

# 모노레일 추진시스템용 고효율 수냉식 냉각구조 및 방법에 관한 연구

## Study of the structure and method of high efficiency water cooling system for monorail propulsion system

고형근†      박태홍\*      송민수\*\*      오석진\*\*\*      박진홍\*\*\*\*  
Hyung-keun KO   Tae-hong Park   Min-su Song   Sek-jin On   Jin-hong Park

### ABSTRACT

Monorail, with the cutting edge technology from EMU system, is small to medium sized transportation solution with bus size capacity, and one of key factors is to minimize size and weight. The Wolmi urban tour monorail, which is a center guide type first ever introduced in the world, is also consists minimizing size and weight of the propulsion system (inverter and motor), which generates considerable amount of heat. This study presents a solution of the structure and method of water cooling system of minimize the size and weight of high efficiency propulsion system, and an effective control method for energy saving.

### 국문요약

모노레일은 전철의 최첨단 시스템을 적용하여 버스 규모의 크기로 운용할 수 있는 중소형 교통수단으로서 각 장치들에 대한 소형, 경량화가 무엇보다 중요하다. 세계 최초로 도입한 중앙 안내 방식의 도심관광형 월미모노레일 또한 소형, 경량화 된 장치들로 구성되어있으며, 특히 열이 많이 발생하는 추진 시스템(인버터, 모터)을 소형, 경량화 하기 위해 집중적인 연구와 시험이 이루어졌다.

본 연구에서는 고효율의 추진 시스템을 소형, 경량화 할 수 있는 수냉식 냉각 구조 및 방법에 관한 해법연구와 함께 에너지 절감에 효과적인 제어방식을 제시하였다.

### 1. 서론

최근 대중교통 수단으로서 철도는 도시와 도시간을 연결하는 중대형 고속철도와 도심내부를 운행하는 중소형 경전철로 구분되어 각광 받고 있다.

특히 경전철은 국가 교통정책의 패러다임인 ‘저탄소 녹색 성장’ 및 ‘지속가능 발전’ 이라는 주제로 친환경적인 대중교통 수단으로 연구, 개발이 활발히 진행되고 있다.

그 중 모노레일은 친환경적, 경제성, 효율성 등에서 최적의 조건을 갖추고 있고 전철의 최첨단 시스템이 적용되어있어 도심 내부의 수송용이나 도심 및 관광지의 투어용으로 적합하다는 평가를 받고 있다. 하지만 모노레일은 차량의 크기가 작기 때문에 각 장치들 특히, 추진 시스템의 소형, 경량화가 이루어져야 한다.

각 장치들을 소형, 경량화 하기 위해서 해결해야 할 여러 가지 문제 중에 중요한 사항은 ‘보이지 않는 벽’ 즉, 장치들이 기동할 때 발생하는 ‘열’ 을 냉각시키는 방법이다.

우리나라 최초로 도입된 도심관광형 월미 모노레일의 추진 시스템을 냉각하기 위해 사용된 고효율 수냉식 냉각시스템에 대한 연구와 성능 입증은 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

† 책임저자 : 비회원, (주)로윈 기술본부장  
E-mail : pluslhk@rowin.co.kr  
TEL : (054)420-2977 FAX : (054)420-2899  
\* 비회원, (주)로윈 기술연구소 수석연구원  
\*\* 비회원, (주)로윈 기술연구소 책임연구원  
\*\*\* 비회원, (주)로윈 기술연구소 선임연구원  
\*\*\*\* 교신저자 : 비회원, (주)로윈 기술연구소 주임연구원

## 2. 모노레일 추진시스템용 냉각 시스템

### 2.1 수냉식 냉각 시스템의 도입배경

각 장치들을 냉각시키는 방법에는 공냉식과 수냉식 방법이 있다.

공냉식 방법에서 장치의 발열은 모두 대기에 발산되기 때문에 반드시 고체면에서 공기의 열전달이 존재하며, 이 부분의 열저항이 병목되어 기술적인 해법을 찾는 데 한계가 있다.

그리고 Fan의 소음이나 먼지, 티끌의 유체진동 등 불합리한 상태가 발생하기도 한다. 또한 풍속이 일정 이상이 되면 거기에 알맞은 열저항의 저하를 기대할 수 없다. 이 때문에 풍속은 어느 정도 이하로 억제하고 Heat Sink나 Duct 형상의 최적화에 의한 저열, 저저항화를 추구하는 것이 주된 기술과제가 된다.

