

EMU type 2층열차 차량시스템에 관한 기초연구

Preliminary Investigations of a Double Deck Train (EMU type) System

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

ABSTRACT

In recent years, efficient commuter transportation has become one of major issues to be taken into account around Seoul metropolitan area. In order to solve the problems, 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. For these reasons, we have studied the double deck train system for the existing lines around Seoul metropolitan area as an alternative way to carry heavy transportation efficiently and comfortably.

Key words : double deck train

1. 서론

일본, 프랑스 등의 경우, 대도시권 도심 내 비싼 주거비 및 개발제한으로 대도시권 외곽에 거주하는 주민의 수가 급격히 증가하게 되는 이른바 대도시권역의 급속 팽창 현상이 발생하고 있다. 따라서 이들 나라에서는 교외지역 거주자들을 위해 쾌적하면서도 신속한 출퇴근 용 대중 교통수단이 절실히 필요하게 되었고 열차의 편성차량 증가, 시격단축 등 여러 가지 방안을 검토한 결과 2층열차를 투입하는 것이 최적 대안으로 모색되었다. 이는 2층열차의 투입이 쾌적한 승객서비스를 제공하면서 선로용량 증대 등 시설물에 투자하여 수송량을 증강시키는 것보다 훨씬 저렴한 방법임이 입증되었기 때문이다. 그러나 2층열차는 기존 차량보다 차량 단면적이 크고 무게중심이 높으므로 주변 시설물과의 간섭문제나 주행안전성에 있어 불리한 점을 내포하고 있을 뿐만 아니라 차량중량이 무겁고 기기배치를 위한 차량내 공간이 협소하기 때문에 2층열차를 기존 노선에 투입하기 위하여는 차량시스템에 대한 세심한 검토가 요구된다.

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원
** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 연구원
*** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원
**** 동림컨설팅트 전문

광역철도망에서 운용되는 2층 전동차는 차량구조 특성상, 출입문 수가 적어 승하차 시간이 다소 길게 되는 단점이 있으므로 수도권 광역철도망 운행시 주요 거점역에서만 정차하는 급행의 개념으로 투입하기에 적절하며 대피선이 설치되지 않은 도심내부(지하철 구간)에서 운행하기보다는 수도권 외곽지역에서 도심으로 연계하는 광역철도망(또는 근거리 inter-city)에 투입되는 것이 바람직하다.

2. 국외 2층열차 관련 기술 동향

2층열차는 차량의 높이가 터널 및 차량한계에 의해 제한을 받으므로 미국, 독일, 프랑스 등에서 현재 상업 운행되는 2층열차 중 우리 현실에 적합한 차종은 없으나 일본의 경우, 동경 교외선 등에서 차고 4.1m 내외의 2층열차 차량도 운용하고 있기 때문에 우리나라의 광역철도망 중 도심 외곽 지역에서의 2층열차 운행은 가능할 것으로 전망된다.

2층열차 설계시 가장 중요한 요소 중 하나가 공간배치의 효율성 측면이다. 프랑스 알스톰사는 차체의 공간을 최대한 활용하기 위해 차량 하부의 전기장치, 제동장치, 공압 관련 장치, 제어반 등을 소형화하여 재배치하고 계단 밑이나 차량의 앞뒤 끝단의 공간을 활용하였다. 차량의 단면형상은 UIC계이치를 최대한 활용, 롤링모션(rolling motion)시 시설물과의 간섭이 일어나지 않도록 하고 있으며 차량의 편성방식 및 의자배치, 계단위치 및 형상, 전두부의 형상, 차체의 폭과 높이를 고객의 요구에 맞게 맞춤설계가 가능한 설계방식을 적용하고 있다.

2.1 일본 동경근교 교외선 2층열차 운영현황

일본의 경우, 동경 도심지의 비싼 주거비용 및 쾌적한 주거환경 선호경향으로 최근 교외 주거지역이 급속히 팽창하고 있는데 교외지역 거주자들에게 쾌적하고 신속한 통근수단을 제공하기 위해 2층열차가 투입되게 되었다.

