

응답스펙트럼 계산을 위한 잡음기준 Noise Criteria for the Calculation of Response Spectra

노명현* 최강룡* 윤철호*
Noh, Myunghyun Choi, Kang-Ryong Yoon, Choul-Ho

ABSTRACT

By using simulated ground motions, which is sum of earthquake signals and noise, we measured the distortion of response spectra due to noise. We found that the distortion is more closely related to the signal-to-noise (S/N) ratio of root-mean-square (RMS) measurement than that of conventional peak measurement. Given a S/N ratio, the distortion of absolute acceleration response spectra is independent on the earthquake magnitude, while that of relative displacement response spectra has a strong dependence on the earthquake magnitude. This means that, when we calculate response spectra from time histories, we can efficiently predict the distortion of acceleration response spectra simply by measuring the RMS S/N ratios, or the distortion of displacement response spectra by combining the RMS S/N ratios and the earthquake magnitudes.

1. 서 론

1900년대 초반부터는 양산단층대를 중심으로 한국지질자원연구원이 지진계를 설치하여 디지털 지진기록을 생산하기 시작하였고[1], 기상청도 1995년 영월지진 및 1996년 경주지진 이후에 지진 관측망을 대폭적으로 개선·확장하여 본격적인 지진관측을 시작하였다[2]. 이들 관측망에서 획득되는 지진자료는 양질의 디지털 자료로서 작은 지진동까지도 정밀하게 기록하기 때문에, 최근에는 이들 자료로부터 응답스펙트럼을 계산하려는 시도가 이루어지기도 했다. 그러나 강지진동이 아닌 약지진동(표1 참조)으로부터 응답스펙트럼을 계산할 때에는 잡음의 영향을 반드시 고려해야 한다.

표 1. 이 논문에 사용된 강지진동과 약지진동의 정의.

용 어	기 술
강지진동(Strong Motion)	<ul style="list-style-type: none"> · 지진 기록에서 지진파의 종류, 위상에 관계없이 가장 큰 에너지가 전달된 부분 · 근거리에서 계측된 대규모 지진 기록
약지진동(Weak Motion)	<ul style="list-style-type: none"> · 원거리에서 계측된 대규모 지진 기록 · 근거리에서 계측된 중, 소규모 지진 기록

* 정회원, 한국원자력안전기술원

모든 지진동에는 잡음이 포함되어 있으며, 이로부터 계산된 응답스펙트럼은, 정도의 차이는 있지만, 잡음에 의하여 왜곡된다. 잡음에 의한 응답스펙트럼의 왜곡을 무시할 수 있는 수준으로 유지하기 위해서는 잡음에 비하여 지진신호가 충분히 큰 지진동 자료, 즉 강지진동 자료만을 이용하는 것이다. 그러나 현실적으로 한반도와 같은 중약진 지역에서 충분한 강지진동 자료를 확보하는 것은 불가능하다. 또한, 강지진동 자료가 확보되었다 하더라도 이로부터 계산된 응답스펙트럼이 잡음에 의하여 어느 정도 왜곡되었는지, 또는 바꾸어 말하면, 잡음에 비하여 지진신호가 얼마나 커야 잡음의 효과를 무시할 수 있는지 분석할 필요가 있다. 이러한 취지에서 인공적으로 모사된 지진신호와 잡음을 이용하여 응답스펙트럼에 미치는 잡음의 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 지진동 모사와 잡음의 측정

지진으로부터 실측된 지진동 자료는 지진신호(Earthquake Signal)와 잡음(Noise)의 합이다. 이 미 지진신호와 잡음이 혼합된 지진동으로부터 역으로 이 두 가지를 분리하는 것은 근본적으로 불가능하다. 그러나 응답스펙트럼에 대한 잡음의 효과를 정량적으로 분석하기 위해서는 지진신호와 잡음을 분리할 필요가 있다. 이를 위하여 분리가 불가능한 실측 지진동 자료 대신 인공적으로 지진신호와 잡음을 각각 모사하여 이용하였다.

