〈논문〉 SAE NO. 99370297

토션 빔의 단면형상에 따른 현가계의 구조적 특성과 롤 거동에 관한 연구

A study on the structural characteristics and roll behavior of suspension for the section profile of torsion beam

이 동 찬*, 변 준 형*
Dongchan Lee, Joonhyong Byun

ABSTRACT

The kinematic and compliance characteristics of torsion beam axle is structurally related to the location and section profile of torsion beam and the span from body mounting point to wheel center. This paper presents the effect of section properties in torsion beam on the structural characteristics and roll behavior of suspension. The structural characteristics is on the maximum stress in the welding area of torsion beam and the roll behavior is on roll steer and roll camber of suspension which are important for controllability and stability in cornering.

Four factors are used for the section design of torsion beam, which are thickness, midline length, arc inner radius, and sector half angle. Through the structural and quasi-static analysis made for six torsion beam axle models, it can be noticed that roll steer and the structural durability of suspension are closely related to warping constant and shear center in section properties of torsion beam.

주요기술용어:Torsion beam(토션빔), Shear center(전단중심), Inner pivot point(내적 피봇점), Roll center height(롤 중심 높이), Roll steer(롤 스티어), Roll camber(롤 캠버), Pure torsion(순수 비틀림), Warping torsion(뒤틀린 비틀림)

Nomenclature

ϕ : Roll angle
θ : Twist angle
L : Midline length
R : Arc inner radius
γ : Sector half angle
K : Torsional constant
C_w : Warping constant
α' : Semi-trailing arm angle
L' : Effective swing arm length
H_{RCH} : Roll center height

1. 서 론

현가계에서 공간활용을 최대화하면서 설계자가 요구하는 기하학적 및 컴플라이언스

* 정회원, 고등기술연구원

거동을 확보할 수 있는 현가는 토션빔 액슬이다. 이러한 현가계는 기하학적 및 컴플라이언스 특성을 확보하기 위하여 좌우 트레일링 암(trailing arm)과 단순한 형태의 토션빔을 용접으로써 강결합하게 됨으로 이 부위에서 내구성을 확보하도록 토션빔의 단면형상, 보강재의 형상 및 배치를 검토하여야 한다. 토션빔의 일반적인 형상은 U 및 V 단면이며, 배치에 따라 롤 안정바를 설치하여 추가적인 롤 강성을 확보한다. 그리고 토션빔의 배치에 따라 횡 및 전후 방향에 대한 조종 안정성에 영향을 준다.

토션빔의 트레일링 암에서 배치, 결합부에서 최대 응력, 그리고 현가계의 기하학적 및 컴플라이언스 거동특성에 대하여 검토하는 것은 토션빔 액슬의 초기설계단계에서 요구되는 사항이다. 토션빔의 단면형상이 주로 변형되는 것은 현가의 롤 거동시 빔의 비틀림 거동에 기인되므로, 본 논문에서는 토션빔의 배치에 따른 롤 거동과 토션빔의 비틀림 거동 관계, 단면의 전단중심과 롤 중심 높이와의 관계, 배치가 동일한 액슬에 대하여 빔 단면의 형상에 따른 결합부에서 발생하는 최대 응력, 그리고 차량의 선회성과 접지력에 영향을 주는 롤 스티어와 롤 캠버를 검토하기로 한다.

2. 토션빔의 기하학적 영향

2.1 샤시의 롤 각과 빔의 비틀림 각의 관계[1]

토션빔의 배치는 현가계에서 패키지, 롤 강성, 및 롤 중심높이를 고려하여 그 위치를 결정하여야 한다. 차체의 롤 각(ϕ)과 토션빔의 비틀림 각(θ)의 관계는 Fig. 1로부터 유도할 수 있다. 롤 각은 현가계의 롤 거동시 부쉬의 강성에 기인하는 차체 마운팅 부쉬에서의 롤 각(α)과 차체 마운팅 부쉬 장착부에서 차량의 수직방향으로 거동하지 않는 상태에서 차륜 중심부의 롤 각(β)을 고려하며, C 는 차체 마운팅 부쉬사이의 거리, T 는 윤거(wheel tread)이다. Fig. 1로부터 차체의 롤 각은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \alpha + \beta = \frac{A \cdot \theta}{C} + \frac{B \cdot \theta}{T} \quad (1)$$

