

Microphone Array를 이용한 고압설비의 고장위치인식 알고리즘

論 文

57-12-27

An Accidental Position Detection Algorithm for High-Pressure Equipment using Microphone Array

金 得 權* · 韓 順 新** · 河 鉉 旭* · 李 章 明†

(Deuk Kwon Kim · Sun Sin Han · Hyun Uk Ha · Jang Myung Lee)

Abstract - This study receives the noise transmitted in a constant audio frequency range through a microphone array in which the noise (like grease in a pan) occurs on the power supply line due to the troublesome partial discharge (arc). Then by going through a series of signal processing of removing noise, this study measures the distance and direction up to the noise caused by the troublesome partial discharge (arc) and monitors the result by displaying in the analog and digital method. After these, it determines the state of each size and judges the distance and direction of problematic part. When the signal sound transmitted by the signal source of bad insulator is received on each microphone, the signal comes only in the frequency range of 20 kHz by passing through the circuit of amplification and 6th low pass filter. Then, this signal is entered in a digital value of digital signal processing (TMS320F2812) through the 16-bit A/D conversion. By doing so, the sound distance, direction and coordinate of bad insulator can be detected by realizing the correlation method of detecting the arriving time difference occurring on each microphone and the algorithm of detecting maximum time difference.

Key Words : Fault insulator, Cross-correlation, Sound detection, Microphone, Array

1. 서 론

끊임없는 경제성장과 동시에 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, 편애자, 지지애자, 인류애자, 옥내배전용애자, 가지애자 등이 있고, 재료상에 따른 분류로는 자기애자, 유리애자, 폴리머 애자등이 있는데, 현 우리나라에서는 보편적으로 자기애자를 사용하고 있는 실정이다. 이러한 애자가 불량하면 1. 전력 전송 효율 저하로 인한 국가적 손실이 커질 것이고, 2. 불량애자의 부분방전으로 인한 안전성의 문제가 대두 되고, 3. 전력의 불안정한 공급으로 인한 사회 전반에서 예상치 못한 일이 벌어질 것이다. 그에 따라 이러한 불량애자를 측정하는 방식으로는 전계를 검출하거나, 코로나카메라에 의한 검

출 방법이나, 초음파식, 네옴램프식 방법등이 연구되고 제품으로도 나와 있지만, 이러한 검출장치들이 정확도가 떨어지고 정량적이지 못하다는 단점을 가지고 있다 [6]. 그리고 배전선로의 가공 전선은 공급전압과 부하용량 등에 대하여 다양한 종류의 전선이 사용되며 가공전선의 금속재료와 설치 환경 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 배전선로 상에서 발생하는 고장 중 부분방전(아크)으로 인한 소음(지지직거리는 소리)이 일정한 가청주파수대역에서 발생하는 소음을 마이크로폰 어레이를 통하여 수신하고 잡음을 제거하는 등의 일련의 신호처리과정을 거쳐, 고장 중 부분방전(아크)으로 인한 소음원까지의 거리, 방향, 좌표를 측정하고 이를 아날로그 및 디지털로 표시되게 함으로서 고장 여부를 감시한다. 그 결과로 크기 별로 상태

* 學生會員 : 부산대학교 전자공학과 석사과정

** 正 會 員 : 부산대학교 전자공학과 박사과정

† 교신저자, 正會員 : 부산대학교 전자공학과 교수

E-mail : jmlee@pusan.ac.kr

接受日字 : 2008年 8月 8日

最終完了 : 2008年 9月 26日

를 판단하여 고장부의 거리, 방향, 좌표를 판단한다. 종래의 불량기기 검출방법은 관측할 수 있는 부위가 한정 되어 있으므로 정확한 이상 유·무를 판단할 수 없다는 문제점이 있으며[12], 방송파나 자동차 등에서 발생하는 외래 잡음 전파와 불량 기기에서 발생하는 고장 음을 구별하기가 어려운 문제점을 안고 있다[14]. 그래서 위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 고압설비내의 불량한 기기에서 발생하는 고장 음을 검출하여 그 고압설비의 불량 유·무를 판단하는 장치를 설계하고자 한다.

본 논문의 구성은 서론에 이어 2장에서는 마이크로폰으로 들어오는 신호 사이의 시간차를 알기 위해 상호상관 알고리즘(Cross-correlation algorithm)에 대하여 소개 하고, 세 개의 마이크로폰으로 들어오는 고장 신호음을 이 알고리즘을 이용해서 시간차를 구하는 방법에 대하여 설명하였다. 3장에서는 2장에서 구한 시간차를 이용해서 음원이 마이크로폰으로 부터의 거리와 방향 그리고 좌표를 구하는 알고리즘에 대하여 소개 하였다. 4장에서는 본 알고리즘의 실험환경과 실험장치의 구성에 대한 설명과 함께 실험 결과에 대하여 설명하고, 5장에서 실험 결과에 대한 정리 및 향후 연구 방향에 대한 결론을 제시하였다.

