

자기적 방법을 이용한 구조재료의 비파괴적 평가

Nondestructive Evaluation of Structural Materials using Micromagnetic Methods

박 덕 근

Park, Deuk-gun

1. 서 론

자기현상을 이용한 비파괴평가방법은 자분탐상법(magnetic particle testing: MPT)과 누설자속탐상시험법(magnetic flux leakage: MFLT) 등이 이전부터 강자성 재료의 표면 개구결함이나 표면근처의 결함을 검출하는데 적용되어 왔다. 그러나 자기적 성질이 재료의 미세조직, 잔류응력, 열화 또는 조사손상 등에 의하여 변화하는 것이 알려지면서 이를 비파괴 평가에 이용하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부는 실용화되어 제품이 나오고 있다. 이에 따라 자기적 방법은 잔류응력 측정, 터빈 재료 등의 열화(degradation) 및 피로파괴 등 종래의 비파괴 평가방법으로 탐지하기가 불가능한 재료의 손상을 탐지하는 유력한 수단으로 활발히 연구되고 있다[1,2].

원자력 발전소와 같은 거대 구조물을 구성하고 있는 재료의 열화는 구조물의 내구성 및 파괴저항성을 저하시켜 안전성에 큰 위협이 된다. 특히 기존의 비파괴 평가방법으로는 탐지가 불가능했던 재료의 경년열화(aging)나 피로 손상(fatigue), 조사손상(radiation damage) 등을 자기적 방법으로 탐지할 수 있다는 것이 알려지면서 관련연구가 활성화되고 있다. 최근에는 중성자 조사에 따른 자기적 특성 변화를 이용, 원자로 압력용기의 손상을 평가하기 위한 연구가 각 나라마다 활발하게 진행되고 있다[3,4].

원자로 압력용기재료는 가동 중 고 에너지의 중성자에 의해 파괴저항성이 약화되는 조사취화(radiation embrittlement)가 일어난다. 이는 압력용기의 건전성을 위협하며, 원자력 발전소 수명 단축의 가장 큰 원인이 되고 있다. 따라서 원자로 압력용기 주위에는 압력용기의 취화 정도를 감시하는 감시시편을 넣은 캡슐(survei llance capsule)을 부착, 주기적으로 인출하여 파괴시험을 거쳐 압력용기의 안전성을 확인하고 있다. 그러나 이 감시 시험은 많은 비용과 시간이 요구되며 특히 시편 수의 제약으로 인하여 노후화 된 발전소의 경우 안전성을 입증하는 데 충분치 못하다. 따라서 신뢰성 있는 비파괴적 시험법이 개발된다면 이는 원자로 압력용기의 건전성뿐만 아니라 원자력발전소의 수명 연장에도 크게 기여할 것이다.

미국 NRC(nuclear regulatory commission)[5], 일본 JAERI 등에서는 기존의 압력용기 감시시험을 통한 파괴 시험에서, 자기적인 평가 방법으로 원자로 압력용기의 조사손상을 비파괴적으로 평가하는 새로운 기술로의 전환을 위하여 연구를 추천하고 있다. 이에 따라 유럽 및 미국의 각 기관들은 구조재료의 열화를 평가하는 비파괴 시험의 중요성을 인식하고 GRETE 라는 국제 협력 프로그램을 발족하였다. 이 프로그램의 목적은 재료의 열화(material degradation)를 평가하는 비파괴적인 기술을 개발하는 것이다. 자기적 방법을 이용한 비파괴 평가의 목적은 주로 Fig. 1에 제시되어 있는 상관관계와 같

이 비파괴적 방법으로 얻은 결과와 기존의 파괴시험으로 얻은 결과 및 재료의 미세조직의 변화와 연관시키는 것이다[6,7].

자기적 방법을 이용한 비파괴 평가방법에는 바크하우젠 노이즈 (Magnetic Barkhausen noise), 자기음향 방출 (Magneto Acoustic Emission), 비선형 조화파 해석 (Nonlinear Harmonic analysis), SQUID, EMAT 등 여러 가지 기술들이 연구되고 있다[8,9]. 본 논문에서는 이들 기술들에 대한 최근의 연구결과를 소개하고 자기적 방법을 이용한 비파괴 평가방법의 발전 가능성 살펴보았다.

