

전기강판의 자기특성 측정을 위한 2방향 여자 형 Single Sheet Tester 개발

論 文
54B-10-2

Double-Excitation Type Single Sheet Tester for the Measurement of the Magnetic Characteristics of the Electrical Steel Sheets

金 洪 正* · 高 彰 燮[†] · 洪 瑄 基^{**} · 申 判 錫^{***}
(Hong Jung Kim · Chang Seop Koh · Sun-Ki Hong · Pan Seok Shin)

Abstract - In this paper, a double-excitation type single sheet tester is developed to measure the magnetic characteristics of the electrical steel sheets. The developed system has the uniform magnetic field area of $20 \times 20 \text{ mm}^2$, and can be applied to the measurement of the magnetic characteristics of the Non-oriented and Grain oriented electrical steel sheets. In the developed system, the magnetic flux density and magnetic field intensity are measured by using B-coil and H-coil, respectively. The B-coil has 1 turn search coil for each direction, and H-coil has 640 and 640 turns for rolling direction and transverse direction on the 1mm thickness Glass-Epoxy basement, respectively. Through experiments, it is shown that the system can measure the magnetic characteristics up to 1.8T of magnetic flux density in the rolling direction in case of the Grain oriented electrical steel sheet. The measured results are compared with those measured in Okayama university, Japan.

Key Words : Electrical Steel Sheet, Single Sheet Tester, Double-Excitation, Alternating Magnetic Fields, Iron Loss

1. 서 론

최근 생활수준의 향상으로 산업체는 물론이고 일반 가정에서도 전기기기의 사용이 급격하게 증가하고 있으며 이에 따라 전력에너지의 소모가 급증하고 있다. 조사된 바에 의하면 우리나라를 비롯한 OECD국가들에서 전체 전력의 50%이상(일본의 경우 53%)이 전동기를 비롯한 전기기기에서 소비되고 있으며, 그중 전기기기의 손실로 10-15%(일본의 경우 전기기기의 평균 효율은 90%인 것으로 보고 되고 있음)가 낭비되고 있는 것으로 알려지고 있다[1]. 따라서 생활수준이 많이 향상된 지금 전력 사용의 효율을 높이고 환경을 보호하기 위해서는 절약의 미덕을 강조하던 통상의 방법 외에 전기기기의 효율 향상을 통한 적극적인 에너지 절약에 관한 연구가 필요하다.

전기기기의 효율은 전기기기의 설계기술과 생산기술 뿐만 아니라 전기기기를 구성하는 주요 부품인 전기강판(Electrical Steel Sheet)의 자기적 특성과 손실특성에 의하여 많이 좌우된다[2]. 특히 무조건 적으로 값비싼 전기강판을 이용하는 것 보다는 전기강판의 특성을 정확히 측정하고 이를 설계에 적극 활용함으로써 전기기기의 효율을 향상시키는 것이 무엇보다

중요하다고 하겠다. 이런 관점에서 보면 전기기기의 고효율 설계를 위해서는 CAE 프로그램을 이용한 전기기기의 특성해석 기술, 형상 최적설계 기술 및 생산기술의 개발과 더불어 전기강판과 영구자석 등 전기기기를 구성하는 필수 재료들에 대한 특성을 정밀하게 측정할 수 있는 기술을 개발하고, 측정결과를 적절히 모델링하여 설계과정에 이를 반영할 수 있도록 해야 한다[3].

일본과 독일 등에서는 전기기기의 고효율 설계를 위하여 유한요소법 등을 이용한 전기기기의 특성 해석과 최적 설계 기법을 이용한 최적 설계 등 전기기기에 대한 직접적인 연구 뿐만 아니라 전기기기를 구성하는 전기강판의 자기적 특성 측정에 대한 연구도 활발히 진행하고 있다. 예를 들면, 미국, 일본과 독일 등에서는 전기기기에 이용되는 전기강판의 자기적 특성의 측정에 관한 자체적인 표준을 제정하여 정확하고 객관적인 측정을 유도하고 있으며, 전기기기 업체에서는 측정 결과를 설계에 활용함으로써 전기기기의 효율을 극대화하기 위한 노력을 하고 있다[4].

전기강판의 자기적 특성은 크게 교번자계(Alternating Magnetic Field)가 인가되는 경우의 특성과 회전자계(Rotating Magnetic Field)가 인가되는 경우의 특성으로 나누어 측정된다. 전기강판의 교번자계 특성은 인가되는 자계가 방향은 일정하고 그 크기만이 시간에 대하여 변화하는 경우로, 인가되는 자계의 세기(Magnetic Field Intensity)와 인가 자계의 방향에 해당하는 자속밀도(Magnetic Flux Density)와의 관계를 나타낸다. 이러한 전기강판의 교번자계 특성은 자계의 세기와 자속밀도의 방향이 일치하기 때문에, 주로 B-H 곡선과 히스테리시스 곡선을 이용하여 완벽하게 표현되어지며, 단상 변압기와 같이 기기 내에서 인가자계의 방향이 변하

* 교신저자, 正 會 員 : 忠北大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授

E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr

* 學生會員 : 忠北大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 湖西大 電氣情報通信工學部 副教授

*** 正 會 員 : 弘益大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授

接受日字 : 2005年 5月 6日

最終完了 : 2005年 8月 20日

지 않는 경우 유용한 특성이다. 전기강판의 교번자계 특성은, 통상 1차원 자계 특성(1D Magnetic Characteristic)이라 부르고, 이때 발생하는 철손이 교번자계 손실(Alternating Iron Loss)에 해당한다[5].