2. 도달시간차 알고리즘

고장 중 부분방전으로 인한 음원신호(지지직거리는 소리)를 평면상에서 일정한 간격의 형태로 되어 있는 마이크로폰 어레이에 수신되었을 때, 마이크로폰의 위치, 간격 및 배열 등의 요소에 따라 각 마이크로폰에 수신된 신호음 사이에는 도달시간차가 발생한다. 이 신호음 도달시간차를 검출하여, 수신부로부터 고압설비 고장 신호음까지의 거리, 방향, 좌표를 측정하는 것이 기본적인 알고리즘이다. 고압설비 고장 신호음을 3개의 마이크로폰으로 구성된 수신부에서 수신하고 각 마이크로폰 도달시간차를 검출하여 음원의 위치를 구하는 알고리즘은 다음과 같다. 고압설비 고장 신호음으로부터 발신된 음원 신호의 음파 에너지가 3개의 마이크로폰 어레이로 구성된 수신부에 수신되었다면 어떤 시간 t 에 대하여 i 번째 마이크로폰에 수신되는 신호음 $M_i(t)$ 은 식 (1)과 같이 표현된다[6].

$$M_i(t_i) = s_i(t_i) + n_i(t_i) \quad (1.a)$$

$$M_i(t_i) = s_i(t_1 + \Delta t_{1i}) + n_i(t_i) \quad (1.b)$$

$$M_i(t_i) = s_i(t_1 + \Delta t_{1i}) + n_i \quad (1.c)$$

위 식에서 $s_i(t_i)$ 는 i 번째 마이크로폰에 수신되는 신호, $n_i(t_i)$ 는 i 번째 마이크로폰에 수신되는 외부잡음, Δt_{1i} 는 각 마이크로폰과 임의로 정한 첫 번째 마이크로폰에 도달한 신호와의 시간차를 나타낸다. 여기서 외부잡음은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이라 가정하고, 시간에 독립적인 변수라 생각한다. 고압설비 고장 신호음으로부터 i 번째 마이크로폰까지의 거리 R_i 은 식 (2)와 같이 표현된다[7].

$$R_i = t_i \cdot c [m] \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

위 식에서 t_i 는 고압설비 고장 신호음의 i 번째 마이크로폰까지

지 도달시간, c 는 상온에서의 음파의 속도(=340m/s)를 나타낸다고 할 때, 각 마이크로폰 사이의 고압설비 고장 신호음의 도달시간차를 식 (3)과 같이 표현된다.

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

도달 시간 차이를 이용한 방법은 배열 형태의 배치로 우리가 정한 공간의 차원수 이상의 마이크로폰이 필요하며[8][9], 계산량이 많기 때문에 계산량을 줄이기 위한 알고리즘과[11], 반향 신호의 영향이 많은 곳에서는 신뢰도가 떨어지는 단점이 발생하므로, 이에 대한 연구도 동시에 진행되어야 한다[10].

2.1 상호상관 관계(Cross-correlation Algorithm)

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

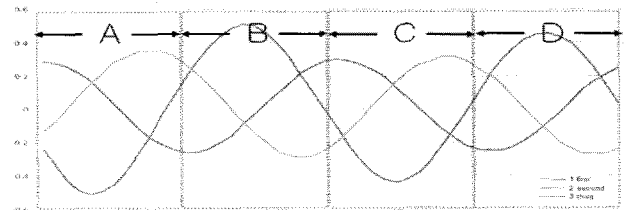


그림 1 세 개의 마이크로폰 으로 들어오는 음파신호
Fig. 1 Sound wave signal into microphone

상호 상관 함수의 핵심 알고리즘은 임의의 한 개 마이크로폰에 파형 ①이 가장 먼저 수신된 고장 음이라 가정하고, 다른 두 개의 마이크로폰에 수신된 다른 고장 음 신호 파형 ②, ③을 비교하여 각 마이크로폰에 도달 하는 시간차를 계산하고, 이러한 시간차를 이용해서 마이크로폰으로부터 음원까지의 거리를 알아내는 방법을 사용한다. 이를 위해 상호상관 알고리즘을 사용하는데 기본 파형 ①을 시간 축으로 이동시키면서 다른 신호와 곱하는 연산을 함으로써 이 결과 값이 최대값이 나왔을 때 샘플링 값을 기준으로 몇칸을 이동하였는지를 알아보는 방법을 사용하고 있다. 이러한 방법으로 알아낸 값에서 샘플링 주기를 곱하여 $\Delta t_1, \Delta t_2$ 를 검출할 수 있다. 고압설비 고장 신호음이 두 마이크로폰 M_1 과 Δt_1 의 시간차를 가지고 수신되었을 때, 식 (4)와 같이 표현된다[7].

$$M_2(t_2) = s_2(t_2) + n_2 \quad (4.a)$$

$$M_2(t_2) = s_1(t_1 + \Delta t_{12}) + n_2 \quad (4.b)$$

식 (4)에서 $s_1(t), s_2(t)$ 는 마이크로폰 M_2 에 들어오는 고압설비 고장음 신호, n_2 는 M_2 에 수신되는 외부잡음이라 정의한다. 외부잡음에 의해 영향을 받지 않을 때, 두신호의 상호상관 함수는 식 (5)와 같이 표현된다[7].

$$C_{x_2 x_1}(\Delta t_1) = E[x_2(t) \cdot x_1(t + \Delta t_{12})] = \overline{x_2(t) \cdot x_1(t + \Delta t_{12})} \quad (5)$$

식 (5)에서 E 는 기대치를 나타내는 것으로 이 기대치가 최대가 되는 Δt_{12} 에서 두 신호의 유사성이 가장 크게 되는 것이고[7], Δt_{12} 이 두 신호의 도달시간차가 되는 것이다. 신호의 관측 시간 T 는 유한한 범위를 가지므로, 식 (6)과 같이 표현된다.