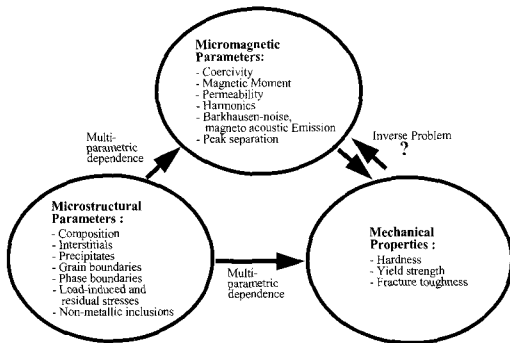


Fig. 1 The relation among micro magnetic variables, mechanical properties and material parameters used in the nondestructive evaluation of material

2. 비파괴 평가에 사용되는 자기적 방법

2.1. 바크하우젠 노이즈(Magnetic Barkhausen Noise)

강자성체의 특징은 비선형성을 나타내는 자기이력곡선(B-H 곡선)에 있으며, B-H 곡선의 기원은 자기유도(magnetic induction)와 자기장(magnetic field)의 위상차에 있다. 강자성체의 특징은 자구(magnetic domain)에 있으며 한 자구 내에서는 스핀의 방향이 일정하게 배열 되어있으며 이를 자발자화라 한다. 강자성체는 수많은 자구들로 구성되어 있으며 자구와 자구 사이의 경계를 자벽(domain wall) 이라한다. 자벽은 자발자화의 방향이 서로 다른 자구와 자구사이의 경계면이며, 자벽 내에서 자발자화의 서서히 바뀜으로서 자벽은 자구와 자구사이의 완충 역할을 하게 된다. 따라서 자구를 매우 작은 하나의 자석으로 취급할 수가 있다.

그러나 강자성체에 변화하는 자기장을 가하면 자벽이 이동하게 되며 이 자벽의 이동은 비가역적이고 불연속적으로 된다. 자기유도법칙에 의하여 자속의 변화는 기전력을 유발 하므로 강자성체에 시간에 따라 변화하는 자기장을 가하면 역시 기전력이 유도되며 이 기전력의 변화를 Barkhausen noise 라고 한다. Fig. 2에서처럼 B-H 곡선의 특정 부위를 확대하면 수많은 잡음(noise) 신호가 결합되어 있는데 이것이 Barkhausen noise(BN)이며, Barkhausen에 의해 1919년 처음으로 발견되었다[10]. BN가 발생하는 원인은 주로 자벽이 한 위치에서 다른 위치로 갑작스런 점프 (jump)를 하기 때문인 것으로 알려져 있으며, BN 는 자구의 존재에 대한 증거가 된다. BN는 페러데이의 자기유도 법칙에 의한 자벽의 운동의 결과로 발생하므로 다음 식으로 나타낼 수 있다 [11].

$$V(t) = 2N' CI_S \left(\frac{du}{dt} \right) \cos \theta = 2N' CI_S A v(x) \cos \theta \quad (1)$$

$$v(x) = 2HI_S \cos \theta - F(x) \quad (2)$$

식 (1)에서 $V(t)$ 는 BN를 나타내며, N' 는 단위 길이당 코일의 감은수, C 는 상수, $2I_S$ 는 180° 자벽에 의한 자화의 변화, u 는 자구벽의 부피, A 는 180° 자벽의 면적, θ 는 자속과 탐지코일과의 각도, 식 (2)에서 $v(x)$ 는 자벽의 이동속도, H 는 인가자기장, $F(x)$ 는 자벽의 운동을 방해하는 저지력 (retarding force) 이 된다.

일반적으로 자벽은 180° 자벽과 비- 180° 자벽(90° 자벽)으로 나눌 수 있는데, 180° 자벽에서는 이웃하는 자구의 자화의 방향이 서로 반 평행하며 따라서 두 자구의 자기모멘트는 같은 결정 방향 속에 있다. 90° 자벽은 이웃하는 자구의 자기모멘트가 90° 가까운 각을 이루고 있을 경우의 자벽을 말한다.

BN는 변화하는 자기장하에서 자성체의 자구 및 그 경계면이 비가역적인 운동을 함으로 발생하며 시핀의 상태, dislocation 정도, 불순물의 크기 및 분포 등의 미세 조직 등에 따라 변하게 된다. 따라서 BN를 이용하여 재료의 미세조직과 기계적 특성을 조사할 수 있다. 또한 BN는 재료의 내부 응력 상태에 민감한데, 이는 자구가 최대응력이 작용하는 축을 따라 정렬하기 때문이다. 따라서 인장 또는 압축 응력 하에서 BN는 증가하거나 감소한다.

이러한 BN 신호들은 펄스의 수, 그리고 진폭의 변화에 의해 관측되거나 인가된 자기장 함수로서 rms 전압으로 관측된다[12].

Fig. 2는 BN의 발생기구를 보여주며 매끈하게 보이는 자기이력 곡선이 (b)와 같이 많은 수의 불규칙적인 신호로 이루어져 있는 것을 알 수 있다. 이 신호를 오실로스코프 상에서 시간의 진행에 따라 그리면 아래그림의 BN가 된다.

