

자동차용 Leaf 스프링 재질의 마찰 및 마멸 특성

오세두[†] · 안종찬 · 박순철* · 정원욱* · 배동호** · 이영제**[†]

성균관대학교 대학원 기계공학부

*현대자동차 차량시험2팀

**성균관대학교 기계공학부

The Characteristics of Friction and Wear for Automotive Leaf Spring Materials

Se-Doo Oh[†], Jong-Chan Ahn, Soon-Cheol Park*, Won-Wook Jung*, Dong-ho Bae*, and Young-Ze Lee**[†]

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

**Test Team 2, Hyundai Motors Co. Ltd.*

***School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

Abstract - In the present study, the residual stresses can have a significant on the life of structural engineering components. Residual stresses are created by the surface treatment such as shot peening or deep rolling. The objective of this experimental investigation is to study the influence of friction and wear characteristics due to residual stress under dry sliding condition. Friction and wear data were obtained with a specially designed tribometer. Test specimens were made of SUP9(leaf spring material) after they were created residual stress by shot peening treatment. Residual stress profiles were measured at surface by means of the X-ray diffraction. Sliding tests were carried out different contact pressure and same sliding velocity 0.035m/s(50rpm). Leaf spring assembly test used to strain gauge sticked on leaf spring specimen in order to measure interleaf friction of leaf spring. Therefore, we were obtained hysteresis curve. As the residual stresses of surfaces increased, coefficient of friction and wear volume are decreased, but the residual stresses of surfaces are high, and consequently wear volume do not decreased. Coefficient of friction obtained from leaf spring assembly test is lower than that obtained from sliding test. From the results, structural engineering components reduce coefficient of friction and resistant wear in order to have residual stresses themselves.

Key words - Leaf spring, Shot peening, Residual stress, Interleaf friction force

1. 서론

leaf 스프링은 에너지를 흡수 및 저장, 그리고 방출을 통하여 승차감과 효율을 향상시키고, 소위 unsprung weights을 감소시키는 매우 중요한 부품이다[1]. 낮은 동특성과 소음 등의 단점이 있음에

도 불구하고 leaf 스프링은 버스, 화물차 등의 차량에 널리 이용되고 있다. 이러한 스프링의 품질과 내구성을 위해서는 구조 및 피로해석 뿐 아니라 마찰 및 마멸 특성이 매우 중요한데, leaf 스프링에 관해서는 주로 상용 프로그램에 의한 유한요소해석이 연구의 대부분을 차지하였다[2-3]. 이러한 연구들에서는 마찰력을 무시하였기 때문에 실제 스프링에서는 예상치 못한 파괴가 발생하였다[4-5].

[†] 주저자 : sd532@nature.skku.ac.kr

[‡] 책임저자 : yzlee@yurim.skku.ac.kr

Table 1 Surface hardness and roughness of specimens before and after shot peening

	contact pressure (load)	before shot peening		after shot peening	
		hardness	roughness	hardness	roughness
		(Hv)	(Ra; μm)	(Hv)	(Ra; μm)
test 1	4MPa (10kg)		1.27		0.80
test 2	6MPa (15kg)		2.19		1.39
test 3	8MPa (20kg)	414	2.40	505	1.19
test 4	10MPa(25kg)		1.40		0.74
test 5	12MPa(30kg)		0.97		1.19

leaf 스프링에서 나타나는 마찰력은 leaf의 상대 운동을 구속하려는 힘으로 정의되는데, 스프링에 가해지는 하중과 leaf의 변위를 측정하면 이력거동 (hysteresis behavior)을 보이게 된다[6]. interleaf friction은 하중-변위 선도에서 이력된 정도를 측정하고 힘으로 환산하여 구할 수 있다. 이러한 힘은 leaf 사이의 응력을 해석함에 있어 중요한 인자이며, 특히 마멸에 의한 leaf 두께의 변화 또는 국부적인 손상은 응력집중을 유발하여 스프링을 파손시킨다.

마찰 및 마멸은 이론적인 해석을 통해서도 정확한 거동을 예측하기 어려워서 적절한 실험을 통하여 특성을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 pin-on-disk 형태의 시험기를 사용하여 스프링재질의 마찰계수 및 마멸량을 측정하고자 한다. 또한 스프링의 표면에는 일반적으로 shot peening 공정을 거쳐 잔류응력이 존재하는데, 이러한 공정이 마찰 및 마멸에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 마지막으로 실제 조립된 상태의 스프링을 사용하여 leaf 사이에 걸리는 마찰력(interleaf friction)을 측정한다.

