

탄소섬유강화 질화규소 세라믹스의 마찰마모 특성

박이현* · 윤한기** · 김부안*** · 박원조****

*동의대학교 대학원 기계공학과

**동의대학교 기계공학부

***부경대학교 재료공학부

****경상대학교 기계항공공학부

Sliding Wear Properties of Carbon Fiber Reinforced Si₃N₄ Ceramics

Yi-Hyun Park*, Han-Ki Yoon**, Bu-Ahn Kim*** AND Won-Jo Park****

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Dong-Eui University, Busan, Korea

**Division of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

***Division of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeong-Sang National University, Tongyoung, Korea

****Division of Material Engineering, Pu-Kyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Engineering ceramics 구조용 세라믹스, wear resistance 마모 저항, carbon short fiber 탄소 단섬유, Hot press method 핫프레스법, Flexural strength 굽힘 강도, Specific modulus 비탄성계수, Friction coefficient 마찰계수, Specific wear loss 비마모량

ABSTRACT: Si₃N₄ composites have been extensively studied for engineering ceramics, because it has excellent room and high temperature strength, wear resistance properties, good resistance to oxidation, and good thermal and chemical stability. In the present work, carbon short fiber reinforced Si₃N₄ ceramics were fabricated by hot press method in N₂ atmosphere at 1800°C using Al₂O₃ and Y₂O₃ as sintering additives. Content of carbon short fiber was 0%, 0.1% and 0.3%. The composites were evaluated in terms of density, flexural strength and elastic modulus through the 3-point bending test at room temperature. Also, The wear behavior was determined by the pin on disk wear tester using silicon nitride ball. Experimental density and flexural strength decreased with increasing content of carbon fiber. But specific modulus increased with increasing content of carbon fiber. In addition, friction coefficient and specific wear loss decreased with increasing content of carbon short fiber by reason of interfacial defects between matrix and fiber.

1. 서 론

파인 세라믹스는 다른 금속이나 유기재료에 비해 고온강도가 높고, 화학적 안정성이 뛰어나다는 장점을 가지고 있다. 따라서 구조용 재료 분야 이외에도 전기·전자, 화학, 광학 및 생체분야와 같이 활용범위가 점점 확대되어 가고 있다. 특히 질화규소 세라믹스의 경우는 타 세라믹스에 비해 파괴인성이 높고 내열충격성이 뛰어나므로 고성능 세라믹 볼베어링 및 세라믹 엔진의 부품 등에 적용되는 대표적인 파인 세라믹스 중 하나이다(김부안 등, 2001, 김대중 등, 2000, 이기현 등, 1993).

대부분의 회전체를 지지하는 구름베어링은 각종 산업기기에 있어서 없어서는 안 되는 아주 중요한 기계요소 중 하나로 최근 산업의 발달로 인해 사용 환경이 매우 열악해 지고 있는 실정이다. 따라서 기존의 베어링 재료로 사용되고 있는 고탄소 크롬베어링강이나 기타 특수강으로는 고속, 고온과 같은 특수환경에 적용을 하기가 곤란하므로 구조용 파인 세라믹스로 주목받고 있

는 질화규소를 이용한 베어링의 사용이 증가하고 있는 추세이다(최인혁 등, 1999).

그러나 세라믹스는 금속결합이 아닌 이온결합이나 공유결합을 이루고 있는 물질이므로 극히 미소한 변형에도 그 내부에 축적되는 에너지가 크며, 인장응력장에서 취성파괴를 일으키게 된다는 결점을 지니고 있다. 따라서 많은 연구자들은 강성, 인성, 상온 및 고온 강도를 향상시키기 위하여 복합재료의 제조에 관한 연구를 활발히 진행 중에 있다(박이현 등, 2003, Y. H. Park, H. K. Yoon and A. Kohyama, 2003).

