

1996년 12월 13일 M_L 4.5 영월 지진의 지진원 상수

Source parameters for the December 13 1996 M_L 4.5 Earthquake in Yeongwol, South Korea

최호선¹⁾

Choi, Hoseon

국문 요약 >> 1996년 12월 13일 강원도 영월군 지역에서 국지규모(M_L) 4.5의 지진이 발생하였다. 진앙은 37.2545°N , 128.7277°E 이며, 지체구조상 옥천습곡대에 해당한다. 지진자료의 필터링 대역에 따라 파형역산을 수행하였는데, 0.02~0.2 Hz 필터링 대역을 적용할 경우 진원 깊이는 6 km, 지진모멘트는 1.3×10^{16} N·m로 추정되었다. 이 지진모멘트는 모멘트규모(M_w) 4.7에 해당한다. 파형역산과 P파의 초동 극성 분석을 통한 영월 지진의 발진기구는 역단층 성분을 포함한 주향이동단층 특성을 보이며, 주응력 방향은 동북동-서남서 방향이다. 스펙트럼 분석을 통해 추정된 모멘트규모는 4.8이며, 이는 파형역산에 의해 추정된 모멘트규모와 비슷하다. 평균 응력강하는 14.3 MPa로 추정되었다.

주요어 영월, 지진원 상수, 파형역산, 발진기구, 스펙트럼

ABSTRACT >> On December 13, 1996, an earthquake with local magnitude (M_L) 4.5 occurred in the Yeongwol area of South Korea. The epicenter was 37.2545°N and 128.7277°E , which is located inside the Okcheon Fold Belt. The waveform inversion analysis was carried out to estimate source parameters of the event according to the filtering bandwidth of seismic data. Using 0.02~0.2 Hz filtering bandwidth, focal depth and seismic moment were estimated to be 6 km and 1.3×10^{16} N·m, respectively. This seismic moment corresponds to the moment magnitude (M_w) 4.7. The focal mechanism by the waveform inversion and P wave first motion polarity analysis is a strike slip faulting including a small thrust component, and the direction of P-axis is ENE-WSW. The moment magnitude estimated by spectral analysis was 4.8, which is similar to that estimated by waveform inversion. Average stress drop was estimated to be 14.3 MPa.

Key words Yeongwol, Source parameter, Waveform inversion, Focal mechanism, Spectrum

1. 서론

1996년 12월 13일 13시 10분경 강원도 영월군 동쪽 약 20 km 지역에서 국지규모(M_L) 4.5의 지진이 발생하였다. 기상청은 이 지진의 진앙이 내륙이고 진원의 깊이가 깊지 않아, 제주를 포함한 한반도 전역에서 진동을 느꼈으며, 규모에 비해 지진의 감지 범위가 넓었다고 밝히고 있다. 이 지진은 1978년 10월 7일 M_L 5.0의 홍성 지진 이후 남한 내륙

지방에서 처음 발생한 중규모 지진으로서 발생 이후 상당 기간 여진활동이 지속되었으며, M_L 2.5 이상의 여진이 5회 관측되었다.

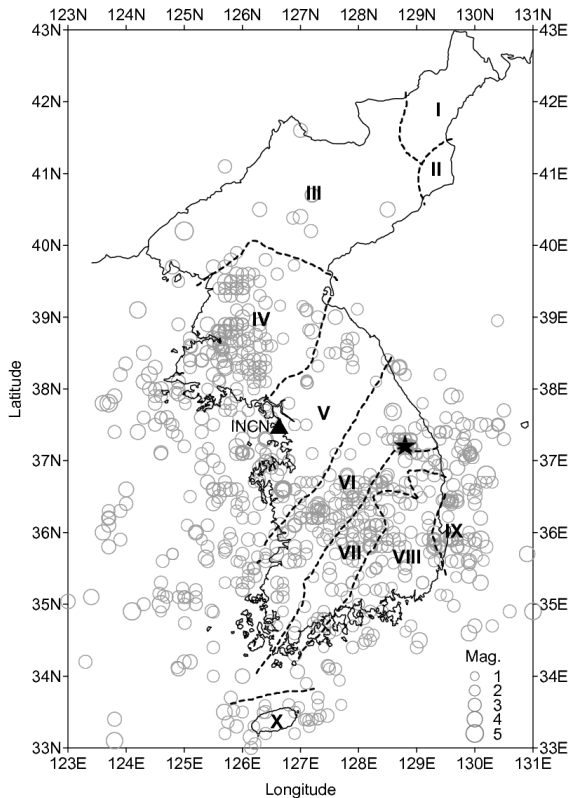
그림 1은 기상청이 본격적으로 지진관측망을 구성하여 지진을 관측하기 시작한 1978년부터 2009년 5월까지 한반도 및 인근 해역에서 발생한 지진의 진앙 분포를 보여주고 있다. 지체구조상 지진이 발생한 지역은 옥천습곡대에 해당한다. 옥천습곡대는 한반도 남부지역에서 경기육괴와 영남육괴 사이에, 북동부의 해안에서부터 남서부의 해안까지 연장 발달하고 있다. 20세기 들어 옥천습곡대에서 발생한 가장 큰 지진은 속리산 지진(1978년 9월 16일, M_L 5.2)으로서 영월 지진으로부터 남서 방향으로 약 100 km 떨어진 지역에서 발생하였다.

