

# 부산국가지질공원 학술연구용역 최종보고서

2022. 3



부산광역시  
BUSAN METROPOLITAN CITY







참 여 진

연구책임자

부산대학교 임현수 교 수

연구참여자

부경대학교 주영지 교 수

부산대학교 하수진 박사과정

부산대학교 채용운 박사과정





# 목 차

I. 사업개요 .....	1
1. 사업개요 .....	3
2. 추진일정 .....	4
II. 연구지역 .....	5
1. 부산국가지질공원 .....	7
2. 다대포분지와 다대포층 .....	13
III. 연구방법 .....	19
1. 조사방법 .....	21
2. 분석방법 .....	25
IV. 사업 수행 내용 및 결과 .....	33
1. 부산지역 대표 지형·지질(다대포층) 학술조사 및 가치 증명 .....	35
2. 부산국가지질공원 관련 학술 및 등재 논문 작성 .....	68
3. 교육·홍보를 위한 지질명소 안내판 문안 작성 .....	69
V. 부록 .....	83



## 표 목 차

표 1. 총분석점 및 유효분석점과 시료별 연대분포.....	36
표 2. 다대포층의 LA-MC-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연대측정 결과.....	38

# 그림 목 차

그림 1. 과업의 내용별 추진 일정 .....	4
그림 2. 부산국가지질공원의 범위와 지질명소의 위치 .....	7
그림 3. 부산국가지질공원의 로고와 정식명칭 .....	8
그림 4. 부산국가지질공원의 지형도 .....	9
그림 5. 부산국가지질공원의 지질도 .....	11
그림 6. 부산국가지질공원과 각 지질명소의 층서계통표 .....	12
그림 7. (a) 한반도에 분포하는 백악기 분지들, (b) 다대포분지의 지질도 .....	13
그림 8. 다대포층과 상하부 암체들의 층서 단면 모식도 .....	14
그림 9. 다대포분지(다대포층) 내 시료채취 위치 (a) 평면 지질도와 (b) 층서 단면 모식도 .....	23
그림 10. 촬영에 사용된 DJI사의 드론(MAVIC 2 Pro) .....	24
그림 11. 저어콘 광물 분리과정 .....	25
그림 12. 에폭시 마운트에 올려져 연마된 저어콘 입자들의 실체현미경 사진 .....	25
그림 13. 하부 다대포층(LD-1)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진 .....	26
그림 14. 하부 다대포층(LD-2)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진 .....	26
그림 15. 하부 다대포층(LD-3)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진 .....	27
그림 16. 화쇄류암(IG-1)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진 .....	27
그림 17. 상부 다대포층(UD-1)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진 .....	28
그림 18. 상부 다대포층(UD-2)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진 .....	28
그림 19. 한국기초과학지원연구원(오창센터)에 설치된 동위원소 분석장비(LA-MC-ICP-MS) .....	29
그림 20. 박편용 시료들의 채취 위치와 두송반도와 송도반도의 역암노두 및 분리된 채트역 .....	30
그림 21. 박편 촬영에 이용된 편광현미경과 카메라(ZEISS axio Lab A1. + axio Cam ICc 1) .....	31
그림 22. 시료별 저어콘들의 확률밀도분포곡선과 히스토그램(우측: 젊은 연대 부분(녹색 사각형)을 확대) .....	35



그림 23. 백악기 저어콘들의 확률밀도분포곡선.....	36
그림 24. 일치곡선(concordia diagram)상에 도시된 다대포층 쇄설성 저어콘 연대측정 결과.....	37
그림 25. 지질연대표와 다대포분지의 형성 및 진화 시기 .....	56
그림 26. 시료별 연대분포와 그에 따른 추정된 주 기원지 변화 양상.....	57
그림 27. 한반도 페름기-쥐라기 암체 분포도.....	59
그림 28. 추정되는 백악기 고지리 복원도.....	60
그림 29. 하부 다대포층(LD-1) 박편사진. (a, b) 기질부와 데사이트 역의 경계(노란색 실선), (c, d) 데사이트 역, (e, f) 기질 내 데사이트 암편들. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light.....	62
그림 30. 하부 다대포층(LD-2) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light.....	63
그림 31. 하부 다대포층(LD-3) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light.....	63
그림 32. 상하부 다대포층의 경계부에 위치한 화쇄류암(IG-1) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light.....	64
그림 33. 상부 다대포층(UD-1) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light.....	65
그림 34. 암남공원의 하부 다대포층 역암 내 척트에서 산출되는 원형의 방산층 화석.....	66
그림 35. 두송반도의 하부 다대포층 역암 내 척트에서 산출되는 원형의 방산층 화석.....	67

# 제 I 장 사업개요





# I. 사업개요

## 1. 사업의 개요

### □ 사업명

- 부산국가지질공원 학술연구용역

### □ 사업기간

- 2021. 10. 07. - 2022. 03. 05.

### □ 사업비

- 금 30,000,000원 (금삼천만원), 부가세 포함

### □ 사업범위

- 공간적 범위: 부산국가지질공원 내 다대포층 분포지역
- 시간적 범위: 착수일로부터 150일
- 내용적 범위: 다대포층의 퇴적연대 및 퇴적물 기원지를 밝혀 부산국가지질공원의 학술적 가치증진 및 교육과 홍보에 활용

### □ 주요 사업내용

- 부산지역 대표 지형·지질(다대포층) 학술조사 및 가치 증명
  - 현황조사, 정밀 야외조사 및 시료채취, 광물·암석학적 분석 및 연대측정
- 부산국가지질공원 관련 학술 및 등재 논문 작성
  - 분석 및 해석 결과를 토대로 한 등재지(KCI) 학술논문 작성 (과제 종료 후 6개월 이내 게재승인)
- 교육·홍보를 위한 지질명소 안내판 문안 작성
  - 그림, 사진 등을 이용하여 다대포층을 포함하는 지질명소의 안내 문안 작성



## 2. 추진일정

### □ 부산지역 대표 지형·지질(다대포층) 학술조사 및 가치 증명

- 사업 착수와 동시에 야외조사 및 시료채취를 우선적으로 수행하고, 시료에서 저어콘 광물을 분리
- 2개월 차에는 한국기초과학지원연구원(KBSI)의 LA-MC-ICPMS 장비를 이용해 저어콘 U-Pb 연대측정을 수행 및 박편을 제작해 관찰
- 3개월 차에는 분석결과를 해석

### □ 부산국가지질공원 관련 학술 및 등재 논문 작성

- 3개월 차부터 해석된 자료를 활용해 약 2개월간 논문을 작성
- 5개월 차에 최종적으로 작성된 논문을 등재학술지(KCI)에 투고

### □ 교육·홍보를 위한 지질명소 안내판 문안 작성

- 4개월 차부터 약 2개월간 안내문안 작성 및 검토

과업내용	과업기간 (5개월: 21년-22년)					
	10월	11월	12월	1월	2월	3월
부산지역 대표 지형·지질(다대포층) 학술조사 및 가치 증명	야외조사 및 시료채취	연대측정 및 박편관찰	분석결과 해석			
부산국가지질공원 관련 학술 및 등재 논문 작성			논문작성	논문작성	논문투고	논문심사 및 게재승인
교육·홍보를 위한 지질명소 안내판 문안 작성				안내문안 작성	안내문안 검토	



2021 한국석유지질 퇴적학회 (우수포스터발표상)      Jeju GGN 2020      중간 보고회      최종 보고회

그림 1. 과업의 내용별 추진 일정

## 제 II 장 연구지역





## Ⅱ. 연구지역

### 1. 부산국가지질공원

#### 1.1 지질공원의 명칭 및 일반현황

“부산국가지질공원”은 2013년 12월 6일 환경부 고시 제2013-152호에 의해 부산의 우수한 지질유산 자원을 보전 및 교육·관광자원으로 활용함으로써 국민의 휴양 및 정서 함양에 기여하고 지역경제 활성화의 도모를 목적으로 자연공원법 제36조 3에 따라 인증되었다. 그리고 “부산국가지질공원”은 현재 UNESCO 세계지질공원으로 인증받기 위한 부산광역시의 지질공원 명칭이다.



그림 2. 부산국가지질공원의 범위와 지질명소의 위치

부산국가지질공원은 한반도 남동부의 부산광역시에 속하며, 낙동강하구에서 몰운대, 두송반도, 송도반도, 태종대를 거쳐 이기대 지역까지 이어지는 해안 지역과 금정산, 백양산, 황령산, 장산의 산지 지역으로 이루어져 있다(그림 2). 부산국가지질공원의 로고는 부산의 지질, 지형, 문화, 관광 콘텐츠를 상징화하고 있다(그림 3).



그림 3. 부산국가지질공원의 로고와 정식명칭

## 1.2 부산국가지질공원의 지형 개관

한반도의 동남단에 위치한 부산국가지질공원(부산광역시)에는 바다, 산지 그리고 강하구의 다양한 지형들이 분포한다. 부산광역시 일원은 지형적으로 태백산맥의 말단부에 해당하며 구릉성 산지와 소반도, 섬, 만이 발달하는 리아스식 해안의 특징을 보인다. 부산의 전체적인 지세를 형성하는 기본골격은 울산광역시 부근에서 두 갈래로 갈라지는 태백산맥으로서, 원효산-금정산-백양산-구덕산-다대포로 이어지는 북북동-남남서 방향의 큰 줄기(금정산맥)와 달음산-장산-금련산-봉래산으로 이어지는 또 다른 북북동 방향의 줄기(금련산맥)로 이루어진다(그림 4).

부산광역시 남부 일대는 북부에 비해 상대적 저지대로 도심지가 발달하고 있다. 이 저지대는 남쪽으로 장림반도 남단 몰운대부터 장산 남쪽의 수영만에 이르는 해안과 접하며, 북쪽으로 금정산에서 다대포 몰운대에 이르는 북북동 방향의 산지와 금정산에서 해운대의 장산으로 연결되는 북서 방향의 산지 사이에 의해 둘러싸여 있다. 위와 같은 전반적인 산지 지형 특성 때문에 부산광역시의 남해안과 동해안은 소반도와 섬, 그리고 만이 발달하는 전형적인 리아스식 해안의 특성을 보인다(그림 4). 그로 인해 해안선의 출입이 심하고 해안 평야의 발달이 미약하다. 서부 일대는 양산천이 낙동강 본류에 합류하는 물금에서 시작해 남쪽의 낙동강하구를 향해 넓게 펼쳐지는 저지대로 구성되며, 하구 일원에 발달하는 삼각주와 범람원 지형이 형성되어 있다. 이곳은 동쪽의 금정산맥과 북서쪽의 신어산맥에 의해 둘러싸여 하나의 분지 지형을 형성하고 있으며, 약 1만 년 이

상의 오랜 세월을 통해 낙동강 상류에서 운반되어 퇴적된 평균 60 m 이상의 두꺼운 충적층이 분포하는 것이 특징이다. 양산천이 낙동강 본류에 합류하는 물금 부근에서 낙동강하구까지 삼각주 지형이 넓게 펼쳐져 있으며, 삼각주 말단에는 대마등, 장자도, 신자도, 땡금머리등, 백합등, 도요등 등의 크고 작은 연안 사주들이 형성되어 있다.

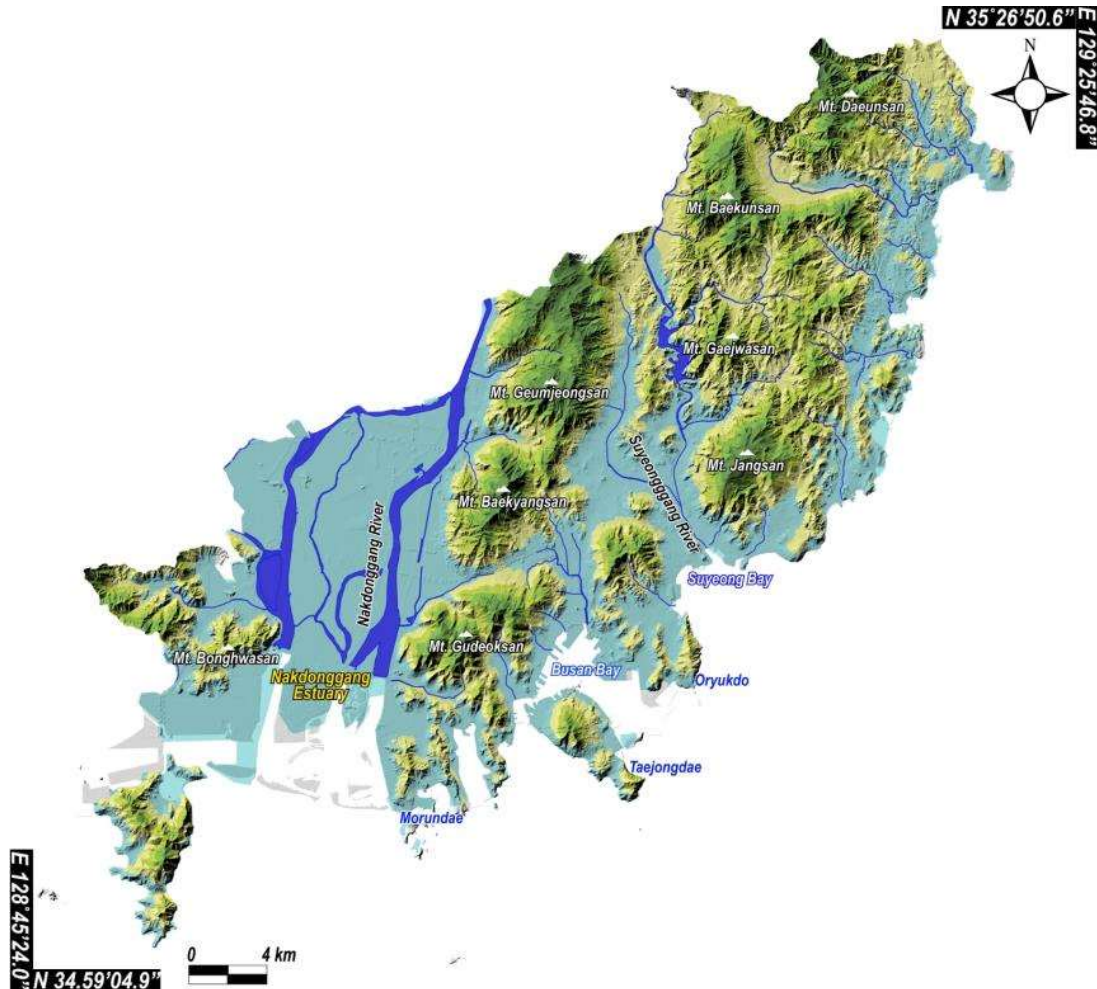


그림 4. 부산국가지질공원의 지형도

부산광역시의 행정구역 내 총 34개의 산이 있으며 이중 지질, 지형적으로 독특한 산으로는 금정산, 백양산, 봉래산, 장산, 황령산 등이 있다. 특히 금정산은 주로 화강암류로 구성되며, 토르, 인셀베르그, 새프롤라이트 등의 독특한 지형이 많이 발달하는 전형적인 화강암 풍화지형을 보여준다. 또한, 과거 폭발적인 유문암질 화산활동으로 만들어진 장산은 잔류화산체로서 블록스트림, 돌서령 등이 발달하고 있다.

부산광역시의 해안에는 적기, 장림, 송도, 두송반도 등의 남-북 방향으로 돌출된 반도지형과 그 사이로 수영만, 부산만, 감천만, 다대만 등의 만입지형이 발달한다. 또한,



해안선 가까이에 산지가 위치하는 침식해안으로 해식작용이 활발하며, 태종대, 몰운대, 이기대 등의 암석 해안에서는 해식절벽, 해식동굴, 파식대지 등이 흔히 관찰된다.

### 1.3 부산국가지질공원의 지질

부산국가지질공원은 지체구조상 백악기 경상분지에 속한다(그림 5a). 경상분지는 남한에서 가장 큰 퇴적분지로 암상 및 층서적 차이에 의해 영양소분지, 의성소분지, 밀양소분지, 낙동곡분으로 다시 세분될 수 있다. 층서는 하위로부터 신동층군과 하양층군 퇴적암류, 유천층군 화산암류와 응회질퇴적암류 그리고 이들을 모두 관입한 불국사화강암류로 정립되어 있다. 소분지들 중 부산국가지질공원은 밀양소분지의 남동부에 위치하며, 유천층군에 해당되는 화산암류와 퇴적암류 그리고 불국사화강암류에 해당되는 심성암류가 주로 분포하고 있다(그림 5b). 주요 지질구조로는 한반도 남동부의 가장 큰 구조선인 양산단층계를 구성하는 북북동 방향의 양산단층, 동래단층, 일광단층이 부산 도심을 관통하며, 이들의 운동과 관련된 소단층 및 절리들이 발달한다.

부산광역시 일원의 지질은 오래된 순서로부터 안산암질과 데사이트질 위주의 유천층군 중성질 화산암류, 이들 화산암류 사이에 퇴적된 다대포층, 태종대층 등의 응회질퇴적암, 유문암질 위주의 유천층군 산성질 화산암류, 이들 모두를 관입하고 있는 불국사화강암류와 중성 및 산성의 암맥과암상, 그리고 제4기에 퇴적된 충적층으로 구성된다(그림 6). 부산국가지질공원 지질층서의 가장 하부를 이루는 유천층군 화산암류는 안산암질과 데사이트질 화산암류로 이루어진 중성질 화산암류와 유문암질과 유문데사이트질 화산암류로 이루어진 산성질 화산암류로 양분되며, 전반적으로 산성질 화산암류가 중성질 화산암류보다 후기로 알려져 있다. 중성질 화산암류는 백양산, 황령산, 금련산, 승학산, 구덕산 등의 산지와 이기대, 태종대, 송도반도, 두송반도, 몰운대의 해안가에 폭넓게 분포하며, 12개 지질명소 중 낙동강 하구를 제외한 모든 지질명소에서 관찰할 수 있다. 데사이트질 화산암류는 주로 화산각력암, 응회각력암, 화산력응회암 등의 화성쇄설암이 우세하고 부분적으로 용암류와 관입암의 산상을 보이는데 반해, 안산암질 화산암류는 주로 화산각력암, 응회각력암, 화산력응회암 등의 화성쇄설암과 용암류가 서로 교호하면서 산출된다.

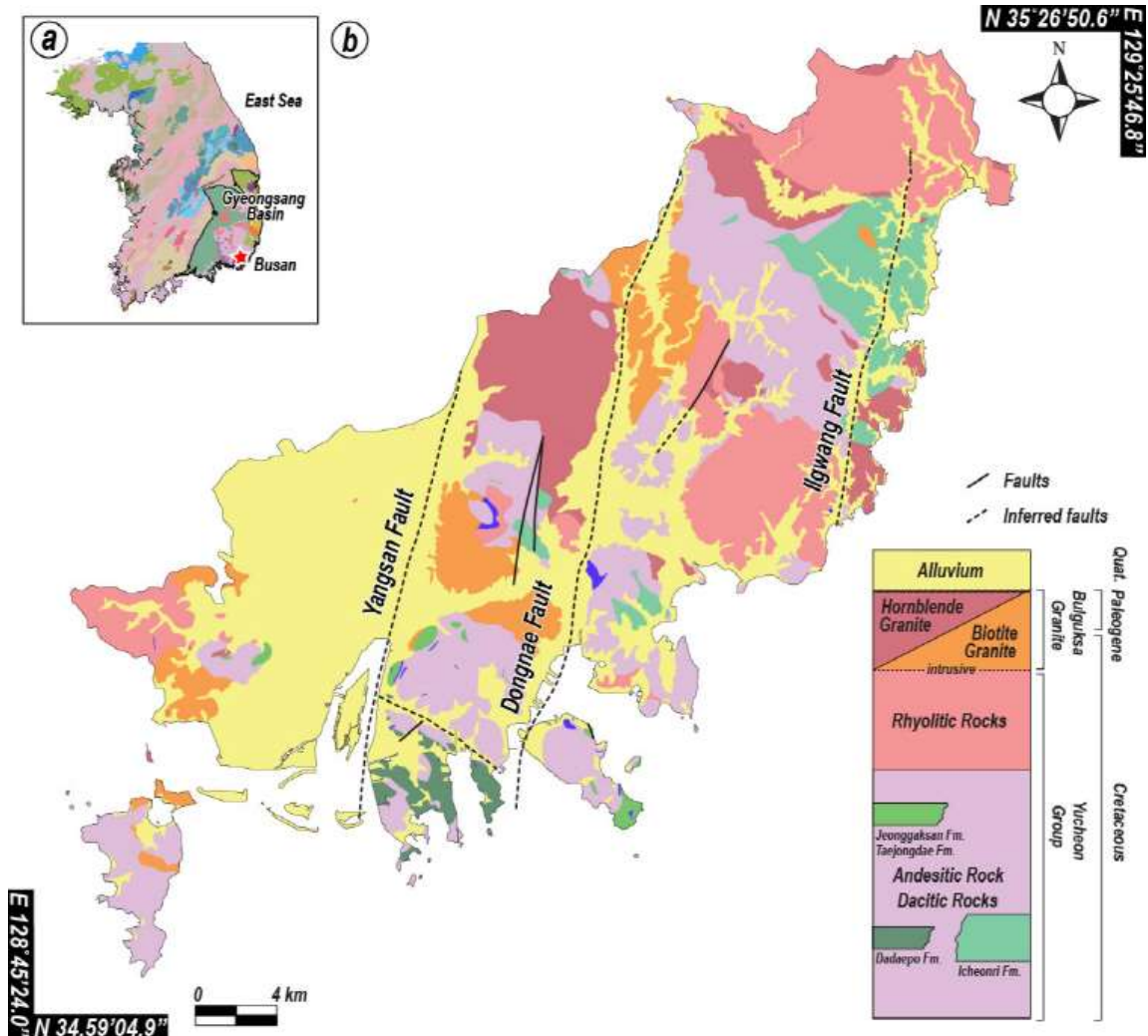


그림 5. 부산국가지질공원의 지질도

다대포층은 부산국가지질공원의 남서부 낙동강과 부산만 사이의 해안가에 위치한 백악기 다대포분지 지역에 분포하며, 물운대, 두송반도, 송도반도, 두도 지질명소에서 관찰할 수 있다(그림 5b). 다대포분지는 백악기말 화산활동이 활발했던 경상분지 유천소분지 내에서 독특하게 만들어진 구조분지이다. 분지 형성 기작은 분지 양쪽 경계를 이루는 양산단층과 동래단층의 좌수향 주향이동 운동으로 북동-남서 방향의 인장력이 발생해 만들어진 당겨열림형(pull-apart) 분지로 해석되고 있다. 응회질퇴적암은 황령산, 백양산 등의 산지와 이기대, 태종대 등의 해안가 일대에 분산 및 고립되어 불연속적으로 분포한다. 유천층군 산성질 화산암류는 장산 일대에 광범위하게 분포하며, 백양산과 영도 봉래산 주변에도 부분적으로 산출된다. 산성질 화산암류는 유문데사이트질 화산각력암 및 용결응회암, 분출 및 관입상의 유문암류, 유문암질 응회암, 유문반암 등의 다양한 암상을 보이며, 유문데사이트질암이 유문암질암보다 대체로 고기의 연령을 나타낸다. 산성질 화

산암류가 가장 폭넓게 분포하는 장산화산체는 백악기 말의 칼데라의 잔존구조인 화산함물체(콜드론, cauldron)로 잘 알려져 있다. 유천층군 화산암류와 퇴적암류를 모두 관입하는 후기의 불국사화강암류는 금정산, 백양산, 엄광산 등의 산지를 중심으로 광범위한 분포를 보이며, 황령산 서부, 장산 북부, 영도 남부에도 소규모 암체로 나타난다. 지질명소 중에서는 금정산, 백양산, 구상반려암 지질명소에서 흔히 관찰할 수 있다.

지질 시대	부산국가 지질공원	지질명소											
		눌차도	낙동강 하구	다대포 해변	물운대 송도반도 압남공원	두송반도 두도	태종대 조도	이기대 오륙도	장산 해운대 송정 PT	용궁사 오랑대	금정산	구상 반려암	백양산
제4기	삼각주 해빈 퇴적층 단구 퇴적층	해빈 퇴적층 단구 퇴적층	삼각주 해빈 퇴적층	삼각주 해빈 퇴적층	충적층 해빈 퇴적층 단구 퇴적층	충적층 해빈 퇴적층	충적층 해빈 퇴적층	충적층 해빈 퇴적층	충적층	충적층 해빈 퇴적층	충적층	충적층	충적층
2.6 Ma													
신생기													
고신생기	불국사 관입암류	흑운모 화강암 및 화강섬록암					흑운모 화강암			세립질 화강암		흑운모 화강암 및 각석섬 화강암	흑운모 화강암
66 Ma	유천층군 산성질 화산암류						유문암질 화산암류		유문암질 화산암류				유문암질 화산암류
백악기	용화질 퇴적암 다대포층 유천층군 중성질 화산암류	안산암질 및 데사이트질 화산암류		안산암질 화산암류 다대포층	안산암질 화산암류 다대포층	안산암질 화산암류 다대포층	안산암질 화산암류 다대포층 데사이트질 화산암류	용화질 퇴적암 안산암질 화산암류	안산암질 화산암류	안산암질 화산암류	안산암질 화산암류	안산암질 화산암류	용화질 퇴적암 안산암질 화산암류

그림 6. 부산국가지질공원과 각 지질명소의 층서계통표



## 2. 다대포분지와 다대포층

### 2.1 다대포분지와 다대포층

다대포분지는 한반도의 남동부 말단부에 위치하며, 후기 백악기에 만들어진 작은 규모의 퇴적분지이다(그림 7). 서쪽과 동쪽은 북북동 방향의 양산단층과 동래단층이 각각 경계를 이룬다(그림 7b). 다대포분지를 충전하고 있는 다대포층에는 북서 주향의 퇴적동시성 정단층과 화성 및 쇄설성 기원 암맥 등이 발달한다. 이런 것들을 근거로 다대포분지는 양산단층과 동래단층의 좌수향 주향이동 운동으로 발생한 북동-남서 방향의 인장력에 의해 형성된 인리형 분지임을 제시했다(그림 7b).

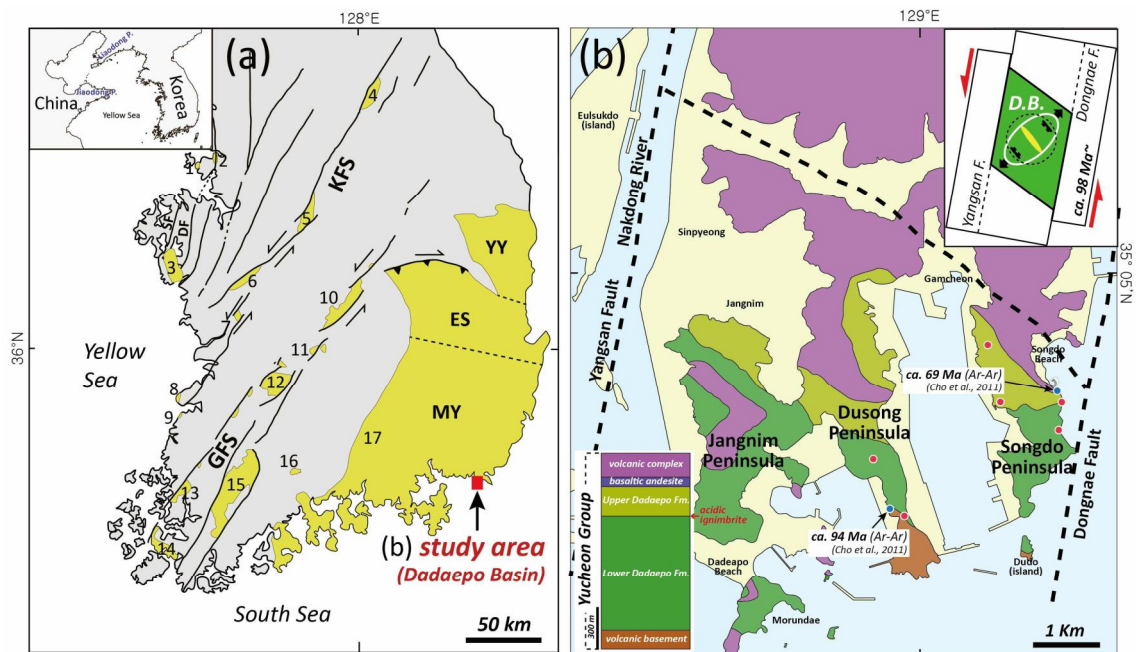


그림 7. (a) 한반도에 분포하는 백악기 분지들, (b) 다대포분지의 지질도

다대포분지를 채우는 다대포층은 주로 역암, 사암, 자색이암 등으로 구성된 하부 다대포층과 주로 세립에서 조립질의 응회질사암, 올리브에서 어두운 화색의 이암, 그리고 화산기원물질이 풍부한 상부 다대포층으로 구분되며, 상하부 다대포층 사이에는 화쇄류암(ignimbrite)이 약 2.5 m 두께로 발달한다(그림 8). 다대포층의 퇴적시기에 대한 기존 Ar-Ar 연대측정 연구에서는 최하부 다대포층과 부정합 관계에 있는 테사이트질 화산암에서 약 94 Ma 그리고 최상부 다대포층을 덮고 있는 현무암질 용암류에서 약 69 Ma로 보고했다(그림 7b).

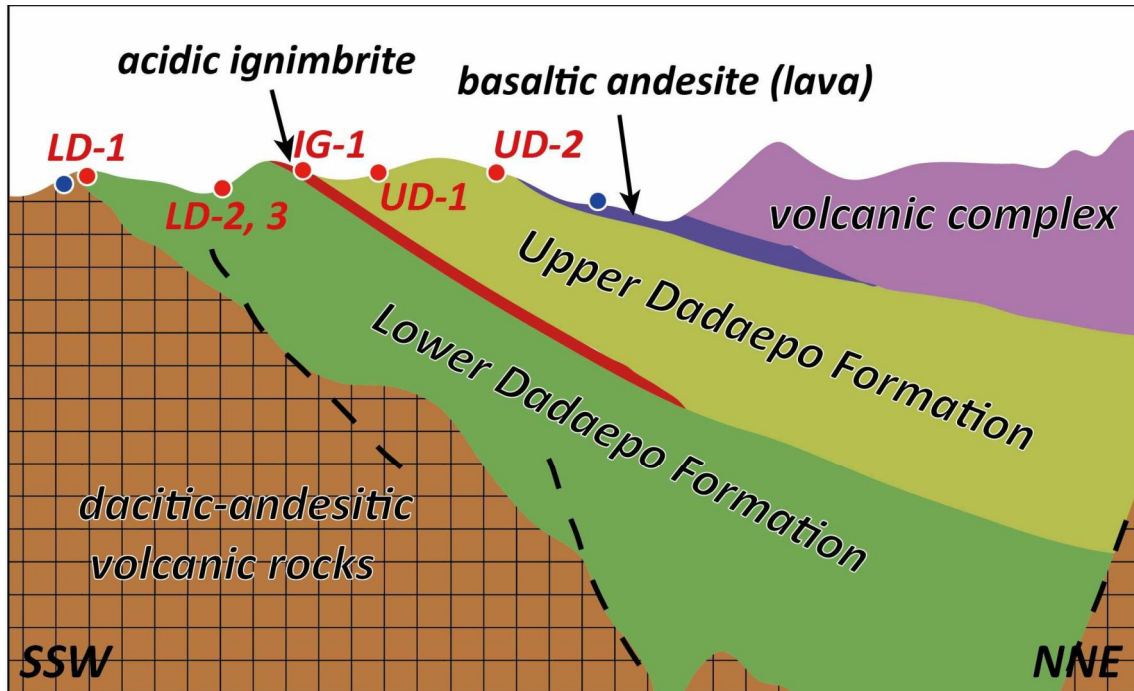


그림 8. 다대포층과 상하부 암체들의 층서 단면 모식도

## 2.2 부산국가지질공원의 다대포층에 위치하는 지질명소와 지질유산

부산은 2013년 12개의 지질명소로 이루어진 국가지질공원으로 인증받은 후, 공원 운영과 세계지질공원 인증 추진 과정에서 신규 지질명소의 발굴을 통해 20개의 지질명소로 확대하였고 공원의 범위도 부산광역시 전역으로 확장했다. 그 중 현재 부산국가지질공원에서 다대포층이 분포하는 곳은 다대포해변, 물운대, 두송반도, 송도반도, 암남공원, 두도 지질명소로 총 6곳이다(그림 2).

### 2.2.1 다대포 해변 지질명소

다대포 해변은 면적 53,000 m<sup>2</sup>, 길이 900 m, 너비 100 m에 이르는 규모를 가지며 낙동강 상류에서 공급된 양질의 모래와 완만한 경사, 얇은 수심과 따뜻한 수온으로 매년 많은 피서객이 방문하는 부산의 대표적인 해수욕장이다. 모래 해변을 따라 해안사구와 사구식물, 현생 연흔, 갯벌과 엽낭게 등 다양한 지질 및 생태기록을 관찰할 수 있다. 해변의 동쪽 끝 물운대 지역에는 다대포분지의 충전물인 역암, 사암, 실트암, 이암 등의 다대포층 퇴적층과 안산암, 데사이트의 화성암류가 분포하고 있으며, 퇴적동시성 정단층, 암맥과 광맥, 암상 등 다양한 절리군과 층리, 사층리, 화석 등 많은 퇴적구조들도 관찰할 수 있다. 주변에는 물운대, 화손대, 다대포패총, 낙동강하구 철새도래지, 아미

산전망대, 다대포객사, 정운공순의비 등 다양한 문화 유적지와 관광명소들도 분포하고 있으며, ‘꿈의 낙조분수’를 비롯한 다대포 해변공원이 조성되어 탐방객이 크게 증가했고, 갯벌 체험, 서핑 등 다양한 체험 활동이 이루어지고 있다.

### 2.2.2 물운대 지질명소

부산 사하구 남단의 해안가에 위치한 물운대 지질명소는 지질학적으로 백악기 말 양산단층과 동래단층 사이에서 만들어진 다대포분지의 남서부에 해당되며, 한 마리의 게가 양 집게발을 벌리고 있는 형상으로 이곳에 안개와 구름이 끼는 날에는 섬이 보이지 않아, 구름 속에 빠진 곳(沒雲臺, 물운대)이라는 이름이 유래되었다. 이곳의 동쪽 끝에는 화순대가 서쪽 끝에는 장운대가 위치하고 있다. 백악기 말의 하부 다대포층과 그 후 부산의 지각변형과정을 한 눈에 볼 수 있으며, 역암, 사암, 실트암, 이암 등의 다대포층 퇴적층과 안산암, 데사이트, 유문암 등의 화성암류, 그리고 제4기 단구퇴적층 등의 다양한 암종과 단층, 단층암, 암맥, 광맥, 쳐트편, 사층리, 혼적화석 등을 관찰할 수 있다. 그러므로 다양한 지질특성을 간직한 지질학의 교과서라 불릴만한 곳이다. 아울러, 물운대는 섬과 육지 사이에 사주가 만들어져 연결된 육계도라는 독특한 지형이며, 해안절벽, 파식대지, 역빈 등의 다양한 지형유산 및 경관을 보여준다. 또한, 퇴적동시성 정단층, 주향이동단층과 꽃다발구조, 퇴적형 및 주입형 쇄설성 암맥, 고지진성 구조, 다양한 조성의 마그마성 암맥, 석영과 방해석 광맥, 안행상(en echelon) 절리군 등의 독특한 지질구조들과 층리, 사층리, 혼적화석 등의 다양한 퇴적구조들도 관찰된다. 특히, 교과서에 소개될 수준의 전형적인 양상을 보이는 지루(horst), 지구(graben), 반지구(half-graben)의 다양한 형태를 보이는 공액상(conjugate) 퇴적동시성 정단층들은 지각의 신장과 분지의 확장과정을 설명함에 있어 탁월한 학술적 가치를 가진 것으로 판단된다. 역암층에 함유된 쳐트편들은 한반도와 일본열도의 고지리 대비에 있어 중요하며, 퇴적형 쇄설성 암맥은 국내 다른 지역에서는 보고된 바 없는 독특한 지질구조로서 국가적인 지질학적 가치를 가진 것으로 판단된다.

### 2.2.3 두송반도 지질명소

두송반도 지질명소의 지질은 다대포분지의 기반암에 해당되는 안산암 및 데사이트질 화산암류, 역암, 사암, 실트암, 이암, 이회암이 교호하는 하부 다대포층 그리고 하부 다대포층을 관입 및 피복하는 안산암 및 데사이트로 구성되어 있어, 뛰어난 지질다양성을 보여준다. 특징적인 지질구조로는 다대포분지의 확장과 관련된 퇴적동시성 정단층, 쇄설

성 암맥 및 암상, 고지진성 연성변형구조 등이 나타나며, 층리, 사층리, 환원점, 석화목, 석회질 켈크리트(석회질 단괴) 등의 다양한 퇴적구조들도 관찰된다. 특히, 이곳의 쇄설성 암맥들은 root zone, branched system, bridged segment 등의 다양한 산상을 보여, 쇄설성 암맥의 생성 및 정치 기작을 이해하는데 탁월한 학술적 가치를 가진다. 특정 층준에 밀집되어 있는 load cast, bed separation, ball-and-pillow, pillar structure 등의 다양한 고지진성 구조들 또한 연구 가치가 높으며, 지질 재해적 관점에서도 매우 중요한 의미를 가진다. 또한, 적색 사암층에서는 공룡알 파편 화석들이 관찰되며, 최근에는 이회암층에서 국가적 가치를 지니는 공룡알 동지화석이 보고되었다. 켈크리트 복합층은 백악기의 고기후 연구에 있어 중요한 연구대상이며, 두송반도의 켈크리트 복합층처럼 다양한 산상의 켈크리트가 산출되는 곳은 국내에서 흔하지 않아 국가적인 지질학적 가치를 지닌 것으로 판단된다.

#### 2.2.4 송도반도 지질명소

부산 서구 암남동 일대의 송도반도 지질명소는 암남공원에서 송도해수욕장으로 이어지는 산책로를 통해 하부 다대포층에서 상부 다대포층까지 연속적인 암상변화와 다대포층을 관입 및 피복하고 있는 다양한 화산암류들을 관찰할 수 있다. 또한, 공룡의 전성기인 중생대 백악기 지층과 함께 아름다운 해안 절경을 한눈에 볼 수 있는 새로운 관광명소로 각광받고 있다. 송도반도 지질명소의 다대포층은 역암, 사암, 실트암, 이암, 응회질 퇴적암 등의 다양한 퇴적층으로 이루어져 있으며, 하부 다대포층에서 상부 다대포층으로 변화하는 연속적인 암상 관찰을 통해 하성에서 호성으로 변화하는 퇴적환경의 변화를 확인할 수 있다. 또한, 층리, 사층리, 깎고 메운 구조, 연흔 등의 다양한 퇴적구조들이 나타나며, 석회질 고토양, 켈크리트 등의 특징적인 지질기록도 관찰된다. 하부 다대포층 적색층에서는 공룡골격 및 공룡알 동지 화석이 나타나며, 다양한 흔적화석도 관찰된다. 그리고 역암층에 다량으로 함유된 쳐트편은 백악기 말에 한반도와 일본열도의 고지리를 복원하는 연구에서 중요한 역할을 한다. 아울러 퇴적동시성 정단층, 쇄설성 암맥, 안산암질 암맥과 암상, 유문암질 암맥 등과 같은 학술적 연구가치가 높은 다양한 지질구조도 분포한다.

#### 2.2.5 암남공원 지질명소

암남공원 지질명소는 송도반도 지질명소의 남단에서부터 두도 지질명소 입구까지 이어지며 지질학적으로는 백악기 말 양산단층과 동래단층 사이에서 만들어진 다대포분지의 동남부에 해당한다. 하부 다대포층 퇴적층, 역암, 사암, 이암 등의 다양한 암석과 정단

층, 마그마성 암맥, 쇄설성 암맥 등의 다양한 지질구조를 관찰할 수 있어 지질다양성 또한 매우 풍부하다. 암남공원은 1972년 자연공원으로 지정되었으나, 군사보호구역에 묶여 출입이 통제되다가 1996년 개방되었다. 공원 전체가 해양성 수목의 울창한 숲으로 이루어져 있고, 500여 종의 해양식물과 야생화 등이 군락을 이루고 있다. 해안가를 따라서는 하부 다대포층 퇴적암으로 이루어진 기암절벽이 깎아지듯이 솟아 있어 푸른 바다와 함께 절경을 이룬다. 최근에는 송도해상케이블카와 공룡 테마공원이 조성되면서, 지질교육 및 관광을 위한 코스로 부각되고 있으며, 암남공원에는 전망대, 구름다리, 산책로, 광장, 체육시설, 낚시시설 등의 기반시설이 조성되어 있고, 암남공원 서편의 시스템인 동섬을 연결하는 용궁구름다리가 복원되어 부산국가지질공원의 주요 지질명소로 역할을 할 것으로 기대된다.

#### 2.2.6 두도 지질명소

두도 지질명소는 1972년에 자연공원으로 지정되었다. 두도는 암남반도의 암남공원에서 서남쪽으로 500 m 떨어진 무인도로 동백나무, 비쭉이, 해송 등의 다양한 자생식물과 바다 산호, 부산의 상징 새인 갈매기가 많이 서식하고, 수려한 한려해상의 경관을 만끽할 수 있는 곳이다. 해안절벽을 따라서는 백악기 말에 퇴적된 하부 다대포층과 화산암들이 절경을 이룬다. 두도에는 유천층군 화산암류와 하부 다대포층과의 부정합면이 잘 노출되어 있어, 이곳은 그동안 학계에서 논란이 되던 다대포층의 층서 설정에 중요한 학술적 가치를 지닌다. 또한, 하부 다대포층에서 공룡알 동지화석과 석화목 등의 지질유산이 나타나며, 정단층 및 주향이동단층, 꽃다발구조, 암맥 등의 다양한 지질구조들도 관찰된다.





## 제 III 장 연구방법



### Ⅲ. 연구방법

#### 1. 조사방법

##### 1.1 다대포분지(다대포층)을 포함한 한반도의 백악기 지사에 관한 전반적 이해

과업 시작단계에서는 기존 문헌들을 통한 과업 대상의 세부내용을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 이번 연구에서는 부산국가지질공원 관련자료와 지금까지 출판된 다대포층 지질명소들에 관한 논문 현황조사 및 자료수집을 최우선으로 수행했다. 나아가 다대포분지와 다대포층이 속하는 지질시대(백악기)에 한반도에 발생한 전반적인 지질학적 사건과 지구조적 상황을 파악하기 위해 해당 학술논문 및 자료를 수집했다. 수집된 자료들과 전문가 자문을 바탕으로 다대포층 및 상하부 암체들의 특성과 암체들이 잘 노출된 지점들에 대한 정보를 이용해 야외 지질조사 및 시료채취를 위한 계획을 수립했으며, 전문가 자문 내용은 아래와 같다.

##### ○ 다대포분지 내 다대포층 노출이 양호한 시료채취 대상지역에 관한 자문

현재 하부 다대포층과 상부 다대포층 및 이들을 덮고 있는 현무암질 용암류는 암남공원에서부터 송도해변으로 이어지는 해안데크를 따라 매우 잘 노출되어 있다. 그러나 2020년 태풍으로 인해 현재 해안데크가 매우 심각하게 훼손되어 접근이 어렵기 때문에 시료채취를 위해서는 타 지역의 노두를 활용하는 것이 바람직하다. 송도반도의 서편에 나 있는 산길을 따라 곳곳에 다대포층 퇴적암이 노출되어 있기에 이를 대체할 수 있다. 또한 다대포층의 하위에 위치하는 암석은 두송반도 남쪽에 위치하는데, 아래 해안을 따라난 도로변으로는 낙석방지 시설로 인해 노두를 관찰하기 쉽지 않다. 이는 다송중학교 인근에 위치한 도로를 따라 두송반도 전망대로 이어지는 임도를 따라 노출된 노두를 활용하는 것이 효율적이다. 임도를 따라 남쪽으로 가다보면 대략 두송대성터널 위치를 지나며 다대포층 하위 암체로 전이된다. 방산층 화석을 포함하는 쳐트들은 암남공원 주차장의 북측에 노출된 노두에서 시료를 채취할 수 있다.

### ○ 다대포층의 암석학적 특징에 관한 자문

다대포층은 기존 연구결과에 의하면 백악기 후기로 알려져 있기 때문에 대부분의 퇴적암에 화산물질이 많이 포함되어 있을 가능성이 크다. 이는 다대포층의 퇴적연령을 구하기 위해서는 매우 좋은 암석학적 특성으로 볼 수 있으나, 본 연구의 또 하나의 목적인 퇴적물 기원지 해석을 하기에는 매우 불리하다. 따라서 두 가지 목적을 모두 달성하기 위해서는 퇴적연령을 구하기 위해 반드시 포함되어야 하는 시료 일부를 제외하고는 최대한 화산물질을 적게 함유하는 사암을 채취할 것을 염두에 두어야 한다.

## 1.2 야외조사 및 시료채취

분석할 시료를 채취하기 전 다대포층이 분포하는 지질명소 및 지역에 관한 상세 야외지질조사를 통해 야외 산상 및 시료채취 대상 후보 암체들을 선정했다. 야외지질조사 결과를 토대로 퇴적시기(화산물질이 풍부한 암석이 유리) 및 기원지(소량 혹은 화산물질을 포함하지 않는 암석이 유리) 연구에 유리한 암체를 특정했다. 다대포분지를 채우는 다대포층의 퇴적시기와 퇴적물 기원지를 밝히기 위해 하부 다대포층과 상부 다대포층 그리고 이들 사이에 분포하는 화쇄류암에서 총 6개의 시료를 채취했다(그림 9). 먼저 하부 다대포층에서는 하부의 데사이트질 화산암 역들로 주로 구성된 기저역암 시료(LD-1)와 중상부 층위의 사암(LD-2와 LD-3)에서 각 1개씩 총 3개의 시료를 채취했다. 그리고 송도반도 동편에 분포하는 상하부 다대포층 경계부에서 화쇄류암 시료(IG-1)를 채취했다. 상부 다대포층에서는 송도반도 서편에 분포하는 두 지점들에서 시료들(UD-1과 UD-2)을 채취했다. 추가 기원지 분석으로 역암 내 포함된 찰트 내 방산층 화석 포함 여부를 확인하기 위해 개별 찰트역들도 채취했다.

