

응답스펙트럼해석을 위한 모우드 응답 조합방법 비교연구

Comparative Study of Modal Combination Methods in Response Spectrum Analysis

오 현창현*, 최강룡**, 김문수**
Hyun, Chang Hun Choi, Kang Ryoung Kim, Moon Soo

ABSTRACT

The modal combination methods are studied for estimating the maximum structural responses in the seismic analysis by the response spectrum method. The most important problem in the modal combination is how to account for the correlation between the modal responses and to combine the high frequency modes (of which frequencies are greater than that at which the spectral acceleration approximately returns to the ZPA(zero period acceleration)). In this study, therefore, the widely known methods are investigated and compared among the numerous ones proposed up to now including those recommended in Regulatory Guide 1.92. The applicability of each method is investigated through example analyses also.

1. 서론

구조물의 내진설계를 위해 주로 이용되고 있는 내진해석 방법인 응답스펙트럼 해석법은 구조물의 운동방정식에 대해 모우드 해석을 수행한 후 각 모우드에 대해 최대 응답을 구하는 방법이다. 따라서 이 방법을 이용하여 내진해석을 수행하려면 각 모우드별 최대 응답을 적절히 조합하여 구조물의 실제 최대 응답을 예측하여야 한다. 모우드별 응답의 조합 방법은 모우드 응답간의 상관관계를 고려하는 방법에 대한 이론에 따라, 그리고 실제 적용시의 간편성 및 보수성 등을 고려하여 여러가지 방법들이 제안되어 사용되고 있다. 이 중 Square Root of the Sum of the Squares (SRSS) 방법(각 모우드 최대 응답들의 제곱을 더한 후 제곱근을 취하는 방법)[1]이 가장 널리 사용되고 있으나 이 방법은 응답을 과소평가하게 되는 경우가 많으며, 이러한 문제를 해결하고자 제안되어 있는 다수의 모우드 응답조합 방법들도 각각 장단점 및 적용에의 제한성들을 가지고 있다. 국내 및 미국에서 적용하고 있는 원전 구조물의 내진설계에 관한 기술기준에서도 이 SRSS 방법을 포함한 몇가지의 방법들을 허용가능한 방법으로 채택하고 있으나[2-4] 그 이론적 배경들이 명료하지 않으며 적용 결과에 대한 이해가 부족한 실정이다.

모우드별 최대 응답을 조합하는데 있어서 중요한 것은 모우드 응답간의 상관관계를 어떻게 고려할 것인가 하는 문제와 고차 진동수 모우드(가속도 응답이 영주기 가속도가 되는 진동수보다 큰 고유진동수를 가지는 모우드)를 어떻게 고려할 것인가 하는 문제이다. 따라서 본 연구에서는 원전 구조물의 내진설계 기준에서 채택하고 있는 방법들을 포함하여, 위의 문제들을 해결하기 위해 지금까지 연구 발표되고 제안되어져 있는 방법들중에서

널리 알려져 있는 방법들을 비교 분석하였으며 예제해석을 수행하여 각 방법들의 적용성을 검토하였다.

2. 모우드 응답 조합 방법

2.1 모우드간 상관관계를 고려하지 않은 방법

2.1.1 Absolute Sum (ABS) 방법

이 방법은 각 모우드별 최대 응답의 절대값을 더하여 최대 응답을 예측하는 방법으로서 식(1)과 같이 최대 응답을 계산한다. 일반적으로 모든 모우드 응답은 동시에 최대가 되지는 않으므로 이 계산 결과는 다른 방법에 의한 모우드 응답조합 결과의 상한치가 된다.

$$R = \sum_{k=1}^N |R_k| \quad (1)$$

여기서 R_k 는 k번째 모우드의 최대 모우드 응답, N은 해석에 고려한 모우드의 수, R은 예상 최대 총 응답이다.

2.1.2 Square Root of the Sum of the Squares (SRSS) 방법

L.E.Goodman, E.Rosenblueth, N.M.Newmark 등이 제안한 방법[1]으로서 모우드별 최대 응답을 제곱한 것을 모두 더한 후 제곱근을 취하여 식(2)와 같이 최대 응답을 예측한다.

$$R = \left[\sum_{k=1}^N R_k^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

이 방법은 사용이 간편한 데에 비하여 최대 응답을 비교적 잘 예측하므로 일반적인 구조물의 경우가 장 널리 사용되고 있다. 그러나 모든 모우드가 서로 잘 떨어져 있는 경우 실제 응답과 잘 일치하지만 근접모우드가 존재할 때에는 응답을 과소평가하게

* 정희원, 한국원자력안전기술원 선임연구원

** 한국원자력안전기술원 선임연구원

된다.[5] Reg. Guide 1.92[4]에서는 근접모우드(두 모우드의 진동수가 서로 10%이내인 경우)가 없는 경우에 이 방법을 사용하는 것을 허용하고 있다.

