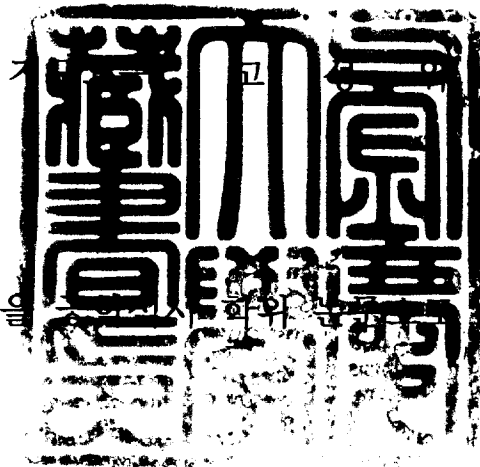


공학석사 학위논문

CFRP 복합재의 적층방향에 대한 마찰 및 마모 특성



이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2005年 2月

부경대학교 대학원

제어기계공학과

최 영 근

최영근의 공학석사 학위논문으로 인준함

2004年 12月

주 심 공학박사 문 덕 홍



위 원 공학박사 김 시 영



위 원 공학박사 고 성 위



목 차

Abstract	1
제1장 서론	3
제2장 마찰 및 마모이론	7
2.1 마찰이론	7
2.2 마모이론	9
제3장 재료 및 실험방법	12
3.1 실험재료	12
3.2 실험장치 및 실험방법	13
제4장 결과 및 고찰	21
4.1 마찰계수와 비마모율	23
4.1.1 일방향 적층재의 경우	23
4.1.2 사교적층판의 경우	28

4.2 파면해석	36
제5장 결 론	41
참 고 문 헌	42

Friction and Wear Characteristics of a Carbon Fiber Reinforced Composite against Lay-up Orientation

Young-Kuen Choi

*Department of Control and Mechanical Engineering,
The Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

Recently, there has been remarkably growth in the large-scale industrial application of plastics and fiber reinforced/polymer matrix composites. The features that make composites so promising as industrial and engineering materials are their high specific strength(strength/density), their high specific stiffness(modulus/density), and the opportunities to tailor materials properties through the control of fiber and matrix composition and fiber orientation states through processing technology. In addition, parts made from these materials have the ability to dampen shock and vibration, provide corrosion protection, and operate with little or no maintenance, making them excellent materials for the aircraft and aerospace industry, chemical industry, automotive industry, etc. Furthermore, application of polymer composites are found in mechanical components such as gears, cams, wheels, impellers, brakes, clutches, seals, conveyors, transmission belts, bushes, and bearings.

In most of these services, the materials are subjected to different kinds of friction and wear, mechanical stresses and various environment. Particularly the friction and wear is a very important factor influencing the mechanical behavior of polymer composites.

This paper is the study on dry sliding wear behavior of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy matrix composite against lay-up orientation. Test is investigate the effect of the lay-up orientation, surface roughness of friction counterpart, fiber direction, load and sliding velocity when circumstance continuously at 21°C, 60%RH. Pin-on-disk dry sliding wear tests for each experimental condition were carried out with a carbon fiber reinforced plastic pin on stainless steel disk in order to search the friction and wear characteristics. Under each conditions, the friction coefficient of composites and the specific wear rates are measured. The wear rates and friction coefficients against the stainless steel counterpart processed were experimentally determined and the resulting wear mechanisms were microscopically observed. The effect on friction and wear behavior are observed differently, according to various conditions. The fiber destruction and cracking caused fiber bending on the contact surface, which was discovered to be dominant wear mechanism. When sliding took place against counterpart, the highest wear resistance and the lowest friction coefficient were observed in the $[0]_{24s}$ lay-up orientation at anti-parallel direction.

제 1 장 서 론

최근 급속한 과학 및 기술의 발전에 따라 산업전반의 기계설비와 자동차, 선박, 항공기 등의 작동조건이 고속화, 고하중화 되고 있으며 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 재료의 강도, 경량성, 내열화 등의 고 기능성을 갖춘 재료의 개발이 추진되고 있다. 이러한 새로운 특성을 개발하는 면에서 복합재료가 관심을 받고 있으며 이 복합재료 중 섬유강화 복합재료는 높은 비강도, 비강성, 경량성, 내식성 등의 특성으로 인해 크게 각광을 받고 있고 그 응용분야 또한 늘고 있다.

복합재료는 두 가지 이상의 서로 다른 성질이 거시적으로 혼합된 유용한 재료를 말한다. 두 가지 이상의 다른 물질을 혼합하는 방법에는 원자와 원자가 합쳐져서 화합물로 되는 경우가 있는데 이런 경우에는 복합재료라고 하지 않는다. 복합재료는 혼합되어 있는 상태에서도 각 성분이 원래의 성질을 지니고 있어 미시적으로 보면 비균질한 상태로 존재하고 있다. 이들 재료의 장점은 비중이 낮고 높은 비강도와 비강성의 값을 가질 수 있고 원하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있다는 점이다. 기존의 금속재료는 등방성 재료이기 때문에 모든 방향으로 강성과 강도가 같으나, 복합재료는 필요한 방향으로만 강성과 강도를 조절하여 재료의 낭비를 막을 수 있다. 또한 복합재료는 제조방법이 용이하다. 그리고 탄소섬유는 열팽창계수가 거의 0에 가깝기 때문에, 이러한 재료로서 구조물이나 부품 등을 제조하면 온도의 변화에 따라 크기가 변화하지 않는 구조물이나 부품을 제조할 수가 있다.

복합재료는 대부분 서로 다른 플라이(ply)와 플라이가 기지에 의하여 결합되는 적층판 형태로 많이 사용되며 각 층의 상호작용으로 인하여 마찰 및 마모특성도 단일층보다는 복잡하게 나타난다. 복합재료의 적층판에는 모든 층이 같은 적층각으로만 이루어져 있는 동일 적층판, 중간면을 중심으로 적층각 및 두께가

서로 대칭인 대칭 적층판, 중간면을 중심으로 층두께는 같고 적층각의 절대값은 같으나 부호가 반대인 역대칭 적층판 및 대칭성이 전혀 없는 비대칭 적층판 등의 4가지로 구분된다. 그 중에서도 대칭 적층판은 중간면을 중심으로 기하학적으로 재료의 물성값이 대칭이 되는 적층판으로써 다른 적층판에 비하여 두 가지 장점이 있다. 첫째로, 복합재료로 성형할 때 열변형에 의한 비틀림을 방지할 수 있고, 둘째로 응력해석 및 구조설계가 간단하다는 점이 있어 많이 사용하고 있다.

섬유강화 복합재료는 플라스틱 재료가 지닌 가공성의 장점을 충분히 살린 것으로 수지와 강화섬유로 구성된다. 수지는 열경화성수지와 열가소성수지로 분류되며 각각의 수지의 특성은 열가소성 수지는 한번 열을 가열한 후에 재가열하면 재성형하여 사용할 수 있고 열경화성 수지는 한번 열을 가열한 후 굳으면 재성형이 어려운 점이다. 섬유강화 복합재료는 사용되어지는 강화섬유에 따라 GFRP(glass fiber reinforced plastic)과 CFRP(carbon fiber reinforced plastic)가 일반적으로 사용되어지고 있다. 그 응용분야는 기어, 캠, 휠, 임펠러, 브레이크, 베어링과 같은 기계부품 분야 뿐만 아니라 건설, 선박, 자동차산업, 농업 및 광업 그리고 우주항공산업 분야에 이르기까지 거의 모든 산업분야에서 다양하게 이용되고 있다. 이렇게 이용되고 있는 섬유강화 복합재료는 대해 많은 연구들이 이루어져 왔으며 대부분 기계적 거동에 주목하였다.

또한 다양한 조건들에서 섬유강화 복합재료들의 마모거동에 대하여 실험적 그리고 이론적인 연구가 보고되었다¹⁾. Tsukizoe와 Ohmae²⁾ 그리고 Sung과 Suh³⁾는 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재료의 미끄럼 마모에 대한 섬유 방향의 영향에 대한 연구를 하였다. Bonfield⁴⁾는 스테인리스강으로 된 마찰 상대면 위에서 탄소섬유/에폭시 수지로 된 핀으로 실험을 했을 때 마모는 변형된 막 형성을 야기시킨다고 하였으며, 광학현미경과 전파 전자 현미경 검사로 마모막을 관찰하였다. Guicciardi 등⁵⁾은 마모데이터를 재료성능에 이용하여 더 높은 신뢰성 요구 충족을 하기 위해 핀온디스크(pin-on-disk) 마모시험에서 데이터 분산

에 대한 연구를 하였다. Giltrow와 Lancaster⁶⁾는 마찰상대면에서의 마모막 형성, 복합재료에서 섬유유형, 마찰상대면 물질의 구성과 강도 등에 대하여 연구하였다. Shim 등⁷⁾은 탄소섬유 복합재료의 마찰 및 마모 특성에 관한 연구를 하였으며, 다양한 조건하에서 일방향 고탄성 탄소섬유 강화 에폭시 복합재에 관한 연구를 하였다. 높고 낮은 습기에 노출시켜 실험하여 마찰 및 마모 거동을 측정하였으며, 실험결과는 미끄럼 표면에 흡수된 습기는 복합재의 마찰과 마모 특성에 큰 영향을 미친다고 하였다. 또한 다른 섬유방향들을 가진 각각의 시험편들의 마찰 및 마모거동에 있어 다른 점들은 주로 탄소섬유에서 방향성을 가진 혹은 결정들의 미소구조와 매트릭스에서 섬유방향의 거대구조에 의해서 일어나는 비등방성 특성들에 주로 영향을 받는다는 것을 밝혔다. Suh와 Sin⁸⁾은 마찰력은 미끄럼 거리와 표면돌기들의 변형, 마모입자들과 단단한 돌기들에 의한 쟁기질, 미끄럼 표면 바닥부분의 응착 등에 의해 변화되는 환경에 영향을 받는다고 하였다. 또한 마찰계수는 재료의 간단한 특성치가 아니며 미끄럼 조건에 따라 마찰조각이 4~6단계가 있다고 하였다. Friedrich 등⁹⁾은 상온에서 일방향 탄소섬유강화 유리 매트릭스 복합재의 건조미끄럼과 연삭마모에 대하여 연구하였다. 종류가 다른 금속들과 SiC 종이에 대한 비마모율과 마찰계수들은 실험을 통하여 결정되어졌고 마모 메커니즘은 현미경을 통하여 관찰하였다. 복합재의 주 섬유방향들과 관계가 있는 세 가지의 주요 미끄럼 방향들을 선택하였다. 매끄러운 단단한 금속에 대해 미끄럼이 일어났을 때 가장 큰 마모저항과 가장 낮은 마찰계수는 AP(anti-parallel)방향에서 관찰되었으며, 복합재와 상대재에 있어서 마모율은 상대재의 경도가 증가할수록 감소한다. 유색의 마모 파편은 두 가지 종류가 관찰되었고 이것들은 미끄럼이 일어나는 동안에 마모 메커니즘에 있어서 중요한 역할을 하였다. 탄소섬유-유리 복합재의 연삭마모 특성들에 영향을 주는 미끄럼 방향과 SiC입자 크기에 대해서도 연구를 하였다. 접촉면 형상의 종류는 마모율에 영향을 주었으며, 특히 P(parallel)방향에서였다. 매끈한 금속과는 반대로 AP(anti-parallel)방향에서의 복합재의 마모율은 다른 두 방향보다 명백

히 높았다. 또한 지배적인 마모메커니즘은 섬유의 평면 굽힘이었으며, 이것은 섬유의 파괴와 균열을 야기한다.

