

## 論文

## 알루미늄 합금 디스크용 마찰재의 제조 및 그 특성에 관한 연구

손태관\*, 장상희\*\*, 제갈영순\*\*\*\*

## The Studies on the Fabrication and Properties of Friction Materials for Aluminium Alloy Disk

T. K. Sohn\*, S. H. Jang\*\*, Y. S. Gal\*\*\*\*

## ABSTRACT

This article deals with the manufacture and test results of asbestos-free friction material for Aluminium alloy disk. In order to obtain optimum formulation, various formulations of fibres, matrix, modifiers, fillers, etc were designed and evaluated. The constant friction and brake dynamometer tests were performed to know weak and strong point for each friction material. The C21 formulation of various tested formulations exhibited superior friction constant(0.35~38), fade rate (18%) by JASO C406 test mode and maximum wear 1.6 mm, disc wear 0.08 mm by JASO C427 test mode. The surface morphology of AL alloy disk(before and after test) was observed by Scanning Electron Microscope(SEM) and Image Analyzer.

## 초 록

본 연구는 자동차용 알루미늄 합금 디스크에 적용하기 위한 마찰재 제조에 관한 내용을 제시한 것이다. 최적 마찰재 조성을 확보하기 위하여 섬유, 결합재, 충전재, 마찰 성능 조정재 등으로 분류할 수 있는 각 원재료를 채택, 배합 설비에 의한 마찰재 시편을 제작하였으며 그 특성을 실제 차량 1/5 크기의 브레이크 다이내모미터를 이용하여 평가하였다. 마찰 성능을 JASO C406 P1에 준하여 실험한 결과 마찰계수가 0.35~0.38, fade율이 18%였으며, 내 마모성은 JASO C427에 준하여 온도별 마모시험을 실시하였는데 시험 종료후 마찰재의 마모량이 1.6mm, 디스크 마모량이 0.08mm 수준인 우수한 배합 조성을 획득할 수 있었다. 시험 전·후의 마찰재와 알루미늄 합금 디스크의 표면상태는 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

**Key words:** 마찰재(Friction Materials), 디스크(Disk), 케블라(Kevlar), 조성(Formulation), 다이내모미터(Dynamometer)

## 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 가벼운 무게와 함께 높은 강도를 가지고 있어, 항공우주용 구조 재료 뿐만 아니라 일반 산업용 재료로도 많이 사용되고 있다[1,2]. 보강 섬유로는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유 등이 많이 사용되고 있으

며, 모재(matrix)로는 에폭시 수지, 페놀수지, 폴리에스테르 수지, 실리콘 수지 등이 있는데, 이 중에서 페놀수지는 내산성 및 내열특성이 다른 매트릭스에 비해서 우수하고, 가격이 비교적 저렴하여 산업용 부품에서부터 항공우주용 내열 부품에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있다[3-5]. 페놀수지는 크게 두가지 유형으로 나누어지는데, 반응성

\* 상신브레이크공업(주) 기술연구소

\*\* 구미1대학 식품과학과

\*\*\*\* 경일대학교 교양학부, 교신전자(E-mail:ysgal@kiu.ac.kr)

메틸올(-CH<sub>2</sub>-OH)을 포함하고 있지 않아, 경화시 별도의 조성이 필요한 노블락(novolac) 수지와 페닐기에 메틸올(-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-OH)을 가지고 있어 가열만으로 경화가 가능한 레졸형 페놀수지가 있다. 이 레졸형 수지는 다른 반응물없이 수지 자체만으로 경화가 가능하므로 이를 일단계 수지(one-stage resin)로 부르기도 한다[6].

페놀수지의 여러 가지 응용분야중의 하나가 차량 제동장치 마찰재 제작의 매트릭스인데, 마찰재의 구성 성분으로는 강도를 위한 유기 및 무기 섬유소재, graphite나 MoS<sub>2</sub>와 같은 윤활재, 철, 동, 알루미늄, 황동 등과 같은 마찰계수 안정제, alumina, silica, mullite와 같은 연마재 등 20여종 이상의 화합물이 사용된다. 이 중에서 페놀수지는 이러한 다양한 조성을 묶어주는 결합제 역할을 하며, 제품의 최종 성능에 중요한 영향을 미치게 된다[7-13].

