

SAW 여기를 위한 EMAT의 설계 및 제작에 관한 연구

Design and Fabrication of EMAT for Excitation of SAW

김 흥 기*, 이 재 승**, 전 계 석***

(Heung-Ki Kim, Jae-Seung Lee, Kye-Suk Jun)

요 약

본 논문에서는 표면에서 한파장 깊이 이내에 존재하는 결함 검출에 우수한 특성을 나타내는 meander line형 EMAT의 설계를 하고 그 특성을 연구분석하였다.

효율적인 동 자기장을 위하여 간격 0.72mm와 폭 0.65mm의 코일을 구성하였으며 정 자기장을 위하여 1500 가우스의 자석코일을 구성하였다.

제작된 EMAT는 중심 주파수 2MHz, 대역폭 36%를 가지며 임펄스응답 특성은 0.15 mm의 비접촉 방법으로 측정된 결과 이론적 결과와 일치하고 중심 주파수에서의 삽입손실은 45.46 dB로 측정 되었다.

ABSTRACT

In this paper, meander line type EMAT (Electro-Magnetic Acoustic Transducer) has been designed and fabricated with a theory properties for detecting flaw existing within one wavelength in depth, and its characteristics have been analyzed.

For the purpose of getting effective dynamic and static magnetic intensity, the coil has been arrayed using wire with interval of 0.75 mm and width of 0.65 mm and permanent magnets with 1500 Gauss have been constructed respectively. The center frequency and fractional bandwidth of the fabricated EMAT was 2 MHz and 36% respectively and its impulse response has been measured by non contacting technique(the distance between the conducting media and the coil was 0.15mm).

In the measuring results, it has been shown that Insertion Loss(IL) was 45.46dB and it was good agreement with theoretical result.

I. 서 론

- * 전기전자공학 석사과정과 박사과정
- ** 전기전자공학 석사과정과 석사과정
- *** 전기전자공학 석사과정과 교수

항공, 우주, 원자력 발전등과 같은 초정밀 공학이 발달함에 따라 음향파를 이용한 비파괴 검사(N.D.T.)에 대한 관심이 높아지고 있다.^{1)~6)}

기존에 사용되어 지고있는 음향 변환기(Acoustic Transducer)는 압전 물질을 이용한 것으로, 1929년 어

SAW 에기름 위한 EMAT의 설계 및 제작에 관한 연구

S.J.Sokolov에 의해 고체 물질 내부의 결함 검출에 응용되었으며 최근대선주에 sonar system으로 이용되었다.

압전형 음향 변환기의 발전으로 인하여 오늘날에는 불투명한 고체 내부의 결함을 이미지 처리해석 영상화하는 단계까지 발전하여 왔으나 음향파를 효율적으로 전송하기 위해서는 중간 매체(예: 물, 기름등의 액체)를 사용하여야 하며 공기중에서는 비파괴 검사를 수행할 수 없는 것이 큰 단점으로 대두되었다.^{11,12} 최근들어 이러한 압전형 음향 변환기의 단점을 보완하여 공기중에서 비접촉으로 비파괴 검사를 수행할 수 있는 EMAT(Electro-Magnetic Acoustic Transducer)의 제작이 시도되고있다.^{13,14}

11

EMAT는 동 자기장 발생용 코일과 정 자기장 발생용 자석군으로 구성되고 Eddy Current와 정 자기장과 상호 작용에 의해 생기는 Lorentz Force를 이용하여 음향파를 발생시키며 완전한 비접촉식 방식이다.¹⁵

비접촉으로 음향파를 여기시킨 최초의 실험은 Vinogradov와 Ulyanov¹⁶에 의해 수행되었으며, 정 자기장과 동 자기장의 상호 작용을 이용한 Lorentz force로 주기적인 음향파를 여기시킨 최근의 실험은 H.M.Frost¹⁷, R.Bruce Thompson¹⁸, Szabo and Frost^{19,20}등에 의해 수행되어 SAW(Surface Acoustic Wave)의 송,수신을 가능하게 하였다.