이 논문에서는 2006년에 제안된 1차원 지각속도구조 모

¹⁾ 정회원·한국원자력안전기술원, 선임연구원/서울대학교 지구환경과학부
(교신저자: hoseon@kins.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 7. 13 / 수정일 : 2009. 9. 9 / 게재확정일 : 2009. 9. 9)



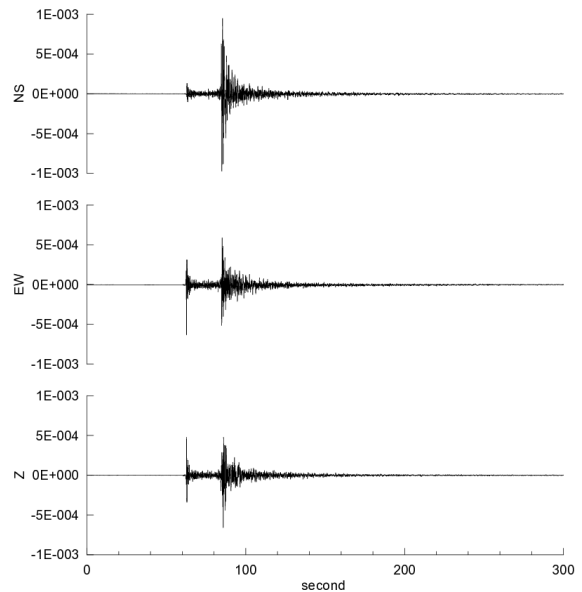
〈그림 1〉 1978년부터 2009년 5월까지 한반도 및 인근 해역에서 발생한 지진의 진앙(회색 원)과 영월 지진의 진앙(별). 점선은 지체구조구 경계(I: 함북습곡대, II: 길주-명천분지, III: 낭림육괴, IV: 평안육괴, V: 경기융괴, VI: 옥천습곡대, VII: 영남육괴, VIII: 경상분지, IX: 연일분지, X: 제주화산대)를 나타내며, 삼각형은 INCN(인천) 지진관측소이다.

델⁽¹⁾을 일관성 있게 적용하여, 영월 지진의 위치, 발진기구, 모멘트규모 등과 같은 지진원 상수를 추정하여 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 지진의 위치

기상청은 영월 지진의 진앙 위치를 37.20°N, 128.80°E로, 한국지질자원연구원은 37.2518°N, 128.7113°E로 발표하였다. 이번 연구에서는 Chang and Baag⁽¹⁾ 모델을 지각속도구조 모델로 사용하여 영월 지진의 진앙 위치를 재결정하였다. 이 모델은 광대역 지진파형과 경로시간을 함께 분석하여 구한 1차원 지각속도구조 모델이다. 각 지진자료의 P파 초동시간을 선택하기 위해 한국지질자원연구원의 디지털 지진자료 9개와 GSN(Global Seismographic Network)의 디지털 지진자료 1개를 사용하였다. 또한 기상청 아날로그 지진자료 5개에 대해서는 Song⁽²⁾에 제시된 P파 초동시간을 사용하였다. HYPOINVERSE-2000⁽³⁾을 이용하여 계



〈그림 2〉 INCN 지진관측소에 기록된 영월 지진의 삼성분 속도파형. 진폭의 단위는 m/sec이다.

산한 결과, 영월 지진의 진앙은 37.2545°N, 128.7277°E로 한국지질자원연구원이 발표한 진앙과 크게 다르지 않다. 진원 깊이는 8.5 km로 추정되었으나, 2.2절에서 파형역산(Waveform Inversion)을 통해 재결정하였다.

