

보구조물의 유연이음을 이용한 쉘구조물의 기하학적 비선형해석에 관한 연구

A Study on the Geometrically Nonlinear Analysis of Shell Structures Using the Flexible Joints of Beam Structures

김 성 익*
Kim, Sung-Ick

이 창 훈**
Lee, Chang-Hun

민 옥 기***
Min, Oak-Key

요 약

복잡한 구조물의 거동을 해석하는 데 있어서 초기 설계단계에서 부터 쉘요소를 사용하여 해석하는 것은 많은 시간과 경비가 요구된다. 이에 경비절감의 측면에서 쉘구조물을 단순 보구조물에 의해 모델링함에 의해 분석하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 단순화된 보구조물의 결합부에 고려하기 위한 유연도를 나타내는 굽힘회전강성을 결정하는 방법을 제안하고, 제안된 방법을 통해 얻어진 결합부에서의 유연도를 보구조물의 결합부에 적용하여 비선형해석을 수행한다. 수치해석 결과로 쉘구조물에서 나타나는 기하학적 비선형 거동을 결합부에서 유연도를 고려하는 단순 보구조물에 의해 작은 오차의 범위안에서 기술할 수 있었다.

Abstract

In the analysis of the behavior of a complex structure, it requires much time and cost to analyze its behavior by using shell elements at the early design concept. For the purpose of the decrease of time and cost, many researches have been performed with the intention to analyze its behavior through replacing a shell model by a simple beam model. In the present study, a method is proposed for determining a bending spring stiffness which means the flexibility for applying into the joints of the simple beam model. Geometrically nonlinear analysis is performed through the application of the determined flexibility into joints of the simple beam model. The nonlinear behavior of thin-walled tube shell structure can be described within a little error through the simple beam model with flexible joints.

Keywords : simple beam model, flexible joints, geometrically nonlinear analysis

1. 서 론

지난 수년간 자동차산업을 중심으로 경량이면서 안전도와 승차감이 증가된 차량을 개발하기 위해 차체구조의 해석에 많은 관심이 있어 왔다. 차

량의 개발에 필요한 차체구조의 해석에는 컴퓨터를 이용한 방법이 해석에 소요되는 시간과 경비의 절감 및 신뢰의 측면에서 필수적인 방법이다. 복잡한 구조의 차체를 이론적으로 분석하는 것은 거의 불가능하며, 실제 차체를 대상으로 한 실험분

* 국방과학연구소

** 현대자동차(주)

*** 정회원, 연세대학교 기계설계학과, 교수

• 이 논문에 대한 토론을 1997년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

석 또한 많은 시간과 경비를 요구하므로 다량으로 수행하기에는 많은 제약이 뒤따른다. 따라서 차체의 분석에는 실제 차체의 실험과 컴퓨터를 이용한 해석이 병행되어 왔다. 한편, 컴퓨터를 이용한 해석시 구조변경이 잦은 초기 설계단계에서 일반 셸 요소를 이용하여 차체의 거동을 해석하고자 할 때 모델의 작성과 분석에 많은 시간과 경비가 요구되고 있다. 이에 해석효율을 높이기 위해 차체구조의 일부분을 단순한 보요소로 모델링함에 의해 분석하고자 하는 방법의 개발에 많은 연구자들이 노력을 기울여 오고 있다.

최근에 차체의 초기 설계단계에서 저차의 고유모드를 나타내는 진동수에 대한 평가를 위해, 복잡한 셸모델 대신에 단순한 보모델에 의해 차체의 진동특성을 평가하려는 연구가 진행되어 왔다. 이들 연구들은 보모델의 결합부에서의 강성이 셸모델의 결합부에서의 강성에 비해 크게 평가되어 셸모델의 진동특성을 제대로 묘사하지 못하고 있음을 지적하고, 보모델의 결합부에 유연도를 나타내는 회전강성을 고려하여 강체이음 보모델에 의해 발생하는 고유진동수의 오차를 개선하고자 하였다.^[1,2,3] 이 연구들은 주로 셸구조물의 결합부를 포함하는 성분모델인 결합부모델의 선형 진동특성을 살펴보는 연구로 진행되어 왔다. 한편, 차체구조물과 같이 박판 튜브로 이루어진 구조물의 거동을 결합부에서 유연도를 고려하는 보구조물로 단순화하여 해석하려는 연구^[4]가 수행되어지기도 하였으나, 주로 단순화된 보구조물의 결합부에서의 유연도변화가 구조물의 선형 정적거동에 미치는 영향을 연구하였다.

구조물의 비선형거동의 원인은 주로 구조부재의 기하학적인 변형에 기인하여 발생하는 기하학적 비선형성과 재료의 비선형거동에 의해 발생하는 재료의 비선형성에 기인한다. 본 연구에서는 박판 사각튜브로 이루어진 셸구조물의 기하학적 비선형거동을 결합부에서 유연도를 고려하는 단순 보구조물에 의해 기술하고자 한다. 이를 위해 단순 보구조물의 결합부에 고려하기 위한 유연도를 결정하기 위한 방법을 제안하고, 제안된 방법을 통해 얻어진 결합부에서의 유연도를 단순 보구

조물의 결합부에 적용하여 비선형해석을 수행하고자 한다. 그리고 단순 보구조물의 기하학적 비선형해석을 통해 얻어진 해석결과와 셸구조물에서 나타나는 기하학적 비선형거동을 비교함에 의해 본 연구의 타당성을 살펴보고자 한다.

2 이 론

대표적인 성분모델인 T,L형 결합부모델의 결합부에서의 유연도를 나타내는 선형 굽힘회전강성을 결정하기 위한 방법^[3]을 언급하고, 비선형해석시 때 증분단계에서 필요로 되어지는 선형증분 굽힘회전강성식을 제안한다. 결합부모델의 결합부에서의 유연도를 단순 보구조물의 결합부에 적용하여 비선형해석을 수행하기 위해 양단에 유연요소를 갖는 보요소의 증분강성행렬^[5,6,7]과 비선형 알고리즘으로 변위증분 알고리즘^[8]을 사용하여 개발한 비선형해석 프로그램에 관하여 소개한다. 본 연구에서는 단순 보구조물의 결합부에서 고려하는 유연도를 나타내는 회전강성으로서 굽힘회전강성만을 고려한다.

