

# 多支持 配管系統의 耐震解析

李凡洙 · 金容成

<한국에너지연구소 원자로계통 연구실>

## 1. 序 論

原子力發電所의 配管系統은 고도의 安全性 및 信賴性을 確保하여야 하며, 이를 위하여 設計의 初期段階에서부터 여러 가지의 外部에서 작용하는 荷重에 대한 構造的인 安全性을 證明하여야 한다. 최근에는 여러 外部荷重 가운데서 특히 地震에 대한 構造物의 安全性解析이 요구되고 있다.

配管系統의 耐震解析을 위한 方法으로는 時間履歷曲線(time history)에 의한 方法, 單應答스펙트럼(single response spectrum)에 의한 方法 그리고 多應答스펙트럼(multiple response spectrum)에 의한 方法이 있다. 이 가운데서 가장 실제에 가까운 解析結果를 얻기 위해서는 入力地震에서 位相差가 고려되는 時間履歷曲線에 의한 方法이 타당하지만 計算을 위한 入力데이터의 준비, 計算등에 있어서 많은 時間, 努力, 經費가 소요되는 단점이 있다. 따라서 일반적으로 配管系統의 耐震解析은 層應答스펙트럼(floor response spectrum)에 의한 方法으로 수행한다.

配管系統은 건물의 여러 곳에서 支持되고 있으므로 耐震解析을 위해서는 먼저 각 支持點에서의 入力地震이 정의되어야 하며, 이는 보통 직교되는 세 방향의 加速度 應答스펙트럼으로 나타낼 수 있다.

지금까지는 配管의 耐震解析을 위하여 모든 支持點에서 같은 入力地震이 동시에 작용한다는 개념에서 單應答스펙트럼에 의한 方法이 이용되

어 왔다. 이 때 사용하는 入力地震의 應答스펙트럼은 모든 入力地震을 包括하는 스펙트럼(enveloped response spectrum)이나 가장 높은 위치의 支持點에 작용하는 스펙트럼이다. 그러나 이 方法에서는 각 支持點 및 각 方向에 따라 작용하는 入力地震들 사이의 位相差가 고려되지 않는다.

그런데 각 支持點에서 入力되는 地震荷重은 均一하지 않기 때문에 최근에 와서는 보다 실제에 가까운 地震에 의한 應答를 얻기 위해서 多應答스펙트럼에 의한 方法이 이용되고 있다. 이 方法에서는 각 支持點에 작용하는 실제의 入力地震을 사용하지만 여기에서도 位相差는 고려되지 않는다.

本 解說에서는 多應答스펙트럼 方法에 대한 解析理論을 고찰하고, 실제 해석에로서 같은 解析 모델에 대하여 單應答스펙트럼에 의한 方法과 多應答스펙트럼에 의한 方法으로 解析하여 그 結果를 비교 검토하였다.

## 2. 解析理論

配管系統의 각 支持點에서 均一하지 않는 入力地震荷重在 작용할 때 配管系統의 舉動을 支配하는 일반적인 運動方程式은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서

$X_a, X_s$  : 支持되지 않는 地點과 支持點에서의 變位벡터

$M_a, M_s$  : 支持되지 않는 地點과 支持點에서의 集中質量에 대한 對角線行列

$C, K$  : 減衰行列 및 剛性行列

$C_{as}, K_{as}$  : 支持點의 運動으로 인한 支持되지 않는 自由度에서의 커플링(coupling)된 힘을 나타내는 減衰行列 및 剛性行列

$F_s$  : 支持點에서의 反力벡터

식 (1)에서 減衰行列과 剛性行列은 對稱行列이므로  $C_{as}=C^{T_{as}}, K_{as}=K^{T_{as}}$ 이다.

식 (1)을 分離하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} [M_a]\{\ddot{X}_a\} + [C_a]\{\dot{X}_a\} + [K_a]\{X_a\} \\ = -[C_{as}]\{\dot{X}_s\} - [K_{as}]\{X_s\} \end{aligned} \quad (2)$$

원자력발전소의 系統 및 部品の 地震이나 다른 動的荷重에 대한 健全性 解析時 構造物에 발생된 應力은 ASME sec. III code에서 1次 應力과 2次 應力으로 나누어 檢討하도록 하고 있다.