2.1 지진신호 모사

지진신호는 Boore[3]의 추계학적 방법을 이용하여 모사되었다. 추계학적 모사방법은 이미 국내에서도 많이 소개된 바 있으므로 그 과정만을 간략히 소개하면 다음과 같다. 먼저, 백색잡음(White Noise)을 생성한다. 백색잡음에 지진신호의 형상을 나타내는 포락함수(Envelop Function)을 곱하면 실제 지진신호와 유사한 단기신호(Transient Signal)가 만들어진다. 이를 주파수 영역으로 푸리에 변환(Fourier Transform) 후, 지진학적 모델에 근거한 지진신호 진폭스펙트럼을 곱한다. 이를 다시 시간영역으로 역푸리에 변환(Inverse Fourier Transform)하면, 목적인 지진신호의 시간이력(Time History)이 구해진다. 특정 지역의 지진원 및 지진파 전파특성을 나타내는 진폭스펙트럼의 입력요소는 대부분 Noh and Lee[4](1995)에서 선택되었다.

응답스펙트럼 계산을 위해 관심 있는 규모 및 거리에 대한 지진신호를 모사하였다. 지진의 규모는 3.0부터 6.0까지, 규모증분을 0.5로 7개의 규모를 선정하였다. 거리는 10 km부터 800 km 내에서 규모에 따라 유동적으로 변화시켰으며, 거리증분을 주로 10 km 간격으로 하되, 원거리에서는 50 km까지 변화시키기도 했다.

여기에서 주의할 점은, 위에서 구해진 시간이력은 단지 1개의 표본에 불과하며, 통계적 추정 값은 반복 실행을 통해 생성된 충분히 많은 표본에 대한 집단평균(Ensemble Average)을 통해 계산되어야 한다는 것이다. 집단평균을 구하기 위하여 각 규모-거리 쌍에 대하여 300개씩 지진신호를 모사하였다.

2.2 잡음 모사

지진동에 포함된 잡음의 요인은 매우 다양하다. 일반적으로 차량이나 기계진동과 같이 인공적으로 발생한 잡음은 1 Hz 이상의 주파수로 구성되며, 이를 미진동(Microtremor)이라고 한다. 원전

부지에서는 터빈의 회전진동에 의한 30 Hz의 잡음이 가장 우세하게 관찰된다. 이 밖에 주기 6초의 해양정상파(Standing Oceanic Wave)도 흔히 관측되는 잡음의 하나이다. 따라서, 특정 지역의 잡음 특성은 그 지역에서 장기간 관측을 통해서 규명되어야 한다. 그러나 여기에서는 포괄적인 잡음의 영향을 분석하기 위하여 백색 가우스 잡음(White Gaussian Noise)을 이용하였다.

백색 가우스 잡음을 모사하는 절차는 다음과 같다. 먼저 난수생성 프로그램(Random Number Generator)을 이용하여 [0,1] 구간에서 균질분포(Uniform Distribution)를 따르는 2조의 난수 시계열(Time Series) $u_1(t)$, $u_2(t)$ 를 작성한다. 이 2조의 난수 시계열(Time Series)로부터 평균이 0이고 표준편차가 1인 백색 표준가우스 잡음 $n_s(t)$ 는 아래의 변환을 통해 구해진다.

$$n_s(t) = u_1 \sqrt{-\frac{2 \log R}{R}}, \text{ or } u_2 \sqrt{-\frac{2 \log R}{R}}, \quad (1)$$

$$\text{where } R = [2u_1(t) - 1]^2 + [2u_2(t) - 1]^2, \text{ if } u_1^2 + u_2^2 < 1$$

또한, 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 백색 가우스 잡음 $n(t)$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$n(t) = \sigma n_s(t) \quad (2)$$

분석에 사용할 잡음으로서 표준편차 0.01 gal(=0.00001g)을 선택하였다. 지진신호 모사에서와 마찬가지로 각 규모-거리 쌍에 대하여 300개씩의 잡음을 모사하였다.

2.3 지진동 모사

지진신호 $S(t)$ 와 잡음 $n(t)$ 가 모사되면, 지진동 $A(t)$ 는 다음과 같이 지진신호와 잡음의 합으로 표현된다.

$$A(t) = S(t) + n(t) \quad (3)$$

그림 1은 모사된 지진동 표본의 일례를 보여준다. 이 지진동은 거리 150 km 지점에서 발생한 규모 5.0의 지진에 의한 지반가속도이다. 그림의 전반부(지진신호가 시작되기 전)와 후반부(지진신호가 끝나 가는 시점)에서 잡음이 잘 관찰된다. 양쪽 화살표로 표시된 구간(T_r)은 지진신호가 집중된 시간대로서 강지진동 지속시간(T_d)의 2배로 정의하였다.

