

# 접합부 변형을 고려한 파이프 설비의 효율적인 해석

## Efficient Analysis of Piping Systems with Joint Deformation

오이동근\* 송윤환\*\* 안경철\*\*\*  
Dong-Guen Lee Yoon-Hwan Song Gyeong-Cheol An

### ABSTRACT

Piping systems are composed of pipes with various thickness, diameter and length. Accurate analysis of a piping system requires a complicated three dimensional finite element model and a computer system with large memory size, while simplified models result in system response prediction with deteriorated accuracy.

An efficient analysis model for piping systems is proposed in this study. The proposed model is developed by introducing a joint model which accounts for the behavior of a pipe connection. Pipes are represented by beam elements and the effect of local deformation of pipe connections are replaced by joint element deformations.

The proposed model which is as simple and efficient as a beam model can be used to obtain piping system response with accuracy close to that of a finite element model.

### 1. 서론

원자력 발전설비 구조물 중의 파이프 설비는 사용 기간 동안 구조적 안전성이 크게 요구되는데 정적 또는 동적 하중에 대하여 파이프 설비의 정확한 거동을 예측함으로써 파괴로 인해 발생할 수 있는 사고에 의한 안전성을 확인할 수 있어야 한다.

지금까지의 파이프 설비에 대한 해석은 쉘요소를 이용한 유한요소법에 의한 해석법과 보요소를 사용한 해석법의 두가지가 사용되어 왔는데 쉘요소에 의한 방법은 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점은 있으나 모델링하기가 복잡하고 어려울뿐만 아니라 계산시간이 많이 들며 조금만 복잡해져도 자유도수가 많아져서 전체적인 파이프 설비에 대한 해석용으로는 사용하기가 부적합하기 때문에 주로 부분적인 정밀 모델에 대한 해석을 하는 데에 이용되어 왔다. 이에 비해 보요소에 의한 방법은 파이프를 보요소를 사용하여 모델링하므로 계산시간과 모델링하는 데 소요되는 시간이 많이 줄어드는 장점이 있으며 이 점은 특히 동적해석을 할 때 두드러지게 나타난다. 이러한 장점 때문에 보요소에 의한 방법은 전체적인 파이프 설비를 해석하는 데 많이 쓰여 왔으나 현재 사용되고 있는 방법은 파이프의 중심과 접합부가 일치하지 않음으로써 발생하는 ovalization과 같은 유연성 효과를 고려하지 못하고 있다. 이와 같이 기존의 파이프 설비 해석 방법들은 파이프 설비를 전체적으로 정확히 해석하지 못하고 간략한 해석모델을 사용하여 대략적인 해석 결과를 예측하거나 부분적인 모델을 사용하게 되어 전체적인 거동을 찾아내지 못하는 문제점이 있다. 따라서 파이프 설비의 전체적인 거동을 정확히 알아내기 위해서 접합부의 효과를 고려한 간략화된 방법이 필요하다.

파이프 접합부의 효과는 연결되고 있는 파이프 사이의 직경의 비나 두께에 의해 영향을 받는데 특히 직경의 비가 크거나 두께가 얇은 경우에는 접합부의 유연성 효과가 크게 나타난다. 접합부의 효과는 파이프 설비의 정적 혹은 동적해석에 있어서 매우 중요한 요

인이 되며 그러한 효과를 고려하면서 파이프를 보요소로 모델링하여 해석한다면 쉘요소에 의한 유한요소법의 비효율성을 극복할 수 있고 종래의 간략화된 보요소에 의한 해석법보다 더욱 효율적이고 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서 파이프 설비의 접합부 효과를 고려할 수 있는 새로운 모델을 개발하고 이 모델을 보요소와 결합하여 정적, 동적 하중에 의한 파이프 설비의 거동을 정확하고 효율적으로 해석할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 해석 모델

#### 2.1 접합부의 일반사항

그림 1은 공간상에 놓여 있는 T자형 접합부를 갖는 파이프 설비를 나타내고 있으며 이와 같은 파이프 설비를 보요소를 사용하여 모델링할 때 주파이프와 여기에 연결되고 있는 파이프가 주파이프의 중심에서 일치하고 있는 것으로 보고 모델링을 하나 실제로 파이프 설비는 가운데가 비어 있기 때문에 파이프의 연결은 주파이프의 가장자리에서 이루어진다. 이로 인해 유연성 효과가 나타나는데 따라서 정확한 해석을 위해서는 파이프의 중심과 가장자리를 연결짓는 새로운 요소의 개발이 필요하다.

