

논문 2014-51-7-24

산업용 무선센서네트워크 설계와 음향 세척 장치의 음파 검출을 위한 응용

(Wireless Sensor Network Design for Industrial Applications and the Sound Wave Detection in Acoustic Cleaning Systems)

김 아 연*, 한 재 준*, 김 동 식**

(A Yeon Kim[Ⓞ], Jae Jun Han, and Dong Sik Kim)

요 약

화력발전소와 같은 석유화학 설비, 소각 설비 등에서는 재, 먼지 등의 이물질이 발생하며 이물질을 효과적으로 제거하기 위한 방법으로 음향 세척 장치를 이용하는 방식이 있다. 하지만 이 방법의 경우 이물질로 인하여 혼의 입구가 막혀 오작동할 가능성이 있다는 단점이 있다. 본 연구에서는 음향 세척 장치의 정상 작동을 감지하기 위한 음파 검출 무선 센서를 개발하였으며, 센서의 원리를 설명하였다. 이 음파 검출 무선 센서는 실험을 통하여 고온 혹은 저온의 다양한 산업 환경에서 안정적인 동작을 확인하였다. 또한 음파 검출 무선 센서와 424MHz 대역을 이용한 통신을 하여 데이터를 수신하는 무선 데이터 수집 장치를 개발하여 음파 검출 무선 센서의 동작 상태를 외부에서 확인할 수 있도록 하였다.

Abstract

The acoustic cleaning system is widely used to remove foreign materials in factories, such as thermal power plants and incinerators. However, the acoustic cleaning systems tend to be clogged by foreign materials. In this paper, we develop a wireless sensor network for the sound wave detection in order to monitor proper operations in the acoustic cleaning systems. We observe that the developed wireless sensor network for the wave detection shows a stable operation in various industrial environments of wide temperature ranges. We also develop a data gathering device, which displays the current status of the sound generator and several values detected from the wireless sensor.

Keywords : 무선 센서 네트워크, 무선 데이터 수집 장치, 음파 검출 무선 센서, 음향 세척 장치

I. 서 론

화력발전소와 같은 전력 설비, 석유화학 설비, 시멘트

설비, 소각 설비 등에서는 방대한 양의 먼지, 재, 파우더 등(이하 이물질)이 발생하며 설비의 안정된 작동을 위하여 이러한 이물질을 제거해야 한다. 효율적인 제거를 위하여 여러 가지 방법을 사용한다. 첫 번째 방법으로는 인력을 투입하여 직접 설비를 청소하는 고전적인 방법이 있다. 이 방법은 이물질을 제거하는 동안에 설비를 멈추어야 하고, 인력이 직접 설비 안으로 들어감에 따라 위험성이 커지는 단점이 있다. 두 번째 방법으로는 공기대포(air cannon)를 이용하는 방법으로, 고압의 공기를 이물질이 쌓여 있는 곳에 발사함으로써 이물질

* 학생회원, ** 평생회원, 한국외국어대학교 전자정보공학과

(Hankuk University of Foreign Studies)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail: aykim1208@hufs.ac.kr)

※ 이 논문은 2014학년도 산업통상자원부의 지원을 받아 수행된 연구임(10041740)

접수일자: 2014년01월10일, 수정일자: 2014년05월26일

수정완료: 2014년06월26일

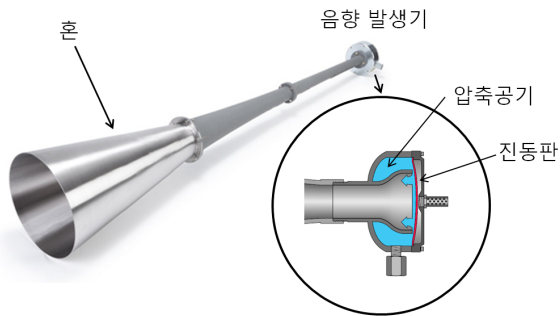


그림 1. 음향 세척 장치^[4] (ESP-75, GE 사, 75Hz, 147dB, 80 SCFM @ 90 PSI)
 Fig. 1. Acoustic cleaner^[3] (ESP-75, GE Co., 75Hz, 147dB, 80 SCFM @ 90 PS).

