

항공기 브레이크 재료용 탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모 거동

우성택 · 윤재륜

한국과학기술원 정밀공학과

Friction and Wear Behavior of Carbon/Carbon Composites for Aircraft Brake Material

Seong T. Woo and Jae R. Youn

Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract—Friction and wear behavior of a carbon/carbon composite material for aircraft brake material was experimentally investigated. Friction and wear test setup was designed and built for the experiment. Friction and wear tests were conducted under various sliding conditions. Friction coefficients were measured and processed by a data acquisition system and amount of wear measured by a balance. Stainless steel disk was used as the counterface material. Temperature was also measured by inserting thermocouple 2.5 mm beneath the sliding surface of the carbon/carbon composite specimen. Wear surfaces were observed by SEM and analyzed by EDAX. The experimental results showed that sliding speed and normal force did not have significant effects on friction coefficient and wear factor of the composite. Temperature increase just below the surface was not large enough to cause any thermal degradation or oxidation which occurred at higher temperature when tested by TGA. Wear film was generated both on the specimen and on the counterface at relatively low sliding speed but cracks, grooves, and wear debris were observed at high sliding speed. Friction coefficient remained almost constant when the sliding speed or normal load was varied. It is believed that the adhesive and abrasive components contributed mainly to the friction coefficient. Wear behavior at low sliding speed was governed by wear film formation and adhesive wear mechanism. At high speed, fiber orientation, ploughing by counterface asperities, and fiber breakage dominated wear of the carbon/carbon composite.

1. 서 론

탄소/탄소 복합재료(carbon/carbon composite)란 탄소섬유로 이루어진 다공성 섬유 구조에 모재(matrix)로서 탄소를 충전시킨 복합재료로 탄소섬유 강화 탄소(carbon fiber reinforced carbon)라고도 한다. 이러한 탄소/탄소 복합재료는 2500°C 이상의 고온에서도 상온에서의 강도가 유지되며 밀도가 낮고 열충격 저항성과 열전도도 및 마찰과 마모특성이 우수하기 때문에 로켓트 노즐과 우주 왕복선의 내화타일, 항공기의 브레이크 디스크와 같은 우주항공 재료로 널리 사용되고 있다. 또한 탄소/탄소 복합재료는 화학적으로 안정하여 내식 재료로 사용되며, 좋은 생체 적합성이 있어 혈전 현상을 보이지 않으므로 인공 심장

판막, 인공 혈관, 인공 뼈, 인공 관절 등의 생체 재료에도 응용되고 있다.

그러나 탄소는 대기중에서 약 500°C 이하의 낮은 온도에서 쉽게 산화되어 기계적 성질이 급격히 저하되는 취약점이 있다. 그래서 탄소/탄소 복합재료의 우수한 고온 특성을 유지하기 위해서는 산화분위기나 대기중에서 쉽게 산화되는 결점을 보완해야 한다. 탄소/탄소 복합재료의 산화방지를 위해서는 표면에 내산화막을 코팅(coating)하는 방법과 억제제(inhibitor)를 첨가하여 모재의 내산화성을 향상시키는 방법 등이 있다.

20세기에 이르러 수송체가 점차 대형화 및 고속화되면서 브레이크 마찰계면에서의 열방출 속도와 마찰면의 온도가 증가되면서 고성능 브레이크 재료의

필요성에 따라 금속계 마찰재료, 금속 분말과 비금속 분말을 사용한 소결 마찰재료, 그리고 탄소/탄소 복합재료 순으로 개발되어 왔다[1]. 브레이크는 마찰에 의하여 움직이는 물체의 운동에너지를 열에너지로 바꾸어 이 열을 대기중으로 방출함으로써 물체를 정지시키는 기능을 갖고 있다. 항공기용 브레이크는 차량용에 비해 고속에서 제동을 시작하므로 항공기의 착륙 후 수십초 이내에 막대한 양의 에너지를 흡수해야 하는데 전투기의 비상 이륙정지(emergency rejected take-off: RTO)시에는 브레이크 계면에서의 온도가 1300~1500°C 까지 상승된다. 이때 에너지 흡수량은 4천만 주울(Joule)에 이르는데 브레이크 디스크의 마찰표면은 1000°C 이상 상승하며 이때 마찰력의 저하나 기계적 강도저하가 없어야 안전한 제동을 할 수 있다. 탄소/탄소 복합재료는 항공기용 브레이크 재료로 사용될 경우 금속계 마찰 재료에 비해 고온에서 강도가 2배이고, 열용량 2.5배, 무게 절감은 40%에 이르며 이에 대한 마찰 및 마모 특성 연구가 주목되고 있다.

