

# 다층 압전진동자를 이용한 주파수 가변 초음파 메스의 개발

○김 무 준, 하 강 열 (부경대학교)

## Frequency Controllable Ultrasonic knife made by multi-layered PZT ultrasonic transducer

Moo Joon Kim, Kang Lyeol Ha (Pukyong University)

### Abstract

Ultrasonic knives have been successfully used for the surgery of many medical fields. However, the conventional ultrasonic knives for surgical operation cannot be controlled its resonant frequency. So if the material to cut has different characteristic impedance then different ultrasonic knife will be needed. Because the optimum driving frequency of ultrasonic knife is different by characteristic impedance of material.

In this work, using a frequency variable ultrasonic transducer made of multi-layered PZT vibrator, a frequency controllable ultrasonic knife will be suggested. The design and computation principles will be also derived. For this work, firstly, the characteristics of this ultrasonic knife will be analyzed by transmission line model equivalent circuit, and the free admittance characteristics and vibrational velocity distributions will be obtained. Secondly, we will design and make the frequency controllable electrical oscillator for driving this ultrasonic knife.

### 1. 서론

초음파 메스는 외과 수술용 메스를 초음파 진동시켜 수술을 가능하도록 고안한 장비로, 최근에는 인체중에 있는 결석에 초음파 진동하는 진동체를 직접 접촉시켜 그들을 파괴하여 배출하는 수술법<sup>(1)</sup>도 연구되어 실용화되고 있다. 외과수술에 있어서 초음파 메스<sup>(2,3,4)</sup>의 이점으로는 첫째, 신경 및 0.5mm이상의 혈관 등 탄력성이 좋은 것은 보존시키고, 둘째, 조작이 간편하고, 셋째, 장기의 절단부분에 있어서의 생체조직의 피해가 가볍다는 것 등의 이점<sup>(9)</sup>이 있다. 그러나, 커다란 뼈를 절단

할 때와 연조직인 피부, 지방질 등을 절단할 때 사용되는 초음파의 주파수는 달라져야만 한다<sup>(6)</sup>. 이것은 경조직인 뼈와 연조직인 피부와의 음향임피던스가 다르기 때문이다. 따라서, 수술대상에 따라 최적의 사용주파수가 다르게 되고, 복수의 부분을 수술하여야 할 경우, 복수의 초음파 메스가 필요하게 된다. 특히, 치과수술용 초음파 메스<sup>(7)</sup>의 경우 여러종류의 수술용 칼을 준비하여 필요에 따라 초음파 메스의 호온에 결합하여 사용하고 있으나, 상황에 따른 빈번한 칼의 교환은 매우 불편한 실정이다.

한편 두께진동모드의 압전 진동자에 있어서 전

기단자에 접속한 전기적인 부하상태를 변화시키면 그 주파수특성이 크게 바뀐다<sup>(8)</sup>. 이 현상은 다층구조로 되어있는 초음파 트랜스듀서의 특성제어에 응용<sup>(9,10)</sup>되고 있으나 그 이론적 검토나 등가회로적인 해석은 충분하다고 할 수 없다. 특히 다층구조로 구성된 압전초음파 트랜스듀서의 특성을 해석하는 경우 Mason<sup>(11)</sup>의 등가회로를 사용하면 그 계산이 복잡하고 단자조건에 따른 실효 감쇄량 등의 고찰이 매우 어렵게 된다. 또한 KLM의 전송선로형 등가회로가 있으나, 이 등가회로 역시 다층구조의 경우 압전체의 전기단자에 대한 취급이 매우 불편하다. 한편 菊池<sup>(12)</sup> 등은 拔山<sup>(13)</sup>에 의해 제안된 전기음향변환이론을 기초로 하여 복합구조의 다층막 압전체를 전송선로의 종속접속으로 해석하는 방법이 제안되어 있으나, 종래의 전송선로형 등가회로의 경우 압전체의 전기단자의 부하상태를 고려할 수 없어 상술한 전기적인 부하상태에 의한 특성변화를 해석하기에는 곤란한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 먼저 전기단자의 부하상태까지 고려한 전송선로형 등가회로를 도출하고, 이것을 이론적 수단으로 삼아 구동 주파수를 가변할 수 있는 초음파 메스를 설계 및 제작한다. 제작된 초음파 메스의 구동특성을 해석하기 위하여 공진특성의 변화 및 진동속도분포의 변화등을 측정하고 이론계산결과와 비교 검토한다.

