

## 비파괴 검사용 초음파 탐촉자에서의 정합층 최적 설계법

박치승<sup>†</sup> · 김선진  
한양대학교 재료공학과

### Design Method for the Optimized Acoustic Matching Layers of UT Probes

Chiseung Park<sup>†</sup> and Seon Jin Kim  
Division of Material Science and Engineering, Hanyang University Seoul, Korea

(2003년 9월 1일, 2003년 9월 30일 최종수정본 받음)

**Abstract** In this study, we have tried to find the optimized design variables of the matching layer which is important part of thickness mode ultrasonic transducer and finally reach the conclusion that the electrical property of piezo-element must be under consideration when the optimized acoustic impedance is estimated. Proper expression of the effective impedance of front load at free resonant frequency( $Z_f^{(0)}$ ) has been induced by introducing the principle of binomial multilayer transformer and gradient based numerical method is utilized to find the most acceptable value of  $Z_f^{(0)}$ . Optimized point of acoustic impedance can be calculated directly from  $Z_f^{(0)}$  using some simple formula which we propose. We also verify our result by both numerical and experimental method and get a good enhancement especially it concern to the bandwidth of ultrasonic transducer.

**Key words** matching layer, acoustic impedance, resonant frequency, bandwidth

## 1. 서 론

탄소강, 주강과 같이 높은 음향 임피던스를 가지는 재료에 직접 접촉하여 탐사를 수행하는 경우를 제외하면, 탐촉자가 사용되는 거의 대부분의 환경에서 압전소자와 전면부하와의 임피던스 차이가 매우 크다. 이러한 이유로 대부분의 초음파 탐촉자는 하나 이상의 임피던스 정합층을 가지도록 설계하며, 이는 에너지 전달 효율 및 대역폭 개선에 크게 기여한다.<sup>1,2)</sup> 거의 모든 탐촉자에서는 1/4파장 정합층을 사용하고 있으며, 그 물리적 근거는 기초 파동역학에서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 1966년 Kossof에 의하여 1/4파장 임피던스 정합층 사용이 제안된 이래, Goll과 Auld는 다층변환기를 제안했으며, 1976년 Desilet에 의하여 KLM 등가회로에 기반한 정합층 설계법이 제안되었다.<sup>3-5)</sup> Desilet에 의해 제안된 방법은 기연구결과(고전적 정합층 설계)보다 우수한 성능을 가지며 현재까지 꾸준히 사용되고 있다. 그러나 고전적 설계법은 물론 Desilet의 설계법 또한 압전소자의 음향학적 성질만이 고려하며 그 전기적 특성은 고려하지 않는다. 그 결과, 사용되는 정합층의 수가 증가하여도 에너지 전달 효율과 대역폭은 개선이 없으며, 이는 물리적, 직관적인 예측에 반(反)한다. 본 연구에서는 압전소자의 음향학적 성질뿐만 아니라 그 전기적 특성까지 고려한 정합층 설계

법을 제안하고, 그 우수성을 입증한다.

## 2. 탐촉자 시뮬레이션 및 설계에 대한 개관

### 2.1 KLM 등가회로

두께방향의 운동만을 고려하여 1차원 문제로 축소할 경우, 압전 파동 방정식의 해는 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있으며, 이 행렬을 임피던스 행렬이라 한다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_0' \cot 2\theta & Z_0' \cot 2\theta & \frac{h}{w} \\ Z_0' \cot 2\theta & Z_0' \cot 2\theta & \frac{h}{w} \\ \frac{h}{w} & \frac{h}{w} & \frac{1}{wC_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 행렬방정식으로부터 압전소자의 전기-기계 결합효과에 대한 해석이 가능하나, 이 Z행렬과 동일한 임피던스 행렬을 가지는 회로(등가회로)를 고안함으로써 해석 범위의 확장을 가져올 수 있으며, 그 물리적 의미에 대한 직관을 높여 준다. 이미 수많은 등가회로가 고안되어 왔으나 가장 널리 알려지고 유효한 것은 Mason 등가모델과 KLM 등가모델이다.<sup>6,7)</sup> KLM 등가모델(Fig. 1 참조)은 압전소자, 정합층, 후면층 등 압전소자의 음향적 부분을 전송선로로 대치하며, 구속 상태에서의 전기용량  $C_0$ , 복소 전기용량  $C_0'$ , 및 전기부분과 음향부분을 매개하는 권선

