

# 내진여유도 평가를 위한 분석기준지진동(RLGM) 평가 연구

## A Study on Review-Level Ground Motion For Seismic Margin Assessment

연관희\*                      이종립\*\*  
Yun, Kwan-Hee              Lee, Jong-Rim

### ABSTRACT

Evaluating a Review-Level Ground Motion is a key to efficiently perform Seismic Margin Assessment of nuclear power plants, whose purpose is to determine a ground motion level for which a plant has high-confidence-of-a-low-probability of seismic-induced core damage and to identify any weaker-link components. In this study, a method to obtain RLGMs is reviewed which is recommended by Electric Power Research Institute and implemented to be applied to Limerick site in eastern and central U.S. as a case study. This method provides reasonable and site-specific RLGMs as minimum required plant HCLPF for SMA that meet a target mean seismic core-damage frequency based on seismic hazard results and generic values of uncertainty and randomness parameters of the core-damage fragility curves. In addition, high-frequency RLGM is justifiably modified to reflect the increased seismic capacity of high-frequency components and spatial variation and incoherence of input ground motion on a basement of large structures by establishing a method to obtain high-frequency reduction factors according to EPRI guidelines.

### 1. 서론

미국 NRC는 원자력발전소에서 발생가능한 중대한 노심사고와 관련한 문제를 해결하기 위해 중대사고정책(Severe Accident Policy)을 수립하였으며 외부사건에 대한 발전소의 취약요소를 찾기 위한 IPEEE(Individual Plant Examination for External Events)를 수행할 것을 명시하였는데 중대 외부사건으로는 안전정지지진(Safety Shut-down Earthquake)을 초과하는 지진이 고려되고 있다.

IPEEE 수행 방안으로는 확률론적 지진위험도 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment)와 SMA(Seismic Margin Assessment, 내진여유도 평가)를 인정하고 있으며, 확률론적 지진위험도 평가는 지진에 의한 CDF(Core-Damage Frequency, 노심손상빈도) 및 격납건물 파손확률 등 정량적인 계산 결과를 제공하지만, SMA는 내진안전성 여부에 대한 정성적인 평가를 강조한다.([1])

RLE(Review Level Earthquake, 분석기준지진)은 SMA의 중요한 요소로 발전소의 HCLPF (high confidence-of-a-low-probability-of-failure) 내진성능은 RLE에 대해 계산된다. RLE는 원전규제기관과의 협의를 통해 결정되며 목적에 따라 여러 대안이 존재한다.([2]) RLE의 수준을 너무 낮게 설정하면 발전소의 취약요소를 파악할 수 없고 최저 HCLPF 내진성능만 평가할 수 있으며, 너무 높게 설정하면 SMA에 많은 작업량이 뒤따른다. 미국 중동부 지역의 최근 SMA 연구결과에 따르면 0.2g 이하의 SSE를 갖는 부지의 경우 RLE를 PGA 0.3g로 설정하는 것이 적절한 것으로 알려져 있다.

\* 한국전력공사 전력연구원 선임보수연구원, 정회원  
\*\* 한국전력공사 전력연구원 수석 연구원, 정회원

SMA에서는 결정된 RLE에 대해 발전소 중요 기기/구조물에 대한 HCLPF 내진성능을 계산하고, HCLPF 내진성능이 RLE보다 크면 선별제외(Screening-Out)시키고 선별된 기기/구조물(Outlier)에 대하여는 HCLPF 내진성능을 재평가하게 된다. 한편 경제적이고 효율적인 재평가를 위해서는 해당 부지의 지진·지질 및 구조물의 특성이 고려되고 원전규제기관의 안전정책목표를 만족하는 합리적인 입력지진동인 RLGM(Review-Level Ground Motion, 분석기준지진동)이 필요하다. 본 연구에서는 연초과빈도로서 제시되는 지진재해도 및 노심손상 CDF 곡선에 기반한 EPRI RLGM 평가 방법을 소개하고 미국 중동부지역의 지진재해도 결과를 바탕으로 예시적으로 RLGM을 평가하고자 한다. 이때 RLGM 평가시 고주파성분기 정척부의 연성에 의한 비선형거동과 지반운동의 공간적 변화 및 비상관성(spatial variation and incoherency)에 의한 고주파응답감쇠계수(high frequency reduction factor)도 반영하였으며 최종적으로 계산된 RLGM은 개념적으로 안전목표를 충족시키는 발전소의 최소 HCLPF 내진성능으로 해석될 수 있다.

