

고온 시험용 초음파 트랜스듀서 개발에 관한 연구

A Study on Development of Ultrasonic Transducer for High Temperature Ultrasonic Testing

김기복* 윤동진* 이승석*
정희원

K. B. Kim D. J. Yoon S. S. Lee

1. 서론

현재 비파괴 상태진단기술의 세계적인 연구동향은 비접촉식 시험기술, 실시간 광역기술, 고온 환경 하에서의 시험기술, 온라인 감시기술, 고감도, 고분해능, 소형화 및 무선통신기술 등을 개발하는 방향으로 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 특히 고온 환경 하에서의 시험기술의 경우 철강공장 등에서 그 수요가 급증하고 있는데 반하여 국내의 경우 개발기술이 거의 전무하며 외국에서 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 최근 여러 가지 다양한 복합재료와 공업용 재료들이 개발됨에 따라 이들 재료의 제작 공정이 복잡해질 뿐만 아니라 고온 및 고압의 공정조건이 요구되는 경우가 많다. 따라서 고온 환경 하에서 재료의 특성을 비파괴적으로 검사할 수 있는 초음파 탐촉자가 요구된다고 하겠다.

고온 환경 하에서의 시험기술은 세계적으로 우수한 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. 이러한 고온 환경 하에서 적용할 수 있는 비파괴 검사기술로서 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 압전형 초음파 탐촉자보다 감도가 다소 떨어진다는 연구보고도 있다[3]. 기존의 고온 초음파 탐상에서는 주로 delay line이나 buffer rod를 이용한 방법[4-7]을 많이 이용해 왔으며 별도의 냉각장치가 필요하다. 따라서 고온 환경에서의 비파괴 검사용 초음파 탐촉자로서는 시험체와 직접 접촉하여 연속적인 측정이 가능한 압전형 초음파 탐촉자가 보다 적합할 것으로 판단된다. 이러한 고온용 초음파 탐촉자는 또한 농업생명분야에서 각종 건조과정에서의 재료의 물성평가, 특히, 목재 건조시 발생하는 목재의 균열 검사 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 고온 환경에서 연속적인 초음파 탐상이 가능한 고온용 압전형 초음파 탐촉자를 국산화하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 고온용 탐촉자 구성요소들의 특성을 고찰한 다음 개발된 탐촉자의 특성을 평가하였다.

* 한국표준과학연구원 산업측정표준부 비파괴계측그룹

+ 본 논문은 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원에 의해 수행되었음.(과제번호: 2000NNL01C091)

+ 본 논문은 2002년도 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회에서 발표된 논문에서 일부 발췌하였음.

2. 탐촉자 설계 및 제작

2.1 압전재료 및 관련 부품 선정

본 연구를 위하여 선정된 고온용 압전재료는 큐리 온도가 600°C 이상인 bismuth titanate 계열의 세라믹 압전재료로서 주요 특성은 표 1에서 보는바와 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°C 정도에서 연소가 되는 것으로 예비 실험결과 나타나 본 연구에서 목표로 하는 500°C의 설계 조건을 만족시키지 못하는 것으로 분석되었다. 또한 압전재료와의 전기적 결선을 위한 납땜도 약 350°C 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/°C)로 조사되어 본 연구에서 선정된 고온용 압전재료의 열팽창계수에 가장 근접하는 것으로 나타났다.

고온용 탐촉자의 케이스에 적합한 금속재료의 특성을 조사한 결과 고탄소강의 열팽창 계수가 10.5×10^{-6} cm/cm/°C로서 본 연구에서의 압전재료의 열팽창 계수인 9.9×10^{-6} cm/cm/°C에 근접하였다. 또한 비슷한 범위의 열팽창계수를 가지는 알루미늄을 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 mm인 두께 진동모드의 초음파 탐촉자를 설계·제작하였으며 이론적인 초음파 주파수는 기본 진동모드에서 1 mm 직경일 경우 2.08 MHz, 2 mm 직경일 경우 1.04 MHz로 각각 계산되었다.

