

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0035

원형단면을 포함하는 결합부의 강성평가 방법 연구

A Study on the Evaluation of the Flexibility of Joint Area including Circular Section

국종영*, 박상준*
Jongyoung Kuk, Sangjun Park

ABSTRACT

In this study, we considered the method evaluating the flexibility of joint area including member with circular section. We regarded the flexibility of joint area as translational and rotational springs for the purpose of expressing local deformation.

We verified this method by the use of normal mode analysis. We also calculated this joint area occurring in penetration so as to apply this method to other cases.

Compare with the shell element model, we can gain the considerably approximate values.

주요기술용어 : Joint Area(결합부), Circular Section(원형단면), Normal Mode Analysis(고유진동해석), Local Deformation(국부변형)

1. 서론

자동차는 서로 다른 기능을 가진 수많은 부품으로 구성되어 있다. 차량의 골격을 이루는 바디와 샤시 또한 서로 다른 성격을 가진 부재들이 다양한 방법으로 결합되어 있으며, 이러한 결합부의 특성은 차량의 구조적인 특성에 많은 영향을 미친다.

유한요소법을 이용하여 차량 구조를 해석하고자 할 때 결합부의 특성을 잘 표현하여야 하며, 결합부를 잘 표현하기 위해서는 쉘

요소로 실제와 같이 모델링하는 것이 좋은 방법이다. 하지만 해석기간, 해석모델의 간편성 및 경제성 등을 고려할 때 차체 전체를 쉘요소로 모델링하여 차체의 정적·동적 특성을 알아낸다는 것은 합리적인 방법이 아닐 것이다. 특히 차량의 초기 설계시에는 부정확한 단면형상과 개발기간 단축의 이유로 보요소를 사용하게 되는데, 보요소는 결합 특성상 실제 결합부보다 더 강하게 계산된다. 이러한 결합부의 특성을 적절하게 표현하지 못하면, 실제 결과와 상당한 차이의 오차를 보이게 된다. 따라서 보요소를 이용하여 결합부를 묘사할 경우, 결합부에 유연성을 고려하기 위하여 많은 연구가 행해져 왔다.

* 회원, 기아자동차

Lubkin¹⁾은 상용차에서 박스형 단면을 가진 구조물이 점용접으로 결합되어 있는 결합부의 유연성을 연구하였으며, Chang²⁾은 차체구조의 정적 해석에 회전스프링을 사용하여 결합부의 유연성을 고려하였다. Sunami^{3,4)} 등은 박스형 단면을 가진 T형 결합부와 L형 결합부에 대해 전단변형이 발생할 시 결합부의 특성을 연구하였다. 조규종⁵⁾ 등은 대형버스의 몇 가지 결합부에 대해 광탄성시험을 한 후 유효단면적을 계산하여 결합부의 단면특성을 보정하는 방법으로 문제를 해결하였다. 김윤영⁶⁾ 등은 박스형 단면을 가진 T형 결합부를 변형에너지에 의한 해석적인 방법을 통해 결합강성을 얻어내는 방법을 제시하였다. 박경진⁷⁾ 등은 전기자동차의 차체개발과 관련하여 보요소로 모델링된 결합부의 특성을 실험과 일치시키기 위해 최적화 방법을 이용하였다. 서종환⁸⁾ 등은 보요소 해석시 범하기 쉬운 오류를 보완하고 정밀도를 높이기 위하여, 결합부를 쉘요소로 모델링한 후 계의 자유도 수를 줄여 강성행렬과 질량행렬을 축약하는 방법으로 결합부를 계산하였다. 이와 같이 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 주로 박스형 단면을 가진 결합부에 대한 연구결과로 실제 차량의 수많은 결합부를 적절히 표현해 줄 수 있는가 하는 의문은 지금까지 명백히 풀리지 않고 있다.

본 연구에서는 지금까지 많은 연구로 검증이 되어 있는 박스형 단면을 가진 결합부와는 달리 원형 단면을 포함하여 다른 한 부재에 국부적인 변형이 발생하는 결합부에 대해 결합강성을 평가할 수 있는 방법을 생각해 보고, 이 방법을 상용자동차의 샤시 프레임에 많이 쓰이는 관통이 일어나는 원형 단면을 가진 결합부에 적용할 수 있도록 하고자 한다.

