

# 전기철도차량용 추진시스템의 성능 시험평가 방법 및 사례

박 찬 배\*, 이 병 송\*\*

(철도기술연구원 고속철도연구본부 \*선임연구원, \*\*책임연구원)

전기철도차량은 차량의 운행에 필요한 전력 및 동력을 공급하기 위한 대용량 추진제어 컨버터/인버터, 소용량 스위칭 모드 전원장치와 같은 전력변환장치와 견인전동기에 이르기까지 다양한 설비를 갖추고 있다. 전기철도차량의 성능평가는 전력변환장치와 견인전동기를 포함한 추진장치의 성능평가라 할 수 있을 정도로 많은 비중을 차지하고 있다. 한국철도기술연구원은 국토해양부로부터 지정받은 성능시험기관으로써 국내 다양한 철도차량의 성능평가를 수행하고 있다. 본 논문에서는 철도차량의 성능시험기준을 근간으로 철도차량용 추진제어 인버터와 견인전동기의 성능 시험평가에 대한 방법 및 다양한 성능 시험평가 사례에 대하여 소개하고자 한다.

들이 대량수송 및 주간선 차량의 추진장치 시스템 시험 장비를 구축하여 품질 표준을 향상시키고 차량발주 시험에 소요되는 시간의 절약으로 비용 절감을 이루고 있다. 한국철도기술연구원(KRRI)도 이러한 대외 환경변화에 발맞추어 2007년도부터 철도차량용 추진장치 성능시험설비를 구축하여 운영하고 있다. 일반적으로 철도차량의 성능시험은 설비의 제작공정에 따라 부품시험, 구성품 시험, 완성차 시험, 예비주행 및 본선 시운전의 각 단계별로 실시하고, 그 시험기준으로 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준 및 철도차량 성능시험 시행지침이 적용된다. 철도차량용 추진장치의 성능시험 기준도 상기의 시험기준 및 시행지침의 일부로써 유사한 시험절차의 진행된다.

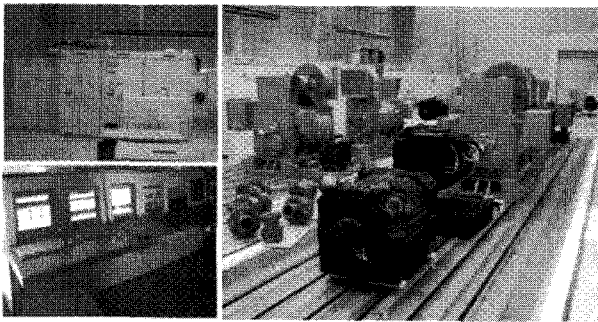
## 1. 서론

일반적으로 새로운 철도차량의 개발 시 새로운 형식의 차량 개발에 대한 막대한 기술적, 재정적 위험 부담이 있으며 최근 철도차량용 교류견인장치 제어 기능의 복잡성으로 인해 전체 시스템의 사전시험의 필요성이 증대되고 있으며, 실제 노선에서 행해지는 시운전 시험은 비용과 시간이 많이 들고 특정 동작 상황을 재현하는 것이 쉽지 않기 때문에 많은 어려움이 따르고 있다. 따라서 현재 많은 비용과 지루한 노력이 따르는 철도차량의 발주시험이 "시스템 시험"의 큰 범주 내에서 차량 제작사에 의해 검증되고 있는 추세이며, 많은 차량 제작업체