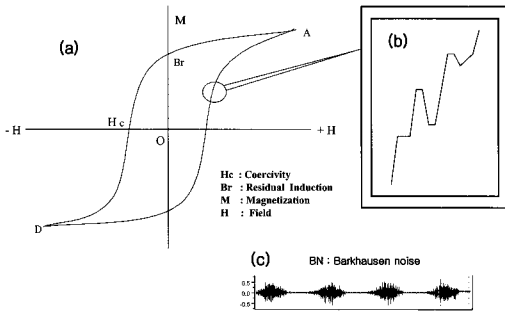


Fig. 2 Schematic representation of the appearance of a portion of the magnetization curve as revealed by instrumentation of sufficiently great sensitivity and resolution

BN를 이용하여 재료의 경도 및 내부응력을 측정하는 장치는 개발되어 있으며, 일부는 상업적으로 상품화된 것도 있다. 특히 BN를 이용한 평가가 유용한 것으로는 피로나 경년열화 현상을 들 수 있다. 따라서 배관 및 로터의 주축 등이 피로에 의해 파괴되는 것을 미연에 탐지하는데 이용되고 있다[11]. 한편으로 BN는 원자로 압력용기의 감시시험을 대신할 수 있는 가장 유용한 비파괴적 평가 방법으로 연구가 계속되고 있다[13]. Fig. 3은 BN를 이용하여 재료의 결함을 탐지하는 장치의 모식도를 나타낸 것이다. 여기서 탐지코일 대신에 음향센서를 부착하면 자기음향방출이 방출되며 코일에서 유도되는 신호를 주파수 분석하면 비선형 조화진동을 얻을 수 있다[14].

2.2. 자기음향방출 (Magneto Acoustic Emission)

BN의 탐지코일 대신 음향 탐촉자를 부착하면 음향 신호가 발생하는데 이를 Magneto Acoustic Emission(MAE)라 하며, MAE는 BN과 같이 불규칙적인 자벽 운동에 의하여 일어난다. 앞에서 살펴

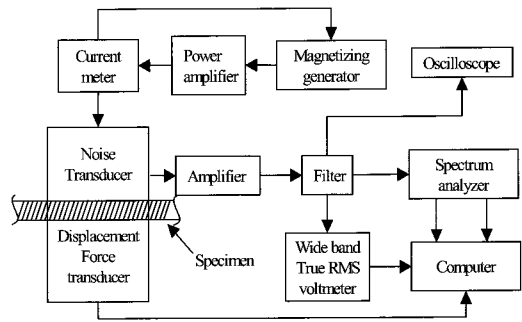


Fig. 3 Block diagram of the equipment used for measurement system including Barkhausen noise, Magneto-acoustic emission and nonlinear harmonics

보았듯이 자벽은 180° 자벽과 90° 자벽으로 나눌 수 있으며, 180°자벽은 이웃하는 자구의 자화가 반평행하기 때문에 응력의 영향을 받지 않는다. 반면 90° 자벽은 이웃하는 자구가 각을 이루고 있기 때문에 자화의 변화에 의하여 응력이 발생하게 된다. 이 응력은 결정격자를 이동시키며 이에 따라 음향이 발생하게 된다. 따라서 MAE는 BN과 달리 주로 자벽의 근원인 90°자벽의 이동과 자벽의 생성, 소멸에 의하여 발생한다. 이는 MAE가 자벽에서의 자기탄성 에너지 또는 자벽과 격자와의 직접적인 상호작용에 의하여 발생하기 때문이다[15]. MAE와 BN는 모두 자벽 동역학에 의한 것이기 때문에 그들은 서로 밀접히 관련되어 있다. 그러나 작용하는 자벽의 차이 때문에 재료의 종류와 열처리상태 등에 따라 각기 다르게 나타나며, 이를 이용하여 조사손상이나 재료 열화 등을 탐지할 수 있다[16]. 보통 BN 에너지와 MAE 사이에 선형적인 관계가 성립하는데, 이는 MAE가 자기 에너지를 격자 진동, 즉 열 에너지로 전환시키는 중간단계 역할을 한다는 것을 의미한다. 일반적으로 MAE가 BN 보다 높은 자장에서 나타나는데, 이는 MAE의 원인이 되는 90°자벽은 BN source의 180°자벽 보다 높은 활성화 에너지를 가지기 때문이다. Fig. 4는 중성자 조사량을 달리한 원자로 압력용기강의 BN 에너지, 자기음향 에너지와 미세경도와의 변화를 측정된 것이다[17]. 이들은 서로 선형적인 관계를 보여주고 있으며, 중성자 조사에 의한 조사경화현상을 자기적인 방법으로 탐지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

