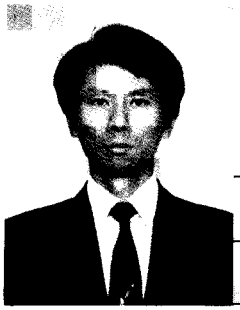
# 고속전철 마찰 제동장치 기술 동향



김 완 두

(KIMM 신교통기술연구부)

'80. 2 서울대학교 공과대학 기계설계학과 (학사)
'82. 2 서울대학교 대학원 기계설계학과 (석사)
'93. 2 서울대학교 대학원 기계설계학과 (박사)
'95. 8 - '96. 8 Purdue University Visting Scholar
'82. 3 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

우 창 수

(KIMM 신교통기술연구부)

'83. 2 영남대학교 공과대학 기계설계학과 (학사)
'87. 2 서울대학교 대학원 기계설계학과 (석사)
'87. 2 - '89. 4 대원강업 기술연구소 연구원
'89. 4 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 서 론

다가올 21세기는 고도화된 과학기술의 발전으로 교통수단의 획기적인 진보가 예상된다. 차세대를 대비한 이들 교통수단들에 대한 발전은 주로 안정성, 경제성, 기동성 및 공해방지 등에 주안점을 두고 있으며 새로운 에너지 자원을 활용하는 교통수단들도 개발되고 있다.

특히, 육지 교통수단으로서 안정성과 경제성 면에서 많은 이점이 있는 철도차량은 대표적인 대중 교통수단으로서 자리 매김을 하고 있고, 최근 프랑스, 독일, 일본 등에서 개발되어 이미 실용화된 고속전철 차량의 등장으로 기동 면에서 결코 항공기에 뒤지지 않는 경지에 이르렀다[1,2].

우리 나라의 경우, 늘어나는 차량 이용 교통인구의 분산을 위해 이미 오래 전부터 고속전철 사업에 대한 논의가 있어 왔으며, 이미 300km/h급의 경부고속철도를 위한 공사가 진행 중에 있다.

열차는 일정궤도 위를 차륜이 회전운동을 하면서 계획된 속도로 주행해야 하므로 필요에 따라 그 속도를 제어 또는 감속하여 안전하고 확실하게 정해진 위치에 정지시킬 수 있는 기능과 돌발적인 사태가 발생하면 신속하게 열차의 억속 및 감속기능으로 안전한 정지를 할 수가 있어야 하는데 이러한 목적으로 설치된 시스템이 제동장치이다[3,4]. 고속전철 제동장치는 열차의 속도제어와 정지를 위해서 중요한 역할을 담당하며, 차량의 속도 향상과 운행 시간 단축 그리고 차량과 승객의 안전 운행에 직결되는 중요 장치이다.

고속전철의 수송 능력 극대화를 위한 제동장치

표 1 열차 차종에 따른 브레이크 시스템

| 차 종 | 새마을 | 전동차 | TGV | ICE | 신간선 |
|---|---|---|---|---|---|
| 동력차 (기관차) | 발전제동 답면제동 | 회생제동 답면제동 | 회생(발전)제동 답면제동 | 회생제동 디스크제동 | 회생제동 디스크제동 |
| 객차 | 디스크제동 | 디스크제동 | 디스크제동 | 디스크제동 | 디스크제동 |

의 필수적인 요구조건은 안전성, 정확성 및 신뢰성 등을 들 수 있으며 또한, 속도조정, 목표제동, 승차감 개선 등을 위해 최적 제동제어기술의 확보와 안전성을 기초로 한 예비성과 다양한 방법의 분할시스템이 실현되어야 하며, 추진시스템과 자동열차 제어시스템과의 최적 연계 시스템 구축과 안전성과 내구성을 겸비한 제동시스템의 설계, 제작 및 성능시험, 유지 보수관리 기술 개발이 필수적이라 하겠다.

철도차량의 제동장치는 분류방법에 따라 여러 가지로 나뉘어진다. 대표적인 분류방법으로서는 제동력의 동력원에 의한 분류와 제동력의 발생방법에 의한 분류가 있다. 전자는 인력제동, 진공제동, 공기제동 및 전기제동 등으로 분류되며, 후자는 차륜과 레일 사이의 점착력을 이용하는지 여부에 따라 점착식 제동장치와 비점착식 제동장치로 분류된다. 점착식 제동장치에는 디스크브레이크와 답면브레이크와 같은 마찰방식과 가감저항(rheostatic), 재발전(regenerative) 등의 모터제너레이터 방식, 그리고 와전류를 이용한 와전류 방식 등으로 분류된다. 기계적 마찰을 이용한 디스크브레이크와 답면브레이크는 표1에서 보는바와 같이 대부분의 철도차량에 가장 많이 사용되고 있는 제동장치로서, 차량의 고속화에 따라 많은 기술 발전이 이루어지고 있는 장치이다.

본 고에서는 고속전철에 적용되고 있는 디스크브레이크와 답면브레이크의 기본 형상 및 원리, 디스크브레이크 특성해석과 최근의 국내외 기술개발 동향에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 마찰제동장치의 개요

최근 철도차량의 대부분은 제동 작동 시에 흡수하지 않으면 안될 방대한 에너지를 발전제동이나 회생제동으로써 회수한다. 그러나, 이와같은 차량에서도 브레이크의 신뢰성 확보를 위해 반드시 마찰 제동장치를 설치해 두고 있으며 객차나 화차 등에서는 전면적으로 마찰제동에 의존하고 있다. 마찰 제동장치는 제동통에 공급된 압력공기의 힘을 레버기구를 통하여 적당한 크기로 증대시켜 브레이크 슈우에 전달하므로서 제동의 목적을 달성하는 장치로 답면 제동장치와 디스크 제동장치가 있는데, 고속에서는 마찰제동에 의한 제동 효과가 작고 높은 에너지의 열을 제동장치가 흡수해야 하는 부담 때문에 저속에서 주로 사용된다[5,6]

### 2.1 답면브레이크 (Tread Brake)

답면브레이크는 브레이크 슈우(brake shoe)를 차륜의 답면에 밀어 붙여 운동에너지를 차륜과 브레이크 슈우간의 마찰일로 흡수하며 이때 생기는 열을 대기 중에 방산하는 방식으로, 차륜 답면에서 직접 마찰작용이 일어나므로 차륜마모가 크다는 단점이 있지만 아직까지도 궤도차량류의 마찰 제동방식으로 가장 널리 사용되고 있는 제동장치이다. 그림 1은 전형적인 답면브레이크의 모습을 보여준다. 그림 2는 답면브레이크의 제동원리를 설명하기 위한 개략도로서, 답면브레이크의 제동력 ($F$)은 다음식으로 계산된다.

$$F = \text{패드 압부력}(P) \cdot \text{패드 마찰계수}(f) \leq \text{축하중}(W) \cdot \text{점착계수}(\mu)$$

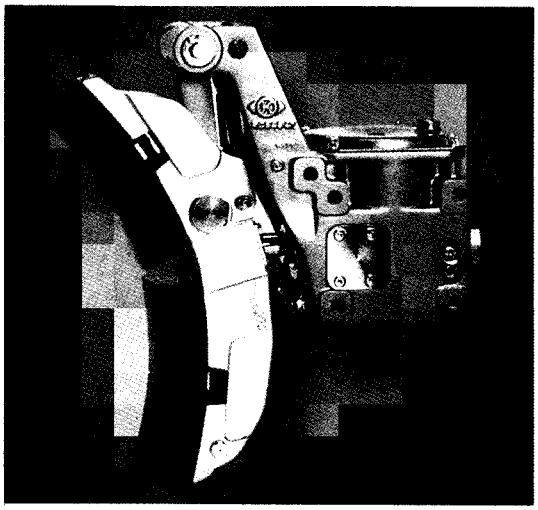


그림 1. 답면브레이크 모습

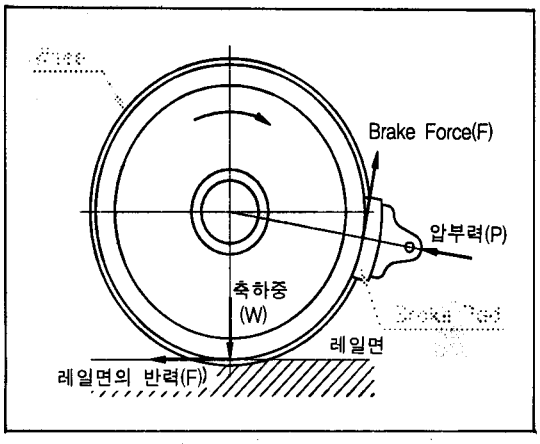



그림 2. 답면브레이크의 작동 원리

## 2.2 디스크브레이크 (Disc Brake)

디스크 제동장치는 차륜과는 다른 마찰원판인 브레이크 디스크를 차륜, 차축, 추진축 등에 고정시켜서 이것에 라이닝(lining) 브레이크 패드를 압착시켜 회전을 정지시키는 기구이다. 디스크 브레이크는 고속차량의 제동 성능을 개선하기 위해 개발된 것으로 답면 브레이크에 비해 부품 수가 많아지기 때문에 경비 면에서는 좀 불리하지만, 제동 성능향상의 효과가 크므로 종합적인 득실로 고속전철에는 디스크 브레이크가 흔히 채용되고 있다.

