

# 와전류 발열장치를 응용한 모터 구동형 히터 개발

채용웅\* · 윤광열\*\*

Development of Heater Driven by Motor by Using Eddy Current

Yong-Yoong Chai\* · Kwang-Yeol Yoon\*\*

요 약

본 연구에서는 와전류를 생성하는 모터를 제어하여 구동하는 히터를 설계하였다. 모터는 와전류 히터의 회전체를 구동하는데, 자기장은 와전류 히터의 회전체와 고정체 사이의 공기간극에서 주어지며, 고정체에 대한 회전체의 운동은 와전류를 발생시키며 이것이 결국 열을 발생시키게 된다. 본 연구에서는 이 장치의 효율에 영향을 주는 요소들의 분석을 위해 8개와 16개의 자석으로 구성된 회전판을 이용하였다. 그 결과 자기장의 자극은 모터의 속도와 회전체를 구성하는 자석의 개수에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This paper describes the operation of a heater which was designed to control a motor that generates an eddy current. As the motor drives the rotor of an eddy current heater, magnetic fields are provided within the air gap between an eddy current heater's rotor and stator. Throughout the research, a rotor composed of 8 and 16 pieces of magnets was used to analyze which are the factors that affect the efficiency of this equipment. Test results showed that the magnetic fields are influenced by variable functions including the velocity of a motor and the quantity of magnets composing a rotor.

키워드

Eddy Current, Heater, Magnetic Field, Motor, Induction Heating, Energy  
와전류, 발열기, 자기장, 모터, 유도 가열, 에너지

## 1. 서 론

21세기 현대 사회는 태양[1], 풍력[2] 등의 자연에너지를 전기에너지로 변환하는 기술의 개발과 더불어 필요시 저장된 에너지를 사용하는 에너지 저장 및 공급 기술, 전기를 사용하는 제품들의 전기사용 효율의 등급제 및 고효율화 등 다양한 신기술의 개발을 통해 전기 사용을 절감하려는 노력이 지속적으로 이어지고 있다. 이러한 노력의 일환으로 최근에는 전기에너지에

자연에너지를 추가함으로써 효율을 극대화하여 열에너지를 생성하는데 대한 관심이 확산되고 있다.

전기에너지가 열에너지로 변환되어 사용되는 분야는 매우 넓다. 예를 들어 제품금형의 가열, 건조, 제품의 제조 공정 등이 모든 분야에 필수불가결한 공정일뿐만 아니라 건축, 빌딩, 가정용 냉난방에 사용되는 전기의 열변환 등에도 많이 사용되고 있다[3-4]. 전기를 열로 바꾸는 장치 중 가장 큰 비율을 차지하는 모터는 전기 사용의 주요 제품인데, 모터의 효율을 몇

\* 계명대학교 전자공학과(yychai@kmu.ac.kr)

\*\*교신저자: 계명대학교 전자공학과

• 접수일 : 2019. 08. 14

• 수정완료일 : 2019. 09. 14

• 게재확정일 : 2019. 10. 15

• Received : Aug. 14, 2019, Revised : Sep. 14, 2019, Accepted : Oct. 15, 2019

• Corresponding Author : Kwang-Yeol Yoon

Dept. Electronics Engineering, Keimyung University,

Email : yoonky@kmu.ac.kr

% 만이라도 높인다면 전기에너지를 생산하기 위한 투자를 줄이는데 크게 기여하게 될 것이다. 전기에너지를 열로 변환하는 것에 머무르지 않고, 전기에너지를 자연에너지를 추가하여 열에너지를 얻는 양을 증대시킬 수만 있다면 이러한 방법은 에너지 생산의 효율을 제고하는데 크게 기여하게 될 것이다. 즉, 투입된 전기량 대비 변환되는 에너지의 양이 기존의 기술에 의한 효율보다 높은 효율이 될 만큼 발생된다면 이를 응용한 제품의 개발은 경쟁력 우위를 확보할 수 있을 것이다.

전기에너지를 열에너지로 변환시켜 산업용 제조공정에서 사용하는 한가지의 예가 유도가열기술이다 [5-8]. 감긴 코일에 전류를 흘려 고주파를 전달하면 코일 내에 위치한 전도체 재질의 소재에 유도전류가 흘러 비접촉으로 고온으로 가열하게 되는 유도가열 방식은 이미 널리 사용되는 기술로서, 자기장이 교번하면서 와전류가 발생하여 전도체에 접촉하면서 열로 변환되는 원리를 응용한 것이다. 이 기술은 철강의 용해로, 강재의 열처리 공정과 부품 생산, 보일러 등 다양한 곳에 응용되고 있다[9-10].