본 논문에서는 CFRP 복합재료에 대해 적층방향에 따라 CFRP 복합재료의 건조 미끄럼 마모거동을 실험한 연구로 상대재(경면 가공한 스테인리스 스틸, STS304)에 대한 마찰계수와 비마모율을 실험을 통해 얻었으며, 실험한 재료의 마모면을 광학현미경 및 주사현미경(SEM)을 통해 관찰하여 마찰(friction) 및 마모(wear) 특성을 비교하였다.

제 2 장 마찰 및 마모이론

2.1 마찰이론

마찰은 직·간접적인 표면접촉을 하고 있는 두 고체가 상대운동을 하려고 할 때는 항상 그 운동에 대한 저항이 생기는 현상을 말하며, 이 때의 저항력을 마찰력이라 한다. 인류가 소비하는 에너지의 많은 부분이 마찰손실로 소비되는 것을 생각할 때 마찰이 얼마나 중요한 문제인가 알 수 있다. 따라서 설계의 개선이나 재료의 개선 혹은 윤활제의 개선을 통하여 마찰을 줄이는 일은 현대기술에 있어서 매우 중요한 것이라고 할 수 있다. 마찰을 마찰표면에 따라 분류하면 건조마찰, 표면층 마찰, 유체마찰, 경계마찰, 혼합마찰 등으로 나눌 수 있다.

건조마찰은 마찰접촉면이 치밀하게 접촉되어 있는 상태이고 접촉면 사이에 산화물 층이나 다른 물질이 전혀 없는 깨끗한 상태이다. 표면층 마찰은 마찰 표면에 산화물 층이나 고형윤활제가 있는 상태이다. 유체마찰은 마찰면이 유체의 의해 완전히 분리되어 유체내부 마찰만 있는 상태를 말한다. 경계마찰은 마찰면 사이에 하중에 의해 쉽게 파단되는 얇은 윤활막이 있는 상태이며, 혼합마찰은 마찰면이 유막에 의해 부분접촉을 하고 있는 상태이다.

또한 마찰성분의 유형⁸⁾에는 표면돌기변형마찰 성분, 응착마찰 성분, 쟁기질마찰 성분이 있다.

표면돌기변형마찰 성분은 미끄럼 접촉시 변형으로 인하여 기계적 에너지가 소성변형 효과로서 소산되며, 표면돌기변형은 정지마찰계수를 결정짓고 또한 동적마찰계수에도 영향을 미친다. 새로운 표면돌기들이 생기는 경우는 많지 않으므로 표면돌기변형의 동적마찰계수에의 기여도는 쟁기질이나 응착성분에 비해 크지 않다. 응착마찰 성분은 접촉부 응착 결합들의 형성과 과열에 기인한다.

이론적으로는 두 접촉 물체 사이의 인력들은 물체들의 결합에 기여하는 모든 종류의 힘(금속, 이온, 공유결합)뿐만아니라 2차적인 반데르발스(van der waals) 결합 등이 포함된다. 응착이론의 핵심은 마찰면의 표면돌기들이 상대면의 표면 돌기들과 접촉하고 응착한 후 마찰의 기구학적 요구를 만족시키기 위하여 전단 하는 것이다. 쟁기질 마찰 성분은 미끄럼 마찰 접촉에서 한 표면이 다른쪽보다 상당히 단단하면 그 단단한 표면돌기들이 연한 표면으로 침투할 것이다. 쟁기질의 기본적인 가능 유형은 표면돌기들에 의한 쟁기질과 침투된 마모 입자들에 의한 쟁기질이 있다. 이것은 마찰저항에 상당한 기여를 하게 된다. 또한 쟁기질은 총 마찰력을 증가시키며 작은 마모입자들을 생성시키고, 마찰면의 마모에 영향을 미친다. 쟁기질 작용으로 생성된 흙의 양 옆을 따라 굴곡이 형성되며 이 굴곡이 평평하게 되고 반복하중을 받을 때 이들 중 일부는 계속되는 마찰에 따라 마모입자들이 된다.

2.2 마모이론

마모는 표면의 상대운동 결과로 미세한 입자들이 접촉면에서 이탈되는 현상으로 정의되며, 모든 기계 장치에서 불가피하게 발생하는 현상이다. 마모의 원인으로서는 응착, 부식, 절삭, 피로, 파단(fracture) 및 화학적 상호작용 등이 알려져 있다. 그러나 대부분의 경우 마모는 한 가지 원인에 의해서 발생하는 것이 아니라 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 나타나게 된다.

마모의 종류로는 응착마모(adhesive wear), 연삭마모(abrasive wear), 미동마모(fretting wear), 피로마모(fatigue wear), 침식마모(erosive wear), 화학적마모(corrosive wear)가 있다. 응착마모는 두 표면이 접촉하여 상대운동을 할 때, 두 표면의 원자들 간에 존재하는 인력에 의하여 두 접촉면이 응착되어서 한 접촉면으로부터 파편이 떨어져 나오는 형태의 마모를 말하며 응착마찰과 매우 유사하다. 응착마모 과정의 시작은 고체 재료들이 원자적 규모로 접촉하면서 형성되는 접촉표면의 응착 접합부들에 의한다. 접촉하는 고체들의 성질에 따라 다른 응착 접합부들이 초래되며 마모면에 움덩이(holes), 얇은 조각(scales), 재료의 변형(transferred materials) 등이 나타난다. 연삭마모는 거칠고 단단한 표면이나 혹은 거친 입자를 포함한 연한 표면이 연한 표면과 상대운동을 할 때 연한 표면에 절삭작용을 함으로써, 연한 표면의 물질이 제거되는 형태의 마모를 말한다. 단단한 입자나 표면돌기들은 표면을 자르고, 칩(chip)생성하고, 심한 소성변형을 일으키며 피하에 손상을 입혀 결국 마모입자들을 생성시킨다. 접선방향의 운동이 가해지면 단단한 표면에는 미소절단(microcutting), 미소균열(microcracking), 미소쟁기질(microplowing) 등의 복합적인 효과들이 나타나며 주된 메카니즘은 쟁기질(plowing)에 의한 것으로 생각된다.

미동마모는 접촉표면들이 작은 진폭의 진동을 받게 될 때 일어나게 된다. 접촉표면이 작은 진폭의 진동을 받으면, 접촉표면으로부터 매우 작은 마모입자가 생성되게 되고 (응착마모), 이 입자들은 곧 산화되어 단단한 산화물을 만들며 (부식), 이 산화물들이 절삭마모를 일으키게 된다. 따라서 이러한 형태의 마모는 미동 부식마모 (fretting Corrosion)라고 불려지기도 한다.

피로마모는 표면에 마찰학적 하중이 반복적으로 가해지면 표면피로가 일어나 마모입자들이 발생한다. 이런 효과들은 표면에서 직접적이고 물리적인 고체간의 접촉이 없이 표면과 그 밑에서의 응력들의 작용으로 인한 것이며 마모면에서 균열(crack), 움덩이(dimples), 입자(particle) 등이 나타난다. 침식마모는 고체의 표면에 고체나 혹은 액체 입자들과 부딪힘에 의하여 마모되는 현상을 말한다. 낙수에 의하여 바위에 구멍이 뚫리는 것은 침식마모의 좋은 예라고 할 수 있다. 화학적 마모는 상대운동이 부식적인 환경에서 일어날 때, 접촉표면을 둘러싸고 있는 주위환경과 접촉표면과의 화학적인 작용으로 생긴 화합물이 표면으로부터 떨어져 나가는 것을 말한다. 주위환경과 재질 성분들의 동적 상호작용이 마모과정을 결정하며 마모막과 입자(particle)에 화학적 작용 부산물이 나타난다.

마모 결과는 비마모율¹⁰⁾의 향으로 주어졌으며 계산은 다음과 같다.

$$\dot{w}_s = \frac{\Delta m}{\Delta t} \frac{1}{\rho F_n} \quad (1)$$

비마모율의 물리적 의미는 임의의 입력에너지에 대한 재료의 부피손실이다.

여기에서 $\dot{w}_s$ 는 비마모율, v 는 미끄럼 속도, ρ 는 시편의 밀도, Δh 는 Δt 동안 시편의 손상깊이, A 는 시편의 실접촉면적, Δm 은 Δt 에서 손실 질량, F_n 은 수직하중을 나타낸다.

핀온디스크 시험기에서 $\Delta m^{10)}$ 은 다음과 같다.

$$\Delta m = \Delta h A \rho \quad (2)$$

여기에서 Δm 은 Δt 에서 손실 질량, Δh 는 Δt 동안 시편의 손상깊이, A 는 시편의 실접촉면적, ρ 는 시편의 밀도를 나타낸다.

핀온디스크 시험기의 시편과 상대재의 접촉면 사이의 마찰력은 토크-로드셀 (torque-loadcell)로 연속적으로 원격조정 되었다. 건조마찰에 Amonton-Coulomb 법칙을 적용하면 마찰계수¹⁰⁾는 다음과 같이 계산된다.

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad (3)$$

여기서 μ 는 마찰계수, F_n 은 수직하중, F_f 는 측정된 마찰력을 나타낸다.

제 3 장 재료 및 실험방법

3.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 일방향 탄소섬유 강화 에폭시기지 복합재 프리프레그(HCU 100NS, 한국카본)를 사용하였다. Table 1은 이 회사에서 사용하는 탄소섬유들의 종류 및 물성을 보여주고 있다. 본 실험에 사용된 탄소섬유는 고탄성계수의 탄소섬유이다. 복합재 시편을 제작하기 위하여 프리프레그를 적층방향에 따라 준비하여 적층시킨 후 자체 제작한 hot press에서 가열·가압하여 경화시켜 4.5mm 두께의 판으로 제조한 후 시편크기로 절단하여 가공하였다. 제조과정은 CFRP 프리프레그를 250mm x 250mm의 일정한 크기로 절단한 후 적층방향에 따라 48플라이(ply)를 적층하였다. 금형은 알콜과 아세톤으로 세척하였으며 이형제를 금형에 골고루 도포하였다(혼합비율 KF96:아세톤=1:100). 그 후 적층된 프리프레그를 금형에 삽입한 후 금형을 프레스 위에 놓은 후 Fig.1과 같이 가열, 가압하여 경화시켰다.

복합재 판은 다이아몬드 톱으로 조심스럽게 절단한 후, 이것을 입자가 작은 고운 연마지(15 μ m)를 사용하여 시편에 크랙이 보이지 않게 가로 단면이 4.5mm x 5.5mm, 길이 15mm로 연마하여 마찰과 마모시험의 시편으로 사용하였다.

