

# KLM 및 FEM 시뮬레이션을 이용한 비파괴검사용 선형배열 초음파 탐촉자의 설계 및 제작

## Design and Fabrication of Linear-Array Ultrasonic Transducer Using KLM and FEM Simulation for Non-Destructive Testing

박찬욱\*, 성진호\*, 정종섭\*†

Chan-Yuk Park\*, Jin-Ho Sung\* and Jong-Seob Jeong\*†

**초 록** 본 논문에서는 기존의 비파괴 초음파검사 시 사용되는 단일소자 탐촉자와 부채꼴 위상배열 탐촉자의 단점을 보완할 수 있는 선형배열 탐촉자를 설계 및 제작하였다. 선형배열 탐촉자는 KLM 해석 기반의 PiezoCAD 프로그램과 FEM 해석 기반의 PZFlex 프로그램을 사용하여 설계되었으며 고해상도를 위한 광대역 특성을 갖도록 압전소자 설계 시 2-2 복합체 구조를 도입하였다. 설계된 적층 구조를 바탕으로 128개 소자를 갖는 선형배열 탐촉자를 제작하고 시뮬레이션 결과와 성능 비교를 수행하였다. 제작된 선형배열 탐촉자는 5.5 MHz의 중심주파수를 가지며 -6 dB 에서 70%의 주파수 대역폭을 나타내어 초음파검사 시 검사체 내부의 효과적인 영상을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

**주요용어:** 초음파, 선형배열 초음파 탐촉자, 2-2복합체, KLM 시뮬레이션, FEM 시뮬레이션

**Abstract** In this paper, a linear-array transducer capable of overcoming the faults of a single element and phased array transducers with convex shape for non-destructive ultrasonic testing was designed and fabricated. A 5.5 MHz linear-array transducer was designed using the PiezoCAD program based on the KLM analysis and the PZFlex program based on the FEM analysis. A 2-2 composite structure was employed to achieve broad-band characteristics. A 128 element linear-array transducer was fabricated and its performance was compared with the simulation results. The center frequency of the fabricated transducer was 5.5 MHz and the -6 dB frequency bandwidth was 70 %. Thus, we expect that the designed transducer can provide an effective inner image of the test material during non-destructive ultrasonic testing.

**Keywords:** Linear Array Ultrasonic Transducer, 2-2 Composite, KLM Simulation, FEM Simulation

### 1. 서 론

비파괴검사는 검사체를 파괴하거나 변형시키지 않고 검사체 내부의 결함 유무를 판별하거나 열화를 평가하는 기술이다. 이러한 비파괴검사 방법 중 초음파를 이용하는 방법은 일반적으로 금속 및 콘크리트의 두께와 내부의 결함을 검출하는데 널리 이용되고 있다[1]. 초음파검사는 다른 비파괴검사 방법과 달리 높은 정확성을 가지기

때문에 검사 결과의 신뢰성이 높고 검사 결과를 실시간으로 확인이 가능하다는 장점을 가진다.

이러한 초음파검사를 위해 사용되는 초음파 탐촉자는 일반적으로 단일소자 탐촉자(single element transducer)와 위상배열 탐촉자(phased array transducer)가 많이 사용되고 있다. 단일소자 탐촉자는 하나의 소자로 구성되기 때문에 제작공정이 배열형 탐촉자보다 용이하여 초음파검사가 활성화된 이래로 현재까지 널리 이용되고 있다. 하지만 하

[Received: January 7, 2015, Revised: March 1, 2015, Accepted: March 26, 2015] \*동국대학교 의생명공학과,

†Corresponding Author: Department of Medical Biotechnology, Dongguk University Biomed Campus, 32, Dongguk-ro, Ilsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 440-820, Korea (E-mail: jjsspace@dongguk.edu )

