

도로 하중조건을 고려한 상용차 판스프링의 피로강도 평가 II

손일선 †·배동호*·정원석*·정원욱**·박순철**

Fatigue Strength Evaluation of LCV Leaf spring Considering Road Load Response II

Sohn Ilseon, Bae Dongho, Jung Wonseok, Jung Wonwook and Park Suncheol

Key Words: Suspension(현가장치), Leaf Spring(판스프링), Endurance(내구성), Road load Response(도로하중조건), Damage Analysis(손상분석)

Abstract

Suspension system of vehicle have enough endurance during its life time to protect passenger. Spring is one of major part of vehicle. Thus, a fatigue strength evaluation for leaf spring based on road load response was carried out. At first, strain of leaf spring is measured on the city condition and proving ground condition. And next, the damage analysis of road load response data was carried out. And fatigue test of leaf spring were also carried out.

Based on $\epsilon - N$ life relation, fatigue life of leaf spring was evaluated at belgian mode, city mode and drawing test specification. After that, it is compared the design life of leaf spring and evaluated fatigue life by belgian mode, city mode and drawing test specification.

From the above, the maximum load-fatigue life relation of leaf spring was defined by test. and new test target of belgian mode and city mode was proposed to accept design specification of leaf spring. It is expect that proposed test target can verify leaf spring fatigue endurance at specific road condition.

1. 서 론

자동차 현가장치는 자동차의 승차감과 운전성에 매우 직접적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 보안부품이다. 현가장치란 자동차 차체에 대하여 차륜을 상하이외의 방향에는 적당한 강성을 가지고 지지하고, 상하방향은 스프링, 감쇠기구에 의해 지지하는 것으로 차륜과 노면 사이에 발생하는 구동력, 제동력, 횡력 등의 전후, 좌우 하중을 확실히 차체에 전달하기 위하여는 최

적의 상태로 타이어를 노면에 접지시켜, 목적하는 차량 운동상태를 가능하게 해야 한다.[1]

따라서, 승객을 사고로부터 보호하기 위하여, 현가장치의 부품은 사용중 파손이 발생하지 않도록 충분한 내구성을 확보하여야 하고, 특히 판스프링(leaf spring)은 차량 현가장치의 매우 중요한 보안부품이기 때문에 이점이 충분히 고려되어야 한다.

그런데, 소형상용차(light commercial vehicle)의 해외수출이 증가되면서 기존의 판스프링 설계 및 개발방법으로는 해외에서 요구되는 충분한 내구수명을 보장하기 어려운 문제가 발생하여, 이를 개선할 새로운 판스프링 설계방법의 개발이 요구되었다.

† 오산대학 컴퓨터응용기계설계과
E-mail : issohn@osan.ac.kr
TEL : (031)370-2664 FAX : (031)370-2669
* 성균관대학교 기계공학부
** 현대자동차 차량시험1팀

따라서, 본 연구에서는 실제 차량 주행중 발생되는 도로하중에 의한 응력을 고려한 판스프링 설계기준을 개발하고자 한다. 그러기 위하여 스트레인게이지(strain gage)를 사용하여 판스프링의 도로주행 조건 및 시험로 주행조건에 대한 판스프링의 변위를 계측하였다. 또한 판스프링의 피로수명을 평가하기 위하여 피로시험을 수행하였다.

각각의 도로 주행에서 발생하는 판스프링의 변위에 대한 손상분석(damage analysis)을 수행한 다음에 변위-피로수명 관계식을 이용하여 각각의 도로조건에 대한 피로수명을 예측하였다. 또한, 도면 시험규정에 의하여 발생하는 변위에 대한 피로수명도 예측하였다.

예측된 피로수명과 설계수명을 비교 분석하여 시험의 적정성을 평가하고 새로운 판스프링 시험기준을 제시하고자 한다.

2. 도로하중조건 측정

2.1 계측용 회로설계

도로주행 상태에서 판스프링에 부착된 스트레인게이지의 손상을 방지하기 위하여 Fig. 1과 같이 20x100x5mm의 홈을 가공한 뒤 스트레인 게이지를 판스프링에 부착하였고, 계측선(lead wire)의 절손을 방지하기 위하여 홈(groove)을 가공하였다.

