

전력선통신을 이용한 선박 및 건축용 발열유리 온도제어 시스템

이수형¹, 김인동[†]

Power Line Communication-based Heated Glass Temperature Control System

Su-Hyeong Lee¹ and In-Dong Kim[†]

Abstract

Heated glasses are widely used to prevent surface condensation and freezing in ship and building windows. This study proposes a heated glass temperature control system composed of power and control circuits to control the temperature of heated glasses. The proposed temperature control system adopts a digital controller instead of a conventional analog controller. Thus, the proposed system has better characteristics, such as precise setup and control of glass temperature, setup and control of output power, and control mode change between ON/OFF and phase controls. The system can also implement multi-functional control algorithms. The control characteristics are not dependent upon external disturbances, such as ambient temperature and electrical noises. Furthermore, the proposed temperature control system utilizes the power line communication (PLC) method to control the number of heated glasses without any extra communication lines. The system proposes a new communication protocol with strong immunity to electrical switching noises. A new sensorless algorithm is used to detect the temperature of the heated glass. This study presents the design guidelines in detail and its effectiveness are confirmed by implementing a 4-kw prototype temperature control system.

Key words: Heated glass, Power line communication, Temperature sensorless control, Digital control

1. 서 론

건축물의 유리창은 우천 시나 겨울철에 건물 내부와 외부의 기온 차에 의하여 유리창에 습기 또는 성애가 생기게 된다. 이로 인해 건물내외에서 본 외부전망 및 내부시야를 망치게 할 뿐만 아니라 창가에 머무르는 사람에게 쾌적한 온도를 제공하지 못하는 단점이 있다.^[1]

또한 선박의 앞창 및 측면창은 선박이 대양을 항해 중에 전방 및 후방 시야를 확보하는데 중요한 역할을 한다. 특히 겨울철 북극해나 또는 남극 대륙 인근 대양을 운항 중일 때는 선박 위로 덮치는 파도 등에 의해

선박의 프론트 및 리어 측 유리에 바닷물이 동결되거나 또는 성애에 의해 시계확보가 곤란하게 되어 항해에 방해를 받게 된다. 이러한 현상들을 방지하기 위해 일반적으로 발열유리를 사용한다.

발열유리는 그림 1과 같이 크게 열선방식과 도전체 코팅방식으로 분류할 수 있다. 열선방식의 발열유리를 만드는 방식은 필름 양단에 전극을 배치하고 열선(0.01~0.02 [mm])을 직병렬구조로 배치하여 필름위에 고정시킨다. 그 후 두 장의 강화유리 사이에 넣고 압착시켜 만든다. 도전체 코팅방식의 발열유리는 유리양단에 전극을 고정시킨 후 전기가 통하는 투명한 물질을 도포하여 만든다. 이렇게 제작된 발열유리들은 전극에 전압을 인가하면 저항체로 발열을 하게 되는 구조이다.

이러한 발열유리는 건축물, 선박 또는 차량 유리의 습기와 성애를 제거할 뿐 만 아니라, 창가 및 실내 전체의 온도를 균일하며 최적조건으로 유지할 수 있다.^[2]

발열유리의 발열전력을 제어하기 위해 가변 출력전압 특성을 갖는 전력변환기를 필요로 하며 이를 통해 발열

Paper number: TKPE-2015-20-2-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: idkim@pknu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng, Pukyong National University
Tel: +82-51-629-6318 Fax: +82-51-629-6305

¹ PSTEK R&D Institute

Manuscript received May 7, 2014; accepted Dec. 10, 2014

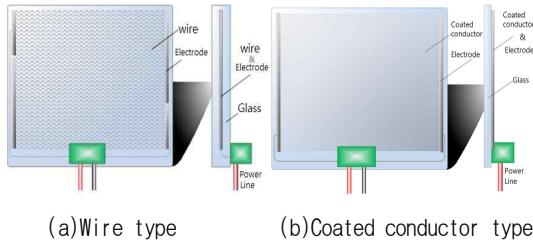


Fig. 1. Types of heated glass.

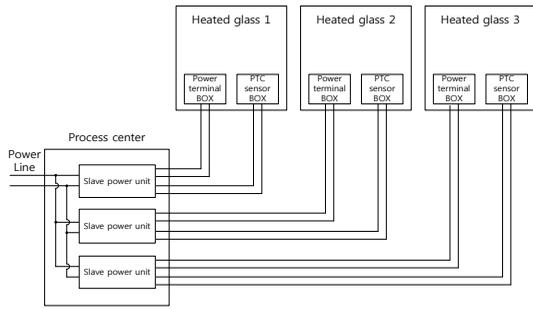


Fig. 2. Conventional heated glass temperature control system.

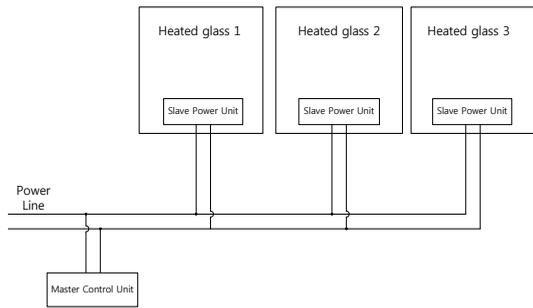


Fig. 3. Proposed power line communication-based heated glass temperature control system.

유리 온도 뿐 만 아니라 실내의 온도를 제어한다. 대형 건물의 경우 다수의 발열유리창의 온도제어를 위해 유리창마다 온도센서와 전력변환기인 전압제어기를 그림 2와 같이 별도로 설치하게 되며, 이로 인한 전력선과 온도센서의 신호선이 복잡하게 배치된다. 또한 발열유리 온도의 중앙 집중관리가 곤란하다.

따라서 본 논문에서는 선박 및 건축용 발열유리의 온도 제어를 위한 전력선통신 (power line communication (PLC))을 이용한 발열유리용 온도 제어시스템을 제안한다. 제안한 발열유리 온도제어 시스템은 그림 3과 같이 각 발열유리창의 온도제어를 위해 전력변환기능과 통신기능을 포함한 전압제어기(Slave power unit)와 이들을 전력선 통신을 이용하여 중앙 집중관리가 가능하게 각 발열유리창의 전압제어기를 결합하는 마스터 제어 유닛(Master Control Unit)로 구성된다.

