

비파괴검사용 압전형 초음파 탐촉자

Piezoelectric Ultrasonic Transducer for NDT

김기복(학술제2분과(초음파)위원)
 E-mail: kimkibok@kriss.re.kr

1. 서론

초음파 탐촉자(ultrasonic transducers)는 초음파를 이용한 비파괴검사 기술의 핵심 부품이다. 비파괴시험에서 초음파 분야가 차지하는 비중은 매우 크며 이에 따라 초음파 탐촉자의 중요성도 매우 크다고 하겠다. 현재 국내에서도 초음파 비파괴시험용 탐촉자가 상용화되고 있으나 특수 환경에서 사용하기 위한 탐촉자나 높은 감도가 요구되는 탐촉자의 경우 대부분 외국에서 수입하고 있다.

시험 대상체의 형상이나 재질, 그리고 결함의 크기와 종류가 매우 다양해짐에 따라 기존의 범용 탐촉자로는 탐상이 곤란한 경우가 많다. 이러한 경우 각각의 탐상 환경에 적합한 초음파 탐촉자가 개발되어야 하며 필요에 따라서는 특수하게 제작이 되어야 할 경우도 있다. 초음파 탐촉자 제작 기술은 이론적 내용 보다는 많은 부분이 제작자의 노-하우에 좌우되는 경우가 많기 때문에 실제 제작의 어려움을 느끼는 경우가 많다. 본 기술 강좌에서는 현재 비파괴검사 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 압전형 초음파 탐촉자에 대한 내용으로서 탐촉자 제작시 고려해야 할 사항을 중심으로 기술하였다.

비파괴시험에 사용되는 초음파 탐촉자는 시험대상체 사이에서 초음파 전달매질의 유무에 따라 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수 있으며 접촉식 초음파 탐촉자는 초음파를 대상체면에 수직하게 입사하는 수직형과 썰기를 사용하여 특정 각도로 입사하게 하는 경사각용 변환기로 분류할 수 있다.

직접접촉용 탐촉자는 대상체의 한쪽 면에서 초음파를 송·수신하는 1탐형(pulse-echo형), 송·수신 탐촉자가 분리되어 있는 2탐형으로 구분된다. 2탐형 탐촉자는 초음파의 송신부와 수신부가 완전히 분리되어 사용되는 분리형과 한 몸체로 되어 있는 분할형으로 나눌 수 있다. 경사각 직접접촉용 초음파 탐촉자는 썰기가 고정되어 있는 고정각형과 썰기를 교체할 수 있게 하거나 유동성이 있게 한 가변각형으로 구분할 수 있다.

국부 수침용 초음파 탐촉자는 주로 강판 등의 자동화 검사시스템에서 이용되는데 초음파 탐촉자와 대상체 사이의 접촉매질로 물과 같이 얇은 층 등을 사용하여 초음파 탐촉자가 국부적으로 잠긴 상태로 사용된다. 수침용 초음파 탐촉자는 물을 초음파의 전달매질로 하여 초음파 탐촉자가 완전히 잠긴 상태로 사용되는데 초음파를 집속하는 집속형 초음파 탐촉자가 많이 이용된다. 직접접촉용의 경우 초음파 탐촉자에 가해지는 힘과 대상체의 표면 상태 등의 시험 조건에 따라서 시험 결과가 상당한 영향을 받게 되는데, 수침형 초음파 탐촉자는 상대적으로 적은 영향을 받아 더 정량적인 검사를 할 수 있다.

