

철도차량용 축소형 IPT 시스템의 특성 연구

박찬배*, 이형우*, 이병송*, 김기병*
한국철도기술연구원 고속철도연구본부*

A Study on the Characteristics of Small-scaled IPT System for Railway Vehicles

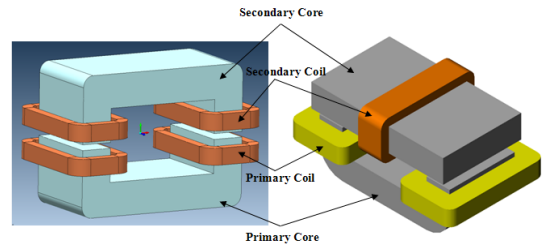
Chan-Bae Park*, Hyung-Woo Lee*, Byung-Song Lee*, Ki-Byung Kim*
High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute*

Abstract - 유도급전용 변압기(Inductive Power Transformer, IPT)는 비접촉 전력전송장치이며, 그 응용범위는 전동차용 충전기, 핸드폰용 충전기와 같은 소용량 시스템뿐만 아니라, 전기자동차, 산업용 이송장치, 철도 시스템과 같은 대용량 시스템에까지 확대되고 있다. 철도시스템과 같은 교통시스템에 적용되는 IPT 시스템의 경우, 소용량 시스템과 달리 큰 공극을 가지기 때문에 높은 에너지 전달 효율을 얻기 위하여 IPT 모듈의 주의 깊은 설계가 요구되기 때문에 본 논문에서는 철도차량에 적용하기 위한 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT의 등가회로 파라미터와 커플링 계수에 대한 특성을 해석적 방법을 통하여 분석하고, 실제 20[kW]급 IPT 시제품 모듈의 실험을 통하여 등가회로 파라미터 검증 및 IPT 모듈의 효율 계측을 수행하였다.

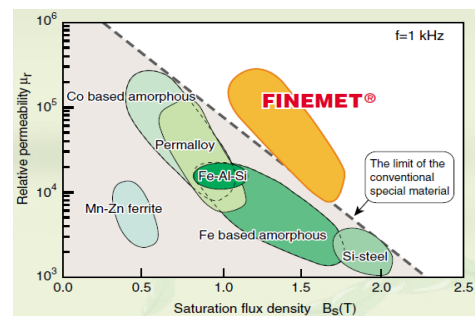
IPT의 출력은 모두 20[kW]이며, 턴 수는 IPT의 1차측이 10턴, 2차측이 6턴이며, IPT의 공극은 모두 5[mm]이다. 그림 2에서 보는 바와 같이, U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT의 차이점은 2차측 코어의 형상이다. IPT용 1차/2차 코어에 적용된 재료는 Nano-Crystalline 프로세스에 의해 제작된 아몰포스 메탈이다. 그림 3은 Nano-Crystalline 프로세스를 적용한 아몰포스 메탈(Finemet)의 비투자율/포화 자속밀도 특성을 보여 준다[3]. 표 1에 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT의 주요 설계 결과를 정리하였다.

1. 서 론

유도급전용 변압기(Inductive Power Transformer, IPT)는 비접촉 전력전송장치로서, 응용범위는 전동차용 충전기, 핸드폰 충전기와 같은 소용량 시스템뿐만 아니라, 전기자동차, 산업용 이송장치와 같은 대용량 시스템에까지 확대되고 있다[1]. 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 고속철도와 같은 대용량의 시스템에 적용시키기에는 아직까지 해결해야 할 기술적 문제가 많이 남아있다. 일반적으로, 철도시스템과 같은 교통시스템에 적용되는 IPT 시스템의 경우, 소용량 시스템과 달리 큰 공극을 가지기 때문에 높은 에너지 전달 효율을 얻기 위하여 IPT 모듈의 주의 깊은 설계가 요구된다. 따라서, IPT 시스템의 등가회로 파라미터와 커플링 계수는 높은 에너지 전달 효율을 위한 중요한 설계 요소들이다[1]. 본 논문에서는 철도차량에 적용하기 위한 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT의 등가회로 파라미터와 커플링 계수에 대한 특성을 FEM을 이용한 해석적 방법을 통하여 분석하고, 실제 제작 모델의 실험을 통하여 각종 특성 검증을 수행하였다.