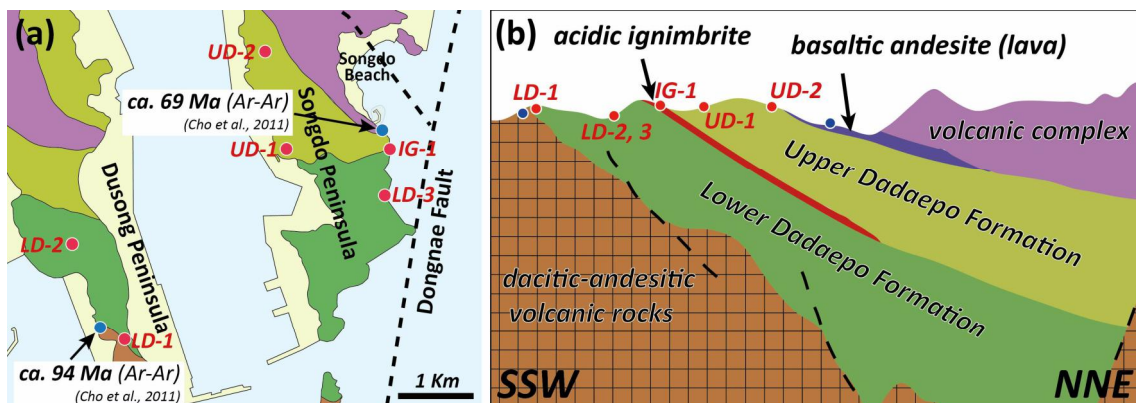


그림 9. 다대포분지(다대포층) 내 시료채취 위치 (a) 평면 지질도와 (b) 층서 단면 모식도

### 1.3 안내문안에 포함될 야외 영상 촬영

군사적 목적으로 개발되기 시작한 무인 비행체(unmanned aerial vehicles)의 활용이 늘어나기 시작하면서, 현재는 우리 주변에서 드론을 어렵지 않게 발견할 수 있게 되었다. 최근 드론을 구성하는 부품 산업들의 기술 발전과 더불어 점차 민간 및 상업적인 활용도가 높아지고 있다. 취미용으로 많이 사용되고 있는 쿼드콥터 형태의 드론은, 로터크레프트(rotorcraft) 형태의 수직이착륙 방식의 소형 무인 비행체로 분류된다(그림 10). 이러한 드론을 활용한 영상촬영은 기존에 사람이 손으로 영상장비를 휴대해 촬영하는 것에 비해 매우 다양한 각도에서 원하는 장면을 손쉽게 얻을 수 있는 매우 큰 장점이 있다. 그러므로 이번 연구에서는 드론을 활용한 항공 영상촬영방법으로 일부 노두 사진을 얻었다.



그림 10. 촬영에 사용된 DJI사의 드론(MAVIC 2 Pro)



## 2. 분석방법

### 2.1 저어콘 U-Pb 연대측정

채취된 시료들은 분쇄 후 체질(sieving)과 패닝(비중선별), 자성 및 증액분리 과정을 거쳐 중광물을 농집시켰고, 이후 실체현미경을 이용한 수작업(hand-picking)으로 저어콘 광물을 분리했다(그림 11). 분리한 저어콘 입자들은 에폭시에 마운팅한 후 입자표면이 노출되도록 연마편을 제작했다(그림 12). 분석 전 주사전자현미경(SEM)을 통해 후방산란전자(BSE)와 음극선 발광(CL) 영상을 얻어 크랙(crack)과 포유물(inclusion)이 없는 곳으로 분석점을 결정했다(그림 13-18).

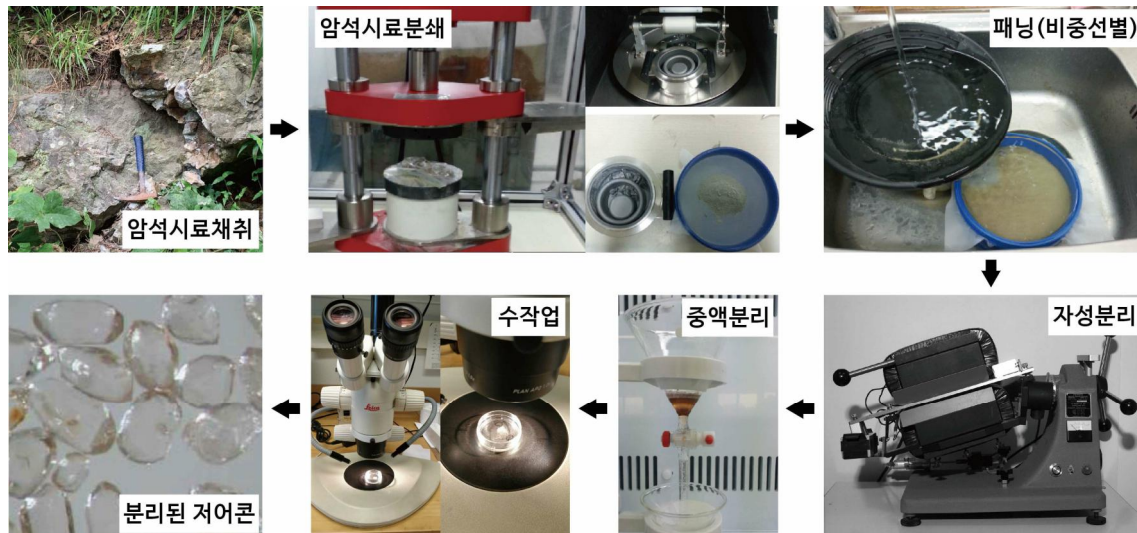


그림 11. 저어콘 광물 분리과정

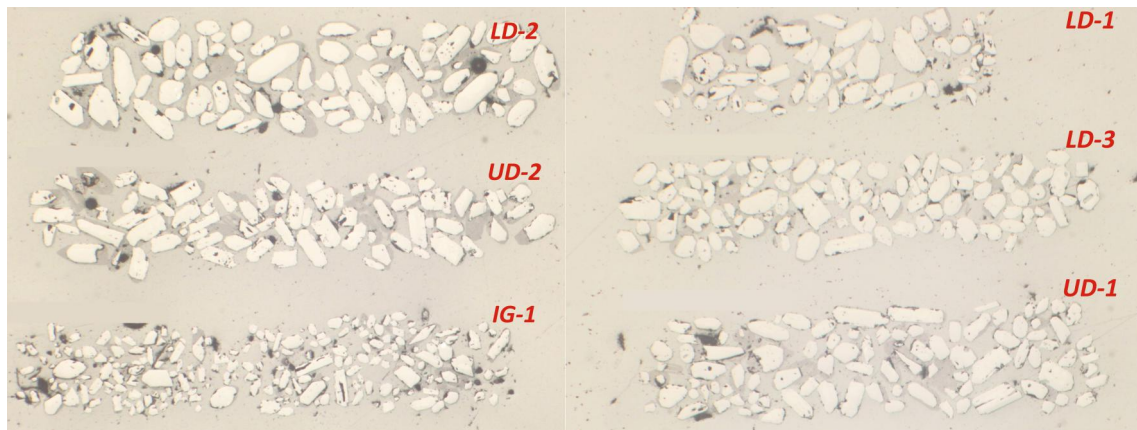


그림 12. 에폭시 마운트에 올려져 연마된 저어콘 입자들의 실체현미경 사진

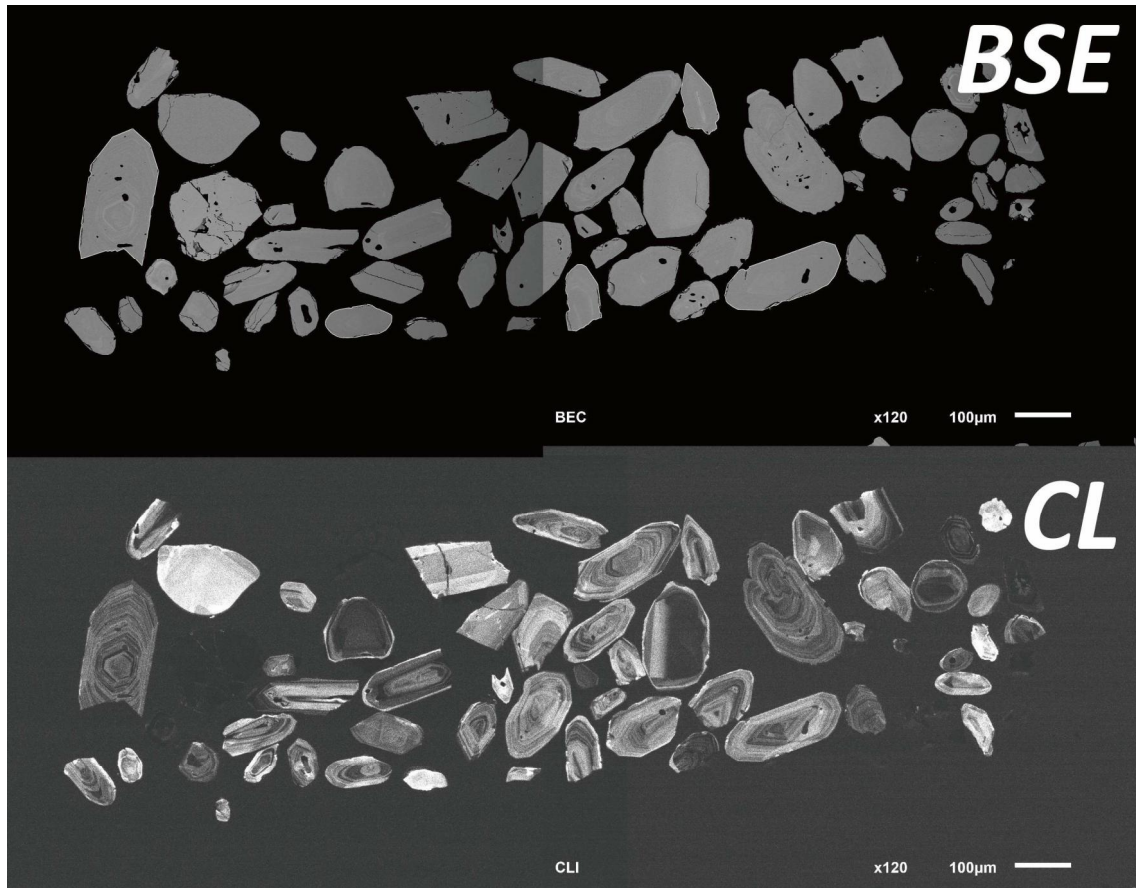


그림 13. 하부 다대포층(LD-1)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진

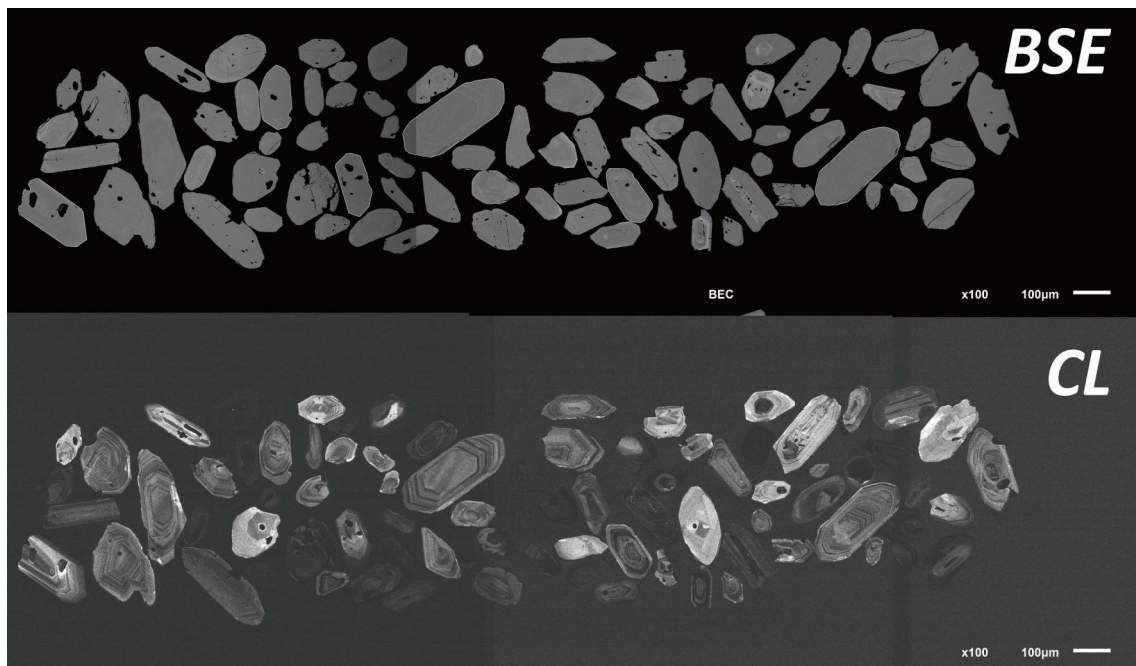


그림 14. 하부 다대포층(LD-2)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진



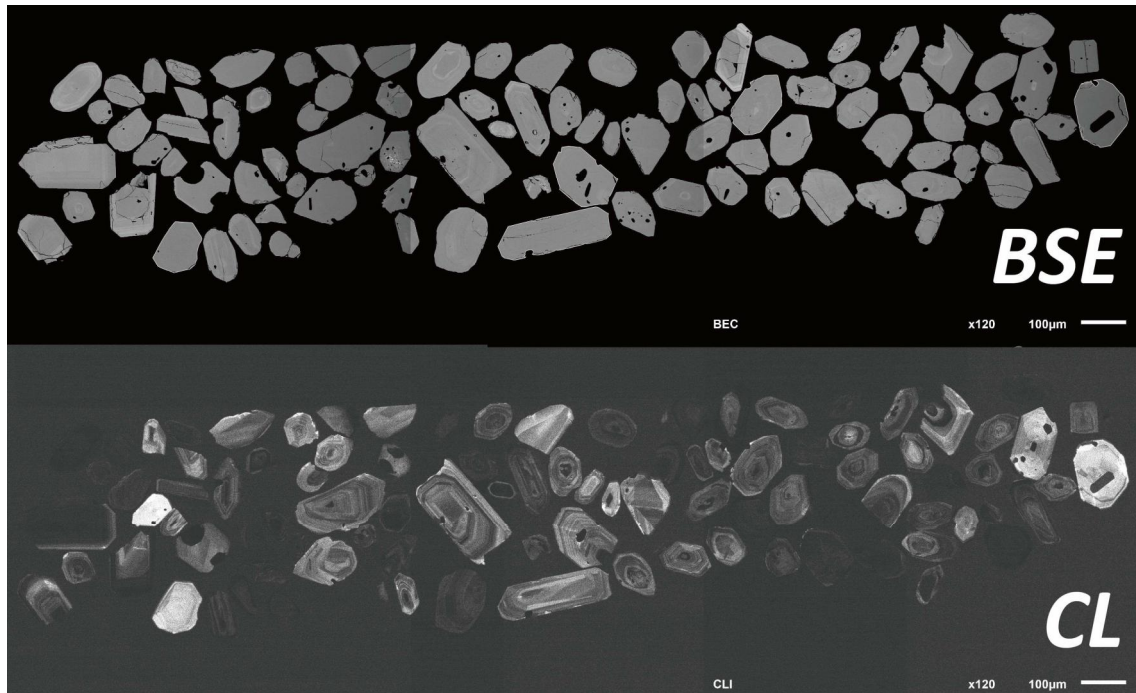


그림 15. 하부 다대포층(LD-3)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진

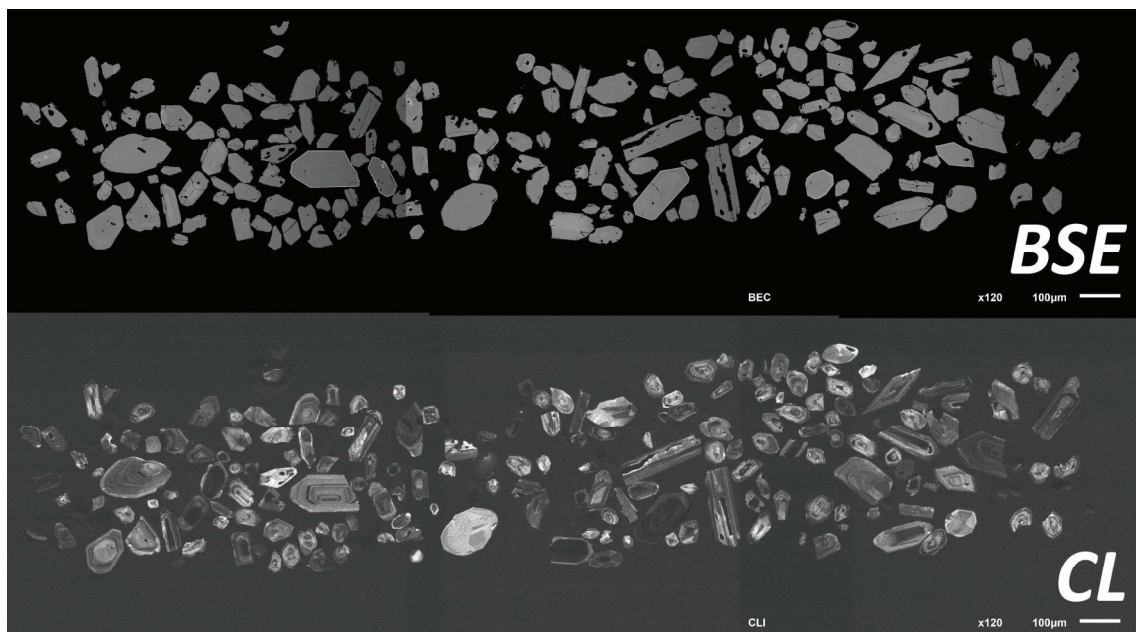


그림 16. 화쇄류암(IG-1)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진

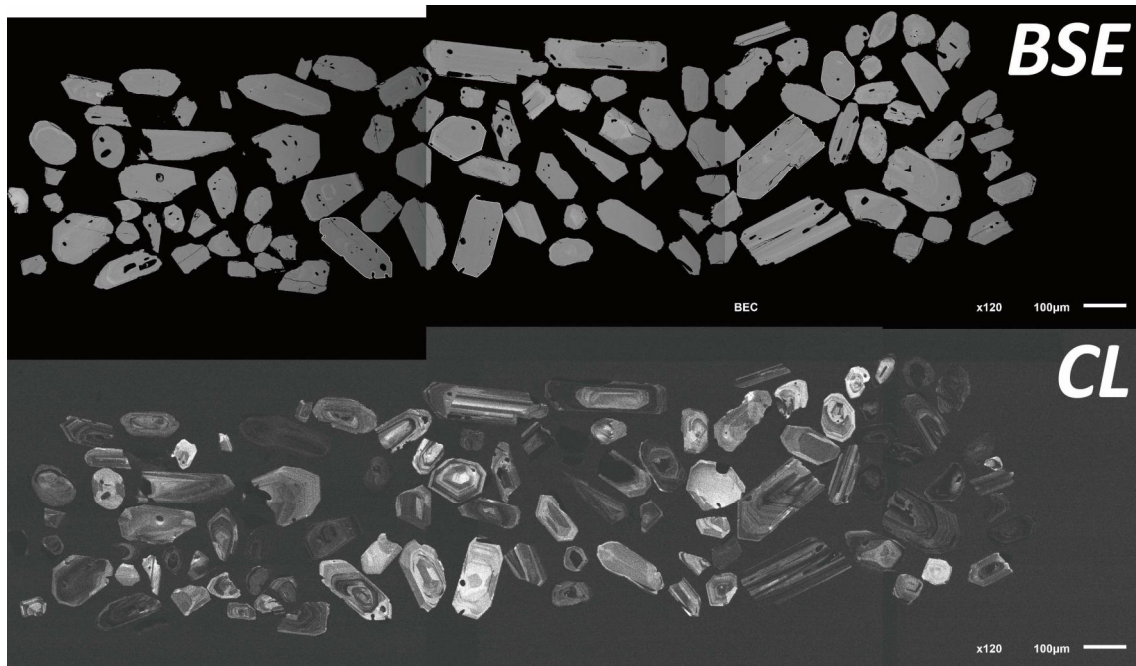


그림 17. 상부 다대포층(UD-1)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진

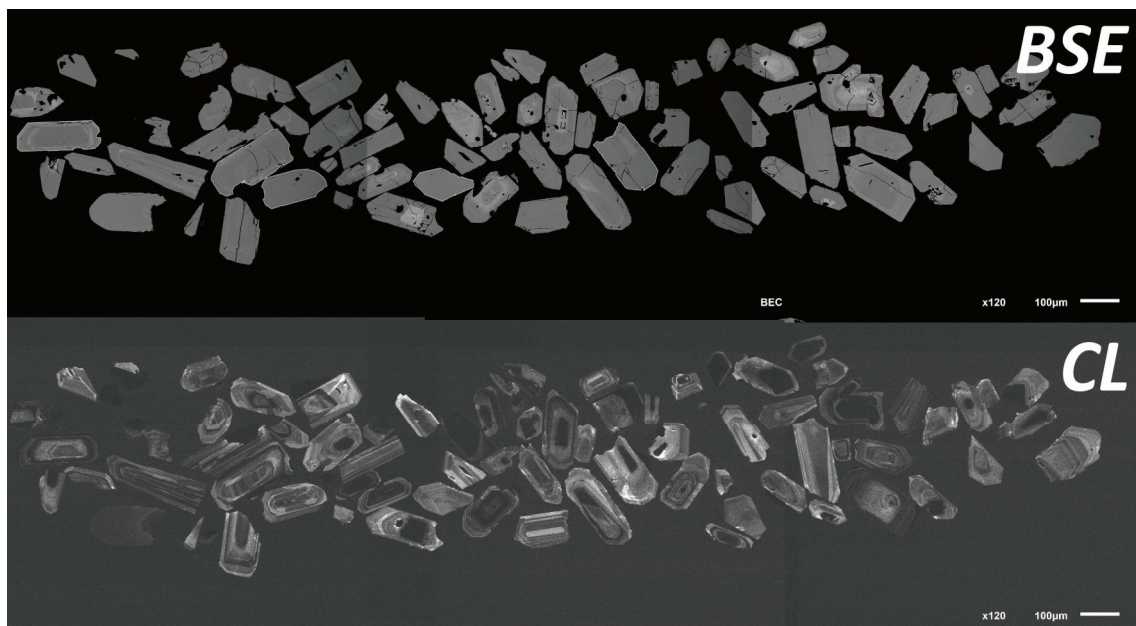


그림 18. 상부 다대포층(UD-2)에서 분리된 저어콘들의 전자현미경(SEM) 사진

쇄설성 저어콘 U-Pb 연령측정은 한국기초과학지원연구원(KBSI)에 설치된 LA-MC-ICP-MS 장비를 이용해 수행되었다(그림 19). 대부분 하부 다대포층 아래의 데사이트질 암석의 역들로 구성된 기저역암과 상하부 다대포층 사이에 놓이는 산성질 화쇄류암에서는 각각 40개와 50개 그리고 사암 시료에서는 74~95개의 저어콘을 분석했다. 충분한 저어콘 입자들이 분리된 산성질 화쇄류암 시료에서는 자형(euhedral) 및 뚜렷한 진동누대(oscillatory zoning)를 나타내는 저어콘들을 선별적으로 분석했다. 직경 20  $\mu\text{m}$ 의 레이저빔을 이용해 시료 분석점 5개 당 하나의 91500 표준 저어콘( $1065.4 \pm 0.3$  Ma)과 10개 당 하나의 Plešovice 표준 저어콘( $337.13 \pm 0.37$  Ma)시료를 함께 분석했다. 분석 후 얻은 원자료는 Iolite 2.5와 ISOPLLOT 프로그램으로 처리하였다. 단일 저어콘 입자에서 연령이 섞이거나 납손실(Pb loss)에 의한 효과를 제거하기 위해 >10% 불일치 연령을 보이는 분석점들은 연령계산에서 제외했다. 유효분석점들을 이용해 저어콘 연령 분포를 파악 후 퇴적물의 기원지를 해석했다. 가장 젊은 군집에서 통계적으로 대표성이 있다고 알려진  $2\sigma$  [YC2 $\sigma$  (3+)] 방법( $2\sigma$ 의 오차범위 내에서 최소 3개 이상의 가장 젊은 연령을 이용)을 활용해 t-검정(t-test)을 통과한 분석점들로부터 계산된  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령이 시료별 최소연령으로 이용되었다. 그러나 가장 젊은 군집에서 상대적으로 연령들의 분산이 큰 UD-2 시료에 대해서는 ISOPLLOT의 터프저콘 알고리즘(tuffzirc algorithm)을 적용해 통계적으로 신뢰도 있는 구간으로 선정된 분석점들을 이용해  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령을 계산했다.



그림 19. 한국기초과학지원연구원(오창센터)에 설치된 동위원소 분석장비(LA-MC-ICP-MS)



## 2.2 박편관찰

그림 20의 연대측정을 위한 시료들 중 매우 심각하게 풍화를 받아 박편제작이 어려운 상부 다대포층의 UD-2 시료를 제외한 5개의 시료와 하부 다대포층 역암 및 역암 내 산출되는 쳐트 역들을 채취한 후 절단 과정을 거쳐 박편용 유리판에 접착 가능한 크기로 가공했다. 가공된 시료들은 유리에 접착을 위해 한쪽 면을 연마재를 이용해 연마 후, 아탈다이트 접착제를 사용해 접착하고 접착제가 완전히 굳을 때까지 약 24시간 기다렸다. 완전히 접착된 것을 확인한 후 암석을 절단 및 연마과정을 거쳐 두께가 0.03 mm 가 될 때까지 연마했다. 완성된 박편은 부산대학교 지구관 211호에 설치된 편광현미경을 활용해 내부 조직 및 방산층 화석 유무를 확인했다(그림 21).

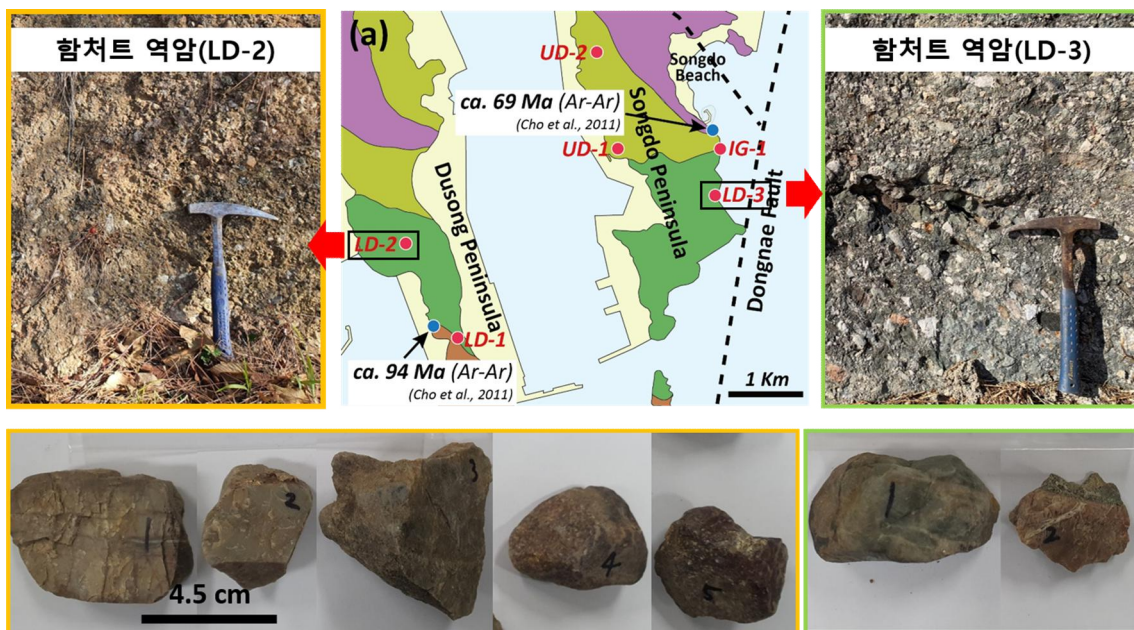


그림 20. 박편용 시료들의 채취 위치와 두송반도와 송도반도의 역암노두 및 분리된 쳐트역

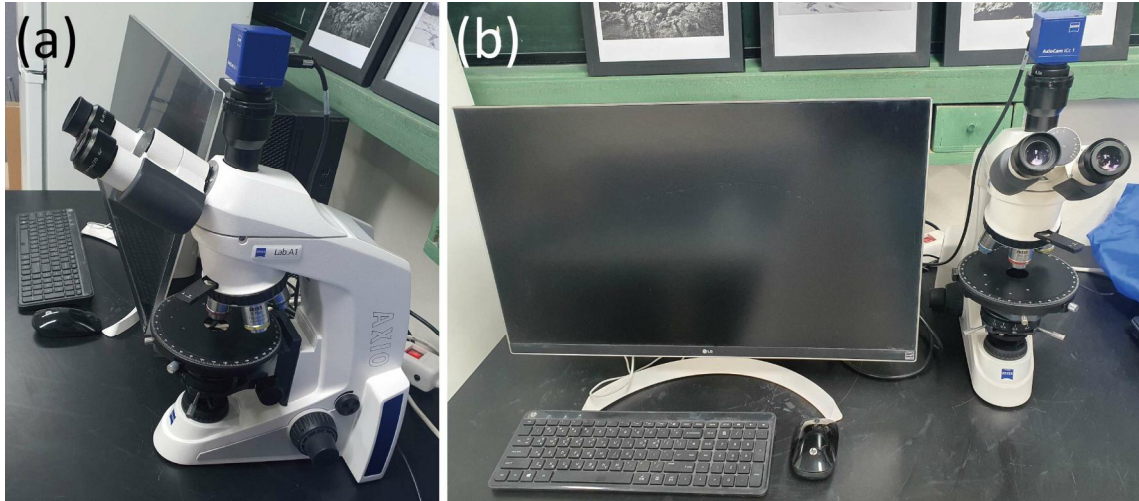


그림 21. 박편 촬영에 이용된 편광현미경과 카메라(ZEISS axio Lab A1. + axio Cam ICc 1)





## 제 IV 장 사업 수행 내용 및 결과





## IV. 사업 수행 내용 및 결과

### 1. 부산지역 대표 지형·지질(다대포층) 학술조사 및 가치 증명

#### 1.1 다대포층 연대측정 결과

분석결과 대부분의 시료들(LD-1, 2, 3, UD-1)은 선캄브리아 시대에서 백악기에 이르는 넓은 연대범위를 나타냈다(그림 22). 그러나 상하부 다대포층 사이에 산출되는 화쇄류암(IG-1)은 고생대 말의 폐름기에서 백악기 범위를 나타냈고, 상부 다대포층 UD-2 시료에서는 오직 백악기 연대 만을 보여주었다(그림 22).

연대분포의 특징으로는 쇄설성 저어콘들의 연대가 하부 다대포층의 LD-3 시료를 제외하면 모두 백악기에서 가장 많이 분포한다는 점이다. 그리고 대부분 시료들이 고생대와 중생대 트라이아스기, 중생대 쥐라기 연대를 보여주는 저어콘들이 0~10% 정도로 산발적인 산출을 보이는데 반해, 하부 다대포층의 LD-3 시료에서는 고생대 폐름기를 나타내는 저어콘들이 1/3정도로 많은 부분을 차지하고 있다(표 1). 쇄설성 저어콘 연령들의 확률밀도분포는 모든 시료들에서 백악기에 포함된 가장 젊은 군집에서 최고 정점을 보여준다(그림 22).

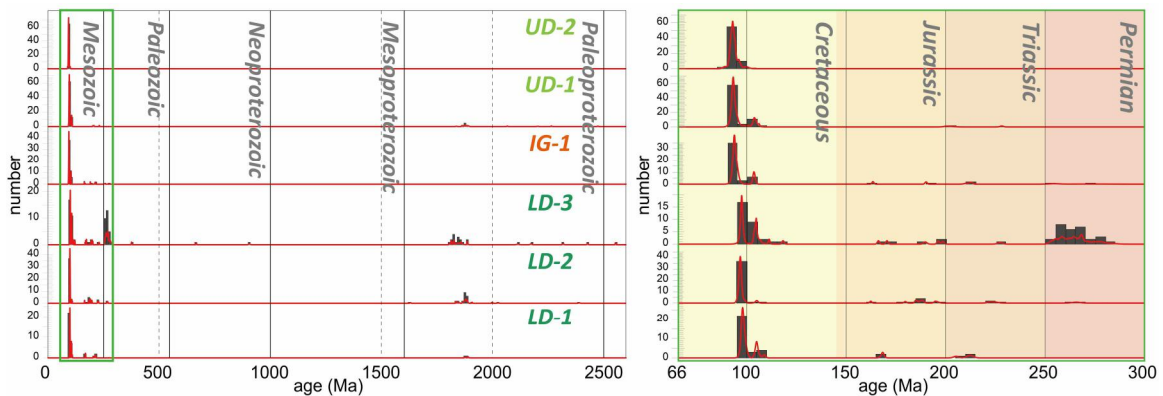


그림 22. 시료별 저어콘들의 확률밀도분포곡선과 히스토그램(우측: 젊은 연대 부분(녹색 사각형)을 확대)

표 1. 총분석점 및 유효분석점과 시료별 연대분포

Samples	Total	*Valid	Precambrian	Paleozoic	Triassic	Jurassic	Cretaceous
U. Dadaepo Fm. (UD-2)	74	68	-	-	-	-	100%
U. Dadaepo Fm. (UD-1)	95	94	17%	-	2%	1%	80%
acidic ignimbrite (IG-1)	50	50	-	4%	4%	4%	88%
L. Dadaepo Fm. (LD-3)	93	89	26%	34%	1%	6%	34%
L. Dadaepo Fm. (LD-2)	80	79	33%	3%	4%	11%	49%
L. Dadaepo Fm. (LD-1)	40	36	6%	-	8%	6%	81%

\*분석오류와  $\geq 10\%$ 의 불일치를 보이는 분석점을 제외한 분석점

최고 정점 연대는 하부 다대포층인 LD-1에서 약 9,800만년, LD-2와 LD-3에서 약 9,700만년, 상하부 다대포층 사이의 화쇄류암인 IG-1에서 약 9,400만년, 상부 다대포층인 UD-1과 2에서 9,300만년을 지시해, 지층의 하부에서 상부로 갈수록 점차 젊어지는 경향을 보인다(그림 23).

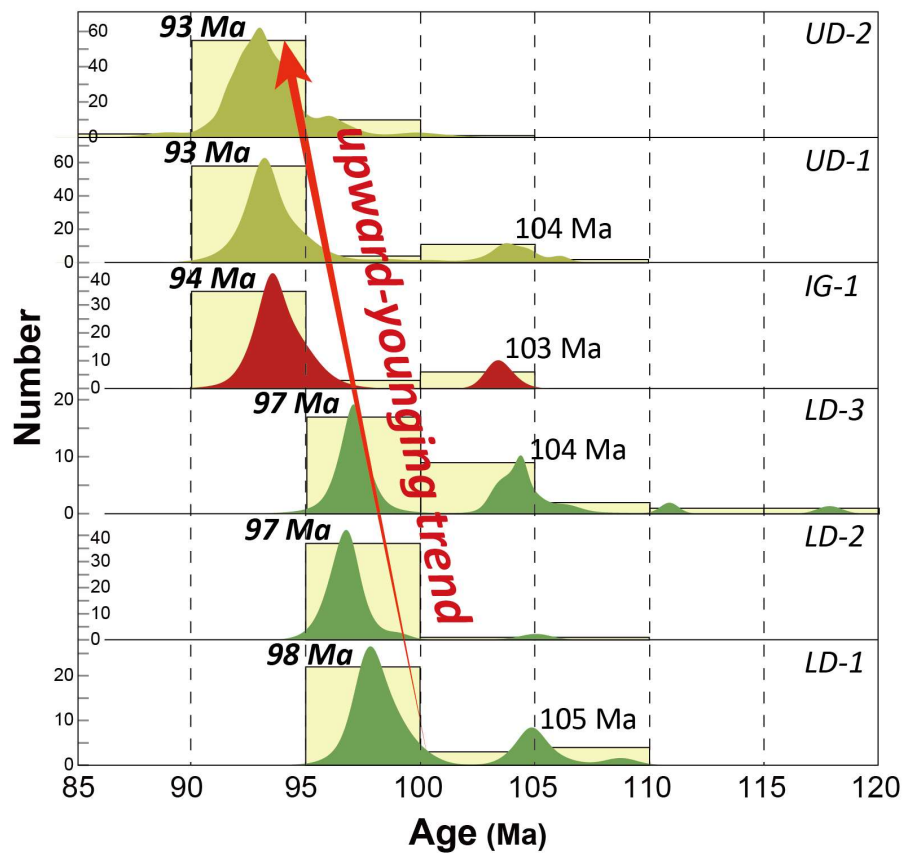


그림 23. 백악기 저어콘들의 확률밀도분포곡선

가장 젊은 군집의  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중 평균 연대는 하부 다대포층의 LD-1에서 22개의 분석점으로부터  $98.0 \pm 0.3$  Ma (MSWD=0.93), LD-2에서 37개의 분석점으로부터  $96.8 \pm 0.2$  Ma (MSWD=0.98), LD-3에서 17개의 분석점으로부터  $97.1 \pm 0.3$  Ma (MSWD=0.14), 화쇄류암(IG-1)에서 38개의 분석점으로부터  $93.6 \pm 0.2$  Ma (MSWD=0.90), 상부 다대포층의 UD-1에서 60개의 분석점으로부터  $93.3 \pm 0.2$  Ma (MSWD=0.69), 그리고 UD-2에서 41개의 분석점으로부터  $92.8 \pm 0.2$  Ma (MSWD=1.2)로 계산되었다(그림 24).

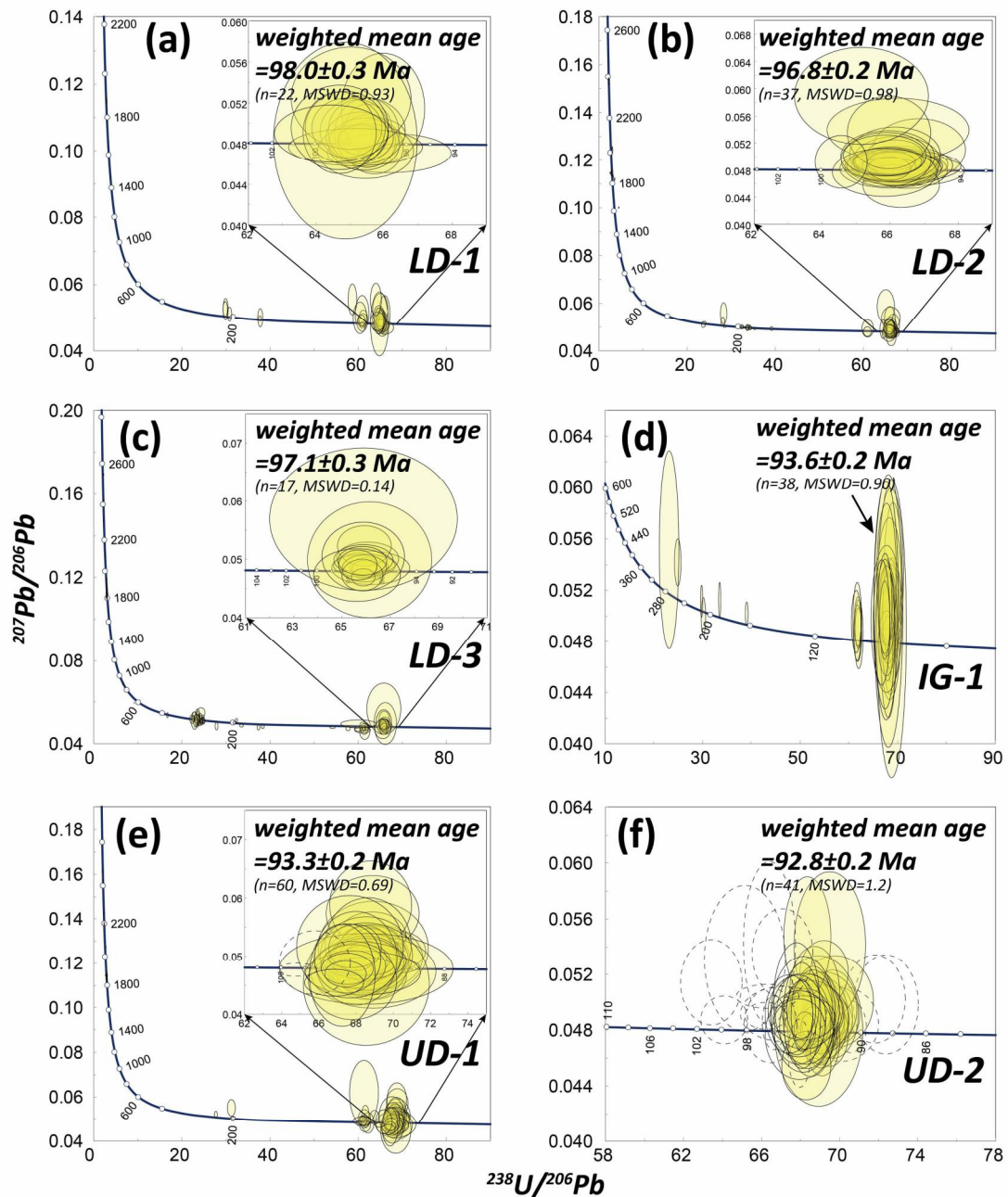


그림 24. 일치곡선(concordia diagram)상에 도시된 다대포층 쇄설성 저어콘 연대측정결과

표 2. 다대포층의 LA-MC-ICP-MS 저어콘 U-Pb 연대측정 결과

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-1 (n=40)														
LD-1-1	1.29	0.0556	± 0.0038	0.0170	± 0.0002	0.131	± 0.009	-5.5	108.8	± 1.4	124.5	± 8.3	418.0	± 69.0
LD-1-2	0.85	0.0556	± 0.0040	0.0156	± 0.0003	0.120	± 0.009	-4.7	99.9	± 1.6	114.4	± 8.2	418.0	± 62.0
LD-1-3	0.53	0.0483	± 0.0021	0.0153	± 0.0002	0.103	± 0.004		97.7	± 1.0	99.1	± 3.8	187.0	± 47.0
LD-1-4	0.57	0.0514	± 0.0044	0.0164	± 0.0003	0.120	± 0.012		105.0	± 2.2	115.0	± 11.0	410.0	± 69.0
LD-1-5	0.99	0.0496	± 0.0024	0.0154	± 0.0002	0.106	± 0.005		98.6	± 1.2	102.2	± 4.7	231.0	± 50.0
LD-1-6	0.51	0.0477	± 0.0022	0.0152	± 0.0002	0.100	± 0.004		97.4	± 1.0	97.9	± 4.0	242.0	± 51.0
LD-1-7	0.71	0.0491	± 0.0033	0.0155	± 0.0002	0.105	± 0.007		98.9	± 1.3	100.7	± 6.2	247.0	± 61.0
LD-1-8	0.40	0.0502	± 0.0023	0.0265	± 0.0003	0.183	± 0.009		168.3	± 2.1	170.2	± 7.4	307.0	± 43.0
LD-1-9	1.69	0.0492	± 0.0014	0.0165	± 0.0002	0.111	± 0.003		105.2	± 1.3	107.1	± 2.6	184.0	± 28.0
LD-1-10	0.55	0.0512	± 0.0018	0.0324	± 0.0004	0.232	± 0.009		205.5	± 2.6	211.3	± 7.6	305.0	± 42.0
LD-1-11	0.65	0.0515	± 0.0044	0.0152	± 0.0002	0.108	± 0.010		97.0	± 1.5	105.3	± 9.3	460.0	± 130.0
LD-1-12	0.16	0.1157	± 0.0004	0.3429	± 0.0079	5.430	± 0.130		1899.0	± 38.0	1895.0	± 20.0	1889.3	± 4.0
LD-1-13	0.27	0.0500	± 0.0021	0.0164	± 0.0002	0.112	± 0.005		104.5	± 1.4	107.8	± 4.5	237.0	± 78.0
LD-1-14	0.92	0.0497	± 0.0018	0.0153	± 0.0001	0.104	± 0.004		97.6	± 0.9	100.8	± 3.6	300.0	± 41.0
LD-1-15	0.69	0.0496	± 0.0034	0.0155	± 0.0003	0.104	± 0.007		98.9	± 1.8	100.6	± 6.7	353.0	± 78.0
LD-1-16	0.76	0.0490	± 0.0023	0.0155	± 0.0003	0.104	± 0.005		99.3	± 2.1	100.3	± 4.6	229.0	± 38.0
LD-1-17	0.74	0.0720	± 0.0033	0.0156	± 0.0002	0.153	± 0.007	-36.6	100.1	± 1.4	144.2	± 6.1	939.0	± 54.0
LD-1-18	0.50	0.0483	± 0.0079	0.0154	± 0.0004	0.103	± 0.017		98.6	± 2.6	99.0	± 16.0	370.0	± 120.0
LD-1-19	0.60	0.0493	± 0.0025	0.0153	± 0.0002	0.104	± 0.005		98.1	± 1.1	100.8	± 4.9	315.0	± 47.0
LD-1-20	1.05	0.0496	± 0.0029	0.0154	± 0.0002	0.106	± 0.006		98.7	± 1.4	102.0	± 5.7	229.0	± 60.0
LD-1-21	0.47	0.0525	± 0.0041	0.0154	± 0.0003	0.111	± 0.008		98.4	± 2.2	106.4	± 7.7	454.0	± 96.0
LD-1-22	0.68	0.0527	± 0.0019	0.0336	± 0.0005	0.241	± 0.008		213.1	± 3.0	218.9	± 6.5	340.0	± 39.0
LD-1-23	0.61	0.0527	± 0.0027	0.0334	± 0.0005	0.241	± 0.012		212.0	± 3.1	218.0	± 10.0	429.0	± 50.0
LD-1-24	0.70	0.0471	± 0.0016	0.0151	± 0.0003	0.099	± 0.004		96.8	± 2.2	95.2	± 3.9	144.0	± 33.0
LD-1-25	0.80	0.0477	± 0.0015	0.0154	± 0.0004	0.102	± 0.004		98.2	± 2.4	98.1	± 3.8	144.0	± 29.0
LD-1-26	0.74	0.0490	± 0.0013	0.0152	± 0.0002	0.104	± 0.003		97.5	± 1.2	99.9	± 2.9	208.0	± 26.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-1-27	0.78	0.0487	± 0.0020	0.0153	± 0.0002	0.102	± 0.004		98.0	± 1.2	98.5	± 3.9	320.0	± 49.0
LD-1-28	0.98	0.0499	± 0.0007	0.0265	± 0.0002	0.181	± 0.003		168.5	± 1.2	169.1	± 2.5	199.0	± 18.0
LD-1-29	0.66	0.0491	± 0.0028	0.0153	± 0.0002	0.103	± 0.006		97.7	± 1.2	99.2	± 5.3	454.0	± 66.0
LD-1-30	1.10	0.0493	± 0.0027	0.0153	± 0.0002	0.104	± 0.005		97.9	± 1.5	100.4	± 4.9	281.0	± 57.0
LD-1-31	0.89	0.0473	± 0.0022	0.0153	± 0.0003	0.099	± 0.005		97.7	± 1.7	96.2	± 4.2	179.0	± 61.0
LD-1-32	1.26	0.0484	± 0.0012	0.0153	± 0.0001	0.102	± 0.003		98.0	± 0.9	98.1	± 2.5	186.0	± 27.0
LD-1-33	0.82	0.0478	± 0.0008	0.0164	± 0.0001	0.108	± 0.002		104.9	± 0.9	103.9	± 1.9	145.0	± 18.0
LD-1-34	0.82	0.0646	± 0.0056	0.0154	± 0.0003	0.135	± 0.012	-18.2	98.2	± 1.9	129.0	± 11.0	830.0	± 150.0
LD-1-35	0.88	0.0802	± 0.0036	0.0191	± 0.0007	0.208	± 0.011	-44.8	122.0	± 4.4	190.7	± 9.6	1133.0	± 87.0
LD-1-36	0.49	0.1149	± 0.0006	0.3460	± 0.0110	5.470	± 0.180		1913.0	± 49.0	1887.0	± 26.0	1876.8	± 5.8
LD-1-37	0.69	0.0480	± 0.0021	0.0153	± 0.0002	0.102	± 0.005		97.8	± 1.3	98.6	± 4.6	276.0	± 43.0
LD-1-38	0.85	0.0495	± 0.0016	0.0164	± 0.0002	0.112	± 0.004		104.7	± 1.5	107.9	± 3.7	274.0	± 33.0
LD-1-39	0.79	0.0501	± 0.0039	0.0166	± 0.0003	0.112	± 0.009		105.8	± 2.2	108.7	± 8.0	450.0	± 85.0
LD-1-40	0.06	0.1061	± 0.0005	0.1706	± 0.0022	2.476	± 0.032	-22.6	1015.0	± 12.0	1265.9	± 9.4	1729.8	± 4.6
LD-2 (n=80)														
LD-2-1	1.07	0.0501	± 0.0031	0.0152	± 0.0003	0.105	± 0.006		97.0	± 1.6	101.1	± 5.6	328.0	± 55.0
LD-2-2	0.19	0.1150	± 0.0011	0.3404	± 0.0032	5.450	± 0.086		1889.0	± 15.0	1892.0	± 14.0	1887.0	± 11.0
LD-2-3	0.92	0.0511	± 0.0008	0.0422	± 0.0006	0.297	± 0.006		266.6	± 3.6	264.5	± 4.2	252.0	± 25.0
LD-2-4	0.35	0.0486	± 0.0019	0.0151	± 0.0003	0.101	± 0.005		96.4	± 2.0	98.2	± 4.2	214.0	± 41.0
LD-2-5	0.50	0.0511	± 0.0037	0.0150	± 0.0003	0.107	± 0.008		95.7	± 1.6	103.3	± 7.3	310.0	± 120.0
LD-2-6	0.70	0.0493	± 0.0032	0.0155	± 0.0002	0.106	± 0.007		99.1	± 0.9	101.7	± 6.6	290.0	± 120.0
LD-2-7	0.46	0.0487	± 0.0024	0.0151	± 0.0003	0.102	± 0.005		96.6	± 1.9	99.2	± 4.6	304.0	± 59.0
LD-2-8	0.55	0.0482	± 0.0023	0.0152	± 0.0003	0.102	± 0.005		96.9	± 1.8	98.0	± 4.6	222.0	± 46.0
LD-2-9	0.66	0.0495	± 0.0014	0.0151	± 0.0002	0.102	± 0.003		96.5	± 1.4	98.8	± 2.5	203.0	± 43.0
LD-2-10	0.19	0.1154	± 0.0006	0.3421	± 0.0073	5.440	± 0.110		1896.0	± 35.0	1894.0	± 19.0	1887.3	± 3.6
LD-2-11	0.39	0.0577	± 0.0021	0.0161	± 0.0002	0.129	± 0.004	-14.6	102.8	± 1.2	122.7	± 3.7	537.0	± 56.0
LD-2-12	0.05	0.1145	± 0.0009	0.3398	± 0.0068	5.403	± 0.090		1886.0	± 33.0	1885.0	± 14.0	1874.9	± 4.8
LD-2-13	1.05	0.0477	± 0.0029	0.0152	± 0.0003	0.099	± 0.006		97.2	± 1.8	95.6	± 5.9	327.0	± 55.0
LD-2-14	0.19	0.1153	± 0.0007	0.3407	± 0.0060	5.420	± 0.079		1890.0	± 29.0	1887.0	± 12.0	1884.7	± 7.5