$$C_{x_1x_2}(\Delta t_{12}) = \frac{1}{T} \int_0^T x_2(t_2) \cdot x_1(t_1 + \Delta t_{12}) dt \quad (6)$$

마이크로폰을 통하여 수신되는 신호음은 아날로그 신호이지만, A/D 변환을 거쳐 디지털 값을 가지게 된다. DSP 에서는 임의의 2000개의 샘플링 값을 데이터 셋으로 정하게 되고, 한 개 데이터 셋내에서의 상호상관함수는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$C_{x_1x_2} = \frac{1}{2000} \sum_{n=1}^{2000} x_2(n) \cdot x_1(n) \quad (7)$$

두 신호의 도달시간차를 검출하기 위하여 어느 한 신호를 또 다른 신호로 이동시켜 두 파형이 가장 근사하게 되는 이동량 즉, 상관관계 정도가 가장 높은 이동 래그수 Δn_{12} 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$C_{x_1x_2}(\Delta n_{12}) = \frac{1}{2000} \sum_{n=1}^{2000} x_2(n) \cdot x_1(n + \Delta n_{12}) \quad (8)$$

식 (8)에서 $C_{x_1x_2}(\Delta n_{12})$ 이 최대값을 가지게 하는 Δn_{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. 식 (8)은 신호 x_1 이 Δn_{12} 만큼 이동 하였을 때의 신호 x_2 와의 상호상관 함수를 나타낸 것이다. 신뢰성 높은 Δn_{12} 값을 구하기 위해 앞에서 임의로 정한 데이터 셋으로 2000개 수치군을 4개의 500개 데이터 프레임 수치 군으로 나누어 두 데이터 시퀀스 사이의 상호상관함수를 $A(n=1 \sim 500)$, $B(n=501 \sim 1000)$, $C(n=1001 \sim 1500)$, $D(n=1501 \sim 2000)$ 구간에서 각 구간의 값을 평균값을 구하여 Δn_{12} 를 표현하면 식 (9)와 같이

$$\Delta n_{12} = \frac{\sum_{n=1}^N [(x_1(n-d) - mx_1) \times (x_2(n) - mx_2)]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_1(n-d) - mx_1)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_2(n) - mx_2)^2}} \quad (9)$$

위 식 (9)에서 분모의 각 신호의 크기 값으로 나누어 준 것은 신호 값 자체의 크기로 인해 상관도가 영향 받지 않기 위해 평균화(Normalize)한 값이고, 그 외의 각각의 변수는,

$$n_{12} = \frac{l_{12}}{c} F_s, n_{23} = \frac{l_{23}}{c} F_s \Rightarrow d = -n_{12} \sim n_{12}, -n_{23} \sim n_{23},$$

$mx_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_1(n)$, $mx_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_2(n)$ 로 정의한다. 위 값들에서 c 는 상온에서 공기중 음속으로 $340m/s$, 각 마이크로폰 사이의 거리(l_1, l_2)는 $15cm$, 샘플링 주파수(Sampling frequency, F_s)는 $53KHz$, 최대의 시간차를 가질수 있는 샘플링 개수(n_{12}, n_{23})는 phasor 값으로는 360° , 샘플링 개수로는 50개로 정

의한다. d 는 한 개의 신호음으로부터 좌, 우로 Time shift 시킬 수 있는 범위를 의미하고, mx_1, mx_2 는 두 개의 신호의 평균값을 의미한다.

A, B, C, D 네 구간에 식 (9)를 적용시킨 값을 각각 $\alpha_{x_1x_2}(\Delta n_{12})$, $\beta_{x_1x_2}(\Delta n_{12})$, $\gamma_{x_1x_2}(\Delta n_{12})$, $\delta_{x_1x_2}(\Delta n_{12})$ 라 하면, 전체 2000개 데이터 셋 내에서의 이동 래그수 Δn_{12} 를 구하기 위해서는 각각의 데이터 프레임에서의 시간차의 산술적 평균을 구해서 식 (14)와 같이 계산 한다.

$$\Delta n_{12} = \frac{\alpha_{x_1x_2}(\Delta n_{12}) + \beta_{x_1x_2}(\Delta n_{12}) + \gamma_{x_1x_2}(\Delta n_{12}) + \delta_{x_1x_2}(\Delta n_{12})}{4} \quad (10)$$

식 (14)에서 상호상관 계수를 평균하여 이동 래그수 Δn_{12} 에 샘플링 주기를 곱하여주어, 아날로그 값으로 두 신호의 시간차를 구해보면, 식 (15) 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t_{12} = \frac{\Delta n_{12}}{f_s} [\text{sec}] = \frac{\Delta n_{12}}{53kHz} = \Delta n_{12} \times 18.8679\mu s \quad (11)$$

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

3. 위치인식 알고리즘

3.1 2차원 공간에서의 거리 측정

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

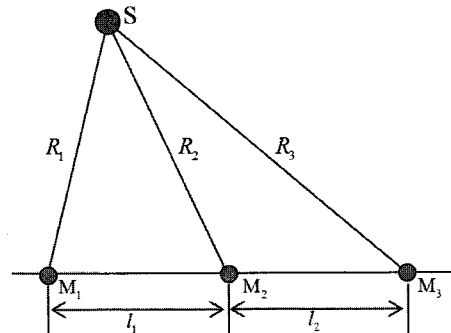


그림 2 2차원 공간에서 음파의 거리 측정원리
Fig. 2 The measurement principal of distance of sound signal in two dimensional space

