

유도형 전력선통신 기반 라즈베리파이를 이용한 스마트 안전감시시스템

손 경 략*

Smart Safety Monitoring System Using Inductive Power Line Communication Based Raspberry-Pie

Kyung-rak Sohn*

요 약

본 연구에서는 통신망 구축이 어려운 작업장이나 전자파 장애구역이 많은 특수한 환경에 적합한 사물인터넷 기반 유도형 전력선통신 시스템을 제안하였다. 유도형 전력선 통신은 전용 통신선 없이 작업장에 배치된 전선을 이용하여 구현이 가능한 정점이 있으므로, 이에 적합한 유도형 신호결합 장치를 토로이달형 페라이트 코어를 이용하여 개발하였다. 제작된 유도형 신호결합장치는 전선에 설치하기 쉽도록 두 조각으로 되어 있다. 그러므로 둘 사이의 공기간극 조절은 유도형 전력선 통신에서 높은 선로 전류 변동의 잡음에 대응 할 수 있는 효과적인 방법으로 사용할 수 있음을 보였다. 안전감지 센서 시스템은 주위 환경 감지 센서, 블루투스 및 지그비 모듈 등을 장착한 라즈베리파이로 구현하였다. 위급상황이 발생하면 자동적으로 작업자 착용시스템에 경보가 전달되고, 동시에 작업 중단을 위하여 전력선에 설치된 전력차단시스템이 아두이노에 의해서 제어된다. 제안된 유도형 전력선통신 기반 스마트 안전알람시스템은 성공적으로 작동함을 보였다.

Key Words : Inductive communication, soft ferrite core, inductive coupling unit, Safety monitoring system

ABSTRACT

In this paper, we proposed an IoT-based inductive power line communication (PLC) system suitable for a special environment where a dedicated communication network is difficult to establish or where there are many electromagnetic interference. Since the inductive PLC can be realized by using any wire placed in the workplace, an induction type signal coupling device suitable for this purpose is developed using a Mg-Zn toroidal ferrite core. The inductive coupler is composed of two pieces for the convenience of installation on the wire. Furthermore, air gap control between the two is an effective way to cope with high line current fluctuations in the inductive PLC. The safety alarm sensor system was implemented with Raspberry-pie equipped with environmental sensors, Bluetooth and ZigBee module. When an emergency occurs, an alarm is automatically sent to the operator wearing system. At the same time the power interruption system installed on the power line is controlled by the Arduino in order to stop the operation. The proposed inductive PLC based smart safety alarm system has been successfully demonstrated.

* 본 연구는 한국연구재단의 중견연구지원사업 (NRF2017R1A2B4010993)으로 수행되었습니다.

• First Author: Korea Maritime and Ocean University Major of Electronics and Communications Engineering, krsohnhong@kmou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-04-099, Received April 5, 2017; Revised June 12, 2017; Accepted June 19, 2017

