

TSPE19230-032-12

우주 물질의 극한환경 실험을 통한 지구
내부의 이해

Understanding of Earth's interior through
experimentally designing extreme conditions of
extraterrestrial materials



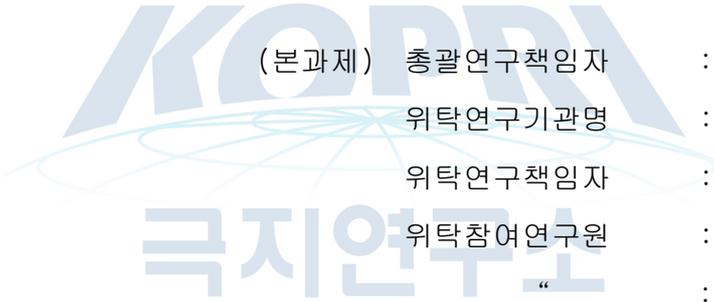
연세대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 남극종단산맥 형성과정 연구 및 남극지질·운석정보시스템 구축 ” 과제의 위탁연구 “ 우주 물질의 극한환경 실험을 통한 지구 내부의 이해 ” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020. 01. 31



(본과제) 총괄연구책임자	: 이 미 정
위탁연구기관명	: 연세대학교
위탁연구책임자	: 이 용 재
위탁참여연구원	: 공 미 혜
“	: 황 희 정
“	: 김 태 현
“	: 방 윤 아
“	: 최 진 혁
“	: 권 소 연
“	: 윤 서 희
“	: 강 교 선
“	: 이 정 민
“	: 심 희 현
“	: 정 호 용

보고서 초록

위탁연구과제명	우주 물질의 극한 환경 실험을 통한 지구 내부의 이해				
위탁연구책임자	이 용 재	해당단계 참여연구원수	12	해당단계 연구비	40,000 (천원)
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교 지구시스템과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	21
<p>- 본 연구개발은 첨단 분석 기술을 적용한 충격변성 (미)분화운석의 결정학적 연구 및 (미)분화 운석 구성광물을 대상으로 한 극한 환경 실험 수행을 통해 최종적으로 행성의 생성 및 진화 과정을 규명하고자 함.</p> <p>- 연구 내용 및 결과는 다음과 같음.</p> <p>가. 충격변성 (미)분화 운석의 구성 광물 연구 : TIL08001 운석에서 anhydrous phase B로 추정되는 광물 최초로 발견.</p> <p>나. 4세대 가속기 선원과 레이저 충격을 이용한 (미)분화 운석 구성 물질에 대한 동적 극한 환경 실험 : 포항에 위치한 PAL-XFEL 4세대 가속기 시설에서 광학 레이저와 짧은 pulse duration을 가진 X-선을 이용한 합성 철 시료와 철질 운석 내의 철-니켈 합금 상에 대한 충격 압력 실험을 수행. 시료로 입사하는 광학 레이저와 X-선 지연 시간에 따른 X-선 회절 측정을 통하여 광학 레이저에 의해 발생하는 충격에 의해 짧은 시간 내에 일어나는 순수 철 시료 및 철 운석(Gibeon)에 포함된 kamacite와 taenite의 구조 변화를 관찰 및 분석.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	광물학, 운석, 동적극한환경, 가속기, 행성형성			
	영 어	Mineralogy, Meteorites, Dynamic extreme conditions, Synchrotron, Planetary formation			

요 약 문

I. 제 목

: 우주 물질의 극한환경 실험을 통한 지구 내부의 이해

II. 연구개발의 목적

: 첨단 분석 기술을 적용한 충격변성 (미)분화운석의 광물학적 연구 및 (미)분화 운석 구성광물을 대상으로 한 극한 환경 실험 수행을 통해 최종적으로 행성의 생성 및 진화 과정을 규명하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 결과

: 다양한 운석에 대해 광물학적 분석과 첨단 가속기 시설을 활용한 연구를 수행하였으며, 본 연구에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 운석 내 기존 지표상에서 발견되지 않은 고압 광물상(anhydrous phase B)의 증거 발견
- (2) PAL-XFEL에서의 충격 압력 실험을 통한 순수 합성 철과 철질 운석 (Gibeon)에 포함된 kamacite 와 taenite의 구조 변화 관찰.

IV. 연구개발결과의 활용계획

: 본 연구에서는 첨단 거대시설 활용과 극한 환경 모사 실험을 통하여 새로운 차원의 운석 연구를 수행하였으며, 이를 통해 아직 규명되지 않은 지질학적 현상들을 새롭게 밝힐 수 있는 극지 연구의 새로운 분야 및 모델을 제시하였다.

S U M M A R Y

(영 문 요약 문)

I. Title

: Understanding of Earth's interior through extreme conditions studies of extraterrestrial materials.

II. Purpose of R&D

: We propose to perform extreme conditions experiments on meteoritic minerals using 3rd and 4th generation synchrotron facilities to gain novel insights into the evolution of planets.

III. Contents and Results of R&D

: In this program, advanced synchrotron and XFEL facilities have been used to understand the process of planetary formation. The results of this research program are as follows. (1) Observing first experimental evidence of anhydrous phase B in the ordinary chondrite(TIL08001) that have not been found on Earth (2) The observation of shock-induced lattice dynamics in synthetic iron and natural iron-nickel alloy (Gibeon meteorite) through the laser shock compression experiment at PAL-XFEL.

IV. Application Plans of R&D Results

: Through this research program, we demonstrated a new model of meteorite research under extreme conditions using advanced analytical techniques at synchrotron and XFEL facilities. We expect that our findings are novel and would show a model in polar research to shed new insights into the geological and planetary understandings.

목 차

제 1 장 서론

- 1절 연구개발의 목적
- 2절 연구개발의 필요성
- 3절 연구개발의 최종 목표

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1절 해외 기술 개발 현황
- 2절 국내 기술 개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 1절 연구개발수행 방법
 - 가. 주사전자현미경분석
 - 나. 방사광 가속기 실험
- 2절 연구개발수행 결과
 - 가. 충격 변성 (미)분화 운석을 대상으로 한 문헌조사
 - 나. 충격변성 (미)분화 운석의 구성 광물 연구
 - 다. 4세대 가속기 선원과 레이저 충격을 이용한 (미)분화 운석 구성 물질에 대한 동적 극한 환경 실험
 - (1) 순수 철 (합성)에 대한 동적 극한 환경 실험
 - (2) 철 운석(Gibeon)에 포함된 kamacite와 taenite에 대한 동적 극한 환경 실험

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- 1절 연구개발목표 달성도
- 2절 연구결과의 대외 기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