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-2-15	0.08	0.1150	± 0.0006	0.3393	± 0.0030	5.421	± 0.054		1883.0	± 15.0	1888.0	± 8.5	1879.8	± 5.5
LD-2-16	0.63	0.0482	± 0.0010	0.0151	± 0.0002	0.100	± 0.002		96.4	± 1.1	96.7	± 2.2	180.0	± 22.0
LD-2-17	0.91	0.0496	± 0.0030	0.0164	± 0.0003	0.112	± 0.007		104.9	± 1.8	107.6	± 6.6	346.0	± 63.0
LD-2-18	0.35	0.1147	± 0.0005	0.3384	± 0.0045	5.325	± 0.075		1878.0	± 22.0	1872.0	± 12.0	1874.7	± 4.5
LD-2-19	0.39	0.0540	± 0.0038	0.0151	± 0.0004	0.116	± 0.008	-5.5	96.6	± 2.4	111.3	± 7.0	520.0	± 110.0
LD-2-20	0.19	0.1149	± 0.0004	0.3357	± 0.0038	5.291	± 0.059		1865.0	± 18.0	1866.2	± 9.6	1879.8	± 2.8
LD-2-21	0.04	0.1126	± 0.0004	0.2790	± 0.0022	4.305	± 0.038	-5.6	1586.0	± 11.0	1693.5	± 7.4	1842.3	± 3.5
LD-2-22	1.21	0.0480	± 0.0022	0.0150	± 0.0002	0.098	± 0.004		96.2	± 1.4	95.3	± 4.2	324.0	± 49.0
LD-2-23	0.53	0.0489	± 0.0019	0.0151	± 0.0002	0.102	± 0.004		96.3	± 1.5	98.1	± 3.9	228.0	± 38.0
LD-2-24	0.05	0.1153	± 0.0003	0.3389	± 0.0050	5.355	± 0.080		1881.0	± 24.0	1877.0	± 13.0	1884.6	± 2.6
LD-2-25	0.24	0.1535	± 0.0012	0.4501	± 0.0064	9.430	± 0.130		2395.0	± 28.0	2381.0	± 13.0	2389.7	± 7.2
LD-2-26	0.42	0.0519	± 0.0005	0.0419	± 0.0006	0.300	± 0.006		264.8	± 3.9	266.7	± 4.4	284.0	± 15.0
LD-2-27	0.43	0.0487	± 0.0020	0.0151	± 0.0002	0.101	± 0.005		96.7	± 1.5	99.1	± 3.7	181.0	± 67.0
LD-2-28	0.19	0.1150	± 0.0003	0.3850	± 0.0057	6.084	± 0.088		2098.0	± 26.0	1990.0	± 12.0	1878.8	± 2.6
LD-2-29	0.45	0.1150	± 0.0008	0.3434	± 0.0090	5.420	± 0.130		1902.0	± 43.0	1886.0	± 21.0	1880.2	± 6.3
LD-2-30	0.54	0.0494	± 0.0030	0.0151	± 0.0002	0.104	± 0.008		96.7	± 1.5	96.2	± 4.9	323.0	± 82.0
LD-2-31	0.66	0.0498	± 0.0009	0.0296	± 0.0003	0.202	± 0.004		188.1	± 1.6	186.8	± 3.4	230.0	± 18.0
LD-2-32	1.11	0.0506	± 0.0016	0.0151	± 0.0002	0.104	± 0.003	0.0	96.7	± 1.0	100.7	± 3.0	297.0	± 35.0
LD-2-33	0.35	0.0495	± 0.0007	0.0255	± 0.0002	0.173	± 0.003		162.4	± 1.0	162.0	± 2.2	189.0	± 18.0
LD-2-34	0.47	0.0481	± 0.0016	0.0151	± 0.0002	0.101	± 0.004		96.6	± 1.0	97.5	± 3.2	245.0	± 34.0
LD-2-35	0.63	0.0479	± 0.0019	0.0151	± 0.0002	0.101	± 0.004		96.6	± 1.0	97.7	± 3.6	270.0	± 39.0
LD-2-36	0.01	0.1143	± 0.0008	0.3321	± 0.0033	5.223	± 0.053		1848.0	± 16.0	1856.2	± 8.7	1871.2	± 8.8
LD-2-37	0.83	0.1247	± 0.0012	0.3321	± 0.0054	5.810	± 0.120	-3.1	1848.0	± 26.0	1950.0	± 18.0	2024.2	± 7.6
LD-2-38	0.51	0.0504	± 0.0007	0.0309	± 0.0003	0.212	± 0.003		196.1	± 1.8	194.8	± 2.8	210.0	± 19.0
LD-2-39	1.67	0.1147	± 0.0005	0.3447	± 0.0054	5.481	± 0.081		1909.0	± 26.0	1897.0	± 13.0	1877.9	± 3.7
LD-2-40	0.34	0.1228	± 0.0003	0.3636	± 0.0025	6.147	± 0.045		1999.0	± 12.0	1996.6	± 6.4	1998.8	± 2.5
LD-2-41	0.55	0.0483	± 0.0014	0.0152	± 0.0001	0.101	± 0.003		97.0	± 0.8	97.8	± 2.6	174.0	± 27.0
LD-2-42	0.95	0.0480	± 0.0018	0.0150	± 0.0003	0.099	± 0.004		95.9	± 1.7	95.8	± 3.6	214.0	± 54.0
LD-2-43	0.48	0.0494	± 0.0017	0.0152	± 0.0002	0.103	± 0.004		97.0	± 1.2	99.7	± 3.6	216.0	± 45.0



Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-2-44	0.24	0.0503	± 0.0005	0.0307	± 0.0002	0.212	± 0.003		194.8	± 1.3	195.5	± 2.1	195.0	± 17.0
LD-2-45	0.62	0.0561	± 0.0037	0.0353	± 0.0007	0.274	± 0.019	-1.2	223.7	± 4.6	246.0	± 15.0	624.0	± 72.0
LD-2-46	0.25	0.0499	± 0.0007	0.0292	± 0.0002	0.201	± 0.003		185.6	± 1.2	186.1	± 2.7	205.0	± 18.0
LD-2-47	0.32	0.0500	± 0.0010	0.0297	± 0.0002	0.206	± 0.004		188.6	± 1.4	189.9	± 3.6	204.0	± 21.0
LD-2-48	0.81	0.0494	± 0.0011	0.0151	± 0.0001	0.105	± 0.003	-1.0	96.9	± 0.8	101.0	± 2.3	212.0	± 32.0
LD-2-49	0.20	0.0486	± 0.0018	0.0151	± 0.0003	0.102	± 0.004		96.8	± 1.7	98.2	± 3.9	142.0	± 36.0
LD-2-50	0.04	0.1147	± 0.0005	0.3425	± 0.0046	5.484	± 0.076		1899.0	± 22.0	1898.0	± 12.0	1874.2	± 3.2
LD-2-51	1.09	0.0502	± 0.0025	0.0152	± 0.0002	0.107	± 0.006		97.2	± 1.5	103.1	± 5.0	405.0	± 50.0
LD-2-52	0.65	0.0525	± 0.0017	0.0356	± 0.0004	0.260	± 0.009		225.3	± 2.7	234.7	± 6.8	363.0	± 34.0
LD-2-53	0.03	0.1153	± 0.0004	0.3400	± 0.0028	5.453	± 0.052		1886.0	± 14.0	1893.9	± 8.1	1885.7	± 4.1
LD-2-54	0.61	0.0590	± 0.0058	0.0154	± 0.0004	0.121	± 0.012	-4.5	98.2	± 2.4	115.0	± 10.0	675.0	± 87.0
LD-2-55	0.13	0.1168	± 0.0004	0.3358	± 0.0025	5.448	± 0.043	-0.4	1866.0	± 12.0	1891.7	± 6.8	1907.3	± 2.9
LD-2-56	0.67	0.0505	± 0.0004	0.0351	± 0.0004	0.243	± 0.003		222.3	± 2.3	221.4	± 2.4	210.0	± 12.0
LD-2-57	0.53	0.0489	± 0.0013	0.0150	± 0.0002	0.102	± 0.003		96.1	± 1.0	98.2	± 2.5	183.0	± 35.0
LD-2-58	0.25	0.1143	± 0.0007	0.3362	± 0.0037	5.250	± 0.067		1868.0	± 18.0	1860.0	± 11.0	1865.1	± 6.1
LD-2-59	0.61	0.0491	± 0.0015	0.0151	± 0.0002	0.103	± 0.003		96.5	± 1.1	99.3	± 2.7	261.0	± 41.0
LD-2-60	1.14	0.0482	± 0.0016	0.0164	± 0.0002	0.108	± 0.004		105.1	± 1.2	103.9	± 3.3	279.0	± 39.0
LD-2-61	0.41	0.0458	± 0.0027	0.0151	± 0.0002	0.095	± 0.005		96.5	± 1.3	92.2	± 4.9	341.0	± 76.0
LD-2-62	0.64	0.0494	± 0.0013	0.0151	± 0.0001	0.102	± 0.003		96.5	± 0.9	98.7	± 2.7	223.0	± 24.0
LD-2-63	0.05	0.1142	± 0.0004	0.3371	± 0.0033	5.324	± 0.048		1872.0	± 16.0	1874.0	± 7.3	1869.7	± 3.6
LD-2-64	1.41	0.0504	± 0.0033	0.0151	± 0.0003	0.106	± 0.007		96.7	± 1.6	102.2	± 6.2	485.0	± 74.0
LD-2-65	0.68	0.0496	± 0.0033	0.0152	± 0.0003	0.105	± 0.007		97.1	± 1.6	101.5	± 6.5	370.0	± 63.0
LD-2-66	0.96	0.0493	± 0.0017	0.0152	± 0.0002	0.106	± 0.004	-0.1	97.0	± 1.2	102.1	± 3.8	296.0	± 48.0
LD-2-67	0.23	0.1121	± 0.0004	0.2804	± 0.0027	4.404	± 0.044	-5.9	1596.0	± 13.0	1712.1	± 8.3	1835.9	± 3.4
LD-2-68	1.01	0.0536	± 0.0044	0.0152	± 0.0002	0.114	± 0.010	-1.8	97.0	± 1.5	109.2	± 9.0	380.0	± 80.0
LD-2-69	0.37	0.0494	± 0.0016	0.0151	± 0.0002	0.104	± 0.003		96.8	± 0.9	100.7	± 3.2	260.0	± 33.0
LD-2-70	0.74	0.0480	± 0.0007	0.0151	± 0.0001	0.101	± 0.002		96.8	± 0.6	98.1	± 1.5	139.0	± 16.0
LD-2-71	0.07	0.1122	± 0.0002	0.2746	± 0.0021	4.344	± 0.035	-7.6	1565.0	± 11.0	1701.1	± 6.6	1834.2	± 2.5
LD-2-72	0.39	0.0497	± 0.0005	0.0291	± 0.0002	0.202	± 0.002		184.9	± 1.0	186.5	± 1.8	181.0	± 11.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-2-73	0.05	0.1003	± 0.0003	0.2244	± 0.0039	3.168	± 0.056	-8.7	1304.0	± 20.0	1451.0	± 13.0	1629.7	± 4.6
LD-2-74	0.65	0.0503	± 0.0006	0.0295	± 0.0003	0.208	± 0.003	0.0	187.1	± 1.7	191.5	± 2.7	199.0	± 14.0
LD-2-75	0.36	0.0495	± 0.0004	0.0283	± 0.0002	0.196	± 0.002		179.8	± 1.2	181.7	± 1.6	168.2	± 9.6
LD-2-76	0.53	0.0486	± 0.0011	0.0152	± 0.0002	0.101	± 0.003		97.0	± 0.9	97.9	± 2.3	184.0	± 26.0
LD-2-77	1.34	0.0492	± 0.0014	0.0152	± 0.0001	0.103	± 0.003		96.9	± 0.8	99.3	± 2.8	199.0	± 29.0
LD-2-78	0.37	0.1133	± 0.0006	0.3118	± 0.0020	4.831	± 0.037	-1.4	1749.2	± 9.6	1789.8	± 6.4	1849.8	± 5.5
LD-2-79	0.46	0.0481	± 0.0019	0.0151	± 0.0002	0.098	± 0.004		96.6	± 1.4	95.0	± 3.8	217.0	± 51.0
LD-2-80	0.26	0.1145	± 0.0004	0.3655	± 0.0035	5.675	± 0.060		2009.0	± 16.0	1928.5	± 9.1	1870.6	± 4.0
LD-3 (n=93)														
LD-3-1	0.41	0.0490	± 0.0016	0.0152	± 0.0002	0.103	± 0.004		97.1	± 1.5	99.4	± 3.6	170.0	± 42.0
LD-3-2	0.64	0.0521	± 0.0017	0.0404	± 0.0004	0.286	± 0.010		255.2	± 2.4	256.1	± 7.5	294.0	± 46.0
LD-3-3	0.54	0.0514	± 0.0007	0.0309	± 0.0002	0.220	± 0.003	-1.1	196.1	± 1.2	202.2	± 2.7	264.0	± 17.0
LD-3-4	0.04	0.1153	± 0.0003	0.3410	± 0.0019	5.217	± 0.047		1891.4	± 9.1	1855.1	± 7.6	1884.3	± 2.1
LD-3-5	0.23	0.1156	± 0.0006	0.3433	± 0.0027	5.639	± 0.055		1902.0	± 13.0	1921.4	± 8.5	1886.9	± 5.5
LD-3-6	0.51	0.0504	± 0.0006	0.0313	± 0.0002	0.220	± 0.004		198.5	± 1.5	201.7	± 3.2	228.0	± 18.0
LD-3-7	0.19	0.1313	± 0.0012	0.3817	± 0.0058	6.540	± 0.120		2084.0	± 27.0	2054.0	± 17.0	2113.0	± 11.0
LD-3-8	0.92	0.0570	± 0.0100	0.0152	± 0.0007	0.128	± 0.023	-0.2	97.1	± 4.7	123.0	± 21.0	1060.0	± 180.0
LD-3-9	0.25	0.0485	± 0.0005	0.0163	± 0.0001	0.109	± 0.001		104.4	± 0.5	105.3	± 1.2	126.9	± 9.8
LD-3-10	1.05	0.0500	± 0.0081	0.0151	± 0.0005	0.113	± 0.018		96.7	± 3.0	108.0	± 17.0	720.0	± 140.0
LD-3-11	0.15	0.1475	± 0.0005	0.4689	± 0.0039	9.574	± 0.087		2478.0	± 17.0	2394.5	± 8.4	2317.1	± 4.6
LD-3-12	0.76	0.0526	± 0.0015	0.0419	± 0.0005	0.304	± 0.008		264.7	± 2.8	269.0	± 6.3	309.0	± 37.0
LD-3-13	0.47	0.0484	± 0.0018	0.0164	± 0.0002	0.113	± 0.004		104.9	± 0.9	109.1	± 4.1	254.0	± 34.0
LD-3-14	0.71	0.0474	± 0.0037	0.0152	± 0.0003	0.105	± 0.009		97.5	± 2.2	101.6	± 8.1	300.0	± 130.0
LD-3-15	0.24	0.0552	± 0.0021	0.0411	± 0.0012	0.320	± 0.014	-1.2	259.4	± 7.6	281.0	± 11.0	450.0	± 40.0
LD-3-16	0.54	0.0502	± 0.0023	0.0151	± 0.0002	0.107	± 0.005	-0.1	96.9	± 1.5	102.9	± 4.4	320.0	± 51.0
LD-3-17	0.66	0.0524	± 0.0016	0.0428	± 0.0008	0.305	± 0.010		270.2	± 4.7	269.7	± 7.7	358.0	± 33.0
LD-3-18	0.22	0.0481	± 0.0004	0.0185	± 0.0002	0.122	± 0.002		117.9	± 1.1	116.8	± 1.3	107.0	± 12.0
LD-3-19	0.79	0.0522	± 0.0017	0.0449	± 0.0009	0.348	± 0.015	-1.2	283.2	± 5.3	303.0	± 11.0	289.0	± 50.0
LD-3-20	0.48	0.1135	± 0.0017	0.3574	± 0.0072	6.000	± 0.170		1969.0	± 34.0	1974.0	± 25.0	1863.0	± 22.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-3-21	0.13	0.1359	± 0.0006	0.4001	± 0.0023	7.507	± 0.072		2169.0	± 10.0	2173.7	± 8.6	2172.4	± 6.9
LD-3-22	0.22	0.1132	± 0.0008	0.3400	± 0.0032	5.249	± 0.060		1887.0	± 16.0	1862.0	± 10.0	1847.5	± 8.1
LD-3-23	0.33	0.0691	± 0.0005	0.1504	± 0.0011	1.426	± 0.014		903.4	± 6.2	899.5	± 5.7	902.4	± 8.6
LD-3-24	0.48	0.0524	± 0.0028	0.0152	± 0.0002	0.111	± 0.006	-3.1	97.0	± 1.3	106.8	± 5.5	425.0	± 56.0
LD-3-25	0.22	0.1539	± 0.0022	0.2117	± 0.0041	4.510	± 0.130	-36.1	1238.0	± 22.0	1730.0	± 23.0	2393.0	± 18.0
LD-3-26	0.33	0.0468	± 0.0012	0.0164	± 0.0004	0.105	± 0.004		104.8	± 2.5	101.2	± 3.6	82.0	± 16.0
LD-3-27	0.55	0.0520	± 0.0016	0.0411	± 0.0006	0.289	± 0.010		259.6	± 3.6	257.9	± 8.0	339.0	± 38.0
LD-3-28	0.69	0.0530	± 0.0032	0.0425	± 0.0009	0.297	± 0.023		268.3	± 5.7	267.0	± 17.0	336.0	± 89.0
LD-3-29	0.47	0.0521	± 0.0005	0.0417	± 0.0008	0.302	± 0.006		263.5	± 4.7	267.9	± 5.0	281.0	± 15.0
LD-3-30	0.34	0.0505	± 0.0017	0.0427	± 0.0007	0.307	± 0.010		269.7	± 4.4	271.8	± 7.9	295.0	± 42.0
LD-3-31	0.52	0.0570	± 0.0023	0.0151	± 0.0004	0.121	± 0.005	-12.2	96.6	± 2.4	115.7	± 4.9	505.0	± 51.0
LD-3-32	0.65	0.0540	± 0.0012	0.0438	± 0.0007	0.341	± 0.010	-3.8	276.5	± 4.1	298.4	± 7.2	402.0	± 32.0
LD-3-33	0.66	0.0486	± 0.0023	0.0151	± 0.0003	0.104	± 0.005		96.7	± 1.9	100.5	± 4.9	278.0	± 56.0
LD-3-34	0.36	0.0512	± 0.0009	0.0410	± 0.0004	0.286	± 0.005		259.1	± 2.1	255.2	± 3.9	243.0	± 23.0
LD-3-35	0.34	0.0488	± 0.0013	0.0151	± 0.0002	0.100	± 0.003		96.8	± 1.0	97.1	± 2.5	176.0	± 30.0
LD-3-36	0.67	0.0531	± 0.0014	0.0413	± 0.0006	0.305	± 0.008		261.0	± 3.4	269.5	± 6.5	353.0	± 33.0
LD-3-37	0.47	0.0518	± 0.0016	0.0420	± 0.0006	0.297	± 0.009		265.3	± 3.4	264.9	± 6.9	301.0	± 34.0
LD-3-38	0.13	0.1135	± 0.0005	0.3568	± 0.0060	5.321	± 0.091		1966.0	± 28.0	1871.0	± 15.0	1856.0	± 4.9
LD-3-39	0.52	0.0512	± 0.0012	0.0403	± 0.0006	0.286	± 0.008		254.4	± 3.6	254.4	± 6.3	276.0	± 27.0
LD-3-40	0.37	0.0490	± 0.0007	0.0298	± 0.0003	0.202	± 0.004		189.6	± 1.7	186.7	± 3.3	168.0	± 19.0
LD-3-41	0.34	0.0478	± 0.0006	0.0163	± 0.0001	0.108	± 0.001		104.3	± 0.7	103.6	± 1.2	125.0	± 15.0
LD-3-42	0.87	0.0579	± 0.0041	0.0152	± 0.0003	0.124	± 0.009	-11.2	97.4	± 2.0	118.3	± 8.0	532.0	± 79.0
LD-3-43	0.13	0.1138	± 0.0005	0.3339	± 0.0024	5.241	± 0.035		1857.0	± 12.0	1858.8	± 5.8	1859.1	± 4.5
LD-3-44	0.63	0.0484	± 0.0013	0.0151	± 0.0001	0.100	± 0.003		96.7	± 0.9	96.9	± 2.6	206.0	± 30.0
LD-3-45	0.45	0.0499	± 0.0016	0.0167	± 0.0009	0.121	± 0.007		106.4	± 5.9	117.1	± 6.6	234.0	± 44.0
LD-3-46	0.33	0.0477	± 0.0009	0.0174	± 0.0001	0.117	± 0.003		110.9	± 0.8	112.3	± 2.2	142.0	± 22.0
LD-3-47	0.50	0.0532	± 0.0023	0.0425	± 0.0006	0.313	± 0.013		268.0	± 3.8	275.0	± 10.0	374.0	± 46.0
LD-3-48	0.58	0.0500	± 0.0021	0.0152	± 0.0002	0.109	± 0.005	-2.3	97.1	± 1.5	104.9	± 4.1	285.0	± 45.0
LD-3-49	0.82	0.1122	± 0.0007	0.3238	± 0.0026	5.007	± 0.046		1808.0	± 12.0	1820.5	± 7.7	1837.2	± 6.8

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-3-50	0.48	0.0498	± 0.0020	0.0152	± 0.0002	0.108	± 0.004	-1.1	97.2	± 1.2	103.5	± 4.0	270.0	± 40.0
LD-3-51	0.46	0.0522	± 0.0013	0.0441	± 0.0006	0.317	± 0.008		278.4	± 3.4	279.2	± 6.1	325.0	± 31.0
LD-3-52	0.38	0.0476	± 0.0010	0.0162	± 0.0001	0.107	± 0.002		103.3	± 0.7	103.3	± 2.2	154.0	± 24.0
LD-3-53	0.73	0.0485	± 0.0019	0.0152	± 0.0002	0.098	± 0.004		97.1	± 1.1	94.4	± 3.6	212.0	± 43.0
LD-3-54	0.52	0.0515	± 0.0034	0.0438	± 0.0012	0.314	± 0.023		276.1	± 7.1	274.0	± 18.0	500.0	± 100.0
LD-3-55	0.10	0.1114	± 0.0006	0.3266	± 0.0018	5.219	± 0.051	-0.8	1822.9	± 8.7	1855.2	± 8.2	1822.6	± 5.8
LD-3-56	0.29	0.1132	± 0.0009	0.3362	± 0.0027	5.288	± 0.049		1868.0	± 13.0	1866.6	± 7.9	1846.5	± 8.5
LD-3-57	0.12	0.1116	± 0.0004	0.3337	± 0.0027	5.292	± 0.054		1856.0	± 13.0	1866.8	± 8.8	1826.0	± 3.6
LD-3-58	0.25	0.0522	± 0.0007	0.0404	± 0.0003	0.293	± 0.005	-0.4	255.2	± 1.8	261.6	± 3.7	293.0	± 19.0
LD-3-59	0.74	0.0520	± 0.0010	0.0408	± 0.0004	0.297	± 0.006		257.5	± 2.3	263.8	± 4.3	274.0	± 18.0
LD-3-60	0.70	0.0488	± 0.0016	0.0359	± 0.0004	0.247	± 0.009		227.3	± 2.5	225.5	± 7.3	172.0	± 27.0
LD-3-61	0.13	0.1115	± 0.0003	0.3248	± 0.0028	4.996	± 0.048		1813.0	± 14.0	1820.3	± 8.5	1825.5	± 3.0
LD-3-62	0.38	0.0483	± 0.0013	0.0152	± 0.0001	0.101	± 0.003		97.0	± 0.6	97.4	± 2.5	225.0	± 31.0
LD-3-63	0.60	0.0507	± 0.0010	0.0422	± 0.0003	0.295	± 0.006		266.8	± 2.0	261.9	± 4.8	247.0	± 27.0
LD-3-64	0.21	0.0476	± 0.0006	0.0163	± 0.0002	0.100	± 0.002		103.9	± 1.5	97.1	± 1.5	78.0	± 19.0
LD-3-65	0.47	0.0513	± 0.0013	0.0408	± 0.0004	0.289	± 0.007		258.0	± 2.2	257.2	± 5.6	270.0	± 33.0
LD-3-66	0.48	0.1573	± 0.0006	0.4578	± 0.0041	9.850	± 0.120		2429.0	± 18.0	2420.0	± 11.0	2426.7	± 5.0
LD-3-67	0.63	0.0506	± 0.0011	0.0410	± 0.0004	0.280	± 0.007		258.8	± 2.7	251.3	± 5.6	244.0	± 26.0
LD-3-68	0.26	0.1697	± 0.0004	0.4533	± 0.0046	10.570	± 0.130	-1.9	2409.0	± 21.0	2486.0	± 11.0	2552.4	± 3.0
LD-3-69	0.18	0.1113	± 0.0003	0.3316	± 0.0022	5.093	± 0.047		1846.0	± 11.0	1835.9	± 7.5	1821.7	± 3.1
LD-3-70	0.41	0.0509	± 0.0005	0.0400	± 0.0003	0.281	± 0.003		252.8	± 2.0	251.4	± 2.6	233.0	± 12.0
LD-3-71	0.29	0.0540	± 0.0009	0.0596	± 0.0004	0.444	± 0.009		373.1	± 2.3	373.6	± 6.0	366.0	± 24.0
LD-3-72	0.30	0.0491	± 0.0021	0.0152	± 0.0002	0.108	± 0.005	-1.4	97.4	± 0.9	104.3	± 4.6	220.0	± 47.0
LD-3-73	0.44	0.0474	± 0.0022	0.0163	± 0.0002	0.112	± 0.006		104.1	± 1.2	107.9	± 5.0	120.0	± 37.0
LD-3-74	0.12	0.1103	± 0.0006	0.3221	± 0.0058	4.730	± 0.100		1799.0	± 28.0	1769.0	± 19.0	1805.1	± 4.3
LD-3-75	0.51	0.0504	± 0.0011	0.0425	± 0.0002	0.295	± 0.007		268.4	± 1.3	261.7	± 5.1	235.0	± 29.0
LD-3-76	0.50	0.0474	± 0.0011	0.0166	± 0.0002	0.110	± 0.004		106.3	± 1.3	105.6	± 3.2	95.0	± 26.0
LD-3-77	0.41	0.0474	± 0.0022	0.0152	± 0.0002	0.099	± 0.005		97.2	± 1.0	96.3	± 4.4	233.0	± 37.0
LD-3-78	0.08	0.0599	± 0.0004	0.1086	± 0.0005	0.877	± 0.008		664.8	± 2.9	639.8	± 4.0	608.0	± 10.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
LD-3-79	0.66	0.0485	± 0.0007	0.0261	± 0.0002	0.171	± 0.002		166.0	± 1.1	160.5	± 1.9	128.0	± 17.0
LD-3-80	0.50	0.0505	± 0.0008	0.0415	± 0.0003	0.290	± 0.005		262.2	± 2.0	258.1	± 3.7	216.0	± 21.0
LD-3-81	0.48	0.0511	± 0.0006	0.0425	± 0.0002	0.298	± 0.004		268.4	± 1.3	265.0	± 3.1	250.0	± 15.0
LD-3-82	0.06	0.1107	± 0.0003	0.3347	± 0.0018	5.091	± 0.047		1861.2	± 8.9	1835.4	± 8.1	1811.3	± 3.4
LD-3-83	0.65	0.0511	± 0.0024	0.0434	± 0.0007	0.308	± 0.014		274.1	± 4.4	276.0	± 11.0	337.0	± 44.0
LD-3-84	0.45	0.0498	± 0.0005	0.0416	± 0.0005	0.284	± 0.006		262.9	± 3.1	253.7	± 4.5	179.0	± 15.0
LD-3-85	0.58	0.0503	± 0.0008	0.0419	± 0.0002	0.293	± 0.005		264.6	± 1.4	260.5	± 4.1	242.0	± 23.0
LD-3-86	0.70	0.0482	± 0.0009	0.0268	± 0.0002	0.171	± 0.004		170.3	± 1.1	160.3	± 3.1	146.0	± 25.0
LD-3-87	0.13	0.1108	± 0.0003	0.3584	± 0.0023	5.459	± 0.070		1974.0	± 11.0	1894.0	± 11.0	1812.3	± 2.7
LD-3-88	0.52	0.0461	± 0.0031	0.0163	± 0.0003	0.105	± 0.007		104.0	± 1.6	101.2	± 6.6	348.0	± 82.0
LD-3-89	0.38	0.0475	± 0.0010	0.0162	± 0.0001	0.108	± 0.002		103.8	± 0.8	104.4	± 2.2	100.0	± 17.0
LD-3-90	0.50	0.0470	± 0.0012	0.0152	± 0.0001	0.099	± 0.003		97.1	± 0.6	95.4	± 2.5	197.0	± 38.0
LD-3-91	1.51	0.0506	± 0.0048	0.0152	± 0.0003	0.112	± 0.011		97.1	± 2.0	107.8	± 9.9	410.0	± 99.0
LD-3-92	0.62	0.1161	± 0.0034	0.3462	± 0.0084	5.540	± 0.270		1913.0	± 40.0	1887.0	± 37.0	1847.0	± 27.0
LD-3-93	0.37	0.1077	± 0.0007	0.1677	± 0.0075	2.450	± 0.100	-18.1	996.0	± 41.0	1247.0	± 30.0	1763.1	± 6.7
IG-1 (n=50)														
IG-1-1	0.76	0.0496	± 0.0020	0.0163	± 0.0002	0.111	± 0.004		104.0	± 1.3	106.5	± 4.0	285.0	± 30.0
IG-1-2	0.90	0.0497	± 0.0025	0.0149	± 0.0002	0.105	± 0.005	0.0	95.0	± 1.2	101.0	± 4.8	232.0	± 51.0
IG-1-3	0.70	0.0491	± 0.0013	0.0162	± 0.0001	0.109	± 0.003		103.3	± 0.9	105.2	± 2.6	222.0	± 30.0
IG-1-4	0.32	0.0500	± 0.0012	0.0332	± 0.0004	0.228	± 0.006		210.7	± 2.5	208.1	± 5.1	227.0	± 27.0
IG-1-5	0.91	0.0486	± 0.0048	0.0148	± 0.0004	0.101	± 0.009		95.0	± 2.3	97.6	± 8.1	177.0	± 98.0
IG-1-6	0.66	0.0542	± 0.0015	0.0403	± 0.0009	0.297	± 0.012		254.6	± 5.3	262.9	± 9.2	376.0	± 41.0
IG-1-7	0.52	0.0498	± 0.0047	0.0148	± 0.0006	0.102	± 0.009		94.5	± 3.6	98.1	± 8.4	320.0	± 110.0
IG-1-8	0.84	0.0531	± 0.0047	0.0145	± 0.0003	0.108	± 0.010		92.7	± 2.1	103.9	± 9.5	550.0	± 110.0
IG-1-9	0.65	0.0479	± 0.0021	0.0148	± 0.0003	0.099	± 0.005		94.5	± 1.9	95.4	± 4.2	206.0	± 82.0
IG-1-10	0.86	0.0492	± 0.0015	0.0146	± 0.0002	0.099	± 0.003		93.5	± 1.3	95.5	± 2.8	246.0	± 33.0
IG-1-11	0.45	0.0497	± 0.0040	0.0145	± 0.0003	0.100	± 0.008		93.0	± 1.7	95.7	± 7.6	427.0	± 69.0
IG-1-12	0.29	0.0490	± 0.0095	0.0146	± 0.0005	0.103	± 0.018		93.1	± 3.4	99.0	± 17.0	620.0	± 150.0
IG-1-13	0.64	0.0504	± 0.0087	0.0147	± 0.0005	0.106	± 0.020		94.0	± 3.4	101.0	± 18.0	520.0	± 190.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
IG-1-14	0.81	0.0533	± 0.0045	0.0148	± 0.0004	0.110	± 0.009	-0.6	94.5	± 2.3	105.2	± 7.8	421.0	± 76.0
IG-1-15	0.77	0.0504	± 0.0029	0.0148	± 0.0003	0.105	± 0.006	-0.6	94.5	± 1.9	102.0	± 5.0	238.0	± 66.0
IG-1-16	0.31	0.0528	± 0.0040	0.0146	± 0.0004	0.111	± 0.009	-3.0	93.7	± 2.7	107.3	± 8.1	497.0	± 74.0
IG-1-17	0.45	0.0483	± 0.0020	0.0146	± 0.0002	0.098	± 0.004		93.3	± 1.4	94.8	± 3.8	259.0	± 41.0
IG-1-18	0.68	0.0461	± 0.0018	0.0146	± 0.0002	0.095	± 0.004		93.5	± 1.2	92.4	± 3.6	214.0	± 42.0
IG-1-19	0.82	0.0510	± 0.0026	0.0147	± 0.0002	0.104	± 0.005		93.9	± 1.3	99.9	± 4.9	352.0	± 68.0
IG-1-20	0.35	0.0501	± 0.0031	0.0147	± 0.0003	0.100	± 0.006		94.2	± 2.1	97.6	± 5.8	385.0	± 49.0
IG-1-21	1.00	0.0552	± 0.0063	0.0433	± 0.0030	0.348	± 0.037		273.0	± 18.0	303.0	± 28.0	810.0	± 110.0
IG-1-22	0.56	0.0506	± 0.0021	0.0147	± 0.0003	0.104	± 0.005	0.0	94.1	± 1.9	100.3	± 4.3	309.0	± 37.0
IG-1-23	0.74	0.0534	± 0.0054	0.0146	± 0.0004	0.104	± 0.012		93.3	± 2.8	101.0	± 11.0	590.0	± 100.0
IG-1-24	0.81	0.0467	± 0.0038	0.0147	± 0.0003	0.094	± 0.007		94.0	± 1.6	90.6	± 6.9	296.0	± 67.0
IG-1-25	0.76	0.0490	± 0.0045	0.0146	± 0.0004	0.102	± 0.010		93.6	± 2.5	98.8	± 9.3	298.0	± 90.0
IG-1-26	0.96	0.0512	± 0.0076	0.0148	± 0.0004	0.105	± 0.015		94.7	± 2.8	103.0	± 13.0	336.0	± 96.0
IG-1-27	1.55	0.0502	± 0.0017	0.0147	± 0.0002	0.102	± 0.004		94.0	± 1.4	98.1	± 3.3	230.0	± 36.0
IG-1-28	0.58	0.0486	± 0.0022	0.0161	± 0.0002	0.109	± 0.005		103.2	± 1.2	105.0	± 4.8	231.0	± 48.0
IG-1-29	0.94	0.0487	± 0.0018	0.0162	± 0.0002	0.109	± 0.004		103.4	± 1.1	105.3	± 3.2	227.0	± 39.0
IG-1-30	0.45	0.0498	± 0.0040	0.0149	± 0.0003	0.108	± 0.008	-0.5	95.5	± 2.0	105.0	± 7.0	340.0	± 100.0
IG-1-31	0.29	0.0485	± 0.0017	0.0146	± 0.0001	0.099	± 0.003		93.2	± 0.9	96.2	± 3.1	189.0	± 44.0
IG-1-32	1.59	0.0496	± 0.0016	0.0162	± 0.0002	0.111	± 0.004		103.4	± 1.1	106.3	± 3.5	244.0	± 38.0
IG-1-33	0.73	0.0475	± 0.0021	0.0147	± 0.0002	0.095	± 0.004		94.2	± 1.2	92.6	± 4.0	304.0	± 49.0
IG-1-34	0.29	0.0513	± 0.0011	0.0299	± 0.0002	0.212	± 0.004	-0.5	190.1	± 1.1	195.8	± 3.6	255.0	± 27.0
IG-1-35	0.59	0.0510	± 0.0032	0.0148	± 0.0003	0.107	± 0.007	-2.5	94.9	± 1.6	104.8	± 5.9	325.0	± 69.0
IG-1-36	0.86	0.0496	± 0.0025	0.0162	± 0.0002	0.112	± 0.006		103.6	± 1.2	107.6	± 5.1	321.0	± 51.0
IG-1-37	1.16	0.0488	± 0.0015	0.0146	± 0.0001	0.098	± 0.003		93.6	± 0.9	94.9	± 3.0	234.0	± 36.0
IG-1-38	0.99	0.0512	± 0.0010	0.0336	± 0.0002	0.237	± 0.005		212.9	± 1.4	215.6	± 4.2	275.0	± 28.0
IG-1-39	0.76	0.0491	± 0.0017	0.0146	± 0.0002	0.099	± 0.003		93.6	± 1.0	95.9	± 3.2	268.0	± 35.0
IG-1-40	0.75	0.0473	± 0.0014	0.0146	± 0.0001	0.094	± 0.003		93.5	± 0.7	91.7	± 2.5	202.0	± 33.0
IG-1-41	0.91	0.0492	± 0.0015	0.0146	± 0.0001	0.098	± 0.003		93.2	± 0.9	95.0	± 2.6	224.0	± 33.0
IG-1-42	1.03	0.0477	± 0.0014	0.0146	± 0.0001	0.096	± 0.003		93.7	± 0.9	92.9	± 2.7	160.0	± 27.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
IG-1-43	0.86	0.0482	± 0.0013	0.0144	± 0.0002	0.096	± 0.003		92.4	± 1.0	93.3	± 2.9	225.0	± 36.0
IG-1-44	0.37	0.0504	± 0.0030	0.0145	± 0.0002	0.099	± 0.006		93.1	± 1.4	95.7	± 5.7	360.0	± 100.0
IG-1-45	0.65	0.0496	± 0.0019	0.0146	± 0.0002	0.099	± 0.004		93.3	± 1.0	95.9	± 3.5	296.0	± 41.0
IG-1-46	1.16	0.0504	± 0.0025	0.0147	± 0.0002	0.104	± 0.005	-0.1	94.3	± 1.2	100.2	± 4.6	377.0	± 56.0
IG-1-47	0.40	0.0482	± 0.0017	0.0145	± 0.0002	0.097	± 0.004		92.8	± 1.0	93.5	± 3.4	240.0	± 40.0
IG-1-48	0.46	0.0502	± 0.0008	0.0257	± 0.0002	0.178	± 0.003		163.3	± 1.0	166.6	± 2.5	226.0	± 21.0
IG-1-49	0.35	0.0497	± 0.0019	0.0146	± 0.0002	0.100	± 0.004		93.5	± 1.0	96.6	± 3.5	286.0	± 40.0
IG-1-50	0.61	0.0492	± 0.0015	0.0146	± 0.0002	0.099	± 0.003		93.3	± 1.0	96.1	± 3.1	265.0	± 41.0
UD-1 (n=95)														
UD-1-1	0.37	0.0470	± 0.0014	0.0146	± 0.0001	0.096	± 0.003		93.5	± 0.7	92.6	± 2.7	128.0	± 35.0
UD-1-2	0.43	0.0483	± 0.0031	0.0147	± 0.0003	0.100	± 0.007		94.4	± 1.9	96.5	± 6.3	257.0	± 80.0
UD-1-3	0.78	0.0503	± 0.0054	0.0146	± 0.0004	0.098	± 0.009		93.4	± 2.7	94.5	± 8.7	407.0	± 86.0
UD-1-4	0.27	0.1122	± 0.0006	0.3286	± 0.0023	5.094	± 0.045		1832.0	± 11.0	1835.1	± 7.4	1836.4	± 6.1
UD-1-5	0.58	0.0492	± 0.0029	0.0146	± 0.0002	0.100	± 0.006		93.5	± 1.3	96.2	± 5.4	318.0	± 69.0
UD-1-6	0.10	0.1148	± 0.0005	0.3522	± 0.0021	5.608	± 0.041		1944.7	± 9.8	1916.9	± 6.2	1877.5	± 3.9
UD-1-7	0.28	0.0489	± 0.0016	0.0146	± 0.0001	0.099	± 0.003		93.2	± 0.7	95.8	± 3.0	227.0	± 42.0
UD-1-8	0.64	0.0489	± 0.0024	0.0146	± 0.0002	0.098	± 0.005		93.2	± 0.9	94.7	± 4.5	335.0	± 57.0
UD-1-9	0.24	0.0494	± 0.0011	0.0162	± 0.0001	0.111	± 0.003		103.7	± 0.7	106.8	± 2.6	160.0	± 26.0
UD-1-10	1.04	0.0459	± 0.0055	0.0148	± 0.0004	0.094	± 0.011		94.4	± 2.7	90.0	± 10.0	380.0	± 130.0
UD-1-11	1.44	0.0760	± 0.0110	0.0213	± 0.0013	0.271	± 0.092	-20.6	136.1	± 7.9	221.0	± 49.0	950.0	± 180.0
UD-1-12	0.11	0.1159	± 0.0005	0.3393	± 0.0022	5.435	± 0.041		1883.0	± 11.0	1889.8	± 6.5	1892.8	± 4.3
UD-1-13	0.38	0.0473	± 0.0023	0.0162	± 0.0003	0.107	± 0.005		103.8	± 1.7	102.7	± 4.8	154.0	± 61.0
UD-1-14	0.24	0.0511	± 0.0027	0.0157	± 0.0002	0.111	± 0.006		100.4	± 1.4	106.2	± 5.6	447.0	± 54.0
UD-1-15	0.24	0.0526	± 0.0033	0.0162	± 0.0002	0.118	± 0.008	-0.7	103.8	± 1.1	112.9	± 7.3	413.0	± 89.0
UD-1-16	0.65	0.0515	± 0.0066	0.0145	± 0.0005	0.104	± 0.013		92.9	± 3.3	100.0	± 12.0	560.0	± 100.0
UD-1-17	0.13	0.1277	± 0.0005	0.3539	± 0.0024	6.226	± 0.050	-1.9	1953.0	± 11.0	2008.2	± 6.9	2065.8	± 4.1
UD-1-18	0.15	0.1150	± 0.0005	0.3612	± 0.0020	5.733	± 0.040		1987.7	± 9.3	1935.9	± 6.0	1881.4	± 4.4
UD-1-19	0.39	0.0493	± 0.0050	0.0146	± 0.0003	0.099	± 0.011		93.4	± 1.8	96.0	± 9.9	281.0	± 97.0
UD-1-20	0.30	0.0468	± 0.0072	0.0149	± 0.0003	0.095	± 0.014		95.1	± 2.1	92.0	± 13.0	310.0	± 130.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error 2 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error 2 $\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$
UD-1-21	0.36	0.0497	± 0.0049	0.0148	± 0.0003	0.101	± 0.009		94.8	± 2.0	97.7	± 8.5	267.0	± 62.0
UD-1-22	0.47	0.1570	± 0.0006	0.4554	± 0.0041	9.840	± 0.110		2421.0	± 18.0	2418.0	± 11.0	2423.5	± 5.3
UD-1-23	0.57	0.0495	± 0.0021	0.0164	± 0.0002	0.112	± 0.005		104.7	± 1.4	107.2	± 4.5	285.0	± 43.0
UD-1-24	0.70	0.0465	± 0.0032	0.0146	± 0.0003	0.092	± 0.008		93.1	± 2.2	89.3	± 7.3	156.0	± 27.0
UD-1-25	0.72	0.0489	± 0.0024	0.0146	± 0.0002	0.098	± 0.005		93.2	± 1.4	94.9	± 4.5	359.0	± 60.0
UD-1-26	2.01	0.0483	± 0.0013	0.0145	± 0.0001	0.096	± 0.003		92.9	± 0.8	93.3	± 2.4	222.0	± 33.0
UD-1-27	0.54	0.0489	± 0.0031	0.0146	± 0.0003	0.097	± 0.006		93.2	± 2.1	94.0	± 5.4	339.0	± 81.0
UD-1-28	0.43	0.0467	± 0.0021	0.0145	± 0.0002	0.095	± 0.005		93.1	± 1.4	91.4	± 4.2	291.0	± 47.0
UD-1-29	0.27	0.1156	± 0.0007	0.3500	± 0.0029	5.553	± 0.058		1934.0	± 14.0	1908.8	± 9.1	1888.1	± 6.5
UD-1-30	0.37	0.0482	± 0.0022	0.0145	± 0.0002	0.096	± 0.004		93.1	± 1.2	92.5	± 3.8	216.0	± 43.0
UD-1-31	0.32	0.0529	± 0.0022	0.0145	± 0.0003	0.107	± 0.005	-4.6	93.0	± 1.6	103.1	± 4.2	364.0	± 58.0
UD-1-32	1.07	0.0590	± 0.0061	0.0145	± 0.0004	0.116	± 0.012	-4.9	93.0	± 2.4	111.0	± 11.0	650.0	± 100.0
UD-1-33	0.54	0.0554	± 0.0031	0.0320	± 0.0007	0.243	± 0.015		203.2	± 4.4	219.0	± 12.0	531.0	± 60.0
UD-1-34	0.89	0.0453	± 0.0086	0.0146	± 0.0006	0.091	± 0.018		93.4	± 3.8	91.0	± 18.0	380.0	± 110.0
UD-1-35	0.71	0.0497	± 0.0066	0.0147	± 0.0004	0.101	± 0.013		94.1	± 2.4	97.0	± 12.0	320.0	± 120.0
UD-1-36	0.09	0.1147	± 0.0004	0.3866	± 0.0019	6.096	± 0.035		2106.8	± 9.0	1989.3	± 5.0	1876.1	± 3.3
UD-1-37	0.35	0.0517	± 0.0072	0.0148	± 0.0005	0.103	± 0.014		94.6	± 3.2	99.0	± 13.0	450.0	± 170.0
UD-1-38	0.77	0.0521	± 0.0066	0.0146	± 0.0004	0.105	± 0.013		93.3	± 2.6	101.0	± 12.0	390.0	± 100.0
UD-1-39	0.28	0.0460	± 0.0020	0.0145	± 0.0002	0.092	± 0.004		93.0	± 1.0	89.9	± 3.8	183.0	± 34.0
UD-1-40	0.37	0.0503	± 0.0012	0.0164	± 0.0001	0.113	± 0.003	-1.0	104.7	± 0.8	108.9	± 2.4	262.0	± 28.0
UD-1-41	0.40	0.0511	± 0.0029	0.0143	± 0.0003	0.101	± 0.007		91.5	± 1.9	98.0	± 6.0	375.0	± 85.0
UD-1-42	1.65	0.0491	± 0.0052	0.0145	± 0.0004	0.099	± 0.011		93.0	± 2.2	95.3	± 9.8	290.0	± 120.0
UD-1-43	0.91	0.0503	± 0.0035	0.0163	± 0.0003	0.112	± 0.008		104.1	± 1.9	106.9	± 7.0	410.0	± 68.0
UD-1-44	0.28	0.0489	± 0.0019	0.0162	± 0.0002	0.109	± 0.005		103.6	± 1.1	105.7	± 4.5	230.0	± 68.0
UD-1-45	0.95	0.0575	± 0.0053	0.0145	± 0.0004	0.116	± 0.011	-6.2	92.9	± 2.7	111.3	± 9.9	789.0	± 91.0
UD-1-46	0.30	0.0511	± 0.0023	0.0145	± 0.0003	0.102	± 0.005		93.0	± 1.7	98.3	± 4.3	360.0	± 56.0
UD-1-47	0.12	0.1144	± 0.0006	0.3297	± 0.0048	5.202	± 0.083		1836.0	± 23.0	1853.0	± 13.0	1876.3	± 4.9
UD-1-48	1.25	0.0482	± 0.0008	0.0166	± 0.0001	0.110	± 0.002		106.2	± 0.7	105.6	± 1.9	150.0	± 21.0
UD-1-49	0.53	0.0490	± 0.0045	0.0152	± 0.0004	0.103	± 0.009		97.2	± 2.3	99.9	± 8.1	575.0	± 98.0



Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
UD-1-50	0.15	0.0482	± 0.0010	0.0163	± 0.0003	0.108	± 0.003		104.2	± 1.8	104.4	± 2.9	154.0	± 30.0
UD-1-51	0.26	0.0470	± 0.0018	0.0148	± 0.0002	0.097	± 0.004		94.9	± 1.3	94.2	± 4.0	213.0	± 75.0
UD-1-52	0.28	0.0477	± 0.0009	0.0154	± 0.0002	0.101	± 0.002		98.7	± 1.3	97.9	± 2.2	104.0	± 23.0
UD-1-53	0.35	0.0493	± 0.0026	0.0146	± 0.0004	0.099	± 0.005		93.5	± 2.5	95.6	± 5.0	205.0	± 52.0
UD-1-54	0.37	0.0489	± 0.0038	0.0146	± 0.0004	0.098	± 0.007		93.4	± 2.3	94.4	± 6.6	307.0	± 78.0
UD-1-55	0.46	0.0479	± 0.0050	0.0146	± 0.0008	0.092	± 0.009		93.4	± 5.2	89.5	± 8.6	236.0	± 58.0
UD-1-56	0.37	0.0483	± 0.0013	0.0146	± 0.0005	0.097	± 0.004		93.2	± 3.1	93.5	± 3.6	173.0	± 23.0
UD-1-57	0.73	0.1617	± 0.0007	0.5042	± 0.0057	11.200	± 0.130		2633.0	± 24.0	2538.0	± 11.0	2473.4	± 4.4
UD-1-58	1.32	0.0472	± 0.0031	0.0146	± 0.0005	0.098	± 0.008		93.6	± 3.4	94.0	± 7.0	376.0	± 61.0
UD-1-59	1.02	0.0482	± 0.0020	0.0145	± 0.0002	0.097	± 0.004		92.7	± 1.2	94.6	± 3.7	268.0	± 45.0
UD-1-60	0.77	0.0537	± 0.0033	0.0145	± 0.0003	0.108	± 0.007	-2.9	92.9	± 2.0	103.9	± 6.3	531.0	± 61.0
UD-1-61	0.08	0.1146	± 0.0005	0.3281	± 0.0021	5.199	± 0.035	-0.4	1829.0	± 10.0	1852.0	± 5.8	1872.2	± 4.8
UD-1-62	1.67	0.0494	± 0.0046	0.0145	± 0.0002	0.099	± 0.009		93.0	± 1.4	95.3	± 8.0	376.0	± 69.0
UD-1-63	1.00	0.0495	± 0.0030	0.0146	± 0.0003	0.099	± 0.006		93.4	± 2.1	95.6	± 5.6	311.0	± 56.0
UD-1-64	0.35	0.0483	± 0.0013	0.0146	± 0.0003	0.097	± 0.003		93.6	± 1.8	93.6	± 3.1	220.0	± 30.0
UD-1-65	0.78	0.0474	± 0.0051	0.0145	± 0.0006	0.099	± 0.010		92.9	± 3.7	95.7	± 9.5	346.0	± 90.0
UD-1-66	0.53	0.0491	± 0.0036	0.0145	± 0.0003	0.099	± 0.006		93.0	± 1.7	95.7	± 5.9	423.0	± 80.0
UD-1-67	0.92	0.0502	± 0.0038	0.0146	± 0.0003	0.099	± 0.008		93.1	± 1.7	94.5	± 7.7	493.0	± 66.0
UD-1-68	0.66	0.0506	± 0.0025	0.0145	± 0.0002	0.101	± 0.005		92.9	± 1.4	97.5	± 4.8	318.0	± 54.0
UD-1-69	0.29	0.0491	± 0.0023	0.0145	± 0.0002	0.098	± 0.005		92.8	± 1.2	95.2	± 4.3	255.0	± 54.0
UD-1-70	0.27	0.0485	± 0.0008	0.0146	± 0.0002	0.098	± 0.002		93.2	± 1.0	94.8	± 1.7	163.0	± 19.0
UD-1-71	0.25	0.0489	± 0.0013	0.0146	± 0.0001	0.099	± 0.003		93.1	± 0.9	95.5	± 2.6	192.0	± 36.0
UD-1-72	1.24	0.0525	± 0.0011	0.0361	± 0.0003	0.260	± 0.006		228.4	± 1.7	234.1	± 4.9	306.0	± 30.0
UD-1-73	0.71	0.0494	± 0.0047	0.0145	± 0.0003	0.098	± 0.009		92.7	± 2.0	94.1	± 8.6	590.0	± 110.0
UD-1-74	0.45	0.0485	± 0.0038	0.0161	± 0.0003	0.105	± 0.009		102.8	± 1.8	101.4	± 8.1	279.0	± 72.0
UD-1-75	0.67	0.0508	± 0.0005	0.0316	± 0.0005	0.222	± 0.004		200.5	± 2.8	203.4	± 3.1	221.0	± 13.0
UD-1-76	0.39	0.0504	± 0.0030	0.0146	± 0.0003	0.102	± 0.006		93.3	± 2.1	98.3	± 5.3	267.0	± 52.0
UD-1-77	0.62	0.0495	± 0.0021	0.0146	± 0.0002	0.101	± 0.004		93.4	± 1.4	97.6	± 4.0	253.0	± 44.0
UD-1-78	3.12	0.0498	± 0.0027	0.0145	± 0.0003	0.099	± 0.006		92.7	± 1.6	95.9	± 5.2	309.0	± 81.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error 2 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error 2 $\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$
UD-1-79	0.22	0.1140	± 0.0006	0.3488	± 0.0036	5.487	± 0.064		1928.0	± 17.0	1897.0	± 10.0	1863.3	± 5.5
UD-1-80	1.87	0.0455	± 0.0019	0.0150	± 0.0003	0.095	± 0.004		95.8	± 1.8	91.8	± 3.6	150.0	± 250.0
UD-1-81	0.30	0.0482	± 0.0014	0.0146	± 0.0001	0.098	± 0.003		93.3	± 0.9	94.4	± 2.6	192.0	± 31.0
UD-1-82	-0.02	0.1138	± 0.0003	0.3333	± 0.0019	5.255	± 0.032		1854.3	± 9.3	1861.2	± 5.2	1860.7	± 2.5
UD-1-83	0.41	0.0490	± 0.0016	0.0146	± 0.0002	0.099	± 0.003		93.2	± 1.1	95.5	± 3.1	222.0	± 34.0
UD-1-84	0.40	0.0494	± 0.0016	0.0164	± 0.0004	0.112	± 0.005		105.0	± 2.8	108.0	± 4.5	204.0	± 46.0
UD-1-85	0.30	0.0514	± 0.0014	0.0145	± 0.0003	0.104	± 0.004	-2.4	92.9	± 1.9	100.4	± 3.4	214.0	± 53.0
UD-1-86	0.82	0.0499	± 0.0046	0.0145	± 0.0004	0.099	± 0.008		92.8	± 2.8	96.1	± 7.2	278.0	± 96.0
UD-1-87	0.13	0.1144	± 0.0005	0.3381	± 0.0034	5.367	± 0.056		1877.0	± 16.0	1880.5	± 9.0	1872.3	± 4.0
UD-1-88	1.63	0.0506	± 0.0029	0.0145	± 0.0002	0.100	± 0.006		92.8	± 1.5	96.6	± 5.1	392.0	± 56.0
UD-1-89	0.11	0.1379	± 0.0008	0.4108	± 0.0070	7.830	± 0.150		2216.0	± 32.0	2209.0	± 17.0	2202.0	± 7.7
UD-1-90	0.16	0.1431	± 0.0004	0.4183	± 0.0041	8.284	± 0.087		2252.0	± 19.0	2262.4	± 9.4	2264.1	± 2.9
UD-1-91	0.25	0.0479	± 0.0022	0.0148	± 0.0003	0.098	± 0.004		94.8	± 1.6	94.8	± 4.0	107.0	± 41.0
UD-1-92	0.39	0.0486	± 0.0020	0.0145	± 0.0002	0.097	± 0.004		93.0	± 1.0	94.3	± 3.7	199.0	± 52.0
UD-1-93	0.68	0.0516	± 0.0033	0.0147	± 0.0003	0.107	± 0.006	-1.9	94.2	± 1.6	102.7	± 5.1	320.0	± 95.0
UD-1-94	1.37	0.0620	± 0.0120	0.0163	± 0.0007	0.147	± 0.029	-2.1	104.3	± 4.5	137.0	± 26.0	870.0	± 180.0
UD-1-95	0.24	0.0496	± 0.0012	0.0148	± 0.0002	0.101	± 0.002	-0.1	94.4	± 1.4	97.8	± 1.9	163.0	± 29.0
UD-2 (n=74)														
UD-2-1	0.65	0.0499	± 0.0029	0.0138	± 0.0003	0.095	± 0.006		88.5	± 1.7	92.5	± 5.7	316.0	± 68.0
UD-2-2	0.51	0.0478	± 0.0007	0.0145	± 0.0001	0.096	± 0.002		93.0	± 0.4	93.1	± 1.4	105.0	± 19.0
UD-2-3	0.36	0.0481	± 0.0020	0.0145	± 0.0002	0.097	± 0.004		92.9	± 1.1	93.9	± 3.5	178.0	± 42.0
UD-2-4	0.42	0.0495	± 0.0022	0.0145	± 0.0003	0.096	± 0.004		92.5	± 1.8	93.1	± 3.8	228.0	± 52.0
UD-2-5	0.36	0.0489	± 0.0012	0.0144	± 0.0002	0.097	± 0.002		92.0	± 1.0	94.1	± 2.2	172.0	± 26.0
UD-2-6	0.38	0.0493	± 0.0017	0.0145	± 0.0002	0.099	± 0.004		93.0	± 1.5	95.6	± 3.7	247.0	± 40.0
UD-2-7	2.28	0.0482	± 0.0017	0.0147	± 0.0002	0.098	± 0.004		94.3	± 1.5	94.5	± 3.8	154.0	± 33.0
UD-2-8	0.44	0.0480	± 0.0044	0.0145	± 0.0004	0.098	± 0.009		92.9	± 2.5	94.3	± 7.9	300.0	± 58.0
UD-2-9	0.48	0.0494	± 0.0022	0.0147	± 0.0003	0.099	± 0.004		93.8	± 2.0	95.7	± 3.9	251.0	± 45.0
UD-2-10	0.41	0.0478	± 0.0019	0.0144	± 0.0002	0.095	± 0.004		92.1	± 1.0	91.5	± 3.7	265.0	± 40.0
UD-2-11	0.82	0.0489	± 0.0012	0.0145	± 0.0002	0.097	± 0.003		92.7	± 1.2	94.4	± 2.4	183.0	± 31.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
UD-2-12	0.46	0.0486	± 0.0014	0.0143	± 0.0001	0.096	± 0.003		91.6	± 0.9	93.1	± 2.4	210.0	± 31.0
UD-2-13	0.51	0.0489	± 0.0014	0.0144	± 0.0001	0.098	± 0.003		92.2	± 0.9	94.6	± 2.6	244.0	± 37.0
UD-2-14	0.44	0.0488	± 0.0020	0.0145	± 0.0003	0.096	± 0.004		92.8	± 1.6	93.2	± 3.9	308.0	± 59.0
UD-2-15	0.42	0.0501	± 0.0027	0.0143	± 0.0003	0.101	± 0.006		91.7	± 2.1	97.1	± 5.5	256.0	± 55.0
UD-2-16	0.63	0.0482	± 0.0018	0.0145	± 0.0001	0.097	± 0.004		92.9	± 0.9	93.6	± 3.4	246.0	± 47.0
UD-2-17	0.42	0.0491	± 0.0017	0.0143	± 0.0001	0.096	± 0.004		91.6	± 0.9	93.9	± 3.2	232.0	± 32.0
UD-2-18	0.22	0.0515	± 0.0025	0.0158	± 0.0003	0.113	± 0.007		100.9	± 2.1	108.2	± 6.2	262.0	± 53.0
UD-2-19	0.38	0.0489	± 0.0023	0.0144	± 0.0002	0.097	± 0.004		92.2	± 1.1	94.1	± 3.9	293.0	± 46.0
UD-2-20	0.38	0.0492	± 0.0026	0.0144	± 0.0002	0.099	± 0.005		91.9	± 1.4	96.1	± 4.9	391.0	± 56.0
UD-2-21	0.36	0.0455	± 0.0020	0.0146	± 0.0002	0.093	± 0.004		93.7	± 1.4	90.0	± 4.0	145.0	± 58.0
UD-2-22	0.56	0.0480	± 0.0013	0.0145	± 0.0001	0.097	± 0.003		92.7	± 0.9	93.7	± 2.6	184.0	± 32.0
UD-2-23	0.31	0.0579	± 0.0017	0.0151	± 0.0002	0.119	± 0.005	-12.9	96.4	± 1.1	114.4	± 4.5	515.0	± 41.0
UD-2-24	0.41	0.0489	± 0.0013	0.0147	± 0.0003	0.100	± 0.003		93.9	± 1.8	97.1	± 2.9	205.0	± 35.0
UD-2-25	0.39	0.0620	± 0.0063	0.0151	± 0.0003	0.131	± 0.013	-15.3	96.3	± 2.0	125.0	± 12.0	730.0	± 120.0
UD-2-26	0.47	0.0481	± 0.0013	0.0145	± 0.0002	0.096	± 0.003		92.6	± 1.0	93.1	± 2.7	167.0	± 28.0
UD-2-27	1.58	0.0483	± 0.0022	0.0146	± 0.0002	0.099	± 0.005		93.7	± 1.5	96.0	± 4.5	230.0	± 53.0
UD-2-28	0.29	0.0492	± 0.0016	0.0149	± 0.0004	0.102	± 0.004		95.4	± 2.5	98.4	± 3.8	164.0	± 40.0
UD-2-29	0.66	0.0485	± 0.0022	0.0143	± 0.0003	0.096	± 0.005		91.3	± 2.1	92.8	± 4.5	271.0	± 53.0
UD-2-30	0.40	0.0488	± 0.0026	0.0147	± 0.0003	0.098	± 0.005		94.3	± 1.6	95.1	± 4.3	194.0	± 63.0
UD-2-31	0.44	0.0494	± 0.0018	0.0146	± 0.0003	0.099	± 0.004		93.3	± 1.7	95.8	± 3.9	204.0	± 38.0
UD-2-32	0.39	0.0492	± 0.0023	0.0148	± 0.0002	0.101	± 0.005		95.0	± 1.4	97.7	± 4.4	128.0	± 58.0
UD-2-33	0.45	0.0503	± 0.0026	0.0139	± 0.0003	0.097	± 0.005		89.2	± 1.6	94.3	± 4.4	184.0	± 75.0
UD-2-34	0.66	0.1260	± 0.0100	0.0178	± 0.0004	0.312	± 0.030	-119.7	113.5	± 2.6	276.0	± 24.0	1790.0	± 190.0
UD-2-35	0.35	0.0488	± 0.0014	0.0156	± 0.0002	0.106	± 0.003		99.8	± 1.5	101.8	± 2.7	128.0	± 24.0
UD-2-36	0.56	0.0508	± 0.0027	0.0146	± 0.0002	0.102	± 0.006		93.1	± 1.4	98.5	± 5.7	244.0	± 51.0
UD-2-37	0.54	0.0522	± 0.0019	0.0145	± 0.0002	0.105	± 0.004	-4.2	92.5	± 1.3	101.6	± 3.9	328.0	± 48.0
UD-2-38	0.38	0.0484	± 0.0030	0.0146	± 0.0002	0.097	± 0.006		93.4	± 1.3	94.3	± 5.4	295.0	± 84.0
UD-2-39	0.36	0.0486	± 0.0013	0.0145	± 0.0001	0.098	± 0.003		93.1	± 0.8	94.5	± 2.3	160.0	± 29.0
UD-2-40	0.61	0.0494	± 0.0023	0.0145	± 0.0002	0.099	± 0.005		92.7	± 1.0	95.3	± 4.3	251.0	± 45.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error $2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error $2\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error $2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error $2\sigma$
UD-2-41	0.42	0.0532	± 0.0043	0.0154	± 0.0004	0.112	± 0.009		98.2	± 2.5	107.6	± 8.0	340.0	± 110.0
UD-2-42	0.23	0.0486	± 0.0016	0.0150	± 0.0001	0.100	± 0.003		96.0	± 0.7	96.5	± 3.1	154.0	± 21.0
UD-2-43	0.37	0.0536	± 0.0026	0.0149	± 0.0003	0.112	± 0.006	-4.5	95.4	± 1.8	107.3	± 5.8	403.0	± 88.0
UD-2-44	0.40	0.0472	± 0.0020	0.0145	± 0.0002	0.093	± 0.004		92.6	± 1.0	90.3	± 3.6	214.0	± 51.0
UD-2-45	0.42	0.0464	± 0.0020	0.0147	± 0.0001	0.094	± 0.004		94.2	± 0.6	91.5	± 3.9	203.0	± 61.0
UD-2-46	0.42	0.0480	± 0.0020	0.0145	± 0.0001	0.096	± 0.004		92.7	± 0.8	93.3	± 4.1	223.0	± 50.0
UD-2-47	0.63	0.0485	± 0.0026	0.0146	± 0.0002	0.100	± 0.005		93.6	± 1.4	96.8	± 4.3	284.0	± 42.0
UD-2-48	0.30	0.0491	± 0.0008	0.0151	± 0.0002	0.103	± 0.002	-0.1	96.6	± 1.2	99.4	± 1.5	162.0	± 29.0
UD-2-49	0.54	0.0503	± 0.0033	0.0148	± 0.0002	0.104	± 0.007		94.4	± 1.4	99.8	± 6.8	296.0	± 54.0
UD-2-50	0.45	0.0477	± 0.0026	0.0147	± 0.0003	0.097	± 0.005		94.2	± 2.0	93.6	± 4.2	90.0	± 25.0
UD-2-51	0.37	0.0491	± 0.0031	0.0147	± 0.0002	0.099	± 0.007		94.0	± 1.1	96.1	± 6.0	248.0	± 69.0
UD-2-52	0.57	0.0543	± 0.0048	0.0151	± 0.0003	0.112	± 0.009	-1.6	96.4	± 1.6	108.1	± 8.6	335.0	± 75.0
UD-2-53	0.51	0.0492	± 0.0034	0.0147	± 0.0003	0.100	± 0.007		94.0	± 1.8	96.7	± 6.3	235.0	± 64.0
UD-2-54	0.39	0.0497	± 0.0024	0.0146	± 0.0002	0.100	± 0.005		93.2	± 1.1	96.7	± 4.5	254.0	± 49.0
UD-2-55	0.36	0.0586	± 0.0028	0.0148	± 0.0002	0.119	± 0.006	-14.2	94.5	± 1.1	114.0	± 5.0	537.0	± 70.0
UD-2-56	0.42	0.0491	± 0.0021	0.0147	± 0.0001	0.100	± 0.004		94.0	± 0.6	96.5	± 3.6	206.0	± 48.0
UD-2-57	0.25	0.0542	± 0.0043	0.0144	± 0.0003	0.111	± 0.009	-4.3	92.1	± 2.0	106.7	± 8.6	437.0	± 93.0
UD-2-58	0.45	0.0505	± 0.0007	0.0151	± 0.0003	0.104	± 0.003	0.0	96.5	± 1.9	100.7	± 2.3	208.0	± 13.0
UD-2-59	0.38	0.0491	± 0.0016	0.0143	± 0.0002	0.096	± 0.003		91.3	± 1.0	93.1	± 2.9	143.0	± 34.0
UD-2-60	0.38	0.0484	± 0.0022	0.0151	± 0.0003	0.100	± 0.004		96.3	± 1.6	96.9	± 3.8	162.0	± 38.0
UD-2-61	0.39	0.0480	± 0.0011	0.0147	± 0.0001	0.098	± 0.002		93.8	± 0.6	94.6	± 2.2	153.0	± 32.0
UD-2-62	0.38	0.0495	± 0.0017	0.0147	± 0.0001	0.100	± 0.004		94.1	± 0.8	96.8	± 3.2	204.0	± 44.0
UD-2-63	0.33	0.0485	± 0.0010	0.0146	± 0.0001	0.098	± 0.002		93.3	± 0.6	94.5	± 1.6	131.0	± 22.0
UD-2-64	0.47	0.0472	± 0.0015	0.0145	± 0.0001	0.093	± 0.003		92.7	± 0.9	90.6	± 2.7	152.0	± 37.0
UD-2-65	0.41	0.0481	± 0.0010	0.0146	± 0.0001	0.098	± 0.002		93.4	± 0.6	94.5	± 1.9	156.0	± 28.0
UD-2-66	0.45	0.0485	± 0.0014	0.0144	± 0.0001	0.096	± 0.003		92.1	± 0.8	93.3	± 2.6	230.0	± 31.0
UD-2-67	0.53	0.0500	± 0.0018	0.0145	± 0.0001	0.100	± 0.004		92.8	± 0.9	97.0	± 3.4	237.0	± 42.0
UD-2-68	0.63	0.0486	± 0.0011	0.0143	± 0.0001	0.095	± 0.002		91.5	± 0.5	92.2	± 1.9	212.0	± 26.0
UD-2-69	0.56	0.0475	± 0.0012	0.0144	± 0.0001	0.094	± 0.002		92.1	± 0.6	91.3	± 2.3	213.0	± 32.0

Sample Name	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error 2 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error 2 $\sigma$	Disc. (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2 $\sigma$
UD-2-70	0.41	0.0499	± 0.0020	0.0146	± 0.0002	0.099	± 0.004		93.2	± 1.1	95.6	± 3.4	250.0	± 43.0
UD-2-71	0.46	0.0483	± 0.0015	0.0142	± 0.0001	0.094	± 0.003		90.7	± 0.8	91.3	± 2.8	195.0	± 24.0
UD-2-72	0.73	0.2871	± 0.0078	0.0213	± 0.0004	0.850	± 0.035	-340.2	135.8	± 2.2	619.0	± 19.0	3393.0	± 41.0
UD-2-73	0.41	0.0548	± 0.0035	0.0146	± 0.0002	0.112	± 0.007	-6.5	93.6	± 1.3	107.3	± 6.3	404.0	± 72.0
UD-2-74	0.41	0.1016	± 0.0073	0.0171	± 0.0002	0.238	± 0.016	-82.5	109.5	± 1.2	214.0	± 13.0	1490.0	± 140.0

\*Degree of discordance(%): negative numbers and blanks show normal discordant and concordant within 2 $\sigma$  of the analytical error, respectively.

### 1.1.1 다대포층의 퇴적시기

다대포층 퇴적시기에 대한 기존 연대측정 연구는 하부 다대포층 아래 다대포분지의 기저를 이루는 데사이트질 암석과 상부 다대포층을 덮는 현무암질 안산암 용암류를 대상으로 수행된  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  전암 연령측정이 유일하다. 그 결과 하부 데사이트질 암석은  $94 \pm 7$  Ma로 불확실한 연령이 도출된 것으로 해석되었지만, 상부 용암류 연령인  $68.7 \pm 1.5$  Ma는 다대포층이 69 Ma 직전까지 퇴적된 것으로 해석되었다(그림 9)(Cho *et al.*, 2011).

그러나 이번 채설성 저어콘 U-Pb 연령은 하부 다대포층 최하부의 기저역암에서  $98.0 \pm 0.3$  Ma, 상하부 다대포층 경계에 분포하는 산성질 화쇄류암에서  $93.6 \pm 0.2$  Ma, 상부 다대포층 상부에서  $92.8 \pm 0.2$  Ma의 최소연령을 지시했다(그림 24). 기저역암의 약 98 Ma는 기존  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연령측정(데사이트질 화산암)에서 보고된 연령과 오차범위에서 일치하지만, 기존 연령측정법은 암석의 변질에 취약하며 그로 인한 결과의 신뢰도가 매우 낮았다는 점에서 본 연구의 약 98 Ma를 기저역암의 최소연령으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다. 기저역암의 최소연령은 총 36개의 유효분석점들 중 22개(60% 이상)로 이루어진 최소연령 군집 분석점들로부터 계산되었으며, 기저역암을 구성하는 대부분의 역들이 하부 다대포층 아래의 데사이트질 화산암으로 구성된다. 위 사실은 계산된 최소연령이 데사이트질 화산암의 분출 연령임을 지시한다. 그러므로 하부 다대포층 기저역암은 약 98 Ma 이후 퇴적이 시작되었고 이는 다대포분지가 형성되기 시작한 시기와의 매우 유사하다.

그리고 상하부 다대포층 경계의 산성질 화쇄류암에서 계산된  $93.6 \pm 0.2$  Ma는 분출 시기를 직접적으로 지시하는 동시에 하부 다대포층의 최소퇴적연령을 제한한다(그림 24). 이번 연구결과는 하부 다대포층이 약 98.0 Ma 이후에 퇴적되기 시작해 산성질 화쇄류암(약 93.6 Ma)의 형성시기인 후기 백악기 세노마늄절(Cenomanian)에서 투로니아절(Turonian) 초까지 퇴적되었음을 지시한다(그림 24).

상부 다대포층 상부시료에서 계산된  $92.8 \pm 0.2$  Ma의 최소연령은 상부 다대포층을 직접 덮는 현무암질 안산암 용암류에서 측정된 기존  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연령인 약 69 Ma와 약 24 my의 상당한 연령 차이를 나타낸다. 이 차이는 상부 다대포층의 퇴적 이후 상당한 시간적 간격을 가지며 용암류가 흘렀거나 용암류의 분출 이후 열적 영향으로 인한 변질에 의한 것일 수 있다. 그러나 상부 다대포층과 용암류의 경계가 불규칙 요철 모양을 보이며, 하위의 상부 다대포층 사암이 불꽃구조를 보이고 상위의 용암류로 주입된다는 점, 용암류의 암편이 하위 암체에 포획된다는 점 등은 용암류가 피복할 당시 상부 다대포층이 완전히 고화되지 않은 상태였음을 지시한다(Cho *et al.*, 2011). 위 관찰 결과는 상

부 다대포층 최상부의 퇴적 후 많은 시간이 지나지 않아 용암류가 피복했음을 의미하므로, 첫 번째 가능성은 배제할 수 있다. 후자의 가능성은 다대포층에 퇴적 이후 관입한 중성~산성질 조성을 보이는 다수의 암맥과 암상(sill)들이 산출된다는 야외관찰결과를 통해 확인할 수 있다. 기존 전암  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  용암류 연령측정에 이용된 시료의 채취 지점이 위치하는 송도반도 동편에는 대체로 동서 방향의 주향을 보이는 두께 약 3-5 m의 유문암질 암맥이 8매 이상 관찰된다. 특히 두께 약 3 m에 달하는 유문암질 암맥(자세: 282/76)은 상부 다대포층 최상부 및 이를 덮는 현무암질 안산암 용암류를 직접 자르며 접하고 있어 현무암질 안산암 용암류가 분출 이후 유문암질 암맥의 관입에 의한 열적 영향을 받았을 가능성이 높다. 그러므로 하위 화쇄류암의 분출시기가 투로니아절 초인 것을 고려할 때 상부 다대포층은 후기 백악기 투로니아절의 초기에 비교적 짧은 시간에 걸쳐 퇴적된 것으로 추정된다(그림 24). 이는 상부 다대포층을 구성하는 지층들이 화산물질을 많이 포함한다는 사실에 근거해 생각해 볼 때, 상부 다대포층의 퇴적은 인근지역의 활발한 화산활동에 의해 매우 빠른 속도로 일어났다는 것을 알 수 있다. 위 사실들을 요약하면, 다대포분지를 채우는 하부 다대포층은 약 9,800만년 전 퇴적되기 시작해 약 9,400만년 전까지 퇴적되었고, 이후 상부 다대포층은 활발한 화산물질의 퇴적으로 인해 약 9,400만년 전부터 약 9,300만년 전까지 빠른 속도로 퇴적되었다. 이는 다대포층이 지질시대 중 후기 백악기의 세노마눔절부터 투로니아절 초까지 퇴적되었다는 것을 지시한다(그림 25).



다대포분지의  
형성 및 진화시기

# GSA GEOLOGIC TIME SCALE v. 5.0

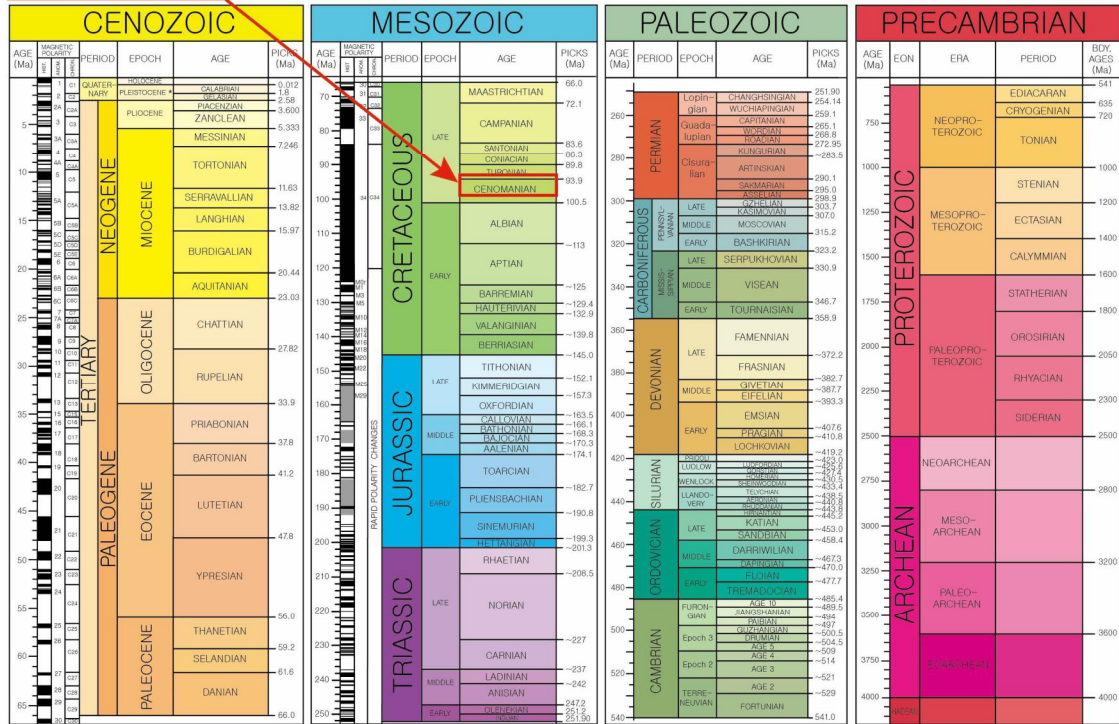


그림 25. 지질연대표와 다대포분지의 형성 및 진화 시기

### 1.1.2 다대포층 퇴적물의 기원지 변화와 고지리적 의미

층서적으로 하부~상부 다대포층의 암체들에서 채취된 시료들의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령분포를 활용해 다대포층을 구성하는 퇴적물들의 기원지 변화를 알아보았다. 먼저 가장 하부 암체인 LD-1의 경우 80% 이상의 백악기 저어콘들이 산출되었고, 일부 선캄브리아 시대(약 6%), 중생대 트라이아스기(약 8%), 중생대 쥐라기(6%) 저어콘들로 구성된다(그림 26).

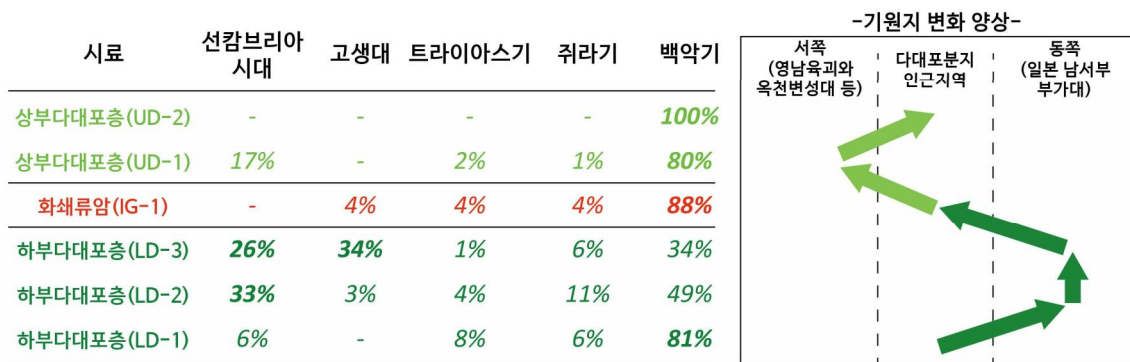


그림 26. 시료별 연대분포와 그에 따른 추정된 주 기원지 변화 양상

백악기 저어콘들을 제외한 6~8% 내외로 산출되는 연대의 암체들은 한반도의 지체구조 상 영남육괴와 옥천변성대, 경기육괴 즉 다대포분지를 포함하는 경상분지 북, 서, 북서쪽에 흔히 분포하는 암체들이다(그림 27). 그러나, 이들의 산출량이 백악기 저어콘들에 비해 매우 적다는 것은 LD-1 시료의 암체가 퇴적될 당시(분지 형성 시작) 다대포분지로 공급되는 퇴적물들 중 분지 북서 방향으로 차례로 분포하는 영남육괴와 옥천변성대, 경기육괴 기원의 퇴적물이 매우 제한적이라는 것을 의미한다. 또한 LD-1 시료는 기저역암으로 대부분의 역들이 다대포분지의 기저를 이루는 테사이트질 역으로 구성된다. 이는 분지 형성 당시 대부분의 퇴적물들이 분지 내부 혹은 매우 인접한 곳으로부터 공급되었다는 것을 의미한다(그림 26). 하지만 하부 다대포층 중부 층위에 해당하는 LD-2와 LD-3 시료는 다른 시료들에 비해 백악기 저어콘들이 비율이 각각 49%와 34%로 확연히 낮게 나타나는 반면, 선캄브리아 시대의 저어콘들은 비교적 높은 비율로 산출된다(그림 26). 또 다른 특징으로는 화쇄류암을 제외한 상하부 다대포층 모든 시료에서 산출되지 않던 고생대 페름기 저어콘들이 나타나며, 특히 LD-3 시료에서 30% 이상으로 상당한 비율을 차지한다(그림 26). 쇄설성 저어콘에서 나타난 페름기 연대의 암체는 그림 27에서 붉은색으로 표시된 부분으로 좁은 지역에 걸쳐 한반도에 분포한다. 이처럼 좁게 분포하는 암체가 다른 연령의 암체들에 비해 선택적으로 다대포분지로 공급되어 약 34%

의 비율로 차지할 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다. 이를 대체할 수 있는 기원지는 일본의 남서부 지역에 분포하는 부가대 퇴적물이 있다. 부가대 퇴적물을 대상으로 수행된 쇄설성 저어콘 연대측정 결과에서도 페름기 저어콘들이 매우 많은 비율로 나타나는 암체들이 빈번한 것으로 확인되었다. 이번 연구의 다대포층에서 산출된 페름기 저어콘들도 일본 남서부 부가대에서 기원했을 가능성이 있을 것으로 추정된다(그림 26). 다양한 부가대 암체들 중 지역 및 시대를 특정하고 부가대 퇴적물이 내륙(한반도)으로 공급된 기작을 밝히기 위해서는 추가연구가 필요하다. 그러나 분명한 사실은 한반도에 분포하는 가장 큰 퇴적분지인 경상분지의 몇몇 퇴적층에서 일본의 남서부 부가대 기원의 퇴적물들이 여러번 보고되어, 동해가 열리기 전 한반도와 일본 열도의 남서부 지역은 서로 인접해 있었고 퇴적물을 상호 공급할 수 있었다는 것이다(그림 28).

상하부 다대포층 사이의 화쇄류암(IG-1) 시료에서는 백악기 저어콘들이 약 88%로 대부분을 차지했으며, 일부 고생대 페름기(4%), 중생대 트라이아스기(4%), 중생대 쥐라기(4%) 저어콘들을 포함하고 있다(그림 26). 화쇄류는 화산의 폭발적 분출에 의해 형성된 화산쇄설성 먼지구름으로, 특성상 분지 인근의 화산활동에 의해 발생한 화쇄류의 퇴적으로 화쇄류암이 형성되었다. 이 사실은 화쇄류암을 구성하는 퇴적물의 대부분이 분지 인근지역에서 유래한 것으로 판단될 수 있다. 그러나 백악기 저어콘 외 소량으로 산출되는 저어콘들의 산출은 마그마 분출과정 및 화쇄류의 이동 과정에 포함된 일부 암편들에서 유래한 것으로 생각된다(그림 26).

상부 다대포층의 UD-1에서는 약 80% 그리고 UD-2에서는 100%로 매우 많은 양의 백악기 저어콘들이 산출된다(그림 26). 이는 화산물질을 많이 포함하는 상부 다대포층의 특징으로 야외 암석관찰에서도 확인되듯이 퇴적 당시의 분지 주변의 활발한 화산활동에 의한 것으로 판단된다. 그러나 UD-1은 UD-2 시료와 달리 선캄브리아 시대의 저어콘을 17%나 포함하고 있을 뿐 아니라 중생대 트라이아스기와 쥐라기 저어콘들도 각각 2%와 1% 정도 포함한다(그림 26). 이는 UD-2 시료의 암체의 퇴적물들이 분지 근방의 화산활동에 의한 분출물들로 모두 구성되는 반면, UD-1 시료의 경우 일부 북서쪽의 영남육괴와 옥천변성대 지역으로부터 공급된 퇴적물이 섞여 있다는 것을 의미한다(그림 26). 또한 상부 다대포층에서 고생대 페름기 저어콘들이 더 이상 산출되지 않는 것은 분지 인근 지역의 화산활동에 의해 고수계의 변화가 있었을 가능성을 암시한다.

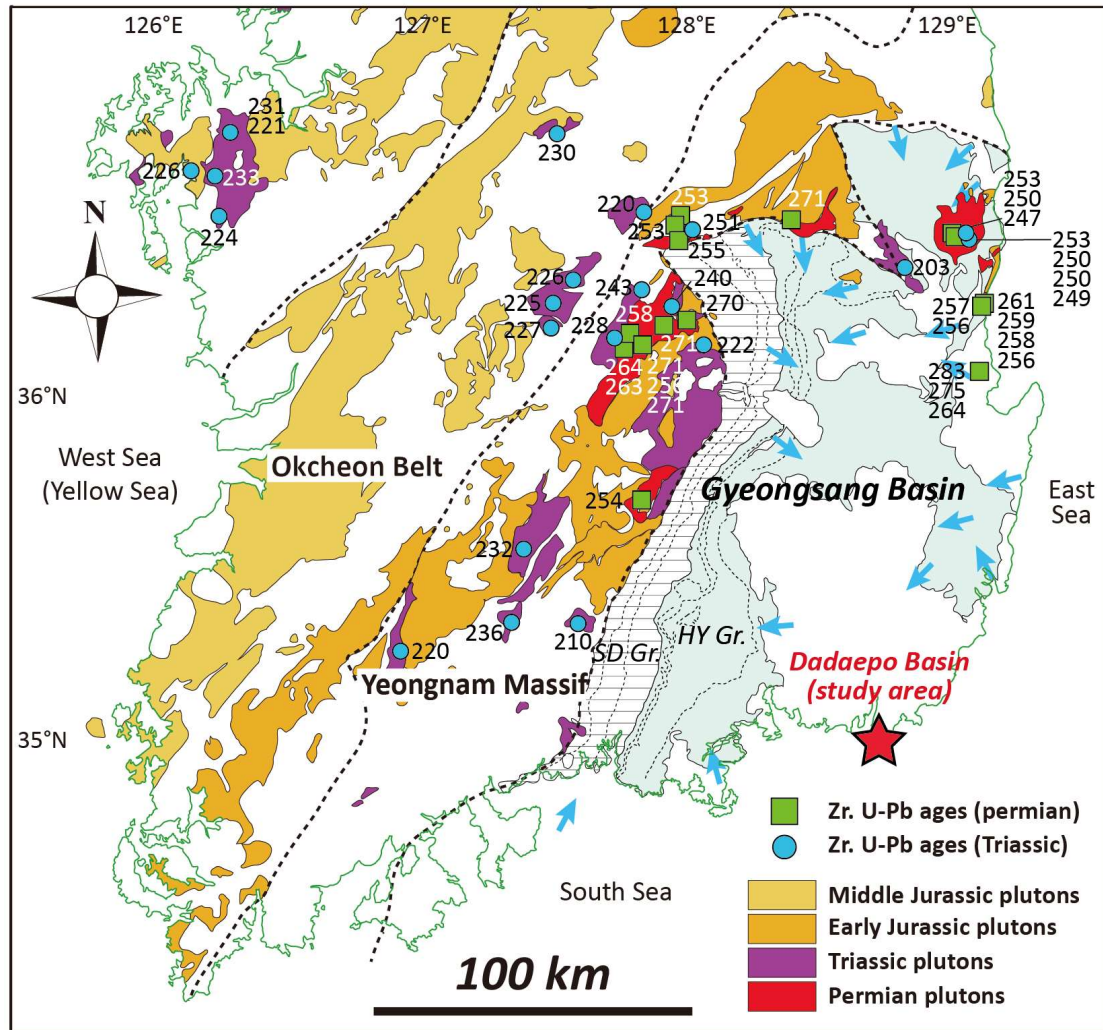


그림 27. 한반도 페름기-쥐라기 암체 분포도



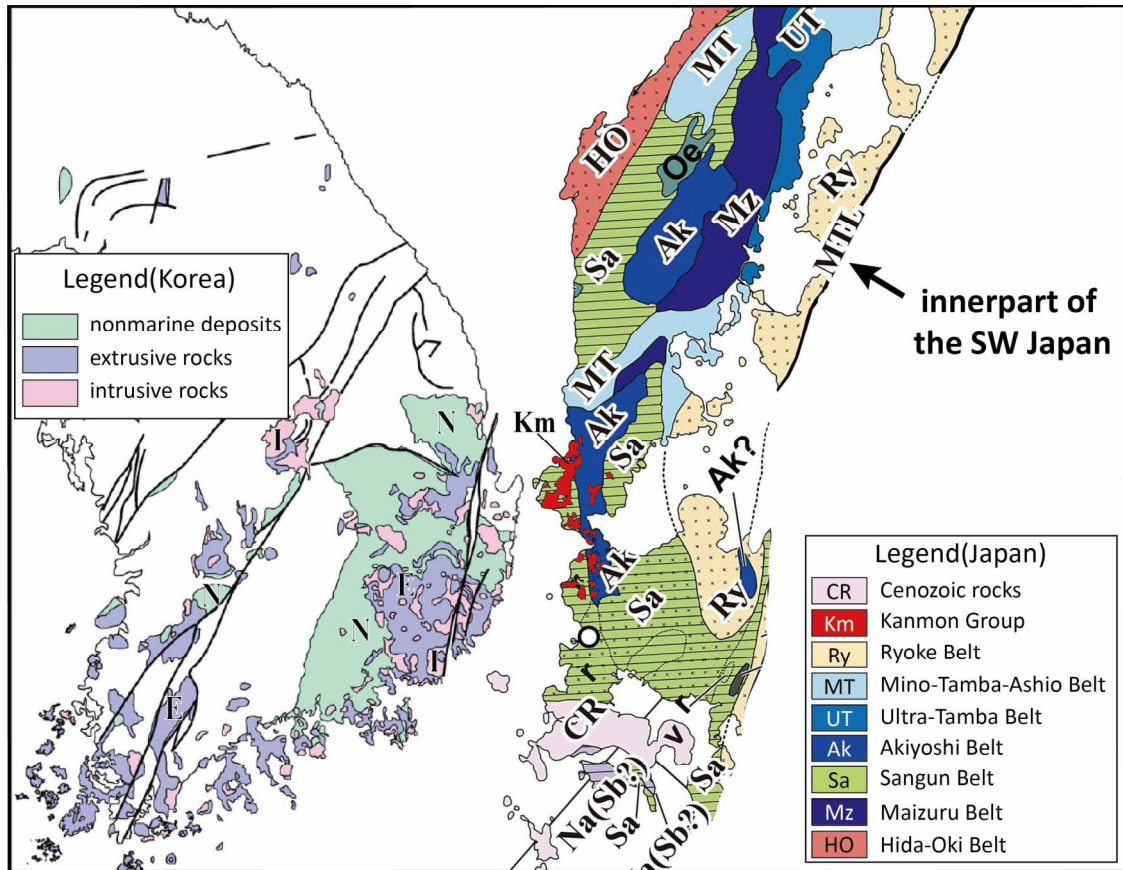


그림 28. 추정되는 백악기 고지리 복원도

## 1.2 박편 관찰 결과

### 1.2.1 하부 다대포층 LD-1

하부 다대포층의 LD-1 시료는 기저역암으로 변질이 심한 데사이트 역을 함유한다(그림 29). 또한 기질부는 퇴적 이후 열수작용에 의해 매우 미세한 방해석(micrite)이 침전된 것으로 보이며, 작은 크기의 데사이트 역들도 곳곳에서 관찰된다(그림 29a, b, e, f). 기저역암의 역으로 산출되는 데사이트가 심각한 변질을 받았다는 사실은 기존 Ar-Ar 연대측정 결과값을 신뢰할 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 기존 연구보다는 이번 연구에서 수행된 선풍성 저어콘을 대상으로 한 U-Pb 연령을 사용하는 것이 타당해 보인다.