I. 서 론

국가인권위원회에서 발간한 2014년 산재 위험 직 종 실태조사 보고서에 의하면, 같은 사업장에서 한 번에 2명 이상이 사망하거나 또는 1년 내 연이어 발생한 중대재해사고는 주로 대기업 하도급업체 근로자인 경우가 많으며 특히 건설업과 조선업, 철강업에서 문제가 다수 발생함을 보여준다^[1]. 2003년 조선업의 재해율은 2.29이고 2012년 0.97인 반면, 제조업은 2003년 1.42이고 2012년은 0.84이다. 2000년대 중반이후 조선업의 재해율이 점진적으로 낮아지고 있긴 하지만, 제조업 수준 이하로 낮추기 위해서는 조선소 현장에서 발생할 수 있는 위험요소에 대하여 신속하게 인지하고 대처할 수 있는 다양한 모니터링 시스템들이 개발되고 적용되어야 한다. 용접으로 인한 사고의 경우 밀폐장소의 가스농도점검, 통풍·환기여부, 외부감시인 등의 방법으로 사전 예방이 가능하지만, 지속적인 점검과 외부통신망에 의한 제어 및 감시가 현실적으로 어려운 경우가 많다. 작업장 전체의 상황을 원격 모니터링할 수 있는 안전관리 시스템이 필요하며 이러한 원격 안전관리 시스템의 운영을 위해서는 통신 네트워크 구축이 필수적이다^[2]. 그러나 조선소나 해양플랜트 작업장의 경우 통신 네트워크 구축에 있어서 구조물 특성상 많은 제약이 있다^[3]. 무선통신방식은 철 구조물의 격막 때문에 다양한 센서 정보들을 게이트웨이를 거쳐 원격지인 관제소까지 보내기엔 전자파 감쇠 및 차폐로 인한 통신거리와 신뢰성 문제가 있다. 전용선 통신 방식은 별도의 유선망을 설치하는 것으로 데이터 전송 장치 모두가 전용 회선망에 연결되어 있기 때문에 설치비용과 통신망 사용료를 고려해야 한다. 또한 선박의 크기와 종류가 바뀔 때 마다 적절한 통신망 재구성이 필요하다. 한편 무배선 통신 방식은 기존의 전기선을 통신선로로 이용하는 전력선 통신이므로 설치 및 운영이 용이하다. 통신을 위한 추가적인 배선 설치가 필요 없는 방식이며 특히 유도형 결합기에 의한 비접촉 방식은 훨씬 작업이 가능하다는 장점이 있어 가장 유리하다^[4,5].

본 논문에서는 작업자의 안전 경보 또는 작업장에 대한 안전 모니터링이 필요한 곳에 적용할 수 있는 사물인터넷을 위한 유도형 전력선기반 무배선 통신 시스템을 제안한다. 유선통신망 구축이 어렵거나 전자파 장애로 인한 무선통신이 제한될 수 있는 곳에 작업장의 용접선로 등을 통신채널로 활용할 수 있는 시스템이다^[6]. 작업장의 안전상황을 모니터링할 센서시스템은 라즈베리파이를 이용하여 휴대형으로 구현하였으

며 작업자가 필요한 곳에 탈 부착할 수 있도록 하였다. 주변 시스템과의 연동을 위한 근거리 통신 수단으로 블루투스 와 지그비 모듈이 장착되어 있다. 비접촉식 전력선 통신을 위한 유도형 신호결합장치는 광대역 전력선 통신 대역폭에 적합하도록 토로이달형 페라이트 코어 자심재료를 사용하여 제작하였다. 대용량 전류에도 안정적인 통신 속도를 보장할 수 있는 방법으로 자심 간 공기간극을 이용하였다. 위험경보가 발생하였음에도 작업자가 작업을 중단하거나 현 위치를 벗어나지 않고 지속적으로 작업을 수행할 경우 관제소에서 작업장의 전원을 강제적으로 차단하는 기능도 아두이노를 이용하여 추가하였다.

II. 유도형 신호결합 장치

작업장 내 전선을 통신채널로 활용하여 전력선 통신시스템을 구현하기 위해서는 신호 결합 장치가 필요하다. 접촉식과 비접촉식의 두 가지 방법이 일반적이는데 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 토로이달형 자심재료가 통신선로를 감싸는 구조의 비접촉식 방식인 유도형을 사용하였다. 접촉방식인 용량성 결합장치는 전력선에 물리적인 접촉이 필요하므로 적용에 제한적이며 특히 대용량 전력선의 경우 연결을 위해 선로를 절단하거나 피복을 벗겨야 하는 등의 문제로 적용이 어렵다^[7].

제작할 유도형 신호결합장치의 크기는 페라이트 코어의 인덕턴스 L 과 도선에 흐르는 전류 i 에 의해 결정된다. 코어의 유효 단면적은 A_e 이며 유효길이는 l_e 로 주어지므로 코어 유효체적은 $V_e = A_e l_e$ 로 계산할 수 있다. 유도형 신호결합장치는 전력선의 물리적인 훼손 없이 체결과 해체를 간편하게 할 목적으로 Fig.

