

# 센터필러 - 루프레일 결합부의 강성에 영향을 미치는 인자 연구

이상범\*, 임홍재<sup>+</sup>, 이종선<sup>++</sup>

(논문접수일 2003. 7. 21, 심사완료일 2003. 9. 18)

## A Study on Design Parameters Affecting the Stiffness of Center Pillar-Roof Rail Joint

Sang Beom Lee\*, Hong Jae Yim<sup>+</sup>, Jong Sun Lee<sup>++</sup>

### Abstract

The global stiffnesses and vibration characteristics of vehicle structures are mainly influenced by the local stiffnesses of the joint structures consisted of complicated thin-walled panels. In this paper, the parametric study for the stiffnesses of the center pillar-roof rail joint of vehicle structure is performed through the linear static analysis. The analysis result shows that the reinforcement panel much affects the joint stiffness of out-plane direction (i.e., z-direction). And also, the flange radius and width of the joint structure much affect the joint stiffness of out-plane direction. The study shows that vehicle joint stiffnesses can be effectively determined in designing vehicle structure through the parametric study.

**Key Words :** Coherence Effect(기여도 효과), Joint Stiffness(결합부 강성), Parametric Study(인자 연구), Vehicle Structure(차량 구조)

### 1. 서론

차체설계 시 소음 및 진동관련 분야는 운전자 또는 승객이 직접 주관적으로 느끼고 성능 및 품질을 평가할 수 있기 때문에 선진 각국의 자동차회사들은 오래 전부터 저진동·저소음 차체 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 각종 차체 진동을 저감시키고 진동특성을 개선하기 위해서는 초기 설계단계에서부터 개발될 차체의 진동특성을 정확히 예측할 수 있는 차체진동해석기술과 발생 가능한 진동문제를 차체구조의 설계변경을 통하여 미리 해결할 수 있는 차체구조

설계기술의 확립은 필수적이다.

차체설계 시 개발될 차체의 아이들 세이크(idle shake)와 같은 저주파수 진동특성은 보통 필러(pillar), 루프레일(roof rail), 로커(rocker) 등의 단면계수와 이러한 구조물이 서로 만나는 결합부(joint)의 회전강성에 의해 많은 영향을 받는다<sup>(1)</sup>. 따라서 필러 및 결합부의 설계기법을 확립하는 것은 초기설계뿐만 아니라 차량 개발단계에서 일어날 수 있는 차체구조의 설계변경을 효율적으로 수행하기 위해 반드시 필요하다.

차량의 형상을 유지하고 작용하중을 지지·전달하는 필

\* 주저자, 국민대학교 자동차공학전문대학원 (sblee@kookmin.ac.kr)

주소: 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1

+ 국민대학교 자동차공학전문대학원

++ 대전대학교 기계설계공학과

러, 루프레이일, 로커 등은 여러 개의 강판들이 복잡하고 불규칙한 형태의 폐단면(closed section)으로 구성되어 있으며 이러한 부재들은 결합부에 의해 서로 연결된다. 이러한 폐단면 박판부들은 차체의 동적·정적 거동에 많은 영향을 미치며, 특히 결합부의 회전강성은 국부적인 변형에 의해 차량의 고유진동수에 많은 영향을 미친다<sup>(2-5)</sup>.

본 연구에서는 실차모델의 결합부 중에서 비교적 간단한 형상을 가지고 있는 센터필러와 루프레이일이 만나는 결합부에 대하여 결합부를 구성하는 센터필러 단면 및 루프레이일 단면의 단면계수를 구하고 끝단모멘트법(tip moment method)을 이용한 선형정적해석(linear static analysis)을 통하여 결합부 회전강성을 구한다. 또한 결합부를 형성하는 판재 두께의 변화에 따른 단면계수의 변화율 및 판재 두께, 플랜지 폭 그리고 플랜지 반지름의 변화에 따른 결합부 회전강성의 변화를 알아보기 위한 인자 연구를 수행하며 기여도 분석을 통하여 결합부 회전강성에 대한 각 부재의 기여도를 파악한다.