<sup>†</sup>E-Mail : cspark1@kaitec.co.kr

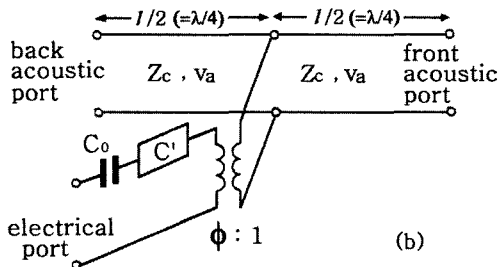


Fig. 1. KLM model.

비  $\Phi$ 를 가진 변압기로 이루어진다.

KLM 모델의 장점은 실제 탐촉자와의 유사성과 해석 대상의 확장성에 있다. 정합층 및 후면층이 첨가 될 경우, 해당 층에 대한 등가 회로를 새로이 구성해야하는 여타 등가모델과는 달리 적당한 전송선로를 첨가하면 되므로 해석의 확장이 매우 용이하다. 또한 압전소자의 절반을 각각 전/후면으로 향하는 하나의 정합층으로 취급하고 압전소자의 전기적-기계적 연성을 권선비에 부가함으로써 전기부분과 음향부분에 대한 명확한 구분이 이루어진다. 이 등가회로의 행렬을 구하고, 이 행렬로부터 왕복전달함수  $H = V_{out}/V_{in}$ 를 계산함으로써 탐촉자의 임펄스 응답을 효과적으로 모사할 수 있다.

### 2.2 Desilet의 설계법

고전적인 정합층 설계법은 각 층에서의 다중 부분반사에 대한 고찰에서 얻어지며, 널리 알려진 내용이므로 이에 대한 자세한 논의는 생략한다. 아래의 Table 1과 2는 고전적인 정합층 설계법과 Desilet에 의해 제안된 정합층 임피던스 공식을 보여준다. 여기서  $Z_1$ 는 압전소자로부터 전면부하 방향으로  $i$ 번째 정합층의 임피던스,  $Z_c$ 는 압전소자의 임피던스,  $Z_t$ 은 전면부하의 임피던스,  $Z_f$ 는 압전소자 전면에서 부하를 바라본 임피던스, 그리고  $Z_f^{(0)}$ 는 공진주파수에서의  $Z_f$ 이다. Desilet에 의하여 제안된 정합층 설계법은 압전소자의 전후면 절반을 각각 1/4 파장 정합층으로 보는 KLM 등가회로의 기본 아이디어에 그 기반을 두고 있다. 즉 첫 번째 정합층의 임피던

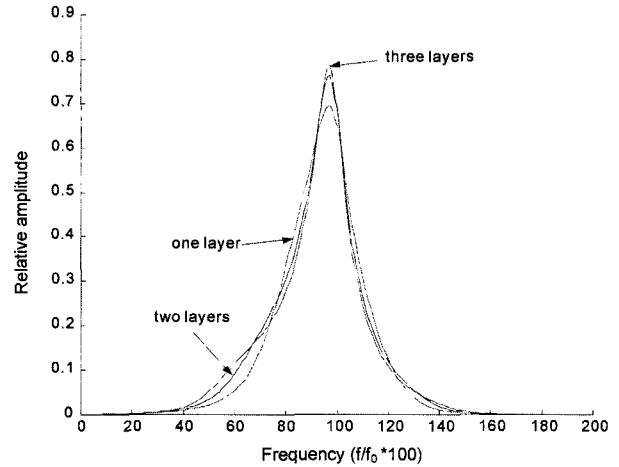


Fig. 2. Spectrum variation in complete transducer having different number of Desilet's matching layer.

스는  $Z_c$ 로 고정되며,  $Z_0$ 는 압전소자 중앙에서 압전소자 전면을 바라본 임피던스  $Z_f$ 로 대체된다. Desilet의 설계법에서  $Z_t$ 와  $Z_f^{(0)}$ 는  $Z_c$ 와  $Z_t$ 에만 의존하며,  $Z_t < Z_c$ 인 경우,  $Z_f^{(0)}$ 는 정합층수가 많아짐에 따라 증가한다.

