

초음파 탐촉자를 위한 정합층 설계

김 연 보*, 노 용 래**

* 대구대학교 전자공학과

** 경북대학교 전자공학과 / 센서기술연구센터

1. 서문

초음파 탐촉자에 사용되는 정합층의 특성은 탐촉자의 용도에 따라 달라진다. 용도는 크게 고출력 초음파 응용분야와 고해상도 응용분야로 나눌 수 있겠다^[1]. 그러나 주어진 일정한 전압에 대해 발생된 파형이 고출력압과 동시에 광대역인 것이 가장 바람직할텐데 통상의 정합층 설계법으로 이 두가지를 동시에 만족시키기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제에 대한 해답을 도출하기 위하여 그림 1에 나타난 전형적인 구조를 대상으로, 동일한 압전소자에 대하여 정합층의 물성을 변화시킬 때 탐촉자의 성능에 어떤 변화가 나타나는지를 밝히고 그 결과에 따라 최적 정합층을 결정하고자 한다. 우선 기존의 정합층 설계에 관한 대표적인 결과들을 인용하여 그때의 시간영역, 주파수 영역에서의 파형을 관찰하고, 나아가 실제 구현가능한 여러 정합층 물성들에 대해 해석한 결과들 이상의 결과들과 비교해본다. 그 결과로서 최대 출력을 얻고자 할 때, 최대 작동 주파수대역을 얻고자 할 때, 그리고 우수한 출력과 우수한 작동주파수 대역을 동시에 얻고자 할 때의 정합층의 최적물성들을 결정하고자 한다.

2. 해석이론

통상 초음파 탐촉자의 해석에 널리 이용되는 방법은 등가회로를 이용해 주파수 특성을 규명하고, 그 결과를 변환하여 시간영역에서의 특성을 차후에 구하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 본 논문에서는 Ref. 2에 기술된 것과 같이 서로 다른 음향 임피던스를 가지는 매질들의 경계면에서의 투과 및 반사특성을 반복적으로 계산하는 방법을 이용해 시간영역에서의 파형을 직접 구한다음 그 결과를 Fourier Transform하여 주파수 특성을 간접 구현하는 방법으로 탐촉자의 성능을 평가하고자 한다. 이상의 두방법중 어느 것이 더 우수하다고 단정짓기는 어려우나 본 논문의 방법은 실제 실험 상황을 직접적으로 묘사할 수 있다는 장점외에, 모델링에 걸리는 시간이 월등히 짧다는 잇점이 있다. 나아가 본 논문에서는 정합층 재료의 음향 임피던스 값으로 감쇠계수를 무시한 실수값만을 사용하였는데, 향후 재료의 감쇠특성도 함께 묘사하고자 할 때 복소 물성을 적용하기가 용이하다는 장점도 있다. 해석에서는 발신자로서의 특성과 수신자로서의 특성이 모두 결합된 탐촉자의 최종성능을 구하였다. 그림 1에서 정합회로와 외장의 영향은 무시하였고, 압전소자 및 각 층의 유한 단면적의 영향은 각 매질의 임피던스 값에 포함하였다. 정합층의 두께는 파장의 1/4로 하였으며, 후면층은 충분히 두꺼워서 입사된 음향파가 다시 압전소자 쪽으로 반사되어 돌아오는 경우는 없다고 가정하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

그림 1의 모델에 사용된 압전소자와 후면층의 물성은 표 1에 나타나 있다. 정합층 임피던스에 관한 많은 연구들중 J. H. Goll^[3]과 C. S. Desilets^[4]의 경우를 들어 표 1에 나타난 구조에 적합한 두개의 연속한 정합층들의 물성값들을 구하여 표 2에 보였다. 이 두 경우들은 각각 압전세라

빅 단면적의 유한성까지도 고려했는지, Mason의 혹은 KLM의 등가회로를 사용했는지 하는 등의 차이도 있으나, 본 논문에서의 주된 차이라면 J. H. Goll은 광대역 주파수대역에 중점을 두었고, C. S. Desilets는 광대역 못지않게 탐촉자의 고출력파에도 비중을 두었다는 점이다. 따라서 이들 두 경우는 본 논문에서 다루는 문제에 대한 대표적인 기존 연구사례가 될 수 있다.