디스크 브레이크의 설계조건으로는 제동력에 충분히 대응할 수 있어야 하며, 방열이 잘되어 디스크에서 발생되는 열을 빠른 속도로 냉각시킬수 잇어야 한다. 또한, 열팽창에 따라 발생되는 열응력에 의한 균열의 발생이 없어야 하며 분해 및 조립 등 사용이 편리해야 한다.

브레이크 설계에 있어서는 우수한 제동 성능이 보장되도록 설계하고, 성능시험에 있어서는 제동성능시험기(dynamometer) 등 브레이크 시험 장비로 실제 주행상태와 같은 조건에서 시험을 수행하여 차량의 속도와 증량에 적합한 브레이크를 개발해야 한다[7,8].

그림 3은 전형적인 디스크브레이크의 모습을 보여준다. 그림 4는 디스크브레이크의 제동원리를 설명하기 위한 개략도로서, 제동력 ($F_b$)은 다음 식으로 계산된다.

$$F_b = \text{패드 압부력}(P) \cdot \text{패드 마찰계수}(f) \leq \text{축하중}(W) \cdot \text{점착계수}(\mu) \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

여기서, $R_1$은 휠(Wheel) 반경, $R_2$는 브레이크 작용반경

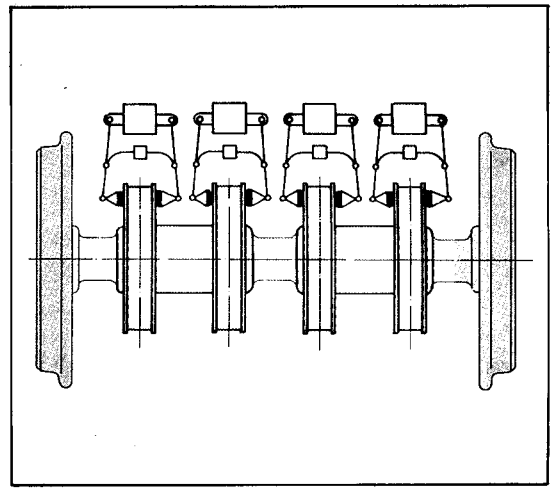


그림 3. 디스크브레이크의 모습

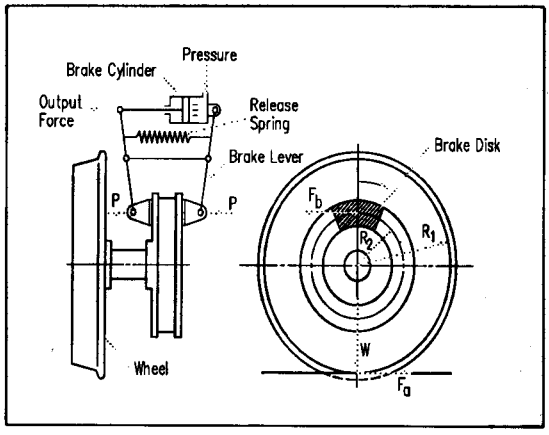



그림 4. 디스크브레이크의 작동 원리

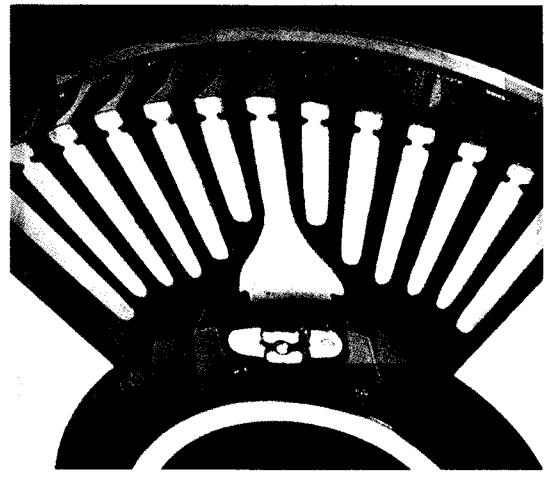


그림 5. 반경방향 냉각핀을 지닌 디스크 형상

## 3. 디스크브레이크 기술 개발 동향

고속철도 차량에는 마찰력이 우수하면서도 소음이 적은 차축 장착식 디스크브레이크나 플랜지 부착식 디스크브레이크가 사용되며 일체형 디스크브레이크는 높은 회전속도를 가진 장, 단거리 철도차량에 사용되고 있다. 현재 사용되고 있는 디스크는 통기상태에 따라 고속전철용인 TGV와 ICE에 사용되는 non-ventilated steel forged disc와 지하철을 포함한 일반철도 차량으로 국내 철도차량에 적용되고 있는 ventilated disc type으로 나눌 수 있다[9].

### 3.1 냉각핀을 지닌 디스크

그림 5는 우수한 열전도 및 높은 열분산(heat dissipation)을 위한 최적 형상으로 반경방향 냉각핀(radial cooling fins) 형태를 가진 디스크브레이크로 주로 200km/h급의 철도차량에 이용되고 있으며, 그림 6은 200km/h 이상의 열차를 위해 설계된 냉각핀 형상으로 반경 및 원주방향이 복합된 타입으로 에너지 손실과 디스크 금속 표면으로 부터 아주 우수한 열전달이 일어난다. 이 형상은 고속철도의 객차에 이용된다. 이 두 타입의 재질은 회주철(gray cast iron) 또는 주강(cast steel) 으로 되어 있다[10].

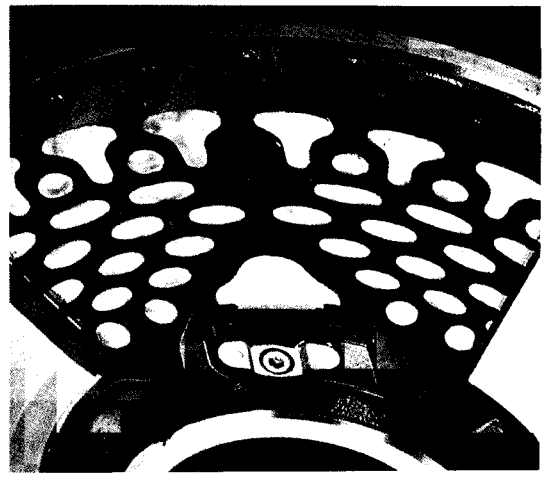


그림 6. 반경 및 원주방향의 냉각핀을 지닌 디스크 형상

### 3.2 일체형 단조강 디스크

시속 300km 이상의 고속전철에 사용되는 디스크브레이크는 기존의 제동장치에 비해 훨씬 상승된 제동출력과 에너지를 가져야 하므로 과거의 주조디스크는 사용이 불가능하며 보다 높은 강도를 지닌 합금강철을 이용한 비통기성 일체형 단조강디스크가 개발되어 사용되고 있다. 그림 7은 일체형 단조강디스크의 모습을 보여준다.

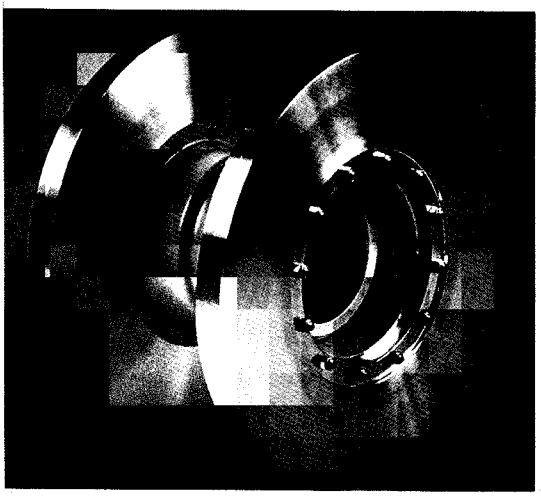


그림 7. 일체형 단조강 디스크

시속 300km 이상의 고속전철은 최고속력의 최고출력에서 심한 열의 작용을 받기 때문에 디스크의 윗부분은 핵심부분과 주변부분의 온도차에 의해 부분적 팽창에서 오는 압착에 의해 방사형의 압박을 받는다. 높은 에너지로 이루어지는 제동에서 이 압박은 40여초가 지나면 최고치에 도달한다. 이것은 디스크 재질의 탄성한계를 넘을 수 있으며 그 결과로 심한 잔류응력을 발생시킬 수 도 있다. 그러므로, 심한 물리적 작용을 받는 이 부분은 탄성적인 면과 조형적인 면에서 두가지 형태의 변형을 일으킬 수 있다.

