

PMN-PT 압전 단결정을 이용한 고감쇠 재료 비파괴 평가용 초음파 탐촉자 연구

Study on Ultrasonic Transducer for Non-Destructive Evaluation of Highly Attenuative Material Using PMN-PT Single Crystal

김기복*[†], 안봉영*, 김영길*, 박상기**, 하정수**

Ki-Bok Kim*[†], Bongyoung Ahn*, Young-Gil Kim*, Sang-Ki Park** and Jeong-Soo Ha**

초 록 일반적으로 비파괴 검사용 초음파 탐촉자는 PZT를 이용한 압전소자가 많이 이용되어 왔다. 최근 압전특성이 PZT보다 크게 뛰어난 PMN-PT 압전 단결정 재료가 개발되어 초음파를 이용한 비파괴 평가 분야에 폭넓게 활용될 것으로 기대되고 있다. 본 연구는 PMN-PT를 이용하여 발전설비 고감쇠 재료의 비파괴 평가에 적합한 초음파 탐촉자를 개발하기 위하여 수행되었다. KLM 모델을 이용하여 초음파 탐촉자의 특성을 시뮬레이션 하였으며 이를 기반으로 하여 중심주파수 1 및 2.25 MHz PMN-PT 종파용 초음파 탐촉자를 제작하여 상용 초음파 탐촉자와 그 성능을 비교하였다.

주요용어: PMN-PT 압전 단결정, 고감쇠 재료, 비파괴 평가, 초음파 탐촉자

Abstract Recently, a new class of single-crystal piezoelectric materials such as lead metanibobate doped with lead titanate (PMN-PT) has been synthesized and were found to further enhance the electro-mechanical coupling factor compared to piezo-ceramic materials. This paper describes fabrication and evaluation of PMN-PT single crystal ultrasonic transducers for contact measurement of stainless steel that is one of the highly attenuative materials. The design conditions for ultrasonic transducer such as front matching layer between test materials and piezo-material and backing materials were investigated based on the simulation results by KLM model. The PMN-PT single crystal ultrasonic transducers with centre frequencies at 1 and 2.25 MHz were fabricated and their performances were evaluated.

Keywords: PMN-PT Single Crystal, Highly Attenuative Material, Non-Destructive Evaluation, Ultrasonic Transducer

1. 서 론

최근 그동안의 고도 성장기에 앞 다투어 건설되었던 원자력 발전설비, 화력 발전설비, 석유 화학플랜트 등 대형 설비들의 사용시기의 경과와 함께 가혹한 사용 환경 등으로 인하여 각종 부재들의 열화 손상에 따른 설비의 안전성 문제가 부각되고 있다. 이들 부재들 중 주로 스테인레스강(SUS)이 고온강도, 내열성, 기계적 성질 등이 뛰어나므로 발전설비

의 고온용 튜브, 파이프 및 각종 장치의 재료로 많이 사용된다. 이들 부재들은 고온 환경에서의 장시간 사용에 따른 열응력, 열피로 등으로 취화현상이 발생하며 이에 따라 구조물의 기능저하 뿐만 아니라 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 설비의 안전성 및 잔여수명 등을 정량적으로 평가하는 것이 매우 중요하며 여러 가지 다양한 비파괴 평가기법 중에서 초음파를 이용한 비파괴평가 기술이 많이 적용되고 있다[1-3].