현재까지 자동차의 브레이크 라이닝 및 디스크 패드에 석면이 주성분인 재료가 사용되어 왔는데 석면 섬유는 폐질환, 심장 쇠약, 발암성 등 인간에게 위험 물질로 판명되었기 때문에 탄소/탄소 복합재료가 석면의 대체물로서 주철 디스크(cast iron disk)에 대한 탄소/탄소 복합재료 브레이크 패드가 활발하게 연구되고 있으며, 성공적인 연구가 많은 나라에서 이루어지고 있다[3].

탄소/탄소 복합재료는 마찰 및 마모특성과 열충격 저항성을 이용하여 고성능 브레이크로의 응용이 활발하게 이루어지고 있으며, 여러 연구들에서 보고된 탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모조건과 그에 따른 실험결과는 아래와 같다.

S. Kimura, E. Yasuda 그리고 N. Narita[1]는 탄소/탄소 복합재료의 열처리 온도(heat treat temperature), 탄성계수, 밀도, 굽힘 강도를 변화시키며 실험하였다. 마모율은 마찰계수와 표면거칠기에 따라 지수함수적으로 증가했는데 이는 탄소섬유의 노출로 인하여 연삭마모가 마모기구를 지배하였음을 보여주는 것이며 탄성계수에는 반비례했다. 2000°C 이상 열처리된 탄소/탄소 복합재료의 마찰면에서는 흑연막(graphite film)이 관찰되었고 마찰계수가 0.4 이상에서는 연삭마모 메카니즘, 0.4 이하에서는 산화 마모 메카니즘이 지배 인자로 보고되었다[2].

S. Awasthi와 J.L. Wood[2]는 탄소/탄소 복합재

료를 가지고 링 온 링(ring on ring) 형태로 실제 비행기 제동조건에서 실험하였는데, 비행기가 착륙 정지시 조건인 브레이크 마찰면의 온도가 매우 높은 조건에서는 마찰계수는 0.6까지 상승하였고 저속에서는 0.1 이하였으며 탄소/탄소 복합재료의 일반적인 마모기구는 마모 입자(wear debris)로부터 마모막이 형성되고, 반복된 마찰로 인하여 마모막의 편상 박리(delamination) 현상이 발생하는 것이라고 설명하였다[3].

B. Pu와 Q. Huang[3]은 밀도 1.55-1.6 g/cm³, 2000°C로 열처리된 탄소/탄소 복합재료로 된 외경 75.8 mm, 내경 60.6 mm인 2개의 rotor와 stator로 압력, 속도를 변화시키면서 마찰과 마모를 해석하였는데 8 kg/cm²의 압력하에서 마찰속도를 2 m/s에서 6 m/s로 증가시키기에 따라 마찰계수는 0.28에서 0.2로 감소하였고, 마찰속도가 6 m/s에서 10 m/s로 증가되었을 경우 마찰계수도 0.2에서 0.48로 증가하였으며 10 m/s 이상의 마찰속도에서는 마찰계수는 거의 일정하였다. 저속, 저하중에서의 마모율이 고속, 고하중에서의 마모율보다 10내지 100배 정도 큰 값을 갖는 것으로 보고하였다. 저속, 저하중인 경우에 마찰 및 마모는 온도와 압력의 함수이고 고하중, 고온에서만 흑연막이 형성되어 강하게 응착함으로써 내마모성이 증가하는 것으로 설명되었다[5].

E. Fitzer와 W. Fritz 그리고 A. Gkogkidis[4]는 일방향, 2방향 탄소/탄소 복합재료로 다양한 열처리 온도, 섬유 분율, 섬유 배열(fiber orientation)을 가지는 시편을 선택하여 마찰 및 마모 실험을 하였는데 배향각이 40°, 120°에서 최대값의 마찰과 마모가 측정되었고 탄성계수 값은 최소를 나타내었다. 또 열처리 온도가 증가함에 따라 마찰과 마모는 감소하였는데 이는 흑연화가 증가함에 따라 연삭효과(abrasion effect)가 감소하고 흑연 마모막의 응착효과가 증가하여 나타난 현상으로 설명하였다. 섬유 분율의 증가에 따라서도 마찰과 마모는 감소함을 나타내었다.

R.C. Bill[5]은 일정속도하에서 탄소재료(carbon material)와 강철디스크(steel disk)에 대해 실험한 결과 마찰계수는 0.13~0.16의 거의 일정한 값을 얻었고 속도가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하였는데 마찰면의 온도상승으로 인한 전단강도의 감소 때문으로 설명하였다.