한편, 전기강판의 회전자계 특성은 3상 변압기의 T-형 연결부분, 그리고 회전기기의 고정자에서와 같이 인가되는 자계가 그 크기와 방향이 모두 시간에 대하여 변화하는 경우 나타나는 특성으로, 인가되는 자계의 세기와 자속밀도의 방향이 일반적으로 일치하지 않게 된다. 이로 인하여 자성체 내에서는 교번자계가 인가되는 경우의 교번자계 손실 외에 $BH \sin \delta$ (여기서 δ 는 H와 B의 위상차이다)에 해당하는 회전자계 손실이 발생하게 된다. 이러한 전기강판의 회전자계 특성을 통상 2차원 자계 특성(2D Magnetic Characteristic)이라 한다. 전기강판의 회전자계 특성은 통상 일정한 크기를 갖는 자속밀도가 일정한 속도로 회전하는 경우, 이에 대응하는 자계의 세기의 방향과 크기를 통하여 표현된다[6]. 그러나 전기강판의 교번자계 특성이 B-H곡선과 히스테리시스 곡선을 이용하여 표현되어지고, 이를 유한요소법과 같은 수치해석에 쉽게 적용되어지는데 비하여, 전기강판의 회전자계 특성은 아직껏 적절한 모델링방법이 개발되지 않아 유한요소법을 이용한 해석에 적극적으로 활용되지 못하고 있는 실정이다.

전기강판의 자기적 특성은 Epstein 장치 또는 Single Sheet Tester를 이용하여 측정되는데, 교번자계 특성의 경우 세계 표준과 일본 표준은 Single Sheet Tester를 이용하여 규정되었다. 특히 최근에는 일본과 독일을 중심으로 전기강판의 회전자계 특성의 측정에 대한 연구가 심도 있게 진행되고 있으며, 또한 측정결과를 유한요소법을 이용한 특성해석에 활용하기 위하여 측정결과에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

그러나 국내에서는 유한요소법과 같은 수치해석 기법을 이용한 전기기기의 설계 및 특성해석, 그리고 형상 최적설계를 통한 전기기기의 효율 향상 등에 관해서는 많은 연구가 이루어져 이미 세계적인 수준에 도달하였다고 인정되나, 전기강판의 자기적 특성의 측정, 그리고 측정 결과를 적절히 반영한 전기기기의 특성해석과 설계에 관해서는 거의 연구가 이루어지지 않고 있다. 그 결과 국내에는 전기강판의 자기적 특성의 측정에 관한 표준마저도 제정되어 있지 않은 실정이다.

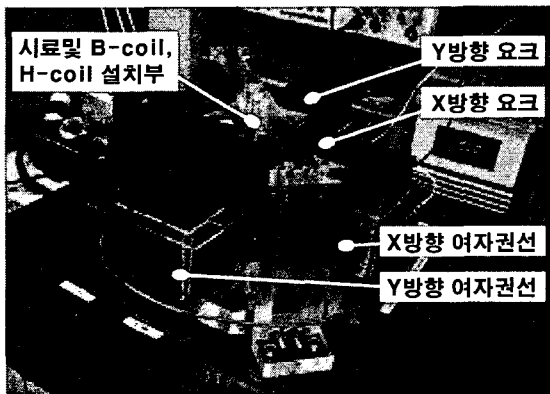


그림 1 2방향 자계인가 형 Single sheet tester.
Fig. 1 Double-excitation type single sheet tester.

본 논문에서는 각종 전기기기에 필수적으로 이용되는 전기강판의 자기적 특성을 측정하기 위하여 2방향 자계인가가 가능한 Single Sheet Tester를 개발하여 전기강판의 자기적 특성을 측정하고, 그 결과를 검증하였다.

2. 2방향 자계인가 형 Single Sheet Tester 시스템

그림 1은 본 논문에서 개발된 2방향 자계인가 Single Sheet Tester의 전체적인 모습이다. 개발된 Single Sheet Tester는 시료, 여자권선(Exciting Coils), 요크, B-coil과 H-coil 그리고 신호처리부로 구성된다. 표 1은 개발된 2방향 자계인가 형 Single Sheet Tester의 사양을 나타낸다.

2.1 요크

본 연구에서는 등방성 전기강판(0.35mm)을 이용하여 제작하였으며, 전기기기에 널리 이용되는 등방성 및 이방성 전기강판의 교번자계 특성과 회전자계 특성을 측정할 수 있도록 개발하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 요크는, 그림 2에 나타난 크기가 $80 \times 80 \text{ mm}^2$ 인 전기강판 시료의 중앙 부분의 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 영역에서 균등한 자계가 발생되도록 설계하였고, 그림 3-a)는 개발된 요크의 전체적인 형상을, 그리고 그림 3-b)는 요크의 단면을 나타내고 있다.

여자권선이 설치된 요크에 의하여 발생하는 자계의 분포는 요크의 pole의 형상에 따라 달라진다. 따라서 H-coil과 B-coil이 위치하는 영역에서 균등하고 강력한 자계가 인가될 수 있도록 요크의 형상을 설계해야 한다. 그림 4는 요크의 형상 및 두께의 변화에 따른 인가자계의 분포를 유한요소법을 이용하여 해석하고 비교한 것이다. 이를 위하여 그림 4-a)와 같이 요크의 기본 형상과 자료를 가정하고, 두께 0.5mm인 시료의 중앙부분($15 \times 2.5 \text{ mm}^2$)에 1.2T의 자계가 인가되도록 여자권선의 Ampere-Turn을 결정하였다. 또한, 인가자계의 불균일성(Non-Uniformity)은 다음과 같이 정의하였다.

표 1 Single sheet tester의 사양
Table 1 Details of single sheet tester

Items	Spec
source frequency	60Hz
specimen size	$80 \times 80 \text{ mm}^2$
uniform field area	$20 \times 20 \text{ mm}^2$
measuring frequency	20-3000Hz
electrical steel sheets	Non-oriented & Grain oriented
x-axis exciting winding	1.5 ϕ , 300turn
y-axis exciting winding	1.5 ϕ , 300turn
B measurement	B-coil method
H measurement	Single H-coil method
Max. voltage & current of power amplifier	150V, 15A
B-coil	0.05 ϕ , 1turn
H-coil	0.04 ϕ , 640turn

$$Non - uniformity[\%] = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{mean}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, B_{max} 와 B_{min} 은 각각 관심 영역에서 자속밀도의 최대치와 최소치이고, B_{mean} 은 자속밀도의 평균치이다. 해석 결과로부터 요크의 중앙부분에서 0.01%의 불균일성을 갖는 자계를 인가하기 위해서는 그림 4-b)와 같이 요크의 두께를 최

