

# 리니어전철의 이해



| 이 형 우 |  
한국철도기술연구원  
선임연구원



| 박 찬 배 |  
한국철도기술연구원  
선임연구원



| 권 삼 영 |  
한국철도기술연구원  
책임연구원



| 박 현 준 |  
한국철도기술연구원  
수석연구원

## 1. 서론

철도가 다른 수송시스템에 비해 높은 시장성 및 수요를 창출하기 위해서는 건설비나 운영비 등이 적으며, 신속하고 안전해야 하는 새로운 교통시스템으로서 끊임없는 신기술 개발이 이루어져야 한다. 이에 대량수송이 가능하고 환경 친화적인 관점에서 지하철이나 전철이 도입되었으며, 현재는 경제적, 공간적 측면에서 효율이 뛰어난 경전철 시스템이 국내외적으로 많은 각광을 받고 있다. 세계적으로 차세대 신교통시스템이 갖추어야 할 조건으로는 다음과 같은 점들이 요구된다.

- (1) 신속, 안전, 편리성이 보장되어야 한다.
- (2) 대기오염 및 소음(70dB 이하) 등 환경적인 측면에서 우수하여야 한다.
- (3) 경량, 콤팩트화 된 차량시스템이며, 궤도도 경량화 하여 건설비가 적어야 한다.
- (4) 전자동 무인화 시스템의 도입 등에 의하여 운전되어야 한다.
- (5) 추진 및 제동 능력이 기후 및 날씨에 영향을 받지 않아야 한다.
- (6) 유지보수 비용이 적은 시스템이어야 한다.
- (7) 국토의 효율적인 활용과 토지매입비의 저가측면에서 경제적이어야 한다.
- (8) 대도시 교통의 경우 역간거리가 짧으므로 가/감속력

이 커야하고, 짧은 시간 간격으로 대량수송이 가능한 운행시스템이어야 한다.

그러나 이와 같이 급가속이나 급구배용 추진 시스템의 요구를 만족시켜줄 만한 시스템은 그리 많지 않다. 철도 시스템에 사용되어 오던 기존의 점착 구동방식은 그 추진발생 원리상 급가속이나 급곡선 주행, 급구배 등판이 상당히 어렵다는 단점을 가지고 있다. 점착 구동방식은 회전모터를 이용하여, 차체에 장착된 휠과 지면에 고정되어 있는 레일 사이의 마찰력을 통해 추진력을 얻는 구조이다. 이런 이유로 큰 추진력을 얻기 위해서는 차체의 무게가 이에 비례해서 커져야 한다는 제한이 가해지게 되며 이는 또다시 급가속을 어렵게 만드는 원인으로 작용하게 된다. 또한, 급가속 및 급제동의 어려움은 열차운행의 시격을 증가시키는 요인이 된다.

점착 구동방식이 지닌 이와 같은 단점을 극복하고 급가속, 급구배용 추진 시스템에 적합하며 환경친화적인 시스템을 찾기 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔으며 이에 대한 한 가지 해결방안으로서 제시되어 온 것이 바로 리니어모터(선형 전동기)를 이용한 추진 시스템이다. 리니어 방식 추진 시스템은 전자기력을 추진력으로 이용하는 비접촉 시스템으로서 점착 구동방식이 가지는, 접촉으로 인해 발생하는 급가속, 고속에서의 여러 난점들을 피할 수 있게 해준다.