탄소/탄소 복합재료의 제조방법은 탄소섬유를 사용하여 여러가지 방법으로 Preform을 제작한 후 모재(matrix)로써 수지를 사용하여 수지를 채우는 방법에

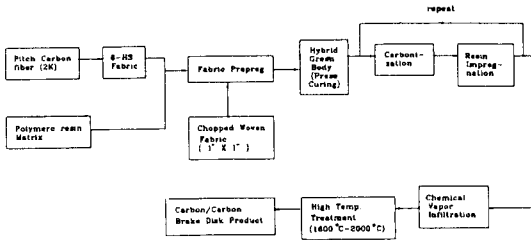


Fig. 1. Manufacturing process of carbon/carbon composite

따라 액상 함침법(liquid impregnation method)과 화학증착법(chemical vapor deposition method)으로 나눌 수 있다[8]. 액상 함침법은 비교적 두꺼운 시편을 제작하는데 효과적이고 경제적으로 저렴한 반면, 탄화과정 동안 휘발성 물질의 손실 및 모재 자체의 수축이 발생하여 기공이 많아지고 고밀도화에 어려운 단점이 있다. 화학증착법은 고밀도화에 좋은 방법이나 브레이크 디스크와 같은 두꺼운 재료에는 균일한 밀도를 얻기 어려운 단점이 있다.

탄소/탄소 복합재료의 제조공정은 초벌 성형품(green body) 제조, 1차 탄화, 수회의 함침 및 재탄화, 흑연화, 내산화 처리, 기계가공의 몇 단계로 구성되어 있는데 각 제조 단계에서의 공정 변수(기질 precursor의 종류, 탄소섬유 종류 및 표면 처리 유무, 탄화 속도, 최종 탄화온도, 함침 방법, 내산화 처리 방법)에 따라 재료의 계면 특성, 미세구조, 밀도 등이 달라지고 이는 직접적으로 재료의 기본 물성에 영향을 준다. Fig. 1은 실험에 사용한 항공기용 브레이크 재료인 탄소/탄소 복합재료의 제조과정이다.

탄소/탄소 복합재료의 마찰과 마모 특성은 제조 공정 변수, 상대 마찰면 재료, 마찰 조건, 섬유의 배열에 의하여 변화하며, 탄소/탄소 복합재료의 마찰과 마모에 대한 여러 연구보고서들에 따르면 실험에 사용된 탄소/탄소 복합재료의 마찰과 마모 현상은 매우 복잡하여 마찰되는 재료, 조건, 환경 등에 따라 그 메커니즘도 달라지며 탄소/탄소 복합재료에 대한 정보는 매우 부족하므로 기본적인 마찰 및 마모 특성의 연구는 매우 중요한 의미가 있다.

본 연구에서는 실제 비행기 브레이크에 작용하는 압력과 비슷하게 수직하중을 가하고 다양한 마찰속도에 따른 마모량과 마찰계수, 마찰면의 온도의 측정과 더불어 마모된 표면의 형상을 관찰하여 각 경우의 마찰과 마모 현상에 대하여 연구하였다.

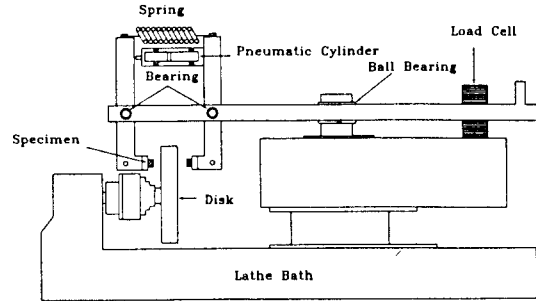


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup

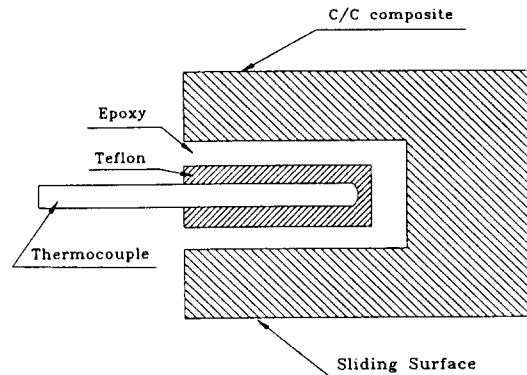


Fig. 3. Schematic diagram of thermocouple installation

2. 실험

탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모 실험을 위하여 본 연구실에서 설계 제작한 장치는 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 선반(lathe)의 주축에 디스크가 고정되어 회전하고 시편 호울더에 있는 시편이 디스크와 접촉하여 상대적인 미끄럼 운동을 하게 된다. 실험 장치는 크게 2개의 수직보와 1개의 수평보로 나누어져 있는데 수직보는 수평보와 베어링으로 연결되어 있고, 공압 실린더로 탄소/탄소 복합재료 시편이 디스크와 접촉하도록 하중을 가하는 역할을 한다. 수평보는 평면상에서 회전이 가능하도록 베어링으로 지지되어 있어서 실험시 발생한 마찰력에 의한 수평보의 회전을 로드셀(load cell)로 전달하여 마찰력을 측정할 수 있으며 마찰계수는 마찰력과 마찰면에 작용하는 수직하중의 비로서 계산할 수 있다.

