한국자동차공학회논문집 제 9 권 제 5 호, pp.157-164

판스프링의 이력특성이 대형트럭의 조종성능에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Hysteretic Characteristics of Leaf Springs on Handling of a Large-Sized Truck

문 일 동*, 오 재 윤**
Il-Dong Moon, Chae-Youn Oh

ABSTRACT

This paper performs static and dynamic tests of a multi-leaf spring and a tapered leaf spring to investigate their hysteretic characteristics. In the static test, trapezoidal input load is applied with 0.1Hz excitation frequency and with zero initial loading conditions. In the dynamic test, sinusoidal input load is applied with five excitation amplitudes and three excitation frequencies. In these tests, static and dynamic hysteretic characteristics of the multi-leaf spring and the tapered leaf spring are compared, and, the effects of excitation amplitudes and frequencies on dynamic spring rate are also shown. In this paper, actual vehicle tests are performed to study the effects of hysteretic characteristics of the large-sized truck's handling performance. The multi-leaf spring or the tapered leaf spring is used in the front suspension. The actual vehicle test is performed in a double lane change track with three velocities. Lateral acceleration, yaw rate and roll angle are measured using a gyro-meter located at the mass center of the cab. The test results showed that a large-sized truck with a tapered leaf spring needs to have an additional apparatus such as roll stabilizer bar to increase the roll stiffness due to hysteretic characteristics.

주요기술용어 : Multi-leaf spring(MLS, 다판스프링), Tapered leaf spring(TLS, 테이퍼 판스프링), Lateral acceleration(횡 가속도), Roll angle(롤 각), Steering wheel angle(조향휠 각), Double lane change(이중 차선 변경), Handling(조종성능)

1. 서 론

산업의 급속한 팽창에 따라 산업현장에서 많은 물품을 빨리 전달하여 물류비용과 물류시간을 단축하고자 대형 상용차의 고속화와 경량화 등에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다. 특히, 대형 상용차의 현가장치에 사용되고 있는 판스프링(leaf spring)은 차량의 성능과 중량적인 측면에서 어느 부품보다도 큰 비중을 차지하고 있으며, 이 부품의 경량화는 적재량의 증가에 그대로 기여할 수 있다. 그리고 이 부품의 동특성 개선에 따른 성능 향상은 운전자의 피로를 경감시키고 화물의 안전운송에 크게 기여할

* 회원, 대우자동차(주) 상용차사업부
** 회원, 전북대학교 기계공학부, 메카트로닉스 연구센타

수 있으므로 판스프링에 관한 연구가 활발하게 수행되고 있다.

현재 대부분의 대형 상용차 현가장치로 사용되는 다판스프링(multi-leaf spring)은 이력현상에 의한 승차감 저감 문제[1]와 판과 판 사이의 마찰에 의한 소음 발생 문제 등을 가지고 있다. 그래서 다판스프링은 대형 상용차의 고속화와 경량화에 필수적인 요건인 동 특성 개선과 경량화 측면에서 한계점에 도달한 것으로 여겨지고 있다.

근래에는 이 같은 다판스프링이 가지고 있는 문제점을 개선할 뿐 아니라 중량도 줄이기 위해 전산해석[2-4]과 단품시험[5,6] 및 실차시험[7]을 통한 판스프링의 동 특성과 판간 마찰력에 대한 연구와 판간 마찰력이 차량 승차성능에 미치는 영향에 대한 연구 등과 같은 판스프링에 관한 많은 연구가 수행되고 있다. 이같은 많은 연구들을 통하여 다판스프링이 가지고 있는 문제점들을 개선할 수 있고 재료역학적인 관점에서 다판스프링에 가장 가까운 형태로 여겨지는 테이퍼 판스프링을 전륜 현가장치에 장착하는 방안이 제안되고 있다.