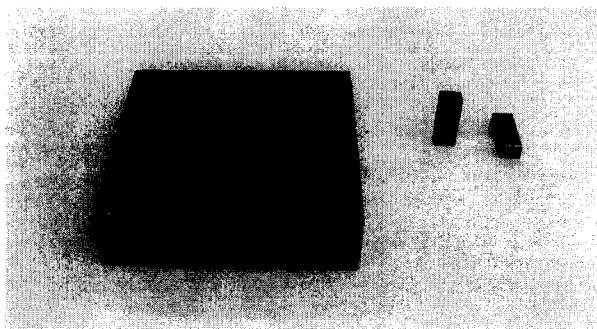


Fig. 1 Specimens of the leaf spring material

2. 실험

2.1 실험 시편

(1) 미끄럼 실험 시편

실험에 사용된 시편은 현대자동차의 스타렉스 차량에 사용되는 leaf 스프링 재료인 SUP9강을 이용하였으며, 마찰 및 마멸특성에 대한 shot peening 효과를 평가하기 위해서 shot peening 처리를 한 것과 하지 않은 것, 두 종류를 선택하였다. shot peening 조건은 shot ball의 직경이 0.8mm이고, 속도는 61m/s이다. leaf spring 시편은 미끄럼 실험을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같이 두께가 10mm인 판(60mm×60mm)과 핀(6mm×4mm) 형태로 가공하였다. 시편을 가공할 때 실제 판 재료의 접촉조건을 표현하기 위해서 표면에 도포된 도장이 벗겨지지 않도록 하였다.

Table 1은 판 시편과 핀 시편의 표면조도와 경도를 보여준다. SUP9 시편은 실제 자동차에서 사용하는 제품 그대로 도장이 있는 상태로 표면조도를 측정하였고, 표면경도는 도장을 벗겨낸 후 측정을 하였다. shot peening 처리로 인한 압축잔류응력의 증가로 경도는 증가하고, 표면조도는 시편에 도포된 도장이 균일하지 않기 때문에 불규칙한 값을 보이고 있다.

(2) interleaf friction 측정 시편

interleaf 마찰은 이웃하는 판 사이의 상대운동을 방해하는 힘으로 정의될 수 있다. 이러한 마찰력은 현가장치의 감쇠효과에 이용되고, 현가장치를 구성하는 스프링의 초기 처짐을 방해한다. interleaf friction으로 인하여 leaf spring의 하중-변위선도는

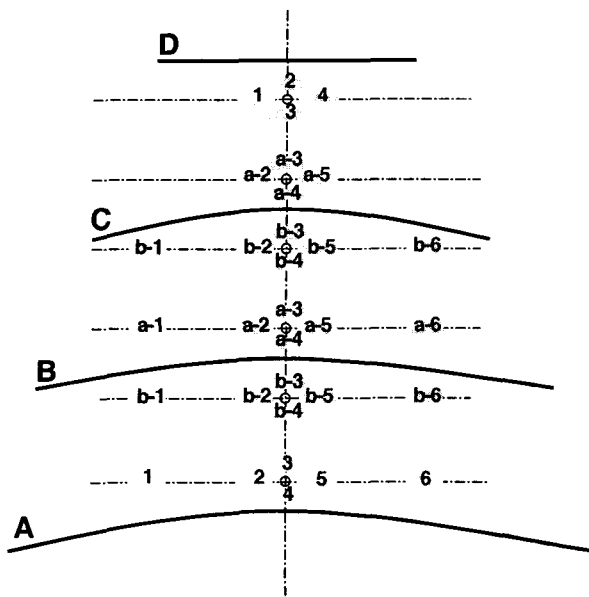


Fig. 2 The positions of strain gauges stuck on the leaf spring assembly

이력거동을 보이게 된다. 본 실험에서는 leaf spring의 하중-변위선도를 측정하였다.

하중-변위선도 측정을 위하여 leaf spring의 표면에 strain gauge를 부착하였다. 우선 각 leaf를 분리하여 strain gauge를 부착하고자 하는 위치에 엔드밀을 이용하여 홈을 내었다. 홈의 표면을 사포를 이용하여 매끄럽게 한 후 strain gauge를 부착하였다. Fig. 2와 같이 leaf A의 앞면에 6개, leaf B에는 앞면 6개와 뒷면 6개를, leaf C에는 앞면 4개와 뒷면 6개, leaf D에는 뒷면에만 4개, 총 32개의 strain gauge를 부착하였다. 모두 부착하고 다시 각 leaf를 원대 모양대로 조립하였다. Fig. 3은 strain gauge 부착을 완료하고 재조립한 leaf spring을 보여준다.