이들 접촉용 초음파 탐촉자는 사용되는 주파수 영역에 따라서 고주파수, 저주파수 초음파 탐촉자로 분류할 수 있으며, 주파수 대역폭에서 따라서 좁은 주파수 대역폭을 지닌 협대역형과 넓은 범위의 주파수 대역폭을 지닌 광대역형 초음파 탐촉자로 구분할 수 있다. 사용되는 온도 범위에 따라서 고온용, 저온용, 상온용으로 분류할 수 있다. 또 초음파를 집속하는 집속형과 집속하지 않

는 평면형으로 구분된다. 사용되는 초음파의 종류에 따라서 종파형, 횡파형, 표면파형으로 분류할 수 있다. 최근에는 여러 개의 압전소자들을 일렬 혹은 2차원으로 배열한 다음 개별 소자를 일정한 시간차로 구동하여 초음파를 발생시켜 초음파 빔을 집속하거나 조향한 다음 순차적으로 수신되는 신호를 재구성하여 영상화할 수 있는 위상배열 초음파 탐촉자도 비파괴검사에 활용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.

2. 압전형 초음파 탐촉자의 구조

2.1. 기본 구조

비파괴시험에 사용되는 압전형 초음파 탐촉자의 전형적인 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이 수직형, 경사각형, 분할형의 구조를 지니며 그 구조는 압전소자, 후면재, 마모판과 썸기 등으로 구성되며 거의 모든 압전형 초음파 탐촉자가 이러한 기본적인 구조를 가지고 있다. 압전형 초음파 탐촉자에서 압전소자 두께 t 와 공진주파수 f_n 의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$f_n = \frac{(2n-1)c}{2t} \tag{1}$$

여기서 n 은 자연수, c 는 압전소자에서의 초음파 속도를 나타낸다.

상기 식(1)로부터 두께 공진모드를 이용한 탐촉자를 제작할 경우 설계 공진주파수가 주어지면 이 설계 주파수가 첫 번째 조화공진주파수가 되며 ($n=1$) 이에 따라 첫 번째 공진 모드에 해당되

는 두께를 계산할 수 있다. 이때 압전소자에서의 초음파 속도는 압전소자 제작회사에서 제공하는 소자 특성자료로부터 얻거나 측정하여 얻을 수 있다. 여기서 주의해야 할 점은 원판형 압전소자의 경우 (다른 형태의 소자도 적용됨) 소자의 직경과 두께의 비에 따라 두께 공진모드 외에 횡방향 공진특성도 나타낼 수 있으며 그 경계는 압전소자의 특성(d , 및 g 값, 추후 설명)에 따라 다르지만 보통 소자 직경이 두께보다 충분히 크면 (약 10배 정도) 거의 무시될 수 있다.

후면재는 압전소자로부터 뒤로 진행되는 초음파를 산란 및 흡수하여, 발생하는 초음파의 폭을 줄여주는 역할을 하여 초음파 탐촉자의 주파수 대역폭과 밀접한 관계를 지닌다[1]. 높은 음향임피던스의 후면재는 신호의 시간축 상의 폭을 좁게 하며 축상 분해능이 높은 광대역 특성의 초음파 탐촉자에 사용된다. 반대로 음향임피던스가 낮을 경우 시간축 상의 펄스폭이 넓어져 축상 분해능이 낮은 공진형이 된다[2]. 후면재는 보통 일정한 크기의 금속 입자와 에폭시를 적당한 비율로 배합하여 사용하는데 그 배합 비율에 따라 신호의 크기와 대역폭을 조절할 수 있으며 제작 비용 및 방법은 주로 탐촉자 제작회사의 노하우로서 거의 공개되지 않는다.

수직형의 경우 마모판은 초음파의 효과적인 전달을 위하여 음향임피던스와 두께가 선택되며 압전소자를 보호할 목적으로 알루미늄과 같은 내마모성 소재가 많이 이용된다. 마모판은 투과되는 초음파 에너지를 최대로 할 수 있는 소재와 두께를 고려해야 하며 전면정합층이라고도 한다. 초음파 에너지를 최대로 하기 위해서는 식(2)와 같

