

# 동력분산형 고속철도용 변압기 설계 및 자계해석 모델

## A Transformer Design and Magnetic Analysis Model for the High-Speed EMU

박병건\*

Park, Byoung-Gun

현동석\*\*

Hyun, Dong-Seok

### ABSTRACT

This paper proposes a magnetic analysis model and design method of transformer for the high-speed EMU. It has a many part of the consideration in design because the transformer in high-speed train has the multiple output. Also the output characteristic, weight, and size of transformer is an important factor. This research proposes a design method of transformer in high-speed EMU. And it is easy to design by using the analysis model in design the transformer through the establishment of the magnetic analysis model.

### 1. 서 론

최근 고속전철 시스템의 기술은 프랑스의 TGV를 기본으로 한 동력 집중식 계열의 차량이 스페인과 한국에 수출하여 상업화에 성공하였고 계속하여 발전할 것으로 예상되었으나, 독일 Siemens사의 ICE3를 기본으로 한 동력 분산식 차량이 스페인 2세대 고속열차 도입계약, 중국의 고속철도 차량 도입, 러시아의 고속철도 해외차량 도입 계약 등 지속적으로 성장하고 있다. 따라서, 국내 고속 철도 기술개발을 위해 현재 개발된 한국형 고속열차의 지속적인 성능 개량과 세계적인 기술발전 경향을 분석하고 국내외 시장 특징을 고려한 차세대 고속열차 기술의 개발이 필요하다[1-3]. 고속철도용 변압기는 다수의 출력을 가지며 동일한 코어 내에서 다중 권선이 연결되기 때문에 이러한 권선 상호간의 영향을 분석하고 설계조건에 맞게 배치하는 것이 중요하다. 변압기 출력은 복수개의 출력이 동일함을 요구하나, 실제 운전조건에서는 출력간의 불평형 현상이 발생하고, 출력 단 임피던스의 간섭현상이 일어나서 병렬 컨버터의 특성이 제대로 나타나지 않는다. 이러한 변압기의 모델링은 다양하게 연구되어 왔으며, 다중 출력을 갖는 변압기의 응용에 대한 기본적인 연구들은 이미 많은 논문들에 의해 발표되어져 왔다. 기존에 제안되어진 2권선 변압기에 대한  $\pi$  등가모델[4]은 변압기의 특성을 간단하게 표현할 수 있는 방법이며, 3권선 변압기 및 다중 출력의 변압기 모델에 대한 확장도 가능하다. 또한, 변압기의 모델링은 릴럭턴스 모델[5], 상호연결 모델[6] 등이 제안되어져 왔다. 변압기의 설계과정은 기존에 연구된 다양한 방법이 존재하지만, 기존의 방법은 기본적인 변압기 특성에 의존하고 있다. 다중 출력을 고려한 고속전철용 변압기에 대한 설계방법은 변압기 특성의 최적화를 위해 필요하다.

본 논문에서는 동력분산형 고속철도용 변압기의 용량계산과 설계 방법을 제안하였다. 기본적인 변압기 모델링과 변압기의 용량에 따른 설계에 필요한 변수를 계산하며, 설계된 변압기의 타당성을 검증하기 위해 자계해석 시뮬레이션을 통하여 변압기 자계해석 모델을 수립하여 변압기의 기본적인 특성을 확인하였다.

\* 한양대학교 전기공학과 박사과정, 정회원

E-mail : redalarm@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0341 FAX : (02)2220-0570

\*\* 한양대학교 전기공학과 교수, 정회원

## 2. 변압기 용량 산정

현재 개발 계획된 시제차량의 차량 변성은 그림1 과 같이 총 6량 1편성으로 구성되어 있다.

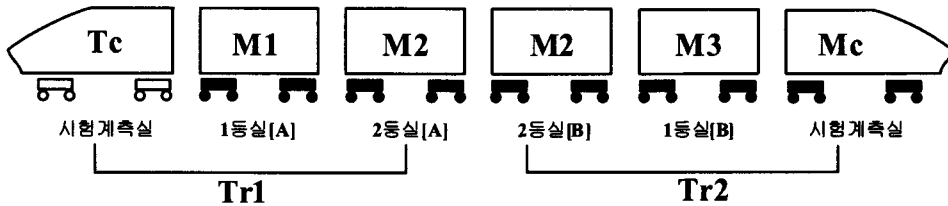


그림 1. 시제차량의 차량편성

차량별 주요장치는 다음과 같다.

