

고속전철용 소결 복합재의 마찰 특성평가

정소라* · 홍의석 · 장호†

고려대학교 신소재공학과

The Brake Performance of Sintered Friction Materials Developed for High Speed Trains

Sola Chung*, Uiseok Hong and Ho Jang†

Dept. of Material Science and Engineering, Korea University

Abstract – The brake performance of sintered friction materials for the high speed train was studied. In this study, newly developed sintered materials based on copper were compared with the commercial products for high speed trains. They were tested on a 1/5 scale dynamometer using low carbon steel disks. Effectiveness, fade, and recovery tests were carried out to examine friction performance and the change of disk thickness variation (DTV) during brake applications and noise propensity were also evaluated. Results showed that the two sintered friction materials exhibit similar friction coefficients and braking performance, whereas the newly developed friction material was superior in terms of DTV generation and noise propensity to the commercial friction material. The improvement of the newly developed friction material was attributed to the high graphite content which reduced the stick-slip phenomena and prevented uneven disk wear by producing friction films on the counter disk.

Key words – friction, sintered, trains, disk, noise propensity, friction film, stick-slip.

1. 서 론

철도 차량에 대한 고속화와 고출력화가 추진 되면서, 속도를 제어 할 수 있는 제동 시스템의 역할이 중요한 문제로 대두되고 있다. 철도차량은 전기제동, 활주제어, 마찰제동, 디스크 제동 등 여러 가지 제동 시스템을 갖추고 있으나[1], 고속 주행시 속도제어에 사용되는 전기제동의 경우를 제외하고는 마찰재를 이용한 디스크 제동이 가장 큰 역할을 하고 있다. 또한 마찰재를 이용한 디스크 제동은 전기제동 장치가 작동할 수 없는 긴급한 상황에서 전적으로 제동을 담당하기 때문에 고속철도 차량에서는 핵심 부품 중의 하나로 간주되고 있다. 일반적으로 고속철도의 기계식 접촉 제동에는 동계 소결 마찰재가 사용 되고 있으며, 이는 동계 소결 마찰재가 고온에서도 강도를 잃지 않고 제동에 필요한 마찰력을 유지 할 수 있기 때문이다[2].

소결 마찰재는 고온에서 강도를 잃지 않는 특성이 외에도 다양한 제동 환경에서 제동력을 유지하면서 제동소음이 적도록 고안 되어야 하고, 마찰재가 디스크를 공격 하여 불균일한 마모를 초래하지 않도록 제작되어야 한다. 현재 선진국의 철도 차량에 쓰이는 디스크-패드 제동 시스템은 체계적인 연구를 통해 정확성과 신뢰성을 겸비한 제동 능력을 가지고 있다. 반면 국내에서는 마찰재에 관한 연구가 기초 단계에 머무르고 있어 대부분 외국의 상용 제품을 그대로 이용하고 있는 실정이다. 본 연구는 고속 철도 차량의 제동에 사용 되도록 개발된 동계 소결 마찰재와 해외 상용 마찰재를 비교하여 제동에 요구되는 제동 특성 및 소음 발생빈도를 동시에 분석하였다.

2. 시험 방법

2-1. 마찰재

본 연구에서는 개발품과 현재 고속철도에 사용되는

*주저자 : tachibana@korea.ac.kr

†책임저자 : hojang@korea.ac.kr

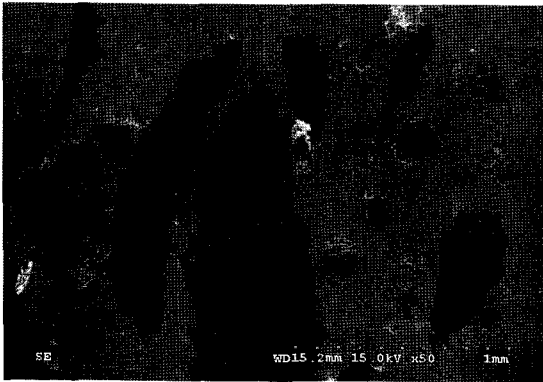


Fig. 1. SEM surface morphology of the developed friction materials.

