

# 자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰 특성에 관한 연구

## (II. 비석면계 유기질 (Non-asbestos Organic) 마찰재와 반금속 (Semi-metallic) 마찰재의 마찰 특성 비교)

김성진 · 장 호\*

고려대학교 대학원, \*고려대학교 공과대학 재료·금속공학부

### Study of Friction Characteristics of Non-asbestos Organic (NAO) and Semi-metallic Brake Pads During Automotive Braking

Sung Jin Kim and Ho Jang\*

*Department of Materials Science and Engineering, Graduate School, Korea University*  
*\*Department of Materials Science and Engineering, Korea University*

**Abstract**—Frictional characteristics 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 inertial brake dynamometer to investigate friction stability, rooster tailing phenomena, temperature change during drags and stops. Results show that the level of the friction force is strong functions of time, temperature, and speed regardless of the type of friction materials. In particular, rooster tailing effects are pronounced in the case of semi-metallic friction materials compared to non-asbestos organic friction materials. The phenomena appear strongly dependent on raw materials contained in the friction materials.

**Key words**—friction materials, friction stability, non-asbestos organic friction material, semi-metallic friction material, drag test, stop test, friction characteristics.

#### 1. 서 론

자동차의 감속 및 정차에 사용되는 마찰재의 제동 성능은 주로 마찰재와 로터(rotor)의 재료적 특성과 그에 따른 마찰특성에 의해 결정된다. 마찰재의 특성은 마찰재 제조에 사용되는 원료의 종류 및 제조 방법에 따라 크게 변하며 자동차의 제동장치(brake system)에 관련된 여러 가지 요소들 중에서 매우 중요한 역할을 한다[1-3]. 일반적으로 마찰재는 운전자가 요구하는 여러 가지 조건을 만족하여야 하며 그 중 대표적인 것들은 제동시의 안전도, 안락감, 수명, 그리고 적절한 가격 등이다. 이러한 운전자의 기대치를 기술적인 용어로 표현하자면 적절한 수준의 안정된 마찰계수, 진동이나 잡음의 극소화, 마찰재와 로터의 마모 감소 그

리고 비교적 저렴한 제조단가 등을 만족 시켜야 함을 뜻한다. 이러한 자동차용 마찰재는 주행 시 다양한 조건과 환경에서 사용되므로, 온도, 습도, 속도 및 감속도 등에 따라 마찰특성이 변화하지 않도록 고안되어야 하며 이러한 변수에 따른 마찰현상의 과학적인 연구 및 분석은 매우 난이한 것으로 알려져 있다[4,5].

현재 자동차 제조업체에서 사용되고 있는 마찰재는 비석면 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. 비석면계 유기질

(NAO) 마찰재는 종래의 마찰재에 사용되던 석면이 발암물질로 판명난 후 그 대체용으로 개발된 것으로서 석면이 약 30~70%를 차지하던 중전의 석면계 유기질 마찰재와는 달리 석면 대신 다른 종류의 강화섬유 또는 강화재로 대체하고 마찰조절제를 첨가하여 제작한 것이다. 일반적으로 비석면계 유기질 마찰재에 많이 사용되는 강화용 물질로는 유리섬유, 암면, 세라믹 섬유, 아라미드 섬유, 금속 섬유, 운모 등이 있으며, 마찰 조절제로는 금속분말, 고체윤활제, 연마제 등이 사용된다. 금속성 마찰재는 금속분말과 강철섬유를 기본 원료로 하여 제작되며 세라믹 분말, 고무분말, 흑연분말 등을 마찰조절제로 사용되는 것이 일반적이다. 자동차 제조업체에서 사용하는 OEM (original equipment manufacturer)용 마찰재는 8~20여 종류의 원료를 혼합하여 제작된 것이며 노볼락계의 수지(novolac resin)를 고착제로 사용하여 성형한다[1]. 일반적으로 비석면계 유기질 마찰재는 승용차에 많이 사용되며 반금속성 마찰재는 유기질 마찰재에 비하여 열에 강한 것으로 알려져 대형 차종(heavy duty vehicle)에 더 빈번히 사용된다. 그러나 이러한 경향은 현재 그 구분이 정확하지 않으며 1990년대 이후에 사용되는 마찰재들의 경우를 보면 경트럭(light truck)에 유기질 마찰재가 상당량 적용되고 있으며 현재에도 많은 승용차에 반금속성 마찰재가 많이 사용되고 있음이 그를 대변하고 있다. 현재 일반적으로 알려져 있는 바로는 운전자의 요구를 완벽히 만족시키는 마찰재는 많지 않으며 비석면계 유기질 마찰재는 안락감과 떨림현상에서 그리고 반금속성 마찰재는 고온특성과 수명의 측면에서 우수성을 나타내고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 제동시 잡음 현상 등의 다양한 브레이크 관련 현상들은 마찰재의 종류에 관계 없이 흔히 대두되고 있으며 그러한 문제들을 해결하기 위해 많

은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 현재 자동차 제조업체에서 가장 많이 사용하고 있는 대표적인 두 마찰재, 즉 비석면계 유기질 마찰재와 반금속성 마찰재들 중 각각 한 마찰재들을 대상으로 그 재료 특성과 마찰특성 그리고 그에 따른 마모에 대하여 비교 연구하였다. 이를 위해 필요한 마찰 및 마모 시험은 실제 자동차의 제동 상황을 그대로 재현하기 위하여 실차와 같은 양의 관성과 제동력을 구사하는 브레이크용 dynamometer를 사용하여 시험하였다.

