



## 자기변형 물질을 이용한 초음파 응용 기술

이 호 철\*

(대구가톨릭대학교 기계자동차공학부)

### 1. 머리말

초음파 기술은 이 기술과 관련해서는 이제 그 중요성을 따로 이야기하지 않을 정도로 많은 산업 분야에서 활용이 되고 있다. 과학기술에 대한 전문적인 지식이 없는 일반인들조차 기술적 내용을 이해할 수 없더라도 우리의 생활 곳곳에 초음파라는 것이 사용된다는 것 정도는 인식하고 있을 정도다. 예를 들어 우리는 건강검진이라는 말을 들으면 으레 초음파 검사 정도는 하게 될 것이라는 것을 알고 있으며 태어나지도 않은 아이의 얼굴이나 건강상태를 미리 알려주는 기술도 초음파를 이용하고 있다는 것을 알고 있다.

초음파 응용기술은 이렇게 일반인들조차 그 기술에 대해서 한마디 할 수 있을 정도로 일상생활에 깊이 관여하고 있는 기술이기도 하지만 그 활용 범위가 다양해서 이제 그 기술이 어떤 산업에서 어떻게 사용되고 있는지를 정리하는 것도 쉽지 않은 기술이 되어버렸다. 이 글에서는 감히 그 쉽지 않은 작업의 일부를 시도하였다. 초음파와 관련된 모든 관련분야를 소개한다는 것은 결코 쉬운 작업이 아니라는 것을 솔직히 인정하고 이 글에서는 초음파 장치를 만들 때 사용되는 재료

중에서 자기변형 현상(magnetostriction)<sup>1)</sup>을 사용하는 초음파 기술로 그 범위를 제한하였다. 또한 자기변형 현상을 이용한 초음파 기술들 중에서도 재료 측면에서 경쟁관계에 있는 PZT(piezoelectric ceramic)를 재료로 이용한 초음파 기술과 비교했을 때 상대적으로 경쟁력이 있다고 판단되는 기술을 중심으로 소개를 하였다. 이러한 연장선상에서 저자가 최근 관심을 두고 연구하고 있는 축 및 판 구조물 상에서의 비접촉 초음파의 생성 및 측정 에 관한 기술을 소개하였다.

### 2. 자기변형 물질을 이용한 초음파 응용 기술

#### 2.1 자기변형 현상

먼저 이해를 돕기 위해서 자기변형 현상에 대한 설명이 필요하리라 판단된다. 그림 1은 자기변형 현상을 설명하고 있다. 그림 1의 왼쪽에서와 같이 강자성체 물질에 솔레노이드 코일과 같은 자기장 발생 장치를 이용해서 자기장을 걸어주면 자기장의 방향으로 기계적인 변위가 발생하는 것을 '자기변형 현상'이라고 부르며 1800년대에 Joule에 의해서 처음으로 발견되었다. 지능 구조물(smart structure)에 사용되는 다른 재료

1) 여기서 자기변형 현상이라고 말하는 것은 본래 자기변형 현상과 역 자기변형 현상(inverse magnetostriction)을 모두 포함하는 말로 사용하였다. 많은 경우 'magnetostriction'은 '자왜현상'이라고 번역되는데 이 단어는 그 의미가 바로 와 닿지 않기에 이 글에서는 그 의미가 확실하다고는 자기변형 현상을 사용하였다.

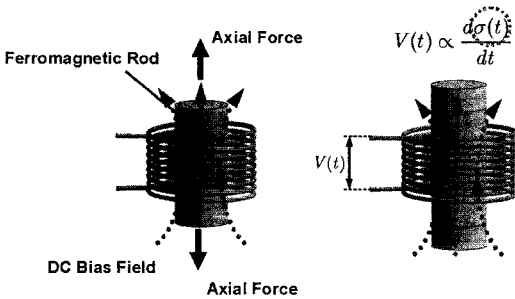


그림 1 자기변형 현상의 개념도

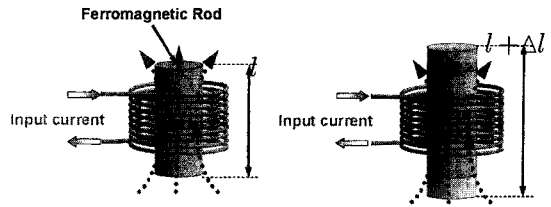


그림 2 역자기변형 현상의 개념도

들이 그러하듯이 자기변형 물질도 역작용이 존재한다. 즉 기계적인 변위가 강자성체에 가해지면 강자성체의 자기적인 상태가 변화하게 된다. 그림 2는 이런 역자기변형 현상(Villari effect)을 보여주고 있다.

정리하자면 그림 1에 설명된 자기변형 현상은 이러한 물질들이 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 바꿔주는 구동기(actuator)로 사용할 수 있음을 보여주고 있고 그림 2에 설명된 역 자기변형 현상은 이러한 물질들이 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 바꿔주는 센서로 사용될 수 있음을 보여주고 있다. 한 가지 기억해야 할 것은 그림 1의 자기변형 현상이 일어날 때는 대상이 되는 강자성체의 자기적인 상태가 포화상태가 아니어야 하고 그림 2의 역 자기변형 현상이 센서로서 의미 있게 발생하려면 대상이 되는 강자성체가 어느 정도의 자화(magnetization)가 진행된 상태여야 한다는 것이다. 일반적으로 이 '어느 정도의 자화'를 만들어주기 위해서 영구 자석이나 전자석을 사용하여 미리 일정 정도의 자기장을 걸어주게 되며 이를 바이어스(bias) 자기장이라고 부른다. 센서로 사용하는 경우 가장 중요한 인자인 민감도가 이 바이어스 자기장에 의해서 심하게 영향을 받으므로 센서로 활용하는 경우 항상 염두에 두어야 한다. 물론 구동기로 사용하는 경우에도 바이어스 자기장은 출력에 큰 영향을 준다.

