

열전 냉각기의 모델링 및 열전달 해석에 대한 연구

고윤석*

A Study about the Modelling of Thermoelectric Cooler and the Thermal Transfer Analysis

Yun-Seok Ko*

요 약

열전 냉각기는 냉온 정밀온도제어가 가능하고, 소형화 및 경량화가 가능할 뿐만 아니라 기계적인 진동이 없어 신뢰성을 높일 수 있다는 장점 때문에 다양한 분야에 적용이 시도되고 있다. 하지만 열적 모델링 및 해석이 요구되기 때문에 적용분야에 최적한 열전 냉각기를 설계하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 SINDA/FLUINT 해석법을 이용하여 열전 냉각기 모델링과 크기 결정 문제 그리고 열적해석 등을 연구함으로써 열전 냉각기의 적용을 위한 기반기술을 확립하고자 한다.

ABSTRAC

The thermoelectric cooler is receiving great interest because of advantages such as the precise temperature control capability, the compact and lightweight cooler, and the mechanical vibrationless structure which enhances the reliability compared with the existing vapor compression cooler. However, it is not easy to design the optimal thermoelectric cooler which appropriate to the application because the thermal analysis should be necessary required. Accordingly, this paper studies the methodology of the modelling, sizing and thermal analysis of the thermoelectric cooler using SINDA/FLUINT analysis tool.

키워드

Peltier Cooling, Thermoelectric Cooling, Thermal Transfer Analysis, Cooling Temperature Control, SINDA/FLUITI
펠티에 냉각, 열전냉각, 열전달해석, 냉각온도제어, SINDA/FLUINT

1. 서 론

현재, 가장 보편적으로 사용되는 냉각 시스템은 암모니아나 프레온 가스 등과 같은 냉매의 증발잠열 특성을 이용하는 증기 압축식 냉각 시스템으로 인류의 생활에 큰 기여를 하여왔다. 하지만, 냉매 가스가 지구온난화에 영향을 미침으로서 환경 친화적인 새로운 냉매가 요구되고 있으며, 증기 압축 냉각 사이클 조직 때문에 발생하는 기계적인 진동 및 소음 문제, 다양한

적용분야에서 요구하는 크기와 무게 등으로의 제작하기 어렵다는 점, 정밀온도제어가 어렵다는 점 등이 문제점으로 지적되어 왔다.

최근, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 열전 냉각기가 큰 관심을 받고 있다[1-7]. 열전 냉각기는 반도체 소자를 기반으로 하는 냉각 방식이기 때문에 냉매를 필요로 하지 않으며, 전류제어에 의해서 냉온 정밀온도제어가 가능하다. 또한 다양한 적용분야에 적합한 소형화 및 경량화가 가능하고 기계적인 진동

* 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과(ysko@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2014. 09. 16

심사(수정)일자 : 2014. 10. 20

게재확정일자 : 2014. 11. 10

이 없어 신뢰성을 높일 수 있다.

하지만 냉각 대상에 최적한 열전 냉각기를 제작하기 위해서는 적용대상에 적합한 열적 냉각기 모델링 및 해석기술이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 열전 냉각기를 적용하는 데에 있어 가장 핵심적인 문제인 열전 냉각기 모델링 및 열적 해석 문제를 SINDA/FLUINT 해석법[2-3]을 이용하여 연구한다.

II. 열전냉각의 기본 이론

2.1 열전소자

두개의 서로 다른 금속을 접합시킨 후 외부에서 전류를 인가하면 접합부 한 편에서는 흡열, 다른 한 편에서는 발열 현상이 일어나는데, 이러한 현상을 펠티에 효과라 한다[1]. 하지만 그 당시의 금속으로는 냉각효율이 낮아 냉각장치로의 적용에 어려움을 겪다가 비교적 높은 냉각효율을 얻을 수 있는 반도체 소자가 출현함으로써 냉각장치로의 적용연구가 활발히 이루어져 지금은 다양한 분야에 적용이 시도되고 있다. 그림 1은 한 개의 p형 반도체와 한 개의 n형 반도체 쌍(커플)으로 구성되는 열전소자를 보인다.(www. tetch.com 참조)

