[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 23, No. 1 (2003. 2)

고온 접촉식 탐상용 초음파 탐촉자 개발 및 평가

Development and Characterization of Ultrasonic Transducers for High Temperature Contact Measurement

김기복*,†, 김병극**, 이승석*, 윤남원**, 윤동진*, 안윤국**

Ki-Bok Kim*,†, Byoung-Geuk Kim**, Seung-Seok Lee*, Nam-Won Yoon**, Dong-Jin Yoon* and Yoon-Kook Ahn*

초 록 고온(500℃) 환경에서 접촉식 탐상이 가능한 초음파 탐촉자를 개발하고 평가하였다. 고온용 탐촉자는 Curie 온도가 600 ℃ 이상인 bismuth titanate 계열의 압전세라믹 소자, 텅스텐 분말과 inorganic binder를 혼합한 후면재, 알루미나 튜브, 전면재, 하우징 등으로 구성되었다. 기본 공진주파수가 각각 1.04 및 2.08 MHz의 2 종류 탐촉자를 제작하였으며 각종 고온용 커플런트의 온도특성을 시험하였다. 개발된 고온용 탐촉자를 이용하여 강재 시편을 대상으로 시편에서의 초음파 반사신호를 측정한 결과 시편의 온도가 증가함에 따라 반사신호의 크기는 감소하였다. 고온에서 반복측정 실험결과 500℃에서 연속적인 접촉식 초음파 탐상이 가능한 것으로 나타났다.

주요용어: 고온 시험, 고온용 초음파 탐촉자, 고온 압전재료, 커플런트

Abstract Piezoelectric ultrasonic transducers for high temperature contact measurement were developed. These high temperature ultrasonic transducers (HTUT) consisted of bismuth titanate piezoceramic element whose Curie temperature is higher than 600℃, a backing material of the mixture of tungsten powder and inorganic binder, an inner alumina tube, a wear plate and a housing. The operational frequencies of the HTUT were 1.04 and 2.08 MHz, respectively. Various commercially available couplants for high temperature were evaluated and compared. As a couplant for high temperature ultrasonic testing between HTUT and test specimen, gold epoxy was selected. The peak amplitude of pulse-echo signals from steel test specimen decreased with increasing temperature. The operational temperature of the HTUT reached up to 500℃ at which the continuous contact measurement was possible.

Keywords: high temperature measurement, high temperature ultrasonic transducer, high temperature piezoelectric material, couplant

1. 서 론

현재 비파괴 상태진단기술의 세계적인 연구동향은 비접촉식 시험기술, 실시간 광역기술, 고온 환경하에서의 시험기술, 온라인 감시기술, 고감도, 고분해능, 소형화 및 무선통신기술 등을 개발하는 방향으로 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 특히 고온 환경 하에서의 시험기술의 경우 철강공장 등에서

(접수일: 2002. 5. 16, 심사완료일: 2002. 7. 2) * 한국표준과학연구원, ** (주)하기소닉, †교신저자: 한국표준과학연구원 안전계측연구센터(Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejon 305-340) kimkibok@kriss.re.kr

그 수요가 급증하고 있는데 반하여 국내의 경우 개발기술이 거의 전무하며 외국에서 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 한편, 최근 여러 가지 다양한 복합재료와 공업용 재료들이 개발되고 있는데 이들 재료의 제작 공정이 복잡할 뿐만 아니라 고온 및 고압의 공정조건이 요구되는 경우가 많다. 따라서 고온 환경 하에서 재료의 특성을 비파괴적으로 검사할 수 있는 초음파 센서가 요구된다고 하겠다.

고온 환경 하에서의 시험기술은 세계적으로 유수한 극소수의 연구기관 또는 회사만이 보유하고 있는 일종의 원천기술로서 기술이전이 용이하지 않으며 상용화된 초음파 탐촉자의 경우 그 가격이 매우 고가일 뿐만 아니라 제작회사의 know-how로서 그 기술이 거의 공개되고 있지 않는 실정이다. 이에 따라 고온용 초음파 탐촉자 제작기술 개발 및 국산화가 시급하며 이러한 기술이 성공적으로 수행될 경우 지금까지 국내에서 기술확보가 안되었던 고온 상태의 제품이나 설비의 결함검출, 재질 평가가 가능하게 될 것으로 생각된다.