마찰 온도는 마찰면으로부터 2.5 mm 내부의 온도를 측정하였으며 이를 위해 마찰면에 평행하게 마찰면의 중심축까지 드릴로 구멍을 내어 열전대(thermocou-

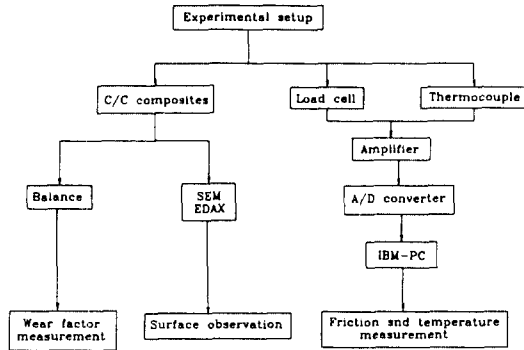


Fig. 4. Schematic diagram of data acquisition system employed for measurement of frictional force

ple)를 설치하였으며, 절연을 위해 열전대 끝을 테프론으로 감았고 구멍내의 공간은 예폭시로 충전하였다 (Fig. 3).

로드셀과 열전대에서 측정된 마찰력과 마찰면 온도의 출력신호는 증폭기(amplifier)를 통해 증폭되고 증폭된 신호는 아날로그/디지털 변환기(analog/digital converter)에 의해 수치화되어 IBM-PC/XT에 입력되었다(Fig. 4).

본 실험에 사용된 시편은 항공기 브레이크용 탄소/탄소 복합재료로서 마찰면은 Chopped Woven Fabric이고 등방성의 특성을 나타내며, 비마찰면은 Continuous Woven Fabric으로 구성되어 있다. Continuous Woven Fabric의 형태는 8매 주자직(8-harness satin)의 Fabric형으로 이와 같은 형태는 변형이 용이하고 단위길이당 높은 Yarn수를 제공하므로 평직형(plain weave)보다 모든 방향에서 우수한 강도를 전달하여 주는 특징이 있으며 Chopped Woven Fabric의 구조는 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 마찰면 재료로 Chop형을 사용한 것은 우수한 마찰특성과 등방성의 열적 특성을 제공하므로 온도상승시에 열적 특성이 우수하기 때문이다. 실험한 탄소/탄소 복합재료는 밀도 1.76~1.78 g/cm³, 기공율(porosity) 4.4~7.3%이며 사용된 섬유는 Pitch계 탄소섬유가 사용되었으며 직경은 평균 10 μm이고 한개의 Yarn당 필라멘트(filament)수는 2000개이다.

탄소/탄소 복합재료는 다이아몬드 절단기(diamond saw)로 4 mm×6.5 mm의 사각형 단면을 가지는 시편으로 절단하였으며 상대 마찰면의 재료로는 스테인레스강(SUS 304)을 사용하였고 디스크의 직경은 240 mm, 두께 10 mm이고 마찰 트랙의 직경은 230 mm인 경우와 디스크의 직경 370 mm, 두께 10 mm,

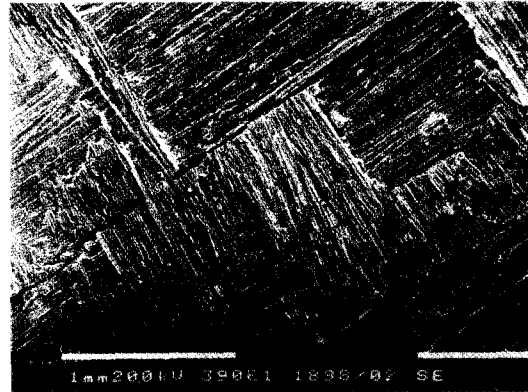


Fig. 5. SEM picture of the composite surface showing chopped fabric structure with short fiber orientation

트랙 직경은 350 mm인 경우를 사용하였다. 활주면의 표면 거칠기는 연마지로 연마한 뒤 접촉식 표면조도 측정기로 측정된 Ra값은 0.1 μm 정도였고 탄소/탄소 복합재료 시편과 상대 마찰면은 메틸 알코올과 헥세인(hexane)으로 처리하였다.

