

## 빔과 스프링 요소를 이용한 승용차의 차체 프레임 설계

### A design on the chassis frame of passenger car using beam and spring elements

이 동 찬\*, 이 상 호\*\*, 한 창 수\*\*\*  
Dongchan Lee, Sangho Lee, Changsoo Han

#### ABSTRACT

This paper presents the optimization design technique on the joint stiffness and section characteristic factors of chassis frame, by using beam and spring elements in a given design package. Two correction methods are used for the optimization design of chassis frame. First is the equivalent inertia of moment method in relation to the section characteristic factors of joint zones, which are thickness, width and height of frame channel section. Second is the rotational spring element with joint stiffness of joint zones. The CAE example shows that the relationship of section characteristic factors and joint stiffness can effectively be used in designing chassis frame. In this point, if static and dynamic targets are given, the joint zone and section characteristic factors of chassis frame intended may be designed and defined by using beam and rotational spring elements.

주요기술용어: 유연전이영역 (Flexible transition zone), 모노코크 (Monocoque),  
동가관성모멘트 (Equivalent inertia of moment), 회전스프링 (Rotational spring),  
비례강성계수 (Proportional stiffness modulus), 결합부 강성 (Joint stiffness)

#### Nomenclature

$I_{y(z)}$  ; Moment of inertia of area  
 $J$  ; Torsional constant  
 $L_{1f(2f)}$  ; Effective joint length

$U$  ; Strain energy  
 $K_{\alpha(\beta)}$  ; Rotational stiffness of joint area

#### 1. 서론

차체의 초기 설계시 정적 및 동적 강성을 검토하기 위하여 설계와 해석을 반복적으로 수행하게 된다. 이러한 점에서 차체 프레임

\* 정회원, 고등기술연구원 설계기술연구실  
\*\* 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원  
\*\*\* 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

을 이루는 부재를 셀 요소로 모델링하여 검토하는 것은 시간과 비용이 많이 든다. 그러므로 단순 모델링 방법을 통하여 차체 프레임을 설계한다면 해석 및 설계 효율을 향상시킬 수 있다. 단순 모델링에 의하여 차체의 정적 및 동적강성을 검토함에 있어서 빔 요소로써 폐단면 부재를 표현하면, 부재가 연결되는 부위에서 결합부의 유연성이 고려되지 않아 실제 강성과는 차이가 있다. 이는 빔 요소를 사용하여 모델링하면 결합부와 같은 부위에서 단면의 지오메트리가 급격히 변화하여 빔이 불연속적으로 연결되어 상대적으로 유연천이영역이 발생한다.<sup>(1,2)</sup> 이와 같이 단면이 급격하게 변화하는 유연천이영역에서 단면형상인자만을 고려하면, 결합부의 단면 특성치가 결합부와 연결된 부재의 단면 특성치와 큰 차이를 나타낸다. 그러나 단면형상인자와 결합부 강성은 주어진 설계영역 내에서 검토될 수 있어야 한다.

본 논문은 초기 설계단계에서 모노코크 차체 프레임이 가지는 정적 및 동적강성을 고려하여 각 부재와 이에 연결된 결합부를 빔 요소와 회전 스프링 요소로써 구성하는 설계 및 최적화 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 결합부에 대한 모델링

### 2.1 등가 관성모멘트법

차체 프레임의 결합부는 T형과 L형 결합부로 구분될 수 있으며, 결합부위의 변형률 에너지를 보정하기 위한 방법으로 결합부 단면의 면적 관성모멘트와 비틀림 상수를 보정하는 등가 관성모멘트법 그리고 결합부 강성을 고려하는 회전 스프링법이 있다.

