

解析모델의 構造變數 變動이 동적응답에 미치는 影響

Effects of Structural Parameter Variations on Dynamic Responses

박형기* · 임부영**

Park, Hyung Ghee · Lim, Boo Young

Abstract

The variations of the natural frequencies and the peak response acceleration at the top of prestressed concrete reactor building due to random variability and/or model uncertainty of structural parameters are studied. The results may be used as essential input parameters in seismic probabilistic risk assessment or seismic margin assessment of the reactor building. The sensitivity test of each structural parameter is first performed to determine the most influential parameter upon the natural frequency of structure model. Then Monte Carlo simulation technique is applied to evaluate the effect of parameter variation on the natural frequencies and the peak response acceleration. The acceleration time history is obtained by direct integration scheme. As the study results, it is found that the fundamental natural frequency and the peak response acceleration at the top of the building are most strongly affected by Young's modulus among the structural parameters, in which the value of mean plus one standard deviation obtained by probabilistic approach deviates up to about (+)12% from the result of deterministic method. Considering the uncertainty of flexural rigidity, the structural responses vary in range of (-)4%~(+)14%.

요 지

部分構造法으로 프리스트레스트 콘크리트 原子爐格納建物の 지진에 대한 확률위험도분석이나 내진 안전여유평가기상부구조에 관한 入力資料가 되는 構造物의 고유진동수와 구조물 상부에서의 최대가속도값의 構造變數에 대한 변동성이 연구되었다. 본 연구는 먼저 구조모델의 고유진동수에 가장 큰 영향을 미치는 구조변수를 결정하기 위하여 각 構造變數의 相對的 敏感度를 分析하였고, 각 변수의 결정에 포함될 수 있는 不確實性의 정도를 고려하여 Monte Carlo 수치모형실험을 수행하였다. 최대가속도값의 변화는 直接積分에 의한 시간이력곡선법으로 분석되었다. 연구결과로 첫번째모드의 고유진동수와 건물 정상부의 최대가속도값은 각 변수중 탄성계수의 영향을 가장 크게 받으며, 결정론적 방법으로 구한 값과 비교할 때 확률론적 방법으로 구한 값(평균+표준편차)은 (+)12% 정도 변함을 알 수 있다. 또한 휨강성의 불확실성을 고려하면 동적응답은 (-)4%~(+)14% 정도 달라진다.

* 정희원 · 인천대학교 토목공학과 부교수

** 정희원 · (주)삼우기술단

1. 序 論

원자력발전소는 多量의 방사성물질을 含有하고 있으므로 발전소 수명기간 동안 발생 가능한 모든 사고시에도 주변 인구 및 환경이 방사능 오염으로부터 安全하게 保護되도록 設計 및 建設되어야 한다.

(1) 이러한 목적을 달성하기 위해서 自然現象인 지진에 대하여 일반시설물의 耐震設計 節次보다 보다 解析的이고 부지의 特性을 상세히 조사 반영하는 地震解析과 設計方法에 따르고 施工段階에서는 엄격한 品質保證業務가 이루어지고 있다.

최근에는 미국원자력규제위원회가 원자력발전소의 安全性 확보를 위한 重大事故 대책의 일환으로서 Generic Letter 88-20 Supplement 4를 공포하므로 IPEEE(Individual Plant Examination for External Events)가 요구되었다.⁽²⁾ 따라서 미국내의 록키산맥 동부지방에 있는 각 발전소는 지진에 대한 확률위험도분석(Seismic Probabilistic Risk Assessment) 방법 또는 내진안전여유평가(Seismic Margin Assessment) 방법으로 耐震性을 평가하여야 할 실정이다. 국내에서도 일부 발전소에 대해 이와 관련된 평가가 이루어지고 있다.⁽³⁾ 이 평가에서는 해석모델의 구조변수 변동이 구조물의 지진응답에 미치는 確率論의 特徵이 반영되어야 한다.

구조변수 변동에 대한 研究로서는, 콘크리트의 力學的 特性의 불확실성에 대한 Mirza 등⁽⁴⁾의 연구와 콘크리트 部材치수의 변동에 대한 Mirza 등⁽⁵⁾의 연구가 있었다. 또한 Mirza 등⁽⁶⁾은 철근의 항복강도 및 항복변형도 영향 등의 역학적 특성 뿐만 아니라 단면적 등의 변동에 대하여 가능한 자료를 종합하고 이를 분석하였다. Galambos 등⁽⁷⁾은 강구조물의 荷重-抵抗係數設計基準을 개발할 때 구조용 강재의 통계적 특징을 제시한 바 있고, Morrone⁽⁸⁾는 原子力發電 安全關聯 구조물과 部品の 감쇠값을 기진력의 형태와 크기로 나누어 연구한 결과를 발표하였다.