Desilet에 의하여 제안된 방법은 고전적인 방법보다 우수한 정합효과를 가지며 이는 탐촉자의 성능과 직결된다. 그러나 이들 정합층 설계법은 전송선로에서의 임피던스 정합만을 고려하고 있으며, 이는 탐촉자의 음향적 성질만을 고려하고 있음을 의미한다. Fig. 2는 Desilet 설계법에 의한 일반형 탐촉자의 설계 예(주파수 응답특성)를 보여준다. 계산에 사용된 압전소자는 LM 디스크 ( $C_0 = 44$  nF,  $N_t = 1525$ ,  $Z_c = 19$  MRayl,  $f_0 = 2.0$  MHz,  $k_t = 0.30$ )이고, 전면부하와 후면재는 각각 루사이트( $Z_t = 3.2$  MRayl)와 우레탄수지-텅스텐카바이드 혼합물( $Z_b = 4.6$  MRayl)이다. 전기정합 네트워크의 직렬 인덕턴스는 15 uH이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 1층의 정합층이 가장 넓은 주파수 대역폭을 제공하는 것으로 보여진다. 즉 정합층의 추가적인 부여는 주파수 대역폭을 오히려 좁아지게 한다. 음향학적 관점에서 초음파 전달을 고려한다면, 정합층수가 증가할수록 주파수대역폭이 증가해야하지만, 실

Table 1. Classical matching layer formula.

Layers	Impedance	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_f^{(0)}$
1		$(Z_c)^{1/3} (Z_t)^{2/3}$			$(Z_c)^{2/3} (Z_t)^{1/3}$
2		$(Z_c)^{4/7} (Z_t)^{3/7}$	$(Z_c)^{1/7} (Z_t)^{6/7}$		$(Z_c)^{6/7} (Z_t)^{1/7}$
3		$(Z_c)^{11/15} (Z_t)^{4/15}$	$(Z_c)^{1/3} (Z_t)^{2/3}$	$(Z_c)^{1/15} (Z_t)^{14/15}$	$(Z_c)^{14/15} (Z_t)^{1/15}$

Table 2. Desilet's matching layer formula.

Layers	Impedance	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_f^{(0)}$
1		$(Z_c)^{1/3} (Z_t)^{2/3}$			$(Z_c)^{2/3} (Z_t)^{1/3}$
2		$(Z_c)^{4/7} (Z_t)^{3/7}$	$(Z_c)^{1/7} (Z_t)^{6/7}$		$(Z_c)^{6/7} (Z_t)^{1/7}$
3		$(Z_c)^{11/15} (Z_t)^{4/15}$	$(Z_c)^{1/3} (Z_t)^{2/3}$	$(Z_c)^{1/15} (Z_t)^{14/15}$	$(Z_c)^{14/15} (Z_t)^{1/15}$

제는 그렇지 않다는 것이다. 이는 압전소자의 전기적 특성에 기인한다. Table 2에서 알 수 있듯이, 정합층의 수가 증가함에 따라 압전판의 전면에서 바라본 전면부하의 실효임피던스  $Z_f^{(0)}$ 가 증가한다. 그러므로, Fig. 2의 결과는 가장 우수한 전기음향특성을 제공하는 부하의 최적 실효임피던스가 존재한다는 것을 강하게 암시하고 있다. 그러나 압전판과 부하의 음향임피던스만을 고려한 Desilet의 정합공식을 이용하는 현재의 초음파변환기 설계방법에서는 정합층의 수에 따라 부하의 실효임피던스  $Z_f^{(0)}$ 가 불연속적으로 변화하므로 그 최적값을 선정할 수 없다.

