

고출력 광대역 초음파 탐촉자를 위한 정합층 설계

Design of Matching Layers for high Efficiency-wide band Ultrasonic Transducers

김연보*, 노용래**
(Yeonbo Kim*, Yongae Roh**)

요약

초음파 탐촉자의 응용분야를 크게 고해상도 분야와 고출력 분야로 나누어 각각의 경우에 대하여 가장 우수한 탐촉자 성능을 구현케 하는 정합층의 물성을 결정하고자 하였다. 나아가 동일한 탐촉자에 대해 이 두 가지 특성이 모두 우수한 것을 요구하는 경우가 일반적이므로 각각의 분야에 대해 동시에 최선일 수는 없으나 두 분야에 공히 만족스러운 특성을 나타낼 수 있도록 하는 정합층의 물성을 최적화 하고자 하였다. 통상적인 등가회로 해석법과는 달리 탐촉자 구성매질들 간의 경계면에서의 투과, 반사계수들을 반복 계산하는 방법을 통해 시간영역에서의 파형을 직접 구하고 이를 Fourier Transform하여 주파수 특성을 관찰하여 전형적인 탐촉자의 구조에 대하여 해석한 결과, 각 응용분야별로 가장 우수한 성능을 나타내는 정합층의 조합을 찾아내었다. 본 연구에서 찾은 정합층의 조합은 고출력용, 광대역용으로 각각 특화된 것으로 J. H. Goll과 C. S. Desilets의 방법들과 같은 기존의 연구결과들에 비해서 최대 57%까지 탐촉자 성능의 개선효과를 보였다. 나아가 고해상도와 고출력이 동시에 요구되는 응용분야에 대한 탐촉자의 성능평가를 위하여 새로운 평가지수를 개발하였으며, 적용결과 기존의 정합층 설계방법들에 의한 것 보다 양 특성 모두에 걸쳐 더 우수한 탐촉자 성능을 구현할 수 있었다. 본 연구에서 수행한 정합층 설계방법은 다양한 형태의 탐촉자 개발에 있어 유용한 정합층 및 후면층 설계기술로 적용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

Application fields of ultrasonic transducers can be divided into two categories, a high ultrasonic resolution required field and a high ultrasonic power required field. This paper is aimed to determine the optimal properties of the matching layers of the transducer for each of the applications. Further, it is aimed to optimize the properties of the matching layers that show satisfactory performances for both of the application fields. Through the direct time domain analysis of the transmission and reflection behavior of the ultrasonic wave, apart from the conventional equivalent circuit analysis, and Fourier transformation of its results, we found the optimum acoustic impedances of the matching layers. The newly determined layers provide much better transducer performance-57% at most-than those obtained with conventional design methods. Based on the results, we also found the optimal acoustic impedances of the layers good for both of the application fields. For the optimization, we developed a new transducer performance evaluation parameter that can be applied to any type of ultrasonic transducers.

I. 서론

의료용 초음파 진단기나 산업설비용 비파괴검사장치에서 초음파 탐촉자는 직접 음향신호를 발신하고 수신하는 핵심부품이다. Fig. 1은 일반적인 압전형 초음파 탐촉자의 구조로써 전기-음향 변환특성을 가지는 압전세라믹스를 중심으로 그 전후에 탐촉 대상체와의 음향적 결합

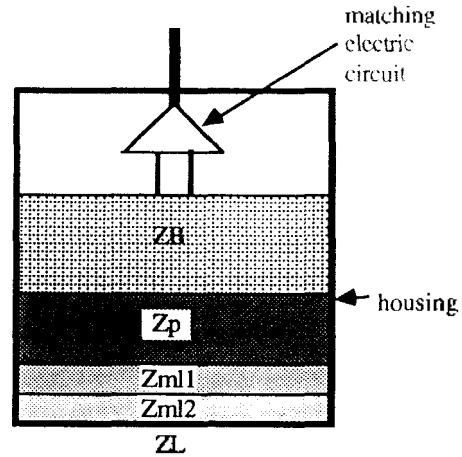
을 용이하게 하기 위해 적절한 음향 임피던스를 갖는 정합층과 후면층이 부착되어 있다. 그리고 이것과 연결되는 측정기와외 전기적 결합특성을 향상시키기 위한 정합회로 등으로 구성되어 있다. 여기서 후면층은 압전소자에 의해 후면으로 발신된 초음파가 전면으로 반사되어 돌아오는 것을 방지하기 위한 것이며, 정합층은 압전소자에서 생성된 초음파가 대상 매질(여기서는 물) 속으로 가장 효율적으로 전파해 나갈 수 있도록 음향 임피던스의 결합을 증진시키는 역할을 한다. 이들 중 가장 중요한 부분은 외부에서 가해진 전기에너지를 기계적 진동에너지로 변환시키는 압전소자이다. 그러나 이것에 관해서는

*대구대학교 정보통신공학부
**경북대학교 전자전기공학부/센서기술연구센터
접수일자: 1996년 6월 27일

이미 많은 연구가 이루어져서 지금은 응용범위만 주어지면 요구사항에 맞는 압전소자들이 상용화되어 있는 상태이다¹¹⁾. 반면에 탐촉자 성능에 절대적인 영향을 미치는 정합층에 관하여서는 상대적으로 사용되는 재료의 특성이나 상용화 부분에서 미흡한 실정이다.