기존의 유선 통신을 사용할 경우 별도의 통신선로가 필요로 하며 이로 인해 추가적인 비용이 발생하고 유지

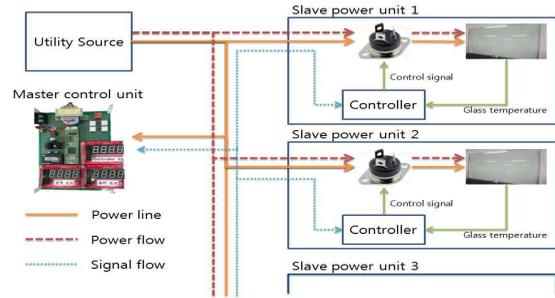


Fig. 4. Power and signal flow of the proposed system.

보수가 까다롭다. 하지만 전력선통신을 사용할 경우 전력전달을 목적으로 하는 전력선에 통신 신호를 실어서 전송하는 통식방식이므로 별도의 통신선이 필요가 없어진다. 그러므로 통신선을 제거함으로써 설치비용이 감소하고 외관이 좋아진다. 또한 발열유리의 추가적 설치와 장치의 위치 변경이 용이하다.

또한 본 논문은 제안한 발열유리 온도제어 시스템에서 신뢰도 높은 전력선통신을 위해 전기적 잡음에 대해 강한 특성을 갖는 통신 알고리즘을 제안하며, 발열유리를 실내에서 전열기로 사용할 경우 열선의 온도를 추정하는 온도센서리스 방식을 제안한다.

2. 제안한 발열유리 온도제어시스템

2.1 제안한 전체 시스템 구성

그림 4는 제안된 발열유리 온도제어시스템에서의 전력 및 신호의 흐름을 나타낸 그림으로 1개의 마스터 제어 유닛(Master control unit)과 다수의 전압제어기 (Slaver power unit)로 구성되어 있으며, 전력선을 기반으로 전력의 흐름과 통신의 흐름을 볼 수 있다. 마스터 제어유닛은 사용자로부터 입력받은 설정온도명령을 전력선을 사용하여 전압제어기에 전달하며, 전압제어기로부터 실제 발열유리 온도와 각종 고장신호를 전달받아 표시장치에 표시하거나 상위레벨 시스템에 전달하는 기능을 갖는다. 그리고 전압제어기는 전력선을 통해 받은 온도명령에 따라 내부의 전력변환기를 통해 발열유리에 전달하는 전압 제어를 통해 발열유리의 온도와 출력 전력을 제어하는 기능을 갖는다. 상세한 마스터 제어 유닛과 전압제어기 회로는 그림 5와 같다.

2.2 전력 회로 및 제어 회로

그림 5는 마스터 제어 유닛과 전압제어기의 상세회로를 보이고 있다. 마스트 제어 유닛은 시스템을 전체적으로 제어하기 위한 MCU 제어부, 하위의 전압제어기로서의 온도명령, 실제온도, 고장정보 송수신과 상위로 이 값들의 전달을 담당하는 전력선통신 모듈부, 송수신된 온도 정보와 고장정보를 표시는 표시부, 그 외의 주변장치로 구성되어 있다.

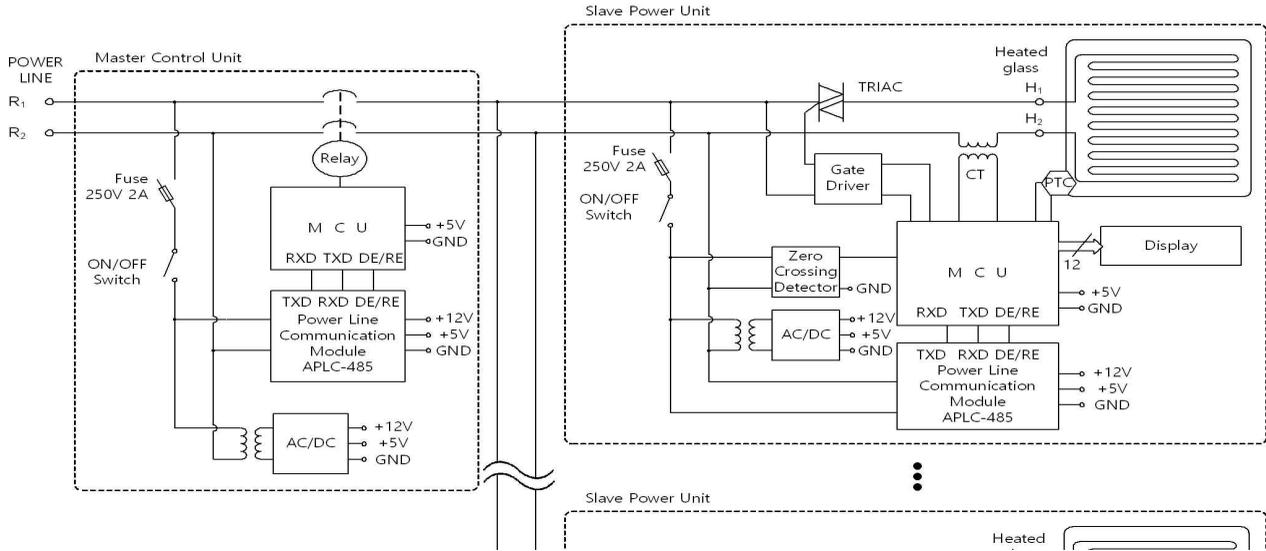


Fig. 5. Detailed configuration of the proposed power line communication-based heated glass temperature control system.

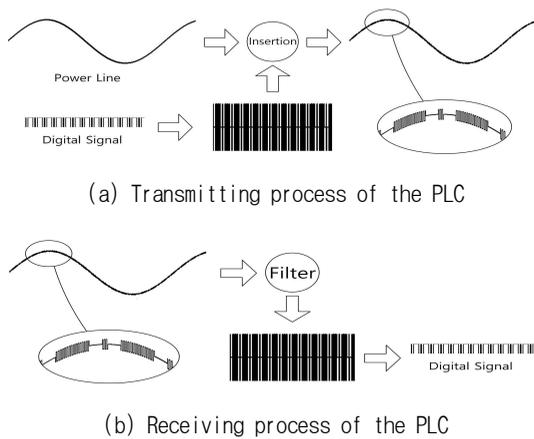


Fig. 6. Transmitting and receiving processes of the power line communication.

전압제어기는 발열유리에 부착되어 있는 PTC (Positive temperature coefficient) 온도센서를 이용하여 현재의 온도와 발열유리의 설정 온도를 비교하여 필요한 출력률을 결정한다. 이 출력률을 바탕으로 스위칭 소자인 TRIAC을 제어한다. TRIAC의 제어에 따라 상용전원에서 발열유리로 제어된 전력이 전달된다.

