

고속 전철용 소결 마찰재료 개발

Development of Sintered Friction Material for High Speed Train

김기열*, 김상호**, 이범주***, 조정환****

Ki-Youl Kim, Sang-Ho Kim, Beom-Joo Lee, Jeong-whan Cho

Abstract

The Friction Brake Pad of High Speed Train is the most important parts in brake system, which is usually made of Cu-based Sintered friction material. This study has been carried out about the formulation effects of sintered friction material and made lots of sample brake pads. Then, we have done the performance test of the developed product by using full scale inertia Dynamo-meter. This performance test (braking speed 300km/h) was conducted as GEC Alstom Standard test procedure and High Speed Brake Test (braking speed 350km/h) was done at "Poli" in Italy. The friction properties of this product was almost identical with the brake pad which is currently used to TGV. And the temperature of brake disk on braking speed 350Km/h was a little higher.

1. 서 론

지구상에 존재하는 마찰재료는 크게 유기계 마찰재료와 금속계 마찰재료, 그리고 카본 복합체 마찰재료로 구분하고 있다. 특히 금속 소결 마찰재는 금속계 마찰재료의 일종으로 다양한 종류의 금속분말과 비금속분말을 사용하여 마찰특성에 맞게 혼합하고, 프레스를 사용한 성형 공정을 거쳐 소결 과정을 통하여 제작되며, 이런 제작과정의 이름을 따서 소결마찰재라고 한다[1, 2]. 소결 마찰재의 가장 큰 특징은 800℃의 고온 상태에서도 안정된 마찰특성을 나타내며, 또한 습기가 있는 상태에서도 유기계 비석면 마찰재나 카본 복합체 마찰재보다 우수한 특성을 갖는 것이다[3]. 고속전철용 마찰재료는 비가 오는 경우에서도 제동특성을 발휘하여야 함으로 앞서의 장점을 가지고 있는 금속 소결 마찰재가 채택되어 주로 사용하고 있으며, 우리 연구팀은 한국형 고속전철에 적합한 소결 마찰재를 개발하기 위하여 1996년부터 개발을 진행하여 왔다[4, 5, 6]. 여기서는 현재 유럽 고속전철에 사용되는 마찰재 pad의 형상 및 재료에 대한 조사를 실시한 내용

* 대우종합기계 중앙연구소 소재개발팀 책임연구원 032-760-1979 tenkim@dhiltd.co.kr
** 대우종합기계 중앙연구소 소재개발팀 주임연구원 032-760-6240 shkim@dhiltd.co.kr
*** 대우종합기계 중앙연구소 소재개발팀 책임연구원 032-760-1498 bjee@dhiltd.co.kr
**** 대우종합기계 중앙연구소 소재개발팀 수석연구원 032-760-1468 jwcho@dhiltd.co.kr

과 이러한 결과를 바탕으로 한국형 고속전철에 적합한 소결 마찰재를 개발하고 시제품을 제작하여 시험 평가한 과정을 소개하였다.

2. 고속전철용 마찰 pad 비교

2.1 마찰 pad의 형상비교

해외에서 사용하고 있는 3사의 고속전철용 마찰pad를 분석한 결과 모두 직경 40mm인 9개의 원기둥 형태의 소결재 stud를 사용하고 있으며 그 배열은 서로 유사하였다. 하지만, 소결재 stud의 외부 보강 방법과 stud를 back steel에 체결하는 방법, 그리고 back steel과 dovetail을 붙이는 방법 등은 조금씩 달랐다. 각 사의 마찰 pad는 그 형상과 모양에 있어서 각각 특색을 가지고 있는 것으로 알려져 있다[7].

2.2 마찰 pad의 재료 분석

Table 1은 재료 분석 결과로써, A사는 청동계 기지부를 가지고 있었으며, 알루미늄과 실리콘이 트 등으로 이루어진 광물이 마찰조절제로 약 10% 첨가되어 있다. B사의 경우 첨가원소가 가장 간단하며, 기지부는 구리만을 사용한 것이 특징이다. 마찰조절제로 페로 크롬(Fe-Cr)이 일부 사용되고 있다. C사는 기지부가 청동이며 첨가 원소가 8가지 정도로 상당히 많이 첨가되어 있으며, 마찰조절제로 공구강 분말을 일부 사용하고 있다. 전체적으로 윤활제는 흑연을 주로 사용하며 금속 윤활제의 일종인 납(Pb)등은 관찰되지 않았다.