## 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 정확하게 발표할 수 없으며 그 대략적인 구성 원료만을 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 나타낸 바와 같이 각 마찰재는 10가지 이상의 원료를 사용하여 제작된 복합재료이며 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 매우 복잡한 미세조직 가지고 있다. 본 실험에서는 이들 마찰재의 원소 분포를 측정하기 위하여 x-ray fluorescence spectrometry(XRFS, Rigaku Co. Japan)를 이용하였으며, 분석에 따른 마찰재 내의 주요 원소들의 분포는 Table 2와 같다.

마찰재의 제조는 건식혼합(dry mixing), 사전성형(pre-forming), 고온 고압에서의 성형, 경화(curing)의 단계로 이루어졌다. 이때의 각 단계에서의 온도, 시간, 압력 등의 제조 조건은 마찰재의 종류 및 마찰재 제조업체 별로 약간의 차이가 있으나, 그 일반적인 예가 이미 여러 논문에서 발표된 바 있으므로 본 논문에서

**Table 1. Major raw materials used for manufacturing the two friction materials; NAO-23, and SME-58**

Raw Materials	NAO-22 (non-asbestos organic type)	SME-58 (semi-metallic type)
Binder	Phenolic Resin (Novolac)	Phenolic Resin (Novolac)
Organic Fiber	Aramide type+Others	Aramide type
Ceramic Fiber	Rock Wool+Others	---
Metals	Cu fiber+Cu particles Others	Steel Fiber+Iron Powder+Others
Lubricants	Graphite+ZnS+Others	Graphite+MoS <sub>2</sub> +Others
Abrasives	ZrO <sub>2</sub> +Others	SiO <sub>2</sub> +Others
Fillers	Bayrite+Mica+Vermiculite+Others	Bayrite+Vermiculite+Others
Friction Modifiers	Rubber Powder+Others	Rubber Powder+Others

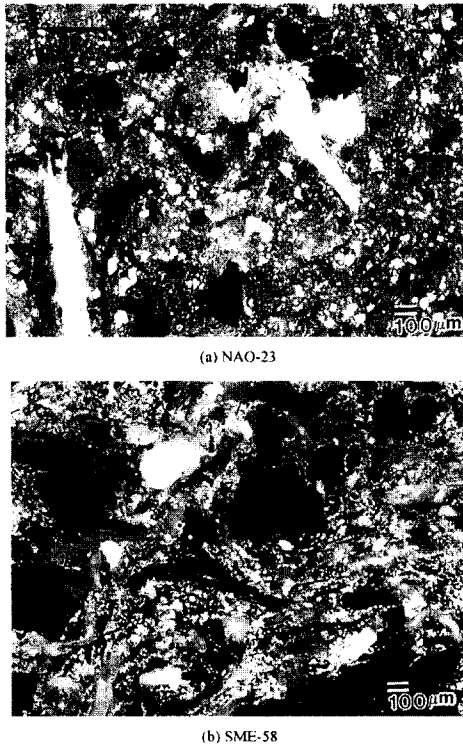


Fig. 1. Microstructure of friction materials NAO-23 and SME-58. These micrographs are back-scattered electron images of SEM and show typical microstructures of NAO type and semi-metallic type friction materials.

서는 생략하였다[1].

마찰재의 상대재로 사용된 로터(rotor)는 회주철로 제작되었으며 sand casting 후 기계가공을 거쳐 완성되었다. 본 실험에서 사용된 로터는 중형 승용차의 전륜에 사용되는 것으로서 두께가 26 mm, 직경이 276 mm 이었으며 직선형 vane이 냉각을 돕기 위해 고안된 것이다. Dynamometer 시험에 마찰재들과 함께 사용된 로터들은 비슷한 disk thickness variation(DTV)를 가진 것들을 선택하여 시험하였다. 비석면계 유기질(NAO) 마찰재와 반금속(semi-metallic) 마찰재의 시험에 사용된 rotor의 DTV는 각각 3.8  $\mu\text{m}$ , 3.6  $\mu\text{m}$ 이었

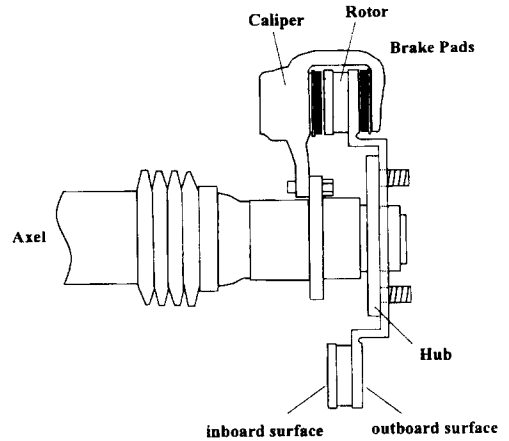


Fig. 2. A schematic diagram of the front brake assembly used in this experiment.

다. 실험에 사용된 전륜 브레이크 어셈블리(assembly) 구조를 Fig. 2에 나타내었다.

