

프레임 강성이 차량의 조종안정성에 미치는 영향

Effects of Chassis Frame Stiffness on Vehicle Handling Characteristics

이 병 립*
Byungrim Lee

ABSTRACT

In order to investigate how the chassis frame stiffness including body structure affects vehicle handling characteristics, in this paper, objective test evaluations such as steady state circle maneuvering test and pulse input transient test are performed. The basic steer characteristics can be obtained from stability factor and 4 parameter method is used to evaluate vehicle handling characteristics between original vehicle and the other with reinforced chassis. The result shows that vehicle with reinforced chassis has advantages in handling characteristics.

주요기술용어 : Stability factor(스테빌리티 팩터), 4 parameter method(4 파라미터 방법), Steady state circle(정상원), Roll rate(롤율), Cornering power(코너링 파워), Pulse input transient response(펄스입력 과도응답)

1. 서 론

차량의 제조기술 발달과 고성능화에 따라 운전성능도 동시에 향상됨으로써 차량의 개발 초기 단계에서 높은 조종안정성을 확보하는 것이 요구된다. 차량의 조종안정성을 향상시키기 위하여 그동안 해석 및 시험평가 방법에 관한 많은 연구가 수행되어 눈부신 발전이 있었다.¹⁻⁶⁾ 조종안정성은 현가장치, 조향장치, 타이어 및 이와 같은 시스템의 강성과 컴플라이언스 특성에 의해 좌우된다. 그러나 차체의 강성이 조종안정성에 영향을 미치고 있음은 보고된 바 있으나,⁷⁾ 부분적인 보강 등을 실시하고 관능 시험평가(feeling test evaluation)를 통하여 개선하는 경우가 대부

분이며 정량적인 평가를 통하여 개선한 예는 매우 드물다.

본 연구에서는 프레임을 사용하는 SUV 차량에 대해 프레임을 포함한 차체의 강성을 증가시켰을 때 차량의 조종안정성에 미치는 영향을 정량적으로 검토하고자 한다. 이를 위해, 프레임을 포함하는 차체의 굽힘 및 비틀림 현상을 진동 모우드로부터 확인하고, 변형에 영향을 끼치는 부분을 기존 차량의 특성을 고려하여 강성 보강을 실시한다. 보강 전후의 차량에 대해 정상원 선회 시험(steady state circle maneuvering test) 및 펄스입력 과도응답 시험(pulse input transient response test)을 실시한다. 이 시험 데이터를 이용하여 스테빌리티 팩터(stability factor)를 산출하고, 4 파라미터 평가 방법(four parameter evaluation me-

* 회원, 현대자동차 남양연구소

thod)^{8,9)}을 이용하여 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 스테빌리티 팩터 및 4 파라미터 방법

프레임을 포함한 차체의 강성을 보완하는 경우 차량의 기본 특성이 어떻게 변화하는지에 대해 차량의 정상원 선회 시 스티어 특성을 대표적으로 표현할 수 있는 스테빌리티 팩터에 대해 살펴보고, 오픈 루프(open loop) 시험인 펄스 입력 과도응답 시험 결과를 이용하는 4 파라미터 방법에 대해 검토하고자 한다. Fig. 1과 같이 차량의 가장 간단한 모델인 2 자유도 모델을 고려하여 운동방정식을 세우면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^{10,11)}

$$\begin{pmatrix} \frac{C_{sf}l_f^2 + C_{sr}l_r^2}{V} & C_{sf}l_f - C_{sr}l_r \\ m + \frac{C_{sf}l_f - C_{sr}l_r}{V^2} & \frac{C_{sf} + C_{sr}}{V} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I \frac{d\gamma}{dt} \\ m \frac{d\beta}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{sf}l_f \\ \frac{C_{sf}}{V} \end{pmatrix} \delta_f \quad (1)$$

여기서,

γ : yaw rate

β : side slip angle

δ_f : front steer angle

V : vehicle velocity

m : vehicle mass

I : inertia moment of vehicle

l_f : distance between center gravity and front wheel center

l_r : distance between center gravity and rear wheel center

C_{sf} : equivalent front cornering power

C_{sr} : equivalent rear cornering power

차량이 정상원을 선회하고 있다고 가정하면 차량 중심점의 횡 미끄럼각의 변화는 없으며 ($\frac{d\beta}{dt} = 0$), 요우 레이트도 일정($\frac{d\gamma}{dt} = 0$)하다. 이

