

# Microphone Array와 열화상 카메라를 이용한 고압설비 고장검출

## Malfunction Detection of High Voltage Equipment Using Microphone Array and Infrared Thermal Imaging Camera

한 순 신, 최 재 영, 이 장 명\*  
(SunSin-Han, JaeYoung-Choi, and JangMyung-Lee)

**Abstract:** The paper proposes a hierarchical fault detection method for the high voltage equipment using a microphone array which detects the location of fault and the thermal imaging and CCD cameras which verifies the fault and stores the image, respectively. There are partial arc discharges on the faulty insulators, which generates a specific pattern of sound. Detecting the signal using the microphone array, the location of the faulty insulator can be estimated. The 6th band-pass filter was applied to remove noise signal from wind or external influence. When the mobile robot carries the thermal and CCD cameras to the possible place of the fault insulator, the fault insulators or power transmission wires can be detected by the thermal images, which are caused by the aging or natural erosion. Finally, the CCD camera captures the image of the fault insulator for the record. The detection scheme of fault location using the microphone array and the thermal images have been proved to be effective through the real experiments. As a result of this research, it becomes possible to use a mobile robot with the integrated sensors to detect the fault insulators instead of a human being.

**Keywords:** power line inspection, microphone, array, infrared imaging camera, CCD camera, insulator

### 1. 서론

끊임없는 경제성장과 더불어 전력에 대한 수요는 끝없이 증가하고 있다. 그에 따라 필연적으로 최근 고품질의 전력을 공급하기 위한 노력이 각 분야에 걸쳐 이루어지고 있다[1]. 이와 같은 추세에 따라 고압설비 기기의 이상 징후와 장애에 일어날 고장을 인지하여, 필요한 대응을 실행하는 예방진단 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[2].

예방진단은 애자와 배전선로의 가공전선에 대하여 실행한다[3]. 애자란 송·배전선이나 전기기기의 나선부분을 전기적으로 절연하고 동시에 기계적으로 유지 또는 지지하기 위하여 사용되는 것을 말한다[4]. 이러한 성질을 만족시키기 위한 애자의 종류에는 기능상에 따른 분류로는 현수애자, 장간애자, 핀애자, 지지애자, 인류애자, 옥내배전용 애자, 가지애자 등이 있고, 재료상에 따른 분류로는 자기애자, 유리애자, 폴리머애자 등이 있는데, 현 우리나라에서는 보편적으로 자기 애자를 사용하고 있는 실정이다. 이러한 애자가 불량하면 전력 전송 효율 저하로 인한 국가적 손실이 커질 것이고, 불량 애자의 부분방전으로 인한 안전성의 문제가 대두 되고, 전력의 불안정한 공급으로 인한 사회 전반에서 예상치 못한 일이 벌어질 것이다. 그에 따라 이러한 불량애자를 측정하는 방식으로는 열화상 카메라를 이용한 방법이나 사람 육안에 의한 점검 방식, 전계를 검출하거나, 코로나카메라에 의한 검출 방법, 초음파식, 네온 램프식 방법 등이 연구되고 제품으로도 나와 있지만, 이러한 검출장치들의 정확도가 떨어지고 정량적이지 못하다는 단점을 가지고 있다[6]. 그리고 배전선로의 가공전선은 공급전압과 부하용량 등에 대하여 다양

한 종류의 전선이 사용되며 가공전선의 금속재료와 설치환경 그리고 전선규격에 따라 매우 복잡한 형태의 불량을 나타낸다[1]. 애자와 배전선로의 가공전선의 다양한 불량상태와 결합에 대응하여 애자가 설치된 상태에서 그리고 가공전선이 활선인 상태에서 분리 혹은 절취하지 않고 검사를 하기 위해, 현재 진단 방법은 승주기별 점검 방법으로 육안에 의존한 방법을 사용하고 있다[7,8]. 이는 연간 500억의 예산을 투입하면서도 전체 지지물의 7%만을 점검하고 있는 상태이다. 그리고 검사를 위하여 트럭 위에서 활선전공자에 의한 점검은 안전사고에 대한 우려가 있고, 인력에 의한 검사이므로 한 경간 전체를 자세히 검사할 수 없을 뿐만 아니라, 신뢰성이 낮고 외부의 결합이 아닌, 내부적인 결합에 대하여서는 검출할 수 없다[4]. 첨단산업과 IT산업의 급격한 팽창으로 사회 전반에 걸쳐 고품질의 전력을 공급하기 위해 다각도의 노력을 하고 있으나, 배전선로 승주 기별점검은 큰 영향을 미치지 못하는 실정이다. 따라서 인력에 의한 점검을 로봇에 의한 점검으로의 교체가 필요한 시기이다[1]. 본 연구에서는 불량 고압설비를 마이크론 배열(microphone array)를 이용하여 1차 진단하고 2차 진단 방법으로 열화상 카메라를 이용하여 고장진단 하였다[15-17]. 1차 고장진단 방법으로는 배전선로 중 애자에서 발생하는 고장 중 부분방전(아크)으로 인한 소음(지직거리는 소리)이 일정한 가청 주파수대역에서 발생하는 소음을 마이크론 배열을 통하여 수신하고 잡음을 제거하는 등의 일련의 신호처리 과정을 거쳐, 고장 중 부분방전(아크)으로 인한 소음원까지의 거리, 방향, 좌표를 측정하고 이를 아날로그 및 디지털로 표시되게 함으로서 고장 여부를 감지한다. 그 결과로 크기별로 상태를 판단하여 고장부의 거리, 방향, 좌표를 판단한다. 그리고 1차 진단에서 발생한 고장 난 부분을 열화상 카메라를 이용하여 2차 고장진단을 하게 된다. 종래의 불량 고압설비 검출방법은 관측할 수 있는 부위가 한정되어 있으므로 정확한 이상 유·무를 판단

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 7. 23., 수정: 2009. 8. 5., 채택확정: 2009. 11. 22.

한순신, 최재영, 이장명: 부산대학교 전자전기공학부

(ranger112@pusan.ac.kr/jam5177@pusan.ac.kr/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-10171-0).

할 수 없다는 문제점이 있으며[12], 방송파나 자동차 등에서 발생하는 외부잡음 전파와 불량 기기에서 발생하는 고장음을 구별하기가 어려운 문제점을 안고 있다. 그래서 위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 고압설비 내의 불량한 기기에서 발생하는 고장음을 검출하여 그 고압설비의 불량 유·무를 판단하는 장치를 설계하여 고장진단을 시행하였다. 그리고 2차 고장진단 방법으로 배전선로와 애자의 열화상태 및 부식된 상태일 때의 온도변화를 파악할 수 있는 열화상 카메라와 그 불량상태의 실영상 이미지를 파악할 수 있는 CCD 카메라를 이용하여 고압설비의 불량을 점검하는 고장진단하는 두가지 방법을 사용하여 보다 더 정확하고 안전한 고압설비의 고장진단을 할 수 있도록 하였다.