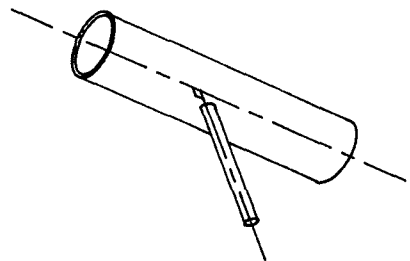


그림 1. 3차원 파이프 설비

\* 정회원 한국과학기술원 토목공학과 조교수  
\*\* 정회원 한국과학기술원 토목공학과 박사과정  
\*\*\* (주)코리아 엔지니어링 사원

## 2.2 접합부의 모델

파이프 접합부의 유연성 효과를 고려하기 위해 개발된 가상요소(그림 2)는 주파이프의 반경만큼의 길이를 가지며 3개의 절점과 2개의 요소로 구성되어 있다. 가상요소를 구성하고 있는 2개의 요소 중에서 요소 I은 반경만큼의 길이를 가지며 이 요소는 그림 3(a)와 같이 주파이프에 작은 파이프가 연결되어 있을 때, 연결 파이프에 축 방향으로 작용하는 하중으로 인해 그림 3(b)에서 보는 바와 같은 ovalization 효과로 인하여 변형이 생기는 것을 고려하기 위한 요소이다. 요소 I은 축방향으로만 강성을 갖는 강체(rigid body)로 이루어져 있고 축방향 강성에 의하여 요소의 성질이 결정되므로 그림 2에서와 같이 강체안에 스프링이 설치되어 있는 것으로 모델링하였다. 두개의 파이프가 만나는 점에서 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 직각으로 연결되어 있는 파이프가 그림 3(c)와 (d) 같은 모멘트를 받을 경우 주파이프 쪽과 연결 파이프 쪽의 변위는 같지만 회전각은 다르게 된다. 세개의 회전각 중에서 비틀림에 관한 회전각은 무시할 수 있으므로 결국 회전각 2개가 서로 다르게 된다. 같은 위치에 있는 두개의 절점 사이의 이러한 관계는 요소 II에서처럼 두 절점을 회전탄성 스프링으로 연결하여 그 효과를 나타낼 수 있는데 이 요소에서는 두 방향으로 회전탄성 스프링을 설치하며 각 방향의 스프링은 독립적인 강성을 갖는다.



그림 2. 가상 요소

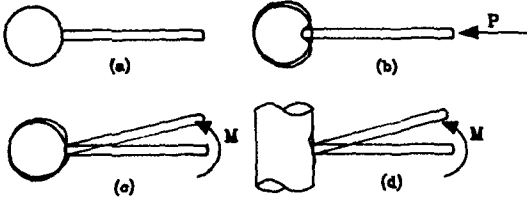


그림 3. 파이프 접합부의 변위 형상

가상요소는 3개의 절점과 2개의 요소로 구성되어 총 18개의 자유도가 존재하는데 요소 I에서는 축방향으로만 강성을 갖는 강체로 이루어지므로 강체운동식에 의해 한쪽 절점의 변위와 요소의 좌표만 알고 있으면 반대쪽의 변위는 쉽게 구할 수 있기 때문에 실제의 자유도는 12개 중에서 한쪽 절점의 자유도 6개에 축방향 강성을 더한 7개만 필요하게 된다. 요소 II의 경우에는 12개의 자유도 중에서 두 절점에서 4개의 자유도가 같기 때문에 8개의 자유도만 남게 된다. 따라서 총 18개의 자유도 중에서 요소 I에서 7개와 요소 II에서 8개를 합하여 15개의 자유도가 필요한데 이중에서 요소 I과 요소 II가 공유하는 절점이 하나 있으므로 6개를 뺀 9개의 독립적인 자유도만 필요하게 된다.

## 2.3 가상요소에 대한 강성행렬

그림 4는 공간상에 있는 파이프 설비가 접합부를 가지면서 연결되어 있을 경우 이를 보요소와 가상요소

를 합하여 하나의 새로운 보요소로 모델링한 것을 나타낸다. 그림에서 보요소 ij는 가상요소 jk와 kl에 의해서 주파이프와 연결되는데 여기서 jk는 회전강성 스프링이 설치되어 있는 요소 II이고 kl은 축방향으로 강성 스프링이 설치되어 있는 강체인 요소 I이다.

