

한반도 대륙암권맨틀의 진화: 부분적 손실과 그 시기

박계현*

부경대학교 환경·해양대학 지구환경과학과

Evolution of the Subcontinental Lithospheric Mantle of Korean Peninsula: Partial Loss and its Timing

Kye-Hun Park*

Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요약: 한반도 중부지역의 백령도, 간성, 아산-평택, 보은 조곡리와 한반도 남부의 제주도 등지의 한반도 여러 곳에 분포하는 신생대 알칼리 현무암에 포함된 초고철질 맨틀 포획암은 대부분 스피넬 리졸라이트이며 이보다 더 깊은 곳에서 안정한 석류석 리졸라이트는 아직 보고된바 없다. 이는 한반도의 암권맨틀 두께가 석류석 리졸라이트가 안정할만한 깊이까지 도달하지는 않음을 시사한다. 한반도 지각의 일부는 시생대로부터 형성된 것으로 볼 수 있기 때문에 약 150 km 이상의 암권 두께를 갖는 것이 정상이지만 맨틀포획암들로부터 보고된 최대 포획깊이는 60-90 km에 불과하다. 정상적인 한반도 암권의 두께에 비하여 현재의 암권두께가 현저하게 얇은 것은 시생대로부터의 지각진화사를 보임에도 불구하고 평균 80 km내외의 암권 두께를 보이는 북중국 크레이톤의 경우와 매우 비슷하다. 따라서 북중국에서 주장된 것처럼 한반도 역시 지질시대를 통해 수십 km에 달하는 암권맨틀의 하부가 떨어져 나갔을 가능성이 제기된다. 암권맨틀의 상당한 손실을 야기한 주요한 지질사건은 한반도의 여러 지역의 선크브리아 지각들이 공통적으로 나타내는 19-20억년의 고원생대 화성 및 변성작용과 최근에 활발하고 보고되고 있는 중생대초의 대륙충돌 사건을 감안 할 때 북중국 동부지역과 마찬가지로 고원생대와 중생대초의 대륙충돌일 가능성이 매우 높다.

핵심어: 대륙암권맨틀, 암권 두께, 암권맨틀 손실, 맨틀 포획암, 대륙충돌

Abstract: The Cenozoic alkali basalts are distributed over Korea, both on central part as Bangnyeongdo, Ganseong, Pyeongtaek-Asan and Jogongni and also on southernmost part Jeju. The ultramafic mantle xenoliths carried by Korean alkali basalts are spinel lherzolites. Garnet lherzolite that is more stable at the deeper level has not been reported so far, indicating that the lithospheric thickness under Korea does not reach deep enough to the stable zone of garnet lherzolite. The crustal evolution history of the Korean peninsula, at least some part of it, seemingly started since the Archean, it normally should have lithospheric thickness greater than 150 km. However, the mantle xenoliths carried by the Cenozoic alkali basalts indicate the maximum depth of origination in the much shallower range of 60-90 km. Such significantly thinner lithospheric thickness of the Korean peninsula than expected is quite similar to the case of North China Craton having lithospheric thickness of ca. 80 km in average, suggesting thinning of the lithospheric mantle in a depth scale of a few tens of kilometers during the past geologic time. The main causal events for such significant thinning of the lithospheric mantle can be continental collisional events of Paleoproterozoic and early Mesozoic similar to the case of North China Craton, which are also supported by Paleoproterozoic igneous and metamorphic events during the 1.9-2.0 Ga occurring all over the Korean peninsula and also early Mesozoic continental collisional event which has been discussed on lively arguments.

Key words: Sub-continental lithospheric mantle(SCLM), lithospheric thickness, loss of lithospheric mantle, mantle xenolith, continental collision

*Corresponding author

Tel: 051-629-6629

E-mail: khpark@pknu.ac.kr

서 론

판구조론은 20세기중 정립된 여러 지질학 이론 중에서 지질학의 발전에 가장 크게 기여한 매우 혁신적인 이론으로 평가할 수 있다. 판구조운동은 대류하는 맨틀인 연약권(asthenosphere)의 위에서 강체처럼 움직이는 암권(lithosphere)으로 이루어진 판의 생성과 이동 및 소멸, 그리고 이러한 과정들의 진행중에 일어나는 여러 지질현상들을 설명해줄 수 있는 획기적인 이론이다. 판구조론의 태동 이래 지금까지 논의되어 온 판구조운동은 대부분 판자체의 이동과 관련한 현상에 집중되어왔다. 즉, 새로운 해양판이 중앙해령 지역에서 생성된 이후 수평적인 이동을 하여 섭입대에서 다른 판 아래로 움직여 들어가는 동안 일어나는 판의 운동과 관련한 지질학적 변화들이 가장 큰 주목을 받아왔다고 할 수 있다. 생성과 소멸이 비교적 잘 이해되고 있는 해양판과는 대조적으로 대륙지역의 판을 구성하는 암권맨틀의 생성과 진화과정은 상대적으로 잘 이해되지 못해온 것이 사실이다. 일부학자들은 대륙지역의 판을 이루고 있는 대륙지각 아래의 암권맨틀(Subcontinental Lithospheric Mantle; SCLM)이 섭입과정을 거치지 않고도 부분적으로 떨어져 나가거나 침식될 수 있으며(예, Dunbar and Sawyer, 1989; Seber et al., 1996; Li et al., 2002), 또한 성분적인 변화를 겪기도 한다(예, Menzies et al., 1987; Workman et al., 2005)고 주장한다. 이러한 암권의 변화과정은 용기와 마그마작용을 비롯한 여러 지질현상들을 일으키는데 중요한 역할을 한다는 것이 알려지고 있으며 점차적으로 더 많은 학자들에 의해 연구되고 있다(예, Lastowka and Sheehan, 2001; Elkins-Tanton, 2005).