EMAT는 전기적인 성질과 기계적인 성질이 상호 변환될 수 있는 특성을 이용한 것으로서 도선 또는 도체박막에 의해 Eddy-Current가 도체매질 표면에 비 접촉으로 발생되고, 발생한 Eddy-Current에 대한 고정된 정 자기장의 Lorentz Force 작용으로 도체매질표면에 음향파가 여기된다.^{11,20,21,22}

EMAT는 코일의 구성 모드에 따라 spiral형과 meander line 또는 grating line형으로 대별되며, 여기 시키고자하는 파의 모드에 따라 코일을 구성된다.²³ spiral형 EMAT는 bulk 파를 여기시키며 쿨라장 길이 이상에 존재하는 결함 검출에 이용되어지고 meander line 또는 grating line형 EMAT는 한파장 길이 미만에 존재하는 결함 검출에 우수한 특성을 나타내는 SAW를 여기시킨다.^{11,22,24}

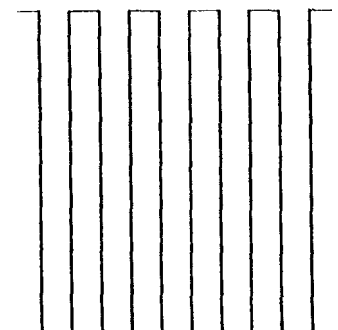
본 연구에서는 비파괴 검사에서 이용이 가능하며 제작이 용이한 SAW발생 방식으로서 meander line형 EMAT과 grating line형 EMAT를 비교하여 연구하였으며 우선적으로 코일의 특성을 해석 하였으며 EMAT에 대한 능가회로를 구성하였고 동 자기장과 정 자기장을 위한 코일과 자석군의 설계 파라미터를 결정하였다.

EMAT의 특성 실험에서는 중심 주파수 2 MHz의 제작된 형태의 EMAT를 pitch-catch방식을 이용하여 전기 입력펄스에 대한 응답을 분석하였으며 중심 주파수에서의 삽입 손실 IL(Insertion Loss)을 측정하였다.

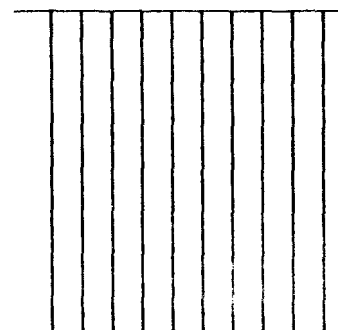
II. EMAT의 특성 해석

II-1. 코일의 특성 해석

SAM의 에기름 위한 기본적인 EMAT 코일의 형태는 meander line형과 grating line형으로서 기본 구조는 그림 1과 같다.



(a) meander line type



(b) grating line type

그림 1. EMAT 코일의 기본 구조
Fig. 1 Basic geometries of EMAT coil

meander line형의 grating line형의 차이점은 중심 주파수에 있어서 각각의 중심 주파수는 다음과 같은 관계를 가진다¹⁾

$$f(\text{meander}) = f(\text{grating}) \quad (1)$$

EMAT는 SAW의 진행방향에 θ 의 각도로 입사되어지는 전자기장과 도체매질 표면에 Eddy current를 발생시키는 코일로 구성되어 지므로 실제적인 EMAT의 특성은 코일의 특성으로 특징지어지고 코일의 형태와 피각에 따라 저항 R과 인덕턴스 L이 달라진다.

즉 코일의 임피던스 Z는 (2)식과 같이 주어진다.

$$Z = R + j\omega L \quad (2)$$

II-2. 도체매질 표면에서의 코일의 특성 해석

meander line 또는 grating line형의 코일이 도체매질 표면에 놓일때는 도체매질의 전자기적 성질에 의해 전체적인 특성이 변화하게 된다.