© 2015, Korean Society for Nondestructive Testing

나의 소자를 이용하여 검사체 내부에 초음파를 송·수신함에 따라 하나의 주사선만을 형성하기 때문에 검사체 내부에서 반사되는 결함의 형상을 정밀하게 판단하기 어려우며 탐촉자 표면으로부터 초음파가 집속되는 거리가 고정되기 때문에 검사하고자 하는 두께에 따라 다양한 종류의 탐촉자를 필요로 한다. 또한 검사체의 면적이 넓은 경우 검사자의 불편을 초래하게 된다. 이러한 단일소자 탐촉자의 단점을 보완하기 위해 다수의 소자들로 구성된 위상배열 탐촉자가 개발되어 널리 이용되고 있다. 위상배열 탐촉자는 탐촉자를 구성하는 모든 개별 소자에 신호를 동시에 인가하며, 인가되는 신호를 시간지연(time delay) 시킴으로써 초음파가 집속되는 거리와 각도의 조절이 가능하다. 이러한 위상배열 탐촉자는 표면의 중심으로부터 부채꼴 형태의 영상을 구현하여 검사체 내부에서 초음파가 집속되는 깊이가 증가할수록 원거리영역에서 넓은 영상을 획득할 수 있다. 하지만 부채꼴 형태의 영상이 구현되기 때문에 탐촉자 표면에 위치한 근거리(near field) 음장 내에서는 영상의 폭이 좁아 효율적인 검사가 어려운 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 비파괴검사 분야 중 초음파검사에 사용되는 단일소자 탐촉자와 위상배열 탐촉자의 문제점을 개선할 수 있는 선형배열 탐촉자를 설계 및 제작하였다. 본 논문에서 설계한 선형배열 탐촉자는 위상배열 탐촉자처럼 다수의 소자들로 구성되어 있어 시간지연을 통한 초음파의 집속거리 조절이 가능할 뿐만 아니라 수신신호의 동적집속이 가능하다. 그러나 위상배열 탐촉자와는 달리 각각의 주사선들을 획득하기 위해 전체 소자들 중 일부의 소자들이 한 그룹(sub-aperture)으로 활성화되며 각 그룹 내에 존재하는 소자들의 시간지연을 통하여 초음파 빔이 집속되는 거리를 조절한다. 각도 조절없이 평평한 탐촉자 표면으로부터 수직으로만 개별 주사선들이 형성되기 때문에 직사각형 형태의 영상 구현이 가능하다. 이러한 선형배열 탐촉자의 특징은 부채꼴 형태의 영상을 구현하여 근거리 음장의 폭이 좁은 위상배열 탐촉자 대비 사각형 형태의 넓은 폭의 영상을 근거리에서부터 구현이 가능하며 이로 인하여, 탐촉자 표면에 위치한 근거리 음장에서도 검사체의 결함 유무를 효과적으로

확인할 수 있다는 장점을 갖는다[2].

이러한 비파괴검사용 선형배열 탐촉자를 설계하기 위해서 KLM(Krimholtz, Leedom and Matthaei) 해석 기반의 PiezoCAD(Sonic Concepts, WA, USA)와 FEM(finite element method) 해석 기반의 PZFlex(Weidlinger Associates, NY, USA)를 이용하였으며 이들 시뮬레이션 결과를 이용하여 배열소자의 적층구조를 도출하였다. 설계한 선형배열 탐촉자는 영상의 해상도를 향상시켜 검사체 내부의 결함 유무를 정확하게 진단할 수 있도록 광대역 특성을 갖도록 설계하였으며 이를 위해 압전물질과 폴리머(polymer)가 혼합되는 2-2복합체(composite) 구조로 설계하였다. 또한 5.5 MHz의 중심주파수를 갖도록 설계하여 검사체 내부의 미세한 결함 유무를 확인 가능하도록 하였으며 총 128개의 소자로 설계하여 넓은 면적의 검사체 진단 시 편의성을 향상시켰다. 설계한 적층구조를 바탕으로 선형배열 탐촉자를 제작하였으며 제작된 탐촉자의 성능 평가를 통해 시뮬레이션 결과와 비교를 실시하여 비파괴검사 분야에 적용 가능한지를 분석하였다.

## 2. KLM 및 FEM 시뮬레이션을 이용한 선형배열 탐촉자의 설계

본 논문에서는 5.5 MHz 2-2복합체 구조를 갖는 선형배열 탐촉자를 설계하기 위해서 KLM 및 FEM 시뮬레이션을 이용하였다. 이를 통해 2-2복합체의 구조를 확립하고 확립된 구조의 복합체가 가지는 특성 및 물성치를 도출하였다. 도출된 물성치는 KLM 시뮬레이션에 적용하여 FEM 시뮬레이션과 함께 정합층, 후면층 등을 포함하는 적층구조를 설계 및 제작하여 성능을 평가하였다.