복합재료의 종류를 살펴보면 입자강화 복합재료, 섬유강화 복합재료, 구조용 복합재료로 구분할 수가 있으며, 섬유강화 복합재료는 다시 장섬유 강화 복합재료, 단섬유 강화 복합재료로 나눌 수가 있다. 단섬유 강화 복합재료는 장섬유 강화 복합재료에 비해 비강도 및 비탄성계수가 높고 여러 형상을 가진 구조물을 제조하는 것이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 단섬유 강화 복합재료 중 정렬된 단섬유 강화 복합재료의 경우는 섬유의 배열 방향에 따라 이방성 특성을 지니는 반면, 정렬되지 않은 단섬유 강화 복합재료는 정렬된 단섬유 강화 복합재료에 비해 섬유의 강화 효과는 좋지 않은 편이나 재료의 성질이 등방성이라는 장점을 가지고 있다(William D. Callister Jr., 2000).

제1저자 박이현 연락처: 부산광역시 부산진구 엄광로 995

051-890-2109 02gm086@deu.ac.kr

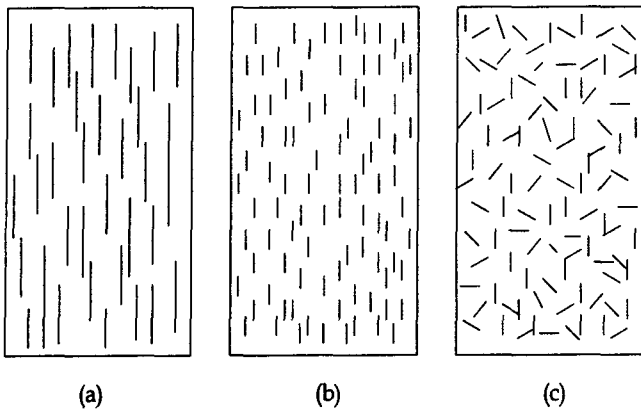


Fig. 1 (a) arranged long fiber (b) arranged short fiber (c) unarranged short fiber

본 연구에서는 구조용 파인 세라믹스의 대표적인 재료인 질화규소에 탄소 섬유를 강화재로 사용하여 정렬되지 않은 단섬유 강화 복합재료를 제조하였고, 복합재료의 제조시 탄소 섬유의 함유량에 따른 굽힘 강도와 마찰 마모 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제조

본 실험에서는 Fig. 1의 (c)와 같은 정렬되지 않은 탄소 단섬유 강화 질화규소 복합재료를 제조하기 위하여 섬유는 Hercules 탄소 섬유를 사용하였으며 길이는 1 mm인 단섬유를 사용하였다. 질화규소는 SN-E10 분말을 사용하였고, 소결소재로는 알루미늄과 이트리아를 사용하였다. 탄소 섬유는 기지재에 비해 0%, 0.1%, 0.3%의 함유량을 가지는 복합재료를 Fig. 2의 Hot Press 장비를 사용하여 가압소결법으로 제조하였다.

탄소 단섬유 강화 질화규소 복합재료는 원형의 그라파이트 금형에 질화규소와 소결조제 그리고 탄소 단섬유가 혼합된 분말을 넣고, 질소 분위기, 1800°C에서 소결되었는데, 실온에서부터 1200°C까지는 약 60°C/min의 승온 속도로 가열되었으며, 질소가스는 400 torr로 가하였고 1200°C에서 1시간 동안 온도를 유지하였다. 그리고 1200°C에서부터 소결온도인 1800°C까지의