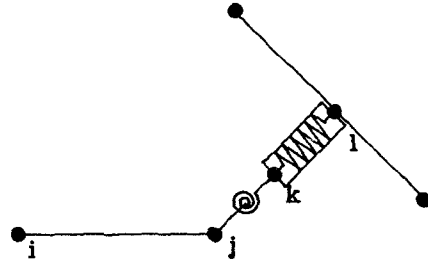


그림 4. 파이프 접합부 모델

그림 5와 같이 보요소의 한쪽 끝에 강성이 각각  $K_{sy}$ 와  $K_{sz}$ 인 회전 탄성 스프링이 두 방향에 설치되어 있을 때 강성행렬은 응력법(flexibility approach)에 의하여 구할 수 있으며 이때 강성행렬  $[K_M]$ 은 절점 i와 k에 대해 다음과 같이 나누어 쓸 수 있다.

$$[K_M] = \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [K_{ik}] \\ [K_{ki}] & [K_{kk}] \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

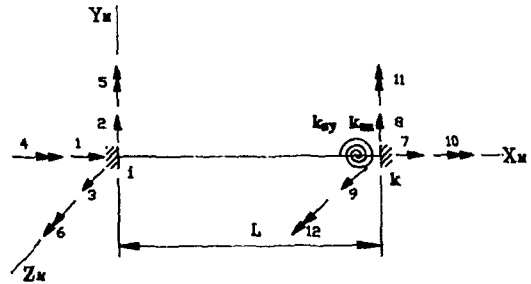


그림 5. 회전탄성 스프링이 설치되어 있는 보요소

절점 k에 대한 강성행렬  $[K_{kk}]$ 는 연성행렬  $[F_{kk}]$ 와 역의 관계가 있으므로  $[F_{kk}]$ 의 역행렬을 구함으로써 얻을 수 있다.

$$[K_{kk}] = [F_{kk}]^{-1} \quad (2-2)$$

절점 k에 대한 강성행렬  $[K_{kk}]$ 는 절점 k에 단위 변위가 생기게 하기 위해 절점 k에 가해야 할 힘을 의미하며 이때 절점 i에서의 등가 정적 하중을 나타내는  $[K_{ik}]$ 는 다음과 같은 변환행렬  $[T_{ik}]$ 에 의해 구할 수 있다.

$$[T_{ik}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L & 0 & 1 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

변환행렬  $[T_{ik}]$ 는 요소의 길이에 의해서 표현되며  $[K_{ik}]$ 는 정적 평형 관계에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_{ik}] = -[T_{ik}][K_{kk}] \quad (2-4)$$

여기서  $[K_{kk}]$ 는 절점 k에서의 단위 변위가 생기는 힘이 작용할 때 이로 인해 절점 i에서의 작용하는 힘을 의미한다.  $[K_{ki}]$ 는 강성행렬의 대칭성을 이용하여  $[K_{ik}]$ 의 전치행렬을 구하면 된다.

$$[K_{ki}] = [K_{ik}]^T = -[K_{kk}][T_{ik}]^T \quad (2-5)$$

식 (2-4)를 절점 k에 대한 강성행렬에 대한 식으로 나타내면

$$[K_{kk}] = -[T_{ik}]^{-1}[K_{ik}] \quad (2-6)$$

이고,  $[K_{ii}]$ 는 식(2-6)과 비슷한 관계를 이용하여  $[K_{ki}]$ 에 의해 나타낼 수 있는데 다음과 같다.

$$[K_{ii}] = -[T_{ki}]^{-1}[K_{ki}] \quad (2-7)$$

변환행렬  $[T_{ik}]$ 와  $[T_{ki}]$  사이에는 다음과 같은 관계가 있으므로

$$[T_{ki}]^{-1} = [T_{ik}]^{-T} \quad (2-8)$$

이를 이용하여 식 (2-7)을 다시 정리하면

$$[K_{ii}] = [T_{ki}]^{-T}[K_{kk}][T_{ik}]^T \quad (2-9)$$

이와 같이 보요소의 한쪽 끝에 회전강성 스프링이 설치되어 있을 경우의 강성행렬  $[K_M]$ 은 요소의 한쪽 끝에서 연성행렬을 구하여 요소 전체에 대한 강성행렬로 바꿀 수 있다.

$$[K_M] = \begin{bmatrix} [T_{ik}]^{-T}[K_{kk}][T_{ik}]^T & -[T_{ik}][K_{kk}] \\ -[K_{kk}][T_{ik}]^T & [K_{kk}] \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

요소 l의 축방향 강성스프링의 효과를 고려한 새로운 강성행렬은 앞에서 구한 강성행렬( $[K_M]$ ) 중에서 축방향 변위에 관계되는 강성 항이 바뀌어져야 하는데 이 새로운 강성 항은 스프링의 직렬 조합을 생각하면 쉽게 계산될 수 있다.

