

PVDF 및 P(VDF-TrFE)를 이용한 고주파수 수침용 초음파 탐촉자 개발 및 평가

Development and Characterization of High Frequency Ultrasonic Transducer Using PVDF and P(VDF-TrFE)

김기복*[†], 김병극***, 이승석*

Ki-Bok Kim*[†], Byoung-Geuk Kim*** and Seung-Seok Lee*

초 록 PVDF 및 P(VDF-TrFE) 고분자 압전박막을 이용하여 고주파수 수침용 초음파 탐촉자를 제작한 다음 그 특성을 비교·평가하였다. 탐촉자와 탐상기 사이의 신호전송용 동축케이블의 길이가 고주파수 초음파 검출장에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 초음파 빔의 초점이 형성되는 반사체가 편평할수록 고주파수 초음파 검출장은 감소하는 것으로 나타났으며 3mm 직경의 PVDF 탐촉자의 경우 0.5mm 강구에서 약 100MHz의 광대역 고주파수 초음파 검출장을 형성하였다. PVDF와 P(VDF-TrFE) 탐촉자를 비교한 결과 반사신호의 피크 값과 빔 폭은 P(VDF-TrFE)가 PVDF 보다 크게 나타났으나 고주파수 초음파 검출장은 PVDF가 P(VDF-TrFE)보다 광대역 특성을 나타내었다. 개발된 3mm 직경의 PVDF 탐촉자를 이용하여 표면의 깊이균열 크기가 30~100 μ m인 수소유기균열(HIC) 강재 시편을 C-scan한 결과 고감도의 분해능으로 미세 균열의 검출이 가능하였다.

주요용어: PVDF, P(VDF-TrFE), 고주파수 초음파 탐촉자, 고주파수 초음파 검출장

Abstract The high frequency ultrasonic transducers using polyvinyliden fluoride(PVDF) and polyvinylidene fluoride trifluoroethylene (P(VDF-TrFE)) were developed. The characteristics of fabricated high frequency ultrasonic transducer such as beam diameter, high frequency ultrasonic detection field and amplitude of the first pulse echo signal from the test target in the water were analyzed. The high frequency ultrasonic detection field was affected by the length of coaxial cable between high frequency transducer and ultrasonic pulser/receiver. As the size of the test target increased, the high frequency detection field decreased and the amplitude of a reflection signal increased. The peak amplitude of the first pulse echo signal of P(VDF-TrFE) transducer was higher than that of PVDF transducer. The high frequency ultrasonic detection field of PVDF transducer was wider than that of P(VDF-TrFE) transducer. With C-scan testing, the developed high frequency ultrasonic transducer could detect the 30 to 100 μ m of hydrogen induced crack of steel specimen by C-scan testing.

Keywords: PVDF, P(VDF-TrFE), high frequency ultrasonic transducer, high frequency ultrasonic detection field

1. 서 론

최근 금속재료 및 세라믹 내에 존재하는 미세 결함[1,2]

뿐만 아니라 고집적화 되고 있는 반도체 패키지 내에서 발생하는 delamination, crack 등과 같은 미세 결함에 대한 검출 요구가 증가하고 있으며 반도체의 두께가 1~2mm

로 점점 얇아지고 있는 추세를 감안하면 내부의 결합 크기는 더욱 작아질 것으로 사료된다. 따라서 고주파수/고감도 초음파 센서가 요구되고 있다. 또한 15MHz 이상의 초음파를 사용하는 의료용 초음파 영상진단 장비 등에는 기존의 세라믹 계열 압전재료의 한계인 감도, 영상의 재현성, 빔의 특성, 탐촉자 제작의 어려움 등으로 인하여 고분자 압전박막을 이용한 탐촉자가 사용된다[3].

일반적으로 대부분의 고분자 재료는 분극화되면 압전 특성을 나타내지만 실제 이용 가능한 압전재료로서는 PVDF(Polyvinylidene fluoride)가 대표적이며 이외에도 결정화도와 성능을 향상시키기 위하여 VDF(vinylidene fluoride)에 TrFE(vinylidene fluoride trifluoroethylene)를 공중합시킨 P(VDF-TrFE) copolymer가 사용된다[4]. 이러한 고분자 압전재료는 그 압전특성 뿐만 아니라 가볍고 유연성이 뛰어나며 인체와 같이 음향 임피던스가 낮은 매질에 적용할 때 압전체와 매질사이의 음향 임피던스를 보다 효과적으로 정합할 수 있기 때문에 음향 손실을 줄일 수 있으며 의료용 초음파 진단장비에 적용할 경우 그 해상도를 높일 수 있다는 장점이 있다.

