

시상 및 지하구간 운행 2층·급행열차 추진시스템에 관한 연구

백광선\*, 이강원, 온정근  
한국철도기술연구원

A Study on the traction system of double deck (express trains for ground and underground

BAIK KWANGSUN, LEE GWANGWON, OHN JUNGGHUN  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - In this paper, traction system of a double deck train were designed to examine technical reasonableness for driving on the ground and underground. Double deck trains operated in other countries were also considered. For designing the electric devices, two types of accelerations and electric devices arrangements which are based on the current subway system were considered.

1. 서 론

일본, 프랑스 등 철도 선진국에서는 쾌적하면서도 효율적인 수송량 증강수단인 2층 열차의 활용을 증가시키고 있는 추세이다. 이는 2층 열차를 투입하는 것이 선로용량 증대 등 시설물에 투자하여 수송량을 증강시키는 것보다 훨씬 저렴한 투자방법임이 입증되었기 때문이다. 국내에서도 차량이 계속 증가하여 도심에서 교통체증이 증가하고 있으므로 도시 외곽에서 도심으로 출퇴근하는 사람들이 도심으로 들어가는데 어려움을 느끼고 있어 기존 전동차와 차별화된 급행열차의 요구가 증대되고 있다. 본 연구는 수도권 광역철도(또는 중거리 inter-city)에 운용되는 급행 2층 열차 차량 도입의 타당성을 검토하기 위해 수행하는 과제의 일환으로, 필요한 차량성능을 만족하기 위한 추진시스템의 필요 용량과 기기배치의 타당성 검토를 목적으로 한다. 2층 열차는 기존 전동차와 크기는 동일하지만 차량에 더 많은 좌석이 설치되는 관계로 차량 하부에 전장품을 매달고 있는 기존 전동차에 비하여 전장품의 배치에 어려움이 있다. 2층 열차에 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나인 공간배치가 효율적으로 배치되도록 구성하는 것이 중요하며 외국에서도 이 부분에 가장 많이 관심을 하고 있다. 여기에 더하여 2층 열차의 운행 구간이 결정된 것이 아니기 때문에 운행될 수 있는 시상 및 지하 그리고 AC/DC 겸용 또는 AC 전용 구간운행을 예상하여 관련된 Factor를 고려하였으며, 지난번에 보고된 연구된 결과를 보완하여 정동크영역을 동일하게 가져간 추진장치와 보조전원장치에 대한 구체적인 용량설계를 하였다. 본 연구의 결과는 향후 2층 열차와 관련된 국내의 철도수준을 선진철도수준으로 향상시키기 위한 기초가 될 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 외국사례

일본의 2층 열차는 Central, West, East Japan Railway 및 Odakyu Railway에서 운행되고 있으며 운행되고 있는 차종도 다양하고 동력분산식의 전동차 형식을 택하고 있다. 쇼난신주쿠 라인(신주쿠와 오다와라 구간 87.7km 운행)에서 운행되는 215계의 경우 Mc 차량에는 전장품이 집중적으로 배치되며 차량하부(상하)에는 Compressor 및 저항기, 전기부품이 탑재하였으며, 가속도를 2.3km/h/s이다. 이외에도 217계가 구리하마 동경-나리타공항(구리하마 - 동경: 70km, 15역, 동경 -

나리타 공항: 79km, 17역)으로 연계운행 하고 있다. 프랑스의 알스톰사 사례를 보면 기존열차와의 상이한 설계로 인하여 가장 고심한 부분은 주요장치들의 재배치에 있었다. 최대한 공간을 활용하면서 차량하부에 위치하였던 장치들이 소형화 되어 다른 공간으로 재배치되고 인버터의 경우 지붕에 설치할 수 있도록 재설계하여 강제 냉각방식을 취하기도 한다. 주요 견인방식은 EMU, DMU, DEMU, Push-Pull의 4가지이며 상업운행속도는 120~220km/h 이다. 또한 고속전철에서도 설계 최대속도 320km/h, 영업 최고속도 300km/h인 2층 열차(CORADIA Duplex)를 운용하며 세계 2층열차 시장 진출을 위해 준비하고 있다. 이 열차는 지붕에 설치된 IGBT 인버터(heat pipes 적용, 강제냉각방식)와 유도전동기(375kW ~ 450kW)를 사용하고 있다. 알스톰사의 2층 열차 납품 실적은 표 1과 같다. 미국에서는 CDT(California Department of Transportation)와 Metra에서 기관차 견인형 객차형식의 2층 열차가 운행되고 있으며 네덜란드에서는 차량 당 1개의 견인전동기의 최대 출력 398kW, IGBT 인버터, 상용제동 0.66m/s<sup>2</sup>, 비상제동 1.05m/s<sup>2</sup>, 최고속도 160km/h인 EMU type의 Bombardier에서 제작된 2층 열차가 운행되고 있다. 그 외에 독일과 이스라엘 등에서 다양한 추진 성능과 시스템을 갖춘 2층 열차가 운행되고 있다.

