

소결 마찰재의 마찰특성에 미치는 고체 윤활제의 영향

정진현, 이범주, 조정환, 정동윤*, 권석진**
대우중공업 중앙연구소, *육군사관학교, **한국철도기술연구원

The effect of solid lubricant on the frictional characteristics of Cu base sintered friction material.

J. H. Jeong, B. J. Lee, J. W. Cho, D. Y. Chung, S. J. Kun

Abstract

The effect of graphite on the frictional characteristics of Cu-based sintered friction materials was studied by pin-on-disk type wear test. A study has been carried out concerning the optimum concentration of graphite in sintered friction material to obtain the minimum wear rate and low friction coefficient.

Friction coefficient and wear rate were increased as increasing the content of graphite in the matrix. In the study the optimum concentration of graphite was 19vol % to get the minimum wear rate and optimal friction coefficient.

Key Words: Cu base sintered friction material, friction, wear, graphite,

1. 서론

고속전철, 항공기 등의 고속, 고하중의 제동시스템에 사용되는 동계 소결 마찰재는 10여종 이상의 서로 다른 성분으로 구성되어 있는 복합재료이다. 제동용 마찰재는 구성재료를 기능상 분류하면 크게 기지금속, 마찰 조절제, 고체윤활제로 구분할 수 있다.⁽¹⁾

고체 윤활제로 첨가할수 있는 재료로는 납(Pb), 흑연(Graphite), MoS₂, CaF₂ 등이 있다. 특히 흑연은 층상구조에 의한 용이한 전단 변형과 고온에서 가스등과의 강한 결합력에 의해서 흑연의 층간 결합력을 약화 시킴으로서 마찰계수를 낮추는 효과를 나타낸다. 고체윤활제인 흑연은 마찰면에서의 상대금속과의 응착현상을 억제하고 안정된 마찰계수를 확보하기 위해서 첨가되므로 흑연의 량, 크기의 최적화가 중요하다.^(2,3,5,6)

본 연구에서는 동계 소결마찰재의 고체 윤활제인 흑연의 첨가량에 따른 마찰계수 및 마모량을 평가하였고, 최적의 고체 윤활제량을 설정하였다. 또한 마찰면 분석을 통하여 흑연이 동계 소결마찰재의 마찰특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

2-1 시편의 제조

시험에 사용된 마찰시편의 제조는 분말야금법으로 제조된 청동기지 소결 마찰재로서 성분은 Table 1 과 같다. 청동기지금속에 마찰조절제로 Fe, SiO₂, 등이 첨가되었으며, 고체 윤활제로 흑연(size:400-500 μm)을 첨가하였다.

각 성분 분말은 편석이 발생하지 않도록 혼합한 후, 3-4 ton/cm²의 압력으로 두께 15mm, 크기 30×30mm가 되도록 성형하였으며, 이론밀도의 80%가 되도록 하였다. 이렇게 제작된 성형체는 소결온도 750 - 850°C, 환원성 분위기 소결로에서 일정한 가압력으로 가압소결을 실시하여 이론밀도의 약 90%가 되는 시편으로 제작하였다.

소결후 각 시편의 미세 조직사진은 Fig 1.에서와 같이 흑연이 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있으며, 혼합시 분쇄되어 100 μm이하의 흑연분말도 존재함을 알수 있다. 또한 소결후 각 시편의 물성은 table 2.와 같다.

Table 1. Chemical compositions of sintered Cu-based friction materials (vol%)

Specimen	Lubricant	Matrix	Friction Modifier
S1	9	56	35
S2	19	46	
S3	25	40	
S4	31	34	
S5	45	20	

Table 2. Properties of green and sintered friction materials.

Specimen	Green density (g/cm ³)	Sintered density (g/cm ³)	Hardness (HRR)
S1	5.25	6.26	120.1
S2	4.83	5.58	114.6
S3	4.55	5.12	110.4
S4	4.31	4.70	103.4
S5	3.69	3.89	87.5