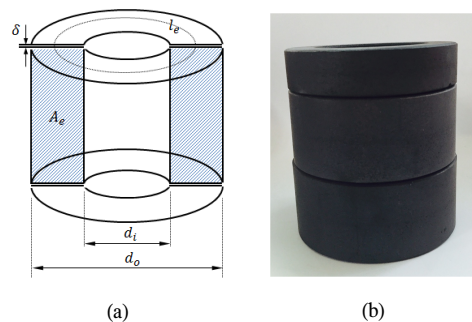


그림 1. 토로이달형 페라이트 코어. (a) 기본구조, (b) 페라이트 코어 형상
Fig. 1. Toroidal ferrite core. (a) basic schematic and (b) shape of the ferrite core

1 (a)와 같이 둘로 쪼개져 δ 만큼의 공기 간극을 가지는 구조이다. 그러므로 공기간극으로 인한 지속손실이 발생하여 유효 투자율 μ_e 는 식 (1)로 주어진다⁸⁾.

$$\mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{2\delta}{l_e}} \quad (1)$$

여기서 μ 은 재료의 투자율이다. 식 (1)로부터 유효 투자율 μ_e 가 공기간극 δ 의 함수로 나타나므로 두 페라이트 코어간의 간극을 증가시키면 유효투자율이 낮아져서 자심재료 포화전류를 높일 수 있다. 그러므로 적당한 δ 를 이용하면 대전류가 흐르거나 전류 변동이 심한 선로에서도 전력선통신을 위한 유도형 신호결합장치를 사용할 수 있는 방법으로 고려할 수 있다. 이때 페라이트 코어 내부에 저장되는 자기에너지 W 는 식 (2)와 같다.

$$W = V_e \int_0^B HdB = \frac{1}{2} V_e \frac{B^2}{\mu_e} \quad (2)$$

여기서 B 는 자속밀도이다. 만약 전류 i 가 흐르는 전력선이 코어중심을 관통하고 있다면 자기에너지는 $W = Li^2/2$ 이므로 식 (2)로부터 코어의 크기 V_e 를 결정할 수 있으며 식 (3)으로 주어진다.

$$V_e = \frac{\mu_e Li^2}{B^2} \quad (3)$$

본 연구에서는 500A 대전류 하에도 동작할 수 있는 유도형 신호결합장치를 설계하였다. Fig. 2는 최종 제작된 결합장치의 모양과 공기간극에 대한 삽입손실

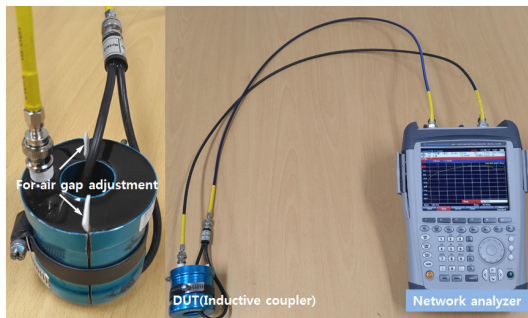


그림 2. 유도형 결합장치와 S21 측정을 위한 실험 장치도
Fig. 2. Inductive coupling unit and experimental setup for measurement of S21

을 측정하기 위한 실험 구성도를 보여준다. 유도형 결합장치는 두 개로 쪼개진 외형이 합쳐지는 구조이다. 서로 맞닿는 부분에 적절한 두께의 시편을 삽입하면 일정한 공기 간극을 유지할 수 있다. 본 연구에서는 종이를 이용하여 얇은 두께의 시편을 만들고 좌우 두 곳에 각각 삽입하여 공기 간격을 맞추었다.

제작된 신호결합장치의 주파수 응답 특성은 Fig. 3과 같이 네트워크 분석기로 측정된 삽입손실로부터 확인할 수 있다. 5가지 조건의 공기간극 (δ 는 각각 0, 50, 125, 190, 250 μm)에 대하여 S_{21} 을 측정된 결과 광대역 전력선 통신주파수 범위 (2-30 MHz) 내에서 -3 dB 이내의 손실을 가진다. 그러나 공기간극이 커질수록 2 MHz 이하 주파수영역의 손실은 커지고 있으므로, 식 (2)로부터 공기간극을 통한 누설자속이 커지고 이로 인하여 신호결합력이 감소됨을 예측할 수 있다.