그림 2에서 고압설비 신호음으로부터 각각의 마이크로폰으로 들어올 때의 거리를 R_1, R_2, R_3 라 하면 각각의 거리는,

$$R_1 = c \cdot t_1 = x \quad (12.a)$$

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

$$R_3 = c \cdot t_3 = c \cdot (t_1 + \Delta t_{13}) = x + c\Delta t_{13} \quad (12.c)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (12)에서 c 는 음파의 속도($= 340m/s$)이고, t_1 는 고압설비 고장 신호음이 인의로 정한 첫 번째 마이크로폰까지 도달하는데 걸리는 시간으로 이 값을 변수로 두고, t_2 는 고장신호음으로부터 두 번째 마이크로폰까지 걸리는 시간인데, 앞에서 상호 상관 알고리즘으로 구한 Δt_{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 (12)와 같이 표현 된다. 도달 시간차와 마이크로폰 간격 길이 정보를 이용해 파푸스의 중선 법칙(Pappus' summary)에 따라 (13)식과 같이 구해지게 된다.

$$\begin{aligned} R_1^2 + R_3^2 &= 2(R_2^2 + l_1^2) \\ x^2 + (x + c\Delta t_{13})^2 &= 2\{(x + c\Delta t_{12})^2 + l_1^2\} \\ 2xc\Delta t_{13} + (c\Delta t_{13})^2 &= 2\{2xc\Delta t_{12} + (c\Delta t_{12})^2 + l_1^2\} \\ 2c(\Delta t_{13} - 2\Delta t_{12})x &= 2l_1^2 + 2(c\Delta t_{12})^2 - (c\Delta t_{13})^2 \\ x &= \frac{2l_1^2 + 2(c\Delta t_{12})^2 - (c\Delta t_{13})^2}{2c(\Delta t_{13} - 2\Delta t_{12})} \end{aligned} \quad (13)$$

이 식에서 x 는 음원으로부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리가 되고, 이 값을 (12.b), (12.c)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 $\triangle SM_1M_2$ 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 (14)과 같이 알 수 있다. 음원이 첫 번째 마이크로폰으로 들어오는 각도를 θ_{M_1} 이라 하면,

$$\theta_{M_1} = \cos^{-1} \frac{R_1^2 + l_1^2 - R_2^2}{2R_1l_1} \quad (14.a)$$

과 같이 구할 수 있고, 같은 방법으로 다른 두 마이크로폰에 대해 똑같은 알고리즘을 적용시키면,

$$\theta_{M_2} = \cos^{-1} \frac{R_2^2 + l_1^2 - R_1^2}{2R_2l_1} \quad (14.b)$$

$$\theta_{M_3} = \cos^{-1} \frac{R_3^2 + l_2^2 - R_2^2}{2R_3l_2} \quad (14.c)$$

와 같이 구할 수 있다.

3.3 좌표 측정

3.3.1 2차원 좌표 측정

그림 2에서 $\triangle SM_1M_2$ 를 그림 3과 같이 두 개의 삼각형으로 나누고, 앞에서 구한 거리 정보를 바탕으로 M_1 을 원점으로 거리

좌표를 만들게 되면 $M_1 = (0,0)$, $M_2 = (l_1,0)$, $M_3 = (l_1+l_2,0)$ 로 정의 할 수 있다. 음원의 좌표를 $S=(a,b)$ 라고 할 때, 다음의 점선으로 둘러싸인 두 개의 삼각형으로부터, 피타고라스 정리를 사용하게 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 (a,b) 를 구하게 되면,

$$a = \frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1} \quad (15.a)$$

$$b = \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}\right)^2} \quad (15.b)$$

로 나타낼 수 있다.

$$\therefore S = \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}, \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{R_1^2 - R_2^2 + l_1^2}{2l_1}\right)^2} \right) \quad (15.c)$$

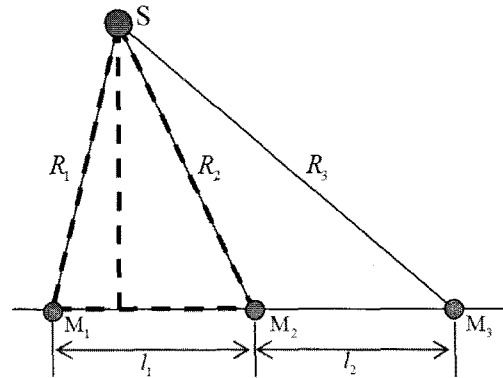


그림 3 2차원 공간에서 좌표 측정

Fig. 3 Coordinate detection in two dimensional space

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.

