

탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모 거동과 신경회로망에의 적용에 관한 연구

류병진* · 윤재륜** · 권익환***

*삼성중공업, **서울대학교 섬유고분자공학과

***제일모직 화성연구소

Friction and Wear Behavior of Carbon/carbon Composite Materials and its Application to a Neural Network

Byeong J. Ryu*, Jae R. Youn** and Ick H. Kwon***

*Samsung Heavy Industries Co., Ltd.

**Department of Fiber and Polymer Science, Seoul National University

***R&D Center, Chemicals Division, Cheil Industries Inc.

Abstract—Effects of resin contents, number of carbonization, graphitization, sliding speed, and oxidation on friction and wear behavior of carbon/carbon composite materials were investigated. Friction and wear tests were carried out under various sliding conditions. An experimental setup was designed and built in the laboratory. Stainless steel disks were used as the counterface material. Friction coefficient, temperature, and wear factor were measured with a data acquisition system. Wear surfaces were observed by the scanning electron microscope. It has been shown that the average friction coefficient was increased with the sliding speed in the range of 1.43~6.10 m/s, but it decreased in the range of 6.10~17.35 m/s. Specimens prepared by different numbers of carbonization showed variations in friction coefficient and friction coefficient of the graphitized specimen was the highest. Friction coefficients depended on contribution of the plowing and adhesive components. As the number of carbonization was increased, wear factor was reduced. Wear factor of the graphitized specimens dropped further. In the case of graphitized specimens, sliding speed had a large influence on wear behavior. When the tribological experiments were conducted in nitrogen atmosphere, the wear factor was decreased to two thirds of the wear factor obtained in air. It is obvious that the difference was affected by oxidation. Results of friction and wear tests were applied to a neural network system based on the backpropagation algorithm. A neural network may be a valuable tool for prediction of tribological behavior of the carbon/carbon composite material if ample data are present.

1. 서 론

탄소섬유(carbon fiber) 보강재에 탄소모재(matrix)로 구성된 탄소/탄소 복합재료(carbon/carbon composite)는 경량, 고강도, 고내열성으로 인하여 우주 항공 분야의 마찰재료, 내화재료, 삭마재료로 사용되고 있으며, 우수한 생체 친화성과 화학적 안정성을 가지므로 의료재료로도 주목되고 있다[1-3]. 여러 응용 분야중에서도 탄소/탄소 복합재료는 마찰 및 마모

특성과 열충격 저항성을 활용한 고성능 항공기 브레이크의 응용이 활발하게 이루어지고 있다. 항공기용 탄소/탄소 복합재료 브레이크의 성능 평가로서 마찰 및 마모 시험이 중요한 위치를 차지한다. 항공기용 브레이크는 차량에 비해 매우 고속에서 제동을 시작하므로 항공기 착륙 후 수십 초 이내에 막대한 양의 에너지를 흡수해야만 하는데, 이때 대기로 방출되는 열의 비율은 무시할 수 있을 정도이므로 브레이크 디스크는 열흡수체(heat sink)로서 작용하게 된다[4].

이때의 브레이크 디스크의 마찰 표면은 1000°C 이상 온도가 상승하며, 이때 마찰력의 저하나 기계적 강도 저하가 없어야 안전한 제동을 할 수 있다.

탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모거동에 관하여 연구 보고된 논문들을 살펴보면, 마찰 및 마모 실험에서 중요한 인자들은 마찰표면에서의 상대 미끄럼 속도, 마찰표면에서의 압력, 단위질량당 또는 단위마찰 표면적당의 부하에너지, 제동시 마찰표면의 온도와 습도 등인데, 실험조건에 따라서 마찰 및 마모 메카니즘이 변화할 것이라고 보고되었다[5].

S. Awasthi 및 J. L. Wood[5]는 탄소/탄소 복합재료의 링-온-링(ring on ring) type으로 실험을 했는데, 각각의 초기 미끄럼속도의 변화에 따른 평균 마찰계수를 측정하였다. 탄소섬유의 구조가 다른 세가지 종류의 탄소/탄소 복합재료를 제작하여 서로 상대마찰면으로 사용하였다. 저속에서는 마찰계수가 0.1 정도였고, 중속인 7.6 m/s에서는 평균 마찰계수가 0.6이 되었고 고속인 30.4 m/s에서는 0.15정도로 고속에서 평균 마찰계수가 감소하였다. 또한 온도가 증가함에 따라 마찰계수는 상승하였다. 탄소/탄소 복합재료의 일반적인 마모기구로서는 새로운 마모표면이 형성된 후 반복적인 마찰로 인하여 마모입자들이 발생하고 이 마모입자들로부터 마모막이 형성되며, 이 마모막이 박리되어 새로운 마모표면을 형성하는 과정이 되풀이된다고 제안하였다.

N. Murdie, J. Don, C. Kocher, R. Liew 및 C. P. Ju[6]는 피치(pitch)계 탄소섬유로 된 두 종류의 2D 탄소/탄소 복합재료를 서로의 상대마찰면으로 하여 마찰 및 마모 실험을 하였는데, 낮은 에너지조건(1295 rpm, 0.69 MPa)일 때는 마찰계수가 0.5이고, 높은 에너지조건(3975 rpm, 1.24 MPa)일 때는 마찰계수가 0.2정도로 감소한다고 하였다. 마모거동은 낮은 에너지조건에서는 연삭마모가 주요 요인이 되어 마찰계수가 크고, 높은 에너지조건에서는 얇은 마모막이 형성되어 마찰계수를 감소시킨다고 설명하였다.

B. Pu 및 Q. Huang[7]은 PAN계 탄소섬유를 함유하며 1.55~1.60 g/cm³의 밀도를 가진 탄소/탄소 복합재료를 제조하여 탄소/탄소 복합재료간의 압력과 미끄럼속도를 변화시키며 실험을 행하였다. 마찰계수는 낮은 속도 구간(2~6 m/s)에서 0.28에서 0.2까지 감소하였으며, 중간 속도 구간(6~10 m/s)에서는 0.48까지 증가하다가 그 이후의 속도에서는 서서히 감소하여 30 m/s에서는 0.2정도가 되었다. 속도가 낮고, 하중이 낮은, 즉, 낮은 에너지조건일 때의 마모율은

높은 속도, 높은 하중의 고에너지조건일 때의 마모량보다 10~100배 정도 더 컸다. 고에너지일 때 낮은 마찰계수와 낮은 마모량을 갖는 이유를 흑연마모막의 형성으로 설명하였다.

S. Kimura, E. Yasuda 및 N. Narita[8]는 페놀수지를 모재로 사용하여 PAN계 탄소섬유구조가 다르며 부피분율이 40%인 세가지 복합재료 시편을 각각 상대마찰면으로 사용하였다. 탄소/탄소 복합재료를 1625 rpm, 0.67~1.33 MPa의 실험조건에서 열처리온도(heat treatment temperature)와 탄성계수(elastic modulus)를 변화시켜 가공된 시편에 대하여 실험을 수행하였다. 열처리온도가 증가할수록 마찰계수는 증가하였고, 탄성 계수가 증가할수록 마찰계수는 감소하였다. 그리고 마찰계수가 증가할수록 마모율은 증가한다고 하였다. 열처리온도가 감소할수록 산화에 의한 마모량이 증가하고, 열처리온도가 증가할수록 흑연마모막의 형성이 용이하다고 하였다. 이 연구에서 제안한 마모기구는 낮은 표면에너지 때문에 연삭마모에 의한 마모가 지배적이며 탄소/탄소의 연삭마모는 마찰표면의 탄소섬유 노출 정도에 의하여 영향을 받는다고 하였다.

E. Fitzer, W. Fritz 및 A. Gkogkidis[9]는 탄소/탄소 복합재료의 자동차 브레이크 재료에의 응용 타당성을 검토하기 위하여 상대마찰면으로 주철(cast iron)을 사용하여 마찰실험하였다. 섬유함량, 섬유배향, 최종열처리온도에 의한 마찰 및 마모 특성을 파악하였는데, 마찰방향에 대한 섬유배향이 40°와 120° 부근에서 마찰계수와 마모율이 가장 컸다. 이런 결과는 탄성변형에 대한 저항이 이들 방향에서 최소이기 때문이라고 설명되었다. 그리고 섬유함량에 대한 결과는 섬유함량이 증가할수록 마찰계수와 마모율이 감소됨을 보여주었다. 섬유배향이 0°인 일방향 탄소/탄소 복합재료의 최종열처리온도에 대한 실험 결과는 열처리온도가 증가할수록 마찰계수와 마모율이 감소하며, 이는 열처리온도가 증가할수록 흑연층의 미끄럼이 향상될 가능성이 있어[10], 결국 연삭마모의 영향은 감소하며 응착마모에 의하여 형성된 흑연마모막이 표면에 응착되어 윤활작용을 하기 때문으로 설명되었다.