적층방향은 일방향([0]_{24s}), [0/90]_{12s}, [0/45/90]_{8s} 3종류를 사용하였다. 각 방향에서 시편은 [0]_{24s}인 경우에는 미끄럼 방향을 평행, 직각, 수직 3가지로 채취하여 실험하였고, [0/90]_{12s} 와 [0/45/90]_{8s}의 경우에는 각각 한 방향으로만 실험하였다. Fig.2는 시편의 부분 형상을 나타낸 것이다.

Table 1 Properties of various carbon fibers

Fiber type	Tensile Strength(GPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation	Mass per Unit Length tex ($\times 10^{-3}$ g/m)	Density (g/cm ³)
High strength	4.90	230	2.1	800	1.80
High strain	4.41	295	1.5	750	1.75
Intermediate modulus	4.61	345	1.3	600	1.77
	4.61	390	1.2	600	1.82
High modulus	4.41	450	1.0	430	1.85

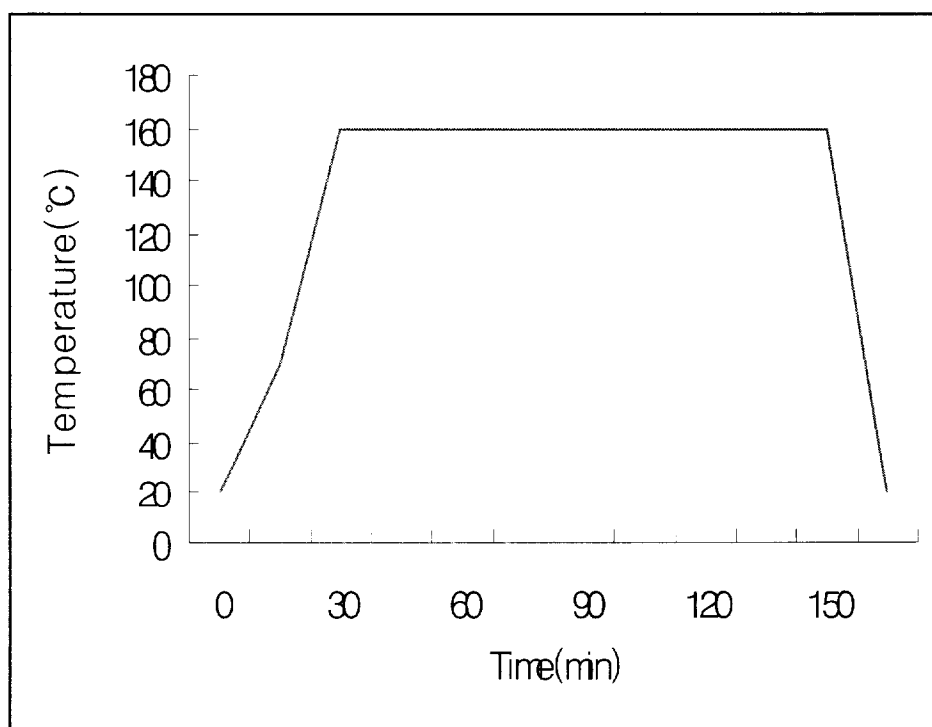
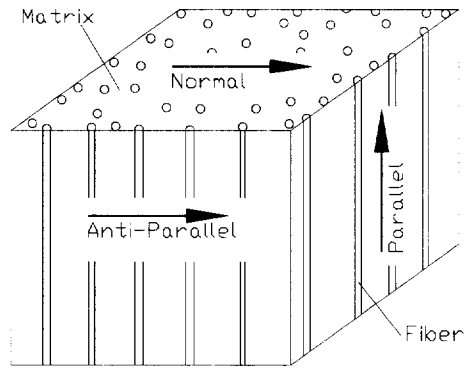
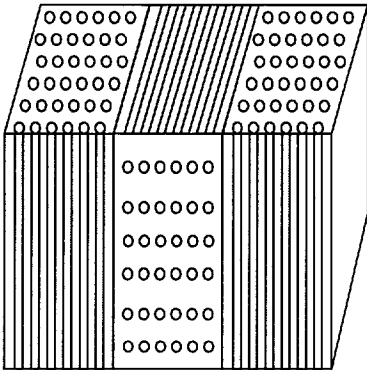


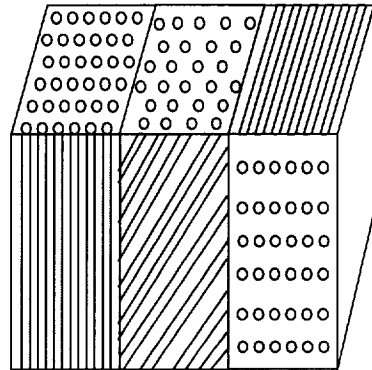
Fig.1 Cure cycle employed for carbon fiber/epoxy matrix.



(a) $[0]_{24s}$



(b) $[0/90]_{12s}$



(c) $[0/45/90]_{8s}$

Fig. 2 A part of specimen of CFRP composites.

3.2 실험장치 및 실험방법

섬유의 적층방향에 따라 각각의 시험편을 실험을 하였으며 적층방향이 $[0]_{24s}$ 인 경우의 실험은 미끄럼방향을 3가지(평행, 직각, 수직)로 구별하여 실험하였으며, $[0/90]_{12s}$, $[0/45/90]_{8s}$ 인 경우는 각각 한 방향으로만 실험하였다.

건조 미끄럼 마모시험은 Fig.3과 같이 자체 제작한 핀온디스크(pin-on-disc)형 시험기를 사용하여 실시하였다¹¹⁾. 핫프레스로 제작된 복합재료 판에서 복합재인 핀은 45mm x 5.5mm x 15mm의 치수를 갖도록 절단하여 사용하였다.

Fig. 4는 본 실험에 사용된 상대재인 스테인리스강 STS 304로 Disk의 모양과 치수를 나타낸 것이다. 스테인리스강이 상대 마찰면으로 채택된 이유는 가장 적은 마모를 위한 상대재 재료로 보고되었기 때문이다.

시험 시 환경조건은 온도(21℃)와 습도(60%RH)의 조절이 가능한 환경 챔버를 제작하여 온도와 습도를 일정하게 유지시켰다. 마모손실의 관찰은 실험전후의 시편과 상대재의 무게를 측정하였다. 상대 마찰재는 지름 80mm×두께 1.5mm의 디스크형으로 표면을 경면 가공한 스테인리스 강(STS304, INI스틸)을 사용하였으며, 그 특성은 Table 2에 나타나 있다.

수직하중(p)의 변화는 12N~36N 사이이며, 속도(v)는 0.6m/s~1.9m/s사이로 각각 조건에 맞게 유지시키며 시험을 실시하였다. 동일한 시험조건에서 5개의 시험편을 4시간씩 마모시험을 실시하였으며, 시편과 상대재의 질량변화는 3번 이상 측정하여 평균값을 구하였다. 핀온디스크형 시험기에서 복합재 핀은 스테인리스 강 상대재인 디스크에 대하여 미끄러졌다. 마찰력 측정은 계속적으로 측정하였으며 로드셀을 통한 마찰력의 연속 원격조정(monitring)을 실시하여 마찰계수(μ)를 얻었다. 이 방법으로 마찰계 초기의 정적 안정상태 및 다양한 미끄럼 조건에서 마모율이 안정(평형) 수준에 도달하였으며 마모율 변화를 구분할 수 있었다. 각각의 시험조건이 복합재의 적층방향에 따라 마모에 미치는 영향의 비교는 초기마모상태 구간에서만 비교하였고, 계의 마모수명은 지배적인 구간에

대하여 고려하였다. 비마모율의 계산은 시험시간과 초기마모상태 구간에서 손실된 무게를 사용하였다. 실제 마모시험에 앞서 예비시험을 실시하여 핀의 경우, 핀온디스크형 시험기에 연마지(입도 15 μ m)를 사용하여 예비 마모를 시킨 후 아세톤으로 깨끗이 세척하고 건조로에서 약 60분간 건조시킨 후 시험하였는데 이것은 시험 전에 시편의 표면거칠기를 항상 같게 조정하여 디스크와 접촉면적이 일정하게 하여 두 접촉면 사이의 접촉이 더 양호한 상태로 되기 때문이다. 디스크의 경우는 표면을 마른수건으로 깨끗이 닦았다. 시험편의 적층방향이 [0]_{24s}인 경우에는 방향에 따라 각각 시편을 사용하였으며 적층방향이 [0/90]_{12s}와 [0/45/90]_{8s}의 경우는 시험 방향은 한쪽방향만 실시하였다. 각 시편은 새로운 디스크 위에서 실험하였다. 시험 전후 시편과 상대재의 질량손실은 Mettler 분석천칭(감도 0.01mg)으로 측정하여 같은 환경조건에서 시험을 실시하였다.

미시 파면해석을 위해 마모된 시편의 마찰특성 비교 및 마모기구 조사를 위한 표면 관찰은 광학현미경과 주사전자현미경(SEM)을 사용하였다. Fig.5는 본 실험에 사용한 주사전자현미경(SEM)을 나타낸 사진이다.

Table 2 Chemical composites and mechanical properties of used counterpart

	STS 304						
Chemical composition (wt. %)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	18.0~20.0	8.0~10.5
Mechanical properties	Tensile strength		Elongation		Hardness		Roughness
	520		39		196		0.05 μ m

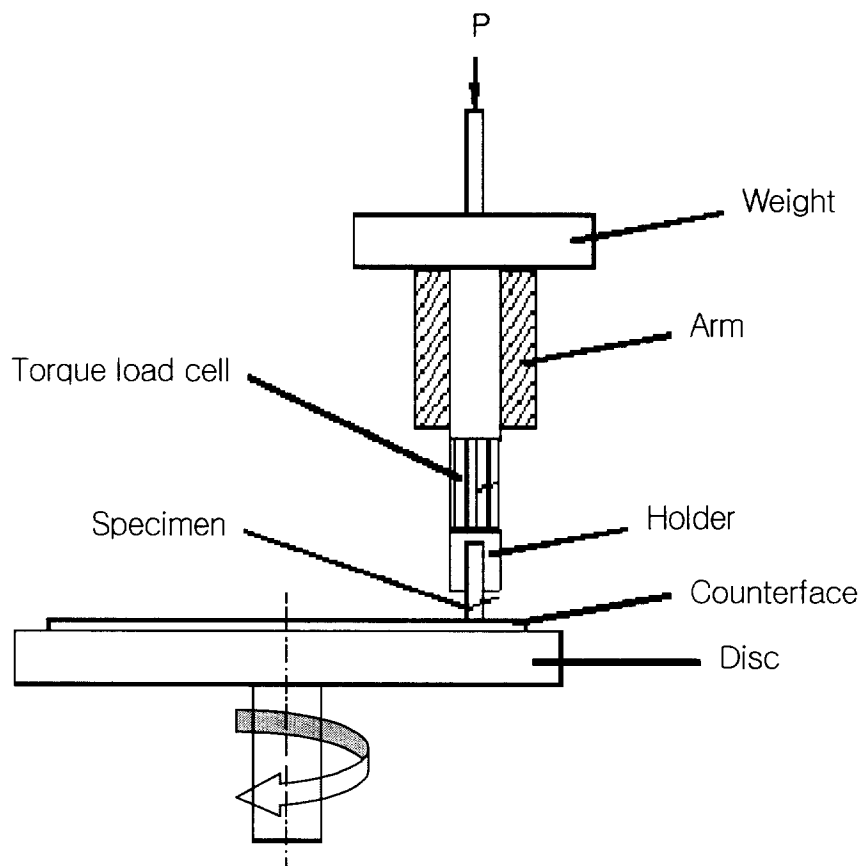


Fig. 3 Schematic diagram of pin-on-disc test apparatus.