마찰 및 마모 특성을 측정하기 위해 사용된 브레이크 용 dynamometer(Model D-1900, Link Engineering Co.)의 구조와 측정 능력은 이미 발표된 논문에서 상세히 기술하였으므로 본 논문에서는 생략하였다[6]. Dynamometer 시험은 두 단계로 이루어져 있으며, 그 첫 단계는 일정한 압력 하에서 시행한 끌기(drag) 시험이며 두 번째 단계는 100 km/h로 주행하는 자동차를 다양한 조건하에서 실행하는 정차(stop) 실험이다. 끌기(drag) 시험은 초기 온도 100°C하에서 장시간 동안 일정한 가압력(0.52 MPa) 하에서 제동하여 마찰시 발생하는 열에 따른 마찰현상의 변화를 연구하기 위한 것이며, 본 실험에서는 15회 반복하여 시행하였다. 정차시험은 가압력과 로터(rotor)의 초기온도를 변화시켜 그에 따른 마찰계수의 안정도(friction stability)를 측정하기 위한 시험이며, 정차시험 시의 가압력과 로터의 초기 온도 범위는 각각 100 psi(0.69 MPa)~500 psi(3.5 MPa) 과 150F(66°C)~450F(232°C)로 하였다.

Dynamometer를 이용하여 브레이크 시험 할 때, 마찰재와 로터 간의 마찰력을 표현하는 마찰계수는 마찰 시의 토크 값, 캘리퍼에 설치된 피스톤에 의한 가

Table 2. 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-23	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.

압력, 피스톤의 면적, 그리고 마찰재의 접촉 형상으로부터 계산할 수 있다. 마찰계수를 구하기 위해 사용한 수식은 다음과 같다.

$$\mu = \frac{T}{2 \cdot P \cdot R_{eff} \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{T}{P} \cdot (G)$$

여기서  $T$ =torque (Nm)

$P$ =input pressure (MPa)

$(G)$ =Geometric Factor

$R_{eff}$ =effective radius of rotor

$R_o$ =outer radius of a rotor contacting with friction pad

$R_i$ =inner radius of a rotor contacting with friction pad

본 실험에서 사용된 브레이크 시스템의 형상으로부터 얻은 geometric factor ( $G$ )는 약 0.001305이었다. 이와 같이 계산된 마찰계수는 마찰 시 마찰면의 온도에 따라 변화하며, 이에 따른 마찰재의 마찰특성은 마찰재의 종류 뿐 아니라 같은 종류의 마찰재라도 사용된 원료의 종류 및 배합 방법에 의해 변하기 때문에 마찰계수의 변화 유형을 직접 실험하지 않고는 예측하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 제동시 로터 및 마찰재의 온도변화, 압력과 초기 로터온도에 따른 마찰계수의 안정성, 그리고 시간과 온도에 따른 마찰특성에 관해 연구하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. 정차(stop)시험 및 끌기(drag)시험 시의 마찰열에 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 영향을 미칠 뿐 아니라 로터 및 마찰재의 형상 및 재료적 성질을 변화시켜 제동시 다양한 현상을 나타내기 때문이다. 마찰열이 마찰특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 마찰재 및 로터에 각각 열전대(thermocouple)와 비접촉식 적외선 온도계(infra-red thermometer)를 설치하여 제동 또는 끌기시험 중 시간에 따른 온도변화를 측정하였다. 로터의 온도는 적외선 온도계를 로터의 가장자리(inboard side edge)에 조준하여 측정 하였다. 마찰재의 온도변화는 열전대가 마찰재 표면에서 2 mm 거리

에 위치하도록 마찰재의 중앙에 설치하여 측정하였다 (SAE Standard J2155). Fig. 3에 두 마찰재를 대상으로 시속 100 km/h부터 동일한 조건( $IBT=65^{\circ}C$ , 가압력=1.4 MPa)에서 제동하여 완전 정지할 때 시간에 따른 온도 변화를 나타내었다. 제동시간은 두 마찰재(NAO-