$\{X^a\}$ 와  $\{X^s\}$ 를 각각 動的變位, 靜的(pseudostatic)變位라하면 이로 인한 應力들은 1次 및 2次 應力으로 분류된다. 2次 應力은 構造物 部材들 상호간에 自家拘束되고,  $\{X^a\}$ 에 의한 應力狀態는 慣性力에 의한 平均狀態가 고려되는 運動方程式이 성립한다.

따라서 全體變位는

$$\{X_a\} = \{X_a^d\} + \{X_a^s\} \quad (3)$$

와 같이 쓸 수 있고,  $\{X_a^s\}$ 는 식 (2)로부터 쉽게 구해진다.  $[H_{as}] = -[K_a]^{-1}[K_{as}]$ 를 靜的影響係數行列(pseudostatic influence matrix)이라 하면

$$\{X_a^s\} = -[H_{as}]\{X_s\} \quad (4)$$

系統이 Rayleigh 減衰에 지배된다고 가정하고, 식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하면

$$\begin{aligned} [M_a]\{\ddot{X}_a^d\} + [C_a]\{\dot{X}_a^d\} + [K_a]\{X_a^d\} \\ = -[M_a][H_{as}]\{\dot{X}_s\} \end{aligned} \quad (5)$$

가 된다.

系の 모우드形狀(mode shape)  $\phi$ 와 固有振動數  $\omega$ 를 非減衰 自由振動 方程式으로부터 구하면  $N$ 次 모우드까지 고려한 解는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{X_a^d\} = \sum_{n=1}^N [\phi_n] Y_n(t) \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하고  $\phi^T$ 를 곱하면

$$M_n^* \ddot{Y}_n + C_n^* \dot{Y}_n + K_n^* Y_n = \Gamma_n \{X_s\} \quad (7)$$

여기서  $M_n^*, C_n^*, K_n^*$ 는 각각 일반화된 質量行列, 減衰行列, 剛性行列이고  $\Gamma_n$ 은 모우드參與係數(modal participation factor)라 하며 다음과 같이 표현된다.

$$M_n^* = [\phi_n]^T [M_a] [\phi_n] \quad (8a)$$

$$C_n^* = [\phi_n]^T [C_a] [\phi_n] = 2 \xi_n \omega_n M_n^* \quad (8b)$$

$$K_n^* = [\phi_n]^T [K_a] [\phi_n] = \omega_n^2 M_n^* \quad (8c)$$

$$\Gamma_n = -[\phi_n]^T [M_a] [H_{as}] \quad (8d)$$

식 (7)로부터  $k$ 번째 支持點에서 작용하는  $i$ 방향의 入力地震으로 인한  $n$ 次的 모우드應答을  $Y_n^{ki}$ 라고 하면

$$\begin{aligned} \ddot{Y}_n^{ki} + 2 \xi_n \omega_n \dot{Y}_n^{ki} + \omega_n^2 Y_n^{ki} \\ = - \frac{\Gamma_n^{ki}}{M_n^*} \ddot{X}_s^{ki} \end{aligned} \quad (9)$$

을 얻을 수 있고, 이 식으로부터 解를 구할 수 있다.

일반적으로 사용되는 入力地震은 각 支持點 및 方向別로 減衰率  $\xi_n$ 와 固有振動數  $\omega_n$ 에 따른 加速度 應答스펙트럼으로 주어지므로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$S_a = S_a^{ki}(\xi_n, \omega_n) \quad (10)$$

따라서  $n$ 次 모우드의 最大變位應答은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_n^{ki \max} &= |Y_n^{ki \max}| \\ &= \left| \frac{\Gamma_n^{ki}}{\omega_n^2 M_n^*} S_a^{ki}(\xi_n, \omega_n) \right| \end{aligned} \quad (11)$$

入力地震이 作用하는 각 支持點과 方向에 따른 應答의 組合은 각 入力地震들의 統計的인 特性에 따라서 각각 적절한 方法으로 수행한다. 일반적으로 方向成分에 대한 應答組合은 自乘平均法(the square root of the sum of the squares method)을 사용하고, 支持點들에 대해서는 自乘平均法과 絕對合(absolute sum)에 의한 方法으로 組合한다.

$$Y_n \max = \left\{ \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^m (Y_n^{ki \max})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

## ■ 解 說

$$Y_n \max = \left[ \sum_{i=1}^3 \left\{ \sum_{k=1}^m |Y_n^{ki} \max| \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

또 각 모우드의 應答組合은 USNRC Regulatory Guide 1.92 에 주어진 方法에 따라서 수행한다.