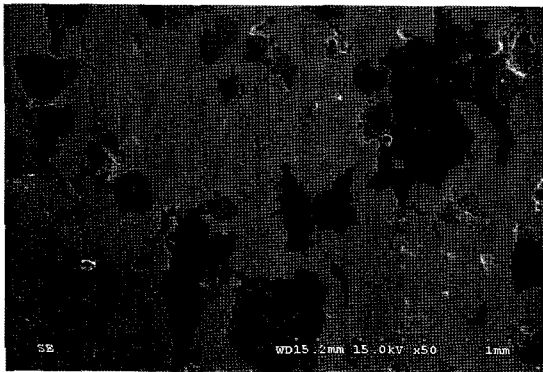


Fig. 2. SEM surface morphology of the commercial friction materials.

상용제품을 이용하여 마찰면의 차이를 분석하였다. 기계적 연마 후 주사 전자 현미경을 이용해 관찰한 마찰재 표면형상을 그림1 과 그림2에 나타내었다.

주사 전자 현미경을 통해 관찰된 개발품과 상용품의 마찰면 사진에서 검게 나타난 흑연의 분포가 판이하게 다른 것을 확인할 수 있다. 개발품에서 보이는 흑연의 넓은 분포는 연마 작업 전에는 관찰되지 않았던 양상으로 흑연이 연마시에 마찰에 의해 길게 밀려난 것으로 판단된다. 연마 작업 전에는 개발품이나 상용품에서 모두 비슷한 모양과 크기의 흑연이 관찰되었고, 상용품에서는 작업 전 후 흑연 분포의 변화를 관찰할 수 없었다. EDX로 마찰면을 분석한 결과 대부분의 기지는 Cu와 Fe로 이루어져 있고, 소량의 Al, Si, O를 포함하고 있다. EDX 분석결과 개발품과 상용품의 성분 차이는 거의 없는 것으로 판단된다.

2-2. 마찰마모 시험

2-2-1. 제동시험

개발품과 상용품의 제동특성을 비교하기 위하여 제동시험을 실시하였다. 제동 시험에는 1/5 스케일 다이나모미터가 사용 되었으며, 각 마찰재는 18 mm×45 mm크기로 가공되어 캘리퍼 에 장착 되었다. 마찰 상대재로 저탄소강으로 제작된 직경 142 mm의 디스크가 사용 되었다. 마찰시험은 마찰계수의 안정화를 위한 버니싱과 감속도에 따른 마찰계수 변화를 관찰하는 시험인 효력 시험, 온도 상승에 따른 마찰 계수 수준의 하락과 회복 정도를 측정하는 페이드-회복 시험 으로 구성되어 있다. 버니싱 시험은 65 km/h에서 0.35 g의 감속도를 가지고 총 200회 제동을 실시 하였다. 효력시험은 각 50 km/h, 100 km/h, 130 km/h의 속도에서 0.1 g~0.8 g의 감속도로 실시 되었 으며 3회 반복 하였다. 페이드-회복 시험은 50 km/h 속도로 80°C의 초기온도에서 0.3 g의 감속 도로 3회 제동을 실시하는 첫단계와 60°C의 온도에서 100 km/h의 속도로 0.45 g의 감속도를 가지고 10회 이상 제동하는 두번째 단계로 이루어졌다. 또한 마지막 단계로 50 km/h의 속도에서 0.3 g로 제동하면서 마찰계수의 회복 수준을 시험하였다.

2-2-2. DTV변화 측정 시험

제동시험 전 후의 디스크 두께 변화(DTV: Disk Thickness Variation)를 측정 하기위해 65 km/h의 속도에서 0.35 g의 감속도로 총 400회 제동을 실시한 후 초기 DTV를 측정하였고 100 km/h 에서 0.3 g의 감속도로 100회씩 제동 시험한 후 후기 DTV를 측정하여 마찰에 의해 발생하는 DTV변화를 측정 하였다. DTV 측정은 비접촉식 변위 측정기(REBAM 3300 proximity probe, Bently) 를 사용하였다. 회전하는 디스크의 양면에 비접 촉식 변위 측정기를 설치한 후, 양면에서의 거리를 측정하여 디스크가 가장 두꺼운 지점과 가장 얇은 지점의 차이로 DTV를 계산하였다[3].