## 2. 차량의 결합부

Fig. 1은 전형적인 승용차의 B.I.W.(body-in-white)를 나타내고 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 복잡한 형상을 하고 있는 여러 개의 판재들이 점용접 등의 방법에 의하여 조

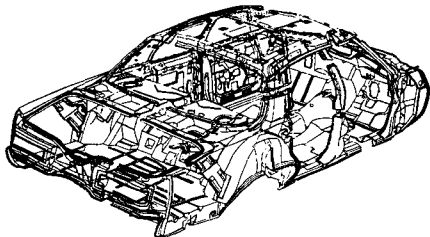


Fig. 1 Typical automotive body structure

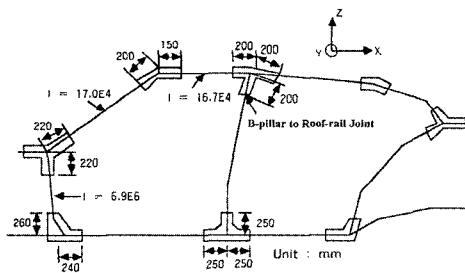


Fig. 2 Structural joints of typical passenger car

립된다. 각종 필러와 결합부는 B.I.W.의 동적·정적 특성에 많은 영향을 미치며, 특히 결합부는 진동이나 외부 힘에 의해 국부적인 굽힘(bending), 비틀림(twisting) 및 뒤틀림(warping) 등이 복합적으로 발생하는 복잡한 부위로서 차량의 진동 특성에 매우 큰 영향을 미친다. Fig. 2는 승용차의 결합부 위치를 나타내고 있으며 결합되는 형태에 따라 T-형, L-형 및 Y-형 등으로 구분한다.

## 3. 단면계수의 계산

본 연구에서는 Fig. 2에서 나타낸 결합부 중에서 그 형상이 비교적 간단한 센터필러와 루프레이일이 서로 만나는 결합부를 연구 대상으로 선정하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 이 결합부의 센터필러 단면과 루프레이일 단면에 대한 단면계수를 단면계수 계산 및 최적설계를 위해 개발한 프로그램인 SECOPT(SECTION OPTimization)<sup>(6)</sup>을 이용하여 계산하였고 Table 1에 그 결과를 나타내었다.

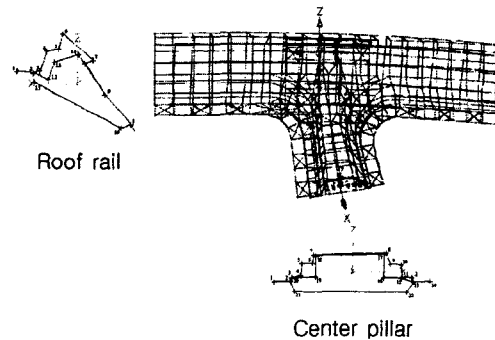


Fig. 3 Finite element model of center pillar-roof rail joint

Table 1 Calculation of section modulus

Section	Section modulus	
	Unit: mm <sup>4</sup>	
Center pillar section	I <sub>y</sub>	7.50E4
	I <sub>z</sub>	3.23E5
	J	8.04E4
Roof rail section	I <sub>y</sub>	2.64E5
	I <sub>z</sub>	1.92E5
	J	3.69E5

#### 4. 회전강성의 계산

차체의 결합부는 내판(inner panel), 외판(outer panel) 그리고 보강판(reinforcement panel) 등의 프레스 성형된 판재들로 이루어져 있으며 각 판재는 점용점으로 서로 결합되어 있다. 이러한 결합부의 회전강성을 수행하는 방법으로는 실험적 방법과 해석적 방법으로 나눌 수 있는데 해석적 방법으로 결합부 회전강성을 구하기 위해서는 결합부를 상세하게 셀요소로 표현한 유한요소모델이 요구된다. 본 연구를 위한 결합부 상세모델은 Fig. 3에 이미 나타내었으며 6,500여개의 절점으로 구성된다.