- Tc : 공기압축기 2대[각 6량 부하용량],  
SIV/Battery/Charger 1조 [6량 부하용량]
- M1 : 판토타그래프 1대, 변압기 1대(Tr1) [동력차 2량 부하용량]
- M2 : 유도전동기용 컨버터/인버터 1조 [동력차 2량 부하용량]
- M3 : 판토타그래프 1대, 주변압기 1대(Tr2) [동력차 3량 부하용량]
- Mc : 영구자석 동기전동기용 컨버터/인버터 1대 [동력차 1량 부하용량]  
SIV/Battery/Charger 1조 [6량 부하용량]

시제 차량에는 두 대의 변압기가 탑재되며 현재 구성된 변압기에 대한 부하는 다음과 같이 구분할 수 있다.

- Tr1 : 유도전동기 8대, 보조전원 및 배터리 충전장치[동력차 2량 부하용량]
- Tr2 : 유도전동기 8대, 동기전동기 4대, 보조전원 및 배터리 충전장치  
[동력차 3량 부하용량]

현재 계획된 부하를 바탕으로 변압기의 용량을 설계하였다. 설계된 변압기의 용량은 동력차 2량에 대한 전원공급 계획을 가지고 있는 Tr1을 대상으로 하여 계산하였다. 계획된 고속 전철에 사용되는 3상 4극의 유도 전동기의 용량은 410[kW], 보조전원장치(SIV)의 용량은 350[kVA], 배터리 충전장치의 용량은 60[kVA]로 기본 설계 계획을 반영하여 정의하였다.

먼저, 전동기 구동용 인버터의 용량을 구하기 위해 인버터의 효율을 0.95로 가정하면 전동기 1대를 구동하기 위한 인버터의 용량은 약 431.5[kW]가 된다. 인버터 1대가 4대의 전동기를 구동하게 되므로 인버터 1대의 총 용량은 1726[kW]로 다음과 같이 계산할 수 있다.

- 인버터 1대당 필요한 용량 =  $(410[\text{kW}]/0.95) = 431.5[\text{kW}]$
- 전동기에서 인버터의 총용량 =  $(410[\text{kW}]/0.95)*4 = 1726[\text{kW}]$

컨버터의 용량을 계산하기 위해서 컨버터의 효율을 0.98로 가정하면, 컨버터의 출력 용량은 1761.22[kW]로 계산할 수 있다. 이 값에서 컨버터 자체의 손실을 감안하고, 출력의 여유분을 고려하여 컨버터의 총 출력 용량을 설정하면 다음과 같은 계산으로 1800[kW]가 된다.

- 컨버터의 출력 용량 =  $1726[\text{kW}]/0.98 = 1761.22[\text{kW}] = 1800[\text{kW}]$

이를 바탕으로 변압기의 용량과 각각의 값들을 구하면 다음과 같이 계산할 수 있다.

- 전동기를 고려한 변압기 용량 =  $1800[\text{kW}]/0.98 = 1836.7[\text{kVA}] = 1840[\text{kVA}]$
- 변압기 2차측 출력 용량 = 변압기 용량 + 보조전원장치 용량 + 배터리 충전장치 용량  
 $= 1840[\text{kVA}] * 2 + 350[\text{kVA}] + 60[\text{kVA}]$   
 $= 4090[\text{kVA}]$
- 변압기 2차측 전류 =  $1840[\text{kW}]/1400[\text{Vac}] = 1314[\text{A}]$
- 컨버터 1대당 입력 전류 =  $1314[\text{A}]/2 = 657[\text{A}]$

결과적으로, 손실분을 고려한 변압기 2차측 출력 용량은 4090[kVA]가 되고, 변압기 1차측 전압을 25[kV], 2차측 전압을 1400[Vac]라면 컨버터의 입력 전류는 1314[A]가 된다. 따라서 컨버터 2대의 병렬 운전시 각 컨버터에 흐르는 입력 전류는 657[A]이다. 출력단 직류 전압이 2800[V]이면, 컨버터 출력단 직류 전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

- 출력단 직류 전류 =  $1762[\text{kW}]/2800[\text{V}] = 629.28[\text{A}] = 630[\text{A}]$

이상의 내용을 정리하면 표 1과 같다.