테이퍼 판스프링은 스프링의 판의 수를 일반적인 다판스프링이 가지고 있는 12개 정도를 3~4개 정도로 크게 줄이고 판의 폭을 적절하게 설계하여 전체적인 스프링 판간 마찰면적을 2배 이상 감소시켜 차량의 승차감을 향상시킬 뿐[7] 아니라 중량도 다판스프링에 비하여 30% 정도 절감할 수 있다. 또한 스프링 판간 마찰면적을 크게 감소할 수 있으므로 판과 판 사이에서 발생하는 소음을 감소시킬 수 있고, 판스프링의 수명을 연장시킬 수 있어서 유지관리가 용이해지는 장점도 가지고 있다. 그러나 전륜 현가장치에 테이퍼 판스프링을 장착한 차량에서는 기존의 다판스프링을 장착한 차량에 비하여 선회주행시 롤링이 과도하게 발생할 수도 있다는 문제점을 내재하고 있다.

본 연구에서는 다판스프링과 테이퍼 판스프링단품을 이용하여 다양한 조건에서 정적시험 뿐 아니라 동적시험을 수행하여 이 들이 가지는 이력특성에 대한 연구 결과를 제시한다. 그리고 본 연구에서는 기존에는 많은 연구가 수행되지 않은 다판스프링과 테이퍼 판스프링의 이력특성이 대형트럭의 조종성능에 미치는 영향을 실차시험을 통해 정량적으로 평가하고자 한다. 실차시험은 이중 차선 변경로에서 세 가지의 일정 차속으로 수행한다. 실차시험에서는 조종성능 평가의 주요인자로 고려되는 횡 가속도와 요 속도 및 롤 각 특성을 캡 질량중심점에 자이로미터를 장착하여 측정한다.

2. 판스프링의 이력곡선

일반적인 판스프링의 하중에 따른 변위 특성 선도는 Fig. 1과 같다. 이 그림이 보여주는 바와 같이 초기상태에서 판스프링에 가부하(loading)를 작용시키면 "AB"를 따라서 변위가 발생하고, 감부하(unloading)를 작용시키면 "BCDE"를 따라서 변위가 발생한다. 다시 가부하를 작용하면 "EGH"를 따라서 변위가 발생하여 한 사이클의 폐루프(closed loop)를 이루게 된다.

이력곡선이라고 불리우는 이 폐루프는 하중의 작용 방향이 바뀔 때 판스프링 끝 접촉부와 인접하는 판 사이의 마찰 때문에 발생한다고 알려진 과도 변형 구간인 비선형 구간"BC", "EG"를 가지게 되고, 이것이 각 판스프링의 이력특성을 결정한다.[6] 이력곡선에 의해 둘러 쌓

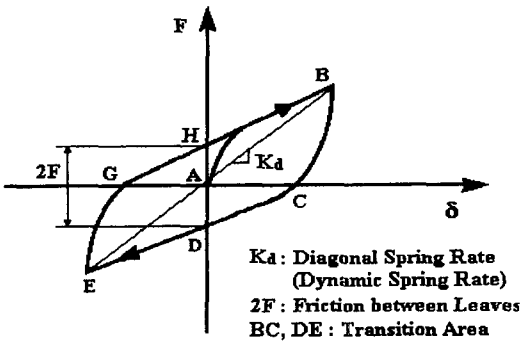

Fig. 1 A load-deflection diagram of multi-leaf spring

인 면적에 의해 계산되는 판스프링의 판간 마찰에 의한 한 사이클당 손실되는 운동에너지는 하중이 가해지는 주파수에는 무관하지만, 진폭의 제곱에 근사하게 비례한다.[8] 판간 마찰에 의해 손실되는 운동에너지는 차량에 구조적인 감쇄력을 제공하여 차량의 동 특성에 많은 영향을 미친다.

이력곡선에서 대각 스프링 상수(diagonal spring rate)라고도 일컬어지는 "B"점과 "E"점을 연결한 직선의 기울기는 동 스프링 상수를 정의한다. 그리고 "D"점과 "H"점 간의 하중 차이를 변위 폭(2F)에서의 판간 마찰력이라 한다.

3. 판스프링 단품시험

본 연구에 이용된 다판스프링과 테이퍼 판스프링의 정적인 상태와 동적인 상태에서 이력특성을 파악하기 위하여, 각 판스프링 단품에 대한 정적시험과 동적시험을 수행하였다.