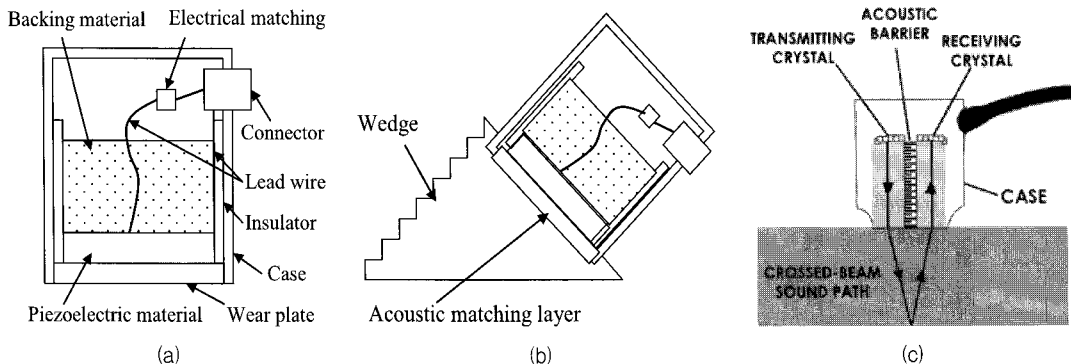


그림 1 압전형 초음파 탐촉자의 구조 (a) 수직형, (b) 경사각형, (c) 분할형

이 마모판의 음향임피던스(Z_2)가 압전소자(Z_1)와 시험체의 음향임피던스(Z_3)의 기하평균으로 주어진다. 이때 두께는 파장의 (1/4)배로 하면 투과계수가 최대가 된다[3].

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3} \quad (2)$$

식(2)는 전면정합층이 1개일 때에 적용될 수 있으며 전면정합층의 갯수가 2개 이상일 경우에 대해서도 적용할 수 있는 계산식도 여러 문헌에서 찾아볼 수 있다.

수침용이나 경사각형의 초음파 탐촉자의 경우는 전달매체가 물이나 플라스틱 소재이므로 압전소자보다 음향임피던스가 낮은 재료가 사용되고, 또한 수침용 탐촉자의 경우는 마모판을 곡면으로 하여 초음파가 집중되는 집속형 탐촉자를 제작할 수 있다.

경사각형 초음파 탐촉자의 쉘기는 플라스틱류의 소재를 각도에 맞게 가공하여 사용한다. 쉘기의 각도는 굴절되는 초음파의 각도와 관계는 스넬의 법칙에 의하여 결정되므로 이에 따라서 적절한 쉘기를 선택하거나 제작하여야 한다. 굴절각은 대상체에 따라서 달라지며 각도에 따라서 횡파와 종파가 대상체 안에 동시에 발생할 수 있으므로 유의해야 한다.

2.2. 압전재료

압전형 초음파 탐촉자의 경우 어떠한 압전재료를 선정하느냐에 따라 탐촉자의 성능에 큰 영향을 미친다. 결정성 고체는 원자의 격자배열이 3차원 상에서 32가지의 다른 형태로 존재할 수 있는데 이 중 20종이 대칭 중심의 결여에 의한 압전현상을 나타낸다. 역학적 응력에 의한 전하 또는 전장이 형성되는 현상을 압전현상이라 하며, 역으로 전장이 가해졌을 때에는 팽창 또는 수축 등의 변형이 일어나는 현상을 역압전효과라 하며 압전소자는 가역의 두 현상을 모두 지니는데 이를 통틀어서 압전현상이라 한다.

압전소자는 크게 단결정과 결정성 세라믹스로 분류된다. 단결정 압전소자에는 수정, 황옥(topaz), 로셀염, LiNbO_3 등이 있다. 현재 초음파의 송·수신효율이 높아 비파괴시험용 탐촉자에 보편적으로 쓰이고 있는 재료는 결정성 세라믹스로서 유전율이 단결정보다 100여배 정도 큰 강유

전성 소재가 많이 이용되고 있다. 여기에는 PZT 세라믹스 계열과 BaTiO_3 , PbNb_2O_6 등이 있으며 PVDF와 같은 압전폴리머와 PMN-PT 압전 단결정도 이용되고 있다.

