

## 확률모의기법에 의한 응답스펙트럼 최적화 방안 연구 Optimization of Floor Response Spectra by Monte-Carlo Simulation

황규호, 송정국, 강선구  
한국전력기술주식회사  
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

장정범, 서용표, 이종립  
한국전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

### 요약

층응답스펙트럼 작성을 위해 사용되는 구조모델의 구축 과정과 지진응답해석 과정에는 확정적 설계변수가 이용된다. 지진응답해석의 결과로서 도출되는 층응답스펙트럼을 안전관련 기기의 내진 설계에 사용하고자 할 때, 설계 스펙트럼가속도 값이 기기의 고유진동모드에 따라 변화하므로 보수적 설계를 위한 응답해석모델의 작성 기준이 모호하다. 따라서 설계단계에서는 평활화과정을 거친 층응답스펙트럼을 사용함으로써 확정적 변수의 사용에 따른 해석모델의 불확실성을 고려하고 있다. 이와 같은 층응답스펙트럼 작성 절차 때문에 안전관련 기기의 설계지진하중은 지나치게 보수적으로 평가되는 경향이 있다. 해석상의 보수성을 제거하기 위하여 설계변수를 확률변수로 취급하고, 다수의 응답해석을 통하여 최적의 스펙트럼가속도를 도출하는 방안이 제시되고 있으나 본 연구에서는 다수의 응답해석과정없이, 확정적 응답해석 결과를 활용하여 일련의 확률모의기법을 적용함으로써 최적의 층응답스펙트럼을 도출하는 방안을 제시하였다.

### Abstract

Deterministic design variables are used in the process of structural modeling and seismic response analysis to generate floor response spectra. When safety-related equipment are seismically designed based on the floor response spectra, the design acceleration would be changed depending on the natural vibration mode of the equipment. Thus conventional design approach accounts for the variability on the acceleration by broadening the peak spectral acceleration. This design approach causes design acceleration to the equipment to be conservative. In order to reduce the conservatism, many response analyses have to be performed and best-estimated spectral acceleration should be extracted. This study proposed a probabilistic approach to give best-estimated floor response spectra without many response analyses.

## 1. 서 론

확률변수를 다룰 때 확률변수에 내재된 불확실성을 처리하는 문제는 지금까지 많은 논란이 있었고 현재도 여전히 중요한 연구 분야의 하나로 남아 있다. 특히 지진동과 같은 확률과정(random process)을 다룰 때 내재된 불확실성을 정량화하고, 이를 전체 응답해석과정에 반영하는 과정에는 많은 보수성이 내재되게 된다. 일반적으로 확률변수는 그 분포의 대표값과 산포도로 정의될 수 있다. 흔히 사용되는 대표값과 산포도는 평균 혹은 메디안과 분산이다. 본 연구에서는 공학적으로 중요한 대표값 중의 하나인 메디안(중앙값)과 표준편차를 중심으로 다룬다. 확률과정을 공학적으로 분석할 때, 확률과정의 평균 특성보다는 확률과정의 산포 특성이 더욱 중요하게 다루어진다. 산포도를 표현하는 분산은 이차모멘트 개념을 통하여 정의된다. 이차모멘트법(Second Moment Procedure)은 대수정규분포의 메디안과 대수표준편차를 정규분포의 평균과 표준편차로 변환하는데 있어서 다음과 같은 일정한 관계식을 사용한다.

$$F_{median} = F_{mean} \times \exp\left(\frac{-\beta^2}{2}\right) \quad (1)$$

$$\beta_F = \sqrt{\ln\left[\left(\frac{\sigma_F}{F_{mean}}\right)^2 - 1\right]} \quad (2)$$