을 제거 하게 되는데, 첫 번째 방법에 비하여 시간과 비용이 적게 들지만 하나의 공기대포의 이물질을 제거하는 범위가 좁아서 여러 개의 공기대포를 사용해야 하는 단점이 있다^[1]. 세 번째 방법으로는 음향 세척 장치(acoustic cleaner)를 이용 하는 방법으로^[2], 이를 그림 1에 나타내었다. 음향 세척 장치는 음향 발생기와 혼으로 구성되어있는데, 음향 발생기 안으로 고압의 공기를 넣으면 이 공기가 진동판을 진동 시키면서 60 - 420Hz의 주파수에 140dB 이상의 음압을 가지는 음파를 만들어내 이물질을 제거하는 방법이다. 이 방법은 시설이 작동하는 동안에도 시설을 멈추지 않고 이물질 제거 작업이 가능한데, 예를 들면 10분의 주기로 약 10초 동안 음향 세척 장치를 작동시켜서 이물질을 제거할 수 있다. 또한 제거하는 범위가 넓어 여러 대의 공기대포를 대신 할 수 있는 장점이 있기 때문에 앞서 언급한 각종 설비에서 주로 사용하는 방법이다.

그러나 음향 세척 방법은 설비에서 발생하는 이물질에 의하여 음향 세척 장치의 혼이 막혀 오작동 하는 경우가 있다. 음향 세척 장치의 오작동을 탐지하기 위해서 기존에는 관리자가 음향 세척장치 설비를 뜯어 확인 하는 방법이 사용 되었다. 이 방법은 효율이 떨어져 장치의 작동을 감시하기위한 음파 검출 장치 개발의 필요성이 있다. 음파 검출 센서 설치 시 구멍을 뚫지 않고 설치하는 경우 음파의 세기를 검출할 때 오류가 발생할 수 있으므로 기존의 음파 검출 센서는 구멍을 뚫어 센서를 내부에 집어넣는 방식을 사용한다. 하지만 이 방식은 설치가 불편하고 유지보수가 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는, 이러한 개선하여 음향 세척 장치에 구멍을 뚫지 않고 음향 세척 장치의 외부에 설치하는

음파 검출 무선 센서를 제안한다. 음파 검출 무선 센서를 외부에 설치하여 검출하는 경우 외부의 소음으로 인하여 간섭이 일어날 수 있고, 직접적인 음파 검출이 어려워 검출의 정확성에 영향을 줄 수 있다^[3]. 본 논문에서 제안한 장치는 검출 정확도를 높이기 위하여 음향 세척 장치에 구멍을 뚫지 않고 센서를 설치한 환경에서 신호의 세기를 측정하여 기록하고, 이를 근거로 적응적인 검출을 시도하였다. 음파 검출 시 무선 센서는 온도의 범위가 다양한 산업 환경에서 안정된 작동을 보장해야하므로, 온도 안정성에 관련한 실험을 진행하고 결과를 정리하였다. 또한 혼의 이상 동작 여부를 확인하고, 설치 환경에 따른 적합한 문턱 값을 설정할 수 있도록 하기 위해 무선 데이터 수집 장치를 제안하였다. 무선 데이터 수집 장치는 관리자가 이동을 하며 음파 검출 센서에서 보내오는 값을 읽고 문턱 값을 설정하기 위해 무선 통신을 이용한다. 음파 검출 무선 센서와 무선 데이터 수집 장치 간 통신은 424MHz 대역을 이용한 무선 센서 네트워크로 이루어지며, 한 개의 무선 데이터 수집 장치는 여러 개의 음파 검출 무선 센서와 통신하고 스타 네트워크를 구성하여 통신한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 본 논문에서 제안한 음파 검출을 위한 무선 센서와 데이터 수집 장치를 소개하고, 이를 이용한 센서 네트워크 구조를 소개하였다. 제 III장에서는 실제 환경에서 무선 센서의 작동 실험 및 온도에 대한 장치의 안정성을 알아보기 위한 실험을 진행하고 그 결과를 정리하였다.