1974년 Liu 등⁽⁹⁾은 응답스펙트럼해석법으로 원자로건물 모델에 안전운전정지지진(SSE)와 SSE의 1/2을 入力시키고 不確實한 입력변수에 대한 確率分布形을 設定하여 構造變數의 변동이 應答스펙트럼에 미치는 영향을 파악하는 Monte Carlo 수치모형실험을 하였다. 그 후 Liu 등의 연구에서 사용한 變

數의 確率分布形이 修正 제시되었다.⁽¹⁰⁾ Hamilton 등⁽¹¹⁾은 確率論에 立脚하여 실험치와 경험식을 사용하여 固定地盤과 地盤의 유연성을 고려한 경우에 대하여 각 變數의 變動이 固有振動數에 미치는 영향을 研究하였다. Healey 등⁽¹²⁾에 의해 San Fernando 지진을 경험한 건물의 주기 결정에 대한 研究結果도 소개된 바 있다.

본 연구에서는 부분구조법으로 전형적인 프리스트레스트 콘크리트 原子爐格納建物の 지진에 대한 확률위험도분석이나 耐震安全餘裕評價에서 상부구조에 대한 입력자료가 될 수 있는 固定地盤上的의 모델에 대하여 Monte Carlo 수치모형실험을 한다. 입력변수의 變動이 동적거동에 미치는 영향을 시간이력곡선법으로 研究하며, 해석모델작성에 사용되는 단면2차모멘트, 질량, 유효전단면적, 탄성계수 등의 設計時나 施工時에 발생할 수 있는 不確實성이 고려된다.

2. 決定論的 解析 및 敏感度分析

그림 1과 같은 固定地盤 構造物의 지진하중에 대한 運動方程式은 다음과 같이 표현된다.

$$[\tilde{M}] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = -[\tilde{M}] \{1\} \ddot{u}_g \quad (1)$$

여기서, $[\tilde{M}]$ = 주대각선 요소만 零이 아닌 質量行列

$[C]$ = 減衰行列

$[K]$ = 剛度行列

$\{x\}$ = 구조물의 변형에 의한 지반에 대한 상대변위

$\{1\}$ = 지진하중의 작용방향을 나타내는 벡터

\ddot{u}_g = 지반 가속도

식 (1)의 감쇠행렬은 구조시스템 감쇠율로부터 구하며, 質量行列 및 剛度行列에 비례한다고 가정한다.⁽¹⁰⁾ 본 논문의 연구에서는 최대가속도값의 계산에 구조시스템 감쇠율을 5%로 고려하고 운동방정식의 해는 직접적분법인 線形加速度 假定에 근거한 Wilson- θ 방법으로 구한다.

그림 1의 해석모델의 節點과 部材特性은 표 1과

표 1. 해석모델의 절점 및 부재특성

(a) 질량

Mass No.	El., ft (m)	Mass, k-sec ² /ft (kg)	Mass Moment of Inertia, k-ft-sec ² (kg·m ²)
1	207.0 (63.11)	5.9 (2.68 × 10 ³)	3.11 × 10 ³ (4.22 × 10 ⁶)
2	198.5 (60.52)	65.84 (2.99 × 10 ⁴)	5.28 × 10 ⁴ (7.16 × 10 ⁷)
3	184.4 (56.22)	76.76 (3.43 × 10 ⁴)	1.15 × 10 ⁵ (1.56 × 10 ⁸)
4	165.3 (50.40)	93.79 (4.25 × 10 ⁴)	1.83 × 10 ⁵ (2.48 × 10 ⁸)
5	143.8 (43.84)	143.17 (6.49 × 10 ⁴)	2.92 × 10 ⁵ (3.96 × 10 ⁸)
6	123.8 (37.74)	130.43 (5.92 × 10 ⁴)	2.64 × 10 ⁵ (3.58 × 10 ⁸)
7	103.8 (31.65)	130.43 (5.92 × 10 ⁴)	2.64 × 10 ⁵ (3.58 × 10 ⁸)
8	83.8 (25.55)	130.43 (5.92 × 10 ⁴)	2.64 × 10 ⁵ (3.58 × 10 ⁸)
9	63.8 (19.45)	130.43 (5.92 × 10 ⁴)	2.64 × 10 ⁵ (3.58 × 10 ⁸)
10	43.8 (13.35)	130.43 (5.92 × 10 ⁴)	2.64 × 10 ⁵ (3.58 × 10 ⁸)
11	23.5 (7.16)	142.86 (6.48 × 10 ⁴)	2.92 × 10 ⁵ (3.96 × 10 ⁸)
BASE	0.0 (0.0)	—	—