지금까지 구한 보요소 ij에 회전강성 스프링과 축방향 강성스프링이 설치되어 있을 경우의 강성행렬을 주파이프의 중심과 연결시키기 위해서 우선 절점 i와 k 사이의 힘의 평형 관계를 나타내면

$$\{P_i\} = [K_{ii}]\{U_i\} + [K_{ik}]\{U_k\} \quad (2-11)$$

$$\{P_k\} = [K_{ki}]\{U_i\} + [K_{kk}]\{U_k\} \quad (2-12)$$

이 되고, 절점 k와 l점 사이의 변환행렬을  $[T_{kl}]$ 이라 할 때 이것을 이용하여 절점 k와 l 사이의 힘과 변위의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\{P_k\} = [T_{kl}]\{P_l\} \quad (2-13)$$

$$\{U_i\} = [T_{kl}]^T\{U_k\} \quad (2-14)$$

여기서 변환행렬  $[T_{kl}]$ 은 요소의 좌표만 알면 쉽게 구할 수 있으며 다음과 같이 나타내어진다.

$$[T_{kl}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -z_{kl} & y_{kl} & 1 & 0 & 0 \\ z_{kl} & 0 & -x_{kl} & 0 & 1 & 0 \\ -y_{kl} & x_{kl} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

여기서  $x_{kl}$ 은 절점 k와 l 사이의 x 방향으로의 길이이며  $y_{kl}$ 과  $z_{kl}$ 도 각각 y와 z 방향의 길이이다. 식 (2-14)을  $\{U_k\}$ 에 대해 쓰면

$$\{U_k\} = [T_{kl}]^{-T}\{U_l\} \quad (2-16)$$

로 나타낼 수 있고 이를 식 (2-11)과 (2-12)에 대입하면

$$\{P_i\} = [K_{ii}]\{U_i\} + [K_{ik}][T_{kl}]^{-T}\{U_k\} \quad (2-17)$$

$$\{P_k\} = [K_{ki}]\{U_i\} + [K_{kk}][T_{kl}]^{-T}\{U_k\} \quad (2-18)$$

과 같이 되고 식 (2-18)에 식 (2-13)을 대입하면

$$\{P_i\} = [T_{kl}]^{-1}[K_{ki}]\{U_i\} + [T_{kl}]^{-1}[K_{kk}][T_{kl}]^{-T}\{U_k\} \quad (2-19)$$

과 같이  $\{P_i\}$ 에 대한 관계식을 얻을 수 있으며 따라서 절점 i와 l에 대해 다음과 같은 행렬 형태의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \{P_i\} \\ \{P_k\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{ii}] & [K_{ik}][T_{kl}]^{-T} \\ [T_{kl}]^{-1}[K_{ki}] & [T_{kl}]^{-1}[K_{kk}][T_{kl}]^{-T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{U_i\} \\ \{U_k\} \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

결국 절점 i와 절점 l로 이루어진 부재의 강성행렬은 다음과 같이 나타내어진다.

$$[K_M^*] = \begin{bmatrix} [T_{ik}]^{-T}[K_{kk}][T_{ik}]^T & -[T_{ik}][K_{kk}][T_{kl}]^{-T} \\ -[T_{kl}]^{-1}[K_{kk}][T_{ik}]^T & [T_{kl}]^{-1}[K_{kk}][T_{kl}]^{-T} \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

#### 2.4 가상요소에 대한 질량 행렬

집합부를 가지고 있는 보요소에 대한 질량행렬은 강성행렬 구성시 사용된 강체운동과 비슷한 방법에 의해서 가상요소의 질량행렬을 파이프 중심으로 이동시킬 수 있다. 그림 5의 요소 ik에 대한 질량행렬은 집중질량을 사용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$[M] = \begin{bmatrix} [M_i] & 0 \\ 0 & [M_k] \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

절점 k에 대한 관성력은 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$\{P_k\} = [M_k]\{\ddot{U}_k\} \quad (2-23)$$

식 (2-14)의 변위벡터  $\{U_i\}$ 을 시간 t에 대해 2번 미분하면 다음과 같은 가속도 벡터가 되고

$$\{\ddot{U}_i\} = [T_{kl}]^T\{\ddot{U}_k\} \quad (2-24)$$

식 (2-13)과 (2-24)를 식 (2-23)에 대입하여 정리하면

$$\{P\} = [T_k]^{-1}[M_k][T_k]^{-T}\{\ddot{U}\} \quad (2-25)$$

이고, 따라서 절점 1의 질량행렬  $[M_1]$ 은 다음과 같다.

$$[M_1] = [T_k]^{-1}[M_k][T_k]^{-T} \quad (2-26)$$

이와 같이 접합부에 대한 질량은 절점 k에서 1로 이동된다.

### 3. 해석방법

#### 3.1 동적평형 방정식

파이프 설비는 설비의 가동, 파괴로 인한 충격, 지진과 같은 동적하중에 대한 정확한 지동의 예측이 요구되는데 접합부의 영향을 고려한 파이프 설비의 거동을 알아보기 위해 동적평형 방정식을 나타내 보면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{1\}\ddot{X}_g \quad (3-1)$$

여기서  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 은 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이며,  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$ ,  $\{u\}$ 은 가속도, 속도, 변위벡터를 나타낸다.