### 2.1. 2-2복합체 압전소자의 설계

일반적인 벌크 형태의 압전소자는 약 30 MRayl의 높은 음향 임피던스를 갖는다. 이러한 높은 음향 임피던스는 물 등의 매질이 가지는 1.5 MRayl 정도의 음향 임피던스와 큰 차이를 가지기 때문에 압전소자에서 발생한 초음파가 매질과의 경계면에서 투과하지 못하고 반사되며 이는 초음파영상 화질의 저하를 유발한다. 따라서 압전소자가

가지는 음향 임피던스를 감소시켜 매질과의 음향 임피던스 차이를 최소화하고 동시에 전기기계 결합계수( $k_t$ ) 값을 향상시켜 탐촉자가 광대역 특성을 갖도록 압전소자에 일정한 방향으로 폴리머를 혼합하는 복합체 구조의 설계가 널리 이용되고 있다[3].

대표적으로 2-2 및 1-3복합체 구조가 널리 이용되고 있으며 본 논문에서는 제조공정에서 발생할 수 있는 소자의 손실을 최소화하기 위해 2-2 복합체 구조로 설계를 진행하였다. 2-2복합체 구조 설계 시 사용된 압전소자는 PMN-PT를 이용하였으며 폴리머로는 EPO-TEK 301(Epoxy Technology, MA, USA)를 사용하였다. PMN-PT의 경우 일반적으로 초음파 탐촉자에 널리 사용되는 PZT계열보다 높은  $k_t$ 와  $d_{33}$ (압전변형 상수값)을 가지기 때문에 보다 넓은 대역폭과 높은 감도를 가지는 탐촉자 제작에 용이하다.

배열형 탐촉자의 2-2복합체 구조 설계 시 생성되는 소자간 간격(kerf)은 크게 두 가지로 구분되는데 각 소자들의 간격을 구분하기 위한 다이싱 커프와 2-2복합체 구조를 위한 서브 다이싱 커프로 구분할 수 있다. 먼저 다이싱 커프의 폭과 압전소자의 폭을 포함하는 피치(pitch)는 선형배열 탐촉자의 그레이팅 로브(grating lobe) 발생을 최소화하기 위해 한 파장( $1\lambda$ )으로 설계하였다. 이러한 설계는 외형적으로 유사한 선형배열 탐촉자와 위상배열 탐촉자간의 가장 큰 차이점으로서 선형배열 탐촉자의 경우 그레이팅 로브의 영향을 최소화하기 위해 한 파장 이하로의 소자 설계가 필요하며, 위상배열 탐촉자의 경우 반(half) 파장 이하로 소자 설계가 필요하다. 다이싱 커프 및 서브다이싱 커프의 폭은 추후 탐촉자 제작 시 사용 가능한 블레이드 폭을 고려하여 25  $\mu\text{m}$ 로 설계하였다.

이러한 2-2복합체 구조 설계 시 배열형 탐촉자를 구성하는 각 소자의 특성과 물성치는 고정된 피치 내에서 압전소자와 혼합되는 폴리머의 폭에 따라 바뀌게 된다. 대표적으로 부피분율과 소자의 종횡비에 따라서 달라지는데 설계된 2-2복합체의 압전체가 가지는 부피분율의 경우 0.82로써 선행 연구 결과에서 권장하는 0.6-0.7보다 다소 높게 설계되었다. 이렇게 설계된 복합체의 부피분율을 바탕으로 식(1)-(4)에 기술한 식을 이용하여 설계된 2-2복합체의 물성치를 도출하였다 [4-6].

$$\bar{\rho} = v_c \rho_c + v_p \rho_p, \quad (1)$$

$$\bar{Z} = \sqrt{\bar{\rho} \cdot \bar{C}_{33}^p}, \quad (2)$$

$$\bar{v}_L = \sqrt{\frac{\bar{C}_{33}^p}{\bar{\rho}}}, \quad (3)$$

$$\bar{k}_t = \frac{\bar{e}_{33}}{\sqrt{\bar{C}_{33}^p \cdot \bar{\epsilon}_{33}^s}} \quad (4)$$

여기서  $\bar{\rho}$ 는 2-2 복합체의 밀도,  $v_c$ 는 압전체의 부피분율,  $\rho_c$ 는 압전체의 밀도,  $v_p$ 는 폴리머의 부피분율,  $\rho_p$ 는 폴리머의 밀도,  $\bar{Z}$ 는 2-2 복합체의 음향 임피던스,  $\bar{C}_{33}^p$ 는 2-2 복합체의 탄성 스티프니스,  $\bar{v}_L$ 는 2-2 복합체의 종파 속도,  $\bar{k}_t$ 는 2-2 복합체의 전기기계 결합 계수,  $\bar{\epsilon}_{33}^s$ 는 2-2 복합체의 유전율,  $\bar{e}_{33}$ 는 2-2 복합체의 압전상수를 의미한다.