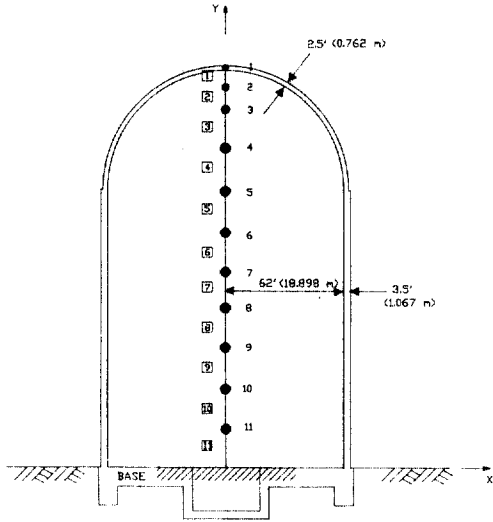


그림 1. 지진해석을 위한 원자로격납건물 모델

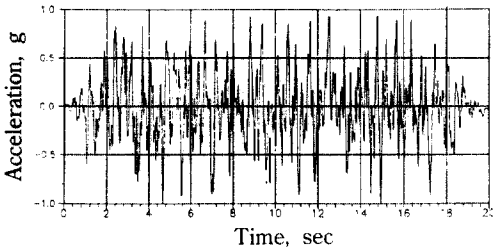


그림 2. 설계지반가속도가 1.0g의 미국원자력규제위원회 원회 표준설계응답스펙트럼을 기준으로 만들어진 입력운동 지속시간이 20초인 인공가속도-시간이력곡선

같고, 탄성계수는 6.9×10^5 ksf(33.0372 GPa)이다. 각 절점은 수평병진과 수평축에 대한 회전의 자유도만을 갖는다. 入力運動 \ddot{u}_g 는 미국원자력규제위원회의 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 그림 2와 같은 지속시간 20초의 인공가속도-시간이력곡선이다. 그림 3에 보인 바와 같이 入力運動의 응답스펙트럼과 표준설계응답스펙트럼을 비교한 결과는 妥當性이 있다고 판단된다.

決定論的 解析의 結果로 固有振動數와 最大加速度的 크기를 표 2에 정리하였다.

동적해석모델에 사용되는 각 구조변수(질량, 탄성계수, 단면2차모멘트, 유효전단면적 등)가 동적응답에 미치는 相對的 敏感度를 파악하기 위하여 일률

적으로 決定論的 解析時에 사용한 값의 $\pm 10\%$ 를 변화시킨 값을 사용하여 固有値解析을 수행하였다. 첫번째모드의 고유진동수를 分析한 결과는 표 3과 같다. 표 3에서 보는 바와 같이 첫번째모드는 탄성계수, 질량, 유효전단면적, 단면2차모멘트의 순서로 敏感하게 영향을 받음을 알 수 있다. 有效剪斷面積의

표 1. (계속)

(b) 부재특성

Member No.	Area, ft ² (m ²)	Effective Shear Area, ft ² (m ²)	Area Moment of Inertia, ft ⁴ (m ⁴)
1	990 (91.97)	500 (46.45)	0.2×10 ⁶ (1.73×10 ³)
2	990 (91.97)	500 (46.45)	0.8×10 ⁶ (6.90×10 ³)
3	990 (91.97)	500 (46.45)	1.5×10 ⁶ (1.295×10 ⁴)
4	990 (91.97)	500 (46.45)	1.9×10 ⁶ (1.64×10 ⁴)
5	1400 (130.06)	700 (65.03)	2.8×10 ⁶ (2.42×10 ⁴)
6	1400 (130.06)	700 (65.03)	2.8×10 ⁶ (2.42×10 ⁴)
7	1400 (130.06)	700 (65.03)	2.8×10 ⁶ (2.42×10 ⁴)
8	1400 (130.06)	700 (65.03)	2.8×10 ⁶ (2.42×10 ⁴)
9	1400 (130.06)	700 (65.03)	2.8×10 ⁶ (2.42×10 ⁴)
10	1400 (130.06)	700 (65.03)	2.8×10 ⁶ (2.42×10 ⁴)
11	1400 (130.06)	700 (65.03)	2.8×10 ⁶ (2.42×10 ⁴)

영향이 단면2차모멘트와 비슷하게 나타내는 것은 해석모델이 전단변형이 큰 구조이기 때문으로 판단된다.

