

초고온 온도 측정을 위한 초음파 자왜 센서 시스템 개발

Development of Ultrasonic Magnetostrictive Sensors System to Measure in Very High Temperatures

구길모*, 김상백*, 박치승**, 최종호***, 고덕영****
(Kil-Mo Koo*, Sang-Baik Kim*, Chi-Seong Park**, Jong-Ho Choi***, Duck-Young Ko****)

*한국원자력연구소 열수력안전연구팀, ** (주)카이텍 설비안전진단그룹,
*** 강남대학교 지식정보공학부, **** 전주공업대학 전자정보과
(접수일자: 2001년 6월 8일; 수정일자: 2001년 7월 9일; 채택일자: 2001년 8월 6일)

본 논문에서는 노심 용융물과 원자로 용기하부 반구내벽 사이의 간격형성 여부 및 간극의 열적 영향을 측정하기 위한 LAVA (Lower-plenum arrested vessel attack) 실험에서 초고온 상태에 있는 노심 용융물의 온도를 측정할 목적으로 초고온 온도측정 시스템을 개발하였다. 본 연구에서는 제안된 이론의 유용성을 확인할 목적으로 개발한 초음파 자왜 센서 시스템을 이용하여 2300°C까지의 온도를 측정함으로써 실험을 통해 개발된 시스템의 효율성을 증명하였다.

핵심용어: 초음파, 자왜 센서, Lower-plenum arrested vessel attack, 온도측정

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.3)

The temperature measurement of very high temperature core melt is of importance in LAVA (Lower-plenum Arrested Vessel Attack) 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 delay time of ultrasonic wavelets due to high temperature is suggested. As a first stage, a molten material temperature was measured up to 2300°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 the reference[1] and the efficiency of the developed system are certified by performing experiments. This sensor welded magnetostrictive element and tungsten element will be able to measure a temperature range of 3000°C hereafter.

Keywords: Ultrasonic, Magnetostrictive sensor, Lower-plenum arrested vessel attack, Temperature measurement, Magnetostrictive

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.3)

1. 서론

최근 들어 노심 용융물과 원자로 용기하부 반구내벽 사이의 간극형성 여부 및 생성원리를 규명하고, 간극이 노심 용융물과 반구의 열적 거동에 미치는 영향을 분석

하는 것을 목표로 하는 LAVA 실험이 원자력 분야에서 수행되고 있다[2]. 기존의 접촉식 열전대 방식[3]에서는 열전대 재료의 내구성 및 절연 전환(insurant shunting) 영향 때문에 2000°C 이상의 온도측정이 불가능하다. 그리고 적외선이나 레이저를 사용하는 비접촉식 방식[4]에서는 빛의 직진성 때문에 검사체 표면의 온도측정은 가능하나 내면의 측정치가 정확하지 않고 접근성이 떨어지며, 외부조건에 의해 수증기 및 에어졸 등의 간섭이 받

책임저자: 구길모 (kmkoo@kaeri.re.kr)
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
한국원자력연구소 열수력 안전연구팀
(전화: 042-868-8023; 팩스: 042-863-3689)

생되면 측정에 문제점이 있었다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고온과 육안으로 접근이 어려운 환경에서 높은 온도를 정확하게 측정할 수 있는 초음파 지연시간을 이용한 초고온 측정 시스템을 개발하고자 한다.

제시된 방식은 접촉식에서 문제가 되고 있는 온도측정의 한계를 극복한 것으로 적외선이나 레이저를 이용하는 기존의 비접촉식 방식에서 불가능한 검사체 내면의 초고온을 측정하고자 하는 것이다. 본 논문에서 제시된 방식은 야기코일에서 발생된 전기펄스의 자기장을 자기 변형선을 이용하여 짧은 주기의 초음파 펄스로 변환한 다음 도파선을 따라 전파시켜 다수의 센싱 노치 (sensing notch)에서 반사되는 초음파의 지연시간을 이용하여 평균온도를 측정하고자 하는 것이다.

그리고 본 연구에서는 이미 제안된 이론[1]을 바탕으로 원자력 분야에 적용이 가능한 초고온 측정 시스템을 개발하고, 초고온 측정 시스템에 사용되는 초음파 온도센서는 텅스텐 합금 재료를 이용하여 특수 가공하고, 센서 덮개는 텅스텐 합금 봉에 슈퍼 전자 빔 가공법을 적용하여 관으로 제작한다. 또한 용융물의 고온에 내구성을 가지는 특수 센서 덮개를 제작하였으며, 탐촉자는 미국의 Panametrics사 제품을 사용하고자 한다.

Remendur 합금소재를 자왜소자로 이용하였고, 자왜소자와 텅스텐의 합금은 전자 빔 용접방법으로 용융 결합하여 용접부에서 반사되는 음향에너지가 최소가 되도록 제작한다.