결합부 회전강성을 구하기 위해 Fig. 4에서 보는 바와 같이 먼저 루프레이 부위의 양단을 이루는 모든 절점들을 고정시킨다. 그리고 센터필러 끝 부분 단면의 도심에 절점을 만들고 그 절점에 국부 좌표계(local coordinate)를 설정하였다. 이 국부 좌표계에 있어서 센터필러 단면에 수직인 방향으로 x-축을 설정하였고, y-축은 차량 전후 방향(in-plane direction)으로 설정하였으며, z-축은 좌우 방향(out-plane

direction)으로 설정하였다. 그리고 센터필러 단면에 국부적인 변형 없이 모멘트를 가하기 위해 필러의 끝 단면을 이루는 노드들과 도심을 강체 보요소(rigid bar element)로 연결시켰다. 1N·mm의 모멘트를 도심에 설정된 절점의 국부 좌표계 방향으로 각각 가하였고 모멘트를 가한 점에서 각 방향의 회전각을 측정하였다. 측정된 결과를 식 (1)에 대입하여 각 방향에 대한 회전강성을 구한다.

$$K_x = \frac{M_x}{\theta_x}, \quad K_y = \frac{M_y}{\theta_y}, \quad K_z = \frac{M_z}{\theta_z} \quad (1)$$

계산된 회전강성을 Table 2에 나타내었다. 이 결과로부터 z-방향의 회전강성이 가장 크며 y-방향이 가장 작다는 것을 알 수 있다. 또한 각 방향으로 단위모멘트를 가했을 때 각 판재에 저장되는 변형에너지 분포(strain energy distribution)를 살펴봄으로써 단위모멘트를 받았을 때 각 부재의 국부적 변형 정도를 알 수 있다. Fig. 5는 x-방향으로 단위모멘트를 가했을 때 각 판재에 저장되는 변형에너지 분포를 보여주고 있는데 그림에서 보는 바와 같이 외판에 가장 많은 변형에너지가 저장됨을 알 수 있다.

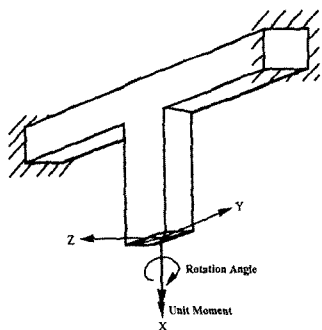


Fig. 4 Tip moment method to determine joint stiffness

Table 2 Joint stiffness of center pillar-roof rail joint

Unit: N · mm/rad	
Joint stiffness	Value
$K_x$	1.43E7
$K_y$	4.07E6
$K_z$	6.96E7

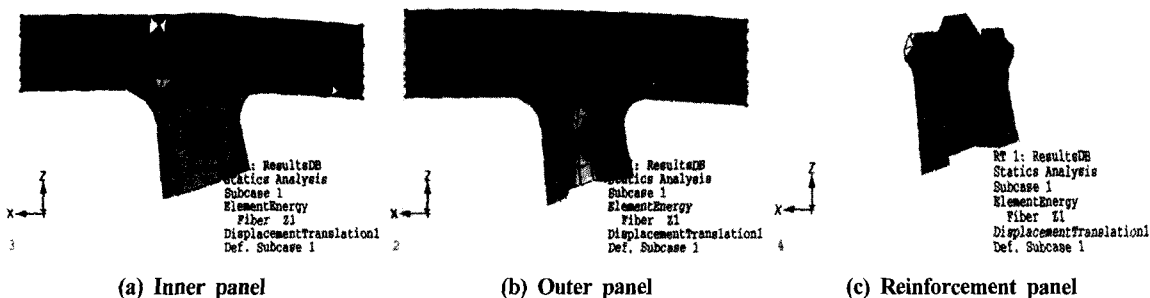


Fig. 5 Strain energy distribution of each panel due to unit moment of x-direction

