

기기 정착부 연성도를 고려한 평가용 스펙트럼의 수정
Modification of Evaluation Response Spectrum by Ductility of Equipment
Anchorage

최인길, 전영선, 서정문

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호

요 약

일반적으로 기기의 내진성능 평가 시 기기의 용접 정착부를 취성 파괴로 가정하여 내진 성능을 산정한다. 그러나 실제 기기 정착부는 최소한의 변형성능을 가지고 있으며 이로 인해 비선형 거동을 함에 따라 고진동수 특성을 갖는 기기의 경우 기기의 유효진동수가 감소하게 되며 비탄성에너지 흡수능력이 증가하게 된다. 본 연구에서는 EPRI에서 개발된 기기 정착부 연성도를 고려한 평가용 응답 스펙트럼 수정방법을 이용하여 국내 원전 부지의 등재해도 스펙트럼을 수정하였다. 이 때 각종 감쇠비에 따른 스펙트럼 값은 랜덤 진동론을 이용하여 제안된 식에 의해 평가하였다. 연구결과 기기 정착부의 연성도를 이용할 경우 고진동수 영역의 감소가 뚜렷하게 나타났으며 이를 이용함으로써 기기의 구조적 파괴에 대한 내진성능을 합리적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The failure mode of welded anchorage is assumed as brittle in the seismic capacity evaluation of nuclear power plant equipments. But the welded anchorage has some ductile capacity. This limited displacement capacity can cause the reduction of the effective frequency of high frequency equipments and the increase of the inelastic energy absorption capacity due to the nonlinear behavior. In this study, the uniform hazard spectrum for Korean nuclear power plant site was modified using the response spectrum reduction factor developed by EPRI. The spectral acceleration for various damping ratio was determined by the theoretical method based on the random vibration theory. In conclusion, the high frequency components of evaluation response spectra were greatly reduced due to the consideration of welded anchorage ductility. This reduced response spectra can be used for the development of in-structure response spectra used in the seismic capacity evaluation of high frequency equipments.

1. 서론

최근 수행한 우리나라 및 미국 동부지역에 대한 지진재해도 평가 결과 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum; UHS)가 10Hz 이상의 고진동수 영역에서 매우 큰 스펙트럴 값을 갖는 것으로 나타났다[1]. 이는 기존의 원전 설계나 내진여유도 평가에 사용되어 온 US NRC R. G. 1.60[2] 스펙트럼이나 NUREG/CR-0098[3] 스펙트럼과는 반대의 경향을 보여주는 것이다. 그러나 이러한 UHS는 1~10Hz의 저진동수 구간에서는 매우 작은 스펙트럼 가속도의 증폭을 보여주고 있다. 이러한 특징을 내진의 관점에서 볼 때 이들 지반운동은 기존의 설계나 평가용 지진에 비해 구조물이나 기기에 손상을 줄 가능성이 매우 낮다고 볼 수 있다.

대부분의 원전 구조물의 고유진동수는 1~10Hz 범위에 있으며 심각한 손상이 발생하기 전에 유효진동수를 4Hz 이하로 끌어내릴 수 있는 충분한 중간변형능력을 가지고 있으며 매우 조약하게 건설되었거나 취약한 연결부가 존재하지 않는 한 10Hz 이상의 지진동은 구조물의 설계에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 인식되고 있다[4].

원전에 설치된 대부분의 기기는 5~25Hz 범위의 고유진동수를 가지고 있다. 일부 내진 해석에서 기기의 고유진동수가 25Hz를 초과하는 것으로 나타나는 경우도 있으나 이는 내진해석 시 구조물과 기기 정착부의 연성도를 무시하거나 잘못 평가하였기 때문이다. 기기의 질량이 매우 작아 지진에 의한 손상에 취약하지 않은 경우를 제외하고는 기기를 구조물에 정착하였을 경우 25Hz 이상이 되도록 견고하게 부착하는 것은 불가능하다. 따라서 기기의 경우 주요 관심 진동수대는 25Hz 까지라고 할 수 있다.

거의 대부분의 취성파괴모드를 갖는 기기의 경우에도 심각한 손상을 입기 전에 유효진동수를 25Hz 이하로 신속히 저하시킬 수 있는 충분한 변형능력을 가지고 있다. 대부분의 경우 기기 정착부는 하중전달 능력이 완전히 동원되기 전까지 최소 0.06~0.12 in 정도의 변형에 견딜 수 있다. 그러므로 10Hz 이상에서 1g 이하의 가속도에서는 기기가 파괴되지 않을 것으로 예측할 수 있다. 그러므로 진동에 의한 계전기의 오작동을 제외한 기기에 손상을 줄 수 있는 진동수의 범위는 10Hz 이하라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발된 기기 정착부의 연성도를 고려한 수정응답스펙트럼 작성법[5]에 근거하여 수정응답 스펙트럼 작성법을 확립하고 국내 원전 부지의 등재해도 스펙트럼을 수정하였다.