동일본 철도는 동경근교 외곽 주택지의 원거리 통근 대책으로서 215계 근교형 2층열차를 도입, 착석 통근의 기회를 늘렸으며 중·장거리 및 도시간(intercity)이나 교외지역(광역철도망) 출퇴근자를 위한 운행이 주목적으로 수송량은 좌석승객 기준이다. 215계 열차는 쇼난 Liner(동경-오다와라, 83.9km, 표정속도 67km/h, 1992년 4월 20일 개통) 및 쇼난신주쿠 Liner(신주쿠-오다와라, 87.7 km, 표정속도 59.1km/h, 2001년 12월 1일에 개통) 에서 급행으로 운행되고 있으며 정차는 시나가와, 후지사와 및 치케아사키 역에서만 한다. 최고 120km/h로 운용되며 열차의 편성은 $M_c - M' - T - T' - T' - T_s(\text{특실}) - T_s(\text{특실}) - T - M' - M_c$ 의 순으로 되어있고 차체(연결면간 길이: 20m, 폭:2.9m, 높이:4.07m, 출입문 폭:0.9m)는 스테인레스로 제작되었다. 차량편성의 양쪽 끝에 위치하고 있는 M_c 차량은 2층에만 객실이 있고 1층에는 메인컨트롤러, 인버터 등 주요장비를 탑재하고 있는 기계실로 활용하고 있으며 동력차(M')는 부수차량(T)과 마찬가지로 1, 2층 모두를 객실로 활용하는 형태(120석)로 되어있지만 차이점은 부수차량과 달리 차장실과 화장실이 없다.

주로 “쇼난 Liner”로 사용되고 있는 기존의 185계와 비교하면, 215계 차량편성(10량)은 좌석수 기준으로 60% 향상된 1010석을 갖추고 있다.

2.2 프랑스 파리근교의 2층열차 운영현황

RER(파리 광역철도망)의 라인A는 80년대 이후 승객이 급증하여 이들의 쾌적한 수송문제가 큰 고민거리로 지적되어 RATP(파리권 대중교통 공사)는 2층열차를 투입하게 되었다. 2층열차는 쾌적한 승차감을 유지하면서 승객 수송량이 기존차량에 비해 30~35%정도 크기 때문이다.

Z2N(최대속도 140km/h, 차고 4.32m, 차량 폭 2.82m)의 동력차 및 부수차량의 길이는 각각 25.1m, 26.4m이며 동력차에는 집전장치가 설치되고 차량 양 끝단에 전장품이 설치되는 공간이 있다. 측 출입문은 편성에 속한 모든 차량의 양쪽에 2개씩 설치되어 있으나 동력차(2동실)의 경우는 답승 승객수가 적으므로 문의 폭을 1.3m로 하였으며 4량이나 5량을 한 편성으로 하여 운용된다.

MI2N 형식(최대속도 120km/h, 표정속도 약 50km/h)은 5량 편성으로 운용되고 있는데 SNCF(프랑스 철도공사) 차량편성은 2등실(운전실 포함)+동력차(2등실)+2등실(부수차량)+동력차(1,2등실)+2등실(운전실)로 구성되어 있다. RATP는 1996년 2월 MI2N 차량을 처음 도입하여 차량 적용시험을 거친 후 현재 운용 중인데 좌석 승객 수 550명, 입석 승객 수(4명/m²)는 732명으로 이는 같은 노선에서 운행되고 있는 다른 차량에 비해 승객 수송량이 30%정도 향상된 것이다. 출입문은 승객들의 승하차를 쉽게 하기 위하여 폭을 2m로 대폭 확장하여 적용하였다.