신호처리단은 초음파 발진부 및 수신부로 구성하였다. 초음파 탐상장치는 5058 PR Panametrics사와 USD-15

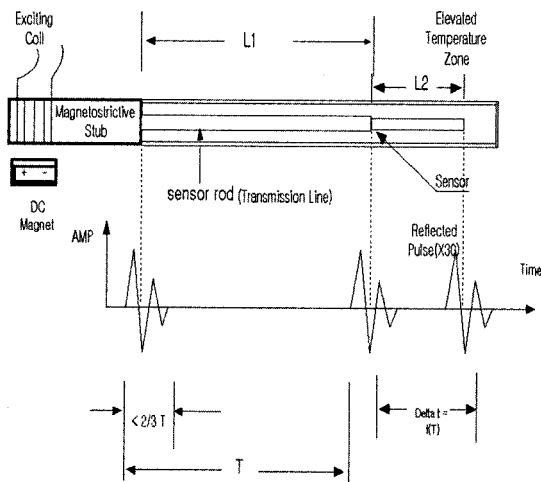


그림 1. 초음파 온도센서의 동작원리
Fig. 1. Operating principle of the ultrasonic thermometry sensor.

Krautkramer사의 제품을 병용하고, Tektronics사 Digital Phosphor 1GHz 대역 오실로스코프를 RS-232로 PC에 연결하여 데이터를 취득하도록 구성한다.

또한 본 연구에서는 초음파 반사신호의 지연시간을 측정하여 센서의 열 전달 특성을 해석하고, 실험을 통하여 획득한 수집데이터를 보정곡선을 이용하여 지연시간을 온도로 환산함으로써 약 2300℃의 고온 용융물의 온도를 측정할 수 있도록 한다.

II. 초음파 지연시간을 이용한 다중노치 초고온 측정법

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

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

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[1].

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

여기서 E는 영 계수(Young's modulus)이다.

그림 1은 본 연구에서 개발한 초음파 초고온 측정 시스템의 기본원리와 온도변화에 따라 지연되는 반사신호의 패턴을 나타냈다. 야기코일에서 발생된 전기펄스의 자기장은 자기변형 선에서 짧은 주기성을 갖는 초음파 펄스를 갖는다. 도파선을 따라 전파되는 초음파 펄스는 음향 임피던스의 불연속 위치, 끝단, 직경이 변하는 위치에서 반사되고, 반사된 음향신호는 다시 야기 코일에서 전기신호로 변환된다.

초음파 펄스의 속도는 센서선의 온도에 밀접한 관계가 있으므로 반사체로부터 반사된 도착시간의 차이는 센서선의 평균 온도와 관계가 있다. 초음파 지연시간을 이용한 방식에서는 매우 높은 온도의 측정이 가능하나 센서재료의 용융점에 제한을 받는다.

일반적으로 텅스텐 합금을 사용할 경우 3410℃에서 온도 제한을 받게 되는데, 열전대 측정 방법과 비교하면 약 1000℃ 이상 높은 온도이다.

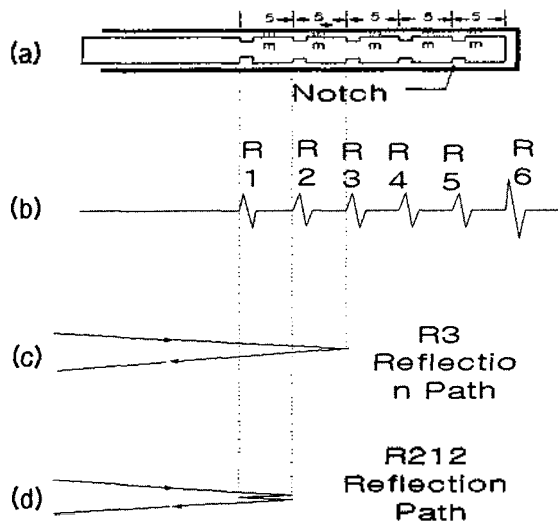


그림 2. 다중 노치에서 반사지연신호의 패턴 및 경로
 (a) 5소자 초음파 온도센서, (b) 반사신호 패턴, (c) R3 반사경로, (d) R212 반사경로
 Fig. 2. Pattern and path of reflection delay signal from the multi-notch.
 (a) 5 elements ultrasonic sensor, (b) reflection patterns, (c) R3 reflection path, (d) R212 reflection path.

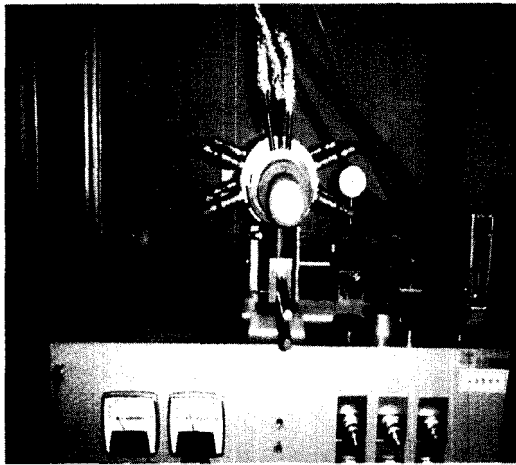


그림 3. 고온 실험용 전기로
 Fig. 3. Furnace System.

본 연구에서는 기존의 적외선이나 레이저를 사용하는 방식과는 달리 초음파의 지연시간을 이용하여 원자력 분야에서 초고온을 측정할 수 있는 장치를 제시된 이론[1]을 바탕으로 초고온 측정 시스템을 개발하고자 한다.

