

2 layer 정합층을 갖는 초음파트랜스듀서의 동작 특성에 관한 연구

허필우*, 이양래*, 임의수*, 고광식**
 *한국기계연구원, **경북대학교 전자공학과

The Research for the Operation Characteristics of Ultrasonic Transducer with 2 Layer Matching

Pil Woo Heo*, Yang Lae Lee*, Eui Su Lim*, Kwang Sik Koh**

*Korean Institute of Machinery and Materials, **Kyungpook National University
 pwheo@mailgw.kimm.re.kr

Abstract

이중 매질에서 초음파전달은 각 매질의 음향임피던스에 영향을 받는다. 초음파전동자로 사용되는 압전소자와 매질로 가장 많이 사용되는 물은 음향임피던스 차이가 크므로 경계면에서 투과율이 감소한다. 이를 개선하기 위해 압전소자와 물 사이에 음향정합층을 삽입하여 사용한다. 정합층은 1 layer로 사용되는 경우도 있지만, 넓은 대역폭을 요구하는 분야에서는 2 layer가 사용된다. 본 논문에서는 1 layer 정합층을 갖는 초음파트랜스듀서에 대해 시간영역에서 해석하는 기법을 분석하였으며, 이를 근거로 매질 사이의 물리적 특성을 고려하여 2 layer 정합층을 갖는 초음파트랜스듀서를 해석하였다. 해석결과 2 layer 정합층일 경우 1 layer에 비해 공진주파수에서의 이득은 감소하였으나 대역폭이 증가됨을 알 수 있었다.

I. 서론

압전 트랜스듀서를 해석하거나 설계하기 위해서는 트랜스듀서의 각 port에서의 경계조건(임피던스)들을 해석해 임피던스 방정식을 풀면 된다. 그러나 보다 일반화된 방법은 임피던스 방정식과 동등한 전기적 등가회로를 만들고 이 등가회로를 해석하는 것이다. 그런데 임피던스 방정식을 만족하는 등가회로는 유일하지 않기 때문에 여러 가지 형태의 등가회로가 가능하며 등가회로에 따라 압전소자나 트랜스듀서를 해석하는 관점이 달라질 수 있다. 이제까지는 주로 Mason의 등가회로나 KLM의 전송로 모델이 사용되어 왔다. 이들의 등가회

로는 주파수 영역에서 트랜스듀서를 해석하기는 쉬우나 초음파 트랜스듀서 문제의 궁극적인 목적인 시간영역에서의 임펄스응답을 구하기 위해서는 등가회로의 전달함수를 구하고 이를 다시 푸리에 역변환을 해야 하는 번거로움뿐만 아니라 트랜스듀서에 대한 물리적인 직관을 얻기가 힘들다는 약점을 가지고 있다. 본 논문에서는 1 layer matching에 대해 Laplace 변환에 근거한 시간영역에서 초음파트랜스듀서 해석방법을 분석하였으며, 이를 개선된 대역폭을 갖는 2 layer matching 초음파트랜스듀서에 적용하였다.

II. 본론

제 1 절 초음파의 투과와 반사

초음파가 이중 매질을 진행할 때 반사와 투과 현상이 나타난다. 반사파와 투과된 파의 음압 진폭과 강도의 비는 2개의 매질에서 특성 음향임피던스와 음속과 입사파가 경계면에 직각으로 만들어지는 각도에 의존한다. 그림1과 같이 초음파가 음향임피던스 $r_1 = \rho_1 c_1$,

$r_2 = \rho_2 c_2$ 를 갖는 매질에 입사되면 음향임피던스 차이에 따라 일부는 투과되고 일부는 반사된다. 이때, 반사 계수 $R = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} = \frac{1 - r_1/r_2}{1 + r_1/r_2}$ 이고, $1 + R = T$ 이므로 투

과 계수 $T = \frac{2r_2}{r_2 + r_1} = \frac{2}{1 + r_1/r_2}$ 이다.