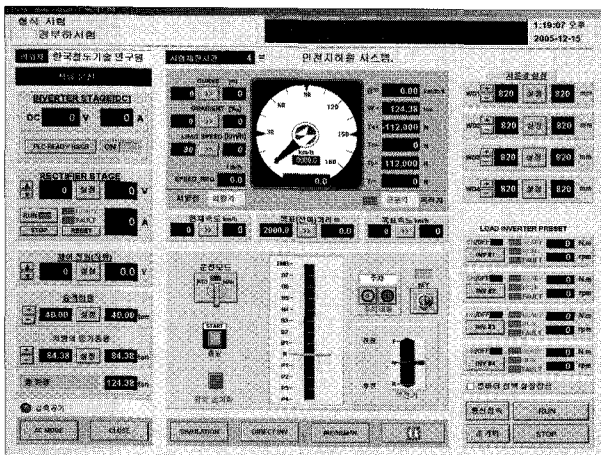
## 2. 추진장치 성능시험설비 개요

### 2.1 추진장치 성능시험설비의 기본 사양

추진장치 성능시험설비는 철도차량에 사용되는 다양한 추진장치의 성능시험을 실시하기 위한 것으로, 추진장치의 개발과 형식인증 단계에서 추진장치의 성능을 시험하고 검증하는데 사용된다. 추진장치 조합성능시험은 인버터와 견인전동기 조합시스템의 기능과 성능을 시험하는 통상적인 조합시험과 함께 차량의 운행을 모의시험하기 위한 시뮬레이션 시험이 포함되어 있다. 그림 1은 한국철도기술연구원에 구축된 철도차량용 추진장치 성능시험설비를 보여주며, 그



(a) 추진장치 성능시험설비의 H/W 파트



(b) 추진장치 성능시험설비 제어용 S/W

그림 1 한국철도기술연구원의 추진장치 성능시험설비

표 1 철도차량용 추진장치 성능시험설비의 주요사항

항목	주요 사양 및 내역
시험대상	DC1,500V, DC750V, AC22,000V 차량의 추진장치
시험가능항목	형식시험, 조합시험, 시뮬레이션 시험
최대시험속도	5,000rpm
최대토크	10,000N.m
운전방식	1대 단독운전 : 660kW, 3,500N.m 2대 연결운전 : 1,320kW, 7,000N.m
교류전원설비	정격 3,000kVA, 단상 25kVA, 2,500kW 상평형장치
직류전원설비	정격전압 750V, 1,500V, 제어범위 450V~1,000V, 900V~2,000V
부하설비	660kW급 4대의 유도전동기, 인버터 제어방식, 4상한 토크/속도 제어

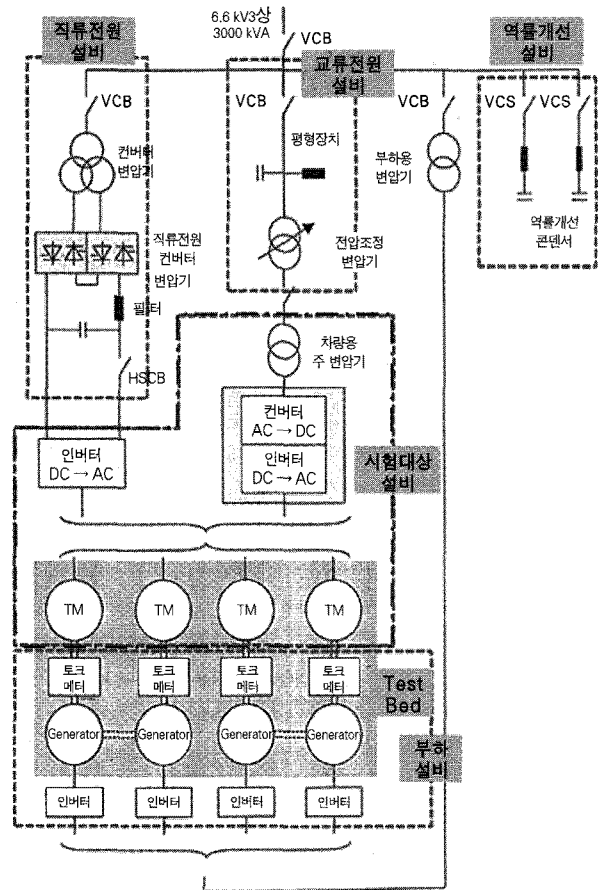


그림 2 추진장치 성능시험설비의 전원/부하설비 구성도

림 2는 추진장치 성능시험설비의 전원/부하설비 구성도를 보여준다. 표 1은 철도차량용 추진장치 성능시험설비의 주요사항을 보여준다.