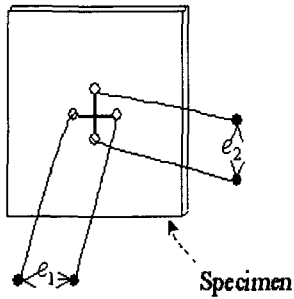
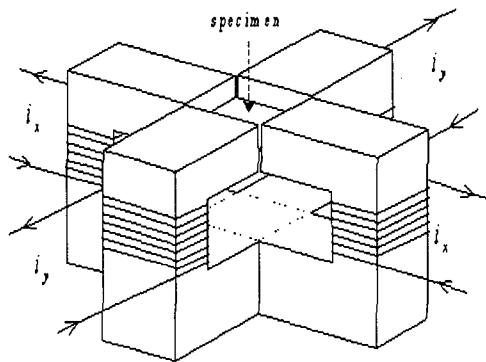
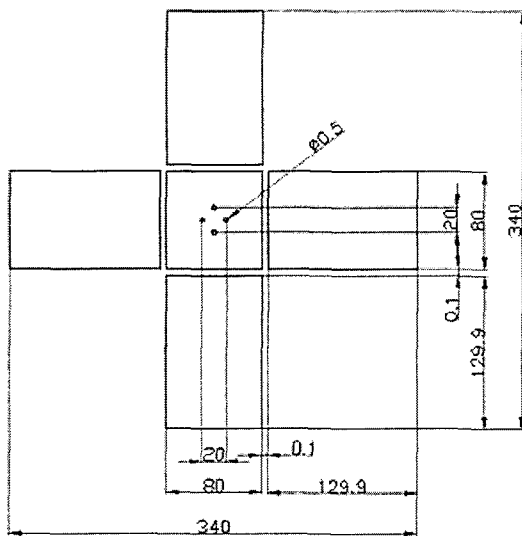


그림 2 시료와 B-coil
Fig. 2 Specimen and B-coil



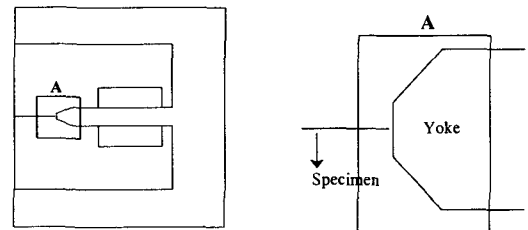
(a) 2방향 자계인가 요크



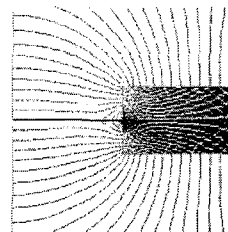
(b) 요크의 단면도

그림 3 2방향 자계인가 요크
Fig. 3 Double excitation yoke

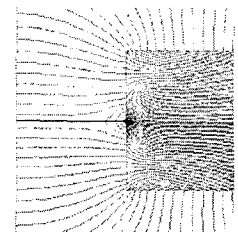
소한 25mm 이상으로 설계해야 함을 알 수 있었다. 또한 요크의 두께를 50mm로 증가시키면, 그림 4-c)에서 알 수 있는 바와 같이, 인가자계의 불균일성은 0.005%이하로 감소하고, 여자권선의 Ampere-Turn이 일정한 경우 두께가 25mm인 경우보다 더 강한 자계를 인가할 수 있었다. 그림 4의 (d)와 (e)는 자속을 시료에 집중시키기 위하여 요크의 형상을 변화시킨 것으로 문헌[7]에서 이용된 형상이다. 그러나 유한요소법을 이용한 해석에 의하면 자계의 균일성과 그 크기에서 별 효과가 없음을 알 수 있었다. 또한 그림 4-f)는 H-coil이 시료의 위쪽 또는 아래쪽 한곳에만 설치함을 이용하여 시료를 요크의 중심에서 벗어나게 한 것으로, 이 경우에는 균등한 자계를 인가하기 어려움을 알 수 있다. 본 연구에서는 시료 및 H-coil의 지지대의 설계를 용이하게 하기 위하여 요크의 두께를 25mm로 설정하였다.



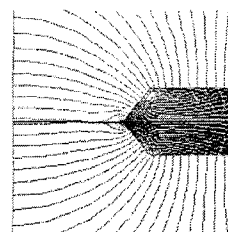
(a)요크의 기본 형상



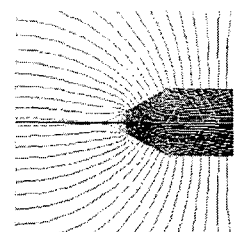
(b)형상 1 (두께 25mm)



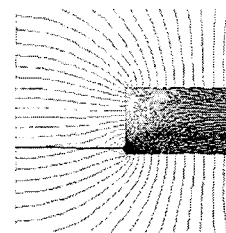
(c)형상 2 (두께 50mm)



(d)형상 3 (형상 변경)



(e)형상 4 (형상 변경)



(f)형상 5 (시료의 위치 변경)

그림 4 요크의 형상과 치수에 따른 자속밀도의 분포
Fig. 4 Distribution of flux density according to shape and size.

