

## 論文

## 중속에서의 하이브리드 복합재료의 미끄럼 마찰 및 마모 특성에 관한 연구

정형범\* · 윤재륜\*

**A study on Sliding Friction and Wear Characteristics of Hybrid Composites at Medium Sliding Speed**

H. B. Jung\* and J. R. Youn\*

**ABSTRACT**

Tribological properties of fiber composite materials were measured and wear resistant hybrid structure was proposed based upon the understanding of tribological behavior of the composite materials. Unidirectional composites with glass fibers, carbon fibers, and aramid fibers were tested for tribological properties in order to propose a wear resistant hybrid structure. Hybrid composites which contain carbon and aramid fibers were prepared, the specimens were sliced by a water-jet cutter, and friction and wear properties were measured. An experimental set-up was designed and built for the friction and wear test of the composite specimens. Unidirectional fiber composite and hybrid composite specimens were tested to evaluate the tribological behavior for biomimetic applications. It is observed that the friction and wear behavior of fiber composites depends upon fiber orientation, sliding speed, and type of reinforcing fibers.

## 초 록

하이브리드 복합재료는 구조용으로 개발되어 여러 분야에서 응용되고 있으며, 특히 항공산업, 우주산업, 스포츠 레저산업, 자동차산업 등에서 그 응용 분야를 확대하고 있다. 섬유 보강 고분자 복합재료는 비강도, 비강성이 높으며, 물리 화학적 성질, 동적 특성, 트라이볼로지 특성 등이 우수하여 고부가가치를 가지는 부품이나 성형물을 생산할 수 있다. 이러한 하이브리드 복합재료는 치차, 베어링, 캠, 씨일 등의 마찰부품으로도 사용가능성이 매우 높으며, 하이브리드 복합재료의 구조를 적절히 설계함으로써 일정한 하중에 견디며, 마찰마모특성이 뛰어난 바이오미메틱 재료로서 사용될 수 있다.

복합재료의 마찰 및 마모 특성을 규명하기 위하여 마찰 및 마모시험기를 설계하여 제작한 후 일방향 섬유복합재료의 마찰 및 마모 성질을 측정하였다. 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유 등이 포함된 일방향 복합재료의 트라이볼로지 특성을 규명하여 이를 바탕으로 최소마모율이 예상되는 하이브리드 복합재료의 구조를 제안하기 위하여 유리섬유복합재료, 탄소섬유 복합재료, 아라미드섬유 복합재료의 마찰 및 마모특성을 측정하였다. 그 결과 섬유복합재료의 마찰 및 마모성질은 섬유의 배향과 활주속도 및 보강섬유의 종류에 따라 변화함을 알았다. 각 시편에 대한 실험 결과를 분석하여, 탄소섬유와 아라미드섬유가 하이브리드화 된 복합재료의 구조를 제안하고 그 시편을 제작하여 실험하였고 결과를 분석하였다.

\*서울대학교 섬유고분자공학과

### 1. 서 론

고분자 및 섬유보강 고분자 복합재료의 산업에의 응용은 최근 수십 년간 괄목할만한 성장을 하였다. 이러한 신소재가 산업적 공학적 재료로서 널리 쓰이는 이유는 높은 비강도, 높은 비강성, 그리고 섬유와 모재의 조합, 섬유의 종류와 부피분율, 섬유배향, 복합재료의 하이브리드화, 공정조건 등을 제어함으로써 최종 복합재료성형물의 여러 특성인, 물리적 성질, 화학적 성질, 기계적 성질, 동적 성질, 트라이볼로지 특성 등을 조절할 수 있기 때문이다. 이러한 복합재료 부품들은 충격과 진동을 감쇠시키고, 부식을 방지하며 정형가공이 용이하므로 항공산업, 우주산업, 자동차산업, 전자산업 등의 소재로서 매우 훌륭하다. 특히 하이브리드 복합재료는 요구되는 기계적 특성을 만족시킬 수 있으므로 항공산업, 스포츠레저산업, 우주산업 등 고부가가치 산업 등에 적절하다. 고분자복합재료는 치차, 캠, 바퀴, 추진날개, 브레이크, 클러치, 씰(seal), 컨베이어, 이송벨트, 부시, 베어링 등 기계부품에 응용되며, 배관, 수송관, 요동용기, 분리기, 열압축기 등 화학공업 시설부품이나 농업, 광업, 건축분야에도 널리 활용되며 그 활용범위가 계속 확대되고 있는 추세이다.

복합재료는 구조용으로 많이 개발되어 왔으나, 베어링, 씰 등 마찰과 마모에 노출되는 여러 기계 부품에도 응용되어진다. 예를 들어 자동차 엔진이나 선박용 소형엔진의 부품에도 복합재료가 쓰이며 변속 치차 등에도 사용된다. 재래의 방법으로는 윤활이 용이하지 않거나 바람직하지 않은 경우들, 즉 베어링 하중이 크고 속도가 낮은 곳, 유지보수가 어렵거나 불가능한 곳, 윤활유가 식품이나 의류 같은 제품을 오염시킬 수 있는 곳, 작은 하중이 요구되는 경우 등의 치차나, 베어링, 씰 등의 재료로서 복합재료가 사용되며, 하이브리드 복합재료의 구조를 적절히 설계함으로써 그 응용분야를 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

고분자 재료들은 무게가 가볍고, 화학적으로 안정되어 있으며, 금속부품과 비교하여 소음이 적고 마찰계수가 낮으므로 마찰 기계 요소로서 사용되며 이들에 다양한 첨가제를 혼합시켜 기계적 강도나 마찰, 마모 등을 향상시킨다[1]. 예를 들어 베어링재료로서 사용 가능한 다양한 복합재료들이 있으며 이들 재료에는 흑연, 이황화 몰리브데늄( $MoS_2$ ), PTFE입자 등의 고체윤활제를 첨가하여 마찰특성을 향상시킨다. 그러나 이러한 고체 윤활제들은 상대 마찰 면인 금속표면에 잘 옮겨

붙으며, 요구되는 부피 분율이 10%이상이어서 재료의 기계적 강도를 저하시킨다. 경우에 따라서는 열전도도를 향상시키기 위하여, 청동, 은, 흑연가루 등이 첨가되기도 한다.

1960년대 말부터 사용되기 시작한 탄소섬유는 고분자의 보강재로 널리 사용되며, 비강도, 비강성, 열팽창성, 피로, 내식성 등에 있어 금속을 비롯한 다른 재료들에 비하여 월등한 성질을 갖고 있다. 탄소섬유는 보강재의 역할도 하지만 흑연성분이 있어 고체윤활작용도 할 수 있고, 열전도성도 우수하여 윤활에의 응용 가능성을 고루 갖추고 있다. 이러한 탄소섬유 보강 복합재료의 마모특성을 평가하고 연구하기 위하여 여러 조건하에서 많은 연구 결과가 보고되었다[2-9]. 예를 들어 미끄럼 마모(Sliding wear), 연삭 마모(Abrasive wear), 침식 마모(Erosive wear), 프레팅 마모(Fretting wear)등의 조건하에서 복합재료의 마모 거동 등에 대한 실험적 및 이론적 연구들이 수행되어 왔다. 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드(Aramid)섬유 등이 포함된 복합재료의 마찰 및 마모거동 등에 대하여 폭넓게 연구되어 왔으나[1-22] 하이브리드 복합재료에 관한 연구는 보고된 바가 거의 없는 실정이다.

