

Friction Bushing용 복합재료의 미끄럼 마찰마모특성에 관한 연구

이한영[†] · 허대홍* · 김태준* · 조용재* · 조범래 · 허만대**

계명대학교 재료공학과, *계명대학교 대학원, **평화발레오(주)기술연구소

Sliding Wear and Friction Properties of Composite Materials for Friction Bushing

Han-Young Lee[†], Dae-Hong Heo*, Tae-Jun Kim*, Yong-Jae Cho*,
Bum-Rae Cho and Man-Dae Hur**

Dept. of Materials Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

*Dept. of Materials Engineering, Graduate school in Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

**Valeo Pyeong-Hwa Co. R&D Center, Daegu 704-190, Korea

Abstract – The sliding friction and wear properties of mineral fiber reinforced composite(MF) and glass fiber reinforced composites(GF) are investigated to clarify their field of use and the role of each fiber in friction material. Friction and wear test reveals that GF composite has better wear resistance even though with low friction coefficient, comparing with MF composite. Glass fiber strengthen effectively the matrix and may absorb friction energy to convert it into the fracture energy of them, as well as its lubricative role. However, mineral fiber in MF composite is too small to strengthen the matrix. Then MF composite are easily plowed and worn out by asperity on counter material. Friction coefficient of MF composite is higher friction coefficient than that of GF composite and varied widely with test.

Key words – mineral fiber, glass fiber, composite, friction, wear, friction material.

1. 서 론

Bushing 마찰재는 미끄럼운동을 하는 부위의 마찰마모특성을 향상시키기 위해 사용되는 부품이다. 자동차의 클러치는 클러치 facing외에 spline hub, disc plate, torsion spring, cushion plate 등 다수의 부품으로 이루어져 있으나 여기에도 bushing 마찰재가 사용되고 있다. 이 클러치용 bushing 마찰재는 클러치 내에서 hub plate와 접촉하여 clutch disc가 friction spring의 하중으로 비틀림을 받을 때, 발생하는 마찰력으로 그 하중을 damping시키는 역할을 한다[1]. 이러한 측면에서 클러치용 bushing 마찰재는 자동차 구동계의 진동, 소음 발생과 밀접한 관계가 있어 사용 마찰재의 미끄럼 마찰

마모특성은 자동차의 고급화, 고성능화 측면에서 중요한 인자로 작용하고 있다[2].

현재 클러치용 bushing 마찰재로는 나이론 66에 강화제로 유리섬유(glass fiber)를 첨가시킨 복합재료[1]가 널리 사용되고 있다. 그러나 이 복합재료는 다소 마찰계수가 적어 클러치의 damping능에 다소 문제가 있는 것으로 알려지고 있다. 그래서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고무에 SiO₂와 CaO 그리고 Al₂O₃ 등이 주 성분인 mineral fiber를 첨가한 복합재료가 개발되어 병행하여 사용되고 있으나 이것도 많은 문제점이 있는 것으로 알려지고 있다. 자동차의 고급화, 고성능화 측면에서 이들 마찰재의 문제점 해결 및 대체 마찰재의 개발은 필수불가결한 사안이나 사실 지금도 이들 사용 마찰재의 사용한계조차도 불명확 것으로 밝혀졌다. 이는 이들 원료를 대부분 수입에 의존하고 있기 때문으로 생

[†]주저자 · 책임저자 : lhy@kmu.ac.kr

각되나, 사실 이들의 마찰마모특성의 비교 조사뿐만 아니고 마찰마모특성에 미치는 기지와 fiber의 역할이 규명되지 않았기 때문인 것으로 생각되었다.

이에 본 연구에서는 우선 클러치용 friction bushing 마찰재로 사용되고 있는 두 종류의 복합재료의 미끄럼 마찰마모 특성을 조사하여 각각의 사용한계를 명확히 하고 미끄럼 마찰마모 특성에 미치는 각 마찰재의 기지와 fiber의 역할을 규명하였다.