우리나라에서는 대륙암권맨틀에 대한 연구가 아직은 중요한 주제로 관심을 받지 못하고 있지만 이웃한 중국의 경우에는 매우 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 북동 중국지역의 경우 시생대의 기저암체를 가진 대륙지역임에도 불구하고 이해적으로 매우 얇은 암권두께를 가지는 것이 발견되었으며, 이는 중생대 초에 일어난 암권의 손실 때문인 것으로 해석되었다(예, Gao et al., 2002; Wu et al., 2003; Deng et al., 2004; Xu, 2007; Zheng et al., 2007). 이러한 암권 손실은 중생대 이후에 일어난 화성활동과 광화작용 등 여러 지질현상을 일으킨 중요한 원인으로 설명되고 있다(예, Chen et al., 2003; Yang et al., 2003).

중국과 인접하고 있는 우리나라의 여러 지질현상들 역시 이러한 암권의 진화와 관련되어있을 가능성이 높다고 생각한다. 이 논문에서는 한반도의 여러 곳에 분포하는 신생대 알칼리 현무암에 포획되어 올라온 맨틀 기원의 초고철질 포획암들에 대한 기존의 연구 결과를 최근 북중국 지역에서 연구된 결과와 비교하여 한반도의 암권맨틀 진화사를 조명해보고 하 한다.

중국의 암권맨틀 두께 변화

우리나라의 대륙암권맨틀에 대해 알아보기 전에 대륙암권맨틀의 생성시기와 두께 변화에 대한 일반적인 경향과 더불어 중국에서의 연구결과를 간략하게 언급할 필요가 있다.

암권의 두께에 대한 정보(예, Gung et al., 2003)는 열류량의 분석과 전기전도도 등과 같은 여러 가지 방법에 의해서 추정될 수 있지만 그 중에서 가장 많이 활용되는 것은 깊은 곳에서 유래한 화성암에 포함된 맨틀 포획암에 의한 것과 심부지역을 지나가는 지진파를 활용하는 토모그래피에 의한 것이다(예, Li et al., 2009). 대륙 암권의 경우 대류하는 맨틀구역에 비해 상당히 차가운 온도를 가지며 어느 깊이에서도 맨틀암석의 고상선보다 높은 온도로 올라가지 않기 때문에 마그마가 만들어질 수 없다. 따라서 대륙지역에서 나타나는 맨틀기원의 판내부 화성활동은 암권맨틀 하부의 대류하는 더 뜨거운 맨틀의 용융에 의해 발생한 것으로 생각할 수 있다. 이러한 화성암 중에서 알칼리 현무암 또는 킴벌라이트의 경우 상당히 빠른 속도로 상승하는 것으로 알려져 있으며, 상승 도중에 경로에 있는 맨틀 및 지각 암석들을 다수 포획암으로 함께 운반하는 경향이 있다. 이렇게 포획된 암석들이 원래 어느 깊이에 있었는지는 포획암을 구성하는 광물들 사이의 화학조성을 이용하여 평형을 이루었던 온도-압력조건을 지온지압계를 이용해 알아볼 수 있다. 이렇게 알아낸 암권두께와 지진파 토모그래피로 구한 결과는 대체로 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

많은 학자들은 대륙지역 암권맨틀의 생성은 상부지각의 형성과 매우 밀접하게 연관되어 있다고 생각한다(예, Jaupart and Mareschal, 1999; Pearson, 1999; Artemieva and Moonev, 2002; Griffin et al., 2003; Bdard, 2006). Artemieva and Moonev(2002)는 지진학적, 열적, 그리고 암석학적 증거들을 개괄하여 선캠브리아 대륙암권의 국지적인 최대 두께가 크게 변화하

며(140-350 km) 시생대 크레이톤은 200-220 km와 300-350 km의 쌍모식 분포를 보인다고 하였다. 학자들마다 다소 그 숫자는 다르지만 시생대지역의 암권 두께는 지질시대가 젊은 지역보다 훨씬 더 두꺼운 대륙암권맨틀을 갖는 것이 일반적이며 최소 150 km에 달한다고 알려져 있다.

중국의 암권맨틀에 대한 가장 주목할만한 연구결과는 현재 북중국 크레이톤(North China Craton; NCC)의 암권맨틀 두께에 대한 것이다. 북중국 크레이톤의 주된 생성시기는 시생대인 것으로 연구되어있다(예, Zhao et al., 2001; Liu et al., 2004). 그러나 북중국 크레이톤의 대륙암권맨틀 두께는 시생대 지역치고는 너무 얇으며, 지각이 처음 형성된 시생대 이후의 지질시대 동안에 상당한 두께의 암권맨틀 부분이 손실되었다는 주장이 여러 학자들에 의해 제기되었다(Fan et al., 2000; Xu, 2001; Guo et al., 2003; Zhang, 2005; Yang, 2009; Zhang et al., 2009). 이러한 주장의 근거는 지질시대별로 암권맨틀의 두께가 변화했음이 알려졌기 때문이다. 고생대에 관입한 킴벌라이트에 포함된 맨틀 포획암의 경우 구성광물들의 화학조성으로부터 알아낸 평형상대의 압력조건으로부터 깊이를 환산해보면 상당한 깊이를 나타내지만 중생대 이후의 알칼리 현무암에 포함된 맨틀포획암들은 훨씬 더 얇은 깊이에서 포획되었음이 나타난다. 이로 부터 고생대의 킴벌라이트 관입시기와 중생대의 알칼리 현무암 활동 시기 사이에 심각한 암권맨틀의 손실이 일어났음이 주장되었다(예, Fan et al., 2000). 현재 이 지역의 암권맨틀 두께가 중생대 또는 신생대 알칼리 현무암의 맨틀 포획암들에 의해 알려진 것과 상응하는 두께를 갖는 것은 맨틀 토모그래피 결과로도 뒷받침되고 있다(Yu et al., 2003; Liu et al., 2004; Huang and Zhao., 2004; Yao et al., 2005; Chen et al., 2008; Li et al., 2009; Huang et al., 2009; Tian et al., 2009; Santosh et al., 2010; Zhu et al., 2010). Chen et al.(2008)은 북중국 크레이톤 암권의 두께가 남동부의 분지와 해안지역에서 60 - 70 km 정도까지 얇아지며 북서쪽의 산악지역과 대륙내부에서 140 km를 넘지않는 정도로 깊어짐을 영상화시킨 암권-연약권 경계를 통해 나타내었다. Chen et al.(2008)은 이러한 관찰결과로부터 대부분의 크레이톤 지역들에서 전형적으로 >180 km 두께가 나타남과 비교할 때 북중국 크레이톤에서는 암권의 얇아짐 현상이 널리 퍼져 나타난다고 하였다.

