



2020. 8. 31.(월)

문의 : 담당자 연락처(02-880-6724)

연구책임자 이성근 교수(02-880-6729) / (제1/교신저자)

연구단/연구진 박선영, 이아침 연구원

(서울대학교 지구물질과학연구소, 02-877-3072)

제드 모센펠더 박사(Jed Mosenfelder) 박사(미네소타 대학교)

폴 아시모프(Paul Asimow) 박사(캘리포니아 공과대학)

지구 내부 맨틀에서 형성된 배아 상태(embryonic) 현무암질 마그마의 원자구조 및 엔트로피 규명

□ 개요

서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 이성근 교수의 연구팀은 지구내부에서 맨틀 암석의 용융 시 형성되는 현무암질 용융체(배아 현무암질 용융체, embryonic basaltic melts로 명명하였습니다)의 원자구조를 세계최초로 실험적으로 규명하였습니다. 이러한 원자단위의 정보를 바탕으로 배아 현무암질 용융체가 상승하며, 겪는 열개(network)의 얽힘 정도의 변화를 규명하였고, 이로부터 용융체의 엔트로피를 구하였습니다. 배아용융체의 엔트로피 변화가 맨틀의 기계적 특성(지진파속도)의 변화에 미치는 미시적 기원을 정립하였습니다. 연구논문이 미국 국립과학원 회보(PNAS, Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America)에 한국시간으로 2020년 8월 25일 (화) 오전 4시 [미국동부(Eastern time)시간으로 8월 24일 오후 3시] 온라인 판에 출판되었습니다.

(<https://www.pnas.org/content/early/2020/08/21/2014519117>).

본 논문의 Press-embargo가 논문 게재와 함께 해제되어 아래의 논문 관련사항을 소개하여 드립니다.

논문제목 “Configurational Entropy of Basaltic Melts in Earth’s Mantle “

학술지 미국 국립과학원회보 (PNAS, Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America)

저자 이성근(Lee, Sung Keun)교수 (제1/교신저자), 박선영 연구원, 이아침 연구원 서울대학교 지구환경과학부 e-mail: sungklee@snu.ac.kr/제드 모센펠더 박사(Jed Mosenfelder) 박사 미국 미네소타 대학교(University of Minnesota), 폴 아시모프(Paul Asimow) 박사 미국 캘리포니아 공과대학 (California Institute of Technology)

□ 연구의 중요성

- 지판이 분리되는 해양저의 중앙해령에서 분출된 현무암질 용융체(melts)가 냉각되고 고화되어 해양지각이 형성됩니다.
- 지표에서 분출된 중앙해령 현무암질 용융체는 지하 수십 km에서, 혹은 물과 같은 유체(fluid)와 공존할 경우 지구내부 150km (약 ~5만 기압, 대기압의 5만 배의 압력) 이상의 깊이에 존재하는 맨틀 암석의 용융(melting)에서 기원합니다.
- 따라서, 초기 용융체의 기원지인 지구내부 맨틀의 정보(맨틀의 조성, 기계적 성질-딱딱한 정도)는 실제 확인하기 어려우므로, 지표에서 분출된 현무암질 용융체를 분석하여, 간접적으로 정보를 얻고 있습니다.
- 그러나, 지구내부에서 맨틀암석의 용융으로 형성된 초기상태의 마그마 (본 논문에서는 이를 생명체에 비유하여, 배아 현무암질 용융체, embryonic basaltic melts, 라고 명명하였습니다)의 성질은 지표에서 분출된 용융체와는 매우 다른 것으로 알려져 있습니다.
- 따라서, 맨틀의 진정한 이해를 위하여서는 지표면에 분출한 용융체가 아니라, 지구 내부에서 생성된 배아 현무암질 용융체를 이해하는 것이 중요합니다. 특히 배아 상태 용융체의 원자구조를 규명하여 생성 당시의 기원지인 맨틀의 특성을 직접적으로 이해할 수 있습니다(붙임 2. 용어설명 2번 참조).
- 이러한 중요성에도 불구하고, 마그마의 상승 과정 중에 용융 당시의 깊이에서의 생성초기의 원자단위의 정보가 소실되어, 고압환경에서 탄생한 배아

상태 마그마의 원자구조는 알려지지 않았으며, 이는 현대 지구과학이 규명하여야 할 난제 중에 하나입니다. 서울대학교의 이성근 교수 연구팀은 배아 상태 마그마의 원자구조에 대한 정보를 최초로 실험적으로 획득하였습니다.

