

(논문) SAE NO. 96370084

ABS 작동에 의한 캘리퍼하우징에 미치는 피로손상평가

Fatigue Damage Analysis of the Caliper Housing under ABS Mode

김 정 엽,* 모 중 운**
C. Y. Kim, J. W. Mo

ABSTRACT

The brakes are the most important safety-critical accident avoidance components of a motor vehicle. They must perform safely under a variety of operating conditions and must have enough strength not to fail during the life of a vehicle. Recently, anti-lock brake systems are used on more and more passenger cars. The ABS brakes modulate brake line pressure to prevent brakes from locking during braking.

In this study, finite element analysis, material test for FCD45, measurement of stress and cumulative fatigue damage analysis were performed to evaluate fatigue damage of the caliper housing under ABS mode.

주요기술용어 : ABS(안티락브레이크시스템), Caliper housing(캘리퍼 하우스), Fatigue damage(피로손상), S-N curve(응력-수명곡선)

1. 서 론

안전한 운전을 하기 위해서는 교통상황에 따라 차량의 속도를 조절할 필요가 있다. 브레이크는 타이어, 조향장치와 함께 자동차의 안전에 직결되는 부품으로, 젖은도로나 건조한 도로, 거친 도로나 미끄러운 도로와 같은 노면조건을 포함한 다양한 작동환경하에서 안정적으로 작동을 하여

야 하며, 자동차가 작동을 하는 수명기간중에는 파손이 발생하지 않을 충분한 강도와 내구성을 가지고 있어야 한다. 승용차 기술의 발전과 함께 브레이크 성능도 향상되어 최적의 제동력을 발생 시키는 물론 안정된 제동을 할 수 있게 되었으나, 급제동시나 제동시 노면의 상태에 따라 차량은 조향성을 잃고 불안정하게 움직이게 되며 제동거리 또한 증가하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 ABS(anti-lock brake system)가 개발되었으며, 최근에는 이를 장착한 차량이 급격히 늘고 있다.

* 정회원, 만도기계 중앙연구소

** 만도기계 중앙연구소

ABS가 작동을 하게 되면 일반브레이크(common brake system, CBS)와는 달리 차륜의 잠김(locking) 현상을 방지하기 위해 브레이크실린더에 공급되는 유압을 계속 변화시킨다. 즉, 브레이크 작동시 CBS의 경우는 한번의 유압상승이 있는데 비해, ABS의 경우는 노면상태 및 감가속도에 따라 유압이 반복적으로 작용하여 수십에서 수백사이클의 하중이 작용하게 되므로 이러한 압력변동에 의한 피로손상에 미치는 영향에 대하여 검토할 필요가 있다. 피로수명은 작용하중의 크기와 작용사이클수에 의해 지배되므로, CBS와 ABS의 두경우에 대한 피로강도는 주행조건에 대한 발생응력의 크기와 횟수와 재료의 피로데이터를 이용하여 검증할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 ABS의 작동에 의한 캘리퍼하우징(caliper housing)에 미치는 피로손상에 대해 평가하기 위하여, 유한요소해석, ABS, CBS의 두 작동모드에 대한 발생응력의 실측과 피로시험을 통한 피로데이터를 이용하여 피로손상을 계산함으로써, ABS용 캘리퍼하우징에 대한 피로강도를 평가한다.

2. 유한요소해석 및 실차응력측정

2.1 유한요소해석

제동시 유압에 의해 캘리퍼하우징에 발생하는 위험부위의 파악 및 응력계산을 위해 ANSYS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 캘리퍼하우징의 유한요소모델은 축방향으로 대칭이므로 1/2만을 모델링하였고, 총 2,640개의 8 node solid element로 구성되었으며, 그 형상은 Fig.1과 같다.