2. 기기 정착부의 특성

2.1 볼트정착

전기기기 또는 기계기기는 보통 확장형 앵커(Expansion Anchor)나 cast-in-place 앵커볼트로 정착한다. cast-in-place 앵커볼트의 파괴모드는 일반적으로 강재볼트와 유사한 연성 하중-변위 특성을 가지는 연성파괴모드에 의한 볼트의 파괴로 나타난다. 반면에 확장형 앵커볼트는 콘크리트의 파괴모드가 주종을 이루고 있어 취성파괴로 본다. 따라서 여기에서는 확장형 앵커볼트를 가장 취약한 형태의 볼트 정착부로 고려하였으며 이러한 형태의 정착부 하중-변위 특성에 주안점을 두었다.

앵커볼트에 대한 하중-변위 곡선이 제시된 문헌 분석 결과 확장형 볼트의 극한 변위는 볼트의 크기, 매립깊이 및 콘크리트의 강도에 따라 크게 달라지며 일반적으로 인장강도에 비해 전단강도가 큰 것으로 나타났다. 또한 원전에 사용되고 있는 확장형 앵커볼트의 경우 극한 변위가 0.1in 이상인 것으로 나타났다[5].

고진동수 기기의 극한성능은 정착단의 극한 변위에 의해 좌우되며 볼트 정착부의 극한 변위 성능은 용접 연결부에 비해 크므로 볼트 정착부의 경우 파괴에 이르기 위해서는 더 큰 연성도계수를 가지게 된다고 결론지을 수 있다. 따라서 고진동수 지진의 영향 평가에서는 용접 연결이 더욱 취약함을 알 수 있다.

2.2 용접 정착

용접부의 파괴는 취성파괴로 정의할 수 있으며 연성도계수 F_{μ} 는 1.0으로 일반적으로 간주한다. 기기 정착에 사용되는 용접의 경우 낮은 변위 성능을 가지고 있으며 이것은 사실이라 할 수 있다. 예를 들면 3/16in 필렛용접의 경우 용접부에서의 변위가 약 0.01in 발생할 경우 횡방향 전단에 의해 파괴된다. 저진동수 진동에 (2-5Hz) 대해서는 일단 항복변위 (약 0.001in)에 다다르면 지진의 크기가 조금만 증가해도 용접부의 변위가 극한변위를 초과하여 파괴에 이르게 된다. 그러나 고진동수 기기 (10Hz 이상)의 경우에는 항복점 이후에 큰 성능을 가지고 있다[5].

원전 내부에 설치된 전기기기의 정착에 가장 보편적으로 사용되는 용접방법이 필렛용접이며 필렛용접에 대한 특성은 다음과 같다.

- 횡방향 (x 또는 y 방향) 으로 하중을 받는 필렛용접의 경우 세로방향 (z 방향) 하중을 받을 경우에 비해 상대적으로 큰 극한강도를 가지나 변위성능은 낮다.
- z 방향으로 하중을 받는 필렛용접은 x 또는 y 방향으로 하중을 받을 경우에 비해 극한 강도는 작으나 큰 변위성능을 가지고 있다.
- 항복점에서의 항복강도, 극한강도 및 변위와 파괴점에서의 변위는 leg 사이즈에 선형적으로 비례한다. 예를 들면 3/16 inch 용접의 극한강도는 8.3kips/in이며 3/8in 용접은 그 두 배인 16.6 kips/in 이다.
- 필렛용접의 단위 길이당 초기강성은 leg의 사이즈에 무관하다. 예를 들면 3/16in 용접의 단위 inch 당 강성은 3/8in 용접에서와 같다. 그러나 주어진 설계 전단력에 대해 사용된 3/16in 용접의 사이즈는 3/8in 용접을 사용한 경우에 비해 그 길이가 2배가 된다. 따라서 3/16in 용접에 의한 연결은 동일한 강도로 3/8in 용접에 의한 연결부에 비해 2배의 강성을 갖는다.

