

Meander Line형 EMAT의 대역 특성에 관한 연구

(A Study on the Characteristic of Bandwidth of Meander Line Type EMAT.)

김 흥 기* 전 계 석**

(Heung-Ki Kim*, Kye-Suk JUN**)

요 약

본 연구에서는 알루미늄 금속의 결함 검출을 위한 meander line형 EMAT를 모의 실험을 통해 설계하고 그 대역특성을 연구분석하였다.

모의 실험결과 중심주파수 3.63[MHz]에서 비대역폭이 42.5[%]인 경우는 코일의 폭 0.2[mm], 코일길이 4[cm], 변환기의 주기수 4[회]임을 알수있었으며, 이 결과를 토대로 EMAT를 제작하여 순도 99.99[%]의 알루미늄을 샘플로 선택하여 그 표면에서 한 파장 범위 이내에 반경 0.5[mm], 높이 1[mm]의 원통형 결함을 만들고 피치-캐치법으로 결함을 검출하였다.

ABSTRACT

In this paper, the Meander Line type EMAT(Electro Magnetic Acoustic Transducer) for detection of a flaw in aluminum has been designed on the basis of the result of simulation and its characteristic of bandwidth has been studied and analyzed.

This simulated results have shown that the EMAT has the fractional bandwidth of 42.5[%] when coil width is 0.2[mm], coil length is 40[mm], and the number of transducer periods are 4 at the center frequency of 3.63[MHz].

In this experiment, the EMAT has been fabricated by the simulated result and its insertionloss measured by the pitch-catch method.

An Aluminum (purity 99.99%) has been chosen as a sample, and the cylindrical typtth flaw with radius of 0.5[mm] and height of 1[mm] has been made within the depth of one wavelength from the surface of sample.

The fabricated EMAT has been used for detection of a flaw in the subsurface of sample by pitch-catch method.

I. 서 론

EMAT(Electro Magnetic Acoustic Transducer)는 공기중에서 비 접촉으로 대상체(Conducting

Media)에 음향파를 여기시키는것으로서 동 자기장을 발생시키기 위한 코일과 정자기장을 인가하기위한 영구자석군으로 구성 되어지며 전기적 특성은 코일의 형태에 의해서 결정되고 여기시키고자 하는 음향파 모드에 따라 코일구성이 달라진다.⁽¹⁻³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

변환기의 주요특성의 하나인 대역특성은 일반적으로 변환기의 주기수에 의해 결정되며 주기수가 많으

*경희대학교 전자공학과 박사과정

**경희대학교 전자공학과 교수

면 대역폭이 적어지고 주기수가 적으면 대역폭이 커진다. 대역특성에 영향을 주는 또 다른 것으로는 동조용 콘덴서(수신용 EMAT에 사용)가 있으며 이것은 EMAT 코일과 접속하여 사용하므로 용량의 변화에 의해 대역특성이 달라진다. 그 이외에 대역특성에 영향을 주는 것으로는 코일길이, 코일폭 및 비접촉간격등이 있으나 주기수와 동조용 콘덴서에 비해 큰 영향을 미치지 못한다.¹³⁻⁵⁰⁸¹¹⁻¹²⁾

일반적으로 결함을 탐상하기 위한 변환기는 광대역성을 요구하나 대역폭이 크면 삽입손실이 커서 신호검출이 어려우므로 적절한 대역특성을 갖도록 하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 우선적으로 Meander Line형 EMAT의 대역특성을 보다 정확하게 조사하기 위하여 변환기의 주기수, 코일길이 및 비접촉간격등에 따른 대역특성을 모의실험하고 광대역성을 갖는 변환기를 구성하기 위하여 신호검출이 가능한 삽입손실값에 대응하는 변환기의 비대역폭값을 구하여 변환기의 설계 파라미터값을 결정한다. 다음으로 금속을 대상으로 그 표면에서 한파장 범위내에 존재하는 결함을 탐상하기 위한 광대역성 EMAT의 성능을 평가하고자 한다. 이를 위하여 샘플로서 99.99 [%]의 알루미늄 금속을 선택하여 그 표면에서 한파장 범위내에 반경 0.4[mm], 높이 1[mm]인 원통형 결함을 만들고 제작된 EMAT를 사용하여 비치-캐치 방법으로 결함을 검출한다.

