

# 産業플랜트 配管系統의 解析 및 設計시스템 開發에 關한 研究

柳鍾烈\* · 崔暢根\*\* · 李鍾元\* · 吳在華\*\*

## A Study on the Development of the Computer Aided Analysis and Design System of the Piping Networks of Industrial Plants

Chong Yul Yoo, Chang Koon Choi, Chong Won Lee and Jae Wha Oh

### Abstract

A new computer system for the stress analysis and design of piping network has been developed in this study. For the stress analysis, the system utilizes the finite element technique in which the frontal technique is used as the equation solver. The element library of the system has (1) Pipe Element (2) Beam Element, (3) Hanger Element and (4) Spring Element which should be sufficient to model the entire piping system including flexible supports, joints, piping rack and hangers. Based on the element stresses, code check has been performed and the safety factor for each element is calculated.

### 1. 序 論

近代重化學 플랜트(石油 및 그 系列工場, 化工工場等), 大型船舶(유조선) 및 지역난방 시스템 등은 복잡한 配管系統(Piping Network)으로 구성되어 있으며 이 配管系統이 全體 플랜트에서 차지하는 比重은 상당히 높다. 그러므로 自重, 外力, 內壓 및 溫度變化에 따른 시스템 全體의 正確한 應力解析에 立脚한 플랜트 配管系統의 最適設計가 매우 바람직하다. 그러나 從來의 통상적인 방법에 의한 應力解析은 局地的인 解析에 그치는 경우가 많아 全體 시스템에 대한 一括構造解析이 不可能하여 正確한 應力分布를 얻기 어려웠다.

1960年代 Computer 기술의 급속한 발전과 이에 併行한 有限要素法(Finite Element Method)의 급속한 발전은 構造解析分野에 劃期的인 變革을 가져 왔으며 여태까지 正確한 應力解析이 不可能했던 복잡한 構造시스템의 解析도 이 方法에 의해 신빙성있는 應力解析이 可能하게 되었다. 통상적인 방법에 의해서는 해결이 어려

웠던 복잡한 配管系統의 應力解析도 이 有限要素法에 의해서는 적절히 解決될 수 있게 되었다.

### 2. 有限要素法에 依한 應力解析

오늘날 有限要素法의 一般的인 理論은 이미 널리 알려져 있고 (1, 2, 3, 4) 또 實問題에도 널리 活用되고 있어서 그 理論을 여기서 詳細하게 再論할 必要는 없다. 따라서 本論과 관계있는 部分만 略述하기로 한다.

#### 2.1. Modeling

有限要素法에 依한 配管系統(Piping Network System)의 應力解析에 있어 有限要素法에 적합하도록 Modeling 하는 것이 우선 必要하다. 全體 配管系統의 Modeling 에는 다음과 같은 형태의 要素들이 必要하게 된다.

- 1) Pipe Element
- 2) Beam Element
- 3) Hanger Element
- 4) Spring Element

Pipe Element 는 System 의 核心的인 Element로서 直管(Straight Pipe) 및 曲管(Curved Pipe) Element

\*正會員, 陸軍士官學校

\*\*陸軍士官學校

토 이루어지며 管의 연결부분이나 Valve 등은 그 영향이 작은 때는 무시할 수 있다. Beam Element는 配管系統을 支持하는 Support나 Piping Rack를 Modeling하는데 사용되며, Hanger Element는 Piping System은 위에서 支持하는 Hanger의 Modeling에 사용된다. 그리고 Spring Element는 配管系統의 끝 부분의 Flexible Boundary에서 사용되며 특히 끝 부분의 變位를 지정하는데 有用하다. 以上の 4種의 Element로서 支持 Rack, Hanger 등을 包含하는 全體 시스템을 完全하게 Modeling 할 수 있다.