2-2 마찰 시험 조건 및 방법

본 연구에서 사용된 마찰시험기는 Pin-on-disk형의 정속식 시험기로서 Fig 2.에 나

타난 바와 같으며, 접촉면의 평형을 유지하기 위하여 회주철 디스크의 접촉표면 좌우측에 2개의 시편을 설치하였다. 시험시 시편에 가해진 수직하중은 1,078N이고, 마찰면에서의 마찰속도는 16m/sec이었다. 마찰시험은 6단계로 구성되어 있으며, 1,2단계는 외부에서의 열원 공급없이 마찰열에 의하여 디스크의 온도가 상승한 것이다. 3, 4단계에서는 외부열원에 의하여 분위기 온도가 350°C가 되도록 조절하였으며, 5, 6단계에서는 분위기 온도를 450°C로 상승시켜서 온도에 따른 마찰특성을 각 단계별로 비교하였다. 매단계는 1,000회전씩 5회의 반복시험으로 이루어졌으며 매 회마다 2분씩의 휴지시간을 두었다. 시험중 마찰계수는 1,000회전 동안의 평균치로 측정하였으며 정상상태의 마찰계수를 측정하기 위하여 초기 300회전 까지의 마찰계수는 제외되었다. 마모량의 측정은 매 단계마다 시험이 끝난후 시편의 초기값에 대한 무게차이를 측정하고 밀도와 단면적으로 나누어서 환산한 두께 차이로 매 단계별로 비교하였다.

고체윤활제인 흑연의 첨가량의 변화가 마찰특성에 미치는 영향을 평가하고자 광학현미경, SEM, EDS등으로 마찰면을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1 고체 윤활제량에 따른 마찰계수의 변화

Fig 3.은 고체 윤활제인 흑연의 첨가량에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것이다. 시험조건으로서 수직하중이 1,078N이고, 마찰속도가 16m/s일때 흑연량이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이것은 흑연량이 31vol%이상인 시편의 경우 Table 2.에 나타난 바와 같이 기지강도의 감소로 인하여 분산되어 있던 흑연이 마찰시 기지금속으로 부터 탈락되어 마찰면에서의 윤활작용을 충분히 수행하지 못함에 따른 것으로 판단된다. 또한 흑연량의 증가로 마찰시편의 열전도도가 상대적으로 감소되어 마찰면에서의 순간 마찰온도가 증가함에 따라 흑연함유량이 적은 시편보다 응착이 빨리 진행됨으로서 마찰계수를 증가시킨 것으로 판단된다. 끝으로 흑연은 대기중에서 마찰면의 온도가 약 538°C에 이르면 급속히 산화되어 마찰계수가 증가하는 것으로 보고되었다.⁽⁴⁾ 그러나 흑연의 첨가량이 19vol%이하인 경우는 마찰표면에 얇은 흑연층이 형성되면서 응착을 억제하고 마찰 debris를 마찰면에서 방출시키는 윤활작용을 함으로써 마찰계수가 안정하게 나타난 것으로 판단된다.

본 시험에 사용된 마찰시편의 안정된 마찰계수 측면을 고려할때, 고체윤활제의 첨가량은 9 - 19vol%가 적절하며, 또한 흑연의 증가는 밀도의 감소를 가져오므로 동계 소결 마찰재의 경량화를 고려할 때, 19vol%의 고체윤활제를 첨가한 시편이 최적화된 시편임을 알수 있다.