실제 비행기의 착륙시 브레이크 디스크에 작용하는 미끄럼 속도는 31 m/s이고 압력은 0.88 MPa인데 본 실험에서는 실제 비행기 조건에서와 비슷한 압력하에서 다양한 속도에 대해 실험을 하였다. 3.5 kgf(1.319 MPa)의 수직하중조건에서 마찰속도를 1.93, 6.41, 9.03, 16.86, 27.5 m/s로 변화시키면서 각각의 조건에 대해 50 km의 활주거리에 대해 탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모거동을 관찰하였다. 또 다양한 속도에 따른 거동과 더불어 마찰속도 1.93 m/s, 수직하중 7 kgf의 조건으로 압력변화에 따른 마찰 및 마모 실험을 하였다. 각 실험은 4~5회씩 수행하였으며 마찰력과 마찰면의 온도는 15초와 1분 간격으로 컴퓨터에 입력하여 시간(미끄럼 거리)에 따른 변화를 알 수 있으며 시편의 질량 변화를 0.1 mg 정확도의 전자 저울로 측정하였으며, 시편은 실험이 종료된 상태 그대로 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

마찰면으로부터 2.5 mm 내부에서의 온도변화 및 마찰계수를 시간에 따라 연속적으로 측정하였으며, 그 전형적인 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 미끄럼 거리의 함수로 나타내었다. 실험은 각각 50 km의 활주 거리로 실험을 하였으며 Fig. 8에 나타난 바와 같이 평균 마찰계수는 활주 속도에 따라 거의 변하지 않음을 알

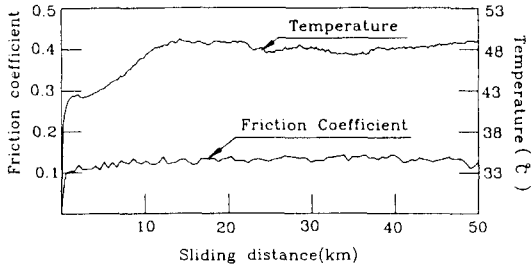


Fig. 6. Friction coefficient and temperature variation as a function of sliding distance (normal load: 3.5 kgf, sliding speed: 1.93 m/s)

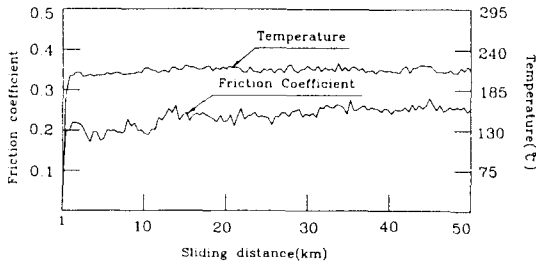


Fig. 7. Friction coefficient and temperature variation as a function of sliding distance (normal load: 3.5 kgf, sliding speed: 27.53 m/s)

수 있었다. 또한 마찰면의 온도, 수직 하중도 마찰계수에는 큰 영향을 미치지 않았다. 복합재료 시편을 자세히 조사하면 속도의 증가에 따라 마찰면에 비교적 큰 홈(grooves)과 마모막이 잘 형성되었음을 알 수 있다. 고속(27.5 m/s)의 경우는 홈이 발생하면서 그때 발생한 모래의 파편과 모래로부터 이탈된 섬유가 마찰면 사이에서 쟁기질을 하면서 마찰계수를 증가시킬 것으로 기대되나 비교적 마모막 형성이 양호한 것으로 보아 마찰계수의 증가가 크지 않은 것으로 판단되며 이때 마찰면에서 깊이 2.5 mm 지점의 측정온도가 최고 200°C 까지 상승하였으나 마찰계수는 큰 변화가 없는 것으로 보아 온도상승이 마찰계수에 미치는 영향은 작은 것으로 믿어진다.

수직하중 3.5 kgf, 속도 1.93 m/s와 수직하중 7 kgf, 속도 1.93 m/s의 실험조건에서의 결과를 비교하여 보면 마찰계수는 수직하중의 영향은 거의 없었지만 약간 감소하였는데, 이는 수직하중이 증가하여도 마모막 형성으로 인하여 실접촉 면적이 하중에 비례하여 증가하지 않았으며, 마모막 자체의 영향으로 마찰력 증가가 이루어지지 않은 것으로 보여진다.

50 km의 거리를 실험하는 동안 안정된 마찰계수

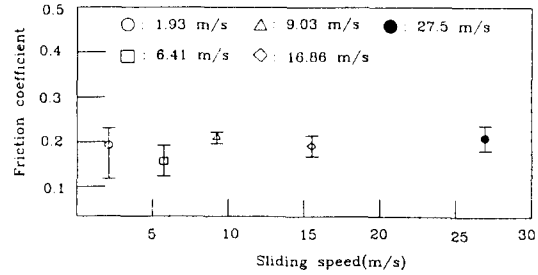


Fig. 8. Average friction coefficient for different sliding speed (normal load: 3.5 kgf)

