

대륙 지각은 어떻게 형성되는가? (How does the continental crust form?)

해당 부분은 2021-3-9에 SNU 지구환경과학부 김영희 교수님께 수업 중 질문하였고, 익일인 2021-3-10에 교수님께서 eTL에 올려 주신 자료를 통해 확인한 내용임.

Ref 1. How Does Earth's Continental Crust Form? A New Bottom-Up Theory 정리

Columbia Univ. Earth Institute의 소식지[1]에 따르면, 원래 지질학자들은 대륙 지각은 판의 경계 등에서 발견되는 화산 열도나 대륙 화산호 내에서 생성되는 것으로 생각했다. 그 이유는 이 화산 열도 및 대륙 화산호에서 발견되는 용암의 조성 성분이 지질화학적으로 대륙 지각의 조성과 비슷했기 때문이다. 하지만 이 용암의 조성이 대륙 지각의 조성과 비슷하긴 하지만, 화산 열도 및 대륙 화산호 하부의 조성은 대륙 지각 하부의 조성과는 좀 다르기 때문에, 다소 의문스러운 가설이었다.

"Scientists have long believed that continental crust forms in volcanic arcs - they know the magma brought up in the arc's volcanoes is geochemically very similar to continental crust. The lingering question has been how exactly that happens. While the magma that reaches the surface is similar to continental crust, the lower crust beneath volcanic arcs is quite different from the lower half of continental crust."

하지만 *Nature Geoscience*에 발표된 논문에 의하면, 조금 다른 방식의 가설을 제시하여 이를 설명했는데, 이 화산 열도 및 대륙 화산호에서 분출된 용암과 비교적 얇은 깊이에서 형성된 변성암들이 판의 경계에서 섭입대로 진입하고, 용융되어 대륙 하부 지각으로 공급되면서(마치 밥솥의 김이 주방 찬장에 부딪혀 퍼지는 형상으로) 대륙 하부 지각의 조성을 변화시킨다고 주장했다. 이러한 과정이 지구 역사에 걸쳐 광대한 대부분의 지구 하부 지각을 형성했다는 유력한 증거들이 발견된 상태이다.

"A new study appearing in this week's *Nature Geoscience* raises questions about one popular theory and provides new support for another, in which arc lava from the surface and shallow "plutons" - magma that solidified without erupting - are pulled down into the Earth at subduction zones and then rise up to accumulate at the bottom of the arc crust like steam on a kitchen ceiling. Scientists have found compelling evidence to suggest that this could have produced the vast majority of lower continental crust through Earth history."

이러한 과정은 재적층(relamination)이라 불리는데, 대륙판 - 해양판의 수렴형 경계에서 해양판이 섭입할 때, 대양저퇴적물, 용암, 심성암을 대륙화산호나 화산 열도로부터 끌어 섭입대로 섭입하고, 그 결과 이들 섭입한 물질들이 열과 압력에 의하여 변성된다. 이들 섭입물질의 집적 덩어리들이 주변 맨틀보다 고밀도라면 가라앉지만, 이를테면 실리카가 풍부한 화강암 등을 형성하여 저밀도가 되면 상승하여 화산 열도나 대륙 화산호 하부의 지각에 집적된다.

"The process, called relamination, starts at the edge of a continental plate, where an oceanic plate is diving under the continental plate and magma is rising to form a volcanic arc. As the oceanic plate dives, it drags down sediment, lava and plutonic rock from the edge of the arc. As arc material descends, minerals within it become unstable with the rising pressure and heat, and they undergo chemical changes. New minerals form, and chunks of the rock and sediment can break off. When those chunks are denser than the mantle rock around them, they continue to sink, But when they are less dense, such as those that form silica-rich granulites, they become buoyant and float upward until they reach the bottom of the arc crust and accumulate there."

즉, 대륙 화산호 / 화산 열도 지각 하부의 구성분은 주로 재적층 과정 등에 의하여 대륙 기원 퇴적물들이 섭입대에서 하부로 유입되어, 용암 외에도 이들 퇴적물들이 함께 혼합되어 있기 때문에 대륙 지각 상부와 다른 셈이다.

"Sediments are really well represented in continental lower crust, but how did they get on to the bottom of the continent? The easiest way is for that sediment to be pushed down a subduction zone and rise to accumulate at the base of the crust," said Peter Kelemen, a geochemist at Columbia Univ.