#### 2.1.1 T형 박스채널<sup>(3)</sup>

Fig. 1과 같은 결합부에 하중  $P_y$ 와  $P_z$ 가 작용할 때, 구조물에 저장되는 변형률 에너지를 식(1)과 (2)와 같다.

$$(U_{P_y}) = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{(M_{A_z} - R_{A_y} \cdot x)^2}{EI_z} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{(M_{B_z} - R_{B_y} \cdot x)^2}{EI_z} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} \frac{(P_y \cdot x)^2}{EI_z} dx$$

$$= \frac{1}{2} \frac{P_y^2}{EI_z} \left[ \frac{1}{8} L_2^2 \cdot L_1 + \frac{1}{3} L_2^3 \right] \quad (1)$$

$$(U_{P_z}) = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{(M_{A_y} - R_{A_z} \cdot x)^2}{EI_y} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{(M_{B_y} - R_{B_z} \cdot x)^2}{EI_y} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{(M_{A_x})^2}{GJ} dx$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{(M_{B_x})^2}{GJ} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_2} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y} dx$$

$$= \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{EI_y} \left[ \frac{1}{24} L_1^3 + \frac{1}{3} L_2^3 \right] + \frac{1}{4} \frac{P_z^2}{GJ} (L_2^2 \cdot L_1) \quad (2)$$

여기서,  $M_{A_x} = M_{B_x} = \frac{1}{2} P_z L_2$ ,  $M_{A_y} = M_{B_y} = \frac{1}{4} P_z L_1$ ,  
 $M_{A_z} = M_{B_z} = \frac{1}{4} P_y L_2$ ,  $R_{A_z} = R_{B_z} = \frac{1}{2} P_z$ ,

$$R_{A_y} = R_{B_y} = \frac{3}{4} P_y \frac{L_2}{L_1}$$

결합부위에서 변형률 에너지를 집중되는 유효결합부위길이  $L_{1f}$ ,  $L_{2f}$ 를 고려하여 이 부위에서  $I_y$ ,  $I_z$  그리고  $J$ 를 보정한 변형률 에너지를 다음과 같다.

$$(U^*)_{P_y} = \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{A_z} - R_{A_y} \cdot x)^2}{EI_z} dx + \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(M_{A_z} - R_{A_y} \cdot x)^2}{EI_z^*} dx$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{B_z} - R_{B_y} \cdot x)^2}{EI_z} dx + \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(M_{B_z} - R_{B_y} \cdot x)^2}{EI_z^*} dx$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{B_z} - R_{B_y} \cdot x)^2}{EI_z^*} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(P_y \cdot x)^2}{EI_z} dx + \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(P_y \cdot x)^2}{EI_z^*} dx$$

$$= \frac{1}{2} \frac{P_y^2}{EI_z} \left[ \frac{1}{8} L_2^2 (L_1 - L_{1f}) - \frac{3}{8} \frac{L_2^2}{L_1} (L_1 - L_{1f})^2 \right]$$

$$+ \frac{3}{8} \frac{L_2^2}{L_1^2} (L_1 - L_{1f})^3 + \frac{1}{3} (L_2 - L_{2f})^3$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{P_y^2}{EI_z^*} \left[ \frac{1}{8} L_2^2 L_{1f} - \frac{3}{8} \frac{L_2^2}{L_1} (L_1^2 - (L_1 - L_{1f})^2) \right]$$