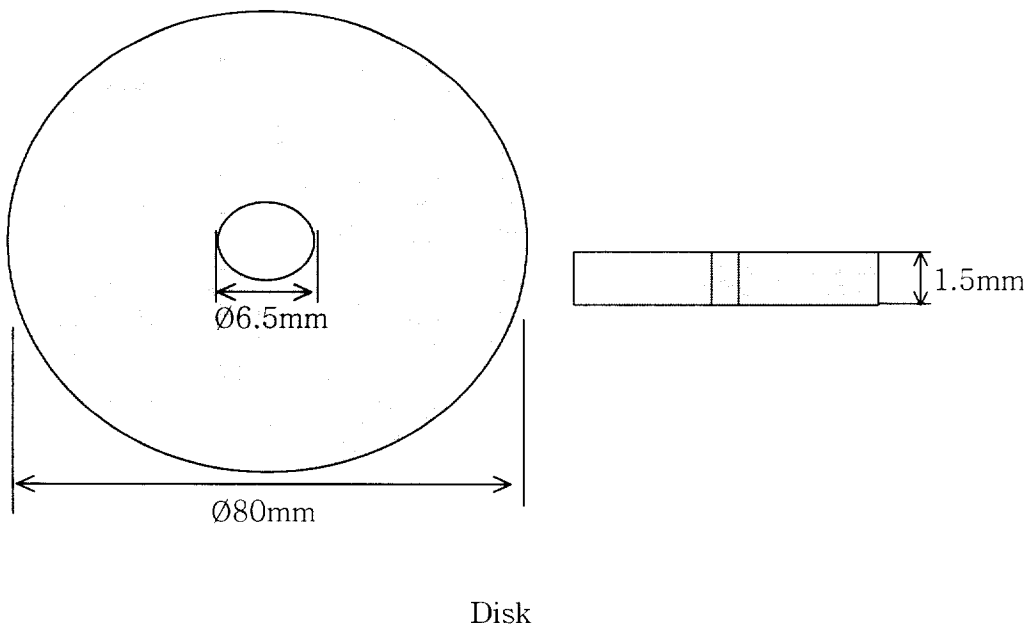


Fig. 4 Dimensions of the disk.

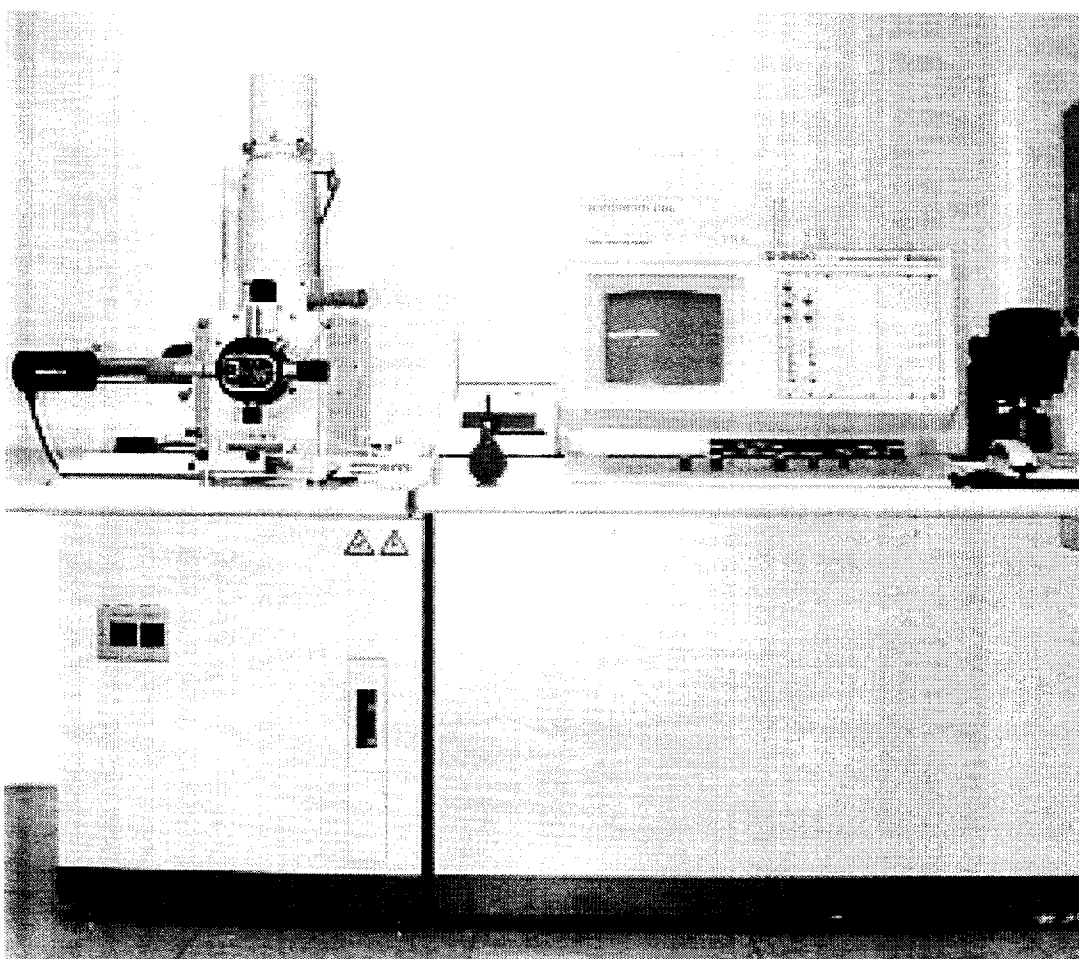


Fig.5 Scanning Electron Microscope.

제 4 장 결과 및 고찰

CFRP 복합재의 마찰과 마모성능을 경면 가공한 스테인리스강 상대재에 대하여 핀온디스크형 시험기로 적층방향에 따른 시험편을 각각의 조건에 대해 실험한 결과는 초기 마모가 일어나고 안정상태에 이르는 시간이 대체적으로 30분정도 나타났으며, 초기 시간동안 고체-고체의 미끄럼 마모에서 영향을 미치는 마모 메커니즘인 응착(adhesion), 연삭(abrasion), 피로(fatigue)와 돌기변형 등으로 인해 마모가 많이 일어났으며 시간이 지날수록 마찰계수가 떨어지면서 안정상태가 되면 마모는 현저하게 줄어들었으며 마모량도 줄어들었다. Table 3은 적층방향과 실험조건에 따른 각각의 마찰계수와 비마모율의 자료를 나타낸 것이다.

Table 3 Average friction coefficients and specific wear rates for each sliding conditions after 4 hours

Condition		Fiber orientation	Specific wear rate ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$)	Friction coefficient
P(N)	v(m/s)			
12	0.6	[0] _{24s} N	7.11	0.24
		[0] _{24s} AP	3.33	0.14
		[0] _{24s} P	5.10	0.20
		[0/90] _{12s}	4.20	0.16
		[0/45/90] _{8s}	5.20	0.20
24	1.3	[0] _{24s} N	7.26	0.24
		[0] _{24s} AP	3.80	0.17
		[0] _{24s} P	5.23	0.20
		[0/90] _{12s}	5.33	0.20
		[0/45/90] _{8s}	6.13	0.21
36	1.9	[0] _{24s} N	7.50	0.25
		[0] _{24s} AP	3.31	0.14
		[0] _{24s} P	5.33	0.20
		[0/90] _{12s}	5.55	0.19
		[0/45/90] _{8s}	6.33	0.21

4.1 마찰계수와 비마모율

4.1.1 일방향 적층재의 경우

Fig.6~8은 각각의 조건에서 $[0]_{24s}$ 적층 복합재의 3가지 섬유방향에 대하여 재료의 평균 마찰계수와 비마모율을 그래프로 나타내고 있다. 각각의 미끄럼속도와 하중의 조건에서 평균 마찰계수와 비마모율 값은 마찰방향이 AP, P, N 방향 순으로 낮았다. 특히 AP방향일 때 평균 마찰계수와 비마모율의 값이 매우 낮았다. 이것은 Shim 등¹²⁾이 찾은 결과와 유사한 것으로 에폭시 기지속의 섬유방향이 재료의 마찰계수에 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다. 또한 이 조건들에서 4시간 동안 실험하였을 때 마모량은 아주 적었다. 이것이 의미하는 것은 이들 마모조건에서는 복합재의 마찰면에 가해진 압력과 속도가 충분히 크지 않기 때문에 섬유가 뚜렷한 손상을 받지 않으므로 탄소섬유 복합재가 이러한 조건에 이용된다면 매우 우수한 내마모 물질이 될 수 있다는 것을 의미한다.

일방향 복합재료에서 마찰방향을 섬유방향에 따라 달리 했을 경우 즉 N방향, P방향, AP방향으로 하였을 경우, 비마모율의 차이가 발생하는 것은 실접촉점이 다르기 때문이라 할 수 있다. 즉 P방향의 경우에 섬유와의 실접촉점이 AP방향보다 많을 것이라 생각된다. N방향의 경우 섬유의 길이 방향에서 수직되도록 상대마찰면에 접촉하게 되므로 실제의 접촉점이 작게 된다고 볼 수 있다. 또한 P방향에서 실접촉이 많으므로 하중분산 효과를 유발하게 되므로 P방향의 비마모율이 N방향의 그것보다 낮게 나타난다. 한편 AP방향의 비마모율을 P방향의 그것과 비교하여 보면 P방향과 AP방향의 실접촉점은 비슷하다고 생각되지만 P방향의 경우에 미끄럼 마찰을 하면 파단된 섬유가 모재에서 분리되어 탈락되므로 마모가 가속화되고 이것이 비마모율을 높게 나타낸다고 생각된다. 이러한 결과는 Tuskizoe와 Ohmae¹³⁾의 결과와도 유사한 경향이다. 이러한 이유로 N방향의 비마모율이 가장 높게 나타나고 있다.