경계조건은 Fig.2와 같이 캘리퍼하우징이 캐리어(carrier)에 연결되는 볼트구멍을 x, y, z 방향으로 완전히 고정하였고, 대칭면은 x축방향으로 구속하였다. 캘리퍼하우징에는 실린더의 유압에 의해 패드(pad)를 밀어주어 발생하므로 실린더에는 차량감가속도 0.9g에 상응하는 유압, $P_c=9.81\text{MPa}$, 핑거(finger)부위에는 유압에 의한 힘에 상응하는 압력, P_f ,

$$P_f = P_c \frac{A_c}{A_f} \quad (1)$$

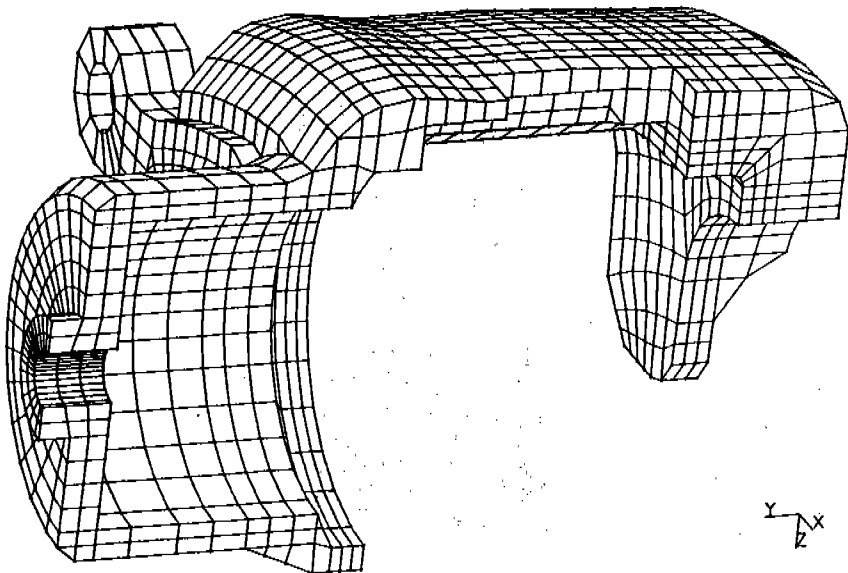


Fig.1 Finite element mesh of the caliper housing

을 균일하게 주었으며, 여기서 A_c 는 실린더 면적, A_f 는 핑거 면적이다.

Fig.3은 해석결과로서 Von Mises 동가응력(equivalent stress)을 보여주고 있다. 위험부위로 예상되는 최대응력의 발생위치는 핑거부와 브릿지(bridge)부의 접점 A로서 피로손상에 의해

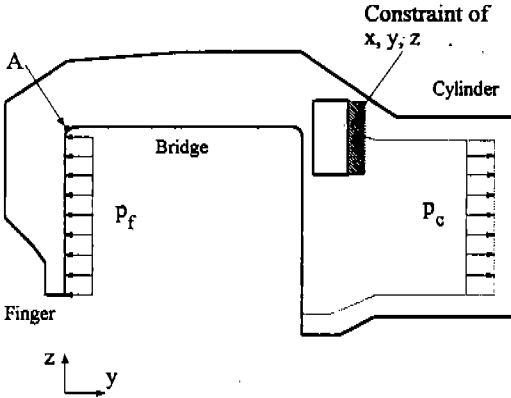


Fig.2 Boundary conditions

파손될 가능성이 가장 높은 곳이며, 그 크기는 273MPa 이다. 운전중 브레이크의 파손은 대형 사고로 이어져 차체뿐만 아니라 운전자의 안전에 대단히 큰 문제이므로, 캘리퍼하우징은 강도가 매우 크게 설계되어 있어, 캘리퍼하우징에 대한 구조해석결과에서 볼 수 있듯이 최대 발생응력은 탄성범위내에 있다.

2.2 실차 응력측정

CBS와 ABS 모드에서의 실차 조건에서 발생하는 유압과 응력을 측정하기 위하여 실차주행시험을 수행하였다. 캘리퍼하우징에 작용하는 하중은 주로 실린더유압에 의한 하중으로, 이 하중에 의해 브릿지부에 응력이 발생한다. 이러한 하중에 의해 발생하는 응력과 유압을 측정하기 위해 Fig.4와 같이 브릿지부의 응력과 실린더 압력을 각각 게이지길이(gage length)가 1.54mm인 스트레인게이지와 압력센서를 이용하여 측정하였다.