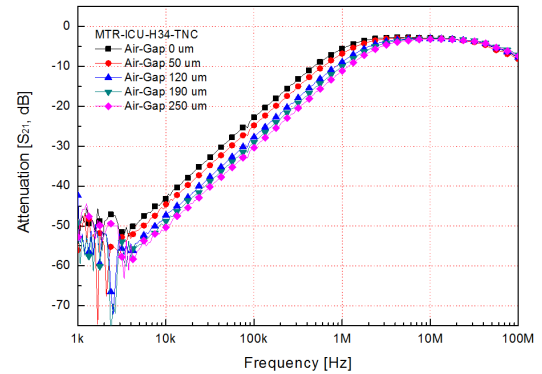


그림 3. 공기간극 변화에 대하여 측정된 삽입손실
Fig. 3. Measured insertion loss for air gap change

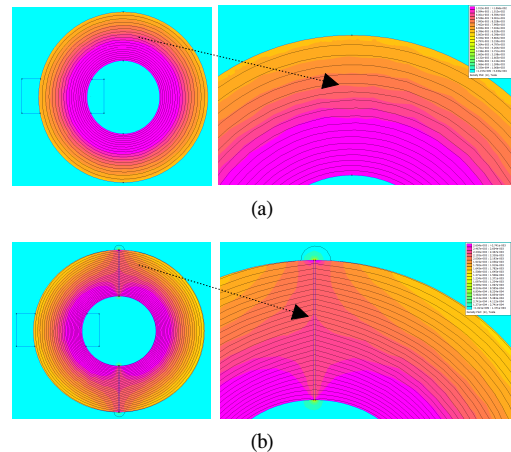


그림 4. 자속밀도분포 (a) 공기간극 $\delta=0$, (b) $\delta=250 \mu\text{m}$
Fig. 4. Distribution of magnetic flux density. (a) air gap $\delta=0$ and (b) $\delta=250 \mu\text{m}$

공기간극으로 인한 토로이달 코어의 자속밀도분포를 계산한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4 (a)는 코어가 환형으로 보존된 경우이며 자기장 에너지 누설이 발생하지 않고 코어 내부에 축적되어 있다. 그러나 Fig. 4 (b)와 같이 코어가 두 조각으로 절단되고 그 사이에 공기간극이 250 μm 있을 경우 자속은 공기간극을 통해 누설됨을 볼 수 있다.

Fig. 5는 공기간극의 정도에 따라 상대적인 자기장 에너지의 손실을 계산한 결과를 보여준다. 공기간극이 증가하면 자기장 에너지는 지수 함수적으로 감소한다. 이것은 식 (1)에서 투자율의 감소와 관련되므로 공기간극 조정은 자심재료의 포화전류를 높일 수 있는 수단이 된다. 그러나 식 (2)로부터 축적된 자기에너지의 손실이 발생하여 신호결합력이 떨어지므로 데이터 전송 속도저하와 타협해야 한다.

대 전류 조건하에서 전류변동 폭에 대한 전력선 통신 성능 시험과 유도형 신호결합장치의 최적 공기간극 조건을 설정하기 위한 실험 구성도는 Fig. 6과 같다. 500 A 이상의 대 전류를 발생할 수 있는 대전류시험기 전극과 전력선 통신을 위한 선로를 동시에 신호

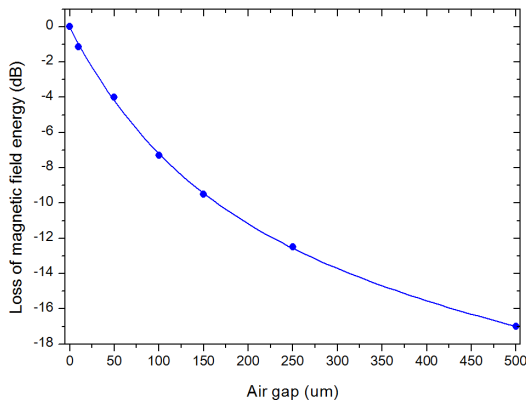


그림 5. 공기간극에 대한 페라이트 코어 내부의 자장 에너지 손실
Fig. 5. Loss of magnetic field energy in ferrite core for air gap