종래의 비파괴검사용 초음파 탐촉자는 탄성파의 감쇠가 심하지 않은 재질이나 재료를 중심으로 개발되어 왔으며 주로 PZT와 같은 압전 세라믹 소자를 사용하여 왔다. 그러나 여러 가지 다양한 재질로 구성되는 발전설비 중 특히 고감쇠 재료에 대한 기존의 초음파 탐촉자의 적용은 많은 한계를 가지고 있다. 감쇠가 심한 재료내부의 결함을 검출하기 위해서는 고출력 초음파를 이용해야 하며 이를 위해서는 가능한 한 초음파 주파수가 낮은 것이 바람직하다. 그러나 초음파 주파수가 낮으면 센서의 감도가 저하되기 때문에 효율적인 결함 탐상이 어렵게 된다. 이러한 점 때문에 선진 외국에서도 감쇠가 심한 재료에 대한 비파괴 검사용 초음파 탐촉자를 개발하기 위한 많은 노력을 기울이고 있다. 외국의 경우 미국의 Panametrics사, Ultran사, 독일의 KrautKramer사, 일본의 Toray사 등에서 고감쇠 재료용 초음파 탐촉자를 개발하기 위한 연구를 활발히 진행하고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 초음파 탐촉자는 압전재료로서 PZT를 이용한 탐촉자가 대부분이며 주로 압전소자, 후면재, 마모판(전면 정합층), 전기 임피던스 정합회로 등으로 구성된다[4-9]. 최근에는 새로운 압전재료로서 PMN-PT (lead magnesium niobate titanate) 단결정이 주목을 받고 있는데 PMN-PT 단결정은 강유전체 단결정으로서 전계에 의해 전기 분극이 유지되는 압전체 중에서 특정 결정체에서 나타내는 전계를 소거해도 기존의 자발분극이 지워지지 않는 강유전성을 갖는 재료이다. 이러한 PMN-PT는 뛰어난 압전특성을 갖고 있기 때문에 초음파 발생소자로서의 응용성이 뛰어나다[10-13].

따라서 본 연구는 PMN-PT 압전재료를 이용하여 발전설비 고감쇠 재료의 비파괴 검사에 적합한 초음파 탐촉자를 개발하기 위하여 수행되었다. 중심 주파수 1 및 2.25 MHz를 중심으로 탐촉자의 최적 제작조건을 KLM 모델을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 PMN-PT 초음파 탐촉자를 제작하여 기존의 상용 PZT 초음파 탐촉자와 그 성능을 비교하였다.

2. PMN-PT 초음파 탐촉자 제작

2.1. PMN-PT 압전 단결정

압전재료는 초음파를 송수신 할 수 있는 능동소

자로서 탐촉자에서 가장 중요한 요소이다. 압전재료로서는 세라믹 계열의 압전재료인 PZT가 많이 사용 되어 왔으나 PZT 보다 압전특성이 향상된 압전 단결정에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 압전단결정 중 대표적인 재료가 PMN-PT로서 PZT 세라믹스 보다 제조 단가가 비싼 단점이 있지만 기존의 PZT 세라믹스보다 전기-음향 변환효율을 나타내는 전기기계결합계수(k_t)가 약 20% 정도 높으며 초음파 발생효율을 나타내는 d_{33} 와 초음파 수신효율을 나타내는 g_{33} 값이 PZT보다 매우 높다[14]. 본 연구에서 적용된 PMN-PT의 주요 특성은 Table 1에서 보는 바와 같으며 일반적으로 많이 사용되는 PZT-5A, PZT-5H의 자료와 비교하였다.

Table 1 Some properties of selected piezo materials

Properties	PZT ceramics		PMN-PT single crystal
	PZT-5A	PZT-5H	
Electro-mechanical coupling factor, k_t	0.49	0.505	0.65-0.75
Piezoelectric charge constant, d_{33} (10^{-12} C/V)	374	593	1,500-2,500
Piezoelectric voltage constant, g_{33} (10^{-3} Vm/N)	24.8	19.7	35
Curie Temperature, ($^{\circ}$ C)	36.5	190	150
Sound velocity (m/s)	4,350	4,560	3,600
Density (kg/m^3)	7,750	7,500	8,000
Acoustic impedance, (10^6 $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)	34	34	28.8
Frequency constant, N_t (Hz m)	1,890	2,000	1,800-1,900

2.2. 전면 정합층 제작

압전소자와 부하 사이에 위치하는 전면 정합층은 압전소자와 부하 사이의 음향 임피던스 차이를 개선하여 음파의 투과성을 증가시킨다. 전면 정합층의 최적 음향 임피던스는 압전소자의 음향 임피던스와 부하의 음향 임피던스의 기하학적 평균으로 얻어지며 이때 전면 정합층의 두께는 1/4 파장 두께로 계산된다. 이때 부하의 음향 임피던스는 스테인리스강의 음향임피던스인 45~50 MRayL를 고려하여 알루미늄을 전면 정합층 재료로 선정하였다. 이때 선정된 알루미늄의 음파 속도, 밀도, 음향 임피던스는 3950 m/s, 11,000 kg/m^3 , 43 MRayL이며 두께는 1 MHz 탐촉자의 경우 1.0 mm, 2.25 MHz 탐촉자의 경우 0.45 mm로 제작하였다.