여기서

$F_{median}$  : 변수 F의 메디안

$\beta_F$  : 변수 F의 대수표준편차

$F_{mean}$  : 변수 F의 평균

$\sigma_F$  : 변수 F의 표준편차

실무에서는 확률변수의 표준편차를 구할 때, 이차모멘트법을 단순화한 근사이차모멘트법(Approximate Second Moment Procedure)을 사용한다. 근사이차모멘트법에서는 대수정규분포의 메디안 값과(가우스) 정규분포의 평균값이 동일하다고 가정하고, 또한 정규분포의 표준편차는 대수정규분포의 대수표준편차에 단지 메디안 값을 곱함으로써 얻을 수 있다고 가정함으로써 전체 계산과정을 대폭 단순화시킨다. 근사이차모멘트법은 평가자의 직관을 활용하므로 계산이 간편하고, 개략적으로 합리적인 수준의 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 단순화 가정은 스펙트럼가속도가 급격히 변동하는 구간에서 현실과 동떨어진 불확실성을 얻게 되는 원인이 되고, 사안별로는 오히려 비보수적인 결과가 산출되기도 하는 결함을 가지고 있다.

몬테칼로 모의기법은 일반적 통계처리 문제를 객관적으로 검증하는데 널리 사용되는 기법이다. 몬테칼로 기법은 표본치를 용이하게 얻을 수 있는 어떤 유형의 분포에 대해서도 적용될 수 있기 때문에 이 방법의 적용 범위는 대수정규분포에만 국한되지 않는다. 그럼에도 불구하고 몬테칼로 해석을 수행하는 데 요구되는 기본사항은 다음과 같이 매우 단순하다.

- 내재변수의 확률분포 특성이 정의되어 있을 것
- 확률분포 내 데이터를 반복처리할 수 있는 관계식이 정립되어 있을 것

본 연구에서는 몬테칼로 확률모의기법을 확정적 응답해석 결과에 적용함으로써 기존 층응답스펙 트럼에 내재된 보수성을 제거하고 최적화하는 방안을 모색하였다.

## 2. 확정적 지진응답해석

본 연구에서는 실제 원자력발전소 구조물 모델을 사용하는 대신 원자력 구조물의 구조 특성을 반영하되, 상대적으로 처리가 간편한 단순 모델을 구축하였다 (그림 1).

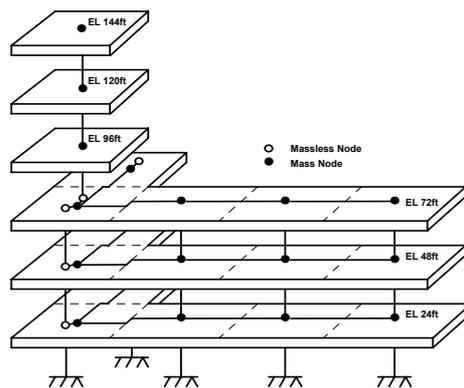


그림 1 지진응답해석모델

현행 원전구조물은 설계단계에서부터 기하학적 정형성을 가진 구조형식을 채택하고 있고 수평방향지진과 수직방향지진의 상대적 영향이 거의 없다는 가정에 따라 수평방향 모델과 수직방향 모델을 분리하여 지진응답해석을 수행하고 있다. 수평 모델의 경우 수평변위와 수평 강성축을 중심으로 발생하는 회전변위만을 고려한다. 즉, 층슬래브는 강체거동을 하고 전단벽체는 수평변위만 허용되며 질량은 각 층슬래브에 집중된 전단모델을 사용한다. 그러나 이와 같은 해석모델은 수직 및 회전변위를 구속함으로써 고유진동수가 실제 구조물의 결과보다 높게 평가될 수 있으며, 특히 수평 방향 슬래브의 유연성을 고려할 필요가 있는 경우는 신뢰성이 떨어질 수 있다. 본 연구에서는 횡방향 상대변위를 유발시킬 수 있는 기하학적 비정형 구조물을 이상화하고, 층슬래브의 연성 거동을 고려한 집중질량모델을 구축하였다. 연구 대상 구조물은 가로 192ft, 세로 96ft, 높이 144ft 인 철근 콘크리트 구조물로서, 벽체의 간격과 층간 높이는 각각 24ft 이다. 전단벽체의 두께는 4ft 이고, 층슬래브의 두께는 1ft 이며, 지반으로부터 3층까지는 가로방향 (X) 길이에 대한 세로방향 (Y) 길이의 비율이 2 : 1인 L형 구조이고, 4층부터 6층까지는 가로방향 길이와 세로방향 길이의 비율이 1 : 1 인 기하학적 비정형구조이다. 재료물성치는 표 1 에 제시된 것과 같이 표준원전의 재료 물성치와 동일한 값을 사용하였다.