## 2.2 자기변형 재료

자외현상을 일으키는 물질은 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 철을 주성분으로 하는 재료의 대부분과 니켈(Ni), 코발트(Cobalt) 등이다<sup>(1)</sup>. 다른 지능재료들과 마찬가지로 자기변형 물질도 재료와 관련된 연구가 꾸준히 진행되어 많은 신물질들이 개발되었고 지금도 많은 연구들이 진행되고 있다. 자기변형 물질도 지능재료의 하나인 관계로 다른 지능재료들과 많은 응용분야에서 경쟁관계를 가지기도 하고 보완하는 관계를 형성하기도 한다. 지능재료로 가장 널리 사용되고 있는 3가지 물질은 피에조 물질, 자기변형 물질, 형상 기억합금이지만 형상기억합금은 일반적으로 너무나 큰 시상수(time constant)를 가지고 있기 때문에 초음파의 발생 재료로는 부적합하다. 하지만 피에조 물질과 자기변형 물질은 여러 응용 분야에서 오랜 세월을 서로 경쟁하면서 발전해 온 관계라고 볼 수 있다.

예를 들어 초음파 세척과 관련된 기술을 살펴 보면 초기 초음파 장치에는 천연 피에조 물질(수정 결정체: quartz crystal)이 사용되었다. 1930년대 하지만 초음파 장치의 사용이 급격히 증대됨에 비해서 피에조와 관련된 기술은 안정적이고 신뢰성 있는 재료로서의 역할을 수행하는데 실패하였고 바로 이때부터 자기변형 물질이 초음파 장치 특히 초음파 세척기의 구동용 재료로 피에조 물질보다 우위에 서게 된다. 자기변형 물질은 당시의 상황에서는 피에조 물질에 비해서 매우 높은 신뢰성을 보여주었기 때문에 경쟁우위에 설 수 있었다. 상황이 바뀌게 된 것은 2차 세계 대전에서 SONAR에 사용하는 초음파 물질로 새로운 피에조 물질이 개발되면서부터다. 인공으

표 1 대표적인 지능 물질들의 정적(static) 특성 값 비교 (Cedrat)

		Terfenol-D	Composite GMM	PZT-4	Soft PZT MLA	MSM
Max static strain	ppm	1800	1000	600	1250	50000
Coupling coeff.	%	70	35	67	65	-
Young's modulus	GPa	25	20	60	40	7
Max prestress	MPa	50	30	50	40	-
Max dyn. strain	ppm	4000	3000	1600	2000	-

로 만들어진 새로운 세라믹 물질은 천연재료로 만들어진 피에조 물질인 수정 결정체에 비해서 더욱 강력하고 더욱 안정된 진동원으로서의 역할을 수행할 수 있음이 알려졌다. 또 이 새로운 세라믹 물질에 압축력을 미리 가해줄 수 있는 방법이 고안되어 깨지기 쉬운 피에조 물질의 단점이 어느 정도 극복될 수 있었다.<sup>2)</sup> 당시에 초음파 세정 기술과 관련하여 피에조 물질이 극복해야 할 또 하나의 문제점은 바로 장착의 문제였다. 하지만 1950년대 항공기 산업에서 발전한 접착기술은 이러한 문제점까지 해결해줄 수 있는 길을 열어주었으며 접착기술은 최근까지도 발전을 거듭해오고 있다. 이렇게 자기변형 물질이 대세였던 초음파용 물질을 피에조 물질이 대체되는 과정에는 유관 기술의 발전이 결정적인 영향을 주었다는 사실을 기억하자.

위에서 장황하게 초음파 세정의 예를 언급한 것은 피에조 기술과 자기변형 기술은 해당 재료 기술 자체의 발전은 물론이고 다른 분야의 기술의 발전에 의해서 경쟁우위에 설 수도 있고 또 뒤처지기도 하였다는 것을 말하고 싶기 때문이다. 이러한 경쟁이 서로의 기술을 발전시켜주는 원동력으로 작용하는 것은 주지의 사실이다. 하지만 서로의 장단점을 확실하게 인식하여 주어진 상황에서 가장 적절한 지능재료를 선택할 필요 또한 엄연히 존재한다. 기업들의 관계나 사람들 사이의 관계에서도 과도한 경쟁은 때로는 서로에게 도움이 되지 않으며 서로의 영역을 정확하

게 인식할 때 오히려 더 많은 발전이 있어왔음 또한 알고 있다.