첫번째로, 분지모양의 변형은 디스크 윗부분과 바퀴통의 기하학적 불균형과 디스크 양면에 대한 라이닝의 다른 효과열에 의해 이루어질 수 있다. 이것은 라이닝을 불완전하게 만드는 요인이 되므로 그 폭은 주로 이 부분의 강성도, 즉 관성모멘트와 관계의 경직성에 달려있다.

또한, 주변부의 파도모양 변형은 주변의 팽창에 기인하므로 튀어나온 부분에 대해 뜨거운점(hot spot)을 만들어낸다. 그 폭은 윗부분의 경직성과 주변의 팽창으로 인해 뜨거운 부분과 차가운 부분의 중심면에 대해 열이 가해지는 순간에 달려있다. 이 파도모양 변형은 디스크 패드가 유연하지 못할경우 진동, 라이닝의 마모 증가, 열경도를 동반한 온도의 집중, 방사상 균열 등 아주 위험한 결과를 초래할 수 있으며, 뜨거운점의 중심에서 약 900℃의 온도까지 올라가지만 완전한 상태에서는 475℃를 넘지 않아야 한다.

디스크 윗부분은 디스크 패드에 의해 심하게 마모되거나 홈집이 생기지 않기 위해 충분한 내구성을 갖추어야 한다.

이러한 고찰과 많은 실험의 결과로 표 2~3과

표 2. 단조강 디스크의 기계적 성질 및 주요 치수

| 항목 (Item) | 값 (Value) |
|---|---|
| 인장강도 (Tensile strength) | 1050 ~ 1250 MPa |
| 항복강도 (Yield strength) | 970 MPa |
| 연신율 (Elongation) | 11 % |
| 경도 (Hardness) | 331 ~ 338 HB |
| 외경 (Outer diameter) | 640 mm |
| 내경 (Inner diameter) | 350 ~ 360 mm |
| 두께 (Thickness) | 45 mm |

표 3 단조강 디스크의 화학성분

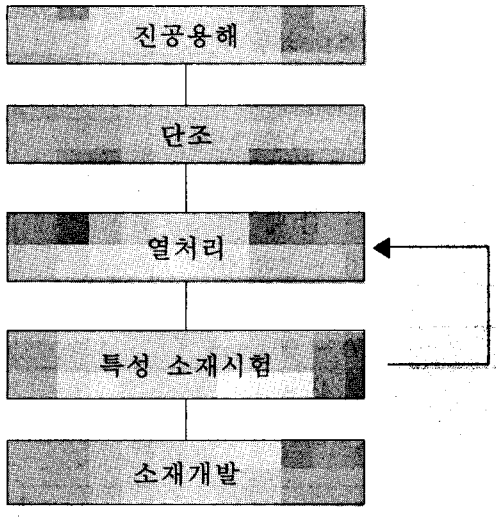
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| C | 0.24~0.31% | Mo | 0.6~0.9% | Si | 0.4~0.7% |
| V | 0.20~0.40% | Mn | 0.5~0.9% | Cr | 1.3~1.6% |
| S | < 0.007% | Ni | < 0.40% | P | < 0.015% |

같은 기계적, 화학적 특성을 지닌 디스크 재질이 개발되었으며, 각 기본 디스크는 18.5 × $10^6$ joules의 에너지를 쉽게 흡수할 수 있게 되었다. 이 에너지는 시속 300km로부터 16‰의 계속된 경사에서 동력대차 위에 있는 가변저항기에 의한 제동에 의해서 예외적으로 분산될 수 있으며 이것은 최대한의 감소허용 상황에 해당한다.

단조강 디스크의 개발을 위해서는 재질은 물론이고 단조 및 열처리 기술이 필수적이다. KIMM 연구팀은 표 2와 3의 화학성분과 기계적 특성을 지닌 단조강 디스크 소재 개발을 위한 연구를 수행하였다.

표 4는 디스크 소재 개발을 위한 공정을 보여준다. 먼저, 합금의 제조방안으로 디스크는 단조품이기 때문에 화학성분의 분포가 균일해야 하고 황(S) 및 인(P)의 규제치가 엄격하므로 반드시 전기로 제강후 레이들 정련을 거치야 하며, 강괴의 주조 시에는 아르곤 분위기하에서 하주법을 이용해야 한다. 또한, 소재의 거시 편석 정도와 비금속 개재물의 극소화를 위한 강괴의 hot-top 설정 방안도 함께 연구되어야 한다.

표 4. 단조강디스크 소재 개발 공정




제조된 강괴는 가열 및 단조를 거쳐 전극을 만든 후 electro-slag remelting을 통해 거시 편석을 제거하고 단조한 후 최종 물성을 얻기 위한 열처리 공정을 거친다. 강괴의 단조 중 균열발생을 억제하고 조직의 미세화 및 균질화를 얻기 위해서는 단조 전 가열온도와 단조 시의 압하속도, 그리고 최적 단조온도의 설정이 매우 중요하므로 최적 단조조건을 확립하기 위한 연구와 소재의 미세조직, 결정입도와 기계적 성질(인장강도, 항복강도, 연신율) 및 경도를 얻기 위한 열처리 조건을 결정하였다. 이를 위해서는 노말라이징(nomalizing), 퀜칭(quenching), 템퍼링(tempering) 온도 및 시간, 급냉 시의 냉각미디어, 그리고 가열 및 냉각속도의 결정을 위한 연구를 수행하였다.

디스크 소재 특성시험으로 먼저 전해철을 구입하여 화학조성 C=0.27, Si=0.55, Mn=0.70, Ni=0.30, Cr=1.40, Mo=0.65, V=0.30, S+P<0.2%로 50kg (dia=200mm, length=300mm) 1 charge 용량을 진공 용해하여 강괴를 제작한 후 1200℃에서 2시간 가열하여 두께 300mm를 50mm까지 단조하였다.

균질화 열처리하여 Bainite 조직을 얻기 위한 열처리 조건은 910℃에서 3시간 가열한 후 노냉을 거쳐 다시 890℃에서 3시간 가열 후 공냉(air cooling)하였다.

경도, 충격 및 인장시험 등 각종 기계적 성질 시험을 수행하기 위해 10개의 시편을 540℃ ~ 660℃ 까지 30℃ 간격으로 5가지 온도에서 1시간씩 템퍼링한 후 공냉하였으며, 기계적 특성시험을 수행한 결과를 표 5~7에 나타내었다.

경도시험은 브리넬(Brinell) 경도시험기를 이용하여 300kg의 하중을 작용하여 시험한 결과, 660℃에서 펌퍼링한 시편을 제외하면 모두 기준치인 331~388 HB를 만족하였으며, 충격시험은 상온에서 23J 이상의 충격특성을 가져야 하는데 시험결과 어닐링(annealing)한 시편만 규격을 만족함을 알 수 있었다. 상온 인장시험은 540℃ ~ 660℃에서 공냉(air cooled) 및 템퍼링 상태의 시편 조건으로 Instron 4206 10톤 용량의 만능재료시험기를 이용하여 크로스 헤드 스피드(cross head speed)를 2.5mm/min로 하여 시험한 결과 As air cooled 시편과 630℃에서 템퍼링한 시편만 기준치

인 인장강도 1050~1250MPa, 항복강도 970MPa 이상, 연신율 11% 이상을 만족하였다.

이상의 기계적 특성시험을 통하여 현재까지 시험된 조건에서 인장, 충격, 경도값 모두 규격을 만족하는 열처리 조건은 어닐링 온도 (890℃)에서 공냉한 상태임을 알 수 있었다. 그러나, 어닐링 온도를 880℃~920℃ 사이에서 여러 온도로 변화시키면서 템퍼링을 실시할 경우, 규격을 만족하는 열처리 조건을 찾을 수 있을 것으로 생각된다.