2.3. 후면재 제작

후면재는 압전소자의 뒷부분에서 압전소자의 진동을 제한하는 damper 역할을 하여 분해능을 높이고 주파수 대역폭을 넓히는 작용을 한다. 또한 후면재는 불필요한 신호의 간섭을 피하기 위해 후면재에 전달된 초음파를 산란 또는 흡수하여 제거할 수 있어야 한다. 본 연구에서의 후면재는 에폭시와 평균 입자크기가 25 μm인 텅스텐 분말을 배합하여 제작하였다. 에폭시는 Araldite GY 509(미국)로서 경화제와 1 : 4의 비율로 혼합한 후 텅스텐 분말의 비율을 증가시키면서 배합한 다음 진공 챔버를 이용하여 내부의 기포를 제거하였다. 최종적으로 상온에서 24시간 경화하여 후면재를 완성하였다. 에폭시와 텅스텐 분말의 배합 비율에 따라 제작된 후면재 재료의 밀도와 초음파 투과 속도를 측정하여 음향 임피던스를 계산하였다. 초음파 속도를 측정하기 위하여 후면재의 두께를 5 mm로 일정하게 제작하여 중심주파수 2.25 MHz의 초음파 탐촉자 2개를 사용하여 through transmission 방법을 이용하여 측정하였다. Table 2는 본 연구에서 제작된 에폭시와 텅스텐 분말의 배합 비율에 따른 밀도, 초음파 속도, 음향 임피던스를 각각 나타낸다.

Table 2 Characteristics of fabricated backing materials with various conditions

Ratio (epoxy : powder)	Density (kg/m ³)	Velocity (m/s)	Acoustic impedance (MRayL)
1 : 0	1150	2836	3.3
1 : 2	1710	2395	4.1
1 : 4	3570	1704	6.1
1 : 6	5050	1720	8.5

2.4. 전기정합회로 제작

초음파 탐촉자의 압전소자는 유전체로서 정전용량을 가지고 있으며 압전소자가 초음파 송신기로 사용될 때는 압전소자에 가해지는 인가전압이 압전소자의 정전용량 특성에 의해 바로 전달되지 못하여 초음파 신호를 발생하는데 시간이 소요되기 때문에 초음파 신호의 상승시간이 증가하게 되고 동시에 압전소자 내에 축적되는 전류의 양이 증가하게 된다. 반면 초음파 수신기로 사용될 때는 초음파 변환기의 부하로 작용하여 수신 감도를 감소시

키게 되므로 정전용량의 영향을 최대한 상쇄시키는 것이 바람직하다. 전기정합회로는 중심주파수(f_0)에서 인덕턴스를 이용하여 직렬 임피던스 정합회로를 구성하여 원하는 주파수 대역에서 정전용량에 의해 발생하는 리액턴스에 의한 영향을 상쇄시켜 에너지가 최대한으로 전달 될 수 있도록 한다. 본 연구에서 임피던스 정합회로를 제작하기 위하여 먼저 압전소자의 정전용량(C_0)을 임피던스 분석기(HP 4194A, Hewlett Packard, 미국)를 이용하여 측정하고 다음 식 (1)의 관계를 이용하여 필요한 인덕턴스(L_0)를 결정하였다.

$$L_0 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_0} \tag{1}$$

임피던스 분석기로 중심주파수에 대한 인덕턴스를 측정하면서 고주파용 헬라이트 코어에 코일을 감아서 식 (1)을 만족하는 코일을 제작하였다. Table 3은 각 중심주파수에서 측정된 정전용량과 제작된 코일의 인덕턴스를 나타내었다.

Table 3 Clamped capacitance and matching inductance for piezoelectric elements

Frequency	Capacitance (nF)	Inductance (μH)
1 MHz	1	28.7
2.25 MHz	3.38	1.43

2.5. 탐촉자 구조

이상의 탐촉자 구성품들을 고려한 탐촉자 구조는 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 탐촉자 케이스는 외부 케이스, 내부 케이스, 캡으로 구성하였다. 외부 케이스와 캡은 SUS 304로 제작하였으며 내부 케이스는 플라스틱으로 제작하였다. 각각의 구성품들은 Fig. 2에서 보는바와 같다.

