

최근 백령도해역 발생지진의 지진원 및 응답스펙트럼 특성 분석

김준경 *

세명대학교

Analysis of Characteristics of Seismic Source and Response Spectrum of Ground Motions from Recent Earthquake near the Backyoung Island

Jun-Kyoung Kim*

Semyung Univesity

요 약: 최근 백령도 해역에서 발생한 규모 4.3에 해당하는 중규모 지진(2011년 6월 17일)으로부터 관측된 지반진동 파형을 이용하여 지진원 기구 및 수평 응답스펙트럼을 분석하였다. 분석결과를 한반도의 응력방향과 비교하였고 또한 국내 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다. 지진원 연구에 이용된 지반진동은 3개 관측소(각 관측소에서 3성분)에서 관측된 진파형에 대해 모멘트텐서 기본식을 이용한 격자탐색법을 적용하여 분석하였다. 지진원기구에서 제시하는 주압축응력 방향은 ENE-WSW 방향으로 기존 한반도 전체의 주 응력방향과 대체로 유사하였다. 원자력 관련 구조물의 내진설계 기준과 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다. 국내 원자력시설물의 내진기준으로 이용되고 있는 Reg. Guide 1.60과 비교한 결과 특히 약 3 Hz 이상의 높은 고유진동수 영역에서 Reg. Guide 1.60 기준보다 높은 값을 보여 주었다. 또한 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준인 표준 설계응답스펙트럼을 비교한 결과 약 0.8초 이하의 단주기 영역의 전체 대역(SD 지반조건)에서 자료처리 결과가 기준을 크게 초과하였다. 향후 국내 지진활동 실정에 적합한 내진설계 기준 마련을 위해 관측자료의 질적 향상 및 양적인 축적 등을 통하여 특히 높은 고유진동수 대역에서 수평응답스펙트럼 기준의 보수성을 재고할 필요가 있다.

주요어: 모멘트텐서, 지진원기구, 수평응답스펙트럼, Reg. Guide 1.60, 표준 설계응답스펙트럼

Abstract: We analysed ground motions from Mw 4.3 earthquake around Backyoung Island for the seismic source focal mechanism and horizontal response spectrum. Focal mechanism of the Backyoung Islands area was compared to existing principal stress orientation of the Korean Peninsula and horizontal response spectrum was also compared to those of the US NRC Regulatory Guide (1.60) and the Korean National Building Code. The ground motions of 3 stations, including vertical, radial, and tangential components for each station, were used for grid search method of moment tensor seismic source. The principal stress orientation from this study, ENE-WSW, is consistent fairly well with that of the Korean Peninsula. The horizontal response spectrum using 30 observed ground motions analysed and then were compared to both the seismic design response spectra (Reg Guide 1.60), applied to the domestic nuclear power plants, and the Korean Standard Design Response Spectrum for general structures and buildings (1997). Response spectrum of 30 horizontal ground motions were used for normalization with respect to the peak acceleration value of each ground motion. The results showed that the horizontal response spectrum revealed higher values for frequency bands above 3 Hz than Reg. Guide (1.60). The results were also compared to the Korean Standard Response Spectrum for the 3 different soil types and showed that the vertical response spectra revealed higher values for the frequency bands below 0.8 second than the Korean Standard Response Spectrum (SD soil condition). However, through the qualitative improvements and quantitative enhancement of the observed ground motions, the conservation of horizontal seismic design response spectrum should be considered more significantly for the higher frequency bands

Keywords: moment tensor, focal mechanism, horizontal response spectrum, Reg. Guide 1.60, korean standard design response spectrum

2011년 10월 10일 접수; 2011년 11월 7일 수정; 2011년 11월 18일 채택;

*Corresponding author

E-mail: kjk-512@semyung.ac.kr

Address: Department of Fire & Disaster Prevention,
Semyung University, Sinwoul-Dong,
Jecheon-City Chungbuk, 390-711, Korea

서론

최근 백령도 인근에서 발생한 지진은 규모 4.3 (한국지질자원연구원)의 중규모 지진에 해당한다. 이 지역은 2002년 이래 규모 3.5 이상의 지진이 이번 지진까지 포함하여 5차례 발생하여 왔을 뿐만 아니라 보다 작은 규모의 지진들도 다수 발생하고 있어 한반도 남쪽지역에서 중규모급의 지진활동이 비교적 활발한 지역 가운데 하나이다. 따라서 이번 지진의 주응력 방향의 분석을 통해 지역적 특성과 한반도 전체의 주응력 특성과 비교하는 것이 대단히 중요하다.

해당 지진의 지진원 특성을 보다 상세하게 규명하기 위해 여러가지 지진원 모델중에서 특히 모멘트텐서 지진원 대표이론을 적용하였다. 이 분야에 대한 이론은 Backus and Mulcahy (1977) 및 Gilbert and Dziewonski (1975) 등에 의해 제시되었다. 모멘트텐서 지진원 대표이론은 단층활동, 폭발 및 마그마 관입 등 다양한 지구물리적 지진원을 9개의 모멘트텐서 성분으로 대표 가능하고 각각 성분의 조합으로 단층면의 기하학적 성상을 나타낼 수 있다. 또한 분석결과 얻어진 모멘트텐서의 determinant 값을 이용하여 모멘트 규모 및 단층과 폭발 등의 지진원의 특성을 쉽게 분석할 수 있다.