PTC를 제거한 경우 CT를 통한 전류 검지와 입력단 전압검지를 통해 발열유리의 저항과 온도를 추정해서 온도센서리스 제어를 구현한다.

2.3 제안한 전력선 통신 방법

전력선 통신에서 변조 및 복조는 기본적으로 그림 6과 같다. 그림 6(a)는 고주파 데이터 신호를 전력선에 실어 교류 전원 파형을 변조되는 과정을 나타낸 것이다.^{[3]-[6]} MCU에서 출력되는 이진 디지털신호는 전력선 통신모듈에서 ASK변조를 거친 후 전력선에 실린다. 그

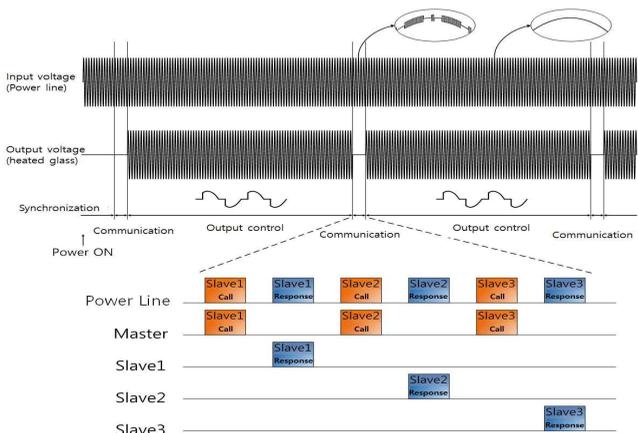


Fig. 7. Proposed noise reduction method of PLC: Distinguishing between the PLC communication section and the output control section.

림 13은 전력선 통신의 수신과정을 나타내는 그림이다. 그림에서는 보는 것처럼 전력선 통신모듈에서 전력선의 고주파데이터를 추출한 후 ASK복조를 통해 이진 디지털 신호를 얻으며 이 신호는 MCU로 인가된다.

일반적으로 부하의 전력제어를 위해 위상제어를 사용하는 시스템에서는 전력선에 많은 고조파 성분에 포함하므로 이로 인한 전기적 노이즈 때문에 전력선 통신이 원활히 이루어지 않으며 전력선통신 사용 자체를 제한한다.^[4] 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 7과 같은 교류 전력선에서 전력선통신의 노이즈 제거방법을 제안한다. 기존의 구간 분할방식의 전력선 통신방식은 직류 전력선에서 소 전력의 전원과 부하 사이에서 구간분할 방식이나 본 논문에서의 방식은 교류 전력선에서 구현한 구간 분할 전력선 통신으로 교류 전력을 직접 사용하는 전열부하와 같이 큰 시정수를 갖

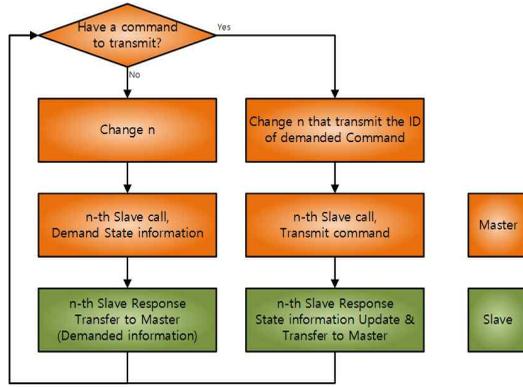


Fig. 8. Communication algorithm during the PLC section.

는 부하에 널리 사용 될 수 있다^[10].

제안하는 방법은 그림에서 보는 바와 같이 출력제어 구간과 통신구간을 나누어 온도제어시스템을 동작시킨다. 즉 전력제어 구간에서는 전력변환기를 제어하여 부하로의 전력을 제어한다. 통신구간에서는 전력변환기를 동작을 잠시 정지시켜 단지 통신신호만 전력선을 통해 주고 받게 된다. 이렇게 전력변환기의 동작이 오프된 통신구간에서 전력선 통신이 이루어짐에 따라 전력선통신 시 출력제어에 의한 노이즈간섭을 방지할 수 있다.

통신구간에서의 통신방식은 마스터 제어 유닛에서 특정 ID의 전압제어기에 명령을 내리면 해당 ID를 할당받은 전압제어기만 응답하는 방식을 취한다. 마스터 제어 유닛은 사용자로부터 입력받은 설정온도 명령을 전력선을 통해 전압제어기에 전달하며, 전압제어기는 발열유리의 제어상태 및 상태정보를 상위레벨 시스템에 전달하는 기능을 갖는다. 통신 구간에서 이루어지는 통신시스템의 상세한 흐름도는 그림 8과 같다.

2.4 제안한 센서리스 온도 감지 방법

그림 2에서 보는 바와 같이 기존의 발열유리 온도제어 시스템은 발열유리의 온도를 감지하기 위해 발열유리에 온도센서인 PTC 저항을 부착하여 온도를 측정한다. 이 경우 PTC 부착과 이를 위한 별도의 접속함이 필요하게 되며, 길게 늘어진 신호선과 이로 인한 전기적 노이즈문제가 존재하게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 온도센서리스 감지 방법을 제안한다.

그림 10은 발열유리 열선 저항의 온도특성을 나타낸 것으로 R_0 는 초기 저항 값이며 a 는 물질고유의 온도계수이다. a 오차는 온도에 대해 정비례 오차를 가지며 R_0 오차는 정비례 오차 및 일정한 온도 오차를 발생시킨다. 이런 오차들은 발열유리와 제어기 사이의 선로 길이 및 재질에 의하여 주로 발생한다. 최초 튜닝 시 이런 오차들을 보상할 수 있다.

발열유리에 의한 발열유리의 열선 저항 R_H 는 전압제어기에 의해 발열유리에 인가하는 입력단 전압과 부하에 흐르는 부하전류를 측정하여 식(1)에 계산 감지할 수 있다.

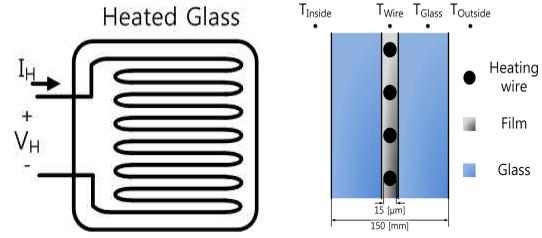


Fig. 9. Equivalent circuit and sectional view of the heated glass.