$$+ \frac{3}{8} \frac{L_2^2}{L_1^2} (L_1^3 - (L_1 - L_{1f})^3)$$

$$+ \frac{1}{3} (L_2^3 - (L_2 - L_{2f})^3] \quad (3)$$

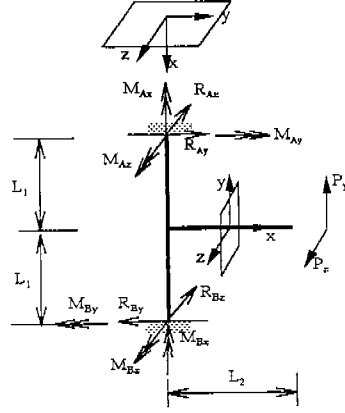
$$\begin{aligned} (U^*)_{P_z} &= \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{Ay} - R_{Az} \cdot x)^2}{EI_y} dx \\ &+ \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(M_{Ay} - R_{Az} \cdot x)^2}{EI_y^*} dx \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{Ay} - R_{Az} \cdot x)^2}{EI_y} dx \\ &+ \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(M_{By} - R_{Bz} \cdot x)^2}{EI_y^*} dx \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{Ax})^2}{GJ} dx + \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(M_{Ax})^2}{GJ^*} dx \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{Bx})^2}{GJ} dx + \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(M_{Bx})^2}{GJ^*} dx \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y} dx + \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y^*} dx \\ &= \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{EI_y} \left[ \frac{1}{8} L_1^2 (L_1 - L_{1f}) - \frac{1}{4} L_1 (L_1 - L_{1f})^2 \right. \\ &+ \frac{1}{6} (L_1 - L_{1f})^3 + \frac{1}{3} (L_2 - L_{2f})^3 \Big] \\ &+ \frac{1}{4} \frac{P_z^2}{GJ} L_2^2 (L_1 - L_{1f}) + \frac{1}{4} \frac{P_z^2}{GJ^*} L_2^2 L_{1f} \\ &+ \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{EI_y^*} \left[ \frac{1}{8} L_1^2 L_{1f} - \frac{1}{4} L_1 (L_1^2 - (L_1 - L_{1f})^2) \right. \\ &+ \frac{1}{6} (L_1^3 - (L_1 - L_{1f})^3) + \frac{1}{3} (L_2^3 - (L_2 - L_{2f})^3) \Big] \end{aligned} \quad (4)$$

식(3),(4)는 유효 결합부위에서 변형을 에너지 보정하기 위하여  $I_y^*$ ,  $I_z^*$ ,  $J^*$ 를 도입한 것이며, Castigliano의 제 2 정리를 이용하여 변형을 에너지가 보정되지 않은 빔과 보정된 빔 모델에 대한 하중점에서 변위비는 다음과 같으며, 이 값은 빔 모델과 셀 모델의 해석을 통하여 구할 수 있다.

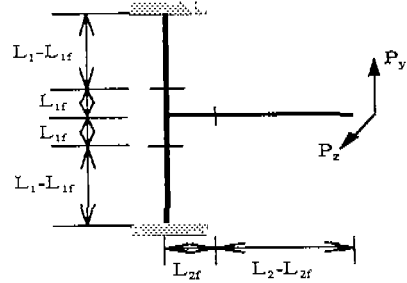
$$\left( \frac{\partial U_{P_y}}{\partial P_y} \right) / \left( \frac{\partial U_{P_y}}{\partial P_y} \right) = x_{P_y} \quad (5-a)$$

$$\left( \frac{\partial U_{P_z}}{\partial P_z} \right) / \left( \frac{\partial U_{P_z}}{\partial P_z} \right) = x_{P_z} \quad (5-b)$$

식(5)에서 보정된 면적 관성모멘트 ( $I_y^*$ ,  $I_z^*$ )와 비틀림 상수 ( $J^*$ )는  $x_{P_y}$ ,  $x_{P_z}$ ,  $L_{1f}$ ,  $L_{2f}$ 와 밀접한 관계가 있음을 나타낸다.



(a) T type beam



(b) T type beam with joint area

Fig. 1 T type beam model

### 2.1.2 L형 박스채널<sup>(3)</sup>

Fig. 2와 같이 하중이 작용할 때, 빔 모델에서 각각의 하중에 의하여 구조물에 저장되는 변형을 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (U_{P_y}) &= \frac{1}{2} \int_0^{L_2} \frac{(P_y \cdot x)^2}{EI_z} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{M_{Ax}^2}{EI_z} dx \\ &= \frac{1}{2} \frac{P_y^2}{EI_z} \left[ L_2^2 L_1 + \frac{1}{3} L_2^3 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (U_{P_z}) &= \frac{1}{2} \int_0^{L_2} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y} dx \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^{L_1} \frac{M_{Ax}^2}{GJ} dx \\ &= \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{EI_y} \left[ \frac{1}{3} L_1^3 + \frac{1}{3} L_2^3 \right] + \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{GJ} L_2^2 L_1 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $M_{Ax} = P_z L_2$ ,  $M_{Ay} = P_z L_1$ ,

$M_{Az} = P_y L_2, R_{Az} = P_z$  이다.