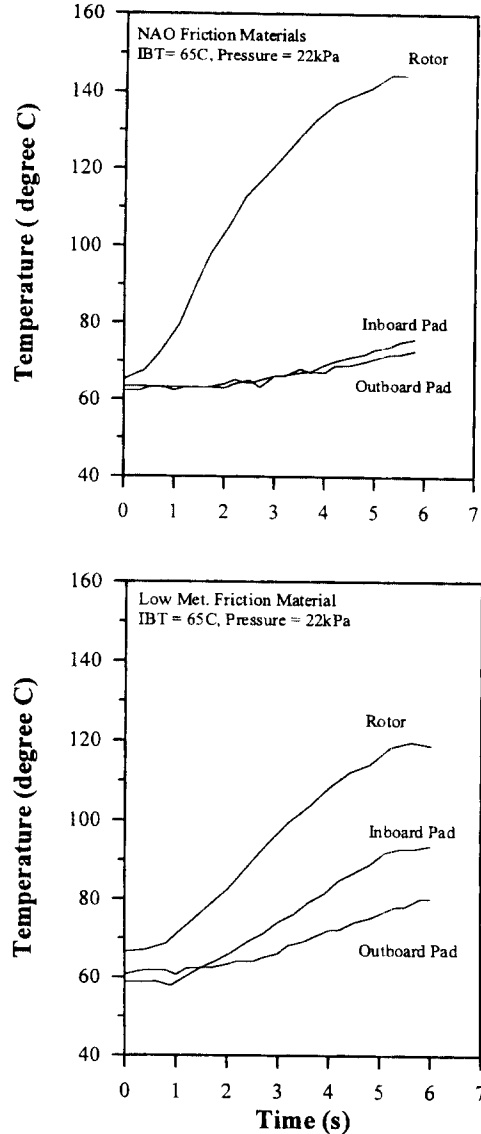


Fig. 3. Change of temperature at rotor, inboard pad, and outboard pad locations for (a)NAO-23 and (b) SME-58 friction materials during stop test. Stop condition : initial brake temperature= $65^{\circ}C$ , initial speed: 100 km/h, applied pressure= $1.4 MPa$ .

23, SME-58)의 경우 모두 약 6초 정도 소요되었다. 같은 제동조건에서 로터의 온도는 NAO 마찰재를 사용했을 때가 반금속 마찰재를 사용하였을 때보다 더 증가하였다. 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. 4는 일정한 압력 하에서 끌기시험 하였을 때 나타난 로터 및 마찰재의 온도변화 이다. 정착시험 때와 마찬가지로 끌기 시험이 진행됨에 따른 로터 및 마찰재의 온도변화는 사용된 마찰재의 종류에 따라 다르게 나타났다. 특히 반금속 마찰재를 사용하였을 경우 로터의 안쪽면에 설치된 마찰재의 온도가 끌기시험 후반에 바깥쪽 면에 설치된 마찰재의 온도 뿐 아니라 로터의 온도 보다 높게 나타났다. 이는 Fig. 2에서 보여진 바와 같이 로터의 inboard에서 마찰열에 의해 발생한 열이 outboard에서 발생한 열보다 더 용이하게 차축(axle)을 통해 전달되어 지기 때문이다. 따라서 로터 양쪽에 설치된 마찰재들 간의 온도 편차는 로터의 형상과 밀접한 관계가 있다. 이러한 로터 양면의 온도 편차는 로터의 열변형을 유발하며 또 한 그에 따른 마찰재 및 로터의 불균일 마모를 초래한다[7].

로터 양면의 온도편차 그리고 마찰재와 로터간의 온도 차이는 브레이크의 시험 평가에 중요한 영향을 미친다. 특히 실차 시험 또는 dynamometer 시험 때 선택한 마찰온도의 측정 위치는 시험결과에 큰 차이를 나타낼 수 있다. 예를 들어 초기 브레이크 온도가 일정하게 유지한 상태에서 연속적으로 제동하여 마찰재의 마모량을 측정할 때 마찰재에 설치된 열전대를 기준으로 하여 시험 평가한 경우 마찰재들의 열전도도 차이 때문에 마찰재의 마모량이 마찰재의 종류에 따라 크게 변할 수 있다. 따라서 반금속 마찰재와 NAO 마찰재를 동일 차종에 적용하여 시험할 때 마찰재에 부착된 열전대에서 얻은 온도를 기준으로 시험하는 것은 최선의 방법이 아니라 하겠다. 브레이크 성능 시험 시 마찰현상을 보다 정확히 시험하기 위해서는 마