상용 초음파 탐촉자에 많이 사용되고 있는 PZT 계열 압전재료는 전기기계결합계수 및 기계적 Q값과 같은 압전특성들이 고분자 압전박막 보다 양호하지만 고주파수의 초음파를 송수신하기 위해서는 압전재료의 두께가 매우 얇아지기 때문에 압전재료가 쉽게 파손될 수 있다. 또한 압전재료 자체의 높은 음향 임피던스로 인하여 감도가 저하되기 때문에 고주파수 초음파 탐촉자로서의 사용이 제한된다[5,6].

고감도/고주파수 초음파 탐촉자는 대부분 PVDF 또는 PVDF에 다른 복합재료들을 공중합시킨 copolymer를 이용하여 제작되고 있으며 이러한 고분자 압전재료는 Q값이 낮기 때문에 짧은 펄스의 송수신이 가능하여 수 MHz에서 100MHz 이상의 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있다. 반면, 전기기계결합계수가 일반 세라믹 계열의 압전재료 보다 상대적으로 낮아 초음파 송수신 효율은 세라믹 계열의 압전재료 보다 떨어지고 주파수가 높아지면 초음파의 지향성은 에리해지고 축상 분해능도 향상되지만 감쇠가 커지게 된다. 따라서 이러한 고분자 압전재료의 특성을 고려하여 최적의 탐촉자 제작에 관한 연구가 외국에서는 이미 활발하게 수행되고 있으며[3,4,7,8] 많은 제품들이 상용화되어 시판되고 있다.

고분자 압전재료는 앞으로 산업분야의 비파괴 검사뿐만 아니라 초음파 현미경을 비롯하여 의료용 진단 분야

까지 폭넓게 이용될 것으로 전망된다. 국내의 관련연구를 살펴보면, PVDF로 제작된 25MHz의 중심주파수를 가지는 수침형 집속축 초음파 탐촉자와 압전 세라믹(PZT-4) 탐촉자의 특성을 비교한 연구가 수행된 바 있다[9]. 또한 중심 주파수 80MHz, 초점 거리 25mm, 직경 5mm인 PVDF 수침용 초음파 탐촉자를 사용하여 고주파수 탐촉자의 검출장 형성 방법과 Cr-Ni 강에서의 결합 검출 성능에 대한 연구[1]가 수행되었으며 고주파수 PVDF 수침용 초음파 탐촉자를 이용하여 SiC 세라믹 내부의 미세 결함을 검출하기 위한 연구가 수행된 바 있다[2]. 그러나 지금까지의 연구는 기존의 상용화된 PVDF 초음파 탐촉자를 이용하여 탐촉자 자체의 특성이나 결합 검출 특성을 고찰한 연구가 대부분이며 탐촉자의 국내 개발뿐만 아니라 고분자 압전박막을 이용한 고주파수 초음파 탐촉자의 특성에 대한 자료는 없는 실정이다.

본 연구는 PVDF와 P(VDF-TrFE)를 이용하여 고주파수 수침용 집속형 초음파 탐촉자를 자체 개발·제작한 다음 펄스 에코 신호의 크기 및 주파수 특성을 분석하여 고주파수 초음파 검출장에 영향을 미치게 될 것으로 생각되는 케이블의 길이, 반사체의 크기의 영향들을 실험을 통해서 규명하였다. 또한 개발·제작된 고주파수 초음파 탐촉자와 C-scan 장비를 이용하여 수소유기균열(hydrogen induced crack)이 있는 강제 시편의 표면균열을 검출하였으며 PVDF와 P(VDF-TrFE) 탐촉자뿐만 아니라 상용화된 외국의 PVDF 초음파 탐촉자에 대하여 펄스 에코 응답특성을 서로 비교하였다.

2. 고주파수 수침형 초음파 센서 제작

본 연구에서 사용된 PVDF 및 P(VDF-TrFE)는 Measurement Specialities사(미국)에서 제작된 압전박막으로서 주요 특성은 Table 1에서 보는바와 같다[10]. P(VDF-TrFE)의 두께진동 전기기계결합계수가 0.25~0.29로서 PVDF보다 약 2배정도 큼을 알 수 있다. 본 연구에서의 고주파수 초음파 탐촉자는 고분자 압전박막의 두께를 9 μ m로 하여 두께진동모드의 초음파를 발생하도록 설계·제작하였으며 따라서 이론적인 초음파의 기본 공진 주파수는 PVDF가 122.2 MHz, P(VDF-TrFE)가 133.3MHz로 각각 계산되었다[11].