3. 스펙트럼 수정방법

원전 기기의 내진성능 평가에는 일반적으로 지진취약도 분석이나 내진여유도 해석 방법이 사용되고 있다. 이들 두 방법에서는 기기의 내진성능을 평가할 때 일반적으로 용접에 의한 연결부는 취성파괴를 하는 것으로 가정하여 내진성능을 평가하고 있다. 이는 저진동수 지진동에 의한 저진동수 기기의 파괴와 관련된 지진 경험으로부터 이러한 결론

이 나왔다고 할 수 있다. 저진동수 지진의 손상능력은 최근의 해석적인 연구에서도 잘 나타나 있다[6,7].

그러나 용접에 대한 파괴실험에서 약간의 연성도를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 비록 용접의 변위한계가 매우 작아도 고진동수 기기의 성능을 증가시키는데 매우 중요한 영향을 미친다. 고진동수 기기의 경우 이러한 추가적인 연성도는 코드에 규정된 용접부 허용응력에 의해 주어지는 여유도를 초과하는 보너스가 된다. 일반적인 설계과정에서는 모든 기기에 대해 비선형 해석을 수행할 수 없다. 따라서 코드에서는 설계 상황을 반영한 안전율을 설정하고 있다. 저진동수 기기의 정착에 사용되는 용접의 취성 거동을 인정할 경우 코드에서는 항복점에서 파괴가 발생하는 것으로 가정하여 용접부의 허용응력을 제시해 준다. 이러한 추가적인 연성능력의 존재는 고진동수 기기의 평가 또는 설계응답 스펙트럼의 감소에 대한 근거를 제공해준다. 특히 고진동수가 우세한 입력지진동에 대해 비선형 거동은 유효진동수의 감소를 가져오고 에너지의 흡수량을 증가시켜준다.

기기의 연성능력을 고려하여 미국 EPRI에서는 활동 모델 및 락킹 모델의 2가지 평가 방법을 이용하여 수정응답스펙트럼 작성법을 개발하였다[5]. 두 모델중 활동모델에 의한 값이 락킹 모델에 의한 값보다 보수적으로 나타났으며 본 연구에서도 활동모델을 이용하였다. 이하에 활동모델을 이용한 평가용 스펙트럼의 축소방법에 대해 기술한다.

기기 정착부의 비탄성 거동에 의한 영향을 연성도계수 또는 비탄성에너지 흡수계수라고 불리는 F_{μ} 를 이용하여 정의할 수 있다. 일관성 있는 여유도를 확보하기 위해서는 고정단 진동수 f_f 및 감쇠비 β_f 를 갖는 기기의 탄성 스펙트럴 가속도 S_{ae} 는 연성도계수를 이용하여 수정된 스펙트럴 가속도 S_{ar} 을 산정할 수 있다. 즉,

$$S_{ar} = \frac{S_{ae}}{F_{\mu}} \quad (1)$$

5Hz의 고유진동수를 갖는 기기의 경우 0.01 inch의 정착부 변형에 의한 진동수의 감소나 에너지 흡수량은 무시할 수 있다. 이는 5Hz의 낮은 진동수를 갖는 기기의 경우 탄성 변형량이 0.01inch 보다 훨씬 커 정착부의 비탄성거동에 의한 이득이 거의 없기 때문이다. 이 경우 취성파괴로 간주하여 연성도계수 1.0을 사용하여도 무방하다.

그러나 고진동수의 고유진동수를 갖는 기기의 경우 0.01inch의 정착부 비탄성 거동으로 인한 유효진동수의 감소 및 비탄성에너지 흡수가 매우 커 연성도계수에 의한 수정이 큰 영향을 미치게 된다. SMA 등에 활용할 수 있는 기기의 정착부 연성도를 고려한 평가용 수정응답스펙트럼 작성 방법을 요약하면 다음과 같다.

- 층응답스펙트럼 작성을 위한 시간이력 작성 시 수정계수는 평가용 지반응답 스펙트럼에 1 이상의 계수를 곱한 응답스펙트럼을 기준으로 한다. 다시 말하면 먼저 평가용 스펙트럼을 계수로 스케일링하여 수정응답 스펙트럼을 구하고 이 수정응답스펙트럼을 계수로 나눈다. 이 최종적인 수정 스펙트럼을 이용하여 층응답스펙트럼을 산정한다. 이때 사용하는 안전계수는 설계 또는 평가 어느 쪽에 사용될 것인가에 따라 결정되며 또한 층응답스펙트럼이 지반 상인가 또는 건물 내부인가에 따라 결정된다.

