

2001 춘계학술발표대회 논문집

한국원자력학회

초음파 온도 센서를 이용한 용융물 온도 측정 실험에 관한 연구

A Study on Temperature Measurement for Molten Material using Ultrasonic Temperature Sensor

구길모, 김상백, 강경호, 하광순, 강희영

한국원자력(연)

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

노심 용융물과 원자로 용기하부 반구내벽 사이의 간격형성 여부 및 간극의 열적 영향을 측정하기 위한 LAVA실험에서 초고온 상태에 있는 노심 용융물의 온도를 측정하는 것은 매우 중요한 연구과제이다. 기존의 접촉식 열전대 방식에서는 측정온도가 2000°C 이하이어야 하며, 적외선을 이용한 비접촉식 방식에서는 내면 온도측정이 불가능하고 수증기 및 공기 등에 의한 간섭에 민감하다는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 초음파 웨이브렛 지연시간을 이용한 초고온 측정법을 제안하고, 첫 단계로서 용융물 온도에 내구성을 갖는 초음파 센서를 설계하여 약 2000°C 까지 용융물의 온도를 측정하였다. 또한 본 실험 연구에서는 제안된 이론의 유용성 및 개발된 시스템의 효율성을 실험을 통하여 확인하였다.

Abstract

The temperature measurement of very high temperature core melt is of importance in LAVA experiment in which gap formation between core melt and the reactor lower head, and the effect of the gap on thermal behavior are to be measured. The existing temperature measurement techniques have some problems, which the thermocouple, one of the contact methods, is restricted to under 2000°C, and the infrared thermometry, one of the noncontact methods, is unable to measure an internal temperature and very sensitive to the interference from reacted gases. So, in order to solve these problems, the delay time of ultrasonic wavelets due to high temperature is suggested. As a first stage, a molten material temperature was measured up to 2000°C. Also, the optimization design of the ultrasonic temperature sensor with persistence at the high temperature was suggested in this paper. And the utilization of the theory suggested in this paper and the efficiency of the developed system are certified by performing experiments.

1. 서론

최근 들어 노심 용융물과 원자로 용기하부 반구내벽 사이의 간극형성 여부 및 생성원리를 규명하고, 간극이 노심 용융물과 반구의 열적 거동에 미치는 영향을 분석하는 것을 목표로 하는 LAVA(Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 실험이 원자력 분야에서 수행되고 있다^[1].

기존의 접촉식 열전대 방식^[2]에서는 열전대 재료의 내구성 및 Insulator shunting 영향 때문에 2000℃ 이상의 온도측정이 불가능하다. 그리고 적외선이나 레이저를 사용하는 비접촉식 방식^[3]에서는 빛의 직진성 때문에 검사체 표면의 온도측정은 가능하나 내면의 측정치가 정확하지 않고 접근성이 떨어지며, 외부조건에 의해 수증기 및 에어졸 등의 간섭이 발생되면 측정이 불가능하다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고온과 육안접근이 어려운 환경에서 높은 온도를 정확하게 측정할 수 있는 초음파 지연시간을 이용한 초고온 측정 시스템을 새롭게 개발하였다. 제안된 방식은 접촉식에서 문제가 되고 있는 온도측정의 한계를 극복한 것으로 적외선이나 레이저를 이용하는 기존의 비접촉식 방식에서 불가능한 검사체 내면의 초고온을 측정하고자 하는 것이다. 본 논문에서 새롭게 제안된 방식은 야기코일에서 발생된 전기펄스의 자기장을 자기 변형선을 이용하여 짧은 주기의 초음파 펄스로 변환한 다음 도파선을 따라 전파시켜 다수의 센싱너치에서 반사되는 초음파의 지연시간을 이용하여 평균온도를 측정하고자 하는 것이다.

그리고 본 연구에서는 제안된 이론을 바탕으로 원자력 분야에 적용이 가능한 초고온 측정 시스템을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 초고온 측정 시스템에 사용되는 초음파 온도센서는 텅스텐 합금 재료를 이용하여 특수 가공하였으며, Sheath는 텅스텐 합금 봉에 슈퍼 EDM 가공법을 적용하여 관으로 제작하였으며. 또한 용융물의 고온에 내구성을 가지는 특수 sheath를 제작하였다. 탐촉자는 미국의 PANAMETRICS사 제품을 사용하였다. REMENDUR 합금소재를 자왜소자로 사용하였고, 자왜소자와 텅스텐의 합금은 전자 용접방법으로 용융 결합하여 용접부에서 반사되는 음향에너지가 최소가 되도록 하였다.

신호처리단은 초음파 발진부 및 수신부로 구성하였다. 초음파 탐상장치는 5058 PR PANMETRICS사와 USD-15 KRAUTKRAMER사의 제품을 병행하여 사용하였고, Tek.사. Digital Phosphor 1GHz 대역 오실로스코프를 RS-232로 PC에 연결하여 데이터를 취득하였다.

또한 본 연구에서는 초음파 반사신호의 지연시간을 측정하여 센서의 열전달 특성을 해석하고, 실험을 통하여 획득한 수집데이터를 보정곡선을 이용하여 지연시간을 온도로 환산함으로써 약 2000℃의 고온 용융물의 온도를 측정할 수 있었다.

2. 초음파 지연시간을 이용한 다중노치 초고온 측정법

기체, 액체, 고체 등에서의 음속은 온도에 의존적임으로 고체내에서의 음속은 재료계수와 밀도의 함수로 식 (1)과 같이 표현된다^[4].

$$v = (M/\rho)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 M은 재료계수이고, ρ 는 밀도이다.