Fig. 1은 B사에서 입수된 소결 마찰 pad의 마찰재 조직사진으로 내부기공이 많이 관찰되고 있으며, 400 μ m 이상의 굵은 고체윤활제가 군데군데 흩어져 있다. 마찰조절제로 첨가된 세라믹 분말은 흰색으로 역시 굵은 입자로 관찰된다. 소결은 900 $^{\circ}$ C 이상의 고온에서 소결된 것으로 보이며, 이것은 기지부가 청동이 아닌 금속 Cu 만을 사용하기 때문에 소결 온도를 높인 것으로 추측된다.

Table 1. Raw materials of the pads which are currently used to TGV

Maker	Matrix	Friction Modifier	Lubricant	Remark
A Co.	65-75	10-20	8-10	Mineral 10
B Co.	60-70	10-20	15-20	Cu only
C Co.	60-70	10-15	10-15	Tool steel 15

주) 숫자는 중량%(wt%)으로 표현됨

3. 고속전철용 마찰 pad 개발

한국형 고속전철에 적합한 소결 마찰재 pad를 개발하기 위하여 bench-marking한 자료를 통하여 개발에 들어갔다. 다수의 시제품을 제작하였고 제작된 시제품은 마찰특성 분석을 위하여 (주)한국배럴에 의뢰하여 300km/h의 다이내모 시험을 실시하였다. 또한 고속제동 상태에 대한 평가를

위하여 이탈리아 “Poli” 사를 통하여 350km/h의 고속 제동 시험을 실시하였다.

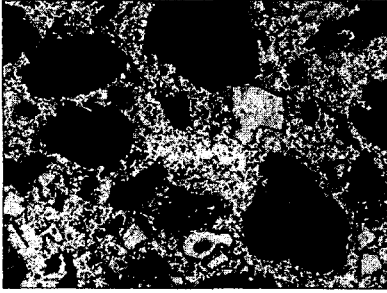


Fig 1. Micro-structure of B Co.
(Mag.50, Nital 2%)

Table 2. Raw materials of the developed Pads

No.	Matrix (Cu)	Friction Modifier			Lubricant	
		Metal	Non-metal	Carbide	Carbon	the rest
H601	Bal.	10	7	3	10	3
H602	↑	10	5	3	15	↑
H603	↑	10	7	1.5	10	↑
H604	↑	15	7	4	10	↑

주) 숫자는 중량%(wt%)으로 표현됨

3.1 시제품의 제작

개발된 마찰재의 주요성분을 Table. 2에 나타내었다. 초기 개발된 DFM-H601은 마찰계수의 안정성과 재현성이 낮아 H602~H604를 추가로 제작하였는데, H602는 무기물량을 줄이고 상대적으로 카본 량을 증가시켰다. H603은 카바이드 량만 약간 감소하였으며, H604는 금속분과 카바이드 량을 모두 조금씩 증가시켰다.

제조공정은 적정 분말을 혼합, 성형하고 보강 컵과 성형체를 조립한 후 900℃ 이상의 온도에서 가압소결을 실시하였다. 가압소결은 환원성 혼합가스 분위기에서 실시하였다. 제작된 소결체 스티드의 물리적 성질은 Table 3과 같다. 카본이 많이 첨가된 H602의 경우 밀도와 경도가 상대적으로 낮았으며, 반면 카바이드 량을 줄인 H603은 경도가 약간 상승하였다.