## 5. 인자 연구

### 5.1 판재 두께변화에 따른 단면계수의 변화

결합부를 구성하는 각 부위별 두께를 각각 25% 증가시킬 때 단면계수의 변화를 살펴보았다. 두께 변경 전 결합부의 질량은 1.702kg이며, 이 중 내판은 0.657kg, 외판은 0.756 kg 그리고 보강판은 0.289kg으로서 전체 질량 중 각각 38.6%, 44.4% 및 17.0%를 차지하고 있다. 각 판재의 두께를 25% 증가시키에 따라 내판은 0.164kg, 외판은 0.189kg 그리고 보강판은 0.072kg이 증가하였다.

Table 3에 단면계수를 계산한 결과를 나타내었는데, 여기서 Case 1은 내판만 0.8mm에서 1.0mm로 변경하고 나머지 판재의 두께는 변경하지 않았을 때의 단면계수값이고, Case 2는 외판의 두께만 0.8mm에서 1.0mm로 변경하고 나머지 판재의 두께는 변경하지 않았을 때의 단면계수값을 보여주고 있다. 또한 Case 3는 보강판의 두께만 1.2mm에서 1.5mm로 변경시킨 후 계산한 단면계수값을 보여주고 있다.

### 5.2 판재 두께변화에 따른 회전강성의 변화

결합부를 구성하는 판재의 두께변화에 따른 회전강성의 영향을 알아보기 위해 5.1절의 3 가지 경우에 대하여 정적 해석을 수행하였다. 즉, Case 1은 내판만 25% 증가시켜서 0.8mm에서 1.0mm로 변경하고 나머지 판재의 두께는 변경하지 않고 각 방향으로 단위모멘트를 가하였으며, Case 2

Table 3 Section modulus variation due to change of panel thickness

		Unit: mm <sup>4</sup>		
Section	Section modulus	Case 1	Case 2	Case 3
Center pillar	I <sub>y</sub>	7.94E4 (+5.9%)	8.17E4 (+9.0%)	8.22E4 (+9.6%)
	I <sub>z</sub>	3.44E5 (+6.5%)	3.50E5 (+8.1%)	3.57E5 (+10.5%)
	J	9.04E4 (+12.5%)	8.56E4 (+6.6%)	8.35E4 (+3.8%)
Roof rail	I <sub>y</sub>	2.84E5 (+7.5%)	2.91E5 (+9.9%)	2.84E5 (+7.4%)
	I <sub>z</sub>	2.02E5 (+5.2%)	2.13E5 (+11.3%)	2.07E5 (+8.4%)
	J	4.04E5 (+9.5%)	4.20E5 (+13.7%)	3.69E5 (+0.1%)

는 외판의 두께만 0.8mm에서 1.0mm로 변경시킨 후 각 방향에 대하여 단위모멘트를 가하였다. 또한 Case 3은 보강판의 두께만 1.2mm에서 1.5mm로 변경시킨 후 단위모멘트를 가하였다. 상용 유한요소해석 소프트웨어인 MSC/NASTRAN<sup>(8)</sup>을 이용하여 단위모멘트를 가한 절점의 회전각을 구하였으며 그 결과를 식 (1)에 대입하여 회전강성을 계산하였고 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 이 표에서 보는 바와 같이 Case 1, 즉 내판의 두께를 25% 증가시켰을 때에는 z-방향의 회전강성이 6.96E7 N·mm/rad에서 8.21E7 N·mm/rad으로 변경되었으며 강성 변화율이 18.0%로 크게 증가하였으며, Case 2 즉, 외판의 두께를 25% 증가시켰을 때에는 y-방향의 회전강성이 4.07E6에서 4.84E6으로 19.1%의 큰 증가율을 보이고 있다. 그리고 Case 3 즉, 보강판의 두께를 25% 증가시켰을 때에는 y-방향의 회전강성이 4.07E6에서 4.99E6으로 22.6%의 가장 큰 증가율을 보이고 있다.