2.2 2층 열차 기본사항  
2.2.1 차량구성



- Mc : 제어구동차 - M' : 구동차(집전장치)
- M : 구동차 - T : 객차

그림 1. 1층 열차의 기본 편성

그림 1의 차량을 추진하기 위한 시스템이 구성은 그림2와 같다. 이 그림에는 AC25000V를 전원으로 하는 시스템을 구성으로 하고 있으며 DC의 경우에는 컨버터와 인버터 사이에 연결단자를 내주면 된다. SIV는 DC단의 직류전원을 사용하여 CVCF 인버터를 구동하는 방법도 있으나 컨버터가 고장나는 경우, SIV까지 동작을 못하는 현상을 제거하는 목적으로 주변 압기에서 3차전선을 사용하여 별도의 전압을 이용하는 것으로 한다. DC를 사용하는 경우, 추진용 인버터와 마찬가지로 인버터와 컨버터 사이에 연결단자를 내서 급전할 수 있다.

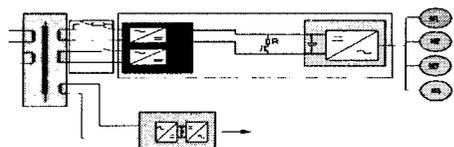


그림 2. 추진시스템 구성도

### 2.2.2차량설계사양

기본 과제에서 제안한 결과를 이용하여 2층 열차의 전장품의 용량을 계산하기 위한 승객과 차량의 중량 그리고 편성 구성을 정리하면 표1과 같다. 차량이 운행되는 구간에 따라 사용 장치에 영향을 받으나 검토되는 경우는 변압기 등 중량이 큰 전장품을 동일하게 사용하므로 차량의 중량을 일정하게 계산한다.

표1. 2층열차 차량 사양

구분	내용
편성구성	5M5T
가선전압	25,000Vac 또는 1,500Vdc
신호장치	ATC/ATO
전동기 구성	1C4M, 4 motors/Mcar
가속도	3.0 h/h/sec or 25km/h/s
목표 최고속도	110 km/h
전체중량	595.36ton(총하중 만차시 200 %고려)
차륜경	820 mm(최대 860mm)
열차 주행 저항	(1) 지상구간 $R = (1.65 + 0.024V)W_m + (0.078 + 0.0028V)W_t + (0.028 + 0.0078(n-1))V^2$ kg (2) 지하구간 $R = 0.000745V^2 + 0.0359V + 1.867$ (kg/ton) V: km/h, W <sub>m</sub> : 편성당 동력차 총 중량, W <sub>t</sub> : 편성중 부수차 총중량, n: 편성차량수 (평지 및 직선주로에서, V는 열차속도(km/h))

### 2.2.3 추진시스템 및 전기장치 설계

#### (1) 일반

현재 운용되는 전동차의 사용 전원은 각 운용처의 관리 구간마다 다르다. 서울 및 경인지방에서 철도청이 관리하는 구간은 AC를 사용하고 서울시지하철 공사 등에서는 DC 구간이다. 따라서 1호선 및 4호선의 경우 한국철도공사와 서울지하철공사에서 운영하는 전원이 혼재되어 이 구간에는 AC/DC 겸용전동차가 사용되며 철도청이 운영하는 분당선의 경우 AC 전용 전동차를 그리고 서울지하철공사에서 운영하는 2호선 등은 DC 전용 전동차를 사용한다. 차량이 사용하는 전원은 전장품의 종류와 차량의 중량에 영향을 미친다. 또한 전동차가 운행되는 구간(지상 또는 지하)은 전동차의 주행저항에 영향을 미치게 되고 가속성능에 영향을 주게 된다. 현재 사용되는 도시철도차량의 가속성능을 만족하고자 하는 경우 지하구간의 주행저항이 지상구간에 비하여 큰 관계로 추진장치의 용량이 증가하게 만든다. 이 외에도 본선에 사용되는 전원의 종류에 따라 차량에 탑재되는 전장품의 구성이 달라지므로 무게에 영향을 줄 수 있고 이와 같은 부하의 변화는 결국 차량의 추진성능에 영향을 미치고 전장품의 용량에도 영향을 주게 된다. 본 논문은 타당성을 확인하는 것이므로 차량 중량의 변화까지는 고려하지 않으나 주행 구간에 따른 각각의 경우에 대하여 검토를 하면 다음과 같다.

