

# 配管系統의 耐震解析에 따른 應答組合과 漏落質量效果

李 凡 洙

<韓國에너지研究所 原子爐系統研究室>

## 1. 머리 말

원자력발전소는 사고시 주변의 인구 및 환경에 미치는 영향의 심각성을 고려하여 가능한 모든 安全措施를 취하여 설계·건설되도록 하고 있다. 특히 原子爐冷却材系統의 配管이 그러하며 고도의 安全性 및 信賴性을 확보하기 위하여 地震에 대해서도 構造的인 健全性이 입증되어야 한다.

일반적으로 지진하중에 대한 배관계통의 耐震解析에서는 層應答스펙트럼에 의한 모우드解析方法이 이용되고 있다. 이 때 내진해석으로 얻어진 應答의 組合에는 신중한 고려가 필요하다. 즉 배관계통의 특성, 입력지진의 특성, 계산에 고려하는 모우드의 數등을 감안하여 적절한 응답조합이 이루어져야 한다.

본 해설에서는 여러 가지의 응답조합방법과 해석시 고려되는 모우드의 수를 제한함으로써 발생하는 誤差를 보정하기 위한 漏落質量效果(missing mass effect)에 대하여 설명하고자 한다. 또 두 가지의 해석모델에 대하여 실제 내진 해석을 수행하여 그 결과를 비교검토하기로 한다.

## 2. 耐震解析의 理論

地震荷重은 배관계통의 각 支持點에 작용하여 배관으로 전달된다. 이 때 배관의 거동을 지배

하는 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_a & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_a \\ \ddot{X}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_a & C_{as} \\ C_{as} & C_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_a \\ \dot{X}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_a & K_{as} \\ K_{as} & K_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_a \\ X_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_s \end{Bmatrix} \quad (1)$$

이 식에 대한 자세한 해석과정은 참고문헌(1)에 나와 있다. 여기서  $\{X^d\}$ 와  $\{X^s\}$ 를 각각 動的 變位, 靜的 變位라 하면 전체변위는

$$\{X_a\} = \{X_a^d\} + \{X_a^s\} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있고, 정적 변위  $\{X_a^s\}$ 는 다음과 같이 쉽게 구해진다.

$$\begin{aligned} \{X_a^s\} &= -[K_a]^{-1}[K_{as}]\{X_s\} \\ &= [\eta_{as}]\{X_s\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $[\eta_{as}]$ 는 靜的 影響係數(pseudostatic influence coefficient)이다. 또 동적 변위  $\{X_a^d\}$ 에 대해서는 계의 모우드형상  $\phi$ 와 固有振動數  $\omega$ 를 非減衰 自由振動 方程式으로부터 구하여  $N$ 次 모우드까지 고려하면

$$\{X_a^d\} = \sum_{n=1}^N [\phi_n] Y_n(t) \quad (4)$$

와 같이 표현할 수 있다. 식 (1)을 분리하여 식 (2), (3), (4)를 대입하고  $\phi^T$ 를 곱하면  $n$ 차의 모우드應答  $Y_n$ 에 대해서

$$\ddot{Y}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{Y}_n + \omega_n^2 Y_n = \frac{[\phi_n]^T [M_a] [K_a]^{-1} [K_{as}]}{[\phi_n]^T [M_a] [\phi_n]} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \end{Bmatrix} \quad (5)$$

가 얻어지며 이 식으로부터 해를 구할 수 있다.

일반적으로 해석에 사용되는 入力地震은 각 지점과 방향별로 減衰率  $\xi_n$ 와 고유진동수  $\omega_n$ 에 따른 加速度 應答스펙트럼으로 주어지므로 다음

과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_a = S_a^k(\xi_n, \omega_n) \quad (6)$$

따라서  $k$  번째 支持點에서  $j$  방향으로 작용하는 입력지진으로 인한  $n$  차 모우드의 최대변위 응답은 일반화된 질량에 대한 正規化를 고려하면

$$(Y_n^k)_{\max} = \left| \frac{1}{\omega_n^2} [\phi_n]^T [M_a] [K_a]^{-1} [K_{as}] S_a^k(\xi_n, \omega_n) \right| \quad (7)$$

을 얻을 수 있다.

### 3. 應答의 組合

배관계통의 내진해석으로 얻어진 應力, 모우먼트, 변위, 힘등의 應答은 USNRC Reg. Guide 1.92의 기준에 따라 입력지진의 방향성분 및 모우드에 대한 조합이 이루어져야 한다. 한편 多應答스펙트럼에 의한 해석에서는 입력지진이 작용하는 지지점들 사이의 응답조합도 수행하여 최종응답을 구한다.