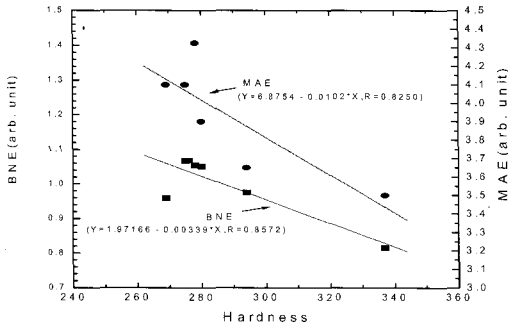


Fig. 4 The relationship among Barkhausen noise energy, Magnetoacoustic energy and micro hardness in the neutron irradiated pressure vessel steel[17]

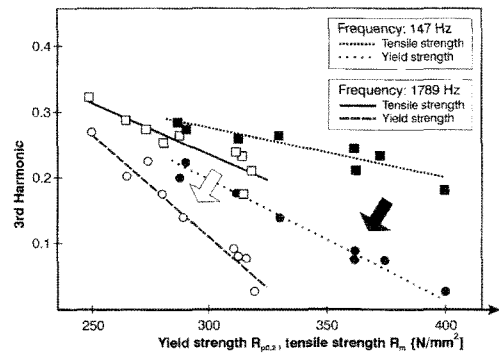


Fig. 5 Experimentally determined third harmonic amplitude induced in a secondary coil as a function of tensile strength and yield strength for two different frequencies

2.3. 비선형 조화파 해석(Non Linear Harmonic Analysis)

비선형 조화파는 자기이력곡선의 비선형성으로부터 유도되는 신호이다. 재료의 비선형성으로 인하여 자기이력과 시간에 의존하는 강한 자기유도(self induction) 는 반대효과를 야기한다. 따라서 유도된 기전력(e.m.f.)은 기본진동에 부가되는 높은 차수의 조화파 때문에 전력공급에 영향을 미친다. 즉 인가된 진동수와 함께 진동하는 신호부분인 자기이력 곡선의 대칭성은 오로지 기수의 대칭만 허용한다. (3, 5, 7, 9, ...) 왜냐하면 B-H 곡선의 자기유도 부분을 Fourier 전개 할 때, 주기적이고 대칭적인 파동에서 우함수는 사라지기 때문이다. 이에 따라 높은 차수의 진폭과 위상으로부터 자기왜곡인자 (magnetic distortion factor)가 유도된다. 한 자화주기 (자기장 세기의 시간 신호)동안의 조화파의 시간신호는 자기이력 곡선상의 보자력을 결정하는 기본 부분에 의하여 감소하는데, 왜곡인자(Distortion factor)는 비선형성의 측정이며, 재료의 미세구조를 판단하는 척도가 된다. 따라서 이 기술은 재료의 열화에 따라 미세조직이 변화함으로써 전체 자기이력곡선이 변하기 때문에 이를 이용하여 재료의 성질을 평가하는 것이다[18]. 비선형 조화파는 재료내의 불순물이나 응력상태 또는 자기이방성에 따라 영향을 받는다. 진동하는 정현파를 가진 자기장이 재료에 인가되면, 이 자기장은 전달함수로 작용하는 재료에 영향을 받아 변화한다. 따라서 탐지코일은 원래의 신호와 다른 조화파의 위상을 가진 신호를 탐지한다. 비선형 조화 신호는 유도된 자기장의 주파수를 분석(FFT Spectral Analysis)함으로써 얻어진다[19].

비선형 조화파는 결함의 종류에 따라 민감하게 작용하는 조화파 차수가 다르다. 예를 들어 강자성체 내의 불순물 증가는 전체적으로 1차 조화파가 3차 조화파보다 큰 폭으로 감소하며, 자화 방향으로 응력이 증가하면 3차 조화파의 증가폭이 1차 조화파의 증가폭 보다 대단히 크게 나타난다. Fig. 5는 DC 형의 독일 철강에 대한 실험 데이터이다. 조화파 신호는 강판 상하의 공심 코일에 유도된 신호를 측정하였다[20]. 1차 공심 코일은 교류자기장을 생성시키며 이는 강판을 투과하여 2차 코일에 유도전압을 발생시킨다. 2차 전압은 Fourier 변환을 통하여 조화파로 분리된다. 조화파를 측정 한 후에 항복강도와 인장강도를 구하기 위하여 파피시험을 수행하였다. 그림에서 보듯이 3차 조화파의 진폭은 인장강도가 증가함에 따라 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 비슷한 결과가 1차 조화파와 5차 조화파에 대하여도 얻어졌으며 이는 이론적 모델과도 잘 일치하고 있다.