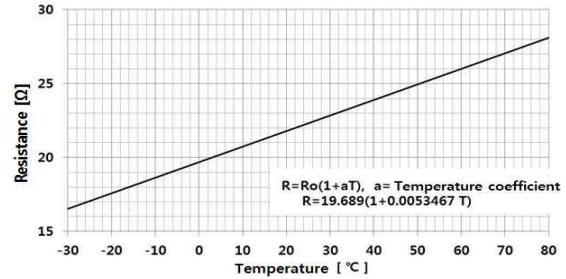
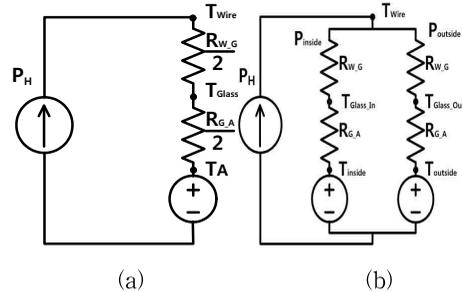


Fig. 10. Temperature characteristic of hot-wire in the heated glass.



(a) Low temperature difference between both sides
(b) High temperature difference between both sides

Fig 11. Thermal equivalent circuit of the heated glass.

$$R_H = \frac{V_H}{I_H} = R_0(1 + aT_{wire}) \quad (1)$$

발열유리의 입력단 전압 V_H 은 같은 전압을 제어기 전원으로 사용하므로 쉽게 감지가 가능하며, 발열유리 전류 I_H 감지 역시 과전류 보호회로를 위해 기 부착되어 있는 전류 CT를 사용하여 쉽게 감지할 수 있다.

또한 발열유리에 사용되는 열선은 그림 10과 같이 일반적인 저항과 같은 온도 특성을 가지므로 식(1) 같이 표현할 수 있다. 따라서 식(1)로부터 발열유리에서의 열선온도 T_{wire} 는 식(2)와 같이 계산 즉 감지할 수 있다.

$$T_{wire} = \frac{1}{a} \left(\frac{V_H}{I_H} - R_0 \right) \quad (2)$$

TABLE I
SPECIFICATION OF HEATED GLASS TEMPERATURE
CONTROL SYSTEM

Item	Content
Rated Power	4.4 [kW]
Source Voltage	Single-phase AC 220 [V], 50-60 [Hz]
Max Current	20 [A]
Control IC	MCU, TRIAC
Fault Detection	Over Current, Open Load, etc
Communication	PLC (Power Line Communication)

발열유리의 온도는 발열유리를 설치하는 장소에 따라 그림 11과 같이 서로 다른 열 등가회로로 모델링할 수 있다. 그림 11(a)는 발열유리의 양면이 접한 주위 온도가 서로 같을 때의 열 등가회로를 보이고 있다. 이러한 경우에 발열유리의 온도 T_{glass} 는 식(3), 발열유리 입력 전력 P_H 는 (4)에 의해 계산 및 검지할 수 있다

$$T_{glass} = T_{wire} - P_H R_{WG} / 2 \quad (3)$$

$$P_H = V_H I_H \quad (4)$$

한편 발열유리의 양면이 접한 주위 온도가 서로 다를 때 열등가회로는 그림 11(b)와 같이 동작한다. 실내 온도가 실외 온도보다 높은 경우 즉 $T_{inside} \gg T_{outside}$ 인 경우 $P_{outside} \approx P_H$ 이다. 따라서 실외측 발열유리 온도 $T_{glass.out}$ 은 식(5)같이 계산 할 수 있다.

$$T_{glass.out} = T_{wire} - P_H R_{WG} \quad (5)$$

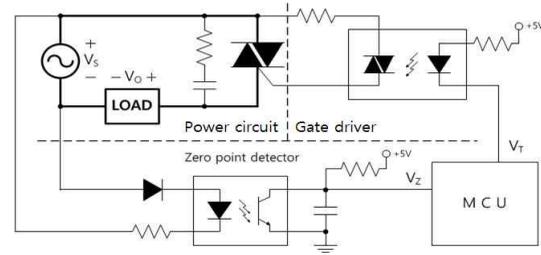
정밀한 온도제어가 필요한 발열유리 온도제어시스템에서는 발열유리의 열 등가회로를 적용하기 위해 실내 및 실외 온도중 하나의 측정이 필요하다. 열선과 유리표면의 열 저항 $R_{W,G}$ 는 유리표면과 공기층의 열 저항 $R_{G,A}$ 에 비해 매우 작다. 그러므로 정밀한 온도를 필요치 않은 발열유리 온도검지는 발열유리의 정확한 열 저항의 계산 혹은 측정을 고려하지 않아도 된다.

3. 발열유리 온도제어시스템 설계

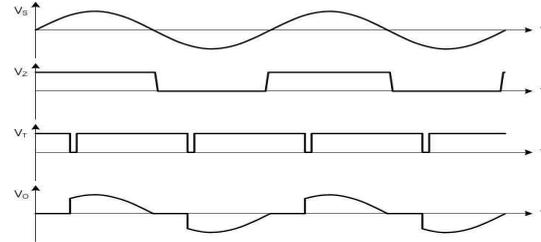
표 1은 본 논문에서 제안한 발열유리 온도제어시스템의 설계사양이다. 본 논문에서 설계한 컨버터의 정격전류는 20[A], 정격출력전압은 220[V]이며, 정격 출력은 $P_{CON.pk} = 4.4 [kW]$ 이다.

3.1 전력회로의 설계

TRIAC을 사용한 AC/AC 전력 변환기에서 제어 방식으로는 ON/OFF 제어방식과 위상제어방식이 있다. 발열



(a) Circuit configuration of phase controlled system



(b) Related waveforms

Fig. 12. Phase-controlled system.

유리에서의 제어방법으로 위상제어방식보다 ON/OFF 제어방식이 EMI/EMC 관점에서 비교적 유리하지만, 낮은 저항 값을 갖는 코팅방식 발열유리에서는 ON시 큰 전류가 흐르는 단점이 있다. 위상제어방식의 시스템은 소프트웨어를 통해 ON/OFF 제어방식으로 변경이 가능하며, 스마트 유리(Smart Glass)에도 응용이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 위상제어 방식을 채택하여 AC/AC 전력 변환기를 구현하였다.

그림 12(a)는 위상 제어 방식의 시스템을 나타낸 것이며 게이트 드라이버는 내부에 영점검출기능이 없는 Random Phase 방식의 Optoisolators TRIAC Driver이다. 따라서 입력 전원의 영점을 찾기 위해 추가적인 영점검출 회로가 필요하다.

