

클러치 마스터실린더 컵-시일 고무의 마찰계수 실험 연구

이재천^{*1)} · 임문혁¹⁾ · 이병수¹⁾ · 장지현²⁾ · 정용승²⁾ · 허만대³⁾ · 최병기³⁾

계명대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 계명대학교 기계공학 대학원²⁾ · (주)평화발레오³⁾

An Experimental Study on The Friction Coefficient of Rubbers for Clutch Master Cylinder Cup-Seals

J.-C. Lee^{*1)} · M.-H. Im¹⁾ · B.-S. Lee¹⁾ · J.-H. Jang²⁾ · Y.-S. Cheong²⁾ · M.-D. Hur³⁾ · B.-K. Choi³⁾

¹⁾Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

²⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

³⁾Valeo Pyeong Hwa Co., LTD., 105B, Seongseo Industrial Complex., Jangdong, Dalseo-gu, Daegu 704-190, Korea

(Received 28 November 2002 / Accepted 2 July 2003)

Abstract : The friction coefficients of the rubber for clutch master cylinder were experimentally measured in this study. The cylindrical rubber samples for primary cup-seal and secondary cup-seal were tested against the aluminum or the steel plates of master cylinder housing under the various conditions of brake oil temperatures and normal loads. Dry sliding friction coefficients were also measured under various load conditions.

The test revealed following results. First, the friction coefficient under fluid lubrication condition in general decreases, as the oil temperature or normal load increases. Second, the steel plate of low surface roughness yielded comparatively low friction coefficient on the range of 0.30~0.67. On the other hand, the aluminum plate of high surface roughness yielded high friction coefficient on the range of 0.31~1.15. Third, the friction coefficient of dry surface contact decreases as the normal load increases. This is contrary to the general principle of friction coefficient between metal plates.

Key words : Clutch master cylinder(클러치 마스터실린더), Primary cup-seal(주 컵-시일), Secondary cup-seal(보조 컵-시일), Stick-slip(스틱-슬립), Dry friction(건마찰), Friction coefficient(마찰계수)

1. 서론

클러치 유압시스템은 클러치 페달의 압력으로 마스터 실린더에서 발생시킨 유압을 관로를 통해 릴리스 실린더에 전달하는 시스템이다. 일반 유압 실린더는 피스톤의 행정에 의해 고압이 형성되므로 밀봉장치인 시일(Seal)에 대한 연구가 진행되었다.^{1,4)} 이와 같은 시일에 대한 연구는 주로 전산해석에 의해 응력분포를 구함으로써 여러 시일의 성능

을 분석하고 최적 형상을 설계하는 것이다. 아래 Fig. 1은 클러치 마스터실린더의 내부 구조와 시일의 형상이다.

클러치 마스터실린더 컵-시일에 대해서는, 이재천과 이범수⁵⁾가 내구 사이클 시험 중 오일소모량을

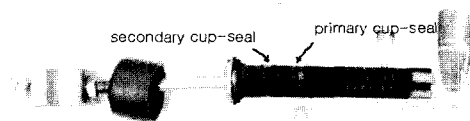


Fig. 1 Section view of master cylinder

*To whom correspondence should be addressed.
ljcds@kmu.ac.kr

추정하고 Weibull 그래프로 신뢰성을 해석함으로써 클러치 마스터실린더 컵-시일의 목표수명을 예측한 바 있다. 또한 임문혁, 이재천, 구본은⁶⁾은 클러치 마스터실린더 작동 중 주 컵-시일(Primary cup-seal)의 응력을 유한요소 해석함으로써 시일의 형상이 응력분포와 실린더 내벽과의 접촉거동에 미치는 영향을 분석하였다.