N과 P방향의 경우에 하중이 12N에서 36N까지 증가하고, 미끄럼속도가 0.6m/s~1.9m/s까지 증가함에 따라 비마모율은 증가함을 알 수 있다. 반면에 AP방향의 비마모율은 마찰조건이 가혹해짐에도 불구하고 증가하다가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 N방향의 경우 섬유들이 마모막으로 덮이지 않는 상태로 표면에 노출되어 있으므로 일부의 섬유들이 상대면과의 상호작용으로 인하여 떨어져 나가기 때문에 N방향의 비마모율이 증가한다고 생각할 수 있다. 반면에 AP방향의 경우에는 마찰방향으로 섬유와 매트릭스가 교대로 배열되어 있으므로 마찰로 인해 생성된 마모입자가 잘 혼합되어 움푹파인 부분들을 메우고 또한 하중의 증가에 따라 마찰면 전체에 고르게 분포된 흑연성분을 가지게 되므로 내마모성이 변하기 때문이라 생각할 수 있으며 이에 대한 상세한 연구가 필요하다. 특이한 사항은 Fig.8의 $P=36N$ $v=1.9m/s$ 의 조건에서 AP방향은 초기마모시 마모막 형성이 되어 후반부에는 거의 마모량이 없었다. 이는 마모막 속에 포함된 탄소섬유가 내부적으로 윤활제와 같은 역할을 할 수 있다는 것을 나타낸다.

한편 마찰계수는 마찰조건이 가혹해짐에 따라 N방향의 그것은 다소 증가함을 알 수 있다. 그러나 AP방향에서는 마찰계수가 증가하다가 감소하고 P방향에서의 마찰계수는 거의 일정함을 알 수 있다.

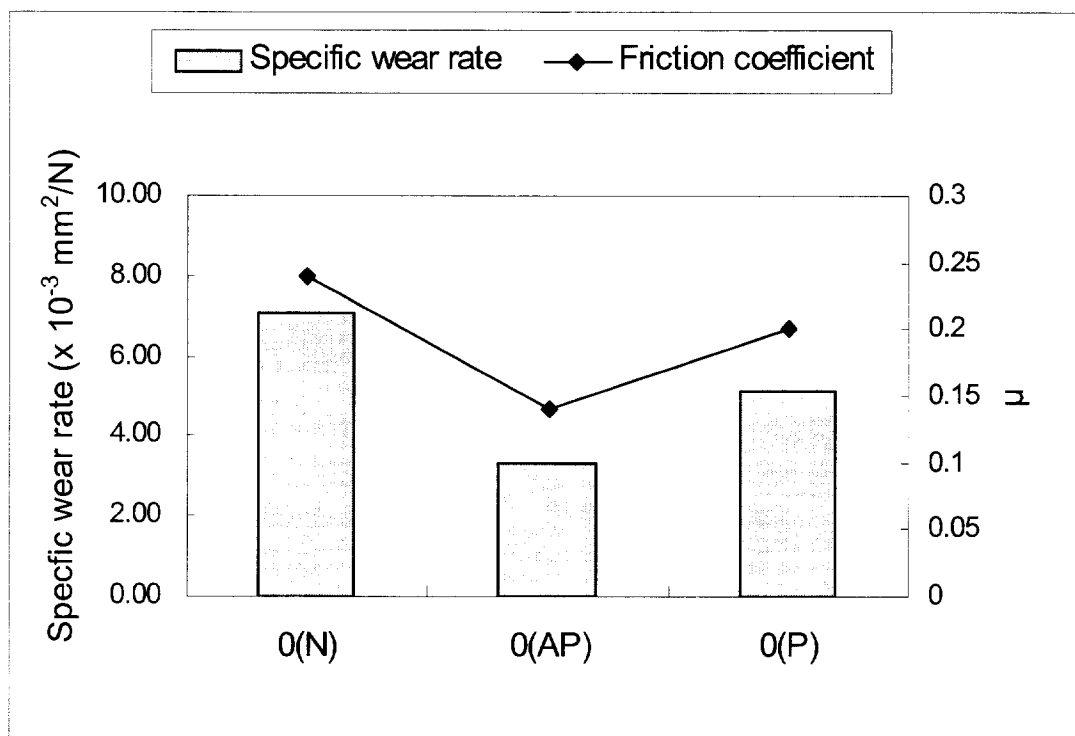


Fig. 6 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=12\text{N}$, $v=0.6\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

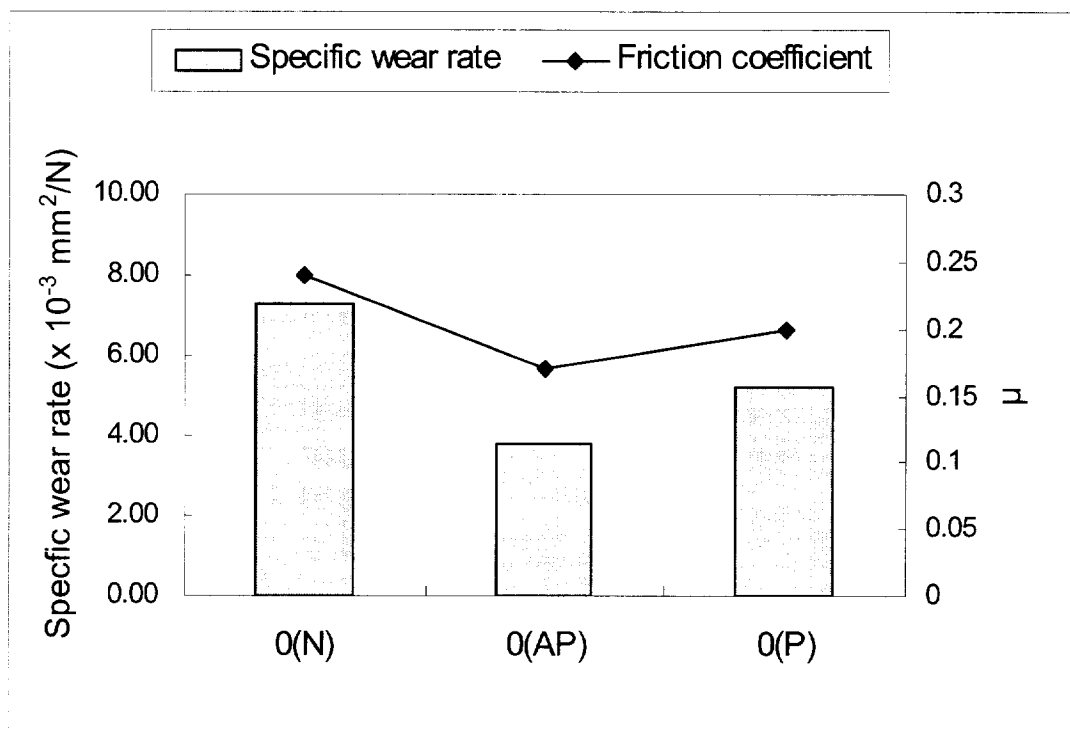


Fig.7 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=24\text{N}$, $v=1.3\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

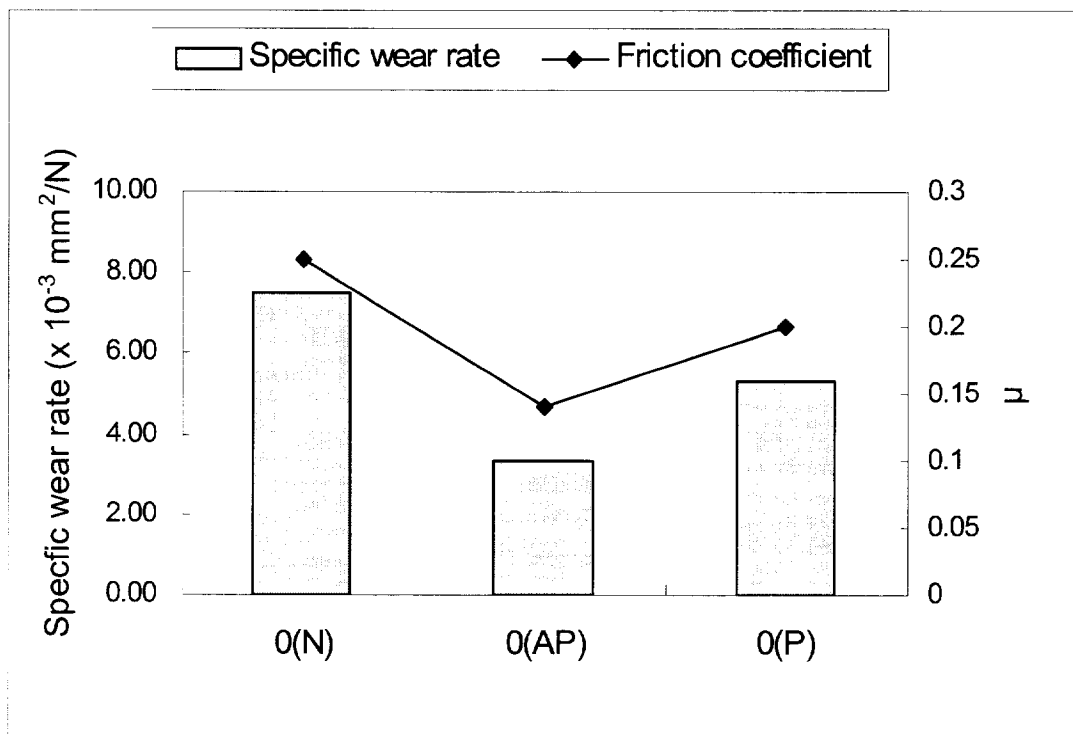


Fig.8 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=36\text{N}$, $v=1.9\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

4.1.2 사교적층판의 경우

Fig.9는 $P=12\text{N}$, $v=0.6\text{m/s}$ 의 조건에서 적층방향 $[0/90]_{12s}$ 와 $[0/45/90]_{8s}$ 의 복합재 시험편을 시험한 결과를 나타내었다. $[0/45/90]_{8s}$ 적층시 보다 $[0/90]_{12s}$ 적층한 복합재의 시험편이 비마모율과 마찰계수가 낮게 나타났다. $[0/90]_{12s}$ 적층시는 $[0]_{24s}$ 적층시 AP방향의 실험결과와 유사하였다.. 이는 초기 마모시 탈락한 섬유와 마멸입자들이 마모막 형성에 영향을 미쳤음을 알 수 있으며 경면상대재와 복합재 간에 윤활제와 같은 역할을 할 수 있음을 나타낸다.

Fig.10은 적층방향 $[0/90]_{12s}$ 와 $[0/45/90]_{8s}$ 의 복합재 시험편을 $P=24\text{N}$, $v=1.3\text{m/s}$ 의 조건에서 실험한 결과이다. 전체적인 경향은 Fig.9와 유사하게 나타났다.

Fig.11은 적층방향 $[0/90]_{12s}$ 와 $[0/45/90]_{8s}$ 의 복합재 시험편을 $P=36\text{N}$, $v=1.9\text{m/s}$ 의 조건에서 실험한 결과이다. 비마모량과 마찰계수는 Fig.9와 10보다 조금씩 증가하였으나 초기마모시 탈락한 섬유와 마멸입자들이 마모막을 형성한 후에는 값이 안정상태를 나타내었다.

Fig.12는 적층방향에 따라 복합재 시험편을 $P=12\text{N}$, $v=0.6\text{m/s}$ 의 조건에서 실험한 결과이다. 마찰계수와 비마모율의 값은 $[0]_{24s}(N)$, $[0/45/90]_{8s}$, $[0/90]_{12s}$, $[0]_{24s}(AP)$, 의 순서로 높았다. $[0]_{24s}(AP)$, $[0/90]_{12s}$ 의 값은 차이가 별로 나지 않았다.

