

## EMAT를 이용한 냉연강판의 소성이방성 측정

### Measurement of plastic anisotropy of cold rolled steel sheets using electromagnetic acoustic transducer

황 의 찬(한양대학교 대학원), 장 경 영(한양대학교),

안 봉 영, 이 승 석(한국표준과학연구원),

김 수 광, 김 상 영(POSCO)

#### Abstract

Ultrasonic sensor for evaluating plastic anisotropy was developed. Magnetostrictive type EMAT is sensor to transmit and receive the Lamb wave using magnetostriction. It is suitable for on line processing because of transmitting and receiving ultrasonic without contact ODCs(orientation distribution coefficients).  $W_{400}$ ,  $W_{420}$ ,  $W_{440}$  were respectively calculated using zeroth order Lamb wave velocities, the calculated ODCs was used for evaluating plastic anisotropy, the results was compared for mean values of destructive tests. Besides, the Lorentz EMAT for generating longitudinal wave and two shear waves simultaneously and the Lorentz type EMAT for measuring SH wave velocities were made. ODCs were calculated using the measured resonant modes and velocities. The results of two methods show possibility of on line processing measurement.

## 1. 서론

자동차 차체나 냉장고 외장판등에 사용되는 냉연강판의 경우 press 가공과 같은 소성 가공을 할 때  $\bar{r}$ -value으로 나타내는 소성이방성을 가공 정도를 결정하는 매우 중요한 재료 특성이다.  $\bar{r}$ -value를 측정하는 방법으로 기존의 단축 인장 시험이나, 고유 진동법과 같은 파괴시험법은 on-line상에서의 측정이 불가능하고, 모든 제품에 대해서 측정할 수 없을 뿐만 아니라 시간과 경비가 소요되는 단점이 있다. 수요자들에게 확실한 품질보증을 해주기 위해서는 모든 제품에 대해서 측정이 가능해야 하고 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 on-line상에서의 측정이 가능해야 한다. on-line상에서 소성이방성을 측정하려면 무엇보다도 제품의 생산에 영향을 미치지 않게 하기 위하여 측정 시스템을 비접촉식으로 해야 한다. EMAT(Electromagnetic acoustic transducer)는 압전소자를 이용하는 접촉식 탐촉자와는 달리 비접촉식으로 초음파를 송수신 할 수 있기 때문에 현재까지 알려진 초음파 탐촉자 중에서는 on-line 상에서 소성이방성을 평가하기에 가장 적합하다 할 수 있다.

본 논문은 이러한 EMAT를 이용하여 냉연강판의 소성이방성을 측정하는 방법에 대하여 검토한 것이다. 방법론에 있어서는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 Lamb wave를 이용하는 방법<sup>[1][2]</sup>이고, 두 번째는 종파, 횡파, 그리고 SH

wave를 이용하는 방법<sup>[3]</sup>이다. 본 연구에서는 첫 번째 방법에 우선적으로 관심을 두었으며, 아울러 두 번째 방법도 실행하여 비교 검토하였다.

첫 번째 방법에서는, 우선 Lamb wave를 발생시키는 자외형 EMAT를 제작하였고, 제작된 탐촉자의 성능을 평가하였다. 입연강판의 모든 독립적인 CODF(crystallite orientation distribution function)의 계수인 ODCs(orientation distribution coefficients),  $W_{400}$ ,  $W_{420}$ ,  $W_{440}$ 을 각각 압연방향에 대하여  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  방향의 Lamb wave의 속도를 측정함으로써 얻었다.

두 번째 방법에서는, 먼저 종파와 횡파를 동시에 발생시키는 EMAT와 SH wave를 발생시키는 EMAT를 제작하였다. 종파와 횡파를 동시에 발생시키는 EMAT로 강판의 두께방향으로 진행하는 종파와 횡파의 공진 모드를 각각 측정하여 주파수비를 구했고, SH wave를 발생시키는 EMAT로는 강판의 압연방향에 대하여  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  방향으로 진행하는 SH wave의 속도를 측정하여 속도비를 구하여 각각의 ODCs를 계산하였다. 실제로으로  $\bar{r}$ -value는 각각의 ODCs들, 특히 그 중에서도  $W_{400}$ 과 아주 밀접하게 관련되므로  $W_{400}$ 으로써  $\bar{r}$ -value를 주정하였다.