제작된 고주파수 초음파 탐촉자의 개요도는 Fig. 1에서 보는바와 같다. PVDF와 P(VDF-TrFE)의 직경(active element)은 각각 3mm로 하였으며 초음파를 집속할 수 있도록 적절한 초점거리가 각각 1264mm가 되도록 압전

Table 1 Typical properties of piezo films

Parameter	PVDF	P(VDF-TrFE)
Thickness(μm)	9	9
Piezo strain constant, d_{33} ($\text{m/m}/(\text{V/m})$)	-33	-38
Piezo stress constant, g_{33} ($\text{V/m}/(\text{N/m}^2)$)	-330	-542
Electromechanical coupling factor(k)	14%	25-29%
Mechanical quality factor, Q	10-13	25
Speed of sound(thickness)(10^3m/s)	2.2	2.4
Mass density(kg/m^3)	1780	1820
Nominal frequency(MHz)	122.2	133.3

박막을 음향렌즈 형태의 구면으로 설계·제작하였다. 고주파수 탐촉자 내에서 후방 산란되는 초음파를 효과적으로 감쇠 시키고 분산시키기 위하여 후면재(backing)을 제작하여 압전박막의 후면에 부착하였다. 또한 탐촉자 케이스와 후면재 사이를 전기적으로 절연하기 위하여 절연튜브를 사용하였다.

본 연구에서 PVDF와 P(VDF-TrFE)로 제작된 고주파수 수침용 초음파 탐촉자의 사양과 비교를 위하여 선정된 외국의 K사 탐촉자에 대한 사양은 Table 2에서 보는 바와 같다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1. 측정시스템 구성

본 연구에서의 고주파수 초음파 탐촉자 특성 측정시스템은 Fig. 2에서 보는바와 같다. 측정시스템은 개발된 각각의 고주파수 초음파 탐촉자와 pulser pre-amplifier module HIS1901, gated RF signal을 위한 module HIS1006, attenuator, filter module HIS1011을 포함한 주파수 대역폭이 1.5MHz에서 150MHz로 광대역인 Krautkramer 사(독일)의 HIS2 high frequency flaw detector, 디지털 오실로스코프(1GHz, LeCroy), PC, 수조로 구성하였다. 개발·제작된 고주파수 초음파 탐촉자의 초점거리와 빔폭의 정밀한 측정은 마이크로미터를 이용하여 10 μm 씩 3축 방향으로 탐촉자의 위치 조정이 가능하도록 하였다.

Table 2 Specification of the high frequency focused transducers with piezo film

Parameter	High frequency transducer		
	Prototype		Commercial Type
Piezoelectric Material	PVDF	P(VDF-TrFE)	PVDF
Nominal frequency(MHz)	122.2	133.3	80
Diameter of piezo film(mm)	3		5
Focal length(mm)	12.64		22.5
Connector type	Microdot		UHF

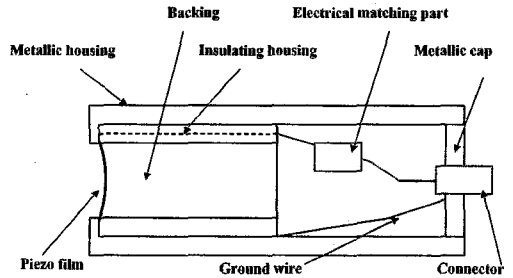


Fig. 1 Schematic diagram of the high frequency focused transducer with piezo film

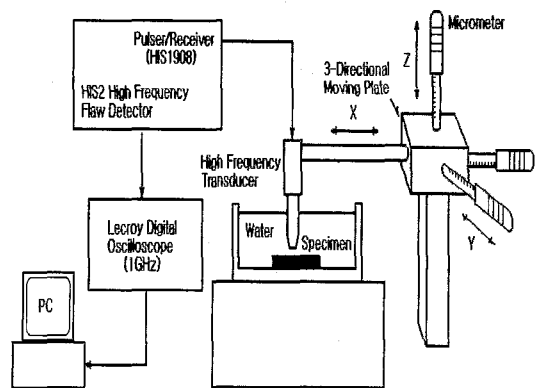


Fig. 2 Schematic diagram of the immersion type high frequency ultrasonic measurement system