본 연구의 유한요소법을 이용한 계산은 범용 유한요소 해석 코드인 MSC/NASTRAN⁹⁾을 이용하였으며, 결합강성은 FORTRAN으

로 프로그래밍하여 계산하였다.

2. 결합부의 크기 선정

결합부의 유연성을 어떻게 보상할 것인가에 앞서 결합부의 길이를 얼마만큼으로 할 것인가는 결합강성의 평가에 있어서 또 하나의 중요한 인자이다. 片上哲史¹⁰⁾ 등은 결합부 부재의 길이를 단면폭의 약 3배로 선정하였으나 그 이론적인 근거는 제시하지 않았다. 김윤영¹¹⁾ 등은 결합부의 길이를 변화시켜 가면서 모멘트를 가하여 결합부의 변형에너지 밀도가 더 이상 변화하지 않는 크기를 결합부의 최소크기로 하였다.

따라서 본 연구에서도 정적모멘트에 대한 결합부의 변형에너지밀도를 살펴본 후 변형에너지밀도가 더 이상 변화하지 않는 부재의 길이를 결합부의 길이로 선정하였다.

Fig.1에서는 T형 결합부의 변형에너지밀도를 결합부 길이에 대해 표시하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 결합부의 길이가 400mm 이상이 될 경우에는 변형에너지의 밀도가 변화하지 않음을 알 수 있다.

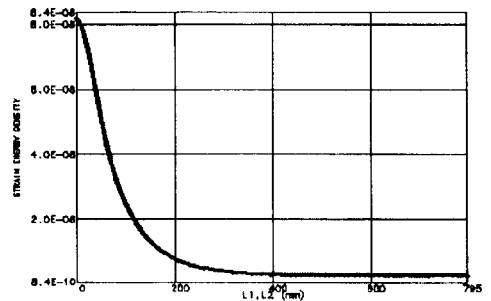


Fig.1 Strain energy density in member 2 when M_x is applied tip of member 1

3. 결합강성 평가

Fig.2와 같이 두개의 부재로 이루어져 있는 T형 결합부를 해석적으로 계산할 때 단순히

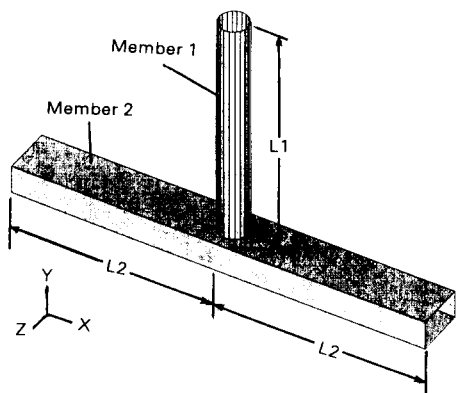


Fig.2 The T-shape joint model

두 부재가 강결합으로 결합되어 있다고 가정을 하면 이 구조물의 고유진동수는 지나치게 크게 평가된다. 따라서 이러한 결합부에 회전스프링을 사용하여 결합부의 유연성을 보정해 주는 방법은 이미 많은 연구로 밝혀진 바 있다. 이 회전스프링의 강성값을 구하기 위하여 Fig.3과 같이 결합부를 단순화시킬 수 있다.

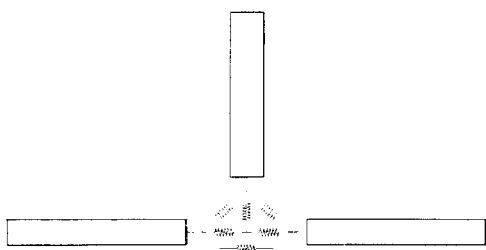


Fig.3 Simplification of the T-shape joint model

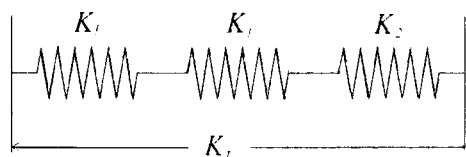


Fig.4 Spring model of the T-shape joint model

Fig.3에 나타난 결합부 모델의 스프링은 다음 Fig.4와 같이 부재 1, 부재 2와 결합부만의 강성을 갖는 스프링으로 생각할 수 있으며, 직렬스프링의 관점에서 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} \quad (1)$$