식 (1)로부터 고체내의 재료계수와 밀도는 온도함수이므로 음속은 온도측정에 이용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 직경이 작은 재료선에서는 음속측정에 영계수가 이용된다^[5].

$$v = (E/\rho)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 E는 영계수(Young's module)이다.

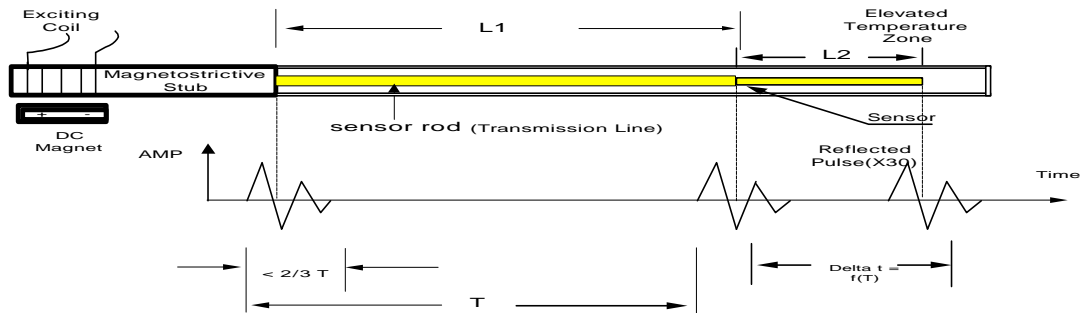


그림 1. 펄스에코 방식에 의한 초음파 온도메터

그림 1에 본 연구에서 제안한 초음파 초고온 측정 시스템의 기본원리와 온도변화에 따라 지연되는 반사신호의 패턴을 나타냈다. 야기코일에서 발생된 전기펄스의 자기장은 자기변형 선에서 짧은 주기성을 갖는 초음파 펄스로 변환된다. 도파선을 따라 전파되는 초음파 펄스는 음향 임피던스의 불연속 위치, 끝단, 직경이 변하는 위치에서 반사된다. 반사된 음향 신호는 다시 야기 코일에서 전기신호로 변환된다.

초음파 펄스의 속도는 센서선의 온도에 밀접한 관계가 있으므로 반사체로부터 반사된 도착 시간차는 센서 선의 평균 온도와 관계가 있다. 초음파 지연시간을 이용한 방식에서는 매우 높은 온도의 측정이 가능하나 센서재료의 용융점에 제한을 받는다. 일반적으로 텅스텐 합금을 사용할 경우 3410 °C 에서 온도 제한을 받게 되는데, 열전대 측정 방법과 비교하면 약 1000°C 이상 높은 온도이다.

본 연구에서는 기존의 적외선이나 레이저를 사용하는 방식과는 달리 초음파의 지연시간을 이용하여 원자력 분야에서 초고온을 측정할 수 있는 방식을 제안하고, 제안된 이론을 바탕으로 초고온 측정 시스템을 개발하였다. 특히, 그림 2에 나타낸 바와 같이 본 연구에서는 1개의 온도센서 로드에서 다수의 센싱 노치를 부착하여 각각의 노치에서 반사되는 초음파의 지연시간을 식 (2)에 적용하여 온도를 측정하는 방식을 새롭게 제안하였다. 이러한 다중노치 방식을 사용하면 비접촉방식에서 문제가 되고 있는 온도측정의 한계를 극복하는 것이 가능하며, 또 적외선이나 레이저를 이용한 비접촉방식에서 문제가 되고 있는 내면온도 측정 및 수증기 및 공기 등에 의한 간섭의 영향을 해결할 수 있다. 그림 2에 다중 노치인 5소자 온도센서와 센서로부터 반사된 신호패턴, 그리고 R3 반사경로와 R212 반사경로를 나타냈다.

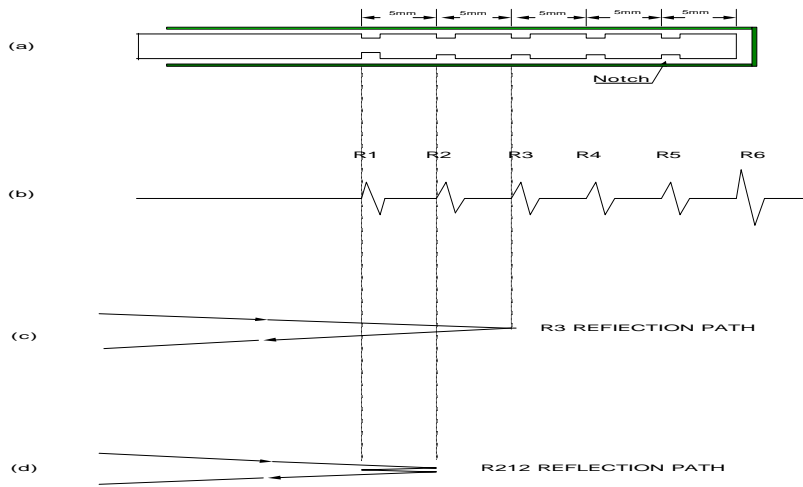


그림 2. 다중 노치에서 반사 지연신호의 패턴 및 경로 (a) 5소자 초음파 온도센서, (b) 반사신호 패턴, (c) R3 반사경로, (d) R212 반사경로

3. 초음파 초고온 측정 시스템의 개발

본 연구에서는 다중노치로부터 반사된 초음파 지연시간을 실시간으로 측정하여 온도함수로 변환하는 초음파 지연시간을 이용한 다중노치 초고온 측정법을 제안하고, 제안된 이론을 바탕으로 원자력 분야에 적용이 가능한 초고온 측정 시스템을 개발하였다. 본 연구팀이 개발한 시스템을 그림 3에 나타냈다.