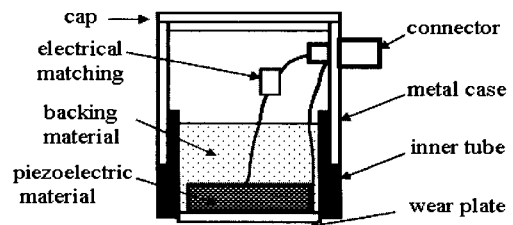


Fig. 1 Structure of the PMN-PT ultrasonic transducer

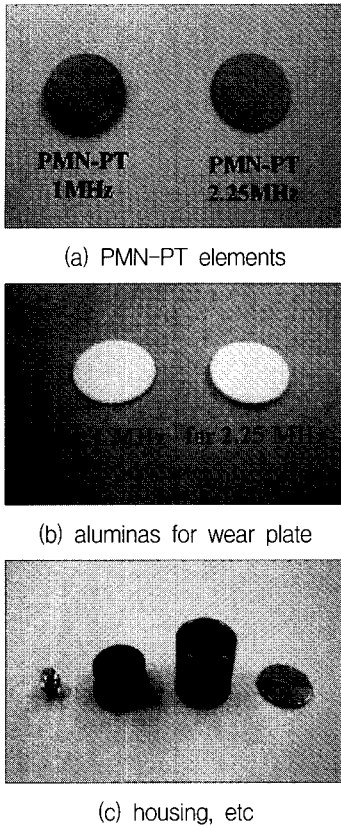


Fig. 2 Components of the PMN-PT ultrasonic transducer

3. 초음파 탐촉자 시뮬레이션

초음파 탐촉자의 최적 설계 값을 찾기 위해 KLM 모델과 전송선로 이론을 이용하여 전면정합층, 후면재의 조건들을 바꾸어 가면서 초음파 탐촉자의 응답신호를 분석하였다. 박판형 압전소자의 전기-기계 결합 효과를 해석하기 위해 개발된 KLM 모델은 1970년에 Krimholz, Leedom 그리고 Matthei에 의해 제안된 등가회로이다[15]. KLM 모델에서는 압전소자의 음향부분을 전송선로로 가정함으로써 압전소자와 마모판이 직렬로 연결된 경우에도 물리적 해석이 쉽다는 장점이 있다. KLM 모델에 기반한 초음파 탐촉자 시뮬레이션 프로그램은 초음파 탐촉자를 Fig. 3에서와 같은 회로망 형태로 구성한 후 왕복전달함수로 표현하여 초음파 탐촉자의 임펄스 응답을 얻는다. 이러한 시뮬레이션 과정을 통해 초음파 탐촉자 제작에 필요한 최적 설계변수와 응답 신호 예측이 가능하다[16]. 시뮬레이션을 위한 프로그램은 MATLAB 소프트

웨어로 작성하였다.

시뮬레이션에서 부하 조건은 오스테나이트계 SUS316으로 하였으며 시뮬레이션에 필요한 변수는 Table 1의 자료를 이용하였다. 이때 압전재료와 전면정합층 사이의 접합을 위한 에폭시의 두께와 음향임피던스 정합을 위한 커플런트 두께에 따라 초음파 탐촉자의 특성에 많은 영향을 미칠 수 있으므로 본 시뮬레이션에서는 각각의 두께를 1 μm 로 고정하여 시뮬레이션 하였다. 또한 압전재료의 전극 두께는 Au로서 수백 \AA 정도 이므로 전극두께의 영향은 무시하였다. 따라서 압전재료, 마모판, 접합을 위한 에폭시의 특성은 고정되어 있으므로 후면재의 음향임피던스를 바꾸어 가면서 초음파 탐촉자의 응답특성을 시뮬레이션 하였다.

