

# 과도탄성파에 대한 PZT 변환자의 응답특성 해석

배 중성, 김 우성, 김 무준, 하 강열, 이 중규  
부경대학교 물리학과

## Analysis of the PZT trasducer's response for the transient elastic waves

J. S. Bae, W. S. Kim, M. J. Kim, K. L. Ha and Jong-Kyu Lee  
Dept. of Physics, Pukyong National University

### 요 약

공기경계층을 갖는 유리평판에서 힘의 크기가 10N 이고 상승시간이 약 280 ns 인 경사 접하중이 인가된 경우에 대하여 진앙점에서 입자 변위와 입자 속도를 계산하였다. 이론적으로 계산된 수직성분의 입자속도가 PZT 변환자에 입사한다고 가정하여 PZT 변환자의 과도 응답특성을 Mason 등가회로와 격자점을 이용하여 계산하였다. 유리모세관의 파파시에 방출되는 과도탄성파를 이용하여 유리평판의 진앙점에서 PZT 변환기의 응답을 조사하였고, 이론과 비교한 결과 상당히 일치하였다. 이를 이용하여 음향방출 시스템인 음향방출 발생원, 전파매질, 변환자 및 신호분석시스템을 수학적으로 모형화할 수 있는 기초를 마련하였다.

### 1. 서 론

음향방출(Acoustic Emission, AE)은 고체매질의 내부 및 표면에서 여러가지의 요인에 의하여 국부적인 응력장의 급격한 변화에 의하여 방출되는 탄성파를 말하고 있다. 이러한 음향방출은 기본적으로 (1)음향방출 발생원, (2) 전파매질, (3) 변환자 및 (4)신호분석시스템이란 4 개의 영역으로 나눌 수 있다. 먼저, 음향방출 발생원은 균열의 발생 및 전파, 전이의 이동, 마텐사이트 상 변화시 마텐사이트상의 생성 및 소멸, 강자성체의 자화시 자화구역의 생성 및 소멸 등이 있고, 이러한 음향방출 발생원에 의해서 국부적인 응력장의 변화가 일어나면 탄성파가 방출되어 전파매질로 전파하게 된다. 이렇게 전파한 탄성파가 변환기에서 전기적인 신호로

변환되어 신호분석시스템에서 음향방출 신호의 분석이 이루어진다. 이렇게 얻어진 신호분석의 결과를 이용하여 음향방출 발생원의 여러 가지 특성을 파악하게 된다. 그러나 검출된 음향방출 신호는 전파매질, 변환자 및 신호분석시스템에 의해서 음향방출 신호가 왜곡되므로, 실제로 음향방출 발생원의 특성을 파악하는 데는 많은 어려움이 따르고 있다.

Breckenridge et al [1]은 큰 불록의 표면에서 유리모세관의 파파시에 일어나는 표면변위가 탄성반공간의 내부 혹은 표면에 위치한 정발생원에 의해서 반공간의 표면까지 탄성파 전파를 다룬 고전적인 Lamb 의 문제와 유사성을 발견하면서 이론적 모형의 시발점이 이루어졌다. Knopoff[2]와 Pao et al[3]은 평판에서 이론적으로 탄성파의 전파에 관한 문제를 해결하였다. 그러나, 이리

한 음향방출 신호를 정량적으로 해석하기 위하여 많은 노력을 기울여 왔으나, 변환자의 물리량, 시편의 기하학적인 형상 및 수치해석상의 오차문제 등의 많은 문제로 인하여 실제의 음향방출과 완전히 관련 짓기는 상당한 어려움이 따른다.

음향방출 시스템을 계통적으로 분석하기 위하여 변환자의 특성을 정확히 파악할 필요가 있다. 음향방출 시스템의 이상적인 변환자는 점 수신자이면서 변위, 속도 및 가속도가 선형으로 출력되어지는 변환자를 말한다. 실제로 사용되는 상용인 PZT 변환자는 아래와 같은 요인들 때문에 이상적인 변환자로 간주하기 어려운 상황이다. 유한한 크기를 갖는 압전체의 계구면때문에 압전체의 면적에 입사한 역학적인 신호를 적분한 신호가 출력되고, 전면재, 전극, 압전체, 전극, 후면재 등의 적층에 의하여 매질사이에서 반사 및 부파 등에 의해 시 역학적 신호가 변조된 신호로 변환되어 나타난다.