도로하중 계측 도중에 측정용 전선과 스트레인게이지를 연결하는 얇은 계측선이 굽기의 차이로 절손되는 것을 예방하기 위하여 판스프링 측면을 평면으로 가공하고 터미널(terminal)을 부착하여 전선과 계측선(lead wire)을 연결하였다.

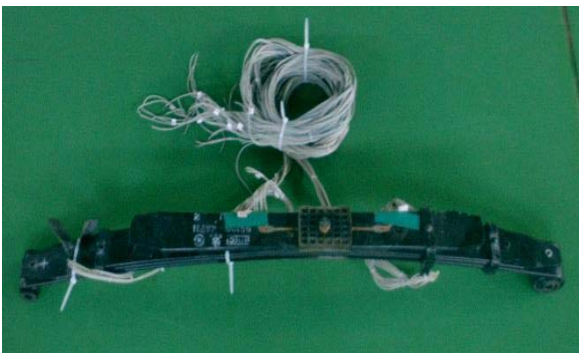


Fig. 1 Strain gages on leaf spring.

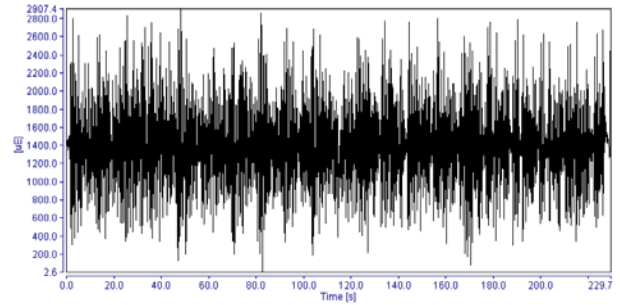


Fig. 2 Road load response at belgian mode

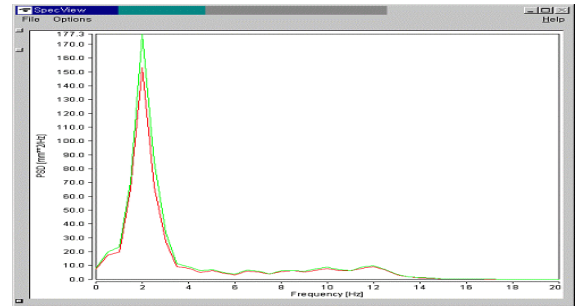


Fig. 3 Power spectrum density of belgian mode

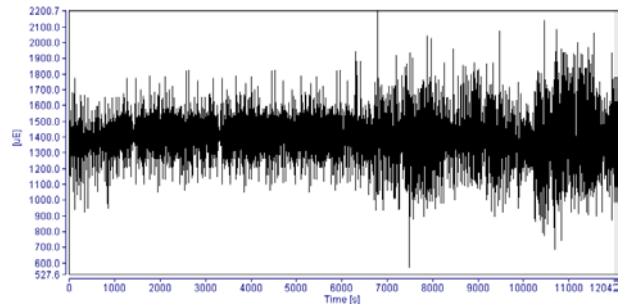


Fig. 4 Road load response at city mode

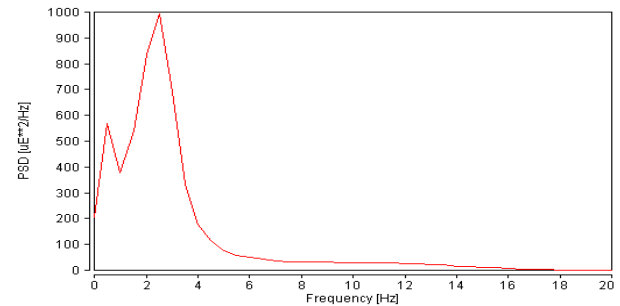


Fig. 5 Power spectrum density of city mode

2.2.1 도로 하중조건 계측

판스프링에 스트레인게이지가 부착된 소형상용차를 GVW (gross vehicle weight) 하중조건에서 시험주행로의 벨지안 모드(Belgian mode)를 주행하면서 판스프링의 변위를 계측하였다.[2]