### 3. 새로운 정합층 설계법 제안

기 연구결과에 따르면 KLM 등가회로의 음향부분과 전기부분의 품질인자를 일치시킬 때 가장 효율적인 에너지 전달이 이루어지며 최적의 대역폭을 얻는다. KLM 등가회로에서 음향부분의 품질인자

$$Q_a \sim \frac{\pi 2Z_c - (Z_f/Z_c)^2 - (Z_b/Z_c)^2}{4 Z_f/Z_c + Z_b/Z_c} \quad (2)$$

는 6 dB 스펙트럼 폭을 정의 하는 두 주파수  $w_1$ 과  $w_2$  중에서 낮은 주파수에서 전체 시스템 임피던스의 저항성분과 리액턴스 성분이 같다는 사실에서 유도되며, 전기부분의 품질인자

$$Q_e \sim \frac{\pi}{4k_t^2} (Z_f/Z_c + Z_b/Z_c) \quad (3)$$

는 KLM 등가회로의 변압기에서의 운동임피던스와 RLC회로의 고찰로부터 얻어진다. 이 두 표현 식으로부터 후면제의 최적 임피던스는 아래와 같이 주어진다.

$$Z_b = \frac{-Z_f + \sqrt{Z_f^2 + (1 + k_t^2)[2Z_c^2 - Z_f^2]} - Z_f^2}{1 + k_t^2} \quad (4)$$

이 방정식은  $Z_b$ 에 대한 2차 방정식이므로 두 개의 해를 가지게 되며 이들이 양의 실근(후면제의 특성임피던스는 허수, 음수를 가질 수 없다)을 가지기 위해서는 전면부하의 임피던스가 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$Z_f < Z_c \sqrt{\frac{2k_t^2}{1 + k_t^2}} \equiv \bar{Z}_f \quad (5)$$

즉, 압전소자의 전기기계 결합 계수에 의존하는  $Z_f$ 의

한계 값이 존재한다는 결론을 얻는다. 이 한계 값을  $\bar{Z}_f$ 라고 하면,  $Z_f = \bar{Z}_f$ 에서  $Z_b = 0$ 이다. 다시 말해서  $Z_b = 0$ 일 때  $Q_a = Q_e$ 를 만족하는 전면부하 값이  $\bar{Z}_f$ 이다. 이 조건에서 가장 효율이 좋고 대역폭이 넓은 탐촉자를 얻을 수 있으나, 일반적으로  $Z_b \neq 0$  이므로 전면부하의 임피던스는 한계 값 보다 작은 어떤 값을 가진다:  $Z_f < \bar{Z}_f$  이미 언급한 바와 같이 Desilet의 설계법에서는 정합층의 수가 증가함에 따라 전면 부하가 증가하며, 압전소자의 전기적 특성에 근거한 한계 값  $\bar{Z}_f$ 은 고려하지 않는다. 본고의 연구에서는 Desilet 설계법의 이러한 문제점을 해결할 새로운 설계법을 제안한다.

본고에서 제안하는 것은 압전소자의 초음파특성과 전기특성을 함께 고려하여 음향임피던스 정합층을 새롭게 설계함으로써 압전변환기의 전기음향특성을 보다 향상시키고자 하는 것이다. 그 핵심 아이디어는 음향임피던스  $Z_f^{(0)}$ 가 층수에 따라 변하지 않는 정합층들을 고안하는 것이다. 마이크로파 분야에서 잘 알려진 바이노미얼 다층 변환기(binomial multilayer transformer)나 체비셰프(Chebyshev) 다층 변환기의 원리를 적용함으로써 이러한 정합층들의 임피던스 정합공식을 발견하는 것은 어렵지 않다.<sup>8-10)</sup> Table 3은 바이노미얼 변환기의 원리를 적용하여 다음 식으로부터 유도한 임피던스 정합공식을 보여준다.

$$\ln \frac{Z_{i+1}}{Z_i} = 2^{-n} C_i^n \ln \frac{Z_l}{Z_f^{(0)}} \quad (6)$$

여기서  $i = 0, \dots, n$ 이고  $Z_0 = Z_f^{(0)}, Z_{n+1} = Z_l, C_i^n = n!/((n-i)!i!)$ 이다. Desilet의 정합공식과는 달리, 각 정합층의 임피던스  $Z_i$ 는 전면부하의 임피던스  $Z_f$ 과는 무관함을 볼 수 있다:  $Z_i$ 는  $Z_c$ 와  $Z_f^{(0)}$ 에만 의존한다.  $Z_f^{(0)}$ 의 최적값은 초음파변환기의 임펄스 응답특성에 대한 컴퓨터 수치계산에 의해 발견될 수 있다.