Table 1. Physical and electrical properties of bismuth titanate piezoceramic.

Parameter	Value
Relative Dielectric Constant	165
Thickness Coupling Coefficient, k_t	≥ 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), Q_M	100
Density (gm/cm^3)	7.2
Acoustic Impedance (MRayl)	29
Sound Velocity (m/sec)	4165
Curie Temperature (°C)	>600
Thermal Coefficient of Expansion($10^{-6}/°C$)	9.9

2.2 고온용 초음파 탐촉자 제작

본 연구에서 설계·제작된 고온용 탐촉자의 구조는 그림 1에서 보는 바와 같다. 고온용 탐촉자에서 초음파 신호의 송수신시 후방 산란되는 신호를 감쇠시키기 위하여 고온용 후면재를 먼저 제작하였다. 1600°C까지 안정한 inorganic binder에 일정 입자 크기의 텅스텐 분말을 혼합하여 압전재료의 직경과 동일한 크기로 성형한 다음 성형된 후면재의 단면을 cutting 하고 lapping 한 후 고온용 전도성 접합제를 이용하여 압전재료와 접합하였다.

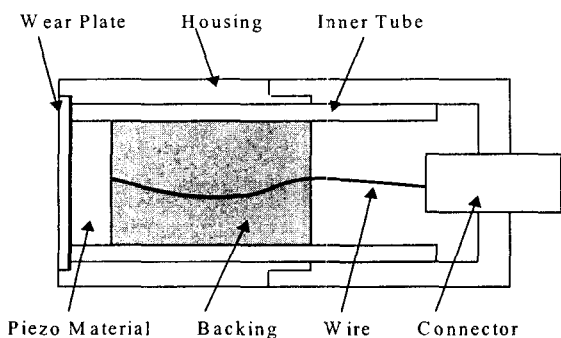


Fig. 1. Schematic diagram of the high temperature ultrasonic transducer.

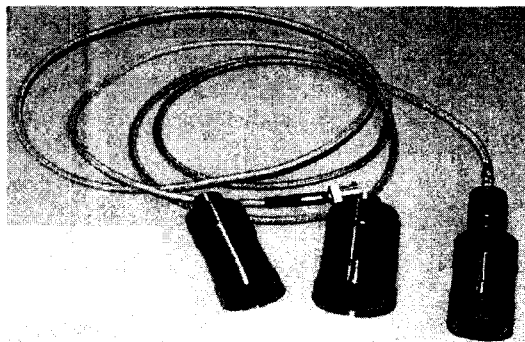


Fig. 2. Photo of the ultrasonic transducers and coaxial cable and connector for high temperature.

탐촉자 케이스와 압전재료를 전기적으로 절연시키고 안정된 backing을 위하여 열팽창 계수가 $8.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 인 알루미늄 재질의 내부 튜브를 제작한 후 고온용 세라믹 접착제를 이용하여 준비된 압전재료를 튜브 끝 부분에 맞추어 접착하였다. 그 다음 압전재료와 초음파 파장의 1/4 배에 해당되는 전면재를 알루미늄으로 제작하여 고온용 전도성 에폭시로 접합하였으며 금속 케이스와 전도되게 하여 커넥터와 그라운드를 겸하도록 하였다. 제작된 고온용 초음파 탐촉자는 2 MHz 주파수의 직경 20 mm 탐촉자와 1 MHz 주파수의 직경 25.4 mm 탐촉자이며 그림 2와 같다.

한편, 현재 고온용의 동축케이블 및 커넥터가 상용화 되어있지 않아 본 연구에서는 고온시험용 케이블과 커넥터를 자체 개발하여 사용하였으며 시판되고 있는 고온용 커플러도 동시에 분석하였다.