압전소자에서 응력(T), 변형률(S), 변위전하밀도(D), 전기장(E)은 각각 다음과 같은 관계를 가진다[1].

$$D = eS + \epsilon^E E \quad (3)$$

$$T = c^E S - eE \quad (4)$$

여기서, e 는 변형률이 존재할 때 발생하는 분극 정도를 나타내는 압전상수이다. ϵ^E 는 변형률이 일정할 때의 유전율이며 c^E 는 전기장이 일정할 때의 강성도를 나타낸다. 압전재의 전기적 성질들(E, D)과 기계적 성질들(S, T)사이의 관계를 압전구성관계(piezoelectric constitutive relation)라 한다. 압전구성관계식은 독립변수를 선택하는 방법에 따라 4가지 종류의 식이 사용된다. 압전재료의 압전특성을 나타내는 대표적인 상수로서는 전기기계결합계수(k_t), 압전변형상수(d), 압전전압상수(g), 기계적 특성계수(Q_m) 등을 들 수 있다. 표 1에 대표적으로 많이 사용되는 PZT, PVDF, PMN-PT 단결정 소자에 대한 특성들을 나타내었다. 표 1에서 d_{33} 의 경우 두 번째 첨자는 압전소자의 z 축 방향의 분극($x=1, y=2, z=3$ 을 나타냄)을 나타내고 첫 번째 첨자는 압전소자의 변형방향(여기서는 3이므로 z 방향)을 나타낸다. k_{33} 과 g_{33} 도 동일한 의미이다. 전기기계결합계수는 역학적 에너지와 전기적 에너지 사이의 상호 변환효율을

표 1 각종 압전재료의 압전 특성

주요 특성	PZT-5A	PVDF	PMN-PT	
밀도 (kg/m ³)	7750	1780	8000	
유전율 (@ 1kHz)	2000	12-13	5500	
결합계수	k_{33}	0.71	-	0.92
	k_t	0.49	0.14	0.67
압전변형상수, d_{33} (pC/N)	374	-33	1780	
압전전압상수, g_{33} (10 ⁻³ Vm/n)	24.8	-330	35.0	
퀴리온도 (°C)	365	80	150	
종파속도 (m/s)	4350	2200	3600	
음향임피던스(MRayl)	33.7	3.9	28.8	

나타낸다. 압전변형상수가 크면 초음파 발생특성이 우수함을 나타내며 압전전압상수가 크면 초음파 수신특성이 우수하다는 것을 나타낸다. 기계적 특성계수가 큰 것은 협대역 주파수 특성, 즉, 초음파 변환기의 특성이 공진형 특성에 가깝다는 것을 나타낸다. 따라서 제작해야 될 탐촉자의 사용 용도(수신용, 송신용, 송수신용, 광대역, 협대역 등)에 따라 이들 특성 값들을 고려하여 선정해야 한다. 또한 고온 환경에 사용하기 위해서는 퀴리온도가 높은 소자를 선정해야 한다.

2.3. 전기정합회로

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 감소시키게 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 최대로 전달될 수 있도록 한다. 임피던스 정합회로를 제작하기 위해서는 먼저 압전소자의 정전용량(C_0)을 측정한 후 다음 식(5)의 관계를 이용하여 필요한 인덕턴스(L_0)를 결정할 수 있다.

$$L_0 = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_0} \tag{5}$$

3. 초음파 탐촉자 시뮬레이션

초음파 탐촉자의 최적 설계 값들을 찾기 위하여 실제로 제작하여 그 조건들을 찾는다는 것은 매우 많은 시간과 노력이 소요된다. 탐촉자 제작 회사의 경우 오랜 시간동안 많은 노-하우들이 축적되어 있어 여러 가지 유형별 조건에 맞는 최적 제작조건을 결정할 수 있지만 새로운 탐촉자를 개발할 경우에는 초음파 탐촉자 시뮬레이션을 통하여 여러 제작 조건에 따른 초음파 탐촉자의 특성을 분석할 필요가 있다. 이러한 시뮬레이션 모델들 중 가장 많이 사용되는 것이 KLM 모델이며 유한요소해석을 통한 설계 시뮬레이션도 많이 사용되고 있다. 박판형 압전소자의 전기-기계 결합 효과를 해석하기 위해 개발된 KLM 모델은 1970년에 Krimholz, Leedom 그리고 Matiae에 의해 제안된 등가회로이다[4]. 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 그림 2에서와 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[5].