북중국 크레이톤의 암권맨틀 손실의 원인은 아직 명확하게 밝혀지지는 않았지만 두꺼워진 암권 하부에서의 에클로자이트 형성에 의한 중력적 불안정성에 대해 논란(예, Deng et al., 2007; Yang, 2009)과 함께 중생대초에 일어난 북중국과 남중국 사이의 대륙충돌 사건이 중요한 촉발요인으로 논의되고 있다(예, Wu et al., 2006; Yang et al., 2007; Zheng et al., 2007; Yang, 2009). 하지만 현생의 시기뿐만 아니라 고원생대에도 암권맨틀의 일부 손실이 있었으며 이러한 두 번의 암권맨틀 손실이 모두 대륙 충돌사건과 관련있다는 주장도 제기되었다(예, Santosh et al., 2010). 따라서 최근의 많은 연구에서 주장된 것과 같이 한반도 역시 중생대초의 대륙충돌사건을 겪었다면 상당한 암권맨틀의 손실을 겪었을 가능성을 생각해볼 수 있다.

한반도의 암권맨틀 두께

한반도의 암권맨틀의 두께, 생성과 진화 등에 대한 연구는 아직 본격적으로 이루어지 않고 있다. 특히 현재의 암권 두께를 정확하게 알아낼 수 있는 심부 토모그래피 자료가 없으며, 포획암의 연구를 통해 오래된 지질시대의 암권두께를 추정할 수 있는 기회를 제공하는 오래된 연령을 갖는 킴벌라이트는 그 자체가 알려진 것이 없다. 하지만 한반도 지각의 최초 생성시기에 대해서는 최근의 여러 연구자료들을 바탕으로 어느 정도 그 윤곽을 알 수 있기 때문에 암권맨틀의 손실 없이 정상적인 진화를 한 경우의 암권두께를 대략적으로 추정해 볼 수 있다. 또한 한반도의 여러 지역에 신생대 알칼리 현무암들이 분포하며, 이러한 알칼리 현무암에 포획되어 운반된 맨틀 포획암들이 존재하기 때문에 현재의 한반도 암권두께에 대해서는 대략적으로 추정해 볼 수 있다. 이로부터 한반도의 암권맨틀이 정상적인 진화를 하고 있는지 아니면 북중국 크레이톤과 마찬가지로 암권의 두께에 상당한 변화가 있었는지를 알아볼 수 있을 것이다.

한반도 암권맨틀의 최초 생성시기와 진화

앞에서 언급한 것처럼 대륙지역 암권맨틀의 생성은 위에 놓인 지각의 생성과 밀접한 관련이 있기 때문에 한반도의 상부지각이 언제 만들어졌느냐는 대략적인

암권의 두께를 추정하는데 매우 중요하다. 한반도의 선캄브리아 기저암체들로부터 측정된 최근의 정밀한 연대자료들은 대부분 20-18억년 정도의 초기원생대에 집중된다(예, Turek and Kim, 1996; 박계현 외, 2000; 송용선 외, 2001, 2009; Sagong et al., 2003; 오창환 외, 2006; Zhao et al., 2006; Wu et al., 2007; Kim et al., 2008; 김남훈 외, 2009; Horie et al., 2009; Yi and Cho, 2009; 이호선 외, 2010). 이러한 결과는 초고철질 포획암들에 대한 Re-Os 연구를 통해 한반도 암권맨틀의 생성시기를 약 19-18억년 정도로 보고한 최근의 연구결과(Lee and Walker, 2006; 이승렬, 2006)와도 합치한다. 한반도에서는 대이작도(Cho et al., 2008)의 경우 외에는 아직 확실하게 시생대로 알려진 암석이 널리 나타나지는 않고 있지만 최근 보고된 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령자료를 보면 30억년 이상의 오래된 연령을 포함하여 시생대의 연령을 나타내는 핵을 가진 저어콘들이 여러 지역에서 나타나며(조동룡과 김용준, 2003; 조동룡과 김유봉, 2003; 조동룡 외, 2006; 오창환 외, 2006) 이러한 저어콘들의 존재는 더 오래된 지각암석이 한반도에 존재했었음에 대한 유력한 지시자로 간주할 수 있다. 대이작도를 포함하여 시생대말-원생대초에 해당하는 약 24-25억년 정도의 연령을 가진 암석들은 영남육괴, 경기육괴 및 낭림육괴의 여러 곳에서 보고되었으며(Kim et al., 1999; Chang et al., 2003; Zhao et al., 2006), 추가적인 연대측정을 통해 더 오래된 시생대에 만들어진 암석들이 발견될 가능성도 있기 때문에 한반도의 암권맨틀 역시 시생대부터 생성이 시작되었다고 추정하는 것은 무리가 아니라도 생각된다. 최근의 Hf 동위원소 연구결과 >35억년의 지각성분이 한반도에서 검출된 것(Lee et al., 2007) 역시 이러한 추론을 지지한다. 일반적으로 30억년 이상된 시생대 대륙지역의 암권맨틀은 >150 km의 두께를 갖고 있기 때문에 한반도 역시 이 시기 이후 별다른 교란이 없었다면 이와 상응하는 암권맨틀의 두께를 가져야 할 것이다.