**II. Microphone array를 이용한 고압설비 고장위치 인식**

**1. 도달 시간차 알고리즘**

고장 중 부분방전으로 인한 음원신호(지직거리는 소리)가 평면상에서 일정한 간격의 형태로 되어 있는 마이크로폰(Microphone)에 수신되었을 때, 마이크로폰의 위치, 간격 및 배열 등의 요소에 따라 각 마이크로폰에 수신된 신호음 사이에는 도달시간차가 발생한다. 이 신호음 도달시간차를 검출하여, 수신부로부터 고압설비 고장신호음까지의 거리, 방향, 좌표를 측정하는 것이 기본적인 알고리즘이다. 고압설비 고장신호음을 3개의 마이크로폰으로 구성된 수신부에서 수신하고 각 마이크로폰 도달시간차를 검출하여 음원의 위치를 구하는 알고리즘은 다음과 같다. 고압설비 고장신호음으로부터 발신된 음원 신호의 음파 에너지가 3개의 마이크로폰 어레이로 구성된 수신부에 수신되었다면 임의의 시간  $t_j$ 에 대하여  $i$  번째 마이크로폰에 수신되는 신호음  $M_i(t_j)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$M_i(t_j) = s_i(t_j) + n_i(t_j) \tag{1}$$

위 식에서  $s_i(t_j)$ 는  $i$  번째 마이크로폰까지 도달하는 신호 파형을 나타내고,  $n_i(t_j)$ 는  $i$  번째 마이크로폰으로 들어오는 잡음성분을 나타낸다. 만약 시간  $t_j$ 를 첫 번째 마이크로폰에 도달한 신호와의 시간차  $\Delta t_{1i}$ 를 사용하여 기술하면,

$$M_i(t_j) = s_i(t_1 + \Delta t_{1i}) + n_i(t_1 + \Delta t_{1i}) \tag{2}$$

이 되며, 더 나아가 외부잡음  $n_i(t_j)$ 를 AWGN (Additive White Gaussian Noise)이라 가정하면, 잡음은 시간에 대해서 독립된 성분이 되므로, 다음 식으로 기술된다.

$$M_i(t_j) = s_i(t_1 + \Delta t_{1i}) + n_i \tag{3}$$

고압설비 고장신호음으로부터  $i$  번째 마이크로폰까지의 거리  $R_i$ 은 다음과 같이 표현된다[7].

$$R_i = t_i \cdot c \quad i = 1, 2, 3 \tag{4}$$

위 식에서  $t_i$ 는 고압설비 고장신호음의  $i$  번째 마이크로폰까지 도달시간,  $c$ 는 상온에서의 음파의 속도( $= 340m/s$ )를 나타낸다고 할 때, 각 마이크로폰 사이의 고압설비 고장신호

음의 도달시간차를 식 (5)과 같이 표현된다.

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j \quad i, j = 1, 2, 3 \tag{5}$$

도달시간차를 이용한 방법은 배열 형태의 배치로 지정한 공간의 차원수 이상의 마이크로폰이 필요하며[8,9], 계산량이 많기 때문에 계산량을 줄이기 위한 알고리즘[11]을 연구하여야 한다. 또한, 반향신호의 영향이 많은 곳에서는 신뢰도가 떨어지는 단점이 발생하므로, 이에 대한 연구도 동시에 진행되어야 한다[10].

**2. 상호상관 관계(cross-correlation algorithm)**

그림 1에서 ①, ②, ③ 파형은 외부잡음이 없을 때 각 마이크로폰을 이용하여 수신한 신호음 파형을 나타낸 것으로, 가로축은 신호음의 관측시간, 세로축은 신호음의 진폭을 표현한 것이다.

상호 상관 함수의 핵심 알고리즘은 임의의 한 개 마이크로폰에 파형 ①이 가장 먼저 수신된 고장신호음이라 가정하고, 다른 두 개의 마이크로폰에 수신된 다른 고장신호음 신호 파형 ②, ③을 비교하여 각 마이크로폰에 도달하는 시간차를 계산하고, 이러한 시간차를 이용해서 마이크로폰으로부터 고장음원까지의 거리를 알아내는 방법을 사용한다. 이를 위해 상호상관 알고리즘을 사용하는데 기본 파형 ①을 시간 축으로 이동시키면서 다른 신호와 곱하는 연산을 함으로써 이 결과 값이 최대 값이 나왔을 때 샘플링 값을 기준으로 몇 칸을 이동하였는지를 알아보는 방법을 사용하고 있다. 이러한 방법으로 알아낸 값에서 샘플링 주기를 곱하여,  $\Delta t_{12}$ 를 검출할 수 있다. 상호상관함수 값이 최대값을 가지게 하는  $\Delta n_{12}$ 을 찾아서, 실험환경에서의 A/D 변환기의 샘플링 주기인  $18.8679 \mu s$  만큼을 곱하여 주게 되면 하나의 신호가 다른 신호에서 얼마만큼의 시간차가 있는지를 알 수 있다. 신뢰성 높은  $\Delta n_{12}$  값을 구하기 위해 임의로 정한 데이터 셋으로 2000개 수치 군을 4개의 500개 데이터 프레임 수치 군으로 나누어 두 데이터 시퀀스 사이의 상호상관함수를  $A(n=1\sim 500), B(n=501\sim 1000), C(n=1001\sim 1500), D(1501\sim 2000)$  구간에서 각 구간의 값을 평균값을 구하여  $\Delta n_{12}$ 를 표현하면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta n_{12} = \arg \max \left[ \frac{\sum_{n=1}^N [(m_1(n-d) - m_1) \times (m_2(n) - m_2)]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (m_1(n-d) - m_1)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (m_2(n) - m_2)^2}} \right] \tag{6}$$

위 식 (6)에서 분모의 각 신호의 크기 값으로 나누어 준 것은 신호 값 자체의 크기로 인해 상관도가 영향 받지 않기 위

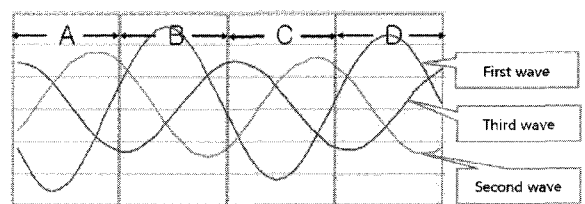


그림 1. 세 개의 마이크로폰으로 들어오는 음파신호.  
Fig. 1. Sound wave signal into microphone.