(a) U-U type IPT (b) U-I type IPT
〈그림 2〉 경전철차량용 IPT 모듈의 설계 모델

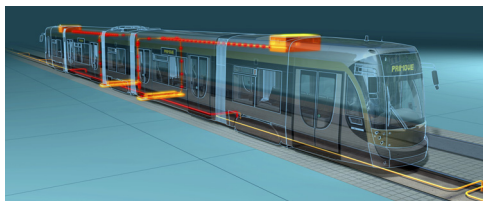


〈그림 3〉 아몰포스 메탈(FINEMET)의 비투자율/포화 자속밀도 특성

2. IPT 설계 및 자기등가회로 파라미터 도출을 위한 분석

2.1 철도차량용 IPT의 개념

그림 1은 Bombardier사의 PRIMOVE라는 경량전철을 보여준다. 이 시스템은 추진을 위한 250[kW]급 전력을 바닥급전식 IPT 시스템을 이용하여 정차 또는 운행 중에 전달받는 방식이다[2]. 이 방식은 노선 전체에 IPT 시스템이 설치되어야 하므로, 초기 투자비가 많이 드는 단점이 있다. 한국철도기술연구원에서도 경량전철(트램)용 무접촉 급전시스템으로써 IPT 시스템 적용을 위한 기초 연구를 진행하고 있으며, 차량이 일정시간 역에 정지해 있는 동안 지상의 급전 전력을 차량으로 전달하는 급속 충전 방식을 검토하고 있다.



〈그림 1〉 BOMBARDIER의 PRIMOVE 시스템과 IPT 시스템의 구성

2.2 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT 설계

본 연구에서는 철도차량에 적용하기 위한 축소형 IPT 모듈을 설계하였다. 그림 2는 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT의 설계 모델을 보여준다. 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT와 U-I 타입

〈표 1〉 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT 모듈의 주요 사양

Contents	U-U Type IPT / U-I Type IPT
Output Power	20 kW
Airgap	5 mm
Core Material	Amorphous metal (Nano-Crystallization Process)
Number of Turns	Primary 10 Turns / Secondary 6 Turns
Ritz Wire Spec.	Φ3 mm / Φ7 mm

2.3 2D-FEM을 이용한 등가회로 파라미터 도출

본 연구에서는 철도차량용 축소형 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT의 등가회로 파라미터를 도출하기 위하여 2D 유한요소법(FEM) 이용한 IPT의 1차측 코일과 2차측 코일 사이의 커플링 법을 사용하였다. 그림 4는 IPT의 등가회로를 보여주며, 식 (1),(2)는 IPT의 1차측 코일과 2차측 코일 사이의 커플링 법에 의한 등가회로 파라미터를 도출하기 위한 수식을 보여준다[4].

$$L_{additive}, L_{subtractive} = L_1 + L_2 \pm 2L_m \quad (1)$$

$$L_m = (L_{additive} - L_{subtractive})/4 \quad (2)$$

여기서, a : Turn Ratio

L_1, L_2 : Primary and secondary self-inductance, H

L_m : Mutual inductance, H

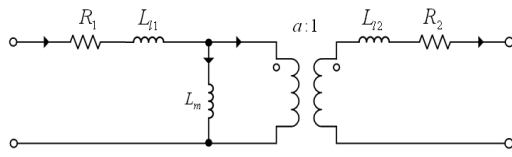
$L_{additive}$: Total additive inductance, H

$L_{subtractive}$: Total subtractive inductance, H

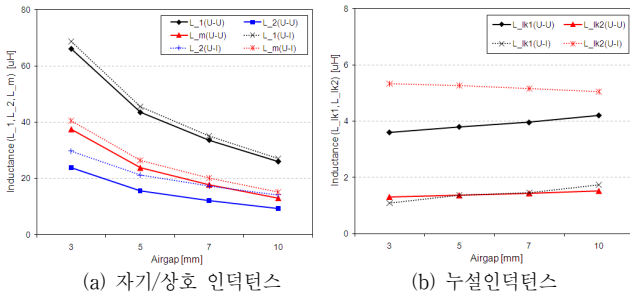
L_{11}, L_{12} : Primary and secondary leakage inductance, H