파이프 설비를 보요소로 모델링하여 파이프 설비에 대한 강성행렬을 구하기 위해 각 요소에 대해 접합부의 유무에 따라 강성행렬을 구한 다음 조합하여 전체 구조물에 대한 강성행렬을 구한다. 자유도 수를 줄이기 위해 matrix condensation 기법이 사용되는데 본 연구에서는 전체 강성행렬을 회전각에 대한 자유도를 없애고 변위(translation)에 관한 강성행렬로 줄였다.

질량행렬은 질량이 각 절점에만 집중되는 집중질량을 사용하여 구성하였다.

구조물의 감쇠행렬을 산정하는 방법에는 구조물의 첫번째 진동수와 두번째 진동수를 사용하는 Rayleigh damping과 모우드 감쇠비에 모우드 형상벡터를 곱하여 계산하는 모우드 감쇠법이 있는데 본 논문에서는 Rayleigh damping에 의해서 계산하였다.

#### 3.2 수치해석법

공간상에 놓여 있는 파이프 설비에 대한 수치해석법에는 시간 영역법(time domain method)과 주파수 영역법(frequency domain method)이 있는데 본 연구에서는 시간영역법을 사용하였다. 시간영역 해석법에는 모우드중첩법(mode superposition method)과 직접적분법(direct integration method)이 있으나 감쇠행렬을 직접입력 해석하는 직접적분법을 사용하였다. 직접적분법으로는 전체적분 구간에 대해서 안정성(stability)을 만족시키는 constant average acceleration method를 사용하였다.

### 4. 예제해석

#### 4.1 가상요소의 강성값 결정

본 연구에서 개발한 가상요소를 사용하여 접합부의 효과를 고려할 때 접합부의 특성을 나타내는 3개의 강성값이 요구되며 이 강성값은 가상요소를 이루고 있는 2개의 요소중에서 요소 I에서 사용된 축방향 스프링의 강성값과 요소 II에 두 방향으로 설치한 회전탄성 스프

링의 강성값이다. 이들 강성값은 셸이론을 사용하여 이론적인 식을 도출하거나 셸요소를 이용한 유한요소법에 의한 해석을 통해 경험적인 식으로 유도될 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서는 제한된 시간 때문에 위와 같은 방법을 사용하지 못하고 예제해석시에 필요한 강성값을 직접 셸요소를 사용하여 유한요소법에 의한 해석결과를 본 연구에서 제안한 방법에 의한 결과와 비교하여 구했다. 접합부마다의 특성을 나타내는 3개의 강성값은 서로 독립적인 값이므로 이 값을 구하기 위해서는 각각의 특성값을 나타낼 수 있는 하중을 가하여 그 값을 결정할 수 있다.

예제 해석시에 사용된 접합부는 모두 3개로 접합부마다 나타나는 3개의 강성값을 다음과 같은 방법에 의해 결정했다. 셸요소로 모델링하여 SAP IV에 의한 해석을 할 때, 실제 파이프와 가능한 한 같은 모양을 나타낼 수 있도록 파이프를 원주 방향을 따라 16각형으로 모델링하였다. 파이프 직경의 크기에 상관없이 두께와 직경의 비가 큰 경우에는 파이프의 유연성 효과가 크지 않기 때문에 작은 파이프는 보요소를 사용하여 모델링 하였다. 이와 같이 모델링한 후 작은 파이프의 자유단에 3개의 강성값을 구할 수 있도록 축방향 힘과 두 방향으로 모멘트를 발생하게 하는 힘을 작용시켜 본 연구에서 제안한 방법을 사용하여 작용하는 하중에 따라 강성값을 변화시켜서 유한요소법에서 구한 결과와 같게 되는 때의 값을 접합부의 강성값으로 결정할 수 있다. 예제 해석에 사용된 파이프의 직경은 작은 파이프의 경우에 5cm, 주파이프의 경우에는 50cm이며 탄성계수와 두께는 모두 2100ton/cm<sup>2</sup>, 0.5cm이다.