2.2. Element Stiffness Matrix의 계산

Pipe Element는 Beam Element의 특수한 경우로 생각할 수 있고 그 Stiffness Matrix의 유도는 Beam Element의 Stiffness Matrix와 같은 개념으로 구해진다(6). 즉 공간내의 任意의 方向을 가진 Pipe Element는 局部座標系(Local Coordinate System)에서 各節點(Node)에서의 6自由度(Degree of Freedom)에 따른 12×12의 Stiffness Matrix "K"를 구한다. 이 때 Piping System의 熱應力의 重要性에 비추어 溫度變化에 따른 項(Term)이 包含되며 內壓에 의한 Hoop Stress의 영향도 고려된다. 즉 Stiffness Matrix는 다음과 같은 Stress-Strain 관계에 立脚해서 유도되어야 한다.

$$\sigma = D(\epsilon_E - \epsilon_0) \tag{1}$$

여기서  $\sigma$ =Stress

$D$ =Stress-Strain 관계를 나타내는 Matrix

$\epsilon_E$ =탄성변형에 따른 Strain

$\epsilon_0$ =온도변화 및 Hoop Stress에 따른 變形度 (Residual Stress)

直管 Element의 Stiffness matrix는 널리 알려진 다음과 같은 식에 依해서 구한다.

$$K = \int_l B^T D B dx \tag{2}$$

여기서  $K$ =Stiffness matrix(12×12)

$B$ =Strain-Displacement 관계를 나타내는 matrix

$D$ =Section Property를 나타내는 matrix

直管 Element와는 달리 曲管 Element의 Stiffness matrix를 구하는 것은 보다 복잡하다. 즉 먼저 Element의 Flexibility matrix를 구한 뒤에 Inverse matrix를 구하여 Stiffness matrix를 얻게 된다(6).  $j$ 점에서의 Pipe Element의 Flexibility는

$$f_{ij} = \int_l m^T D^{-1} m dx \tag{3}$$

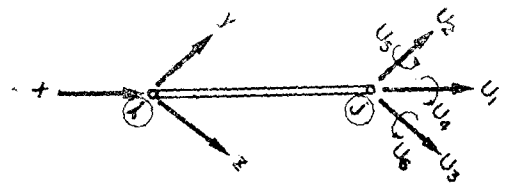


그림 1. 直管 Element의 局部座標系( $i$ 점에 표시)와 變位( $j$ 점에 표시)

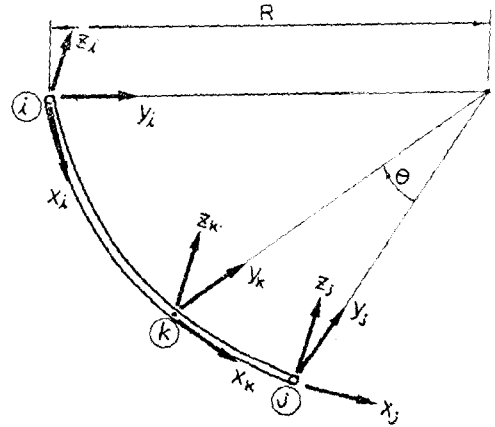


그림 2. 曲管 Element

만약에 Element의 Stiffness를

$$K = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \tag{4}$$

로 表示한다면 Submatrix  $K_{jj}$ 는 다음날 같이 表示된다.

$$K_{jj} = f_{jj}^{-1} \tag{5}$$

그밖에  $K_{ii}$ ,  $K_{ij}$  및  $K_{ji}$ 도 같은 方法으로 구해진다.

만일 Pipe Element이 圓弧(Circularly Curved)라면  $D$  matrix와  $m$  matrix는 간단하게 代數적으로 表現할 수 있다.

즉

$$D = \begin{pmatrix} EA & & & & & \\ & GA_y & & & & \\ & & GA_x & & & \\ & & & GJ & & \\ & & & & EI_y & \\ & & & & & EI_x \end{pmatrix} \tag{6}$$

任意의 點  $k$ 에서의  $m_{kj}$  matrix는

$$m_{kj} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R(1 - \cos \theta) & 0 & \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ R(1 - \cos \theta) & 0 & -R \sin \theta & 0 & 1 & 0 \\ 0 & R \sin \theta & 0 & -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \tag{7}$$

그밖에 Beam, Hanger 및 Spring Element의 Stiffness

matrix 등은 널리 一般化된 方法으로 구할 수 있다<sup>(1, 2, 3, 4, 5)</sup>.