### 4. 수치 해석

본고에서는 기존에 사용되어 오던 시간응답의 실수 부분으로 주어지는 rf 파형보다는 진폭으로 주어지는 비디오 파형을 사용한다. Fig. 3에서 보인 것처럼, 비디오 파형은 전파정류된 rf 파형의 포락선을 나타낸다. 음과 양의 두 피크를 갖고 진동하는 rf 신호 보다는 양의 한 피크를 갖고 단조 증가 또는 감소하는 비디오 파형을 이용함으로써, 초음파변환기의 임펄스 응답특성을 보다 정량적으로 평가할 수 있다. 단위 진폭을 갖는 전기임펄스

Table 3. New matching layer formula proposed in this study.

Layers	Impedance				
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_f^{(0)}$	
1	$(Z_c Z_f^{(0)})^{1/2}$			$Z_f^{(0)}$	
2	$(Z_c)^{3/4} (Z_f^{(0)})^{1/4}$	$(Z_c)^{1/4} (Z_f^{(0)})^{3/4}$		$Z_f^{(0)}$	
3	$(Z_c)^{7/8} (Z_f^{(0)})^{1/8}$	$(Z_c Z_f^{(0)})^{1/2}$	$(Z_c)^{1/8} (Z_f^{(0)})^{7/8}$	$Z_f^{(0)}$	

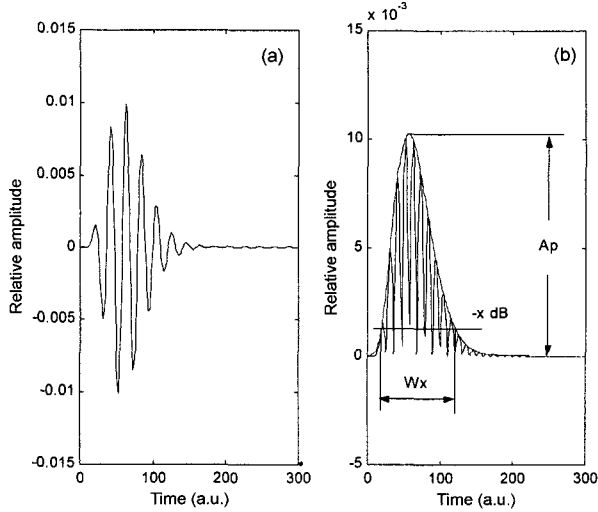


Fig. 3. Impulse response of transducer: (a) rf-waveform, (b) rectified rf-waveform and video-waveform.

에 대한 응답에코 진폭의 비를 의미하는 변환기의 상대 감도를 먼저 정의한다:

$$S_r = 20 \log(A_p), (A_p = V_{out}/V_{in}, V: \text{volt}) \quad (7)$$

여기서  $A_p$ 는 비디오 파형의 피크진폭이다. 이 상대감도는 항상 음의 값을 갖는다. 그리고 변환기의 성능지수를 다음과 같이 정의한다:

$$P_x = |S_r| W_x \quad (8)$$

여기서  $P_x$ 는 피크진폭의  $-x$ dB에 대응되는 파형폭을 나타낸다. 변환기의 감도와 분해능이 좋을수록,  $|S_r|$ 과  $W_x$ 는 둘 다 감소하므로 성능지수  $P_x$ 는 작아진다.

