

Ray Tracing을 이용한 지진파 특성 분석

전정수¹⁾, 전명순¹⁾, 제일영¹⁾

1. 서론

일차적으로 지진요소가 결정되면, 지진요소 결정시 사용한 지각구조에 대한 Ray tracing을 통해 지진요소의 정확도를 평가할 수 있을 뿐만 아니라 초동파와의 phase의 이론적 도달시간과 진폭 등을 계산하여 관측된 지진자료로부터 더욱 많은 정보를 추출할 수 있다. 또한 현재까지 대부분의 ray tracing은 수평구조에 대해 수행되었으나, 각거리의 증가에 따라 오차가 비례적으로 증가하여 최근들어 isosphere 구조에 대해 수행하는 추세에 있다.

본 연구에서는 Ecole Normale Superieure의 Henri-Claude Nataf(1995)에 의해 개발된 "Spheray" fortran source code (ver. 7v7)를 이용하여 ray tracing을 수행하였다. 본 Spheray은 isotropic spherical earth model에서 ray parameter를 이용하여 진앙거리에 따른 각 phase별 주시시간(travel time), 진폭 등을 계산하는 프로그램으로서 IRIS 등 세계적으로 사용되고 있다. 따라서 ray tracing을 통해 각각의 phase의 특성을 분석하여 향후 지진자료분석시 판단기준으로 활용할 수 있을 것이다.

2. 주시시간 분석

실제 관측되는 많은 phase들은 각거리 3° (약 330km) 이내의 event에 의해 발생된 것이다. 그러나 각거리 3° 이내의 근거리 event의 phase들은 국지적인 이상과 수평적 변화에 매우 민감하게 반응하여 매우 복잡한 양상을 보여준다. 또한 이들 근거리 phase는 각 지역의 지질학적 특성에 많은 영향을 받으므로 이에 대한 충분한 분석이 우선적으로 수행되어야 한다.

진원에서 전파한 파는 무수히 많은 전파경로를 통해 관측소에 도달할 수 있으나, 실제 관측자료의 분석시에는 초동 phase 및 진폭이 상대적으로 뚜렷하게 나타날 수 있는 제한적인 phase만을 적용하므로 본 연구에서는 이중 대표적인 p, PmP, Pn 및 Pg phase와 s, SmS, Sn 및 Sg phase에 대해서만 고려했다. 여기서 p phase는 take-off angle이 90° 이상인 phase로, Pg phase는 take-off angle이 90° 이내이며 moho면을 통과하거나 moho면에서 반사하지 않는 phase로 구분하였다. Pg phase의 경우 위의 조건을 만족시키면서도 ray parameter가 다른 즉 take-off angle이 다른 phase들이 있을 수 있으며, 이런 경우에는 가장 도달시간이 빠른 phase를 Pg phase로 정하였다. PmP 및 Pn phase는 각각 moho면에서 반사된 phase와 굴절된 phase이다.

관측된 phase들은 비록 산란된 분포를 보이지만 분포 범위내에서 뚜렷한 선상배열 양상을 보여주고 있다. Hsu 속도구조모델로부터 계산된 이론 도달시간은 이들 선상배열과 매우 잘 일치하고 있다. P phase의 경우 각거리 1° 미만의 경우 p phase와 잘 일치하며, 각거리 2° 이상의 경우 Pg 혹은 PmP와 잘 일치한다. 반면 각거리가 1~2° 사이의 경우 대부분의 관측자료가 이 범위에 속하나 각 phase들의 이론적 도달시간도 매우 차이가 작게 나고 있다. 각거리 1.7° 이전에는 p phase가 가장 먼저 도달하나, 이후에는 Pn phase가 먼저 도달한다. 특히 각거리 1.7° 부근에서 각 phase별 최대 시간차는 0.45초이나, 각거리 3.0° 부근에서는 1.89초 정도 차이가 난다. 일반적으로 측정된 단주기 지진계의 고유주파수가 1 Hz임을 고려할 때 각거리 1~2° 범위에서 각각의 phase를 구별하기는 매우 어려운 것이다. 또한 각거리 2° 이상의 범위에서 실제 관측자료의 선상배열은 Pg phase와는 잘 일치하나 Pn phase와는 거의 일치하지 않고 있으며, 이는 우리나라에서의 event의 규모와 각거리를 고려할 때 대부

본의 경우 Pn phase가 배경잡음보다 작거나 배경잡음으로부터 Pn phase를 구별해내기가 어려웠던 것으로 판단된다.

S phase의 경우 이론적으로는 각거리 1.5° 이전은 s phase가 이후에는 Sn phase가 먼저 도달되는 것으로 계산되나 실측자료는 이들 s 및 Sn phase보다 약간 늦은 도달시간을 보여주고 있다. 이는 실측자료의 경우 어떤 초동 S phase보다는 여러 S파들의 상호 간섭에 의해 진폭이 증폭되어 나타나는 Lg phase가 식별의 용이성으로 인한 것으로 판단된다. 전체적으로 S phase는 P파보다 주기가 길어 각 phase가 인접할 경우 식별이 어려우며, 이전에 선행하는 P파와 배경잡음등으로 인해 각각의 phase를 식별하기는 매우 어려운 문제이다.

