

# 패치형 자왜 초음파 변환기 성능에 대한 바이어스 자기장의 영향

## Effect of Biasing Magnetic Fields on the Patch-type Magnetostrictive Transducers

이 호 철\* · 김 희 용\*

Hocheol Lee and Heeyoung Kim

(2009년 7월 29일 접수 ; 2009년 9월 30일 심사완료)

**Key Words** : Structural Health Monitoring(구조물 건강성 진단), Smart Material(지능형 물질), Ultrasonic Transducer(초음파 변환기), Magnetostrictive Material(자왜물질), Lamb Wave(람파), Biasing Field(바이어스 자기장)

### ABSTRACT

The effects of biasing magnetic fields on the performances of magnetostrictive ultrasonic transducers are investigated. The transducers are patch-type ones which are used for SHM of plate structures. Various kinds of configurations of biasing magnets are covered experimentally. It is experimentally verified that how the biasing magnetic field deploys is the most significant factors on maximizing the transducer output. From the magnetostriction curve of nickel, it is concluded qualitatively that it is not the absolute values of biasing magnetic field but the slope of magnetostriction curve to be taken account of.

### 1. 서 론

최근 들어 초음파의 응용 분야 중에서 많은 사람들의 주목을 받고 있는 분야는 소위 구조물의 건강성 진단(SHM: structural health monitoring)이라고 불리는 것이다. 구조물 건강성 진단에 사용되는 초음파 발생 및 측정용 변환기(transducer)에는 지능형 물질(smart material)이라고 불리는 피에조 물질이 주로 사용되고 있다. 피에조 물질은 가용 주파수 대역폭이 넓은 특유의 장점이 있을 뿐 아니라 최근 복합재 기술을 토대로 기존의 세라믹 물질의 단점을 대체하는 신재료들이 계속적으로 등장하고 있다는 점에서도 구조물 건강성 진단에 매우 이상적인 재료로 간주되어 왔다<sup>(1)</sup>.

하지만 피에조 물질이 가지고 있는 치명적인 단

점 또한 존재한다. 가장 대표적인 단점은 피에조 물질의 경우 초음파를 생성 및 측정하기 위해서는 반드시 해당 센서나 구동기(actuator)에 배선(wiring)을 직접 해야 한다는 것이다<sup>(2)</sup>. 이는 만일 어떤 구조물에 대한 이상 진단을 수행함에 있어 기존에 부착된 센서나 구동기가 적합하지 않거나 성능이 개선된 구동기가 나올 때마다 기존의 변환기를 제거하고 다시 붙이는 과정을 반복하지 않으면 안 된다는 것을 의미한다.

자왜현상을 이용한 초음파의 발생 및 측정에 관한 연구 역시 피에조와 병행하여 꾸준히 관심을 받아왔다. 특히 최근에는 위에서 언급한 피에조의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 집중적인 연구가 이루어지고 있다. 피에조 물질이 전기장을 이용하여 기계적인 변위를 일으킴에 비해서 자왜물질은 자기장을 이용해서 변위를 일으키므로 본질적으로 비접촉 특성을 가지게 된다. 이는 피에조 물질처럼 배선을 직접 하지 않아도 전기에너지를 기계적 에너지로 변환하는 것이 가능하다는 것을 의미한다<sup>(3)</sup>.

† 교신저자; 정회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부  
E-mail : hclee21@cu.ac.kr

Tel : (053)850-2712, Fax : (053)850-2710

\* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

최근에 이루어진 관련 연구를 통해서 살펴보면 Fig. 1(a)과 같다<sup>(4)</sup>. Fig. 1(a)에서 패치(patch)라고 표시된 것은 니켈(nickel)로 만들어진 강자성체 물질로 자왜현상을 일으키는 물질이다. 패치의 상단에 존재하는 코일과 자석은 각각 동적(dynamic) 자기장과 정적(static) 자기장을 생성하여 패치 상에 변화하는 자기장을 만들어 줌으로써 패치가 자왜현상을 통해서 기계적인 변위를 발생할 수 있도록 해준다. Fig. 1(b)는 이렇게 구성된 장치를 통해서 발생한 초음파를 측정된 측정결과와 한 사례를 보여주고 있다. 첫 번째 신호는 전기전자적인 결합(coupling)으로 인해서 생기는 신호이고 평판을 따라서 전파되는 Lamb파 신호가 뒤를 따르고 있음을 알 수 있다.