본 연구에서는 음향방출 시스템을 계통적으로 분석하기 위하여 유리모세관 파피시에 발생하는 과도탄성파를 원추형 압전변환자와 압전 PZT 변환자를 사용하여 측정하였다. 특히, 압전 PZT 변환자의 과도탄성파 응답 특성을 Heaviside 함수의 접하중이 인가된 경우에 대한 진앙점에서 이론적인 변위 및 속도와 비교하여 분석하였다.

## 2. 이 론

### 2-1 계단함수인 접하중의 인가시 진앙점에서 수직변위 및 속도

힘의 크기가 1 dyne 이고 연에 수직으로 작용하는 Heaviside 계단함수의 시간의존성을 갖는 접하중이 인가된 경우에, 진앙점에서 수직변위(  $U_z$  )를 이론적으로 계산한 해석적인 해는 다음과 같다.

$$U_z(t) = \frac{1}{\pi ab} \left[ \frac{q^2(2q^2 - 2 + a^{-2})^2 a^{-2} H(t - b/c_1)}{[(2q^2 - 2 + a^{-2})^2 - 4q(q^2 - 1)(a^{-2})^{1/2}]^2} - \frac{4y^2(y^2 - 1)(y^2 + a^2 - 1)H(t - b/c_2)}{[(2y^2 - 1)^2 - 4(y^2 - 1)(y^2 + a^2 - 1)]^{1/2}} \right. \\ \left. + \frac{1}{3} v^2 (2v^2 - 2 + a^{-2}) \frac{[(2v^2 - 2 + a^{-2})^2 + 4v(y^2 - 1)(a^{-2})^{1/2}]^2}{[(2v^2 - 2 + a^{-2})^2 - 4v(y^2 - 1)(a^{-2})^{1/2}]^4} \chi a^{-4} H(t - 3b/c_1) \dots \dots \dots \right]$$

여기서  $q=c_1/b$ ,  $y=c_2/b$ ,  $v=q/3$ ,  $a=c_1/c_2$

$c_1$ =종파속도,  $c_2$ =횡파속도,  $b$ =평판 두께

$\mu$ =lame constant,  $H(t)$ =Heaviside function

이다

식(1)을 이용하여 계산된 파형은 Fig. 1의 A에 주어지고 있고, 이 계산된 파형의 중요한 특징은 제일 먼저 종파(Primary wave, P 파)가 도달할 때 계단이 주어지고, 횡파(Secondary wave, S 파)가 도달할 때까지 계속하여 증가한다. S 파의 도달시간부터 파형의 기울기가 감소하는 것은 무한매질 또는 다른 여러경우의 평면파에 대해서는 종파운동과 횡파운동은 그대로 유지가 되지만 평판에서 대칭축상 운동의 경우 횡파 운동은 순수 종파로 나타내 보인다. P3 과 P5 는 각각 종파로서 유리 평판내에서 3b 및 5b 를 진행한 종파를 말한다.

### 2-2. 압전 PZT 변환자의 응답에 대한 컴퓨터 simulation

압전변환자를 일반적으로 해석하는 방법은 역학적인 진동계를 전기적인 등가회로로 변환하여 이 등가회로를 해석하는 것이며, Mason 은 1 차원 모델에 대한 얇은 판 압전변환자에 대한 등가회로를 제안하였다. Rhyne 은 Mason 등가회로를 개량하였고, Mason 등가회로의 음향부분을 전송선로로 해석하여 KLM 등가회로를 제안하였다. 등가회로를 풀어서 압전 PZT 변환자를 해석하는 방법에는 진동수에 대한 주파수 응답을 구하는 방법과 시간에 대한 임펄스 응답을 구하는 방법이 있다.