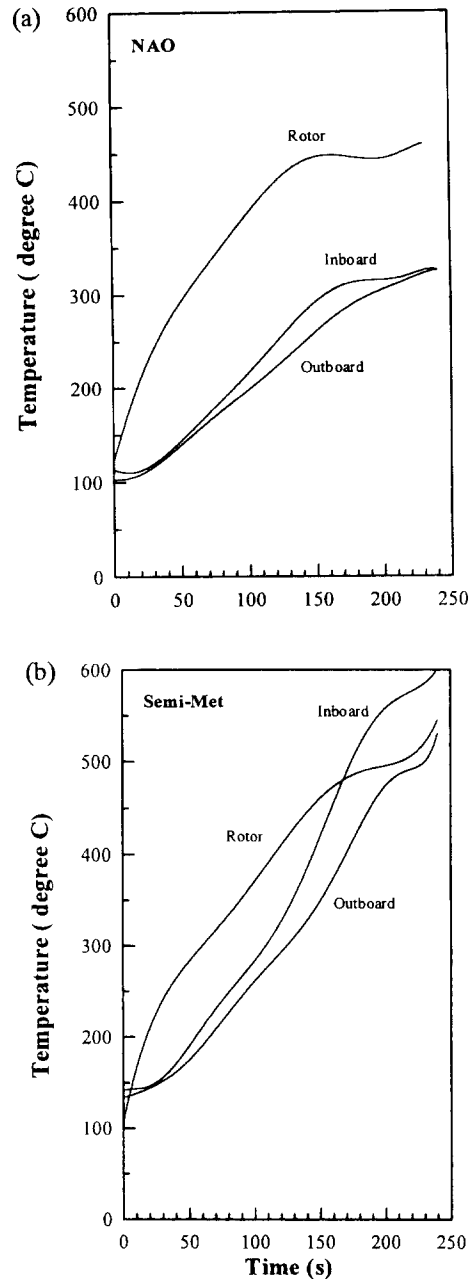


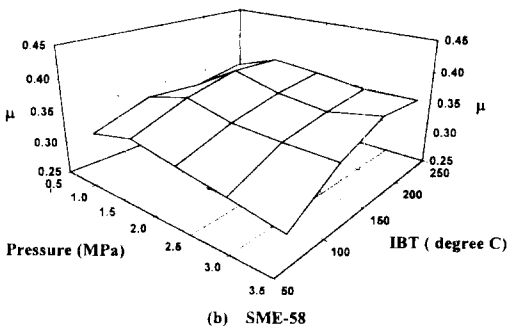
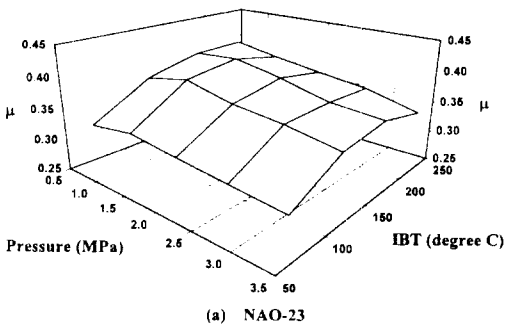
Fig. 4. Change of temperature at rotor, inboard pad, and out board pad locations for (a)NAO-23 and (b) SME-58 friction materials during 8th drag test. Drag condition: initial brake temperature=100°C, applied pressure=0.52 MPa.

찰재의 온도 보다는 반드시 rotor의 온도를 기준으로 하여 시험하는 것이 바람직하다.

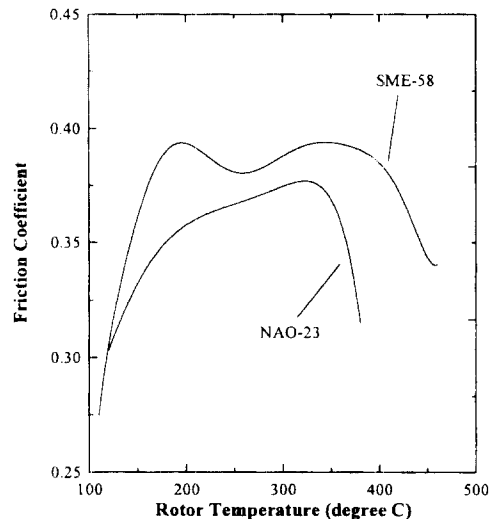
**3-2. 제동시 마찰계수의 안정성 (Friction stability)**

자동차 제동시의 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 제동조건 하에서 얻어진 마찰계수들의 표준 편차로 그 안정도를 나타낸다. Fig. 5에 마찰재 NAO-23과 SME-58을 사용하여 정차할 때 가압력과 초기 로터온도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. NAO-23 마찰재의 평균 마찰계수는 0.359이었으며 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. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 NAO-23 마찰재를 사용한 경우 마찰계수가 가압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 초기 로터의 온도를 증가함 따라 마찰계수가 증가하였다가 고온에서 다시 감소하는 경향을

보여주었다. SME-58마찰재의 경우는 마찰계수가 가압력의 변화에 크게 변하지 않았으나 초기로터 온도에 따라 고압에서 민감하게 증가함을 보여주었다. 이러한 로터온도에 따른 마찰계수의 변화는 일정한 압력 하에서 장시간의 마찰시험을 하여 고온에서의 마찰특성을 얻어내는 끌기시험에서 그 경향을 명확하게 나타낼 수 있다. Fig. 6에 로터온도에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. NAO-23 마찰재의 경우에는 초기에는 마찰계수가 온도에 따라 증가하다가 약 180(330°C사이에서는 완만한 증가를 보였으며 그 이상의 온도에서는 마찰계수가 급격히 감소하는 fading 현상을 보여주고 있다. 반면에 SME-58 마찰재를 사용하여 시험한 경우에는 NAO-23 마찰재의 경우와는 달리 약 200(300°C 구간에서 마찰계수가 약간 감소한 후 다시 한번 증가하여 고온 fading현상의 측면에서 우수한 마찰특성을 보여주고 있다. 이러한 고온에서의 fading 현상은 마찰재에 포함된 원료들의 열분해 온도(decomposition temperature)와 그에 따른 열분해 후의 생성물이 마찰현상에 영향을 주어 발생한 현상으로 생각된다. 일반적으로 fading현상은 고온에서 마찰재에 사용되는 유기질 원료가 기화되어 마찰재와 로터의 접촉을 방해함으로써 나타나는 현상으로 알려져 있으며 이를 방지하기위해 마찰재의 기공도를 조절한다[8]. 본 실험에서 사용된 마찰재들의 기공도는



**Fig. 5. 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.**



**Fig. 6. Change of friction coefficient as a function of rotor temperature during drag test using (a) NAO-23 and (b) SME-58 friction materials.**

