공학석사 학위논문

초음파 센서를 이용한 굴삭기용 장애물 인식 시스템에 관한 연구

A Study on an Obstacle Recognition System for Excavator Using Ultrasonic Sensors

울 산 대 학 교 대 학 원
제 어 계 측 공 학 과
김 성 호

초음파 센서를 이용한
굴삭기용 장애물 인식 시스템에 관한 연구

A Study on an Obstacle Recognition System for Excavator Using Ultrasonic Sensors

지도교수 박 경 섭

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2000 년 12 월

울 산 대 학 교 대 학 원
제 어 계 측 공 학 과
김 성 호

김성호의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원　　이 홍 희　　(인)

심사위원　　조 강 현　　(인)

심사위원　　박 경 섭　　(인)

울 산 대 학 교　대 학 원

2000 년　12 월

[국문요약]

초음파 센서를 이용한 굴삭기용 장애물 인식 시스템에 관한 연구

울산대학교 대학원
제어계측공학과
김 성 호

굴삭기는 구조적인 특성상 운전자 시계 사각지역을 가지고 있기 때문에 이 지역에서 작업하는 작업자들을 운전자가 발견하지 못하여 산재 사고가 자주 발생한다. 본 논문에서는 굴삭기 운전자 시계 사각지역내의 장애물에 대한 정보(감지방향과 거리)를 운전자에게 제공함으로써 사고를 예방할 수 있는 굴삭기의 장애물 인식 시스템을 개발하였다. 이를 위해, 대표적인 거리 검출용 센서들의 특성 조사를 통한 장애물 인식 센서로서 적합한 초음파 센서를 선정하였으며, 주 제어기와 다수의 센서 모듈간에 CAN을 적용한 초음파 센서 장애물 인식 시스템을 설계, 제작하였다. 초음파 센서는 공기를 매체로 하는 Acoustic Wave를 이용하므로 그 특성상 필연적으로 외부 소음에 따른 오동작의 위험이 따른다. 따라서 굴삭기 자체에서 발생하는 소음과 진동, 버켓 조작 시 외부 물체와의 충돌로 인한 소음, 그리고 주위의 작업자들로부터 발생하는 소음 등 작업현장에서 발생할 수 있는 잡음을 제거하기 위해 Cross-Correlation 및 Certainty Map 기법을 사용한 알고리즘을 개발하여 시스템에 적용하였다. 이 알고리즘을 적용한 센서 모듈의 장애물 검출 성능은 인체 및 표준 반사체를 6m 거리에서 검출하였고 외부 소음에 대하여 강인한 특성을 보였다.

주요어 : Obstacle Recognition, Histogramic Probability Distribution Method, Certainty Map, Certainty Value

목 차

표 목록

그림 목록

1 서론

건설 현장에서의 안전사고 중 굴삭기에 의한 사고가 건수나 피해정도로 볼 때 상당한 비중을 차지하고 있으며 특히 돌발 장애물(작업자 포함)로 인한 산재 사고가 빈번하다. 굴삭기에 의한 인명재해의 주 요인은 구조적인 특성상 운전자 시계 사각지역(장비 우측과 후방)을 가지고 있어 이러한 사각지역에서 작업 또는 사각지역으로의 돌발 침입하는 작업자들을 운전자가 발견하지 못하여 발생한다[1,2]. 이러한 운전자 시계 사각지역내의 장애물에 대하여 정확하고 신속하게 정보를 제공한다면 많은 사고를 미연에 방지할 수 있다.

장애물에 대한 굴삭기의 안전장치와 관련된 연구는 주로 일본에서 활발한 연구가 진행중이다. 일본 건설성과 신-카타필라社는 후방 3개소에 초음파 센서를 설치하여 굴삭기의 작업 반경내의 장애물의 유무를 검출해 내려는 시도를 하였으며[3], 역시 일본 건설성과 9개 건설장비 및 센서관련업체들은 8개의 초음파 센서를 적용하여 감지영역 이내에 대한 탐색과 동시에 동작 제한 영역을 설정하도록 하는 연구를 수행하였다[4]. 초음파 센서 이외에도 카메라와 접촉 센서를 이용한 연구도 있었다[1]. 또한 굴삭기는 아니지만 일본의 고마쯔社는 안전감시용 센서로 밀리파 레이더를 개발하여 건설산업용 덤프트럭에 적용 시험한 결과도 있었다{5}. 그러나, 아직까지는 실제 적용될 수 있을 정도의 신뢰도 확보 및 작업효율 저하 문제로 실차 적용을 미루고 있는 것으로 판단된다.

본 논문은 굴삭기 운전자의 시계 사각지역을 제거함으로써 굴삭기 작업의 안전성 및 신뢰도를 향상시킬 수 있는 견실한 장애물 인식 시스템 개발을 목적으로 한다. 이를 위해 먼저 대표적인 거리 검출용 센서들의 특성 비교를 통해 선정한 초음파 센서의 특성 시험을 통해 환경 노이즈에 견실한 장애물 인식 알고리듬의 필요성을 입증하고, 선정한 센서를 이용한 장애물 인식 시스템을 설계, 제작하여 실차(굴삭기)에서 실험을 수행하였다.

본 논문에서는 굴삭기에서의 운전자 시계 사각지역을 검출하기 위하여 10개정도의 초음파 센서를 장착하여 고유의 검출영역을 부여하고 이 검출영역을 1차 경보지역, 2차 경보지역, 3차 경보지역으로 세분화하여 센서들을 연동시켜 위험 거리에 작업자나 물체가 있을 경우 작업을 중지시킬 수 있도록 하기 위한 시스템을 구현하였다. 초음파 센서는 공기를 매체로 하는 Acoustic Wave를 이용하므로 그 특성상 필연적으로 외부 소음에 따른 오동작의 위험이 따른다. 따라서 굴삭기 자체에서 발생하는 소음과 진동, 버켓 조작 시 외부 물체와의 충돌로 인한 소음, 그리고 주위의 작업자

들로부터 발생하는 소음 등 작업현장에서 발생할 수 있는 소음 측정 시험을 통해, 환경 초음파 노이즈에 견실한 장애물 인식 알고리즘의 필요성을 입증하였다. 초음파 센서는 대형 트럭용으로 개발된 Polaroid사의 9000시리즈를 사용하였다. 소음제거를 위하여 단품모듈에서는 Cross Correlation 기법을 사용하여 자신이 송신한 신호만을 검출하도록 하였으며, 주 제어부는 Certainty Map 기법을 사용하여 불연속적으로 입사되는 외란 잡음을 제거하고자 한다.

2 초음파 센서 시스템 개발

2.1 굴삭기 장애물 검출용 센서의 선정 검토

굴삭기에서 운전자의 시계 사각지역은 대략 그림 1과 같이 표현된다. 이러한 사각 내에 존재하는 사람 등의 장애물을 검출하기 위하여 초음파, RF 센서, 초전형 적외선 센서, PSD(Position Sensitive Detector), 레이저 센서 등의 센서들을 검토하였다.

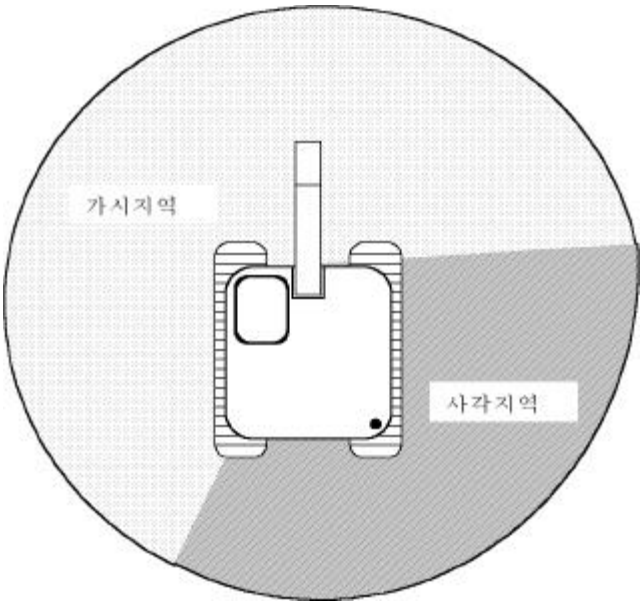


그림 1. 굴삭기 운전자의 사각지역의 도시

각 센서들의 최대 검출거리는 모두 10m 이상이다. 따라서 검지거리에 의한 특성비교는 의미가 없을 것으로 본다. 여기서는 거리 분해능, 검출범위, 환경특성, 적용사례 등으로 비교 분석하고자 한다. 표 1은 굴삭기용 물체 검출로 사용 가능한 센서들의 특성을 비교 및 검토한 것이다.

표 1. 대표적인 거리검출 센서들의 특성 비교

항목	RF센서	LASER	PSD	초음파	초전센서
검출 거리	◎	◎	△	△	△
분해능	◎	◎	△	⊙	X
검출 범위(각) 제어	◎	◎	△	X	△
비의 영향	⊙	△	△	⊙	△
안개,연기,눈의 영향	◎	△	X	⊙	X
진흙의 영향	⊙	X	X	△	X
EMI	△	⊙	⊙	◎	◎
상호 간섭도	△	⊙	⊙	⊙	X
인체 위험도	◎	△	⊙	◎	◎
크기	◎	△	△	◎	◎
유지 보수	◎	△	⊙	◎	⊙
가격	△	X	⊙	◎	◎

◎ : 아주 좋음 ⊙ : 좋음 △ : 보통 X : 나쁨

(1) RF 센서

전파를 사용하는 RF 센서의 경우 거리분해능에서 우수한 특성을 얻을 수 있다. RF 센서의 특성상 전파의 변조방식 및 알고리즘의 차이에 따라 특성에 많은 차이를 보인다. Pulse Doppler 센서의 경우 거리검출보다는 속도 검출에 많은 특성이 좌우되므로 속도변화가 없는 정지 물체 검출용으로는 사용이 불가능하다. FM-CW(Frequency Modulated Continues Wave) 센서의 경우 정지 물체의 검출이 가능하면서 속도의 검출도 가능하다. 그러나 속도 분해능과 거리분해능이 반비례관

계에 있어서 양쪽의 분해능을 동시에 올리지 못하는 단점이 있다. 센서의 검출범위의 제어는 안테나의 설계변경에 의해 변경이 가능하다. 각도 검출을 위해서는 앞서 언급한 방식들 외에 Patch Array 기법이나, Mono Pulse기법을 부가적으로 사용하여야만 한다. 차량용으로 개발된 RF 센서들의 경우 평균적으로 검출각도 10도 범위에서 분해능1도를 보장하며, 일부업체(DASA etc.)의 경우 0.1도의 각도 분해능을 가진다. RF 센서는 전파의 진행을 방해하는 유전체가 센서 전방에 없다면 검출에 별다른 영향을 받지 않는다. 특히, 폭우가 내릴 경우, 여타 어떤 센서시스템과 비교해서도 안정적인 동작특성을 보인다. 유일하게 환경에 대한 영향을 받는 경우가 센서의 전면에 얼음이 얼어 있을 경우인데 이는 얼음이 전파의 안테나 렌즈 기능을 하여 전파를 산란시키기 때문이다. 그러나 현재 적용 가능한 어떠한 센서 시스템도 결빙의 경우에는 정상적인 작동을 하지 못한다. 그러나 근거리의 검출 기능은 결빙의 경우, 약간의 오차를 보이지만 작동한다. 이러한 결론으로 볼 때 환경특성에 대한 강인성은 RF 센서가 가장 큰 것으로 보인다. 현재 10 30m이내의 근거리 검출용 센서는 실내 도난경보기 등에 적용되어 판매되고 있으며, 차량의 후방경보용 센서로도 개발되어 판매되고 있다. 150m 이상의 거리 검출이 가능한 RF 센서는 차량의 정속 유지 및 자동차간의 거리유지 장치인 ICC(Intelligent Cruise Controller)에 적용되어 사용되고 있으며, 수십에서 수백Km의 거리검출이 가능한 레이더의 경우 항공 항만 관제용으로 폭넓게 적용되어 사용되고 있다. 3 4년 전까지만 하더라도 RF 센서의 가격은 매우 고가여서 산업 및 민수용의 적용이 불가능하였으나 현재 자동차업체를 필두로 양산 체제에 들어가면서 150m 이상의 원거리 레이더의 경우에도 가격이 수십만원대로 떨어지고 있으며, 근거리용의 센서는 10만원대 미만의 가격으로 적용이 가능하다.

(2) 레이저 센서

가장 정교한 거리 검출이 가능한 레이저 센서는 일반적인 저가형의 시스템이라도 거리 분해능이 1cm미만의 오차를 보인다. 최대 검출거리는 RF 레이더보다는 짧지만 수백에서 수Km까지 검출이 가능하고, 속도를 직접적으로 측정하지는 못하지만 빠른 샘플링을 이용하여 간접측정이 가능하다. 레이저 센서 시스템은 빛의 특성 때문에 환경에 대해서 취약한 면을 보인다. 특히, 비가 올 경우, 안개가 끼어 있을 경우, 먼지가 있을 경우 검출거리가 많이 떨어지며, 비의 양에 따라 오동작의 가능성이 크다. 따라서 환경에 대하여 취약한 면을 보인다. 레이저 센서 시스템은 기본적으로 빛의 직진 선상의 한 점에 대한 정보만을 얻을 수 있다. 따라서 어떤 범위를 검출하기 위해서는 스케닝이 필수적이다. 이를 위해서 모터에 의해 구동되는 광학 기구부가 존

재하게 되므로 진동이나 충격에 취약한 면을 보인다. 현재 레이저 거리 검출 센서는 토목 측량, 정밀 위치검출 등의 산업분야에 응용되고 있다.

(3) PSD(Position Sensitive Detector)센서

적외선 센서와 연동되어 근거리 물체검출용으로 사용되며, 입사되는 광의 초점의 위치에 따라서 전류의 평형이 달라지는 센서의 특성을 이용하여 거리를 검출한다. 센서의 특성이 Linear 센서로서 광학부의 정밀도에 따라서 1mm 이하의 거리 분해능을 구현할 수 있다. 그러나, 역시 적외선의 광원을 이용하므로 비가 올 경우, 안개가 끼어 있을 경우, 먼지가 있을 경우 오동작 및 검출거리의 감소를 유발하게 된다. 현재 모든 자동카메라의 자동 초점 조절용 센서로 적용되어 사용되고 있으며, 차량에서 앞좌석 승객의 자세를 검출하기 위한 센서로 적용 검토되고 있다.

(4) 초음파 센서

공기의 Acoustic Wave를 이용하여 거리를 검출하는 초음파 센서의 검출거리는 최대 10m, 분해능도 5cm 정도여서 상대적으로 광학센서나, RF 센서에 비해 떨어진다. 그러나 초음파 센서는 공기의 진동을 이용하여 장애물 검출 및 거리를 계측하므로 비가 올 경우에도 동작 성능에 영향을 거의 받지 않는다. 또한, 안개가 끼어 있을 경우와 먼지가 많이 발생하는 환경에서도 안정적으로 거리의 검출이 가능하다. 또한 시속 40Km/h 이하의 바람에서는 별반 영향을 받지 않으므로 환경에 대하여 매우 안정적이다. 초음파 센서는 센서의 매체자체가 공기의 Acoustic Wave를 이용하므로 그 특성상 필연적으로 외부 소음에 따른 오동작의 위험이 따른다. 그러나 주기적인 계측이 일어나는 초음파 신호와 비주기적인 초음파 잡음은 서로 구별되며, 이를 이용한 잡음제거방법이 많이 연구되고 있으며, 휴리스틱 잡음 제거 필터를 구성할 경우 제거가 가능하다. 특히, 초음파 센서는 가격적인 측면에서 단품가격이 수만원대여서 가격적인 측면에서 매우 유리하며, 이를 어레이로 배치하는 등의 응용이 가능하다.