초음파 탐촉자의 정합층 설계는 탐촉자의 용도에 따라 다르다. 용도를 크게 두 분야로 나누면 초음파의 고출력 응용분야와 고해상도 응용분야로 나눌 수 있다¹²⁾. 탐촉자의 분해능을 향상시킨 고해상도 응용을 위해서는 초음파가 짧은 지속시간(ringdown time)과 동시에 넓은 주파수 대역(bandwidth)이 요구된다. 통상 파형의 지속시간이 짧으면, 이것을 Fourier 변환한 주파수특성은 넓어지기 때문에 이것은 동일한 요건이라 할 수 있다. 반면에 고출력의 초음파를 얻기 위해서는 작동 주파수 대역폭은 어느 정도 감소 시키더라도 나타난 파형의 피크 진폭(peak amplitude)을 가능한 한 크게 하여야 할 것이다. 일반적으로 고출력의 초음파를 얻기 위해 널리 사용되는 Tonpitz 구조는 저주파 대역에서는 효율적이나 고주파 대역에서는 주파수대역의 감소가 커서 수 MHz대의 고주파대역용 탐촉자에서는 얇은 압전소자에 높은 압축응력을 가하기 어렵기 때문에 Fig. 1과 같은 구조를 취할 수 밖에 없다. 초음파 탐촉자에서 넓은 작동 주파수대역을 구현할 것인가, 아니면 최대 진폭을 구현할 것인가 하는 문제는 압전소자의 영향도 크지만 정합층의 물성에 의해서도 크게 영향을 받는다. 정합층에 관한 기존의 연구들은 대부분이 탐촉자가 광대역특성을 가지도록 하여 탐촉자의 해상도를 높이는 것이 그 목적이었다.¹³⁻¹⁵⁾ 반면에 고출력의 초음파를 발생시키기 위한 정합층의 물성에 관해서는 상대적으로 연구가 미진한 편인데 대표적인 연구사례로 C. S. Desilets의 결과가 있다.¹⁶⁾ 그러나 이것이 협대역 액추에이터로만 사용하는 경우를 제외한 대부분의 경우 가장 바람직한 것은 주어진 전압에 대해 발생된 초음파의 파형이 광대역과 동시에 고출력의 것이 요구되지만, 이 두 가지를 동시에 만족시키는 것이 상당히 어렵다. 그러므로 양 특성 모두가 우수한 탐촉자의 정합층의 물성을 결정하기 위해서는 기존의 정합층 설계 방법만으로는 정확한 해를 구하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 전형적인 구조의 초음파 탐촉자를 대상으로 동일한 압전소자에 대하여 정합층의 물성을 변화시킴에 따라 탐촉자의 성능에 어떠한 변화가 나타나는지를 밝히고 그 결과에 따라 최적 정합층의 물성을 결정하고자 한다. 이것을 위하여 이미 개발되어 널리 사용되고 있는 정합층의 설계에 관한 대표적인 결과들을 인용하여 그 때의 시간영역, 주파수 영역에서의 파형을 관찰하고, 다음으로 정합층으로 사용될 수 있는 여러 물성들을 본 연구의 탐촉자 모델에 대입하여 얻은 결과를 기존의 결과들과 비교해 보고자 한다. 그 결과로서 최대 출력이 요구될 때, 넓은 주파수 대역이 요구될 때, 그리고 고출력과 광대역이 동시에 요구될 때의 정합층의 최적물성들을 결정하고자

한다.



- ZB : backing material impedance
- Zp : PZT impedance
- Zm1 : first matching layer impedance
- Zm2 : second matching layer impedance
- ZL : acoustic radiation medium impedance

Fig. 1. Typical structure of an ultrasonic transducer. This specific model consists of a piezoceramic disk, two matching layers, and a backing material.

II. 해석 이론

압전 초음파 탐촉자의 해석에 일반적으로 이용되는 방법은 탐촉자의 특성을 Mason이나 Krimholtz, Leedon 그리고 Matthaei(KLM)의 등가회로를 구성하여 주파수 특성을 규명하고, 그 결과를 역 Fourier 변환하여 시간영역에서의 특성을 구하는 것이다. 이것은 탐촉자의 주파수 특성을 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있지만, 넓은 작동 주파수대역이 반드시 우수한 선형성의 위상특성을 보장하는 것도 아니며, 실제 탐촉자의 사용시 직접 측정되는 것은 시간영역의 파형이며 이 파형을 간접적으로 구한다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 음향 임피던스를 가지는 매질들의 경계면에서의 투과계수 및 반사계수를 반복적으로 계산하여 압전소자에서 발신, 수신되는 음파를 결정하는 방법을 이용하여 시간영역에서의 파형을 직접 구하고 그 결과를 Fourier 변환하여 주파수 특성을 간접 구현하는 방법¹⁷⁾으로 탐촉자의 성능을 평가하고자 한다. 이상의 두 방법중 어느 것이 더 우수하다고 단정 지우기는 어렵지만 본 연구에서 채택한 방법은 실제 실험 상황을 직접적으로 묘사할 수 있다는 장점과 모델링에 소요되는 계산 시간이 월등히 짧다는 이점이 있다. 그리고 본 연구에서는 정합층 재료의 음향임피던스는 감쇠계수를 무시한 실수 값만을 사용하였지만 향후 정합층, 후면층, 압전소자, 방사 음향매질 등의 감쇠특성

5. 함께 고려하고자 할 때 각 부분들의 복소 유향특성을 적용하기가 이 방법이 훨씬 용이하다는 장점이 있다.