## 2. 지진재해도 및 지진취약도 결과를 이용한 원전 CDF 평가

일반적으로 CDF의 평균값은 일련의 지진취약도 곡선과 이산화된 지진재해도 곡선의 수치적분에 의해 얻어진다. 그러나 지진재해도 곡선과 지진취약도 곡선을 적절한 함수형태로 표현하면 CDF의 평균값과 분산을 다음과 같이 단순화된 이론적인 함수로 나타낼 수 있다.

$$\overline{SCDF} = \overline{H}(\overline{A}) \exp \left[ \frac{1}{2} K^2 H (\beta^2_R + \beta^2_U) \right] \quad (1)$$

여기서  $\overline{SCDF}$ 는 지진에 의한 평균 CDF를 의미하며  $\overline{A}$ 는 노심손상 지진취약도의 이중로그정규분포(doubly-lognormal distribution)에서 지반운동의 중앙-중앙값(median-median)으로 발전소의 내진성능을 표현하는 양으로 CDF의 지진취약도 곡선군으로부터 도출될 수 있고(그림 1),  $\overline{H}(\overline{A})$ 는 지반운동  $\overline{A}$ 에서의 평균지진재해도,  $K_H$ 는 log-log 공간에서의 지진재해도 곡선의(음수)기울기를 의미한다. 또한  $\beta_R$ 과  $\beta_U$ 는 노심손상 지진취약도 이중로그정규분포의 무작위성(randomness)과 불확실성(uncertainty)을 정량화한 항이다.

원전의 CDF를 함수의 형태로 표현한 식 (1)의 유도는 참고문헌 [3]에 수록되어 있으며, 이때 1) 지진재해도는 log-log공간상에서 선형식으로 근사될 수 있으며, 2) 지진취약도 곡선이 이중로그정규분포를 따른다고 가정하였다. 상기 식의 장점은 CDF에 미치는 주요 영향 인자가 무엇인지를 나타낼 수 있으며 수학적으로 간단하여 쉽게 응용이 될 수 있다는 점이다. 식 (1)에 따르면 CDF의 수준은 지진재해도의 중앙값보다 평균값에 좌우되며 발전소의 내진성능 수준에 대한 어떠한 가정도 필요치 않으며 오직 CDF 지진취약도 곡선군의 불확실성 인자에만 좌우된다.

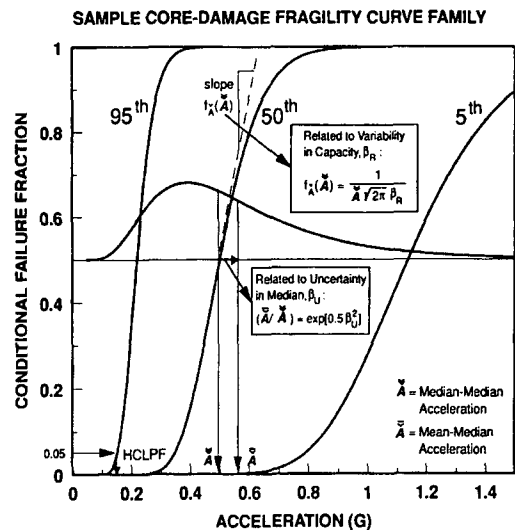


그림 1. 노심손상 지진취약도 곡선 파라미터인  $\beta_R$ ,  $\beta_U$ ,  $\overline{A}$ , HCLPF에 대한 개념도([3])

### 3. RLGM 결정 방법

발전소 고유의 RLGM 스펙트럼을 구하는 개략적인 절차는 다음과 같다.