Fig. 1에 보인 초음파 변환기 이후에 많은 형태의 자왜형 초음파 변환기가 제안되었다<sup>(5-8)</sup>. 제안된 초음파 변환기들은 기존의 피에조 물질을 이용한 변환기에 비금가는 혹은 그 성능을 뛰어 넘는 특성을 가지면서도 비접촉 방식의 에너지 변환이라는 본질은 유지하고 있어서 평판구조물의 구조물 안정성

평가에 활용할 수 있는 가능성이 매우 높다.

하지만 지금까지의 연구들은 주로 새로운 초음파 변환기의 가능성을 검증하거나 초음파 방사 패턴을 예측 및 확인하는 것에 집중되어 있었다. 특히 초음파 변환기의 성능에 가장 큰 영향을 주는 인자 중 하나인 바이어스 자기장의 크기에 대한 연구는 거의 이루어진 바가 없다. 이에 이 논문에서는 지금까지 제시된 자왜형 초음파 변환기들에 대해서 바이어스 자기장이 출력 성능에 어떤 영향을 주는 지를 평가하고자 한다. 지금까지 제시된 자왜형 초음파 변환기를 직접 제작하고 바이어스 자기장의 크기를 변화 시킬 수 있는 실험 장치를 이용해서 바이어스 자기장의 크기를 변화시켜가면서 출력의 크기를 조사하였다. 결론적으로 기존에 제시된 초음파 변환기들은 최적의 성능을 낼 수 있는 조건에서 구동되고 있지 않다는 것을 확인하였다. 끝으로 초음파 변환기에 사용된 재료인 니켈의 자왜 변형 특성 그래프를 이용하여 이 논문의 실험에서 발견되는 초음파 변환기의 출력 특성의 원인에 대하여 논의하였다.

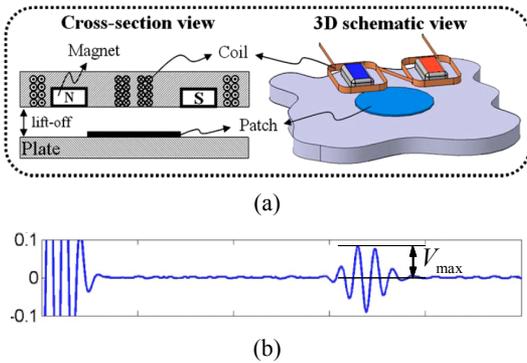


Fig. 1 (a) Schematic figures of an example of magnetostrictive transducers and (b) its time domain output signal

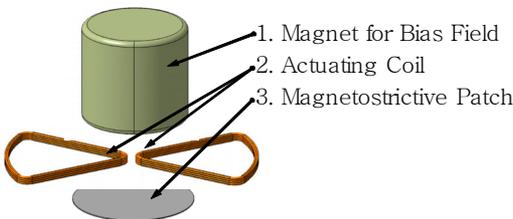


Fig. 2 Schematic figures of the components of a proposed magnetostrictive transducer

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치의 구성

Fig. 2는 이 연구에서 사용된 자왜형 초음파 센서의 구성을 개략적으로 보여주고 있다. 그림에서 1로 표시된 바이어스 자기장용 자석은 그림에 3으로 표시된 패치에 일정한 크기의 정적인 자기장을 생성해 주기 위해서 사용되고 있으며 이 연구의 주 실험 대상이다. 2로 표시된 가진 코일은 패치에 동적인 자기장을 생성해 줌으로써 펄스(pulse) 형태의 초음파를 생성할 수 있게 해준다. 마지막으로 3으로 표시된 패치는 이 연구에서는 니켈을 사용하였는데 강자성체 물질로 자기장 아래 놓이면 변형을 일으키게 된다.