### 2.2 추진장치 성능시험설비의 시험대상

일반적으로 전기철도차량은 추진을 위해 공급되는 가선전원의 종류에 따라 직류전원차량과 교류전원차량으로 구분 가능하다. 직류전원의 경우, 경량전철에 주로 적용되는 DC750(V)와 도시철도에 적용되는 DC1,500(V)로 구분된다. 교류전원의 경우, 간선철도 및 교외선 전동차, 고속철도에 적용되는 단상 AC25(kV)가 있다. 표 2는 추진장치 성능시험설비의 시험대상 철도차량 추진시스템별 주요사항을 나타낸다. 표 2에서 알 수 있듯이, 최근의 제어장치는 VVVF 인버터가 일반적이며, 이로부터 구동되는 견인전동기는 유도전동기와 동기전동기가 추세이므로, 인버터와 유도전동기, 동기전동기의 조합은 향후 상당기간 전기추진장치 AC류를 이룰 것으로 예상된다. 일반적 국내 도시철도차량의 추진시스템 구성은 1C(Controller)4M(Motor)이며, 견인전동기의 용량은

표 2 시험대상 철도차량 추진시스템별 주요사항

구분	도시철도차량 (서울 5호선)	경량전철차량 (K-AGT)	고속철도차량 (KTX II)
가선 전압	· DC 1,500V	· DC 750V	· AC 25,000V
컨 버터	-	-	· 형식 : 2개 4상한 컨버터를 이용한 직렬접속방식
인 버터	· 전압형 인버터 (1C4M) · 입력전압 : DC 1,500V · 출력전압 : AC 1,100V · 용량 : 1.1MVA	· 전압형 인버터 (1C2M) · 입력전압 : DC 750V · 출력전압 : AC 550V · 용량 : 350kVA	· 전압형 인버터 (1C2M) · 입력전압 : DC 2,800V · 출력전압 : AC 2,180V · 용량 : 2.7MVA
견 인 전 동 기	· 농형 유도전동기 · 회전수 : 4,950rpm · 극수 : 4 · 용량 : 200kW × 4 · 효율 : 92%	· 농형 유도전동기 · 회전수 : 4,000rpm · 극수 : 4 · 용량 : 110kW × 2 · 효율 : 90%	· 농형 유도전동기 · 회전수 : 6,500rpm · 극수 : 4 · 용량 : 1,100kW × 2 · 효율 : 95.4%

200(kW)급이다. 경량전철과 고속철도차량의 추진시스템은 1C2M이며, 견인전동기의 용량은 각각 110(kW)급과 1,130(kW)급이 적용되고 있다. 도시철도차량과 고속철도차량은 판도그래프로부터 수전되어 입력전압의 크기 및 형식이 서로 다르므로 이를 감안한 전원설비구성과 주 시험대상인 인버터와 견인전동기의 용량차이를 감안한 부하설비 선정 및 부하제어가 중요하며, 시험 대상의 변경에 따라서도 성능 시험이 가능하도록 호환성을 고려한 시험설비 구축이 필요하다.

### 3. 철도차량용 추진시스템 성능 시험평가

3.1 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 관련 국내 규격  
현재 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가와 관련된 국내 규격은 IEC 국제규격을 번역하여 기술적 내용 및 규격서의 서식을 변경하지 않고 작성한 한국산업규격이다. 먼저 전기견인 철도차량용 및 도로차량용 회전기기와 관련하여 컨버터 구동형 교류전동기 이외 기기의 개별 요구사항(KSC-IEC 60349-1)과 컨버터 구동형 교류전동기의 개별 요구사항(KSC-IEC 60349-2) 관련 규격이 있다. 또한 철도용 전기설비와 관련하여