II. 음파 검출을 위한 시스템 소개

1. 음파 검출 시스템

음파 검출 시스템은 음파 검출 무선 센서, 전원 공급 장치, 출력 장치, 그리고 무선 센서의 동작 상태를 분석할 수 있는 무선 데이터 수집 장치로 구성되어 있다. 음파 검출 무선 센서는 음향 세척 장치의 작동 유무를 검사하여 세척 장치 작동 탐지 신호를 내보내고, 동시에 무선으로 음향 세척 장치에서 나오는 음파의 세기를 무선 데이터 수집 장치로 전달할 수 있다. 전원 공급 장치는 AC 전원을 입력받아 음파 검출 무선 센서에게 전원을 공급하고 음파 검출 무선 센서에서 받은 세척 장치 작동 탐지 신호를 출력 장치로 전달한다. 출력 장치는 전원 공급 장치에게 전달 받은 세척 장치 작동 탐지 신

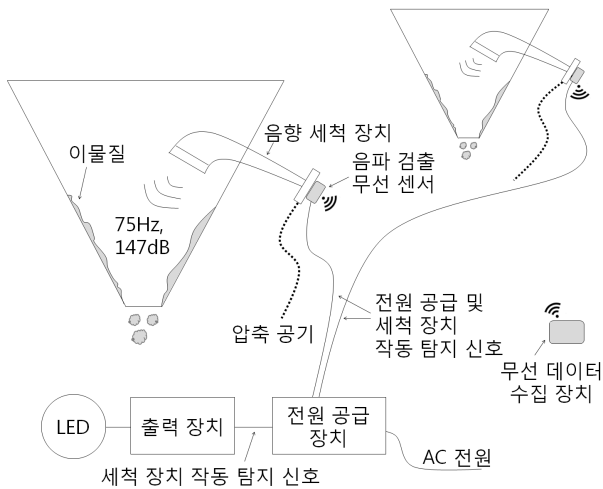


그림 2. 음향 세척 장치와 음파 검출 시스템의 구성
Fig. 2. Structure of a acoustic cleaner and the sound wave detection systems.

호를 LED를 통해 표시한다. 음파 검출 시스템의 구성을 그림 2에 나타내었다.

2. 음파 검출을 위한 무선 센서

음향 세척 장치의 작동을 확인하기 위한 음파 검출 무선 센서의 구성은 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 설계된 무선 센서는 TI(Texas Instruments)사의 MCU(MSP430G2553)와, Analog Device 사의 마이크(ADMP401)와 연산증폭기(AD8542), 릴레이, 그리고 424MHz 주파수 대역 무선 통신을 위하여 RFIC칩으로 TI 사의 CC1120이 내장된 협대역 무선 송수신 모듈 등으로 구성 되어있다.

음향 세척 장치의 작동여부를 확인하기 위한 그림 3의 음파 검출 무선 센서의 작동을 설명하면 다음과 같

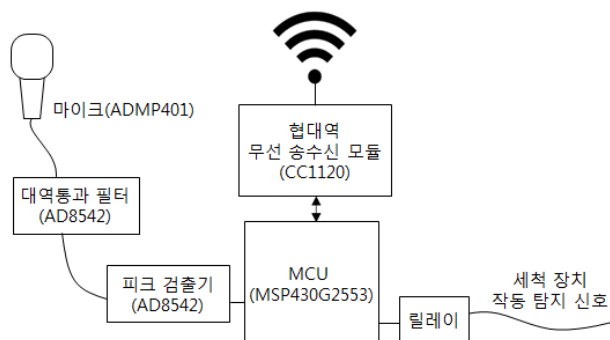


그림 3. 음파 검출 무선 센서의 구성
Fig. 3. Structure of the wireless sensor for the sound wave detection.

다. 먼저 음향 세척 장치에서 발생하는 음파를 마이크가 전기적 신호로 전환하고 대역통과필터는 음향 세척 장치(GE, ESP-75)의 중심주파수인 75Hz의 주파수를 가지는 신호만을 통과시킨다. 마이크로 들어온 신호가 대역통과필터를 통과하면 잡음인 75Hz 이외의 주파수를 걸러주는데, 이는 잡음에 의한 오작동을 방지 할 수 있을 뿐만 아니라 혼의 이상 작동 등의 고장으로 인한 임의의 주파수를 발생시키는 경우도 검출해 낼 수 있다. 대역통과필터를 거친 정현파 형태를 띠는 신호의 최대 진폭을 검출하기 위해 피크 검출기를 적용한다. 피크 검출기를 통과한 신호는 MCU의 A/D컨버터로 0~1.65V 내에서 최대 진폭을 읽어 음향 세척 장치에서 나오는 음파의 세기를 측정할 수 있다. 음향 세척 장치의 작동 여부를 판단하기 위하여 MCU가 A/D컨버터로 읽은 값과 비교할 문턱 값이 필요하다. 입력 받은 값이 문턱 값 보다 높으면 음향 세척 장치는 정상적으로 작동한다고 할 수 있고, 반대로 입력 받은 값이 문턱 값 보다 낮으면 음향 세척 장치는 오작동 했거나 작동하지 않는다고 할 수 있다. MCU는 음향 세척 장치의 작동 유무를 판단하여 세척 장치 작동 탐지 신호를 릴레이를 이용하여 내보낸다. 정상으로 작동했을 경우에는 릴레이를 켜고, 그렇지 않은 경우에는 릴레이를 꺼서 관리자에게 이상 작동 여부를 알린다.