결합부의 회전강성 K_{rj} 를 구하기 위하여 부재 2의 양단을 완전 고정하고, 부재 1의 끝단에 M_x, M_y, M_z 를 가하였을 때 부재 1, 2 각각에 발생하는 회전각을 구하면

$$\theta_{1x} = \int_0^{L_1} \frac{M_x}{EI_{x1}} dy = \frac{M_x L_1}{EI_{x1}} \quad (2)$$

$$\theta_{2x} = \int_0^{L_2} \frac{M_x}{2GJ_2} dx = \frac{M_x L_2}{2GJ_2} \quad (3)$$

$$\theta_{1y} = \frac{M_y L_1}{GJ_1} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \theta_{2y} &= \frac{d}{dx} \left[-\frac{M_y}{8EI_{y2}} \{ (5x^2 - 20L_2x + 20L_2^2) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{L_2} (12L_2^2 - x^3 - 16L_2^3) \} \right]_{x=L_2} \\ &= \frac{M_y L_2}{8EI_{y2}} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\theta_{1z} = \int_0^{L_1} \frac{M_z}{EI_{y1}} dy = \frac{M_z L_1}{EI_{y1}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \theta_{2z} &= \frac{d}{dx} \left[-\frac{M_z}{8EI_{x2}} \{ (5x^2 - 20L_2x + 20L_2^2) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{L_2} (12L_2^2 - x^3 - 16L_2^3) \} \right]_{x=L_2} \\ &= \frac{M_z L_2}{8EI_{x2}} \quad (7) \end{aligned}$$

과 같다. 식(2)~(7)에서 구한 각 부재의 회

전각을 이용하여 부재 1, 2의 회전강성을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 K_{r1x} &= \frac{EI_{x1}}{L_1} \\
 K_{r1y} &= \frac{GJ_1}{L_1} \\
 K_{r1z} &= \frac{EI_{y1}}{L_1} \\
 K_{r2x} &= \frac{2GJ_2}{L_2} \\
 K_{r2y} &= \frac{8EI_{y2}}{L_2} \\
 K_{r2z} &= \frac{8EI_{x2}}{L_2}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

자유단 끝단에서의 전체회전강성(Krf)은 각각의 모멘트에 대하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 K_{rfx} &= \frac{M_x}{\theta_x} \\
 K_{rfy} &= \frac{M_y}{\theta_y} \\
 K_{rfz} &= \frac{M_z}{\theta_z}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

결합부의 회전강성(Krj)은 (1), (8), (9)식을 이용하여 계산할 수 있다.

결합부를 해석하는데 있어서 보통 이와 같은 회전강성만으로 결합부의 유연성을 고려해주고 병진강성은 강결합이라 생각하고 계산할 수 있다. 그러나 본 연구에서 고려하고

있는 국부적인 변형이 발생하는 결합부의 경우에는 병진강성을 무시하여서는 안된다.

따라서 부재 2의 국부적인 변형을 병진강성으로 보상해 줄 수 있는 방법을 찾기 위해 다음과 같은 가정을 하였다. 부재 2의 국부적인 변형은 부재 1의 변형을 지지해 주지 못하고 발생하는 것이므로 결합부의 병진강성중 부재 1의 축방향 강성만 고려하여 부재 2의 국부적인 변형을 병진스프링으로 변환하고, 그외의 병진강성은 강결합이라고 가정한다.

부재 1의 끝단에 F_y 를 가한 후 각 부재와 전체결합부의 병진강성(K_{ty})을 구하면

$$K_{1y} = \frac{EA_1}{L_1}
 \tag{10}$$

$$K_{2y} = \frac{1536EI_{x2}}{L_2^3}$$

$$K_{ty} = \frac{F_y}{\delta_y}
 \tag{11}$$

과 같다. (1), (10), (11)식을 이용하여 부재 1의 축방향에 작용하는 병진강성을 구할 수 있다.

결합부의 병진강성은 보통 강결합으로 생각하고 문제를 풀어도 상관이 없는 박스형 결합부와는 달리 원형단면으로 인한 국부적인 변형이 발생하는 결합부의 경우에는 병진강성을 고려해야 할 것이다.