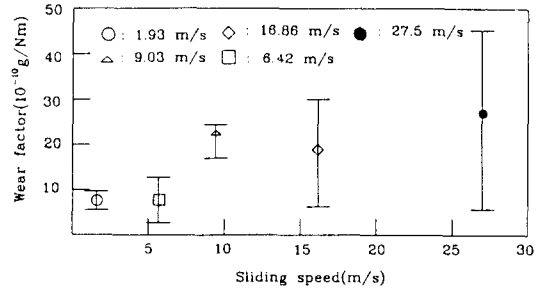


Fig. 9. Average wear factor for different sliding speed (normal load: 3.5 kgf)

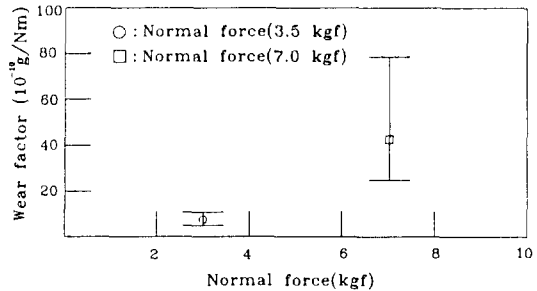


Fig. 10. Average wear factor for different normal force (sliding speed: 1.93 m/s)

곡선을 얻을 수 있었는데 이는 미끄럼 초기에는 마찰 표면에 존재하는 돌기(asperity)와 기공 등으로 인하여 불균일성이 존재하였는데 계속되는 미끄럼 마찰로 마모막이 형성되면서 매끄러운 마찰면이 형성되었기 때문으로 추정된다.

실험 전후의 무게 감소량을 측정하여 각 실험조건에서의 마모인자를 계산한 결과 미끄럼 속도의 변화에 따른 마모인자의 변화는 Fig. 9와 같이 주어졌다. 이 결과를 보면 수직하중이 일정할 때 속도가 증가함에 따라 마모율과 마모인자가 증가하는 것으로 나타났

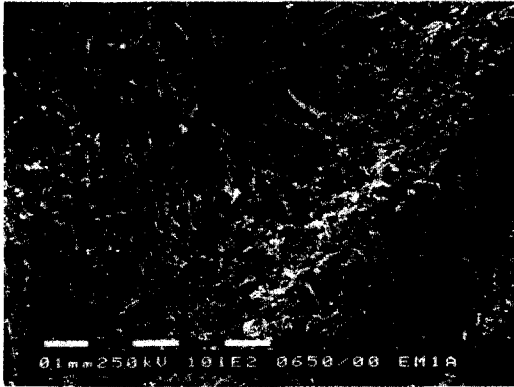


Fig. 11. Wear debris generated on wear surface of the composite (normal load: 3.5 kgf, sliding speed: 27.5 m/s)

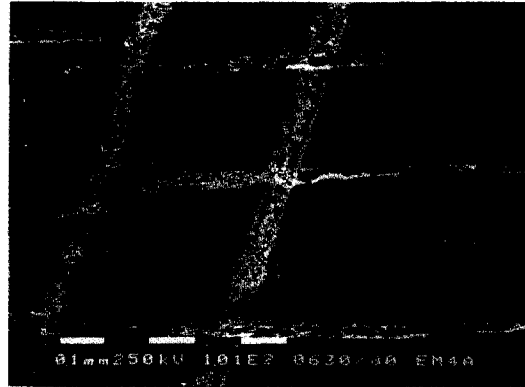


Fig. 13. Microcrack formed along the fiber direction when sliding direction was transverse to the fiber direction (normal load: 3.5 kgf, sliding speed: 27.5 m/s)

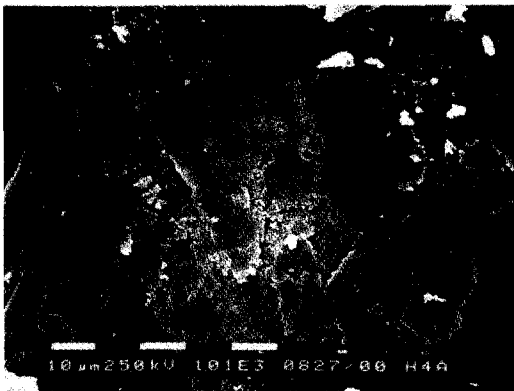


Fig. 12. Wear film generated on the carbon/carbon composite specimen (normal force: 3.5 kgf, sliding speed: 1.93 m/s)



Fig. 14. Wear surface of the carbon/carbon composite specimen (normal force: 3.5 kgf, sliding speed: 16.86 m/s)

으며 Fig.10에 보인 바와 같이 속도를 고정시키고 수직하중을 증가시켰을 경우 마모율과 마모인자가 뚜렷이 증가함을 보였다. 속도가 증가함에 따라 연삭마모에 의한 흠의 발생 및 섬유파편과 균열 등이 많이 관찰되었는데(Fig. 11) 이러한 현상들이 마모에 기여하였음을 알 수 있다.