2. 실험 방법

2-1. 시험편

본 연구에서는 시험 마찰재로 나이론 66에 유리섬유(평균직경 10 μm)를 각각 15%, 30%, 50% 첨가한 3종류의 복합재료 원료를 사출성형하여 클러치용 friction bushing의 제품(두께 약 3t)을 각각 제작하였다(이하 GF15, GF30, GF50) 또 다른 시험 마찰재로는 고무에 평균직경 4~6 μm 의 mineral fiber(43%SiO₂+8%Al₂O₃+39%CaO+6%MgO+4%기타)가 혼합된 원료를 고무에서 성형하고 압연하여 2t의 판재(이하 MF)로 제작하였다. 이후 이들은 공히 10 × 10 mm²의 형태로 절단하여 소정의 마찰마모시험편으로 제작하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 마찰재들의 밀도 및 경도를 나타내었다. 밀도는 액중 침량법으로 산출한 결과이며, 경도는 JIS-A에 의거한 고무경도계로 각각 5회 이상 측정된 평균값을 나타낸 것이다.

Fig. 1은 MF제 및 GF15제의 마찰면을 시험전 #600 abrasive paper로 연마한 후 SEM으로 관찰한 결과를

나타낸 것이다. GF제는 균일한 크기의 needle like 유리섬유가 균일하게 분포하고 있는 것을 관찰되나, MF제의 경우는 크기가 불균일하여 미세한 fiber와 조대한 fiber의 덩어리로 혼재되어 있는 것으로 확인되었다.

미끄럼마모시험의 상대재는 실제 클러치의 hub plate의 소재인 자동차 구조용 열간연강판인 SAPH440 (0.1%C, 0.5%Mn, 0.04%이하의 P 및 S)을 소정의 disc ($\phi 80 \times 4.5 \text{ mm}$, Ra = 1.34 μm , Rmax = 8.52 μm)로 가공한 후 침탄소입하였다.

2-2. 미끄럼 마모시험조건

미끄럼마찰마모시험은 지난보고[3,4]와 동일하게 두 종류의 plate-on-disc형 미끄럼마찰마모시험기를 이용하였다. 저하중 시험은 상온에서 하중을 2.9 N으로 일정하게 하고 선속도변화를 1, 3, 5, 8 m/s로 변화시켰다. 그리고 가속시험을 위해 55.2 N의 고하중 시험을 추가하였다. 이 경우는 상온 1 m/s 및 2.5 m/s의 선속도에서 시험하였으나 1 m/s의 경우는 100°C로 승온한 분위기속에서의 시험도 추가하였다.

이들 마찰마모시험의 총 미끄럼거리는 10 km까지로 하였으며 무윤활 상태에서 이루어졌다. 마모량은 소정의 거리마다 증량감소로 산출하였으며 마모율은 각 시험편의 밀도를 고려하여 단위 거리당 마모체적으로 정리하였다. 그리고 이들 값은 동일한 조건에서 2~4회의 시험을 하여 각각의 평균값을 취하였다. 마찰계수 산출은 지난보고[3,4]와 동일하게 소정의 거리마다 시험을 중단하고 재개하는 간헐적인 시험의 구간별 마찰계수를 산출하고 해석하였다.

Table 1. Density and hardness of test pieces

	MF	GF15	GF30	GF50
Density(g/cm ³)	1.68149	1.20225	1.32818	1.44286
Hardness	86	88.6	92.8	89.0

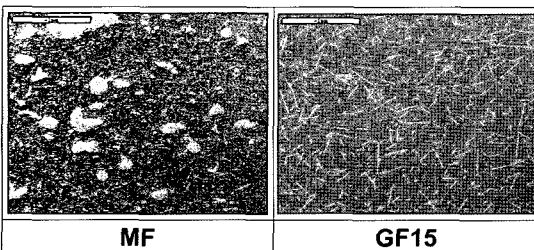


Fig. 1. SEM micrographs of surface before test.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 미끄럼 마모시험 결과

3-1-1. 저하중 시험 결과

Fig. 2는 2.9 N의 하중에서 거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것으로 GF50의 경우를 나타낸 것이다. Fig. 3은 각 마찰재의 이러한 거리에 대한 마모량의 변화를 초기마모영역과 정상마모영역으로 구분하여 미끄럼 속도에 따른 마모율을 각각 비교한 것이다. Fig. 2~3에서 보듯이 저하중에서는 시험 마찰재들의 마모가 현저히 적어 각 마찰재의 마모특성이 명확하다고 할 수 없으나, 전반적으로 초기마모영역에서는 3~5 m/s의 중간속도영역에서 최소의 마모율을 나타내는 계곡형의

