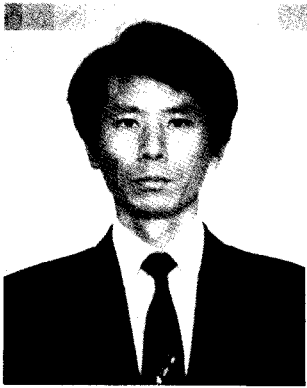


# 고속전철의 제동시스템 기술현황



김 완 두 (KIMM 신교통기술연구부)

- '80.2 서울대학교 공과대학 기계설계학과(학사)
- '82.2 서울대학교 대학원 기계설계학과(석사)
- '93.2 서울대학교 대학원 기계설계학과(박사)
- '82.3~현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 머릿말

시속 300km/h에 달하는 고속철도는 속도의 제 곱함으로 커지는 차량의 운동에너지를 마찰, 열 및 전기 에너지 등 다른 에너지로 변환시키기 위한 제동시스템의 개념과 설계에 대해 여러가지 복합적인 고도기술을 요구하고 있다. 고속전철의 제동시스템은 차량의 속도 향상과 운행 시간 단축 그리고 차량과승객의 안전 운행에 직결되는 중요 장치이다. 고속전철의 제동시스템이 지녀야 할 필수적인 요구조건은 '안전성', '정확성' 및 '신뢰성' 등을 들 수 있다.<sup>[1, 2]</sup>

철도차량에 사용되는 제동시스템은 크게 레일과 차륜의 점착(adhesion)에 의한 제동시스템과 점착과 무관한 비점착제동시스템으로 구분되며, 여러가지 제동 방식 중에서 최신의 고속 전철에서 주로 사용되고 있는 것은 답면브레이크, 디스크 브레이크, Hydrokinetic, Rheostatic, Regenerative, 전자력레일브레이크 및 선형과 전류브레이크 등이다.<sup>[3]</sup>

한편, 제동시스템은 제동방식에 따라 기계식과 전기식으로도 분류되며, 중고속 영역에서는 전기 브레이크, 저속에서는 기계식인 디스크브레이크가 상호 보완적으로 사용된다. 제동성, 신뢰성 및 내구성 등의 특성을 모두 만족시키는 제동 시스템의 구성과 요소 부품의 적절한 설계 및 정확한 성능평가 그리고 신속 정확한 보수유지 등에 대한 기술이 매우 중요하다.

현재 우리나라 경부고속철도의 차량 도입은 프랑스의 GEC Alstom사의 TGV로 결정된 상태이며, 관련 중요 부품들도 우선적으로 TGV의 형식에 따라야 할 실정에 놓여 있다.

본 글에서는 TGV의 제동시스템을 바탕으로 전반적인 고속철도 제동시스템의 기술현황을 조사 분석하고, 국내외의 기술 현황을 파악하여 2000년대 초에 경부고속철도의 상업·운행 및 자체 기술에 의한 350km/h급의 한국형 고속전철의 실현을 위한 제동시스템에 관한 기술 현황을 소개하고자 한다.

## 2. 제동시스템 종류

최첨단의 우주왕복선 및 초음속비행기로부터 철도차량, 자동차를 비롯하여 자전거 및 손수레 등에 이르기까지 각종 운송수단에는 제동시스템이 필수적이다. 표 1은 주요 운송수단의 급제동 즉 비상제동 시의 제동거리를 보여준다.<sup>[4]</sup> 경부고속철도의 운행속도는 300km/h급으로서 급제동에 소요되는 제동거리는 우리의 고유 척도로서 무려 10리 정도에 달하게 됨을 알 수 있다. 고속철도 운전자의 가시거리가 맑은 날에도 1km 이상이 되지 않는 점을 감안해 볼때, 돌발 사태 시 사고 방지를 위해서는 제동시스템의 확실한 제동력 발생은 물론이고 신뢰성 높은 상황 감지시스템과 모니터링시스템의 확보가 필수적이라 하겠다.