## 2. 소성이방성(Plastic anisotropy)

냉연강판은 무수히 많은 미세한 결정립의 집합체이다. 각각의 결정립은 단결정으로 구성되어 있고, 그 내부는 원자들이 아닌 분자들이 규칙적으로 배열되어 있기 때문에 불리적, 화학적인 성질은 결정립들이 어떤 방향으로 배열되어 있느냐에 따라 크게 다르다. 결정립의 방향이 완전히 랜덤하게 분포되어 있다면 결정립이 가진 강한 이방성은 서로 상쇄되어 거시적으로는 등방체가 된다. 그러나 일반적으로 다결정 재료에서는 제조, 가공 공정 중에 결정의 방향이 특정의 방향으로 우선적으로 발달하는 경향이 있다. 이와 같이 다결정체가 우선적인 방향을 가지고 배열하는 상태를 집합조직(texture)이라 한다. 텍스처에 의해 재료의 각종 성질에 이방성이 생기게 되고 이러한 텍스처를 제어해서 소재의 각종 특성을 살리거나 또한 역으로 이방성에 의한 악성질을 감소시키어 소재의 유통성을 높일 수 있게 된다.

다결정체의 텍스처는 CODF(Crystallite orientation distribution function),  $w(\xi, \psi, \varphi)$ <sup>[6]</sup>에 의해 나타내어진다. CODF는 입의의 결정립의 3개의 직교하는 축이 압연판의 압연방향, 축방향, 두께방향의 3개의 직교하는 좌표계에 대해서 Euler angle,  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  ( $\xi = \cos \theta$ )로 나타내어진 방위에 존재하는 확률밀도를 준다. Roe와 Bunge가 확립한 CODF를 일반화된 구조화 함수(generalized spherical harmonics)의 항으로 표시하면 다음과 같다.

$$w(\xi, \psi, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} Z_{lmn}(\xi) e^{-im\psi} e^{-in\varphi} \quad (2.1)$$

$$W_{lmn} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 w(\xi, \psi, \varphi) Z_{lmn}(\xi) e^{im\psi} e^{in\varphi} d\xi d\psi d\varphi \quad (2.2)$$

여기서  $Z_{lmn}$ 은 일반화된 Legendre function의 급수로 전개되고, 전개계수  $W_{lmn}$ 은 방위분포계수, ODCs(orientation distribution coefficients)이라 한다. 큐빅 결정 구조에 대해서는 일부 ODCs들은 소멸되고, 다른 많은 것들은 상호 의존적이다. 소멸되거나 의존적이지 않은 독립적인 ODCs은  $W_{000} = 1/(4\sqrt{2}\pi^2)$ ,  $W_{lm0}$  ( $m=0, 2, 4$ )이다. 기본적인 ODC인  $W_{000}$ 은 등방성을 결정짓고, 다른 모든 ODCs은 이방성에 기여한다. 3개의 ODCs중에서  $W_{200}$ 은  $\bar{r}$ -value와 직접적으로 관계가 되고,  $W_{220}$ 과  $W_{440}$ 은 deep drawing시의 'ears' 현상에 관계된다.

냉연강판은 프레스 가공 등과 같은 소성 가공을 할 때에 파단이 일어나지 않도록 압연 조직과 열처리 조건을 변경하여 압연 면내([1 1 1] plane) 방향으로 펴기지 쉽게 되도록 텍스처를 조정하는데, 이러한 지표로써 Lankford등에 의해서 제안된 소성비( $r$  값)를 들 수가 있다.