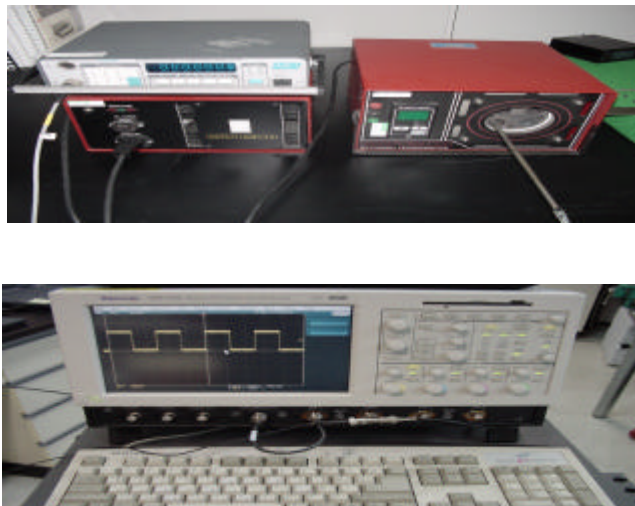


그림 3. 초음파 초고온 측정 계측 시스템

3.1 센서 및 Sheath

UTS 센서의 절차는 센서선을 가공하여 자왜소자와 특수 용접한다. Sheath 관은 3단계로 센서선에 삽입하고 지지봉으로 연결한다. 이때 센서선은 액체 실리콘을 코팅하여 센서선과 Sheath 간에 접촉을 방지하였다. 완성된 센서의 Remendur는 자왜 탐촉에 삽입한다. 그림4 및 5는 분해 및 조립된 센서선의 도면이다. 초음파 센서 가공 치수 및 제작 차수는 표.1과 같다.

표.1 센서 및 Sheath의 치수

재료	길이	OD	너치 위치	너치 종류	너치 가공법
센서	레늄텅스텐	1000mm	45mm,300mm	Round, Vee	EB 및 기계
Sheath	텅스텐	34.5mm x 3	1mm	6.5mm	3mm
자왜소자	REMEDUR	50mm	N/A	N/A	N/A