서론에서 언급한 바와 같이 이 연구의 목적은 바이어스 자기장이 출력 성능에 주는 영향을 평가하는 것이 목적이므로 Fig. 2의 1에 해당하는 영구자석 부분에 다양한 변화를 주되 2와 3은 각각의 비교실험 군내에서는 변화시키지 않도록 하였다. 영구자석 부분에 가할 수 있는 변화의 종류는 크게 2가지로 제한하였다. 하나는 영구자석의 형태 자체가 변화하는 것이고 다른 하나는 같은 변환기 구성에

대해서 각각의 요소들의 상대적인 위치가 변화하는 것이다.

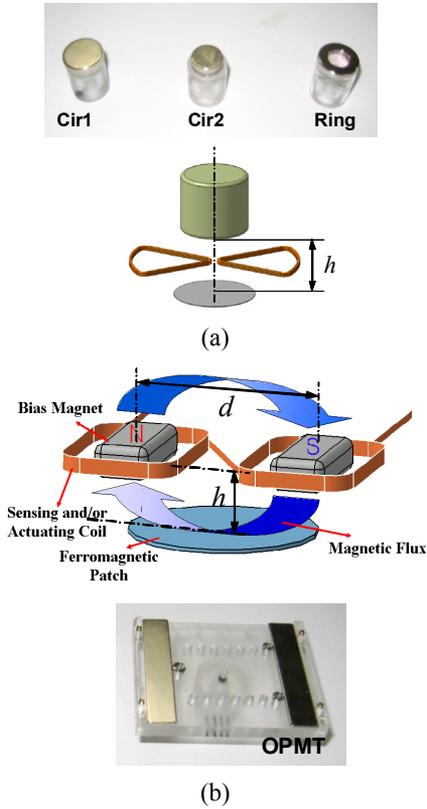


Fig. 3 Prepared specimens for (a) the radially axis-symmetric biasing magnetic fields and (b) the case of OPMT<sup>(4)</sup>

Fig. 3에 이 연구에서 사용한 영구자석의 종류를 보였다. 먼저 Fig. 3(a)는 영구자석으로부터 만들어지는 바이어스 자기장의 형태가 패치를 중심으로 반경 방향으로 형성되는 경우를 대표한다. 서로 다른 크기의 디스크 형태의 시편(Cir1과 Cir2)과 링 형태의 영구자석에 대해서 실험을 수행하였다. 실험은 각각의 영구자석 형태에 대해서 영구자석과 패치간의 간격( $h$ )을 변화시켰을 때 나타나는 출력 성능의 변화를 측정하였다. 초음파 센서의 출력 성능은 여러 가지가 있을 수 있으나 이 연구에서는 Fig. 1(b)에 보인 바와 같이 출력 펄스 신호의 최대값으로 채택하여 바이어스 자기장이 출력 펄스의 크기에 어떤 영향을 주는지 살펴볼 수 있도록 하였다. 기존에 발표된 연구에서 사용된 초음파 변환기가 최적의 조건에서 사용되었는지를 확인하기 위하여 OPMT라고 불리는 초음파 변환기와 유사한 형태를 가지는 초음파 변환기를 제작하였고<sup>(4)</sup>, Fig. 3(b)에 OPMT의 구성 및 제작된 바이어스 자기장용 자석을 보였다. OPMT의 경우는 (a)의 경우와 달리 높이뿐만 아니라 두 자석의 거리도 영향을 줄 것으로 판단하여 자석간 거리  $d$ 도 변화시킬 수 있도록 실험 장치를 제작하였다.