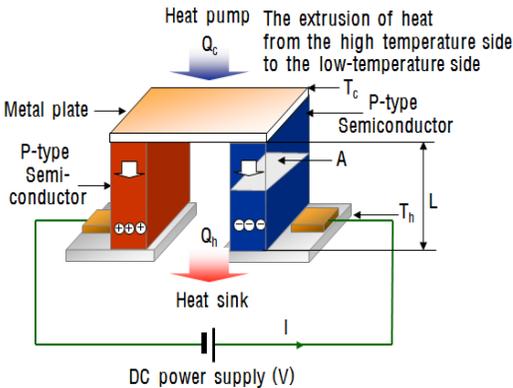


그림 1. 열전소자
Fig. 1 Thermoelectric device

그림 1에서, Q_c 는 흡열량(Heat load), Q_h 는 방열량, V 는 전압, I 는 인가전류, L 은 냉각소자의 높이, A 는 냉각소자의 단면적을 표시한다. 또한 T_c 는 냉각 측 온도, T_h 는 고온 측 온도를 표시한다.

열전소자의 반도체 소재로는 가장 높은 MF(Figure of Merit) 즉, zT 를 가지는 소재를 채택한다. 식 (1)에서 MF는 열전 소재의 성능의 질을 표시한다[2].

$$zT = \frac{\alpha^2 \sigma}{k} T \quad (1)$$

식 (1)에서, α 는 제백효과 계수, σ 는 전기 전도율, k 는 열전도율 그리고 T 는 온도를 나타낸다. 단, T 는 경우에 따라서 표시되지 않는다.

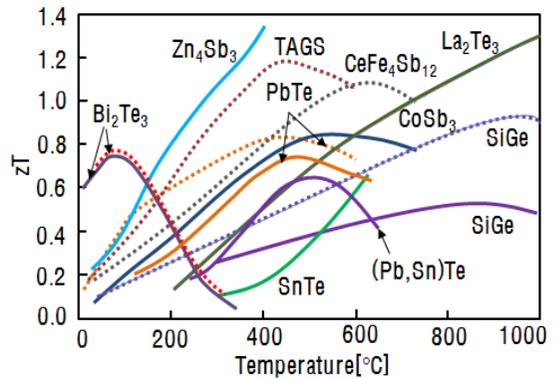


그림 2. p형과 n형 열전소재들에 대한 zT
Fig. 2 zT p-type, n-type thermoelectric materials

그림 2로부터 0-200°C 범위 내에서 가장 높은 zT 를 가지는 소재는 Bi_2Te_3 임을 알 수 있다.) 따라서 열전소자로는 Bi_2Te_3 등에 셀렌과 같은 불순물을 첨가하여 만든 n형 반도체와 p형 반도체를 널리 사용하고 있다. 그림 2에서 실선은 p형 열전소자들, 점선은 n형 열전소자들에 대한 zT 를 보인다.

2.2 열전냉각 모듈

열전모듈은 그림 3에 나타낸 바와 같이 한쪽 면에 전극을 설치한 2장의 알루미늄 또는 질화 알루미늄 등의 절연성 세라믹 기판에 열전소자를 교대로 나열하여 구성한다. 세라믹 기판은 알루미늄이나 구리로 구성되는 도전성 히트싱크와 양호한 열적접합을 유지하면서 전기적 절연을 확보할 수 있다.

1) J.Snyder, http://www.its.caltech.edu/~jsnyder/thermoelectrics/science_page.htm

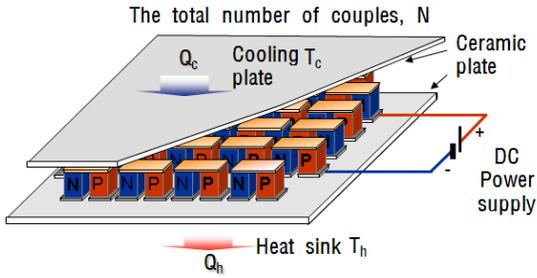


그림 3. 열전냉각 모듈
Fig. 3 Thermoelectric cooling module

전극은 수십 m의 구리로 구성되며, 열전 반도체와는 Sn-Pb이나 Au-Sn 등의 납에 의해 접합된다. 이때, 온도차분(Temperature differential) ΔT_{max} 는 식 (2)로 표시된다. (www.tetech.com, Okano 참조)

$$\Delta T_{max} = T_h - (\sqrt{1 + 2zT_h} - 1) / z \quad (2)$$

그리고 흡열량 (Q_c)와 전압(V)은 식 (3)과 식 (4)로 각각 표시될 수 있다.