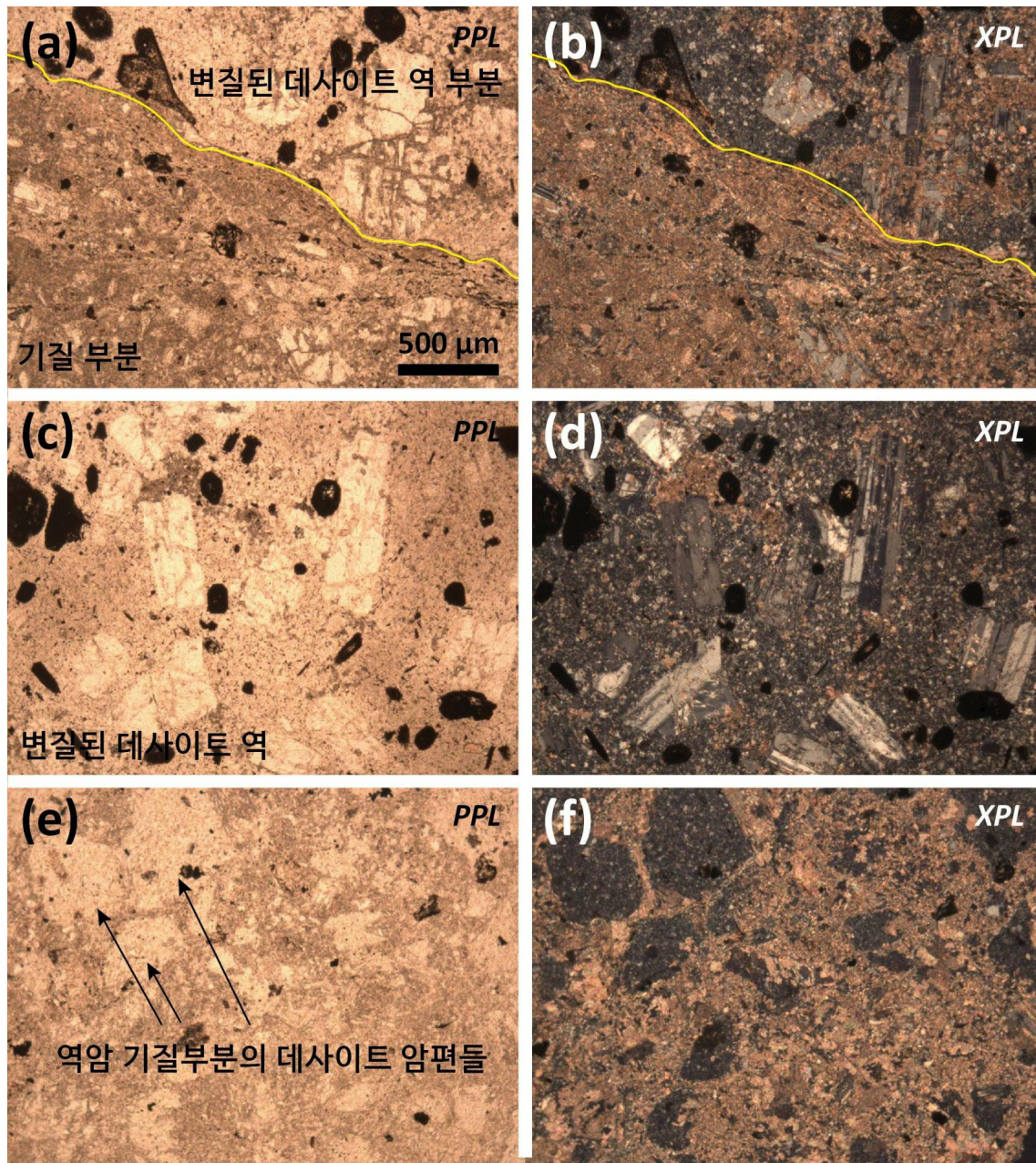


그림 29. 하부 다대포층(LD-1) 박편사진. (a, b) 기질부와 데사이트 역의 경계(노란색 실선), (c, d) 데사이트 역, (e, f) 기질 내 데사이트 암편들. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light



### 1.2.2 하부 다대포층 LD-2와 LD-3

하부 다대포층의 LD-2와 LD-3 시료는 중립질 사암(medium-grained sandstone)이며, 조성적으로 대부분 석영과 암편으로 구성되고 소량의 장석을 포함하는 것으로 보아 암편질 잡사암(lithic wacke)에 해당한다(그림 30와 31). 구성 입자들의 원마도는 아각형에서 원형에 이르기까지 다양하다.

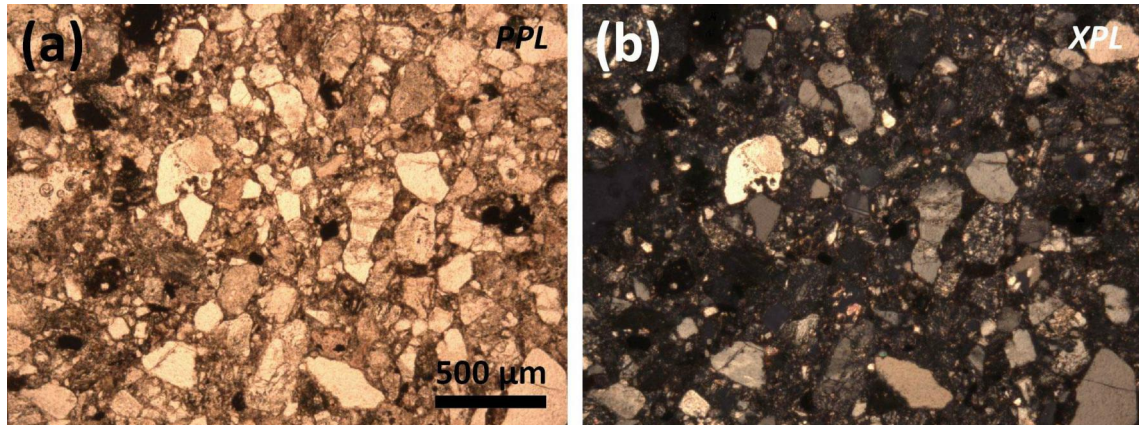


그림 30. 하부 다대포층(LD-2) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light

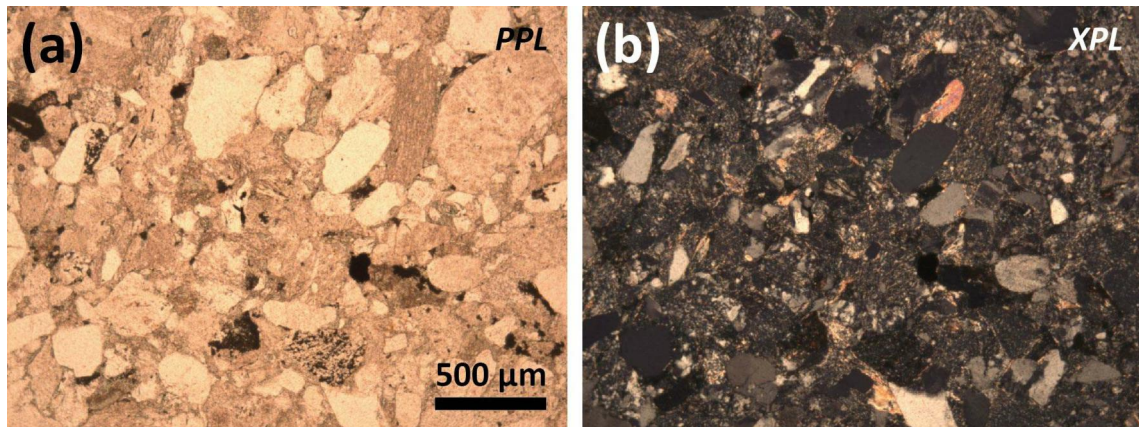


그림 31. 하부 다대포층(LD-3) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light



### 1.2.3 화쇄류암 IG-1

상하부 다대포층 사이에 산출되는 화쇄류암의 IG-1 시료는 화산쇄설물질의 분출과 흐름 작용 동안 포함된 것으로 보이는 원마도가 좋은 암편을 포함하고 있다(그림 32a, b). 또한 정확한 정체는 파악되지 않았지만 화산 분출 과정에 형성 및 포함된 것(펠레의 눈물?)으로 생각되는 것도 관찰된다(그림 32c, d). 그 외 구성 광물 및 입자들은 대체로 각형을 나타내고 입자의 크기로 보아 세립질에 해당한다(그림 32).

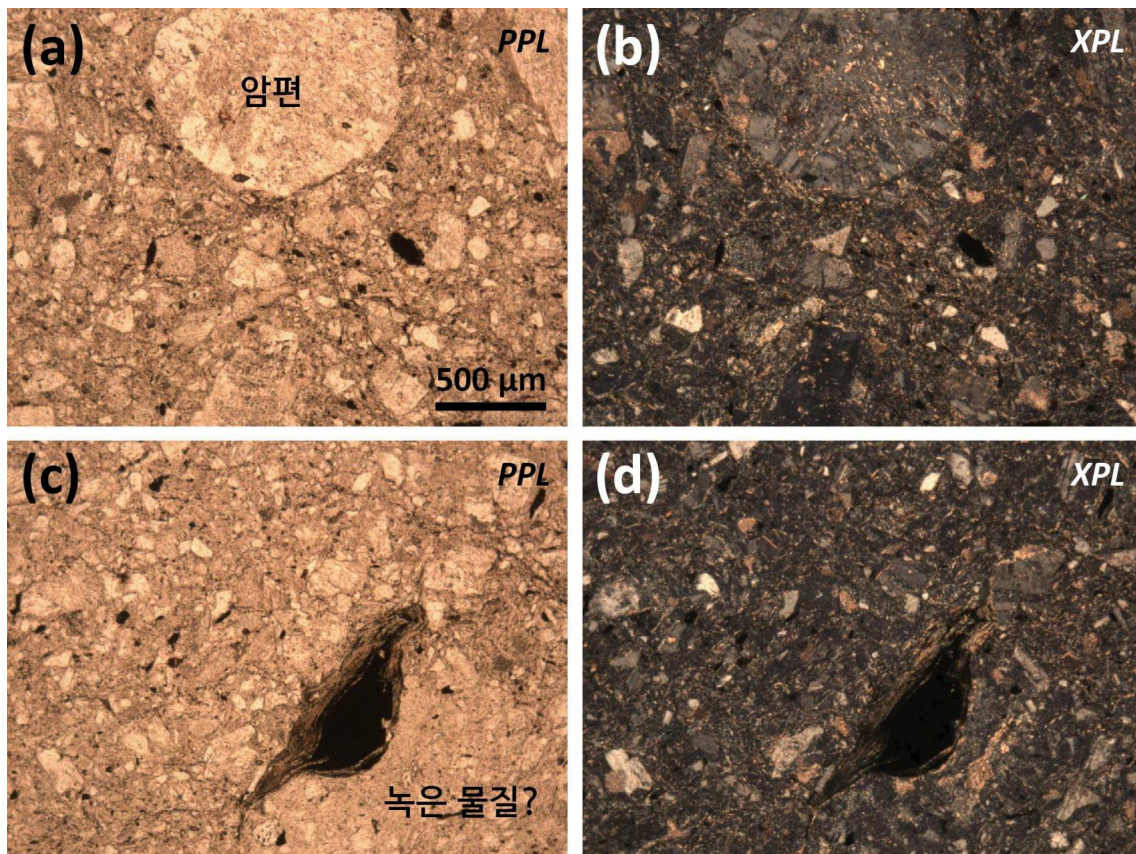


그림 32. 상하부 다대포층의 경계부에 위치한 화쇄류암(IG-1) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light

#### 1.2.4 상부 다대포층 UD-1

상부 다대포층의 UD-1 시료는 대체로 각형의 석영 및 장석과 아각형에서 원형의 암편들로 구성된다(그림 33). 퇴적 이후 변질에 의해 일부 입자들의 경계가 불분명하게 관찰된다. 그러나 하부 다대포층과 비교했을 때 많은 양의 화산기원의 물질들이 관찰된다.

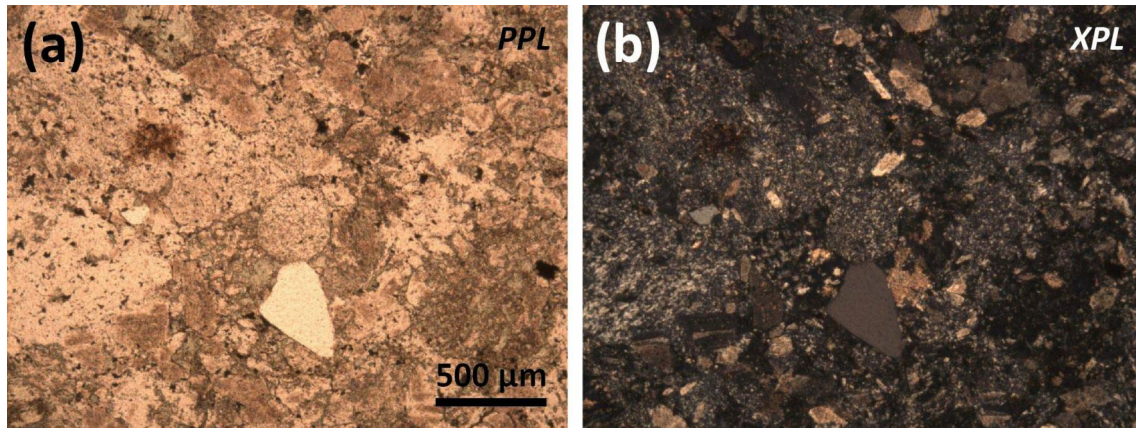


그림 33. 상부 다대포층(UD-1) 박편사진. PPL: plane-polarized light, XPL: cross-polarized light



### 1.2.5 하부다대포층 역암 쳐트편

암남공원과 두송반도 지질명소에서 산출되는 역암에 포함된 쳐트편에서는 약 100-250  $\mu\text{m}$  크기의 둥근 형태 입자들이 관찰된다. 해당 입자들은 바다에서 부유 생활을 하는 방산충(radiolarian)이라는 미생물 화석이며, 방산충 화석을 포함하는 기원 암석은 우리나라에는 없지만 인접한 일본에 흔하게 분포한다(그림 34과 35). 이를 통해 지금은 한국과 일본이 동해에 의해 분리되어 있지만, 이 지층이 퇴적될 당시에는 서로 연결되어 일본에서 한반도로 퇴적물을 공급받을 수 있었다는 것을 알 수 있다(그림 28).

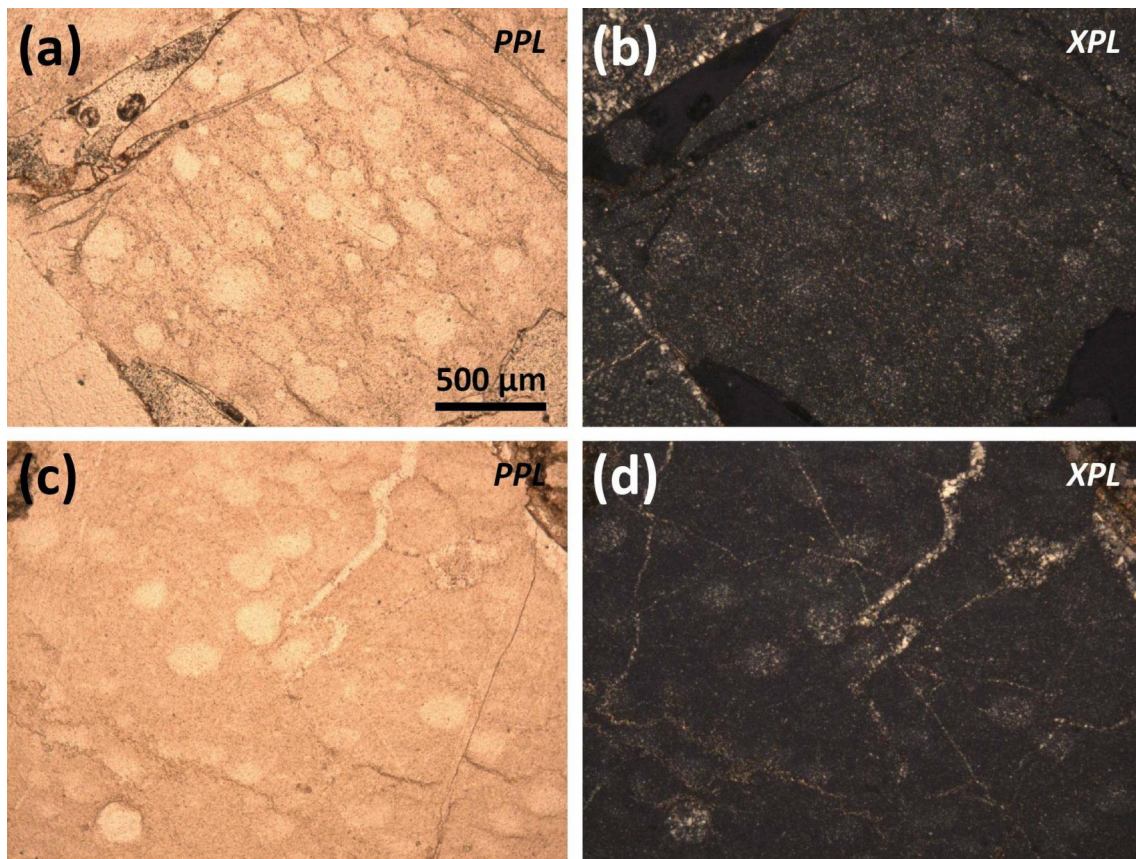


그림 34. 암남공원의 하부 다대포층 역암 내 쳐트에서 산출되는 원형의 방산충 화석

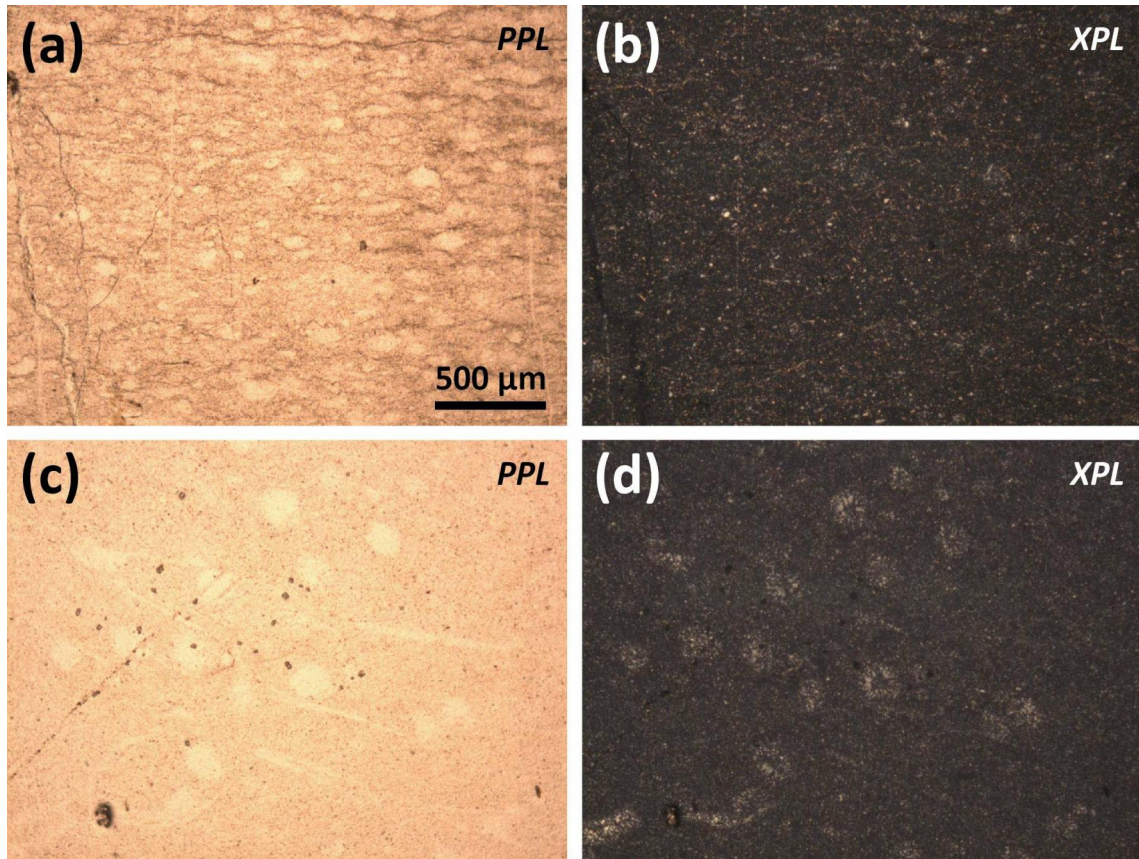


그림 35. 두송반도의 하부 다대포층 역암 내 쉘트에서 산출되는 원형의 방산충 화석

## 2. 부산국가지질공원 관련 학술 및 등재 논문 작성

이번 과업을 통해 도출된 다양한 학술적 성과를 요약하면, 다대포분지 및 다대포층의 형성 및 진화 시기와 다대포층을 구성하는 퇴적물의 기원지와 기원지 분석자료를 활용한 고수계를 해석했다는 점이다. 그러나 우선적으로 이번 과업의 결과물들 중 분지의 형성 및 진화 시기에 관한 정보를 바탕으로 백악기 분지들과의 층서대비 및 백악기에 발생한 한반도 지구조 진화사적인 의미에 관해 토의하는 논문이 작성되었다. 작성된 논문의 초안은 부록에 수록되어 있다. 논문은 추후 영문으로 작성되어 2022년 3월 중 국제학술지(SCIE)에 투고될 예정이다.

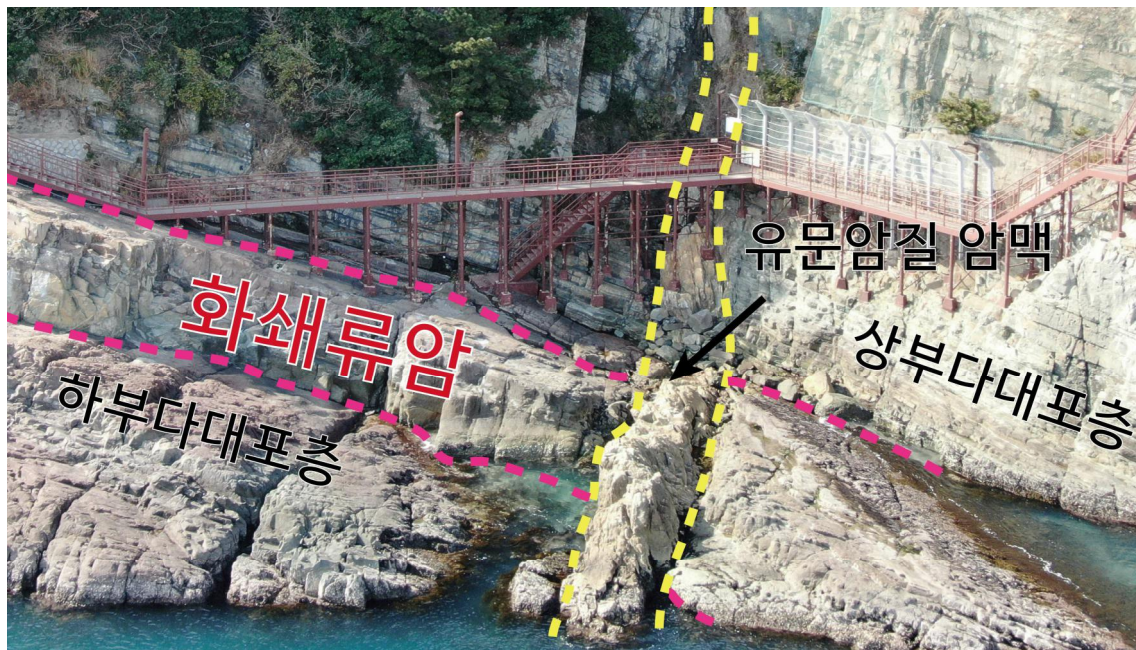


### 3. 교육·홍보를 위한 지질명소 안내판 문안 작성

#### 3.1 신규 안내문안

##### 3.1.1 송도반도 S5 화산폭발로 퇴적된 암석 -화쇄류암

Ignimbrite



서로 다른 퇴적환경에서 만들어진 붉은색 줄무늬를 많이 포함하는 하부 다대포층과 대부분 회색 줄무늬로 이루어진 상부 다대포층 사이에는 약 2.5 m 두께의 화쇄류암이 관찰됩니다. 화쇄류암은 화산폭발로 형성된 암석으로 하부 다대포층에서 상부 다대포층으로 퇴적환경이 바뀌는데 화산활동이 중요한 역할을 했다는 것을 짐작하게 합니다. 화산의 분출 시기는 암석 속 저어콘 광물의 우라늄(U)-납(Pb) 방사성 동위원소 연령측정법을 이용해 약 9,360만년 전(중생대 백악기)으로 밝혀졌습니다.

#### 화쇄류암은 어떻게 만들어졌을까?

화쇄류암은 격렬한 화산폭발로 인해 분출된 뜨거운 화산물질들(암석먼지구름)이 지표를 따라 빠르게 흘러 쌓인 암석으로, 지층이 쌓이는 동안 주변에 폭발적인 화산활동이 있었다는 것을 알 수 있습니다. 마그마는  $\text{SiO}_2$  함량이 높을수록 점성도가 높아지는데, 점성도가 낮은 현무암질, 중간인 안산암질, 높은 유문암질로 구분됩니다. 점성도가 낮으면 주로 용암의 형태로 흘러나오지만, 점성도가 높으면 보다 폭발적으로 격렬하게 분화해 화산먼지구름을 분출시킵니다.

Q. 화쇄류암은 어떤 성분의 마그마 활동으로 형성된 것일까요? 정답: 유문암질 마그마





### 3.1.2 암남공원 A5 어떤 환경에서 쌓였을까?-하부 다대포층

Lower Dadaepo Formation



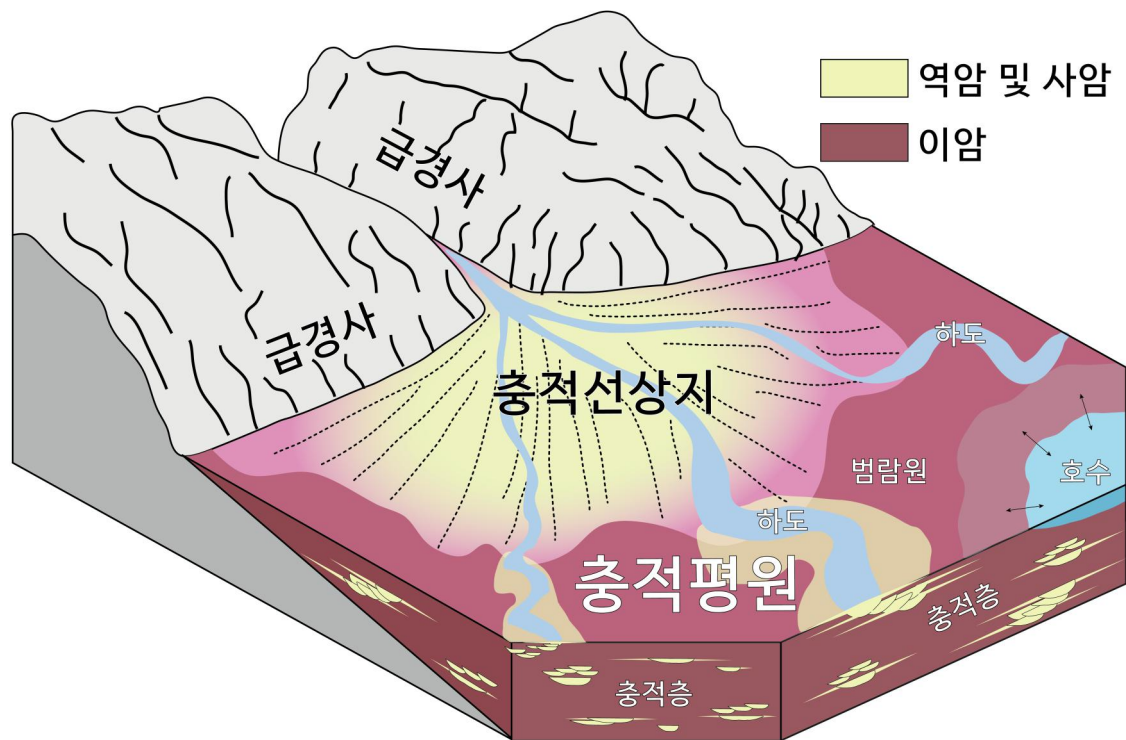
하부 다대포층은 다양한 두께의 밝은색과 붉은색 줄무늬(층리)가 반복됩니다. 밝은색을 띠는 암석은 주로 자갈과 모래로 구성되고, 붉은색을 보이는 암석은 주로 입자 크기가 작은 모래, 실트 또는 점토로 구성됩니다. 크기가 작은 입자들로 구성된 퇴적암들은 쌓일 당시의 조건에 따라 고유의 색을 띠는 경우가 많습니다. 그 중 붉은색은 산화환경을 지시하며, 녹스는 것과 같이 철이온을 포함한 일부 알갱이들이 산소와 반응해 붉은색을 나타냅니다. 즉, 공기 중에 노출된 환경에서 퇴적되었다는 것을 의미합니다. 퇴적시기는 이곳 사암에서 분리한 저어콘 광물의 우라늄(U)-납(Pb) 방사성 동위원소 연령측정에 의해 약 9,710만년 전으로 밝혀졌습니다.

#### 하부 다대포층은 어떤 환경에서 퇴적되었을까?

이곳 퇴적층에서 밝은색으로 보이는 역암과 사암은 주로 물길(하도)을 따라 이동하는 자갈과 모래에 의해 형성된 암석이고, 붉은색 사암과 이암은 홍수 시 범람에 의해 쌓인 암석들입니다. 아래 그림과 같이 급경사를 따라 이동하는 퇴적물들은 완만한 곳을 만나면 쌓이는데, 가장 가까운 곳부터 주로 자갈과 모래가 쌓이고 멀어지면서 퇴적물의 크기가 작아지며 부채꼴 형태의 충적선상지(alluvial fan)를 만들게 됩니다. 반면, 퇴적물 공

급지에서 먼 곳은 경사가 완만해지며, 보통의 경우 하도를 통해서 퇴적물이 운반됩니다. 하지만 홍수가 일어나면 하도를 따라 이동하던 작은 퇴적물들이 범람하여 주변의 넓은 범람원(floodplain) 지역에 쌓이게 됩니다. 이후 범람원에 쌓인 퇴적물들은 공기와 지속적으로 접촉하여 붉은색을 보이게 됩니다. 주로 하도와 범람원으로 구성되는 퇴적환경을 충적평원(alluvial plain)이라고 합니다.

Q. 이곳의 퇴적층은 주로 어떤 환경에서 퇴적된 것일까요? 정답: 충적평원





### 3.1.3 암남공원 A7 너는 어디서 왔니?-역암·쳐트편

Conglomerate · Chert clasts



역암은 퇴적물의 종류에 관계없이 주로 2 mm 이상의 자갈들이 30% 이상 포함된 퇴적암을 말합니다. 하부 다대포층 역암은 쳐트(chert)라고 불리는 암석 조각들을 포함합니다. 쳐트는 대부분  $\text{SiO}_2$ 의 화학조성을 가지는 미세한 결정으로 구성되고 다양한 색을 나타냅니다. 쳐트는  $\text{SiO}_2$  껍질 또는 골격을 가지는 생물체가 쌓여서 만들어지고, 무기적으로 수중에서 침전되어 만들어질 수 있습니다. 이곳의 쳐트에는 바다에서 부유 생활을 하는 방산충(radiolarian)이라는 미생물화석이 포함되어 있는데, 방산충 화석을 포함하는 기원 암석은 우리나라에는 없지만 인접한 일본에 흔하게 분포합니다. 지금은 한국과 일본이 동해에 의해 분리되어 있지만, 이 지층이 퇴적될 당시에는 서로 연결되어 있어 일본으로부터 퇴적물을 공급받을 수 있었음을 알 수 있습니다.

#### 그렇다면 동해는 언제 어떻게 형성되었을까?

약 2400만년 전 한반도의 동쪽에 인접해 있던 일본열도가 분리되어 남동쪽으로 이동하며 동해가 열리기 시작했습니다. 이때 한반도와 일본열도 사이의 대륙이 갈라지며 바닷물이 흘러들어왔습니다. 일본열도의 지속적인 이동으로 틈이 점점 넓어져 바다의 모습을 갖추었고, 약 1500만년 전까지 활발하게 이동해 지금의 동해와 같은 모습을 이루었습니다.

(기존 송도반도 그림 활용)

### 3.1.4 두송반도 DS2 어머니 이게 공룡알이구나!

#### Dinosaur Egg Fossils



두송반도 주변의 해안 절벽에는 하부 다대포층이 넓게 분포하고 있는데 2000년대 초반 이 절벽에서 떨어진 붉은색 이암 덩어리에서 공룡알 화석이 발견되었습니다. 붉은색 이암 안을 자세히 살펴보면 까만 색을 띠는 공룡알 화석의 파편이나 길쭉한 형태의 알(elongatoolithid type)을 볼 수 있습니다(표본 관찰 필요).

하부 다대포층이 쌓였던 이곳은 하천 주변의 평원으로 홍수로 강물이 불어나면 물에 잠기는 범람원 환경이었습니다. 이 시기는 건기와 우기가 반복되는 다소 건조한 기후로 인해 식생이 풍부하지 않았습니니다. 공룡들은 숨을 곳이 많지 않은 범람원 환경에서 위협으로부터 알을 지키기 위해 구덩이를 판 후 둥지를 만들기도 했습니다. 하지만 홍수로 인해 둥지를 벗어난 알들은 함께 떠밀려온 퇴적물들에 묻혀 보존될 수 있었습니다.

이곳의 공룡알 파편들이 모여있거나 둥근 알의 형태가 남을 수 있었던 것은 비교적 가까운 둥지로부터 알들이 이동되었기 때문입니다. 공룡알은 주로 석회질 성분의 이루어 지는데 건조한 기후 아래 범람원 토양에 석회질 물질이 침전되며 이들이 더 잘 보존될 수 있도록 도왔습니다.

### 우리나라에서 공룡알 화석을 볼 수 있는 곳은?

지금으로부터 약 9천 7백만년 전 백악기동안 한반도에 서식했던 공룡들은 여러 흔적을 남겨두었습니다. 공룡의 모습을 추측해볼 수 있는 공룡뼈 화석, 걸음걸이 같은 행동 특성을 보여주는 발자국 화석과 함께 공룡알 화석은 공룡의 산란지 환경과 고생태 해석의 중요한 증거입니다. 부산 두송반도의 다대포층과 함께 경남 고성군 고성층, 경남 사천시 함안층, 경남 하동군 하산동층, 전남 보성군 선소층, 전남 구례군 금내리층은 경기도 화성시의 시화호층은 대표적인 중생대 백악기 공룡알 화석산지입니다.



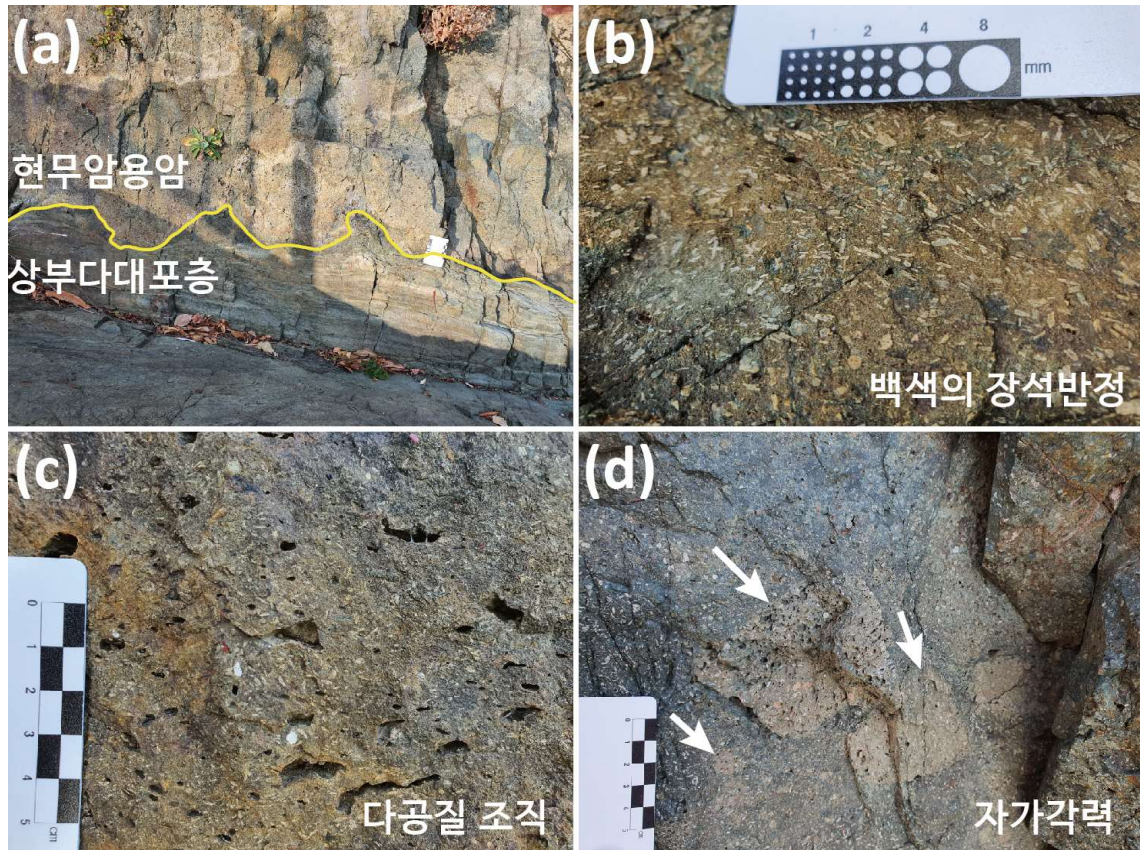
### 3.2 수정이 필요한 기존 안내문안

#### 3.2.1 송도반도 S2 호수 옆에서 분출한 용암-현무암 용암

Basaltic Lava



상부 다대포층 위에는 어두운 색의 암석이 있는데, 이는 화산활동으로 분출된 용암이 흘러 굳어진 것입니다. 마그마는 성분에 따라 어두운색의 현무암질, 중간색인 안산암질, 밝은색의 유문암질로 구분합니다. 현무암질 마그마는 유문암질이나 암산암질 마그마보다 낮은  $\text{SiO}_2$  함량 때문에 점성이 낮아 지표로 나오게 되면 용암의 형태로 흐르게 됩니다. 용암의 분출 시기는 상부 다대포층 상부 암석의 우라늄(U)-납(Pb) 방사성 동위원소 연령 측정에 의해 약 9,280만년 전으로 밝혀졌습니다. 현무암질 용암과 상부 다대포층의 경계는 울퉁불퉁한 형태를 보이고, 현무암은 반상조직, 다공질조직, 자각력화 암편 등 전형적인 용암의 특징을 보여줍니다.



현무암 용암의 광물알갱이(반정)와 구멍(다공질 조직), 자가각력은 어떻게 형성될까?

**반정(phenocryst):** 화성암에서 주변의 바탕에 비해 크기가 큰 광물 결정들을 말하며, 화산 분출 전 마그마 냉각되는 과정에서 먼저 비교적 크게 만들어진 광물 결정들이 용암으로 분출되어 함께 밖으로 나와 형성된 것입니다.

**다공질조직:** 지하 깊은 곳의 마그마에는 휘발성 성분이 녹아 있습니다. 휘발성분은 마그마가 상승해 용암으로 분출하는 과정에 압력이 감소되 기체로 분리되는데, 용암이 식어 굳어지는 과정에서 빠져나가지 못한 기체들이 기공으로 남아 형성됩니다.

**자가각력:** 용암이 흐를 때 공기 혹은 지표면과 접하는 바깥 부분이 먼저 굳는데, 이 과정에서 용암 내부의 지속적인 흐름에 의해 먼저 굳은 외부가 깨지며 용암 속 각력으로 포함되어 형성됩니다.



### 3.2.2 송도반도 S12 어떤 환경에서 쌓였을까?-하부 다대포층

Lower Dadaepo Formation



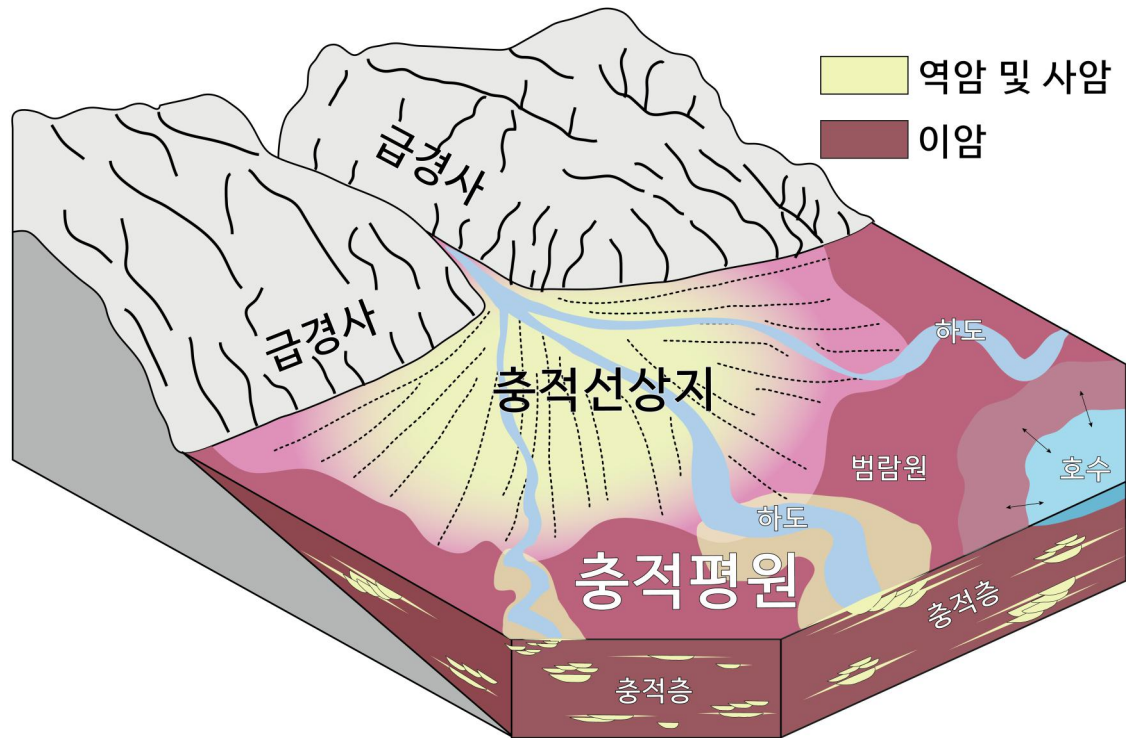
하부 다대포층은 다양한 두께의 밝은색과 붉은색 줄무늬(층리)가 반복됩니다. 밝은색을 띠는 암석은 주로 자갈과 모래로 구성되고 붉은색을 보이는 암석은 주로 입자 크기가 작은 모래와 실트, 점토로 구성됩니다. 입자 크기가 작은 퇴적암들은 쌓일 당시의 조건에 따라 고유의 색을 띠는 경우가 많습니다. 그 중 붉은색은 산화 환경을 지시하며 녹스는 것과 같이 철이온을 포함한 일부 알갱이들이 산소와 반응해 붉은색을 보입니다. 즉, 공기 중에 노출된 육상환경에서 쌓였다는 것을 의미합니다. 퇴적시기는 이곳 사암에서 분리한 저어콘 광물의 우라늄(U)-납(Pb) 방사성 동위원소 연령측정에 의해 약 9,710만년 전으로 밝혀졌습니다.

