

경량전철용 유도급전 시스템의 전자파 분석 연구

A Study on the Electro-magnetic Wave of Inductive Power Transfer System for Light Railway Transit

박 찬 배[†] · 이 병 송* · 이 형 우**

(Chan-Bae Park · Byung-Song Lee · Hyung-Woo Lee)

Abstract - Traction motors for driving and power conversion devices using semiconductor switch are equipped with a transportation systems such as an electrical railway system. Power conversion devices have the possibility of malfunction by external electromagnetic waves. As a result, these could affect the safe operation of the railway. Moreover, the electromagnetic waves above safe limits will be harmful to the passengers inside the railway vehicles or anyone working around the rail-track. For this reason, the importance and need about the reliability check and complement of electromagnetic waves generated from the IPT(Inductive Power Transfer) system have been suggested for the safe application of the IPT system to the railway system. In this study, prediction for the electromagnetic wave properties was conducted through FEM(Finite Element Method) analysis of 5kW-class IPT system design model. Next, the 5kW IPT system prototype was made and then the small-scaled railway vehicle was made to mount the IPT system and the energy management system. Finally, the electromagnetic waves generated from the real small-scaled IPT system were measured and analyzed, and then the reliability check of predictions by FEM analysis were carried out.

Key Words : Electromagnetic waves, Inductive Power Transfer, IPT, Railway vehicle

1. 서 론

유도급전(Inductive Power Transfer, IPT) 시스템은 비접촉 전력전송장치로써, 응용범위는 전동칫솔 충전기, 핸드폰 충전기와 같은 소 용량 시스템뿐만 아니라, 전기자동차, 산업용 이송장치와 같은 대용량 시스템에까지 확대되고 있다 [1][2]. 최근 철도 시스템 분야에서도 기존의 접촉식 가공 전차선 급전 방식을 벗어나 새로운 개념의 에너지 전송시스템으로써 IPT 시스템의 다양한 응용 연구를 진행하고 있다. 특히 철도시스템이 점차 고속화가 되어 가면서 기존의 접촉식 가공 전차선 급전 방식이 직면한 기술 한계에 대한 방안으로 IPT 시스템이 대두되고 있다. 하지만 IPT 시스템을 철도차량과 같은 대용량의 교통시스템에 적용시키기에는 아직까지 해결해야 할 기술적 문제가 많이 남아있으며, IPT 시스템에서 발생하는 전자파 문제도 해결해야 할 문제 중 하나이다. 일반적으로, 전기철도시스템과 같은 교통시스템에는 구동용 견인전동기 및 전력반도체를 사용하는 전력변환장치가 탑재되어 있으며, 이러한 장치는 외부 전자파에 의한 오동작 가능성을 내포하고 있으며, 이로 인해 철도의 안전운행에 영향을 줄 수 있다. 또한 기준 이상의 전자파는 철도차량 내부에 탑승한 승객이나 선로 주변의 작업인에게도 유해할 것이다[3]. 그림 1은 일반인에 대한 전자파 강도 기준을

보여준다[4]. 이러한 이유로 최근 유도급전 시스템을 철도차량에 안전하게 적용하기 위하여 유도급전 시스템으로부터 발생하는 전자파에 대한 신뢰성 확인과 보완에 대한 필요성 및 중요성이 제기되고 있다. 따라서 본 논문에서는 경량전철에 유도급전 시스템을 적용하기 위한 선행 기술 확보 차원에서 먼저 5kW급 유도급전 모듈 설계 모델의 수치해석을 이용한 전자파 특성을 예측하고, 5kW급 유도급전 모듈 단품 및 이를 탑재할 수 있는 축소형 철도차량 시스템을 제작하여 실제 유도급전 모듈 단품 및 이를 탑재한 철도차량 시스템으로부터 발생하는 전자파를 측정하고 그 특성을 분석하고자 한다.