2.1 결합부모델의 선형 굽힘회전강성

박판 사각튜브로 이루어진 T형 결합부모델을 셸모델 대신에 단순 보요소에 의해 모델링함에 있어 고려하여야 하는 결합부에서의 유연도를 나타내는 굽힘회전강성을 결정하기 위해 그림 1에서와 같이 T형 결합부모델이 보요소 모델에 의해 등가된다고 생각한다. 그림 1에서 L_1 은 T형 결합부모델의 수직부재의 길이, $2L_2$ 는 수평부재의 길이, H 는 단면특성길이, t 는 두께를 나타낸다. 또한 L 은 등가된 보요소의 수직부재의 길이를 나타낸다. 또

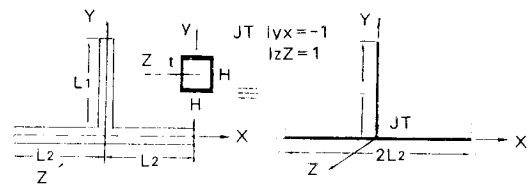


그림 1 결합부에서 유연도를 고려하는 보모델로 등가된 T형 결합부모델

한 JT는 유연도를 고려하는 보모델의 결합부의 위치를 나타낸다. 그림 1에서 l_{yX} 는 X축에 대한 결합부 JT의 단면 중심축인 y축의 방향여현을 나타내며, l_{zZ} 는 Z축에 대한 결합부 JT의 단면 중심축인 z축의 방향여현을 의미한다.

수직부재의 양단이 고정된 T형 결합부모델의 수직부재의 자유단에 X축의 양의 방향으로 하중 F_X 가 작용하는 경우, 보모델의 결합부 JT에서의 유연도를 나타내는 수직부재의 단면 중심축인 z축 방향으로의 선형 굽힘회전강성 K_{fz} 를 결정하는 방법을 생각한다. 작용하중의 크기가 작고, 결합부에서의 모멘트-회전각 관계가 선형인 것으로 가정하면, 보모델의 결합부에서의 유연도를 나타내는 모멘트-회전각 관계는 다음과 같이

$$M_{fz} = K_{fz} \theta_{fz} \tag{1}$$

선형적으로 표현할 수 있다. 식(1)에서 M_{fz} 는 결합부에 의해 전달되는 Z축 방향의 모멘트, K_{fz} 는 결합부에서 고려되는 수직부재의 단면 중심축인 z축 방향의 선형 굽힘회전강성, θ_{fz} 는 결합부에서의 Z축 방향의 회전각을 의미한다.

보모델에서 고려해야 하는 결합부에서의 회전각 θ_{fz} 는 쉘요소 모델링에 의해 결과한 수직부재의 결합부에서의 회전각 θ_z 와 강체이음을 가정하는 보요소 모델링에 의해 결과한 수직부재의 결합부에서의 회전각 θ_{bz} 의 차이를 나타내는 상대 회전각을 의미한다. 즉 θ_{fz} 는

$$\theta_{fz} = \theta_z - \theta_{bz} \tag{2}$$

와 같이 정의된다.

결합부에서의 회전각과 수직부재의 자유단에서의 최대변위와의 관계를 두 모델에 대해 도식적으로 표현하면 그림 2에서와 같다.

그림 2에서 δ_X 는 쉘요소로 모델링하여 해석적으로 얻어지는 수직부재의 자유단에서의 최대변위, δ_{bX} 는 강체이음을 가정하는 보요소로 모델링하여 해석적으로 얻어지는 수직부재의 자유단에서의

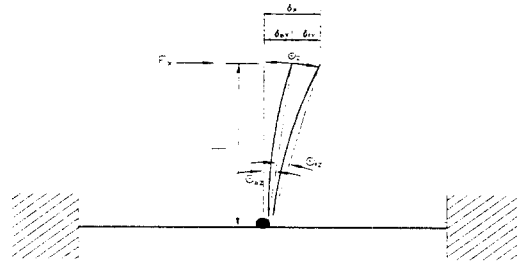


그림 2 결합부에서의 회전각과 수직부재의 자유단에서의 최대변위와의 관계

최대변위, 그리고 δ_{fX} 는 두 최대변위의 차를 의미하며, 이는 쉘모델의 유연성에 기인한 변위를 나타낸다. 수직부재의 자유단에서의 최대변위가 작다고 가정하면, 회전각 θ_z , θ_{bz} 은 수직부재의 길이와 자유단에서의 최대변위의 비로서 다음과 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$\theta_z \simeq \frac{\delta_X}{L}, \theta_{bz} \simeq \frac{\delta_{bX}}{L} \tag{3}$$

식(2)와 식(3)의 관계로부터 보모델의 결합부에서 고려해야 하는 결합부에서의 회전각 θ_{fz} 는 다음과 같이

$$\theta_{fz} = \frac{1}{L}(\delta_X - \delta_{bX}) = \frac{1}{L} \delta_{fX} \tag{4}$$

수직부재의 자유단에서의 두 모델의 최대변위의 차에 의해 표현될 수 있다.