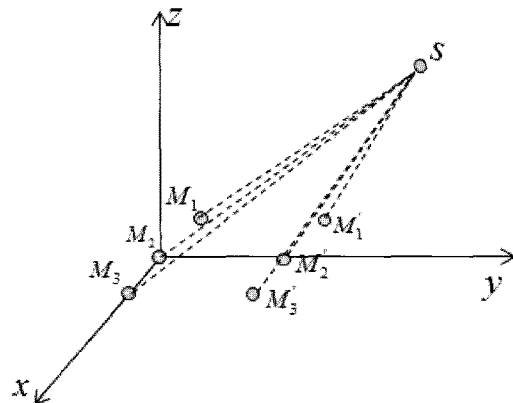


그림 4 3차원 공간에서 좌표 측정

Fig. 4 Coordinate in three-dimensional space

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 $M'_1(-l_1,e,0)$, $M'_2(0,e,0)$, $M'_3(l_2,e,0)$ 로 정의할 수 있다고 하면 이 알고리즘을 적용 하였을 때, l_1 , l_2 , d , d' , Δt_{12} , Δt_{13} , $\Delta t'_{12}$, $\Delta t'_{13}$, c 값은 우리가 구성한 시뮬레이션 환경이나, 실험에 따른 앞의 상호상관 알고리즘을 통해 알 수 있는 값이고, a , b , c , t_1 , t'_1 는 아직 알 수 없는 값인데, 현 시스템에서 변수 값이 5개 이고, 식은 6개 이므로 이 시스템은 단 하나의 해를 가지도록 답을 구할 수 있다. 그 해를 찾기 위해 고압설비 고장 신호음의 좌표로부터 각각의 마이크로폰까지의 거리를 정의하면, 마이크로폰 M_1 에서 고장설비 고장 신호음까지의 거리는,

$$\overline{M_1S} = \sqrt{(a+l_1)^2 + b^2 + c^2} = c \cdot t_1 = d_1 \quad (16.a)$$

가 되고 같은 방법으로 $\overline{M_2S}$, $\overline{M_3S}$ 를 구하면,

$$\overline{M_2S} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} = c \cdot (t_1 + \Delta t_{12}) = d_2 \quad (16.b)$$

$$\overline{M_3S} = \sqrt{(a-l_2)^2 + b^2 + c^2} = c \cdot (t_1 + \Delta t_{13}) = d_3 \quad (16.c)$$

가 된다. 시뮬레이터가 이동한 후의 평면에서 각 마이크로폰에서 신호음까지의 거리는,

$$\overline{M'_1S} = \sqrt{(a+l_1)^2 + (b-e)^2 + c^2} = c \cdot t'_1 = d'_1 \quad (17.a)$$

$$\overline{M'_2S} = \sqrt{a^2 + (b-e)^2 + c^2} = c \cdot (t'_1 + \Delta t'_{12}) = d'_2 \quad (17.b)$$

$$\overline{M'_3S} = \sqrt{(a-l_2)^2 + (b-e)^2 + c^2} = c \cdot (t'_1 + \Delta t'_{13}) = d'_3 \quad (17.c)$$

로 정의 할 수 있다. 시뮬레이터의 하드웨어 구성에서 $l_1 = l_2$ 라고 가정하고 (16.a)와 (16.c)를 연산하면,

$$4al_1 = -2c^2t_1\Delta t_{13} - (c\Delta t_{13})^2 \quad (18.a)$$

가 되고, (16.a)와 (16.b)를 연산하면,

$$2al_1 + l_1^2 = -2c^2t_1\Delta t_{12} - (c\Delta t_{12})^2 \quad (18.b)$$

가 된다. (18.a)와 (18.b)를 연산하면,

$$t_1 = \frac{2l_1 - c^2\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \quad (19)$$

의 값을 가지게 되고, 같은 알고리즘을 식 (17)에 적용하면,

$$t'_1 = \frac{2l_1 - c^2\{(\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \quad (20)$$

로 정의 할 수 있다. 식 (19)와 식 (20)에서 구한 t_1 과 t'_1 를 다시 식 (16)과 (17)에 대입하여 정리 하게 되면,

$$d_1 = \frac{2d_1 - c^3\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \quad (21.a)$$

$$d_2 = \frac{2d_1 - c^3\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2 + 2\Delta t_{12}(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \quad (21.b)$$

$$d_3 = \frac{2d_1 - c^3\{(\Delta t_{13})^2 - (\Delta t_{12})^2 + 2\Delta t_{13}(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})\}}{2c^2(\Delta t_{13} - \Delta t_{12})} \quad (21.c)$$

$$d'_1 = \frac{2d_1 - c^3\{(\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2\}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \quad (21.d)$$

$$d'_2 = \frac{2d_1 - c^3\{(\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2 + 2\Delta t'_{12}(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})\}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \quad (21.e)$$

$$d'_3 = \frac{2d_1 - c^3\{(\Delta t'_{13})^2 - (\Delta t'_{12})^2 + 2\Delta t'_{13}(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})\}}{2c^2(\Delta t'_{13} - \Delta t'_{12})} \quad (21.f)$$