표 1 일반인에 대한 전자파(자기) 강도 기준(IEEE C95.1)
Table 1 Electromagnetic wave(Magnetic field) intensity criteria for the general public (IEEE C95.1)

주파수 범위 [kHz]	자속밀도 [mT]	자기장 강도[A/m]
3.0~3.35	0.687/f	547/f
3.35~5000	0.205	163

2. 경량전철용 축소형 유도급전 시스템 설계 및 제작

국내에서는 경량전철(트램)용 비접촉 급전시스템으로써 유도급전 시스템 적용을 위한 기초 연구가 진행되고 있으며, 철도차량이 일정시간 역에 정지해 있는 동안 지상의 급전 전력을 차량으로 전달하는 급속 충전 방식이 연구되고 있다. 그림 1은 경량전철용 유도급전 시스템 운영방안에 대한

* 정 회 원 : 한국철도기술연구원 책임연구원
** 정 회 원 : 한국철도기술연구원 선임연구원
† 교신저자, 정회원 : 한국철도기술연구원 선임연구원
E-mail : cbpark@krii.re.kr
접수일자 : 2012년 5월 21일
최종완료 : 2012년 7월 9일

개념 및 설계가 완료된 5kW급 축소형 유도급전 모듈을 보여준다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 설계가 완료된 축소형 유도급전 모듈의 코어 형태는 U-U 타입으로써, 1차측 코어는 지상 레도에 설치되며, 2차측 코어는 철도차량의 하부에 설치된다. 그림 2는 경량전철용 축소형 유도급전 시스템 및 이와 연계된 추진제어시스템 구성도를 보여준다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 경량전철용 축소형 유도급전 시스템 및 이와 연계된 추진제어시스템은 지상의 3상 상용 60Hz 전원을 단상 20kHz 전원으로 변환해주는 공진형 인버터, 비접촉 전력공급용 유도급전 모듈, 에너지 저장을 위한 슈퍼캡과 급속충전기, 양방향 DC-DC 컨버터, 철도차량 추진을 위한 모터와 제어기 Unit, 무선제어장치 및 이 모든 구성품을 탑재할 수 있는 축소형 철도차량/레일로 구성된다. 경량전철용 축소형 IPT 시스템 및 이와 연계된 추진제어시스템의 에너지 전달 흐름도 그림 2에 나타내었다. 먼저 축소 철도차량의 모터링 시에는 지상의 공진형 인버터와 유도급전 모듈로 구성된 유도급전 시스템으로부터 AC180~240V(20KHz) 전원을 입력받아 급속충전기를 이용하여 슈퍼캡을 DC42V로 충전한다. 다음으로 슈퍼캡에 저장된 에너지는 양방향 DC-DC 컨버터를 통해서 MCU(Motor Control Unit)로 전달되어 최종적으로 전동기로 전달된다.

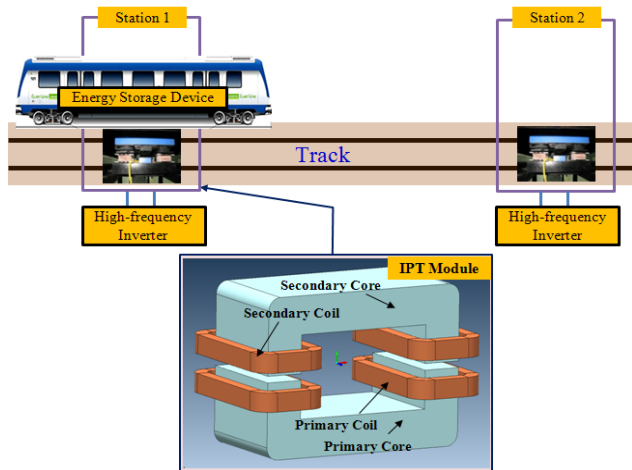


그림 1 경량전철용 유도급전 시스템 개념 및 설계가 완료된 5kW급 축소형 유도급전 모듈
 Fig. 1 Concept of IPT system for Light Railway Vehicle and 5kW small-scaled IPT module