2-2-3. 저속 마찰 마모 시험

속도에 따른 마찰특성의 변화를 측정하기 위해 Pad-on disk 형태의 저속 마찰 시험기를 이용 하였다[4]. 상대재는 저탄소강 디스크와 회주철 디스크를 이용하여 마찰특성을 비교하였다. 회주철 디스크를 사용한 시험은 9N의 수직 하중 하에 이루어 졌으며, 일정한 수직 하중 아래 속도를 변화시켜 60초 간 측정한 후 마찰계수의 평균값을 구하였다. 재현성 구현을 위해 각 속도에 대하여 3회 반복 시험 하였다. 시험에 사용된 속도는 1 rpm~36.75 rpm 범위이다. 저탄소 강 디스크를 이용한 시험은 디스크가 일정한 거리(10회전)를 회

전할 때의 마찰 계수를 측정하였다.

2-2-4. 소음 측정 시험

소음의 측정은 정속 마찰시험기를[5] 사용하여 별도로 실시 하였다. 시험은 0.4 m/s의 정속 및 0.7 kgf/cm²의 정압으로 한시간 동안 진행되었다. 제동시 발생하는 소음은 주변에 설치된 마이크로 폰을 거쳐 데이터 수집장치로 전달되고, 이는 스펙트럼 분석기를 통해 분석된다. 스펙트럼 분석기는 FFT 함수를 사용하여 소

음의 주파수 및 음압을 나타내게 된다[6]. 디스크와 마찰재의 마찰면에서 발생하는 소리 이외에도 베어링이나 모터의 잡음이 마이크로 폰에 입력될 경우를 제외하기 위하여, 60 dB 이상의 소음만 주파수에 따라 축적하여 저장되는 방식으로 측정되었다.

3. 시험 결과 및 고찰

3-1. 제동시험

3-1-1. 효력시험

효력시험은 속도 및 감속도의 변화에 따른 마찰특성을 관찰하는 시험이며 그 시험 결과를 그림3에 나타냈다. 제 1효력 시험은 버니싱 시험 이전에 측정된 결과로서 균일한 마찰특성이 나타나지 않은 상태이다. 제 2효력 시험은 버니싱을 통해 마찰계수가 안정화된 후 측정된 결과이고, 제 3효력시험은 제 1, 2 페이드-회복 시험 후 진행된 시험으로 마찰재 및 디스크가 열이력을 받은 후에 관찰되는 마찰계수의 변화를 측정하는 시험이다. 개발품과 상용품에 따른 마찰 특성은 크게 다르지 않았으나 제 1효력과 제 2효력 시험 중 100 km/h의 속도에서 제동했을 때, 상용제품을 사용한 경우의 마찰계수가 개발 품을 사용한 경우의 마찰계수보다 약간 높게 나타났다. 두 시편을 사용한 결과에서 모두 감속 도가 증가하면서 마찰계수가 상승하는 양상을 나타내었다.

3-1-2. 페이드-회복 시험

페이드-회복 시험은 고온에서 마찰계수가 급격히 감소하는 현상인 페이드 현상과 온도 하강시 발생하는 마찰계수의 회복 현상을 측정하는 시험 이다. 페이드-회복 시험의 결과를 그림 4에 나타 내었다. 1차 페이드에서 올라간 최고온도는 두 시 편 모두 300°C이며, 2차 페이드에서는 320°C를 넘 는 수준까지 온도가 상승하였다. 페이드-회복 시험에서 마찰계수와 온도는 개발품과 상용품이 상 당히 비슷한 양상을 나타냈으며 두 시편 모두 마찰계수의 수준이 고온에서도 0.35 이하로 감소하지 않은 것을 확인 할 수 있다. 온도가 조금 더 올라간 2차 페이드-회복 시험결과에서는 개발 품의 마찰계수가 상용품의 마찰계수 보다 상대적으로 조금 낮은 양상을 보이고 있으나 회복시험 에서 회복 정도는 거의 동일하게 나타났다.