한편, 수직부재의 자유단에 X축의 양의 방향으로 작용하는 하중 F_X 에 의해 보모델의 결합부에 전달되는 모멘트 M_Z 은

$$M_Z = F_X L \tag{5}$$

와 같다. 또한 결합부에 의해서 전달되는 모멘트 M_{fz} 와 결합부에 전달되는 모멘트 M_Z 가 같다는 가정^[2]으로부터

$$M_{fz} = M_Z \tag{6}$$

의 관계가 성립한다. 따라서 식(4)와 식(6)의 관계를 식(1)에 대입하고, 보모델의 결합부에서 고려되어야 할 수직부재의 단면 중심축인 z축 방향에서의 선형 굽힘회전강성 K_{fz} 에 대해 정리하면

$$K_{fz} = \frac{M_z L}{\delta_{fz}} = \frac{F_x L^2}{\delta_x - \delta_{bx}} \quad (7)$$

와 같다. 식(7)에서 결정된 보모델의 결합부에서의 굽힘회전강성값은 각 절점에서 유연도를 고려하는 유한 보요소의 끝단에서 입력데이터로 요구되는 무차원 회전강성계수로 변환되어야 한다. 즉, 길이가 L인 수직부재를 유한 보요소로 모델링할 때 유연도가 고려되는 유한 보요소의 길이를 l이라 하면, 유한 보요소의 한 쪽 끝단에서 고려되는 무차원 굽힘회전강성계수 k_{fz} 은 결합부에서의 굽힘회전강성값인 K_{fz} 과 다음의 관계가 있다.^[5]

$$K_{fz} = k_{fz} \frac{EI}{l} \quad (8)$$

그러므로 길이가 l인 유한 보요소에서 고려되어야 하는 무차원 회전강성계수 k_{fz} 은 식(8)에 식(7)의 관계를 대입하고 k_{fz} 에 대해 정리하면

$$k_{fz} = K_{fz} \frac{l}{EI} = \frac{F_x L^2 l}{EI(\delta_x - \delta_{bx})} \quad (9)$$

와 같이 얻어진다. 식(9)는 T형 결합부모델의 경우에 대해 등가된 보모델의 결합부에서 고려되어야 할 수직부재의 단면 중심축인 z축 방향에서의 무차원 선형 굽힘회전강성값을 나타낸다. 이 식에서 δ_x , δ_{bx} 는 유한요소 모델링에 의해 수치해석적으로 결정되어진 값이므로, 식(9)는 L형 결합부모델에 대해서도 적용이 가능한 보모델의 결합부에서의 무차원 선형 굽힘회전강성식을 나타낸다. 따라서 작용하중이 선형인 범위내에서 작용한다고 가정하면 결합부에서의 무차원 굽힘회전강성계수 k 는 일반적으로 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$k = \frac{FL^2 l}{EI(\delta - \delta_b)} = \frac{L^2 l}{EI(\frac{\delta}{F} - \alpha)} \quad (10)$$

식(10)에서 δ 는 실험 혹은 셸요소로 모델링하였을 때의 하중작용점에서의 최대변위, δ_b 는 강체이음을 가정하는 보요소로 모델링하여 해석적으로 얻어지는 하중작용점에서의 최대변위, α 는 단위 하중당 발생하는 보요소 모델링에 의한 하중작용점에서의 변위인 δ_b/F 를 나타낸다.

2.2 결합부모델의 선형증분 굽힘회전강성

본 절에서는 박판 사각튜브로 이루어진 결합부모델의 기하학적 비선형거동을 셸모델 대신에 단순 보모델에 의해 기술하고자 단순 보모델의 결합부에서 고려되어야 하는 유연도를 나타내는 모멘트-회전각 관계를 얻기 위해 다음과 같이 매 증분 단계에서의 증분하중의 크기가 작다고 가정하고, 이러한 증분하중구간에서 보모델의 결합부에 고려되어야 할 모멘트-회전각 관계를 선형적인 것으로 가정한다. 매 증분단계에서 증분하중의 크기가 충분히 작게 취해지므로, 결합부의 유연도를 나타내는 모멘트-회전각 관계를 선형적인 것으로 가정하여 사용하여도 실제 요구되는 비선형 모멘트-회전각 관계를 사용하여 얻어진 결과와 많은 차이를 보이지 않을 것이라 사료된다.

이러한 가정아래 매 증분하중구간에서 보모델의 결합부에 고려해야 하는 무차원 굽힘회전강성계수 Δk 를

$$\Delta k = \frac{L^2 l}{EI(\frac{\Delta \delta}{\Delta F} - \alpha)} \quad (11)$$

와 같이 가정하여 사용한다. 식(11)에서 결정되어지는 무차원 굽힘회전강성계수 Δk 는 하중 증분단계동안 일정한 값을 가진다. 식(11)에서 $\Delta \delta$ 는 실험 혹은 셸요소로 모델링하였을 때 비선형성이 포함된 하중증분에 따른 하중작용점에서의 최대변위의 차, ΔF 는 증분하중의 크기, α 는 단위 하중당 발생하는 보요소 모델링에 의해 결과한 선형변위

의 비를 나타낸다. 식(11)에서의 무차원 굽힘회전 강성계수 Δk 는 쉘요소 모델링에 의한 기하학적인 비선형성이 포함된 선형증분 굽힘회전강성을 나타낸다.

따라서 매 증분단계에서 단순 보모델의 결합부에 고려해야 할 모멘트와 회전각 사이의 관계는 식(1)과 식(8)의 관계로부터

$$\Delta M = \Delta k \frac{EI}{l} \Delta \theta \quad (12)$$

와 같이 선형적으로 얻어진다.

2.3 비선형해석 프로그램

앞 절에서 쉘구조물의 기하학적 비선형거동을 결합부에서 유연도를 고려하는 단순 보구조물에 의해 기술하고자 성분모델인 결합부모델의 결합부에서의 비선형 모멘트-회전각 선도를 결정하기 위한 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 이와같이

결정된 결합부에서의 유연도를 고려하는 단순 보구조물의 기하학적 비선형해석을 수행하고자, 양단에서 유연요소를 갖는 보요소의 증분강성행렬과 비선형 알고리즘으로 변위증분 알고리즘⁽⁸⁾을 사용하여 비선형해석 프로그램인 NESAP(Non-linear Elastic Spatial frame Analysis Program)를 작성하였다. 작성된 비선형해석 프로그램인 NESAP의 흐름도는 그림 3에서와 같다.