본 논문에서 언급하는 기술은 전기를 직접 코일에 흘려서 와전류 발열을 발생 시키는 것이 아니고 영구 자석이 갖는 자기장의 세기를 이용하여 비접촉으로 전도체에 와전류를 발생시켜서 열을 발생되도록 하는 것이다.

이 기술은 와전류를 이용하여 열을 발생시켜 이를 상업적으로 사용하는 장치 및 제품을 개발하는데 목적이 있다. 이와 같은 방식을 통해 모터 회전에 의한 와전류 유도가열방식의 이동형 운수기 제품, 산업용 열기 제품 및 와전류 유도가열방식의 열 공급 장치 개발 등에 이용할 수 있을 것이다. 풍향 등의 자연에너지를 이용하여 모터를 대체할 회전력을 얻는다고 가정하면 기존의 전기에너지에 자연에너지를 더함으로써 열에너지를 만들어내는데 있어서 효율을 극대화할 수 있을 것이다.

## II. 와전류운수기 제작

와전류 현상은 도체의 내부 안에서 만들어지는 전류로, 도체 전체가 아닌 일부분에 소용돌이 모양으로

단한 통로를 흐르는 전류로서, 도체 내부를 지나는 자기력선속의 변화로 인해서 생기는 전류를 일컫는다. 자석을 도체판 위에서 이동시키면 자기력선속이 변하면서 맴돌이 전류가 생기고, 맴돌이 전류의 자기장은 자석의 이동을 방해하게 되는데, 이 맴돌이 전류를 와전류라고 한다.

와전류 발열은 자기장의 변화가 발생하고 있는 자계 중에 놓여있는 도전성 물체 내에 발생하는 와류손 또는 히스테리시스 손을 이용하여 가열하는 방식이다. 피가열체가 도전성일 때는 피가열물에 직접 열이 발생하지만 절연성일 때는 우선 도전성 용기 중에서 발생하는 열을 가지고 용기 속에 있는 피가열물을 간접적으로 가열시키게 된다.

와전류 발열을 이용한 가열방식은 피가열체 내에서 직접 열을 발생시킬 수 있으며 다른 가열 가열방식에서처럼 열원을 이용하지 않는다. 화석연료 사용에 비해 주위 온도가 높아지지 않고, 이산화탄소 배출도 없기 때문에 탄소배출에 의한 환경규제가 강화되고 있는 글로벌한 규제에서 자유로울 수 있다.

그림 1은 열변환 장치 기구부에 들어가는 8개 혹은 16개의 자석을 수용하는 2개의 외함 설계도이다. 이것은 자석 배열방식에 따른 열발생 정도를 실험하기 위한 장치로서, 모터와 고정 프레임, 자석, 자석고정 지그로 구성되어있으며, 자석의 개수에 따른 온도 변화를 알아보기 위한 방안이었다. 그림1에서 (a)에는 총 8개의 자석이 위치하며 (b)에는 총 8개의 자석이 배치되도록 하였다. 이 두 개의 구조는 후에 구조물에 의한 효율을 측정하는데 사용되었다.

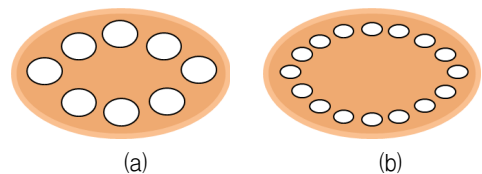


그림 1. 히터의 외함 (a) 자석 8개, (b) 자석 16개  
Fig. 1 Enclosure of Heater (a) 8 piece magnet, (b) 16 piece magnet

그림 2는 그림 1의 외함이 발열체 위에 고정되어 있는 모습을 보이고 있다. 즉, 1차 측에 자기장을 발생하는 자석을 배치하고, 2차측에 도체판을 고정된 구

조로서 모터로 1차측 자석을 회전시키면 고정된 2차측 도체판에 자계의 변화가 연속으로 나타난다. 이 자계의 변화로 와전류가 발생하고, 이로 인해 열이 발생하는 것이다.