우성택[11]은 마찰상대면으로 스테인레스강(stainless steel)을 사용하여 chopped fabric 탄소/탄소 복합재료에 실제 비행기 브레이크에 작용하는 압력보다 큰 수직하중을 가하고 다양한 마찰속도에 따른 마모량과 마찰계수, 마모면의 온도 변화와 더불어 마모된

표면의 형태를 관찰하였다. 속도의 증가에 따라서 시편의 마찰면에서 큰 홈(groove)이 발생하였는데, 마찰시 발생한 매트릭스의 파편과 매트릭스로부터 이탈된 섬유에 의한 마찰면 사이에서의 쟁기질이 마찰성분의 주요한 역할을 한다고 하였다. 수직하중이 증가하여도 마모막 형성으로 인하여 실접촉 면적이 하중에 비례하여 증가하지 않았기 때문에 마찰계수의 변화는 작으며, 온도 증가에 따른 마찰계수의 변화도 매우 작았다. 수직하중이 일정할 때 속도증가에 따라, 또 속도가 일정할 경우 수직하중의 증가에 따라 마모율과 마모인자가 각각 증가하였다. 즉 이런 사실로 비추어볼 때 고에너지 조건에서는 마모율이 증가함을 알 수 있었다.

H. W. Chang과 R. M. Rusnak[12-14]은 마찰표면이 아닌 다른 면들에 산화보호 코팅을 하여 27.86 m/s, 1.6 MPa의 조건으로 질소가스분위기, 공기중, 그리고 다른 산소 농도의 분위기하에서 마찰 및 마모 실험을 하여 탄소/탄소 복합재료의 산화에 대한 영향을 알아보았다. 질소분위기하에서의 마모량이 공기중에서의 마모량의 1/4.5배였으며, 산소 농도 증가에 따라 마모율은 증가하였다. 고에너지조건하에서 산화에 의한 마모량이 저에너지조건하에서의 산화에 의한 마모량보다 많음을 실험결과로부터 알 수 있었다. 산화에 의한 마모량은 전체마모량의 60% 가량이었다. 고에너지 제동 조건에서의 산화는 마모량이 큰 주요 요인이며, 탄소고체의 CO, CO₂로의 변환에 의한 직접 마모를 유발시키며, 마찰 표면(surface)과 표면하(sub-surface)의 재료를 약하게 하여 기계적 마모를 촉진시키는 원인이라고 설명하였다. 그리고 온도영역에 따른 산화의 영향을 살펴보기 위하여 아르곤(argon) 가스분위기 하에서의 실험을 수행하였는데, 450~650 °C에서는 기공확산(pore diffusion)에 의한 산화가 주된 역할을 하며, 650~750°C에서는 시편표면에서 가스의 반응물로 인하여 형성된 stagnant gas film을 통한 확산에 의한 산화가 주된 역할을 한다고 하였다 [14]. 또 공기중에서의 산화시에는 탄소섬유의 산화가 CVD공정을 거친 탄소소재보다 더욱 빨리 진행하며, 흑연화와 CVD공정을 거친 탄소소재는 구조적인 안정성과 산화에 대한 저항성이 증가되어진다고 하였다 [15].

위의 연구들에서 살펴보았듯이 탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모거동은 탄소섬유와 매트릭스의 종류, 탄소섬유함량과 미끄럼 방향, 탄화횟수, 매트릭스 충전방법, 최종열처리온도 등의 제조공정과 이에 따른

재료의 미세구조, 미끄럼속도, 압력, 환경분위기(산화, 비산화분위기) 등에 따라 많은 영향을 받음을 알 수 있고, 또 각 결과들은 서로 다른 결과를 내포하기도 하며, 실험조건과 재료의 종류들과의 복잡한 비선형적인 관계를 파악하기 어려워서, 명확한 마찰 및 마모기구에 대한 결과가 나타나 있지 않다. 그리고 위의 연구들은 항공기 브레이크 재료로서 기동과 정지시의 마찰 및 마모에 대한 연구들이어서 기본적인 마찰 및 마모 특성과 산화의 영향, 그리고 실험조건과 재료 종류에 대한 비선형 관계 정립에 대한 연구의 필요성이 제기된다.

본 연구에서는 탄소/탄소 복합재료의 제조 공정단계별 재료에 대한 마찰 및 마모 실험을 수행하여 각각의 공정(1, 2, 3, 4차 탄화, 흑연화)에 따른 중간 제품과 흑연화 공정을 거친 재료의 마찰 및 마모 특성을 제시하며, 산화 분위기(공기중)와 비산화 분위기(질소가스)에서의 실험을 통하여 산화에 의한 효과를 파악하고, 신경회로망을 이용하여 공정단계(1, 2, 3, 4차 탄화, 흑연화), 수지 함유량(26, 33, 39 wt%) 미끄럼속도(1.43, 6.10, 17.35 m/s) 등의 조건들에 따른 마찰계수와 마모량에 대한 비선형 관계들을 파악하여 탄소/탄소 복합재료의 트라이볼로지 특성을 규명해 보고자 하였다.

2. 실 험

탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모 실험을 수행하기 위하여 2 마력의 동력을 갖는 선반의 주축에 직경이 370 mm 되는 디스크를 고정시켜 이를 회전시키고 시편 호울더에 있는 시편에 공압을 가하여 디스크를 잡게 되면, 이때 회전하는 디스크와 고정된 시편 사이에 마찰력이 작용하는데, 회전하게 되어 있는 수평보를 이용하여 이 마찰력을 로드셀(load cell)에 전달하게 되어 있다. 실험 장치의 구성도 및 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 회전하는 디스크에 공압을 사용하여 시편을 접촉시키는데, 이 공압을 조정함으로써 실험시편의 수직하중과 압력을 조절할 수 있다. 회전하는 디스크의 회전수 전환에 따라 미끄럼속도의 조절이 가능하여, 실험하려는 실험조건을 제공하는 장치를 구성할 수 있다. 마찰력과 마찰계수를 데이터로 받기 위하여, 로드셀에 전달되어진 마찰력을 전압 신호로 바꾸어 이를 증폭기(amplifier)를 통하여 어느 정도 증폭(gain의 정도)시켜 이 신호를 A/D변환기(analog/digital converter)에 통과시켜 디지털 신

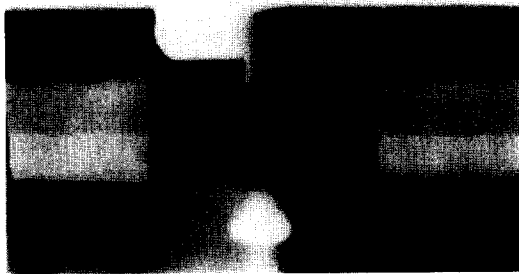
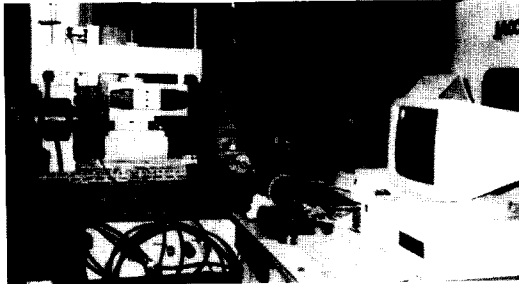
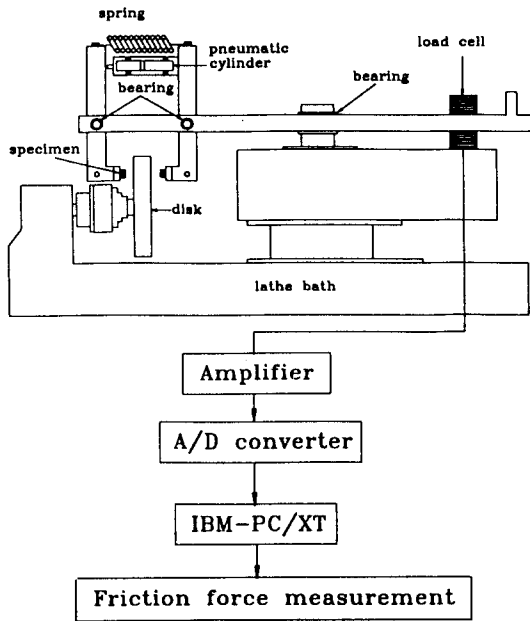


Fig. 1. Schematic diagram and pictures of the experimental set-up.