고온 환경 하에서 적용할 수 있는 비파괴검사기술로서 EMAT(electromagnetic acoustic transducer), 레이저 유도 초음파 등을 들 수 있다. EMAT는 고온 환경에서 재료의 기계적 특성뿐만 아니라 결함을 탐상하는데 매우 효과적인 방법이지만 시험체가 전도성 재료이어야 한다는 단점이 있다. 또한 EMAT를 이용한 초음파 에너지는 신호대 잡음비가 상대적으로 낮기 때문에 고감도의 초음파 탐상에는 다소 불리한 것으로 보고되고 있다[2]. 한편 레이저 유도 초음파 기술은 그 원리상 고온환경에서 재료 물성의 비접촉 측정에 매우 유용하게 적용될 수 있지만 가격이 매우 비싸다는 단점이 있을 뿐만 아니라 시험체 내의 crack tip에 대한 검출의 경우 압전형 초음파 센서보다 감도가 다소 떨어진다는 연구보고도 있다[3]. 기존의 고온 초음파 탐상에서는 주로 delay line이나 buffer rod를 이용한 방법[4-7]을 많이 이용해 왔으나 압전형 초음파 센서보다 감도가 낮을 뿐만 아니라 buffer rod의 경우 별도의 냉각장치가 필요하다[4,5]. 따라서 이러한 여러 가지 점들을 고려할 때 고온 환경에서의 비파괴 검사용 초음파 센서로서는 시험체와 직접 접촉하여 연속적인 측정이 가능한 압전형 초음파 탐촉자가 보다 적합할 것으로 판단된다. 그러나 이러한 고온용 탐촉자의 개발에는 극복해야할 기술적인 난제들이 많다. 특히 고온용 초음파 탐촉자의 압전재료는 고온에서도 압전성이 유지되어야 하며 관련되는 구성품 들도 고온에서 그 특성이 유지되어야 한다. 기존의 상용화되어 있는 고온 시험용 초음파 탐촉자는 거의 외산 제품이며 국내 제작 기술의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 고온 환경에서 연속적인 초음파 탐상이 가능한 고온용 압전형 초음파 탐촉자에 대한 국산화 및 국내 제작 기술을 개발하기 위하여 수행되었으며 고온용 초음파 탐촉자에 필요한 탐촉자 구성 요소들의 특성과 개발된 탐촉자의 특성을 평가하였다.

2. 고온용 탐촉자 설계 및 제작

2.1. 고온 압전재료 및 관련 고온 부품 선정

고온용 압전재료는 퀴리 온도가 약 1000℃ 이상인 압전재료로서 $LiNbO_3$, AlN 등을 들 수 있다. $LiNbO_3$는 녹는점이 약 1250℃, 퀴리 온도가 1140℃로서 고온용 탐촉자의 제작에 적합하다. 또한 이방성 재료로서 결정의 cutting 방향에 따라 여러 가지 압전특성을 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 음향임피던스가 약 35 MRayl로서 강재(steel)와 유사하여 음향 임피던스 정합에 유리하며 주로 표면 탄성파 소자로 이용되고 있다. $LiNbO_3$의 온도팽창계수는 두께방향의 경우 15×10^{-6}cm/cm/℃, 길이방향의 경우 4.1×10^{-6}cm/cm/℃이다. 고온에서 $LiNbO_3$을 이용하여 일정 주파수 이상의 초음파를 발생시키기 위해서는 압전재료를 래핑하여 후면재 등에 접착하게 되는데 이때 압전특성이 감소되거나 미세한 균열이 발생되기도 한다[3]. 36° Y-cut $LiNbO_3$를 스크린 인쇄된 알루미나 배열 판에 접합하여 400℃에서 시편의 crack tip을 탐상하는 연구가 수행되었으며 고온 환경에서의 문제점으로서는 고온용 접합제와 커플런트가 지적되었다[2].