과형계산의 기본이론⁷⁾을 간단히 설명하면 다음과 같다. 탐촉자의 구조를 임피던스 배열에 따라 Fig. 2와 같이 평면적으로 나타내고, 압전 구조방정식

$$\begin{aligned} T_{33} &= c_{33}^E S_3 - e_{33} E; \\ D_3 &= e_{33} S_3 + \epsilon_{33}^S E; \end{aligned} \quad (1)$$

을 만족하는 압전소자에 외부 전압이 인가되면 소자의 양단에서는 발생된 초음파에 대한 힘의 평형이 이루어져야 하는데, 소자와 정합층간의 경계면에서 힘(Force)의 평형 방정식을 표시하면 식 (2)와 같다.

$$(Z_p + Z_{ml}) v = c_{33} V_{in} \frac{A}{l} \quad (2)$$

식(1), (2)에서 T는 응력, S는 변형을, D는 전기변위, E는 전계, c는 탄성 강성계수, e는 압전계수, ε은 유전상수, A는 각 매질의 단면적, l은 압전소자의 두께이고, v는 발생된 초음파의 속도이다. 식 (2)로부터 경계면에서의 속도에 의해 발생되어 각 매질로 전파하는 초음파의 힘 성분인 진폭 F는 첫 번째 정합층의 경우 다음 식 (3)

$$\begin{aligned} F_{ml} &= Z_{ml} v \\ &= \frac{c_{33} V_{in} A}{l} \frac{Z_{ml}}{Z_p + Z_{ml}} \end{aligned} \quad (3)$$

으로부터 구할 수 있다. 동일한 요령으로 Fig. 2에 나타난 다른 진폭들도 구할 수 있을 것이다. 이것들이 나머지 매질들의 경계면을 통과할 때 나타나는 투과계수와 반사계수들을 계산하여 초기의 진폭에 곱해주면 최종적으로 블록속으로 전파해 가는 파형을 구할 수 있다.

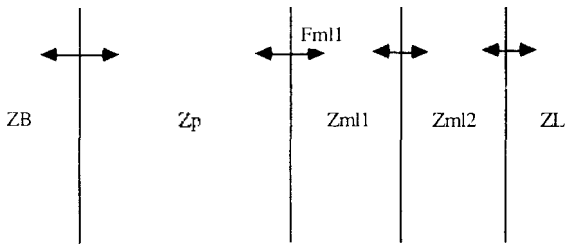


Fig 2. Generation of acoustic waves by the piezoelectric element (Zp) and successive transmission and reflection of the waves at adjacent layer interfaces.

본 연구를 위해 시뮬레이션 프로그램을 작성하였는데, 각 매질들간의 투과계수와 반사계수의 계산은 위의 기본이론⁷⁾을 바탕으로 좀 더 발전된 행렬계산 방식인 반복계산법⁸⁾을 사용하였다. 계산을 통하여 구한 탐촉자 성능은

Pulse-Echo 시험을 모두 거친 상태, 즉 초음파 송신자로서의 특성과 수신자로서의 특성이 결합된 최종성능이다. 탐촉자가 수신자로 작동할 때는 발신특성 해석시 구한 최종 파형을 탐촉자의 표면, 즉 최외곽 정합층에 다시 입력시켜 위의 투과, 반사계수 계산과정을 역으로 수행하여 압전소자 표면에서의 속도를 구하여 식 (4)로부터 소자에 발생하는 변위 x를 구하고, 식 (5)로부터 최종적으로 압전소자에 발생하는 출력전압 V_{out} 를 구하였다.

$$x = \int_0^{t_0} v dt \quad (4)$$

$$V_{out} = \frac{h_{33}}{Z_p} \quad (5)$$

식(4), (5)에서 t_0 는 파형의 총 지속시간이고, h_{33} 는 압전계수이다. 탐촉자의 최종 응답특성은 V_{out}/V_{in} 이 된다. 본 연구에서는 이렇게 구한 탐촉자 성능의 우열을 평가하는 요소로, 고출력성을 평가하기 위한 응답의 피크진폭(A_p)과 광대역성을 평가하기 위한 -6dB 감쇠대역 값(BW)을 구하여 비교하였다. 해석과정에서 Fig. 1의 모델에 나타난 정합회로와 외장의 영향은 무시하였으며, 압전소자 및 각 층의 유한 단면적의 영향은 각 매질의 임피던스 값에 포함하였다. 모델에서 정합층의 두께는 압전소자에서 발생하는 초음파의 중심 주파수 파장의 1/4로 하였다. 후면층 역시 탐촉자의 성능에 상당한 영향을 주지만 본 연구는 정합층의 최적물성을 구하는 것이므로 이것의 영향은 고려하지 않고 단지 이것의 두께가 충분히 두꺼워서 후면층으로 입사된 음향파가 다시 압전소자 쪽으로 반사되어 돌아오는 경우는 없다고 가정하였다.

III. 해석 결과 및 고찰

Fig. 1의 모델에 사용된 압전소자와 후면층의 물성은 표 1에 나타내었다. 본 연구에서 정합층의 물성은 여러가지로 변화를 시켰지만 다른 물성들은 동일하게 유지하였다. 해석에서 압전소자와 정합층의 임피던스는 허수값은 고려치 않고 실수값만을 적용하였으며, 후면층의 물성으로는 표 1의 실수값 외에 주어진 두께에서 초음파의 반사를 방지할 수 있도록 충분히 큰 감쇠계수를 임의로 설정하여 임피던스의 허수 값으로 사용하였다. 정합층의 물성에 관해서는 많은 사람들이 연구를 수행하여 왔는데, 그 대표적인 예로서 J. H. Goll과 C. S. Desilets의 경우를 표 1의 값 일때 연속한 2개의 정합층의 물성값들을 구하여 표 2에 나타내었다. 이것들은 각각 압전세라믹스 단면적의 유한성 고려여부, Mason 혹은 KLM의 등가회로 사용여부 등에 따라 다소 차이가 있지만, 본 연구의 주제 면에서 보면 Goll의 정합층은 넓은 주파수대역에 중점을 두었으며, Desilets의 정합층은 광대역 못지 않게 탐촉자의 효율성 즉 고출력화에도 비중을 두었다는 점이다. 따라서 이들 두 경우는 본 연구의 주제에 대한 대표적인 기준

Table 1. Properties of the materials composing the ultrasonic transducer.

| | | | |
|------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------|
| PZT | ϵ_{33} | 15.8 | C/m ² |
| | h_{33} | 21.5×10^8 | V/m |
| | ϵ_4 | 1700 | |
| | f_r (resonant freq.) | 3.5 | MHz |
| | sound velocity | 4350 | m/s |
| | density | 7750 | Kg/m ² |
| | area | 1820 | mm ² |
| backing material | acoustic impedance | 3.65 Mrayl (Kg/m ² sec) | |
| radiation medium | acoustic impedance | 1.5 Mrayl (Kg/m ² sec) | |