3. 실험장치 및 방법

고온용 초음파 탐촉자의 특성을 평가하기 위하여 그림 3에서 보는 바와 같은 초음파 탐상 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 사용된 고온용 로(爐)는 1000°C까지 시편을 가열할 수 있으며 초음파 펄서/리시버와 디지털 오실로스코프(Lecroy)로 구성하였다. 고온 실험은 먼저 상온에서 고온 로 내부에 두께 40mm의 강재 시편을 위치시킨 후 시편에 커플러를 도포한 다음 개발된 고온용 초음파 탐촉자를 가압하여 접촉시켰다. 시편에서의 초음파 반사신호를 저장한 다음 로의 온도를 상온에서 500°C까지 서서히 증가시키면서 시편의 표면과 저면에서 반사되는 초음파 신호를 획득하여 저장하였다.

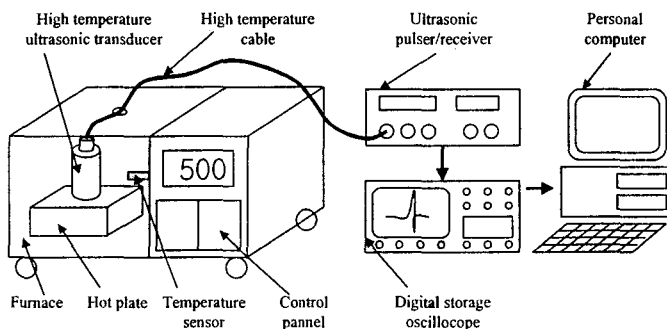


Fig. 3. High temperature ultrasonic testing system.

4. 결과 및 고찰

4.1. 고온용 커플런트의 온도특성 분석

현재 개발되어 판매되고 있는 상용의 고온용 커플런트에 대하여 고온 특성을 분석하였다. 강제 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. 분석결과 gold epoxy 계열의 접합제가 본 연구에서 목표로 하는 온도에서 고온용 커플런트의 기능을 할 수 있을 것으로 나타났다.

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 측정된 결과 그림 5에서 보는바와 같은 시편 저면에서의 반사 신호를 얻을 수 있었다. 첫 번째 반사신호를 주파수 분석한 결과는 그림 7에서 보는바와 같이 피크 주파수가 2.4 MHz, 중심 주파수는 1.85 MHz, 대역폭은 약 92 %를 나타내었다.

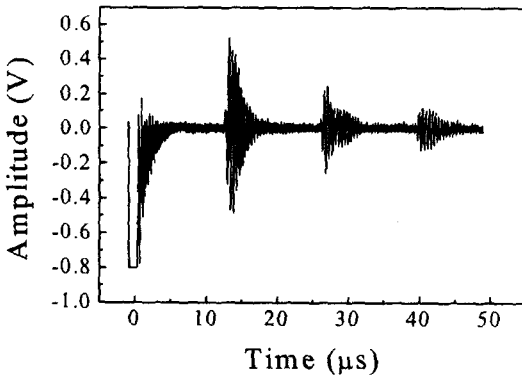


Fig. 4. The main bang and pulse echo signal of a fabricated ultrasonic transducer for high temperature from 40 mm thickness of steel block.

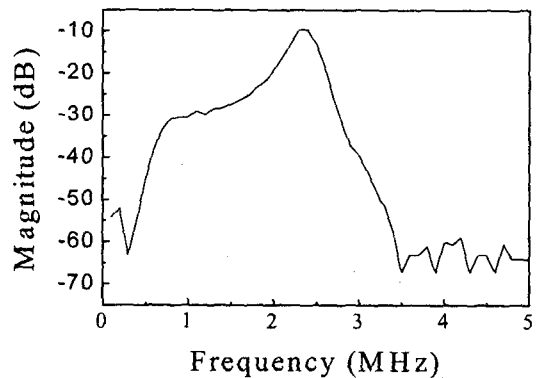


Fig. 5. Frequency spectrum of pulse echo signal of fabricated ultrasonic transducer for high temperature from 40 mm thickness of steel block.

