

## 배전설비 결함 검출을 위한 초음파 음원 위치추정 및 시각화 기법

# Ultrasonic Source Localization and Visualization Technique for Fault Detection of a Power Distribution Equipment

박진하, 정하형, 유준\*

(Jin Ha Park<sup>1</sup>, Ha Hyoung Jung<sup>1</sup>, and Joon Lyou<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

**Abstract:** This paper describes the implementation of localization and visualization scheme to find out an ultrasonic source caused by defects of a power distribution line equipment. To increase the fault detection performance, 2×4 sensor array is configured with MEMS ultrasonic sensors, and from the sensor signals acquired, the azimuth and elevation angles of the ultrasonic source is estimated based on the delay-sum beam forming method. Also, to visualize the estimated location, it is marked on the background image. Experimental results show applicability of the present technique.

**Keywords:** ultrasonic array, sound source localization, delay-sum beamforming, fault detection, distribution line equipment

### I. 서론

20세기 중반이후 국내 전력산업은 국가 경제발전과 맞물려 전기에너지의 사용량이 크게 증가하였으며 이는 전력설비의 대용량화를 가져왔다. 현재 우리나라는 세계 최고수준의 전력 서비스 품질을 유지하고 있으나 사용자는 전력공급의 무정전과 신뢰성 높은 전력공급을 지속적으로 요구하고 있다.

다양한 전력설비 중에서 배전설비는 가장 광범위하게 건설되어 있다. 특히, 배전설비는 대부분 사용자와 밀접한 주택단지, 빌딩, 도로 등에 가설되어 고장 시 사용자의 큰 불편을 야기할 수 있기 때문에 안정적인 전력을 공급하기 위해 신뢰성이 크게 요구된다. 이를 위해 배전 설비의 장기적인 전력 품질 유지를 위해 많은 시간과 인력, 비용이 투입되고 있지만 아직까지도 작업자의 육안 점검으로 인해 사고의 위험성 뿐 만 아니라 비용 및 시간의 비효율성 등 많은 문제점을 가지고 있다.

이를 해결하기 위해 접촉 방식인 분담전압, 전압강도 및 누설전류 측정 등의 방법이 사용되었으나 작업의 불편, 기능의 한계와 오진단 가능성으로 인해 널리 사용되지 못하였다. 하지만 최근 열화상, 초음파, 자외선 검출과 같이 배전설비에 대한 육안 점검 및 접촉식 진단 방법을 대체할 수 있는 다양한 비접촉식 진단 방법과 장비가 개발되고 있

으며 설비관리 기술은 점차 첨단화되어 단순 육안점검 및 보수 개념에 의한 시간기준 정비에서 벗어나 진단 장비를 이용한 상태판정 정비로 변화하고 있다. 따라서 설비의 고장이전 상태판정을 통해 이상 징후를 검출하여 불시 정전에 의한 손실을 최소화 할 수 있으며 투입되는 시간과 비용을 절감함으로써 경제적인 설비 점검 및 관리가 가능하

다[1]. 다양한 비접촉식 진단 방법 중 기존 초음파 분석 방법은 현수애자, 라인포스트 애자와 같은 절연물의 미세균열 및 표면오손, 또는 전선의 바인드 침식과 같은 결함 발생 시 부분방전에 의해 발생하는 초음파를 검출하여 가청 음역대로 변형시켜 작업자가 직접 음을 청취함으로써 고장 여부를 판단하는 방법으로써 비교적 원거리에서 신속한 진단이 가능한 장점이 있지만 작업자의 숙련도에 따라 결함 검출 정확도와 정밀도가 좌우될 뿐 만 아니라 장비의 한계로 인해 정확한 결함 위치 추정이 불가능하여 육안 점검이 병행되어야 하는 문제점이 있다.

이에 본 논문에서는 언급한 초음파 분석 방법의 문제점을 해결하기 위하여 초음파 음원의 위치 추정과 시각화에 관한 연구를 수행한다. 즉, MEMS 형태의 초음파 센서를 이용하여 2×4 배열을 구성하고 각 센서의 신호를 데이터 획득 장비를 통해 동시에 수집한다. 그리고 음원의 위치를 파악하기 위하여 지연-합 빔형성(Delay-sum beamforming) 방법[2,3]을 적용함으로써 행 방향 신호들로부터 음원의 수평각(Azimuth angle)을, 열 방향 신호들로부터 수직각(Elevation angle)을 추정한다. 또한, CCD 카메라를 장착하고 수집한 영상의 좌표계와 초음파 배열의 좌표계를 일치시킴으로써 음원의 발생 위치를 육안으로 확인할 수 있도록 시각화 한다. 최종적으로 실험장치 구성 및 수행 결과를 통하여 본 방식의 타당성을 보인다.