Fig.13은 적층방향에 따라 복합재 시험편을 $P=24\text{N}$, $v=1.3\text{m/s}$ 의 조건에서 실험한 결과이다. 결과 값은 전체적으로 조건이 $P=12\text{N}$, $v=0.6\text{m/s}$ 일 때와 유사하나 앞의 조건보다 마찰계수와 비마모율의 값이 전체적으로 증가하였다.

Fig.14는 적층방향에 따라 복합재 시험편을 $P=36\text{N}$, $v=1.9\text{m/s}$ 의 조건에서 실험한 결과이다. 이 조건에서도 역시 앞의 두 그림에서 알 수 있듯이 전체적인 경향은 유사하게 나타나며 앞의 그래프들의 값보다 약간씩 전체적으로 증가함을 볼 수 있으며, 약간의 차이점은 $[0]_{24s}$ 의 (N)방향으로 실험하였을 때의 마찰계수와 비마모율 값이 앞의 두 그래프의 결과 값보다 높게 나타남을 알 수 있

는데 이는 초기에 하중과 속도의 조건이 앞의 조건보다 높게 시작하지만 초기 마모시에 마모막 형성이 일어나지 않아 마찰계수가 더 크게 나타났으며, $[0]_{24s}$ (AP)방향과 $[0/90]_{12s}$ 의 마찰계수와 비마모율 값은 앞의 두 결과들 보다 낮게 나타나는데 이는 초기 마모시에 앞의 두 조건들보다 이 조건에서 마모막의 형성이 잘 일어나 경면상대재와 복합재 사이의 윤활작용이 더 잘 일어났음을 알 수 있다.

복합재를 사교적층판으로 한 경우 즉, 적층방향을 $[0/90]_{12s}$ 와 $[0/45/90]_{8s}$ 로 했을 경우이다. 이 때의 평균 마찰계수와 비 마모율의 값은 $[0]_{24s}$ (N) 방향과 $[0]_{24s}$ (AP) 방향 사이의 값을 나타내고 있다. $[0/90]_{12s}$ 의 평균 마찰계수와 비마모율의 값은 $[0]_{24s}$ (AP) 방향의 값에 더 가까운 결과를 나타내고 있으며 $[0/45/90]_{8s}$ 의 평균 마찰계수와 비마모율은 $[0/90]_{12s}$ 의 값에 더 가깝게 나타나고 있다. 이것은 복합재를 $[0/90]_{12s}$ 로 했을 경우는 $[0]_{24s}$ (N) 방향과 $[0]_{24s}$ (AP) 방향을 사교적층한 경우라 볼 수 있다. 이것은 일방향일때 가장 낮은 평균 마찰계수와 비마모율을 보이는 $[0]_{24s}$ (AP) 방향이 마모시에 평균 마찰계수와 비마모율을 낮추는데 영향을 미친 결과라 볼 수 있다. 적층방향이 $[0/45/90]_{8s}$ 인 경우에도 역시 $[0/90]_{12s}$ 로 적층한 것에 [45]적층판을 추가한 것으로 볼 수 있으며 실험데이터 역시 같은 경향으로 나타났다.

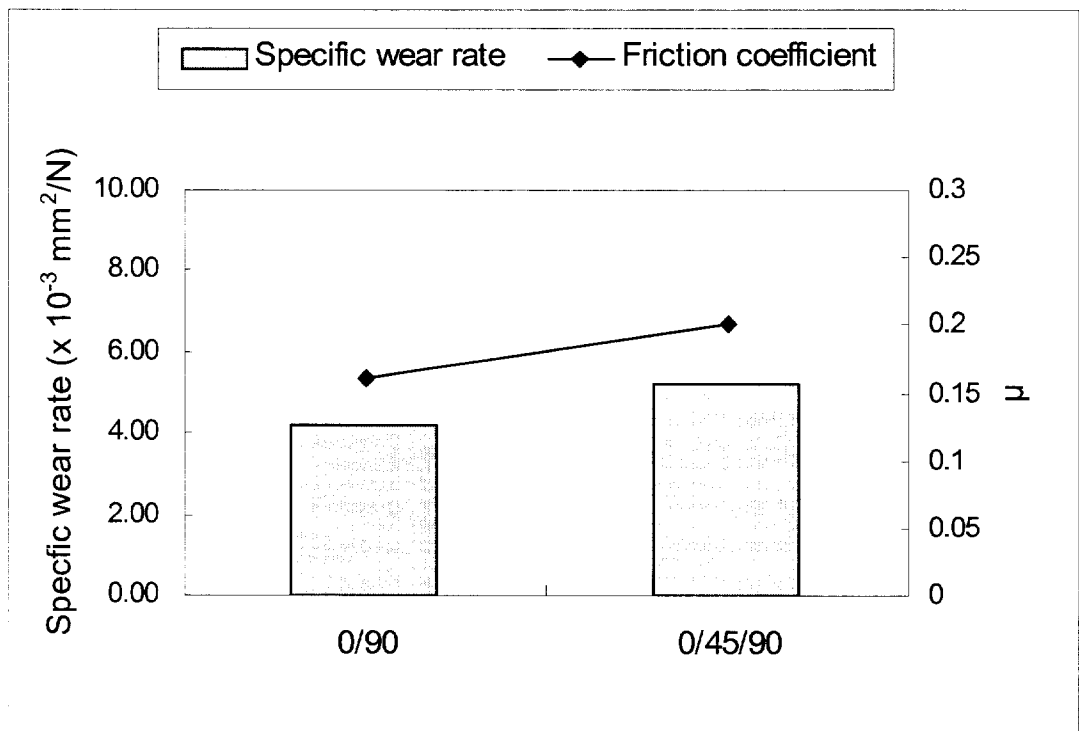


Fig.9 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=12\text{N}$, $v=0.6\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

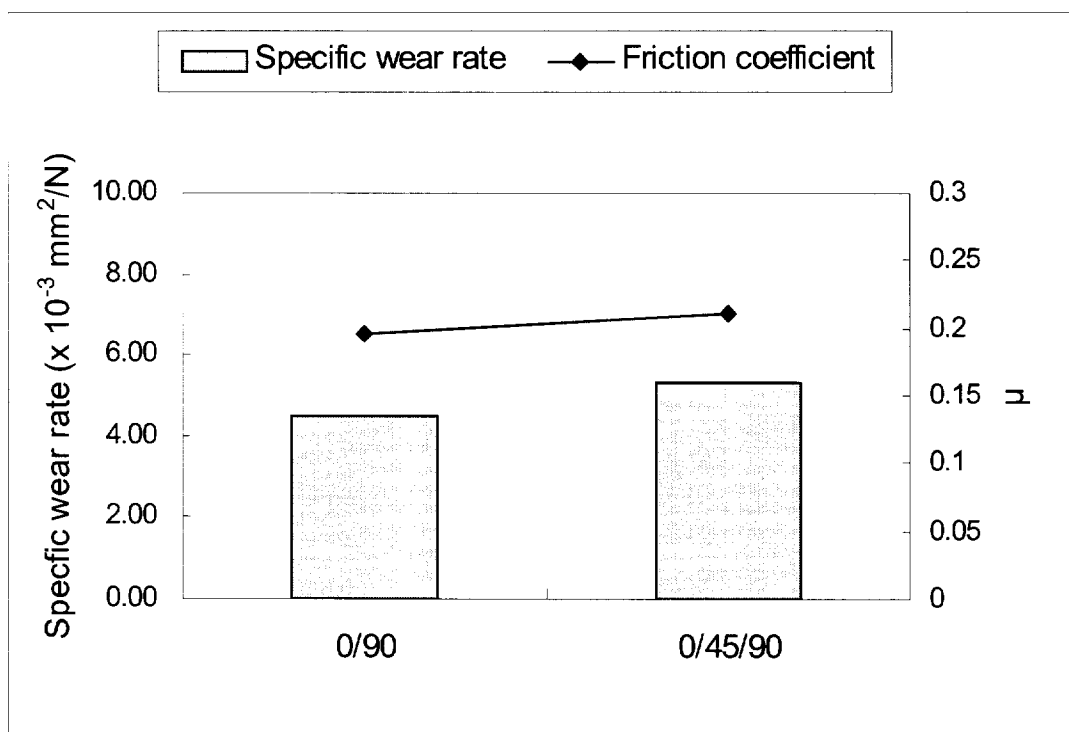


Fig.10 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=24\text{N}$, $v=1.3\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

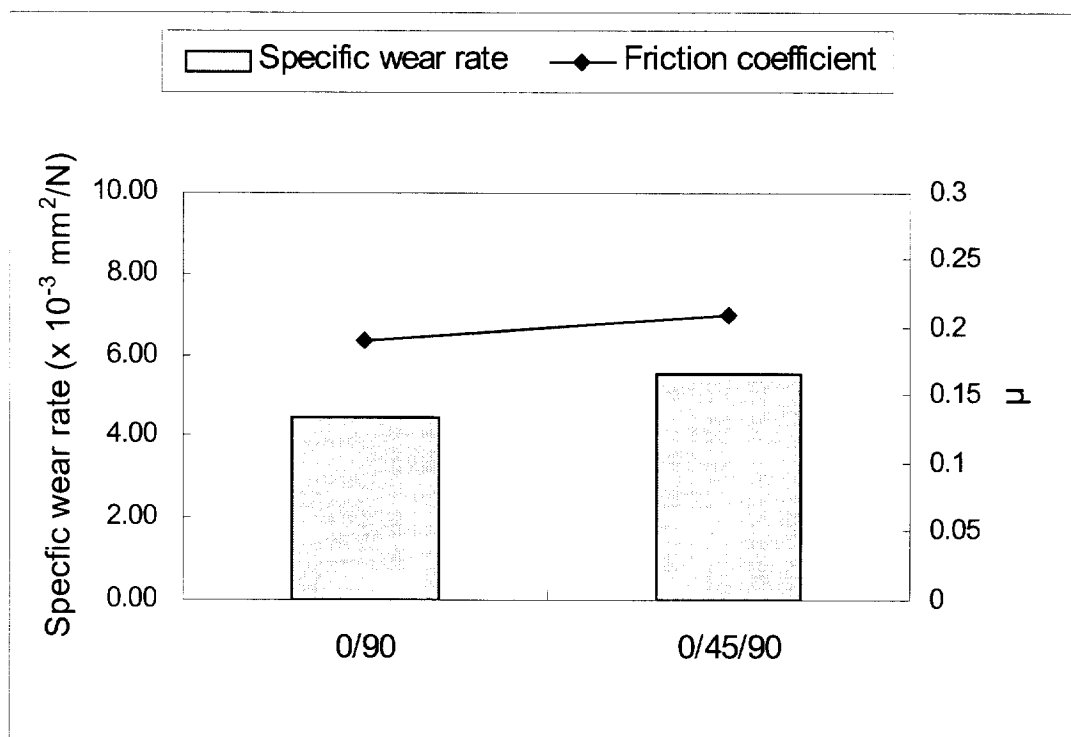


Fig.11 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=36\text{N}$, $v=1.9\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