Fig.5에 보인 L형 결합부도 Fig. 4의 스프링모델로 생각할 수 있으며, T형 결합부와 같은 방법으로 회전강성과 병진강성을 구할 수 있다. 외팔보의 특징을 가지고 있는 부재 1의 회전강성과 병진강성은 T형 결합부의 부재 1과 같으므로 부재 2에 대한 회전강성과 병진강성을 구하면 다음과 같다.

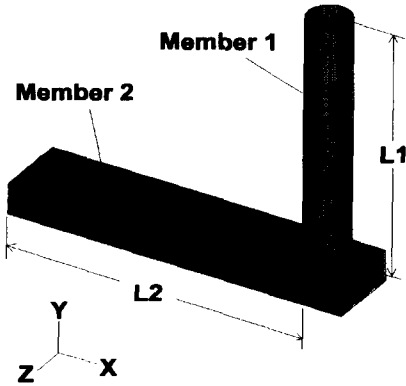


Fig.5 The L-shape joint model

$$K_{r2x} = \frac{GJ_2}{L_2}$$

$$K_{r2y} = \frac{EI_{y2}}{L_2} \quad (12)$$

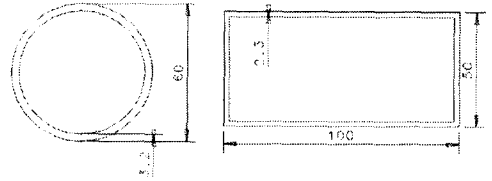
$$K_{r2z} = \frac{EI_{z2}}{L_2}$$

$$K_{\theta y} = \frac{3EI_{z2}}{L_2^3} \quad (13)$$

결합부 전체의 회전강성과 병진강성은 각각 (9), (11)식과 같이 구할 수 있으므로 (1), (12), (13)식과 함께 계산하면, L형 결합부의 결합 회전강성과 병진강성도 계산할 수 있다.

4. 고유진동수 해석을 통한 결합강성 모델의 검증

앞에서 구한 결합강성의 검증을 위하여 T형 결합부와 L형 결합부에 대해 고유진동수 해석을 실시하였다. 결합부는 Fig.6과 같이 원형 단면과 박스형 단면으로 이루어져 있으며, 이 단면들에 대한 물성치를 Table 1에 나타내었다.



(a) member 1 (b) member 2

Fig.6 Sections of member 1 and member 2 (Unit:mm)

Table 1 Properties of member 1 and member 2

Property	Unit	Member 1	Member 2
Length (L1, L2)	m	0.375	0.4
Section Area (A)	m ²	5.76 × 10 ⁻⁴	6.69 × 10 ⁻⁴
Young's Modulus (E)	N/m ²	2.07 × 10 ¹¹	2.07 × 10 ¹¹
Shear Modulus (G)	N/m ²	8.02 × 10 ¹⁰	8.02 × 10 ¹⁰
Moment of Inertia (Ix)	m ⁴	2.37 × 10 ⁻⁷	2.98 × 10 ⁻⁷
Moment of Inertia (Iy)	m ⁴	2.37 × 10 ⁻⁷	8.82 × 10 ⁻⁷
Torsional Constant (J)	m ⁴	4.74 × 10 ⁻⁷	6.99 × 10 ⁻⁷

Table 2 Results of normal mode analysis(Unit:Hz)

Type of Joint	Mode	Shell	Beam (K _n +K _θ)	Beam (K _n)
T-Joint	1st Mode	69.0	67.8	417.3
	2nd Mode	390.7	346.1	480.1
	3rd Mode	664.8	663.8	-
L-Joint	1st Mode	80.9	78.1	451.5
	2nd Mode	651.4	649.0	-

해석은 쉘요소로 모델링된 모델을 기준으로 결합부의 유연성에 회전강성만을 고려하고 병진강성은 강결합으로 한 보요소 모델과 회전강성과 부재 1의 축방향 병진강성을 고려한 보요소 모델에 대해 수행하였으며, 해석결과는 결합부의 전체적인 동적 특성을 보여주는 모드에 대해서 고유진동수 및 모우드형상 등을 비교하였다. 고유진동수 해석결과