3.1 단품 시험조건 및 방법

Fig. 2는 판스프링의 이력특성을 평가하기 위하여 사용된 시험 장치를 보여준다. 이 그림에서 보여주는 바와 같이 판스프링 단품 양 끝단을 시험기에 고정하고 판스프링을 클램프로 고정한 후 판스프링 중앙 부위에 유압 액츄에이터로 하중을 가하여 각 단품에 대한 시험을 수행하였다.

정적인 상태에서 이력특성을 구하기 위한 시험은 무하중 상태의 초기 하중조건에서 0.1Hz의 사다리꼴형태의 하중을 가하여 수행하였다. 다판스프링의 경우는 가진 변위 범위를 0~95 mm로 하였고, 테이퍼 판스프링의 경우는 가진 변위 범위를 0~165mm로 하였다. 또한 동적인 상태에서 이력특성을 구하기 위한 시험은 적차 상태의 초기 하중조건에서 정현파 형태의 입력 파형으로 입력 진폭을 ±1, ±2, ±3, ±4, ±5 mm의 다섯 가지 경우를 사용하였으며, 입력 주파수로는 1, 3, 5Hz의 세 가지를 사용하였다.

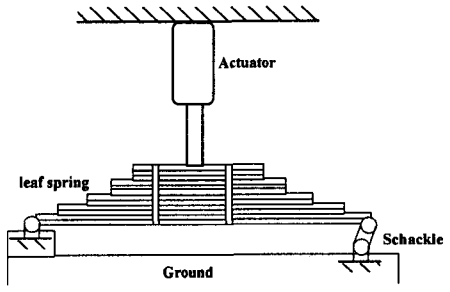

Fig. 2 A schematic diagram of the leaf spring test equipment

3.2 단품 시험결과 및 고찰

Fig. 3은 정적시험을 통해 얻어진 본 연구에 사용된 다판스프링과 테이퍼 판스프링의 이력특성을 보여주는 하중-변위 선도이다. 이 그림이 보여주는 바와 같이 테이퍼 판스프링의 설계기준 스프링 상수는 47.5KN/mm이고, 다판스프링의 설계기준 스프링 상수는 38.9KN/mm이다. 이와 같이 정적 시험조건에서 테이퍼 판스프링은 다판스프링에 비하여 22% 정도 큰 설계기준 스프링 상수를 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 이력곡선의 면적에 의해 계산되는 감쇄량은 다판스프링이 테이퍼 판스프링에 비해 월등히 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 다판스프링과 테이퍼 판스프링에 입력 주파수로 1Hz를 사용한 경우의 동적시험 결과를 보여준다. Fig. 4와 Fig. 5로부터 Fig. 3의 정적 이력특성 선도로부터 얻

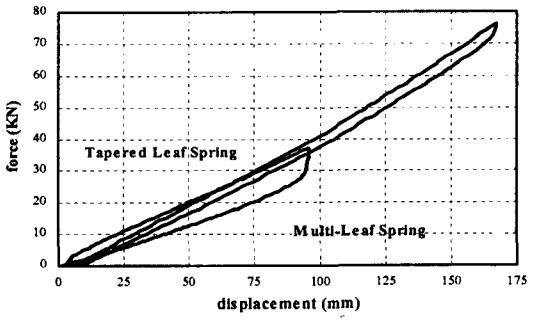

Fig. 3 Static force-displacement characteristics of the leaf spring

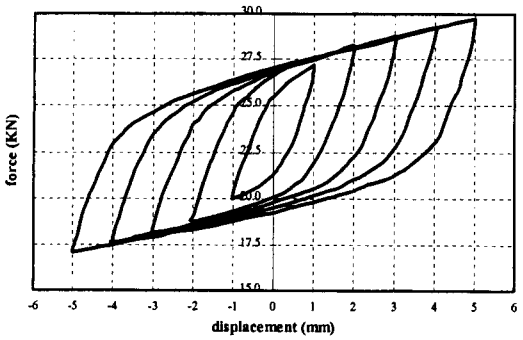

Fig. 4 Dynamic force-displacement characteristics of the multi-leaf spring (excitation freq. : 1Hz)