표 2는 철도차량용 5kW급 유도급전 시스템의 주요 사양을 보여준다. 표 2에서 보는 바와 같이, 철도차량용 유도급전 시스템은 공진형 인버터, 유도급전 모듈, 슈퍼캡과 급속충전기, 양방향 DC/DC 컨버터, 모터와 제어기 Unit 및 무선제어장치로 구성된다. 이 중에서 유도급전 모듈의 공극은 5mm이며, 1차/2차 코어에 적용된 재료는 Nano-Crystalline 프로세스에 의해 제작된 아몰포스 메탈이며, 1차/2차 코일은 Ritz Wire를 사용하였으며, 1차 10턴, 2차 6턴으로 구성하였다. 그림 3은 제작이 완료된 5kW급 U-U type 유도급전 모듈과 유도급전 시스템이 적용된 축소 철도차량을 보여준다 [5-7].

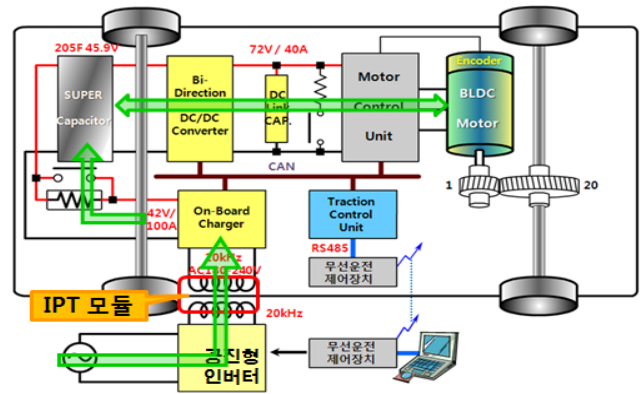


그림 2 경량전철용 축소형 유도급전 시스템 및 추진제어시스템 구성도
 Fig. 2 Configuration of the small-scaled IPT and propulsion system for Light Railway Vehicle

표 2 경량전철용 5kW급 유도급전 시스템의 주요 사양
 Table 2 Main specification of 5kW IPT system for Light Railway Vehicle

주요 구성품		주요 Spec.
유도급전 모듈	출력	5 kW
	공극	5 mm
	코어재질	Amorphous metal (Nano-Crystallization Process)
	턴수	1차 10 턴 / 2차 6 턴
	Ritz Wire	Φ3 mm / Φ7 mm
공진형 인버터	최대출력 20kW / 효율 90% 공진주파수 : 20kHz	
슈퍼캡	42V 205F	
급속충전기	최대50A 정전류 충전/42V 정전압 충전 기능 포함, 효율 85%	
양방향 DC/DC 컨버터	출력 5kW, In 42V/ Out 72V 효율 92%	
Motor/ Control Unit	Max.3,000rpm / Rated 9.5Nm	
차량제어기	CAN통신을 이용한 각 장비 운용	
무선제어장치	Gigbee송수신	

3. 수치해석을 이용한 유도급전 시스템의 전자파 특성 예측

본 연구에서는 먼저 설계된 5kW급 U-U type 유도급전 모듈의 상용 전자기해석 Tool을 활용한 수치해석을 통하여 유도급전 모듈에서 발생하는 전자파 특성을 예측하였다. 해석 조건으로 U-U type 유도급전 모듈의 1차측 전류는 61A, 2차측 전류는 7.4A로 수행하였다. 그림 4는 상용 전자기 해석 Tool을 이용하여 분석한 5kW급 U-U type 유도급전 모듈 및 주변의 자기장 분포를 보여준다. 그림 4에서 보는 바