Table 1 은 (1)-(4)의 식을 이용해서 도출된 2-2 복합체의 주요 물성치를 나타낸다. 식(1)-(4)에서 나타난 각 기호 상단의 바(bar)는 2-2복합체 구조를 의미하며 식(1)은 2-2복합체 구조에서 소자가 가지는 밀도를 계산하기 위한 공식으로써  $v$ 와  $\rho$ 는 각각 세라믹과 폴리머가 가지는 각각의 부피분율과 밀도를 의미하며, 아래첨자  $c$ 와  $p$ 는 각각 세라믹과 폴리머를 의미한다. 식(2)는 2-2복합체 구조에서 소자가 가지는 음향 임피던스를 계산하기 위한 공식으로써  $\bar{C}_{33}^p$ 는 2-2 복합체 구조에서 압전소자의 탄성 스티프니스를 의미한다. 식(3)은 앞서 도출된 밀도와 음향 임피던스를 이용하여 2-2복합체 구조에서 소자가 가지는 종파 속도를 계산하기 위한 공식을 의미한다. 식(4)는 2-2복합체 구조에서 소자가 가지는 전기-기계 결합계수를 계산하기 위한 공식으로써  $\bar{e}_{33}$ 와  $\bar{\epsilon}_{33}^s$ 는

Table 1 Material properties of 2-2 piezo-composite

Parameters	2-2 Piezo-composite
Volume fraction ratio	82 (%)
Density ( $\bar{\rho}$ )	6849 (kg/m <sup>3</sup> )
Longitudinal velocity ( $\bar{v}_L$ )	3483 (m/s)
Acoustic impedance ( $\bar{Z}$ )	23.8 (MRayl)

각각 2-2복합체 구조에서의 압전상수와 유전율을 의미한다. 식(1)-(4)를 이용하여 도출된 각 물성치는 5.5 MHz 중심주파수를 위한 2-2복합체의 두께를 선정하기 위해 KLM 시뮬레이션에 적용하였으며 FEM 시뮬레이션 결과와 비교를 실시하였다.

두 시뮬레이션 결과 5.5 MHz의 중심주파수를 위한 2-2복합체의 두께는 추후 정합층 등의 소자로 인하여 발생하는 주파수 저하 현상 등을 고려하여 240  $\mu\text{m}$ 로 선정하였다. 따라서 설계된 2-2 복합체를 이루는 소자의 중횡비는 0.48를 나타내며 이는 선행 연구 결과에서 보고되는 소자의 횡방향 공진으로 인한 모드 결합의 영향을 배제할 수 있는 0.5 이하로 설계하였다.

## 2.2. 적층구조 설계

설계된 2-2복합체 구조를 바탕으로 KLM 해석 기반 및 FEM 해석 기반의 시뮬레이션을 이용하여 탐촉자 적층구조를 확립하였다. 각 시뮬레이션은 배열형 탐촉자를 구성하는 한 개의 소자만을 설계하여 해당 소자에서 펄스-에코시뮬을 통해 발생하는 중심주파수 및 -6 dB 대역폭을 측정하여 성능 평가를 실시하였다. Fig. 1은 FEM 해석 기반을 이용하여 설계한 선형배열 탐촉자의 적층구조로서 2차원 구조로 설계하였으며 KLM 해석 기반 설계도 마찬가지로 동일한 적층구조로 설계하였다.

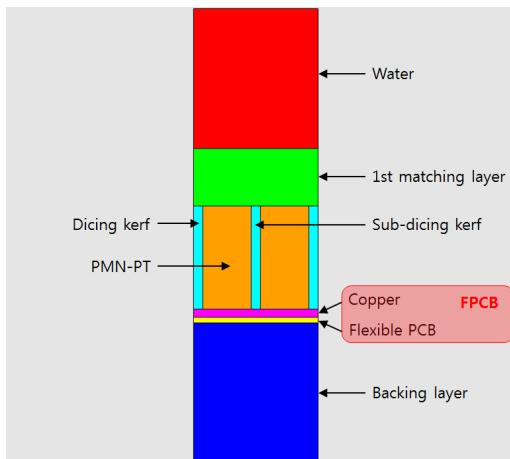


Fig. 1 Acoustic stack of 2-2 composite linear array transducer

Table 2 Material properties of matching layer and backing layer

	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Longitudinal velocity (m/s)	Acoustic impedance (MRayl)
Matching layer	3175	2066	6.56
Backing layer	5105	1865	9.52