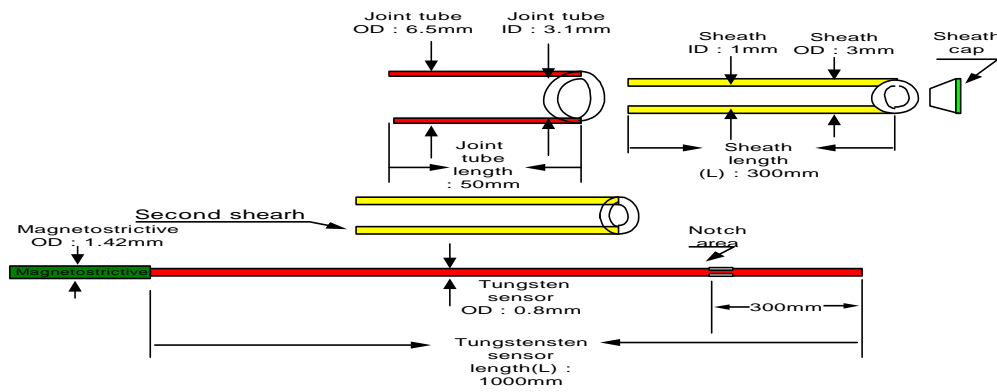


그림 4. 센서 분해도

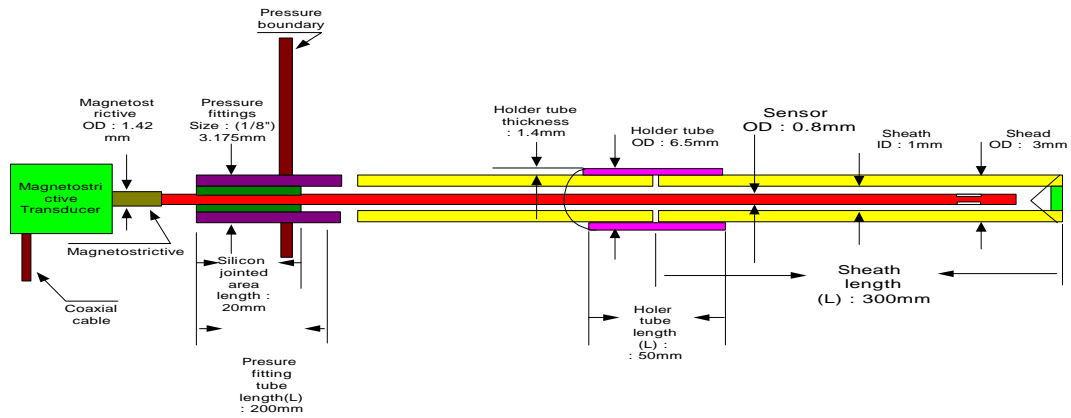


그림 5. 센서 조립도

3.2 탐촉자

10mm 길이의 토륨화 텅스텐 센서소자는 초음파 반사신호를 약 $4\mu\text{s}$ 정도 지연시킨다. 따라서 반사신호의 분리를 위해서는 초음파 펄스폭은 $2\text{--}3\mu\text{s}$ 이하가 되어야 한다. 초음파 펄스의 간격은 자기장 펄스의 주기와 자기장 펄스와 결합된 자기변형선의 길이에 의해서 결정된다. 자왜 탐촉자의 펄스 간격과 모양에 관해서는 참고문헌 [5]에서 상세히 기술하고 있다. 펄스 자기장에 결합된 자왜선의 길이를 최소화하기 위한 방법으로 2mm의 짧은 폭 코일이 사용된다. 이 경우 코일의 끝단에 위치하는 페라이트 디스크(Ferrite disc)의 길이는 약 4mm이다. 본 연구에서는 펄스주기를 최적화하기 위해 임피던스 값이 작은 Delrin R사(2mm 길이, 1.1mm 직경, #44 구리선, 100-150 권수)의 코일을 사용하였다. 코일의 인덕턴스는 $15\mu\text{H}\sim 30\mu\text{H}$ 가 최적인 것으로 확인되었다. 그림 6에 본 연구팀이 제작한 초음파 thermometry를 나타냈다.

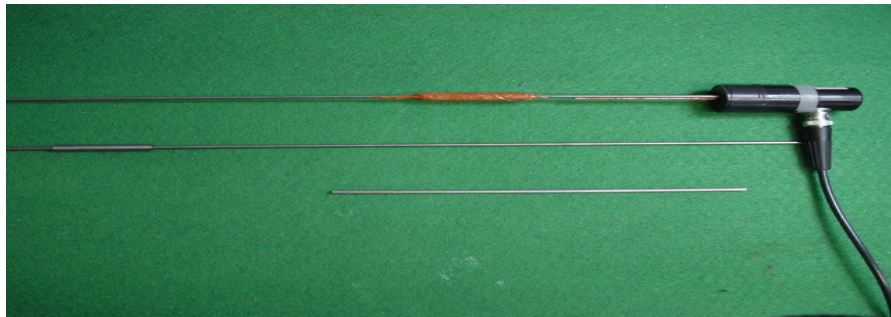


그림 6. 초음파 thermometry

3.3 자왜(magnetostrictive)선

자왜선의 직경은 야기되는 전기펄스와 초음파 펄스의 특성에 따라 결정된다. 자왜선의 직경이 너무 클 경우에는 파형과 진폭이 변화된다. 반면에 자왜선의 직경이 너무 작을 경우에는 야기된 자기장과 에너지 결합도가 작아지므로 신호의 진폭이 작아진다. 최적의 자왜선 직경은 약 0.7-1.5mm 정도이다.

Remendur는 본 시스템에서 사용한 자기변형 재료중 하나로 높은 자왜계수를 가진다는 특징 때문에 초음파 온도 측정기에 널리 사용되고 있다. 입력 전기신호에 야기되어 최대 자왜효과를 얻기 위해서는 열처리가 필요하다. 본 시스템에서는 보호된 대기 중에서 다양한 온도로 처리하여 최대의 자기장 특성을 갖도록 하였다. DC 자기장을 Remendur에 걸어주면 자왜효과가 좋아진다. 직경이 5mm이고 길이가 25mm인 Alnico 라드자석을 Remendur 선으로부터 3-5mm 근접한 거리에서 사용할 때 최대 진폭을 얻을 수 있었다. 자기변형 선의 길이는 중요하지는 않지만 일반적으로 But 용접부에서 약 10% 정도의 신호가 반사된다.

텅스텐-Remendur 접합부에서 작은 임피던스 부정합이 발생하므로 Remendur의 길이는 센서에서 반사되는 신호와 연결부 반사신호와의 간섭을 방지할 수 있도록 설정해야 한다. 따라서 Remendur 지역을 진행하는 초음파 펄스의 전파시간을 측정하여 두 센서에서 반사되는 신호간의 시간간격보다 작거나 크게 하는 것이 필요하다. 본 실험에서는 텅스텐-Remendur 접합부에서 발생하는 신호를 배제하기 위해서 Remendur 재료에서 가장 긴 전파 시간이 가장 높은 온도에서 두 지점 사이의 지연시간을 초과하도록 설계하였다.

Remendur의 속도가 실내온도에서 5400m/s이고 3000℃에서의 토륨화 텅스텐의 음속이 3300m/s인것을 고려하면 10mm 간격으로 5개가 있는 82mm 이상되는 센서는 Remendur의 길이가 텅스텐 소자보다 1.64배 정도 길어야 한다. 한편, Remendur의 길이는 가장 낮은 온도에서 반사되는 신호간의 가장 짧은 전파지연보다 더 작아야 한다. 센서 사이의 거리를 10mm로 하고, 가장 낮은 실험실의 온도를 고려하면 Remendur의 길이는 $10 \times 5400/4320 = 12.5 \text{ mm}$ 보 적어야 하는데 반사신호의 중첩을 피하기 위해서는 12.5mm 보다 수mm 정도 더 작은 것이 좋다.