해 평준화(normalize)한 값이고, 그 외의 각각의 변수는,  $n_{12} = \frac{l_{12}}{c} F_s$ ,  $n_{23} = \frac{l_{23}}{c} F_s$ ,  $d = -n_{12} \sim n_{12}$ ,  $m_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_1(n)$ ,  $m_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_2(n)$  으로 정의한다. 위 값들에서  $c$  는 상온에서 공기 중 음속으로  $340 \text{ m/s}$ , 각 마이크로폰 사이의 거리 ( $l_1, l_2$ ) 는  $15 \text{ cm}$ , 샘플링 주파수(sampling frequency,  $F_s$ ) 는  $53 \text{ kHz}$ , 최대의 시간차를 가질 수 있는 샘플링 개수 ( $n_{12}, n_{23}$ ) 는 phasor 값으로는  $360^\circ$ , 샘플링 개수로는 50개로 정의한다.  $d$  는 한 개의 신호음으로부터 좌, 우로 time shift 시킬 수 있는 범위를 의미하고,  $m_1, m_2$  는 두 개의 신호의 평균 값을 의미한다.

A, B, C, D 네 구간에 식 (6)를 적용시킨 값을 각각  $\alpha_{m_1 m_2}(\Delta n_{12})$ ,  $\beta_{m_1 m_2}(\Delta n_{12})$ ,  $\gamma_{m_1 m_2}(\Delta n_{12})$ ,  $\delta_{m_1 m_2}(\Delta n_{12})$  라 하면, 전체 2000개 데이터 셋 내에서의 이동 래그수  $\Delta n_{12}$  를 구하기 위해서는 각각의 데이터 프레임에서의 시간차의 산술적 평균은 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta n_{12} = \frac{\alpha_{m_1 m_2}(\Delta n_{12}) + \beta_{m_1 m_2}(\Delta n_{12}) + \gamma_{m_1 m_2}(\Delta n_{12}) + \delta_{m_1 m_2}(\Delta n_{12})}{4} \quad (7)$$

식 (7)에서 상호상관 계수를 평균하여 이동 래그수  $\Delta n_{12}$  에 샘플링 주기를 곱하여, 아날로그 값으로 두 신호의 시간차를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t_{12} = \frac{\Delta n_{12}}{f_s} [\text{sec}] = \frac{\Delta n_{12}}{53 \text{ kHz}} = \Delta n_{12} \times 18.8679 \mu\text{s} \quad (8)$$

같은 방법으로 마이크로폰  $M_1$  와  $M_3$  사이의 도달시간차  $t_{13}$  도 측정할 수 있다.

### 3. 위치인식 알고리즘

#### 3.1 2차원 공간에서의 거리측정

하나의 신호음(S)와 3개의 마이크로폰  $M_1, M_2, M_3$  를 한 평면상에서 일정한 간격으로 ( $l_1 = l_2 = 15 \text{ cm}$ ) 배열하면 고압설비 신호음으로부터 각각의 마이크로폰까지  $R_1, R_2, R_3$  의 거리로 두고, 이를 도식화 하면, 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

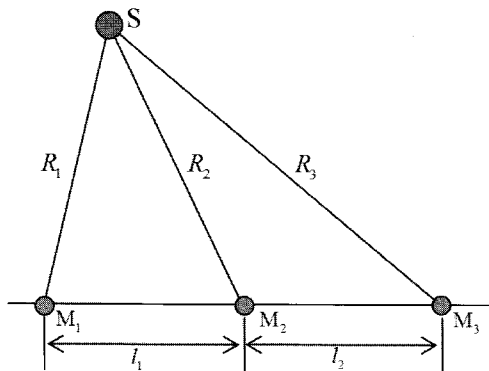


그림 2. 2차원 공간에서 음파의 거리 측정원리.

Fig. 2. The measurement principal of distance of sound signal in two dimensional space.

그림 2에서 고압설비 신호음으로부터 각각의 마이크로폰으로 들어올 때의 거리를  $R_1, R_2, R_3$  라 하면 각각의 거리는, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 = c \cdot t_1 = x \quad (9a)$$

$$R_2 = c \cdot t_2 = c \cdot (t_1 + \Delta t_{12}) = x + c \Delta t_{12} \quad (9b)$$

$$R_3 = c \cdot t_3 = c \cdot (t_1 + \Delta t_{13}) = x + c \Delta t_{13} \quad (9c)$$

식 (9)에서  $c$  는 음파의 속도( $=340 \text{ m/s}$ ) 이고,  $t_1$  는 고압설비 고장신호음이 임의로 정한 첫 번째 마이크로폰까지 도달하는데 걸리는 시간,  $t_2$  는 고장신호음으로부터 두 번째 마이크로폰까지 걸리는 시간이라고 가정하면, 앞에서 말한 상호상관 알고리즘으로 구한  $\Delta t_{12}$  을 이용하면  $t_2$  는  $t_1 + \Delta t_{12}$  이 된다. 같은 방법으로 세 번째 마이크로폰까지 도달하는 시간  $t_3$  는  $t_1 + \Delta t_{13}$  가 되고 이 값들을 이용해서 거리를 계산하게 되면 식 (9)와 같이 표현된다. 도달시간차와 마이크로폰 간격 길이 정보를 이용해 파푸스의 중선법칙에 따라 다음과 같이 구해지게 된다.

$$d_1 = \frac{2l_1^2 + 2(c\Delta t_{12})^2 - (c\Delta t_{13})^2}{2c(\Delta t_{13} - 2\Delta t_{12})} \quad (10)$$

식 (10)에서  $d_1$  는 음원으로부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리가 되고, 이 값을 (9b), (9c)에 적용하게 되면 음원으로부터 두 번째, 세 번째 마이크로폰까지의 거리도 알 수 있다.

#### 3.2 2차원 공간에서의 각도 측정

2차원 평면상에서 음원 (S)로부터 세 개의 마이크로폰까지의 거리는 앞 장에서 구하였으므로, 이 거리 정보를 이용하여 그림 2내의  $\Delta SM_1 M_2$  에 코사인 제 2 법칙을 사용하면 음원이 해당 마이크로폰으로 들어오는 각도 정보를 알 수 있고, 세 개의 마이크로폰에 적용해 보면 각각 마이크로폰으로 들어오는 음원의 각도 정보를 식 (11)과 같이 알 수 있다. 음원이 첫 번째 마이크로폰으로 들어오는 각도를  $\theta_{M_1}$  이라 하면,

$$\theta_{M_1} = \cos^{-1} \frac{R_1^2 + l_1^2 - R_2^2}{2R_1 l_1} \quad (11a)$$

식 (11a)와 같이 구할 수 있고, 같은 방법으로 다른 두 마이크로폰에 대해 똑같은 알고리즘을 적용시키면,

$$\theta_{M_2} = \cos^{-1} \frac{R_2^2 + l_1^2 - R_1^2}{2R_2 l_1} \quad (11b)$$

$$\theta_{M_3} = \cos^{-1} \frac{R_3^2 + l_2^2 - R_2^2}{2R_3 l_2} \quad (11c)$$

로 구할 수 있다.