#### 3.1. 應答의 方向成分組合

세 직교방향성분의 입력지진 즉 두개의 수평방향과 한 개의 수직방향의 입력지진을 받는 部材에 대한 應答組合은 層應答스펙트럼에 의한 해석인 경우에는 自乘平均法(the square root of the squares method)으로 한다. 또 時間記錄(time history)에 의한 해석에서는 應答이 입력지진의 각 방향성분별로 계산될 경우에 이 방법을 사용한다. 이것은 지진하중이 작용할 때 部材에 생기는 最大應答이 동시에 발생할 가능성이 작기 때문이다.

그러나 입력지진이 시간기록으로서 세 직교방향성분을 동시에 고려하여 시간단계별로 얻어진 응답에 대해서는 代數的인 조합으로 해를 구한다. 그런데 이 방법이 사용될 때는 각 방향의 입력지진이 서로 統計的으로 獨立的이어야 한다

#### 3.2. 應答의 모우드組合

USNRC Reg. Guide 1.92에 의하면 각 모우

드가 서로 잘 분리되어 있을 때 즉 서로 이웃하는 모우드의 고유진동수의 차이가 낮은 고유진동수의 10%보다 클 때에는 自乘平均法에 의하여 모우드응답을 조합한다. 이것을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y = \left( \sum_{n=1}^N Y_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

여기서  $N$ 은 고려하는 모우드의 수이다.

그러나 서로 접근된 모우드가 존재하면 접근된 모우드 사이의 상호영향을 고려하여야 한다. 이러한 경우에는 Grouping 방법, Ten Percent 방법 그리고 Double Sum 방법에 의하여 조합한다.

Grouping 방법은 낮은 고유진동수의 10%내에 있는 모든 모우드를 하나의 그룹으로 나누어 이 그룹에 있는 모우드의 상호연관성을 고려하고 전체 모우드를 자승평균법으로 조합하는 방법이다.

$$Y = \left[ \sum_{n=1}^N Y_n^2 + \sum_{q=1}^p \sum_{i=m}^j |Y_{i_q} Y_{m_q}| \right]^{\frac{1}{2}}, \quad l \neq m \quad (9)$$

여기서,

- $Y_{i_q}, Y_{m_q}$ :  $q$  번째 그룹에 있는 모우드응답  $Y_i, Y_m$
- $i$ : 그룹이 시작되는 모우드번호
- $j$ : 그룹이 끝나는 모우드번호
- $p$ : 분리된 모우드를 제외한 접근된 모우드그룹의 수.

Ten Percent 방법은 서로 접근된 모우드 사이의 영향을 고려하여 전체 모우드에 대하여 자승평균법으로 조합하는 방법이며 다음과 같이 표현된다.

$$Y = \left[ \sum_{n=1}^N Y_n^2 + 2 \sum |Y_i Y_j| \right]^{\frac{1}{2}}, \quad i \neq j \quad (10)$$

여기서  $i$ 와  $j$ 는 서로 접근된 모우드의 번호이고 이 때의 고유진동수를 각각  $\omega_i, \omega_j$ 라고 하면  $\frac{\omega_j - \omega_i}{\omega_i} \leq 0.1, 1 \leq i < j \leq N$ 의 관계가 있다.

또 Double Sum 방법에 의한 조합은 다음과 같다.

◆ 解 說

$$Y = \left[ \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^N |Y_n Y_s| \varepsilon_{ns} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{ns} = \left[ 1 + \left( \frac{\omega_n' - \omega_s'}{\xi_n' \omega_n + \xi_s' \omega_s} \right)^2 \right]^{-1} \quad (12)$$

$$\omega_n' = \omega_n [1 - \xi_n^2]^{1/2} \quad (13)$$

$$\xi_n' = \xi_n + \frac{2}{t_d \omega_n} \quad (14)$$

여기서

$Y_s$ :  $s$  차 모우드의 최대응답

$\omega_n$ :  $n$  차 모우드의 고유진동수

$\xi_n$ :  $n$  차 모우드의 減衰率

$t_d$ : 地震의 持續時間(sec)

이 외에도 각 모우드의 최대응답이 동시에 발생한다고 가정하여 絶對合(absolute sum)으로 조합하는 방법이 있다.

$$Y = \sum_{n=1}^N |Y_n| \quad (15)$$

그러나 이 방법은 結果가 너무 보수적이므로 실제 설계에서는 잘 사용되지 않는다.