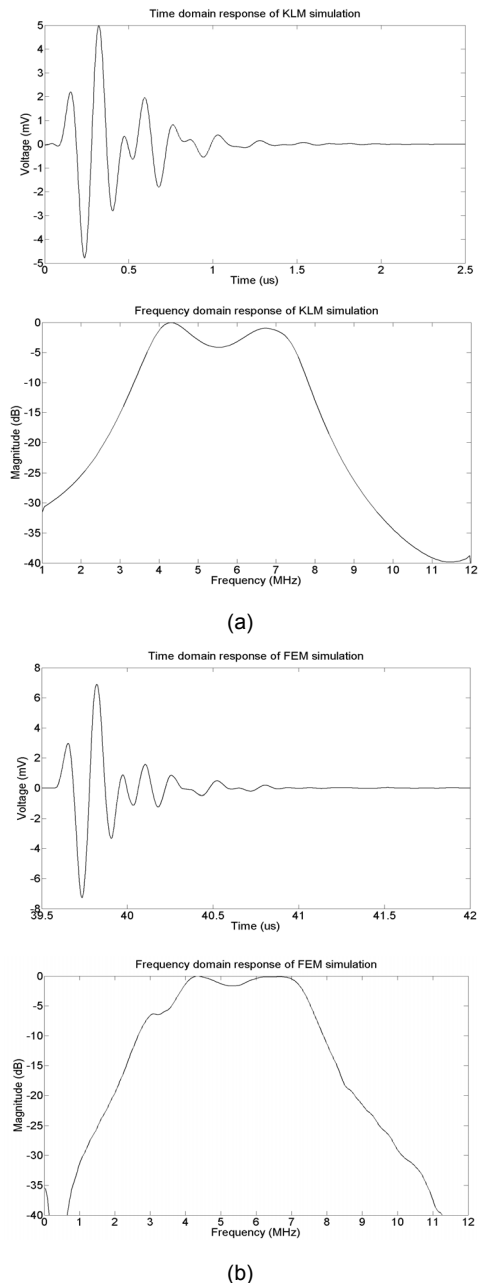


Fig. 2 Time/frequency domain pulse-echo response results of KLM (a) and FEM (b)

설계한 적층구조는 물, 2-2복합체, 단일 정합층, 후면층, FPCB(flexible PCB)를 포함한다. 압전 소자의 압전효과를 위해서는 소자의 양면에 전극 및 접지전극을 생성해야 하는데 일반적으로 배열형 탐촉자의 경우 소자의 한 면은 FPCB를 이용하여 소자별 전극을 인가하며 다른 한 면은 얇은 층의 GRS(ground sheet)를 이용하여 접지전극을 생성한다. 이 경우 GRS의 주재료는 구리로 형성되기 때문에 상당히 높은 음향 임피던스를 가지며 비록 두께가 얇더라도 탐촉자 전방으로 진행하는 초음파에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 설계에서는 GRS를 통한 접지전극 생성을 대체하기 위해 전기전도성을 가지는 정합층을 이용하여 접지전극을 생성하였다. 이러한 설계를 통해 GRS로 인한 초음파 신호의 반사 및 감쇠를 예방하는 동시에 2-2복합체와 매질간의 음향 임피던스 정합을 구현할 수 있도록 설계하였다.

설계에 사용된 정합층은 제조공정의 간소화를 위해 단일 정합층으로 설계하였으며 9.5 MRayl의 높은 음향 임피던스를 가지는 후면층을 사용하여 단일 정합층으로 인하여 저하될 수 있는 대역폭을 증가시킬 수 있도록 설계하였다. 설계된 정합층의 음향 임피던스는 낮은 음향 임피던스 값을 가지는 금속 등을 고려하여 7 MRayl로 설계하였으며 본 논문에서는 일반적인 물을 매질로 성능평가를 실시하였다. Table 2는 설계에 적용된 정합층 및 후면층에 대한 주요 물성치를 나타내며 Fig. 2는 KLM 및 FEM 시뮬레이션을 이용해 설계한 적층구조에서 펄스-에코시험을 통해 측정된 시간영역 신호와 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 이때 두 시뮬레이션 결과의 시간영역 비교 시 가로축의 시간이 서로 다르게 측정되었다. 이는, 탐촉자 표면에서부터 타켓까지의 거리 차이에 따라 발생하는 시간지연의 결과가 KLM 시뮬레이션에서는 결과적으로 반영되지 않기 때문이며 펄스-에코시험 과정에서 매질내에서 발생하는 초음파 신호의 감쇠 등은 FEM 시뮬레이션과 동일하게 적용되었다.