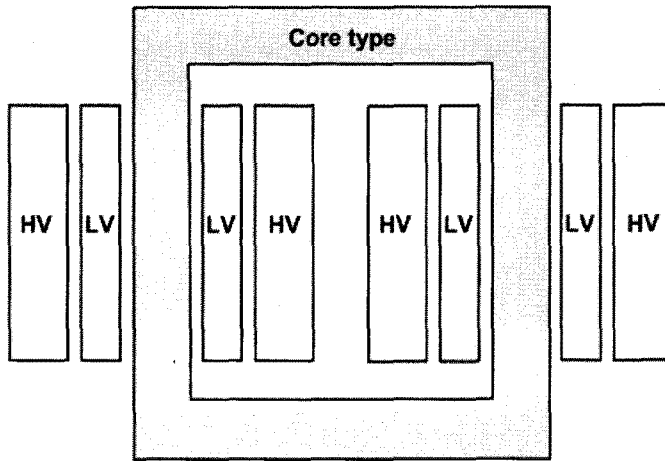
표 1. 주전력 변환시스템의 파라미터

변압기 용량	4090[kVA]
변압기 1차측 전압	25000[Vac], 60[Hz]
변압기 1차측 전류	163.6[A]
변압기 2차측 전압	1400[Vac], 60[Hz]
변압기 2차측 전류	1314[A]
컨버터 1대당 입력 전류	657[A]
컨버터 총 출력 용량	1800[kW]
컨버터 출력 직류 전압	2800[V]
컨버터 출력 전류	630[A]

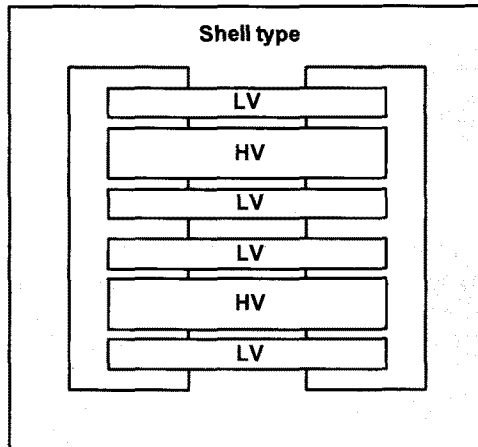
### 3. 변압기 설계요소

#### 3.1 변압기 코어 구조

변압기의 코어 형태에 따라 그림2와 같이 내철형(Core type) 구조와 외철형(Shell type) 구조로 나누어진다. 내철형 구조는 코어를 권선이 감은 형태를 나타내고, 외철형 구조는 반대로 권선을 코어가 감은 형태를 이루고 있다. 코어는 일반적으로 와전류에 의한 손실을 줄이기 위해 적층구조로 형성한다. 일반적으로 내철형 구조는 외철형 구조에 비해 더 많은 권선이 사용되고 철의 사용은 줄어든다. 단상 변압기의 경우 두 개의 레그를 형성하며, 누설 자속을 줄이기 위해 각각의 레그에 1차측과 2차측 권선을 반씩 구성하게 된다. 일반적으로 저압의 2차측 권선이 코어에 가깝게 위치하며, 외부로 1차측 고압 권선이 감싸게 하여, 절연을 손쉽게 하여 비용을 절감시킬 수 있다. 외철형 코어의 경우 단상 변압기를 구성하기 위해 3개의 레그를 가지며, 변압기의 중심에 1차측과 2차측 권선을 감게된다. 외철형 구조의 권선은 샌드위치 형태 혹은 상호교번형태로 감게되며, 외철형 구조는 자속 경로를 두 개로 형성하기 때문에 철의 양은 증가하고, 권선의 양은 줄어들게 된다.



(a) 내철형 코어(Core type)



(b) 외철형 코어(Shell type)

그림 2. 변압기 코어형태에 따른 구조

### 3.2 변압기 턴당 전압

변압기의 전체 용량은 KVA로 1차측 단상 25kV의 입력전압을 받아 2차측 출력전압 1400V로 강압시킨다. 변압기의 턴당 전압은 1차측과 2차측이 동일하며, 턴당 전압이 낮아질 수록 변압기의 중량을 줄일 수 있다. 자기회로내의 총자속이 턴당 전압에 의해 식(1)과 같이 계산되어지는 것을 고려하여 13.609[V]로 선정하였다.

$$\Phi = \frac{1}{4.44 \times f} \times \frac{V_1}{t_1} = \frac{1}{4.44 \times f} \times \frac{V_2}{t_2} \quad (1)$$

각 권선에 대한 턴당 전압을 고려하였을 경우 턴-수는 다음과 같다.