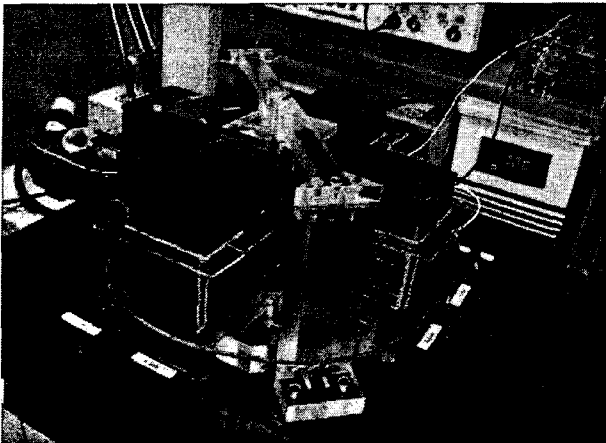


그림 5 제작된 자계인가 요크
Fig. 5 The manufactured magnetic excitation yoke

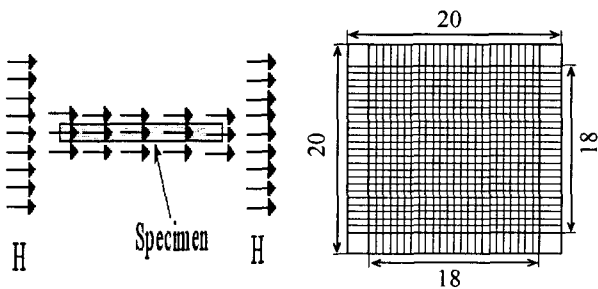
2.2 여자권선

여자권선은 1.5φ를 이용하여 그림 3-a) 및 그림 5와 같이 요크의 양쪽에 균등하게 설치하였으며, x 및 y방향으로 각각 300turn으로 하였다. 자연냉각의 상태에서 인가 가능한 최대 전류밀도를 3A/mm²로 하면, 최대 2827.4 A/m의 자계를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서 설계한 요크는 그림 3-a)와 그림 5에서 보듯이 냉각이 매우 쉬운 구조이기 때문에, 경우에 따라서는 강제냉각을 이용할 수 있고 따라서 더욱 큰 자계를 발생시킬 수 있도록 하였다.

2.3 B-coil

그림 2에 나타난 것과 같이 80x80 mm²인 시료의 중앙 부분에 20mm의 간격으로 0.5φ인 구멍을 내고 x 및 y방향에 대하여 0.05 φ인 절연코일을 이용하여 각각 1turn인 B-coil을 설치하였다. B-coil에 유기되는 전압으로부터 자속밀도의 크기는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$B_i(t) = \frac{1}{S_B} \int e_i(t) dt \quad (2)$$



(a) 자계의 분포 (b) H-coil

그림 6 전기강판 주위의 자계분포 및 H-coil
Fig. 6 Distribution of around electrical steel sheet and H-coil

여기서, S_B 는 B-coil이 형성하는 단면의 단면적이고, $e_i(t)$ 는 B-coil에 유기되는 전압, 그리고 첨자 i 는 x 또는 y를 나타낸다.

2.4 H-coil

자계의 연속조건에 따르면, 그림 6-a)과 같이 균등한 자계 내에 얇은 전기강판이 위치하는 경우, 전기강판과 공기영역의 경계에서 H의 접선 성분이 연속이고 법선성분은 존재하지 않는 것으로 가정할 수 있기 때문에 시료(전기강판)에 밀착하여 H를 측정함으로써 시료 내의 H를 측정할 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 그림 6-b)와 같이 두께 1mm의 Glass-Epoxy에 0.04 φ의 권선을 이용하여 H-coil을 제작하였다. 제작된 권선은 우선 x방향의 자계의 세기를 측정하기 위하여 Glass-Epoxy에 밀착하여 2층으로 640턴을 감고, 그 위에 y방향의 자계의 세기를 측정하기 위하여 역시 2층으로 640턴을 감았다. 표준 슬레노이드 코일을 이용하여 제작된 H-coil의 (Area · Turn)을 측정된 결과 x방향 및 y방향에 대하여 각각 0.0128과 0.0138이었다. 자계의 세기는 H-coil에 유기되는 전압으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$H_i(t) = \frac{1}{\mu_0(Area \cdot Turn)_i} \int e_i(t) dt \quad (3)$$

여기서, 첨자 i 는 x 또는 y를 나타낸다.

2.5 H-coil 및 시료 지지대

측정하고자 하는 시료를 요크의 중앙에 위치하고, 또한 H-coil을 시료와 밀착되게 위치하기 위하여 지지대를 이용한다. 그림 7은 제작된 지지대를 나타내며, 지지대의 재질은 아크릴 수지이다. 그림에서와 같이 시료와 H-coil의 위치를 유연하게 맞출 수 있도록 스폰지를 사용했으며, 지지대의 전체적인 높이를 조절할 수 있도록 Glass-Epoxy로 가공한 나사를 이용하였다.

2.6 측정 시스템

그림 8에 2방향 여자형 Single Sheet Tester 시스템을 나타내었다. 컴퓨터에서 발생된 x방향 및 y방향의 여자전압의 파형은 Low Pass Filter(NF P-82)를 이용하여 고주파 성분을 제거한 후, 전력증폭기(Power Amplifier, NF4520, 2kVA)에 연결된다. 증폭된 전압은 직류성분을 제거하기 위하여 Matching Transformer를 거치고 각각 x방향 및 y방향 여자 권선에 연결된다. H-coil 및 B-coil에서 측정된 유기전압은