탐촉자 성능개선의 비교자료로서 우선 정합층이 없을 경우의 파형을 관찰하여 그림 2에 보였다. 그림 2-a는 시간영역 응답의 피크진폭(Ap)을 임의의 선형 단위로 나타낸 것이고, 그림 2-b는 주파수 응답특성을 dB단위로 나타낸 것이다. 압전소자가 직접 물과 접촉한 상태에서 나타난 이 파형은 Ap가 12.2이고, 주파수대역(BW)은 -6dB 감쇠대역을 기준으로 할 때 9.4%이다. 동일한 요령으로 표 2의 정합층을 사용했을 때 J. H. Goll의 경우 Ap는 33.9, BW는 40.6%이고, C. S. Desilets의 경우 Ap는 38.4, BW는 57.8% 이다. 다음으로 실제 적용가능한 범위내의 정합층의 물성들을 단계별로 적용하여 탐촉자의 응답특성을 알아보았다. 적용한 임피던스는 Zm1이 5.0 - 20.0 Mrayl, Zm2가 1.5 - 5.0 Mrayl의 범위이고, 계산 결과는 그림 3과 4에 나타나 있다. 그림에 나타난 Ap와 BW는 각각의 최대값에 대해 정규화된 수치를 나타낸다. 그림 3의 최대 Ap는 Zm1이 9.7 Mrayl이고 Zm2이 2.8 Mrayl일 때 나타나는데 그때의 파형 및 주파수특성은 Ap가 39.0, BW가 54.7%이다. 이렇게 구한 Ap는 기존 경우에 비해 각각 15.0 %, 1.6 % 큰 것이다. 동일한 방법으로 작동 주파수대역의 변화를 관찰해보면 그림의 최대 BW는 Zm1이 11.6 Mrayl, Zm2가 3.0 Mrayl일 때 나타났으며 그때의 Ap는 38.3, BW는 64.1%이다. Ap가 최대일 때보다 피크 진폭은 약 1.8% 줄었으나, 주파수대역은 약 14% 증가하였다. 이 주파수대역값은 J. H. Goll과 C. S. Desilets의 결과에 비해서도 각각 57%, 11% 큰 값이다. 이상의 결과들을 바탕으로 Ap와 BW가 모두 우수한 경우의 정합층 물성들을 결정하고자 본 논문에서 다음의 탐촉자 성능 평가식을 고안하였다.

$$\text{Evaluation} = \frac{20 \log_{10}(A_p) - 20 \log_{10}(A_p^0)}{20 \log_{10}(A_p^{\max}) - 20 \log_{10}(A_p^0)} + \frac{BW - BW^0}{BW^{\max} - BW^0} \quad (1)$$

여기서 A_p^0 는 정합층이 없을 때의 피크 진폭이고 A_p^{\max} 는 그림 3에 나타난 최대 피크 진폭이다. 마찬가지로 BW^0 는 정합층이 없을 때의 주파수대역이고 BW^{\max} 는 그림 4에 나타난 최대 주파수대역이다. Ap의 증대효과와 BW증가효과가 동일한 가중치를 가지도록 하기 위하여 식 1에서 첫번째 항의 각 값들도 dB 단위로 환산하여 비교하였다. 이 식을 이용해 정합층의 물성에 따른 Evaluation값의 변화를 관찰하면 그림 3과 4에서와 마찬가지로 Zm1이 10.7 Mrayl, Zm2가 2.9 Mrayl일 때 최대값이 나타났다. 이 때의 파형은 그림 5에 나타나 있고, Ap는 38.7, BW는 62.5% 이다. 개별적인 응용분야에 대한 최선의 응답성능보다는 못하지만 상당히 우수한 특성을 보이고 있다.