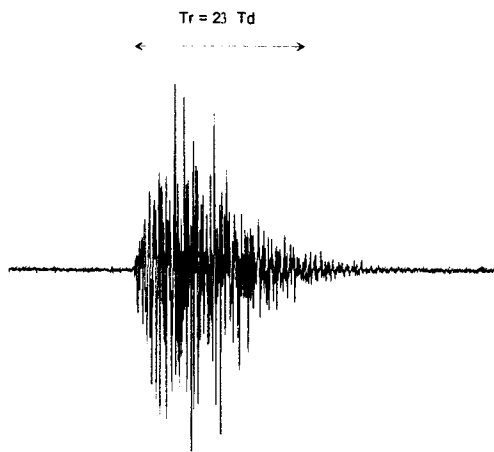


그림 1. 모사된 지진동 표본의 예.

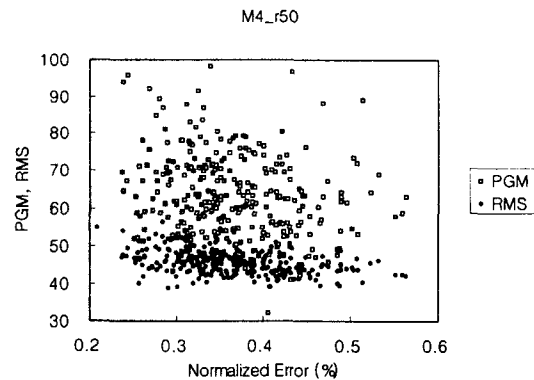


그림 2. S/N 비와 응답스펙트럼 왜곡의 상관관계.

2.4 신호-잡음비의 측정

잡음에 의한 응답스펙트럼 왜곡 정도를 분석하기 위해서 먼저 지진신호와 잡음의 상대적 세기가 결정되어야 하는데, 이를 신호-잡음비(Signal-to-Noise Ratio; 이하 S/N 비)라고 한다. 전통적으로 신호-잡음비는 신호와 잡음에서 각각 최대 값을 추출하여 그 비율로 표현한다. 그러나 최대 값은 전체 지진신호나 잡음 중 하나의 값에 불과하기 때문에 대표성이 낮을 수 있다는 것이 일반적으로 인정되어 왔다. 이에 대한 대안으로 제곱평균제곱근(Root-Mean-Square; 이하 RMS)의 비를 이용한 RMS 비를 도입하였다.

RMS 비는 다음과 같이 측정된다. 먼저, 지진동 시간이력에서 지진신호가 도달하기 전(그림 1에서 전반부)의 기록, 즉 순수한 잡음에 대하여 RMS 값을 구한다. 다음 지진신호(그림 1에서 양쪽 화살표 구간)에 대한 RMS 값을 구하여 이 값을 잡음에 대한 RMS 값으로 나눈다. 여기에서 RMS 계산에 이용된 지진신호에는 잡음도 포함되어 있음에 유의할 필요가 있다. 지진신호와 잡음을 분리해서 생성했기 때문에 순수한 지진신호만의 RMS 값을 계산할 수도 있다. 그럼에도 불구하고, 잡음이 포함된 지진신호에 대한 RMS 값을 계산하는 이유는, 실제 지진동 기록에는 항상 잡음이 포함되어 있기 때문에 실제 상황에서의 적용을 고려했기 때문이다.

잡음은 처음부터 끝까지 동일한 백색잡음이기 때문에 충분히 긴 시간의 자료에 대해서 RMS 값을 구하면 표준편차(σ)에 안정적으로 수렴한다. 그러나 지진신호는 단기신호(Transient Signal)로서 유한한 시간 구간 내에서만 존재하기 때문에 시간구간을 길게 잡으면 값이 점차적으로 감소하여 종국에는 0으로 수렴한다. 그러므로 지진에너지의 대부분을 포함할 수 있도록 충분히 길되, 과도하게 길지 않은 시간구간을 선정할 필요가 있다. 여기에서는 대부분의 지진에너지를 포함한 집중시간(T_d)을 RMS 계산을 위한 시간 길이로 선정하여 이를 지진신호 및 잡음에 동일하게 적용하였다. 이 값의 타당성은 4.3절에 기술되어 있다.

