

베어링용 흑연재 Bushing 개발

김경자 · 조광연 · 정윤중* · 임연수*

기술품질원 요업기술원

*명지대학교 무기재료공학과

(1997년 3월 5일 접수)

Development of Graphite Bushing for Bearing

K.J. Kim, K.Y. Cho, Y.J. Chung and Y.S. Lim

Institute of Ceramic Technology

*Dept. of Inorg. Mater. Eng., Myong Ji Univ.

(Received March 5, 1997)

요 약

Seal, Bearing, Bushing과 같은 기계요소에는 탄소재료의 사용이 크게 증가하고 있다. 본 연구에서는 흑연, 수지, 규조토를 각각 lubricant modifier, 결합재, friction modifier로 사용하고 이들을 수지결합 흑연복합체로 열가압시키는 최적의 조건을 검토한 후 효율적 사용을 위한 특성을 조사하였다. 원료의 첨가량과 기계적 강도 및 마찰마모 특성, 특히 마모거리와 마찰계수 등의 상관관계로서 흑연, 수지, 규조토의 조성비를 20:40:40의 무게비로 정하고 마찰계수, 마모양, 경도, 꺾임강도 등의 물성을 측정하였다. load별 마찰계수 측정에서는 3.5 kgf이상의 접동하중에서 마찰계수가 갑자기 증가하였으며 접동속도별 마찰계수변화에서는 일정한 값을 보였다.

ABSTRACT

The use of carbon materials in mechanical components such as bearings, seals, and bushings that do not require lubricants is increasing rapidly. This paper reports on establishing the optimal condition for resin-bonded carbon materials. We fixed the content ratio of materials, which include graphite powder and diatomite as a lubricant modifier and a friction modifier, respectively, with resin used as a bonding material. We then produced bushings using hot-pressing within the temperature range of resin curing. The properties of bushing, the friction coefficient, wear rate and the mechanical strengths are discussed in relation to the content of respective materials, with correlation of friction coefficient and sliding distance. Finally, we examined the friction coefficient changes according to the applied load on bushing and the friction coefficient changes according to contact speed of bushing.

Key words : Lubricant modifier, Friction modifier, Resin-bonded carbon

1. 서 론

탄소는 상온부근에서 화학적으로 안정된 원소로 기계 및 화학공업분야에서 중요한 역할¹⁾을 한다. 물리적으로 볼 경우 탄소는 금속적 성질과 세라믹스적 성질을 동시에 지니고 있으며 흑연결정 성장정도에 따라 분류되는데 그 성장정도가 클수록 금속적 성질을 지니게 된다. 이와같이 어느쪽의 성질이 지배적인가에 의해 물리적 성질²⁾이 광범위하게 변화된다.

근래 기계요소용 재료로서 금속이나 세라믹스재료에서 탄소재료로 대체되어 사용되는 것은 탄소의 양호한 열전

도성, 윤활성, 내식성 등의 특성³⁾ 때문이다. 일반적으로 탄소가 기계용 재료로 이용되는 특성⁴⁾은 아래와 같다.

- 자기윤활성으로 급유가 필요 없고 건조상태의 마찰마모에서도 불꽃이 없다
- 열전도가 양호하여 국부적 승온 발생이 없고
- 열팽창계수가 작아 열충격에 강하며
- 압축강도가 커서 고온에서도 강도가 저하되지 않는다.
- 내식성이 우수하여 부식성 유체에 사용이 가능하며
- 가공성이 우수하여 각종 형상의 고정밀 제품을 만들기 용이하다.

그러나 탄소재료는 기계적 강도 및 내마모가 약하기 때문에 기계용 재료로 이용될 때 주로 흑연단체 외에 복합재료⁵⁾로 제조된다. Bushing은 상대재와 접동하면서 동력을 전달하는 역할을 하므로 첫째, 충분한 강도를 지니고 있어서 가해지는 하중을 견딜 수 있어야하며 둘째, 낮은 마찰계수를 가져야 동력전달시 에너지 손실이 없고 셋째, 낮은 비마모량을 가지고 있어야 수명을 길게 유지하며 기계의 효율을 높일 수 있다.