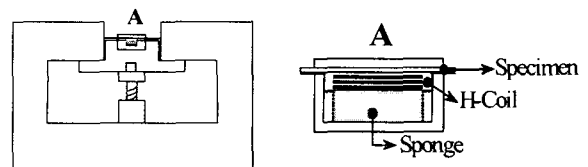


그림 7 H-coil 및 시료의 지지대
Fig. 7 Supporter of specimen and H-coil

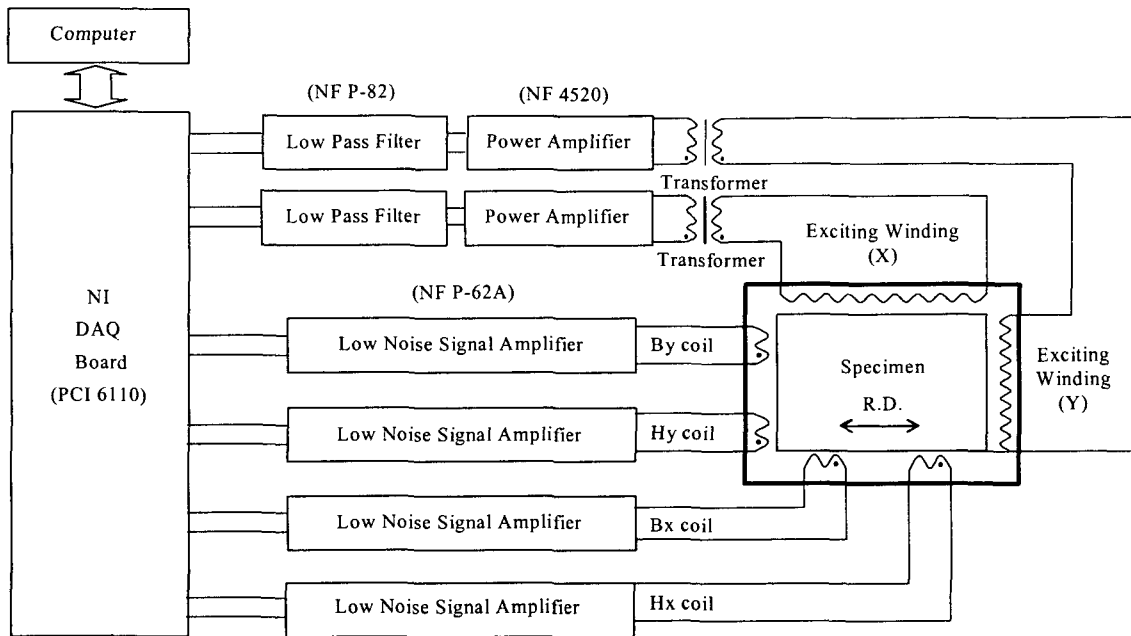


그림 8 2방향 여자형 Single Sheet Tester 시스템
Fig. 8 Double-excitation type single sheet tester

Noise Amplifier(NF P-62A)를 이용하여 증폭된 후, 컴퓨터로 들어오게 된다. 이때 측정시스템과 컴퓨터 간의 통신은 모두 NI사의 DAQ Board(PCI 6110)을 사용하여 이루어졌다.

H-coil과 B-coil의 유기전압 신호가 들어오면, 식 (2)과 식 (3)을 이용하여 각각 자속밀도와 자계의 세기를 계산하고, 이로부터 히스테리시스 곡선을 그린다. 이때 얻고자하는 자속 밀도의 파형을 다음과 같이 표현한다.

$$B_{\theta}(t) = B_m \cos(\omega t) \quad [T] \quad (4)$$

여기서, θ 는 인가자계의 방향이 x축과 이루는 각도이다. 이로부터 x방향 및 y방향의 얻고자 하는 자속밀도 파형은 각각 다음과 같다.

$$B_x(t) = B_m \cos \theta \cos(\omega t) \quad [T] \quad (5-1)$$

$$B_y(t) = B_m \sin \theta \cos(\omega t) \quad [T] \quad (5-2)$$

이에 해당하는 유기전압의 파형은 각각 다음과 같이 된다.

$$e_x(t) = (\text{Area} \cdot \text{Turn})_x \omega B_m \cos \theta \sin(\omega t) \quad [V] \quad (6-1)$$

$$e_y(t) = (\text{Area} \cdot \text{Turn})_y \omega B_m \sin \theta \sin(\omega t) \quad [V] \quad (6-2)$$

따라서 측정과정에서 자속밀도가 식 (4)와 같이 주어지는 정현파가 되도록 하기 위하여 x, y방향의 유기전압이 각각 식 (6-1)과 식(6-2)가 되도록 x방향 및 y방향의 여자전압의 파형을 조절하였다.

시료의 B-H곡선은 위에서 측정된 히스테리시스 곡선으로부터, 각각의 히스테리시스 곡선에서 자속밀도가 최대인 점과 그때의 자계의 세기인 점 (B_{max}, H_b)을 연결하여 구하였다. 또한, 시료에서 발생하는 철손은 다음과 같이 계산된다[8].

$$P = \frac{1}{\rho T} \int_T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad [W/Kg] \quad (7)$$

여기서, ρ 는 시료의 밀도이고 T 는 주기이다.

3. 측정결과 및 검증

개발된 2방향 여자형 Single Sheet Tester를 이용하여 등방성 및 이방성 전기강판의 자기적인 특성을 측정하고, 그 결과를 일본 Okayama 대학의 3D Lab에서 측정된 결과와 비교함으로써 측정의 타당성을 검증하였다. 측정에 사용된 시료는 등방성 전기강판(Non-Oriented Electrical Steel Sheet) 2종(시료 A: 0.35mm, 시료 B: 0.5mm)과 이방성 전기강판(Grain-Oriented Electrical Steel Sheet, 시료 C: 0.3mm) 1종으로 하였다. 측정 주파수는 모두 50Hz로 하였다.

일반적으로 전기강판 내의 자계의 세기(H)와 자속밀도(B)의 관계를 보면, 그림 9와 같이 두개의 방향이 서로 일치하지 않는 현상이 발생하고, 이러한 현상은 무방향성 전기강판보다는 방향성 전기강판에서 더욱 심하게 나타난다[9]. 이것은 자속밀도와 자계의 세기의 관계를 다음과 같이 나타낼 때

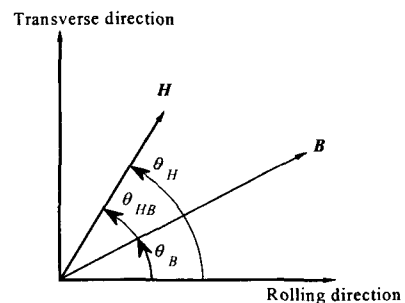


그림 9 자계의 세기와 자속밀도

Fig. 9 Magnetic field intensity and magnetic flux density vectors

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} \end{bmatrix} \vec{H} \quad (8)$$

투자율 텐서의 비대각선(off-diagonal) 성분이 영이 아니기 때문에 생겨나는 현상이다. 따라서 본 논문에서는 측정된 자

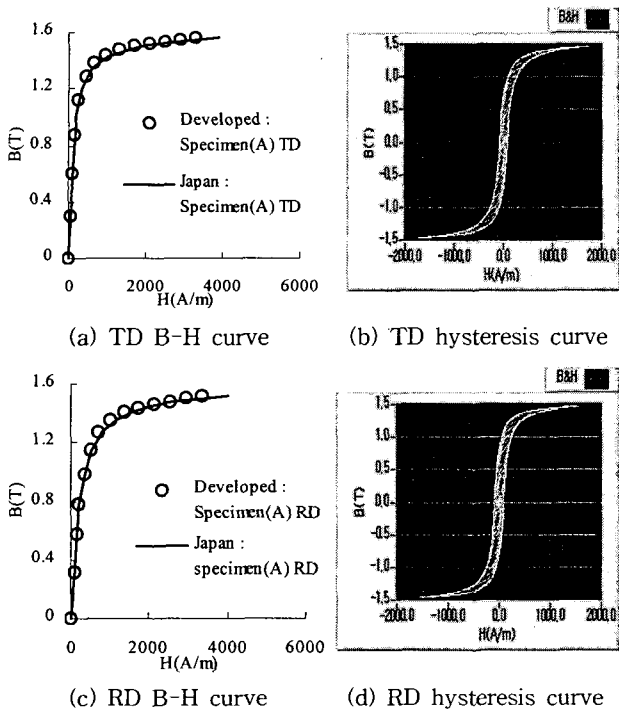


그림 10 등방성 전기강관 시료(A)의 RD 와 TD 방향 측정
Fig. 10 The measurement of isotropic specimen(A)