- 고압 턴수 = 25000 [V] / 13.609 = 1837 턴
- 저압 턴수 = 1400 [V] / 13.609 = 102 턴

### 3.3 변압기 코어 단면적

변압기의 자속밀도를 자기포화를 고려하여 1.6T로 선정하였을 경우, 계산된 턴-수를 이용하여 식(2)과 같이 변압기 코어의 단면적을 계산할 수 있다.

$$A_c = \frac{E_{rms} \times 10^8}{4.44 f N B_{max}} = \frac{25kV \times 10^8}{4.44 \times 60 \times 1837 \times 1.8T} = 283.8cm^2 \quad (2)$$

이 식에서  $E_{rms}$ 는 변압기 1차측 전압,  $N$ 은 1차측 턴-수,  $f$ 는 주파수,  $B_{max}$ 는 최대자속밀도이다.

이러한 단면적을 내철형 변압기 기본 형태에 도입하여, 변압기 코어의 단면적을 구하면 그림 3과 같이 나타난다.

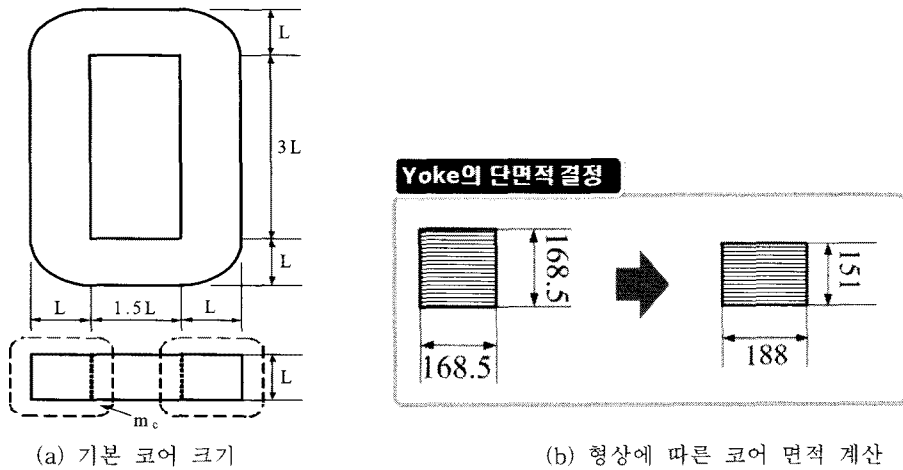


그림3. 코어의 단면적 계산

원형 레그를 구성하기 위하여 계산된 코어의 단면적을 바탕으로 최적화 시키는 과정이 필요하다. 구상된 원형 레그의 구성은 그림 4와 같다.

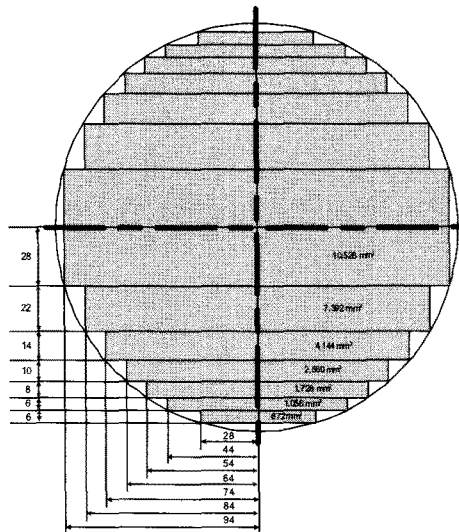


그림4. 코어의 원형레그 단면적 구성

### 3.4 변압기 권선크기

변압기 권선의 크기는 기존에 제안되어진 권선의 크기를 반영하였다. 구성된 변압기 권선의 크기는 다음 표2와 같다.

표2. 변압기 권선의 크기

구분	도체선정 (mm)	권선종류	절연지 (mm)	병렬도체	철심각당 권선수 (층×턴)
권인	2.6×10.0	Layer	0.36	2H3W	1(4 <sup>ℓ</sup> ×21 <sup>ℓ</sup> )
고압	1.8×5.0	Layer	0.46	1	$\frac{1}{2}$ (12 <sup>ℓ</sup> ×126 <sup>ℓ</sup> )
보조	2.6×10.0	Layer	0.36	3W	$\frac{1}{2}$ (1 <sup>ℓ</sup> ×17 <sup>ℓ</sup> )

### 4. 변압기 전자계 해석 모델

변압기 전자계 해석 모델은 전자계해석 시뮬레이션 툴인 Ansoft사의 Maxwell3D로 구성하였다. 수립된 전자계 해석 모델을 기반으로 향후 개발되어질 변압기 해석 모델의 기본 데이터로 이용함으로써 변압기 특성을 고려한 전자계해석 모델의 기반을 마련할 수 있을 것이다. 그림 5는 설계된 코어의 형상과 FEM 분석 결과를 나타낸다. 그림 6은 설계된 권선의 형상을 나타내며, 그림 7은 설계된 변압기의 코어와 권선의 형상을 나타내며, 그림 8을 통하여 설계된 변압기 해석 모델의 특성을 확인할 수 있다.