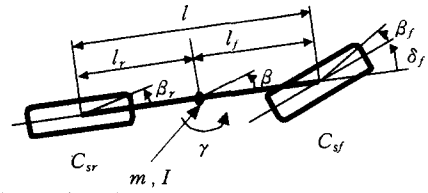


Fig. 1 2 dof vehicle model

러한 조건을 식 (1)에 대입하고 스테빌리티 팩터를 포함하는 식으로 정리하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\delta_f - \delta_r}{\delta_{f0} - \delta_{r0}} = 1 + KV^2 \quad (2)$$

여기서,

δ_r : rear steer angle

δ_{f0} : front steer angle in low velocity

δ_{r0} : rear steer angle in low velocity

l : wheel base

K : stability factor

식 (2)에서 후륜 타각을 하지 않는다고 하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta_f}{\delta_{f0}} = 1 + KV^2 \quad (3)$$

식 (3)의 스테빌리티 팩터 K 는 식(4)로 표현된다.

$$K = \frac{m}{2l^2} \left(\frac{l_r}{C_{sf}} - \frac{l_f}{C_{sr}} \right) \quad (4)$$

본 연구에서는 조종안정 성능의 평가를 위해 4 파라미터 평가 방법을 이용하였는데 이 방법은 펄스 입력에 대한 과도응답 시험^{12,13)} 결과를 기초로 한다. 식 (1)로부터 전달함수를 구하고 스테빌리티 팩터를 사용하여 정리하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 이 식에서 4 파라미터는 요우잉 속도 공진주파수, 요우잉 속도 정상계인, 요우잉 속도 감쇠비 및 횡가속도의 위상 지연을 평가 지표로 삼고 있다.

$$A_i = \frac{1}{i_{total}} \frac{V}{l(1 + KV^2)}$$

$$f_n = \frac{l}{2\pi V} \sqrt{\frac{C_{sf}C_{sr}(1+KV^2)}{mI_{zz}}}$$

$$\zeta = \frac{1}{2l} \frac{I_{zz}(C_{sf} + C_{sr}) + m(C_{sf}l_f^2 + C_{sr}l_r^2)}{\sqrt{mI_{zz}C_{sf}C_{sr}(1+KV^2)}}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{l_r I C_{sr}}{\left(\frac{l C_{sr}}{2\pi} - 2\pi I_{zz} \right) V} \right\}$$

$$- \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta f_n}{f_n^2 - 1} \right) \quad (5)$$

여기서,

Al : steady state gain of yaw velocity

f_n : natural frequency of yaw velocity response

ζ : damping ratio of yaw velocity response

ϕ : phase delay of lateral acceleration (1 Hz)

i_{total} : total ratio

이렇게 표현되는 공진 주파수 f_n 은 방향 조종 응답성(heading responsiveness), 정상상태 계인 Al 은 방향 조종 용이성(heading easiness), 감쇠비 ζ 는 방향 감쇠(directional damping) 그리고 위상 지연 ϕ 는 추종 제어성(following controllability)을 의미하게 된다.

3. 프레임, 차체 강성 및 보완

프레임의 굽힘 및 비틀림 진동 1차 모우드는 해석을 통하여 Fig. 2 및 Fig. 3과 같은 해석 결과를 얻을 수 있다. 굽힘 및 비틀림 진동 모우드로부터 변형에 크게 기여할 수 있는 부분은 사이드 멤버 및 양 끝단의 크로스 멤버의 단면 계수와 각각의 배치 형태에 의해 얻어지는 강성임을 알 수 있다.

Fig. 4는 프레임과 동시에 차체를 고려한 경우에 대한 비틀림 진동해석 결과를 나타낸다. 이 결과는 프레임 끝단으로 갈수록 변형량이 커짐을 알 수 있는데, 프레임을 사용하는 차량은 현가장치 및 조향장치를 포함하는 샤시 시스템(chassis system)이 프레임에 장착되어 있기 때문에 프레임의 이와같은 변형은 차량의 조종안정성에 직접적인 영향을 끼치게 된다.

