Proceedings of the 11th
KACC, October 1996

용융아연욕 탕면 높이 측정을 위한 초음파 센서의 사용에 관하여

On the Use of an Acoustic Sensor for Measuring the Level of a Zinc Pot

°박 상 덕*, 임 태 균*, 이 왕 하*, 이 옥 산**

*포항산업과학연구원 공정자동화연구팀 (Tel: 0562-279-6735; Fax: 0562-279-6599; E-mail: Sdpark@RISnet.rist.re.kr)
**POSCO 광양제철소 냉연부 용융도금공장

Abstracts Throughout CGL (Continuous Galvanizing Line) in steel works, zinc-coated steel sheets are produced which are used where long-running corrosion resistivity is required. During the galvanizing process, top dross is created and floated on the zinc pot. Because the dross leaves ill patterns on the coated sheets, a robot system is developed to automatically collect and remove the top dross. It consists of a robot and its carriage system, a pot level sensor, a system controller, and special robot tools. For the first time, the level of zinc pot must be measured and fed back to the robot controller to avoid submersion of the robot hand into the hot zinc pot. In this paper, acoustic distance sensor is tested as a candidate for the pot level sensor in the view point of hot environment. Some considerations on the use of the acoustic distance sensor will be denoted.

Keywords Steel Making Plant, Zinc Pot, Pot Level Sensor, Acoustic Sensor, Sensor Characteristics

1. 서론

제철소의 연속용융 도금설비 (CGL: Continuous Galvanizing Line)는 자동차나 가전제품 등에 주로 쓰이는 내식성 (耐蝕性) 아연도금 강판을 생산하는 설비이다. 도금 공정은 가열로에서 예열된 강판(steel sheet)이 용융아연욕 (zinc pot)을 지나면서 이루어지는데, 이때 고압의 공기 분사(air knife)에 의해 도금 두께가 조절된다. 이러한 과정에서 고온 상태 (450 ℃ 가량)의 용융 아연은 화학 반응이 쉬워져 철과 산소와 반응하게 되어, 용융아연욕 상부에는 이러한 화합물로 이루어진 부유물(top dross)이 생기는데,[1] 이들이 강판에 묻을 경우 도금 품질에 영향을 준다.

따라서, 이 부유물들은 용융아연욕 상부로부터 정기적으로 제거되어야 하는데, 현재까지 부유물 제거는 거의 대부분 수작업에 의해 이루어지고 있으며 대략 20~30 분마다 한번씩 작업자가 (a) 삽과 같은 기구를 이용하여 긁어 모으고 떠서 (b) 회수통에 버린다. (그림 1)

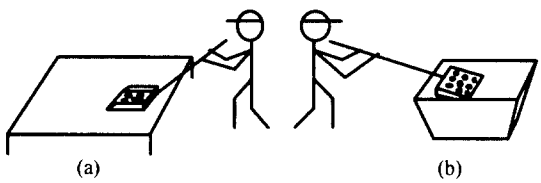


그림 1. 작업자에 의한 부유물 제거 작업.
Fig. 1. Manual operation for top dross removal.

그런데, 용융아연욕 주변은 작업 환경이 열악하여 부유물 제거 작업은 작업자들이 기피하는 작업 중의 하나가 되고 있다. 450 ℃ 가량의 용융아연욕에서 발산하는 고열과 아연가루및 도금 공정중에 발생하는 제트기 소음과 같은 고소음은 작업자에게 해로우며, 10 kg 가량의 부유물 제거 기구도 다루기에 힘들다. 또한, 작업자는 난청과 실족 사고에 노출되어 있어 위험 작업 요소가 되고 있다.

따라서, 이 작업의 자동화를 위해 용융아연욕 부유물 제거용 로봇 시스템이 개발되었다.(그림 2) 여기서는 사람의 부유물 제거 작업 방법에 착안하여 로봇 시스템으로 하여금 직접 부유물을 모으고 떠서 버리는 작업 방안을 연구하였다. [2,3]

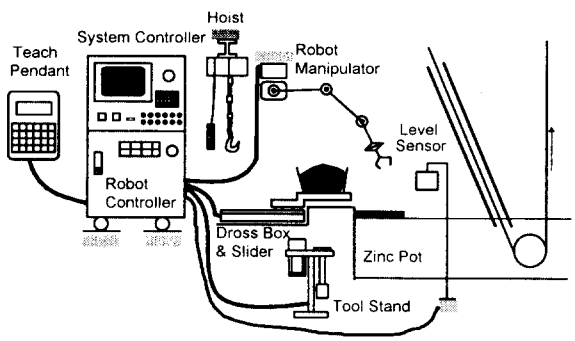


그림 2. 전체 시스템 구성 개략도.
Fig. 2. Schematic diagram for the integrated system.