음파 검출 무선 센서는 측정 데이터의 고신뢰성뿐만 아니라 높은 내구성이 요구된다. 주변으로 부터의 충격과 먼지, 습기로 부터 음파 검출 무선 센서를 보호하기 위하여 IP67 등급의 인클로저를 사용한다. IP67 등급은 방진과 방수에 대한 등급으로서, 분진이 내부에 침입하지 못하고 수심 1미터에서 30분간 잠겨도 물이 침입하지 않는 등급을 말한다. 음파 검출 무선 센서의 모습을 그림 4에 나타내었다.



그림 4. 개발한 음파 검출 무선 센서의 모습
Fig. 4. Developed wireless sensor for the sound wave detection.

3. 무선 데이터 수집 장치

음향 세척 장치는 설치 환경에 따라 장치에서 발생하는 음파의 진폭이 차이가 나거나 주변 환경의 소음으로 인해 설치 환경을 고려하여야 한다. 음향 세척 장치를 설치하는 환경마다 음파 검출 무선 센서가 읽는 값이 차이가 나는데 이를 변경하기 위하여 무선 데이터 수집 장치를 이용한다. 무선 데이터 수집 장치는 무선 송수신 모듈을 이용하여 음파 검출 무선 센서가 읽은 값을 전달 받게 된다. 관리자가 이동을 하며 음파 검출 센서에서 보내오는 값을 읽기 위해 무선 통신을 이용한다. 그림 5는 무선 데이터 수집 장치의 구조를 나타내었으며, MCU는 TI 사의 MCU(MSP430F1611), TI 사의 CC1120이 내장된 협대역 무선 송수신 모듈, 디스플레이, 전원부로 구성되어 있다. 전원부는 사용 환경에 따라 usb 전원, 5V 어댑터 전원, 건전지를 선택하여 사용하는 것이 가능하다.

무선 데이터 수집 장치는 음파 검출 무선 센서가 넘겨준 75Hz 중심주파수를 가지는 음파의 진폭 값을 전압 값으로 변환하여 모니터로 출력함으로써 설치 환경에 따른 진폭을 알려주고 그에 따른 적절한 문턱 값을 설정 할 수 있게 한다. 음향 발생기가 147dB의 음파를 만들어내었을 때 무선 데이터 수집 장치에서 검출되는 값은 0.78V를 나타내며, 이때 오차 범위 10%를 고려하여 0.70V를 문턱 값으로 설정하였다. 문턱 값을 펌웨어를 통하여 수정 가능하다. 또한 이 수치를 확인하여 혼의 이상 유무를 검출해낼 수 있다. 무선 송수신 모듈을

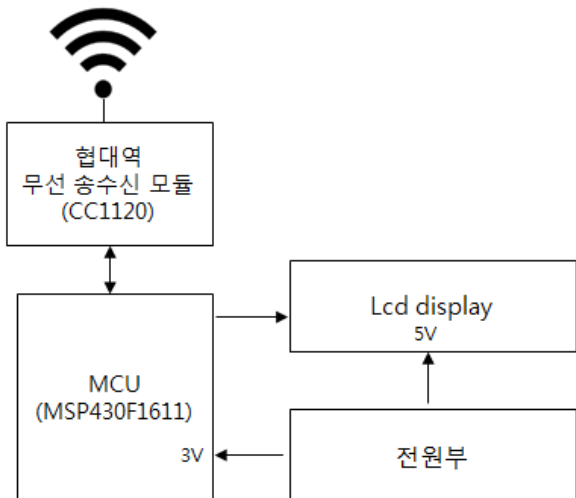


그림 5. 무선 데이터 수집 장치 구성
Fig. 5. Structure of the wireless data gathering device.