3.4 PC 기반 인터페이스

본 연구팀이 개발한 다중 초음파 온도측정기는 PC 기반 초음파 탐상장치의 인터페이스 및 버스구조이며 프로그래밍이 가능한 시스템이다. 기본적으로 1개에서 5개의 센서를 가지며, 이 시스템에서는 한 개 또는 두 개의 센서를 구동할 수 있다. 센서로부터 반사된 신호는 각 센서의 시작/정지 신호를 전기적으로 발생하여 선택할 수 있다. 이들 시작/정지 신호들은 일정한 시간간격으로 멀티플렉서에 입력되고, 카운터는 모든 소자에서 반사되는 신호에 대해서 시간간격을 계산한다. 이 경우 센서의 수는 최대 10개까지 가능하다. 카운터의 디지털 출력 데이터는 계측기나 컴퓨터에 직접 입력된다. 본 시스템에서는 필요한 신호를 0.5~1.0 μ s 범위의 게이트를 이용하여 선택할 수 있다. 이와 같이 게이트 범위가 선정되면 시작/정지신호는 게이트 신호와 초음파 비디오 신호를 AND 함수로 출력한다.

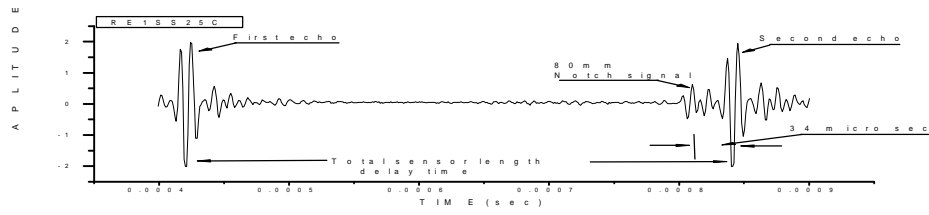
3.5 센서 구동단 및 전치 증폭기

약 300 볼트용량을 가지는 펄서와 코일은 20m의 RG58 동축케이블로 연결된다. 본 시스템으로부터 센서에 공급되는 신호의 펄스폭은 0.5 μ s이다. 그리고 반복율과 전류는 각각 60Hz-500Hz와 0.5A이다.

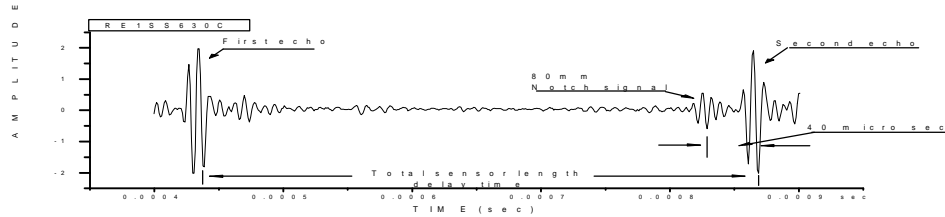
4. 실 험

4.1 초음파 웨이브렛 지연시간 측정

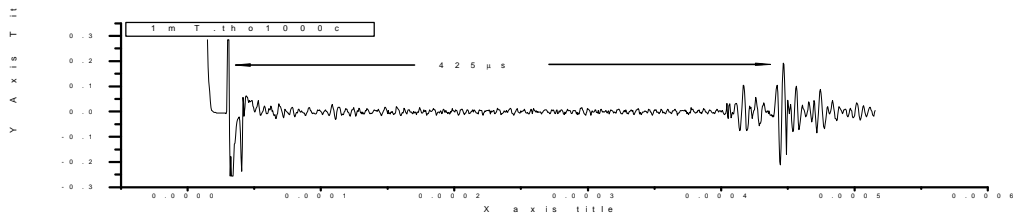
초음파 온도측정 실험을 수행하기 위해서 SILICONT 전기로를 이용하여 약 1600℃ 까지 온도를 높이면서 약 100℃ 마다 지연시간을 측정하였다. 또한 2300℃의 고온측정은 표준연구원 특수노를 사용하여 온도를 측정하였다. 이때 온도 측정 시스템은 그림 7과 같이 PC 기반 초음파 탐상장치를 이용하였다. 그림 8(a)는 상온에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호의 패턴이다. 그림 8(b)는 630℃에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이다. 그림 8(c)는 1000℃에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 425 μ s이다. 그림 8(d)는 1600℃에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 426.3 μ s이다.



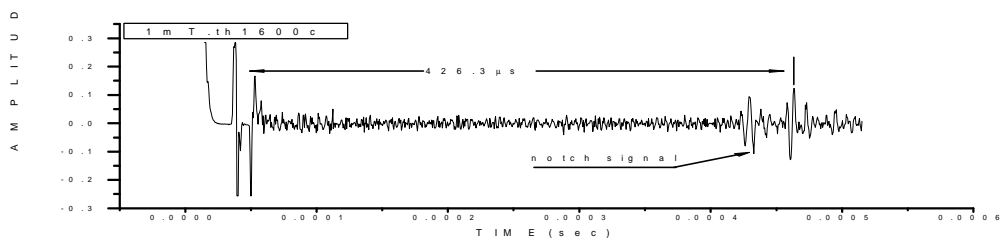
(a)



(b)



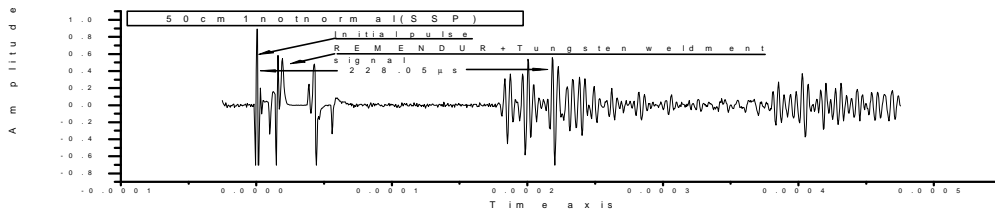
(c)