4.3 개발된 탐촉자의 내구성 측정

본 연구에서 개발된 고온용 초음파 탐촉자의 내구성을 측정하기 위하여 탐촉자를 고온용 로의 내부에서 상온에서 500℃까지 2시간 동안 상승시킨 후 500℃에서 다시 약 30분 정도 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. 그림 6에서 보는바와 같이 고온 시험 전의 초음파 반사신호의 피크 값인 0.52 V보다 다소 감소된 0.4 V정도의 값을 나타내었으며 고온에서의 반복 회수가 증가하더라도 초음파 반사신호 파형이 거의 동일하게 유지되는 것으로 나타났다. 또한 그림 7에서와 같이 고온에서의 반복 시험 회수가 증가하더라도 초음파 반사신호의 주파수 특성도 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

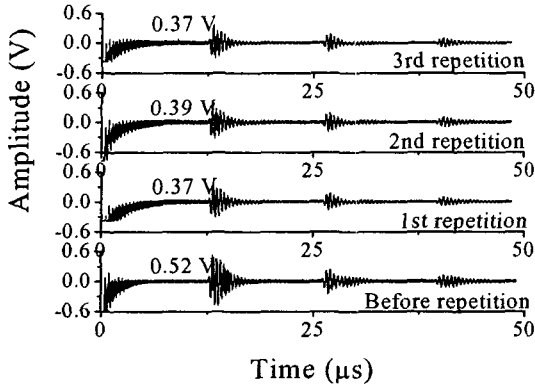


Fig. 6. Durability test results of the fabricated ultrasonic transducer for high temperature under 500°C of environmental condition.

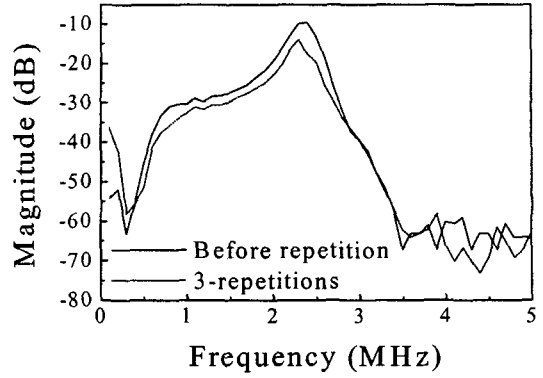


Fig. 7. Comparison for frequency spectrum between before high temperature testing and after 3-repetitions of high temperature testing.

4.4. 온도에 따른 초음파 반사신호 변화

온도 증가에 따른 초음파 반사신호의 피크 값의 변화를 그림 8에 나타내었다. 개발된 2개의 2 MHz용 탐촉자에 대하여 측정된 것으로서 각각 Prototype 1 및 Prototype 2라 표시하였다. 비교를 위하여 측정된 반사신호의 피크 값을 정규화하여 나타낸 결과 각각의 탐촉자에서 시편의 온도가 증가할 수록 반사신호의 피크 값은 감소하는 경향을 나타내었는데 이러한 결과는 기존의 고온 탐촉자 개발의 연구결과[8, 9]와 거의 유사하였다. 또한 2 개의 탐촉자가 200°C 이상의 온도에서 서로 다른 형태로 감소되고 있는데 이것은 각 탐촉자에서 후면재의 음향 임피던스 차이인 것으로 사료된다.

그림 8에서 공통적으로 약 350°C 부근에서 감소되던 반사신호가 다시 증가하였는데 이러한 이유로서는 본 실험에 사용된 고온용 커플런트인 gold epoxy의 온도특성으로 생각된다. 또한 그림 9에서 나타낸 바와 같이 500°C의 고온에서도 전체적으로 신호의 크기는 상당히 작아졌지만 반사신호의 형태는 거의 동일하게 유지하는 것으로 나타났다.