Table 2. Properties of matching layer with conventional impedance matching formulae.

| | J. H. Goll | C. S. Desilets |
|----------|------------|----------------|
| Z_{m1} | 15.5 | 8.9 |
| Z_{m2} | 3.3 | 2.3 |

Unit: Mrayl

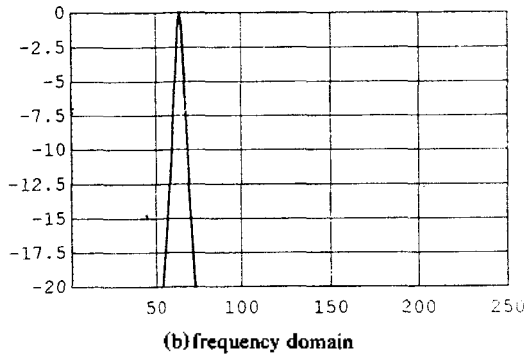
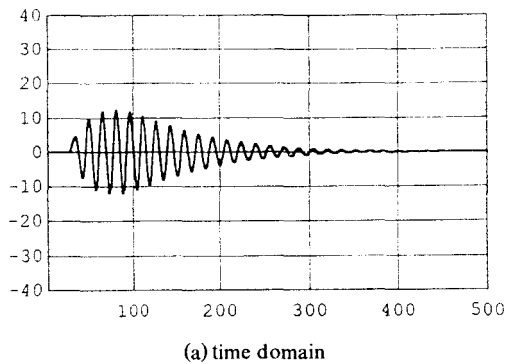


Fig 3. Time domain and frequency domain performances of the transducer without any matching layers

의 연구사례가 될 수 있다.

Fig. 3은 정합층을 부착하지 않을 때의 Pulse-Echo 모의시험 결과이고 표 1에 나타난 경우의 정합층들의 물성을 각각 Fig. 1의 모델에 대입하여 탐촉자로 Pulse-Echo 모형시험을 수행했을 때의 결과를 나타내었는데 Fig. 4는 Goll의 경우, Fig. 5는 Desilets의 경우를 각각 나타낸다.

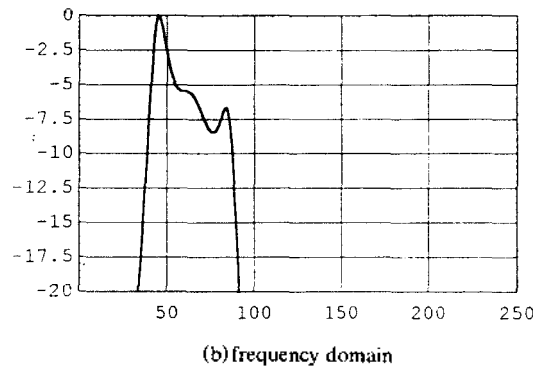
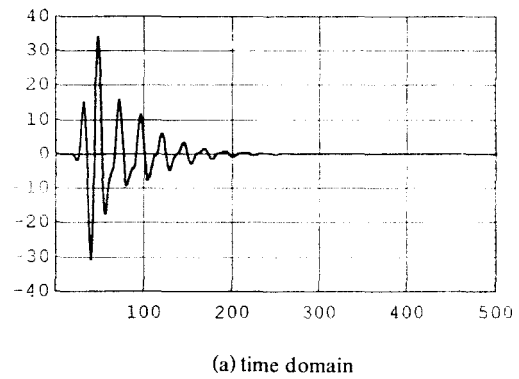


Fig 4. Time domain and frequency domain performances of the transducer with the matching layers following the formula of J. H. Goll

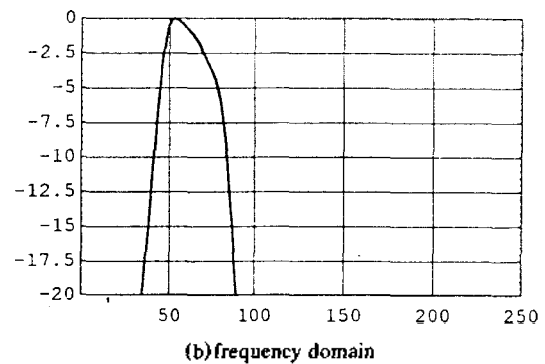
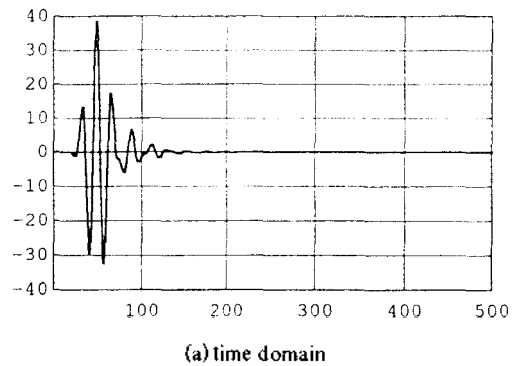


Fig 5. Time domain and frequency domain performances of the transducer with the matching layers following the formula of C. S. Desilets