3. 수치해석

수치해석에서는 박판 사각튜브로 이루어진 결합부모델에 대한 비선형해석을 통하여 결과된 결합부에서의 유연도를 단순 보구조물의 결합부에 적용하여 비선형해석을 수행한 후, 쉘구조물에서 나타나는 비선형거동과의 비교를 통하여 본 연구의 타당성을 살펴본다. 본 연구에서는 이를 위해 단면특성길이 $H=30\text{mm}$, 두께 $t=1.5\text{mm}$ 인 박판 사각튜브로 이루어진 프레임구조물을 고려한다. 또한 쉘구조물을 모델링하고 기하학적 비선형해석을 수행하기 위해 전문 프로그램인 ABAQUS⁽⁹⁾를 사용한다. 본 연구에서 고려하는 박판 사각튜브의 기하학적 물성치와 재료의 물성치는 표 1에 수록한다.

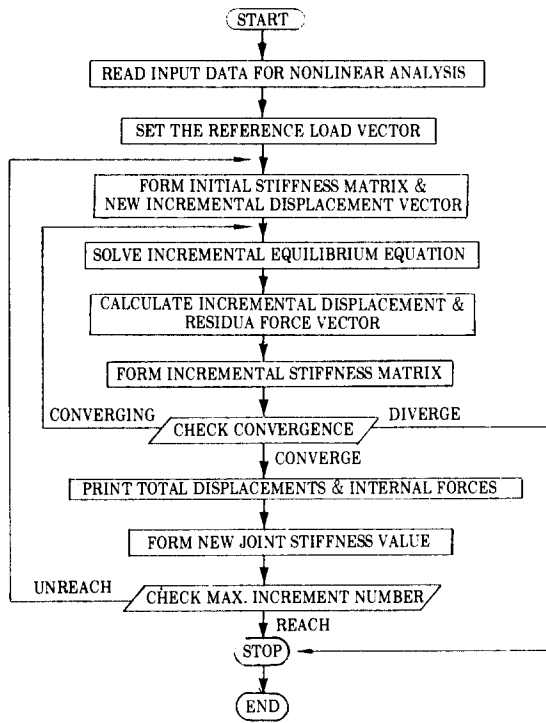


그림 3 NESAP의 흐름도

표 1 박판 사각튜브의 물성치

Geometric properties	Area A(mm ²)	171.00
		Torsion constant J(mm ⁴)
	Moment of inertia Iy(mm ⁴)	23213.25
Material properties	Young's modulus(kgf/mm ²)	21000.00
	Shear modulus(kgf/mm ²)	8076.92

3.1 결합부모델의 유연특성

본 절에서는 성분모델인 TL형 결합부모델에 대해 결합부의 유연도를 나타내는 모멘트-회전각 선도를 앞 장에서 제안한 굽힘회전강성식(11)과 모멘트-회전각 관계식(12)를 이용하여 결정한다. 본 연구에서는 ABAQUS에서 쉘모델의 기하학적 비선형해석을 통해 얻어진 해석이 가능한 하중-변

위구간만을 고려한다. 각 결합부모델에 대해 얻어진 결합부에서의 유연도를 나타내는 모멘트-회전각 선도는 다음과 같다.

3.1.1 T형 결합부모델

T형 결합부모델을 보요소로 모델링한 경우의 기하학적인 형상은 그림 4에서와 같다.

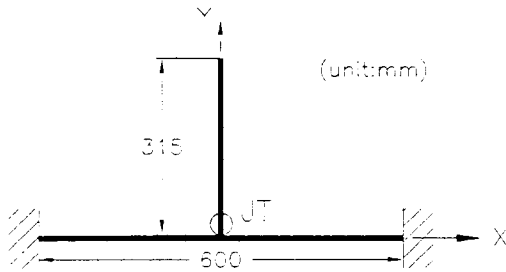


그림 4 단순 보모델에 의해 등가된 T형 결합부모델

그림 4에서 JT는 보요소로 모델링한 경우 쉘요소의 유연특성을 고려하기 위한 결합부의 위치를 나타낸다. T형 결합부모델을 유한 보요소로 모델링하기 위해 사용된 요소의 수는 15개이고, 총 절점수는 16개이다. 또한 그림 5에서와 같이 해석모델을 ABAQUS에서 쉘요소로 모델링하기 위해 사용한 쉘요소의 수는 124개이며, 절점의 수는 504개이다.

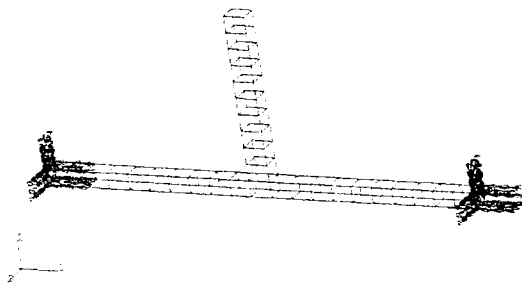


그림 5 T형 결합부모델의 쉘요소 모델링

T형 결합부모델의 수직부재의 자유단에 X축의 양의방향으로 집중하중이 작용하는 경우를 생각한다. 이 경우에 있어 보모델의 결합부 JT에서 고려되어야 할 모멘트-회전각 선도는 증분하중구간이 선형이라고 가정함에 의해 그림 6에서와 같이

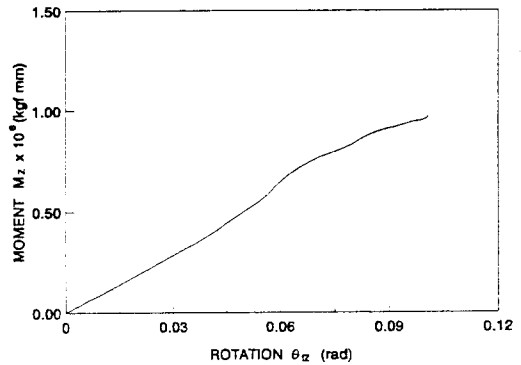


그림 6 면내하중 F_x 를 받는 T형 결합부모델의 모멘트-회전각 관계

얻어진다.

다음으로 T형 결합부모델의 수직부재의 자유단에 Z축의 양의방향으로 집중하중이 작용하는 경우를 생각한다. 이 경우에 있어 보모델의 결합부 JT에서 고려되어야 할 모멘트-회전각 선도는 증분하중구간이 선형이라고 가정함에 의해 그림 7에서와 같이 얻어진다.