국내 자동차 산업은 비약적으로 발전하여 생산능력 세계 5위, 미국 수출은 일본에 이어 2위의 규모이다. 전 세계적으로 브레이크 부분 뿐만 아니라 산업계 전반에 요구되는 기술은 청정기술이다. 저공해 물질의 사용, 높은 연비의 연료 사용 등을 범으로 유도해 나가고 있는 실정이다. 그러나 브레이크 마찰재 부분은 아직도 대부분 인체에 유해하거나 취급상 특별한 주의가 요구되는 원료들을 다량 사용하고 있는 실정이다. 또한 마찰재의 마모에 의한 환경 오염 뿐만 아니라 마찰재 상대재의 공격성이 큰 특성으로 인하여 악순환이 반복되고 있다. 다행스럽게도 마찰재의 제조 경향은 1980년대 석면 마찰재에서 1990년대 유럽을 중심으로한 로-스틸(low-steel)계 마찰재, 일본을 중심으로한 난-스틸(non-steel)계 마찰재로의 빠른 전환이 이루어지고 있으며 그에 따른 상대재인 디스크(disc), 드럼(drum)의 경우도 경량이며 마모성이 우수한 알루미늄 합금 소재로 전환되어 가고 있다. 일본의 경우 이미 알루미늄 합금 디스크를 상용화할 목적으로 이미 개발을 완료한 상태이다.

알루미늄 합금 디스크는 경량이고, 고강도 유지, 내부식성이 좋은 장점과 더불어 회주철 디스크의 경우 디스크 마모 분진으로 인하여 알루미늄 휠이 검게되는 오염 문제가 없다는 점이다. 반면에 고온에 약하며 내마모성이 좋지 않은 단점이 있다.

본 논문에서는 알루미늄 합금 디스크의 개발을 위한 기초연구로서 다양한 조성의 마찰재를 설계하여 제작하고 여러 가지 분석장비를 사용하여 그 특성을 시험/평가한 내용을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

Table 1은 알루미늄 합금 디스크용으로 본 연구에서 사용한 조성을 개략적으로 나타낸 것이다. 자동차용 브레이크 마찰재는 다양한 구성성분, 즉 섬유, 유기계 마찰조정

제, 무기계 마찰조정제, 결합제, 충전제 등을 조합하여 제조하게 된다. 본 연구에서 사용한 결합제는 제동시 Noise 발생이 적은 변성 노블락(novolac)계 페놀수지로 단분자 페놀이 1.9~2.6 % 이며, 수평균분자량(Mn)이 816이고, 중량 평균분자량(Mw) 8650 였으며, 그 배합비의 증감에 따른 마찰, 마모 특성을 관찰하였다.

마찰재에 있어 섬유의 역할은 기본 강도 유지, 보강성, 기공성 유지 등이며 충전제와 결합제인 페놀수지가 잘 분산될 수 있게 하는 구성 요소이다. 따라서 그 형상, 비중, 섬유장, 섬유경 등의 차이에 의해 다양한 기능의 마찰재 설계가 가능하다. 보강섬유는 대부분 단섬유가 사용되며 본 연구에서 사용된 섬유는 인장강도가 0.16~0.20 GPa인 아라미드 섬유를 사용하였다.

이외에 금속의 강도에 상당하는 보강성을 부여하며, 열전도율을 좋게하는 비철금속 섬유로써 brass wool, copper wool, 그리고 glass, ceramic 섬유 등을 사용하였다. 마찰 특성을 좌우하는 성분이 충전제와 마찰 조정제인데 특수 제조된 입도 10 μm 이하의 재료를 사용하였으며, 고온에서 마모를 줄이고 noise를 저하시키기 위하여 graphite, MoS<sub>2</sub> 등을 사용하였다. Fade성, 효력안정성을 위하여 동, 알루미늄 등의 비철 분말을 이용하였고 목표 마찰계수를 위하여 ZrO<sub>2</sub>, mullite 등을 사용하였다.