Fig. 4에 이 연구에서 사용된 실험 장치들을 이용하여 실제로 실험을 하고 있는 모습을 보였다. 실험은 Fig. 4의 송신자(transmitting device)로 표시된 장치에서 초음파 펄스 신호를 발생하고 이를 수신자(receiver device)에서 전압신호로 변환한 뒤 이를 전치 증폭기(AD8022)를 통해서 증폭하여 오실로스코프를 통해서 관찰하는 방식을 취하였다. 정확하고 효율적인 실험을 위해서 영구자석의 높이 조절에는 스텝핑 모터(steping motor)를 이용하였으며 전체 실험 시스템은 LabVIEW를 이용하여 제어하였다.

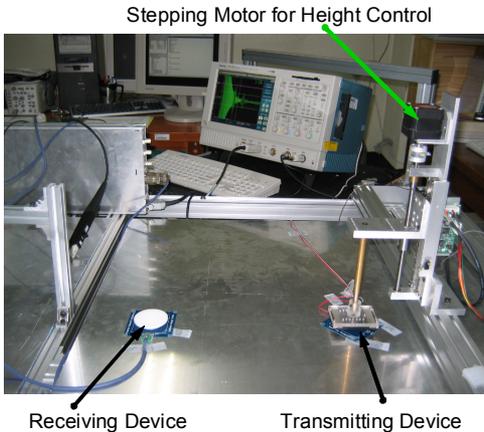


Fig. 4 Experimental setup for measuring the performances of the proposed transducers

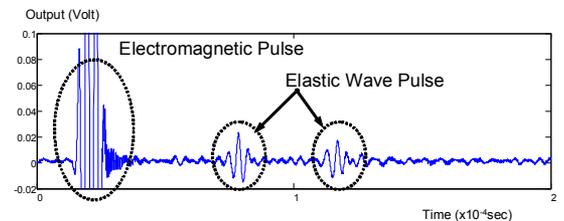


Fig. 5 Measured time signal from experimental setup of Fig. 4

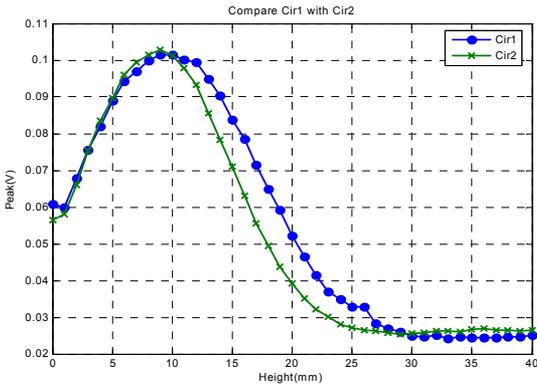


Fig. 6 Output voltage variations according to the distance between the permanent magnet and the nickel patch attached to aluminum plate

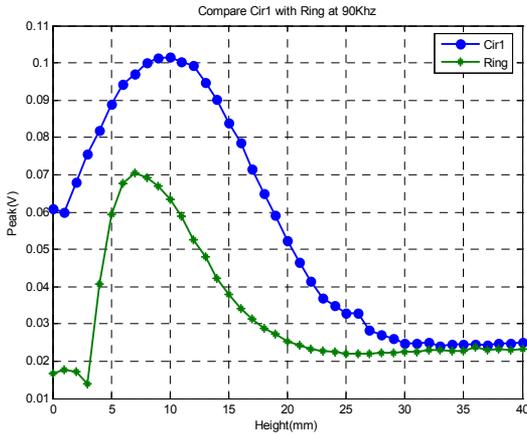


Fig. 7 Difference of output voltage variation between a cylinder type permanent magnet and a ring type one