KLM 모델과 전송선로 이론을 이용하여 전면 정합층, 후면재의 조건들을 바꾸어 가면서 초음

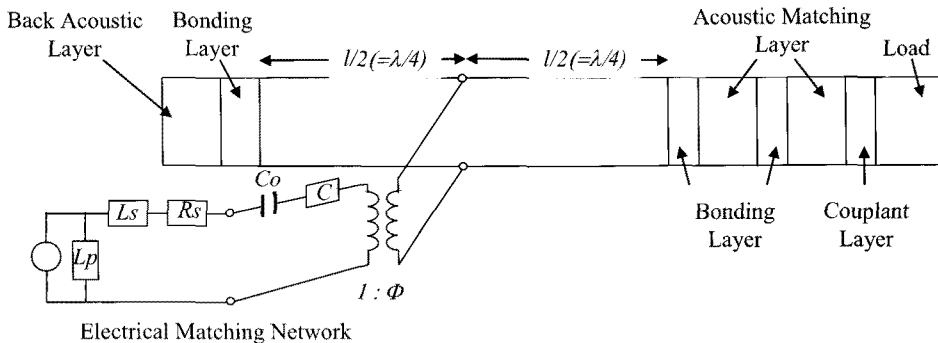


그림 2 KLM 모델과 전송선로를 이용한 초음파 탐촉자 구성

파 탐촉자의 응답신호를 분석할 수 있다. 상용 프로그램(PiezoCAD, Sonic Concepts사, 미국)도 개발되어 있기 때문에 굳이 해석용 프로그램을 작성하지 않더라도 비교적 손쉽게 여러 가지 제작 조건에 따른 탐촉자 특성들을 분석할 수 있다. 탐촉자 구조를 변경하거나 정합층을 증가시키는 경우와 같은 설계 변경이 필요할 경우에는 모델을 수정하여 해석을 위한 프로그램을 작성해야 하므로 이에 관해서는 추후에 기술강좌를 통하여 설명할 예정이다.

4. 초음파 탐촉자 특성인자

4.1. 초음파 탐촉자의 음장

정량적인 비파괴시험을 위해서는 탐촉자에서 발생된 초음파가 매질 내에서 어떻게 분포하고 있는가 하는 정보가 요구된다. 이러한 초음파 음장의 분포는 초음파 탐촉자의 크기 및 형상, 사용주파수에 따라서 달라진다. 그림 3과 같이 반경 a 인 원판이 어떤 특정한 주파수 ω 로 움직일 때의 음장의 분포에 대하여 고찰하기로 한다. 이 원판이 $U = U_0 \exp(j\omega t)$ 의 속도로 움직인다면 매질 내의 위치 (r, ψ) 에서의 음압 $p(r, \psi, t)$ 는 식(6)과 같이 주어진다[3].

$$p(r, \psi, t) = j \frac{\rho c U_0 k}{2\pi} \int \frac{e^{j(\omega t - kr')}}{r'} dS \quad (6)$$

여기서 적분 범위는 원판 전체로서 $\theta \leq a$ 이다. 여기서 주된 관심사는 r 및 ψ 에 따른 음압의 분

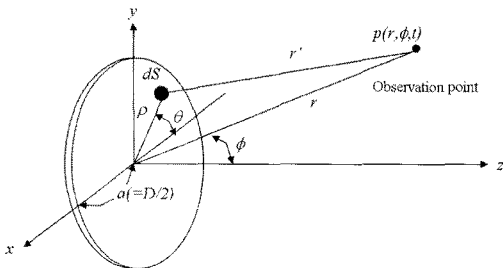


그림 3 피스톤에서의 음파 발생 특성 분석을 위한 좌표계

포로서 $\psi = 0$ 일 때 r 에 따른 p 의 변화와 $r \rightarrow \infty$ 일 때의 ψ 에 따른 p 의 변화이다.