Table 3. Physical properties of the developed pads

No.	D (g/cm ³)	Hardness (HRR)		
		center	edge	bottom
H601	5.16	82	80	86
H602	5.06	78	79	74
H603	5.19	87	89	91
H604	5.12	84	84	87

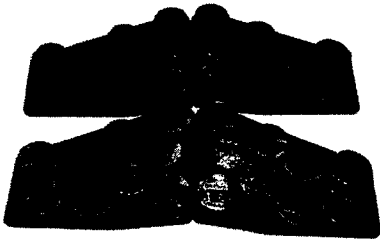


Fig 2. Developed sintered pads

Fig 3. Micro-structure of DFM-H603

제작한 개발 소결재 pad의 형상은 Fig 2와 같으며, H603의 전자 현미경 조직사진은 Fig 3에 나타내었다. 여기서 흰색으로 관찰되는 것은 무기물 마찰 조정제이며, 검은색으로 보이는 것은 고체 윤활제이다. 전자 현미경 사진으로 배율은 약 31배이다.

3.2. 다이نام오 시험 평가

3.2.1 시험 방법

Fig 4는 개발된 소결재 pad의 마찰특성 평가를 실시한 300km/h급 다이نام오 시험기이다. 마찰 특성의 평가는 "GEC Alsthom ST 19-225-933 Appendix #1"의 성능검사 (Performance Test)에 준하여 실시하였으며, 이때 사용된 disk는 유진기공(주)에서 공급한 Cr-Mo-V강 소재의 Ventilated Type 이며 Fig 4에 조립된 상태의 disk를 나타내었다.

시험 순서 및 절차는 최고속도 300km/h 제동이 7(혹은 11) 차례를 포함되며, 총 31(혹은 47)회 제동하는 것으로 구성되어 있는데 앞서 Alsthom의 것과는 제동횟수가 조금 수정되었다. 이번 시험에서는 개발품의 성능비교를 위해 현재 고속전철용으로 사용되고 있는 A사와 B사의 Brake pad를 함께 시험하였다.

한편, 고속제동의 경우 Fig 5의 고속 제동 다이아모 시험기를 사용하여 이탈리아 "Poli"사에서 350km/h의 속도에서 제동하는 시험을 실시하였으며, 제동 조건은 제동 초속도 350km/h에서 기계제동만 사용된다고 가정하여 Load/brake-disk는 4ton으로 하였다. 역시 마찰 disk는 유진기공(주)에서 공급한 Ventilated Type을 사용하였다. Table 4는 제동 시험 조건에 따른 시험 변수들에 대하여 나타내었다.

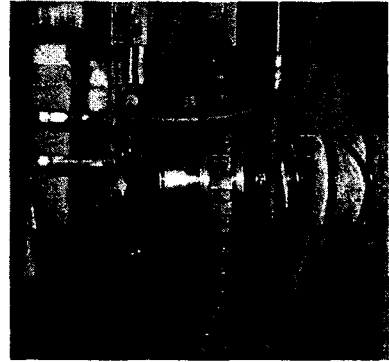


Fig 4. Brake assembly of the Inertia Dynamo-meter for 300km/h brake test at KOREA BERAL Co.

Table 4. Brake test parameter for the developed pad

Brake Mode	Load/disk	Inertia (kg.m ²)	Max. B-speed	Control Mode	Max. B-Energy
Normal Brake	4.0 Ton	792	300 km/h	Deceleration	13.9 MJ
High sped Brake	↑	↑	350 km/h	↑	18.9 MJ

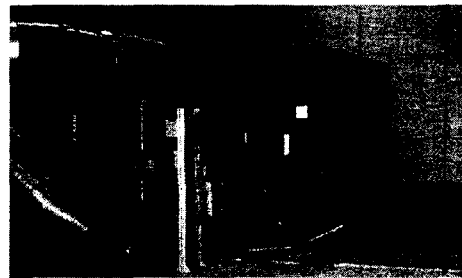


Fig 5 Dynamo-meter at "Poli" in Italy for 350km/h brake test

3.2.2 300km/h 시험 결과

Fig 6은 개발품과 비교하기 위해 A사의 brake pad를 시험한 결과를 나타내었다. 300km/h제동에서 마찰계수는 0.21~0.27 수준으로 낮은 값을 가지며, 안정성도 낮다. 160km/h제동에서는 0.31~0.35 수준이며, 각 Cycle에 대해 안정성과 재현성이 없는 것으로 판단되며, holding brake에서도 0.22~0.24 수준의 낮은 마찰계수를 나타낸다.