3-2. DTV 변화 시험

디스크의 국부적인 미세조직 변화와 마찰재의 재질

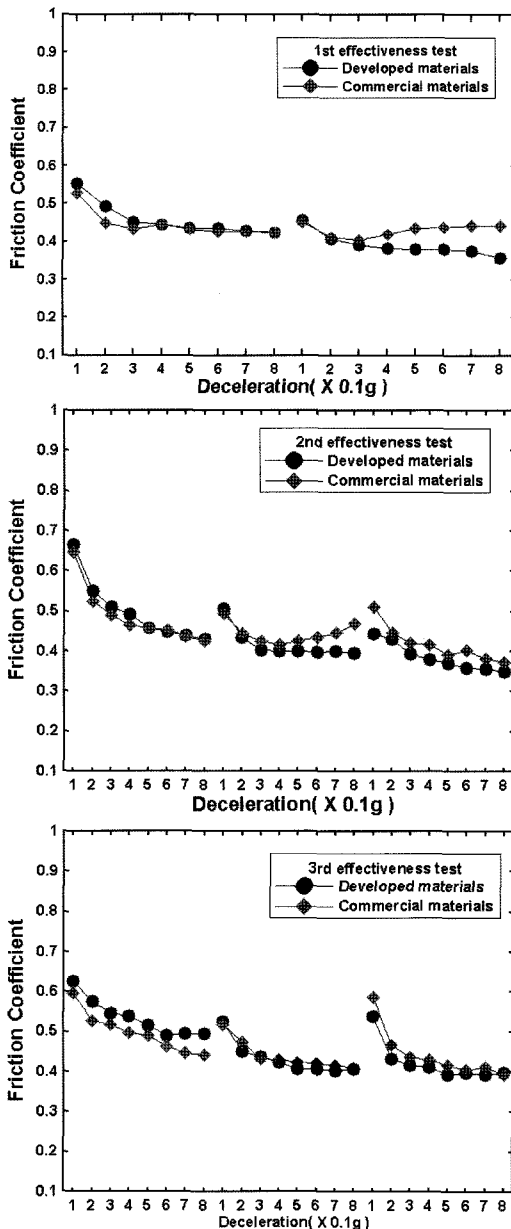


Fig. 3. Friction coefficient of effectiveness test.

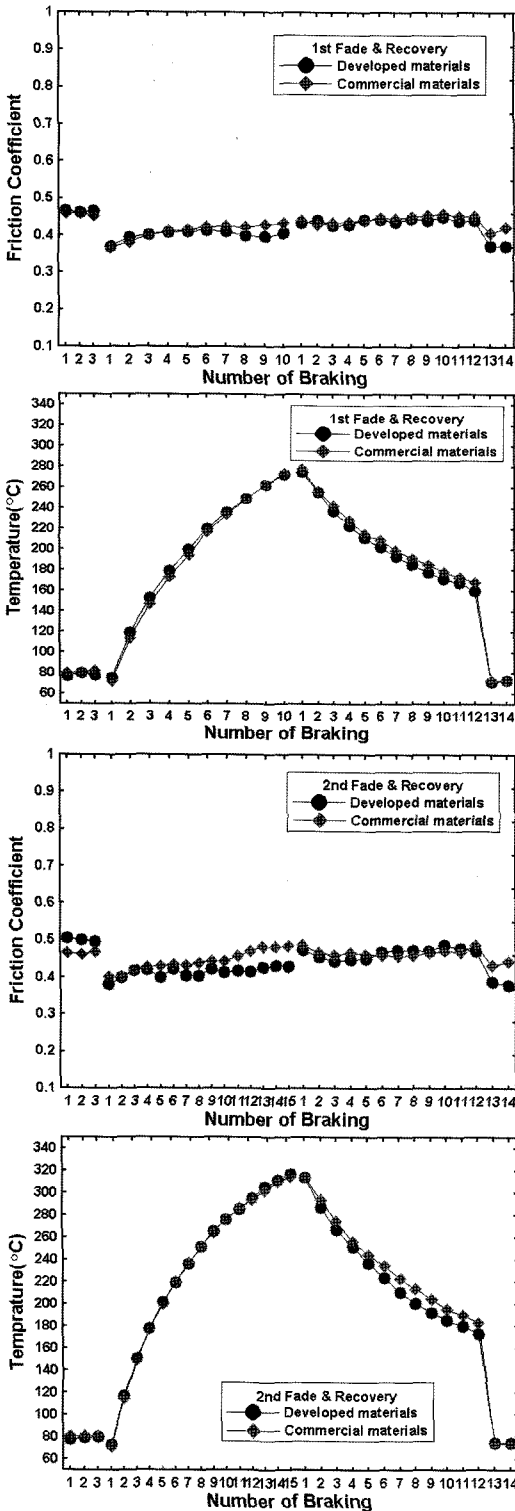


Fig. 4. Friction coefficients and temperature variation during fade and recovery tests.