## 2. 이 론

### 2-1. 등가회로의 도출

두계진동모드의 압전진동자에 관한 전송선로 방정식은 다음과 같이 구해진다<sup>(14)</sup>.

$$\begin{bmatrix} p_l + F \\ v_l \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} p_o + F \\ v_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

단,

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$$

$$B_{11} = B_{22} = \cos \gamma l_b$$

$$B_{12} = jz_o \sin \gamma l_b$$

$$B_{21} = j \frac{1}{z_o} \sin \gamma l_b$$

여기서  $p_o$ ,  $p_l$  및  $v_o$ ,  $v_l$ 은 각각 압전진동자의

양단면에 있어서의 힘과 입자속도이고  $l_b$ 는 압전체의 두께이며  $z_o$ 는 특성 임피던스,  $\gamma$ 는 전파상수이다. 또  $Q$ 를 전원에 의해 인가된 전하량이라고 하면 음향적 진동원은  $F = hQ$ 로 주어진다. 이것을 전송선로형 등가회로로 나타내면 그림 1과 같다.

그러나, 그림 1에 나타낸 바와 같은 일반적인 전송선로형 등가회로 및 그 전송선로 방정식에는 압전체의 전기단자에 접속한 전기적인 부하의 영향이 고려되어 있지 않다. 본 연구에서는 그림 2에 나타낸 것과 같이 외부에서 용력을 받고 있는 압전진동자의 전기단자에 전기적인 부하  $Z_e$ 를 접속한 경우의 전송선로형 등가회로를 검토한다.

이 경우 외부용력에 의해 생성되는 전하량  $Q_i$ 는 다음과 같다.

$$Q_i = \frac{h}{j\omega} (v_l - v_o) \quad (2)$$

여기서  $h$ 는 압전체의 압전  $h$  상수 이다.

이 전하량  $Q_i$ 는 즉시 외부의 전기적 부하  $Z_e$ 에 의해 분배 및 이동하여 결과적으로 진동자의 전극에 남는 전하량은 다음과 같다.

$$Q_{eff} = \frac{Q_i}{j\omega C_o Z_e + 1} = \sigma Q_i \quad (3)$$

여기서  $C_o$ 는 압전체의 제동용량이다.

따라서 (3)식의  $Q_{eff}$ 에 의한 기계적인 양

$F_e = hQ_{eff}$ 을 (1)식의  $F$ 대신 대입해  $p_o$  및  $v_o$ 와  $p_l$  및  $v_l$ 의 관계를 구하면 전기단자의 부하상태를 고려한 전송선로 방정식이 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} p_l \\ v_l \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} p_o \\ v_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

단,

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}$$

$$P_{11} = P_{22} = \frac{\frac{z_o}{j \tan \gamma l_p} + z}{\frac{z_o}{j \sin \gamma l_p} + z}$$

$$P_{12} = \frac{z_o^2 + \frac{2z_o(1 - \cos \gamma l_p)}{j \sin \gamma l_p} z}{\frac{z_o}{j \sin \gamma l_p} + z}$$

$$P_{21} = \frac{1}{\frac{z_o}{j \sin \gamma l_p} + z}$$

단,

$$\sigma = \frac{1}{j\omega C_o Z_e + 1}, \quad z = -\frac{\sigma C_o h^2}{j\omega}$$

따라서  $z_{v_o}$  및  $z_{v_i}$ 를 각각  $-F_B$  및  $-F_A$ 로 하면 (4)식은 다음과 같이 고쳐질 수 있고

$$\begin{bmatrix} p_i - F_B \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{B} \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_o + F_A \\ v_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

그림 3과 같이 전기단자의 부하상태를 고려한 압전진동자의 전송선로형 등가회로가 유추될 수 있다.