(5) 초전형 적외선센서

초전형 적외선 센서는 인체에서 발사되는 열적외선을 검출 가능하므로 사람의 진입유무 검출이 가능하다. 거리분해 능력은 기본적으로 가지고 있지 않으나, 수신감도를 조절하여 검지거리를 조절하는 것이 가능하다. 검출범위의 조절은 렌즈를 사용하

여 조절하는 것이 가능하다. 따라서 실내에 사람의 진입여부를 검출하는 센서로는 많이 응용되고 있다. 그러나 옥외에서 사용할 경우 직사광이나 열잡음에 취약하여, 오동작의 유발이 가능해 옥외에서 사용하는 센서 시스템에서는 적용되지 않고 있다.

2.2 굴삭기 장애물 검출용 센서의 선정

지금까지 굴삭기 주변 장애물 검출에 사용 가능한 각종 센서들을 비교 검토하였다. 검출거리와 분해능, 검출 범위에서 RF 센서와 레이저 센서 같은 경우에 초음파 센서 보다 성능이 우수한 편이지만 이는 장거리 기준(150m)일 때이므로, 굴삭기의 작업환경의 범위인 근거리(10m이내)에서는 초음파 센서의 검출거리의 단위가 cm이하로 측정 가능하므로 RF 센서와 레이저 센서에 비해 그 특성이 큰 문제가 되지 않는다. 초음파 센서는 넓은 검출 범위를 가지고 있고, 검출각을 조절하는 것이 쉽지 않아 일반적으로 불리한 것으로 나타나지만, 본 논문에서 응용하는 방향에서는 오히려 일정한 범위를 가지고 있는 것을 이용할 수 있을 것으로 보여 더 유리할 것으로 본다. 인체 위험도에 있어서도 레이저 센서와 적외선 광을 이용한 PSD는 직접적으로 그 광원을 인체의 눈에 노출시켰을 때 안구손상 등의 위험이 있지만 Acoustic Wave를 사용하는 초음파 센서의 경우는 인체에 직접적으로 노출을 시켜도 전혀 해가 없다. 그리고 크기에서도 초음파 센서는 작게 제작이 가능하며 유지보수, 가격에서도 타 센서보다 그 우위를 지킨다.

지금까지 살펴본 바와 같이 환경에 강인한 센서 시스템이 요구되는 굴삭기 작업환경에서는 RF 센서와 초음파 센서가 적합한 것으로 판단된다.

2.3 초음파의 개요

역사적으로 보아 초음파의 응용이 최초로 계획된 것은 제1차 세계 대전중 독일 잠수함에 시달림을 받던 연합군측이 그 탐지용으로 개발한 것인데, 이것은 결국 전쟁에서 쓰이지 못하고 전쟁이 끝난 후 측심기로써 실용화되었다. 그 후 소나(Sonar) 기술은 대폭으로 개량되어 전후 민생용으로 여러 분야에 적용됨에 따라 초음파 기술은 눈부신 발전을 거듭하였다.

초음파란 주파수가 높은 음파를 말한다. 음파란 잘 알고 있듯이 공기중이나 수중 또는 고체 속을 전달하는 기계적 진동이다. 음파 중에는 20㎐ 20㎑ 범위의 것은 사

람이 귀로들을 수 있기 때문에 가청음이라 부른다. 일반적으로 초음파라 하면 이보다 높고 사람이 귀로 직접 들을 수 없는 주파수의 음파를 가리킨다.

초음파의 특징을 들어보면 매체는 공기뿐만 아니라 오히려 액체나 고체에 많이 이용되고, 주파수가 높고 파장이 짧기 때문에 고분해능의 계측을 할 수 있다. 또 강도가 매우 큰 경우의 응용도 많다. 파장 λ는 주파수 f와 음속 c와의 사이에 $\lambda = c/f$ 의 관계가 있다. 음속은 일반적으로 주파수에 무관계한 상수이기 때문에 동일매질에서는 파장이 주파수에 반비례한다.

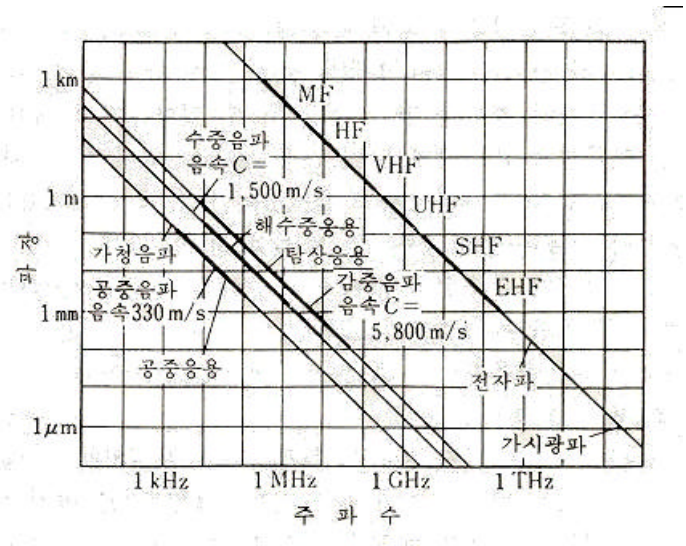


그림 2. 전자파와 초음파의 주파수와 파장

초음파의 음속은 전자파의 속도(3×10^8 m/s)에 비하여 현저히 작고 공기 속에서는 약 340m/s, 수중에서는 약 1500m/s, 강(鋼) 속에서는 5800m/s라 한다. 따라서 동일 주파수에 있어서의 초음파의 파장은 전자파에 비교하여 현저히 짧아진다. 이 관계가 그림 2에 나와 있다.

초음파 발생이나 검출은 크게 나누면 전자유도현상, 자왜현상, 압전현상의 어느 하나를 이용하고 있다. 어느 것이든 전기 에너지와 탄성 에너지의 변환을 하며, 전기신호를 초음파로 변환하는 송파기(스피커)와 그 역변환을 하는 수파기(마이크로폰)가 있다. 일반적으로 이 둘은 동일 구조로 초음파의 발생과 검지가 가능하며, 합쳐서 이것을 초음파 트랜스듀서라고 한다.

(1) 전자유도형 진동자

이 타입의 구조는 다이내믹형의 스피커와 같다. 자계 중의 전자가 받는 힘(로렌츠의 힘)을 이용하여 초음파의 방사나 검출을 한다. 이것은 자왜 또는 압전형의 공진형 진동자와 달리 비공진형이다. 따라서 주파수가 높아지면 변환 효율이 나빠진다. 또, 주파수 선택성이 없어 노이즈 등을 타기 쉬운 결점이 있는 반면 공진 주파수에 좌우되지 않고 간단하다는 이점도 있지만 최근에는 그다지 쓰이고 있지 않다.

(2) 자왜 진동자

페라이트(Ni, Co, Cu, Fe등의 금속산화물의 혼합분말을 압축, 성형하여 소결한 것), 알루페로(Al-Fe의 합금), 니켈 등을 가공하여 코일을 감은 것이다. 전류를 흘리면 재료의 물리적 성질이나 구조에 따라 정해지는 고유진동수에 공진해서 자계와 수직인 방향으로 신축, 진동하여 초음파를 발생시킨다. 페라이트는 절연물이므로 고주파 자장에 대해 와전류의 발생이 적고 에너지 변환 효율이 양호하다. 그 때문에 에너지를 필요로 하는 분야(공작 공구나 세척기 등)에 사용되고 있다. 견고하지만 외력에 대한 저항력이 약하므로 과여진이나 충격에 주의할 필요가 있다. 또 용도에 따라 주파수의 선택이 중요하다. 28㎑, 100㎑등의 진동자를 표준품으로 구입할 수 있다.

(3) 압전 진동자

수정, 로셀염의 결정 및 티탄산바륨이나 티탄산염과 같은 압전소자의 압전 효과를 이용하여 초음파를 발생시키거나 검출하는 것이다. 압전효과라고 하는 것은 외부에서 압력이 가해지면 전압을 일으키는 것인데, 반대로 전압을 가하면 그 변화에 따라 일그러지고 진동을 일으킨다. 압전 진동자는 용액 속에서 또는 금속 내에서 ㎒급 초음파의 송수신도 가능하다. 현재 초음파 센서로서 가장 많이 이용되고 있는 것이 압전(Piezo) 효과를 이용한 진동자로서 2매의 압전 소자를 맞붙여 한 쪽이 늘어나면 다른 쪽이 줄어들도록 하여 왜곡 진동을 하도록 한 진동자이다.

2.3.1 초음파에 의한 센싱

초음파를 감지하여 측정하는 데는 여러 가지 초음파의 물리적 성질이나 대상 물체의 음향적 성질이 이용된다. 대상 물체로부터 초음파의 반사, 산란을 이용하는 기술로는 초음파가 공기 중 또는 수중을 전달하여 다른 매질에 닿으면 그 음향 임피던스

의 차이에 따라 반사가 일어난다. 따라서 대상물체를 향해 초음파를 발사하고 그 반사를 검출, 해석함으로써 그 물체의 존재나 위치 또는 그 성질을 파악할 수 있다. 초음파가 어떤 매질을 통하여 다른 매질과의 경계면에 도달했을 때 거기서 반사가 일어난다. 그곳에서의 반사율은 다른 두 매질의 음향 임피던스의 차에 따라 결정되는 것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$r = \frac{Z_2 \cos\theta_1 - Z_1 \cos\theta_2}{Z_2 \cos\theta_1 + Z_1 \cos\theta_2}$$

여기서 Z_1은 입사측 매질의 음향 임피던스, Z_2는 나오는 측의 임피던스, θ_1은 입사각, θ_2는 출사각이다.

일반적으로 임피던스는

$$Z = \rho C$$

로 표현된다. 여기서 ρ는 매질의 빈도, C는 그 매질 속의 음속이다. 이 식은 음향 임피던스가 실수일 때, 즉 전달 중에 흡수 감쇠가 없을 때만 성립하므로 아주 정확하다고는 할 수 없다. 그러나 일반적으로 초음파가 전달되는 매질에서는 그 허수 성분이 작기 때문에 음향 임피던스는 거의 실수로 생각할 수 있다.

매질의 경계면이 비교적 평탄하고 어느 정도 이상의 면적을 가지면 거기에 도달한 초음파는 규칙적으로 반사한다. 그러나 경계면에 미세한 요철이 있는 경우, 여기서 반사되는 초음파는 불규칙적이다. 또 초음파가 전달하고 있는 매질 속에 음향 임피던스가 다른 미세한 물체가 존재하는 불균일한 매질의 경우도 그곳에서 불규칙적인 반사를 발생한다. 이 불규칙적인 반사를 산란이라고 한다.

2.3.2 초음파 센서의 공기중의 거리 측정

표 2 는 초음파 센서를 사용한 검출방식을 나타낸다. 검출방식에는 직접형과 반사형이 있는데, 직접형 검출방식은 송신기와 수신기를 대향하여 배치함으로써 직접파가 있을 때는 (신호전압이 있을 때는) 물체가 존재하지 않고 신호전압이 없으면 물체가 존재하는 것이다. 반사형 검출 방식은 송신기와 수신기를 비교적 가깝게 배치할 수 있는데, 반사파가 있을 때 물체가 존재하는 것이다. 또 반사형에는 송신기와 수신기를 2개 사용하는 독립형과 하나의 송수신 겸용 초음파 센서를 사용하는 겸용

형이 있다. 겸용형은 센서 하나로 해결할 수 있는 이점은 있으나 송수신 전환회로가 필요하며, 아주 가까운 거리는 검출할 수 없다.

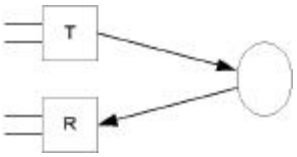
센서로부터 대상 물체까지의 거리를 알기 위한 방법으로 초음파의 왕복 전달시간 측정에 의한 거리 측정법이 있다.

공기 중에서 음파의 전달 속도는 대략 340m/sec이고, 음의 왕복 전달시간이 t초라고 하면 그 사이의 거리(d)는 다음과 같다.

$$d\,(cm) = \frac{1}{2} \times 340 \times 100 \times t(\mathrm{sec}\,ond)$$

보통 공기 중에서 거리 측정에 사용되는 초음파 주파수 f = 25㎑ 200㎑ 정도이며, 파장 $\lambda = v/f$ 는 수밀리 수십 밀리 급이다. 이런 종류의 거리 센서는 초음파에 의한 센싱의 가장 기본적인 것으로, 이들은 어느 것이나 대상 물체까지의 거리를 비교적 간단하게 측정할 수 있다.

표 2 초음파 센서의 검출 방식

배치, 방식	용 도	특징
직접형 	리모콘 물체의 검지	- 검지감도를 자유로이 설정할 수 있어 설계가 쉽다. - 설치장소가 2개소 필요
반사방식(독립형) 	물체의 검지 거리측정	- T에서 R로 직접 들어가는데 대한 대책 필요 - T와 R 전용 센서를 사용할 수 있으며 효율이 좋다. - 근거리(10cm 이하)인 경우가 많다.
반사방식(겸용형) 	물체의 검지 거리 특징	- 송수신 전환회로가 필요. - 근거리(10cm 이하)는 측정할 수 없다.

초음파의 송신 디바이스로부터 발사되는 초음파의 빔폭, 또는 수신 디바이스가 지향성을 갖는 수신 빔폭은 음향 진동면이나 개구가 클수록, 또 파장이 짧을수록 예리한 지향성의 빔이 발생된다.

표 3. 공중에 대한 초음파 반사형 거리계의 응용

측정 장치	측정 대상	목 적
수위계	물탱크, 하천 등의 액면	계측의 자동화.
적설계	설면(雪面)	무인관측, 기상대의 AMEDAS에도 이용된다.
차량 검출 장치	자동차	교통신호의 제어, 도로의 정체 상황 감시.
자동차	장애물	자동차 후진시의 충돌 방지. (범퍼 장착)
카메라용 거리계	피사체	오토포커스.

표 3에서 같이 이런 종류의 거리 센서는 초음파에 의한 센싱의 가장 기본적인 것으로 앞서 언급한 분체 레벨 센서 이외에 표 3과 같이 여러 분야에서 이용되고 있다. 이들은 어느 것이나 대상 물체까지의 거리를 비교적 간단하게 측정할 수 있다. 따라서 예민한 초음파 빔을 공간적으로 주사함으로써 2차원 또는 3차원적인 공간의 확산을 측정할 수 있다. 이와 같은 목적의 거리 측정기를 레인지 파인더(range finder)라고 한다.

2.4 굴삭기 작업환경에서의 초음파 센서의 특성 시험 및 검토

초음파 센서의 초음파 반사에 의한 장애물의 결정방법은 전기적 신호가 트랜스듀서에 의해 초음파 신호로 변환된 다음 공기를 매질로 진행하다 반사되어 다시 트랜스듀서를 통해 전기적 신호로 바뀐다. 따라서 이 반사파의 유무가 곧 장애물의 유무가 된다[7]. 굴삭기와 장애물과의 거리검출과 작업환경에서 발생할 수 있는 소

음이 초음파 센서에 얼마나 영향을 미치는가에 대한 실험을 하기 위하여 초음파 마이크로폰이 필요하다. 초음파 마이크로폰은 Transmitting Sensitivity와 Receiving Sensitivity가 높은 600 Series Transducer와 6500 Series Sonar Ranging Module을 사용하여 그 출력신호를 점검하였다.

2.4.1 환경 시험용 초음파 센서 600 Series Electrostatic Transducer의 특성

환경 시험용 초음파 센서인 Polaroid사의 600 Series Electrostatic Transducer의 센서 외형은 그림 3과 같다. 센서자체는 실내용으로 제작되어 환경에 대한 내구성은 떨어지나 센서의 송수신 감도는 매우 뛰어난 센서이다.