본 문

제 1 장. 서론

1절. 연구개발의 목적

1. 첨단 분석기술을 적용한 충격변성 (미)분화운석의 결정학적 연구

- EM(Electron Microscopy)-SD(Synchrotron Diffraction)활용 국제 공동 연구를 통한 충격변성 (미)분화운석 내의 구성 광물 연구
- (미)분화운석 구성 광물의 결정학적-지화학적 특성 연구

2. (미)분화운석 구성광물을 대상으로 한 극한 환경 실험 수행

- 첨단 대형과학시설 (포항 3세대 방사광 가속기 및 4세대 가속기) 시설 활용 연구
- 운석 광물의 정적 고온-고압 하에서의 구조 변화 관찰
- 운석 광물의 동적 극한 환경 연구를 통한 행성 형성 및 운석 충돌 과정에 대한 모사 실험 수행
- 운석 시료와 실시간 극한 환경 실험의 분석이 접목된 새로운 융합 연구를 통한 행성의 생성 및 진화 과정 규명

2절. 연구 개발의 필요성

- 미분화운석은 지구형 행성 및 소행성의 기본적인 구성요소인 동시에 태양계 생성 초기 당시의 화학적 구성요소를 현재까지 보존하고 있어 과거로부터 현재까지의 행성의 진화 및 분화 과정을 이해하는데 중요한 대상 물질로서 고려되어 왔다. 선진국(미국, 일본 등)을 중심으로 남극 탐사 및 운석 연구가 기존에 활발하게 추진됐으나, 기존의 연구는 암석학/지화학적 연구에 치중되어 있어 운석을 구성하고 있는 마이크론 단위의 광물학적 접근에 대한 연구는 상대적으로 미비한 상태이다.

- 본 연구 개발은 본 연구실에서 최근 발전된 분석기술(결정학적 분석 및 분광학적 분석)을 적용하여 (미)분화 운석에 대한 광물학적 측면에서 접근을 하는 것을 목표로 하며 이를 통하여 미분화 운석 내에 존재할 수 있는 아직 확인되지 않은 새로운 광물에 대한 발견 및 이를 이용한 물성 연구를 기대해 볼 수 있다.

- 운석에 포함된 광물에 대하여 첨단 가속기 시설과 고온-고압 극한 환경에서의 실시간 분석기술을 접목은 그동안 국내 및 해외 연구팀에서도 많이 시도되지 않았던 연구 방법으로 이 연구를 통해 본 연구실에서는 운석 형성 당시의 물성 및 변화 과정을 알아보고자 함. 또한, 이를 통해 행성 형성과 진화 과정에 대한 새로운

정보를 제공하고자 한다.

3절. 연구개발의 최종목표

1. 최종목표의 설정 근거

- 본 연구실은 다양한 지구에 존재하는 광물 시료뿐 아니라 광물학적으로 분석이 덜 된 운석 시료에 대하여 결정학적-분광학적 측정을 위한 다양한 기기들이 연구실에 설치되어 활용되고 있다.

- 또한 본 연구실은 국내외 여러 곳의 첨단 가속기 시설 방문 연구를 전문적으로 활용하여 극한 환경 모사 실험에 관한 연구 결과를 포함한 다수의 해외 저널에 발표해 오고 있다.

2. 최종 목표

- 본 연구개발을 통해 의미 있는 (미)분화 운석 시료에 대해 첨단 가속기 시설의 이용 및 극한 환경 연구 방법을 적용하여 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 과학적 사실을 제공하는 것을 최종 목표로 한다. 또한 이를 통해 행성 형성 및 진화에 대한 새로운 이해를 제시할 수 있는 연구결과를 도출해내고 최종적으로 SCI급의 논문 게재를 목표로 한다.

극지연구소

제 2 장. 국내외 기술개발 현황

1절. 해외 기술 개발 현황

- 남극에서 발견되는 운석은 지구에 낙하하기 직전 조성의 보존성이 매우 우수한 편에 속하여 일부 국가에서는 1900년대 중반부터 많은 탐사를 통한 운석 수집 및 연구를 진행해왔다. 지난 수십 년간 전 세계 연구자들의 연구를 통해 다양한 운석에 대한 지구화학적 그리고 암석학적인 연구들이 많이 보고되어왔으나, 상대적으로 운석 시료에 대한 광물학적인 접근 및 극한 환경에서의 실험 진행은 매우 드물다.

- 최근 거대 과학시설인 가속기(3세대 방사광가속기 운영 및 4세대 광원 건설)를 필두로 하여 급속도로 발달한 X-선 측정 기술과 이를 이용한 극한 환경 모사가 가능한 기기들의 발달로 인하여 최근 해외 선진국(미국 및 일본)의 연구 그룹을 중심으로 운석 시료를 이용하여 행성의 형성 및 진화 과정을 밝히기 위한 연구들이 활발하게 이루어지는 중이다.

- 최근에 기존 지표상에 존재하는 광물들의 고온-고압 실험을 통하여 지구 내부에 존재할 것으로 추측된 고압 상들이 실제 운석 시료에서 발견되고 있으며 분야 상위 저널에 연구결과가 발표되고 있다.

● 최근 보고된 운석 내에서 실제 발견된 고압 상들에 관한 해외 그룹의 연구 사례
- 미분화운석에서 지구 맨틀에서 존재할 것이라고 예측되었던 광물상이 실제로 발견된 사례가 사이언스지에 발표됨 (Tschauner et al., 2014).

- 운석내 특정 광물상에 대한 가속기를 활용한 극한 환경 실험을 통해 화성에 물이 존재할 수 있다는 연구 사례가 네이처 커뮤니케이션스에 발표됨 (Adcock et al., 2017).

- 운석 내 새로운 광물상에 대한 연구 결과들이 아메리칸 미네랄로지스트에 여러 차례 보고됨 (Ma et al., 2017; Ma et al., 2012).

- 남극에서 발견되는 미분화운석은 행성 형성 초기의 물질로 구성된 것으로 잘 알려져, 행성의 진화 과정을 밝히기 위한 시료로서 가치가 있으나, 여전히 시료의 희귀성과 실험적 접근의 어려움으로 극한 환경과 가속기 시설 활용 연구의 접목사례는 전 세계적으로 매우 드문 상황이다.

2절. 국내 기술 개발 현황

- 남극 운석 탐사 및 남극에서 발견되는 운석의 지화학적/암석학적 분석은 국내에서는 극지 연구소를 중심으로 그간 활발히 진행되어 옴. 하지만 남극 운석에 대한

광물학적 접근 및 첨단 가속기 시설을 접목한 연구는 국내에서는 시도된 바가 없다.

- 최근 선진국을 중심으로 운석에 대한 광물학적 접근으로 상위 저널에 연구결과의 보고가 늘어나는 추세이므로 국내 역시 남극 운석탐사를 통하여 발견된 다양한 운석 시료들에 대한 전문적인 광물학적 접근이 요구되는 시점이다.