$$Q_c = 2N[\alpha IT_c - \frac{1}{2}I^2\rho\frac{L}{A} - k\frac{A}{L}(T_h - T_c)] \quad (3)$$

$$V = 2N[\alpha(T_h - T_c)Ip(L/A)] \quad (4)$$

여기에서, N은 냉각소자 커플들의 수, α 는 제백효과 계수, ρ 은 전기저항률, κ 는 열전도율을 나타낸다.

III. 열전냉각 제어전략 설계

열전냉각 제어회로는 기본적으로 PWM 제어를 이용하여 실현된다. 그림 4는 PWM 기반의 온도제어회로를 보인다[5-7]. 이때 온도제어 전략은 그림 5에 보인다. T_s 는 냉각면의 설정온도, ϵ 는 허용된 온도변화 범위이다. 따라서 냉각 면 온도 T_c 가 $T_s + \epsilon$ 보가 크면 냉각 제어 범위에 들기 때문에 냉각제어가 이루어지며, 반대로 T_c 가 $T_s - \epsilon$ 보가 작아 히팅 제어 범위에 들면 히팅 제어가 이루어져 $T_s - \epsilon < T_c < T_s + \epsilon$ 를 만족할 수 있도록 한다. 이때 냉각제어나 히팅제어는 PWM 제어에 의해서 그림 6과 같이 펄스폭을 조정하여 평

균전압을 제어함으로써 이루어진다.

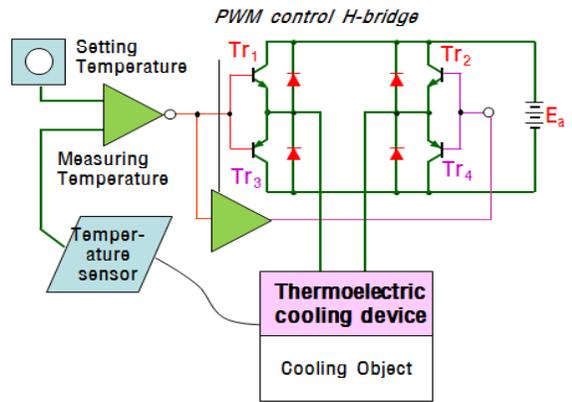


그림 4. PWM 기반 냉각장치의 온도제어회로
Fig. 4 Temperature control circuit based on PWM

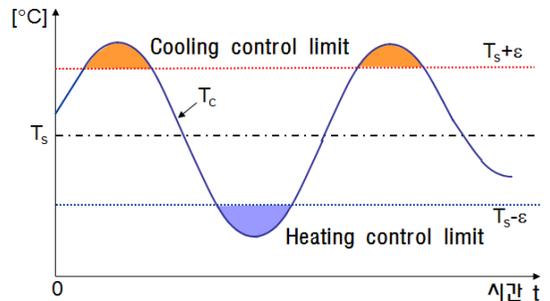


그림 5. 온도제어 전략
Fig. 5 Temperature control strategy

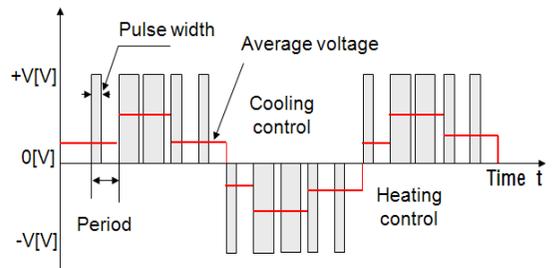


그림 6. 그림 5의 T_c 에 대한 PWM 펄스 파형
Fig. 6 PWM pulse waveform for T_c of Fig. 5

IV 열전냉각기 설계 방법론

SINDA/FLUINT법에 근거한 열전 냉각기 설계 방법론은 1) 먼저 열전 냉각기의 3차원 열적 모델링으로부터 시작된다. 2) 냉각하고자 하는 디바이스, 열전 냉각기 그리고 히트싱크의 열전달성 모델링을 수행한다. 다음 열전 냉각기 사이즈를 결정한다.