z 축 상에서의 음압의 분포는 $p(r, 0, t)$ 로 다음과 같이 주어진다.

$$p(r, 0, t) = 2\rho_0 c U_0^{j\omega t_0} [e^{-jkr} - \exp(-jk\sqrt{r^2 + a^2})] \quad (7)$$

이 때, 음압의 진폭은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$p(r, 0) = 2\rho_0 c U_0 \left| \sin \left[\frac{1}{2} kr \sqrt{1 + (a/r)^2} - 1 \right] \right| \quad (8)$$

한편, $r/a \gg 1, r/a \gg ka$ 즉, 거리가 원판의 반경 및 파장에 비하여 매우 멀 경우(원거리 음장)에 다음과 같이 근사적으로 주어진다.

$$p_{ax(r)} = \frac{1}{2} \rho_0 c U_0 \frac{a}{r} ka \quad (9)$$

또한 거리 r 이 ∞ 에서 0으로 접근함에 따라 (근거리 음장) 음압은 간섭 효과에 의해 0과 $2\rho_0 c U_0$ 사이를 진동하는 신호를 나타내며 이 때 첫 번째 극값은 일반적으로 근거리 음장과 원거리 음장의 경계값으로 다음 식(10)과 같이 주어진다.

$$\frac{r_1}{a} = \frac{a}{\lambda} - \frac{1}{4} \frac{\lambda}{a} \quad (10)$$

여기서 $a = \lambda/2$ 이면 식(10)의 $r_1 = 0$ 이 되므로 이 경우에는 근거리 음장이 존재하지 않는다. 그러나 일반적으로 많이 사용되는 초음파 탐촉자의 경우는 $a \gg \lambda$ 이고 이 경우 근거리 음장과 원거리 음장의 경계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_1 = \frac{a^2}{\lambda} \quad (11)$$

탐촉자의 반경이 $a = 4\lambda$ 인 경우에 대한 음압, $p(z)$ 을 도시하면 그림 4와 같다. 이 경우 식(10)으로부터 $r_1 = 4a$ 로 주어지고 $r < 2a$ 영역에서는 거리 변화에 따라서 음장의 크기가 매우 빨리 바뀐다.

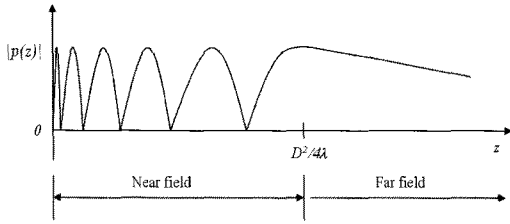


그림 4 반지름이 4λ인 원형 피스톤에서 발생하는 초음파의 축상 음압 특성

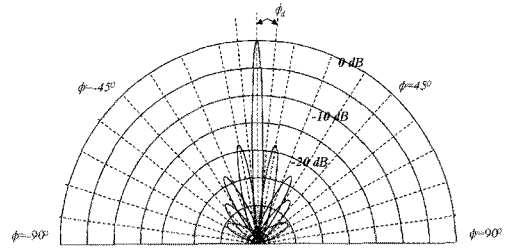


그림 5 ka=10인 원형 피스톤의 지향성

4.2. 초음파 탐촉자의 지향성

탐촉자의 또 다른 중요한 특성은 지향성인데, 원거리 음장($r \gg a$)에서의 음압은 식(12)와 같이 근사화 될 수 있다.

$$p(r, \psi, t) = j \frac{hr\rho_0c}{2} U_0 \frac{a}{r} ka e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{2J_1(ka \sin \psi)}{ka \sin \psi} \right] \tag{12}$$

여기서는 J 는 베셀 함수이다. 식(12)에서 각도 변수는 모두 괄호 안에 나타나 있고 이 항은 $\psi \rightarrow 0$ 에 따라서 1이 되므로 괄호 안의 항을 지향성을 나타내는 변수로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$H(\psi) = \left| \frac{2J_1(v)}{v} \right|, \quad v = ka \sin \psi \tag{13}$$

