

마찰과학의 결정체 ‘브레이크용 마찰재’

글 | 장 호 _ 고려대학교 신소재공학부 교수 hojang@korea.ac.kr

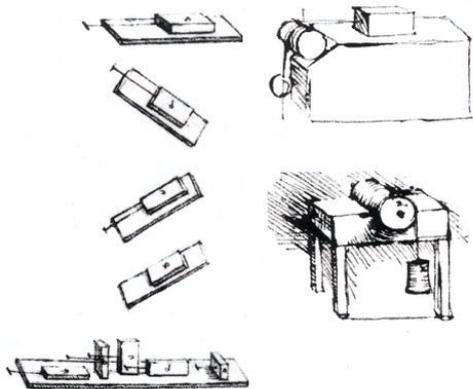
마찰현상에 대한 이해가 인류의 발전에 미친 영향은 아무리 강조해도 지나치지 않는다. 이는 우주에 존재하는 모든 에너지 중 약 70%가 마찰현상으로 사라지며, 우리는 에너지가 마찰에 의해 다른 에너지로 변환되는 경로를 조절함으로써 생활에 필요한 다양한 현상을 구현하고 있기 때문이다. 마찰현상의 이해 및 마찰계수의 조절이 없이는 원시시대 부싯돌의 이용에서부터 스트라디바리우스 바이올린의 아름다운 선율, 그리고 슈마허의 포몰러 윈(F-1) 자동차 경주가 불가능하게 된다. 따라서 이러한 마찰현상은 15세기말에 레오나르도 다빈치가 ‘코덱스 아틀란티쿠스’에서 과학적으로 접근하는 방법을 소개하기 훨씬 이전부터 이미 고대 인류에게는 가장 유용한 현상이자 큰 걸림돌로 받아들여졌을 것이다. 그러나 마찰현상에 관한 학문적 접근은 17~18세기에 이르러서야 아몬턴과 쿨롱에 의해 체계적으로 진행된다. 아몬턴은 마찰법칙을 정리하였으며, 쿨롱은 최초로 정마찰과 동마찰에 대한 개념을 도입하였다.

마찰·마모연구 투자로 GNP 1% 손실 방지

한편 마찰에 수반되어 나타나는 마모현상은 마찰현상에 비해 원인 및 기구가 복잡하여 20세기 들어선 이후에 과학적인 접근이 시

도되었다. 그러나 마모현상에 대한 관심은 우리가 일상생활에서 사용하는 다양한 연장뿐 아니라 공업적으로 사용되는 기계류의 수명을 결정하므로 이를 저감시키기 위한 노력은 근대 산업 발달의 역사와 맥을 같이 하고 있다. 따라서 마찰 및 마모현상 연구의 궁극적인 목표 중의 하나는 미끄럼시 수반되는 마찰력과 마모의 감소로 표현하기도 한다. 특히 마모는 경제적인 손실과 직결되며 이에 대한 근본적인 원인을 밝혀내기 위한 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 영국에서 1966년도에 발간된 기념비적인 요스트 보고서에 의하면 마찰 및 마모현상에 대한 몰이해에 따른 경제적인 손실은 선진국의 경우 국민총생산(GNP)의 약 4%에 이르는 것으로 보고하고 있다. 또한 1976년에 발간된 또 다른 보고서에 의하면 마찰마모 연구 투자를 통하여 약 1%의 GNP 손실을 방지할 수 있으며, 이는 투자대비 약 50배의 효과가 있는 것으로 발표하고 있다.

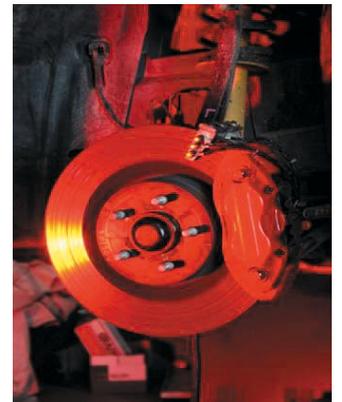
마찰현상을 체계적으로 연구하는 학문은 그리스어 어원을 따라 ‘트라이볼로지’라고 지칭하며, 특별히 이를 우리말로 대변할 만한 통일된 용어가 없어 영문 명칭을 그대로 사용하거나 종종 마찰마모공학 또는 마찰 및 윤활공학으로 불리기도 한다. 트라이볼로지는 그 학문적 정의에 따르면 ‘미끄럼운동을 하면서 상호작용을 하는 표면에 관한 과학과 기술’로 표현되며, 미끄럼계면에 수반되는 현



Codex Atlanticus: 레오나르도 다빈치가 시행하던 마찰시험장비의 개략도. Codex Atlanticus는 다빈치의 과학적 실험 기록을 그림과 함께 수록한 책을 말한다.