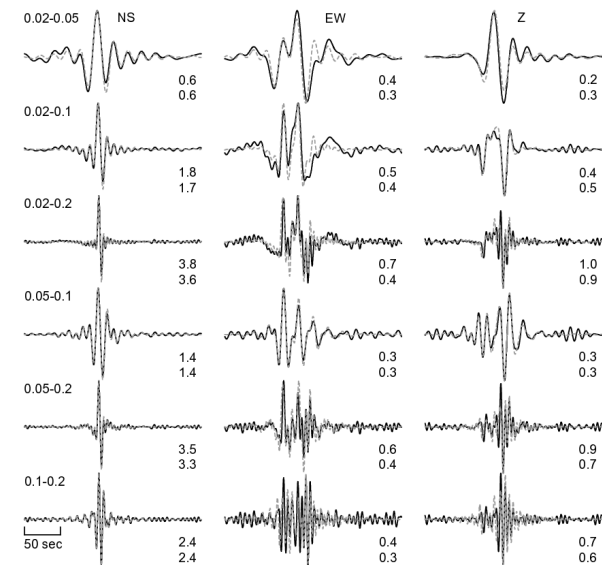
2.2 발진기구

2.1절에서 결정한 본진의 진앙을 고정하여 발진기구를 계산하였다. 일반적으로 발진기구 계산은 저주파수 영역을 이용하기 때문에 장주기나 광대역 지진자료가 필요하다. 영월 지진을 기록한 기상청의 지진자료는 아날로그 지진자료이므로 파형역산을 적용하기 어려우며, 한국지질자원연구원의 지진자료는 디지털 지진자료이지만, 단주기 지진자료이고 포화되어(Saturated) 파형역산을 적용할 수 없다. 다행히 GSN의 INCN(인천) 지진관측소에서 파형역산에 사용 가능한 디지털 지진자료를 취득할 수 있었다(그림 2). 관련 지진자료는 IRIS(International Research Institutions for Seismology) 홈페이지(<http://www.iris.edu>)를 통해 취득할 수 있다.

파형역산을 위해 사용된 지각속도구조 모델은 지진의 진앙을 결정할 때 사용된 Chang and Baag⁽¹⁾ 모델을 사용하였으며, S파의 지각속도구조 모델을 위해 포아송비(Poisson's Ratio)는 1.78을 사용하였다. 파형역산에 포함되는 지각속도구조 모델의 Qs는 Kim et al.⁽⁴⁾에 의해 제시된 결과를 바탕으로 380으로 설정하였으나, 장주기 신호의 파형 모델링에는 큰 영향을 주지 않는다. 광대역 속도 지진자료는 계기 보정을 실시한 후 적분하여 변위기록으로 바꾸었다.

이상적으로는 단일 지진관측소 지진자료만으로도 발진기구와 진원 깊이를 계산하는데 충분하지만⁽⁵⁾, 실제로는 파형역산에 입력되는 파라미터의 불확실성, 지진자료에 포함된 잡음 등의 영향으로 두 곳 이상에서 기록된 지진자료가 필요하다. Kim and Kraeva⁽⁶⁾는 이 연구와 같은 단일 지진관측소의 지진자료를 이용하여 지각속도구조 모델이 영월 지진의 발진기구에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 평가하였다. 이 연구에서는 적용되는 필터링 대역(Filtering Bandwidth)이 발진기구에 어떠한 영향을 주는지 확인하였다. 적용한 필터링 대역은 6개(0.02~0.05, 0.02~0.1, 0.02~0.2, 0.05~0.1, 0.05~0.2, 0.1~0.2 Hz)이다.

Green 함수 계산을 위해 Bouchon⁽⁷⁾이 제안한 주파수-파수법을 적용하였다. 지진은 단층작용에 의해 발생하므로, 순수한 Deviatoric 성분의 지진원으로 간주하여 장주기 신호의 파형을 모델링하였고, 파형역산을 위해 지진관측소 파형의 상대적인 시간 이동(Time Shift)을 허용하였다.⁽⁸⁾



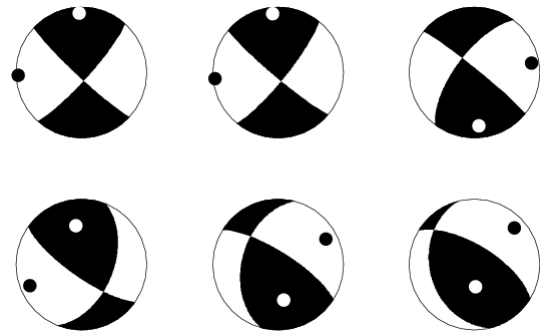
〈그림 3〉 최대 진폭으로 정규화하여 비교한 관측 지진파형(실선)과 합성 지진파형(점선). 파형의 왼쪽 상단 숫자는 적용한 필터링 대역이며, 단위는 Hz이다. 파형의 오른쪽 하단 숫자는 관측 지진파형(위)과 합성 지진파형(아래)의 최대진폭을 의미하며, 진폭의 단위는 10⁻⁵ m이다.

그림 3은 적용한 필터링 대역에 따른 관측 지진파형과 합성 지진파형을 최대진폭으로 정규화하여 비교한 것이다. 파형의 왼쪽 상단 숫자는 적용한 필터링 대역이며, 단위는 Hz이다. 파형의 오른쪽 하단 숫자는 관측 지진파형(위)과 합성 지진파형(아래)의 최대진폭을 의미하며, 단위는 10⁻⁵ m이다. 전체적으로 관측 지진파형과 합성 지진파형은 잘 일치한다. 표 1은 적용한 필터링 대역에 따른 Variation Reduction (VR), 진원 깊이 및 모멘트규모를 나타내고 있다. VR은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$VR = 1 - \frac{\sum (d_i - s_i)^2}{\sum (d_i)^2} \quad (1)$$

여기에서 d_i 는 관측 지진파형, s_i 는 합성 지진파형을 나타낸다.