본 연구에서는 흑연, 규조토, 수지 각각 lubricant modifier, friction modifier 및 결합재로 사용하였으며, 이들을 서로 혼합하고 열가압하여 기계적 강도, 마찰마모 특성, 미세구조 관찰로 최적조성을 조사한 후 그 물리적 특성에 대해서 검토하였다.

2. 실험방법

2.1. 사용원료

본 연구에서 사용한 규조토는 SiO₂ 71.4%, Al₂O₃ 12.3%를 함유하고 입도는 325 mesh 이하 99.9%의 범위로 비중은 2.26을 나타냈다. 흑연재는 비중이 2.22인 Lonza사 흑연으로 325 mesh이하 98%의 입자로 회분이 0.05%를 나타냈다. 수지는 레졸형 페놀수지로서 연화점이 80-110°C, 경화온도가 130°C로 경화시간은 30-60 sec였다.

2.2. 시편제조

수지결합 흑연재 Bushing의 강도, 경도 및 마찰마모 특성에 적합한 흑연, 규조토, 수지의 조성을 검토하기 위해 우선 흑연을 10%로 고정킨후 규조토의 함량을 수지 변화량에 따라 첨가시켜 조합하였다. 이때 혼합은 아세톤, 에틸 알콜, 메틸 알콜에서 실시한 예비실험을 참고로 하여 무수 methyl alcohol중에서 각 원료의 분리가 일어나지 않도록 서서히 alcohol을 증발시키며 혼합하였고 이를 60°C의 dry oven에서 충분히 건조하였다. 이때 시편의 성형성을 향상시키기 위해 diethylene glycol을 성형조제로 첨가하여 건조하였다. 시편성형은 분말을 일정량 정량하여 밀도나 격임강도 측정용 시편으로 5×10×40 mm인 각주형으로, 마찰마모특성 측정용 시편은 10×20×30 mm 시편으로 초기압력 150 kg/cm²의 압력하에 수지의 연화점 및 경화온도를 참고로 해서 80-90°C까지 승온시켜 hot-pressing하고 다시 성형압 500 kg/cm²의 압으로 140°C까지 승온시켜 경화가 진행되도록 하여 시편을 제작하였다.

2.3. 물성측정

시편의 부피밀도, 격임강도, 경도, 마찰마모특성 및 미

세구조 관찰등의 측정방법⁶⁾은 다음과 같다.

2.3.1. 부피비중, 격임강도

시편의 부피비중은 KS L 3409에 의해 행하고 격임강도는 3point loading방법⁹⁾으로 상온에서 측정하였으며 이때 cross head speed는 0.5 mm/min, span거리는 30 mm로 하였다. 측정값은 시편 5개를 측정하여 그 평균값으로 하였다. 경도측정은 shore hardness tester를 사용하여 시편의 각 양면에 대해 3회씩 6회 측정값의 평균값을 취하였다.

2.3.2. 마찰마모 및 마찰계수

시편의 마찰마모측정⁷⁾은 Pin-on-Disc type의 마찰마모 시험기를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 마찰마모 시험장치는 시편Pin과 상대재 Disc로 이루어져 시편holder는 시편에 수직하중이 주어지도록 하고 10단위로 RPM조절 가능한 DC Motor를 사용하였으며, Pin시료는 규격 3×4×20 mm로 선단은 반구상으로 가공연마하였다. Disc는 60×10 mm, 경도 85의 연마된 상대재를 사용하였다. 마찰마모시험은 하중 2 kg, 접동속도 53 cm/sec. 대기중 상온에서 행하여 3시간 후 마모량을 구하였다. 마모량은 기본적으로 접동거리 X와 하중P에 비례하므로 단위 접동거리, 단위하중당 마모량으로 정의 되는 비마모량 $W_s = W/Px$ ⁸⁾에 따라 구하였다. 마찰계수측정은 마찰마모 측정 시작부터 10분간격으로 60분간 측정하여 비교하였다. 마찰계수의 수치적인 현상측정은 시편에 하중P를 걸어 접동하면서 운동방향과 역으로 마찰력 F가 작용, 하중 P에 비례하므로 $\mu = F/P$ 로 정의된다.