\* Corresponding Author

Manuscript received November 15, 2014 / revised January 15, 2015 / accepted February 25, 2015

박진하, 정하형, 유준: 충남대학교 전자공학과

(quodlibet@cnu.ac.kr/junghh7@cnu.ac.kr/jlyou@cnu.ac.kr)

※ 본 논문은 2014년도 충남대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌고, 이의 초안이 ICROS 대전충청지부 학술대회에서 발표되었음.

## II. 초음파 음원 위치추정

지연-합 빔형성 방법은 그림 1과 2에서 보듯이 배열된 각 센서로부터 획득한 신호의 위상 차이를 검출하여 센서 배열의 전방에 존재하는 미지의 음원 발생 위치를 추정하는 방법으로써 수직방향에서 입사되는 음원은 위상 차이가 발생하지 않지만 비스듬히 입사되는 신호는 입사각에 따라 차이가 비례하는 원리를 이용한다.

이때 입사되는 음파 신호의 수신 모델은 음원과 센서 사이의 거리, 음원의 파장에 의해 평면파 모델과 구면파 모델로 구분되며 음원의 파장을  $\lambda$ , 센서 배열의 크기를  $D$ , 음원과 센서 사이의 거리를  $r_s$ 라고 할 때 식 (1)과 같다.

$$|\vec{r}_s| > \frac{2D^2}{\lambda} : \text{for plane wave model} \quad (1)$$

$$|\vec{r}_s| < \frac{2D^2}{\lambda} : \text{for spherical wave model}$$

위 식에 따라 센서 배열의 크기가 작을수록, 파장에 비하여 음원과 센서 사이의 거리가 멀리 떨어져 있을수록 음파를 평면파 모델로 간주할 수 있다[4].

본 논문에서 수집되는 음원은 40kHz 대역의 초음파이며 약 5~10m의 거리에서 발생되므로 평면파 모델을 이용하여 위치 추정을 수행한다. 한편, 배열의 인접한 두 센서 신호의 관계는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$x_n(t) = x_{n-1}(t + \tau) \quad (2)$$

즉,  $n$ 번째 센서에 입사되는 신호( $x_n(t)$ )는 인접한 센서 신호( $x_{n-1}(t + \tau)$ )에  $\tau$ 만큼 위상 차이가 발생하여 입사되며 이때  $\tau$ 는 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

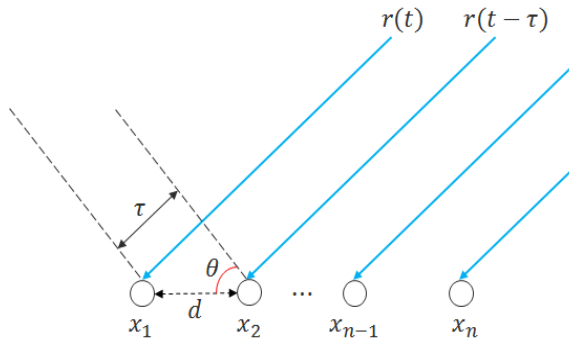


그림 1. 각 센서 신호 및 입사각 정의.

Fig. 1. Definition of each sensor and angle of incidence.

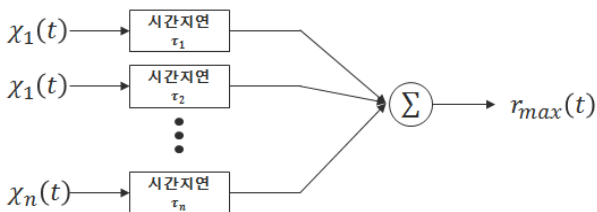


그림 2. 지연-합 빔형성 방법.

Fig. 2. Delay-sum beamforming scheme.