3. 構造變數의 標本 抽出

3.1 구조변수의 確率의 特性

해석모델의 구조변수인 斷面2次모멘트, 有效剪斷面積, 彈性係數, 質量的 적정한 확률분포형으로 참고문헌(10)에서 제안한 그림 4와 같은 정규분포로

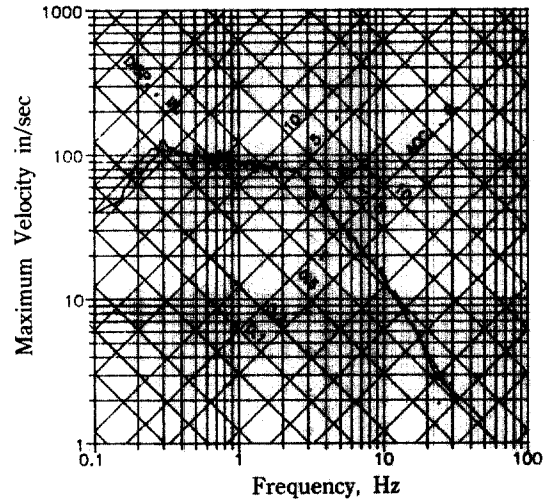


그림 3. 미국원자력규제위원회의 표준설계응답스펙트럼과 인공가속도-시간이변곡선의 응답스펙트럼의 비교

표 2. 결정론적 해석 결과

(a) 고유진동수

Mode	Frequency(cps)
1	5.15
2	14.70
3	27.30
4	29.40
5	41.60

(b) 최대가속도

Nodal Point No.	Peak Acceleration (g)
1 (Crown of Dome)	3.406
5	2.537
11	1.217

設定하였다. 각 분포의 標準偏差는 중앙값을 1로 했을 때의 값으로 나타내었다.

그림 4에서 보인 각 변수중 단상계수와 단면2차모멘트에 대한 확률분포형의 중앙값을 결정해야 한다. 彈性係數는 콘크리트 압축강도의 平方根에 비례하고⁽¹⁴⁾, 실제 타설된 콘크리트의 압축강도는 여러 요인에 의해 設計基準强度和 달라진다. 施工時 환경과 品質管理 程度에 따라 콘크리트 압축강도가

표 3. 첫번째모드의 고유진동수의 민감도 분석결과

Parameter	Variations of Fundamental Natural Freq.	Total
Young's Modulus, E	+4.8%	9.9%
Modulus, E	-5.1%	
Mass, M	-4.5%	9.5%
	+5.0%	
Effective Shear Area, A _{sh}	+2.5%	5.2%
Moment of Inertia, I	-2.7%	
Moment of Inertia, I	+2.5%	5.0%
	-2.5%	

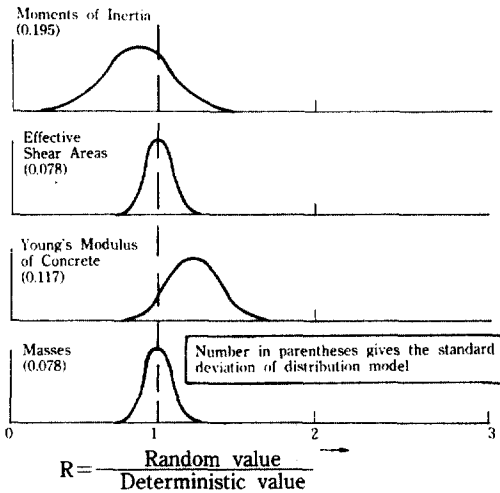


그림 4. 지진해석 입력변수들의 확률분포형

낮아지기 때문에 설계기준강도를 얻기위해 配合設計時에 目標로 하는 콘크리트강도(배합강도)를 높인다. 보통의 품질관리하에서는 ACI Code를 참조하면 증가계수는 1.23정도로, 또한 표준편차는 0.13 정도로 추정이 가능하다. 탄성계수에 절대적인 영향을 미치는 콘크리트의 압축강도는 荷重을 가하는 速度에 따라 달라지기도 하며 또한 현장콘크리트와 실험실 콘크리트 강도의 差가 예상되나 이들은 거의 相殺되는 量이다. 따라서 본 研究에서는 탄성계수 확률분포형의 중앙값을 $\sqrt{1.23}=1.11$ 로 택한다.

단면2차모멘트 確率分布形의 중앙값은 Hamilton 등⁽¹¹⁾의 研究結果로 얻은 휨강성(EI)에 대한 대수정규분포의 平均($\lambda_{EI} = -0.016$)과 彈性係數의 정규분포에 대한 平均($\mu_E = 1.11$), 표준편차($\sigma_E = 0.13$)를 이용하여 구한다.

