

자동차에 사용되는 금속성 마찰재와 유기질 마찰재의 마찰 특성에 관한 연구

장 호

고려대학교 공과대학 재료·금속 공학부
서울시 성북구 안암동 5 가 1 번지 136-701

Abstract

Friction properties of two different types of automotive friction materials were studied. They were non-asbestos organic and semi-metallic friction materials. The two friction materials were tested using an inertia brake dynamometer to investigate friction stability, rooster tailing phenomena, temperature change of friction couples during drags and stops. Results showed that the level of the friction force is strong function of time, temperature, and speed regardless of the type of friction materials. The change of friction coefficient during braking (rooster tailing) was pronounced when the applied pressure was increased in the case of semi-metallic friction materials. This phenomena appears strongly dependent on the applied pressure, initial brake temperature and ingredients in the friction material.

1. 서론

자동차의 속도 제어에 사용되는 마찰재의 제동 성능은 주로 마찰재와 로터(rotor)의 재료적 특성과 그에 따른 마찰특성에 의해 결정된다. 이러한 마찰재의 마찰특성은 마찰재 제조에 사용되는 원료의 종류 및 제조 방법에 따라 크게 변하며 따라서 자동차의 제동장치(brake system)에 관련된 여러 가지 요소들 중에서 가장 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. [1,2,3] 자동차용 마찰재는 주행 시 다양한 조건과 환경에서 사용되므로, 온도, 습도, 속도 및 감속도 등에 따라 마찰특성이 변화하지 않도록 고안되어야 한다. [4,5] 일반적으로 마찰재는 운전자가 요구하는 여러 가지 조건을 만족하여야 하며 그 중 대표적인 것들은 적절한 수준에서의 안정된 마찰계수, 진동이나 잡음의 극소화, 마찰재와 로터의 마모 감소 그리고 비교적 저렴한 제조단가 등이다.

현재 자동차 제조업체에서 사용되고 있는 비석면계 마찰재는 유기질 마찰재(non-asbestos organic (NAO) friction material)와 금속성 마찰재(non-asbestos metallic friction material)로 크게 분류되며,

금속성 마찰재는 금속의 함량에 따라 저금속성 마찰재(low-metallic, 마찰재 중 금속의 함량이 30%이하인 경우)와 반금속성 마찰재(semi-metallic 금속의 함량이 30% 이상인 경우)로 다시 나뉘어진다. 현재 일반적으로 알려져 있는 바로는 비석면계 유기질 마찰재는 안락감과 떨림현상에서 그리고 반금속성 마찰재는 고온특성과 수명의 측면에서 우수성을 나타내고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 제동 시 잡음 현상 등의 다양한 브레이크 관련 현상들은 마찰재의 종류에 관계 없이 흔히 대두되고 있으며 그러한 문제들을 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 현재 자동차 제조업체에서 가장 많이 사용하고 있는 대표적인 두 마찰재를 대상으로 그들의 마찰특성에 관해 비교 연구하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 두 마찰재는 비석면계 유기질 마찰재(NAO-23)와 반금속성 마찰재(SME-58)로서 현재 자동차에 장착되어 시판되고 있는 마찰재들을 대상으로 하였다. 이들 두 마찰재의 제조에

사용된 정확한 원료들의 구성비 및 그 종류는 마찰재 제조업체의 비밀이므로 본 연구에서 발표할 수 없으며 일반적으로 10 가지 이상의 원료가 포함된 복합재료이다. Table 1에 x-ray fluorescence spectrometry (XRFS, Rigaku Co. Japan)를 이용하여 측정된 마찰재는 원소 분포를 나타내었다. 마찰재 내의 원료 분포를 나타내기 위해 저배율에서의 조직사진을 Fig. 1에 나타내었다.

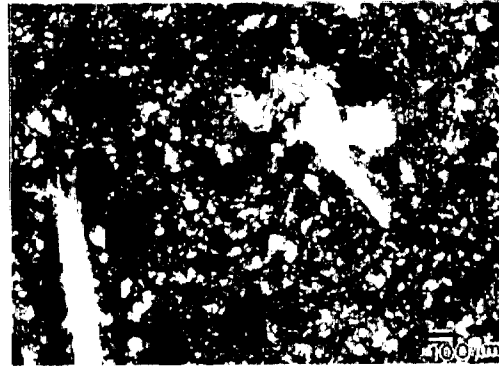
마찰재의 제조는 건식혼합(dry mixing), 사전성형(pre-forming), 고온 고압에서의 성형, 경화(curing)의 단계로 이루어졌으며 마찰재의 상대재로 사용된 로터(rotor)는 회주철로 제작되었으며 sand casting 후 기계가공을 거쳐 완성되었다.