고주파 신호의 전송을 위한 케이블은 고주파가 됨에 따라 표피효과(skin effect), 방사(radiation), 유전손실(dielectric loss) 등에 의해 전송손실이 발생한다[12]. 따라서 본 연구에서의 고주파 초음파 신호에 대한 RF 신호 전송을 위하여 고주파 전송특성이 우수하고 신호의 안정성이 뛰어나며 고주파의 초음파 탐촉자에 많이 사용되는 AWG 34 동축케이블(RG174)을 이용하였으며[13,14] 연결용 커넥터는 microdot 커넥터를 사용하였다. 동축케이블의 길이가 초음파 반사신호 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 케이블의 길이를 17.5cm, 88.7cm, 191cm의 3 종류로 변화시켜 가면서 펄스 에코 신호의 응답특성을 분석하였다.

3.2. 측정 시편

본 연구에서의 고주파수 초음파 탐촉자 특성 측정용 test target은 재질이 SUS 304로서 지름이 각각 1.5mm와 0.5mm인 강구 및 두께가 30mm인 steel block을 사용하여 펄스-에코 신호의 크기 및 주파수 특성, 초점에서의 빔폭 등을 분석하였다. 이때 초점에서의 빔폭 측정 및 분석방법은 참고문헌[9]를 참조하였다.

test target인 강구의 최소 크기는 본 연구에서 제작된 초음파 탐촉자의 주파수가 100MHz 이상이므로 ASTM에서 규정한 탐촉자 특성 측정법[15]에 의하면 강구의 직경이 약 0.4mm가 되어야 하지만 직경 0.4mm인 강구를 제작하기가 용이하지 않아 산업용 배어링으로 제작된 직경 0.5mm인 강구를 사용하였다.

개발·제작된 고주파수 수침용 집속형 초음파 탐촉자를 이용하여 실제 결함이 있는 시편을 대상으로 결함 검출성능을 평가하기 위하여 균열 길이가 30~100 μm 범위인 수소유기균열(HIC) 강재 시편에 대하여 SAM-2000((주)어코랩)을 이용하여 C-scan을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 케이블 길이에 따른 고주파수 초음파 검출장

제작된 고주파수 초음파 탐촉자의 특성 측정 실험에 앞서 초음파 센서와 탐상기 사이의 신호 전송용 동축 케이블의 길이가 test target에서 반사되는 초음파 신호의 크기 및 주파수 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 길이가 각각 17.5cm, 88.7cm, 191cm인 3 종류의 케이블

을 이용하여 측정하였으며 초음파 탐상기의 수신기 감쇠는 각각의 동축케이블에서 40dB로 동일하게 설정하였다. 마이크로미터를 이용하여 0.5mm 강구에 대하여 최대의 펄스 에코가 수신되도록 초음파 탐촉자의 위치를 조정하였다. 즉, 초점거리에서 획득된 반사 신호의 크기 및 주파수를 분석하였다. Fig. 3은 펄스-에코 신호를 나타낸 것으로서 피크 값은 케이블 길이에 무관하게 거의 비슷한 범위인 반면 케이블의 길이가 상대적으로 짧아질 경우 신호 파형이 예리한 단일 펄스 형태가 되는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 4에서 보는바와 같이 주파수를 분석한 결과 케이블 길이가 가장 짧은 17.5cm에서 약 100MHz까지의 고주파수 초음파 검출장이 형성되었다. 반면, 케이블 길이가 길어질수록 고주파수 초음파 검출장이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 고주파수 초음파 탐촉자를 이용한 초음파 탐상에서, 신호 전송용 동축케이블의 길이가 고주파수 초음파 검출장에 영향을 미치게 되므로 추후 관련 연구를 통하여 이러한 영향을 명확하게 규명해야 할 것으로 사료된다.

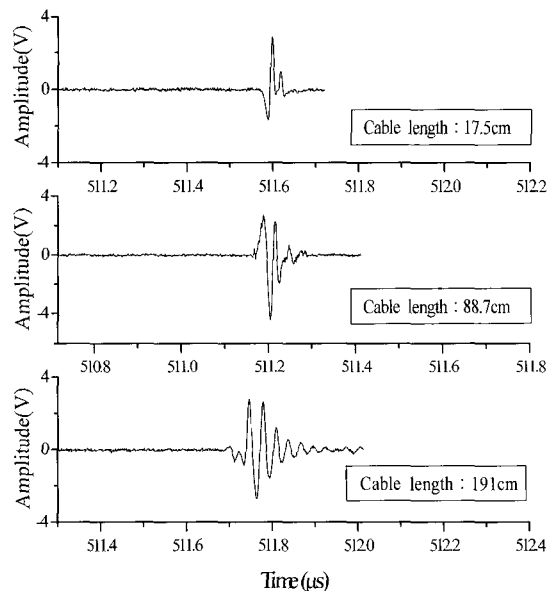


Fig. 3 Effect of cable length on the amplitude and shape of the first pulse echo signal at focal length with 3mm diameter of PVDF transducer. Test target is 0.5mm diameter of steel ball and receiver attenuation is 40dB