2.3.3. 미세구조 관찰

격임강도, 부피비중, 경도, 마찰마모량 측정값의 변화를 관찰한 후 마찰마모시험전과 시험후 마모 시편 미세구조와 마모상태를 SEM으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수지함량 변화

본 실험에서 사용한 수지는 레졸형 페놀수지로 작업성이 좋고 기계적 강도가 크며 내열성이 좋아 베어링이나 Bushing을 제조할 때에 사용되어 재료들간에 결합재 역할을 한다. 따라서 수지의 함량정도는 Bushing의 물성을 결정짓는 중요한 인자이다.

수지함량은 규조토와 흑연간의 원료혼합의 용이성 및 기계적 강도 유지를 고려하여 우선 예비실험을 거친 후 25 wt%로부터 50 wt%까지 범위를 정하고 5 wt% 범위로 시편을 제작하였다. 이때 흑연은 10 wt%로 고정시켰고 상대적으로 규조토의 함량을 수지 변화량에 따라 첨가시켜 물성을 검토하였다.

Fig. 1은 수지함량에 따른 강도 및 경도 측정 결과이다.

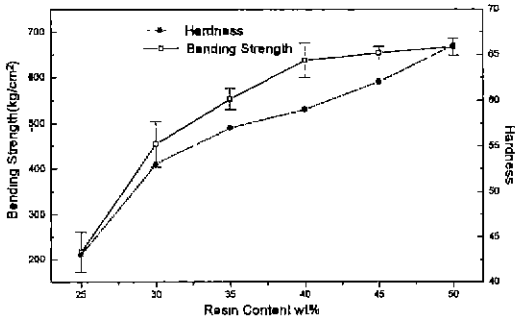


Fig. 1. Bending strength and hardness of resin-bonded carbon according to resin content (resin+diatomite=90 wt%)

수지함량이 증가할수록 꺾임강도 및 경도는 계속 증가하고 있다. 수지함량 40%이상에서는 꺾임강도가 완만한 증가추세를 보이고 있다. 수지는 경화후 기계적 강도가 큰 재료이기 때문에 수지량의 증가에 따라 기계적 강도가 커진 것으로 판단된다. 그런데 본 연구에서 개발하는 탄소재 Bushing의 상대재는 주로 경도가 80-85정도인 S45C Steel재가 대부분이다. 이점을 고려하여 Pin-on-Disc법에 의한 마찰마모시험을 실시하며 관찰한 결과 경도가 60이상인 시편에서는 마찰소음이 심하게 발생되었다. 따라서 꺾임강도값이 가장 크면서 경도는 60을 넘지 않도록 하는 수지함량은 40%가 적당하였다.

3.2. 흑연함량 변화

흑연은 결정내에서 육각의 판상에서는 공유결합을 하는 반면, 층간에는 그보다 결합력이 약한 반데르발스 결합을 이루어 층밀림의 힘이 작용될 때에는 층간 밀림 현상이 쉽게 일어난다. 이것이 바로 탄소재료가 자기윤활성을 띠는 이유이다. 이는 Bushing이 장비내에 장착되어 축수와 실린더 사이에서 접동하며 회전할때 요구되는 가장 중요한 특성중의 하나이다.

Fig. 2는 수지량을 40%로 고정시킨 상태에서 흑연 변

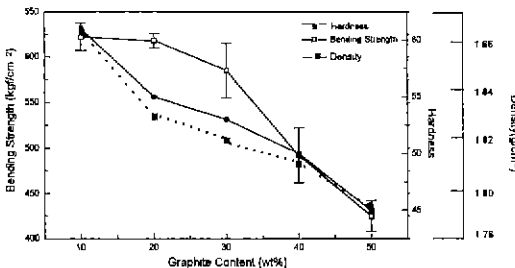


Fig. 2. Bending strength and hardness of resin-bonded carbon according to resin content (resin+diatomite=60 wt%)

화량에 따른 꺾임강도와 경도값의 측정결과이다. 흑연 함량이 증가할수록 밀도가 감소하고 꺾임강도와 경도가 감소하였다. 이는 Wettability¹⁰⁾와 가소성이 좋지 못한 흑연의 양이 많아져 치밀화가 떨어진 결과로 생각된다. 여기에서 흑연과 규조토의 상대적 첨가량관계를 생각해 보면 규조토가 증가할수록 밀도값이 높아지며 기계적강도가 증가하는 것으로 생각할 수 있다.

