

고온에서 비석면 마찰재의 마찰·마모특성

안병길·최응수·권오관

한국과학기술연구원 Tribology 연구실

Frictional and Wear Characteristics of Non-Asbestos Friction Materials at Elevated Temperature

Byeng Gil Ahn, Ung Su Choi, Oh Kwan Kwon

Tribology Laboratory, Korea Institute of Science and Technology

Abstract—The frictional and wear characteristics of non-asbestos friction materials made of four different fibers (carbon, aramid, ceramic and glass) have been investigated at elevated temperature using High Frequency Friction Tester. On the basis of the experimental results, friction and wear phenomena of four different non-asbestos fibers were caused by lattice layer film of carbon, polymeric transfer film of aramid, abrasion of ceramic and adhesion of glass fiber under each contact junction. The surface analysis of the worn specimens and counter parts after tests were observed using Scanning Electron Microscope and Optical Microscope.

1. 서 론

마찰재는 운동물체의 운동에너지를 열로 전환시키는 작용을 하며 계내에서 생성된 열은 마찰시스템의 구성요소를 통한 전도, 대기로의 대류 및 복사에 의해 발산된다[1,2]. 마찰재의 용도는 자동차, 기관차, 항공기 및 산업용에 이르기까지 브레이크와 클러치 등의 라이닝 및 패드로 사용되며, 마찰시스템에 따라 경하중용 소재로서 펄프, 석면 등이 보강된 유기마찰재와 금속석유가 보강된 반금속(semi-metallic) 마찰재, 고하중용인 소결금속 마찰재로 구분된다. 이들중 범용 마찰재의 소재로 내열성, 내마모성, 마찰특성 및 경제성 등의 우수한 성능을 지닌 석면이 광범위하게 사용되어 왔으나 환경 및 인체에 대한 유해성의 문제가 대두되어 사용이 금지되고 있는 추세이다[1]. 마찰재의 성능은 내열성, 내마모성, 온도에 따른 마찰특성의 안정성, 열전도성 및 소음감소 등의 복합적인 기능이 요구되므로 이를 충족시키기 위한 석면 대체소재인 비석면 소재의 개발이 필요하다.

최근에 비석면 소재로 유리 섬유[1], 세라믹 섬유[4], 아라미드 섬유[5], 아크릴 섬유[6] 및 탄소 섬유[2-4, 7-9] 등이 일부 적용되고 있으나 이들에 대한 마찰·마모 메카니즘의 현상규명이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비석면 소재들의 마찰·마모 메카니즘의 현상을 규명함으로써 비석면 마찰재의 개발에 대한 기초자료를 얻는데 그 목적이 있다.

2. 실 험

2-1. 재료

일반적으로 마찰재는 섬유상의 보강재, 무기충전제 및 열경화성 수지 등으로 구성되어 있다. 섬유상의 보강재로서 비석면 소재들인 탄소 섬유, 아라미드 섬유, 세라믹 섬유 및 유리 섬유 등이 사용되었으며, 이들은 3-5 mm의 단섬유로 시편제조시 각각 50 vol.%씩 첨가되어 마찰·마모특성을 비교 검토하였다. 섬유상인 보강재들의 물리적 특성은 Table 1에 수록하였다.

무기충전제는 마찰재의 마찰특성을 증진시키기 위해 사용되며 산화철, 산화알루미늄 및 산화아연 등의 금속산화물과 황산바륨, 산화붕소 등이 첨가되며, 이외에 카슈너스트(cashew-dust) 등이 첨가되기도 한다. 시편제조시 이들을 일정량 첨가하여 마찰특성을 향상시키고자 하였다. 열경화성 수지는 마찰재의 기계적 강도를 향상시키기 위해 사용되는 것으로 기계적 특성과 더불어 마찰열에 대한 우수한 내열성이 요구된다. 멜라민 수지,

Table 1. Physical Properties of fibers

Classification	Diameter of fiber (μm)	Length of fiber (mm)	Modulus (GPa)	Aspect ratio	Density (g/cm ³)	Composition
Carbon fiber	6.8	3	390	15	1.8	—
Aramid fiber	12.3	3-4	130	—	1.5	—
Ceramic fiber	—	4-5	303	20	2.6	SiO ₂ 46% MgO 12% CaO 16% Al ₂ O ₃ 15% Others 1%
Glass fiber	9.4	3	72.4	320	2.5	—

Table 2. Physical Properties of Phenol Resin

용점(°C)	76-86
flow (ml/min)	34-46
경화온도(°C)	160
경화시간(sec)	46-60
Hexamine Content(%)	6.3-6.8
특징	내수성, 내 Alkali성

에폭시수지 및 페놀수지 등이 사용되고 있으나 이들 중 광범위하게 사용되는 페놀수지를 선정하였다. 본 실험에서는 다양한 종류의 페놀수지중 내열성이 우수한 직쇄계 노블락(straight novolac) 수지를 사용하였으며, 이의 물성은 Table 2에 수록하였다.