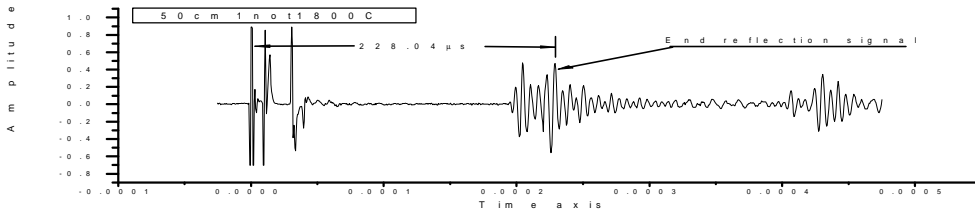
(d)

그림 8. (a) 20°C, (b) 630°C, (c) 1000°C, (d) 1600°C 온도변화에 따른 지연신호 패턴 (센서 선 길이 L : 1000mm)

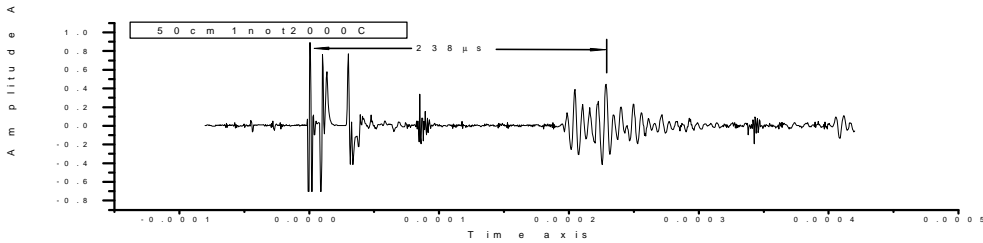
그림 9(a)는 상온에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호의 패턴이다. 그림 9(b)는 1800°C에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 228.04 μ s이다. 그림 9(c)는 2000°C에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 238 μ s이다. 그림 9(d)는 2200°C에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 239.4 μ s이다.



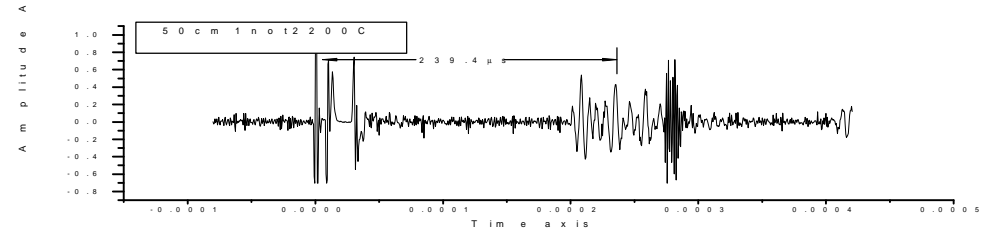
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9. (a) 20°C, (b) 1800°C, (c) 2000°C, (d) 2200°C 온도변화에 따른 지연신호 패턴 (센서 선 길이 L : 500mm)

온도측정 결과 2000°C에서 실제값과 초음파 지연시간에 따른 측정값의 정밀도는 3.5cm 길이 당 10회 반복 측정 결과 평균값은 0.03%의 작은 오차로 나타났다.

4.2 온도측정

초음파 지연시간으로부터 노심용융물의 온도를 측정하기 위해 초음파 온도-지연 보정곡선을 얻기 위한 실험을 수행하였다. SILICONIT 전기로에 온도측정 센서를 열발생 지역에 수평으로 설치하였으며, 센서선은 일본 Nilaco Corporation의 2% 토륨 텅스텐을 사용하였다. 온도교정을 위해서 파이로 메터와 K타입 열전대 온도계를 병행 설치하여 측정된 온도를 비교하였다. 온도증가에 따른 온도 지연시간을 측정하기 위해서 PC 기반 시스템을 이용하여 온도지연 데이

터를 수집하고, 이를 바탕으로 PC에 저장된 온도지연 데이터를 온도함수로 변환하기 위해 온도-지연시간 보정곡선을 작성하였다. 이 보정곡선의 지연시간은 편의상 센서 끝단의 반복 신호 구간을 설정하였다. 그림 10에 2% 토륨 텅스텐 센서를 이용한 초음파 초고온 측정 시스템의 온도-지연시간 보정곡선을 나타냈다.

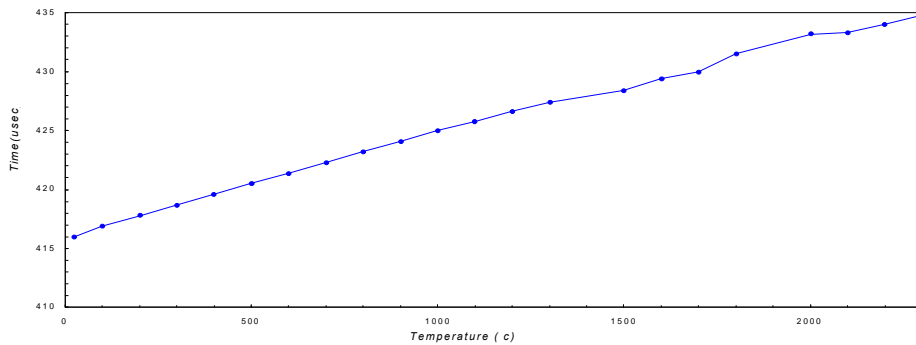


그림 10. 2% 토륨 텅스텐 센서의 온도-지연시간 보정곡선

이상의 실험에서 얻은 온도-지연시간 보정곡선을 이용해서 2300°C까지 100°C 간격으로 노심 용융물 온도를 각각 10회씩 반복 측정된 결과, 측정값 모두가 0.03% 오차내에 포함된다는 것을 확인하였다.

