저어콘의 내부 누대구조의 3차원적 복원기법

김숙주 · 이기욱*

한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

3D Reconstruction of Internal Zonation in Zircon

Sook Ju Kim and Keewook Yi*

Division of Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Ochang 363-883, Korea

요약: 저어콘 음극선발광영상의 입체적 연구를 위해, 단계적 연마를 사용한 연쇄단층촬영과 영상 후처리작업으로 저어콘 내부 누대구조의 3차원 복원을 최초로 시도하였다. 연구에 사용된 시료는 경상분지 북동부 영덕화강암체에서 분리한 고생대말 시기의 저어콘으로 평면 음극선발광영상에서는 전형적인 진동누대구조가 관찰된다. 시료의 연쇄단층촬영을 위해 에폭시마운트 제작 후 3 μm 과 1 μm 연마액을 이용한 연마와 후방산란 전자영상과 음극선발광영상 촬영을 시료가 소진될 때까지 반복하였다. 단계별 두께의 차이는 약 3 μm 이며, 약 80여개의 저어콘 중 7개를 선정하여 같은 면적 영상파일로 저장한 후 영상편집 소프트웨어인 Image J와 Volume Viewer를 이용하여 3차원 내부구조를 복원하여, 저어콘의 진동누대 및 덧성장구조를 입체적으로 재현하는데 성공하였다. 3차원적 내부구조 영상은 2차원적으로 관찰하는 단면영상의 내부구조와 달리 특정방향에 따른 단면관찰이 가능하고 다양한 변화양상을 재현할 수 있다. 이 방법은 고분해능 이차이온질량분석기 연대결과가 복잡하게 나오는 저어콘이나 미세구조 파악이 필요한 다른 지질시료의 입체적인 성장 및 재결정작용의 내부 구조연구에 응용될 수 있다.

핵심어: 저어콘, 음극선발광영상, 3차원 내부구조복원

Abstract: A series of the planar cathodoluminescence (CL) and backscattered-electron (BSE) images of magmatic zircon from the Paleozoic Yeongdeok pluton in the southeastern Korean Peninsula were taken using a scanning electron microscope for a 3D reconstruction of internal zonation of zircon. Seven zircon crystals mounted in epoxy were serially polished with average 3 μm thickness to their disappearance. Their 3D reconstruction of zonation was performed using the Volume Viewer function in the ImageJ software. The 3D oscillatory zoning pattern of zircon was apparently shown in all the analyzed crystals. This method can further be applied to zircon crystals of multiple growth histories as well as other geological materials.

Keywords: Zircon, Cathodoluminescence, 3D reconstruction

서론

저어콘은 다른 광물에 비해서 상대적으로 많은 우라늄을 함유하고 있어서 U-Pb 동위원소 측정에 적합하며, 열이온화질량분석기(TIMs), 고분해능 이차이온 질량분석기(SHRIMP), 레이저용발 유도결합 플라즈마 질량분석기(LA-ICP-MS)를 이용한 지질연대 측정에

많이 이용된다. 또한, 저어콘 결정작용은 형성 당시의 온도, 압력, 암석의 산성도 등 주위 환경에 영향을 받기 때문에 암석이 형성된 지질학적 사건을 저어콘 내부조직 관찰을 통해 간접적으로 유추할 수 있다 (Corfu *et al.*, 2003). 저어콘은 변성, 변질 그리고 풍화작용에 강한 성질을 가지고 있어서 오래된 입자의 일부분이 이후의 지질사건으로 새로 생긴 영역과 함께 하나의 입자를 구성하는 경우도 있다. 특히, 복잡한 지질학적 사건에 의해 성장과 용해-파괴를 반복한 복잡한 내부구조를 가지는 저어콘을 대상으로 표

*Corresponding author
Tel: 043-240-5175
E-mail: ky@kbsi.re.kr

Fig. 1. Flow-chart for experimental techniques of this study.