- 현재 연세대학교 지구시스템과학과 결정학 연구실(본 연구실)에는 운석 구성 광물의 결정학적-분광학적 분석을 위한 마이크로 X-선 회절 장치, 마이크로 라만, 마이크로 적외선 흡수 분광기 및 마이크로 X-선 형광 측정기기가 설치되어 있으며 지구에서 발견되는 다양한 광물 시료의 광물학적 분석에 활용 중이다.

- 연세대학교 결정학 연구실에서는 기존에 국내외의 첨단 가속기 시설 이용 연구를 전문적으로 수행하여 이를 통해 얻은 결과들에 대학교 지구과학분야 최상위저널 및 광물학분야 상위 저널에 다수의 연구 결과들을 발표하고 있다.

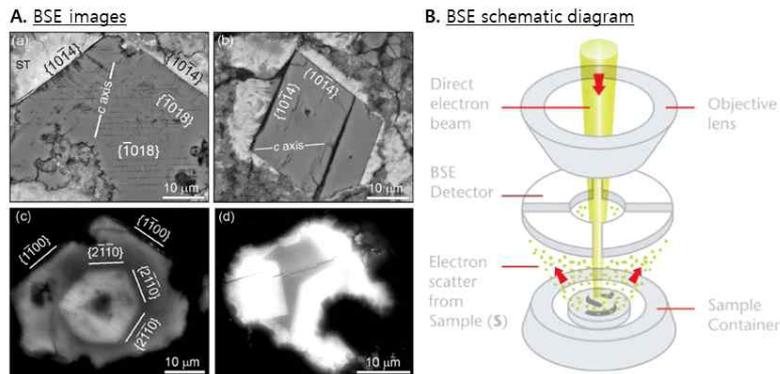
- 본 연구실에서는 연구설비 및 전문성을 기반으로 하여 의미있는 운석 시료에 대해 운석에 포함된 새로운 광물상 탐색 및 고온-고압 극한 환경과 실시간 분석기술 접목 연구를 통해 행성 형성 및 진화에 대한 이해를 높이고자 하며, 실험적으로 접근이 힘들었던 운석 충돌 모사 실험을 통하여 새로운 지질학적 연구 결과를 도출하고자 한다.

제 3 장. 연구개발수행 방법 및 결과

1절. 연구개발수행 방법

가. 주사전자현미경분석(Field-emission Scanning Electron Microscopy, FESEM)

- 주사전자현미경(SEM)을 이용한 후방산란전자(Backscattered electron, BSE) 이미징을 통해 충격을 받은 운석에서 서브마이크론(submicron) 크기의 고압 광물에 대한 이미지 및 화학 분석에 이용한다.



<주사전자현미경의 BSE 이미지와 모식도(Lee and Lindgren, 2014; Blomfield et al, 2014)>

나. 방사광 가속기 실험 (Synchrotron X-ray Diffraction)

- 운석은 마이크론 크기의 광물들로 구성되어있어 구성 광물의 동정과 새로운 광물상 발견을 위해서 고해상도 전자현미경 분석과 함께 방사광 X-선 회절법의 이용이 필수적이다.

- 3세대 방사광 가속기의 고휘도 ($>10^{15}$ photons/sec/mm²/mrad²/0.1% BW)-고집속 (<20 micron)-고에너지 (>20 KeV) 선원을 이용하여 다이아몬드 앤빌셀을 이용한 정적 고온고압 실험을 수행하고, 4세대 방사광 가속기의 펨토초 영역 시간 분해능을 이용하여 레이저 충격 하 동적 격자구조 변화 연구를 수행 가능하다.



<포항 3세대, 4세대 방사광 가속기 모습>

2절. 연구개발수행 결과

- 본 연구개발수행을 통하여 연세대학교 지구시스템과학과 결정학 연구실에서 수행한 연구는 다음과 같다.

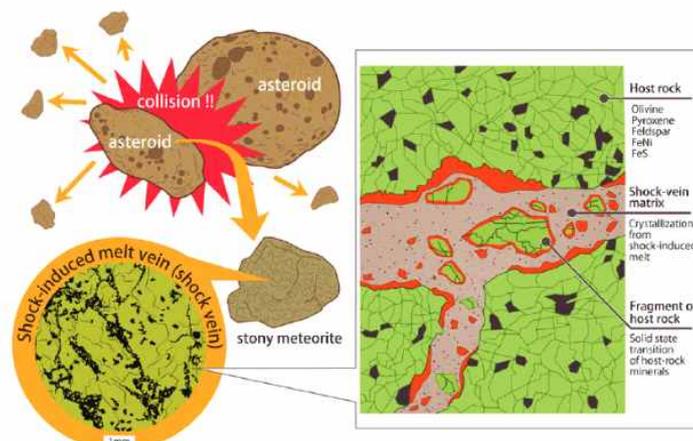
1. 충격 변성 (미)분화 운석을 대상으로 한 문헌조사
2. 충격 변성 (미)분화 운석의 구성 광물 연구
3. 4세대 가속기 선원과 레이저 충격을 이용한 (미)분화 운석 구성 물질에 대한 동적 극한 환경 실험

가. 충격 변성 (미)분화 운석을 대상으로 한 문헌조사

- 지구 표면에서 발견 되는 광물들은 온도-압력 조건에 따라 구조적, 그리고 물리-화학적 상전이를 겪으며, 더 나아가 지구 내부의 고온-고압 조건에서는 지표 환경에서 발견하기 힘든 고압 상으로 상전이를 겪게 된다.

- 특히 행성 형성 및 분화 진행 단계에서 겪게 되는 기존의 정적 고압 실험에서는 알려지지 않은 충격변성 과정에서의 새로운 고압 상의 형성과 물리-화학적 특성 변화에 대한 이해는 행성의 진화 과정에 대한 단서를 제공할 수 있는 실마리가 될 수 있으므로 (미)분화운석을 구성하는 광물들에 대한 연구는 전 행성적인 진화 모델을 이해하는데 필수적이다.

- 본 연구개발에서는 (미)분화 운석의 구성 광물을 통하여 충격변성 당시의 충격 압력, 지속시간, 충격 정도는 운석 내 고압 광물의 상변화 모사를 기반으로 추정하며 운석 내에 존재하는 광물의 온도-압력 상 안정도 연구를 통해 초기 태양계 진화 및 분화의 개선된 모델 수립 정보를 제공하고자 충격 변성 (미)분화 운석을 대상으로 문헌 조사를 수행하였다.