정규분포와 대수정규분포의 平均과 標準偏差 사이의 관계식은 식 (2)와 같다.

$$\mu = \exp(\lambda + 1/2\zeta^2) \quad (2)$$

여기서, μ = 정규분포의 평균

λ = 대수정규분포의 평균

ζ = 대수정규분포의 표준편차

식 (2)의 대수정규분포의 표준편차 ζ 는 변동계수 δ 가 0.3이하이면 다음식이 성립된다⁽¹⁵⁾.

$$\zeta \approx \delta / \mu \quad (3)$$

여기서, σ = 정규분포의 표준편차

式 (2)와 (3)을 이용하여 탄성계수의 대수정규분포에 대한 平均과 標準偏差를 구하면 $\lambda_E = 0.098$, $\zeta_E = 0.117$ 이다. 따라서 단면2차모멘트의 대수정규분포의 平均은 -0.114가 되고, 이를 정규분포의 평균으로 나타내면 식 (2)에 의해 $\mu_I = 0.913$ 을 얻는다.

각 변수에 대해 設定된 確率的 特性상 不確實性이 크고 또한 敏感度 分析結果를 기준으로 판단하면 동적거동에 중요한 영향을 미치는 變數는 彈性係數와 斷面2차모멘트이다. 따라서 해석모델 구조변수의 變動이 고유진동수와 최대가속도에 미치는 영향의 分析 高찰에서는 각 변수의 경우 뿐만 아니라 탄성계수와 단면2차모멘트 두 변수를 同時에 考慮하는 경우도 포함시켰다.

3.2 抽出된 표본자료의 分布 適合性 判定

表 4에 보인 각 變數의 分布에 맞는 標本 抽出은 먼저 0~1 사이에서 均等分布하는 난수를 발생시킨 후 이를 設定된 확률분포로 변환시킨다. 이때 均等分布하는 난수를 彈性係數의 變動을 고려하기 위한 1세트, 단면2차모멘트를 위한 5세트, 質量을 위한 7세트, 유효전단면적을 위한 2세트를 준비한다. 構造變數의 확률적 特性을 만족시키는 標本자료 抽出과 Kolmogorov-Smirnov test에 의한 抽出된 확률분포의 적합성 검정에 통계패키지 STATGRAPHICS

표 4. 각 변수의 추출된 표본에 대한 K-S검정결과

Parameter	$ D_{max} $ Normal	$D_N^{0.10}$	$D_N^{0.05}$
Moments of Inertia, I	0.090	0.16	0.136
Effective Shear Area, Ash	0.082	0.16	0.136
Young's Modulus, E	0.092	0.16	0.136
Mass, M	0.080	0.16	0.136

(16)을 이용하였다.

표본의 크기는 100으로 하였고, 표 4에 보인 각 변수의 적합성 검정결과로부터 추출된 변수의 표본은 적합한 것으로 판단된다. 예로서 추출된 탄성계수에 대한 막대그래프와 확률누가함수(Cumulative Distribution Function)를 그림 5에 보였다.

확률변수 표본들 사이의 상관성을 파악하기 위하여 각 변수세트 사이의 상관관계와 동일 변수세트 사이의 상관관계도 분석하였다. 그 결과로 단순상관계수는 0.2 이하가 되었고, 이로부터 변수간의 상관성을 무시할 수 있는 정도임을 알 수 있다.

4. 構造變數에 의한 變動性 分析

첫번째모드의 고유진동수의 변동성은 결정론의 방법으로 얻은 값에 대해 定規化시킨 값을 각 變數의 경우별로 정규분포와 대수정규분포에 맞추어 분석하여 결과를 표 5에 정리하였다. 표 5를 고찰하면 탄성계수의 영향이 가장 크고, 그 다음으로 단면2차모멘트이다. 그림 6에서는 휨강성의 변동에 대한 수치모형실험 결과를 보였다.

또한 탄성계수, 단면2차모멘트와 휨강성(ED)의 변동에 따른 각 모드별 고유진동수의 변동성을 정규분포에 맞추어 확률이 1, 5, 10, 90, 95, 99%인 경우에 대하여 분석하여 그림 7에 보였다. 彈性係數의 경우는 모든 모드에 걸쳐 거의 일정하나, 斷面2次모멘트의 경우는 첫번째 모드의 변화에 크게 영향을 미치고 높은 진동모드에서는 그 다지 크지 않음을 알 수 있다.