그림 12(b)는 위상제어 방식에서 입력 전원 전압 V_s , Zero point 검출 전압 V_z , 게이트 전압 V_T , 출력 전압 V_o 를 나타낸다. 전원전압이 인가되면 영점검출기를 통해 V_z 의 전압이 결정되고 이때 V_z 전압의 edge를 판별하면 전원전압의 영점을 알 수 있으며, 사전에 계산된 출력률에 따른 지연각을 메모리에 저장 한 후, 동작 시 요구되는 출력률만큼 V_T 를 제어한다. V_T 스위칭 신호에 따라 TRIAC을 턴 온 시점이 결정되며, 부하에 전력이 전달된다.^{[7]-[9]}

3.2 온도제어부 설계

발열유리 설치환경의 다양성으로 인한 센서리스 오차가 증가할 수 있으며 이런 오차는 최초 튜닝시 설치 완료 후 제거되는 온도센서로 보상이 가능하다. 또한 온도 제어부가 설계되었을 시 한 제품으로 사용자의 요구에 맞게 일반적인 형태와 센서리스 형태로 동작이 가능하다.

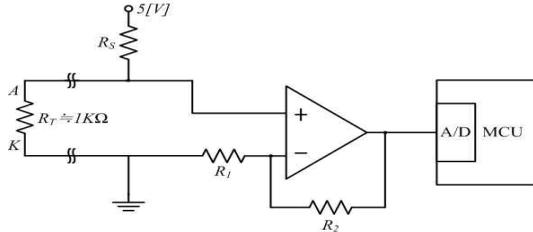


Fig. 13. Temperature sensing circuit.

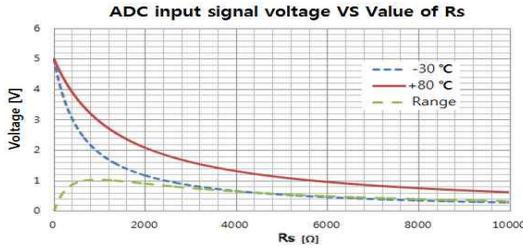
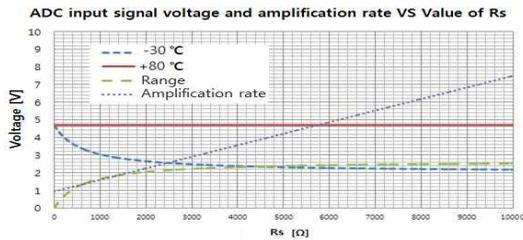
Fig. 14. ADC input signal as a function of R_S .Fig. 15. ADC input signal voltage and amplification ratio as a function of R_S .

그림 13은 온도 센서부의 회로를 나타낸 것이며 R_T 는 유리에 부착되는 온도 센서(PTC)를 나타낸다. 유리온도가 상승함에 따라 R_T 값이 변화하게 되고 R_S , R_T 저항에 의한 분배전압이 비반전 증폭기를 지나 MCU의 ADC 입력핀에 인가된다. 사용한 ADC의 입력전압 범위는 0 ~ 5 [V]이며 10비트 분해능을 갖고 있으므로,

$$ADC_{Digital\ Value} = \frac{ADC_{Input\ Voltage}}{ADC_{Reference\ Voltage}(5[V])} \times 1024 \quad (6)$$

그림 14는 비반전 증폭기를 제외하고 각각 -30 [°C]와 80 [°C]일 때 R_T 와 R_S 의 분배 전압을 나타낸 것이며 범위는 -30 [°C]일 때의 전압과 80 [°C]일 때의 전압 차이를 나타낸 것이다. 범위가 넓을수록 온도 해상도가 향상된다. 즉, 온도의 제어가 정밀해진다. 최대 범위일 때의 R_S 값은 약 800 [Ω]이고 ADC 유효 범위는 약 1 [V]이다.

그림 15은 비반전 증폭기를 사용하여 발열유리 온도 80 [°C]에서 ADC의 최대 입력 전압이 항상 4.7 [V]가 되도록 증폭비를 가변시켰을 때 얻은 그래프이다. 즉 그림 15에서 증폭비는 ADC 최대 입력 전압을 4.7 [V]로

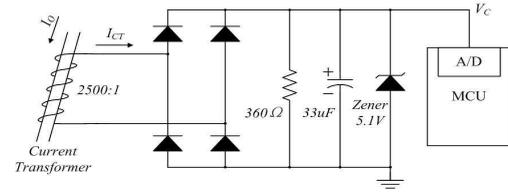


Fig. 16. Current sensing circuit.

맞추기 위한 증폭비율이다.

R_S 값이 증가할수록 -30 [°C]와 80 [°C]일 때의 전압차가 증가한다. 하지만 R_S 가 너무 크게 되면 R_T 에 흐르는 전류가 작아져 노이즈관점에서 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 온도센서의 데이터 시트를 참조하여 적절한 R_S 값을 선정할 필요가 있다.

R_S 값이 4.7 [kΩ]일 때 증폭비는 4배가 되며 ADC 유효 범위는 약 2.37 [V]이다. 증폭기를 사용하지 않았을 때 최대 ADC 유효 범위가 1 [V]임을 고려해보면 증폭기를 사용하면 온도 해상도가 2배 이상 증가한 것을 알 수 있다. R_S 가 4.7 [kΩ]일 때 분해능은 0.227 [°C/Digital Value]이다. 전기적 노이즈를 제거하기 위해 발열유리온도 값을 이동평균(Moving average)을 통해 계산한다.

3.3 전류 센서부 설계

그림 16은 전류 센서부의 회로도이다. 정격 부하 전류 20 [Arms] 이므로 여유를 고려하여 IO에 흐르는 최대 전류가 40 [Arms]라고 가정할 때 CT의 2차측 전류의 평균치 I_{CT} 는 $\sqrt{2} \times 40 / 2500 \times 0.637 = 14 [mA_{peak}]$ 이다.

피크 전류가 ADC 허용범위 최대치인 5 [V]가 되는 저항은 약 360 [Ω]이다. 차단주파수를 낮을수록 전류 센싱이 정밀해지지만 이 경우 신속한 과부하검지에 어려움이 있기 때문에 차단주파수는 리플주파수(120 [Hz])의 1/10인 12 [Hz]로 선정하였다.