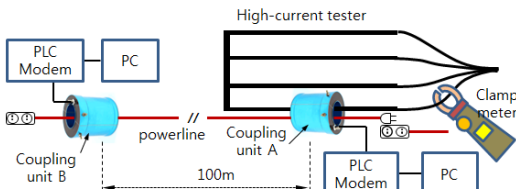


그림 6. 대전류 변동 조건하에서 데이터 속도 측정을 위한 구성도
Fig. 6. Configuration for data rate measurement under high current fluctuation

결합장치 A (Coupling unit A)로 체결하였다. 100 m 길이의 선로 반대쪽에도 동일한 결합장치 B를 체결하여 양방향 통신이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 전력선 모뎀은 200Mbps급 물리계층속도를 가지며 동작주파수는 2-34 MHz인 MM-D200 모델(Mattron Corp.)을 사용하였다. 실험은 클램프미터로 선로의 전류를 측정하면서 두 결합 장치 간 통신 속도를 측정하였다.

공기간극과 선로 전류 크기에 따른 통신 속도 측정 결과는 Fig. 7과 같다. 전류는 0-300 A 까지 가변하였고, 통신 속도는 네트워크 성능 측정을 위한 iperf를 이용하여 60초 동안 5초 간격으로 총 12회 측정한 결과의 평균값을 기록하였다. 실험실 환경에서 전류 300A 조건에서는 공기간극이 50 μm 일 경우 10 Mbps 이하의 통신 속도를 보였지만 공기간극이 250 μm 가 되면 10 Mbps이상으로 통신 속도가 개선되었다. 공기간극이 125 μm 이상에서는 선로전류가 50 A 이하에서 평균통신 속도 50 Mbps를 유지하였다. 그러나 50 A 이상의 전류조건하에서 공기간극이 50 μm 이하라면 통신 속도는 20 Mbps 이하로 떨어진다. 만약 유도형 전력선 통신에서 용접선과 같이 전류 변화가 매우 큰 전력선의 경우, 대 전류로 인한 통신장치가 발생할 경우를 대비할 필요가 있다. 이때는 최대 전류를 예상하여 사전에 적절한 두께의 시편으로 일정한 공기간극이 유지되게 하여야 한다. 아크용접기의 경우 용접 중 최대 전류가 200A 정도인데 이 경우 20 Mbps 정도의 통신 속도가 요구된다면 공기간극은 125 μm 를 기준으로 설정하는 것이 타당하다.

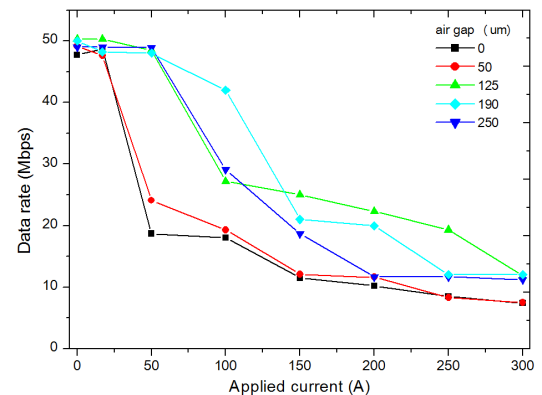
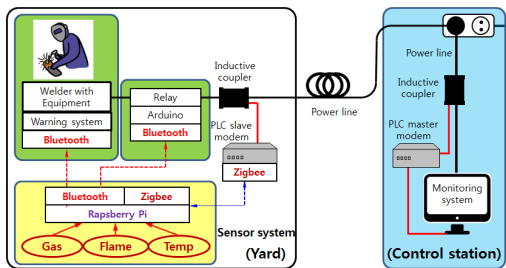