### 3.3. 支持點에 대한 應答의 組合

각 지지점에서 작용하는 入力地震이 서로 다를 때에는 支持點 사이의 應答組合도 이루어져야 한다. 각 지지점 사이의 입력지진과 응답이 각각 통계적으로 독립적인 경우에는 식(8)로 표현되는 自乘平均法에 의하여 조합한다. 그러나 통계적으로 독립적이지 않거나 독립적이라는 타당한 근거가 없을 때는 각 지지점 사이의 位相差를 고려하지 않고 설계의 安全性을 위하여 식(15)로 표현되는 絶對合에 의한 방법으로 조합한다.

## 4. 漏落質量效果

충응답스펙트럼에 의한 모우드해석방법으로 배관계통의 내진해석을 수행할 때는 계통에 존재하는 모든 모우드를 고려하지 않고 몇 개의 모우드만을 계산에 고려하게 되므로 近似解가 얻어진다. 그것은 어느 정도의 큰 振動數(보통 33Hz) 이상에 해당하는 모우드는 剛體運動을 하

는 것으로 생각할 수 있기 때문이다. 따라서 일반적으로 고유진동수가 33Hz 이하인 모우드만을 고려한다. 이와 같이 고려하는 모우드의 수를 제한하는 것은 質點에 작용하는 어떤 質量을 무시하는 것과 같다. 이것을 漏落質量(missing mass)이라 한다.

배관계통의 變位나 應力과 같은 應答에 있어서는 高次의 모우드에 의한 영향이 작기 때문에 누락질량으로 인한 誤差는 보통 작다. 즉 누락질량으로 인한 誤差는 보통 작다. 즉 누락질량과 관련된 慣性力은 작은 변위와 應력을 발생시킨다. 그러나 배관의 支持物에 대한 荷重에 있어서는 高次의 모우드에 의한 영향이 클 수도 있다. 어떤 지지점이 完全拘束支持點으로 정의 되면 고려되는 모든 모우드에서 그 구속지지점의 集中質量은 고려되지 않기 때문에 拘束點에서의 反力은 아주 작아질 수가 있다. 왜냐하면 구속점의 剛性이 커서 固有振動數가 크기 때문이다. 따라서 배관계통의 내진해석에서 應答을 구할 때는 漏落質量效果에 대한 補正이 필요하게 된다.

### 4.1. 剛性이 큰 配管에 대한 漏落質量效果

剛性이 큰 배관계통은 地震荷重에 대해서 剛體와 같은 應答을 나타낸다. 어느 시간에 어떤 질점에 작용하는 慣性力은 질량과 해당 입력지진의 零週期加速度(zero period acceleration: ZPA)를 곱한 것과 같다. 剛性이 큰 배관이  $k$ 번째 지지점에서  $j$ 방향으로 작용하는 지진하중을 받는다면 靜的 影響係數  $\eta$ 는 單位값을 갖는다. 이것을  $\{i\}$ 로 표현하면 이에 해당하는 相關성력은

$$\{F^{kj}\}_i = [M] \{i\} (S_a^{kj})_{ZPA} \quad (16)$$

이다. 한편  $n$ 차 모우드의 相關력벡터는

$$\begin{aligned} \{F_n^{kj}\} &= \omega_n^2 [M] [\phi_n] Y_n^{kj} \\ &= [M] [\phi_n] [\phi_n]^T [M] \{i\} (S_a^{kj})_{ZPA} \end{aligned} \quad (17)$$

이므로  $N$ 차 모우드까지 고려한 結果의 相關력은 다음과 같다.

$$\{F^{kj}\}_s = \sum_{n=1}^N \{F_n^{kj}\} \quad (18)$$

따라서 剛性이 큰 배관계통에 대해서는

$$\begin{aligned} \{F^{kj}\}_n &= \{F^{kj}\}_t - \{F^{kj}\}_s \\ &= ([M] - \sum_{n=1}^N [M][\phi_n][\phi_n]^T [M]) \{i\} \\ & \quad (S_a^{kj})_{ZPA} \end{aligned} \quad (19)$$

로 주어지는 漏落質量效果를 고려할 수 있다. 그러나 실제로는 강성이 큰 배관에 대해서는 靜的 等價荷重에 의한 靜的 解析으로 최대응답을 구하기 때문에 모우드해석이 잘 사용되지 않는다.