그림 2에 나타난 것처럼 1개의 온도센서 선에 다수의 센싱 노치를 가공하여 각각의 노치에서 반사되는 초음파의 지연시간을 식 (2)에 적용하여 온도를 측정하였다.

다중노치 방식의 장점은 노치 개수의 온도 분포 측정이 가능하나 단점으로는 신호의 구분이 어렵게 된다. 그림 2에 다중 노치인 5 소자 온도센서와 센서로부터 반사된

신호패턴, 그리고 R3 반사경로와 R212 반사경로를 표시하였다.

III. 초음파 초고온 측정 시스템의 개발

본 연구에서는 단일 및 다중노치로부터 반사된 초음파 지연시간을 실시간으로 측정하여 온도함수로 변환하는 초음파 지연시간을 이용한 다중노치 초고온 센서를 제작하고, 원자력 분야에 적용이 가능한 초고온 측정 시스템을 개발하였다. 그림 3은 고온 실험용 전기로이다.

3.1. 센서 및 덮개 설계 및 제작

UTS 센서의 설계 및 제작 절차는 센서선을 가공하여 자왜소자와 특수 용접하고, 텅스텐 센서선 및 덮개는 국내업체의 가공 기술의 한계 때문에 설계하면서 가장 유사한 치수를 수입하여 제작하였다.

덮개인 센서 보호 관은 3단계로 센서선에 삽입하고 외부에 지지관으로 연결하였으며, 덮개의 끝단을 고온의 용융물의 유입을 막기 위해서 순수 텅스텐의 사다리꼴 원뿔 모양의 마개를 특수 제작하였다.

마개의 외경 치수는 덮개의 내경과 비교하여 약간 큰 상태에서 작은 상태로 기계적 고정이 되도록 가공하여 고온 상태에서 덮개에 결합시킨다.

이때 1000℃ 범위 실험에서는 센서선을 액체 실리콘을 코팅하고, 1600℃ 범위에서는 산화 이트륨(Y_2O_3)을 코팅하고 2300℃ 범위에서는 세라믹 용사코팅을 하여 센서선과 덮개사이의 접촉을 방지하였다. 완성된 센서의 자왜소자인 Remendur는 초음파 탐촉에 삽입하도록 한다.

그림 4 및 5는 분해 및 조립된 센서선의 도면이다. 초음파 센서 가공 치수와 제작 치수는 표 1과 같다.

표 1. 자왜 센서와 덮개의 가공 치수 및 제작 치수
 Table 1. Dimensions for magnetostrictive sensor and sheath.

부품	재료	길이	OD	너치 위치	너치 종류	너치 가공법
센서	레늄 텅스텐	1000mm	0.8mm	45mm, 300mm	Round, Vee	EB 및 기계
부품	재료	길이	OD	ID	연결관 OD	연결관 ID
덮개	텅스텐	34.5mm x 3	3mm	1mm	6.5mm	3mm
자왜 소자	REME DUR	50mm	14.3mm	N/A	N/A	N/A

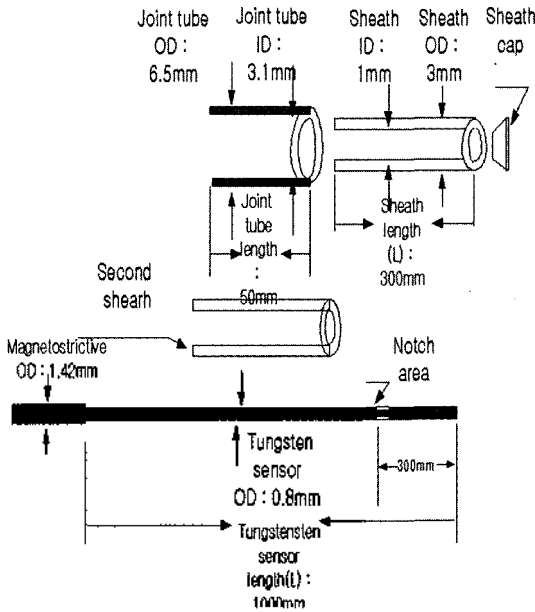


그림 4. 센서선의 분해도면
Fig. 4. Analytic drawing of sensor rod.

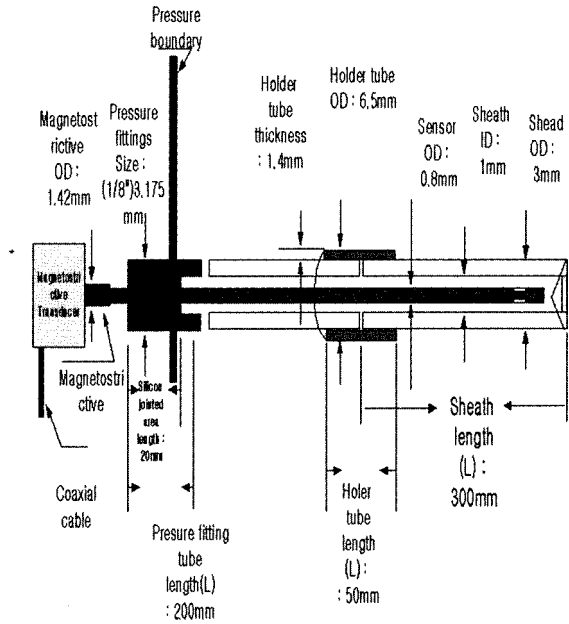


그림 5. 조립된 센서선의 도면
Fig. 5. Assembled drawing of sensor rod.