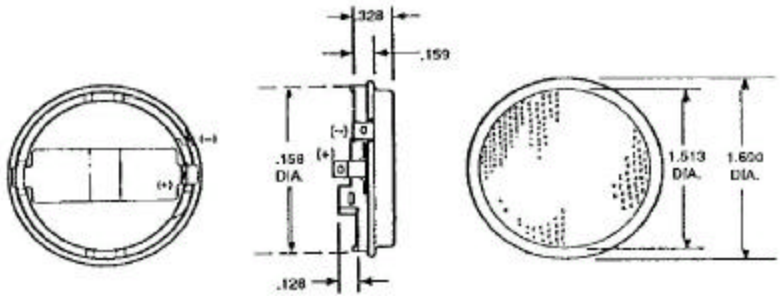


그림 3. 600 Series Electrostatic Trasducer.

이 초음파 센서의 기본적인 특성은 표 4와 같다[8].

표 4. 600 Series Electrostatic Transducer의 기본적인 특성

Distance Range	0.15m - 10.7m
Beam Angle	12。
Operation Condition Temperature	-30℃ 70℃
Max. Transmitting Sensitivity at 50KHz	110dB
Min. Receiving Sensitivity at 50KHz	-42dB

2.4.2 6500 Series Sonar Ranging Module의 특성

거리 검출용 센서의 신호처리는 6500 Series Sonar Ranging Module을 사용하였고, 그 Schematic은 그림 4와 같다.

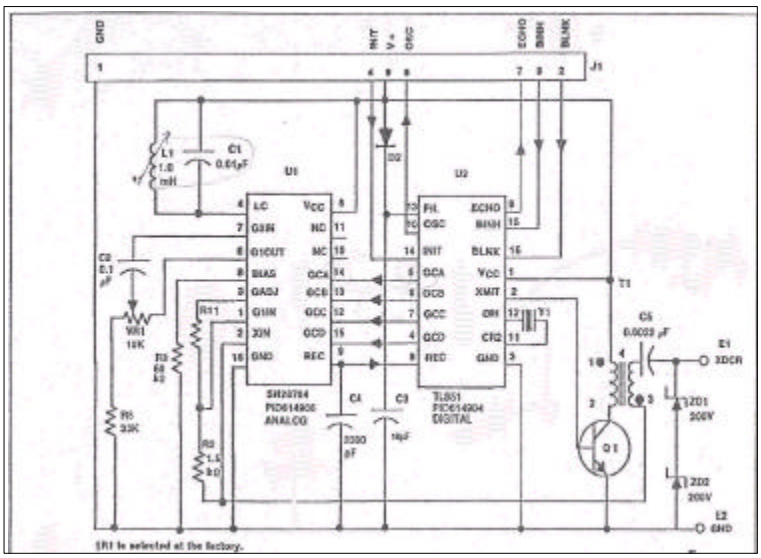


그림 4. 6500 Series Sonar Ranging Module의 Schematic

초음파 트랜스듀서로부터 수신된 전기신호는 그림 4의 Analog Chip인 TL852(U1)의 1번(G1IN)단자로 입력되어 1번과 3번(GADJ)단자 사이에 외부에서 연결된 저항에 의해 1차 증폭되고, 4개의 외부 입력 신호(GCA, GCB, GCC, GCD)에 의해 결정되는 Gain control값에 의해 2차 증폭된 후 4번(LC)단자와 외부 Vcc 사이의 LC 회로구성에 의한 약 50㎑의 BP Filter를 거쳐 6번(G1OUT)단자로 출력된다. 이후 이 신호는 다시 내부의 회로를 거쳐 9번(REC)단자를 통해 최종 출력된다.

Gain Control(GCA, GCB, GCC, GCD)의 동작은 먼 거리로부터 수신된 초음파일수록 신호레벨이 작다는 점을 보상하기 위해 초음파 출력제어 소자인 TL851(U2)은 초음파를 발사 후 12단계에 걸쳐 4-bit gain control (GCA, GCB, GCC, GCD)을 출력하고 이를 입력받은 TL852(U1)는 해당 4-bit 신호조건에 따라 이득을 조절하며, 약 G = 0.25 에서 G = 11 까지 단계별로 조절 상승시킨다. 즉, 가까운 거리로부터 반사된 초음파 신호에는 작은 이득을, 먼 거리에서 반사된 초음파 신호에는 큰 이득을 적용하게 된다.

2.4.3 Polaroid사 6500 Series Sonar Ranging Module의 출력신호 점검

초음파 센서의 지향축상에 검출되는 물체와의 거리를 변화시키며 초음파 리시버의 전기신호를 측정하여 초음파 센서의 기본적인 동작특성을 파악하였다. 그림 5에서 [A]는 Polaroid사의 6500 Series Sonar Ranging Module이고, [B]는 600 Series Electrostatic Transducer이며 [C]는 초음파 센서로 검출할 대상의 물체이다.

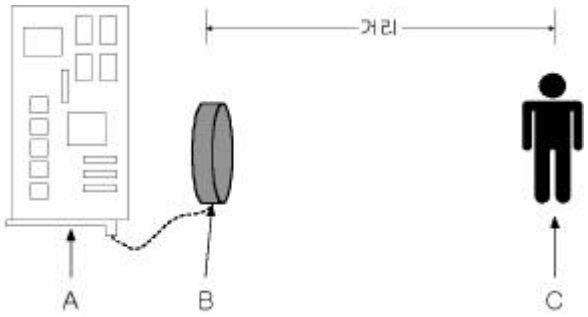


그림 5. 초음파 센서 기초 실험 방법 I

Polaroid사의 6500 Series Sonar Ranging Module에서 초음파 출력제어 소자인 TL851의 4-bit Control Gain값으로 Receiver 소자인 TL852에 의해 증폭 Level을 정한다.

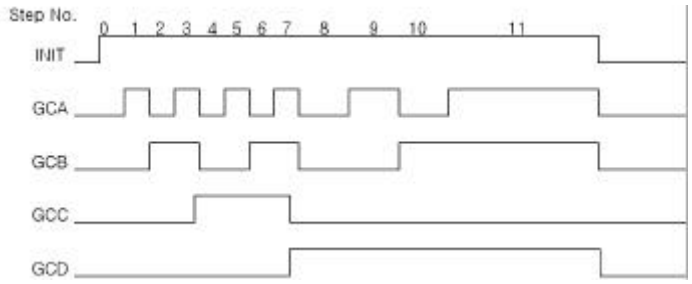


그림 6. Digital Gain Control Waveform.

표 5와 그림 6에서 시간에 따라 4-bit Control Gain(GCA, GCB, GCC, GCD)값으로 Step Number가 정해지고 이렇게 정해진 Step Number에 따라 그림 7에서 보는 것과 같이 Receiver Gain값이 정해짐에 따라 가까운 물체로부터 수신된 신호에는 낮은 이득을, 먼 물체로부터 수신되는 약한 신호는 높은 이득으로 보상해준다.

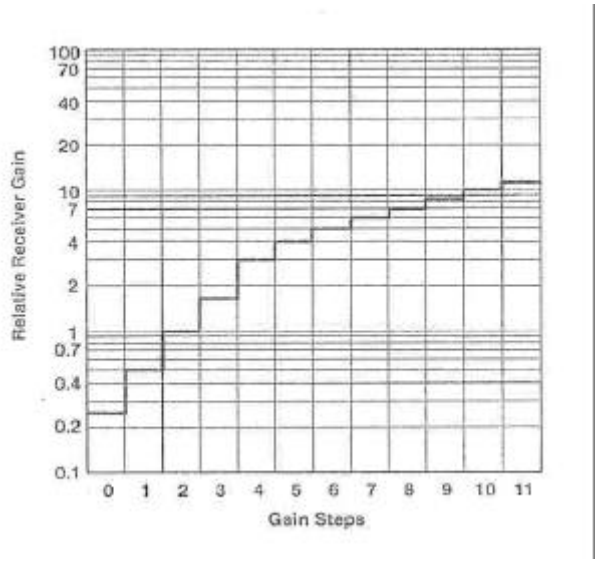


그림 7. Receiver Gain vs Gain Step Number.

표 5. **견품 센서의 이득 조절 출력값**

Step Number	GCD	GCC	GCB	GCA	Time(ms) from Initiate
0	L	L	L	L	2.38 ms
1	L	L	L	H	5.12 ms
2	L	L	H	L	7.87 ms
3	L	L	H	H	10.61 ms
4	L	H	L	L	13.35 ms
5	L	H	L	H	16.09 ms
6	L	H	H	L	18.84 ms
7	L	H	H	H	21.58 ms
8	H	L	L	L	27.07 ms
9	H	L	L	H	32.55 ms
10	H	L	H	L	38.04 ms
11	H	L	H	H	INIT

그림 8은 검출된 물체와의 거리는 2m를 유지하며 초음파 마이크로폰의 TL852 GCA, GCB, GCC, GCD의 4-bit 입력을 Step 7의 조건(H, H, H, L)으로 하여 수신 신호를 검출하였다.

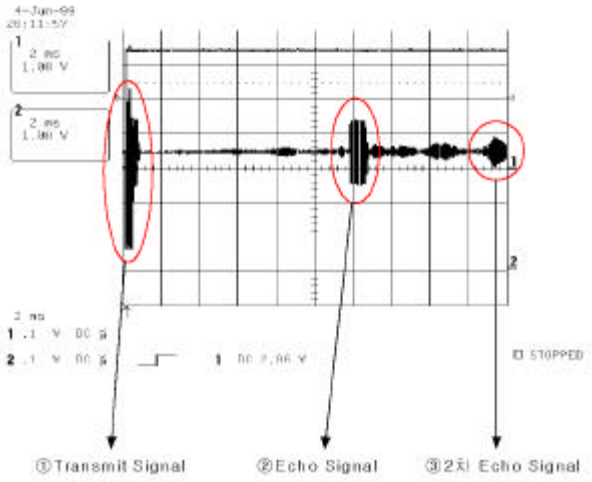


그림 8. 초음파 센서의 송수신 기본 파형

초음파 센서로부터 받은 Echo Signal을 내부의 회로를 통해 튜닝 되어 Receiver 소자인 TL852로부터 TL851로 입력되는 신호 파형은 그림 9와 같다.

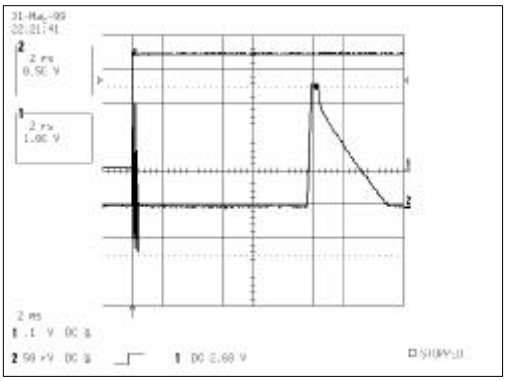


그림 9. TL852로 입력되는 Echo Signal

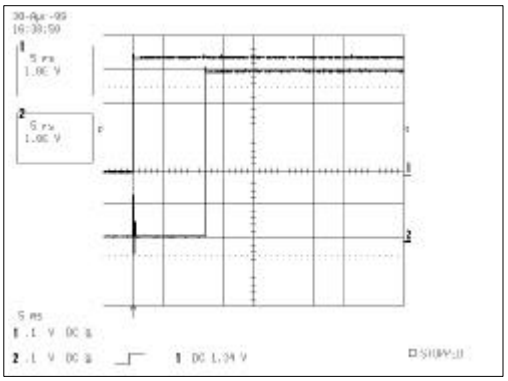


그림 10. TL852의 최종 Echo Signal

TL852로부터 입력받은 Echo Signal을 초음파 출력 제어소자인 TL851의 내부 Comparator를 통해 최종적으로 그림 10과 같은 사용자가 필요한 TTL Level의 신호를 구할 수 있다.

그림 11부터 16은 거리에 따라 변화하는 초음파 센서 모듈의 최종 출력을 측정한 결과아다. 전체적인 실험결과는 오차율이 얼마인지 측정하기 위한 것이다.

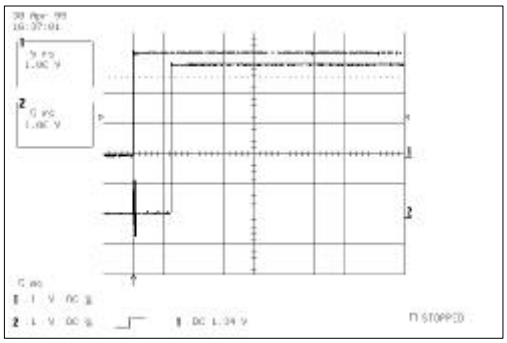


그림 11. **물체와의 거리**: 1m, **오차**: 2% (2cm)

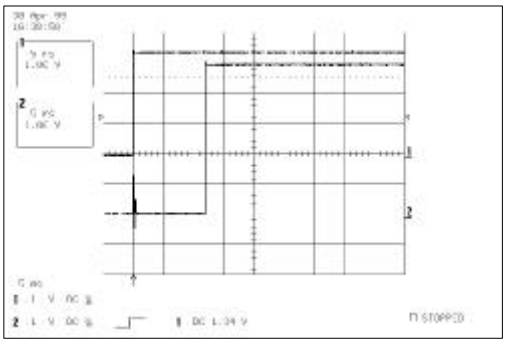


그림 12. **물체와의 거리**: 2m, **오차**: 2% (4cm)

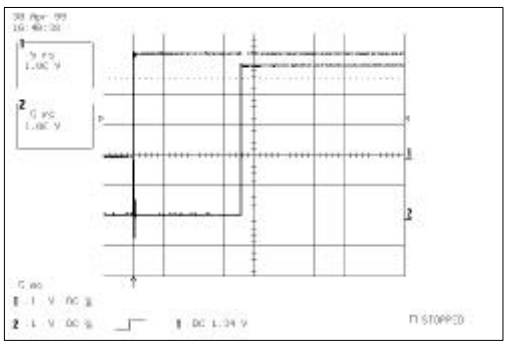


그림 13. **물체와의 거리**: 3m, **오차**: 2% (6cm)

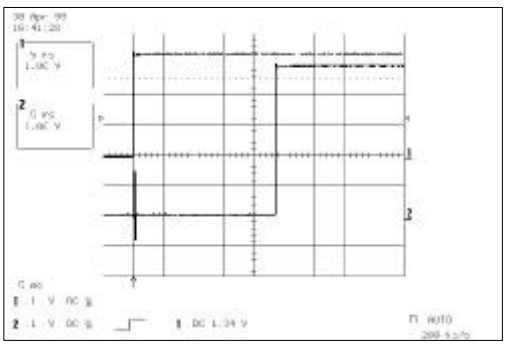


그림 14. **물체와의 거리**: 4m, **오차**: 0.75 % (3cm)

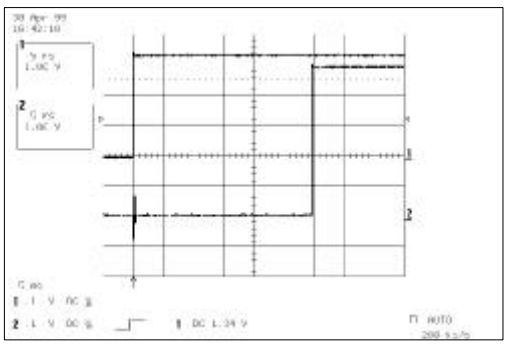


그림 15. **물체와의 거리**: 5m, **오차**: 1% (4.9cm)

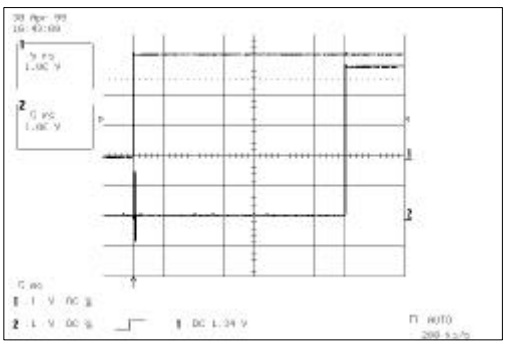


그림 16. **물체와의 거리**: 6m, **오차**: 0.83 (5cm)

다음 그림 17과 그림 18은 거리에 따라 변화하는 초음파 센서 모듈의 최종 출력과 음속을 340m/s로 가정하여 식 $d(cm) = \frac{1}{2} \times 340 \times 100 \times t(\mathrm{sec}ond)$에 기인하여 그 오차를 그래프로 표현한 것이다.

