

브레이크 마찰재용 고분자재료

손 태 관

1. 서 론

인류는 오래 전부터 마찰의 존재를 알고 있었으며, 마찰을 이용하여 불을 얻었고 윤활유의 이용으로 차륜 발명을 완성하였다. 산업 발전을 돌이켜 볼 때, 일면 마찰에 견딜 수 있는 우수한 재료를 얻기 위한 노력과 이를 최소화하기 위한 연구를 병행하여 왔다고 볼 수 있다. 특히 움직이는 동력장치에 있어서 마찰 마모는 그 기기의 효율과 수명에 직접적인 영향을 미친다.

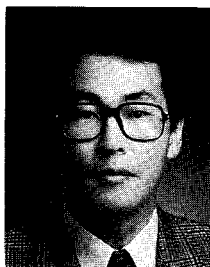
역사적으로 마찰의 기구학에 대하여 과학적으로 연구하고 기술한 사람은 이탈리아의 레오나르도 다 빈치(Lenardo da Vinci, 1452-1519)였다. 그는 「무게 2배인 경우의 마찰은 2배가 된다」는 사실과 접촉면적과 마찰의 영향에 대해 구체적인 기록을 남겼으며,¹ 이후 「마찰은 수직하중에 비례한다」는 마찰 제 1법칙과 「마찰력은 표면 접촉면적과는 무관하다」는 마찰 제 2법칙의 이론적 근거를 제시하였다. 또한 아몬톤(G. Amontons, 1663-1705)에 의한 재발견에서 「마찰력은 하중의 3분의1 정도이다」는 이론과 마찰계수의 개념을 도입하게 되었으며 100년후 프랑스의 쿨롱(G. Coulomb, 1736-1806)에 의하여 위의 제 2법칙을 확인하였다. 즉, 「마찰력(운동마찰의 경우)은 미끄럼 속도에 무관하며 정지마찰력은 운동마찰력보다 크다」는 사실을 발견하였다.

현대 마찰마모학은 동력원의 발달과 재료 발전에 수반하여 체계적으로 연구되어 왔으며 이 가운데 자동차산업의 발전으로 차량 고기능화, 고성능화에

따라 더욱 안전하고 완벽한 신뢰성을 부여하기 위한 제동장치부분과 마찰재료에 대한 전문적인 연구가 진행되었다.

자동차에 있어 제동장치는 움직이는 차량 속도제어 및 정지 목적으로 이용되며, 제동장치 대부분을 차지하는 마찰식 브레이크는 차량의 운동에너지를 마찰열 에너지로 바꾸고 이것을 대기로 방출시켜 정지 또는 감속작용을 한다. 이와 유사한 형태로 마찰 클러치는 수동 트랜스미션과 엔진사이에 설치되어, 마찰에 의해 엔진으로부터의 동력을 전달시키거나 차단하는 역할을 한다. 이와같이 자동차 제동장치에서 가장 주된 역할을 담당하는 마찰재료는 반복적인 미끄럼마찰과 큰 토크(torque)를 견디어야 하는 매우 가혹한 요구조건으로 특별한 기능을 갖추어야 한다.

최근 엔진 및 서스펜션(suspension)의 발달과 도로와 운전자의 다양한 습관 등에 의해, 브레이크에 요구되는 성능은 보다 다양하고 엄격해지고 있다. 이와같이 마찰재료의 요구조건은 마찰계수가 적당히 높고 속도, 압력, 온도, 물, 습도 등에 의한 마찰물



손태관

1986 영남대학교 공업화학과(학사)
1989 영남대학교 공업화학과(석사)
1996 영남대학교 공업화학과(박사)
1995~ 대구비대대학 자동차과
1997 겸임교수
1998~ 구미1대학 차량기계과 겸임교수
현재
1985~ 상신브레이크 기술연구소 책임
현재 연구원

Polymeric Binders of Brake Friction Materials

상신브레이크공업(주) 기술연구소(Tae-Kwan Shon, R & D Center, Sang-Shin Brake Ind. Co., Ltd. 1-37, Buk-Ri, Nongong-Eub, Talsong-Gun, Taegu 711-713, Korea)

성의 변화가 적어야 하며, 내마모성이 우수하고 충분한 열적, 기계적 강도와 디스크에 손상을 주지 않음과 동시에 열전도율이 좋아야 한다. 또한 자동차를 장기간 운행하지 않은 경우 및 물과 습기에 의한 요인으로, 마찰재와 상대재인 디스크에 부식을 야기시킬 수 있는데 이와 같은 환경에서도 본래의 물성을 유지할 수 있어야 한다.