F·o·c·u·s

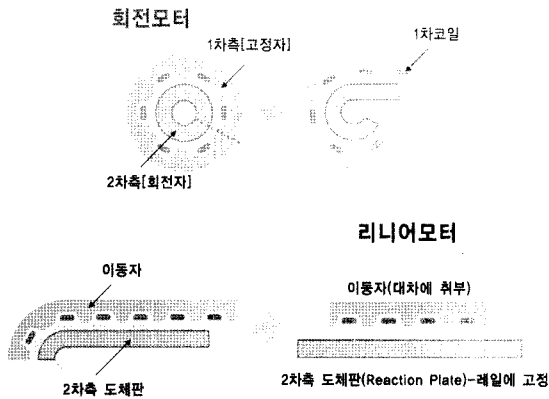


그림 1. 리니어모터의 개념도

회전형 모터와 리니어 모터의 간단한 개념이 그림 1에 나타나 있다. 리니어 모터란 회전형 모터의 한 면을 수직하게 절단해 평편하게 펼쳐 놓은 형태의 전동기로서 회전형 모터 단독으로는 만들어 낼 수 없는 선형운동을 가능하게 해주는 전동기이다. 리니어 모터는 다양한 종류들이 존재하며 각각의 타입들은 각자만의 장단점을 가지고 있다.

이런 장단점에 의거해 급가속, 고속용 철도차량 추진 시스템에서 주로 고려되었던 것들로 LIM(선형유도전동기, Linear Induction Motor)과 LSM(선형동기전동기, Linear Synchronous Motor)의 두 가지가 있다. 이 중에서 LIM은 LSM에 비하여 재료비와 설치비를 대폭 절감할 수 있으며, 제작 및 설치가 용이하므로 막대한 공사비를 요구하는 철도 차량에는 LIM 방식의 리니어 추진시스템이 적합하다.

## 2. 리니어 전철

### 2.1 리니어 전철의 개요

철도시스템에 사용되어 오던 기존의 점착구동방식과 달리, 리니어 추진 시스템은 전자기력을 추진력으로 이용하는 비점착구동 시스템이다. 리니어 전철이란 차상하부에 리니어 모터를 장착하여 차량의 추진력을 리니어 모터로부터 직접 얻는 전철을 말한다. 리니어 모터를 철도차량에 적용할 경우 다음과 같은 장점을 얻을 수 있다.

- 마찰에 의한 에너지 손실이 없으므로 시스템이 고효율화 된다.
- 마모가 없으므로 부품의 교체가 없어서 유지관리비가 저감된다.
- 소음발생이 없어서 환경성이 좋아져 도심교통수단으로 적합하다.
- 기계적 운동 변환장치가 없으므로 전체 시스템이 단순화되고 중량이 가벼워져 경량화가 된다. 따라서 차량을 추진하는 경우에는 중량감소로 콘크리트 고가 빔에 의한 선로 건설이 가능하고 에너지 소비도 저감되어 운전비가 감소된다.
- 직접 추진력을 발생하므로 차량을 추진하는 경우에 제어 응답성능이 좋아져 급가속, 급감속 능력이 더욱 좋아지고, 운행시격이 짧아지며, 정거장의 플랫폼 홈도 짧아지는 장점을 가지고 있다.

리니어 모터의 지지 구조를 살펴보면 1차 측은 suspension link와 motor support를 통하여 대차 프레임에 연결되고 인장봉(traction rod)을 통하여 차체에 견인력을 전달한다. 또한 소음을 감소하기 위하여 저소음 차륜(Sound proof wheel)을 사용한다. 그림 2는 리니어 모터의 1차 측과 2차 측의 지지 구조를 보여주며, 그림 3은 리니어 추진시스템의 단면도이다.

리니어 모터의 2차측 도체판은 back-iron 위에 경계면을 이루며 장착되는데 1차측 철심과 2차측 back-iron 사이에는 추진력보다 큰 흡인력이 작용하므로 1차측을 대차에 장착