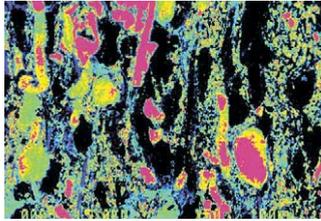
자동차의 전륜제동장치의 모식도



자동차의 전륜제동장치의 사진



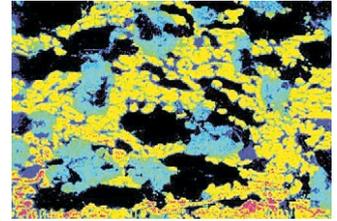
일본 도요타의 렉서스에 사용되고 있는 마찰재 1



마찰재 1을 고배율에서 성분분석한 결과, 각각 다른 색은 다른 원료를 나타낸다.



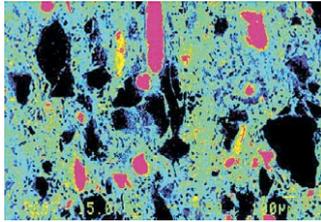
미국 GM의 캐딜락에 사용되고 있는 마찰재 2



마찰재 2를 고배율에서 성분분석한 결과, 각각 다른 색은 다른 원료를 나타낸다.



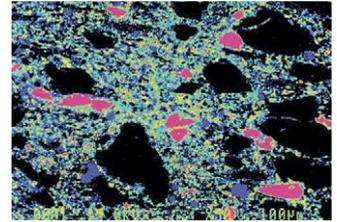
현대자동차의 소나타에 사용되고 있는 마찰재 3



마찰재 3을 고배율에서 성분 분석한 결과, 각각 다른 색은 다른 원료를 나타낸다.



미국 포드자동차의 토러스에 사용되고 있는 마찰재 4



마찰재 4를 고배율에서 성분분석한 결과, 각각 다른 색은 다른 원료를 나타낸다.

상이 매우 복잡하여 정확한 현상을 이해하기 위해서는 물리, 화학, 응용수학, 역학, 열전달, 유변학, 재료과학, 운할공학 등의 다양한 학문분야가 필요한 대표적인 융합학문이다.

트라이볼로지 연구는 미끄럼이나 구름이 수반되는 기계요소 디자인에 필수적이며, 마찰력의 조절을 통해 기능을 성취하는 경우와 마모를 조절하여 기능을 성취하는 경우로 나뉜다. 전자의 경우는 마찰재, 클러치, 구동바퀴, 볼트, 너트와 같이 최적 마찰계수의 크기가 비교적 높은 경우이며, 후자의 경우는 연필, 기계가공, 연삭 등과 같이 마모를 통해 목적을 성취하는 경우다. 그러나 엔진, 기어, 베어링, 캠, 시일 등의 대부분의 기계류의 경우에는 마찰 마모를 최소화하기 위해 트라이볼로지 연구를 수행한다.

복합재료에 페놀수지 섞어 성형 후 열처리

마찰현상을 이용한 다양한 부품소재들 중 가장 변수가 많고 체계적으로 접근하기 어려운 대상을 꼽는다면 많은 트라이볼로지 관련 연구자들이 자동차 브레이크용 마찰재를 거론한다. 이는 브레이크 제동시 다양한 온도, 습도 및 압력조건 범위에서 마찰재가 사용되기 때문이다. 이러한 특수한 조건에서 제동력을 유지하고, 또한 마찰계면에서 소음 및 떨림을 야기하지 않는 제품을 개발하기 위해 마찰재는 많은 원료를 포함하는 복합재료로 발전되기 시작하였으며, 이 때문에 마찰재 개발은 종종 검은 예술로 잘못 알려져 있다.