예를 들어 표 1은 Cedrat라는 업체에서 제시한 몇 가지 대표적인 지능재료의 특성을 보여주고 있다<sup>2)</sup>. 이 표만으로 판단하면 Terfenol-D라는 재료는 초음파 세정기로서 매우 이상적인 물질로 여겨진다. 변환효율(coupling coefficient)도 오히려 PZT보다 좋으며 최대 변형률도 월등히 좋으니 말이다. 하지만 이는 큰 오해를 낳을 수도 있는 정보다. 예를 들어 일반적으로 자기변형 물질의 변환 효율은 약 30~40% 정도로 약 70% 근방의 값을 보이는 PZT에 비해서는 낮은 것이 보통이다. 이는 PZT가 본질적으로 전기장에 의해서 나타나기 때문에 전기에너지를 직접 기계적인 에너지로 변환함에 비해서 자기변형물질은 전기적인 에너지를 자기적인 에너지로 전환한 뒤에 다시 이 자기적인 에너지가 기계적인 에너지로 변환되는 과정을 거치게 되어있다. 주지하는 바와 같이 에너지변환은 100%가 될 수 없어 변환의 단계가 추가되면 변환 효율은 낮아지게 되어있다. 게다가 자기변형 물질의 경우 자기장을 만들어 주는 코일에서 발생하는 열손실과 자기변형재료에서 발생하는 히스테리시스로 인한 에너지 손실이 매우 크다. 물론 표 1의 데이터가 틀린 것은 아닐 것이다. 특히 변환 효율의 경우 적절한 바이어스 자기장을 형성해주면 PZT와 비슷한 수준의 효율을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있기 때문이다. 문제는 표 1과 같은 데이터를 아무런 부가적

2) 이는 압축력에는 강한 면모를 보이지만 인장력에는 매우 취약한 특성을 보이는 콘크리트의 단점을 극복하기 위해서 미리 인장력이 가해진 강철선을 집어넣어 콘크리트에 평소와 압축력이 가해지도록 하는 건축기술과 매우 비슷한 것이다.

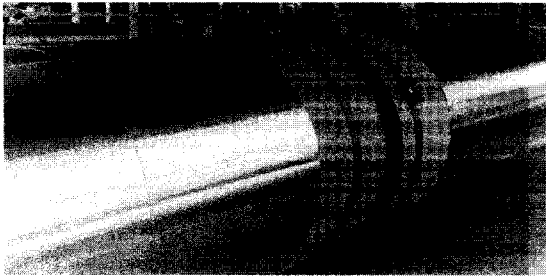


그림 3 유도 초음파를 이용한 자성체 배관의 결함 검사

인 설명도 없이 제시하면 이 기술을 처음 접하고 활용하고자 하는 연구자들에게는 큰 오해를 불러일으킬 수도 있다는 것이다.

정리해서 말하자면 지능재료를 선택함에 있어 제일 중요한 것은 각 지능재료의 특성을 현재 적용하고자 하는 응용과의 연관성 속에서 정확하게 파악하여 가장 적합한 재료를 고르는 능력인 것이다. 다른 모든 기술에서와 마찬가지로 모든 초음파 응용에서 최고의 성능을 보장하는 재료는 존재하지 않는다. 자기변형 물질을 채택하는 것이 상대적으로 좋을 수 있고 또 어떤 경우에는 자기변형 물질을 선택하지 않으면 안 되는 응용 분야도 있을 것이다. 전통적으로 다음과 같은 사례들은 자기변형 물질이 상대적 우위 혹은 절대적 우위를 점하고 있다고 판단되는 응용 분야들이다.

1. 비접촉을 유지하면서 초음파를 발생해야 하는 경우
2. 큰 힘이나 큰 변위가 필요한 경우<sup>3)</sup>
3. 저주파에서 큰 파워가 필요한 경우
4. 저전압에서 사용해야만 하는 경우
5. 극저온 혹은 초고온에서 사용해야 하는 경우<sup>4)</sup>

3) 이 부분 역시 자기변형 물질이 피에조 물질에 의해서 계속적으로 도전 받고 있는 분야다. 최근 PMN이나 MFC 등은 상당히 다층 stack 구조를 통해서 자기변형에 필적하는 큰 변형률을 쉽게 구현하고 있다.  
 4) 많은 대(大) 자기변형 물질(giant magnetostriction material)이 상온에서는 동작하지 않고 극저온에서 동작한다. 이를 단점이라고 생각할 수도 있으나 이렇게 역으로 이용할 수도 있다.  
 5) 자기변형 특성을 가지는 물질 중에 성공적으로 상업화된 대표적인 사례로는 구동기 분야에서는 Terfemol-D([www.etrema.com](http://www.etrema.com))이고 센서 분야에서는 Metglas([www.metglas.com](http://www.metglas.com))가 있다.  
 6) 커플런트 없이 공기를 통해서 직접 초음파를 전달하는 기술에 대한 연구가 많이 진행되었으나 임피던스의 차이로 발생하는 손실을 극복하는 데는 근본적으로 한계가 있다고 하겠다.

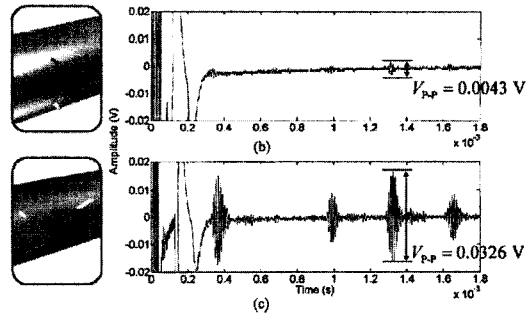


그림 4 자기변형 패치를 이용한 비자성체 배관에서의 초음파 발생 및 측정

염두에 두어야 할 것은 전통적으로 자기변형 물질이 우위를 점하고 있는 이들 분야 중에서 새로 출현하는 다른 지능재료들에 의해서 자기변형 재료들이 압도를 당하고 있는 분야도 있으며 또 새로운 자기변형 재료의 개발로 피에조 물질과 같은 다른 지능재료의 위상을 대체하는 분야도 있다.<sup>5)</sup> 당연한 말이지만 세상에 영원한 것은 없는 것이다. 이제 위에서 언급한 자기변형이 우위에 있는 몇 가지 사례에 대해서 알아보도록 하자.