표 5. 단조강 디스크 소재 경도시험 결과

(unit : HB)

| 시편수 | 용체화처리 (890℃) | 540 ℃ | 570 ℃ | 600 ℃ | 630 ℃ | 660 ℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 341 | 352 | 352 | 363 | 359 | 285 |
| 2 | 341 | 352 | 352 | 363 | 359 | 285 |
| 3 | 341 | 352 | 352 | 363 | 359 | 293 |
| 4 | | | | | | 293 |
| Ave. | 341 | 352 | 352 | 363 | 359 | 288 |

표 6. 단조강 디스크 소재 충격시험 결과

(unit : J)

| 용체화처리 (890℃) | 540℃ | 570℃ | 600℃ | 630℃ | 660℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| 28.6 | 16.8 | 16.8 | 9.9 | 16.8 | 41.4 |

표 7. 단조강 디스크 소재 인장시험 결과

| 조건 | 항복강도 (MPa) | 인장강도 (MPa) | 연신율 (%) |
|---|---|---|---|
| 공냉 | 972.75 | 1196.19 | 13.97 |
| 540 ℃ | 925.32 | 1270.37 | 15.75 |
| 570 ℃ | 931.30 | 1278.90 | 17.98 |
| 600 ℃ | 910.32 | 1269.88 | 17.50 |
| 630 ℃ | 1038.41 | 1237.64 | 20.97 |
| 660 ℃ | 923.45 | 1045.37 | 19.14 |

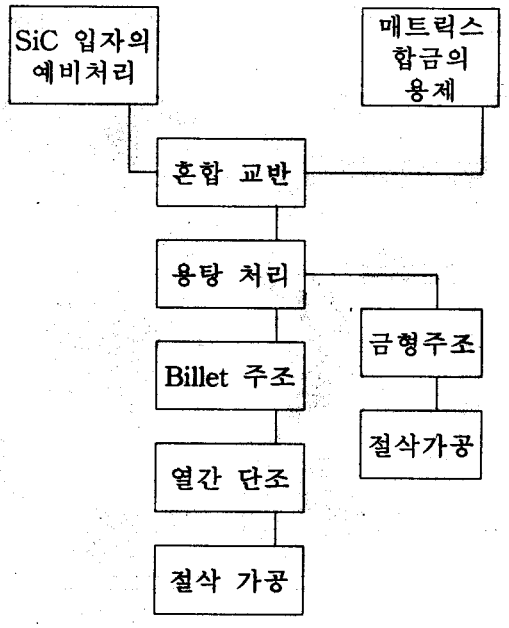
### 3.3 알루미늄 복합재료 디스크

철도차량이 고속이 되면 될수록 제동 시 발생되는 마찰 열용량은 커지기 때문에, 고속화를 실현하기 위한 방안의 하나로서 차량의 질량을 가볍게 하는 방법이 있으며, 이를 위해 개발된 것이 알루미늄제 디스크브레이크이다.

원소재는 탄화규소(SiC)입자를 이용한 입자 분산형 알루미늄 복합재료로 이 경우 강화재가 입자인 것이나 그 크기가 비교적 큰 것 등의 이유에서 강도 특성의 향상은 크게 기대할 수는 없지만, 내마모성이나 탄성계수 등의 기능 면에서의 특성 향상이 실현 가능하다.

알루미늄 복합재료의 제조방법으로서는 일반적으로 알루미늄합금 분말과 강화 입자를 분말의 상태에서 혼합한 후 고화시키는 분말법과 미리 용해한 알루미늄합금 용탕에 교반 등의 수단에 따라 강화 입자를 분산시키는 용탕법이 있는데, 철도차량용 디스크 제조에는 용탕법을 적용하는 경우가 많다.

표 8. 알루미늄합금기복합재료 디스크 제조공정



알루미늄 복합재료 디스크브레이크의 제조 공정은 용탕과 입자 간의 흐름이 악화되는 것을 개선하기 위해 SiC 입자에 예비 처리를 실시한 후, 미리 용해한 알루미늄합금 용탕안에 첨가하여 교반 혼합을 행한다. 그 후, 원통형의 빌렛(billet) 형상으로 주조하고, 열간 단조에 따라 디스크 모양으로 소성가공을 실시하여, 절삭가공에 따라 마무리를 한다.

표 8은 알루미늄합금기 복합재료 디스크의 제조공정을 보여준다.

알루미늄 복합재료의 디스크브레이크의 특성으로 그 성질은 매트릭스가 되는 합금에 따라 크게 달라질 수 있기 때문에 여러가지 알루미늄 합금 중에서 어느 합금을 디스크브레이크용의 매트릭스 합금으로 선택하는가는 중요한 문제이다.

디스크브레이크의 경우, 온도의 상승은 필연적이고 열처리형의 합금 사용은 적당하지 않기 때문에 비열처리형의 합금에서 비교적 강도가 높은 Al-Mg계 합금을 매트릭스로서 하고, SiC 입자를 분산시킨 알루미늄 합금기 복합재료가 적당하다. 고속 주행하고 있는 차량을 제동했을 때 통상의 철계의 디스크는 그 열 때문에 표면이 빨갛게 되어 700 ~ 800℃를 넘게 된다.

그러나, 알루미늄 복합재료는 충분한 열용량만 있으면, 열전도가 좋기 때문에 표면 등의 국부적으로 열이 모이기 어렵기 때문에 알루미늄제 디스크의 경우, 열피로 균열이 일어나지 않는다는 이점도 있다. 또한, 이 복합재료의 비중은 주철의 40% 이하로 작으므로 디스크로서의 전체 중량은 철계재료의 약 50% 정도로 경량화를 달성할 수 있는 알루미늄 디스크브레이크가 그림 8에서 보는 바와 같이 개발되었다.

알루미늄 디스크 브레이크용 패드는 알루미늄제 디스크의 초기 단계에서는 입수 가능한 라이닝재를 이용해 각종의 마찰 마모시험을 행하여 디스크 브레이크 패드재로서의 평가를 진행하고 있다. 실물 크기의 디스크에 대한 평가에 의해 그 가능성을 확인한 후에 종래의 철계 디스크와는 물리적 성질, 기계적성질이 다른 알루미늄제 디스크용 라이닝의 개발에 착수하여, 각종 소결합금이나 세미메탈릭계 재료의 검사를 행한 결과, 고속에서의 브레이크 조건에 있어서는 소결계가 적합하다는 결론에 도달하여 연구, 개발을 추진하고 있다[11,12].

### 3.4 브레이크 패드

브레이크 성능은 차량의 속도와 무게, 제동면적에 따라 큰 영향을 받으므로, 최근 차량의 속도가

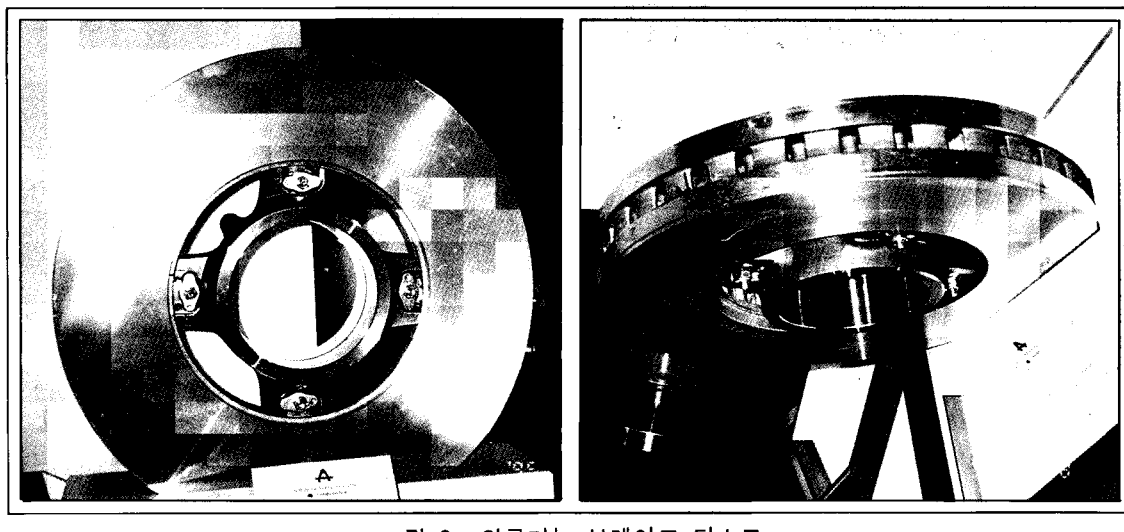


그림 8. 알루미늄 브레이크 디스크

더욱 빨라지고 축의 무게와 제동면적이 줄기 때문에 패드 및 라이닝 재료의 끊임없는 개발이 요구되고 있다. 선진국에서는 패드의 원재료 개발에 많은 연구가 진행되고 있으며, 새로운 패드 및 라이닝의 생산을 위해 차체의 공기역학적 거동, 현가장치 형상, 브레이크 면적, 엔진 출력, 무게분포, 열적과정 등을 고려하여 신제품 개발에 박차를 가하고 있다.

고속철도용으로 사용되는 브레이크 패드는 표 9에 나타낸 것과 같이 UIC 규정에 따라야 하며, 현재 널리 사용되고 있는 유기재 마찰재(organic pad)와 소결합금(sintered) 마찰재 브레이크 패드에 관해서 알아보았다.