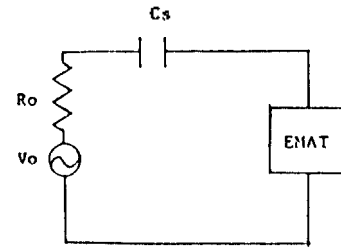
II. Maender Line형 EMAT의 설계

2-1. EMAT의 삽입손실

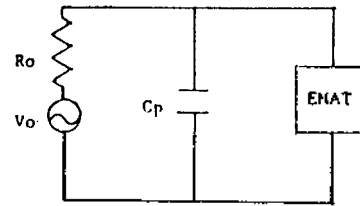
송신용 EMAT에는 직렬 동조회로를 사용하여 대상체(도체매질) 표면에 최대 와전류를 분포시키며 분포된 와전류를 효율적으로 수신하기 위해서 수신용 EMAT에 병렬 동조회로를 사용한다.¹⁵⁾

동조회로를 사용한 경우는 그림 1과 같으며 EMAT 등가회로의 삽입손실 IL은 식(1)과 같이 주어진다.¹⁶⁾⁽¹²⁾

$$IL = 10 \log TE \tag{1}$$



(a) 송신용 EMAT



(b) 수신용 EMAT

그림 1. EMAT의 동조회로
Fig. 1. Tuning circuit EMAT

식(1)에서 TE는 EMAT의 변환효율을 나타내며 송신용 EMAT에서의 효율 TE_s와 수신용 EMAT에서의 효율 TE_p는 식(2)와 같이 주어진다.¹⁶⁾

$$TE_s = 2R_a / R_o \tag{2-1}$$

$$TE_p = (2R_a / R_o) (1 - \omega^2 LC_p)^{-1} \tag{2-2}$$

식(2)에서 R_o는 전원 내부저항, C_s, C_p는 동조용 콘덴서를 나타내고 C_p의 변화에 의해 TE_p를 증감시킬수가 있음을 알 수 있으며 L는 코일의 인덕턴스로서 식(3)과 같이 나타내어진다.¹⁶⁾

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi N} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \right) \frac{\sin^2(n\pi S / 2b)}{(n\pi S / 2b)^2} \left[\frac{1 + \cos n\pi}{2} \right] \{ 1 - \exp(-2n\pi G / b) \} \tag{3}$$

음향 방식 저항 R_a는 식(4)와 같이 주어지며¹⁴⁾⁽¹²⁾

$$R_a = 2\omega B_0^2 N^2 M^2 \sin^2(s / 2b) \cdot \exp[-2\pi(G / b)] \sin^2[N(f - f_0) / f_0] \tag{4}$$

N은 변환기의 주기수, l는 코일 길이, b는 코일간격, s는 코일폭, G는 코일과 샘플과의 비접촉간격, M^2 은 정자기장의 입사방향계수이고 SAW의 진행방향 또는 수직방향이며 입사방향에 따라 M^2 의 값이 변화한다.

III. 모의 실험

Meander Line형 EMAT의 대역특성을 정확하게 조사하기 위하여 먼저 중심주파수를 3.63[MHz]로 정하고 코일폭 S를 0.2[mm]로 한 다음 대역특성에 영향을 미치는 변환기의 주기수, 코일길이, 비접촉간격등을 이용하여 이들의 파라미터값 변화에 의한 삽입 손실과 대역특성을 조사하였다. 그림 3은 이들의 파라미터값 변화에 의한 삽입손실과 대역특성을 나타낸 대표적인 그림이다.

그림 3에서 알 수 있듯이 Meander Line형 EMAT의 대역특성은 변환기의 주기수에 의해 결정된다고 볼 수 있으며 주기수가 많을수록 대역폭은 크게 감소됨을 나타내었다.

코일길이에 의해서는 대역특성에 큰 변화가 없었으나 정확한 대역특성을 얻는데 필요하며 비접촉간격 G에 의한 대역특성은 G가 0.1[mm] 이상에서는 대역특성에 영향을 미치지 못하였다.