도체매질 표면에서의 meander line형 EMAT의 기본적인 구조는 그림 2와 같이 나타내어질 수 있으며

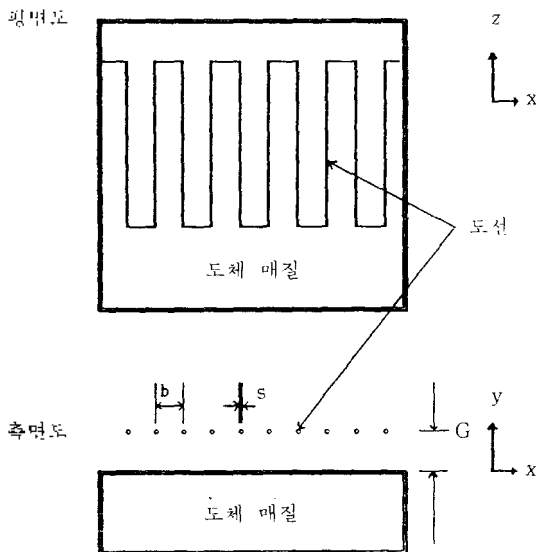


그림 2 도체매질 표면에서의 EMAT 구조
Fig. 2 Basic geometry of meander line EMAT on the conducting media

간격 b와 폭 s를 가지는 도선을 통과하는 전류 I는 각각의 도선 주위로 동 자기장을 형성하며, 이러한 동 자기장은 인접한 도선과 도체매질에 영향을 미친다.

코일에 전류 I가 흐를때 형성되어지는 동 자기장의 강도는 다음과 같이 주어지며²⁾

$$H = 2(I/b) \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}(ns/2b) \cos[\pi n(x/b)] \exp[-\pi n(G/b)] \quad (3)$$

코일과 도체매질과의 거리 G와 간격 b가 고정될경우, 도선의 폭 s의 변화에 따른 동 자기장의 강도에 대한 시뮬레이션은 그림 3과 같다.

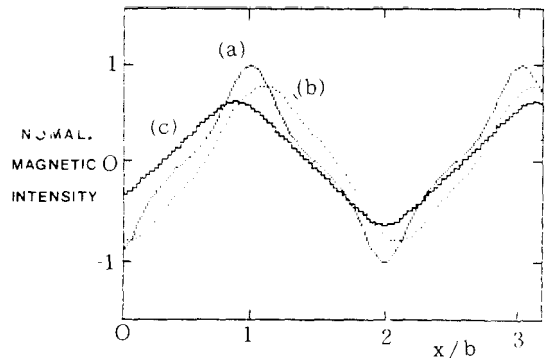


그림 3. G/b=0.21 일때의 동 자기장의 강도
Fig. 3 simulation of magnetic intensity
(x/b: x방향으로의 도선의 위치)
(a) s/b=0.25 (b) s/b=0.5 (c) s/b=0.9

그림 3.의 시뮬레이션에서 도선의 폭 s가 증가함에 따라 동 자기장의 강도는 감소하게 되고 결과적으로 효율적인 SAW의 여기를 위해서는 s의 값이 충분히 작아야 함을 알 수 있다.

또한 EMAT의 중심 주파수는 도선의 간격 b와 도체매질에서의 SAW의 속도에 의해서 결정되며 고주파수용 코일을 제작하여 EMAT의 분해능을 높이기 위해서는 도선의 간격 b를 작게해야한다.

1X2K9X41

II-3. 등가회로

그림 2와 같은 구조를 가지는 EMAT의 등가 회로는 그림 4.로 주어진다.