철도차량에 사용되는 제동시스템은 크게 레일과 차량의 점착(adhesion)에 의한 제동시스템과 점착과 무관한 제동시스템(비점착제동시스템)으로 구분된다. 각각의 종류는 표 2에 보는 바와 같다. 우리나라의 경부고속철도는 지난 6월 차량형식이 프랑스의 TGV 형으로 결정이 된 상태이므로, 제동시스템 역시 TGV형에 따라야 하나 우리 측의

표 1. 주요 운송 수단의 비상 제동거리 비교

|                           | distance to stop                    |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Boeing 747 (200 km/h)     | 1500 m                              |
| Motor Car (120 km/h)      | dry road : 95 m<br>wet road : 142 m |
| Lorry (80 km/h)           | dry road : 60 m<br>wet road : 90 m  |
| Freight Train (80 km/h)   | 700 m                               |
| TGV-PSE (270 km/h)        | 3000 m                              |
| TGV-Atlantique (300 km/h) | 3300 m                              |

요구에 의해 재발전(Regenerative) 제동시스템을 포함시킨바 있다.

표 3은 세계 각국의 주요 고속철도의 제동시스템의 형식을 보여준다. 표 4는 TGV-PSE 제동시스템에 대한 설명이며, 그림 1은 제동 시 약 2km마다 나뉘어진 "Block Sections"의 신호과정을 나타낸 도표이다.<sup>[4]</sup>

여러가지 제동 방식 중에서 최신의 고속 전철에서 주로 사용되고 있는 것은 답면브레이크, 디스크브레이크, Hydrokinetic, Rheostatic, Regenerative, 전자력레일브레이크 및 선형와전류브레이크 등이다. 주요 제동시스템의 특성은 다음과 같다.<sup>[3,4,5]</sup>

### 2.1 답면브레이크 (Tread Brake)

답면브레이크는 브레이크슈(brake shoe)를 차륜에 직접 밀착시켜 제동력을 발생시키는 장치로서 아직까지도 궤도차량류의 마찰브레이크 형식으로 가장 널리 사용되고 있는 제동시스템이다. 그러나, 동 브레이크 장치의 사용 한계는 시속 약 160km/h로 알려져 있으며, 좀 더 높은 속도에서의 적용을 위해서는 차륜답면(wheel tread)에 열적 손상이 미치지 않도록 제동파워를 낮게 유지시켜야만 한다.

그림 2의 양쪽 끝단에 차륜을 밀어주고 있는 답면브레이크의 일부를 보여주고 있다.

### 2.2 디스크브레이크 (Disc Brake)

디스크브레이크의 사용한계는 온도 상승에 따라 마모율이 크게 좌우되는 브레이크패드(brake pad)에 의해 우선적으로 영향을 받는다. 독일의 Bundesbahn에서 실시한 브레이크디스크의 마찰표면의 온도가 상시 제동 시 200°K, 드물게 사용되는 비상제동 시 300°K 이상을 넘지 않으면 열적 손상을 일으키지 않음을 밝히고 있다. 그림 3과 4는 상시제동 감속도가 '-0.5m/s'이고 비상제동 감속도가 '-1.0m/s'인 액슬에 장착된 직경 610mm인 브레이크디스크의 액슬하중과 속도에 따른 온도 상승의 변화를 보여준다. 이로부터 구한 12톤

