

고속전철용 제동 마찰재 개발

Development of the Friction Materials for High Speed Train.

정 동 윤, 김 재 곤
D. Y. Chung, J. G. Kim



정 동 윤
• 1955년 9월 생
• Tribology, 마찰재 설계
• 부교수, 육군사관학교 병기공학과



김 재 곤
• 1954년 11월 생
• 금속가공, 재료설계
• 부장, 대우중공업(주) 중앙연구소, 소재기술부

등 다양한 분야의 종합된 기술을 필요로 한다. 더욱이 철도분야의 기술이 외국에 비해 낮은 우리의 현실을 감안할 때, 고속전철사업이 국내 관련분야의 기술향상에 기여하는 바가 매우 클 것으로 기대된다.

고속전철에 요구되는 기술은 일반적으로 시스템 및 제어설계, 차량설계, 급전 및 집전, 제동장치 및 토목 등으로 크게 대별할 수 있다. 물론 이러한 기술중에서 국내의 수준으로 가능한 분야가 있으나 대부분의 첨단기술은 기술이전이 계획되어 있다. 그러나 기술이전이 많은 기술료를 지불해야 하는 것 외에도, 원천 기본기술 및 소모품에 대한 기술이전이 불가능하다는 문제점을 안고 있다. 따라서 궁극적으로 국내 기술력을 향상시켜서 기술의 자립과 아울러 차세대 고속전철에 대비해야만 하는 국가적 명제를 안고 있다고 보아야 할 것이다. 현재 우리나라에서는 한국 고속철도 건설공단이 중심이 되어서 고속전철의 도입에 따른 기술이전과 함께 자체 설계능력 배양을 위하여 노력하고 있으며, 과거처 및 상공부 등의 정부 부처에서도 국내기술의 향상 및 차세대 고속전철의 설계능력 확보 방안에 대하여 활발히 논의하고 있다.

고속전철은 재래식 철도에 비하여 2배 이상의 속력을 낼 수 있다. 그러나 그 속력은 언제든지 원하는 지점에 안전하게 정지할 수 있다는 제동

1. 서 론

개국이래 최대의 역사라고 하는 고속전철사업이 확정되어, 차종 선정과 아울러 기초 토목공사가 한창 진행중이다. 최근 우리나라의 실정은 제한된 도로망과 급격히 증가되는 자동차로 인해 각 고속도로 및 철도는 포화상태를 이루고 있다. 이에 따라 산업 물동량과 인원수송이 매우 어려운 실정이며 결과적으로 국제 경쟁력마저 떨어지게 하는 중요 요인이 되고 있다. 이러한 때에 결정된 고속전철사업은 다소 늦은 감이 있으나 매우 다행스런 일이다. 고속전철은 현대 기술의 종합체로서 기계, 전기 및 전자, 컴퓨터, 재료, 토목 기술

능력이 보장될 때 가치가 있는 것이다. 따라서 안전을 위한 고속전철의 제동장치는 그 중요성이 더욱 크다하겠다. 본문의 내용은 제동장치 중에서도 마찰을 통해 고속전철을 제동하는데 직접적으로 사용되는 마찰재의 기능과 요구성능을 살펴보고, 국내의 개발동향에 대하여 소개하고자 한다. 마찰재는 고속전철 부품 중 가장 소모성이 큰 핵심 부품이고 안전에 관련된 기능성 부품이므로 프랑스에서 기술이전을 기피하고 있다. 따라서 국내에서 자체생산이 이루어지지 않을 경우 요구하는대로 대가를 지불하고 구입해서 사용해야 하는 문제를 안고 있다.

현재 국내에는 자동차용 마찰재를 생산하는 업체가 3~4개사가 있고 철도차량용 마찰재를 생산하는 업체도 1~2개사가 있으나 대부분 외국과 기술제휴를 맺고 있는 상태이다. 그나마 대부분의 회사가 고속전철에는 적합하지 않은 유기질 마찰재를 생산하고 있어서, 이 분야의 연구가 더욱 시급한 실정이다.

2. 고속전철용 마찰재

고속전철은 시속 300km/h 이상으로 주행하므로 차량과 승객의 안전을 위하여 제동장치의 안전성, 신뢰성 및 정확성 등이 보장되어야 한다. 한국형 고속전철의 제동장치는 크게 기계식과 전기식으로 분류되며, 중고속 영역에서는 전기 브레이크, 저속에서는 기계식 디스크 브레이크가 상호 보완적으로 작동된다.¹⁾ 본문에서는 기계식에 사용되는 디스크 브레이크의 마찰재에 대하여 소개하고자 한다.