섬유보강 복합재료의 마찰과 마모에 영향을 주는 인자들은 상대마찰면의 경도, 표면 거칠기, 재질, 섬유의 종류, 그리고 섬유배열방향 등이 있다. 섬유의 구조 및 배열방향과 상대면에 대한 배열상태가 마모특성에 큰 영향을 주며 특히 하이브리드 복합재료의 경우에는 가능한 섬유구조와 분율비, 각 섬유들의 배열방향 등 그 조합이 매우 많기 때문에 조직적인 연구와 실험이 요구된다. 일 방향 섬유복합재료의 경우에는 섬유가 마찰방향과 평행으로 배향되어 있으면 길이방향(longitudinal direction), 마찰면과 평행이나 마찰방향과 수직이면 횡단 방향(transverse direction), 마찰면 및 마찰방향에 수직으로 배향되어 있으면 수직방향(normal direction)이라 정의하여 각 방향에 따른 마찰 및 마모 거동의 변화를 연구하여 왔다.

탄소섬유 복합재료의 마찰 및 마모 특성에 대한 연구는 Lancaster[2]를 비롯한 여러 연구자들에 의하여 광범위하게 이루어 졌다. Lancaster는 고탄성 탄소섬유 복합재료의 원통형 시편을 고정시키고, 이에 대하여 연강의 원통형 시편을 직각으로 설치하여 회전시켰다. 따라서 마모량이 증가함에 따라 겉보기 마찰면적은 증가하였다. 마찰조건은 수직하중 1.2kgf, 마찰속도를 0.54m/s로 하였는데 마찰방향에 대한 섬유방향의 영

향에 관한 실험결과 수직방향의 마모율이 가장 낮았고 길이방향의 마모율이 가장 높았다. Giltrow와 Lancaster[3]는 여러 열경화성 수지를 고탄성 탄소섬유와 고강도 탄소섬유로 보강한 복합재료의 원기둥형 시편을 고정시키고, 여러 가지 상대 마찰면 재료의 원기둥형 시편을 직각으로 설치하여 회전시키거나, 원뿔형의 복합 재료 시편을 고정시키고 원판형의 상대 마찰면을 회전시켜 마모실험 하였다. 마찰 조건은 수직하중이 1.2kg이거나 4kg이었고, 마찰속도는 0.54m/s 이었다. 그들에 의하면 상대 마찰면에서의 물질이착막 (transfer film)형성 정도, 복합재료 내부의 섬유유형, 상대 마찰면 물질의 구성과 강도, 그리고 마모 상태들이 마모율에 상당한 영향을 준다고 하였다. Berg, Bartra와 Tirosh[4]는 고탄성 탄소 섬유와 고강도 탄소 섬유를 함유하는 에폭시 매트릭스 복합재료를 시편으로 하고, 열처리 경화시킨 베어링 강(52100steel)을 상대 마찰면으로 하여, 수직 하중 1-5kg와 마찰속도 0.005-0.1m/s의 마찰 조건하에서 실험하였다. 이 실험에서 섬유들은 마찰면에 평행하였다. 고강도 탄소 섬유 복합재료의 경우, 수직하중 1kg 이하에서는 마모가 무시할 만 하였으나, 그 이상에서는 상대 마찰면에 심한 연삭 마모를 일으켰으며 마모율도 증가하였다. 또한 고탄성 탄소 섬유 복합재료의 경우에는 상대 마찰면에 물질이착막을 형성하였으며, 이것이 복합재료와 상대 마찰면의 마모를 방지한다고 보고하였다.

Giltrow[5]는 온도의 영향을 조사하기 위하여 고탄성 탄소섬유와 고강도 탄소섬유를 함유하는 고분자 복합재료들과 여러 재질의 상대 마찰면을 이용하여 수직하중 1.2kg와 비교적 저속의 마찰속도 0.53m/s의 조건하에서 실험하였다. 흑연 탄소의 낮은 마찰과 마모는 표면에 흡착한 수분에 의존하는 것으로 알려져 있다. 실험 결과 상대 마찰면 재료의 전체 온도(bulk temperature)가 100℃이상일 경우 마찰과 마모는 매트릭스 레진, 섬유의 종류, 방향 등과 무관하며, 고탄성 탄소섬유 복합재료의 마모율이 급격히 증가하여 고강도 탄소섬유(high strength, type II) 복합재료에 비해 우월했던 내마모성이 사라졌다. Tsukizoe와 Ohmae[6]는 고탄성 탄소섬유와 고강도 탄소 섬유들을 여러 고분자들에 일방향으로 배열시킨 복합 재료의 직사각형 시편 여러 개를 원주 방향으로 등간격이 되도록 고정 배치시키고, 상대 마찰면으로는 풀립 처리된 환형의 0.25% 탄소강을 이용하여 회전시켰다. 마찰조건으로는 수직하중 460kg(평균 수직압력 83.3 MPa), 마찰속도

0.33-0.83m/s의 조건하에서 실험하였다. 고탄성 탄소 섬유 복합 재료의 경우, 최소 마모율은 횡단 방향이었고, 최대 마모율은 길이방향이었다. 반면에, 고강도 탄소 섬유 복합재료의 경우는 그와 반대이었다.

Sung과 Suh[7]는 고강도 탄소 섬유, 유리 섬유, 아라미드 섬유 등을 에폭시에 일방향으로 배열시킨 복합재료의 직육면체 시편을 고정시키고, 이에 대하여 베어링 강(ANSI 52100)의 링형 원주면을 상대마찰면으로 하여 회전시키는 핀온링(pin-on-ring)형태의 마찰 실험을 하였다. 마찰 조건은 수직하중 1kg(평균 수직 압력 0.243MPa), 마찰 속도 2.54m/s의 조건하에서 실험하였다. 그 실험에 의하면, 고강도 탄소 섬유 복합재료의 최소 마모는 수직 방향에서 일어났고, 최대 마모는 횡단 방향에서 나타났다. Fahmy와 West[8]는 고강도 탄소 섬유 복합재료의 마모 거동에 관한 연구에서, 이 복합재료의 마모율이 섬유 방향에 강하게 의존한다는 것을 보여주었다. 최소 마모는 마찰면과 섬유가 45도의 각도를 이루면서, 마찰면에 투영된 섬유의 배열 방향이 미끄럼 방향과 같은, 끄는 형태일 때 발생하였다. Shim, Kwon과 Youn[9]은 일방향 고탄성 탄소 섬유 에폭시 복합재료 시편 핀과 원판형의 스테인레스 강(SUS 304)을 상대마찰면으로 구성한 핀-온-디스크 마찰 시험기를 사용하였다. 수직 하중 19.6N과 48N, 마찰 속도 0.5m/s와 2.5m/s의 조건에서 실험한 결과, 조건에 따라 각 섬유 배열들의 마찰 및 마모 순위가 다소 변동이 있었으나 대체로 횡단방향에서의 마찰과 마모가 가장 낮게 나타났으며, 수직 방향이 가장 크게 나타났다. 이와 함께, 마찰면의 현미경 관찰 및 섬유 배열의 구조에 대한 고찰을 통하여 횡단 방향에서 마모율이 가장 낮은 것은 상대 마찰면에 물질이착막이 잘 생성되기 때문이며, 수직 방향에서 마모율이 가장 높은 것은 상대 마찰면이 손상을 많이 입기 때문임을 밝혔다. Gopal, Dharani 및 Blum[10]등은 유리섬유/케블라 펄프 하이브리드 복합재료와 스틸섬유/케블라 펄프 하이브리드 복합재료의 트라이볼로지 특성을 연구하였으며, 하이브리드 화에 의한 특성변화를 관찰하였다.

