

자외 초음파를 이용한 Stand-off 기술에 따른 UTS 설계 및 실험

*구길모, *김상백, *김희동, *강희영, *정용무, **박치승

*한국원자력연구소

** (주) 카이텍

UTS Designs and Experiments according to a Stand-off Technique using the Magnetostrictive Ultrasonic

Koo Kil-Mo*, Kim Sang-Baik*, Kim Hee-Dong*, Kang Hee-Young*, Joung Young-Moo*,
Park Chi-Seong**

* KAERI kmkoo@kaeri.re.kr
** KAETEC cspark1@kaetec.co.kr

요약

본 논문에서는 초음파 웨이브렛 지연시간을 이용한 초고온 온도 측정법을 기초로 하여, 이 기술을 바탕으로 두 번째 단계인 용융물 온도에서 내구성을 갖는 초음파 센서(UTS : Ultrasonic Temperature Sense)를 설계하여 약 2300°C 까지 실험로 내부의 온도를 측정하고자 한다. 이때 UTS 설계의 중요 인수는 센서 봉 외부 표면과 시스(sheath) 내부 표면의 두 텅스텐 재료가 비접촉 상태로 요구된다. 만약 이들 두 재료가 고온의 상태에서 접촉 되면 음향적 분로인 Shunting 현상이 발생한다. 이 현상을 물리적으로 억제하기 위한 센서 설계가 필요하게 되며, 이 센서 설계의 성공 여부의 첫째 요구 조건으로서 센서 내부의 구조적으로 음향 Shunting 현상을 억제하는 기술이 필요로 하게 된다. 이들 센서의 내부 구조에 상호 접촉을 피하기 위해서 작은 공간에 새롭게 구조적 분리가 가능한 텅스텐 재료인 Standoff를 제작하여 설치하였다. 그러나 본 실험에서는 제안된 Standoff적용한 출력 신호의 신호 대 잡음 비는 소량의 개선 가능성을 확인하였으나, 다양한 Standoff의 설계와 제작이 지속적으로 진행 되어야 할 것이다.

1. 서론

본 논문에서는 기존의 접촉식 열전대 방식[1]과 적외선[2]나 레이저[3]를 사용하는 비접촉식 방식에서 발

생하는 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 제안된 방식은 야기코일에서 발생된 전기필스의 자기장을 자기 변형선을 이용하여 짧은 주기의 초음파 펄스로 변환한 다음 도파선을 따라 전파시켜 다수의 센싱 너치에서 반사되는 초음파의 지연시간을 이용하여 평균 온도를 측정하고자 하는 것이다.

본 연구에서 개발한 초고온 측정 시스템에 사용되는 초음파 온도센서는 텅스텐 합금 재료를 이용하여 특수 가공하였으며, Sheath는 텅스텐 합금 봉에 슈퍼 이디엄 가공법을 적용하여 관으로 제작하였으며, 또한 용융물의 고온에 내구성을 가지는 특수 시스를 제작하였고, 탐촉자는 미국의 파나메트릭스사 제품을 사용하였다. 리멘듀어(Remenadur) 합금소재를 자외소자로 사용하였고, 자외소자와 텅스텐의 합금은 전자 용접방법으로 용융 결합하여 용접부에서 반사되는 음향에너지가 최소가 되도록 하였다. 신호처리단은 초음파 발진부 및 수신부로 구성하였다.

본 실험에서 제작한 standoff은 텅스텐 2% 센서선

과 시스(sheath) 사이의 수 mm 공간에서 두 개체사이에서 발생하는 스티킹(sticking)현상과 블로(shunting)현상을 개선하고자 w-26% Re 합금재료를 외경이 1mm이하로서 너치 외경 보다 큰 조건에서 판 두께 1mm의 제원을 가지는 특수 standoff를 제작하여 센서의 너치 위치에 설치하고 시스를 조립하였다. 그러나 이 Standoff 기능의 효과는 두 물질 간에 최소의 접촉면적과 초고온에서의 내구성을 가지는 특수 설계가 필요하게 된다. Standoff를 설치한 센서로부터 탐지한 출력신호의 잡음대 신호의비는 현저하게 정량적 개선의비로 나타나지는 않았으나 보다 지속적인 실험이 요구될 것이다.

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 M 은 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 E 는 영계수(Young's module)이다.