지진모멘트텐서 지진원 대표이론을 적용하는 연구방법은 국내에서는 Kim and Kraeva (1998), 김준경(2007a) 및 김준경(2007b)에 의해 각각 오대산 지진 및 울진지진에 대해 적용되었고, 특히 Kim and Kraeva (1998)은 하나의 광대역 관측소 자료만을 이용하는 방법을 적용하여 영월지진을 포함한 국내 외에서 발생한 중소규모의 지진에 대해 분석하였다.

또한 진앙이 인천국제공항, 인천 및 서울 등 주요시설 및 인구집중지역인 수도권에 가까이 위치하고 있어 백령도 인근 해역지진으로부터 관측된 지반진동을 이용하여 내진공학적인 특성도 분석하였다. 설계지반운동의 특성은 일반적으로 응답스펙트럼으로 표현된다. 응답스펙트럼은 우리나라 고유의 지진 지체구조 특성, 진앙거리에 따른 감쇠 특성 및 고유주기 등을 기초로 하고 있다. 그러나 해당 분야에 대한 연구가 아직 충분하지 못해 1997년에 건설교통부에 의해 제시된 건축물 및 구조물을 위한 응답스펙트럼(건설교통부, 1997)을 약 10 여년 동안 개정없이 동일한 기준을 계속 채택하고 있으나 최근 개정 중이다.

최근 발생한 백령도 해역지진과 같은 중규모의 지진으로부터

관측된 지반진동을 이용하여 모멘트 텐서방법을 통한 지진원기구를 분석한 결과를 기존의 연구에서 제시된 기준에 제시된 한반도 주변의 응력방향과 비교하였다. 또한 응답스펙트럼을 분석하였고 결과를 국내에서 비교적 엄격하게 적용하고 있는 것으로 알려진 원자력시설물에 관한 내진설계 기준 뿐만 아니라 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다.

지반진동 자료

본 연구에서는 최근 발생한 백령도 해역지진(Fig. 1)인 중규모 지진으로부터 측정된 지반진동을 고려하였고 이중에서 잡음이 비교적 작은 지반진동 자료를 이용하였다. Fig. 1에서 가장 큰 삼각형은 진앙위치, 작은 삼각형은 지진원 분석 및 응답스펙트럼 분석, 그리고 원표시는 응답스펙트럼 분석을 위해 이용된 자료를 관측한 관측소이다. 해당 지진으로부터 발생한 지진으로부터 측정된 지반진동 자료를 이용하여 초동 도달전 시간영역과 도달 후 시간영역 일부를 우선 푸리에스펙트럼 등을 분석하여 비교하였고, 분석 결과중에서 S/N비가 낮은 지반진동의 수평성분을 모두 제외하였다. 지반진동의 지진발생 일자, 발표기관별 규모 및 진앙위치는 Table 1에 제시되어 있다. 지진원 요소들의 분석을 위해 본 연구에서는 한국지질자원연구

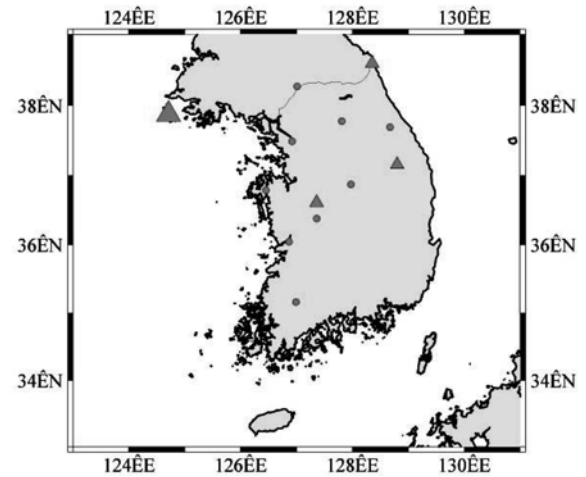


Fig. 1. Map of epicenter stations for Backyoung Island earthquake (large triangle; epicenter small triangle; stations for seismic source circle; stations for response spectrum)

Table 1. Magnitude and epicenter Backyoung Island earthquake.

진앙위치 결정기관	발생일자	규모	진앙위치		비고
			위도	경도	
한국기상청(KMA)		4.1 (M _L)	37.91 N	124.5 E	
한국지질자원연구원(KIGAM)	2011/06/17	4.3 (M _L)	37.8723N	124.7100E	
본 연구(KIGAM 진앙위치 이용)		3.9 (M _w)	37.8723N	124.7100E	

원이 결정한 진앙좌표를 이용하였다. 응답스펙트럼 분석을 위해 동서 및 남북성분을 포함하여 수평 성분 30개 자료를 처리하여 분석하였고 지진원 기구를 분석하기 위해 3개 관측소 지반진동을 이용하였고 각 관측소에서 관측된 3개 성분 즉 수직 동서 및 남북 성분 모두 9개 파형을 이용하였다. 자료타입은 응답스펙트럼 분석을 위해 가속도 자료를 지진원 기구를 분석하기 위해 속도 자료를 이용하였고 샘플링 간격은 공통적으로 1초당 100개이다. 또한 관측된 지반진동의 관측소의 지반특성은 국내의 연구결과가 아직 충분하지 못하여 구체적으로 고려하지 않았다. 향후 많은 연구가 필요한 분야이다. 지진원 심도 및 지진원 기구 분석을 위해 진앙위치는 한국지질자원연구원이 제시한 진앙위치를 이용하였다.