그림 4는 적용한 필터링 대역에 따른 영월 지진의 발진기구를 도시한 것이다. 대부분의 주응력 방향은 동북동-서남서 방향이다. 한반도 및 주변에서 단층작용을 일으키는 주응력 방향은 같은 판내 지역인 북동부 중국 지역의 주응력 방향과 매우 유사하다고 알려져 있다.⁽⁹⁾



〈그림 4〉 필터링 대역에 따른 영월 지진의 발진기구. 상단은 왼쪽부터 0.02~0.05, 0.02~0.1, 0.02~0.2 Hz, 하단은 왼쪽부터 0.05~0.1, 0.05~0.2, 0.1~0.2 Hz의 필터링 대역이 적용되었다. 작은 검은 원과 흰 원은 각각 P축과 T축을 나타낸다.

〈표 1〉 적용한 필터링 대역에 따른 Variation Reduction, 진원 깊이 및 모멘트규모

필터링 대역 (Hz)	Variance Reduction (%)	진원 깊이 (km)	모멘트규모 (M _w)
0.02~0.05	84	16	4.9
0.02~0.1	91	7	4.7
0.02~0.2	88	6	4.7
0.05~0.1	98	5	4.7
0.05~0.2	91	4	4.6
0.1~0.2	91	3	4.6

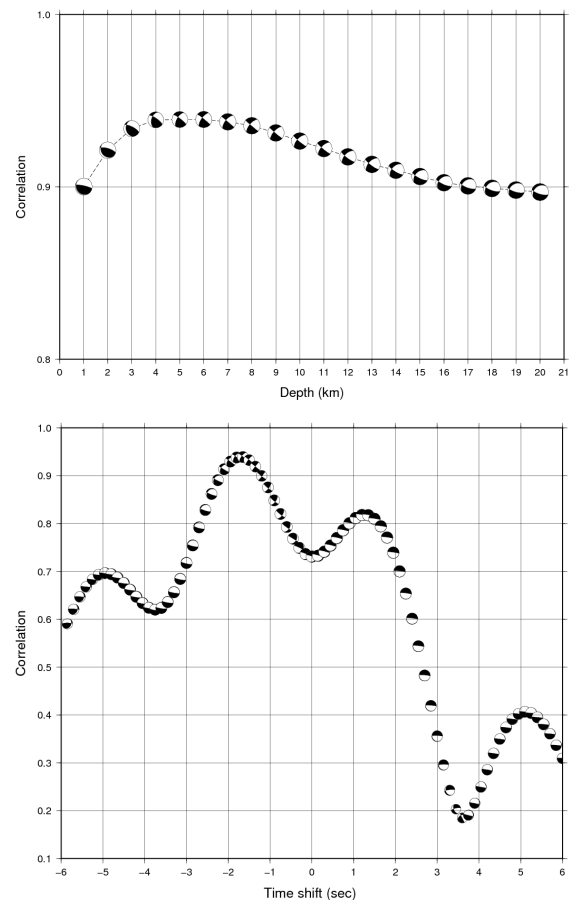
Kubo et al.⁽⁵⁾에 따르면 규모 3.5 이상 5 미만, 거리가 50 km 이상일 경우, 0.02~0.05 Hz 필터링 대역을 사용하도록 제안하였는데, 이는 경험적으로 제시된 값이다. 국내 지진의 경우, 이 규모 범위 내에서도 규모가 작으면 0.05~0.1 Hz 이 적당하고, 규모가 크면 0.02~0.05 Hz이 적당한 것으로 판단되나, 일괄적으로 정하기에는 연구결과가 부족하다. 다수의 지진관측소를 사용하는 경우에는 낮은 필터링 대역(0.02~0.05 Hz)을 사용하거나 높은 필터링 대역(0.05~0.1 Hz)을 사용해도 비슷한 결과를 보여준다. 이상적으로는 단일 지진관측소의 경우, 3개 성분(동서, 남북, 상하)의 자료만으로도 지진의 깊이, 발진기구, 모멘트규모 등과 같은 지진원 상수를 모두 구할 수 있으나, 잡음 등의 문제를 고려할 때 신중한 판단이 요구된다. 이러한 이유로 관측 지진파형과 합성 지진파형의 일치도인 *VR*만으로 최적의 발진기구를 선택하지 않았다.