또한, 시내주행시의 도로하중에 따른 판스프링의 변위상태를 확인하기 위하여 실차시험과 동일한 도로주행 규정을 따라서 시내모드(city

mode)를 주행하면서 판스프링의 변위를 계측하였다. Fig. 2는 주행시험로의 벨지안모드 주행시 판스프링의 변위를 보여준다. Fig. 3은 주행시험로의 벨지안모드 주행시 판스프링의 주파수 데이터(power spectrum data)를 보여준다. Fig. 4는 일반도로 시티모드의 판스프링 변위를 보여준다. Fig. 5는 일반도로 시티모드의 주파수 데이터를 보여준다. Table 1은 측정된 도로길이 및 구간을 나타내고 있다

Table 1 Contents of road data

No.	Road Name	Road Length
City Mode	A road	6.75%
	B road	25.77%
	C road	5.52%
	D road	4.90%
	E road	3.06%
	F road	18.04%
	G road	6.75%
	H road	3.68%
	I road	5.52%
	J road	6.13%
	K road	6.13%
L road	7.36%	
Belgian Mode	Belgian road	B km

3. 판스프링 피로강도 평가

3.1 실험장치 및 실험조건

피로설계 기준을 선정하기 위하여 판스프링의 피로실험 데이터가 필요하다. 피로실험 데이터를 획득하는 방법은 임의로 선정된 조건하에서 피로실험을 수행하여 데이터를 획득하는 방법이 일반적이다. 하지만, 임의조건에서 구한 피로실험 데이터는 실제상황을 재현한 것이 아니기 때문에 설계에 대한 신뢰감을 떨어뜨리고 경제적이고 합리적인 설계를 하기 어렵다.

따라서, 실제상황의 가혹한 조건을 기준으로 피로실험을 수행하여 획득한 데이터를 기준으로 피로설계 기준을 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 판스프링의 내구목표를 만족시키고, 설계유연성을 확보하기 위하여 실제 도로시험에서 획득



Fig. 6 Multi-axial material tester(INSTRON 880)

한 데이터를 바탕으로 판스프링의 피로강도 평가시험을 수행하였다.[3]

실험장치는 Fig. 6의 다축 재료시험기(Instron 880, 50ton)를 사용하였다. 변위제어방식으로 부하 하중을 제어하였다. 그리고 실차의 차체와 판스프링 연동운동에 의한 영향은 고려하지 않았다.

하지만, 판스프링 굽힘변형에 의한 연신변형 효과(elongation deformation effect)를 충분히 재현할 수 있도록 하기 위하여 샤클 대신에 스프링 양고정부에 롤러 베어링을 삽입하고, 베어링의 직선운동 가이드용 지그(jig)를 시험기 베드(bed) 위에 고정하여 판스프링의 하중점에 하중을 가하였을 때 길이방향 변위가 원활히 이루어지도록 하였다.

3.2 피로실험 결과

Fig. 7은 판스프링의 피로실험 결과를 하중범위와 피로수명 관계로 도시한 것이다.

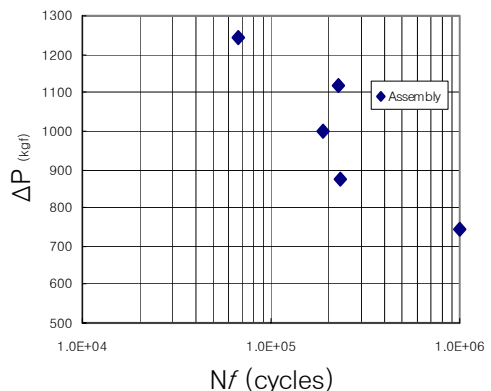


Fig. 7 Relationship between ΔP and N_f

피로하중에 의한 파단은 대체로 No.1과 No.3의 스프링 중앙 체결부 주위에서 발생하였다.

4. 판스프링 수명평가

판 스프링의 피로수명을 평가하기 위해서 3단계의 검증방법을 사용한다. 1단계가 도면 시험규정에 의한 판스프링 내구시험이고, 2단계는 판스프링을 실차에 장착한 다음 주행시험로를 달리면서 피로수명을 평가하는 벨지안모드(belgian mode) 시험이고 3단계는 일반소비자들과 동일한 가혹도를 유지하기 위하여 준비된 시티모드(city mode) 시험을 통하여 수명을 평가하는 방법이다. 이 3단계 판스프링 평가방법에 대하여 각각 수명을 평가해 보기로 하자. 판스프링의 목표수명은 현 설계사양의 거리로 가정하였다.