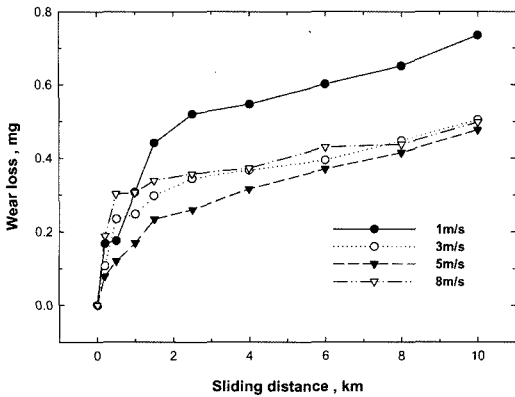


Fig. 2. The changes of wear loss with sliding distance for GF50 under 2.9 N.

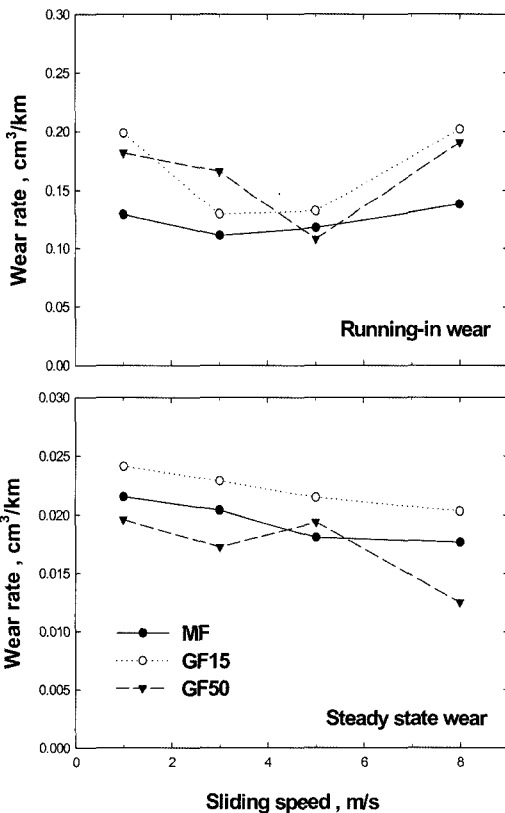


Fig. 3. Wear characteristics curves as a function of sliding speed under 2.9 N.

마모특성의 형태를 나타내고 있다. 정상마모영역에서는 대부분 속도가 증가함에 따라 연속적으로 마모율이 감소하고 있다. 이러한 마모형태는 일반적으로 알려진 고분자재료의 마모곡선형태[5]와 유사하다. 이들의 마

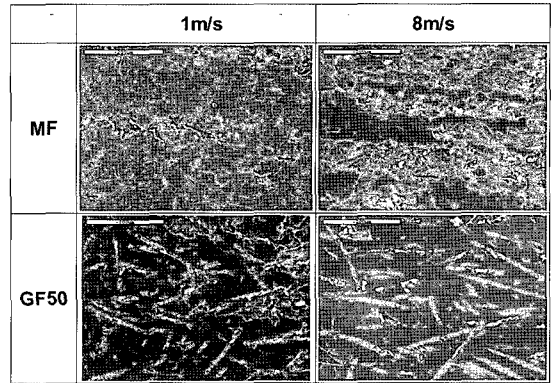


Fig. 4. Morphology of worn surfaces after test under 2.9 N.

모특성은 초기마모영역에서 MF재가 다소 양호하나 정상마모영역에서는 유리섬유 함유량이 높은 GF50의 마모특성이 양호해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 1 m/s와 8 m/s에서 시험한 MF와 GF50의 마모면의 SEM사진을 나타내었다. MF재의 마모면에는 그림에서 보듯이 plowing된 부위가 관찰되고 특히 8 m/s에서 현저하다. 이는 상대재의 돌기가 마찰재에 몰입되어 마찰면을 plowing한 것으로 생각된다. 그러나 이들 마모면에서는 fiber가 현저하지 않아 plowing 시 같이 탈락된 것으로 생각된다. 이에 반해 GF50의 마찰면은 전반적으로 깨끗하고 유리섬유가 그대로 잔존하고 있다. 그러나 일부 유리섬유가 깨어지고 탈락된 부위가 관찰되나 8 m/s에서는 그 정도가 적다. 결국 MF재의 마모는 상대재 돌기에 의한 plowing에 의해 진행되나 GF재의 마모는 유리섬유의 파단과 탈락으로 진행됨을 알 수 있다. 이러한 측면에서 MF재의 mineral fiber는 기지강화에 커다란 역할을 하지 못하나 GF재의 유리섬유는 유효하게 작용을 하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 마모형태로 미루어 MF재는 마찰거리를 증대하였다면 마모율이 현저히 증가할 것으로 추정된다.