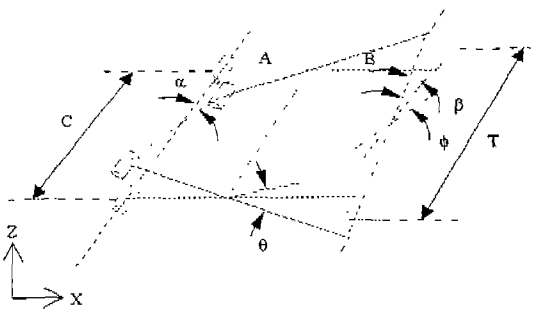


Fig. 1 Roll behavior of torsion beam axle

식(1)로부터 윤거, 차체 마운팅 부쉬사이 거리, 그리고 측면상에서 부쉬중심에서 토션빔의 전단중심까지의 거리(A), 토션빔의 전단중심에서 차륜중심까지의 거리(B)와의 관계는 식(2) 와 같다.

$$\frac{\phi}{\theta} = \frac{A}{C} + \frac{B}{T} \quad (2)$$

식(2)에서 T 와 C 가 일정하다면, 토션빔의 위치가 차체 마운팅 부쉬의 위치에 있을 때 빔의 비틀림 각이 최대가 되며, 차륜중심에 있을 때 최소가 된다. 차체의 롤 거동시 토션빔의 위치가 차체 마운팅 부쉬위치에 있을 때, 빔과 부쉬는 비틀림 거동이 주가 되며, 차륜중심방향으로 토션빔의 위치가 이동하면서 굽힘과 비틀림 거동을 동시에 받는다.

2.2 단면형상에 대한 정의

현가의 롤 거동은 양 차륜의 접지점에서 수직방향 변위차에 의하여 빔은 비틀림 및 굽힘거동을 한다. 그러므로 빔의 거동에 따른

결합부에서 발생하는 응력과 단면형상은 액슬의 내구성과 롤 거동에 영향을 준다. 단면형상에 따른 결합부위의 응력과 롤 거동을 검토하기 위하여 단면형상인자를 Fig. 2와 같이 두께(t), 단면 중심선 길이(L), 원호반경(R) 그리고 폴렌지부의 벌어진 각을 나타내는 반개각(γ)으로 나타낼 수 있으며, L은 $2(b+\lambda R)$로써 단면의 총 길이이다. 본 논문에서는 차륜중심과 차체 마운팅 부쉬 위치가 정해진 패키지내에서 동일한 단면적을 가지는 빔에 대하여 예제 모델을 구성하였다. 차륜에 작용하는 수직하중은 토션빔에 비틀림 거동을 발생시키는 토오크가 작용되며, 토오크에 의하여 빔이 비틀릴 때, 거동에 영향을 미치는 단면계수는 전단중심, 비틀림 상수, 뒤틀림 상수이며, 굽힘거동에 영향을 미치는 단면계수는 도심, 면적관성모멘트(I_x , I_z), 도심으로부터 단면 끝단까지의 거리(c_x , c_z)이다. 여기서 단면형상을 나타내는 인자는 t, L, R, 그리고 γ이며, 이로부터 단면 특성치인 면적관성모멘트, 비틀림 및 뒤틀림 상수등이 구해진다. 사용된 예제에 대한 단면 특성치는 Table 1에 나타나있다.

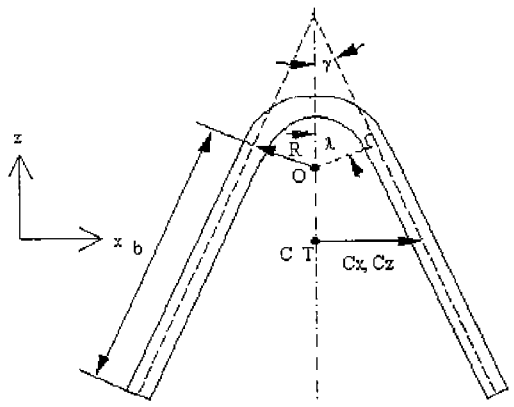


Fig. 2 Section profile of torsion beam

2.3 전단중심과 롤 중심높이의 관계[2]