연구방법

지진원 요소 분석

단층활동, 폭발 및 마그마 관입 등 다양한 지구물리적 원인으로 발생한 지진이 등가의 double coupled body force 또는 9개 성분의 대칭 지진모멘트텐서로 대표할 수 있고 지진모멘트텐서가 2차 텐서라고 가정할 경우 지진원에 대한 지구물질의 동탄성학적인 반응은 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$U_k(x', t') = G_{kj}(x', t'; o, o) * M_{ij}(o, t') \quad (1)$$

여기서 U_k ; velocity motion k -th direction ($k=1$; vertical $k=2$; radial and $k=3$; tangential)

G_{kj} ; the elasto-dynamic Green's function

M_{ij} ; a set of time dependent moment tensors

*; convolution operator

k ; vertical ($k=1$) radial ($k=2$) 그리고 tangential ($k=3$) 성분 지반진동을 나타낸다.

식 (1)에서 primed 변수는 관측소 좌표계를 나타내고 unprimed 변수는 지진원 좌표계를 나타낸다.

위 식을 이용하여 관측된 지진파형으로부터 역산을 통하여 지진원에 대한 정보를 분석할 경우 크게 두 가지로 분류된다. 한 가지 방법은 시간영역에서 이루어지는 방법이고 다른 방법은 주파수 영역에서 이루어지는 역산 방법이다. 시간영역에서 이루어지는 역산 방법은 일반적으로 $M_{ij}(ot)$ 성분이 모두 동일한 지진원 시간이력(source time function)을 가지고 있다고 가정한다.

위 기본식을 이용하여 여러 연구기관에서 컴퓨터에서 실행 가능한 프로그램화를 수행하였으나 본 논문에서는 Hermann (2002)에 의해 코드화된 컴퓨터 프로그램을 이용하였다. 또한 전파형 격자탐색법을 이용하여 지진규모, 지진원기구와 진원깊이 등과 같은 지진원 요소들을 개략적으로 분석하였다. 또한

모멘트텐서 기본식을 이용하여 지진규모, 지진원기구와 진원깊이 등과 같은 지진원 요소들을 분석할 때 최적 주파수 범위는 각각 관측소에 따라 약간 변화가 있었으나 3개 관측소 파형을 동시에 사용할 때 관측소에 관계없이 0.02 Hz에서 0.1 Hz 대역을 일률적으로 적용할 때 variance reduction값이 가장 높아 제시된 주파수 범위를 분석에 적용하였다.

응답스펙트럼 분석

응답스펙트럼에 대한 연구는 Benioff (1934)에 의해 시작되어 Biot (1941), Housner (1959), Newmark *et al.* (1973a 1973b, 1973c) Boore *et al.* (1994) 등에 다양한 연구자들에 의해 활발하게 수행되어 왔다. 국내에서 수행된 연구는 주로 원자력 분야와 관련하여 수행되어 왔으며 김준경(2009) 김준경 등(2010) 윤종구 등(2006) 김성균(2007)에 의해 연구되어 왔다. 최근 한반도 주변의 지역에서 대규모 및 중규모 지진이 자주 발생하여 향후 내진설계 응답스펙트럼 분야에 대해 인식이 고되고 있다.

입력 지반진동의 시간길이를 조절할 필요가 있고 이를 위해 진앙거리에 따라 지반진동의 지속시간 중 일부 구간을 입력되 지반진동 에너지가 충분히 포함되도록 하였다. 또한 응답스펙트럼을 계산할 때 주기 또는 고유진동수의 범위는 0.1 Hz부터 50 Hz까지 범위에서 0.1 Hz씩 증가시키면서 500개의 고유진동수 각각에 대해 반응을 계산하였다.

약 30 Hz 이상의 고주파 영역의 지반진동은 일반적으로 빨리 감쇠할 뿐만 아니라 주요 구조물 전체에 심각한 구조적인 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 또한 본 분석 결과를 국내 원자력시설물의 내진기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60에서도 약 33 Hz까지만 값이 제시되어 있다. 고유진동수 영역에 대한 여유를 감안하여 본 연구에서는 최대 고유진동수 50 Hz까지 응답을 계산하여 그 결과를 상호 비교하였다. 물론 구조물마다 다양한 고유주기를 갖고 있지만 대부분의 토목 및 건축 구조물의 경우 약 1 Hz에서 약 5 Hz의 범위에서 고유주기 조건을 가지고 있으므로 특히 이러한 고유진동수 대역에서 구조물의 응답 특성이 대단히 중요하다.

지진으로 관측된 지반진동 자료들은 측정거리 지진규모 지반조건 등의 다양한 인자들의 변화에 따라서 서로 다른 최대 지반가속도값을 가지고 있어 지반진동을 분석하여 얻어진 각각의 응답스펙트럼들을 단순하게 조합하여 통계적으로 처리하는 것은 의미가 없다. 따라서 동일한 최대 지반가속도에 대해 각각의 응답스펙트럼을 정규화한 후에 스펙트럼을 구하는 것이 일반적이다. 정규화하는 방법으로 최대 지반가속도 유효 최대가속도(Effective Peak Acceleration) 및 스펙트럼 강도(Spectrum Intensity) 을 이용하는 방법 등 3가지 종류로 분류하고 있으나 본 연구에서는 최대지반가속도에 의한 정규화 방법을 적용하였다.