Fig 7은 B사의 brake pad 대한 것으로 초기 120km/h 제동을 제외하면 평균 마찰계수의 값이 0.30~0.42의 범위에서 변화하고 있으며, 특히 총 20차례의 160km/h 제동에서는 평균 마찰계수가 0.40~0.43을 유지하여 안정성이 높은 것으로 평가된다. 300km/h에서는 0.30~0.35의 값을 나타내어 속도가 높으며 마찰계수가 낮은 것으로 나타났다.

Fig 8은 H601에 대한 것으로 마찰계수가 300km/h에서 오히려 160km/h 보다 높게 나타나고 있는데 이것은 고속에서 기존의 마찰표면이 새로운 마찰표면으로 바뀌고 있는 것으로 생각되며, 상대적으로 높은 마모량을 나타내는 것으로 확인할 수 있다[8, 9].

Fig 9는 H602의 개선된 마찰특성으로 소결체에서 무기물량이 줄어든 반면 흑연 양이 증가되었는데, 마찰계수는 전체적으로 0.3이하로 낮게 나타나고 있다. 특히 160km/h에서 5번의 제동시험에서 마찰계수가 온도에 민감하게 변화함을 보여주고 있는데 재현성은 나타나지만 마찰계수의 안정성은 매우 낮은 재료이다.

Fig 10은 H603의 Test Sequence에 따른 속도와 마찰계수의 결과를 나타낸 것이다. H603은 300km/h에서의 마찰계수가 약 0.31~0.35로 가장 안정적이며, 또한 재현성도 뛰어나다. 160km/h제동에서는 0.39~0.40이며 각 Cycle에 대해 재현성이 있는 것으로 판단된다. 이러한 안정된 마찰계수를 얻기 위하여서는 안정된 산화피막이 형성되어야 하며[8, 10, 11, 12], H603의 경우 첨가 원소의 조

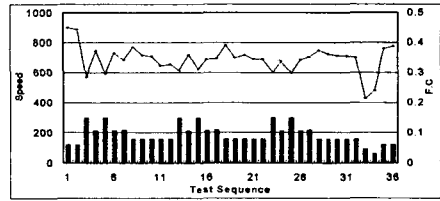


Fig 6 Friction coefficient of A Co.

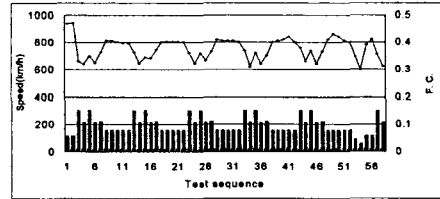


Fig 7 Friction coefficient of B Co.

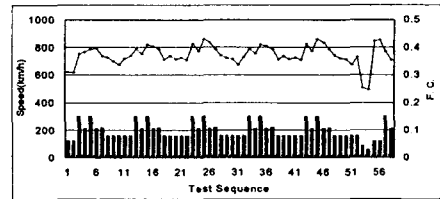


Fig 8 Friction coefficient of H601

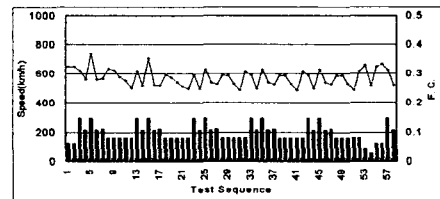


Fig 9 Friction coefficient of H602

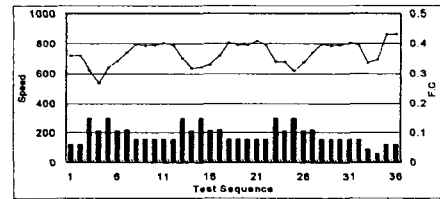


Fig 10 Friction coefficient of H603

성비가 160km/h의 제동조건에서 산화피막 형성이 가장 적합한 것으로 판단된다.

Fig 11은 H604의 Test Sequence에 대한 제동 속도와 마찰계수의 관계를 나타내었다. 고속(300 km/h)제동에서 마찰계수는 0.20~0.27 수준으로 낮고 160km/h 반복제동은 마찰계수가 0.30~0.36수준으로 올라가지만 전체적으로 마찰계수가 낮다. 속도별 마찰계수의 안정성이 있고, 재현성도 있다고 판단된다. 하지만 holding brake에서의 마찰계수는 0.21~0.24 수준으로 극히 낮게 나타났다.