토션빔 액슬에서 토션빔의 단면에 대한 전단 중심이 정해지고 빔의 배치가 정해지면 다음과 같은 방법에 의하여 현가의 롤 중심 높이를 구할 수 있다. 롤 거동시 차륜의 궤적에 대한 피봇점은 차체 마운팅 점과 토션빔 거리상의 중심이 된다. 그러므로 이 두 점을 연결하는 직선과 Fig. 3-(a)와 같이 우측 차륜의 스핀들축을 지나는 평면에서 교차하는 점이 좌측 타이어 접지점의 궤적에 대한 피봇점이 되며, 이를 스윙 암 피봇점(P)이라 한다. 그리고 토션 빔의 거동은 스윙 암 피봇 점과 차체 마운팅 점을 연결하는 직선과 Fig. 3-(b)와 같이 rear view상에서 중심 수직선과의 교점인 가상 내적 피봇점을 지나는 축에 대하여 비틀림 거동을 한다. 이 교점에 빔 단면의 전단 중심과 일치시켜 단면의 뒤틀림을 적게 한다. Fig.3-(a)로부터 a와 b의 위치가 정해지면 세미 트레일링 암 각(α')이 정해지며, 유효 스윙암 L'이 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$L' = \frac{e}{\tan\alpha'} \tag{3}$$

여기서 e는 차체 마운팅 부쉬와 차륜 중심 사이의 거리이다.

Fig.3-(b)로부터 스윙암 피봇점과 롤 중심 높이(H_{RCH})관계는 지면과 스윙암 피봇점 수직거리(Z_p), 차륜중심과 부쉬사이 Y 방향거리(f), 차체중심과 부쉬사이 Y 방향거리(a), 그리고 부쉬와 스윙암 피봇점사이 방향거리(L')로써 스윙암 피봇점과 지면을 이루는 각(β')으로 나타낼 수 있다.

$$\tan\beta' = \frac{H_{RCH}}{a+f} = \frac{Z_p}{f+L'} \tag{4}$$

스윙암 피봇점과 부쉬사이 연결선과 지면과 이루는 가상의 각인 γ'에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\tan\gamma' = \frac{Z_i - Z_{OL}}{Y_{OL}} = \frac{Z_P - Z_{OL}}{L'} \qquad (5)$$

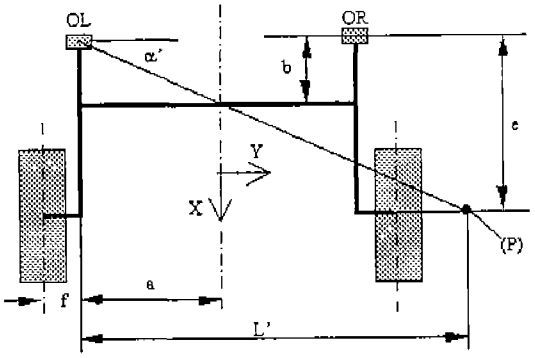
여기서 Z_{OL}과 Y_{OL}은 차량 좌표계에서 좌측부쉬의 Z와 Y좌표를 나타내며, Z_i 는 내적 피봇점의 Z좌표를 나타낸다.

식(4)와 식(5)로부터 롤 중심 높이와 전단중심인 내적 피봇점 사이의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

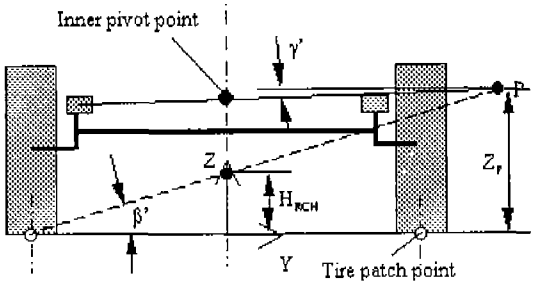
$$H_{RCH} = \frac{a+f}{f+L'} Z_p$$

$$= \frac{a+f}{f+L'}\left[\frac{L'}{Y_{OL}}(Z_i - Z_{OL}) + Z_{OL}\right] \qquad (6)$$

식(3) - 식(6)을 사용하여 토션빔의 위치를 선정할 수 있다. 토션빔 액슬에서 빔 단면의 전단중심을 알면 롤 중심 높이를 결정할 수 있으며, 차륜중심의 움직임에 따라 전단중심의 위치도 변한다.