호를 받아 다시 이 신호 값을 IBM-PC에 저장하였다. 그리고, 비산화 분위기의 마찰 및 마모 실험을 위해 전체 실험 장치를 섬유가 보강되어 있는 비닐로 둘러싸고 밀봉(sealing)하였다. Fig. 2에 그 모습을 나타내었다. 마찰 온도의 측정을 위해서는 Fig. 3과 같이 실험시편의 옆면으로부터 마찰면에서 밀로 2.5 mm

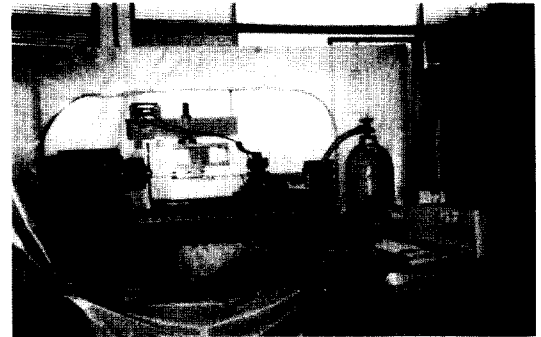


Fig. 2. Pictures of the experimental set-up with nitrogen environment.

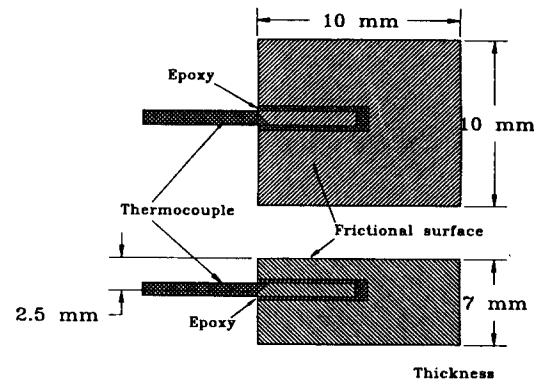


Fig. 3. Schematic diagram of thermocouple installation.

정도 떨어진 위치에서 마찰면의 중앙까지 드릴로 구멍을 뚫고 여기에 열전대(thermocouple)를 삽입하고 에폭시수지로 고정하였다. 이 열전대를 전용 증폭기에 연결하여 온도를 전압신호로 바꾼 신호를 A/D변환기를 통하여 IBM-PC에 저장하였다. 전체적인 실험 측정 시스템의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다.

실험에 사용된 시편의 탄소섬유는 Torayca의 T300 (필라멘트 6k)인 탄소섬유 yarn의 2D fabric type(8HS

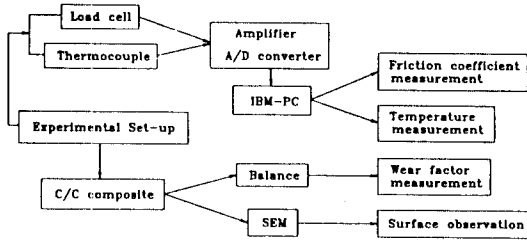


Fig. 4. Block diagram of friction and wear experiments.

Table 1. Variation of density and apparent porosity after each processing step

Resin contents	Density (g/cm ³)		
	26%wt	33%wt	39%wt
Green body	1.56	1.53	1.49
1 st Carbonization	1.40	1.37	1.36
2 nd Carbonization	1.52	1.53	1.42
3 rd Carbonization	1.57	1.52	1.48
4 th Carbonization	1.53	1.55	1.53
Graphitization	1.50	1.49	—

Resin contents	Apparent porosity (%)		
	26%wt	33%wt	39%wt
Green body	1.24	1.48	2.50
1 st Carbonization	17.48	19.85	20.10
2 nd Carbonization	10.58	11.96	12.68
3 rd Carbonization	7.95	5.11	11.98
4 th Carbonization	6.64	8.13	12.34
Graphitization	8.10	8.91	6.03

Table 2. Physical properties of the specimens with different resin contents after each processing step

Resin contents: 26%wt	G/B	1C	2C	3C	4C	G
Flexural strength (MPa)	460	38.4	35.7	34.8	34.3	92.0
Flexural modulus (GPa)	52	32.2	43.9	41.8	45.4	42.0
ILSS (MPa)	24	—	3.5	2.6	3.9	7.5
Resin contents: 33%wt	G/B	1C	2C	3C	4C	G
Flexural strength (MPa)	420	40.2	42.4	38.7	41.8	89~124
Flexural modulus (GPa)	46	28.2	41.6	41.7	48.9	45~54
ILSS (MPa)	21	2.7	3.8	3.6	4.2	0.4~7.1
Resin contents: 39%wt	G/B	1C	2C	3C	4C	G
Flexural strength (MPa)	380	42.5	34.5~38.1	38.4	37.2	80.8
Flexural modulus (GPa)	43	29.4	39.9	41.0	45.1	46.9
ILSS (MPa)	20	2.8	3.2	4.3	3.8	6.3

cloth)이다. 수지로는 페놀을 사용하였다. 수지함량이 26 wt%, 33%, 39%인 각각의 green body를 1차 탄화(1C)시켰고, 액상 침침법을 이용하여 2, 3, 4차 탄화(2, 3, 4C)하였다. 그리고 흑연화를 수행하였다. 각각의 공정을 거친 시편에 물성치를 Table 1, 2에 나타내었다. 그리고 시편 호우더에 시편을 고정하기 위하여 수지 함량과 탄화공정(탄화횟수, 흑연화)에 따라, 각각의 시편을 10×10 mm²으로 절단하였다. 상대 마찰면의 재료로는 스테인레스강(SUS 304)를 사용하였는데, 직경은 370 mm, 두께 10 mm, 트랙 직경은 350 mm이었다. 상대 마찰 활주면은 매 실험전에 연마지로 연마하였으며, 시편과 상대 마찰면의 건조 마찰을 위해 표면을 메틸알코올과 헥세인(hexane)으로 처리하였다. 미끄럼속도(1.43, 6.10, 17.35 m/s), 수지 함량(26, 33, 39 wt%), 그리고 공정단계(탄화횟수, 흑연화) 등의 변수들의 마찰 및 마모거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 각 시편마다 실험을 수행하였다. 시편의 종류는 수지함량이 26 wt%이고 1, 2, 3, 4차 탄화를 거친 시편과 흑연화된 시편, 33 wt%의 1, 2, 3, 4차 탄화와 흑연화, 그리고 39 wt%의 1, 2, 3차 탄화시편과 흑연화시편 등의 14가지이다. 압력을 1.06 MPa로 고정하고, 미끄럼속도 변화에 따른 실험을 행하였는데 1.43 m/s, 6.10 m/s, 17.35 m/s로 하여 저속, 중속, 고속에서의 마찰 및 마모거동을 살펴보았다. 각 실험의 활주거리는 10 km로 하였다. 각 실험은 여러번 수행하여 그 평균값을 취하였다. 마찰계수는 보정(calibration)된 로드셀로부터 온 마찰력의 신호(힘을 전압으로 바꾼)를 A/D변환기에 연결하고 이를

컴퓨터에 입력하여 이를 수직하중으로 나누어서 계산하였고, 마모량은 0.1 mg의 정확도를 가지는 전자저울(Mettler AE240)로 측정하였다.

비산화분위기(질소가스분위기)에서의 실험시편으로 26 wt% 4C, 33 wt% 4C를 사용하였고, 대기중(공기중)에서의 똑같은 조건에서의 결과와 비교하기 위하여 미끄럼속도는 17.35 m/s, 수직압력은 1.06 MPa, 그리고 활주거리는 10 km의 조건으로 실험하였다. 실험장치를 구성한 후, 실행하기 전에 실험장치를 돌려싸고 있는 섬유강화된 비닐을 밀봉하고 진공펌프로 공기를 뽑아 내었고, 질소 가스를 불어넣어 실험장치 주위의 공간에 질소 분위기가 되게 하여 비산화분위기하에서의 마찰 및 마모 실험이 수행될 수 있게 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

각각의 마찰계수와 마모인자는 3~5회의 실험 데이터의 평균값을 취하였다. 특히 마찰계수는 전체 활주거리에 따른 변화를 전부 측정하여 그 평균값을 취하였다. 각각의 시편 종류별로 마찰계수 값을 살펴보면, 미끄럼속도를 1.43 m/s에서 6.10 m/s로 변화시켰을 때 마찰계수는 감소하였으며, 미끄럼속도를 6.10 m/s에서 17.35 m/s로 변화시켰을 때 마찰계수는 약간 증가하였다(Fig. 5). 마찰계수의 범위는 0.25~0.5 정도였다. 미끄럼속도가 6.10 m/s 인 경우 각 시편의 탄화횟수의 증가에 따라 마찰계수는 감소하였으며 3차 탄화 이상과 흑연화된 시편에서는 마찰계수가 다시 증가함을 Fig. 6으로부터 알 수 있다. 시편의 마찰 표면을 전자현미경(SEM) 사진에 의하여 살펴보면, 1차 탄화 및 2차 탄화 시편의 마찰표면의 경우는 Fig. 7(a)에서와 같이 많은 홈(groove)들이 발생하였고, 표면의 플라이드의 박리현상에 의하여 손상되었음을 알 수 있다. 이런 현상은 완전한 고밀도화 처리를 하지 않았기 때문에 시편 자체에 많은 기공(porosity)들이 존재하는 것에 기인하며, 또한 ILSS(interlaminar shear stress)의 값이 작기 때문에 마찰 표면을 매끄럽게 하여 응착 마찰이 주로 발생해도 곧 표면의 박리가 일어나서, 모재의 파편과 모재로부터 이탈된 섬유가 마찰면 사이에서 쟁기질 마찰을 일으켜 거친 마찰면이 생성된다고 설명할 수 있다. 3차, 4차 탄화 시편의 마찰 표면을 나타낸 Fig. 7(b)에서는 모재의 파편과 섬유의 파편들이 모여 응착된 마모막의 형성을 관찰할 수 있다. 흑연화 시편의 마찰 표면을 보여주는