3.2. 자왜 탐촉자

10mm 길이의 토륨화 텅스텐 센서소자는 초음파 반사 신호를 약 $4 \mu s$ 정도 지연시킨다. 따라서 반사신호의 분리를 위해서는 초음파 펄스폭은 $2-3 \mu s$ 이하가 되어야 한다. 초음파 펄스의 간격은 자기장 펄스의 주기와 자기장 펄스와 결합된 자기 변형선의 길이에 의해서 결정되고 있다.

자왜 탐촉자의 펄스 간격과 모양에 관해서는 참고문헌 [5]에서 상세히 기술하고 있다. 펄스 자기장에 결합된 자왜선의 길이를 최소화하기 위한 방법으로 2mm의 짧은 폭 코일이 사용되며, 이 경우 코일의 끝단에 위치하는 페라이트 디스크의 길이는 약 4mm이다.

본 연구에서는 펄스주기를 최적화하기 위해 임피던스 값이 작은 Delrin R사 (2mm 길이, 1.1mm 직경, #44 구리

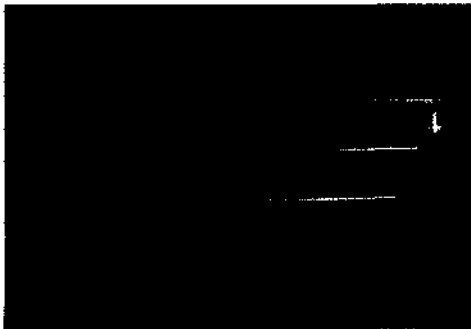


그림 6. 초음파 온도 센서
Fig. 6. Ultrasonic thermometer sensor.

선, 100-150 권수)의 코일을 이용하였으며, 이때 코일의 인덕턴스는 $15 \mu H \sim 30 \mu H$ 가 최적인 것으로 확인되었다.

그림 6에 본 연구팀이 제작한 초음파 온도 센서를 보여 주고 있다.

3.3. 자왜 (magnetostrictive)선

자왜선의 직경은 야기되는 전기펄스와 초음파 펄스의 특성에 따라 결정되며, 자왜선의 직경이 너무 클 경우에는 파형과 진폭이 변화된다. 반면에 자왜선의 직경이 너무 작을 경우에는 야기된 자기장과 에너지 결합도가 작아 지므로 신호의 진폭이 작아지며, 최적의 자왜선 직경은 약 0.7-1.5mm로 하였다.

Remendur는 본 시스템에서 사용한 자기변형 재료 중 하나로 높은 자왜계수를 가진다는 특징 때문에 초음파 온도 측정기에 사용되고 있다. 이들 자왜소자는 입력 전기신호에 야기되어 최대 자왜효과를 얻기 위해서는 열처리가 필요하다.

본 시스템에서는 보호된 대기 중에서 다양한 온도로 처리하여 최대의 자기장 특성을 갖도록 하였으며, DC 자기장을 Remendur에 걸어주면 자왜효과가 향상되었다. 직경이 5mm이고 길이가 25mm인 Alnico 리드자석을 Remendur 선으로부터 3-5mm 근접한 거리에서 사용할 때 최대 진폭을 얻을 수 있었다. 자기변형 선의 길이는 Butt 용접부에서 약 10% 정도의 신호가 반사되었다.

텅스텐-Remendur 접합부에서 작은 임피던스 부정합

이 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 하여 중첩됨을 피하는 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 300°C에서의 토륨화 텅스텐의 음속이 3300m/s인 것을 고려하면 10mm 간격으로 5개가 있는 82mm 이상 되는 센서는 Remendur의 길이가 텅스텐 소자보다 1.64 배 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 $10 \times 5400/4320 = 12.5$ mm 보다 적어야 하는데 반사신호의 중첩을 피하기 위해서는 12.5mm 보다 수 mm 정도 더 작은 것이 좋다.

3.4. PC 기반 인터페이스

본 연구팀이 개발한 다중 초음파 온도측정기는 PC 기반 초음파 탐상장치의 인터페이스 및 버스구조이며 프로 그래밍이 가능한 시스템을 구성하였다.

기본적으로 1개에서 2개의 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 멀티플렉서(multiplexer)에 입력되고, 카운터는 모든 소자에서 반사되는 신호에 대해서 시간간격을 계산한다. 이 경우 센서의 수는 최대 10개까지 가능하며, 카운터의 디지털 출력 데이터는 제측기나 컴퓨터에 직접 입력한다.

본 시스템에서는 필요한 신호를 0.5~1.0 μ s 범위의 게이트를 이용하여 선택할 수 있으며, 게이트 범위가 선정되면 시작/정지신호는 게이트 신호와 초음파 비디오 신호를 논리의 곱의 함수로 출력한다.