시험조건은 노면마찰계수, μ 가 약 0.1이 되는

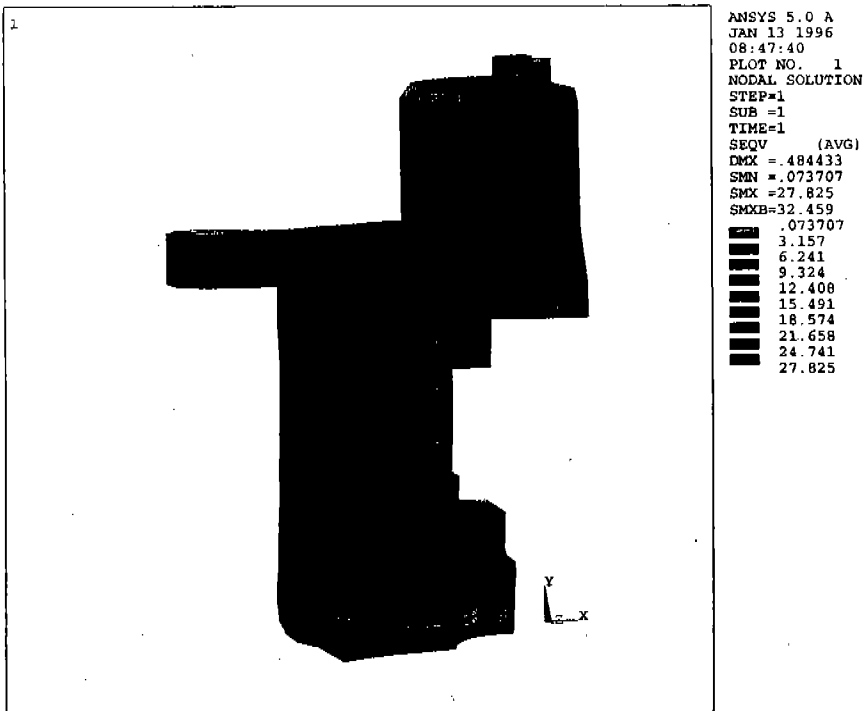


Fig.3 Stress contour of caliper housing(unit : kgf/mm²)