이와 같은 최초 생성시기 이후에 일어난 가장 강력한 사건은 경기육괴, 영남육괴, 낭림육괴에서 모두 공통적으로 나타나는 19-20억년전의 광범위한 화성활동과 광역변성작용이라고 할 수 있다(예, 박계현 외, 2000; 송용선 외, 2001, 2009; Sagong et al., 2003; 오창환 외, 2006; Zhao et al., 2006; Kim et al., 2008; 김남훈 외, 2009; Yi and Cho, 2009; 이호선

외, 2010). 또한 신원생대말의 사건들 역시 일부 지역에서 기록되고 있다(예, Lee et al., 1998; Lee et al., 2003). 현생에 들어와서는 고생대초의 조선누층군이 형성되던 시기의 비교적 안정된 퇴적작용후 대결층 시기를 겪은 후 다시 고생대말에 평안누층군의 퇴적작용이 일어났다. 대결층 시기 동안에 상당한 격동적 변화를 겪었는지 여부에 대해서는 아직까지 잘 알려진 기록이 없다. 인접한 중국의 북중국과 남중국 지괴들 사이에서는 고생대말-중생대초의 시기에 강력한 대륙충돌이 일어났으며 아마도 우리나라도 같은 시기에 대륙충돌 내지는 그에 수반된 상당한 지구조적 환경변화를 겪었을 것으로 보는 학자들이 많다(예, Ree et al., 1996; Oh et al., 2006). 이후 중생대와 신생대시기에는 몇 차례의 섭입관련 화강암질 화성활동이 단속적으로 일어났으며 특히 삼첩기-쥬라기 시기에 강력한 화강암질 화성활동이 있었다. 주된 화성활동시기의 사이에는 분지의 형성과 퇴적작용이 있었으며, 신생대에는 한반도와 주변지역에 열점에 의한 현무암질 화성활동이 일어났다.

이상에서 개략적으로 살펴본 한반도에서 일어났던 여러 지질시대에서의 화성활동, 변성작용 및 관련된 지구조적 변형은 한반도지역 대륙지각 아래에 놓인 암권맨틀의 진화에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 이 중에서도 특히 고원생대의 19-20억년 시기에 있었던 화성-변성작용과 중생대초에 일어난 대륙충돌이 가장 강력한 사건이었을 것으로 생각되며, 북중국 크레이튼의 경우에도 이 두 시기에 일어난 강력한 지질사건들이 암권맨틀의 두께를 크게 감소시켰다고 여러 학자들이 주장하고 있다. 그러면 한반도의 경우에 현재의 암권맨틀 두께가 시생대로부터 큰 사건없이 진화해온 일반적 암권맨틀의 경우에서처럼 적어도 150 km 이상의 두께를 갖고 있는지 아니면 이와 상당한 차이를 보이는지의 여부와, 차이가 보인다면 그 이유는 무엇일지에 대하여 다음 절에서 논의한다.

한반도 초고철질 포획암의 포획깊이

한반도에 분포하는 신생대 알칼리 현무암에 포획된 초고철질의 맨틀 포획암들이 어떤 깊이에서 포획되었는지에 대한 연구는 한반도 암권맨틀의 현재 두께에 대한 간접적인 정보를 제공해줄 수 있다. 한반도의 신생대 알칼리 현무암에 포함된 맨틀 포획암은 대부

Table 1. Reported depths of the origination calculated from the spinel lherzolite xenoliths entrained by the Cenozoic alkali basalts of Korean peninsula

Location	Main Rock type	Depth (km)	References
Baengnyeongdo, Boeun, Ganseong	Spinel Lherzolite	42-53	Lee (1995)
Baengnyeongdo	Spinel Lherzolite	25-70	Choi and Kwon (2005)
Ganseong	Spinel Lherzolite	57-67	Kil et al. (2007)
Boeun Jogongni	Spinel Lherzolite	30-55	Kim et al. (1988)
		50-63	Kil (2007)
Asan-Pyeongtaek	Spinel Lherzolite	56-74	Shin et al. (2006)
Jejudo	Spinel Lherzolite	45-90	Choi et al. (2001)

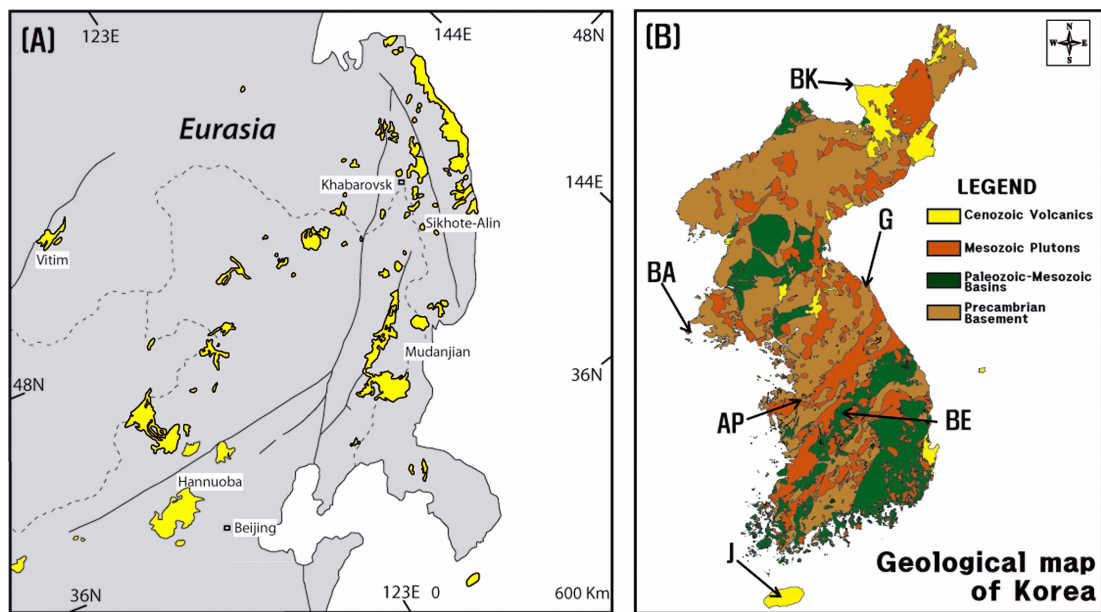


Fig. 1. (A) Distribution of Cenozoic basalts in northeast Asia (modified after Okamura et al., 2005). (B) Simplified geological map of the Korean peninsula. Distribution of the late Cenozoic basalts and mantle-derived xenoliths are indicated by letters. AP=Asan-Pyeongtaek, BA=Baengnyeongdo, BE=Boeun, G=Ganseong, and J=Jejudo.