3-1-2. 고하중 시험 결과

Fig. 5는 55 N의 하중하 MF재와 GF30재에 대해 상온의 1 m/s 및 2.5 m/s 그리고 100°C로 승온한 분위기에서 1 m/s의 미끄럼속도에서 각기 거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이다. 이들의 마모량은 저하중시와 달리 커다란 증가를 보이며 이러한 증가는 특히 MF재가 현저하다. 그러나 고온에서는 GF재도 크

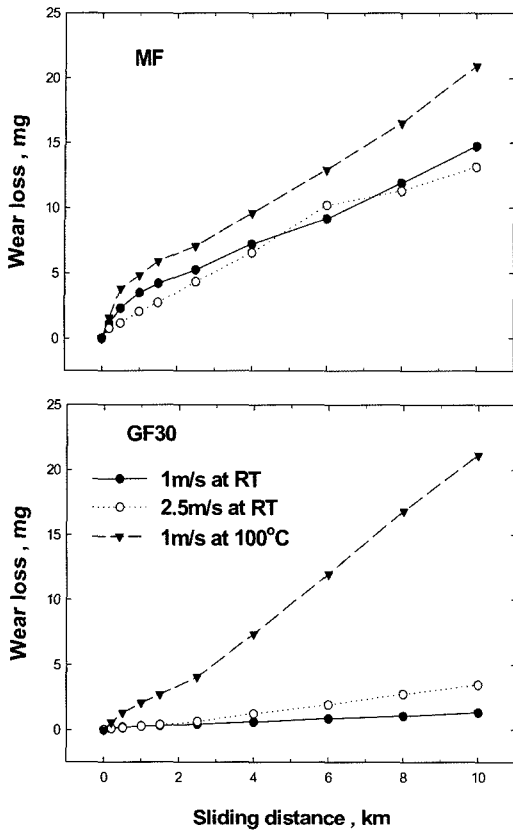


Fig. 5. The changes of wear loss with sliding distance under 55.2 N.

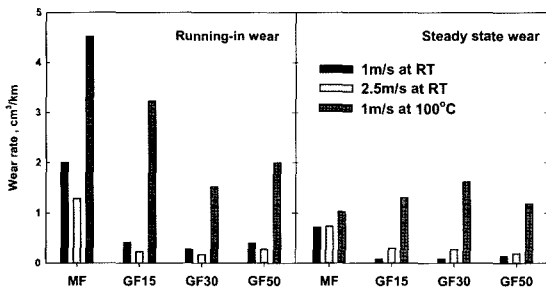


Fig. 6. Comparison of wear rate with test condition under 55.2 N.

게 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에 이들을 초기 마모영역과 정상마모영역으로 구분하여 각 영역에서 마찰재별로 시험조건에 따른 마모율을 비교하였다. 초기마모영역에서는 MF재가 어느 조건에서나 GF재에 비해 마모율이 큰 것을 알 수 있다. GF재의 경우 상온에서는 유리섬유 함유량과는 무관하나 고온에서는

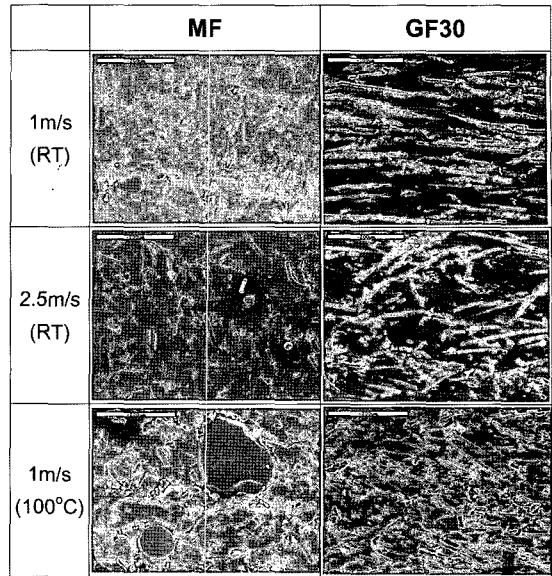


Fig. 7. Morphology of worn surfaces after test under 2.9 N.