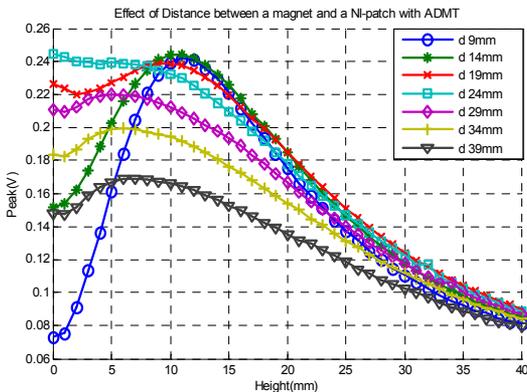


Fig. 8 Output voltage variations according to the height(h) and distance(d)

Fig. 5에 Fig. 4의 실험을 통해서 취득한 측정신호를 보였다. 처음에 매우 크게 보이는 신호는 탄성파에 의해서 발생하는 신호가 아니라 송신자와 수신자 사이에는 전자기적인 결합 메카니즘이 존재하기 때문에 발생하는 신호다. 뒤에 따라오는 신호가 실제로 탄성파에 의해서 발생하는 신호로 측정된 신호의 위치를 통해서 계산하여 Lamb파 중에서 S0에 속하는 탄성파임을 확인하였다<sup>9)</sup>.

## 2.2 실험 결과

먼저 Fig. 6에 Fig. 3에 보인 시편들 중에서 Cir1(직경=15 mm)과 Cir2(직경=20 mm)에 대하여 영구자석의 높이를 변화시켜가면서 실험을 수행한 결과를 보였다. 이 실험은 중심 주파수가 60 kHz인 Gaussian 펄스 형태의 신호를 송신부에서 발생시키고 수신부에서 이를 측정된 뒤에 Fig. 1(b)에 보인 것과 같이 이 펄스 신호의 최대값을 측정된 것이다. 기본적으로 전체 실험 결과들에서 공통으로 발견되는 주목할 만한 결론은 이전의 연구들에서 채택한 바이어스 자기장이 최적의 상태가 아니라는 것이다. 예를 들어 강한 자기장이 보다 큰 자왜현상을 일으킬 것이라는 일반적인 예측에 의하면 Fig. 3의 (a)나 (b)의 초음파 변환기 구성에서 영구자석과 패치의 거리는 가까우면 가까울수록 성능이 좋을 것이라는 예상을 하게 된다. 하지만 실제 실험 결과는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 이 거리가 가까우면 오히려 출력 신호의 크기가 줄어드는 현상을 볼 수 있다. Fig. 6에서 알 수 있는 또 다른 중요한 특징은 출력의 변화가 단조 감소 혹은 증가하는 양상을 보이지 않고 특정한 높이에서 최대값을 가진다는 것이다. 이는 유사한 형태의 자왜형 변환기를 설계할 때 매우 중요한 설계 지침으로 사용될 수 있다. Fig. 6은 자석의 직경은 전체적인 출력 특성에 크게 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다.

Fig. 7은 자석이 크기는 같고 (직경=20 mm) 모양이 다른 경우에 출력 특성이 어떻게 달라지는가를 보여주고 있다. Fig. 6과 같은 실험 조건에서 실험하였고 링 형태의 자석의 경우 내경이 10 mm인 것을 사용하였다. 특정한 높이에서 최대 출력을 보인다는 점은 Fig. 6과 같으나 원통형 자석과 링 형태의 자석이 최대 출력을 보이는 높이가 다를 수 있다. 마찬가지로 자석과 패치가 너무 가까이 있게 되

면 출력 특성이 오히려 더 나빠지는 현상도 똑 같이 관찰 되었다.