3.3. 마찰마모특성 및 미세구조 관찰

본 실험은 상온의 무윤활(Dry contact)상태에서 Pin-on-Disc Type으로 마모속도 53 cm/sec, 마모하중은 마찰계수 및 마모량측정시 2 kgf로 일정하게 가하여 행하였다.

Fig. 3은 시편의 수지 변화량에 따른 마찰계수값이다. 수지40 wt%의 결과에서 가장 낮은 마찰계수값을 보이고 있다. 이는 3.1에서 수지의 함량을 기계적 강도로써 정한 결과에 일치하는 것으로 이를 최적 함량으로 볼 수 있다. 수지25-규조토65% 방향일수록 마찰계수가 높아지는 것은 섞인 재료들간에 결합재역할을 하는 수지의 양이 점차 작아져 결합력이 떨어진 상태에서 더욱이 규조토의 양은 많아져 마찰마모과정에서 이 입자들이 쉽게 떨어져나와 마모표면을 불안정하게 하여 마찰계수를 높인 것으로 판단된다. 또한 수지40%이상의 시편에서 마찰계수를 높인 것은 Fig. 1의 결과로부터 경도가 60을 넘으며 마찰소음이 심하게 발생한 결과와 일치한다.

Fig. 4는 흑연의 변화량에 따른 마찰계수 값으로 흑연 함량이 30%를 중심으로 마찰계수의 경향이 변환되고 있다. 이 그림을 전체적으로 볼 때 마찰계수를 낮추는 흑연의 양은 20-30%가 적당한 것으로 판단된다. 이 결과로부터 흑연함량에 따른 마찰계수 변화는 Fig. 2와 연관지어 볼때 기계적 강도의 경향과 반드시 일치하지 않는다는 것을 알았다.

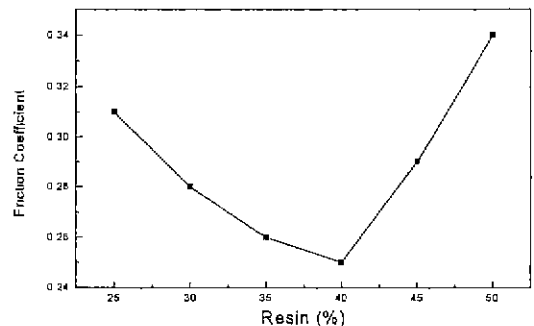


Fig. 3. Friction coefficient of resin-bonded carbon according to resin-diatomite content (resin+diatomite=90 wt%)

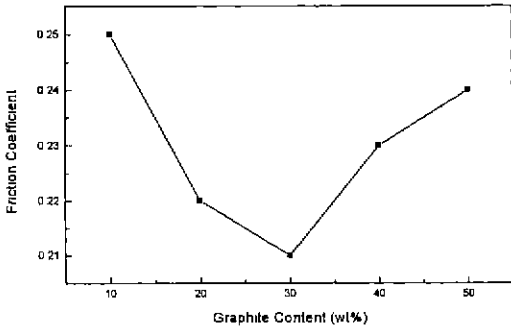


Fig. 4. Friction coefficient of resin-bonded carbon according to resin-diatomite content (resin+diatomite=60 wt%)

또한 흑연함량에 따른 비마모량과 경도값을 Fig. 5에 나타냈다. 흑연함량이 증가함에 따라 비마모량이 증가하였고 같은 그림에서 경도값은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 이미 3.2에서 설명된 바와 같으며 경도가 낮아질수록 마모표면입자들이 쉽게 떨어져 나가 마모량을 늘린 것으로 생각된다. 이것을 규조토의 측면에서 고찰하면 규조토의 사용량이 증가할수록 경도는 증가하며, Fig. 5는 비마모량이 감소하는 결과를 알 수 있다. 이는 규조토가 흑연보다 wettability가 좋아 시편의 성형성을 도우며 또한 규조토 pore에 수지가 쉽게 채워 밀도를 높여 경도를 증가시켜 본 실험에서 내마모 역할을 한 것으로 여겨진다. Fig. 5는 경도와 비마모량의 관계가 정성적으로 실험적 결과와 일치하는 결과를 보여준 것으로 Bushing의 마모방지를 위해서는 경도를 증가시키는 조건을 찾는 것이 중요하다고 본다.