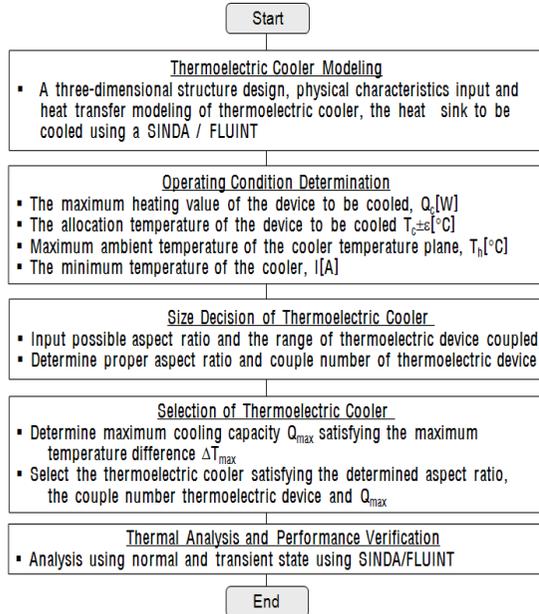


그림 7. SINDA/FLUINT 해석방법론
Fig. 7 SINDA/FLUINT design methodolog

이때 기본적으로 요구되는 정적 데이터는 냉각하고자 하는 디바이스의 최대 발열량 Q_c [W] 및 허용온도 $T_{c\pm\epsilon}$ [°C], 냉각기 고온 면의 최대 주위온도 T_h [°C], 냉각기의 최소전류 I [A]이다. 반면에 sweep 데이터는 가능한 aspect ratio (L/A)와 열전소자커플 수 범위이다. 이 데이터들을 기반으로 SINDA/FLUINT 솔루션을 적용하여 적절한 aspect ratio 및 열전소자 커플 수가 결정된다. 다음, 열전 냉각기를 선택한다. T_{max} 를 결정한 후, 이 조건을 만족하는 최대냉각용량 Q_{max} 를 결정한다. 그리고 결정된 aspect ratio, 열전소자 커플

수와 Q_{max} 를 만족하는 열전 냉각기를 선택한다.

AbleMax(사)에서 제공되는 SINDA/FLUINT 솔루션을 이용하여 결정된 열전 냉각기를 기반으로 하는 열적 모델링을 실현한다. 냉각하고자 하는 디바이스, 열전 냉각기 그리고 히트싱크를 모델링한다. 최종적으로 SINDA/FLUINT 솔루션을 이용하여 선택된 정상상태 및 과도상태를 그래픽적으로 해석함으로써 그 설계의 유효성을 검증한다. 그림 7은 SINDA /FLUINT법에 근거한 설계 방법론을 보인다.

V. 열전 냉각기 모델링 및 열적 해석

본 장에서는 그림 7에 보인 설계절체에 따라 열적 냉각기 모델링 및 열적 해석 방법론을 보이기 위해서 먼저 냉각하고자 하는 디바이스의 스펙을 다음과 같이 결정하였다.

- 냉각하고자하는 디바이스의 크기 : 10cm× 10cm
- 냉각하고자하는 디바이스의 발열량 Q_c : 25[W]
- 냉각기 고온 면의 최대 주위온도 T_h : 25[°C]
- 냉각기 냉각면의 최대 허용온도 T_c : 9[°C]

다음 Baumann²⁾이 제시한 SINDA/FLUINT 솔루션 기반의 열전 냉각기 3차원 모델을 제시된 규격에 맞춰 그림 8에 보인바와 같이 재실체한 후, 2개의 경우에 대해서 열적해석을 시도하였다.

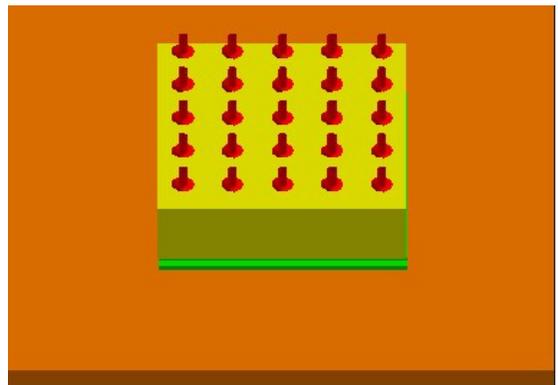


그림 8. 열전냉각기의 3차원 열적 모델링

Fig. 8 Thermal modelling of thermoelectric cooler

2) J. Baumann, 'Modelling and Sizing a Thermo electric Cooler Within a Thermal Analyzer', www.crtech.com

Case 1) 아래와 같은 스펙을 가지는 열전 냉각기에 대해서 SINDA/FLUINT 솔루션을 이용하여 열적 해석을 실시하였다.