표 3 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 관련 규격

규격	주요 내용	관련 국제 규격
· KSC-IEC 60349-1 : 전기 견인 철도 차량용 및 도로 차량용 회전기기-제1부: 컨버터 구동형 교류전동기 이외 기기의 개별 요구 사항	· 전기적으로 추진되는 철도차량 및 도로차량에 사용되는 회전기 가운데 전력변환장치로 구동되는 교류 전동기를 제외한 기기에 적용 · 견인전동기, 엔진 구동 주발전기, 주 전동발전기, 보조전동기, 보조발전기, 보조전동발전기 등을 포함	IEC 60349-1
· KSC-IEC 60349-2 : 전기 견인 철도 차량용 및 도로 차량용 회전기기-제1부: 컨버터 구동형 교류전동기의 개별 요구 사항	· 전기적으로 추진되는 철도차량 및 도로차량에 사용되는 컨버터 구동형 교류 전동기에 적용 · 전기적 입력은 전력변환장치에 의해 이루어지는 전동기에 적용	IEC 60349-2
· KSC-IEC 61287-1 : 철도용 전기설비-철도용 전력변환장치-제1부: 특성 및 시험방법	· 철도차량에 장착하는 전력전자 변환장치에 적용 · 모든 종류의 변환기 및 견인용 변환기와 보조 변환기에 대한 특별 규정도 제공 · 교류전차선, 직류전차선, 자동급전을 고려하고 있으며, 트롤리 버스과 같은 기타 견인차량에도 적용 가능	IEC 61287-1
· KSC-IEC 61377 : 철도용 전기설비-전기 견인용 인버터 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합 시험 방법	· 전동기, 인버터 및 이들의 제어장치의 조합에 적용 · 전압원/전류원 인버터로 구동되는 동기/비동기전동기 조합에 적용 · 인버터, 교류전동기 및 관련 제어시스템을 구성하는 전기구동장치의 성능특성 확인에 적용	IEC 61377
· KSC-IEC 61377-2 : 철도용 전기설비의 복합시험-제2부 : 초파 구동형 직류 견인전동기 및 제어기	· 전동기, 초파 및 제어기로 이루어진 복합 시스템에 적용 · 초파 컨버터에 의해 구동되는 연속직류전동기/개별 여자된 직류전동기 조합에 적용되며 이와 관련된 제어시스템으로 이루어진 전기구동장치의 성능특성 확인에 적용	IEC 61377-2
· KSC-IEC 61377-3 : 철도용 전기설비의 복합시험-제3부 : 전기견인용 간접 변환기 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합시험 방법	· 전동기, 인버터 및 이들의 제어장치의 조합에 적용 · 간접 변환기, 교류전동기 및 관련 제어시스템을 구성하는 전기구동장치의 성능특성 확인에 적용 · KS C IEC 61377에서 추가적으로 공급전압의 급격한 변화/부하의 급격한 변화시 특성시험 및 간섭시험, 고장조건 등이 포함됨	IEC 61377-3

여 철도용 전력변환장치 특성 및 시험방법(KSC-IEC 61287-1)과 전기 견인용 인버터 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합 시험 방법(KSC-IEC 61377) 규격이 있다. 마지막으로 철도용 전기설비의 복합시험과 관련하여 초퍼 구동형 직류 견인전동기 및 제어기(KSC-IEC 61377-2)와 전기견인용 간접 변환기 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합시험 방법(KSC-IEC 61377-3) 규격이 있다. 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 관련 규격 및 주요내용을 표 3에 정리하였다.

### 3.2 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 항목

일반적으로 전기철도차량의 추진장치는 차량의 운행에 필요한 전력 및 동력을 공급하기 위한 컨버터/인버터를 포함한 전력변환장치와 차륜에 회전력을 전달하는 견인전동기로 구성된다. 따라서 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가도 추진제어용 인버터와 견인전동기 각각의 단품 성능시험과 추진제어용 인버터와 견인전동기를 조합 구성한 성능시험으로 구분된다. 표 4는 도시철도차량 추진제어용 인버터의 단품 성능 시험 항목을 보여주며, 표 5는 도시철도차량용 견인전동기의