### 2.2 시험편 제조

마찰재는 앞에서 제시한 구성성분으로 혼합, 성형하는데 그 순서는 다음과 같다. 먼저 설계된 배합에 의거 계량하고 RPM 120정도의 체적 50 리터 크기의 원통형 혼합기에서 6분간 혼합후 실온에서 체적 100 입방크기의 금형에서 예비성형을 하였다. 예비 성형체를 동일한 체적의 열성형 금형에서 150±10 °C 온도 상태에서 가압, 배기 조건을 반복하여 마찰재를 경화시키고 230±10 °C 온도 구간에서 6±1 시간 동안 완전 경화를 시켰다. 성형완료한 마찰재를 16x8x5 밀리의 규격으로 가공하여 시험편을 제조하였다. 재료의 투입량은 시험체 단면적 50.0 cm<sup>2</sup>에 대하여 110±5 gr, 성형압은 650±25 kgf/cm<sup>2</sup>로 하였는데, 이 경우 시험체의 비중이 2.05 였고 기공율은 14±3 % 였다. 성형시 발생하는 gas에 의한 크랙이나 부풀음이 없도록 충분히 gas를 방출 시켰다. 알루미늄 합금 디스크용으로 본 연구에서 사용한 조성을 개략적으로 나타낸 것이다.

### 2.3 마찰재 성능시험

제조한 마찰재의 평가시험은 아케보노 엔지니어링(AKEBONO ENGINEERING) 사가 제작한 Fig. 1의 1/5 스케일 다이노미터(1/5 scale dynamometer)를 사용하여 수행하였으며, 시험 최대관성(Inertia)은 0.3 kg·m·sec<sup>2</sup>이고, 최대 제동압은 250 kg/cm<sup>2</sup>이고 최대 제동 Torque는 35kg·m이

다. 회전속도는 3500 rpm이고 시험 가능온도는 실온에서 1200 °C까지이다. 실제로 본 실험에 이용된 Inertia는 2.1 kg·m·sec<sup>2</sup>이고 Cylinder 면적은 9.35 cm<sup>2</sup>였다. 그 시험순서는 다음과 같다.

- 1) JASO C 406 P1에 의거 시편 두개를 두께 5±0.5 mm로 하여 온도 100 °C, 감속도 0.25 G, 제동횟수 200회로 초기 길들이기를 실시하였다. 시편의 시험 전후두께는 1/1000 mm 마이크로미터로 5개소를 측정하였으며 무게 역시 1/10,000 gr 전자저울을 사용하여 시험전후에 시편의 무게를 측정하였다.
- 2) 디스크 온도 100 °C에서 5000회전하는 동안 마찰력을 기록하고 마찰후의 두께를 측정하였다. 단 측정은 시료를 냉각한 후에 행하였다.
- 3) 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C의 각 온도에서는 2)와 동일한 방법으로 측정을 한다. 이 경우 1500회전 이내에서 각 규정별 디스크온도에 도달하여야 한다.
- 4) 최고 온도까지 시험한 후 300 °C, 250 °C, 200 °C, 150 °C, 100 °C로 떨어질 때마다 그 온도에서의 마찰력을 기록하여 마찰계수를 기록한다. 이 경우 각 온도에서 1500회전하는 동안의 마찰력을 기록한다. 다음 식을 이용하여 마찰계수와 체적 마모율을 계산하였다.

$$\text{마찰계수 } u = \frac{f}{F}$$

여기에서 F: 시편에 걸리는 전체 압착력(kg)  
f: 마찰력(kg)

체적마모율(cm<sup>3</sup>/kg·m)

$$W_b = \frac{Ad}{\sum (pAwt)} = \frac{d}{\sum (pwvt)}$$

여기서 A : 시편면적(cm<sup>2</sup>)  
d : 마모두께(cm)  
p : 면압(kg/cm<sup>2</sup>)  
v : 미끄럼 속도(m/sec)  
u : 마찰계수  
t : 마찰시간(sec)

### 2.4 효력시험

Brake Dynamometer는 단시간내에 신뢰성이 높은 평가를 위한 대표적인 장비로써 운동에너지를 열에너지로 교환하며 기계가동부의 운동량을 줄이는 가장 간단한 장치이다. 효력시험의 시험방법과 조건은 자동차용 브레이크 마찰계 성능시험 규격인 JASO C-406에 정해져 있으며 정 Torque

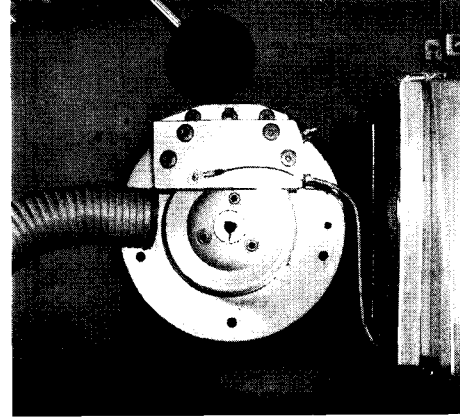


Fig. 1 Photograph of 1/5 scale dynameter.