2.1.3 Grouping/Ten Percent 방법

Reg. Guide 1.92에서 근접모우드가 존재할 때 사용을 허용하고 있는 방법으로서 공식적으로는 발표되지 않은 연구결과에 의한 방법이다. 이 방법에서는 식 (3)과 같이 근접모우드 응답들은 ABS 방법을 적용하여 조합하고 이 결과를 나머지 모우드의 응답들과 SRSS 방법으로 조합한다.

$$R = \left[\sum_{k=1}^N R_k^2 + 2 \sum_{i \neq j} |R_i R_j| \right]^{\frac{1}{2}}, \quad i \neq j \quad (3)$$

여기서, 두번째 summation 항은 모든 근접한 모우드인 i 번째 모우드와 j 번째 모우드에 대하여 더한다. 일반적으로 이 방법은 응답을 과대 평가하게 되며 때에 따라 과소 평가할 수도 있다.

2.2 모우드간 상관관계를 고려한 방법

모우드간 상관관계를 고려하기 위하여 모우드 상관계수 (modal correlation coefficient)를 사용하여 최대 지진응답을 예측하는 방법으로서 이 계수의 유도방법에 따라 아래의 여러가지 방법들이 제안되어져 사용되고 있다. 최대 지진응답은 식(4)에 의해 계산하며 이 식은 지진응답이 stationary ergodic process라는 가정하에 유도될 수 있다.[6]

$$R^2 = \sum_{i,j} \epsilon_{ij} R_i R_j \quad (4.a)$$

또는

$$R^2 = \sum_i R_i^2 + 2 \sum_{i>j} \epsilon_{ij} R_i R_j \quad (4.b)$$

여기서 ϵ_{ij} 를 모우드 상관계수라고 한다.

2.2.1 Double Sum Combination (DSC) 방법

이 방법은 E.Rosenblueth, J.Elorduy가 제안한 방법[7]으로서 지진에 의한 지반운동은 유한한 길이의 white noise이며 지진응답은 $e^{-\beta\omega t} \sin(\omega_1 t)$ 의 형태로 감소하는 주기함수라는 가정하에 유도된 식(5)를 사용한다.

$$\epsilon_{ij} = \left[1 + \left(\frac{\omega'_i - \omega'_j}{\beta'_i \omega_i + \beta'_j \omega_j} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

여기서,

$$\omega'_i = \omega_i \sqrt{1 - \beta_i^2}, \quad \beta'_i = \beta_i + \frac{2}{t_d \omega_i} \quad (6)$$

이며, ω_i, β_i 는 i 번째 모우드의 고유진동수 및 감쇠비, t_d 는 white noise segment의 유효지속시간 (effective duration)으로서 실제 적용시는 지진의 지속시간을 사용한다. 이 방법은 실제 지진응답을 비

교적 잘 예측하지만 유효 지진지속시간이 변수로 사용되기 때문에 적용에 어려움이 있다.

2.2.2 Double Summation 방법(DSM)

Reg. Guide 1.92에서 근접모우드가 존재할 때 사용을 허용하고 있는 방법으로서 DSC 방법을 변형시킨 것이다. 이 방법에서는 식(4)를 사용하지 않고 식(7)과 같이 double summation 항의 모우드 응답을 절대값을 취하여 적용하도록 하고 있다.

$$R^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |R_i R_j| \epsilon_{ij} \quad (7)$$

여기서 ϵ_{ij} 는 DSC방법의 식 (5)와 같다.

2.2.3 Gupta - Cordero (G-C) 방법

DSC 방법을 이용하려면 유효 지진지속시간 t_d 를 결정하는데 어려움이 있으므로 이 변수의 사용을 피하기 위하여, A.K.Gupta와 K.Cordero가 이 방법에 의한 모우드 상관계수를 식 (8)과 같이 수정하였다.[6,8]

$$\epsilon_{ij} = \left[1 + \left(\frac{\omega'_i - \omega'_j}{\beta_i \omega_i + \beta_j \omega_j + c_{ij}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (8)$$

여기서,

$$c_{ij} = (0.16 - 0.5\beta_{ij})(1.4 - |\omega_i^2 - \omega_j^2|) \geq 0 \quad (9)$$

이며, β_{ij} 는 평균 감쇠비이다. 이때 계수 c_{ij} 의 계산식은 10개의 강진기록으로부터 수치적으로 구해낸 식이다.

2.2.4 Complete Quadratic Combination (CQC) 방법

지반운동을 white noise로 가정하고 강진구간은 구조물의 고유진동주기에 비하여 길며 지진의 power spectrum은 넓은 진동수에 걸쳐 분포되어 있다는 가정을 사용하여 A. Der Kiureghian[9]이 다음 식과 같이 유도하였다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{8 \sqrt{\beta_i \beta_j} (\beta_i + r \beta_j) r^{\frac{1}{2}}}{(1 - r^2)^2 + 4\beta_i \beta_j r(1 + r^2) + 4(\beta_i^2 + \beta_j^2) r^2} \quad (10)$$

여기서 $r = \frac{\omega_j}{\omega_i}$ 이다. 이 방법은 프랑스의 원전 설계기준인 RCC-G[10]에서 채택하여 사용하고 있다.