본 실험에서 사용된 로터는 중형 승용차의 전륜에 사용되는 것으로서 두께가 26mm, 직경이 276mm이었으며 직선형 vane 이 냉각을 돕기 위해 고안된 것이었다. 비석면계 유기질(NAO) 마찰재와 반금속(semi-metallic) 마찰재의 시험에 사용된 rotor의 DTV는 각각 3.8 μm, 3.6 μm이었다.

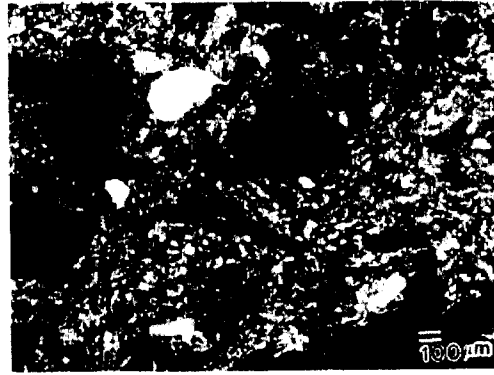
마찰 및 마모 특성을 측정하기 위해 본 실험에서는 브레이크 용 dynamometer (Model D-1900, Link Engineering Co.)가 사용되었다.[6] Dynamometer 시험은 두 단계로 이루어져 있으며, 그 첫 단계는 일정한 압력 하에서 시행한 끌기(drag) 시험이며 두 번째 단계는 100km/h로 주행하는 자동차를 다양한 조건하에서 실행하는 정차(stop) 실험이다. 끌기(drag) 시험은 초기 온도 100 ℃하에서 장시간 동안 일정한 가압력(0.52MPa) 하에서 제동하여 마찰시 발생하는 열에 따른 마찰현상의 변화를 연구하기 위한 것이며, 정차시험은 가압력과 로터(rotor)의 초기온도를 변화시켜 그에 따른 마찰계수의 안정도(friction stability)를 측정하기 위한 시험이다. 정차시험 시의 가압력과 로터의 초기 온도 범위는 각각 100 psi(0.69 MPa) - 500 psi(3.5 MPa) 과 150F(66 ℃) - 450F(232 ℃)로 하였다.

Table 1. Semi-quantitative composition of the friction materials (weight percent) from XRFS analysis.

	Al	Sb	Ba	Ca	C	Cu	Fe	Mg	Mo	K	Si	S	Others
NAO-22	4.8	7.7	20.0	3.5	22.3	8.5	14.3	0.1	--	2.3	6.9	3.9	bal.
SME-58	1.0	3.4	15.2	0.6	27.1	7.7	23.1	2.8	2.0	0.3	3.1	3.9	bal.



(a) NAO-23



(b) SME-58

Figure 1. Microstructures of friction materials NAO-23 and SME-58. (back-scattered electron images of SEM)

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 정차(stop)시험 및 끌기(drag) 시험 시의 마찰 열에 의한 로터와 마찰재의 온도변화.

자동차 정차(stop)시험 및 끌기(drag)시험 때 발생하는 마찰열은 브레이크 성능에 매우 중요한 영향을 미친다. 이는 마찰시 온도가 마찰계수에 영향