그림에서 보는 것처럼 C. S. Desilets의 정합층이 J. H. Goll의 그것보다 전반적으로 우수한 특성을 보이고 있는데, J. H. Goll의 경우 최대피크진폭(A_p)은 33.9, 최대대역폭(BW)은 40.6%이고, C. S. Desilets의 경우는 각각 38.4, 57.8% 이었다. 이들 결과는 기존의 등가회로 해석법으로 설계한 정합층에 의한 것으로, 본 연구 결과의 효용성을 평가하는 기준이 된다. 본 연구에서는 Fig. 1의 모델에 실제 적용 가능한 범위내의 정합층의 물성들을 단계별로 연속적으로 변화시켜 탐촉자의 응답특성을 구하였다. 적용한 정합층의 음향 임피던스는 1차 정합층(Z_{m1})의 경우 5.0-20.0 Mrayl, 2차 정합층(Z_{m2})의 경우 1.5-5.0 Mrayl의 범위로 설정하였다¹⁾. 표 1의 물성에 대한 사전 계산을 통하여 이 범위의 값들만이 탐촉자의 성능을 향상시키는 역할을 하고, 이 밖의 물성들은 오히려 탐촉자의 성능을 저하시키는 것이 확인되었다. 정합층은 통상 고무나 에폭시 계열의 고분자재료에 비중이 큰 고체 입자를 혼합하여 제작하는데, 현실적으로 20.0 Mrayl 이상의 높은 임피던스를 구현하기는 매우 어렵다. 이 범위의 임피던스에 대한 계산 결과는 Fig. 6과 7에 나타나 있다. 그림에 나타난 A_p 와 BW는 각각의 최대값에 대해 표준화된 수치를 나

타낸다. 그림에서 보듯이 음향파의 피크 진폭과 주파수 대역폭은 특정 물성의 정합층들이 조합될 때 각각 최대 값을 보이고 이것에서 멀어질수록 감소함을 알 수 있다.

Fig. 6에서 피크 진폭의 최대값이 나타날 때를 2차원적으로 자세히 보인 Fig. 8에서 알 수 있듯이 정합층의 임피던스가 Z_{m1} 이 9.7 Mrayl, Z_{m2} 가 2.8 Mrayl 일 때 A_p 가 최대로 나타났다. 그 때의 파형 및 주파수특성은 Fig. 9에 보였는데 A_p 는 39.0, BW는 54.7%이었다. 본 연구에서 얻은 정합층의 임피던스는 J. H. Goll의 값과는 큰 차이를 보이지만 C. S. Desilets의 그것과는 상당히 근접한다. A_p 는 Goll과 Desilets의 경우에 비해 각각 15.0%, 1.6% 크게 나타났다. 동일한 방법으로 작동 주파수 대역의 변화를 관찰해 보면 최대 BW는 Z_{m1} 이 11.6 Mrayl, Z_{m2} 가 3.0 Mrayl 일 때 이었으며 그때의 파형 및 주파수 특성을 Fig. 10에 보였다. Fig. 10에서 A_p 는 38.3, BW는 64.1%이었다. Fig. 9와 비교해 볼 때 A_p 는 약 1.8% 감소하였으나, BW는 약 14% 증가하였다. Fig. 10에서 BW는 J. H. Goll과 C. S. Desilets의 결과 보다 각각 57%, 11% 증가된 값이다. 이상의 결과들을 바탕으로 A_p 와 BW가 모두 우수한 경우의 정합층 물성들을 결정하고자 하였다. 앞의 결과에서 보듯이 하나의 정합층 쌍에 의해 최대의 피크진폭과 작동 주파수에서 대역폭이 동시에 최대가 될 수는

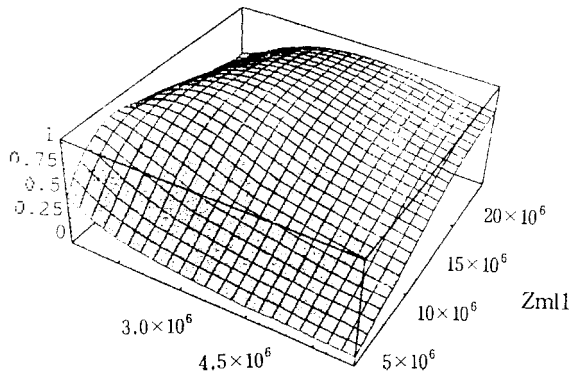


Fig 6. Variation of the peak amplitude (A_p) with matching layer impedances, Z_{m1} and Z_{m2} .

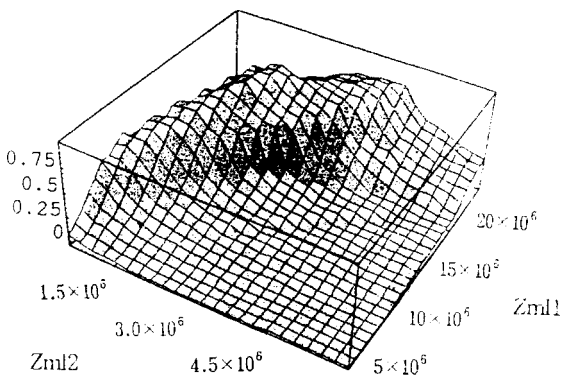
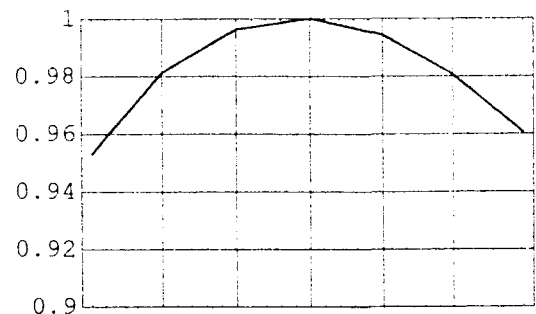
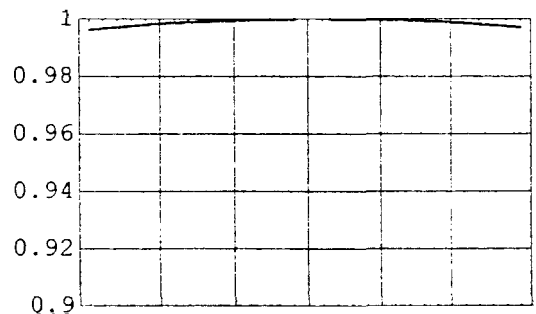


Fig 7. Variation of the bandwidth (BW) with matching layer impedances, Z_{m1} and Z_{m2} .