주어진 압전소자와 후면재에 대한  $Z_f^{(0)}$ 의 최적값,  $Z_f^{(d)}$ 를 찾기 위하여, 정합층이 없는 경우를 먼저 고려한다. 이 경우,  $Z_f$ 는 모든 주파수에서 일정한 실수 값을 갖는다:  $Z_f = Z_c$ .  $Z_f$ 값을 체계적으로 변화시키면서 상대감도, 파형폭, 성능지수를 계산하고, 그 결과로부터  $Z_f^{(d)}$ 를 결정한다. 예로써, Fig. 4는 정합층과 전면부하를 제외한 다른 모든 설계매개변수들이 Fig. 2의 경우와 같을 때 얻어진 계산결과들이다. 감도는  $Z_f$ 와 함께 증가한다. 가장 우수한 분해능을 제공하는  $Z_f$ 값과 최소의 성능지수를 제공하는  $Z_f$ 값이 존재함을 볼 수 있다:  $Z_f$ 값( $=0.43Z_c$ ). 이는 일반형 탐촉자에 해당되는 사항이며, 고감도 초음파 변환기의 경우는 높은 상대감도와 적절한 파형폭을 제공하는  $Z_f$ 값이, 고분해능 초음파 변환기의 경우는 좁은 파형폭과 적절한 상대감도를 제공하는  $Z_f$ 값이  $Z_f^{(d)}$ 로 결정된다.

이제 위에서 설명된 방법으로  $Z_f^{(d)}$ 를 결정 한 후, 정합층이 있는 경우를 고려한다. 각 정합층의 임피던스  $Z_n$ 는  $Z_f^{(0)} = Z_f^{(d)}$ 로 둬므로써 Table 3으로부터 얻어질 수 있다.

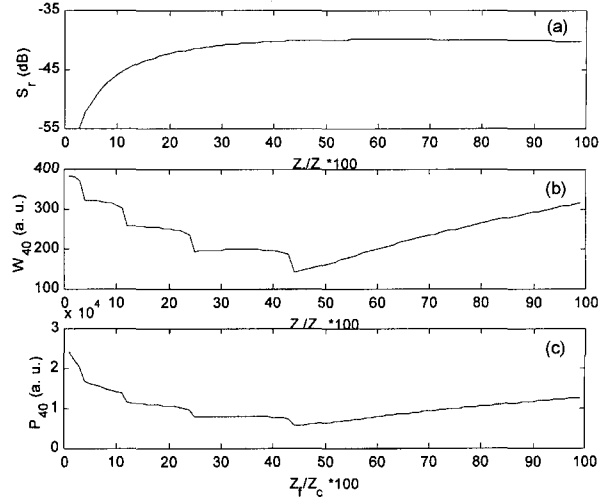


Fig. 4. Dependence of (a) relative sensitivity, (b) pulse duration, (c) performance index, on front load impedance without matching layer.

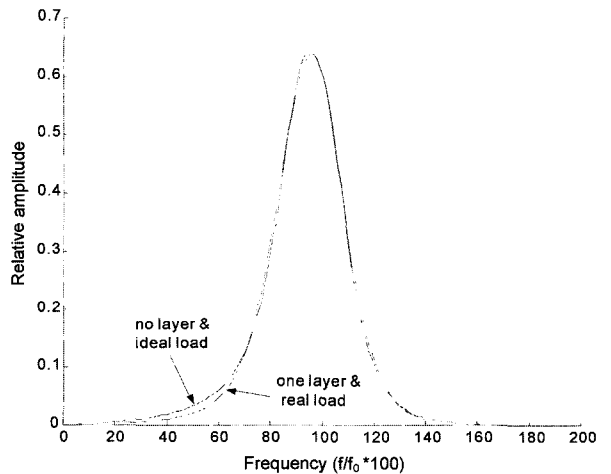


Fig. 5. Spectrum variation in complete transducer having different number of matching layer newly proposed.

Fig. 5는 정합층을 제외한 모든 설계매개변수들이 Fig. 2의 경우와 같을 때 정합층의 수에 따른 초음파 변환기의 주파수 스펙트럼 변화를 보여준다. 여기서 0층은 정합층 없이 전면부하 임피던스  $Z_f$ 이 최적설계값  $Z_f^{(d)} (=0.43Z_c)$ 를 갖는 이상적인 경우이다. 1층의 정합층만으로도 이상적인 0층의 경우에 충분히 가까이 접근함을 볼 수 있다; 그래서 2층과 3층의 정합층을 갖는 초음파 변환기들에 대한 주파수 스펙트럼은 나타내지 않았다.