여기서, R은 항상 실수이다. 즉 $r_1 < r_2$ 이면 양수이고 $r_1 > r_2$ 이면 음수이다. 결과적으로 경계면에서 반사파의 음압은 입사파와 동일 위상이거나 180° 차이가

난다. 매질 2의 음향임피던스가 매질 1보다 크면 양수 음압을 갖는 입사파는 양수 음압으로 반사된다. 한편 $r_1 > r_2$ 이면 양수 음압은 음수 음압으로 반사된다. 음향임피던스가 같으면 반사계수는 0이고 완전히 투과된다. 투과계수 T 는 매질의 음향임피던스 r_1, r_2 에 무관하게 양수이다. 결과적으로 경계면에서 투과된 파의 음압은 항상 입사파와 위상이 같다.

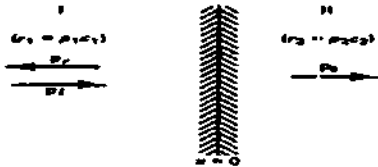
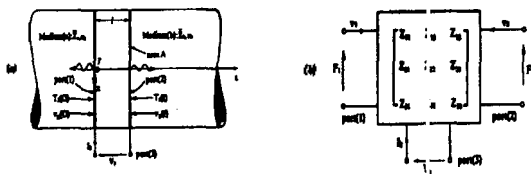


그림 1. 이중매질에서 초음파진달 특성

제 2 절 디스크형 트랜스듀서 해석용 등가회로

압전소자가 주위에 매체와 연결될 때 그 구조를 단순화하면 그림2와 같이 나타낼 수 있다.



(a) 트랜스듀서 기하구조

(b) 음향단자를 갖는 등가회로

그림 2. 디스크형 압전소자와 경계면 기하구조와 등가회로

매트릭스의 계수는 아래와 같은 관계식으로 계산된다. 이것을 Mason이 제안한 등가회로로 나타내면 그림 3과 같다. 여기서 F 와 V 는 각각 힘과 속도를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_0 \cot \beta_a l & Z_0 \csc \beta_a l & h/\omega \\ Z_0 \csc \beta_a l & Z_0 \cot \beta_a l & h/\omega \\ h/\omega & h/\omega & 1/\omega C_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

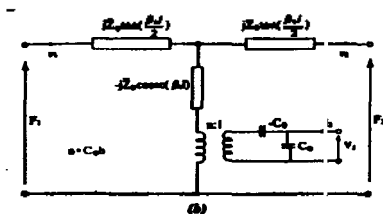


그림 3. Mason 등가회로

제 3 절 초음파트랜스듀서 해석

1. 초음파트랜스듀서 모델

여기에서는 식(1)을 시간에 대한 Laplace 변환 꼴로 바꾸어 시간영역 해석을 위한 새로운 등가회로로 변환한다. 식(1)은 전압과 전류들 사이의 관계가 주파수 ω 에 의존하는 형태로 나타나 있다. 이 식을 시간에 대한 함수로 나타내기 위해 복소주파수변수 p 를 도입하자.

$p = j\omega$ 라 하면 시간 t 에 대한 Laplace 역변환 형태인 p 의 함수로서의 임피던스 방정식 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_c \frac{Z^2+1}{Z-1} & Z_c \frac{2Z}{Z^2-1} & h/p \\ Z_c \frac{2Z}{Z^2-1} & Z_c \frac{Z^2+1}{Z-1} & h/p \\ h/p & h/p & 1/C_0 p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

그런데 힘 F 와 전기적인 전압 V 는 압전효과에 관련된 항과 압전효과를 무시한 항으로 나누어 쓸 수 있다. 힘 F 에 대해 압전효과에 의한 항을 F_p , 압전효과를 무시한 역학적인 항을 F_m 이라고 하고 전압 V 에 대해 압전효과에 의한 항을 V_p , 압전효과를 무시한 전기적인 항을 V_E 라 하면 식 (2)는 식 (3)의 형태로 표현된다.