와 같이 1차측과 2차측 코어 사이의 공극 주변에서의 자속 누설이 있음을 확인할 수 있다. 그림 5는 5kW급 U-U type 유도급전 모듈에서 방출되는 전자파 특성 예측을 위한 거리에 따른 자기장 계산 결과를 보여준다. 그림 5에서 X-Y-Z 축 중심은 1차측 코어와 2차측 코어가 마주하고 있는 면 중심부분이다. 그림 5에서 보는 바와 같이, X축 방향과 Y축 방향의 거리에 따른 자기장 분포에서 갑작스럽게 값이 커지는 부분은 1차측 코어와 2차측 코어가 접하는 공극 부분과 코어를 지나는 부분의 영향 때문이다. X축 방향의 거리에 따른 자기장 분포는 최대 약 0.025T, Y축 방향의 거리에 따른 자기장 분포는 최대 약 0.018T, Z축 방향의 거리에 따른 자기장 분포는 최대 약 0.0044T가 나왔다. 그리고 X-Y-Z축 중심에서 150mm 이상 떨어지게 되면 모든 축에서 자장이 급속하게 감소하여 매우 작은 값까지 떨어지게 되는 것을 확인할 수 있다.

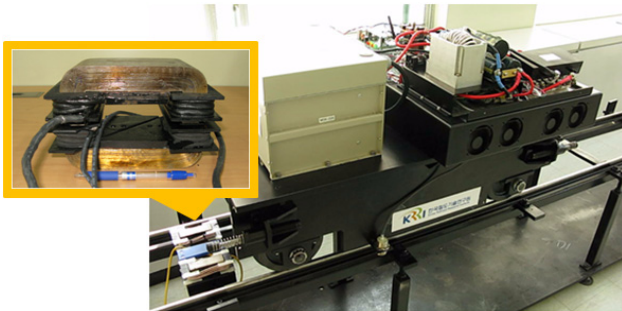
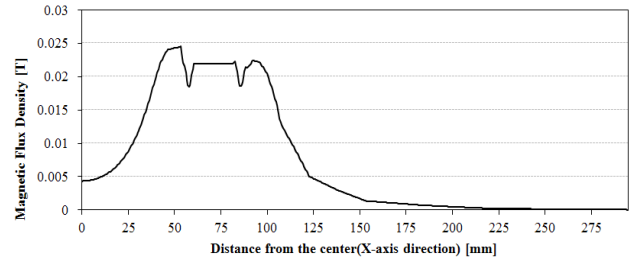
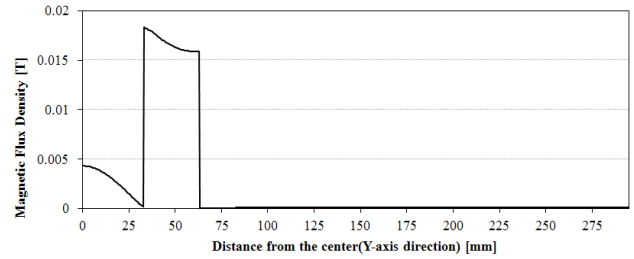


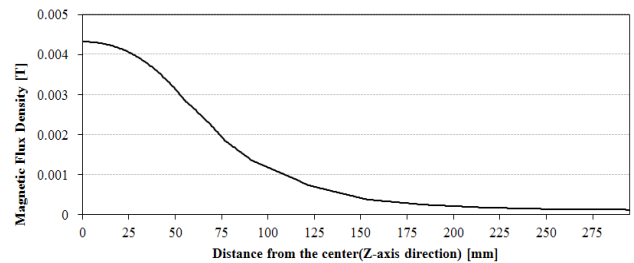
그림 3 5kW급 U-U type 유도급전 모듈(좌)과 유도급전 시스템이 적용된 축소 철도차량(우)
 Fig. 3 5kW U-U type IPT module(Left) and a small-scaled railway vehicle with the IPT system(Right)



(a) X-axis magnetic field intensity



(b) Y-axis magnetic field intensity



(c) Z-axis magnetic field intensity

그림 5 5kW급 유도급전 모듈에서 방출되는 전자파 특성 예측을 위한 거리에 따른 자기장 계산 결과
 Fig. 5 Calculation results of the magnetic field by distance for property prediction of electromagnetic waves emitted from the IPT module