프랑스에서는 MI2N을 비롯한 2층열차의 운행 효율성을 인정받아 점차 그 수가 늘고 있는 추세이며 2층열차 운영의 성공적 케이스로 평가되고 있다. RATP는 RER노선에서 기존의 전동차와 2층열차인 MI2N 차량을 혼용하고 주요 거점역에서 파리도심 내부로의 이동을 위해 METRO와 연계되도록 운용하고 있다.

3. 국내실정을 고려한 2층열차 차량 개념모델의 기본 구조 및 제원

2층열차 차량 양쪽끝단은 대차가 위치하는 관계로 1개 층으로 되어있고 대차 사이의 부분만 2층으로 하되 1층 바닥면은 대차 상면보다 밑으로 내려오는 구조로 되어있다. 그림 1은 2층열차 차체의 기본 구조를 나타내고 있으며 계단을 통해 1층 및 2층으로 이동할 수 있는 구조로 되어있고 차량 구조 특성상 출입문 수에 제한이 있으므로 원활한 승하차를 위해 기존 차량보다 폭이 넓은 출입문(2m)을 채택하였다. 그림 2와 3은 동력차 및 부수 차량의 내부구조를 나타내고 있으며 2층은 좌석 식이고 1층은 기존 전동차와 유사한 형태의 구조로 하여 좌석 수를 기존차량 대비 50%이상 확대한 구조이다. 그림 4는 2층열차 차량편성을 나타내고 있으며 10량 1편성(5M5T)으로 검토한 것이고 표 1, 2, 3에 명시된 내용은 현재까지 검토된 2층열차 차량의 기본 제원 및 차종별 기기배치 방안을 표시한 것으로 국내 운영 타당성을 분석하기 설정된 것이다.

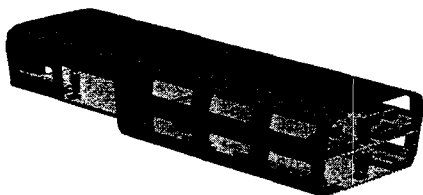


그림 1. 2층열차 차체구조

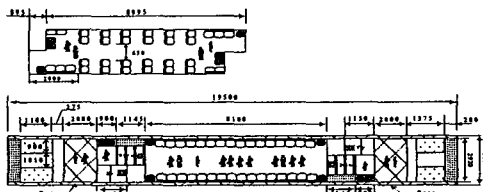


그림 2. M-car 내부형상도

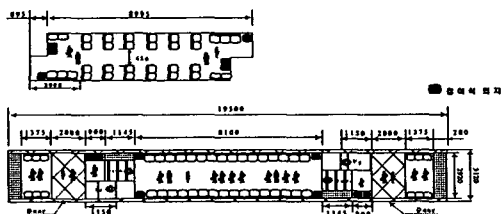


그림 3. T-car 내부 형상도



그림 4. 2층열차 차량편성도

표 1. 차종별 기기배치 방안

기기명칭	제어구동차(M _c)	구동차(M)	구동차(M')	부수차(T)
제동설비	○	○	○	○
HVAC	○	○	○	○
주변압기	○	-	○	-
판토타이프 및 관련설비	○	-	○	-
인버터/컨버터	○	-	○	-
제동저항기	○	-	○	-
SIV 인버터	○	-	-	-
충전장치 및 축전지	-	○	-	-
일반 배전반	○	○	○	○