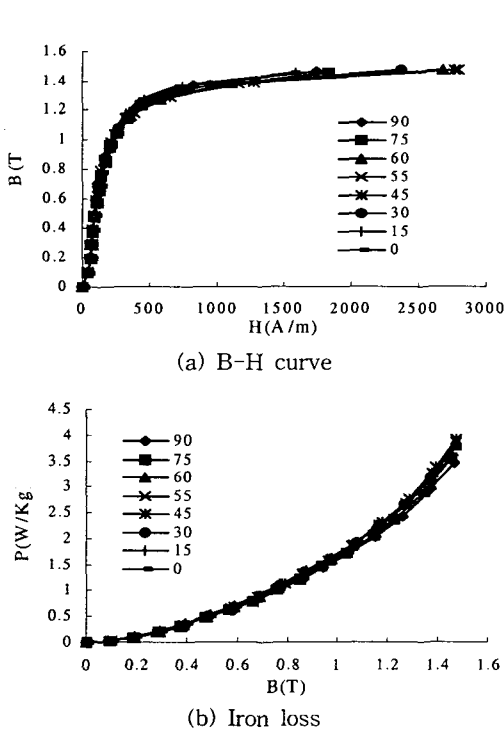


그림 11 등방성 전기강관 시료(A)의 측정 결과
Fig. 11 The measurement of isotropic specimen (A)

속밀도 벡터와 자계의 세기 벡터로부터 히스테리시스 곡선을 그리기 위하여 $|\vec{B}|$ 와 $|\vec{H}|\cos\theta_{HB}$ 을 각각 계산하고, 이로부터 히스테리시스 곡선을 그렸다.

그림 10은 등방성 전기강관 시료 A에 대하여, 전기강관의 RD(Rolling Direction)와 TD(Transverse Direction)방향으로 자계가 인가될 때, 본 연구에서 측정된 B-H곡선을 일본에서 측정된 결과와 비교하고 있다. 그림10의 (a)와 (c)에서 알 수 있듯이 두 결과는 서로 잘 일치하고 있으며, 이로부터 본 논문에서 개발된 측정시스템이 타당함을 알 수 있다. 그림 10의 (b)와 (d)는 시료 A에 대하여 RD(Rolling Direction)와 TD(Transverse Direction)방향으로 자계를 인가하였을 때, 주파수 50Hz에서 인가 자계에 따른 히스테리시스 곡선을 나타내고 있으며, 그림에서 히스테리시스 곡선으로 둘러싸인 부분의 면적이 와전류 손실을 포함하는 철손이다. 한편 그림 11의 (a)와 (b)는 시료 A에 대하여 인가자계의 방향에 따른 B-H곡선과 철손곡선의 변화를 나타내고 있으며, 등방성 시료임에도 불구하고 자계의 인가방향에 따라 그 특성이 조금씩 변함을 알 수 있다.

그림 12는 등방성 전기강관 시료 B에 대하여, 전기강관의 RD(Rolling Direction)와 TD(Transverse Direction)방향으로 자계가 인가될 때, 본 연구에서 측정된 B-H곡선을 일본에서 측정된 결과와 비교하고 있다. 그림12의 (a)와 (c)에서 알 수 있듯이 B-H곡선의 결과가 잘 일치하고 있다. 그림 12의 (b)와 (d)는 시료 B에 대하여 RD(Rolling Direction)와 TD(Transverse Direction)방향으로 자계를 인가하였을 때, 주파수 50Hz에서 인가 자계에 따른 히스테리시스 곡선을 나타내고 있으며, 시료 A의 경우와는 달리 시료 B의 경우에는, 자

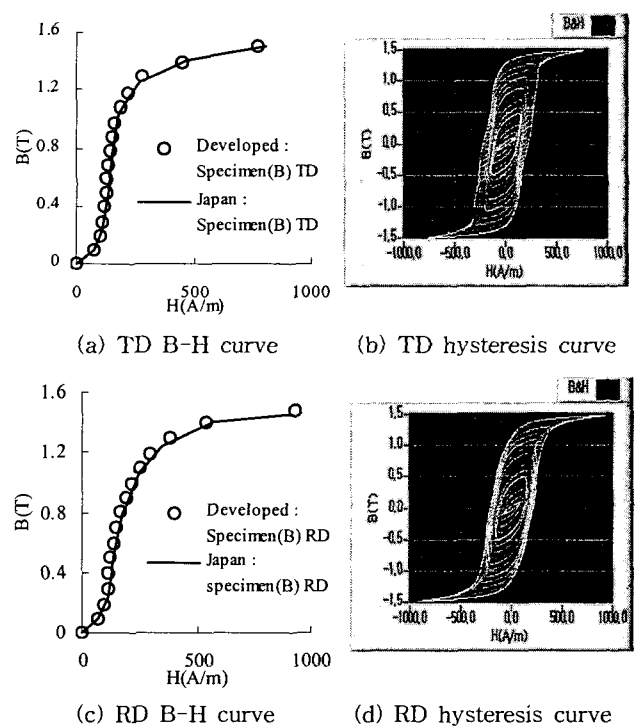
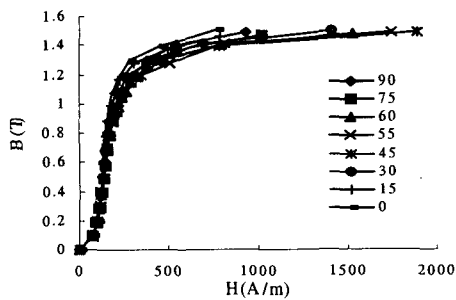
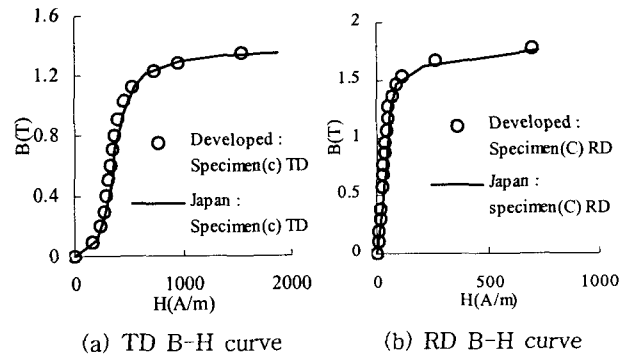