표 4 도시철도차량 추진제어용 인버터 단품 성능시험 구분

시험항목	형식시험	전수시험
외관구조 및 측정검사	◎	◎
냉각시험	◎	
보호검출 기능 시험	◎	◎
제어 기능 시험	◎	◎
경부하 시험	◎	◎
소음 / 온도 시험	◎	
효율 측정 시험	◎	
공급 과전압 / 과도 에너지 시험	◎	
절연저항 및 내전압 시험	◎	◎
부분 방전 시험	◎	
안전 요구 시험	◎	
진동 / 노이즈 시험	◎	

표 5 도시철도차량용 견인전동기 단품 성능시험 구분

시험항목	형식시험	전수시험
외관구조 및 측정검사	◎	◎
온도 상승 시험	◎	
특성 시험	◎	◎
과속 시험	◎	◎
소음 시험	◎	
절연저항 및 내전압 시험	◎	◎
진동 시험	◎	◎

단품 성능시험 항목을 보여준다. 도시철도차량용 견인전동기의 단품 성능시험은 정현파 전원 및 인버터에 의한 스위칭 전원을 사용한다. 표 6은 도시철도차량용 추진시스템의 조합 성능시험 항목을 보여준다. 도시철도차량용 추진시스템의 조합 성능시험은 차량에 설치되는 견인전동기, 인버터, 주간제어기, 필터 리액터 등 관련 기기를 조합하여 시험하며, 실제 가선전원 조건 및 실제 차량에 설치되었을 경우(1C4M)와 거의 동등한 조건에서 시험평가를 수행한다.

## 4. 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 사례

### 4.1 도시철도차량용 추진장치의 조합성능 시험평가 사례 서울도시철도 7호선 연장구간에서 운행될 도시철도차량에

표 6 도시철도차량용 추진시스템 조합 성능시험 구분

시험항목	형식시험
온도상승 시험	◎
특성 시험 · 토크시험 · 전동기 발열상태의 토크 특성시험 · 전동기 냉각상태의 토크 특성시험 · 전 토크영역에서의 속도시험 · 효율 특성시험	◎
보호시스템 시험 · 제어장치 전원시험 · 인버터 입력전압 변동시험 · 정전 시험 · 회생부하 시험	◎
환경 시험	◎
유도장애 시험	◎
신뢰성 시험	◎

표 7 도시철도차량용 추진장치 일반 사양

항목	주요 사양	
전력 변환 장치	적용차량	직류 전동차
	주회로소자	모듈형 IGBT 3300V 1200A
	입력전압	DC 1500V
	출력주파수	0~163 Hz
	제어용량	AC 모터 210kW×4대
견인 전동기	형식	3상 유도전동기 (4극)
	출력	210kW
	전압/전류	AC 1100V / 135A
	효율/역률	92 % / 88 %