제어로 수행하였다. 설정 Torque는 제동감속도 0.1G~0.8G 범위로 측정점을 6점으로 하고 마찰계수(μ)는 디스크 브레이크의 토크(T)를 나타내는 다음 식에 의해 구했다.

$$T = (\pi/4) \cdot d^2 \mu n P$$

여기에서 d: 휠 실린더의 직경 (mm)  
P: 제동액압 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
r: 제동유효반경 (mm)  
n: Pad 개수

$\pi d^2 r n / 4 = K$ 라 하면  $\mu = 1/K \cdot T/P$ 가 된다.

여기서 K는 브레이크 장치에 의해 정해지는 상수이다. 시험시 K를 설정해 놓고 제동시험을 수행하면 매 시험마다의 P와 T가 측정되어 μ가 자동적으로 연산처리되어 기록되어진다. μ는 1회 제동 시에 변화를 하지만 여기에서는 평균값으로서 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

현재까지의 연구결과와 문헌을 참고로 최적의 조성 및 공정조건을 찾기 위하여 예비 배합조성을 만들어 각각에 대한 마찰성능 및 그 물성을 우선 비교/검토하였다. 섬유, 결합재, 충전재(마찰조정재 포함)의 삼선분계의 변화에 따른 마찰성능 및 마모율의 변화를 관찰하였다.

Fig. 2에 나타난 삼선분계도에서 A는 외국 제품을 분석한 결과로부터 재료 설계한 시험체의 혼합비이다. 본 실험의 마찰재와 유사한 일본 A사 제품의 마찰계수는 0.35~0.38 범위였으며 마모율은 150 °C, 350 °C에서 시험했을 경우 각각 2.5 cm<sup>3</sup>/kg·m 및 6.0 cm<sup>3</sup>/kg·m 였다



및 탄화현상으로 내열강도가 떨어져서 약해지거나 파괴되는 현상으로 판단된다. 결합재의 양이 상대적으로 많은 C2의 경우 평균 마찰계수는 0.37로써 비교적 안정되어 있으나, 200~250 °C 부근에서 약간 높고 회복시험시 200 °C 이하에서 마찰계수가 많이 떨어지는 현상을 나타내었다. 그 원인은 250 °C 부근에서 열화된 과량의 결합재의 윤활작용에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 6에서 제시하고 있는 C2의 마모율은 고온영역에서 매우 적는데 이것은 앞에서 설명한 열화된 수지에 의한 윤활작용이 그 원인으로 사료된다.

보다 안정된 재료설계를 위하여 C2의 배합비를 기준으로 하여 섬유기재 및 결합재의 조정에 따른 마찰재 성능차이를 확인하기 위하여 C21, C22, C23의 재료설계를 하였다. 이렇게 제조한 시편의 실험결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 결과에서와 같이, C21에 비해서 각각 결합재나 마찰조정제의 함량을 약간 증가시킨 C22 및 C23인 경우는 200 °C를 넘으면 마찰계수가 약간 높게 나타나고 있으나, 전체적으로 볼 때 평균 마찰계수가 0.36~0.38 수준으로 안정되어 있음을 알 수 있었다. 마모율 또한 비교대상인 외국제품에 비하여 낮았다. 반면에 C21 조성인 경우 마찰계수가 전 시험 영역에 걸쳐 0.40을 넘지 않았으며 마모율 역시 양호한 것으로 밝혀졌다. 이상과 같은 방법으로 재료 설계된 배합비 중 전 온도영역에서 가장 안정된 마찰계수를 나타내며 마모율도 비교적 적은 C21 배합조성을 대표 조성으로 선정하였다.

브레이크 마찰재의 성능시험 방법은 크게 차량 실차시험과 리그(Rig)시험 즉 브레이크 다이내모미터 시뮬레이션(dynamometer simulation)으로 나눌 수 있다. 실차시험의 경우 시험 운전자가 일정한 압력으로 페달에 힘을 가하는 것이 어렵고, 기상조건에 따른 가변성, 시험차량에 여러 가지 계측기를 적재하는데 어려움 및 시험자 관능평가에 의한 객관적 정량평가가 어려운 점이 있다. 최근에 앞서 언급한 여러 문제점을 해결할 수 있는 우수한 장비가 많이 개발되어 있지만 장비가 고가이거나 비전문가들이 접근하기가 쉽지 않고 연구 개발용으로는 적합하지 않은 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 브레이크 마찰성능 평가의 대표적인 장비인 브레이크 다이내모미터를 사용하여 마찰재의 성능을 평가하였다. 이는 운동에너지를 열에너지로 교환하며 기계 작동부의 운동량을 줄이는 가장 간단한 장치이다.