#### 4.2. 힘성이 큰 배관에 대한 漏落質量效果

힘성이 큰 배관의 해석에서 고려하는 모우드의 수가 제한되면 무시되는 모우드는 일반적으로 剛體와 같이 振幅이 작은 모우드에 해당된다. 따라서 이러한 배관에 대해서도 식 (19)를 적용하여 누락질량효과를 결정할 수 있다. 이때에는 단위백터  $\{i\}$ 와 零週期加速度  $(S_a^{kj})_{ZPA}$  대신  $\{i\}$ 와 차단 진동수에 해당하는 加速度스펙트럼값  $(S_a^{kj})_{COF}$ 를 사용해야 한다. 이와 같이 할 수 있는 가정은 차단 진동수 이상의 모우드는 아주 큰 진동수를 갖는다 생각할 수 있기 때문이다.

결국 힘성이 큰 배관에 대한 누락질량효과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{F^{kj}\}_n &= ([M] - \sum_{n=1}^N [M][\phi_n][\phi_n]^T [M]) \{i\} \\ & \quad (S_a^{kj})_{COF} \end{aligned} \quad (20)$$

### 5. 解析의 實例 및 考察

그림 1과 그림 2의 두 배관계통을 해석모델로 하였다. 이 해석모델로서 실제 耐震解析을 수행하여 여러 가지의 應答組合結果를 비교하였다. 또 배관의 응력과 지지물의 하중에 미치는 누락질량효과를 검토하였다.

그림 1의 해석모델에서는 건물벽의 貫通地點과 탱크의 노즐부위를 完全拘束支持點으로 모델링하고, 그림 3과 4와 같이 應答스펙트럼으로 주어진 減衰率 1%의 運轉基準地震을 적용하였다. 그리고 그림 2의 해석모델은 2개의 루우프를 갖는 原子爐冷却材系統의 배관으로서 原子

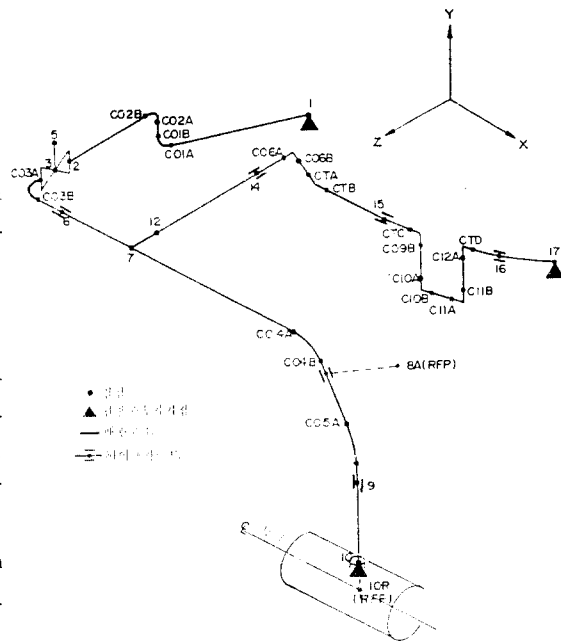


그림 1 配管系統의 解析모델 No. 1

爐容器, 蒸氣發生器, 冷却材펌프등은 배관으로 모델링하였다. 입력지진으로서는 그림 5와 6과 같이 應答스펙트럼으로 주어진 減衰率 2%의 운전기준지진을 적용하였다. 한편 내진해석을 위한 電算프로그램은 SUPERPIPE를 사용하였다.

두 해석모델의 고유진동수를 표 1에 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 33Hz 이하의 고유진동수를 갖는 모우드가 해석모델 No. 1에서는 11개, 해석모델 No. 2에서는 25개가 존재한다. 또 서로 이웃하는 모우드의 고유진동수가 10%내에서 접근되어 있는 모우드는 각각 7개, 21개이고 3개 및 6개의 그룹이 있다. 이와 같이 일반적으로 배관의 배치구조가 복잡할수록 접근된 모우드의 존재가능성이 크다.