Fig. 3 Leaf spring assembly sticking strain gauges

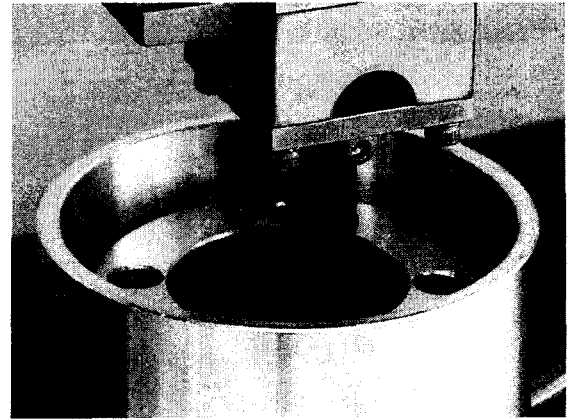


Fig. 4 Pin-on-disk type sliding test

2.2 실험 장치

(1) 미끄럼 실험 장치

실험장치는 압자와 시험편의 형상을 바꿀 수 있는 다목적 마모 시험기를 이용하였으며, 본 실험에서는 핀 시험편과 판 시험편을 pin-on-disk 형으로 사용하였다. Fig. 4와 같이 핀 시험편과 판 시험편은 각각 시험편 홀더에 고정되어 핀 시험편을 통하여 수직하중이 작용되고 판 시험편이 미끄럼 회전을 하게 된다. 미끄럼 실험 동안 로드셀을 이용하여 마찰력과 마찰계수를 측정하였다.

(2) interleaf friction 측정

본 실험을 위하여 25ton 용량의 다축재료시험기를 이용하였다. 전용 jig를 제작하여 leaf spring을

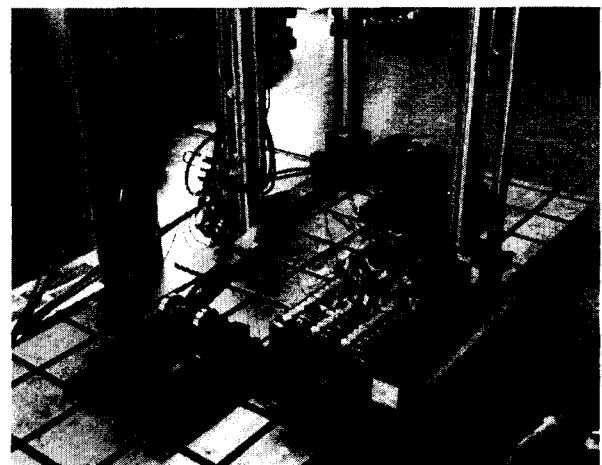


Fig. 5 Leaf spring assembly test

Table 2 COF of specimens before and after shot peening during the sliding test

	contact pressure (load)	COF of specimens before shot peening	COF of specimens after shot peening
test 1	4MPa (10kg)	0.49	0.28
test 2	6MPa (15kg)	0.55	0.29
test 3	8MPa (20kg)	0.52	0.27
test 4	10MPa(25kg)	failure	0.29
test 5	12MPa(30kg)	failure	0.25
Average		0.52	0.28

장착하고 하중을 작용시킨다. Fig. 5는 leaf spring 을 시험기에 장착하여 실험하고 있는 모습을 보여 준다. strain gauge에서 나온 신호는 UCAM의 각 채널에 연결되어 측정된다.

2.3 실험 방법

미끄럼 실험은 선속도를 0.035m/s(50rpm)로 일정하게 하였으며, 실온에서 수행하였다. 실험하중은 SUP9 시편이 실제 자동차에서 받을 수 있는 접촉압력인 4MPa(10kg), 6MPa(15kg), 8MPa(20kg), 10MPa(35kg), 12MPa(30kg)으로 하여 수행하였고 각 실험별로 마찰력과 마찰계수를 측정하였다. 실험시간은 건마찰 조건(dry condition)에서 2시간 동안 수행되었는데, 실험조건이 상당히 가혹하기 때문에 미끄럼 실험 중에 마찰력이 갑자기 증가하면서 재료의 표면파괴(scuffing)가 발생하기 전까지 미끄럼 실험을 하였다.

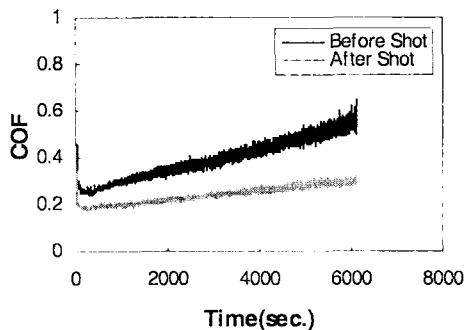
또 leaf spring assembly를 이용하여 interleaf

friction 실험을 수행하였다. 만능시험기를 통하여 leaf spring에 하중을 작용시킨다. 각 하중에 따라서 strain gauge의 신호를 기록한다. 크게 두 종류의 실험을 수행하였다. 최대하중 800kg으로 50kg씩 증가시키면서 신호를 기록하였고, 다른 하나는 최대하중을 1200kg으로 100kg씩 증가시키면서 실험하였다. 800kg에서는 다시 50kg씩 하중을 감소시키면서 신호를 기록하였다. 또 1200kg에서는 100kg씩 감소시키면서 신호를 기록하였다. 측정된 신호들을 정리하여 하중-변위곡선을 그렸다.