4.1 시내모드 주행시 수명평가

시내모드(city mode)를 주행할 때 판스프링의 수명을 평가하기 위하여 LMS사의 프로그램 팔랑스 모듈(Falancs module)을 이용하였다.[4]

시내모드에서 측정된 판스프링의 변위를 이용하여 rainflow counting을 수행하고, 변위-수명 관계식(strain-life approach)을 이용하기 위하여 피로시험에서 구한 변위-피로수명 관계식을 적용한 다음 스미스-왓슨-타퍼 방정식(smith - watson - topper equation)을 이용하여 판스프링의 수명을 예측하였다.[5]

Fig. 8은 시티모드 주행시 판스프링의 예측된 수명을 보여주고 있다.

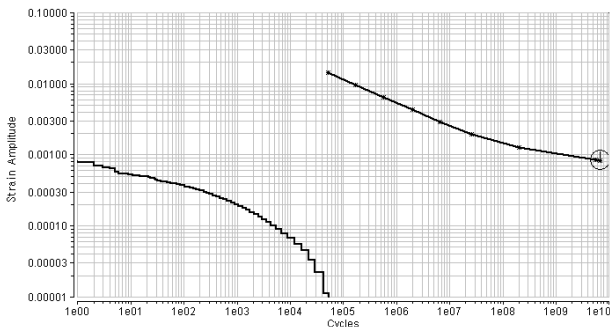


Fig. 8 Predicted fatigue life at city mode

Table 2 Predicted fatigue life at city mode

Strain Amplitude	Cycles	Blocks	Failure Mode
0.00087	56838 E+5	107500.0	Cyclic
0.00129	2015 E+5	3810.9	Cyclic
0.00193	256.2 E+5	484.5	Cyclic
0.00287	66.55 E+5	125.9	Cyclic
0.00429	20.00 E+5	37.8	Cyclic
0.00640	5.809 E+5	11.0	Cyclic
0.00955	1.694 E+5	3.2	Cyclic
0.01425	0.52 E+5	0.98	Cyclic
0.00084	67496 E+5	127650	Cyclic

시티모드 주행시험에서 판스프링의 데이터를 분석한 Table 2를 보면 시티모드 주행시험을 127,650회 반복하면 판스프링에 파단이 발생하는 것으로 수명이 예측되었다. 이 경우 시티모드의 1회 길이를 100%라 할때 이의 12,765,000% 주행시 파손되어 판스프링은 무한수명을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 시티모드로는 목표수명에서의 판스프링 신뢰성을 정확하게 평가하기 어렵다. 따라서 시티모드 가혹도를 조정할 필요가 있다.

4.2 주행시험로 주행시 수명평가

벨지안모드를 주행할 때 판스프링의 수명을 평가하여 보았다. 평가방법은 시티모드의 수명평가와 동일한 방법을 사용하였다. Fig. 9는 벨지안모드 주행시 판스프링의 예측된 수명을 보여주고 있다.

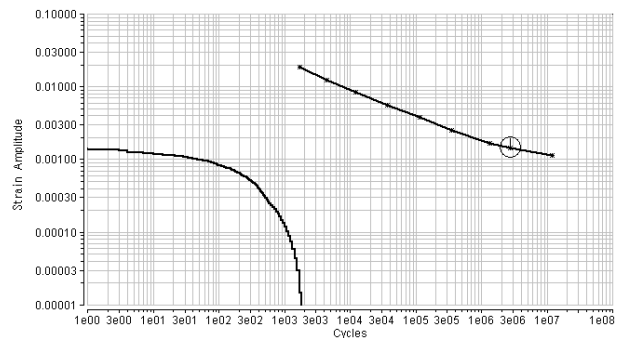


Fig. 9 Predicted fatigue life at belgian mode

Table 3 Predicted fatigue life at belgian mode

Strain Amplitude	Cycles	Blocks	Failure Mode
0.00114	117.43 E+5	6441.6	Cyclic
0.00170	13.46 E+5	738.4	Cyclic
0.00253	3.48 E+5	191.1	Cyclic
0.00378	1.13 E+5	62.1	Cyclic
0.00564	0.36 E+5	19.8	Cyclic
0.00841	0.12 E+5	6.6	Cyclic
0.01255	0.04 E+5	2.4	Cyclic
0.01873	0.02 E+5	0.9	Cyclic
0.00145	27.31 E+5	1498.1	Cyclic