2.2.5 Tsai 방법

N.C.Tsai[11]는 매개변수 연구를 매우 많이 수행하여 모우드 상관계수를 경험식으로 식(11)과 같이 유도하였다.

$$\epsilon_{ij} = \begin{cases} 1 - \left[\frac{\Delta^2}{\Delta^2 + 4(\beta + 0.01)^2} \right] H(\bar{f}), & \Delta \leq 0.2 \\ 0, & \Delta > 0.2 \end{cases} \quad (11)$$

여기서,

$$\bar{f} = (f_i + f_j)/2, \quad \Delta = (f_i - f_j)/\bar{f} \quad (12)$$

$$H(\bar{f}) = \begin{cases} \bar{f}, & 0.0 < \bar{f} \leq 1.0 \\ 1.0, & 1.0 < \bar{f} \leq 5.0 \\ 1.0 - 0.07(\bar{f} - 5.0), & 5.0 < \bar{f} \leq 15.0 \\ 0.3 - 0.02(\bar{f} - 15.0), & 15.0 < \bar{f} \leq 25.0 \\ 0.0, & 25.0 < \bar{f} \end{cases} \quad (13)$$

이며, f_i 는 i 번째 모우드의 주파수이다.

2.3 진동수 종속 상관효과(frequency dependent correlation effect) 고려방법

이 방법에서는 각 모우드 응답을 강제성분 (rigid component) R_i^r 과 감쇠주기 성분 (damped periodic component) R_i^p 로 분리하여 고려한다. 이때 모든 강제성분은 지반 입력운동과 완전한 상관관계 (perfectly correlated)를 가지며, 또한 강제성분간에 대해서 완전한 상관관계를 가진다고 가정하여 식 (14)와 같이 대수적으로 더한다. 또한 감쇠주기 성분은 2.2절에서 설명한 모우드 상관계수를 이용하여 식 (15)와 같이 조합한다.

$$R^r = \sum_{i=1}^N R_i^r \quad (14)$$

$$R^p = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} R_i^p R_j^p} \quad (15)$$

여기서, R^r, R^p 는 각각 총 강제응답과 총 감쇠주기 응답이다.

진동수 종속 상관효과를 고려하는 방법은 모우드 응답의 강제성분을 구하는 방법과 총응답을 구하기 위하여 강제성분과 감쇠주기성분을 조합하는 방법에 따라 크게 다음의 세가지 방법이 제안되어 있다.

2.3.1 Lindley - Yow 방법

총 강제응답과 총 감쇠주기응답을 식 (16)과 같이 SRSS조합하여 총응답을 구한다.[12]

$$R = \sqrt{(R^r)^2 + (R^p)^2} \quad (16)$$

이때 총 강제응답과 총 감쇠주기응답은 식(14)와 식(15)에 의해 구하며 각 모우드 응답의 강제응답 성분과 감쇠주기 성분은 아래의 식에 의해 구한다.

$$R_i^r = R_i \alpha_i \quad (17)$$

$$R_i^p = R_i \sqrt{1 - \alpha_i^2} \quad (18)$$

$$\alpha_i = ZPAVS_{ai}, \quad 0.0 \leq \alpha_i \leq 1.0 \quad (19)$$

이며, S_{ai} 는 i 번째 모우드의 가속도 응답스펙트럼 값이다. 이 방법은 낮은 진동수 영역($f_i < 2$ Hz)에서 α 값이 너무 과다하게 계산되어 실제와 모순되는 결과를 주므로 구조물의 고유진동수가 낮은 경우는 사용에 주의가 필요하다.

한편 식(16)의 총 지진응답은 식(14), (15), (17), (18)을 이 식에 대입하여 다음과 같이 단순화시켜

나타낼 수 있다.

$$R^2 = \sum_{i=1}^N R_i^2 + 2 \sum_{i > j}^N \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} R_i R_j \quad (20)$$

여기서

$$\varepsilon_{ij} = \alpha_i \alpha_j + \sqrt{(1 - \alpha_i^2)} \sqrt{(1 - \alpha_j^2)} \varepsilon_{ij} \quad (21)$$

이다

2.3.2 Hadjian 방법

총 강제응답과 총 감쇠주기 응답을 식 (22)와 같이 ABS 조합하여 총 지진응답을 구한다.[13]

$$R = |R^r| + |R^p| \quad (22)$$

총 강제응답과 총 감쇠주기응답은 식(14)와 식 (15)에 의해 구하며 각 모우드 응답의 강제응답 성분과 감쇠주기 성분은 아래의 식에 의해 구한다.

$$R_i^r = R_i \alpha_i \quad (23)$$

$$R_i^p = R_i (1 - \alpha_i) \quad (24)$$

여기서,

$$\alpha_i = ZPA/S_{ai}, \quad 0.0 \leq \alpha_i \leq 1.0 \quad (25)$$

이 방법도 Lindley-Yow 방법과 마찬가지로 낮은 진동수 영역에서 사용에 주의가 필요하다.

2.3.3 Gupta 방법

계수 α_i 를 구하는 방법을 제외하고는 Lindley-Yow 방법과 같다. 이 방법에서 α_i 는 다음과 같이 계산한다.[6,14]

$$\alpha_i = \begin{cases} 0, & f_i < f_1 \\ \log(f_i/f_1), & f_1 \leq f_i \leq f_2 \\ \log(f_2/f_1), & f_2 < f_i \\ 1, & \end{cases} \quad (26)$$

$$f_1 = S_{a \max} / (2\pi S_{v \max}), \quad f_2 = (f_1 + 2f_r) / 3 \quad (27)$$

여기서 f_r 는 강제 진동수 (rigid frequency : 약 33Hz)이며 $S_{a \max}$ 와 $S_{v \max}$ 는 각각 입력 응답스펙트럼의 최대 가속도 값과 최대 속도 값이다.