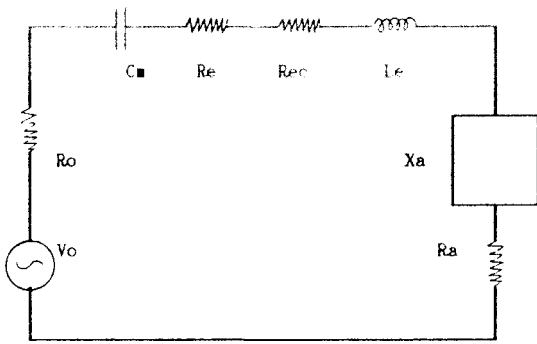


그림 4. 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit

그림 4에서 Vo와 Ro는 전원전압과 전원 내부저항이며 Re와 Le는 코일의 저항 및 인덕턴스이고 Rec는 Eddy current resistance이며 Ra와 Xa는 EMAT의 방사저항 및 방사리액턴스이고 Cm은 동조캐패시턴스를 나타낸다. (수신측 Cm은 병렬 연결)

그림 4에서 음향 방사저항 Ra는 (4)식과 같이 주어진다.¹⁴⁾

$$Ra = 2l\omega B_0^2 N^2 M^2 \sin^2(\alpha) \cdot 2b \exp[-2\pi(G/b)] \sin^2 [N(f-f_0) / f_0] \quad (4)$$

(4)식에서 N은 코일의 주기수, G는 코일과 도체배설과의 거리이고 M²은 정자기장의 암사방향계수이다.

일반적으로 내부저항 Ro는 수십오옴 이고 Ra는 마이크로오옴에서 밀리오옴의 단위를 가지며, Re는 수오옴, Rec=Re, 그리고 Le는 수 마이크로헨리 이하의 단위를 가지므로 그림 4로 구성된 EMAT 등가회로의 효율 TE는 (5)식과 같이 간략화될 수 있다.¹⁵⁾

$$TE = 2Ra / Ro \quad (5)$$

또한 단일 EMAT의 삽입 손실 IL은 (6)식으로 정의 된다.¹⁶⁾

$$IL = 10 \cdot \log TE \quad (6)$$

(6)식으로 주어지는 수파수에 따른 삽입 손실

IL의 시뮬레이션은 그림 5와 같이 나타난다. 그림 5는 100MHz의 주파수에서 100MHz의 주파수 대역폭(100MHz)에서의 삽입손실은 43.1dB이다.

본 연구에서는 특정의 동일한 수신 및 발신용 EMAT 회로를 제작하였으며 pitch-catch방식으로 특성을 조사하였다.

단일 EMAT는 도체배설의 표면을 따라 양쪽방향(bidirection)으로 SAW를 이기시키고, pitch-catch 방식에서는 한쪽방향으로 이기시킨 SAW를 수신한다. 따라서 (6)식으로 주어지는 단일 EMAT의 삽입 손실 IL은 pitch-catch 방식에서 수신 및 발신용 EMAT 한쌍의 삽입 손실과 같다.

그림 6은 좌방의 EMAT에 대한 임펄스 응답 특성을 보여주며 이것을 발신용 EMAT의 임펄스 응답과 수신용 EMAT의 임펄스 응답의 곱방향을 구하여 나타낸 것이다.¹⁷⁾