도심관광형 인천 월미모노레일은 월미도를 순환하는 노선으로서 지역 특성상 공기 중에 염분이 많고 주변 항만에서 유입되는 이물질이 많은 곳이다. 이런 환경에서 공냉식의 방법, 특히, Fan을 사용할 경우 복잡한 필터 구조를 사용하지 않으면 각 장치 내부에 이물질이 유입될 가능성이 높다.

그리고 유지보수 시 각 필터의 청소 및 교체가 불필요하게 나타나게 되고 각 장치 내부의 이물질들을 제거해야 하는 등 많은 애로점이 발생한다.

하지만 수냉식 구조는 각 장치들의 발열부위에 Water Pipe만 설치하면 되므로 공냉식보다 소형, 경량화하기가 유리하다는 장점을 가지고 있다.

특히, 견인전동기의 경우 냉각 효과가 일반 공냉식보다 월등히 우수하므로 소형, 경량화가 가능하고 Fan에 의한 소음을 없앨 수 있다. 그리고 Fan의 축동력이 필요 없기 때문에 효율이 높아지고 유지, 보수가 간편해질 수 있다.

### 2.2 냉각시퀀스

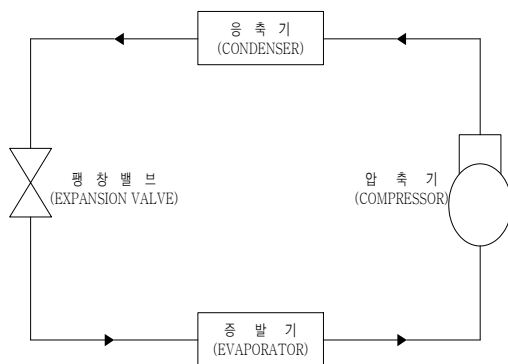


그림1. 냉각장치 기본적인 냉각 사이클

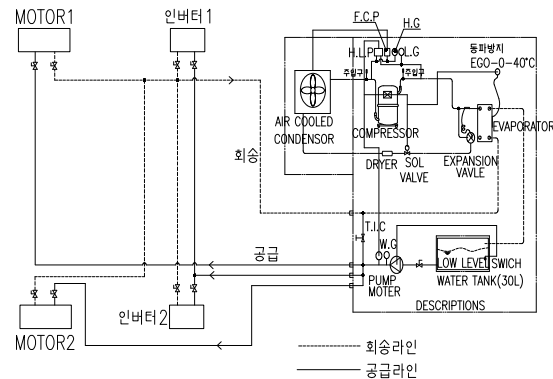


그림2. 냉각장치의 다이어그램

냉각장치에 의해 냉각된 냉각수가 공급라인을 거쳐 각각 추진제어장치와 견인전동기로 공급되고 추진제어장치와 견인전동기에 의해 온도가 상승한 냉각수는 회송라인을 거쳐 냉각장치로 들어오게 된다. 회송된 고온의 냉각수는 그림1과 같이 냉각장치의 증발기를 거쳐 압축기, 응축기, 팽창밸브를 거쳐 물탱크로 유입되어 다시 추진제어장치와 견인전동기로 공급된다.

따라서 수냉식 냉각시스템은 앞서 설명한 바와 같이 공급과 회송이 반복적으로 이루어지면서 추진시스템을 냉각시키는 방식으로 설계되었다.

도심관광형 월미 모노레일은 그림2와 같이 2량 1편성으로서 각 차량마다 견인전동기 2개, 추진제어장치 2개, 냉각장치 1개가 설치되어 있다. 상대적으로 발생하는 열량이 적은 추진제어장치는 같은 배관라인을 사용하고 견인전동기는 각각 독립라인을 사용하여 냉각수를 공급하도록 시스템이 구성되어 있다.

냉각장치는 냉각장치 및 추진 장치 내부에 설치된 온도센서에 의해 냉각장치가 자동적으로 기동된다. 초기 기동 시 냉각장치는 부하 공급용 펌프만 기동하여 추진 장치 내부에 냉각수를 순환시킨다. 그 후 추진 장치의 연속적인 기동으로 추진 장치 내부 및 냉각수의 온도가 기준온도 이상으로 상승하면 온도

를 모니터링 하고 있던 냉각장치가 자동으로 기동하여 냉각수를 설정온도 이하로 낮추어 추진 장치로 냉각수를 공급한다.