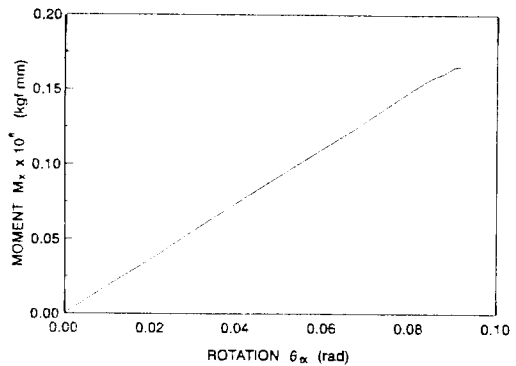


그림 7 면외하중 F_z 를 받는 T형 결합부모델의 모멘트-회전각 관계

3.1.2 L형 결합부모델

L형 결합부모델을 보요소로 모델링한 경우의 기하학적인 형상은 그림 8에서와 같다.

그림 8에서 JL은 L형 결합부모델을 보요소로 모델링한 경우 쉘요소의 유연특성을 고려하기 위한 결합부의 위치를 나타낸다. L형 결합부모델을

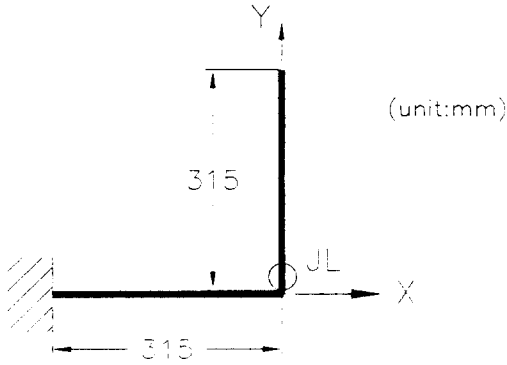


그림 8 단순 보모델에 의해 등가된 L형 결함부모델

유한 요소로 모델링하기 위해 사용된 요소의 수는 10개이고, 총 절점수는 11개이다. 또한 그림 9에서와 같이 해석모델을 쉘요소로 모델링하기 위해 사용한 쉘요소의 수는 85개이며, 절점의 수는 345개이다.

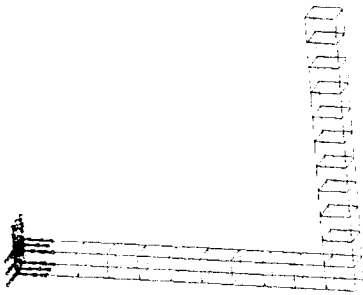


그림 9 L형 결함부모델의 쉘요소 모델링

L형 결함부모델의 수직부재의 자유단에 X축의 음의방향으로 집중하중이 작용하는 경우를 생각한다. 이 경우에 있어 보모델의 결함부에서 고려되어야 할 모멘트-회전각 선도는 그림 10에서와 같이 얻어진다.

L형 결함부모델의 수직부재의 자유단에 Z축의 양의방향으로 집중하중이 작용하는 경우를 생각한다. 이 경우에 있어 보모델의 결함부에서 고려되어야 할 모멘트-회전각 선도는 그림 11에서와 같이 얻어진다.

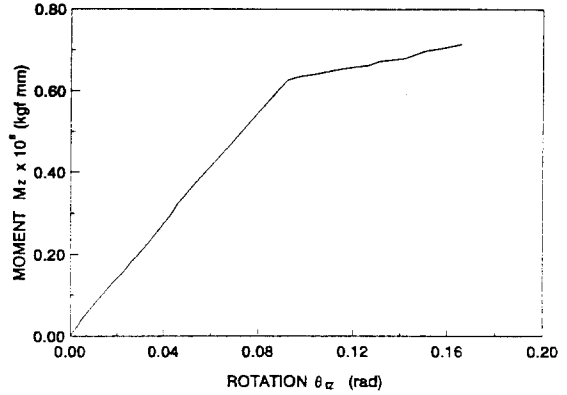


그림 10 면내하중 F_x를 받는 L형 결함부모델의 모멘트-회전각 관계

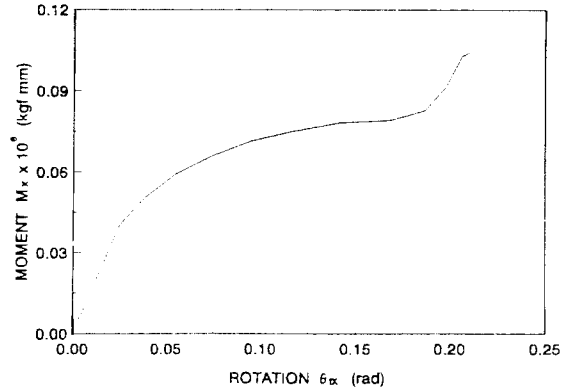


그림 11 면외하중 F_z를 받는 L형 결함부모델의 모멘트-회전각 관계

3.2 경계단의 유연특성

경계단의 고정조건을 고려하기 위해 그림 12에서와 같이 자유단에서 수직하중을 받는 외팔보를 생각한다.



그림 12 경계단에서 유연도를 고려하는 외팔보모델

그림 12에서 I_{yX} 는 X축에 대한 부재의 단면 중심축인 y축의 방향여현을, I_{zZ} 은 Z축에 대한 부재의

단면 중심축인 z축의 방향여현을 나타낸다. 해석 모델을 유한 요소로 모델링하기 위해 사용한 요소의 수는 5개이고, 총 절점수는 6개이다. 또한 셸 요소로 모델링하기 위해 사용한 셸요소의 수는 41개이며, 절점의 수는 169개이다. 그림 12에서 JB는 유연도가 고려되는 경계단의 위치를 나타낸다. 경계단이 고정된 외팔보모델의 경계단 JB에서 고려되어야 할 모멘트-회전각 선도는 그림 13에서와 같이 얻어진다.