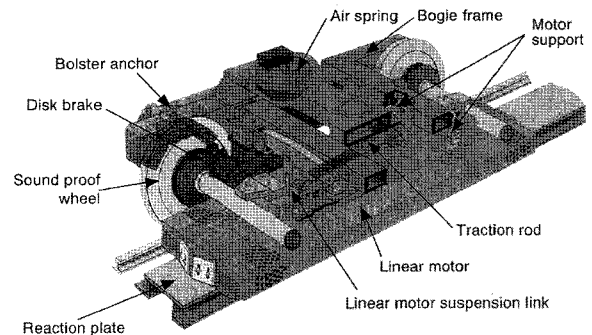


그림 2. 리니어모터의 대차 지지구조

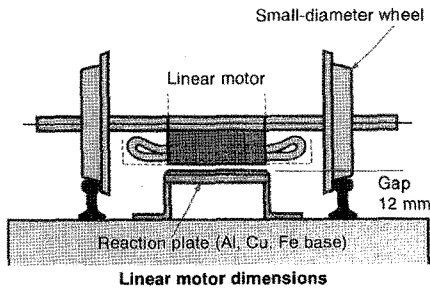


그림 3. 리니어 추진시스템의 단면도

하는 방법과 2차측 back-iron을 지상에 지지시키는 방법에 각별히 유의해야 한다. 2차측 도체판의 재질은 역구내에서는 효율을 향상시키기 위하여 때때로 구리(Cu)를 사용하며, 일반 구간에서는 알루미늄(Al)을 사용한다. 기계적 공극은 약 9~12[mm]이며, 경사지 및 곡선부 주행 시에 공극의 변화가 발생할 수 있다. 리니어 전철은 리니어 모터에 의한 비점착 구동방식이므로 차륜의 직경이 대폭 감축되어 차량의 저상화가 가능하다.

2.2 리니어 전철의 특징

앞서 언급하였듯이, 기존의 철도차량은 차륜과 레일간의 점착력에 의하여 열차가 견인되므로 차륜의 공전(slip) 또는 활주(sliding) 현상이 발생할 수 있으며, 날씨 및 기후조건에 따라서 마찰계수의 변동이 있으므로 점착 성능의 변화가 심하다. 그러나 리니어 전철의 경우에는 리니어 모터의 1차측과 지상에 설치된 2차측 레일 간에 전자기력이 작용하여 추진되는 비점착 구동 방식이므로 레일의 마찰계수 변화에 무관하게 추력을 제어할 수 있다.

또한 리니어 전철의 차륜은 중량지지와 안내를 할 뿐이므로 동력을 전달할 필요가 없기 때문에 반경이 작은 곡선을 통과할 때에도 삐걱거리는 소리의 발생이 억제되어 소음저감, 노선 선택의 자유도 향상에 도움이 되고 있다. 환경성에 관해서는 비점착 지지기술과 조합함으로써 한층 높은 향상이 가능하다.

그러나 리니어 모터는 추력과 흡인력이 동시에 발생하므로 흡인력을 극복할 수 있는 2차측 도체판의 지지 방식에 대한 특별한 대책이 필요하다. 리니어 전철의 특징을 다음과 같이 정리하여 볼 수 있다.

(1) 탁월한 등판능력

- 힘이 차륜으로 전달되지 않으므로, 급경사 등판능력 탁월(80%로 회전형의 2배 이상)
- 지하구간의 역사를 얇은 곳에 건설할 수 있음
- 지하·고가의 진입구간 길이 단축 가능함

(2) 터널 단면의 획기적 축소

- 리니어모터를 채용하여 차량 높이가 낮아짐

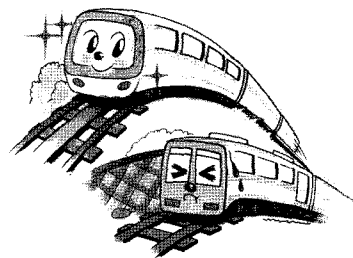


그림 4. 급구배 등판능력

- 터널 단면적 최소화로 건설비 저감(제3궤조 채용)
- 기존 노선/터널에 2층 열차 운행 가능

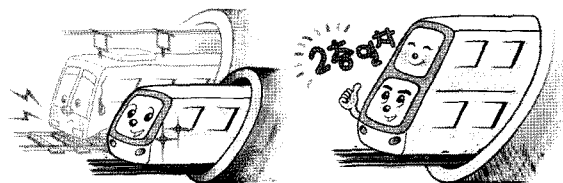


그림 5. 터널 단면적의 획기적 축소

(3) 급곡선 주행

- 차륜경 소형화, 고정축거 단축, 자기조향대차 채용으로 곡선반경 50m 가능
- 노선선정이 자유롭고, 접근성이 향상됨
- 기존 시가지에의 도입이 용이하여 건설에 유리