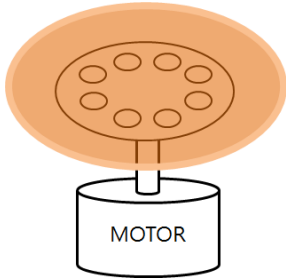


그림 2. 발열체 구성도  
Fig. 2 Block diagram of heater

그림 3은 그림 2의 상판에 물통 등을 올려놓을 수 있도록 선반의 역할을 하는 구조물이 있는 발열장치를 보인다. 그 선반 아래에는 모터에 의해 회전하는 히터의 외함이 보인다.

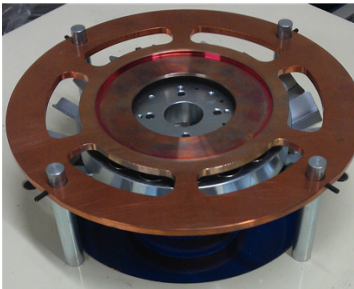


그림 3. 발열체 사진  
Fig. 3 Picture of heater

자석은 회전할 때 가열물에 자속의 교변이 일어나도록 극을 변화하면서 부착한다. 여러 가지 자속의 크기나, 배열 구조, 자속교변 속도 등에 따른 변화를 시험하기 위해 다음과 같이 구성해보았다.

그림 4는 와전류 온수기 실험장치의 구성 블록도이다. 열을 발생시키는 와전류 발생 장치부와 모터를 회전시키기 위한 인버터, 모터의 속도를 제어하기 위한 인버터 제어 컨트롤보드부, 각종 센서 피드백신호를 취득하는 센서보드부 등으로 구성되어 있다.

각종 검출용 센서로는 열과 온도를 제어하기 위해

취득해야할 물 온도, 탱크자체 온도 검출용 온도센서, 물 사용 시 물의 배출 속도를 측정하는 유량센서, 모터속도 측정용 스피드센서, 인버터 출력 전류 측정 센서를 사용한다.

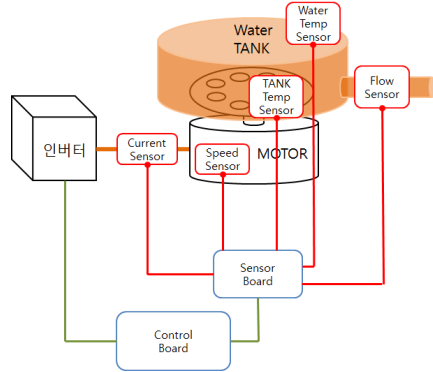


그림 4. 히터의 전기장치 블록도  
Fig. 4 Block diagram of electrical equipment in heater

그림 4의 전기장치를 운용하는 프로그램은 그림 5와 같이 설계되었다.

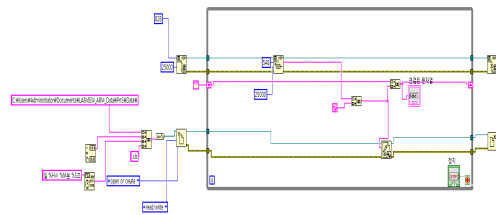
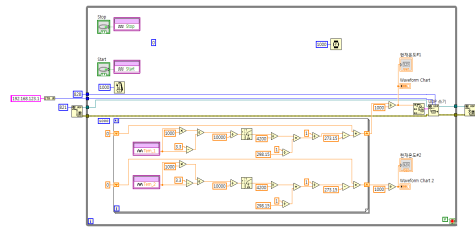


그림 5. 히터구동제어기  
Fig. 5 Heater driving controller

해당 프로그램은 써미스터를 이용한 온도계측 보드에서 데이터를 취득하여 실시간 데이터를 저장하고 이를 디스플레이 하는 기능을 한다. 프로그램에서 ADC를 이용하여 취득한 데이터를 사용자가 설정한

데이터와 비교하여 온도유지를 위한 온도의 증가 및 감소를 판단하며, 이 때 취득데이터와 설정데이터간의 온도 차이에 따라 모터 속도를 제어하는 기능을 갖는다. 이것은 UDP통신을 통한 마이크로컨트롤러와 PC와의 통신 구현으로 구현되었다. 이외에도 시스템의 자동온도조절모드와 수동조작모드의 상태알림 표시, 현재 모터의 속도 및 토크 디스플레이, 시스템 구동 중 에러사항 경고기능, PC와의 데이터 통신에 따른 추가기능을 부여하는 것들이 가능하도록 프로그램 되었다.