이상과 같이 탄소섬유 복합재료의 마찰 및 마모특성에 관한 연구 보고가 가장 많으며 하이브리드 복합재료의 트라이볼로지 특성에 대한 연구논문은 찾기 어려운 실정이다. 하이브리드 복합재료에는 탄소섬유, 유리 섬유, 아라미드섬유, 스펙트라 섬유 등 여러 종류의 섬유가 여러 형태와 배열 상태 및 분율을 가지고 포함되

어 있을 수 있으므로 이러한 섬유가 각각 그 형태와 배열에 따라 마모거동에 미치는 영향을 규명하고, 요구되는 기계적 성질을 만족시키며 최적의 내마모성을 가지는 하이브리드 복합재료의 구조를 제안하기 위하여서는 하이브리드 복합재료의 마찰 및 마모 특성을 연구하여야 한다. 복합재료의 마모 특성은 보강 섬유의 종류, 상대 마찰면의 종류와 상태, 마찰조건 등에 민감하다. 일방향 탄소 섬유 복합재료의 마찰 및 마모거동에 대한 여러 연구에서 알 수 있듯이 복합재료의 마찰 및 마모 현상은 매우 복잡하여 마찰되는 재료, 조건, 환경 등에 따라 그 메커니즘도 변화하며, 이를 설명할 수 있는 적절한 모델이 요구된다. 미래의 마찰재료(friction material)로서 하이브리드 복합재료의 전망은 매우 밝으며 하이브리드 복합재료의 트라이볼로지 특성에 대한 많은 연구가 필요하다.

## 2. 실험

### 2.1. 시편의 제작

본 연구에서는 내마모성이 뛰어난 하이브리드 복합재료를 설계하기 위하여 필요한 기초연구를 수행할 목적으로 다양한 종류의 섬유를 일방향으로 배향시켜 제작한 복합재료의 트라이볼로지 연구를 수행하였고 특히 마모성질이 우수한 것으로 판명된 탄소섬유와 아라미드섬유의 하이브리드 복합재료를 중점적으로 실험하였다. 모재로는 열경화성 수지인 에폭시를 사용하였는데, 그 이유는 열경화성 수지는 가교 결합으로 인해 강성이 크고, 열가소성 수지보다 높은 연화점과 보다 좋은 크립 성질을 가지므로 높은 온도에서도 사용될 수 있으며, 화학적 안정성도 뛰어나기 때문이다. 특히 열경화성 수지 중에서도 에폭시는 다른 열경화성 수지에 비해 여러 성질이 뛰어나므로 본 연구에서는 에폭시를 복합재료 시편의 모재로 사용하였다. 보강재로는 유리 섬유, 아라미드 섬유, 그리고 고탄성 탄소 섬유를 사용하였으며 사용된 재료의 물성은 Table 1에 정리하였다.

모재인 에폭시 수지와 보강재인 여러 섬유들을 사용하여 판형 복합재료를 압축성형으로 가공한 후 다이아몬드 톱과 water jet으로 절단하여 시편을 준비하였다. 마찰 방향과 복합재료의 섬유 배열 방향에 따른 마찰 및 마모 메커니즘의 변화를 알기 위하여, Fig. 1에서 정의된 바와 같이 대표적인 세 가지 섬유방향의 시편들을 복합재료 판재로부터 제작하였다. 본 연구에서는

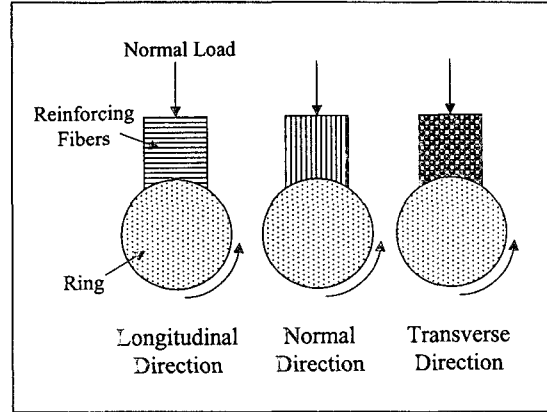


Fig. 1. Sliding directions adopted for the investigation.

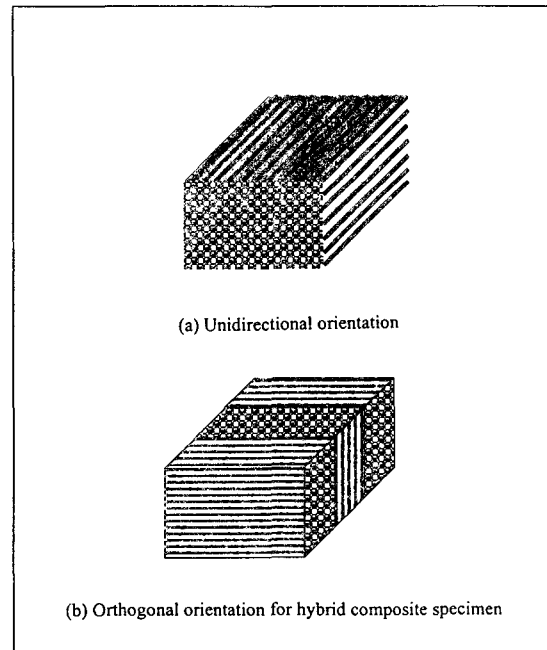


Fig. 2. Hybrid composite specimens with specific fiber orientations used for friction and wear tests.

길이 방향(longitudinal), 횡단 방향(transverse), 그리고 수직 방향(normal) 시편을 준비하였다. 탄소 섬유와 아라미드섬유의 하이브리드 복합재료 시편도 Fig. 2에 보여준 바와 같이 2가지 섬유배열 상태를 가지도록 제작하였다.

