2층 열차 전기시스템 설계에 관한 연구

백광선, 장동욱, 김진환, 온정근
한국철도기술연구원

A study on Electric system design of double deck trains

Kwang-sun Baik*, Jang Dong-uk, Jin-whan Kim, Jung-ghun Ohn
KRRI

Abstract - 주어진 운행횟수에서 가능한 많은 승객을 최대한 빠른 시간에 정해진 목적지까지 이동시킬 수 있는 2층 열차의 기본 설계에 필요한 차량내 장치, 신호시스템 및 급전계통에 대하여 전기관련 시스템의 주요 사양을 검토하여 향후 차량을 본격적으로 설계시 기본 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

철도를 이용한 수송수단은 도로를 이용한 타 교통수단에 비하여 신속성과 정시성의 큰 장점을 가지고 있어 그동안 국가의 기간산업으로써 경제발전에도 크게 기여를 해 왔으나, 타 교통수단에 비해 철도산업은 투자의 미흡으로 발전속도도 크게 뒤떨어진 실정에 있었다. 그러나 수도권을 중심으로 점차 심각해지고 있는 도로교통의 체증 현상 및 수도권 전철구간의 이용객 증가에 따라 역내 및 차내 혼잡이 가중되고 있으며, 수도권인구의 효율적 분산책 및 무분별한 난개발 방지책의 일환으로 정부에서 수도권 외곽의 택지개발을 정책적으로 시행하게 되었으나 서울 외곽의 신도시들은 자체적으로 자급자족의 기능을 갖추지 못하고 서울의 베드타운으로 전락해가고 있는 실정이다. 자체적 자급자족 기능을 갖추지 못한 이러한 주거환경의 변화는 수도권의 구간별 수요변화로 이어져 서울외곽지역에서 서울과 연결되는 도로는 출퇴근 시 극심한 정체구간으로 변하고 있으며 이로 인한 물류비용의 증가는 국가 경제에도 큰 손실로 이어지고 있다. 따라서 이의 근본적 해결책(자체 자급자족 기능을 갖춘 신도시 개발)을 모색하기 어렵다면 국가 경쟁력 향상차원에서 원활한 수송수요 처리방안(열차 운영체계의 개선)을 모색하여야 한다. 그래서 정부에서는 효과적 교통수단으로서 철도의 장점을 최대한 살리고 철도를 더욱 탄력적으로 운용하기 위한 대안의 하나로 2층 열차의 기술적 타당을 검토를 한국철도기술연구원에 의뢰하여 진행시키고 있다. 2층 열차는 승객이 기존의 전동차에 비하여 증가하므로 중량이 증가하고 축중이 16톤에 달하지 않아야 하는 기본 요구사항에 만족하도록 하기 위하여 각 장치의 크기 및 중량을 고려하여 용량을 설계하여야 하는 문제가 있다. 본 연구는 국내 실정에 맞는 2층 열차의 기술개발과 관련하여 차량의 본격적인 제작에 앞서 그와 같은 문제점을 극복하는 방안으로 각 장치의 분포를 고려하여 2층 열차의 운행에 필요한 급전계통, 추진, 제어, 신호, 종합제어장치와 관련된 차량전기시스템의 사양(안)을 전반적으로 연구,검토하였다.

2. 본 론

2.1 2층 열차의 기본 구성 및 사양

2층 열차의 기본 구성은 다음과 같다.

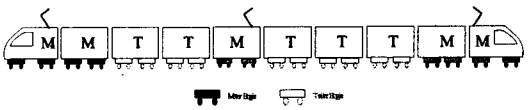

그림 1. 2층 열차의 기본 편성

- Mc: 제어 구동차
- M : 구동차
- M': 구동차(집전장치 부착)
- T : 부수차

2층 열차의 주요 제원은 다음과 같다.