(a) change of Z_{m1} for a fixed Z_{m2}



(b) change of Z_{m2} for a fixed Z_{m1}

Fig 8. Two dimensional variation of the peak amplitude (A_p) with matching layer impedances, Z_{m1} and Z_{m2} .

없기 때문에 이들 두 특성값이 모두 만족할 만큼 우수한 경우를 선정하기 위하여 다음의 평가식을 고안하였다.

$$\text{Evaluation} = \frac{20 \log_{10}(A_p) - 20 \log_{10}(A_{p_0})}{20 \log_{10}(A_{p_{\max}}) - 20 \log_{10}(A_{p_0})} + \frac{BW - BW_0}{BW_{\max} - BW_0} \quad (6)$$

여기서 A_{p_0} 는 Fig. 3에서 보인 정합층이 없을 때의 피크 진폭, $A_{p_{\max}}$ 는 Fig. 9에 나타난 최대피크 진폭이고, A_p 는 평가하고자 하는 정합층의 피크진폭이다. 즉 식 (6)의 첫째 항은 최대 피크진폭이 나타나는 경우와 정합층이 없을 때의 피크진폭 차이에 대한 임의의 경우와 정합층이 없을 경우와의 피크진폭 차이의 상대적 비를 나타낸다. 동일한 요령으로 BW_0 는 정합층이 없을 때의 대역폭이며, BW_{\max} 는 Fig. 10에 나타난 최대 대역폭으로서, 식 (6)의 두 번째 항은 최대 대역폭이 나타나는 경우와 정합층이 없을 때의 대역폭 차이에 대한 임의의 경우와 정합층이 없을 때의 대역폭 차이의 상대적 비를 나타낸다.

탐촉자의 고출력성과 광대역성을 동시에 평가함에 있어 A_p 의 증대효과와 BW 증가효과가 동일한 가중치를 가지기 위해서는 각 항의 차원도 동일하게 설정되어야 할 것이다. 그런데 Fig. 3, 9, 10 등에서 BW 는 수직축이 dB 단

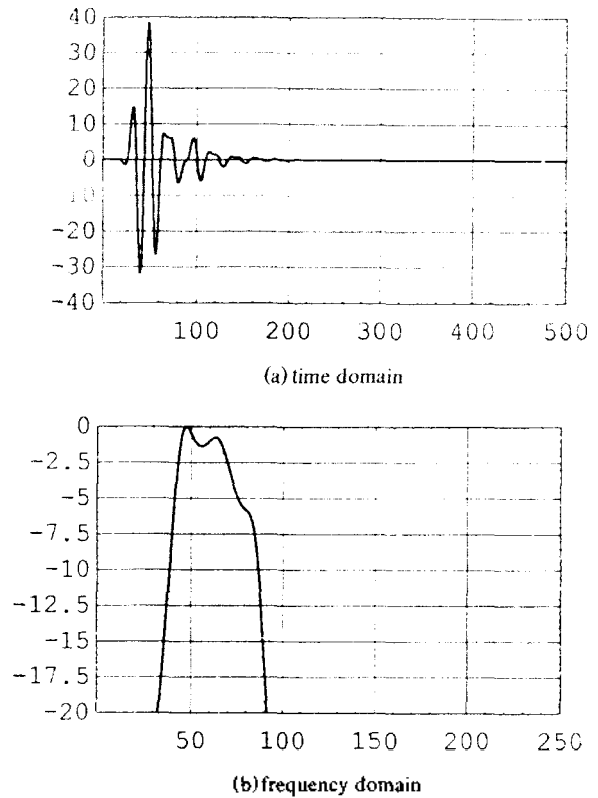


Fig 10. Time domain and frequency domain performances of the transducer with the matching layers having the largest bandwidth (BW)

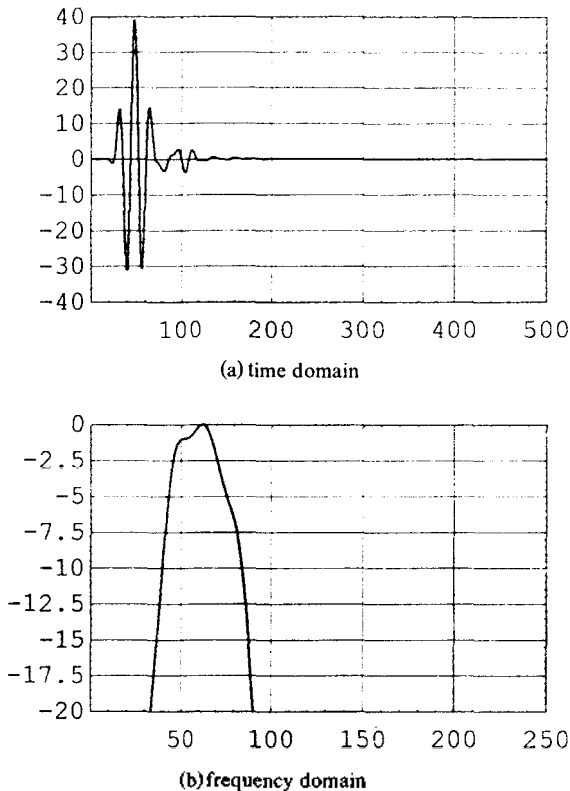


Fig 9. Time domain and frequency domain performances of the transducer with the matching layers having the largest peak amplitude (A_p).