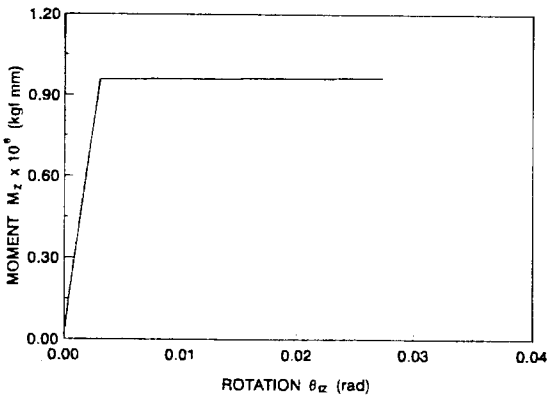


그림 13 수직하중 FY를 받는 외팔보모델의 모멘트-회전각 관계

3.3 박판 사각튜브 셸구조물의 비선형해석

박판 사각튜브로 이루어진 셸구조물의 비선형 거동을 단순 보구조물에 의해 기술하고자 보구조물의 결합부와 경계단에 앞 절에서 결정된 T,L형 결합부모델과 외팔보모델의 유연도를 고려하여 기하학적 비선형해석을 수행한다.

3.3.1 2베이(bay) 포탈 프레임 셸구조물의 비선형해석

해석모델로서 T형과 L형 결합부모델을 가지고, 경계단이 고정된 박판 사각튜브로 이루어진 2베이 포탈 프레임(portal frame)구조물을 생각한다. 경계단이 고정되고 수직부재의 한 쪽 끝에서 X축의 양의 방향으로 하중을 받는 2베이 포탈 프레임구조물의 보요소 모델링에 대한 기하학적인 형상은 그림 14와 같다.

그림 14에서 JL, JT는 각각 L형, T형 결합부모

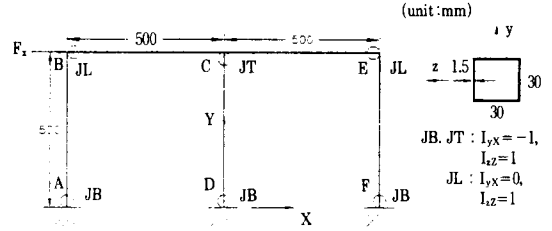


그림 14 2베이 포탈 프레임구조물의 유연이음 보요소 모델링

델의 결합부에서의 유연도를 고려하는 위치를 나타내고, JB는 경계단에서의 유연도를 고려하는 위치를 나타낸다. 또한 I_{yX} 는 X축에 대한 부재의 단면 중심축인 y축의 방향여현을, I_{zZ} 은 Z축에 대한 부재의 단면 중심축인 z축 방향의 방향여현을 나타낸다. 해석모델에 대해 각 부재의 단면 중심축인 z축 방향에서의 굽힘회전강성을 고려한다.

해석모델을 ABAQUS에서 셸요소로 모델링하기 위해 사용한 총 요소수는 211개이고, 총 절점수는 855개이다. 또한 NESAP에서 보요소로 모델링하기 위해 사용한 총 요소수는 25개이고, 총 절점수는 26개이다. 해석모델을 ABAQUS에서 셸요소로 모델링하고, 비선형해석을 수행하여 하중작용점에서의 최대변위가 145(mm)일때 11,400(kgf)의 하중을 얻었다. 본 연구에서는 셸모델의 비선형해석을 통해 얻어진 하중-변위구간을 고려한다. 비선형해석 프로그램인 NESAP에서의 해석을 수

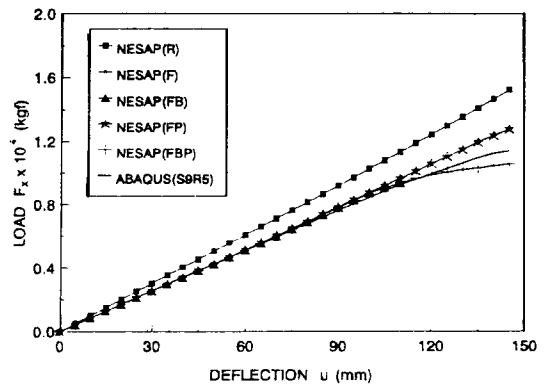


그림 15 수평하중 Fx를 받는 2베이 포탈 프레임구조물의 기하학적 비선형거동

행하기 위해 하중작용점에서의 증분변위의 크기를 0.05(mm)로 하고, 전 변위의 크기를 145(mm)로 한다. 해석결과는 그림 15에서와 같다.

그림 15에서 횡측은 하중작용점에서의 최대변위를 나타내며, 종측은 작용하중의 크기를 나타낸다. 해석결과에서 보여지는 각 기호에 대한 설명은 표 2에 수록한다.

표 2 그림 15의 기호 해설

Legend	Element	Joints	Flexibility	Max. displacement (mm)	Note
NESAP(R)	beam	-	rigid	145	-
NESAP(F)	beam	JT, JL	그림 6, 그림 10	130	Prescribed moment
NESAP(FB)	beam	JT, JL, JB	그림 6, 그림 10, 그림 13	110	Prescribed moment
NESAP(FP)	beam	JT, JL	그림 6, 그림 10	145	-
NESAP(FBP)	beam	JT, JL, JB	그림 6, 그림 10, 그림 13	145	-
ABAQUS(S9R5)	shell	-	-	145	-

표 2에서 Joints는 그림 14에서 정의된 유연도를 고려하는 결합부를 나타내고, Flexibility는 결합부에서 고려되는 유연도를 의미한다. Prescribed moment는 NESAP에서 비선형해석을 수행함에 의해 얻어진 결합부 JT, JL 혹은 JB에서의 모멘트가 그림 6, 그림 10 혹은 그림 13에서의 최대모멘트값에 도달되면 NESAP에서 비선형해석을 중단한 경우의 해석결과를 나타낸다. 또한 ABAQUS(S9R5)는 전문 프로그램인 ABAQUS에서 해석모델을 9절점 사면형 쉘요소인 S9R5 쉘요소를 사용하여 모델링한 후 해석한 결과를 나타낸다.