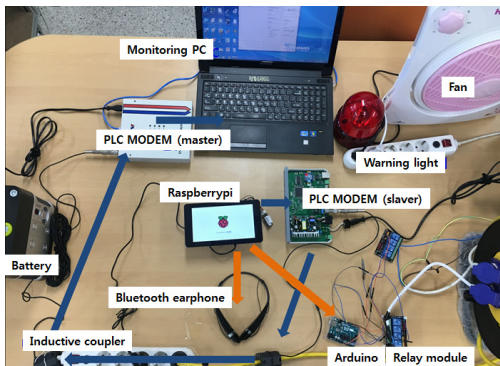
그림 7. 공기간극과 전류변화에 따른 데이터 속도
Fig. 7. Measured data rate corresponding to the air gap and the current change

III. 전력선통신 기반 스마트 안전모니터링 시스템

본 연구에서 제안한 전력선 통신 기반 스마트 안전 모니터링 시스템의 구성도는 Fig. 8 (a)와 같다. 작업장에는 작업자가 휴대할 수 있는 블루투스 통신기반의 착용형 디바이스, 작업공간에 부착할 수 있는 라즈베리파이 기반의 휴대형 센서시스템, 전력공급을 차단하는 아두이노 기반 제어시스템, 전력선 통신을 위한 모뎀과 유도형 신호결합장치 등이 설치된다. 라즈베리파이에는 가스, 불꽃, 온도 등을 측정하는 센서가 부착되며 블루투스를 통해 작업자에게 위험상황을 알리는 기능이 구현되어져 있다. 또한 라즈베리파이는 근거리 무선통신을 위한 지그비 모듈이 장착되어 있어서 전력선모뎀의 지그비와 통신하며 수집된 센서 정보는 전력선을 통해 관제소에 실시간 전송된다. 위험상황 감지 시 작업자에게 공급되는 전력을 자동차단하기 위한 릴레이가 아두이노에 장착되어 있고 블루투스를 통해 라즈베리파이의 제어를 받는다. 관제소에는 작업장의 센서 정보를 수집하고 상태를 모니터링하는 시스템이 있다. Fig. 8 (b)는 실제 제작된 시스템의 사진



(a)



(b)

그림 8. 안전모니터링 시스템. (a) 제안된 시스템의 블록도, (b)구현된 시스템의 사진
Fig. 8. Safety monitoring system. (a) Block diagram of the proposed system and (b) photograph of the implemented system

이다. 작업장의 센서 시스템과 관제소간 통신은 유도형 결합장치를 통한 전력선통신으로 수행된다.

시스템의 동작은 Fig. 9의 순서도와 같다. 라즈베리파이는 안전진단 센서들에게 정해진 시간간격에 정보를 요청하고, 수신된 데이터는 지그비를 통해 전력선 모뎀의 지그비로 전송한다. 이 후 신호 결합장치를 거쳐 전력선을 통해 관제소에 센서 데이터를 보낸다. 수집된 센서값이 위험 문턱값을 넘어가면 라즈베리파이는 블루투스 모듈을 통해 작업자 착용 시스템인 이어폰에 경고 메시지를 보낸다. 이와 동시에 작업자의 작업 공구 또는 장치에 공급되는 전류를 차단하기 위한 아두이노의 릴레이가 작동하고 자동전원차단이 이루어진다. 관제소에서는 평상시 정상적인 상태의 센서값이 표시되지만 문턱값을 초과하면 모니터링 PC에도 경고메시지가 뜨게 된다. 이 후 관제소에서는 작업자에게 적절한 메시지를 전달할 수 있게 구현되었다. 모니터링 PC에서는 작업장의 전원공급이 차단되었다는 메시지를 라즈베리파이로부터 받는다. 이 후 위험한 상황이 해소되면 관제소에서 작업장의 전원을 원상 복구시킬 수 있다.