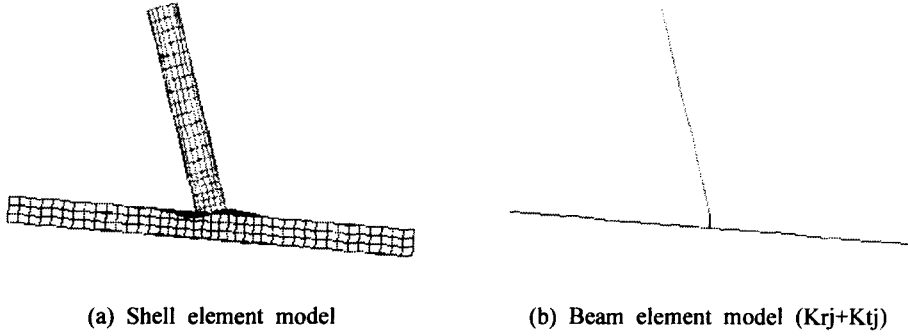


Fig. 7 1st mode shape of T-joint model

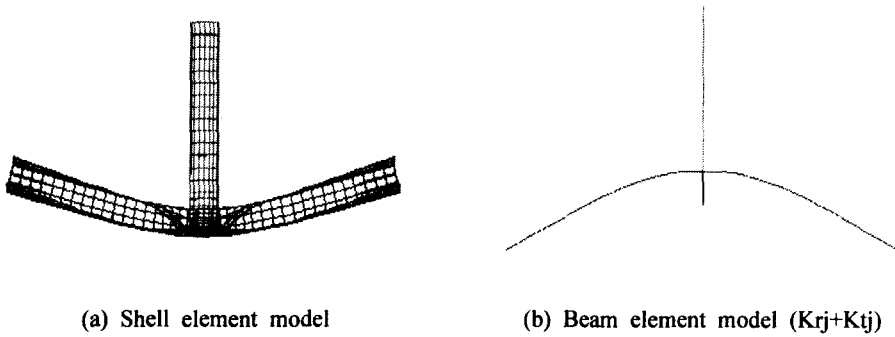


Fig. 8 2nd mode shape of T-joint model

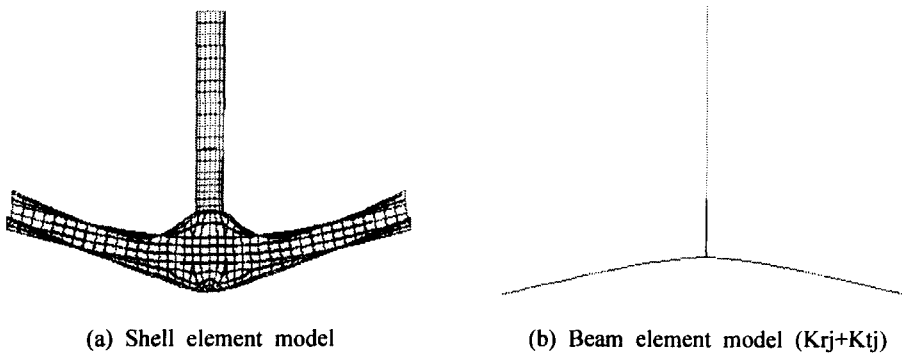


Fig. 9 3rd mode shape of T-joint model

를 Table 2에 나타내었다.