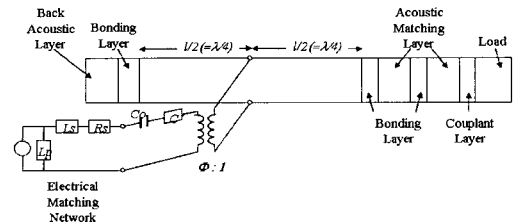


Fig. 3 Transmission line model of piezoelectric transducer in thickness vibration mode based on KLM model

4. 초음파 시험 장치

개발된 고감쇠 재료용 초음파 탐촉자의 특성을 측정하기 위하여 pulse-echo 법을 이용하였으며 실험 장치는 Fig. 4에서와 같은 초음파 측정장치를 구성하였다. 펄스/리시버는 Panametrics사(미국)의 5601A/T를 이용하였으며 수신되는 초음파 신호를 저장하고 분석하기 위하여 LeCroy사(미국)의 오실로스코프를 사용하였다. 고감쇠용 초음파 탐촉자의 중심주파수는 1 MHz 및 2.25 MHz 탐촉자(Fig. 5)이며 성능비교를 위하여 동일한 직경의 압전소자를 가지는 상용 탐촉자를 이용하였다. 상용 탐촉자로는 Panametric사(미국)의 1 MHz 초음파 탐촉자 (A 103R)와 Savelery사(미국)의 2.25 MHz(CMC- 0204)를 각각 이용하였으며 탐촉자의 압전소자는 PZT 압전세라믹스이다. 초음파 시험에 사용된 고감쇠 재료는 두산중공업(주)에서 제공한 두께와 폭이 각각 30 mm와 20 mm인 오스테나이트계 SUS316 시편을 이용하였으며 Fig. 6에서 보는 바와 같다.

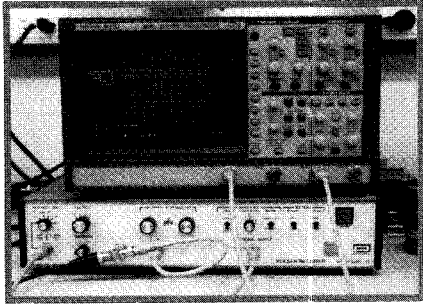


Fig. 4 Ultrasonic measurement system

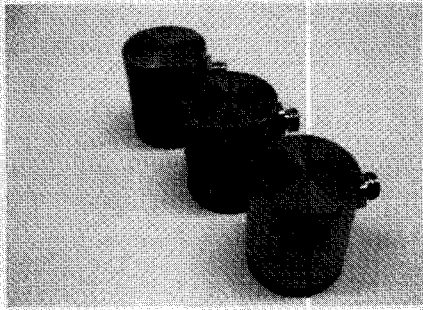


Fig. 5 Photo of fabricated ultrasonic transducers

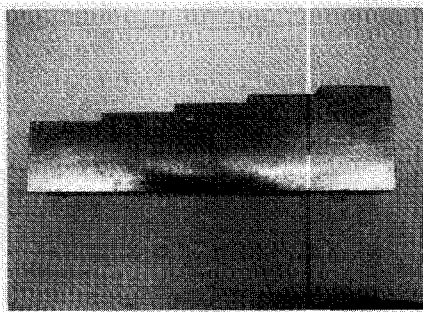


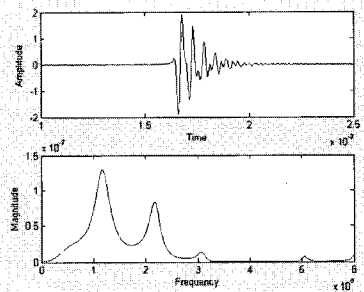
Fig. 6 Photo of test block for highly attenuative material (Austenitic SUS316)

5. 결과 및 고찰

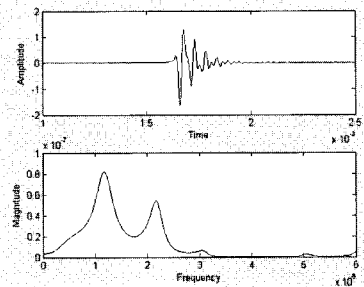
5.1. 후면재 제작조건에 따른 초음파 탐촉자 응답 신호 시뮬레이션

후면재의 음향임피던스는 Table 2에서 보는 바와 같이 에폭시와 텅스텐 입자의 배합비율을 다르게 하여 제작하여 미리 측정해 두었다. Table 2의 배합비율을 적용하여 초음파 탐촉자의 응답신호를 분석하였다. Fig. 7과 8은 중심주파수가 1 MHz 및 2.25 MHz의 PMN-PT 압전소자와 후면재, 마모판,