벨지안 모드 주행시험에서 판스프링의 데이터를 분석한 Table 3을 보면 벨지안 모드 주행시험을 1498.1회 반복하면 판스프링에 파단이 발생하는 것으로 수명이 예측되었다. 이 경우 시티모드의 1회 길이를 100%라 할때 이의 239690% 주행시 판스프링이 파손될 것으로 예측되었다.

4.3 도면 시험규정에 의한 수명평가

판스프링의 도면에 규정된 시험방법을 기준으로 판스프링의 수명을 평가하여 보았다. 평가 방법은 시티모드의 수명평가와 동일한 방법을 사용하였다.

Fig. 10은 도면 시험규정(767.5kg)에 의거하여 하중을 가하여, 그 때 판스프링의 변위를 보여주고 있다. Fig. 11은 도면 시험규정에 의거하여 판스프링의 예측된 수명을 보여주고 있다.

도면 시험규정에 의하여 판스프링의 내구수명을 분석한 Table 4을 보면 판스프링 내구시험을 1.4657회 반복하면 판스프링에 파단이 발생하는 것으로 수명이 예측되었다.

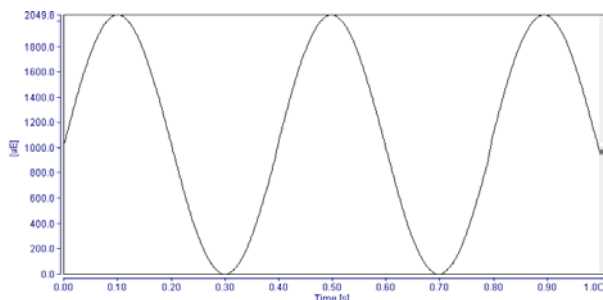


Fig. 10 Drawing test specification of leaf spring

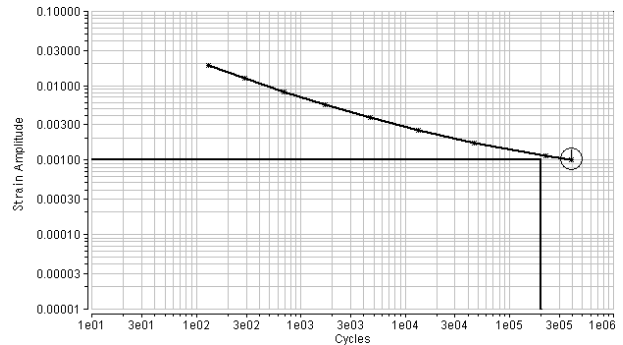


Fig. 10 Predicted fatigue life at drawing test specification

Table 4 Predicted fatigue life at drawing test specification

Strain Amplitude	Cycles	Blocks	Failure Mode
0.00114	2.2419 E+5	0.8407	Cyclic
0.00170	0.4563 E+5	0.1711	Cyclic
0.00253	0.1338 E+5	0.0502	Cyclic
0.00378	0.0462 E+5	0.0173	Cyclic
0.00563	0.0173 E+5	0.0065	Cyclic
0.0084	0.0069 E+5	0.0026	Cyclic
0.01252	292.3649	0.0110	Cyclic
0.01867	129.6664	0.0004	Cyclic
0.00101	3.9087 E+5	1.4657	Cyclic

이 경우 도면 시험규정을 100% cycle이라 할 때 이의 146.57% cycle에서 판스프링이 파손될 것으로 예측되었다. 이것은 도면 시험규정을 충분히 만족시키는 피로 수명을 가지고 있음을 보여주고 있다.