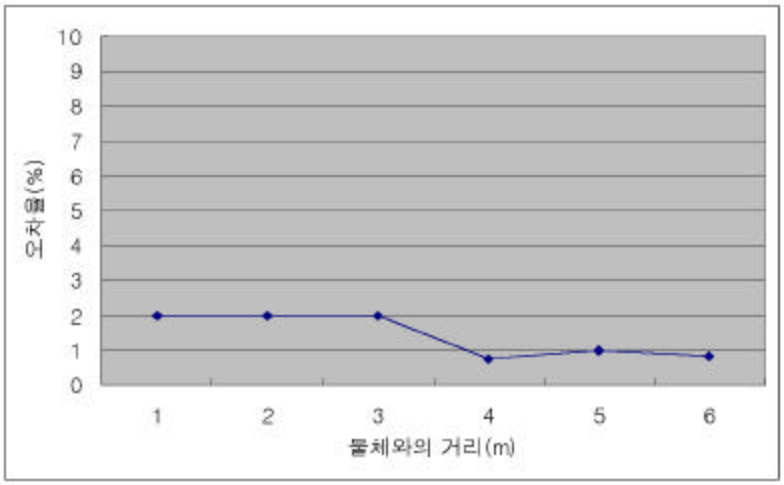


그림 17. 물체와의 거리(m)와 오차율(%)

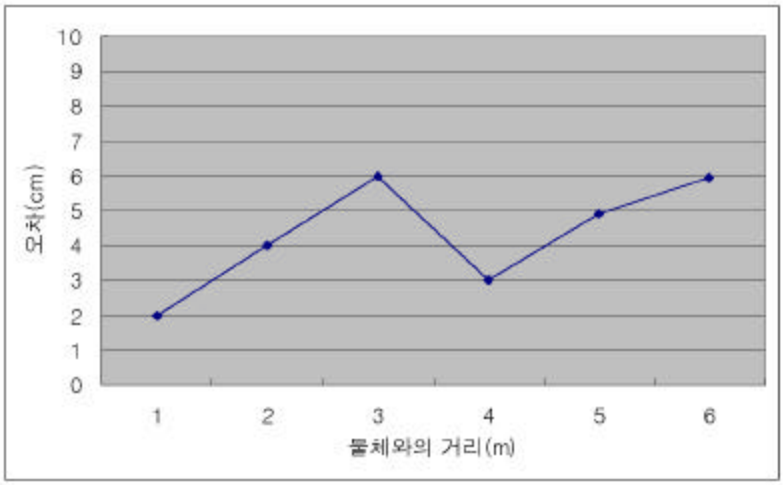


그림 18. 물체와의 거리(m)와 오차(cm)

2.4.4 굴삭기 환경 소음의 초음파 반응

그림 19는 굴삭기의 작업환경에서 발생할 수 있는 소음이 초음파 센서에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위하여 초음파 센서의 지향축상에서 인위적인 소음을 인가하여 초음파 마이크로폰의 전기신호를 측정하였다.

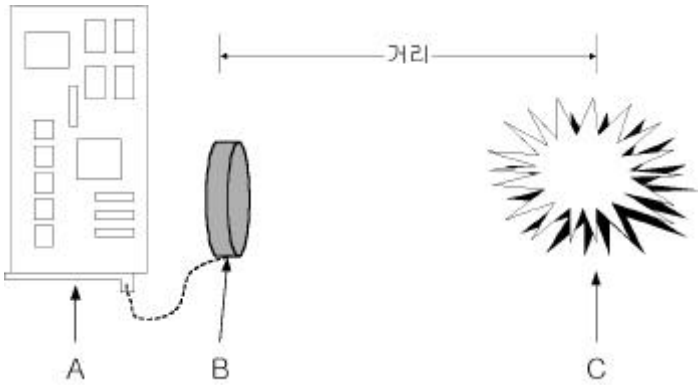


그림 19. 초음파 센서 기초 실험 방법 II

A : Polaroid 사의 6500 Series Sonar Ranging Module
B : Polaroid 사의 600 Series Electrostatic Transducer
C : 초음파 센서로 수신된 소음

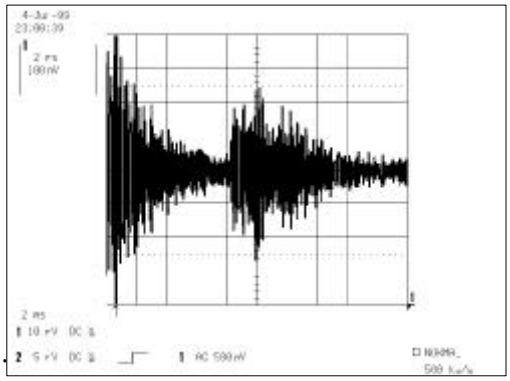


그림20. 외부 소음의 예

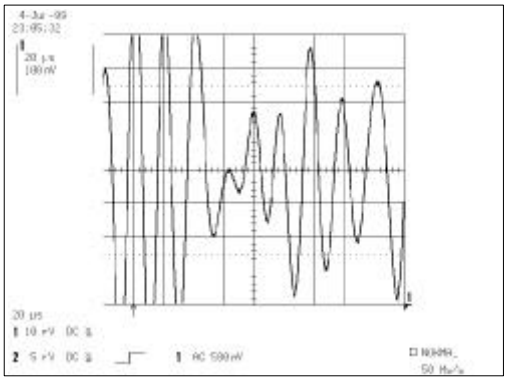


그림 21. 그림 20을 확대하여 본 그림

그림 20과 21은 초음파 마이크로폰과 약 2m거리에서 6500모듈로 초음파를 발생시키지 않고 쇠 부딪히는 소리(크기가 8인치인 스패너 두개를 약 0.5 sec주기로 부딪혀 내는 소리) 인가 시 TL852의 수신 신호를 검출한 결과이다.

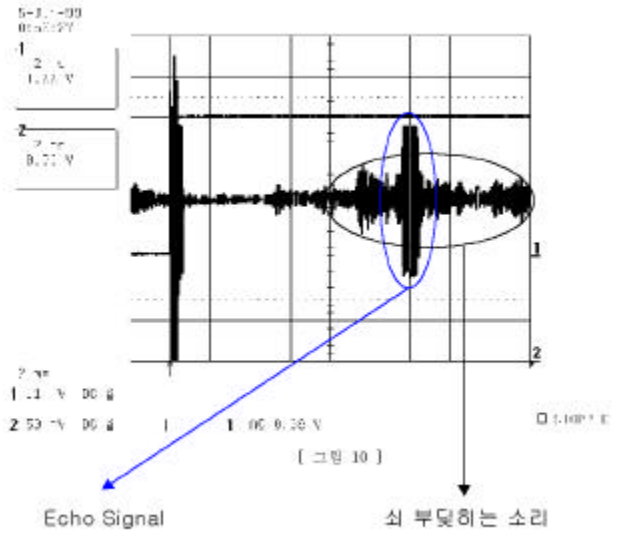


그림 22. 초음파 센서에 소음을 첨가한 경우 I

그림 22는 초음파 마이크로폰에 6500모듈을 사용하여 반사 물체와 2m 간격을 두고 거리를 측정하면서, 쇠 부딪히는 소리(Noise)를 인가하였을 때의 실험 결과이다. 그림 22에서 측정된 Noise는 스패너 두개로 센서와의 거리가 약2m 되는 곳에서 일반인이 작업공구로 발생시킬 수 있는 최대의 힘으로 발생시킨 Noise이므로 위의 실험결과로 봐서 스패너 충격은 작업반경 2m 이상에서도 센서의 오동작을 유발하지는 않을 것으로 추측된다.굴삭기(R210LC-3)를 대상으로 굴삭기 자체에서 발생하는 소음(장비시동, rpm변화 작업기 조작, 버켓 기본 조작, 릴리이프 동작, 버켓 out 충격 등)과 초음파 센서와의 거리를 1m로 유지하며 실험한 결과 초음파센서는 반응을 하지 않았다.

그림 23은 사람을 대상으로 측정거리 2.7m에서 초음파를 발·수신하고 동시에 쇠봉을 맞부딪혀 측정한 그림이다. 즉 장애물과 소음원이 같은 장소에 있는 경우이다.

위의 실험으로 보면 사람을 대상으로 수신된 초음파 양보다 쇠봉 소음원으로부터

수신된 초음파량이 큰 것을 알 수 있으나 이는 표 5에서 각 신호의 수신되는 시간을 찾아서 그림 7의 이득값을 참조하면, 소음이 수신될 때의 이득은 G=8.5(34ms)이고 사람을 대상으로 수신될 때의 이득 G=4(16ms)이므로 소음원으로부터 수신된 잡음 신호가 사람으로부터 반사되어 수신된 신호와 동일 시점에 수신되었다면 초음파량이 1/2 이하가 될 것이다.

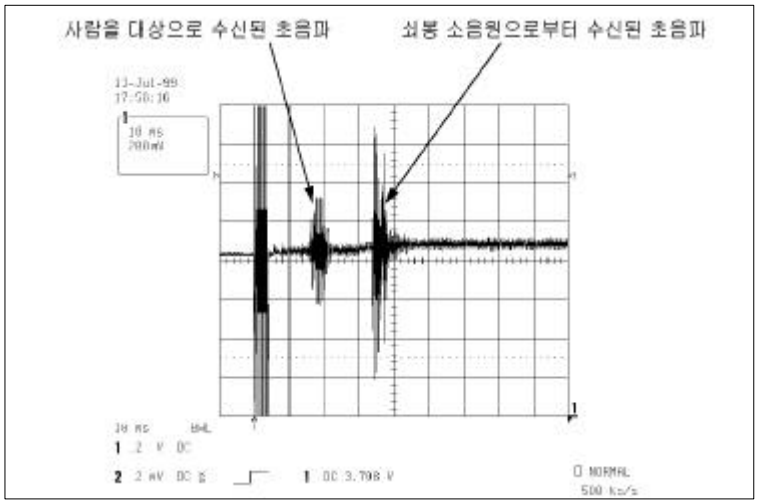


그림 23. 초음파 센서에 소음을 첨가한 경우 II

2.5 굴삭기 사각지역 검출용 초음파 어레이(array) 센서모듈의 설계

굴삭기의 사각을 검출하기 위하여 본 논문에서는 10개정도의 초음파 센서를 장착하여 고유의 검출영역을 부여하고 이 검출영역을 그림 24와 같이 1차 경보지역, 2차 경보지역, 3차 경보지역으로 세분화하여 센서들을 연동시켜 각 경보지역마다 다른 경고음을 굴삭기 운전자에게 알려주는 시스템을 구현하였다.

초음파 센서는 센서의 매체자체가 공기의 Acoustic Wave를 이용하므로 그 특성상 필연적으로 외부 소음에 따른 오동작의 위험이 따른다. 이를 해결하기 위하여 뛰어난 성능의 잡음제거 필터가 요구되는데, 일반적인 아날로그 필터 외에 부가적인 잡음 제거 알고리즘이 필요하다.

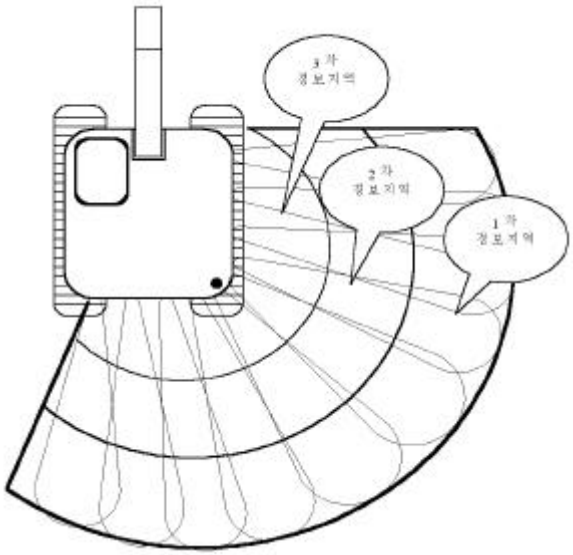


그림 24. 초음파 센서를 배치하여 운전자의
사각지역을 제거한 예.

기본적인 구성요소인 초음파 센서로는 Polaroid사의 9000시리즈를 선택하였다.

대형 트럭용으로 개발된 Polaroid사의 9000 Series Piezo Transducer는 센서의 특성상 2개의 빔 폭(수직 12도, 수평 27도)을 가지므로 선택적으로 사용 가능하고, 센서의 온도 특성은 -40℃ 85℃이고 SAE 1455 for Heavy Duty Trucks 규격을 만족한다 [8].

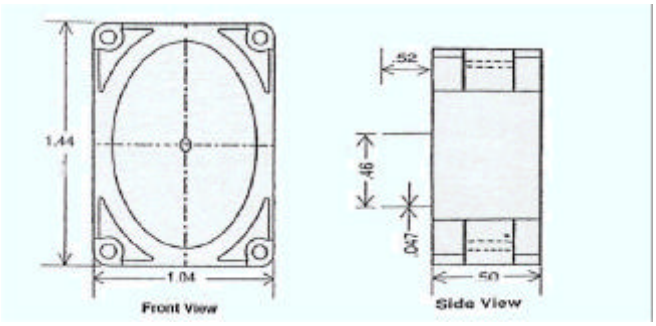


그림 25. 9000 Series Piezo Transducer

동작 주파수는 45KHz이고, 45KHz에서 최대 Transmitting Sensitivity는 108dB이며 또한 같은 주파수대인 45KHz에서 최소 Receiving Sensitivity는 -75dB이다.

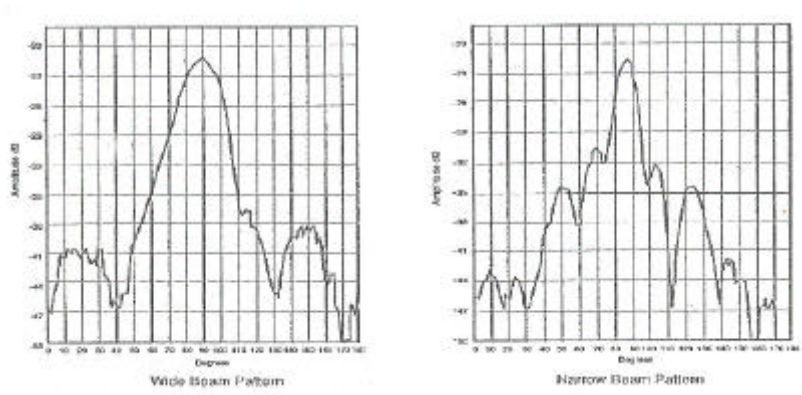


그림 26. 9000 Series의 Beam Pattern

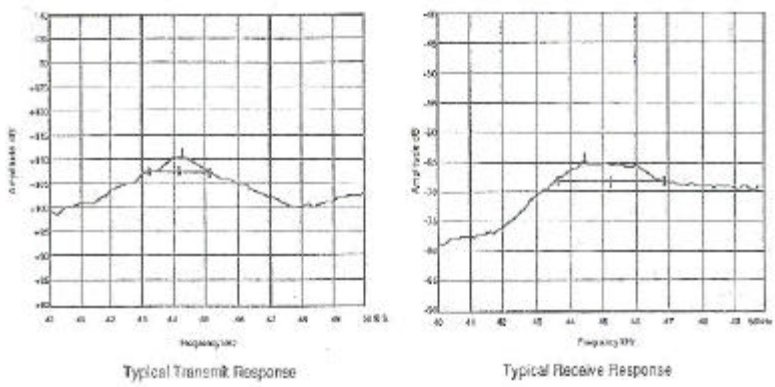


그림 27. 9000 Series의 주파수 특성

그림 26과 그림 27은 9000 Series Piezo Transducer의 특성을 그래프로 표시한 것이다. Polaroid사의 9000 Series Piezo Transducer는 600 Series Electrostatic Transducer와 특성이 다르기 때문에 6500 Series Sonar Ranging Module을 그대로 사용하지 못하고 9000 Series의 특성에 맞추어 Ranging Module을 설계하였다. 600 Series Electrostatic Transducer는 사양서에서 제안된 Driving Voltage가 150V(peak)

이고 Maximum Driving Voltage가 400V인 반면에, 9000 Series Piezo Transducer는 Spec.에서 제안한 Driving Voltage가 120V(peak)이고 Maximum Driving Voltage가 140V이므로 6500 Series Sonar Ranging Module을 그대로 사용하지 못한다. 또한 Analog Chip인 TL851은 온도 Spec.이 0 40℃로서 중장비 작업요건을 만족시키지 못한다. 따라서 6500 Series Sonar Ranging Module의 출력제어 소자인 TL851을 대신하여 ATMEL사의 8-bit microprocessor인 89C52를 사용하여 전송신호와 4-bit Control Gain값을 만들어 Receiver 소자인 TL852의 초음파 수신의 증폭 Level을 정하였다.