이렇듯 클러치 마스터실린더 컵-시일에 대한 기존의 연구는 시일의 밀봉기능과 누유에 대한 것이었다. 그러나 최근들어 자동차 품질에 대한 소비자들의 인식이 제고되면서 클러치 유압시스템의 소음 문제가 부각되고 있다. 클러치 유압시스템의 NVH (Noise, Vibration, Harshness) 문제 중 하나가 클러치 마스터실린더의 피스톤 왕복운동 중 발생하는 섭동소음이다. 클러치 마스터실린더의 섭동소음은 상온에서는 발생하지 않으며, 통상 클러치가 위치한 엔진실 온도가 높을수록 쉽게 발생하였다. 또한 실험에 의해 소음 발생원을 확인한 바에 의하면, 컵-시일과 실린더 내면 사이의 건조마찰(Dry-friction)이 그 원인인 것으로 판명되었다.⁷⁾

따라서 본 연구는 클러치 마스터실린더의 섭동소음을 해결하기 위한 기본 연구로써, 컵-시일의 고무 소재와 클러치 마스터실린더 소재인 금속 시편 간의 마찰계수 측정에 대한 것이다. 고무 소재는 주 컵-시일과 보조 컵-시일(Secondary cup-seal)의 2가지를 사용하였으며, 금속 시편은 알루미늄과 강철(Steel)을 각각 사용하였다. 알루미늄과 강철 시편을 대상으로 한 이유는 마스터실린더의 경량화를 위해 종전의 알루미늄 하우징에서 플라스틱에 강철 심(Shim)을 박는 방식의 하우징으로 설계 변경하는 과정에서 섭동소음 문제가 부각되었기 때문이다.

실험은 실제 운전조건에 맞춰 작동유인 브레이크 오일의 온도와 수직하중을 각각 변화시키며 진행하였다. 사용된 스틱-슬립 마찰시험기는 SK(주) 대덕연구원에 보유된 장비로써 다음 장에서 소개하였다.

2. 실험

2.1 스틱-슬립마찰시험기와 시편

아래 Fig. 2와 Fig. 3은 본 연구에서 사용한 스틱-

슬립 마찰시험기의 전경과 개략도이다.

마찰계수 측정에 관한 기존의 연구로는, 금속면 사이의 건마찰과 유체윤활시 마찰계수 측정에 대한 연구는 일부 있으나⁸⁻¹⁰⁾ 고무와 금속면간의 연구는 거의 없는 형편이다.¹¹⁾ 특히 기존의 고무 마찰계수 연구¹¹⁾가 원판고무와 금속봉 사이의 점접촉 마찰인 반면, 본 시험기에서는 고무와 금속 간의 면 접촉이 이루어짐으로써, 마스터실린더 내면과 컵-시일 고무간의 실제적인 접촉상황과 유사해진다는 점이다.

Fig. 3에서 보듯이 원형 고무시편이 지렛대 빔 한 끝에 부착되어, 수직하중에 의해 알루미늄 시편과 상대 접촉한다. 금속 시편을 고정시킨 상자에는 브레이크 오일을 채우고 가열기(Heater)로 온도를 제어한다. 고무시편을 부착한 빔의 미끄럼 운동에 따라 고무와 금속시편 사이에 발생한 마찰력을 스트레인게이지로 측정한다. 스트레인게이지 출력은 증폭기(Amplifier)등의 신호처리 시스템을 거쳐 펜 플롯터(Pen-plotter)로 그려진다. Table 1은 시험에 사용된 고무와 금속시편의 주요 물성치에 대한 것이다. Table 1에서 보듯이, 본 연구에서는 기존 실린더 하우징인 알루미늄과 대체 목표 재질인 강철시편에