- 1) 평균 CDF 안전목표 설정.(예;  $2 \times 10^{-5}$ )
- 2) 평균지진재해도 결과, 또는 중앙값재해도로부터 유도된 유사평균재해도 결과를 구함. 재해도는 적당한 주파수(예; 1, 2.5, 5, 10Hz)에서 스펙트럴가속도 값으로 표시.
- 3) 지진재해도가 주어지면 임의로 선정된 내진성능에 해당하는 평균 CDF를 계산.
- 4) 계산한 평균 CDF가 안전목표를 만족시킬 때까지 선정된 내진성능값을 조정하여 반복 수행.
- 5) 최종적으로 조정된 내진성능에 해당하는 평균지진재해도를 계산.
- 6) 1, 2.5, 5, 10 Hz의 스펙트럴가속도 재해도 결과에 대해 상기 과정을 수행하고, 여기에서 나오는 평균지진재해도 결과들의 평균값 계산.
- 7) 위에서 결정된 재해도 결과에 대해 평가된 평균 UHS를 RLGM으로 설정.(혹은 1, 2.5, 5, 10 Hz에서의 조정된 내진성능을 이용하여 RLGM 스펙트럼으로 설정)

RLGM을 결정하기 위해서는 적절한 안전기준을 설정할 필요가 있는데 미국 NRC 안전목표정책(Safety-Goal Policy) 수행을 위해 현재 권장되고 있는 안전목표(safety target)은 전체평균 CDF  $1 \times 10^{-4}$ 과 일치한다. 이에 따라 RLGM의 수준은 전체평균 CDF에 대한 지진사건의 기여도에 따라 도표 1과 같이 분류될 수 있다.

도표 1. 안전목표에 따른 RLGM 분류

전체평균 CDF	지진사건 기여도(%)	평균 CDF 안전목표	RLGMs
$1 \times 10^{-4}$	50	$5.0 \times 10^{-5}$	RLGM-A
	20	$2.0 \times 10^{-5}$	RLGM-B
	5	$0.5 \times 10^{-5}$	RLGM-C

지진재해도 결과는 1~10 Hz 영역에서 스펙트럴가속도 값으로 얻어지는데, 이는 2~15 Hz, 특히 2~10 Hz 영역의 지진동이 과거의 연구에서 발전소 구조물 및 기기에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문이다.

발전소의 내진성능은 지진에 의한 노심손상 취약도곡선군을 이용함으로써 결정할 수 있는데, 노심손상 취약도곡선은 주어진 지진동 인자의 일정 범위에 대한 조건부 노심손상 발생확률을 나타낸다. 노심손상 취약도곡선군은 취약도곡선의 불확실성을 나타내기 위해 이용되며, 이러한 곡선군은 이중로그정규분포의 불확실성 인자인  $\check{A}$ ,  $\beta_R$ ,  $\beta_U$ 에 의해 간편하게 나타낼 수 있다. 이들 로그표준편차는 발전소마다 그리 큰 차이는 없으며, 미국중동부의 PRA 연구결과에 따르면 발전소 수준에서 이들 값의 평균은 각각 0.22와 0.24이다. 또한 발전소마다 이들의 변화율은 매우 작아서(각각 0.14, 0.16) 발전소의 일반적인 취약도곡선군을 결정할 수 있다. (4) 발전소 HCLPF 내진성능 수준은 취약도곡선군으로부터 구할 수 있는데, 발전소 지진취약도곡선이 로그정규분포를 따른다고 가정할 때 주파수  $f$ 에서 노심손상 HCLPF 내진성능은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$HCLPF_f = \check{A}_f \exp[-1.65(\beta_R + \beta_U)] \quad (2)$$

이렇게 결정된 HCLPF 내진성능 수준을 RLGM 스펙트럼의 스케일 기준점으로 이용할 때 50% 비초과확률의 HCLPF 내진성능 값이라고 말한다.(HCLPF(50%)) 그러나 일반적으로 HCLPF 내진성능은 84% 비초과확률(HCLPF(84%))을 가져야 하는데 응답스펙트럼 굴곡의 불확실성을 일반적으로 정량화한 식 (3)을 이용하면 HCLPF(50%)을 HCLPF(84%)으로 바꿀 수 있다.