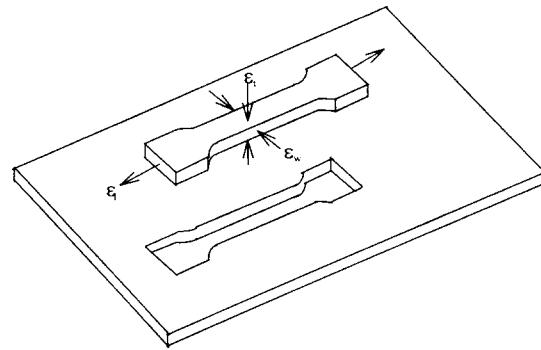


Fig. 2.1 The definition of plastic strain ratio

일반적으로  $r$  값은 Fig. 2.1에 보여진 기계적 인장시험으로써 정의될 수 있다.  $r$  값은 시편을 잘라내어 압연 방향에 대하여 각각 3 방향( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ )에서 리본모양으로 잘라 낸 시편을 길이 방향으로 15~20% 정도의 변형이 일어나도록 변형을 주고, 이 변형 전후의 판 너비와 판 폭에 대한 변형률의 비로써 정의된다.

$$r_{0,45,90} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (2.3)$$

여기서  $r_w$ 는 압연방향에 대해서  $\theta$ 의 각에 해당하는 방향의 변형률 비이다. 한편 인장가공정도를 정하는 소성이방성,  $\bar{r}$  value는 다음의 수식처럼 면내의 평균 소성비로써 정의할 수 있다.

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.4)$$

$\bar{r}$  value가 크면 deep drawing과 같은 소성 가공시 좋은 성형성을 가지고 있다고 할 수 있으나 너무 크면 "ears"라 불리는 주기적인 로브(lobe)가 발생하고,  $\bar{r}$  value가 작으면 소성가공시 파단이 쉽게 발생하게 된다. 따라서 강판은 가공 목적에 따라 적당한  $\bar{r}$  value를 가져야 한다.

## 3. EMAT

EMAT(Electromagnetic acoustic transducer)는 전자기힘(electromagnetic forces)을 이용하여 전도체 또는 자성 물체를 매질로 하여 초음파를 발진시키고 수신하기 위한 장치이고, 탐촉자와 매질 사이의 연성(coupling)이 전자기 힘에 의해 일어나므로 아무런 물리적인 접촉이 필요 없다. 일반적으로 EMAT는 정자기장을 발생시키는 자석과 동자기장을 발생시키기 위한 코일로 구성되어지고, 자석과 코일의 형상과 방향에 따라 발생되는 초음파의 모우드가 달라진다.

EMAT는 재료 내에서 초음파를 어떠한 방식으로 송수신 하

#### 4.1 Lamb wave를 이용한 측정법

접합조직을 가진 밀도  $\rho$ , 두께  $2d$ 의 압연강판에  $s_0$  모드의 Lamb wave가 압연방향에 대하여  $\theta$ 의 각으로 전파하는 경우에  $Z = d$  응력이 0이 되는 경계조건으로 운동방정식을 풀면 다음의 식으로 된다.

$$V_s(\theta) = V_0 \sqrt{(1-\delta)} + \left( \frac{c}{\rho V_0} \right) (s_0 W_{400} + s_2 W_{420} \cos 2\theta + s_4 W_{440} \cos 4\theta) \quad (4.1)$$

where,  $V_0 = \{4\mu(\lambda + \mu)/(\lambda + 2\mu)\rho\}^{1/2}$

$$\delta = \{\lambda/(\lambda + 2\mu)\}^2 (kd)^2/3$$

$$s_0 = (2\sqrt{2}\pi^2/35)\{3 + 16\lambda(\lambda + \mu)/(\lambda + 2\mu)^2\}$$

$$s_2 = -(8\sqrt{5}\pi^2/35)\{(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + 2\mu)\}$$

$$s_4 = 4\pi^2/\sqrt{35}$$

여기서  $V_0$ 은  $kd \sim 0$ 의 극한에서의  $s_0$  모드의 Lamb wave 전파속도,  $c$ 는 이별성인자로  $\alpha$ -Fe 단결정의 경우에는  $\sim 136.6$  GPa,  $\lambda$ 는 등방성체의 라페정수,  $k$ 는 파수(wave number)이다. 위의 식의  $\theta$ 에  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 를 대입하여 정리하면 실제적으로 ODCs를 각각 계산할 수 있다.