그림 2에 표시한 전기적인 부하  $Z_e$ 의 영향을 고찰해 보면 우선  $Z_e$ 가  $\infty$ 의 경우, 즉 압전진동자의 전기단자가 개방되어 있는 경우는 (5)식에 있어서의  $z$ 는 0이 되고 (5)식의 전송선로 방정식 및 그림 3의 전송선로형 등가회로는 각각 (1)식 및 그림 1에 있어서 진동자를 구동시키지 않는 경우 ( $Q=0$ )의 전송선로 방정식 및 전송선로형 등가회로와 일치하게 된다. 특별한 경우로서  $Z_e$ 가 코일의 인덕턴스  $L_e$ 에 의한 부하인 경우 (5)식의  $\sigma$ 는 다음과 같이 된다.

$$\sigma = \frac{1}{1 - \omega^2 C_o L_e} \quad (6)$$

(6)식의  $L_e$ 의 값이  $1/\omega^2 C_o L_o$ 에 가까워질수록 전송선로상의 임피던스  $z$ 가 크게 되고 이 압전체의 외전상의 음향적 특성이 크게 변하게 된다. 따라서 전기단자에 전기적인 부하를 접속시킨 비구동 압전층을 가진 다층구조 압전 트랜스듀서는 그 전기적 부하에 의해 트랜스듀서의 주파수특성을 크게 변화시키는 것이 가능하게 된다.

그림 4는 일반적으로 사용되고 있는 고체 호운을 나타내고 있다. 본 연구에서 사용하는 전송선로형 등가회로에 적용하기 위하여 원추형 호운에 대

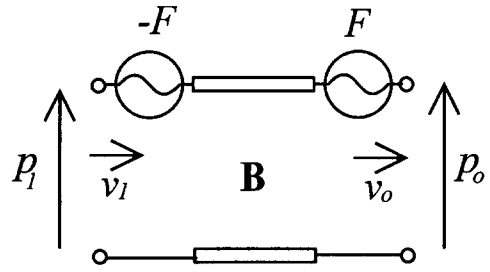


Fig. 1 Transmission-line model equivalent circuit of piezoelectric transducer

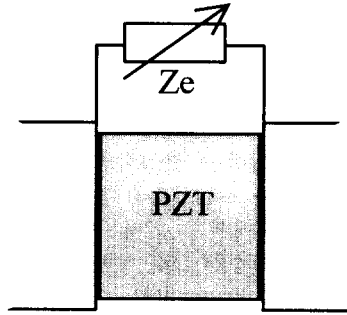


Fig. 2 Thickness mode piezoelectric vibrator connected electrical impedance to electrical terminals

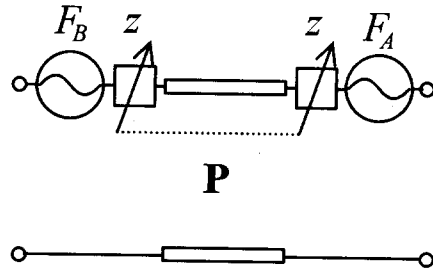


Fig. 3 New transmission-line model equivalent circuit including the electrical impedance effect

한 전송선로 방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\begin{bmatrix} p_i \\ v_i \end{bmatrix} = \frac{l}{l - l_o} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_o \\ v_o \end{bmatrix} \quad (7)$$

단,

$$C_{11} = \frac{1}{l_o} \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} \sin al + \frac{S_2}{S_1} \cos al$$

$$C_{12} = j \left( \frac{c\sqrt{S_1 S_2}}{\omega a l_0} + \frac{cS_2}{\omega} \right) \sin a l$$

$$+ \left( -\frac{c\sqrt{S_1 S_2}}{\omega l_0} + \frac{cS_2}{l_0 a \omega} \right) \cos a l$$

$$C_{21} = -j \frac{\omega}{cS_1 a} \sin a l$$

$$C_{22} = \frac{1}{a l_0} \sin a l - \cos a l$$

## 2-2. 주파수가변형 다층구조 초음파 메스의 자유 어드미턴스 계산

상술한 전기적 임피던스의 효과에 대한 응용의 한 예로서, 본 연구에서는 2층의 주파수 제어용 압전층과 1층의 구동용 압전층을 갖는 주파수가변형 다층구조 초음파 메스에 대한 특성해석을 행하였다. 그림 5에 나타낸 것과 같이 가운데에 위치한 구동용 압전층에는 전원을 연결하고, 다른 양쪽의 압전층에는 가변 임피던스만을 연결하여 주파수 제어용 진동자로 사용하였다. 이 초음파 메스에 관한 등가회로를 상술한 전송선로형 등가회로를 사용하여 표시하면 그림 6와 같이 나타낼 수 있다. 이 등가회로는 전기 음향 변환 이론<sup>(15)</sup>에 기초를 두고 있으므로 전기 음향 변환 기본식의 제정수를 구하면 다음과 같다.