표1. 2층 열차 주요제원

항목	제원
가선전압	AC25000V
열차길이	200.0m
좌석수	정원시:1868석(좌석:806,입석:1062) 만차시:2930석(좌석:806,입석:2124)
열차중량	공차시:412.2톤 만차시(200%입석혼잡):595.36톤 (최대 차축하중:16톤)
최고운행속도	110km/h
가속도	3km/h/s
감속도	3.5km/h/s(상용) 4.5km/h/s(비상)
차체크기	길이:19500mm 폭:3210mm 높이:4190mm
열차형식	EMU(Electric Multiple Unit)
평성당 량수	10량
총출력	4600KW
견인전동기수	20개
편성당 판토수	3대
추진장치구성	1C2M, 4 motors/Mcar(분산식)
제동방식	회생브레이크 병용 전기지령식 공기브레이크
열차제어시스템	ATS/ATP
차륜경	820 ㎜(최대 860㎜)
인버터/컨버터	4상한 PWM제어, VVVF인버터 제어
보조전원제어	CVCF 제어
집전방식	카테너리 공급방식(공기압에 의한 상승 하강 방식)

이에 적용되는 열차 주행저항식(전동차, 지하구간)은 다음과 같다.

$R = 0.000745 \times V^2 + 0.0359 \times V + 1.867$ kg/ton

(평지 및 직선주로에서, V는 열차속도(㎞/h))

상기의 사양에 따라 차량의 요구 특성을 그리면 다음과 같다.

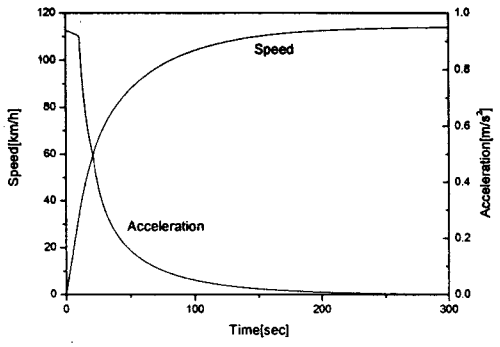

그림 2. 시간에 따른 속도, 가속도 특성

2.2 각 장치별 검토

차량을 그림 1과 같이 구성할 때 변압기는 총 3대가 사용된다. 견인전동기 8대를 구동하는 변압기 2대와 견인전동기 4대를 구동하는 변압기 1대로 구성된다. 차량을 구동하기 위한 추진시스템은 변압기에서 25,000Vac를 추진용 C/I를 구동하기 위하여 2차 측을 구성한다. 보조전원장치의 전원 공급은 C/I의 컨버터 출력 DC전압을 이용할 수도 있으나, 컨버터가 어떤 원인으로 고장이 발생할 경우 차량의 운행에 필수적인 제어 전원을 공급하는 보조전원장치(SIV)가 동작을 하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 변압기에 3 차 권선을 추가하여 안정적으로 SIV가 동작할 수 있도록 한다.

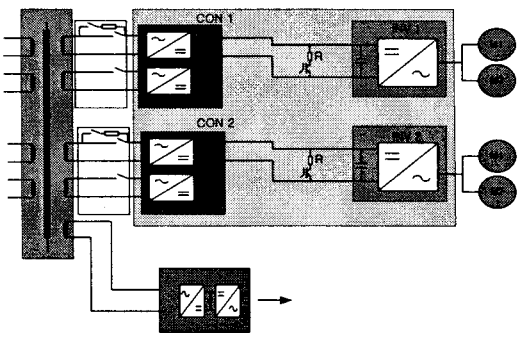

그림3. 추진장치 시스템

상기 추진시스템을 구성하는 각 주요 시스템은 다음과 같은 사양을 갖는다.