펄스-에코시험 시 소자에 인가되는 신호는 임펄스 신호를 이용하였으며 Table 3은 KLM 및 FEM 시뮬레이션을 이용해 측정된 중심주파수 및 -6 dB 대역폭을 나타낸다. KLM 및 FEM으로 계산된 중심주파수는 각각 5.5 MHz, 5.4 MHz로

Table 3 Results of KLM and FEM simulation

Method	Center frequency (MHz)	-6 dB bandwidth (%)
KLM	5.5	73.6
FEM	5.4	75.4

서 상당히 유사한 수치를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 -6 dB 대역폭의 경우 KLM은 73.6%, FEM은 75.4%로 측정되어 FEM 시뮬레이션 결과가 다소 높게 나타났다.

중심주파수 및 -6 dB 대역폭에서 얻어진 결과 외에도 두 시뮬레이션에서 나타난 시간축 파형과 주파수 스펙트럼의 패턴이 서로 유사한 양상을 보이는 것을 확인하였다. 대역폭에 있어서 두 시뮬레이션간의 다소 차이가 발생하였지만 두 방법 모두 본 연구에서 설계한 적층구조에 따른 중심주파수 및 대역폭이 목표로 했던 5.5 MHz와 광대역 특성을 갖는 약 70%를 나타냄으로써 초음파탐상검사에 효과적인 선형배열 탐촉자에 적합한 적층구조임을 확인하였다.

### 3. 선형배열 탐촉자의 제작 및 성능 평가

#### 3.1. 선형배열 탐촉자의 제작

설계한 시뮬레이션의 적층구조를 바탕으로 128 소자를 갖는 2-2복합체 구조의 5.5 MHz 선형배열 탐촉자를 제작하였다. 2-2복합체 구조의 제작을 위해  $50 \times 20 \times 1$ (mm)의 크기를 갖는 벌크 타입의 PMN-PT를 이용하였다. 2-2복합체 구조를 제작하는 방법으로 PMN-PT 표면에 정밀절삭기를 이용하여 생성된 커프에 폴리머를 삽입하는 dicing & filling 방법을 이용하였다.

이러한 방법으로 제작된 탐촉자는 일반적으로 두 가지로 구분할 수 있다. 먼저 FPCB 상에 복합체 등의 압전소자, 정합층 및 후면층의 모든 적층구조를 완성 후 절삭하여 폴리머를 삽입하는 방법과 적층구조를 형성하는 복합체 등의 압전소자 및 정합층을 개별적으로 절삭한 후 적층구조를 완성하는 것으로 구분할 수 있다. 전자의 경우 적층구조를 완성 후 절삭을 실시하기 때문에 제조공정에서 소모되는 시간을 절감할 수 있으며 복

합체와 정합층간의 커프를 서로 동일하게 형성할 수 있어서 소자간의 발생하는 cross-talk 등의 감소가 가능한 제조공정이 될 수 있다. 하지만 절삭을 위해 삽입되는 블레이드가 FPCB 표면 혹은 후면층 표면까지 정확한 깊이의 절삭을 필요로 하고 탐촉자의 주파수가 증가할수록 복합체 및 정합층의 두께가 감소되어 절삭과정에서 복합체와 정합층이 동시에 손상이 발생할 수 있다. 후자의 경우 복합체 및 정합층의 커프 형성 시 개별적으로 절삭을 실시하기 때문에 소자의 손상을 최소화할 수 있으며 FPCB 및 후면층의 손상 또한 예방할 수 있다. 따라서 본 제작에서는 후자의 방식을 택하여 2-2복합체 형성 후 FPCB 및 정합층 등의 소자를 접착하여 제작을 실시하였다. PMN-PT에 다이싱 커프 및 서브 다이싱 커프를 형성하기 위해서 정밀절삭기(DAS342, Disco, Japan)를 이용하여 25  $\mu\text{m}$ 의 폭으로 커프를 생성하였다.