본 연구에서 관심이 있는 것은 초음파의 펄스 즉 시간 영역에서 초음파의 응답 특성이다. Mason 이 유도한 임피던스행렬로부터 변환자를 전송선로와 이에 직렬 연결된 전압원으로 해석한 등가회로를 이용하였고, 이 등가회로를 바탕으로 변환자에서 진행파들 사이의 관계식과 lattice 모델을 사용하여 컴퓨터를 이용하여

iteration 방법으로 임펄스 응답을 계산하였다. 특히, 유리모세관 파괴시에 방출되는 과도탄성파의 수직속도 성분이 변환자의 전면에 입사된다고 가정하여 가정하였고, 상승시간은 약 280ns 이고 힘의 크기는 약 10N 이라고 가정하였다.

### 3. 실험

유리평판의 중앙에 놓여진 유리모세관은 indenter에 의하여 파괴직전까지 지탱하다가 더 이상의 하중이 인가 되면 유리모세관의 표면에 균열이 발생하여 파괴가 일어난다. 이러한 급격한 점하중의 소거가 음향방출 발생원이 되어 과도탄성파가 발생하게 된다. 발생한 과도탄성파는 유리평판을 전파하여 진앙점에 위치한 변환기를 통하여 검출되고, 디지털 오실로스코프를 이용하여 음향방출 신호를 저장하였다. 실험에 사용된 유리모세관의 내경 및 외경은 각각 0.33 및 0.4 mm 이고, 전파매질로 사용된 상용 유리 평판의 두께 및 직경은 43.7 및 290 mm 이었다. 본 연구에 사용된 변환자는 광대역 변환자라고 알려진 원추형 PZT 변환자와 전면체가 백색 알루미늄인 디스크형 PZT 변환자를 사용하였다. 디스크형 PZT 변환자는 미국 Edo 사의 EC-65 PZT 를 사용하여 제작하였고, 직경 및 두께는 12.7 및 3.78 mm 이고, 공진주파수는 595kHz 이었다.

### 4. 결과 및 토의

공기층을 경계면을 갖는 유리 평판에 계단함수의 힘이 점하중으로 인가된 경우에 대하여 Knopoff의 적분식을 이용하여 종파가 유리 평판내를 7 회 전파한 시간동안의 진앙점에서 이론적인 변위를 계산하였다. 힘의 크기가 10 N 이고 280ns 의 상승시간을 갖는 경사함수라고 가정하였고, 실험에 사용된 유리평판의 밀도, 종파 및 횡파의 속도를 이용하여 계산하였다. 유리평판의 진앙점에서 계산된 수직 성분의 변위와 속도는 Fig. 1 의 A 와 C 에 보여 주고 있다. 이 그림에 주어진  $mPnS$

는 유리 평판사이클 종파로  $m$  회, 횡파로  $n$  회 전파하여 진앙점에 도달한 파를 말한다. 즉 1P2S 는 유리평판내를 1 회는 종파로 2 회는 횡파로 전파하여 진앙점에 도달한 파를 말한다. 그림에서 종파의 도달 시간인 7.9 $\mu$ s 에서 수직성분의 변위는 계단함수와 비슷하게 상승하고, 그 이후 종파의 도달시간까지 급격히 증가하였다. 횡파가 도달한 이후는 수직 성분 변위의 기울기가 급격히 감소하였고, 횡파는 반대 극성의 성분을 갖는 변위임을 알 수 있다. 그림에서 1P, 3P 및 5P 의 수직성분의 속도는 7.9, 23.7 및 39.5 $\mu$ s 에 도달하였고, 점하중에 의하여 발생한 탄성파는 구면파로 전파하므로 진앙점에서 계산된 수직성분 속도의 크기가 전파거리에 반비례함을 보여주고 있다.

광대역이라고 알려진 원추형 PZT 변환자에 대하여 유리모세관 파괴시 진앙점에서 응답은 Fig.1 의 B 에 주어지고 있다. 유리모세관의 파괴시 진앙점의 변위와 비교하면 상당히 유사함을 알 수 있고, 이를 Fig.1 의 수직성분 변위라고 말하여도 무방하리라 생각된다. 앞에서 기술된 이론적인 과도탄성파에 대한 고찰을 그대로 유지할 수 있으리라 생각된다.