그러나 각 판재가 갖고 있는 질량이 서로 다르므로 단순히 판재의 두께 증가에 대한 강성 증가율로 비교하는 것 보다는 질량 증가에 대한 강성 증가 비율의 형태로 표현함으로써 각 판재가 결합부 회전강성에 미치는 기여도 효과를

Table 4 Joint stiffness variation due to change of panel thickness

		Unit: N·mm/rad		
Joint stiffness		Case 1	Case 2	Case 3
K <sub>x</sub>		1.61E7 (+13.1%)	1.68E7 (+18.1%)	1.49E7 (+4.5%)
K <sub>y</sub>		4.46E6 (+9.7%)	4.84E6 (+19.1%)	4.99E6 (+22.6%)
K <sub>z</sub>		8.21E7 (+18.0%)	7.86E7 (+13.0%)	7.46E7 (+7.3%)

Table 5 Joint stiffness variation due to change of flange radius

		Unit: N·mm/rad		
Joint stiffness		25% decrease	Initial model	25% increase
K <sub>x</sub>		1.41E7 (-1.2%)	1.43E7	1.46E7 (+2.3%)
K <sub>y</sub>		4.05E6 (-0.5%)	4.07E6	4.11E6 (+0.9%)
K <sub>z</sub>		6.15E7 (-11.7%)	6.96E7	7.65E7 (+10.0%)

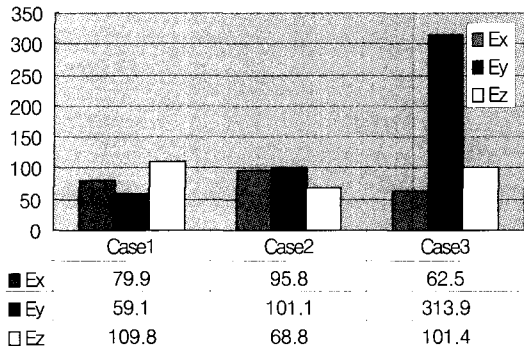


Fig. 6 Comparison of coherence effect for joint stiffness

Table 6 Joint stiffness variation due to change of flange width

Joint stiffness	Unit: N · mm/rad		
	25% decrease	Initial model	25% increase
$K_x$	1.40E7 (-2.1%)	1.43E7	1.44E7 (+0.9%)
$K_y$	3.87E6 (-4.9%)	4.07E6	4.10E6 (+0.9%)
$K_z$	5.48E7 (-21.3%)	6.96E7	8.60E7 (+23.6%)

적합하게 평가할 수 있다.

Fig. 6에 결합부 회전강성에 대한 판재의 기여도 효과를 나타내었으며  $E_x$ ,  $E_y$  및  $E_z$ 는 각각  $K_x$ ,  $K_y$  및  $K_z$ 에 대한 판재의 기여도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이  $K_x$ 에는 외판,  $K_y$ 에는 보강판 그리고  $K_z$ 에는 내판의 기여도가 큰 것을 알 수 있으며 특히, 보강판은 다른 부재에 비해 y-방향 회전강성에 대한 기여도가 매우 큰 것을 알 수 있다.

### 5.3 플랜지 반지름 변화에 따른 회전강성 변화

결합부의 반지름 변화에 따른 회전강성의 변화를 알아보기 위해 원래의 반지름보다 25% 작게 그리고 25% 크게 변경하여 정적해석을 수행하였다. 해석된 결과를 Table 5에 나타내었는데, 이 표에서 보는 바와 같이 반지름을 25% 감소시켰을 때 z-방향의 회전강성은  $6.96E7 \text{ N} \cdot \text{mm/rad}$ 에서  $6.15E7 \text{ N} \cdot \text{mm/rad}$ 으로 11.7%가 감소하였으며, 반지름을 25% 증가시켰을 때에는  $7.65E7$ 로 10.0%가 증가하였다. 이러한 증감율은 x-방향 및 y-방향에 대한 회전강성의 증감율에 비하여 상당히 큰 증감율을 나타내는 것이다. 즉, 반지름의 변화에 대하여 z-방향에 대한 회전강성의 변화가 매우

크다는 것을 알 수 있다.