0.02 Hz에 가까운 대역을 포함한 파형에 의한 발진기구는 약간의 역단층 성분이 가미된 주향이동단층 특성을 보이며, 0.2 Hz에 가까운 대역을 포함한 파형에 의한 발진기구는 역단층 성분이 더욱 가미된 주향이동단층이나 역단층 특성을 보여준다. 0.02~0.2 Hz 필터링 대역의 발진기구는 이들이 적절하게 혼합된 것처럼 보인다. 우선 *VR*, 진원 깊이 그리고 모멘트규모를 고려하여 0.02~0.05 Hz 필터링 대역의 발진기구를 제외하였으며(표 1 참조), P파 극성을 이용한 발진기구의 선택 정보(그림 7 참조)를 고려하여 0.05~0.1 Hz 필터링 대역의 발진기구를 제외하였다. 0.02~0.1 Hz 필터링 대역의 발진기구를 보면, 0.02~0.05 Hz 필터링 대역의 발진기구와 거의 같은 것으로 보아 0.02~0.05 Hz 필터링 대역이 발진기구 결정에 더 큰 영향을 주는 것으로 보인다. 그러나 0.02~0.2 Hz와 0.05~0.2 Hz 필터링 대역과 같이 0.1~0.2 Hz 필터링 대역이 같이 고려되면 발진기구가 차이를 보인다. 이러한 점을 감안한다면 영월 지진의 발진기구 계산에는 저주파수 필터링 대역(0.02~0.1 Hz)뿐만 아니라 고주파수 필터링 대역(0.1~0.2 Hz)을 모두 고려해야함을 알 수 있다. 따라서 가장 넓은 필터링 대역을 고려하면서도 *VR*이 작지 않고, P파 극성에 의한 발진기구의 선택 정보도 수용할 수 있으며, 2.3절의 스펙트럼 분석에 의한 모멘트규모와 비슷하고, 2.1절에서 재결정된 진원 깊이와 상충하지 않는 0.02~0.2 Hz 필터링 대역에 의한 발진기구를 영월 지진의 발진기구로 선택하였다.

표 1에서 0.02~0.05 Hz 필터링 대역의 모멘트규모(M_w)는 4.9, 0.05~0.2 Hz와 0.1~0.2 Hz 필터링 대역인 경우 4.6으로 추정되었고, 나머지 필터링 대역인 경우 4.7로 추정되었다. 0.02 Hz에 가까운 대역을 포함한 파형에 의한 모멘

트규모는 크게 추정되며, 0.2 Hz에 가까운 대역을 포함한 파형에 의한 모멘트규모는 작게 추정되는 경향이 있었다. 이는 속도 기록을 적분하여 변위 기록으로 변환할 때 생기는 잡음의 영향이 저주파수 대역에서 커지는 현상과 무관하지 않다. 기상청은 2007년 1월 20일에 발생한 오대산 지진의 국지규모를 4.8로 발표하였으나, Jo and Baag⁽¹⁰⁾에 의한 모멘트규모 4.5, Kim et al.⁽¹¹⁾에 의한 모멘트규모 4.6보다 크게 추정되었다. 반면 기상청은 영월 지진에 대한 국지규모를 4.5로 발표하였으나, 이 연구에서의 모멘트규모는 4.6~4.9로, 국지규모보다 크게 추정되었다. 이러한 결과로 볼 때 과거와 현재 기상청의 지진규모 산정에 대한 일관성을 확인할 필요가 있다.

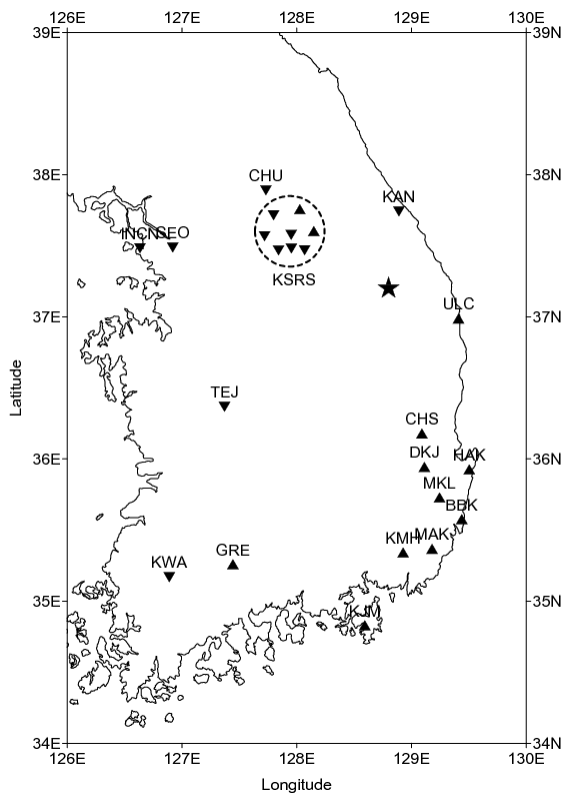
표 1에서 0.02~0.05 Hz 필터링 대역에 의한 진원의 깊이는 16 km이며, 나머지 경우는 3~7 km의 깊이를 보인다. 앞서 기상청이 밝힌 것처럼 영월 지진의 진원 깊이가 깊지 않다고 하였고, 2.1절에서 재결정된 지진의 깊이가 8.5 km이며, 한국지질자원연구원의 연보(Chi et al.⁽¹²⁾)에도 영월 지진의 깊이를 7.68 km로 발표한 것을 고려한다면, 3~7 km로 추정된 깊이가 합리적인 것으로 보인다. 그림 5의 상단