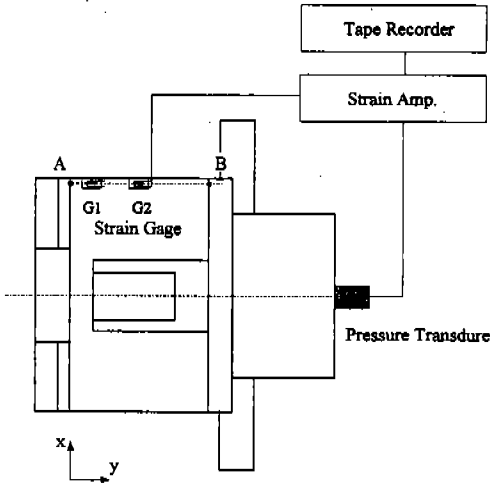


Fig.4 Schematic diagram of test apparatus

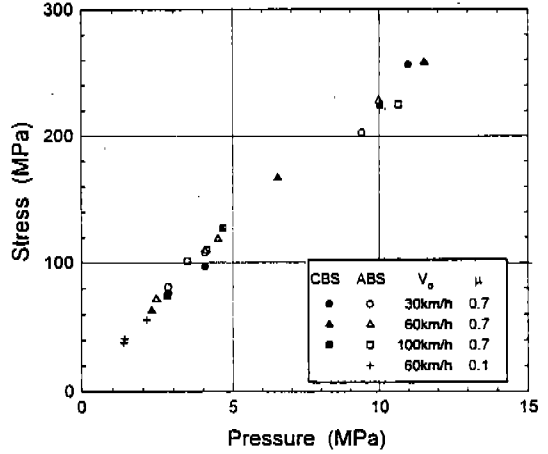


Fig.6 Relation between cylinder pressure and stress

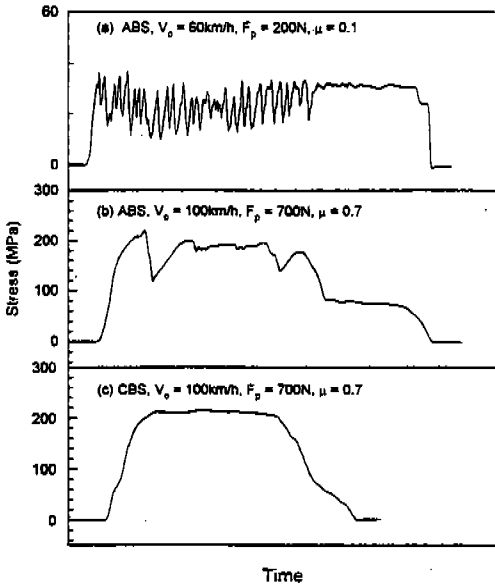


Fig.5 Measured stress history using strain gage, G1

젖은 철판(wet steel plate)에서 ABS 모드, 차량 초속, $V_0=60\text{km/h}$ 의 제동시험과 노면마찰계수가 약 0.7이 되는 아스팔트도로에서 ABS와 CBS 모드에서 $V_0=30, 60, 100\text{km/h}$ 의 경우에 대해, 페달달력, F_p 를 약 200, 400, 700N에 대한 시험을 수행하였다.

Fig.5는 측정결과로서, 제동시 Fig.4의 스트레인게이지 G1에서 측정된 응력변화를 보여주고 있다. Fig.5(a)는 노면마찰계수가 약 0.1되는 젖은 철판에서 초기 차속 60km/h, 페달달력 200N에 대한 측정 예이다. 그림에서 ABS가 작동함에 따라 차륜의 잠김현상을 방지하기 위해 실린더 유압은 크게 상승하지 않고 반복적으로 변동하는 것을 알 수 있다. ABS모드에서 발생 유압의 크기나 횟수는 차량의 무게나 차속등의 주행상태나 노면상태등에 따라 변한다. 한편 Fig.5(b)와 (c)는 노면마찰계수가 0.7인 정상노면에 대해 차량 초기속도가 100km/h, 페달달력 700N인 경우의 측정결과이고, Fig.5(b)는 ABS 모드, Fig.5(c)는 CBS모드에서의 발생응력을 나타내고 있다. 발생응력의 크기는 ABS와 CBS에서 큰 차이가 없고, ABS 작동에 의한 응력변동만이 관찰된다. 즉, ABS의 작동으로 인한 압력의 감소는 없고, 차륜이 잠기지 않도록 압력을 변동시키게 되며, 다만, 노면마찰계수가 변하게 되면 차륜이 잠기는 압력이 변하게 되므로 발생 응력도 변하게 된다.

Fig.6은 실차주행중에 측정한 실린더유압과 측정응력의 관계를 보여주고 있다. 차륜의 토크에 의해 영향을 받는 캐리어와는 달리, 켈리퍼하우징에 발생하는 응력은 노면마찰계수, 차량 초

기속도나 노면, 브레이크모드에 관계없이 유압에 비례하고 있음을 알 수 있다.

2.3 유한요소해석결과와의 비교

Fig.7은 응력측정결과와 유한요소해석결과를 비교한 것이다. 그림에서 y축은 축방향 응력을 x축은 Fig.4의 점 A에서 점 B까지의 거리를 나타내고 있으며, 곡선은 유한요소해석에 의한 결과를, 기호 (○)는 스트레인 게이지로 측정된 응력을 나타내고 있다. 계산결과는 평균부에 가까운 점 A에서의 응력이 응력집중의 영향으로 가장 크며, 점 B 부근에서의 응력은 단면적의 증가로 인하여 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 전체적으로 유한요소해석결과와 실험상에서 측정된 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3. 피로해석

3.1 재료시험

캘리포하우징의 재료로 사용되고 있는 FCD45에 대한 재료물성치를 얻기 위하여 인장시험 및 피로시험을 수행하였다.

인장시험은 ASTM E8¹⁾의 방법에 의해 수행하였다. 시험편은 캘리포 하우징에서 채취하여,

시험편의 지름은 6.35mm가 되도록 가공하였고, 변위 측정은 표점거리(gage length)가 25mm인 익스텐소미터(Extensometer)를 이용하였다.