표 2와 3에는 支持點간의 應答조합結果를 나타내었다. 이 표로부터 自乘平均法에 의한 조합結果는 絕對합에 의한 결과보다 해석모델 No. 1의 경우에는 약 10%, 해석모델 No. 2의 경우에는 약 30%가 작게 나타나고 있음을 알 수 있

◆ 解 說

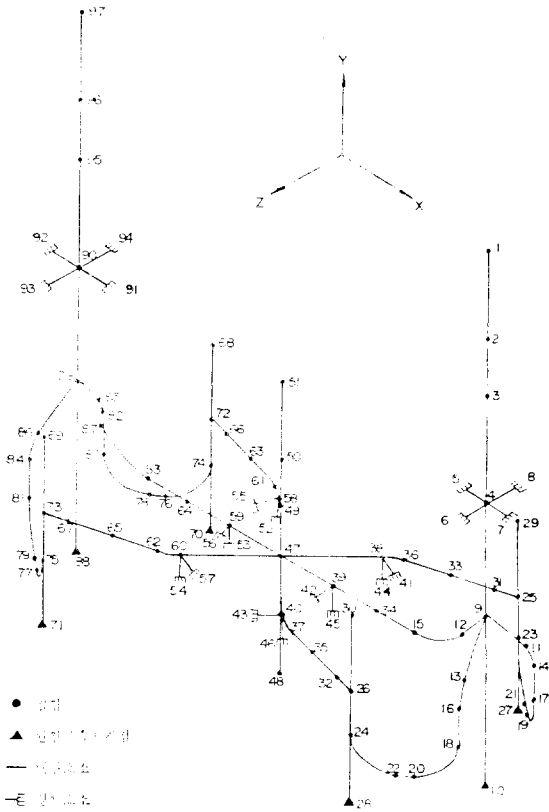


그림 2 配管系統의 解析모델 No. 2

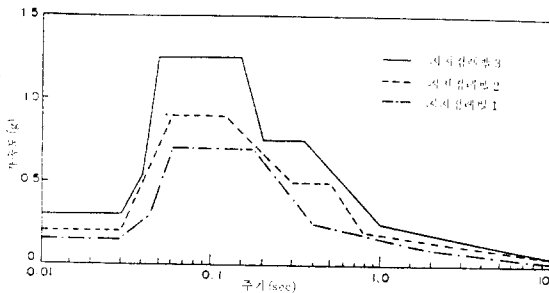


그림 3 解析모델 No. 1에 대한 水平方向의 層應答스펙트럼(減衰率 1%)

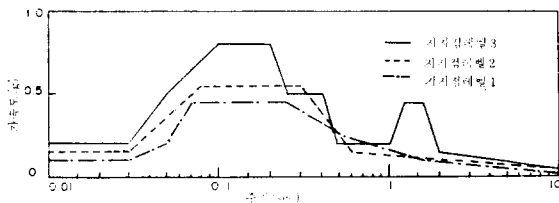


그림 4 解析모델 No. 1에 대한 垂直方向의 層應答스펙트럼(減衰率 1%)

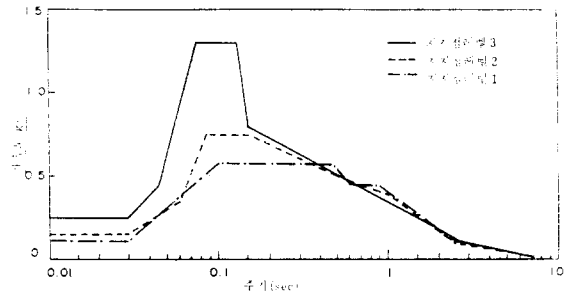


그림 5 解析모델 No. 2에 대한 水平方向의 層應答스펙트럼(減衰率 2%)

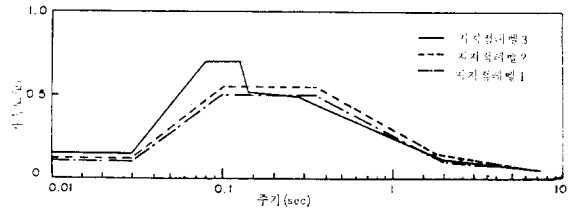


그림 6 解析모델 No. 2에 대한 垂直方向의 層應答스펙트럼(減衰率 2%)

표 1 解析모델 No. 1 및 No. 2에 대한 33Hz 이하의 固有振動數

解析모델 No. 1		解析모델 No. 2	
모우드	固有振動數 (Hz)	모우드	固有振動數 (Hz)
1	5.971	1	6.142
2	14.048	2	6.241
3	15.521	3	6.539
4	18.454	4	6.587
5	19.661	5	6.609
6	22.456	6	6.860
7	22.861	7	7.979
8	25.727	8	10.051
9	28.891	9	10.422
10	29.903	10	11.864
11	30.703	11	13.569
		12	14.173
		13	14.282
		14	14.511
		15	15.574
		16	15.750
		17	18.843
		18	19.136
		19	28.090
		20	28.833
		21	29.551
		22	30.111
		23	30.424
		24	30.636
		25	31.497

다. 따라서 각 지지점에서 서로 다르게 작용하는 입력지진들이 統計적으로 獨立的이라는 확실한 근거가 없을 때는 설계의 안전성을 위하여 지지점사이의 응답조합은 絶對합에 의한 방법으로 수행하는 것이 바람직하다.