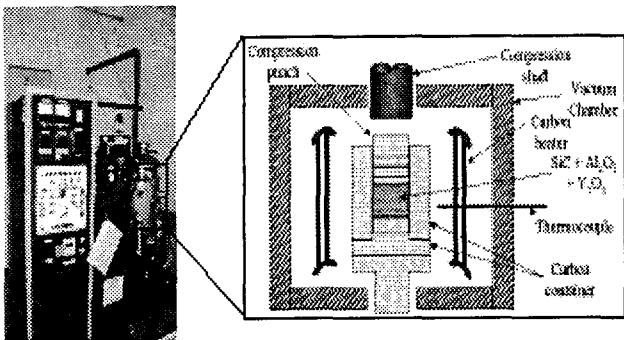


Fig. 2 Picture and schematic diagram of hot-pressing machine

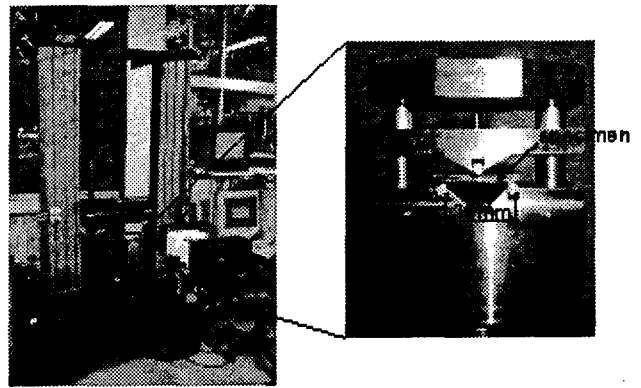


Fig. 3 Material test machine (INSTRON-5581) and 3-point bending jig

승온 속도는 약 30°C/min로 가열하였으며, 질소가스를 700 torr로 가하였고 소결온도에서 2시간 동안 유지하였다. 프레스는 약 7 ton의 압력을 가함으로 해서 Hot Press 과정을 수행하였다.

이러한 Hot Press 과정을 통해서 얻은 원형의 소결체를 절단기를 이용하여 3×4×22 mm³의 치수를 가지는 3점 굽힘 실험용 시험편인 bar 형상으로 절단하였으며, 다이아몬드 슬러리를 이용한 연마기로 표면을 0.1 μm까지 폴리싱 작업을 하였으며, 굽힘 실험시 응력 집중에 의한 강도의 오차를 줄이기 위해 시험편 모서리 부분을 모따기 하였다.

2.2 특성평가

본 연구에서 제조된 정렬되지 않은 탄소 단섬유 강화 질화규소 복합재료의 소결 밀도는 아르키메데스의 원리를 이용하여 측정하였으며, 밀도를 측정한 시험편은 건조기에서 24시간 이상 건조시킨 후 상온에서 3점 굽힘 실험을 통하여 강도 특성을 평가하였다. 강도 특성 평가에 사용한 재료시험기는 Fig. 3에서 보이고 있는 INSTRON 5581을 사용하였다. 시험편 아래쪽 지지대의 길이가 18 mm인 지그를 사용하였으며, 크로스헤드의 스피드는 0.5 mm/min으로 실험하였다. 마찰 마모 특성은 핀 온 디스크 타입의 윤활 마찰 시험기를 사용하여 평가하였으며, 20×20×4 mm³크기의 시험편을 사용하였다. 디스크 휠의 스피드는

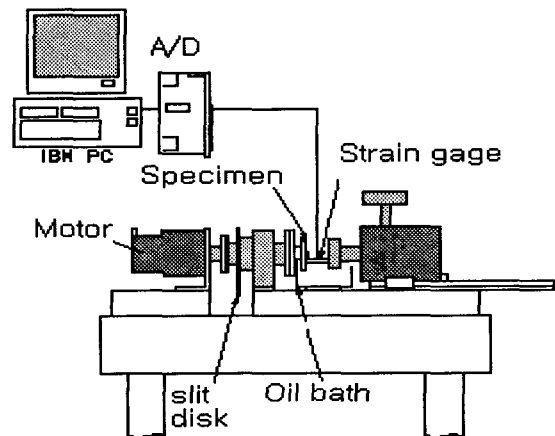


Fig. 4 Schematic diagram of friction wear test machine

14.5 rpm으로 하였으며, 하중은 8 kg과 9 kg의 두 종류를 적용하였고, 총 실험 시간은 6시간으로 하며 2시간 마다 마모량을 측정하였다. 그림 4는 본 연구에서 사용된 윤활 마찰 시험기의 개략도를 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 복합재료의 소결밀도