□ 연구결과

- 1) 이성근 교수 연구팀은 지표에서부터 지구 상부맨틀의 암석이 최초로 녹는 약 150km까지의 압력에 해당하는 5만 기압의 압력에서 현무암질 용융체의 원자 구조를 최초로 보고하였습니다. 또한 150km의 형성 깊이에서부터 용승하는 비정질 마그마의 구조를 거슬러 올라가 초기 상태의 마그마 용융체 (embryonic basaltic melts)의 진화과정을 규명하였습니다.
- 2) 배아 상태 현무암질 용융체의 비정질 열계(network)가 지표면의 용융체에 비하여 더 심하게 얽혀있는 구조를 가지고 있습니다 (그림설명 참조). 따라서 고압환경에서 생성된 마그마가 지표로 용승하면서 열계의 얽혀있는 정도가 감소합니다.
- 3) 지구내부의 현무암질 용융체열계의 얽힘정도에 따라 현무암질 용융체의 엔트로피가 결정됩니다. 이러한 엔트로피의 변화가 맨틀의 지진파전달 특성 (지진파의 속도)을 설명하는 체계를 제시하였습니다. 즉 배아 상태 용융체의 엔트로피가 증가하면, 지진파의 속도가 느려지고, 엔트로피가 감소하면, 지진파의 속도가 증가하는 관계를 밝혔습니다(붙임 2. 용어설명 2번 참조).
- 4) 지구 내부에서 현무암질용융체의 얽힘의 정도의 변화로 인한 지진파 속도의 감소로부터, 100-150km에서 맨틀의 연화(softening, 딱딱한 정도의 감소)에 대한 원인을 제공하였습니다(붙임 2. 용어설명 2번 참조).

□ 연구의의

- 본 연구는 상부 맨틀 환경에서 현무암질 용융체의 원자 구조를 최초로 규명한 결과입니다.
- 지구내부 맨틀에서의 형성 당시의 배아상태의 현무암질 용융체의 구조를 규명하여, 마그마 열계의 얽힘이 풀리는 과정을 실험적으로 규명하였습니

다. 이러한 마그마 열계의 얽힘의 풀림이 DNA 사슬이 풀리는 과정과 비유하여, 현무암질 마그마의 성장과 진화를 설명하였습니다 (그림설명 참조).

- 배아 상태 마그마의 원자구조와 엔트로피의 연관성, 그리고 엔트로피와 지진파의 전달속도의 연관성을 최초로 규명하여, 지구 내부맨틀의 연화 (softening)의 원인을 원자단위에서 설명하였습니다. 이로부터 지구형성초기에서부터 지구맨틀의 진화에 대한 미시적 실마리를 제공하였습니다.

□ 교신저자 소개

성명: 이성근

서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 부교수

박사: 스탠포드대학교 지질환경학과 (부전공: 화학)

석사: 스탠포드대학교 화학공학과

석사: 서울대학교 지질학과

학사: 서울대학교 지질학과 (부전공: 재료공학)

□ 연구비 지원 프로그램

한국 연구재단의 지원으로 수행되었습니다.

미국 국립과학원 회보(PNAS, Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America)에 대하여: PNAS는 물리/화학/생물/지구과학전 등의 다양한 분야에서 혁신적인 연구결과를 소개하는 학술지입니다 (자세한 사항은 다음의 학술지 홈페이지를 참조 바람: www.pnas.org).