표 2. 2층열차 기본제원

2층열차(EMU형) 주요 기본 제원					
성능	최고운행속도: 110 km/h, 가속도: 3 km/h/s, 감속도: 3.5 km/h/s(상용), 4.5 km/h/s(비상)				
차체	길이	길이: 19500 mm (총 열차길이: 200m), 최대 폭: 3120 mm, 높이: 4190 mm			
대차	대차중심간 거리	대차형식	고정축거	차륜 경	차륜담면
	13.8m	볼스터리스 형식 - 1차: 코니컬축상스프링 - 2차: 공기스프링	2.1m	0.86m	원호형1/20
추진 제어 장치	전원전압	AC 25 kV			
	컨버터/인버터	4상한 PWM제어방식, VVVF인버터 제어			
	전인전동기	유도전동기			
	제동방식	희생브레이크 병용 전기지령식 공기브레이크			
편성당 량수	10 량				
열차 중량	공차시 : 412.2톤 만차시(200% 입석혼잡) : 595.36톤(최대차축하중 : 16톤)				
좌석수	정원시 : 1868석(좌석: 806석, 입석: 1062석) 만차시(200% 입석혼잡) : 2930석(좌석: 806석, 입석: 2124석)				
전인전동기 출력/수량	230kW/모터 20대 (총 출력 4,600kW)				
편성당 판토수	3대				

표 3. 2층열차편성 모델 중량

항목	Mc1	M1	T1	T2	M'	T3	T4	T5	M2	Mc2	합계
차체	9,800	9,200	9,000	9,000	9,800	9,000	9,000	9,000	9,200	9,800	92,800
운전실설비	1,500									1,500	3,000
실내설비	4,510	5,250	5,970	5,970	4,780	5,970	5,970	5,970	5,250	4,510	54,150
기계설비	4,100	5,100	4,100	4,100	4,100	4,100	4,100	4,100	5,100	4,100	43,000
전장품 설비	16,200	5,200	2,200	2,200	9,650	2,200	2,200	2,200	5,200	16,200	63,450
차외설비	2,700	2,100	2,100	2,100	3,700	2,100	2,100	2,100	2,100	2,700	23,800
대차	15,400	15,400	11,000	11,000	15,400	11,000	11,000	11,000	15,400	15,400	132,000
공차중량	54,210	42,250	34,370	34,370	47,430	34,370	34,370	34,370	42,250	54,210	412,200
정비하중	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	1,500
정비중량	54,360	42,400	34,520	34,520	47,580	34,520	34,520	34,520	42,400	54,360	413,700
승객하중 (만차시, 200% 입석혼잡)	8,680	20,336	22,196	22,196	12,648	22,196	22,196	22,196	20,336	8,680	181,660
총하중 (만차시, 200% 입석혼잡)	63,040	62,736	56,716	56,716	60,228	56,716	56,716	56,716	62,736	63,040	595,360

4. 2층열차 차량 주행 동특성

2층열차는 승객 및 차량부속기기로 인한 하중으로 차체의 운동중심이 상승하여 곡선 주행 시 주행 안전성이 떨어질 가능성이 있으므로 2층열차 개념모델에 대하여 차량주행 시 주행특성을 분석하였다. 궤도 및 터널 데이터는 실측데이터 및 설계도면을 참고로 하였고 차량 운용조건 및 대차 물성치는 기존 전동차의 조건을 적용하였다. 해석에 사용된 S/W는 철도차량 동특성 해석 전용 프로그램인 영국 AEA Technology사의 VAMPIRE(Ver.3.5)이다.

차량은 입석혼잡 200%의 영차조건으로 하였는데 차체는 본 연구에서 검토된 개념모델을 적용

하였으며, 대차는 국내에서 운용중인 과천선 차량(M_{car})을 대상으로 모델링하였다. 2층열차의 현가계는 1차현가계에 코니컬 축상 고무스프링이, 2차현가계에 공기스프링이 장착된 볼스타리스 형식으로 구성되어 있다. 궤도는 곡선통과 시를 가정하여 과천선구간(표준궤간, 1435mm, 50kgN 레일 적용)에 실존하는 R300구간을 샘플링하여 모델링하였다(실제의 선로에서 궤도 검측차로 측정한 궤도데이터를 해석프로그램 궤도조건에 적합하게 변환하여 적용). 또한, 최고속도 주행시를 고려한 해석을 위하여 경부선 서울~수원간 직선선로 일부를 샘플링하여 궤도모델로 사용하였다.