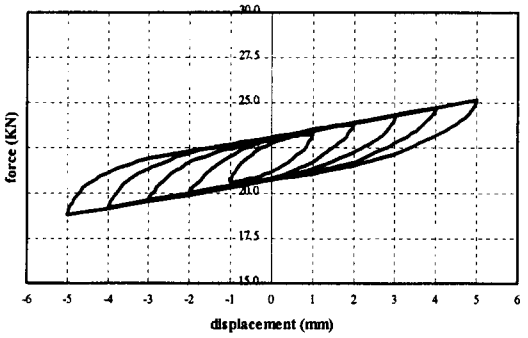

Fig. 5 Dynamic force-displacement characteristics of the tapered leaf spring (excitation freq. : 1Hz)

은 스프링 상수 값의 경향과는 반대로 동적인 상태에서는, 같은 진폭과 같은 주파수에서, 다판스프링은 테이퍼 판스프링에 비해 월등히 큰 스프링 상수 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 감쇄량은 정적인 상태와 같이 동적인 상태에서도 모든 가진 진폭에서 테이퍼 판스프링은 다판스프링에 비해 매우 작은 구조적인 감쇄를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 다판스프링과 테이퍼 판스프링의 각 주파수와 각 진폭에서 동 스프링 상수 값을 정리하여 보여준다. 이 그림들로부터 두 경우 모두 초기에는 동 스프링 상수의 감소 폭이 크고, 가진 진폭이 커짐에 따라 동 스프링 상수 감소 폭이 작아지고 있음을 알 수 있다. 그러나 두 경우 모두 ±1mm의 가진 진폭에서만 가진 주파수에 따라 약간의 동 스프링

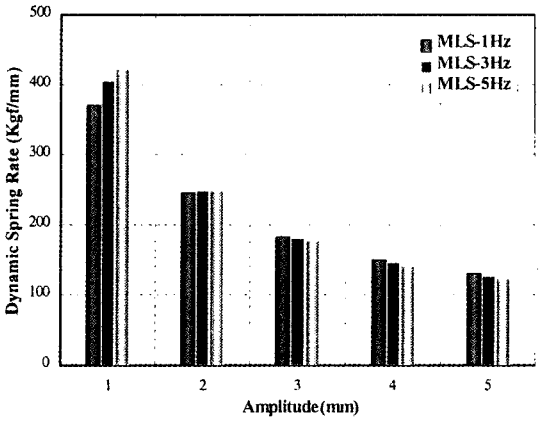

Fig. 6 Dynamic spring rate of the multi-leaf spring

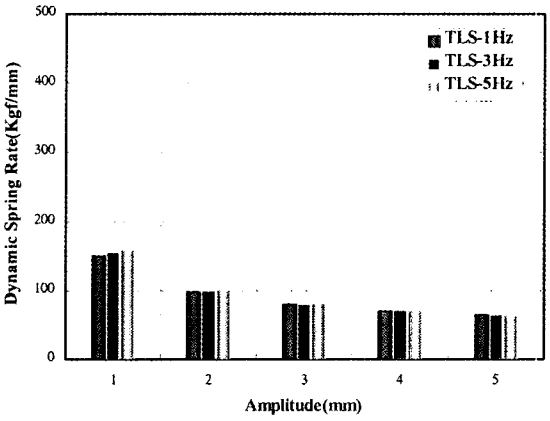

Fig. 7 Dynamic spring rate of the tapered leaf spring

상수 값의 차이를 보여주고 있다. 이와 같이 동 스프링 상수는 가진 주파수보다 가진 진폭에 더욱 민감하게 변화하고 있음을 알 수 있었다.

4. 실차 주행시험

앞 절에서 단품시험을 수행하여 이력 특성을 평가한 다판스프링과 테이퍼 판스프링을 대형 트럭 전륜 현가장치에 적용하여 이 들이 차량의 동 특성에 미치는 영향을 비교 평가하기 위한 실차 시험을 수행하였다. 실차시험에 이용된 차량의 차고(overall height)는 3290mm이고, 차폭(overall width)은 2495mm이고, 차량 총길이(overall length)는 7685mm이며 차중(G.V.W :

Gross Vehicle Weight)은 26,261kg이다. 그리고 횡 가속도와 요 속도 및 롤 각을 측정하기 위한 자이로미터가 장착되는 캡의 질량 중심점의 위치는 차량좌표계를 기준으로 X=-580.1, Y=0, Z=1124이다.