- [붙임] 1. 연구결과 2. 용어설명 3. 그림설명
 4. 연구진 이력사항

연구결과

배아상태 현무암질 마그마의 원자구조 및 엔트로피

지판이 분리되는 해양저의 중앙해령에서 분출된 현무암질 용융체(melts)가 냉각되고 고화되어 해양지각이 형성됩니다. 지표에서 분출된 중앙해령 현무암질 용융체는 지하 수십 km에서, 혹은 물과 같은 유체(fluid)와 공존할 경우 지구내부 150km (약 ~5만 기압, 대기압의 5만배의 압력) 이상의 깊이에 존재하는 맨틀 암석의 용융(melting)에서 기원합니다. 따라서, 초기 용융체의 기원지인 지구내부 맨틀의 정보(맨틀의 조성, 기계적 성질-딱딱한 정도)는 실제 확인하기 어려우므로, 지표에서 분출된 현무암질 용융체를 분석하여, 간접적으로 정보를 얻고 있습니다. 그러나, 지구내부에서 맨틀암석의 용융으로 형성된 초기상태의 마그마 (본 논문에서는 이를 생명체에 비유하여, 배아 현무암질 용융체, **embryonic basaltic melts**, 라고 명명하였습니다)의 성질은 지표에서 분출된 용융체와는 매우 다른 것으로 알려져 있습니다. 따라서, 맨틀의 진정한 이해를 위하여서는 지표면에 분출한 용융체가 아니라, 지구 내부에서 생성된 배아 현무암질 용융체를 이해하는 것이 중요합니다. 특히 배아 상태 용융체의 원자구조를 규명하여 생성 당시의 기원지인 맨틀의 특성을 직접적으로 이해할 수 있습니다. 이러한 중요성에도 불구하고, 마그마의 상승 과정 중에 용융 당시의 깊이에서의 생성초기의 원자단위의 정보가 소실되어, 고압환경에서 탄생한 배아 상태 마그마의 원자구조는 알려지지 않았으며, 이는 현대 지구과학이 규명하여야 할 난제 중에 하나입니다.

이성근 교수 연구팀은 지표에서부터 지구 상부맨틀의 암석이 최초로 녹는 약 150km까지의 압력에 해당하는 5만 기압의 압력에서 현무암질 용융체의 원자 구조를 최초로 보고하였습니다. 또한 150km의 형성 깊이에서부터 용승하는 비정질 마그마의 구조를 거슬러 올라가 초기 상태의 마그마 용융체(embryonic basaltic melts)의 진화과정을 규명하였습니다. 배아 상태 현무암질 용융체의 비정질 열계(network)가 지표면의 용융체에 비하여 더 심하게 얽혀있는 구조를 가지고 있습니다. 따라서 고압환경에서 생성된 마그마가 지표로 용승하면서 열계의 얽혀있는 정도가 감소합니다. 지구내부의 현무암질 용융체열계의 얽힘정도에 따라 현무암질 용융체의 엔트로피가 결정됩니다. 이러한 엔트로피의 변화가 맨틀의 지진파전달 특성(지진파의 속도)을 설명하는

체계를 제시하였습니다. 즉 배아 상태 용융체의 엔트로피가 증가하면, 지진파의 속도가 느려지고, 엔트로피가 감소하면, 지진파의 속도가 증가하는 관계를 밝혔습니다. 지구 내부에서 현무암질용융체의 윅힘의 정도의 변화로 인한 지진파 속도의 감소로부터, 100-150km에서 맨틀의 연화(softening, 딱딱한 정도의 감소)에 대한 원인을 제공하였습니다.

용 어 설 명

1. 물질의 물성과 원자구조

- 물질의 물성은 원자 구조와 밀접한 관련을 가집니다. 또한 물성의 변화는 물질의 원자구조의 변화를 수반합니다. 현무암질 마그마 용융체의 경우, 기존의 연구들로부터 고압(high pressure)환경에서 마그마 용융체의 성질이 지표에서 분출된 용융체와 다른 것이 알려져 있습니다. 따라서 고압환경에서의 물성 변화를 이해하기 위해서는 맨틀암석의 용융이 시작되는 해당 깊이의 압력에서의 현무암질 용융체의 원자구조의 정보를 획득하는 것이 필요합니다.