4.3 용융물 초음파 신호 취득

초음파 온도 측정 시스템은 초음파 탐상장치와 오실로 스코프로 구성되며, 탐상기 USK-15 크라우트 크라머 장비의 RF(radio frequency) 출력 단을 오실로 스코프 채널 2에 연결하여 신호를 수집하였다. PC 제어 오실로스코프는 자체 저장 장치에 약 50개 파일로 약 10초 간격 시간별 저장하였다. 초음파 온도 신호는 약 10초 간격으로 수집하였다. 그림 11은 오실로스코프로 수집한 초음파 신호 패턴이다.

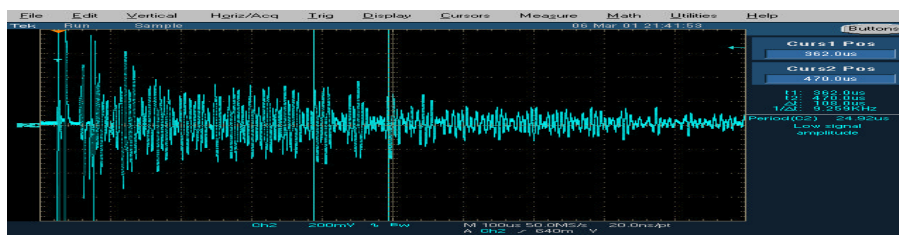


그림 11. 오실로스코프로 수집한 초음파 신호 패턴

4.4 용융물 초음파 신호 측정 및 분석

오실로스코프의 측정 전 저장 파일에 대한 조정값은 한 파일 당 저장된 초음파 신호의 시간 축 구간을 약 1000μs에 20.0ns/pt로 설정하고 전체 시간 축 데이터는 1000000포인트로 하였다.

이들 전체 구간의 불필요한 구간인 초기 시간 축 2500포인트 구간과 센서 끝단 신호인 약 600000포인트 이후는 제거하고 이들 신호를 재구성하여 분석하였다. 온도에 따른 초음파 신호의 지연시간 측정은 오실로스코프의 직접 기능을 사용하지 않고 저장된 파일을 이용하여 시간 축의 변이 지연시간을 계산하였다. 그림 12는 상온에서 상승된 온도 범위의 초음파 신호를 나타낸다. 그림 12(a)와 그림 12(b)간에 온도에 따른 지연시간은 약 $3.75\mu\text{s}$ 로 계산되었다. 초음파 신호의 지연 측정 범위는 센서의 끝단에서 300mm 거리의 너치 신호를 사용하였다. 보정 곡선의 1000mm 길이를 기준하면 약 $12.49\mu\text{s}$ 지연값은 보정 곡선에 의해서 온도를 환산하면 1939.8°C 값이 된다. 그러나 이번 실험에 사용된 sheath의 두께가 3mm 두께 일 경우 내구성은 좋았으나 온도 응답 속도 및 전달 특성은 떨어진 것으로 예상된다. 또한 센서와 Sheath의 접촉을 피하기 위해서 액체 실리콘 재료를 사용하였으나 잡음 대 신호비는 낮게 나타남을 알 수 있었다.

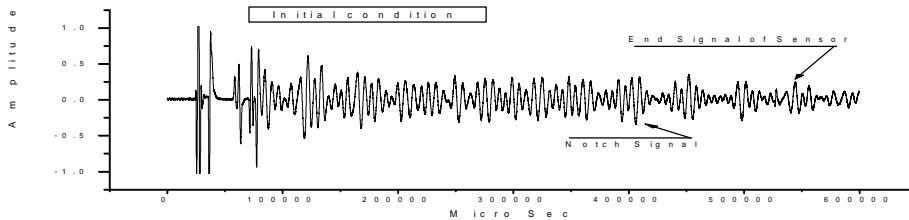


그림 12(a) 상온에서 초음파 신호

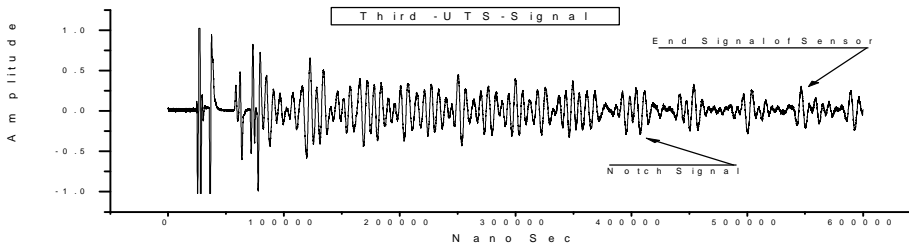


그림 12(b) 지연된 초음파 온도 신호

5. 결론

LAVA 실험의 온도측정은 매우 중요한 측정인수이다. 기존의 접촉식 열전대 방식은 2000°C 이상에서는 열전대 재료 내구성, Insulator shunting 영향 등의 제한 때문에 한계가 있다. 비접촉식 방법으로서 적외선, Laser 온도 측정 방법은 빛의 직진성 및 비투과성 때문에 검사체의 표면 측정은 편리하나 용융물 내부 측정에 제한을 받게된다.