FCD45의 화학적 조성과 인장시험결과는 각각 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

피로시험은 ASTM E467²⁾의 방법에 의해 S-N(응력-수명)데이터를 얻었다. 시험편은 인장시험편과 마찬가지로 지름은 6.35mm가 되도록 가공하였으며, 시험기는 100kN 용량의 MTS 서보 유압시험기를 이용하였다. 시험되풀이 속도는 25Hz로 하였으며, 시험 하중비, R=0, -1의 두경우에 대한 시험을 수행하였다. 피로수명은 시험편이 완전히 파단될 때의 사이클수로 정의하였으며, 피로한도는 10⁷사이클로 정의하였다.

3.2 피로해석

피로수명의 S-N 곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다³⁾.

$$S_a = \sigma_f N^b \tag{2}$$

여기서, σ_f 는 피로강도계수(fatigue strength coefficient), b는 피로강도지수(fatigue strength exponent)이다.

고되풀이수(high-cycle) 영역에서 평균응력의 영향을 고려하기 위한 방법으로는

$$\text{Solderberg} : \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$$

Table 1 Chemical composition of FCD45 (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Fe
FCD45	2.29	2.67	0.51	0.077	0.006	-

Table 2 Mechanical properties of FCD45

Material	Young's modulus (GPa)	0.2% yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
FCD45	166	310	460	16.8

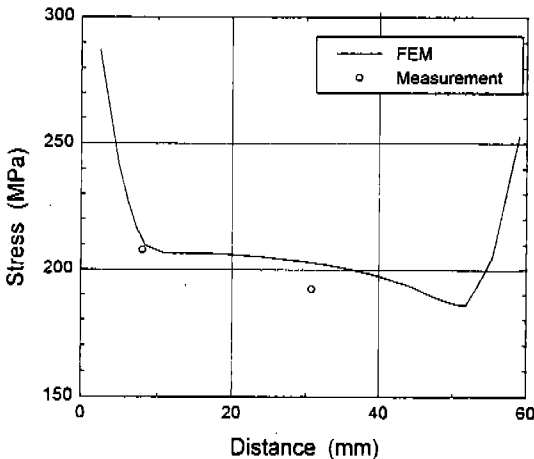


Fig.7 Comparison of measured stress and FEA result

Goodman : $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$

Gerber : $\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1$

Morrow : $\frac{\sigma_e}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_f} = 1$

Smith-Wattson-Topper : $(\sigma_a + \sigma_m)\sigma_a = S_e^2$ (3)

와 같은 제안식이 있다³⁾. 여기서 S_e 는 동가응력, σ_a 는 응력진폭, σ_m 은 평균응력, S_u 는 항복응력, S_e 는 인장강도, S_f 는 진파단응력이다. 본 연구에서 수행한 FCD45의 경우, 하중비 $R = -1, 0$ 의 두 실험결과를 정리한 결과, Goodman법에 의해 평균응력의 영향을 고려한 결과가 가장 잘 일치하고 있으며, Goodman식에 의해 정리한 실험결과는 Fig.8과 같다. FCD45에 대한 피로시험결과, Fig.8에서 얻은 σ'_f 와 b 는 각각

$\sigma'_f = 1050\text{MPa}$

$b = -0.11$ (4)

이다. 피로수명을 평가하기 위해서는 Fig.5와 같은 하중이력(load history)을 일정진폭시험데이터와 비교하기 위하여, 그 크기와 발생횟수를 계산하여야 한다. 계산방법에는 여러가지 방법이 제안

되고 있으나, 일반적으로 피로수명의 계산에 많이 쓰이는 방법으로는 레인플로우 사이클카운팅(rain-flow cycle counting)법이 있다⁴⁾. Fig.9(a)와 (c)는 각각 Fig.5(a)와 (b)의 하중이력을 레인플로우법에 의해 계산한 결과로, 계산된 각 하중사이클의 평균과 진폭에 대한 발생빈도를 보여주고 있다. 진폭이 작은 하중사이클이 발생응력의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

피로취약부로 예상되는 점 A에서의 누적피로손상(cumulative fatigue damage), D는 점 A에서의 응력이력을 사이클카운팅하고, 응력사이클중 i 번째 응력진폭, S_i 에 대한 일정응력진폭하중하의 수명을 N_i , 뒤돌이수를 n_i 라고 할 때, 피로한도이하의 응력에 의한 피로손상을 고려한, 수정 Miner rule⁵⁾에 의해

$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$ (5)

와 같이 계산할 수 있다.