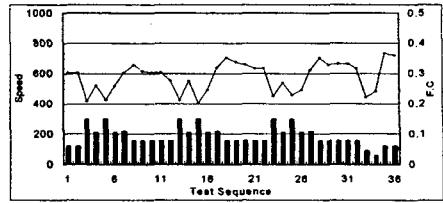


Fig 11 Friction coefficient of H604

시험한 6종류의 brake pad에 대해 마찰 계수 값의 절대값, 안정성, 재현성 측면에서 평가하면, B사의 Brake pad 와 DFM-H603 이 UIC 524.1에서 요구하는 마찰계수 값과 가장 잘 일치하고 있으며 마찰계수의 온도에 따른 안정성과 매 사이클마다 반복된 재현성도 상대적으로 우수한 것 같다.

개발된 pad에 대한 첨가 원소의 영향을 보면, 경질입자인 카바이드 량으로 인한 마찰특성 변화가 가장 큰 것으로 보이며, 현재의 조성에서 가장 적절한 카바이드 량은 약 1~2wt% 정도 인 것으로 추정된다[6].

3.2.3 고속제동 시험결과

DFM-H603에 대하여 비상제동 시험을 실시하였다. Test procedure는 (주)유진기공에서 제공한 것으로 전체 제동 순서는 앞서 “GEC Alsthom의 Appendix 1”과 유사하며 300km/h 제동 대신에 350km/h에서 50km/h 씩 감속도를 증가하며 제동하는 방법을 사용하였다.

Fig 12는 고속 제동 시험 결과로써 제동속도가 감소함에 따라 마찰계수는 점차 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 350km/h제동에서 마찰계수는 약 0.35수준, 160km/h제동에서는 0.40~0.45로 마찰계수의 안정성은 좀 떨어진다. 마모량은 300km/h제동과 비교하여 2.5배 많았다.

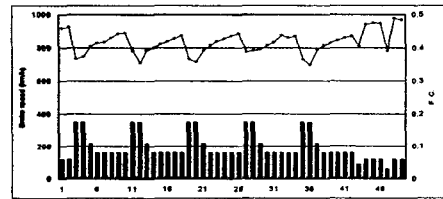


Fig 12 Friction coefficient of H603 under 350km/h brake test

3.2.4 고속 제동 disk면의 순간 온도

Fig 13은 disk에 장착된 Thermocouple (T/C)의 위치를 나타내었다. T/C(원으로 표시된 것)는 pad의 접촉중심부, 중심부에서 40mm 안쪽, 중심부에서 40mm바깥쪽으로 한 면에 3개씩, 총 6개(R1, R2, R3, L1, L2, L3)를 설치하고, 마찰면에서 깊이는 1mm로 하였다.

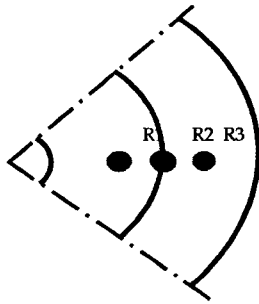


Fig 13 Thermocouple location of brake disk

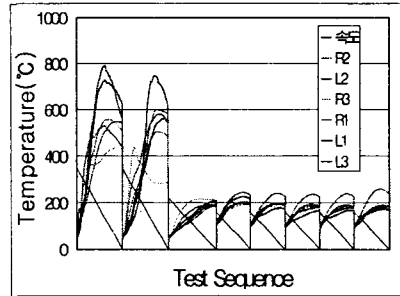


Fig 14 Temperature profile of brake disk under 350km/h brake test

Fig 14는 제동시의 속도에 따른 6개의 T/C에서 얻은 disk면의 온도를 1cycle에 대하여 나타낸 것이며, 처음 높은 2개의 peak는 350km/h 제동일 때, 다음 peak는 220km/h제동, 나머지 5차례의 제동은 160km/h 제동일 때의 disk면 온도이다. 220km/h이하의 제동속도에서는 모든 온도가 250°C이하임으로, disk에 아무런 영향을 미치지 않을 것으로 예상되나, 350km/h제동은 평균 550°C수준이지만, 특정부위의 온도가 순간적으로 800°C까지 이르게 된다. 이것은 Fig 13에서 R2~R3부위에서 나타나는 것으로 관찰되었다.