Fig. 6은 흑연함량에 따른 마찰계수와 마모거리에 대한 상관관계를 조사한 결과이다. 전체적으로 시편은 마모초기에 마찰계수가 급격히 증가하다가 점차 낮아지며

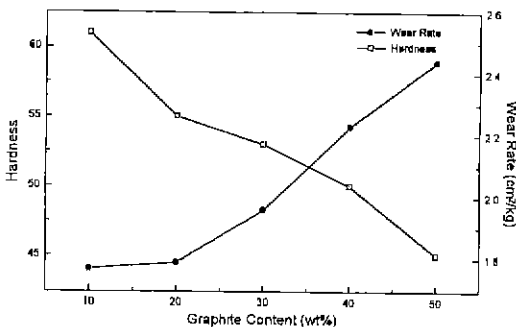


Fig. 5. Hardness and wear rate of resin-bonded carbon according to graphite content (graphite+diatomite=60 wt%)

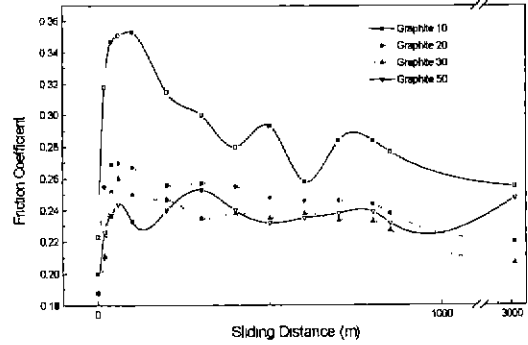


Fig. 6. Correlation of friction coefficient and sliding distance of bushing according to graphite content.

안정된 값을 보이고 있다. 그러나 흑연함량 10 wt%일때는 다른 함량에 비해서 마찰계수값이 큰 기복을 보이며 계속 불안정한 양상을 보이고 있다. 또 흑연함량 50%에서도 30%때보다 기복이 큰 curve를 보이고 있다. 이는 Fig. 4에서 흑연함량10%와 50%의 마찰계수값이 가장 컸던 결과와 일치한다. 흑연함량 20%의 curve가 마모초기부터 가장 작은 기복의 안정된 모양을 보이고 있다. 흑연함량에 따른 마모양상이 각각 다르게 나타나는 결과를 참고하여 흑연양을 20%로 택하고 규조토40%, 수지40%와 함께 Bushing의 조성으로 정하였다. 이 결과로부터 흑연의 원활한 윤활작용을 위해 적합한 함량선정이 중요하다고 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 흑연함량변화에 따른 시편의 마모전과 마모후 미세조직이다. 마모전 SEM사진에서 보면 흑연함량이 40, 50%로 증가할수록 수지에 충분히 젖어 들지 못한 각이진 흑연입자들을 확인할 수 있다. 또 이와 같은 함량의 마모후 마모시편사진에서도 보면 40, 50%로 갈수록 마모표면에 파잉의 흑연입자로 인한 심한 파임현상을 볼 수 있다. 이는 3.4에서 흑연함량에 따른 기계적강도 변화, 마찰계수와 마모거리에 따른 변화에서 이미 설명한 바있다.

Fig. 9는 앞의 결과에서 정한 최적의 조성(수지40 wt%, 흑연20 wt%, 규조토 40 wt%)으로 열가압시킨 시편을 하중을 달리하여 측정된 마찰계수값의 변화이다. 그림에서 보면 하중이 증가할수록 마찰계수값이 약간 감소하듯이 보이다가 3.5 kgf 이상에서는 갑자기 마찰계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 개발한 Bushing의 효율적 사용 범위로 판단된다.