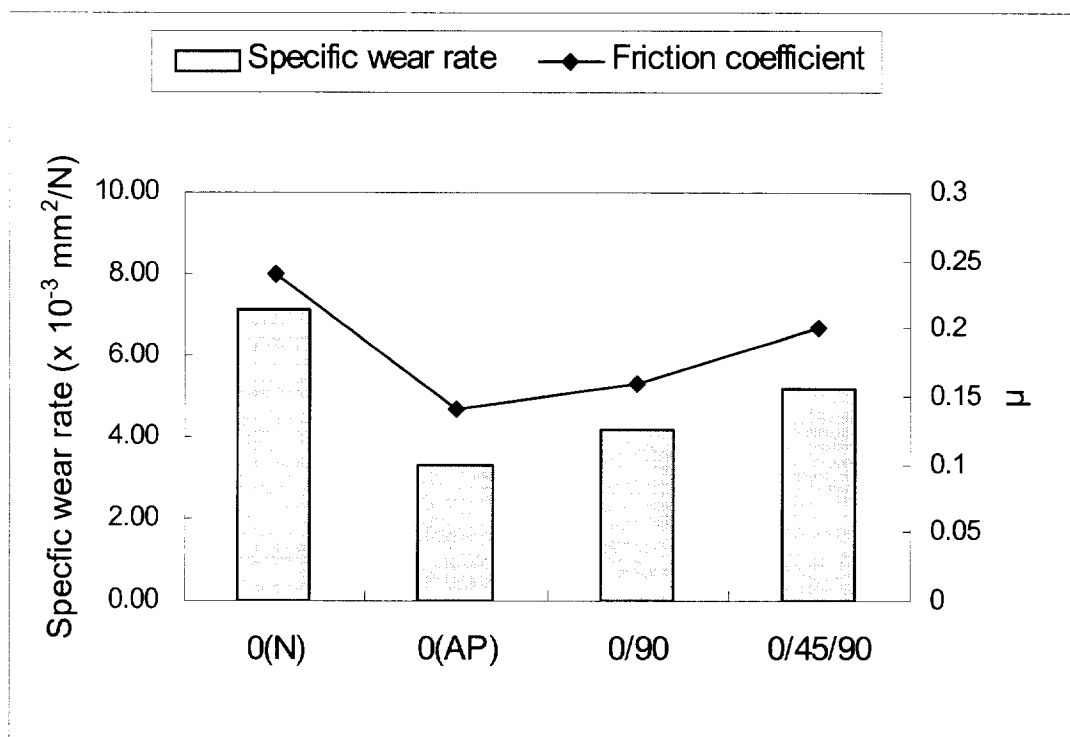


Fig.12 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=12\text{N}$, $v=0.6\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

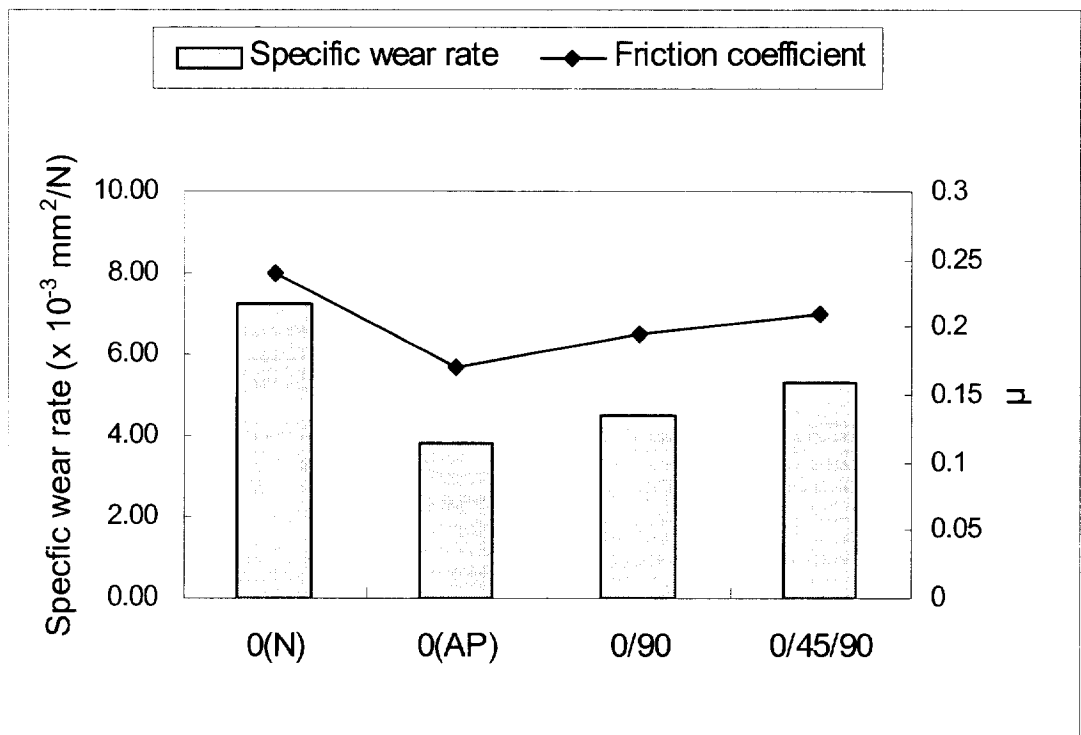


Fig.13 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=24\text{N}$, $v=1.3\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

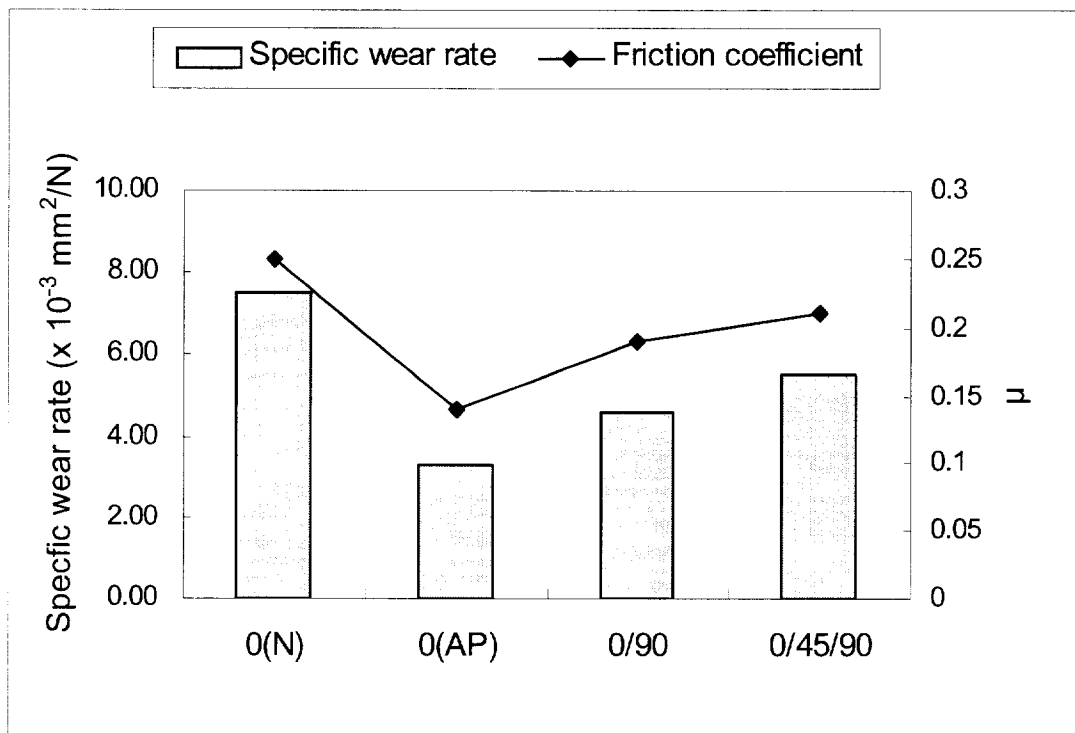


Fig.14 Specific wear rates and friction coefficient of the carbon composite as the lay-up orientation at $P=36\text{N}$, $v=1.9\text{m/s}$ tested on a pin-on-disc device.

4.2 파면해석

편온디스크형 마모시험기에서 섬유방향에 따라 시험된 시편의 마모면은 Fig.15~19에서 복합적이고 다양한 마모 메카니즘을 나타내고 있다.

경면 가공된 상대재에 대한 복합재의 마모면은 먼저 Fig.15는 적층방향 $[0]_{24s}$ 인 N방향에서의 복합재의 마모면을 나타낸 것으로 방향에서는 섬유단면의 연마가 일어났으며 약간의 마모막이 생성되었으나 복합재의 마모량과 마찰계수는 가장 크게 나타났다. 이러한 현상은 마모막의 생성이 거의 일어나지 않았고, 섬유의 이탈현상이나 절단이 일어나기가 어려워 미끄럼 마모에서 가장 영향을 미치는 웅덩이, 얇은 조각, 재료의 변형 등과 같은 웅착마모 메카니즘이 거의 나타나지 않았다.

Fig.16은 적층방향 $[0]_{24s}$ 인 AP방향에서의 복합재의 마모면을 나타낸 것으로 섬유들이 상대면과의 접촉으로 웅착마모가 일어났으며, 피로마모인 균열(cracking)에 의한 섬유파단이 발생하였으며, 긁힘(scratch), 고랑(furrow), 섬유의 조각박리(chips flake) 등이 발생하여 섬유 덩어리들이 떨어져 나가 흩어져 있음을 볼 수 있다. 표면은 마모막으로 덮여 있으며, 섬유와 기지가 교대로 있어서 마멸입자들이 잘 섞이며 이것이 섬유가 탈락한 자리를 메우고 전체 마찰면에 고루 분포되어 전체 마찰면이 내마모성을 지니며 마모량과 마찰계수도 적층방향에 따른 복합재 시편 중 가장 낮게 나타났다.

Fig.17은 적층방향 $[0]_{24s}$ 인 P방향에서의 복합재의 마모면을 나타낸 것으로 연삭마모 메카니즘인 긁힘과 쟁기질현상 등이 보이며 균열과 마모입자 등도 나타난다. 또한 섬유의 절단과 균열로 인해 탄소섬유들이 연마되어 평평해진 옆면을 나타내고 있으며 일부의 섬유들이 상대면과의 상호작용으로 인해 떨어져 나가고 그 자리는 마모분으로 채워진 모습이 나타난다.

Fig.18은 적층방향 $[0/90]_{12s}$ 인 복합재의 마모면을 나타낸 것으로 상대면과의 응착마모가 나타나며 섬유파단도 볼 수 있다. 또한 피로마모에서 주로 보이는 균열(cracking)과 마멸된 입자들이 마모면 위에 퍼져있는 것을 볼 수 있으며 일부 마모막이 나타난다.

Fig.19는 적층방향 $[0/45/90]_{8s}$ 인 복합재의 마모면을 나타낸 것으로 피로마모에 의해 섬유의 균열(cracking)이 발생했으며 고랑, 섬유의 조각박리 등이 나타나며 섬유덩어리들이 떨어져 나가 흩어져 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 섬유가 탈락한 자리를 마모입자들이 잘 채우지 못하고 있으며 마모막 또한 거의 보이지 않고 있다.