기계 임피던스  $z_i$  :

$$z_i = \frac{p_o}{v_o} = -\frac{Q_{12}}{Q_{11}} \quad (8)$$

역계수 A :

$$A = -\frac{v_o}{I} z_i$$

$$= \frac{h}{j\omega} \left\{ \frac{Q_{22}^{-1}}{Q_{12}^{-1}} (V_{22} - U_{22}) + (-V_{12} + U_{12}) \right\} z_i \quad (9)$$

여기서  $Q_{12}^{-1}$ 과  $Q_{22}^{-1}$ 는 각각 행렬  $Q$ 의 역행렬에 대한 원소를 나타내고 있다.

제동 임피던스 :

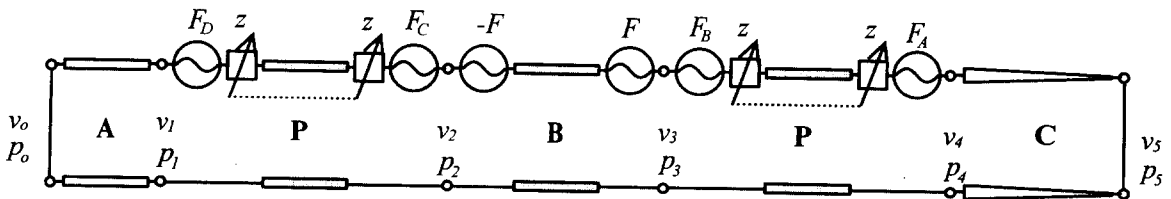


Fig. 6 Transmission-line model equivalent circuit of frequency controllable ultrasonic knife

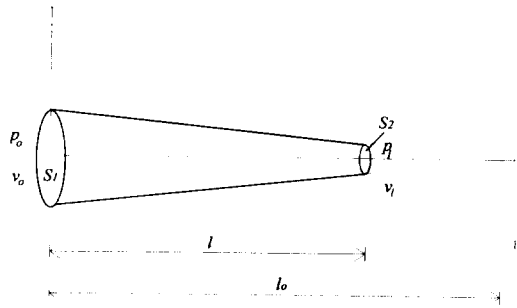
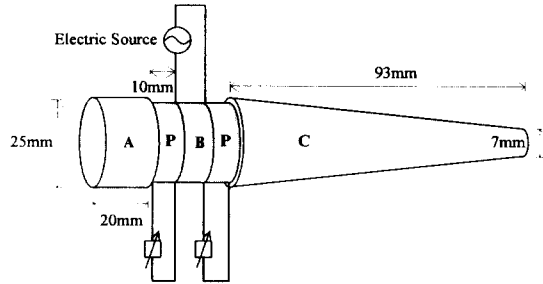


Fig. 4 Horn for amplification of vibrational displacement amplitude



Variable Impedance

Fig. 5 Construction of frequency controllable ultrasonic knife

$$Z_d = \frac{V}{I}$$

$$= \frac{1}{j\omega C_o}$$

$$- \frac{1}{j} \left( \frac{h}{\omega} \right)^2 \left[ \left\{ -\frac{Q_{12}^{-1}}{Q_{22}^{-1}} (-V_{12} + U_{12}) \right. \right.$$

$$\left. \left. + (-V_{22} + U_{22}) \right\} (V_{21} - U_{21}) + B_{21} \right] \quad (10)$$

단, 계산을 위해 다음과 같은 행렬을 정의 하였다.

$$\begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 구한 전기 음향 변환의 제정수를 자유 임피던스  $Z_f$ 에 관한 다음식에 대입하면 주파수 가변형 다층 구조 초음파메스에 대한 자유임피던스의 주파수특성을 구할 수 있다.

$$Z_f = Z_d + Z_o - \frac{A^2}{z_r + z_t} \quad (15)$$

이 자유 임피던스의 역수로써 자유 어드미턴스를 구할 수 있다.