#### 4.2 종파, 횡파와 SH-wave를 이용한 측정법

압연강판은 입방결정의 다결정 접합체이고, 여기서는 사방정계(Orthorhombic) 대칭구조로 가정한다. Fig. 4.1에  $O-xyz$  좌표계를 sample의 좌표계라 했을 때 rolling, transverse, and normal direction을 나타냈다.

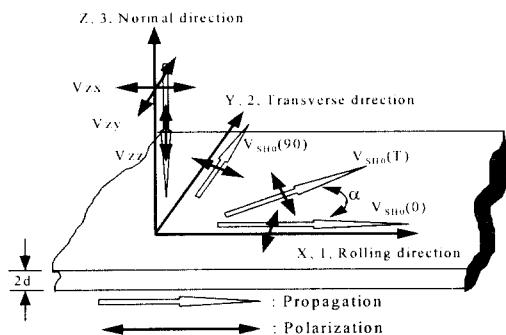


Fig. 4.1 Propagation and polarization direction of ultrasonic waves

$W_{400}$ 과  $W_{420}$ 은 종파와 두 가지의 횡파의 비로써 계산할 수 있고,  $W_{440}$ 은 SH wave의 속도와  $W_{400}$ ,  $W_{420}$ 로써 계산 할 수 있다.

$$K_1^2 = \frac{\rho V_{S0}^2}{\rho V_{zz}^2} = \frac{C_{44}^0 + C^0 \left( \frac{1}{5} - \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 [W_{400} + (\frac{5}{2})^{\frac{1}{2}} W_{420}] \right)}{C_{11}^0 - 2C^0 \left( \frac{1}{5} - \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_{400} \right)} \quad (4.2)$$

$$K_2^2 = \frac{\rho V_{S0}^2}{\rho V_{zz}^2} = \frac{C_{44}^0 + C^0 \left( \frac{1}{5} - \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 [W_{400} - (\frac{5}{2})^{\frac{1}{2}} W_{420}] \right)}{C_{11}^0 - 2C^0 \left( \frac{1}{5} - \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_{400} \right)} \quad (4.3)$$

$$K_3^2 = \frac{\rho V_{SH}^2(45^\circ)}{\rho V_{SH}^2(0^\circ)} = (1 + \frac{\beta^2}{2}) \quad (4.4)$$

where,  $\beta = [\frac{1}{2}(\frac{C_{11} + C_{22}}{2} - C_{12} - \frac{(C_{11} - C_{22})^2}{2C_{33}}) - C_{66}]^{1/2}$

식 (4.2)와 (4.3)은  $W_{400}$ 과  $W_{420}$ 에 대한 선형방정식 이므로 간단한 절차를 거쳐서 얻어질 수 있으며,  $W_{440}$ 은 식(4.4)과  $W_{400}$ 과  $W_{420}$ 의 값들로써 계산되어진다.