현재 이 기술은 각국의 실험실에서 연구되는 수준이며, 아직 상용화 된 기술은 아니다. 그러나 고속컴퓨터에 의한 신호처리 기술의 발달에 의하여 활발히 연구되고 있다[14].

24. 초전도양자간섭장치(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)

최근에 들어서 활발하게 연구되고 있는 장치 중의 하나가 SQUID인데, 초전도양자 간섭장치는 분해능이 10-14 T(tesla)로서 현재 알려진 기기 중 자

기장을 가장 정밀하게 측정할 수 있는 장비이다. 이렇게 높은 정밀도로 인하여 생체자기장이나 지진측정 등 지구물리학의 측정에 널리 사용되고 있다[21]. SQUID에는 직류에서 작동하는 DC SQUID와 고주파에서 작동하는 RF SQUID 두 가지 종류가 있다. 일반적으로 RF SQUID는 고온초전도체로 제작하는데 DC SQUID의 정밀도가 RF SQUID 보다 10 배 이상 높다. 따라서 DC SQUID 는 인체의 자기장 측정과 같은 고 정밀 자기장 측정에, RF SQUID는 비파괴용으로 널리 사용된다. DC SQUID는 두 개의 조셉슨 접합을 초전도 고리로 연결한 구조를 가지고 있으며, RF SQUID는 한 개의 조셉슨 접합을 초전도체 고리에 연결한 구조를 하고 있다.

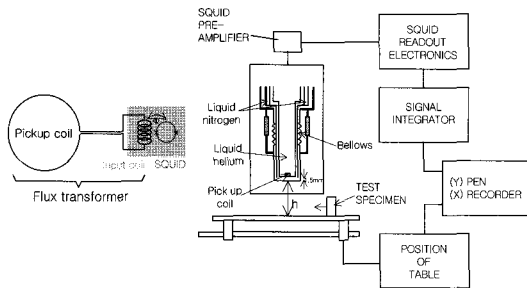


Fig. 6 Schematic representation of superconducting quantum interference device and its measurement system [25]

SQUID는 자속을 전압으로 변환 시키는 소자이므로 주어진 자기장 신호에 대해 자속 값을 키우기 위해서는 유효검출 면적을 증가 시켜야 한다. 이를 위해 면적이 큰 검출코일로 자기장을 검출하고 입력 코일을 통해 SQUID 에 자속을 효과적으로 전달 시킨다. SQUID를 이용한 비파괴 탐색에서 탐지코일 (gradiometer)은 시험편 위를 통과하면서 자속변화를 측정하는 구조로 되어있다. 따라서 탐지코일과 시험편 사이의 거리와 시험편의 크기에 의하여 전자회로를 통하여 유도되는 신호의 출력은 변하게 된다. Fig. 6에서 SQUID 탐지원리와 측정장치를 도시하였다. 비파괴 탐색에 SQUID를 적용하는 가장 중요한 이유는 숨겨진 균열이나 항공기의 알루미늄 구조에서의 부식과 같은 특별한 형태의 결함에 대하여 탐지의 신뢰성을 높이는 것이다. SQUID 비파괴 탐색은 민감성이나, 공간분해능, 정확성 및 잡음의 비율 등에서 기존의 비파괴 탐색을 능가한다 [22]. 최근에는 SQUID를 사용하여 원자로재료의 재

료열화를 평가하기위하여 시스템 개선 등이 이루어지고 있다[23,24]. 그러나 다른 비파괴 기술들과 상업적으로 경쟁하기 위해서는 초음파나 X-선 등에 의하여 주어지는 시각적인 정보에 비하여 정량적인 영상을 제공하여야 한다.