2-2. 시편의 제조

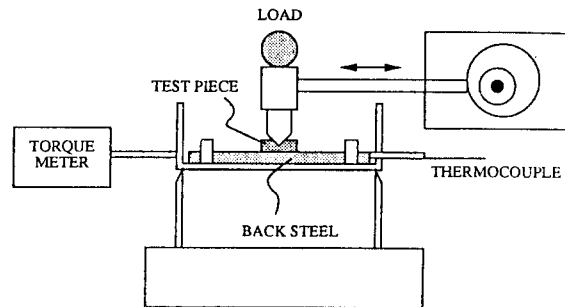
비석면 소재로 섬유상 보강재인 탄소 섬유, 아라미드 섬유, 세라믹 섬유 및 유리 섬유 등을 50 vol.%씩 첨가하였으며, 이외에 일정량의 무기충전제와 페놀수지를 첨가한 후, 혼합기에서 일정시간 혼합하였다.

균일하게 혼합된 혼합물을 금형에 담아 가열가압기에서 200 kg/cm², 180°C하에서 20분간 성형하였다. 성형된 시편을 200°C에서 4시간의 열처리 후, 소정의 치수로 가공하여 마찰재 시편을 제조하였다.

2-3. 실험장치 및 실험방법

실험장치 및 마찰재는 건식접촉(dry contact)하에서 작동되며 마찰시 고온의 마찰열이 생성되므로 마찰소재의 열변형(thermal deformation)에 의한 마찰특성 감소 현상이 초래된다.

따라서 본 실험에서는 가혹한 조건을 유지하기 위해 고온하에서 마찰재들의 마찰·마모특성을 고찰하였다. 고온용 마찰·마모 시험기로서 High Frequency Friction Tester가 사용되었으며, 이의 접촉 메카니즘 구조는 Fig. 1에 도시하였다. 실험조건은 마찰속도 0.45 m/sec, 하중

**Fig. 1. Schematic Diagram of Contact Assembly**

10 Kg_f 하에서 온도변화 및 일정온도에서의 미끄럼 거리변화에 따른 마찰재 시편들의 마찰·마모특성을 마찰계수와 마모량으로 나타내었다.

상대 마찰면의 소재로서 주철강을 연마처리하여 사용하였으며, 시험 후 표면조도 시험기(Talysulf-6)를 이용하여 상대 마찰면들의 표면조도를 측정하였다. 그리고 주사전자현미경(SEM)과 광학현미경을 이용하여 마찰·마모 시험 후 마찰재 시편과 상대 마찰면들의 마모된 표면을 각각 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 온도의 영향

마찰재 시편들의 온도변화(25-400°C)에 따른 마찰특성을 조사하였다. Fig. 2는 일정한 하중(10 Kg_f)과 마찰속도(0.45 m/sec) 하에서 8°C/min의 온도증가에 따른 마찰재 시편들의 마찰특성을 나타낸 것이다. 각 시편들은 250°C 이하의 온도에서 높은 마찰계수와 250°C 이상의 온도에서 급격한 마찰계수 감소를 보여주고 있다. 모든 마찰재 시편들의 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 측정결과 290°C 부근에서 페놀의 열분해가 개시되어 370°C 부근에서 완료되었으며, 이는 250°C 이상의 온도에서 모든 시편들의 급격한 마찰계수 감소현상이 첨가된

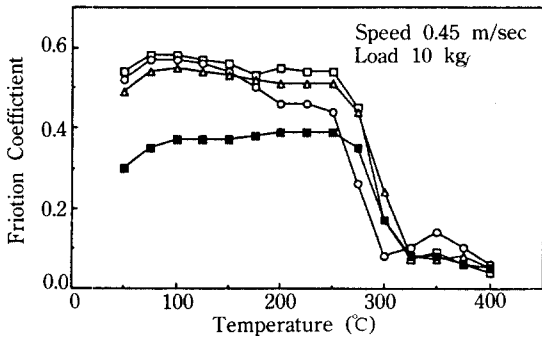


Fig. 2. Effect of the Temperature on the Friction Coefficient
 ■: Sample 1 (carbon 50%), △: Sample 2 (aramid 50%),
 ○: Sample 3 (ceramic 50%), □: Sample 4 (glass 50%)

페놀수지의 열분해에 기인된 것임을 설명하는 것이다.