(4) 구조적 우수성

- 회전형 기어장치가 불필요한 우수한 구조 특성

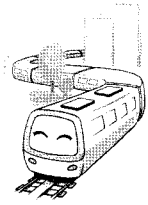
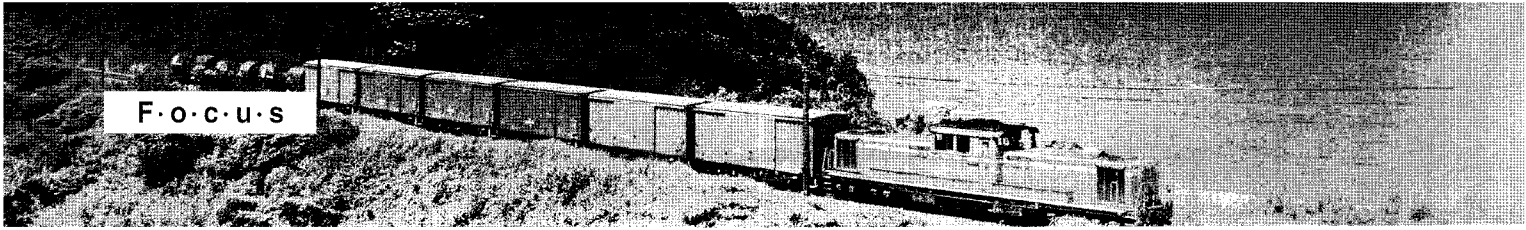


그림 6. 급곡선 주행

- 차륜/레일의 마모가 적어 유지보수비 감소
- 단순구조로서 내구성/신뢰성이 향상됨



그림 7. 구조적 우수성

(5) 차량편성의 유연성

- 2량부터 10량까지 편성을 유연하게 할 수 있어 수송 수요 대처능력 우수
- 러시아워/평상시/악천후시 시간적, 환경적 대응 능력 탁월
- 우수한 급가감속 성능으로 운행시격 단축

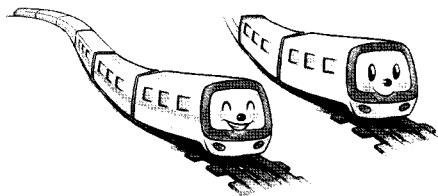


그림 8. 차량편성의 유연성

(6) 내 기후성

- 얼음/눈/비 등 운행 환경조건에 절대적 유리
- 사계절 기후 변화에 무관한 우수한 신뢰성/안정성

(7) 친환경성

- 자기조향대차 채용으로 소음 저감

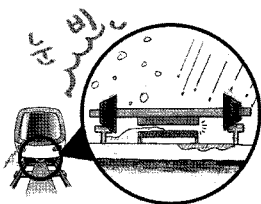


그림 9. 내 기후성

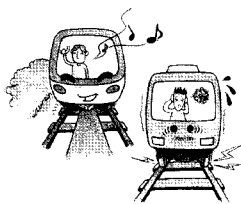


그림 10. 친환경성

- 제3궤조를 사용하여 도시 미관 수려
- 에너지 손실 최소화 (자기부상열차 대비)

2.3 리니어 전철의 현황

리니어 추진시스템을 이용한 지하철 또는 경전철의 개발은 일본, 캐나다, 미국 등을 중심으로 연구되어졌으며, 1980년대 후반부터 상용화가 이루어졌고 현재도 많은 기술개발을 도모하고 있다.