여기서는 앞의 재료설계실험 결과 대표조성으로 선정된 C21 재료조성의 시험편을 대상으로 다이내모미터 시험을 수행하여 실제 차량의 제동시 발생할 수 있는 문제점을 간접적으로 관찰하였다. 다이내모미터 시험에 사용한 디스크의 재질은 알루미늄과 분말상 규소의 복합재료로서 규소의 함량이 약 15% 정도이며 경도는 HRB 70정도인 알루미늄 합금 디스크이다.

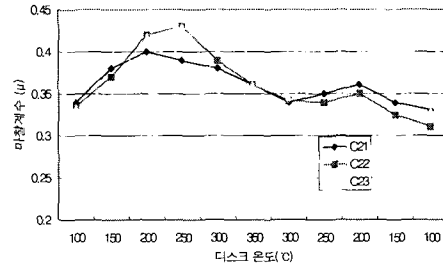


Fig. 7 Friction coefficients and temperature of disk as the formulations (C21, C22, C23).

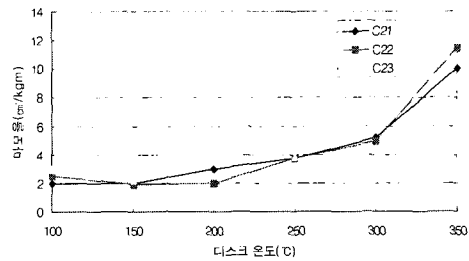


Fig. 8 Wear rates as a function of the temperature of disk (formulation: C21, C22, C23).

그 실험결과를 Fig. 9에 제시하였다. 본 시험체의 마찰계수( $\mu$ )는 0.31~0.35로 안정되어 있다. 제1효력 시험은 제동감속도 0.1~0.8G로 속도 50, 100 KPH에서의 마찰 특성을 평가하는 항목인데, 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제1효력에서는 마찰계수( $\mu$ )가 0.28~0.43으로 약간 높고 감속도 증가에 따른 마찰계수( $\mu$ )값이 50 KPH인 경우 다소 증가하는 경향을 보여주었으나, 제2,3효력시험(제1효력시험의 제동 감속도와 동일한 감속도로 제동하나 50, 100, 130 KPH에서의 마찰성능 평가)에서는 안정되어 있음을 알 수 있다. 일반적으로 마찰재는 차속이 높아지면 마찰계수( $\mu$ )가 낮아지는 경향이 있으나, 본 시험체는 고속에서도 제동역압이 마찰계수( $\mu$ )에 미치는 영향은 거의 없이 안정되어 있음을 알 수 있었다.

다이내모미터 시험후의 알루미늄 합금 디스크의 마모는 6  $\mu\text{m}$ 이고 시험체의 전 마모는 136  $\mu\text{m}$ 로 상당히 적은 마모율을 나타내었다. 마찰 전과 후의 알루미늄 합금 디스크의 표면조도를 폭방향으로 기록한 결과를 분석하였다. 시험전의 디스크 표면조도는 Ra 8.3~9.3  $\mu\text{m}$ ,  $R_{\text{max}}$  11.0  $\mu\text{m}$ 이고 산과 산 사이가 약 200  $\mu\text{m}$  간격으로 균일하게 가공되어 있었다. 시험후의 디스크 표면조도는 Ra 0.7~1.8  $\mu\text{m}$ ,  $R_{\text{max}}$  2.8  $\mu\text{m}$ 이고 산부분이 마모되었지만 여전히 약 200  $\mu\text{m}$ 간격으로 균일하게 유지되어 있었다. 이러한 사실로부터 디스크의 마모는 극히 적고 산과 산 사이에는 시험체의 마모