시편 1은 탄소섬유가 첨가된 시편으로 온도변화에 따라 다른 시편들 보다 낮은 마찰계수 값을 일정하게 유지하고 있다. 탄소섬유의 대부분은 윤활특성이 좋은 흑연(graphite) 성분이므로 마찰시 탄소섬유내의 흑연 성분에 의한 층상구조를 형성하여 일정한 마찰계수 경향을 나타내고 있으며, 시편 2와 4는 각각 아라미드 섬유와 유리 섬유가 첨가된 것으로 온도변화에 따라 높은 마찰계수를 나타내고 있다. 이는 아라미드 섬유와 유리 섬유가 상대 마찰면 접촉표면에 각각 고분자 전이막(transfer film)과 응착막(adhesion film)을 형성하기 때문이라 사료된다. 시편 3은 세라믹 섬유가 첨가된 것으로 온도가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하고 있으며, 이는 규소와 급속산화물이 주성분인 세라믹 섬유의 높은 취성과 경도에 의한 연삭마모에 기인된 것으로 마모된 상대 마찰 표면의 관찰시 해석이 가능하다.

Fig. 3, 4는 온도변화에 따른 마찰 시험 후, 각 시편들의 마모량 측정결과와 상대 마찰면의 표면조도 값을 나타낸 것이다. 탄소 섬유가 첨가된 시편의 마모량이 가장 적었으며, 아라미드 섬유, 세라믹 섬유 및 유리 섬유 순으로 마모량이 증가하였다. 상대 마찰면의 표면조도 측정결과 탄소 섬유가 첨가된 시편의 상대 마찰면 표면조도(Ra) 값이 가장 적었으며, 아라미드 섬유, 세라믹 섬유 및 유리 섬유의 순으로 증가하였다. 마찰시편들의 마모량과 상대 마찰면들의 표면조도 값은 Fig. 2에서 각 섬유가 함유된 마찰 시편들의 마찰특성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

3-2. 미끄럼 거리변화의 영향

Fig. 5, 6은 표면온도 100°C, 하중 10 Kg, 및 미끄럼 속도 0.45 m/sec 하에서 미끄럼 거리변화에 대한 마찰계수와

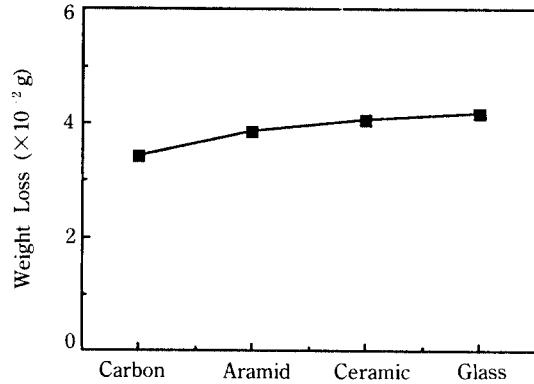


Fig. 3. Weight Loss of the Friction Materials after Friction Test

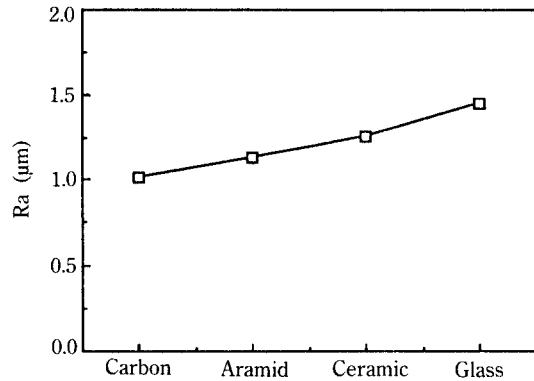


Fig. 4. Surface Roughness (Ra) of the Back Steel after Friction Test

마모량을 각각 나타낸 것이다. 탄소섬유가 첨가된 시편의 경우 미끄럼 거리 증가에 따라 일정한 마찰계수 값을 나타내고 있으나, 아라미드, 세라믹 및 유리 섬유가 첨가된 시편들은 감소 경향을 나타낸다. 특히 탄소 섬유가 첨가된 시편은 다른 보강 섬유들이 첨가된 시편보다 낮은 마찰계수 값을 보여주고 있다.