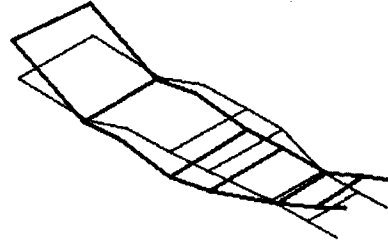


Fig. 2 Bending vibration 1st mode of frame

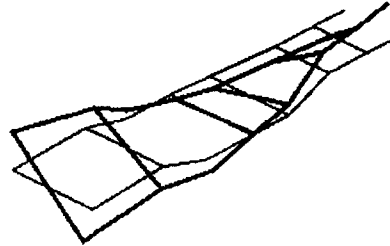


Fig. 3 Torsional vibration 1st mode of frame

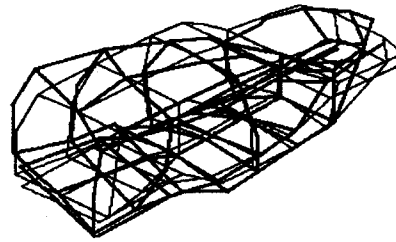


Fig. 4 Torsional vibration 1st mode of frame and body assembly

그러므로 본 연구에서는 프레임의 비틀림 및 상하 좌우방향 굽힘의 발생이 최소화될 수 있도록 기존 프레임 차량의 특성을 고려하여 Fig. 5에서 보는 것과 같이 브라켓(bracket) 및 “口” 또는 “ㄷ”형 채널의 멤버를 사용하여 보강하였으며, Table 1에 상세 보강 내역을 나타냈다.

또한, 차체는 프레임에 고무 부쉬 등을 이용하여 장착되는데 Fig. 3 및 Fig. 4에서 보여주는 것처럼 프레임에 비해 기여도가 상대적으로 작기 때문에 차체의 ‘B’ 필러를 기준으로 Fig. 6에서 보는 것과 같이 파이프를 사용하여 보강을 하였고, 상세 내용을 Table 2에 나타냈다.

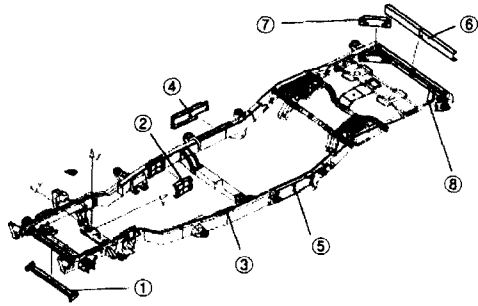


Fig. 5 Chassis frame structure

Table 1 Reinforcement of frame

Parts	Dimension	Symbol
Front cross member	40×40×1.6t	①
Mid side member	120×40×3.2t	②③
Rear side member	120×40×3.2t	④⑤
Rear end cross member	75×45×2.3t	⑥
Gusset	75×45×2.3t	⑦⑧

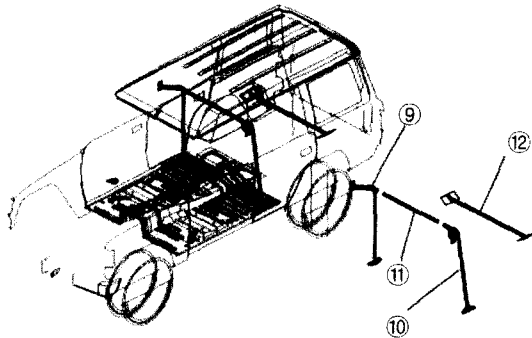


Fig. 6 Body structure

Table 2 Reinforcement of body

Parts	Dimension	Symbol
Roll over bar	φ 34×1.6t	⑨⑩
Cross bar	φ 34×1.6t	⑪
Rear cross bar	φ 38.1×2.3t	⑫

4. 시험 방법

프레임 및 차체를 보강한 차량에 대해 정상원

선회 시험 및 펄스입력 과도 응답 시험을 실시한다. 시험 시 차량의 중량은 설계기준 중량(DVW: design vehicle weight)을 적용하고 아스팔트 노면에서 시험을 실시한다.

정상원 선회 시험은 KS R 1095-90의 승용차의 정상원 시험 방법에 따라 반경 30m의 원을 극저속에서 한계 속도까지 좌우방향으로 선회를 실시하여 스티어링 휠 각도, 횡가속도, 요우 각속도, 차속 및 롤 각도를 계측한다.