표 2. 철도 차량 제동시스템의 종류

|   |  |
|---|--|
| <b>■ 점착식 제동시스템(Wheel-to-Rail Adhesion Dependent Method)</b>     |  |
| ◇ 휠셋-트럭 마찰 방식 (Wheelset-to-Truck Friction)                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 답면브레이크 (Tread Brake)</li> <li>○ 디스크브레이크 (Disc Brake)</li> <li>○ 드럼브레이크 (Drum Brake)</li> </ul>  |
| ◇ 미케니컬 리타더 방식 (Mechanical Retarder)                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 하이드로리타더 (Hydro Retarder)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 하이드로키네틱 (Hydrokinetic)</li> <li>- 하이드로스타틱 (Hydrostatic)</li> </ul> </li> <li>○ 공기 리타더 (Air Retarder)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 엔진브레이크 (Engine brake)</li> <li>- 콤푸레서 (Compressor)</li> </ul> </li> </ul> |
| ◇ 모터 제너레이터 방식 (Motor Generator, Electrodynamic)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가감저항 (Rheostatic)</li> <li>○ 재발전 (Regenerative)</li> </ul>  |
| ◇ 와전류 방식 (Eddy Current)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 와전류 디스크브레이크 (Eddy Currnt Disc Brake)</li> <li>○ 와전류 휠브레이크 (Eddy Current Wheel Brake)</li> </ul>   |
| <b>■ 비점착식 제동시스템 (Wheel-to-Rail Adhesion Independent Method)</b> |  |
| ◇ 레일-트럭 선형마찰 방식 (Rail-to-Truck Linear Friction)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 전자력레일브레이크 (Electromagnetic Rail Brake)</li> </ul>   |
| ◇ 선형 미케니컬 리타레이션 방식 (Linear Mechanical Retardation)              | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 하이드로닉 (Hydraulic)</li> <li>○ 공력 (Aerodynamic)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 열차 저항 (Train Resistance)</li> <li>- 공력브레이크 (Aerodynamic Brake)</li> </ul> </li> </ul>  |
| ◇ 선형 모터/브레이크 방식 (Linear Motor/Brake)                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 선형유도전동기 (Linear Induction Motor)</li> </ul>   |
| ◇ 선형와전류 방식 (Linear Eddy Current)                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 와전류 레일 브레이크 (Eddy Current Rail Brake)</li> <li>○ 선형모멘텀 변환 (Llinear Momentum Exchange)</li> </ul>  |

표 3. 주요 고속철도의 제동시스템<sup>[3]</sup>

| train               | car           | Max. Service speed (km/h) | brake type  |            |                            |                        |                          |                             | train resistance |
|---------------------|---------------|---------------------------|-------------|------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|
|                     |               |                           | tread brake | disc brake | electro-dynamic rheostatic | hydro-kinetic retarder | engine compression brake | electro-magnetic rail brake |                  |
| TGV-PSE (France)    | power trailer | 270                       | ◎<br>◎      | ◎          | ◎                          |                        |                          |                             | ◎<br>◎           |
| APT (England)       | power trailer | 250                       | ◎<br>◎      |            |                            | ◎<br>◎                 |                          |                             | ◎<br>◎           |
| HST (England)       | power trailer | 200                       | ◎           | ◎<br>◎     |                            |                        |                          |                             | ◎<br>◎           |
| LRC (Canada)        | power trailer | 190                       | ◎<br>◎      | ◎          | ◎                          |                        |                          |                             | ◎<br>◎           |
| Series 961 (Japan)  |               | 250                       |             | ◎          | ◎                          |                        |                          |                             | ◎                |
| ETR401 (Italy)      |               | 250                       |             | ◎          | ◎                          |                        |                          | ●                           | ◎                |
| ET403 (Germany)     |               | 200                       |             | ◎          | ◎                          |                        |                          | ●                           | ◎                |
| Metroliner (U.S.A.) |               | 210                       | ◎           |            | ◎                          |                        |                          |                             | ◎                |
| SPV2000 (U.S.A.)    |               | 190                       | ◎           |            |                            | ◎                      | ◎                        |                             | ◎                |