### 3. 추진시스템 냉각 구조 및 발열량 계산

#### 3.1 추진제어장치

##### 3.1.1 추진제어장치 냉각 구조

추진제어장치는 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motors)을 구동하기 위한 시스템이다. 그림 3과 같이 2개의 암(Arm)은 물론 DC Link 전압의 평활 및 필터 역할을 위한 FC(Filter Capacitor)와 함께 4개의 암(Arm)으로 구성된 총 4개의 IGBT Stack이 있으며, 빠르고 정밀한 토크제어를 위해 벡터 제어 방식으로 견인전동기를 각각 제어한다.

그림4는 IGBT Stack의 냉각판 내에 Water Pipe의 구조를 나타낸 그림이다. 추진제어장치의 IGBT stack에 냉각용 방열판을 붙이고 방열판 내부에 냉각수가 흐를 수 있도록 Water Pipe를 설치하였다.



그림3. 추진제어장치 IGBT Stack의 사진

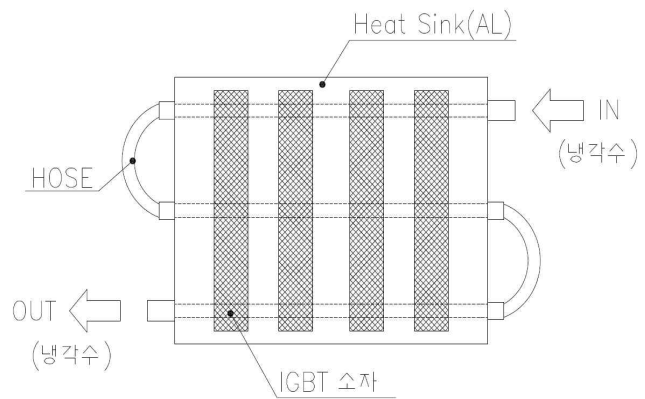


그림4. IGBT Stack의 냉각판 내의 Water Pipe 구조

##### 3.1.2 발열량 계산

추진제어장치에서 열에 가장 취약한 부분은 바로 스위칭 소자 즉, IGBT Stack이다. IGBT Stack의 발열량 계산은 IGBT의 도통손실 및 스위칭 손실, 환류 다이오드 도통 손실 및 스위칭 손실로 구분되고 각 특성 곡선에 따라 발열량이 결정되며, 추가적으로 제어변수인 스위칭 주파수와 역률, 변조지수, 주행 패턴 등에 따라 발열량이 다르므로 시스템의 특성에 적합한 설계가 요구되어 진다. 아래의 계산식은 IGBT 및 환류 다이오드의 스위칭 손실과 도통 손실을 계산하는 식으로 여기서  $P_{IC}$ 와  $P_{IS}$ 는 각각 IGBT의 도통 손실과 스위칭 손실이며,  $P_{DC}$ 와  $P_{DS}$ 는 환류 다이오드의 도통 손실과 스위칭 손실이다.

$$P_{IC} = I_{MP} \cdot V_{CE(sat)} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cdot \cos\theta \right) \quad (1)$$

$$P_{IS} = (E_{ON} + E_{OFF}) \cdot f_{sw} \cdot \frac{1}{\pi} \quad (2)$$

$$P_{DC} = I_{MP} \cdot V_F \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cdot \cos\theta \right) \quad (3)$$

$$P_{DS} = \frac{1}{8} \cdot I_{rr} \cdot t_{rr} \cdot V_{CE(peak)} \cdot f_{sw} \quad (4)$$

표 1. 손실 계산값

NO.	내용	손실	계
(1)	$P_{IC}$	385.7W	816.6W
(2)	$P_{IS}$	132.4W	
(3)	$P_{DC}$	267.6W	
(4)	$P_{DS}$	30.9W	

여기서,  $I_{MP}$ 는 입력(출력) 최대 전류,  $V_{CE(sat)}$ 는 IGBT의 Collector-Emitter간 포화전압,  $M$ 은 변조지수,  $\cos\theta$ 는 역률,  $E_{ON}$ ,  $E_{OFF}$ 는  $I_{MP}$ 에서의 턴-온, 턴-오프 손실,  $f_{sw}$ 는 스위칭 주파수,  $V_F$ 는  $I_{MP}$ 에서 다이오드의 순방향 전압,  $I_{rr}$ 는 다이오드 역회복 전류,  $t_{rr}$ 은 다이오드 역회복 시간이다.