### 2.3. 全體 System의 Stiffness Matrix의 組合

各 Element 마다의 Local Stiffness Matrix가 구해 지면 全體 System의 Stiffness Matrix로 組合하게 되는데 組合에 앞서 各各 다른 Local Coordinate System에서 구한 Stiffness Matrix를 統一된 System, 즉 Global Coordinate System에 依한 Stiffness Matrix로 변환한다. 즉,

$$\bar{K} = R^T K R \quad (8)$$

여기서  $\bar{K}$ 는 Element의 Global Stiffness Matrix,  $R$ 은 Transformation Matrix이다.

일단 各 Element Type別, 各 Element의 Global Stiffness Matrix가 구해지면 다음 단계에서는 全體 System의 Stiffness Matrix로 組合된다. 즉,

$$K = \sum \bar{K} \quad (9)$$

Stiffness Matrix의 組合과 함께 Load Vector를 組合하고 Boundary Condition을 도입하므로써 全體 System의 平衡方程式(Load-Deflection Equation)을 얻는다.

$$Ku = P \quad (10)$$

여기서  $u$ 는 變位,  $P$ 는 Load Vector를 나타낸다.

### 2.4. 變位 및 應力

일단 式(10)과 같은 平衡方程式이 구해지면  $K$ 와  $P$ 는 既知數들이고 變位  $u$ 가 未知數가 된다. 그러면 一般的으로 Gauss Elimination Method나 Choleski의 Square Root Method에 依해서 未知數로서의 節點變位( $u$ )를 구하게 되며 이 節點變位에 따라서 各 部材의 部材力(Member Force)이 계산된다.

그러나 Piping System에 있어서는 各 要素들이 線型(Linear)으로 연결되어 있고 分岐(Branch)가 갈라져 나온 것이 많아서 이러한 형태의 구조물에는 Frontal Solution Method에 依한 平衡方程式의 解가 可變(Variable) Bandwidth를 使用하기 때문에 훨씬 經濟의이다<sup>2)</sup>. 이 Frontal Solution에서는 特異한 前線(Front)의 개념에 依해서 Stiffness Matrix의 組合과 解를 同時에 구하면서 最終 Element가 組合될 때까지 前線이 前進해 나가게 된다.

### 3. 部材設計

計算된 部材力에 依해서 各 部材의 各種應力을 구하

게 된다. 그러나 管에 굽힘이 생기면 그 斷面은 眞圓을 유지할 수 없고 다소 찌그러져 扁平化하므로 曲管의 計算에는 梁(Beam)의 公式을 그대로 利用할 수 없다. 曲管이 굽혀지면 斷面의 扁平化에 依해 굽힘저항이 감소하여, 管斷面의 慣性모우멘트가 감소하는 것과 같은 結果가 된다.

참고문헌 10의 Appendix D에는 이러한 영향(Bend Flexibility Factor)에 대해 상세히 나타나 있다. 또한 管의 扁平化로 因하여 橫方向으로도 應力이 發生하여 應力이 增強되는바 이러한 效果는 應力增強係數(Stress Intensification Factor)를 導入함으로써 얻어진다. 各種 이음쇠에 대한 應力增強係數의 값은 참고문헌 10의 Appendix D에 자세히 設明되어 있으며 여기에서는 이 結果를 使用하여 應力計算을 하였다. 實際設計를 위한 合成應力의 適用基準은 참고문헌 10의 ANSI B 31.1-1977 Edition의 Power Piping Code에 準하였다. 즉 엥카사이에서 熱膨脹, 重量, 다른 持續荷重 및 부수적인 其他 荷重의 影響을 分析하여 荷重의 種類에 따라 다음과 같이 適用하였다<sup>(10)</sup>.