## 5. 측정방법

### 5.1 실험장치

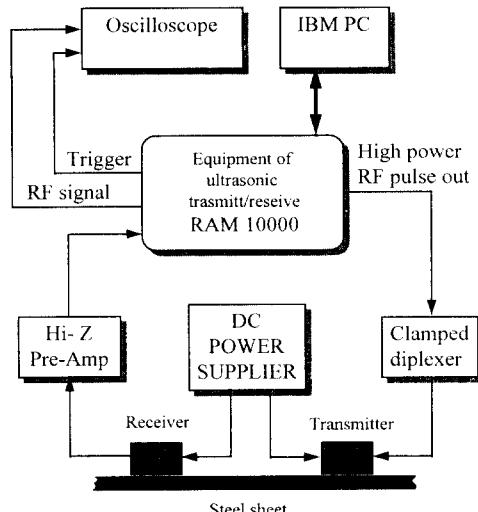


Fig. 5.1 Experimental set up

EMAT의 구동을 위해서는 전자석에 직류전류를 흘려주기 위한 power supply(영구자석을 사용할 경우에는 필요 없음), 와 전류 발생용 코일에 burst형의 펄스를 가해주기 위한 gated amplifier, 그리고 수신된 신호의 증폭 및 filtering을 위한 수신기가 필요하다. power supply로는 국내 ED engineering사의 Model 330이 이용되었다. gated amplifier와 수신장치로는 미국 RITEC사의 RAM 10000이 이용되었다. RAM 10000은

느냐에 따라서 일반적인 로렌츠힘을 이용하는 경우와, 자왜효과를 이용하는 경우로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 자왜효과를 이용하는 경우와 두 가지의 로렌츠힘을 이용하는 경우의 세 가지의 EMAT를 각각 제작하였다.

### 3.1 자왜효과를 이용한 EMAT

강자성 재료에 일정한 방향으로 자기장을 부가하면 그 풀진은 부가된 자기장의 방향으로 변형(strain)을 일으키는데, 이러한 현상을 자왜(magnetostriction)<sup>[4]</sup>라 한다. Fig. 3.1에 본 연구에서 제작된 Lamb wave를 발생시키는 EMAT의 구조를 나타내었다.

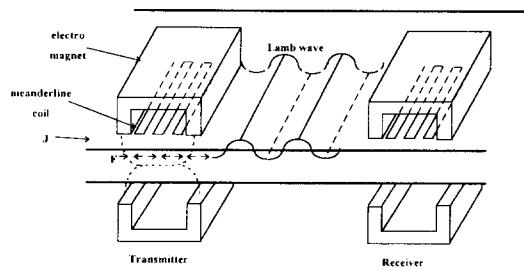


Fig. 3.1 Magnetostrictive type EMAT for Lamb wave

재료 내의 자화강도를 조절하기 위해 전자석으로 정자기장을 형성하고, 재료 위에 있는 코일에 원하는 주파수로 교류의 주파수를 흘리면 코일 주변에는 푸레밍의 오른 나사의 법칙에 의해서 동자기장이 형성된다. 형성된 동자기장은 재료 내에서 자왜 현상을 일으키고, 이 자왜 현상이 초음파의 소스로써 작용된다. 이러한 과정의 역과정은 역시 수신하는 과정에 똑같이 적용된다.

### 3.2 종파와 횡파발생

본 연구에서 제작된 종파의  $V_{zz}$ 와 횡파의  $V_{zx}$ ,  $V_{zy}$ 를 동시에 발생시키는 EMAT의 구조가 Fig. 3.2에 보여진다.

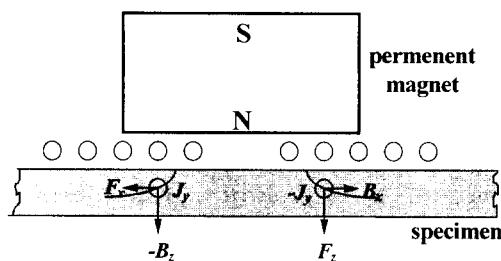


Fig. 3.2 Lorentz type EMAT for resonance

disk type의 자석 아래에 spiral type의 코일이 놓여있다. 재료 내에는 코일에 흐르는 원하는 주파수를 가진 전류에 의해 와전류가 생성된다. 어느 순간에서 일정한 방향으로 전류가 흐르고 있을 때를 고려해 보면 각각의 module에서는  $-F_z$ 의 같은 방향으로 로렌츠힘이 생성됨을 알 수가 있다. 코일에 반대방향의 전류가 흐르면 와전류의 방향도 반대가 되어서  $F_z$ 의 같은 방향으로 로렌츠힘이 생긴다. 이러한 과정이 반복되어 재료 내에는 SH wave가 발생된다. 본 연구에서는 바장이 5mm 동작주파수가 약 660kHz으로 제작되었다.