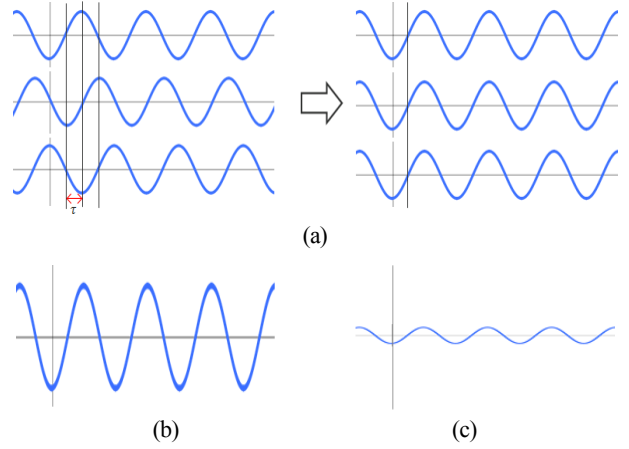


그림 3. 위상 차이에 따른 신호의 합.

Fig. 3. Sum of the signal according to the phase difference.

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (3)$$

여기서  $\theta$ 는 음원의 입사각,  $d$ 는 각 마이크로폰 사이의 거리  $c$ 는 초음파 음원의 전파속도(340m/s)를 나타낸다.

또한, 각 신호의 지연-합 신호  $r(t)$ 는 아래 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{n-1}(t + \tau) \quad (4)$$

그리고 위상 차이는 결과적으로 식 (5)와 같이 지연-합 신호가 최대값일 때의 값으로 추정한다.

$$r(t) \approx r_{\max}(t) \quad \text{if} \quad \tau \approx \tau_{\text{true}} \quad (5)$$

그림 3(a)는 지연-합 계산 과정에서 각 신호에 대해 위상 차이  $\tau$  만큼 신호가 이동되는 과정을 의미하며, 그림 3(b)는 추정된 위상 차이가 참에 근접할수록 지연-합이 최대값에 근접함을, 그림 3(c)는 반대의 경우를 나타낸다.

## III. 초음파 음원 시각화

초음파 센서 배열로부터 추정된 음원의 위치를 육안으로 확인할 수 있도록 CCD 카메라를 장착하고 이로부터 획득한 컬러 영상과의 결합을 통해 음원의 시각화를 수행한다.

이때 초음파 센서 배열과 CCD 카메라의 장착 위치는 서로 일치하지 않으므로 피측정체와 피사체의 시점에 오차가 존재한다. 따라서 두 종류의 신호를 동일한 좌표계로 정렬시켜주는 정합 과정이 필요하며 이를 위해 그림 4와 같이 핀홀 카메라 모델을 이용하여 초음파 센서 배열의 신호를 2차원 영상으로 변환하도록 한다.

배열로부터 추정된 음원의 위치는 중심으로부터 수평각  $\theta$ 와 수직각  $\phi$ 로 나타내며 식 (6)을 이용하여 가상의 영상과 동일한 좌표계의 픽셀 위치를 계산할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{x}{d}, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{y}{d} \quad (6)$$

여기서  $x, y$  는 3차원 공간상에 존재하는 초음파 음원으로

부터 2차원 평면에 투영되는 영상 좌표를 의미하며,  $d$ 는 원래 핀홀 카메라 모델에서 초점거리를 의미하지만 여기서는 초음파 배열로부터 가상의 영상 평면까지의 거리를 의미한다. 따라서 다음 식 (7)을 통해 초음파 음원의 영상 좌표계 위치를 구할 수 있다.

$$x = d \times \tan\theta, \quad y = d \times \tan\phi \quad (7)$$

한편, 배열 신호로부터 구성된 영상을 CCD 카메라의 기준 영상과 정합하기 위하여 두 영상 사이에 회전변환 관계는 존재하지 않고 단지 크기변환 및 위치변환 관계만 존재한다고 가정한다. 따라서 다음 식 (8)을 이용하여 초음파 배열의 영상 좌표를 CCD 카메라의 기준 영상 좌표와 일치시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (8)$$