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R} = 37 [\mu F] \quad (7)$$

변류기(Current Transformer)는 전류원으로 볼 수 있으므로 다이오드 온드롭 전압(On drop voltage)을 고려하지 않아도 되며, 리플 주파수가 120 [Hz]이기 때문에 저항성분만 고려하여 ADC 입력핀에 인가되는 전압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ADC_{Digital\ Value} = \frac{I_o}{2500} \times 0.637 \times 360 \times \frac{1024}{5} \quad (8)$$

3.4 전력선통신 구간 설계

그림 17은 1개의 마스트 제어 유닛과 5개의 전압제

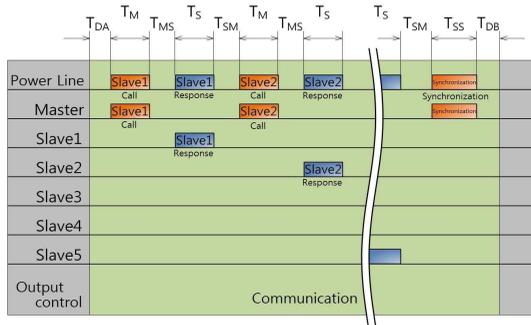


Fig. 17. Timing chart of PLC.



Fig. 18. Wire-type heated glass.

여기로 구성된 전력선 통신 온도제어시스템에서 통신구간의 타이밍 차트를 보이고 있다. 마스터 제어 유닛과 전압제어기간의 전송은 데이터 프레임이 40 비트로 구성되어있으며, 통신 속도는 2400 [bps]이다. 그러므로 40 비트의 데이터 전송시간은 16.7 [ms]이며, 10비트 간격마다 1 [ms]의 지연시간이 존재하므로 마스터와 슬레이브간의 데이터 전송시간 T_M , T_S 는 각각 19.67[ms]이다.

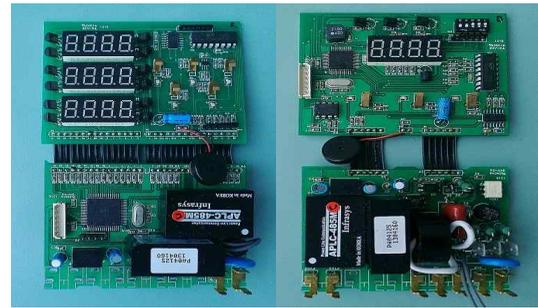
동기화 데이터는 10bit로 구성되어 있으며 동기화 데이터 전송시간 T_{SS} 는 4.167 [ms]이다. 출력제어구간이 종료되고 통신구간이 시작된 후 첫 통신이 이루어질 때까지의 지연시간 T_{DA} 는 10 [ms]이다. 동기화 신호이후 통신구간이 종료되고 출력제어구간이 시작될 때까지의 지연시간 T_{DB} 는 5 [ms]이다. 마스터에서 특정 슬레이브를 호출하였을 때 해당 슬레이브가 응답할 때까지의 지연시간 T_{MS} 는 5 [ms]이다. 슬레이브가 응답을 완료후 마스터에서 또 다른 슬레이브를 호출할 때까지의 지연시간 T_{SM} 는 7.5 [ms]이다.

따라서 그림 17의 시스템에서 통신구간의 전체 필요시간은 $T_{DA}+5*(T_M+T_S+T_{MS}+T_{SM})+T_{SS}+T_{DB}$ 이며, 약 290.84 [ms]가 소요된다. 출력제어구간의 시간이 3분일 때 전력전달률(=통신구간의 시간/출력제어구간의 시간)은 99.84 [%]이므로 통신구간이 출력제어구간 사이마다 존재하더라도 발열유리에 인가 가능한 전체 출력에는 거의 영향이 없다.

또한 1개의 마스터 제어 유닛과 15개의 전압제어기로 구성되는 시스템에서도 통신구간의 전체 필요시간은 $T_{DA}+15*(T_M+T_S+T_{MS}+T_{SM})+T_{SS}+T_{DB}$ 이며, 약 834.2 [ms]가 소요된다. 따라서 출력제어구간의 시간이 3분일 때 전력전달률은 99.54 [%]이므로, 역시 발열유리에 인가 가능한 전체 출력에는 거의 영향이 없다.

4. 실험

그림 18은 실험에 사용된 2 [kW]급 가로 150 [mm], 세로 100 [mm] 인 발열유리이다. 그림 19(a)는 실험에 사용된 마스터 제어 유닛의 모습이며 전압제어기의 ID, 전압제어기의 설정온도 및 유리온도를 설정, 전송 및 표시한다. 그림 19(b)은 전압제어기의 모습이며 마스터 제



(a) (b)

Fig. 19. Master control unit and slave power unit.

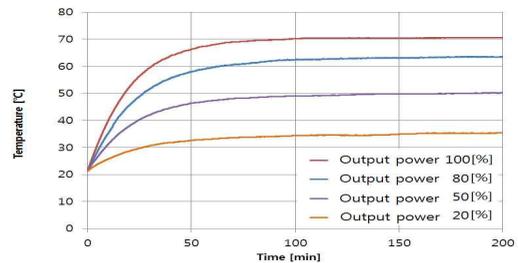


Fig. 20. Measured heated glass temperature for the variation of output voltage ratio (Open-loop test).

어 유닛으로부터 출력률과 설정온도 및 유리온도를 전송받아 발열유리 온도 및 전력을 직접 제어한다.

4.1 발열유리 전력 및 온도제어 실험

그림 20은 전압 출력률에 따른 발열유리의 온도 변화를 나타낸 것이며 전압 출력률이 높을수록 수렴하는 온도가 높은 것을 알 수 있다. 그림 20의 실험은 발열 유리의 온도 피드백을 받지 않은 개방 루프 실험 (Open-loop test)으로 발열유리에 인가하는 전력 제어 실험에 해당하며, 실제 전력제어가 잘 이루어짐을 볼 수 있다.

그림 21과 22는 온도 피드백을 갖는 폐루프 실험 (Closed-loop test) 결과를 보이고 있으며, 실제로 발열 유리 온도제어가 잘 되고 있음을 볼 수 있다. 그림 21은 초기 설정온도를 50 [°C]로 설정하여 약 37분간의 실험 결과를 보이고 있으며, 설정온도를 30 [°C]로 재설정하였을 시의 P 제어 실험 결과를 나타내는 결과 그래

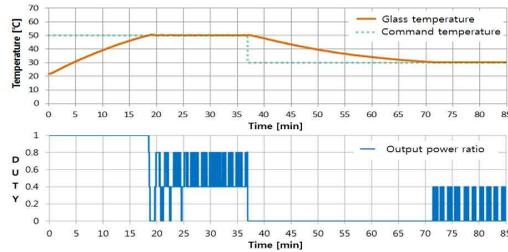


Fig. 21. Measured heated glass temperature and duty cycle when using P controller.

