

국내실정을 고려한 2층전동차 차량시스템 기초연구

A Double Deck EMU Train System for the Korean Railroad Network

김형진* 황원주** 허현무*** 백광선*** 박광복****
Kim, Hyeongjin Hwang, Wonju Hur, Hyunmoo Baik, Kwangsun Park, Kwangbok

ABSTRACT

Several countries such as Japan, France and so on gradually operate double deck trains as efficient, reliable and comfortable mass transportation systems. However, the double deck trains have relatively big cross sectional areas and high mass centers that cause unsafe vehicle running performances and interface problems between the vehicles and infrastructures, and do not have enough spaces for electric equipments. Therefore, prior to operate double deck trains on the existing lines in Korea, careful investigations should be performed. In this study, we have roughly designed a double deck EMU train system for the existing lines around Seoul metropolitan area.

1. 서론

2층열차는 미국, 유럽, 일본, 중국 등 해외의 많은 나라에서 최근 고속철도 및 통근용 차량으로 그 활용도 및 관심이 높아지고 있는데, 본 연구에서 주로 검토한 일본, 프랑스 등의 수도권 외곽 기존철도의 경우, 수도권 도심 내의 고 주거비용 및 개발제한으로 인해 급격히 증가한 수도권 외곽 거주민을 위한 쾌적하면서도 신속한 출퇴근 용 대중 교통수단의 하나로 통근용 2층열차를 투입하게 되었다.

일본 및 프랑스의 통근용 2층열차의 운행형태는 서로 상이하며 각 나라의 실정 및 노선상황에 적합한 형태로 운용되고 있다. 예를 들자면, 일본의 경우, 동경 도심내부에서의 승하차 시간 지연 등의 이유로 2층열차는 기존 전동차와는 달리 좌석식으로 고급화하였으며 도심내부 운행을 하지 않고 동경과 외곽도시를 연결(80km ~140km 정도의 중거리 인터시티 개념) 운행하고 있는데 반해 프랑스의 경우는 파리도심 내부 운행용 지하철(METRO)과 주요 거점역에서 연계, 환승되는 RER노선(파리 도심을 관통, 외곽도시에서 외곽도시로 연결)에서 통근용 2층열차가 운행되고 있다. 이는 RER노선이 지하철 노선과 구별되어 운행되므로 이 노선에 투입될 수 있는 차량의 크기(길이 및 높이)도 크고 출퇴근 시 차내 혼잡율도 우리보다 낮기 때문에 가능하다.

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 연구원, 비회원
*** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원, 정회원
**** 동림컨설팅트 전문, 정회원

2층열차는 단면적 및 높이가 커서 기존차량에 비해 주변 시설물과의 간섭이나 주행안전성이 불리할 가능성이 있고 기기배치를 위한 공간이 협소하므로 2층열차를 기존 노선에 투입하기 위해서는 차량시스템에 대한 세심한 검토가 요구된다. 특히, 2층 열차는 기존 전동차와 비교할 때 승하차 시간이 길어 혼잡하고 대피선도 설치되지 않은 도심내부에서 기존의 지하철과 혼용하여 운행하는 것은 오히려 선로용량을 저감시킬 수 있으며 차체규격도 도시철도와 부합되지 않는다. 따라서 2층열차(EMU)는 기존의 전동차(도시철도)와는 차별적으로 운행되어야 하며 수도권 외곽지역에서 도심으로 연계하기 위한 중거리 급행 inter-city 차량으로 투입되는 것이 바람직하고 수도권 광역철도망에서 운용될 경우는 일부 거점역만 정차하는 급행의 개념으로 투입되어야 할 것이다

2. 해외의 2층열차 현황 및 기술 동향

그림 1은 미국(캘리포니아)에서 교외 통근 및 로컬 인터시티용으로 운용되는 2층 객차를 나타낸 것이며 차량의 길이는 25.9m, 높이는 4.836m 에 달해 대형 2층 차량에 속한다. 해외의 2층열차 조사 결과 미국, 독일, 프랑스 등지의 2층열차는 차량이 크고 중량이 무거워 우리 현실에 적합하지 않으나 일본의 경우 동경외곽 교외선에서 차고 4.1m 내외의 소형 2층열차 차량도 운용하고 있기 때문에 우리나라의 중거리 인터시티 및 광역철도망 중 도심 외곽 지역에서의 2층열차 운행은 가능할 것으로 전망된다.