$$HCLPF(84\%) \approx 1.2 \times HCLPF(50\%) \quad (3)$$

지진재해도 및 취약도 결과가 주어지면, RLGM 스펙트럼을 평가하기 위한 주요 과정은 평균 CDF가 안전목표와 같아질 때까지 식 (1), (2), (3)을 이용하여 HCLPF 내진성능을 조정하며 반복 계산을 수행하는 것이다. 안전목표를 만족시키는 HCLPF 내진성능 값은 최소한으로 요구되는 발전소 HCLPF 내진성능 수준 또는 RLGM 값이다.

#### 4. 고주파수 영역에서 입력지진동 응답스펙트럼의 감쇠

일반적으로 고주파수 지진동은 원전 구조물 및 기기에 큰 피해를 주지 않기 때문에, 지진외부사건에 대한 발전소 중대사고 평가를 위한 입력지진동인 RLGM 스펙트럼의 고주파수 영역은 감쇠될 수 있는데 감쇠시킬 수 있는 두 가지 근거로는 1) 고주파성분기기 정착부의 연성(ductility) 2) 비수직 지진파 입사 및 지반매질의 비균질성에 의한 지진동의 공간적 변화 및 비상관성이 있다.

일반적인 연성능력은 입력지진동의 주파수에 의존하는 상대적인 값으로서 변위가 큰 저주파수 지진동의 경우 정착부 용접부의 비탄성 응답은 연성능력을 보이지 않는 반면, 변위가 작은 고주파수기기의 경우 용접에 이용된 물질의 연성특성이 전체 내진성능에 가장 큰 영향을 미치며 기기내진성능을 결정하는데 고려되어야 한다.

RLGM 응답스펙트럼의 고주파수 성분을 감쇠시켜 SMA에서 고주파수 기기들을 분석하기 위한 RLGM 응답스펙트럼을 얻기 위해 이용되는 고주파수응답감소계수는 단순화된 sliding 모델(그림 2)을 이용하여 구하며, 이때 모델 바닥에서의 질량과 마찰력은 없는 것으로 가정한다. ( $\alpha=0$ ,  $\phi=0$ )

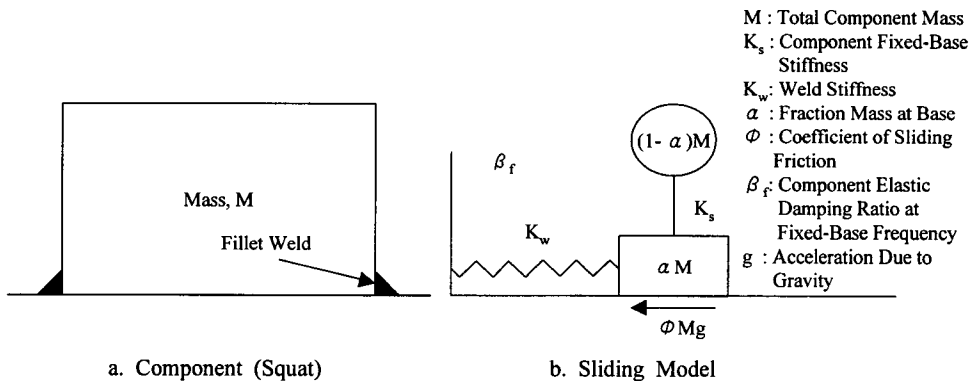


그림 2. 기기 sliding 모델

응답스펙트럼 고주파 감쇠는 비탄성에너지흡수계수 ( $F_{\mu}$ )를 이용하여 구현되며 이 값은 유사선형탄성모델(pseudo-linear elastic model) 이론((5))을 적용하여 도출되는데 참고문헌 [6]에 상세한 절차가 수록되어 있다. 이 계산 절차와 관련된 주요 관계식은 식 (4), (5)와 같은데 이는 미국내 15 개의 지진에 대한 비선형 시간-이력해석 결과를 유사선형탄성모델 해석결과와 비교하여 경험적으로 보정된 식이다.