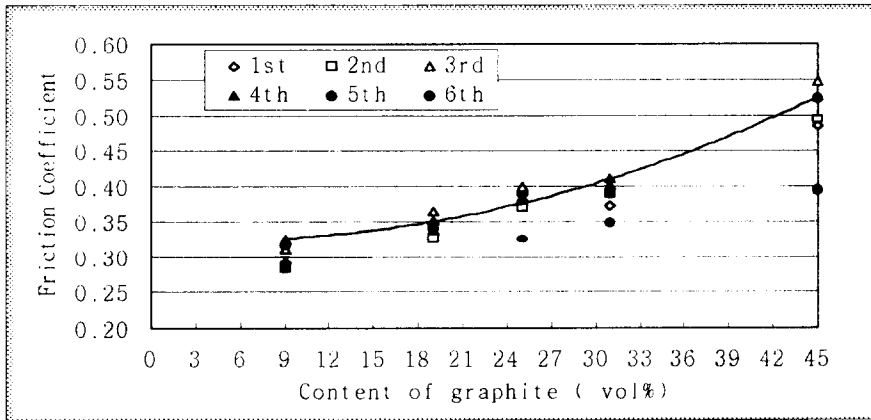


Fig 3. Content of graphite v.s Friction coefficient

3-2 고체 윤활제량에 따른 마모량의 변화

Fig 4.는 정속식 마찰시험에서 단계별 마모량의 누적된 값을 나타낸 것이다. 흑연량이 증가됨으로써 마찰시 기지강도가 감소되고 그로 인하여 탈락되는 흑연의 양이 증가함으로써 마찰면의 단위면적당 가해지는 압부력이 상대적으로 증가하여 31vol%이상에서 마모가 급격히 증가하였다. 또한 흑연이 탈락된 자리는 불연속된 마찰 산화물층의 열 피로균열 전파에 영향을 주므로써 마모량이 증가한 것으로 나타났다. 마찰조정제로 첨가되는 경질의 입자는 기지금속의 소성유동을 억제하여 마모표면 직하에서 균열 전파를 방해하여 마모량을 감소시키는 역할을 하는 것으로 보고되고 있다⁽⁵⁾. 그러나 흑연량의 증가는 기지금속의 소성유동을 용이하게 하여 경질입자의 탈락이 많이 발생되므로 마모량이 증가한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 고체 윤활제량이 9 - 25vol%로 첨가된 경우에는 서로 마모량의 차이가 크게 나타나지 않았다.

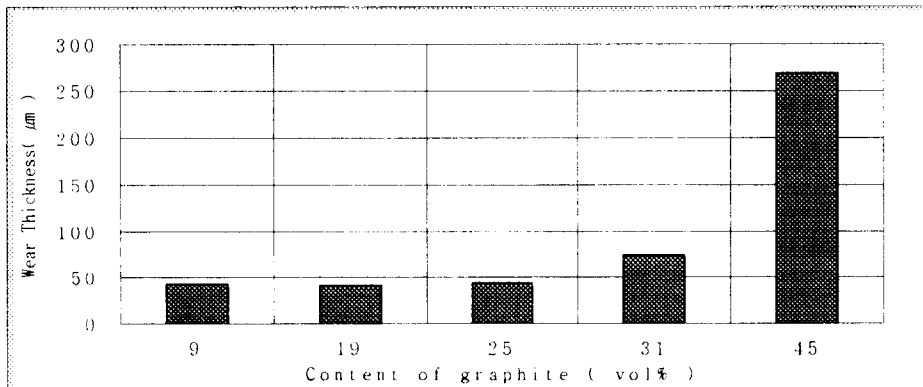


Fig 4. Content of graphite v.s Wear thickness.

3-3 온도에 따른 마찰계수의 변화

Fig 5는 마찰시험시 마찰면의 온도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내고 있다. 마찰면의 온도는 Thermocouple을 이용하여 소결마찰재의 마찰표면에서 후방 3mm되는 지점에서 측정하였다. 흑연량이 31vol%경우가 마찰온도에 영향을 받지 않는 시편으로 나타났고, 19vol% 이하인 시편은 마찰 표면온도가 약 300°C에서 마찰계수가 감소되는 경향을 나타내고 있다. 이것은 고온에서 대기중의 gas와 흑연이 서로 결합되어 흑연의 층간결합력을 약하게 하여 마찰계수가 감소한 것으로 판단된다⁽⁴⁾. 그러나 흑연량이 45vol%첨가된 시편의 경우 350°C이상에서 마찰계수가 감소하는 현상을 나타냈다. 19vol% 이하인 시편은 마찰면에서 흑연이 윤활제 역할을 하였으나, 45vol%첨가된 시편은 흑연이 마찰면에서 윤활작용을 하지 못하고 온도가 증가함으로써 기지금속의 소성유동이 용이해지는 350°C이상에서 마찰계수가 감소하는 현상을 나타낸 것으로 판단된다.