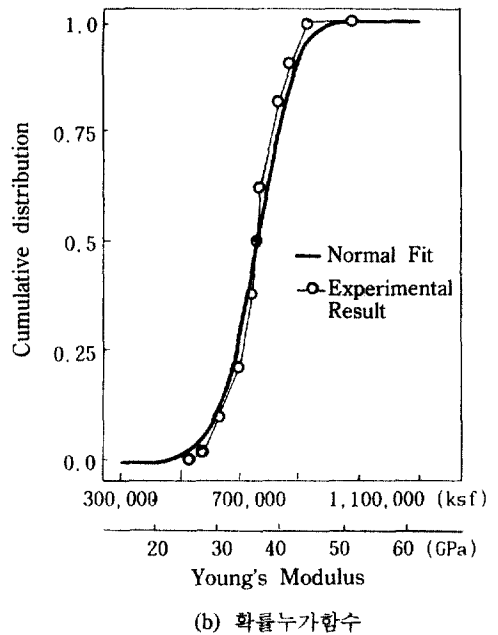
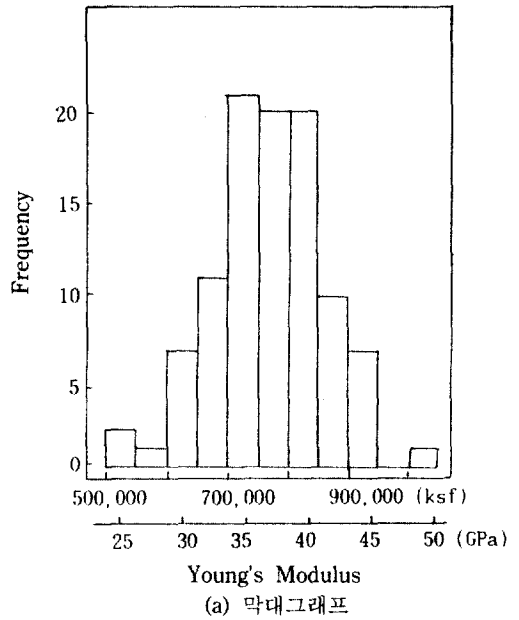


그림 5. 추출된 탄성계수의 확률특성

해석모델의 정상부, 중간부 그리고 하부에서 가속도-시간이력곡선상의 최대가속도값을 결정론의 방법으로 얻은 값에 대해 정규화시키고 정규분포와 대수정규분포로 취급하여 平均, 標準偏差, D_{max} 값을 구하여 표 6과 표 7에 나타내었다. 分布形의 適合性

표 5. 각 변수의 변동이 첫번째모드의 고유진동수에 미치는 영향 분석

(a) 정규분포

Parameter	Mean	Standard Deviation	$ D_{max} $ Normal
E	1.060	0.060	0.060
M	1.000	0.016	0.068
Ash	0.998	0.020	0.070
I	0.999	0.050	0.080
EI	1.060	0.080	0.070

(b) 대수정규분포

Parameter	Mean	Standard Deviation	$ D_{max} $ Log-Normal
E	0.052	0.060	0.070
M	-0.0004	0.016	0.060
Ash	-0.003	0.020	0.070
I	-0.002	0.047	0.089
EI	0.052	0.075	0.085

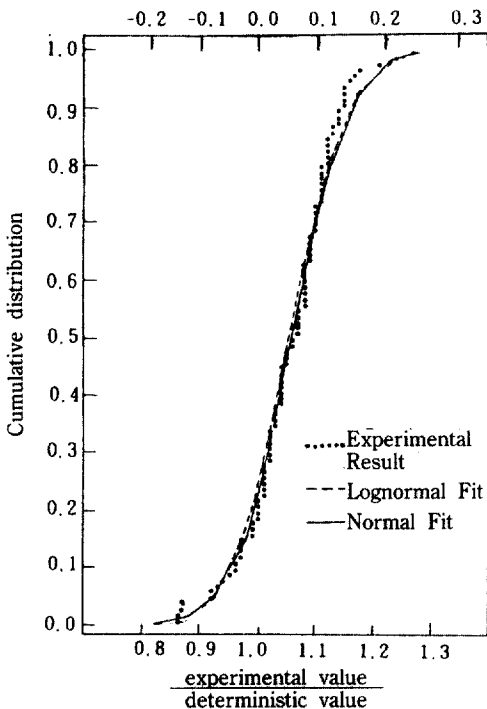
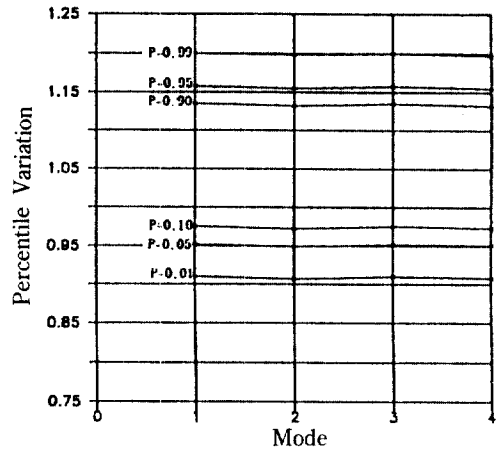
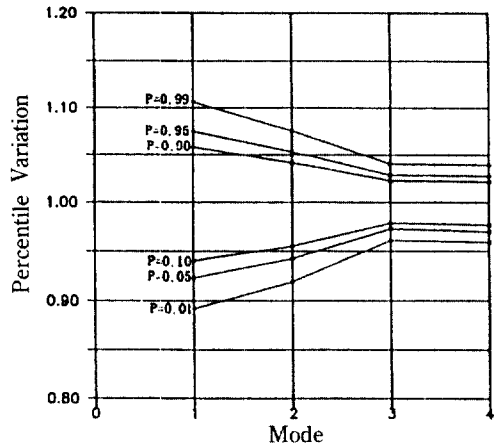