- 수정응답 스펙트럼을 구하기 위한 계산은 최소 10Hz 까지 수행하고 수정응답스펙트럼을 원래의 응답스펙트럼과 8Hz에서 연결한다.
- 고진동수 영역에서는 점근된 수정응답스펙트럼 가속도 값을 사용하며 활동모델에 의한 간략법을 기준으로 축소응답스펙트럼을 작성한다. 이는 두 방법에 의한 축소응답스펙트럼이 서로 교차되는 것을 방지하기 위함이다.
- 지반 상에 설치된 기기를 평가할 경우 최소 안전계수 F_{SM} 은 1.5, 건물 내에 설치된 기기의 경우에는 3.0으로 한다. 설계모드에서는 지반 상에 설치된 경우 2.0, 건물 내에 설치된 경우 4.0으로 한다. 모든 경우에 대해 보수적으로 F_{SM} 을 4.0으로 사용할 수 있다.

원전 내에 설치된 기기를 베이스에서의 질량을 무시하고 마찰력이 없다고 가정한 그림 1과 같을 때 활동모델을 사용한 수정 응답스펙트럼 산정은 그림 2의 절차에 따라 수행하게 되며 이 때 각 단계에서 계산에 사용되는 식은 표 1과 같다[5].

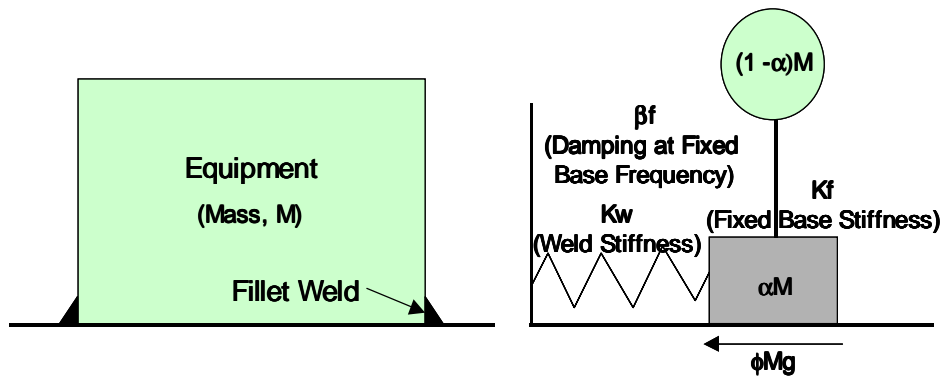


그림 1. 기기 활동 모델

4. 유효감쇠비에 대한 스펙트럴 가속도 결정

앞서 기술한 바와 같이 기기의 연성도를 고려하여 입력스펙트럼을 수정하기 위해서는 유효감쇠비에 대한 스펙트럼 형상의 결정이 요구된다. 표 1의 4에서 유효진동수에서의 유효감쇠비가 산정되면 이 감쇠값에 따른 $S_a(f_e, \beta_e)$ 를 5에서 산정하여 최종적으로 연성도계수를 산정하며 이를 이용하여 수정응답스펙트럼을 작성하게 된다.

일반적으로 우리나라의 지진재해도 해석에서는 5% 감쇠비에 대한 지반운동 감쇄식만이 주어지므로 인해 다양한 감쇠비에 대한 스펙트럼 값을 결정할 필요가 있다[8].

본 연구에서는 수정 입력 스펙트럼 작성을 위해 NUREG/CR-6728[9]에서 제시하고 있는 방법을 사용하였다. 여러 가지 감쇠비에 대한 스펙트럼 값을 결정하는 방법으로 랜덤 진동론에 의한 방법과 경험적인 방법이 제시되어 있다. 본 연구에서는 이중 랜덤 진동론에 의한 방법이 가장 합리적인 것으로 판단되어 이 방법을 적용하였다.