그림 6은 이진데이터로 이루어진 데이터를 처리하여 신호의 해석 및 파형 분석을 하는 프로그램이다. 이진데이터는 사용 중인 디지털저 등 PCI, PXI보드에서 제공되는 툴을 사용하거나 외부 컴파일러를 이용한 프로그램을 작성하여 데이터를 얻고 처리한다. 본 프로그램은 기존에 사용 중인 컴파일러나 데이터 수집 프로그램에서 추출한 출력값인 이진데이터를 가공하고 이를 그래프로 도식화하여 신호처리를 수월하게 하였다.

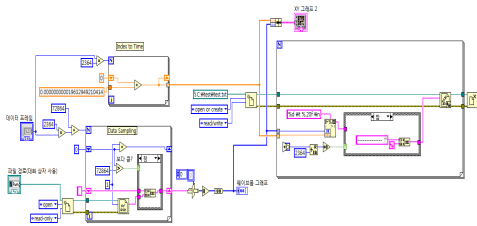


그림 6. 신호의 해석 및 파형 분석 제어기  
Fig. 6 Controller for interpreting and analyzing of signal

또한 어떠한 타입의 이진데이터라도 헤더 부분의 데이터 주소를 알 수 있다면 이를 제거한 후 순수한 데이터를 추출하여 샘플링을 거쳐 그래프에 도식화하여 데이터를 처리하고, 처리된 데이터를 문자열로 저장하여 다른 프로그램에서도 충분히 활용 가능하도록 하였다. 이러한 운용은 와전류 발생장치에서 다수의 센서와 DAQ보드를 이용한 다채널의 입력에 따른 다채널의 출력 데이터를 도식화하여야 하는 경우에도 한개의 데이터 수집 프로그램으로 가능하도록 할 것이다.

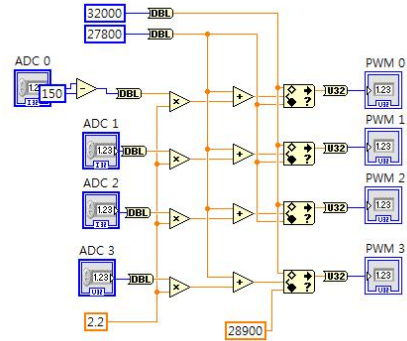


그림 7. 모터제어기  
Fig. 7 Motor controller

그림 7은 와전류를 발생시키기 위한 모터제어 프로그램이다. 기존의 모터 제어를 위한 프로그램의 경우 포지션 제어, 출력의 세기 등 한 가지의 특화된 기능을 목표로 설계되는 것이 대부분이다. 이러한 기존 설계방식에 따라 센서와 같은 외부 변화 요인에 따른 모터 동작에는 두 가지 이상의 모듈이 필요하고 이에 따른 두 가지 이상의 프로그램이 필요하였다. 하지만 본 프로그램은 센서의 데이터 취득과 모터 제어를 위한 PWM 신호발생을 하나의 프로그램으로 작성함으로써 본 프로그램을 사용하는 모듈도 하나로 작동이 가능하게 하였다. 이러한 이점은 산업현장에서 모듈 제작비용 절감과 더불어 제작될 제품의 부피를 줄일 수 있고, 어떠한 종류의 센서라도 확장 가능한 시스템이 되도록 할 것이다.

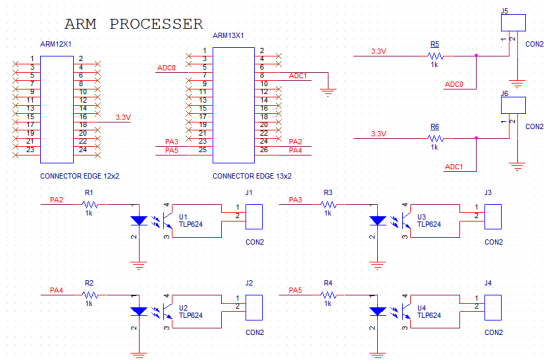


그림 8. 온도제어모듈  
Fig. 8 Temperature controlling module

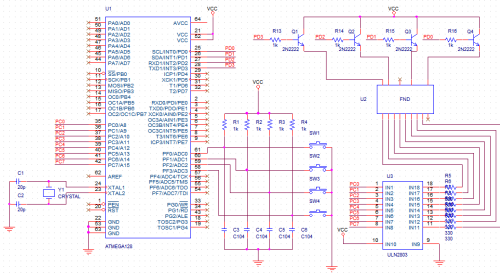


그림 9. FND 제어 모듈  
Fig. 9 FND controlling module

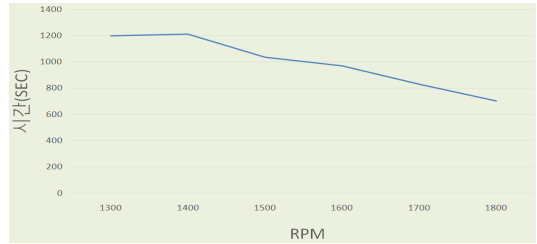
그림 8은 Arm을 이용한 온도제어모듈을 나타내며, 그림 9는 Atmega를 이용한 FND제어 수동모듈을 나타낸다.