◎ : Emergency braking only

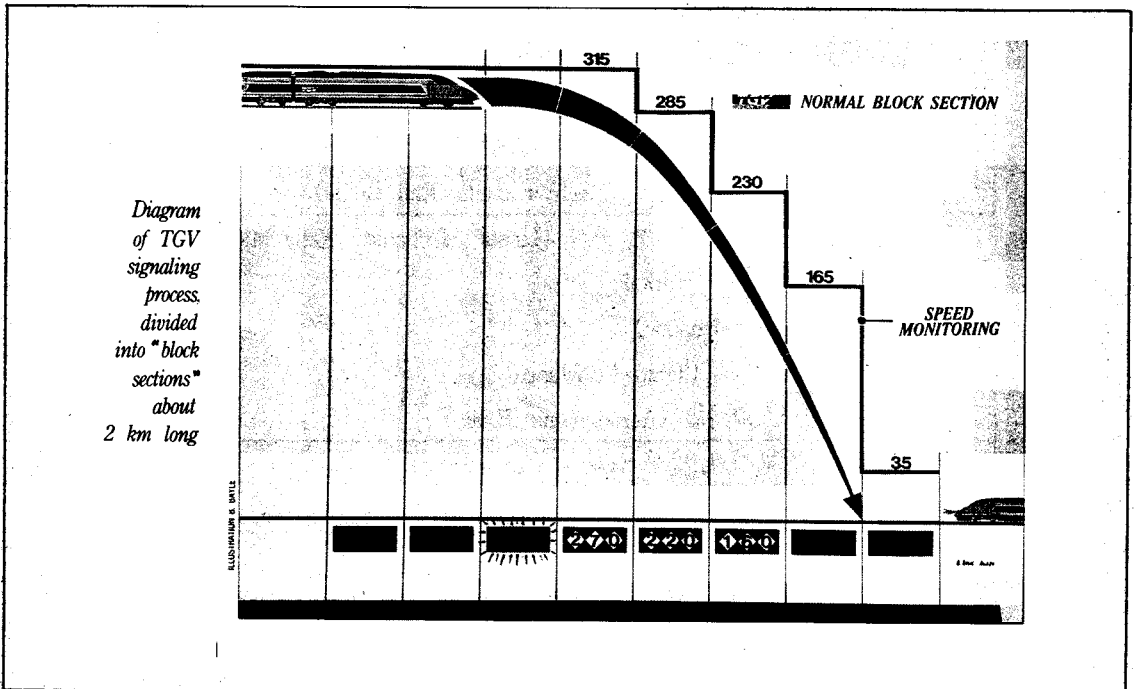


그림 1. TGV 제동 시의 신호 과정 선도

표 4. TGV-PSE 제동시스템의 명세<sup>[3]</sup>

| Powered Car  | Trailer Car  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nonarticulated</li> <li>- Axles are not mechanically couple</li> <li>- Truck Wheelbase : 300 cm</li> <li>- Unsprung weight : 2000 kg/axle</li> <li>- Total truck weight : 7220 kg/truck</li> <li>- Average axle loading : 16090 kg/axle</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Articulated</li> <li>- Axles are not mechanically coupled</li> <li>- Truck Wheelbase : 300 cm</li> <li>- Unsprung weight : 2000 kg/axle</li> <li>- Total truck weight : 7720 kg/truck</li> <li>- Average axle lading : 15350 kg/axle</li> </ul>   |
| Tread Brake (26 axles/train)   | Tread Brake (26 axles/train)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 brake unit/wheel,<br/>located on in board side of axles</li> <li>- 2 brake units/axle,<br/>4 brake units/truck</li> <li>- 52 brake units/train</li> <li>- Brake units are mounted on truck frame</li> <li>- Electropneumatic actuation</li> <li>- Used for service &amp; emergency braking</li> <li>- 92 cm diameter wheel</li> <li>- Materials : cast iron blocks</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 brake unit/wheel,<br/>located on in board side of axles</li> <li>- 2 brake units/axle,<br/>4 brake units/truck</li> <li>- 52 brake units/train</li> <li>- Brake units are mounted on truck frame</li> <li>- Electropneumatic actuation</li> <li>- Used for service &amp; emergency braking</li> <li>- 92 cm diameter wheel</li> <li>- Materials : cast iron blocks</li> </ul>   |
| Electrodynamic Brake (12 axles/train)  | Electrodynamic Brake (12 axles/train)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rheostatic</li> <li>- Dynamos mounted on car body</li> <li>- 1 dynamo/powerd axle,<br/>2 dynamos/powerd truck</li> <li>- 2 axles/powerd truck are<br/>powered/braked</li> <li>- 12 axles/train are powered/braked</li> <li>- Used for service &amp; emergency braking</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Axle mounted discs,<br/>located inboard of wheels</li> <li>- 4 discs/axle, 8 discs/truck</li> <li>- 56 disc/train</li> <li>- brake shoes and rigging<br/>are mounted on truck frame</li> <li>- Electropneumatic actuation</li> <li>- Disc Brake used for<br/>service &amp; emergency braking</li> <li>- Overall disc dimensions :<br/>64 cm O.D. x 8.5 cm thick</li> <li>- Materials : Disc - Cast iron<br/>Pads - Composition</li> </ul> |

액슬하중의 최대허용속도에 대한 소요 브레이크 디스크의 수는 다음과 같다.