### 3.3 좌표측정

#### 3.3.1 2차원 좌표 측정

그림 3과 같이 두 개의 삼각형으로 나누고, 앞에서 구한 거리 정보를 바탕으로  $M_1$  을 기준으로 거리 좌표를 설정하면  $M_1 = (0,0)$ ,  $M_2 = (l_1,0)$ ,  $M_3 = (l_2 + l_3,0)$  로 정의할 수 있다. 음원의 좌표를  $S = (a,b)$  라고 할 때, 다음의 점선으로 둘러싸인 두 개의 삼각형으로부터, 피타고라스 정리를 사용

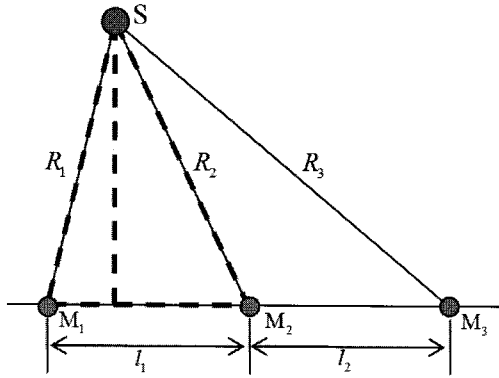


그림 3. 2차원 공간에서 좌표 측정.

Fig. 3. Coordinate determination in two dimensional space.

하게 되면,  $a^2 + b^2 = R_1^2$  과  $(l_1 - a)^2 + b^2 = R_2^2$  두 식을 얻을 수 있다. 두 식으로부터 좌표 음원의 좌표  $S(a,b)$  를 구하게 되면, 식 (12a), (12b)로 표현된다.

$$a = \frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1} \tag{12a}$$

$$b = \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}\right)^2} \tag{12b}$$

$$\therefore S = \left( \frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}, \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}\right)^2} \right) \tag{12c}$$

3.3.2 3차원 좌표 측정

3차원에서의 좌표 측정을 위해서는 하나의 정보가 더 필요하게 되는데 더 필요하게 되는 정보는 2차원 평면에서 좌표 정보를 얻고, 또 일정 거리를 이동하고 나서 다시 2차원 평면에서 좌표 정보를 얻어서 결국 3차원 좌표를 얻을 수 있는 알고리즘을 적용한다.

그림 4에서  $S$ 는 고압설비의 음원이 되고 이 점의 좌표를  $S(a,b,c)$  라 두고,  $M_1$ 과  $M_2$  사이의 거리  $l_1$ 은 15cm,  $M_2$ 와  $M_3$  사이의 거리  $l_2$ 는 15cm로 고정되어 있다. 초기의 마이크로폰의 좌표 값을  $M_1 = (-l_1, 0, 0)$ ,  $M_2 = (0, 0, 0)$ ,  $M_3 = (l_2, 0, 0)$  라 두고 일정 거리 이동하였을 때의 좌표를  $M'_1, M'_2, M'_3$  이라 하면 각각의 좌표 값은  $M'_1 = (-l_1, e, 0)$ ,

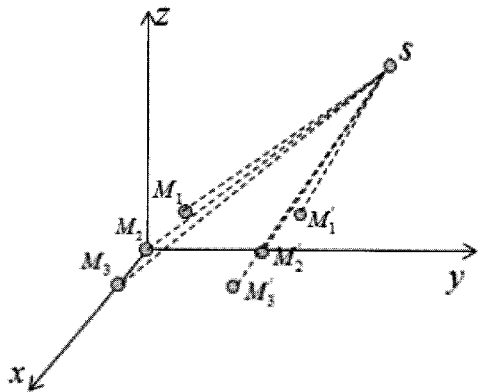


그림 4. 3차원 공간에서 좌표 측정.

Fig. 4. Coordinate in three-dimensional space.

$M'_2 = (0, e, 0)$   $M'_3 = (l_2, e, 0)$ 로 정의할 수 있다고 하면 이 알고리즘을 적용하였을 때,  $l_1, l_2, d, d', \Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t'_{12}, \Delta t'_{13}, c$  값은 구성된 시뮬레이션 환경이나, 실험에 따른 앞의 상호상관 알고리즘을 통해 알 수 있는 값이고,  $a, b, c, t_1, t'_1$ 는 알 수 없는 값인데, 현 시스템에서 변수 값이 5개이고, 식은 6개 이므로 이 시스템은 단 하나의 해를 가지도록 답을 구할 수 있다. 그 해를 찾기 위해 고압설비 고장신호음의 좌표로부터 각각의 마이크로폰까지의 거리를 정의하면, 마이크로폰  $M_1$ 에서 고장설비 고장신호음까지의  $\overline{M_1S}$  및  $\overline{M_2S}, \overline{M_3S}$  를 구하면,

$$\overline{M_1S} = \sqrt{(a+l_1)^2 + b^2 + c^2} = c \cdot t_1 = d_1 \tag{13a}$$

$$\overline{M_2S} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = c \cdot (t_1 + \Delta t_{12}) = d_2 \tag{13b}$$

$$\overline{M_3S} = \sqrt{(a-l_2)^2 + b^2 + c^2} = c \cdot (t_1 + \Delta t_{13}) = d_3 \tag{13c}$$

와 같이 된다. 시뮬레이터가 이동한 후의 평면에서 각 마이크로폰에서 신호음까지의 거리는,

$$\overline{M'_1S} = \sqrt{(a+l_1)^2 + (b-e)^2 + c^2} = c \cdot t'_1 = d'_1 \tag{14a}$$

$$\overline{M'_2S} = \sqrt{a^2 + (b-e)^2 + c^2} = c \cdot (t'_1 + \Delta t'_{12}) = d'_2 \tag{14b}$$

$$\overline{M'_3S} = \sqrt{(a-l_2)^2 + (b-e)^2 + c^2} = c \cdot (t'_1 + \Delta t'_{13}) = d'_3 \tag{14c}$$