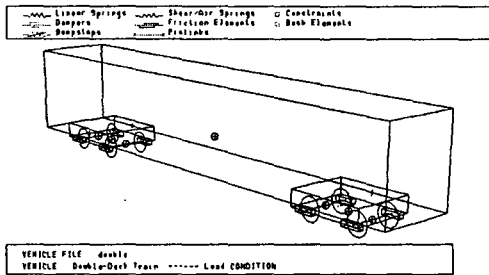


그림 5. 2층열차 차량모델 구성요소

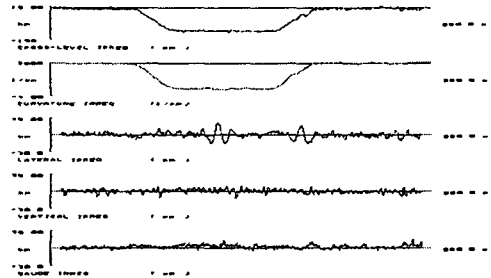


그림 6. 선로데이터(과천선 샘플링, R300)

곡선(R300 구간) 통과속도는 전동차의 곡선통과속도인 60km/h를 적용하였으며, 최고속도 주행시는 2층열차 사양 최고속도인 110km/h를 적용하여 해석을 수행하였다. 해석에 따른 동적성능 평가 기준은 국내 철도차량에 통상적으로 적용되어온 기준치를 적용하여 그 적합성 여부를 검토하였다. 2층열차모델의 R300곡선구간 통과시, 차량주행안전도 관련 인자인 동적윤증감소율, 탈선계수, 정상횡가속도는 모두 허용기준치 이내에 있음을 알 수 있다.

또한, 최고속도 110km/h 주행시에도 주행안전도 관련 탈선계수 및 윤증감소율은 모두 허용 기준치 이내에 있음을 알 수 있다. 따라서, 2층열차 사양안에 근거한 10량편성 차량모델의 안정성 및 주행안전도측면에서 동적성능은 적절하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 7~9는 R300 곡선구간 통과시 차량동적 인자인 윤증감소율, 탈선계수, 차체정상 횡가속도를 나타낸 선도이며 그림 10~11은 직선선로를 최고속도 110km/h 주행 시 윤증감소율, 탈선계수를 나타낸 선도이다

표 4. 차량주행시 동특성 해석결과

선로	주행 속도	항목	해석 결과	비고
R300	60km/h	탈선계수	0.51	· 30Hz low pass filter · 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1%일 때 1.1까지 허용
		윤증감소 [%]	29.3	· 30Hz low pass filter · 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1%일 때 80%까지 허용
		정상 횡가속도[m/s ²]	0.52	· 차체횡가속도 정상성분 · 0.8m/s ² 까지 허용
직선선로	110km/h	탈선계수	0.33	· 30Hz low pass filter · 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1%일 때 1.1까지 허용
		윤증감소 [%]	28.2	· 30Hz low pass filter · 구간 최대치 · 빈도누적확률 0.1%일 때 80%까지 허용