4.2. Test target에 따른 반사 신호특성

설계·제작된 3mm PVDF 초음파 센서를 이용하여 초점거리에서 test target의 종류에 따른 펄스 에코 신호의 크기와 주파수 특성을 비교한 결과 Fig. 5에서 보는바와 같다. 0.5mm 및 1.5mm 강구의 경우 탐상기의 수신기 감쇠를 40dB로 설정하여 측정하였으며 steel block의 경우 50dB로 설정하여 측정하였다. 반사체(test target)의 크기가 증가할수록 반사되는 초음파 신호의 피크 값은 증가하였는데 (Fig. 5(a)) 이러한 결과는 기존의 25MHz PVDF 수침용 집속형 초음파 탐촉자를 이용한 연구결과 [9]와 유사한 것으로 나타났다. 이러한 이유로는 집속형 탐촉자의 특성상 초음파 빔이 형성되는 반사체의 구면의 영향 즉, 초음파가 수직으로 입사할 때 반사체가 편평할수록 전반사되어 집중되는 신호가 많아지기 때문에 반사 신호의 크기가 상대적으로 높게 나타나게 된다. 반면 0.5mm 강구에서 형성된 100MHz 대역의 고주파수 초음파 검출장은 반사체의 크기가 증가함에 따라 점점 축소되어 steel block에서는 약 56MHz 정도로 감소되는 것으로 나타났는데 반사체의 반사면이 편평해짐에 따라 비교적 큰 신호의 저주파수 초음파가 증가하는 것으로 생각된다. 이러한 현상들은 P(VDF-TrFE) 탐촉자에서도 동일하게 나타났는데 추후 이러한 현상을 규명하기 위한 보완연구가 필요할 것으로 생각된다.

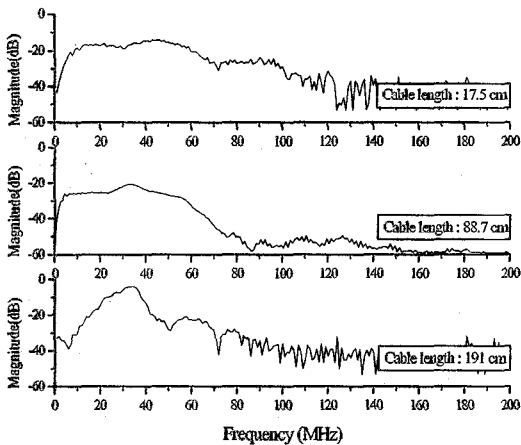
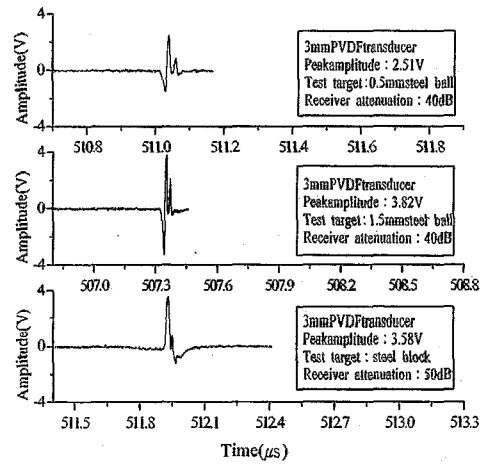


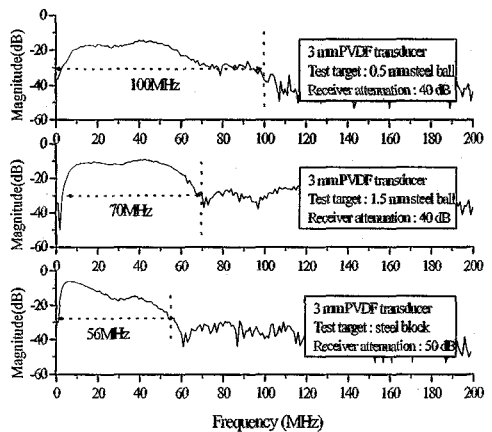
Fig. 4 Effect of cable length on high frequency ultrasonic detection field of the first pulse echo signal at focal length with 3mm diameter of PVDF transducer. Test target is 0.5mm diameter of steel ball and receiver attenuation is 40dB