결합부에서 변형률 에너지를 보정하면 다음과 같다.

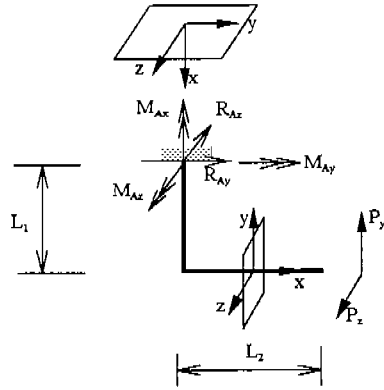
$$\begin{aligned}
 (U_{Py}^*) &= \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(M_{Az})^2}{EI_z} dx \\
 &+ \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(M_{Az})^2}{EI_z^*} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(P_y \cdot x)^2}{EI_z} dx \\
 &+ \frac{1}{2} \int_{L_2-L_{2f}}^{L_2} \frac{(P_y \cdot x)^2}{EI_z^*} dx \\
 &= \frac{1}{2} \frac{P_y^2}{EI_z} [L_2^2(L_1-L_{1f}) + \frac{1}{3}(L_2-L_{2f})^3] \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{P_y^2}{EI_z^*} [L_2^2 L_{1f} + \frac{1}{3}(L_2^3 - (L_2-L_{2f})^3)] \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (U_{Pz}^*) &= \frac{1}{2} \int_0^{L_2-L_{2f}} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y} dx \\
 &+ \frac{1}{2} \int_{L_2-L_{2f}}^{L_2} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y^*} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y} dx \\
 &+ \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{(P_z \cdot x)^2}{EI_y^*} dx + \frac{1}{2} \int_0^{L_1-L_{1f}} \frac{M_{Ax}^2}{GJ} dx \\
 &+ \frac{1}{2} \int_{L_1-L_{1f}}^{L_1} \frac{M_{Ax}^2}{GJ^*} dx \\
 &= \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{EI_y} [\frac{1}{3}(L_1-L_{1f})^3 + \frac{1}{3}(L_2-L_{2f})^3] \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{EI_y^*} [\frac{1}{3}(L_1^3 - (L_1-L_{1f})^3) \\
 &+ \frac{1}{3}(L_2^3 - (L_2-L_{2f})^3)] \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{GJ} [L_2^2(L_1-L_{1f})] + \frac{1}{2} \frac{P_z^2}{GJ^*} L_2^2 L_{1f} \quad (9)
 \end{aligned}$$

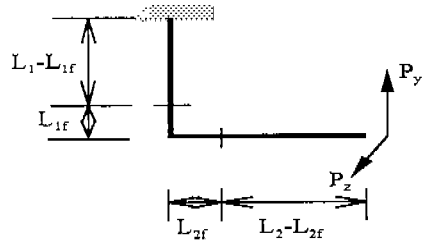
식(8),(9)는 유효 결합부위에서 변형률 에너지를 보정하기 위하여  $I_y^*, I_z^*, J^*$ 를 도입한 것이며, Castigliano의 제 2 정리를 이용하여 변형률 에너지가 보정되지 않은 빔과 보정된 빔 모델에 대한 변위비는 식(5)의 관계로부터 얻어진다.