표 9. 브레이크 패드 특성 규정 UIC Code 541-3

| 특성 | 내 용 |
|---|---|
| 일반특성 | o 마찰계수는 0.35 |
| | o 합성재료로 제작 |
| | o 차륜 및 차축에 장착하여 디스크에 사용 |
| | o 같은 제조공법에 의해 제작된 것을 사용 |
| | o 석연, 납, 아연 성분의 금속 사용은 금지 |
| | o 사용시 먼지, 미분자가루, 가스발생으로 승객에 유해하거나 불쾌감을 주면 안됨 |
| | o 제동성능이 양호하여야 함 |
| | o 라이닝의 마모량과 수면이 적합하여야 함 |
| | o 디스크의 마모량도 적합하여야 한다 |
| | o 이 규격에서 성능은 패드 전체 두께에 동일하여야 한다 |
| 마찰특성 | o 마찰계수는 초기 제동속도로 부터 라이닝 장착에 사용되는 동안에는 압력, 온도, 등 어떠한 변화에서도 일정 |
| | o 마찰계수와 평균마찰계수는 허용범위 이내 유지 요함, 마찰계수편차는 15% 이내 |
| | o 적은 상태, 눈이 올때도 건조시와 마찰계수는 동일 |
| | o 정지시 연속 제동 상태에서도 (400 °C) 15% 이내 |
| 구조상 특성 | o 두께 24mm ~ 35mm, 마찰면 200cm$^2$ , 직경은 최소 610cm$^2$까지 |
| | o 5mm 두께로 마모될 때까지 사용 가능토록 제작 |
| | o 홀더에 슬라이딩을 장착하여 사용 |
| 기계적, 물리적 특성 | o 재질의 균일성 확보<br>- 기포 결함이 없어야 하며<br>- 습동면을 부식시키는 재료 사용 불가<br>- 라이닝이 디스크에 열상을 주어서는 안됨 |
| | o 기계적, 물리적 특성이나 마찰특성이 -40 °C~ 400 °C 에서 변하지 않아야 한다 |
| | o 밀도, 내화도, 재료성분, 경도, 탄성계수 등 표시를 요함 |
| | o 3개의 라이닝을 시험하여 평균치 적용 |

3.4.1 비석면 브레이크 패드(Non-asbestos brake pad)

석면이 포함되지 않은 유기재 마찰재의 일반적인 조성은 파이버(fiber)와 금속(metal)이다. 제조공정은 원재료를 무인 자동설비로 원하는 조성을 PC로 입력하면 자동적으로 원재료 저장 펠렛에 담겨져, 150℃ 정도에서 4~5분간 혼합하는데 crusher type의 impeller가 고무와 광물섬유 등을 짓이기면서 혼합한 후 넓은 tray에 담겨져 냉각탑에 보관한 후 성형 및 몰딩과정을 거쳐 지그를 사용하여 몰딩된 패드를 쌓아 250℃로 11시간 정도로 한꺼번에 curing한다. 다음은 curing된 패드의 측면 지꺼기를 제거하고 마무리 검사를 거쳐 포장하는 순으로 제조공정이 이루어진다.

고속철도용으로 개발된 알루미늄 디스크에 적용할 브레이크 패드로는 소결합금 패드와 알루미늄 디스크가 접촉할 경우에는 디스크 표면이 손상되므로, 소음이 최소화하고 알루미늄 디스크에 적합한 유기재 재료로된 브레이크 패드에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

특히 디스크와 유기재 패드에 있어서 패드 경도에 따른 마찰특성 적용 범위를 보면 경도가 낮을수록 고속 사용에 적당하다는 실험적 경험값을 얻고 있다.

그림 9는 독일의 Becorit사에서 알루미늄 디스크 브레이크 패드용으로 개발된 유기재 패드로 Φ 640 x 100mm의 알루미늄 디스크에 UIC code 541-3에 따라 작동시험한 결과와 형상을 나타내었다.

3.4.2 소결합금 브레이크 패드 (Sintered brake pad)

일반적으로 유기재 패드를 사용하는 주철 디스크를 가지는 디스크브레이크의 온도 한계는 400℃이지만, 최근 합금강 디스크 개발로 높은 온도에 견딜 수 있는 마찰재 개발이 요구되고 있다. 이에 부응하기 위하여 700℃ 이상의 온도에 견디고, 높은 열응력에서도 마모가 적으며 수분과 적설의 영향 하에서도 마찰계수의 변화가 적은 소결합금 브레이크 패드가 개발되었다.

소결합금 브레이크 패드의 제조공정으로는, 원소재인 Cu, Fe, Gr와 금속 첨가물 Gr, $SiO_2$, SiC, $MoS_2$, Mo, Cr, Ni, Sn을 혼합하여 일정한 압력으로 형상을 내게 되는데 성형시 성형압과 die 형상 등을 주의해야 한다.