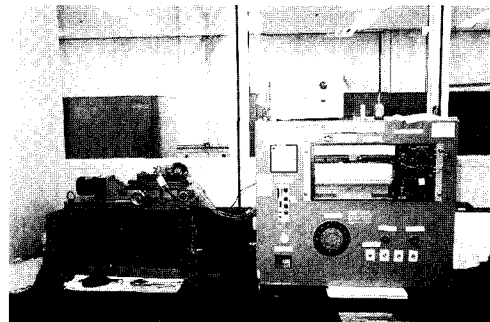


Fig. 2 Overview of stick-slip tester

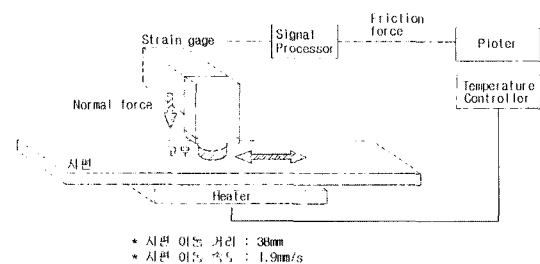


Fig. 3 Schematic of stick-slip tester

Table 1 Properties of test samples

| 품명 | 재질 | 경도 | 조도 | | |
|------------|------------------|--------------------|------|------|------|
| | | | Rmax | Ra | Rz |
| 실린더 하우징 | Aluminum AC2A | 137~140 Brinell | 3.38 | 0.18 | 1.73 |
| | Steel FC25 | 201-207 Brinell | 2.07 | 0.16 | 1.48 |
| 주 컵-시일 | EPDM 7210 | 67 Shore | | | |
| 보조 컵-시일 | EPDM(H) 7210H | 70 Shore | | | |

대해 각각 주 컵-시일 및 보조 컵-시일 고무 시편 간의 상대운동 시, 마찰계수를 측정하였다.

재료의 재료·화학적 성분보다는 조도와 같은 기계적 물성치가 마찰계수의 주요변수임을 확인하기 위해 기존 알루미늄 하우징의 대체목표 재질인 강철시편의 조도가 알루미늄 시편의 조도보다 낮게 제작하였다. 또한 금속시편의 조도를 최대높이거칠기(R_{max}), 중심선평균거칠기(R_a), 10점평균거칠기(R_z)로 각각 측정하여 마찰계수와 연관된 유효 조도 사양을 알아보았다. 마찰계수는 윤활조건(무윤활, 윤활), 부하하중 및 온도를 변화시키며 측정하였다. 무윤활 상태에서는 상온(약 25℃)상태에서 하중의 변화만을 고려하였으며, 윤활상태에서는 하중(500g부터 3500g까지 500g씩 증가)과 온도(상온, 40℃, 60℃, 80℃)를 각각 변화시켰다.

금속시편의 크기는 15mm×160mm×2.15 mm이었고, 고무시편은 직경 6.4mm, 두께 2.58mm의 원판이었으며, 미끄럼운동 시 모서리가 겹질리는 것을 억제하기 위해 가장자리에 0.5mm의 곡률을 주었다. 시험유는 (주)극동제연의 상용 브레이크 오일(Dot3)을 사용하였다.

고무시편과 금속시편 간의 마찰계수는 스트레인 게이지의 출력을 플롯터 펜에 의해 중립위치(Neutral position)으로부터 옮겨 그려진 거리(mm)를 측정하여 환산한다. 한 사이클(Cycle)당 고무시편이 부착된 빔의 이동거리는 38mm이고 약 20초 동안 서서히 이동한다. 한 사이클이 끝나면 반대 방향으로 반복 진행한다.

2.2 시험 절차와 마찰계수 계산

시험 절차는 다음과 같다.

1) 금속 및 고무 시편에 묻은 이물질 제거키 위해 헵탄(Heptan)을 이용하여 약 30분간 초음파 세척한다.

2) 접착제를 사용하여 고무시편을 시험기 빔에 흔들리지 않도록 부착한다.

3) 금속시편을 부착한다. 윤활시험 시 브레이크 오일을 시편 상자에 채운다.

4) 온도 조절기를 이용하여 시험 온도(상온, 80℃, 60℃, 40℃)를 맞추고 열평형조건에 이르도록 대기한다.

5) 무부하 상태에서 플롯터의 기준값을 확인한다

6) 각 시험 온도에서 하중에 변화를 주어 각각의 스트레인(Strain) 값을 측정한다.