펄스입력 과도응답 시험은 JASO Z 110-91의 승용차의 조타 과도응답 시험 방법에 따라 차속 60km/h, 80km/h, 100km/h으로 3~5초 간 직진 주행 후 펄스 폭 0.3~0.5초, 4% (3.6~4.4%)의 횡가속도를 발생시킬 수 있는 크기로 하여, 각각의 속도에서 3회 실시하며, 스티어링 휠 각도, 횡가속도, 요우 레이트, 차속 및 롤 각도를 계측한다. 이 시험으로부터 4 파라미터를 구하고 조종 안정성 평가를 실시할 수 있게 된다.

5. 시험결과 및 고찰

정상원 선회 시험 방법에 의해 스티어 각도와 속도를 횡가속도를 증대시키면서 측정된 결과와 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 스테빌리티 팩터를 구하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 7로부터 스테빌리티 팩터는 프레임 및 차체를 Table 2와 3과 같이 보강한 사양의 차량이 0.4G이하에서는 31%~15%, 0.4G 이상에서는 12% 크게 나타남을 알 수 있다.

스테빌리티 팩터가 커질수록 차량은 언더스티어(under steer) 경향이 커지게 되는데, 프레임 및 차체를 보강한 사양이 큰 값의 스테빌리티 팩터를 갖게 됨으로 기존 차량보다 언더스티어 경향의 차량이 됨을 알 수 있다.

차량의 롤 특성의 영향을 확인하기 위하여 롤율(roll rate)을 비교하였다. 롤율은 0.5G의 횡가속도로 원을 선회할 때의 롤 각도를 나타낸다. 이와 같은 시험을 통하여 Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 프레임 및 차체 보강이 롤율 증

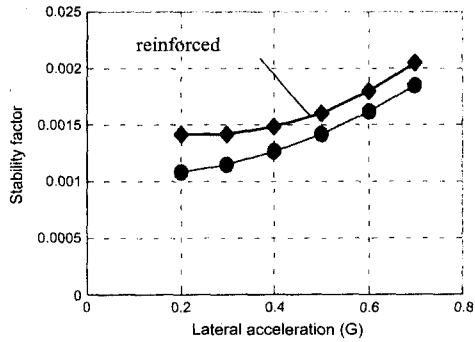


Fig. 7 Stability factor (K)

대에 끼치는 영향은 매우 작음을 알 수 있다.

펄스입력 과도응답 시험은 속도 100km/h로 주행상태에서 실시하고 계측한 데이터를 사용하여 4 파라미터를 구한 결과를 Table 3와 Fig. 9에 각각 표현하였다. Fig. 9의 좌표축은 윗 방향이 공진 주파수, 아래 방향이 감쇠비, 왼쪽 방향이 정상상태 계인으로써 바깥쪽으로 갈수록 각각 커지며, 오른쪽 축은 위상지연으로 바깥쪽으로 갈수록 작아지게 된다.

Fig. 9로부터 강성 보강을 실시한 차량은 동일 시스템을 사용하더라도 방향조종 용이성 측면에서는 3.25% 정도 불리하게, 추종 제어성능은 9.7%, 조종 용이성은 9.9% 각각 유리하게 그리고 방향 감쇠성 측면에서는 2.8% 불리하게 각각 나타났다.

차량의 운동성능은 Fig. 9의 마름모 면적의 크기로 나타낼 수 있으며, 면적비는 보강사양 적용

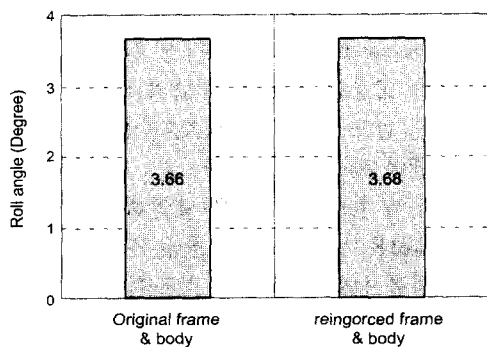


Fig. 8 Roll angle at 0.5G

Table 3 4 parameters of vehicle

	Vehicle with original frame	Vehicle with reinforced frame
Al	0.102	0.112
fn	1.27	1.23
ζ	0.725	0.706
ϕ	-36.3	-33.1