그림 5는 본 연구에서 제조된 질화규소 복합재료 시험편의 탄소 섬유 함유량에 따른 소결 밀도를 나타내고 있는 그래프이다. x축이 탄소 섬유의 함유량을 표시하고, 왼쪽 y축이 측정된 밀도, 오른쪽 y축이 복합법칙에 의해 계산된 이론밀도와 측정된 밀도의 비를 백분율로 나타낸 상대밀도를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 탄소 섬유의 함유량이 높아질수록 소결밀도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 탄소 섬유의 밀도가 질

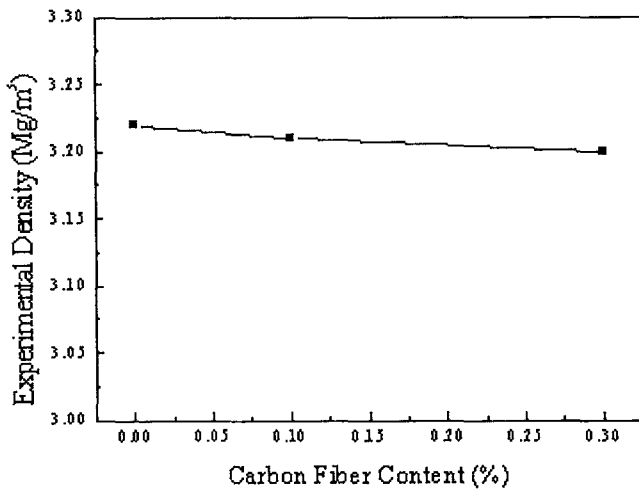


Fig. 5 Experimental density of carbon fiber reinforced Si₃N₄ composites

화규소의 밀도보다 낮기 때문에 함유량이 높아질수록 복합재료의 밀도는 낮아지는 것으로 보인다.

3.2 굽힘 강도 특성

그림 6은 상온에서 측정된 정렬되지 않은 탄소 단섬유 강화 질화규소 복합재료의 탄소 섬유 함유량에 따른 굽힘 강도를 나타내고 있는 그래프이다. 탄소 섬유가 함유되어 있지 않은 질화규소 즉, 탄소 섬유의 함유량이 0%인 시험편의 경우 굽힘 강도가 약 1050 MPa의 값을 나타내고 있으며, 탄소 섬유의 함유량이 높아질수록 굽힘 강도가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 탄소 섬유의 함유량이 0%에서 0.1%로 증가할 때 굽힘 강도의 감소량이 약 300 MPa인 것에 비해 0.1%에서 0.3%로 탄소 섬유의 함유량이 증가할 경우 굽힘 강도의 감소량은 약 100 MPa로 감소되는 폭이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이러한 양상을 보이는 원인으로서는 탄소 섬유가 첨가되지 않은 시험편의 경우에는 주된 파단의 원인이 시험편 내부에 존재하는 결합인 기공, 불순물 그리고 첨가제 등에 의한 것이며, 탄소 섬유가 첨가된 복합재료의 경우에는 섬유와 매트릭스간에 존재하는 계면 결합이 파단의 주된 원인이라서 이와 같이 탄소 단섬유의 함유량에 따라서 강도의 감소량이 차이가 나는 것이라 판단된다.