### III. 실험결과

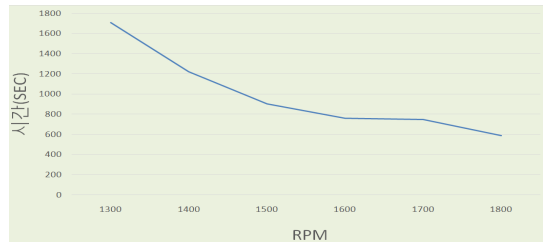
발열기의 회전수에 따른 온도 변화를 알아보고 시스템의 열변환 효율을 검토하기 위해 모터의 회전수를 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800rpm의 각기 다른 조건에서 온도특성 실험을 하였다. 또한 회전판에 있는 자석수에 따른 효율을 알아보기 위해 8개 16개의 자석을 장치하고 그 결과를 살펴보았다. 자석의 배치는 그림 1에 나타난 (a)와 (b)의 형태로 하였다.

실험에 사용된 모터는 TSC-23P를 사용하였다. TSC-23P는 2.2kW, 4P, 단상, V/T 인버터 일체형이며 속도(rpm)제어형의 전기적 스펙이고 유도전동기 모터는 설정속도에 대해서 실제 부하는 변동되므로 모터의 입력선에 Watt Meter를 연결하여 모터에 입력되는 소요전력(Watt)을 측정하였다. 그림 10은 자석이 8개 16개 각각에 대한 rpm에 따른 온열기의 상판에 놓인 물통의 물의 온도가 80°C까지 상승하는데 소요되는 시간을 보여주는 그래프이다. 그림에서 (a)는 자석을 8개 사용했을 경우이고 (b)는 자석을 16개를 사용했을 경우의 모터의 속도에 따른 물의 온도가 80도에 이르는 시간을 나타낸다. 그림 (a)와 (b)를 비교해보면 자석이 많다고 해서 열효율이 더 좋은 것은 아닌 것을 알 수 있다. 예를 들어 1300rpm의 경우 8개의 자석을 사용한 발열체는 1200초의 시간이 걸린 반면에 2배의 더 많은 자석을 사용한 발열체의 경우

는 약 1700초의 시간이 걸리는 것을 확인할 수 있다. 반면에 rpm이 1700이상으로 증가하게 되는 경우에는 8개의 자석을 사용한 경우에 비해 16개의 자석을 사용한 발열체가 짧은 시간에 더 많은 열을 발생시키는 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 10. 온도변화 (a) 자석 8개 (b) 자석 16개  
Fig. 10 Temperature change (a) 8 piece magnet (b) 16 piece magnet

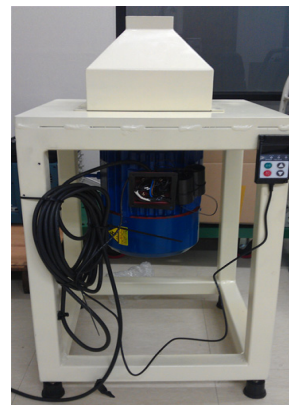


그림 11. 와전류 발열기  
Fig. 11 Eddy current heater

모터의 rpm을 증가시키는 경우에는 8개를 사용하는 경우나 16개의 자석을 사용하는 경우와나 비슷하게 결정 온도에 걸리는 시간이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 효율이라는 측면을 고려해 보면 rpm의 증가가 반드시 효율을 높인다고 볼 수는 없을 것이다. 왜냐하면 rpm을 높이기 위한 전력의 소모가 증가하기 때문에 고속과 저속에서의 모터의 전력소모가 다르기 때문이다. 그림 11은 개발된 와전류 발열기 사진을 나타낸다.