### 5.4 플랜지 폭 변화에 따른 회전강성 변화

결합부의 플랜지 폭을 원래 플랜지 폭 보다 25% 줄였을 때와 25% 키웠을 때 회전강성의 변화를 살펴보았는데, 플랜지 반지름 변화에 따른 회전강성의 변화율과 마찬가지로 z-방향의 변화율이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 즉, Table 6에서 보는 바와 같이 플랜지 폭을 25% 줄였을 때는 z-방향 회전강성이  $6.96E7 \text{ N} \cdot \text{mm/rad}$ 에서  $5.48E7$ 로 21.3%가 줄어들었고, 플랜지 폭을 25% 키웠을 때는  $8.60E7$ 로 23.6%가 증가하였다.

## 6. 결론

본 논문에서는 승용차 구조물의 센터필러-루프레일 결합부를 구성하고 있는 여러 설계인자 중에서 판재의 두께, 플랜지의 폭, 그리고 플랜지 반지름의 변화가 결합부 회전강성에 미치는 영향을 정적해석을 통하여 살펴보았다. 또한 결합부를 구성하는 각 판재의 변형 및 저장되는 변형에너지의 분포를 살펴보았다.

본 연구를 통하여 플랜지의 반지름 및 플랜지 폭을 변경하는 경우에는 z-방향 회전강성은 크게 변경되는 반면 x-방향 및 y-방향 회전강성은 상대적으로 작은 변화만을 보였으며 플랜지 반지름을 변경하는 경우보다는 플랜지부 폭을 변경하는 경우가 z-방향 회전강성에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 결합부를 구성하는 판재 중에서 내판의 두께를 증대시켰을 때에는 z-방향 회전강성이 크게 증가하였고, 외판의 두께를 증대시켰을 때에는 y-방향 회전강성이 크게 증가했으며, 보강판의 두께를 증대시켰을 때에는 y-방향의 회전강성이 가장 많이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 결합부를 구성하는 각 판재의 질량 변화량 당 강성 증가율을 표현하는 기여도 분석을 통하여 결합부 회전강성에 대하여 보강판의 기여도가 매우 큰 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제시한 결합부 강성 인자 연구 및 기여도 분석 방법을 차량 초기설계 및 설계변경 단계에 이용함으로써 설계자가 요구하는 동적특성을 만족하는 차체구조의 설계 변경을 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Kamal, M. M., and Wolf, J. A., 1982, *Modern Automotive Structural Analysis*, Van Nostrand Reinhold Co.
- (2) Chang, D. C., 1974, "Effects of Flexible Connections on Body Structural Response," *Transactions of Society of Automotive Engineers*, Vol. 83, pp. 233 ~ 244.
- (3) Garro, L., and Vullo, V., 1986, "Deformations Car Body Joints under Operation Conditions," *Conference Proceedings of Society of Automotive Engineers*, pp. 5403 ~ 5420.
- (4) Kim, Y. Y., Yim, H. J., Kang, J. H., and Kim, J. H., 1995, "Reconsideration of the Joint Modeling Technique: In a Box-Beam T-Joint," *Conference Proceedings of Society of Automotive Engineers*, pp. 275 ~ 279.
- (5) Lee, S. B., 2000, "Design Optimization for Vehicle Pillar Section Shape Using Simple Finite Element Model," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 6, pp. 133 ~ 139.
- (6) Lee, H. Y., 1995, "Stiffness Analysis and Optimal Design of Thin Walled Beam Structures," Master Thesis, Kookmin University.
- (7) Yim, H. J., Kim, Y. Y., Lee, S. B., and Song, M. Y., 1995, "Modeling and Vibration Analysis of Vehicle Structures Using Equivalent Beam Stiffness for Joints," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 537 ~ 542.
- (8) *MSC/NASTRAN User's Manual*, 1997, The Macneal Schwendler Co.