한편 AlN은 그 특성상 주로 고주파용 및 고온용에 적합한 압전재료로서 고온에서 매우 안정한 압전특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 적절한 압전필름의 두께를 얻기 위하여 일반적으로 CVD (chemical vapor deposition) 공정이 적용되는데 이러한 CVD 방법으로 제작한 AlN 필름을 이용하여 1220 °K에서 50 MHz 이상의 초음파를 발생시키는 연구가 수행되었으며[3] 1200℃ 이상의 고압 압력용기의 두께 탐상이 가능한 것으로 보고되고 있다[8].

본 연구를 위하여 선정된 고온용 압전재료는 퀴리 온도가 600℃ 이상인 bismuth titanate 계열의 세라믹 압전재료로서 주요 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다. 고온용 압전형 초음파 탐촉자를 제작하기 위해서는 각종 접합제, 후면재(backing material), 케이스 등의 온도 특성과 열팽창 계수 등이 고려되어야 한다. 상용 온도에서 일반적으로 많이 사용되는 에폭시 계통의 접합제는 보통 250~300℃ 정도에서 연소가 되는 것으로 예비 실험결과 나타나 본 연구에서 목표로 하는 500℃의 설계 조건을 만족시키지 못하는 것으로 분석되었다. 또한 압전재료와의 전기적 결선을 위한 납땜도 약 350℃ 정도이므로 전기적 결선이나 접합을 위해서는 전도성이 있는 고온용 접합제를 고려해야 한다. 문헌 및 자료 조사 결과 고온환경에서의 접합제는 inorganic binder 계통의 접합제의 열팽창계수는 약 7~8.5($\times 10^{-6}$cm/cm/℃)로 조사되어 본 연구에서 선정한 고온용 압전재료의 열팽창계수에 가장 근접하는 것으로 나타났다.

고온용 탐촉자의 케이스에 적합한 금속재료의 특성을 조사한 결과 고탄소강의 열팽창 계수가 10.5×10^{-6}cm/cm/℃로서 본 연구에서의 압전재료의 열팽창 계수인 9.9×10^{-6}cm/cm/℃에 근접하였다.

Table 1 Physical and electrical properties of bismuth titanate piezoceramic

Parameter	Value
Relative Dielectric Constant	165
Thickness Coupling Coefficient, kt	≥0.15
Piezo electric strain constant (10^{-12}Coul/Newton), d_{33}	≥18
Piezo electric voltage constant (10^{-12}Coul/Newton), g_{33}	14.5
Mechanical Quality Factor (Thickness), QM	100
Density (gm/cm^3)	7.2
Acoustic Impedance (MRayl)	29
Sound Velocity (m/sec)	4165
Curie Temperature (℃)	>600
Thermal Coefficient of Expansion (10^{-6}cm/cm/℃)	9.9

또한 비슷한 범위의 열팽창계수를 가지는 알루미나를 이용하여 탐촉자의 내부 튜브를 제작하여 탐촉자 내부에서 압전재료와 후면재를 지지하고 케이스와 전기적 절연을 겸하도록 하였다.

본 연구에서 사용된 압전재료의 직경은 20 mm 및 25.4 mm 이며, 두께가 각각 1 mm 및 2 mm 인 두께 진동모드의 초음파 탐촉자를 설계·제작하였으며 이론적인 초음파 주파수는 기본 진동 모드에서 1 mm 두께일 경우 2.08 MHz, 2 mm 두께일 경우 1.04 MHz로 각각 계산되었다.

2.2. 고온용 초음파 탐촉자 제작

본 연구에서 설계·제작된 고온용 탐촉자의 구조는 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 고온용 탐촉자에서 초음파 신호의 송수신시 후방 산란되는 신호를 감쇠시키기 위하여 고온용 후면재를 먼저 제작하였다. 1600℃까지 안정한 inorganic binder에 일정 입자 크기의 텅스텐 분말을 혼합하여 제작하였다.