### 2.3 자기변형을 이용한 초음파 기술 사례

#### (1) 유도 초음파를 이용한 배관 검사

유도 초음파를 이용한 배관 검사는 소위 SHM(structural health monitoring)으로 알려진 진단분야의 핵심 기술 중 하나다(그림 3)<sup>3)</sup>. 이 기술 분야에서 자기변형 물질이 상대적으로 우세를 점할 수 있는 이유는 초음파의 발생 원리가 비접촉이라는 것에 있다. 피에조를 이용하는 초음파 발생 장치의 경우 직접 접촉에 의한 에너지 전달이 필요하기 때문에 소위 커플런트라고 불리는 유체를 사용하여 초음파 발생장치와 검사 대상을 연결해 주어야 한다.<sup>6)</sup> 하지만 배관 검사를 실

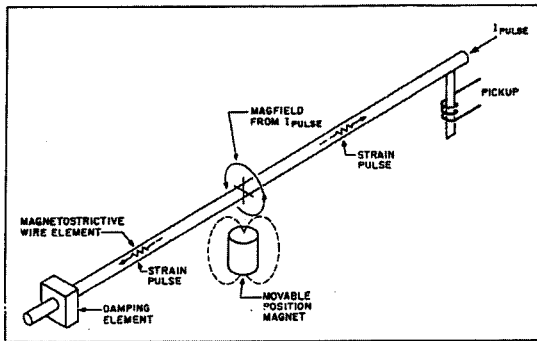


그림 5 초음파를 이용한 거리 측정 센서의 원리

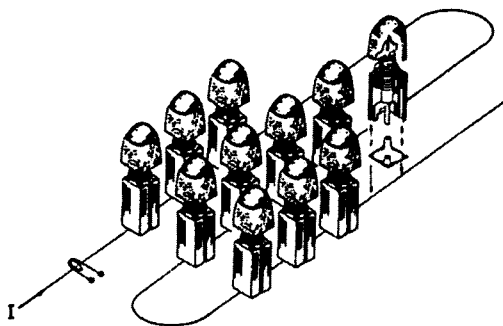


그림 6 지연선을 응용한 컴퓨터 키보드

시하는 현장의 상황은 커플런트를 검사대상에도포하는데 무리가 있는 경우가 많으며 설사 이것이 가능하다고 하더라도 많은 경우 고비용을 초래하게 된다는 문제가 있다. 하지만 배관이 자기변형 물질인 경우에는 자기장을 통해서 에너지가 전달되기 때문에 배관의 표면에 어떠한 처리도 불필요하게 된다.

많은 배관들이 강자성체인 철을 중심으로 만들어진 재료를 사용하기 때문에 이 방법을 이용한다면 대부분의 배관에 대해서 검사가 가능하다. 하지만 철을 재료로 하는 배관들에서 발생하는 자기변형 현상은 그 세기가 매우 작아서 잡음이 많은 현장에서 낮은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 낮다는 문제에 봉착하게 된다. 하드웨어적인 측면에서의 개선이나 각종 신호처리 방법을 이용하여 문제를 해결하고 있으나 근본

적으로 낮은 커플링 효율은 극복하기가 현실적으로 매우 어렵다. 또 하나의 문제는 자기변형 현상을 일으키지 않는 재료로 만들어진 배관에 적용하는 것이다. 알루미늄이나 동을 기반으로 하는 배관이나 철을 기본으로 하지만 자기변형이 발생하지 않는 스테인리스 스틸 그리고 플라스틱을 재료로 하는 배관들은 이 방법의 적용이 불가능하게 된다.

최근에 이런 비자성체 배관에 자기변형 현상을 잘 일으키는 자성체 패치를 붙여서 이 문제를 해결하려는 노력들이 가시화 되고 있다. 그림 4는 비자성체 배관에 자성체(Nickel) 패치를 접착시켜 초음파를 발생 시키고 측정하는 예를 보여주고 있다<sup>4)</sup>. 자성체 배관을 그대로 사용하는 경우와 비교했을 때 다양한 모양의 패치 설계를 통해서 여러 가지 모드의 초음파를 발생하기 쉽고 또 발생하는 초음파의 세기도 최대화 시킬 수 있다는 장점을 가진다. 이 측정 방법은 배관뿐 아니라 케이블카의 케이블이나 다리 구조물의 케이블과 같은 케이블 구조에도 유용하게 사용할 수 있다.

#### (2) 지연선(delay line)을 이용한 센서

지연선이란 디지털을 이용한 전자공학이 발달하기 전에 전기적인 신호를 사용해서는 얻어내기 힘든 시간적인 지연을 기계적인 방법으로 얻어내는 장치를 말한다. 최근에는 디지털을 이용한 전자공학의 발전으로 이러한 원래 목적으로 사용하는 경우는 많지 않으나 이 원리를 이용하여 여타의 지능재료로는 구현하기 힘든 센서 시스템을 구현한 사례는 많이 있다. 대표적인 사례가 MTS사에서 개발한 위치 센서다(그림 5)<sup>6)</sup>.