4.1 실차 시험조건 및 방법

실차 시험은 차량의 동적 과도응답 특성, 주행경로를 벗어나는 정도, 차량의 위험 회피 성능 등과 같은 동 특성을 평가하기 위하여 수행되는 이중 차선 변경(double lane change) 주행 시험을 실시하였다. Fig. 8은 ISO/TR 3888 규정[9]에 따른 이중 차선 변경 시험로의 개략도이다. 실차 주행시험은 40kph, 50kph와 60kph의 세 속도에 대해 수행하였다.

실차 시험에 이용된 시험차량은 전륜 현가장치에 다판스프링을 장착한 경우와 테이퍼 판스프링을 장착한 경우로 달리 하였고, 나머지 시스템은 모두 동일하게 하였다. 실차 주행 선회 시험에서는 차량의 동 특성을 나타내는 주요 변수[10]로 고려되는 다음 세 가지를 캡 질량중심점에 자이로미터를 장착하여 측정하였다.

① 캡의 질량 중심점에서 횡 가속도(lateral acceleration)
② 캡의 롤 각(roll angle)
③ 캡의 요 속도(yaw rate)

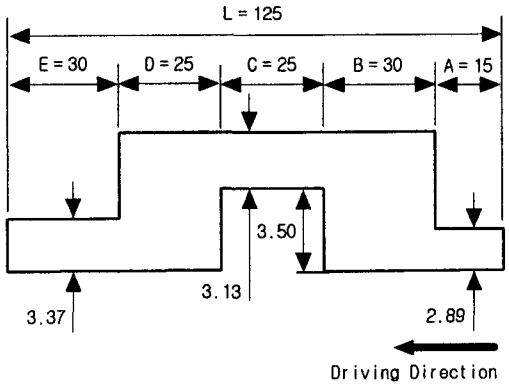

Fig. 8 Lane-change track and designation of sections (unit = m)

4.2 실차 시험결과 및 고찰

차량 속도 40kph에 대한 이중 차선 변경 주행 시험 결과는 Fig. 9～12에, 50kph의 속도에 대한 시험 결과는 Fig. 13～16에, 60kph의 속도에 대한 시험 결과는 Fig. 17～20에 각각 조향휠 각, 캡 롤 각, 캡 횡가속도, 캡 요 속도 순으로 나타내었다.

앞 절의 단품 시험결과에서 보여주는 바와 같이 테이퍼 판 스프링은 다판 스프링에 비해 월등히 작은 구조적인 감쇄와 동 스프링 상수를 가지고 있다. 이와 같은 특성에 의해 Fig. 10, Fig. 14, Fig. 18에서 보여주는 바와 같이 캡 롤 각 변화의 정도가 테이퍼 판스프링을 장착한 차량이 다판 스프링을 장착한 차량에 비하여 월등하게 심하다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 이와 같은 현상은 차량의 속도가 커짐에 따라 심해지고 있음을 알 수 있다. 따라서 롤 강성을 보강하기 위한 스태빌라이져 바와 같은 보조 장치를 부착하지 않고 테이퍼 판스프링만을 장착한 차량은 이중 차선 변경시험에서 차량의 속도가 증가됨에 따라 롤 운동이 심해진다. 이로 인해 운전자가 이중 차선 변경을 위한 규정된 차선을 유지하는데 다판스프링을 장착한 차량의 경우보다 어려움을 겪었다는 사실을 Fig. 9, Fig. 13과 Fig. 17의 조향휠 각 그림으로부터 확인할 수 있다. 특히 Fig. 17에서 보여주는 바와 같이 차량의 속도가 60kph로 커지면 테이퍼 판스프링을 장착한 차량은 다판스프링을 장착한 차량에 비해 규정된 이중 차선 변경로를 유지하기 위하여 조향휠 각을 매우 급격하고도 큰 폭으로 좌우로 변화시켜야만 했음을 알 수 있다. 그러므로 테이퍼 판스프링만을 장착한 차량은 조종성능 측면에서 다판 스프링을 장착한 차량에 비해 고속 주행시 매우 불리할 것으로 생각된다.