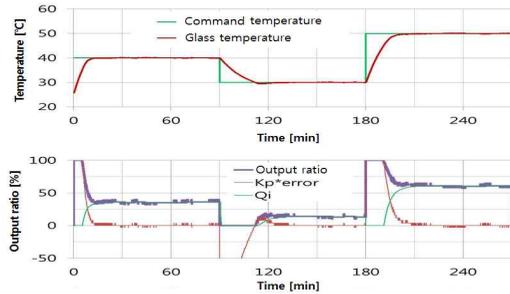


Fig. 22. Heated glass temperature and duty cycle when using PI controller.

프이다. 정상상태오차를 줄이기 위해 P Gain을 크게 하였기 때문에 출력을 증감률이 크다.

그림 22는 위상제어 방식으로 페루프 PI제어를 한 것이다. 초기 설정온도를 40 [°C] 로 설정하여 약 90분간 유지하고, 설정온도를 30 [°C] 로 재설정하였다. 그리고 90분 뒤에 설정온도를 50 [°C]로 재설정하였으며 설정온도 변경에 따른 출력을 변화를 나타내고 있다. 출력률은 $K_p \cdot error + Q_i$ 이며 발열유리에 공급되는 전력은 출력률에 의해 결정된다.

4.2 전력선 통신 실험

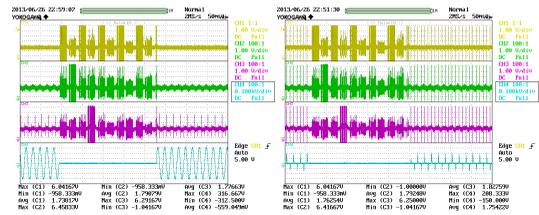
4.2.1 제어방식에 따른 전력선 노이즈 실험

그림 23와 24의 각 채널은 다음과 같다.

- Ch.1 Master control unit의 400 [kHz]성분 (1 [V/div])
 - Ch.2 전압제어기1의 400 [kHz]성분, (1 [V/div])
 - Ch.3 전압제어기2의 400 [kHz]성분, (1 [V/div])
 - Ch.4 전압제어기2의 부하 전압, (100 [V/div])
- Time/Div = 50 [ms/div]

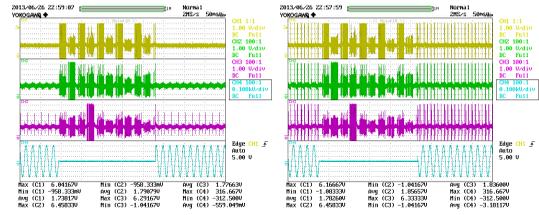
그림 23은 제어 방식에 따른 전력선 노이즈 현상을 알 수 있는 실험 파형이다. 좌측 파형은 ON/OFF 제어 방식으로 전압제어기2의 TRIAC을 제어하였을 때 결과 파형이고, 우측 파형은 위상제어방식으로 전압제어기2의 TRIAC을 제어하였을 때의 결과파형이다.

출력제어구간에서 전력선통신에 악영향을 미치는 임펄스 노이즈가 발생하고, ON/OFF제어 방식 보다 위상 제어방식에서 많은 노이즈가 발생하고 다른 Unit에도 영향을 주는 것을 볼 수 있다.



(a) ON/OFF control (b) Phase-control.

Fig. 23. Power line noise according to control.



(a) when one salve unit controlled, (b) when five salve units controlled

Fig. 24. Power line noise according to the number of controlled slaves during output control section.

4.2.2 전력선 노이즈 간섭 실험

그림 24의 좌측 파형은 1대의 전압제어기가 출력위상 제어를 하고 있는 실험결과 파형이며, 우측 파형은 다수의 전압제어기가 출력위상제어를 하고 있는 실험이다. 이때 발생하는 임펄스 노이즈는 각각의 전압제어기의 TRIAC이 턴-온이 되는 순간 발생하므로 다수의 발열유리를 개별 제어할시 전력선노이즈는 여러 스위칭순간에 많이 발생하게 된다. 따라서 그림 23, 24의 파형으로부터 출력제어구간과 통신구간이 서로 겹치지 않아야 된다는 것을 확인할 수 있다.

4.2.3 통신거리에 따른 전력선 신호 감쇠 실험

1개의 마스터 제어 유닛과 활성화된 5개의 전압제어기로 실험을 진행하였다. 그림 25와 26의 각 채널은 다음과 같다.

- Ch.1 마스터 제어 유닛의 400 [kHz]성분 (1 [V/div])
 - Ch.2 전압제어기1의 400 [kHz]성분 (1 [V/div])
 - Ch.3 전압제어기2의 400 [kHz]성분 (1 [V/div])
 - Ch.4 전압제어기3의 400 [kHz]성분 (1 [V/div])
- Time/Div = 50 [ms/div]

그림 25의 좌측 파형은 통신거리가 1 [m]일 때의 파형이고 우측 파형은 70 [m]일 때의 파형이며, 이 파형들은 각각의 유닛에 인가된 전력선의 400 [kHz]성분을 나타낸다. 좌측 파형에서는 송수신시 신호의 감쇠는 거의 일어나지 않았고, 우측파형에서는 수신 신호의 감쇠가 일어나므로, 통신거리에 따른 신호 감쇠를 볼 수 있다.

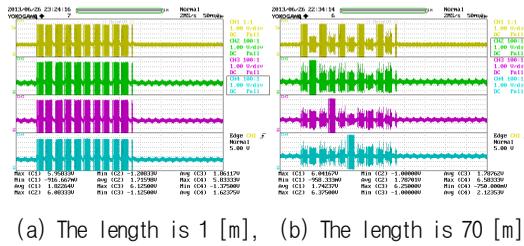


Fig. 25. PLC signal attenuation according to the length of communication line.

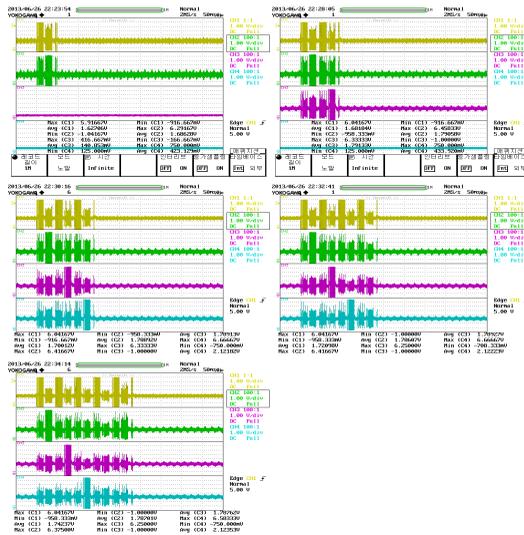


Fig. 26. PLC signal characteristics according to the number of enabled slave units (communication distance between respective units = 70 [m]).