2.4 고차 진동수 모우드의 고려 방법

고차진동수 모우드의 고려방법에 대하여도 많은 연구가 수행되어 왔으며 이 방법들을 크게 분류하면 유사정적(pseudo-static)으로 고려하는 방법[15]과 동력학 이론에 의해 유도된 방법으로 고려하는 방법[16]으로 나눌 수 있다. 그러나 후자의 방법은 모우드 가속도법을 이용한 방법으로서 지금까지는 실무에서 사용하지 않는 상대가속도 응답스펙트럼과 상대속도 응답스펙트럼을 필요로 하므로 여기서는 실무에서 이용될 수 있는 전자의 방법에 대하여만 기술하였다.

2.4.1 Pseudostatic Force 방법

missing mass를 정적으로 고려하는 방법으로서 R.P. Kennedy가 제안하였으며[3,15] G.H. Powell, J.K.Biswas 등도 이와 유사한 방법을 발표한 바 있

다. 이 방법에 의한 총 지진응답의 계산은 아래와 같이 수행한다.

- 1) ZPA보다 작은 고유진동수의 모우드 응답을 Reg.Guide 1.92에 따라 조합한다.
- 2) 1)의 해석에 포함되지 않은 자유도 질량비를 다음의 식에 의해 계산한다.

$$e_i = \sum_{k=1}^n c_k \times \phi_{k,i} - \delta_{ij} \quad (28)$$

여기서, c_k 는 k번째 모우드의 모우드 기여도 계수, δ_{ij} 는 Kronecker delta (i : 자유도 방향, j : 지진 방향)이며, 이때 $|e_i| \geq 0.1$ 이면 고차 모우드 응답을 고려해야 한다.

- 3) 각 자유도 i 에 대한 유사정적 관성력을 식(29)에 의해 계산한 후 모든 자유도에 이 관성력을 적용하여 정적 해석을 수행함으로써 고차 진동수 모우드의 최대응답을 계산한다.

$$P_i = ZPA \times M_i \times e_i \quad (29)$$

- 4) 1)과 3)의 결과를 SRSS 조합한다.

2.4.2 Algebraic Sum 방법

이 방법 역시 R.P.Kennedy가 제안하였으며[3,15] Pseudostatic Force 방법과 마찬가지로 USNRC SRP (3.7.2절)에서 허용가능한 방법으로 채택하고 있다. 이 방법에 의한 총응답의 계산은 다음과 같이 수행한다.

- 1) 모우드의 추가로 인한 총응답의 증가가 10% 이하가 되는 모우드까지 모우드 응답을 구한다.
- 2) 이 모우드 응답중 ZPA보다 작은 고유진동수의 모우드 응답을 Reg.Guide 1.92에 따라 조합한다.
- 3) 고차 진동수 모우드 응답을 서로 대수적으로 더한 후 이 결과의 절대값을 2)의 결과와 더한다.

2.4.3 Improved CQC 방법

이 방법은 최근에 발표된 방법으로서 A.Der Kiureghian이 자신이 제안했던 CQC 방법을 이론적으로 확장하여 다음과 같이 총 지진응답 계산식을 유도한 것이다.[17]

$$R = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j \rho_{ij} D_i D_j + a_s^2 \ddot{u}_{\max}^2 + 2 \sum_{i=1}^N a_i a_s \rho_{is} D_i \ddot{u}_{\max} \right]^{1/2} \quad (30)$$

여기서,

$$a_s = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{\omega_i^2} - R_s, \quad \rho_{is} = \frac{A(\omega_i, \zeta_i)}{\ddot{u}_{\max}} \left(1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_s^2} \right) \quad (31)$$

$$w_i = \sqrt{\lambda_{2,ii} / \lambda_{0,ii}}, \quad D_i = D(\omega_i, \zeta_i) = A(\omega_i, \zeta_i) / \omega_i^2 \quad (32)$$

이며, $\lambda_{m,ii}$ 는 i 번째 모우드의 m 차 spectral moment, R_s 는 단위 지반 입력 가속도에 대한 정적 응답, $A(\omega_i, \zeta_i)$ 는 응답스펙트럼 가속도, a_i 는 유효 모우드 기여도 계수(modal effective participation factor)로서 모우드 shape에 해당하는 응답과 모우드 기여도 계수를 곱한 것이다.

따라서 다른 식들에서의 R_s 는 식(30)에서 $a_i D_i$ 와 같아진다. 또한 이 식에서 첫번째항은 해석에 고려한 N 개의 모우드 응답을 CQC 방법에 의해 조합한

것이며, 두번째항은 해석에 포함되지 않은 모우드의 정적인 기여도, 세번째항은 해석에 고려한 모우드와 고려되지 않은 정적 모우드간의 상관관계를 나타내고 있다.

3. 예제해석 및 결과분석

제 2장에서 설명한 방법들의 비교 분석 및 적용성을 조사하기 위하여 먼저 각 방법에 의한 모우드 상관계수들을 비교 분석하였으며 간단한 몇개의 구조 모델을 선택하여 각 방법들의 적용성을 평가하였다. 마지막으로 이 방법들을 실제 구조물에 적용하기 위하여 영광 원자력 3.4호기의 격납건물을 단순화시킨 모델에 대하여 해석을 수행하였다.