그림 6의 한쪽 끝이 고정되어 있는 길이 200cm의 주파이프가 고정단으로부터 150cm 떨어진 곳에 접합부 A를 가지고 있을 때 접합부에서의 강성값을 구하기 위해 그림 8과 같이 절점 1에 하중을 가하여 SAP IV에서의 결과와 본 연구에서 제안한 방법으로 얻어진 결과를 비교하여 가장 일치할 때의 값으로 결정하였으며 그 값은 축방향 스프링의 강성  $K_a$ 가 7.20 ton/cm이고 두개의 회전탄성 스프링의 강성은  $K_{sy}$ 가 584.5 ton-cm/rad 이고  $K_{sz}$ 은 1979.0 ton-cm/rad 이다. 그림 6의 접합부 B에 대해서도 같은 방법으로 강성값을 결정할 수 있으며 그 값은  $K_a$ 가 14.66 ton/cm이고  $K_{sy}$ 는 807.40 ton-cm/rad이며  $K_{sz}$ 은 2629.00 ton-cm/rad이다. 길이가 100cm인 주파이프가 한쪽 끝이 고정되어 있고 고정단으로부터 50cm 떨어진 위치에 접합부가 있는 경우인 접합부 C(그림 7)에 대해서도 동일한 방법으로 강성값을 구하면  $K_a$ 가 24.49 ton/cm,  $K_{sy}$ 는 780.0 ton-cm/rad이며  $K_{sz}$ 은 2024.0 ton-cm/rad이다.

이와 같이 구한 각 접합부의 강성값을 사용하여 본 연구에서 제안한 방법으로 정적, 동적 해석을 수행하여 셸요소 그리고 보요소만에 의한 결과와 비교할 것이다.

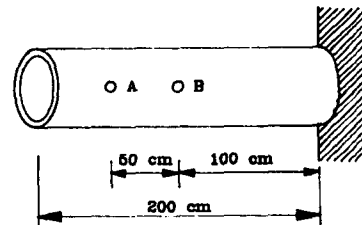


그림 6. 접합부 A와 B의 위치

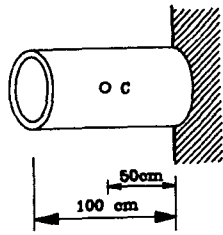


그림 7. 접합부 C의 위치

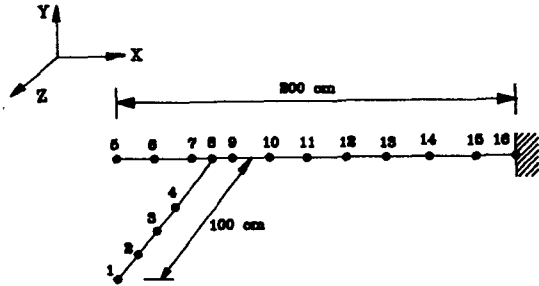


그림 8. 접합부 A의 강성값 결정을 위한 모델

#### 4.2 정적해석

앞에서 구한 접합부의 강성값을 사용하여 접합부에 의해 연결되고 있는 그림 9와 같은 간단한 파이프 설비에 대해 정적해석을 수행하여 접합부의 영향을 알아 보았다. 쉘요소와 보요소의 조합에 의한 모델링을 통해 SAP IV에서 얻은 결과, 본 연구에서 제안한 방법에 의한 결과 그리고 보요소만에 의해 모델링하여 얻은 결과들을 비교하였다.

그림 9와 같이 길이 200cm인 주파이프가 고정단으로부터 100cm와 150cm인 곳에 2개의 접합부 A, B를 가지면서 작은 파이프가 연결되어 있고 절점 2에 Z 방향으로 -5ton의 하중을 받을 경우의 작은 파이프의 각 절점에서의 변위와 부재력을 표 1과 표 2에 나타내었다. 각 절점에서의 변위를 보면, 본 연구에서 제안한 방법이 정확한 해인 SAP IV에 의한 결과와 보요소만에 의한 방법보다 더욱 잘 일치함을 알 수 있다. 부재력의 비교에 있어서도 변위의 비교에서와 같은 양상을

보이고 있으며 이는 보요소만에 의한 해석이 접합부의 영향을 제대로 고려하지 못하고 있음에 기인한다.