EDAX 실험결과 탄소/탄소 복합재료 마찰면에서 철(Fe) 성분의 존재는 확인할 수 없었으며 마찰 상대면인 스테인레스강에서는 흑연막이 확인되었다. 마모면(worn surface)을 관찰해 보면 스테인레스강과 탄소/탄소 복합재료 사이에 마찰이 시작됨에 따라 모재와 섬유 마모 파편들이 발생하고 이러한 입자들은 복합재료 표면에 존재하는 기공들을 채우고 그 나머지는 마찰면 사이에서 압력을 받아 치밀해져서

마모막을 형성하는데 이러한 마모막은 취성인 경향을 갖고 있으며 계속되는 미끄럼 마찰로 표면에서 이탈되며 이때 복합재료 표면에서 새로운 마모가 발생하면서 마모막을 반복적으로 형성하는 것으로 생각된다. 이러한 마모막은 Fig. 12에 보여진 바와 같은 형상을 가지며 마찰과 마모를 감소시키는 중요한 역할을 한다.

복합재료 시편의 전자주사현미경(SEM : scanning electron microscope) 관찰결과 고속조건에서 미끄럼 방향에 수직으로 크랙이 발생한 부분이 있는데(Fig. 13)이 균열은 섬유방향으로 섬유표면을 따라 발생하였는데 이는 상대면에 의한 반복적인 응력의 결과로 사료된다. 연삭마모에 의해 발생한 흠들 주변에서는 모재 파편들과 모재로부터 이탈하여 절단된 섬유조

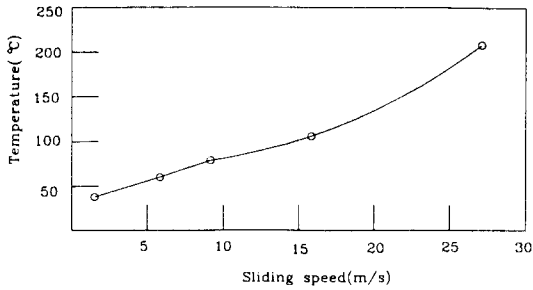


Fig. 15. Steady state temperature rise at 2.5 mm beneath the surface of the composite with respect to sliding speed (normal load: 3.5 kgf)

각들이 관찰되는데(Fig. 14) 이러한 마모 입자(wear debris)들은 표면에 노출되어 마모에 기여하므로 마모율이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 마모막의 형성과 연삭마모에 의한 마찰면의 손상은 마모인자를 결정하는 중요한 조건으로 사료되며 이는 마찰조건에 따라 변화할 것으로 믿어진다. 즉, 섬유 배열상태, 상대 마찰면의 경도 및 표면 거칠기, 마찰속도 및 수직압력, 주위 온도, 상대습도 등에 따라 변화할 것이다.

실험에 사용된 시편의 마찰면은 Chopped fabric.으로 표면은 다양한 섬유 배열을 보여주는데 Fig. 5는 실험전 표면의 섬유 배열상태를 나타내며 실험에 사용된 시편들의 섬유 배열을 관찰해 본 결과 배열은 마찰 방향에 대하여 길이 방향(longitudinal), 횡단 방향(transverse), 수직 방향(normal) 배열을 갖는 경우와 동시에 길이 방향 배열과 횡단 방향 배열을 갖는 경우, 약 30°, 45°, 60° 등의 배열로 되어 있는 경우가 있었는데 이러한 섬유 배열은 복합재료의 마모에 영향을 주어서 분산된 마모인자를 얻는 것으로 생각되며 실험 전후의 무게감소를 토대로 마모된 두께를 계산해 본 결과 50 km 주행시 보통 적층판(ply thickness : 0.32 mm)의 약 1%인 0.03 mm 내외가 마모되었다. 섬유배열 방향의 영향을 규명하기 위하여서는 일방향 탄소/탄소 복합재료를 제조하여 여러 배열 방향에서 실험을 수행하여야 할 것으로 생각된다.

마모율은 고속과 높은 수직하중하에서 더욱 분산된 값을 보이는데 섬유배열의 영향과 연삭에 의한 흠의 발생 정도에 영향을 받은 것으로 생각되며 높은 마찰속도에서는 마모막이 잘 형성되어 보호막의 역할을 하여서 낮은 마모율을 가지는 경우와 연삭마모의 영향으로 마모율이 큰 경우가 있으며 수직하중이 클수록

마모막은 잘 형성되었는데 응착력의 증가가 주요한 역할을 한 것으로 생각된다.