이 장치는 매우 넓은 범위에서<sup>7)</sup> 움직이는 물체의 거리를 측정할 수 있게 해주는 장치인데 그림 5에서와 같이 얇은 강자성체 선재(magnetostrictive wire element)에 초음파를 발생해주는 장치(movable position magnet: 이하 '이동체'라 부

7) MTS에서 나온 카탈로그를 참조하면 약 10m의 거리까지 측정이 가능하며 분해능은 0.01 mm 이하다.

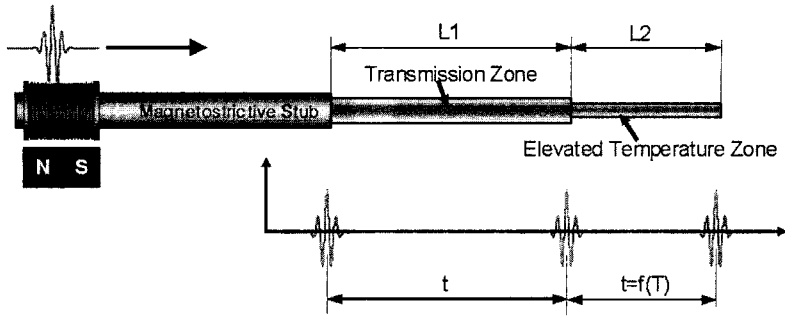


그림 7 초음파를 이용한 온도 측정 장치의 구조

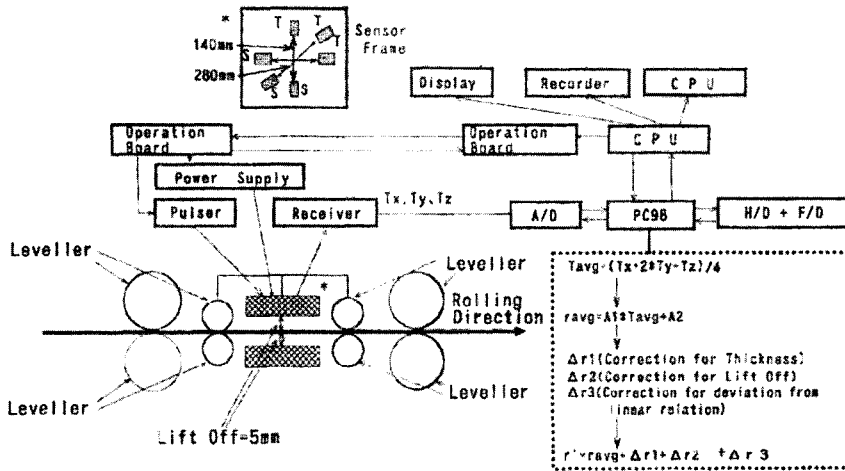


그림 8 자기변형 및 EMAT를 이용한 철판의 drawability 측정

른다.)와 발생한 초음파를 측정해주는 장치 (pickup)를 가지고 있다. 만일 초음파 펄스를 발생 시킨 시간과 픽업에서 초음파가 관측된 시간을 알고 있고 초음파의 이동속도를 알고 있다면 현재 이동체의 위치를 알 수 있다. 비접촉 방식으로 초음파가 발생하기 때문에 이동체와 선재 사이에 아무런 접촉이 필요 없으며 이로 인해 이동체의 자유로운 이동이 가능하다. 피에조와 같이 접촉을 요구하는 방식의 초음파 발생 장치는 사용하기 힘든 분야라고 하겠다.

제품으로 성공하지는 못했으나 지연선 현상을 응용한 재미있는 예로 그림 6에 키보드를 보였다<sup>6)</sup>. 키보드의 각 키에 자석을 달아 키가 눌러질 때 초음파가 지연선을 따라서 발생하고 발생한 초

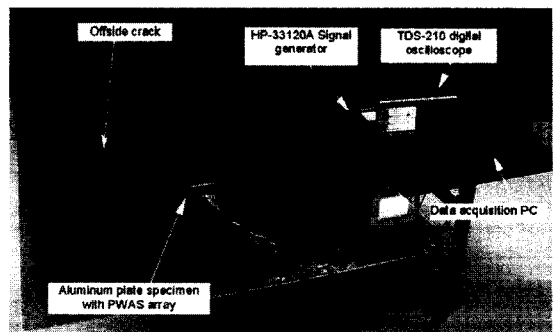


그림 9 PWAS array를 이용한 평판의 결함 진단

음파는 지연선을 따라 센서까지 전파된다. 전파 되는데 걸리는 시간이 각 키에 따라서 다르다는 것을 이용하여 어떤 키가 눌러졌는지를 측정하

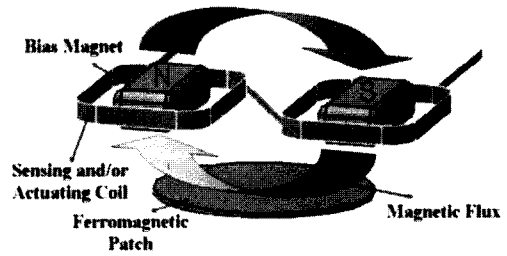
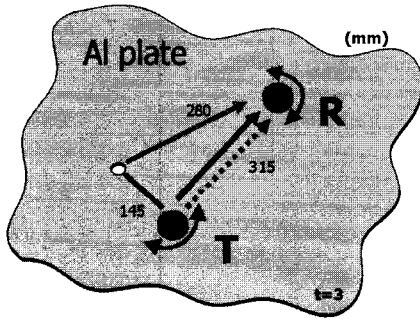


그림 10 자기변형 패치를 이용한 판 구조물의 결함진단

는 시스템이다.