연구 결과

진원심도 및 규모 분석

여러 가지 지진원 변수를 분석하기 위해 김성균 정부홍 (1985)에 의한 지각속도구조 모델 이용하여 식 (1)에서 우선 이론적인 지각반응함수(G_{kij})를 계산하였고 이를 이용하여 관측파형(U_k)의 역산을 통해 진원심도를 분석하였다. 지진원 심도를 분석하는 과정은 모멘트텐서 지진원 모델을 이용할 경우 (1)식에서 제시된 바와 같이 비선형성을 갖고 있기 때문에 비선형성을 해결하기 위해 각각의 심도에 따라 역산을 반복하고 역산결과 중에서 관측파형과 이론파형이 서로 가장 잘 일치하

는 경우에 해당하는 진원심도가 일반적으로 가장 적합하다고 분석한다. 관측파형과 이론파형이 일치하는 정도에 대한 관계식은 식 (2)에 제시되어 있다.

$$\text{Variance Reduction} = \left[1 - \frac{\sum(d_i - s_i)^2}{\sum(d_i)^2} \right] \quad (2)$$

여기서 d_i 는 관측파형이고 s_i 는 역산을 통해 얻어진 지진원 변수값과 지각구조 속도모델을 동시에 고려하여 만들어진 이론파형이다.

Fig. 2는 지진원 심도를 분석한 결과를 보여주고 있다. 가로축은 지진원 심도를 나타내고 세로축은 관측파형과 이론파형이 일치하는 정도를 나타내고 있다. Fig. 2에 의하면 지진원 심도 분석결과 지진원 심도는 약 15 km에서 일치정도가 약 80%로 최대값을 보여 주었다. Fig. 3을 살펴보면 최대값을 중심으로 양방향으로(진원깊이 감소 및 증가) 일치정도가 완만하나 감소하고 있어 최적 진원심도를 비교적 쉽게 분석할 수 있었다. 지진원 심도인 약 15 km는 지각내에서 지진이 발생하였고 지각 중간부의 깊이에서 발생한 것을 의미한다. 한국지질자원연구원에서 국내에서 발생하고 있는 지진의 지진원 심도를 계속적으로 발표해오고 있고 발표된 심도 분포를 고려할 때 지진원 심도인 약 15 km는 일반적으로 국내 및 백령도 해역 지역에서 발생하는 지진유발단층의 깊이와 대체로 일치한다.

분석된 진원심도는 Table 2에서 한국지질자원연구원이 제시된 결과 보다 약 3 km 깊은 심도의 값을 보여 주고 있어 일반적인 지진원 심도 분석 불확실성 등을 고려할 때 커다란 차이는 없다. 지진원 심도의 분석 차이는 백령도 해역 지진이 내

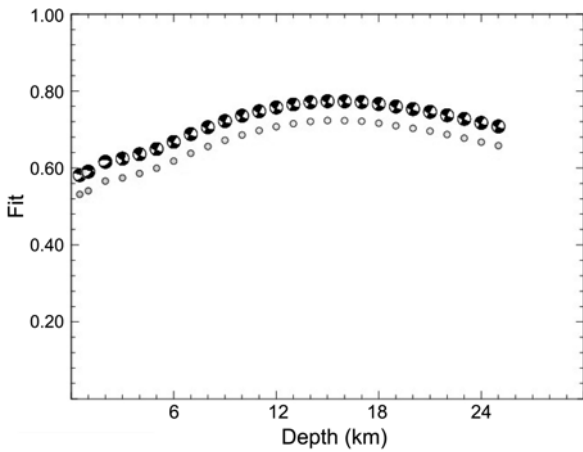


Fig. 2. Depth sensitivity and focal mechanism for waveform grid serach (x scale; focal depth y scale; fitness of waveforms).

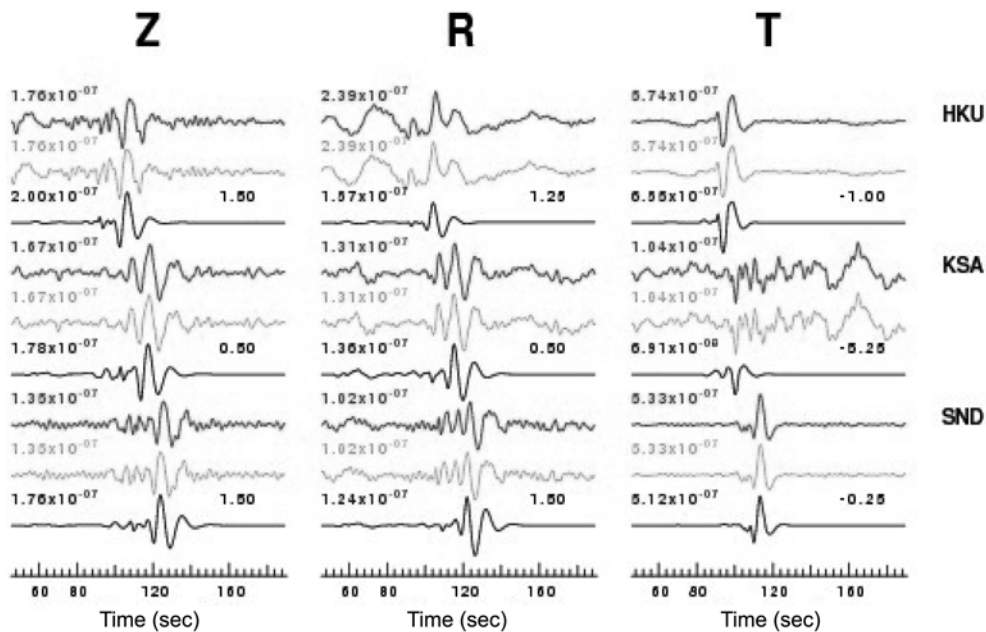


Fig. 3. Waveform comparison for depth of 15 km (uppermost-observed middle-synthetic with first motion movements bottom-synthetic without first motion movements).

륙이 아니고 해역에서 발생한 지진이기 때문에 이 지역에 대한 지각속도 모델이 내륙지각 모델에 비해 불확실성을 보다 크게 가지고 있고 또는 지진파형의 초동시각값의 선택의 차이 등에 기인할 가능성도 있는 것으로 보인다.