Fig. 4는 펜 플롯터로 출력한 시험 데이터의 한 예이다. Fig. 4와 같이 플롯터의 출력 데이터는 중심선으로부터의 거리(mm) x에 따라 다음과 같이 마찰력(F)으로 환산된다.

$$F = \frac{200\mu s \times 4kgf \times x}{42mm \times 4096\mu s} \quad (1)$$

식 (1)에서 보듯, 본 시험기의 스트레인 게이지는 4kgf의 하중에서 4,096μs의 변형이 일어나며, 플롯터는 스트레인 게이지 200μs 변형일 때 기준선에서

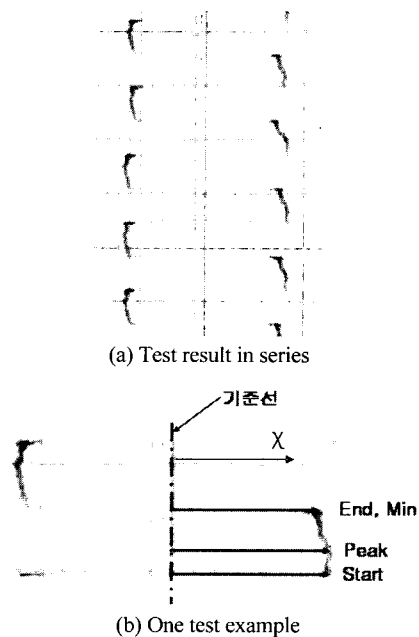


Fig. 4 An example of test result

42mm 떨어져 위치한다.

따라서 마찰계수(μ)는 다음과 같다.

$$\mu = F/N \quad (2)$$

여기서 F는 식 (1)의 마찰력이며 N은 고무시편이 부착된 빔에 가한 수직하중이다. 평균(Mean) 마찰계수는 최대(Peak) 값과 최소값의 산술평균으로 계산하였다.

플롯터 펜의 궤적은 Fig. 4에서 보듯이 고무시편이 부착된 빔의 운동방향이 바뀔에 따라 기준선으로부터 최고점(Peak)에 도달한 후 서서히 감소한다. 이것은 운동방향이 바뀌며 발생한 고무의 변형으로 인한, 일종의 스틱-슬립 현상으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 최고점의 마찰계수와 최고, 최저점의 산술평균 마찰계수를 함께 계산하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 윤활 조건

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 알루미늄(AC2A) 시편과 주 컵-시일 고무시편(EPDM7210) 및 알루미늄 시편과 보조 컵-시일 고무시편(EPDM7210H) 간의 윤활상태에서의 마찰계수 측정 결과를 보여준다.

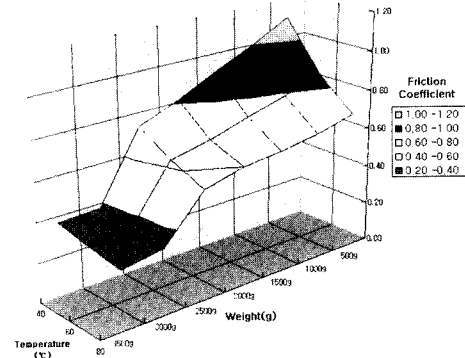
Fig. 6에서 보듯이 일정한 하중에서 온도가 증가할수록 마찰계수는 감소하였다. 이것은 온도가 증가함에 따라 브레이크 오일의 점도가 감소함으로써 알루미늄과 고무시편 사이의 전단응력이 감소하였기 때문이다.