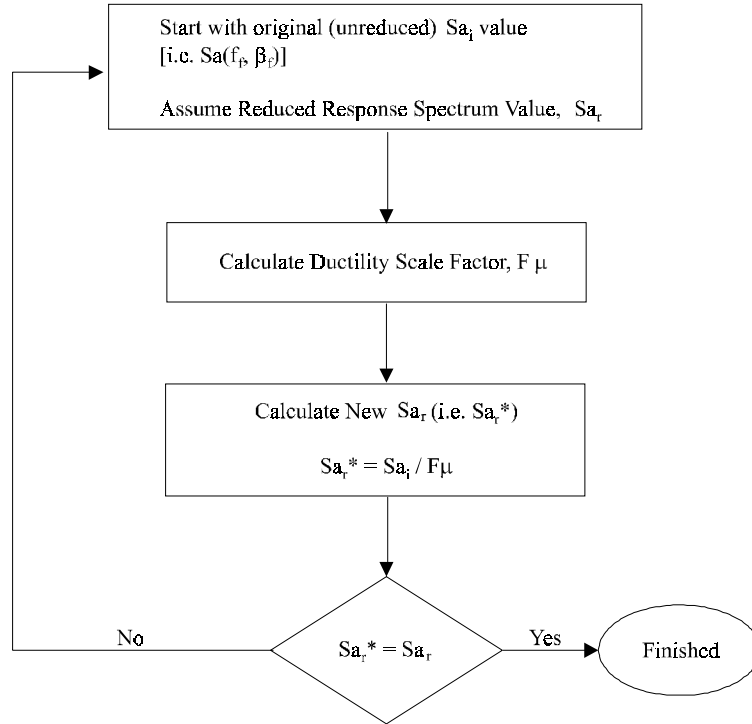


그림 2. 응답스펙트럼 수정계수 산정 흐름도[5]

표 1. 수정응답 스펙트럼 산정을 위한 수식[5]

Step	Equation	Constant
1. Nonlinear Parameter, A	$A = \frac{(2\pi f_f)^2 \delta_u}{Sa_c}$ <p>where:</p> $f_f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_f}{M}}$ $Sa_c = F_{SM} Sa_r$	K_f = Component fixed-base stiffness M = Component mass δ_u = Weld ultimate displacement capacity g = Acceleration due to gravity Sa_r = Reduced spectral acceleration F_{SM} = Required minimum safety factor
2. Normalized Secant Frequency Squared, X	$X = \frac{1}{1 + A}$	
3. Normalized Effective Frequency Squared, X_e	$X_e = 1 - (1 - X)^{1.6}$	
4. Effective Damping Ratio at Effective Frequency, β_e	$\beta_e \approx \frac{X}{X_e} \left[X^{1/2} \beta_f + \frac{0.6}{\pi} (1 - X) \left(1 - \frac{1}{\mu_w} \right) \right]$	β_f = Elastic damping ratio at fixed-base frequency $\mu_w = \delta_u / \delta_y$ δ_y = Weld yield displ.
5. Ductility Scale Factor, F_μ	$F_\mu = \frac{X_e}{X} \frac{Sa(f_f, \beta_f)}{Sa(f_e, \beta_e)}$ <p>where</p> $f_e = f_f X_e^{1/2}$	$Sa(f, \beta)$ = Spectral acceleration at frequency, f , and damping, β

진동수 $1 \leq f < 5\text{Hz}$ 에 대해서는 Rosenblueth[10]의 방법을 적용한다. 임의 진동수에서 5% 감쇠비의 스펙트럼으로부터 임의의 감쇠비에 대한 스펙트럼 값 S_a 는 다음의 식으로부터 산정할 수 있다.

$$S_a(f, \xi) = S_a(f, 0.05) \left[\frac{1 + 4.9\xi f D}{1 + 4.9 \times 0.05 f D} \right]^{-0.41} \quad (2)$$

여기서 ξ 는 감쇠비를 나타내며 D 는 강진지속시간을 나타낸다.

5Hz 이상의 진동수 구간에 대해서는 Vanmarcke[11]에 의해 제시된 다음의 식을 이용하여 스펙트럼 값을 산정한다.

$$S_a(f, \xi) = \left\{ PGA^2 + [S_a(f, 0.05)^2 - PGA^2] \left[\frac{1 + 4.9\xi f D}{1 + 4.9 \times 0.05 f D} \right]^{-0.82} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

여기서 PGA 는 침두지반가속도를 나타낸다. 위의 식에서 두 번째 항이 0 이하가 되어서는 안된다. 강진지속시간 D 는 거리에 따라 달라지며 미국 서부지역에 위치한 부지에서는 Abrahamson and Silva[12]에 의해 제시된 값을 사용하며 미국 중동부 지역에서는 Atkinson and Boore[13]에 의해 제시된 값을 사용한다. 본 연구에서는 우리나라의 지진과 전파특성이나 부지특성이 미국 중동부 지역과 유사하므로 미국 중동부 지역에 적용되는 값을 사용하여 산정하였다. 위에서 제시된 두 식은 감쇠비가 0.5%에서 20%까지 적용할 수 있으며 수평 및 수직방향 입력 스펙트럼에 공히 적용할 수 있다.

그림 3에 미국 중동부 지역의 5% 등재해도 스펙트럼을 이용하여 각종 감쇠비에 대한 스펙트럼을 작성한 것을 보여주고 있다. 이 때 기준 스펙트럼은 앞서 기술한 바와 같이 5% 감쇠비에 대한 등재해도 스펙트럼을 사용하였다.