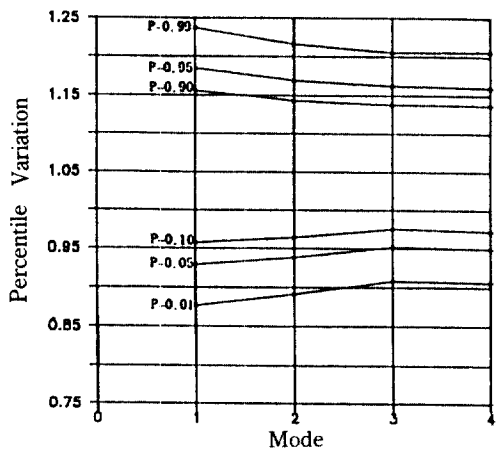
그림 6. 휨강성(EI)의 변동이 첫번째모드의 고유진동수에 미치는 영향



(a) 탄성계수(E)



(b) 단면2차모멘트(I)



(c) 휨강성(EI)

그림 7. 정규분포 가정에 따른 각 모드별 고유진동수의 변화

표 6. 각 변수의 변동이 최대가속도값에 미치는 영향 분석 : 정규분포로 취급한 경우

Parameter	Nodal Point No.	Mean	Standard Deviation	$ D_{max} $ Normal
E	1 (Crown of Dome)	1.031	0.090	0.115
	5	0.987	0.062	0.129
	11	0.957	0.029	0.088
M	1 (Crown of Dome)	0.993	0.052	0.075
	5	0.995	0.023	0.084
	11	0.998	0.071	0.152
A_{sh}	1 (Crown of Dome)	1.072	0.062	0.075
	5	1.004	0.051	0.078
	11	0.981	0.082	0.149
I	1 (Crown of Dome)	1.041	0.062	0.070
	5	1.011	0.042	0.080
	11	0.990	0.016	0.137
EI	1 (Crown of Dome)	1.051	0.091	0.096
	5	0.991	0.050	0.068
	11	0.950	0.032	0.096

표 7. 각 변수의 변동이 최대가속도값에 미치는 영향 분석 : 대수정규분포로 취급한 경우

Parameter	Nodal Point No.	Mean	Standard Deviation	$ D_{max} $ Log-Normal
E	1 (Crown of Dome)	0.026	0.083	0.112
	5	-0.016	0.069	0.152
	11	-0.044	0.030	0.097
M	1 (Crown of Dome)	-0.009	0.052	0.065
	5	-0.005	0.023	0.082
	11	-0.004	0.055	0.143
A_{sh}	1 (Crown of Dome)	0.062	0.058	0.067
	5	0.003	0.046	0.085
	11	-0.022	0.066	0.152
I	1 (Crown of Dome)	0.033	0.056	0.083
	5	0.010	0.043	0.075
	11	-0.015	0.017	0.157
EI	1 (Crown of Dome)	0.042	0.080	0.056
	5	-0.016	0.056	0.079
	11	-0.055	0.032	0.094

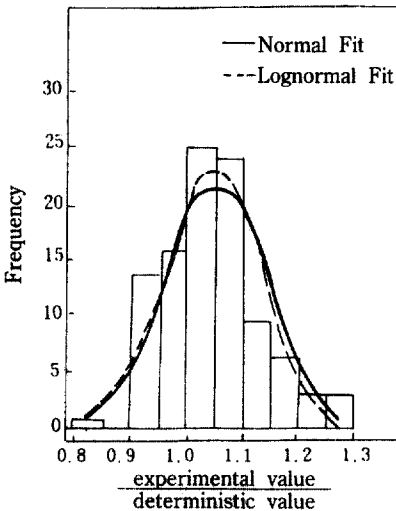


그림 8. 휨강성(EI)의 변동이 건물 정상부에서 계산된 최대가속도값에 미치는 영향분석

檢定結果 건물하부를 제외하곤 유의수준 5%에서의 값($D_N^{0.05} = 0.136$)보다 적으므로 가정된 두 분포가 적합하다고 할 수 있다. 또한 휨강성의 변동이 建物 정상부의 최대가속도값에 미치는 영향을 분석한 결과는 그림 8과 같다.