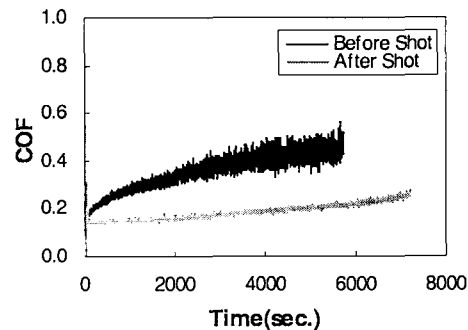
3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰계수 측정

shot peening을 하지 않은 시편과 한 시편에 대하여 미끄럼 실험을 수행한 후 나타난 마찰계수를 Table 2에 나타내었다. 우선 shot peening을 하지 않은 시편의 마찰계수는 약 0.52 정도까지 올라



(a) 6MPa



(b) 10MPa

Fig. 6 COF signals during the sliding tests

Table 3 Wear volume of specimens before and after shot peening

	contact pressure (load)	wear of specimens before shot peening [mm ³]	wear of specimens after shot peening [mm ³]
test 1	4MPa (10kg)	7.14mm ³	11.23mm ³
test 2	6MPa (15kg)	11.23mm ³	11.74mm ³
test 3	8MPa (20kg)	13.27mm ³	11.23mm ³
test 4	10MPa(25kg)	failure	9.19mm ³
test 5	12MPa(30kg)	failure	11.94mm ³

가며, shot peening을 한 시편의 경우는 0.28 정도 까지 상승한다. 10MPa과 12MPa의 압력에서는 shot peening 하지 않은 마찰력이 급격히 상승하는 표면파괴가 발생한다. 그러나 shot peening 된 시편에서는 마찰계수가 급격히 상승하지 않으며, 파괴도 발생하지 않았다. Fig. 6(a)는 접촉압력이 6MPa일 때 나타나는 마찰계수를 보여준다. 시간에 따라 마찰계수는 점차 증가하고 있으며, shot peening 하지 않은 시편보다는 shot peening 한 시편에서 훨씬 안정적인 신호를 보인다. 4MPa과 8MPa 조건에서도 이와 유사한 마찰계수를 얻었다. Fig. 6(b)는 접촉압력이 10MPa일 때의 마찰계수를 보여준다. shot peening을 한 시편은 마찬가지로 안정적인 마찰계수가 측정되지만, shot peening 하지 않은 시편은 2시간의 미끄럼 시간을 버티지 못하고 마찰계수가 증가하면서 파괴된다. 12MPa 조건의 실험에서도 shot peening하지 않은 시편에서는 파괴가 일어난다. 실험 후 판 시편의 접촉면을 살펴보면 표면의 도장이 모두 벗겨져 있으며, 판 시편의 마멸트랙에서도 도장이 벗겨진 것을 관찰할 수 있다. 즉 미끄럼 초기에는 도장이 접촉면에서 윤활작용을 하기 때문에 저마찰계수가 나타난

다. 그러나 미끄럼이 계속됨에 따라 접촉면을 분리하는 역할을 지속하지 못하고 접촉면에서 조금씩 이탈하면서 마찰계수는 증가하게 된다.

3.2 마멸량 측정

미끄럼 실험 후 나타난 마멸트랙을 조도계로 측정하여 마멸량을 계산하였다. Table 3은 각 실험조건에서 측정된 마멸량을 보여주는데, shot peening 하지 않은 시편의 경우에는 압력이 증가함에 따라 마멸량이 증가하고 있다. shot peening을 한 경우에는 접촉압력과 무관하게 유사한 경향을 보이고 있다. 이것은 시편의 표면에 도포된 도장의 두께가 불균일하기 때문에 나타난다. 따라서 정확한 마멸량의 측정을 위해서 금속표면의 도장을 벗겨내고 미끄럼 실험을 수행할 필요가 있다.