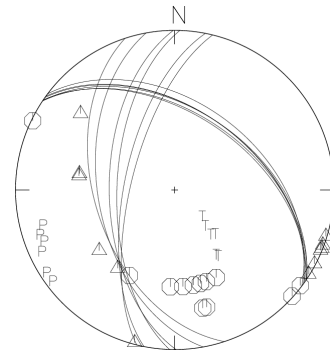
〈그림 5〉 진원의 깊이 변화에 따른 상관계수(상단)와 시간 이동 범위에 따른 상관계수(하단) 그래프(0.02~0.2 Hz 필터링 대역 적용). 각 위치별 발진기구가 도시되어 있다.

그림은 필터링 대역을 0.02~0.2 Hz로 적용했을 경우 깊이 에 대한 상관계수를 도시한 것이다. 지진의 깊이를 1 km부터 20 km까지 1 km씩 증가시키면서 총 20개 깊이에 대한 상관계수를 구하였다. 지진의 깊이가 1 km부터 6 km까지 깊어질수록 상관계수가 점점 증가하다가, 6 km 이후부터는 점점 감소하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 영월 지진의 최종 깊이를 6 km로 결정하였다. 그림 5의 하단 그림은 필터링 대역을 0.02~0.2 Hz로 적용했을 경우 허용된 시간 이동 범위에 따른 상관계수를 도시한 것이다. 허용된 시간 이동 범위는 -6초부터 6초까지 설정하였다. 가장 큰 상관계수를 갖는 시간 이동은 -1.65초이며, 이는 적용된 필터링 대역에서 지각속도구조모델이 실제 지각속도구조보다 약간 느리다는 것을 의미한다.

파형역산 외에 별도로 P파의 초동 극성을 이용하여 영월 지진의 발진기구를 분석하였다. 한국지질자원연구원의 지진 자료나 INCN 지진관측소의 지진자료는 디지털 자료로 육안으로 초동의 극성 판단이 가능하지만, 기상청 지진자료의 경우 아날로그 자료이고 초동의 극성을 육안으로 판단하기 어렵다. 이 연구에서는 기상청과 KSRS(Korea Seismic Research Station)의 지진자료에 대해서는 Baag et al.⁽¹³⁾의 초동 극성을 참고하였으며(그림 6), 지각속도구조 모델은 Chang and



〈그림 6〉 지진관측소별 P파의 초동 극성. 삼각형은 초동 극성이 +이며, 역삼각형은 초동 극성이 -를 나타낸다. 별은 영월 지진의 진앙이다.



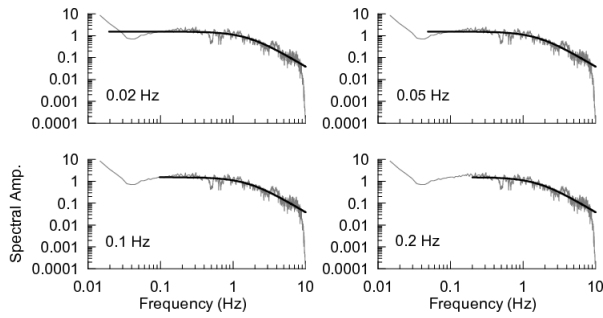
〈그림 7〉 P파의 초동 극성을 이용한 영월 지진의 발진기구. 팔각형은 초동 극성이 +이며, 삼각형은 초동 극성이 -를 나타낸다.

Baag⁽¹⁾을 사용하였다. Baag et al.⁽¹³⁾에서 ULSN을 기상청에서 운영하는 울산 지진관측소라고 하였으나, 당시 기상청은 울진 지진관측소를 운영하고 있었으며, 이 논문의 그림에서도 ULSN의 위치를 울산이 아닌 울진 인근에 도시하고 있다. 영월 지진의 발진기구를 추정하기 위해 FOCMEC⁽¹⁴⁾을 이용하였으며, 주향, 경사, 면선각을 각각 5°씩 증가시키면서 계산하였다. P파의 초동에 대한 오류를 1개까지 허용한 후 계산한 결과 다수의 단층해(~6개)를 얻었으며, 이를 그림 7에 도시하였다. 파형역산에 의한 발진기구와 비교해보면, 0.2 Hz에 가까운 대역의 파형을 포함한 발진기구와 비슷하며, 역단층 성분을 포함한 주향이동단층 특성을 보여준다. 주응력 방향은 파형역산에 의한 결과와 마찬가지로 주로 동북동-서남서 방향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