그리고 있을 때를 고려해 보면 재료 내에 와전류가 생성된 지점에서는 그림에서 보듯이 비스듬한 방향으로 자기장이 걸려 있음을 알 수가 있다. 이 때 자기장을 x성분과 z성분으로 나누면 자기장의 각각의 성분과 와전류에 의해 각각  $\pm x$ 성분과  $\pm z$ 성분의 로렌츠힘이 생기게 된다.  $\pm x$ 성분의 힘은 종파를 발생시키고  $\pm z$ 성분의 힘은 횡파를 발생시키게 된다. Fig. 3.5는 한 단면만을 고려한 그림이어서 y성분은 생략이 됐다. 본 연구에서는 지름 19mm인 disk type Nd-Fe-B 영구자석과, 지름 30 mm인 spiral type의 코일이 사용되었다. 제작된 주파수의 band width는 약 2~10MHz이다.

### 3.3 SH wave 발생

본 연구에서 제작된 SH wave를 발생시키는 EMAT의 구조가 Fig. 3.3에 보여진다.

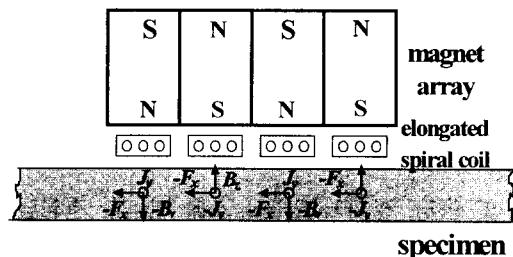


Fig. 3.3 Lorentz type EMAT for SH wave

관형의 자석이 주기적으로 배열되어 있고, 그 아래에 rectangular type의 코일이 놓여있다. 재료 내에는 코일에 흐르는 원하는 주파수를 가진 전류에 의해 와전류가 생성된다. 자기장은 재료의 두께방향으로 각각 형성되고, 어느 순간에서 일정한 방향으로 전류가 흐르고 있을 때를 고려해 보면 각각의 module에서는  $-F_z$ 의 같은 방향으로 로렌츠힘이 생성됨을 알 수가 있다. 코일에 반대방향의 전류가 흐르면 와전류의 방향도 반대가 되어서  $F_z$ 의 같은 방향으로 로렌츠힘이 생긴다. 이러한 과정이 반복되어 재료 내에는 SH wave가 발생된다. 본 연구에서는 바장이 5mm 동작주파수가 약 660kHz으로 제작되었다.

## 4. 측정 원리

많은 국외의 학자들에 의해 강판상의 초음파의 속도 이방성은 집합조직(texture)과 밀접한 관련이 있음이 밝혀져 있다. C. M. Sayers는 초음파의 전파속도가 텍스처를 반영해서 변화하고, 이방성을 나타낸다는 것을 밝혔고 후쿠오카와 히라오 등은 초음파의 전파속도와 텍스처의 관계 그리고 그것으로  $T_{\text{value}}$  value을 정량적으로 평가하는 방법을 제시했다.

burst의 크기와 시간을 임의로 조절하여 주파수의 특성이 우수한 강력한 펄스를 EMAT에 가할 수 있으며, superheterodyne 방식<sup>[5]</sup>으로 신호를 수신하므로 신호의 s/n를 크게 높일 수 있다 Fig. 5.1에 사용된 장치의 구성도를 나타냈다.

## 5.2 Lamb wave 이용

Lamb wave를 이용하는 측정은 송신용과 수신용의 2개의 센서가 필요하다 강판의 rolling 방향에 대한 0°, 45°, 90°의 세 방향에 대해 각각의 전파시간차를 측정하여 앞에서 보여진 수식으로 각각의 ODCs를 계산하는 방법이다. Fig. 5.2에 간단하게 강판상을 전파하는 Lamb wave와 송수신 센서와 S<sub>0</sub>-mode의 Lamb wave를 나타냈다.