을 미칠 뿐 아니라 로터 및 마찰재의 형상 및 재료적 성질을 변화시켜 제동 시 다양한 현상을 나타내기 때문이다. 본 실험에서는 마찰에 의한 온도가 마찰특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 마찰재 및 로터에 각각 열전대(thermocouple)와 비접촉식 온도계인 적외선 온도계(infra-red thermometer)를 설치하여 제동 또는 끌기시험 중 시간에 따른 온도변화를 측정하였다. 로터의 온도는 적외선 온도계를 로터의 가장자리에 조준하여 측정 하였으며 마찰재의 온도변화를 측정하기 위해 열전대를 마찰표면에서 2mm 거리에 위치하도록 마찰재의 중앙에 설치하여 측정하였다 (SAE Standard J2155). Fig. 2에 두 마찰재를 대상으로 시속 100km/h부터 동일한 조건(IBT=65℃, 가압력=1.4MPa)에서 제동하여 완전 정지할 때 시간에 따른 온도 변화를 나타내었다. 로터의 온도는 NAO 마찰재를 사용했을 때가 반금속 마찰재를 사용하였을 때보다 더 증가하였으며, 반면에 마찰재의 온도는 반금속 마찰재의 온도가 NAO 마찰재에 비해 더 높게 나타났다. 이러한 현상은 마찰재의 열전도율에 직접적인 관계가 있다. 다량의 금속성분 때문에 열전도율이 우수한 반금속 마찰재를 사용한 경우에는 로터의 온도가 적게 상승하는 반면 마찰재의 온도가 높게 나타나며, 열전도율이 좋지않은 NAO 마찰재를 사용한 경우는 마찰재가 마찰계면의 열을 전달하지 못하여 반금속 마찰재를 사용한 경우 보다 로터의 온도를 더 증가시킨 것으로 생각된다. Fig. 3은 일정한 압력 하에서 끌기시험 하였을 때 나타난 로터의 온도변화이다. 정차시험 때와 마찬가지로 끌기 시험이 진행됨에 따른 로터의 온도 변화도 사용된 마찰재의 종류에 따라 다르게 나타났으며 특히 반금속 마찰재를 사용하였을 경우 로터의 안쪽면에 설치된 마찰재의 온도가 바깥쪽 면에 설치된 마찰재의 온도보다 높게 나타났다. 이는 마찰계면으로 부터 로터에 연결된 차축(axle)으로의 열 흐름 차이 때문으로 생각된다. (로터 안쪽면에서 hat 부분으로의 열전달이 더 용이하기 때문에 생긴 현상). 이러한 로터 양면의 온도 편차는 로터의 coning 현상(로터가 원뿔형으로 열변형

하는 현상) 및 그에 따른 마찰재 및 로터의 불균일 마모를 초래할 수 있다.[7]

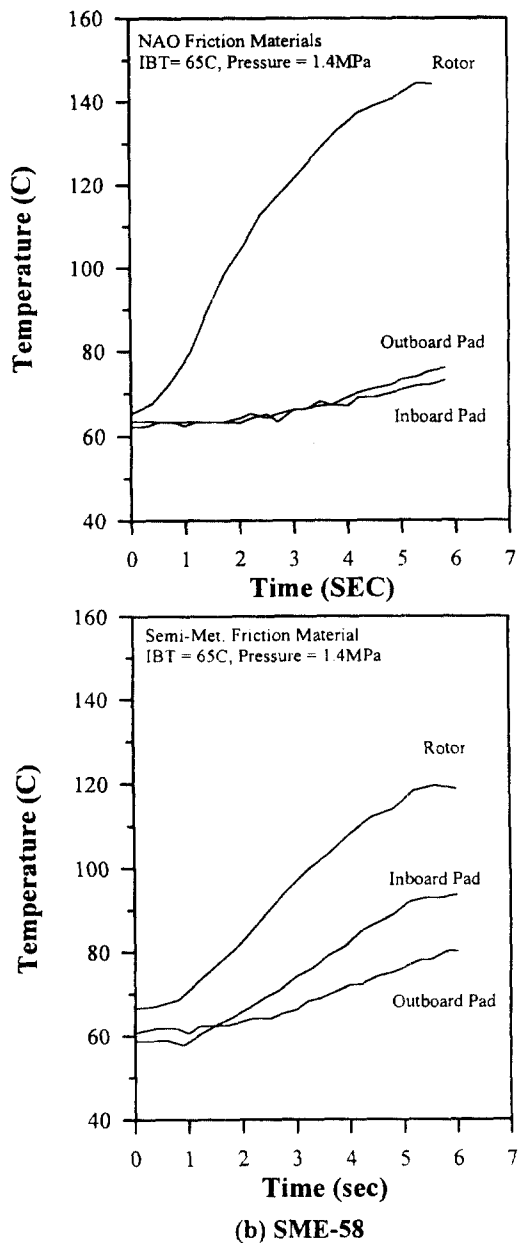
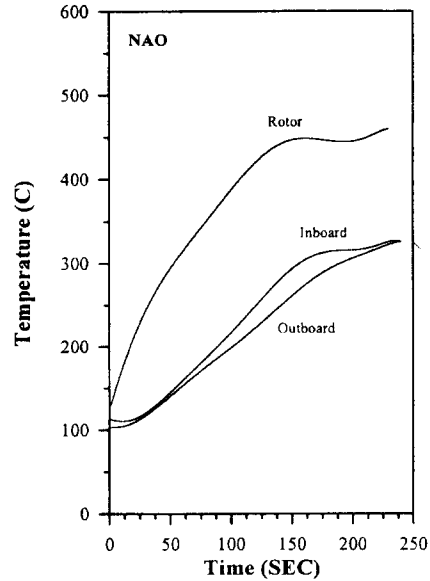


Figure 2. Change of temperature at rotor, inboard pad, and outboard pad locations for (a)NAO-23 and (b)SME-58 friction materials during stop. Stop condition : IBT = 65℃, initial speed:100 km/h, applied pressure=1.4 MPa.