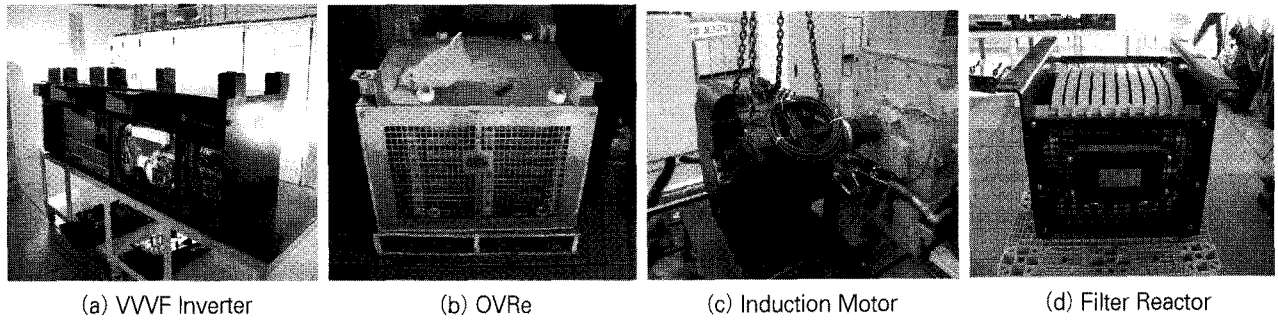
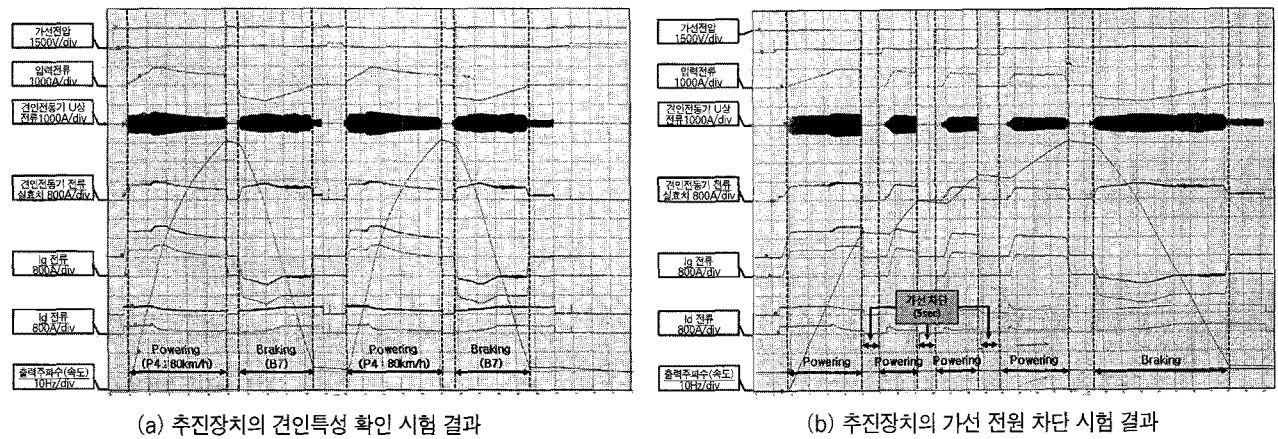


그림 3 도시철도차량용 추진장치의 일반 구성품



(a) 추진장치의 견인특성 확인 시험 결과

(b) 추진장치의 가선 전원 차단 시험 결과

그림 4 도시철도차량용 추진장치의 조합성능 시험 사례

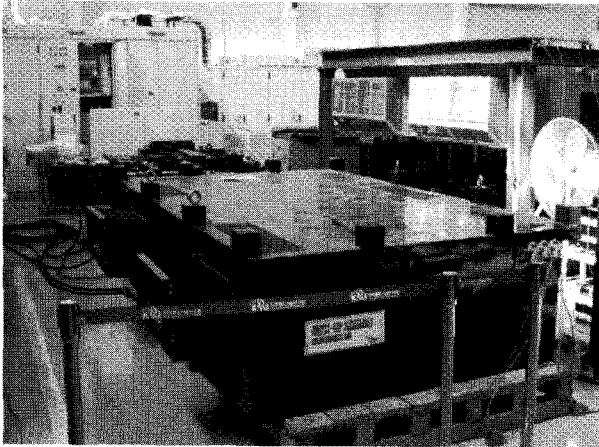
장착되는 추진제어용 인버터 및 견인전동기를 포함한 추진장치에 대한 조합성능 시험을 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 추진장치 성능시험설비를 활용하여 수행하였다. 표 7은 도시철도차량용 추진장치의 일반적인 사양을 보여주며, 그림 3은 도시철도차량용 추진장치의 일반 구성품을 보여준다. 기본적으로 추진장치 조합 성능시험 시 기본 구성품은 VVVF 인버터, OVRc, Filter Reactor, Induction Motor로 이루어진다. 그림 4는 도시철도차량용 추진장치의 조합성능 시험 결과 사례를 보여준다. 그림 4(a)는 부하의 연결상태에서 추진장치의 견인특성이 양호하게 나오는지 확인하기 위한 견인특성 확인 시험 결과로써, 추진장치의 Powering과 Braking을 교대로 수행하였다. 그림 4(b)는 추진장치의 운전 중 가선전압(DC1500V)을 5초간 차단하였다가 복위 시 성능 확인시험 결과이다.