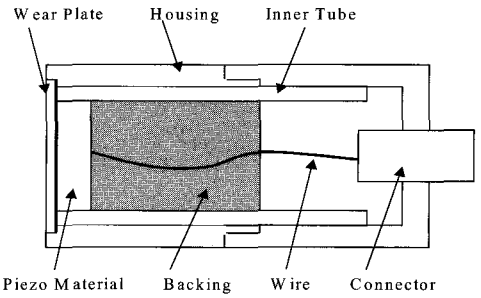

Fig. 1 Schematic diagram of the high temperature ultrasonic transducer

탐촉자 케이스와 압전재료를 전기적으로 절연시키기고 안정된 backing을 위하여 열팽창 계수가 8.2 $\times10^{-6}$cm/cm/℃인 알루미나 재질의 내부 튜브를 제작하였다. 또한 알루미나 재질의 전면재를 제작하여 압전재료에 고온용 접합재로 접합하였다.

2.3. 고온용 커플런트

현재 시판되고 있는 고온용 커플런트를 구입하여 본 연구에서 목표로 하는 500℃의 온도에서 그 특성을 조사하였다. 분석에 사용된 커플런트는 3개회

사의 제품이며 그 외 고온용 전도성 접합제로 많이 사용되는 gold epoxy에 대하여 고온용 커플런트로서의 사용가능 여부를 조사하였다.

3. 실험장치 및 방법

고온용 초음파 탐촉자의 특성을 평가하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같은 초음파 탐상 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 사용된 고온용 로(爐)는 1000℃까지 시편을 가열할 수 있으며 초음파 펄서/리시버 (Panametrics)와 디지털 오실로스코프(Lecroy)로 구성하였다. 고온 실험은 먼저 상온에서 고온로 내부에 두께 40mm의 강재 시편을 위치시킨 후 시편에 커플런트를 도포한 다음 개발된 고온다.용 초음파 탐촉자를 가압하여 접촉시켰다. 시편에서의 초음파 반사신호를 저장한 다음 로의 온도를 상온에서 500℃까지 서서히 증가시키면서 시편의 표면과 저면에서 반사되는 초음파 신호를 획득하여 진폭 및 파형을 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 고온용 커플런트의 온도특성 분석

현재 개발되어 판매되고 있는 상용의 고온용 커플런트에 대하여 고온 특성을 분석하였다. 강재 시편 위에 각 커플런트를 일정량 도포한 다음 500℃까지 온도를 상승시켜 가면서 커플런트의 상태를 육안 관찰하였으며 온도 증가에 따른 각 커플런트의 대략적인 연소개시 시점을 측정하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 분석에 사용된 커플런트 모두 제작회사에서 제시한 온도 특성을 모두 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 이것은 기존의 상용화된 고온용 커플런트는 고온에서 연속적인 측정용이 아니라 주로 탐촉자와 시편사이에서의 순간적인 측정에 사용되기 때문인 것으로 고온 노출 시간도 보통 수 초 이내로 제한된다. 한편 gold epoxy 계열의 접합제가 고온용 커플런트의 기능을 할 수 있을 것으로 나타났다.

Table 2 Temperature characteristics of various couplants

Maker	O.T.*(maker)	F.P.*(this study)
Sono (USA)	350~580℃	375℃
Panametrics (USA)	260~540℃	350℃
KrautKramer (German)	~550℃	300℃
Epo-Tek(USA) (gold epoxy)	-	500℃

*) O.T. notes operating temperature by maker.
F.P. notes flash point in this study.