개발된 부유물 제거용 로봇 시스템은 용융아연욕의 탕면 높이 변화를 감지하는 거리센서 시스템, 부유물을 긁어 모으는 긁게, 부유물을 떠서 버리는 삽, 이 로봇 기구들을 자동으로 번갈아 집고 작업하는 로봇 손목 기구부 및 부유물 제거 작업을 수행하는 로봇과 주행시스템, 그리고 전체 시스템을 제어하는 통합 시스템 제어기 등으로 구성된다. 이 로봇 시스템은 미리 입력된 작업 주기에 따라 용융아연욕 레벨 센서로부터 탕면 높이를 알아내어 부유물을 긁어 모으는 기구와 부유물을 떠서 버리는 기구를 자동으로 번갈아 집고 작업 높이를 조절하여 부유물 제거 작업을 자동으로 수행하게 된다.

그런데, 도금 공정 과정중 용융아연욕에 녹아 있는 용융 아연이 강판에 묻어 도금됨에 따라 용융아연욕의 탕면은 낮아지게 되고 작업자는 탕면 높이를 감시하여 다시 아연 잉곳을 넣어 탕면 높이를 일정하게 관리한다. 이러한 과정에서 용융아연욕의 탕면은 변화하게 되며 로봇이 일정한 높이에서만 작업할 경우 부유물이 삽에 담겨지지 않거나 순수 용융아연까지 버려

지는 등 부유물 제거 작업의 효율이 떨어지게 되며, 심하면 로봇의 손목부나 부유물 제거 기구가 용융아연욕 속에 잠기게 된다. 따라서, 정확한 탕면 높이를 측정하여 로봇이 탕면 높이의 변화에 대응하여 능동적으로 부유물 제거용 삽의 장입깊이를 조정하여 작업하여야 한다.

본 논문에서는, 용융아연욕 탕면 높이 측정을 위해 초음파 센서를 사용할 때 실제로 뜨거운 센서 주위 환경이 센서 측정값에 미치는 영향의 특성을 연구하였다.[2]

2. 초음파 거리 센서의 특성 실험

2.1 초음파 거리 센서의 일반 특성

초음파는 보통 사람의 귀로 들을 수 없는 20 kHz 이상의 주파수를 갖는 음파이며, 초음파 센서는 이러한 초음파를 대상물체로 방사하고 물체로부터 되돌아 오는 반사파를 검출하여 신호처리함으로써 원하는 목적에 사용한다.

초음파 거리 센서 (Acoustic Distance Sensor: ADS)는 반사파가 되돌아 오는 시간을 감지하여 거리 측정을 목적으로 만든 것인데, 물체까지의 거리를 정확히 측정하기 위해서는 측정하려는 대상이 놓여 있는 주위 환경에 의한 영향을 잘 고려하여야 한다. 대기 중 음파의 전달 속도는 대략 344 m/s 정도이나, (20 °C 일 때) 매질의 온도와 밀도에 의해 영향을 받으며, 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$c = 331.5 + 0.607\,t \text{ (m/s)}, \quad \text{c: speed; t: temperature} \qquad (1)$$

본 연구에서는, 이러한 초음파 거리 센서의 일반 특성에 근거하여 이러한 센서가 용융아연욕 탕면 높이 측정을 위해 사용 가능한지, 어떠한 특성을 보이는지를 연구하였다. 이 연구에서 사용된 초음파 센서의 사양은 다음과 같다.

측 정 범 위 : 200~1300 mm
분 해 능 : 1 mm
구동 주파수 : 40 kHz
아날로그출력 : 4~20 mA
응 답 특 성 : 10 Hz
사용주변온도 : -25 ~ +75 °C (센서부), 0 ~ 55 °C (Amp 부)

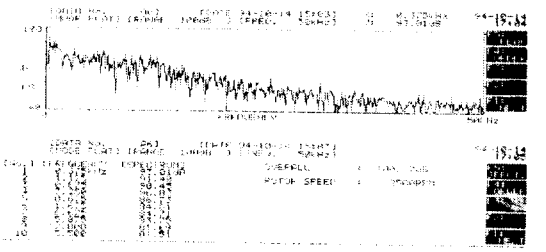
2.2 소음(noise) 측정 실험

초음파 센서는 제품마다 사용되는 고유의 초음파 주파수가 있으며, 대상물 주변 환경에서부터 나오는 소음이 만일 초음파 주파수와 비슷한 경우에는 측정값에 오류가 발생되는 경우가 있다. 따라서 초음파 센서를 적용할 때는 사전에 주위의 소음 주파수의 범위를 파악하는 것이 필수적이다.