4.3. PVDF와 P(VDF-TrFE) 탐촉자의 반사신호 특성 비교

0.5mm 직경의 강구에 대한 PVDF와 P(VDF-TrFE) 탐촉자의 펄스 에코 신호 특성을 비교한 결과 Fig. 6에서 보는바와 같다. 3mm 직경의 PVDF 탐촉자의 초점거리는 11.94mm, 3mm 직경의 P(VDF-TrFE) 탐촉자의 초점거리는 12.30mm로 각각 측정되었는데 이 값들은 Table 2에서의



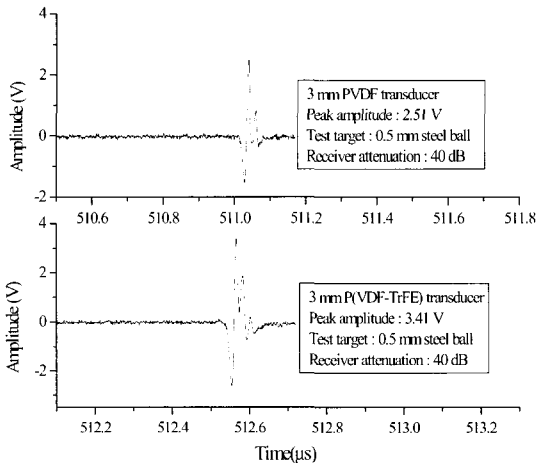
(a) First pulse echo signal



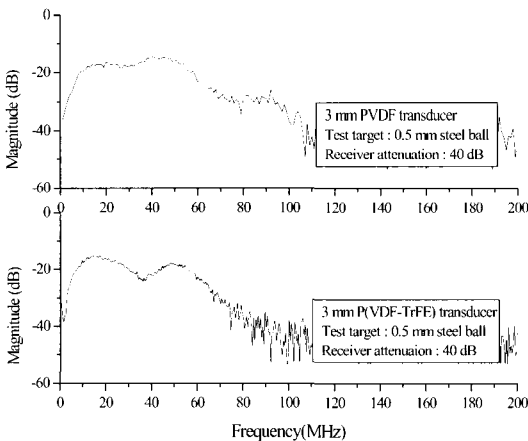
(b) High frequency ultrasonic detection field

Fig. 5 Effects of the test target size on the first echo signal at focal length with 3mm diameter of prototype PVDF transducer (a) first pulse echo signal (b) high frequency ultrasonic detection field.

이론적인 계산 값과 거의 비슷한 값을 나타내었다. 전반적으로 초점거리에서 반사신호의 크기는 P(VDF-TrFE) 탐촉자가 PVDF 탐촉자보다 약 2.7dB 정도 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Table 1에서 논의된 바와 같이 P(VDF-TrFE)의 전기기계결합계수가 PVDF 보다 약 2배 정도 높기 때문에 충분히 예상된 결과이다. 반면, 주파수특성은 PVDF의 경우 약 100MHz 정도의 광대역 고주파수



(a) First pulse echo signal



(b) High frequency ultrasonic detection field

Fig. 6 Comparison of the first echo signal between 3mm diameter of prototype PVDF and P(VDF-TrFE) transducers using 0.5mm diameter of steel ball in the water (a) peak amplitude and (b) high frequency ultrasonic detection field

초음파 검출장을 형성하였으나 P(VDF-TrFE)의 경우 약 65MHz로서 PVDF보다 고주파수 초음파 검출장의 대역폭이 좁게 나타나는 것으로 분석되었다.

한편, Fig. 7은 5mm 직경의 외국 K사 PVDF 탐촉자를 이용하여 0.5mm 강구에 대한 반사 신호를 측정하고 주파수 변환한 결과이다. 이때 탐상기의 수신기 감쇠를 25dB로 설정하였다. 왜냐하면 본 연구에서 제작된 다른 3mm 탐촉자의 측정조건과 동일한 40dB로 설정할 경우 시편에서 반사되는 신호가 거의 잡음수준 정도로 감쇠되어 나타나 신호분석이 용이하지 않았기 때문이다. 따라서 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 제작된 3mm 직경의 탐촉자의 결과와 비교해볼 때 외국 K사의 초음파 반사신호의 크기가 상대적으로 작을 뿐만 아니라 고주파수 검출장 대역폭도 약 50MHz정도로서 매우 좁게 나타났다.