IV. 실험 및 고찰

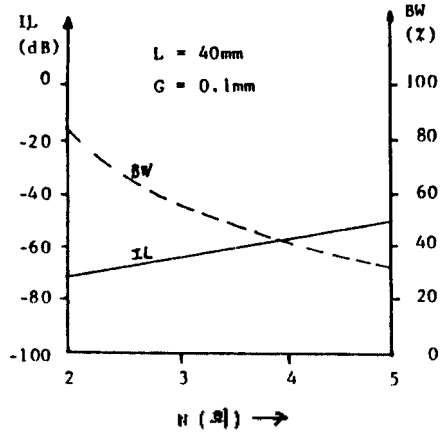
4-1. Meander Line형 EMAT의 설계 및 제작

모의실험된 결과를 이용하여 다음과 같은 조건들을 찾아 보았으며 표 1은 이에 대한 값이다.

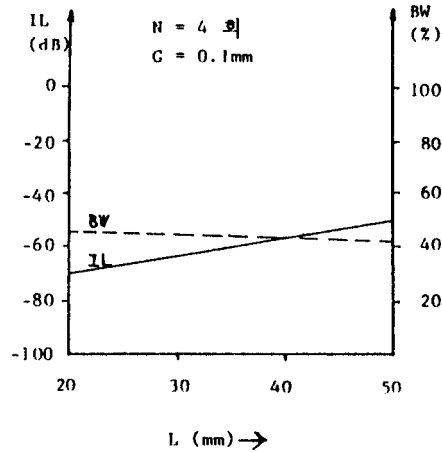
- 1) 삽입손실이 가장 적을 때의 비대역폭과 주기수, 코일 길이, 비접촉간격
- 2) 삽입손실이 가장 클 때의 비대역폭과 주기수,

표 1. 모의 실험 결과

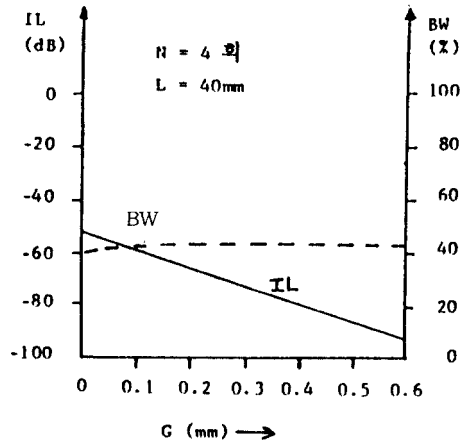
조건 / 특성	IL(dB)	BW(%)	N(회)	l(cm)	G(mm)
1)의 조건	09.6	3	64	40	0.05
2)의 조건	109.0	82	2	20	0.65
3)의 조건	① 63.8	57	3	40	0.1
	② 57.4	42.5	4	40	0.1



(a) N에 의한 IL과 BW



(b) L에 의한 IL과 BW



(c) G에 의한 IL과 BW

그림 3. Parameter값 변화에 의한 삽입손실과 대역특성
Fig. 3. The characteristic of IL and BW by varuatuibi of parameters(N, L, G)

코일 길이, 비접촉간격

3) 1)의 경우는 신호검출은 쉬우나 결합을 탐상하기에는 어려움이 있으며, 2)의 경우는 비파괴 검사에 사용하기는 쉬우나 신호검출이 어려우므로 적절한 대역특성을 갖는 경우의 비대역폭과 주기수, 코일 길이, 비접촉 간격

모의실험의 결과로 보아 EMAT 제작에 필요한 설계값은 3)의 조건에 해당되고 3)의 조건 ①인 경우는 삽입손실이 커서 결합탐상에 어려움이 있으므로 본 실험에서는 3)의 조건 ②인 경우에 맞도록 EMAT를 제작하였으며 그 구조는 그림 3과 같다. 그림 3에서는 박막형 코일을 사용하여 코일폭 $S=0.2[\text{mm}]$, 코일간격 $b=0.4[\text{mm}]$, 코일길이 $L=40[\text{mm}]$, 주기수 $N=4[\text{회}]$ 로 동자기장을 구성하였으며 한쌍의 수신용과 발신용의 동자기장 코일유닛을 동일하게 하였다.