그림 6. 무선 데이터 수집 장치의 모습
Fig. 6. Wireless data gathering device.

사용할 경우 값을 설정할 때 마다 인클로저를 열어보지 않고 설치된 상태에서 작동 상태를 모니터링을 할 수 있으며 설치된 환경과 동일한 상태이기 때문에 측정된 데이터의 고신뢰성을 확보할 수 있다. 개발한 무선 데이터 수집 장치의 모습을 그림 6에 나타내었다. 다수의 스위치를 넣어 다양한 모드의 조작이 가능하도록 프로그래밍 하는 것이 가능하다.

4. 센서 네트워크 구조

음파 검출 무선 센서와 무선 데이터 수집 장치는 424MHz 대역을 이용하여 통신하며, 무선통신을 하기

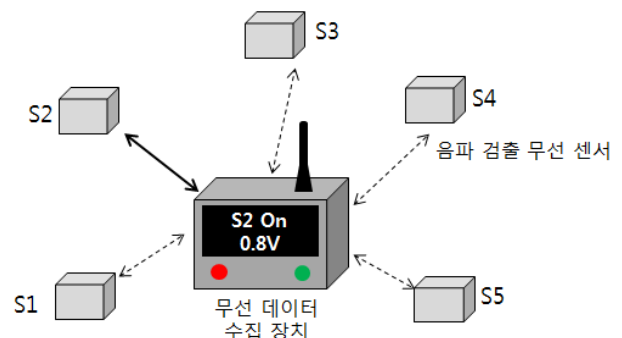


그림 7. 음파 검출 무선 센서와 무선 데이터 수집 장치 간 스타네트워크 구조
Fig. 7. Structure of the star network between the wireless sensors for the sound wave detection and the wireless data gathering device.

위하여 TI 사의 RFIC칩인 CC1120이 내장된 협대역 무선 송수신 모듈을 사용하였다. 한 개의 무선 데이터 수집 장치는 다수의 음파 검출 무선 센서와 스타 네트워크를 구성한다. 424MHz 무선 통신을 이용하여 음파 검출 무선 센서는 무선 데이터 수집 장치에 검출한 값을 전송할 수 있으며, 무선 데이터 수집 장치는 음파 검출 무선 센서의 문턱 값을 설정하는 것이 가능하다. 음파 검출 무선 센서와 무선 데이터 수집 장치를 이용한 스타네트워크의 구조를 그림 7에 나타내었다.

III. 음파 검출 시스템 구현 및 온도 안정성 테스트

1. 음파 검출을 위한 시스템 구현

개발한 무선 센서의 작동 여부를 확인하기 위한 실험을 진행하였으며, 실험은 경기도 안산시 단원구 첨단로에 위치한 안산도시개발(주)에서 진행하였다. 실험에서는 총 세 개(장치 A, B, C)의 음향 세척 장치를 이용하였으며, 음향 세척 장치 외부에 제한한 무선 센서를 부착하였고, 설치 환경을 그림 8(a)와 (b)에 나타내었다.

실험 방법은 세 개의 음향 세척 장치 A, B, C를 시간을 두고 각자 작동시키고, 작동시킨 음향 세척 장치에 부착된 무선 센서가 무선 데이터 수집 장치에 데이터를

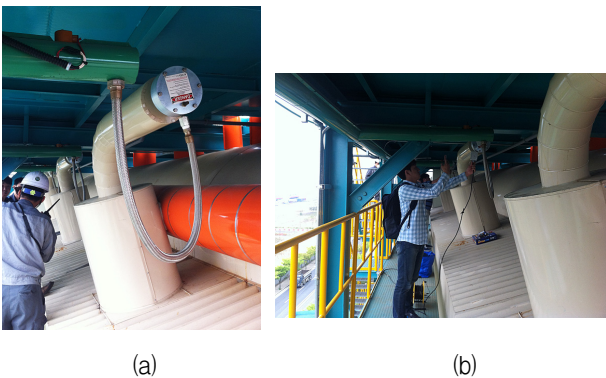


그림 8. 소각 시설에 설치되어있는 음향 세척 장치와 개발한 음파 검출 무선 센서 실험 (a) 소각 장치의 상부에 설치되어 있는 세 개의 음파 세척 장치(GE) (b) 무선 센서 실험 장면

Fig. 8. Experiment of the developed wireless sensor for the sound wave detection with acoustic cleaners in incineration facility (a) Three acoustic cleaners (GE) installed at the top of incineration facility (b) Experiment of the wireless sensors for the sound wave detection

표 1. 세 종류의 음향 세척 장치에 따른 무선 데이터 수집 장치에서 읽은 전압 값

Table 1. Voltages detected from the wireless data gathering device according to the three acoustic cleaners.