2.2.1 추진시스템

2.2.1.1 추진장치

가. PWM컨버터 기본사양

(1) 일반사항
- 4상환 방식으로 하여 역행 및 회생시 역률 1제어

(2) 주요제원
- 제어방식 : 4상한제어
- 사용소자 : IGBT이상의 동등 소자
- 냉각방식 : 자연냉각방식
- 출력 : 532KW

나. VVVF 인버터 기본사양

(1) 일반사항
- VVVF(가변전압, 가변주파수) 제어방식, 벡터제어 사용가
- 유지보수성을 높이기 위해 기능별 유니트화
- 유도장해기준 및 보호기능 강화
- 자기진단기능 강화

(2) 주요제원
- 사용소자 : IGBT이상의 동등 소자
- 냉각방식 : 자연냉각방식
- 출력 : 616KW

2.2.1.2 견인전동기

가. 기본사양

(1) 일반사항
- 절연등급은 200종 이상으로 한다.
- 고조파에 대한 온도상승 억제
- 프레임 리스 구조
- 베어링 윤활방식은 주유관부 밀봉형 윤활방식
- 베어링 온도 상시감시기능

(2) 특성사양
- 정토크 영역 : 0~35km/h
- 정출력 영역 : 0~55 km/h
- 선간전압 : 1500Vdc(1170Vac)
- 효율 : 92% 이상
- 역률 : 0.85
- 정격출력 : 230KW

상기 추진장치와 견인전동기를 사용할 때 견인 및 제동 특성곡선은 다음 그림과 같다.

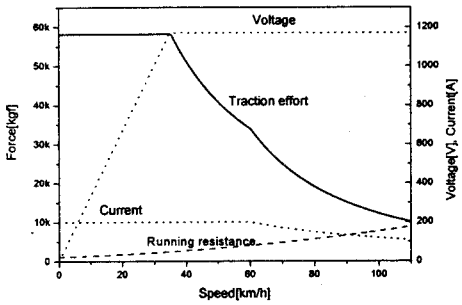

그림4. 속도에 따른 견인력, 전압, 전류 및 주행저항 곡선

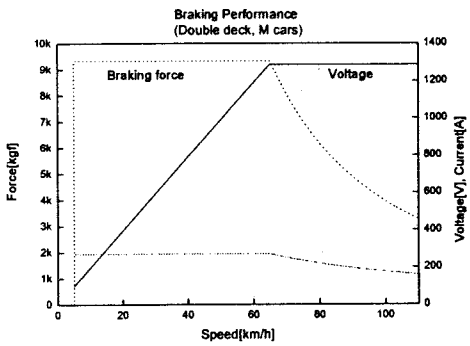

그림5. 회생시 제동특성

2.2.1.3 변압기

- 1차측 전압 : 25000Vac
- 2차측 전압 : 정류된 DC Link단 전압이 1,500V일 것.
- 강제 냉각방식일 것.
- 용량 : 833KVA 이상
- 보조전원장치용 3차 권선을 사용할 것,
- 입력 : 883KW 이상
- 출력 : 560KW(효율 95% 이상)

2.2.1.4 보조전원장치

- 구성 : 변압기 3차 권선을 이용
- 자연 냉각방식
- 일정전압 일정주파수 제어의 정지형 인버터, 출력변압기와 충전기 및 축전지로 구성한다.
- AC3상 380V(Y결선) 및 DC100V 출력할 것.
- 차량에 2대 설치할 수 있는 충분한 용량을 가질 것.
- 충전기 고장 시 30분 이상 제어전원을 공급할 수 있을 것.
- 충분한 보호기능을 가질 것.
- 종합제어장치와 연계하여 차상 자기진단기능 및 고장이 감시 등 모니터링 기능을 갖는 것으로 하며, 각 부위의 동작상태 및 고장시 상황을 종합제어장치로 전송한다,
- 입력전압변동에 관계없이 일정주파수(±2%)와 일정주파수(+5%,-10%이내)을 유지하여야 한다.
- 용량 : 250KVA 이상

2.2.1.5 차량정보시스템

(가) 일반사항

- 시스템의 일부가 고장이 발생해도 전체 차량의 운행에는 영향을 미치지 않아야 한다.
- 신호장치 등과 인터페이스되어 차량의 종합기능이 수행되도록 하며, 주요기기에 대한 일간 및 월간검사와 운행전 운행에 필요한 사전정보를 알 수 있도록 한다.
- 시스템을 구성하는 각 컴퓨터들은 서로간의 통신으로 정보를 공유하며, 운행에 관한 제반정보가 메모리카드를 통하여 기지에서 출력하도록 함으로서 유지보수의 편리성이 제고되도록 한다.