4.4 판스프링 시험기준 제안

판스프링의 목표내구수명은 일정거리의 도로 주행에서 파손이 발생하지 않을 것을 설계 목표로 가정하고, 이에 대한 피로수명을 검증하기 위하여 도면 시험규정에 의한 판스프링 내구시험, 실차상태의 시티모드 주행시험 및 벨지안 모드 시험을 수행하여 판스프링의 피로수명에 대한 평가를 수행하였다.

시티모드의 경우 목표주행거리의 피로수명을 가지는 판스프링을 평가하기 위하여 시험모드를 재조정할 필요가 있다. 손상분석을 통하여 목표수명을 평가할 수 있도록 제안된 시티모드 시험안을 Table 5는 보여준다.

Table 5 Proposed city mode test

Road Name	Road Length	Blocks	Total Length
A road	0.00367%	2312	8.48%
B road	0.014%	1152	16.13%
C road	0.003%	1283	3.85%
D road	0.00267%	3265	8.71%
I road	0.003%	6423	19.27%
Total			56.43%

시티모드의 경우 일반주행 목표에 상당하는 판스프링 피로수명을 평가하기 위하여 기존목표 주행거리의 56.42%에 해당하는 시티모드 시험이 필요함을 알 수 있다.

하지만, 벨지안모드 시험의 경우 목표주행거리 주행에 상당하는 동일한 가속도를 가지는 시험거리를 손상분석을 통하여 계산해 보았다. Fig. 11은 LMS 프로그램에 의하여 계산된 결과를 보여준다.

벨지안 모드의 경우 목표주행거리 일반도로 주행에 상당하는 내구수명을 평가하기 위해서는 1278번 반복 시험하는 것이 바람직한 것으로 평가되었다.

참고로, 도면시험규정에 의한 판스프링의 피로시험 수명의 경향을 조사하여 보았다. Fig. 12는 도면 시험하중에 대한 시험하중과 수명의 상관관계를 보여준다.

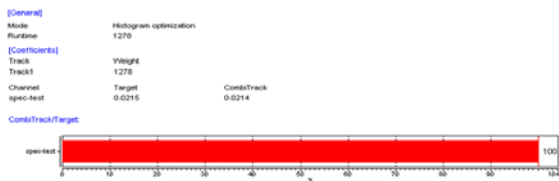


Fig. 11 Damage analysis for target life at belgian mode

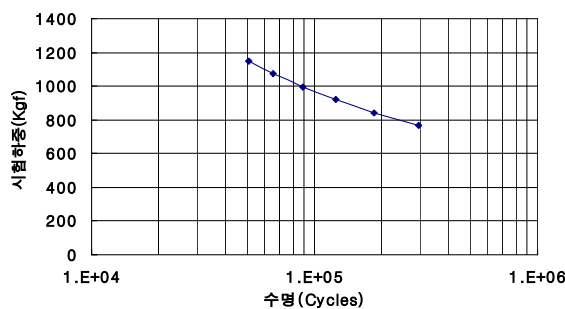


Fig. 12 The relationship between load and life

5. 결 론

(1) 도면 시험규정, 벨지안모드 실차시험 및 시티모드 실차시험에 대한 판스프링 피로수명을 예측하였다.

(2) 시티모드의 경우, 판스프링 목표수명 주행을 평가할 수 있는 새로운 시험모드를 제안하였다.

(3) 벨지안모드의 경우, 판스프링 목표수명 주행에 상당하는 시험거리를 제시하였다.

(4) 도면시험 규정에 의한 판스프링 내구시험의 경우, 시험하중과 수명 관계를 제시하였다.

후 기

본 연구는 (주) 현대자동차의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim ungeo, 1996, Handbook of automobile technology, Vol.2, pp.445-500
- (2) Bae dongho, 2002, Report for the target of leaf spring endurance for LCV.
- (3) Sohn ilseon, Bae dongho, Jung wonseok, Jung wonwook and Park suncheol, 2002, Fatigue strength evaluation of LCV leaf spring considering road load response, Proceeding of KSAE 2002, Vol. 2, No 1, p.744~749, 2002
- (4) M.E Barkey, Michael Hack, 2000, LMS Falancs Theory Manual, Vol. 2.9, pp. 85-98.
- (5) Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, 1998, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, pp. 60-70