Fig. 10은 작업장의 라즈베리파이에 장착된 센서의 응답상태를 관제소의 모니터링 PC에서 실시간으로 확인한 것이다. Fig. 10 (a)에서 실험의 수월성을 위해 문턱 온도를 22℃로 설정한 상태에서 주변온도가 문턱값을 초과하면 경고알람이 작업자에게 전달되고 전로의 전력은 차단(shutdown) 된다. 가스와 불꽃에 대한 센서 반응의 경우도 각각 Fig. 10 (b)와 (c) 같이

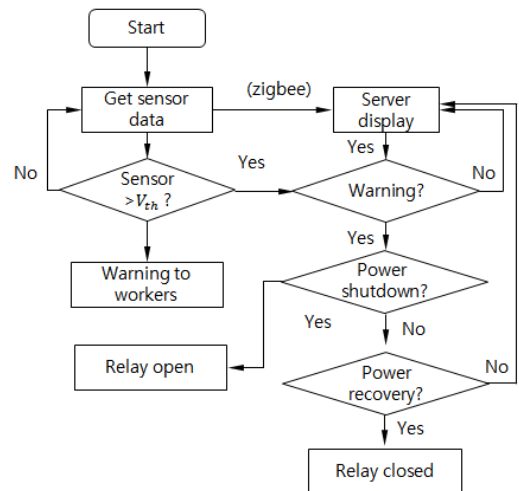


그림 9. 제안된 시스템의 동작 순서도
Fig. 9. Flow chart of the system

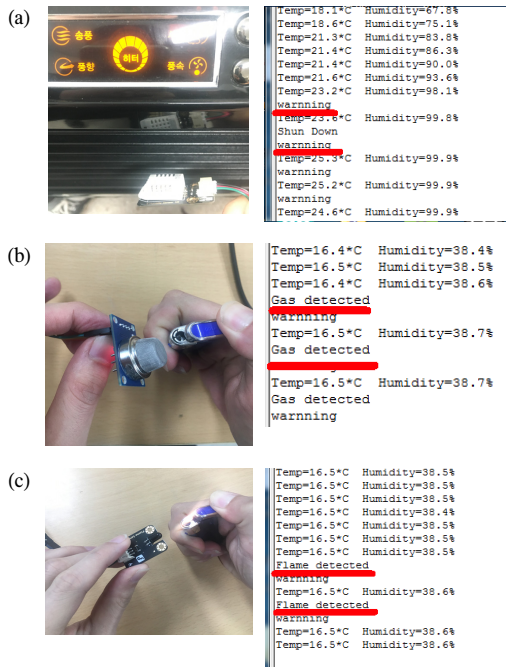


그림 10. 센서응답. (a)온도, (b)가스, (c)불꽃
Fig. 10. Sensor response. (a) temperature, (b) gas, (c) flame

동작하고 경고알람이 주어진다.

만약 관제소에서 작업장에 전력 공급을 재개하고자 할 경우 Fig. 11 (a)와 같이 restart 명령어로 가능하며 Fig. 11(b)와 같이 릴레이에 의해 전력공급을 위한 스위치가 작동한다. 반대로 전력차단은 stop 명령어로 가능하며 동작 상태는 Fig. 11 (c)와 같다. 릴레이가 장착된 아두이노는 블루투스 모듈을 통해 라즈베리파

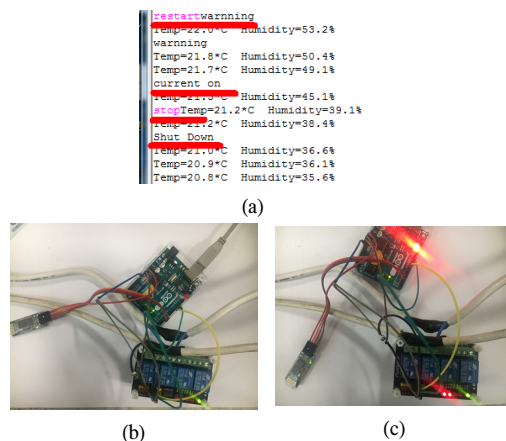


그림 11. 제안된 시스템의 동작 순서도
Fig. 11. Remotely relay control. (a) monitoring screen, (b) electric power supply and (c) shutdown

이로부터 제어명령을 수신한다.