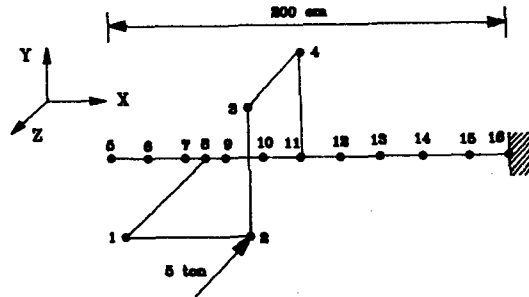


그림 9. 정적해석을 위한 파이프 설비 예제의 모형

표 2. 정적해석으로부터 구한 부재력의 비교

부재	축력 ( ton )			전단력 ( ton )		
	경우 1	경우 2	경우 3	경우 1	경우 2	경우 3
1	4.0211	4.0517	3.9677	-0.0479	-0.0664	-0.2394
2	-4.0211	-4.0517	-3.9677	0.0479	0.0664	0.2394
3	0.0367	0.0511	0.0749	-0.0479	-0.0664	-0.2394
4	0.0479	0.0664	0.2394	0.0367	0.0511	0.0749
5	-0.0479	-0.0664	-0.2394	-0.0367	-0.0511	-0.0749
	0.9789	0.9483	1.0323	0.0479	0.0664	0.2394
	-0.9789	-0.9483	-1.0323	-0.0479	-0.0664	-0.2394
	-0.0479	-0.0664	-0.2394	-0.0367	-0.0511	-0.0749
	0.0479	0.0664	0.2394	0.0367	0.0511	0.0749
	원모멘트(극부좌표의 Y방향)			원모멘트(극부좌표의 Z방향)		
부재	경우 1	경우 2	경우 3	경우 1	경우 2	경우 3
1	3.5736	2.6603	12.3628	34.2545	33.3830	39.1542
2	-3.5736	-2.6603	-12.3628	-37.8441	-33.8670	-57.1099
3	-34.2545	-33.3830	-39.1542	3.5736	2.6603	12.3628
4	34.2545	33.3830	39.1542	-1.1806	-2.3381	-3.923
5	53.8855	54.1910	46.9784	1.1806	2.3381	3.923
	-53.8855	-54.1910	-46.9784	2.4919	2.7713	7.1026
	2.4919	2.7713	7.1026	63.6317	61.4510	64.0715
	-2.4919	-2.7713	-7.1026	-58.8456	-60.8070	-40.1305
	-50.2131	-49.0820	-39.4835	-2.4919	-2.7713	-7.1026
	50.2131	49.0820	39.4835	0.2625	1.0608	1.4814

표 1. 정적해석으로부터 구한 변위와 회전각의 비교

절 점	X방향 변위 ( cm )			Y방향 변위 ( cm )			Z방향 변위 ( cm )		
	경우 1	경우 2	경우 3	경우 1	경우 2	경우 3	경우 1	경우 2	경우 3
1	13.769	13.637	9.262	-6.863	-6.498	-3.117	-0.655	-0.499	-0.076
2	13.769	13.637	9.262	-7.277	-6.892	-4.566	-17.173	-16.994	-13.823
3	14.689	14.605	12.169	-7.277	-6.892	-4.566	-0.867	-1.151	-0.934
4	0.028	0.040	0.185	0.003	0.116	0.001	-0.861	-1.145	-0.928
절 점	X방향 회전각 ( rad )			Y방향 회전각 ( rad )			Z방향 회전각 ( rad )		
	경우 1	경우 2	경우 3	경우 1	경우 2	경우 3	경우 1	경우 2	경우 3
1	.1173	.1136	.0737	.2915	.2906	.2335	-0.0069	-0.0066	-0.0249
2	.1615	.1567	.1242	.3367	.3363	.2842	-0.0092	-0.0090	-0.0311
3	.1330	.1294	.1001	.1977	.1965	.1629	-0.0080	-0.0086	-0.0246
4	.0142	.0108	.0009	.0970	.0963	.0791	-0.0015	-0.0014	-0.0062

경우 1 : 본 연구에서 제안한 방법에 의한 해석    경우 2 : SAP IV에 의한 해석    경우 3 : 보요소만에 의한 해석

### 4-3 동적해석

주파이프의 고정단으로부터 50cm 떨어진 곳에 접합부가 있고 접합부에 작은 파이프가 연결되어 있는 그림 10과 같은 파이프 설비에 대하여 정적 해석에서와 같이 쉘요소를 사용한 SAP IV 결과, 본 연구에서 제안한 방법과 기존의 단순한 보요소만에 의한 결과를 비교하였다. 여기서 SAP IV의 결과는 파이프의 단면형상의 변화에 의한 모우드를 방지하기 위해 파이프 자유단 끝의 중심에서 16각형으로 모델링한 파이프의 접점으로 질량은 없고 강성이 큰 보요소를 연결하여 구한 진동수이다. 이렇게 하는 이유는 주파이프의 길이가 직경에 비하여 크지 않기 때문에 파이프의 단면에 관하여 변형을 하는 모드가 선행하기 때문이며, 파이프의 길이가 길어지면 파이프의 단면에 관한 변형보다는 파이프의 길이에 관한 변형 모드가 선행될 것이다. 그러나 본 연구에서는 컴퓨터 용량상의 문제로 파이프의 길이를 길게 하는 대신에 길이가 상대적으로 짧은 파이프에 대하여 길이에 관한 변형 모드를 선행시키기 위하여 앞에서 설명한 강성이 큰 보요소를 파이프의 자유단에 추가하였다.

접합부의 강성값은 앞에서 구한 접합부 C에서의 값을 사용하였고 그림 10의 파이프 설비에 대한 진동수를 표 3에 나타내었다.