로 구할 수 있다. 복잡해 보이지만 모두 알고 있는 값이기 때문에 프로세서 연산으로 간단히 얻을 수 있다. 실제 좌표값을 알기 위해서 식 (16)와 식 (17)을 제곱하여 나타내면,

$$(a+l_1)^2 + b^2 + c^2 = d_1^2 \quad (22.a)$$

$$a^2 + b^2 + c^2 = d_2^2 \quad (22.b)$$

$$(a-l_2)^2 + b^2 + c^2 = d_3^2 \quad (22.c)$$

$$(a+l_1)^2 + (b-e)^2 + c^2 = d_1'^2 \quad (23.a)$$

$$a^2 + (b-e)^2 + c^2 = d_2'^2 \quad (23.b)$$

$$(a-l_2)^2 + (b-e)^2 + c^2 = d_3'^2 \quad (23.c)$$

이 되고, 식 (22.a)-(22.b)을 연산하여 정리하면,

$$a = \frac{d_1^2 - d_2^2 - l_1^2}{2l_1} \quad (24.a)$$

가 되고, 식 (22.b)-(23.b)를 연산하여 정리하면,

$$b = \frac{d_2^2 - d_2'^2 - e^2}{2e} \quad (25.b)$$

식(24), (25)을 식 (22.b)에 대입하여 정리하면,

$$c = \sqrt{d_2^2 - \left(\frac{d_1^2 - d_2^2 - l_1^2}{2l_1}\right)^2 - \left(\frac{d_2^2 - d_2'^2 - e^2}{2e}\right)^2} \quad (31.c)$$

$$S = \left(\frac{d_1^2 - d_2^2 - l_1^2}{2l_1}, \frac{d_2^2 - d_2'^2 - e^2}{2e}, \sqrt{d_2^2 - \left(\frac{d_1^2 - d_2^2 - l_1^2}{2l_1}\right)^2 - \left(\frac{d_2^2 - d_2'^2 - e^2}{2e}\right)^2}\right)$$

와 같이 3차원 좌표를 얻을 수 있는데 앞선 식 (21)을 적용하면 3차원 공간에서의 고압설비 고장음의 좌표 값을 알 수 있다.

4. 실험 및 결과

본 논문에 사용된 실험의 시뮬레이터는 크게 데이터 수집부분과 프로세서 연산처리 부분으로 구성된다. 데이터 수집부분은 마이크로폰으로 들어오는 신호를 오프셋을 제거하기 위한 고역통과 필터 와 증폭기, 그리고 알리아싱(Aliasing)과 직류 성분을 없애기 위한 대역통과 필터를 거치고, 16bit, 100ksp/s A/D 변환회로 부분으로 구성되어있다. 연산처리 부분은 TMS320F2812 DSP 버스형 모듈을 사용하여 신호 처리를 담당하고 있다. 데이터 수집부분을 통해서 들어온 신호가 신호처리 과정을 통해 프로세서 부분에서 고장 고압설비 신호음의 도달 시간차, 거리, 방향, 좌표를 연산한다. 데이터 수집부분과 프로세서 연산 처리부분을 개략적으로 표현하면 그림 5와 같이 표현된다.

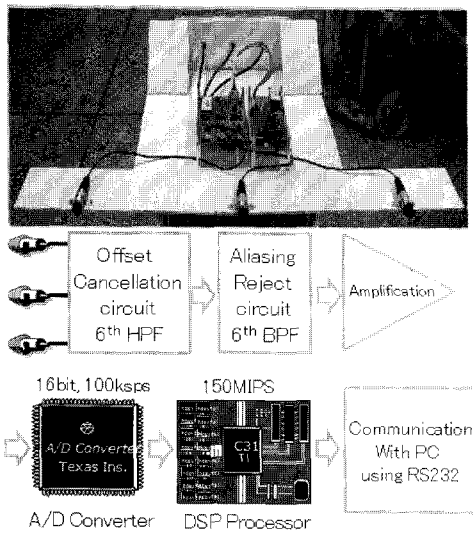


그림 5 시스템 블록 다이어그램
Fig. 5 System block diagram

시스템의 전체 알고리즘을 살펴보기 위한 순서도는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

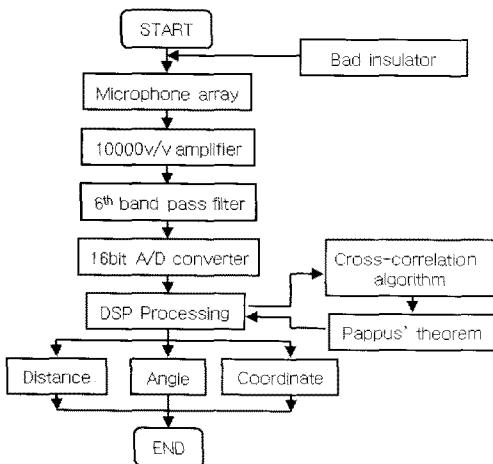


그림 6 실험 순서도
Fig. 6 Experimental flow chart

본 연산이 진행되는 동안 DSP 모듈은 PC와 지속적으로 시리얼통신(U-ART communication)을 하며 신호음에 대한 정보나 DSP에서 연산하여 나온 결과 거리, 각도, 좌표 정보를 전송하게 되는데, 이 고압설비의 신호음을 PC에서 Matlab을 이용하여 도식화 해보면 그림 7과 같이 얻을 수 있다.