- 냉각기의 최소전류 $I = 4[A]$
- Aspect ratio (L/A) : 0.0025m
- 열전소자커플 수 : 71

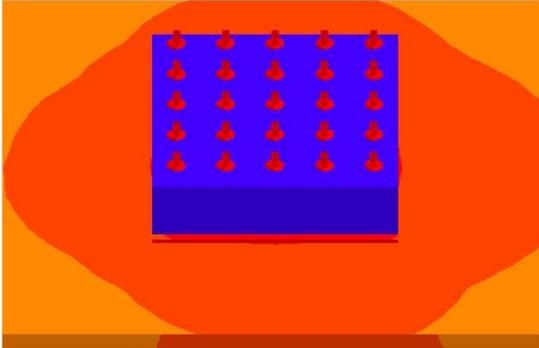


그림 9. 경우 1에 대한 정상상태 해석
Fig. 9 Steady status analysis for case 1

그림 9와 그림 10은 SINDA/FLUINT 솔루션을 이용하여 얻은 정적상태와 8000초 동안의 과도상태 해석 결과를 보인다.

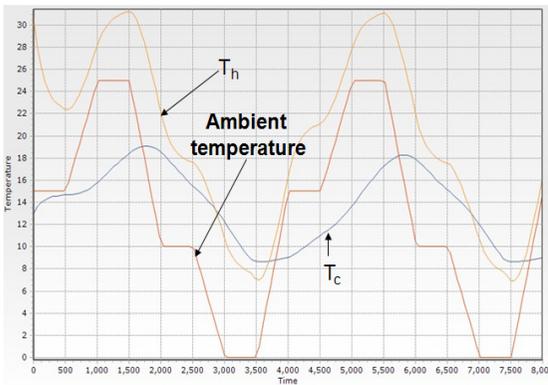


그림 10. 경우 1에 대한 과도상태 해석
Fig. 10 Transition status analysis for case 1

그림 9에서, 냉각기 히트싱크의 중앙에서 바깥쪽으로의 온도가 $31.45 < 30.22 < 28.99 < 27.76 [^{\circ}C]$ 의 순으로 비교적 낮게 분포됨을 알 수 있다. 반면에 그림 10은

$T_c > 11 [^{\circ}C]$ 인 경우를 보인다. 이 그림들로부터 적용 사양의 열전 냉각기가 냉각용량 부족으로 열 펌핑을 효과적으로 하지 못해 온도제어가 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.

Case 2) 일반적으로 널리 사용되는 다음 사양을 열전 냉각기의 사양으로 하여 열적해석을 시도하였다. 이 사양은 $3.87cm \times 3.87cm$ 크기의 냉각대상에 대해서 [2]에 의해서 최적해로 제시된 사양이다. 냉각기의 사양은 aspect ratio 0.118cm, 열전소자커플 수 127, $\Delta T_{max} 67 [^{\circ}C]$, $Q_{max} 51.4 [W]$, $I_{max} 6.0 [A]$, $V_{max} 15.4 [V]$ 이다.