<운석 내 shock vein에서 고압 광물의 형성 메카니즘 (Tomioka and Miyahara, 2017)>

나. 충격변성 (미)분화 운석의 구성 광물 연구

- 본 연구개발에서는 Thiel Mountains (TIL08001)운석을 이용하였으며, TIL08001 운석은 2008년 남극 Bermel Escarpment에서 발견된 운석으로 극지연구소로부터 운석 시료를 제공 받아 분석을 진행하였다.

- TIL08001 운석은 보통 콘드라이트(Ordinary chondrites)에 속하며 풍화 단계는 W1에 속한다. 또한 이 운석의 충격 당시의 충격 단계는 S3에 해당하며 충격으로 생성된 vein의 너비는 약 3 mm 이하로 운석 전체에 분포된 특징을 보인다.

- 본 연구개발에서는 TIL08001 운석 내 구성 광물을 보다 정밀하게 연구하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 분석, X선 회절(X-Ray Diffraction, XRD) 분석, 적외선 분광(InfraRed spectroscopy, IR) 분석 수행하였다.



<Thiel Mountains (TIL08001) 운석 박편의 모습>

(1) 주사 전자 현미경 분석

- TIL08001 운석의 박편 시료에 대한 주사전자현미경 분석은 Caltech (California Institute of Technology)과 KOPRI (Korea Polar Research Institute), 연세대학교에서 수행하였다.

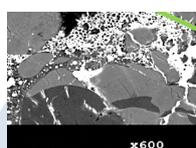


<실험에 이용한 주사전자현미경 이미지. (a) Caltech의 ZEISS 1550VP, (b) KOPRI의 JSM-7200F, (c) 연세대학교의 JSM-7001F>

- 주사전자현미경 분석을 통하여 TIL08001 운석 내 omphacite와 협재되어 존재하

는 anhydrous phase B와 troilite와 협재 되어 존재하는 anhydrous phase B를 발견하였다.

- 발견된 anhydrous phase B는 100% Mg end member가 아닌 Fe를 함유하는 형태로 에너지 분산형 분광(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) 분석을 이용하여 anhydrous phase B의 화학 조성을 분석해본 결과, $(Mg_{0.65}Fe_{0.24})_{14}Si_5O_{24}$ 의 화학 조성을 갖는 것을 확인하였다.



troilite

<TIL08001 운석 내의 Anhydrous phase B의 SEM 이미지>

(2) X-선 회절 분석 및 적외선 분광 분석

- TIL08001 운석을 구성하는 광물 상동정 및 SEM 분석에서 발견된 anhydrous phase B의 구조 분석을 위하여 미국 시카고에 위치한 Advanced Photon Source 3세대 방사광 가속기의 13-IDD 빔라인에서 X-선 회절 측정을 수행하였다.

- X-선 회절 측정에 이용된 에너지는 30 keV, 빔 크기는 $2 \mu m \times 10 \mu m$ 이고, 노출 시간은 5초로 한 개의 운석 박편 시료에서 grid scan을 하여 총 120개의 데이터를 획득하였다.

- 획득한 X선 회절 결과 중 TIL08001 운석에 존재하는 vein 내에서 명목상 무수광물(Nominally Anhydrous Mineral, NAM)인 anhydrous phase B를 발견하였다. 또한 얻어진 분말 회절 실험 데이터를 Rietveld refinement를 통하여 anhydrous phase B의 구조 분석을 수행하였다.



<TIL08001 운석의 X-선 회절 분석을 위한 미국 방사광 가속기(Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory) 13-IDD 빔라인의 셋업 모습>

- TIL08001 운석에 포함되어 있는 anhydrous phase B가 주변의 다른 광물과 적외선 분광 스펙트럼에서 어떠한 차이를 보이는지 비교하기 위해 포항 가속기 연구소의 3세대 방사광 가속기의 12D (적외선 분광학) 빔라인에서 분광 분석을 수행하였다. 그 결과 anhydrous phase B는 주변에 존재하는 감람석(olivine)과 구분되는 Si-O vibration을 갖는 스펙트럼을 획득하였다.

<미국 방사광 가속기(Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory) 13-IDD 빔라인에서 측정된 TIL08001 시료 내의 Anhydrous phase B의 X-선 회절 패턴>

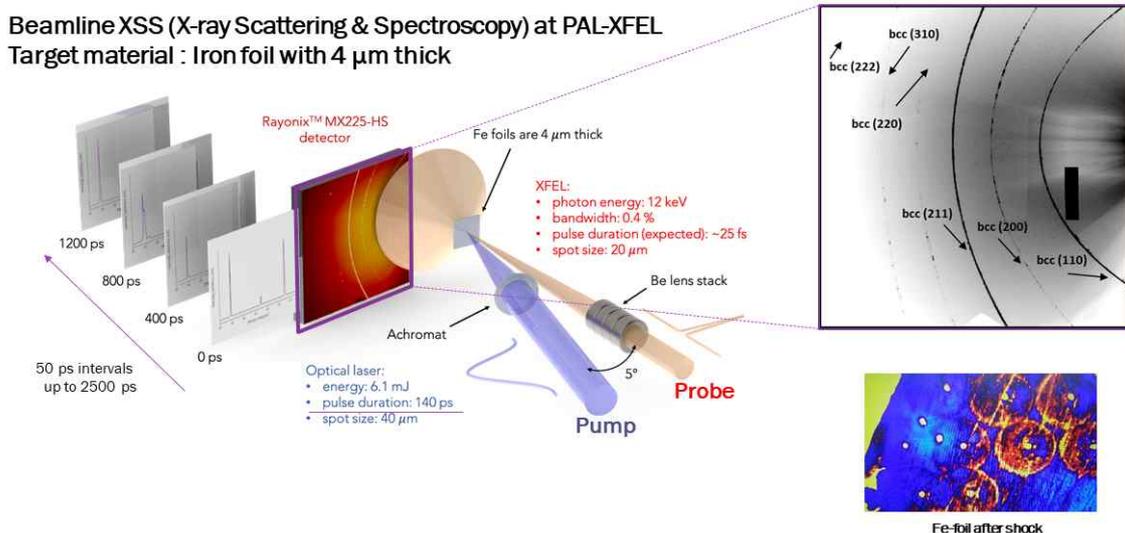
다. 4세대 가속기 선원과 레이저 충격을 이용한 (미)분화 운석 구성 물질에 대한 동적 극한 환경 실험

- 지구의 내부에 존재하는 핵은 가장 안정한 원소이자 우주에서 풍부하고 무거운 원소인 철로 이루어져 있으며 철에 대한 정적 및 동적 고온-고압 연구는 행성 및 지구의 동역학과 자기 특성을 이해함과 함께 철의 산업적 활용에 대한 중요한 기초 정보를 제공한다.