로 정의 할 수 있다. 시뮬레이터의 하드웨어 구성에서  $l_1 = l_2$  라고 가정하고 식 (13)와 식 (14)로 부터,

$$4al_1 = -2c^2t_1\Delta t_{13} - (c\Delta t_{13})^2 \tag{15}$$

가 되고, (13a)와 (13b)를 연립하여 정리하면,

$$2al_1 + l_1^2 = -2c^2t_1\Delta t_{12} - (c\Delta t_{12})^2 \tag{16}$$

가 된다. (13)와 (14)로부터,

$$t_1 = \frac{2l_1 - c^2\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \tag{17}$$

을 얻을 수 있고, 같은 알고리즘을 식 (14)에 적용하면,

$$t'_1 = \frac{2l_1 - c^2\{(\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \tag{18}$$

으로 나타낼 수 있다. 식 (17)와 식 (18)에서 구한  $t_1$  과  $t'_1$  를 다시 식 (13)과 (14)에 대입하여 정리 하게 되면,

$$d_1 = \frac{2cl_1 - c^3\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \tag{19a}$$

$$d_2 = \frac{2cl_1 - c^3\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2 + 2\Delta t_{12}(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \tag{19b}$$

$$d_3 = \frac{2cl_1 - c^3\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2 + 2\Delta t_{13}(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \tag{19c}$$

$$d'_1 = \frac{2cl_1 - c^3\{(\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \tag{19d}$$

$$d'_2 = \frac{2cl_1 - c^3 \{ (\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2 + 2\Delta t'_{12}(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12}) \}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \quad (19e)$$

$$d'_3 = \frac{2cl_1 - c^3 \{ (\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2 + 2\Delta t'_{13}(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12}) \}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \quad (19f)$$

로 구할 수 있다. 복잡해 보이지만 모두 알고 있는 값이기 때문에 프로세서 연산으로 간단히 얻을 수 있다. 실제 좌표 값을 알기 위해서 식 (17)과 식 (18)을 사용하면, S(a,b,c)는 다음과 같이 구해진다.

$$a = \frac{d_1^2 - d_2^2 - l_1^2}{2l_1} \quad (20a)$$

$$b = \frac{d_2^2 - d_2^2 - e^2}{2e} \quad (20b)$$

$$c = \sqrt{d_2^2 - \left(\frac{d_1^2 - d_2^2 - l_1^2}{2l_1}\right)^2 + \left(\frac{d_2^2 - d_2^2 - e^2}{2e}\right)^2} \quad (20c)$$

본 논문에 사용된 실험의 시뮬레이터는 크게 데이터 수집 부분과 프로세서 연산처리 부분으로 구성된다. 데이터 수집 부분은 마이크로폰으로 들어오는 신호의 오프셋을 제거하기 위한 대역통과 필터와 증폭기, 그리고 aliasing과 직류 성분을 없애기 위한 대역통과 필터, 16 bit, 100 ksp/s A/D 변환회로 부분으로 구성되어있다. 그리고 연산처리 부분은 TMS320F2812 DSP 버스형 모듈을 사용하여 신호 처리를 담당한다. 데이터 수집부분을 통해서 들어온 신호가 신호처리 과정을 통해 프로세서 부분에서 고장 고압설비 신호음의 도달시간차, 거리, 방향, 좌표를 연산된다. 데이터 수집부분과 프로세서 연산 처리부분을 개략적으로 표현하면 그림 5와 같이 표현된다.

그림 6은 그림 5에서의 마이크로폰으로부터 6<sup>th</sup> 대역통과 필터로 들어 가는 신호를 그림 6(a)에 나타내었고, 그림 6(b)는 필터링을 거친 결과값을 나타내었다.

시스템의 전체 알고리즘을 살펴보기 위한 순서도는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

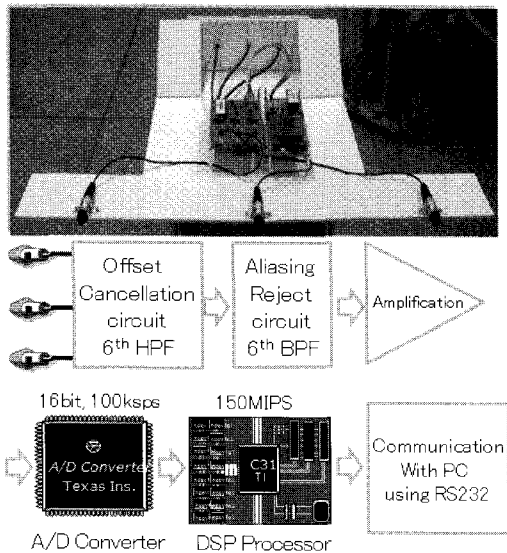


그림 5. 시스템 블럭 다이어그램.

Fig. 5. System block diagram.

본 연산이 진행되는 동안 DSP 모듈은 PC와 지속적으로 U-ART 통신을 하며 신호음에 대한 정보나 DSP에서 연산하여 나온 결과 거리, 각도, 좌표 정보를 전송하게 되는데, 이 고압설비의 신호음을 PC에서 matlab을 이용하여 도식화 하면, 그림 8과 같이 얻을 수 있다.

DSP에서 상호상관 알고리즘을 적용시켜 얼마의 시간차가 있었는지를 계산하고 그만큼을 이동시켜서, 위상각을 맞추어서 나타내면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다.

그림 10은 각각 1.3 m, 2 m, 3 m, 4 m 에서 위치알고리즘을 적용한 후의 추종성능에 대한 비교 실험결과이다. 1.5초 간격으로 20개의 데이터를 받아 분석한 결과 오차범위가 큰 데이

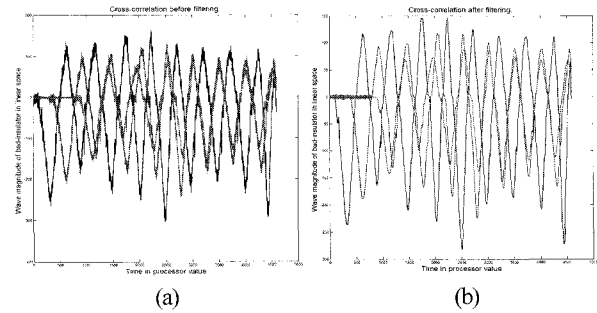


그림 6. (a) 필터링 전 마이크로폰으로 들어 오는 신호, (b) 필터링 후 마이크로폰으로 들어 오는 신호.

Fig. 6. (a) Microphone signal before filtering, (b) Microphone signal after filtering.