다음은 펠렛 홀더(pellet holder)의 제작으로 각

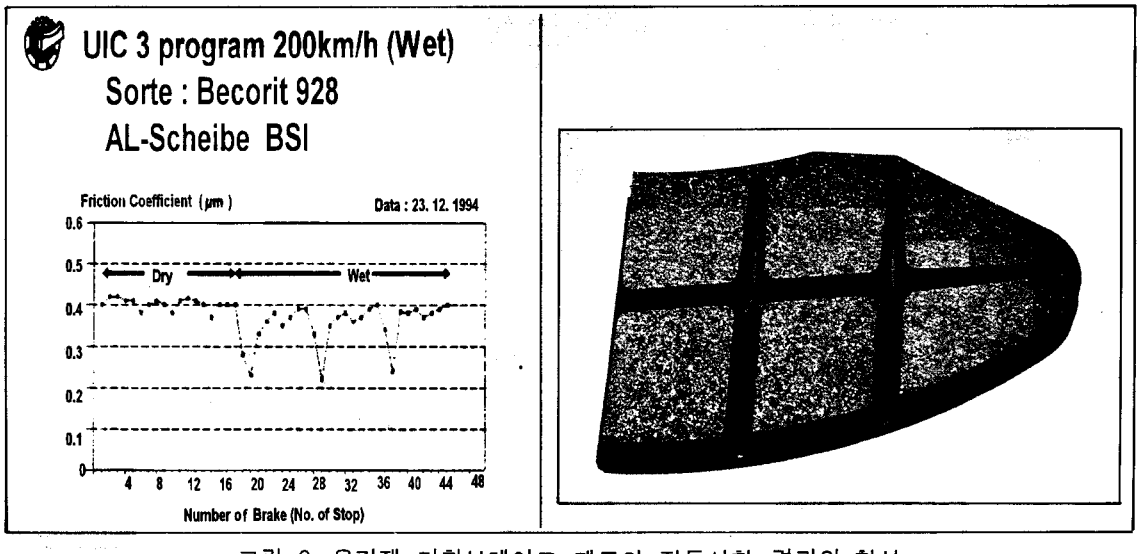



그림 9. 유기재 마찰브레이크 패드의 작동시험 결과와 형상

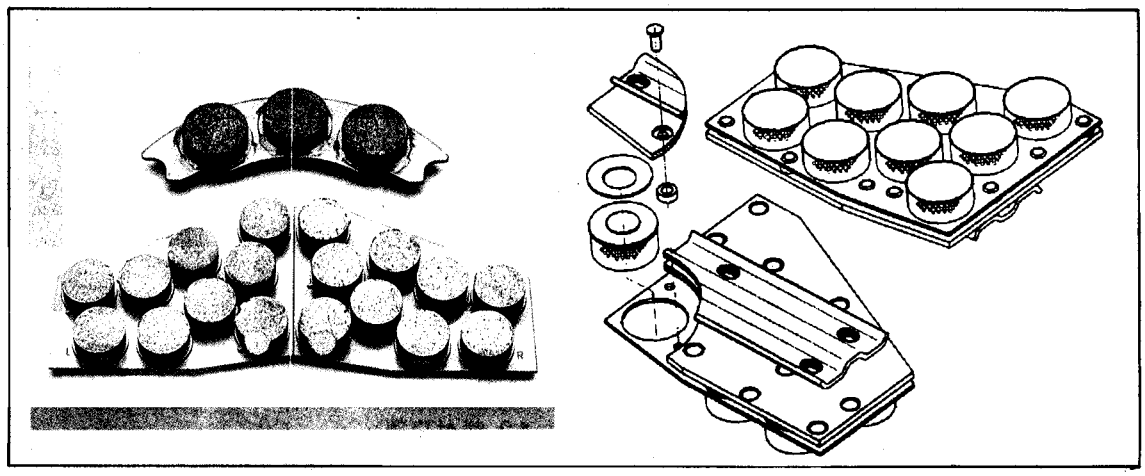


그림 10. 소결합금 브레이크 패드

차종에 적용할 형태에 따라 제작되는데 TGV-A, ICE 타입은 홀더를 뒷 강판에 직접 장착하고, 스페인 TGV용으로는 디스크의 열분포를 균일하게 하기 위해 펠렛 뒤에 콘 스프링(cone spring)을 장착하는 형태가 있다. 일반적으로 홀더는 3가지 부품으로 구성되는데 스페이스(spacer), 홀더(holder), 홀더 플레이트(holder plate)이며 저탄소강에 tin plating 처리를 한다. 펠렛 홀더는 홀더 플레이트에 튀어 나온 점(point)이 있어 이 부분에서 홀더, 스페이스 등이 용접(point welding) 된 후, 소결체의 제동조건에서 강도를 향상하고자 펠렛 홀더와 성형체를 결합하는 재가압 공정을 거친 후 소결작업에 들어간다. 소결은 mesh belt furnace를 사용하며 분위기 가스는 혼합가스 (N2 + H2)를 사용하여, 소결온도는 700℃ → 800~820℃ → 850~ 855℃로 3단계로 나누어 실시하고 소결시간은 통상 2~3시간 정도이다. 소결작업이 끝나면 뒷 강판과 펠렛을 용접하는 공정과 펠렛 표면의 연마공정을 거쳐 제조 회사명 및 롯드 번호(lot No.)를 기입하여 포장작업으로 제조공정이 끝나게 된다. 소결합금 브레이크 패드의 형상은 그림 10에서 보는 바와 같이 고온점(hot spot)의 발생이 최소가 되고 배수상태 및 소음 등을 고려하여 실린더 타입으로 제작되었다. 이는 성형공정이 간단하고 전면이 소결체인 것에 비하여 스프링 장치를 이용하여 소결 패드의 완전한 접촉이 가능하게 하여 heat sink로서 넓은 표면적을 얻을 수 있다.

### 3.5 비금속 디스크 브레이크

그밖에 경량 브레이크 재료로는 탄소/탄소섬유 복합재료(C/C composite)가 있다. 이 재료를 사용한 브레이크는 항공기나 F1 racing car 등에서 이미 실용화되고 있지만, 철도에서의 실용화를 향한 연구개발이 현재 꾸준히 진행되고 있다[13].

일본의 최근 자료에 의하면 350km/h 이상의 고속철도 차량의 제동장치로서 경량이면서 내열성이 우수한 다판식 C/C Multi-디스크브레이크가 개발되었다고 보고하고 있다[14].

브레이크시험기에 의한 마찰 마모특성, 브레이크 성능, 온도 특성 등의 시험에서 C/C디스크의 마찰계수는 저속도에서 큰 변동을 띠었지만 속도 450km/h 에서는 안정된 경향을 나타내고 있으며, 마모량도 금속계 재료보다도 상당히 적은 결과를 얻었다. 또한, 열적 조건이 까다로운 베어링의 온도를 190℃이하로 할 수 있게 되었다. 연속 반복 브레이크 시의 온도 특성과 저속 브레이크 시의 마찰계수의 변동을 보완하기 위한 제동력 제어의 적절히 하여 양호한 결과를 얻었다. 향후 현차에서의 내구성시험 등을 통하여 실용화를 위한 노

력을 계획하고 있다.

한편, 장래의 고부하 조건에 적용할 수 있는 브레이크 재료로서 융점이나 강도가 높은 금속간 화합물, 세라믹 등이 후보로 거론되고 있으며, 브레이크 성능 향상을 위해서 종래 기술의 연장선상에서 새로운 재료의 개발도 고려하여야 하겠다.

## 4. 디스크브레이크의 열분포해석

### 4.1 개요

고속전철에 사용되는 브레이크 시스템은 고도의 안정성과 신뢰성을 요구하므로 디스크와 패드 사이의 온도분포 해석을 통한 안전성 확인이 필수적이라 하겠다. 특히, 브레이크 시스템에서 고장이 유발되면 인명과 재산에 직접적인 영향을 주기 때문에 기술 선진국에서 많은 연구개발이 수행되고 있으며 최근에는 가혹한 여러조건에서 제동력 향상과 제동거리의 축소를 실현하고 있다.

차량의 속도 제곱에 비례하는 운동에너지가 전부 열로 변환되어 주위로 소산되는 제동장치에서 차량의 속도가 빨라질수록 브레이크에 걸리는 열 부하는 급격히 증가한다. 따라서, 향후 고속에서 사용될 수 있는 내열 변형성, 내열 균열성 브레이크를 개발하기 위해서는 부품의 강도계산이 필수적이며 이를 위해서는 전열 문제의 해석이 우선된다.

마찰에 의한 제동이 지속되는 동안 모든 마찰일은 열로 변환되어 주위 환경의 온도상승을 야기시킨다. 이 온도 상승은 효율적이고 안전한 작동조건, 마찰재질의 선택 및 브레이크 판과 차륜의 최적화, 작동부하 결정 등에 있어 매우 중요한 인자가 된다. 이와 같은 브레이크 내 발열에 의한 문제점을 제거하기 위해서는 제동 시 증가하는 열 부하 및 반복되는 브레이크 열의 열 피로에 의한 브레이크 내의 온도에 대한 정보 획득을 통하여 부품의 열응력 해석을 이해함으로써 고효율, 고강도를 갖는 우수한 경질의 판 형상 및 재질을 결정할 수 있다[15]

또한 브레이크와 패드 사이에서 발생된 열 부하의 열적 거동을 분석하고 냉각 성능 향상을 위한 패드 형상 설계가 필요하다. 브레이크 설계에 있어서 가장 중요한 문제중의 하나인 디스크와 패드사이의 미끄럼 마찰에너지에 의한 마찰 면에 발생되는 마찰열에 의한 열전도 및 온도분포 해석을 수행하여 마찰소재의 선정 및 형상, 크기를 결정할 수 있는 유용한 설계 데이타를 제공하였다.

### 4.2 해석모델

브레이크 내의 온도분포는 디스크와 패드사이의 마찰에 의해 발생된 발열량 및 주위로의 열전달에 의한 냉각성능에 따라 크게 좌우되며, 그 정량적인 분석을 위해서는 브레이크 작동시간에 따라 변화하는 비정상상태의 열전도해석이 요구된다.

브레이크 내부의 열전도에 영향을 미치는 요소로서 브레이크 형상 및 크기, 판 및 패드의 열전도도, 비열, 밀도 등의 물성치와 브레이크와 주위 공기사이의 열전달계수, 차량속도, 브레이크 작동시간, 차량무게, 브레이크 수 등에 의한 총 발생열량 등이 고려될 수 있다. 이들을 변수로 하여 제동 시 시간에 따라 변화하는 열적 거동에 관한 기구를 분석함으로서 냉각성능을 향상시키고 고온의 고 부하 점을 제거함으로써 제동효과를 상승시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 브레이크 및 패드의 온도분포 및 그 주위로의 열 이동 상태를 해석하기 위한 모델은 다음과 같다.

일반적인 브레이크와 패드시스템은 그림 11과 같이 패드와 디스크 면이 직접 접촉하고 있는 마찰면(빗금친 부분)에서 발생한 마찰열이 열전도에 의해 디스크 내부에 축적된 후 열 대류 현상에 의해 외부로 방출된다. 이때 디스크와 패드 접촉면에서의 열적특성은 일정하고 마찰 면에서의 복사열을 배제하고 대류 열전달계수를 일정하다 하였을 때 전도 방정식 및 관련 경계조건으로부터 접촉면에서 발생된 열량이 디스크, 축 및 디스크