- 본 연구팀은 2017년 처음 가동되기 시작한 포항 4세대 가속기 선원(PAL-XFEL)의 X-선과 광학 레이저의 충격을 이용해 동적 고온-고압의 극한 환경하에서의 합성 철과 철질운석에 포함된 철-니켈 합금 광물에 대하여 원자 단위의 동역학적인 변화를 측정하는 실험을 수행하였다.

- PAL-XFEL에서 수행된 동적 극한 환경 실험(레이저 충격 실험)에 이용된 광학 레이저는 6.1 mJ의 에너지를 가지며, 140 ps의 pulse duration, 그리고 40 μm 의 레이저 사이즈를 가짐. 또한 X-선 회절 측정에 이용된 X-선 에너지는 12 keV, 빔 크기는 20 μm 이고 최대 25 fs의 짧은 pulse duration을 가지고 있다.

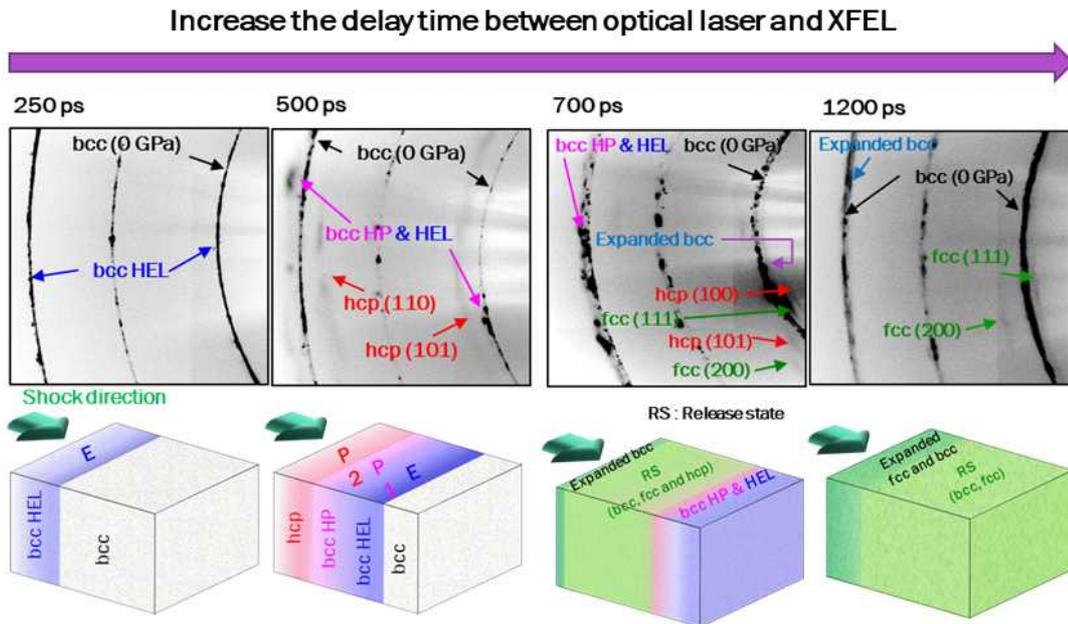
- PAL-XFEL에서 수행된 레이저 충격 실험은 먼저 광학 레이저를 이용하여 시료에 충격을 가한 후에 (pump) 광학 레이저가 시료로 조사된 후, 광학 레이저와 X-선 사이의 지연 시간을 가지고 X-선이 입사하게 되는 (probe) ‘pump-and-probe’ 방법으로 실험을 진행하였다.



<포항 4세대 가속기 레이저 충격 실험의 모식도>

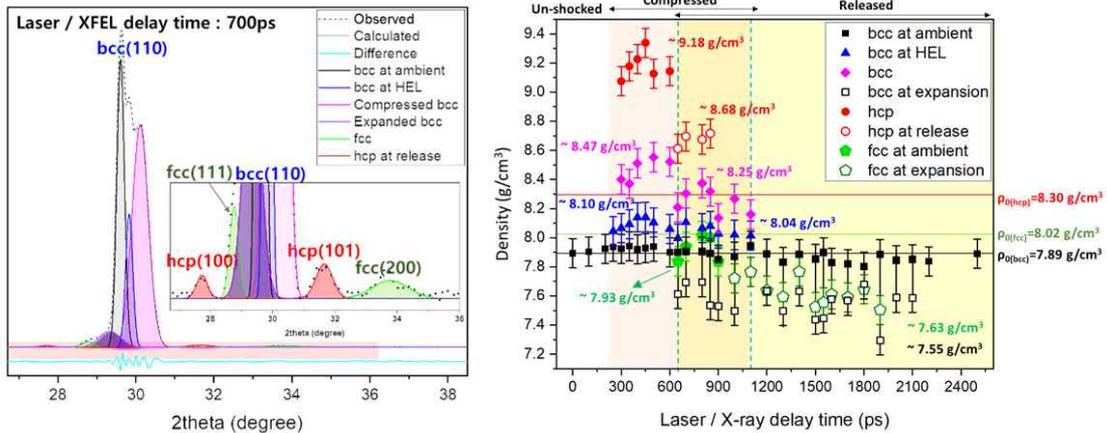
(1) 순수 철 (합성)에 대한 동적 극한 환경 실험

- 본 연구는 2019년 5월 포항 4세대 가속기 선원을 이용하여 4 μm 의 두께를 가진 철 포일에 대한 레이저 충격 실험을 수행하였다.



<순수 철 충격 실험에서의 광학 레이저/X-선의 지연 시간에 증가에 따른 X-선 회절 이미지 변화 및 충격의 전파 과정을 보여주는 모식도>

- X-선은 광학 레이저와 최소 0 ps에서 최대 2500 ps의 지연 시간을 가지고 시료에 입사 하였으며, 50 ps 간격으로 측정하였다.
- 획득한 X-선 회절 패턴에 대해서 각 충격의 전달 및 완화에 따른 철의 압축 및 팽창 상을 관찰하였으며 정확한 변화를 알기 위해 peak-profile fitting을 수행하여 각 상의 밀도를 계산함. 결과는 아래 그림과 같다.
- PAL-XFEL에서 수행된 순수 철의 충격 고압 실험 결과, 충격을 받는 단계에서 3-wave structure로, 그리고 충격이 완화되는 단계에서 2-wave structure phase로 완전히 분리 되는 것을 실시간 X-선 회절 측정을 통해 확인하였다.
- 본 연구에서 수행된 철의 충격 고압 실험 결과, 순수 철이 충격 효과로 인해 bcc 구조에서 hcp 구조로 변하는 상전이 압력은 약 13.6 GPa로 기존에 정적 압력 실험을 통해 보고된 상전이 압력과 유사하다.
- Hugoniot Elastic Limit(HEL)은 약 9 GPa로 이전에 보고된 순수 철의 충격 고압 실험에서의 HEL중 가장 큰 값을 가진다.