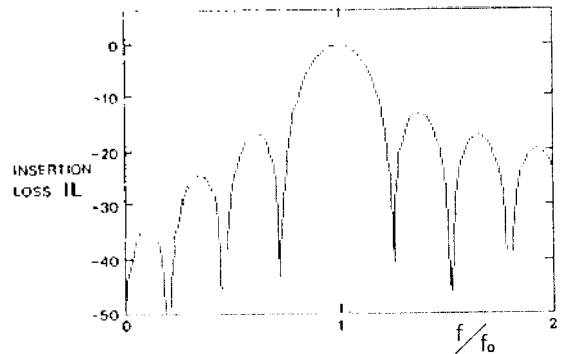


그림 5. 시뮬레이션된 삽입 손실
Fig. 5 Simulation of Insertion Loss

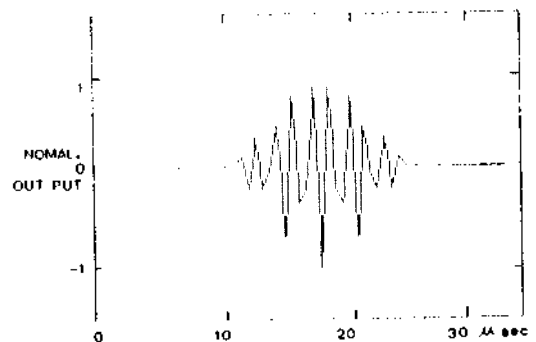


그림 6. 시뮬레이션된 임펄스 응답
Fig. 6 Simulation of Impulse Response

III. Meander line형 EMAT의 설계 및 제작

본 연구에서는, 기본적인 meander line형 EMAT에 대한 임펄스 응답을 얻기 위하여 주진동의 일정한 주파수 범위를 갖는 정자장을 위한 코일과 보편적인 감자기장을 위한 자석군을 구성 하였으며 BNC 콘넥터로 연결되는 임피던스 매칭을 제작 하였다.

III-1. 동자기장을 위한 코일의 구성

그림 3에서의 직선레이선과 같이 도선의 중심은 작은 수직 요철을 가진 동자기장을 형성하지만 제작상의 어려움으로 인해 본 실험에서는, 폭 0.65mm의 동 도선을 사용하였다.

제작된 코일은 크닝 도과 같은 유각을 가지며 중주파수는 2MHz이다.

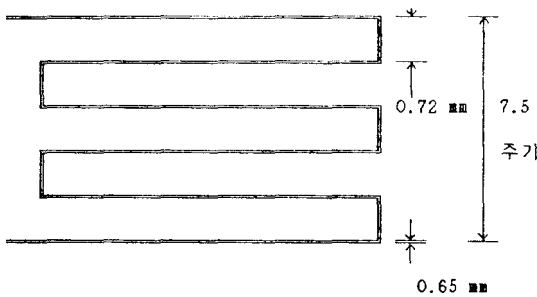


그림 7. 동자기장을 위한 코일의 구성
Fig. 7 Schematic of coil

III-2. 정자기장을 위한 자석군의 구성

정자기장의 입사 방향은 SAW의 진행방향 또는 수직방향이며 입사방향에 따라 (4)식에서의 입사방향계수 M^2 의 값이 변화한다.

본 실험에서는 $3 \times 4 \times 10$ mm의 영구자석 6개를 하나의 자석군으로 배열 하였으며 에폭시수 사용하여 플렉시칼래스트에 고정하였다.

IV. 결과 및 고찰

제작된 한쌍의 meander line형 EMAT의 임펄스 응답을 측정하기 위한 실험 장치의 블록 선도는 그림 9와 같다.