2층열차(전동차) 설계시 가장 중요한 요소 중 하나는 공간배치로, 프랑스 알스톰사는 차량 하부의 전기장치, 제동장치, 공압 관련 장치, 제어반 등을 소형화하여 재배치하고 계단 밑이나 차량의 앞뒤 끝단의 공간을 효율적으로 활용하였으며 차량의 편성방식 및 의자배치, 계단위치 및 형상, 전두부의 형상, 차체의 폭과 높이를 고객의 요구에 따라 맞춤설계(그림 2)가 가능하도록 하였다.



그림 1. CDT(캘리포니아)



그림 2. 전두부, 전방출구, 객실부, 후방출구의 선택적 조합을 통한 맞춤설계

프랑스 RATP(파리권 대중교통공사)는 RER노선에 1997년부터 쾌적한 승차감을 유지하고 승객 수송량도 기존차량에 비해 30%정도 향상된 MI2N 2층열차를 투입하고 있다. MI2N(최대속도 120 km/h, 표정속도 약 50km/h)은 5량 1편성이며 좌석 승객 수 550명, 입석 승객 수(4명/m²)는 732명이고 출입문은 승하차를 쉽게 하기 위해 폭을 2m로 확장하였다. RATP는 RER노선에서 기존 전동차와 MI2N 차량을 혼용 운행하고, 주요 거점 역에서 파리도심 내부로의 이동을 위해 METRO와 연계되도록 운용하고 있으며 RER노선에서 운행되는 2층열차의 수는 점차 증가하는 추세에 있다.

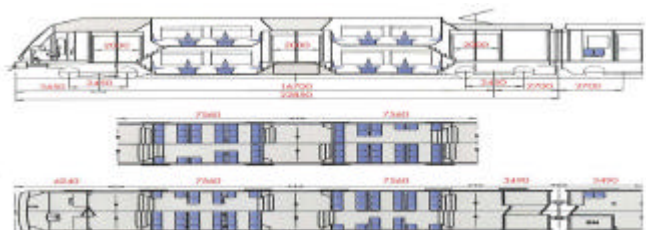


그림 3. MI2N 차량

Talgo 22(스페인)는 차량전체가 2층 구조로 된 차량으로, 모델의 개념 설계를 바탕으로 실물사이즈 mock-up이 제작되었다. 이 차량은 출입문 위치가 낮게 설치되어 1층으로 가기 위한 계단이 따로 필요 없으며 2층으로 통하는 계단만 설치 되어있다. 또한 1층 및 2층에 각각의 통로가 있어 편성의 다른 차량으로 이동 시 계단을 오르내릴 필요가 없으며 차량과 차량 사이에 1축 관절대차를 채택하여 기존차량과는 상이한 개념의 차량이다. 사용용도는 통근용(또는 중거리 인터시티)이고 차량높이는 4,600~4,950mm, 차량폭은 2,850~3,300mm, 편성타입은 동력집중식이며 추진 및 급전장치가 탑재되는 동력차를 제외한 부수차량 길이는 7.5~9.0m이다.



그림 4. Talgo 22

동일본 철도는 동경의 고 주거비용과 쾌적한 주거환경 선호추세로 증가한 교외 거주자들을 위해 쾌적하고 신속한 통근수단으로 동경 교외선에 215계(10량 편성) 2층열차를 투입, 착석통근 기회를 늘렸다. 이 차량은 중거리 도시간 및 교외지역 출퇴근자를 위한 것이며 수송량은 좌석승객 기준인데 출퇴근 시 승하차 시간 지연을 피하기 위해 입석위주인 기존 차량과 차별화 운영되고 있다. 215계 열차는 쇼난 Liner(동경-오다와라, 83.9km) 및 쇼난신주쿠 Liner(신주쿠-오다와라, 87.7 km)에서 급행으로 운행된다. 이 열차의 최고 속도는 120km/h이며 차체(연결면간 길이: 20m, 폭:2.9m, 높이:4.07m, 출입문 폭:0.9m)는 스테인레스로 제작되었고 차체/차체 및 차체/대차간 횡변위를 감쇠하는 기구가 설치되어있다. 차량편성 양 끝단의 M_c 차량은 2층만 객실이고 1층은 메인 컨트롤러, 인버터 등이 탑재된 기계실이며 열차 1편성 당 좌석수는 1,010석이다. 구리하마에서 나리타공항(구리하마-동경-나리타 공항, 149km)까지 운영되는 217계(11량 편성) 열차는 편성 중 2량만 2층열차(특실, 좌석 위주)이며 특실은 기본요금 외에 거리별로 차등 부가되는 특실요금을 지불해야 한다.