<(좌) 광학 레이저와 X-선의 지연 시간이 700 ps일때의 X-선 회절 패턴에 대한 Pseudo-Voigt peak-profile fitting 결과. (우) peak-profile fitting 결과를 바탕으로 계산된 각 지연 시간에 따른 순수 철의 상전이 및 밀도 변화 플랏>

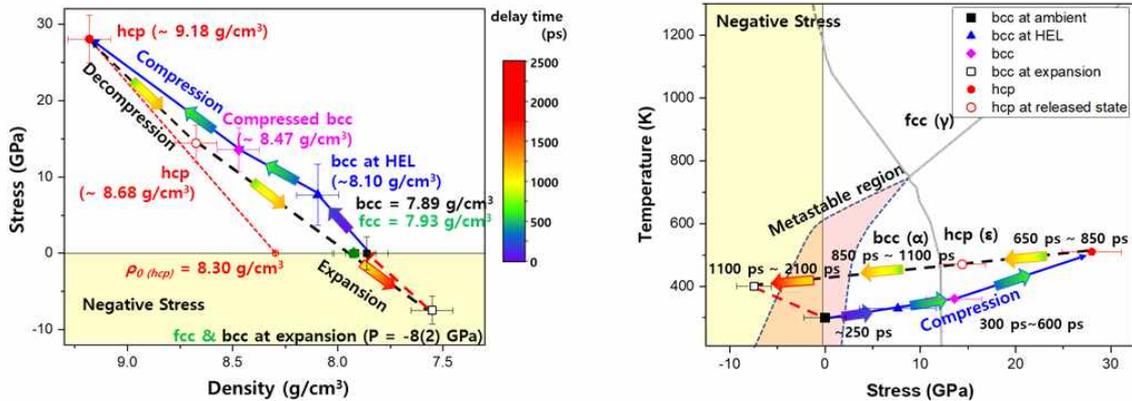
- 광학 레이저와 X-선의 지연시간이 250 ps 일 때 충격 전달에 의한 압축 효과로 인해 Hugoniot elastic limit (HEL)이 처음으로 관찰되며 300 ps에서 순수 철의 고압 상인 hcp 구조가 관찰되기 시작한다. 광학 레이저와 X-선의 지연시간 450 ps에서 충격에 의한 효과가 최대가 되며 이때의 예상되는 압력은 철의 Rankin-Hugoniot relation을 고려하였을 때 약 34 GPa로 추정된다.

- 광학 레이저와 X-선의 지연시간 650 ps 이후 압력 완화 단계로 넘어가며 부피가 기존의 bcc 구조의 철보다 큰 bcc 상과 fcc 상의 철이 관찰되기 시작한다.

- 1200 ps 이후에는 압축 상이 모두 사라지며 팽창 상만 관찰되다가, 2200 ps 이후에는 팽창 상이 사라지고 충격 전의 철과 비슷한 밀도를 가진 bcc 구조의 철만 관찰된다.

- bcc에서 hcp 구조로의 전환 될 때 계산된 strain rate은 약 $\sim 3.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 로 2014년 Crowhurst et al.에 보고된 값 (up to $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$)과 비교 하였을 때 높은 값을 가진다. (Crowhurst et al., 2014)

- 또한 압력이 완전히 relaxing이 되는 final stage에서 rarefaction wave의 propagation에 의해 형성되는 음성 격자 압력 (negative lattice pressure)에 의한 팽창된 bcc와 fcc 구조가 관찰된다. 이는 이전에 보고된 적 없는 충격 압력 실험에서의 순수 철에서 발견된 독특한 현상이다.



<PAL-XFEL에서의 충격 고압 실험을 통해 결정된 충격에 의한 철의 bcc, hcp 그리고 fcc 상의 대략적인 전이 과정을 보여주는 플랏>

- 본 연구를 통하여 PAL-XFEL에서 최초로 광학레이저와 고휘도의 25 fs 이하의 짧은 pulse duration을 가진 X-선을 이용하여 순수 철에 대한 충격 압력 실험을 성공적으로 수행하였으며, 이를 통해 짧은 시간 동안 발생하는 레이저 충격 유발 효과에 의한 철의 구조적 변화를 포착하고 변화 과정을 이해하는데 새로운 과학적 기회를 제공하였다.

(2) 철 운석(Gibeon)에 포함된 kamacite와 taenite에 대한 동적 극한 환경 실험

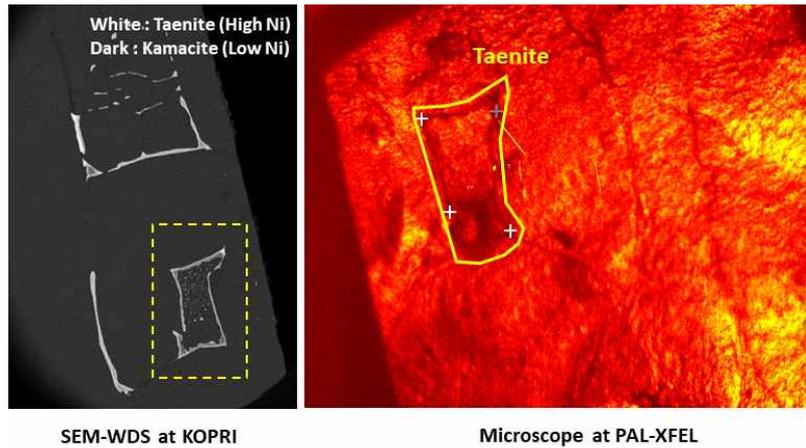
- 본 연구실은 2019년 5월 포항 4세대 가속기 선원을 이용하여 분화 운석인 pallasite (Gibeon)에 포함된 철-니켈 합금 물질인 kamacite(α -(Fe, Ni), 낮은 Ni 함량 (10 % 미만))과 taenite(γ -(Ni, Fe), 높은 Ni 함량 (20-60 %))에 대하여 레이저 충격 실험을 수행하였다.

- PAL-XFEL에서의 레이저 충격 실험 진행 전인 2019년 3월 18일 극지연구소에 설치된 SEM을 이용하여 시료 분석 진행함. SEM-EDS Mapping을 통해 taenite (Ni > 20%, fcc) 영역과 plessite (10 % < Ni < 20 %, fcc와 bcc가 혼재) 그리고 kamacite(Ni < 10 %, bcc) 영역을 구분하여 가속기 레이저 충격 실험을 수행할 부분을 선별하였으며, 운석의 각 지점을 좌표화 하여 각 위치에 따른 정확한 상 정보를 획득하였다.