표 1 구조요소의 재료특성

구조 재료	강도 (psi)	탄성계수 E (ksf)	전단탄성계수 G (ksf)	프아송 비 μ	단위중량 (pcf)
콘크리트	4,500	585,600	250,260	0.17	150

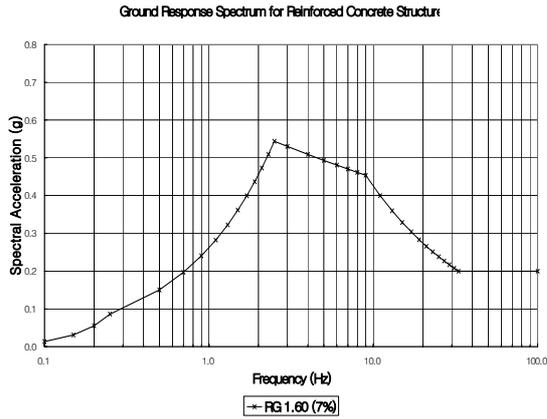


그림 2 Reg. Guide 1.60 지반응답스펙트럼

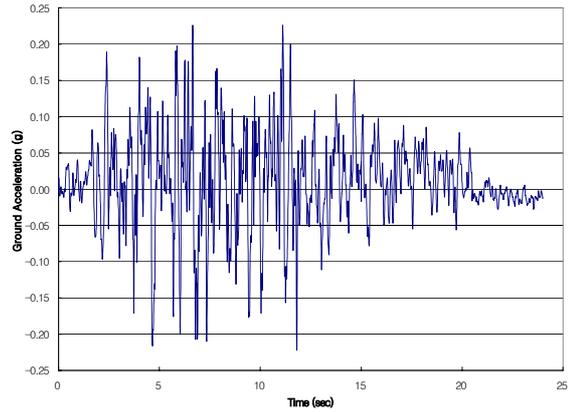


그림 3 Reg. Guide 1.60 인공시간이력

응답해석과정에서 사용된 시간이력은 Reg. Guide 1.60 지반응답스펙트럼 (그림 2) 을 포괄하는 인공시간이력 (그림 3) 이고, 구조 감쇠비는 안전정지지진 수준에서 7% 로 가정하였다. 본 연구에 사용된 층응답스펙트럼은 설계용 층응답스펙트럼과는 달리 평활화 과정을 거치지 않은 스펙트럼으로서 메디안 스펙트럼으로 간주된다. 특히 구조물의 동특성을 최대한 반영하기 위하여 최상층 슬래브의 층응답스펙트럼을 활용하였다 (그림 4).

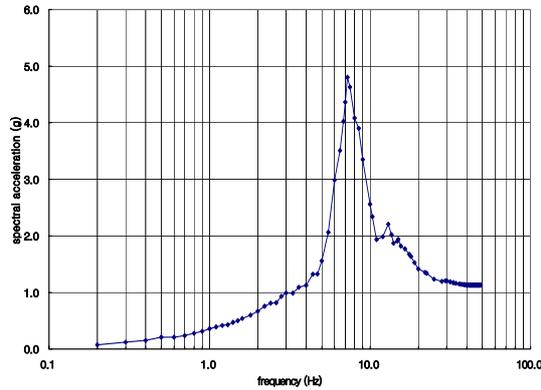


그림 4 최상층부 메디안 층응답스펙트럼

그림 4에서 보듯이 구조물 고유진동수는 약 7 Hz 부근에 있으며 이 진동수를 중심으로 스펙트럼 가속도는 급격히 증가하거나 급격히 감소하는 경향을 보인다. 따라서 이 구간의 진동수를 가진 기기는 확정적 모드해석 방법으로 얻은 진동수의 작은 변화에도 설계용 가속도 값에 상당한 차이를 보인다. 이러한 불확실성 요인 때문에 설계 지진하중에는 과도한 보수성이 내재되게 되는데 이러한 불확실성의 제거는 확률적 접근을 통해 가능할 수 있다.