롤 각에 비해 상대적으로 현가장치의 구조적인 감쇄와 동 스프링 상수에 영향을 적게 받는 횡 가속도의 경우에는 Fig. 11, Fig. 15와 Fig.

19에서 보여주는 바와 같이 낮은 속도에서는 다판스프링을 장착한 차량이 테이퍼 판스프링을 장착한 차량의 경우보다 약간 큰 진폭을 보여주었다. 그러나 차량의 속도가 커짐에 따라 차량의 횡가속도에 대한 차량 롤 운동의 영향이 점점 커짐으로 60kph에서는 테이퍼 판스프링을 장착한 차량이 다판스프링을 장착한 차량보다 약간 더 큰 횡가속도 진폭을 보여주었다.

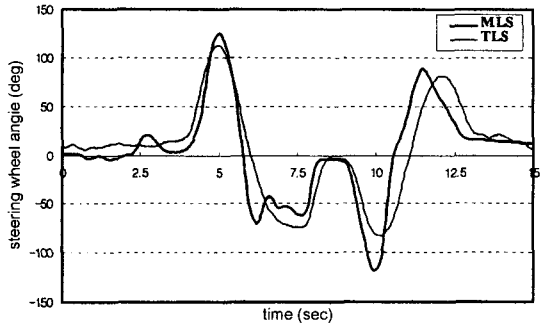

Fig. 9 Steering wheel angle (V=40kph)

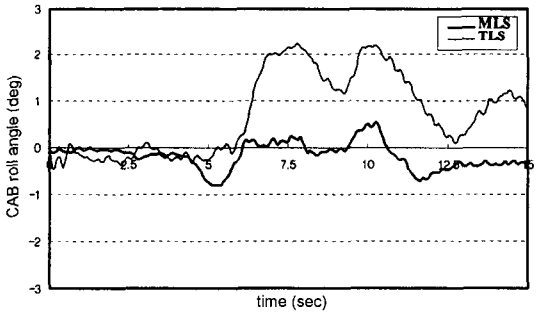

Fig. 10 CAB roll angle (V=40kph)

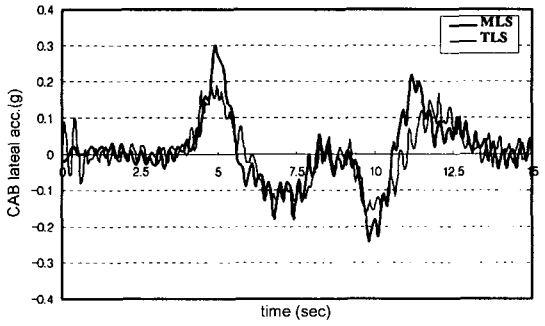

Fig. 11 CAB lateral acceleration (V=40kph)

그러나 현가장치의 구조적인 감쇄와 동 스프링 상수에는 거의 영향을 받지 않고 주로 조향휠 각에 직접적으로 영향을 받는 요 속도의 경우에는 Fig. 12, Fig. 16과 Fig. 20에서 보여주는 바와 같이 모든 속도에서 다판스프링을 장착한 차량과 테이퍼 판스프링을 장착한 차량이 매우 유사한 경향을 보여주었다.

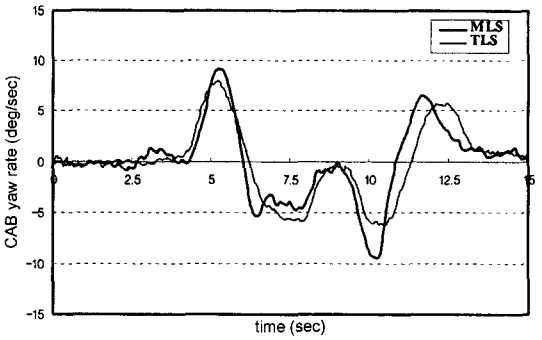

Fig. 12 CAB yaw rate (V=40kph)

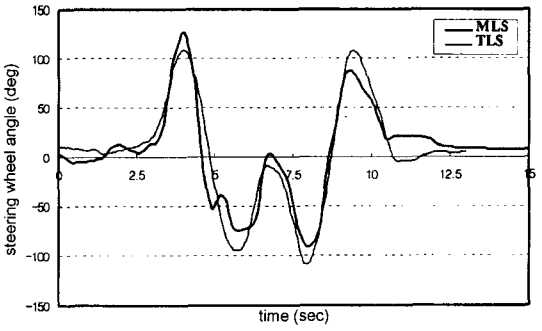

Fig. 13 Steering wheel angle (V=50kph)