따라서 leaf spring 재료의 정확한 마멸량을 측정하기 위해서 표면의 도장을 제거한 후 미끄럼 실험을 수행하였다. Table 4는 각 실험조건에서 shot peening 전후 시편의 마멸량을 보여준다. 접촉압력이 증가할수록 leaf spring 재료의 마멸량을 증가하고 있으며, shot peening 하지 않은 시편이 한 시편에 비해 두 배 이상의 마멸을 나타나고 있

Table 4 Wear volume of specimens before and after shot peening removing painting

	contact pressure (load)	wear of specimens before shot peening [mm ³]	wear of specimens after shot peening [mm ³]
test 1	4MPa (10kg)	3.01	1.24
test 2	6MPa (15kg)	5.50	2.11
test 3	8MPa (20kg)	7.08	3.38
test 4	10MPa(25kg)	failure	4.51
test 5	12MPa(30kg)	failure	4.89

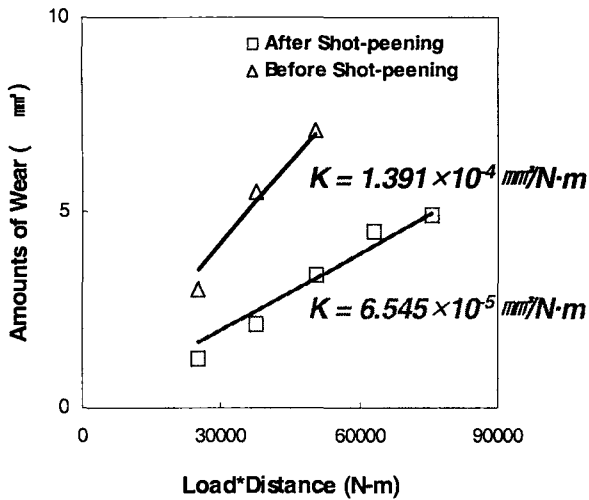


Fig. 7 Wear rate of specimens

다.

3.3 마멸률 K 측정

마멸량을 이용하여 마멸률을 측정하였다. 마멸률은 마멸량을 수직하중과 미끄럼거리의 곱으로 나눈 값으로 정의하는데, 재료가 갖는 마멸에 대한 저항성을 나타낸다. 즉 마멸률이 크다는 것은 동일한 하중과 진행거리 동안 마멸량이 많다는 것을 나타내기 때문에 마멸에 대한 저항성이 약하다고 말할 수 있다. 본 실험에서는 마멸률의 상대적인 비교를 통하여 shot peening 전후 시편의 마멸에 대한 저항성을 비교할 수 있다. Fig. 7에서 마멸률을 하중과 미끄럼거리의 곱에 대하여 나타내었다. 정의에 의해서 그 기울기가 마멸률 K가 된다. shot

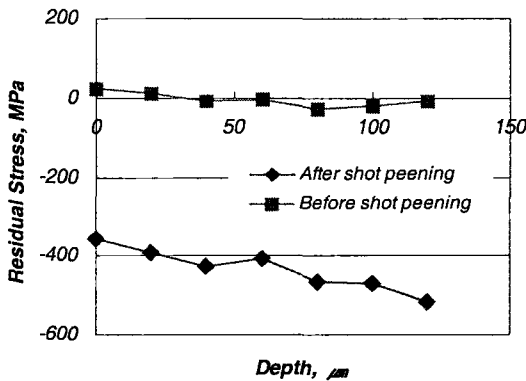


Fig. 8 Residual stress distribution

peening을 한 경우 마멸률은 $K=6.545 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 이고, shot peening을 하지 않을 경우는 $K=1.391 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 이다. 따라서 shot peening 공정을 통하여 마멸률을 낮출 수 있으며, 본 실험에서는 두 배정도 내마멸의 향상을 기대할 수 있다.

3.4 잔류응력의 측정

shot peening 전후 leaf spring 시편 표면에 나타나는 잔류응력을 측정하였다. leaf spring 시편을 전해연마를 이용하여 표면에서 $20 \mu\text{m}$ 의 깊이로 $120 \mu\text{m}$ 까지 연마하였고, 각 깊이별로 XRD(X-ray diffraction)를 이용하여 잔류응력을 측정하였다. Fig. 8은 shot peening 전후 시편에 대한 깊이별 잔류응력 분포를 보여준다. shot peening을 하지 않은 시편의 경우 표면에 약간의 인장응력이 존재하며 표면에서 깊게 들어가더라도 잔류응력이 거의 변화하지 않는다. 그러나 shot peening 한 시편의 경우는 표면에 약 350MPa 의 압축응력이 존재하며 표면에서 깊어질수록 압축응력이 증가한다. 따라서 shot peening 처리를 함으로써 표면은 압축잔류응력을 갖게 되고, 이러한 압축잔류응력은 재료의 내마멸성을 향상시킬 수 있다.