#### 4.2 차세대전동차용 DD-PMSM의 성능 시험평가 사례 차세대 전동차용 직접구동 견인전동기(Direct Drive

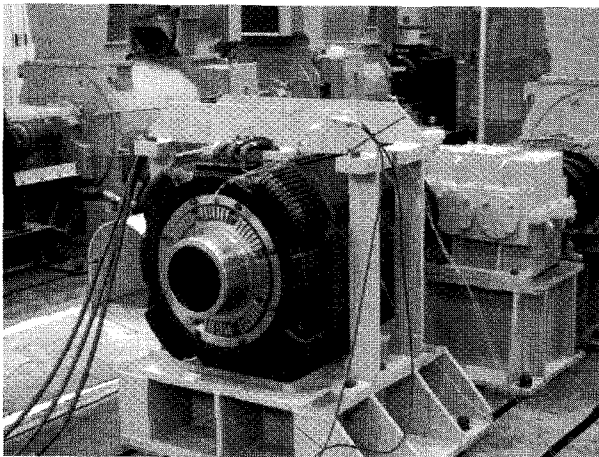
표 8 차세대 전동차용 DD-PMSM 시제품 주요 사양

항목	주요 사양
형식	매입형 영구자석형 동기전동기 (IPM)
출력	200kW
전압 / 전류	1100V / 200A
역률 / 효율	90% 이상 / 94% 이상
극수	10극
냉각방식	전폐형 자연냉각
최대회전수	885 RPM

Permanent Magnet Synchronous Motor) 시제품의 각종 성능 시험을 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 추진장치 성능시험설비를 활용하여 수행하였다. 직접구동 견인전동기