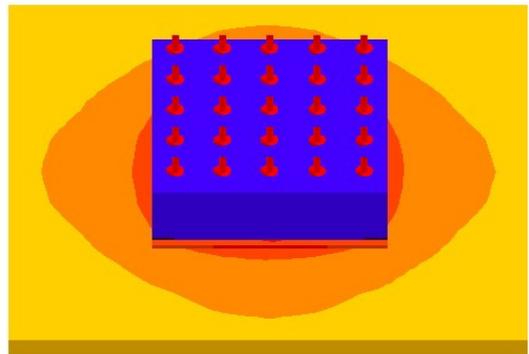


그림 11. 경우 2에 대한 정상상태 해석
Fig. 11 Steady status analysis for case 2

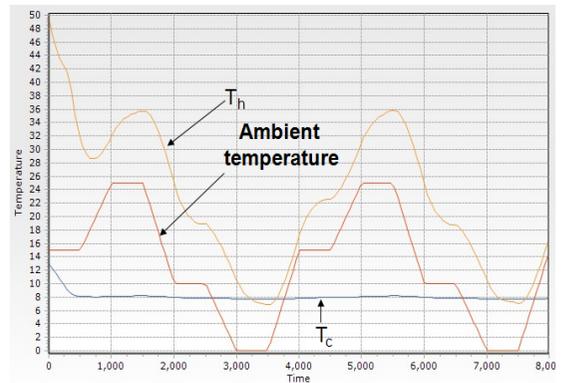


그림 12. 경우 2에 대한 과도상태 해석
Fig. 12 Transition status analysis for case 2

그림 11과 그림 12는 위의 사양을 적용하여 정상상태와 8000초 동안의 과도상태를 해석한 결과를 보인다

다. 그림 11에서 냉각장치 히트싱크의 중앙에서 바깥 쪽으로의 온도가 $42.79 < 40.67 < 38.54 < 36.4 [^{\circ}\text{C}]$ 의 순으로 분포되어 그림 9에 비해 히트싱크의 온도가 높아졌음을 알 수 있다. 반면에, 그림 12는 냉각면의 온도가 $7 < T_c < 11 [^{\circ}\text{C}]$ 의 범위 내에서 유지됨을 보임으로써 적용된 사양의 열전 냉각기가 열 펌핑을 효과적으로 하여 냉각면의 온도를 규정된 범위내서 정확하게 유지하고 있음을 알 수 있다.

VI. 결론

본 연구에서는 열전 냉각기를 적용하는 데에 있어 가장 핵심적인 문제인 열전 냉각기 모델링 및 열적 해석 문제를 SINDA/FLUINT 솔루션을 이용하여 검토하였다. 현재 상용화된 2개의 대표적인 열전 냉각기 모델을 적용하여 열적 해석 결과를 비교, 분석하였는데, 각 용량에 최적한 열적 냉각기가 결정되어야 온도제어가 정확하게 이루어질 수 있음을 확인할 수 있었다. 차후, 다양한 분야에 대한 적용을 위해서는 본 연구결과를 기반으로 냉각하고자 하는 적용대상의 열적 특성을 분석하여 모델링 할 수 있는 기술 개발 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

감사의글

이 논문은 2014년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해서 연구되었음

References

- [1] J. Baumann, "Modeling and Sizing a Thermoelectric Cooler within a Thermal Analyzer," *Annual Spacecraft Thermal Control Workshop, The Aerospace Corporation*, El Segundo, CA, Mar. 2006.
- [2] L. Shi, "Thermal and Thermoelectric Characterization of Nanostructures," *Tutorial on Micro and Nano Scale Heat Transfer, 2003 ASME Int. Mechanical Eng. Congress & Exposition*, Washington DC, Nov. 2003.
- [3] J. Wang, K. Zou, and J. Friend, "Minimum Power Loss Control - Thermoelectric Technology in Power Electronics Cooling," *Proc. of the 2009 Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, Sept. 2009, pp. 2543-2548.
- [4] J. Finn, D. J. Ewing, L. Ma, and J. Wagner, "Nanofluid Augmented Coolant Rail Thermoelectric Cooling of Electronic Systems - Modeling and Analysis," *2011 American Control Conference on O'Farrell Street*, San Francisco, CA, June 29 - July 01, 2011.
- [5] Y.-S. Ko, W.-C. Lee, and I.-S. Kim, "A Consideration on the Application of Thermoelectric Cooler to Obesity Therapy," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1437-1442.
- [6] D.-I. Yang, C.-L. Li, Z.-H. Jin, K.-S. Lee, and Y.-S. Ko, "A Study on Hybrid Track Circuit Tag Recognition Enhancement," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 4, 2014, pp. 537-542.
- [7] M.-S. Kim and Y.-J. 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, 2014, pp. 799-804.

저자 소개



고윤석(Yun-Seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업(공학사)

1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사)

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구원

1996년~1997년 포스코 경영연구소 연구위원

1997년~현재, 남서울대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 전력시스템 제어, 배전자동화, 로봇제어