30%이상 첨가한 것이 양호한 것으로 밝혀졌다. 정상 마모영역에서도 상온시험 시에는 MF재의 마모율이 GF재보다 크나, 고온시험에서는 유사한 마모율을 나타내고 있다.

Fig. 7은 MF 및 GF30의 마모면의 SEM사진을 나타낸 것이다. MF재는 어느 조건에서도 마모면에 plowing된 부분이 관찰되나 저하중시와 달리 현저하지 않고 일부 조대한 fiber가 관찰되고 있다. 이와 같이 고하중 조건임에도 불구하고 plowing이 적은 것은 상대재 돌기가 소성변형되어 진실접촉면적이 증대되었기 때문인 것으로 사료된다. 즉 시험초기에는 상대재 돌기에 의해 현저히 마모량이 증대하나 상대재의 돌기가 마모 또는 소성변형되어 응착마모로 천이되면서 마모량이 감소한 것으로 생각된다. GF재의 경우는 전반적으로 마모면이 깨끗하고 유리섬유가 관찰된다. 이는 전술한대로 유리섬유가 기지 강화에 유효하게 작용하였기 때문인 것으로 생각된다. 상온 1m/s에서는 일부 유리섬유의 파손과 유리섬유와 기지사이의 틈이 관찰되나 2.5 m/s에서는 적은 크기의 유리섬유가 다수 관찰되고 있다. 그리고 고온의 마모면에서는 미세하고 많은 양의 fiber가 전면에 분포하고 있는 것으로 밝혀졌다.

이상의 결과, GF의 경우는 fiber가 유효하게 기지를 강화시켜 기지의 마모를 최소화할 뿐만 아니라 유리섬유 자체의 윤활작용[6]으로 인해 양호한 마모특성을 나

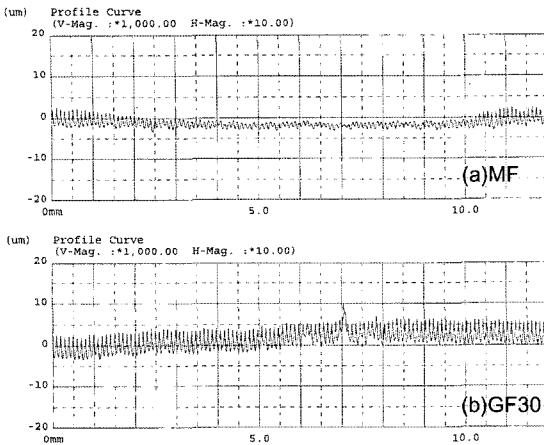


Fig. 8. Surface profiles on counter materials tested at 1 m/s under 55.2 N.

타내는 것으로 사료된다. 더욱이 needle like fiber는 가혹한 조건이 되면 외력을 파괴에너지로 전환하여 damping을 하며 이들은 밀리거나 재전이 되어 기지에 잔존하여 내마모성 향상에 기여하는 것으로 사료된다. 그러나 이들의 양이 많아지면 탈락하면서 마모량이 증대하는 것으로 생각된다. 이에 반해 MF재는 fiber가 미세하고 불균일하여 기지강화의 효과가 적은 것으로 생각되어 진다. 그러나 고온에서는 일부 조대한 fiber 덩어리가 유효한 작용을 하는 것으로 밝혀졌다. Fig. 8는 MF재 및 GF30재의 1 m/s에서의 상대재 마모면의 단면곡선 profile을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 MF재의 상대재의 마모면은 가공돌기가 관찰되지 않아 상대재공격성이 큰 것으로 확인되었다. 결국 MF재의 마모면은 초기마모에서 기지와 fiber가 상대재의 돌기에 의해 plowing되어 탈락되면서 abrasive입자로 작용하여 마찰재와 상대재를 동시에 마모시키나 상대재의 돌기가 무디어진 정상마모영역에 이르면 응착마모로 천이되는 것으로 생각된다.