그림 2는 동일한 지진동 자료에서 최대 값을 이용한 S/N 비(PGM)와 RMS를 이용한 S/N 비를 각각 계산하여 이를 응답스펙트럼의 왜곡과 대비한 그림이다. 가로축은 다음 절에 기술된 응답스펙트럼의 왜곡을 나타내고, 세로축은 RMS(\circ)와 PGM(\square)을 이용하여 계산된 S/N 비를 나타낸다. PGM을 이용한 S/N 비는 RMS를 이용한 S/N 비에 비하여 산포도가 매우 큼을 알 수 있다. 이로부터 응답스펙트럼의 왜곡 정도는 PGM보다 RMS를 이용한 S/N 비와 더 높은 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 따라서 이후의 모든 분석에서 RMS를 이용한 S/N 비를 적용하였다.

4. 응답스펙트럼 왜곡 분석

4.1 응답스펙트럼 계산

앞에서 모사된 지진동 자료로부터 응답스펙트럼을 계산하였다. 전술한 바와 같이 통계적 대표 값을 추정하기 위하여, 각 규모-거리 쌍에 대하여 300회씩 응답스펙트럼을 계산하여 집단평균(Ensemble Average)을 취하였다.

모든 응답스펙트럼은 5%의 감쇄(Fraction of Critical Damping)를 적용하여 계산되었다. 응답스펙트럼 계산에 이용된 단진자 고유주기는 총 91개로서, 0.04초부터 15초까지 대수적으로 균등 분포한다.

잡음에 의한 응답스펙트럼 왜곡을 분석하기 위하여 2조의 응답스펙트럼을 계산하였다. 제1조는 잡음을 포함하지 않는 순수한 지진신호, $S(t)$ 에 대한 응답스펙트럼이며, 제2조는 잡음을 포함한 지진동, $A(t)$ 에 대한 응답스펙트럼이다. 또한 2조의 응답스펙트럼은 각각 절대가속도 응답스펙트럼(Absolute Acceleration Response Spectrum; 이하 AA), 상대속도 응답스펙트럼(Relative Velocity Response Spectrum; 이하 RV) 및 상대변위 응답스펙트럼(Relative Displacement Response Spectrum; 이하 RD)을 계산하였다.

4.2 왜곡의 측정

2조의 응답스펙트럼으로부터 잡음에 의한 응답스펙트럼 왜곡 $D(\%)$ 을 다음과 같이 측정하였다.

$$D = \frac{\sum |R_{ps}(p_i) - R_{cs}(p_i)|}{\sum |R_{ps}(p_i)|} \times 100, \quad i = 1, 91 \quad (4)$$

위에서 p_i 는 i 번째 고유주기이고, R_{ps} 는 제1조, 즉 순수한 지진신호에 대한 응답스펙트럼이며, R_{cs} 는 제2조, 즉 잡음에 오염된 지진신호에 대한 응답스펙트럼이다.

4.3 시간구간 길이의 영향

응답스펙트럼은 지진신호 도달시간으로부터 강지진동 지속시간(T_d)의 2배가 되는 시간(T_r)에 이르는 시간구간의 지진동에 대하여 계산되었다. 강지진동 지속시간은 다음과 같이 계산된다.

$$T_d = 1/f_c + 0.05r \quad (5)$$

한편, 시간구간의 길이도 응답스펙트럼 계산결과에 영향을 미칠 수 있으므로, 시간구간의 길이를 변화시켜 가면서 왜곡 D 를 계산해 보았다. 그림 3은 시간구간의 길이와 AA의 왜곡을 비교하고 있다. 가로축은 시간구간의 길이로서 강지진동 지속시간의 배수로 표기되었으며, 세로축은 왜곡을 나타낸다. 순수한 지진신호(ps)와 오염된 지진신호(cs)에 대하여 분석하였다.