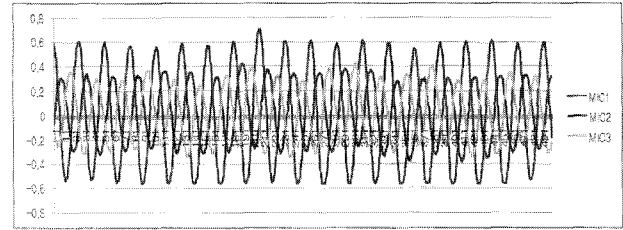


그림 7 세 개의 마이크로폰 으로 들어오는 음파신호
Fig. 7 Sound signal coming into three Microphones

DSP에서 상호상관 알고리즘을 적용시켜 얼마의 시간차가 있었는지를 계산하고 그만큼을 이동시켜서, 위상각을 맞추어서 나타내면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

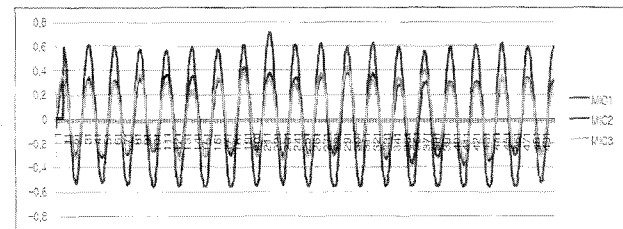


그림 8 상호상관 알고리즘 적용후의 음파신호
Fig. 8 Sound signal applied cross-correlation algorithm

그림 9는 각각 1.3m, 2m, 3m, 4m 에서 위치알고리즘을 적용한 후의 추종성능에 대한 비교 실험결과이다. 1.5초 간격으로 20개의 데이터 받아 분석한 결과 오차범위가 큰 데이터 값들은 주변의 소음에 의한 값으로서 디지털 필터링이 필요하다. 확률분포를 사용하여 디지털 필터링한 출력거리는 그림 9와 같이 도식화된다.

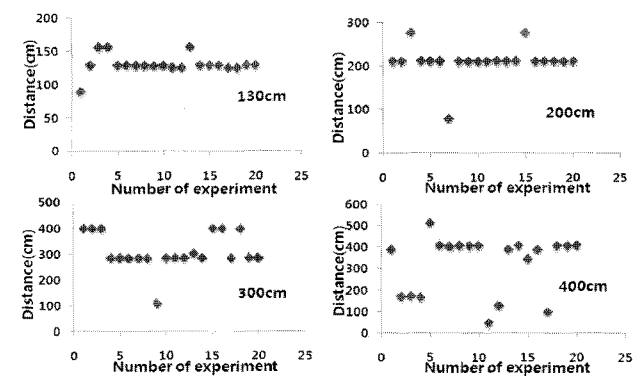


그림 9 출력 거리
Fig. 9 Output distance

그림 10은 각각 1.3m, 2m, 3m, 4m에서 확률분포 함수를 적용 후의 추종성능에 대한 비교 실험결과이다. 실제 거리와 가까운 데이터 값들은 50%이상의 분포도를 가지고 오차범위는 $\pm 15\text{cm}$ 를 가진다.

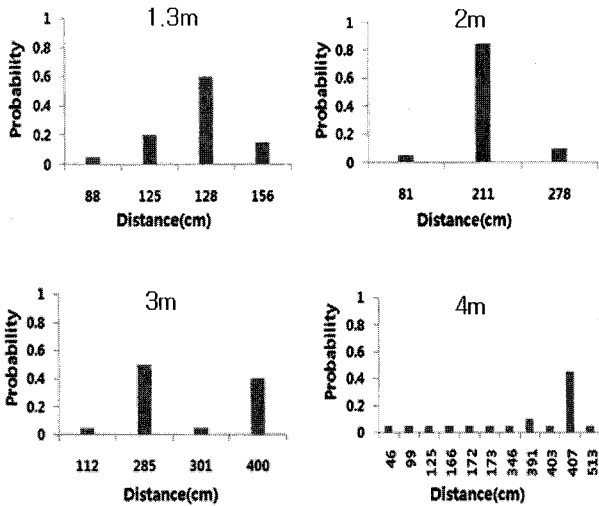


그림 10 확률 분포에 의한 출력거리
Fig. 10 Output distance by probability distribution

앞에서 구한 디지털 값을 이용해 각각의 구간에서 평균과 표준편차를 구하고 구해진 평균과 표준편차를 이용해 음원의 거리 정보를 가우시안분포로 도식해 보면,