분 스피넬 리졸라이트이며 적어도 약 85 km 이상의 깊은 곳에서 안정한 석류석 리졸라이트(Robinson and Wood, 1998)는 아직 보고된바가 없다. 석류석 리졸라이트가 발견되지 않는 것은 한반도의 경우 신생대 알칼리 현무암이 상승하면서 포획할 수 있는 암권맨틀의 두께가 석류석 리졸라이트가 안정한 깊이까지 내려가지 않음을 가리킨다. 다른 말로 하면 한반도의 암권맨틀 두께가 일반적인 시생대 지역의 맨틀에 비해서는 훨씬 얇을 것임을 나타낸다.

한반도의 알칼리 현무암에 포함된 스피넬 리졸라이트 맨틀 포획암의 포획깊이에 대한 연구를 보면 (Table 1, Fig. 1) 이한영(1995)은 강원도 고성군 간성지역, 충북 보은군 조곡리, 백령도의 알칼리 현무암

내 스피넬 리졸라이트 포획암의 포획깊이를 42-63 km로 보고하였다. 다른 연구자들의 결과를 보면 보은군 조곡리 포획암의 경우 50-63 km(Kil, 2007) 또는 30-55 km(김윤규 외, 1988)로 추정되었으며, 강원도 고성군 간성지역의 경우 57-67 km(길영우 외, 2007), 아산과 평택 지역은 56-74 km(신홍자 외, 2006), 제주도는 45-90 km(Choi et al., 2001) 그리고 백령도는 25-70 km(Choi and Kwon, 2005)로 보고되었다 (Fig. 2)이를 종합하면 최소 25 km, 최대 90 km의 범위이다. 이와 같이 맨틀 포획암들로부터 계산된 포획깊이 중에서 가장 깊은 값이 그 지역의 암권 두께에 가장 근접한 값으로 볼 수 있을 것이다. 지역별 최대 깊이의 경우 제주도를 제외한 지역은 63-75 km, 제주

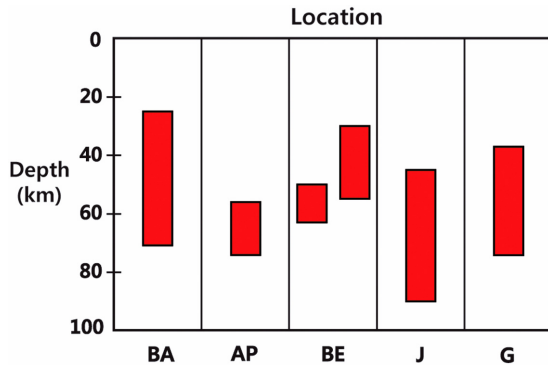


Fig. 2. Depths of origination for spinel lherzolite xenoliths carried within the Cenozoic alkali basalts of Korean Peninsula. The ultramafic xenoliths of Korean Peninsula reveal their derivation from the lithosphere having relatively thin thickness of 60-90 km, which is much thinner than normal lithosphere evolved since Archean indicating lithospheric thinning. The letters on the bottom of the figure indicate the locations of the mantle-derived xenoliths; AP=Asan-Pyeongtaek, BA=Bangnyeongdo, BE=Boeun, G=Ganseong, and J=Jejudo. Data are from Kim et al. (1988), Choi et al. (2001, 2005), Shin et al. (2006), Kil (2007) and Kil et al. (2007).

도는 90 km이다. 이러한 값들은 시생대 지역에서 보고되는 >150 km의 암권두께에 비해서는 훨씬 얇은 두께이며, 최대의 수치를 보이는 제주도의 경우조차도 상당히 얇음을 뚜렷하게 보여준다. 이러한 현상은 북중국 크레이톤의 동부지역과 마찬가지로 한반도의 암권맨틀 역시 수십 km에 달하는 두께만큼 지질시대를 통해 없어졌을 가능성을 강력하게 뒷받침한다. 중국의 경우 암권맨틀의 손실 원인으로 제안된 것은 앞에서 언급한 것처럼 두 번에 걸친 고원생대와 중생대초의 충돌사건이다. 한반도에서도 이 두 시기에 현저한 지질사건들이 일어났었음이 많은 연대측정 자료들로 뒷받침되기 때문에 한반도의 암권맨틀 손실 역시 그러한 사건들에 수반되었을 가능성이 매우 높다.

한반도 암권맨틀 손실의 의미

앞에서 살펴본 자료들은 현재의 한반도의 암권맨틀이 정상적인 시생대지역 또는 고원생대지역의 암권맨틀로 보기에 상당히 얇은 두께이며, 지질시대를 통해 손실되었을 가능성을 강력하게 뒷받침한다. 신생대 현무암의 분포지역이 한반도 중부지역 서부의 백령도, 동부의 간성, 중앙부의 아산-평택 및 보은 조곡리, 남부의 제주도 등과 같이 한반도의 여러 지역에

걸쳐 분포하며 이들 모두가 상당한 암권맨틀의 손실을 나타낸다. 즉, 이러한 암권맨틀의 손실이 어느 지역에 국한된 국지적인 현상이 아니라 한반도의 전지역에 걸쳐 나타나는 광역적인 현상이라는 것에 주목할 필요가 있다.

이 연구에서 살펴본 것과 같이 맨틀 포획암에 의한 암권맨틀 두께의 추정 은 알칼리 현무암이 나타나는 지역에 국한될 수 밖에 없기 때문에 보다 상세한 암권맨틀 두께의 분포와 변화양상을 파악하기 위해서는 지진파 토모그래피 등에 의한 보다 광역적인 자료 획득이 요구된다. 특히 대부분의 지역에서 최대값이 63-75 km로 상당히 비슷한 반면에 제주도는 90 km로 다소 두껍게 나타나는 것은 암권맨틀의 손실이 국지적으로 다를 가능성을 차이가 있을 가능성을 제기하며 보다 정밀한 연구가 필요함을 말해준다. 한반도 중부의 여러 지역들이 상대적으로 더욱 얇은 두께를 보이는 것은 중부지역이 중생대초 대륙충돌대 경계의 유력한 후보지역인 것과 밀접한 관련성이 있으며, 비교적 암권맨틀의 손실정도가 덜한 제주도 지역은 이와 같은 대륙충돌대로부터의 거리가 상대적으로 멀기 때문일 수도 있다. 하지만 어느 시기에 어떤 지질사건 때문에 암권맨틀이 손실되었는지를 알아내기 위해서는 더욱 정밀한 연구들이 필요하다.