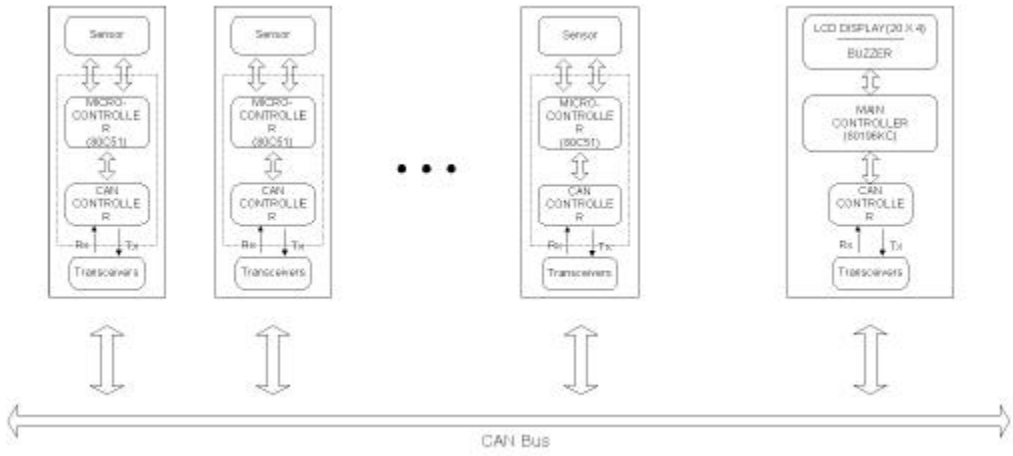


그림 28. 초음파 센서 시스템의 구성도

부록 1과 2는 Polaroid사의 9000 Series 초음파 센서의 특성에 맞추어 Ranging Module을 설계한 회로도이다. TL851로부터 발생하는 초음파 센서의 전송신호도 외부 Pulse Generator없이 89C52의 내부 클럭(16㎒)을 분주하여 만들도록 설계하였다. [4],[5]. 그림 28은 본 논문에서 제작한 굴삭기의 장애물 인식 및 접촉방지 시스템의 Block Diagram이다. 개별 센서의 동작을 지시하고 장애물의 위치를 판별하고 경보하는 Main Control부와 Main Control부의 동작 명령을 받아서 처리하는 센서부들로 구성된다. 전체 시스템의 통신은 CAN(Controller Area Network) V2.0을 사용한 필립스사의 SJA1000 Stand Alone Controller를 사용하여 연결하였다. 이상과 같이 초음파 센서로부터 정보를 받아들이고, 주 제어기는 이 정보를 이용하여 장애물을 검출하고, 다시 초음파 센서로부터 정보를 받아들이는 과정을 반복한다. 이러한 과정의 1주기는 200ms로 하였다.

2.5.1 센서 모듈의 구조

센서 모듈은 크게 디지털부와 아날로그부로 나누어 설계하였다. 그림 29와 30은 디지털부와 아날로그부의 구성도를 나타낸 것이다.

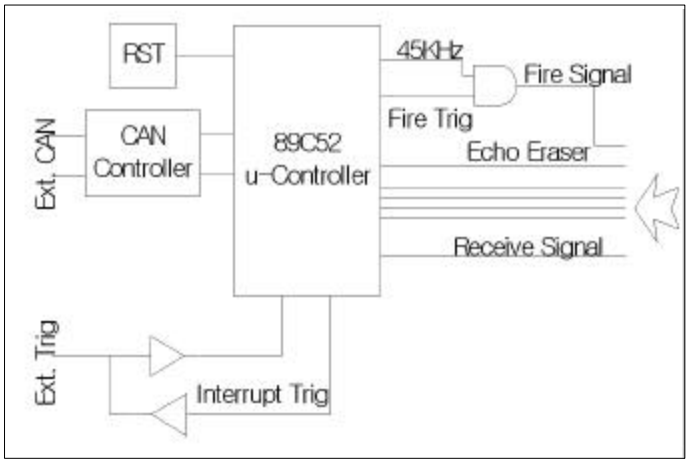


그림 29. 디지털부

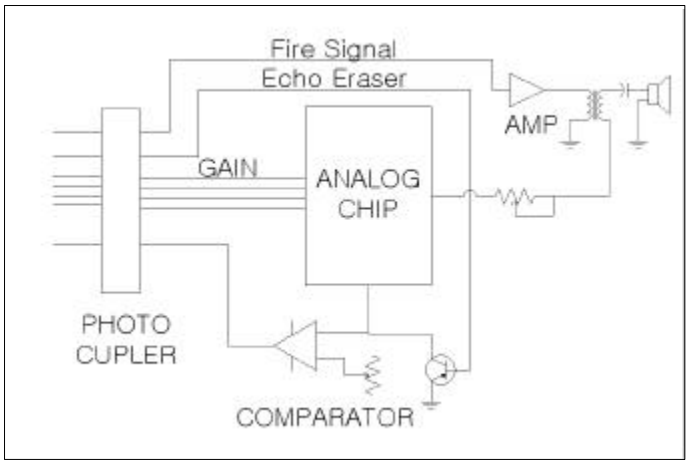


그림 30. 아날로그부

2.5.2 디지털부의 회로 설계

그림 31은 센서 모듈 디지털부의 89C52 Controller의 주변회로와 CAN Interface 회로이다.

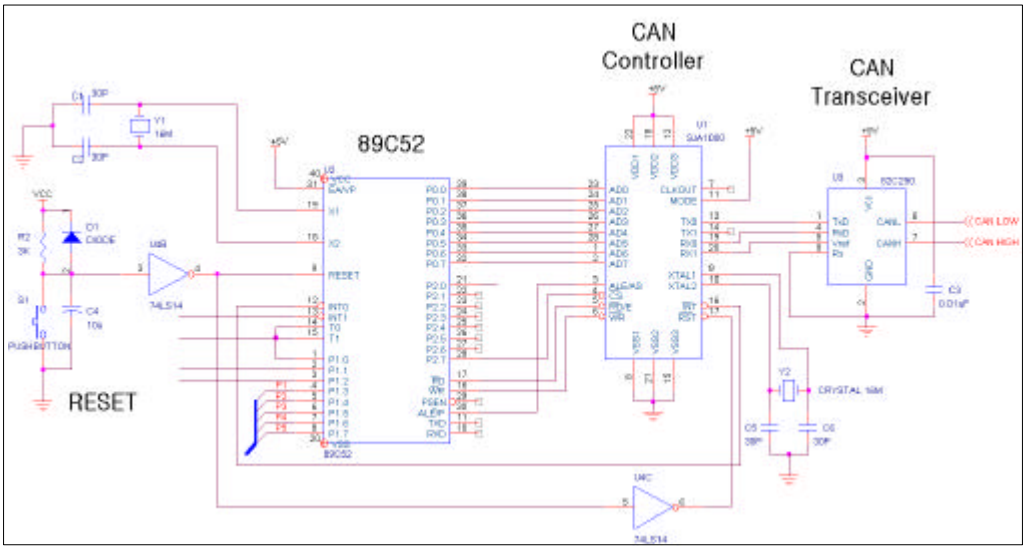


그림 31. 89c52 Controller 주변회로 및 CAN Interface 회로도

본 논문에서는 주 제어부에서 보내는 각 초음파 센서 모듈의 동작명령과 각 초음파 센서 모듈에서 주제어부로 보내는 장애물 거리정보의 통신을 위해 CAN (Controller Area Network)을 도입하였다. CAN의 일반적인 특징은 직렬 비동기식 통신 시스템으로서 다중통신이 가능하고 메시지에 대한 우선 순위를 결정하여 통신 안정성을 보장하고 최대 1Mbps(최대 bus길이 40m 일때)의 전송속도로 다양한 정보의 실시간 전송이 가능하고, 11 bits ID (29 bits ID - 확장모드일 경우)를 가지므로 다양한 코드별 분류가 가능하다. 최대 노드수는 ISO(International Standardization Organization) 11898에 따라 30개로 제한된다. 최대 데이터 크기는 8bytes이다. 메시지 전달 지연 시간은 전송속도와 메시지에 대한 우선 순위에 의해 결정되며 오류 검출과 보정에 대해 강력한 기능을 제공한다. 전송된 메시지에 대해 수신측의 인증신호가 없을 경우 오류를 검출하게 된다. 또한 메시지가 충돌에 의해 파손되었을 경우 Bus는 Idle 상태로 됨과 동시에 메시지를 자동적으로 재전송 하게 됨으로써 정보유실을 방지한다. 노드상의 임시오류와 영구적인 파손이 발생하면 자동적으로 노드를

분리함으로써 전체 시스템의 안정성을 보장한다. 따라서 운전자 시계 사각지역을 검출하기 위한 전체 시스템의 신뢰성을 향상시키고, 커넥터나 배선의 간략화로 각 센서 모듈 배치의 확장된 유연성을 증가시키기 위해 각 초음파 센서 모듈간의 통신은 CAN을 이용하였다.

그림 32는 센서 모듈 디지털부의 Fire Trigger Pulse Generator부분의 회로이다.

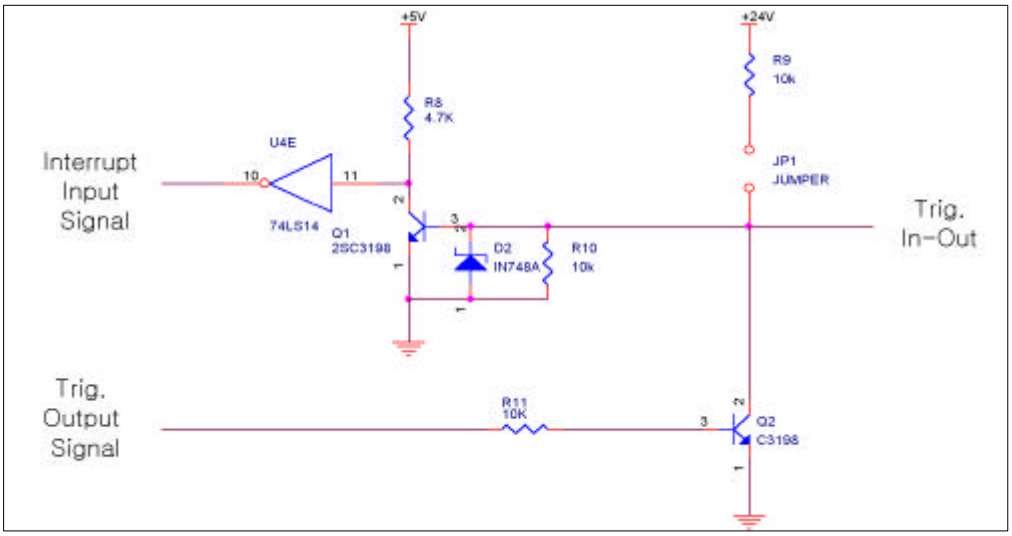


그림 32. Fire Trigger Pulse Generator

2.5.3 아날로그부의 회로 설계

그림 33은 초음파 센서 모듈의 송수신부의 회로이다.

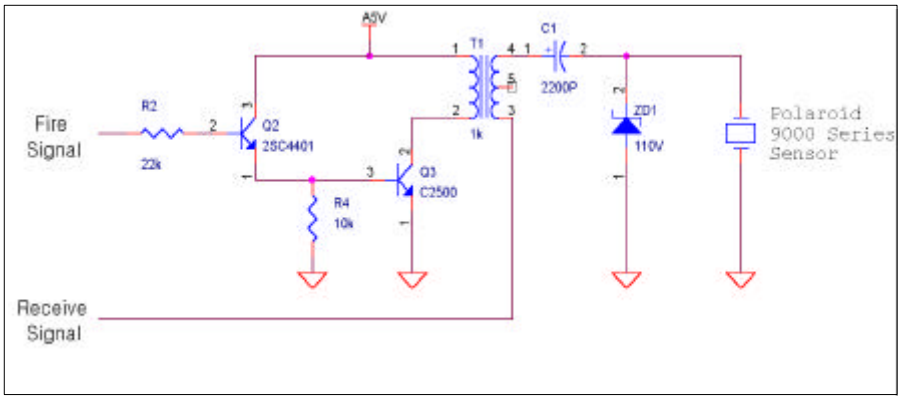


그림 33. 초음파 송수신부

대형 트럭용으로 개발된 Polaroid사의 9000 Series Piezo Transducers는 Driving Voltage 120V(peak)이고 Maximum Driving Voltage가 140V이다.

그림 34에서 Echo Erase Signal은 본 논문에서 사용한 초음파 센서가 Piezo Transducer이므로 송신 시 Ringing의 영향으로 Echo가 생기므로, 송신 펄스 발사 후 안정시간까지 Echo Erase On이고 그 이후에는 수신할 수 있게 소프트웨어적으로 제어 가능하다. 초음파 센서 모듈 실험에서는 그림 35의 게인 신호를 6 9ms동안은 수신 게인 레벨 '0', 9ms이후에는 수신게인 레벨 '1'로 수신게인을 고정하여 89C52에서 보내진다.

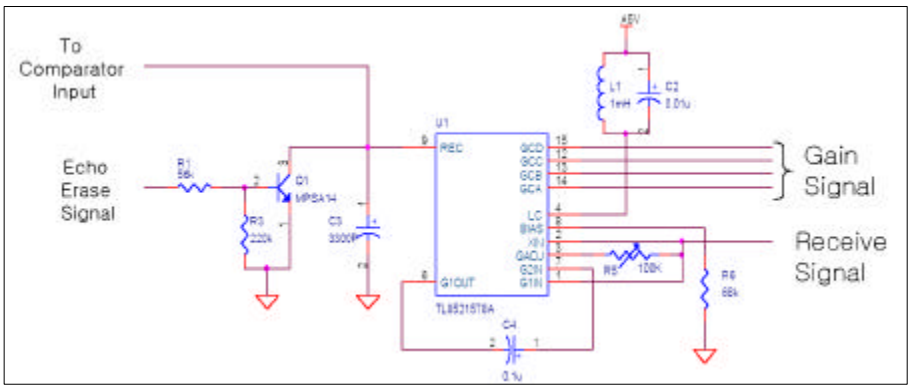


그림 34. Amp, Band Pass Filter, Gain Control, 적분기 회로부

2.6 Main Controller의 설계

사용자 Interface를 위한 LCD, Buzzer, RS-232 통신 등을 장착하여 장애물 검출정보를 소리와 거리 정보로 표시한다. 그림 35는 Main Controller의 구성도 이다. 80196KC controller에서 CAN controller를 통해 초음파 어레이 센서들을 구동하고, 초음파 어레이 센서들로부터 거리 정보를 받아 실제적인 거리로 연산하고 LCD로 표현하는 부분이다.