### 3. 몬테칼로 확률 모의

안전관련 기기의 내진설계과정에서 기기의 고유 진동수는 중요한 확률변수로 간주된다. 본 연구에서는 통상적인 층응답스펙트럼의 전체 주파수 구간의 특성을 반영할 수 있도록 다음과 같은 세

가지 안전관련 기기를 선정하여 분석하였다.

- 차단기 (Switchgear) : 고유진동수 = 6Hz
- 모터제어반 (Motor Control Center) : 고유진동수 = 9Hz
- 수직원심펌프 (Vertical Pump) : 고유진동수 = 25Hz

각 기기는 응답해석모델의 최상층 슬래브에 설치되어 있다고 가정하였고, 그림 4에서 보듯이 각각의 기기는 스펙트럼가속도의 증가구간, 감소구간, 그리고 편평한 구간에 각각 대응된다.

### 3.1 스펙트럼가속도의 누적확률분포

차단기의 고유진동수 (6.0 Hz)는 확정적 모드해석으로 얻어지는데 확률적 관점에서 볼 때 진동수는 일정한 확률분포를 가진다. 적절한 지진응답해석모델을 사용하여 확정적 모드해석으로 얻어진 진동수는 매디안으로 간주될 수 있다. 진동수의 확률분포 특성을 반영한 해석을 위해 차단기의 진동수를 중심으로 분포하는 100개의 랜덤진동수를 식 (3) 을 이용하여 산출하였다.

$$f_i = f_e \times \exp[\beta_o \Phi^{-1}(u_i)] \tag{3}$$

여기서

$f_i$  : 랜덤 진동수

$f_e$  : 기기 고유진동수

$\beta_o$  : 기기(0.11) 및 구조물(0.15) 의 고유진동수 불확실성

$\Phi^{-1}$  : 역가우스 연산기호

$u_i$  : 정규화된 표준편차

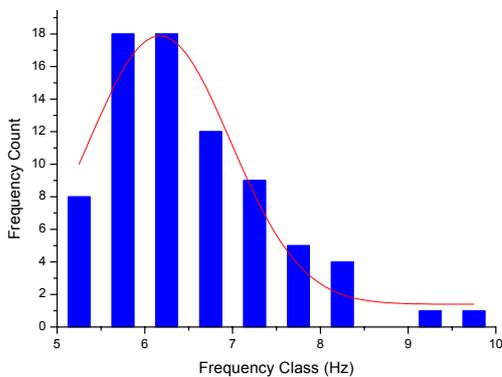


그림 5 차단기 히스토그램과 확률밀도곡선

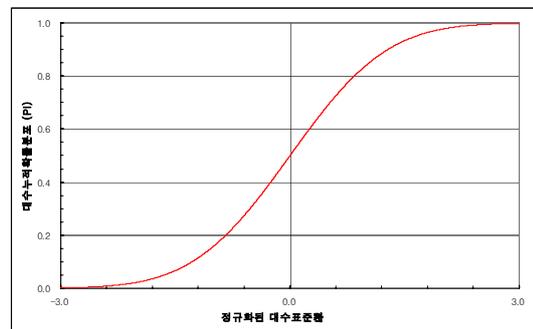


그림 6 누적확률분포곡선

그림 5 는 차단기 진동수의 히스토그램과 그 확률밀도곡선을 보여 주고 있으며, 그림 6 은 이에 대응하는 누적확률분포곡선을 보여 주고 있다. 차단기의 랜덤진동수 분포는 그림 5 에서 보듯이 메디안이 6.35 Hz 이고 표준편차가 0.93 인 대수정규분포를 가진다. 랜덤진동수가 대수정규분포를 가진다는 사실에 근거하여 각 진동수에 대응하는 누적확률분포 값을 얻을 수 있는데 이는 정규화된 대수표준편차와 누적확률분포 값을 도시한 누적확률분포곡선 (그림 6) 으로부터 얻어진다.

메디안 스펙트럼가속도는 확정적 지진응답 해석결과로부터 얻은 층응답스펙트럼가속도이므로 랜덤진동수 각각에 대응하는 메디안 층응답스펙트럼으로부터 스펙트럼가속도 분포를 얻을 수 있다. 확정적 응답해석으로부터 도출된 메디안 스펙트럼가속도 자체를 확률변수로 간주하였으므로, 최적의 기기 설계용 지진하중을 얻기 위해서는 메디안 스펙트럼 가속도의 메디안, 즉 95% 신뢰도를 가진 스펙트럼가속도 값을 구할 필요성이 있다. 이와 같이 메디안의 메디안을 고려하는 해석모델을 ‘중복대수정규모델’ (double log-normal model) 이라고 한다.