R_1, R_2 : Primary and secondary resistance, Ω

그림 5는 U-U 타입 IPT와 U-I 타입 IPT의 2D-FEM을 이용한 IPT의 1차측과 2차측 사이의 자속선 분포를 보여준다. 그림 6은 IPT 모델의 공극 변화에 따른 각 IPT 모델의 등가회로 파라미터의 특성 분석 결과를 보여준다. 그림 6 (a)에서 보는바와 같이, 공극 변화에 따른 파라미터들의 변화가 크며, U-I 타입이 U-U 타입에 비해 자기인덕턴스와 상호인덕턴스 값이 큼을 알 수 있다. 또한 그림 6 (b)에서 보는 바와 같이, 1차측 누설 인덕턴스는 U-U 타입이 U-I 타입보다 크고, 2차측 누설 인덕턴스는 U-I 타입이 U-U 타입보다 큼을 알 수 있다. 특히 U-I 타입의 경우, 공극이 증가되면서 2차측의 누설 인덕턴스가 감소되는 경향을 보이는데, 이는 그림 5에서 보는 바와 같이, 공극이 증가되면서 1차측 코어 요크와 2차측 코어 요크 사이의 간격이 벌어져 1차측 코어 요크와 2차측 코어 요크 사이에서 직접 쇄교 자속 성분이 감소되었기 때문이다.



〈그림 4〉 IPT 모델의 등가회로

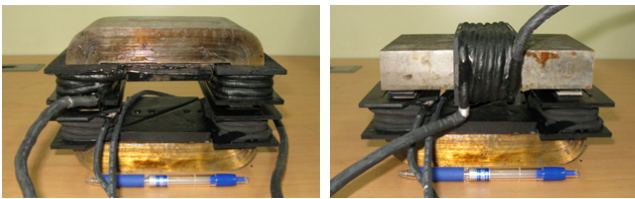


(a) 자기/상호 인덕턴스

(b) 누설인덕턴스

〈그림 5〉 FEM을 이용한 각 IPT 모델의 공극 변화에 따른 등가회로 파라미터 특성 곡선

3. 실험에 의한 등가회로 파라미터 및 전달전달 효율 특성 검증



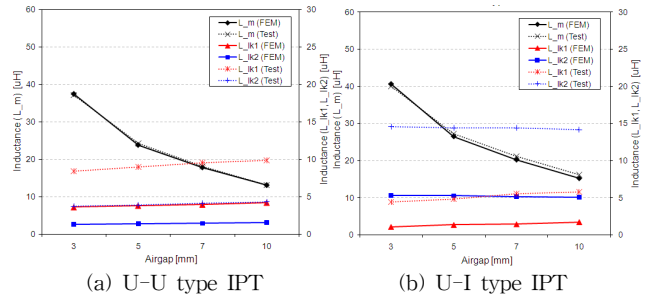
(a) U-U type IPT

(b) U-I type IPT

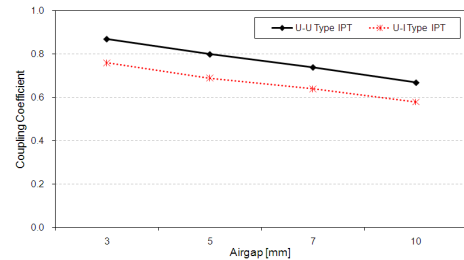
〈그림 6〉 20[kW]급 U-U type 과 U-I type IPT의 시험 모듈