Fig. 10은 최적조성 시편의 점동속도별 마찰계수 변화이다. 속도증가에 따라 마찰계수값의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 일반 세라믹스 재료가 마찰마모과정에서 속도가 증가함에 따라 마모표면에 발열이 심해지

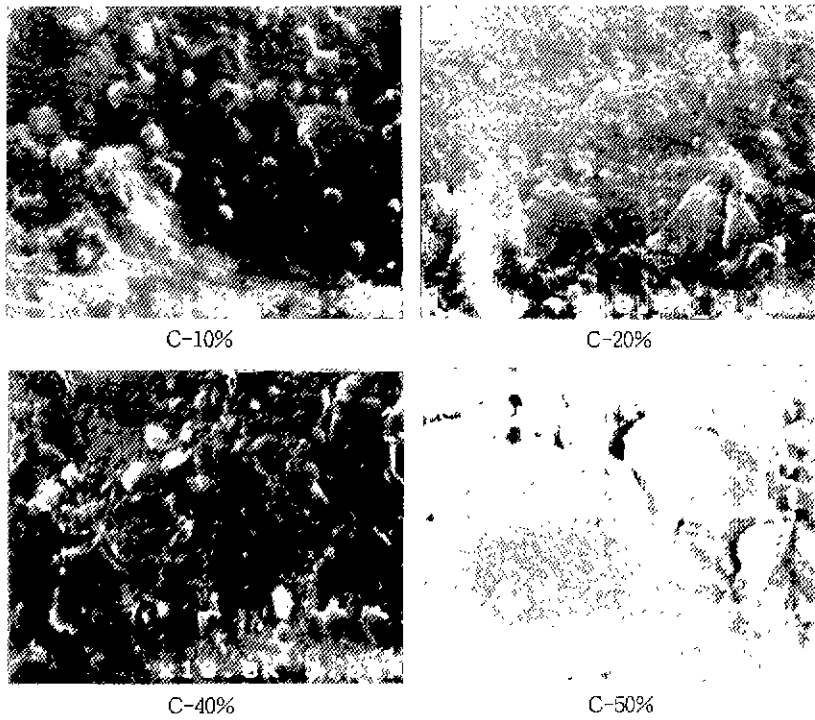


Fig. 7. Scanning electron micrographs of cross-section of bushing samples with graphite increasing taken before wear test

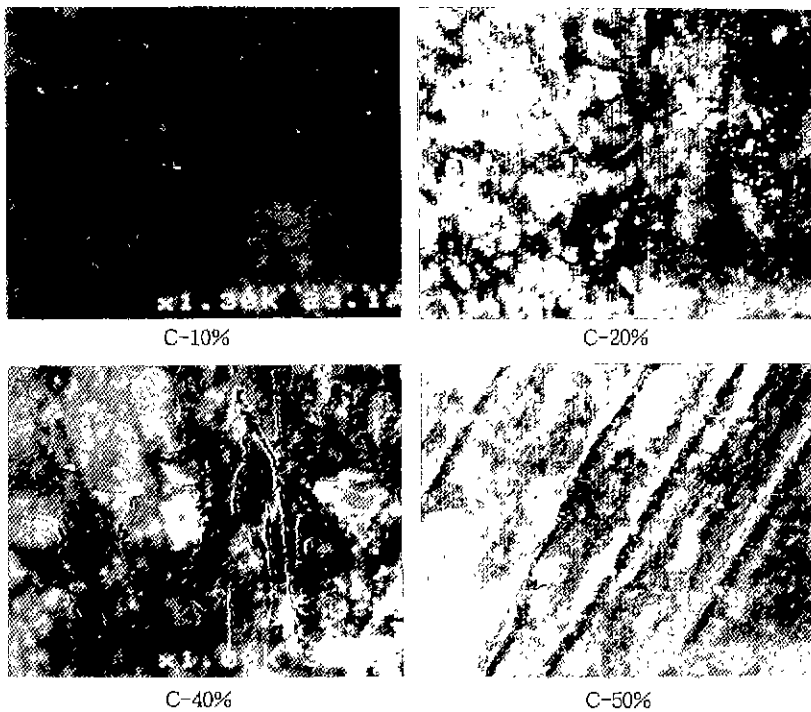


Fig. 8. Scanning electron micrographs of surface of bushing samples with graphite increasing taken after wear test.