5. 結 論

典型的인 프리스트레스트 콘크리트 原子爐格納建物の 지진에 대한 확률위험도분석이나 내진안전여유평가분석을 부분구조법으로 수행할 경우에 필요한 上部構造 變數들의 불확실성이 고려된 固有振動數와 최대가속도값의 변동에 대한 研究로서 Monte Carlo 수치모형실험이 수행되었다. 연구결과로 다음을 알 수 있다.

(1) 상대적 敏感度解析과 變數의 확률적 특성을 고려한 수치모형실험결과로 첫번째모드의 고유진동수와 建物 頂上部에서의 최대가속도값은 彈性係數와 단면2차모멘트에 가장 크게 영향을 받는다.

(2) 첫번째 모드의 고유진동수와 建物 頂上部에서의 최대가속도값을 탄성계수의 불확실성만을 고려한 수치모형실험 결과(平均+標準偏差)는 決定論的方法으로 얻은 값에 비하여 (+)12% 정도까지 변한다. 또한 휨강성의 不確實性을 고려하는 경우는 動的應答이 (-)4%~(+14% 정도 달라진다.

参 考 文 獻

1. US 10CFR50 Appendix A, Criterion 2-Design Basis for Protection against Natural Phenomena.
2. Gurbuz, O., Modeen, D.J., Stepp, J.C. and Kassawara, R.P., "Industry Perspective on Individual Plant Examination of External Events (IPEEE)", *Proceedings of the 3rd Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping*, North Carolina State Univ., 1990, pp. II/2-1~II/2-17.
3. Ravindra, M.K., Tong, W.H., Kipp, T.R. and Bragnolo, L.J., Seismic and Wind Fragility Evaluation of Kori Nuclear Power Plant Unit 4, NUS Crop., Gaithersburg, 1991.
4. Mirza, S.A., Hatzinikolas, M. and MacGregor, J.G., "Statistical Description of Strength of Concrete", *J. of Structural Div., ASCE*, Vol. 105, No. ST6, 1979, pp. 1021-1307.
5. Mirza, S.A. and MacGregor, J.G., "Variations in Dimensions of Reinforced Concrete Members", *J. of Structural Div., ASCE*, Vol. 105, No. ST4, 1979, pp. 751-766.
6. Mirza, S.A. and MacGregor, J.G., "Variability of Mechanical Properties of Reinforced Bars", *J. of Structural Div., ASCE*, Vol. 105, No. ST5, 1979, pp. 921-937.
7. Galambos, T.V. and Ravindra, M.K., "Properties of Steel for Use in LRFD", *J. of Structural Div., ASCE*, Vol. 104, No. ST9, 1978, pp. 1459-1468.
8. Morrone, A., "Damping Values of Nuclear Power Plant Components", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 26, 1974.
9. Liu, L.K., Child, C.L. and Nowothy, B., "Effects of Parameter Variations on Floor Response Spectra", *Proceedings of Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities*, 1973, pp. 435-458.
10. Stevenson, J.D. et al., Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities, ASCE Special Publication, 1980, pp. 252-254, 275-282.
11. Hamilton, C.W. and Hadjian, A.H., "Probabilistic Frequency Variations of Structure-Soil System", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 38, 1976, pp. 303-322.
12. Healey, J.J., Wu, S.T. and Murga, M., Project IV-Structural Building Response of SSMRP (Phase I); Structural Building Response Review, LLNL, UCRL-15185, 1980, pp. 115-165.
13. Johnson, J.J., Goudreau, G.L., Bumpus, S.E. and Maslenikov, O.R., SSMRP Phase I Final Report; SMACS-Seismic Methodology Analysis Chain with Statistics (Project VIII), LLNL, NUREG/CR-2015, Vol. 9, UCRL-53021, Vol. 9, 1981.
14. ACI Committee 363, State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI 363R-84, 1984, p. 21.
15. Ang, A.H-S. and Tang, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume I & II, John Wiley & Sons, 1984.
16. STSC, Inc., STATGRAPHICS Version 4.0.

(接受 : 1993. 4. 23)