### 2.1.3 T 및 L형 박스채널의 설계적용성

대부분의 모노코크 차체 프레임의 결합부는 일정한 직선부재가 곡률을 가지면서 결합되는 구조이며, 이와 같은 곡률부위를 유효결합부길이라고 볼 수 있다. T 및 L형 박스



(a) L type beam



(b) L type beam with joint area

Fig. 2 L type beam model

채널에서 유효결합부 길이는  $L_{1f}, L_{2f}$ 이며,  $I_y$ 와  $I_z$ 는 결합부 직선부재의 면적관성모멘트로 볼 수 있다. 식(5)의  $x_{Py}, x_{Pz}$ 는  $I_y^*$ 와  $I_z^*$  그리고  $J^*$ 의 함수이며, 단면의 변화비가 일정하다고 가정하면, 즉  $I_y^*/I_z^* = I_y/I_z$  일 때, 변형률 에너지가 보정된 단면 특성치를 구할 수 있다. 그러나 이와 같은 관계식만 사용한다면, 보정된 면적 관성모멘트와 비틀림 상수는 결합부 강성을 가져야 하기 때문에 실제로 설계될 결합부와 결합부에 연결되는 부재의 단면 특성치와 차이를 나타낸다.

### 2.2 회전스프링 대치법

Fig. 3과 같이 단면이 급격히 변화하는 결합부위에 회전강성요소를 적용하는 방법으

로, Fig. 3과 같이 단면의 도심(D점)에서 수직방향으로 위치한 강제요소의 끝단에 하중을 가하여 모멘트 효과가 나타나도록 하며, 회전강성은 결합부의 지오메트리 인자로부터 구할 수 있다. Fig. 3에서 하중  $P_y$ 가 작용할 때, O점은 부재단면과 하중점에서 처짐 변위의 회전 중심점이며, a는 도심 D점에서 하중작용점까지 거리로써 결합부에서 충분히 모멘트의 영향을 받을 수 있는 길이이다. 단면 B와 C는 경계부로서 고정한다. 단면 끝단과 하중 작용점의 처짐변위 ( $\delta_1, \delta_2$ )는 정적해석으로부터 구한다. 단면과 수평방향의 하중( $P_y$ )에 대한 결합부 회전중심의 위치는  $x = \frac{a \delta_1}{\delta_2 - \delta_1}$ 이며, 회전중심에서 회전각은  $\alpha = \tan^{-1} \frac{\delta_1}{x}$ 이다. 따라서 회전강성  $K_\alpha$ 는 부재의 굽힘거동에 대한강성으로써 식(10)과 같다.

$$K_\alpha = \frac{P_y(x+a)}{a} \quad (10)$$

또한, 단면에 토크( $T$ )가 작용할 때, 비틀림 강성은 식(11)과 같다.  $\delta_3$ 은 단면한점의 곡선변위이다.

$$K_\beta = \frac{T}{\beta} = \frac{T}{\tan^{-1} \frac{\delta_3}{r}} \quad (11)$$

### 3. 차체 프레임 최적설계

주어진 설계영역내 결합부 강성, 유효결합부의 단면특성, 그리고 결합부에 연결되는 일련의 직선부재에 대하여 차체 프레임 설계시 최적화하는 방법을 제시하려 한다.

#### 3.1 최적설계를 위한 인자설정<sup>(4,5)</sup>

##### 3.1.1 박스채널의 단면형상

일반적인 직사각형 단면인 Fig. 4에 대한 면적 관성모멘트와 비틀림 상수는 다음과 같다.

$$I_x = \sum \left[ \frac{tl^3}{12} \cos^2 \theta + \frac{tl^3}{12} \sin^2 \theta + tl c_x^2 \right] \quad (12-a)$$