면분석이 필요한 경우, 분석위치 선정 및 분석결과 해석을 위해 주사전자현미경을 이용한 음극선발광영상(Cathodoluminescence; CL)이나 후방산란전자영상(Backscattered electron; BSE) 영상촬영이 필수적이다(Cawood *et al.*, 2012; Gerhrels, 2012). 일반적으로 음극선발광영상과 후방산란전자영상은 이차원적으로 단면촬영되는데, 광물성장 과정을 단면영상으로는 유추하기 힘든 경우도 있다(Spear and Pyle, 2002). SHRIMP는 1~2 μm 분석깊이를 가지지만 20 μm 정도 직경의 분석영역으로 인해 두 개 이상 연대를 가지는 영역의 혼합분석 가능성이 항상 존재하므로 연대측정 분석결과는 내부구조의 자세한 관찰없이 정확한 해석이 불가능하다. 특히, LA-ICP-MS는 수백 마이크로미터 깊이 분석 영역을 가지므로 혼합분석의 가능성이 높으며, 입체적인 내부구조 관찰이 중요하다. 따라서 이 연구에서는 저어콘 음극선발광영상의 3차원적 이해를 위해 단계적 연마를 사용한 연쇄단층촬영을 이용하여 저어콘의 3차원 내부구조 복원을 최초로 시도하였다. 연쇄단층촬영을 위한 시료전처리방법과 영상편집 소프트웨어 Image J (Rasband, 1997-2014)를 이용한 3차원적 저어콘 내부구조 복원 및 관찰법에 대해 기술한다(Figs. 1, 2).

Fig. 2. A schematic diagram of this study for 3D reconstruction (modified after Schmitz *et al.*, 2013).

실험방법

저어콘 시료 전처리

연구에 사용된 시료는 경상분지 북동부 영덕화강암체에서 분리한 고생대말 시기의 저어콘 (252.9 ± 2.5 Ma; Yi *et al.*, 2012)으로 전형적인 진동누대구조가 관찰된다. 분석 시료(YD-03)는 유압파쇄기(hydraulic crusher)를 이용하여 파쇄 하였으며 Fritsch 사의 Pulversette9 진동 컵 밀(vibrating cup mill)을 이용하여 파쇄한 암석을 분쇄하였다. 망직경 245 μm 크기의 시브천을 이용하여 망직경보다 작은 크기의 광물을 분리하였으며 중광물만 남기기 위하여 남은 광물을 비커에 넣고 일정하게 약한 물줄기를 비커에 떨어지게 하여 가벼운 광물을 제거 하였다. 물에 의해 분리된 중광물을 선광팬을 이용하여 물에 넣고 흔들어서 남아있는 가벼운 광물을 제거 하였다. 그 후 자석을 이용하여 자성광물을 분리 하고 요오드화메틸렌(diiodomethane; CH_2I_2 ; 비중=3.32) 중액을 이용하여 저어콘이 포함된 중광물을 분리 후 현미경하에서 트위저를 이용하여 자형의 저어콘을 선별하였다. 각 저어콘 입자를 트위저를 이용해 하나씩 양면테이프 위로 옮겨 심는 방법으로 양면테이프에 저어콘을 고정하였으며 에폭시는 수지와 경화제를 25:3의 질량비로 섞어 사용하였다. 에폭시가 굳은 후 마운트를 저속절단기를 이용하여 절단하였으며 시료면을 sand-paper (#1200)를 이용하여 테이프 자국이 없어질 때까지 중류수를 뿌려가며 연마하였다. 연마 후 연마기계를 이용하여 3 μm 연마판과 연마액을 이용하여 10분간 연마하고, 그 후 1 μm 연마판과 연마액을 이용하여

1분간 연마하였다.