각 보강재들을 첨가한 시편들의 미끄럼 거리에 따른 마모량 결과에서 탄소 섬유가 첨가된 시편의 경우 가장 낮은 마모량을 나타내고 있다. 이는 탄소 섬유내의 흑연성분에 의한 층상구조 형성과 섬유의 고탄성에 기인된 것이라 사료된다. 유리 섬유, 세라믹 섬유 및 아라미드 섬유를 각각 첨가한 시편들은 미끄럼 거리가 증가함에 따라 급격한 마모량의 증가를 나타내고 있으며, 낮은 탄성계수와 높은 방향성 변형율(aspect ratio)의 유리 섬유가 첨가된 시편의 마모량이 가장 많았다.

미끄럼 거리변화에 따른 마찰계수와 마모량 측정 후,

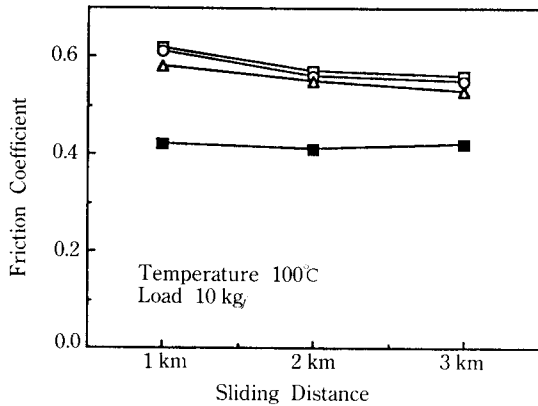


Fig. 5. Effect of the Sliding Distance on the Friction Coefficient

■: Sample 1 (carbon), △: Sample 2 (aramid), ○: Sample 3 (ceramic), □: Sample 4 (glass)

각 시편들의 상대 마찰면 표면조도를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 탄소 섬유가 첨가된 시편의 상대 마찰면 표면조도(Ra) 값이 가장 낮았으며, 이는 미끄럼 거리 변화에 대한 마모량 감소와도 일치하는 경향이다. 아라미드 섬유가 첨가된 시편의 표면조도(Ra) 값이 유리섬유나 세라믹 섬유가 첨가된 시편보다 낮은 값을 나타냈으며, 이는 마찰시 아라미드 섬유의 고분자 전이막(polymer transfer film) 형성에 기인된 것이라 사료된다.

3-3. 마모표면 분석

3-3-1. 주사전자현미경을 이용한 마찰재 시편들의 마모표면 관찰

표면온도 100°C, 하중 10 Kg, 미끄럼 거리 3 Km 하에서의 마찰시험 후, 각 마찰재 시편들의 마모된 표면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며, 이의 결과는 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8-a, b, c, d는 탄소, 아라미드, 세라믹 및 유리 섬유가 각각 첨가된 시편들의 마모표면으로 탄소 섬유와 세라믹 섬유의 경우는 아라미드 섬유와 유리 섬유의 경우와 다른 마모현상을 보여주고 있다. 탄소 섬유와 세라믹 섬유는 높은 탄성계수를 지닌 반면 아라미드와 유리 섬유는 낮은 탄성계수를 지니고 있어 이들의 물성에 크게 좌우된다.

탄소 섬유가 첨가된 시편의 마찰면은 섬유내의 흑연 성분에 의한 층상구조막의 미끄럼 마모(8-a), 아라미드 섬유가 첨가된 시편은 고분자 물질인 아라미드 섬유의 고분자 전이막 형성에 의해 마모가 진행됨을 예견할 수 있다(8-b).

규소와 금속 산화물이 주성분인 세라믹 섬유가 첨가된

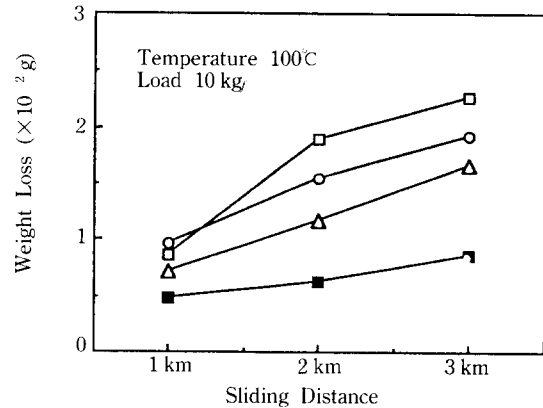


Fig. 6. Effect of the Sliding Distance on the Weight Loss

■: Sample 1 (carbon), △: Sample 2 (aramid), ○: Sample 3 (ceramic), □: Sample 4 (glass)