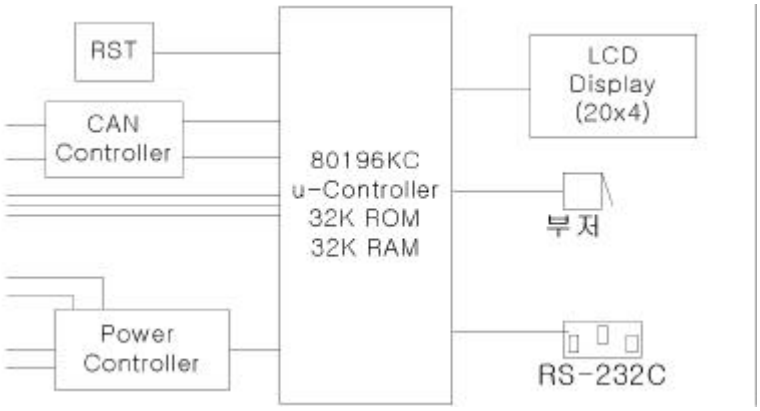


그림 35. Main Controller부의 구성도

3 거리검출 알고리즘

초음파 센서 시스템에서 장애물에 반사되어 돌아오는 반사파는 전송신호와 동기되어 일정 간격으로 나타나지만 소음은 그 특성상 전송신호에 상관없이 불규칙적으로 나타난다. 이에 Cross-Correlation 알고리즘을 적용하여 소음을 제거하였다.

우선 신호간의 상관관계를 수학적으로 표현하기 위해 correlation function을 정의하는데, 동일한 신호에 대해서는 Auto-Correlation function, 서로 다른 두 신호에 대해서는 Cross-Correlation function 이라고 한다. 시간영역에서 신호의 상관관계를 나타내는 Correlation function을 Fourier transform하여 주파수영역에서 해석해 보면 special density function과 연관성을 가짐을 볼 수 있다. 즉 Correlation function은 시간영역에서는 신호의 상관관계를 나타내는 함수가 되고 주파수영역에서는 그 신호가 포함하고 있는 power 또는 energy의 분포를 나타내는 함수가 된다.

3.1 Cross-Correlation

두 신호 $x(t)$와 $y(t)$의 상호상관함수 $R_{xy}(\tau)$는 시간 t 에서의 $x(t)$와 시간 $t+\tau$에서의 $y(t+\tau)$의 곱을 충분히 긴 시간 T 에 걸쳐 평균한 값으로서 다음과 같다.

$$R_{xy} = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)y(t+\tau)\,dt$$

자기상관함수 $R_{xy}(\tau)$는 $x(t) = y(t)$인 경우의 상호상관함수 $R_{xy}(\tau)$의 특수한 경우로 볼 수 있다.

본 논문에서 사용한 Cross-Correlation의 패턴은 그림 36과 같다.

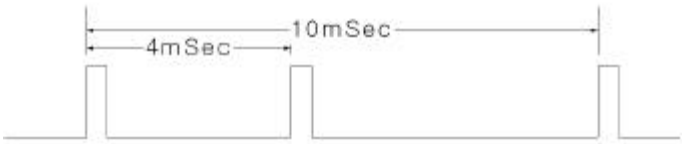


그림 36. Cross-Correlation을 적용한 송신신호

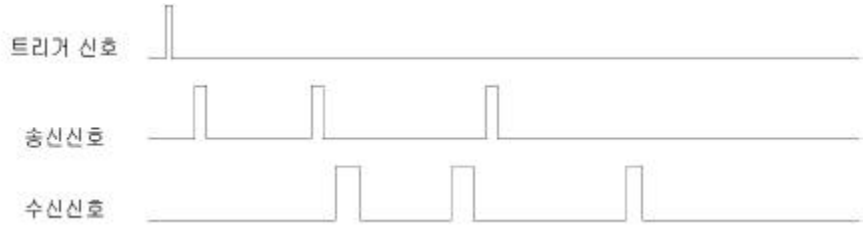


그림 37. 송수신 신호의 패턴

초음파 단품 모듈에 수신 인터럽트 주기를 0.4ms (거리분해능: 6.8cm)로 하여 Cross-Correlation 알고리즘을 적용하였다.

그림 38은 Cross-Correlation 알고리즘을 적용한 실제 초음파 센서 모듈의 송수신 파형이다. 채널1은 수신 파형이고 채널2는 송신 파형이며, 4m에 장애물이 있는 상태이다. 우선 송신 펄스 2개만을 이용하여 Cross-Correlation 알고리즘을 적용한 사례이다.

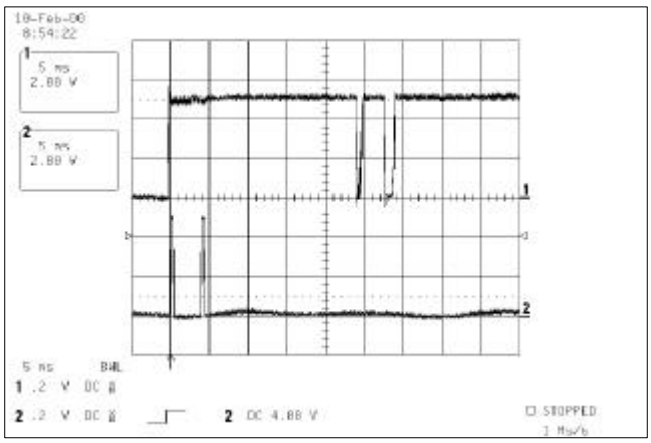


그림 38. Cross-Correlation 알고리듬을 적용한
실제 송수신 파형 (송신펄스 2개)

Cross-Correlation 알고리즘을 적용하여 단순히 첫 수신신호 TOF만을 고려하여 장애물을 감지하는 것과 달리, 그림 39에서 보는 바와 같이 하나의 초음파 센서로 2m에 있는 장애물과 4m에 있는 장애물을 감지, 복수개의 장애물을 감지할 수 있었다.

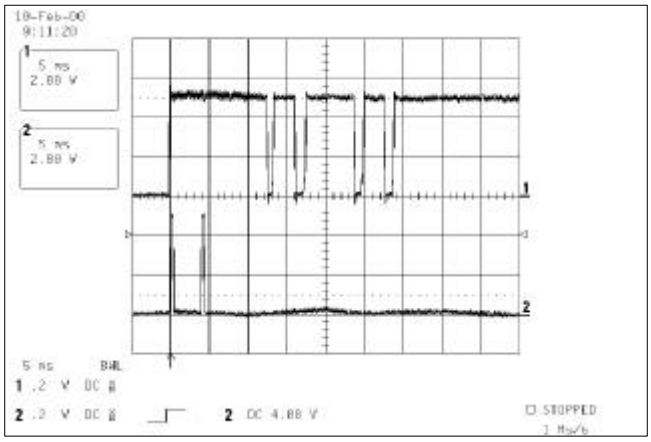


그림 39. Cross-Correlation **알고리즘을 적용하여**
복수개의 장애물을 검출한 예 (**송신펄스** 2**개**)

그림 40**은 송신 펄스** 3**개를 사용하여** Cross-Correlation **알고리즘을 적용하여** 4m**에 있는 장애물을 검출한 파형이다**. **채널**1**은 수신 파형이고 채널**2**는 송신 파형이다**.

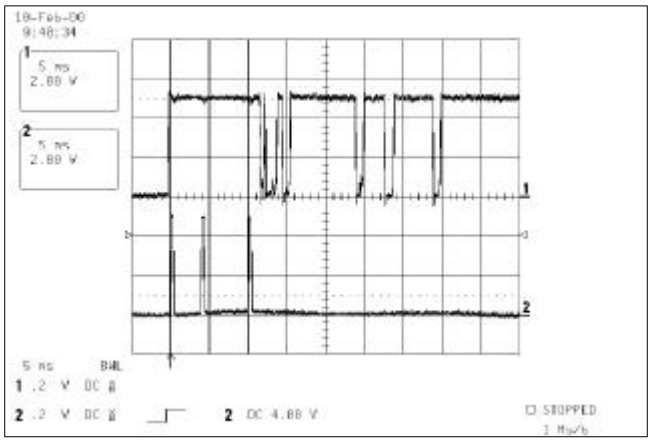


그림 40. Cross-Correlation **알고리듬을 적용한**
실제 송수신 파형 (**송신펄스** 3**개**)

그림 41**에서** 2**개의 송신 펄스를 사용한 것과 마찬가지로** 3**개의 송신 펄스를 사용**

하여Cross-Correlation 알고리즘을 적용하여 하나의 초음파 센서로 2m 30cm에 있는 장애물과 4m에 있는 장애물을 감지, 복수의 장애물을 감지할 수 있었다.

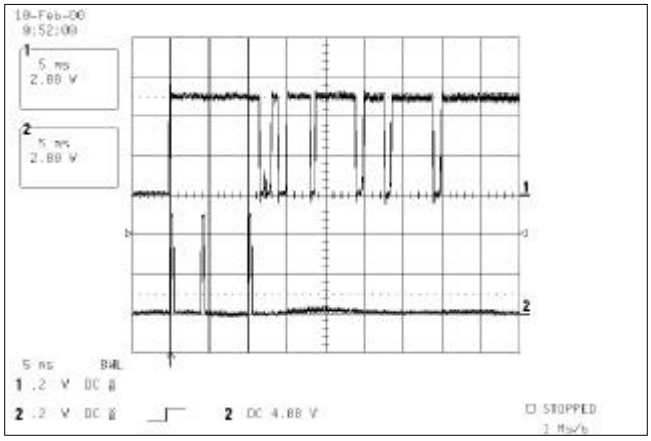


그림 41. Cross-Correlation 알고리즘을 적용하여
복수개의 장애물을 검출한 예 (송신펄스 3개)

3.2 Certainty map method

본 논문에서는 초음파 어레이(array) 센서를 사용하여 굴삭기 주위의 장애물을 검출하고, 또한 굴삭기 작업장에서 발생할 수 있는 여러 가지 잡음을 제거하는 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 사용한 Certainty Map 기법은 확률 분포에 근거한 신뢰도 검증의 방법으로, 인식되는 장애물의 거리 정보를 바탕으로 하여 Sigmoid Function의 확률 값을 누적한다. 이에 따라 임계치 이상으로 증가한 장애물만을 표적으로 인식하며, 외란에 의한 오동작을 최소화 할 수 있다.

이를 위하여 제작한 시스템의 초음파 센서로부터 거리 정보를 받아들이고 이 정보를 이용하여 장애물이 존재한다는 확실성값(certainty value)을 Certainty Map에 부여한다.

제안한 Certainty Map 기법은 그림 44에서와 같이 각각의 초음파 센서에 검출할 수 있는 영역을 사각형모양의 셀로 나누어 장애물이 검출되는 해당셀에 확실성값을 누적하여 임계치 이상으로 증가하는 셀에만 장애물이 존재한다고 본다.

그림 42는 Certainty Map을 작성하여 각 셀에 확실성값을 부여하는 알고리즘을

흐름도로 나타낸것이다.

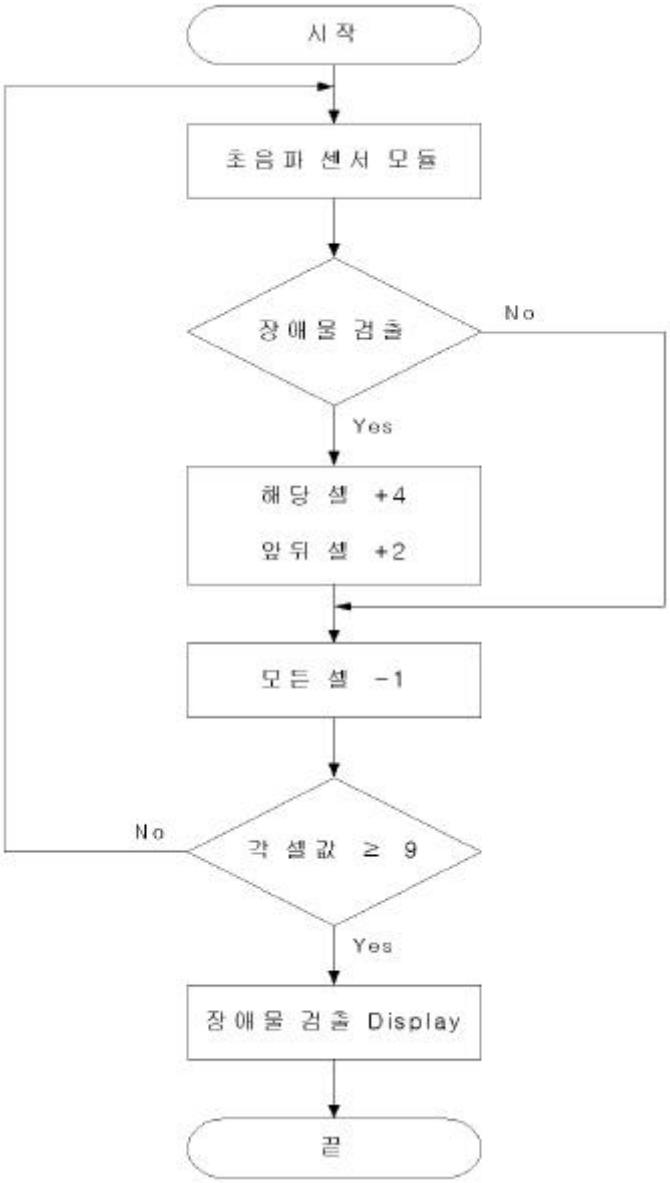


그림 42. Certainty Map 기법의 흐름도

예를 들면, 초음파 센서의 송신주기를 200ms로 하고 각 센서 모듈마다 24개의 셀(cell)을 정한다. 장애물이 있을 시 장애물이 있는 셀에는 '4' 그 앞, 뒤 셀에는 각각 '2'의 확실성값을 부여하고, 다음 값을 읽어오기 전에 모든 값에서 '1'을 뺀다. 그 후 다시 장애물이 검출되면 해당 셀에는 '4'를 앞 뒤 셀에는 '2'를 부여하는 방식으로 각 셀의 최대값의 확실성값은 '9' 이거나 이를 초과한 값이 쌓이면 장애물이 있는 것으로 간주한다. 초음파센서로부터 정보를 받는 주기가 200ms이므로 최소 3주기 이상 Certainty Map에 확실성값이 쌓여야만 장애물이 있는 것으로 판단한다. 따라서 단발성 잡음인 경우에는 주기적으로 존재하지 않으므로 이러한 확실성값에 의해 작성되는 Certainty Map에 의하여 제거된다.

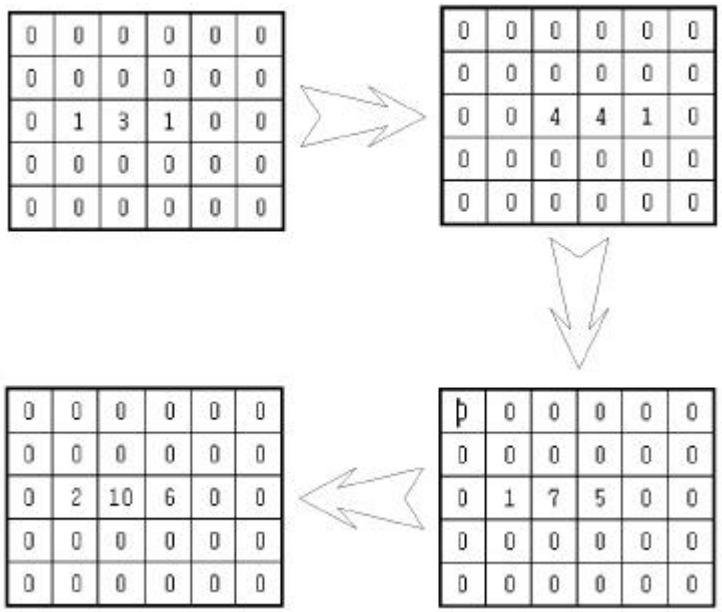


그림 43. Certainty Value를 통한 장애물 검출방법

그림 43은 그림 44의 복수개의 장애물 중 검은 테두리가 있는 부분의 장애물 검출 시 Certainty Map에 확실성값을 부여하는 위의 방법을 도식화하여 나타내었다. 그림 43의 네 번째 Certainty Map에서 '10'이라는 확실성값은 그 해당 셀에 장애물이 존재한다는 것을 의미한다.