또한 Fig. 5와 Fig. 6에서 보듯이 일정한 온도에서 하중이 증가함에 따라, 마찰계수는 점차 감소하였다. 이것은 다음과 같이 설명된다. 즉, Petroff의 법칙에 의하면, 유체윤활 상태로 상대운동하는 두 면 사이의 마찰계수(μ)는 다음과 같은 관계를 갖는다.¹²⁾

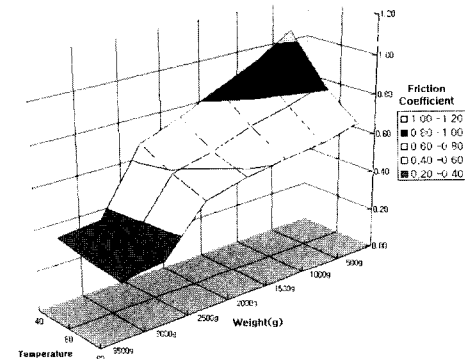
$$\mu \propto \frac{Z \cdot N}{P \cdot \delta} \quad (3)$$

관계 식 (3)에서 Z는 절대점도, N는 상대속도, P는 면압력, δ 는 유막두께(Film thickness)이다.

Fig. 5와 Fig. 6의 고무와 금속 면간의 유체윤활에서의 실험은, 하중의 증가에 따라 유막두께의 감소보다 유막면압력의 증가율이 상대적으로 컸던 것으로 판단된다. 유막면압력의 증가는 유체윤활하는



(a) Peak friction coefficient



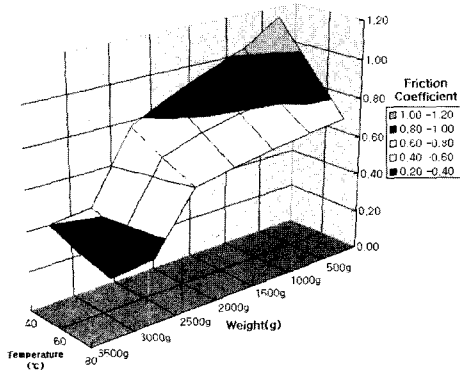
(b) Mean friction coefficient

Fig. 5 Test results (AC2A vs. EPDM7210)

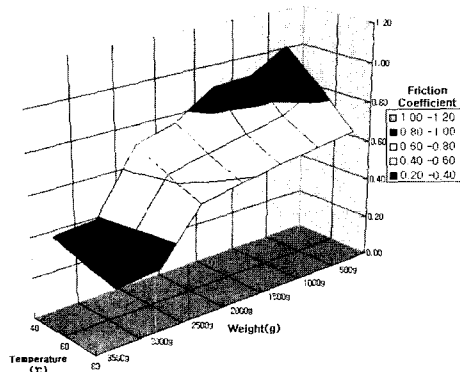
상대면의 돌기(Asperity)를 평평하게 누그러뜨리며 따라서 마찰계수는 감소한다.¹²⁾ 따라서 식 (3)에 의거, 본 실험에서 하중이 증가함에 따라 마찰계수는 감소하였다. 최대 마찰계수는 평균마찰계수보다 약 3~5% 컸으며, Fig. 4에서 보듯이 고무시편이 부착된 빔의 운동방향이 바뀐 직후에 발생하였다. 이것은 운동방향이 바뀌며 발생한 고무의 찌그러짐 변형으로 인한, 일종의 스틱-슬립 현상으로 판단된다.

Fig. 5과 Fig. 6을 비교할 때, 보조 컵-시일 고무시편(EPDM7210H)이 주 컵-시일 고무시편(EPDM7210)보다 전반적으로 약간 작은 마찰계수를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 보조 컵-시일 고무시편(EPDM7210H)의 경도가 주 컵-시일 고무시편(EPDM7210)의 경도보다 큼으로써 고무의 변형이 적었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 강철(FC25) 시편과 주 컵-시일 고무시편(EPDM7210) 및 강철(AC2A) 시편과