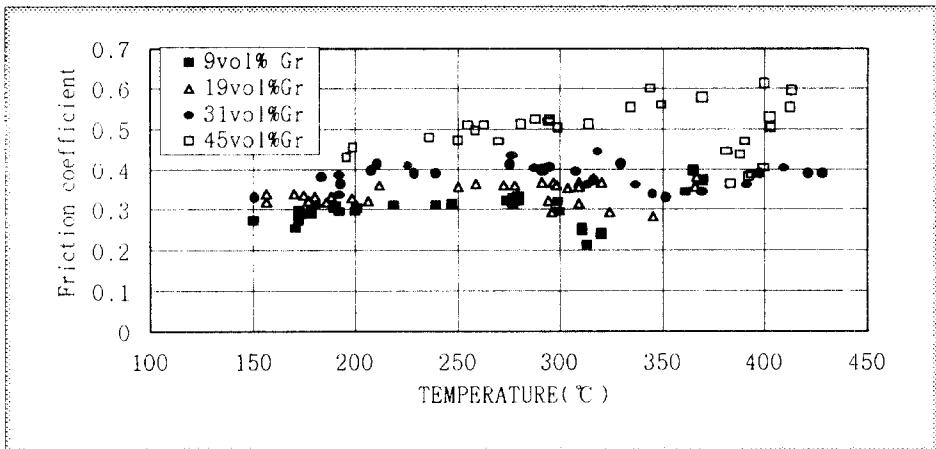


Fig 5. Surface temperature of specimen v.s friction coefficient

3-4. 마찰면 분석

Fig 6.은 마찰시험후 마찰표면의 미세조직으로써 흑연의 첨가량이 31vol%이상인 (c),(d)의 경우는 상대적으로 기지금속이 감소되어 동일한 시험조건에서 기지금속이 분담하는 열의 량이 증가함으로써 산화층의 형성과 파괴가 반복적으로 일어나며, 상대 마찰면과의 응착이 발생되어 마찰계수가 증가된 것으로 판단된다. 흑연량이 9vol%인 (a)의 경우는 금속표면 또는 산화층위에 미분의 흑연입자가 존재하여 마모입자의 방출

이 용이하도록 윤활작용을 함으로써 마찰계수는 안정하고 산화층이 안정되게 형성되어 마모량이 감소한 것으로 보여진다.

Fig 7은 마찰면에서 마찰조정제의 마모상태를 나타내고 있다. 흑연이 적은 시편(9, 19vol%Gr)의 경우는 경질의 마찰조정제가 마찰면에 고착되어 소성유동층의 형성을 억제하고 산화층의 박리를 막아서 마모량을 감소시키는 효과가 있는 반면, 흑연 함유량이 많은 31, 45vol%Gr의 경우는 경질의 B₄C가 마찰면에서 탈락되어 잘 관찰되지 않았다. Fig 7의 (a),(b)에서 마찰열에 의해 Cu가 산화된 것으로 보이는 붉은 면을 관찰할 수 있으며, (b)의 마찰면에서 온도의 상승에 의한 Cu가 용융상태에 가까운 형태로 소성유동(smearing)된 흔적을 관찰할 수 있었다⁽¹⁾

Table 3 은 마찰시험후 마찰면을 EDS분석한 값으로서 흑연의 첨가량에 무관하게 비슷한 량의 Fe, Cu산화물층이 존재하는 것으로 관찰되었다. 흑연이 증가함으로써 마찰 표면온도가 증가하여 산화층의 형성에 영향을 주는 것으로 나타났다. Fig 8은 마찰시편의 단면을 관찰한 것으로 흑연량이 증가함으로써 산화층의 두께가 증가함을 관찰할 수 있었다. 또한 불연속적인 산화층과 과도한 산화층은 마찰특성에 악영향을 주는 것으로 보여진다.

Table 3 EDS analysis of the worn surfaces. (wt%)

Element	Fe	Cu	O	Sn	C
19vol% Gr	49.60	21.68	19.66	2.21	1.22
45vol% Gr	48.39	22.18	20.52	1.94	1.14

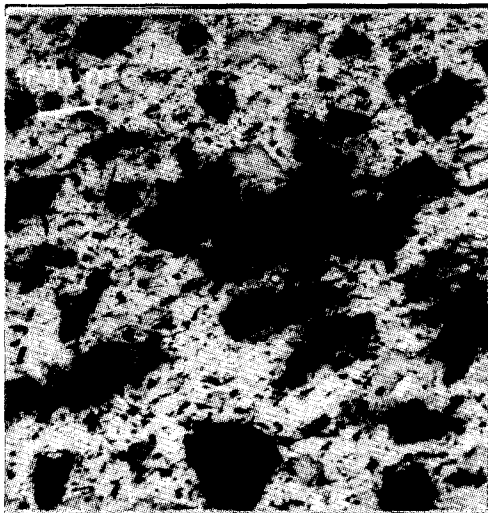
4. 결론

최적의 고체윤활제량을 설정하기 위한 흑연의 첨가에 따른 pin-on-disk type 정속식 마찰시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