생성된 커프 내에 EPO-TEK 301을 삽입하여 24시간 동안 경화시켰으며 경화 후 시뮬레이션을 이용하여 도출된 두께로 랩핑(lapping)을 실시하였다. 2-2복합체의 평균 두께는 220  $\mu\text{m}$ 가 되도록 제작하였으며 복합체의 전극 및 접지전극을 생성하기 위해 크롬(chrome) 및 금(gold)을 각각 500/2000  $\text{\AA}$  두께로 스퍼터 작업을 실시하여 최종적으로 2-2복합체의 제작을 완료하였다. 제작된 2-2복합체는 각 소자별 신호 인가를 위해서 FPCB에 생성된 신호선과 일치하도록 접착하였으며 후면층 및 정합층을 접착하여 128 소자로 구성된 5.5 MHz 2-2복합체 구조의 선형배열 탐촉자의 제작을 완료하였다. Fig. 3은 최종적으로 제작된 선형배열 탐촉자를 나타낸다.

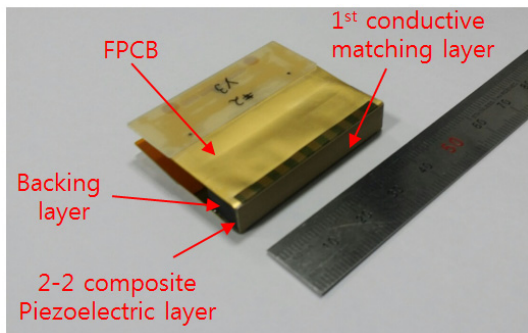
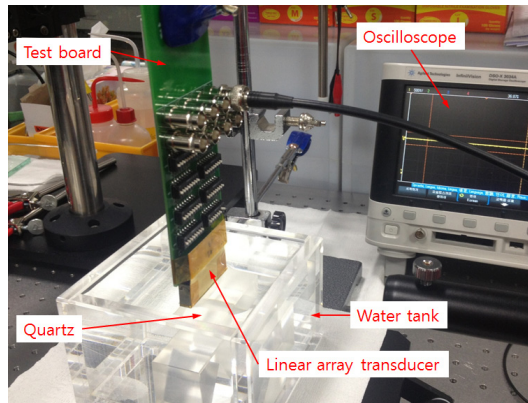


Fig. 3 Photograph of the fabricated linear array transducer

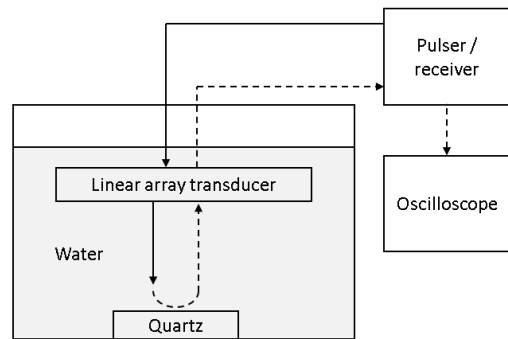
### 3.2. 선형배열 탐촉자의 성능 평가

제작된 선형배열 탐촉자는 초음파검사 방법과 동일한 펄스-에코시험을 통해 성능을 평가하였으며 탐촉자를 구성하는 각 소자들의 개별적인 펄스-에코시험을 통해 성능 평가를 실시하였다. 성능 평가 항목은 시뮬레이션과 동일한 중심주파수 및 -6 dB 대역폭의 측정값을 바탕으로 평가를 실시하였다. 펄스-에코시험을 위해 물을 매질로 사용하였으며 수조 내에 수정(quartz)을 타겟으로 놓고 탐촉자 표면에서부터 타겟까지의 거리를 3 cm로 설정하였다.

각 소자에 신호를 인가하고 타겟으로부터 되돌아오는 초음파 신호를 수신하기 위해 Pulser/receiver (5073PR, Olympus, Japan)를 이용하였으며 수신된 신호를 분석하기 위해서 오실로스코프(DSO-X 3034, Agilent, CA, USA)를 이용하였다. Fig. 4의 (a)는 펄스-에코시험을 위한 실험 환경을 나타내



(a)



(b)

Fig. 4 Experimental setup for pulse-echo measurement: photograph (a) and its block diagram (b)