(a) Peak friction coefficient

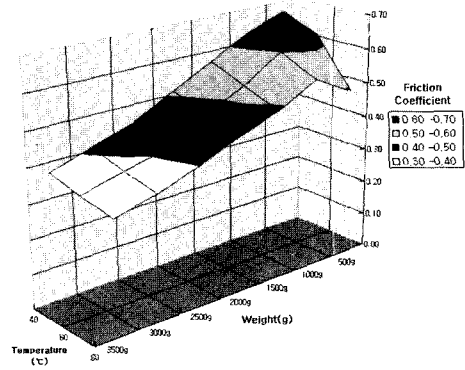


(b) Mean friction coefficient

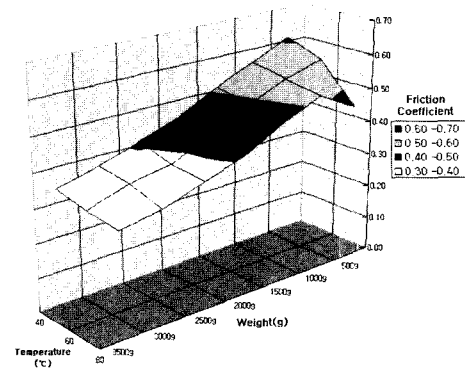
Fig. 6 Test results (AC2A vs. EPDM7210H)

보조 컵-시일 고무시편(EPDM7210H) 간의 윤활상태에서의 마찰계수 측정 결과를 보여준다.

온도와 하중 증가에 따른 강철 시편과 고무 시편 사이의 마찰계수의 감소는 Fig. 5와 Fig. 6에서 살펴본 알루미늄 시편과 고무 시편간의 마찰계수 특성과 유사하다. 단지 Fig. 7과 Fig. 8의 강철 시편과 고무 시편 사이의 마찰계수의 특성과 Fig. 5와 Fig. 6의 알루미늄 시편과 고무 시편 간의 마찰계수 특성을 비교해 볼 때, 같은 운동조건에서 강철시편이 알루미늄 시편보다 훨씬 낮은 마찰계수를 보여준다. 이것은 Table 1에서 보듯이 본 실험에서 사용한 알루미늄 시편의 조도가 강철 시편보다 컸기 때문으로 판단된다. 특히 최대높이거칠기(R_{max})는 다른 거칠기에 비해서 상대적으로 큰 차이가 남으로써 마찰계수와 관련된 표면조도의 규제 사양으로써 적합함을 알 수 있다.



(a) Peak friction coefficient



(b) Mean friction coefficient

Fig. 7 Test results (FC25 vs. EPDM7210)

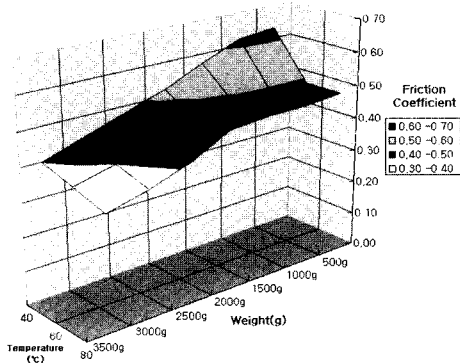
3.2 무윤활 조건(건 마찰)

Fig. 9는 브레이크 오일이 없는 무윤활 상태의 상온에서 하중을 변화시키며 알루미늄 시편 및 강철 시편과 주 컵-시일 고무시편 및 보조 컵-시일 고무시편 간의 마찰계수를 각각 측정한 결과이다.

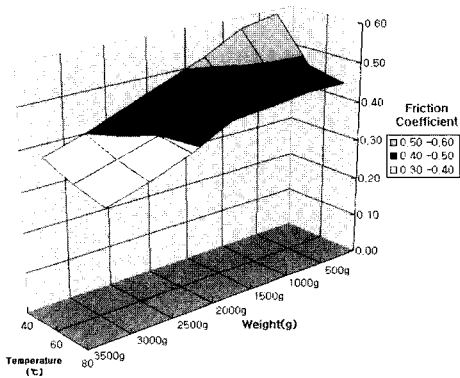
Fig. 9에서 보듯이, 건 마찰 상황에서도 하중의 증가에 따라 마찰계수는 계속 감소하였다.