2.1 고속전철용 마찰재

마찰재란 상대면인 디스크와의 마찰에 따라 운동에너지를 열에너지로 변환시켜 대상체를 감속시키거나 또는 가속을 제어하는데 사용되는 재료이다. 이 때 발생한 열에너지는 주로 상대면에 흡수된 후 대기중으로 방출된다. 마찰재는 유기질, 소결 합금, 탄소-탄소 및 세라믹 등으로 크게 분류된다.

이중 유기질 마찰재는 요즘 자동차는 물론 대형

트럭 및 일반 철도차량의 마찰재로 널리 사용되고 있다. 이 재료는 기지(Matrix)에 필가제, 마찰 조절제 및 결합제 등 10여가지 성분으로 구성된 복합재료이며, 현재는 석면의 사용이 금지된 까닭에 대체 섬유를 찾는 연구가 많이 진행되고 있다.²⁾ 결합제로 사용되는 열경화성 수지(Phenolic Resin)는 크리이프 및 열저항성이 우수하고, 압축용력이 상당히 높으며(510MPa), 표면 응착력이 좋은 장점 등이 있다.³⁾ 그러나 고속전철의 경우, 제동시 발생하는 접촉면의 온도가 열경화성 수지의 분해온도에 접근하므로 결합력을 잃게 될 우려가 있어서 유기질 마찰재는 고속전철용으로 부적합하다고 하겠다. 한편 탄소-탄소 마찰재는 주로 군용 항공기용 마찰재로 많이 사용되는 등 제동특성이 우수하나 고가인 단점이 있다. 실제로 외국의 경우에도 이러한 이유등으로 인하여 고속전철 마찰재로서 금속 소결재를 채택하고 있다.⁴⁾

2.2 마찰재의 요구성능

고속전철용 마찰재의 일반적인 요구성능은 대략 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 고온에서의 충분한 강도
- 2) 높은 비열 및 열전도성(마찰열에 의한 온도상승을 최소화하기 위하여)
- 3) 일정한 마찰계수(사용조건의 변화에 관계 없이)
- 4) 내마모성

제동장치의 생명은 정상주행시는 물론 비상시에도 요구되는 제동거리에서 고속전철을 안전하게 정지시키는 데 있다. 그림 1은 TGV의 동력차와 대차에 장착되는 제동 마찰재를 보여주고 있다. TGV의 경우 동력차는 공간상의 문제로 인하여 답면제동(Shoe)을 하도록 되어있으며 대차는 Axle당 4개씩의 마찰재 패드(Disk Pad)로 제동한다. 정상제동시에는 일반적으로 전기 및 기계 제동이 동시에 작동하나 전원공급이 차단된 비상제동의 경우는 마찰재를 사용하는 기계제동에 의해서 제동력이 주로 제공된다. 기계제동에 의해서만 제동이 이루어진다고 할 때 요구되는 최대 제동력은 표 1과 같다.⁵⁾

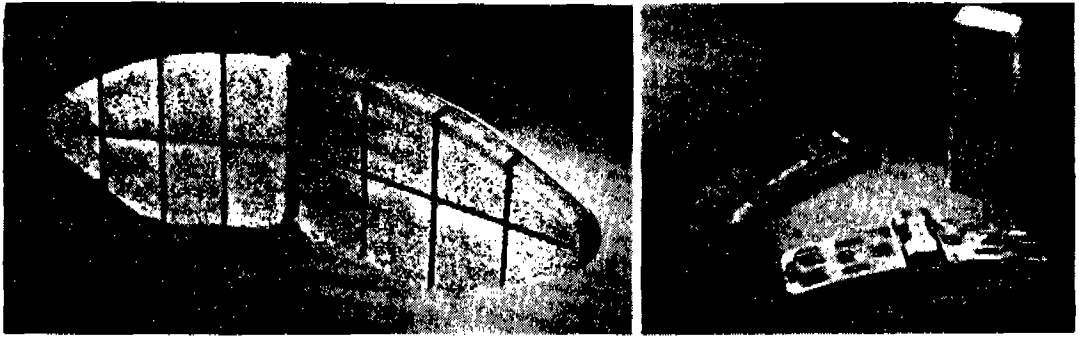


그림 1 고속전철용 제동마찰재

표 1 마찰재에 의한 최대요구동력

동 력 차		대 차	
속 도	최대제동력	속 도	최대제동력
V<160km/h	1,660daN	V<215km/h	4,280daN
V≥160km/h	590daN	V≥215km/h	3,210daN