Fig. 3은 역산한 결과 얻어진 모멘트텐서를 이용하여 지진원 심도 15 km에 대해 진앙거리가 증가하는 순서로 이론파형과 관측파형을 비교한 것이다. 가로축은 시간을 나타내고 있고 왼쪽으로부터 수직성분 radial 성분 및 tangential 성분 파형을 나타내고 있다. 각 관측소에서 각각의 성분에 대한 파형비교 그림은 가장 위에 위치하고 있는 파형은 실제 관측된 파형 중간 파형은 지진원기구 변수의 역산을 위해서 초동 시각을 이동시키지 않았을 경우 가장 아래 파형은 최적 역산을 위해서 초동 시각을 전후로 이동시켰을 경우에 해당한다. 그리고 파형을 전후방향으로 이동시킨 시간이 맨 아래 파형의 오른쪽에 제시되어 있고 단위는 초이다. 이동시간의 차이는 기존 지각모델의 불확실성 및 잡음이 많을 경우 미숙한 초동시각 선택 등의 여러 가지 원인이 될 수 있다. 파형의 오른쪽 끝에는 관측소 이름이 있다. Z R T 성분은 공통적으로 진앙거리가 증가함에 따라 P파 및 S파의 도달시간 간격이 체계적으로 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3에 의하면 KSA 관측소의 T 성분은 잡음으로 인하여 일치 정도가 상대적으로 낮으나 다른 관측소의 3가지 성분들은 초동부터 이후까지 대체로 파형이 잘 일치하고 있다. Fig. 2에서 제시된 바와같이 전체적으로 이론파형과 관측파형이 일치하는 정도가 약 80%로 높은 것을 보여주고 있다.

지진규모는 Table 1에 제시되어 있고 분석결과 얻어진 규모는 기상청 및 한국지질자원연구원과 같이 2개 기관에서 결정된 규모값 보다 작은 값을 보여주고 있다. 다른 2개 기관에이 제시하는 규모는 국지규모(M_L) 단위이고 본 연구에서는 지진으로부터 발생한 에너지를 더욱 강조하는 모멘트규모(M_w)를 분석하여 제시하였다. 따라서 동일지진이라도 규모에 대한 정의의 차이가 다르기 때문에 규모값이 차이가 있을 수 있다. 이 지역은 2002년 이래 규모 3.5 이상의 지진이 규모 3.9 (M_w)인 이번 지진까지 포함하여 5차례 발생하여 왔을 뿐만 아니라 이 보다 작은 규모의 지진들도 다수 발생하고 있어 한반도 남쪽 지역에서 중규모급의 지진활동이 비교적 활발한 지역 가운데 하나이다. 현재 이들 지진에 대한 관측자료가 부족한 실정이나 향후 보다 정밀한 광역적인 분석이 요구되는 지역이다.

지진원기구 분석

Table 2. Comparison of focal depth.

발표기관	지진원 깊이	remarks
한국지질자원연구원	12.3 km	
본 연구	15 km	

모멘트텐서 지진원 모델을 이용할 경우 지진원기구를 분석하는 과정은 지진원 심도를 분석하는 과정과 달리 식 (1)에서 알 수 있는 바와같이 선형성을 갖고 있다. 따라서 각각의 지진원 심도를 약 1 km씩 증가시키고 각각 주어진 지진원심도에서 다시 주향 경사 및 rake 각도를 5°씩 증가시켜 가면서 격자망탐색(grid search) 방법을 이용하여 지진원 기구를 분석하였다. 이 경우 (2)식에서 제시된 관측파형과 이론파형이 가장 잘 일치하는 경우에 해당하는 지진원기구가 가장 적합하다고 해석하였다.

Fig. 4에 한국지질자원연구원이 제시한 진앙위치를 초기값으로 하고 김성균 정부홍(1985)에 의한 지각 속도구조모델을 이용하여 역산을 수행한 결과 얻어진 지진원 기구를 나타내고 있다. 단층면의 rake angle이 5°의 결과를 보여 주고 있어 전형적인 주향단층의 경향을 보여주고 있다. 지진유발단층의 경사각은 거의 수직에 가깝고 주압축 응력방향은 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 ENE-WSW 방향을 제시하고 있다. 이는 일반적으로 유라시아판 태평양판 그리고 인도판 활동의 상호 균형으로 설명되고 있는 한반도의 주응력 방향(전명순, 전정수, 2008)과 거의 일치한다.

분석된 지진원 기구에 의하면 90도로 직교화된 2개의 가능성 있는 단층면해를 얻을 수 있어 본 연구 결과만으로 2개 중 어느 단층면이 실제 지진이 발생한 단층면인지 판단하기 힘들고 보다 다양한 방법을 이용한 많은 분석이 필요하다. 하지만 이 지역은 4.0 이상의 지진규모도 다수 존재하고 있는 본 연구대상 지진의 진앙부근에서 다수의 지진들의 진앙분포는 백령도로부터 황해도 내륙으로 이어지고 있다. 따라서 물론 다른 가능성도 존재하지만 단층대가 진앙분포 방향으로 존재할 가

Table 3. Focal mechanism (strike dip and rake angle) of Backyoung Island earthquake.

focal mechanism (°)	
STRIKE	120
DIP	70
RAKE	5

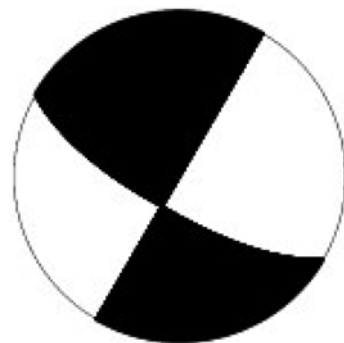


Fig. 4. Focal mechanism of Backyoung Island earthquake.