일반적으로 수직하중이 증가함에 따라 상대 접촉하는 두 면의 거칠기 돌기(Asperity)는 상대 면으로 침입하게 되고(Interlocking), 따라서 마찰계수는 점차 증가한다.¹³⁾ 그럼에도 불구하고 본 실험에서 하중의 증가에 따라 마찰계수가 감소한 것은, 고무의 변형으로 인한 접촉면적의 증가로 인해 금속과 고무 간의 돌출부위 침입량이 오히려 줄어들었기 때문으로 판단된다. 그러나 실제 마스터실린더 내의 컵-시일은 측방향(Lateral) 변형이 제한되므로 본 실험의 결과와 다를 수 있다.

클러치 마스터실린더 컵-시일 고무의 마찰계수 실험 연구



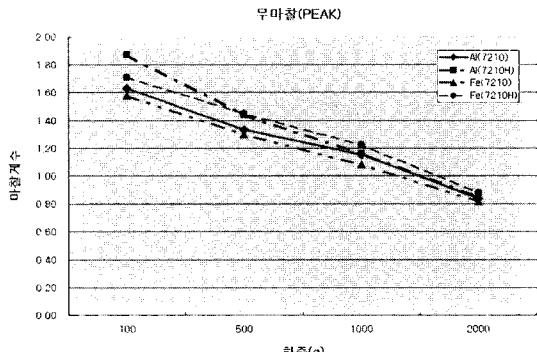
(a) Peak friction coefficient



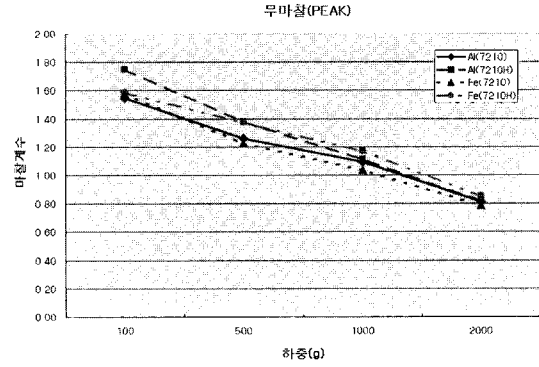
(b) Mean friction coefficient

Fig. 8 Test results (FC25 vs. EPDM7210H)

또한 Fig. 9는 조도가 낮은 강철보다는 조도가 큰 알루미늄이, 경도가 낮은 주 컵-시일 고무보다는 경도가 높은 보조 컵-시일 고무가 높은 마찰계수를 보이고 있다. 이것은 건 마찰 상황에서는 유체윤활과 달리, 경도가 높은 고무일수록 돌출부위의 전단력의 증가로 인해 마찰계수가 높아짐을 뜻한다. 또한



(a) Peak friction coefficient



(b) Mean friction coefficient

Fig. 9 Test results without brake oil

유체윤활 때와 마찬가지로 건마찰 상황에서도, 알루미늄과 강철의 재질에 따른 재료화학적성분보다는 표면조도의 기계적 물성치가 마찰계수에 결정적 영향을 주고 있음을 뜻한다.

4. 결론

본 연구에서는 클러치 마스터실린더의 고온에서의 섭동소음 문제와 관련하여 마스터실린더 하우징 소재인 알루미늄 시편 및 강철 시편과, 경도가 다른 두 가지 컵-시일 고무 시편 간의 마찰계수를 측정하였다. 본 연구의 특징은, 기존 연구¹¹⁾가 원판고무와 금속봉 사이의 점접촉 마찰이었던 반면, 본 연구에서는 마스터실린더 내면과 컵-시일 고무간의 실제 상황과 유사해지도록 고무와 금속 간의 면 접촉 상태로 실험한 것이다.

유체윤활 상태에서의 실험 결과, 윤활제인 브레이크 오일의 온도가 올라가면 마찰계수는 줄어들었으며, 수직하중의 증가에 대해서도 마찰계수는 감소하였다. 또한 경도가 큰 고무시편의 마찰계수가 경도가 낮은 고무시편의 마찰계수보다 비교적 작은 것을 확인할 수 있었다. 또한 조도가 낮은 강철보다는 조도가 높은 알루미늄 시편이 큰 마찰계수를 나타내었다.