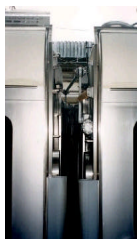


그림 5. 215계 2층열차

그림 6. 217계 2층열차

3. 국내실정을 고려한 2층열차 차량 개념모델의 기본 구조 및 제원

2층차량은 차량 높이를 줄이기 위해 가운데 부분인 대차 사이만 2층으로 하되 1층 바닥면은 대차 상면보다 밑으로 내려오게 하는 구조가 일반적인 경향이다. 2층열차는 객차형과 전동차형으로 구분되는데 본 연구에서 검토된 2층열차 모델은 전동차형이며 이러한 방식으로는 저상홈 운영이 곤란할 것으로 평가된다. 이는 출입문 위치 변경뿐만 아니라 출입문 폭도 축소되어 승하차 시간이

많이 소요되고 전후부 동력차는 운전실 출입문 및 대차와 전장품 설치공간 때문에 차량하부에 승객용 출입문을 설치하기가 용이하지 않기 때문이다.

그림 7은 본 연구에서 검토된 2층열차 차체의 기본 구조를 나타내고 있으며 출입문 근처에 설치된 계단을 통해 1층 및 2층으로 이동할 수 있고 차량 구조 특성상 기존 전동차에 비해 출입문 수가 적으므로 원활한 승하차를 위해 기존 차량보다 폭이 넓은 출입문(2m)을 채택하였다. 그림 8은 2층열차의 편성을 10량 1편성(5M5T)으로 검토한 것을 보여주고 있으며 그림 9는 부수 차량의 내부구조를 나타내고 있는데 정원기준 수송량을 증강하기 위해 2층은 좌석 식이고 1층은 기존 전동차와 유사한 형태의 구조로 하여 편성 당 좌석 수를 기존차량 대비 50%이상 확대한 구조로 검토하였다. 표 1, 2, 3에 명시된 내용은 현재까지 검토된 차종별 기기배치방안, 기본 제원, 차량 중량 추정치를 표시한 것으로 국내 운영 타당성을 분석하기 위해 개념적으로 설정된 것이므로 향후 전장품의 소형/경량화 및 구조/형상 변화에 따라 달라질 수 있다. 차량의 제원은 실제로 투입되는 노선이나 운용조건 등에 따라 달라지는데 AC 전용구간에서 운용되는 중거리 급행 인터시티 차량은 가속도를 도시철도보다 낮추어 설계하면 기기배치에 큰 문제가 없을 것으로 보이나 도시철도의 가속도(3 km/h/s)를 지니면서 AC/DC 구간에서 운용되는 차량은 전장품의 사이즈를 대폭 줄여야 차량에 탑재가 가능할 것으로 판단된다(컨버터 등 부피가 큰 전장품에 강제냉각방식 도입 등). 또한 상대적으로 큰 2층열차의 단면적을 감안할 때, 서울시 도시철도건설 규칙(서울시 규칙 제 3000호, 1999년)의 차체 규격 중 높이(레일 두부 상면에서 지붕 면까지 3.8m 이하)를 만족시킬 수 있는 2층열차 제작이 어려우므로 해당규칙이 적용되는 도시철도 구간에서의 운용이 불가능할 것으로 사료되며 해당규칙이 2층열차에는 적용되지 않는다고 하더라도 수도권 1기 지하철보다 차량 한계가 작은 2기 지하철에서의 운용은 기술적으로 상당히 어렵다.

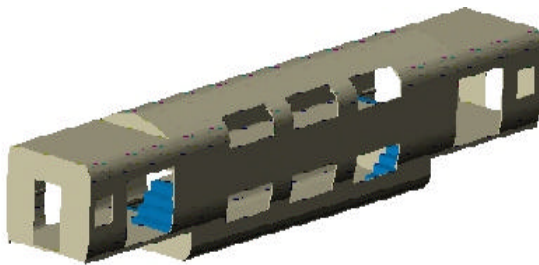


그림 7. 2층열차 차체 컨셉 모델

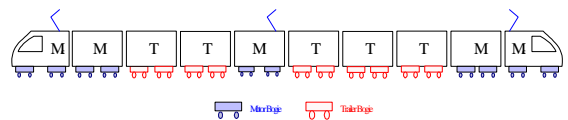


그림 8. 2층열차 차량편성도

1.