3-2. 마찰계수의 변화

Fig. 9는 2.9 N의 저하중 시험시 측정된 각 구간별 마찰계수의 변화를 평균하여 미끄럼거리에 대해 그 평균값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서도 보듯이 대부분의 마찰계수의 변화는 초기에 급증한 후 2 km부근까지는 불안정한 마찰상태를 보이나 서서히 감소하면서 안정되어 감을 알 수 있다. 그러나 MF재는 속도에 따라 마찰계수 값에 차이가 현저하여 마찰안정성에 문제가 있는 것으로 추정된다. 이에 반해 GF재는 마

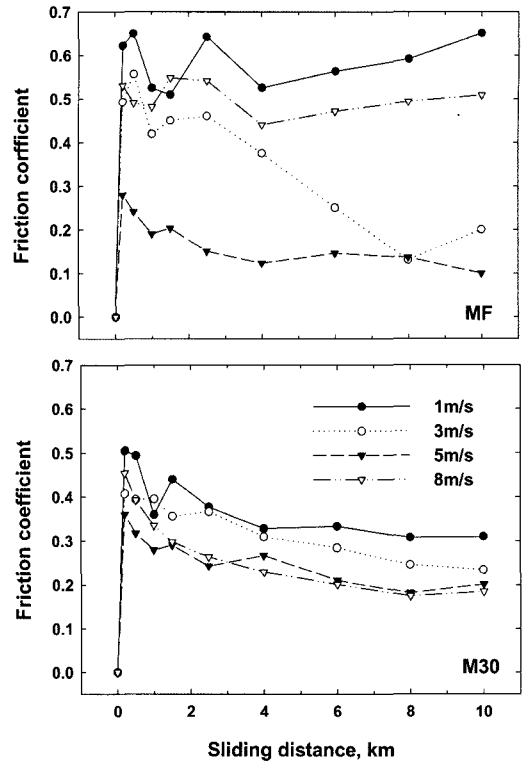


Fig. 9. The change of friction coefficient with the sliding distance at various sliding speeds (2.9 N).

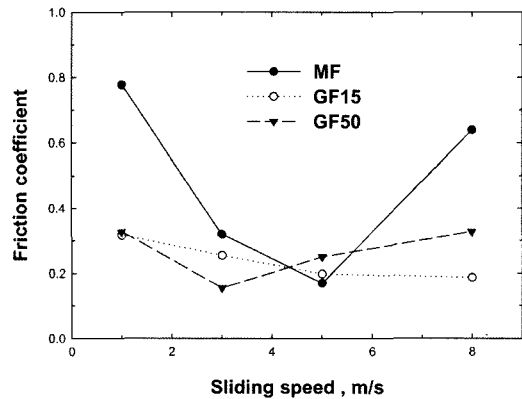


Fig. 10. Change of average friction coefficient with sliding speed (2.9 N).

찰계수 변화가 현저히 적고 안정적임을 알 수 있다. 그러나 유리섬유 함유량에 따른 마찰계수의 차이는 현저하지 않았다. Fig. 10은 Fig. 9의 각속도별 마찰계수의 변화에서 3 km이후의 마찰계수값의 평균값을 나타낸 것이다. 그림에서도 보듯이 MF재의 마찰계수는 GF

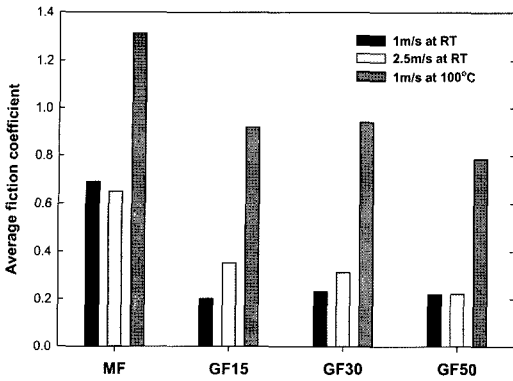


Fig. 11. Comparison of average friction coefficient with test condition (55.2 N).