3.5 interleaf friction 측정

Fig. 9은 최대하중 800kg 실험에서 나타나는 하중-변위선도이다. strain gauge마다 한 개의 곡선이 그려지므로 32개의 곡선이 나타나는데, 변형이 많은 부분이 y축에서 많이 벗어나게 그려진다. 변위가 (-)로 표시되는 것은 strain gauge가 압축되는 것을 나타낸다.

Fig. 10는 최대하중 1200kg 실험에서 나타나는 하중-변위선도이다. Fig. 9과 마찬가지로 32개의 선도가 나타나며, 경향이 유사하다.

Fig. 11은 interleaf friction을 구하기 위해서 각각의 하중실험에서 데이터를 추출한 것이다. 추출된 곳은 각 800kg 과 1200kg 실험에 D-2 위치의 하중-변위선도이다. interleaf friction은 hysteresis 곡선에서 중앙의 하중 차이이므로, 하중-변위선도에서 계산할 수 있다. 최대하중 800kg 실험에서 interleaf friction force는 30kg 정도로 나타나며, 1200kg 실험에서는 40kg 정도로 나타난다.

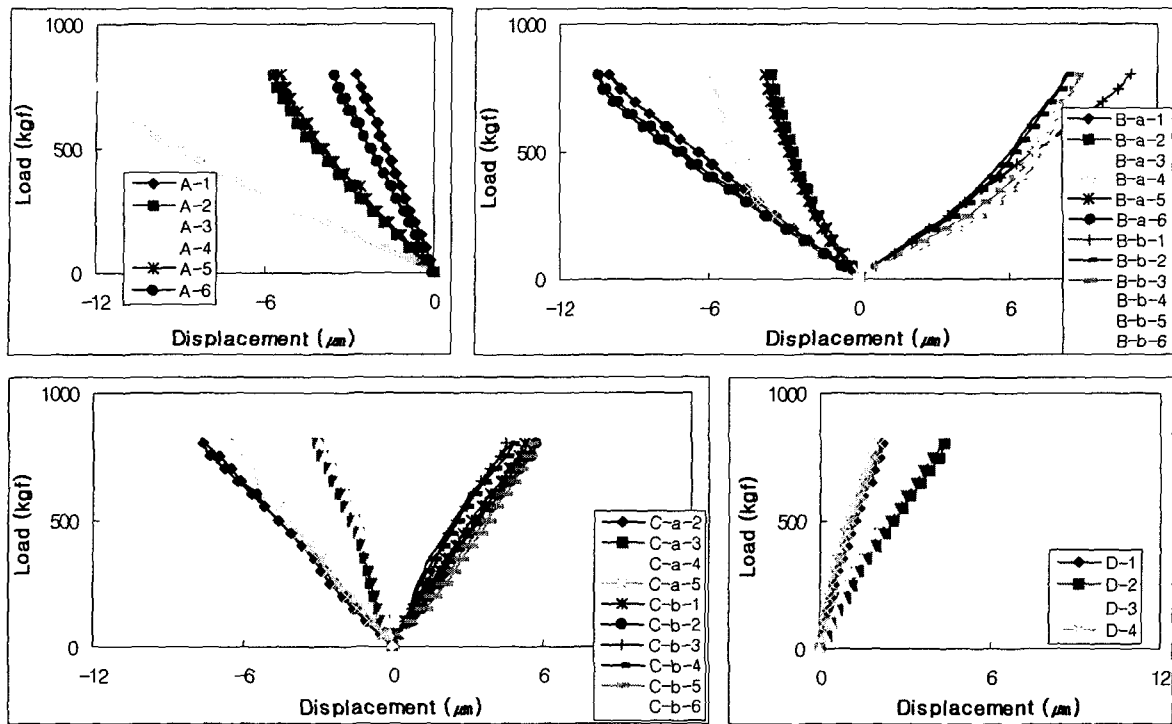


Fig. 9 Hysteresis curves for each positions of strain gauges in 800kg test

이와 같은 방법을 이용하여 각 위치에서 측정된 하중-변위선도에서 interleaf friction을 구하였다. Table 5와 Table 6은 800kg과 1200kg 실험동안 각

위치에서 측정된 interleaf friction force를 나타낸다. 결과에 의하면 위치에 따라 마찰력은 변화하며, 각 leaf를 연결시키는 볼트 주위에서 더 큰 값