- Ni 함량이 20% 이상인 taenite에 대해 레이저 충격 실험을 수행하였으나 taenite 부분의 크기가 광학 레이저 및 X-선의 크기보다 작은 영역에 존재하여, kamacite와 taenite가 동시에 광학 레이저에 의해 충격을 받고 1개의 X-선 회절 데이터에 kamacite와 taenite의 회절 피크가 동시에 관찰된다.

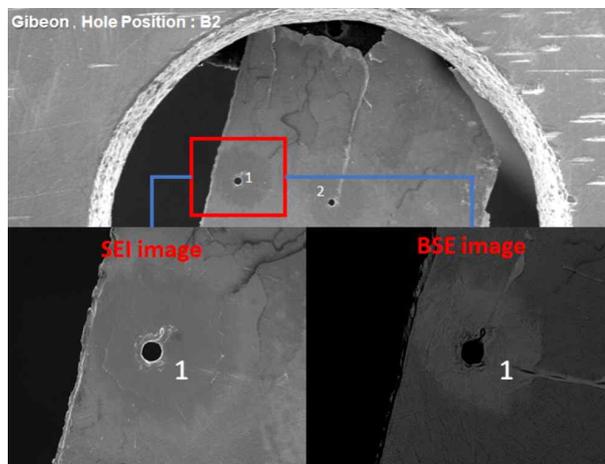
- Kamacite는 bcc구조를 taenite는 fcc의 구조를 가지므로 회절 패턴에서 구별 및 분석이 가능하여 kamacite와 taenite의 피크가 서로 영향을 주지 않으면서 피크의

강도가 분석이 가능할 정도로 강하게 나타나는 kamacite의 (110)피크, taenite의 (002) 피크를 선택하여 peak-profile fitting 분석을 진행하였다.

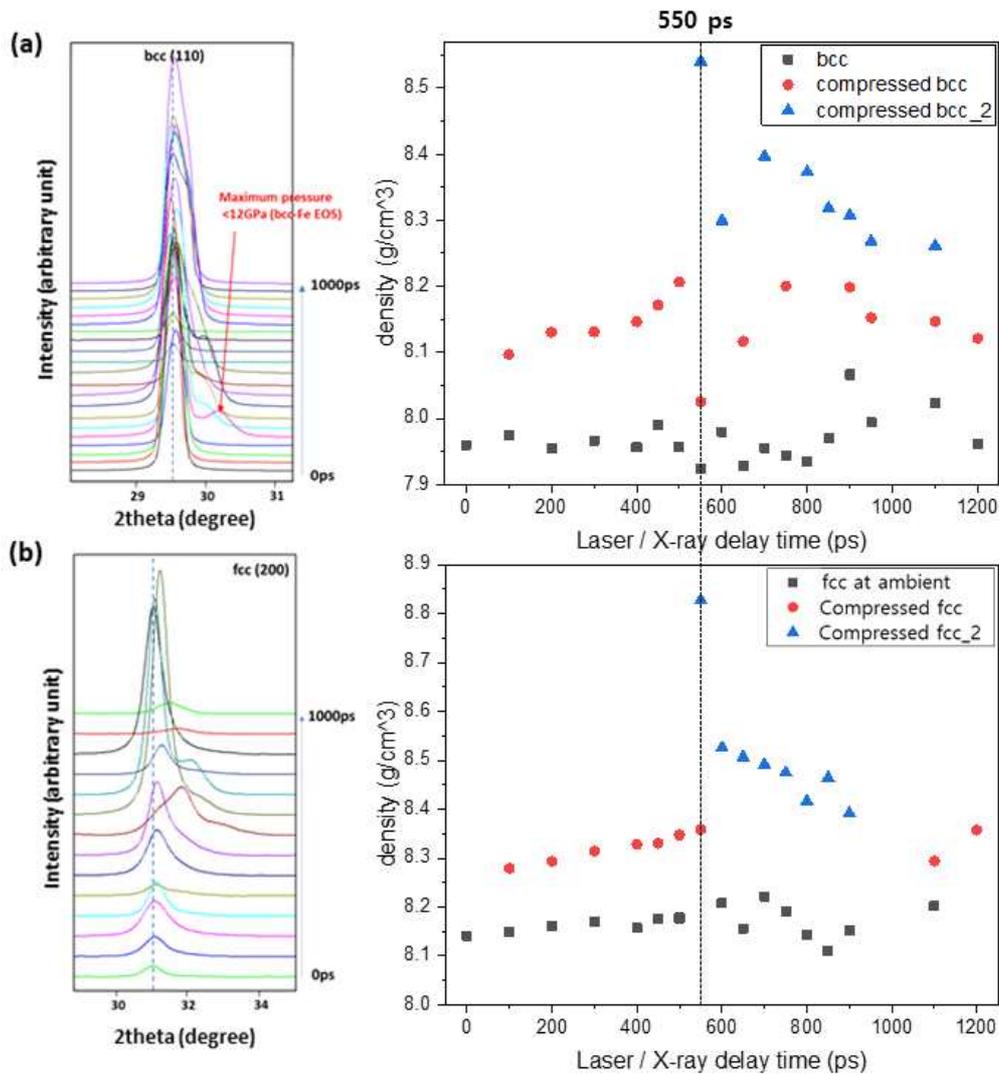


<PAL-XFEL의 충격고압실험에 사용된 Gibeon 운석의 SEM-WDS 이미지(좌) 및 Photo-microscope 이미지(우).>

- 두 광물 모두에서 레이저 충격으로 발생한 압력으로 인하여 더 높은 밀도를 가지는 압축된 상을 성공적으로 관찰하였다.
- kamacite와 taenite 모두 레이저-엑스레이 지연 시간이 550 ps 일 때 가장 압축된 상이 관찰되며 550 ps 이후 충격이 완화되면서 밀도가 낮아지는 것을 kamacite와 taenite 모두에서 관찰하였다.
- 추후 추가 분석을 통해 순수 철과 철질 운석 내의 철-니켈 물질에 대한 충격 고압 거동을 비교할 예정이다. 이를 통해 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 새로운 이해를 제시할 수 있을 것으로 기대한다.



<Gibeon)의 kamacite와 taenite의 XFEL 실험 이후 SEM 이미지>



<포항 4세대 가속기에서의 운석 시료에 대한 레이저 충격 실험 결과>

(a) kamacite에 대한 충격 실험 결과 (좌) kamacite의 레이저-엑스레이 지연 시간에 따른 X선 회절 패턴의 변화 및 (우) 계산된 밀도의 변화. (b) taenite에 대한 충격 실험 결과. (좌) taenite의 레이저-엑스레이 지연 시간에 따른 X선 회절 패턴의 변화 및 (우) 계산된 밀도의 변화.