(나) 승무원 지원기능

- 모니터링 기능 : 기존의 폐문표시나 과부하 표시외에 열차 내 주요기기의 이상정보를 운전대의 디스플레이 장치에 정리하여 표시하도록 한다. 또한 인버터 등 각 주요 장치의 전압이나 전류의 변화를 기억하여 재현 및 해석할 수 있도록 함으로 사고원인을 규명할 수 있도록 한다.
- 운전정보표시 기능 : 조업표시나 열차번호의 설정, 행선표시의 설정, 시각표나 정차역명, 도착 (발차) 번선(番線), 제한속도 등을 운전사에게 제공하는 기능을 갖는다. 이렇게 하여 승무원의 업무가 운전사 한사람으로 가능해지도록 한다.

(다) 검사기능

- 당초의 차량 탑재기기의 모니터링 기능에 더하여, 출고검사나 차상검사 같은 검사기능이 부가하여 기능을 확대한다.
- 차고를 출고할 때 열차의 전원투입 확인이나 기동확인, 폐문확인 등의 검사를 하는 출고검사 기능을 추가한다.
- 구동 시스템이나 보조전원, 브레이크 장치, ATC, 보안장치 등의 자동시험과 그 기록을 할 수 있도록 차상검사 기능을 사용한다.

(라) 제어기능

- 운전대에서 지령되는 운전지령을 전송하는 것이다. 역행지령, 브레이크 지령, 자동시험 시의 제어지령이나 공조기의 제어지령, 등회로 제어지령 등을 모두 높은 신뢰성과 안전성을 요하기 때문에 종래의 통과선(引通線)도 병용한다.

2.2.1.6 방송장치

- 차량의 종합제어장치와 연계하여 자동으로 안내 방송이 될 수 있어야 하며, 차상에서의 자체 운용이 가능해야 한다.
- 수동 및 자동 작동이 가능해야 한다.
- 비상시를 대비하여 방송을 통해 승무원이나 승객을 용이하게 통제할 수 있어야 하며, 방송 순서는 다음과 같다(종합 사령실로부터의 방송 → 차량 내의 비상방송, 전달방송, 자동 안내방송)
- 승객 안내정보는 객실안내표시기와 조화를 이루어 현시 및 방송되어야 하며, 자동 및 수동으로 작동될 수 있도록 설계 제작되어야 한다.
- 각 열차는 실내·외 및 출입문 열리는 방향 등을 구분하여 방송할 수 있어야 한다.

2.2.1.7 고전압장치

가. 집전장치

- 기계적으로 견고하고 특히 지하의 낮은 강체가선 및 지상의 카테너리선에서 주어진 선로조건과 설계속도 하에서 견인부하와 보조부하의 전원공급에 시상이 없는 양호한 추종성 및 집전성능을 가져야 한다.
- M'차량에 설치된 1대의 집전장치에 의해 집전된다.
- 공기압에 의하여 상승하고, 스프링에 의하여 하강하는 방식을 취한다.
- M/C Key를 제거한 상태에서 가선이 정지될 경우, 별도 조작없이 하강하며, 종합제어장치에 의하여 감시되고 운전실에 표시되도록 한다.
- IEC 494, JIS E6301에 준한다.

나. 차단기

- 충분히 빠른 차단 속도와 전류 차단 용량을 가져야 한다.
- 제어 전원만을 사용하여 투입 및 차단되어야 한다.
- 주 퓨즈의 출력단에 설치하여야 한다.
- 분해 조립을 위하여 충분한 공간이 확보되어야 한다.
- 전동차의 주회로 스위치 기능 및 고장전류 차단기능을 하여야 한다.
- IEC 77, IEC 157-1에 준한다.