### 2-3. 진동속도 분포의 계산

본 연구에서 사용하고 있는 분포정수형 등가회로는 진동속도 혹은 응력의 분포를 계산할 경우 매우 편리하다. 상술한 등가회로를 사용하여 (15)식에서 구한 자유 임피던스로 부터 공진주파수  $f_o$ 가 구해지면 이 공진주파수를 (14)식에 대입한다. 이때 (14)식은 거리에 따른 속도 분포를 구하기 위해 위치의 함수로 둔다. 즉,

$$\begin{bmatrix} p_5(x) \\ v_5(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}(x) & Q_{12}(x) \\ Q_{21}(x) & Q_{22}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_o \\ v_o \end{bmatrix} \quad (16)$$

경계조건으로써  $p_o = 0$ 을 적용하면

$$p_5(x) = Q_{12}(x)v_o \quad (17)$$

$$v_5(x) = Q_{22}(x)v_o \quad (18)$$

로 간단히 구할 수 있다.

## 3. 실험 및 계산결과

### 3-1. 구조

본 연구에서 제작한 주파수가변형 다층구조 초음파 메스의 구조는 그림 5에 나타난 이론모델과 동일하나, 압전체는 극성을 서로 맞물린 두께 5mm의 압전체 2장을 사용하여 두께 10mm의 진동자의 역할을 하게 하였다. 이것은 압전체의 내구성과 전기적 용량을 크게하기 위함이다. 이와같은

압전체의 쌍을 3쌍 사용하여 중앙에 위치한 압전체의 쌍을 구동부로, 양옆의 압전체의 쌍을 주파수 제어부로 사용하였다. 전면의 진폭확대부인 금속 호온과 배면의 금속은 알미늄을 사용하여 압전체와 함께 볼트로 죄어 고정시켰다. 또 호온의 선단에는 일반 외과수술용 칼을 고정시켜 메스의 역할을 할 수 있도록 하였다. 주파수 제어부의 압전체의 전기단자에는 외부 임피던스로서 베이크라이트로 제작한 보빈에 에나멜선을 감아 제작한 코일을 연결하고 보빈의 중앙을 통과하는 페라이트코어를 움직여 가며 코일의 인덕턴스값을 바꾸었다.

### 3-2. 자유어드미턴스의 결과

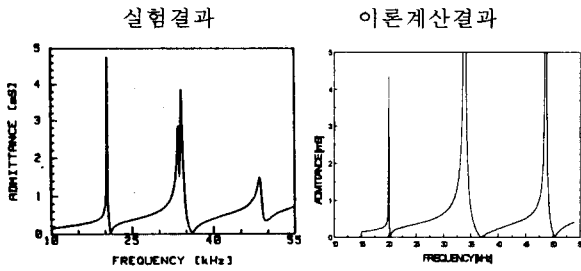
본 연구에서 제작한 주파수가변형 다층구조 초음파 메스의 자유어드미턴스를 측정된 결과를 그림 7에 계산결과와 함께 나타내었다. 이 결과를 보면 주파수 가변용 압전체의 전기단자에 접속한 인덕턴스의 값  $L_e$ 에 따라 초음파 메스의 공진주파수가 큰 폭으로 바뀌는 것을 알 수 있다. 먼저 그림 7(a)에 나타난  $L_e = \infty$ 인 경우를 보면 주어진 주파수영역 내에서 3개의 공진 모드를 나타내고 있다. 실험 결과를 보면 33[kHz]부근의 공진모드에서 경방향 진동에 의한 스프리어스가 나타나고 있지만 두께 진동만을 생각하면 실험 결과와 계산 결과는 좋은 일치를 보이고 있다. 그림 7(b)는  $L_e = 62[mH]$ 의 경우로 37[kHz]부근에서 공진모드가 나타나, 37[kHz]의 주파수로 구동하는 것이 가능하게 된다. 인덕턴스의 값을 바꾸어

$L_e = 33[mH]$ 로 하였을 경우의 결과를 그림 7(c)