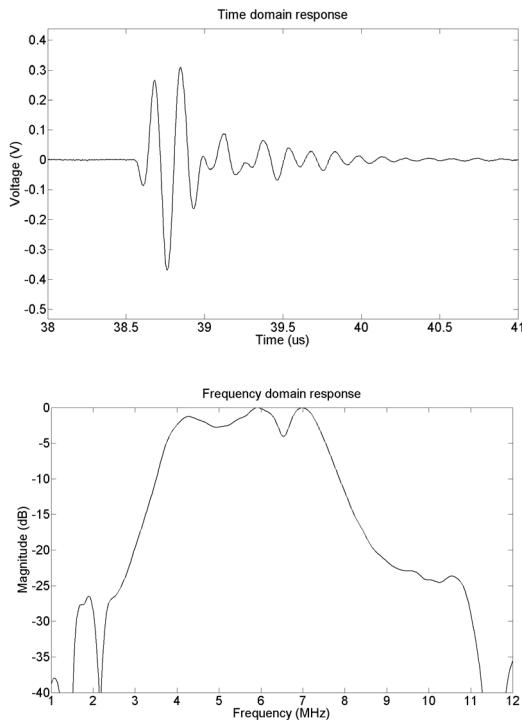


Fig. 5 Time/frequency domain pulse-echo response results of the fabricated linear array ultrasonic transducer

며 (b)는 시험을 위한 시스템의 블록선도를 나타낸다. 펄스-에코 측정 결과 평균적으로 각 소자들은 5.5 MHz의 중심주파수 및 -6 dB 에서 70%의 대역폭을 나타내었다. Fig. 5는 제작된 2-2복합체 선형배열 탐촉자를 이용한 펄스-에코시험 결과를 나타낸다.

#### 4. 고찰 및 결론

본 논문에서는 기존의 초음파검사에서 이용되는 단일소자 탐촉자와 위상배열 탐촉자의 단점을 보완할 수 있는 2-2복합체 구조의 선형배열 탐촉자를 설계 및 제작하였다. 제작된 탐촉자는 총 128소자로 구성되며 5.5 MHz의 중심주파수를 갖도록 제작하여 성능 평가를 실시하였다. 전반적으로 제작한 탐촉자는 KLM 및 FEM 시뮬레이션과 유사한 측정 결과를 얻었으며, 대역폭의 경우 FEM 시뮬레이션 결과와의 차이가 KLM에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 1D 분

석을 기반으로 한 KLM, 2D 분석을 기반으로 한 FEM 분석 알고리즘의 기본적인 차이와 더불어 FEM 설계 시 적층구조를 형성하는 물질들의 물성치 중 일부가 실제 제작한 소자와 차이가 있기 때문으로 판단된다. 그러나 중심주파수와 신호의 파형 등은 시작품과 매우 유사하게 측정됨에 따라 추후 FEM을 이용하여 더욱 정확한 탐촉자 설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한 제작된 탐촉자는 단일 정합층 구조로 설계되었음에도 불구하고 -6 dB 에서 70%의 높은 대역폭을 가졌으며, 이는 상대적으로 높은 후면층의 음향 임피던스 영향인 것으로 판단된다. 이처럼 제작된 탐촉자는 5.5 MHz의 중심주파수 및 광대역 특성을 가짐으로써 검사체 내부의 미세한 결함을 검출하는 것이 가능할 것으로 기대된다. 추후에는 제작된 선형배열 탐촉자를 이용한 영상 실험을 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업핵심기술개발사업의 일환으로 (과제번호 MOTIE/KEIT 10048528, 현장·진단응급현장 시정선도를 위한 ICT기반무선 초음파 솔루션 개발), 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT융합고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2015-H8601-15-1004).

#### 참고문헌

- [1] D. M. McCann and M. C. Forde, "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures," *NDT&E International*, Vol. 34, No. 2, pp. 71-84 (2001)
- [2] R. S. C. Cobbold, "Foundations of Biomedical Ultrasound," New York, USA, pp. 460-491 (2007)
- [3] K. C. Cheng, H. L. W. Chan, C. L. Choy, Q. Yin, H. Luo and Z. Yin, "Single crystal PMN-0.33PT/epoxy 1-3 composites for ultrasonic transducer applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 50, No. 9, PP. 1177-1183 (2003)
- [4] J. H. Cha and J. H. Chang, "Development of 15 MHz 2-2 piezo-composite ultrasound linear

- array transducers for ophthalmic imaging," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 217, pp. 39-48 (2014)
- [5] W. A. Smith and B. A. Auld, "Modeling 1-3 composite piezoelectrics: thickness-mode oscillations," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 38, No. 1, pp. 40-47 (1991)
- [6] T. A. Ritter, T. R. Shrout, R. Tutwiler and K. K. Shung, "A 30-MHz piezo-composite ultrasound array for medical imaging applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 49, No. 2, pp. 217-230 (2002)