결론

한반도 중부지역의 백령도, 간성, 아산-평택, 보은 조곡리와 한반도 남부의 제주도 등지의 한반도 여러 곳에 분포하는 신생대 알칼리 현무암에 포함된 초고철질 맨틀 포획암은 대부분 스피넬 러졸라이트이며 이보다 더 깊은 곳에서 안정한 석류석 러졸라이트는 아직 보고된 바 없다. 이는 맨틀포획암으로 포획된 암권맨틀이 석류석 러졸라이트가 안정할만한 깊이까지 도달하지는 않음을 시사한다. 보고된 맨틀 포획암의 포획깊이로 추정한 한반도지역 암권맨틀의 두께는 60-90 km인 것으로 나타나며, 이는 한반도 상부지각 암석들의 연령과 저어콘 U-Pb 연령을 감안할 때 적어도 약 150 km의 두께를 가져야 정상인 것에 비하면 매우 얇은 두께이다. 이러한 현상은 시생대에 지각생성이 시작되었으나 현재 평균 80 km 내외의 암권두께를 보이고 있어 지질시대를 통해 암권맨틀의 두께가 상당히 감소한 것으로 보고된 북중국 크레이톤의 동부지역 경우와 비슷하다. 북중국 크레이톤 동부지

역의 경우 고원생대와 중생대초의 대륙충돌 사건의 결과로 수십 km에 달하는 암권맨틀의 하부가 떨어져 나갔는데 많은 학자들이 동의하고 있음을 감안하면 한반도에서도 유사한 현상이 일어났던 것으로 추정해 볼 수 있다. 그 근거는 한반도 역시 19-20억년의 고원생대의 화성 및 변성작용이 매우 활발하였으며, 중생대초의 대륙충돌을 겪은 것으로 보고되고 있기 때문이다. 중국의 경우와 마찬가지로 대륙충돌이 암권맨틀의 현재 두께분포를 보다 정밀하게 밝히기 위해서는 맨틀 포획암들에 대한 보다 정밀한 암석학적, 지구화학적 연구와 더불어 지진파 토모그래피 등과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

원고를 읽고 건설적인 비평을 통해 도움을 준 이승렬 박사, 이미정 박사께 감사드립니다. 이 연구는 한국연구재단의 연구비 지원(2008-0058809)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김남훈, 송용선, 박계현, 이호선, 2009, 영남(소백산)육괴 북동부 평해지역 화강편마암류의 SHRIMP U-Pb 저온 연대. *암석학회지*, 18, 31-47.
- 길영우, 신흥자, 고보균, 2007, 강원도 고성지역에 분포하는 알칼리 현무암질 마그마의 상승경로. *암석학회지*, 16, 196-207.
- 김윤규, 이대성, 송윤구, 김선억, 1988, 보은지역 조곡리 현무암에 함유된 초염기성 포획암의 암석학. *지질학회지*, 24 특별호, 57-66.
- 박계현, 송용선, 박맹언, 이승구, 류호정, 2000, 동북아시아 지역 선캄브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 1. 지리산 지역 변성암의 변성연대. *암석학회지*, 9, 29-39.
- 송용선, 박계현, 박맹언, Cao Lin, Jin Wei, Zhang Xingzhou, 류호정, 2001, 동북아시아지역 선캄브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 2. 경기육괴 일부 변성암. *암석학회지*, 10, 95-105.
- 송용선, 박계현, 이호선, Cao Lin, Orihashi Yuji, 2009, 북한 증산-평원지역 화강편마암의 LA-ICP-MS U-Pb 저온 연대. *암석학회지*, 18, 171-179.
- 신흥자, 길영우, 진명식, 이석훈, 2006, 아산, 평택 지역 상부맨틀 포획암의 암석학적 연구. *지질학회지*, 42, 95-113.
- 오창환, 김정빈, 박영석, 김성원, 2006, 경기육괴 고원생대 암류들에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대와 그 의미. *지질학회지*, 42, 587-606.
- 이승렬, 2006, Re-Os 동위원소 시스템의 원리와 한반도 하부지각맨틀의 연령. *암석학회지*, 15, 106-117.
- 이한영, 1995, 남한의 알칼리 현무암에 분포하는 맨틀포획암의 암석화학적 연구: 상부맨틀의 온도 및 압력추정. *암석학회지*, 4, 104-123.
- 이호선, 박계현, 송용선, 김남훈, Orihashi Yuji, 2010, 영남육괴 북동부 홍계사 화강암의 LA-ICP-MS U-Pb 저온 연대. *암석학회지*, 19, 103-108.
- 조동룡, 김용준, 2003, 경기육괴 포천 지역의 흑운모 편마암과 우백질 화강암맥에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 측정: 광역변성작용 연령 및 퇴적시기의 제한. *대한지질학회 2003년 추계학술발표회 초록집*, 76.
- 조동룡, 김용준, Richard Armstrong, 2006, 서산층군 함철규암의 쇄설성 저어콘에 대한 SHRIMP U-Pb 연대: 시대의 층서의 제한. *암석학회지*, 15, 119-127.
- 조동룡, 김유봉, 2003, 장계-장수 지역의 영남육괴 선캄브리아 기반암류에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 측정: 고원생대의 지질사건. *대한지질학회 2003년 추계학술발표회 초록집*, 77.
- Artemieva, I.M. and Mooney, W.D., 2002, On the relations between cratonic lithospheric thickness, plate motions, and basal drag. *Tectonophysics*, 358, 211-231.
- Bédard, J.H., 2006, A catalytic delamination-derived model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 1188-1214.
- Chang, H.-W., Turek, A. and Kim, C.-B., 2003, U-Pb zircon geochronology and Sm-Nd-Pb isotopic constraint for Precambrian plutonic rocks in the northeastern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 37, 471-491.
- Chen, B., Jahn, B.-M. and Zhai, M., 2003, Sr-Nd isotopic characterization of the Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, North China Craton, and implications for Archaean lithosphere thinning. *Journal of the Geological Society, London*, 60, 963-970.
- Chen, L., Tao, W., Zhao, L. and Zheng, T., 2008, Distinct lateral variation of lithospheric thickness in the Northeastern North China Craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 267, 56-68.
- Cho, M., Kim, H., Lee, Y., Horie, K. and Hidaka, H., 2008, The oldest (ca. 2.51 Ga) rock in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daeijak Island, western Gyeonggi massif. *Geosciences Journal*, 12, 1-6.
- Choi, S.H., Jwa, Y.-J. and Lee, H.Y., 2001, Geothermal gradient of the upper mantle beneath Jeju Island, Korea: evidence from mantle xenoliths. *The Island Arc*, 10, 175-193.
- Choi, S.H. and Kwon, S.-T., 2005, Mineral chemistry of spinel peridotite xenoliths from Baegnyeong Island, South Korea, and its implications for the paleogeotherm of the uppermost mantle. *The Island Arc*, 14, 236-253.
- Deng, J., Su, S., Niu, Y., Liu, C., Zhao, G., Zhao, X., Zhou, S. and Wu, Z., 2007, A possible model for the lithos-