#### 하부 다대포층은 어떤 환경에서 퇴적되었을까?

이곳 퇴적층에서 밝은색으로 보이는 역암과 사암은 주로 물길(하도)을 따라 이동하는 자갈과 모래에 의해 형성된 암석이고, 붉은색 사암과 이암은 홍수 시 범람에 의해 쌓인 암석들입니다. 아래 그림과 같이 급경사를 따라 이동하는 퇴적물들은 완만한 곳을 만나면 쌓이는데, 가장 가까운 곳부터 주로 자갈과 모래가 쌓이고 멀어지면서 퇴적물의 크기가 작아지며 부채꼴 형태의 충적선상지(alluvial fan)를 만들게 됩니다. 반면, 퇴적물 공급지에서 먼 곳은 경사가 완만해지며, 보통의 경우 하도를 통해서 퇴적물이 운반됩니다. 하지만 홍수가 일어나면 하도를 따라 이동하던 작은 퇴적물들이 범람하여 주변의 넓은

범람원(floodplain) 지역에 쌓이게 됩니다. 이후 범람원에 쌓인 퇴적물들은 공기와 지속적으로 접촉하여 붉은색을 보이게 됩니다. 주로 하도와 범람원으로 구성되는 퇴적환경을 충적평원(alluvial plain)이라고 합니다.

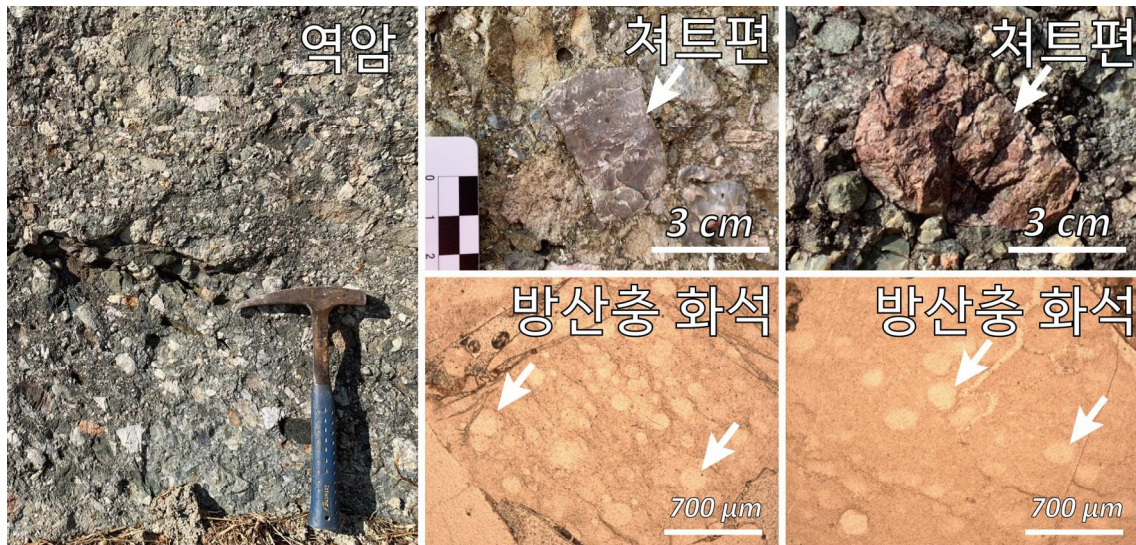
이곳의 퇴적층은 주로 어떤 환경에서 퇴적된 것일까요? 정답: 충적평원





### 3.2.3 송도반도 S13 너는 어디서 왔니?-역암·쳐트편

Conglomerate · Chert clasts



역암은 퇴적물의 종류에 관계없이 주로 2 mm 이상의 자갈들이 30% 이상 포함된 퇴적암을 말합니다. 하부 다대포층 역암은 쳐트(chert)라고 불리는 암석 조각들을 포함합니다. 쳐트는 대부분  $\text{SiO}_2$ 의 화학조성을 가지는 미세한 결정으로 구성되고 다양한 색을 나타냅니다. 쳐트는  $\text{SiO}_2$  껍질 또는 골격을 가지는 생물체가 쌓여서 만들어지고, 무기적으로 수중에서 침전되어 만들어질 수 있습니다. 이곳의 쳐트에는 바다에서 부유 생활을 하는 방산충(radiolarian)이라는 미생물화석이 포함되어 있는데, 방산충 화석을 포함하는 기원 암석은 우리나라에는 없지만 인접한 일본에 흔하게 분포합니다. 지금은 한국과 일본이 동해에 의해 분리되어 있지만, 이 지층이 퇴적될 당시에는 서로 연결되어 있어 일본으로부터 퇴적물을 공급받을 수 있었음을 알 수 있습니다.

#### 그렇다면 동해는 언제 어떻게 형성되었을까?

약 2400만년 전 한반도의 동쪽에 인접해 있던 일본열도가 분리되어 남동쪽으로 이동하며 동해가 열리기 시작했습니다. 이때 한반도와 일본열도 사이의 대륙이 갈라지며 바닷물이 흘러들어왔습니다. 일본열도의 지속적인 이동으로 틈이 점점 넓어져 바다의 모습을 갖추었고, 약 1500만년 전까지 활발하게 이동해 지금의 동해와 같은 모습을 이루었습니다.

(기존 그림 활용)

### 3.2.4 두송반도 DS6 흙이 석회암으로 변했다고?-캘크리트 복합층

#### Compound Calcrete Deposits

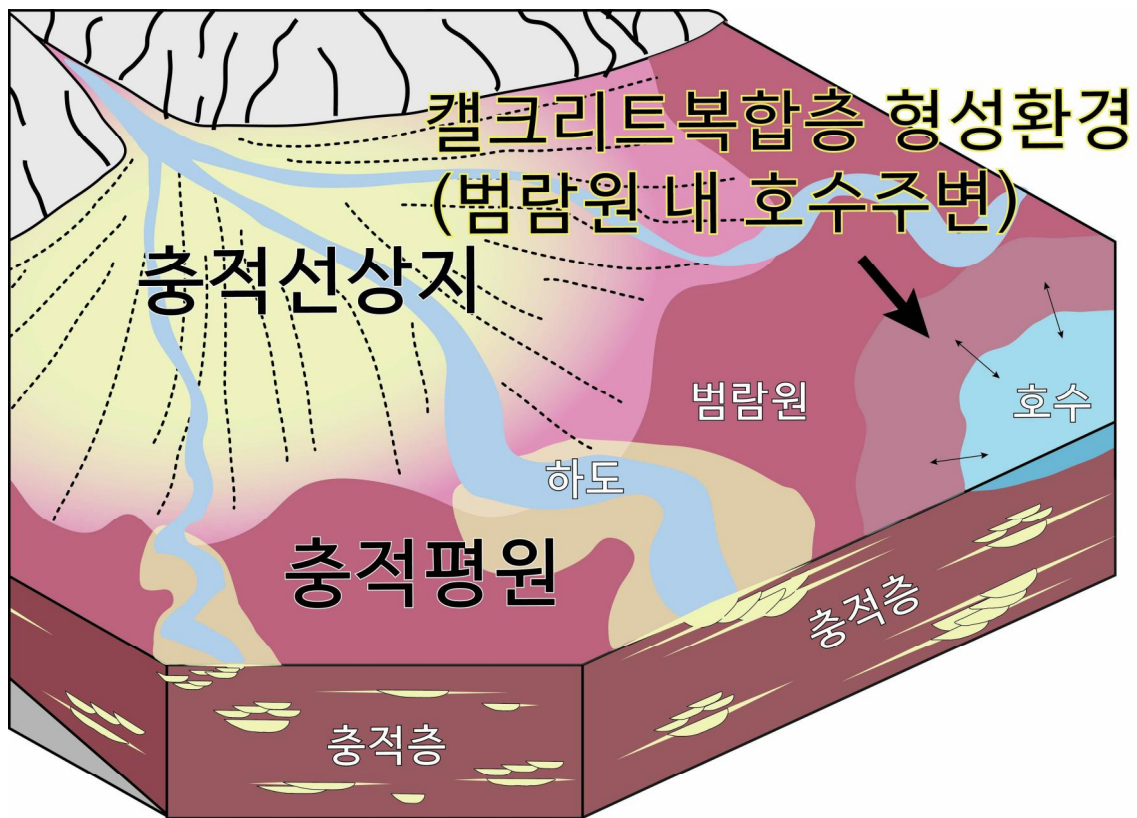


두송반도의 하부 다대포층에는 묽은 염산(HCl)에 격렬하게 반응하는 지층들이 약 10 m 두께로 나타납니다. 이 반응은 묽은 염산과 지층에 포함된 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ ; 방해석)이 반응해 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )를 만들기 때문입니다. 퇴적암 내 포함된 탄산칼슘은 퇴적 당시 퇴적물 사이의 빈공간을 채우며 침전된 것입니다. 이처럼 퇴적물 내 탄산칼슘의 침전으로 단단해진 것들을 캘크리트(calcrete)라고 부릅니다. 캘크리트는 지표 근처에서 오랜 시간에 걸쳐 만들어집니다. 퇴적물이 지표 근처에서 오랜 기간 머무르면 토양화 작용(pedogenesis)을 받아 토양으로 바뀌게 되고, 기후가 건조할 경우 이 과정에서 캘크리트가 형성될 수 있습니다. 퇴적 시기는 사암에서 분리한 저어콘 광물의 우라늄(U)-납(Pb) 방사성 동위원소 연령측정에 의해 약 9,680만년 전으로 밝혀졌습니다.



### 캘크리트 복합층은 어떤 환경에서 형성되었을까?

이곳에 발달하는 캘크리트는 대체로 5가지 유형으로 구성되기 때문에 캘크리트 복합층이라 말합니다. 각 유형은 단괴상-미크라이트질 괴상, 단괴상-이회질 괴상, 엽층성, 단괴상, 이회질 괴상에 해당합니다. 캘크리트 복합층은 충적평원의 저지대 내지 호수 주변에서 호수의 확장과 축소에 따라 퇴적과 토양화 작용이 반복되면서 형성된 것입니다. 캘크리트 복합층 형성 당시인 백악기의 기후는 전반적으로 건조한 조건이 유지되는 가운데 때때로 습윤한 조건이 반복되었습니다.



## 제 V 장 부록





## 본문

# 부산지역 후기 백악기 다대포층의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연대 및 지질학적 의미

채용운<sup>1</sup> · 하수진<sup>1</sup> · 주영지<sup>2</sup> · 백인성<sup>2</sup> · 강희철<sup>1</sup> · 임현수<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지질환경과학과

<sup>2</sup>부경대학교 지구환경과학과

## 요 약

부산지역에 분포하는 백악기 다대포분지의 상하부 다대포층 퇴적시기를 밝히기 위해 다양한 위치와 층준에서 총 6개의 시료를 채취해 LA-MC-ICPMS 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령측정을 수행했다. 백악기 저어콘은 하부 다대포층에서 81%(LD-1), 49%(LD-2), 34%(LD-3), 상하부 다대포층 경계의 화쇄류암에서 88%(IG-1), 상부 다대포층에서 80%(UD-1), 100%(UD-2)로 나타났다. 백악기 저어콘들 중 가장 젊은 군집을 이용해 계산된  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령은 LD-1에서  $98.0 \pm 0.3$  Ma, LD-2에서  $96.8 \pm 0.2$  Ma, LD-3에서  $97.1 \pm 0.3$  Ma, IG-1에서  $93.6 \pm 0.2$  Ma, UD-1에서  $93.3 \pm 0.2$  Ma, 그리고 UD-2에서  $92.8 \pm 0.2$  Ma이다. 다대포층은 후기 백악기 세노마니안(Cenomanian) 초에서 튜로니안(Turonian) 초에 퇴적되었음을 의미하며, 유천층군 최하부에 대비될 것으로 판단된다. 그리고 한반도 백악기 분지들의 시층서를 종합하면 백악기에 한반도의 북동-남서 방향 단층계들의 좌수향 주향이동 운동은 대략 85 Ma를 기점으로 쇠퇴하는 양상을 보였다.

주요어 : 다대포분지, 다대포층, 저어콘 U-Pb 연령측정, 백악기, 시층서와 암층서

Yong-Un Chae, Sujin Ha, Young Ji Joo, In Sung Paik, Hee-Cheol Kang, and Hyoun Soo Lim, 2022, Detrital zircon U-Pb ages and their geological implication of the Cretaceous Dadaepo Formation in Busan, Korea.

**Abstract:** Detrital zircon U-Pb dating using LA-MC-ICPMS was performed on a total of six samples to reveal the depositional period of the Upper and Lower Dadaepo formations in the Dadaepo Basin located in the Busan area. Cretaceous zircons accounted for 81% (LD-1), 49% (LD-2), 34% (LD-3) in the Lower Dadaepo Formation, 88% (IG-1) in the ignimbrite at the boundary of the Upper and Lower

Dadaepo formations, and 80% (UD-1) and 100% (UD-2) in the Upper Dadaepo Formation. The  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted mean ages using the youngest clusters of zircons were calculated to be  $98.0 \pm 0.3$  Ma in LD-1,  $96.8 \pm 0.2$  Ma in LD-2,  $97.1 \pm 0.3$  Ma in LD-3, and  $93.6 \pm 0.2$  Ma in IG-1,  $93.3 \pm 0.2$  Ma in UD-1, and  $92.8 \pm 0.2$  Ma in UD-2. This means that the Dadaepo Formation had been deposited from the early Cenomanian to the early Turonian of the Late Cretaceous, and the formation is correlated with the lowermost Yucheon Group. Additionally, the synthesized chronostratigraphy of the Cretaceous basins in Korea indicates that the sinistral strike-slip movement of the NE-SW striking fault systems in the Korean Peninsula had decreased starting at about 85 Ma.

Keywords : Dadaepo Basin, Dadaepo Formation, zircon U-Pb age dating, Cretaceous, Diachronism

## 1. 서 론

퇴적분지(sedimentary basin) 및 분지충전물(basin-fill)은 기본적으로 퇴적 당시의 고기후와 고환경, 고생태, 고지리 등에 대한 다양한 정보에 더하여, 분지의 형성 및 소멸과 함께 광역적 지구조환경 변화에 대한 정보들도 포함할 수 있어 지질학적으로 매우 중요하다. 부산지역에 분포하는 다대포분지의 다대포층도 공룡알화석, 공룡뼈화석, 켈크리트(석회질고토양), 고지진성 구조, 쇄설성 암맥, 퇴적동시성 정단층, 층리, 사층리, 이회암, 역암, 역암 내 쳐트편, 화쇄류암 등 다양한 지질기록들을 간직하고 있다. 퇴적암에 기록된 지질학적 정보들에 대해서는 현상 발생의 인과관계 및 기작을 밝히는 연구도 중요하지만, 지질학적 사건들을 정확히 해석하기 위해서는 신뢰도 높은 연령측정 연구가 선행되어야 한다.

다대포층은 1983년 발간된 1:5만 지질도폭 조사에서 최초로 유천층군에 대비되었다(Chang *et al.*, 1983). 하지만 이후 고지자기학적 연구(Kim, 1988)와 일반적인 유천층군과의 전반적인 암상차이(Shin, 1997)를 바탕으로 하양층군에 대비되기도 하였다. 또한 지금까지 수치연령 측정법을 통한 다대포층 퇴적시기 연구는 하부 다대포층 아래의 데사이트질 암석(약 94 Ma)과 상부 다대포층 위의 현무암질 안산암 용암류(약 69 Ma)를 대상으로 한  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  전암(whole rock) 연령측정이 전부이다(Cho *et al.*, 2011). 하부 암체의 약 94 Ma는 심각한 풍화변질에 의해 신뢰할 수 없는 수준의 연령측정결과로 여겨졌지만, 상부 암체의 약 69 Ma는 퇴적이 종결된 시기로 제안되었다(Cho *et al.*, 2011). 그러나  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  전암 연령측정법은 구성 광물에 따라 폐쇄 온도(약 300-500°C)가 매우 낮아 암석 형성 이후 열적 영향에 매우 취약한 특성을 보이는데, 다대포분지 및 퇴적층 곳곳에는 퇴적 이후 관입한 다양한 암맥들이 다수 관찰되므로 보다 안정적인

고 신뢰도 높은 방법을 이용한 재검증이 필요하다.

따라서 이번 연구에서는 기존연구에서 수행된  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  전암 연령측정법에 비해 폐쇄온도가 월등히 높고(약 900°C) 풍화에 강한 저어콘 광물에 대한 U-Pb 연령측정법을 이용해 다대포층 퇴적시기 제한 및 층서대비를 시도하였고, 연구결과가 가지는 지구조적 의미에 대해서도 고찰하였다. 이번 연구 결과는 한반도 백악기 지층들의 층서대비 뿐 아니라 하양층군에서 유천층군으로 전이되는 경계부에서의 암층서 및 시층서에 대한 이해, 나아가 백악기 한반도 지구조운동에 관한 이해를 도울 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 일반지질

백악기 시기의 동아시아 지역에는 고태평양판(이자나기판)과 유라시아판 간의 사각섭입(oblique subduction)에 의한 육성 퇴적분지들이 다수 형성되었으며, 동일 지구조 환경에 의해 한반도 전역에도 소규모의 분지들이 형성되었다(Fig. 1). 한반도의 백악기 소분지들은 대부분 북동-남서 주향단층들의 좌수향 주향이동에 의한 인리형분지(pull-apart basin)로 해석되었다(Lee, 1999; Ryang, 2013). 이들과는 달리 한반도의 남동부를 넓게 차지하는 가장 큰 백악기 육성분지인 경상분지의 형성에 대해서는 최근 분지의 경계 및 내부에 존재하는 구조적 자료를 토대로 좌수향의 주향이동 단층작용과 함께 고태평양판의 섭입된 슬랩이 남동쪽으로 퇴각(roll-back)하면서 발생한 인장력에 의해 형성된 것으로 해석되었다(Cheon *et al.*, 2020).

연구지역인 다대포분지는 한반도의 남동부에 위치하는 백악기 소분지 중 하나로 부산의 남부지역인 장림반도와 두송반도, 송도반도에 분포한다(Fig. 1). 다대포분지의 서쪽과 동쪽에는 양산단층과 동래단층이 각각 경계를 이루며, 분지 형성기작은 이들 단층들의 좌수향 주향이동에 의한 것으로 제시되었다(Cho *et al.*, 2016). 분지를 채우는 다대포층은 층후가 1000 m 이상으로, 화산물질 함량과 암상변화에 따라 하부 다대포층과 상부 다대포층으로 구분되며(Lee, 1975; Shin, 1997), 이들 사이에는 약 2.5 m 두께를 보이는 괴상의 산성질 화쇄류암이 분포한다(Fig. 2b)(Chough and Sohn, 2010). 하부 다대포층은 전반적으로 층적선상지에서 하성평원(국부적인 호소 발달)에 이르는 환경의 퇴적층으로 해석되었으며(Paik *et al.*, 1997; Paik and Kim, 2003), 상부 다대포층은 대체적으로 호수 및 호수주변 환경의 퇴적층으로 해석되었다(Lee, 1975; Shin, 1997; Chough and Sohn, 2010). 한편, 하부 다대포층에서는 공룡알 화석과 나자식물의 석화목 등이 산출되며, 건조한 기후조건의 발달을 시사하는 고토양 기원의 켈크리트복합층이 나타난다(Paik *et al.*, 1997; Paik and Kim, 2003; Paik *et al.*, 2012)

## 3. 시료 및 분석방법

다대포분지를 채우는 다대포층의 퇴적시기를 밝히기 위해 하부 다대포층과 상부 다대포층 그리고 이들 사이에 분포하는 화쇄류암에서 총 6개의 시료를 채취했다(Fig. 2). 먼저 하부 다대

포층에서는 하부의 데사이트질 화산암 역들로 주로 구성된 기저역암 시료(LD-1)와 중상부 층위의 사암 및 실트암(LD-2와 LD-3)에서 각 1개씩 총 3개의 시료를 채취했다. 그리고 송도반도 동편에 분포하는 상하부 다대포층 경계부에서 화쇄류암 시료(IG-1)를 채취했다. 상부 다대포층에서는 송도반도 서편에 분포하는 두 지점들에서 시료들(UD-1과 UD-2)을 채취했다. 채취한 시료들은 분쇄 후 체질(sieving)과 중액 및 자성분리 과정을 거쳐 중광물을 농집시켰고, 이후 실체현미경을 이용한 수작업(hand-picking)으로 저어콘 광물을 분리했다. 분리한 저어콘 입자들은 에폭시에 마운팅한 후 연마편을 제작했다. 분석 전에 주사전자현미경(SEM)을 통해 후방산란전자(BSE)와 음극선 발광(CL) 영상을 얻어 크랙(crack)과 포유물(inclusion)이 없는 곳으로 분석점을 결정했다(Fig. 3). 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령측정은 한국기초과학지원연구원(KBSI)에 설치된 LA-MC-ICPMS 장비를 이용해 수행되었다.

대부분 하부 다대포층 아래의 데사이트질 암석의 역들로 구성된 기저역암과 상하부 다대포층 사이에 놓이는 산성질 화쇄류암에서는 각각 40개와 50개 그리고 사암 시료에서는 74~95개의 저어콘을 분석했다. 충분한 저어콘 입자들이 분리된 산성질 화쇄류암 시료에서는 자형(euhedral) 및 뚜렷한 진동누대(oscillatory zoning)를 나타내는 저어콘들을 선별적으로 분석했다. 직경 20  $\mu\text{m}$ 의 레이저빔을 이용해 시료 분석점 5개 당 하나의 91500 표준 저어콘( $1065.4 \pm 0.3$  Ma; Wiedenbeck *et al.*, 1995)과 10개 당 하나의 Plešovice 표준 저어콘( $337.13 \pm 0.37$  Ma; Sláma *et al.*, 2008)시료를 함께 분석했다. 분석 후 얻은 원자료는 Iolite 2.5(Paton *et al.*, 2011)와 ISOPLLOT 프로그램(Ludwig, 2008)으로 처리되었다. 단일 저어콘 입자에서 연령이 섞이거나 납손실(Pb loss)에 의한 효과를 제거하기 위해 >10% 불일치 연령을 보이는 분석점들은 연령계산에서 제외되었다(cf., Gehrels *et al.*, 1995). 가장 젊은 군집에서 통계적으로 대표성이 있다고 알려진  $2\sigma$  [YC $2\sigma$  (3+)] 방법( $2\sigma$ 의 오차범위 내에서 최소 3개 이상의 가장 젊은 연령을 이용)을 활용해 t-검정(t-test)을 통과한 분석점들로부터 계산된  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령이 시료별 최소연령으로 이용되었다. 그러나 가장 젊은 군집에서 상대적으로 연령들의 분산이 큰 UD-2 시료에 대해서는 ISOPLLOT의 터프저콘 알고리즘(tuffzirc algorithm)을 적용해 통계적으로 신뢰도 있는 구간으로 선정된 분석점들을 이용해  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령을 계산했다.

#### 4. 분석결과

주사전자현미경(SEM) 영상을 이용해 관찰한 백악기 저어콘의 크기와 형태는 시료에 따라 다소 차이를 보인다. The ImageJ software was used to measure the lengths of the long axes of the Cretaceous zircons on the mount (Supplementary Appendix 1). 먼저, 가장 하부인 기저역암(LD-1)의 백악기 저어콘 크기는 약 65-250  $\mu\text{m}$ 의 범위를 나타내고, 평균은 약 136  $\mu\text{m}$  (n=29)로 측정되었다. 하부 다대포층 LD-2와 LD-3 시료의 백악기 저어콘들은 각각 약 63-317  $\mu\text{m}$ 와 64-255  $\mu\text{m}$ 의 길이 범위를 가지며, 평균은 각각 166  $\mu\text{m}$ (n=39)과 124  $\mu\text{m}$ (n=30)로 나타났다. 상하부 다대포층 사이에 놓이는 화쇄류암(IG-1)의 백악기 저어콘 크기 범위는 약

52-213  $\mu\text{m}$ 이며, 평균은 약 93  $\mu\text{m}$  ( $n=44$ )로 측정되었다. 상부 다대포층 UD-1과 UD-2시료의 백악기 저어콘들은 각각 약 40-296  $\mu\text{m}$ 와 44-264  $\mu\text{m}$ 의 길이 범위를 보이며, 평균은 각각 약 121  $\mu\text{m}$  ( $n=75$ )와 139  $\mu\text{m}$  ( $n=68$ )를 나타냈다. 백악기 저어콘들의 전반적인 형태는 주상 혹은 짧은 단주상이 우세하지만, 파편상으로 원형을 인지하기 어려운 저어콘들도 포함되어 있다(Fig. 3). 백악기 저어콘들은 원마도가 좋은 것부터 각형에 이르기까지 다양한 양상을 보인다. 그리고 대부분 자형의 뚜렷한 진동누대를 나타내며, 한 점을 제외한 모든 분석점에서 Th/U값이 0.2이상으로 대부분이 마그마로부터 결정화된 화성기원 저어콘임을 알 수 있다(Table 1; Hoskin and Schaltegger, 2003; Hartmann and Santos, 2004).

분석결과 LD-1, 2, 3, IG-1, UD-1, 2 시료에서 각각 29(81%), 39(49%), 30(34%), 44(88%), 75(80%), 68(100%)개의 백악기 연령을 얻었다(Table 2). 그 중 확률밀도분포를 이용한 가장 젊은 정점연령(youngest graphical peak age)은 차례로 98, 97, 97, 94, 93, 93 Ma를 나타냈다(Fig. 4). 또한 가장 젊은 군집을 이용해 계산된  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  가중평균연령은 LD-1에서  $98.0 \pm 0.3$  Ma ( $n=22$ , MSWD=0.93), LD-2에서  $96.8 \pm 0.2$  Ma ( $n=37$ , MSWD=0.98), LD-3에서  $97.1 \pm 0.3$  Ma ( $n=17$ , MSWD=0.14), IG-1에서  $93.6 \pm 0.2$  Ma ( $n=38$ , MSWD=0.90), UD-1에서  $93.3 \pm 0.2$  Ma ( $n=60$ , MSWD=0.69), 그리고 UD-2에서  $92.8 \pm 0.2$  Ma ( $n=41$ , MSWD=1.2)로 계산되었다(Fig. 5).

## 5. 토의

### 5.1 다대포층의 퇴적시기

수치연령측정법을 이용한 다대포층 퇴적시기 연구는 하부 다대포층 아래 다대포분지의 기저를 이루는 데사이트질 암석과 상부 다대포층을 덮고 있는 현무암질 안산암 용암류를 대상으로 수행된  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  전암 연령측정이 유일하다. 그 결과 하부 데사이트질 암석은  $94 \pm 7$  Ma로 불확실한 연령이 도출된 것으로 해석되었지만, 상부 용암류 연령인  $68.7 \pm 1.5$  Ma는 다대포층이 69 Ma 직전까지 퇴적된 것으로 해석되어 유천층군 고성층에 대비되었다(Fig. 2)(Cho *et al.*, 2011).

그러나 이번 연구의 쇄설성 저어콘 U-Pb 연령은 하부 다대포층 최하부의 기저역암에서  $98.0 \pm 0.3$  Ma, 상하부 다대포층 경계에 분포하는 산성질 화쇄류암에서  $93.6 \pm 0.2$  Ma, 상부 다대포층 상부에서  $92.8 \pm 0.2$  Ma의 최소연령을 지시했다(Fig. 5). 기저역암의 약 98 Ma는 기존  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연령측정(데사이트질 화산암)에서 보고된 연령과 오차범위에서 일치하지만, 기존 연령측정법은 암석의 변질에 취약하며 그로 인한 결과의 신뢰도가 매우 낮았다는 점에서 본 연구의 약 98 Ma를 기저역암의 최소연령으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다. 기저역암의 최소연령은 총 36개의 유효분석점들 중 22개(60% 이상)로 이루어진 최소연령 군집 분석점들로부터 계산되었으며, 기저역암을 구성하는 대부분의 역들이 하부 다대포층 아래의 데사이트질 화산암으로



구성된다. 위 사실은 계산된 최소연령이 데사이트질 화산암의 분출연령임을 지시한다. 그러므로 하부 다대포층 기저역암은 약 98 Ma 이후 퇴적이 시작되었고 이는 다대포분지가 형성되기 시작한 시기일 뿐만 아니라 분지형성에 직접적인 영향을 미친 연구지역 양산단층과 동래단층의 운동 시기를 지시하는 것으로 보인다.

그리고 상하부 다대포층 경계의 산성질 화쇄류암에서 계산된  $93.6 \pm 0.2$  Ma는 분출 시기를 직접적으로 지시하는 동시에 하부 다대포층의 최소퇴적연령을 제한한다(Fig. 5). 이번 연구결과는 하부 다대포층이 약 98.0 Ma 이후에 퇴적되기 시작해 산성질 화쇄류암(약 93.6 Ma)의 형성시기인 세노마니안에서 튜로니안 초까지 퇴적되었음을 지시한다(Fig. 5). 또한 다대포분지의 진화사에서 산성질 화쇄류암이 형성된 튜로니안 초기에 분지의 급격한 침강에 의해 호수가 형성되고 하부 다대포층에서 상부 다대포층으로 바뀌는 퇴적환경의 급격한 변화가 일어난 것으로 해석된다.

상부 다대포층 상부시료에서 계산된  $92.8 \pm 0.2$  Ma의 최소연령은 상부 다대포층을 직접 덮는 현무암질 안산암 용암류에서 측정된 기존  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연령인 약 69 Ma와 약 24 my의 상당한 연령 차이를 보인다(Fig. 2 and 5). 이 차이는 상부 다대포층의 퇴적 이후 상당한 시간적 간격을 가지며 용암류가 흘렀거나 용암류의 분출 이후 열적 영향으로 인한 변질에 의한 것일 수 있다. 그러나 상부 다대포층과 용암류의 경계가 불규칙 요철 모양을 보이며, 하위의 상부 다대포층 사암이 불꽃구조를 보이고 상위의 용암류로 주입된다는 점, 용암류의 암편이 하위 암체에 포획된다는 점 등은 용암류가 피복할 당시 상부 다대포층이 완전히 고화되지 않은 상태였음을 지시한다(Cho *et al.*, 2011). 위 관찰 결과는 상부 다대포층 최상부의 퇴적 후 많은 시간이 지나지 않아 용암류가 피복했음을 의미하므로, 첫 번째 가능성은 배제할 수 있다. 후자의 가능성은 다대포층에 퇴적 이후 관입한 중성~산성질 조성을 보이는 다수의 암맥과 암상(sill)들이 산출된다는 야외 관찰결과를 통해 확인할 수 있다. 기존 전암  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  용암류 연령측정에 이용된 시료의 채취 지점이 위치하는 송도반도 동편에는 대체로 동서방향의 주향을 보이는 두께 약 3-5 m의 유문암질 암맥이 8매 이상 관찰된다. 특히 두께 약 3 m에 달하는 유문암질 암맥(자세: 282/76)은 상부 다대포층 최상부 및 이를 덮는 현무암질 안산암 용암류를 직접 자르며 접하고 있어 현무암질 안산암 용암류가 분출 이후 유문암질 암맥의 관입에 의한 열적 영향을 받았을 가능성이 높다(Fig. 6). 또한 부산-가덕의 1:5만 지질도폭 조사에서 제시된 층서는 크게 아래로부터 다대포층, 안산질화산각력암, 안산암류, 암회색응회질퇴적암, 유문석영안산암질화산각력암/유문석영안산암질 용결응회암, 유문석영안산암, 유문암질암/유문암질응회암 등의 순으로 제안되었다(Chang *et al.*, 1983). 나열된 암체들 중 부산 해운대 일대의 장산은 유문암질암/유문암질응회암으로 분대되며, K-Ar연령은 약 71-63 Ma로 보고되었다(Chang *et al.*, 1983; Yun and Sang, 1994). 이는 유문암질암/유문암질응회암이 다대포층과 층서적 위치 차이가 상당함에도 불구하고 다대포층을 덮고 있는 용암류의 시기와 유사한 시기를 나타내어 서로 조화롭지 못하다. 이번 연구에서 다대포층을 관입한 유문암질 암맥들에 대한 직접적인 관입 연령을 측정하지는 못했지만, 부산 및 인근 지역의 화강암류에 대한 K-Ar과 Rb-Sr 연령측정 결과는 대부분 70-50 Ma에 집중되어 나타난다(Lee *et al.*, 1995; Yun *et al.*, 2005). 위 연령범위는 상부 다대포층 상위의 용암류에 대

한  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연령측정 값을 포함하며, 이는 용암류의 연령이 이후의 산성질 화성활동에 의해 변질되었을 가능성을 뒷받침한다. 그러므로 하위 화쇄류암의 분출시기가 튜로니안 초인 것을 고려할 때 상부 다대포층은 후기 백악기 튜로니안인 비교적 짧은 시간에 걸쳐 퇴적된 것으로 추정된다(Fig. 4 and 5).

## 5.2 다대포층의 층서대비

층서는 암층서, 생층서, 시층서를 사용해 대비될 수 있지만, 층서단위는 야외조사를 통한 암상 차이를 이용해 설정되는 것이 일반적이다. 그러나 최근에는 수치연령측정의 정확도와 정밀도가 과거에 비해 크게 개선되어, 결과값을 이용해 시간 층서를 대비하려는 시도가 증가하고 있다. 다대포층에서 수행된  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연령측정 결과(약 94-69 Ma)에 의해 다대포층의 시층서가 유천층군 고성층에 대비된다고 해석되었다(Choi *et al.*, 2011). 이후 고성층에서 수행된 저어콘 U-Pb 연령측정 결과를 이용해 고성층이 다대포층과 퇴적시점(약 92 Ma)은 유사하지만, 다대포층 보다 퇴적이 빠르게 종결(약 89-85 Ma)된 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2018). 그러나 앞에서 논한 것과 같이  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  연령측정 결과는 상당한 약점들을 내포한다. 이번 저어콘 U-Pb 연령측정 결과는 다대포층이 약 98-93 Ma동안 퇴적되었음을 지시하며, 이는 다대포층이 고성층에 비해 퇴적 시점이 빠르고 고성층의 퇴적이 시작될 즈음에 퇴적이 종결되었음을 지시한다(Fig. 7).

선행연구에서 다대포층의 층서는 1983년 발간된 1:5만 지질도폭 조사에서 최초로 유천층군에 대비되었다(Chang *et al.*, 1983). 이후 고지자기학적 연구(Kim, 1988)에서 역자화의 출현을 이용한 자기층서와 일반적인 유천층군과의 전반적인 암상 차이(하양층군 퇴적층과의 암상이 유사)를 이용한 암층서(Shin, 1997)를 토대로 다대포층을 하양층군에 대비시키기도 했다. 고지자기학적으로 백악기의 대부분은 Cretaceous Normal Superchron(CNS: ~126-84 Ma; Gradstein *et al.*, 2012)으로 알려져 있다(Helsley and Steiner, 1969). 그러나 CNS 동안에도 전기(e.g., VandenBerg *et al.*, 1978; Lowrie *et al.*, 1980; Tarduno, 1990; Das *et al.*, 1996; Gilder *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2004), 중기(Benammi *et al.*, 2006), 후기(Fang *et al.*, 1989; Archibald and Irving, 1990; He *et al.*, 2012; Kollofrath, 2012; Shcherbakova *et al.*, 2012)의 다양한 시기에 짧은 역자화의 존재가 지속적으로 확인되고 있다. 그러므로 다대포층에서 확인된 일부 역자화도 CNS기간 내 포함되는 단기간의 역자화를 반영하는 것으로 재해석될 여지가 있다. 또한 암층서 대비는 근본적으로 암상에 의존하며 암상의 유사성은 보통 퇴적환경의 유사성으로부터 기인한다. 암층서를 이용한 퇴적암체의 대비는 동일 퇴적분지 내 비교적 연속적인 퇴적체 혹은 일부 유사한 지구조적 사건을 공유하는 인접한 분지들의 퇴적체에서 적용될 수 있다. 그럼에도 유사 퇴적환경이 꼭 유사한 기간에 형성되지 않을 가능성이 있으므로 암층서 대비에는 다양한 지시자들을 이용하고 신중하게 접근해야 한다.

이번 연구결과를 이용해 다대포층의 시층서를 대비하기 위해 경상분지의 하양층군 상부와

유천층군 하부 지층들에서 수행된 저어콘 U-Pb 연령자료들을 정리했다(Fig. 8). 하양층군 상부 지층에서 가장 젊은 연령은 약 94 Ma이며, 유천층군 하부에서 가장 오래된 연령은 약 97 Ma로 나타났다. 이는 암층서와 시층서가 사교한다는 이시성(diachronism)을 의미하며, 지금까지 자료들에서는 하양층군과 유천층군의 암층서 경계부에서 약 3 my의 중첩 기간이 인지된다(Fig. 7). 경상분지 내 암층서와 시층서의 사교는 밀양소분지의 함안층 중부~상부 혹은 함안층과 진동층의 경계에서 나타나며, 경상누층군의 대표적 열쇠층(key bed) 역할을 하는 구산동응회암이 가장 좋은 예시다(Fig. 7 and 8).

이번 연구에서 밝혀낸 다대포층의 퇴적시기는 대략 하양층군과 유천층군의 암층서 경계시기와 일치하기에 시간층서만을 이용한 층서대비에는 어려움이 있다(Fig. 7). 그러나, 하양층군이 대부분 쇄설성 퇴적암으로 구성되고 일부 화산암들이 부분적으로 협재하는데 반해, 유천층군은 대부분 화산암으로 구성되며 일부 쇄설성 퇴적암들이 분포한다(Chang, 1975). 다대포분지의 기저에서 확인된 암석들은 데사이트질-안산암질 화산암들(용암류, 화산각력암, 화산력 응회암, 화산회 응회암)로 다대포층이 퇴적되기 직전 활발한 화산활동이 발생했음을 알려준다(Cho *et al.*, 2016). 다대포층의 상부는 현무암질 안산암 용암류에 의해 덮이고, 용암류의 상부에는 다시 안산암질 화산암류들이 놓인다(Cho *et al.*, 2016). 위 사실은 다대포층이 화산활동에 의한 퇴적이 진행되던 중 동래단층과 양산단층의 좌수향 주향이동으로 인한 빠른 분지 침강으로 인해 연구지역에 국부적으로 발생한 쇄설성 퇴적작용의 결과물임을 지시한다(Fig. 1b). 이를 종합하면 다대포층이 유천층군에 대비되는 것으로 해석하는 것이 가장 합리적이며, 시층서를 고려하면 유천층군의 최하부 즈음에 위치할 것으로 판단된다(Fig. 7).

### 5.3 지구조적 의미

다대포층의 퇴적시기인 약 98-93 Ma는 다대포분지의 형성 및 진화시기를 나타내기도 한다. 다대포분지 내 퇴적동시성 정단층, 쇄설성 암맥, 데사이트질 암맥 등의 인장구조와 동래단층 인근 다대포층의 경사방향 회전(단층에 의한 끌림작용)을 이용해 분지가 양산단층과 동래단층의 좌수향 주향이동에 따른 북동-남서 인장응력 하에서 형성되었음이 밝혀졌다(Cho *et al.*, 2016). 또한 고성층에 발달한 퇴적동시성 구조와 연령측정 결과를 이용해 고성층은 약 92-85 Ma 동안 북북동-남남서 혹은 북동-남서의 최소수평응력에 의한 퇴적동시성 신장구조를 나타내어 다대포층과 유사한 응력장에서 퇴적된 것으로 해석되었다(Lee, Y. *et al.*, 2018).

이번 연구에서는 보다 거시적 규모의 지구조환경 해석을 위해 경상분지의 밀양소분지 및 저어콘 U-Pb 연령측정 자료를 이용해 대략적인 퇴적연령 제한이 가능한 일부 소분지 자료들을 함께 도시했다(Fig. 7). 수집된 소분지들의 퇴적연령은 대략 110 Ma에서 85 Ma 사이에 분포하고 있고, 경상분지 내 독립적으로 분포하는 다대포층과 고성층도 위 연령 범위에 놓인다(Fig. 7). 백악기 동안 동아시아 지역에서는 유라시아판과 고태평양판 간의 사각섭입에 의해 북동-남서 혹은 북북동-남남서의 주향 단층계들이 대규모 좌수향 주향이동운동을 했으며, 그 결과 다양한 구조분

지들이 형성되었다. 한반도에도 남한의 약 1/4의 영역을 차지하는 경상분지를 시작(약 127 Ma; Lee, T.H. *et al.*, 2018)으로 다양한 소분지들이 형성되었다(Fig. 1a)(Ryang, 2013). 한반도의 백악기 소분지들의 형성에는 추가령단층계, 공주단층계, 광주단층계, 양산단층계가 주로 관여한 것으로 알려져 있고, 한반도 인근 지역에는 일본의 중앙지구조선(Median Tectonic Line)과 중국의 탄루단층계(Tan-Lu Fault System) 등이 대표적이다. 백악기 동안 이 단층계들이 주로 좌수향 주향이동을 했다는 사실에는 대체로 동의하지만, 정확한 운동시기 및 시기에 따른 운동감각의 변화에 대해서는 이견이 많다(Kano *et al.*, 1991; Otsuki, 1992; Xu *et al.*, 1995; Zhu *et al.*, 1995; Okada and Sakai, 2000; Ren *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2003; Tokiwa, 2009; Shinn *et al.*, 2010). 비록 자료의 수는 많지 않지만 이번 연구결과와 현재까지 수집된 자료를 종합한 결과, 한반도 내 다대포분지를 포함한 소분지들의 퇴적작용 종결시기는 대체로 약 85 Ma 혹은 이전으로 나타난다(Fig. 7). 이는 한반도 내 북동-남서 혹은 북북동-남남서 방향의 단층들의 백악기 좌수향 주향이동운동과 그로 인한 퇴적작용이 약 85 Ma 이전에 활발했다는 것을 의미한다. 비록 85 Ma 이후에도 암맥군(64-52 Ma; Son *et al.*, 2007)과 화강암 내 자기미세구조(60-70 Ma; Cho *et al.*, 2007) 연구에서 양산단층의 좌수향 운동감각이 인지되지만 대소규모의 분지를 형성시킨 85 Ma 이전에 비해 소규모로 운동했을 가능성이 높다. 또한 경상분지에 분포하는 경상누층군의 구조지질학적 연구에 의하면 백악기 후기 약 90-85 Ma에 지구조 환경의 변화(응력장 변화)로 인해 분지 내 쇄설성 퇴적작용이 종결된 것으로 해석되어, 위 가능성을 뒷받침한다(Cheon *et al.*, 2020). 그리고 고성층에 발달한 다양한 변형구조로부터 위 시기의 응력장변화는 거시적 지구조 환경의 변화가 아닌 한반도 동남부의 최대주응력( $\sigma_1$ )과 중간주응력( $\sigma_2$ ) 축이 국지적으로 바뀐 것에서 유래한 것으로 해석되었다(Lee, Y. *et al.*, 2018)

## 6. 결론

다대포층을 대상으로 한 저어콘 U-Pb 연령측정결과 하부 다대포층이 약 98-94 Ma, 상부 다대포층이 약 94-93 Ma 동안 퇴적되었음을 나타낸다. 이는 후기 백악기 세노마니안 초에서 튜로니안 초의 지질연대에 해당한다. 다대포층의 층서대비는 시층서적으로 하양층군과 유천층군의 사교 시기를 지시하지만, 다대포분지의 기반이 되는 암체와 다대포층을 덮는 상부 암체들이 모두 활발한 화산활동의 산물인 점을 고려할 때 다대포층은 유천층군의 최하부에 대비되는 것으로 해석된다. 지구조적으로 백악기에 한반도의 북동-남서 혹은 북북동-남남서 단층계들은 약 85 Ma 이전에는 활발한 좌수향 주향이동운동에 의해 산발적으로 구조분지를 형성했다. 그러나 유사한 응력장이 이후에도 유지되었음에도 불구하고 분지진화 및 퇴적기록이 점차 사라짐은 좌수향의 주향이동운동이 이전에 비해 쇠퇴하였음을 의미한다.