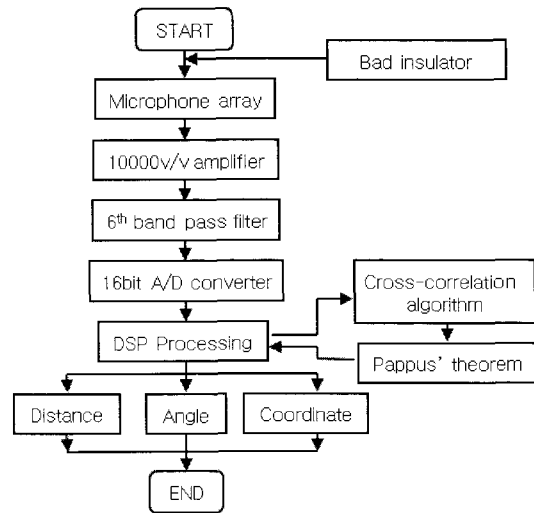


그림 7. 실험 순서도.

Fig. 7. Experimental flowchart.

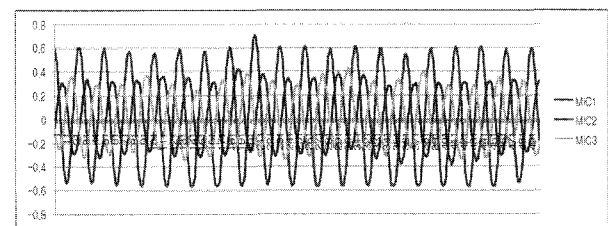


그림 8. 세 개의 마이크로폰으로 들어오는 음파신호.

Fig. 8. Sound signal coming into three microphones.

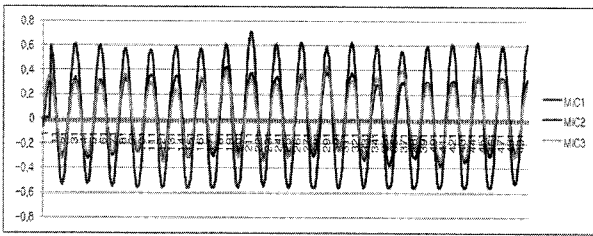


그림 9. 상호상관 알고리즘 적용 후의 음파신호.  
Fig. 9. Sound signal applied cross-correlation algorithm.

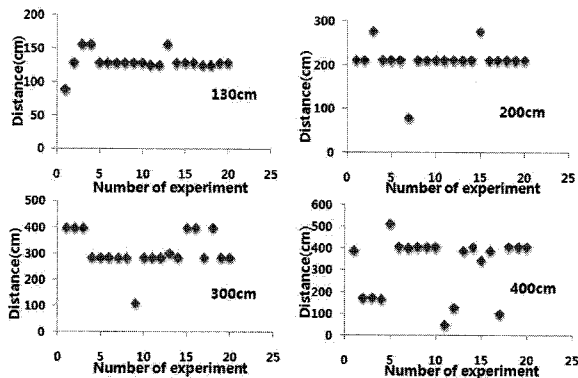


그림 10. 출력 거리.  
Fig. 10. Output distance.

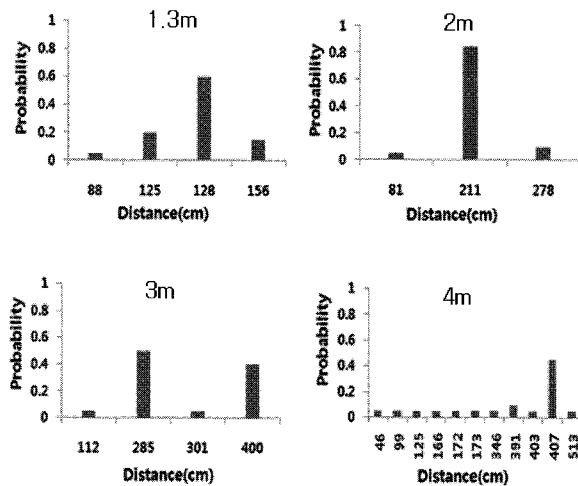


그림 11. 확률 분포에 의한 출력거리.  
Fig. 11. Output distance by probability distribution.

터 값들은 주변의 소음에 의한 값으로서 디지털 필터링이 필요하다. 확률분포를 사용하여 디지털 필터링한 출력거리는 그림 10과 같이 도식화된다.

그림 11은 각각 1.3 m, 2 m, 3 m, 4 m 에서 확률분포 함수를 적용한 후의 추종성능에 대한 비교 실험결과이다. 실제 거리와 가까운 데이터 값들은 50%이상의 분포도를 가지고 오차 범위는  $\pm 15\text{cm}$ 를 가진다.

앞에서 구한 디지털 값을 이용해 각각의 구간에서 평균과 표준편차를 구하고 구해진 평균과 표준편차를 이용해 음원의 거리 정보를 가우시안 분포로 도식해 보면, 그림 12과 같이 나타낼 수 있다.

가우시안 분포를 도식해 보면 A/D 변환 과정에서의 절단

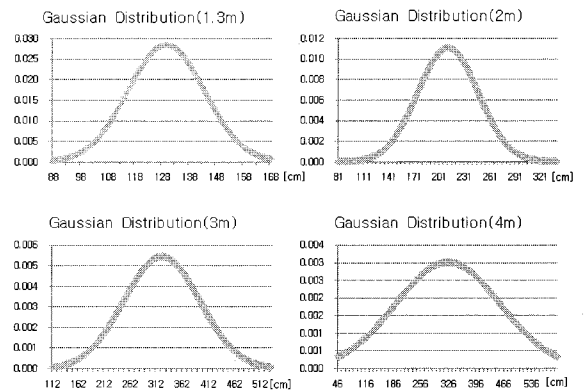


그림 12. 가우시안 분포에 의한 출력거리.  
Fig. 12. Output distance by Gaussian distribution.

오차나 100kps의 제한된 샘플링 주기에 따른 aliasing으로 인한 오차를 거리에 대한 분포도를 통해 봄으로써 시각화 해볼 수 있다.

### III. 열화상, CCD 카메라를 이용한 고장확인

2차 고장진단 방법으로 열화상, CCD 카메라를 이용하여 고압설비를 고장 진단하는 연구를 하였다. 열화상 카메라로 고압설비를 고장진단하고 CCD 카메라로 고장난 고압설비 및 주위환경을 실영상으로 동시에 캡처하는 방법이다. 이는 열화상 카메라의 기본적인 역할인 물체의 온도 분포를 영상화시키고 이 영상을 통해 온도의 분포와 편차를 확인할 수 열화상 카메라의 기능에 CCD 카메라를 추가로 이용하여 열화상 카메라가 점검중인 물체와 주변상태, 환경을 실시간으로 확인하고, 실영상 이미지를 캡처할 수 있게 하여 불량 고압설비 위치와 고장진단 판단을 보다 정확하게 할 수 있도록 하였다. 이렇게 열화상 카메라와 CCD 카메라를 이용하여 고압 설비 들을 실시간으로 점검을 하게 된다. 그림 13와 같은 통합 소프트웨어를 구현하여 고장진단이 용이하도록 하였다.