	음향 세척 장치		
	장치 A	장치 B	장치 C
정 지	0.00V	0.00V	0.00V
작동 중	0.82V	0.75V	0.16V
장치 상태	정상 출력	정상 출력	이상 작동

전송한다. 수집 장치의 모니터에 검출한 전압 값을 출력하며, 이를 표 1에 정리하였다. 0.70V을 문턱 값으로 설정하여 이 값 이상 검출되었을 때를 정상 작동하는 것으로 정의하였다. 장치 A와 B는 문턱 값 0.70V보다 높은 전압을 나타내어 정상적으로 작동하였다고 할 수 있다. 장치 C는 실험 시 장치 A, B보다 높은 주파수의 소리를 내었으며, 혼이 오작동하여 대통과 주파수가 틀어진 것으로 보인다. 장치 A보다 장치 B가 들리는 음파의 세기가 작았는데 이런 이유 때문에 장치 B에서 측정된 전압이 장치 A에서 측정된 전압보다는 약간 낮았다.

2. 온도에 따른 무선 센서의 온도 안정성 테스트

음파 검출 무선 센서와 같은 산업기기는 고온, 저온의 환경에서도 안정된 동작을 보여야한다. 75Hz의 주파수만을 가지는 신호를 통과시키기 위하여 대역통과필터를 이용하였으며, 대역통과필터 회로를 이루는 저항과 커패시터에 따라 대역폭과 중심주파수가 결정된다. 이때 커패시터는 상황에 맞게 적절히 선택하여 사용해야 한다. 칩세라믹 커패시터는 실장하기 쉽고, 고주파 특성이 좋다는 장점이 있으나 온도의 영향을 받기 쉽다. 이는 온도가 변화함에 따라 중심주파수가 75Hz가 아닌 다른 주파수로 이동하여 75Hz의 신호를 검출하는데 어려움을 줄 수 있다. 따라서 온도에 따라 일정한 성능을 보이기 위한 방법으로 대역통과필터 회로에 상대적으로 온도 특성이 좋은 마일러 커패시터를 적용하여 회로를 구성하였다. 온도 변화에 따른 안정적인 작동을 실험하기 위해 온도에 안정적인 마일러 커패시터를 적용한 회로와 일반적으로 많이 사용하는 칩세라믹 커패시터를 적용한 회로를 비교하였다. 실험 시 온도 챔버의 내장 온도 센서의 오차를 고려하여, 기준이 되는 온도를 설

정하기 위하여 한국계측기기 연구센터에서 표준 검교정 완료한 수은 온도계를 사용하였다. 본 실험에서는 정밀한 기준 온도 설정을 위해 $-50\sim 0^{\circ}\text{C}$, $0\sim 50^{\circ}\text{C}$, $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 구간의 세 종류의 수은 온도계를 선정하였다. 기준 온도계의 검교정 결과 $-50\sim 0^{\circ}\text{C}$ 구간 온도계의 보정 값은 -0.2°C , $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 구간 온도계의 보정 값은 0°C , $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 구간 온도계의 보정 값은 -0.2°C 을 얻었으며, 측정 결과에 이 검교정 보정 값을 더하여 정밀 기준 온도를 얻었다. 실험 방법은 음파 검출 무선 센서의 입력단인 마이크 회로를 단락시키고 신호 입력단에 함수 발생기를 연결하여 주파수가 75Hz, 진폭이 50mVpp의 신호를 입력시킨다. 온도 챔버에 음파 검출 무선 센서를 넣고 챔버의 온도를 특정 구간 내에서 10도씩 증가시켜 챔버 내의 온도가 충분한 시간을 가지고 수렴하였을 때, 음파 검출 무선 센서에서 전달받은 음파 검출 데이터를 기록하였다. 칩세라믹 커패시터를 적용한 회로는 -10도에서 70도까지, 마일러 커패시터를 적용한 회로는 -40도에서 80도 범위 내에서 실험을 진행하였다. 이 실험 결과를 그림 9에 나타내었다.