표1에 고조파 성분을 고려하여 20% 여유를 포함하면 IGBT stack 4개의 총 손실은 약 3919.7W이다.

#### 3.2 견인전동기

### 3.2.1 견인전동기 냉각 구조

그림5는 고정자 내부 사진이다. 고정자 코어는 두께 0.35t의 규소강판을 사용하며, 고정자 코일은 폴리아미드이미드동선(Poly amide imide Enameled copper wire) - AIW 절연동선을 사용하였다. 회전자 코어는 두께 0.35t의 규소강판을 사용하고, 회전자 축은 합금강으로 제작되었다. 또한 영구자석은 NdFeB-SH급 이상의 등급을 사용하여 회전자 코어에 안전하게 고정시켰다.

고정자 내부에 그림6과 같이 자로에 영향을 미치지 않는 범위에서  $\Phi 6$ 의 water pipe를 설치였고 고정자 프레임에도  $\Phi 10$ 의 Water pipe를 설치하여 냉각 효율을 극대화 시켰다.



그림5. 견인전동기의 고정자 사진

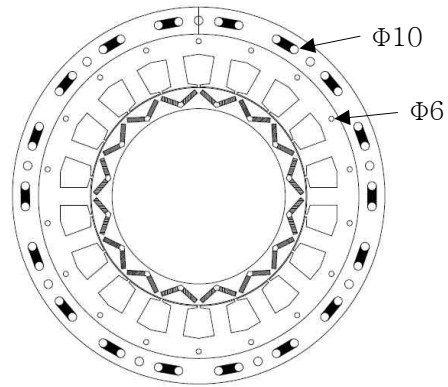


그림6. 견인전동기 냉각수배관

### 3.2.2 발열량 계산

견인전동기에서 발생하는 열량을 계산함에 있어서 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 프레임 표면 열전달은 무시할 만큼 작다.
- ② 전동기 부하측과 반부하측은 열적 대칭을 이룬다.
- ③ 전동기의 손실은 기계적 손실을 포함하여 100% 열손실이다.

영구자석형 전동기의 발열은 고정자 코일에서 발생하는 동손에 의한 발열과 철심의 자속 밀도 변화에 의해 발생하는 철손에 의한 발열로 나누어 볼 수 있다. 먼저 동손에 의한 발열은 고정자 코일의 상저항 계산을 통해 가능하며 그 식은 아래와 같다.

$$R_s = \frac{\rho_c N_{ph} 2l + (r_s + d_s) p_c}{f_s A_s n_p} \quad (5)$$

여기서  $\rho_c$ 는 고정자 권선의 비저항률,  $l$ 은 축방향 길이,  $r_s$ ,  $d_s$ 는 슬롯 깊이,  $p_c$ 는 코일 피치[rad],  $N_{ph}$ 는 상당 직렬 턴수,  $n_p$ 는 병렬 회로수이다.

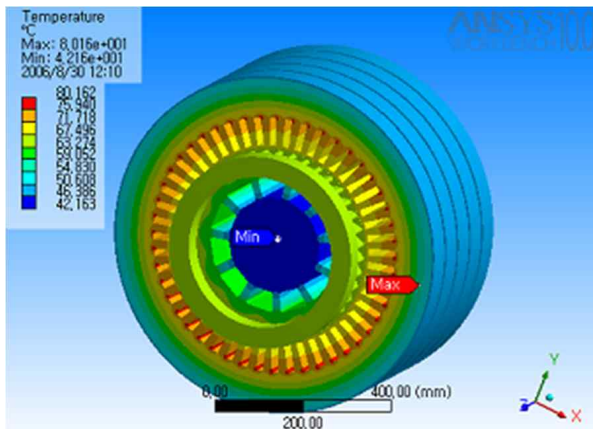


그림7. 견인전동기 열해석 (1)

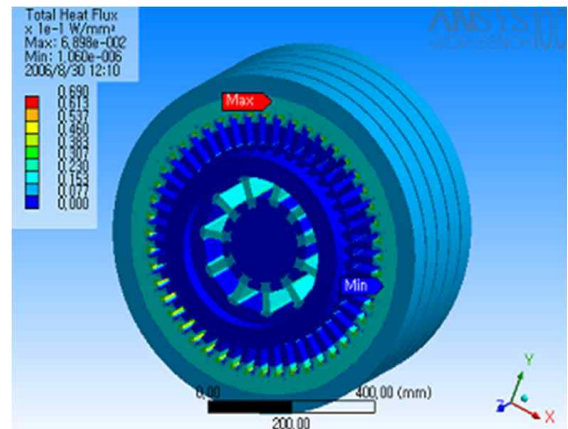


그림8. 견인전동기 열해석 (2)