그림 1은 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 센서 선의 온도에 밀접한 관계가 있으므로 반사체로부터 반사된 도착시간차는 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

℃에서 온도 제한을 받게 되는데, 열전대 측정 방법과 비교하면 약 1000℃ 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.

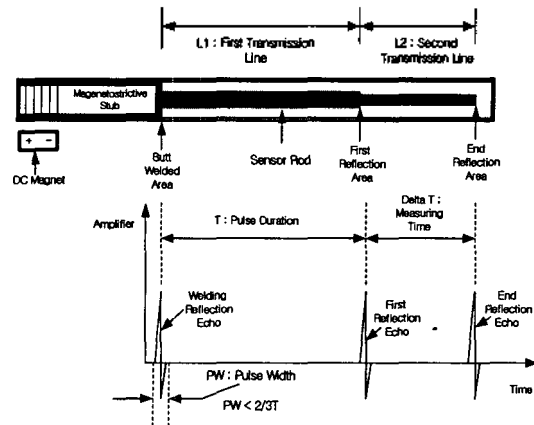


그림 1. 펄스에코 방식에 의한 초음파 온도미터

특히, 1개의 온도센서 로드에서 다수의 센싱 노치를 부착하여 각각의 노치에서 반사되는 초음파의 지연시간을 식(2)에 적용하여 온도를 측정하는 방식을 제안하였다. 이러한 다중노치 방식을 사용하면 비접촉 방식에서 문제가 되고 있는 온도측정의 한계를 극복하는 것이 가능하며, 또 적외선이나 레이저를 이용한 비접촉 방식에서 문제가 되고 있는 내면온도 측정 및 수증기 및 공기 등에 의한 간섭의 영향을 해결할 수 있다.

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 초고온 측정 시스템을 개발하였다.

3.1 센서 및 시스(Sheath)

UTS 센서 제작의 절차는 센서선을 가공하여 자왜소자와 특수 용접한다. 시스 관은 3단계로 센서선에 삽입하고 지지봉으로 연결한다. 이때 센서선은 액체 실리콘을 코팅하여 센서선과 시스 간에 접촉을 방지하였다. 완성된 센서의 리맨듀어는 자왜 탐촉에 삽입한다. 그림2 및

3은 분해 및 조립된 센서선의 도면이다. 초음파 센서 제작을 위한 가공 치수 및 제작 차수는 표. 1과 같다.

	재료	길이	OD	너치 위치	너치 종류	너치 가공법
센서	레늄 텅스텐	1000 mm	0.8mm	45mm 300mm	Round . Vee	EB 및 기계
	재료	길이	OD	ID	연결관 OD	연결관 ID
Sheath	텅스텐	34.5 mm < 3	3mm	1mm	6.5mm	3mm
자외선 조사	REMED UR	50mm	14.3 mm	N/A	N/A	N/A

표.1 센서 및 시스의 치수

3.2 탐촉자

10mm 길이의 토륨화 텅스텐 센서소자는 초음파 반사 신호를 약 4 μs 정도 지연시킨다. 따라서 반사신호의 분리를 위해서는 초음파 펄스폭은 2-3 μs 이하가 되어야 한다.

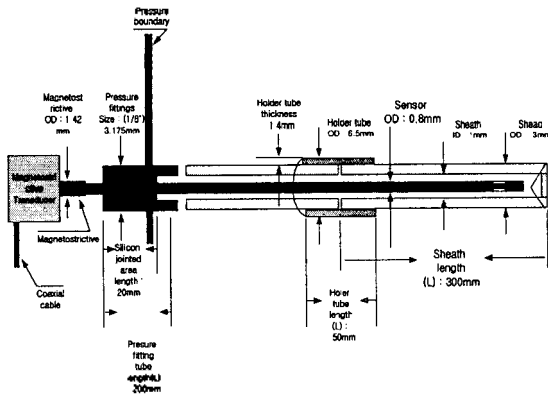


그림 2. 센서 조립도

초음파 펄스의 간격은 자기장 펄스의 주기와 자기장 펄스와 결합된 자기변형선의 길이에 의해서 결정된다. 자외 탐촉자의 펄스 간격과 모양은 기준 설정치를 따른다. 펄스 자기장에 결합된 자외선의 길이를 최소화하기 위한 방법으로 2mm의 짧은 폭 코일이 사용된다. 이 경우 코일의 끝단에 위치하는 페라이트 디스크의 길이는 약 4mm이다. 펄스주기를 최적화하기 위해 임피던스 값이 작은 Delrin R사(2mm 길이, 1.1mm 직경, #44 구리선, 100-150 권수)의 코일을 사용하였다. 코일의 인덕턴스는 15 μH ~ 30 μH가 최적인 것으로 확인되었다. 그

림 2는 실제 제작한 초음파 센서 조립도를 나타냈다.