(a) 持續荷重: 壓力, 重量 및 기타 機械의 荷重은 다음의 方程式을 만족시켜야 한다.

$$\frac{PD_0}{4t_n} + \frac{1000(0.75i)M_A}{Z} \leq S_h \quad (11a)$$

(Metric Units)

$$\frac{PD_0}{4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq S_h \quad (11b)$$

(English Units)

여기서

$P$ =內壓, psig(KPa Gage)

$D_0$ =管의 外徑, in(mm)

$t_n$ =管壁의 두께, in(mm)

$M_A$ =重量 및 기타 持續荷重으로 인한 모우멘트, in-lb (mm-N)

$Z$ =斷面係數, in<sup>3</sup>(mm<sup>3</sup>)

$i$ =應力增強係數(0.75  $i$ 는 항상 1 보다 커야 한다)

$S_h$ =許容應力表에 있는 最大溫度에서의 基本材料의 最大許容應力

(b) 臨時荷重에 依한 應力: 持續荷重에 附加하여 地震 같은 임시하중의 影響이 미칠 때에는 다음의 式(12)을 만족시켜야 한다.

$$\frac{PD_0}{4t_n} + \frac{1000(0.75i)M_A}{Z} + \frac{1000(0.75i)M_B}{Z} \leq KS_h \quad (12a)$$

(Metric Units)

$$\frac{PD_0}{4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{0.75iM_B}{Z} \leq KS_h \quad (12b)$$

(English Units)

여기서

$K=1.15$  (作動期間의 10% 以內에 作用하는 임시하중에 對해서)

$K=1.2$  (作動期間의 1% 以內에 作用하는 임시하중에 對해서)

$M_D$  = 임시하중에 依한 斷面에 作用하는 모우멘트  
(c) 合成應力

(1) 熱膨脹應力 ( $S_E$ )

$$S_E = \frac{1000(i M_c)}{Z} \leq S_A \quad (13a)$$

(Metric Units)

$$S_E = \frac{i M_c}{Z} \leq S_A \quad (13b)$$

(English Units)

여기서

$M_c$  = 열팽창에 의한 모우멘트 (앵카의 變位에 의한 効果를 式(12)에서 除外하였다면, 地震에 의한 앵카 變位로 인한 모우멘트 效果를 包含시킨다)

$$S_A = f(1.25 S_c + 0.25 S_b)$$

$S_c$  = 許容應力表에 있는 最低溫度에서는 基本材料의 許容應力

$f$  = 熱사이클에 對한 應力範圍 감소계수 (이 값은 表 I에 나타나 있으며, 이에 對한 자세한 計算방법은 참고문헌 10을 참조할 것)

(2) 持續荷重과 熱膨脹應力의 合

$$\frac{PD_0}{4t_n} + \frac{1000(0.75 i M_A)}{Z} + \frac{1000(i M_c)}{Z} \leq (S_h + S_A) \quad (14a)$$

(Metric Units)

$$\frac{PD_0}{4t_n} + \frac{0.75 i M_A}{Z} + \frac{i M_c}{Z} \leq (S_h + S_A) \quad (14b)$$

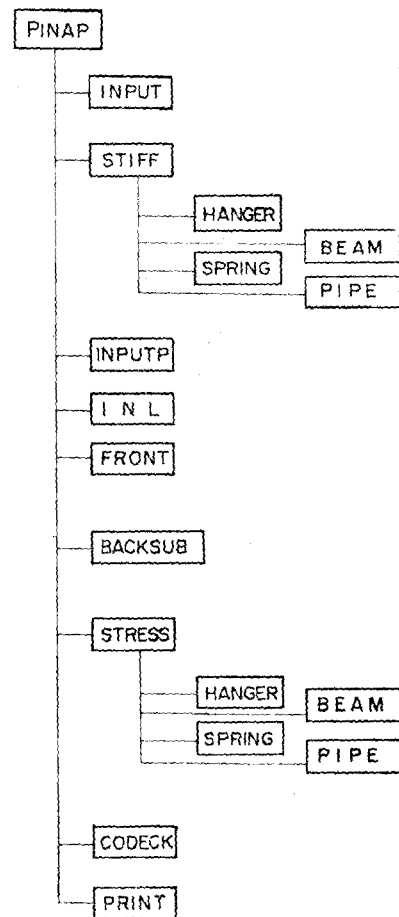
(English Units)

여기서 各項의 定義는 前述한 바와 같다.