그림 15에서 보여지듯이 강제이음을 가정한 보 요소 모델링에 의한 해석결과와 쉘요소 모델링에 의한 해석결과가 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 14와 같이 등가된 단순 보구조물의 결합부 JL, JT와 경계단 JB에 앞에서 결정된 유연도를 고려한 결과, NESAP를 통해 결과된 보 모델의 해석결과가 전문 프로그램인 ABAQUS를 통해 얻어진 쉘모델에 의한 해석결과에 접근하고 있음을 알 수 있다. 규정된 모멘트까지의 해석결과를 살펴보면, NESAP(F)에 의한 해석결과와

NESAP(FB)에 의한 해석결과가 $u=110(\text{mm})$ 까지는 거의 일치하고 있으나, NESAP(FB)에 의한 해석결과는 이 후에 더 진행하고 있지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 NESAP을 통해 얻어진 결합부 JT, JL에서의 모멘트값이 그림 6 혹은 그림 10에서와 같이 규정된 모멘트값에 도달하기 전에 경계단 JB에서의 모멘트값이 그림 13에서와 같이 규정된 모멘트값에 일찍 도달하여 있음을 보여준다.

수평변위 u 의 크기가 145(mm)에 도달될 때까지 비선형해석을 진행하였을 경우의 해석결과를 살펴보면, NESAP(FP)와 NESAP(FBP)가 하중작용점에서의 수평변위가 110(mm)인 지점까지는 같은 거동을 나타내었으나, 그 이후에는 다른 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 결합부에서의 모멘트값에 비해 먼저 규정된 모멘트값에 도달한 경계단 JB에서의 회전강성값이 이후의 거동에 대해 일정하게 유지됨에 따라 나타나는 결과라 사료된다. 한편, 본 절에서 고려하는 최대변위점에서 NESAP(FP)을 통해 얻어진 하중값은 쉘모델에 의해 얻어진 하중값 보다 약 12% 정도 크게 나왔으며, NESAP(FBP)를 통해 얻어진 하중값은 쉘모델에 의해 얻어진 하중값 보다 약 7%정도 작게 나왔다. 이들 결과들로부터 본 절에서 고려하는 쉘요소로 모델링한 해석모델의 비선형거동은 결합부 JT, JL과 경계단 JB에 그림 6, 그림 10, 그리고 그림 13에서와 같이 결정된 유연도를 고려하는 단순 보모델에 의해 약 7%정도의 오차 범위안에서 기술될 수 있음을 알 수 있다.

3.3.2 공간 포탈 프레임 쉘구조물의 비선형해석

박판 사각튜브로 이루어진 3차원 해석모델로서 그림 16에서와 같이 경계단이 고정되고 수직부재의 한쪽 끝단에서 X축의 양의방향으로 집중하중을 받는 구조물을 생각한다. 공간 포탈 프레임구조물을 보구조물로 단순화시킨 모델의 기하학적 인 형상은 그림 16과 같다.

해석모델을 ABAQUS에서 쉘요소로 모델링하기 위해 사용한 요소의 수는 332개이고, 절점수는 1340개이다. 또한 NESAP에서 보요소로 모델링하기 위해 사용한 요소의 수는 40개이고, 총 절점수

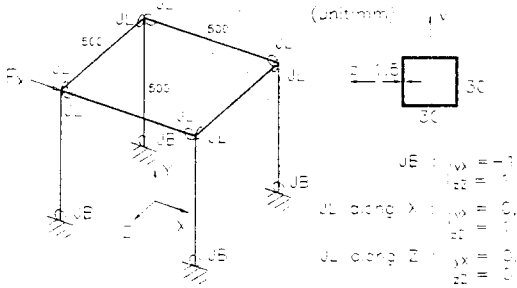


그림 16 공간 프레임구조물의 유연이음 보요소 모델링

는 40개이다. 그림 16에서 JL은 L형 결합부모델의 결합부에서의 유연도를 고려하는 위치를 나타내고, JB는 경계단에서의 유연도를 고려하는 위치를 나타낸다. 또한 I_{yx} 는 X축에 대한 부재의 단면 중심축인 y축의 방향여현을, I_{yz} 은 Z축에 대한 부재의 단면 중심축인 z축 방향의 방향여현을 나타낸다. 본 연구에서 제한한 결합부에서의 유연도를 나타내는 회전강성식은 굽힘회전강성에 관하여 제안되었다. 따라서 본 연구에서는 그림 16에서와 같은 3차원 해석모델의 결합부에서 고려되는 회전강성으로 각 부재의 단면 중심축인 y축 방향과 z축 방향에서의 굽힘회전강성만을 고려한다. 3차원 해석모델을 전문 프로그램인 ABAQUS에서 쉘요소로 모델링하고 비선형해석을 수행하여, 하중작용점에서의 최대변위가 94.2(mm)일때 5,060(kgf)의 하중을 얻었다. 본 연구에서는 이와같이

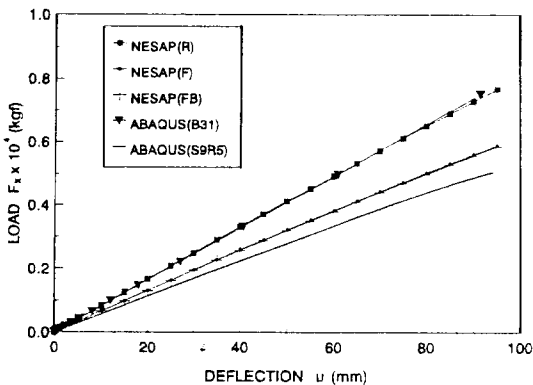


그림 17 수평하중 F_x 를 받는 공간 프레임구조물의 기하학적 비선형거동

ABAQUS에서 쉘모델의 비선형해석을 통해 얻어진 하중-변위구간을 고려한다.

증분변위 알고리즘을 사용하는 NESAP에서의 해석을 수행하기 위해 하중작용점에서의 증분변위의 크기를 0.05(mm)로 하고, 전 변위의 크기를 95(mm)로 한다. 두 해석프로그램을 통해 얻어진 해석결과는 그림 17과 같다.