순수한 지진신호(ps)에 대한 왜곡의 경우에는 잡음에 의한 왜곡이 없으므로, 시간구간의 길이가 강지진동 지속시간의 2배일 때를 기준으로 하여, 이로부터 벗어나는 정도를 왜곡으로 정의하였다. 순수한 지진신호의 경우, 강지진동 지속시간과 동일한 길이의 시간구간을 제외하면 왜곡이 '0%'로 일정하게 나타난다. 이로부터 2가지 결론을 내릴 수 있다. 첫째, 강지진동 지속시간은 전체 지진신호의 에너지를 포함할 수 없다. 따라서 지진신호의 에너지를 충분히 포함하기 위해서는 더 긴 시간구간이 요구된다. 둘째, 2배의 강지진동 지속시간은 전체 지진신호의 에너지를 포함하는데 충분한 길이이다. 2배보다 긴 시간구간은 계산시간만 소비할 뿐 더 이상의 이점이 없다.

잡음에 오염된 지진신호(cs) 중 규모 6의 경우에는 순수한 지진신호의 경우와 유사한 특성을 보인다. 즉, 시간구간의 길이가 강지진동 지속시간의 2배보다 크면 더 이상 왜곡의 변화가 관찰되지 않는다. 반면, 규모 3의 경우에는 시간구간의 길이가 증가할수록 왜곡도 증가함을 알 수 있다. 이는 지진신호의 길이가 유한하므로, 시간구간을 증가시켜도 더 이상 새로이 포함될 지진신호가 없지만, 잡음은 지속적으로 더 많이 포함되기 때문이다. 이상의 분석으로부터 강지진동 지속시간의 2배가 되는 시간구간이 응답스펙트럼을 계산하는데 최적의 길이임을 알 수 있다.

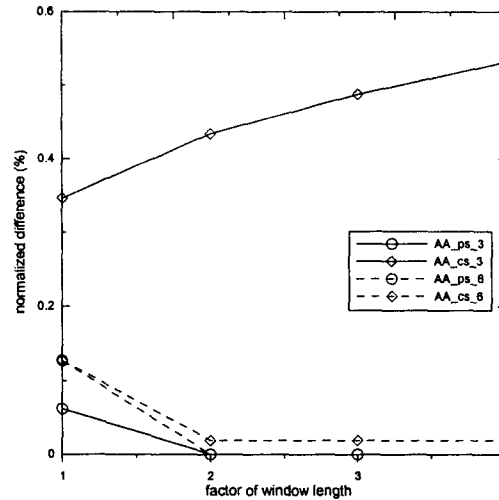


그림 3. 시간구간 길이에 따른 왜곡의 변화.

4.4 S/N 비와 왜곡의 상관관계

그림 4는 잡음에 의한 응답스펙트럼의 왜곡과 RMS S/N 비의 상관관계를 보여준다. 위로부터 RD, RV 및 AA에 대하여 각각 규모별로 도시하였다. 3가지 응답스펙트럼과 모든 규모에 대하여 왜곡의 크기는 RMS S/N 비가 증가함에 따라 일관적으로 감소함을 알 수 있다. 즉, 잡음에 의한 응답스펙트럼의 왜곡과 RMS S/N 비가 높은 상관계수를 갖고 대비된다는 것을 의미한다. 상단에 도시된 RD의 경우 왜곡의 정도는 규모에 따라 크게 변한다. 동일한 S/N 비에 대하여 규모가 작을수록 왜곡이 크게 나타난다. 중단에 도시된 RV의 경우 규모에 대한 왜곡의 변화가 많이 감소했으나, 여전히 약간의 의존성을 보이고 있다. 반면에, 하단에 도시된 AA의 경우에는 규모의 변화에 따른 왜곡의 수준이 거의 변화를 보이지 않고 있다.

그림 5는 규모 3.0 및 6.0에 대하여 AA, RV 및 RD의 왜곡을 S/N 비와 비교하였다. 동일한 S/N 비에 대하여 RD, RV, AA의 순으로 왜곡이 증가한다. RV와 AA의 왜곡은 큰 차이가 없으나 RD의 왜곡은 다른 2개에 비하여 월등히 크게 나타난다. 이러한 차이는 규모가 작을수록 크게 나타나며, 규모가 증가함에 따라 감소하여 규모 6에서는 주목할 만한 차이를 보이지 않는다.