그림 44와 그림 45는 Certainty Map에 확실성값을 각 셀에 부여하여, 여러 가지 형태의 잡음으로부터 복수개의 장애물의 거리와 위치를 검출한 것을 그래프로 나타내었다.

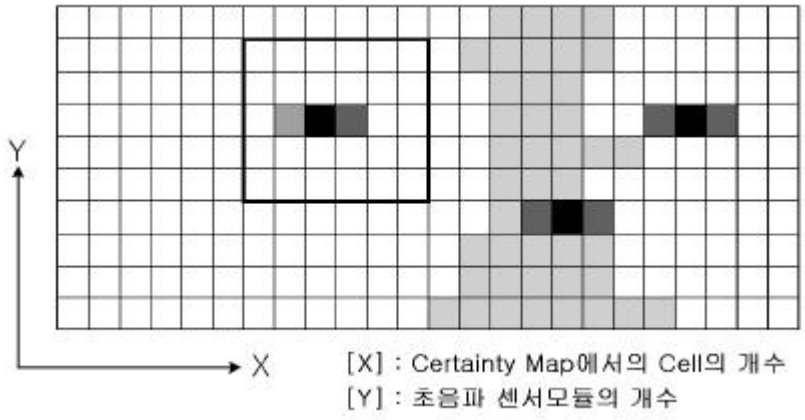


그림 44. Certainty Value의 분포 (1)

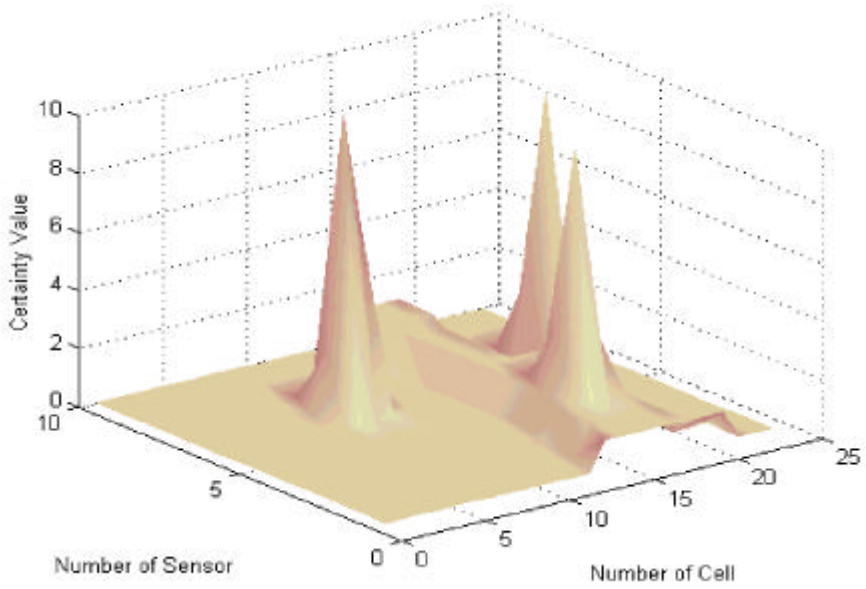


그림 45. Certainty Value의 분포 (2)

4 초음파 센서 실험 결과.

4.1 초음파 센서 단품 모듈의 부분별 특성실험

초음파 센서로부터 6m 거리에서 장애물로는 사각형의 표준 반사체를 사용하여 초음파 센서 단품 모듈의 부분별 특성실험을 하였다.

초음파 신호가 발생하는 순서로 첫째 디지털부의 Fire Trigger Pulse , 둘째 디지털부의 초음파 출력 제어 신호, 셋째 아날로그부의 Fire Signal, 넷째 아날로그부의 Transformer를 거친 Fire Signal, 다섯째 아날로그부의 Echo 파형과 비교기의 출력 파형으로 시험 결과를 전개하였다.

4.1.1 디지털부의 Fire Trigger Pulse

그림 46은 초음파 센서 단품 모듈 디지털부의 Fire Trigger Pulse이다.

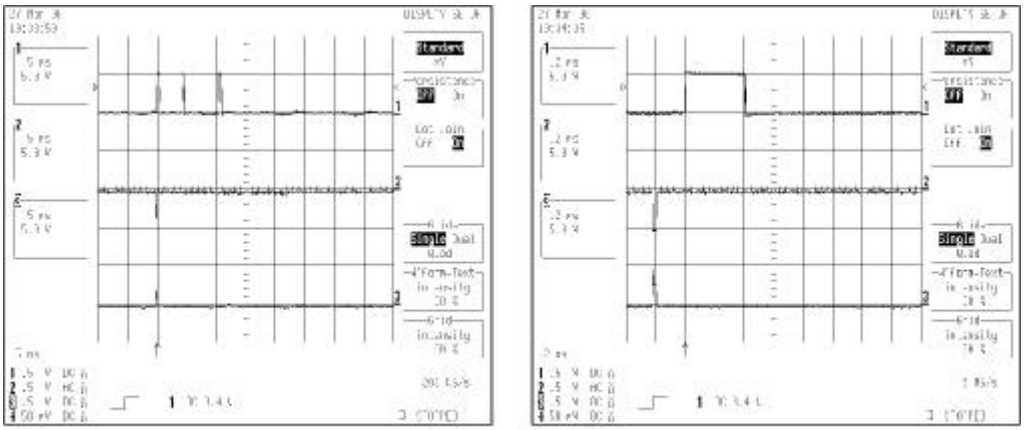


그림 46. 디지털부의 Fire Trigger Pulse

[채널 1] : Trig. Signal
[채널 2] : Interrupt Input Signal
[채널 3] : Trig. Output Signal

그림 46에서 보듯이 89C52에서 출력되는 채널 1의 Trig. Signal은 초음파 센서 모듈 중 제일 먼저 메인보드로부터 동작 신호를 받은 초음파 센서 모듈로부터 발생되는 채널 2의 Interrupt Input Signal에 의해, 남은 초음파 센서 모듈 전체가 동기화되어 채널 3의 Trig. Output Signal을 발생시켜 초음파 모듈이 동작한다. 그림 46의 ⓑ에서 보면 채널 1의 Trig. Signal은 채널 2의 Interrupt Input Signal이 발생하고 약 0.2ms의 시간지연을 가진 후 발생함을 볼 수 있다.

4.1.2 디지털부의 초음파 출력 제어 신호

그림 47은 초음파 센서 단품 모듈 디지털부의 초음파 출력 제어 신호이다.

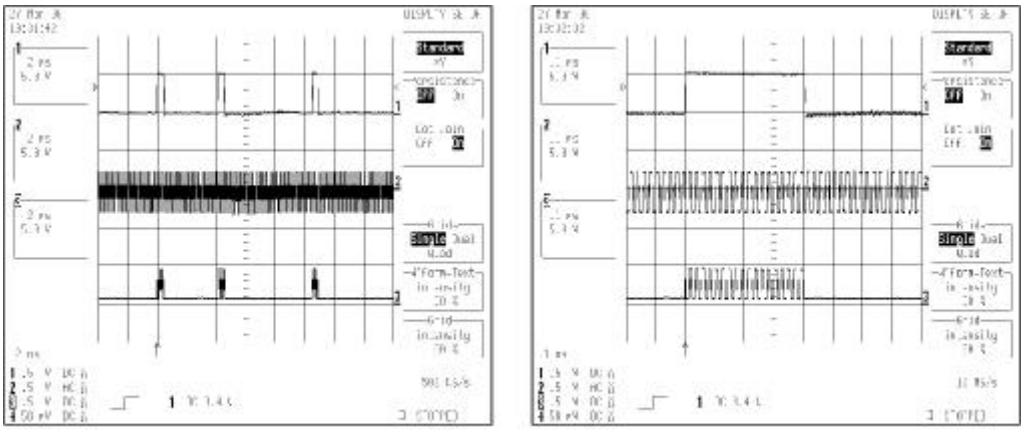


그림 47. 디지털부의 초음파 출력 제어 신호

[채널 1] : Trig. Signal
[채널 2] : 45KHz Modulation Signal
[채널 3] : Fire Signal

앞서 언급한데로 이 초음파 출력 제어 신호는 Interrupt Input Signal에 의하여 발생한다. 그림 47은 89C52의 P1_0에서 출력되는 채널 1의 Trig. Signal과 89C52의 Timer2에서 외부 16MHz의 클럭을 분주하여 출력되는 채널 2의 45KHz Modulation

Signal을 IC 74LS14와 다이오드를 이용해 구성한 Wired OR를 거쳐 출력되는 채널 3의 Fire Signal이다. 그림 47의 ⓐ는 시간축을 좁게, ⓑ는 시간축을 넓게 하여 본 파형이다.

4.1.3 아날로그부의 Fire Signal

그림 48은 초음파 센서 단품 모듈 아날로그부의 Fire Signal이다.

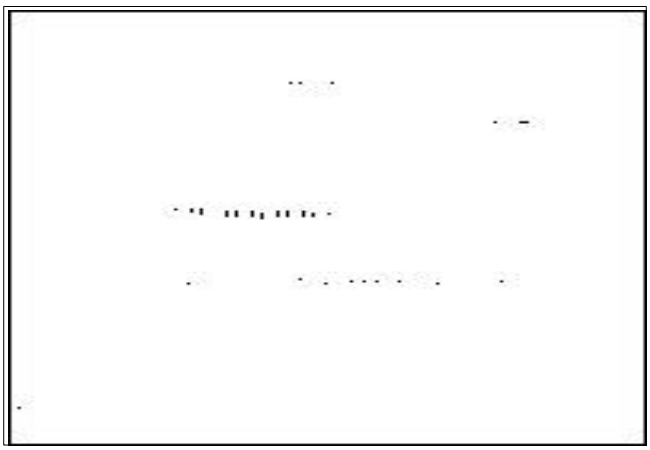


그림 48. 아날로그부의 Fire Signal

[채널 1] : Trig. Signal
[채널 2] : Fire Signal

디지털부에서 발생한 Fire Signal은 Photo Coupler를 통해 완전히 전기적으로 절연되어 아날로그부로 전송된다. 이 신호가 Transformer를 거친 후에 그림 49와 같은 Fire Signal이 되어 초음파 센서를 동작시킨다.

그림 49는 초음파 센서 모듈 아날로그부의 Transformer를 거친 후의 Fire Signal 이다.

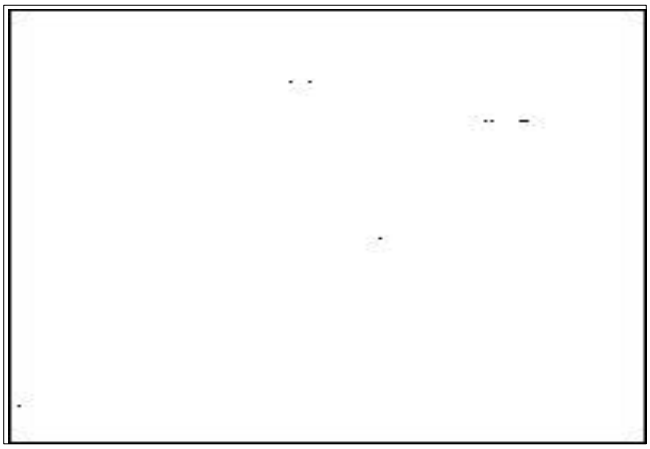


그림 49. 아날로그부의 Transformer를 거친 Fire Signal

[채널 1] : Trig. Signal
[채널 2] : Transformer를 거친 Fire Signal

4.1.4 아날로그부의 Echo 파형과 비교기의 출력 파형

본 논문에서 사용하는 초음파 센서는 송신부와 수신부가 일체형인 Transducer를 사용한다. 디지털부에서 발생한 Fire Signal이 아날로그부의 Transformer를 거쳐 먼저 송신부의 역할을 한 후 Echo Erase 시간을 갖고 수신부의 역할을 한다. 이때 Transducer로 제일 먼저 수신되는 신호는 Echo 파형이다. 그림 50은 아날로그부의 Echo 파형을 도시하였다. 장애물은 사각형의 표준 반사체를 이용하였고 센서와의 거리는 6m를 유지하였다.

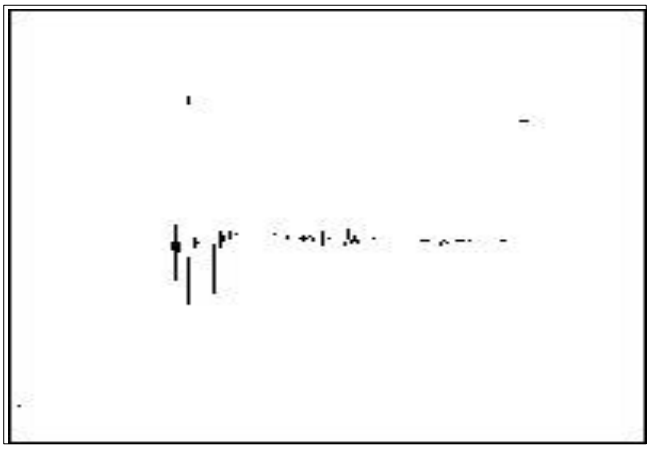


그림 50. 아날로그부의 Echo 파형

[채널 1] : Trig. Signal
[채널 2] : Echo Signal]

Cross-Correlation 알고리즘(3개의 펄스를 사용)을 적용하였기 때문에 하나의 장애물에 대하여 3개의 Echo 파형이 나타남을 알 수 있다. 그림 51에서와 같이 이 Echo 파형이 TL852와 비교기를 거쳐서 최종적으로 필요한 장애물의 거리정보 출력이 된다.

센서와의 거리 6m에 장애물을 설치하고 그 장애물에 반사되어 오는 Echo 파형이 TL852 Analog 칩의 증폭기와 적분기를 거쳐 출력되는 채널 2의 Receive Signal이 된다. 이 Receive Signal은 비교기의 입력이 되고 비교기의 기준전압 2.4 [V]에 맞추어 채널 3과 같은 형태의 출력 신호가 된다. 비교기의 기준전압은 Cross-Correlation 알고리즘을 적용시킨 송신 신호의 패턴을 생각할 때, 수신 신호는 송신 신호의 패턴과 일치하여야 한다. 비교기의 기준전압이 너무 낮아 수신 신호의 패턴이 넓게 나타난다면 이는 잡음과 수신 신호구분이 어렵게 되어 센서 시스템이 오동작을 할 수 있다. 그래서 송신신호의 패턴에 맞추어 수신 신호의 패턴을 알맞게 맞추어 소음에 강한 시스템의 구축을 위하여 비교기의 기준전압을 2.4 [V]에 맞추었다.

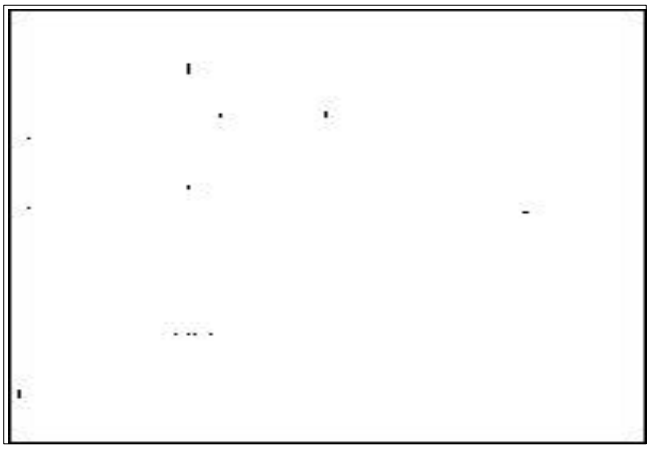


그림 51. 아날로그부의 비교기의 입력 파형과 출력 파형

[채널 1] : Trig. Signal
[채널 2] : Receive Signal (Comparator Input)
[채널 3] : Comparator Output

4.2 초음파 센서 시스템의 굴삭기 장착 시험

4.2.1 초음파 센서의 검출영역 시험

초음파 센서 시스템을 굴삭기에 장착하기 전에 우선 각 초음파 센서모듈의 검출영역을 점검해 보았다.