3.1 모우드 상관계수 분석

모우드 상관계수는 모우드 응답간의 상관관계를 직접적으로 나타내는 것이므로 이 절에서는 모우드 상관계수에 대한 분석을 수행하였다. 먼저 제 2장에 기술된 총 지진응답의 계산식들을 살펴 보면 ABS 방법의 경우 모우드 상관계수는 1이며, SRSS 방법의 경우 0, Grouping/Ten percent 방법의 경우 1 또는 0으로서 이 방법들은 일정한 모우드 상관계수를 가지는 셈이다. 그러므로 이 방법들은 모우드 응답간의 상관관계를 제대로 고려하지 않는 방법임을 알 수 있으며 따라서 여기서는 이들을 제외하여 2.2절에 기술한 방법들에 대하여만 비교 분석하였다.

2.2절에 기술된 모우드 상관계수들을 살펴보면 이계수들은 고려하는 두 모우드의 고유진동수와 모우드 감쇠비의 함수이며 DSC 방법의 경우는 유효 지진지속시간의 함수이기도 함을 알 수 있다. 또한 모우드 상관계수는 감쇠비가 커질수록 커지므로 감쇠비가 큰 경우에 모우드 상관계수는 중요해진다.[18]

그림 1은 두 모우드 간의 고유진동수비의 변화에 따른 모우드 상관계수를 모우드 감쇠비 10%에 대하여 비교한 것으로서, 이 그림으로부터 DSC, G-C, CQC, Tsai 방법에 의한 모우드 상관계수는 대체로 경향이 비슷하지만 이 중에서 매개변수 연구에 의해 제안된 Tsai 방법이 가장 다른 양상을 나타낼 수 있다. 그림 2에는 DSC 방법과 Tsai 방법의 경우 동일한 고유진동수비에 대하여 고유진동수의 변화에 따른 모우드 상관계수를 비교하였다.(모우드 감쇠비 5%인 경우) 이 그림으로부터는 모우드 상관계수는 두 고유진동수간의 비가 작아질수록(즉, 두 모우드가 근접해 갈수록) 커지며 진동수비가 커질수록 작아지므로 실제의 경향을 잘 나타내 주고 있음을 알 수 있다.

고려하는 고유진동수에 대한 모우드 상관계수의 크기의 변화를 살펴 보면 고유진동수가 작을수록 이계수는 커지므로 이때 모우드간의 상관관계는 더 중요해짐을 알 수 있으며, 고려하는 고유진동수가 커짐에 따라 모우드 상관계수는 어떤 일정한 값으로 접근하여 갈아짐을 알 수 있다. 그러나 두 고유진동수가 모두 매우 커지면 각 모우드 응답은 유

사 정적인 응답의 경향을 보여서 두 응답간의 상관 계수는 1에 가까워져야 하므로 이 경향은 Tsai 방법이 보다 더 잘 나타내 준다고 할 수 있다.(그림 2)

3.2 예제해석

본 연구에서는 먼저 근접모우드와 고차 진동수 모우드의 효과를 크게 하기 위한 두가지의 2자유도 모델을 선택하여 예제해석을 수행하였다. 또한 실제 구조물인 영광 원자력 3.4호기의 격납건물을 집중질량 모델로 이상화하여 예제해석을 수행하였다.

모우드 응답 조합 방법들의 적용성을 조사하기 위하여 응답스펙트럼 해석 결과를 시간이력 해석 결과와 비교하였으며 시간이력 해석 결과에 대한 오차율로써 적용성을 평가하였다. 응답스펙트럼 해석 결과의 오차율은 다음식과 같이 계산하였다.

$$\text{오차(\%)} = (\text{RSA-THA})/\text{THA} \times 100$$

여기서 RSA는 응답스펙트럼 해석 결과이며 THA는 시간이력 해석 결과이다.

입력 지진의 최대 지반가속도는 0.2g로 가정하였으며 시간이력 해석을 위한 지진 시간이력으로는 Reg. Guide 1.60[19]의 수평 응답스펙트럼에 근사하도록 작성한 지속시간 24초의 인공 가속도 시간이력(그림 3.a)을 사용하였다. 응답스펙트럼 해석을 위한 응답스펙트럼은 이와 같이 작성된 인공 가속도 시간이력으로부터 구한 응답스펙트럼(그림 3.b)을 사용하였다.

첫번째 예제해석 모델(모델 I)은 그림 4와 표 1에 나타낸 것과 같은 2자유도의 집중질량 모델로서 근접모우드의 효과를 분석하기 위한 것이다. 모델 I-1과 I-2는 고유진동수의 집중율(작은 고유진동수에 대한 두 고유진동수 차의 비율)이 약 7.4%인 경우이며 모델 I-3과 I-4는 고유진동수가 잘 분리되어 있는(well separated) 경우이다.

각 해석 모델에 대하여 여러가지 모우드 응답 조합 방법에 의해 구한 전단력과 휨모멘트의 오차율을 표 2에 보였다. 이 표로부터 ABS 조합 결과는 항상 가장 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있으며, SRSS 조합 결과를 살펴 보면 고유진동 모우드가 잘 분리되어 있는 경우는 비교적 정확한 결과를 보이고 있으나 근접모우드가 존재하는 경우에는 오차가 항상 크며 응답을 과대평가하거나 과소평가하고 있음을 알 수 있다. Grouping/Ten Percent 방법에 의한 결과는 근접모우드의 경우는 ABS 조합 결과와, 모우드가 잘 분리된 경우는 SRSS 조합 결과와 일치하고 있다.