상대 마찰면의 재료로서는 스테인레스 강을 사용했으며, 상대 마찰면인 링 시편의 크기는 외경 180 mm, 두께 30 mm로 기계 가공되었으며, 이 링은 선반 스피

들에 연결된 축에 고정되었다. 상대 마찰면은 매 실험마다 SiC(Silicone Carbide)연마지로 무 방향성을 갖도록 연마하였으며, 복합재료 시편과 상대 마찰면은 건조 마찰을 하도록 하기 위하여 아세톤으로 기름기를 제거하였다.

## 2.2. 마찰 및 마모 시험기의 제작

트라이볼로지 특성을 측정하기 위하여 핀 온 링(Pin-on-ring)형태의 마찰 및 마모시험기를 Fig. 3에 보여준 바와 같이 제작하였다. 선반을 개조하여 척에 지름이 33mm 길이가 570mm인 축을 설치하고 이 축의 중앙부분에 링을 두 개 고정시켜 동시에 2개의 시편을 실험할 수 있는 장치를 개발하였다. 핀과 링의 접촉부에 수직 하중이 걸려 있는 경우, 링이 회전하면 핀에 마찰력이 발생하여 로드 셀에 동일한 힘을 전달함으로써 이 마찰력의 크기를 측정할 수 있도록 설계하였다.

이 실험에서 사용된 로드셀은 봉신 로드셀 주식회사 제품인 스트레인 게이지 식의 굽힘 보 형이며 재질은 알루미늄이고 용량은 6kgf이었다. 로드 셀로부터 나오는 밀리볼트 크기의 전기 신호는 전압 증폭기로 800 내지 1000배로 증폭하여 5V이하의 전압신호로 변환되며, 이 증폭된 전기 신호는 아날로그/디지털 변환기(A/D converter)에 의하여 수치화 되어 PC에 입력되었다. 이 로드 셀에 추의 무게와 같이 크기를 아는 힘을 가한 후, 이들에 대응하는 값들을 전압 증폭기와 A/D변환기와 컴퓨터를 통하여 얻은 후, 이것으로 캘리브레이션을 행하였다. 따라서 실험 중에 발생하는 미지의 마찰력은 이 시스템에 의하여 쉽게 구할 수가 있다. 또한 수직 하중은 기지의 값이므로 이 두 값으로부터

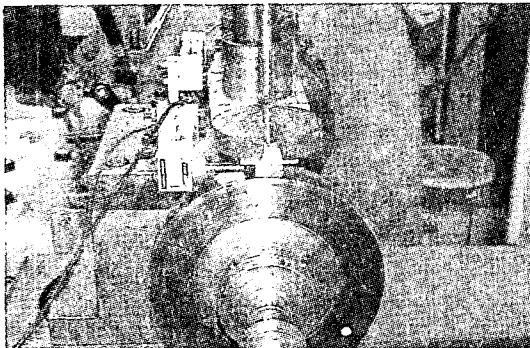


Fig. 3. Sliding apparatus built and employed for the tribological experiments

마찰 계수를 구할 수가 있다.

## 2.3. 마찰 및 마모 실험

마찰 실험은 공기 중에서 실시되었고, 온도는 19-24℃로 유지되었으며, 상대 습도는 20-35% 였다. 트라이볼로지 실험은 온도와 습도에 크게 영향을 받지 않지만 이와 같은 작은 변동은 실험 결과에 거의 영향을 끼치지 않는다. 수직 하중은 2kgf(19.6N)로 고정하였고, 마찰 속력은 1.04m/s(110rpm)와 4.08m/s(433rpm)를 사용하여 섬유배열 방향 이외에도 마찰 속력에 따른 영향도 관찰하였으며 실험에서 사용한 속력을 다른 연구자들[2-11]과 비교하면 증속의 조건이라 할 수 있다.

실험 전후의 복합 재료 시편의 무게는 0.01mg 크기까지의 정밀도를 갖는 전자저울인 Sartorius社의 BP210D를 이용하여 측정하였고, 이것을 통해 실험 전후의 시편의 무게 차를 구했으며, 1.04m/s의 속력으로 실험할 경우 24시간 동안 실험을 수행하였으므로 전체 마찰 거리는 89.9km가 되었다. 한편 다른 마찰 속력의 경우 전체 마찰 거리가 89.9km가 되도록 실험 시간을 조정하였다. 실험에 사용된 시편은 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유가 일방향으로 보강된 복합재료와 탄소/아라미드섬유의 하이브리드 복합재료 등 5가지의 시편을 제작하여 사용하였으며, 3가지 방향과 2가지 속도의 조건을 채택하여 한 조건 당 6번 이상의 실험을 수행하였으며 총 180번 이상의 실험을 통하여 데이터를 측정하여 일관성 있는 결과를 획득하였다. 마찰계수는 마찰력을 측정하여 계산하였으며, 초기의 불안정한 상태가 경과한 후 전체 실험에 걸쳐서 측정된 마찰력의 평균값을 구하여 마찰계수를 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

일방향 섬유복합재료와 탄소/아라미드하이브리드 복합재료의 마찰 및 마모실험 결과를 Fig. 4부터 Fig. 8에 도시하였다. 각각 다른 미끄럼 속도에서의 마찰 계수와 마모인자를 복합재료의 종류와 섬유배열방향에 따라 그래프로 나타내었다.

### 3.1. 유리섬유 강화 복합재료

본 연구에서 사용된 유리섬유는 Owens Corning Fiberglass Corporation에서 만든 S-2유리 섬유이다. 이 섬유는 일반적으로 사용되는 유리 섬유인 E-

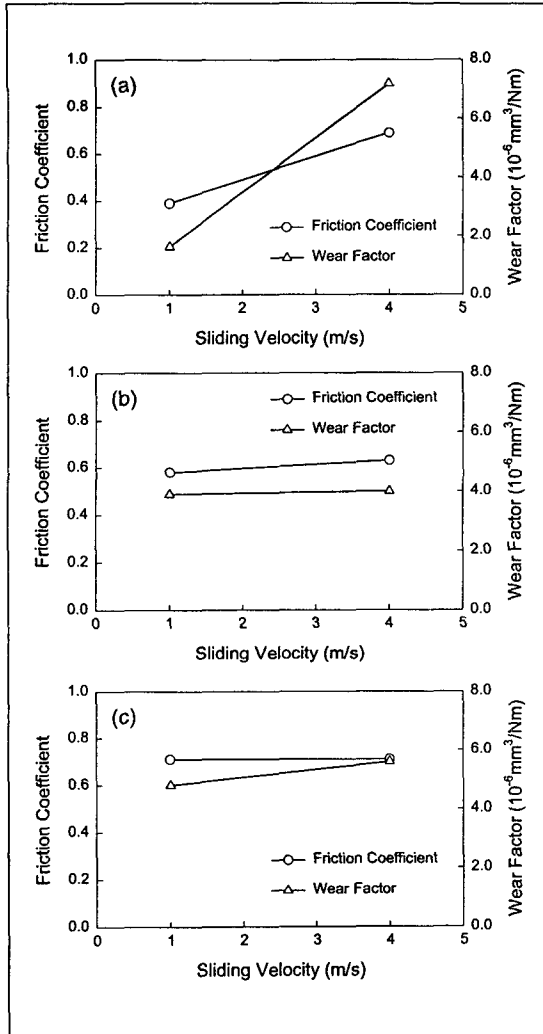


Fig. 4. Friction and wear behavior of unidirectional glass fiber composites at different sliding speeds ; (a) normal direction, (b) transverse direction, (c) longitudinal direction.