Fig.9(b)는 Fig.9(a)의 ABS모드의 레인플로우 사이클카운팅된 각 하중사이클에 의한 피로손상의 계산결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 전체하중이력에 의한 피로손상중 96.7%가 가장 큰 하중에 의해 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 ABS가 작동을 하게 되면, 발생응력의 이력은 Fig.9(a)와 같이 변하게 되나 전체 피로손상에 미치는 영향은 이러한 하중이력중 진폭이 가장 큰 한 사이클에 의해 대부분 발생하게 된다.

한편, 노면의 마찰계수가 증가하면 차륜이 잠기는 유압이 증가하게 되고, 따라서 캘리퍼하우징의 발생응력도 증가하나 사이클수는 Fig.9(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 감소한다. Fig.9(c)의 하중이력에 대한 피로손상은 Fig.9(d)와 같다. 이 경우도 Fig.9(b)의 결과와 마찬가지로 진폭이 가장 큰 하중사이클에 의한 피로손상이 전체의 99.9%를 차지하고 있음을 알 수 있다. ABS 모드에서 측정된 다른 시험에서도 위의 결과와 마찬가지로 가장 큰 한사이클의 하중이 전체 피로손상의 96% 이상을 차지하고 있다. 이로부터 ABS작동에 의한 압력변동은 전체적으로