NAO-2가 13.69% 이었으며 SME-58마찰재는 13.95%의 기공도를 가지고 있었다. 따라서 이들 마찰재에서 발생한 Fading 현상은 기공도의 차이에 의한 영향이 아니라 마찰재 제조에 사용된 원료의 차이 때문으로 생각된다. 마찰계수 감소(fading) 현상을 해석하기 위해 열분석기(Netzsch Ep409)를 이용하여 1000°C까지 분석하였다(Fig. 7). Fig. 7(a)에 보여진 바와 같이 약 400°C 부근에서의 급격한 변화는 유기물질이 열분해되어 나타난 것이며 이러한 경향은 반응에 따른 발열 반응의 양으로 나타난 DSC 곡선에서도 나타나고 있다. 고온에서의(약 700°C) 열분해는 주로 마찰재에 포함된 철이나 강철이 산화됨으로 나타난 현상으로서 Fig. 7(b)와 같이 철분이 많이 포함된 SME-58가 NAO-23 마찰재에 비하여 더 크게 나타나고 있다. 고온 발생된 열분해 생성물은 주로 산화철이며 이러한

반응물질이 고온에서 연마제로 작용하여 fading을 방지함으로써 Fig. 6과 같이 고온에서의 마찰계수 증가를 나타낸 것으로 생각된다. 그러나 산화철에 의한 고온에서의 마찰계수의 증가는 끌기시험시 진동현상을 악화시키는 경향이 있으므로 마찰재의 원료를 선정할 때 각별히 조심하여야 한다. 각 열분해 곡선의 특징을 명확히 이해하기 위해서는 마찰재 제조에 사용된 각 원료들의 열분해특성과 비교함으로써 가능하다[10]. Fig. 6과 Fig. 7을 비교할 때 제동에 의한 fading 온도와 열분석에서 나타난 fading 가능한 온도는 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 편차는 마찰시험 시 온도측정을 직접 마찰계면에서 시행 할 수 없었기 때문에 나타난 결과로 보여지며 실제 마찰온도는 로터나 마찰재에서 측정된 온도와 큰 차이가 있음을 잘 입증하고있다.

### 3-3. 제동시 마찰계수의 시간에 따른 특성.

본 실험에서 마찰계수의 안정성을 계산하기 위해 사용된 마찰계수는 제동시 평균 마찰계수로서 각 정차조건에 따른 제동특성을 충분히 표현하지 못한다. 따라서 다양한 제동 조건에 따른 마찰특성을 보다 상세히 연구하기 위해서는 시간에 따라 어떠한 형태로 마찰계수가 변하는지를 검토하여야 한다. 일반적으로 마찰계수는 마찰계면의 온도와 회전속도에 민감하므로 제동시 시간에 따라 변하게 된다. 시간에 따른 마찰계수의 변화량과 그 형태는 제동시 운전자가 느끼는 제동 특성과 직접적인 관계가 있다. 제동 시간에 따라 마찰계수가 감소하는 경우는 운전자가 제동시간에 따라 브레이크 페달에 더 큰 압력을 가하여야 하기 때문에 제동시 불안감을 느낄 수 있으며 그 반대로 시간에 따라 제동 중 마찰계수가 증가하는 경우는 정차 말기에 운전자의 몸이 전방으로 쏠리게 된다(forward jerking). 이와 같이 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 tailing이라고 불리우며 그 반대 현상을 fading이라고 하며 이러한 현상들은 일반적으로 마찰재에 그 원인이 있는 것으로 알려져 있다. Rooster tailing 현상은 제동 말기의 온도 증가와 감속에 따른 stick-slip 현상에 의해 나타난 것이며 fading 현상은 높지 않은 온도에서 마찰재가 열분해하여 마찰특성을 상

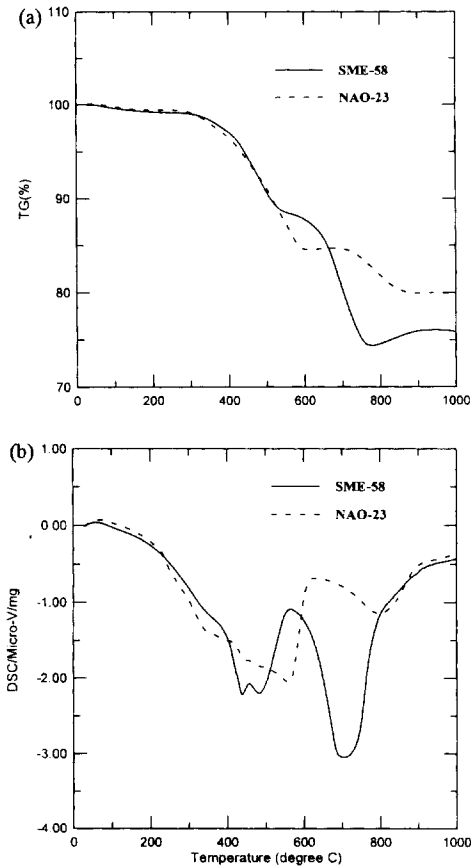


Fig. 7. TGA(a) and DSC(b) thermal analysis of friction materials NAO-23 and SME-58.