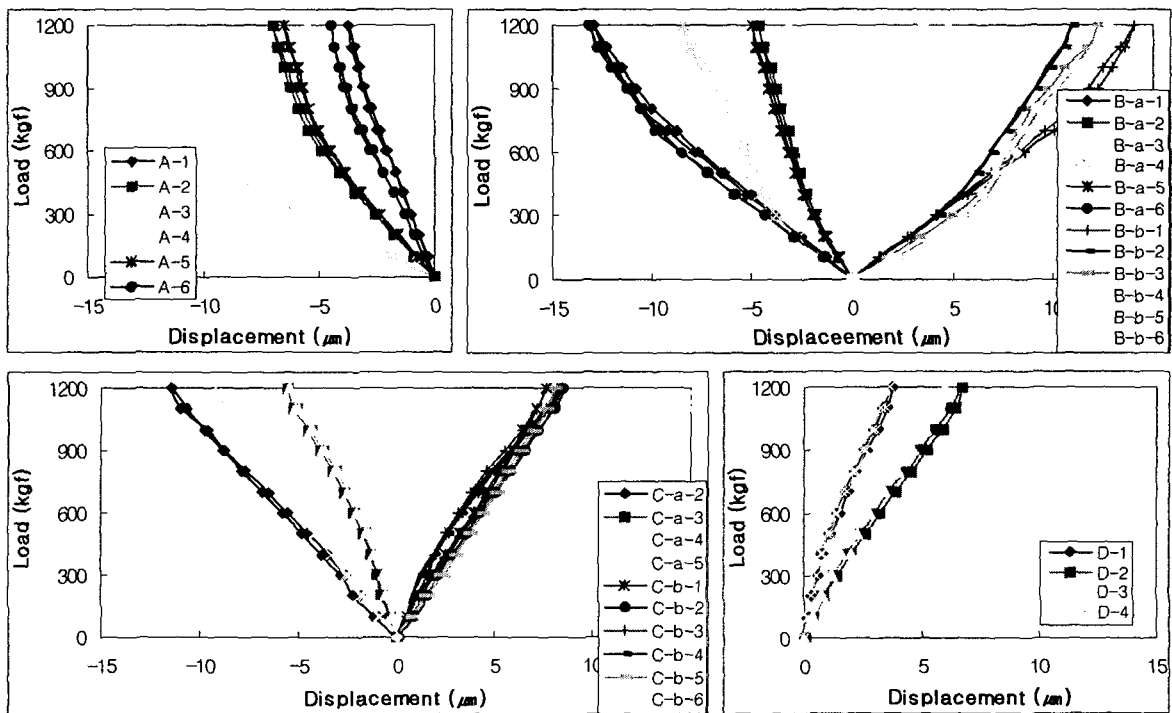


Fig. 10 Hysteresis curves for each positions of strain gauges in 1200kg test

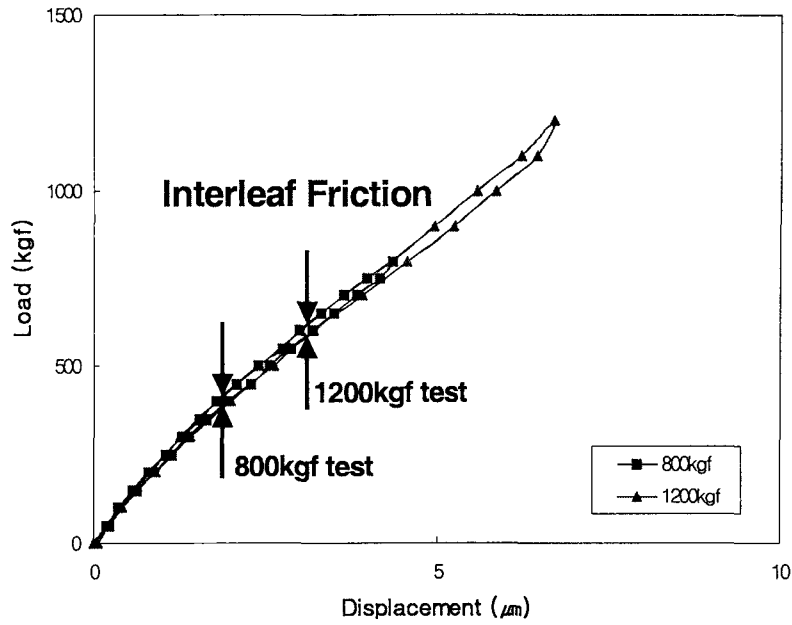


Fig. 11 Measurement of interleaf friction force

을 가진다.

최대마찰력은 leaf B의 a-4와 b-4 위치에서 나타나는데, 800kg 실험에서는 75kg이고 1200kg 실험에서는 100kg이다.