$$\beta_e = \frac{X}{X_e} [X^{1/2} \beta_f + 0.173(1 - X)] \quad (4)$$

$$(1 - X_e) = (1 - X)^{1.6} \quad (5)$$

여기서  $\beta_f$ ,  $\beta_e$ 는 탄성, 유효감쇠계수이며[5],  $X = K_s/K_f$ ,  $X_e = K_e/K_f$ 이다.(그림 3 참조)

RLGM 스펙트럼은 빌딩 내에 설치되어 있는 기기를 분석하기 위한 층응답스펙트럼(IRS, In-structure Response Spectrum)과 지반 위에 설치되어 있는 기기의 SMA를 위한 보다 낮은 수준의 지반 RLGM 스펙트럼으로 구분되며 RLGM의 고주파 감쇠는 다음과 같은 지침을 준수하여 계산되어야 한다.

- 1) RLGM 스펙트럼 감소는 10 Hz이상의 주파수에서 수행하고, 감소된 응답스펙트럼은 8 Hz에서 RLGM 스펙트럼과 다시 연결됨.
- 2) 감소된 응답스펙트럼은 (10% 감쇠 최대스펙트럼가속도)/1.6 보다 커야함.
- 3) IRS를 구하기 위해 이용하는 RLGM은 안전 계수  $F_{SM} = 3.0$ , 지반 위에 설치되어 있는 기기의 경우에는  $F_{SM} = 1.5$ 을 가진 지반 응답스펙트럼을 이용하여 감소된 응답스펙트럼을 결정함.

위에 주어진 안전계수  $F_{SM}$ 은 HCLPF 내진 성능과 중앙값 항복성능 사이의 안전여유도 뿐만 아니라 원전 구조물내의 일반적인 고주파수 지진동 증폭 현상도 고려하여 결정된다. 감소 계수를 결정하기 위해서는 정착부 비틀림(anchorage distortion)의 허용한계로 0.01 inch를 이용하여야 하며, 이것은 3/16 inch 용접부의 극한변위성능(ultimate non-recoverable displacement capacity)에 해당한다. 이러한 허용한계는 보수적이며 미국 중동부 원전 기기들은 적어도 이 이상의 극한변위성능을 갖는 것으로 알려져 있다.([6])

그림 4는 상기 지침과 참고문헌 [6]에 제시된 절차에 의해 본 연구에서 계산된 고주파감쇠 응답스펙트럼과 참고문헌 [3]에 수록된 고주파감쇠 응답스펙트럼 결과를 비교한 그림으로 서로 잘 일치하고 있음을 보여준다. 이때  $F_{SM} = 2.25$ 가 사용되었는데 이 값은 IRS와 지반 RLGM 응답스펙트럼을 계산하기 위한  $F_{SM}$ 을 평균한 값으로 구조물에 대한 대표적인 RLGM으로 간주될 수 있다.

고주파수 지진동에 대해 추가적으로 고려해야 할 사항은 공간적 변화 및 비상관성으로, 이 현상은 대형 구조물 기초에서 예측되는 고주파 지진응답의 크기가 소규모 구조물 기초 상에서 계

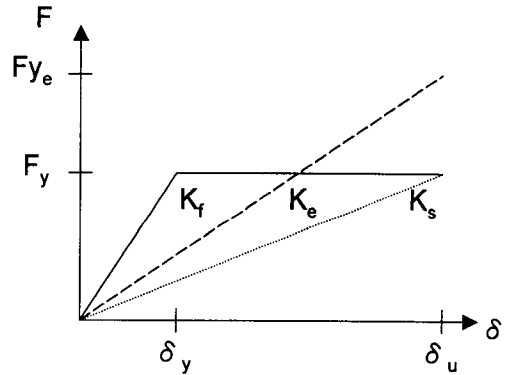


그림 3. 힘-변위 ( $F/\delta$ ) 모식도

$\delta_y$  = yield displacement,  $\delta_u$  = ultimate displacement  
 $K_f$  = elastic stiffness,  $K_s$  = secant stiffness  
 $K_e$  = effective stiffness,  $F_{ye}$  = effective yield force