5. 토론 및 결론

5.1 토론: RD의 왜곡이 더 큰 이유

그림 4와 그림 5에서 응답스펙트럼의 왜곡은 지진의 규모가 작을수록 크게 나타나며, 동일한 조건에서 RD(상대변위 응답스펙트럼)의 왜곡이 RV(상대속도 응답스펙트럼)나 AA(절대가속도 응답스펙트럼)보다 월등히 큰 것으로 나타났다. 이에 대한 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다.

첫째, 규모가 작을수록 응답스펙트럼의 왜곡이 큰 것은 지진동 에너지 자체의 주파수 성분의 변화에 기인한다. 그림 6의 상단 그림은 300개 표본의 집단평균(Ensembl Average)으로부터 구한 잡음, 거리 150 km에서 기록된 규모 6.0의 지진신호, 그리고 거리 30 km에서 기록된 규모 3.0의 지진신호의 푸리에 진폭스펙트럼을 나타내고 있다(응답스펙트럼이 아님). 잡음의 진폭스펙트럼은

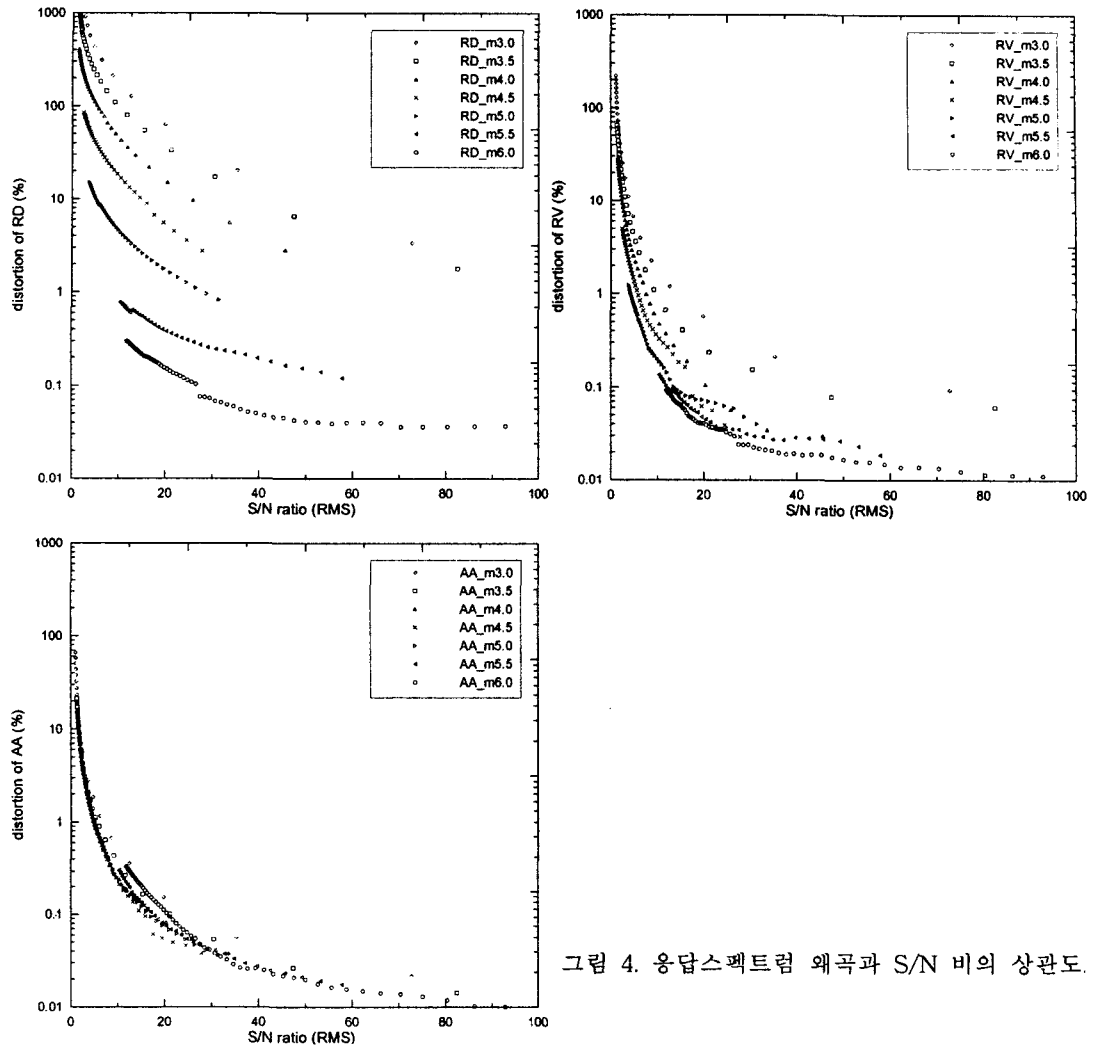


그림 4. 응답스펙트럼 왜곡과 S/N 비의 상관도.

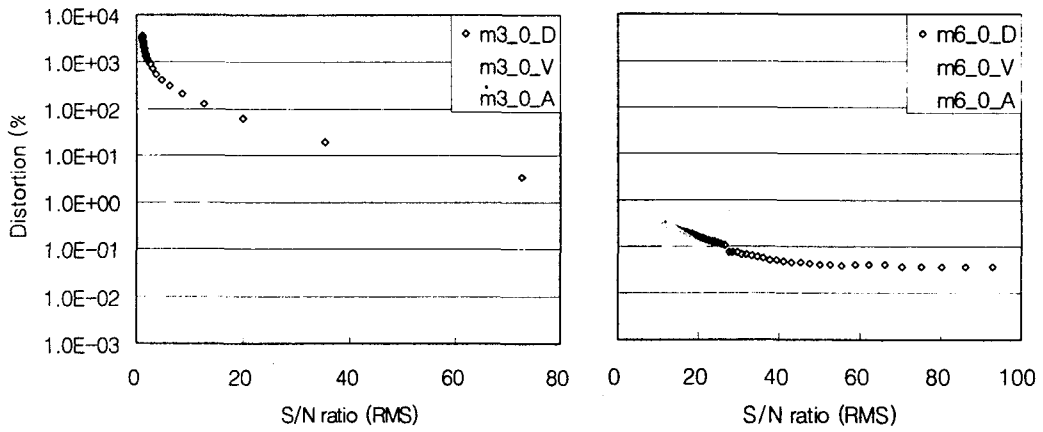


그림 5. 규모별 S/N 비와 응답스펙트럼 왜곡의 상관도.