### (3) 고온에서 재료의 특성 측정

고온의 용융물의 온도를 측정하는 작업에도 자기변형 물질이 유용하게 사용된다. 온도 측정 방법으로 가장 많이 사용하는 접촉식 열전대의 경우 재료의 내구성 문제나 절연 문제로 인해서 200°C 이상에서 사용하는 것이 불가능한 것으로 알려져 있다. 또 적외선이나 레이저를 이용해서 측정하는 방법은 온도는 매우 높은 수준까지 측정할 수 있으나 빛의 특성 상 불투명한 물질의 내부 온도는 측정할 수 없다는 한계가 있다. 하지만 초음파를 이용하면 이렇게 접근이 어려운 고온 용융물의 내부 온도까지 측정할 수 있다<sup>7)</sup>. 그림 7에 초음파 온도계의 동작을 이해할 수 있도록 간략화 시킨 구조를 보였는데 측정 원리는 다음과 같다. 즉, 자기변형 봉재에서 비접촉 방식으로 초음파 펄스를 발생시키고 발생된 초음파가 여러 개의 단을 만나면서 반사되어 돌아오게 된다. 재료에서 전파되는 초음파의 속도는 아래와 같이 밀도의 함수이고 밀도는 온도의 함수이므로 초음파의 평균속도를 이용해서 역으로 온도를 추정할 수 있다.

$$v \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ and } \rho = f(T)$$

비슷한 원리로 철판의 제조과정에서 drawability

를 측정하는데도 자기변형을 이용한 초음파는 유용하게 사용된다. 그림 8에서 알 수 있듯이 이 경우 철판은 온도가 뜨거울 뿐 아니라 롤링 공정으로 계속적으로 이동하고 있기 때문에 기존의 접촉식 초음파 발생 장치를 사용하는 것은 적합하지 않다. 하지만 자기변형 방식을 이용하면 그림 8에서 알 수 있듯이 심지어 5mm까지 떨어진 위치에서도 초음파를 발생시키고 측정하는 것이 가능해서 기존의 접촉식의 한계를 뛰어넘는 측정이 가능하다<sup>8)</sup>.

### (4) 판 구조물에서 Embedded SHM(structural health monitoring)

최근 항공우주 분야에서 가장 뜨거운 연구 주제 중 하나는 항공우주 구조물의 결함의 유무, 위치 등을 찾아내거나(diagnosis) 결함의 생성에 관한 정보를 예측하는(prognosis) 기술이다. 기존의 다양한 결함진단 기술이 항공우주 구조물의 결함진단에 사용되고 있으며 초음파를 이용한 진단 역시 대표적인 진단 기술로 주목을 받고 있다. 최근에는 PWAS(piezoelectric wafer active sensor)라고 하여 초음파를 발생하고 측정하는 장치를 아예 구조물을 제작하는 단계에서 함께 삽입하여(embedded) 간단한 방법으로 지속적인 진단이 가능하게 하는 기술이 제안되었다<sup>9)</sup>. 피에조 물질을 구조물에 삽입한 뒤에 이를 이용하여 초음파를 생성하고 생성된 초음파가 결함에서 반사되는 신호를 다시 초음파로 측정하게 되는데 진

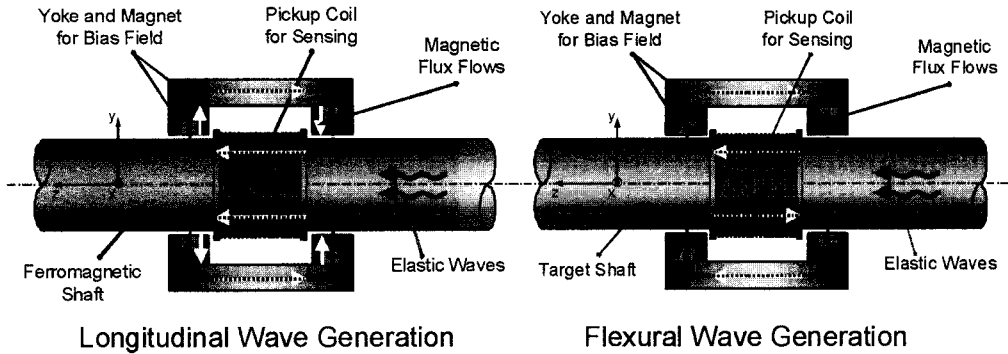


그림 11 그림 자기변형 물질을 이용한 축 상에서 다양한 초음파의 측정

단할 대상에 반드시 접촉해야 하는 피에조 방식의 단점을 극복할 수 있는 좋은 응용 사례라고 하겠다.

하지만 피에조 물질을 이런 방식으로 사용하여 진단을 수행하는 것에도 실용화 측면에서 넘기 힘든 근본적인 한계가 존재한다. 그림 9는 PWAS를 array 형태로 이용하여 실험실 차원에서 측정을 수행하고 있는 모습이다. 그림에서 알 수 있듯이 하나의 PWAS에 필요한 배선은 2개이고 접지선을 공유한다고 가정해도  $n$ 개의 센서를 삽입하는 경우  $n+1$ 개의 배선이 필요하게 된다. 항공우주 구조물의 경우 대부분 그 크기가 커서 삽입형 센서를 사용하는 경우 매우 많은 숫자의 센서가 들어가게 되고 이들의 배선은 실용화에 큰 걸림돌로 작용한다. 커넥터 등을 이용해서 찰탁식으로 한다고 해도 매번 배선을 연결하고 분리하는 작업은 진단작업의 효율성에 큰 장애로 작용할 것이다.