실험 결과 세라믹 커패시터를 적용한 회로는 -10도에서 70도 측정 전체 구간에서 낮은 출력을 보였으며, 전압의 변동 폭이 컸다. 반면 마일러 커패시터를 적용한 회로는 -40도에서 80도까지 전체 측정 구간에서 비교적 일정한 값인 약 0.9V의 정상 출력을 보였다. 이는 산업용 온도 범위 내에서 안정적인 동작을 만족한다.

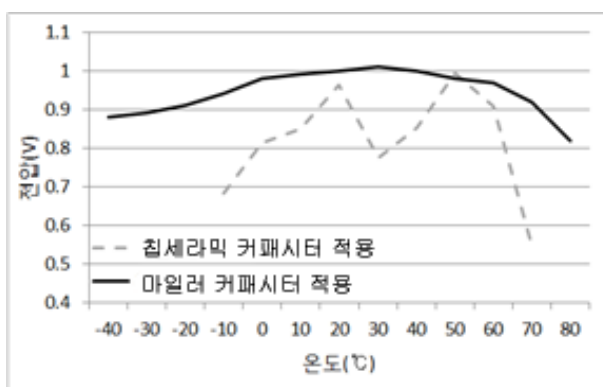


그림 9. 기존 회로와 온도 보상 회로 적용 시 온도에 따른 음파 검출치의 비교

Fig. 9. Comparison of the detected sound wave value between circuits using chip ceramic capacitor and mylar capacitor depending on the temperature.

IV. 결 론

화력발전소의 설비나 소각 설비에서 음향 세척 장치를 사용하여 효율적으로 이물질을 제거할 수 있다. 이러한 음향 세척 장치의 작동 상태를 감시하기 위해서는 음파 검출 센서가 필요한데, 본 연구에서 개발한 음파 검출 무선 센서는, 센서의 내부 작동 신호 등을 무선을 통하여 외부에서 손쉽게 확인해 볼 수 있어서 보다 효율적으로 음파 검출을 가능하게 한다. 또한 음파 검출 무선 센서는 화력발전소 등의 고온 또는 저온의 다양한 산업 환경에서 안정적으로 동작하도록 설계되어야 한다. 이에 온도의 변화에 안정적인 소자를 이용하여 회로를 구성한 결과, 기존 회로와 비교하여 -40도에서 80도의 전 구간에서 정상 출력을 보였다. 향후 화력발전소 등의 소각 장비가 있는 산업 환경에 본 연구에서 개발한 음파 검출 무선 센서의 설치로 설비에 직접적인 인력 투입 없이 안전하게 설비 내 이물질의 효율적 제거 및 응용을 기대한다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다[10041740, 빌딩내 기기들을 웹을 통해 연동하여 사용자 맞춤형 실시간 최적제어 모니터링 서비스를 제공하는 소프트웨어 개발].

REFERENCES

- [1] Primasonics International Ltd.
http://www.primasonics.com/acoustic_cleaners_cement_applications.htm
- [2] B. K. Schimmoller, "Tuning in to acoustic cleaning", *Power Engineering*, vol. 103, no. 7, pp. 18-23, 1999.
- [3] J. Han, T. Yu and A. Kim, "Development of wireless sensor for the wave detection of acoustic cleaning systems", IEEK summer Conf., pp. 1568-1571, Jeju, Korea, July 2013.
- [4] General Electric Company,
http://www.ge-energy.com/products_and_services

— 저 자 소 개 —



김 아 연(학생회원)
2013년 한국외국어대학교
전자공학과 학사 졸업.
2013년~한국외국어대학교
전자정보공학과 석사과정.

<주관심분야 : 무선 센서 네트워크, 신호처리>



한 재 준(학생회원)
2014년 한국외국어대학교 디지털
정보공학과 학사 졸업.
2014년~한국외국어대학교
전자정보공학과 석사과정.

<주관심분야 : 무선 센서 네트워크>



김 동 식(평생회원)
1986년 서울대학교 제어계측
공학과 학사 졸업.
1988년 서울대학교 제어계측
공학과 석사 졸업.
1994년 서울대학교 제어계측
공학과 박사 졸업.

1998년~1999년 미국 인디애나 Purdue 대학교
ECE 조교수.

2000년~현재 한국외국어대학교 전자공학과 교수
<주관심분야: 신호처리, 바이오메디컬 영상처리,
스마트 그리드, 무선센서네트워크>