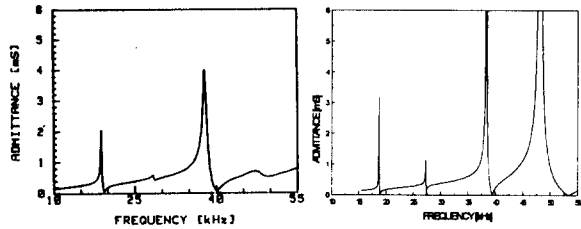
에 나타내었다. 그림 7(b)의 경우에서 나타났던 24[kHz]부근과 37[kHz]부근의 공진 모드는 각각 30[kHz]부근과 44[kHz]부근으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그러나 실험결과를 보면 알 수 있듯이 44[kHz]부근의 공진모드는 그 어드미턴스의 값이 작아져 변환효율면에서 그리 좋지 않을것으로 예상된다.

### 3-3 진동속도의 측정

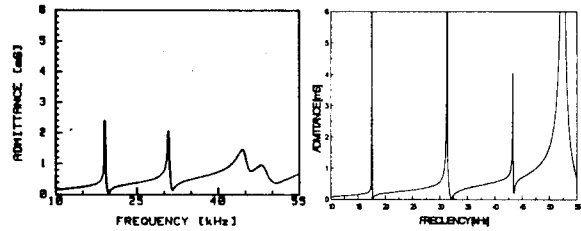
진동속도분포를 측정하기 위하여 본 연구에서는 레이저 도플러 속도계를 이용한 측정법을 사용하였다<sup>(16)</sup>. 그림 7에 나타난 어드미턴스의 결과로부터 전기단자에 접속한 인덕턴스의 값에 따라 공진주



(a)  $L_e = \infty$



(b)  $L_e = 62[mH]$



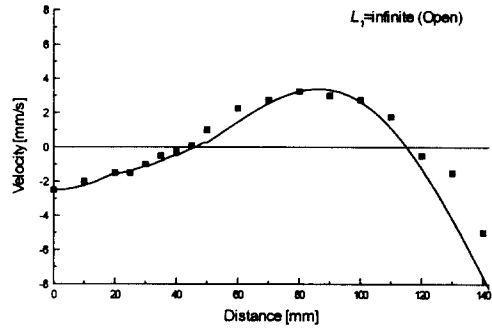
(c)  $L_e = 33[mH]$

Fig. 7 Results of free admittance characteristics

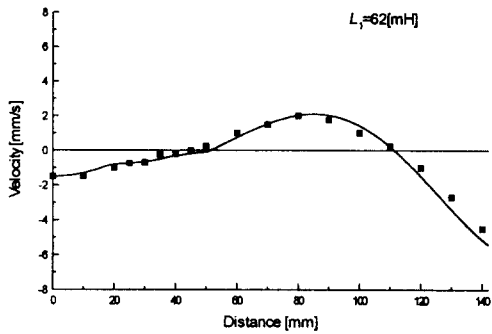
파수가 결정된다. 이 공진주파수로 구동하였을 경우의 진동속도분포에 대한 결과를 그림 8에 나타내었다. 여기서 ■로 나타낸 것은 실험결과이고 실선으로 나타낸 것은 이론계산 결과이다. 이론계산의 경우, 추정적으로 구한  $x=0$ 에서의 진동속도를 (18)식의  $v_0$ 로 하여 계산을 수행하였다. 진동속도의 진폭은  $L_e = \infty$ 의 경우가 가장 큰 것으로 나타나, 사용주파수를 바꾸기 위하여 전기단자에 인덕턴스를 접속할 경우 그 진동효율은 다소 감소할 것이나 목적에 따라 구동주파수를 가변할 수 있음이 확인 되었다.