4. 실 모델의 전자파 측정을 통한 특성 분석

4.1 실 모델 유도급전 모듈의 전자파 측정을 통한 해석 결과 검증

본 연구에서는 유도급전 시스템 대한 전자장 해석 방법의 신뢰성 검증을 위하여 실 모델로 제작된 5kW급 유도급전 모듈 단품에 대한 부하 조건에서의 자기장 측정을 수행하였다. 자기장 측정은 ESM-100 3D Fieldmeter를 이용하였다. 측정 주파수는 5Hz~400kHz로 본 연구에서의 유도급전 시스템의 20kHz 측정이 가능하다. 그림 6은 5kW급 U-U type 유도급전 모듈의 X-Y-Z축으로 거리에 따른 자기장 측정 결과와 3절에서 계산한 결과의 비교를 보여준다. U-U 타입 유도급전 모듈의 자기장 측정 가능 구조를 고려하여 X축으로 130mm, Y축으로 80mm, Z축으로 80mm부터 측정을 수행하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 5kW급 U-U type 유도급전 모듈의 자기장 측정값과 계산값을 비교한 결과 X축 방향으로 최대 13%, Y축 방향으로 최대 16%, Z축 방향으로 최대 8%으로 차이가 발생함을 확인하였다. 이는 미세한 값

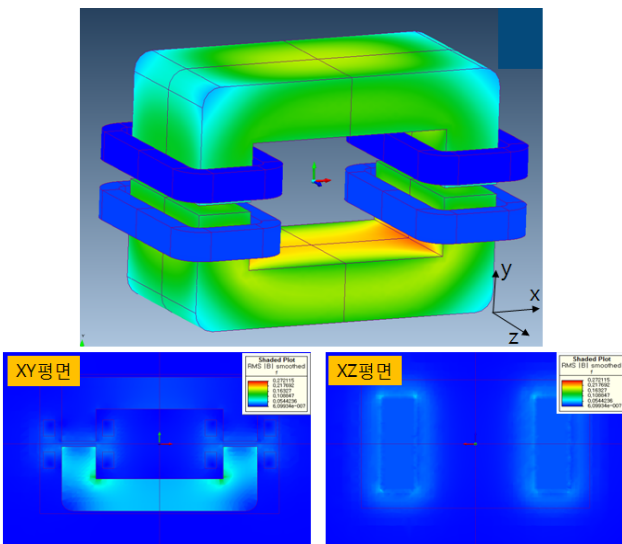
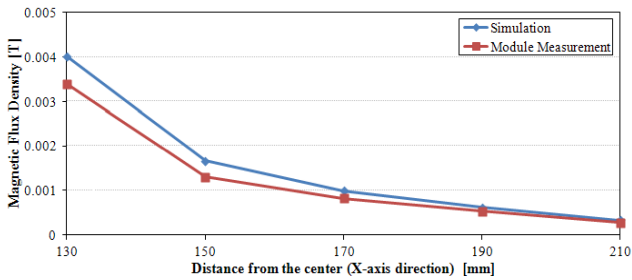
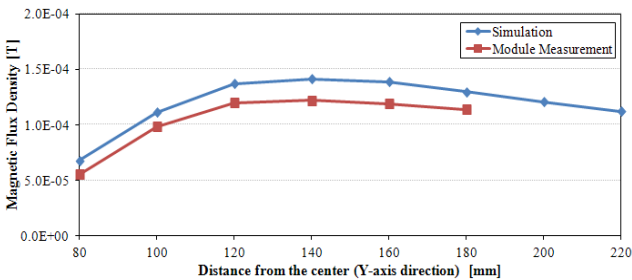


그림 4 FEM Tool을 이용하여 분석한 5kW급 U-U type 유도급전 모듈 및 주변의 자기장 분포
 Fig. 4 Magnetic field distribution of 5kW U-U type IPT module and surroundings using FEM analysis

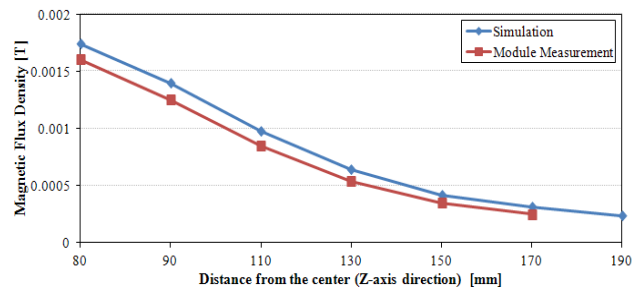
의 자기장 측정에서 오는 실험적 오차의 원인이 큰 것으로 판단되며, 실험적인 결과를 근거로 해석결과의 유의성이 확보되었다고 판단할 수 있다.