(a) Tope view



(b) Rear view

Fig.3 Schematic drawing of torsion beam axle

3. 현가의 구조적 특성과 롤 거동에 대한 검토[3,4]

3.1 결합부 응력

현가계가 롤 거동을 할 때, 토션빔은 굽힘과 비틀림 거동을 하게 된다. 이 중 좌우륜의 스트로크차이에 의하여 발생하는 비틀림 거동은 빔이 결합되는 트레일링 암에서 발생하는 응력에 직접적인 영향을 준다. 비틀림 거동은 끝단구속이 없는 순수 비틀림과 끝단 구속이 있는 뒤틀린 비틀림으로 나눌 수 있다. 박판의 개단면의 순수 비틀림인 경우 토션빔에서 비틀림 상수는 다음과 같이 계산된다.

$$K = xLt^3 \qquad (7)$$

여기서 형상인자인 x는 L/t에 의하여 결정되며, L/t가 10 이상인 경우에는 1/3에 수렴한다. 즉, 비틀림 상수는 단면 형상인자인 R 과 γ 와는 무관하고 L 과 t 에 의하여 결정된다. 그리고 토션빔이 트레일링 암과 결합되는 것과 같은 끝단 구속이 있는 경우 뒤틀린 비틀림은 자연스러운 뒤틀림을 제한한다. 순수 비틀림과 뒤틀린 비틀림을 고려할 때, 토션빔의 길이방향에 대하여 토오크와 비틀림 상수 및 뒤틀림 상수의 관계는 다음과 같다

$$M_t = GK\frac{d\theta}{dy} + EC_w\frac{d^3\theta}{dy^3} \qquad (8)$$

여기서 M_t 는 토션빔에 가해지는 토오크, G 는 전단계수, 그리고 E 는 탄성계수이다.

Fig. 4 는 토션빔의 롤 거동시 트레일링 암에서 발생할 수 있는 단면의 뒤틀림 상태를 나타낸 것이다. 이러한 단면에서 플렌지의 뒤틀림 변위는 차륜의 토우를 변화시키는데 영향을 주어 선회시 조종성에 영향을 준다. 이와 같이 단면의 뒤틀림에 대한 결합부 응력을 검토하기 위하여 Table 2와 같은 액슬의 구성품에 대하여 유한요소모델로 구성하

였다. 부쉬와 스프링은 선형강성의 스프링 요소로써 모델링하였으며, 그 외의 구성품에 대해서 셸 요소를 사용하여 모델을 구성하였다. 롤 조건에 대해서, 변위구속조건을 부과하여 구조해석 소프트웨어인 MSC/NASTRAN을 사용하여 응력분포를 검토하였다. Fig. 5 는 5.0 ° 롤 거동에 대한 결합부의 응력, 단면의 비틀림 상수및 뒤틀림 상수를 나타낸 그림이며, 세로축은 빔 두께에 따라 case 1과 4를 기준으로 상대비를 나타낸 것이다.

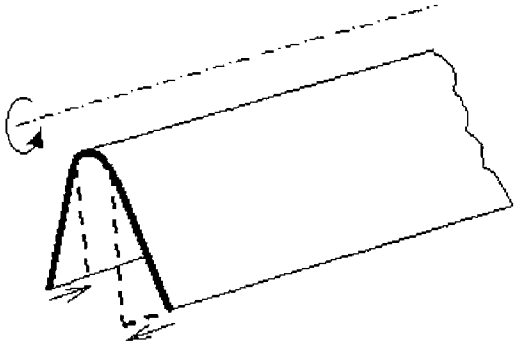
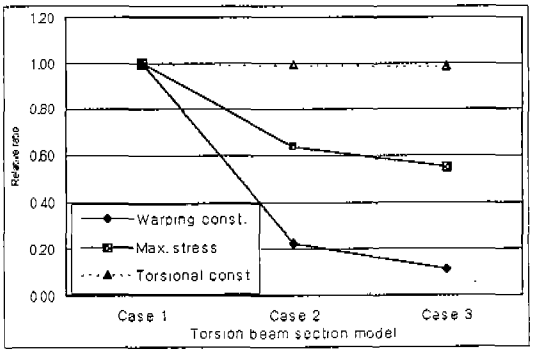
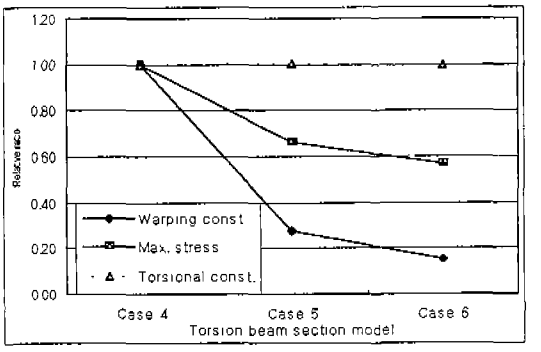