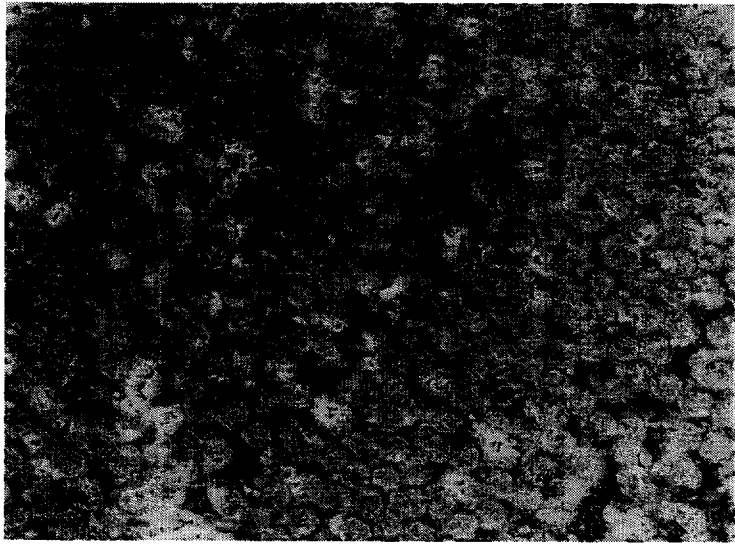


Fig.15 Micrographs of the worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device against lay-up orientation $[0]_{24s}(N)$ at $P=24N$, $v=1.3m/s$.

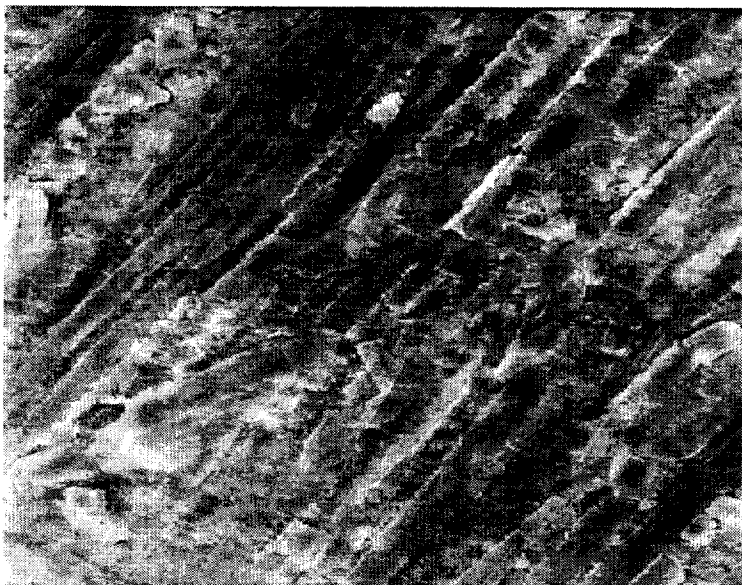


Fig.16 Micrographs of the worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device against lay-up orientation $[0]_{24s}(AP)$ at $P=24N$, $v=1.3m/s$.

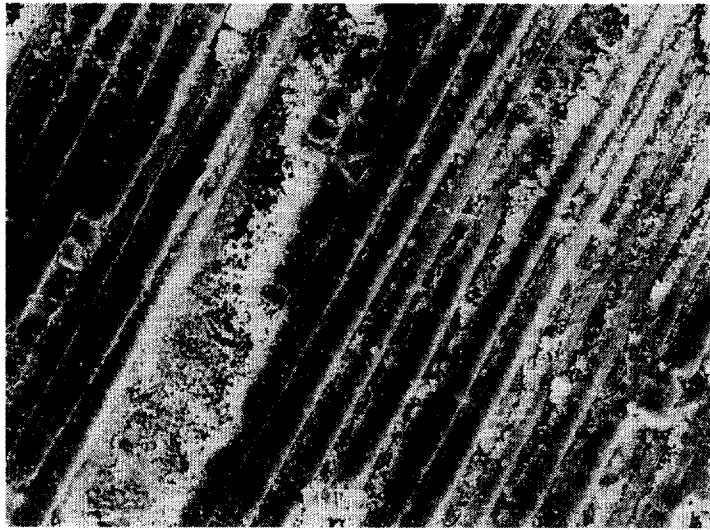


Fig.17 Micrographs of the worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device against lay-up orientation $[0]_{24s}(P)$ at $P=24N$, $v=1.3m/s$.



Fig.18 Micrographs of the worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device against lay-up orientation $[0/90]_{12s}$ at $P=24N$, $v=1.3m/s$.

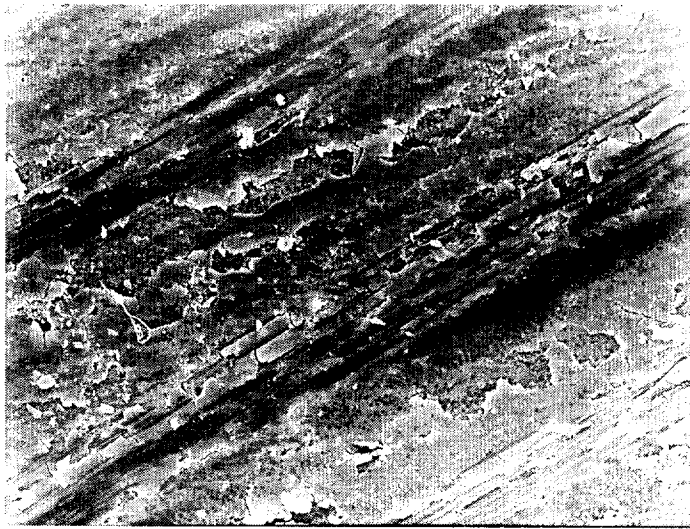


Fig.19 Micrographs of the worn surface of the composite tested on a pin-on-disc device against lay-up orientation $[0/45/90]_{8s}$ at $P=24N$, $v=1.3m/s$.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 탄소 섬유강화 복합재를 경면 가공한 STS 304 상대재를 마찰 상대재로 하여 섬유방향, 적층방향, 마찰방향, 속도, 하중의 영향에 대하여 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일방향 CFRP 복합재의 마모거동에 영향을 미치는 섬유방향에 따른 효과는 다르며 작용하는 마모 메커니즘의 형태에 의존한다. N방향의 비마모율과 마찰 계수가 가장 높게 나타나고, AP방향의 그것이 가장 낮게 나타났다.
- (2) N방향과 P방향의 경우에 CFRP 복합재료의 비마모율은 하중과 미끄럼속도가 증가하면 증가하지만 AP방향의 경우에는 증가하다가 감소한다.
- (3) CFRP 복합재의 적층방향이 $[0]_{24s}$ 에서는 AP 방향이 가장 마찰계수가 낮았으며 그 값은 복합재 적층방향이 $[0/90]_{12s}$ 일 때의 값과 유사하였다.
- (4) CFRP 복합재료와 STS304 상대재에 건조 미끄럼이 일어날 때 적층방향이 $[0]_{24s}$ 에서의 AP 방향일 때 가장 낮은 마찰계수와 가장 높은 마모저항이 관찰되었다.

참 고 문 헌

- 1) Scott D. Henry, 1992, "Materials for friction and wear applications", ASM Handbook, ASM International, Materials Park, Pa., U.S.A. 18, p. 820.
- 2) Tsukizoe T. and Ohmae N., 1975, "Wear Performance of Unidirectionally Oriented Carbon-fiber-reinforced Plastics", Tribol. Int., Vol. 8, pp. 171-175.
- 3) Sung N. and Suh N. P., 1979, "Effect of Fiber Orientation in Friction and Wear of Fiber Reinforced Polymer Composites", Wear Vol. 53, pp. 129-141.
- 4) Bonfield W., 1976, "Wear Transfer Films Formed by Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Sliding on Stainless Steel", Wear, Vol. 37, pp. 113-121.
- 5) Guicciardi S., Melandri C., Lucchini F. and de Portu G., 2002, "On data dispersion in pin-on-disk wear tests", Wear, Vol. 252, pp. 1001-1006.
- 6) Giltrow J. P. and Lancaster J. K., 1970, "The Role of the Counterface in the Friction and Wear of Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Resins", Wear, Vol. 16, pp. 359-374.

- 7) Shim, H.H., Kwon, O.K. and Youn, J.R., 1992, "Effects of fiber orientation and humidity on friction and wear properties of graphite fiber composites", *Wear*, Vol. 157, pp.141-149.
- 8) Suh N. P. and Sin H. C., 1981, "The Genesis of Friction", *Wear*, Vol. 69, pp.91-114.
- 9) Lu Z., Friedrich K., Pannhorst W. and Heinz J., 1993, "Wear and friction of a unidirectional carbon fiber-glass matrix composite against various counterparts", *Wear*, Vol.162-164, pp.1103-1113.
- 10) Beanmont W. R., Schultz M. and Friedrich K., 1990, "Delaware composite design encyclopedia", Technomic, Vol.4, pp.142-153.
- 11) Robert A. Storer, 1997, "Wear testing with a pin-on-disc apparatus", ASTM G 99, Pa, U.S.A. p. 392.
- 12) Shim H. H, Kwon O. K. and Youn J. R., 1991, "Effects of structure and humidity on friction and wear properties of carbon fiber reinforced epoxy composites", *Proc. SPE SNTEC.*, p.1997.
- 13) Tsukizoe T. and Ohmae N., 1977, "Wear mechanism of Unidirectionally Oriented Fiber-Reinforced Plastics", *ASME Trans.*, pp.403-407.

감사의 글

제어기계공학과 대학원의 문을 두드린 때가 엇그제 같은데 어느덧 그 생활을 마무리하게 되었습니다. 그 동안 저에게 학문적, 정신적으로 도움을 주신 많은 고마운 분들이 생각납니다.

부족한 저를 항상 관심과 격려로 열과 성의를 다하여 지도해주신 고성위 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 웃는 얼굴로 격려해주신 안수길 교수님, 편안한 대화로 지속적인 관심을 보여주신 양주호 교수님, 김시영 교수님, 고대권 교수님, 장지성 교수님 또 학과사무실 옆방에 계시면서 항상 관심과 배려를 아끼지 않으신 김영복 교수님에게도 감사를 드립니다. 특히, 학업을 시작하면서 논문이 완성되기까지 아낌없는 충고와 학문의 방향을 제시해 주고 자세하게 가르쳐 준 양병춘 선배의 관심과 어렵고 힘겨움을 느낄 때마다 힘을 주시고 도움을 주신 엄운성 박사님과 응용역학 실험실의 변재주, 안홍철, 류재익, 곽동성 후배들에게도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

항상 곁에서 큰 힘이 되었던 영원한 친구들 송무섭, 이태호, 이정욱, 황운철, 서형훈 등의 친구들에게도 고마움을 전합니다. 또한 떨어져 있었지만 박상식 후배에게도 고마움을 전합니다.

마지막으로 항상 믿음을 갖고 저를 바라보며 응원해 주신 사랑하는 부모님과 형님, 그리고 항상 저를 아껴주고 걱정해주며 사랑으로 대해주던 그녀에게 감사를 드립니다.