정자기장을 구성하기 위해 $5 \times 5 \times 10[\text{mm}]$ 의 내외다움 재질의 0.25[TELSA] 영구자석을 4개 사용하였으며 동자기장 코일과 함께 에폭시로 고정시켰다.⁽¹²⁾⁽¹³⁾

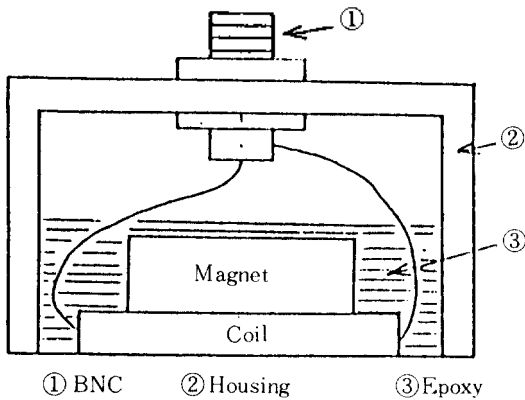


그림 4. EMAT 구조
Fig. 4. Structure of EMAT

4-2. 측정 및 결과

제작된 EMAT를 알루미늄 샘플 표면에서 pitch-catch 방식으로⁽¹²⁾ (동일 조건을 위하여 0.1[mm] 비접촉, 일정거리를 유지) 삽입손실을 측정된 결과를 그림 5에서 보여준다. 그림 5에서 알수있듯이 중심주파수에서 삽입 손실 $IL = -58.9[\text{dB}]$, 비대역폭

$BW = 41[\%]$ 로서 모의실험된 값과 비교하여보면 삽입손실 IL 은 2.6[%], 비대역폭 BW 는 3.5[%]의 오차를 각각 나타냈으나 이론값에 매우 근사한 측정 값을 나타냈음을 알 수가 있다.

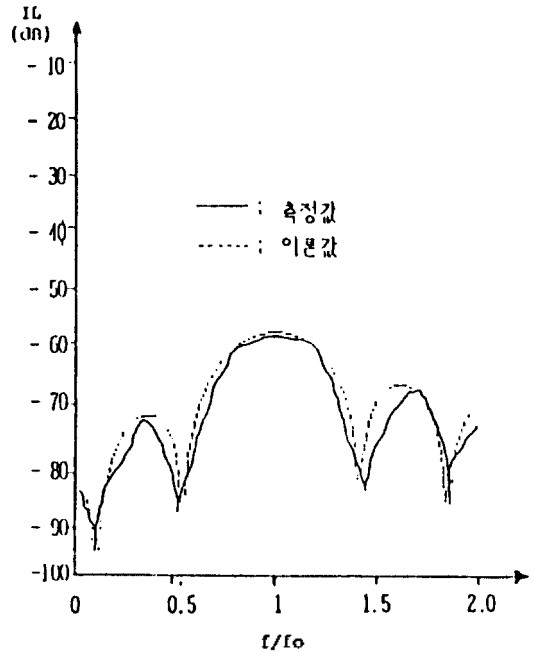


그림 5. EMAT의 삽입손실
Fig. 5. Insertion loss of EMAT

그림 6은 수신용 EMAT에서 동조용 콘덴서 C_p 의 변화에 의한 삽입 손실 IL 과 대역특성 BW 관계를 나타낸 것이다.

그림 6에서 보듯이 C/C_p 가 0.92에서 0.5로 갈수록 비대역폭 $BW = 41[\%]$ 에서 50[%]로 서서히 증가함을 알 수 있으며, 이때 EMAT의 동작주파수가 중심주파수에서 멀어지는 경우이며, C/C_p 가 0.9에서 1에 가까워질수록 EMAT의 동작주파수가 중심주파수에 가까워지므로 비대역폭의 감소가 큼을 알 수가 있다.

사진 1은 알루미늄 샘플 표면에 결합이 없는 경우의 임펄스 응답이고 사진 2는 샘플표면에서 한파장이내에 존재하는 결합의 크기가 반경 0.5[mm], 길이 1[mm]를 갖는 곳에서 검출된 임펄스 응답으로서 사진 1과 비교할때 송신된파가 결합부위를 지나는데 순간 감쇠가 났음을 알 수 있다.