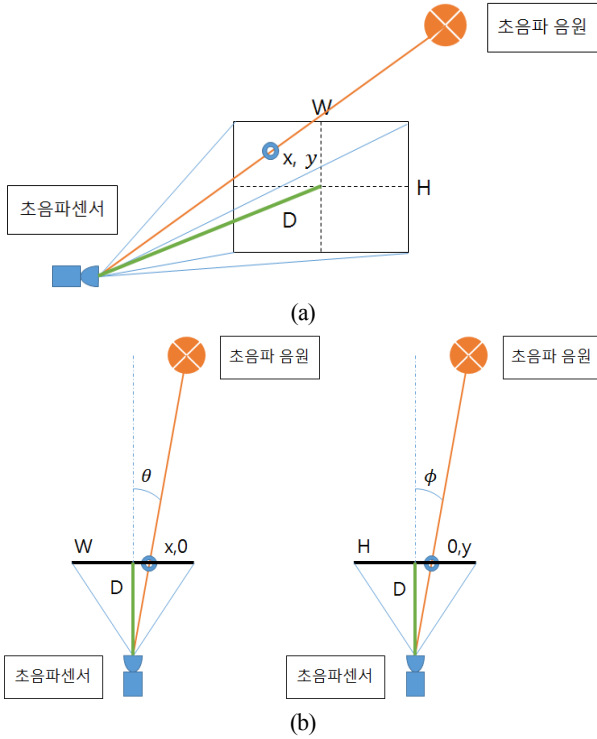


그림 4. 시각화를 위한 영상 좌표계.  
Fig. 4. The image coordinates for visualization.

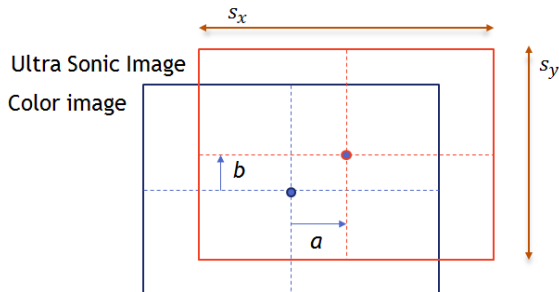


그림 5. 두 카메라의 주점 일치과정.  
Fig. 5. Matching process of the principal point.

여기서  $x, y$ 는 정합 전 초음파 배열 영상의 개별 픽셀 좌표이며  $x', y'$ 은 정합 후 개별 픽셀 좌표를 나타낸다. 또한,  $a, b$ 는 각각  $x$ 축 및  $y$ 축의 위치변환 변수,  $s_x, s_y$ 는 각각  $x$ 축 및  $y$ 축의 크기변환 변수이다.

#### IV. 실험 결과

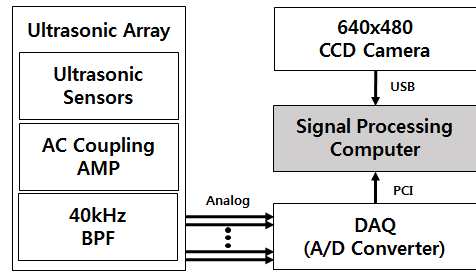
##### 1. 실험장치 구성

그림 6(a)는 초음파 음원 위치 추정 및 시각화 장비의 블록선도를 나타낸다. 초음파 배열은 8개의 초음파 센서와 이 들로부터 수집한 미세한 신호를 증폭하는 부분 및 40kHz 대역의 신호를 통과시키기 위한 대역통과필터 부분으로 구성되며 배열의 아날로그 신호는 동시 샘플링이 가능한 A/D 변환기가 내장된 데이터 획득장치(DAQ: Data Acquisition system)에 입력된다. 그리고 신호처리 컴퓨터는 데이터 획득장치와 PCI 버스를 이용하여 고속으로 데이터를 수신하며 동시에 USB 통신을 이용하여 CCD 카메라와 연동된다. 또한, 초음파 음원의 시각화 영상은 일반 컬러 모니터를 이용하여 표시한다.

한편, 그림 6(b)와 같이 장치를 직접 제작함으로써 실험을 수행하도록 하였다.

그림 7은 제작된 장치를 이용하여 초음파 음원의 위치 추정과 시각화 실험을 수행한 방식을 나타낸다. 장치와 음원 사이의 거리는 6m로 고정하였으며 초음파 음원은 입사각을 미리 알고 있는 3곳의 위치에 초음파 발생기를 배치함으로써 추정된 입사각과 비교실험 및 영상에서의 위치 표현을 살펴보았다.

