

## Seismic evidence for distinct anisotropy in the innermost inner core

Fenglin Niu and Qi-Fu Chen

Nature Geoscience, 2008

Summarized by Seongryong Kim

관련된 phase가 맨틀 heterogeneous에 오염되기 때문에 내핵의 깊은 곳을 연구하기는 어렵다. 그러나 본 연구에서는 PKIKP와 내핵 내부에서 외핵과의 경계면에서 한번 반사되어, PKIKP와 같은 지점에 도달한 phase인 PKIIKP1, PKIIKP2 (1은 minor-arc, 2는 major-arc를 전파)를 이용하여 그 difference time을 측정하고 PREM model과 비교하여 내핵 심부의 anisotropy를 관측하였다. 이 phase들은 맨틀에서의 ray path가 크게 다르지 않고, D''에서 거의 수직으로 통과하기 때문에 맨틀의 영향을 크게 받지 않는다.

특히 PKIIKP phase는 ICB에서의 매우 약한 반사로 인해 관찰하기 힘들데, 깊은 지진의 경우 이 phase가 18~55초 후에 도달하게 되어 관찰이 가능해진다. 깊은 지진이 발생하는 곳 반대편에 대륙이 있는 곳이 별로 없는데, 저자들은 인도네시아와 아르헨티나에서 발생한 깊은 지진이 지구 반대편 베네수엘라와 중국의 array에서 각각 관찰된 것을 발견하였다 (BOLIVAR(PASSCAL), CDSN(중국)). 이 두 path는 적도면에서 각각 8도, 28도 기울어져 있기 때문에(ray angle) 두 방향을 비교하여 내핵의 anisotropy를 알아볼 수 있다.

인도네시아 지진의 경우 source mechanism이 지구 반대편 path에 적당해서 BOLIVAR에서 확실한 polarity가 뒤집힌 PKIIKP2를 관찰할 수 있었다. 가장 먼 station에서는 같은 polarity의 PKIKP와 비슷한 PKIIKP1도 관찰되었다. 이러한 결과는 PREM을 이용하여 계산한 synthetic과 유사한 모양을 보여주는 것을 확인할 수 있다(그림 1b 와 3a)(참고 : polarity에 대한 설명 - PKIIKP1 polarity는 ICB에서의 negative reflection과 underside reflection wave의 internal caustic surface에 의한  $\pi/2$  phase shift의 조합이 어떻게 되는지를 반영한다. PKIIKP2의 경우는 major-arc를 통해 반대편으로 가면서  $\pi/2$  phase shift가 추가된다). 그러나 아르헨티나 지진이 CDSN에 도달하는 대부분의 경우 명확한 PKIIKP phase를 보여주지 않았으나 모든 back azimuth의 wave가 모이는 지점인 180도 가까운 곳의 경우 큰 amplitude 증가를 보여 주었다.

그래서 명확하게 PKIKP phase를 측정하고 PKIIKP-PKIKP 시간을 재기 위해 second-order phase-weight slant stacking을 했다. PKIIKP1,2 둘 다 잘 관찰되었고 그 결과는 인도네시아 지진의 PKIIKP1을 제외하고 PREM을 통한 예측과 완전히 일치한다. PKIIKP1-PKIKP time과 PKIIKP2-PKIKP time을 측정하고 여기에 PREM을 이용하여 구한 differential time을 빼서 travel time residual을 구하였다. 그 결과를 보면 인도네시아-BOLIVAR path는 PREM에 대하여 ~1.8초의 time residual을 보여주었으나 아르헨티나-CDSN path는 PREM과 완전히 일치하였다. Beam-forming을 통해 PKIIKP phase들이 great-circle ray-path 방향으로 정확히 들어왔음을 확인했다.

CMB의 heterogeneity는 Fresnel zone까지 고려 할 때 PKIIKP, PKIKP 모두 400km 범위의 CMB를 통과했고(그림 a의 inset) 따라서 큰 스케일(수백킬로미터)의 heterogeneity는 differential time에 영향을 미치지 않는다. 수십킬로미터의 작은 스케일의 heterogeneity의 경우는 array내의 각각의 관측이 다르게 나오게 만드는데, 그러한 것이 관측되지 않았고, stacking과정에서 이러한 것들은 상쇄되어 약한 amplitude가 나오게 만드는데 이러한 것 역시 없었다. 따라서 작은 스케일의 heterogeneity의 영향도 미미하다고 생각할 수 있다.