주파수(구조물의 고유주파수가 아님)에 무관하게 일정한 크기, 즉 백색 잡음(White Noise)의 특성을 보이고 있다. 반면, 지진신호의 진폭스펙트럼(EQ_6_150 및 EQ_3_30)은 특정 주파수 영역에 에너지가 한정된(Band-limited) 진폭스펙트럼을 가지고 있다. 규모가 작아짐에 따라 전반적인 에너지가 감소할 뿐만 아니라 저주파수 에너지가 감소하여 지진에너지 분포 구간은 더욱 협소한 고주파수 영역에 국한된다. 따라서, 소규모 지진에서 저주파 영역 에너지는 지진신호보다 잡음이 우세하게 되며, 그 결과 낮은 고유주파수(또는 높은 고유주기)를 중심으로 응답스펙트럼의 왜곡이 증가하게 된다.

둘째, 동일한 조건에서 RD가 AA나 RV에 비해 왜곡이 심한 것은 이들의 응답특성에 기인한다. 그림 6의 우측 그림은 상단의 잡음에 대한 응답스펙트럼을 나타낸다. 이 그림에서 가로축이 고유주기(Natural Period)임에 유의한다. 백색 잡음은 전 주파수 범위에 걸쳐 진폭스펙트럼이 일정하므로 이에 대한 응답스펙트럼은 입력 지진동에 대한 단진자(Simple Pendulum) 응답의 민감도(Sensitivity)를 나타낸다. 하단 그림은 고유주기가 작을수록 AA의 민감도가 증가하고, RD의 민감도는 감소하며, RV는 비교적 일정하다. 단진자의 공명(Resonance)을 고려할 때, RD의 민감도가 고유주기가 커질수록 증가한다는 것은 단진자가 저주파수 입력지진동에 더 크게 반응함을 의미한다. 그런데 상단 그림에 나타났듯이, 잡음의 진폭스펙트럼은 저주파수 영역에서 상대적으로 우세하므로 결국, 큰 왜곡을 초래하게 되는 것이다.