2. 고분자 마찰재료와 트라이볼로지(Tribology)

자동차 제동장치에 사용되는 브레이크 마찰재료는 운동에너지를 마찰에 의한 열에너지로 변환시켜 차량의 감속 또는 정지작용을 한다. 브레이크 작동시에 발생된 다량의 열에너지는 자동차의 크기나 차량 속도에 의해서 결정되며, 그 에너지량은 마찰면과 마찰재료 자체에 상당량의 온도로써 영향을 미친다.

따라서 마찰재료의 우수한 마찰력과 긴 수명을 확보하기 위해서는 열적 안정성이 매우 중요하며, 이를 위해 다양한 특성의 여러가지 복합재료가 활용되고 있다. 자동차용 마찰재료는 드럼 브레이크의 브레이크 라이닝과 디스크 브레이크의 디스크 패드에 사용되며, 이들 대부분은 유기계 폴리머를 결합재로 사용하여 각종의 섬유, 무기 및 무기충진제로 된 복합재료로 구성되어 있고, 이것을 유기계 마찰재료 분류한다.¹⁻³ 대분류로 탄소/탄소복합재료(carbon/carbon composite)나, 세라믹(cermet)계 세라믹(ceramic), 동(copper)계 소결금속 등으로 나눌 수 있으며, 자동차용 마찰재료와 고속철도 및 항공기용 브레이크 등으로 특수한 용도에 사용되고 있다.

2.1 유기계 브레이크 재료

2.1.1 조 성

유기계 마찰재료는 기본적으로 섬유(fiber), 결합재(binder), 유기계 충진제(organic filler) 및 무기계 충진제(inorganic filler) 등으로 구성된다.

2.1.1.1 섬 유

종래 마찰재료용 섬유는 대부분이 크리소타일(chrysotile)계 석면이 사용되었으며, 주성분은 규산 마그네슘($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)으로 내열성이 풍부하고, 열 전도율이 극히 낮아 마찰에서 발생한 열량 중 재료내부로 전달되는 것이 비교적 적어, 마찰재의 열적 변화를 최대한 막는 우수한 특성이 있다. 또한 석면은 섬유구조를 가지기 때문에 마찰시의 응력이나 진동 등에 견딜 수 있는 강도를 유지하고 있

으며, 저렴한 가격으로 얻을 수 있는 재료로 현재까지 널리 자동차용 마찰재료로 사용되고 있다. 그러나 1972년의 국제 암연구기구 주최의 의학 심포지엄에서⁴ 석면의 발암성 제거와 위해성이 밝혀짐에 따라, 여러 국가에서 사용을 금지하기 시작하였고, 이와같은 이유로 석면 대체재료의 개발이 활발히 이루어지기 시작하였다. 현재 유럽의 여러나라에서는 자동차용 마찰재료로 석면 사용을 금지하고 있으며, 미국의 경우, 석면 취급상의 작업환경 기준 규제치를 대폭 강화함으로써 사실상 석면 사용을 어렵게 하고 있다. 국내에서도 자동차 브레이크 마찰재료에 석면 사용규제가 점차 강화되고 있고 향후 사용이 금지될 전망이다. 또한 자동차의 고속화와 더불어 브레이크에 관한 요구 수준은 더욱더 엄격해지고 있으며 그 항목도 다양해 지고 있어, 석면을 사용하지 않는 브레이크 재료의 개발이 촉진되고 있다.

석면을 대체할 주 재료는 스틸섬유(steel fiber), 유리섬유(glass fiber), 암석섬유(rock wool), 세라믹 섬유(ceramics fiber), 티탄산칼륨 섬유(potassium titanated fiber), 탄소섬유(carbon fiber), 아라미드 섬유(aramid fiber), 아크릴 섬유(acrylic fiber) 등이 개발되어 있다. 하지만 아직도 많은 부분에서 석면을 대체하기에는 개선이 필요한 상태이다.