D''에서 PKIKP, PKIIKP phase는 거의 수직으로 통과한다. 따라서 D''에서 (맨틀 최 하부 200 km)의 통과 시간은 각각 28, 31초이다. 만약 1.8초의 differential time을 보이려면, D'' layer 전체에 걸쳐 6%의 p파 anomaly가 있어야 한다는 계산이 나온다. 또는 PKIKP path에 3%의 anomaly와 PKIIKP path에 -3%의 anomaly가 있어야 하는데 이는 Fresnel zone을 고려할 때 두 phase의 path는 겹친다고 생각할 수 있다. 또한 현재의 3d p파 맨틀 모델에 의하면 맨틀은 0.2초 정도의 differential time을 야기한다. ULVZ는 10%정도의 anomaly를 보이는데 두께가 50km정도 이므로 이에 의한 최대 travel time anomaly는 0.4초 정도이고 이는 관측값 1.8초에 못미친다. 따라서 D''에서의 영향도 없다고 할 수 있다.

PKIIKP-PKIKP differential time은 지구 ellipticity와 내핵 반경의 변화에도 insensitive하다. ray-tracing을 통해 계산한 결과 내핵 반지름의 1 km증가는 겨우 0.04초의 변화만을 야기했다.

source location의 경우 깊이가 10 km변하면 0.01초 차이가 생겼고, epicentral location이 10 km 변하면 많아야 0.17초의 차이가 생겼다. station이 넓게 퍼져있기 때문에 source location이 심하게 다를 경우 station들 사이의 travel time이 들쭉날쭉해 지게 될텐데, 이러한 것은 없었다.

따라서! differential travel-time residual이 내핵의 heterogeneity나 anisotropy에 의한 것이라 생각할 수 있다. PKIKP들의 내핵에서의 path는 상부 80 km를 지나고 '동반구' '서반구'를 각각 반정도 다 지나기 때문에 내핵 상부(표면)의 degree-one heterogeneity의 영향은 적다고 생각할 수 있다. 그림 2a에서 볼 수 있듯, 이 연구에 사용된 ray의 coverage는 지구의 70%를 지나기 때문에 ICB근처의 작은 속도 anomaly에 의한 영향은 배제할 수 있을 것이다. PKIKP의 경우 두 지진-station간의 path들이 겹치는 경우가 매우 많기 때문에 만약 anomaly가 있다면 두 경우의 dataset모두에 그러한 영향이 나타날 것이다. 따라서 관측된 travel-time residual은 더 빨리 PKIKP phase가 도달했기 때문이라 생각하는 것이 더 타당하다.

두 경우의 path 모두 equatorial path에 가깝게 지난다(ray angle이 equatorial plane에 대해 30도 이하이다). 이는 회전축에 평행한 방향으로 속도가 빠른 기존의 anisotropy모델로 설명하기 어렵다. 다른 phase를 이용한 differential time 연구들 (PKPbd-PKPdf 같은..)에 의해 잘 정의된 내핵 상부에 의해서는 PKIKP의 travel-time anomaly에 크게 영향을 미치지 않는다. 따라서 관찰 결과는 내핵 깊은 부분에 의한 것이어야 한다. 이 깊은 곳에서는 두 path의 PKIKP ray의 거리차이가 280 km 이하이고 이는 0.5 Hz의 p파의 Fresnel zone보다 더 작다. 따라서 PKIKP path에 있는 국소적인 heterogeneity는 두 path 모두에 영향을 미치게 된다. 그래서 인도네시아-베네수엘라 path에서 관찰된 1.8초의 travel-time residual은 적도면에서 더 기울어 질 수록 느려지는 anisotropy에 의한 것으로 설명할 수 있다.

본 연구는 이러한 anisotropy를 구분해 낼 수 있는 해상도를 가지고 있지 않다. 이 연구의 결과는 PKIKP travel-time data를 이용하여 만들어진 innermost inner core (IMIC) model과 일치한다. IMIC는 300 km 반경으로 적도면에서 45도 방향의 속도가 느리다. hexagonal close-packed, body-centered-cubic crystal aggregate가 그러한 anisotropy를 야기할 수 있다는 연구가 있다.