마찰재에는 흑연, 고무분말, 캐슈 외피분말, 암면, 케블라 펄프, 금속분말 및 금속섬유 등 10가지 이상의 다양한 재료를 포함하고 있으며, 페놀수지를 결합제로 사용하여 성형한 후 열처리를 거쳐 제조한다. 1990년대에 본격적으로 시작된 석면규제 이후 현재 국내시장에서 사용되고 있는 비석면 마찰재는 크게 강철섬유를 포함

하고 있지 않은 논스틸 마찰재와 강철섬유가 내재되어 있는 로스틸 마찰재로 크게 구분된다. 국내의 시장 대부분을 이 두 종류의 마찰재가 점유하고 있으며, 로스틸 마찰재는 주로 유럽형 자동차에, 그리고 논스틸 마찰재는 일본 및 미국의 자동차에 사용되고 있다. 따라서 국내 자동차회사는 같은 차종이라도 수출지역 운전자들의 운전습관에 따라 각각 다른 마찰재를 적용하고 있다. 과거에 많이 사용되던 금속성 마찰재는 현재 철도차량의 마찰재에 주로 사용되고 있으며, 자동차 적용시 디스크 공격성 및 잦은 소음 등의 문제 때문에 시장점유율이 매우 저조한 상태다.

일반적으로 마찰재의 제동성능은 제동거리 및 제동시 수반되는 소음빈도 및 떨림의 정도로 표현된다. 이러한 현상은 대부분의 운전자들이 쉽게 감지할 수 있으며 그 때문에 소비자들이 가장 쉽게 불만을 토로할 수 있는 것이기도 하다. 운전자들은 제동시에 이러한 이상현상이 발생하면 우선 브레이크에 장착된 마찰재(라이닝)를 의심하게 된다. 이는 마찰재가 제동시 운동에너지를 마찰에너지로 전환시켜 자동차의 속도를 감속하는데 가장 직접적인 역할을 담당하기 때문이다. 물론 브레이크의 성능이 마찰재에 의해서만 결정되는 것은 아니다. 자동차용 브레이크 장치(어셈블리)는 디스크와 캘리퍼 등 여러 요소로 이루어져 있고 이들의 품질이 제동성능에 미치는 영향도 적지 않다. 그러나 일반적으로 브레이크 장치의 구성요소 중 마찰재는 차체 디자인을 변경하지 않고 비교적 쉽게 다른 재질로의 변환이 가능하기 때문에 자동차 제조회사뿐 아니라 소비자들은 마찰재의 개선을 통해 브레이크 성능향상을 도모하고 있다.

국내에서 주로 사용되고 있는 논스틸 및 로스틸 마찰재는 마찰 특성 측면에서 상이한 양상을 보여준다. 일본을 중심으로 개발된 논스틸 마찰재는 정속도 및 대면공격성 측면에서 우수한 특성을 나

타내고 있으며, 로스틸 마찰재는 제동거리 및 수명 측면에서 우수성을 보이고 있다. 일반적으로 로스틸 마찰재는 포함된 강철섬유의 높은 공격성으로 인해 상대제인 브레이크 디스크를 마모시켜 많은 분진이 생성되고 디스크의 수명을 단축시킨다. 따라서 대부분의 유럽 차종은 마찰재와 브레이크 디스크의 교환주기가 유사하다. 이는 논스틸 마찰재를 사용하는 경우 브레이크 디스크의 교환주기가 마찰재 교환주기에 비해 3~4배 긴 것과 대조된다. 따라서 운전자는 취향에 따라 두 가지 마찰재 중에서 선택할 수 있는 여지가 있다. 이러한 상이한 마찰특성을 비교해보면 논스틸(또는 로스틸) 마찰재의 장점은 로스틸(또는 논스틸) 마찰재의 단점이 되고 있으며, 최근에는 서로의 단점을 보완하고 장점을 극대화하는 융합형 마찰재를 개발하기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 이루어지고 있다.