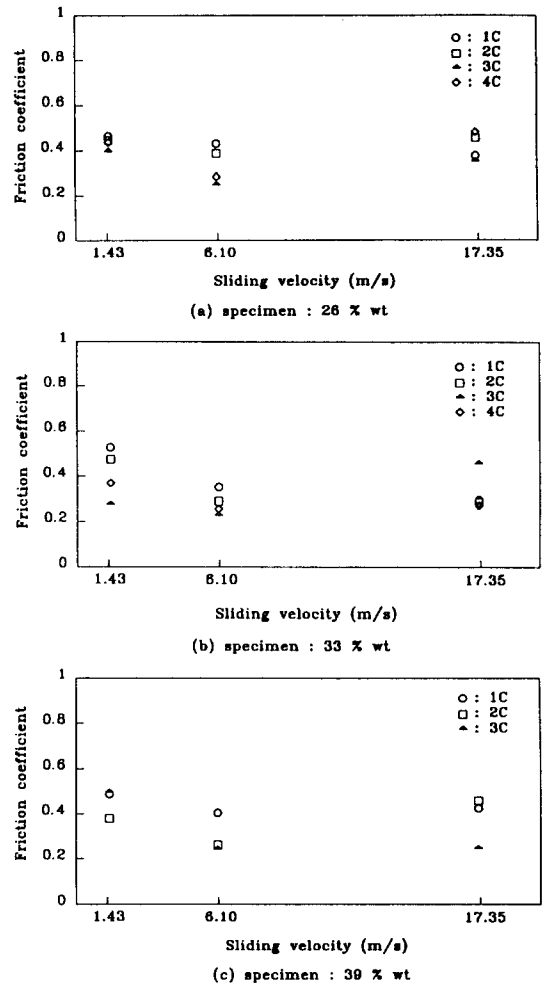


Fig. 5. Average friction coefficient as a function of sliding velocity for different specimens.

Fig. 8(a)를 살펴보면 마찰면의 손상이 거의 없는 것을 알 수 있다. Table 1과 Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 물리적 특성의 향상이 흑연화를 통해 이루어졌으며, 이때 향상된 굽힘 강성과 ILSS의 값이 마찰에 의한 재료의 파단을 방지하여 모재와 섬유의 파편들로 인한 표면의 손상을 적게하고, 복합재료의 안정된 구조 때문에 마모 파편들의 응착이 용이하게 발생하여 비교적 매끈한 마찰면이 생성된 것으로 생각된다.

Fig. 9로부터 마모거동을 살펴보면, 수치함량이 각각 26 wt%, 33 wt%, 39 wt% 인 시편에서 미끄럼속도가 17.35 m/s와 1.43 m/s의 미끄럼속도에서는 마모인자가 탄화횟수의 증가에 따라 감소하였다. 그러나 Fig. 1에

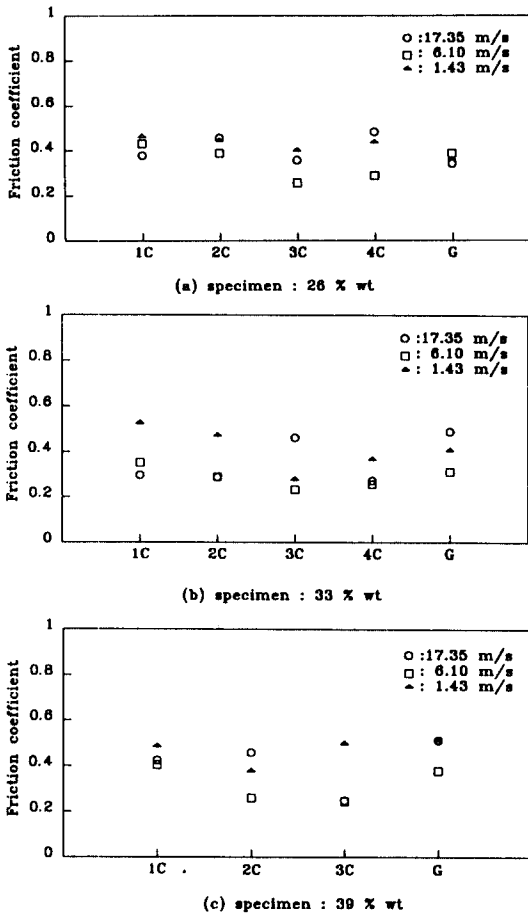
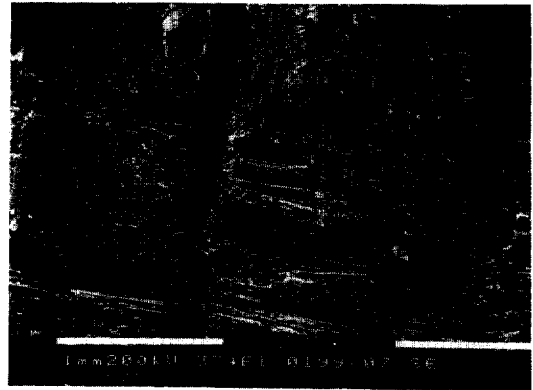
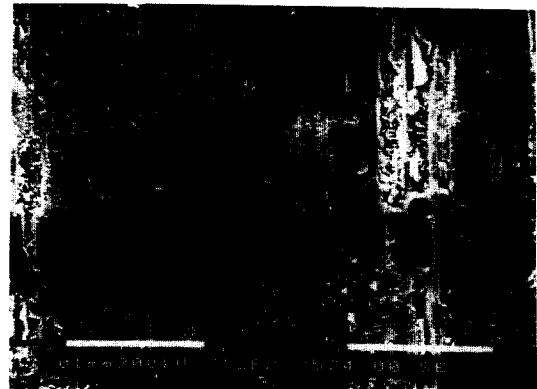


Fig. 6. Average friction coefficient with respect to sliding velocity for different specimens.

나타난 바와 같이 1차 탄화와 4차 탄화된 26 wt%의 시편을 6.1 m/s의 미끄럼속도로 실험한 경우의 마모 인자는 매우 높은 값을 나타내었다. 6.10 m/s의 미끄럼속도를 갖는 2차 탄화된 39 wt% 시편과 17.35 m/s의 미끄럼속도를 갖는 1차 및 2차 탄화된 33 wt%의 시편들에서도 마모인자가 매우 높게 나타났다(Fig. 10). 일반적으로 탄화횟수가 증가할수록 시편의 밀도와 ILSS의 값이 증가하고 porosity의 값은 작아지므로 마찰 표면에서의 마모막의 형성이 용이하여 연삭마모의 역할은 줄어들고 응착마모의 역할이 증가하여 마모량이 적어지는 것으로 생각할 수 있다. 흑연화 이후의 시편에서는 마찰면이 흑연화된 층(graphitic layer)으로 구성되어 있어 마찰면의 미끄러짐이 발생할 가능성이 있으므로 연삭효과를 감소시키고, 응착



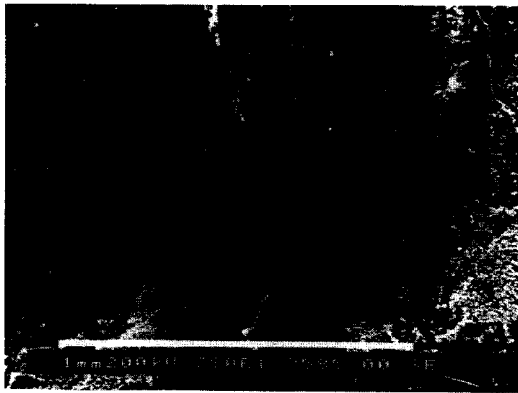
(a) 39 % wt Graphitization, sliding velocity : 1.43 m/s



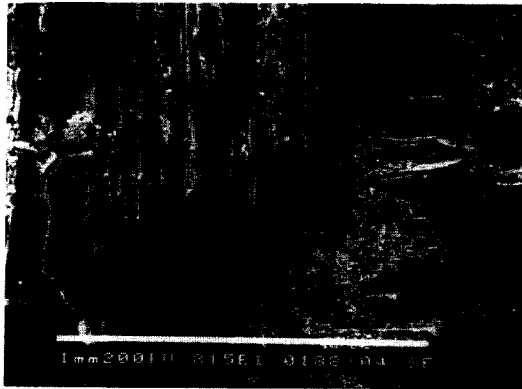
(b) 33 % wt 2C, sliding velocity : 1.43 m/s

Fig. 7. Scanning electron micrographs of wear surface of the carbon/carbon composite specimen.