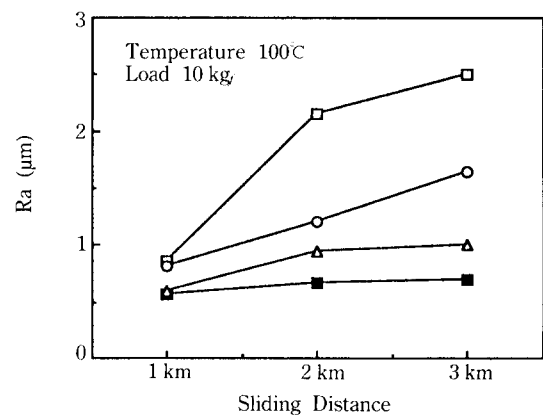


Fig. 7. Effect of the Sliding Distance on the Surface Roughness (Ra)

■: Sample 1 (carbon), △: Sample 2 (aramid), ○: Sample 3 (ceramic), □: Sample 4 (glass)

시편의 마찰면은 섬유의 높은 취성과 연삭에 의한 연삭마모(8-c)가 발생되며, 낮은 탄성계수와 높은 방향성 면성율(aspect ratio)의 유리 섬유가 첨가된 시편의 마찰면은 섬유의 극심한 마모현상(8-d)을 관찰할 수 있으며, 마모된 상대 마찰면에서 응착현상이 관찰되었다.

3-3-2. 광학현미경을 이용한 상대 마찰면의 마모표면 관찰

Fig. 9는 표면온도 100°C, 하중 10 Kg, 및 미끄럼 거리 3 Km의 조건하에서 마찰재 시편들과 마찰시험을 행한 상대 마찰면의 마모표면을 광학현미경으로 관찰한 것이다.

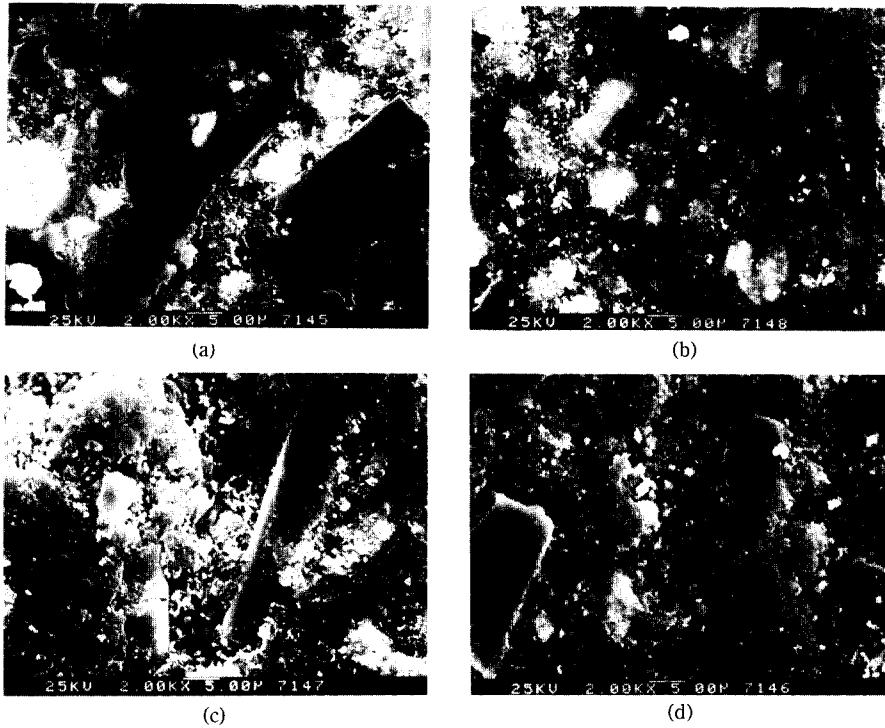


Fig. 8. Scanning Electron Micrograph of the Friction Materials

(a) carbon fiber 50%, (b) aramid fiber 50%, (c) ceramic fiber 50%, (d) glass fiber 50%