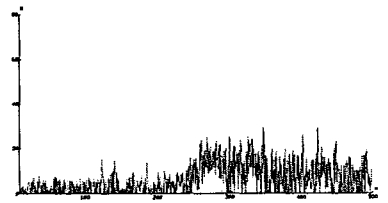


그림 7. 곡선구간 통과시 차륜 윤증감소율



그림 8. 곡선구간 통과시 차륜 탈선계수

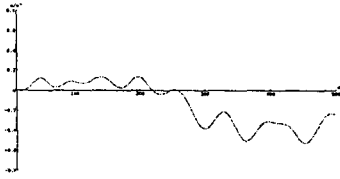


그림 9. 곡선구간 통과시 차체 정상횡가속도

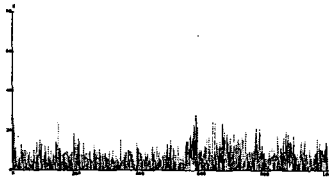


그림 10. 최고속도 주행시의
운중감소율

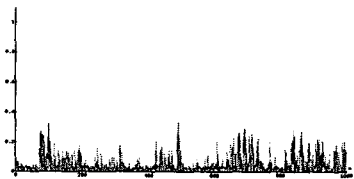


그림 11. 최고속도 주행시의
탈선계수

5. 결론

본 연구에서는 해외의 2층열차 운용사례 검토 및 분석을 통하여 국내실정에 적합한 개념적 2층열차 차량 구조 및 형상을 설정하였으며 16톤 이하의 축중 유지를 위해 차종별 승객수송량, 기기 배치 등을 검토하였다. 2층열차는 차량 하부 공간이 거의 없기 때문에 기존 전동차와는 상이한 기기배치가 요구되며 유효공간을 최대한 활용하기 위해 전장품의 compact화 및 경량화, 기기 재배치 등의 기술이 필수적으로 뒷받침되어야 한다.

2층열차는 기존차량보다 무게중심이 높아 곡선 주행 시 주행 안전성이 떨어질 가능성이 있으므로 개념모델에 대해 주행특성을 분석하였다. 그 결과, R300 곡선구간 통과 시의 동적 운중감소율, 탈선계수, 정상횡가속도 및 최고속도 110km/h 주행 시의 탈선계수 및 운중감소율이 모두 허용 기준치 이내에 들어 기본 제원에 근거한 2층열차 차량모델의 주행안전도 측면에서의 동적 성능은 적절한 것으로 나타났으나 차량 및 시설물, 특히 터널과의 간섭부분은 추가적 연구가 필요하다.

차량의 운용측면에서 볼 때 수도권 전철 구간 중 경인선, 경부선 구간은 이미 급행서비스가 이루어지고 있으므로 2층열차 도입에 따른 제한 조건은 크지 않을 것으로 보이며 수송량 증대 측면에서는 좌석위주의 기존 전동차가 운행되는 유럽 등의 좌석위주 2층열차와 비교해 볼 때 입석위주 전동차를 운행하는 국내실정에서 좌석위주 2층열차의 수송량 증강효과가 유럽만큼 크지는 않을 것이다. 또한 외국의 사례에 비취볼 때 2층열차에 광폭의 출입문을 장착한다고 해도 차내 혼잡율이 극심할 경우 승하차 지연은 피하기 어려울 것으로 판단되므로 대피선이 설치된 지상구간에서 급행열차로 운행되는 것이 가장 적절할 것으로 보인다(2기 지하철 노선은 2층열차의 운행이 불가능 할 것으로 판단되며 지상구간의 터널은 건축한계가 원형대로 보존되어 있어야 한다).

정원 기준 수송량 측면에서 볼 때, 2층열차는 기존 전동차보다 수송량이 증대되나 차내 혼잡율이 증가할수록 수송량 증대효과는 낮아지게 되는데 이는 좌석의 비율이 상대적으로 높기 때문이며 차량자체의 중량도 크기 때문에 수송량을 늘리는데도 한계가 있다. 따라서 우리나라에서의 2층열차는 수송량 증대보다는 승객편의성 향상에 더 큰 비중을 두어야 할 것이며 우리나라의 소득수준 및 삶의 질 향상에 따라 승객 편의성(좌석 편의성) 향상이 앞으로 더욱 강조될 것으로 예측되므로 향후 국내에서의 2층열차 운행 필요성은 점차 증가되어 질 것으로 보인다.

후기

본 연구는 건설교통부가 출연한 건설기반기술혁신사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 정무영 외(1992), "한국인 체형에 맞는 차량내 공간배치에 관한 조사연구", 포항공과대학
2. "도시철도 표준사양", 건설교통부
3. 박광복(1999), "철도차량공학", 삼성종합출판