## 참고문헌

- Archibald, D. A. and Irving, E., 1990, Short interval of a reversed polarity in the Cretaceous Normal Superchron. *E.O.S.*, 71(43), 1298.
- Benammi, M., Alvarado-Ortega, J. and Urrutia-Fucugauchi, J., 2006, Magnetostratigraphy of the lower Cretaceous strata in Tlayúa Quarry, Tepexi de Rodriguez, State of Puebla, Mexico. *Earth Planets and Space*, 58(10), 1295–1302.
- Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1–23.
- Chang, T.W., Kang, P.C., Park, S.-W., Hwang, S.K. and Lee, D.W., 1983, Geological report of the Busan-Gadeok sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 22 p (in Korean with English abstract).
- Cheon, Y., Ha, S., Lee, S. and Son, M., 2020, Tectonic evolution of the Cretaceous Gyeongsang Back-arc Basin, SE Korea: Transition from sinistral transtension to strike-slip kinematics. *Gondwana Research*, 83, 16–35.
- Cho, H., Son, M. and Kim, I.-S., 2007, Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of the granitic rocks in the Eastern Region of the Yangsan Fault. *Economic and Environmental Geology*, 40, 171–189 (in Korean with English abstract).
- Cho, H., Kim, J.-S., Son, M., Sohn, Y.K. and Kim, I.-S., 2011, Petrography and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of volcanic rocks in the Cretaceous Dadaepo Basin, Busan: accumulation time and correlation of the Dadaepo formation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 1–18 (in Korean with English abstract).
- Cho, H., Son, M., Cheon, Y., Sohn, Y. K., Kim, J. S. and Kang, H. C., 2016, Evolution of the Late Cretaceous Dadaepo Basin, SE Korea, in response to oblique subduction of the proto-Pacific (Izanagi/Kula) or Pacific plate. *Gondwana Research*, 39, 145–164.
- Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: new view. *Earth Science Reviews*, 101, 225–249.
- Das, A.K., Piper, J.D.A., Bandyopadhyay, G. and Basu, M.S., 1996, Polarity inversion in the Rajmahal lavas, north-east India: Trap emplacement near commencement of the Cretaceous Normal Superchron. *Geophysical Journal International*, 124(2), 427–432.
- Fang, D.J., Wang, Z.L., Jin, G.H., Gao, R.Q., Ye, D.Q. and Xie, J.L., 1989, The Cretaceous magnetic stratigraphy of Songliao Basin, China. *Science China*



- (Series B), 10, 1084–1091 (in Chinese).
- Gehrels, G.E., Dickinson, W.R., Ross, G.M., Stewart, J.H. and Howell, D.G., 1995, Detrital zircon reference for Cambrian to Triassic miogeoclinal strata of western North America. *Geology*, 23, 831–834.
- Ghim, Y.S., Ko, K. and Lee, B.C., 2020, Occurrence of the lowermost part of the Yucheon Group and its SHRIMP U-Pb ages in Hyeonpoong and Bugok areas. *Economic and Environmental Geology*, 53(4), 397–411 (in Korean with English abstract).
- Gilder, S., Chen, Y., Cogné, J.P., Tan, X.D., Courtillot, V., Sun, D.J. and Li, Y.A., 2003, Paleomagnetism of Upper Jurassic to Lower Cretaceous volcanic and sedimentary rocks from the western Tarim Basin and implications for inclination shallowing and absolute dating of M-0 (ISEA?) chron. *Earth and Planetary Science Letters*, 206(3–4), 587–600.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. and Ogg, G.M., 2012, *The geological time scale 2012*, Elsevier.
- Hartmann, L.A. and Santos, J.O.S., 2004, Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones. *Geology*, 32(1), 73–76.
- He, H.Y., Deng, C.L., Wang, P.J., Pan, Y.X. and Zhu, R.X., 2012, Toward age determination of the termination of the Cretaceous normal superchron. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(2), Q02002.
- Helsley, C.E. and Steiner, M.B., 1969, Evidence for long intervals of normal polarity during the cretaceous period. *Earth and Planetary Science Letters*, 5, 325–332.
- Hoskin, P.W. and Schaltegger, U., 2003, The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53(1), 27–62.
- Kano, K., Nakaji, M. and Takeuchi, S., 1991, Asymmetrical mélange fabric as possible indicators of the convergent direction of plates: a case study from the Shimanto Belt of the Akaishi Mountains, Central Japan. *Tectonophysics*, 185, 375–388.
- Kee, W.S., Koh, H.J., Kim, S.W., Kim, B.C., Kim, Y.B., Kim, Y.H., Kim, H.C., Park, S.I., Song, K.Y., Lee, S.R., Lee, Y.S., Lee, Y.N., Lee, H.J., Cho, D.L., Choi, B.Y., Choi, S.J., Chwae, W.C. and Hwang, J.H., 2011, Tectonic evolution of upper crustal units in the mid-western part of the Korean peninsula. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*, 255 p (in Korean with English abstract).
- Kim, I.S., 1988, Palaeomagnetism of Cretaceous Tadaepo formation, Pusan area: its

- stratigraphic and tectonic significances. *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 211-233 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-S., Cho, H.S., Son, M. and Sohn, Y.K., 2011, Geological age of the Gyeongsang Supergroup. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 26-29, 20 p (in Korean).
- Kim, S.J., Ju, Y.J., Song, J.H., Hong, S.G., and Yi, K., 2015, SHRIMP U-Pb detrital zircon ages in Southwest Eumseong Basin. Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts), Jeju, October 28-31, 358 p (in Korean).
- Kollofrath, J.M., 2012, Energy regime of the geodynamo during the Cretaceous Normal Superchron via paleosecular variation and paleointensity. München: Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Kwon, C.W., Ko, K., Gihm, Y.S., Koh, H.J. and Kim, H., 2017, Late Cretaceous volcanic arc system in southwest Korea: Distribution, lithology, age, and tectonic implications. *Cretaceous research*, 75, 125-140.
- Lee, D.W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *Island Arc*, 8(2), 218-231.
- Lee, H., Kwon, M.G., Shin, S., Cho, H., Kim, J.S., Roh, Y., Huh, M. and Choi, T., 2020, Relationships between Alluvial Facies/Depositional Environments, Detrital Zircon U-Pb Geochronology, and Bulk-Rock Geochemistry in the Cretaceous Neungju Basin (Southwest Korea). *Minerals*, 10(11), 1023.
- Lee, J.I., Kagami, H. and Nagao, K., 1995, Rb-SR and K-Ar age determinations of the granitic rocks in the southern part of the Kyeongsang basin, Korea: Implication for cooling history and evolution of granitic magmatism during late Cretaceous. *Geochemical Journal*, 29, 363-376.
- Lee, S.H., Oh, C.W. and Park, J.W., 2020, The age and geochemistry of the mid-Cretaceous volcanic rocks in the Jinan Basin: Implications for the mid-Cretaceous tectonic environments of the Korean Peninsula and Northeast Asia. *Lithos*, 358, 105383.
- Lee, T.-H., 2016, Formation and evolution of the Gyeongsang Basin: constraints from zircon geochronology and Hf isotope geochemistry. Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Pusan, 240 p.
- Lee, T.H., Park, K.H. and Yi, K., 2018, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons from the Early Cretaceous Nakdong Formation, South East Korea: Timing of initiation of the Gyeongsang Basin and its provenance. *Island Arc*, 27(5), e12258.
- Lee, Y., Cheon, Y., Ha, S., Kang, H.C. and Son, M., 2018, Distribution, age, and

- structural evolution of the Goseong Formation in the southern Gyeongsang basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54(4), 359-381 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.D., 1975, Stratigraphy and Sedimentation of the Dadaepo Formation, Busan. *Journal of Science (Natural Science Part) in Pusan National University* Vol. 20 pp. 91-104.
- Lowrie, W., Alvarez, W., Silva, I.P. and Monechi, S., 1980, Lower cretaceous magnetic stratigraphy in umbrian pelagic carbonate rocks. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 60(2), 263-281.
- Ludwig, K.R., 2008, User's manual for Isoplot 3.6: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, p. 77. Special Publication 4.
- Okada, H. and Sakai, T., 2000, The Cretaceous system of the Japanese Islands and its physical environments. *Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 17, 113-144.
- Otsuki, K., 1992, Oblique subduction, collision of microcontinents and subduction of oceanic ridge: Their implications on the Cretaceous tectonics of Japan. *Island Arc*, 1, 51-63.
- Paik, I.S., Lee, J.D., Kim, J.J., Kim, I.S. and Park, C.W., 1997, Compound calcrete deposits from the Dadaepo formation in Dusong peninsula, Pusan: origin, paleoenvironments, and stratigraphic implication. *Economic and Environmental Geology*, 30, 263-275 (in Korean with English abstract).
- Paik, I.S. and Kim, H.J., 2003, Palustrine calcretes of the Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea: Variation and paleoenvironmental implications. *The Island Arc*, 12, 110-124.
- Paik, I.S., Kim, H.J. and Huh, M., 2012, Dinosaur egg deposits in the Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea: Diversity and paleobiological implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 56, 135-146.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J. and Hergt, J., 2011, Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26, 2508-2518.
- Ren, J., Tamaki, K., Li, S. and Junxia, Z., 2002, Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344, 175-205.
- Ryang, W.-H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean Peninsula. *Journal of the*

- Geological Society of Korea, 49, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Shcherbakova, V.V., Bakhmutov, V.G., Shcherbakov, V.P., Zhidkov, G.V. and Shpyra, V.V., 2012, Palaeointensity and paleomagnetic study of Cretaceous and Palaeocene rocks from Western Antarctica. *Geophysical Journal International*, 189(1), 204-228.
- Shin, J.-J., 1997, Genesis and Structural Evolutionary History of the Dadaepo Basin in Pusan, Korea. Ph. M. thesis, Pusan National University, Pusan, 100 p (in Korean with English abstract).
- Shinn, Y.J., Chough, S.K. and Hwang, I.G., 2010, Structural development and tectonic evolution of Gunsan Basin (Cretaceous-Tertiary) in the central Yellow Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 500-514.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N. and Whitehouse, M.J., 2008, Plešovice zircon-a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249 (1-2), 1-35.
- Son, M., Kim, J.-S., Hwang, B.-H., Lee, I.-H., Kim, J., Song, C.W. and Kim, I.-S., 2007, Paleogene dyke swarms in the eastern Geoje Island, Korea: their absolute ages and tectonic implications. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 16, 82-99 (in Korean with English abstract).
- Tarduno, J.A., 1990, Brief reversed polarity interval during the Cretaceous normal polarity superchron. *Geology*, 18(8), 683- 686.
- Tokiwa, T., 2009, Timing of dextral oblique subduction along the eastern margin of the Asian continent in the Late Cretaceous: evidence from the accretionary complex of the Shimanto Belt in the Kii peninsula, Southwest Japan. *Island Arc*, 18, 306-319.
- VandenBerg, J., Klootwijk, C.T. and Wonders, A.A.H., 1978, Late Mesozoic and Cenozoic movements of the Italian Peninsula: Further paleomagnetic data from the Umbrian sequence. *The Geological Society of America Bulletin*, 89(1), 133-150.
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., Von Quadt, A., Roddick, J.C. and Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19 (1), 1-23.
- Xu, J.W., Zhu, G., Lu, P.J., Zheng, X.X. and Sun, S.Q., 1995, Progress in studies on

- strike-slip chronology of the Tan-Lu fault zone. *Geology of Anhui*, 5, 1-12.
- Yun, S.H., Koh, J.S., Park, K.S., Ahn, H.C., Kim, Y.I., Yoo, S.H., Lee, D.H. and Yun, G.Y., 2005, Rb-Sr whole-rock isochron age and petrology of the Mt. Geumjeong granite, Busan. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 14(1), 61-72 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H. and Sang, G.N., 1994, Geochronology and cauldron structure of the Cretaceous volcanic complexes in southern Kyeongsang Basin, Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 15(5), 376-376 (in Korean with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Dong, S. and Shi, W., 2003, Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shangdong Province, eastern China. *Tectonophysics*, 363, 243-258.
- Zhu, R.X., Hoffman, K.A., Nomade, S., Renne, P., Shi, R.P., Liang, M.M. and Shi, G.H., 2004, Geomagnetic paleointensity and direct age determination of the ISEA (M0r?) chron. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(3-4), 285-295.
- Zhu, G., Xu, J.W. and Shun, S.J., 1995, Isotopic age evidence for the timing of strike-slip movement of the Tan-Lu fault zone. *Geology Review*, 41, 452-461.



# 그림

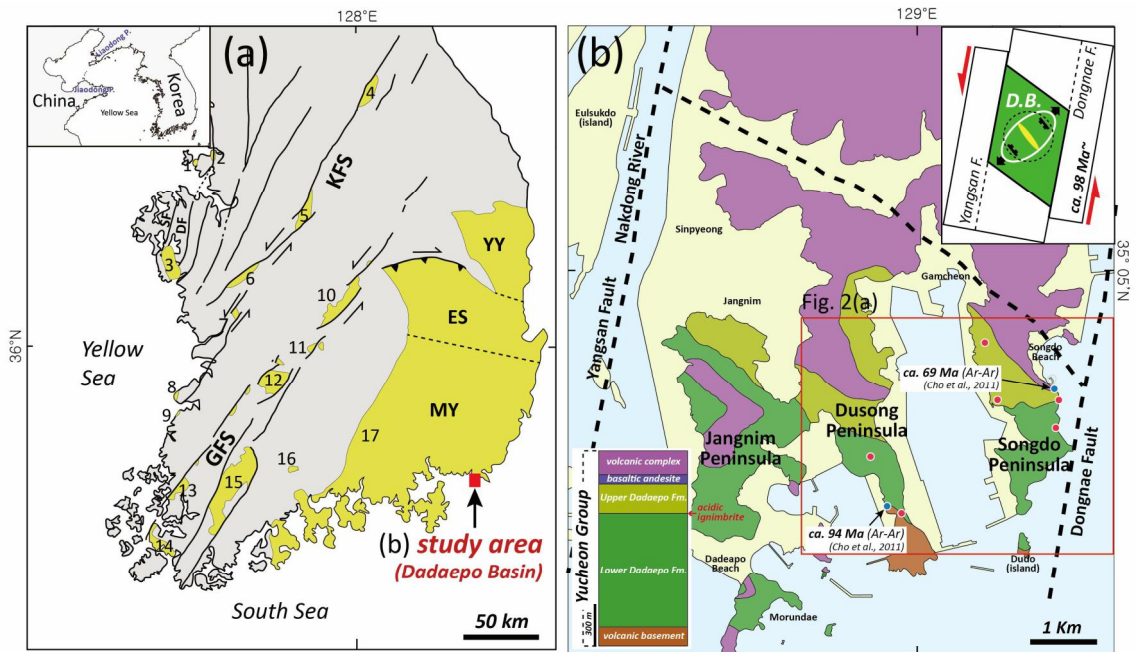


Fig. 1. (a) Cretaceous basins distributed in the Korean Peninsula. (b) Geologic map of the Dadaepo Basin. Numbers in (a) indicate 1: Tando, 2: Namyang, 3: Chonsuman, 4: Pungam, 5: Eumseong, 6: Kongju, 7: Buyeo, 8: Gyeokpo, 9: Gye-hwa, 10: Yeongdong, 11: Muju, 12: Jinan, 13: Hampyeong, 14: Haenam, 15: Neungju, 16: Gurye, 17: Gyeongsang Basin. KFS: Kongju Fault System, GFS: Gwangju Fault System, YY: Yeongyang Subbasin, ES: Euseong Subbasin, MY: Milyang Subbasin. Blue and red circles in (b) indicate the sampling locations of the previous and this study, respectively (modified from Ryang, 2013; Cho *et al.*, 2016).

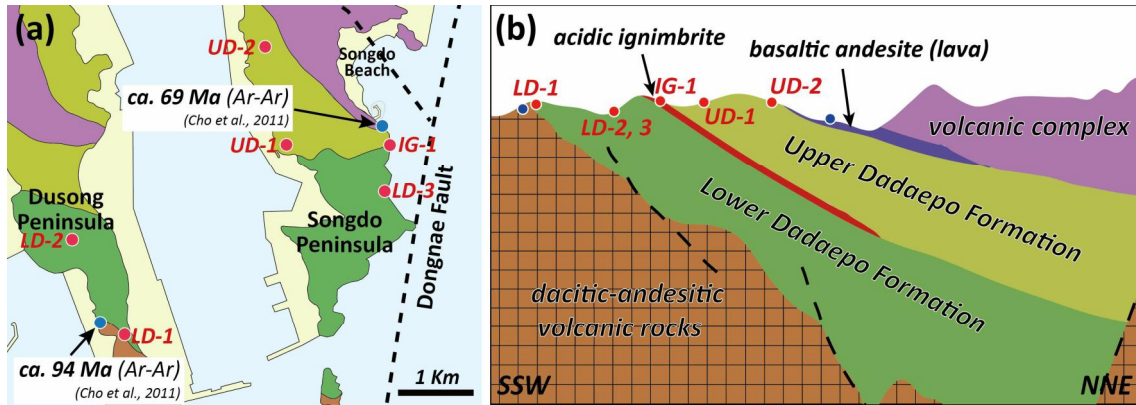


Fig. 2. (a) Geologic map of the Dadaepo Basin showing the sampling locations, (b) schematic stratigraphic section of the Dadaepo Basin. Blue and red circles in (b) indicate the sampling locations of the previous and this study, respectively (modified from Cho *et al.*, 2016).

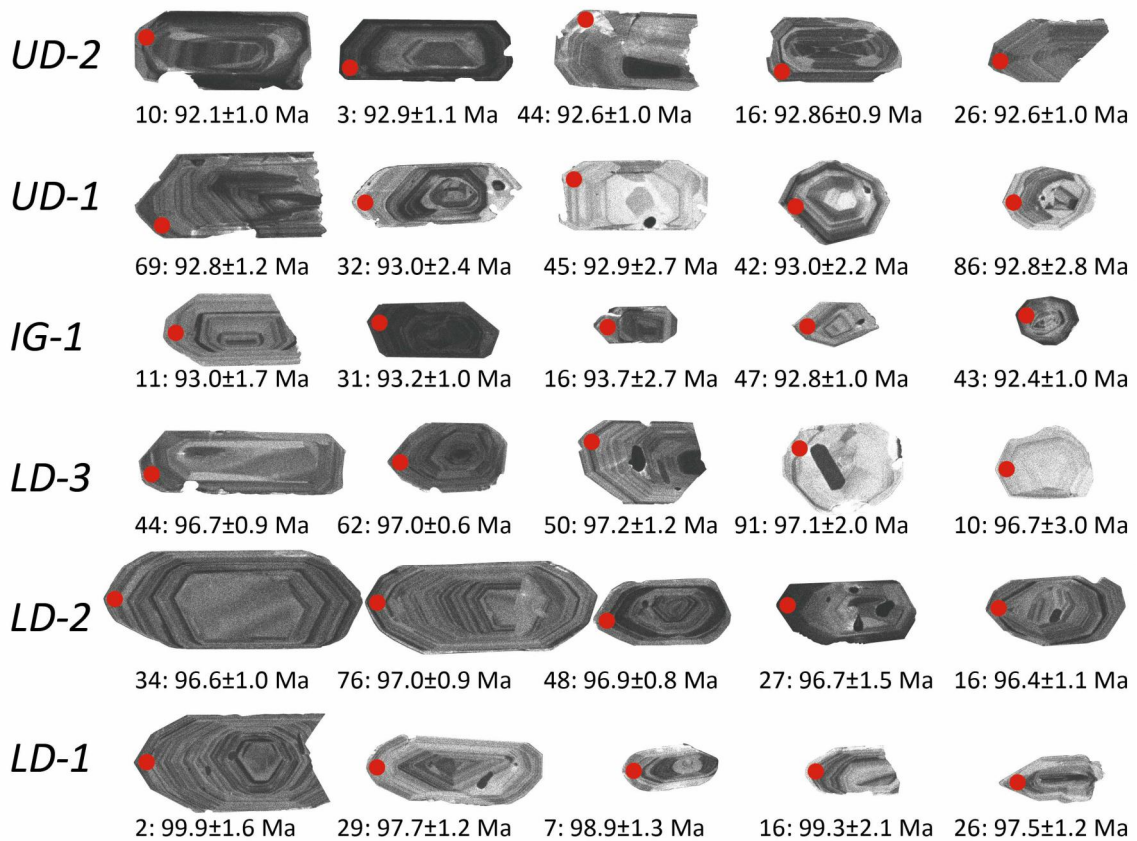


Fig. 3. Scanning electron microscope (SEM) cathodoluminescence (CL) images of the representative Cretaceous zircon grains used in final age calculation. Red circles indicate the analytical spots.

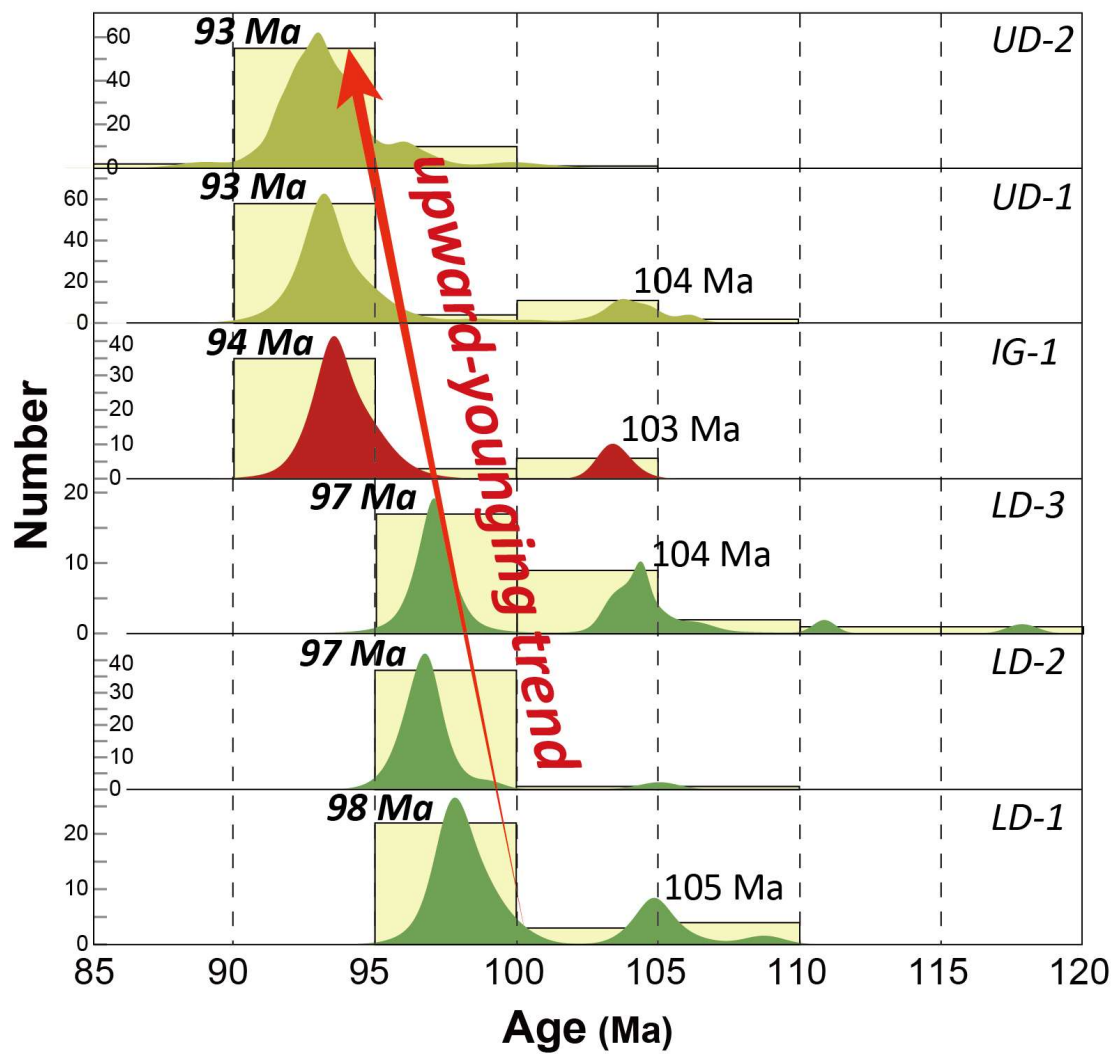


Fig. 4. Probability-density plots of the youngest zircon U-Pb peak ages.

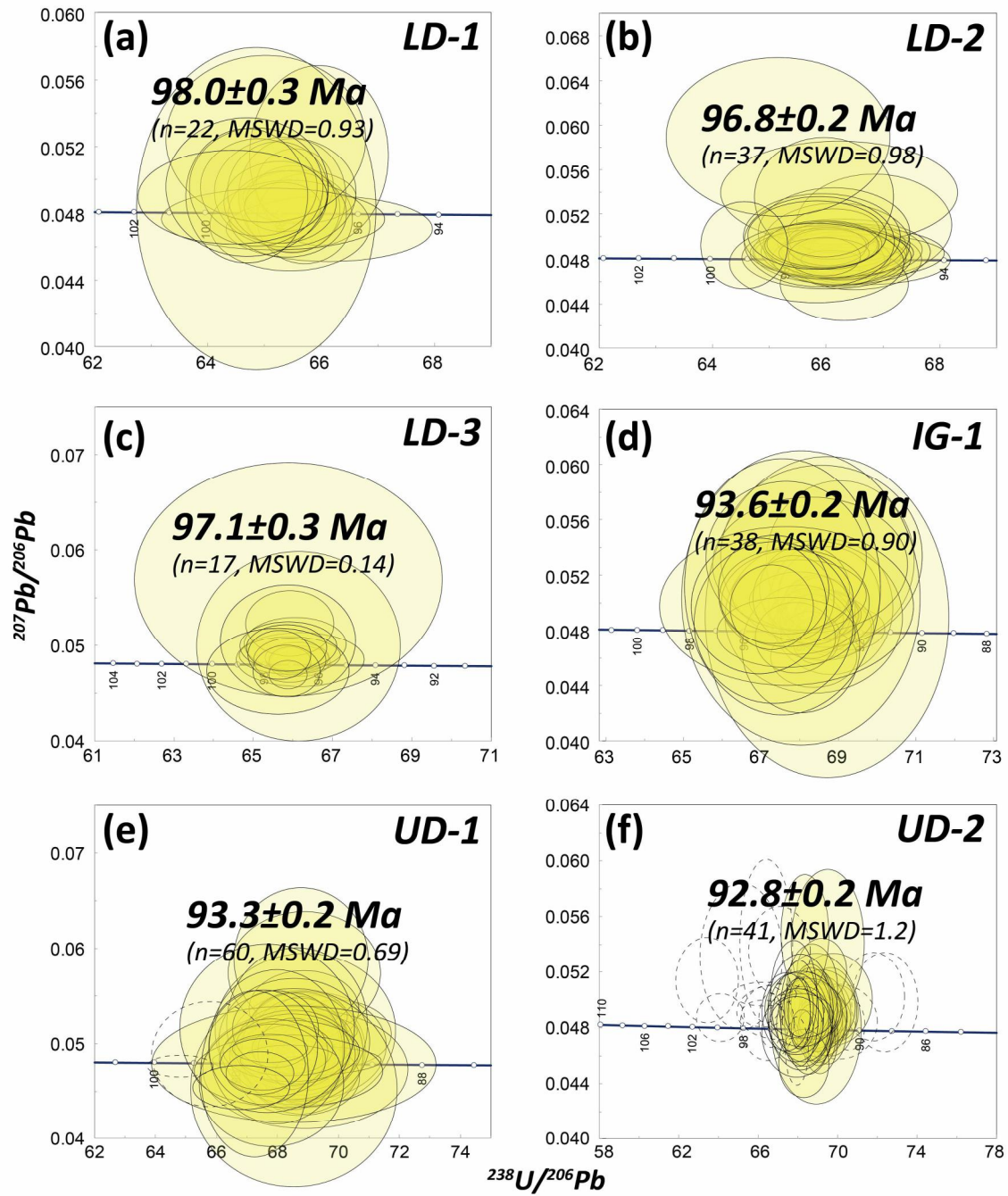


Fig. 5. Concordia diagrams and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted mean ages of youngest cluster from detrital zircon U-Pb ages of each sample.



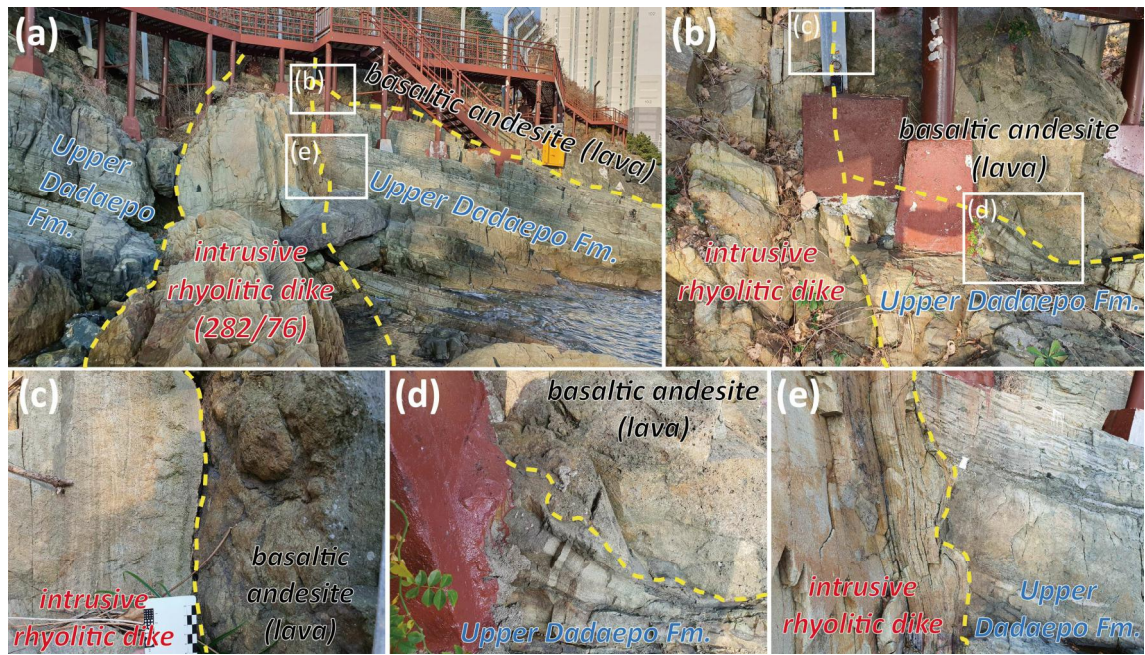


Fig. 6. Outcrop photographs showing the intrusive rhyolitic dike which cut both basaltic andesite and Upper Dadaepo Formation. (a) Panoramic view showing the cross-cutting relationship. (b) Close-up view showing a point where three rock bodies meet. (c) Boundary between intrusive dike and basaltic andesite (lava), (d) Irregular boundary between basaltic andesite and Upper Dadaepo Formation. (e) Boundary between intrusive dike and Upper Dadaepo Formation.

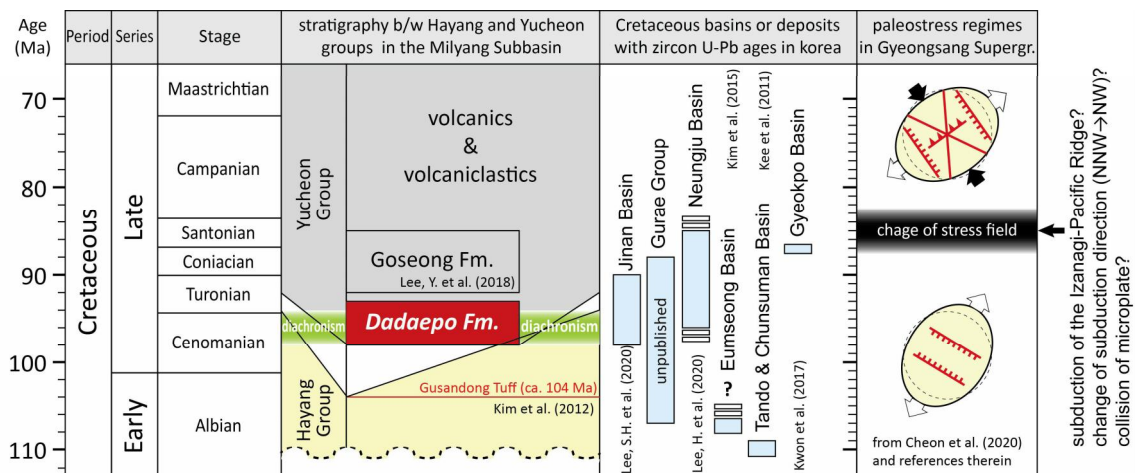


Fig. 7. Stratigraphic correlation of the Dadaepo Formation based on chronostratigraphic data and paleostress history. \*Data from [Kee et al., 2011](#); [Kim et al., 2012](#); [Kim et al., 2015](#); [Kwon et al., 2017](#); [Lee, Y. et al., 2018](#); [Cheon et al., 2020](#); [Lee, S.H. et al., 2020](#); [Lee, H. et al., 2020](#).



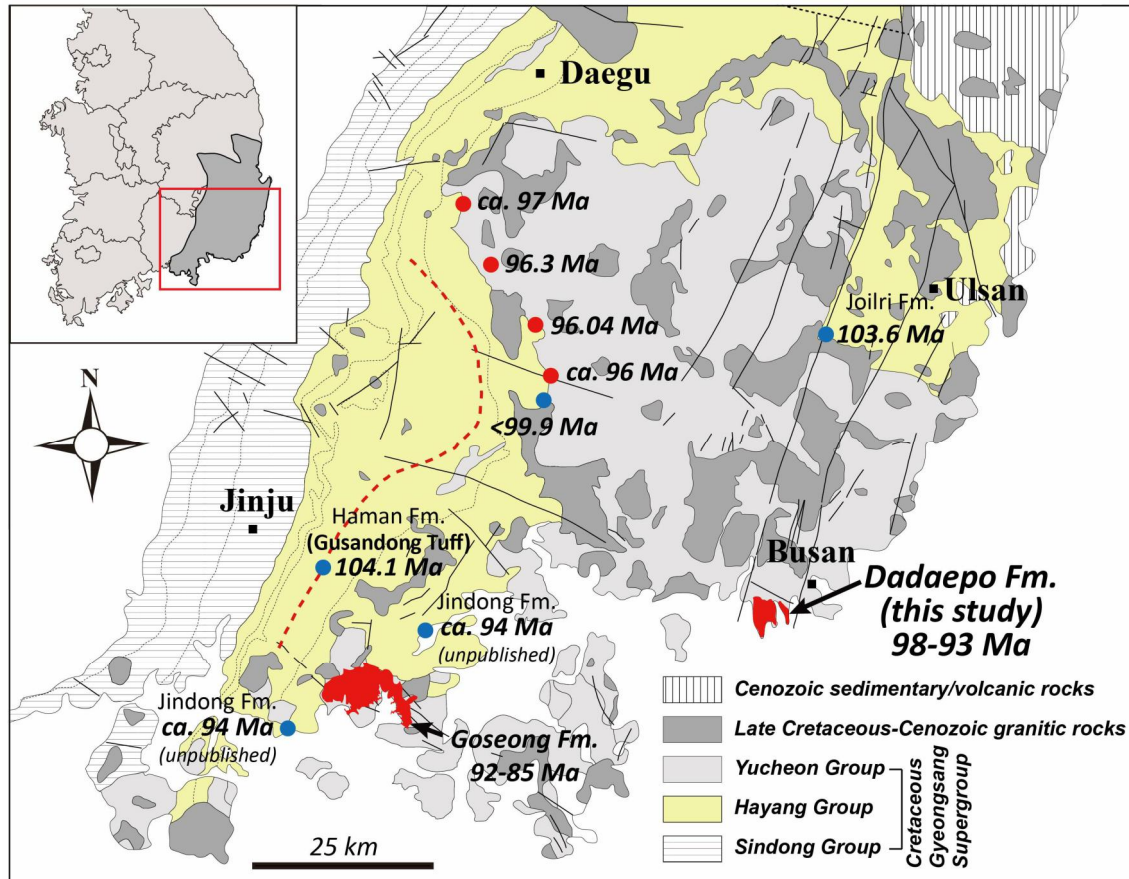


Fig. 8. Geological map showing the sample locations and zircon U-Pb ages of Hayang and Yucheon groups. Blue and red circles belong to Hayang and Yucheon groups, respectively. Red dotted line is the trace of Gusandong Tuff. \*Data from Kim *et al.*, 2012; Lee, 2016; Lee, Y. *et al.*, 2018; Ghim *et al.*, 2020.

# II

Table 1. LA–MC–ICP–MS zircon U–Pb ages of the Dadaepo Formation

Sample	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error	Disc.	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age	Error	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age	Error	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age	Error
Name			2 $\sigma$		2 $\sigma$		2 $\sigma$	(%)	(Ma)	2 $\sigma$	(Ma)	2 $\sigma$	(Ma)	2 $\sigma$
<b>LD-1 (n=29)</b>														
LD-1-24	0.70	0.0471	± 0.0016	0.0151	± 0.0003	0.099	± 0.004		96.8	± 2.2	95.2	± 3.9	144.0	± 33.0
LD-1-11	0.65	0.0515	± 0.0044	0.0152	± 0.0002	0.108	± 0.010		97.0	± 1.5	105.3	± 9.3	460.0	± 130.0
LD-1-6	0.51	0.0477	± 0.0022	0.0152	± 0.0002	0.100	± 0.004		97.4	± 1.0	97.9	± 4.0	242.0	± 51.0
LD-1-26	0.74	0.0490	± 0.0013	0.0152	± 0.0002	0.104	± 0.003		97.5	± 1.2	99.9	± 2.9	208.0	± 26.0
LD-1-14	0.92	0.0497	± 0.0018	0.0153	± 0.0001	0.104	± 0.004		97.6	± 0.9	100.8	± 3.6	300.0	± 41.0
LD-1-3	0.53	0.0483	± 0.0021	0.0153	± 0.0002	0.103	± 0.004		97.7	± 1.0	99.1	± 3.8	187.0	± 47.0
LD-1-29	0.66	0.0491	± 0.0028	0.0153	± 0.0002	0.103	± 0.006		97.7	± 1.2	99.2	± 5.3	454.0	± 66.0
LD-1-31	0.89	0.0473	± 0.0022	0.0153	± 0.0003	0.099	± 0.005		97.7	± 1.7	96.2	± 4.2	179.0	± 61.0
LD-1-37	0.69	0.0480	± 0.0021	0.0153	± 0.0002	0.102	± 0.005		97.8	± 1.3	98.6	± 4.6	276.0	± 43.0
LD-1-30	1.10	0.0493	± 0.0027	0.0153	± 0.0002	0.104	± 0.005		97.9	± 1.5	100.4	± 4.9	281.0	± 57.0
LD-1-32	1.26	0.0484	± 0.0012	0.0153	± 0.0001	0.102	± 0.003		98.0	± 0.9	98.1	± 2.5	186.0	± 27.0
LD-1-27	0.78	0.0487	± 0.0020	0.0153	± 0.0002	0.102	± 0.004		98.0	± 1.2	98.5	± 3.9	320.0	± 49.0
LD-1-19	0.60	0.0493	± 0.0025	0.0153	± 0.0002	0.104	± 0.005		98.1	± 1.1	100.8	± 4.9	315.0	± 47.0
LD-1-25	0.80	0.0477	± 0.0015	0.0154	± 0.0004	0.102	± 0.004		98.2	± 2.4	98.1	± 3.8	144.0	± 29.0
LD-1-34	0.82	0.0646	± 0.0056	0.0154	± 0.0003	0.135	± 0.012	-18.2	98.2	± 1.9	129.0	± 11.0	830.0	± 150.0
LD-1-21	0.47	0.0525	± 0.0041	0.0154	± 0.0003	0.111	± 0.008		98.4	± 2.2	106.4	± 7.7	454.0	± 96.0
LD-1-5	0.99	0.0496	± 0.0024	0.0154	± 0.0002	0.106	± 0.005		98.6	± 1.2	102.2	± 4.7	231.0	± 50.0
LD-1-18	0.50	0.0483	± 0.0079	0.0154	± 0.0004	0.103	± 0.017		98.6	± 2.6	99.0	± 16.0	370.0	± 120.0
LD-1-20	1.05	0.0496	± 0.0029	0.0154	± 0.0002	0.106	± 0.006		98.7	± 1.4	102.0	± 5.7	229.0	± 60.0

LD-1-7	0.71	0.0491	±	0.0033	0.0155	±	0.0002	0.105	±	0.007		98.9	±	1.3	100.7	±	6.2	247.0	±	61.0
LD-1-15	0.69	0.0496	±	0.0034	0.0155	±	0.0003	0.104	±	0.007		98.9	±	1.8	100.6	±	6.7	353.0	±	78.0
LD-1-16	0.76	0.0490	±	0.0023	0.0155	±	0.0003	0.104	±	0.005		99.3	±	2.1	100.3	±	4.6	229.0	±	38.0
LD-1-2	0.85	0.0556	±	0.0040	0.0156	±	0.0003	0.120	±	0.009	-4.7	99.9	±	1.6	114.4	±	8.2	418.0	±	62.0
LD-1-17	0.74	0.0720	±	0.0033	0.0156	±	0.0002	0.153	±	0.007	-36.6	100.1	±	1.4	144.2	±	6.1	939.0	±	54.0
LD-1-13	0.27	0.0500	±	0.0021	0.0164	±	0.0002	0.112	±	0.005		104.5	±	1.4	107.8	±	4.5	237.0	±	78.0
LD-1-38	0.85	0.0495	±	0.0016	0.0164	±	0.0002	0.112	±	0.004		104.7	±	1.5	107.9	±	3.7	274.0	±	33.0
LD-1-33	0.82	0.0478	±	0.0008	0.0164	±	0.0001	0.108	±	0.002		104.9	±	0.9	103.9	±	1.9	145.0	±	18.0
LD-1-4	0.57	0.0514	±	0.0044	0.0164	±	0.0003	0.120	±	0.012		105.0	±	2.2	115.0	±	11.0	410.0	±	69.0
LD-1-9	1.69	0.0492	±	0.0014	0.0165	±	0.0002	0.111	±	0.003		105.2	±	1.3	107.1	±	2.6	184.0	±	28.0
LD-1-39	0.79	0.0501	±	0.0039	0.0166	±	0.0003	0.112	±	0.009		105.8	±	2.2	108.7	±	8.0	450.0	±	85.0
LD-1-1	1.29	0.0556	±	0.0038	0.0170	±	0.0002	0.131	±	0.009	-5.5	108.8	±	1.4	124.5	±	8.3	418.0	±	69.0
LD-1-35	0.88	0.0802	±	0.0036	0.0191	±	0.0007	0.208	±	0.011	-44.8	122.0	±	4.4	190.7	±	9.6	1133.0	±	87.0
<b>LD-2 (n=39)</b>																				
LD-2-5	0.50	0.0511	±	0.0037	0.0150	±	0.0003	0.107	±	0.008		95.7	±	1.6	103.3	±	7.3	310.0	±	120.0
LD-2-42	0.95	0.0480	±	0.0018	0.0150	±	0.0003	0.099	±	0.004		95.9	±	1.7	95.8	±	3.6	214.0	±	54.0
LD-2-57	0.53	0.0489	±	0.0013	0.0150	±	0.0002	0.102	±	0.003		96.1	±	1.0	98.2	±	2.5	183.0	±	35.0
LD-2-22	1.21	0.0480	±	0.0022	0.0150	±	0.0002	0.098	±	0.004		96.2	±	1.4	95.3	±	4.2	324.0	±	49.0
LD-2-23	0.53	0.0489	±	0.0019	0.0151	±	0.0002	0.102	±	0.004		96.3	±	1.5	98.1	±	3.9	228.0	±	38.0
LD-2-4	0.35	0.0486	±	0.0019	0.0151	±	0.0003	0.101	±	0.005		96.4	±	2.0	98.2	±	4.2	214.0	±	41.0
LD-2-16	0.63	0.0482	±	0.0010	0.0151	±	0.0002	0.100	±	0.002		96.4	±	1.1	96.7	±	2.2	180.0	±	22.0
LD-2-9	0.66	0.0495	±	0.0014	0.0151	±	0.0002	0.102	±	0.003		96.5	±	1.4	98.8	±	2.5	203.0	±	43.0
LD-2-59	0.61	0.0491	±	0.0015	0.0151	±	0.0002	0.103	±	0.003		96.5	±	1.1	99.3	±	2.7	261.0	±	41.0
LD-2-61	0.41	0.0458	±	0.0027	0.0151	±	0.0002	0.095	±	0.005		96.5	±	1.3	92.2	±	4.9	341.0	±	76.0
LD-2-62	0.64	0.0494	±	0.0013	0.0151	±	0.0001	0.102	±	0.003		96.5	±	0.9	98.7	±	2.7	223.0	±	24.0

LD-2-35	0.63	0.0479	±	0.0019	0.0151	±	0.0002	0.101	±	0.004		96.6	±	1.0	97.7	±	3.6	270.0	±	39.0
LD-2-7	0.46	0.0487	±	0.0024	0.0151	±	0.0003	0.102	±	0.005		96.6	±	1.9	99.2	±	4.6	304.0	±	59.0
LD-2-19	0.39	0.0540	±	0.0038	0.0151	±	0.0004	0.116	±	0.008	-5.5	96.6	±	2.4	111.3	±	7.0	520.0	±	110.0
LD-2-34	0.47	0.0481	±	0.0016	0.0151	±	0.0002	0.101	±	0.004		96.6	±	1.0	97.5	±	3.2	245.0	±	34.0
LD-2-79	0.46	0.0481	±	0.0019	0.0151	±	0.0002	0.098	±	0.004		96.6	±	1.4	95.0	±	3.8	217.0	±	51.0
LD-2-27	0.43	0.0487	±	0.0020	0.0151	±	0.0002	0.101	±	0.005		96.7	±	1.5	99.1	±	3.7	181.0	±	67.0
LD-2-30	0.54	0.0494	±	0.0030	0.0151	±	0.0002	0.104	±	0.008		96.7	±	1.5	96.2	±	4.9	323.0	±	82.0
LD-2-64	1.41	0.0504	±	0.0033	0.0151	±	0.0003	0.106	±	0.007		96.7	±	1.6	102.2	±	6.2	485.0	±	74.0
LD-2-32	1.11	0.0506	±	0.0016	0.0151	±	0.0002	0.104	±	0.003	0.0	96.7	±	1.0	100.7	±	3.0	297.0	±	35.0
LD-2-69	0.37	0.0494	±	0.0016	0.0151	±	0.0002	0.104	±	0.003		96.8	±	0.9	100.7	±	3.2	260.0	±	33.0
LD-2-49	0.20	0.0486	±	0.0018	0.0151	±	0.0003	0.102	±	0.004		96.8	±	1.7	98.2	±	3.9	142.0	±	36.0
LD-2-70	0.74	0.0480	±	0.0007	0.0151	±	0.0001	0.101	±	0.002		96.8	±	0.6	98.1	±	1.5	139.0	±	16.0
LD-2-8	0.55	0.0482	±	0.0023	0.0152	±	0.0003	0.102	±	0.005		96.9	±	1.8	98.0	±	4.6	222.0	±	46.0
LD-2-48	0.81	0.0494	±	0.0011	0.0151	±	0.0001	0.105	±	0.003	-1.0	96.9	±	0.8	101.0	±	2.3	212.0	±	32.0
LD-2-77	1.34	0.0492	±	0.0014	0.0152	±	0.0001	0.103	±	0.003		96.9	±	0.8	99.3	±	2.8	199.0	±	29.0
LD-2-76	0.53	0.0486	±	0.0011	0.0152	±	0.0002	0.101	±	0.003		97.0	±	0.9	97.9	±	2.3	184.0	±	26.0
LD-2-41	0.55	0.0483	±	0.0014	0.0152	±	0.0001	0.101	±	0.003		97.0	±	0.8	97.8	±	2.6	174.0	±	27.0
LD-2-1	1.07	0.0501	±	0.0031	0.0152	±	0.0003	0.105	±	0.006		97.0	±	1.6	101.1	±	5.6	328.0	±	55.0
LD-2-43	0.48	0.0494	±	0.0017	0.0152	±	0.0002	0.103	±	0.004		97.0	±	1.2	99.7	±	3.6	216.0	±	45.0
LD-2-66	0.96	0.0493	±	0.0017	0.0152	±	0.0002	0.106	±	0.004		97.0	±	1.2	102.1	±	3.8	296.0	±	48.0
LD-2-68	1.01	0.0536	±	0.0044	0.0152	±	0.0002	0.114	±	0.010		97.0	±	1.5	109.2	±	9.0	380.0	±	80.0
LD-2-65	0.68	0.0496	±	0.0033	0.0152	±	0.0003	0.105	±	0.007		97.1	±	1.6	101.5	±	6.5	370.0	±	63.0
LD-2-13	1.05	0.0477	±	0.0029	0.0152	±	0.0003	0.099	±	0.006		97.2	±	1.8	95.6	±	5.9	327.0	±	55.0
LD-2-51	1.09	0.0502	±	0.0025	0.0152	±	0.0002	0.107	±	0.006		97.2	±	1.5	103.1	±	5.0	405.0	±	50.0
LD-2-54	0.61	0.0590	±	0.0058	0.0154	±	0.0004	0.121	±	0.012	-4.5	98.2	±	2.4	115.0	±	10.0	675.0	±	87.0