配管系統의 耐震解析에 따른 應答組合과 漏落質量效果

표 2 解析모델 No. 1의 支持點에 대한 應答組合結果

節點番號	絶對合方法 (ASUM)	自乘平均法 (SRSS)	應力比 (SRSS/ASUM)
1	1018.61psi	848.21 psi	0.8327
C02B	1110.28	948.11	0.8539
C04B	1484.03	1322.89	0.8914
7	3002.19	2523.09	0.8404
10	833.41	730.55	0.8766
14	1756.01	1679.64	0.9565
15	1735.76	1669.65	0.9619
C10A	917.69	777.12	0.8468
C11A	974.00	835.01	0.8573
17	2293.00	2068.49	0.9021
平均値			0.8973

표 3 解析모델 No. 2의 支持點에 대한 應力의 應答組合結果

節點番號	絶對合方法 (ASUM)	自乘平均法 (SRSS)	應力比 (SRSS/ASUM)
14	4755.42 psi	3253.44 psi	0.6842
15	2061.87	1475.80	0.7158
20	3200.03	2299.61	0.7186
33	6399.73	4543.77	0.7100
35	6829.51	4951.81	0.7251
58	4391.27	3087.28	0.7034
61	2165.47	1534.91	0.7088
76	3472.43	2364.56	0.6810
83	2273.88	1619.83	0.7124
84	5439.95	3775.58	0.6940
平均値			0.7012

또 표 4와 5에는 모우드에 대한 응답조합결과를 나타내었다. 표에서 보면 Grouping 방법에 의한 결과를 기준으로 하였을 때 自乘平均法이나 Double Sum 방법에 의하여 조합한 결과는 약간 작게 나타나고 있으며 Ten Percent 방법이나 絶對合方法에 의한 조합결과는 크게 나타나고 있다. 그러나 절대합에 의한 조합결과는 너무 補守的으로 조합되므로 실제 설계에 있어서는 잘 이용되지 않고 있다. 이와 같은 모우드응답의 조합방법은 먼저 고유진동수와 모우드해석

표 4 解析모델 No. 1의 모우드에 대한 應力의 應答組合結果

節點番號	Grouping方法	自乘平均法	Double Sum方法	Ten Percent方法	絶對合方法
1	1.0	0.9075	0.9412	1.0023	1.7290
C02B	1.0	0.9054	0.9353	1.0006	1.7208
C04B	1.0	0.8558	0.9030	1.0002	1.5618
7	1.0	0.9642	0.9912	1.0015	1.8574
10	1.0	0.8899	0.9248	1.0027	1.8836
14	1.0	0.9839	0.9916	1.0041	1.2987
15	1.0	0.9942	0.9971	1.0010	1.2067
C10A	1.0	0.8270	0.9408	1.0116	1.8002
C11A	1.0	0.8298	0.9382	1.0065	1.7237
17	1.0	0.8490	0.9464	1.0001	1.1251
平均値	1.0	0.9208	0.9574	1.0020	1.5525

표 5 解析모델 No. 2의 모우드에 대한 應力의 應答組合結果

節點番號	Grouping方法	自乘平均法	Double Sum方法	Ten Percent方法	絶對合方法
14	1.0	0.7321	0.9089	1.0321	1.2739
15	1.0	0.8423	0.9437	1.0035	1.2287
20	1.0	0.7395	0.9593	1.1089	1.2817
33	1.0	0.7878	0.9196	1.0217	1.3612
35	1.0	0.7763	0.9365	1.0424	1.3804
58	1.0	0.9096	0.9985	1.0171	1.7248
61	1.0	0.8677	0.9797	1.0050	1.6424
76	1.0	0.7788	0.9357	1.0237	1.2656
83	1.0	0.8554	0.9507	1.0020	1.2200
84	1.0	0.7576	0.9192	1.0316	1.2313
平均値	1.0	0.8040	0.9421	1.0298	1.3413

으로부터 얻은 결과를 검토한 후에 결정되어야 하며 접근된 모우드의 수가 많으면 모우드간의 응답조합은 Grouping 방법에 의하여 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 접근된 모우드가 없는 경우에는 절대합에 의한 방법을 제외한 다른 어떤 방법으로 조합하여도 조합결과에 있어서의 큰 차이는 없다.