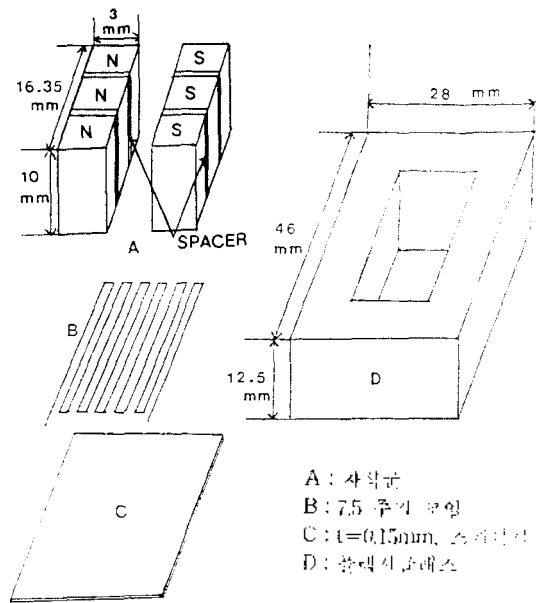


그림 8. 정자기장을 위한 자석군의 구성
Fig. 8 Schematic of magnets

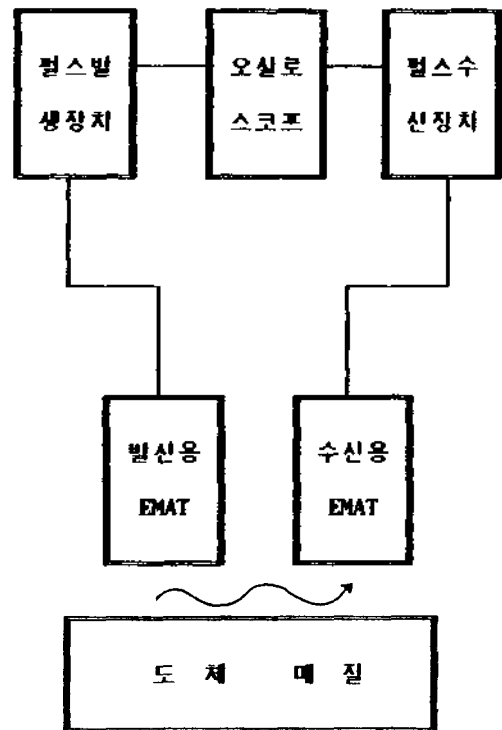


그림 9. 실험 장치의 블록 선도
Fig. 9 Block diagrams of setups

SAW의 pitch-catch 실험은 펄스 발생 장치에서 나온 전기 펄스가 발신용 EMAT를 거쳐 SAW로 전환된 후 도체매질의 표면을 거쳐 수신용 EMAT에서 전기신호로 바뀌어 오실로스코프에 나타난다.

임펄스 응답은 SAW의 pitch-catch 방식을 이용하여 측정 하였으며 사진 1과 같은 입력 펄스를 발생 시키는 EMAT에 인가 하였을때 발생된 EMAT의 크기가 20mm 떨어진 수신용 EMAT에서의 임펄스 응답은 사진 2와 같이 나타난다.

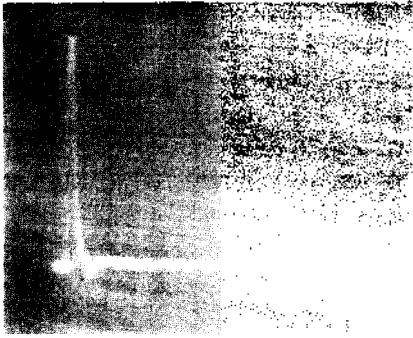


사진 1. 입력 펄스(0.1 μ s, 2V)

Photo 1. Impulse signal

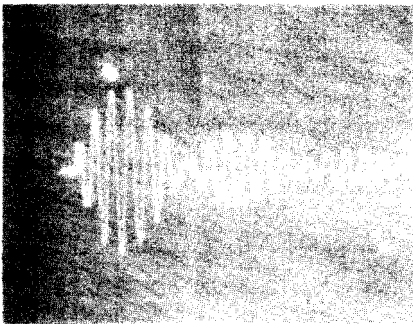


사진 2. 임펄스 응답(5 μ s, 10mV)

Photo 2. Detected Impulse Signal

사진 1,2에서, 중심 주파수에서의 삽입 손실은 인간발 전압에 대한 출력전압의 비로서 계산되어지며 45.46 dB로 측정되었고 그림 5의 시뮬레이션을 통해 계산된 43.4 dB보다 낮은 효율을 나타내었다. 그원인은 도체매질 표면을 따라 전파하는 SAW의 감쇠 현상에서 기인한 것으로 고려 되어진다.

또한 그림 6의 시뮬레이션된 임펄스 응답의 특성

과 실험을 통해 조사한 사진 2의 수신된 임펄스 응답을 비교해 볼때, 사진 2는 주기적으로 반복되는 ringing 현상이 나타나는 현상 볼 수 있으며 이러한 현상은 수신용 EMAT와 도체매질 사이의 SAW의 반사 현상으로 고려 되어진다.¹⁰⁾

V. 결 론

본 논문에서는 중심 주파수 2MHz의 meander line형 EMAT를 설계, 제작 하였으며 코일, 도체매질, 자석군을 고려한 EMA의 특성이 연구되었다.

EMAT의 중심 주파수는 도체매질에서의 SAW의 속도와 자석의 간격에 의해서 결정되며 본 실험에서는 2MHz로 설계 하였다.