표 3은 이상의 결과들을 모두 모은 것인데, 이 표에 의하면 표 1에 나타난 물성의 탐촉자 성능은 Zm1에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다. 본 논문에서 설계한 것과 더불어 기존 설계법에 의한 정합층에 대한 탐촉자의 성능변수 값들을 표 4에 모았다. 표에 의하면 기존의 설계법에 비해 본 논문의 접근 방법이 더 우수한 탐촉자를 구현케한다. 특히 Evaluation이 최대일 때의 탐촉자는 고출력상 및 광대역성 모두에 걸쳐 기존의 방식에 비해 더 나은 성능을 보인다. 이는 본 논문의 해석 방법이 등가회로 해석보다 더 직접적인 파형의 해석을 가능케 하기 때문이라 판단된다. 나아가 표 2, 3과 4에 나타난 결과를 비교해 보면 정합층의 물성에 따라 피크진폭보다는 주파수대역이 훨씬 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 그림 1과 같이 두개의 정합층을 사용한 경우 Zm1이 임피던스가 높은 만큼 물성 조정의 여유가 더 있으며, 따라서 어느 정도의 제작오차를 가지더라도 탐촉자의 성능조절에 더 효율적임을 알 수 있다.

4. 결론

종래의 등가회로 해석법과는 달리 시간영역에서의 파형을 직접 구하고 이를 Fourier Transform하여 주파수 특성을 관찰하는 해석방법을 이용하여 그림 1과 표 1에 나타난 전형적인 탐촉자구조를 해석한 결과, 각 응용분야별로 가장 우수한 성능을 나타내는 정합층의 조합을 찾아 내었다. 본 논문에서 찾은 정합층의 조합은 고출력용, 광대역용으로 각각 특화된 것으로 J. H. Goll과 C. S. Desilets의 방법들과 같은 기존의 연구결과들에 비해서 최대 57%까지 탐촉자 성능의 개선 효과를 보았다. 나아가 고해상도와 고출력이 동시에 요구되는 응용분야에 대한 탐촉자의 성능평가를 위하여 새로운 평가지수를 개발하였으며, 적용결과 기존의 정합층 설계법들에 의한 것들보다 양 특성 모두에 걸쳐 더 우수한 탐촉자 성능을 구현할 수 있었다.

References

1. J. Krautkramer, and H. Krautkramer, Ultrasonic testing of materials, Springer-Verlag, New York, 1990
2. 노용래, 한국음향학회지, vol. 10, No. 6, p. 12, 1991
3. J. H. Goll, IEEE UFFC, vol. 26, No. 6, p. 385, 1979
4. C. S. Desilets, J. D. Fraser, and G. S. Kino, IEEE UFFC, vol. 25, No. 3, p. 115, 1978

PZT -5A	c_{11}	15.8 C/m ²
	h_{33}	21.5E8 V/m
	f_r (resonant freq.)	3.5 MHz
	ϵ_r	1700
	sound velocity	4350 m/s
	density	7750 kg/m ³
	area	1820 mm ²
	backing impedance	3.65 Mrayl
	water	1.5 Mrayl

Table 1. Properties of the materials composing the ultrasonic transducer

	J. H. Goll	C. S. Desilets
Zm1	15.5	8.9
Zm2	3.3	2.3

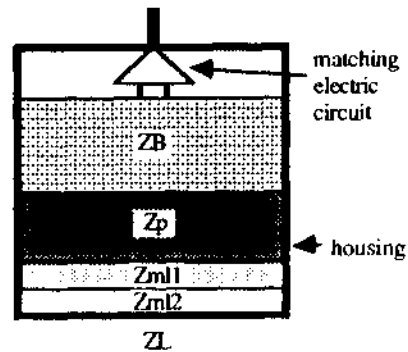
(unit: Mrayl)

Table 2. Properties of mating layers with conventional impedance matching formulae

	maximum Ap	maximum BW	maximum Evaluation
Zm1	9.7	11.6	10.7
Zm2	2.8	3.0	2.9

(unit: Mrayl)

Table 3. Acoustic impedances of the first and the second matching layers for maximum peak amplitude, maximum frequency bandwidth, and optimum performance of the transducer, respectively.