IV. 결론

본 논문에서는 통신망 구축이 어려운 작업장이나 전자과 장애구역이 많은 특수한 환경에서 작업하는 작업자의 안전을 모니터링하고 자율적으로 위험을 경보할 수 있는 사물인터넷 기반 스마트 안전 모니터링 시스템을 라즈베리파이와 유도형 전력선통신을 이용하여 구현하였다. 작업장에 설치된 기존의 전력선을 물리적 훼손 없이 사용할 수 있는 유도형 신호결합 방식의 전력선 통신을 위하여 광대역 전력선 통신 주파수 영역에 적합한 토로이달형 페라이트 코어를 개발하여 적용하였다. 대 전류 신호 적용을 위하여 신호결합장치를 분리형으로 제작하였으며, 합체할 경우 발생하는 공기간극을 이용하여 자심포화 전류를 높일 수 있도록 하였다. 이는 300 A 선로전류 상태에서도 250 um 공기간극으로 10 Mbps 이상의 통신 속도를 선로 길이 100 m 까지 유지할 수 있게 하였다.

안전감지 센서시스템은 라즈베리파이와 블루투스 및 지그비 통신 모듈로 구현하여 위급상황이 발생하면 자동적으로 작업자가 착용하고 있는 이어폰과 같은 알람 시스템에 경보를 알리고, 작업 중단을 위한 전력차단 명령을 내리도록 하였다. 본 연구에서 제안한 시스템은 조선소의 용접기 또는 풍력발전기 등과 같이 대 전류 전력선이 있는 곳에 고정 통신망 구축 없이 전력선만 이용하여 비접촉식으로 가변적 스마트 안전모니터링 시스템을 구축하는데 기여할 것으로 기대한다.

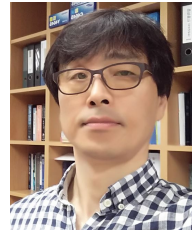
References

- [1] National Human Rights Commission, *Survey on the status of industrial accidents and dangerous occupations*, (2014), Retrieved Aug., 28, 2017, from <https://www.humanrights.go.kr>.
- [2] U. K. Lee, J. H. Kim, H. Cho, and K. Kang, "Development of a mobile safety monitoring system for construction sites," *Automation in Construction*, vol. 18, no. 3, pp. 258-264, 2009.
- [3] Y. Choi, J. Park, and B. Jang, "Design and implementation of the safety management system in shipbuilding," in *Proc. KICS Winter*

Conf., pp. 661-662, Kangwon, Korea, Jan. 2016.

- [4] K. R. Sohn, K. H. Kim, S. U. Jeong, S. Y. Nam, and H. S. Kim, "Performance analysis of the powerline communication for condition monitoring system of an MW class offshore wind turbine's nacelle," *J. Navig. Port Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 159-164, 2016.
- [5] K. H. Kim, S. U. Jeong, S. Y. Nam, and H. S. Kim, K. R. Sohn, "Performance analysis of legacy line communication using high current powerlines in midrange wind turbines," *J. Korean Soc. Marine Eng.*, vol. 40, no. 4, pp. 336-341, 2016.
- [6] J. Jung, S. Yang, K. Sohn, and H. Kim, "Safety monitoring system using power-line communication based on the internet of things," in *Proc. KICS Winter Conf.*, p. 230, Kangwon, Korea, Jan. 2017.
- [7] L. G. da S. Costa, A. C. M. de Queiroz, B. Adebisi, V. L. R. da Costa, and M. V. Ribeiro, "Coupling for power line communication: A survey," *J. Commun. and Inf. Syst.*, vol. 32, no. 1, pp. 8-21, 2017.
- [8] J. Binkofski, "Influence of the properties of magnetic materials on the size and performance of PLC couplers," *ISPLC*, pp. 281-284, Vancouver, Canada, Apr. 2005.

손 경 락 (Kyung-rak Sohn)



1992년 2월 : 경북대학교 전자공학과 학사

2002년 8월 : 경북대학교 전자공학과 박사

2003년 9월-현재 : 한국해양대학교 전자통신공학과 교수
<관심분야> 전력선통신, 가시광통신, 센서네트워크