표 6과 7에는 해석모델 No. 1에 대하여 모우드해석에서 고려하는 모우드의 수를 제한 함으로 인하여 생기는 오차를 보정하기 위한 漏落質量

◆ 解 說

효과를 나타내었다. 표 6 은 應力에 대한 누락질량효과로서 차단주파수 33Hz 이하의 11개 모우드를 전부 고려한 경우에는 누락질량의 영향이 작으나 5개의 모우드만 고려한 경우는 보다 크게 나타나고 있다. 이것은 5개의 모우드를 고려할 때 고려되지 않은 6차에서부터 11차까지 모우드의 영향보다는 차단진동수에 해당하는 층응답가속도의 영향이 크기 때문이다. 그러나 표 7 의 지지물하중에 대한 漏落質量효과를 보면 應力에 미치는 영향보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 11차 모우드까지 고려한 경우로서 누락질량

효과를 감안하지 않았을 때의 지지점 1, 6, 10 의 Z 방향과 지지점 15 의 Y 방향의 하중은 감안했을 때보다 30%이상이나 작게 계산되었다. 5차

표 7 解析모델 No. 1 의 支持物 荷重에 대한 漏落質量效果

支持點 番 號	方 向	11차 모우드까 지 고려		5차 모우드까 지 고려	
		누락질량 효과 고려함	누락질량 효과 고려안함	누락질량 효과 고려함	누락질량 효과 고려안함
1 (完全拘束點)	X	1.0	0.9591	1.7239	0.8279
	Y	1.0	0.9901	2.0086	0.6315
	Z	1.0	0.6878	3.1139	0.6544
6	Y	1.0	0.8018	2.5339	0.7178
	Z	1.0	0.5655	3.9446	0.2904
10 (完全拘束點)	X	1.0	0.8322	2.3282	0.7686
	Y	1.0	0.8338	2.1454	0.8329
	Z	1.0	0.6589	3.3264	0.6488
15	X	1.0	0.9649	1.5879	0.9137
	Y	1.0	0.6024	2.4486	0.1525
	Z	1.0	0.9638	1.5893	0.9153
17 (完全拘束點)	X	1.0	0.7783	2.1502	0.2436
	Y	1.0	0.9800	1.4015	0.4000
	Z	1.0	0.9894	0.7099	0.0569
平均 值	X	1.0	0.8288	2.3983	0.5609
	Y	1.0	0.8065	2.0005	0.6140
	Z	1.0	0.7946	2.5257	0.5048

표 6 解析모델 No. 1 의 應力에 대한 漏落質量效果

節 點 番 號	11차 모우드까지 고려		5차 모우드까지 고려	
	누락질량 효과 고려함	누락질량 효과 고려안함	누락질량 효과 고려함	누락질량 효과 고려안함
1	1.0	0.9893	1.5372	0.8226
C02B	1.0	0.9954	1.2616	0.9110
C04B	1.0	0.9993	1.5863	0.7610
7	1.0	0.9929	1.2922	0.9083
10	1.0	0.9547	1.6543	0.8848
14	1.0	0.9925	1.2014	0.9602
15	1.0	0.9992	1.0397	0.9869
C10A	1.0	0.9697	1.3437	0.4222
C11A	1.0	0.9714	1.2911	0.5070
17	1.0	0.9998	0.7821	0.6397
平均 值	1.0	0.9825	1.3685	0.8362