Table 1. Differences of disk thickness variation

	Initial DTV(μm)	Final DTV(μm)	DTV variation(μm)
Developed materials	35.7	37.5	1.8
Commercial materials	38.0	69.3	31.3

특성 및 대면 공격성의 차이는 디스크의 불균일한 마모를 유발하여 디스크의 두께 변화(DTV)를 발생시킨다. 이러한 디스크의 불균일한 두께 변화는 제동시 토크값의 변화를 증가시켜 브레이크 떨림 현상의 원인이 된다[3]. 본 시험에서는 제동 전 후 디스크 두께 변화 차이를 측정하고 디스크에 대한 마찰재의 대면 공격성 정도를 분석하였다. 초기와 후기의 DTV 값 및 DTV 변화량을 표 1에 나타냈다. 개발품의 DTV 변화는 100 km/h 속도에서 제동 후 1.8 μm 증가한 것으로 나타났으며, 상용품의 경우는 31.3 μm 만큼 증가한 것으로 나타나 개발품의 DTV변화가 상용품 보다 확연하게 작은 것을 확인 할 수 있었다. 마찰시험 후 디스크의 표면을 관찰한 결과 개발품을 사용한 경우 더 균일한 윤활막이 생성 되었으며, 표면에 형성된 윤활막이 마찰표면에서 국부적인 마모 현상을 억제하여 DTV 성장을 감소한 것으로 판단된다.

3-3. 저속 마찰마모 시험

저속 마찰 마모 시험은 극저속에서 속도에 따라 마찰계수의 변화를 측정하고 속도-마찰계수 그래프의 기울기를 분석하여 소음의 발생을 예상 하기 위해 실시하였다. 일반적으로 속도-마찰 계수 그래프의 기울기가 음의 값을 가지고, 정동 마찰계수의 차이가 큰 값을 가질수록 제동시 소음을 야기하는 원인 중 하나인 stick-slip 현상이 잘 일어나는 것으로 알려져 있다[7]. 따라서 stick-slip을 줄이기 위해서는 정동 마찰계수의 차이를 줄이거나, μ -v의 기울기를 감소하여 $\Delta\mu$ 값을 줄여야 한다. 일반적으로 윤활제의 역할이 클수록 μ -v의 기울기가 작은 값을 가지며, 충분한 윤활이 발생할 수 있는 조건에서는 μ -v 기울기가 양의 값을 가지게 된다[8]. 회주철 디스크와 저탄소강 디스크의 시험결과에서 개발품이 상용품 보다 작은 μ 값을 나타냈다.

3-3-1. 회주철 디스크

본 연구에서는 37.5 rpm(58.9 mm/s)과 1 rpm(1.57 mm/s) 사이 구간에 서의 마찰계수 변화와 10 rpm

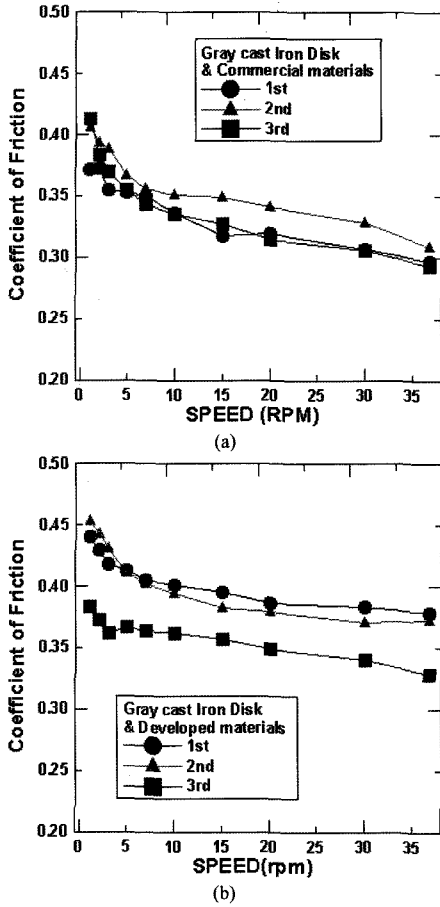


Fig. 5. Friction coefficient of (a) commercial materials and (b) developed materials as a function of sliding speed when tested with gray cast iron disk.