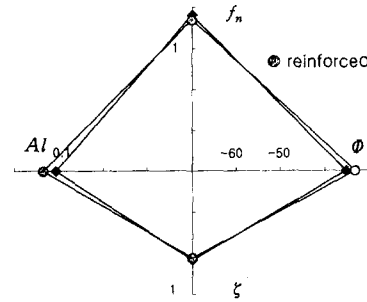


Fig. 9 Vehicle dynamic characteristics by 4 parameter method

시 4.4% 크게 나타났다. 여기서, 면적은 클수록 유리함을 의미하게 된다. 식 (5)의 계인과 Fig. 9로부터 휠베이스의 변화는 보강 이전 사양이 크게 됨을 알 수 있으며, 휠 베이스의 변화는 각 타이어의 코너링 파워를 변화시키므로써 공진 주파수, 위상 지연 및 감쇠 특성을 변화시키게 됨을 알 수 있다. 프레임의 보강은 차량의 운동성능에 영향을 끼쳐 Fig. 7에서 보는 바와 같이 언더스티어 경향이 크게 되며, 추종제어성이 개선됨을 알 수 있다. 지금까지의 결과는 후륜 타이어의 등가 코너링 파워(cornering power)를 증대시키는 경우¹⁴⁾ 정상상태 계인과 위상지연이 모두 작게 되는 경향과는 대조적인 현상을 보인다.

6. 결론

지금까지 이론적인 검토와 실차 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 스테빌리티 팩터 및 4 파라미터 방법을 이용하여 프레임 및 차체의 강성이 조종안정성에

미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다.

2) 프레임 및 차체의 굽힘 및 비틀림 강성을 고려하여 취약 부분의 강성을 보완을 함으로써 차량의 조종안정성을 향상시킬 수 있었다. 즉, 차량 개발 초기 단계에서 주행 시 프레임의 변형이 최소화될 수 있도록 중량, 비용 또는 공법 등을 고려하여 고강성으로 설정하는 것이 바람직한 개발 방향임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) W. F. Milliken, Jr, F. Dell'Amico, R. S. Rice, "The Static Directional Stability and Control of Automobile," SAE 760712, 1976.
- 2) R. S. Rice, W. F. Milliken, "Static Stability and Control of the Automobile Utilizing the Moment Method," SAE 800847, 1980.
- 3) R. W. Allen, T. J. Rosenthal, H. T. Szostak, "Steady State and Transient Analysis of Ground Vehicle Handling," SAE 870495, 1987.
- 4) W. Reichelt, "Correlation Analysis of Open/Closed Loop Data for Objective Assessment of Handling Characteristics of Cars," SAE 910238, 1991.
- 5) M. Abe, et al., "Improvement of Vehicle Handling Safety with Vehicle Side Slip Control by Direct Yaw Moment," 16th IAVSD Symposium, 1999.
- 6) 배상우, 윤중락, 이장무, 탁태오, "차량 모델의 복잡성이 차량동역학 해석에 미치는 영향:모델의 비교 및 검증," 한국자동차공학회 논문집, 제8권 제6호, 2000.
- 7) (社)自動車技術會, "自動車の運動性能向上技術 4 : 自動車技術 シリーズ," 朝倉書店, 1998.
- 8) T. Mimuro, R. Dubensky, H. Yasunaga, K. Satoh, M. Ohsaki, "Four Parameter Evaluation Method of Lateral Transient Response," SAE 901734, 1990.
- 9) D. A. Crolla, R. P. King, H. A. S. Ash, "Subjective and Objective Assessment of Vehicle Handling Performance," FISITA F2000 G346, 2000.
- 10) 安部正人, "自動車の運動と制御," 山海堂, 1992.
- 11) カヤバ工業(株), "自動車の操舵系と操安性," 山海堂, 1995.
- 12) G. H. Heydinger, P. A. Grygier, S. W. Lee, "Pulse Testing Techniques Applied to Vehicle Handling Dynamics," SAE 930828, 1993.
- 13) S. Vedamuthu, E. H. Law, "An Investigation of the Pulse Steer Method for Determining Automobile Handling Qualities," SAE 930829, 1993.
- 14) (社)自動車技術會, "自動車の制御技術 2 : 自動車技術 シリーズ," 朝倉書店, 1997.