Reg. Guide 1.92의 DSM과 DSC 방법에 의한 응답 조합 결과를 살펴 보면 근접모우드의 경우 위치 A에서 거의 같은 결과를 보이고 있으나 위치 B에서는 DSM이 상당히 과대평가된 결과를 주고 있다. 여기서 선택한 근접모우드 모델(모델 I-1, I-2)은 배관 계통과 같이 주구조물과 부구조물 사이의 질량 및 강성차가 매우 큰 경우에 해당하므로 이런 경우의 응답 계산을 DSM으로 수행하는 것은 매우 부정확한 방법이 된다. 또한 Reg. Guide 1.92에서 근접 모우드 응답의 조합 방법으로 채택하고 있는

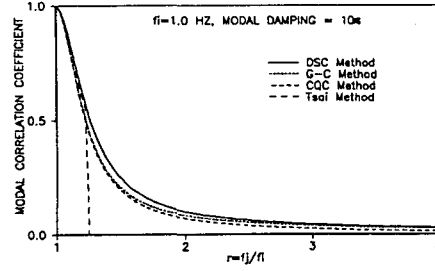
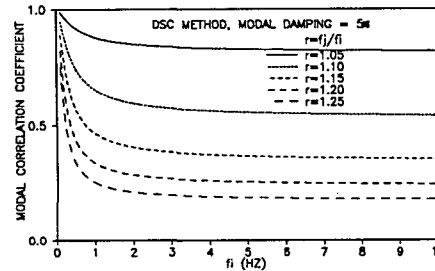
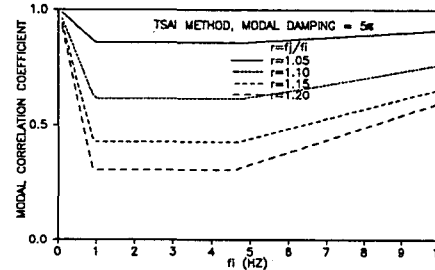


그림 1. 고유진동수에 대한 모우드 상관계수 비교

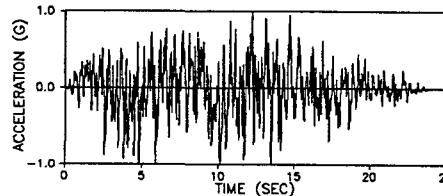


(a) DSC Method

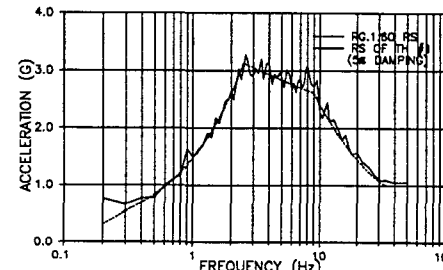


(b) Tsai Method

그림 2. 방법별 모우드 상관계수 비교



(a) 인공 가속도 시간이력



(b) 응답스펙트럼

그림 3. 해석에 사용한 입력 지진

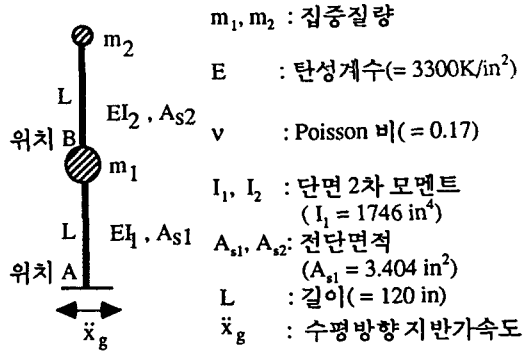


그림 4 예제해석 모델 I

Grouping/Ten Percent 방법, DSM도 응답을 과소평가하기도 함을 알 수 있다. DSC, G-C, CQC 방법에 의한 결과는 대체로 비슷한 양상을 보이고 있으나 CQC 방법이 비교적 보수적으로 응답을 평가하고 있다. 또한 전반적으로는 Tsai 방법이 비교적 응답을 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

진동수 종속 상관 효과를 고려하는 방법은 고유진동수가 클 때에 상대적으로 응답을 잘 예측하고 있다. 이 모델만으로는 진동수 종속 상관 효과를 고려하는 방법들의 우열을 가리기가 힘들지만 Gupta 방법이 비교적 타당한 결과를 보이고 있다고 볼 수 있다.

두번째 예제해석 모델(모델 II)은 그림 5와 같은 2자유도의 고차 진동수 모우드를 가지는 시스템으로서 고차 진동수 모우드의 고려 방법에 대하여 살펴 보고자 선택한 모델이다. 이 모델은 R.P.Kennedy가 고차 진동수 모우드를 설명하기 위해 사용했던 모델[15]이다. 해석결과 스프링의 부

표 1. 예제해석 모델 I의 특성

모델 번호		I-1	I-2	I-3	I-4
물성치	m_1/m_2	200	200	10	10
	I_1/I_2	200	200	10	10
	A_{s1}/A_{s2}	200	200	10	10
고유진동수 (Hz)	m_1 ($K \cdot s^2/in$)	0.1	0.004	0.1	0.004
	f_1	2.172	10.86	1.923	9.614
	f_2	2.332	11.66	2.614	13.17

재력에 대한 모우드 응답 조합 결과는 표 3과 같다. 이 표로부터 본 연구에서 살펴본 고차 진동수 모우드 고려 방법들은 모두 실제 응답을 정확히 예측하고 있으며 ABS 방법은 응답을 과대평가하고 SRSS 방법은 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 또한 모우드 상관관계를 고려하기 위하여 제안된 2.2절의 방법들은 이 모델과 같이 고차 진동수 모우드들끼리 잘 분리된 경우에 SRSS 방법과 같아지므로, 이 방법으로 고차 진동수 모우드의 응답을 조합하면 오차가 매우 크게 발생한다.