4.4. PVDF와 P(VDF-TrFE) 탐촉자의 빔폭 비교

탐촉자의 빔폭은 초점거리에서 마이크로미터를 조정하여 탐촉자를 수평방향으로 이동시키면서 중심축 상에서 신호크기가 1/2이 되는 위치, 즉, 6dB 감소하는 위치를 빔폭으로 하여 측정하였다. Fig. 8은 측정된 탐촉자의 빔폭으로서 P(VDF-TrFE)의 경우 빔 직경이 0.216mm를 나타내어 PVDF의 0.152mm 보다 상대적으로 빔 폭이 큰 것으로 나타났다.

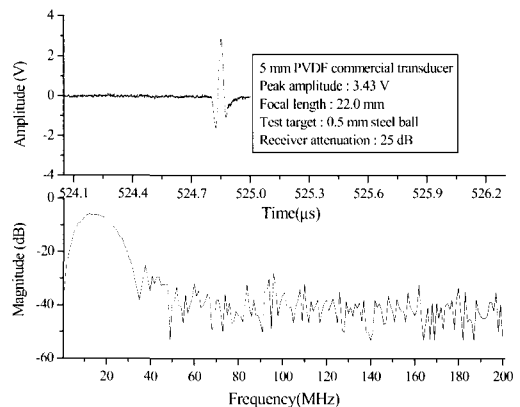
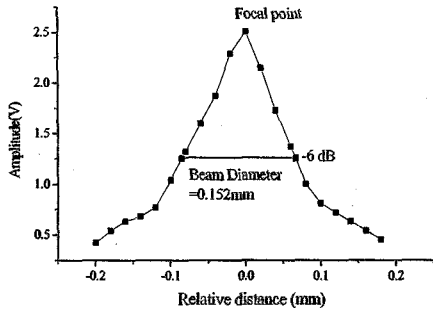
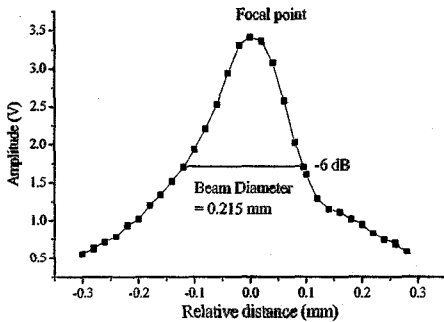


Fig. 7 Peak amplitude and high frequency ultrasonic detection field of a commercial type high frequency transducer with 5mm of diameter PVDF using 0.5mm diameter of steel ball



(a) 3 mm dia. of PVDF transducer



(b) 3 mm dia. of P(VDF-TrFE) transducer

Fig. 8 Comparison of beam diameter between the prototype PVDF and P(VDF-TrFE) transducers

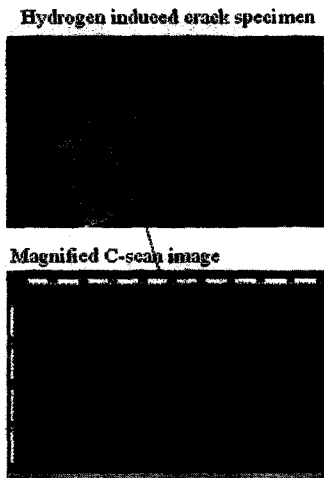


Fig. 9 Magnified C-scan image for hydrogen induced crack specimen having 30 to 100 μm of crack depth by 3mm diameter of PVDF transducer