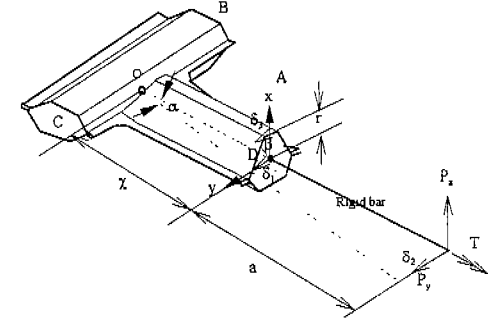


Fig. 3 Schematic model of joint area

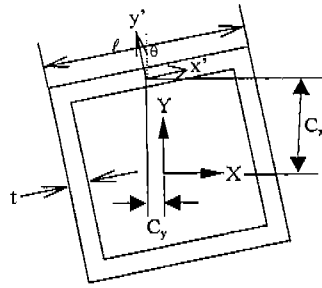


Fig. 4 Basic section profile

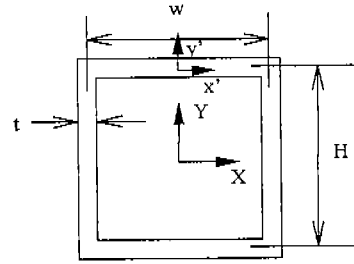


Fig. 5 Design factor for section profile

$$I_y = \sum \left[ \frac{tl^3}{12} \sin^2 \theta + \frac{tl^3}{12} \cos^2 \theta + tl c_y^2 \right] \quad (12-b)$$

$$I_{xy} = \sum \left[ \frac{tl^3 - tl^3}{24} \sin 2\theta + tl c_x c_y \right] \quad (12-c)$$

그리고 개단면과 폐단면에 대한 비틀림 상수는 다음과 같다.

$$J = \sum \frac{tl^3}{3} \quad (13-a)$$

$$J = \frac{4 \bar{A}^2}{\oint \frac{dl}{t}} \quad (13-b)$$

여기서  $\bar{A}$ 는 단면의 중심선에 의해 형성된 단면적이다.

본 연구에서 사용될 단면인 Fig. 5에 대한 단면 특성치는 다음과 같다.

$$I_x = 2 \left( \frac{wt^3}{12} + tw \left( \frac{H}{2} \right)^2 \right) + 2 \left( \frac{tH^3}{12} \right) \quad (14-a)$$

$$I_y = 2 \left( \frac{tw^3}{12} \right) + 2 \left( \frac{Ht^3}{12} + tH \left( \frac{w}{2} \right)^2 \right) \quad (14-b)$$

$$J = \frac{2K(wH)^2}{w+H} \quad (14-c)$$

### 3.1.2 단면형상변경에 따른 결합부강성

결합부 강성은 결합부에 연결된 부재의 단면형상이 변경될 때, 결합부 강성도 이와 함께 변경되어야 한다. 본 연구에서 결합부 강성에 대하여 결합부와 연결된 부재의 단면형상과의 관계를 다음과 같이 정의한다. 결합부에서의 유효 결합부 길이, 물성 그리고 용접형태는 동일하다고 가정한다. 즉, 단면형상인자의 변화에 따라 용접부 크기는 동일하게 변화하며, 용접형태는 변화하지 않는 것으로 가정한다면, 단면형상인자와 관련된 비례강성계수가 존재한다. 그러므로 임의의 단면 형상에 대한 정적인 결합부 강성은 임의의 면적 관성모멘트에 대한 선형적인 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \frac{K}{I} I \quad (15)$$

여기서  $K$ 는 기준 결합부의 굽힘 또는 비틀림 강성,  $I$ 는 기준 결합부의 단면특성치,  $K$ 와  $I$ 는 단면형상 변경에 따른 결합부 강성과 단면특성치이다.

### 3.2 차체프레임에 대한 강성검토

Fig. 6과 같은 모노코크형 차체 프레임에서 4개의 특정 결합부 강성을 식(10)과(11)을 사용하여 관성 좌표계상에서 Table 1과 같이 나타내었으며, 기호 A, B, C는 Fig. 6의 결합부에 대하여 Fig. 3의 단면의 위치를 나타낸다. Table 1에서의 결합부 강성을 회

전 스프링으로, 직선부재는 빔 요소로써 Fig. 7과 같은 유한요소모델을 구성하였다. 차체 프레임의 목표강성은 셸 요소 모델의 정적 및 동적강성이다. 사용된 재질특성은 200 GPa 탄성계수, 0.3 포와송비, 그리고  $7.82 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup> 밀도이다.