그림 13의 좌측 영상은 열화상 카메라 모듈로 촬영한 불량 고압설비의 사진이고, 우측 영상은 불량 고압설비가 촬영되었을때 불량 고압설비 및 주위 환경을 CCD 카메라로 촬영한 영상이다. 그리고 고압설비는 계절이나 환경, 기타 조건에 따라 불량 고압설비의 온도가 다르게 나타난다. 이러한 단점을 극복하기 위해 주위 환경이나 계절, 기타 조건에서도 사

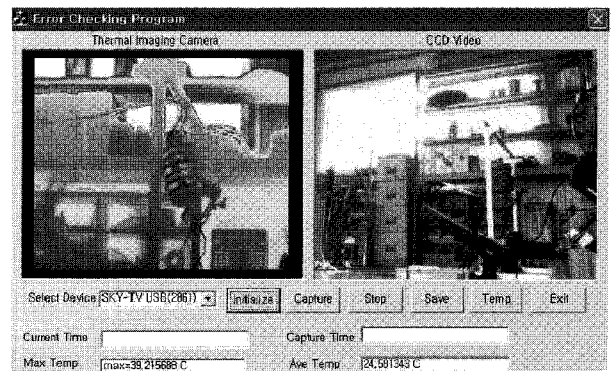


그림 13. 고장검출 프로그램.  
Fig. 13. Diagnostic program.

용 가능하도록 임의로 불량 고압설비의 최저 온도와 최고 온도를 설정할 수 있게 프로그래밍 하였다.

1. 불량 고압설비 측정원리

컴퓨터와 인터페이스 되어있는 열화상 카메라는 그림 13와 같은 고장검출 프로그램을 통해 필요한 데이터를 수집할 수 있다. 열화상 카메라 모듈의 지정된 파렛트 값을 기준으로 측정 가능한 최대 온도( $tem_{high}$ )와 최소 온도( $tem_{low}$ )를 설정한 후 그 파렛트를 255등분하게 된다. 여기서 255등분하게 되는 이유는 RGB 값의 변화에 대한 정확한 온도 측정을 위해서 255등분하였다. 이렇게 지정된 파렛트의 한 눈금 온도( $tem_{ave}$ )가 식 (21)과 같이 계산된다.

$$tem_{ave} = (tem_{high} - tem_{low}) / 256 \quad (21)$$

이렇게 계산된 파렛트 한 눈금의 온도( $tem_{ave}$ )는 열화상 카메라를 통해 전송된 영상 이미지를 5600등분하여 각각 한 칸의 RGB 값( $data_{RGB}$ )과 파렛트의 RGB 값을 비교하여 그에 해당하는 온도( $tem$ )를 측정할 수 있다.

$$tem = tem_{low} + (data_{RGB} \times tem_{ave}) \quad (22)$$

식 (22)에서 나온 한 칸의 온도( $tem$ )를 통해서 물체의 상태를 파악하여 미리 지정해 둔 불량 고압설비의 온도와 비교

하여 그 온도를 넘어갈 경우 열화상, CCD 카메라가 불량 고압설비의 영상을 캡처하여 자동저장 하게 된다.

열화상, CCD 카메라를 이용한 고압설비의 온도 분석 프로그램의 순서도를 그림 14에 나타내었다. 이 순서도는 고장검출 프로그램이 시작되면 열화상, CCD 카메라 두 장치를 동시에 인식하게 된다. 그리고 열화상 카메라가 배전선로 및 애자를 촬영하면서 고장 난 배전선로 및 애자가 발생하면 열화상, CCD 카메라가 동시에 고장 난 배전선로 및 애자를 캡처하고, 자동으로 저장하는 방식으로 되어있다. 열화상 카메라를 이용하여 온도를 분석하는 방법은 위에서 설명하였다.

그리고 CCD 카메라를 사용하는 주된 목적은 고장 난 배전선로 및 불량 애자의 실 영상 및 주위환경을 캡처하고 고장 난 지점을 빠르고 정확하게 찾을 수 있게 하기 위해서이다.

그리고 그림 15와 같은 결과를 통해 고압설비의 불량 유·무를 판단할 수 있다.

아래와 같이 정상애자 그림 15(a)와 불량애자 그림 15(b)의 색깔 변화를 비교해보면, 애자의 불량 유·무 차이를 정확하게 판별할 수 있다. 그리고 고압설비의 불량 온도에 해당하는 온도를 사용자가 설정할 수 있어 고압설비의 불량 점검이 간단하고 정확하게 이루어 질수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 microphone array와 열화상, CCD 카메라를 이용하여 고압설비를 고장 진단하는 방법을 제안하였다. 1차 진단 방법으로 microphone array를 사용하여 고압설비 고장음의 발생 거리, 방향 및 좌표를 추적하는 실험을 연구하였다. 이 방법은 고압설비의 고장신호음은 평면상에서 일정간격으로 배열된 3개의 microphone array로 수신되고 수신된 음원은 데이터 수집회로를 통해서 TMS320F2812 DSP 버스형 모듈로 전달되어 실시간 측정이 가능하도록 하였다. 그리고 고압설비의 고장위치인식 알고리즘을 적용하여 추종성능을 비교 분석 하였다. 고장 음원의 거리가 멀어질수록 커지는 오차값을 제거하기 위해서 확률분포함수를 적용하여 실험을 하였고, 그 결과 실제 거리와 가까운 데이터 값들은 높은 분포도를 가지고 오차범위는  $\pm 15cm$ 를 가지게 되었다. 그러나 microphone array방법은 애자나 변압기 같은 고압설비 고장진단에 적합하나 배전선로 같은 고압설비의 경우는 불량 유·무를 판단하기는 쉽지가 않다. 배전선로 같은 경우 절단이나 단선이 되었을 경우 두꺼운 외부피복이 있어 부분방전(아크)이나 스파크 발생을 찾기가 쉽지가 않다. 대신 배전선로에서는 열이 발생하게 된다. 이러한 배전선로나 고압설비의 열화로 인한 온도 변화나 자연 부식을 열화상 카메라로 분석하고, CCD 카메라를 이용하여 실영상 이미지를 획득하여 고압설비들의 고장진단을 보다 더 정확하게 판별할 수 있었다. 이러한 microphone array방법과 열화상, CCD 카메라를 이용하여 기존에 시행되고 있는 고압설비 점검방법보다 본 논문에서 제안하는 방법을 사용하게 되면 안전성과 비효율성 문제를 해결할 수 있고 정량적인 데이터를 얻을 수 있어 보다 정확한 고장 진단을 할 수 있다. 위와 같은 고압설비 고장진단 장치들을 하나의 모듈로 통합하여 로봇과 같은 이동장치에 부착하여 위험한 고압설비 점검 작업을 사람이 아닌 로봇을 통하여 점검할 수 있음을 보였다.