2. 지구내부 현무암질 마그마의 중요성과 성질

- 지구내부 상부맨틀에 존재하는 현무암질 마그마 용융체는 맨틀 대류와 지판의 이동, 그리고 지구진화에 중요한 역할을 합니다. 일반적인 결정질 고체의 경우 압력이 증가하면, 물질의 밀도가 증가하고, 이때 물질의 딱딱한 정도를 나타내는 체적탄성율(bulk modulus) 그리고 P파의 속도도 증가합니다. 이와 다르게 비정질 현무암질 용융체는 압력이 증가에 따라 밀도는 증가하지만, 체적탄성율이나 P파의 전달속도는 100-150km의 깊이에 해당하는 3-5만 기압의 압력에서 오히려 감소합니다. 이러한 비정질 현무암질 용융체의 연화(softening)과정이 맨틀의 전지구적 대류에 중요한 역할을 담당할 것으로 추정되지만, 이러한 연화과정의 원인은 알려지지 않았습니다.

그림 설명

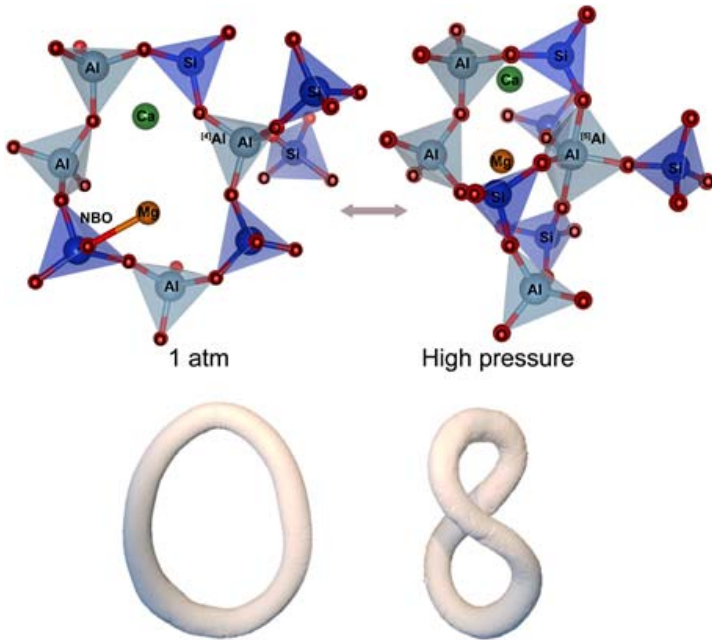


그림 | 압력의 변화에 따른 마그마 용융체 열계의 얽힘 변화. 고압환경에서의 얽혀있는 용융체(오른 쪽)가 상승하여 압력이 감소하면, 열계가 풀리는 것(왼쪽)을 보여줍니다. 이러한 열계의 얽힘정도의 변화는 일상생활에서 흔히 접하는 짜배기나 DNA의 사슬에서 보여주는 구조와 유사합니다.

연구자 이력사항 [이성근 교수]

1. 인적사항

- 소 속 : 서울대학교 지구환경과학부 교수
- 전 화 : 02-880-6729
- E-mail : sungklee@snu.ac.kr



2. 학력

- 1994 서울대학교 지질과학과 이학사(부전공 : 재료공학)
- 1997 서울대학교 지질과학과 이학석사
- 2001 스탠포드 대학교 화학공학과 공학석사
- 2002 스탠포드 대학교 지구과학과 이학박사(부전공 : 화학)

3. 경력사항

- 1994 - 1997 Research assistant, 서울대학교
- 1997 - 1998 Research assistant, 스탠포드 대학교
- 1998 - 2002 Stanford Graduate Fellow, 스탠포드 대학교
- 2002 - 2004 Carnegie Postdoctoral Fellow, 워싱턴 카네기 연구소
- 2004 - 2008 조교수, 서울대학교 지구환경과학부
- 2008 - 2013 부교수(조기 정년보장), 서울대학교 지구환경과학부
- 2013 - 현재 교수, 서울대학교 지구환경과학부

4. 기타 정보

- 과학기술정보통신부 기초연구지원 리더연구부문 선정 (2020)
- 서울대학교 자연과학대학 교육상 (2020)
- 대한지질학회 학술상 수상 (2017)
- 제 1회 서울대학교 자연과학대학 우수강의상 수상 (2015)