2.3 스펙트럼 분석

변위진폭스펙트럼 분석을 통해 영월 지진의 모멘트규모를 재계산하였다. 변위진폭스펙트럼은 진원, 비탄성 감쇄, 기하학적 감쇄, 지진계 전달함수 그리고 부지효과의 곱으로 표현할 수 있다. 변위진폭스펙트럼 분석을 위해 3성분 합성 스펙트럼을 사용하였는데, 3성분 합성스펙트럼은 각 성분별 지진자료를 주파수 영역에서 벡터적으로 합성한 스펙트럼으로, 단일 성분에서 나타나는 벡터 분할비를 제거하고 스펙트럼의 형상을 강화하는 장점이 있다⁽¹⁵⁾. 비탄성 감쇄와 기하학적 감쇄에는 파형역산 때와 마찬가지로 Kim et al.⁽⁴⁾에서 제시한 값을 적용하였다. 부지효과는 별도 연구결과가 없기 때문에 1로 고정하였다.

영월 지진의 스펙트럼 분석을 위해 INCN 지진자료를 이용하였다. 육안으로 구분이 가능한 S파 도달시간 2초 전부터 이후 약 200초 구간을 변위진폭스펙트럼을 구하기 위한 시간창(Time Window)으로 설정하였는데, 이 구간은 S파 계열의 파열들이 함께 공존하는 충분한 길이이다. 모멘트구



〈그림 8〉 영월 지진의 INCN 지진관측소 파형자료에 대한 변위진폭스펙트럼(회색 실선)과 변위진폭모델스펙트럼(검은색 실선)의 비교. 각 스펙트럼 상에 기재된 주파수는 변위진폭모델스펙트럼 계산시 저주파수 시작점이다.

모와 모서리주파수(Corner Frequency)를 결정하기 위해서 격자탐색법(Grid Search Method)(Choi et al.⁽¹⁶⁾)을 이용하였다. 격자탐색법은 국지 최소값(Local Minimum)에 빠질 염려없이 전체 구간에서 오차가 최소로 되는 전체 최소값(Global Minimum)을 찾을 수 있는 장점이 있다. 격자탐색법 적용을 위해 모멘트규모는 3부터 6까지 구간에서 0.1 간격을 사용하였고, 모서리주파수는 0.1 Hz부터 10 Hz의 구간에서 0.1 Hz의 간격을 사용하였다. 탐색해야 할 총 격자의 수는 3100개(31×100)이다.

그림 8은 INCN 지진관측소에 기록된 영월 지진의 스펙트럼 분석 결과이다. 일반적으로는 스펙트럼을 분석하여 모멘트규모를 계산할 때는 다수의 지진관측소에 대한 모멘트규모를 구한 후 이를 평균하지만, 이 연구에서는 단일 지진관측소 지진자료만을 이용했기 때문에 INCN 지진관측소에서 구한 모멘트규모를 영월 지진의 모멘트규모로 선정하였다. 2.2절의 필터링 대역을 고려하여, 저주파수 시작점을 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 Hz로 정한 후 각각에 대한 모멘트규모를 계산하였다. 계산 결과 모든 저주파수 시작점에 대해 모멘트규모는 4.8, 모서리주파수는 1.6 Hz, 응력강하는 14.3 MPa로 추정되었다. 스펙트럼 분석에 의한 모멘트규모는 파형역산을 통해 계산된 모멘트규모 4.7과 비슷하다.

3. 결론 및 토의

2006년에 제안된 1차원 지각속도구조 모델⁽¹⁾을 일관성 있게 적용하여, 1996년 12월 13일에 발생한 영월 지진을 분석하였다. 영월 지진의 발진기구, 진원의 깊이와 지진모멘트를 결정하기 위해 파형역산을 수행하였다. 파형역산시 적용되는 필터링 대역에 따라 지진원 상수가 조금씩 차이를 보인다. 이는 단일 지진관측소 지진자료만으로는 입력 파라미터에 내재된 불확실성, 지진자료의 잡음 등에 의한 영향을

충분히 고려할 수 없기 때문이다. Kubo et al.⁽⁵⁾은 지진자료에 내재된 잡음 등을 고려하여 파형역산에 3개 이상 지진자료를 사용할 것을 제안한 바 있다.

이 연구에서는 가장 넓은 필터링 대역인 0.02~0.2 Hz에 의한 발진기구를 영월 지진의 발진기구로 선정하였으며, 역단층 운동을 포함한 주향이동단층 특성을 나타낸다. 진원의 깊이는 6 km, 지진모멘트는 1.3×10^{16} N·m로 추정되었는데, 이는 모멘트규모 4.7에 해당한다. INCN 지진관측소 지진자료의 스펙트럼 분석에 의한 모멘트규모도 4.8로 추정되어 이와 비슷하다. Saint Louis 대학교의 지진센터(http://www.eas.slu.edu/Earthquake_Center/MECH.KR)에 게시된 영월 지진의 모멘트규모는 4.67로 이번 연구결과와 일치한다. Kim and Kraeva⁽⁶⁾는 영월 지진의 모멘트규모를 5.2로 비교적 크게 추정하였다. 응력강하는 약 14.3 MPa로 일반적인 판내 천발지진의 응력강하로 알려진 10 MPa⁽¹⁷⁾보다 크다.