그림 2는 비상시에 고속전철을 정지시키는 데 요구되는 제동력을 속도에 따라 나타낸 것으로서 답면 및 디스크형 마찰재에 의한 제동이 전체 제동력의 약 85% 이상을 차지하고 있음을 보여 주고 있다.⁶⁾ 300km/h 속도에서의 비상제동시 요구되는 감속도는 약 1.04m/s², 제동시간은 80초 그리고 제동거리는 3500m 이내로서 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 마찰재가 약 0.35의 마찰계수를 제동시간 동안 일정하게 유지해야만 한다.^{6,7)}

한편 TGV의 경우 평상시 및 비상제동시 마찰재가 흡수해야 할 에너지와 동력 및 마찰면의 온도 등이 표 2에 나타나 있다.⁸⁾ 표 2에서 보듯이 비상제동시 마찰면의 온도는 700°C 이상으로써 금속 소결 마찰재를 사용하여 제동하도록 되어 있다.

표 2 제동시 마찰재가 흡수하는 에너지 및 온도

구 분	비상시(300km/h)
에너지(kJ/kg)	400
동 력(kW/kg)	5
마찰면 온도(°C)	700이상

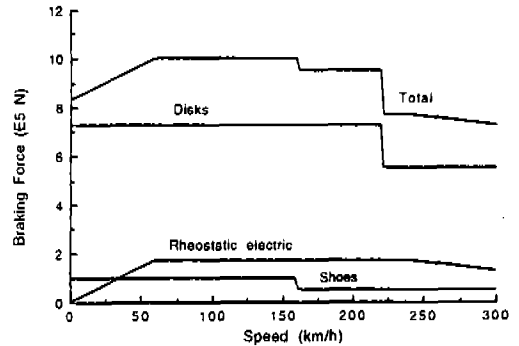


그림 2 고속전철의 속도에 따른 비상 제동력

고속전철을 정지시키는 데에는 전기 및 기계적 제동력 외에도 차륜과 레일간의 접촉력등이 고려되어야 한다. 마찰력이 점착력보다 클 경우, 바퀴가 구르지 않고 미끄러지므로 레일의 접촉면이 평평하게 깎여나가는 현상이 발생하게 된다. 따라서 마찰재에 의한 제동력은 상한이 점착력이고 하한은 제동거리로 제한되므로 신뢰도가 높은 재료가 요구된다.

3. 금속 소결 마찰재의 개발

금속 소결 마찰재를 개발하는데 있어서 가장 중요한 과제는 역시 재료의 성분과 제조 공정이다. 이 두가지 과제는 각 국가간의 노하우로서 기술이전이 된다고 하더라도 획득하기 어려운 내용들이다. 물론 일반적인 성분이나 제조공정은 알려져 있으나 정확한 성능을 발휘할 수 있는

마찰재를 생산하기에는 부족한 내용들이다. 즉 마찰재가 기계적 성질을 충분히 갖추고 있음은 물론 다양한 사용조건에 변화에도 불구하고 일정하고 안정된 마찰계수를 얻을 수 있어야 하는데 그 어려움이 가중되고 있는 것이다.

3.1 금속 소결 마찰재 성분

고속전철의 제동장치에 쓰이는 디스크가 주로 주철 또는 합금강 계열이므로 마찰재는 금속 전이현상 및 친화력등을 고려하여 대부분 동을 기지로 사용한다. 동계 소결 마찰재는 유기질 재료에 비하여 고온에서의 내열성, 내마모성 등이 좋고, 열의 양도체로서 상대 재료의 열 부하를 감소시키는 특성을 갖고 있다. 그리고 과부하에 의해 열적 손상이 발생하더라도 유기질 재료처럼 누적되지 않아서 열이력 후 마찰계수가 떨어지는 페이드 현상이 적다. 이러한 장점에 반하여 재료의 탄력성이 작아서 균일한 접촉면의 유지가 어렵다는 단점이 있다. 또한 동계 소결재료가 일반적으로 마찰계수는 다소 낮지만 고속전철과 같이 마찰속도가 높은 경우 열 부하가 증대되므로 마찰재로서 동계 소결재료의 사용은 적합하다고 하겠다. 기지 이외의 성분으로는 마찰조절제로서 금속계와 아울러 최근에는 세라믹 계열의 금속 산화물, 탄화물 및 질화물 등이 사용되고 윤활제로서는 납 등의 금속이나 비금속인 흑연, 2황화몰리브덴(MoS₂) 등이 사용된다. 일반적으로 소결 마찰재는 약 5가지 이상의 성분으로 구성된 복합재료로서 이중 기지는 약 60% 이상, 마찰조절제는 약 10~20%, 그리고 기타 윤활제가 10~20% 정도를 차지한다. 일본 신간선의 마찰재는 동을 기지로 하고 주석 3~6%, 몰리브덴 3~6%, 세라믹(SiO₂) 3~6%, 흑연 5~10% 그리고 납을 5~10% 함유하고 있다.⁴⁾