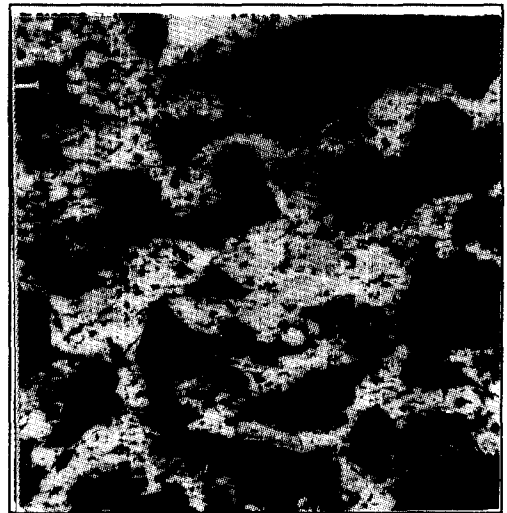
- 1) 고체윤활제인 흑연 첨가량이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하였고, 31vol%이상에서는 급격하게 마모량이 증가하였다.
- 2) 최적의 고체윤활제 첨가시편으로 흑연량이 19vol%첨가한 시편이 안정된 마찰계수와 낮은 마모량을 나타내었다.
- 3) 마찰온도 증가에 따라 안정된 마찰계수를 나타낸 시편은 흑연량이 31vol%첨가한 시편이었고, 흑연량의 증가는 마찰면에 안정된 산화물층을 형성하는데 도움을 주지 않으며, 오히려 기지강도의 감소로 마모량이 증가하였다.

5. 참고문헌

- 1) 정동윤, 김기열, 조정환 “ B₄C첨가에 따른 동계소결합금 마찰재의 마찰특성 변화에 관한 연구, 윤활학회지 Vol. 12, No 3, 1996 ,pp
- 2) Dufek “ The effect of different graphite qualities on the properties of sintered bronzed-based friction materials.” powder metallurgy international Vol 2, No 1, 1970 pp249-252
- 3) Yuko tsuya, Asle and Kazunori “ Optimum concentration of solid lubricant in compact” LUB. ENG. Vol. 31, No 8, pp 402-410
- 4) F. J. CALAUSS “ Solid lubricants and Self-Lubricating solids” Academic press 1972
- 5) 황순홍, 김종국, 허무영, “ 유리섬유 강화 청동기지 복합재에서 마모특성에 미치는 유리섬유와 흑연의 영향” , 한국소성가공학회 95추계학술대회 논문집 pp 181-187
- 6) 송경태외 5명, 동계소결 마찰재에 대한 흑연의 형상과 함량의 영향, 대한기계학회 추계학술발표대회, 1994 pp18-22,



(a) 19vol% Gr



(b) 45vol% Gr

Fig 1. Microstructure of sintered Cu-based friction material($\times 100$)

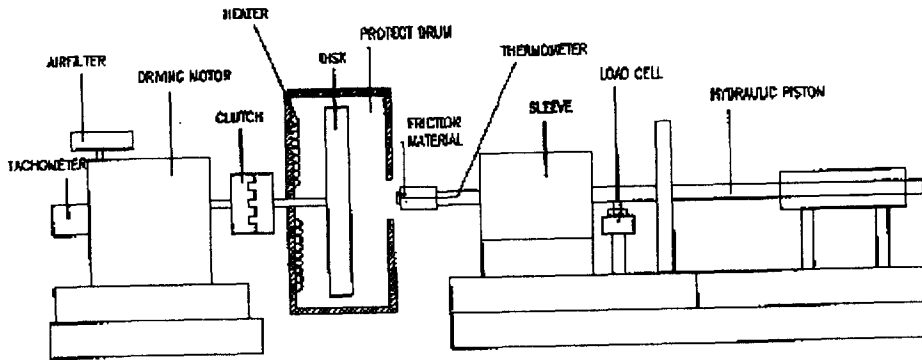


Fig 2. Schematic diagram of friction test rig.



(a) 19vol% Gr



(b) 45vol% Gr

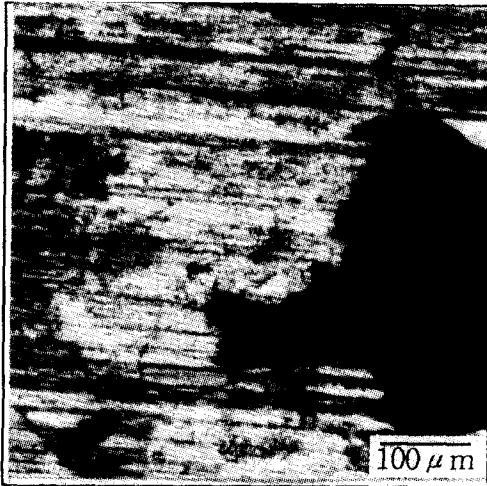
Fig 8. Cross-section of worn surface ($\times 200$)



(a) 9vol% Gr



(b) 19vol% Gr



(c) 31vol% Gr



(d) 45vol% Gr

Fig 6. Micrograph of worn surface ($\times 100$)



(a) 9vol% Gr



(b) 19vol% Gr



(c) 31vol% Gr



(d) 45vol% Gr

Fig 7. Micrograph of B_4C on worn surface ($\times 100$)