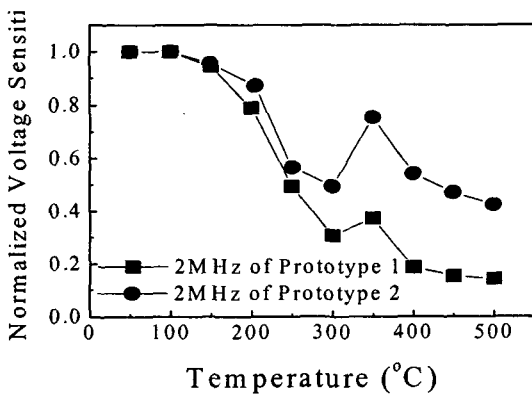


Fig. 8. The normalized peak amplitude of the pulse echo signal as the specimen temperature increased up to 500°C.

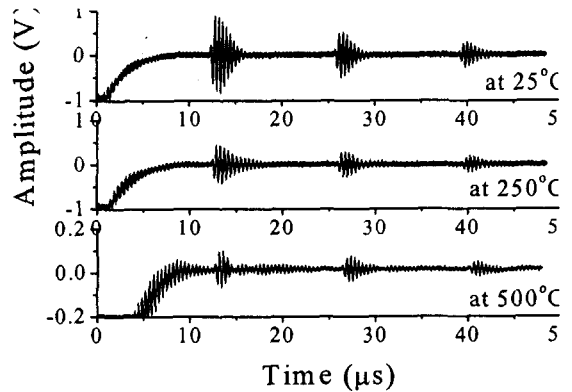


Fig. 9. Variations of the pulse echo signal from 40 mm thick specimen at indicated temperature.

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 수행되었다. 고온환경에서의 초음파 탐상 시험에 필요한 각종 커플런트의 온도특성을 시험하였으며 고온용 커넥터와 케이블을 자체 개발하였다. 구체적인 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 상용의 고온용 커플런트에 대한 고온 시험결과 gold epoxy를 이용할 경우 고온 초음파 시험이 가능한 것으로 분석되었다.
- 2) 큐리 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 연구 결과와 거의 일치하였다.
- 4) 개발된 고온용 탐촉자를 이용할 경우 500℃ 정도의 고온환경에서 연속적인 초음파 탐상이 가능한 것으로 나타났으며 고온용 탐촉자의 국산화 목표가 성공적으로 달성되었다고 판단된다.

6. 참고문헌

1. 이승석, 윤동진, 안봉영, 김영주, 김기복. 2002. 고도화된 비파괴 센싱기술 개발에 의한 상태진단기술의 선진화 연구. 과학기술부 보고서
2. McNab, A., G. Hayward, A. Cochran, I. D. Hall, and K. J. Kirk. 1997. 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. 943-950.
3. Patel, N. D., S. X. Fulford and P. S. Nicholson. 1990. 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. 823-828.
4. Grigg, M. W., T. J. Davis, A. Cimmino, A. G. Klein and G. I. Opat. 1986. Elastic moduli of solids—a method suitable for high temperature measurements. J. Phys. E: Sci. Instrumen. 19. 1059-1063.
5. Jen, C. K., J. G. Legous and L. Parent. 2000. Experimental evaluation of clad metallic buffer rods for high temperature ultrasonic measurement. NDT & E. Int. 33:145-153.
6. Rehman, A. U., C. K. Jen and I. Ihara. 2001. Ultrasonic probe for high temperature immersion measurements. Measurement Science and Technology. 12: 306-312.
7. Szilard. J. 1982. Ultrasonic Testing. Jon Wiley & Sons Ltd. pp.411-436.
8. Stubbs, D. A., and R. E. Dutton. 1996. An Ultrasonic Sensor for High-Temperature Materials Processing. JOM, 48(9): 29-31.
9. Mrasek, A. H., D. Gohlke, K. Matthies and A. Cochran. 1996. High temperature ultrasonic transducers, NDTnet 1:1-10.