#### IV. 결론

본 논문을 통해 모터 회전에 의한 와전류 유도가열 방식의 산업용 가열기를 개발하였다. 이 장치는 모터 회전에 소요되는 전기에너지만을 이용하여 발열 및 온도제어가 가능한 시스템의 제품으로서 온수설비가 되어있지 않은 기관 및 시설의 온수공급기 설치가 가능하다는 것을 보여 주었다. 그러나 모터의 회전력을 전기만이 아닌 자연 에너지, 풍력, 수력, 조력 등을 이용하면 환경 친화적인 히터의 개발도 가능하다는 가능성을 제시하였다. 즉, 전기에너지와 자연에너지를 동시에 활용하게 되면 높은 효율의 산업설비용 온수공급기 공급하게 될 것이다. 이것은 또한 최근에 파리에서 개최된 에너지 기후협약에서 우려했던 이산화탄소 발생량이 대폭 감소하는 효과를 기대할 수 있게 될 것이다.

이 장치의 효율을 개량하기 위해 8개와 16개의 자석으로 구성된 회전판을 이용하여 결과를 분석하였다. 그 결과 자석의 수가 많다고 해서 반드시 열효율이 높은 것은 아니라는 것을 확인할 수 있었다. 모터의 rpm에 의해 특정 온도에 이르는 발열시간이 단축되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 rpm을 상승시키기 위한 전력을 소모를 감안할 때 반드시 효율이 개선될 것이고 말할 수는 없다.

향후에는 자석의 배치에 따른 효율 개선방안에 대한 연구가 필요하고 이에 따른 열변환 효율 시험 및 에너지 변환에 소요되는 비용에 대한 연구가 필요할 것이다.

#### References

- [1] S. Jung, J. Choi, and Y. Choi, "Modeling and Analysis of The Buck Converter in Photovoltaic Power Conditioning System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 7, July 2013, pp. 1039-1048.
- [2] S. Yang, J. Kwon, and W. Kim, "The Design of Operating System on Wind Power Plant," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 1, Feb. 2011, pp. 135-141.
- [3] J. Lee, "A Controller Development of Water Heating in a Ceramic Pipe Using Electronics Control System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 6, Oct. 2011, pp. 717-722.
- [4] Y. Kwak, K. Park, and E. Kim, "Automatic Control System of Vertical Agitation Heater for Controlling Temperature of Greenhouse," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 5, May 2015, pp. 623-628.
- [5] V. Fireteanu and O. Nebi, "Finite Element Electromagnetic 2D Model of an Eddy Current Heater with Rotating Permanent Magnets," *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, no. 32, 2008.
- [6] R. Araneo, A. Geri, M. Maccioni, and G. Veca, "Eddy Current Induction Heating of a Conducting Cylinder in a Magnetic Field," *In Proc. of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources*, Padua, Italy, June 19-22, 2007.
- [7] V. Fireteanu, T. Tudorache, M. Popa, and S. Pasca, "Finite Element Analysis of Aluminum Billet Heating by Rotation in DC Magnetic Fields," *In Proc. of XXIV UIE International Congress*, Krakow, Poland, May 19-22, 2008.
- [8] O. Nebi and V. Fireteanu, "Finite Element Analysis of a Permanent Magnets Heating Device," *In 6th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering ATEE 2008*, Bucharest, Romania, November 20-21, 2008.

- [9] M. Kim and Y. Kim, "Analysis of Cooling Characteristics according to Heating Reduction System Displacement of Major Heating Region on Power Inverter," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 2, Feb. 2015, pp. 261-266.
- [10] M. Kim and Y. Kim, "Temperature Characteristics Analysis of Major Heating Region According to Cooling Device Location of Grid-Connected Photovoltaic Inverter," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 7, Aug. 2014, pp. 799-804.

### 저자 소개



#### **채용웅(Yong-Yoong Chai)**

1985년 8월 서강대학교 졸업 (공학사)

1991년 4월 Oklahoma State Univ. 졸업(공학석사)

1994년 12월 Oklahoma State Univ. 졸업(공학박사)

계명대학교 전자공학과 교수

※ 주 관심분야 : DC-DC컨버터



#### **윤광열(Kwang-Yeol Yoon)**

1994년 후쿠오카공업대학교 정보공학과 졸업(공학사)

1996년 후쿠오카공업대학교 정보공학과 졸업(공학석사)

2001년 큐슈대학교 대학원 시스템정보과학과 졸업(공학박사)

2001년 ~ 현재 계명대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 전파통신시스템, 전자파 전파