#### (2) 추진시스템 용량 선정

· 지상구간만 통과하는 경우

차량이 지상구간만을 운행하는 경우에는 지하구간을 통과하는 경우보다 주행저항이 작다. 분당선이나 경부선의 한국철도공사 구간은 AC를 급전하고 기타 지하구간은 DC를 급전하고 있는 상황이다. 지상 구간만을 보았을 때 AC를 급전하는 것으로 구분할 수 있고, 차량에 Line Filter 등이 없으므로 중량이 AC/DC 전원에서 모두 운행하는 차량보다 가볍다. 이것은 부하가 작다는 것을 의미하며 결과적으로 작은 용량을 가진 추진시스템을 설계하는 것이 가능하게 한다. 지하 구간에는 대피선이 마련된 역이 몇 개 없으므로 도시철도법에 있는 가속도 3.0 km/h/s의 설계 기준을 적용해야 한다. 그런데 경부선의 경우, 지상구간에 각 역마다 대피선이 있는 관계로 각 역마다 정차하는 운전패턴(도시철도법의 규정을 준용하는 광역철도의 경우)을 적용하여 가속도 3.0 km/h/s의 설계 기준을 적용하므로 가속 용량에 다른 추진시스템의 용량이 커지나, 몇 개의 역을 통과한 후 정차하는 운행패턴(줄거리 인

터시티 차량은 급가속 및 감속이 필요치 않으므로 상대적으로 낮은 가속력 적용, 새마을호의 가속도는 2.0 km/h/s에도 미치지 못하고 있음)을 적용하는 경우 급가속 및 감속이 필요치 않으므로 상대적으로 낮은 가속력인 2.5 km/h/s를 적용할 수 있으므로 추진 시스템의 용량을 작게 가져갈 수 있게 된다. 따라 전동차 1호선 초기 구입분에서 적용된 2.5 km/h/s의 가속도를 설계 기준으로 사용할 수 있다. 이런 사항들을 반영하여 필요한 추진시스템의 용량을 계산한 값은 Table4와 같다.

- 지상 및 지하구간을 통과하는 경우

지하구간에서 주행하는 경우 전동차에 의한 바람이 외부로 흩어지지 못하므로 지상구간에 비하여 주행저항이 많이 증가하게 되어 전동기의 용량 및 관련 추진시스템의 용량이 증가한다. 현재의 지하구간은 주행하는 선로와 정차하는 선로가 동일한 역 때문에 급행열차의 장점을 사용할 수 없고 매 역마다 정차를 해야 한다. 이 경우 가속도는 3.0 km/h/s를 적용해야 한다. AC 구간에서 사용하도록 변압기를 설치해야 하고 DC 구간에서는 HB 등이 필요하므로 검토되는 구간 중 차량의 중량이 가장 크고 견인력이 가장 많이 필요한 조건이 된다.

#### (3) 추진시스템 용량 계산

전동차의 가속도를 3.0km/h/s로 하고 지하구간에서 주행하는 경우에 대한 계산결과는 다음과 같다.

$$F_{\text{주행저항}} = (0.000745 \times 35^2 + 0.0359 \times 35 + 1.867) \times 595.36 \times 9.8 \approx 23.6 \text{ kN}$$

에서 3km/h/s의 가속도를 내기 위한 가속력

$$F_{\text{가속력}} = K \times W \times a \times 1.1 = 28.345 \times 595.36 \times 3 \times 9.8 \times 1.1 \approx 545.8 \text{ kN이 되고}$$

$$F_{\text{견인력}} = F_{\text{주행저항}} + F_{\text{가속력}} \approx 569.3 \text{ kN 가 된다.}$$