LD-2-6	0.70	0.0493	±	0.0032	0.0155	±	0.0002	0.106	±	0.007		99.1	±	0.9	101.7	±	6.6	290.0	±	120.0
LD-2-11	0.39	0.0577	±	0.0021	0.0161	±	0.0002	0.129	±	0.004	-14.6	102.8	±	1.2	122.7	±	3.7	537.0	±	56.0
LD-2-17	0.91	0.0496	±	0.0030	0.0164	±	0.0003	0.112	±	0.007		104.9	±	1.8	107.6	±	6.6	346.0	±	63.0
LD-2-60	1.14	0.0482	±	0.0016	0.0164	±	0.0002	0.108	±	0.004		105.1	±	1.2	103.9	±	3.3	279.0	±	39.0
<b>LD-3 (n=30)</b>																				
LD-3-31	0.52	0.0570	±	0.0023	0.0151	±	0.0004	0.121	±	0.005	-12.2	96.6	±	2.4	115.7	±	4.9	505.0	±	51.0
LD-3-44	0.63	0.0484	±	0.0013	0.0151	±	0.0001	0.100	±	0.003		96.7	±	0.9	96.9	±	2.6	206.0	±	30.0
LD-3-10	1.05	0.0500	±	0.0081	0.0151	±	0.0005	0.113	±	0.018		96.7	±	3.0	108.0	±	17.0	720.0	±	140.0
LD-3-33	0.66	0.0486	±	0.0023	0.0151	±	0.0003	0.104	±	0.005		96.7	±	1.9	100.5	±	4.9	278.0	±	56.0
LD-3-35	0.34	0.0488	±	0.0013	0.0151	±	0.0002	0.100	±	0.003		96.8	±	1.0	97.1	±	2.5	176.0	±	30.0
LD-3-16	0.54	0.0502	±	0.0023	0.0151	±	0.0002	0.107	±	0.005	-0.1	96.9	±	1.5	102.9	±	4.4	320.0	±	51.0
LD-3-24	0.48	0.0524	±	0.0028	0.0152	±	0.0002	0.111	±	0.006	-3.1	97.0	±	1.3	106.8	±	5.5	425.0	±	56.0
LD-3-62	0.38	0.0483	±	0.0013	0.0152	±	0.0001	0.101	±	0.003		97.0	±	0.6	97.4	±	2.5	225.0	±	31.0
LD-3-1	0.41	0.0490	±	0.0016	0.0152	±	0.0002	0.103	±	0.004		97.1	±	1.5	99.4	±	3.6	170.0	±	42.0
LD-3-8	0.92	0.0570	±	0.0100	0.0152	±	0.0007	0.128	±	0.023	-0.2	97.1	±	4.7	123.0	±	21.0	1060.0	±	180.0
LD-3-48	0.58	0.0500	±	0.0021	0.0152	±	0.0002	0.109	±	0.005	-2.3	97.1	±	1.5	104.9	±	4.1	285.0	±	45.0
LD-3-53	0.73	0.0485	±	0.0019	0.0152	±	0.0002	0.098	±	0.004		97.1	±	1.1	94.4	±	3.6	212.0	±	43.0
LD-3-91	1.51	0.0506	±	0.0048	0.0152	±	0.0003	0.112	±	0.011		97.1	±	2.0	107.8	±	9.9	410.0	±	99.0
LD-3-90	0.50	0.0470	±	0.0012	0.0152	±	0.0001	0.099	±	0.003		97.1	±	0.6	95.4	±	2.5	197.0	±	38.0
LD-3-77	0.41	0.0474	±	0.0022	0.0152	±	0.0002	0.099	±	0.005		97.2	±	1.0	96.3	±	4.4	233.0	±	37.0
LD-3-50	0.48	0.0498	±	0.0020	0.0152	±	0.0002	0.108	±	0.004	-1.1	97.2	±	1.2	103.5	±	4.0	270.0	±	40.0
LD-3-42	0.87	0.0579	±	0.0041	0.0152	±	0.0003	0.124	±	0.009	-11.2	97.4	±	2.0	118.3	±	8.0	532.0	±	79.0
LD-3-72	0.30	0.0491	±	0.0021	0.0152	±	0.0002	0.108	±	0.005	-1.4	97.4	±	0.9	104.3	±	4.6	220.0	±	47.0
LD-3-14	0.71	0.0474	±	0.0037	0.0152	±	0.0003	0.105	±	0.009		97.5	±	2.2	101.6	±	8.1	300.0	±	130.0
LD-3-52	0.38	0.0476	±	0.0010	0.0162	±	0.0001	0.107	±	0.002		103.3	±	0.7	103.3	±	2.2	154.0	±	24.0



LD-3-89	0.38	0.0475	±	0.0010	0.0162	±	0.0001	0.108	±	0.002	103.8	±	0.8	104.4	±	2.2	100.0	±	17.0
LD-3-64	0.21	0.0476	±	0.0006	0.0163	±	0.0002	0.100	±	0.002	103.9	±	1.5	97.1	±	1.5	78.0	±	19.0
LD-3-88	0.52	0.0461	±	0.0031	0.0163	±	0.0003	0.105	±	0.007	104.0	±	1.6	101.2	±	6.6	348.0	±	82.0
LD-3-73	0.44	0.0474	±	0.0022	0.0163	±	0.0002	0.112	±	0.006	104.1	±	1.2	107.9	±	5.0	120.0	±	37.0
LD-3-41	0.34	0.0478	±	0.0006	0.0163	±	0.0001	0.108	±	0.001	104.3	±	0.7	103.6	±	1.2	125.0	±	15.0
LD-3-9	0.25	0.0485	±	0.0005	0.0163	±	0.0001	0.109	±	0.001	104.4	±	0.5	105.3	±	1.2	126.9	±	9.8
LD-3-26	0.33	0.0468	±	0.0012	0.0164	±	0.0004	0.105	±	0.004	104.8	±	2.5	101.2	±	3.6	82.0	±	16.0
LD-3-13	0.47	0.0484	±	0.0018	0.0164	±	0.0002	0.113	±	0.004	104.9	±	0.9	109.1	±	4.1	254.0	±	34.0
LD-3-76	0.50	0.0474	±	0.0011	0.0166	±	0.0002	0.110	±	0.004	106.3	±	1.3	105.6	±	3.2	95.0	±	26.0
LD-3-45	0.45	0.0499	±	0.0016	0.0167	±	0.0009	0.121	±	0.007	106.4	±	5.9	117.1	±	6.6	234.0	±	44.0
LD-3-46	0.33	0.0477	±	0.0009	0.0174	±	0.0001	0.117	±	0.003	110.9	±	0.8	112.3	±	2.2	142.0	±	22.0
LD-3-18	0.22	0.0481	±	0.0004	0.0185	±	0.0002	0.122	±	0.002	117.9	±	1.1	116.8	±	1.3	107.0	±	12.0

**IG-1 (n=44)**

IG-1-43	0.86	0.0482	±	0.0013	0.0144	±	0.0002	0.096	±	0.003	92.4	±	1.0	93.3	±	2.9	225.0	±	36.0
IG-1-8	0.84	0.0531	±	0.0047	0.0145	±	0.0003	0.108	±	0.010	92.7	±	2.1	103.9	±	9.5	550.0	±	110.0
IG-1-47	0.40	0.0482	±	0.0017	0.0145	±	0.0002	0.097	±	0.004	92.8	±	1.0	93.5	±	3.4	240.0	±	40.0
IG-1-11	0.45	0.0497	±	0.0040	0.0145	±	0.0003	0.100	±	0.008	93.0	±	1.7	95.7	±	7.6	427.0	±	69.0
IG-1-12	0.29	0.0490	±	0.0095	0.0146	±	0.0005	0.103	±	0.018	93.1	±	3.4	99.0	±	17.0	620.0	±	150.0
IG-1-44	0.37	0.0504	±	0.0030	0.0145	±	0.0002	0.099	±	0.006	93.1	±	1.4	95.7	±	5.7	360.0	±	100.0
IG-1-41	0.91	0.0492	±	0.0015	0.0146	±	0.0001	0.098	±	0.003	93.2	±	0.9	95.0	±	2.6	224.0	±	33.0
IG-1-31	0.29	0.0485	±	0.0017	0.0146	±	0.0001	0.099	±	0.003	93.2	±	0.9	96.2	±	3.1	189.0	±	44.0
IG-1-17	0.45	0.0483	±	0.0020	0.0146	±	0.0002	0.098	±	0.004	93.3	±	1.4	94.8	±	3.8	259.0	±	41.0
IG-1-23	0.74	0.0534	±	0.0054	0.0146	±	0.0004	0.104	±	0.012	93.3	±	2.8	101.0	±	11.0	590.0	±	100.0
IG-1-50	0.61	0.0492	±	0.0015	0.0146	±	0.0002	0.099	±	0.003	93.3	±	1.0	96.1	±	3.1	265.0	±	41.0
IG-1-45	0.65	0.0496	±	0.0019	0.0146	±	0.0002	0.099	±	0.004	93.3	±	1.0	95.9	±	3.5	296.0	±	41.0

IG-1-49	0.35	0.0497	±	0.0019	0.0146	±	0.0002	0.100	±	0.004		93.5	±	1.0	96.6	±	3.5	286.0	±	40.0
IG-1-10	0.86	0.0492	±	0.0015	0.0146	±	0.0002	0.099	±	0.003		93.5	±	1.3	95.5	±	2.8	246.0	±	33.0
IG-1-18	0.68	0.0461	±	0.0018	0.0146	±	0.0002	0.095	±	0.004		93.5	±	1.2	92.4	±	3.6	214.0	±	42.0
IG-1-40	0.75	0.0473	±	0.0014	0.0146	±	0.0001	0.094	±	0.003		93.5	±	0.7	91.7	±	2.5	202.0	±	33.0
IG-1-39	0.76	0.0491	±	0.0017	0.0146	±	0.0002	0.099	±	0.003		93.6	±	1.0	95.9	±	3.2	268.0	±	35.0
IG-1-25	0.76	0.0490	±	0.0045	0.0146	±	0.0004	0.102	±	0.010		93.6	±	2.5	98.8	±	9.3	298.0	±	90.0
IG-1-37	1.16	0.0488	±	0.0015	0.0146	±	0.0001	0.098	±	0.003		93.6	±	0.9	94.9	±	3.0	234.0	±	36.0
IG-1-16	0.31	0.0528	±	0.0040	0.0146	±	0.0004	0.111	±	0.009	-3.0	93.7	±	2.7	107.3	±	8.1	497.0	±	74.0
IG-1-42	1.03	0.0477	±	0.0014	0.0146	±	0.0001	0.096	±	0.003		93.7	±	0.9	92.9	±	2.7	160.0	±	27.0
IG-1-19	0.82	0.0510	±	0.0026	0.0147	±	0.0002	0.104	±	0.005		93.9	±	1.3	99.9	±	4.9	352.0	±	68.0
IG-1-13	0.64	0.0504	±	0.0087	0.0147	±	0.0005	0.106	±	0.020		94.0	±	3.4	101.0	±	18.0	520.0	±	190.0
IG-1-24	0.81	0.0467	±	0.0038	0.0147	±	0.0003	0.094	±	0.007		94.0	±	1.6	90.6	±	6.9	296.0	±	67.0
IG-1-27	1.55	0.0502	±	0.0017	0.0147	±	0.0002	0.102	±	0.004		94.0	±	1.4	98.1	±	3.3	230.0	±	36.0
IG-1-22	0.56	0.0506	±	0.0021	0.0147	±	0.0003	0.104	±	0.005	0.0	94.1	±	1.9	100.3	±	4.3	309.0	±	37.0
IG-1-20	0.35	0.0501	±	0.0031	0.0147	±	0.0003	0.100	±	0.006		94.2	±	2.1	97.6	±	5.8	385.0	±	49.0
IG-1-33	0.73	0.0475	±	0.0021	0.0147	±	0.0002	0.095	±	0.004		94.2	±	1.2	92.6	±	4.0	304.0	±	49.0
IG-1-46	1.16	0.0504	±	0.0025	0.0147	±	0.0002	0.104	±	0.005	-0.1	94.3	±	1.2	100.2	±	4.6	377.0	±	56.0
IG-1-7	0.52	0.0498	±	0.0047	0.0148	±	0.0006	0.102	±	0.009		94.5	±	3.6	98.1	±	8.4	320.0	±	110.0
IG-1-9	0.65	0.0479	±	0.0021	0.0148	±	0.0003	0.099	±	0.005		94.5	±	1.9	95.4	±	4.2	206.0	±	82.0
IG-1-14	0.81	0.0533	±	0.0045	0.0148	±	0.0004	0.110	±	0.009	-0.6	94.5	±	2.3	105.2	±	7.8	421.0	±	76.0
IG-1-15	0.77	0.0504	±	0.0029	0.0148	±	0.0003	0.105	±	0.006	-0.6	94.5	±	1.9	102.0	±	5.0	238.0	±	66.0
IG-1-26	0.96	0.0512	±	0.0076	0.0148	±	0.0004	0.105	±	0.015		94.7	±	2.8	103.0	±	13.0	336.0	±	96.0
IG-1-35	0.59	0.0510	±	0.0032	0.0148	±	0.0003	0.107	±	0.007	-2.5	94.9	±	1.6	104.8	±	5.9	325.0	±	69.0
IG-1-2	0.90	0.0497	±	0.0025	0.0149	±	0.0002	0.105	±	0.005	0.0	95.0	±	1.2	101.0	±	4.8	232.0	±	51.0
IG-1-5	0.91	0.0486	±	0.0048	0.0148	±	0.0004	0.101	±	0.009		95.0	±	2.3	97.6	±	8.1	177.0	±	98.0

IG-1-30	0.45	0.0498	±	0.0040	0.0149	±	0.0003	0.108	±	0.008	-0.5	95.5	±	2.0	105.0	±	7.0	340.0	±	100.0
IG-1-28	0.58	0.0486	±	0.0022	0.0161	±	0.0002	0.109	±	0.005		103.2	±	1.2	105.0	±	4.8	231.0	±	48.0
IG-1-3	0.70	0.0491	±	0.0013	0.0162	±	0.0001	0.109	±	0.003		103.3	±	0.9	105.2	±	2.6	222.0	±	30.0
IG-1-29	0.94	0.0487	±	0.0018	0.0162	±	0.0002	0.109	±	0.004		103.4	±	1.1	105.3	±	3.2	227.0	±	39.0
IG-1-32	1.59	0.0496	±	0.0016	0.0162	±	0.0002	0.111	±	0.004		103.4	±	1.1	106.3	±	3.5	244.0	±	38.0
IG-1-36	0.86	0.0496	±	0.0025	0.0162	±	0.0002	0.112	±	0.006		103.6	±	1.2	107.6	±	5.1	321.0	±	51.0
IG-1-1	0.76	0.0496	±	0.0020	0.0163	±	0.0002	0.111	±	0.004		104.0	±	1.3	106.5	±	4.0	285.0	±	30.0
<hr/>																				
<i>UD-1 (n=75)</i>																				
UD-1-41	0.40	0.0511	±	0.0029	0.0143	±	0.0003	0.101	±	0.007		91.5	±	1.9	98.0	±	6.0	375.0	±	85.0
UD-1-59	1.02	0.0482	±	0.0020	0.0145	±	0.0002	0.097	±	0.004		92.7	±	1.2	94.6	±	3.7	268.0	±	45.0
UD-1-73	0.71	0.0494	±	0.0047	0.0145	±	0.0003	0.098	±	0.009		92.7	±	2.0	94.1	±	8.6	590.0	±	110.0
UD-1-78	3.12	0.0498	±	0.0027	0.0145	±	0.0003	0.099	±	0.006		92.7	±	1.6	95.9	±	5.2	309.0	±	81.0
UD-1-69	0.29	0.0491	±	0.0023	0.0145	±	0.0002	0.098	±	0.005		92.8	±	1.2	95.2	±	4.3	255.0	±	54.0
UD-1-86	0.82	0.0499	±	0.0046	0.0145	±	0.0004	0.099	±	0.008		92.8	±	2.8	96.1	±	7.2	278.0	±	96.0
UD-1-88	1.63	0.0506	±	0.0029	0.0145	±	0.0002	0.100	±	0.006		92.8	±	1.5	96.6	±	5.1	392.0	±	56.0
UD-1-16	0.65	0.0515	±	0.0066	0.0145	±	0.0005	0.104	±	0.013		92.9	±	3.3	100.0	±	12.0	560.0	±	100.0
UD-1-45	0.95	0.0575	±	0.0053	0.0145	±	0.0004	0.116	±	0.011	-6.2	92.9	±	2.7	111.3	±	9.9	789.0	±	91.0
UD-1-60	0.77	0.0537	±	0.0033	0.0145	±	0.0003	0.108	±	0.007	-2.9	92.9	±	2.0	103.9	±	6.3	531.0	±	61.0
UD-1-65	0.78	0.0474	±	0.0051	0.0145	±	0.0006	0.099	±	0.010		92.9	±	3.7	95.7	±	9.5	346.0	±	90.0
UD-1-68	0.66	0.0506	±	0.0025	0.0145	±	0.0002	0.101	±	0.005		92.9	±	1.4	97.5	±	4.8	318.0	±	54.0
UD-1-85	0.30	0.0514	±	0.0014	0.0145	±	0.0003	0.104	±	0.004	-2.4	92.9	±	1.9	100.4	±	3.4	214.0	±	53.0
UD-1-26	2.01	0.0483	±	0.0013	0.0145	±	0.0001	0.096	±	0.003		92.9	±	0.8	93.3	±	2.4	222.0	±	33.0
UD-1-92	0.39	0.0486	±	0.0020	0.0145	±	0.0002	0.097	±	0.004		93.0	±	1.0	94.3	±	3.7	199.0	±	52.0
UD-1-31	0.32	0.0529	±	0.0022	0.0145	±	0.0003	0.107	±	0.005	-4.6	93.0	±	1.6	103.1	±	4.2	364.0	±	58.0
UD-1-32	1.07	0.0590	±	0.0061	0.0145	±	0.0004	0.116	±	0.012	-4.9	93.0	±	2.4	111.0	±	11.0	650.0	±	100.0

UD-1-39	0.28	0.0460	±	0.0020	0.0145	±	0.0002	0.092	±	0.004	93.0	±	1.0	89.9	±	3.8	183.0	±	34.0
UD-1-42	1.65	0.0491	±	0.0052	0.0145	±	0.0004	0.099	±	0.011	93.0	±	2.2	95.3	±	9.8	290.0	±	120.0
UD-1-46	0.30	0.0511	±	0.0023	0.0145	±	0.0003	0.102	±	0.005	93.0	±	1.7	98.3	±	4.3	360.0	±	56.0
UD-1-62	1.67	0.0494	±	0.0046	0.0145	±	0.0002	0.099	±	0.009	93.0	±	1.4	95.3	±	8.0	376.0	±	69.0
UD-1-66	0.53	0.0491	±	0.0036	0.0145	±	0.0003	0.099	±	0.006	93.0	±	1.7	95.7	±	5.9	423.0	±	80.0
UD-1-24	0.70	0.0465	±	0.0032	0.0146	±	0.0003	0.092	±	0.008	93.1	±	2.2	89.3	±	7.3	156.0	±	27.0
UD-1-28	0.43	0.0467	±	0.0021	0.0145	±	0.0002	0.095	±	0.005	93.1	±	1.4	91.4	±	4.2	291.0	±	47.0
UD-1-30	0.37	0.0482	±	0.0022	0.0145	±	0.0002	0.096	±	0.004	93.1	±	1.2	92.5	±	3.8	216.0	±	43.0
UD-1-67	0.92	0.0502	±	0.0038	0.0146	±	0.0003	0.099	±	0.008	93.1	±	1.7	94.5	±	7.7	493.0	±	66.0
UD-1-71	0.25	0.0489	±	0.0013	0.0146	±	0.0001	0.099	±	0.003	93.1	±	0.9	95.5	±	2.6	192.0	±	36.0
UD-1-7	0.28	0.0489	±	0.0016	0.0146	±	0.0001	0.099	±	0.003	93.2	±	0.7	95.8	±	3.0	227.0	±	42.0
UD-1-70	0.27	0.0485	±	0.0008	0.0146	±	0.0002	0.098	±	0.002	93.2	±	1.0	94.8	±	1.7	163.0	±	19.0
UD-1-8	0.64	0.0489	±	0.0024	0.0146	±	0.0002	0.098	±	0.005	93.2	±	0.9	94.7	±	4.5	335.0	±	57.0
UD-1-25	0.72	0.0489	±	0.0024	0.0146	±	0.0002	0.098	±	0.005	93.2	±	1.4	94.9	±	4.5	359.0	±	60.0
UD-1-27	0.54	0.0489	±	0.0031	0.0146	±	0.0003	0.097	±	0.006	93.2	±	2.1	94.0	±	5.4	339.0	±	81.0
UD-1-56	0.37	0.0483	±	0.0013	0.0146	±	0.0005	0.097	±	0.004	93.2	±	3.1	93.5	±	3.6	173.0	±	23.0
UD-1-83	0.41	0.0490	±	0.0016	0.0146	±	0.0002	0.099	±	0.003	93.2	±	1.1	95.5	±	3.1	222.0	±	34.0
UD-1-81	0.30	0.0482	±	0.0014	0.0146	±	0.0001	0.098	±	0.003	93.3	±	0.9	94.4	±	2.6	192.0	±	31.0
UD-1-38	0.77	0.0521	±	0.0066	0.0146	±	0.0004	0.105	±	0.013	93.3	±	2.6	101.0	±	12.0	390.0	±	100.0
UD-1-76	0.39	0.0504	±	0.0030	0.0146	±	0.0003	0.102	±	0.006	93.3	±	2.1	98.3	±	5.3	267.0	±	52.0
UD-1-3	0.78	0.0503	±	0.0054	0.0146	±	0.0004	0.098	±	0.009	93.4	±	2.7	94.5	±	8.7	407.0	±	86.0
UD-1-19	0.39	0.0493	±	0.0050	0.0146	±	0.0003	0.099	±	0.011	93.4	±	1.8	96.0	±	9.9	281.0	±	97.0
UD-1-34	0.89	0.0453	±	0.0086	0.0146	±	0.0006	0.091	±	0.018	93.4	±	3.8	91.0	±	18.0	380.0	±	110.0
UD-1-54	0.37	0.0489	±	0.0038	0.0146	±	0.0004	0.098	±	0.007	93.4	±	2.3	94.4	±	6.6	307.0	±	78.0
UD-1-55	0.46	0.0479	±	0.0050	0.0146	±	0.0008	0.092	±	0.009	93.4	±	5.2	89.5	±	8.6	236.0	±	58.0

UD-1-63	1.00	0.0495	±	0.0030	0.0146	±	0.0003	0.099	±	0.006		93.4	±	2.1	95.6	±	5.6	311.0	±	56.0
UD-1-77	0.62	0.0495	±	0.0021	0.0146	±	0.0002	0.101	±	0.004		93.4	±	1.4	97.6	±	4.0	253.0	±	44.0
UD-1-1	0.37	0.0470	±	0.0014	0.0146	±	0.0001	0.096	±	0.003		93.5	±	0.7	92.6	±	2.7	128.0	±	35.0
UD-1-5	0.58	0.0492	±	0.0029	0.0146	±	0.0002	0.100	±	0.006		93.5	±	1.3	96.2	±	5.4	318.0	±	69.0
UD-1-53	0.35	0.0493	±	0.0026	0.0146	±	0.0004	0.099	±	0.005		93.5	±	2.5	95.6	±	5.0	205.0	±	52.0
UD-1-58	1.32	0.0472	±	0.0031	0.0146	±	0.0005	0.098	±	0.008		93.6	±	3.4	94.0	±	7.0	376.0	±	61.0
UD-1-64	0.35	0.0483	±	0.0013	0.0146	±	0.0003	0.097	±	0.003		93.6	±	1.8	93.6	±	3.1	220.0	±	30.0
UD-1-35	0.71	0.0497	±	0.0066	0.0147	±	0.0004	0.101	±	0.013		94.1	±	2.4	97.0	±	12.0	320.0	±	120.0
UD-1-93	0.68	0.0516	±	0.0033	0.0147	±	0.0003	0.107	±	0.006	-1.9	94.2	±	1.6	102.7	±	5.1	320.0	±	95.0
UD-1-2	0.43	0.0483	±	0.0031	0.0147	±	0.0003	0.100	±	0.007		94.4	±	1.9	96.5	±	6.3	257.0	±	80.0
UD-1-10	1.04	0.0459	±	0.0055	0.0148	±	0.0004	0.094	±	0.011		94.4	±	2.7	90.0	±	10.0	380.0	±	130.0
UD-1-95	0.24	0.0496	±	0.0012	0.0148	±	0.0002	0.101	±	0.002	-0.1	94.4	±	1.4	97.8	±	1.9	163.0	±	29.0
UD-1-37	0.35	0.0517	±	0.0072	0.0148	±	0.0005	0.103	±	0.014		94.6	±	3.2	99.0	±	13.0	450.0	±	170.0
UD-1-21	0.36	0.0497	±	0.0049	0.0148	±	0.0003	0.101	±	0.009		94.8	±	2.0	97.7	±	8.5	267.0	±	62.0
UD-1-91	0.25	0.0479	±	0.0022	0.0148	±	0.0003	0.098	±	0.004		94.8	±	1.6	94.8	±	4.0	107.0	±	41.0
UD-1-51	0.26	0.0470	±	0.0018	0.0148	±	0.0002	0.097	±	0.004		94.9	±	1.3	94.2	±	4.0	213.0	±	75.0
UD-1-20	0.30	0.0468	±	0.0072	0.0149	±	0.0003	0.095	±	0.014		95.1	±	2.1	92.0	±	13.0	310.0	±	130.0
UD-1-80	1.87	0.0455	±	0.0019	0.0150	±	0.0003	0.095	±	0.004		95.8	±	1.8	91.8	±	3.6	150.0	±	250.0
UD-1-49	0.53	0.0490	±	0.0045	0.0152	±	0.0004	0.103	±	0.009		97.2	±	2.3	99.9	±	8.1	575.0	±	98.0
UD-1-52	0.28	0.0477	±	0.0009	0.0154	±	0.0002	0.101	±	0.002		98.7	±	1.3	97.9	±	2.2	104.0	±	23.0
UD-1-14	0.24	0.0511	±	0.0027	0.0157	±	0.0002	0.111	±	0.006		100.4	±	1.4	106.2	±	5.6	447.0	±	54.0
UD-1-74	0.45	0.0485	±	0.0038	0.0161	±	0.0003	0.105	±	0.009		102.8	±	1.8	101.4	±	8.1	279.0	±	72.0
UD-1-44	0.28	0.0489	±	0.0019	0.0162	±	0.0002	0.109	±	0.005		103.6	±	1.1	105.7	±	4.5	230.0	±	68.0
UD-1-9	0.24	0.0494	±	0.0011	0.0162	±	0.0001	0.111	±	0.003		103.7	±	0.7	106.8	±	2.6	160.0	±	26.0
UD-1-13	0.38	0.0473	±	0.0023	0.0162	±	0.0003	0.107	±	0.005		103.8	±	1.7	102.7	±	4.8	154.0	±	61.0



UD-1-15	0.24	0.0526	±	0.0033	0.0162	±	0.0002	0.118	±	0.008	-0.7	103.8	±	1.1	112.9	±	7.3	413.0	±	89.0
UD-1-43	0.91	0.0503	±	0.0035	0.0163	±	0.0003	0.112	±	0.008		104.1	±	1.9	106.9	±	7.0	410.0	±	68.0
UD-1-50	0.15	0.0482	±	0.0010	0.0163	±	0.0003	0.108	±	0.003		104.2	±	1.8	104.4	±	2.9	154.0	±	30.0
UD-1-94	1.37	0.0620	±	0.0120	0.0163	±	0.0007	0.147	±	0.029	-2.1	104.3	±	4.5	137.0	±	26.0	870.0	±	180.0
UD-1-23	0.57	0.0495	±	0.0021	0.0164	±	0.0002	0.112	±	0.005		104.7	±	1.4	107.2	±	4.5	285.0	±	43.0
UD-1-40	0.37	0.0503	±	0.0012	0.0164	±	0.0001	0.113	±	0.003	-1.0	104.7	±	0.8	108.9	±	2.4	262.0	±	28.0
UD-1-84	0.40	0.0494	±	0.0016	0.0164	±	0.0004	0.112	±	0.005		105.0	±	2.8	108.0	±	4.5	204.0	±	46.0
UD-1-48	1.25	0.0482	±	0.0008	0.0166	±	0.0001	0.110	±	0.002		106.2	±	0.7	105.6	±	1.9	150.0	±	21.0
UD-1-11	1.44	0.0760	±	0.0110	0.0213	±	0.0013	0.271	±	0.092	-20.6	136.1	±	7.9	221.0	±	49.0	950.0	±	180.0
<b>UD-2 (n=68)</b>																				
UD-2-1	0.65	0.0499	±	0.0029	0.0138	±	0.0003	0.095	±	0.006		88.5	±	1.7	92.5	±	5.7	316.0	±	68.0
UD-2-33	0.45	0.0503	±	0.0026	0.0139	±	0.0003	0.097	±	0.005		89.2	±	1.6	94.3	±	4.4	184.0	±	75.0
UD-2-71	0.46	0.0483	±	0.0015	0.0142	±	0.0001	0.094	±	0.003		90.7	±	0.8	91.3	±	2.8	195.0	±	24.0
UD-2-29	0.66	0.0485	±	0.0022	0.0143	±	0.0003	0.096	±	0.005		91.3	±	2.1	92.8	±	4.5	271.0	±	53.0
UD-2-59	0.38	0.0491	±	0.0016	0.0143	±	0.0002	0.096	±	0.003		91.3	±	1.0	93.1	±	2.9	143.0	±	34.0
UD-2-68	0.63	0.0486	±	0.0011	0.0143	±	0.0001	0.095	±	0.002		91.5	±	0.5	92.2	±	1.9	212.0	±	26.0
UD-2-17	0.42	0.0491	±	0.0017	0.0143	±	0.0001	0.096	±	0.004		91.6	±	0.9	93.9	±	3.2	232.0	±	32.0
UD-2-12	0.46	0.0486	±	0.0014	0.0143	±	0.0001	0.096	±	0.003		91.6	±	0.9	93.1	±	2.4	210.0	±	31.0
UD-2-15	0.42	0.0501	±	0.0027	0.0143	±	0.0003	0.101	±	0.006		91.7	±	2.1	97.1	±	5.5	256.0	±	55.0
UD-2-20	0.38	0.0492	±	0.0026	0.0144	±	0.0002	0.099	±	0.005		91.9	±	1.4	96.1	±	4.9	391.0	±	56.0
UD-2-5	0.36	0.0489	±	0.0012	0.0144	±	0.0002	0.097	±	0.002		92.0	±	1.0	94.1	±	2.2	172.0	±	26.0
UD-2-66	0.45	0.0485	±	0.0014	0.0144	±	0.0001	0.096	±	0.003		92.1	±	0.8	93.3	±	2.6	230.0	±	31.0
UD-2-69	0.56	0.0475	±	0.0012	0.0144	±	0.0001	0.094	±	0.002		92.1	±	0.6	91.3	±	2.3	213.0	±	32.0
UD-2-10	0.41	0.0478	±	0.0019	0.0144	±	0.0002	0.095	±	0.004		92.1	±	1.0	91.5	±	3.7	265.0	±	40.0
UD-2-57	0.25	0.0542	±	0.0043	0.0144	±	0.0003	0.111	±	0.009	-4.3	92.1	±	2.0	106.7	±	8.6	437.0	±	93.0

UD-2-13	0.51	0.0489	±	0.0014	0.0144	±	0.0001	0.098	±	0.003		92.2	±	0.9	94.6	±	2.6	244.0	±	37.0
UD-2-19	0.38	0.0489	±	0.0023	0.0144	±	0.0002	0.097	±	0.004		92.2	±	1.1	94.1	±	3.9	293.0	±	46.0
UD-2-4	0.42	0.0495	±	0.0022	0.0145	±	0.0003	0.096	±	0.004		92.5	±	1.8	93.1	±	3.8	228.0	±	52.0
UD-2-37	0.54	0.0522	±	0.0019	0.0145	±	0.0002	0.105	±	0.004	-4.2	92.5	±	1.3	101.6	±	3.9	328.0	±	48.0
UD-2-44	0.40	0.0472	±	0.0020	0.0145	±	0.0002	0.093	±	0.004		92.6	±	1.0	90.3	±	3.6	214.0	±	51.0
UD-2-26	0.47	0.0481	±	0.0013	0.0145	±	0.0002	0.096	±	0.003		92.6	±	1.0	93.1	±	2.7	167.0	±	28.0
UD-2-64	0.47	0.0472	±	0.0015	0.0145	±	0.0001	0.093	±	0.003		92.7	±	0.9	90.6	±	2.7	152.0	±	37.0
UD-2-11	0.82	0.0489	±	0.0012	0.0145	±	0.0002	0.097	±	0.003		92.7	±	1.2	94.4	±	2.4	183.0	±	31.0
UD-2-22	0.56	0.0480	±	0.0013	0.0145	±	0.0001	0.097	±	0.003		92.7	±	0.9	93.7	±	2.6	184.0	±	32.0
UD-2-40	0.61	0.0494	±	0.0023	0.0145	±	0.0002	0.099	±	0.005		92.7	±	1.0	95.3	±	4.3	251.0	±	45.0
UD-2-46	0.42	0.0480	±	0.0020	0.0145	±	0.0001	0.096	±	0.004		92.7	±	0.8	93.3	±	4.1	223.0	±	50.0
UD-2-67	0.53	0.0500	±	0.0018	0.0145	±	0.0001	0.100	±	0.004		92.8	±	0.9	97.0	±	3.4	237.0	±	42.0
UD-2-14	0.44	0.0488	±	0.0020	0.0145	±	0.0003	0.096	±	0.004		92.8	±	1.6	93.2	±	3.9	308.0	±	59.0
UD-2-16	0.63	0.0482	±	0.0018	0.0145	±	0.0001	0.097	±	0.004		92.9	±	0.9	93.6	±	3.4	246.0	±	47.0
UD-2-3	0.36	0.0481	±	0.0020	0.0145	±	0.0002	0.097	±	0.004		92.9	±	1.1	93.9	±	3.5	178.0	±	42.0
UD-2-8	0.44	0.0480	±	0.0044	0.0145	±	0.0004	0.098	±	0.009		92.9	±	2.5	94.3	±	7.9	300.0	±	58.0
UD-2-2	0.51	0.0478	±	0.0007	0.0145	±	0.0001	0.096	±	0.002		93.0	±	0.4	93.1	±	1.4	105.0	±	19.0
UD-2-6	0.38	0.0493	±	0.0017	0.0145	±	0.0002	0.099	±	0.004		93.0	±	1.5	95.6	±	3.7	247.0	±	40.0
UD-2-39	0.36	0.0486	±	0.0013	0.0145	±	0.0001	0.098	±	0.003		93.1	±	0.8	94.5	±	2.3	160.0	±	29.0
UD-2-36	0.56	0.0508	±	0.0027	0.0146	±	0.0002	0.102	±	0.006		93.1	±	1.4	98.5	±	5.7	244.0	±	51.0
UD-2-54	0.39	0.0497	±	0.0024	0.0146	±	0.0002	0.100	±	0.005		93.2	±	1.1	96.7	±	4.5	254.0	±	49.0
UD-2-70	0.41	0.0499	±	0.0020	0.0146	±	0.0002	0.099	±	0.004		93.2	±	1.1	95.6	±	3.4	250.0	±	43.0
UD-2-63	0.33	0.0485	±	0.0010	0.0146	±	0.0001	0.098	±	0.002		93.3	±	0.6	94.5	±	1.6	131.0	±	22.0
UD-2-31	0.44	0.0494	±	0.0018	0.0146	±	0.0003	0.099	±	0.004		93.3	±	1.7	95.8	±	3.9	204.0	±	38.0
UD-2-38	0.38	0.0484	±	0.0030	0.0146	±	0.0002	0.097	±	0.006		93.4	±	1.3	94.3	±	5.4	295.0	±	84.0

UD-2-65	0.41	0.0481	±	0.0010	0.0146	±	0.0001	0.098	±	0.002		93.4	±	0.6	94.5	±	1.9	156.0	±	28.0
UD-2-47	0.63	0.0485	±	0.0026	0.0146	±	0.0002	0.100	±	0.005		93.6	±	1.4	96.8	±	4.3	284.0	±	42.0
UD-2-73	0.41	0.0548	±	0.0035	0.0146	±	0.0002	0.112	±	0.007	-6.5	93.6	±	1.3	107.3	±	6.3	404.0	±	72.0
UD-2-21	0.36	0.0455	±	0.0020	0.0146	±	0.0002	0.093	±	0.004		93.7	±	1.4	90.0	±	4.0	145.0	±	58.0
UD-2-27	1.58	0.0483	±	0.0022	0.0146	±	0.0002	0.099	±	0.005		93.7	±	1.5	96.0	±	4.5	230.0	±	53.0
UD-2-9	0.48	0.0494	±	0.0022	0.0147	±	0.0003	0.099	±	0.004		93.8	±	2.0	95.7	±	3.9	251.0	±	45.0
UD-2-61	0.39	0.0480	±	0.0011	0.0147	±	0.0001	0.098	±	0.002		93.8	±	0.6	94.6	±	2.2	153.0	±	32.0
UD-2-24	0.41	0.0489	±	0.0013	0.0147	±	0.0003	0.100	±	0.003		93.9	±	1.8	97.1	±	2.9	205.0	±	35.0
UD-2-51	0.37	0.0491	±	0.0031	0.0147	±	0.0002	0.099	±	0.007		94.0	±	1.1	96.1	±	6.0	248.0	±	69.0
UD-2-53	0.51	0.0492	±	0.0034	0.0147	±	0.0003	0.100	±	0.007		94.0	±	1.8	96.7	±	6.3	235.0	±	64.0
UD-2-56	0.42	0.0491	±	0.0021	0.0147	±	0.0001	0.100	±	0.004		94.0	±	0.6	96.5	±	3.6	206.0	±	48.0
UD-2-62	0.38	0.0495	±	0.0017	0.0147	±	0.0001	0.100	±	0.004		94.1	±	0.8	96.8	±	3.2	204.0	±	44.0
UD-2-50	0.45	0.0477	±	0.0026	0.0147	±	0.0003	0.097	±	0.005		94.2	±	2.0	93.6	±	4.2	90.0	±	25.0
UD-2-45	0.42	0.0464	±	0.0020	0.0147	±	0.0001	0.094	±	0.004		94.2	±	0.6	91.5	±	3.9	203.0	±	61.0
UD-2-7	2.28	0.0482	±	0.0017	0.0147	±	0.0002	0.098	±	0.004		94.3	±	1.5	94.5	±	3.8	154.0	±	33.0
UD-2-30	0.40	0.0488	±	0.0026	0.0147	±	0.0003	0.098	±	0.005		94.3	±	1.6	95.1	±	4.3	194.0	±	63.0
UD-2-49	0.54	0.0503	±	0.0033	0.0148	±	0.0002	0.104	±	0.007		94.4	±	1.4	99.8	±	6.8	296.0	±	54.0
UD-2-55	0.36	0.0586	±	0.0028	0.0148	±	0.0002	0.119	±	0.006	-14.2	94.5	±	1.1	114.0	±	5.0	537.0	±	70.0
UD-2-32	0.39	0.0492	±	0.0023	0.0148	±	0.0002	0.101	±	0.005		95.0	±	1.4	97.7	±	4.4	128.0	±	58.0
UD-2-28	0.29	0.0492	±	0.0016	0.0149	±	0.0004	0.102	±	0.004		95.4	±	2.5	98.4	±	3.8	164.0	±	40.0
UD-2-43	0.37	0.0536	±	0.0026	0.0149	±	0.0003	0.112	±	0.006	-4.5	95.4	±	1.8	107.3	±	5.8	403.0	±	88.0
UD-2-42	0.23	0.0486	±	0.0016	0.0150	±	0.0001	0.100	±	0.003		96.0	±	0.7	96.5	±	3.1	154.0	±	21.0
UD-2-25	0.39	0.0620	±	0.0063	0.0151	±	0.0003	0.131	±	0.013	-15.3	96.3	±	2.0	125.0	±	12.0	730.0	±	120.0
UD-2-60	0.38	0.0484	±	0.0022	0.0151	±	0.0003	0.100	±	0.004		96.3	±	1.6	96.9	±	3.8	162.0	±	38.0
UD-2-23	0.31	0.0579	±	0.0017	0.0151	±	0.0002	0.119	±	0.005	-12.9	96.4	±	1.1	114.4	±	4.5	515.0	±	41.0

UD-2-52	0.57	0.0543	±	0.0048	0.0151	±	0.0003	0.112	±	0.009	-1.6	96.4	±	1.6	108.1	±	8.6	335.0	±	75.0
UD-2-58	0.45	0.0505	±	0.0007	0.0151	±	0.0003	0.104	±	0.003	0.0	96.5	±	1.9	100.7	±	2.3	208.0	±	13.0
UD-2-48	0.30	0.0491	±	0.0008	0.0151	±	0.0002	0.103	±	0.002	-0.1	96.6	±	1.2	99.4	±	1.5	162.0	±	29.0
UD-2-41	0.42	0.0532	±	0.0043	0.0154	±	0.0004	0.112	±	0.009		98.2	±	2.5	107.6	±	8.0	340.0	±	110.0
UD-2-35	0.35	0.0488	±	0.0014	0.0156	±	0.0002	0.106	±	0.003		99.8	±	1.5	101.8	±	2.7	128.0	±	24.0
UD-2-18	0.22	0.0515	±	0.0025	0.0158	±	0.0003	0.113	±	0.007		100.9	±	2.1	108.2	±	6.2	262.0	±	53.0
UD-2-74	0.41	0.1016	±	0.0073	0.0171	±	0.0002	0.238	±	0.016	-82.5	109.5	±	1.2	214.0	±	13.0	1490.0	±	140.0
UD-2-34	0.66	0.1260	±	0.0100	0.0178	±	0.0004	0.312	±	0.030	-119.7	113.5	±	2.6	276.0	±	24.0	1790.0	±	190.0
UD-2-72	0.73	0.2871	±	0.0078	0.0213	±	0.0004	0.850	±	0.035	-340.2	135.8	±	2.2	619.0	±	19.0	3393.0	±	41.0

\*Degree of discordance(%): negative numbers and blanks show normal discordant and concordant within 2σ of the analytical error, respectively.

Table 2. Detrital zircon U–Pb age distribution.

<b>Samples</b>	<b>Total</b>	<b>Valid*</b>	<b>Precambrian</b>	<b>Paleozoic</b>	<b>Triassic</b>	<b>Jurassic</b>	<b>Cretaceous</b>
<b>U. Dadaepo Fm. (UD-2)</b>	74	68	-	-	-	-	100%
<b>U. Dadaepo Fm. (UD-1)</b>	95	94	17%	-	2%	1%	80%
<b>acidic ignimbrite (IG-1)</b>	50	50	-	4%	4%	4%	88%
<b>L. Dadaepo Fm. (LD-3)</b>	93	89	26%	34%	1%	6%	34%
<b>L. Dadaepo Fm. (LD-2)</b>	80	79	33%	3%	4%	11%	49%
<b>L. Dadaepo Fm. (LD-1)</b>	40	36	6%	-	8%	6%	81%

\*Removal of trip data and discordance ( $\geq 10$  %)

## 부록

Appendix 1. The lengths of long axes of the Cretaceous zircons on mount

	LD-1	LD-2	LD-3	IG-1	UD-1	UD-2
1	167.847	242.625	254.705	78.899	142.946	117.108
2	67.885	167.69	120.21	81.374	89.918	86.216
3	86.95	87.837	95.024	106.799	71.931	173.674
4	130.195	92.246	99.985	172.739	39.952	115.371
5	105.631	92.754	97.32	74.641	231.257	96.231
6	105.125	216.966	141.416	145.769	114.577	141.309
7	216.984	171.843	148.864	83.998	75.773	55.901
8	248.526	132.562	125.889	163.176	70.648	120.289
9	67.518	117.292	93.712	55.797	190.153	105.992
10	94.393	106.378	108.633	71.043	79.713	168.122
11	128.764	168.053	137.657	181.69	107.963	135.964
12	125.587	119.837	151.13	81.605	141.626	124.744
13	83.201	316.789	95.472	100.853	108.908	71.894
14	224.095	93.507	155.644	95.077	79.14	220.148
15	136.418	317.388	161.197	57.422	150.484	170.963
16	137.407	285.526	107.099	66.482	133.264	124.167
17	151.096	172.202	129.95	54.713	209.516	180.446
18	148.369	166.883	133.883	77.153	296.114	105.265
19	118.647	136.938	169.014	81.147	137.187	154.488
20	169.362	69.714	151.756	103.597	114.434	185.48
21	116.958	231.327	161.334	71.781	80.839	154.368
22	242.298	196.392	92.091	51.965	168.002	151.566
23	165.347	130.617	65.189	68.775	67.169	243.094
24	99.364	203.476	163.229	51.894	75.847	179.701
25	134.305	168.765	88.693	68.368	69.715	95.924
26	64.634	76.797	66.436	97.198	94.367	117.38
27	200.177	286.402	101.392	133.119	153.935	141.807
28	103.372	200.843	66.846	60.123	153.603	173.25
29	117.602	111.9	179.223	82.014	260.736	166.357
30		165.227	64.175	91.87	60.784	215.911
31		135.901		69.558	93.198	91.413
32		203.279		66.998	71.666	139.844
33		240.127		61.787	80.178	264.07
34		154.793		125.403	152.16	204.445
35		119.621		72.82	196.304	178.682
36		214.332		176.711	134.818	102.132
37		184.269		106.746	76.701	125.649
38		126.329		86.027	99.323	213.162
39		63.018		212.548	53.198	108.903
40				120.336	171.333	226.763
41				74.753	127.472	153.521
42				67.046	184.58	83.33
43				55.612	136.68	97.707



44				101.354	100.355	98.126
45					125.885	128.869
46					53.635	179.459
47					83.463	66.816
48					97.648	152.437
49					135.587	129.829
50					107.071	137.626
51					137.272	152.717
52					113.431	155.297
53					56.176	67.386
54					70.936	162.476
55					153.809	198.067
56					153.372	156.663
57					120.534	169.874
58					289.824	131.101
59					166.147	152.02
60					107.887	80.947
61					131.598	136.456
62					83.451	178.476
63					182.614	126.427
64					107.616	102.765
65					144.602	87.185
66					167.728	102.183
67					66.481	88.766
68					221.479	44.45
69					83.73	
70					93.376	
71					48.073	
72					122.621	
73					60.955	
74					98.467	
75					61.112	
Mean	136.485	166.37	124.239	93.381	121.267	139.252
SD	50.918	66.751	41.942	38.919	54.858	46.238
Min	64.634	63.018	64.175	51.894	39.952	44.45
Max	248.526	317.388	254.705	212.548	296.114	264.07