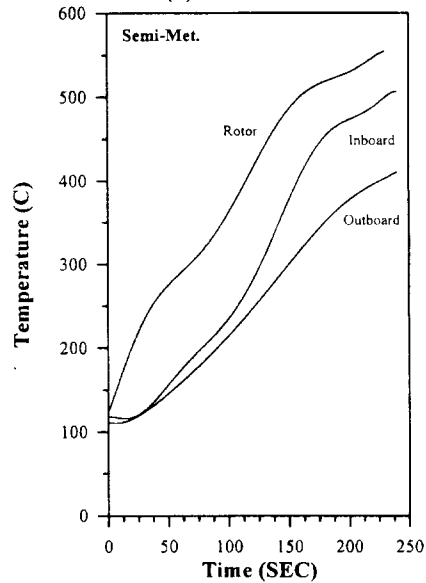
이러한 로터 양면의 온도 편차 그리고 마찰재와 로터간의 온도 차이는 브레이크의 시험 평가 시 중요한 영향을 미칠 수 있다. 특히 실차 시험이나 dynamometer 시험 때 사용된 온도 측정 위치는 그 시험결과에 큰 차이를 나타낼 수 있다. 예를 들어 마찰 온도를 측정할 때 마찰재에 설치된 열전대를 기준으로 하여 시험 평가한 경우에는 원하는 실제 마찰열에 의한 온도보다 최대 100 °C 정도 높은 온도에서 시험하는 결과를 초래하게 되며 따라서 특히 열전도율이 낮은 NAO 마찰재의 경우에는 원하는 온도 보다 상당히 높은 온도에서 마찰시험을 한 경우와 같은 결과를 얻게 된다. 따라서 브레이크 성능 시험 시 마찰 현상을 보다 정확히 시험하기 위해서는 마찰재의 온도 보다는 반드시 rotor의 온도를 기준으로 하여 시험하는 것이 바람직하다.

3-2. 제동 시 마찰계수의 안정성 (Friction stability).

자동차 제동 시의 마찰계수는 로터의 온도, 가압력, 습도 등의 다양한 조건에 의해 변할 수 있다. 마찰계수의 안정성(friction stability)이란 그러한 다양한 제동 조건 하에서 마찰계수가 일정하게 유지되는 정도를 나타내며, 일반적으로 다양한 제동 조건 하에서 얻어진 마찰계수의 표준 편차로 그 안정도를 나타낸다. Figure 4에 마찰재 NAO-23과 SME-58을 사용하여 정차할 때 가압력과 초기 로터 온도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. NAO-23 마찰재의 평균 마찰계수는 0.359 이었으며 SME-58 마찰재의 평균 마찰계수는 0.345를 나타내었다. 두 마찰재의 안정성을 나타내는 마찰계수의 표준편차는 NAO-23의 경우가 0.0274 그리고 SME-58의 경우가 0.0251로서 두 경우 모두 비교적 우수한 안정성을 나타내고 있었다. 마찰계수의 변화는 NAO-23 마찰재의 경우 가압력에 의한 영향보다는 초기 로터의 온도에 의한 영향이 더 컸으며 SME-58 마찰재의 경우는 마찰계수가 가압력과 온도에 따라 모두 변함을 보여주었다. 특히 SME-58의 경우는 가압력이 높을 때 초기 로터 온도가 높을 때 마찰계수가 크게 증가함을