### 3.2 메디안 가속도와 그 불확실성

중복대수정규모델에 의하면, 스펙트럼가속도가 대수정규분포를 가지므로 스펙트럼가속도와 이에 대응하는 누적확률분포 값 간에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$P_i = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{Sa_i}{Sa_m} \right)}{\beta_u} \right] \quad (4)$$

여기서

$Sa_i$  : 랜덤진동수에 대응하는 스펙트럼가속도

$Sa_m$  : 메디안 스펙트럼 가속도

$\beta_U$  : 불확실성

$\Phi(\cdot)$  : 가우스 연산자

상기 식 (4) 에 대해 역가우스연산을 수행하면 대수영역 (log domain) 의 데이터를 정규영역 (normal domain) 의 데이터로 변환할 수 있고, 아래 식 (5) 와 같은 간단한 선형식을 얻게 된다. 이는 대수정규 데이터 (스펙트럼가속도) 가 완벽하게 직선으로 선형화될 수 있음을 의미한다.

$$\ln(Sa_i) = \ln(Sa_m) + \beta \cdot \Phi^{-1}[P_i] \quad (5)$$

여기서

$\Phi^{-1}(\cdot)$  : 역가우스 연산자

누적확률분포 값  $P_i$  의 역가우스연산과 대수를 취한 스펙트럼가속도 데이터를 도시하고 이 데이터에 대한 선형회귀식을 계산하면 주어진 기기 진동수에서의 응답 불확실성을 얻을 수 있다. 그림 7 부터 그림 9 는 고유진동수가 6Hz인 차단기, 고유진동수가 9Hz인 모터제어반, 그리고 고

유진동수가 25Hz인 원심펌프에 대한 선형회귀곡선을 각각 도시한 것이다. 식 (5)로부터 직선의 기울기는 불확실성 대수표준편차,  $\beta_U$  이고, 직선의 교차점의 지수(exponential) 는 95% 신뢰도를 가진 매디안 스펙트럼가속도 값을 의미한다.

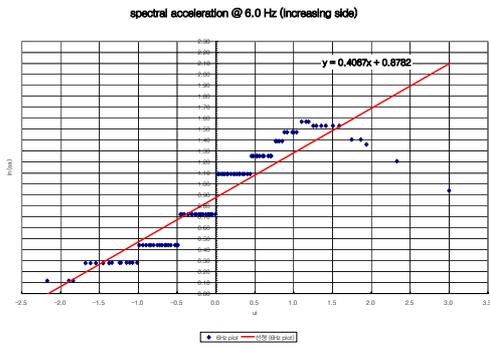


그림 7 차단기 선형회귀곡선

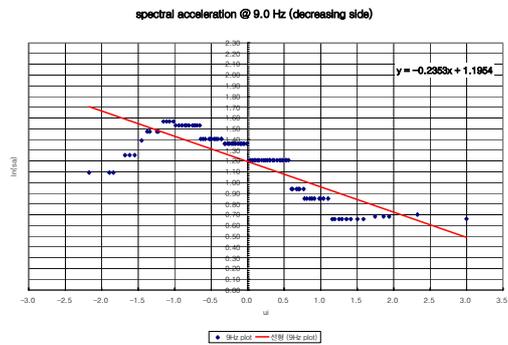


그림 8 모터제어반 선형회귀곡선

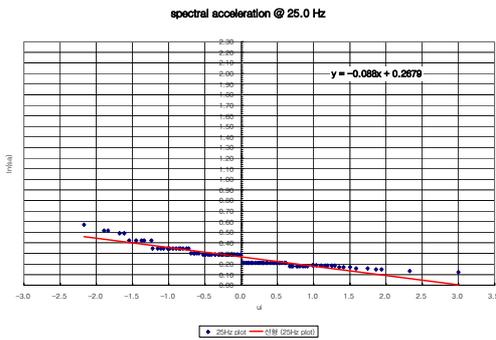


그림 9 원심펌프 선형회귀곡선

### 3.4 응답스펙트럼 최적화

표 1 부터 표 3 은 확정적 방법에 의한 기기설계 가속도와 몬테칼로 확률모의기법에 의한 최적 스펙트럼가속도를 보여주고 있다.