$$F_1 = F_{m1} + F_p \quad \dots \dots \dots (3a)$$

$$F_2 = F_{m2} + F_p \quad \dots \dots \dots (3b)$$

$$V_3 = V_p + V_E \quad \dots \dots \dots (3c)$$

여기서 압전소자면에서의 속도 v_1, v_2 가 압전효과에 의해 압전소자 양단에 기여하는 전압 V_p 에 대해 고려하면 Laplace 역변환 과정을 거쳐 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$V_p(t) = h \int_0^t \{v_1(\tau) + v_2(\tau)\} d\tau \quad \dots \dots \dots (4)$$

이 식은 (5)의 형태로 바꿀 수 있다.

$$V_p(t) = \frac{1}{C_0} \int_0^t C_0 h \{v_1(\tau) + v_2(\tau)\} d\tau \quad \dots \dots \dots (5)$$

따라서 압전소자의 양단에 걸리는 전압은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_3(t) = \frac{1}{C_0} \int_0^t I_3(\tau) + C_0 h \{v_1(\tau) + v_2(\tau)\} d\tau \quad \dots \dots (6)$$

식 (6)은 압전소자 양단의 전압 $V_3(t)$ 가 전류 $I_3(t)$ 와 압전효과에 의한 추가적인 전류 $C_0 h \{V_1(t) + V_2(t)\}$ 가 흘러들어 갈 때 용량 C_0 인 콘덴서 양단에 걸리는 전압임을 의미한다.

2. 시간영역에서의 출력계산

1) 트랜스듀서의 진행과

이제 진행파가 매질 1에서 매질 2로 갈 때 반사 계수 R_{12} 와 투과계수 T_{12} 는 식 (7)과 같이 정의되고 매질 1의 진행파 경과시간을 t_1 이라 정의하면 진행파들 사이의 관계식을 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$R_{12} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}, T_{12} = 1 + R_{12} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (7)$$

만약 초음파 트랜스듀서가 초음파를 발생하는 경우 즉 transmitter로 동작하는 경우 진행파들 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$v_w^-(t) = T_{FW} \alpha_F V_F^-(t-t_F) \quad (8a)$$

$$v_F^+(t) = -R_{FW} \alpha_F V_F^-(t-t_F) \quad (8b)$$

$$v_F^-(t) = -R_{FC} \alpha_F V_F^-(t-t_F) + T_{CF} \alpha_C V_C^-(t-t_C) + \frac{F_P(t)}{Z_c + Z_F} \quad (8c)$$

$$v_c^+(t) = T_{FC} \alpha_F V_F^-(t-t_F) + R_{CF} \alpha_C V_C^-(t-t_C) - \frac{F_P(t)}{Z_c + Z_F} \quad (8d)$$

$$v_C^-(t) = -R_{CB} \alpha_C V_C^-(t-t_C) + T_{BC} \alpha_B V_B^-(t-t_B) + \frac{F_P(t)}{Z_c + Z_B} \quad (8e)$$

$$v_B^+(t) = T_{CB} \alpha_C V_C^-(t-t_C) - R_{CB} \alpha_B V_B^-(t-t_B) + \frac{F_P(t)}{Z_c + Z_B} \quad (8f)$$

$$v_B^-(t) = -R_{BW} \alpha_B V_B^-(t-t_B) \quad (8g)$$

식 (8)에서 α 는 각 매질에서의 감쇠계수로 매질이 lossless라 가정하면 $\alpha=1$ 이다. 식 (8a)에서 $v_w^-(t)$ 는 초음파 트랜스듀서에서 물속으로 전송되는 초음파이고 $v_w^+(t)$ 는 존재하지 않는다. 만약 초음파 트랜스듀서가 receiver로 작동할 경우 $v_w^-(t)$ 는 의미가 없으며, $v_F^+(t)$ 는 다음 식처럼 고쳐 쓰여진다.

$$v_F^+(t) = T_{WF} v_w^+(t) - R_{FW} \alpha_F V_F^-(t-t_F) \quad (8a')$$

윗 식에서 $v_w^+(t)$ 는 초음파 트랜스듀서가 받아들이는 파이다. 이제 식 (8)을 이용해 압전소자 양표면에서의 속도 $v_1(t)$ 과 $v_2(t)$ 를 구하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$v_1(t) = v_c^+(t) - \alpha_C v_c^-(t-t_C) \\ v_2(t) = v_c^-(t) - \alpha_C v_c^+(t-t_C) \quad (9)$$

일단 $v_1(t)$ 과 $v_2(t)$ 가 구해지면 압전효과에 기인하는 전류 $C_0(v_1(t) + v_2(t))$ 를 알게되므로 입력전류 $I_3(t)$ 을 알게되면 식 (6)에 의해 $V_3(t)$ 을 얻을 수 있다.