각 성분의 중량비가 1~2% 변화함에 따라 마찰 및 마모특성이 변하는 것은 물론 각 성분의 입자의 크기에 따라서도 많은 영향을 받으므로 고려해야 할 변수는 엄청나다 하겠다. 기지금속은 마찰재의 강도유지와 마찰 및 내마모의 기본 기능 이외에도 마찰재의 보강판(주로 컵 또는 보강강판형태)과의 결합을 이루는 기능을 하고 있다.

또한 소량의 아연(Zn)이나 주석(Sn)이 첨가되는데 이것은 낮은 용점의 금속으로서 소결 과정에서 액상을 형성하므로 소결을 촉진시키고 나아가 기지에 대한 금속간 화합물이나 합금화 효과를 기대하기 때문이다. 이러한 효과는 기지에 강성을 부여하고, 마모입자가 상대면과의 응착을 일으키는 것을 방지함으로써 마찰재 및 디스크의 마모를 줄이는 보조적인 역할을 한다. 마찰조절제는 마찰면의 온도가 상승되더라도 마찰계수를 유지할 수 있도록 하며 응착 또는 전이된 마모입자를 마찰면 밖으로 제거해내는 역할을 한다. 윤활제로 쓰이는 저용점의 납(Pb)은 금속 기지와 용해도가 없고 연질 금속으로서 마찰면의 온도 상승에 의해 녹아서 피막을 형성하며 마찰재 성분이 상대면으로 전이되는 것을 감소시키고 국부적인 온도상승을 방지하는 기능을 한다. 비금속 윤활제인 흑연과 2황화몰리브덴은 모두 층상구조로서 윤활특성이 좋으나 기능상으로는 매우 다른 면을 보이고 있다. 즉, 공기중에서 흑연은 하중이나 마찰속도가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 반면 2황화몰리브덴은 감소하므로 상호 보완적 기능을 한다.⁸⁾ 또한 흑연은 상온이나 500°C 부근에서 매우 좋은 윤활특성을 보이는 반면 2황화몰리브덴은 그 사이의 온도 즉 400°C에서의 윤활성능이 양호하다.^{4,8,9)}

또한 제조공정과 연계하여 생각해야 하겠으나, 실제로 세라믹이나 흑연 입자들은 금속 기지와는 상대적으로 잘 결합되지 못하므로 마찰이 진행되는 도중에 떨어져 나가게 되고 그 결과 마찰계수가 불안정해지며 마모율이 급격히 증가되기도 한다. 아울러 마찰재의 성분을 선택할 때에는 각 성분의 열적특성도 신중히 고려해야 한다. 왜냐하면 마찰면에서 발생하는 열이 잘 방출되지 않거나 국부적인 열점(Hot Spot)을 생성하게 되면 심한 경우 반복하중에 의해 디스크의 미소 크랙이 발전되어 깨어지기도 하기 때문이다.

3.2 소결 마찰재 제조공정

소결 마찰재의 성분이 결정되었다 하더라도 제조공정이 정밀하게 이루어져야만 마찰재로서의 기능을 발휘할 수 있게 된다. 일반적인 제조

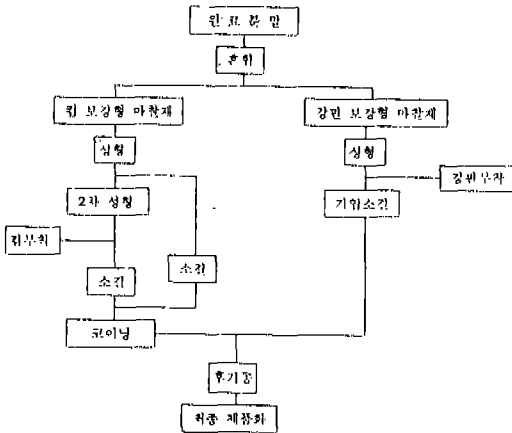


그림 3 소결 마찰재 제조공정도

공정이 그림 3에 나타나 있다.