유리 섬유보다 큰 강성과 강도를 가지며, 또한 높은 열에 대해서도 그 향상된 성질을 유지한다. 사용된 에폭시 수지는 국도 화학에서 YD-128라는 상품명으로 만든 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)로써 에폭시 등가질량은 187이고, 함유량은 5.26~5.43 eq/kg이다. 비중은 20℃에서 1.17이며, 유리 전이 온도는 156℃이다. 경화제(curing agent)로는 aromatic amine인 4-4' diamino diphenyl methane(DDM)을 사용했으며, 이것의 분자량은 198.8이며, 용융점은

92℃이다.

실험결과를 보면 유리섬유 복합재료는 다른 탄소섬유나 아라미드섬유 복합재료에 비해 상당히 마모 성질이 떨어짐을 알 수가 있었으며, 마모량, 마찰계수가 상대적으로 높은 경향을 보였다. 특히 4.08m/s 고속의 마찰속력 실험 조건하에서 수직 방향의 시편이 높은 마모율을 보였다. 이는 Fig. 4에서 보여준 바와 같이 유리섬유 복합재료의 마찰계수가 매우 높으므로 마찰 마모 실험시 시편에 가해지는 응력이 매우 클 것이기 때문이다. 또한 취성이 강한 유리섬유가 쉽게 파괴되고 계면에서의 분리현상도 클 것으로 기대된다. 유리섬유 복합재료의 경우 길이방향에서도 마찰계수가 매우 크나, 4.08m/s의 속력에서는 마모율이 수직 방향보다 작고 1.04m/s의 속력에서는 수직 방향보다 크게 나타났다.

일반적으로 유리섬유는 본 연구의 관심 재료인 다른 두 종류의 섬유, 즉 아라미드 섬유와 탄소섬유에 비해 마모특성이 떨어진다고 익히 알려져 있으며, 본 실험에서도 그것이 증명되었다. 하지만, 유리섬유는 다른 두 섬유들에 비해 가격이 매우 저렴하다는 장점을 지닌다. 따라서 아라미드나 탄소 섬유만으로 강화시킨 복합 재료를 만들기보다는 값이 저렴한 유리섬유를 함께 사용함으로써 하이브리드 화에 의한 상승 작용을 얻을 수 있다. 실제적으로 이에 대한 실험을 Tsukizoe와 Ohmae [13]가 수행하였는데, 이들은 40%의 부피분율을 갖는 고탄성 탄소섬유 에폭시 복합재료와 40%의 고탄성 탄소섬유와 약간의 유리섬유가 하이브리드화된 에폭시 복합 재료에 대해 마모 시험을 하였으며, 하이브리드 복합 재료가 마모 성능이 더 뛰어나다고 밝혀졌다. 따라서 중속 이하에서 사용되며 비교적 높은 마찰 계수가 요구되고 내마모성이 필요한 경우에 유리섬유를 포함하는 하이브리드 복합재료를 설계하여 요구조건을 만족시키는 복합재료 부품을 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.2. 아라미드섬유 강화 복합재료

아라미드섬유 강화 복합재료를 제조함에 있어 모재는 유리섬유 복합재료 제작시 사용한 것과 같은 에폭시와 경화제를 사용했으며, 섬유는 Du Pont사에서 제작한 Kevlar-49를 사용하여 유압프레스를 이용한 압축성형 방법으로 시편을 제조하였다. 아라미드 섬유는 다른 고분자 물질에 비해 높은 온도에서 좋은 물성을 갖는다. 약 360℃의 유리전이온도를 가지며, 잘 타지 않고 나일론처럼 용융되지도 않는다. 탄화(carbonization)로 인한 성능의 손실은 약 425℃에서 일어나

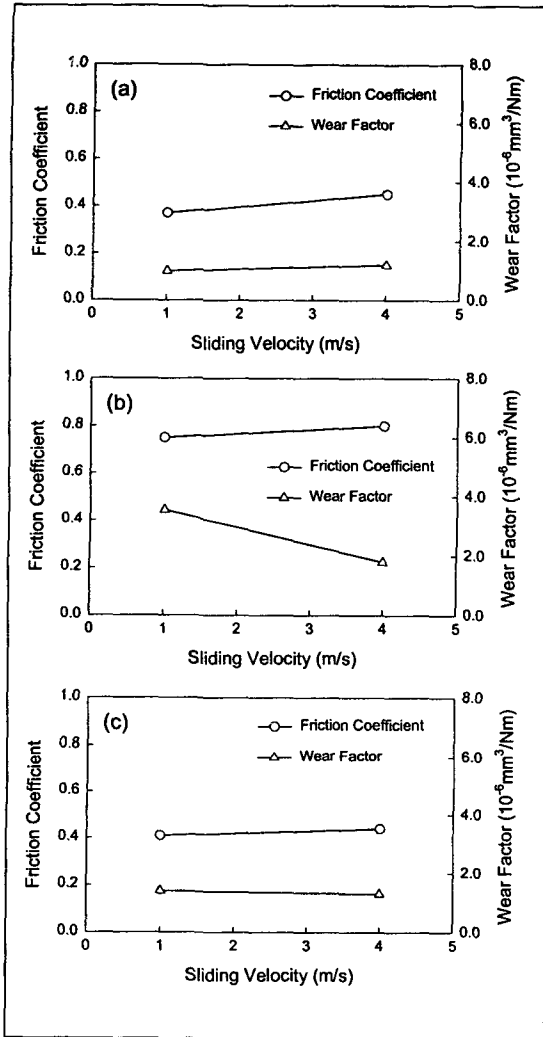


Fig. 5. Friction and wear behavior of unidirectional aramid fiber composites at different sliding speeds; (a) normal direction, (b) transverse direction, (c) longitudinal direction.

나,  $300^{\circ}\text{C}$ 에서도 제한된 시간동안은 사용될 수 있다. 열 팽창 계수(약  $4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )가 작기 때문에 치수 안정성이 좋다.