2009년 현재 리니어 전철을 자체적으로 설계·제작 가능한 국가는 캐나다와 일본 2개 국가가 있다. 캐나다 Bombardier사는 미국, 말레이시아, 중국, 한국 등에 MK-I, MK-II 모델의 리니어 경전철 차량을 수출하고 있다. 일본에서는 국산화된 기술을 바탕으로 자국의 5개 도시(오사카, 도쿄, 고베, 후쿠오카, 요코하마)에 리니어 지하철을 운행하고 있으며, 2개 도시(센다이, 도쿄 공항선)는 운행에

표. 1 세계의 리니어 전철 운행현황

개통년도	국가 및 노선
1985년	캐나다 Toronto SRT Line, 6.4km
1986년	캐나다 Vancouver SkyTrain, 28.6 km
1987년	미국 Detroit 도심순환노선, 단선 4.8 km
1990년	일본 Osaka 도시철도, 5.2 km
1991년	일본 Tokyo Oedo 지하철 노선, 3.8 km
1996년	일본 Osaka 도시철도, 5.7 km
1997년	일본 Osaka 도시철도, 4.1 km
1997년	일본 Tokyo Oedo 지하철 노선, 9.1 km
1998년	말레이시아 Kuala Lumpur시, 29 km
2000년	일본 Tokyo Oedo 지하철 노선, 2.1 km
2000년	일본 Tokyo Oedo 지하철 노선, 25.7 km
2001년	일본 Kobe 도시철도, 7.9 km
2002년	캐나다 Vancouver, 20.3 km
2003년	미국 JFK 공항 AIRTRAIN, 13.5 km
2005년	일본 Fukuoka 도시철도, 12 km
2005년	중국 Guangzhou 지하철 4호선, 14.11 km
2006년	일본 Osaka 도시철도 8호선, 11.9km
2007년	일본 Yokohama 도시철도 4호선, 13 km
2008년	중국 Beijing 공항, 27 km
2009년	(예정) 한국 용인 경전철, 18.4 km
2015년	(예정) 일본 Sendai 도시철도, 14 km

정에 있다. 표 1에 세계 각국의 리니어 전철 운행 현황을 나타내었다.

(1) 일본 형식

일본에서는 1979년도에 도시 교통시스템에 적합한 표준형 소형 지하철 시스템에 관한 필요성이 대두되었으며, 1981년 4월부터 일본철도기술협회를 중심으로 리니어 추진시스템을 이용하는 지하철 개발(Linear Metro)에 착수하였다. 도시의 상업 지구에 GTS(Guided Transportation System)를 도입하기 위해서는 노선과 주변지역에 대한 유연성이 매우 중요하므로 기존 철도보다 급곡선, 급구배를 조용하고 안정적으로 주행할 수 있어야 하며, 이러한 이유로 일본의 고베에서 1981년 세계최초로 완전 자동화된 신교통시스템이 상용화된 이후부터 고무타이어 방식의 신교통시스템이 일본과 프랑스 등에서 성공적으로 운행되고 있었다. 그러나 고무타이어 방식의 신교통시스템은 타이어 마모와 유지보수의 어려움, 에너지 소비 및 계절적 한계(눈, 비) 등으로 인하여 일부 구간에서는 리니어 모터를 이용한 비점착 구동방식 철도의 개발을 수행하였다.

1985년 4월부터 3개년 계획으로 운수성이 주관하여 산·학·연·관 합동으로 지하철의 저가격화에 관한 연구개발을 시작한 이래 1987년 3월부터 오사카에 1,885[m]의 시험선을 설치하여 안전성, 경제성 등의 평가시험을 실시하였다. 또한 사단법인 일본 지하철협회가 ‘리니어 모터 구동 소형 지하철 시스템’의 연구로 최고속도 70[km/h], 길이 1,850[m], 구배 6[‰], 4[‰]의 선로를 오사카에 설치하여 연구를 한 바가 있으며, 교통안전공해연구소, 일본 모노레일협회, 일본 지하철협회 등과 히타치 등의 회사, 동경 교통국, 오사카 교통국 등도 시험선 및 상용화선을 설치하여 시험개발 및 상업화운전을 하여 왔다.