2.1.1.2 결합재

과거에는 아마인유나 동백유, 건조성 유지나 천연 고무, 합성고무 등의 고무류가 이용되었으나 모두다 내열성 문제로, 지금은 페놀수지(phenolic resins)와 같은 열경화성 수지(thermosetting resins)로 대체되어 있으며 그외 각종 내열성 폴리머 적용에 대한 연구가 진행중에 있다.

2.1.1.3 유기계 충진제

유기계 충진제로 가장 일반적인 것은 캐슈더스트(cashew dust)이다. 캐슈더스트는 캐슈넛셸오일(cashew nut shell oil)을 산 또는 알칼리 촉매로 가열 중합한 것에 알데히드류를 반응시켜, 경화 분쇄하여 만들어진 입자상의 물질이다. 이 캐슈더스트는 브레이크 재료의 댐핑(damping)특성을 증가시켜, 제동시 노이즈(noise)를 개선시키는 효과가 있으며, 마찰면에 안정한 막을 형성하여, 마찰계수 안정과 상온에서의 마모 개선에 이용된다. 또 타이어(tire)의 트레드(tread) 부분을 입자화한 분말과 무기분말을 배합한 고무입자 등이 같은 목적으로 사용된다.

2.1.1.4 무기계 충진제

무기계 충전제는 단순히 충전제나 보강재로서의 기능뿐만 아니라 여러가지 마찰성능에 밀접한 관계를 가지고 있다. 즉, 이황화물리브덴 등 고체윤활제는 마찰계수 조절에 유용하며, 구리나 황동 등의 금속분말은 브레이크 드럼이나 디스크 로터(rotar) 마찰면에 고착되어, 마찰면 밀착성 향상으로 제동 안정성과 대면 손상을 최소화하는 목적으로 이용된다. 그외 탄산칼슘(calcium cabonated), 소석회(slaked lime), 황산바륨(barium sulfide), 규산지르코늄(zirconium) 등이 이용되고 있다.

2.1.2 제조방법

유기계 브레이크 재료의 대표적인 제조법은 건식방법(dry mixed type) 또는 수지몰드(resin mold)로 불리는 공법을 이용한다. 이 방법은 분말상의 결합재를 사용하여 섬유나 그외 기타 재료를 건식으로 혼합하고 이와 대비되는 습식방법(wet mixed type)은 결합재를 액상 폴리머나 용제로 희석한 폴리머와 그외 원재료를 습식상태에서 혼합하여 압출 성형 또는 카렌다(calendar) 성형하는 것이다.

2.2 자동차용 브레이크 재료의 요구성능

자동차용 브레이크 재료에 요구되는 성능은 기본적으로는 마찰계수가 적당히 높고 미끄럼속도, 압력, 온도, 물 등에 의한 변화가 적어야 하며, 온도에 따른 마찰계수의 변화가 적고 기계적 강도가 상온에서는 물론 고온에서도 충분하여야 하며, 마찰대면을 손상하지 않아야 하는 특성을 가지고 소음, 저터 등 마찰진동을 최소화시켜야 한다. 또한 마찰재료 자신이 마찰열에 견딜 만큼의 내열성이 필요하고 초고속 차량용이나 부하가 큰 트럭 등의 용도에도 탄력적으로 대응할 수 있어야 한다.