3.5. 센서 구동단 및 전치 증폭기

약 300 볼트용량을 가지는 펄서(pulser)와 코일은

20m의 RG58 동축케이블로 연결되며, 본 시스템으로부터 센서에 공급되는 신호의 펄스폭은 0.5 μ s로 그리고 반복율과 전류는 각각 60Hz~500Hz와 0.5A가 되었다.

IV. 실험

4.1. 예비실험 및 교정

초음파 온도측정 실험을 수행하기 위해서 Siliconit 전기로를 이용하여 약 1600°C 까지 온도를 높이면서 약 100°C 마다 지연시간을 측정하였으며, 2300°C의 고온측정은 표준과학연구원 특수 노를 사용하여 온도를 측정하였다.

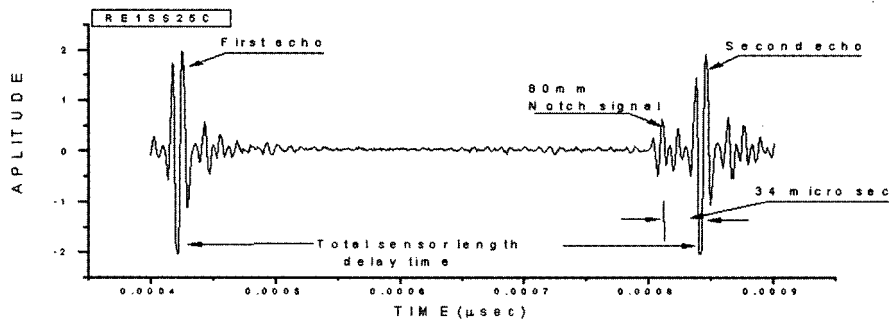
그림 7(a)는 상온에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호의 패턴이고, 그림 7(b)는 630°C에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 그림 7(c)는 1000°C에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 약 425 μ s이었으며, 그림 7(d)는 1600°C에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 1000mm 길이 전체 지연시간은 약 426.3 μ s로 나타났다.

그림 8(a)는 상온에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호의 패턴이며 전체 지연시간은 약 238 μ s이고, 그림 8(b)는 1800°C에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 약 228.04 μ s이었고, 그림 8(c)는 2000°C에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호로, 이때 전체 지연시간은 약 238 μ s가 얻어졌으며, 그림 8(d)는 2200°C에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호로 이때 500mm길이 전체 지연시간은 약 239.4 μ s이었다.

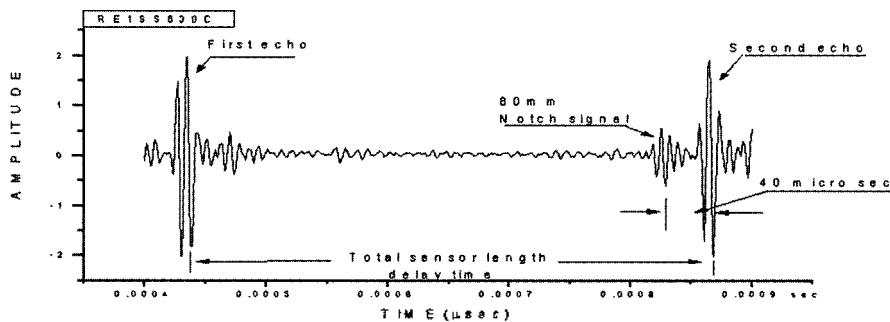
온도측정 결과 2000°C에서 실제 값과 초음파 지연시간에 따른 측정값의 정밀도는 3.5cm 길이 당 10회 반복 측정 결과 평균값은 0.04%의 작은 오차로 나타났다.

초음파 지연시간으로부터 노심 용융물의 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.

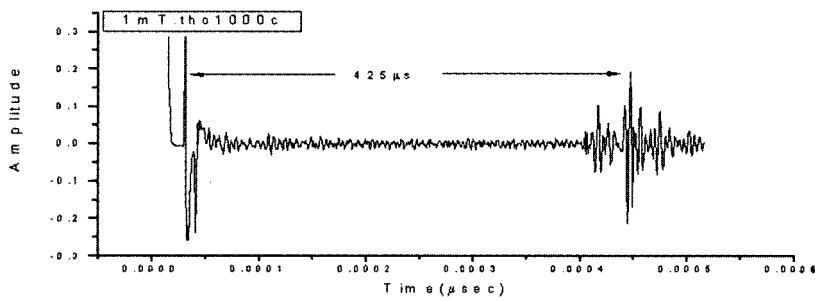
온도교정을 위해서 파이로미터와 약 1000°C 범위에서는 K타입 열전대 온도계를 병용 설치하여 측정된 온도를 비교하였다.