식(13)에서 j_{1m} 을 방정식 $J_1(j_{1m}) = 0$ 을 만족하는 근이라 하면, $ka \sin \psi_m = j_{1m}$ 을 만족하는 ψ_m 에서는 음장이 0이 됨을 알 수 있다. 한 예로서 $ka = 10$ 인 경우에 식(13)으로 주어지는 지향성 $H(\psi)$ 를 극좌표 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 변환기에서 발생하는 초음파 빔은 주 로브와 결 로브들로 구성되며 첫 번째 결 로브의 크기는 주 로브에 비하여 약 -18 dB로 매우 작음을 알 수 있다. 주 로브는 다음과 같이 제1베셀함수의 첫 번째 영이 되는 조건에서 얻어 질 수 있다.

$$J_1(\pm 3.83) = 0 \tag{14}$$

원형 디스크 형상의 초음파 변환기에서 주 로브의 퍼짐각(half-angle)은 다음과 같이 얻어질 수 있으며 탐촉자에서 발생하는 음장의 폭을 결정해주는 변수가 된다.

$$\psi_d = \sin^{-1} \left(\frac{3.83}{ka} \right) \tag{15}$$

5. 맺음말

압전형 초음파 탐촉자와 관련된 설계 이론이나 내용은 통상 초음파 관련 문헌이나 교재에서도 거의 간략하게 다루는 것이 대부분이며 그 내용도 기본개념 위주의 기술이 많다. 본 강좌를 통하여 기존의 교재나 문헌을 탈피하여 쉽게 구조와 개념들에 대하여 기술하고자 하였으나 저자의 능력이 부족하여 기존의 내용과 큰 차이가 없는 것 같아 학회 회원들께 죄송한 마음이 앞선다. 원고 작성 시작 때에는 의욕이 넘쳤으나 시간이 갈수록 기존의 교재나 문헌의 내용과 비슷하게 기술되어 감을 느낀다. 본문에서 기술한 바와 같이 탐촉자 제작은 실제 제작하면서 얻게 되는 경험이 매우 중요하며 제작상의 아주 작은 실수가 탐촉자의 성능에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 제작상의 아주 사소한 경험들을 논리적으로 설명하기에는 저자의 능력이 크게 부족함을 느낀다. 본문에서는 탐촉자 제작에 필요한 가장 기본적인 설계 인자들에 대해서만 기술했으나 실제 제작에서 마주치게 될 여러 가지 제작상의 기술적인 문제들인 압전재료의 상부 및 하부 전극 연결방법, 효율적인 에폭시 배합 및 접합방법, 노이즈 제거 방법, 주파수에 따른 적용 커넥터의 종류, 메인 방의 불감대 감소 방법, 다양한 성능 개선 방법 등과 같이 이론적으로 설명이 곤란한 부분들에 대한 설명이 부족하였다. 비록 처음 의도한 바대로 작성되지 못한 부분이 많았지만 이 강좌를 통하여 압전형 초음파 탐촉자에 대하여 학회 회원들이 좀 더 친숙해졌으며 하는 바람이다.

참고문헌

- [1] G. Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers," *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, 13, pp. 20-30 (1966)
- [2] C. S. Desilets, J. D. Fraser and G. S. Kino, "The design of efficient broad-band piezoelectric transducers," *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 25(3), pp. 115-125 (1978)
- [3] G. S. Kino, "Acoustic Waves-Devices, Imaging & Analog Signal Processing," Prentics-Hall, Englewood Cliffs, NewJersey (1987)
- [4] R. Krimholtz, D. Leedom and G. Matthaei, "New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers," *Electronics Letters* 6, pp. 398-399 (1970)
- [5] M. Castillo, P. Acevedo and E. Moreno, "KLM model for lossy piezoelectric transducers," *Ultrasonics* 41, pp. 671-679 (2003)