자기변형 물질은 기본적으로 초음파의 발생 원리가 비접촉 방식으로 이루어지기 때문에 항공기 구조물의 결함진단과 같은 응용 사례에서 PWAS의 유력한 대안이다. 그림 10은 판형태의 구조물에 자기변형 물질(Nickel)을 접착하고 외부에서 비접촉 방식으로 초음파를 발생하고 측정하는 방법을 보여주고 있다<sup>(10)</sup>. 이 방법이 가지는 최대의 장점은 피에조를 사용하는 경우와 달리 초음파를 발생시키는 패치에 별도로 배선을

할 필요가 없다는 것이다. 배선이 불필요하다는 것은 그 자체로도 강점이지만 이 장점은 추가적인 장점을 유발한다. 즉, 패치의 외부에 걸어주는 자기장의 형태는 코일과 바이어스 자기장을 바꾸는 것만으로 쉽게 바꿀 수 있고 이는 패치상에서 발생하는 초음파의 다양성을 의미하기 때문에 하나의 패치에서 다양한 형태의 자기장을 발생시킬 수 있다는 것을 말한다. 평판을 따라 전파되는 램파의 각 모드나 표면파 등은 각각 독특한 특징이 있어 이를 하나의 패치에서 발생시킬 수 있다면 결함의 특성 파악에 큰 도움이 될 것이 확실하다.

#### (5) 축 구조물에서 초음파의 발생 및 측정

축(shaft) 구조물은 회전 기계구조물의 가장 기본이 되는 요소로 발전소에서 사용하는 축이나 고속 가공기와 같은 고속 장비에 사용하는 축은 결함을 인식하지 못하는 경우 운전 중에 큰 사고로 이어질 가능성이 높기 때문에 지속적인 상태 모니터링이 필요하다. 이 경우에도 초음파를 발생하여 결함에 대한 정보를 찾아내는 방법이 많이 사용되는데 피에조를 이용한 방법을 사용하는 경우에는 접촉의 문제로 인해서 운전 중인 축을 정지시켜 진단을 수행하고 다시 운전하는 방식으로 할 수 밖에 없다. 최근에는 반도체 기술의 발달로 RF기술과 피에조 기술이 결합된 결과 진단장치 전체를 축 상에 장착하고 측정 신호를 RF



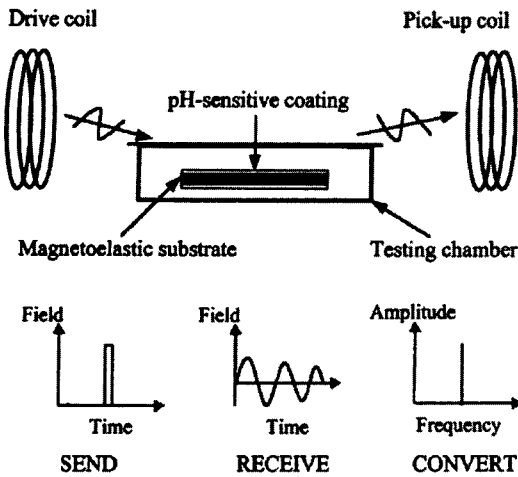


그림 12 자기변형 물질을 이용한 pH 측정 센서

로 외부로 보내는 기술도 사용되고 있으나 가격이 고가이고 장착이 불가능한 환경이 많아서 근본적인 해결책은 되지 못한다.

대부분의 경우 축은 철을 기반으로 하는 재료가 사용되므로 자기변형 물질의 비접촉 초음파 발생 메커니즘을 사용하기에 매우 적합하다. 물론 앞서 평판의 결합진단에서 사용한 바와 같이 보다 뛰어난 자기변형 특성을 가진 물질을 패치 형태로 부착하는 방법도 사용이 가능하다. 평판의 경우와 비슷하게 외부에서 걸어주는 자기장의 형태를 변화시키기가 쉬우므로 축에 다양한 형태의 유도초음파를 만들거나 측정할 수 있어 결합에 대한 보다 다양한 정보를 얻어 낼 수 있다. 그림 11은 축 상에 단지 외부에서 걸어주는 자기장의 형태만 바뀌춤으로서 인장압축파와 굽힘파를 측정할 수 있음을 보여주고 있다<sup>(11)</sup>. 두 가지 종류의 초음파 사이의 전환이 전기적인 제어를 통해서 이루어질 수 있다는 사실은 실제 응용에서 매우 큰 장점으로 작용할 것으로 생각되며 똑 같은 원리가 초음파 발생에도 적용될 수 있다.