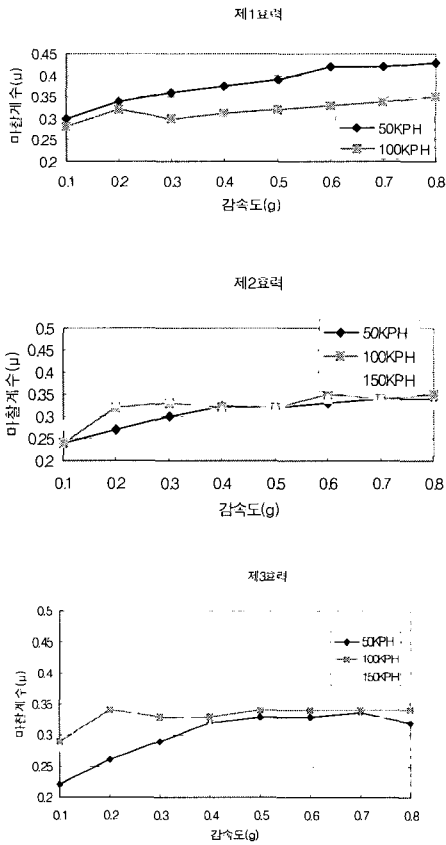
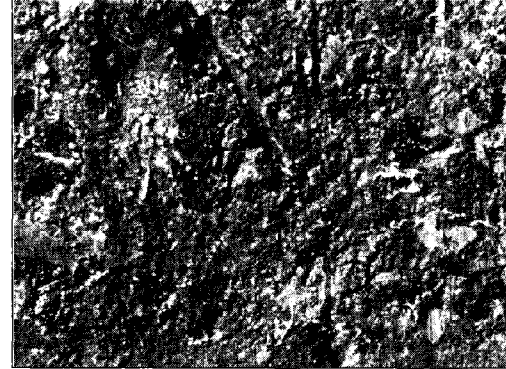


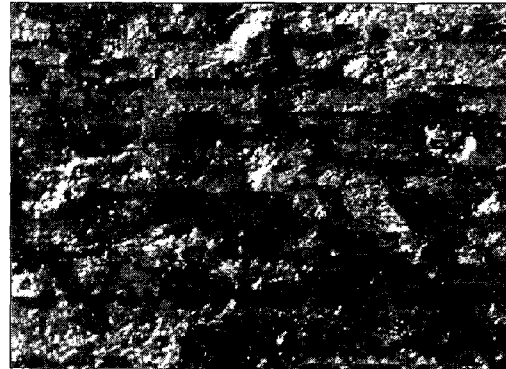
Fig. 9 Friction performance of 1/5 scale dynamometer test.

분진이 부착되어 그 사이에서 마찰이 행해졌다고 판단할 수 있다. 이와 같이 차량의 운동에너지를 디스크와 부착물, 부착물과 시험체 사이의 마찰열로 바꾸어 변환시키면서 디스크 및 시험체의 마모가 적다는 것은 마찰재로서 바람직한 특성이라고 할 수 있다.

시험전후의 알루미늄 합금 디스크의 표면을 Image analyzer 사진(Fig. 10) 및 SEM 사진(Fig. 11)으로 비교분석하였는데, 시험전 디스크의 표면은 자연적으로 생성된 얇은 산화막으로 둘러싸인 표면이 일정하게 가공되어 있는 흔적을 볼 수 있었다. 반면에, 다이내모미터 시험후의 디스크 표면에는 일정하게 가공되어 있는 산과 산 사이에 시험체로부터 분리된 이착물이 균일하게 부착되어 있음을 확인할 수 있었다. 이로부터 브레이크 다이내모미터 시험 후에도 디스크의 마모가 거의 없음을 직접 확인할 수 있었다. 시험후 전자현미경으로 관찰된 얇은 층은 마찰재로부터 이착된 마찰막, 즉 transfer film이고 그 두께는 2~4 μm 정도였다.



(before test)



(after test)

Fig. 10 Image analyzer photographs of AL alloy disk(before and after test).

#### 4. 결론

알루미늄 합금 디스크에 적합한 마찰재 조성을 획득하기 위하여 섬유, 결합재, 충전재, 마찰조정제 등으로 조합된 여러 가지 조성 설계로 시편을 제작, 마찰성능 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 삼성분계도법을 이용하여 결합재 9.8%, 마찰조정제 24.2%인 조성 번호 C21의 경우가 목표치인 마찰계수가 0.38을 얻었으며 마모량도 가장 최소로 나타났다. 둘째, 결합재의 함량이 상대적으로 많은 경우는 회복시험시 200 °C 이하에서 마찰계수가 많이 떨어지는 현상을 보였는데, 이것은 열화된 결합재의 유효작용에 기인한 것으로 판단된다. 셋째, 브레이크 다이내모미터 시험 전후의 알루미늄 합금 디스크의 표면상태를 SEM 등으로 분석한 결과, 시험전 디스크의 표면은 자연적으로 생성된 얇은 산화막 흔적을 보인 반면에 시험후의 디스크 표면에는 마찰재의 이착물이 균일하게 부착되어 있음을 확인할 수 있었다. 넷째, 본 연구를 통하여 알루미늄 합금 디스크 소재에 적합한 마찰재 조성을 획득할 수 있었다.