Fig. 4 Flange warping displacement of torsion beam

Fig. 5와 Table 1에서, 비틀림 상수는 식(7)과 같이 단면의 중심선 길이와 두께의 함수이므로 본 예제와 같이 중심선 길이가 같고 두께만 다른 경우 거의 동일한 값을 가진다. 뒤틀림 상수는 빔이 비틀림을 받을 때, 플렌지의 뒤틀림 변위를 나타내는 상대적인 척도이며, 비틀림에 의한 뒤틀림 정도를 나타내는 것이다. 뒤틀림 상수가 큰 것은 비틀림시 상대적으로 단면의 뒤틀림이 크다고 볼 수 있다. 단면의 중심선 길이가 일정할 때, 호 반경이 작을수록 그리고 반개각이 클수록, 두께가 작을수록 뒤틀림 상수는 작아진다. 단면의 자유로운 뒤틀림에 대한 제한은 토션빔의 비틀림 강성을 증가시킬 뿐만 아니라 트레일링 암과 토션빔의 결합부



(a)



(b)

Fig. 5 Trend of stress in welding area to K and Cw

에서 응력을 증가시킨다. 단면의 뒤틀림 상수의 변화양상과 응력의 변화양상이 유사함을 알 수 있다. 그리고 전단중심의 위치와 관련하여 토션빔의 결합부와 가까워질수록 최대응력이 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 하중작용점과 전단중심의 차이를 감소시킴으로써 빔 단면에 대한 토오크가 감소하기 때문이다. 즉 하중이 전단중심에 작용하면 단면상에서 비틀림은 발생되지 않기 때문에 단면상의 토오크에 의한 변형이 없다. 따라서 전단 중심이 하중이 전달되는 결합부사이의 차이가 작을수록 결합부에서 발생하는 응력은 토오크에 의한 부가적인 영향을 덜 받게된다.

3.2 롤 스티어와 롤 캠버 변화

토션빔 액슬에서 토션빔은 트레일링 암과 용접으로 연결되어 이 부위에서 끝단구속으로 작용하게 된다. 토션빔의 끝단부에서 단면의 뒤틀림은 토션빔의 위치와 더불어 현가의 롤 스티어와 롤 캠버 특성에 영향을 주게된다. 본 논문에서는 동일한 위치에서 6가지 빔의 단면형상에 대하여, 롤 거동시 토우(toe)와 캠버(camber) 변화량을 검토하기로 한다. 현가의 롤 거동을 해석하기 위하여 Table 2와 같은 구성부품에 대하여 Fig. 6과 같이 모델링하여 동역학 해석 상용 소프트웨어인 ADAMS를 사용하였으며, 5.0 ° 롤 각에 대한 롤 거동 해석을 수행하였다.

이에 대한 결과가 Fig. 7과 8에 나타나 있다. Fig. 7과 8 그리고 Table 1로부터 동일한 단면의 중심선 길이에 대하여 뒤틀림 상수가 작을수록 토우의 변화폭이 작아짐을 알 수 있으며, 캠버의 변화폭에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다.

이는 롤 거동시 현가계의 토우 변화가 Fig. 4 에서와 같이 단면 플렌지의 뒤틀림 변위에 기인하는 것으로 뒤틀림 상수가 클수록 전단중심이 높을수록 플렌지의 뒤틀림이 커져 토우 변화량이 커진다. 캠버 변화는 빔의 굽힘거동에 의하여 발생하는 것으로써 빔의 굽힘강성에 영향을 주는 면적 관성 모우멘트와 관련된다는 것을 알 수 있다. 즉, 캠버 변화가 거의 변화하지 않는 것은 R 과 γ 가 달라짐에 따라 단면의 면적관성모멘트가 크게 변화하지 않기 때문이다. Fig. 7의 롤 거동은 차량이 코너링을 할 때 발생하는 것으로 Fig. 5에서 뒤틀림 상수다 커질수록 Fig. 7의 토우변화가 커진다. 이는 좌측 코너링에 대하여 양(+)의 롤 각이 증가할수록 토우아웃 경향이 커져 오버 스티어되는 경향을 가지게 된다.[2]