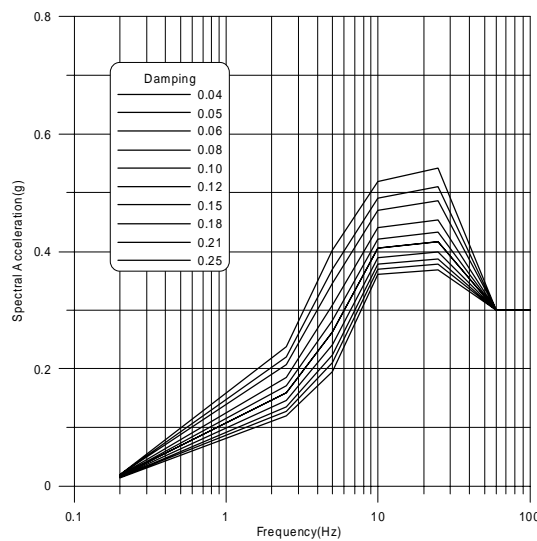


그림 3. 각종 감쇠비에 대한 스펙트럼 작성 예

5. 수정스펙트럼 작성 예

본 연구에서는 앞서 기술한 미국 EPRI의 스펙트럼 수정법과 NUREG/CR-6728에서 제시한 각종 감쇠비에 대한 스펙트럼 형상 결정법을 이용하여 미국 중동부 지역의 등재해도 스펙트럼 및 우리나라 원전 부지의 등재해도 스펙트럼에 대한 수정 스펙트럼을 작성하였다. 그림 4에 우리나라 원전부지에 대한 UHS 및 미국 동부지역의 UHS를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 우리나라 원전 부지에서의 UHS가 기기의 고유진동수가 위치하고 있는 10~30Hz 구간에서 매우 크게 나타났다[14~16]. 미국 동부지역 UHS의 경우 기존의 설계응답스펙트럼인 US NRC R. G. 1.60[2]에 비해 고진동수 영역에서의 증폭이 매우 크게 나타난 것으로 우리나라의 경우 이보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 우리나라 원전 부지에 대한 지진재해도 평가 시 강진자료의 부족 등으로 인해 불확실성이 매우 커 이 스펙트럼에 대한 신뢰가 그다지 크다고는 할 수 없다. 그러나 최근까지의 우리나라 지진학의 연구결과를 최대한 반영한 것이므로 이를 이용하여 본 연구를 수행하였다.

그림 5에서는 앞서 기술한 랜덤진동론을 이용한 각종 감쇠비에 대한 스펙트럼 작성법을 이용하여 국내 원전 부지의 UHS에 대해 7% 및 10% 감쇠비를 갖는 스펙트럼을 5% 스펙트럼을 이용하여 작성한 것을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 감쇠비의 증가에 따른 스펙트럼 가속도의 감소가 잘 표현되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 앞서 그림 3의 결과를 실제 지반운동 감쇄식으로부터 산정한 각종 감쇠비에 대한 스펙트럼과 비교해본 결과 랜덤진동론에 의한 스펙트럼 가속도가 대체적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 그림 5에 나타난 스펙트럼 가속도는 비교적 보수적으로 평가된 것으로 볼 수 있다.

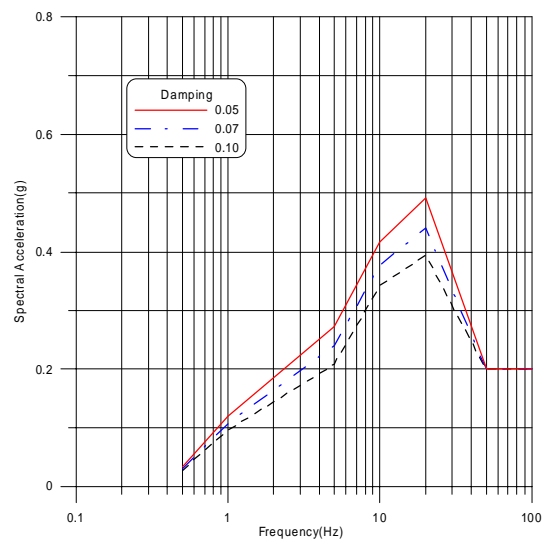
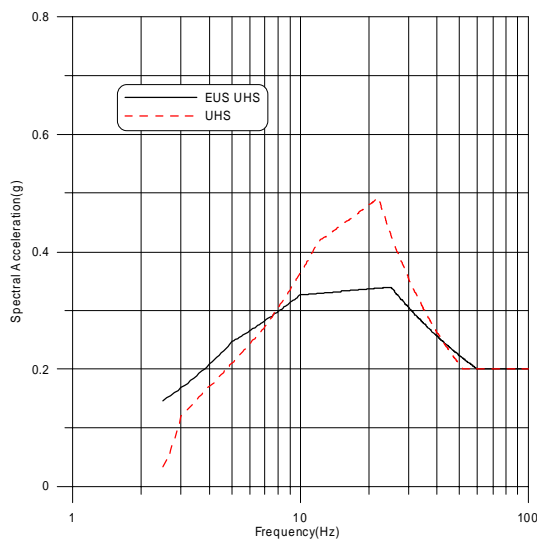