아라미드섬유가 다른 합성섬유에 비하여 열적 성질이 뛰어나기 때문에 본 실험에서도 마모 중에 발생하는 열을 고려하여 아라미드 섬유를 보강재 중의 하나로 선택하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 다른 섬유 배향에 비해 횡단방향에서의 마모 성질이 떨어지며 이는 매우 높은 마찰계수에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 5

에서 주시할 수 있는 바와 같이 횡단방향에서의 마찰계수는 다른 시편이나 실험조건과 비교할 때 최대가 되었으며, 마찰력이 클 것이므로 이 경우에 작용하는 높은 응력으로 인하여 섬유와 모재의 파리가 활발하게 일어날 것으로 생각된다. 하이브리드 복합재료를 제작하여 아라미드섬유의 횡단방향으로 실험을 할 경우에는 마찰력이 감소하고 다른 방향으로의 섬유가 복합재료의 강도를 유지시킴으로써 마모가 감소될 것으로 기대된다. 다른 종류의 섬유가 강화된 복합재료의 경우 마찰 속력이 증가하면 마모인자가 증가하는 양상을 보이나 아라미드섬유의 경우는 저속( $1.04\text{m/s}$ )에서의 실험결과와 중속( $4.08\text{m/s}$ )에서의 실험 결과를 비교하면 길이 방향과 횡단 방향의 경우는 오히려 마모량이 감소하는 현상을 보였다. 특히 횡단 방향의 경우는 중속에서 마찰계수가 약간 증가하였음에도 불구하고 마모가 크게 감소하였음을 알 수 있으며 아라미드 복합재료의 이러한 거동은 매우 특이하다. Tsukizoe와 Ohmae [23]의 연구에 의하면 아라미드 복합재료는 횡단방향에서 미끄럼속도에 민감하게 반응을 보이고 있으나  $0.5$ 에서  $1.17\text{m/s}$ 의 저속에서만 실험을 하였으므로 본 연구결과와 비교하기 어려운 상황이며 이에 대한 많은 연구가 필요하다. 이러한 현상을 적절히 응용함으로써 아라미드섬유의 하이브리드 화를 통하여 마찰속도가 증가하여도 내마모성을 증가시킬 수 있는 복합재료를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.3. 탄소섬유 강화 복합재료

본 연구에서 사용된 탄소섬유는 Toray사의 M40라는 고탄성 탄소섬유이며 모재는 에폭시를 이용하였다. 본 연구에서 제작한 시편 중 탄소섬유 복합재료는 상당히 우수한 트라이볼로지 특성을 보여 주었는데 비교적 높은 섬유의 부피분율(59%) 및 마모 과정 중에 발생하는 물질이착막이 원인으로 여겨진다. 물질이착막 속에 존재하는 탄소성분이 고체 윤활제로 작용하여 마찰계수와 마모인자가 최소가 되는 경향을 보여주었다.

실험결과를 살펴보면 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 활주속도에 관계없이 저속에서 고속까지 길이방향에서 최소의 마모인자를 가지며 수직방향에서 마모가 약간 큰 경향을 나타내었다. 속도에 따라 횡단방향의 마모인자가 길이방향과 같거나 약간 크게 나타났다. 마찰계수도 섬유배향에 따라 마모인자와 거의 동일한 경향을 보였고 그 경향이 매우 예측 가능하므로 복합재료의 하이브리드 화에 적용이 가능할 것이다. 이제까지의 실

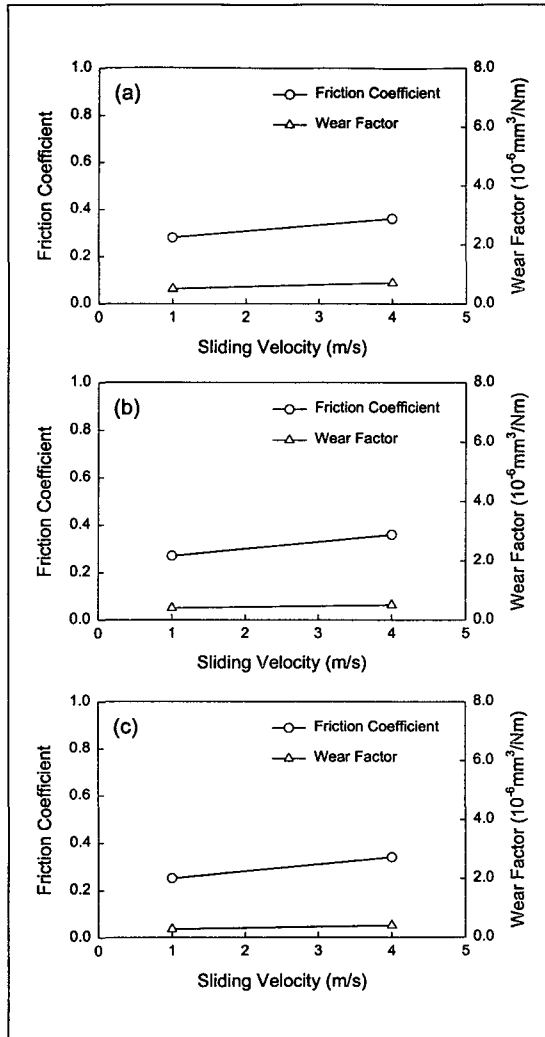


Fig. 6. Friction and wear behavior of unidirectional graphite fiber composites at different sliding speeds ; (a) normal direction, (b) transverse direction, (c) longitudinal direction.

험결과로 보면 일방향 섬유복합재료의 경우 저속에서 고속까지 모든 섬유배열 방향에서 탄소섬유 복합재료가 최소의 마찰계수와 마모인자를 가졌으므로, 마찰과 마모를 최소화시키는 응용조건 하에서는 탄소섬유복합재료가 가장 적절한 것으로 판단할 수 있다. 그러나, 복합재료의 하이브리드화에 의한 효과로 마모인자를 낮출 수 있는 조건이 나타날 수 있으며, 특히 낮은 마모율, 높은 마찰계수를 필요로 하는 경우에는 하이브리드 복합재료의 적용이 요구된다.

### 3.4. 하이브리드복합재료

하이브리드 복합재료의 트라이볼로지 거동을 이해하기 위하여 Fig. 2에서 주어진 바와 같이 두 종류의 하이브리드 복합재료 시편을 압축성형으로 제조하여 동일한 조건에서 실험하였다. 첫 번째 시편은 (a)와 같이 탄소섬유와 아라미드섬유가 같은 방향으로 배열되어 있는 구조를 가지는 복합재료이며, 두 번째 시편은 (b)와 같이 탄소섬유와 아라미드섬유가 직각으로 배열되어 적층된 구조를 가지는 복합재료이다.

#### 3.4.1. 탄소/아라미드섬유 복합재료 1

본 연구에서는 두 종류의 하이브리드 복합재료를 제작하여 실험하였는데 이 중에서 탄소/아라미드복합재료 1은 탄소 섬유와 아라미드 섬유가 같은 방향으로 평행하게 배열된 복합재료를 가리킨다. 제조 시에는 동일한 길이의 탄소 섬유와 아라미드 섬유를 준비하여 제작하였으며 탄소 섬유는 24%, 아라미드섬유는 21%, 에폭시가 나머지 55%의 부피분율을 가지는 것으로 측정되었다.