실험으로써 발생한 것이다[11,12,13]. 그 중 fading 현상은 저질의 마찰재 원료를 사용하였을 때 많이 나타나며, OEM용 마찰재의 경우에는 보기 드문 현상이다. 따라서 본 실험에서는 rooster tailing 현상을 분석하기 위해 원료구성이 상이한 NAO마찰재(NAO-23)와 반금속 마찰재(SME-58)를 대상으로 2가지 다른 정차 조건하에서 제동 말기의 마찰계수 특성에 대하여 비교 검토하였다. Fig. 8(a)와 (b)는 NAO-23 과 SME-58 두 마찰재를 이용하여 가압력 2.1 MPa과 3.5 MPa로 정차할 때 시간에 따른 마찰계수와 로터 온도의 변화를 나타내었다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 두 경우 모두 가압력이 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-23을 사용하였을 때에 비해 더욱 심하게 나타났으며, 이는 공격성이 강한 반금속 마찰재에 포함되어 있는 연마역할을 하는 원료들에 의한 영향으로 보여진다. 특히 가압력이 2.1 MPa일 경우에 비해 가압력이 3.5 MPa일 때는 시간에 따라 마찰계수가 급격히 증가 하였다. 시간에 따른 마찰계수의 상승현상(rooster tailing)은 반금속계 SME-58의 경우가 유기질계 NAO-23의 경우 보다 더 크게 나타났다. 반금속 마찰재에 의한 정차 말기의 마찰계수의 급격한 상승은 고압에서 급제동에 의해 발생한 마찰열이 반금속 마찰재 내의 일부 성분을 변화하여 저속에서stick-slip 현상을 가중시킴으로써 나타난 현상으로 생각된다 [14]. 마찰시 다양한 현상과 물질변화의 연관관계는 마찰재 원료의 다양성 때문에 매우 난해한 것으로 알려져 있으며 앞으로 많은 연구노력이 요구되는 분야이다.

### 3-4. 마찰재의 종류에 따른 로터의 DTV 변화.

브레이크 시험 중에 나타난 로터 DTV(disk thickness variation)의 변화는 제동 중에 나타나는 떨림현상(judder)과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 일반적으로 로터의 DTV가 큰 경우는 토크의 변화량을 증가 시킴으로써 제동시 떨림현상을 나타내는 경향이 많은 것으로 알려져 있다. 브레이크 사용에 따른 로터 DTV의 변화는 로터의 초기 DTV, 마찰재와의 적합성(compatibility), 로터의 내부조직 및 열전도율의 균일성, 초기 로터 내부의 잔류 응력, 캘리퍼의 sliding force 등에 의해 영향 받는 것으로 알려져 있다[15,16]. Burnishing 후 15번의 반복된 끌기시험과 계속된 20종류의 정차시험으로 이루어진 dynamometer 시험 후의 DTV 변화는 마찰재 SME-58 (semi-metallic type)을 사용한 경우에는 약 3.8  $\mu\text{m}$  증가 하였고, NAO-23 (non-asbestos organic type)을 사용한 경우에는 약 1.1  $\mu\text{m}$  가 증가하였다. 이는 로터에 대한 공격성이 강한 SME-58 마찰재가 초기에 존재하는 DTV를 악화시키는 경우로서 매우 흥미 있는 결과라 하겠다. 이러한 결과는 같은 비석면계 유기질 마찰재(NAO type)를 대

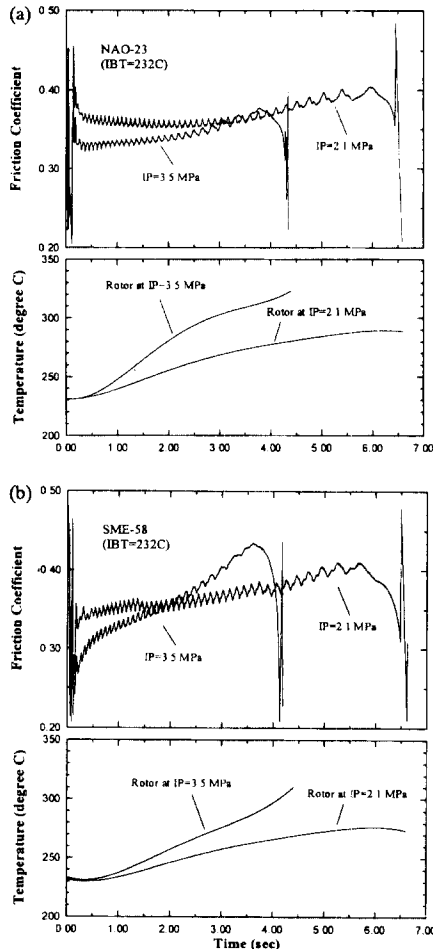


Fig. 8. Change of friction coefficient and rotor temperature during stop test at two different applied pressures (2.1 MPa and 3.5 MPa) for (a)NAO-23 and (b) SME-58 friction materials.