오사카 7호선, 동경 12호선 등의 상용화선이 대표적인 경우로서 기존 지하철에 비하여 리니어 추진시스템을 이용한 경우 터널의 단면적을 64[%] 정도 까지 줄일 수 있어서 전체 건설비의 70[%] 이상을 차지하는 터널공사비를 대폭 경감시킬 수가 있었다. 현재 일본지하철협회는 지상은 모노레일, 지하는 리니어전철을 이용한 교통시스템 구축을 정책적으로 수행하고 있다. 최근에는 동경의 하나다공항과 나리타공항을

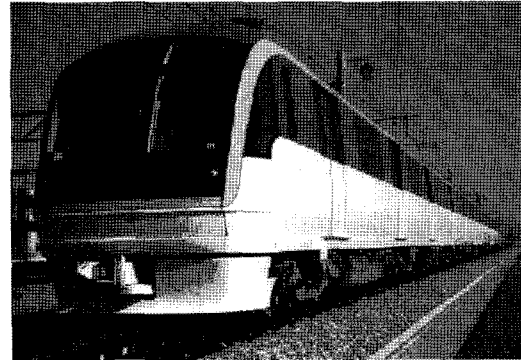


그림 11. 일본의 상업운행 (Fukuoka)

리니어전철로 연결하는 구상을 2009년 4월 공표하였다. 이 경우, 요코하마-나리타공항간의 소요시간이 현행 90분에서 56분으로 단축된다. 건설비는 1조3000억엔이 예상되고, 경제효과는 2조9000억엔, 16만6천명의 고용창출효과가 있다고 보고 있다[6].

(2) 캐나다 형식

캐나다의 UTDC(캐나다 온타리오의 도시수송개발공사, Urban Transit Development Corporation, Ltd)사는 1970년대부터 리니어 모터를 이용한 수송시스템을 개발하기 시작하여 지금은 ALRT (Advanced Light Rapid Transit)시스템으로 상용화를 달성하였다. 세계최초로 리니어 모터 전철을 개발하여 1985년에 토론토의 Scarborough에 시스템을 건설하였고, 그 후 밴쿠버의 Skytrain, 디트로이트의 People Mover를 건설하여 상용화시켰다. UTDC사는 기기 및 시스템 설계, 개발, 판매를 목적으로 1973년 온타리오 주정부가 설립한 회사이며 10년간의 개발 끝에 실용화에 성공하였다. 현재 캐나다에서는 Bombardier사가 기술을 이전받아, 미국의 디트로이트, 뉴욕 JFK 공항 순환노선, 말레이시아 쿠알라룸푸르의 리니어 전철 시스템을 설계, 제작한 바 있으며, 한국의 용인 경전철에 리니어 전철시스템을 건설 중이다. 그림 12는 2008년 8월에 개통한중국 북경의 리니어 전철 시스템이다.

(3) 국내 기술

국내의 리니어모터 관련 개발동향을 살펴보면 1970년대부터 학계에서 이론적 특성해석 정도의 연구가 산발적으로

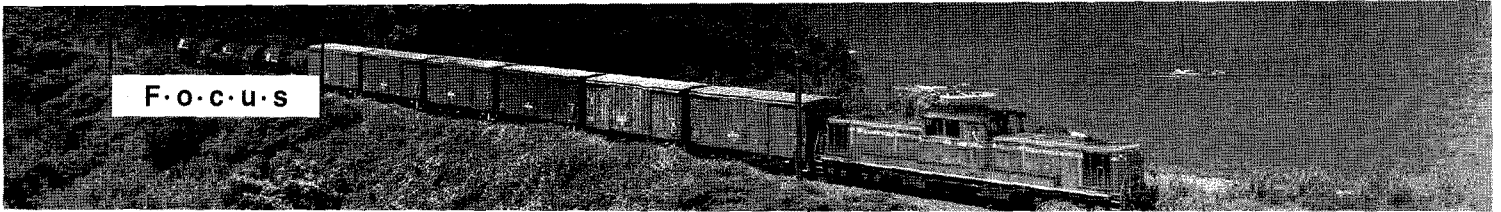


그림 12. 중국의 상업운행 (Beijing)

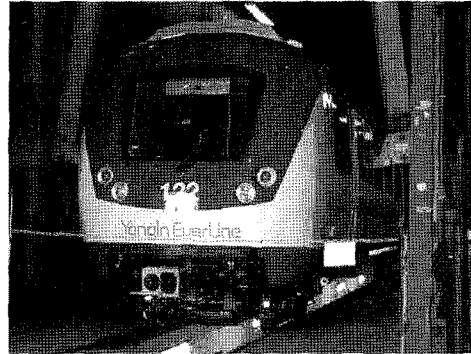


그림 13. 운행예정인 용인경전철

이루어져 오다가, 공작기계에 적용을 위한 설계기술 그리고 측정 장치, 냉각 장치, 칩 방지 기구와 같은 리니어모터를 위한 주변기기의 기술개발에 관한 연구를 꾸준히 수행하였다.