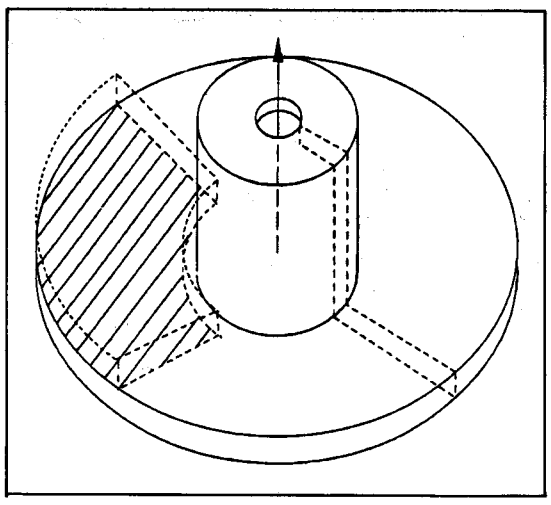


그림 11. 브레이크디스크 개략도

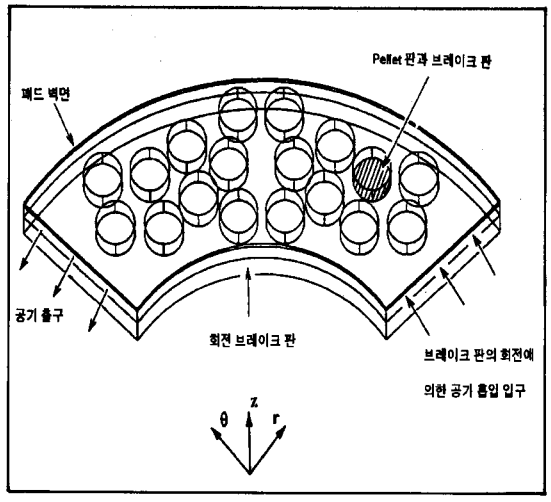



그림 12. 디스크와 패드 개략도

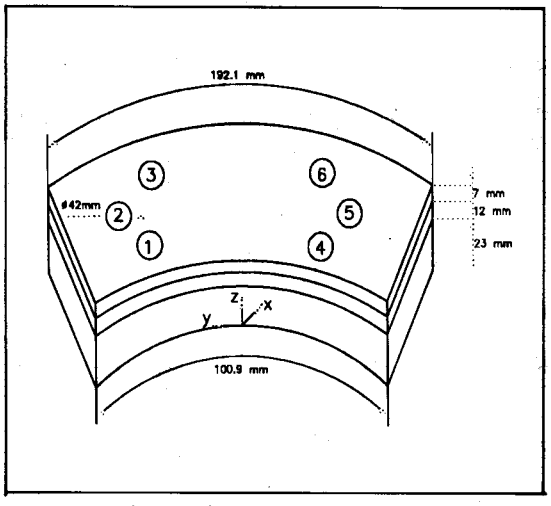



그림 13. 디스크 판과 패드의 치수

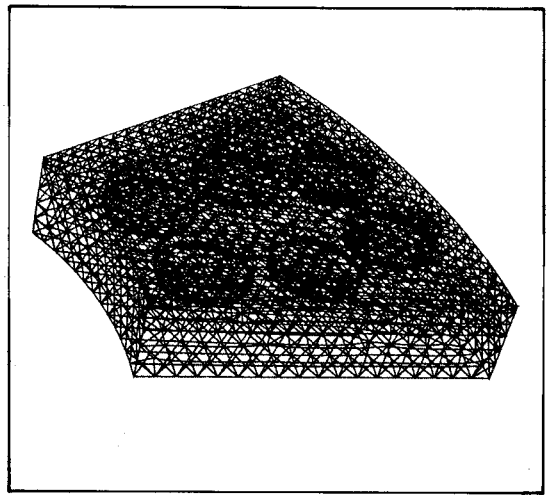


그림 14. 해석을 위한 Surface Mesh

주위의 공기로 방출되는 열량 및 시간에 따른 변화량을 예측하였다.

현재 고속전철에 사용되는 브레이크 패드로서 여러 가지 형태가 사용되고 있으며 우리 나라 경부 고속전철 사업에서 추진 중인 TGV에서 사용되는 소결합금 9개의 펠렛(ϕ42 x H20mm)을 사용한 디스크 브레이크 형상은 그림 10과 같다. 따라서, 그림 12와 같이 시스템을 모델링하여 브레이크 디스크 면이 회전함에 따라 pellet 공간에 유입된 공기에 의한 전도-대류의 복합 열 전달 문제를 해석하였다. 열분포해석은 범용 열유동해석 프로그램인 'FLUENT'을 이용하였으며 3차원 모델링하였다.

그림 13와 14는 디스크판과 패드의 치수와 표면 메쉬(surface mesh)를 보여주며 총 12,341개의 절점을 갖는다. 해석에 사용된 디스크의 재질은 주철이고 패드는 비석면계 복합재료를 채용하였으며, 해석에 필요한 기본 물성치는 표 10와 같다.

표 10. 디스크와 패드의 열적 물성치[16]

| 물성치 | 디스크 | 패드 |
|---|---|---|
| 열전도도(W/mK) | 48 | 1.2 |
| 밀도 (Kg/m³) | 7228 | 2595 |
| 비열 (J/Kg K) | 419 | 1465 |
| 발생열량 (W/m³) | 3 X $10^7$ W/m³ | |
| 판외벽 열전달계수 ($W/m^2$ K) | 100 $W/m^2$ K | |

### 4.3 해석 결과

그림 15는 입구에서 1m/s로 균일하게 유입된 공기에 의해 Z=29mm 위치의 펠렛주위에 형성된 속도벡타를 나타낸 그림으로, 펠렛사이와 벽면부근 좁은 간격에서 증가된 속도는 최대 5.31m/s가 되며 펠렛 후면에서 정체된 유동과 역류가 형성됨을 알 수 있었다.

그림 16은 디스크 판 두께의 중앙부(Z=12mm) 평면의 온도분포로, 펠렛 아랫면인 원형의 고체 영역은 원 중심부와 6개의 펠렛사이의 유동의 정체된 영역 부근(원주부근)에서 550K로 고온 부를 형성하고 있으며, 그 외 전체적인 판의 온도는 400K이다.

그림 17은 펠렛주위를 흐르는 유체의 온도 분포로 펠렛의 원주 방향의 고온 부와 각 펠렛으로부터 공급된 열량에 의해 출구 부근에서 증가된 온도 분포(400K)가 집중되어 있다.

그림 18은 펠렛 3번, 6번의 단면에 대한 온도 분포이다. 아랫면은 주위 공기와 디스크 판 외벽과 접촉면이며, 윗면은 패드 외벽과 주위 공기와의 접촉면으로써 그사이 패드, 펠렛, 디스크 내부의 온도 분포를 나타낸다. 접촉면에서 최대 온도 668K를 나타내며 고체 내부의 전도에 의한 영향으로 냉각되어 형성되는 등온 영역을 나타낸다.

그림 19는 각 펠렛의 접촉부근에서 형성되는 고온 부와 그 주위의 유동의 온도 분포를 나타낸다. 열전도도 증가에 따라 펠렛 내부의 최고 온도가 감소된 반면 전체 면적에 걸쳐 균일한 고온부를 형성하고 있으며 펠렛 주위의 정체된 영역에서 상승된 온도 분포를 나타낸다.

그림 20은 각 펠렛(1~6번)의 중심부를 따라 외벽에서 대류 열전달 ($k_{pad}=1.2 W/mK$) $h=100 W/m^2k$ 을 고려하였을 때, 디스크 벽

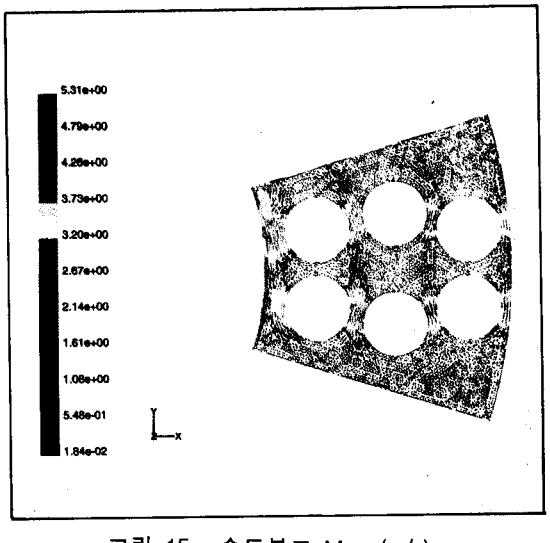



그림 15. 속도분포 Map (m/s)

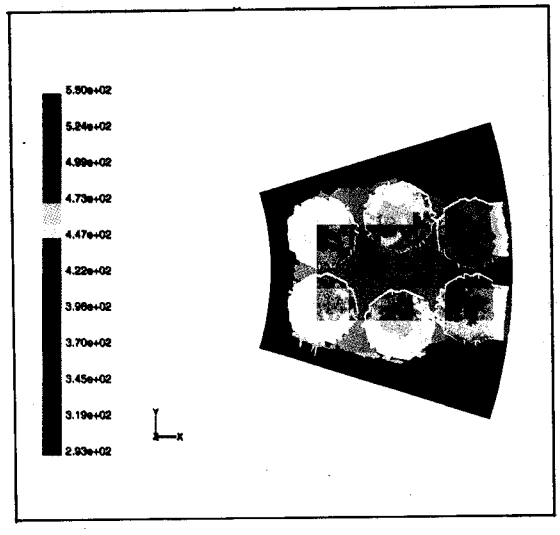



그림 16. 접촉표면의 온도 분포 (K)