- 200km/h : wheelset당 2 브레이크디스크
- 260km/h : wheelset당 3 브레이크디스크
- 300km/h : wheelset당 4 브레이크디스크

디스크브레이크는 제동효율이 높기 때문에 고속차량에 특히 적절하게 이용된다. 그러나, 이것은 점착식브레이크인 점을 항상 잊어서는 안되며, 차륜과 레일면의 상태, 즉 강우, 강설 및 얼음 등에 따라 제동거리가 현저한 차이가 있음을 주의하여야 한다.

그림 2는 액슬축에 장착된 브레이크디스크의 모습을 보여준다.

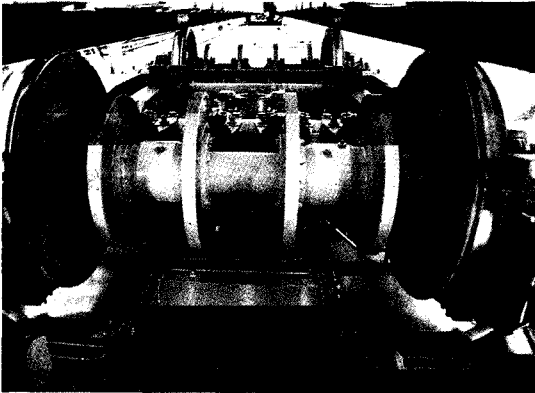


그림2 TVG의 대차 액슬축에 장착된 제동시스템

### 2.3 전자력레일브레이크 (Electro-magnetic Rail Brake)

전자력레일브레이크의 제동력은 레일 표면에 생성된 접촉압력과 브레이크자석과 레일 사이에 존재하는 미끄럼계수에 좌우된다. 그림 5는 접촉면 길이가 1000mm이고 재질이 St 37인 브레이크자석의 속도와 제동력과의 관계를 보여준다. 250km/h 속도에서 4kN정도의 값을 보여주며, 이 자석을 차량당 4개 사용했을 경우 약 0.3m/s의 감속율을 얻을 수 있다. 전자력레일브레이크는 특히 마모에 민감하기 때문에 상시제동에는 사용되지 않으며, 비상제동 시에만 사용된다.

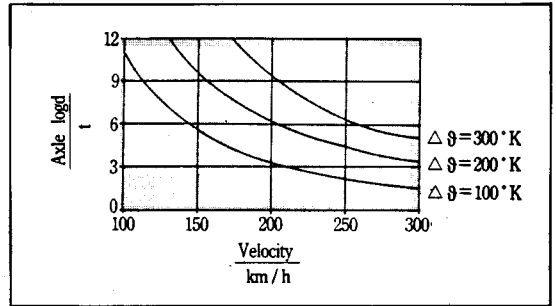


그림 3. 제동감속도 0.5 m/s시 직경 610mm 브레이크디스크의 온도상승

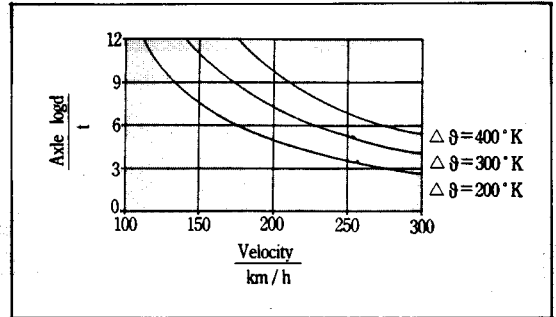


그림 4. 제동감속도 1.0 m/s시 직경 610mm 브레이크디스크의 온도상승

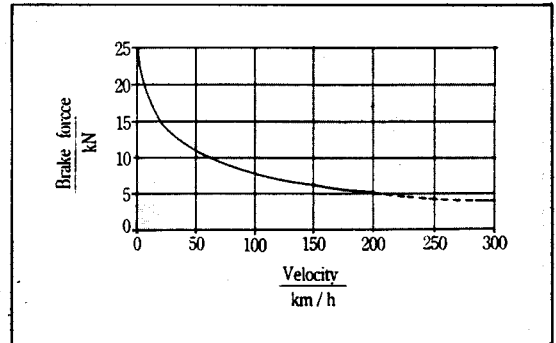


그림 5. 전자력레일브레이크의 제동력

동 브레이크의 특징은 다음과 같다.