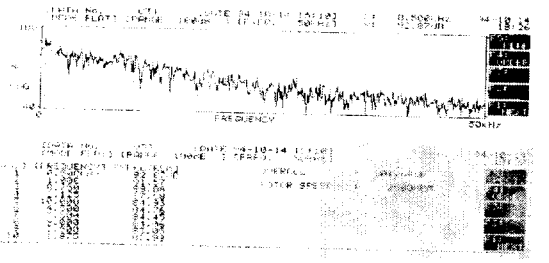
현재 용융아연욕 주위는 도금 공정 중 air knife 의 제트기류에서 발생하는 고소음이 존재하는데 이 소음이 초음파 센서의 측정값에 영향을 줄 수 있다. 이 초음파 센서의 구동 주파수가 40 kHz 이므로 주변의 소음에 40 kHz 정도의 성분이 존재하면 센서의 결과를 신뢰하기 어렵다. 그래서 스펙트럼 분석기 (spectrum analyzer) 기능을 가진 기계 분석기 (machine analyzer)로 용융아연욕 주변의 소음을 분석해 보았다.

이 기계 분석기는 0~50 kHz 정도의 주파수를 분석할 수 있는 것으로 외부의 음파를 마이크로폰으로 입력 받아서 화면에 표시하고 이를 프린트 출력할 수 있으며, 소음 세기 (noise level)에 따라 10 개까지 세기와 주파수 정보도 알 수 있다.

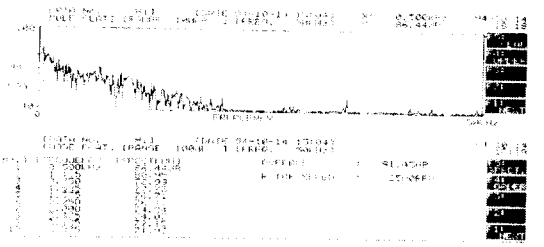
그림 3 에는 용융아연욕 주위 세 부위에서 측정된 소음 스펙트럼이 나타나 있다. 용융아연욕 상부에서 앞면(운전실 쪽), 후면(로봇 시스템 및 센서 설치 부위), 그리고 중앙 부위의 소음 스펙트럼이 측정되었다.



(a) 용융아연욕 전면부



(b) 용융아연욕 중앙 부위



(c) 용융아연욕 후면부 (탕면 높이 센서 설치부)

그림 3. 용융아연욕 주변 세 부위의 소음 스펙트럼.
Fig. 3. Noise spectrum measured at three places around zinc pot.

그림 3.(b)는 용융아연욕 탕면 위 중앙 부근에서 측정된 소음 스펙트럼으로 전반적으로 소음 세기가 높게 나타났다. 그 이유는 이 부근에 소음원인 air knife 가 놓여 있기 때문이다. 그러나 주파수가 50 kHz 로 커짐에 따라 소음 세기는 낮아짐을 알 수 있다. 그림 3.(a)는 용융아연욕의 전면인 운전실 쪽 소음 스펙트럼으로 그림 3.(b)와 비교하면 상대적으로 세기가 낮음을 보여 준다. 그 이유는 이 부근의 경우 운전실 쪽으로 트여 있기 때문이며, 반면에 탕면 위 중앙 부근의 경우 후면부와의 사이에 예열된 강판이 들어 오는 스나우트(snout)가 놓여 있어 약간 밀폐되어 있기 때문에 그 세기가 높게 나타났다.

그림 3.(c)는 용융아연욕 후면부로 탕면 높이 센서가 설치되는 부위의 소음 스펙트럼인데, 20 kHz 이상 고주파 영역에서 소음 세기가 현저히 낮아짐을 알 수 있다. 이는 air knife 와의 사이에 스나우트가 놓여 있어 스나우트가 차폐하는 역할을 하기 때문이다. 특히 40 kHz 부근에서 소음 세기가 매우 낮음을 알 수 있다.