### 3. 解析의 實例

多支持 配管系統의 耐震解析에 대한 實例를 보이기 위한 解析모델은 그림 1, 2 와 같고 解析 모델에 대한 자료는 표 1 에 주어져 있다.

해석을 위한 전산프로그램은 原子力配管解析

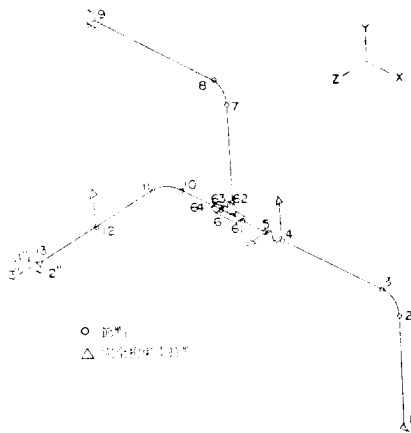


그림 1 配管系統의 解析모델 No. 1

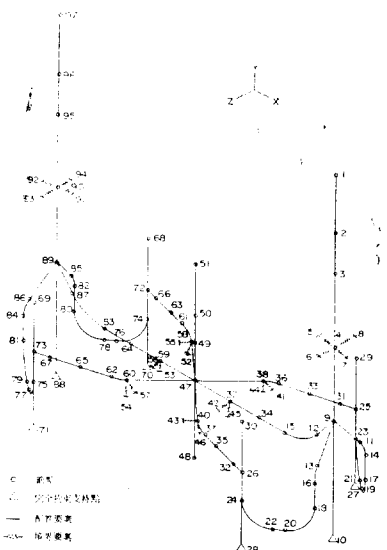


그림 2 配管系統의 解析모델 No. 2

표 1 解析모델의 基本資料

配管系統	모델 No.1	모델 No.2
節點數	17	97
質量作用點의數	17	77
應力의出力數	19	89
支持物의數	6	26
支持物의그룹數	3	3
地震成分	2-Horizontal 1-Vertical	2-Horizontal 1-Vertical
33 Hz 以下의固有振動數를 갖는 모우드의數	9	25
減衰率(%)	1.0	2.0

用인 SUPERPIPE 를 사용하였다.

두 解析모델에 대하여 單應答스펙트럼에 의한 方法과 多應答스펙트럼에 의한 方法으로 解析하여 그 結果를 비교 검토하였다. 解析모델 No. 1 에 대하여는 地震에 의한 慣性力과 支持點에 發生하는 變位로 인한 荷重을 고려하였다. 解析모델 No. 2 는 原子爐 冷却材系統의 配管으로서 原子爐容器, 蒸氣發生器, 냉각제 펌프는 배관으로 모델링 하였으며 地震으로 인한 慣性力만을 고려하였다.

또 應答의 組合은 支持點에 대해서는 自乘平均法으로, 모우드에 대해서는 Grouping 方法으로 수행하였다.

표 2 에는 解析모델 No. 1 에 대하여 地震慣性力만을 고려한 解析結果를 나타내었으며, 표 3 에는 地震慣性力과 支持點의 變位를 동시에 고려한 結果를 나타내었다. 표 2 에서 보면 單應答스펙트럼에 의한 結果는 多應答스펙트럼方法에 의한 結果의 약 2 배로 크게 나타났다. 그러나 표 3 의 結果는 표 2 의 結果보다는 다소 작게 해

표 2 地震慣性力만을 고려한 解析모델

節點番號	單應答스펙트럼解析	多應答스펙트럼解析	應力比 (S.R./M.R.)
1	6673.49	3313.30	2.0142
3	2624.76	1293.92	2.0285
9	5373.63	2697.88	1.9918
11	3262.70	1579.41	2.0658
13	2713.50	1346.70	2.0149

註: 應力의 單位 [psi]