효과를 크게 하여 흑연마모막의 생성에 도움을 주기 때문에 마모량은 더욱더 줄어들 것이라고 판단된다. 6.10 m/s의 속도에서 33 wt% 시편들의 경우에는 마모인자 값이 안정적으로 감소하는 반면, 39 wt% 2차 탄화, 26% 1차와 4차 탄화 시편에서는 높은 마모인자 값이 측정되었는데, 이는 미끄러짐 표면에서의 탄소 섬유 노출 정도와 탄소섬유와 매트릭스간의 구조적 관계를 좌우하는 시편의 수지함량 차이 때문이라고 생각된다. 그리고 실험조건(압력, 미끄럼속도)과의 관계에 있어서, 각각의 실험조건(작동영역)에 맞는 적당한 수지함량 값이 존재하리라 판단된다. 그런데 흑연화가 이루어지지 않은 탄화시편의 경우에는 재료의 상태가 불안정하기 때문에 속도에 따른 경향을 찾아보기 힘들었지만, 재료가 안정화된 흑연화 이후의 시편에서는 Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 속도 증가에 따라 시편의 마모량이 증가하는 경향이 나타



(a) 26 % wt 1C, sliding velocity : 17.35 m/s

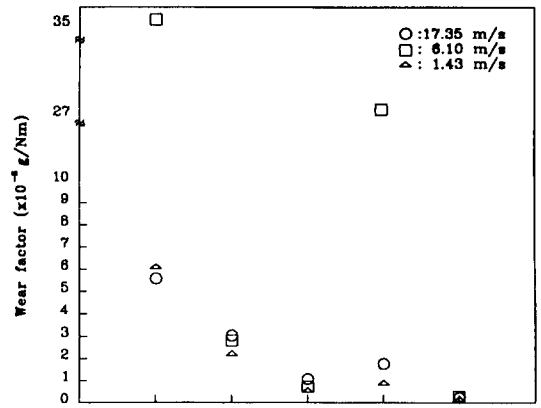


(b) 33 % wt 4C, sliding velocity : 17.35 m/s

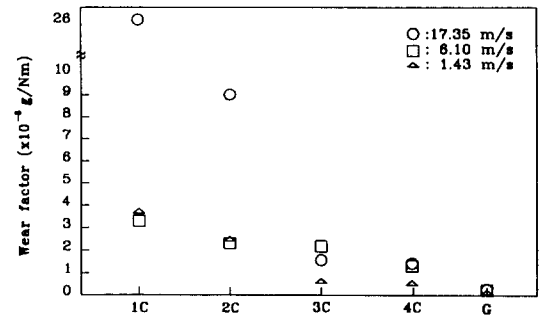
Fig. 8. Scanning electron micrographs of wear surface of the carbon/carbon composite specimen.

남을 볼 수 있었다. 각각의 속도에서 33 wt% 시편의 마모인자가 가장 크게 나타났고, 26 wt% 시편의 마모인자가 가장 작게 나타났다. 탄소섬유의 함량이 증가(수지함량이 감소)할수록 마찰표면의 평활성이 증가하여 마찰계수와 마모인자가 낮아지리라고 생각되어지나, 39 wt% 시편에서의 마모인자 값은 33 wt% 시편의 마모인자 값보다 작고, 마찰계수 값은 큰 사실을 알 수 있었는데 이를 근거로 탄소섬유함량의 천이영역이 있으리라 기대된다.

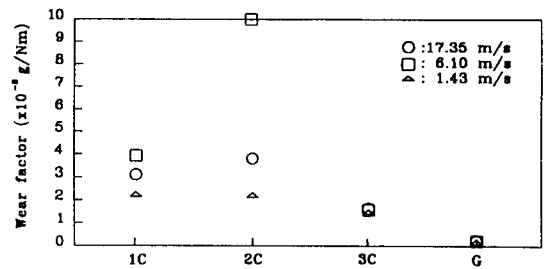
전자주사 현미경(SEM) 사진으로 시편의 마찰 표면을 관찰해 보면, 1차와 2차 탄화 시편에서는 Fig. 8 (b)와 같이 섬유의 파단과 플라이의 박리로 인한 시편 표면의 파괴로 인하여 재료의 손실이 증가한다. 3차와 4차 탄화이후에 흑연화 공정을 거치면서 재료가 구조적인 안정성을 가지게 되어 점차 표면의 파단이 적어지며, 섬유와 모재의 파편들이 새로운 표면을



(a) specimen : 26 % wt



(b) specimen : 33 % wt



(c) specimen : 39 % wt

Fig. 9. Average wear factor with respect to sliding velocity for different specimens.

파괴하지 않고, 각각의 파편들이 모여 이들끼리 서로 마멸되어 마찰 표면에 응착 되리라고 생각된다. Fig. 12(a)에서는 파편들이 서로 마멸되어 표면에 응착되고 있음을 관찰할 수 있다. Fig. 12(b)에서는 잘 형성된 마모막과 섬유의 파단이 생긴면을 동시에 보여주고 있다. 재료의 표면이 균일하고 높은 밀도에 의하여 충진율이 높으면, 마모막의 형성이 안정적으로 계속되어 마모막이 파괴되지 않고 마찰면을 보호할 것으로 사료된다. Fig. 13(a)는 마모막을 10000배로 확대한

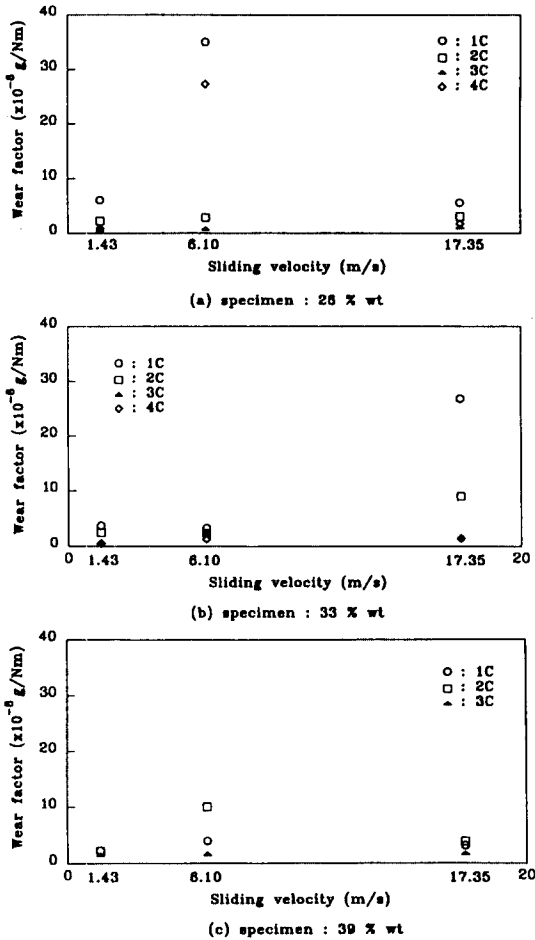


Fig. 10. Average wear factor as a function of sliding velocity for different specimens.

사진으로서 섬유와 모재의 파편들이 미세입자로 형성된 후 표면에 응착하여 마모막이 형성되고 있음을 볼 수 있으며, Fig. 13(b)에서는 형성된 마모막에 균열이 생성되어 파괴되어 가고 있음을 알 수 있다. 그러므로 마모현상은 섬유와 모재의 파편들이 마멸되어 마찰 표면에 응착되며 이러한 치밀해진 입자들이 마모막을 형성하고, 계속되는 마찰 마모 작용에 의하여 마모막이 파괴되어 다시 새로운 파편 조각이 발생하여 이러한 일련의 현상을 되풀이함을 관찰할 수 있었다.