표 2 6 Hz 차단기의 스펙트럼가속도 비교

항 목	확정적 방법	확률적 방법	저감율
수평 방향 (H1) 매디안 가속도	2.98 g	2.44 g	18%
수평 방향 (H2) 매디안 가속도	1.19 g	0.98 g	18%
수직 방향 (V) 매디안 가속도	0.80 g	0.65 g	18%

표 3 9 Hz 모터제어반의 스펙트럼가속도 비교

항 목	확정적 방법	확률적 방법	저감율
수평 방향 (H1) 메디안 가속도	3.35 g	3.26 g	3%
수평 방향 (H2) 메디안 가속도	1.34 g	1.30 g	3%
수직 방향 (V) 메디안 가속도	0.89 g	0.87 g	3%

표 4 25 Hz 원심펌프의 스펙트럼가속도 비교

항 목	확정적 방법	확률적 방법	저감율
수평 방향 (H1) 메디안 가속도	1.23 g	1.31 g	-7%
수평 방향 (H2) 메디안 가속도	0.49 g	0.52 g	-7%
수직 방향 (V) 메디안 가속도	0.13 g	0.35 g	-6%

동일한 과정을 주요 기기의 고유진동수에 적용하면 그림 10 과 같은 최적 스펙트럼가속도를 얻을 수 있다. 기기 진동수별 구체적인 값은 표 5 에 제시되어 있다.

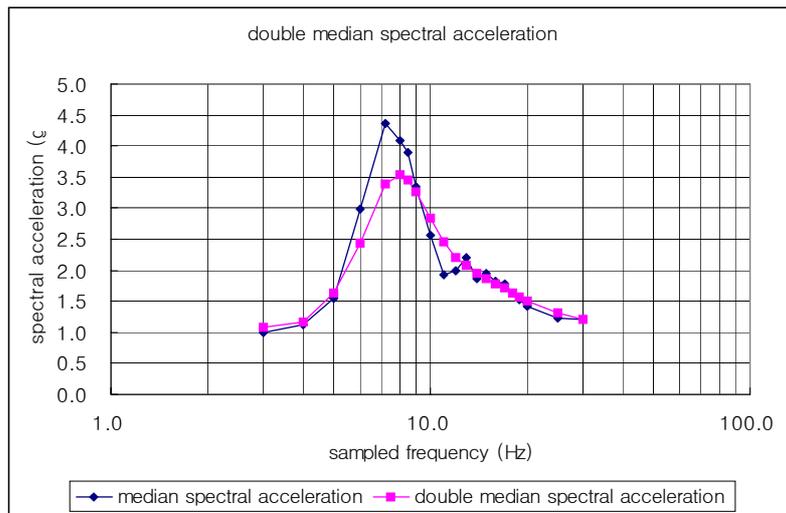


그림 10 확정적 응답스펙트럼과 확률적 응답스펙트럼

그림 11 은 확정적 방법에 의해 도출된 스펙트럼가속도 값과 몬테칼로 확률모의 기법에 의해 도출된 스펙트럼가속도 값을 진동수 별로 보여 주고 있다. 본 연구에서는 개략적인 경향을 알기 위해 중요한 진동수 위치에서의 값을 출력하였는데 진동수 데이터 구간을 더욱 세분하여 스펙트럼가속도 값을 산출할 경우, 더욱 상세한 응답스펙트럼곡선을 얻을 수 있다.