이상의 소음 측정 실험 결과, 주변 소음이 초음파 센서의 구동 주파수인 40 kHz 에서 그 세기가 매우 낮게 나와 초음파 센서를 적용해도 소음으로부터의 외란은 무시할 수 있을 정도로 작음을 확인했다.

2.3 선형성(linearity) 실험

초음파 거리 센서의 선형성을 확인하기 위한 실험을 행하였

다. 그림 4에는 실험장치로 쓰인 보정 장비의 사진이 나타나 있다. 그림에서 1번은 초음파 센서, 2번은 측정하려는 대상물이며, 3번은 거리 실측을 위한 선형자(linear scale)이고 4번은 선형자의 값을 육안으로 읽을 때 paradox error를 줄이기 위한 tool scope이다.

대상물을 이동시키면서 선형자에서 실측한 값과 센서로부터 읽어 들인 측정값을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 실측한 값을 x축상에 표시하고 측정치를 y축상에 표시했는데, 선형성이 매우 우수함을 알 수 있다.

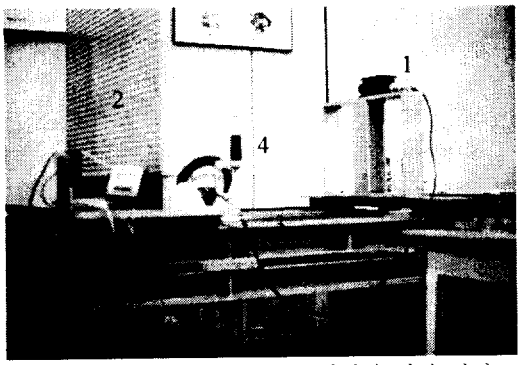


그림 4. 초음파 거리 센서의 선형성 실험 장치.
Fig. 4. Experimental setup for linearity test of ADS.

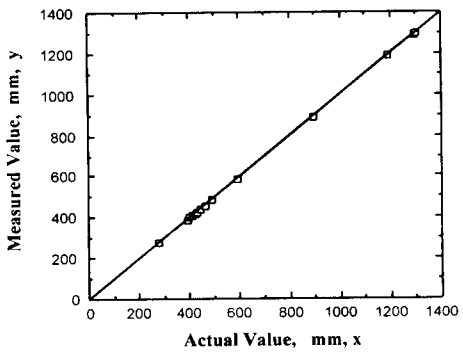


그림 5. 초음파 거리 센서의 선형성 실험 결과.
Fig. 5. Results of the linearity test for ADS.

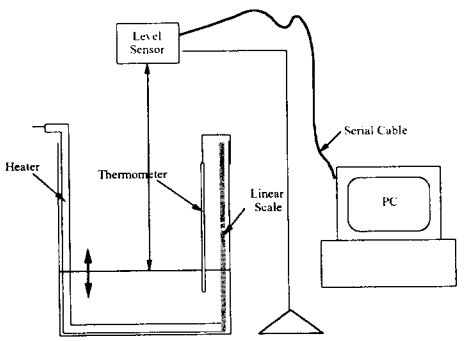


그림 6. 초음파 거리 센서의 온도 영향 실험 장치.
Fig. 6. Schematic diagram for the environmental effect on ADS.

2.4 실리콘 기름 (silicon oil)을 이용한 주변 온도 영향 실험

초음파 센서의 측정값은 주위 온도에 의해 영향받는 것이 일반적이다. 실제로 본 연구에서 거리 측정의 대상물이 되는 용융 아연 탕면은 450 ℃ 가량의 고온이며 탕면 상부의 주위도 고열, 고온의 환경이므로 탕면 높이를 정확히 측정하려면 이러한 환경이 센서 측정값에 어느 정도 영향을 주는지 검증하여야 한다.

본 연구에서는 물보다 비등점이 훨씬 높은 실리콘 기름을 비이커에 넣고 가열하면서 온도의 변화에 따라 센서의 출력값을 측정하여 실제값과 비교해 보았다. 실험장치는 그림 6과 같다.

가열기로 실리콘 기름의 온도를 상승시키면서 실제값과 센서 측정값을 비교하였다. 기름의 온도를 측정하기 위한 수은 온도계 (최고 300 ℃까지 측정)를 준비하고 실제 탕면 높이를 측정하기 위해 비이커에 선형자를 새겼다.