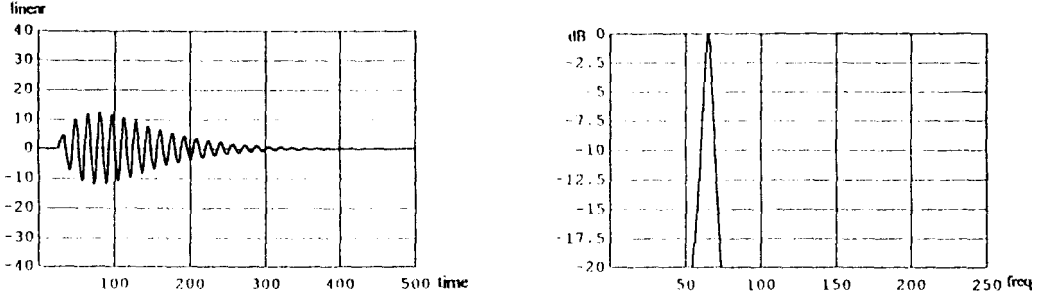


ZB : backing material impedance
 Zp : PZT impedance
 Zm1 : first matching layer impedance
 Zm2 : second matching layer impedance
 ZL : acoustic radiation medium impedance

Fig. 1. Typical structure of an ultrasonic transducer.

	J. H. Goll	C. S. Desilets	Results in this paper		
			Max. Ap	Max. BW	Max. Evaluation
Ap	33.9	38.4	39.0	38.3	38.7
BW(%)	40.6	57.8	54.7	64.1	62.5

Table 4. Comparison of the transducer performance with various impedance matching layer schemes



(a) time domain

(b) frequency domain

Fig. 2. Performances of the transducer without any matching layers

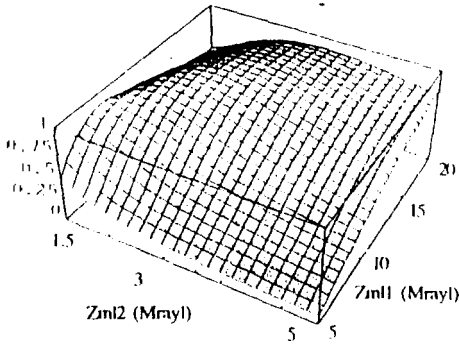


Fig. 3. Variation of the Ap with Zml1 and Zml2.

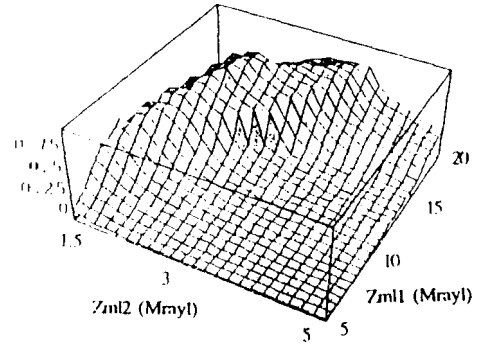
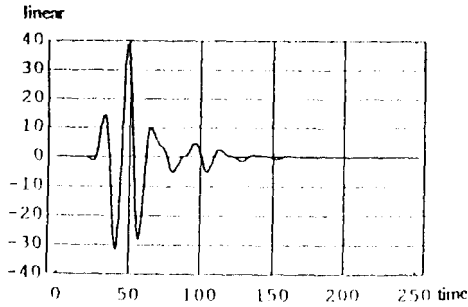
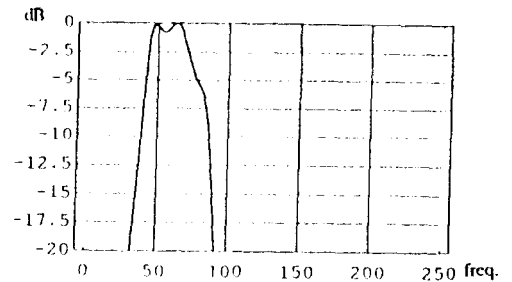


Fig. 4. Variation of the BW with Zml1 and Zml2.



(a) time domain



(b) frequency domain

Fig. 5. Performances of the transducer with the matching layers having the largest value of the Evaluation