표 3 地震慣性力과 支持點 移動을 고려한 解析모델 No. 1의 應力

節點番號	單應答스펙트럼 解析			多應答스펙트럼 解析			應力比 ( $\frac{S.R.}{M.R.}$ )
	地震慣性力	支持點移動	全體應力	地震慣性力	支持點移動	全體應力	
1	6673.49	1108.01	6764.85	3313.30	1108.01	3493.65	1.9363
3	2624.76	981.50	2802.27	1293.92	981.50	1624.06	1.7255
9	5373.63	1379.56	5547.89	2697.88	379.56	3030.14	1.8309
11	3262.70	1857.44	3754.37	1579.41	1857.44	2438.16	1.5398
13	2713.50	3581.61	4493.44	1346.70	3581.61	3826.43	1.1743

註: 應力の 單位 [psi]

표 4 地震慣性力만을 고려한 解析모델 No. 2의 應力

節點番號	單應答스펙트럼 解析	多應答스펙트럼 解析	應力比 (S.R./M.R.)
14	1876.89	3253.44	0.5769
15	1937.44	1475.80	1.3128
20	1959.31	2299.61	0.8520
33	4901.31	4543.77	1.0787
35	5769.86	4951.81	1.1652
63	3754.33	2707.08	1.3869
65	5742.47	6314.94	0.9093
83	1935.39	1619.83	1.1948
84	1989.31	3775.58	0.5269

註: 應力の 單位 [psi]

석도있음을 알 수 있다. 그것은 支持點에서의 變位로 인한 應力은 두 경우 즉 單應答스펙트럼 方法에 의한 解析이나 多應答스펙트럼 方法에 의한 解析에서 꼭 같기 때문이다. 慣性力으로 인한 1次應力과 支持點의 變位로 인한 2次應力은 自乘平均法으로 組合되며, 2次應力은 變位の 發生位置에서 가장 크고 配管의 形狀에 따라 다르지만 일반적으로 멀어질수록 작아진다.

또 표 4 에는 解析모델 No. 2 에 대한 解析結果를 나타내었다. 표 4 에서 보는 바와 같이 어떤 節點에서는 單應答스펙트럼 方法에 의한 解析結果가 多應答스펙트럼 方法에 의한 結果보다 크게 나타났으나 다른 節點에서는 오히려 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 3 과 그림 4 에는 解析모델 No. 1 에 대하여 地震慣性力만을 고려한 경우와 地震慣性力과 支持點의 變位를 동시에 고려한 경우에 單應答

스펙트럼 方法에 의한 應力( $S_1$ )과 多應答스펙트럼 方法에 의한 應力( $S_2$ )을 서로 비교하였다. 그림 3 에서는  $\frac{S_1}{S_2} = 1.9516 \sim 2.0814$  이고 평균값은 2.0275 이다. 또 그림 4 에 나타낸 결과는  $\frac{S_1}{S_2} = 1.1743 \sim 1.9365$  이고, 평균값은 1.6972 이다. 즉 解析모델 No. 1 에 대해서는 單應答스펙트럼 方法에 의한 解析結果가 모두 크게 평가되었다.