3. 고분자재료

3.1 결합재료 고분자의 변천

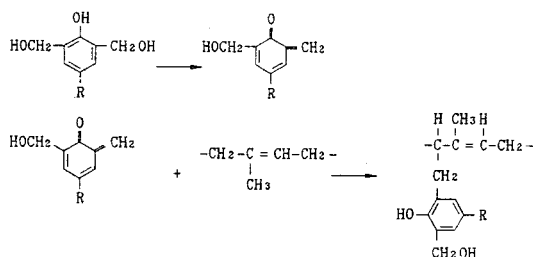
마찰재료의 결합재로서 옛날에는 로진(rosin)이나 아교 등 천연 고분자재료가 사용되어 왔으나, 모두 내열성이 부족하여 곧 건성유로 대체되었으며 지금까지도 중합 아민유나 동백유가 비교적 부하가 가벼운 브레이크 재료로 이용되고 있다. 건성유가 결합재로서 기능을 하기 위해서는 공기 산화에 의한 3차원화가 필요하며 건성유를 결합재로 한 브레이크 재료는 건성유와 기타의 재료를 혼합하여 카렌다롤로 압출기에서 성형한 후 신선한 공기를 다량 주입하여 열처리 노에서 경화시켜 제조된다. 이러한 건성유의 사용은 현재 천연고무나 SBR(styrene-butadiene rubber) 등의 합성고무로 대체되었으며, 고

무류를 결합재로 한 마찰재료는 일반적으로 내열성이 떨어지기 때문에 활용범위가 제한되어 있다.

3.2 현재 이용되는 고분자

현재 생산되고 있는 브레이크 마찰재료는 대부분 결합재로 페놀수지를 채용하고 있다. 페놀수지는 약 100년의 역사를 가진 가장 오래된 수지로 내열성이나 성형 가공성이 우수하고 가격도 비교적 저렴하여 널리 이용되는 우수한 재료이다. 고분자에 따라 마찰재료의 결합재로서 섬유기재나 기타의 혼합물 성형가공시 기계적 강도 확보 목적으로 함께 사용된다. 또한 마찰마모 거동이나 소음, 브레이크 진동 등의 특성은 고분자의 특성에 결정적인 영향을 받는 이유로 페놀과 포르말린으로 된 스트레이트(straight) 페놀수지에 변성 화합물을 부가시켜 성능이 향상된 여러가지 페놀수지가 널리 이용되고 있다. 예로서 고무류나 캐슈넛넬오일, 건성유 등과 같이 이중결합을 가지는 고분자와 반응한 페놀수지는, 스트레이트 페놀수지의 결점인 인성이나 탄성이 개선된 것으로 소음이나 진동흡수 등의 특성이 있고, 마찰계수를 다소 향상시키는데 활용되고 있다.

페놀수지와 불포화 화합물과의 화학반응에 대해서는 단지 콜로이드(colloid)적으로 상호 분산되고 있다는 학설과 어느 정도 화학반응이 발생한다는 주장이 있다.³ 고무류와의 반응에 대해서는 메틸을 페놀(methylol phenol) 분자내의 탈수에 의하거나, 디벤질 에틸(dibenzyl ethyl)의 분열에 의해서 키네메치드가 생성되고 이것이 고무분자의 이중결합과 반응하여 크마론 환이 생성된다.⁴ 또한 별도 생성된 키네메치드가 고무분자의 이중결합에 이웃한 탄소원자에 부가하여 고무분자를 가교시키는 반응은 다음과 같이 진행된다.

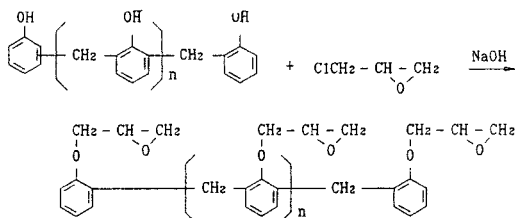


건성유와 페놀수지와의 반응은 아래와 같으며 o-메칠올 페놀(ortho-methylol phenol)이 불포화 탄소결합과 반응하여 크마론 화합물을 생성한다.⁶ 또 동백유와 페놀을 산촉매로 가열하면 페놀이 이중결

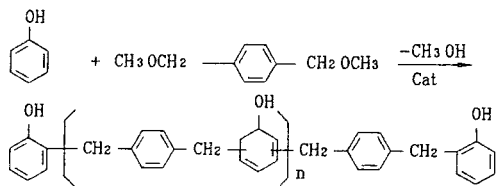
합에 부가한다는 설도 있다.⁷



페놀수지의 내열성 향상 등을 목적으로 페놀수지의 OH기에 다른 원자단을 반응시킨 수지도 실용화되고 있다. 예로서 에폭시화가 있으며 에폭시제로서는 에피크로로히드린(epichlorohydrin)이나 폴리글리시딜에테르 등을 사용하며⁸ 반응은 아래와 같이 진행된다.