表 1. 應力範圍減少係數

溫度 사이클	f
7,000 및 그 以下	1.0
7,000~14,000	0.9
14,000~22,000	0.8
22,000~45,000	0.7
45,000~100,000	0.6
100,000 및 그 以上	0.5

表 2. Program Organization



- Pipe Network Analysis Program
- Reads input data and generates missing informations
- Calculates stiffness matrix of Hanger, Beam, Spring and Pipe Elements and writes on tape with element informations.
- Prints out necessary informations.
- Reads nodal load inputs and writes on tape.
- Reads stiffness matrix, element informations and nodal loads from tape. The elimination process by the Frontal Solution Technique.
- Back-substitution process. Nodal displacements are obtained.
- Element by element stress calculations.
- Code check (ANSI-power piping code) and calculation of safety factor
- Prints out the element stresses and safety factors.

를 表하는 바이다.

#### 4. Computer Programming

以上에서 記述한 內容을 Fortran IV에 依해 Computer Program化 하였다. 時間과 努力의 節約을 爲해 既存 Program<sup>(8)</sup>이 참고되었으며 Piping Network의 構造의 인 特性을 最大限 活用하여 經濟的인 Program이 되도록 하였다. 大型 Computer 뿐만 아니라 中型 Computer에서도 Run이 可能하도록 Overlay 技法을 使用하고 또한 周邊器機(Peripheral Devices)를 最大限 活用하여 Memory에 對한 要求를 最少限으로 감소시켰다. 使用者의 편의를 爲해 Input Data를 間略化하여 Error의 可能性을 最大限 줄이고 設計者에게 Output의 理解가 容易하도록 배려하였다.

이 Program의 構成은 表 2에 주어진 바와 같다.

#### 5. 結 論

本 研究에서는 有限要素法에 依해 全體 System의 應力解析을 하고 그 結果에 따라 ANSI B 31.1-1977年度版 Power Piping Code에 準해 部材設計를 하는 새로운 配管系統의 設計를 爲한 Computer System이 開發되었다.

實際로 本 System을 利用하여 例題를 解析하고 設計한 結果는 대단히 만족스러웠다.

앞으로의 이 分野에서 계속 研究되어야 할 點은 첫째, Pipe Network의 Data Input을 Check하면서 必要한 Isometric Drawing을 할 수 있도록 Preprocessor를 追加하는 문제 둘째, 應力解析結果에 따라 自動적으로 最適部材를 선택할 수 있는 Option을 追加하는 문제 등이다.

#### 謝 辭

本 研究는 1976년도 產學協同財團의 研究補助費에 依하여 이루어진 것임을 밝히며 同財團에 深甚한 謝意

#### 參 考 文 獻

1. Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method in Engineering Science," Mc-Graw Hill, 1971.
2. Brebbia, C. A. & Conner, J. J., "Fundamentals of Finite Element Technique," Halsted Press, 1974.
3. Martin, H. C. & Carey, G. F., "Introduction to Finite Element Analysis," Tower Press, 1973.
4. Huebner, K. H., "The Finite Element Method for Engineers," Tower Press, 1975.
5. Hall, A. S. & Woodhead, R. W., "Frame Analysis," 2nd Edition, John-Wiley, 1967.
6. Hall, A. S. et al., Discussion of Paper, "Curved Beam Stiffness Coefficients," ASCE J. of Struct. Div. Feb. 1969.
7. Irons, B. M., "A Frontal Solution Program for Finite Element Analysis," International J. for Numerical Methods in Engineering, Vol. 2, 1970.
8. Wilson, E. L. et al., "SAPIV-A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear System," EERC, Univ. of California, Berkeley, April 1974.
9. 小河內美男, 配管工學, 機電研究社譯, 1974年 4月.
10. The American Society of Mechanical Engineers, *Power Piping* (American National Standard Code for Pressure Piping), ANSI B 31.1-1977 Edition.
11. King, R. C. & Crocker, S., "*Piping Handbook*," 5th Edition, McGraw-Hill, 1967.
12. The M. W. Kellogg Co., "Design of Piping System," 2nd Ed., John Wiley, 1967.