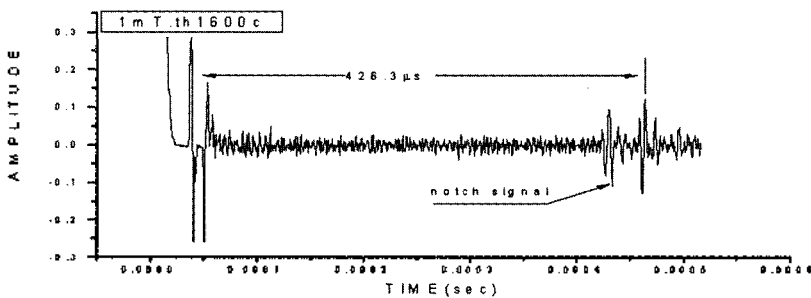
(a) 20°C



(b) 630°C



(c) 1000°C



(d) 1600°C

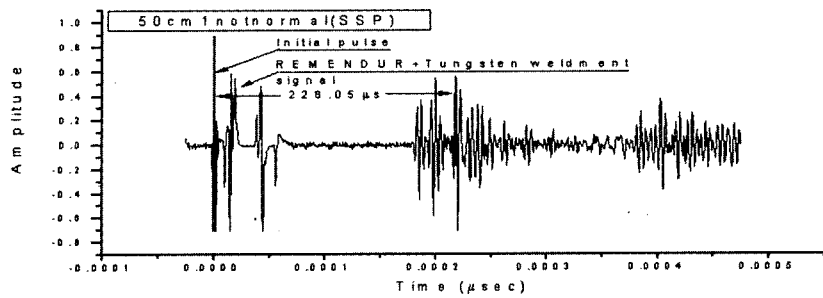
그림 7. 온도변화에 따른 지연 신호패턴 (센서 선 길이가 1000mm 일 때)

Fig. 7. Delay signal patterns according to changing temperature. (length of sensor, L: 1000mm)

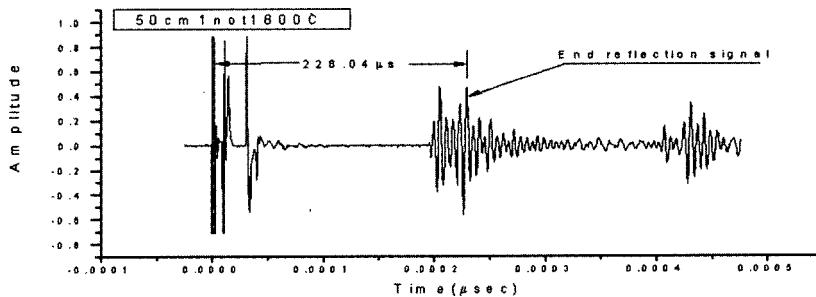
온도증가에 따른 온도 지연시간을 측정하기 위해서 PC 기반 시스템을 이용하여 온도지연 데이터를 수집하고, 이를 바탕으로 PC에 저장된 온도지연 데이터를 온도함수로

변환하기 위해 온도-지연시간 보정곡선을 작성하였다.

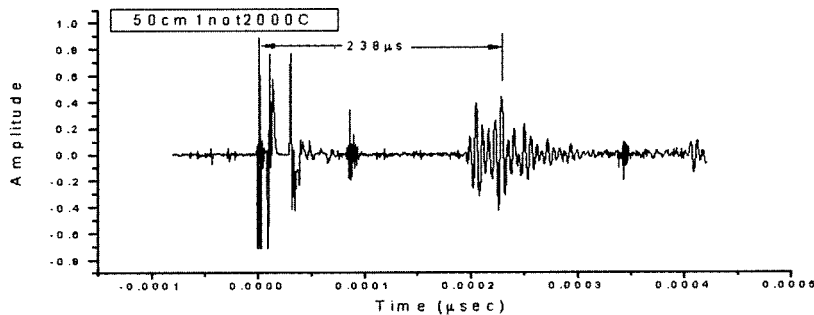
이 보정곡선의 지연시간은 편이상 센서 끝단의 반복 신호구간을 설정하였으며, 이상의 실험에서 얻은 온도-



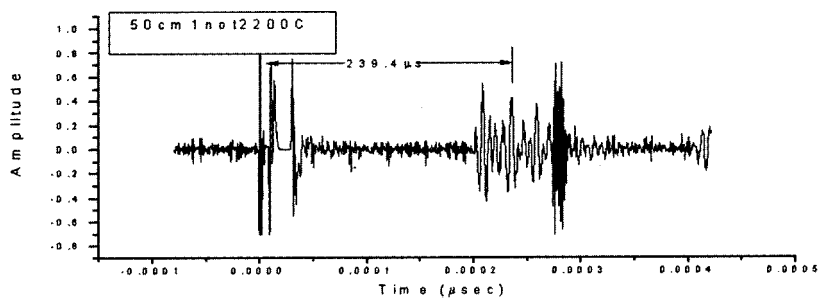
(a) 20°C



(b) 1800°C



(c) 2000°C



(d) 2200°C

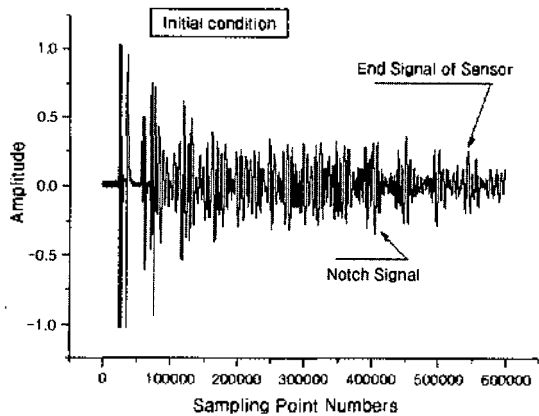
그림 8. 온도변화에 따른 지연 신호패턴 (센서 선 길이가 500mm 일 때)