차세대 하이브리드 마찰재 개발경쟁 치열

전경련이 분석한 부품소재 관련 국제경쟁력 자료에 따르면 현재 국내의 마찰재 기술은 선진국 대비 약 85% 수준으로 발표되고 있다. 이는 국내 마찰재 제조업체가 중소기업의 형태를 벗어나지 못하고 있으며 연구진들이 현업대응에 급급한 나머지 필수적인 마찰재 관련 기초연구에 매진하지 못하고 있는데 가장 큰 원인이 있다. 이러한 구조적인 모순을 극복하기 위해 국내 마찰재 제조회사들은 해외 선진 마찰재 업체로부터 기술계약을 통해 최고의 품질을 요구하는 국내 자동차 업계에 대처하고 있다. 현재 국내 마찰재 매출은 소규모 업체를 포함하면 약 3천억 원으로 추측되며, 자동차의 평균 성장률 11.4%를 감안하면 2010년에는 매출액이 5천억 원을 상회할 것으로 예상된다. 이러한 매출의 성장세는 기술이전료의 증가를 동반하며 통상 기술이전료가 매출의 2.5% 임을 감안하면 기술이전료로 해외에 지출되는 액수는 조만간 100억 원을 넘어설게 될 것이다. 또한 마찰재의 경우에는 기술이전의 조건으로 자사의 사용원료를 지정하기 때문에 제품가격을 결정하는데 가장 큰 요소가 되는 원소재의 선택이 자유롭지 못하여 대부분의 원료를 기술도입선에 의존함에 따른 무역수지 관점에서의 손실은 기술이전료 보다 더 큰 것으로 알려져 있다.

그 동안 국내에서는 마찰재 관련 연구를 주로 기업 자체에서 전담하였으며, 그에 따라 마찰재의 원료에 따른 마찰특성에 관한 과학적인 연구가 매우 적다. 이는 미국, 일본, 및 유럽에서 국가주도로 마찰재 연구센터를 지정하고 꾸준한 연구지원을 하고 있는 것과 사뭇 대조적이다. 자동차의 중추국인 미국은 미국과학재단의 지원

하에 남일리노이 대학에 마찰재 연구센터를 설립하여 이미 지난 15년간 체계적인 연구를 진행하고 있으며, 일본의 도쿄대학교와 인도공대, 그리고 영국의 브레드포드대학교와 스웨덴의 옘살라대학에서도 마찰재 관련 기초연구결과를 많이 도출해내고 있다. 이는 마찰재가 자동차, 철도, 항공기, 중장비, 가전제품, 및 엘리베이터 등의 다양한 수송기계

및 기전제품의 제동장치에 필요한 범용부품이기 때문이다. 특히 수송기계의 경우에는 제동중량 및 장착위치에 따라 각각 제동조건이 달라져 상이한 마찰특성이 요구되며 그에 따라 다른 소재가 사용된다. 따라서 다양한 온도, 압력, 속도의 조건에서 우수한 특성을 나타내는 마찰재의 개발은 고속철도용 마찰재, 항공기 및 군사무기용 마찰재뿐 아니라 최근 개발되고 있는 탄소-세라믹 브레이크용 마찰재의 개발에도 확대적용되어 기술수요에 대한 성장 잠재성이 매우 크다.

차세대 융합마찰재 기술의 핵심은 그간 여러 종류의 마찰재가 가지고 있던 장점들만을 극대화하기 위해 첨단 신소재의 적용과 그에 따른 제조기술의 혁신에 있다. 이와 더불어 새로운 마찰재의 개발은 기존에 사용되던 원료 중 친환경에 위배되는 중금속 원료 및 침상재료를 배제하여야 하기 때문에 차세대 마찰재 개발경쟁은 석면규제로 겪었던 1980년말에 나타났던 세계적 기술주도권 경쟁의 재현이 될 것으로 예상된다. 차세대 마찰재 개발에 관한 이러한 세계적 추세는 국내 마찰재 제조업계에는 기존의 틀을 벗어나 블루오션으로 나아갈 수 있는 절호의 기회이며 7조 원으로 추산되는 세계적인 마찰재 시장에 뛰어들어 마찰재기술의 메카로 발돋움할 수 있는 절호의 기회다. 이러한 마찰재관련 기술경쟁력의 확보는 국내 자동차의 국제경쟁력 향상에 결정적인 역할을 할 것이며, 나아가 하이브리드 마찰재의 기술을 전세계에 수출하여 기술이전을 통한 외화획득에 앞장서게 될 것이다. ㉔



고온에서 진행되는 브레이크 시험 사진 (온도가 800℃까지 상승한다)



글쓴이는 서울대학교 금속공학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 버지니아공대에서 박사학위를 받았다. 포드자동차연구소 연구원을 지냈으며, 고려대학교 미래기술육성센터 센터장을 겸임하고 있다.