데이터 획득장치는 개별 초음파 센서 신호를 1MHz 주파수로 샘플링함으로써 원 신호를 정밀하게 수집하였으며 CCD 카메라의 영상은 640x480 해상도를 갖는다.



(a)  
(b)

그림 6. 실험장치 구성.  
Fig. 6. Experimental setup.

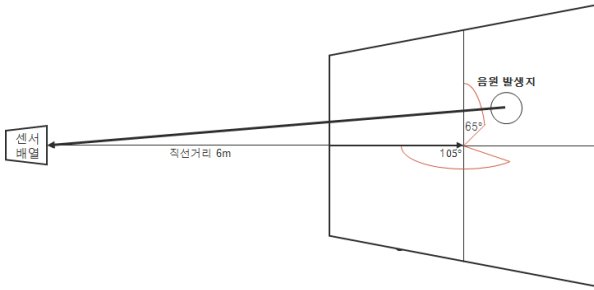


그림 7. 실험 계획.  
Fig. 7. Experiment design.

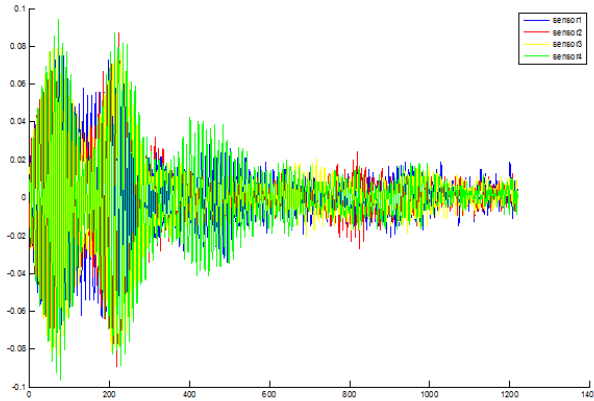


그림 8. 수집된 초음파 신호.  
Fig. 8. Collected ultrasonic signals.

2. 위치추정 실험

구성된 실험장치에서 수집된 초음파 신호는 그림 8과 같다. 신호는 40kHz 대역의 신호로 주기성을 갖는 신호원을 실험에 사용하였다.

수집된 신호를 그림 9와 같이 확대하면 입력된 신호사이의 위상차를 확인 할 수 있으며 보이는 위상차는 곧 시간 지연을 의미하므로 지연-합 빔형성을 통하여 음원의 위치 추정이 가능하다.

음원의 위치에 해당하는 신호의 입사각을 식 (9)로부터 도출하였다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{c \times \tau}{d}\right) \quad (9)$$

이때  $\tau$ 는 샘플링 주파수 1MHz에 의해 최소길이 0.000001m를 갖으며  $\theta$ 값을 계산하기 위해 시간 지연에 따른  $\tau$ 를 길이로 환산한 값은  $0.000001 \times \tau$ 의 값을 갖게 된다. 따라서 실제 계산에 사용되는 수식은 다음과 같다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{340 \times 0.000001 \times \tau}{d}\right) \quad (10)$$

실험을 통해 40kHz 대역의 초음파 신호를 수집하여 지연-합 빔형성 방식을 통해 음원의 위치를 추정하였다. 그림 10은 추정된 음원의 위치를  $\theta$ 로 출력한 데이터이다.

표 1은 추정된 음원의 위치를 실제 음원의 위치와 비교하여 나타낸 것으로 평균적으로 x좌표는 약 1° 미만의 오

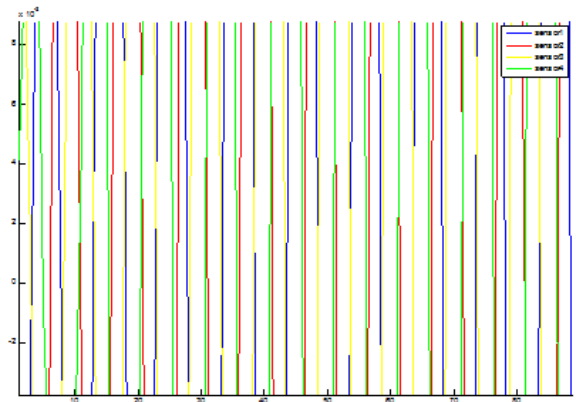


그림 9. 각 센서별 초음파 신호의 위상지연.  
Fig. 9. The phase delay of each ultrasonic signal.