- pheric thinning of North China Craton: evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos*, 96, 22-35.
- Deng, J.F., Mo, X.X., Zhao, H.L., Wu, Z.X., Luo, Z.H. and Su, S.G., 2004, A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: 'continental roots-plume tectonics'. *Earth-Science Reviews*, 65, 223-275.
- Dunbar, J.A. and Sawyer, D.S., 1989, How preexisting weakness control the style of continental breakup. *Journal of Geophysical Research*, 94, 7278-7292.
- Elkins-Tanton, L., 2005, Continental magmatism caused by lithospheric delamination. *Geological Society of America Special Paper*, 388, 449-461.
- Fan, W.M., Zhang, H.F., Baker, J., Jarvis, K.E., Mason, P.R.D. and Menzies, M.A., 2000, On and off the North China Craton: Where is the Archaean keel? *Journal of Petrology*, 41, 933-950.
- Gao, S., Rudnick, R.L., Carlson, R.W., McDonough, W.F. and Liu, Y.-S., 2002, Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 198, 307-322.
- Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Abe, N., Aulbach, S., Davies, R.M., Pearson, N.J., Doyle, B.J. and Kivi, K., 2003, The origin and evolution of Archean lithospheric mantle. *Precambrian Research*, 127, 19-41.
- Gung, Y., Panning, M. and Romanowicz, B., 2003, Global anisotropy and the thickness of continents. *Nature*, 422, 707-711.
- Guo, F., Fan, W., Wang, Y. and Lin, G., 2003, Geochemistry of late Mesozoic mafic magmatism in west Shandong Province, eastern China: characterizing the lost lithospheric mantle beneath the North China Block. *Geochemical Journal*, 37, W63-77.
- Horie, K., Tsutsumi, Y., Kim, H., Cho, M., Hidaka, H. and Terada, K., 2009, A U-Pb geochronological study of migmatitic gneiss in the Busan gneiss complex, Gyeonggi massif, Korea. *Geosciences Journal*, 13, 205-215.
- Huang, J. and Zhao, D., 2004, Crustal heterogeneity and seismotectonics of the region around Beijing, China. *Tectonophysics*, 385, 159-180.
- Huang, Z., Li, H., Zheng, Y. and Peng, Y., 2009, The lithosphere of North China Craton from surface wave tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 164-173.
- Jaupart, C. and Mareschal, J.C., 1999, The thermal structure and thickness of continental roots. *Lithos*, 48, 93-114.
- Kil, Y.-W., 2007, Geochemistry and petrogenesis of spinel ilmenite xenoliths from Boeun, Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29, 29-40.
- Kim, C.-B., Turek, A., Chang, H.-W., Park, Y.-S. and Ahn, K.-S., 1999, U-Pb zircon ages for Precambrian and Mesozoic plutonic rocks in the Seoul-Cheongju-Chooncheon area, Gyeonggi massif, Korea. *Geochemical Journal*, 33, 379-397.
- Kim, S.W., Williams, I.S., Kwon, S. and Oh, C.W., 2008, SHRIMP zircon geochronology, and geochemical characteristics of metaplutonic rocks from the south-western Gyeonggi Block, Korea: Implications for Paleoproterozoic to Mesozoic tectonic links between the Korean Peninsula and eastern China. *Precambrian Research*, 162, 475-497.
- Lastowka, A. and Sheehan, A.F., 2001, Seismic evidence for partial lithospheric delamination model of Colorado Plateau uplift. *Geophysical Research Letters*, 28, 1319-1322.
- Lee, K.-S., Chang, H.-W. and Park, K.-H., 1998, Neoproterozoic bimodal volcanism in the central Ogcheon belt, Korea: age and tectonic implication. *Prec. Res.* 89, 47-57.
- Lee, S.R., Cho, D.-L., Cho, M., Wu, F.-Y., Kim, H. and Jeon, H., 2007, Hf isotopic evidence for Paleoproterozoic (>3.5 Ga) crustal components in the Korean Peninsula. *Geosciences Journal*, 11, 271-277.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H. and Wingate, M.T.D., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the north-western margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precambrian Research*, 122, 297-310.
- Lee, S.R. and Walker, R.J., 2006, Re-Os isotope systematics of mantle xenoliths from South Korea: evidence for complex growth and loss of lithospheric mantle beneath East Asia. *Chemical Geology*, 231, 90-101.
- Li, S., Huang, F. and Li, H., 2002, Post-collisional lithosphere delamination of the Dabie-Sulu orogen. *Chinese Science Bulletin*, 47, 259-263.
- Li, Z., Xu, Y., Hao, T., Xu, Y. and Liu, J., 2009, P wave Velocity Structure in the Crust and Upper Mantle Beneath Northeastern South China Sea and Surrounding Regions. *Earth Science Frontiers*, 16, 252-260.
- Liu, M., Cui, X. and Liu, F., 2004, Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? *Tectonophysics*, 393, 29-42.
- Liu, S., Pan, Y., Xie, Q., Zhang, J. and Li, Q., 2004, Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Research*, 130, 229-249.
- Menzies, M.A., Rogers, N., Tindle, A.G. and Hawkesworth, C.J., 1987, Metasomatic and enrichment processes in lithospheric peridotites, an effect of asthenosphere-lithosphere interaction. In: Menzies, M.A. and Hawkesworth, C.J. eds. *Mantle Metasomatism*. London, UK, Academic Press, pp. 313-361.
- Oh, C.W., Kim, S.W. and Williams, I.S., 2006, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- Okamura, S., Arculus, R.J. and Martynov, Y., 2005, Ceno-