Fig.1 의 D 와 E 는 각각 디스크형 PZT 변환자를 이용하여 유리모세관 파괴시 진앙점에서 과도탄성파를 이론적으로 계산된 결과와 측정된 결과를 보여 주고 있으며, 상당히 일치함을 알 수 있다. 7.9 $\mu$ s 에서 음 전압 펄스가 처음 도달하고 다음에는 음 전압 펄스보다 큰 양 전압 펄스가 나타났고, 그 이후는 음 전압 및 양 전압 펄스가 교대로 나타남을 알 수 있다. 이를 Fig.1 의 C 와 비교하면 첫번째 도달하는 1P 가 PZT 앞전매질의 전극을 만날 때 나타난다고 생각할 수 있다. 마찬가지로 23.7 및 39.5 $\mu$ s 에 나타나는 첫 음 전압 펄스는 각각 3P 및 5P 의 수직성분 속도가 입사하여 발생된 펄스라고 간주할 수 있다. 그러나 Fig.1 의 C 와 D 에서 1S 가 도달하는 시간인 14 $\mu$ s 를 중심으로 관찰하면 서로 일치하는 것을 관찰 할 수 있으나, Fig.1 의 E 에 의하면 상당히 다를 수 있다. 이것은 PZT 앞전제

내를 전파하는 모드가 서로 다르기 때문에 발생하였다. 이론적으로 계산할 경우에는 유리 평판에서 발생한 횡파의 수직성분 속도가 입사하여 압전체 내에서 종파로 전파한다는 알고리즘을 채택되어진 결과이고, 실제로 관찰된 파형에서는 압전체를 통하여 전파한 횡파는 횡파의 속도로서 진행하기 때문에 늦게 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결 론

와경 0.4mm인 유리모세관의 파괴시 방출되는 과도탄성파를 이용하여 유리평판의 진양정에 위치한 PZT 변환자의 응답특성을 실험과 이론을 통하여 비교 분석하였다. 디스크형 PZT 변환자의 응답은 종파의 경우에는 수직성분 속도가 PZT 압전체에 입사하여, 압전체의 전극을 만나는 경우에 펄스형태로 주어졌으나, 횡파의 경우는 현재의 동가외로를 사용하여 이론적으로 예측하기 힘들다. 그러나, 이를 토대로 음향방출 발생원, 전파매질, 변환자 및 신호분석 시스템이 포함된 음향방출 시스템을 모형화 할 수 있는 기초를 마련할 수 있었다.

## 참고문헌

1. F.R. Breckenridge, C.E. Tsiogg and M. Greenspan, *J. Acoust. Soc. Am.*, 57(1975), pp626-631
2. L. Knopoff, *J. Appl. Phys.*, 29(1958), pp661-670
3. Y. H. Pao, R. Gajewski and A. Ceranoglu, *J. Acoust. Soc. Am.*, 65(1979) pp96-105

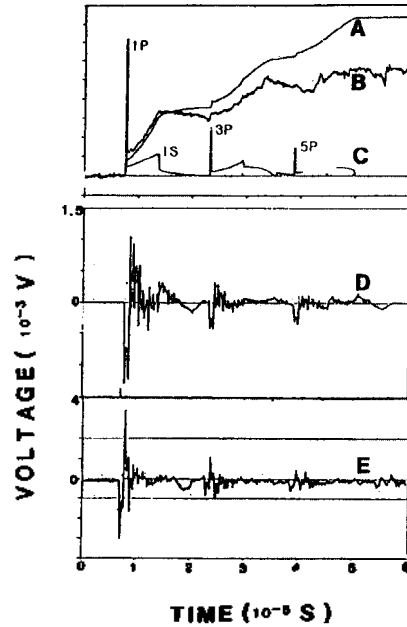


Fig.1 Responses at the epicenter of glass plate during glass capillary breakage;

(A) theoretical displacement , (B) response of conical PZT transducer, (C) theoretical velocity, (D) theoretical response and (E) measured response of the disk-type PZT transducer