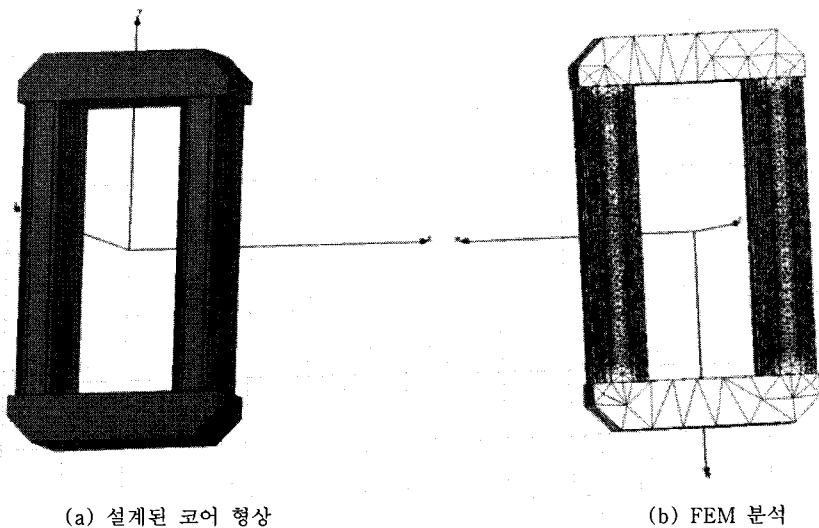
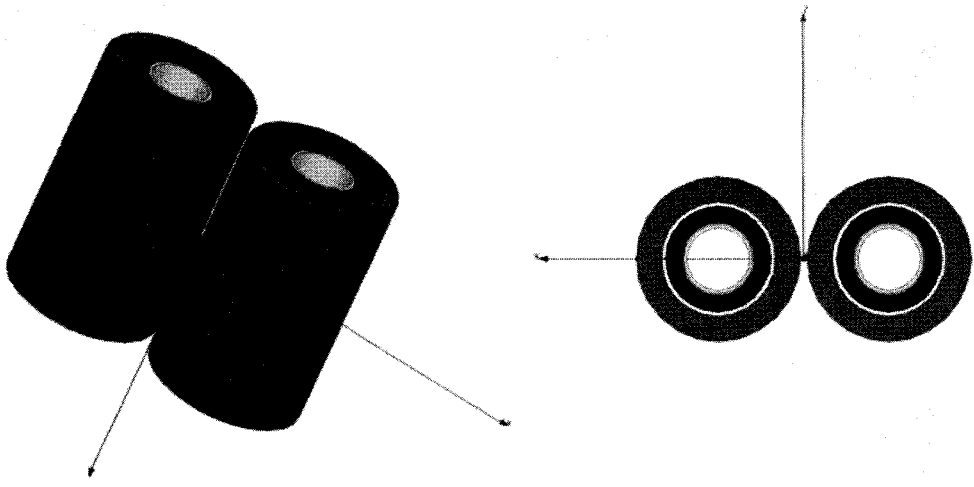