고유진동수 해석결과를 고찰해 보면 회전

강성만으로 결합부를 표현한 보요소 모델은
결합부의 유연성을 잘 표현 할 수 없었으나,

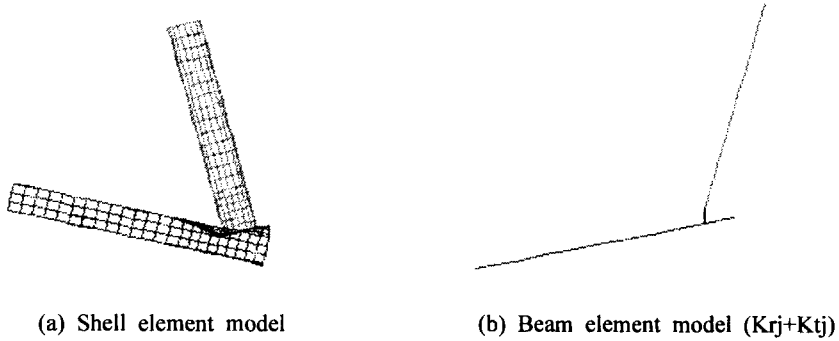


Fig. 10 1st mode shape of L-joint

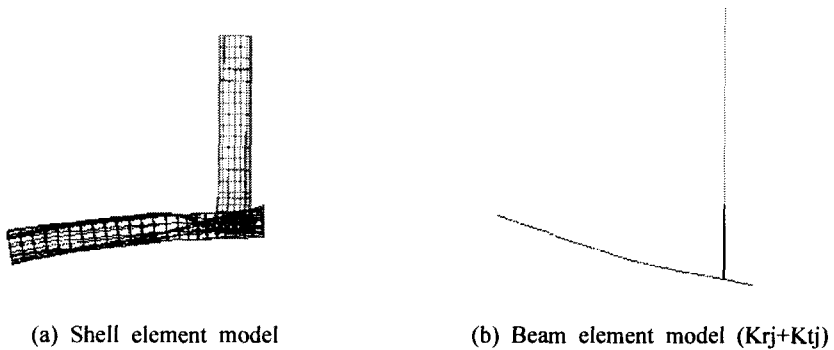


Fig. 11 2nd mode shape of L-joint

회전강성과 병진강성을 함께 고려한 보요소 모델은 쉘요소 모델에 상당히 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 부재 2의 결합부에 발생하는 국부적인 변형을 병진스프링이 잘 표현해 줄 수 있음을 보여주는 것이다.

이러한 현상은 Fig.7에 보인 T형 결합부의 모우드 형상에 잘 나타나 있다. 69.0Hz에서 발생한 첫 번째 모우드는 쉘요소 모델(Fig.7 (a))의 모우드 형상에서 알 수 있듯이 부재 2의 결합부에 지역적인 모우드가 발생하는데 이러한 현상은 회전스프링만으로는 설명할 수 없다. 병진스프링을 함께 사용한 보요소 모델(Fig.7(b))의 모우드 형상을 살펴보면 그러한 지역적인 모드가 결합스프링으로 잘 표

현됨을 보여준다.

이외의 모우드에서도 부재 2에 발생하는 지역적인 모우드 형상을 결합스프링이 잘 표현해 주는 것으로 나타나 있다. T형 결합부 모델의 두 번째, 세 번째 모우드 형상을 Fig.8~9에 나타내었다.

L형 결합부에서도 마찬가지로 회전강성만을 고려했을 경우에는 높은 주파수에서 모우드가 발생하였으나 병진강성을 같이 고려해 준 보요소 모델에서는 쉘요소 모델처럼 부재 2에 발생하는 지역적인 모우드가 잘 표현되어 좋은 결과를 보였다.

그러면 Fig.12와 같이 원형 단면인 부재 1이 부재 2를 관통하여 결합되는 결합부에서

도 앞서 설명한 결합강성이 적용될 수 있는가에 대해 알아볼 필요가 있다. 이러한 결합부는 승합차나 트럭의 샤시 프레임에 많이 쓰이므로 해석적인 방법으로 프레임의 구조적인 특성을 파악하고자 할 때에 필요한 결합부의 특성이기도 하다. 이와 같은 결합부의 결합강성을 평가하기에 앞서 모델링에 대한 몇 가지 고려사항이 있다.

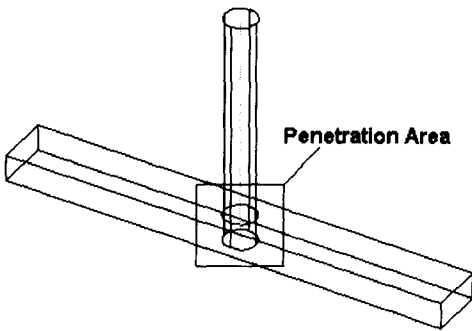


Fig. 12 Joint model with penetration

관통이 발생하는 결합부는 보통의 결합부와는 달리 결합되는 지점이 두 곳에서 발생하므로 모델에서도 두 곳의 결합부분을 표현해 주어야 한다. 그리고 또 하나의 고려사항은 부재 2의 결합부가 부재 1에 의해 관통되므로 부재 2의 단면이 변화한다는 것이다. 그러나 이러한 단면 물성치까지 실제와 같이 모델링한다는 것은 매우 어려운 일이므로 이러한 물성치의 변화를 결합부의 유연성으로 통칭한 후 회전강성과 병진강성으로 보상하여 주는 방법이 훨씬 간편할 것이다.