이 초음파 센서는 출력이 거리에 비례하는 전류값으로 나오며 이 전류값과 실제 거리 사이의 변환표는 표 1과 같다. 그리고 실험 결과의 그림에는 전류값으로 도시되어 있다.

표 1. 센서 출력값과 실제 거리 사이의 변환값.
Table 1. Relation between sensor output and distance.

Sensor output (mA)	10	12	14
거리 (mm)	612.5	750	887.5

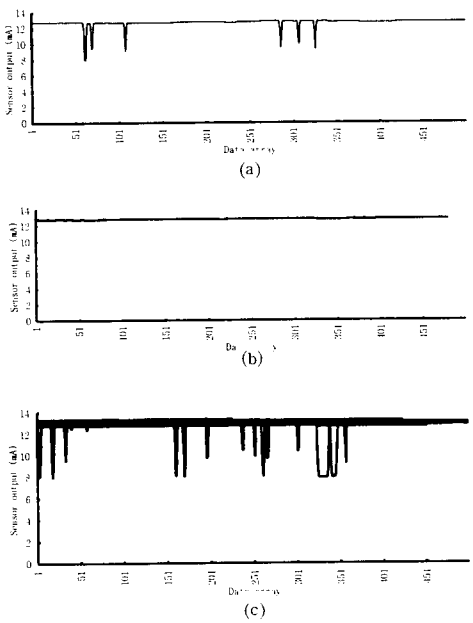


그림 7. 실리콘 기름의 온도 영향 실험 결과.
Fig. 7. Results showing the effect of temperature of silicon oil.

3. 실험 결과 및 토의

그림 7은 센서를 실리콘 기름 탕면 위 일정한 거리에 놓고 실리콘 기름을 가열시키면서 500 개의 센서 출력을 얻은 결과이다. 여기서 그림 7.(a)는 실리콘 기름이 244 ℃일 때 측정된 센서 출력값으로 진동(hunting)이 발생함을 알 수 있다. 그 변동값은 심하게는 4~5 mA에 이르며 거리로는 275 mm 정도이다. 따라서 이러한 환경 하에서는 센서 출력값을 신뢰하기 어렵다. 이 진동의 원인으로는 (1) 센서부의 온도 상승, (2) 앰프(amplifier)부의 온도 상승, (3) 센서와 실리콘 기름 사이 매질인

공기의 온도 상승, (4) 실리콘 기름의 증기에 의한 영향 등을 고려할 수 있다. 이 중 센서부는 온도가 75 °C 이하이고 앰프부는 실리콘 기름에서 떨어져 있으므로 고려에서 제외된다. 반면에, (3)의 항은 식 (1)에 의하면 온도가 상승할 때 음파의 속도가 빨라지고 이에 따라 반사파가 센서에 도달하는 시간이 줄어 거리가 짧게 감지되기 때문에 신호 진동의 원인이 된다.

이러한 현상을 좀 더 관찰하기 위해 그림 7.(b)에서는 그림 7.(a)와 같은 온도에서 실리콘 기름 탕면 위를 선풍기로 강제 송풍시켜 대류 현상에 의한 온도 상승과 실리콘 기름의 증기를 없애 주었다. 그림에서 보면 이때는 센서 출력값이 변동없이 일정하게 나타남을 알 수 있다. 그림 7.(c)는 실리콘 기름을 상온에서부터 270 °C 까지 가열하면서 센서 출력을 얻은 것으로 고온으로 갈수록 값의 진동이 심해지고 그 값도 전반적으로 커짐을 보여 준다. 그림에서 보면 온도의 증가에 따라 센서 출력값이 조금씩 증가하였는데, 이는 실리콘 기름의 열팽창에 의한 부피 증가로 볼 수 있다.