(a) X-axis magnetic field intensity



(b) Y-axis magnetic field intensity



(c) Z-axis magnetic field intensity

그림 6 5kW급 유도급전 모듈의 거리에 따른 자기장 측정값과 계산값의 비교

Fig. 6 Comparison of measured value and calculated value of magnetic fields according to distance of the 5kW IPT module

4.2 유도급전 시스템의 철도차량 적용에 따른 전자파 특성 분석

본 연구에서는 유도급전 시스템의 실제 철도차량 적용 시 유도급전 모듈에서 발생하는 전자파의 특성을 알아보기 위하여 축소모델로 제작된 5kW급 유도급전 모듈을 축소형 철도차량에 장착한 후 부하 조건에서 발생한 자기장 측정을 수행하였다. 그림 7은 본 연구를 위한 축소형 궤도와 궤도에 차량에 유도급전 모듈의 장착 구조를 보여준다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 유도급전 모듈의 1차측은 궤도 사이에 취부가 되며, 2차측은 철도차량의 하부에 장착이 된다. 그림 8은 축소모델 유도급전 시스템의 철도차량 적용 후 발생하는 자기장을 측정하는 모습을 보여준다. 그림 7과 그림 8에서 보는 바와 같이, 궤도와 차량의 구조 때문에 유도급전 모

듈로부터 발생하는 자기장을 구조물 외부로부터 측정하였다. 그림 9는 축소모델 유도급전 모듈의 철도차량 적용 전/후의 자기장 측정값의 비교 분석 결과를 보여준다. 그림 9에서 보는 바와 같이, 축소모델 유도급전 모듈의 철도차량 적용 후 중심에서 X축, Z축 방향으로의 거리에 따른 자기장 분포 측정 결과는 축소모델 유도급전 모듈의 단품 측정 결과보다 작은 값을 나타내고 있다. 이는 그림 7에서 보는 바와 같이, 축소 궤도와 철도차량이 철(자성체)로 구성되어 있으므로 유도급전 모듈에서 발생한 X축 방향과 Z축 방향의 자기장을 일정 부분 저감시키는 역할을 한 것으로 판단된다. 이와는 반대로 Y축 방향으로의 거리에 따른 자기장 분포 측정 결과는 축소모델 유도급전 모듈의 철도차량 적용 후가 축소모델 유도급전 모듈의 단품 측정 결과보다 큰 값을 나타내고 있는데, 이는 궤도 하부를 지지하는 프레임의 하부면도 철로 구성되어 있어 1차측 유도급전 모듈로부터 발생한 누설자속이 집중되어 축소모델 유도급전 모듈의 단품 측정 결과보다 큰 값을 얻은 것으로 판단된다. 결과적으로 유도급전 모듈을 철도차량에 적용함으로써 유도급전 모듈 단품에서 외부로 발생하는 자기장의 일정 부분은 철도차량 자체의 구조에 의해 차폐가 가능하며, 그 효과를 표 3에 정리하였다. 표 3에서 보는 바와 같이, 일반적인 철도시스템에서는 유도급전 모듈로부터 철도차량의 측면(X, Z축 방향)으로 방사되는 자기장의 약 40~50% 정도는 자기차폐가 가능하다는 것을 확인하였다.