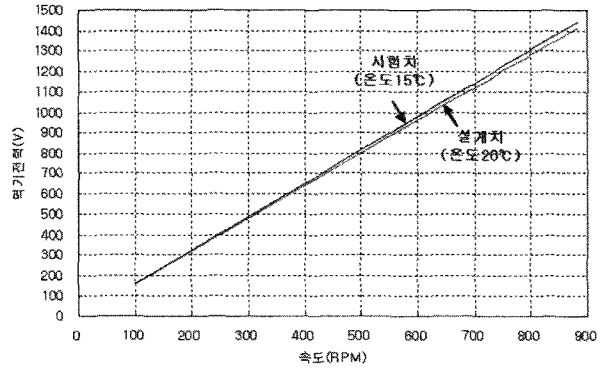
(a) 차량용 변압기와 추진제어용 인버터



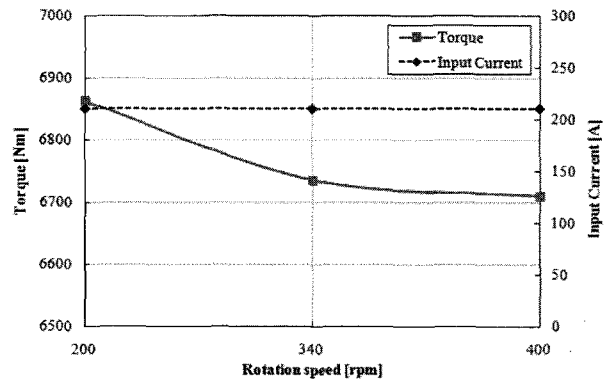
(b) 차세대 전동차용 DD-PMSM과 부하설비

그림 5 차세대 전동차 추진제어용 인버터와 DD-PMSM 시제품 성능 시험 구성품

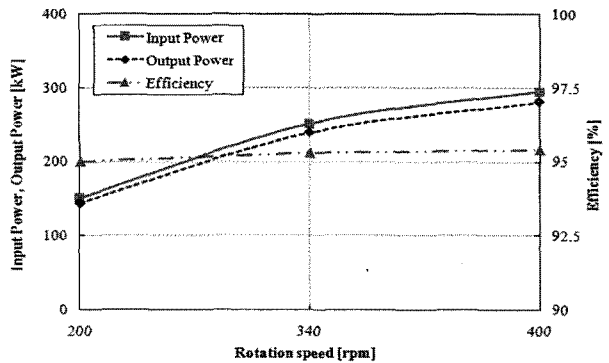
는 차량의 축에 영구자석 동기전동기의 회전자를 직접 설치한 형태로써 기존 철도차량용 견인전동기 구조와 달리 기어 박스가 불필요한 구조이다. 표 8은 차세대 전동차용 DD-PMSM 시제품의 주요 사양을 보여준다. 매입형 영구자석형 동기전동기로서 출력은 200(kW)이다. 그림 5는 차세대 전동차 추진제어용 인버터와 DD-PMSM 시제품 성능시험 구성품을 보여준다. 그림 6은 차세대 전동차용 DD-PMSM의 속도 변화에 따른 역기전력, 토크, 효율 특성시험 결과를 보여준다. 그림 6에서 보는 바와 같이, DD-PMSM의 무부하 역기전력은 설계값과 시험값이 유사함을 확인하였으며, 정격부하에서 발생 토크와 효율이 요구성능 기준을 만족함을 확인하였다.



(a) 역기전력 특성시험 결과



(b) 토크-속도 특성 시험 결과



(c) 효율 특성 시험 결과

그림 6 DD-PMSM 속도 변화 따른 역기전력, 토크, 효율 특성시험 결과

## 5. 결론

요즘 철도차량의 대부분이 전기철도차량으로 대체되면서 전기철도차량의 성능평가는 실질적으로 차량용 전력변환장치와 견인전동기를 포함한 추진장치의 성능평가라 할 수 있을

정도로 많은 비중을 차지하고 있다. 따라서 본 논문에서는 한국철도기술연구원이 보유하고 있는 대형 추진장치 성능시험설비의 소개 및 철도차량의 성능시험기준을 근간으로 철도차량용 추진제어 인버터와 견인전동기의 성능 시험평가에 대한 방법 및 서울도시철도 7호선 연장구간 차량용 추진장치 및 차세대 전동차용 DD-PMSM 시제품의 성능 시험평가 사례에 대하여 기술하였다. 향후 국내의 다양한 철도차량용 추진장치 및 관련 전장품 개발 업체에서 다양한 전원설비 조건과 인버터와 견인전동기의 다양한 용량 차이를 감안한 다양한 부하조건 구현이 가능한 추진장치 성능시험설비를 갖추게 된다면, 새로운 철도차량을 개발하고자 할 때, 새로운 형식의 차량용 추진장치 개발에 필요한 막대한 기술적, 재정적 위험 부담을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. ■

### 참고 문헌

- [1] “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”, 건설교통부-한국철도기술연구원, 2000.
- [2] “고속전철 열차시험 및 성능평가 기술개발 최종보고서(II)”, 한국철도기술연구원, 2002.
- [3] “추진장치 성능시험설비 연구보고서-전기분야”, 한국철도기술연구원, 2000.
- [4] 양병남, “최신 전기철도공학”, 성안당, 2003.
- [5] 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단 경량전철

연구팀, “경량전철 기술”, 도서출판 명신, 2001.

- [6] “주행성능 시험평가기술 개발-완료보고서”, 한국철도기술연구원, 2009.
- [7] “SMRT#7 전동차(56R) 추진장치 조합성능시험 및 평가-완료보고서”, 한국철도기술연구원, 2011.

### 〈 필 자 소 개 〉



#### 박찬배(朴贊培)

1975년 10월 3일생. 2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2009년~현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정. 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년~현재 철도기술연구원 선임연구원.



#### 이병송(李炳松)

1960년 6월 13일생. 1991년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~1997년 한국 고속철도건설공단 철도차량 R&D 센터 선임연구원. 1998년~현재 철도기술연구원 책임연구원.