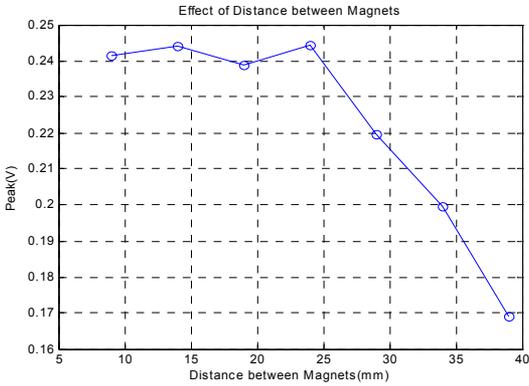


Fig. 9 Peak output voltage variation with respect to distance between magnets

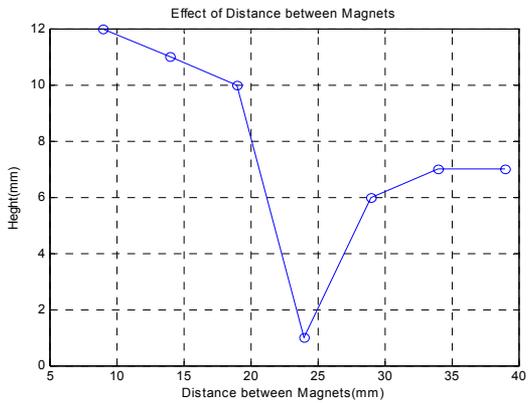


Fig. 10 The effect of distance between magnets on the height of peak voltage occurrence

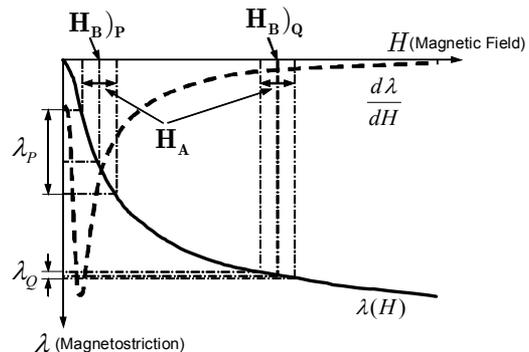


Fig. 11 Magnetostriction curve of nickel which is used as patch material<sup>(10)</sup>

Fig. 8은 Fig. 3(b)에 보인 OPMT<sup>(4)</sup> 형태의 초음파 변환기에 대해서 자석의 높이( $h$ ) 및 자석의 간격( $d$ )을 변화시켜가면서 출력 전압의 최대값을 측정 한 결과를 보여주고 있다. Fig. 8의 결과를 통해서 다음과 같은 특징이 있음을 알 수 있다. 첫 번째로 자석의 높이에 따라서 단조 감소 특성을 보이기도 하고( $d=24\text{ mm}$ ) Fig. 6과 7과 비슷하게 특정한 높이에서 최대 출력을 보이기도 한다. 두 번째로 최대 출력이 나타나는 높이인데 자석의 간격에 따라서 서로 다른 높이에서 최대출력이 나타남을 확인할 수 있다. 물론  $d=24\text{ mm}$ 의 경우에는 단조 감소하므로 최대출력의 개념이 크게 의미가 있지는 않다. 마지막으로 전체적으로 자석 사이의 간격이 좁을수록 출력이 큰 것을 알 수 있다. 이는 영구자석과 패치 그리고 공기로 구성되는 자기회로에서 자석의 간격이 멀수록 자기저항이 커지게 됨으로써 나타나는 현상이다.

Fig. 9는 위에서 언급한 내용 중에서 자석의 간격 변화에 대해서 최대출력의 크기가 어떻게 변화하는

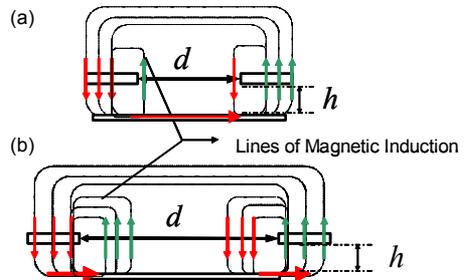


Fig. 12 Variations of magnetic flux leakages according to the distance between magnets