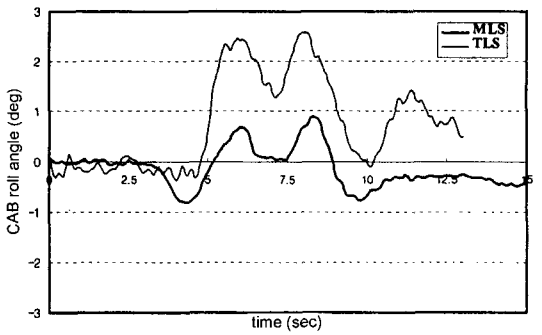

Fig. 14 CAB roll angle (V=50kph)

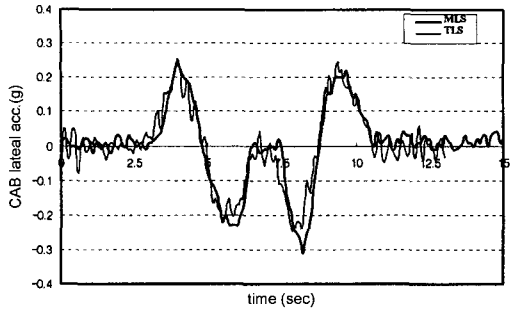

Fig. 15 CAB lateral acceleration (V=50kph)

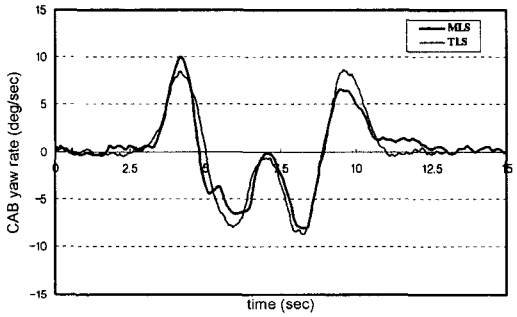

Fig. 16 CAB yaw rate (V=50kph)

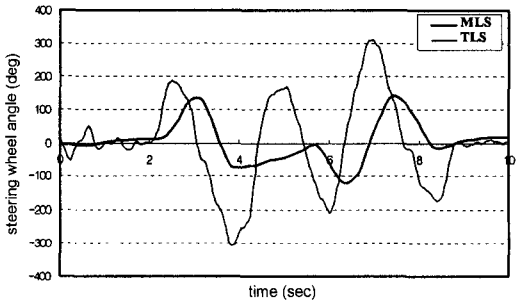

Fig. 17 Steering wheel angle (V=60kph)

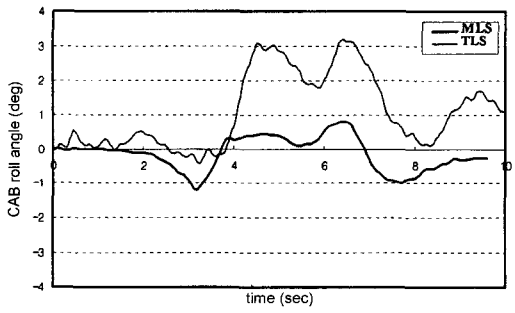

Fig. 18 CAB roll angle (V=60kph)

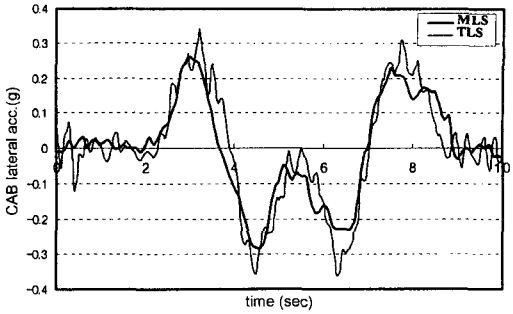

Fig. 19 CAB lateral acceleration (V=60kph)