따라서 본 연구에서는 다중노치로부터 반사된 초음파 지연시간을 실시간으로 측정하여 온도함수로 변환하는 초음파 지연시간을 이용한 다중노치 초고온 측정법을 제안하고 원자력 분

야에 적용이 가능한 초고온 측정 시스템을 개발하여 약 2000℃ 범위의 용융물 온도를 측정하였다.

본 연구에서 개발한 시스템은 센서 및 sheath 부분, 탐촉자 부분, 초음파 신호처리를 위한 인터페이스 부분으로 구성된다. 센서 및 sheath 부분은 텅스텐 합금재료를 특수 가공하여 제작하였다. 센서의 반향자는 3종류의 너치를 가공하였다. 센서의 길이는 약 500-1000mm 범위의 길이로 제작하였다. sheath는 봉의 형태를 관의 형태로 특수 가공하였다. 탐촉자 부분은 음향 신호와 전기신호를 상호 변환하는 자왜(magnetostrictive) 소자와 자기장 변화를 위한 유도코일로 구성된다. 자왜소자의 재료는 REMENDUR이며, 이 재료는 텅스텐 합금재료인 센서재료와 전자용접하여 사용하였다. 초음파 신호처리단은 송수신이 동시에 가능한 KRAUTKRAMER USD-15 와 PANAMETRICS PR 5058를 사용하였다.

사용한 전기로는 온도범위에 따라서 약 700℃에서는 ISOTHERMAL TEC, LTD 전기로를, 약 1600℃에서는 텅스텐 SILICONIT 전기로를, 그리고 2300℃에서는 표준연구원의 특수로를 사용하였다. 온도 측정 범위는 상온에서 약 2300℃범위에 100℃ 마다 온도 지연시간을 측정하여 온도-지연시간 보정곡선을 작성하였다. 온도 지연시간의 구간은 편의 상 센서 끝단 반복구간을 설정하였다. 용융물 온도측정은 이 보정곡선을 이용하여 계산한 결과 1940℃ 온도를 측정할 수 있었다. 이 측정 온도는 저장된 여러 파일 중 한 파일을 선택하여 온도 지연 결과를 온도로 계산한 결과이며, 이번 실험에 사용된 sheath의 두께가 3mm 두께 일 경우 내구성은 좋았으나 온도 응답 속도 및 전달 특성은 떨어진 것으로 예상된다.

한편, 본 연구에서는 초음파 반사신호의 지연시간을 측정하여 센서의 열전달 특성을 해석하고, 실험을 통하여 측정오차를 계산함으로써 본 연구팀에서 개발한 초고온 측정 시스템의 유용성을 확인하였다. 본 연구팀에서는 2800℃ 이상의 용융물 온도 측정 시스템을 개발 중에 있다. 이것이 본 연구의 향후 과제이다.

후기

이 연구는 과학기술에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강경호외 4명. “ 노내 노심용융물 냉각과 관련한 실험연구 기술 보고서,” KAERI/TR-1032/98, 1998.
2. R. L. Shepard, R.F. Hyland, J.M Googe, and J.R McDearman, “Equivalent circuit modeling of insulator shunting errors in high temperature sheathed thermocouples,” from temperature : Its measurement and control in science and Industry, Vol.4, edited by H.H Plumb, Instr. Soc. of America, p.1841, 1972.
3. R. M. Lerman, et. al., “The thermal conductivity of polycrystalline thoria and thoria-urania solid solutions,” WAPD-TM-908, December 1972.
4. L. C. Lynnworth, E. P. Papadaskis, D. R. Patch, K.A. Fowler, and R. L. Shepard, “nuclear reactor applications of new ultrasonic transducer,” IEEE Trans. Nucl. Sci. , NS-18(1), p.1, 1971.

5. G. A. Carlson, W. H. Sullivan, H. G. Plein, and T. M. Kerley, "An ultrasonic thermometry systems for measuring very high temperatures in reactor safety experiments," Sandia Laboratories Report No. SAND79-0621, 1982.
6. R. L. Shepard, R. F. Hyland, J. M. Googe, and J. R. McDearman, "Equivalent circuit modeling of insulator," Shunting errors in its measurement and control in science and industry, Vol. 4, edited by H. H. Plumb, Instr. Soc. of America, p. 1814-1819, 1972.
7. K. E. Kneidel, "Advances in multizone ultrasonic thermometry used to detect critical heat flux," IEEE Trn. on sonics and ultrasonics, Vol. SU-29, No. 3, May 1982.
8. K. M. Koo, J. H. Kim, S.B. Kim, H. D. Kim, and D. Y. Ko, Ultrasonic Thermometry System for Measuring Very High Temperatures Using High Resolution Signal Processing, Proceeding of the ICEIC 2000, pp. 229-232, Aug. 2000.
9. K. m. Koo, C. M. Sim, J. H. Kim, S. B. Kim, and H. D. Kim "A study on an ultrasonic thermometry system for measuring very high temperatures in severe accident Experiments," NTHAS2: Second Japan-Korea Symposium on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Safety Fukuoka, Japan, October 15-18, 2000.