주사전자현미경을 이용한 영상 촬영법

주사전자현미경 영상을 촬영하기 위하여 마운트 표면에 4.5 nm의 두께로 금을 코팅하였으며 한국기초과

학지원연구원에서 보유하고 있는 주사전자현미경 (JEOL JSM-6610LV) 장비로 $\times 95$ 의 배율, 160초, 2560×1920 pixel로 후방산란전자영상과 음극선발광영상을 촬영하였다. 마지막으로 영상 촬영 후 금코팅은 연마제와 연마판을 사용하지 않고 에탄올을 이용하여

Fig. 3. (a) Representative serial CL image of igneous zircon grains from Paleozoic Yeongdeok pluton in southeastern Korea (Yi *et al.*, 2012) and (b) cross sections of 3D reconstruction by Image J program. Scale bar is 200 μm in length.

표면을 닦아 제거하였다. 연마과정 및 후방산란전자 그리고 음극선발광영상 촬영을 13번 반복하였으며 이미지 파일들을 일련번호를 붙여 차례로 저장하였다. 각 과정의 마지막 연마 후 마운트 중앙을 기준으로 캘리퍼스를 사용하여 소수점 2째 자리까지 마운트 두께를 측정하였다. 1번째부터 13번째까지의 두께 차이는 0.04 mm였으며, 각 단계의 두께는 약 3 μm 으로 계산된다. 시료전처리 과정에서의 단계별 연마시간을 조절하면, 단계별 두께를 변화시킬 수 있다.

Image J 영상 분석법

Image J는 미국 국립보건원(National Institute of Health)에서 무료로 배포하는 연구용 영상 편집 소프트웨어로, 이 프로그램의 Volume Viewer를 이용하면 연쇄적 이차원적 이미지를 삼차원적으로 쉽게 복원할 수 있으므로 이를 사용하였다. 주사전자현미경으로 촬영된 저어콘의 영상을 각 단계별로 같은 면적의 이미지 파일로 저장하였다(Fig. 3a). 이 파일들은 하나의 폴더에 저장한 뒤, 이 폴더를 Image J의 활성창에 드래그하면 누적 이미지 파일(stacked image)로 변환되고, Image J 메뉴-Plugins-3D-Volume Viewer를 차례대로 선택하고 Z값을 입력하면 3차원 복원이 완성된다. 이 연구에서는 주사전자현미경 영상의 배율과 각 연마단계의 평균 두께를 계산하여 Volume Viewer의 Z값을 8로 지정하였다. Volume Viewer에서는 특정 각도에서 특정 방향의 단면을 쉽게 관찰할 수 있으며, 이를 연쇄적으로 저장하면 3차원 복원 결과의 동영상으로의 변환도 가능하다(Figs. 3b, 4, 5).

3차원 복원 결과의 동영상은 Youtube (<http://youtu.be/03wXnJlcQII>)에서 볼 수 있다.

결과 및 토론

이 연구에서는 저어콘 음극선발광영상 내부구조의 평면적 관찰방법을 입체적으로 확장하고 3차원적으로 재현하였다. 연구에 사용된 경상분지 북동부 영덕화강암체에서 분리한 고생대말 시기의 저어콘(Yi *et al.*, 2012)의 진동누대구조 및 덧성장구조를 3차원적으로 복원하는데 성공하였으며, 특정방향에 따른 저어콘의 형태를 관찰하고 변화양상을 동영상으로 재현하였다(Fig. 5). 진동누대구조는 3차원 복원영상에서 입체적으로 대칭모양을 이루고 있으며 이는 저어콘의 3차원적 성장과정을 반영하는 것으로 보인다.

단계별 연마법은 광물의 내부조직을 연쇄적으로 직접 관찰할 수 있다는 장점이 있지만, 시간이 많이 걸리고 결국 시료를 소진하게 되는 단점이 있다. 수 mm 이상의 여러 광물의 3차원적 연구에는 단계별 연마방법도 적용되고 있지만(Jung *et al.*, 1999), X-선 전산 단층촬영법(X-ray Computed Tomography; XCT)이 더 활발하게 사용되고 있다(Carlson, 2006). 그러나, 저어콘과 같은 1 mm 이하 크기의 광물이나 음극선발광영상을 통해서만 관찰되는 단일광물 내부 구조 연구의 경우, XCT를 사용할 수 없으며 이 연구방법과 같은 단계별 연마를 사용해야만 한다.