(a) NAO-23

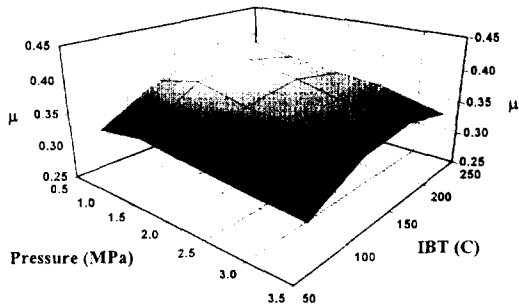


(b) SME-58

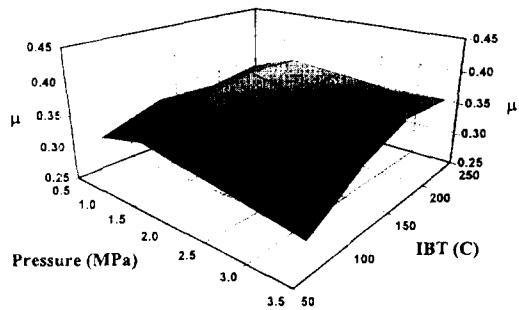
Figure 3. Change of temperature at rotor, inboard pad, and out board pad locations for (a)NAO-23 and (b)SME-58 friction materials during drag test. Drag condition: initial brake temperature = 100 °C, applied pressure = 0.52 MPa.

보여주었다. 이와 같은 온도와 압력에 따른 마찰계수의 변화는 마찰재에 포함된 원료들의 열분해

(thermal decomposition)와 그에 따른 마찰현상의 변화에 의한 것으로 생각된다. 고온에서의 마찰계수 감소(fading)는 NAO-23의 경우 주로 고착제로 사용된 수지(resin) 및 윤활제의 열분해로 인하여 발생한 현상으로 간주되며, SME-58 마찰재의 경우 마찰계수의 변화는 수지 뿐 아니라 마찰재에 다량 포함된 금속성분이 고온에서 산화물로 변함으로써 나타난 현상이라 생각된다. 이러한 현상을 정확히 해석하기 위해서는 각 온도 구간에서 마찰재에 사용되는 다양한 물질들의 열분해 온도를 열분석기(TG, DTA, DSC)를 이용하여 비교 분석함으로써 가능하리라 생각된다.[8,9]



(a) NAO-23



(b) SME-58

Figure 4. Change of friction coefficient at different stop conditions (as functions of applied pressure and initial brake temperature (IBT) for two different friction materials: (a)NAO-23, (b)SME-58.

3-3. 제동 시 마찰계수의 시간에 따른 특성.

본 실험에서 마찰계수의 안정성을 계산하기 위해 사용된 마찰계수는 평균 마찰계수로서 각 정차조건에 따른 제동특성을 충분히 표현하지 못한다. 따라서 각 제동 조건에 따른 마찰특성을 보다 상세히 연구하기 위해서는 제동시간에 따라 어떠한 형태로 마찰계수가 변하는지를 검토하여야 한다. 일반적으로 마찰계수는 마찰면의 온도와 회전속도에 민감하며 시간에 따른 마찰계수의 변화량과 그 형태는 제동 시 운전자가 느끼는 제동특성과 직접적인 관계가 있다. 특히 제동 말기에 나타나는 마찰계수의 변화는 자동차의 안락한 정차와 직접적인 관련이 있으며, 따라서 이러한 현상에 대한 정확한 분석과 마찰특성에 대한 이해는 매우 중요하다. 제동 말기의 현상 중 저속으로 갈 수록 마찰계수가 급격히 증가하는 현상은 rooster tailing 이라고 불리우며 그 반대 현상을 fading 이라고 하며 이러한 현상들은 일반적으로 마찰재에 그 원인이 있는 것으로 알려져 있다. Rooster tailing 현상은 제동 말기의 온도 증가와 감소에 따른 stick-slip 현상에 의해 나타난 것이며 fading 현상은 높지않은 온도에서 마찰재가 열분해하여 마찰특성을 상실함으로써 발생한다.[10,11,12] 그 중 fading 현상은 저질의 마찰재 원료를 사용하였을 때 많이 나타나며, OEM 용 마찰재의 경우에는 보기 드문 현상이다. Fig.5(a)와 (b)는 NAO-23과 SME-58 두 마찰재를 이용하여 가압력 2.1 MPa과 3.5 MPa로 정차할 때 시간에 따른 마찰계수와 로터 온도의 변화를 나타내었다. 두 경우 모두가압력이 증가함에 따라 초기 마찰계수가 감소하였다. 가압력의 증가에 따른 초기 마찰계수의 감소는 높은 압력에서 제동 하였을 때 초기에 불안정한 마찰현상을 겪으면서 마찰계면에 형성되어 있던 마찰막이 심하게 분리되어 일어난 현상으로 생각된다. 이러한 현상은 SME-58 마찰재를 사용했을 때가 NAO-26을 사용하였을 때에 비해 더욱 심하게 나타났으며, 이는 공격성이 강한 반금속 마찰재에 포함되어 있는 연마 역할을 하는 원료들에 의한 영향으로 보여진다.