원료분말은 혼합기 등을 이용하여 혼합하게 된다. 그러나 세라믹(SiO₂)이나 흑연등과 같이 비중이 작은 성분을 직접 혼합하면 잘 분포되지 않고 자기들끼리 응집현상이 발생하여 최종 제품에도 많은 영향을 미치게 되므로 혼합전 특수 처리를 해야한다. 한편 비중이 큰 납성분 등은 제조과정에서 편석을 일으킬 염려가 있으므로 광물성 터어빈 유 등과 함께 섞어서 혼합하기도 한다. 성형시에 가장 중요한 점은 가압 중에 밀도 분포를 균일하게 유지해야 한다는 것이다. 소재 면의 밀도는 마찰 및 마모특성에 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러나 1축 또는 2축으로 압축 성형할 경우 외부 압력이 혼합재 내부로 전달되면서 분말 입자 사이에서 발생하는 마찰저항 때문에 균일한 밀도를 얻기란 매우 어렵다. 따라서 최근에는 HIP(Hot Isostatic Pressing) 성형법이 많이 사용된다. HIP 성형법을 이용할 경우 밀도의 개선 이외에도 편석을 제거하고, 조밀하고 등방성을 갖는 재료를 생산할 수 있으며 소결시간과 소결온도를 감소시키는 효과가 있다. 소결 마찰재 생산공정에서 Hot-Forging에 의한 것보다 HIP에 의해 생산된 재료가 마모특성이 많이 개선된 것으로 보고되고 있다.⁵⁾

동계 소결 마찰재는 약 750-900°C에서 소결한 후 후가공 공정을 거쳐 최종 제품화 된다. 제조 기술은 가압소결, 확산접합 등 비교적 고도의

기술을 요하는 것부터 전기도금, Blanking에 이르기까지 다양하다. 이러한 공정 변수를 결정하는 것도 마찰재의 성분을 결정하는 것만큼 노하우를 찾기위한 많은 연구가 요구된다.

4. 연구개발의 진행 및 결론

고속전철에 소요되는 마찰재의 획득방법으로는 직수입, 기술제휴를 통한 협력생산 그리고 자체개발 등을 들 수 있다. 한국형 고속 전철의 경우 기술격차를 줄이기 위하여 초기에는 기술제휴를 통한 협력생산이 바람직하나 기술이전을 기피하고 있는 실정에서는 자체개발이 필수적이라 하겠다. 나아가 호남 고속전철 및 차세대 한국형 고속전철을 대비하고 국제적 경쟁력을 갖추기 위해서는 시간과 경비가 들더라도 기술력 확보에 만전을 기해야 할 것이다.

소결 마찰재에 대한 국내 기술수준을 돌아볼 때 이미 항공기용 소결 마찰재의 개발 및 생산을 통하여 많은 기술과 경험이 축적되어 있다.⁹⁾ 그러나 고속전철의 제동은 항공기의 제동기구 및 사용 환경과는 다소 다르며, 앞서 본문에서 언급한 바와 같이 마찰재의 조성과 제조공정 관리 등 개발에 따른 많은 난제들이 있다.

이를 위해서는 정부의 지원과 아울러 산학연의 유기적인 협조와 공동연구가 병행하여 추진되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 김원두, 함동호, 1994, "고속전철의 제동장치 기술개발", 대한기계학회지, Vol.34, No.6, pp.446-453.
2. 정동윤, 1994, "비석면-케블라 마찰재의 제동 특성 연구", 한국자동차공학회 논문집, Vol.2, No.5, 9월호 게재예정.
3. B.Bhushan, B.K.Gupta, 1991, "Handbook of Tribology", McGraw HILL pp.13.80-13.82.
4. 花澤 孝, 1987, "摩擦用 のサーメット材料", 鐵と鋼, 第7號, pp.786-795.
5. H.Youssef, C.Comte, 1989, "Consolidation of

- High Performance Friction Materials”, MPR March, pp.201-203
6. GEC Alsthom 제안서, 7.5.1-8.3.4
7. TGV 기술사양 요약, pp.5-6.
8. Donald H.Buckley, 1981, “Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication”, Elsevier Scientific Publishing Co., pp.573-617.
9. 김기열, 이범주, 김재곤, 정동윤, 1994, “고체 윤활제 첨가에 따른 Cu-Base 소결 마찰재의 마찰특성”, 한국분말야금학회