표 5 진동수별 확정적 가속도 대비 확률적 가속도

기기 진동수	확정적 가속도	확률적 가속도	비고
3.0 Hz	0.989 g	1.086 g	
4.0 Hz	1.124 g	1.163 g	
5.0 Hz	1.556 g	1.621 g	
6.0 Hz	2.981 g	2.441 g	차단기
7.0 Hz	4.363 g	3.386 g	
8.0 Hz	4.079 g	3.535 g	
9.0 Hz	3.349 g	3.259 g	모터제어반
10.0 Hz	2.560 g	2.836 g	
11.0 Hz	1.934 g	2.466 g	
12.0 Hz	1.984 g	2.211 g	
13.0 Hz	2.206 g	2.067 g	
14.0 Hz	1.863 g	1.955 g	
15.0 Hz	1.940 g	1.863 g	
16.0 Hz	1.818 g	1.789 g	
17.0 Hz	1.770 g	1.711 g	
18.0 Hz	1.634 g	1.641 g	
19.0 Hz	1.525 g	1.570 g	
20.0 Hz	1.415 g	1.512 g	
25.0 Hz	1.233 g	1.309 g	수직원심펌프
30.0 Hz	1.207 g	1.214 g	

#### 4. 논의 및 결론

지진응답해석 과정에서 사용하고 있는 입력변수들은 원칙적으로 일정한 분포특성을 가진 확률 변수임은 주지의 사실이다. 그러나 기존의 응답해석을 위해 사용되었던 입력변수들은 상수로 간주 되고 확정적 방법에 의해 결정되었다. 그러나 실제에 있어서 이들 변수는 일정한 확률분포를 가지므로 확정적으로 결정된 값들이 현실을 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서 가장 확률이 높은 변수값(최빈값)의 선택에 근본적인 제약이 따르고, 결과적으로 지진응답해석과정에 많은 불확실성이 내재되게 되었다. 특히 내진설계 특성상 기기의 고유 진동수 위치에 따라 스펙트럼가속도 값이 변화하므로 안전측의 해석모델 구축을 위한 질량과 강성 데이터의 보수성 기준이 모호하다. 이러한 문제점을 극복하는 하나의 대안은 질량과 강성 그리고 감쇠비를 독립된 확률변수로 간주하고, 충분히 많은 수의 응답해석을 통하여 높은 신뢰수준의 지진응답 결과를 산출하는 것이다. 그러나 이와 같은 해석방법은 비용-효율 측면에서 바람직하지 않다.

본 연구에서는 지진응답 변수의 대수정규분포 특성과 몬테칼로 확률모의기법을 적용하여, 확정적 해석결과로부터 최적의 응답을 도출하는 방안을 제시하였다. 확률모의기법을 적용할 경우, 구

조물 최상층 슬래브에서의 침투 스펙트럼가속도 값은 확정적 방법에 비해 약 20% 저감되었다. 또한 전 주파수 범위에서 확률적으로 빈도가 가장 높은 가속도 값을 도출함으로써 최적의 스펙트럼 가속도 값을 제시하였다. 이러한 최적값들은 고유진동수가 7 Hz 부근의 기기와 25Hz 부근의 기기에 대해 경제적이고 동시에 안전한 설계값을 제공한다.

내진설계 측면에서 볼 때, 설계절차상의 보수성을 정확히 규명하고 설계 변수에 내재된 불확실성을 정량화함으로써 그 불합리성을 입증할 경우 과거 안전측이라 믿고 과도하게 보수적으로 책정된 설계 변수들에 대한 수정이 가능할 것으로 예상된다. 그리고 이러한 연구결과를 바탕으로 수정된 최적 설계변수를 원전의 내진설계에 적용할 경우, 국내 원전의 경쟁력을 제고하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 가동원전 주기적 안전성평가 사업의 지원을 받아 수행되었음.

### 참고문헌

1. Jack R. Benjamin and C. Allin Cornell, (1970) "Probability, Statistic and Decision for Civil Engineers", McGraw-Hill Book Company, New York.
2. R.P. Kennedy et. al., (1980) "Probabilistic Seismic Safety Study of an Existing Nuclear Power Plant", Nuclear Engineering and Design, Vol. 59, No. 2, pp 315-338.
3. Jack R. Benjamin and Associates, Inc. (1994) "Methodology for Developing Seismic Fragilities", EPRI TR-103959, EPRI.
4. 황규호, 송정국, 강선구, 장정범, 서용표, 이종립, (2004) "확률적 내진성능 최적화 기법 연구", 한국지진공학회 춘계 학술발표회 논문집, Vol. 8, No. 1, pp 111 - 118.