다. 주 퓨즈

- 집전장치의 출력단에 설치되어야 한다.
- 주회로의 지락이나 단락 등 고장발생시 용단하여 과전류를 차단하여야 한다.
- IEC 66에 준해야 한다.

라. 필터 리액터

- 차량의 운행시 부하변동에 따른 전류량의 변화에 대하여 자기포화가 없어야 한다.
- 자연 냉각 방식을 사용한다.

2.2.1.8 차량 구성품 배치 현황

2층 열차는 동일한 기존의 서울시에서 운행하는 지하철과 동일한 크기로 더 많은 사람을 운송해야 하므로 전장품의 배치와 크기가 중요한 설계 Factor가 된다. 구체적인 사항은 관련 문서를 통하여 확인할 수 있으며 본 논문에서는 그 결과만 언급한다. 상기의 결과에 따른 차량 구성품의 배치는 다음 표와 같다.

표2. 2층열차 주요 전기장치 배치현황

기기명칭	제어동차(TC)	구동차(M)	구동차(M)	부수차(T)
제동장치	○	○	○	○
공압설비	-	○	-	-
HVAC	○	○	○	○
주변압기	○	-	○	-
집전장치 및 관련설비	○	-	○	-
인버터/컨버터	○	-	○	-
제동저항기	○	-	○	-
SIV 인버터	○	-	-	-
충전장치 및 축전지	-	○	-	-
일반배전반	○	○	○	○

2.2.1.9 2층 급행열차와 주요 지하철의 추진성능비교

2층 열차에 적용되는 추진성능을 국내에서 운행중인 주요 지하철의 추진성능을 비교하면 다음과 같다. 차량이 운행되는 두간을 기존 지하철 구간에서 운행하는 것을 기본으로 하고 동일한 가감속 성능을 갖는 것을 기준으로 결과를 비교하면 다음과 같다.

표 3. 2층 열차와 주요 지하철 주요 사양 비교

항목 \ 편성	2층열차	SMSC 신형 1호선전동차	SMG 7&8호선전동차	KRRI 표준전동차
열차편성	2Mc+3M+5T	2Tc+5M+3T	2Tc+4M+2T	2Tc+2M
열차속도(Km/h)	110	110	100	100
열차중량(톤)	595	567.8	-	219
전동기출력(KW)	230	200	210	200
전동기 대수	20	20	16	8
총출력(KW)	4600	4000	3360	1600
견인력(KN)				
-기동시	560	529	407	275
-최고속도시	145	103	78	64
가속도(KM/h/s)	2	-	-	-
-평균	3	3	3	3
-40Km/h	0.25	-	-	-
최대동판구배(‰)	35	35	35	35
최고속도도달				
-가속거리(m)	2300	-	-	-
-가속시간(sec)	104	-	-	-

2.2.2 신호시스템

가. 일반사항

- 지상신호설비의 속도명령을 수신하여 해독하며, 제한속도 및 실제 차량속도를 비교한다.
- 과속상태를 인지하고 승무원에게 경보하며, 제동율이 감지되지 않을 경우 필요한 제동이 작용되도록 한다.
- 운전모드별, 출입문 제어모드에 따라 지상신호설비 및 출입문 개폐 스위치로부터 출입문 제어명령을 수신하여 출입문 개폐를 수행하도록 한다.
- 비상시 혹은 기지운전시 전동차의 양측출입문을 동시에 열 수 있도록 한다.
- 영업운행 출발전에 차량의 출입문제어, 제한속도 현시, 상용 및 비상제동작용 등의 주요제어기능을 시험할 수 있는 출발전 시험을 할 수 있도록 한다.