Fig. 8. Delay signal patterns according to changing temperature. (length of sensor, L: 500mm)

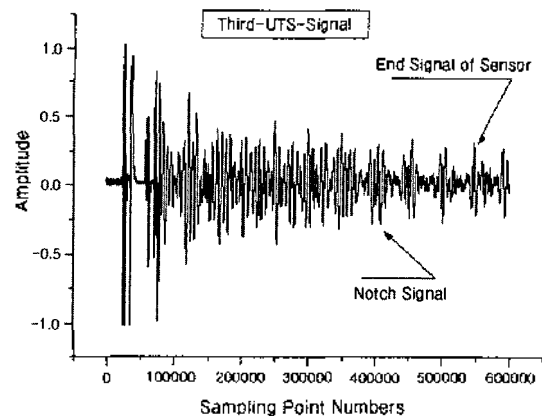
지연시간 보정곡선을 이용해서 2300°C 까지 100°C 간격으로 노심 용융물 온도를 각각 10회씩 반복 측정한 결과, 측정값 모두가 0.04% 오차 범위내에 포함된다는 것이 확인되었다.

4.2. 용융물 내부 온도 측정 및 분석

초음파 온도 측정 시스템은 초음파 탐상장치와 오실로스코프로 구성되며, 초음파 탐상기 USK-15 Krautkramer 장비의 RF (radio frequency) 출력 단을 오실로스코프 채



(a) 정상온도에서 초음파 신호
(a) Ultrasonic signal at normal temperature.



(b) 고온에서 지연 초음파 신호
(b) Delay ultrasonic signal at high temperature.

그림 9. 정상온도와 고온에서의 초음파 신호
Fig. 9. Ultrasonic signal at normal temperature and high temperature.

널 2에 연결하여 신호를 수집하였다. PC 제어 오실로스코프는 자체 저장 장치에 50개 파일로 약 10초 간격 시간별로 저장하였다.

오실로스코프의 측정 전 저장 파일에 대한 조정된 값은 한 파일 당 저장된 초음파 신호의 시간축 구간을 약 1000 μ s에 20.0ns/pt로 설정하고 전체 시간 축 데이터는 1,000,000포인트로 하였다. 이들 전체 구간의 불필요한 구간인 초기 시간 축 2500포인트 구간과 센서 끝단 신호인 약 600,000포인트 이후는 제거하고 이들 신호를 재구성하여 분석하였다.

온도에 따른 초음파 신호의 지연시간 측정은 오실로스코프의 직접 기능을 사용하지 않고 저장된 파일을 이용하여 시간축의 변이 지연시간을 계산하였다.

그림 9는 상온에서 상승된 온도 범위의 초음파 신호를 나타내며, 그림 9(a)와 (b)간에 온도에 따른 지연시간은 약 3.75 μ s로 계산되었다.

초음파 신호의 지연 측정 범위는 센서의 끝단에서 300mm 거리의 너치 신호를 사용하였다. 보정 곡선의 1000mm 길이를 기준으로 하면 약 12.49 μ s 지연값은 보정 곡선에 의해서 온도를 환산하면 1939.8 $^{\circ}$ C 값이 된다. 그러나 이번 실험에 사용된 덮개의 두께가 3mm 두께 일 경우 내구성은 좋았으나 온도 응답 속도 및 전달 특성은 떨어진 것으로 판단된다.

또한 센서와 덮개의 접촉을 피하기 위해서 액체 실리콘 및 산화이트리움 재료를 사용하였으나 이들 물질이 가지는 음향적 흡수 및 간섭 때문에 잡음 대 신호비는 낮게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 현재 개발 중에 있는 세라믹을 이용한 용사 코팅 방법을 사용할 경우 신호 대 잡음비가 개선됨을 확인하였고, 이 코팅 방법을 사

용할 경우 2300 $^{\circ}$ C 이상의 용융물 온도에서도 적용이 가능할 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 기존의 접촉식 열전대 방식 및 적외선 온도 측정의 문제점을 개선하고자 초고온과 육안접근이 어려운 환경에서 정확하게 측정할 수 있는 초고온 온도 측정을 위한 초음파 자왜 센서 시스템을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 시스템은 센서 및 덮개 부분, 탐촉자 부분, 초음파 신호처리를 위한 인터페이스 부분으로 구성된다. 센서 및 덮개 부분은 텅스텐 합금재료를 특수 가공하여 제작하였으며, 센서의 반향자는 3종류의 너치를 가공하였다.

센서의 길이는 약 500-1000mm 범위의 길이로 제작하였다. 덮개는 봉의 형태를 판의 형태로 슈퍼 전자 빔 가공 처리방법과 내경과 외경을 원하는 치수에 맞도록 특수 가공하여 이용하였다.