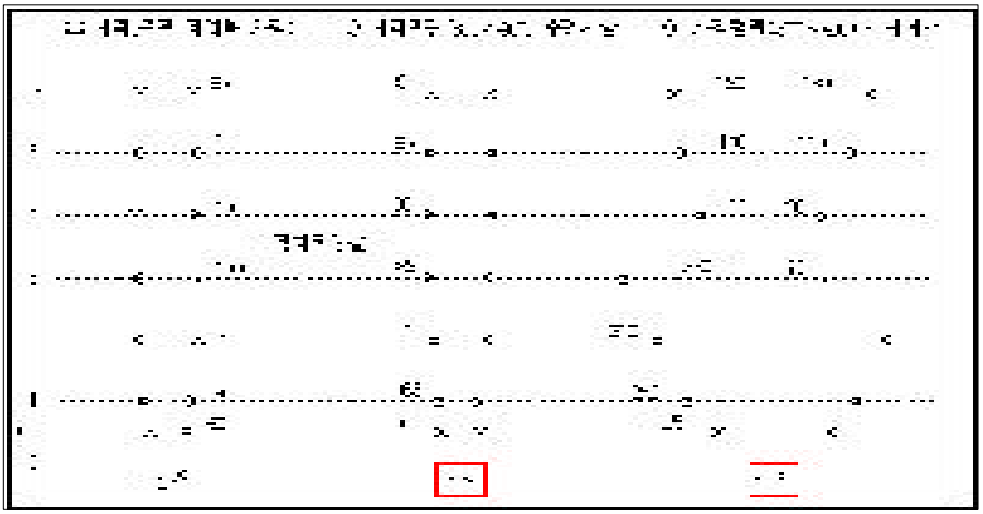


그림 52. 작업복 차림의 사람과 사각 표준 반사체의 검출 영역 시험 결과

원통, 삼각뿔, 사각 표준 반사체 중 센서로부터 반사 정도가 제일 좋은 사각 표준 반사체와 작업복 차림의 사람으로 구분하여 검출 영역 실험하였다. 또한 사각 표준 반사체의 정면지향과 센서쪽으로의 지향을 구분하여 실험하였다. 그림 52는 하나의 초음파 센서모듈로부터 여러 가지 반사체에 대한 검출 영역을 표시한 그림이다.

그림 52에서 ① 과 ②의 비교하자면 방향성을 가진 사각 표준 반사체의 경우가 약간 더 좁음을 알 수 있고 ② 와 ③으로부터 센서 지향의 경우가 수신 검출 폭이 상당히 넓어짐을 알 수 있다.

4.2.2 굴삭기 장착 시험

후방 센서 시스템의 장애물 검출거리는 약 6m로 나타났으나, 우측방과 우측후방의 장애물 검출거리는 각각 3m, 4m로 비교적 짧게 나타났다.

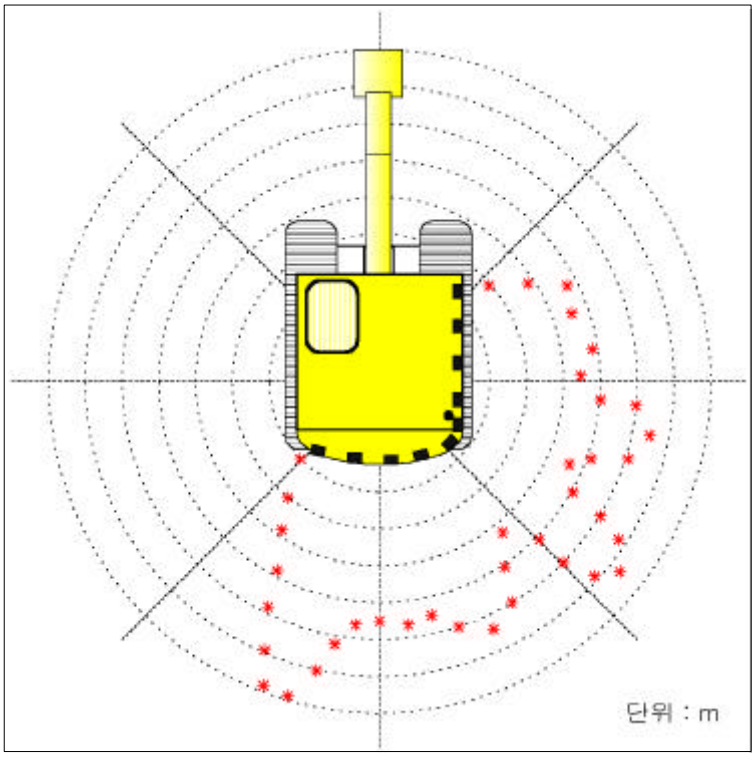


그림 53. 굴삭기의 후방, 우측방, 우측후방에 대한
검출 영역 시험

소음에 대한 시험 결과 거리검출 중에 소음이 발생하더라도 매우 안정된 장애물 검출 응답성을 나타내었음을 볼 수 있다. 굴삭기로의 운전 중 발생하는 진동과 소음은 초음파 시스템에 전혀 영향을 주지 않았다. 또한 초음파 모듈하나와 80C196KC Main Controller를 사용한 거리 측정 및 동작 시험 결과는 안정적이었고, 굴삭기의 저속 스윙 운전 시에도 장애물을 검출하였다. 검출영역을 그림으로 도시하면 그림 53과 같다.

4.2.3 굴삭기 장착 시험 결과 문제점

80196KC Main Controller 와 AT89C52 프로세서를 사용한 초음파 모듈 10개의 연동 시험에서, 초기 전원 인가 시 전원 불안정에 의한 오동작 발생하였다. 그 원인은 아날로그부의 전원 불안정에 의한 것으로 초음파 구동용 Line Driver로 사용한 74LS14의 공급전원이 안정되기 전에 초음파 출력 트랜지스터에 On 신호가 공급되어 전원 불안정이 발생하였다. 이에 대한 해결방안은 초음파 출력 구동용 트랜지스터의 전원을 모듈의 전체 시스템의 전원이 안정되기 전까지 Off시켜줄 수 있는 스위치를 첨가하면 해결이 가능하다.

초음파 모듈에서 Cross-Correlation 알고리즘 적용에 따른 검출 불가 영역이 있음을 알 수 있다. 그 원인은 3개의 Cross-Correlation을 위한 패턴에서 Echo Erase Signal에 의한 검출 불가 영역이 존재하기 때문이다. 그 해결방안은 초음파 모듈을 분리하여 송신모듈과 수신모듈을 각기 사용하면 해결이 가능할 것으로 사료된다.

굴삭기의 고속 스윙 운전 시 소음 제거 알고리즘의 연산속도 지연에 의해 장애물을 검출하지 못하였다. 초음파 모듈별로 10개로 분리되어 있는 Certainty Map을 구간별로 3개로 구성하여 해결이 가능할 것으로 보여진다. 또한 굴삭기의 코너 구간에서 검지를 못하는 영역이 있다. 이는 초음파 센서의 빔 패턴이 좁아서 발생하는 것이다. 센서 모듈의 수를 증가하거나 또는 센서 모듈의 빔 폭이 넓은 초음파 센서로 대체 할 필요성이 있고 초음파 모듈별로 검지 거리 특성이 다르기 때문에 초음파 센서 모듈의 특성에 대한 명확한 기준이 있어야 한다.

5 결론

초음파 센서는 공기를 매체로 하는 Acoustic Wave를 이용하므로 그 특성상 필연적으로 외부 소음에 따른 오동작의 위험이 따른다. 이를 해결하기 위하여 뛰어난 성능의 잡음제거 회로가 요구된다. 이는 일반적인 디지털 필터 외에 부가적인 잡음 제거 알고리즘이 필요하다는 뜻으로 이를 해결하기 위하여 작업현장에서 직접 수집한 정보가 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 환경 시험용 초음파 센서로 이들 정보를 수집하여, 이를 바탕으로 굴삭기용 초음파 센서의 설계를 진행하였다.

굴삭기의 작업환경에서 발생할 수 있는 여러 가지 소음을 고려하여 초음파 모듈로부터 초음파를 발신하지 않고 초음파 센서를 마이크로폰으로만 사용하여 실험한 결과, 장애물에 반사된 신호와 소음원의 신호차를 비교했을 때 소음원과의 거리가 장애물보다 먼 경우에는 반사파의 세기가 크게 측정되었다. 그러나 쇠붕 소음원 등에서 오동작을 유발할 수 있을 정도로 충분히 큰 신호가 검출되었다. 소음과 초음파 센서로부터 전송되어 장애물에 반사되어 돌아오는 반사파를 구분해야 하는데, 이는 장애물에 반사되어 돌아오는 반사파는 전송신호와 동기 되어 일정 간격으로 나타나지만 소음은 그 특성상 전송신호에 상관없이 불규칙적으로 나타난다. 이에 본 논문에서는 Cross-Correlation 알고리즘을 적용하여 송신신호에 알맞은 패턴(3개의 송신펄스)을 이용하여 굴삭기의 작업환경에서 발생할 수 있는 여러 가지 소음을 제거하고, 장애물로부터 여러 가지 소음을 제거하는 데 있어서 Certainty Map 기법을 사용하여 신뢰도를 검증하였다.

본 논문에서 제안한 Cross-Correlation 알고리즘과 Certainty Map 기법을 적용한 초음파 센서의 거리 검출 실험 결과, 초음파 센서의 지향방향에 있는 물체와의 거리는 전송신호를 보낸 후 되돌아온 신호로부터 시간을 측정하여 최대 7m까지 2%미만의 오차로 측정할 수 있었다. 이 알고리즘을 적용한 센서 모듈은 약 6m의 거리 검출 능력이 있었으나 검출 각도에서는 약 10° 이하로 기대에 상당히 못 미치는 실험결과를 보였다. 장애물 검출 성능은 인체 및 표준 반사체를 6m 거리에서 검출하였고 외부 소음에 대하여 강인한 특성을 보였다.

이 같은 성능을 가진 센서 모듈의 문제점으로는, 전체 센서 시스템에서 초음파 모듈이 동일한 성능을 나타내어야 하나 각 초음파 센서와 초음파 센서 모듈별 특성의 차이가 있고, 초음파 센서 모듈에서 Cross-Correlation 알고리즘 적용에 따른 검출 불가 영역이 있으나 초음파 모듈을 분리하여 송신모듈과 수신모듈을 각기 사용하면 해결이 가능하다.

참고문헌

[1] **橋元和男**, **小笠原保**, "**油壓ショベル接觸事故防止システムの開發**", ***建設の機械化***, pp. 24 30, Nov., 1998.

[2] Yoshida Tadashi, Moteki Masaharu, "**建設機械の安全對策**", ***建設の機械化***, pp. 3 7, Mar., 1996.

[3] Hitoshi Maruyama, "**未來型建設機械の安全對策**", ***建設機械***, pp. 37 41, Nov.,1995.

[4] Mikio Kikuchi, Hiromitsu Sekino, Kuniaki Suzuki, "**接近檢知型バックホウの開發**", ***建設機械***, pp. 31 36, June., 1998.

[5] Yasuo Kitahara, "**建設機械用ミリ波レ-ダ**", **고마쯔 기술보고서**, vol.43 no.1, pp.40 50, 1997

[6] Roman Kue, Victor Brian Viard "A Physically Based Navigation Strategy for Sonar-Guided Vehicles", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.10, pp. 75-77 April., 1991.

[7] Minho SONG, shin'ichi YUTA "Autonomous Mobile Robot YAMABICO and its Ultrasonic Range Finding Model", pp.2

[8] **고낙용**, **이건우**, **김영동**, **최한수**, **이번희**, "**초음파 어레이 센서 정보를 이용한 로봇의 실시간 충돌 회피 알고리즘**", *'95KA CC*, pp. 470 473, 10**월호**, 1995.

[9] **김범재**, **이민철**, **이석**, "**장애물 패턴인식을 이용한 자율이동로봇의 예측주행 및 충돌 회피 알고리즘 개발**", *Proc. 13th KA CC*, pp.232, Oct., 1998.

[10] **김성철**, **고낙용**, "**다중 센서 정보를 이용한 실내 주행 로봇의 지역 장애물 회피 방법**", *Proc. 14th KA CC*, pp.A-298, Oct., 1999.

[11] H.R.Everett, "*Sensor for Mobile Robot*", pp.139-148, 1995.

[12] *Ultrasonic Components Technical Specification*, Polaroid.

A Study on an Obstacle Recognition System for Excavator Using Ultrasonic Sensors

Sung-Ho Kim

School of Electrical and Automatic Engineering, University of Ulsan

Abstract

Since there is a blind zone in driver's view around the excavator, industrial accidents between the equipment and the workers within the zone have been occurred frequently. The purpose of this paper is to develop an obstacle recognition system which can prevent such an accident by providing the driver with the information on direction and distance of the obstacle within the blind zone. We designed the ultrasonic sensor based obstacle recognition system which consists of sensor arrays and a control unit connected via CAN(controller area network). The cross-correlation technique and histogramic probability distribution method are used as reliable obstacle detection algorithms to remove the environmental noise. The experimental results using a real excavator show the effectiveness of the system.

Keyword : Obstacle Recognition, Histogramic Probability Distribution Method, Certainty Map, Certainty Value

감사의 글

1992년부터 시작된 저의 울산생활에 작은 결실이 있기까지 도움을 주신분들께 이 작은 지면을 통해 감사의 말씀을 전하고자 합니다.
우선 부족한 저에게 연구실 한켠에 자리를 마련해 주시고 세심한 지도와 아낌없는 조언으로 보살펴주신 박경섭 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 늘 곁에서 많은 격려와 가르침을 베풀어주신 박원심 교수님, 이홍희 교수님, 김한실 교수님께 감사드립니다. 또한 다양한 학무의 길을 인도하여 주신 강희준 교수님, 조강현 교수님, 서영수 교수님께도 감사드립니다.

그 동안 같이 옆에서 힘이 되어준 철호와 병희형, 그리고 광전자 연구실의 식구들인 창훈이형, 창현이, 성환이, 지현이에게도 고마운 마음을 전합니다. 또한 대학원생활을 같이해 온 전력전자 연구실의 의헌, 창근, 승룡, 지능시스템연구실의 재욱, 태호형, 현덕, 자동제어 연구실의 상욱이형, 현철, 재문, 제윤, 태우, 로봇 연구실 진한이형에게도 고마움을 전합니다.
그리고 다시 학교로 돌아오셔서 제가 논문을 쓸 수 있게끔 조언과 질책을 아끼지 않으신 종현이형과 우진이형에게도 감사를 전하며 아울러 주식회사 Adic 가족들에게도 감사의 마음을 전합니다.
학부시절 많은 추억이 깃든 UEBS에서 오랫동안 동거동락했던 봉규, 승욱이, 승완이, 광군이, 주현이와 모든 방송국식구들에게도 진심으로 고마운 마음을 전합니다.

언제나 편안한 마음의 안식처가 되어준 죽마고우들 도엽, 승협, 성수, 철수, 우상, 앨리, 경숙, 신영, 정애, 소미에게도 깊은 우정과 사랑을 전합니다.

특히 언제나 멀리 있지만 날 위해 항상 먼저 생각해주고 사랑으로 대해준 누나에게도 이 지면을 빌어 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.
누구보다 더 못난 손자를 위해 항상 기도 해주시는 할머니께 감사함과 죄송스러움을 전하며, 끝으로 지금까지 항상 사랑으로 대해주시고 절 믿어주시는 아버지, 어머니께 감사드리며 저에게 주신 모든 은혜에 보답하겠습니다.