기존의 연구들과 비교해 보면 S. Awasthi[18]와 N. Murdie[19] 그리고, Baojian Pu[20]의 실험결과를 종합해 볼 때, 대체로 속도가 낮고 압력이 낮은 에너지 조건일 때는 마찰계수가 크고 이 때의 마모거동은

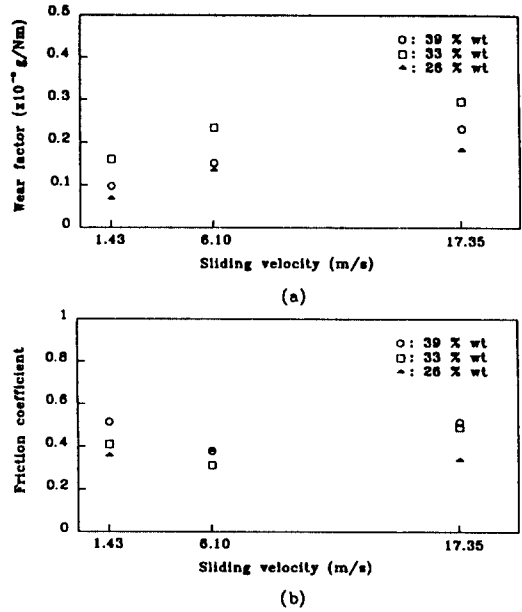
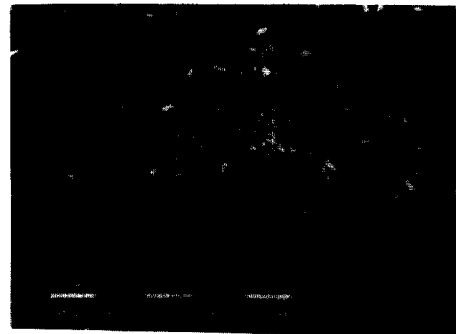


Fig. 11. Average friction coefficient and wear factor with respect to sliding velocity of graphitized specimens.

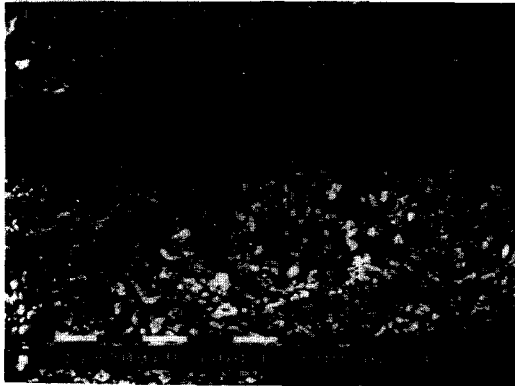


(a) 33 % wt 4C, sliding velocity : 6.10 m/s

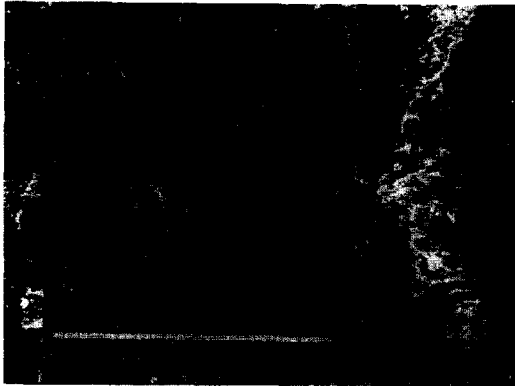


(b) 33 % wt Graphitization, sliding velocity : 6.10 m/s

Fig. 12. Scanning electron micrographs of wear surface of the carbon/carbon composite specimen.



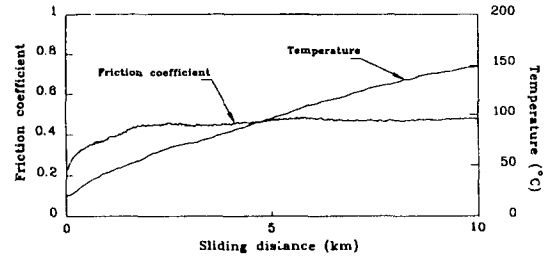
(a) 26 % wt Graphitization, sliding velocity : 17.35 m/s



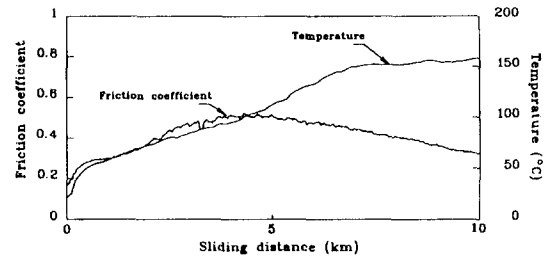
(b) 26 % wt Graphitization, sliding velocity : 17.35 m/s

Fig. 13. Scanning electron micrographs of wear surface of the carbon/carbon composite specimen.

연삭마모가 주된 역할을 하여 마모량도 증가하며, 높은 속도, 높은 압력의 높은 에너지 조건에서는 흑연 마모막의 영향으로 마찰계수를 감소시키고 마모량도 적다고 하였다. S. Awasthi[18]와 Baojian Pu[20]의 실험결과에서는 세 영역의 미끄럼속도의 변화에 대하여 마찰계수의 변화영역을 볼 수 있는데 낮은 속도 영역에서는 마찰계수가 작고, 중간 속도 영역에서는 속도 증가에 따라 마찰계수가 증가하며, 고속이 되면 마찰계수가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 본 실험결과에서는 대체적으로 저속에서의 마찰계수가 높았으며, 속도증가(1.43~6.10 m/s)에 따라 감소하는 경향을 보이다가 속도 증가(6.10~17.35 m/s)에 따라 증가하였다. 1, 2차 탄화 시편의 경우의 마찰면을 관찰한 결과 아주 작은 일부분의 매끄러운 부분이 있었으며, 전체 마찰면은 심하게 파손됨을 볼 수 있어 연삭마모가 지배적이라고 할 수 있었다. 3차, 4차 탄화, 흑연화 공정후의 시편에서는 마모막의 형성으로 인한



(a) specimen : 26 X wt 4th carbonisation



(b) specimen : 33 X wt 4th carbonisation

Fig. 14. Friction coefficient and temperature variation as a function of sliding distance.
(normal pressure: 1.06 MPa, sliding velocity: 17.35 m/s)

응착마모가 주된 역할을 하였으며, 이로 인하여 마모량의 감소가 나타남을 알 수 있었다. E. Fitzer[22]의 연구 결과에서는 섬유함량이 증가할수록 마찰계수와 마모율이 감소한다고 하였고, S. Kimura[21]는 표면에너지가 낮으면 연삭마모에 의한 마모기구가 지배적이며 연삭마모하에서는 미끄러짐 표면에서의 탄소섬유의 노출 정도에 영향을 받는다고 하였다. 본 실험의 결과에서 탄화시편들의 경우에는 재료의 불균일성과 물리적 특성들의 불안정성 때문에 섬유함량에 대한 마찰 및 마모의 경향을 찾기가 어려웠으나 흑연화를 통하여 안정된 상태량을 갖게 된 시편에서는 섬유함량의 영향을 관찰할 수 있었다. 탄소섬유 노출 정도의 영향이 각 시편(26%, 33%, 39wt%)들의 탄소섬유와 매트릭스간의 구조적인 강성과 탄화 혹은 흑연화 때의 매트릭스 수축으로 인한 섬유의 파손 등으로 기계적 물성의 변동에 따라 변화하리라 생각된다. 우성택[24]의 실험 결과에 의하면 마찰은 재질 성분과 관련하여 주된 영향을 받으며, 마모에서는 연삭마모와 크랙의 발생이 주요 역할을 한다고 하였다. 본 실험과 비교해 보면 흑연화 이전의 시편에서는 대체적으로 6.10 m/s의 경우에 마모량의 증가가 현저했다. 한편 흑연화 이후의 시편에서는 속도 증가에 따라 마모량은 증가하였다. 흑연화 공정과 고밀도화

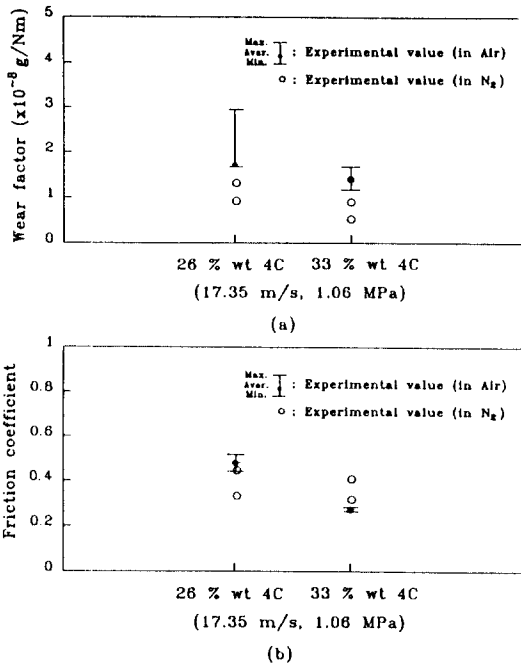


Fig. 15. Comparison of friction coefficient and wear factor between in air and in nitrogen.

공정(CVD)을 거친다면 더욱더 안정된 마찰 마모 현상이 일어나리라 판단된다.