2.5. EMAT(Electromagnetic-Acoustic Transducer)

EMAT(Electromagnetic-Acoustic Transducer)는 탐촉자와 시험체 사이의 물리적인 접촉 없이 전자기적인 힘을 이용하여 초음파를 송수신 할 수 있는 새로운 형태의 탐촉자를 말한다[26]. EMAT의 원리는 Fig. 7에 나타나 있다. 자석과 코일로 이루어져 있는 탐촉자가 금속재료로 이루어진 피검사체의 표면에 접촉하게 되면 전자기 유도작용에 의해 피검사체에 와전류 J 가 발생하게 된다. 따라서 이 전류 J 와 자기장 B 가 상호 작용하여 로렌즈 힘 $F=J \times B$ 가 발생하게 된다. 이 힘은 피검사체 표면을 진동시켜 초음파를 발생시킨다. 비접촉으로 초음파를 송수신하면 움직이고 있는 시험체에 대한 탐상이 용이하므로 제품의 제조 공정상에서의 연속적인 품질관리가 가능해진다. EMAT를 이용하는 방법은 초음파 송수신을 위한 탐촉자를 제외하고는 기존의 접촉식 탐상법과 완전히 동일하므로 실제 상황에서 가장 많이 응용되고 있다[27]. EMAT의 또 다른 장점은 송수신되는 초음파의 모드를 쉽게 결정할 수 있다는 것이다. 즉, EMAT로부터 형성되는 정자기장과 동자기장의 상대적인 방향을 조절함으로써 종파, 횡파 뿐 아니라 표면파와 판파를 별도의 매개체 없이 선택적으로 송수신할 수 있다. 이와 같은 모드의 선택성은 다른 비접촉 방법으로는 실현할 수 없으며, 접촉식 초음파 탐촉자에 비하여도 탁월한 특성이다[28].

EMAT는 근본적으로 비접촉법 이므로 재료의 온도가 매우 높은 경우에도 탐촉자 자체의 냉각설비만 갖추고 있으면 탐상이 가능하다. 최근의 EMAT를 이용한 연구는 결함의 평가보다는 시험체의 재질평가를 위한 방향으로 진행되고 있다. 초음파의 진행속도는 재료의 탄성특성에 따라 변한다. 즉 압연판재의 경우, 압연과정에서 재료의 미세구조가 특정한 방향성을 갖게 되고 이는 그 재료의 탄성적 이방성을 일으키게 된다. 그러므로 각 방향에 따른 초음파 전파속도가 변하게 되고 이를 정량적으로 측정하면 압연에 의한 각 방향으로의

재료의 이방성이 측정된다. 또한 잔류응력의 경우도 초음파 속도의 변화를 일으키므로 초음파 속도 측정으로부터 측정 가능한 양이다. 미국의 Iowa 주립대학 및 일본의 오사카 대학 등에서는 압연판재의 texture 및 plastic anisotropy의 측정에 대한 연구를 비롯하여 잔류응력의 측정에도 EMAT를 이용하고 있다. EMAT는 압전형 탐촉자에 비하여 전자기적 에너지를 역학적 진동에너지로 바꾸어 주는 전환효율이 크게 낮기 때문에 압전형 탐촉자와 비슷한 수준의 s/n를 얻기는 매우 어렵다. 최근 들어 시험체내를 진행하는 초음파의 파장과 시험체의 두께와의 관계로부터 정의되는 acoustic resonance를 이용하여 시험체 내에서의 초음파의 진행속도와 감쇠를 측정할 수 있는 장비와 기술이 개발되어 EMAT의 최대약점인 낮은 전환효율에 의한 낮은 s/n의 문제가 상당히 극복되었다. 미국의 NIST와 Ritec사, 그리고 일본의 오사카대학, 동경공대 등을 중심으로 이 기술을 이용하여 시험체의 물성을 평가하는 연구결과가 꾸준히 발표되고 있다. 이들은 새로운 기술을 이용하여 손쉽게 재료의 이방성 및 잔류응력을 측정하고 있다 [29,30]. EMAT는 사실 속도 센서이지만 특별한 코일 디자인에 대해 Kawashima에 의해 알려졌고, 간단한 접근으로 일반화 할 수 있다[31]. 그리고 자기장을 증가시키기 위한 경우에는 알루미늄 조각 뒤에 강철판을 위치시키기도 한다. EMAT의 구조와 EMAT를 이용한 측정 시스템 및 실험 장치부터 측정된 파형으로부터 얻어진 결과가 Fig. 7에 나타나 있다.

3. 맺음말

자기적 방법을 이용한 재료의 열화탐지 기술은 전술한 바와 같이 매우 다양하다. 그러나 근본 원리는 패러데이의 전자기 자기유도 현상 및 이를 측정하는 센서기술에 기반을 두고 있다. 따라서 어느 한 기술에 정통하면 기타 기술도 쉽게 접근이 가능하다. 위에서 설명한 BN, MAE, EMAT, 비선형조화 해석 등의 기술은 근본적으로 동일한 물리적 현상을 이용한 것이므로 향후 새로운 비파괴 기술의 발전이 기대된다. 이러한 기술이 이미 오래 전부터 알려져 있었으나 발전에 이르지 못하다 최근에 고성능 컴퓨터와 신호처리 기술에 힘입어 급속히 발전하고 있다.