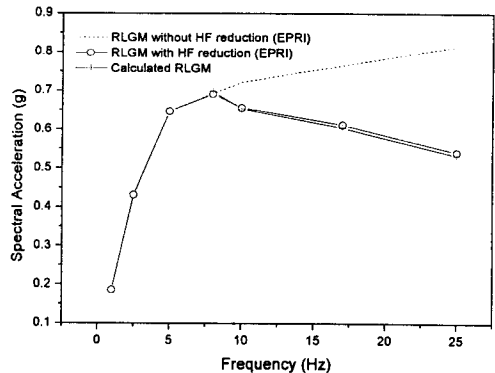


그림 4. 응답스펙트럼 고주파감쇠결과 비교

도표 2. 지진동의 수평성분 공간적 변화 및 비상관성에 의한  
고주파응답감쇠계수

Fundamental Frequency of the Soil-Structure System (Hz)	Reduction Factor
5	1.0
10	0.9
25	0.8

측되는 지진응답 크기보다 상대적으로 낮은 현상을 의미하며 이는 지반 매질의 비균질성이나 수직 전파하지 않는 전단파의 전달에 기인한다. 문헌([6])에 따르면 30~150ft의 평면치수(plan dimension)를 갖는 구조물 강성기초에 대해서는 도표 2의 150ft 평면치수에 대해 제시된 수평성분 응답감소계수(Reduction Factor, Coherency Function)를 구조물 기초 규모에 선형 반비례하여 사용할 수가 있다.(평면치수 0ft인 경우 고주파응답감소계수 = 1를 사용) 한편 도표 2에 제시된 값은 암반(rock site) 및 연약지반(soil site)에 모두 적용될 수 있고 충분히 보수적인 값으로 알려져 있으며 추가적인 부지고유의 지진동 특성 연구에 따라 보다 더 낮은 응답감소계수를 제시할 수 있을 것으로 예상되고 있다.

### 5. RLGM 평가 결과

본 연구에서는 상기 절차를 적용하기 위해 미국 중동부 지역의 Limerick Site에 대한 중앙값 지진재해도 결과를 이용하였다.([7]) 한편 식 (1)로부터 CDF를 평가하기 위해서는 평균지진재해도 값이 사용되어야 하므로 중앙값 지진재해도로부터 평균지진재해도를 근사적으로 얻기 위해 식 (6)을 사용하였으며, 이때 지진재해도의 불확실성을 정량화한 지진재해도 로그표준편차  $\beta_H$ 를 미국 중·동부지역의 대표적인 값인 1.0으로 가정하였다.([3]) 그림 5는 Limerick Site에서의 5% 감쇠 스펙트럴가속도 별 중앙값 지진재해도 결과를 나타낸다.

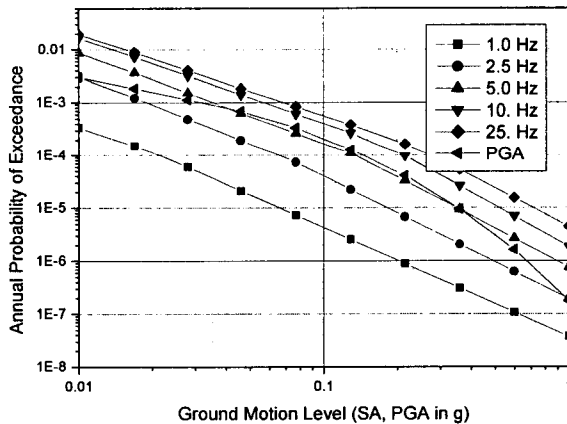


그림 5. Limerick site에서의 스펙트럴가속도별 중앙값 지진재해도 곡선

$$\text{Pseudo Mean Hazard} = e^{0.5\beta_H^2} \times \text{Median Hazard} \quad (6)$$