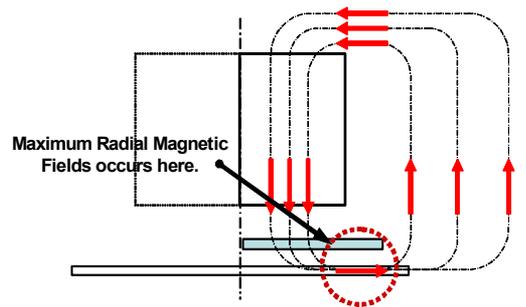


Fig. 13 Expected biasing magnetic field by permanent magnet for the transducers shown in Fig. 3(a)

지를 보여주는 그래프이고 Fig. 10은 자석의 간격 변화에 대해서 최대출력이 나타나는 높이가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있는 그래프다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 자석간의 거리가 특정한 수치 이상으로 벌어지게 되면 출력 전압은 급격하게 줄어든다. 특히 Fig. 10을 보면 자석간의 거리가 24 mm인 경우, 최대 출력이 나타나는 높이가 매우 줄어들어 있음을 알 수 있고 Fig. 9에서 해당 높이에서 출력을 확인해보면 그 출력이 매우 큼을 알 수 있다. 이를 통해서  $d=24$  mm일 때가 초음파 변환기의 크기를 작게 만들면서 출력을 가급적 크게 하고 싶을 때 가장 유리함을 알 수 있다. 각각의 그래프가 Fig. 3(b)에 보인 형태의 초음파 변환기를 만들 때 영구 자석이 어떻게 배치되어야 하는가에 대한 설계기준으로 다양하게 활용될 수 있을 것이다.

### 2.3 토론

Figs. 6~10에 걸친 그래프들 통해서 영구자석의 배치, 형태 그리고 상호간의 위치에 따라서 초음파 변환기의 출력 특성의 변화가 매우 복잡하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 현재 F.E.M을 이용하여 이러한 복잡한 현상을 해석하기 위한 후속 연구가 진행되고 있으나 다음과 같은 정성적인 측면에서의 설명은 현재의 실험결과로도 가능하다.

Fig. 11은 패치의 재료로 사용된 니켈의 자기변형 곡선이다. 니켈은 어느 정도 크기의 자기장이 걸리면 자기변형도 최대값으로 포화하는 현상을 보인다. 하지만 이 연구에서 대상으로 하고 있는 초음파 변환기의 경우는 정적인 변형을 일으키는 것이 아니라 동적 변형을 이용하는 것이므로 정적변형 특성을 보아서는 안 된다. 예를 들어 코일을 이용해서 같은 크기의 동적 자기장( $H_A$ )을 가해준 경우라도 바이어스 자기장의 크기가  $H_{B,P}$ 인 경우와  $H_{B,Q}$ 인 경우를 비교해보면 자기변형 곡선의 기울기가 큰  $H_{B,P}$ 쪽이 훨씬 더 큰 변형을 일으킴을 알 수 있다. 이는 Fig. 8에서 자석이 가까우면 오히려 출력값이 작아지는 현상을 설명해준다.

또한 Fig. 9와 Fig. 10에 높이 24 mm 전후에 걸쳐 관찰되는 출력값의 급격한 감소 및 최대 출력 발생 지점의 변화는 Fig. 11 및 Fig. 12를 이용하면 정성적인 설명이 가능하다. 즉, 자석간의 거리가 멀어지면서 Fig. 12(b)와 같이 자력선의 누설(leakage)

가 많아지게 되고 이로 인해 출력 특성의 열화가 발생하게 되는 것으로 판단된다. 이것이 위에서 설명한 Fig. 11의 자기변형곡선의 특징과 결합하여 Fig. 9와 Fig. 10에 보인 현상을 일으킨다고 추측할 수 있다.

결국 Figs. 6~10에 걸쳐 나타나는 현상들은 Fig. 3(a)의 형태를 가지는 초음파 변환기에서는 자석과 패치의 거리에 따라서 또 Fig. 3(b)의 형태를 가지는 초음파 변환기의 경우에는 자석과 패치 및 자석간 거리가 변화함에 의해서 나타난다. 이렇게 거리가 달라지면 패치에 걸리는 바이어스 자기장의 크기가 달라지고 이 변화된 바이어스 자기장이 Fig. 11의 자기변형 그래프에서 어떤 위치에 있는가에 따라서 출력 특성이 변화하기 때문에 Figs. 6~10의 현상이 나타나는 것으로 판단된다.