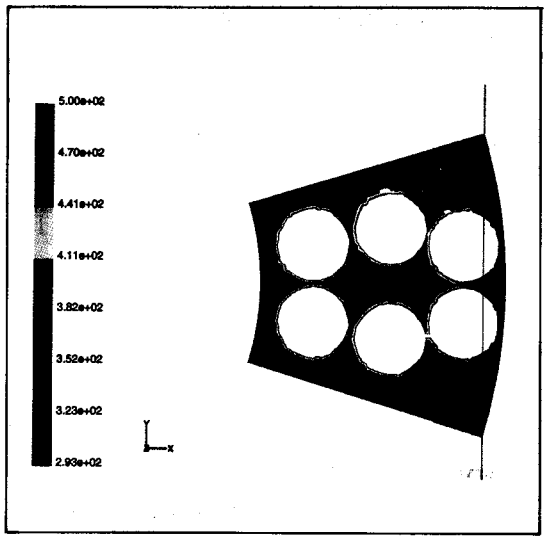



그림 17. Z = 24.5mm 에서의 온도분포 (K)

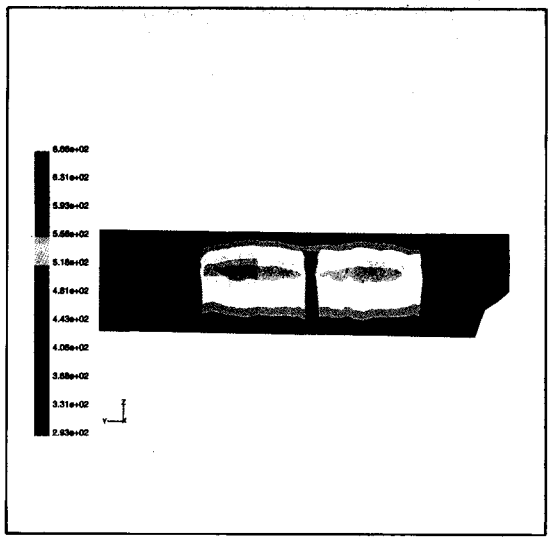


그림 18. 펠렛 번호 3과 6의 온도분포 (K)

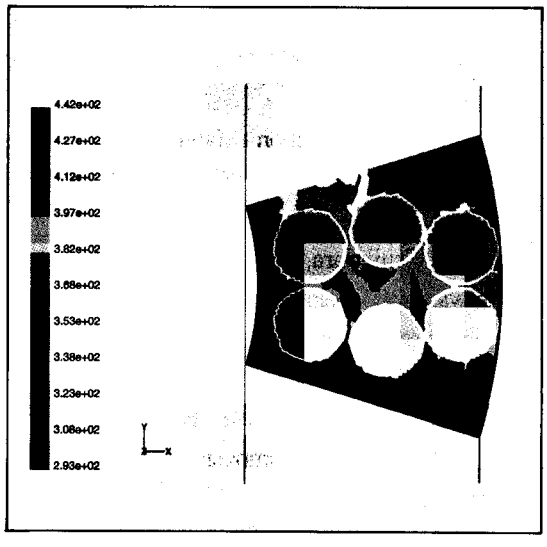



그림 19. 열전도 증가 시 Z = 25.4mm 에서의 온도분포

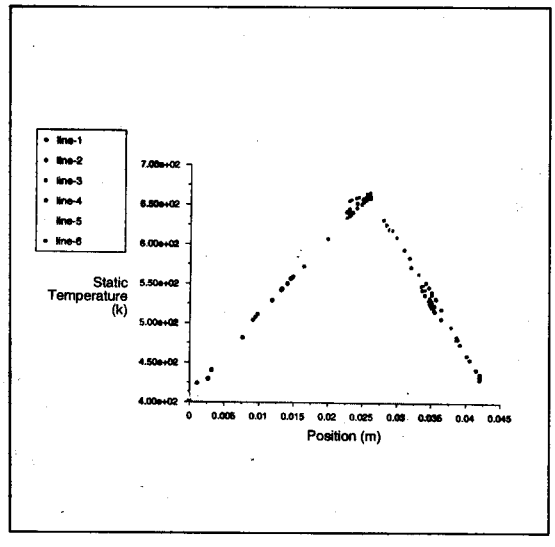



그림 20. $k_{pad}=1.2W/mK,\ h=100W/m^2k$ 시의 온도분포

(Z=0)으로 부터 패드 외벽(Z=42mm)까지 변화하는 온도 분포이다. 이상의 열전도 해석을 통하여 디스크와 패드의 형상과 재질에 따라 온도분포에 큰 영향을 미침을 알 수 있었으며, 특히 패드의 열전도도에 따라 디스크 내의 온도가 매우 민감하게 변화하므로 가능한 한 패드는 열전도도가 우수한 소재로 선정해야 하겠다.

## 5. 결 론

어떤 운송수단을 막론하고 승객 및 차량의 안전을 위해서는 필요한 경우에 항시 신뢰성 있고 안전하게 정지할 수 있는 장치를 구비하여야 한다. 특히, 고속전철과 같은 고속의 대량 운송시스템의 경우는 속도향상 및 운행시간 단축 등을 위

해서는 무엇보다도 고효율 고신뢰성의 제동장치의 확보가 요망된다.

본 고에서는 고속전철에 사용되고 있는 주요 마찰제동장치인 답면브레이크와 디스크브레이크에 대한 기본 형상과 작동 원리 등을 살펴보았다. 특히, 고속전철의 속도 향상에 따라 급격히 커지는 제동력을 감당하기 위한 디스크브레이크의 최신 기술 동향을 조사 분석하였으며, 향후 한국형 고속전철의 제동장치의 국산화 개발에 필요할 것으로 예상되는 단조강 디스크 소재 개발 및 디스크와 패드 간의 열분포해석 기술 등에 대해 그간 KIMM에서 수행되어 온 연구내용을 중심으로 설명하였다.

멀지않은 장래에 350km/h급 한국형 차세대 고속전철의 실현을 위해서는 다른 기술분야와 마찬가지로 제동장치 기술분야에서도 기술이전 프로그램을 통하여 선진 기술을 흡수하고, 또한 그간 국내에서 수행되어 온 연구결과를 충분히 활용 발전시키고 관련 연구팀 간의 유기적인 협조 체제를 구축하여 제동 기술의 조기 정착화에 많은 노력을 기울여야 하겠다.

## 참 고 문 헌


1. 김완두 외, "고속전철 제동역학 해석 및 시스템 예비설계 기술개발(I)," BSN078-299.M, 과학기 술처 제 1차년도 연구보고서, 1995년
2. 김완두, 우창수 외, "고속전철 제동역학 해석 및 시스템 예비설계 기술개발(II)," BSN1 23-384M 과학기술처 제 2차년도 연구보고서, 1996년
3. 제동장치, 고속전철 핸드북, 한국고속철도건설공단, pp. 484-494, 1993.
4. 차량용 브레이크의 개론 (I), 철도기술 세미나, JR동일본 운수차량부 차량과
5. 김완두 외,"고속전철의 제동장치 기술개발," 제34권 6호, 대한기계학회지, pp. 446-453, 1994.
6. H. Sakamoto, etc., "Heavy-Duty Brake Discs for High-Speed Trains," Jour. Sumitomo Metals, Vol. 45-6, 1993, pp. 11-32.
7. P.J.Berndt, W. Schweiger "Experimental and Theoretical Investigation of Brake Squeal with Disc Brakes Installed in Rail Vehicles", Seminar on Friction and Contact Noise, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, June 20-21, 1985. Wear, 113 (1986) pp. 131-142.
8. Rudolf Limpert "Brake Design and Safety", Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, PA 15096-0001
9. M.A. Tanvir "On the cooling of disc brakes on a train", Rail International, pp. 37-42, March 1988.
10. Taro Tsujimura, Shuji Manabe "Suitability of Austempered cast Iron as Brake Disk Material", RTRI, Vol. 30, No. 4, pp. 220-226, 1988. Nov.
11. A. Lacombe, "Friction Materials in Composite Carbon-Carbon SEPCARB," MRS-Europe, Nov. 1985, pp. 33-39.
12. Taro Tsujimura, Hirishi Arai, Naoya Fujiwara, "Development of High Performance Special Cast Iron Brake Shoes", RTRI, Vol. 31, No. 4, pp. 218-224, '90. Dec.
13. Shingo Obara, Takahisa Kato, "Frictional Heating of a Composite", Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 415-422, 1994.
14. 日本 鐵道總 硏報告, 1996, 5
15. Kwangjin Lee, J.R. Barber, "An Experimental Investigation ofFrictionally-Excited Thermo-elastic Instability in Automotive Disk Brakes under a Drag Brake Application" Journal of Tribology, Vol. 116, pp. 409-414, July 1994
16. Yosuke SASAKI, 1995, "Development Philosophy of Friction Materials for Automobile Disc Brakes", Akebono Brake Industry Co., Ltd.