나. 신호방식

(1) 지상신호방식

- 폐색경계지점에 신호기를 설치하여 열차의 점유상태에 따라 후속차량의 제한속도를 지령하는 방식으로 후속차량은 매 폐색구간 진입시마다 자동열차정지장치(automatic train stop, ATS)를 사용한다.
- 제한속도의 단계는 대개 3현시를 기본으로 하고 필요에 따라 4현시 또는 5현시를 사용한다.

(2) 차상신호방식

- 폐색구간에 대한 열차의 점유상태에 따라 후속차량의 제한속도를 지령한다는 개념은 지상신호방식과 동일하나 후속차량은 선행차량이 점유하고 있는 폐색구간과의 상대적인 위치에 따라 차상의 자동열차제어장치(automatic train control, ATC)를 사용한다.
- 2층 열차의 사용목적과 일치하게 고밀도의 단거리 선로에 적합한 방식을 사용한다,
- ATC/ATO 장치가 동시에 사용하여 차량의 속도가 ATC 장치의 제한속도에 추종하여 설정되는 목표속도를 유지하도록 ATO 장치에 의하여 가속, 감속 및 속도제어가 자동으로 행하는 자동운전방식에 적합한 신호방식을 사용한다.
- 열차의 운전밀도가 높아짐에 따라, 신호를 잘못 보거나, 브레이크 조작의 실수 등으로 추돌 및 기타 사고의 발생빈도가 늘어나게 되므로 이를 방지하기 위하여 ATC를 사용한다.
- ①정속도 (지정속도) 주행기능, ②정위치정지기능(TASC), ③정시운전기능을 편입한다.

2.2.3 급전방식

급전방식에는 AC 급전과 DC 급전방식이 있다. AC 급전방식의 경우 전력회사 송전선과 전차선로를 변압기로 묶고 있는 것뿐이며, 변전설비는 간단하고 급전 전압을 높게 할 수 있기 때문에 급전 전류가 작고, 변전소 간격도 길어진다. 또한 교류 급전방식은, 도시간 수송이나 고속철도와 같은 고속운전에 적용하는 방식이다. 그러나, 차량에 변압기와 정류기가 필요하기 때문에 차량설비가 복잡해지거나, 전차선로의 절연간격이 커지는 등의 결점이 있다. 또, 삼상전원의 불평형·전압변동대책이나, 통신유도장해에 대한 배려가 필요하다. 통상적으로 교류급전방식은 장거리 선로에서 송전 효율을 높일 수 있으므로 고속전철이나 역구간이 긴 노선에 적합하고, 직류급전방식은 통신선에 대한 유도장애가 적으므로 역간구간이 짧고 밀집된 대도시 단거리 수송노선에 적합하며, 또한 고정 변전설비를 할 경우 차량을 경량으로 구성할 수 있다는 장점이 있으며, 기존의 지산 구간을 운행하는 경우를 고려하여 2층 열차에서는 AC 구동방식을 채택한다. 만약 DC 구간을 통과해야하는 문제가 발생하면 교직절환기를 설치하여 이를 극복할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 2층 열차의 개발에 앞서 차량과 신호 및 급전계통에 대한 연구를 수행하였다. 승객의 증가에 와 차량 중량 증가에 다른 전장품의 배치를 검토하였고 기존의 주요 전동차에서 필요로 하는 추진성능을 기본으로 예상되는 성능을 낼 수 있는 추진시스템과 신호 및 제어장치의 기본 사양을 검토하여 향후 2층 열차의 개발시 기본 설계 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

* 본 연구는 건설교통부에서 2001년 건설기반기술혁신사업의 일환으로 진행하는 2층·급행열차 운행을 위한 기술개발 및 설계 기준에 관한 연구과제의 일환임.

[참 고 문 헌]

[1] 2층 급행열차 운행을 위한 기술개발 및 설계기준에 관한 연구(국내 시령에 적합한 2층열차 모델 기초연구) 2003.8.29 2002년 건설기반기술혁신사업 제2차년도 연차보고서 한국철도기술연구원

[2] 대구시 2호선 전동차 제작 규격서 2001.12

[3] 전동차 설계 지침