에폭시 접합 층으로 구성된 초음파 탐촉자와 SUS316 시험편, 초음파 탐촉자와 시험편의 접촉 매질인 커플런트층으로 구성된 시험결과를 각각 나타낸다. Fig. 7(a)는 에폭시와 텅스텐 입자의 배합비율이 1 : 4인 경우로서 이때의 측정된 음향임피던스는 6.1 MRayL이며 Fig. 7(b)는 에폭시와 텅스텐 입자의 배합비율이 1 : 6인 경우로서 음향임피던스는 8.5 MRayL을 각각 나타낸다. 음향임피던스가 6.1 MRayL에서 8.5 MRayL로 증가할 경우 초음파 응답신호의 크기는 약 3 dB 정도 감소하는 것으로 분석되었으며 Fig. 7(a)의 경우 피크 주파수와 중심 주파수는 약 1.2 MHz, 대역폭은 33.3% 정도로서 공진형 탐촉자의 특성을 나타내는 것으로 분석되었다. Fig. 8(a)는 에폭시와 텅스텐 입자의 배합비율이 1 : 4일 때의 결과이며 Fig. 8(b)는 1 : 6일 때의 결과를 각각 나타낸다. Fig. 7의 결과와 유사하게 음향임피던스가 증가할 경우 초음파 응답신호의 크기는 약 3.5 dB 정도 감소하는 것으로 분석되었다. Fig. 8(a)에서 피크 주파수는 2.15 MHz, 중심주파수는 1.95 MHz, 대역폭은 약 46.2%를 나타내었다.

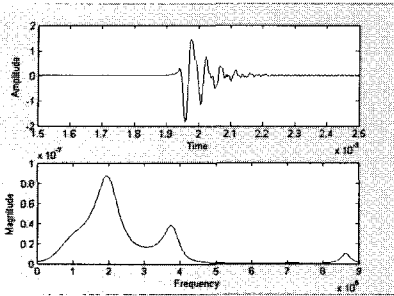


(a) epoxy: tungsten power = 1 : 4

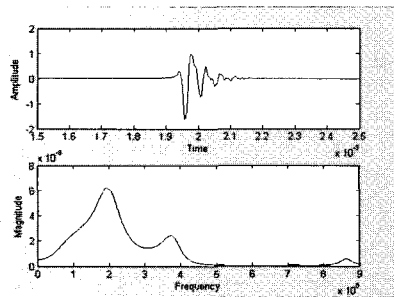


(b) epoxy: tungsten power = 1 : 6

Fig. 7 The simulation results obtained by KLM model for 1 MHz of normal beam ultrasonic transducers. (a) The ratio of epoxy to tungsten powder is 1 to 4 and (b) The ratio of epoxy to tungsten powder is 1 to 6



(a) epoxy: tungsten power = 1 : 4



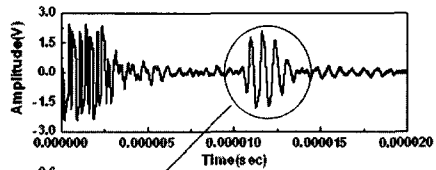
(b) epoxy: tungsten power = 1 : 6

Fig. 8 The simulation results obtained by KLM model for 2.25 MHz of normal beam ultrasonic transducers. (a) The ratio of epoxy to tungsten powder is 1 to 4 and (b) The ratio of epoxy to tungsten powder is 1 to 6