능성이 대단히 높다.

응답스펙트럼 분석

일반적으로 건축 및 토목 구조물은 감쇠율이 3%에서 7%의 범위를 가지고 있고 이중에서 가장 일반적으로 비교되고 있는 5% 감쇠값에 해당하는 응답을 계산하였다. 분석결과를 국내 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준으로 사용되고 있는 Reg. Guide 1.60 (Table 4) 및 국내 일반 구조물 및 건축물의 5% 감쇠값 내진설계기준과 비교하였다. 국내 원자력발전소 내진설계기준에 해당하는 Reg. Guide 1.60은 국내 일반 구조물 및 건축물에 대한 내진설계기준과는 달리 수평 및 수직 성분에 대해 분리하여 기준을 각각 제시하고 있다.

수평 성분 지반진동을 처리하여 진앙거리별 수평 응답스펙트럼을 구하였고 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 각각의 그림에서 가로축은 구조물의 고유 진동수(단위 Hz)를 나타내고 세로축은 정규화를 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 의미한다. 또한 각 고유 진동수에서 평균값과 평균값에 표준편차를 더한 값을 동시에 나타내었다.

Fig. 5에서 증폭계수의 평균값을 고려할 때 최대값의 크기는 약 5에서 6의 값을 보여주고 있다. 그리고 약 5 Hz에서 약 10 Hz의 고유진동수 대역에서 최대값을 나타내고 있다. 약 400개의 수평성분 지진자료를 동시에 처리한 김준경(2010)에 의한

Table 4. Response spectrum values from Reg Guide 1.60 (5% damping).

Comp. & Control Point	33 Hz	9H z	2.5 Hz	0.25 Hz
Horizontal Component	1.0	2.61	3.13	2.50
Vertical Component	1.0	2.61	2.98	1.37

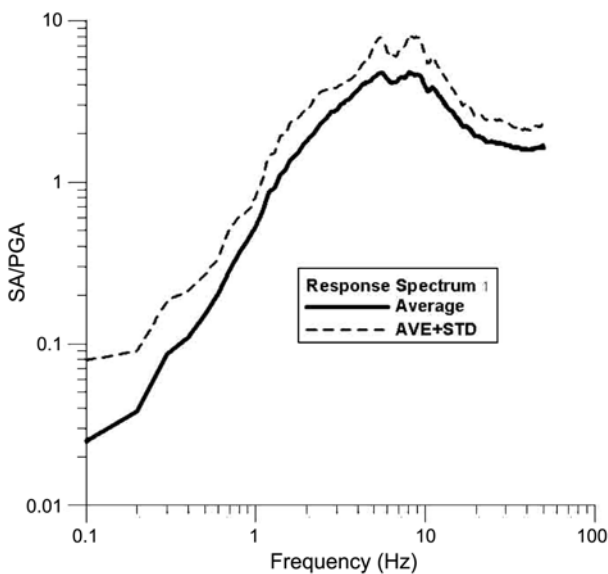


Fig. 5. Horizontal response spectrum (average average + 1σ) with 30 horizontal observed waveforms.

연구결과와 전체적인 모양 특성이 거의 유사하나 최대값이 보다 낮은 진동수 대역으로 이동한 특성을 보여주고 있다. 또한 최대값의 크기가 상대적으로 김준경(2010)에 의한 연구가 제시한 값보다 높은 값을 보여 주었다. 단지 하나의 지진에 의한 결과값을 약 400개의 지진자료를 동시에 처리한 결과와 비교할 경우 대표성에 대한 신뢰는 낮으나 여하튼 본 연구의 결과가 상대적으로 높은 최대응답값을 보여 주고 있다.

수평 응답스펙트럼 분석결과를 국내 원자력 내진설계기준에 해당하는 USNRC가 제시한 Reg. Guide 1.60 기준의 수평성분 표준응답스펙트럼(Table 4)과 비교하여 Fig. 6에 제시하였다. 그림에서 가로축은 고유진동수를 나타내고 세로축은 정규화된 반응값의 증폭계수를 나타낸다. 또한 본 연구에서 분석된 응답스펙트럼 결과 값은 50 Hz까지 또한 원자력발전소 및 관련 시설물의 내진설계 기준은 33 Hz까지 응답값이 제시되어 있다.

수평성분 응답스펙트럼의 평균값은 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 적어도 약 3 Hz 보다 낮은 고유진동수 대역에서는 설계기준값 보다 작은 값을 유지하고 있어 내진설계 기준을 만족하고 있다. 하지만 약 3 Hz 보다 높은 고유진동수 대역에서는 관측 지진자료를 처리한 결과가 기존의 내진설계 기준값을 초과하고 있음을 잘 보여주고 있다.

위에서 제시된 내진설계 기준값을 초과하는 현상은 물론 국내의 지진관측소 부지증폭 특성도 부분적으로 기여하는 것으로 판단된다. 특히 약 5 Hz 이상의 고유진동수 대역 전체에서 기준값을 초과하고 있는 현상은 국내 원자력 산업계에서도 계속 지적되어 왔을 뿐만 아니라 윤종구 외(2006) 및 선창국 외(2007)의 연구에서도 유사한 특징이 이미 제시되어 왔다.