그림 7은 본 연구에서 제조된 복합재료 시험편의 탄성계수를 나타내고 있는 그래프이다. 탄소 단섬유의 함유량이 0%, 0.1%, 0.3%인 세 가지 종류의 시험편에 대한 탄성계수의 값이 모두 약 175 GPa로 오차 범위 내의 유사한 값을 나타내고 있다. 즉, 본 연구에서 제조된 정렬되지 않은 탄소 단섬유 복합재료의 탄성계수는 탄소 섬유의 함유량과는 관계없이 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나 탄소 섬유의 함유량이 높으면 높을수록 복합재료의 밀도가 낮아진다. 따라서 탄성계수와 밀도의 비를 나타내는 비탄성계수가 높아진다는 것이다. 즉, 이것은 탄소 섬유의 첨가에 의해 탄성계수 특성의 저하를 가져오지 않고 재료의 경량화를 이룰 수 있다는 것을 알 수가 있다.

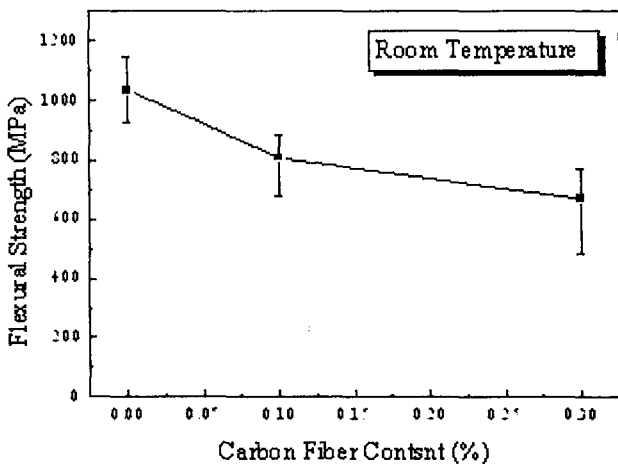


Fig. 6 Relationship between flexural strength and carbon fiber content at room temperature

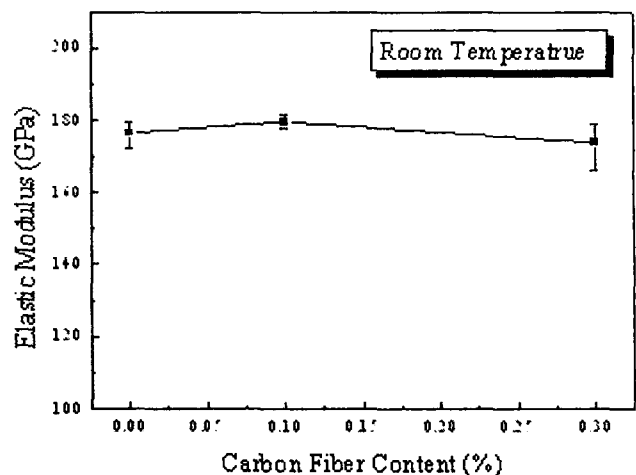
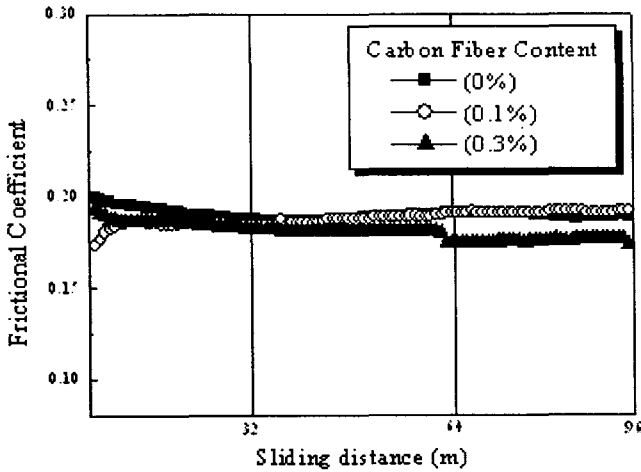