제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1절. 연구개발목표 달성도

- 본 연구팀이 연구 개시 시 제안한 연구 종료 후 평가 기준이 될 수 있는 구체화된 정량·정성적 성과지표는 다음과 같다.

성과목표	세부목표	평가지표(핵심성과 스펙)	1개년 논문 성과 목표 (정량)
(미)분화운석의 광물 특성 및 극한환경 연구	1 충격변성 (미) 분화운석의 결정학적 연구	- EM-SD 활용 국제 공동 연구 - DAC-laser heating 시스템 구축 및 활용 - 3세대 방사광가속기 고온고압 실험	SCI (주/공동) 1/0
	2 (미)분화운석 구성광물을 대상으로 한 극한환경 실험	- EM-SD 활용 국제 공동 연구 - 4세대 가속기 활용 레이저 충격 고압 연구	

- 본 연구팀은 3장 2절의 연구개발 수행 결과에 제시한 것처럼 연구개발 수행 과정에 있어 EM-SD 활용을 통한 국제 공동 연구를 활발히 진행하였으며 특히 연구 기간 동안(2019.01.01.~2019.12.31) 국내외의 3세대 및 4세대 가속기를 활용하여 한국 연구팀 최초로 합성 철 및 철질 운석 시료에 대해 충격 고압 연구를 성공적으로 수행하였다.

- 현재 순수 철(합성)에 대한 충격 고압 연구 논문이 과학전분야 상위 10% 저널에 리비전 진행 중으로 정량적 논문성과 또한 달성할 수 있을 것으로 보인다. 또한 연구기간 동안 진행된 나머지 연구 결과에 대해서도 SCI 저널 게재를 위해 현재 논문화 작업을 진행 중이다.

2절. 연구결과의 대외 기여도

1) 학술적 파급 효과

- 국내외의 다양한 3세대 방사광 가속기 및 4세대 선원과 같은 첨단 거대시설을 활용한 운석 연구를 통하여 지구와 행성의 형성 및 분화과정에 대한 모델을 제시하는 데 이바지함으로써 국내 극지 연구의 우수성 및 다양성을 확장함.

2) 경제적 파급 효과

- 철에 대한 정적 및 동적 극한환경 연구를 통하여 물질 활용에 대한 기초 과학적 이해를 증진 시키고 새로운 물질 및 물성 개발의 기초를 제공할 것으로 기대함.

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

- 마이크론 스케일 분석 장비 활용을 통한 운석 내 미확인된 광물 상의 발견 가능성 제시. 추가적인 미확인 광물상 확정 시 해당 분야 상위 해외 저널 게재 기대.
- 운석에 대한 극한 환경 모사 실험을 통해 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 모델 제시
- 방사광가속기 첨단 분석기법의 접목을 통한 운석 연구의 새로운 모델 제시.
- 행성의 형성 및 진화 과정에 대한 첨단 가속기 시설 연구를 통해 아직 규명되지 않은 지질학적 현상들을 새롭게 밝힘으로써 극지 연구의 새로운 분야 및 모델 제시.



제 6 장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 미국, 일본의 충격 고압 실험 전문가와의 디스커션을 통한 최신 충격 고압 실험 동향 및 실험 방법 습득.
- 미국의 운석 내 광물 분석 전문 그룹과의 협업을 통한 운석 내에 포함되어 있는 광물의 상 동정 및 구조 분석 방법 습득.



제 7 장. 참고문헌

(1) O. Tschauner, C. Ma, J. R. Beckett, C. Prescher, V. B. Prakapenka, G. R. Rossman “Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite” *Science*, 346, 1100-1102, 2014

→ 2장 1절 중 ‘최근 보고된 운석 내에서 실제 발견된 고압 상들에 관한 해외 그룹의 연구 사례 - 미분화운석에서 지구 맨틀에서 존재할 것이라고 예측되었던 광물상이 실제로 발견된 사례가 사이언스지에 발표됨 (Tschauner et al., 2014).’에 인용

(2) C. T. Adcock, O. Tschauner, E. M. Hausrath, A. Udry, S. N. Luo, Y. Cai, M. Ren, A. Lanzirotti, M. Newville, M. Kunz, C. Lin “Shock-transformation of whitlockite to merrillite and the implications for meteoritic phosphate” *Nature Communications*, 8, 14667, 2017

→ 2장 1절 중 ‘최근 보고된 운석 내에서 실제 발견된 고압 상들에 관한 해외 그룹의 연구 사례 - 운석내 특정 광물상에 대한 가속기를 활용한 극한 환경 실험을 통해 화성에 물이 존재할 수 있다는 연구 사례가 네이처 커뮤니케이션스에 발표됨 (Adcock et al., 2017).’에 인용

(3) C. Ma, C. Lin, L. Bindi, P. J. Steinhardt “Hollisterite (Al₃Fe), kryachkoite (Al,Cu)₆(Fe,Cu), and stolperite (AlCu): Three new minerals from the Khatyrka CV3 carbonaceous chondrite” *American Mineralogist*, 102, 690-693, 2017

(4) C. Ma, O. Tschauner, J. R. Beckett, G. R. Rossman, W. Liu “Panguite, (Ti⁴⁺,Sc,Al,Mg,Zr,Ca)₁₈O₃, a new ultra-refractory titania mineral from the Allende meteorite: Synchrotron micro-diffraction and EBSD” *American Mineralogist*, 97, 1219-1225, 2012

*(3) & (4) → 2장 1절 중 ‘최근 보고된 운석 내에서 실제 발견된 고압 상들에 관한 해외 그룹의 연구 사례 - 운석 내 새로운 광물상에 대한 연구 결과들이 아메리칸 미네랄로지스트에 여러 차례 보고됨 (Ma et al., 2017; Ma et al., 2012).’에 인용

(5) N. Tomioka and M. Miyahara “High-pressure minerals in shocked meteorites” *Meteoritics & Planetary Science*, 52, 2017-2039, 2017

→ 제3장 2절의 ‘그림 캡션 <운석 내 shock vein에서 고압 광물의 형성 메커니즘 (Tomioka and Miyahara, 2017)>’에 인용.

(6) J. C. Crowhurst, B. W. Reed, M. R. Armstrong, H. B. Radousky, J. A.

Carter, D. C. Swift, J. M. Zaug, R. W. Minich, N. E. Teslich, M. Kumar “The $\alpha \rightarrow \epsilon$ phase transition in iron at strain rates up to $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ ” *Journal of Applied Physics*, **115**, 113506, 2014

→ 제3장 3절의 ‘bcc에서 hcp 구조로의 전환 될 때 계산된 strain rate은 약 $\sim 3.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 로 2014년 Crowhurst et al.에 보고된 값 (up to $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$)과 비교하였을 때 높은 값을 가짐. (Crowhurst et al., 2014)’에 인용



뒷 면

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.