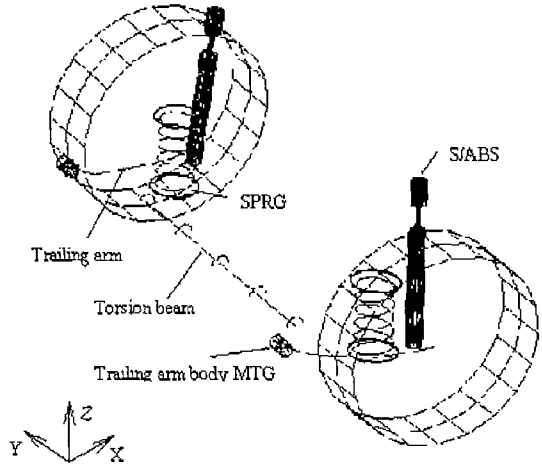
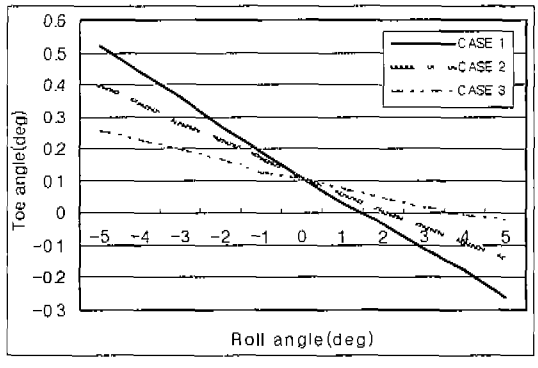
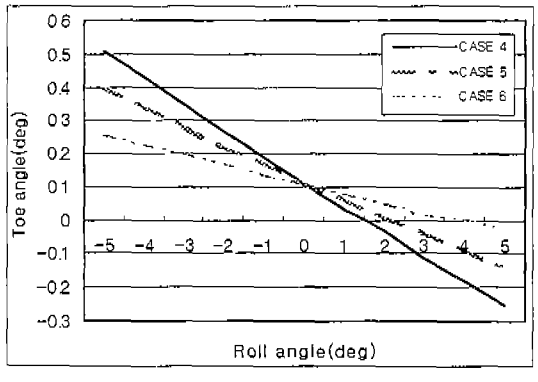


Fig. 6 Schematic model for kinematics of torsion beam axle

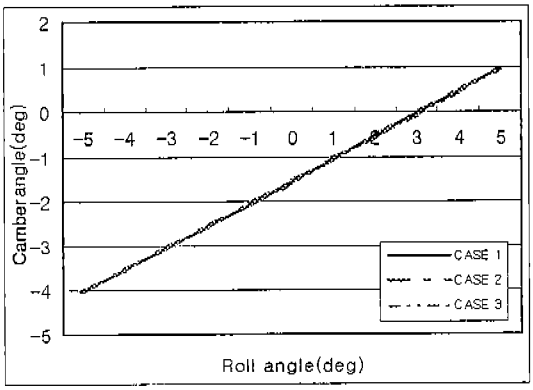


(a)

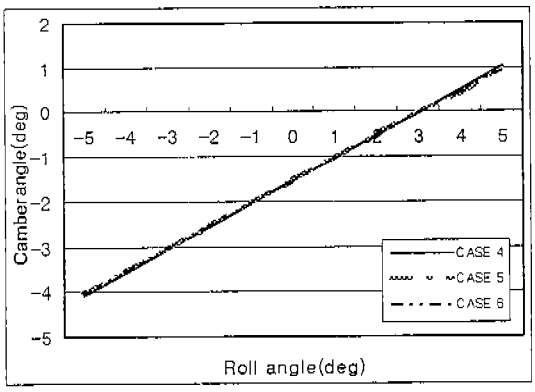


(b)

Fig. 7 Toe change of torsion beam axle in rolling



(a)



(b)

Fig. 8 Camber change of torsion beam axle in rolling

4. 결 론

• 식(2)를 통하여 롤 각과 토션빔의 비틀림 각의 관계를 통하여 토션빔의 위치 변화에 따라 비틀림과 굽힘 거동양상을 검토할 수 있다.

• 식(6)으로부터 롤 중심 높이와 토션빔의 전단 중심과의 관계식을 통하여 전단 중심이 낮을수록 롤 중심 높이는 낮아진다.