그림 17에서 횡축은 하중작용점에서의 최대변위를 나타내며, 종축은 작용하중의 크기를 나타낸다. NESAP(R)은 비선형해석 프로그램인 NESAP에서 강체이음을 가정한 보요소 모델링에 의한 해석결과를, NESAP(F)는 그림 10과 그림 11에서와 같이 결정된 L형 결합부모델의 결합부에서의 유연도를 결합부 JL에 고려한 경우의 해석결과를 나타내고, NESAP(FB)는 결합부 JL에 그림 10과 그림 11에서와 같이 결정된 L형 결합부모델의 결합부에서의 유연도를, 고정 경계단 JB에 그림 13에서와 같이 결정된 외판보의 고정 경계단에서의 유연도를 동시에 고려한 경우의 해석결과를 나타낸다. ABAQUS(S9R5)는 전문 프로그램인 ABAQUS에서 해석모델을 9절점 사변형 쉘요소인 S9R5 쉘요소를 사용하여 모델링한 후 해석한 결과를 나타내고, ABAQUS(B31)은 3차원 보요소인 B31 보요소로 모델링하여 얻어진 해석결과를 나타낸다.

그림 17에서 보여지듯이 강체이음을 가정한 보요소 모델에 의한 해석결과와 쉘요소 모델에 의한 해석결과가 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 보요소 모델의 결합부 JL과 경계단 JB에 앞 절에서 결정된 유연도를 고려한 결과, NESAP를 통해 결과된 보요소 모델의 해석결과가 ABAQUS를 통해 얻어진 쉘요소 모델에 의한 해석결과에 접근하고 있음을 보인다. 그러나 앞 절에서 고려한 평면상에서의 해석모델과 달리 3차원 해석모델을 결합부와 경계단에서 유연도를 고려한 단순 보구조물로 등가하여 해석한 결과는 고려되는 변위의 범위안에서 쉘모델에 의해 얻어진 해석결과와 약 15%정도의 차이를 보이고 있다. 이와같이 3차원 해석모델의 경우에 오차가 크게 나오는 것은 공간 프레임구조물의 결합부 JL에 유연도를 고려

하는 데 있어서 평면상에서 결정된 결합부 JL에서의 유연도를 공간 프레임구조물의 결합부에 직접 적용함에 의해 실제 공간 결합부에서 발생할지도 모르는 결합부간의 연성효과가 무시됨에 따라 기인하는 오차와 고려하는 유연도로서 굽힘회전강성만을 고려함에 의해 결과적으로 공간 프레임구조물에서 나타날지도 모르는 비틀림회전강성의 영향이 무시됨에 따라 발생하는 오차가 복합적으로 나타나 이러한 결과를 보이지 않았나 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 박판 사각튜브로 이루어진 셸구조물의 기하학적인 비선형기동을 보구조물로 단순화시켜 해석하고자 하는 취지에서 행하여 졌다. 이를 위해 본 연구에서는 대표적인 결합부모델인 T형, L형 모델의 결합부에서의 유연도와 경계단에서의 유연도를 결정하여 단순 보구조물의 결합부와 경계단에 적용하고 기하학적 비선형해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 박판 사각튜브로 이루어진 2베이 포탈 프레임 셸구조물에 대해 단순 보구조물의 결합부와 경계단에 본 연구에서 제안한 방법을 통해 얻어진 유연도를 고려하여 해석한 결과, 2베이 포탈 프레임 셸구조물의 기하학적 비선형기동을 약 7% 정도의 오차 범위안에서 기술할 수 있었다.

2. 공간 셸구조물의 경우에 단순 보구조물에 의해 해석한 결과는 셸구조물에 의한 해석결과와 약 15% 정도의 오차를 보이고 있었다. 이러한 오차를 개선하기 위해서 공간 결합부모델의 유연특성에 관한 연구와 결합부에서의 유연도를 나타내는 비틀림회전강성을 얻기 위한 연구가 앞으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 1994년도 연세대학교 학술연구비와 현대자동차의 지원에 의하여 이루어진 것으로 관계기관에 감사를 드립니다.

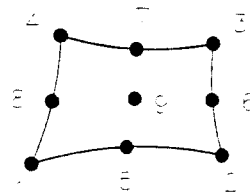
참 고 문 헌

1. Sakurai, T. and Kamada, Y., 1988, "Structural joint stiffness of automotive body," SAE, 880550
2. 김윤영, 김진홍, 강정훈, 임홍재, 1995, "박스 보 T형 조인트의 강성 평가에 관한 연구," 한국자동차 공학회논문집, 제3권, 제4호, pp.68-77
3. 이창훈, 1995, "셀요소 구조물과 유연이음 보요소 구조물의 등가방안," 연세대학교대학원, 석사학위논문
4. Chang, D.C., 1974, "Effects of flexible connections on body structural response," SAE Transactions, Vol.83, pp.233-244
5. Livesley, R.K., 1975, *Matrix method of structural analysis*, 2nd Ed., Pergamon Press, New York
6. Wen, R.K. and Rahimzadeh, J., 1983, "Nonlinear elastic frame analysis by finite element," J. Struct. Engng., Vol.109, No.8, pp.1952-1971
7. Chajes, A. and Churchill, J.E., 1987, "Nonlinear frame analysis by finite element methods," J. Struct. Engng., Vol.113, No.6, pp.1221-1235
8. Batoz, J.L. and Dhatt, G., 1979, "Incremental displacement algorithms for nonlinear problems," Int. J. Num. Meth. Engng., Vol.14, pp. 1262-1264
9. ABAQUS/Standard, 1994, *User's manual*, Ver.5.4, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.

(접수일자 : 1996. 11. 13)

부 록

전문 프로그램인 ABAQUS에서 박판 사각튜브로 이루어진 구조물의 셸모델링을 위해 사용한 셀요소로는 절점당 6개의 자유도를 갖는 9절점 사변형 셀요소인 S9R5 셀요소를 사용한다. 감작적분법(reduced integration)을 사용하는 S9R5 셀요소는 얇은(thin) 셸구조의 해석에서 그의 성능이 우수한 것으로 알려져 있다.



S9R5 셀요소