4.2.4 Slave 수 변화에 따른 전력선 신호 감쇠 실험

그림 26은 1개의 마스터 제어 유닛에 전압제어기가 1~5개가 활성화 되었을 때의 파형이며, 이 파형들은 각각의 Unit에 인가된 전력선의 400 [kHz]성분을 나타낸다. 활성화된 전압제어기 수가 증가함에 따라 전력선 신호의 감쇠는 증가한다. 활성화된 전압제어기가 1개일 경우 전력선신호는 약 -2.1 [dB]로 감쇠되었고, 5개일 경우 약 -5.77 [dB]로 감쇠되었다.

그림 25, 26을 통해 통신거리와 활성화된 전압제어기의 개수가 늘어날수록 전력선신호의 감쇠는 증가한다. 특히 400 [kHz]대역의 선로 임피던스가 신호감쇠의 주요 원인이다. 따라서 활성화되는 전압제어기가 많을 경우 400 [kHz]대역의 임피던스성분이 낮은 케이블을 사용하거나 또는 선로 임피던스를 줄일 수 있는 방안을 강구해야 함을 볼 수 있다.

4.3 발열유리 센서리스 온도검지 실험

그림 27은 실내에서 발열유리를 전열기로 사용하는 경우에 한하여 Open-loop 실험을 한 결과이다. 초기 설정 출력률을 50 [%]로 설정하고, 90분 간격으로 출력률

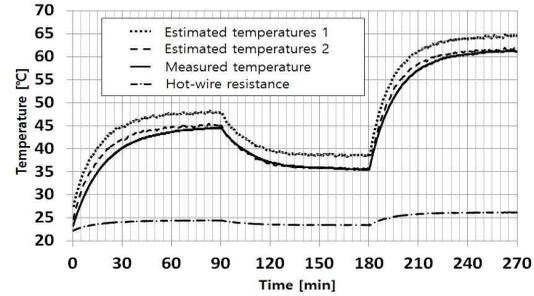


Fig. 27. Estimated glass surface temperatures and measured glass surface temperature.

을 25 [%], 100 [%]로 재설정하였다. 그림에서 추정 온도 1은 전압제어기와 발열유리 사이 선로의 전기적 저항과 발열유리 자체의 열 저항을 고려하지 않은 상태에서 제안한 알고리즘으로 추정한 유리표면온도이며, 추정 온도 2는 선로저항과 열 저항(전체 보정저항 0.3Ω)을 고려한 상태에서 추정한 유리표면온도이며, 유리표면 온도 곡선은 실제 측정된 유리표면온도이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안한 알고리즘에 의해 유리표면의 온도를 잘 추정함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 선박 및 건축용 발열유리의 최적 온도 제어를 위한 전력선통신을 이용한 발열유리 온도 제어 시스템을 제안한다. 제안한 발열유리 온도 제어 시스템은 각 발열유리창의 온도제어를 위해 전력변환기능과 통신기능을 포함한 전압제어기(전압제어기)와 전력선통신을 이용하여 중앙 집중관리가 가능하도록 각 발열유리창의 전압제어기를 결합하는 마스터 제어 유닛(Master Control Unit)로 구성된다. 제안한 방식은 전력선통신을 사용함에 따라 별도의 통신선이 필요가 없어진다. 통신선을 제거함에 따라 설치비용이 감소하고 외관이 좋아지며, 발열유리의 추가적 설치와 위치 변경이 용이하다.

또한 본 논문은 제안한 발열유리 온도 제어 시스템에서 신뢰도 높은 전력선통신을 위해 전기적 잡음에 대해 강한 특성을 갖는 통신 알고리즘을 제안하며, 발열유리의 온도를 추정하는 온도센서리스 방식을 제안한다. 또한 본 논문에서는 제안한 발열유리 온도 제어 시스템의 설계 가이드라인을 제시하였으며, 상세한 실험으로 유효함을 검증하였다.

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음

References

- [1] J. K. Ahn, S. H. Yoo, B. S. Kang, J. Kwon, W. S. IM, and J. H. Kang, "The study of temperature changes heat on the window glass using the rolling stock," *Spring Conference Record of Korean Society for Railway*, pp. 1109-1116, May 2009.
- [2] C. Y. Jang, "High-efficiency windows with improved thermal insulation," *The Magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 36, No. 8, pp. 19-25, Aug. 2007.
- [3] N. Pavlidou, A. J. Han Vinck, J. Yazdani, and B. Honary, "Power line communications: state of the art and future trends," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 41, No.4, pp. 34-40, Apr. 2003.
- [4] H. C. Ferreira, H. M. Grove, O. Hooijen, and A. J. Han Vinck, "Power line communications: an overview," *IEEE AFRICON 4th*, Vol. 2, pp. 558-563, Sep. 1996.
- [5] G. H. Kim and H. Y. Oh, "R&D trend of power line communications technology," *Journal of Electrical World Monthly Magazine*, Vol. 341, pp. 20-31, May 2005.
- [6] S. R. Dan, J. Y. Noh, S. W. Lee, K. M. Choi, M. C. Ju, and Y. I. Park, "Home networking system employing power line and LED lighting," *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, Vol. 38, No. 8, pp. 700-705, Aug. 2013.
- [7] J. M. Kim, "Digital firing control for thyristor converter," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 9, No. 6, pp. 584-591, Dec. 2004.
- [8] J. S. Lee, J. S. Jang, Y. B. Choo, and D. H. Lee, "Firing angle control of thyristor converter using PID controller with parallel data loop," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 14, No. 4, pp. 278-284, Aug. 2009.
- [9] S. J. Kim, "Thyristor control circuit for mechatronics," Cheong-Moon-Gak Publishing Co, pp. 132-134, 1999.
- [10] J. S. Cho and I. K. Hwang, "Power line communication method with splitting of power transmission interval," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 3, pp. 252-258, Jun. 2012.

**이수형(李樹炯)**

1986년 2월 7일생. 2011년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 졸업(석사). 2014년~현재 (주)PSTEK 연구원

**김인동(金仁東)**

1960년 8월 27일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학). 1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원. 1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee Post Doc. 2004년~2005년 미국 Virginia Tech 방문교수. 2012년~2013년 미국 North Carolina State Univ. 방문교수. 1996년~현재 부경대 전기공학과 교수. IEEE Senior Member. 당 학회 기획이사.