3.3 음향 전송 Standoff

텅스텐 2% 센서선과 시스(sheath) 사이의 수 mm 공간은 약 2300°C 이상의 고온도 상승에 따라서 두 개체 사이에 발생하는 스틱킹(sticking)현상과 분로(shunting)현상은 센서의 너치 반향신호의 에너지를 감쇄하게 되어 탐촉자에 수신되는 음향에너지 손실에 따른 신호 대 잡음비가 떨어지게 된다. 특별히 분로 현상이 발생하면 센서라인에 음향에너지가 접촉의 상태조건에 따라서 음향의 신호에너지는 시스(sheath)로 전달되지 않도록 분리시키는 특수 절연체가 필요하게 된다. 이 음향 절연체의 제원은 #26% Re 합금재료를 외경이 1mm이하 너치 외경 보다 큰 조건에서, 판 두께 1mm의 standoff를 제작하여 센서의 너치 위치에 설치하고 시스를 조립하였다. 그림 3은 Standoff 와 센서 및 시스의 분해도를 나타낸다.

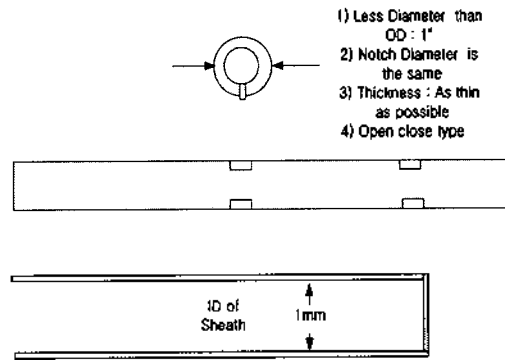


그림 3. Standoff 와 센서 및 시스의 분해도

그러나 이 Standoff 기능의 효과는 두 물질 간에 최소의 접촉면적과 초고온에서의 내구성을 가지는 특수한 설계가 필요하게 된다. Standoff 설치한 센서로부터 탐지한 출력신호의 잡음 대 신호의비는 현저하게 정량적 개선의비로 나타나지는 않았다. 이러한 환경조건에서 만족하기 위해서는 다양한 설계 및 제작기술과 장착기술 등이 함께 선행되어야 할 것이다.

3.4 자외(magnetostrictive)선

자외선의 직경은 야기되는 전기펄스와 초음파 펄스의 특성에 따라 결정된다. 자외선의 직경이 너무 클 경우에는 파형과 진폭이 변화된다. 반면에 자외선의 직경이 너무 작을 경우에는 야기된 자기장과 에너지 결합도가 작아지므로 신호의 진폭이 작아진다. 최적의 자외선 직

경은 약 0.7-1.5mm 정도이다. 리텐듀어는 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 리텐듀어에 걸어주면 자왜효과가 좋아진다. 직경이 5mm이고 길이가 25mm인 Alnico 라드자석을 리텐듀어 선으로부터 3-5mm 근접한 거리에서 사용할 때 최대 진폭을 얻을 수 있었다. 자기변형 선의 길이는 중요하지는 않지만 일반적으로 Butt 용접부에서 약 10% 정도의 신호가 반사된다. 텅스텐-리텐듀어 접합부에서 작은 임피던스 부정합이 발생하므로 리텐듀어의 길이는 센서에서 반사되는 신호와 연결부 반사신호와의 간섭을 방지할 수 있도록 설정해야 한다. 따라서 리텐듀어 지역을 진행하는 초음파 펄스의 전파시간을 측정하여 두 센서에서 반사되는 신호간의 시간간격보다 작거나 크게 하는 것이 필요하다. 본 실험에서는 텅스텐-리텐듀어 접합부에서 발생하는 신호를 배제하기 위해서 리텐듀어 재료에서 가장 긴 전파 시간이 가장 높은 온도에서 두 지점 사이의 지연시간을 초과하도록 설계하였다. 리텐듀어의 속도가 실내온도에서 5400m/s이고 3000℃에서의 토폴화 텅스텐의 음속이 3300m/s인것을 고려하면 10mm 간격으로 5개가 있는 82mm 이상되는 센서는 리텐듀어의 길이가 텅스텐 소자보다 1.64배 정도 길어야 한다. 한편, 리텐듀어의 길이는 가장 낮은 온도에서 반사되는 신호간의 가장 짧은 전파지연보다 더 작아야 한다. 센서 사이의 거리를 10mm로 하고, 가장 낮은 실험실의 온도를 고려하면 리텐듀어의 길이는 $10 \times 5400/4320 = 12.5 \text{ mm}$ 보 적어야 하는데 반사신호의 증첩을 피하기 위해서는 12.5mm 보다 수mm 정도 더 작은 것이 좋다.