코일과 도체매질 표면에서의 시뮬레이션 결과, 자석군이 작용하는 효율성의 특성을 나타낼수 있을 수 있었으나 제작시에 도선의 간격 유지등의 어려움으로 인하여 실험에서는 폭0.65mm, 길이 5.2mm, 7.5 주기의 코일을 제작 하였으며, 정 자기장의 코일을 용해하여 대체시 자마리움 코발트 재질의 EMAT의 코일은 일부는 약 6개를 한쌍으로 하는 자석군을 구성 하였다.

제작된 EMAT의 성능 평가를 위해서는 알미늄 샘플에 대한 임펄스 응답을 pitch-catch 방식으로 실시하였다. 중심 주파수에서의 삽입 손실 IL(Insertion Loss)은 45.46dB로 컴퓨터로 시뮬레이션을 통해 계산된 43.4dB보다 약 2.06 dB 손실이 큰것으로 측정되었고 바 대역폭은 36%로 협대역 특성을 나타냈다. EMAT의 대역폭 및 효율은 코일의 주기수에 의해 결정되며 주기수가 증가함에 따라 대역폭을 나타내다 대역폭은 감소한다. 따라서 EMAT의 사용 목적에 따라 알맞은 코일의 주기수가 선택 되어져야한다.

이상의 실험결과를 이론과 잘 일치하며, 그림 6의 임펄스 응답에 대한 시뮬레이션 결과와 실험의 임펄스 응답과 비교해볼때, 사진 2의 임펄스 응답은 주기적인 ringing현상을 나타내었으며 이것은 수신용 EMAT와 도체매질 사이의 SAW의 반사 현상으로 생각된다.

고 표류의 EMAT 제작을 위해서는 정 자기장을 위한 자석권의 자계장도의 증가와 동 자기장을 위한 전류의 증가가 요구되어지며 고 분해능을 위해서는 보다 정밀한 코일의 제작이 요구되어진다.

REFERENCE

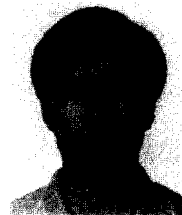
1. H.Yalaat and E.Burstein, J.Appl.Phys., Vol.45, No. 10, pp.4360, Oct. 1974.
2. J.C. Sethares and T.L. Szabo, J.Appl.Phys., 49(13), pp.1054, March, 1978.
3. R.Bruce, Thompson, IEEE, TRANS,SONICS and ULTRASONICS, Vol,SU-20, No.4, pp. 340, October, 1973.
1. Thomas L.Szabo and Harold M.Frost, IEEE, TRANS,SONICS and ULTRASONICS, Vol,SU-23,No.5, pp.323, September 1976.

5. Thomas L. Szabo and Harold M.Frost, IEEE, TRANS,SONICS and ULTRASONICS, Vol,SU-24, No.6, pp.393, November 1977.
6. U.S. Department of Commerce, NBS Technical note 1075, May 1984.
7. S.Kino, "Acoustic waves devices, iaging and analog signal processing", PRENTICE-HALL INC.
8. Korea Standard Reserch Institute, KSRI -89-17-JR (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.Selfridge, H.Tuan, "Development of Transducer for NDE", Stanford Univ., 1979.
11. H.M. Frost, "Electromagnetic-Ultrasonic Transducer : Principles, Practice, and Application", 1978, pp 179:275

▲김 동 기(정회원) 1945년 1월 15일생
 1968. 2. 27 : 광운대학교 응용 전자공학과 졸업
 1978. 2. 27 : 연세대학교 대학원 졸업
 1988. 2. 27 : 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료
 1977. 4 ~ 현재 : 중앙직업훈련원 전자과 근무



▲이 재 승(정회원) 1963년10월22일 서울생
 1989년 : 경희대학교 졸업 (이학사)
 1990년~현재 : 경희대학교 전자공학과 석사과정
 ※관심분야 : 초음파및 신호처리



▲전 개 식(정회원) 9년 2호 참조.