해석적 방법을 이용하여 도출한 각각의 IPT 모델의 등가회로 파라미터 검증에 위하여 그림 6에서 보는 바와 같이 20[kW]급 U-U 타입과 U-I 타입의 IPT 시험모형을 제작하였다. 그림 6은 실험적 방법과 해석적 방법에 의한 각 IPT 모델의 등가회로 파라미터의 비교 결과를 보여준다. 각 IPT 모델의 결합계수와 누설 인덕턴스는 LCR 미터를 이용하여 각 IPT의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 측정하여 도출하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이, U-U 타입과 U-I 타입의 상호 인덕턴스는 실험값과 해석값이 유사함을 알 수 있다. 반면에, 1차측과 2차측 누설 인덕턴스는 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 해석적 방법의 경우, 2D 모델을 고려하였기 때문에 1, 2차 코일의 단부에서의 누설 효과가 고려되지 못했기 때문이다. 하지만 공극 변화에 따른 누설 인덕턴스의 변화 추이는 유사함을 알 수 있다. 그림 7은 실험적 방법을 이용한 각각의 IPT 모델의 공극 변화에 따른 결합계수의 변화 특성을 보여준다. 그림 7에서 보는 바와 같이, U-U 타입 IPT 모델의 결합계수가 U-I 타입 IPT 모델보다 약 12~14[%] 정도 크기 때문에 U-U 타입 IPT 모델의 자속 쇄교 성능이 우수함을 알 수 있다. 마지막으로 에너지 저장장치(수퍼캐패시터)를 포함한 Energy Management System이 포함된 축소형 철도차량

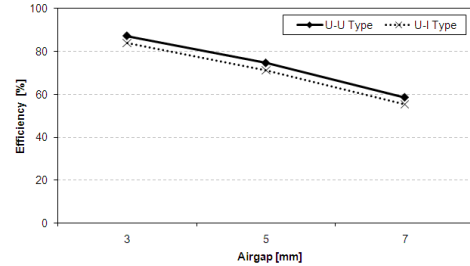
에 U-U 타입과 U-I 타입 IPT 모델을 장착한 후 전부하 조건하에서의 전력전달 효율 시험을 수행하였다. 그림 8은 전부하 조건에서 각각의 IPT 모델의 공극 변화에 따른 전력전달 효율 변화 특성을 보여준다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 공극 변화에 따라 U-U 타입 IPT 모델의 전력전달 효율이 U-I 타입 IPT 모델보다 약 4~6[%] 정도 크기 때문에 고 효율 모델로 U-U 타입이 적합함을 알 수 있다.



〈그림 6〉 실험적 방법과 해석적 방법에 의한 각 IPT 모델의 등가회로 파라미터의 비교 결과



〈그림 7〉 실험적 방법을 이용한 각각의 IPT 모델의 공극 변화에 따른 결합계수의 변화 특성



〈그림 8〉 전부하 조건에서 각각의 IPT 모델의 공극 변화에 따른 전력전달 효율 변화 특성

3. 결 론

철도시스템과 같은 교통시스템에 적용되는 IPT 모델의 경우, 소용량 모듈과 달리 큰 공극을 가지기 때문에 높은 에너지 전달 효율을 얻기 위하여 IPT 모델의 주의 깊은 설계가 요구된다. 따라서, IPT 시스템의 등가회로 파라미터를 이용한 커플링 계수 도출은 고효율 IPT 시스템 구축을 위한 중요한 설계 단계이다.

- 1) 본 연구를 통하여 IPT의 등가회로 파라미터를 이용한 커플링 계수 특성 도출을 위하여 제시한 커플링 법의 유효성을 검증하였다.
- 2) 또한 각 타입의 IPT 모델의 특성 시험 결과, U-U 타입이 U-I 타입보다 큰 결합계수를 가지며, 전부하 조건에서 전력전달 효율이 높기 때문에 최대전력전송 및 고효율을 요구하는 시스템에 U-U 타입의 IPT 적용이 더 유리할 것으로 판단된다.

〔참 고 문 헌〕

[1] M. Budhia, G.A. Covic, J.T. Boys, "Design and optimization of magnetic structures for lumped inductive power transfer systems", ECCE2009, pp.2081-2088, 2009.
 [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] L. Santi, A. Magni, G. Durin, R.L. Sommer, F. Colaiori, S. Zappari, "Dynamic hysteresis in Finemet thin films", INTERMAG2003, pp.AA-08, 2003.
 [4] 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.