탄소섬유와 아라미드섬유가 일방향으로 배향되어 있으므로 길이방향, 수직방향, 횡단방향의 마찰실험을 할 수 있도록 시편을 water jet으로 절단하였으며, 두 가지 마찰속력 하에서 각 방향으로 실험을 수행하였다. Fig. 7에서 주어진 바와 같이 탄소섬유 복합재료에 비해 마모율이 우수한 결과를 나타내 일종의 상승 효과가 있는 것으로 나타났으며 특히 횡단방향에서 1.04 m/s의 마찰 속력일 때는 탄소섬유나 아라미드섬유 복합재료와 비교할 때 최소의 마모인자를 보였다. 또한 마찰계수도 탄소섬유 복합재료보다는 증가하고 아라미드섬유 복합재료보다는 대체로 감소하여 하이브리드 효과가 적절히 나타난 것으로 평가된다. 수직방향이나 길이방향의 경우에도 하이브리드 복합재료의 트라이볼로지 특성이 탄소섬유 복합재료나 아라미드섬유 복합재료의 특성보다 개선되었으며, 속도조건과 하중조건이 적절한 경우에 실제응用に 적합할 것으로 기대된다.

4.08m/s의 속력에서는 하이브리드 복합재료가 모든 방향에서 최소의 마모인자를 가졌고, 마찰계수는 수직방향과 길이방향에서는 아라미드섬유나 탄소섬유 복합재료보다 높은 값을 나타내었고 횡단방향에서는 가장 낮은 값을 나타내었다. 수직방향의 경우에도 4.08m/s의 속력에서 최소의 마모인자를 보였으며 이러한 현상도 하이브리드화에 의한 상승효과로 생각된다. 이러한 결과는 하이브리드 복합재료의 섬유구성과 배열구조 등을 적절히 선택함으로써 요구되는 마모율과 마찰계



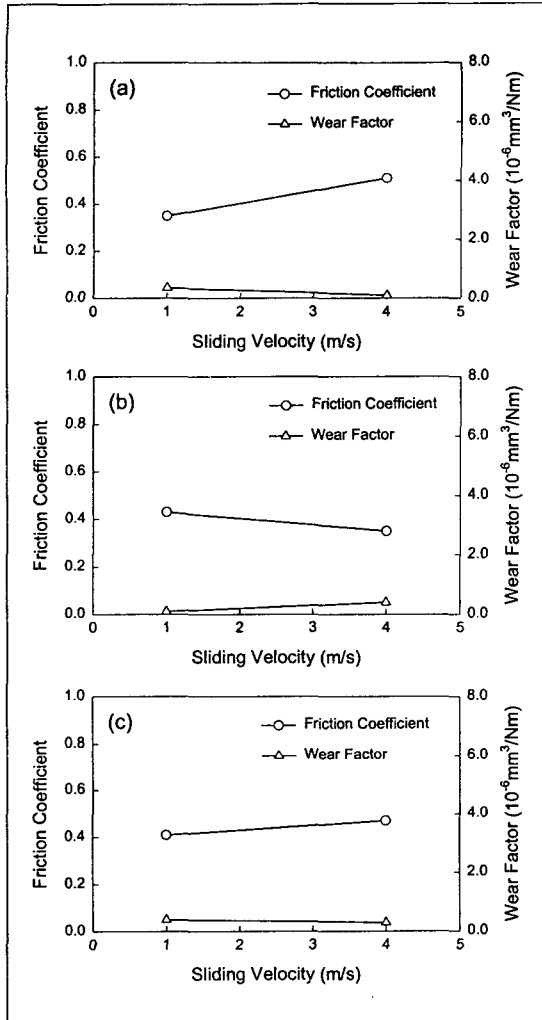


Fig. 7. Friction and wear behavior of unidirectional graphite/aramid hybrid composites at different sliding speeds ; (a) normal direction, (b) transverse direction, (c) longitudinal direction.

수를 얻을 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

**3.4.2. 탄소/아라미드섬유 복합재료 2**

4.08m/s의 조건에서 아라미드섬유 복합재료는 수직 방향에서 가장 작은 마모율을 보였고 탄소섬유 복합재료는 길이방향에서 최소의 마모율을 나타내었으므로, 아라미드섬유가 수직 방향으로 탄소섬유가 길이 방향으로 배열된 하이브리드 복합재료의 마모 및 마찰 거동을 측정하였으며 또한 아라미드섬유를 길이방향으로 탄소섬유를 수직방향으로 배열시킨 하이브리드 복합재료에

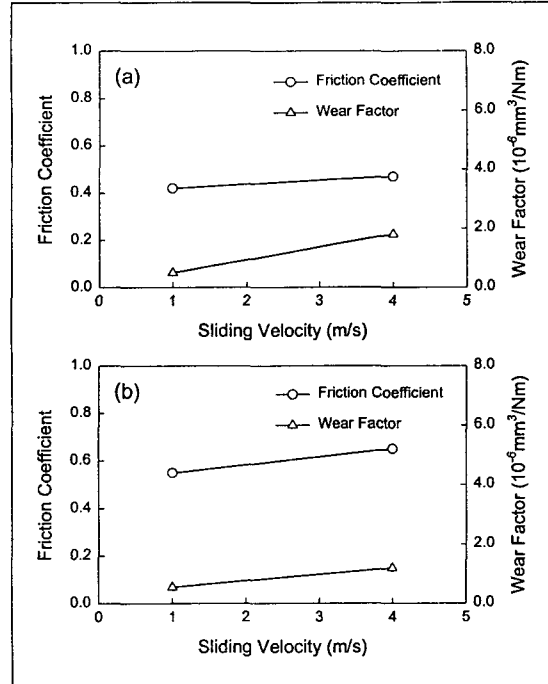


Fig. 8. Friction and wear behavior of graphite/aramid hybrid composites at different sliding speeds ; (a) normal/longitudinal directions, (b) longitudinal/normal directions.

대한 트라이볼로지 특성을 조사하였다. 탄소/아라미드 복합재료 2는 탄소섬유와 아라미드섬유가 서로 90°의 각도로 배열되어 있는 하이브리드 복합재료이다. Fig. 8에서 보여진 바와 같이 (a) 경우의 실험 조건은 상대 마찰면에 탄소섬유가 수직으로, 그리고 아라미드섬유는 평행하게 배열된 경우를 의미하며, (b) 경우의 실험 조건은 상대 마찰면에 탄소섬유가 평행하게 그리고 아라미드섬유는 수직으로 배열된 경우를 의미한다.