흔히 보요소에서는 전단의 영향을 거의 고려하지 않지만, 길이가 짧은 파이프를 간략화한 방법으로 해석을 하는 경우에 전단에 의한 영향을 고려하지 않으면 자칫 좋은 결과를 얻을 수 없는 경우가 발생할 수가 있다. 본 논문에서 제안한 방법의 강성행렬 구성은 이러한 전단 효과를 고려하였다.

표 3에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 제시한 방법이 쉘요소를 사용한 SAP IV의 결과와 잘 일치함을 알 수 있으며 진동 모드의 이러한 일치는 동적해석에서도 좋은 결과를 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

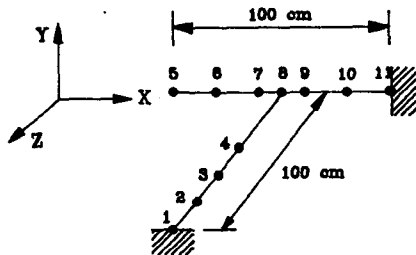


그림 10. 동적해석을 위한 파이프 설비 예제의 모형

표 3. 진동수의 비교 ( Hz )

모우드	경우 1	경우 2	경우 3
1	368.6	363.6	442.0
2	380.3	373.1	446.9
3	429.5	413.9	505.3
4	454.7	417.8	533.3
5	1220.1	425.2	991.1

### 5. 결론

파이프 설비의 접합부에서 나타나는 유연성 효과를 고려하기 위해 본 연구에서 새로운 요소를 개발하였다.

개발된 요소를 사용하여 정적 동적 해석을 할 수 있는 전산코드를 완성하고 간단한 파이프 설비에 대한 예제 해석을 함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보요소만에 의한 파이프 설비의 해석은 접합부의 유연성을 고려하지 못하므로 실제 파이프의 접합부에서 생기는 변위보다 작게 산정되고 부재력은 크게 계산되며 이러한 영향은 파이프의 직경이 크고 두께가 얇은 경우에 크게 된다.
2. 주파이프의 단면 형상 변화에 의한 모우드를 방지하고 접합부에 의해 연결되고 있는 작은 파이프의 길이를 변화시켜 진동수를 구해 비교하여 보면 본 연구에서 제안된 방법에 의한 결과는 SAP IV의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.
3. 정적 동적 해석 결과 본 연구에서 개발한 파이프 접합부 해석 모델은 접합부의 유연성 효과를 잘 나타내고 있으며 쉘요소의 사용에 의한 비효율성을 극복할 수 있고 보요소만의 사용에 의한 결과보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.
4. 파이프 설비의 접합부 변형을 고려하기 위해 본 연구에서 개발된 가상요소를 사용하기 위해서는 접합부의 특성을 나타내는 3개의 스프링의 강성값이 요구되며 여러가지 조건에 의해 영향을 받는 강성값을 결정할 수 있는 방법의 개발이 필요하다.

### 참고 문헌

1. I. Goozman, V. K. Datta and S. P. Nandi, "Analysis and Design Structures in BWR Plants for Pipe Rupture Effects", Structural Design of Nuclear Plant Facilities, Vol. 1-B, December, 1975
2. V. N. Shah, A. J. Hartmann, Nonlinear Dynamic Analysis of a Structure Subjected to Multiple Support Motions", Journal of Pressure Vessel Technology, ASME, Vol. 103, pp.27-32
3. S. Gupta, D. P. Jhaveri, O. Kustu and J. H. Blume, "A Comparative Study of Combination Method Used in Response Spectrum Analysis of Nuclear Piping Systems", Journal of Pressure Vessel Technology, ASME., Vol 106, 1984, pp.25-31
4. K. Gordis, "Outline of Dynamic Analysis for Piping Systems", Nuclear Engineering and Design, Vol. 52, pp.99-110
5. W. Weaver, Jr. and J. M. Gere, "Matrix Analysis of Framed Structures", Van Nostand, 1972
6. W. Weaver, Jr. and Paul P. Johnston, "Structural Dynamics by Finite Elements", 1984
7. W. Weaver, Jr. and Paul P. Johnston, "Finite Elements for Structural Analysis", Prentice-Hall Inc., 1984
8. M. Paz, "Structural Dynamics", Van Nostrand, 1985
9. J. S. Prezemienieki, "Theory of Matrix Structural Analysis", Mcgraw-Hill, 1968
10. R. Craig, Jr., "Structural Dynamics", Wiley, 1981
11. R. W. Clough and J. Penzien, "Dynamics of structures", Mcgraw-Hill, 1975
12. J. M. Biggs, "Introduction to Structural Dynamics", Mcgraw- Hill, 1982