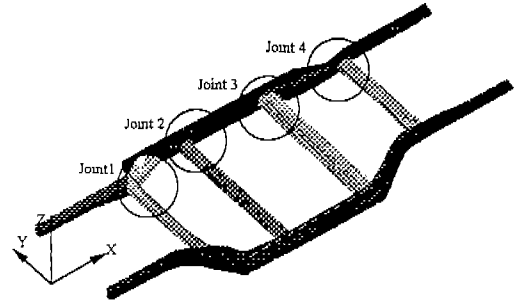


Fig. 6 A monocoque type chassis frame

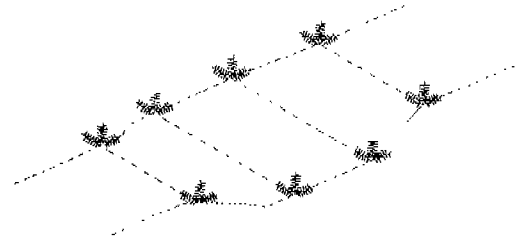


Fig. 7 Beam element model

### 3.3 단면형상설계를 위한 적용성 검토

MSC/NASTRAN의 최적화 모듈<sup>(6)</sup>을 사용하여 각 부재의 단면영역, 즉 정해진 단면의 폭과 높이에 대하여 정적 및 동적강성을 갖도록 박스 단면 특성치인 식(14)를 이용하여 단면형상인자에 대하여 최적설계를 수행하여 결합부 강성이 회전 스프링 강성의 유무에 따른 단면형상인자의 설계성을 검토한다.

등가 관성모멘트법과 같이 결합부에서 회전 스프링을 사용한 강성을 이용하지 않고 유효 결합부 길이에 단면형상인자만을 검토하였을 때, 단면형상인자를 Table 2에 나타내었으며, 그 형상인자들은 경계조건의

상한치를 나타낸다. 이 모델의 고유진동수로 1차 비틀림 모드가 1.82 Hz이고 1차 굽힘모드가 1.60 Hz이며, 설계 목표치를 만족시키지 못한다.

Table 3은 회전 스프링으로 결합부 강성을 반영한 빔 모델에 대하여 최적설계를 수행한 후 산출된 단면형상인자이며, Table 4는 본 연구에서 제시된 빔 모델과 셸 모델의 정적 및 동적강성이다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 차체 프레임 설계시 부재와 관련된 단면형상인자를 어느 정도 상사시켜 사용될 수 있는 단순 빔 모델링 방법을 제시할 수 있었다. 결합부 강성을 회전 스프링으로 표현하며 결합부재의 단면형상변경에 의한 결합부 강성의 변경은 식(15)에 의하여 정적인 탄성거동상에서 단면특성치와 선형적인 관계로써 나타낼 수 있었다.

식(15)는 결합부 강성을 나타내는 회전 스프링요소의 강성치를 연결부재의 단면 특성치와 연계함으로써, 유효 결합부에서 발생하는 단면의 급격한 변화에 의한 유연천이영역의 불연속성을 감소시켜줄 수 있었다. 즉, 결합부에 연결된 각 연결 부재사이의 단면 특성치 차이에 따른 결합부에서 기하학적인 변형의 특이현상을 감소시킬 수 있음을 나타낸다. 그리고 식(15)의 단면형상변경에 따른 결합부 강성을 표현하는 수식은 차체 구조부재를 최적설계하기 위하여 단면형상과 결합부 강성을 검토함에 있어 필요한 관계식이며, 또한 물성에 대한

선형적인 관계를 수식에 포함시켜 재질변경에 대해서도 이용될 수 있다.