특히 거리가 가까운 경우에는 자기장의 세기가 너무 강해서(Fig. 11에서  $H_{B,Q}$ 지점) 오히려 동적변형은 크게 일어나지 않을 것이다. 물론 여기에는 패치에서 발생하는 Lamb파의 모드나 동적 자기장과 바이어스 자기장이 이루는 각도 등도 영향을 주기 때문에 바이어스 자기장만으로 모든 것을 설명할 수 없다. 예를 들어 Fig. 13에서 보듯이 Fig. 3(a)의 경우 패치의 중심에서의 자기장 보다 패치에서 어느 정도 떨어진 곳에서의 정적 자기장이 더 큰 값을 가지게 되고 초음파를 생성함에 있어서도 더 중요한 역할을 한다.

### 3. 결 론

이 연구를 통해서 자왜형 초음파 변환기를 설계 및 제작함에 있어 바이어스 자기장이 출력 특성에 미치는 영향은 매우 중요하며 이 중요성은 초음파 변환기의 구성, 형상, 크기와 무관하다는 사실을 발견하였다. 또 자석의 형상과 관계없이 자석의 높이에 따라서 최대출력이 변화하며 대부분의 경우에서 특정한 높이에서 최대출력을 보임을 확인하였다. 패치에 형성되는 바이어스 자기장은 패치를 구성하는 재료의 자왜 특성으로 인해서 특정 자기장 크기에서 최대출력을 보이며 이 특징이 이 연구의 각종 실험결과와 원인이 되는 것으로 판단된다. 현재 이에 관한 정량적 검증을 위해서 전자기 F.E.M을 이용한 후속 연구가 진행 중에 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) Raghavan, A. and Cesnik, C. E. S., 2007, "Review of Guided-wave Structural Health Monitoring," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 39, No. 2, pp. 91~114.
- (2) Yu, L. and Giurgiutiu, V., 2008, "In situ 2-D Piezoelectric Wafer Active Sensors Arrays for Guided Wave Damage Detection," *Ultrasonics*, Vol. 48, pp. 117~134.
- (3) Bulte, D. P. and Langman, R. A., 2002, "Origins of the Magnetomechanical Effect," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 251, pp. 229~243.
- (4) Cho, S. H., Lee, J. S., Sun, K. H. and Kim, Y. Y., 2005, "Damage Detection in a Plate Using an Orientation-adjustable Magnetostrictive Transducer," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 81~86.
- (5) Cho, S. H., Lee, J. S. and Kim, Y. Y., 2006, "Guided Wave Transduction Experiment Using a Circular Magnetostrictive Patch and a Figure-of-eight Coil in Nonferromagnetic Plates," *Applied Physics Letter*, Vol. 88, pp. 224101-1~3.
- (6) Lee, J. S., Cho, S. H. and Kim, Y. Y., 2007, "Radiation Pattern of Lamb Waves Generated by a Circular Magnetostrictive Patch Transducer," *Applied Physics Letter*, Vol. 90, pp. 054102-1~3.
- (7) Kim, I. K. and Kim, Y. Y., 2007, "Shear Horizontal Wave Transduction in Plates by Magnetostrictive Gratings," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, pp. 693~698.
- (8) Kwun, H. and Kim, S. Y., 2005, "Magnetostrictive Sensor for Generating and Detecting Plate Guided Waves," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 127, No. 3 pp. 284~290.
- (9) Graff, K. F., 1975, "Wave Motion in Elastic Solids," Dover Publication Inc., New York. p. 431.
- (10) Bozorth, R. M., 1993, "Ferromagnetism," IEEE Press, New York, p. 267.