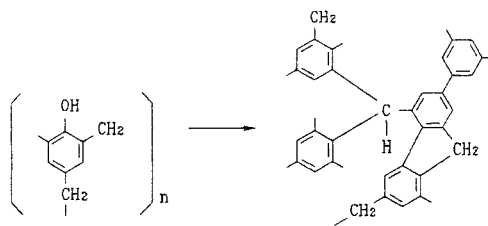
또한 페놀성 OH에 배치시키는 방법으로는 아래와 같은 구조로 2가나 3가의 금속이온에 의한 킬레이트 형성이 일반적이다. 한편 페놀수지의 페놀성 OH기의 농도를 축소시킨 상태에서 페놀과 α,α' -디메틸시발라크실렌을 프리델크라후프트형 촉매하에서 반응시킨 고분자도 사용된다.



3.3 고분자 재료의 트라이볼러지

마찰재료의 결합재로서 고분자를 선택할 경우 내열성 외에 두가지의 특성이 고려되어야 한다. 그 하나는 열분해에 의해 생성되는 휘발성분의 양과 성질이다. 브레이크 재료의 페이드(fade) 현상은 마찰열에 의한 브레이크 재료의 분해가스 발생에 의해 나타나는 것으로,¹⁰ 다른 성분이 열분해한 후 잔류한 고분자의 성질에 기인하는 것으로 판단된다. 폴리머가 열 분해하여 안정한 구조를 만들어 내는 것이 브레이크 재료의 마찰계수 안정성이나 긴 수명을 얻는데 중요하다. 이와 같은 성질은 고분자의 화학구조가 지배적 인자이고 여러 종류의 고분자에 대해서 검토한 결과 페놀수지가 특히 우수한 성질을 구비하

고 있음이 조사되었다.¹¹ 페놀수지에 앞서 언급한 두 가지의 성질에 대해서는 우주 로켓의 대기권 재돌입시 선체보호용 고분자에 요구되는 성질과 공통된 것이 있고 NASA에서도 심도있게 연구되고 있다.^{12,13} 브레이크 재료의 마찰면에 가까운 표층의 마찰에 의한 화학변화를 조사한 보고에 의하면¹⁴ 마찰전에는 통상의 페놀수지 경화물로 존재하는 것이 마찰 후에는 페놀수지가 OH를 잃고 아래와 같이 방향족 탄화수소로 변화된다.



이와 같은 현상은 통상의 페놀수지 경화물의 열분해 반응과는 현저하게 다르기 때문에 마찰에 의한 특별한 반응으로서 충분한 연구대상이 된다고 판단된다. 이 결과 또 단순한 공기중의 열분해 재료를 적절한 고분자로 선택하는 것은 대단히 안전한 것임을 알려준다.

4. 내열성 고분자와 트라이볼러지

브레이크 작동시 마찰면의 온도는 100℃에서 200℃정도이며 가혹한 조건에서는 600℃정도에 이를 경우도 있다. 이로 인하여 브레이크 재료의 결합재에는 상당한 내열성이 요구된다. 또한 최근의 자동차는 고속화로 발전하고 있으므로 마찰재료의 내열성도 더욱 강화되어야 한다. 지금까지는 이러한 요구에 변성 페놀수지의 특성을 이용하였다. 최근 그 한계를 지적하는 경향이 있으므로 각종의 다른 내열성 고분자를 브레이크 재료로 활용하는 방안이 검토되고 있다. 그림 1은 열경화성 고분자의 기계적 성질 50%를 유지할 때 온도와 시간의 관계를 나타내었으며,¹⁴ 이들은 브레이크 재료에 널리 사용되어 페놀수지보다 우수한 특성을 나타내는 폴리이미드(polyimide), 폴리아미드이미드(polyamideimide), 실리콘수지, 폴리페닐렌옥사이드(polyphenyleneoxide), 폴리벤조이미다졸(polybenzimidazole) 등이다.