그림 12 등방성 전기강관 시료(B)의 RD 와 TD방향의 측정
Fig. 12 The measurement of isotropic specimen(B)

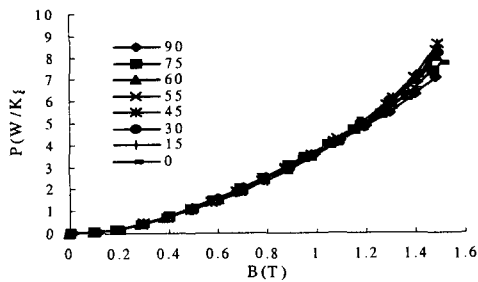
계인가 방향에 따라(Rolling Direction과 Transverse Direction) 히스테리시스 곡선의 모양이 많이 달라지는데 이는 시료 자체의 특성으로 전기강판의 제조공정과 관련이 있는 것으로 생각된다. 그림 13은 등방성 전기강판 시료 B에 대한 측정결과, 즉 인가자계의 방향에 따른 B-H곡선의 변화, 철손곡선의 변화를 나타낸다. 시료 A에 대한 측정 결과와 비교하면 자속밀도의 변화가 동일한 조건에서 시료 B가 철손이 더 큼을 알 수 있다. 이는 두 시료의 히스테리시스 곡선을 비교함으로써 더욱 자명해진다. 이러한 측정 결과를 바탕으로 시료 A와 시료 B를 비교하면, 시료 A의 경우가 자계의 인가방향에 무관한 등방성 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 이방성 전기강판 시료 C에 대하여, 전기강판의 RD(Rolling Direction)와 TD(Transverse Direction)방향으로 자계가 인가될 때, 본 연구에서 측정된 B-H곡선을 일본에서 측정된 결과와 비교하고 있다. 그림14의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 B-H곡선의 결과가 잘 일치하고 있으며, 이로부터 본 논문에서 개발된 측정시스템이 타당함을 알 수 있다. 그림 14의 (c)와 (d)는 시료 C에 대하여 자계 인가방향에 따른 (Rolling Direction과 Transverse Direction) 히스테리시스 곡선을 측정한 것으로, 자계의 인가방향에 따라 그 모양이 달라짐을 알 수 있다. 특히, Transverse Direction으로 자계가 인가되는 경우 자속밀도의 크기가 작은 영역에서 특이한 모양을 나타내는데 이것은 시료자체의 특성인 것으로 파악된다. 그림 15는 이방성 전기강판인 시료 C에 대한 측정결과를 나타낸다. 그림 15-a)는 인가자계 방향에 따른 (Rolling Direction과 Transverse Direction) B-H곡선의 변화를 나타

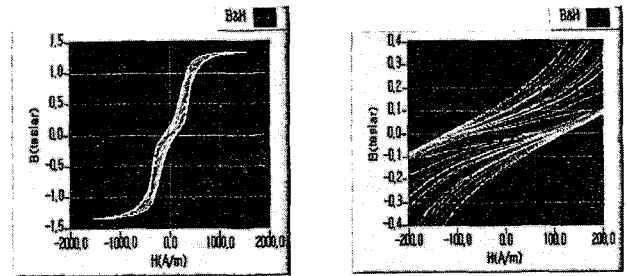
낸 것으로, 인가자계의 방향에 따라 B-H곡선은 물론 포화자속밀도의 값도 다름을 알 수 있다. 즉, 자계가 Rolling Direction으로 인가되는 경우는 B-H곡선을 선형으로 근사화 할 수 있는 구간에서 투자율이 대략 $\mu_R=1.6/200$ 정도가 되나, Transverse Direction으로 자계가 인가되는 경우는 투자율이 대략 $\mu_T=1.2/600$ 정도가 되어, 투자율이 대략 4배 정도 차이가 남을 알 수 있다. 그리고 포화자속밀도도 Rolling Direction으로 자계가 인가되는 경우에는 $B_s \approx 1.8 T$ 정도로 매우 높으나, Transverse Direction으로 자계가 인가되는 경우에는 1.4T 못 미침을 알 수 있다. 또한 그림 15-b)에서 보듯이 자계의 인가방향에 따라 철손도 많이 달라짐을 알 수 있다. 이로부터, 이방성 전기강판을 이용한 전기기기의 특성을 정확하게 해석하고, 손실을 계산하기 위해서는 자계의 인가방향에 따른 투자율의 변화를 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.