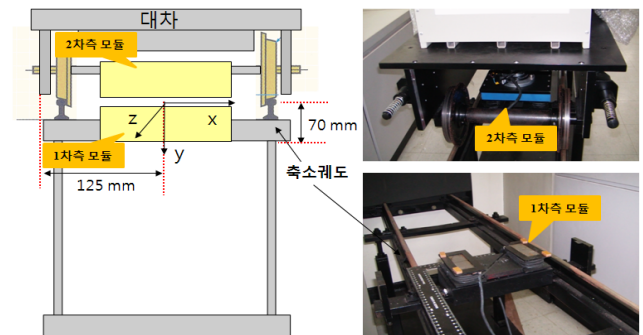


그림 7 축소형 궤도 및 유도급전 모듈의 장착 구조

Fig. 7 A small-scaled rail-track and a mounting structure for the IPT module

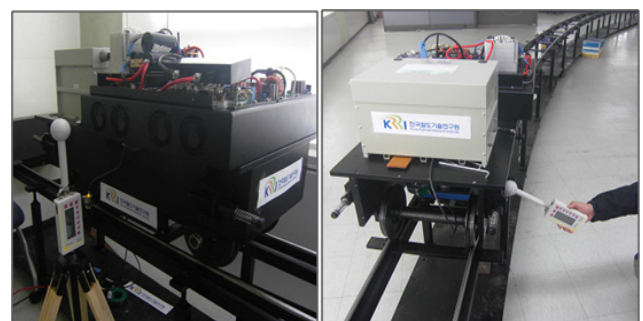
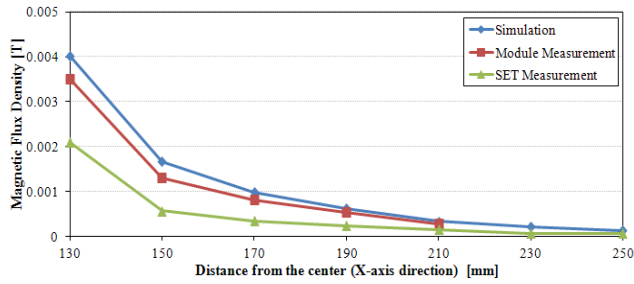
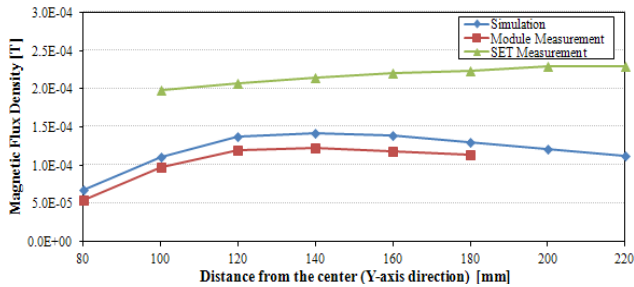


그림 8 축소모델 유도급전 시스템의 철도차량 적용 후 발생 자기장 측정

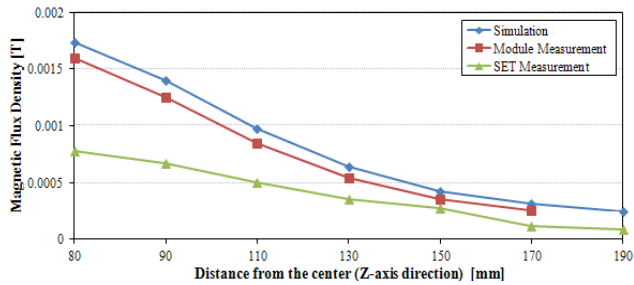
Fig. 8 Magnetic field measurement after applying the small-scaled IPT to the railway vehicle



(a) X-axis magnetic field intensity



(b) Y-axis magnetic field intensity



(c) Z-axis magnetic field intensity

그림 9 축소모델 유도급전 모듈의 철도차량 적용 전/후의 자기장의 측정값 비교

Fig. 9 Comparison of measured magnetic field values before/after applying the small-scaled IPT to the railway vehicle

표 3 축소모델 유도급전 모듈의 철도차량 적용 시 자기장 차폐 효과 결과

Table 3 Shielding effectiveness of magnetic fields by application the small-scaled IPT module to the railway Vehicle

	X축 방향 (T)	Y축 방향 (T)	Z축 방향 (T)
단품 모듈 시	0.0034	0.000098	0.0016
철도차량에 장착 시	0.0021	0.000198	0.00078
자기장 차폐 효과	- 38.2 %	+ 102 %	- 51.3 %