다음으로 수평성분 응답스펙트럼 분석결과를 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준인 표준 설계응답스펙트럼과 동시에 비교하였다(Fig. 7). Fig. 7에서 가로축은 일반건축

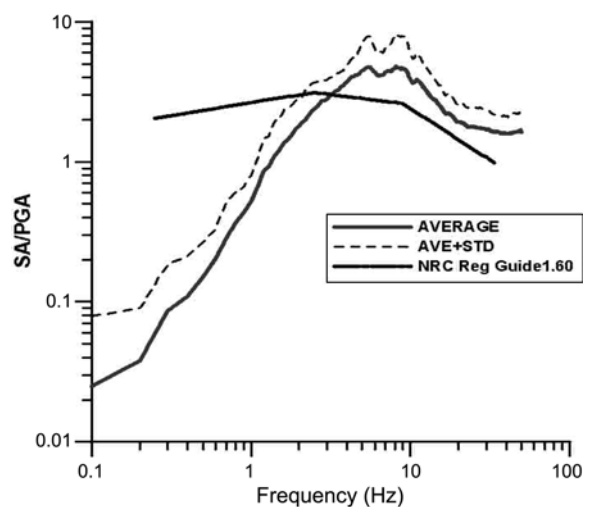


Fig. 6. Comparison of horizontal response spectrum with 30 horizontal observed waveforms with US NRC Standard Response Spectrum.

물의 표준 응답스펙트럼과 비교를 쉽게 하기 위해 고유진동수를 대신하여 구조물의 고유주기를 사용하였으며 세로축은 정규화 과정을 거친 응답스펙트럼의 증폭계수를 나타낸다. 국내 일반구조물 및 건축물에 대한 내진설계 기준은 원자력시설물의 내진설계 기준과는 달리 수평 및 수직 성분의 스펙트럼 모양을 분리하지 않고 적용하고 있다.

우선 내진설계 대상지역의 지진구역(seismic province)과 5개 지반종류(soil type)에 적합한 각각 2가지 종류의 지진계수(Ca 및 Cv)를 선정하여야 한다. 이를 이용하여 표준 설계 응답스펙트럼의 통제주기(Ts 및 To)를 선정한다. 마지막으로 건물의 중요도 및 사회적으로 요구되는 성능기준을 판단하여 재현주기(recurrence period)에 따른 지진위험도계수(seismic hazard coefficient)에 따라 값과 모양 특성을 다르게 정의하고 있다. 동일 지역 및 동일 지반조건일 경우 종합병원 및 재난시거점 학교 등 주요 구조물 및 건축물의 기준인 약 2400년 재현주기의 지진에 대비하기 위한 내진기준은 일반 구조물의 내진기준인 500년의 재현주기의 기준에 비해 전체 주기대역에서 약 2배의 값으로 이루어져 있다.

Fig. 7에서 3종류의 점선으로 이루어진 3개 응답은 가로축에 가까운 곡선으로부터 점차 멀어지는 순서대로 지반조건 SC, SD 및 SE 조건에 대응하고 재래주기는 500년에 해당하는 표준 설계응답스펙트럼과 비교하였다. 예를들면 Fig.에서 SE 지반조건에서는 건축물을 내진설계 할 경우 다른 2개 지반조건에 비해 내진설계 기준값이 상대적으로 크게 제시되어 있으므로 내진설계를 보다 강화하여야 적용해야 하는 것을 의미한다. 본 연구에서 지반조건 SE, SD 및 SC와 같은 3개의 지반조건을 우선 선택한 것은 지진관측소가 위치하고 있는 지반은 간이조사를 통해 SD조건에 해당하는 것이 대부분이고 일부

SC 및 SE 조건의 지반으로 이루어져 있기 때문이다. 결과 그림이 제시하고 있는 바와같이 관측된 지반진동을 분석하여 얻어진 수평성분 응답스펙트럼은 SD 지반 조건의 기준과 비교할 때 0.7초 내지 0.8초 보다 짧은 단주기 즉 약 1.25 Hz 보다 높은 고유진동수 대역에서 응답스펙트럼 결과값 모두가 SD 조건 지반조건의 표준 설계 응답스펙트럼값을 초과하고 있다. 원자력시설물 설계기준과의 보수성을 비교할 경우(약 3 Hz) SD 지반 조건을 고려하면 보다 낮은 고유진동수 영역(약 1.25 Hz)부터 이미 분석값이 기준을 초과하고 있다.

결론

최근 발생한 백령도 해역지진과 같은 중규모의 지진으로부터 관측된 지반진동을 이용하여 지진원기구를 분석한 결과를 기존의 연구에서 제시된 기준에 제시된 한반도 주변의 응력방향과 비교하였다. 또한 응답스펙트럼을 분석하였고 결과를 국내에서 비교적 엄격하게 적용하고 있는 것으로 알려진 원자력 시설물에 관한 내진설계 기준 뿐만 아니라 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준과 각각 비교하였다.

1. 한국지질자원연구원에서 지진발생시 국내에서 발생하고 있는 지진의 지진원 깊이를 계속 발표해오고 있고 이러한 국내 발생 지진에 대한 지진원의 깊이 분포를 고려할 때 백령도 해역지진의 지진원 심도인 약 15 km는 일반적으로 국내 및 백령도 해역 지역에서 발생하는 지진유발단층의 깊이와 대체로 일치한다.

2. 지진원기구 분석결과에서 제시하는 주압축응력 방향은 ENE-WSW 방향으로 기존 한반도 전체의 주 응력방향과 대체로 유사하였다. 백령도 해역은 2002년 이래 규모 3.5 이상의 지진이 규모 3.9인 이번 지진까지 포함하여 5차례 발생하여 왔을 뿐만 아니라 이 보다 작은 규모의 지진들도 다수 발생하고 있어 한반도 남쪽지역에서 중규모급의 지진활동이 비교적 활발한 지역 가운데 하나이다. 현재 이들 지진에 대한 관측자료가 부족한 실정이나 향후 보다 정밀한 광역적인 분석이 요구되는 지역이다.