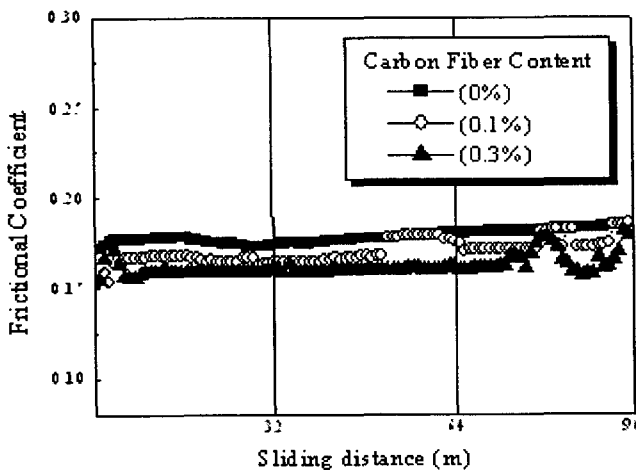
Fig. 7 Relationship between elastic modulus and carbon fiber content at room temperature

3.3 마찰 마모 특성

그림 8은 탄소 단섬유의 함유량이 다른 복합재료를 마찰 마모 실험한 결과로 마찰 거리에 따른 마찰계수의 변화를 각 시험편 별로 보여주고 있는 것이다. (a)는 작용 하중이 8 kg으로 실험한 데이터이며, (b)는 9 kg으로 실험한 데이터이다. (a)와 (b) 모두 탄소 단섬유의 함유량이 높아질수록 마찰계수가 조금씩 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 마찰 거리가 64 m 이상에서는 불안정한 마찰계수가 얻어지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 탄소 섬유를 첨가하기 않은 질화규소 세라믹스에서는 나타나지 않는 현상이다. 즉, 탄소 섬유를 첨가한 복합재료에서만 이러한 현상이 나타나게 되며, (a) 보다는 (b)와 같이 마찰 마모 실험의 하중이 높을수록 심하게 나타나게 되는데, 그 원인으로는 마찰 마모 실험을 실시하면서 시간이 지날수록 섬유가 매트릭스로부터 뿔어져 나가는 현상이 일어나며, 하중이 높을수록 그러한 현상이 더 빈번하게 일어나기 때문이라 생각된다. 그리고 섬유의 함유량이 높을수록 심하게 나타나게 되는데, 그 원인은 강도



(a) load : 8 kg



(b) load : 9 kg

Fig. 8 Friction coefficient of Carbon short fiber reinforced Si_3N_4 composites

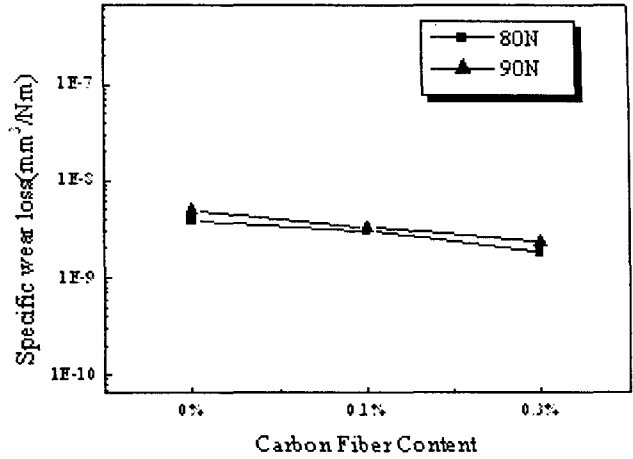


Fig. 9 Relationship between specific wear loss and carbon fiber content

특성과 마찬가지로 섬유의 함유량이 높을수록 매트릭스와 섬유 간의 계면에 존재하는 결합이 많기 때문이라 생각된다.