4.1 폴리이미드(Polyimide)

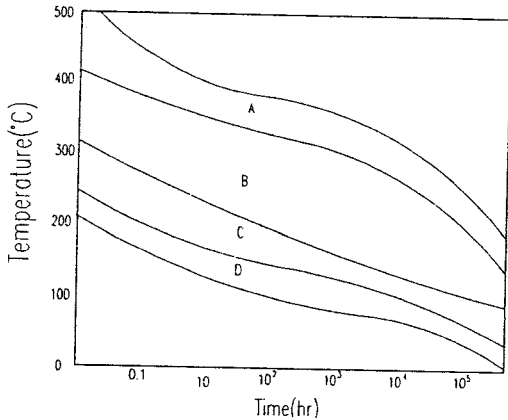


그림 1. Relation of temperature and time in thermosetting polymer.¹⁴

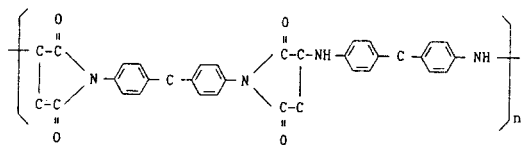
Area, A : Polyamide-imide, polyimide.

Area, B : Silicone, polyphenylene, polybenzimidazole.

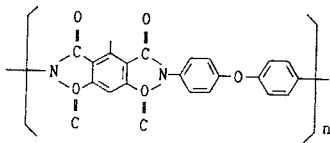
Area, C : Epoxy, polyester, phenol-formaldehyde.

Area D : Melamine-formaldehyde, polyphenylene oxide, polysulfone.

이미드기를 가지는 고분자를 폴리이미드라 정의하며 약 20종 정도가 이것에 속한다. 대표적인 것으로 지방족 폴리이미드에 속하는 로누·푸란사(프랑스)의 케리미드·키넬(Kerimid·Kinel)과 방향족 폴리이미드에 속하는 듀폰사(미국)의 베스펠·카프톤이다(아래 구조식 참조). 이들의 화학구조를 살펴보면 열가소성 수지에 속하나 용점이 뚜렷하지 않으며 또한 고온까지 기계적 성질을 유지하는 것에서 열경화성 고분자와 유사하다.

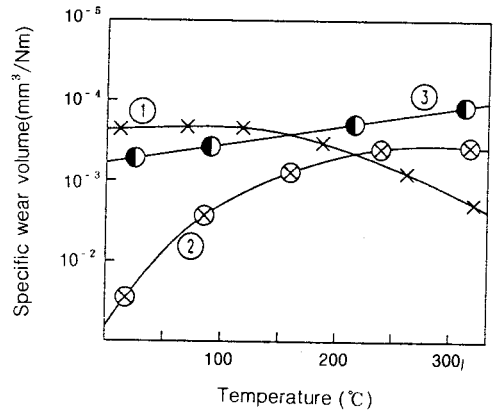


Kerimid·kinel

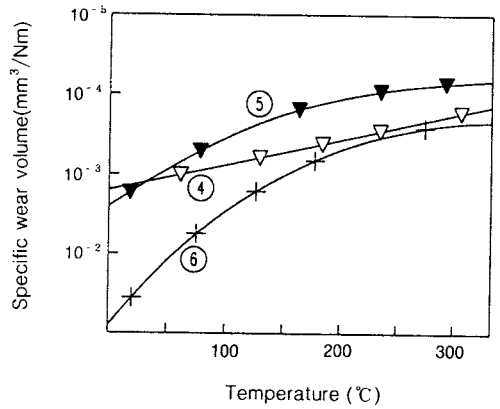


Vespel·kapton

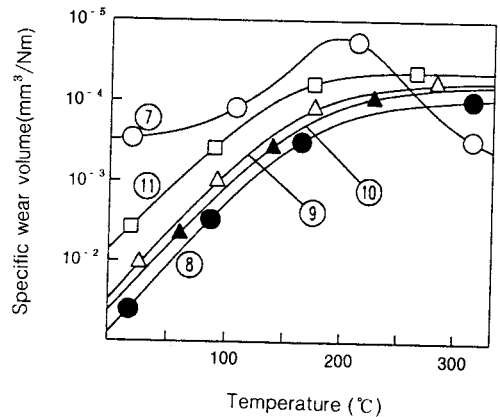
그림 2는 폴리이미드의 온도에 따른 마모량을 나타낸 것이고 표 1은 이들 복합재료의 조성을 나타낸 것이다. 대부분의 시료는 300 °C에서도 10^{-6} mm/Nm의 수준이고 우수한 내마모성을 나타내었다. 또



(a)



(b)



(c)

그림 2. Specific wear volume dependence on temperature of polyimide. Symbols and numbers are as indicated in Table 1.