브레이크 오일이 없는 건마찰의 경우에는, 하중이 증가할 수록 마찰계수가 상승할 것이라는 일반적인 예상과는 달리 하중이 증가할수록 마찰계수는 감소하였다. 이것은 고무의 변형으로 인한 접촉면적의 증가로 인해 금속과 고무 간의 돌출부위 침입

량이 오히려 줄어들었기 때문으로 판단된다.

건마찰 상황에서도 유체윤활 때와 마찬가지로 조도가 낮은 강철보다는 조도가 높은 알루미늄 시편에서 큰 마찰계수를 측정하였다. 이것은 플라스틱 보드에 강철 심(Shim)을 박는 방식의 마스터실린더 하우징에서의 섭동소음 문제를, 고가의 알루미늄 심을 사용치 않더라도 치밀한 조도 관리로써 해결할 수 있음을 뜻한다.

최대 마찰계수는 평균마찰계수보다 약 3~5% 컸으며, 고무시편이 부착된 범의 운동방향이 바뀐 직후에 발생하였다. 이것은 운동방향이 바뀌며 발생한 고무의 찌그림 변형으로 인한, 일종의 스틱-슬립 현상으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해 자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

본 연구에 협조하여 주신 SK(주) 에너지환경연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) B. S. Yang, "Sealing Performance of Oil Seal," J. KSTLE, Vol.3, No.1, pp.12-17, 1987.
- 2) J. U. Choi, I. K. Cheon, H. J. Kim, C. K. Kim, "Finite Element Analysis of the Sealing Mechanism for an U-Cup Seal," J. KSTLE, Vol.10, No.3, pp.12-17, 1997.
- 3) C. K. Kim, I. K. Cheon, "On The Analysis of Rubber Oil Seal in Consideration of Heat Stress," J. KSTLE, Vol.10, No.2, pp.39-42, 1994.
- 4) S. W. Han, W. D. Kim, H. J. Lee, "Numerical Analysis of Water Seal Characteristics," Annual Research Report, KIMM, Vol.24, pp.175-188, 1994.
- 5) J.-C. Lee, B.-S. Lee, "Reliability Analysis for a Clutch Master Cylinder," Proc. KSPE, pp.507-510, 1999.
- 6) M.-H. Im, J.-C. Lee, B.-E. Gu, "Finite Element Analysis of Primary Cup-Seal in a Clutch Master Cylinder," Transactions of KSAE, Vol.10, No.3, pp.143-150, 2002.
- 7) J.-C. Lee, Y.-S. Lee, "Sliding Noise Measurement of Clutch Master Cylinder," Intra-Research Report, Valeo Pyeong Hwa Co., LTD., 2001.
- 8) Y.-S. Kim, W.-J. Choi, "A Cup Drawing Test for Measuring the Coefficient of Friction for Metal Forming," Transactions of KSAE, Vol.2, No.1, pp.96-105, 1994.
- 9) B. J. Lee, H. S. Kim, "Speed Ratio-Torque-Characteristics for a Metal Belt CVT Friction Coefficient," 1997 KSAE Fall Conference KSAE, pp.1039-1044, 1997.
- 10) S. W. Cho, S. M. Choi, C. S. Bae, "The Frictional Modes of Barrel Shaped Piston Ring under Lubrication," Transactions of KSAE, Vol.8, No.3, pp.56-64.
- 11) W. D. Kim, D. J. Kim, C. Nah, Y. S. Lee, "A Study on the Friction Characteristics of Vulcanized Nature Rubber Plate," Elastomer, Vol. 36, No.2, pp.121-129, 2001.
- 12) A. Cameron, The Principles of Lubrication, John Wiley and Sons Inc., pp.7-9, 1967.
- 13) J. Halling, Principles of Tribology, MacMillan Education Ltd., pp.77-78, 1998.