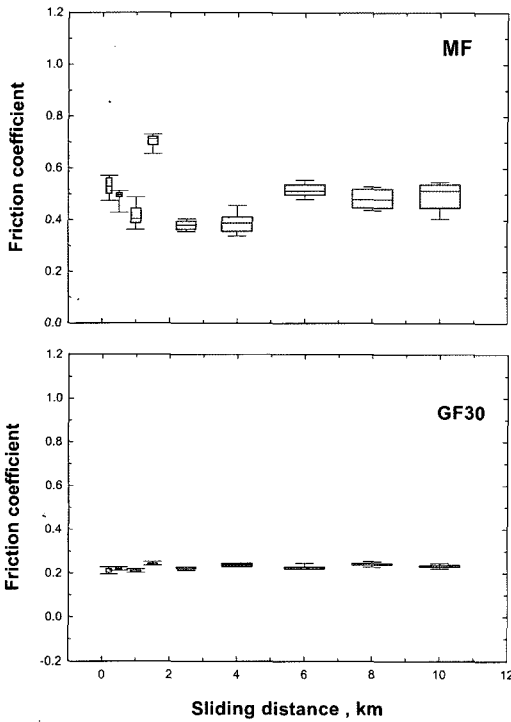


Fig. 12. The box plot of friction coefficient variation with the sliding distance (1 m/s at RT, 55.2 N).

재보다 크나 속도변화에 대해 변화 폭이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 고하중의 경우(Fig. 11)에도 동일하였다. Fig. 12는 고하중의 상온 1 m/s의 미끄럼 속도에서 시험한 MF 및 GF30에 대한 구간별 마찰계수를 box plot한 것이다. 각 plot의 하단 whiskers는 10th, box의 하단은 25th, box의 상단은 75th, 상단 whisker는 90th percentile을 나타내고 있다. 그리고 box

의 폭은 자료의 크기에 대응한다. 그림에서도 보듯이 GF재는 시험초기부터 변화폭이 적고 아주 안정적인 변화를 보이고 있다. GF재의 이러한 안정적인 변화는 유리섬유의 함량에 따라 다소 차이는 있으나 대부분 유사하였다. 반면, MF재는 동일한 시험조건 하에서도 커다란 마찰계수 percentile의 폭을 가지고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 MF재는 마찰계수의 진폭뿐만 아니라 평균마찰계수에 대한 마찰계수의 표준편차 등도 GF재에 비해 현저히 큰 것으로 밝혀져 클러치의 진동, 소음과 관련된 자동차의 Judder현상을 유발할 가능성이 높음을 시사하고 있다. 이러한 사실은 전술한대로 시험초기에는 MF재의 상대재의 공격성이 크나 이 돌기가 무디어진 정상마모영역에서 마모형태가 응착마모로 천이되면서 stick-slip현상이 용이하게 일어나기 때문으로 생각되어 진다.

4. 결 론

클러치용 bushing 마찰재로 사용되고 있는 두 종류의 복합재료의 미끄럼 마찰마모 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Mineral fiber 첨가 복합재료는 전반적으로 유리섬유 첨가 복합재료에 비해 내마모성이 열악하였으며 상대공격성도 큰 것으로 밝혀졌다. 마찰계수는 mineral fiber 첨가 복합재료가 유리섬유 첨가 복합재료에 비해 크고 속도, 하중 등의 마찰조건 변화 따른 변화폭도 큰 것으로 밝혀졌다.

2. Mineral fiber 첨가 복합재료의 마찰면은 상대재 돌기에 의해 plowing되고 돌기가 무디어진면 응착마모의 형태로 전환한다. 유리섬유 첨가 복합재료의 마찰면은 유리섬유가 밀리거나 재전이 발생하며 유리섬유의 탈락으로 마모가 진행된다.

3. Mineral fiber첨가 복합재료의 fiber는 미세하고 불균일하여 유효하게 지지강화를 하지 못하나 유리섬유 첨가 복합재료의 fiber는 기지를 유효하게 강화시켜 마모를 최소화할 뿐만 아니라 가혹한 조건이 되면 외력을 파괴에너지로 전환하여 damping을 하는 것으로 생각되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 평화발레오 기술연구소, “자동차용 마찰 클러치”.
2. 自動車技術會, “自動車のトライボロジ,” 養賢堂, 日本, 1994, 122.
3. 이한영, 김근영, 허만대, “자동차용 클러치마찰재의 미끄럼마찰마모특성해석(제1보 마모특성),” 윤활학회지, 21, 2, 299-305, 2004.
4. 이한영, 김근영, 허만대, “자동차용 클러치마찰재의 미끄럼마찰마모특성해석(제2보 마찰특성),” 윤활학회지, 20, 6, 77-82, 2005.
5. 日本潤滑學會, “新材料のトライボロジ,” 養賢堂, 日本, 1991, 69.
6. D. Hull, “複合材料入門”(宮入裕夫 외 2인 공역), 培風館, 日本, 1977, 16-19.