진동수 종속 상관 효과를 고려하는 방법도 응답의 강채운동 성분을 고려할 수 있는 방법이므로 이 경우에 적용할 수 있을 것이다. 2.3절에 기술된 세 가지 방법들을 이용하여 응답을 계산해 본 결과 세 방법 모두 표 3의 정확해와 같은 결과를 보였다. 이 모델의 경우는 저차 진동수 모우드가 없는 경우이므로 이와 같이 모두 동일한 결과를 보이고 있다. 따라서 진동수 종속 상관 효과를 고려하는 방법도 고차 진동수 모우드를 고려하는 방법으로 채택하여 사용할 수 있으나 Algebraic Sum 방법(2.4절)에서와 마찬가지로 충분한 모우드까지 계산을 수행 해주어야 하는 단점이 있다.

표 2. 모델 I에서의 각 방법별 오차율(%)

방법	모델 I-1		모델 I-2		모델 I-3		모델 I-4									
	위치 A	위치 B	위치 A	위치 B	위치 A	위치 B	위치 A	위치 B								
	F ⁵⁾	M ⁶⁾	F	M	F	M	F	M								
ABS	4.1	4.1	193.5	193.5	9.9	9.9	231.7	206.6	39.4	39.4	32.0	32.0	13.8	13.8	99.5	94.9
SRSS	-26.3	-26.3	107.6	107.6	-22.0	-22.0	135.0	117.2	4.0	4.0	-4.9	-4.9	-8.8	-8.8	52.5	49.0
Group/Ten	4.1	4.1	193.5	193.5	9.9	9.9	231.7	206.6	4.0	4.0	-4.9	-4.9	-8.8	-8.8	52.5	49.0
DSM	-3.6	-3.6	171.8	171.8	0.70	0.68	204.1	180.9	8.6	8.6	-0.07	-0.06	-6.4	-6.4	57.7	54.1
DSC	-3.6	-3.6	11.0	11.0	0.70	0.68	34.4	24.1	8.6	8.6	-10.1	-10.1	-6.4	-6.4	47.1	43.8
G-C	-4.9	-4.9	19.9	19.9	0.50	0.48	35.9	25.5	7.8	7.8	-9.2	-9.2	-6.4	-6.4	47.2	43.9
CQC	-4.9	-5.0	20.1	20.1	0.35	0.38	36.7	26.3	7.7	7.7	9.0	9.0	-6.6	-6.6	47.5	44.2
Tsai	-2.8	-2.8	5.5	5.5	5.9	5.8	-8.9	-15.8	6.7	6.7	7.8	7.8	-2.5	-6.6	47.5	44.2
G/G-C ¹⁾	-4.9	-4.9	19.9	19.9	4.8	4.8	1.1	-6.6	7.8	7.8	-9.2	-9.2	3.3	3.3	22.0	19.2
G/DSC ²⁾	-3.6	-3.6	11.0	11.0	5.0	5.0	-0.44	-8.0	8.6	8.6	-10.1	-10.1	3.3	3.3	21.9	19.1
L-Y/DSC ³⁾	-2.6	-2.6	4.0	4.0	2.5	2.5	21.4	12.2	8.4	8.4	-9.8	-9.8	-2.6	-2.6	38.0	34.9
Had/DSC ⁴⁾	0.88	0.88	21.0	21.0	4.7	4.6	-13.9	-20.4	16.2	16.2	-0.51	-0.51	2.9	2.9	15.3	12.7

주) 1) 2.3절의 Gupta 방법과 G-C 방법의 조합, 2) 2.3절의 Gupta 방법과 DSC 방법의 조합,
 3) 2.3절의 Lindley-Yow 방법과 DSC 방법의 조합, 4) 2.3절의 Hadjian 방법과 DSC 방법의 조합,
 5) 전단력, 6) 휨모멘트