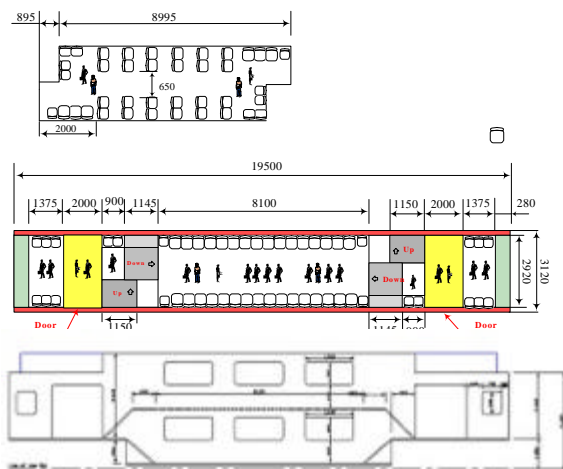


그림 9. T카 형상도

기기명칭/차종	Mc'	M	M'	T
주전력변환장치	○		○	
전자제어박스	○		○	
주변압기	○		○	
SIV 인버터	○		○	
SIV 변압기	○		○	
제동 유니트	○	○	○	○
일반배전반	○	○	○	○
냉난방제어반	○	○	○	○
ATS/ATC 제어장치	○			
HVAC	○	○	○	○
판도그래프 및 관련설비	○		○	

표 2. 2층열차 기본제원

2층열차(EMU형) 주요 기본 제원					
성능	최고운행속도: 110 km/h, 가속도: 3 km/h/s(광역철도), 2.5km/h/s(중거리 인터시티) 감속도: 3.5 km/h/s(상용), 4.5 km/h/s(비상)				
차체	길이	길이: 19500 mm, 폭: 3120 mm, 높이: 4190 mm			
대차	대차중심간 거리	대차형식	고정축거	차륜경	차륜담면
	13.8m	볼스타리스 형식 1차: 코니컬축상스프링, 2차: 공기스프링	2.1m	0.86m	1/20
추진 제어 장치	전원전압	AC 25 kV			
	컨버터/인버터	4상한 PWM제어방식, VVVF인버터 제어			
	견인전동기	유도전동기			
	제동방식	회생브레이크 병용 전기지령식 공기브레이크			
편성당 량수	10 량				
열차 중량	공차시 : 412.2톤 만차시(200% 입석혼잡) : 595.36톤				
좌석수	정원시 : 1868석(좌석: 806석, 입석: 1062석) 만차시(200% 입석혼잡) : 2930석(좌석: 806석, 입석: 2124석)				
견인전동기	230kW/모터 20대 (총 출력 4,600kW)				
편성당 판토수	3대				

표 3. 2층열차 모델 차종별 중량

항목 차종	차체	운전실 설비	실내 설비	기계 설비	전장품 설비	차외 설비	대차	기타 설비	공차 중량	정비 중량	승객하중	총하중
											200% 입석혼잡	200% 입석혼잡
Mc	7,800	1,500	4,510	4,100	16,200	2,700	15,400	2,000	54,210	54,360	8,680	63,040
M	9,200		5,250	5,100	5,200	2,100	15,400		42,250	42,400	20,336	62,736
T	9,000		5,970	4,100	2,200	2,100	11,000		34,370	34,520	22,196	56,716
M'	7,800		4,780	4,100	9,650	3,700	15,400	2,000	47,430	47,580	12,648	60,228

4. 2층열차 차량 주행 동특성

2층열차 개념모델에 대한 주행특성을 분석하기 위해 궤도 및 터널 데이터는 실측데이터 및 설계도면을 참고로 하였고 차량 운용조건 및 대차 물성치는 기존 전동차의 조건을 적용하였다. 해석 S/W는 철도차량 동특성 해석 프로그램인 영국 AEA Technology사의 VAMPIRE(Ver.3.5)이다.

차량은 입석혼잡 200%의 영차조건으로 하였고 대차는 과천선 차량(M_{car})을 대상으로 모델링하였다. 2층열차 현가계는 1차현가계에 코니컬 축상 고무스프링이, 2차현가계에 공기스프링이 장착된 볼스타리스 형식이다(그림 10). 궤도는 과천선 곡선구간 및 경부선 직선구간 일부를 샘플링하여 모델링하였다.