4.5. 수소유기균열(HIC) 강제 시편에 대한 C-scan 결과

제작된 PVDF 탐촉자를 이용하여 표면의 결함깊이가 30~100 μm 범위인 수소유기균열이 있는 강제 시편에 대하여 4×10mm 크기로 C-scan한 결과 Fig. 9에서 보는바와 같다. 고감도의 분해능으로 미세 균열을 검출할 수 있는 것으로 나타났으며 본 연구에서 개발·제작된 고주파수 초음파 탐촉자의 결함 검출 성능이 매우 양호한 것으로 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 PVDF와 P(VDF-TrFE)를 이용하여 고주파수 수침용 초음파 탐촉자를 제작하여 각 탐촉자의 펄스-에코 응답 특성을 비교·분석하였으며 수소유기균열 강제 시편에 적용하여 미세 결함 검출 가능성을 검토하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고주파수 초음파 탐촉자의 경우 탐촉자와 탐상기 사이의 신호 전송용 동축케이블 길이가 길어질수록 고주파수 초음파 검출장이 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 미세 결함 탐상시 신호 전송용 케이블의 길이를 최대한 짧게 하여야 고주파수의 초음파 탐상이 할 것으로 분석되었다.
2. 초음파 빔의 초점이 형성되는 반사체의 면이 편평할수록 반사되는 신호의 크기는 증가하였으나 고주파수 초음파 검출장은 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발 제작된 3mm 직경의 PVDF 탐촉자의 0.5mm 강구에 대한 펄스 에코 신호를 주파수 분석한 결과 약 100 MHz의 광대역 고주파수 초음파 검출장을 형성하였다.
3. PVDF와 P(VDF-TrFE) 탐촉자의 반사 신호특성을 비교한 결과 동일한 탐상조건에서 반사신호의 크기와 빔 폭은 P(VDF-TrFE)가 PVDF보다 높게 나타났으나 고주파수 초음파 검출장은 PVDF가 P(VDF-TrFE)보다 광대역 특성을 나타내었다.
4. 개발 제작된 3mm 직경의 PVDF 탐촉자를 이용하여 표면의 깊이균열 크기가 30~100 μm인 수소유기균열이 있는 강제 시편을 C-scan한 결과 고감도의 분해능으로 미세균열을 검출할 수 있는 것으로 나타나 본 연구에서 개발 제작된 고주파수 초음파 탐촉자의 결함 검출 성능이 매우 양호한 것으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 김병극, 이승석, "PVDF 수침용 초음파 탐촉자의 검출장과 Cr-Ni 강에서의 결함검출능 측정", 비파괴검사학회지 Vol. 17, No. 1. pp. 23-30, (1997)
- [2] 김병극, 이승석, "고주파수 초음파 검출장에서 SiC 세라믹 내부의 미세결함 검출", 비파괴검사학회지 Vol. 17, No. 2. pp. 100-107, (1997)
- [3] F. S. Foster, K. A. Harasiewicz, and M. D. Sherar, "A History of Medical and Biological Imaging with Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47(6). pp. 1363-1371, (2000)
- [4] L. F. Brown, "Design Consideration for Piezoelectric Polymer Ultrasound Transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47(6). pp. 1377-1396, (2000)
- [5] M. J. Zipparo, K. K. Shung, and T. R. Shrout, "Piezoceramics for high frequency (20-100 MHz) single element imaging transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 44(5). pp. 1038-1048, (1997)
- [6] F. S. Foster, L. K. Ryan, and D. Turnbull, "Characterization of lead zirconate titanate ceramics for use in miniature high frequency (20-80 MHz) Transducers," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control., Vol. 38(5). pp. 446-453, (2000)
- [7] M. D. Sherar and F. S. T. Foster, "The design and fabrication of high frequency poly(vinylidene fluoride) transducers," Ultrason. Imag., Vol. 11, pp. 75-94, (1989)
- [8] F. S. Foster, C. J. Pavlin, G. R. Lockwood, L. K. Ryan, K. A. Harasiewicz, L. R. Berube, and A. M. Rauth, "Principles and applications of ultrasound backscatter microscopy," IEEE Transactions Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 40, pp. 608-617, (1993)
- [9] 한응교, 황석태, 이범성, 박준서, 小倉幸夫, "고분자 PVDF 진동자를 이용한 점집속초음파탐촉자의 특성," 비파괴검사학회지, Vol. 12, No. 2. pp. 7-13, (1992)
- [10] Measurement Specialities, Inc., "Piezo Film Sensors," Technical Manual, (2000)
- [11] J. KrautKramer, H. KrautKramer, "Ultrasonic testing of materials," New York, (1977)
- [12] 김정기, "고주파 마이크로파 측정", 도서출판 우신, pp. 21-24, (1994)
- [13] <http://www.korins.com/m/ndti/acces.htm>
- [14] <http://www.harbourkorea.co.kr/korean/hpf-1.htm>
- [15] ASTM, "Standard Guide for Evaluation of Characteristic of Ultrasonic Search Unit," Annual book of ASEM Standards E106-75, Section 3, Vol. 3-3. pp. 450-467, (1989)