(10.57 mm/s)와 1 rpm(1.57 mm/s) 사이 구간에서의 마찰 계수 변화 값을 표 2에 나타냈다. 마찰 계수의 변화 양상은 개발품이 상용품보다 더 작은 결과를 보였으며, 이는 제동시 소음이 발생 할 가능성이 더 작다는 것을 나타낸다.

3-3-2. 저탄소강 디스크

실제 고속철도 차량의 디스크 재질인 저탄소강 디스크를 상대재료 사용하여 시험한 결과 값을 그림 6에 나타냈다. 상용품을 사용한 결과는 회주철 디스크를 사용하여 시험한 결과와 비슷한 양상으로 고속에서 저속으로 속도가 낮아 질수록 마찰계수가 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 개발품 마찰재를 이용하여 시험한 결과는 회주철 디스크를 이용한 실험 결과와 조금 다른 양상을 나타냈다. 7 rpm까지는 속도가 감소함에 따라 마찰력이 상승하며 음의 기울기를 가지게 되나 그

Table 2. Differences of friction coefficients ($\Delta\mu$) as a function of sliding speed with cast iron disk

	gray cast iron			
	Commercial materials	Developed materials	Commercial materials	Developed materials
	$\mu_{37.5}-\mu_1$	$\mu_{37.5}-\mu_1$	$\mu_{10}-\mu_1$	$\mu_{10}-\mu_1$
1st	0.075	0.062	0.036	0.039
2nd	0.097	0.080	0.055	0.057
3rd	0.108	0.055	0.053	0.021
average	0.093	0.066	0.048	0.039

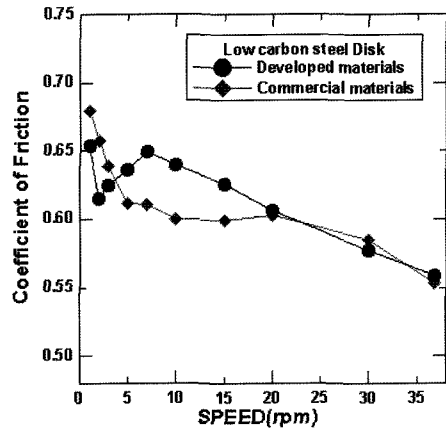


Fig. 6. Friction coefficients of developed and commercial friction materials as a function of sliding speed with low carbon steel disk.

Table 3. Differences of friction coefficients ($\Delta\mu$) as a function of sliding speed with low carbon steel disks

	low carbon steel			
	Commercial materials	Developed materials	Commercial materials	Developed materials
	$\mu_{37.5}-\mu_1$	$\mu_{37.5}-\mu_1$	$\mu_{max}-\mu_{min}$	$\mu_{max}-\mu_{min}$
1st	0.126	0.095	0.126	0.095

후, 2 rpm까지 속도가 감소하면서 마찰력은 감소 하게 된다. 그 후 1 rpm에서 측정된 마찰계수는 다시 상승하는 양상이 나타났다.

단순히 최대 마찰계 수와 최소 마찰계수의 차이로 나타낸 결과값은 개발품이 작은 값을 나타냈고, 최고 속도와 최저 속도에서의 마찰계수 차이도 개발품의 결과 값이 작은 값을 나타냈다. 이를 표 3에 나타냈다.

3-4. 소음 측정 시험

소음 측정 동안의 마찰계수 값은 상용품이 0.53, 개

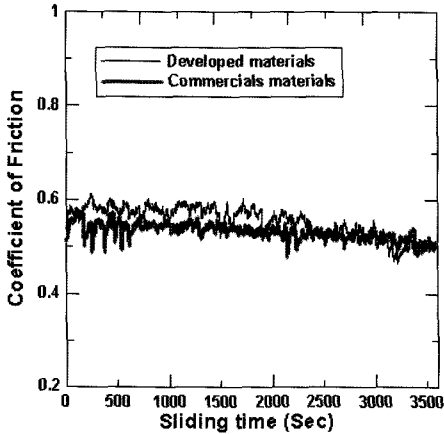


Fig. 7. Friction coefficients of developed and commercial materials during the noise test.