#### 4 결론

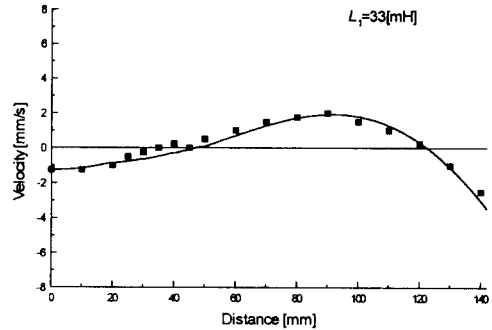
본 연구에서는 주파수가변형 다층구조 초음파 메스를 구현하기 위하여 먼저 전기단자의 부하상



(a)  $f_o = 33kHz$



(b)  $f_o = 37kHz$



(c)  $f_o = 30kHz$

Fig. 8 Results of vibrational velocity distribution

태까지 고려한 전송선로형 등가회로를 도출하고, 이것을 이론적 수단으로 삼아 구동 주파수를 가변할 수 있는 초음파 메스를 설계 및 제작하였다. 제작된 초음파 메스의 구동특성을 해석하기 위하여 공진특성의 변화 및 진동속도분포의 변화등을

측정하고 이론계산결과와 비교 검토한 결과 주파수 가변용 압전체의 전기단자에 접속한 인덕턴스의 값을 바꾸어줌으로써 공진주파수는 넓은 범위에 걸쳐 큰 폭으로 변화함을 확인하였다. 따라서 목적에 따른 구동주파수에 대응할 수 있는 주파수 가변 초음파 메스에 대한 가능성을 이론 및 실험을 통하여 확인하였다.

### 참고문헌

1. 上羽貞行, 杉本恒美: “柔軟な細線を用いた超音波吸引用傳送線路の検討(1)”, 日本超音波醫學會誌, Vol. 16, No. 3, pp. 10-18(1989)
2. Hodgson, W.J.B., Poddar, P.K., Mencer, E.J., Williams, J., Drew, M. and McElhinney, A.J. “Evaluation of ultrasonically powered instruments in the laboratory and in the clinical setting”, Am. J. Gastroenterol. 72, pp.133-140(1979)
3. Takao Takemura “EVALUATION OF ULTRASONIC SURGICAL ASPIRATOR IN THE FIELD OF HEPATIC SURGERY”, Tokoy Jikeikai Medical Journal 99, pp.257-270 (1984)
4. 超音波技術便覽, 日刊工業新聞社, 東京, 1991年
5. Y.Tsuda, E.Mori and S.Ueha : Experimental Study of Ultrasonic Surgical Knife, Jpn. J. Appl. Phy., Vol.22, Suppl. 22 3, pp.105 107 (1982).
6. Medical Tribune, Vol. 23, No. 17 (1990년 4월 23일)
7. 上羽貞行 “超音波メス”, 超音波TECHNO 9月號, pp.19-22(1994)
8. 中鉢憲賢, 金茂俊: “厚み縦振動モード壓電振動子の傳送線路モデル等價回路による多層構造超音波トランスジューサの特性解析について”, 日本電子情報通信學會技術報告, US92-49(1992)
9. 藤原 외, “縱共振周波數調整用電氣端子を有する縱-ねじり複合振動子”, 日本音響學會講演論文集, 1-P-10 (1992. 10)
10. 栗林, 上羽, 森, “超音波リニアモータの進行波勵振の検討”, 日本電子情報通信學會技術報告, US84-22, pp. 22-30 (1984)
11. W. P. Mason, “An Electromechanical Representation of a Piezoelectric Crystal Used as a Transducer”, Proc. of IRE. , Vol. 23, No. 10, pp. 1252-1263, 1935.
12. 菊池, 中鉢, 山水, “超高周波用多層膜超音波トランスジューサの解析”, 日本電子通信學會論文誌 Vol. 55-a, No. 7, pp. 331-338, 1972.
13. 拔山平一, 電氣音響機器の研究, pp. 206-212, 丸善, 東京, 1948.
14. 松中, 中鉢, 菊池, “壓電層超高周波超音波トランスジューサの電極厚さが中心周波數に及ぼす影響”, 日本電氣通信學會技術報告, US74-40, 1975.
15. 金, 中鉢, “多周波數用複合ランジュバン型超音波トランスジューサの特性解析と實驗的検討”, 日本電氣學會論文誌C, Vol. 114-C, No. 1, pp. 42-50 (1994)
16. 金茂俊, 金井浩, 中鉢憲賢: “レーザ・ドプラ速度計を用いた彈性體の振動速度分布の非接觸測定法”, 日本電子情報通信學會技術報告, ES93-37(1993)