곡선(R300 구간) 통과속도는 60km/h를 적용하였고 최고속도(직선구간)는 110km/h를 적용하여 해석을 수행하였다. 그림 11 및 12에 곡선구간 통과 시 차량의 횡변위 및 건축한계 기준치(국유철도 건설규칙의 곡선부 확폭 기준 적용)를 나타내었는데 횡변위가 기준치 내에 드는 것으로 평가되었으나 차량의 횡 변위를 저감시키기 위해 차량의 무게 중심을 낮추고 차체/차체 및 차체/대차 간 횡변위를 감쇠시킬 수 있는 기구의 장착이 필요할 것으로 예측된다. 해석에 따른 동적성능 평가기준은 국내 철도차량에 통상적으로 적용되어온 기준치를 이용, 적합성 여부를 검토하였는데 R300 곡선구간 통과 시 및 최고속도 110km/h 주행 시, 차량주행안전도 관련 인자인 운중감소율, 탈선계수가 모두 허용기준치 이내에 있음을 알 수 있다. 따라서, 2층열차 사양안에 근거한 10량편성 차량모델의 안정성 및 주행안전도측면에서 동적성능은 적절하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

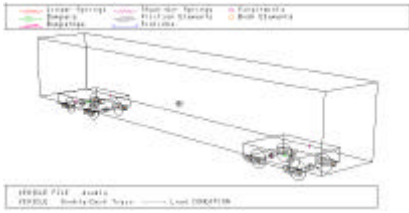


그림 10. 2층열차 차량모델 구성요소

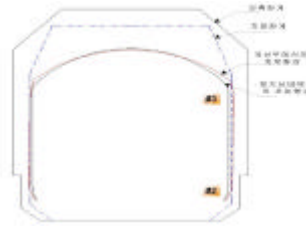


그림 11. 곡선통과시 차량 횡변위

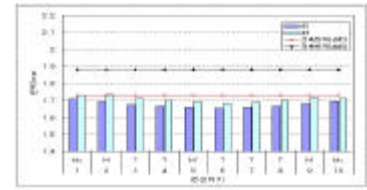


그림 12. 곡선통과시 차종별 횡변위

표 4. 차량주행시 동특성 해석결과

선로	주행속도	항목	해석결과	비고
R300	60km/h	탈선계수	0.67	· 30Hz low pass filter, 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1% 시 1.1까지 허용
		윤증감소 [%]	31.6	· 30Hz low pass filter, 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1% 시 80%까지 허용
직선선로	110km/h	탈선계수	0.37	· 30Hz low pass filter, 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1% 시 1.1까지 허용
		윤증감소 [%]	38.7	· 30Hz low pass filter, 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1% 시 80%까지 허용

5. 결론

본 연구에서는 국내실정을 고려하여 2층열차(전동차) 구조 및 형상을 개념적으로 설정하였으며 차량중량 및 차종별 승객수송량, 기기배치 등을 검토하였다. 2층열차는 차량 하부에 공간이 거의 없어 전동차로 제작할 경우, 기존 차량과는 상이한 기기배치가 필요하며 전장품의 소형/경량화, 기기 재배치 등의 기술이 필수적이다. 또한, 2층열차 개념모델의 주행특성 분석 결과, 곡선구간 통과 시 및 최고속도 110km/h 주행시의 동적 윤증감소율, 탈선계수가 모두 허용 기준치 이내에 들어 기본 제원에 근거한 차량모델의 동적 성능은 적절한 것으로 평가되며 주행 시 시설물과의 간섭문제를 줄이기 위해 차량의 횡변위 감소를 위한 장치가 필요할 것으로 예측된다.

수송량 측면에서는 입석위주 전동차와 비교할 때 2층열차의 수송량 증강효과가 외국의 경우처럼 크지 않을 것이다. 2층열차의 정원은 기존 전동차보다 많으나 좌석비율이 높기 때문에 차내 혼잡율이 증가하면 수송량 증대효과는 낮아지며 축중때문에 수송량을 늘리는데도 한계가 있다. 또한, 차내 혼잡율이 극심할 경우, 승하차 시간 지연이 예상되고 도시철도의 차체규격을 만족시키기 어렵기 때문에 2층열차는 도심운행 위주의 기존 완행전동차(도시철도)와는 차별적으로 원거리 통근자에게 승객편이성을 향상시킨 중거리 급행 인터시티 차량으로 운행되는 것이 바람직할 것이다.

후기

본 연구는 건설교통부가 출연한 건설기반기술혁신사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2003), “2층 급행열차 운영을 위한 기술개발 및 설계기준에 관한 연구(국내 실정에 적합한 2층열차 모델 기초연구)”, 건설기반기술혁신사업 2차년도 연차보고서