그림 9는 탄소 단섬유의 함유량에 따른 복합재료의 비마모량을 나타내고 있는 그래프이다. 사각형 데이터는 하중이 8 kg일 때의 마모량을 나타내며, 삼각형은 9 kg의 하중으로 마모실험을 실시한 결과 탄소 섬유의 함유량에 따른 비마모량을 보여주고 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 마모실험 시 하중이 높고, 탄소 단섬유의 함유량이 높을수록 비마모량이 늘어나는 것을 알 수 있다. 이는 그림 8에서도 볼 수 있듯이 탄소 단섬유의 함유량이 높을수록 섬유와 매트릭스간에 존재하는 계면 결합의 양이 많으므로 인해서 매트릭스로부터 탈락되는 섬유의 양이 많으며, 이러한 현상은 하중이 높을수록 빈번하게 일어나기 때문이라 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 정렬되지 않은 탄소 단섬유 강화 질화규소 복합재료를 섬유의 함유량을 달리하여 제조하고, 굽힘강도 및 마모 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 질화규소의 밀도에 비해서 탄소 섬유의 밀도가 낮으므로 탄소 단섬유의 함유량이 높을수록 복합재료의 소결밀도는 낮아졌다.
- (2) 탄소 단섬유가 첨가된 복합재료의 경우 섬유와 매트릭스간의 계면에 존재하는 결합이 재료 내부에 존재하는 기공, 불순물 및 첨가제에 의한 결합보다 파괴에 미치는 영향이 더 크므로 섬유의 함유량이 높을수록 복합재료의 굽힘 강도는 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 탄소의 함유량과는 관계없이 각 복합재료의 탄성계수는 거의 변함이 없었다. 이는 탄소 섬유의 첨가로 인해 비탄성계수를 높일 수 있으므로 재료의 경량화를 이룰 수 있다는 것을 알 수 있었다.

(4) 탄소 단섬유의 함유량이 높을수록 마찰계수가 조금씩 낮아졌다. 또한 복합재료의 섬유 함유량이 높을수록 마찰 마모 실험 중 매트릭스로부터 탈락되는 섬유의 존재로 인하여 마찰계수가 불안정하게 나타났다.

(5) 질화규소 매트릭스와 탄소 단섬유 사이의 계면에서 존재하는 계면 결합으로 섬유의 함유량이 높아질수록 매트릭스로부터 탈락되는 섬유가 많아지기 때문에 복합재료의 비마모량 역시 탄소 섬유의 함유량과 비례관계에 있다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 동의대학교 두뇌한국21 (BK21) 지역 대학 육성 사업단의 지원으로 이루어졌으며, 국립부경대학교와 경상대학교의 공동저자와 공동연구에 의해 이루어졌으므로 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김부안, 문창권 (2001). "세라믹스 파괴인성평가에 있어서 IF법과 AE", 한국해양공학회지, 제15권, 제2호, pp 61-65.
- 김대중, 채영훈, 김석삼 (2000). "고온하에서 질화규소의 트라이볼로지적 특성", 한국윤활학회지, 제16권, 제4호, pp 282-288.
- 최인혁, 박창남, 최현진, 이준근, 신동우 (1999). "질화규소 세라믹볼의 구름피로수명", 한국윤활학회지, 제15권, 제2호, pp 119-126.
- 이기현, 김경웅 (1993). "습도 및 미끄럼 속도에 따른 질화규소의 마찰 마모 특성에 관한 연구", 한국윤활학회지, 제9권, 제2호, pp 63-69.
- 박이현, 윤한기, A. Kohyama (2003). "Hot Press법을 이용한 액상소결 탄화규소의 제조", 대한기계학회 부산지부 2003년도 추계학술대회 논문집, pp 39-44.
- Y. H. Park, H. K. Yoon, S. P. Lee, W. J. Park, Y. B. Choi, S. C. Huh (2003). "Sliding Wear Characteristics and Processing of MoSi₂ Composites", Ceramic Transactions, Vol 153, Advances in Ceramic Matrix Composites IX, The American Ceramic Society, pp 309-316.
- William D. Callister Jr. (2000). "Materials Science and Engineering an Introduction", John Wiley & Sons Inc, Fifth Edition, Chapter 17. Composites, pp 577-622.