그림 4. EUS UHS 및 국내 원전부지 UHS 비교 그림 5. 각종 감쇠비에 대한 UHS

그림 6에는 미국 동부지역의 UHS를 기기 연성도를 고려한 수정응답 스펙트럼과 비교하여 보여주고 있다. 이 때 기기의 SMA 항복성능과 메디안 항복성능의 비를 나타내는 안전계수 F_{SM} 은 1.5를 사용하였으며 기기의 변형량은 0.01inch로 가정하여 산정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 8Hz 이상에서 스펙트럴 가속도가 크게 감소되며 PGA 역시 0.3g에서 0.27g로 감소되는 것을 보여주고 있다.

그림 7에서는 우리나라 원전 부지의 UHS와 수정된 응답스펙트럼을 보여주고 있다. 이 때 안전계수 및 기기의 변형량은 위와 동일하게 가정하여 산정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 8-40Hz 구간의 고진동수 영역에서는 스펙트럴 가속도가 크게 감소함을 알 수 있으나 40Hz 이상의 구간에서는 오히려 증가함을 알 수 있다. 이는 40Hz 이상의 고유진동수를 갖는 기기의 경우 유효진동수는 스펙트럴 가속도가 매우 큰 구간으로 이동하기 때문에 오히려 응답이 증폭될 수 있음을 보여주고 있다. 다시 말하면 우리나라 원전부지의 UHS는 고진동수 구간에서 스펙트럴 가속도의 증폭이 매우 크고 경사가 매우 급해 유효진동수의 감소에 따른 증폭이 발생함을 보여주고 있다. PGA 역시 0.2g에서 0.24g로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 원전에 설치된 대부분의 기기가 25Hz 이하의 고유진동수를 가지므로 40Hz 이상에서의 스펙트럴 가속도의 증폭에 의한 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