이러한 관통모델의 T형 결합부와 L형 결합부에 대해 고유진동수 해석을 한 결과는 Table 3과 같다.

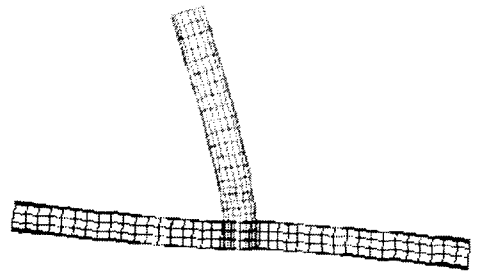
관통모델의 결과에서도 회전강성만을 고려한 보요소 모델은 셸요소 모델과 많은 차이가 있음을 보여준다. 반면 병진강성을 함께 고려한 보요소 모델의 결과는 셸요소 모델과 5%내의 유사한 결과를 보여주고 있다. 이는 병진스프링이 결합부에 발생하는 국부

적인 변형뿐 만 아니라 결합부의 단면 변화에 의한 유연성 정도를 표현해 줄 수 있음을 나타낸다.

Table 3 Result of normal mode analysis with penetration (Unit:Hz)

Type of Joint	Mode	Shell	Beam (K _{rj} +K _{tj})	Beam (K _{rj})
T-Joint	1st Mode	345.3	357.2	416.7
	2nd Mode	410.6	423.8	473.3
	3rd Mode	879.9	887.8	896.2
L-Joint	1st Mode	373.3	394.0	446.7

관통모델의 모우드형상은 Fig.13~16에 보인 바와 같다.



(a) Shell element model



(b) Beam element model (K_{rj}+K_{tj})