#### (6) 기타


앞서 소개한 많은 응용 사례 구분에 포함되지

는 않으나 자기변형 물질만의 독특한 특성을 활용한 재미있는 기술을 몇 가지 더 소개하면 다음과 같다. 그림 12는 자기변형 물질을 이용하여 pH 센서를 개발한 사례를 보여주고 있다<sup>(12)</sup>. 이는 pH를 측정하고자 하는 액체에 직접적인 접촉 없이 무선(remote)으로 pH값을 측정할 수 있도록 하기 위해서 자기변형 물질을 활용하고 있는 사례다. 구동코일에서 발생한 자기장은 pH를 측정할 대상에 담겨져 있는 자기변형 물질을 가진 하고 가진된 기계적 진동의 여진은 자기변형 물질의 자기적 상태를 변형시키게 되어 픽업코일에서 측정할 수 있는 신호를 만들어낸다. 자기변형 물질의 표면에는 pH에 민감하게 화학적 반응을 일으키는 폴리머 필름을 도포한 상태다. 측정 대상이 되는 액체의 pH에 의해서 도포된 폴리머가 반응하는 것이 다르기 때문에 똑같은 가진 신호를 사용한다고 해도 출력 신호는 pH에 따라서 달라지므로 이 출력 신호의 주파수의 변화를 측정하면 pH값을 간접적으로 측정할 수 있게 된다.

최근 에너지 문제에 관한 관심이 높아지면서 에너지 수확(energy harvesting)에도 자기변형 물질을 이용하려는 노력들이 시도되고 있다. 전통적으로 에너지 수확에는 피에조 물질이 우위를 보이고 있으나 '2.2 자기변형 재료'에서 언급한 바와 같이 재료공학의 발달로 신재료가 개발될 가능성은 얼마든지 있으며 자기변형 현상의 고유 특성인 비접촉 특성을 활용한다면 틈새시장은 얼마든지 생길 수 있다고 판단된다<sup>(13)</sup>.

초음파라는 용어의 정의상 언급하지는 못했으나 저주파 대역에서의 기계적 진동을 만들어내는 분야 역시 자기변형 물질이 피에조에 비해서 우위에 있는 기술이다. 예를 들어 유전 발굴 현장에서는 유전의 위치를 파악하기 위해서 지진파를 고의적으로 발생시키는데 이 경우 자기변형 물질을 이용하지 않으면 원하는 크기의 원하는 주파수 대역의 진동을 얻을 수가 없다.

### 3. 맺음말

이 글에서는 짧으나마 자기변형 물질을 초음파의 발생원 및 측정원으로 사용했을 때 피에조 물질과 같은 접촉식 물질을 사용한 경우보다 기술적으로 상대적 우위에 설 수 있거나 반드시 자기변형 물질을 사용할 수밖에 없는 응용 사례에 대해서 살펴보았다. 자기변형 물질도 그 역사만큼이나 기술적으로 완성도가 깊은 기술적 배경을 가지고 있으나 초음파의 발생 및 측정과 관련해서는 피에조 기술이 현실적으로 가장 많이 사용되고 있으며 상대적으로 많은 부분에서 기술적 우위에 있다는 것을 인정할 필요가 있다고 생각한다. 중요한 것은 이 두 지능재료가 서로 어느 쪽이 절대 우위에 있는 것이 아니라 상대적으로 강점이 있는 분야가 있다는 것을 인식하고 각 재료의 특성이 최대한 발휘될 수 있는 가장 적합한 응용 분야에 찾아내는 것이 아닐까 생각한다. 

### 참고문헌

(1) Bozorth, R. M., Ferromagnetism, 1993, IEEE Press.  
 (2) <http://www.cedrat.com>  
 (3) <http://www.ndetech.swri.org>  
 (4) Park, C. I., Kim, W. C., Cho, S. H. and Kim, Y. Y., 2005, "Surface-detached V-shaped Yoke of Obliquely-bonded Magnetostrictive Strips for High Transduction of Ultrasonic Torsional Waves", Applied Physics Letters, p. 87.  
 (5) <http://www.mtssensor.com>  
 (6) Worthington, T. K., Calcagno, P. A., Romankiw, L. T., Thompson, D. A., 1979, "A Magnetoacoustic Keyboard", IEEE Trans.

Magnetics, Vol. 15, No. 6, p. 1797.  
 (7) Koo, K. M., Sim, C. M., Kim, J. H., Kim, S. B. and Kim, H. D., 2000, "A Study on an Ultrasonic Thermometry System for Measuring Very High Temperatures in Severe Accident Experiments", NTHAS 2th : Second Japan-Korean Symposium on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Safety, Fukuoka, Japan, p. 15.  
 (8) Murayama, R., Fujisawa, K., Fukuoka, H. and Hirao, M., 1996, "Development of an On-line Evaluation System of Formability in Cold-rolled Steel Sheets Using Electromagnetic Acoustic Transducers(EMATs)", NDT & E International, Vol. 29, No. 3, p. 141.  
 (9) Giurgiutiu, V., 2007, "Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors", Elsevier.  
 (10) Cho, S. H., Lee, J. S. and Kim, Y. Y., 2006, "Guided Wave Transduction Experiment Using a Circular Magnetostrictive Patch and a Figure-eight Coil in Nonferromagnetic Plates", Applied Physics Letters, Vol. 88, 224101.  
 (11) Lee, H. C., 2008, "Model-selectable Ultrasonic Wave Sensor and its Characteristics", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, p. 247.  
 (12) Cai, Q. Y. and Grimes, C. A., 2000, "A Remote Query Magnetoelastic pH Sensor", Sensor and Actuator B, Vol. 71, p. 112.  
 (13) Berbyuk, V. and Sodhani, J., 2008, "Towards Modelling and Design of Magnetostrictive Electric generators", Computers & Structures, Vol. 86, No. 3-5, p. 307.