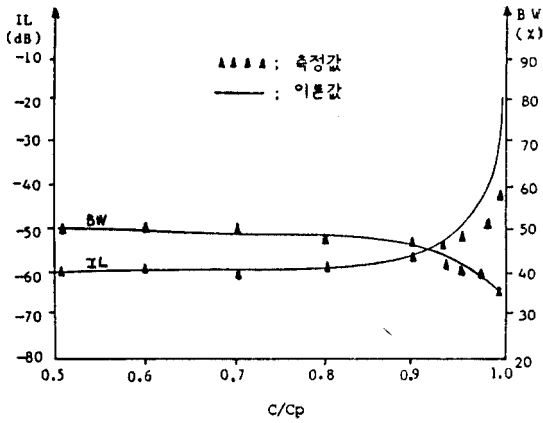


그림 6. Cp의 변화에 의한 삽입손실과 대역특성
 Fig. 6. Insertion loss and bandwidth by varying a Cp

이상의 실험결과로 보아 제작된 EMAT를 비교과 검사에 이용할 경우 삽입손실은 58.9[dB], 비대역폭은 41[%]로 나타내어지며 수신 동조용 콘덴서 Cp의 변화에 의한 삽입손실과 대역특성실험에서는 수신용 EMAT와 수신 입력 증폭단과의 선간용량과 EMAT 자체의 용량을 Cp에 포함시켜 실험한 결과 그림 6와 같이 삽입손실을 +18[dB] 개선 시킬수가 있었으며 비대역폭은 50[%]에서 35[%]의 변화를 나타내었다.

EMAT 특성실험에서 얻어진 알루미늄 샘플의 SAW의 속도는 이론값은 2906[m/sec]이었으나 측정된 값은 2978[m/sec]이었음을 보였다.

본 실험에서의 측정값과 이론값과의 오차는 알루미늄 샘플표면에서의 음향파의 감쇠와 정확치 않은 샘플 특성값, 동자기장용 코일을 제작할때에 설계값에 정확히 일치하는대의 어려움, EMAT와 샘플간의 거리 G를 일정하게 유지못하고 동조용 콘덴서 Cp의 값을 정확한 값으로 할 수 없는것 등이 원인으로 분석된다.

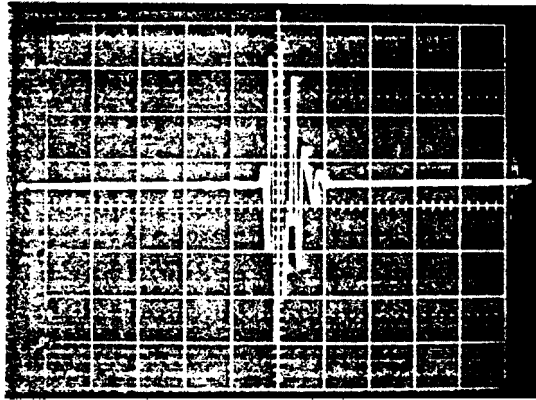
V. 결 론

본 논문에서는 알루미늄금속의 결함검출을 위한 meander line형 EMAT를 모의실험을 통해 설계, 제작 하였으며 삽입손실과 대역특성을 연구 분석하였다.

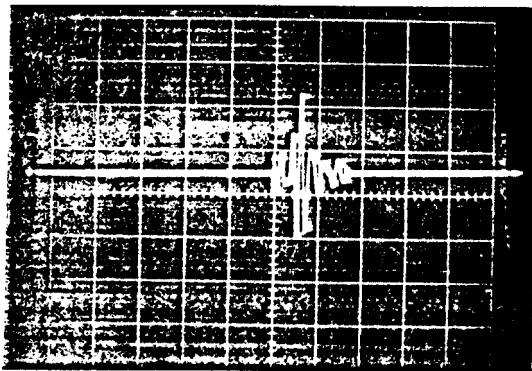
모의실험은 변환기의 주기수와 코일길이 및 비점축간격에 따른 EMAT의 삽입손실과 대역 특성을 연구하였으며 그 결과 중심주파수 3.63[MHz]에서 코일폭 0.2[mm], 코일 길이 40[mm], 주기수 4[회]로 삽입손실 IL는 -57.4[dB], 비대역폭은 42.5[%]이었다.