3.5 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 및 정지 신호를 전기적으로 발생하여 선택할 수 있다. 이들 시작 및 정지 신호들은 일정한 시간간격으로 멀티프렉서에 입력되고, 카운터는 모든 소자에서 반사되는 신호에 대해서 시간간격을 계산한다. 이 경우 센서의 수는 최대 10개까지 가능하다. 카운터

의 디지털 출력 데이터는 계측기나 컴퓨터에 직접 입력된다. 본 시스템에서는 필요한 신호를 0.5~1.0μs 범위의 게이트를 이용하여 선택할 수 있다. 이와 같이 게이트 범위가 선정되면 시작/정지신호는 게이트 신호와 초음파 비디오 신호를 로직 앤드(and) 함수로 출력한다.

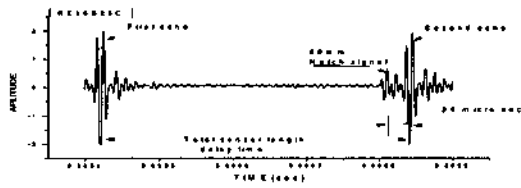
3.6 센서 구동단 및 전치 증폭기

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

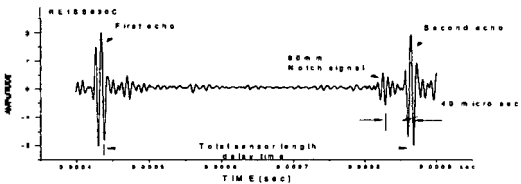
4. 실험

4.1 초음파 웨이브렛 지연시간 측정

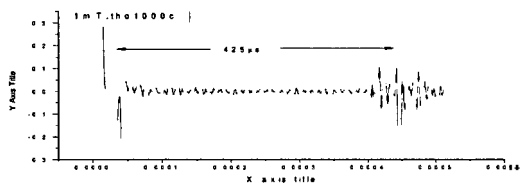
초음파 온도측정 실험을 수행하기 위해서 실리콘사 전기로를 이용하여 약 1600℃ 까지 온도를 높이면서 약 100℃ 마다 지연시간을 측정하였다. 또한 2300℃의 고온측정은 표준연구원 특수노를 사용하여 온도를 측정하였다. 이때 온도 측정 시스템은 PC 기반 초음파 탐상장치를 이용하였다. 그림 4(a)는 상온에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호의 패턴이다. 그림 4(b)는 630℃에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이다. 그림 4(c)는 1000℃에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 425μs이다. 그림 4(d)는 1600℃에서 센서 선 길이가 1000mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 426.3μs이다. 그림 5(a)는 상온에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호의 패턴이다. 그림 5(b)는 1800℃에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 228.04μs이다. 그림 5(c)는 2000℃에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 238μs이다. 그림 5(d)는 2200℃에서 센서 선 길이가 500mm이고 너치가 1개인 센서로부터 반사된 신호이며, 이때 전체 지연시간은 239.4μs이다. 온도측정 결과 2000℃에서 실제값과 초음파 지연시간에 따른 측정값의 정밀도는 3.5cm 길이 당 10회 반복 측정 결과 평균값은 0.03%의 작은 오차로 나타났다.