정적 및 동적 강성 검토예제를 통하여 빔 모델과 셸 모델과의 오차는 10% 이하로 제시된 모델링 방법의 유효성을 나타낼 수 있었다. 이는 초기 설계시 설정된 정적 및 동적 강성에 대하여 결합부 강성과 결합부의 단면특성 그리고 각 부재에 대한 두께, 폭, 그리고 높이와 같은 단면특성이 실제 설계에 구현이 가능함을 나타낸다.

#### 참 고 문 헌

1. Chang D. C., Effects of flexible connections on body structural response, SAE paper 740041.
2. Toshiaki Sakurai, Structural joint stiffness of automotive body, SAE Paper 880550.
3. Choi J.K. et. al., A study on the beam modeling of box channel structures: For the T type joint structures, SAE Paper 960554.
4. Stephen P. Timoshenko & James M.Gere, Theory of elastic stability, McGraw-Hill, 2nd edition, 1963.
5. Kollbrunner & Basler, Torsion in structures: An engineering approach, Springer-verlag Berlin Heidelberg New York, 1969.
6. MSC/NASTRAN Design Sensitivity and Optimization manual, MacNeal-Schwendler Co., 1994.

Table 1 Joint stiffness of monocoque chassis frame(unit:  $10^9$  Nmm/deg)

Joint No.	Section	$K_{RX}$	$K_{RY}$	$K_{RZ}$
1	A	7.95	13.41	21.76
	B	6.91	16.61	11.95
	C	5.56	16.4	9.17
2	A	7.33	11.52	7.36
	B	7.21	18.77	12.93
	C	7.21	18.77	12.93
3	A	75.7	21.44	28.96
	B	5.13	19.53	21.44
	C	6.06	19.42	12.92
4	A	7.65	19.56	29.05
	B	5.63	19.72	13.22
	C	5.63	19.72	13.22

Table 2 Section profile factor of chassis frame without joint stiffness

Joint No.	Design variable	A	B	C	Design boundary
1	t	4	4	4	$2 \leq t \leq 4$
	w	100	100	100	$50 \leq w \leq 100$
	H	100	100	100	$50 \leq H \leq 100$
2	t	4	4	4	$2 \leq t \leq 4$
	w	70	70	70	$50 \leq w \leq 70$
	H	100	100	100	$50 \leq H \leq 100$
3	t	4	4	4	$2 \leq t \leq 4$
	w	100	100	100	$50 \leq w \leq 120$
	H	120	120	120	$50 \leq H \leq 100$
4	t	4	4	4	$2 \leq t \leq 4$
	w	120	120	120	$50 \leq w \leq 120$
	H	100	100	100	$50 \leq H \leq 100$

Table 3 Section profile factor of chassis frame with joint stiffness

Joint No.	Design variable	A	B	C	Design boundary
1	t	3	3	3	$2 \leq t \leq 4$
	w	95	60	60	$50 \leq w \leq 100$
	H	80	80	80	$50 \leq H \leq 100$
2	t	3	3	3	$2 \leq t \leq 4$
	w	55	60	60	$50 \leq w \leq 70$
	H	80	80	80	$50 \leq H \leq 100$
3	t	3	3	3	$2 \leq t \leq 4$
	w	80	60	60	$50 \leq w \leq 120$
	H	90	100	100	$50 \leq H \leq 100$
4	t	3	3	3	$2 \leq t \leq 4$
	w	115	60	60	$50 \leq w \leq 120$
	H	80	80	80	$50 \leq H \leq 100$

Table 4 Results of global stiffness analysis

	Mode	Shell model	Beam model	Error(%)
Static analysis (mm)	Torsion	2.09	1.99	4.78
	Bending	1.03	0.97	5.82
Modal analysis (Hz)	1st torsion	27.44	25.69	6.37
	1st bending	23.15	22.11	4.49