한 그림 3은 각각 시료의 마찰계수와 온도와의 관계를 나타내었다. 조성물에 따른 마찰계수의 상관관계

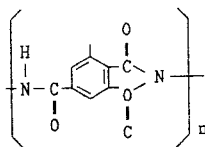
표 1. Compositions of Polyimide Composites

Materials	No.	Symbols	Filler (wt%)
(a)	①	×	filler
	②	⊗	15% graphite
	③	●	15% MoS ₂
(b)	④	▽	filler
	⑤	▼	15% PTFE
	⑥	+	20% graphite
(c)	⑦	○	60% shot glass fiber
	⑧	●	15~30% graphite
	⑨	△	30~40% graphite
	⑩	▲	about 20% graphite + 2~3% MoS ₂
	⑪	□	sintered goods containing graphites

를 비교한 것으로 충전재로 사용된 황산바륨과 탄산칼슘에 있어 황산바륨이 비교적 높은 온도에서도 안정된 마찰계수를 나타냈으며, MoS₂와 흑연과의 비교에서는 흑연의 경우가 전체 온도에서 안정된 마찰특성을 유지시키고 있음에 대한 보고를 확인할 수 있다.^{16,17}

4.2 폴리아미드이미드 (Polyamideimide)

폴리아미드이미드는 다음에 나타낸 구조로 열가소성 수지에 속한 결정성쇄상 고분자이며 용점은 뚜렷하지 않다.



아모코사 제품 토론은 실온강도가 1,900 kgf/cm²로 대단히 높고 127 °C에서도 500 kgf/cm² 정도로 높은 강도를 나타낸다. 폴리아미드·이미드의 마모량의 온도변화 및 마찰계수의 온도변화를 그림 4에 나타내었다.¹⁸

4.3 실리콘 수지 (Silicon Resin) 및 폴리페닐렌옥사이드 (Polyphenyleneoxide)

실리콘 수지 및 폴리페닐렌옥사이드에 대해서도 여러 가지 필러 (filler) 재료와의 상관성에 대해 상세히 검토되고 있다.¹⁹ 대부분의 경우 필러에 대해서 크게 이들의 특성이 영향을 받음으로 마찰재료로의 가능성을 나타내고 있다.

4.4 디아릴프타레이트 수지

디아릴프타레이트는 다음에 나타낸 모노머를 부분적으로 중합한 것이며 이 수지가 개발된 이후 폭넓은 용도로 활용되고 있다. 이 수지의 마찰·마모특성에

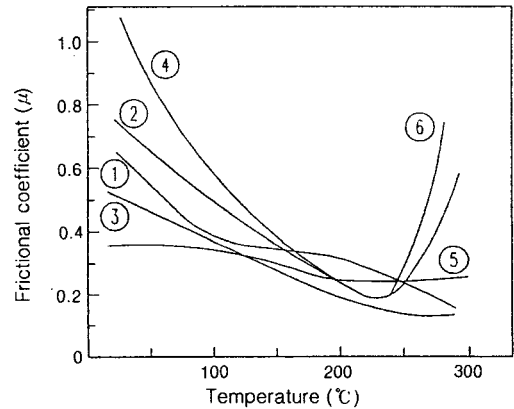
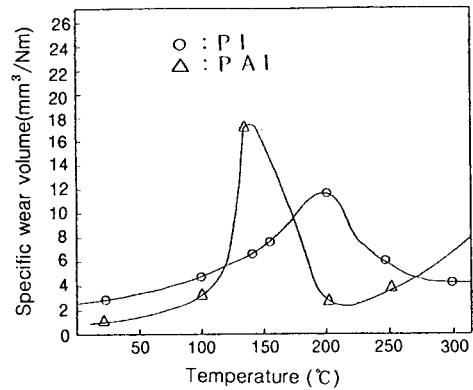
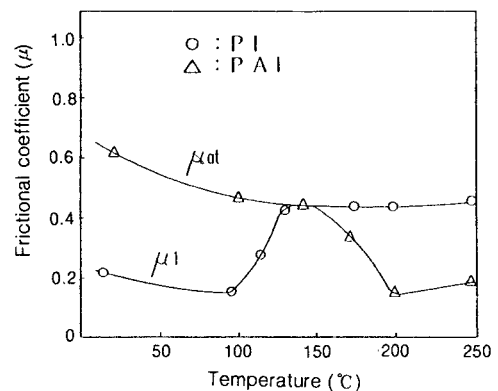