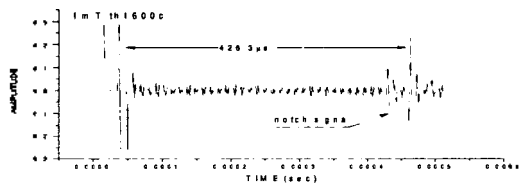
(a)



(b)

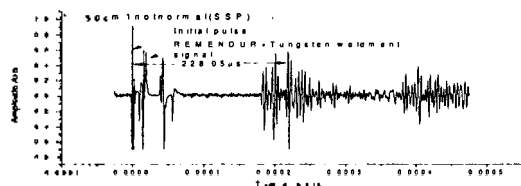


(c)



(d)

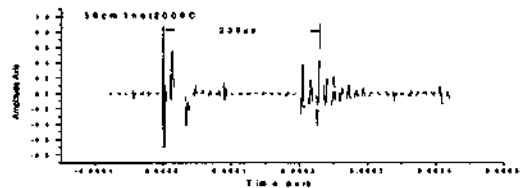
그림 4. (a) 20°C, (b) 630°C, (c) 1000°C, (d) 1600°C 온도변화에 따른 지연신호 패턴(센서 선 길이 L : 1000mm)



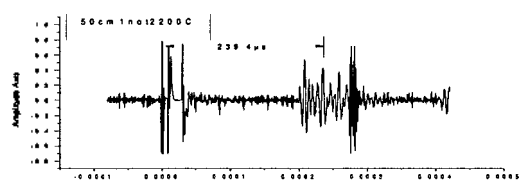
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. (a) 20°C, (b) 1800°C, (c) 2000°C, (d) 2200°C 온도변화에 따른 지연신호 패턴(센서 선 길이 L : 500mm)

4.2 온도측정

초음파 지연시간으로부터 노심용융물의 온도를 측정하기 위해 초음파 온도-지연 보정곡선을 얻기 위한 실험을 수행하였다. 실리콘트사 전기로에 온도측정 센서를 열발생 지역에 수평으로 설치하였으며, 센서선은 일본 Nilaco사의 2% 텅스텐 센서를 사용하였다. 온도교정을 위해서 파이로 미터와 K타입 열전대 온도계를 병행 설치하여 측정된 온도를 비교하였다. 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 편의상 센서 끝단의 반복 신호구간을 설정하여, 2% 텅스텐 센서를 이용한 초음파 초고온 측정 시스템의 온도-지연시간 보정곡선을 나타냈다. 이상의 실험에서 얻은 온도-지연시간 보정곡선을 이용해서 2300°C까지 100°C 간격으로 노심용융물 온도 범위를 각각 10회씩 반복 측정된 결과, 측정값 모두가 0.03% 오차 내에 포함된다는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서 개발한 시스템은 센서 및 시스 부분, 탐촉자 부분, 초음파 신호처리를 위한 인터페이스 부분으로 구성된다. 센서 및 시스 부분은 텅스텐 합금재료를

특수 가공하여 제작하였다. 센서의 반향자는 3종류의 너치를 가공하였다. 센서의 길이는 약 500-1000mm 범위의 길이로 제작하였다. 시스는 봉의 형태를 판의 형태로 특수 가공하였다. 탐촉자 부분은 음향 신호와 전기 신호를 상호 변환하는 자외 소자와 자기장 변화를 위한 유도코일로 구성된다. 자외소자의 재료는 리튬듀어이며, 이 재료는 텅스텐 합금재료인 센서재료와 전자 용접하여 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. 이 측정 온도는 저장된 여러 파일 중 한 파일을 선택하여 온도 지연 결과를 온도로 계산한 결과이며, 이번 실험에 사용된 시스의 두께가 3mm 두께 일 경우 내구성은 좋았으나 온도 응답 속도 및 전달 특성은 떨어진 것으로 예상된다.

한편, 본 논문에서는 w-26% Re 합금자료를 외경이 1mm 이하 너치 외경 보다 큰 조건에서 판 두께 1mm 의 standoff 음향 절연체를 제작하여 센서의 너치 위치에 설치하고 시스를 조립하였다. 그러나 이 Standoff의 음향 절연 기능의 효과는 두 물질 간에 접촉면적과 초고온에서의 내구성을 가지는 특수한 설계가 필요하게 된다. Standoff 설치한 센서로부터 탐지한 출력신호의 신호 대 잡음의 비는 현저하게 정량적 개선의비로 나타나지는 않았다. 이러한 환경조건에서 만족하기 위해서는 다양한 설계 및 제작기술과 장착기술 등이 함께 선행되어야 할 것이다.

후기

이 연구는 과학기술에서 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. R. L. Shepard, R.F. Hyland, J.W. 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.
2. R. M. Lerman, et. al., "The thermal conductivity of polycrystalline thoria and thoria-urania solid solutions," WAPD-TM-908, December 1972.
3. R. L. Shepard, R. F. Hyland, J. W. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.