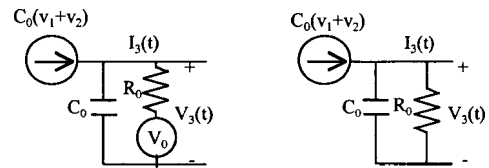
2) Transmitter 와 Receiver의 회로방정식

$v_1(t)$ 과 $v_2(t)$ 를 얻기 위해서는 $F_p(t)$ 를 알아야 하고 $F_p(t)$ 는 $I_3(t)$ 를 알아야 한다. 즉 $I_3(t)$ 가 구해져야 다시 $v_1(t)$ 과 $v_2(t)$ 를 구할 수 있고 $V_3(t)$ 도 구할 수 있다.

여기서는 초음파 트랜스듀서의 transmitter와 receiver 두가지 역할에 대해 등가회로를 보이고 각각의 경우에 대해 $I_3(t)$ 를 구하고자 한다. 먼저 transmitter 로 동작 시 입력전류 $I_3(t)$ 를 구해보자. 그림 4는 내부저항이 R_0 이고 구동전압이 $V_0(t)$ 인 pulser로 트랜스듀서를 구동한 경우를 등가회로로 나타낸 것이다. 등가회로 (그림 4(a))로부터

$$V_3(t) = V_0(t) - R_0 I_3(t) \quad (10)$$

이고 식 (6)을 이용하면 $I_3(t)$ 에 대한 선형미분방정식을 얻을 수 있다.



(a) 초음파 transmitter (b) 초음파 receiver

그림 4. 초음파 transmitter 와 receiver 등가회로

$$\frac{d}{dt} I_3(t) + \frac{1}{R_0 C_0} I_3(t) = \frac{d}{dt} V_0(t) + h \{v_1(t) + v_2(t)\} \quad (11)$$

식 (11)의 해는 다음과 같이 구해진다.

$$I_3(t) = \exp\left[-\frac{t}{R_0 C_0}\right] \int_0^t \frac{1}{R_0} \left[\frac{d}{dt} V_0(\tau) - h \{V_1(\tau) + V_2(\tau)\} \right] \exp\left[\frac{\tau}{R_0 C_0}\right] d\tau \quad (12)$$

receiver의 경우도 transmitter의 경우와 비슷하게 등가회로 (그림4(b))로부터

$$V_3(t) = -R_0 I_3(t) \quad (13)$$

식 (13)을 얻을 수 있고 $I_3(t)$ 에 대한 선형미분방정식을 만들면 식 (14)와 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} I_3(t) + \frac{1}{R_0 C_0} I_3(t) = -\frac{h}{R_0} \{V_1(t) + v_2(t)\} \quad (14)$$

따라서 $I_3(t)$ 에 대해 해를 구하면 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$I_3(t) = -\exp\left[-\frac{t}{R_0 C_0}\right] \frac{h}{R_0} \int_0^t \{V_1(\tau) + V_2(\tau)\} d\tau \quad (15)$$

식 (12)와 식 (15)에 의해 transmitter 와 receiver의 입력전류 $I_3(t)$ 가 구해졌다. 이제 transmitter가 발생시키는 속도와 $v_w^-(t)$ 를 얻을 수 있고 이 결과를 다시 식 (8a')에 $v_w^+(t)$ 로 입력하면 식 (15)를 이용해 식 (6)의 $V_3(t)$ 를 얻어 결국 receiver에 의해 출력되는 임펄스 응답을 얻을 수 있다.

3. 2 layer matching 구현

2 layer matching에서는 전술한 1 layer matching