한반도 및 인접지역에서 발생한 지진의 대부분은 역단층 운동을 포함한 주향이동단층 운동의 특성을 보이며, 전체적인 주응력 방향은 동북동-서남서 방향을 나타낸다.⁽⁹⁾ 영월 지진의 주응력 방향도 이 방향과 대체로 일치하고 있다. 영월 지진은 옥천습곡대의 북동 지역에서 발생하였는데, 발진기구로 추정되는 단층면 방향을 지표상에 나타난 선구조와 직접 연관시키기는 어렵다. 기상청은 영월 지진 발생 이후 5차례 여진이 발생한 것으로 발표하였다. 그러나 기상청의 경우 지진자료가 모두 아날로그 지진자료이고, 한국지질자원연구원의 디지털 지진자료나 별도의 분석 기록을 찾을 수가 없어서 여진의 진앙을 정밀하게 분석할 수 없으므로, 현재로서는 발진기구의 2개의 단층면 중 어느 것이 실제 단층면인가를 판단하기 어렵다.

감사의 글

본 논문은 한국원자력안전기술원 기관고유사업인 원전부지 지진감시 사업과 중장기 연구사업인 원전부지 설계지진 및 지표변형 평가 규제기술개발 사업 연구의 일환으로 수행되었다. 원고의 개선을 위해 세심한 조언을 해주신 익명의 심사위원들께 감사드린다.

참고 문헌

1. Chang, S.-J., and Baag, C.-E., "Crustal structure in southern Korea from joint analysis of regional broadband waveforms and travel times," *Bulletin of the Seismological*

- Society of America*, Vol. 96, 856-870, 2006.
2. Song, S.-G., A study on velocity structure of the Korean Peninsula using earthquake data, Thesis for an M.S. Degree, Seoul National University, 2000.
 3. Klein, F.W., User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes, *Open File Report* 02-171, U.S. Geological Survey, 2002.
 4. Kim, S.K., Kim, S.K., and Chi, H.C., "Attenuation of peak spectral amplitude of acceleration in the southern part of the Korean Peninsula," *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 38, 237-250, 2002.
 5. Kubo, A., Fukuyama, E., Kawai, H., and Nonomura, K., "NIED seismic moment tensor catalogue for regional earthquakes around Japan: quality test and application," *Tectonophysics*, Vol. 356, 23-48, 2002.
 6. Kim, S.G., and Kraeva, N., "Source parameter determination of local earthquakes in Korea using moment tensor inversion of single station data," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 89, 1077-1082, 1999.
 7. Bouchon, M., "A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, 959-971, 1981.
 8. Sokos, E.N., and Zahradnik, J., "ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data," *Computers and Geosciences*, Vol. 34, 967-977, 2008.
 9. Kim, S. K., Jun, M.-S., and Jeon, J.-S., "Recent research for the seismic activities and crustal velocity structure," *Journal of Korea Society of Economic and Environmental Geology*, Vol. 39, 369-384, 2006.
 10. Jo, N., and Baag, C.-E., "The 20 January 2007, Mw 4.5, Odaesan, Korea, earthquake," *Geoscience Journal*, Vol. 11, 51-58, 2007.
 11. Kim, W.-Y., Choi, H., and Noh, M., "The 20 January 2007 Odaesan, Korea, Earthquake Sequence," *Bulletin of the Seismological Society of America*, submitted.
 12. Chi, H. C., Ryu, C.-H., and Shi, I.-C., Seismological Study on Earthquake Engineering (IV), KR-97(C)-3, Korea Institute of Geology, Mining & Materials, 37-38, 1997.
 13. Baag, C.-E., Shin, J. S., Chi, H. C., Kang, I.-B., and Ryoo, Y., "Fault-plane solutions of the December 13, 1996 Yeongweol earthquake," *Journal of the Korean Geophysical Society*, Vol. 1, 23-30, 1998.
 14. Snoke, J. A., "FOCMEC: focal mechanism determinations," *International Handbook of Earthquake Engineering Seismology*, Academic Press, 1629-1630, 2003.
 15. Noh, M., Choi, K.-R., and Kim, T.-K., "Analysis of Fourier amplitude spectrum by composing 3-component seismic records," *Journal of the Korean Geophysical Society*, Vol. 6, 25-29, 2003.
 16. Choi, H., Noh, M., and Choi, K. R., "The relation between local magnitude and moment magnitude in the southern part of the Korean Peninsula," *Journal of the Korean Geophysical Society*, Vol. 7, 185-192, 2004.
 17. Ruff, L. J., "State of stress within the Earth," *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, 548-551, 2002.