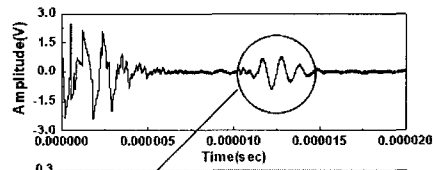
5.2. 최종 탐촉자 제작 및 상용 탐촉자와의 비교

이상의 시뮬레이션 결과를 근거로 하여 에폭시와 텅스텐 입자의 배합비율을 1 : 4로 하여 PMN-PT 초음파 탐촉자를 제작하였다. Fig. 9 및 10은 제작된 1 MHz 및 2.25 MHz 초음파 탐촉자를 고감도용 시편에 pulse-echo법을 적용하여 얻어지는 첫 번째 반사신호와 이 신호에 대한 주파수 분석 결과를 각각 나타낸다. Fig. 9에서, 본 연구에서 제작된 PMN-PT 초음파 탐촉자와 상용의 초음파 탐촉자에 대한 반사신호의 크기를 비교한 결과 상용 대비 약 9.54 dB 정도 신호가 크게 나타났으며 신호대 잡음비를 비교한 결과 본 연구에서 제작된 탐촉자는 17.48 dB, 상용 탐촉자는 15.85 dB를 각각 나타내었다. Fig. 10에서, 2.25 MHz 탐촉자의 경우도 마찬가지로 본 연구에서 제작된 탐촉자가 상용의 초음파 탐촉자보다 반사신호가 11.13 dB 정도 크게 나타났으며 신호대 잡음비는 본 연구에서 제작된 탐촉자는 25.21 dB, 상용 탐촉자는 15.66 dB를 나타

내었다. 한편 본 연구에서 제작된 탐촉자에서 1 MHz 탐촉자의 경우 중심주파수는 1.4 MHz, 대역폭은 39 %, 2.25 MHz 탐촉자의 경우 중심주파수는 2.5 MHz, 대역폭은 약 40%정도를 나타내어 시뮬레이션 결과와 그렇게 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 제작된 초음파 탐촉자는 전체적으로 메인방 신호의 불감대는 상용 초음파 탐촉자보다 다소 길게 나타났는데 이러한 이유로는 PMN-PT의 압전특성에 기인하는 것으로서 Table 1에서 보는 바와 같이 d_{33} 값이 PMN-PT가 PZT보다 약 4-5배 정도 크기 때문에 압전소자 자체의 내부진동에 의한 ringing이 지속되는 시간이 상대적으로 길기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 일정한 두께 이하의 시편, 즉, 시험편의 두께가 상대적으로 얇은 경우에는 첫 번째 반사신호가 메인방의 불감대 근처에서 나타나기 때문에 신호의 분석에 어려움이 있을 것으로 사료된다. 이러한 불감대를 줄이기 위해서는 음향임피던스가 큰 후면재를 적용해야 하나 이 경우 탐촉자의 감도가 저하될 수 있으므로 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.



(a) prototype transducer



(b) commercial transducer

Fig. 9 Comparison of first echo signals obtained by 1 MHz of (a) prototype and (b) commercial transducers

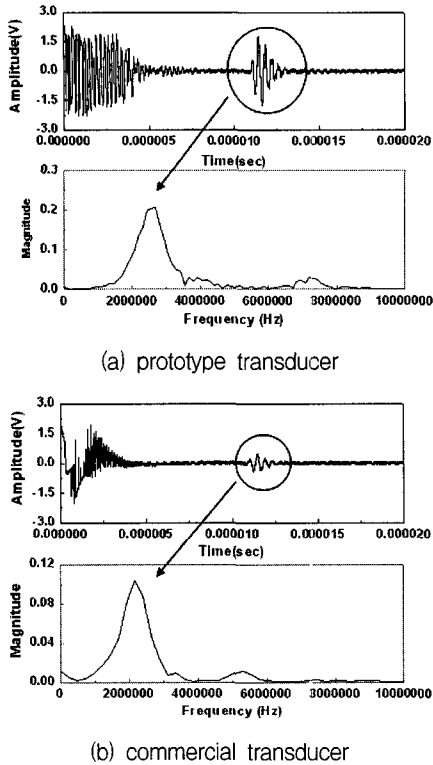


Fig. 10 Comparison of first echo signals obtained by 2.25 MHz of (a) prototype and (b) commercial transducers

6. 요약 및 결론

본 연구는 최근 새로운 압전 단결정으로 주목을 받고 있는 PMN-PT 압전소자를 이용하여 고감쇠 재료의 비파괴 검사에 적합한 초음파 탐촉자를 개발하기 위하여 수행되었다. 압전소자의 두께 공진 모드를 이용하여 중심주파수가 1 및 2.25 MHz인 종파용 초음파 탐촉자를 개발하여 현재 고감쇠 재료로 많이 사용되고 있는 오스테나이트계 SUS316 시험편을 대상으로 그 성능을 측정하였다. 동일한 압전소자 크기를 가지는 상용 초음파 탐촉자를 이용하여 개발된 탐촉자의 성능을 비교·분석하였다. 최적 초음파 탐촉자 제작 조건을 찾기 위하여 KLM 모델에 기반한 초음파 탐촉자 시뮬레이션 프로그램을 제작한 후 후면재 제작 조건을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 후면재의 음향임피던스가 약 6.1 MRayL 정도일 때 초음파 응답특성이 양호한 것으로 분석되었다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 PMN-PT 초음파 탐촉자를 제작하여 고감쇠 재료에