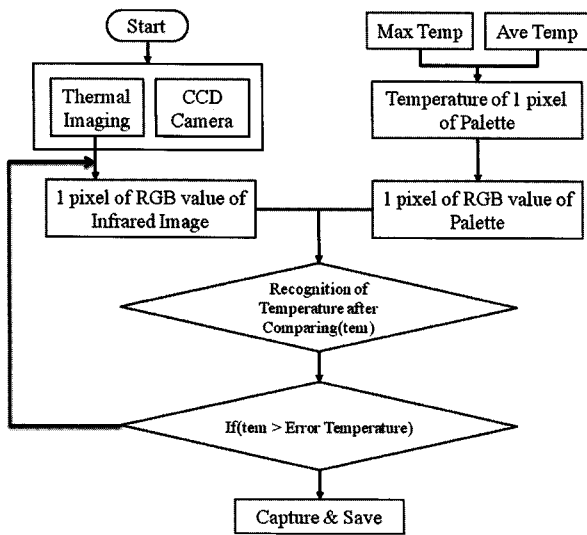


그림 14. 소프트웨어 순서도.  
Fig. 14. Software flowchart.



(a) Normal insulator (b) Faulty insulator

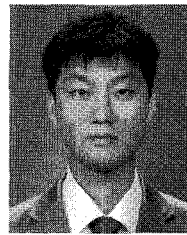
그림 15. 애자의 열화상 이미지.

Fig. 15. Infrared images of insulators.

## 참고문헌

- [1] 강대수, “배전선로 불량애자 검출에 관한 연구,” 한국 통신학회 논문지, vol. 25, no. 6, pp. 46-51, 2000.
- [2] J. Jin, C. S. Chang, C. Chang, T. Hoshino, M. Hanai, and N. Kobayashi, “Classification of partial discharge events in gas-insulated substations using wavelet packet transform and neural network approaches,” *IEEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, vol. 153, no. 2, pp. 55-63, 2006.
- [3] 조연옥, “송전선로의 코로나에 의한 전파잡음 통계적 예측 모델,” 전기학회지, vol. 35, no. 5, pp. 290-294, 1986.
- [4] 조연옥, “송전계통의 코로나에 의한 라디오잡음 분석,” 전기학회지, vol. 35, no. 1, pp. 5-10, 1986.
- [5] 임용배, “전기설비 진단을 위한 적외선 열화상 온도분포 패턴분석 및 능동시험에 관한 연구,” 홍익대학교, 2006.
- [6] G. Clifford Carter and P. B. Abraham, “Estimation of source motion from time delay and time compression measurements,” *J. Acoust. Soc.* pp. 830-832, 1980.
- [7] 문성배, “Microphone Array를 이용한 船舶 汽笛音源 追跡에 관한 研究,” 한국해양대학교 박사 논문, 2002.
- [8] T. Nishiura, T. Yamada, S. Nakamura, and K. Shikano, “Localization of multiple sound sources based on a CSP analysis with a microphone array,” *IEEE/ICASSP*, vol. 2, pp. 1053-1056, 2000.
- [9] 이학주, 김효원, 이규하, “Microphone Array를 이용한 화자 추적 시스템 구현,” TI korea 제4회 DSP 디자인 컨테스트 우수 논문집, 2001.
- [10] 정양원, 강홍구, 이충용, 윤대회, “지연 추적 기능을 갖는 적응 Microphone Array 알고리즘,” 한국통신학회, vol. 30, no. 1C, pp. 54-60, 2005.
- [11] 권기룡, 우창용, 권기창, “3개의 마이크로폰과 음향 시간 지연을 이용한 온라인 인식 적응 능동잡음제거 모델,” 한국통신학회, vol. 5, no. 1, pp. 567-574, 1995.
- [12] 윤종락, “소음원 영상화를 위한 마이크로폰 배열 설계,” 부경대학교 음향진동공학연구소, vol. 2, pp. 169-174, 1997.
- [13] L. Meyer, S. Jayaram, and E. A. Cherney, “Thermal conductivity of filled silicone rubber and its relationship to erosion resistance in the inclined plane test,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, no. 4, Aug. 2004.
- [14] C. Kargel, “Thermal imaging to measure local temperature rises caused by hand-held mobile phones,” *IMTC 2004-Instrumentation and Measurement Technology Conference Como, Italy*, 18-20, May 2004.
- [15] 이기상, “적외선 카메라를 이용한 초고압 변압기의 온도 특성 분석,” 조선대학교, 2003.
- [16] 임용배, “전기설비 진단을 위한 적외선 열화상 온도분포 패턴분석 및 능동시험에 관한 연구,” 홍익대학교, 2006.
- [17] 이학현, “적외선카메라를 이용한 배전선로 결함진단,” 전남대학교 산업대학원, 2003.
- [18] J. Sawada, K. Kusumoto, Y. Maikava, Munakata, and T. Ishikawa, “A mobile robot for inspection of power transmission lines,” *Power Delivery, IEEE Transaction on*, vol. 6, Issue 1, pp. 309-315, Jan. 1991.
- [19] 이채봉, 장비, “음원 위치추정을 위한 음향 홀로그래픽법의 수치 시뮬레이션,” 동서대학교부설연구소, vol. 2, pp. 361-370, 1997.

## 한순신



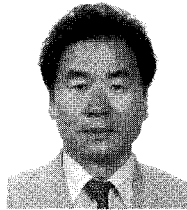
2004년 동서대학교 전자공학과 졸업.  
2006년 부산대학교 전자공학과 석사졸업.  
2007년 3월~현재 부산대학교 전자공학박사과정 재학 중. 관심분야는 센서 융합, 마이크로프로세서 응용.

## 최재영



2007년 동서대학교 정보네트워크 전공 졸업.  
2008년 3월~부산대학교 전자전기공학과 석사과정 재학중. 관심 분야는 영상인식.

## 이장명



1980년 서울대학교 전자공학과 졸업.  
1982년 동 대학원 석사졸업. 1990년 미국 남기주대학교(USC) 컴퓨터공학 박사졸업.  
1992년~현재 부산대학교 전자전기공학부 교수. 관심 분야는 지능로봇 시스템의 설계 및 제어, 마이크로프로세서 응용 및 설계.