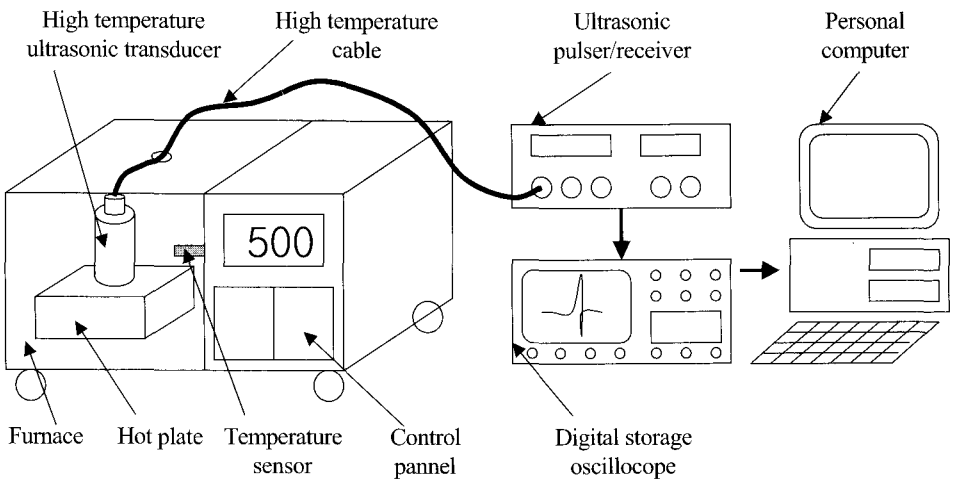

Fig. 2 High temperature ultrasonic testing system

4.2. 상온에서의 초음파 반사신호 분석

개발된 2 MHz의 고온용 탐촉자를 이용하여 상온에서의 펄스-에코 응답 특성을 분석하여 탐촉자의 설계조건을 만족하는지를 먼저 검토하였다. 두께 40 mm의 강재에 상온용 커플런트를 이용하여 초음파 반사신호를 측정한 결과 Fig. 4에서 보는바와 같은 시편 저면에서의 반사 신호를 얻을 수 있었다. 첫 번째 반사신호를 주파수 분석한 결과는 Fig. 4에서 보는바와 같이 중심 주파수가 2.4 MHz, 대역폭은 약 29 %를 나타내었다.

4.3. 고온에서의 반복측정에 따른 탐촉자 특성

본 연구에서 개발된 고온용 초음파 탐촉자의 고온에서의 반복측정에 따른 특성을 측정하기 위하여 탐촉자를 고온용 로의 내부에서 상온에서 500℃까지 2시간 동안 상승시킨 후 500℃에서 다시 약 30 분정도 유지시켰다. 그 다음 상온으로 다시 온도를 낮추는 과정을 수회 반복하였다. 동일한 탐촉자에 대하여 상온에서 탐촉자의 초음파 반사신호를 먼저 측정한 다음 500℃의 고온에서 1~3회 반복한 후 다시 상온에서 초음파 반사신호를 측정하였다.

Fig. 5에서 보는바와 같이 고온 시험 전의 초음파 반사 신호의 피크 값인 0.52 V 보다 다소 감소된 0.38 V 정도의 값을 나타내었으며 고온에서의 반복 회수가 증가하더라도 전체적인 초음파 반사신호의 형태는 거의 동일하게 유지되는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 6에서와 같이 고온에서의 반복시험 회수가 증가하더라도 초음파 반사신호의 주파수 특성도 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

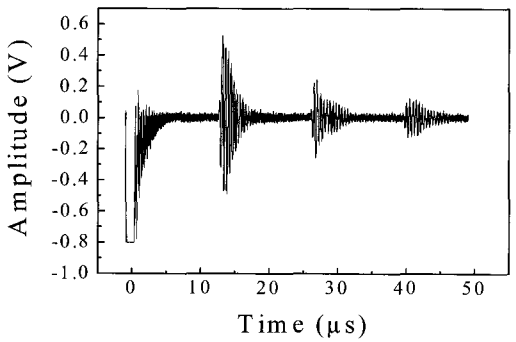

Fig. 3 The main bang and the pulse-echo signal of the manufactured ultrasonic transducer for high temperature from 40 mm thickness of steel block

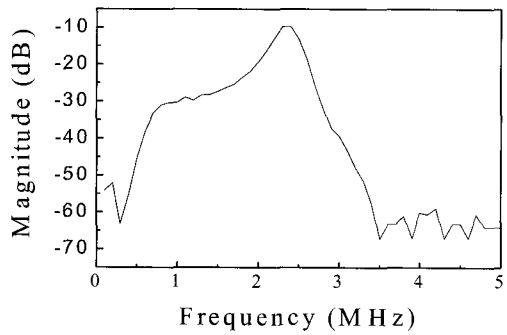

Fig. 4 Frequency spectrum of pulse-echo signal of the manufactured ultrasonic transducer for high temperature from 40 mm thickness of steel block