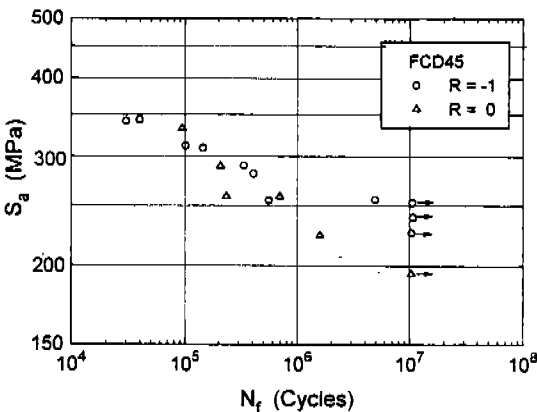


Fig.8 Stress-life curve for FCD45

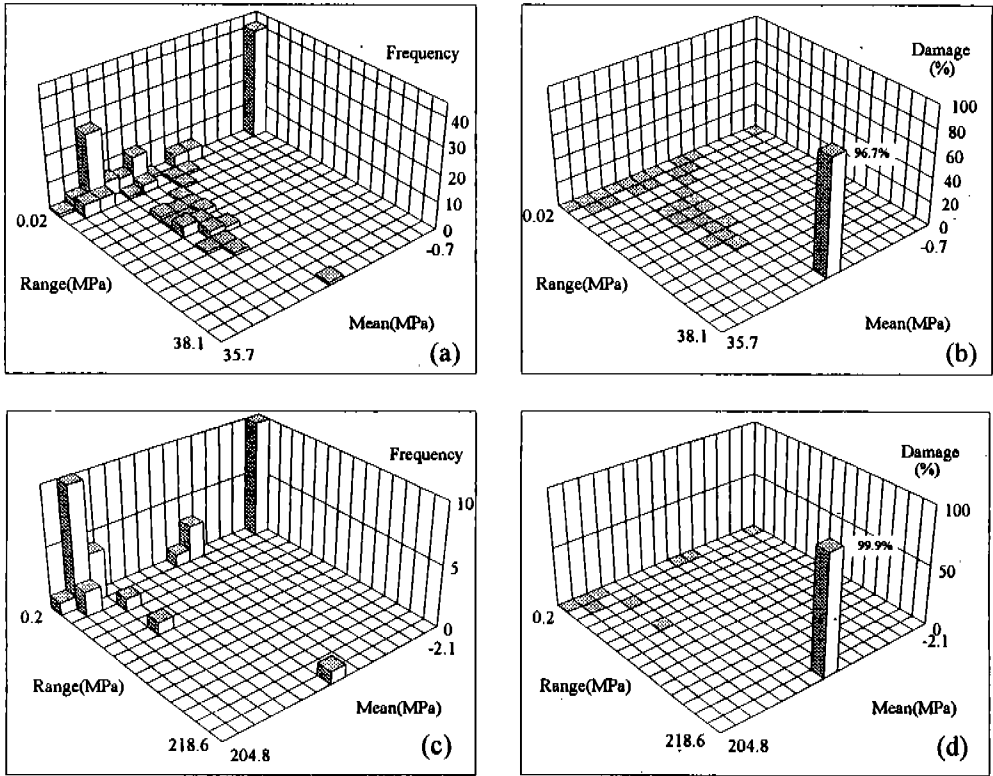


Fig.9 Distribution of Rain-flow cycle counting results and fatigue damage, (a) (b) for ABS mode, $V_0=60\text{km/h}$, $F_p=200\text{N}$, $\mu=0.1$, and (c) (d) for ABS mode, $V_0=100\text{km/h}$, $F_p=700\text{N}$, $\mu=0.7$

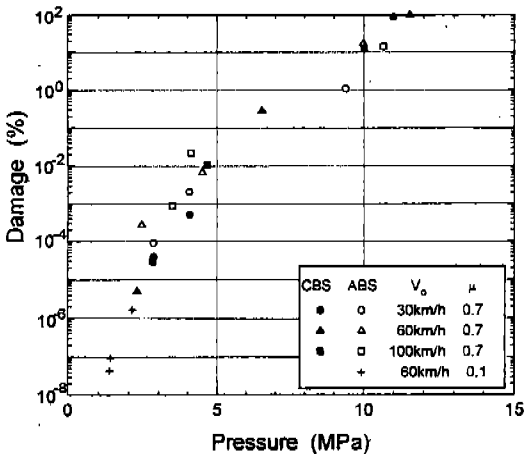


Fig.10 Fatigue damage

피로손상에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Fig.10은 CBS와 ABS 모드의 각 시험조건에 대한 피로손상을 정리한 결과이다. 이 결과는 측정결과 가장 큰 응력이 발생하는 CBS모드, 초기 차속 100km/h, 페달답력 700N, 노면마찰계수 0.7인 경우에 대한 피로손상을 100%로 하여 상대적인 피로손상을 계산하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 피로손상은 유압에 비례하며, 약 7MPa이하의 유압에 의한 피로손상은 거의 무시할 정도이다. 즉, 노면의 마찰계수가 매우 작은 미끄러운 도로에서의 ABS 작동에 의한 압력변동은 전체적으로 피로손상에 거의 영향을 주지 않는다고 생각할 수 있다.

4. 결 론

참 고 문 헌

본 연구에서는 ABS의 작동에 의한 캘리퍼 하우스징에 미치는 피로손상에 대해 평가하기 위하여, 유한요소해석, ABS, CBS의 두 작동모드에 대한 발생응력의 측정과 피로시험을 통한 피로데이터를 이용하여 피로손상을 계산함으로써, ABS용 캘리퍼하우징에 대한 피로강도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 캘리퍼하우징에 발생하는 응력은 실린더 유압에 의해 비례하며, 유한요소해석결과 최고응력이 발생하는 위치는 핑거부와 브릿지부의 접점이다.
- 2) ABS 작동에 의한 유압의 최고 상승값은 CBS와 큰 차이가 없다. 다만 차륜의 잠김 현상을 막기 위해 유압을 변화시킨다.
- 3) ABS 작동에 의한 하중이력중 피로손상에 가장 큰 영향을 주는 응력은 가장 큰 진폭을 갖는 사이클이며, 따라서 ABS 작동에 의한 피로손상은 최고 유압이 같은 경우 CBS모드와 거의 같다. 즉 ABS 작동에 의한 유압변동은 피로손상에 거의 영향을 주지 않는다.

1. ASTM E8, "Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 301, pp. 130~145, 1991.
2. ASTM E467, "Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, pp. 543~57, 1991.
3. J. A. Bannantine, J. J. Comers, and J. L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
4. R. C. Rice, et. al., Fatigue Design Handbook, Second Ed., Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 120~123, 1987.
5. M. A. Miner, "Cumulative Damage in Fatigue," J. Appl. Mech., Trans. ASME, Vol. 12, pp. A159~A164, 1945.