그림 3. Friction coefficient dependence on temperature of polyimide. ① : filler (BaSO₄), ② : 15% graphite, ③ : 15% MoS₂, ④ : filler (CaCO₂) ⑤ : 15% PTFE ⑥ : 20% graphite.



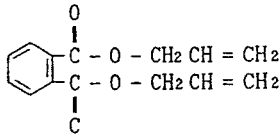
(a)



(b)

그림 4. Specific wear volume and frictional coefficient dependence on temp. (a) specific wear volume of polyimide and polyamideimide, (b) frictional coefficient of polyimide and polyamideimide.

대하여서는 페놀수지보다도 우수한 것으로 보고되었다.



4.5 그 외의 내열성 고분자

이외에도 폴리에테르에테르케톤(polyetheretherketone), 폴리페닐렌설파이드(polyphenylene sulfide), 비스말레이미드(bismaleimide)에 대한 트라이불러지적 검토가 이루어져 매우 흥미있는 결과가 보고되었으며 트리아진 수지(triazin) 가교형 폴리이미드 가교형 폴리아미드이미드 등도 사용이 기대되는 고분자이다.

5. 결 론

브레이크 마찰재의 핵심 기술은 결합재인 고분자 재료의 고온 내열성에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 국내의 경우 몇몇 업체가 마찰재용 페놀수지를 생산하고 있으나 대부분 범용수지에 국한되어 있다. 이미 전세계적인 마찰재의 기술 추이는 결합재의 경우 특수한 내열성 및 내마모성 수지로의 전환이 된 상태이나 안타깝게도 국내 기술 수준은 매우 낙후되

어 있다. 업계의 적극적이지 못한 개발 자세도 문제이지만 이 분야에 관심을 가지고 있는 연구자가 없음이 또한 큰 걱정이다. 전술한 여러 종류 고분자재료의 독자 개발 체제를 갖추지 못하면 마찰재 국산화의 길은 매우 어려울 것으로 판단된다. 이에 대한 체계적인 조사와 집중적인 기술개발이 시급하다.

참 고 문 헌

1. U. S. Pat. 3,007,890 (1964).
2. F. W. Aldrich, *Bendix Technical Journal*, **2**, 1 (1969).
3. G. R. Russell, SAE, No. 750228 (1975).
4. K. Hultsch, *Chemie Der Phendharge*, 78 (1950).
5. C. Curphy, *Plastics* (London) **23**, 465 (1958).
6. K. Hultsch, *Chemie Der Phendharge*, 78 (1950).
7. 山内康夫, 日本特許, 187873.
8. 大島景次, 日本潤滑工業化學, **44**, 347 (1942).
9. J. M. Herring, SAE, No. 670149 (1967).
10. J. M. Jacko, SAE, No. 68417 (1968).
11. D. L. Schmidt, *6th AIAA Structures and Materials Conf.*, p. 148, AIAA, New York, 1965.
12. R. P. Pastoglet, AIAA, J12 114 (1974).
13. J. A. Parker and B. Pugh, NASA TR-R 45 (1967).
14. J. K. Lancaster, *Tribology*, **12**, 219 (1973).
15. J. Giltraw, *Tribology*, **6**, 253 (1973).
16. K. Friedrich, *Tribology*, **1**, 25 (1989).
17. U. S. Tewari *et al.*, *Tribology*, **1**, 27 (1988).
18. 田中久一郎, “第30回 東京講習會教材”, p. 53, 日本潤滑學會, 1985.
19. 關口 勇, 工學院大學研究報告 第51號 (1981).