철손은 전동기 코어에서 자속의 시간의 변화율에 영향을 받는다. 영구자석형 전동기는 장시간의 고속

고출력 운전 중 영구 자석의 감자(Demagnetization)현상이 발생할 수 있고 이를 정확히 예측하기 위해서 철손 해석이 필요하다. 그림7, 8은 견인전동기의 열을 해석한 그림이다.

유한요소법을 이용하여 해석한 결과 정격출력 100kW에서 약 4%의 전기적 손실이 발생하는 것으로 확인 되었다.

#### 4. 모노레일 추진시스템 냉각 성능 및 신뢰성 검증

##### 4.1 신뢰성 시험

수냉식 냉각시스템의 신뢰성을 검증하기 위해 도심형관광 월미 모노레일의 본선 주행조건에 따른 최고 성능으로 연속 20시간 기동하여 시험을 실시하였다.

성능 만족을 위한 목표 온도차는 안정적인 동작을 보증하기 위하여 IGBT Stack의 경우 20℃, 견인전동기 고정자의 경우 60℃로 설정하였다. 시험결과 표2 및 그림9과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

약 4시간이 지난 후부터는 냉각수에 의해 냉각이 이루어지는 IGBT Stack, 견인전동기 프레임 및 고정자 권선이 일정한 온도를 유지하며 냉각이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 냉각수에 의해 냉각이 이루어지지 않는 충전 콘덴서 및 리액터 등의 온도도 포화된 것을 확인할 수 있었다.

표 2. 포화 온도 데이터

NO.	측정위치	초기온도(℃)	측정온도(℃)	상승치
1	외부온도	20.6	-	
2	IGBT Stack 표면	14.8	21.8	7.0
3	IGBT Stack 표면	14.9	22.8	7.9
4	베어링부하측	14.3	20.7	6.4
5	외부프레임	17.5	23.3	5.7
6	고정자 권선	20.3	45.3	25

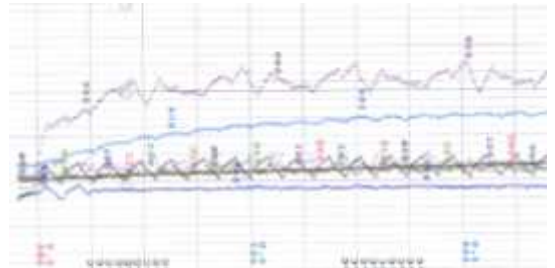


그림9. 신뢰성시험 온도 그래프

##### 4.2 현차 시험

도심관광형 월미 모노레일을 본선에서 최고 성능 조건으로 10시간(1일 운행 기준)을 운행하여 측정한 결과이다. 그림10과 표3을 보면 역시 각 부분의 온도가 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

표 3. 포화 온도 데이터

NO.	측정위치	초기온도(℃)	측정온도(℃)	상승치
1	IGBT Stack 온도	21	32.7	11.7
2	모터 프레임	15	26.5	11.5
3	모터 베어링	16	29.1	13.1

- ① 가선전압 ② 인버터입력전류 ③ 모터 전류 U상/실효치
- ④ 모터 전류 V상/순시치 ⑤ 모터 전류 W상/순시치
- ⑥ 차량속도 ⑦ IGBT stack 온도 ⑧ 모터 프레임 온도
- ⑨ 모터 베어링 온도 ⑩ SIV 방열판 온도
- ⑪ 역행 지령치 ⑫ 가/감속도