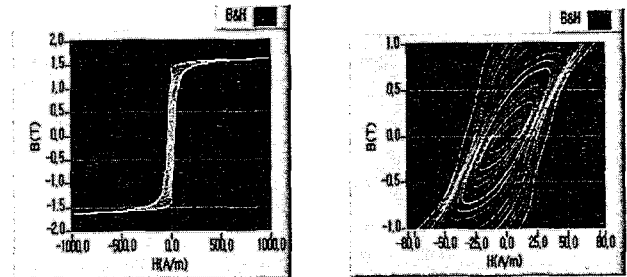
(a) B-H curve



(b) Iron loss



(c) TD hysteresis curve



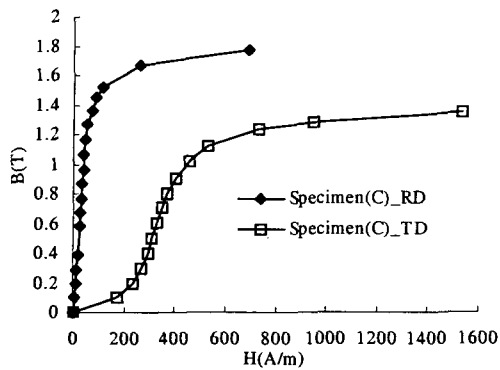
(d) RD hysteresis curve

그림 13 등방성 전기강판 시료(B)의 측정

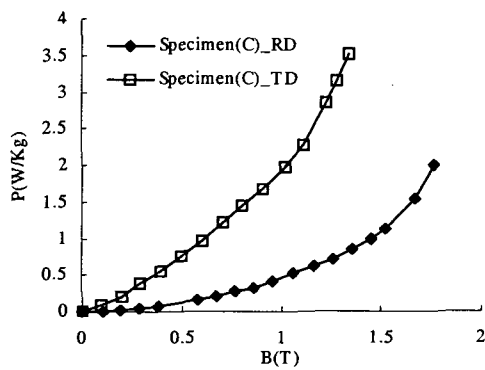
Fig. 13 The measurement of isotropic specimen (B)

그림 14 이방성 전기강판 시료(C)의 RD 와 TD방향의 측정

Fig. 14 The measurement of isotropic specimen(C)



(a) B-H curve



(b) Iron loss

그림 15 이방성 전기강판 시료(C)의 측정
Fig. 15 The measurement of anisotropic specimen (C)

4. 결 론

본 논문에서는 전기기기에 널리 이용되는 전기강판의 특성을 측정하기 위하여 2방향 여자형 Single Sheet Tester 시스템을 개발하였다. 개발된 측정 장치는 균등자계 인가영역(B-coil 및 H-coil 설치영역)이 $20 \times 20 \text{mm}^2$ 로 자구(Magnetic Domain)의 크기가 상대적으로 매우 큰 고방향성 전기강판(Highly-Grain-Oriented Electrical Steel Sheet)인 경우를 제외하면 무방향성 전기강판(Non-Oriented Electrical Steel Sheet)과 방향성 전기강판(Grain-Oriented Electrical Steel Sheet)의 특성을 측정할 수 있다. 본 논문에서 개발된 측정 장치를 이용한 측정결과는 동일한 시료를 타 기관에서 측정한 결과와 비교함으로써 그 타당성을 입증하였고, 따라서 향후 다양한 시료의 특성을 측정 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 전기강판에 교번자계가 인가되는 경우의 자기적인 특성과 손실만을 측정하였으나, 향후에는 전기강판에 회전자계가 인가되는 경우의 특성 및 손실, 그리고 회전자계와 교번자계가 복합적으로 동시에 인가되는 경우의 특성을 측정하는 것이 향후의 연구주제가 될 수 있을 것이다. 또한,

측정된 전기강판의 특성이 전기기기의 설계 및 특성해석에 반영되기 위해서는 측정된 결과를 유한요소법 등을 이용한 전기기기의 특성해석 과정에 반영될 수 있어야 하나, 이것은 통상의 유한요소법으로는 불가능하다. 따라서 측정된 결과가 유한요소법 등에 쉽게 적용될 수 있도록, 측정결과의 적절한 모델링 기법도 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(O2-중-07) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] 에너지관리공단, 전기수요관리, 1994
- [2] H.E. Jordan, "Energy-efficient electric motors and their application", Plenum Press, 1994.
- [3] A. Ikariga, M. Enokizono, H. Shimoji and K. Shuto, "Core material design of rotating machines with a new topology", ICEMS2004, October 31 - November 3, 2004.
- [4] "Method of measurement of the magnetic properties of magnetic steel sheet and strip by means of a single sheet tester", JIS C 2556, 1996.
- [5] M. Enokizono and N. Soda, "Finite element analysis of transformer model core with measured reluctivity tensor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No.5, pp.410-4112, September. 1997.
- [6] K. Fujiwara, T. Adachi, and N. Takahashi, "A proposal of finite-element analysis considering two-dimensional magnetic properties", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No.2, pp.889-892, March. 2002.
- [7] H. Mimura, M. Nakano, K. Fujiwara, "Excitation characteristics of a single sheet tester for the 2-D magnetic properties", The papers of Technical Meeting on Magnetics of IEE Japan MAG-02-188. December. 2002.
- [8] K. Atallah, and D. Howe, "Calculation of the rotational power loss in electrical steel sheet laminations from measured H and B", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 6, pp. 3547-3549, November. 1993.
- [9] K. Fujiwara, "Investigation on methods of description of a permeability tensor", The papers of Technical Meeting on Magnetics of IEE Japan MAG-00-255, November. 2000.

저 자 소 개



김 홍 정 (金 洪 正)

1978년 11월 24일생. 2004년 충북대학교 전기공학과 졸업. 2004년~현재 동대학원 전기공학전공 석사과정.

Tel : 043-274-2426

Fax : 043-274-2426

E-mail : whitezz01@chungbuk.ac.kr



홍 선 기 (洪 瑄 基)

1965년 1월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1993년~1995년 렉스 산전(주) 선임 연구원. 1995년~현재 호서대 전기정보통신공학부 부교수.

Tel : 041-540-5674

Fax : 041-540-5693

E-mail : skhong@office.hoseo.ac.kr



고 창 심 (高 彰 燮)

1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1993~1994년 미국 Florida International University 전기 및 컴퓨터 공학과 객원 연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합 연구소 선임연구원. 1996~현재 충북대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 부교수.

Tel : 043-261-2426

Fax : 043-274-2426

E-mail : Kohcs@chungbuk.ac.kr



신 판 식 (申 判 錫)

1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 Rensselaer Polytechnic 대학원 전력공학과 졸업(석사), 1989년 동대학원 전력공학과 졸업(공학), 1980년~1993년 KERI 연구원. 1993년~현재 홍익대 전기공학과 교수.

Tel : 041-860-2593

Fax : 041-863-7605

E-mail : psshin@hongik.ac.kr