Fig. 13 1st mode shape of T-joint model with penetration

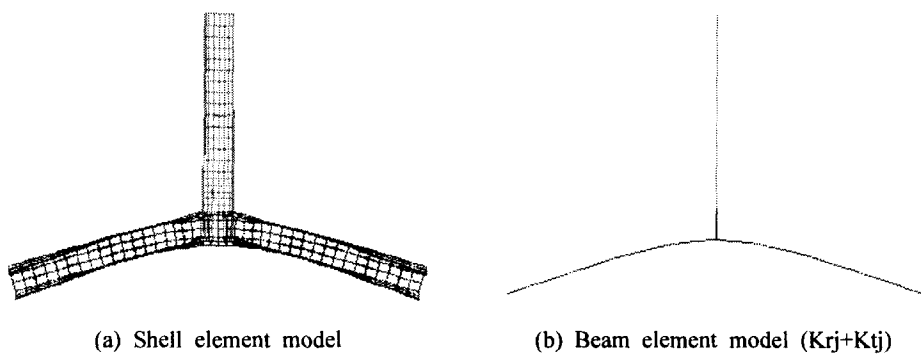


Fig. 14 2nd mode shape of T-joint model with penetration

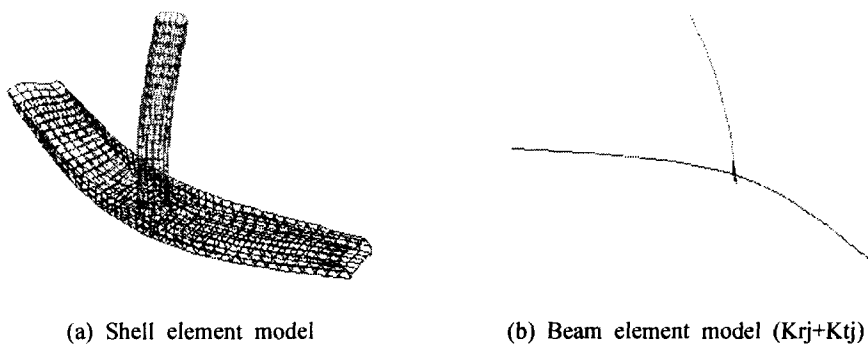


Fig. 15 3rd mode shape of T-joint model with penetration

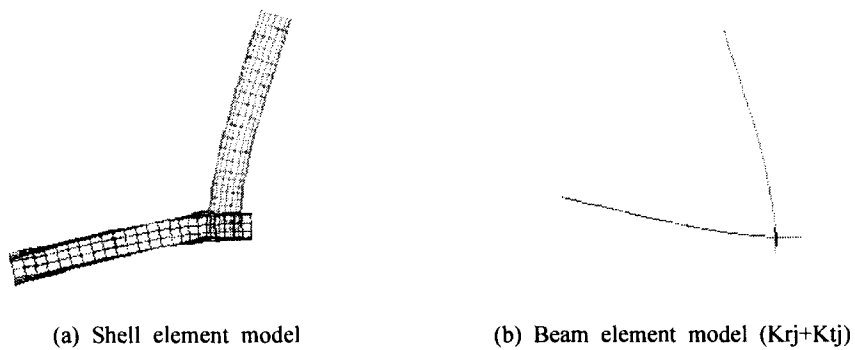


Fig. 16 Mode shape of L-joint model with penetration

5. 결 론

원형단면을 포함하는 결합부의 결합 특성으로 국부적인 변형이 발생하는 경우나 부재간에 관통되어 결합부의 단면이 변화하는 경우에 대해 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 국부적인 변형이 발생하는 결합부의 결합 특성은 회전스프링만으로는 표현할 수 없으며, 병진강성을 고려한 병진스프링으로 결합부에 발생하는 국부적인 변형을 성공적으로 표현할 수 있었다.

2) 부재간에 관통이 발생하는 결합부의 경우에도 회전스프링과 병진스프링으로 결합부의 동적 특성을 잘 예측할 수 있었다. 이때 관통에 의해 발생하는 결합부의 단면 물성치의 변화에 대해서도 회전스프링과 병진스프링으로 결합부 모델을 표현할 수 있었다.

3) 본 연구의 결과를 바탕으로 초기 차량 개발단계에서 보요소를 이용하여 상용자동차의 샤시 프레임의 정적·동적 특성을 보다 향상된 정밀도를 가지고 해석을 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) J.L.Lubkin, "The Flexibility of a Tubular Welded Joint in a Vehicle Frame", SAE No.740340, pp.1518-1522, 1974.
- 2) D.C.Chang, "Effect of Flexible Connections on Body Structural Response", SAE No.750462, 1975.
- 3) Y.Sunami, T.Yugawa and Y.Yoshida, "Analysis of Joint Rigidity In-Plane Bending of Plane-Joint Structures", JSAE Review, Vol.9, No.2, pp.44-51, 1988.
- 4) Y.Sunami, T.Yugawa and Y.Yoshida, "Analysis of the Joint Rigidity of the Automotive Body Structure-Out-of-Plane Bending of Plane-Joint Structures-", JSAE Review, Vol.11, No.3, pp.59-66, 1990.
- 5) 조규종, 김우, 김택, "유한요소법에 의한 차량구조의 최적설계 방안에 관한 연구", 전남대 공업기술연구소, 1990.
- 6) Y.YKim, J.H.Kang and J.H.Kim, "Re-consideration of the Joint Modelling Technique;In a Box-Beam T-Joint", International Congress and Exposition, SAE paper No.951108, 1995.
- 7) 박경진 외 6명, "최적화를 이용한 전기자동차 구조물 접합부의 특성 규명", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp.176-183, 1995.
- 8) 서종환, 서명원, 양원호, "축약행렬법을 적용한 차체결합부 해석", 한국자동차공학회 논문집, 제6권 제4호, pp.9-16, 1998.
- 9) MSC/NASTRAN, "User's Guide", Macneal-Schwendler Corp., 1996.
- 10) 片上哲史 외 9명, "車體構造における結合剛性-第2報 L, T, Y 形結合構造の結合剛性-", 自動車技術會論文集, No.43, pp.143-147, 1990.
- 11) 김윤영, 임홍재, 강정훈, 김진홍, "박스보 T형 조인트의 강성 평가에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제3권 제4호, pp.58-77, 1995.