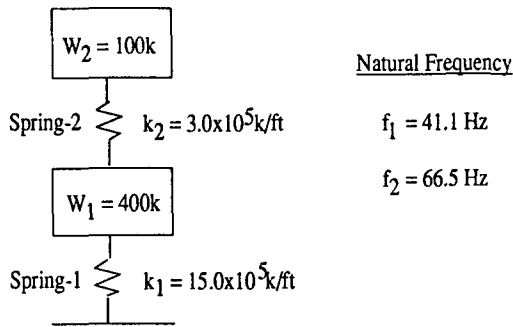


그림 5 예제해석모델 II

마지막 예제해석 모델(모델 III)은 영광 원자력 3.4호기 격납건물의 집중질량 모델로서 초기 14개의 모우드($f_1 = 4.83 \text{ Hz}$, $f_{14} = 89.5 \text{ Hz}$)를 해석에 고려하였을 때 여러가지 방법에 의한 부재력(전단력, 휨 모멘트)의 오차를 비교하였다. 이 실제 구조물 모델에 대한 해석결과들로부터도 ABS 방법은 매우 큰 응답을 예측하고 있음을 알 수 있었다. 이 모델의 경우 근접모우드의 영향과 고차 진동수 모우드의 영향들이 그다지 크게 나타나지 않아 여러가지 방법에 의한 오차들이 대체로 비슷하였다. 이와 같이 각 방법별 오차들이 비슷한 가운데서도 Tsai 방법, Gupta 방법이 비교적 응답을 잘 예측하고 있음을 알 수 있었으며 Hadjian 방법은 그다지 좋은 결과를 나타내지 못하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 원전 구조물의 내진설계 기준에서 채택하고 있는 방법들을 포함하여, 위의 문제들을 해결하기 위해 지금까지 연구 발표되고 제안되어져 있는 방법들 중에서 널리 알려져 있는 방법들을 비교 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 사실들을 알 수 있었다.

- 1) 모우드 최대 응답간의 상관관계를 나타내는 모우드 상관계수는 고려하는 두 모우드의 고유진동수와 모우드 감쇠비의 함수이며 DSC 방법의 경우는 유효 지진지속시간의 함수이기도 하다.
- 2) SRSS 조합 방법은 고유진동 모우드가 잘 분리되어 있는 경우는 비교적 정확한 결과를 예측하지만 근접모우드가 존재하는 경우에는 오차가 항상 크며 응답을 과대평가 또는 과소평가한다.
- 3) 배관 계통과 같이 주구조물과 부구조물 사이의 질량 및 강성차가 매우 큰 경우에 Reg. Guide 1.92의 Double Summation Method를 사용하여 응답을 계산하면 매우 부정확한 결과를 얻게 된다.
- 4) DSC, G-C, CQC 방법에 의한 모우드 응답 조합 결과는 대체로 비슷한 양상을 보이며 Tsai 방법과 Gupta 방법이 지진 응답을 비교적 정확하게 예측한다.
- 5) 모우드 상관관계를 고려하기 위하여 제안된 2.2 절의 방법을 이용하여 고차 진동수 모우드의 응답을 조합하면 오차가 매우 크게 발생한다.

표 3. 모델 II의 모우드 응답 조합 결과

	Exact	ABS	SRSS	본 연구의 고차 진동수 모우드 조합 방법 (3가지 결과 동일)
스프링 1	100k	100k	77.4k	100k
스프링 2	20k	44.9k	34.6k	20k

6) 진동수 종속 상관 효과를 고려하는 방법도 고차 진동수 모우드를 고려하는 방법으로 채택하여 사용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] L.E.Goodman et al., *Proceedings, ASCE*, Nov. 1953, pp.349-1, 349-27.
- [2] 경수로형 원자력발전소 안전심사지침서, 한국 원자력안전기술원, 1991.
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Standard Review Plan*, NUREG-75/087, Sec. 3.7.2, 1989.
- [4] U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Regulatory Guide 1.92*, Rev. 1, Feb. 1976.
- [5] A.K.Singh et al., S&L Report No. SAD-126, for *Proc., Specialty Conf. on Struct. Design of Nuclear Plant Facilities*, Vol.2, Chicago, Dec.1973.
- [6] A.K.Gupta, *Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures*, Blackwell Scientific Publications, Inc., MA, 1990.
- [7] E. Rosenblueth and J.Elorduy, *Proc., Fourth W-CEE*, Santiago, Chile, 1969, A-1, pp.185-196.
- [8] A.K.Gupta and K.Cordero, *Trans. of the 6-th SMIRT*, Paper No. K7/5, Paris, Aug. 1981.
- [9] E.L.Wilson et al., *Short Communication, Earthq. Eng. and Struct. Dyn.*, Vol.9, 1981, pp.187-194.
- [10] EDF, *Design and Construction Rules for Civil Works of PWR Nuclear Islands : RCC-G*, Vol. I - Design, Appendix A, France, July 1988.
- [11] N.C.Tsai, *Trans. of the 7-th SMIRT*, Paper No. K3/11, Chicago, IL, Aug. 1983.
- [12] D.W. Lindley and J.B. Yow, *Proc. 2nd ASCE Conf. on Civil Eng. and Nuclear Power*, Paper No. 8-2, Knoxville, Tennessee, Sept. 1980.
- [13] A.H. Hadjian, *Nuclear Eng. and Design*, Vol.66, No.2, Aug. 1981, pp.179-201.
- [14] P.Bezler et al., NUREG/CR-5627, Oct. 1990.
- [15] D.W.Coats, NUREG/CR-1161, May 1980.
- [16] M.P.Singh and G.O.Maldonado, *Earthq. Eng. and Struct. Dyn.*, Vol.20, 1991, pp.621-635.
- [17] A. Der Kiureghian, Paper No. K09/5, Tokyo, Japan, Aug. 1991, pp.231-236.
- [18] 현창현 외, *구조물의 최대 지진응답 평가에 관한 연구*, 한국원자력안전기술원, 1991.
- [19] U.S. NRC, *Regulatory Guide 1.60*, Rev.1, Dec.1973.