Fig. 6은 한 층의 정합층을 갖고 이 정합층을 제외한 모든 설계매개변수들이 Fig. 2와 같을 때  $Z_f^{(0)}$ 값에 따른 초음파 변환기의 비디오 파형 변화를 직접적으로 보여준다.  $Z_f^{(0)} = 0.55Z_c$ 일 때의 파형은 Desilet의 정합공식에 따라 정합층의 임피던스를 선택한 경우이고,  $Z_f^{(0)} = 0.43Z_c$ 일 때의 파형은 본고에서 제안한 새로운 정합공식에 따라 정합층의 임피던스를 선택한 경우이다. 상대감도와 -

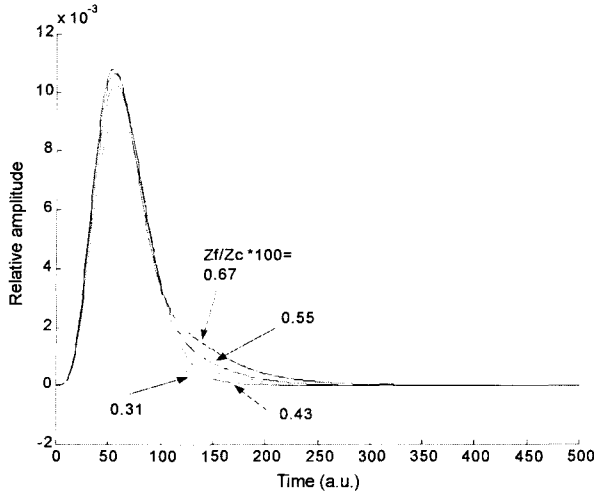


Fig. 6. Variation of video-waveform of impulse response on front-load impedance

40 dB 파형폭은 전자파의 경우 -39.5 dB과 207이었고, 후자의 경우는 -39.9 dB과 154이었다. 상대감도의 차이는 0.4 dB 불과하지만, 분해능은 후자의 경우가 전자보다 26% ( $= (207 - 154) / 207$ ) 정도 개선됨을 알 수 있다. 또한,  $Z_f^{(0)}$  값에 따른 초음파변환기의 비디오 파형 변화를 보다 자세히 보여주기 위해, Fig. 6에는 다른 두  $Z_f^{(0)}$  값(0.31  $Z_c$ , 0.67  $Z_c$ )들에 대한 파형들도 포함시켰다.

## 5. 결 론

압전소자 등가회로의 전기부분과 음향부분의 품질계수에 관한 논의로부터 압전소자의 전기적 특성을 고려한 정합층 설계법을 제안하였다. 기존의 초음파 변환기 정합

층 설계법에 비하여 본고에서 제안한 설계방법은 다음과 같은 장점들을 갖는다: (1) 같은 후면재를 사용할 경우, 보다 우수한 전기음향 특성을 갖는 변환기의 설계 및 제조를 가능하게 한다. 이는 전면부하 실효임피던스의 최적화에 기인한다. (2) 초음파변환기의 사용용도에 따른 전면부하 실효임피던스  $Z_f^{(0)}$ 의 유연한 선택이 가능하므로, 정합재와 후면재의 선정에 보다 높은 자유도를 제공한다. 또한, (3) rf 파형보다는 비디오 파형을 사용함으로써, 초음파변환기의 내부구조에 민감한 전기음향특성(특히, 파형폭)의 정량적인 평가가 가능하다.

## 참 고 문 헌

1. J. Krautkramer, Ultrasonic Testing of Material, Springer-Verlag, Berlin (1977).
2. L. E. Kinsler, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, New York (1982).
3. G. Kossoff, IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics **13**, 20 (1966).
4. J. Goll, and B. A. Auld, IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics **22**, 53 (1975).
5. C. S. Desilets, J. D. Fraser, and G. S. Kino, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics **25**, 115-125 (1978).
6. W. P. Mason, Electromechanical Transducers and Wave Filters, Van Nostrand, Princeton, N.J. (1948).
7. R. Krimholtz, D. Leedom, and G. Matthaei, Electronics Letters **6**, 398 (1970).
8. D. M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, New York (1988).
9. G. S. Kino, Acoustic Waves, Devices, Imaging & Analog Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1987).
10. V. M. Ristic, Principles of Acoustic Devices, John Wiley & Sons, New York (1998).