탐촉자 부분은 음향 신호와 전기신호를 상호 변환하는 자왜 소자와 자기장 변화를 위한 유도코일을 구성하였으며, 사용한 전기로는 온도범위에 따라서 약 700 $^{\circ}$ C에서는 Isothermal Tec, Ltd 전기로를, 약 1600 $^{\circ}$ C에서는 텅스텐 Siliconit 전기로를, 그리고 2300 $^{\circ}$ C에서는 표준연구원의 특수 노를 사용하였다.

제안된 방법에 의해 온도 측정 범위는 상온에서 약 2300 $^{\circ}$ C 범위에서 100 $^{\circ}$ C마다 온도 지연시간을 측정하여 온도-지연시간 보정 곡선을 작성하였으며, 온도 지연시간의 구간은 편의상 센서 끝단 반복구간을 설정하였다.

용융물 온도측정은 이 보정곡선을 이용하여 계산한 결과 1940 °C 온도를 측정할 수 있었으며, 이 측정 온도는 저장된 여러 파일 중 한 파일을 선택하여 온도 지연된 값을 결과를 얻었다. 사용된 탭개의 두께가 3mm 두께일 경우 내구성은 좋았으나 온도 응답 속도 및 전달 특성은 떨어진 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 초음파 반사신호의 지연시간을 측정하여 센서의 열 전달 특성을 해석하고, 실험을 통하여 측정 오차를 계산함으로써 본 연구팀에서 개발한 초고온 측정 시스템의 유용성을 검증하였다. 향후 2800°C 이상의 용융물 초고온 온도 측정 시스템을 적용하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. E. P. Papadakis, K. A. Fowler, and L. C. Lynnworth, "Ultrasonic measurements of Young's modulus and extensional wave attenuation in refractory metal wires at elevated temperatures with application to ultrasonic thermometry," *Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 6, June 1974.
2. 강경호, 김종환, 방래준, 정지환, 김상백, "노내 노심용융물 냉각과 관련한 실험연구 기술 보고서," KAERI/TR-1032/98, 1998.
3. 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, pp, 1841, 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), pp. 1-37, 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, Instrument. Soc. of America, pp. 1814-1819, 1972.
7. K. E. Kneidel, "Advances in multi-zone 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, *pro-ceeding 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," NTHAS 2: Second Japan-Korea Symposium on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Safety Fukuoka, Japan, October pp. 15-18, 2000.

10. J. O. Kim, H. H. Bau, Y. Liu, L. C. Lynnworth, et al., "Torsional sensor applications in two-phase fluids", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 40, No. 5, pp. 563-576, 1993.
11. 김진오, "주기적으로 불균일한 원형막대에서 전파하는 비틀 탐상파", *한국음향학회지*, 제17권 제5호, pp. 79-84, 1998.

저자 약력

● 구 길 모 (Kil-Mo Koo)



1980년: 평온공대 전자통신공학 (공학사)
 1983년 2월: 경희대 대학원 전자공학 (공학석사)
 1996년: 경희대 전자공학 대학원 (공학박사)
 1985년 1월~현재: 한국원자력 연구소 열수력 안전 연구팀 근무
 * 주관심분야: 초음파 신호처리, 비파괴 검사법, 원자력 발전 계측 개발

● 김 상 백 (Sang-Baik Kim)

1979년: 고려대학교 기계공학 (공학사)
 1981년: 과학기술원 기계공학 (공학석사)
 1995년: 과학기술원 기계공학 대학원 (공학박사)
 1979년~ 현재: 한국원자력 연구소 열수력 안전연구팀 노내노심용융물냉각실증 실험 과제 책임자
 * 주관심분야: 중대사고연구, 열 수력, 이상 유동

● 박 치 승 (Chi-Seung Park)



1959년 8월 12일생,
 1981년 2월: 한양대학 공대 재료공학 (공학사)
 1984년 2월: 한양대 대학원 재료공학 (공학석사)
 2000년 2월: 한양대 대학원 재료공학 박사과정 수료
 1984년 2월~1997년 9월: 한국원자력 연구소
 1997년 9월~ 현재: (주)카이텍 설비안전진단 그룹 그 룹장
 * 주관심분야: 초음파 영상 신호처리, 원전 비파괴 검사법 개발

● 최 종 호 (Jong-Ho Choi)



1982년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
 1984년: 중앙대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1987년: 중앙대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1988년~1990년: 군산대학 전자공학과 조교수
 1990년~ 현재: 강남대학교 지식정보공학부 전자공 학전공 교수
 * 주관심분야: 영상정보통신, 컴퓨터 패턴 인식, 초 음파영상, 제스처인식

● 고 덕 영 (Duck-Young Ko)



1973년: 한양대학교 전자공학과 졸업 (공학사),
 1982년: 건국대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1990년 : 건국대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1979년~ 현재: 전주공업대학 전자정보과 교수, IEEE 정회원, 일본 전자통신공학회 정회원
 1993년~1994년: 미국 Wright State University 의 용전자공학과 객원교수
 * 주관심분야: 영상신호처리, 초음파 비파괴검사, 정 보통신제어기기