X : 108.844449	Y : 66.983264
X : 108.844449	Y : 65.920741
X : 108.844449	Y : 65.920741
X : 106.798096	Y : 66.983264
X : 106.798096	Y : 70.123127
X : 106.798096	Y : 68.037481
X : 105.783312	Y : 69.083931
X : 105.783312	Y : 71.155551
X : 104.773584	Y : 70.123127
X : 104.773584	Y : 70.123127
X : 105.783312	Y : 70.123127
X : 103.768528	Y : 69.083931
X : 103.768528	Y : 68.037481
X : 104.773584	Y : 72.181664
X : 104.773584	Y : 73.201904
X : 104.773584	Y : 71.155551
X : 103.768528	Y : 71.155551
X : 103.768528	Y : 72.181664
X : 103.768528	Y : 65.920741

그림 10. 추정된  $\theta$  값.  
Fig. 10. Estimated value of theta.

표 1. 위치추정 결과.

Table 1. Position estimation result.

	X 좌표 ( $\theta$ )	Y 좌표 ( $\theta$ )
음원 위치	105°	65°
위치 추정 #1	105.63°	69.16°
음원 위치	90°	90°
위치 추정 #2	89.02°	93.89°
음원 위치	75°	120°
위치 추정 #3	76.23°	122.33°

차를 보였으나 y좌표는 약 5° 이내의 오차가 발생한 것을 확인하였다. 수평각에 비하여 수직각의 오차가 큰 이유는 배열 구성상 열 방향 센서의 수가 행 방향 센서의 수보다 적음으로써 발생하였다.

3. 위치 영상과 일반 영상의 결합

다음으로 위치추정 실험결과를 바탕으로 생성한 위치영상과 일반 컬러영상이 결합된 영상을 생성하기 위해 수평

화각  $\pm 17^\circ$ , 수직화각  $\pm 14^\circ$ 를 갖는 640x480 픽셀의 VGA급 CCD 카메라를 사용하였으며 초음파 센서 배열에서 획득한 위치영상은 CCD 카메라와 동일한 화각과 해상도를 가정하여 실험을 진행하였다.

식 (7)으로부터 수평화각  $17^\circ$ , 센서와의 거리 4.3m를 기준으로 영상좌표계의 픽셀 위치를 계산하였으며 센서와 영상사이의 픽셀값은 1046이며 이를 식 (8)에 적용하여  $x, y$  좌표를 측정하였다.

그림 11은 일반 영상과 위치 영상의 좌표계를 일치시키기 전 영상으로 두 영상 사이의 시점에 오차가 존재함을 확인할 수 있다.

결합된 두 영상에서 좌표계가 일치하지 않아 발생한 오차를 해결하기 위해 식 (9)를 사용하여 일반 컬러영상을 기준영상으로 좌표계를 일치시켜 주었다. 이때 실제 초음파 발생기의 위치와 추정된 음원 위치는 수평방향 5픽셀, 수직방향 8픽셀의 오차를 보였으며 이는 표 1에서 보였던 위치 추정 결과의 오차에 의한 것이다.

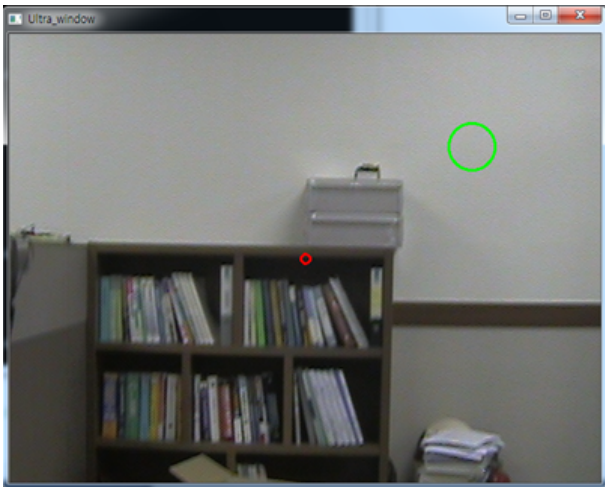


그림 11. 좌표계가 불일치된 영상.  
Fig. 11. Unmatched image in coordinates.