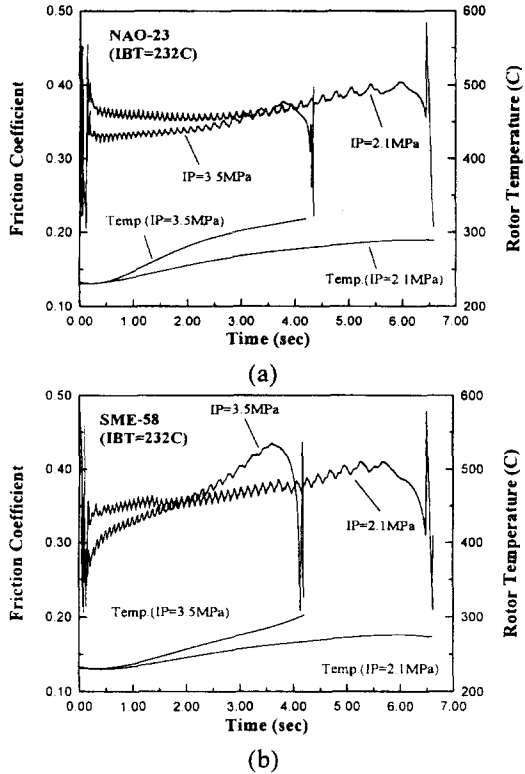


Figure 8. Change of friction coefficient and rotor temperature during stop test at two different applied pressures (2.1 MPa and 3.5 MPa) for (a)NAO-23 and (b)SME-58 friction materials.

특히 가압력이 2.1MPa 일 경우에 비해 가압력이 3.5 MPa 일 때는 시간에 따라 마찰계수가 급격히 증가 하였다. 이러한 시간에 따른 마찰계수의 상승현상(rooster tailing)은 반금속계 SME-58 의 경우가 유기질계 NAO-26 의 경우 보다 더 크게 나타났으며 이와 같은 현상은 고압에서 급제동에 의해 발생한 마찰열이 마찰재 내의 금속성분을 산화시켜 일어난 현상으로 사료된다.[13]

4. 결론

자동차용 마찰재 중 대표적인 두 종류인 유기물계 마찰재와 반금속계 마찰재를 대상으로 브레이크용 dynamometer 를 이용하여 그 마찰특성을 연구하였다. 다양한 정차 조건에서 시험한 마찰안정도

(friction stability)는 두 마찰재 모두 우수한 성질을 보여 주었다. 동일 조건에서 유기물 마찰재인 NAO-23 을 사용하여 정차 시험할 때 반금속계 마찰재를 사용했을 때에 비해 로터온도가 크게 상승되었으며, 반면에 4 분간 끌기시험을 하였을 경우는 반금속계 마찰재를 사용하였을 때가 로터의 온도를 더욱 상승시켰다. 정차시험 시 마찰계수의 시간에 따른 증가 현상(rooster tailing)은 반금속계 마찰재인 SME-58 이 NAO-23 에 비해 더욱 크게 나타났으며 그 증가량은 가압력이 높을 때 더 크게 나타났다.

5. 참고문헌

1. M. Jacko and S.K. Rhee, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th Ed. vol. 4, 523-536, 1992.
2. A.E. Anderson, Metals Handbook, 19th ed., vol.18, 569-577.
3. A.E. Anderson, Friction Maerials Standard Institute, 2-57, 1987.
4. R.G. McLellan, C451, IMechE,1988.
5. H. Jang, J.W. Fash and T.W. Donlon, 13th SAE Brake Colloquium, Pheladelphia, Pennsylvania, Oct. 1995.
6. 장 호, 한국윤활학회지,13 권, 1 호, 1997.
7. A. Yevtushenko, E. Ivanyk, Wear, vol. 185, 159-165, 1995.
8. L.S. Bark, D. Morgan and S.J. Percival, Wear, vol.41,309-314,1977.
9. M. G. Jacko and R.T. Ducharme, SAE paper 730191, 1973.
10. J.A.C. Martin, J.T. Oden, and F.M.F. Simoes, vol.28, 29-92, 1990
11. I.L. Maksimov and A.L. Rakhmanov, Physics letters A, 1987.
12. C. Gao and D. Kuhlmann-Wilsdorf,, Transactions of the ASME, vol.112, 354-360,1990.
13. J. W. Longley and R. Gardner, C453, IMechE, 1988.