김상조의(1983) 속도구조모델에 의해 계산된 도달시간은 전체적으로 Hsu의 속도구조모델에서 계산된 결과와 비슷한 양상을 보이지만 각 층의 속도 차이로 인해 Pn 및 Sn phase와 이후 도달하는 phase 들과의 시간차이는 각거리가 증가할수록 커져 3° 부근에서는 P phase의 경우 5.93초의 시간차이를 보인다. P phase의 경우 각거리 1° 미만의 경우 p phase와 잘 일치하며, 각거리 2° 이상의 경우 Pg 혹은 PmP와 잘 일치한다. 반면 각거리가 1~2° 사이의 경우 이론적 도달시간이 실제 관측결과보다 약간 늦게 도달하는 것으로 나타나고 있다. 특히 Hsu 속도구조모델의 경우와 달리 각거리 1.3° 이후에는 Pn phase가 먼저 도달하는 것으로 나타나고 있다. 전체적으로 각거리 1° 미만의 경우 실측자료와 잘 일치하나 각거리 1° 이상의 경우 시간차이가 크게 나타나고 있다.

S phase의 경우 각거리 1.3° 이전에는 s phase가 각거리 1.3° 이후에는 Sn phase가 먼저 도달하며, 각거리가 증가할수록 Sn과 Sg phase간의 도달시간 차이는 커져 각거리 3° 부근에서는 8.60초 정도의 시간차가 난다. 전체적으로 실측자료와는 각거리 2° 부근을 중심으로 이전은 관측자료가 이후는 이론도달시간이 먼저 도착하여, Hsu 속도구조모델에 비해 관측자료와의 일치성 정도가 낮다.

3. P phase의 진폭 분석

ray tracing결과를 실제 관측자료에 적용하고 분석하기 위해서는 계산상으로 나타난 여러 phase들의 진폭에 대한 정보가 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 source 부근에서의 진폭을 1로 정하고, 지진파가 전파함에 따른 기하학적 감쇠와 불연속면에서의 투과와 반사계수에 따른 에너지 감쇠만을 고려하여 각거리에 따른 진폭을 정규화(normalized)하여 계산하였으나 Pn phase와 같은 굴절파의 진폭은 계산하지 않았다.

각거리의 증가에 따른 p, PmP 및 Pg phase의 정규화된 진폭을 계산한 결과, 각거리가 0.1° 에서 p 및 PmP phase의 진폭은 source 부근에 비해 각각 0.1 및 0.02 정도로 급격히 감소하는 것을 보여주고 있다. 각거리가 증가함에 따라 p 및 Pg phase는 지수함수적으로 감소하는 반면 PmP phase는 일정하게 감소하는 양상을 보여주며, 각거리 3° 부근에서는 진폭이 약 3배 정도의 차이가 난다. Pg phase의 경우 각거리 2.5° 부근에서 진폭의 변화가 일정치 않은 것은 Pg 계열의 phase들 중에서 가장 먼저 도달하는 phase가 다르기 때문에 나타난 것으로 전체적인 감쇠 양상은 일정하게 나타나고 있다.

4. 토의

Pg phase의 경우 전파경로가 다른 여러 가지 경우가 있음을 기술하였다. 만약 지구내부의 속도구조가 일정하거나, 일정한 비율로 점이적으로 증가할 경우에는 도달 가능한 phase는 1개 밖에 없을 것이나, 속도구조가 여러 층으로 구성되어 있거나, 급격히 변하거나 혹은 저속도층이 존재할 경우에는 다양한 경로를 통해 온 많은 phase들이 존재하게 된다(Lay et.al, 1995). 본 연구에서 사용한 모델들은

모두 다층구조이며, 각 층도 일정한 값을 갖는 층과 점이적으로 변하는 층들로 동시에 구성되어 있어 다양한 전파경로를 갖는 여러 phase들이 존재할 수 있다.

Pg phase들의 각거리에 따른 도달시간 및 ray parameter를 계산한 결과, P-1의 경우 각거리 0.7° 에서의 ray parameter는 1,012이며, take-off angle은 71.9° 이며 각거리가 증가함에 따라 log함수적으로 증가하여 각거리 3° 에서는 각각 1,061 및 84.6° 이다. P-2 및 P-3의 경우는 ray parameter가 996.20~996.02 및 1064.55~1064.48, take-off angle은 69.2° 및 87.7° 로 각거리에 따라 미세한 변화를 나타내는 특징이 있다. 또한 각거리 3° 에서 P-1, P-2 및 P-3의 rebound depth는 6,356, 6,354, 6,366km이다. 김상조 모델의 경우 상부 지각과 하부 지각의 경계면까지의 반경이 6,356km이므로, P-2의 경우 하부지각의 상부까지, P-3의 경우 상부지각만을 통과하여 도달한 phase이다. Pn phase의 경우 take-off angle 및 rebound depth는 일정하나, P-1 phase의 경우 rebound depth는 상부지각과 하부지각의 경계면인 6,356km로 일정하지만 take-off angle이 큰 폭으로 변하고 있어 향후 추가적인 분석이 필요하다.

주요어 : Ray tracing, 주시시간, P파의 진폭

1) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 지진연구센터