답면 출력-차륜과 레일간의 출력과 전동기의 기계적 출력은 위에서 계산된 견인력과 속도에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$P_{\text{답면출력}} = \frac{1}{3.6} \times F \times V / \eta \text{ [kW]} \approx 285 \text{ [kW]}$$

여기서,

$$F : \text{차륜1조의 견인력} = \text{전체견인력} / 20 \approx 28.5 \text{ [kN]}$$

$$V : \text{전동차 속도 [km/h]}$$

$$\eta : \text{차륜과 레일사이의 효율} ; 0.97 \text{로 가정}$$

$$P_{\text{전동기기}} = P_{\text{답면출력}} / \eta_{\text{가속기효율}} \approx 293 \text{ [kW]}$$

여기서  $\eta_{\text{가속기효율}}$  을 0.975로 가정

유도 전동기를 35 km/h까지 3 km/h/s의 가속도로 가속하고 55 km/h까지 정 출력 영역을 유지하는 운전조건의 전기적 사양을 구해보면 다음과 같다.

$$P_{\text{전동기전기}} = P_{\text{전동기기}} / \eta_{\text{전동기효율}} = 293 / 0.92 \approx 318 \text{ kW}$$

$$\text{전인전동기 정격출력} = \frac{\text{기동시출력}}{\text{기동시여유율}} \times \frac{\text{전동기여유율}}{\text{기어효율}}$$

$$= \frac{277}{1.5} \times \frac{1.2}{0.975} \approx 230 \text{ [kW]}$$

상기자료를 근거로 축동력과 인버터출력 및 컨버터출력 그리고 변압기의 용량을 구하는 과정은 다음과 같다.

$$P \text{ [kW]} = \frac{TE \text{ [kN]} \times V \text{ [km/h]}}{3.6} = \frac{113.87 \times 35}{3.6} \approx 1,107 \text{ [kW]}$$

$$P_{\text{mv}} \text{ [kW]} = \frac{P \text{ [kW]}}{\eta_M \times \eta_G} = \frac{1107}{0.92 \times 0.975} \approx 1234 \text{ [kW]}$$

$$P_{\text{cm}} \text{ [kW]} = \frac{P_{\text{mv}} \text{ [kW]}}{\eta_i} = \frac{1234}{0.97} \approx 1272 \text{ [kW]}$$

변압기의 입력과 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{\text{Tr1}} \text{ [kW]} = \frac{P_{\text{cm}} \text{ [kW]}}{\eta_c} = \frac{1272}{0.95} \approx 1339 \text{ [kW]}$$

$$P_{\text{ml}} \text{ [kVA]} = \frac{\frac{P_{\text{tr}} \text{ [kW]}}{\eta_{\text{Tr}}} + P_{\text{srv}}}{pf} = \frac{\frac{1339}{0.97} + 250}{0.99}$$

$\approx 1647\text{kVA}$

∴SIV는 편의상 유효전력으로 변환하여 계산함.

현재 10량 1편성으로 운용되는 지하철에는 190KVA 용량의 보조전원장치가 3대 탑재되어 있다. 1대의 보조전원장치는 전동차 3량씩 2조와 4량에 전원을 공급하고 있다. 계산을 간단하게 하기 위하여 비율적으로 1량에는 47.5kVA의 전력이 공급되는 것으로 계산되며 5량으로 보면 237.5kVA면 10량 1편성의 전동차에 1/2에 전원을 공급할 수 있는 것이 된다. 따라서 본 논문에서는 1편성의 전동차에 250kVA 용량의 보조전원장치를 2대 사용하는 것으로 하였다.

표2. 구간별 추진시스템 용량 계산 결과

	1안	2안	3안
정토크영역(Km/h)	35	35	35
정출력영역(Km/h)	55	50	60
주행저항(KN, 정토크영역)	23.6	11.2	23.6
필요전인력(KN, 정토크영역)	569.4	466.0	478.4
견인전동기출력(KW)	230	185	191
축동력(KW, 동력차 1량)	1107	906	930
인버터출력(KW)	1234	1010	1037
컨버터출력(KW)	1272	1041	1069
변압기입력(KVA)	1647	1394	1424
변압기출력(KW)	1339	1096	1125

주1) 구분

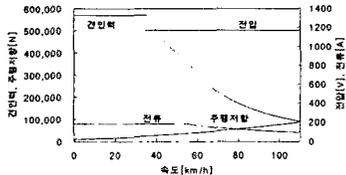
- 1안 : 가속도 3적용, 지하구간 통과
- 2안 : 가속도 2.5적용, 지상구간 통과
- 3안 : 가속도 2.5적용, 지하구간 통과