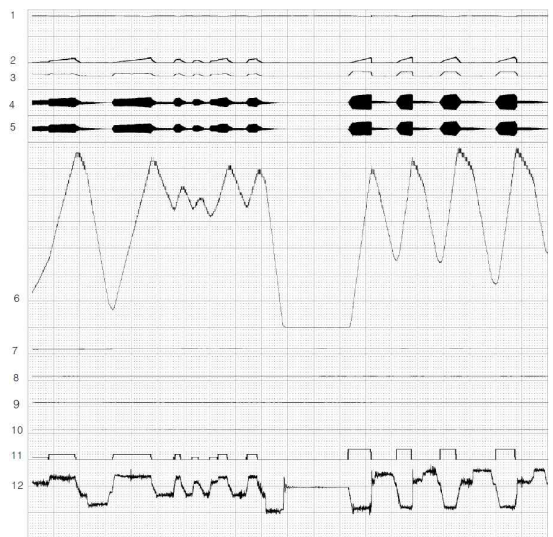


그림10. 현차 시험 온도 그래프

#### 4.2 견인전동기 정격부하시험



냉각구조의 성능을 검증하기 위하여 견인전동기의 정격부하 100kW 시험을 실시하였다.

그림11의 결과로 보아 정격출력으로 기동해도 문제가 없었다. 표4에서 보는바와 같이 견인전동기 영구자석의 성능보증온도인 150℃와 IGBT Stack의 성능보증온도인 60℃보다 각각 약 40℃와 약 34℃의 여유를 갖고 있는 것을 확인할 수 있었다.

표 4. 포화 온도 데이터

NO.	측정위치	초기온도(℃)	측정온도(℃)	상승치
1	외부온도	22.2	-	
2	베어링	18.4	22.9	4.5
3	고정자 권선	10.0	110.5	100.5
4	외부프레임	8.7	13.0	4.3
5	IGBT Stack 표면	10.0	26.4	16.4
6	IGBT Stack 표면	10.3	26.7	16.4

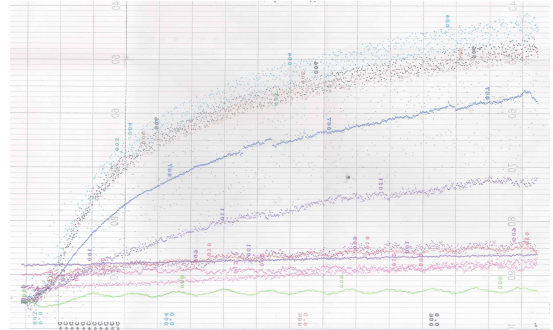


그림11. 정격부하시험 온도 그래프

### 5. 결론

전력 반도체 및 냉각장치의 기술 발전으로 철도차량의 주요 장치들에 대해 소형, 경량화 및 경제성을 높여려는 시도가 계속 이루어지고 있는 시점에서 로윈에 의해 처음 개발된 도심관광형 모노레일과 함께 구성품의 성능을 입증하고 확보한 것은 우수한 기술력을 보여준 좋은 사례라 할 수 있다.

특히 국내 최초로 철도 차량에 적용한 대용량 BLDC모터를 비롯하여 벡터 제어 방식의 추진제어장치 내부에 수냉식 냉각 구조를 도입하고 성능이 우수한 냉각장치(Chiller)로 고효율의 냉각 시스템과 제어 방식을 구축한 것은 훌륭한 성과로서 좋은 평가를 받을 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 이러한 연구 성과를 바탕으로 국내의 관련 기술을 한층 더 발전시키고 소형, 경량화 노력은 물론 용량을 확대하여 중대형 모노레일 개발 시기를 앞당김으로서 수입대체 효과를 높이고 기술 경쟁력 강화에 앞장서는 것이 남은 과제라 할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. 김명한, 이광국, 박수용, “일체형 스택(PEM) 및 냉각장치를 적용한 전동차 추진제어장치 개발 및 상용화 “ 한국철도학회논문집, pp680-685, 2007.
2. 이광국, 김동명, 권일동 “IPM 소자를 사용한 추진제어장치 개발 및 상용화” 한국철도학회논문집, pp.671-675, 2005.
3. 김태운, 노애숙, “IPM 스위칭 소자를 적용한 AC 전동차 추진제어장치” 전력전자학회논문지, 제 10 권, 제3호, pp.223-240, 2005.
4. 피재년, 홍성일, 박태용, “대용량 고속전동기의 제작” 전기학회지, pp.46-53, 1990.
5. 양관석, 이호준, 전원봉, “CFD를 이용한 전동기 냉각성능 개선에 관한 연구” 대한기계학회논문집, pp.261-265, 2005.
6. 서장호, 이상엽, 정현교, “동력분산형 고속 전철의 견인전동기 냉각 시스템 해석 및 설계기술 연구 “ 한국철도학회논문집, pp.1188-1194, 2008.