그러면 이제는 이 재적층 과정에 의해 집적된 대륙 화산호 / 화산 열도 지각 하부의 구성분들이 어떻게 대륙 지각의 성분들로 변성되는가를 논의해야 한다. 지질학자들이 파키스탄과 미 알래스카 반도의 몇몇 지질 변동에 의하여 이들이 지면으로 드러난 노두에서 암석 샘플을 채취하여 분석한 결과, 대륙 화산호 / 화산 열도 지각 하부 (지표로부터 20km 정도 아래)의 샘플은 동일 깊이의 하부 대륙 지각이 포함하며, 변성 작용에도 잘 견디는 탄탈륨(Ta)나 칼륨(K)의 함량비가 더 작았다. 즉, 이 대륙 화산호 / 화산 열도 지각 하부는 밀도가 주변 대륙 지각에 비하여 높기 때문에, 점차 주변과 상호작용하여 그 조성이 대륙 지각과 같아질 때까지 맨틀을 향해 침강한다. 연구진들이 새로 제시한 이론의 재적층 과정이 동작하기 위해서는 데이터에 의하면 깊이 20km 정도 부근에서 이 과정이 일어나야 하지만, 재적층 과정은 35 ~ 40km보다 더 깊은 깊이에서 일어나는 것으로 알려져 있어 곤혹. 그래서 여전히 화산호 / 화산 열도 지각 하부의 구성분들이 어떻게 대륙 지각의 구성분으로 바뀌는지는 불명확. 재적층 과정은 일어나지만, 그러기 위해서는 복잡한 반복되는 지각의 두께 증가와 변성 작용이 필요하다고 함.

Ref 2. Introductory Chapter: Earth Crust - Origin, Structure, Composition and Evolution

- 지구 원시 지각은 지구 초기 형성 과정의 말기인 약 45억년 전에 형성되었을 것으로 추정됨.

지구 지각의 형성과 관련한 3가지 모델

- 지구 지각의 형성과 관련해서는 다음의 3가지 이론이 존재함.

1. 비균질 / 다중 분화 모델 (Inhomogeneous or heterogeneous accretion of the Earth model, Inhomogeneous model, accretion model)

- 이 모델에서는 지구 형성 초기의 분화 과정에서 가벼운 원소들은 외각에 얇은 층을 형성하고, 이것이 지각이 되었다고 설명. (밀도차 이동)
- 한 편, 이 모델에 의하면 고밀도 원소들은 맨틀 하부 등으로 집적되어 지각에서 관찰되면 안되나, 실제로는 고밀도 원소들(우라늄, 토륨)이 지각에서 발견되므로 부적절.

2. 충돌 모델 (Impact model)

- 이 모델에서는 소행성이나 다른 기타 천체들이 지구에 충돌하여 녹은 후, 지각을 형성하였다고 설명. 현무암이 주 성분인 해양 지각의 경우는, 현무암 주 구성의 소행성이 지구에 충돌한 결과 형성되었다는 식임.
- 하지만 달에서 (보통은 소행성의 충돌로 인해 생성되었다고 알려진) 바다 부분의 현무암은 소행성에서 기원한 것이 아님이 밝혀졌으며, 이들 소행성으로 공급되는 현무암의 양은 지구 해양 지각의 형성에는 턱없이 부족한 양이라 부적절.

3. 지구적 모델 (Terrestrial model)

- 현재 가장 지지받고 있는 모델.
- 지구 내적 과정에 의하여 지구의 지각이 형성되었다고 설명하는데, 지구의 분화 과정 말기에 남아 있는 잔열이 지구 상부 맨틀을 완전히 녹였고, 이 때문에 전 지구의 표면을 마그마 바다로 만들어버림.
- 이후 지구의 냉각에 따라 이 마그마 바다가 결정화되면서 광범위한 지각을 형성함.
- 다른 설명으로는 이 용융된 상부 맨틀이 지표상으로 올라와 지각을 형성하였다는 설명도 있음.

- 이 설명은 마그마 바다의 조성이 부분에 따라 다양했다는 점에서 지각 성분의 다양함을 설명할 수 있고, 또한 지구 지각에서 발견되는 층에 따라 조성 성분의 차이가 나는 것도 마그마 바다의 냉각 과정에 의하여 설명할 수 있어, 현재 가장 유력

초기 해양 지각의 형성

- 해양 지각은 대륙 지각의 형성 이전에 등장하였으며, 해령에서부터 형성됨. 초기 해양 지각은 현재의 해양 지각과는 달리 당시의 상부 맨틀의 고온 조건 때문에 20km 정도의 두께에 달하였고, 발산 속도도 빨랐음 (고온 조건은 마그마 상승을 가속화하고, 이것이 형성 양과 발산 속도에 영향), 초기 해양 지각의 성분도 주로 현무암이었을 것으로 추정.
- 초기 해양 지각은 용융된 상부 맨틀보다 고밀도였을 것으로 추정되고, 따라서 초기에는 형성 이후 바로 상부 맨틀로 침강하여 녹아버렸을 것으로 생각됨.

초기 대륙 지각의 형성

- 가장 오래된 대륙 지각은 약 40억년 전에 형성된 것으로 추정됨. 한 편, 지금처럼 화강암 위주의 대륙 지각은 약 30억년 전에야 형성된 것으로 보임.
- 지구를 제외하고는 태양계 내에 대륙 지각을 가지고 있는 행성은 없는 것으로 관측되었는데, 그 이유는 행성에 물과 지각의 침강을 대륙 지각의 형성에 요구하기 때문.
- 수렴대에서 유입된 해수가 맨틀을 냉각시키고, 화강암질 지각을 형성하기 위한 부분적 결정화를 유발하였을 것으로 생각됨.