지진재해도 결과는 특정한 몇몇개의 지반운동수준에 대해 표시되는데 이산화된 지반운동수준 사이구간의 지진재해도는 log-log 공간상에서 직선으로 보간하여 계산되었다. 규제기관 안전목표 수준은 도표 1처럼 분류되는데 CDF  $5.0 \times 10^{-5}$ ,  $2.0 \times 10^{-5}$ ,  $0.5 \times 10^{-5}$ 에 대해 계산된 RLGM을 RLGM-A, RLGM-B, RLGM-C로 표기하였다. 그림 6은 Limerick site에 대한 RLGM의 여러 결과를 보여주고 있는데 정착부의 연성에 의한 고주파응답감쇠계수를 고려한 경우가 8Hz 이상에서 고려

하지 않은 경우보다 낮은 수준의 응답스펙트럼을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 6에는 미국 NRC가 SMA 수행시 RLE로 사용하기를 권유한 0.3g PGA NUREG/CR-0098의 표준스펙트럼이 있는데 이 스펙트럼을 RLGM-B의 1 ~ 10Hz 응답수준을 포괄하도록 스케일할 경우 PGA (RLGM-PGA)가 거의 0.2g로 평가됨을 알 수 있다. 이렇게 스케일된 표준화 응답스펙트럼은 발전소의 HCLPF 내진성능이 PGA로만 알려진 발전소의 SMA를 위해 RLGM으로 사용될 수 있다. 식 (1)을 이용한 발전소 HCLPF 내진성능 계산시 불확실성 파라미터인  $\beta_R$ ,  $\beta_U$ 는 미국 중동부지역의 발전소 지진취약도의 일반적인 값인 0.22, 0.24를 가정하였다. 25Hz 이상의 고주파에 대한 응답스펙트럼 값은 50Hz에서 PGA와 동일한 값을 갖는 것으로 가정하여 근사적으로 계산되었으며 고주파감쇠는 4절에서 검증한 계산 절차를 따랐다.

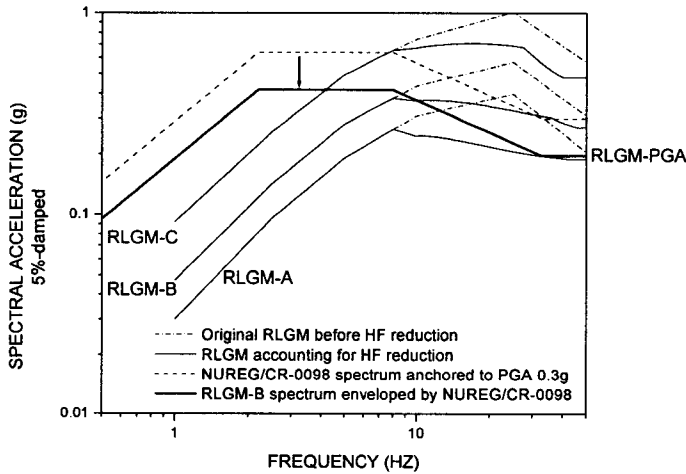


그림 6. 지진외부사건의 평균 CDF 기여도에 따라 규제기관의 안전목표를 만족시키는 RLGM 스펙트럼 비교

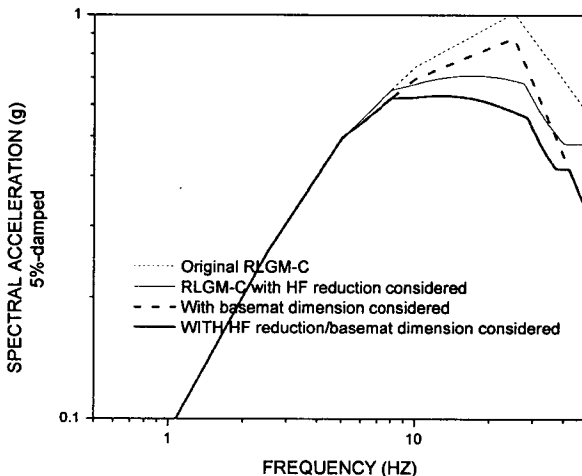


그림 7. 구조물 기초(평면 치수 =100ft)에 대한 지진동의 공간적 변화 및 비상관성을 고려한 RLGM 스펙트럼

또한 구조물 기초의 규모에 의한 고주파 지반응답의 감쇠를 살펴보기 위해 구조물 기초의 평면

치수를 100ft로 가정하였다. 25Hz이하의 고주파응답감쇠계수는 도표 2의 감쇠계수를 이차함수로 보간하여 사용하였으며 25Hz 이상의 주파수에 대해서는 다음과 같은 지반운동에 대한 상관함수 식([8])을 구조물 기초 평면치수 100ft에 대해 계산된 25Hz 감쇠계수에 스케일하여 사용하였다.