산화에 의한 영향을 살펴보기 위하여 26 wt% 4차, 33 wt% 4차 탄화의 시편을 압력 1.06 MPa, 미끄럼 속도 17.35 m/s, 활주거리 10 km의 조건으로 질소가스분위기에서 실험을 수행하였다. 미끄럼 거리에 따른 마찰계수와 온도의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 활주거리의 증가에 따라 마찰계수는 증가하다가 일정하게 되었고, 온도는 시간 경과에 따라 증가하였다. 온도증가에 따른 마찰계수의 영향은 뚜렷하지 않음이 관찰되었다. 마찰 표면의 2.5 mm 아래의 온도를 측정했기 때문에 마찰면의 온도는 더욱 높을 것으로 사료된다. Fig. 15에서는 공기중에서의 실험결과와 질소가스분위기에서의 실험결과를 비교하였다. 마찰계수에 대한 영향은 파악하지 못하였고, 마모인자의 값은 질소가스분위기에서의 경우가 공기중의 경우보다 적게 나타났다. 이는 공기중에서 높은 속도로 마찰이 일어날 경우에는 산화에 의한 재료의 손실이 존재함을 암시하고 있다. 마찰 표면의 온도 측정을 수행한다면 산화의 영향에 대한 정확한 결론을 내릴 수 있을 것이다. 질소가스분위기의 산소농도를 조정하여 산소농도에 따른 산화의 영향을 관찰할 수도

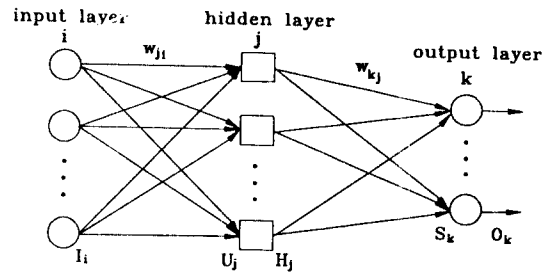


Fig. 16. Schematic diagram of a neural network employed for the study.

있으나, 본 실험에서는 산화에 대한 영향의 유무를 간단히 확인해 보려고 하였는데 산화에 의한 영향이 존재함을 알 수 있었다. 더 큰 에너지조건하에서, 산소농도를 조절하며 실험이 행하여진다면 산화에 의한 영향을 보다 명확히 파악할 수 있을 것이다.

4. 신경회로망의 적용과 결과

인간의 신경 세포를 모델로 한 신경 회로망(neural network)은 입력층 관계를 학습시키는 것 만으로도 비선형성이 강한 함수 관계를 네트워크 내의 연결 강도로서 구축하여 모델링 할 수 있으며 미학습의 입력에 대해서도 타당한 값을 출력할 수 있다. 신경 회로망을 구성하는 구성도를 Fig. 16에 나타내었다. 입력과 출력의 관계식을 살펴보면,

$$U_j = \sum w_{ji} \cdot I_i$$

$$H_j = f(U_j)$$

$$S_k = \sum w_{kj} \cdot H_j$$

$$O_k = f(S_k)$$

$$f(\text{NET}) = 1.0 / [1.0 + \exp(-\text{NET})]$$

여기서, I_i 는 입력층 유니트의 출력, w_{ji} 는 입력층에서 은닉층(hidden layer)으로의 연결강도, H_j 는 은닉층 유니트의 출력, U_j 는 은닉층 유니트의 입력, S_k 는 출력층 유니트의 입력, O_k 는 출력층 유니트의 출력, w_{kj} 는 은닉층에서 출력층으로의 연결강도이다. 응답 함수는 1계 미분이 본래의 함수로서 표현될 수 있고, 출력이 연속치가 되는 것으로 0과 1 사이에서 연속적으로 변화하는 시그모이드(sigmoid) 함수를 사용하였다.

백프로퍼게이션 학습알고리즘은 목표 기대값과 네

트위크의 출력값의 제곱 오차함수를 최소가 되도록 연결강도를 최적화시키는 교사 학습 방법의 하나로서 한 방향으로의 신호 흐름을 가진 feedforward방식의 네트워크이다[16,17]. 연결강도의 값을 변경하기 위해 일반화된 델타규칙을 사용하며, 지역 최소점을 벗어나고, 빠른 수렴 속도를 갖게 하기 위하여 모멘트항을 연결강도의 변화량에 삽입하기도 한다[18-20]. 이것을 식으로 표현하면,

$$E = \sum_p E_p = \sum_p \sum_k \frac{1}{2} (T_k - O_k)^2$$

$$w_{kj}(t+1) = w_{kj}(t) + \Delta w_{kj}(t)$$

$$\Delta w_{kj}(t) = \eta \cdot \delta_k \cdot H_j + m \cdot \Delta w_{kj}(t-1)$$

$$\delta_k = \sum_k (T_k - O_k) \cdot O_k \cdot (1 - O_k)$$

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \Delta w_{ji}(t)$$

$$\Delta w_{ji}(t) = \eta \cdot \sigma_j \cdot I_i + m \cdot \Delta w_{ji}(t-1)$$

$$\sigma_j = \sum_k (T_k - O_k) \cdot O_k \cdot (1 - O_k) \cdot w_{kj} \cdot H_j \cdot (1 - H_j)$$

여기서, E_p 는 p번째 학습패턴에 대한 제곱오차, T_k 는 목표 기대값, t는 iteration number, η 는 학습 계수(상수), $\Delta w_{kj}(t)$, $\Delta w_{ji}(t)$ 는 t번째의 iteration에서의 연결강도의 수정량, m은 모멘트 계수이다.

공정단계(탄화횟수, 흑연화), 미끄럼속도(1.43, 6.01, 17.35 m/s), 수지함량(26, 33, 39 wt%)에 대한 마찰계수와 마모인자의 값에 대한 관계들간에는 복잡한 비선형성이 존재하기 때문에 수학적 상관 관계가 명확히 도출되지 못한다. 그래서 본 논문에서는 신경 회로망을 사용하여 그 비선형 관계에 대한 예측값을 구해 보고자 하였다. 입력층의 유니트는 3개로서 공정단계의 밀도, 미끄럼속도, 수지함량이며, 출력층의 유니트는 2개인데 마찰계수와 마모인자이다. 은닉층은 2개를 사용하였고, 구조를 변화시켜 각각의 구조에 대하여 학습하였으며, 학습의 고속화와 지역 최소점에 빠지지 않도록 모멘트항을 첨가하였다. 각각의 구조에 대하여 학습계수와 모멘트계수를 변화시켜 가며 학습하였다. 사용된 학습 데이터는 Table 3에 나타내었다. 총 실험 데이터는 42개인데 이중 학습 데이터로 36개를 사용하고, 미학습 데이터로 6개를 사용하였다. 즉, 36개의 학습 데이터로 신경 회로망을 학습시킨 뒤 6개의 미학습 데이터로 신경 회로망의 예측 능력을 실험하였다. 은닉층 구조의 변화와 학습계수, 모멘트 계수 값에 따라 많은 영향을 받았는데, 대체적으로 $3 \times 15 \times 15 \times 2$ 구조이며 모멘트계수와 학습계수값이 각각 0.8과

Table 3. Data sets used for learning (1-36) and testing (37-42) of the neural network

	Resin contents (%)	Density (g/cm ³)	Sliding velocity (m/s)	Wear factor ($\times 10^{-8}$ g/Nm)	Friction coefficient
1	26	1.40	17.35	5.568	0.378
2	26	1.40	1.43	6.073	0.465
3	26	1.52	17.35	3.052	0.465
4	26	1.52	1.43	2.216	0.446
5	26	1.57	17.35	1.061	0.356
6	26	1.57	6.10	0.722	0.254
7	26	1.57	1.43	0.526	0.401
8	26	1.53	17.35	1.753	0.482
9	26	1.53	1.43	0.864	0.437
10	26	1.50	17.35	0.183	0.339
11	26	1.50	6.10	0.136	0.383
12	26	1.50	1.43	0.069	0.359
13	33	1.37	6.10	3.285	0.353
14	33	1.37	1.43	3.693	0.528
15	33	1.53	17.35	9.036	0.288
16	33	1.53	6.10	2.330	0.290
17	33	1.53	1.43	2.491	0.475
18	33	1.52	17.35	1.573	0.463
19	33	1.52	6.10	2.184	0.233
20	33	1.52	1.43	0.596	0.280
21	33	1.55	6.10	1.305	0.256
22	33	1.55	1.43	0.521	0.370
23	33	1.49	17.35	0.296	0.490
24	33	1.49	6.10	0.234	0.312
25	33	1.49	1.43	0.161	0.409
26	39	1.35	17.35	3.101	0.425
27	39	1.35	6.10	3.919	0.405
28	39	1.35	1.43	2.202	0.488
29	39	1.50	17.35	3.807	0.459
30	39	1.50	6.10	9.988	0.261
31	39	1.50	1.43	2.167	0.380
32	39	1.49	17.35	1.633	0.250
33	39	1.49	6.10	1.558	0.246
34	39	1.48	17.35	0.232	0.514
35	39	1.48	6.10	0.152	0.379
36	39	1.48	1.43	0.098	0.515
37	26	1.40	6.10	35.018	0.431
38	26	1.52	6.10	2.821	0.387
39	26	1.53	6.10	27.293	0.286
40	33	1.37	17.35	26.838	0.298
41	33	1.55	17.35	1.426	0.273
42	39	1.49	1.43	1.446	0.501