이후 추가연구를 통해 다변성작용이나 변성퇴적암 기원 저어콘의 복잡한 내부구조에도 적용을 하고, 연마의 단계 중에 SHRIMP 연대측정을 병행하면 보다

Fig. 4. (a) Display of Image J program main window for the 3D reconstruction and (b) Volume Viewer. The size of picture is 450×450 pixel and Z is 8.

Fig. 5. Result of 3D reconstruction of zircon in Volume Viewer. Zircon of 3D reconstruction can be sectioned in any direction.

효율적이고 의미있는 연구가 될 것이다. 수백 마이크로미터 깊이를 분석하는 LA-ICP-MS는 연대측정 시 혼합 분석할 가능성이 높는데, 단계별 연마를 통한 분석광물의 3차원 내부구조 형태를 이용하면 효율적인 분석 수행 및 결과해석을 할 수 있을 것이다. 정밀한 해상도의 3차원 복원 영상이 필요한 경우 연마시간을 단축하여 단계별 두께를 줄이거나 음극선발광영상을 고배율로 촬영하는 등으로 분석조건을 최적화하면 된다.

결론

3차원적으로 재현한 음극선발광영상은 SHRIMP나 LA-ICP-MS 등의 마이크로빔을 이용한 표면분석 연대측정 분석결과와 해석에 도움을 줄 수 있으며, 다변

성작용이나 변성퇴적암 기원의 저어콘과 같이 좀 더 복잡한 내부구조를 가지는 다양한 입자 내부구조의 연구에 유용할 것이다. 이 연구의 3차원적 내부구조 관찰법은 저어콘을 중심으로 실험하고 기술되었으나 음극선발광 및 혹은 후방산란전자영상의 누대구조를 가지는 모든 광물에도 적용할 수 있다.

사 사

3차원 내부구조 복원을 위한 영상편집 소프트웨어에 유익한 조언을 해주신 조경구 박사, 심우현 박사, 성유섭 연구원과 이 논문에 건설적이고 친절한 비평을 제공해준 익명의 심사자와 김윤섭 교수께 감사드립니다.

References

- Carlson W.D., 2006, Three-dimensional imaging of earth and planetary materials. *Earth and Planetary Science Letters*, 249, 133-147.
- Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J. and Dhuime, B., 2012, Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40, 875-878.
- Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O. and Kinny, P., 2003, Atlas of Zircon Textures. *REVIEWS in MINERALOGY & GEOCHEMISTRY*, 52, 469-500.
- Gehrels, G., 2012, Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities. In: Busby, C., Asor, A. (Eds.), *Recent Advances in Tectonics of Sedimentary Basins*. Wiley-Blackwell, 47-62.
- Jung, W.-S., Ree, J.-H., and Park, Y., 1999, Non-rotation of garnet porphyroblasts and 3-D inclusion trail data: an example from the Imjingang belt, South Korea. *Tectonophysics*, 307, 381-395.
- Rasband, W.S., 1997-2014, ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>.
- Schmitz, M.D. and Euiper, K.F., 2013, High-Precision Geochronology. *Elements*, 9, 25-30.
- Spear, F.S. and Pyle, J.M., 2002, Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks. In: Kohn, M.L., Rakovan, J. and Hughes, J.M. (Eds.), *Phosphates: Geochemical, Geobiological, and Materials Importance: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Mineralogical Society of America, 48, 293-335.
- Yi, K., Cheong, C.-S., Kim, J., Kim, N., Jeong, Y.-J. and Cho, M., 2012, Late Paleozoic to Early Mesozoic arc-related magmatism in southeastern Korea: SHRIMP zircon geochronology and geochemistry. *Lithos*, 153, 129-141.

2014년 4월 17일 접수
 2014년 4월 18일 심사개시
 2014년 5월 14일 채택