$$\gamma(\omega, \xi) = \exp\left[-\left(\frac{a\omega\xi}{c}\right)^2\right] \quad (7)$$

여기서 a는 상수이며, c는 결보기속도  $\omega$ ,  $\xi$ 는 각각 각주파수와 이격거리이며  $\gamma$ 는 상관함수이다.

구조물 기초의 규모를 추가로 고려하면 그림 7처럼 RLGM의 고주파성분은 더욱더 저감될 수 있으며 이렇게 얻어진 최종 RLGM 스펙트럼은 부지고유의 특성 및 구조물의 규모 특성 그리고 규제기관의 안전목표를 만족시킴으로서 SMA 수행시 Outlier의 HCLPF 내진성능을 효과적으로 평가할 수 있는 합리적인 RLGM으로 활용될 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 SMA 수행을 효율적이고 경제적으로 수행하기 위해 필요한 RLGM 평가시 제반 고려사항들을 알아보고 미국 Limerick지역의 중앙값 지진재해도 곡선을 기초로 RLGM을 예시적으로 평가해 보았다. 주요 고려사항으로는 규제기관의 CDF 안전목표 수준, 부지 지진재해도, CDF 발전소 지진취약도 곡선의 불확실성 인자가 포함되며 특히 지진재해도는 CDF의 안전목표에 직접적인 영향을 미친다. 한편 RLGM의 고주파성분은 고주파수기 정착부의 연성 및 원전 구조물 기초의 평면치수에 의해 감쇠될 수 있다. 본 연구에서는 규제기관의 CDF 안전목표 수준을 만족시키는 RLGM을 평균 지진재해도 결과 및 CDF의 불확실성 인자를 이용하여 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 정착부의 연성에 의한 고주파성분 응답의 감쇠를 유사선형탄성모델 이론에 기반한 EPRI 절차에 따라 구현하고 검증하였으며, 미국 Limerick 지역에 대한 RLGM 평가시 지진동의 공간적 변화 및 비상관성도 고려하여 적용한 결과 고주파성분이 현격히 감쇠됨을 확인하였다.

향후 국내원전에 대한 SMA 수행시 합리적인 RLGM 평가를 위해서는 신뢰성 있는 지진재해도 평가가 선행되어야 할 것으로 사료되며 아울러 국내원전의 고주파 성분기 정착부의 비선형특성 및 지진동의 공간적 변화 및 비상관성을 현실적으로 평가하여 RLGM 평가시 반영해야 할 것이다.

## 7. 참고문헌

- [1] 한국전력공사 (1998), "고리 1호기 수명연장을 위한 내진안전성 확보 기술개발 사전조사"
- [2] Electric Power Research Institute (1991), "A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1)"
- [3] Electric Power Research Institute (1993), "Use of Probabilistic Seismic Hazard Results: General Decision Making, the Charleston Earthquake Issue, and Severe Accident Evaluations"
- [4] Electric Power Research Institute (1991), "Industry Approach to Seismic Severe Accident Policy Implementation".
- [5] R.P. Kennedy, et al (1984), "Engineering Characterization of Ground Motion - Task 1, Effects of Characteristics of Free-Field Motion on Structural Response"
- [6] Electric Power Research Institute (1993), "Analysis of High-Frequency Seismic Effects"
- [7] Electric Power Research Institute (1989), "Probabilistic Seismic Hazard Evaluations at Nuclear Plant Sites in the Central and Eastern United States: Resolution of the Charleston Earthquake Issue"
- [8] Luco, J.E. and A. Mita, (1987), "Response of Circular Foundation to Spatially Random Ground Motion", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 1