주2) 표준 전동차 설계방법에 따른 계산결과

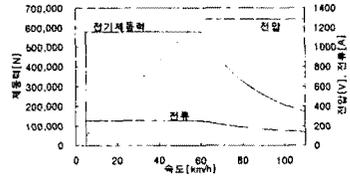
위의 시뮬레이션 결과는 가능한 현재 전동차에서 적용하는 설계 기준을 적용하였으나 본 연구의 목적상 약조건으로 설계하였다.

### 3. 시뮬레이션

전동차가 모든 역에서 정차하지 않고 몇 개의 역마다 한번씩 정차하는 경우를 가정하여 추진장치의 정출력이 시작하는 위치의 가속도를 2.5 km/h/s와 3.0 km/h/s를 적용하였고 지상과 지하구간 주행시 별도의 주행저항을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 3은 가속도를 3.0km/h/s로 지하 및 지상구간을 주행할 때의 견인 및 제동특성을 시뮬레이션을 하였으며 그림 4은 가속도 2.5km/h/s로 지상구간을 주행할 때의 견인 및 제동특성을 시뮬레이션을 하였다. 각 주행구간의 주행저항이 다른 관계로 정토크가 끝나는 위치까지 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 또한 가속성능이 3.0km/h/s일 때와 2.5km/h/s일 때에 차이가 있음을 알 수 있다. 제동특성은 감속도를 3.5km/h/s로 하였을 때를 기준으로 시뮬레이션을 하였다. 그리고 회생제동력이 일정하게 되는 지점은 추진특성곡선상의 정특성영역 시작점을 고려하였다. 이 제동특성은 전동기의 포화 등의 제한사항을 고려하여 변경될 수 있다.

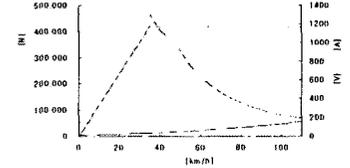


(가) 추진특성곡선

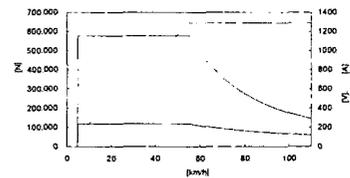


(나) 제동특성곡선

Fig 3. 가속도 3.0 km/h/s, 전구간 주행 특성곡선

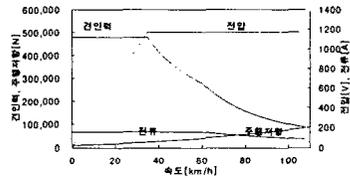


(가) 추진특성곡선

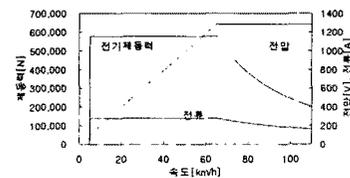


(나) 제동특성곡선

Fig 4. 가속도 2.5 km/h/s, 지상구간 주행 특성곡선



(가) 추진특성곡선



(나) 제동특성곡선

Fig 5. 가속도 2.5 km/h/s, 지하구간 주행 특성곡선

### 4. 결론

본 논문은 2층 열차의 국내 도입, 운용의 타당성을 알아보기 위한 과제의 일환으로 설계된 승객을 운송하는데 있어 현재의 추진 성능을 만족하면서 전장품의 용량과 배치가 설계 차량의 구조에 적합한지를 검토하였으며 2층 열차가 운행되는 구간이 선정되지 않았으므로 수도권 광역철도망(도시철도 차량 가속도 기준 적용) 및 중거리 인터시티에 통근형 전동차로 투입될 경우를 고려하였으며, 차량의 가속성능을 모두 만족하는 전장품의 설계가 가능함을 보여 주었다.

### [참고 문헌]

- [1] 김형진 외, 건설교통부/한국철도기술연구원 2층 급행열차 운영을 위한 기술개발 및 설계 기준에 관한 연구(2차년도 연차보고서), 2003
- [2] 한국철도기술연구원, 추진력변환장치개발(2단계 1차년도 보고서, 2000)
- [3] 한국철도기술연구원, 추진시스템 엔지니어링 기술개발(2차년도 연차보고서, 1998)