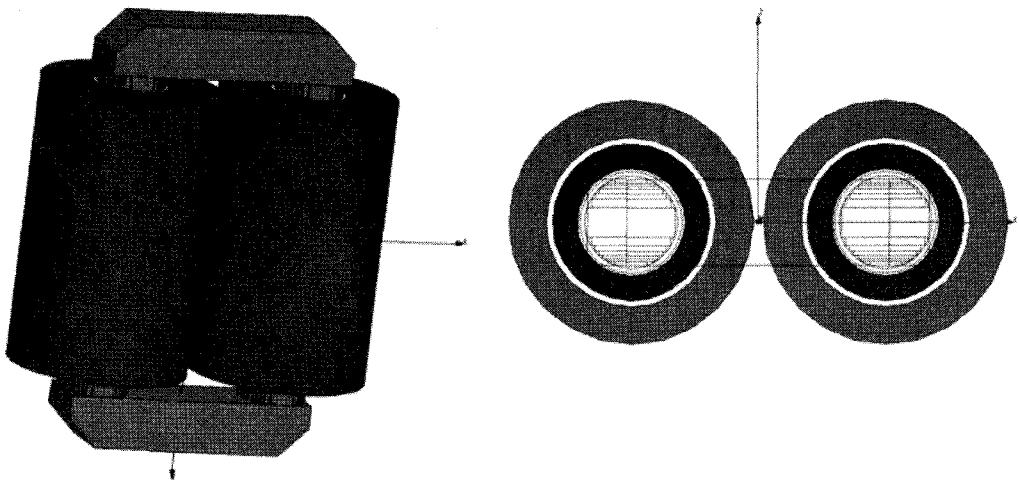
그림 5. 설계된 코어 형상과 FEM 분석결과



(a) 설계된 권선형상

(b) 단면도

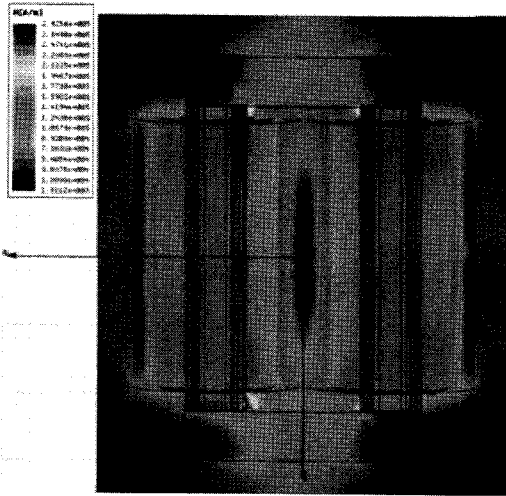
그림 6. 설계된 권선형상과 단면도



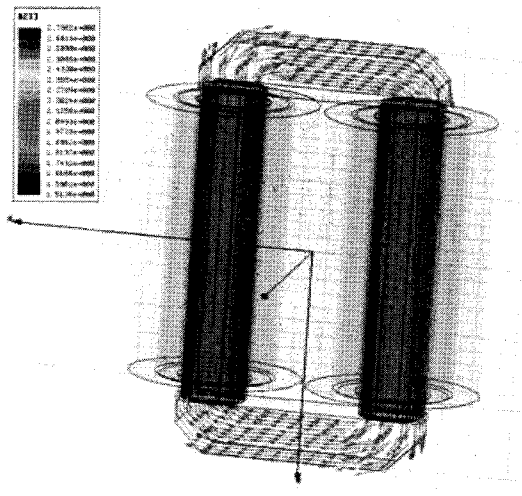
(a) 설계된 변압기 형상

(b) 단면도

그림 7. 설계된 변압기 형상과 단면도



(a) 자계분포



(b) 자속벡터

그림 8. 변압기 자계분포 및 코어내 자속벡터도

## 5. 결 론

본 논문에서는 동력분산형 고속철도용 변압기의 용량계산과 설계 방법을 제안하였다. 기본적인 변압기 모델링과 변압기의 용량에 따른 설계에 필요한 변수를 계산하며, 설계된 변압기의 타당성을 검증하기 위해 자계해석 시뮬레이션을 통하여 변압기 자계해석 모델을 수립하여 변압기의 기본적인 특성을 확인하였다. 제안한 변압기 자계해석 모델은 변압기 설계 연구 시 변압기 모델의 특성을 예측할 수 있으므로, 변압기 설계를 쉽게 할 수 있으며, 설계에 대한 접근 방법은 변압기 설계에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 주변압기개발, 2단계 1차년도 연차보고서, 건설교통부, 2000.
- [2] 세계 각국의 고속전철 시스템의 현황분석, 1996.
- [3] 철도기술 선진화 연구기반 조성, 철도기술 발전 전략수립을 위한 기술지도 작성, 철도기술연구원, 2006.
- [4] A. G. Ganz, : A Simple, Exact Equivalent Circuit for the Three-Winding Transformer,"IEEE Trans. Component Parts, pp. 212-213, Dec. 1962
- [5] A. A. Dauhajre, "Modeling and Estimation of Leakage Phenomena in Magnetic Circuits,"Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, April, 1986.
- [6] V. A. Niemela, "Analysis and Modeling of Leakage Inductance and AC Winding Resistance in High-Frequency Multiple-Winding Transformers,"Ph.D. Thesis, Duke University.