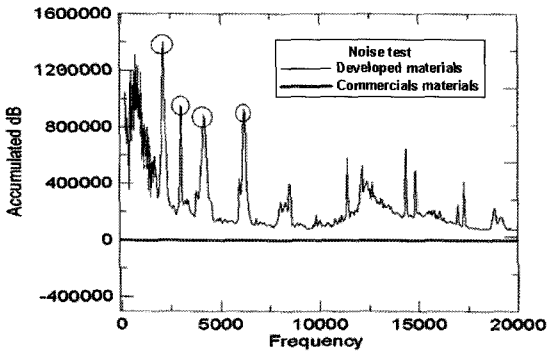


Fig. 8. Accumulated dB which is measured microphone during the noise test.

발품이 0.55로 비슷한 수준을 나타냈다 (그림 7). 마찰 계수는 비슷한 값을 가졌지만 소음의 양상은 다르게 나타났다. 버니싱 시험에서는 개발품 및 상용품 모두에서 심한 소음이 발생되었으나 버니싱 후 실제 소음을 측정 하는 동안에는 개발 품에서 60 dB 이상의 소음이 발생하지 않았다. 반면 상용품은 버니싱 시험 후에도 60 dB 이상의 소음이 다양한 진동수에서 발생되었다. 그림 8에 주파수 영역에 따른 소음의 측정 정도를 그래 프에 나타냈다. 특히 원으로 표시된 주파수 영역에서 소음의 발생이 심하게 측정됐다. 소음 가능성 평가 시험인 저속 마찰시험 결과에서와 같이 실제 소음 측정 시험에서도 개발품이 상용품 보다 소음 발생에 탁월한 효과를 가지는 것으로 평가 된다. 이는 개발품 마찰재의 원활한 윤활 작용이 $\mu-v$ 의 기윤기를 낮추어 stick-slip 현상을 저감시킨 것이라 판단 된다.

4. 결 론

고속 전철용 마찰재의 국산화 적용을 위해 새롭게 개발된 소결 마찰재와 상용 소결 마찰재의 마찰특성을 비교 분석 하였다.

- 1) 효력과 페이드-회복 시험에서 두 시편 모두 비슷한 수준의 마찰계수를 보였다.
- 2) DTV변화는 개발품이 상용품에 비해 작은 값을 나타냈다.
- 3) 속도에 대한 μ 변화는 개발품이 상용품 보다 작은 값을 나타냈다. 이는 더 작은 소음 가능성을 나타낸다.
- 4) 실제 소음 측정 시험에서는 개발품이 상용품 보다 우수한 특성을 나타낸다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 국가 지정 연구실 사업 (과제번호 : R0A-2007-000-10011-0)에 의해 수행 되었습니다. 또한 본 연구의 수행에 도움을 주신 다원 프릭션의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박훈규, 황상규 외, “접속제동 시스템 개발, 2차년도 보고서,” 건설교통부, 1998.
2. 박훈규, 이용순 외., “접속제동 시스템 개발, 1차년도 보고서,” 건설교통부, 1997.
3. 장호, 김성진, 이재영, 윤장혁, 한창주, “The effect of the Composition and Microstructure of Gray Cast Iron Rotor and Friction Pad on Brake Judder Phenomena,” 현대자동차주식회사, 2002.
4. S.J.Kim., M.H.Cho, R.H.Basch, J.W.Fash and Ho.Jang, “Tribological properties of polymer composites containing barite (BaSO₄) or potassium titanate (K₂O·6(Ti O₂)),” *Tribology Letters*, Vol. 17, No 3, pp. 655-661, 2004.
5. S.J.Kim., M.H.Cho, D.S.Lim and H.Jang, “Synergistic effects of aramid pulp and Potassium titanate whiskers in the automotive friction materials,” *Wear* 251, pp. 1484-1491, 2001.
6. 조민형, 김성진, 장호, “친환경 무소음 마찰재,” 한국산업기술재단, 2004.
7. H. Jang, J. S. Lee, J. W. Fash, “Compositio nal effects of the brake friction material on creep groan phenomena,” *Wear* Vol. 251, No.1-12, pp. 1477-1483, 2001.
8. E.Rabinowicz, *Friction and wear of materials*, 2nd Edition, Wiley New York, 1995, pp.109-11.