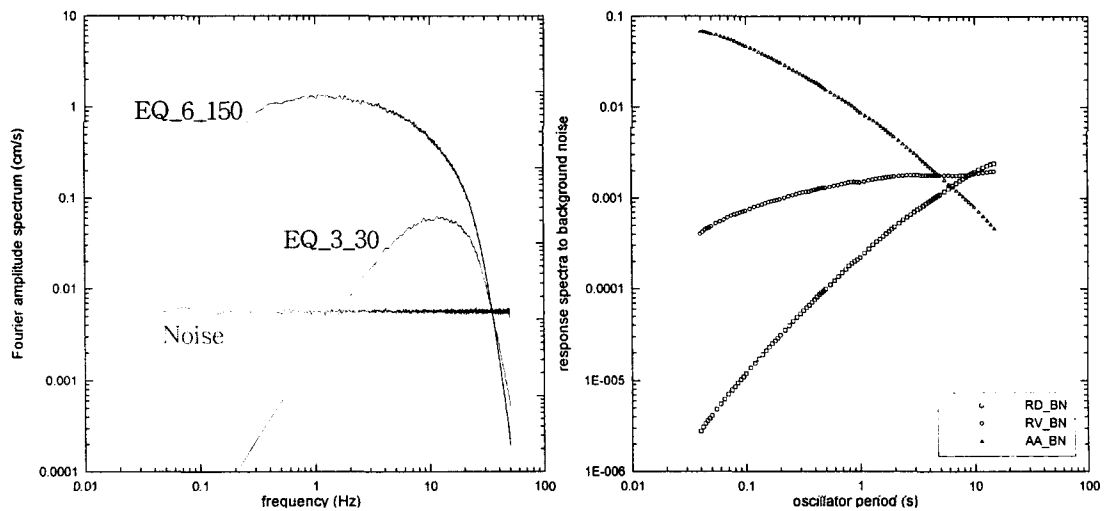


그림 6. 푸리에 진폭스펙트럼과 잡음에 대한 응답스펙트럼.

5.2 결론

지금까지 분석된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 잡음에 의한 응답스펙트럼의 왜곡은 RMS S/N 비와 밀접하게 대비될 수 있다. S/N 비가 증가할수록 왜곡은 일관되게 감소한다.
- RD의 왜곡은 RV나 AA에 비해 크며, 지진의 규모에 따라 급격하게 변한다. 동일한 S/N 비에 대하여 지진의 규모가 작을수록 RD의 왜곡은 증가한다.
- RV의 왜곡은 규모에 따른 변화가 보이나, 그 변화 폭은 크지 않다.

- AA의 왜곡은 규모에 따른 변화를 거의 보이지 않는다.
- 이상의 분석으로부터 다음과 같은 결론에 도달한다.
- 응답스펙트럼을 계산하기 전에 입력 지진동의 S/N 비를 분석하여 잡음에 의한 응답스펙트럼의 왜곡 수준을 평가할 필요가 있다. 특히, 소규모 지진의 경우 이러한 작업은 매우 중요하다.
 - AA의 경우 RMS S/N 비만으로도 응답스펙트럼 왜곡의 추정이 가능하므로, 입력 지진동이 응답스펙트럼 계산에 적합한지 판단하는 기준으로 활용될 수 있다.
 - RD의 경우 응답스펙트럼의 왜곡은 RMS S/N 비뿐만 아니라 규모에 따라서도 달라지므로 입력 지진동의 적합성 평가를 위해서는 이들 2가지를 조합할 필요가 있다.
 - RV의 왜곡은 AA와 RD 왜곡은 중간적 성격을 띠므로 상황에 따라 RMS S/N 비만 이용하거나, S/N 비를 규모와 조합해야 한다.

참고문헌

- [1] 한국지질자원연구원, "양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가", 최종보고서 제2권, 대전, 1998.
- [2] 기상청, "지진관측보고", 서울, 2001.
- [3] Boore, D.M., "Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- [4] Noh, M. and Lee, K., "Estimation of Peak Ground Motions in the Southeastern Part of the Korean Peninsula (II): Development of Predictive Equations", Jour. Geol. Soc. Korea, Vol.31, pp.175-187, 1995.