상으로 마찰재 내의 연마제인 지르코늄 실리케이트 ( $ZrSiO_4$ )의 양을 변화함으로써 공격성을 변화시킨 실험결과와 흡사한 경향을 보여주었다[6]. 마찰재의 내구성을 예측하기 위하여 시험 후 마찰재의 마모량을 측정하였다. 일반적으로 마찰재의 마모량은 마찰재에 사용된 원료 및 제조방법에 따른 마찰특성에 따라 변한다. 동일한 과정에 따른 dynamometer 실험 후 마찰재의 총 마모량은 NAO-23의 경우 약 9.5 wt.% 이었으며 SME-58의 경우 약 13.2 wt.%의 마모를 보여주었다. 특히 SME-58 경우 inboard에 설치된 마찰재는 끌기 시험 중에 매우 높은 온도로 상승됨으로써 표면 이탈현상이 매우 심하게 나타났다. 이는 브레이크 시험 중에 발생한 열에 의해 마찰재가 열분해 되어 나타난 것으로 보인다. 이러한 현상은 Fig. 6에 보여준 바와 같이 SME-58 마찰재를 사용하였을 때의 마찰계수 및 마찰재의 온도가 NAO-23보다 현저히 높았던 사실에 의해 뒷받침 되고 있다. 본 실험에서의 마모는 그 대부분이 15회 반복 시행된 끌기시험 과정에서 발생한 것으로 생각되며 이때 고온에서 고착제로 사용된 수지와 고체윤활제가 열분해되어 발생한 결과로 생각된다. 그러나 본 실험에서의 마모량에 관한 결과는 일정한 가압력에서 끌기시험을 한 경우이므로 실제로 자동차 주행에 따른 마찰재의 마모와는 다른 결과를 나타낼 수 있다. 보다 정확한 마모량을 비교 분석하기 위해서는 일정 압력에서 끌기시험을 하기보다는 일정 토크 값 하에서 끌기 시험을 하여야 하리라 생각된다.

#### 4. 결 론

자동차용 마찰재 중 대표적인 두 종류인 유기물계 마찰재와 반금속계 마찰재를 대상으로 브레이크용 dynamometer를 이용하여 그 마찰특성을 연구하였다. 현재 자동차에 장착되고 있는 두 마찰재를 사용하여 시험하였으며 두 마찰재 모두 비교적 우수한 마찰안정도(friction stability)를 보여 주었다. 동일 조건에서 유기물 마찰재인 NAO-23을 사용하여 정차 시험할 때 반금속계 마찰재를 사용했을 때에 비해 로터온도가 보다 상승되었으며, 반면에 4분간 끌기시험을 할 때는 반금속계 마찰재를 사용하였을 때가 로터의 온도를 더욱 상승시켰다. 끌기시험 중 마찰계수는 SME-58 마찰재를 사용하여 시험하였을 때가 NAO-23 마찰재를 사용했을 때에 비해 더 높게 나타났다. 끌기시험

시 나타난 fading 현상은 SME-58 마찰재가 NAO-23 마찰재에 비해 더 높은 온도에서 나타남으로써 NAO-23 마찰재 보다 우수한 고온 마찰특성을 나타내었다. 정차시험 시 마찰계수의 시간에 따른 증가 현상(rooster tailing)은 반금속 마찰재인 SME-58이 NAO-23에 비해 더욱 크게 나타났으며 그 증가량은 가압력이 높을 때 더 크게 나타났다. 이러한 현상은 반금속 마찰재에 다량 포함되어 있는 금속성 원료들이 마찰열에 의해 산화되어 마찰속도가 저속으로 변하면서 마찰계면에서 stick-slip 현상을 가중시켰기 때문으로 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 1997년도 한국과학재단 지원 핵심전문 연구(과제번호:1-0801-013-2)에 의한 연구결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Jacko and S.K. Rhee, "Brake linings and clutch facings," 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 materials performance issues," in proceedings of fibers in friction materials symposium, Friction Materials Standard Institute, 2-57, 1987.
4. R.G. McLellan, "Requirements of friction materials in commercial vehicle disk brake applications," C451, IMechE, 1988.
5. H. Jang, J.W. Fash and T.W. Donlon, "Effect of the amount of a lubricant and abrasive in the friction material on brake performance," 13th SAE Brake Colloquium, Philadelphia, Pennsylvania, Oct. 1995.
6. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰특성에 관한 연구 I.," 한국윤활학회지, 13권, 1호, 1997.
7. A. Yevtushenko, E. Ivanyk, "Determination of heat and thermal distortion in braking systems," Wear, vol. 185, 159-165, 1995.
8. J.D. Halderman, "Automotive Brake Systems," Prentice Hall, Columbus, Ohio, 1996.
9. S.J. Kim, H. Jang, "Chemical degradation of friction

- materials during automotive braking," in preparation.
10. L.S. Bark, D. Morgan and S.J. Percival, "Polymer changes during friction material performance," *Wear*, vol.41, 309-314, 1977.
  11. M.G. Jacko and R.T. Ducharme, "Simulation and characterization of used brake friction materials and rotors," SAE paper 730191, 1973.
  12. J.A.C. Martin, J.T. Oden, and F.M.F. Simoes, "A study of static and kinetic friction," In. *J. Eng. Science*, vol.28, 29-92, 1990
  13. I.L. Maksimov and A.L. Rakhmanov, "The thermofrictional oscillations under sliding," *Physics letters* A, 1987.
  14. C. Gao and D. Kuhlmann-Wilsdorf, "On stick-slip and the velocity dependence of friction at low speeds," *Transactions of the ASME*, vol.112, 354-360, 1990.
  15. J.W. Longley and R. Gardner, "Some compositional effects in the static and dynamic properties of commercial vehicle disk brakes," C453, IMechE, 1988.
  16. M.J. Haigh, H. Smales, M. Abe, "Vehicle judder under dynamic braking caused by disk thickness variation," C444/022, IMechE, 1933.
  17. A.M. Lang, "An approach to the solution of disk vibration problems," C37, 223-231, IMechE, 1983.