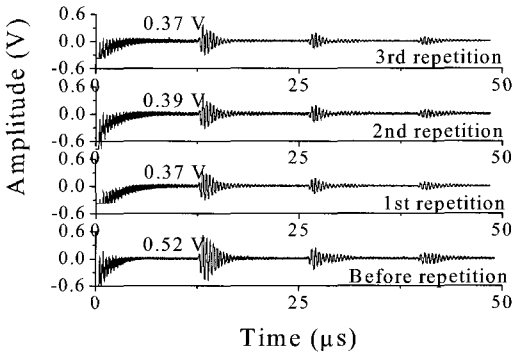

Fig. 5 Durability test results of the manufactured ultrasonic transducer for high temperature under 500℃ of environmental condition

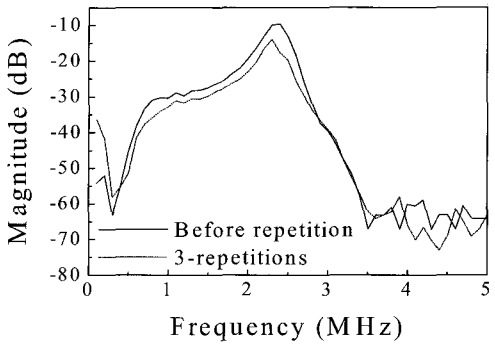

Fig. 6 Comparison for frequency spectra between before high temperature testing and after 3-repetitions of high temperature testing

4.4. 온도에 따른 초음파 반사신호 변화

온도 증가에 따른 초음파 반사신호의 피크 값의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 개발된 2개의 2MHz용 탐촉자에 대하여 측정한 것으로서 각각 Prototype 1 및 Prototype 2로 표시하였다. 비교를 위하여 측정된 반사신호의 피크 값을 정규화하여 나타낸 결과 각각의 탐촉자에서 시편의 온도가 증가할수록 반사신호의 피크 값은 감소하는 경향을 나타내었는데 이러한 결과는 기존의 고온 탐촉자 개발의 연구결과[8,9]와 거의 유사하였다. 이러한 이유로서는 전반적으로 압전소자 자체의 온도특성과 완성된 탐촉자의 구성요소들의 온도특성 들이 복합적으로 작용하여 나타나는 현상으로 사료되며 보다 정확한 원인을 구명하기 위한 보완연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 2개의 탐촉자가 200℃ 이상의 온도에서 서로 다른 형태로 감소되고 있는데 이것은 각 탐촉자에서 후면재의 음향 임피던스 차이인 것으로 사료된다.

Fig. 7에서 공통적으로 약 350℃ 부근에서 감소되던 반사신호가 다시 증가함을 나타내었는데 이러한 이유로서는 본 실험에 사용된 고온용 커플런트인 gold epoxy의 온도특성으로 생각된다. 제조회사의 사양에 의하면 gold epoxy의 경화조건이 약 300~400℃ 범위로서 이 온도 범위인 350℃에서 탐촉자와 시편사이에서 접착되어 있던 gold epoxy가 용융되어 일정 기간 동안 유체 막이 형성되기 때문에 초음파가 상대적으로 잘 전달되는 것으로 판단된다. 한편 그 이상의 온도에서는 완전히 용융된 gold epoxy가 탐촉자와 시편 사이에서 유체 막을 형성하

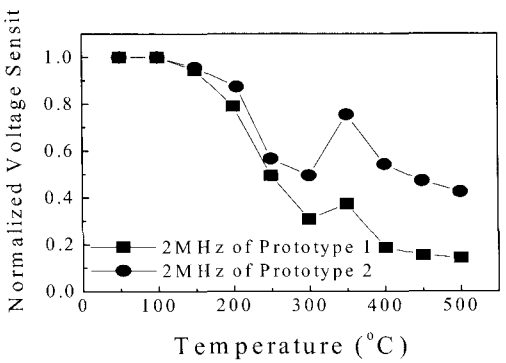

Fig. 7 The normalized peak amplitude of the pulse-echo signal with the specimen temperature increased up to 500℃

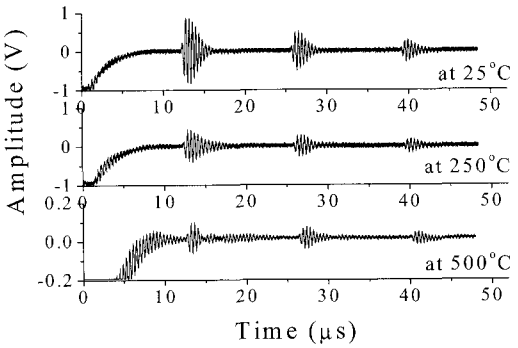

Fig. 8 Variations of the pulse-echo signal from 40mm-thick specimen at indicated temperature

지 못하고 서서히 빠져나가거나 증발하기 때문에 음향 임피던스 정합층을 형성하지 못하여 초음파의 감쇠가 커지는 것으로 판단된다.