표 8 解析모델 No. 2 의 應力에 대한 漏落質量效果

節 點 番 號	25차 모우드까지 고려		18차 모우드까지 고려		9차 모우드까지 고려	
	누락질량 효과 고려함	누락질량 효과 고려안함	누락질량 효과 고려함	누락질량 효과 고려안함	누락질량 효과 고려함	누락질량 효과 고려안함
14	1.0	0.9999	0.9990	0.9987	0.9933	0.9813
15	1.0	1.0000	1.0006	1.0000	1.0347	0.6919
20	1.0	1.0000	0.9995	0.9993	0.9968	0.9836
33	1.0	1.0000	1.0000	0.9999	0.9297	0.8572
35	1.0	1.0000	1.0000	0.9999	0.8997	0.8340
58	1.0	1.0000	1.0005	0.9999	0.8336	0.6455
61	1.0	1.0000	1.0005	0.9999	0.7046	0.4157
76	1.0	1.0000	1.0003	0.9999	0.9799	0.9696
83	1.0	1.0000	1.0005	0.9999	1.0355	0.7593
84	1.0	0.9999	0.9992	0.9989	0.9948	0.9856
平均 值	1.0	1.0000	1.0008	0.9995	0.9851	0.8938

配管系統의 耐震解析에 따른 應答組合과 漏落質量效果

표 9 解析모델 No. 2의 支持物 荷重에 대한 漏落質量效果

節點 番號	方 向	25차 모우드까지 고려		18차 모우드까지 고려		9차 모우드까지 고려	
		누락질량효과 고려함	누락질량효과 고려안함	누락질량효과 고려함	누락질량효과 고려안함	누락질량효과 고려함	누락질량효과 고려안함
4	X	1.0	0.9986	1.0084	0.9986	1.1798	0.8820
	Z	1.0	0.9975	1.0150	0.9975	1.0824	0.9970
27 (完全拘束點)	X	1.0	1.0000	1.0002	0.9999	1.0399	0.9696
	Y	1.0	1.0000	0.9788	0.9008	1.1036	0.6206
	Z	1.0	1.0000	0.9992	0.9984	1.0006	0.9933
40	X	1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0281	0.8588
	Y	1.0	1.0000	1.0441	0.9683	0.8731	0.3267
	Z	1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0281	0.8588
59	Y	1.0	1.0000	1.1817	0.8512	1.6267	0.3920
	Z	1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.1829	0.5505
71 (完全拘束點)	X	1.0	1.0000	1.0002	0.9999	1.0180	0.9694
	Y	1.0	1.0000	0.9276	0.8693	1.0084	0.6401
	Z	1.0	1.0000	0.9997	0.9994	0.9989	0.9954
平 均 值	X	1.0	0.9996	1.0025	0.9996	1.0726	0.9101
	Y	1.0	0.9974	1.0516	0.9355	1.1161	0.4063
	Z	1.0	0.9995	1.0030	0.9992	1.0436	0.8953

모우드까지만 고려할 때는 누락질량효과가 더욱 크게 나타났다.

한편 표 8과 9에는 해석모델 No. 2에 대한 누락질량효과를 나타내었다. 해석모델 No. 2에는 고유진동수가 33Hz 이하인 모우드가 25개 있는데 9차, 18차, 25차까지의 모우드를 고려한 세 경우를 나타내었다. 표 8을 보면 應力에 미치는 漏落質量效果는 별로 크지 않다. 단지 9차의 모우드까지만 고려한 경우 節點 番號 15, 18, 61에서만 그 영향이 다소 클 뿐이다. 또 표 9의 支持物 荷重에 대한 누락질량효과는 응력에 대한 영향보다는 크지만 고려하는 모우드의 수에 따라 별로 큰 영향이 없고 9차 모우드까지만 고려했을 때의 Y방향 하중만이 다소 큰 영향을 받고 있다. 이것은 해석모델 No. 1과는 달리 고려되지 않는 모우드의 영향이나 차단진동수에 해당하는 層應答加速度的 영향이 서로 거의 같기 때문이다.

이와 같이 모우드해석에 의한 배관의 耐震解析時 漏落質量效果는 應力보다는 支持物 荷重에

서 더 크게 나타나고 있다. 따라서 漏落質量效果를 고려함으로써 應力에 대한 補正이 가능하고, 지지물에 대해서도 보다 안전한 설계를 할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

### 6. 맺음 말

이상에서 配管系統의 耐震解析時 사용되는 應答組合方法과 漏落質量效果에 대하여 살펴 보았다. 應答의 組合에 있어서는 배관의 動的 特性과 입력지진의 특성에 따라 적절한 방법으로 수행하고 漏落質量效果를 고려하여 應力이나 支持物 荷重에 대한誤差를 보정하는 것이 바람직하다.

### 참 고 문 헌

- (1) 李 凡洙, 金 容成, “多支持 配管系統의 耐震解析”, 大韓機械學會誌, 第24卷 第3號, pp. 188~192, 1984

(303 페이지에 계속)