- zoic magmatism of the north-eastern Eurasian margin: the role of lithosphere versus asthenosphere. *Journal of Petrology*, 46, 221-253.
- Pearson, D.G., 1999, The age of continental roots. *Lithos*, 48, 171-194.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T. and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Robinson, J.A.C. and Wood, B.J., 1998, The depth of the spinel to garnet transition at the peridotite solidus. *Earth and Planetary Science Letters*, 164, 277-284.
- Sagong, H., Cheong, C.-S. and Kwon, S.-T., 2003, Paleoproterozoic orogeny in South Korea: evidence from Sm-Nd and Pb step-leaching garnet ages of Precambrian basement rocks. *Precambrian Research*, 122, 275-295.
- Santosh, M., Zhao, D. and Kusky, T., 2010, Mantle dynamics of the Paleoproterozoic North China Craton: A perspective based on seismic tomography. *Journal of Geodynamics*, 49, 39-53.
- Seber, D., Barazangi, M., Ibenbrahim, A. and Demnati, A., 1996, Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rif-Betic mountains. *Nature*, 379, 785-790.
- Tian, Y., Zhao, D., Sun, R. and Teng, J., 2009, Seismic imaging of the crust and upper mantle beneath the North China Craton. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 172, 169-182.
- Turek, A. and Kim, C.-B., 1996, U-Pb zircon ages for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochemical Journal*, 30, 231-249.
- Workman, R.K., Hart, S.R., Jackson, M., Regelous, M., Farley, K.A., Blusztajn, J.S., Kurz, M.D. and Staudigel, H., 2005, Recycled metasomatized lithosphere as the origin of the Enriched Mantle II (EM2) end-member: evidence from the Samoan Volcanic Chain. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5, Q04008, doi:10.1029/2003GC000623.
- Wu, F.-Y., Han, R.H., Yang, J.H., Wilde, S.A., Zhai, M.G. and Park, S.C., 2007, Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using UPb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238, 232-248.
- Wu, F.-y., Walker, R.J., Ren, X.-w., Sun, D.-y. and Zhou, X.-h., 2003, Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China. *Chemical Geology*, 196, 107-129.
- Wu, F.-Y., Walker, R.J., Yang, Y.-H., Yuan, H.-L. and Yang, J.-H., 2006, The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 5013-5034.
- Xu, Y.-G., 2001, Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26, 747-757.
- Xu, Y.-G., 2007, Diachronous lithospheric thinning of the North China Craton and formation of the Daxin'anling-Taihangshan gravity lineament. *Lithos*, 96, 281-298.
- Yang, W., 2009, The crust and upper mantle of the Sulu UHPM belt. *Tectonophysics*, 475, 226-234.
- Yang, J.-H., Wu, F.-Y. and Wilde, S.A., 2003, A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning. *Ore Geology Review*, 23, 125-152.
- Yang, J.-H., Wu, F.-Y., Wilde, S.A. and Liu, X.-M., 2007, Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chemical Geology*, 242, 155-175.
- Yao, H., Xu, G., Zhu, L. and Xiao, X., 2005, Mantle structure from inter-station Rayleigh wave dispersion and its tectonic implication in western China and neighboring regions. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 148, 39-54.
- Yi, K. and Cho, M., 2009, SHRIMP geochronology and reaction texture of monazite from a retrogressive transitional layer, Hwacheon Granulite Complex, Korea. *Geosciences Journal*, 13, 293-304.
- Yu, J.-H., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., Xu, X., Zhang, M., and Zhou, X., 2003, The thermal state and composition of the lithospheric mantle beneath the Leizhou Peninsula, South China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 122, Issues 3-4, 1 April 2003, Pages 165-189.
- Zhang, H.-F., 2005, Transformation of lithospheric mantle through peridotite-mantle reaction: a case of Sino-Korean craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 237, 768-780.
- Zhang, S.-H., Zhao, Y., Liu, X.-C., Liu, D.-Y., Chen, F., Xie, L.-W. and Chen, H.-H., 2009, Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complexes from the northern North China Block: constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle. *Lithos*, 110, 229-246.
- Zhao, G., Cao, L., Wilde, S.A., Sun, M., Choe, W.J. and Li, S., 2006, Implications based on the first SHRIMP UPb zircon dating on Precambrian granitoid rocks in North Korea. *Earth and Planetary Science Letters*, 251, 365-379.
- Zhao, G., Wilde, S.A., Cawood, P.A. and Sun, M., 2001, Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107, 45-73.
- Zheng, J., Chunmei, Y.U., Zhang, Z. and Tang, H., 2007, Age and composition of peridotites: implications for the lithospheric thinning accompanying with mantle replace-

- ment beneath the Eastern North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 14, 87-97.
- Zhu, G., Shi, Y. and Tackley, P., 2010, Subduction of the Western Pacific Plate underneath Northeast China: Implications of numerical studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 178, 92-99. Jaupart, C. and Marschal, J.C., 1999, The thermal structure and thickness of continental roots. *Lithos*, 48, 93-114.
-
- 2010년 6월 15일 접수
2010년 6월 16일 심사개시
2010년 7월 28일 채택