• 롤 거동시 토우 변화와 토션빔의 결합

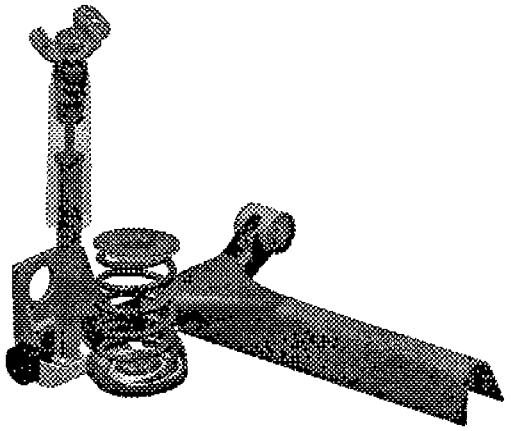


Fig. 9 Torsion beam axle model

부에서 발생하는 최대응력은 단면의 뒤틀림 상수와 밀접한 관련이 있다. 즉, 단면의 뒤틀림 상수가 작을수록 최대응력과 토우 변화폭은 작아진다. 이는 토션빔의 끝단 구속에 대하여 비틀림과 뒤틀림 현상에 영향을 크게 받는 것을 나타낸다 (Fig. 5와 Fig. 7의 경향).

• Fig. 7과 Fig. 8로부터 캠버 변화가 토우 변화와 같이 변화가 크지 않다. 이는 Table 1로부터 토우 변화에 영향을 미치는 인자(비틀림 상수, 뒤틀림 상수)가 캠버 변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 유추할 수 있으며, 캠버 변화는 동일한 차륜의 위치(Fig. 3-(a)의 기호 f)에서 토션빔의 굽힘 강성의 영향을 받는 것으로 판단된다.

• 이러한 설계 내용을 토대로 실제 설계된 토션빔 액슬 현가장치가 Fig. 9에 나타나있다.

후 기

본 연구는 차세대 자동차기술 개발사업 (알루미늄 초 경량차체 및 경량부품개발) 관련 G7연구비의 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

1. T.L. Satchell, 1981, The Design of Trailing Twist Axles, pp. 1 ~ 8, SAE 810420.
2. J. Reimpell and H. Stoll, 1996, The automotive Chassis : Engineering Principles, 2nd edition, SAE Inc.
3. Stephen P. Timoshenko and James M. Gere, 1963, Theory of Elastic Stability, 2nd edition, McGraw-Hill.
4. Stephen P. Timoshenko and D. H. Young, 1968, Elements of Strength of Materials, 5th edition, Prentice-Hall.

Table 1 Section properties of torsion beams

Properties	Notation(unit)	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Thickness	t(mm)	4.5	4.5	4.5	6	6	6
Midline length	L(mm)	205	205	205	207	207	207
Arc inner radius	R(mm)	25	15	15	25	15	15
Sector half angle	γ (deg)	10	20	30	10	20	30
Area	A(mm^2)	927	925	923	1246	1248	1242
MOIx	Ix(mm^4)	6.60E5	6.82E5	6.52E5	8.82E6	9.11E6	8.95E6
MOIz	Iz(mm^4)	6.87E5	6.83E5	7.21E5	9.18E5	9.13E5	9.73E5
Torsional constant	K(mm^4)	6212	6155	6145	14700	14740	14650
Warping constant	Cw(mm^6)	1.05E8	2.36E7	1.15E7	1.60E8	4.36E7	2.40E7
Centroid(x,z)	Cx,Cz (mm,mm)	4084.5, 164.3	4083.7, 161.8	4083.3, 158.5	4084.6, 164.9	4083.8, 162.6	4083.4, 159.2
Shear center(x,z)	S.C. (mm,mm)	4102.0, 226.1	4095.2, 219.8	4094.6, 207.4	4102.1, 226.9	4095.4, 220.9	4094.7, 208.4

Table 2 Chassis components for kinematics

Component	Type	Number
Trailing arm mounting	Bush	2
S/ABS UPR&Chassis	Bush	2
S/ABS LWR&Trailing arm	Bush	2
Spring	Stiffness	2
S/ABS	Damping force	2
Torsion beam	Beam element	1
Torsion beam&Trailing arm	Fixed joint	2
Trailing arm	Rigid body	2