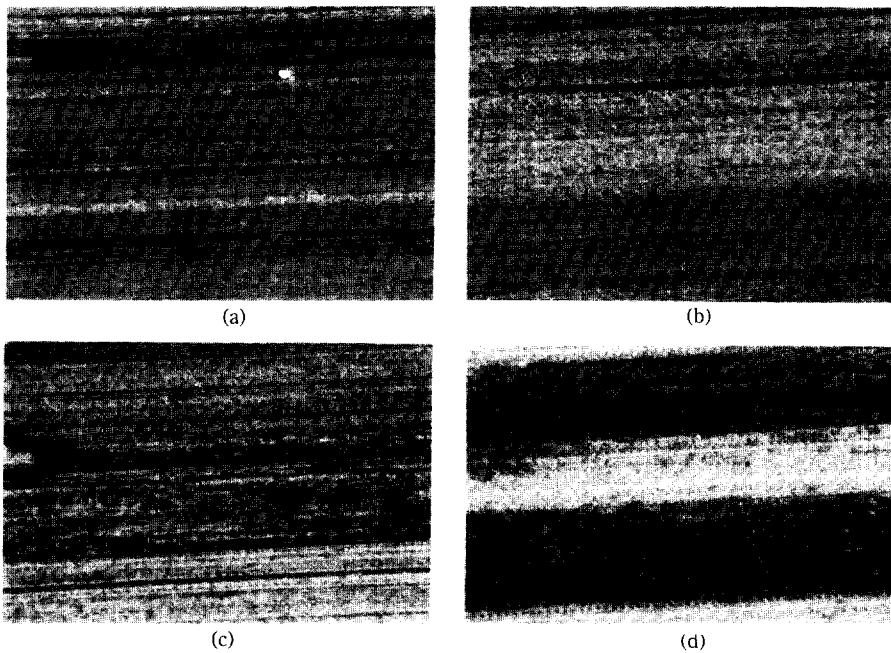


Fig. 9. Optical Photograph of the Back Steel after Friction Test ($\times 100$)

(a) carbon fiber 50%, (b) aramid fiber 50%, (c) ceramic fiber 50%, (d) glass fiber 50%

탄소 섬유가 첨가된 시편의 상대마찰면 마모표면은 탄소 섬유의 흑연 성분에 의한 층상구조막의 형성이 관찰되었으며(9-a), 아라미드 섬유가 첨가된 시편과 접촉된 상대 마찰면의 마모표면은 고분자 전이막의 형성을 알 수 있다(9-b). 세라믹 섬유와 접촉된 상대 마찰면의 마모표면은 섬유에 의해 심한 연삭마모가 관찰되었으며(9-c), 유리 섬유가 첨가된 경우 섬유가 상대 마찰면에 응착되었음을 알 수 있다(9-d).

4. 결 론

비석면 마찰재의 보강소재로 탄소 섬유, 아라미드 섬유, 세라믹 섬유 및 유리 섬유 등을 첨가하여 이들의 마찰·마모특성을 고온에서 비교 검토하였으며, 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도가 증가함에 따라 마찰재의 마찰계수는 약 300 °C 전후에서 급격한 감소현상을 나타내었으며, 이는 첨가된 열경화성 수지의 열분해에 기인된 것이다.

2. 탄소 섬유 보강재의 마찰 및 마모특성은 섬유의 고탄성과 섬유내 흑연성분의 층상구조막 형성에 기인되어 마찰시 우수한 내마모성과 상대 마찰면의 낮은 표면조도 및 일정한 마찰계수 경향을 보였다.

세라믹 섬유와 저탄성 계수의 유리 섬유 보강재는 우수한 마찰특성에 비해 높은 마모량과 상대 마찰면의 높은 표면조도를 나타냈으며, 이는 세라믹 섬유의 연삭마모와 유리 섬유의 응착마모에 기인된 것이다.

아라미드 섬유는 고분자 물질의 응착에 의한 고분자 전이막 형성으로 마찰시 높은 마찰계수와 마모량을 나타내나, 상대 마찰면의 낮은 표면조도를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Automotive Friction Materials Evolution During the Past Decade, wear 100(1984) 503-515.
2. United States Patent 4,278,584.
3. Carbon Fibers and Their Composites. by Erich Pitzer.
4. Non-Asbestos Friction Materials; Mechanical Properties of Binary Systems. by Frank D. Blum, L.R. Dharani.
5. United States Patent 4,374,211
6. Ibid. 4,418,115
7. Ibid. 3,867,491
8. Ibid. 4,457,967
9. Ibid. 4,339,021