수송용 리니어모터 관련 연구의 경우, 1989년 상공부의 공업기반기술 지정, 과기부 주도의 자기부상열차 개발 등의 집중적인 연구 투자가 이루어지면서 연구가 진행되었으며, 1993년부터는 과기부의 지원으로 한국기계연구원이 주관되어 자기부상열차의 개발을 시작하여 기본적인 연구를 수행한 바가 있다. 또한 인천공항철도에 자기부상열차를 도입하는 “도시형 자기부상열차 실용화 사업”이 2006년부터 진행되어 2012년 완공을 목표로 하고 있다.

그러나 대중교통수단으로서 국내에 리니어전철이 적용된 바는 없다. 우리나라 최초의 상업용 리니어 경전철은 용인시 경전철 사업단에서 건설 중인 총연장 18.4km의 용인 경전철이다(2009년 개통 예정). 용인 경전철은 캐나다의 Bombardier사가 개발한 철제차륜의 LIM방식 추진시스템을 도입한 것으로서 캐나다, 미국, 말레이시아, 중국에서도 동일 차량이 운행되고 있다.

한국철도기술연구원에서는 2007년부터 전문연구사업인 “도시철도차량용 750V 리니어 추진시스템 개발”을 추진하고 있으며, 리니어전철의 국산화를 목표로 연구 개발 중이다.

◆ 참고 문헌

- [1] 한국철도기술연구원 리니어전철연구팀, “리니어전철시스템”, 2007
- [2] S. A. Nasar, I. Boldea, “Linear Motion electric machines”, John Wiley & Sons
- [3] Japan Subway Association, “Linear Metro System”, 2004

3. 결론

교통시스템으로서 철도차량에 적용 가능한 대용량 리니어 추진시스템에 대한 연구 개발을 위해서는 필요한 관련 기술 사항을 파악해나가고 이를 통하여 파라미터별 적용성을 분석하는 등 한 단계씩 연구를 진전시켜 나아가갈 필요가 있으며, 다행히도 1980년대부터 산·학·연을 중심으로 한 연구성과를 바탕으로 LIM 방식의 리니어 추진시스템은 국내 실용화가 가능한 단계에 와 있다.

그러나 현재 리니어전철 시장이 점점 넓어지는 시점에서, 국내 철도차량 제작사들의 기술력을 바탕으로 한 사업은 현재 없는 실정으로 기술 국산화, 선진국의 기술 선점 저지, 철도 수출 등을 위하여 국내 기술을 통한 실용화 사업이 시급한 실정이다.

또한 사회적으로도 최근 심각해진 대도시의 교통난을 해소하기 위한 한 방안으로 경전철의 건설계획이 심도 있게 검토되어, 서울시의 경우 향후 7개 노선에 경전철을 도입하기로 결정하였으며, 몇몇 지자체에서 경전철을 도입하여 상업 운행 예정에 있는 등, 국내 기술로 리니어 추진시스템 전철을 상용화할 수 있는 중요한 단계로 국내 기술이 한 단계 발전할 수 있는 좋은 계기가 되리라 생각한다. ☺

- [4] S. Nasar and I. Boldea, “Linear electric motors: Theory, Design, and Practical Applications,” Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [5] Hyung-Wop Lee, Ki-Chan Kim and Ju Lee, Review of maglev train technologies, IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 42, No. 7, pp.1917-1925, 2006
- [6] 한국철도기술연구원, “세계철도기술동향”, Vol. 132, July, 2009