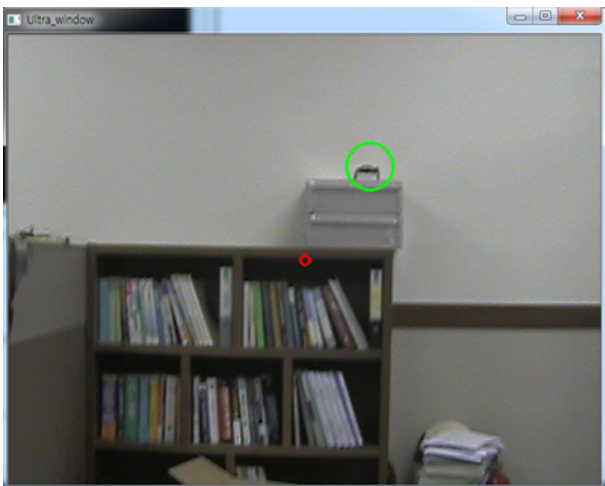


그림 12. 좌표계가 일치된 영상.  
Fig. 12. Matched image in coordinates.

### V. 결론

본 논문에서는 배전설비 결함 검출의 효율성과 정밀도를 높이기 위하여 초음파 음원의 위치 추정과 시각화에 관한 연구를 수행하였다. MEMS 형태의 초음파 센서를 이용하여 2x4 배열을 구성하였고 각 센서의 신호를 데이터 획득 장비를 통해 동시에 수집하였다. 그리고 지연-합 빔형성 방법을 적용하여 행 배열 신호로부터 음원의 수평각을, 열 배열 신호로부터 수직각을 추정하였다. 이에 대한 실험으로 음원의 수평각은  $1^\circ$  이내, 수직각은  $5^\circ$  이내의 결과를 얻었다. 또한 추정된 수평 및 수직각을 통해 일반 CCD 카메라와 영상 정합을 통해 음원의 발생위치의 시각화를 수행하였다.

향후 배열의 구성과 센서 개수의 최적화를 통해 추정 정밀도를 높이고, 다양한 조건에서 실험을 수행함으로써 배전 설비 진단에 적용 가능성을 입증할 계획이다.

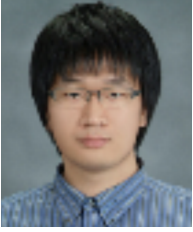
### REFERENCES

- [1] B. H. Jung, "Distribution equipment maintenance management techniques and recent developments," *Monthly of Electrical Tech*, March. 2012, pp. 72-79, 2012.
- [2] Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, *Array Signal Processing Concepts and Techniques*, 1st Ed., Prentice Hall, 1993.
- [3] D. H. Seo, "Impulsive sound source localization using delay and sum beamforming method in time domain," *ME Theses Master (in Korean)*, KAIST, 2010.
- [4] Y. K. Kim and Y. H. Kim, "Comparison between radiation power and beamforming power of plate," *The Journal of the Acoustical Society of Korea (in Korean)*, vol. 16, no. 6, pp. 12-18, Jan. 1997.
- [5] J. H. Park, H. H. Jung, and J. Lyou, "A study on ultrasonic source localization for fault detection on a distribution equipment," *Proc. of ICROS (Institute of Control, Robotics and Systems) 2014 Daejeon-Chungchung Branch Conference (in Korean)*, pp. 149-152, Dec. 2014.
- [6] J. W. Shin, J. M. Song, S. Y. Lee, H. T. Choi, and P. G. Park, "Direction and location estimating algorithm for sound sources with two hydrophones in underwater environment," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 8, pp. 659-754, Aug. 2013.
- [7] J. H. Han, S. S. Shin, and J. M. Lee, "Sound source tracking control of a mobile robot using a microphone array," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 295-399, Apr. 2012.



### 박진하

2007년 충남대학교 전자정보통신과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 석사과정 재학. 관심분야는 영상처리, 초음파 신호처리.



### 정 하 형

2010년 충남대학교 전자전파정보통신과 졸업. 2015년 현재 대학원 석박사 통합과정 재학. 관심분야는 무인항공기 비행제어, 영상처리.



### 유 준

1978년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1984년 동 대학원 박사. 1984년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 산업공정제어, 센서 신호처리, IT기반로봇, 항법시스템.