EMAT의 제작은 효율적인 정자기장을 구성하기 위하여 자계강도가 높은 네오디움 재료의 영구자석 4개를 한쌍으로 하는 자석군을 구성 하였으며 동자기장 강도는 6.5×10^{-3} [AT/m], 정자기장 강도는 0.08[Wb/m²]이었다.

본 연구에서 제작한 EMAT를 결함탐상에 사용할 때 G가 0.8[mm] 이상인 경우는 삽입손실이 커서 결함을 검출할수가 없었으며 삽입손실은 Cp의 변화



수직 : 1[V/div] 수평 : 1[μsec/div]



수직 : 1[V/div] 수평 : 1[μsec/div]

에 의해 개선할 수 있었다. 본 실험의 결과 $C_p=0.0175[\mu F]$ 에서 비대역폭은 50[%]로 증가됨을 보였고 삽입손실도 $-60[dB]$ 정도 증가됨을 나타냈으며 $C_p=0.035[\mu F]$ 에서 삽입손실은 $18[dB]$ 정도 개선됨을 알 수 있었으나 이때의 대역폭은 35[%]로 감소됨을 보였다.

본 실험의 결과 제작된 EMAT를 비파괴검사에 사용할 경우는 대상물체의 내부에 있는 결함을 탐지해야하므로 코일과 샘플간의 거리 G 를 0.05 [mm]이하로 가능한 짧게 하고 C_p 값을 조정하여 삽입손실을 줄이는 대신 적절한 광대역 특성을 얻도록 하여야 한다.

REFERENCE

1. H. Talaat and E. Burstein, J.Appl. phys., Vol.45, No. 10., Oct. 1974, p.4360.
2. J.C.Sethares and T.L.Szabo, J.Appl. Phys., 49(3), March. 1978, p.1054.
3. R. Bruce. Thompson, IEEE. TRANS. SONICS and ULTRASONICS, Vol. SU-20, NO.4, October, 1973,

- p.340.
4. Thomas L. Szabo and Harold M. Frost, IEEE. TRANS. SONICS and ULTRA-SONICS, Vol. SU-23, NO.5, September 1976, p.323.
5. Thomas L. Szabo and Harold M. Frost, IEEE. TRANS. SONICS and ULTRA-SONICS, Vol. SU-24, NO. 6, November 1977, p.393.
6. U.S.Department of Commerce, NBS Technical note 1075, May 1984.
7. S.Kino, "Acoustic waves devices, imaging and analog signal processing", PRENTICE-HALL INC.
8. Korea Standard Reserch Institute, KSRI-89-17-IR (7), 1989.2.
9. M.G.Silk "Ultrasonic transducer for nondestructive testing" Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984.
10. G.S.Kino, B.T,Khuri-Yakub,A.Selfrige, H.Tuan, "Development of Transducer for NDE", Stanford Univ., 1979.
11. H.M. Forst, "Electromagnetic-Ultrasonic Transducer : Principles, Practice, and Application", 1978, pp. 179-275.
12. H.K.Kim et al. "Design and fabrication of EMAT for excitation of SAW", 한국음향학회지 9권3호, 1990, 8.

▲김 홍 기(정회원) 1945년 1월 15일



1968년 2월 27일 : 광운대학교
응용 전자공학과
졸업
1978년 2월 27일 : 연세대학교
대학원 졸업
1988년 2월 27일 : 경희대학교
대학원 전자공학과
석사과정 수료

1989년 4월 ~ 현재 : 중앙직업훈련원 전자과 근무

▲田 啓 石(정회원) 1944년 9월 30일



1970년 : 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1973년 : 연세대학교대학원 졸업(공학석사)
1983년 : 연세대학교 대학원 졸업(공학박사)
1984년 ~ 1985년 : 미국 스텐포드대학교 W. W. HAN SEN LAB.

현재 : 경희대학교 전자공학과 교수(주관심분야 : 초음파 영상처리 및 비파괴검사 등)