Barkhausen noise를 이용한 기술은 최초에는 잔류응력 측정용으로 개발되었으며, 미국의 Southwest Research Institute(SWRI) 등에서 실용화되었다. 이를 이용하여 보잉사에서는 항공기의 터빈 축 및 로터를 검사하고 있다. 그러나 잔류응력과 미세조직의 영향, 및 피로손상 등의 열화 등이 BN 신호에 미치는 부분을 분리하기 힘든 기술적인 어려움으로 인하여 제한된 용도에서만 사용이 가능하였다. 그러나 초음파나 와전류 등 기존에 상용화 된 방법으로는 탐지가 불가능한 중성자 조사손상이나 피로, 크립 등에 의한 재료의 열화에 BN가 민감하게 반응한다는 사실이 알려지면서 현재 각국에서 활발히 연구 중이다. 특히 SQUID를 이용한 열화 탐지기술은 그동안 SQUID가 매우 고가인 관계로 한정된 목적에만 활용이 가능하였다. 그러나 고온 초전도체를 이용한 저가의 SQUID가 출현하면서 새로운 비파괴 방법으로 떠오르고 있다[32].

자기적 방법을 이용한 비파괴 평가는 한국원자력 연구소와 표준연구소 등에서 그동안 간간히 수행되어 왔으나 아직 산업화할 단계에는 이르지 못하고 있다. 반면에 외국의 경우를 살펴보면 독일, 미국, 일본, 구 소련 등에서 많은 연구 사례를 발표하였다. 독일의 IzfP에서는 튜브에서의 초음파의 진행특성을 고찰한 기본적인 연구로부터 튜브내의 결함검출을 위한 EMAT 탐촉자의 제작 및 결함 탐상에의 적용 등과 같이 많은 연구를 수행하였다[2,8]. 미국의 경우, EPRI를 중심으로 steam generator 튜브의 U-bend section에 존재하는 결함의 검출을 목적으로 torsional wave를 사용하여 결함을 검출할 수 있는 탐촉자의 제작기술과 결함검출에의 응용에 대

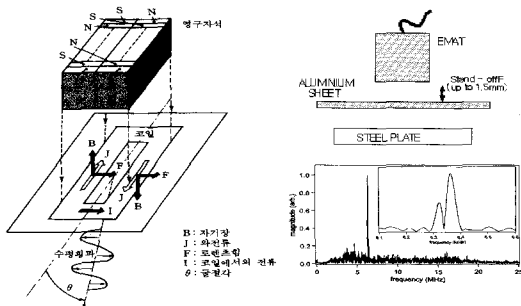


Fig. 7 Principle of generating Shear Horizontal wave, measuring method, and Fast Fourier Transform (FFT) of signal in the EMAT system

한 연구를 수행하였다. 또한 일본의 경우에는 Mitsubishi사와 Hitachi사 등에서 역시 발전설비에 사용되는 튜브류의 결함 탐상을 위한 탐촉자의 제작에 대한 연구사례 등을 많이 발표하여 왔다[33]. 그러나 무엇보다도 자기적 방법을 이용한 비파괴 탐색 중 가장 전망이 밝은 분야로는 원자로 압력용기 재료의 조사손상 평가부분이며, 현재 가장 활발히 연구되고 있는 부분이기도 하다 [18].