그림 5 에는 解析모델 No. 2 에 대한 解析結果를 서로 비교하였다. 그림 5 에 나타낸 결과는

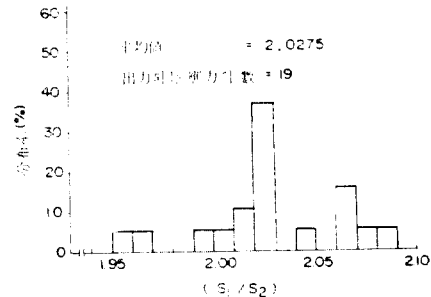


그림 3 地震慣性力만을 고려한 解析모델 No. 1 에 대한 解析結果의 比較

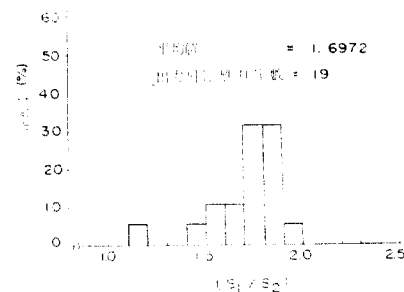


그림 4 地震慣性力과 支持點 移動을 고려한 解析모델 No. 1 에 대한 解析結果의 比較

## ■ 解 說

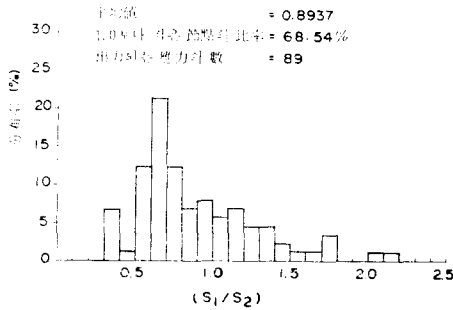


그림 5 地震慣性力만을 고려한 解析모델 No. 2에 대한 解析結果의 比較

$\frac{S_1}{S_2} = 0.3416 \sim 2.1218$  이고 평균값은 0.8937 이다. 즉 單應答스펙트럼方法에 의한 解析結果는 多應答스펙트럼方法에 의한 結果보다 최대 약 66%가 작게 나타나는 節點이 있고, 112%까지 크게 解析되는 節點이 있음을 보여주고 있다. 전체적으로 單應答스펙트럼方法에 의한 結果가 多應答스펙트럼方法에 의한 結果보다 약 11%가 작게 해석되었으며 약 68.5%에 해당하는 節點에서 작은 값으로 나타나고 있다.

## 4. 結 論

以上에서 多支持 配管系統에 대한 理論的인 耐震解析方法을 살펴보고 두 가지의 解析모델에 대하여 單應答스펙트럼에 의한 方法과 多應答스펙트럼에 의한 方法으로 耐震解析을 수행하여 그 結果를 비교 검토하였다.

配管系統의 耐震解析에 있어서 지금까지는 각 支持點에 작용하는 실제의 入力地震 應答스펙트럼曲線을 엔벨로우프(envelope)하여 모든 支持點에 가장 큰 入力地震을 작용시키는 單應答스펙트럼에 의한 方法이 이용되어 왔다. 실제 配管設計는 安全性이 고려되어야 한다. 그래서 이 解析方法이 保守的인 解析結果를 준다는 생각에서 安全設計가 가능하다고 보았다. 그러나 이 方法은 오히려 각 支持點에 해당되는 실제의 入力地震을 작용시키는 多應答스펙트럼에 의한 解析結果보다 작은 값으로 評價되는 경우도 있다. 결국 單應答 스펙트럼에 의한 解析方法이 항상 保守的인 解析結果를 주지 않음을 알 수 있다.

따라서 보다 실제값에 가까운 解析結果를 얻기 위해서는 單應答스펙트럼에 의한 方法보다는 多應答스펙트럼方法에 의한 解析이 바람직하다.

## 참 고 문 헌

- (1) K.R. Leimbach and H. Schmid; "Automated Analysis of Multiple-Support Excitation Piping Problems", Nucl. Eng. Design, Vol. 51, pp.245~252, 1979
- (2) C. Sundararajan, A.K. Vaish, and G.C. Slagis, "Seismic Analysis of Piping Systems Subjected to Multiple Support Excitations", ASME Paper No. 81-WA/PVP-2, 1981
- (3) R.W. Wu, F.A. Hussain, and L.K. Liu, "Seismic Response Analysis of Structural System Subjected to Multiple Support Excitation", Nucl. Eng. Design, Vol. 47, pp.273~282, 1978
- (4) K.M. Vashi, "Seismic Analysis of Structural Systems Subjected to Nonuniform Excitation at Supports", 2nd ASCE Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Power Plant Facilities, pp.188~216 1975
- (5) L.E. Shipley, "Seismic Analysis of Piping Systems", BP-TOP-1, Rev. 3, Bechtel Power Corporation, Jan, 1976
- (6) E.L. Wilson and J. Penzien, "Evaluation of Orthogonal Damping Matrices", Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 4, pp.5~10, 1972
- (7) R.W. Clough and J. Penzien, "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, New York, 1982
- (8) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, 1983 edition.
- (9) "SUPERPIPE—A Computer Program for Structural Analysis and Code Compliance Verification of Piping Systems", Impell Corp., User's Manual, Jun. 1982
- (10) USNRC Regulatory Guide 1.92, "Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Analysis", Feb. 1976