5. 결 론

전기철도시스템에서 내부 장치 또는 외부 장치에 의해 발생된 전자파는 전기철도시스템의 오동작 원인이 될 수 있으며, 철도차량 내부에 탑승한 승객이나 선로 주변의 작업인에게도 유해하다. 이러한 이유로 최근 유도급전 시스템을 철도차량에 안전하게 적용하기 위하여 유도급전 시스템으로부터 발생하는 전자파에 대한 신뢰성 확인과 보완에 대한 필요성 및 중요성이 제기되고 있다. 따라서 경량전철용 유도급전 시스템 개발 연구의 일환으로 유도급전 시스템의 실용화 연구에 앞서 축소형 유도급전 시스템 시제품 및 이를 적용한 철도차량 시제품의 발생 자기장 측정을 통한 전자파 현상 분석 및 신뢰성 확보가 본 연구의 목적이다.

- 1) 본 연구에서는 5kW급 유도급전 시스템 설계 모델의 수치해석을 이용한 전자파 특성을 예측하였다.
- 2) 또한, 실 모델 유도급전 시스템 및 이를 탑재한 축소형 철도차량을 제작하여 실제 유도급전 모듈 단품 및 이를 탑재한 철도차량으로부터 발생하는 전자파를 측정/분석하고 수치해석에 의한 예측 값의 유효성을 검증하였다.
- 3) 본 연구에서는 유도급전 모듈을 철도차량에 적용함으로써 유도급전 모듈 단품에서 외부로 발생하는 자기장의 일정 부분은 철도차량 자체의 구조에 의해 차폐가 가능하며, 일반적인 철도시스템에서 유도급전 모듈로부터 철도차량의 측면(X, Z축 방향)으로 방사되는 자기장의 약 40~50% 정도는 자기차폐가 가능할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] C.B. Park, H.W. Lee, B.S. Lee, H.S. Jung, K.B. Kim, C.S. Kim, "A study on characteristics analysis of 5kW Small-scaled Inductive Power Transfer Module for Railway Vehicles", Spring Conference of the Korean Society for Railway, 2011
- [2] B.S. Lee, H.W. Lee, C.B. Park, "Technology of inductive power transfer for railway vehicles", Auto Journal, Vol.32, No.3, pp.36-40, 2010.
- [3] M.S. Kim, G.W. Lee, M.R. Kim, "A study of measurement of EMI and a research facility of EMC in railroad environment", Spring Conference of the Korean Society for Railway, 2006.
- [4] J.G. Yang, H.S. Kum, "A study for improvement of the technical regulation and testing methods of EMC for electrical railway", Journal of the Korea electromagnetic engineering society. Vol.22, No.1, pp.21-31, 2011.
- [5] K.H. Han, B.S. Lee, S.H. Baek, S.Y. Kwon, H.J. Park, "The characteristic of IPT system used for PRT vehicle by various air-gap", KIEE Summer Conference, 2006.
- [6] K. Han, B. Lee and S. Baek, "The design evaluation of inductive power-transformer for personal rapid

transit by measuring impedance", Journal of applied physics.103, 07E928 - 07E928-3, 2008.

- [7] L. Santi, A. Magni, G. Durin, R.L. Sommer, F. Colaioni, S. Zapperi, "Dynamic hysteresis in Finemet thin films", INTERMAG2003, pp.AA-08, 2003.

저 자 소 개



박 찬 배

1975년 10월 23일 생. 2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2009년 ~ 현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중. 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원.



이 병 송 (李 炳 松)

1960년 6월 13일생. 1991년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 한국고속철도건설공단 철도차량 R&D 센터 선임연구원. 1998년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원.



이 형 우 (李 衡 雨)

1974년 1월 11일생. 2000년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 미국 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학박). 2004년 미국 Cornell Univ. 이론응용 역학과 객원 연구원. 2005년 한양대학교 BK사업단 계약교수. 2006년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.