본 연구의 가장 가혹한 실험조건인 수직 압력 1.319 MPa과 마찰속도 27.5 m/s의 PV값은 실제 항공기의 착륙시 최대 PV값보다 높은 값을 가지는 조건이므로 이때 발생하는 열에 의한 복합재료의 산화 내지 열분해는 매우 중요한 쟁점이다. 마모 실험중에 측정된 온도는 Fig. 15에 주어졌으며 최대 온도는 약 200°C 이었다. 이는 마찰 표면에서 약 2.5 mm 밑의 온도이며 실제 마찰 표면에서의 온도는 이보다 높을 것으로 예상된다. TGA(thermogravimetric analysis) 실험결과 본 시편인 탄소/탄소 복합재료는 공기중에서 약 700°C 로부터 중량 감소가 시작되어 약 1200°C 에서 전량 열분해되었다. 온도 측정 결과, 마모율 측정 결과, 현미경 관찰 결과 등을 종합하여 볼 때, 본 실험조건에서는 열분해에 의한 화학적 마모는 발생하지 않은 것으로 믿어지며, 기계적 마모에 의한 마모 메커니즘이 지배적인 것으로 결론 지을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 항공기 브레이크용 탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모 거동을 연구하였으며 마찰 상대면으로 스테인레스강을 사용하여 실험적으로 고찰하였다.

마찰 표면에서는 마모막, 크랙, 흠, 모재와 섬유로부터 파단된 마모 입자들이 관찰되는데 이들이 마찰 및 마모에 복합적으로 영향을 끼치는 것으로 생각된다. SEM 관찰 결과 마찰면은 마모막이 형성되어 있는 부분과 흠들이 파여 있는 부분으로 이루어져 있었으며 마모막은 응착의 영향으로 발생하고 흠들은 연삭에 의한 것으로 같은 수직하중에서 속도증가의 경우에는 흠들이 크게 자주 발생하였는데 이때 마찰계수는 전반적으로 약간 증가하였으나 속도의 영향은 크지 않았다. 이때 마모인자는 고속에서 분산된 값을 보여주었지만 전체적으로 증가하는 경향을 보여주었다.

1.93 m/s의 마찰속도에서 수직하중을 증가시켰을 때는 급격한 마모인자의 증가를 나타냈다. 이 경우는 마찰면에서의 압력 상승으로 마모 입자들로부터 응착성질의 마모막이 잘 형성되어 마찰계수의 증가는 작은 반면에 마모막의 이탈과 형성의 반복이 자주 일어남에 따라 마모가 증가한 것으로 믿어진다.

온도증가에 따른 열분해에 의한 화학적 마모는 발생하지 않았으며, 이는 시편의 크기, 상대면 재료의

종류, 주위 환경의 분위기 등에 영향을 받을 것이나, 본 연구의 조건에서는 기계적 마모 메커니즘이 지배적인 것으로 나타났다. 마모막이 안정적으로 형성되어 오래 존재하는 경우에는 마모율이 작았으며, 상대면의 돌기나 섬유파면에 의한 연삭마모가 큰 경우에는 마모율이 증가하는 경향을 보이며, 탄소섬유의 배열상태와 마찰조건에 따라 마모 메커니즘이 변하는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. S. Kimura, E. Yasuda and N. Narita, "Friction and Wear of Carbon/Carbon Composite", J. of JSLE, Vol. 28, pp. 11-16, 1984.
2. S. Awasthi and J.L. Wood, "Carbon/Carbon Composite Materials for Aircraft Brakes", Ceramic Eng. Sci. Proc., Vol. 9, pp. 553-560, 1988.
3. E. Fitzer, B. Mayer and K. D. Morgenthaler, "Carbon Fibre Reinforcement in Carbon Linings of Disc Brakes", Institute fur Chemische Technik, Universitat Karlsruhe.
4. Baojian Pu and Qizhen Huang, "Tribological Characteristics of C/C Composites", Lanzhou Carbon Industry Cooperation.
5. R.C. Bill, "Friction and Wear of Carbon-Graphite Materials for High Energy Brakes", 2nd International Conference on Solid lubrication, ASLE, Denver, Colorado, August 14-18, 1978.
6. A. Kelly and S.T. Mileko, Fabrication of Composites, Chap. 3., Elsevier, Amsterdam, 1983.
7. E. Fritz and W. Fritz, "Tribological Behavior of C/C Composites", 4th International Carbon Conference, Baden-Baden, 1986.
8. N. Murdie, J. Don and C. Kocher, "Tribological Study of Carbon/Carbon Composites", Materials Technology Center, South Illinois University, Carbondale, U.S.A, pp. 496-497.
9. E. Fitzer, "The Future of Carbon/Carbon Composites", Carbon, Vol. 25, pp. 163-190, 1987.
10. T.L. Ho, "Wear Studies on Aircraft Brake Materials", Dept. of Mechanical Engineering, Aeronautical Engineering and Mechanics, Rensselaer Polytechnic Institute, pp. 70-76.
11. T.F.J. Quinn, "The Origins of Oxidational Wear", Tribology International, Vol. 16, pp. 257-271, 1983.