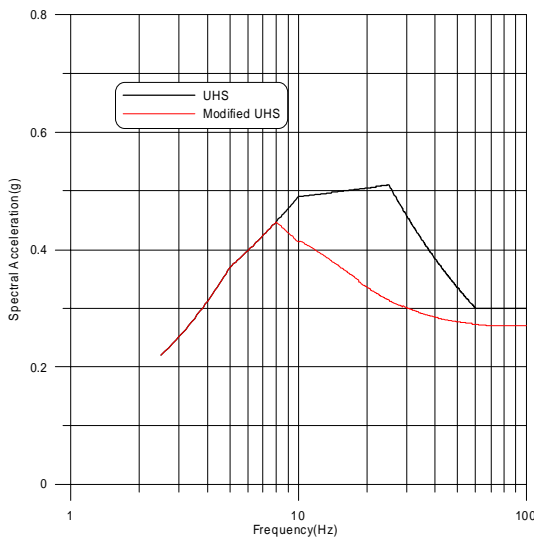


그림 6. EUS UHS의 수정

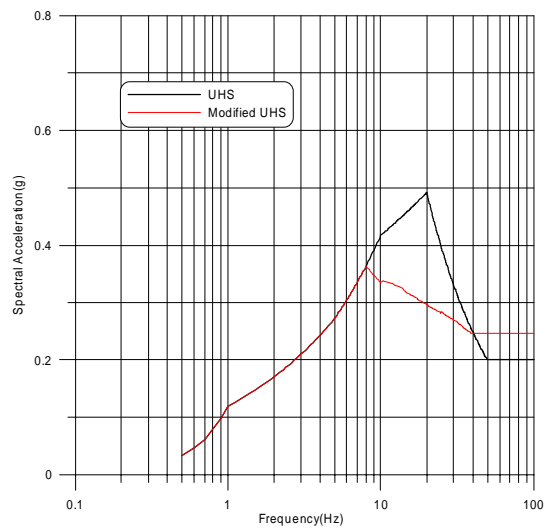


그림 7. 국내원전부지 UHS의 수정

6. 결론

본 연구에서는 기존 EPRI의 연구결과를 이용하여 고진동수 기기의 내진성능 평가를 수행하기 위한 고진동수 성분이 우세한 지진응답스펙트럼에 대한 수정방법을 확립하고 국내 원전부지의 UHS에 대한 수정 응답스펙트럼을 산정하였다. 본 연구의 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 미국 동부 지역이나 우리나라의 경우 UHS에서 저진동수 성분은 설계지진에 비해 매우 작으나 고진동수 영역에서 크게 증폭되는 것으로 나타나 고진동수 기기의 내진 성능 평가 시 고진동수 성분의 영향을 고려하여 평가하여야 한다.
- 기기의 연성도를 고려한 수정응답 스펙트럼의 작성을 위해서는 다양한 감쇠비에 대한 스펙트럼이 요구되나 지진재해도 해석에서 5% 감쇠비에 대한 지반운동 감쇠식이 제시되고 있어 추후 스펙트럼 형상의 수정을 위해서는 지진재해도 해석에서 이러한 사항을 반영할 필요가 있다.
- 랜덤진동론에 의한 각종 감쇠비에 대한 스펙트럼 작성방법은 비교적 보수적인 값을 주는 것으로 나타나 수정 스펙트럼 작성에 효율적으로 사용할 수 있는 것으로 나타났다.
- 우리나라 지진의 고진동수 성분이 미국 동부지역에 비해서도 매우 우세한 것으로 나타나 기기연성도에 의해 매우 큰 진동수 영역에서 PGA가 증가되는 경향을 보여주었다. 그러나 이는 기기의 고유진동수가 존재하는 범위 밖이므로 기기의 내진성능 평가에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.
- 본 연구의 결과는 고진동수 특성을 갖는 UHS에 기초하여 부지 고유 설계스펙트럼을 작성하는데도 매우 유용하게 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 최인길, 전영선, 연관희, “등재해도 스펙트럼을 이용한 지진취약도분석,” 한국원자력학회 2002년 춘계 학술발표회, 2002.
2. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
3. Newmark, N. M. and Hall, W. J., Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants, NUREG/CR-0098, 1978.
4. J. W. Reed, B. Lashkari, R. P. Kennedy and R. P. Kassawara, “Analysis of High-Frequency Seismic Effects,” Transactions of SMiRT 11, Vol. K, K10/2, 1991.
5. J. W. Reed, R. P. Kennedy, and B. Lashkari, Analysis of High-Frequency Seismic Effects, EPRI TR-102470, 1993.
6. R. P. Kennedy, et al., Engineering Characterization of Ground Motion - Task 1, Effects of Characteristics of Free-Field Motion on Structural Response, NUREG/CR-3805, 1984.
7. R. P. Kennedy, D. A. Wesley, and W. H. Tong, Probabilistic Evaluation of the Diablo Canyon Turbine Building Seismic Capacity Using Nonlinear Time History Analysis, Prepared for Pacific Gas & Electric Company, 1988.
8. 한국원자력연구소, 지진재해도 평가의 불확실성 개선에 관한 연구, KAERI/CR-65/99, 1999.

9. R. K. McGuire, W. J. Silva, and C. J. Costantino, Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions : Hazard- and Risk-Consistent Ground Motion Spectra Guidelines, NUREG/CR-6728, 2001.
10. Rosenblueth, E., Characteristics of Earthquakes, In E. Rosenblueth, editor, Design Earthquake Resistant Structures, Ch. 1, Wiley, 1980.
11. Vanmarcke, E. H., Structural Response to Earthquakes, in Seismic Risk and Engineering Decision, edited by C. Lomnitz and E. Rosenblueth, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, London, New York, 1976.
12. Abrahamson, N. A., and W. J. Silva, "Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes," Seism. Soc. Am, 68(1), 1997.
13. Atkinson, G. M., and D. M. Boore, "Some Comparison between Recent Ground Motion Relations," Seism. Soc. Am., 85(1), 1997.
14. 최인길, 서정문, 전영선, "입력스펙트럼 형상이 층응답스펙트럼에 미치는 영향 평가," 한국원자력학회 2002년 추계 학술발표회, 2002.
15. In-Kil Choi, Young-Sun Choun, Jeong-Moon Seo, and Kwan-Hee Yun, "Reevaluation of Seismic Fragility Parameters of Nuclear Power Plant Components Considering Uniform Hazard Spectrum," Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 34, No. 6, 2002.
16. 최인길, 서정문, 전영선, "고진동수 지진동에 대한 원전 기기의 지진취약도 분석," 한국지진공학회 춘계 학술발표회 논문집, 2003.