최대마찰력을 이용하여 마찰계수를 측정하면

800kg 실험에서는 0.19이고, 1200kg 실험에서는 0.17이다. leaf 표면의 strain gauge 신호는 그 표면 위에서 발생하는 마찰력뿐만 아니라 반대쪽 표면에서의 마찰력에 의해서도 영향을 받기 때문에 덜 늘어나게 된다. 따라서 처음 leaf spring 재료를 이

Table 5 Interleaf friction force for each position in 800kg test

	1	2	3	4	5	6
D	20kg	30kg	25kg	25kg	-	-
C-a	-	25kg	30kg	35kg	20kg	-
C-b	20kg	10kg	10kg	30kg	25kg	35
B-a	0kg	10kg	45kg	75kg	45kg	10kg
B-b	0kg	25kg	40kg	70kg	20kg	10kg
A	10kg	20kg	25kg	20kg	10kg	10kg

Table 6 Interleaf friction force for each position in 1200kg test

	1	2	3	4	5	6
D	45kg	40kg	35kg	40kg	-	-
C-a	-	25kg	35kg	50kg	20kg	-
C-b	10kg	20kg	50kg	30kg	20kg	10kg
B-a	20kg	20kg	50kg	100kg	30kg	0kg
B-b	20kg	0kg	80kg	100kg	20kg	10kg
A	20kg	25kg	50kg	50kg	20kg	20kg

용한 미끄럼 실험에서 얻은 마찰계수인 0.27보다 leaf spring assembly를 이용하여 얻은 마찰계수가 작게 된다.

4. 결론

shot peening을 하지 않은 시편과 한 시편에 대한 미끄럼 실험과 leaf spring assembly를 이용한 마찰력 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 미끄럼 실험을 시작하여 2시간 후 shot peening을 한 시편의 경우 마찰계수는 0.28이고, shot peening을 하지 않은 시편의 마찰계수는 0.52로 상대적으로 아주 큰 마찰계수를 보인다.

(2) 수명의 관점에서 shot peening을 하지 않은 시편의 경우, 10MPa 이상의 접촉압력에서 2시간을 버티지 못하고 표면파괴(scuffing)가 일어난다.

(3) 마멸률 K는 shot peening을 한 시편이 $6.545 \times 10^{-5} \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 이고, 하지 않은 시편이 $1.391 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 이다. 따라서 shot peening을 하게 되면 재료의 마멸저항이 향상된다.

(4) shot peening 결과 시편의 표면에 압축잔류 응력이 생성되는 것을 확인하였고, 이러한 압축잔류응력은 재료의 내마멸성을 향상시킬 수 있다.

(5) strain gauge를 leaf spring에 부착하여 하중에 대한 변형율을 측정하여 하중-변위선도를 얻었다.

(6) interleaf friction force 측정 결과, 최대마찰력은 B-a-4와 B-b-4에서 나타난다. 800kg 실험에서 최대마찰력은 75kg이고, 1200kg 실험에서는 100kg이다. 최대마찰력을 이용하여 마찰계수를 측정하면 800kg 실험에서 0.19이고, 1200kg에서는 0.17이다.

후 기

이 연구는 현대자동차 "스프링의 내구목표 설정"의 연구비 지원으로 성균관대학교 산업설비 안전성평가연구센터에서 수행되었습니다.

참고문헌

1. SAE HS788, Design and Application of Leaf Springs, Part 1, 1988.
2. Hamano, T., Itoh, M., "Analysis of Leaf Spring using Finite Element Method with a Joint Element," Spring, Vol. 37, pp. 74~79, 1992.
3. Song, J., Maruyama, Y., "Dynamic Characteristics of Leaf Spring by ADAMS Software," Spring, Vol. 38, pp. 31~36, 1993.
4. Aoyama, T., Tsuru, Y., "The Calculation of a Tip Contact Tapered Leaf Spring," Spring, Vol. 19, pp. 64~67, 1974.
5. Takadera, I., "Oilhydraulically-controlled Taper Leaf Spring," Automotive Technology, Vol. 38, No. 10, 1984.
6. Chishima, K., "Hysteresis Characteristics of Laminated Spring," Spring, Vol. 12, pp. 74~79, 1967.

논문 발표

Session II 윤활유/첨가제, 그리이스, 연료 등

최적 베어링 윤활 그리이스의 합성과 특성연구	129
식물유계 EP 그리이스의 생분해도 평가에 관한 연구	139
Polyurea Grease 종류별 점착성에 관한 연구(1)	149
VHVI 기유의 제품 적용기술에 관한 연구-건설중장비용 유압유	152
냉간압연 Tribo-Simulator에 의한 냉간압연유 윤활성 평가 시험	158
Improving the Precision of Specifications by Evaluating the Influence of Test Parameters on Tribological Results-Synthesis from international Round Robin Test-	164
SRV를 사용한 기어유의 윤활성 평가	181
MTM O의 변속성능과 내구성에 대한 연구	185