이것은 제동할 때 disk면이 평면을 유지하지 못하기 때문에 국부적인 disk/pad 접촉이 이루어졌기 때문으로 생각되어지며 특히 고온에서 disk가 평면을 유지하지 못하는 것은 ① disk의 불 균일한 마찰열 방출에 의한 변형(열변형 차이)과 ② disk를 반복 사용함으로 특정 부위에서 금속조직 변태에 따른 변형이라 판단된다. 실제 Poli社에서 실험한 disk 면은 심한 굴곡 생겼다.

또한, disk면이 pad와 균일하지 못하여, disk의 돌출 된 부위가 먼저 접촉하게 되고, 접촉 부위는 압력이 집중되어 마찰열이 급속도로 상승하게 된다. 따라서, 그 부위에서 disk의 형상이 변하게 되고 심한 마모가 발생하게 된다.

이때, pad도 과도한 마모를 일으키게 되는 것으로 추정된다. 만일 고온에서도 disk와 pad가 균일한 접촉이 이루어질 수 있다면, disk면의 순간온도는 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

한국형 고속전철에 적합한 소결재 pad를 개발을 위하여 현재 유럽에서 사용중인 pad에 대하여 bench-marking한 내용과 우리 연구팀이 자체 개발한 pad의 특성 결과를 상호 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현재 고속전철에 사용중인 소결재 pad는 업체별로 형상이 조금씩 다르며 품질 특성도 제품마다 달랐다. 마찰특성은 B사 제품이 가장 안정적이며, 재현성과 절대 마찰계수가 UIC code를 만족하였다.

- 2) 개발품으로는 DFM-H603의 마찰특성이 300km/h 이하인 모든 제동 속도에서 안정적인 마찰 계수 값을 나타내었고 재현성과 절대 마찰계수가 우수하여 B사 제품과 유사하였다.
- 3) H603에 대한 350km/h의 고속 제동시험에서 마찰특성은 상당히 우수하였으나, brake disk의 부분적인 과열현상이 관찰되어 향후 개선해야 할 문제로 나타났다.
- 4) 350km/h의 고속 제동에서 disk의 최대 평균 온도 값이 높게 나타나, 제동시스템의 마찰열 분산에 대한 고려가 필요한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. K. Gopinath 외 2, "Friction & Wear of Sintered Iron" Wear, 42, 1977, pp245-250
2. N.P. Sub, "The Genesis of Friction" wear, Vol.69, 1981, pp91-114
3. "Disc brake and disk brake linings(1)" International Union of Railway 1985.1.7, 3rd Edition
4. 정동윤, 김재곤, "고속전철용 제동 마찰재 개발" Vol.16, No.5, 1994, pp41-46.
5. 김기열 외4, "고속전철용 제동 시스템에 적용되는 마찰재료" 대한 금속학회 회보, Vol.11, No.2, 1998, pp134-143
6. 정동윤, 김기열, 조정환, "B4C첨가에 따른 동계 소결합금 마찰재의 마찰특성 변화에 관한 연구", vol.12, No.3, 1996, pp48-54
7. US Patent 3844800 "Friction Material"
8. N. A. Hooton, "Metal-Ceramic Composites in High- Energy Applications", Bendix Technical J. spring, 1969
9. T. Liu, S.K.Rhee, " High Temperature Wear of Semimetallic Disk Brake Pad", Wear, vol.46, 1978, pp231
10. T. Hanazawa, "Cermets for Friction Materials" Iron & Steel, vol.73, No.7, 1987, pp36
11. H. Youssef, C. Comte. 1989, "Consolidation of High Performance Friction Materials", MPR March, pp201-203
12. Samuel J. Rosenberg, "The Influence of Oxide Films on the Steels" 6th Annual convention of ASM

감사의 글

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업비로써 진행된 것이며, 산업자원부, 건설교통부, 과학기술부 등 관련 정부기관과 협조해 주신 여러 연구기관 들의 도움에 감사를 표합니다.