0.2일 때에 미학습 데이터에 대한 오차가 적었다. Table 4에 입력의 조건과 그에 따른 실험결과와 신경 회로망의 예측값과의 오차를 나타내었다. 오차의 범위가 1~173%까지 광범위하게 나타났다. 이를 Fig. 17

Table 4. Error of the estimated output vs. test data

Experimental conditions			Friction coefficient				Error(%)
			Aver.	Max.	Min.	Estimated value (N.N.)	
26%	1C(1.40 g/cm ³)	6.10 m/s	0.431	0.479	0.341	0.646	50
26%	2C(1.52 g/cm ³)	6.10 m/s	0.387	0.500	0.305	0.132	66
26%	4C(1.53 g/cm ³)	6.10 m/s	0.286	0.298	0.274	0.183	36
33%	1C(1.37 g/cm ³)	17.35 m/s	0.298	0.314	0.281	0.497	67
33%	4C(1.55 g/cm ³)	17.35 m/s	0.273	0.279	0.267	0.559	105
39%	3C(1.49 g/cm ³)	1.43 m/s	0.501	0.509	0.493	0.386	23
Wear factor ($\times 10^{-8}$ g/Nm)							
26%	1C(1.40 g/cm ³)	6.10 m/s	35.018	40.034	26.475	0.701	98
26%	2C(1.52 g/cm ³)	6.10 m/s	2.821	2.868	1.956	2.202	22
26%	4C(1.53 g/cm ³)	6.10 m/s	27.293	29.058	24.888	4.643	83
33%	1C(1.37 g/cm ³)	17.35 m/s	26.838	28.235	20.733	26.570	1
33%	4C(1.55 g/cm ³)	17.35 m/s	1.426	1.679	1.176	3.893	173
39%	3C(1.49 g/cm ³)	1.43 m/s	1.446	2.138	1.407	1.475	2

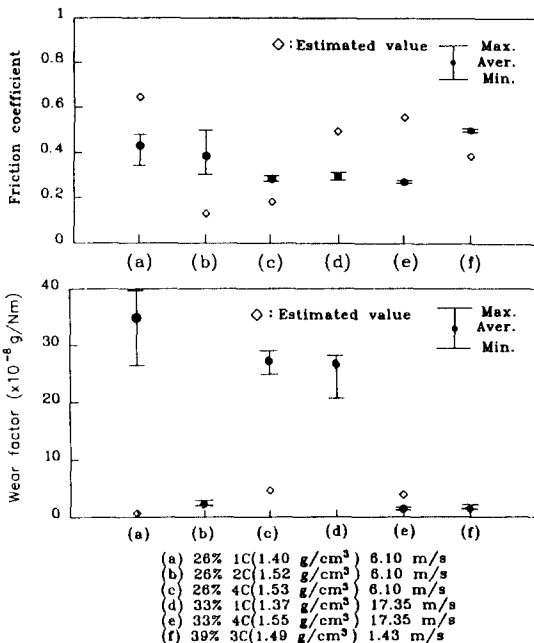


Fig. 17. Estimated values of the unlearned data by the neural network compared with the experimental results.

과 같이 그림으로 나타내어 보면 오차의 값의 분포를 파악할 수 있다. 마찰계수에서는 오차값의 변화가 심하였으나, 마모인자에서는 몇개의 예측치에 있어서는 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 마찰계수에 있어서의 오차가 큰 이유는 실험결과에서도 보았듯이 마찰계수와 실험조건, 즉 입력조건인 밀도, 속도, 수

지함량 증가의 관계에 있어서 일관된 경향을 파악하기 힘들었기 때문이며, 마모인자 값도 실험 데이터가 가장 좋지 않은 결과를 나타내는 값을 알 수 있다. 이로써 신경회로망의 적용에 있어서 학습 데이터로 쓰이는 실험값들이 그 현상을 정확하게 나타낼 수 있는 데이터여야 신경회로망에서의 예측능력이 향상될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

탄화 시편에서는 재료의 불균일성과 굽힘강성, ILSS 등의 물리적 특성의 저하로 인하여 마찰 마모 특성이 취약하였으나, 흑연화를 통한 시편에서는 향상된 마찰 마모특성을 얻었다. 속도의 증가에 따라 마모량은 증가하였으며, 수지함량의 변화에 따른 마모인자의 거동을 고려할 때 수지함량의 천이영역이 존재하리라 판단된다.

탄화횟수가 증가할수록 마찰 표면에서의 마모막의 형성이 용이하여, 연삭마모의 성분이 줄어들고, 응착 마모가 주된 역할을 하여 마모량이 감소하는 것으로 판단되며, 흑연화 이후의 시편에서 급격한 마모량의 감소는 재료의 특성의 향상과 흑연막의 형성에 기인한다고 믿어진다.

질소분위기와 공기중에서의 마찰 마모 실험의 결과에 따르면 질소분위기에서의 마모량이 적게 나타났으며, 이로 인하여 산화에 의한 재료의 취약성이 마모량에 영향을 끼침을 알 수 있었다. 마찰 및 마모실험 데이터의 신경회로망에의 적용이 가능함을

타진하였고, 신경회로망에서의 예측능력을 향상시키기 위해서는 재료의 마찰과 마모 현상을 지배하는 여러가지 광범위한 조건하에서의 전반적인 실험 데이터가 요구된다.

6. 참고 문헌

1. E. Fitzer, "The future of carbon-carbon composites", Carbon, Vol. 25, No. 2, pp. 163-190, 1987.
2. C. F. Lewis, "The unique capabilities of carbon-carbon composites", ME, pp. 27-31, January 1989.
3. J. D. Buckley, "Carbon-carbon, An overview", Ceramic Bulletin, Vol. 67, pp. 364-368, 1988.
4. I. L. Stimson and R. Fisher, "Design and engineering of carbon brakes", phil. Trans. R. Soc. Lond. A294, pp. 583-590, 1980.
5. S. Awasthi and J. L. Wood, "Carbon/carbon composite materials for aircraft brakes", Ceramic Eng. Sci. Proc. , Vol. 9, pp. 553-560, 1988.
6. N. Murdie, J. Don, C. Kocher, R. Liew, and C. P. Ju, "Tribological study of carbon/carbon composites", Materials Technology Center, South Illinois University, Carbondale, U. S. A. , pp. 496-497.
7. Baojian Pu and Qizhen Huang, "Tribological characteristics of c/c composites", Lanzhou Carbon Industry Corporation.
8. S. Kimura, E. Yasuda and N. Narita, "Friction and wear of carbon/carbon composites", J. of JSLE, Vol. 28, pp. 11-16, 1984.
9. E. Fitzer, W. Fritz and A. Gkogkidis, "Tribological behavior of carbon/carbon composites", 4th International Carbon Conference, Baden-Baden, 1986.
10. R. C. Bill, "Friction and wear of carbon-graphite materials for high energy brakes", 2nd International Conference of Solid Lubrication, Denver, Colorado, 1978.
11. 우성택, "항공기 브레이크용 탄소/탄소 복합재료의 마찰 및 마모에 대한 연구", KAIST, M. Thesis, 1993.
12. H. W. Chang and R. M. Rusnak, "Contribution of oxidation to the wear of carbon-carbon composites", Carbon, Vol. 16, pp. 309-312, 1978.
13. H. W. Chang and R. M. Rusnak, "Oxidation behavior of carbon-carbon composites", Carbon, Vol. 17, pp. 407-410, 1979.
14. H. W. Chang, "Correlation of wear with oxidation of carbon-carbon composites", Wear, Vol. 80, pp. 7-14, 1982.
15. B. Dacic and S. Marinkovic, "Kinetics of air oxidation of unidirectional carbon fibers/CVD carbon composites", Carbon, Vol. 25, pp. 409-415, 1987.
16. Richard P. Lippmann, "An introduction to computing with neural Nets", IEEE, ASSP Magazine April, 1987.
17. Philip D. Wasserman, Neural Computing, Van Nostrand Reinhold, 1989.
18. 박민용, 최항식 역, 뉴로 컴퓨터, 대영사, 1991.
19. P. K. Simpson, Artificial Neural Systems, Pergamon Press, Inc., 1990.
20. R. H. Nielsen, Neurocomputing, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1990.