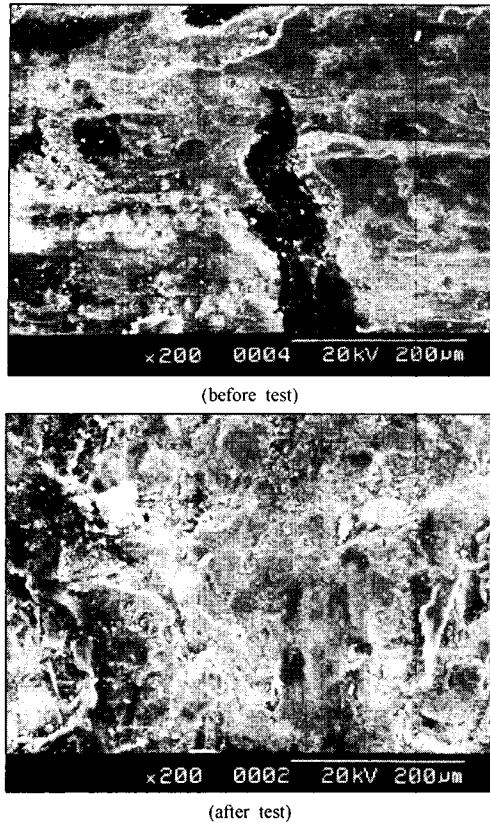


Fig. 11 SEM photographs of AL alloy disk(before and after test).

### 참고문헌

- 1) D. H. Middleton(ed), *Composite Materials in Aircraft Structures*, Longman Scientific & Technical, Harlow, 1990.
- 2) D. V. Rosato, D. P. DiMattia, and D. V. Rosato, *Designing with Plastics and Composites*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- 3) J. R. Lee and S. J. Park, "Development Trend of Matrix Resins in Polymer Composites," *Polymer Science and Technology (Korea)*, 10, 1999, pp. 35-46.
- 4) C. R. Park, "High Performance Fiber Reinforcements for Advanced Composites," *Polymer Science and Technology (Korea)*, 10, 1999, pp. 55-64.
- 5) S. S. Choi, "Structural Characteristics of *p-t*-Octylphenolformaldehyde Resole Resins Using Molecular Simulation," *Polym. Adv. Tech.*, 13(2), 2002, pp. 94-104.
- 6) A. Gardziella, S. A. Pilato, and A Knop, *Phenolic Resins*, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- 7) T. K. Sohn, "Polymeric Binders of Brake Friction Materials," *Polymer Science and Technology (Korea)*, 11, 2000, pp. 759-765.
- 8) R. Gahlin and S. Jacobson, "The Particle Size Effect in Abrasion Studied by Controlled Abrasive Surfaces," *Wear*, 224(1), 1999, pp. 118-125.
- 9) S. Das, D. P. Mondal, O. P. Modi, and R. Dasgupta, "Influence of Experimental Parameters on the Erosive-corrosive Wear of Al-SiC Particle Composite," *Wear*, 231(2), 1999, pp 195-205.
- 10) V. K. Rai, S. K. Srivastava, and S. Ray, "Wear in Cast Titanium Carbide Reinforced Ferrous Composites under Dry Sliding," *Wear*, 231(2), 1999, pp. 265-271.
- 11) M. Eriksson, J. Lord, and S. Jacobson, "Wear and Contact Conditions of Brake Pads: Dynamical in Situ Studies of Pad on Glass," *Wear*, 249(3-4), 2001, pp. 272-278.
- 12) D. C. Sheridan, J. A. Kutchev, and F. Samie, "Approches to the Thermal Modeling of DISC Brakes," *SAE 880256*, 1988.
- 13) F. Bergman, M. Eriksson, and S. Jacobson, "Influence of Disc Topograpy on Generation of Brake Squeal," *Wear*, 225-229, 1999, pp. 621-628.