- 제동의 안전에 있어 특별히 중요하다.(가장 가혹한 환경과 위급한 상황시 유효한 제동거리와 최소의 제동거리를 보장한다)
- 동 브레이크의 제동력은 점착과 주위환경에 영향을 받지 않는다.
- 점착식 제동시스템에 필요한 점착계수를 키워준다.

- 제동거리가 약 25% 감소된다.
- 차량 가격의 약 5%의 비용과 차량당 15톤의 무게가 추가된다.

### 2.4 전기브레이크 (Electric Brake)

전동기식 차량에서 wheelset의 감속조절은 건인모터의 기능을 발전기로 변환함으로써 손쉽게 수행할 수 있으며, 제동저항은 전기에너지의 출력으로 흡수된다. 저속과 정지 시의 제동을 위해서는 다른 마찰식브레이크가 필수적이다. 전기브레이크의 특징은 다음과 같다.

- 전기브레이크는 점착식 브레이크의 일종이다.
- 고속 제동에 더욱 적합하며, 고속에서 큰 제동력을 제공한다.
- 고속 영역에서 다른 점착식 제동시스템의 작동이 필요하지 않다.
- 안전을 위해 전기브레이크는 접촉선(contact wire)과 무관하게 작동되어야 한다.

### 2.5 하이드로다이나믹브레이크 (Hydro-dynamic Brake)

점착식인 동 브레이크는 비마찰식이고 큰 제동력을 제공하며, 제어하기가 용이하여 고속차량에 더욱 적합하다. 정지 상태로 갈수록 동 브레이크는 효력을 발휘하지 못하므로 마찰브레이크와 보완적으로 사용되어야 한다. 동 브레이크는 유압모터유니트에 특히 적합하며, 근본적으로 리타더(retarder)와 관련 제어부품이 필요하게 된다. 이들 부품은 각 wheelset의 리타더, 브레이크 제어, 오일펌프, 냉각장치, 통풍장치, 오일탱크 및 오일배관등이다.

### 2.6 와전류레일브레이크 (Eddy Current Rail Brake)

와전류레일브레이크는 비마찰식, 비점착식 제동시스템이다.<sup>[6]</sup>

1000mm 길이의 브레이크자석이 레일 윗면과의 간격이 7mm를 유지할 때 300km/h 이상의 속도

에서 10kN의 제동력을 낼 수 있으며, 이때 20kW 이상의 전력이 소모되게 된다. 고속에서 이 제동력은 전차력레일브레이크의 2-3배가 된다. 그러나, 높은 전력으로 인한 레일의 과열이 문제가 되고 있지만, 레일의 온도 상승과 이의 영향에 대한 상세한 연구결과는 아직 잘 밝혀져 있지 않은 실정이다.

동 브레이크에 소요되는 에너지는 차량의 밧데리로 충당할 수 없으며, 별도의 에너지원의 공급이 절대 필요하게 된다.

## 3. 국내외의 기술 현황

### 3.1 외국의 기술 수준

열차의 속도가 빨라질수록 급격히 증가하는 디스크에 걸리는 열부하로 인한 문제점을 해결하기 위해, 300km/h 이상의 고속영역에서 사용될 수 있는 내열변형성, 내마모성 및 내열균열성이 우수한 재질 개발과 경량 디스크의 형상개발 등에 대한 많은연구가 진행되고 있으며, 최근에는 Ni-Cr-Mo강을 이용하여 고온강도를 대폭 향상시킨 일체형 단조강 디스크가 실용화되어 열균열 발생의 방지와 경량화에 공헌하고 있다.

또한, 제동력 향상을 위해 알루미늄합금 복합재료와 카본복합재 그리고 세라믹 등을 이용한 신소재 디스크의 개발에 관한 연구도 지속되고 있다.<sup>[6-11]</sup>

이상에서와 같이 고속철도 기술의 선진국에서는 제동성, 신뢰성 및 내구성 등의 특성을 모두 만족시키는 제동 시스템의 구성과 요소 부품의 적절한 설계 및 정확한 성능평가 그리고 신속 정확한 보수유지 등에 대한 복합적인 고도 기술을 확보하고 있는 상태이며, 고속철도에 관한 기술 후발국에 대해 철저한 기술 장벽과 높은 기술료 등을 요구하고 있는 실정이다.