pulse-echo 법을 적용한 결과 1 MHz 탐촉자의 경우 반사신호의 크기가 상용대비 약 9.54 dB정도 크게 나타났으며 2.25 MHz 탐촉자의 경우 약 11.13 dB 정도 크게 나타나 상용 탐촉자보다 성능이 우수한 것으로 분석되었다. 그러나 메인방 신호에서 상대적으로 길게 나타나는 불감대를 줄이기 위한 연구뿐만 아니라 5 MHz 이상의 고감도 초음파 탐촉자 개발에 대한 연구도 수행되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

이 연구는 2006년도 전력산업연구개발 사업(R-2004-1-134)에 의한 연구비 지원에 의해 수행된 것으로서 이에 감사드립니다. 또한 고감쇠 재료인 SUS316 시험편을 지원해주신 두산중공업(주) 비파괴 검사부 유승우 회원님에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. Willems, "Characterization of creep damage by means of ultrasonic techniques," International Conference Life Assessment and Extension Proc. Sess. 2, pp. 8, (1987)
- [2] D. W. Fitting and L. Adler, "Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation," Plenum Press, New York, pp. 63-71, (1981)
- [3] 松原 重行, 横野 泰和, 今中 拓一, "超音波による材料劣化診断技術," 非破壊検査 第46卷 3号, pp. 185-187, (1997)
- [4] H. Jaffe, and D. A. Berlincourt, "Piezoelectric transducer materials," Proc. IEEE 53-10, pp. 1372-1386, (1965)
- [5] C. S. Desilets, J. D. Fraser and G. S. Kino, "The design of efficient broad-band piezoelectric transducers," IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics Vol. 25, No. 3, pp. 115-125, (1978)
- [6] G. Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers," IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, Vol. 13, pp. 20-30, (1966)
- [7] F. S. Foster and J. W. Hunt, "The design and characterization of short pulse ultrasound

- transducers," *Ultrasonics*, Vol. 16, pp. 116-122, (1978)
- [8] C. M. Sayers and C. M. Tait, "Ultrasonic properties of transducer backing," *Ultrasonics*, Vol. 24, pp. 57-60, (1984)
- [9] J. M. Thijssen, W. A. Verhoef, and M. J. Clootermans, "Optimization of ultrasonic transducers," *Ultrasonics*, Vol. 23, pp. 41-46, (1985)
- [10] J. Coutte, B. Dubus, J.-C. Debus, C. Granger, D and D. Jones, "Design, production and testing of PMN-PT electrostrictive transducers," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 883-888, (2002)
- [11] P. Marin-Franch, S. Cochran and K. Kirk, "Progress towards ultrasonud applications of new single crystal materials," *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, Vol. 15, No. 11, pp. 715-720, (2004)
- [12] E. J. Gottlieb, B. Lai, X. Xu, J. Cannata, J. Yen, Q. Zhou, P. Han and H. Ameri, T. Ratanapakorn, A. Barnes, M. Humayun, and K. K. Shung, "PMN-PT high frequency ultrasonic needle transducers for pulsed wave doppler in the eye," *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 2227-2230, (2005)
- [13] Y. Hosono and Y. Yamashita, "Piezoelectric ceramics and single crystals for ultrasonic medical transducers," *J. Electroceram*, Vol. 17, pp. 577-583, (2006)
- [14] S. H. Lee, S. S. Lee, Y. Roh, H.Y. Lee and J. H. Han, "Measurement of all the elastic, dielectric and piezoelectric properties of PMN-PT single crystals," *Journal of the Korean Institute of Electric and Electrical Material Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 31-38, (2004)
- [15] R. Krimholtz, D. Leedom and G. Matthaei, "New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers," *Electronics Letters* 6, 398-399 (1970)
- [16] Y. K. Ahn, "Study on the design and fabrication of piezoelectric ultrasonic transducers," M.S. Thesis, Yeungnam University, (2000)