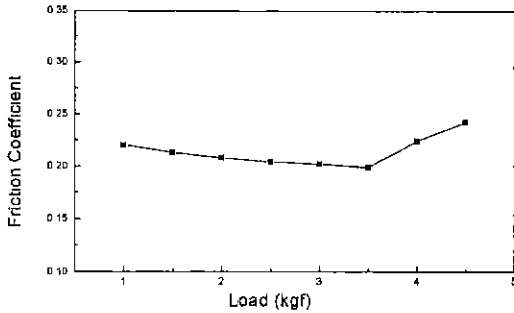


Fig. 9. Friction coefficient changes according to the applied load bushing

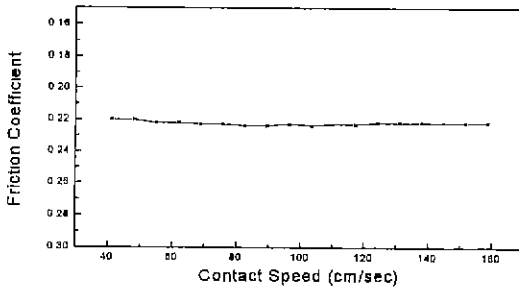


Fig. 10. Friction coefficient of resin-bonded carbon according to contact speed.

고 곧 접동면에 미세한 균열이 생기는 결과와 달리, 본 연구의 흑연재 Bushing은 흑연입자에 따른 자기윤활성 발휘 및 우수한 열전도성으로 속도증가의 영향을 받지 않는 것으로 생각되며, 또한 pore가 많은 구조토의 단열 역할도 무시할 수 없다.

4. 결 론

수지, 흑연, 구조토를 조성한 수지결합질 흑연재 Bushing의 특성은 아래와 같다.

1. 수지, 흑연, 구조토의 최적조성은 각각 40:20:40 wt%로 다음과 같은 물성을 지닌다.

Bending Strength (kgf/cm ²)	Hardness	Density (g/cm ³)	Friction Coef-ficient	Wear Rate (mm/kg)
61.8	52-56	1.83	0.22	1.79×10^{-8}

2. 본 연구에서 개발한 흑연재 Bushing은 접동하중에 따른 마찰계수값의 변화로부터, 접동하중 3.5 kgf이내의 범위에서 효율적으로 사용될 수 있다.

3. 접동속도에 따른 마찰계수는 본 연구에서 측정한 접동속도의 범위(40 cm/sec~160 cm/sec)에서 변화하지 않았다.

REFERENCES

1. 本田 英昌, 小林 和夫, "하이테크 炭素材料," pp.55-58 (1987).
2. 石川 敏攻, 세라믹스, "physics of carbon" 6-10, 25, pp.851 (1971).
3. D. R. Johnson, A. C. Schatthausser, V. J. Tennerly, E. L. Long, "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Project" *Ceramic Bull.*, **64**(2), 1985, pp.276-281
4. 石川敏攻, 長仲通, 日本機械學會誌, "carbon application" 76-661, 1973, pp.1543
5. 本田 英昌, 小林 和夫, (하이테크 炭素材料), 1987, pp.100
6. 炭素材料學會, 炭素材料實驗技術, 1978, pp.132
7. O. O. Ajayi and K. C. Ludema, "Wear," pp.237-257 (1988).
8. D. H. Bulkley and K. MIYOSHI, "Friction and Wear of Ceramics" *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **51**(12) (1972).
9. 西田俊彦, 安全榮一, "세라믹스의 力學的 特性評價" 日刊工業新聞社, 133-167 (1986).
10. Yoshiaki Takata, Yoshinori Fujimori, Shinichi Yosida, The Fourth Asian Thermophysical Properties Conference, "Effect of Experimental Parameters on Wettability measurement," 1995.