### 3.2 국내의 기술 수준

고속전철 제동시스템에 대한 핵심적인 기술 내용에 대한 국내의 개발경험은 미진한 실정이며,

세부기술 분류에 대해서도 대부분 초보적이거나 기초연구단계에 머물고 있다. 그러나 그간 국내 운행 중인 새마을호를 비롯한 수도권 전철 등에 사용되고 있는 제동시스템에 관한 상당한 기술과 경험을 보유하고 있다. 이를 바탕으로 고속철도의 제동장치에 관한 선진 기술을 조기에 습득하여 핵심 기반 기술을 확보하면, 머지않은 장래에 우리의 기술력도 선진국에 도달할 것으로 사료되는 바이다.

#### 4. 맺음말

고속전철의 선진기술 보유국인 프랑스, 독일 및 일본 등에서는 제동시스템에 관련된 전반적인 기술이 고속전철의 안전성, 신뢰성 등의 요구에 부응하여 많은 발전이 있었으며 기술의 안정화 단계에 진입되어 있다.

2000년 내에 경부고속철도의 상업 운행과 자체 기술에 의한 350km/h 급의 한국형 고속전철의 실현은 국내의 취약 분야인 관련 기술에 대한 산학연의 유기적인 협조체제 구축과 공동연구 추진, 고속전철 기술 도입에 관련된 교육훈련 프로그램을 충분히 활용한 핵심 기술의 조기 입수, 그리고 도출된 연구개발 프로그램의 수행 등을 통하여 가능할 것으로 사료된다.

고속 전철 제동시스템 기술 개발의 예상되는 기술적 파급효과 및 응용분야로서는, 자동차, 항공기 및 선박 등의 제동시스템 기술의 고도화, 공해방지를 위한 첨단 마찰재 개발, 고성능 마찰재 개발 및 고강도 설계를 통한 제동시스템의 콤팩트화 및 경량화 달성 그리고 전기식 제동기술의 전기자동차 및 에너지 절약 기술 등을 들 수 있겠다.

#### 참고문헌

1. 송달호 외, "고속전철 시스템의 속도 향상에 미치는 기계적 요인에 관한 연구," UCN 395-1573.C, 한국기계연구소 연구보고서, 1991.
2. 고속전철 핸드북, 한국고속철도건설공단, 1993.
3. IPEEP Train System Review Team, "Passenger Train Equipment Review Report Volume 4. Braking System, Unified Industries, Inc., Springfield, VA, 1981.
4. "The Discs Step IN," *La Vie Du Rail, French Super Train Album*, 1993.
5. A. Braun, "Braking of High Speed Passenger Trains," *IMEchE*, C163/79, 1997, pp. 309-319.
6. G. Gagarin, U. Kroger, and E. Sauweber, "Eddy-Current Magnetic Track Brakes for High-Speed Trains," *CH* 2399-4, 1987, pp. 95-99.
7. P. G. Lohmeier, "Brake Systems for Modern Rapid Transit Traffic," *Conf. on Railway Engineering, Brisbane* 17-19 June, 1985, pp. 163-168.
8. A. Lacombe, "Friction Materials in Composite Carbon-Carbon SEPCARB," *MRS-Europe*, Nov. 1985, pp. 33-39.
9. "Freinage : Les Nouveaux Matériaux," *La Vie Du Rail*-No 2380-Du 28 Janvier Au 3 Février 1993, pp. 17-18.
10. "Coup D'accélérateur Sur Le Frein," *La Vie Du Rail*-No 2340-Du 9 Au 15 Avril 1992, pp. 15-18.
11. Tadao Ohyama, "Speed Up of Shinkansen and Tribology," *Jour. of JSME*, Vol. 94, No. 867, 1991, pp. 34-38.
12. H. Sakamoto, etc., "Heavy-Duty Brake Discs for High-Speed Trains," *Jour. Sumitomo Metals*, Vol. 45-6, 1993, pp. 11-32.