위로 환산된 상태에서 값이고, 반면에 A_p 는 수직축이 선형단위인 상태에서의 값이다. 따라서 두 항의 차원을 동일화하기 위하여 식 (6)에서 첫째 항의 값들도 dB 단위로 환산하여 비교하였다. 식 (6)은 결국 압전소자에 정합층을 부가함으로써 피크 진폭과 주파수 대역 모두에 대해 탐촉자의 성능이 개선된 정도를 정량화 시키기 위해 고안한 것으로서, 두 특성 모두가 최고의 상태를 나타낸다면 Evaluation값은 2가 될 것이고, 정합층이 전혀 없는 경우 혹은 압전소자만의 특성에 비해 전혀 개선된 바가 없을 경우에는 Evaluation 값은 0이 된다. 만약에 정합층에 의해 탐촉자의 성능이 정합층이 없을 경우보다도 더 나빠진다면 Evaluation은 음의 값을 가질 것이다. 이 식을 이용하여 두 정합층의 물성변화에 따른 Evaluation값의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 여기서도 Fig. 6과 7에서와 마찬가지로 특정값에서 최대치를 보였는데, 그 때의 정합층의 물성은 Z_{m1} 이 10.7 Mrayl, Z_{m2} 가 2.9 Mrayl 이었다. 이 정합층에 해당하는 파형은 Fig. 12에 나타나 있는데 A_p 는 38.7, BW 는 62.5%로 나타났다. 개별적인 응용 분야에 대한 최선의 응답 성능보다는 떨어지지만 상당히 우수한 특성을 보이고 있다.

표 3은 이상의 결과들을 비교한 것으로서 표에서 Evaluation이 최대일 때의 정합층 임피던스는 A_p 가 최대일 때의 값과 BW 가 최대일 때의 값의 산술평균과 거의 일치

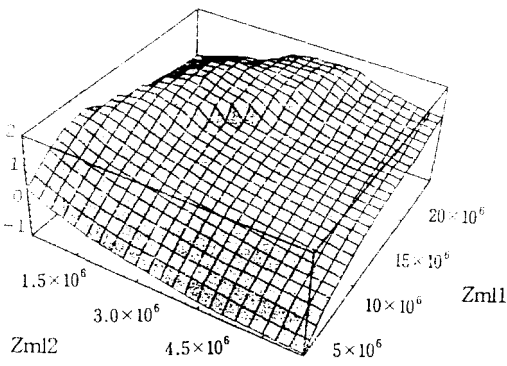


Fig 11. Variation of the Evaluation with matching layer impedances, Z_{m1} and Z_{m2} .

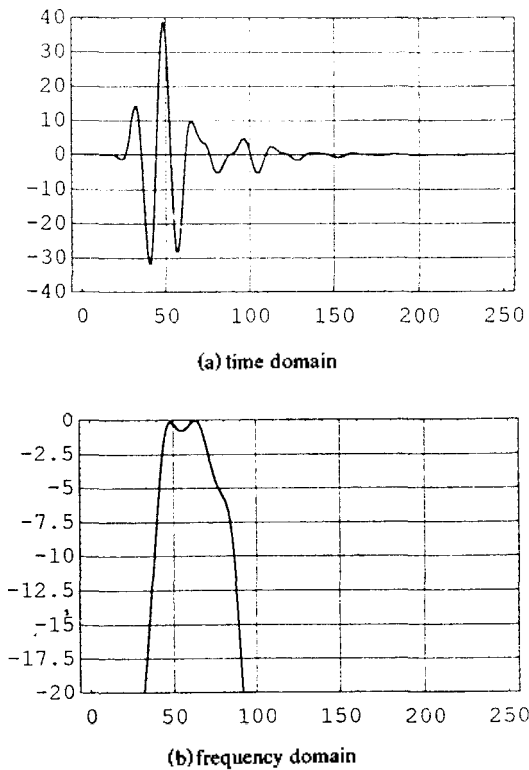


Fig 12. Time domain and frequency domain performances of the transducer with the matching layers having the largest value of the Evaluation

하지만 이것이 구조적으로 항상 이렇다고 보기는 어렵다. 식 (6)이 두 항의 차원을 같게 해서 서로 더한 것이기는 하지만 정합층 물성의 변화에 대한 각 항목의 민감도가 서로 다르다고 보는 것이 일반적이다. 만약 본 연구에서 표 1의 물성 대신에 다른 값을 사용하였다면 Evaluation이 최대일 때의 정합층 임피던스는 다른 경향을 보일 것이다. 표에 나타난 값들은 계산 식을 통해 얻어진 만큼 소수까지의 정확한 수치를 나타내고 있으나, 실제 정합층의 제작시 이 정도의 정밀도를 유지한다는 것은 매우 어렵다. 그리고 본 연구의 결과에 의하면 표 1에 나타

난 물성의 탐촉자 성능은 1차 정합층의 물성에 의해 크게 지배를 받는다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 설계한 정합층과 더불어 기존의 설계법에 의한 정합층에 대한 탐촉자의 성능변수 값들을 표 4에 나타내었다. 표에서 보는 것처럼 기존의 설계법에 비해 본 연구의 접근방법이 더 우수한 탐촉자를 구현케 한다. 특히 Evaluation이 최대일 때의 탐촉자는 고출력성 및 광대역성 모두에 걸쳐 기존의 방식에 비해 우수한 결과를 가져온다. 기존의 결과들도 저손실, 광대역이라는 동일한 목표를 가지고 도출된 것이지만 이러한 차이를 보이는 것은, 본 연구에서 수행한 해석 방법이 등가회로 해석을 통한 방법들보다 더 직접적인 과정의 해석을 가능케 하기 때문이라 생각된다. 나아가 J. H. Goll의 결과와 특히 큰 차이를 보이는 것은, J. H. Goll의 방법은 정합층의 물성을 결정할 때 후면층의 영향을 고려를 하지 않고 단지 압전소자와 방사 음향매질의 영향만을 고려했기 때문에 전체가 조립되고 난 후의 탐촉자 작동상황을 적절히 반영하지 못하는데 기인한다고 판단된다. 반면에 본 연구의 해석법은 탐촉자 전체가 구성된 후에 각 재질들간의 경계면에서의 투과계수 및 반사계수를 모두 반영함으로써 보다 실제 상황을 적절히 반영한다고 할 수 있다. 표 2, 3과 4에 나타난 결과를 서로 비교해 보면 정합층의 물성에 따라 A_p 보다는 BW 가 훨씬 더 큰 영향을 받을 수 있다. 즉 기존의 정합층에 관한 많은 연구들이 주로 탐촉자의 광대역화에 중점을 두었던 것이 타당하다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구에서와 같이 두개의 정합층을 사용할 경우 압전소자에 접착되는 1차 정합층의 임피던스가 큰 만큼 물성조정의 여유가 있음으로 어느 정도의 제작오차를 가지더라도 탐촉자의 성능조절에 더 효율적임을 알 수 있다.