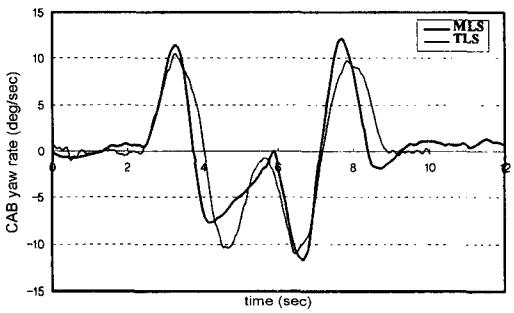

Fig. 20 CAB yaw rate (V=60kph)

5. 결 론

본 논문에서는 다판스프링과 테이퍼 판스프링의 정적인 상태와 동적인 상태에서 이력특성을 파악하기 위한 단품시험을 수행하였다. 정적 시험조건에서는 테이퍼 판스프링이 다판스프링에 비해 큰 스프링 상수 값을 가지나, 동적 시험 조건에서는 이와 반대의 경향을 보여 주었다. 그러나 구조적인 감쇄는 정적 및 동적인 하중 조건 모두에서 다판스프링의 값이 테이퍼 판스프링보다 월등하게 컸다. 다판스프링과 테이퍼 판스프링의 동 스프링 상수는 모두 가진 주파수보다는 가진 진폭에(특히 작은 진폭에서) 매우 민감하게 변화하였다.

본 논문에서는 다판스프링 및 테이퍼 판스프링의 이력특성이 차량의 조종성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 실차 주행시험을 이중 차선 변경 시험로에서 세 가지 속도에 대해 수행하여 횡가속도와 요 속도 및 롤 각을 측정하였

다. 횡가속도와 요 속도에서는 큰 차이를 보여주지 않았으나, 테이퍼 판스프링은 다판스프링에 비해 월등히 작은 구조적인 감쇄와 동 스프링 상수를 가지고 있음으로 해서 캡 롤 각 변화의 정도가 테이퍼 판스프링을 장착한 차량이 다판스프링을 장착한 차량에 비하여 심하게 나타났으며, 특히 차량의 속도가 커짐에 따라 이 같은 경향이 더 심해졌다. 그래서 테이퍼 판스프링을 장착한 차량은 다판스프링을 장착한 차량에 비해 규정된 이중 차선 변경로를 유지하기 위하여 조향휠 각을 급격하게 변화시켜야만 했다. 그러므로 테이퍼 판스프링만을 장착한 차량은 조종성능 측면에서 다판스프링을 장착한 차량에 비해 고속 주행시 매우 불리할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1) T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, 1992.
2) T. Hamano, M. Itoh, "Analysis of Leaf Spring using Finite Element Method with a Joint Element", ばね論文集, Vol.37, pp.39-46, 1992.
3) 박태원, 임홍재, 이기호, 박찬종, 정일호, "소형버스의 동역학 해석을 위한 판스프링 모델링기법 개발", 한국자동차 공학회지, 제6권 제6호, pp.1-6, 1998.
4) J. Song, Y. Maruyama, "Dynamic Characteristics of Leaf Spring by ADAMS Software", ばね論文集, Vol.38, pp.31-36, 1993.
5) E. Yamamoto, T. Hamano, H. Enomoto, I. Numazaki, "Characteristic of Hysteresis Curve of the Leaf Spring", SAE 9530751, 1995.
6) P. S. Fancher, R. D. Ervin, C. C. MacAdam, C. B. Winkler, "Measurement and Representation of the Mechanical Properties of Truck Leaf Spring", SAE 800905, 1980.
7) 김동우, 임종훈, "테이퍼 판스프링 적용 차량의 승차감 향상에 관한 연구", 한국자동차공학회지, 제4권 제6호, pp.229-235, 1996.
8) Singiresu S. Rao, "Mechanical Vibration", Published by Addison-Wesley, 1992.
9) "Test procedure for a severe lane-change manoeuvre", ISO Technical Report 3888, SAE, 1975.
10) 문일동, 권혁조, 오재윤, "대형 트럭의 선회 주행특성 해석을 위한 컴퓨터 모델의 개발", 한국자동차공학회지, 제8권 제4호, pp. 121-129, 2000.