3. 국내 원자력시설물의 내진기준으로 이용되고 있는 Reg. Guide 1.60과 비교한 결과 특히 약 3 Hz 이상의 높은 고유진동수 영역에서 Reg. Guide 1.60 기준보다 높은 값을 보여 주었다. 또한 국내 일반 구조물 및 건축물 내진설계기준인 표준 설계응답스펙트럼을 3개 지반조건에 적용한 결과를 분석 자료와 동시에 비교한 결과 약 0.8초 이하의 단주기 영역의 전체 대역(SC 지반조건)에서 자료처리 결과가 기준을 크게 초과하는 현상을 보여 주었다. 향후 국내 지진활동 실정에 적합한 내진설계 기준 마련을 위해 관측자료의 질적 향상 및 양적인 축적 등을 통하여 특히 높은 고유진동수 대역에서 수평응답스펙트럼 기준의 보수성을 재고할 필요가 있다.

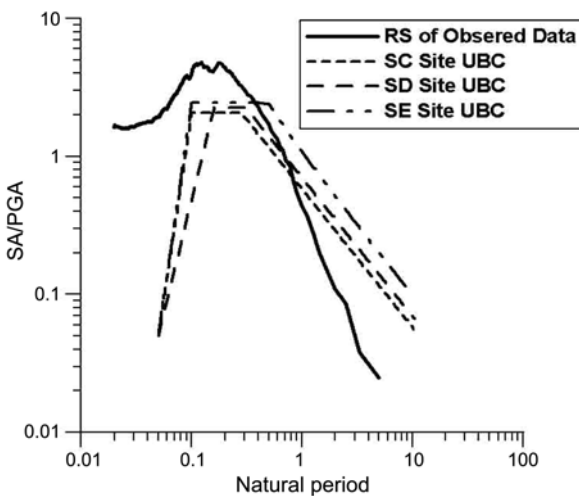


Fig. 7. Comparison of horizontal response spectrum with 30 horizontal observed waveforms with Korean National Building Code.

감사의 글

본 연구는 2011년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술 개발사업(CARTER 2007-5109)”에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부, 1997, 내진설계기준개발 2단계 연구보고서, 한국지진공학회.
- 김성균, 2007, 한반도 지진특성을 고려하여 모사된 강진동에 대한 가속도 응답스펙트럼, 한국지구과학회지, **28**, 179-186.
- 김성균, 정부홍, 1985, 한국 남부지역의 지각구조 광산지질, **18**, 151-157.
- 김준경, 2007a, 오대산지진(2007/01/20)의 지진원 특성에 관한 연구, 대한지질공학회, **17**, 473-500.
- 김준경, 2007b, 울진지진(2004/05/29)의 지진원 특성에 관한 연구, 한국지진공학회, **16**, 33-39.
- 김준경, 2009, 최근 발생지진 관측자료를 이용한 응답스펙트럼 분석, 한국암반공학회, **19**, 490-497.
- 김준경, 2010, 국내 관측자료를 이용한 수평 응답스펙트럼 분석, 한국암반공학회, **20**, 399-407.
- 선창국, 정충기, 김동수, 김재관, 2007, 역사지진 피해발생 음성 지역에 대한 부지고유 지진응답 평가, 한국지질공학회, **17**, 1-13.
- 윤종구, 김동수, 방은석, 2006, 국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 계산에 대한 연구(I) 국내 내진설계 기준의 문제점, 한국지진공학회, **10**, 39-50.
- 전명순, 전정수, 2010, 한반도 및 인근의 지진 메카니즘 특성, 한국지구물리·물리탐사학회, **13**, 198-202.
- Backus, G and Mulcahy, M., 1976, Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources II discontinuous displacements *Geophys. J. R. astro. Soc.*, **47**, 301-329.
- Benioff, H., 1934, The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness Bulletin of the Seismological Society of America, **24**, 88-97.
- Biot, J. A., 1941, A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses Bulletin of the Seismological Society of America, **31**, 100-121.
- Boore, D. M., Joyner, W. B., and Fumal, T. E., 1994, Estimation of Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: An Interim Report Part 2, USGS Open File Report, 94-127, Menlo Park, California.
- Gilbert, F. and Dziewonski, A. M., 1975, An application of normal mode theory to the retrieval of structure parameters and source mechanism from seismic structure *Phil. Trans. R. Soc.*, **A278**, 187-269.
- Hermann, R. B., 2002, Computer Programs in Seismology, University of Saint Louis.
- Housner, G. W., 1959, Behavior of Structures during Earthquakes *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **85**, 104-111.
- Kim, S. G. and Kraeva, 1998, Source parameter determination of local earthquakes in Korea using moment tensor inversion of single station data *Bulletin of Seismological Society of America*, **89**, 1077-1082.
- Newmark, N. M. and Hall, W. J., 1973, Procedures and Criteria for Earthquake Resistant design Building Research Series 46 Building Practices for Disaster Mitigation National Bureau of Standards, U. S. Department of Commerce.
- Newmark, N. M., Blume, J. A., and Kapur, K. K., 1973, Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants *Journal of Power Division, ASCE*, **99**, 287-303.
- Newmark, N. M., Hall, W. J., and Mohraz, B., 1973, A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra Report, WASH-1255, Directorate of Licensing U. S. Atomic Energy Commission.
- Regulatory Guide 1.60, 1968, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.