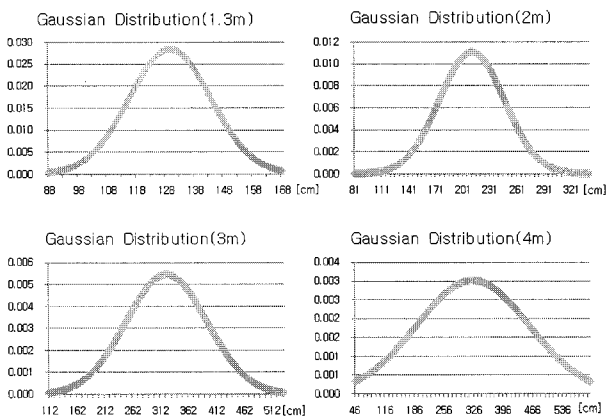


그림 11 가우시안 분포에 의한 출력거리
Fig. 11 Output distance by Gaussian distribution

과 같이 나타낼 수 있다. 가우시안 분포를 도식해 보면 A/D 변환 과정에서의 절단 오차나 100ksps의 제한된 샘플링 주기에 따른 aliasing으로 인한 오차를 거리에 대한 분포도를 통해 봄으로써 시각화 해볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로폰 어레이를 이용하여 고압설비 고장음의 발생 거리, 방향 및 좌표를 추적하는 실험을 연구해 보았다. 고압설비의 고장신호음은 평면상에서 일정간격으로 배열된 3개의 저가의 마이크로폰 배열로 수신되고 수신된 음원은 데이터 수집회로를 통해서 TMS320F2812 DSP 버스형 모듈로 전달되어 실시간 측정이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 본 논문에서 제시한 시뮬레이션 환경으로 만든 고압설비의 고장 위치 인식 알고리즘을 적용하여 추종성능을 비교한 결과 오차를 가지는 결과가 나왔다. 분석된 오차의 원인으로는 1. A/D 변환기의 양자화 비트수와 처리속도의 trade off. 2. 반향신호에 대한 영향이나 잡음의 하울링효과로 인한 예측 불가능한 잡음레벨. 3. DSP 프로세서의 제한된 처리속도로 인한 sampling 시간의 제한. 4. 고압설비 고장신호음의 주파수 대역에 따른 마이크로폰 어레이 사이의 거리변화. 5. 지향성 마이크로폰이지만 마이크로폰 뒷부분의 잡음레벨의 추정으로 인한 SNR 계산. 등이 있었다. 거리가 멀어질수록 커지는 오차 값을 제거하기위해서 확률분포함수를 적용하여 실험한 결과 실제 거리와 가까운 데이터 값들은 높은 분포도를 가지고 오차범위는 $\pm 15\text{cm}$ 을 가지게 되었다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육과학기술부·지식경제부의 출연금으로 수행한 산학협력 중심대학 육성사업의 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 강대수, "배전선로 불량애자 검출에 관한 연구", 한국통신학회 논문지, Vol. 25, No. 6T, 00-25-6T-8, 2006.06.
- [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] 조연욱, "송전선로의 코로나에 의한 전파잡음 통계적 예측 모델," 전기학회지, Vol. 35, No. 5, pp. 290-294, 1986.
- [4] 조연욱, "송전계통의 코로나에 의한 라디오잡음 분석," 전기학회지, Vol. 35, No. 1, pp. 5-10, 1986.
- [5] Sawada, J. Kusurnoto, K. Maikava, Y. Munakata, 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.

- [6] G. Clifford Carter and Phillip B. Abraham, "Estimation of source motion from time delay and time compression measurements," J. Acoust. Soc. pp. 830-832, 1980.
- [7] 문성배, "마이크로폰 어레이를 이용한 船舶 汽笛音源 追跡에 관한 研究," 한국해양대학교 박사 논문, 2002.
- [8] T. Nishiura, T. Yamada, S. Nakamura, 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, "마이크로폰 어레이를 이용한 화자 추적 시스템 구현," TI korea 제4회 DSP 디자인 컨테스트 우수 논문집, 2001.
- [10] 정양원, 강홍구, 이충용, 윤대회, "지연 추정 기능을 갖는 적응 마이크로폰 어레이 알고리즘," 한국통신학회, Vol. 30, No. 1C, pp. 54-60, 2005.
- [11] 권기룡, 우창용, 권기창, "3개의 마이크로폰과 음향 시간지연을 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] 조기량, 조의주, 박영창, "잡음 섞인 신호의 해석과 잡음제거," 여수대학교, Vol. 14, No. 2, pp. 253-256, 1999.
- [14] 권기룡, 우창용, 권기창, "3개의 마이크로폰과 음향 시간지연을 이용한 온라인 인식 적응 능동잡음제거 모델," 한국통신학회 전문대학 논문지, Vol. 5, No. 1, pp. 567-574, 1995.
- [15] 이채봉, 장비, "음원 위치수정을 위한 음향 홀로그래픽 법의 수치 시뮬레이션," 동서대학교부설연구소, Vol. 2, pp. 361-370, 1997.



한 순 신 (韓 順 新)

2004년 동서대학교 전자공학과 졸업.
 2006년 부산대학교 전자공학과 석사졸업.
 2007년 3월~ 현재 부산대학교 전자공학 박사과정 재학 중. 관심분야는 센서융합, 마이크로프로세서 응용.
 Tel : 051-518-1697
 Fax : 051-514-1693
 E-mail : aptldk0229@pusan.ac.kr



하 현 옥 (河 鉉 旭)

2008년 부산대학교 전자전기통신공학과 졸업. 2008년 3월~ 부산대학교 전자전기공학과 석사과정 재학중.
 관심 분야는 Inverted pendulum, Humanoid, Non-linear systems.
 Tel : 051-518-1697
 Fax : 051-514-1693
 E-mail : hhook@pusan.ac.kr



이 장 명 (李 章 明)

1957년 11월 22일 생. 1980년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982년 동대학원 석사. 1990년 미국 남가주대학교(USC) 컴퓨터공학 박사. 1992년~ 현재 부산대학교 전자 전기 통신 공학부 교수. 연구분야는 로보틱스, 유비쿼터스 위치인식 시스템 및 지능제어.
 Tel : 051-518-1697
 Fax : 051-514-1693
 E-mail : jmlee@pusan.ac.kr

저 자 소 개



김 득 권 (金 得 權)

2006년 한국방송통신대학교 컴퓨터공학과 졸업. 2006년 9월~ 현재 부산대학교 전자공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 센서융합, 마이크로프로세서 응용설계, 음성인식, 로보틱스. 모터구동 제어.
 Tel : 051-518-1697
 Fax : 051-514-1693
 E-mail : kdkgood@pusan.ac.kr