Fig. 8의 (a)의 결과를 보면, 4.08m/s에서 측정된 마모인자가 아라미드섬유 복합재료의 길이방향의 마모인자에 거의 접근하는 것을 알 수 있으며, 1.04m/s에서는 하이브리드 복합재료의 마모인자가 탄소섬유 복합재료의 수직방향의 마모거동에 접근하는 것을 알 수 있다. 또한 마찰계수의 경우는 모든 속도에서 아라미드복합재료의 길이 방향의 마찰계수와 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 하이브리드 복합재료 시편의 섬유배향과 활주속도에 따라 마찰 및 마모의 거동의 하이브리드 효과가 나타나지만 특정한 트라이볼로지 성질을 지배하는 섬유의 배향성분이 있음을 알 수 있으며, 이러한 경향성을 규명함으로써 하이브리드 복합재

Table 1. Physical properties of reinforcing fibers and matrix resin

Material	Density	Tensile Strength	Tensile Modulus
Kevlar	1.45g/cm <sup>3</sup>	2.9 GPa	1.30 GPa
S-2 Glass	2.46g/cm <sup>3</sup>	4.6 GPa	86.8 GPa
Carbon	1.81g/cm <sup>3</sup>	2.7 GPa	382 GPa
Epoxy	1.17g/cm <sup>3</sup>	62.5 MPa	4.05 GPa

료의 구조 설계에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 탄소섬유가 길이방향, 아라미드섬유가 수직방향으로 배열된 (b)의 조건에서는 하이브리드 복합재료의 마찰계수가 탄소섬유 복합재료나 아라미드섬유 복합재료보다 커지는 상승효과가 나타났으며, 하이브리드 복합재료의 마모인자는 탄소섬유 복합재료와 아라미드섬유 복합재료의 중간 값을 가지는 하이브리드 효과를 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유, 탄소/아라미드섬유 하이브리드 복합재료를 제작하여 섬유의 배향과 활주속도를 변화시키면서 트라이볼로지 실험을 수행하였으며 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 일반적으로 동일한 복합재료의 경우 마찰속도가 증가하면 마모인자와 마찰계수가 증가하는 경향을 보이며, 섬유배향에 따라 그 정도가 상이함을 알 수 있다.

2. 탄소섬유 복합재료의 경우 탄소 성분의 윤활작용으로 모든 마찰조건에서 가장 작은 마모를 보였으며 아라미드섬유 복합재료는 탄소섬유 복합재료보다 크고 유리섬유 복합재료보다 작은 값의 마모인자를 보였다.

3. 아라미드 섬유 복합재료는 수직방향에서 가장 낮은 마모인자를 가졌고, 유리섬유 복합재료는 길이방향에서 최대마모를 나타내었다. 이러한 일방향 섬유복합재료의 마찰 및 마모성질은 하이브리드 복합재료의 트라이볼로지 특성을 이해하는데 기여한다.

4. 일방향의 섬유배향을 갖는 탄소섬유/아라미드 섬유 하이브리드 복합재료의 경우 마모 특성의 상승효과가 나타나 마모인자가 감소하는 경향을 보였고, 탄소섬유/아라미드섬유가 90°로 배열된 하이브리드 복합재료의 경우에는 활주속도와 섬유배향에 따라 마찰 및 마모현상을 지배하는 섬유 배향이 있는 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(신소재 NE05/3-97)에 의하여 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Lancaster, J. K., "Polymer-based bearing materials", Tribology, Vol. 5, 1972, pp.249-255.
2. Lancaster, J. K., "The effect of carbon fibre reinforcement on the friction and wear of polymers", Brit. J. Appl. Phys.(J. Phys.D), ser.2, Vol. 1, 1968, pp.549-859.
3. Giltrow, J. P., and Lancaster, J. K., "The role of the counterface in the friction and wear of carbon fibre reinforced thermosetting resins", Wear, Vol. 16, 1970, pp.359-374.
4. Breg, C. A., Batra, S., and Tirosh, J., "Wear and friction of two different types of graphite fibre-reinforced composite materials", Fiber Science and Technology, Vol. 6, 1973, pp.159-185.
5. Giltrow, J. P., "The influence of temperature on the wear of carbon fibre reinforced resins", ASLE trans., Vol. 16, pp.83-90.
6. Tsukizoe, T., and Ohmae, N., "Wear mechanism of unidirectionally oriented fibre-reinforced plastics", ASME trans., 1977, pp.403-407.
7. Sung, N. H., and Suh, N. P., "Effect of fibre orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composite", Wear, Vol. 53, 1979, pp.129-141.
8. Fahmy, A. A., and West, H. A., "The effect of fibre orientation on the wear behavior of graphite-epoxy composite materials", 6th International Conference on Composite Materials, Vol. 5, 1987, pp.5.311-5.323.
9. Shim, H. H, Kwon, O. K., and Youn, J. R., "Friction and Wear Behavior of Graphite Fiber-Reinforced Composites", Polymer Composites,

Vol. 11, 1990, pp.337-341.

10. GoPal, P., Dharani, L. R., and Frank, D. B., "Hybrid Phenolic Friction Composites Conaining Kevlar Pulp Part I. Enhancement of Friction and Wear Performance", *Wear*, Vol. 12, 1996, pp.199-206.

11. Lee, K. H. and Youn, J. R., "Friction and Wear Behavior of Short Fiber Reinforced Poly(amide-imide) Composites, *Polymer Composites*", Vol. 13, 1992, pp.251-257.

12. Chen, J. D., Chern, J. H., and Ju, C. P., "Effect of load on tribological behavior of carbon-carbon composites", *Material Science*, Vol. 31, 1996, pp.1221-1229.

13. Tsukizoe, T., and Ohmae, N., "Friction and Wear of Advanced Composite Materials", *Fibre Science and Technology*, Vol. 18, 1983, pp.265-286.

14. Ovaert, T. C., "On the Wear Behavior of Longitudinally(Parallel) Oriented Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Composite", *Tribology Transactions*, Vol. 38, 1995, pp.27-34.

15. Tsukizoe, T., and Ohmae, N., "Wear performance of unidirectionally oriented carbon-fibre-reinforced plastics", *Tribology*, Vol. 8, 1975, pp.171-175.

16. Sinha, S. K., and Biswas, S. K., "Effect of sliding speed on friction and wear of uni-

directional aramid fibre-phenolic resin composite", *Material Science*, Vol. 30, 1995, pp.2430-2437.

17. 윤재륜, "단섬유보강 복합재료의 트라이볼로지 특성", *대한기계학회 논문집*, Vol. 12, 1988, pp.1238-1245.

18. Su, C., and Youn, J. R., "An elastic-plastic stress analysis of a polymeric subsurface with a thin layer under normal and tangential loading", *Wear*, Vol. 123, 1988, pp.355-367.

19. Lhymn, C., "Effect of normal load on the specific wear rate of fibrous composites", *Wear*, Vol. 120, 1987, pp. 1-27.

20. Pool, K. V., Dharan, C. K. H., and Finnie, I., "Erosive wear of composite materials", *Wear*, Vol. 107, 1986, pp.1-12.

21. Clerico, M., and Patierno, M., "Sliding wear of polymeric composites", *Wear*, Vol. 53, 1979, pp.279-301.

22. Bonfield, W., Edwards, B. C., Markham, A. J., and White, J. R., "Wear transfer films formed by carbon fibre reinforced epoxy resin sliding on stainless steel", *Wear*, Vol. 37, 1976, pp.113-121.

23. T. Tsukizoe and Ohmae, "Wear Mechanism of Unidirectionally Oriented Fibre-Reinforced Plastics", in *Wear of Materials*, S. K. Rhee, Ed., ASME, New York, 1977, pp.518-525.