Table 3. Calculation results of the acoustic impedance of matching layers.

| | max. A_p | max. BW | max. Evaluation |
|----------|------------|-----------|-----------------|
| Z_{m1} | 9.7 | 11.6 | 10.7 |
| Z_{m2} | 2.8 | 3.0 | 2.9 |

Unit: Mrayl

Table 4. Comparison of the transducer performance.

| | J. H. Goll | C. S. desilets | Results in this paper. | | |
|-------|------------|----------------|------------------------|-----------|-----------------|
| | | | max. A_p | max. BW | max. Evaluation |
| A_p | 33.9 | 38.4 | 39.0 | 38.3 | 38.7 |
| BW | 40.6% | 57.8% | 61.0% | 64.1% | 64.1% |

IV. 결 론

본 연구에서는 초음파 탐촉자의 응용분야를 크게 고해상도 응용분야와 고출력 응용분야로 나누어 각각의 경우에 대하여 가장 우수한 탐촉자 성능을 구현케 하는 정합

층의 물성을 결정하고자 하였다. 나아가 동일한 탐촉자에 대해 이 두 가지 특성이 모두 우수하기를 요구하는 경우가 일반적이므로 각각의 분야에 대해 동시에 최선일 수는 없으나 두 분야에 공히 만족스러운 특성을 나타낼 수 있도록 하는 정합층의 물성을 찾고자 하였다.

전형적인 탐촉자 구조에 대하여 종래의 등가회로 해석법과는 달리 시간영역에서의 파형을 직접 구하고 이를 Fourier 변환하여 주파수 특성을 관찰하는 해석방법으로 해석한 결과, 각 응용분야별로 가장 우수한 성능을 나타내는 정합층의 물성조합을 찾을 수 있었다. 본 연구에서 찾은 정합층의 조합은 고출력용, 광대역용으로 각각 특화된 것으로 J. H. Goll과 C. S. Desilets의 방법들과 같은 기존의 연구결과들에 비해서 최대 57%까지 탐촉자 성능의 개선효과를 얻었다. 그리고 탐촉자가 고해상도와 고출력이 동시에 요구되는 응용분야에 대한 성능평가를 위하여 새로운 평가지수를 제안하였으며, 적용결과 기존의 정합층 설계법에 의한 것보다 양 특성 모두에 걸쳐 우수한 성능을 구현할 수 있었다.

본 연구에서 수행한 정합층 설계방법은 반드시 본 연구에서 나타낸 구조가 아닌 다양한 형태의 탐촉자 개발에 유용한 정합층 및 후면층 설계기술로 적용될 수 있을 것이다¹⁰⁾. 앞으로 더 연구되어야 할 부분은 본 연구의 설계 결과를 실험적으로 구현해 확인하는 것과, 본 연구에서는 무시된 정합층의 감쇠계수를 고려한 설계법의 개발 등이다.

※이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 연구되었음

참 고 문 헌

1. Catalogue of Vernitron, USA, 1995.
2. J. Krautkramer, and H. Krautkramer, Ultrasonic testing of materials, Springer-Verlag, New York, 1990.
3. F. S. Foster, and J. W. Hunt, "The design and characterization of short pulse ultrasound transducers", Ultrasonics, p. 116, May 1978.
4. J. Soquet, P. Defranould, and J. Desbois, "Design of low-loss wide band ultrasonic transducers for noninvasive medical application", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 26, No. 2, p. 75, 1979.
5. J. H. Goll, "The design of broad band fluid loaded ultrasonic transducers", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 26, No. 6, p. 385, 1979.
6. C. S. Desilets, J. D. Fraser, and G. S. Kino, "The design of efficient broad band piezoelectric transducers", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Con-

rol, vol. 25, No. 3, p. 115, 1978.

7. Yongrae Rho, "Analysis of the Performance of Ultrasonic Transducers", J. of the Acoustical Society of Korea, vol. 10, No. 6, p. 12, 1991.
8. K. Yamaguchi, H. Yagami, and T. Fuji, "New method of time domain analysis of the performance of multi-layered ultrasonic transducers", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 33, No. 6, p. 569, 1986.
9. M. G. Grewe, T. R. Gururaja, T. R. ShROUT, and R. E. Newnham, "acoustic properties of particle/polymer composites for ultrasonic transducer backing applications", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 37, No. 6, p. 506, 1990.
10. A. S. Birks, R. E. Green, Jr., and P. McIntire, Nondestructive testing handbook, American Society for Nondestructive Testing, New York, 1991.

▲김 연 보(Yeonbo Kim)



1979년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년 2월: 영남대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1996년 2월: 영남대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1983년 3월~현재: 대구대학교 정보통신공학부 교수

▲노 용 래(Yong Rac Roh)



1984년: 서울대학교 자원공학과(공학사)
 1986년: 서울대학교 대학원 자원공학과(공학석사)
 1990년: Penn. State Univ. Eng. Science & Mechanics(Ph.D.)
 1993년: 포항 산업기술연구소 선임연구원

1994년~현재: 경북대학교 센서기술연구소 및 전자공학과 조교수