향후 자기적 방법을 이용한 비파괴 평가는 관련 전자기술과 컴퓨터의 성능개선으로 빠른 속도로 기술개발이 진행될 것으로 보인다. 특히 이들 방법은 원자력발전소의 원자로압력용기나 구조물의 배관 등의 탐색을 넘어서서 철교나 빌딩 등의 구조물의 안전검사에도 적용될 수 있으므로 앞으로의 전망은 밝다고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] "NDT Methods for Monitoring Degradation," EUR 18718 EN, Proceedings of the Joint EC-IAEA Specialists Meeting hold at Petten on 10-12 March, (1999)
- [2] G. Dobmann, N. Meyendorf, E. Schneider, Nucl. Eng. Design, 171, pp. 95-112, (1997)
- [3] "Ageing Material Evaluation and Studies by Non-destructive Techniques," (AMES-NDT), AGE-AMES-NDT(00)-D06, Feb, (2000)
- [4] K. Ara, N. Nakajima, N. Ebine and K. Sakasai, Proc. 8th Int. Conf. Pres. Vess. Tech. pp. 183-189, ASME, (1997)
- [5] M. E. Mayfield, "Proposed International Program to Assess Nondestructive Evaluation Methods for Measuring Reactor Pressure Vessel Material Properties," USNRC, (1996.7)
- [6] H. I. McHenry and G. A. Alers, "Nondestructive characterization of Embrittlement in Reactor Pressure Vessel Steels," NUREG/CP-0157, 0162
- [7] K. L. Feiste, W. Reimche, D. Stegemann, "NDT-determination of mechanical and technological sheet steel properties using harmonic analysis", XIV CONAEND Abende RIO-95-XIV Congresso Nacional de Ensaio Nao Destructivos, (1995)
- [8] G. Dobmannetal, "Barkhausen Noise Measurements and related Measurements in Ferromagnetic Materials"; in Volume 1 : Topics on Nondestructive Evaluartion series (B.B. Djordjevic, H. Dos Reis, editors) The American Society for Nondestructive Testing, Inc., ISBN 1-57117-067-7, (1988)
- [9] M. Blaszkievicz, Materials Science Forum V. 210-213, pp. 9-16, (1996)
- [10] H. Barkhausen, "Zwei mit Hilfe der neuen Versaarker entdeckte Erscheinun gen," Physik, Z. 20, p. 401, (1919)
- [11] J. W. Shuilling, G.L. Houze Jr., IEEE Trans. Magn. MAG-6, 195, (1974)
- [12] E. A. Little, et al., Phys. Stat. Sol.(a), 112, 55, (1989)
- [13] R. Grimberg, A. Savin, S. Leitoiu, M.L. Craus, 14th WCNDT, New Delhi, India, 8-13, Dec., pp. 1643-1646, (1996)
- [14] D. Stegmann, W. Reimche, B. Heutling, A. Krys, K. L. Feiste, J. Kroos, M. Stolzenberg, and G. Westkamper, AIP Conf. Proc. 497, p. 196, (1999)
- [15] D. J. Buttle, C. B. Scruby, J. P. Jakubovics and G.A.D. Briggs, Phil. Mag. A, 55(6), pp. 717-734, (1987)
- [16] R. Ranjan, D. C. Jiles, O. Buck and R. B. Thompson, J. Appl. Phys. 61 (8) pp. 3199-3201, (1987)
- [17] D. G. Park, J. H. Hong, K. S. Jang, M. M. Jung, G. M. Kim, J. Kor. Phys. Soc., 34 (5), pp. 434-438, (1999)
- [18] E. Peterson, "Harmonic production of ferromagnetic material at low frequencies and low flux densities", Bell System Technical Journal, 7, pp. 762, (1928)
- [19] H. Kwun and G. L. Burkhardt, NDT International, 20(3) pp. 167-171, (1987)
- [20] M. J. Sablik, D. Stegemann and A. Krys, J. Appl. Phys. 89 (11) pp. 7254, (2001)
- [21] H. Koch, IEEE Trans. Appl. Superconduc., 11 (1) pp. 49-59, (2001)
- [22] J. P. Wikswo, Jr., "The Magnetic Inverse Problem for NDE," SQUID Sensors:

- Fundamentals, Fabrication and Application", Kluwer Academic Publishers
- [23] D. G. Park, D. W. Kim, J. H. Hong, V. Timofeev and C. G. Kim, "HTS SQUID Application for measuring the magnetic properties of AISI type 316(L) steel," J. Mag. Mat., pp. 215-216, 785, (2000)
- [24] N. Maeda, M. Otaka, S. Shimizu, Int. J. Pres. Ves.&Piping 71, pp. 13-17, (1997)
- [25] M. Otaka, S. Evanson, K. Hasegawa and K. Takaku, SMiRT 11, V. L, L21/2, pp. 459-464, (1991)
- [26] S. Suyama and K. Morimoto, "Non-Destructive Examination Technology by Electro-Magnetic Acoustic Transducer", 非破壊検査(일본비파괴검사학회지), Vol. 46, No. 5, pp. 320-325, (1997)
- [27] ASTM E1774-96, "Standard Guide for electromagnetic Acoustic Transducers" (EMATs), Annual Book of ASTM Standards
- [28] M. R Gaerttner, W. D. Wallace, and B. W. Maxfield, Phys. Rev. 184, 702,(1969)
- [29] Y. Kurozumi and Y. Okano, "Electromagnetic Nondestructive Evaluation," IOS Press, T. Takagi et al. (Eds) pp. 121-127, (1997)
- [30] H. L. Grubin, IEEE Trans. Sonics Ultrason. 16, 27, (1969)
- [31] B. W. Maxfield, A. Kuramoto and J. K. Hulbert, NDT International, Vol. 22, Issue 5, pp. 308, (1989)
- [32] D. F. Lu, Chang-xin Fan, Naser S. Alzayed, K. W. Wong, S. G. Han, J. Z. Ruan, Y. Xin, Bingruo Xu, Marvin Chester and David E. Knapp, Physica C: Superconductivity, Vols. 235-240, pp. 3361-3362, (1994)
- [33] R. Murayama, Ultrasonics 39, pp. 335-343, (2001)