또한 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 500℃의 고온에서도 전체적으로 신호의 크기는 상당히 작아졌지만 반사신호의 형태는 거의 동일하게 유지하는 것으로 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 현재 국내 제작이 전무하며 제작 기술도 개발되어 있지 않을 뿐만 아니라 앞으로 그 수요가 증가할 것으로 예상되는 고온용 압전형 초음파 탐촉자에 대한 국산화 개발을 위하여 수행되었으며 구체적인 연구 결과는 다음과 같다.

1) 고온용 초음파 탐촉자의 성능을 평가하기 위한 커플런트의 대용으로서 gold epoxy를 이용할 경우 고온에서 초음파 시험이 가능한 것으로 분석되었으며 고온 시험 현장에서도 사용 가능할 것으로 사료된다.
2) 퀴리 온도가 600℃ 이상인 bismuth titanate 계열의 압전재료, 고온용 세라믹 접합제, 음향 임피던스가 큰 고온용 후면재를 이용하여 개발된 고온용 탐촉자는 고온 환경에서 양호한 초음파 송수신 특성을 나타내었으며 내구성도 양호한 것으로 나타났다.
3) 두께 40 mm인 강재를 대상으로 500℃까지 온도를 상승시키면서 초음파 반사신호의 피크 값을 분석한 결과 대체적으로 온도가 상승함에 따라 피크 값은 감소하는 것으로 나타났으며 기존의 연구결과와 거의 일치하였다.

4) 개발된 고온용 탐촉자를 이용할 경우 500℃ 정도의 고온환경에서 연속적인 초음파 탐상이 가능한 것으로 나타났으며 500℃ 이상에서 견딜 수 있는 고온용 커플런트에 대한 보완 연구가 필요할 것으로 사료된다. 추후 개발된 고온용 탐촉자의 현장적용 연구를 통하여 그 성능을 개선해야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업 (과제번호 : 2000-N-NL-01-C-091)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 이승석 외, "고도화된 비파괴 센싱기술 개발에 의한 상태진단기술의 선진화 연구", 과학기술부 보고서 (2002)

[2] A. McNab, G. Hayward, A. Cochran, I. D. Hall, and K. J. Kirk, "Ultrasonic Arrays For Flaw Characterization At High Temperature. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 16. Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York. pp. 943-950 (1997)

[3] N. D. Patel, S. X. Fulford and P. S. Nicholson, "High Frequency-High Temperature Ultrasonic Transducers", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 16. Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp. 823-828 (1990)

[4] M. W. Grigg, T. J. Davis, A. Cimmino, A. G. Klein and G. I. Opat, "Elastic moduli of solids-a method suitable for high temperature measurements" J. Phys. E: Sci. Instrumen. Vol. 19, pp. 1059-1063 (1986)

[5] C. K. Jen, J. G. Legous and L. Parent, "Experimental evaluation of clad metallic buffer rods for high temperature ultrasonic measurement", NDT & E. International, Vol. 33, pp. 145-153 (2000)

[6] A. U. Rehman, C. K. Jen and I. Ihara, "Ultrasonic probe for high temperature immersion measurements," Measurement Science and Technology, Vol. 12, pp. 306-312 (2001)

[7] J. Szilard. Ultrasonic Testing. Jon Wiley & Sons Ltd., pp. 411-436 (1982)

[8] D. A. Stubbs and R. E. Dutton, An Ultrasonic Sensor for High-Temperature Materials Processing. JOM, 48(9), pp. 29-31 (1996)

[9] A. H. Mrasek, D. Gohlke, K. Matthies and A. Cochran, "High temperature ultrasonic transducers," NDTnet 1:1-10 (1996)