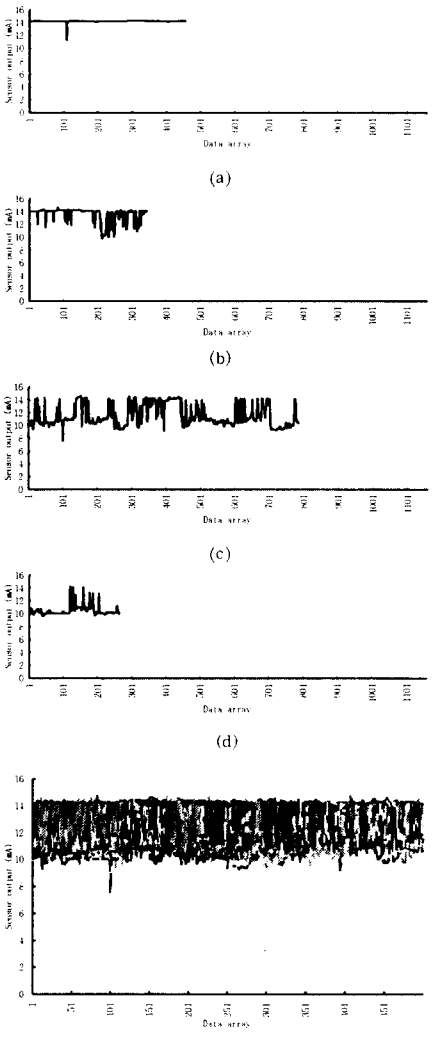


그림 8. 전기로 내의 온도에 따른 거리 센서 측정값.
Fig. 8. Sensor output vs. Temperature in the furnace.

앞의 실험에서 실리콘 기름의 온도 상승으로 인해 많은 양의 증기가 발생한다. 따라서 고온 실험시의 측정값 진동요인이 발생된 증기에 의한 것인지, 아니면 뜨거워진 주위 공기 때문인가를 확인하기 위해서 증기가 발생하지 않는 전기로에서 실험을 행하였다. 전기로 내부의 온도를 상승시키면서 뜨거워진 내부벽을 초음파 센서가 향하도록 하여 일정한 거리에 놓고 실험을 행하였다.

그림 8.(a),(b),(c),(d)는 전기로 내부 온도가 각각 35, 140, 200, 286 °C 일 때의 센서 측정값을 나타내었는데, 온도가 상승함에 따라서 진동의 정도가 심해짐을 알 수 있다. 온도가 상승함에 따라 측정값의 천이가 이루어져 35 °C 일 때의 센서 측정값이 거의 대부분 14 mA (거리로는 887.5 mm)이었는데, 286 °C 일 때의 센서 측정값은 대부분 10 mA 까지 떨어져 거리가 612.5 mm 인 것처럼 측정되었다.

그림 8.(e)는 상온에서 286 °C 까지의 실험 결과를 함께 도시한 것으로 값의 진동 폭이 대략 4mA 정도임을 알 수 있다. 이 값은 거리로 환산하면 대략 275mm 정도의 양이다.

이상의 여러가지 실험 결과를 종합하면, 초음파 거리 센서의 출력값 왜곡의 주 원인은 측정 대상물 주위 매질의 온도 변화에 기인함을 알 수 있다. 또한, 출력값의 변동 폭은 온도의 상승에 따라 심해짐을 알 수 있다. 실제 용융아연욕의 조업온도인 약 450 °C 정도에서는 이러한 경향이 더욱 심화됨이 실험 결과 관측되었다.

따라서, 용융아연욕의 탕면 높이 측정을 위해 초음파 센서를 사용할 때는 센서부를 냉각하고, 앰프부는 용융아연욕에서 멀리 위치시켜 온도 상승을 방지하며, 탕면 상부의 공기 온도가 대류에 의하여 상승하여 음파 속도가 변동되지 않도록 하여야 한다. 또한, 탕면 상부 공기 온도의 변화에 따라 음파 속도가 변동하였을 때 온도에 따른 보정 실험을 통해 거리 값을 보정해 주는 방법도 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여, 이제까지 일반적으로 알려진 바와 같이 초음파 센서의 측정값이 음파 전달 매질의 분위기에 영향 받음을 확인하였다. 따라서, 측정 대상이 고온인 환경 아래에서 정확한 거리 정보를 얻기 위해서는 센서부와 앰프부의 온도 상승을 방지하며, 탕면 상부의 공기 온도가 상승하여 음파 속도가 변동되지 않도록 조치하여야 한다. 또한, 센서 측정값 보정 실험을 통해 대상물 주위 온도에 따라 거리 값을 보정해 주는 방법도 있다

참고문헌

[1] Frank Porter, *Zinc Handbook*, Mechanical Engineering Series, No. 73, Marcel Dekker, Inc.

[2] 임태균, 박상덕, 이왕하 외, *Zinc Pot Top Dross 제거용 Robot 개발*, 1 차년도 연구과제 보고서, 포항산업과학연구원, 1995 년 8 월.

[3] 임태균, 박상덕, 이왕하 외, *Zinc Pot Top Dross 제거용 Robot System 개발 (II)*, 2 차년도 연구과제 보고서, 포항산업과학연구원, 1996 년 6 월.