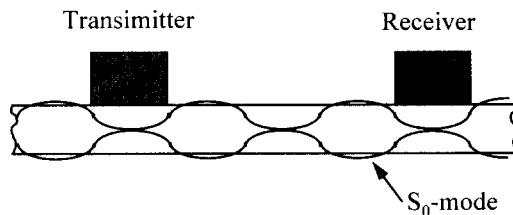


Fig. 5.2 Lamb wave method

## 5.3 종파와 횡파 이용 (공진법)

이 방법은 두께 방향으로 전파하는 하나의 종파와, rolling 방향과 transverse 방향으로 편극된 두개의 횡파를 하나의 센서로써 송신하고 같은 센서로써 수신한다. Fig. 5.3에 이러한 구성을 나타내었다.

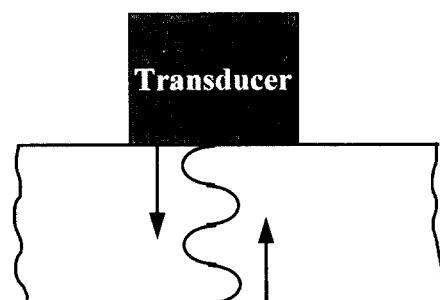


Fig. 5.3 Resonance method

주파수를 어느 일정한 band 내에서 sweep하면 강판내의 standing wave는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{znm} = (m/2d) V_{zz} \quad (5.2)$$

$$f_{zyn} = (n/2d) V_{zy} \quad (5.3)$$

$$f_{zxm} = (n/2d) V_{zx} \quad (5.4)$$

식 (5.2)~(5.4)을 사용하면 속도비는 다음과 같은 공진주파수 비로 바꿀 수가 있다.

$$K_1 = \frac{V_{zy}}{V_{zz}} = \frac{(2d/m)f_{zyn}}{(2d/n)f_{znm}} = \frac{mf_{zyn}}{nf_{znm}} \quad (5.5)$$

$$K_2 = \frac{V_{zx}}{V_{zz}} = \frac{(2d/n)f_{zxm}}{(2d/m)f_{znm}} = \frac{nf_{zxm}}{mf_{znm}} \quad (5.6)$$

Fig. 5.4는 실제 측정의 한 예이다. A의 peak는 1차의 종파 공진모드이고, B는 2차의 transverse 방향 2차의 횡파 공진 모드, 그리고 C는 rolling 방향 2차의 횡파 공진 모드이다.

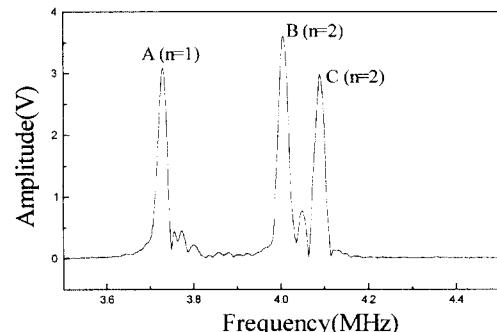


Fig. 5.4 Example of resonance method

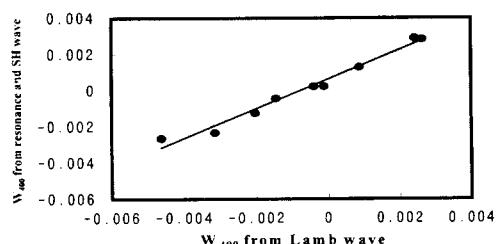
## 5.4 SH wave 이용

SH wave를 이용하는 측정방법은 Lamb wave를 이용하는 방법과 유사하다. 차이점은 magnetostrictive-type의 EMAT에서는 전자석이 사용된 반면, 이 방법에서는 영구자석이 사용되었기 때문에 자화강도를 조절하는 power supply가 필요 없게 된다. 또한 SH wave의 속도는 0° 와 90° 방향의 전파속도가 같다. 속도비는 다음과 같이 전파시간차비로 나타낼 수가 있다.

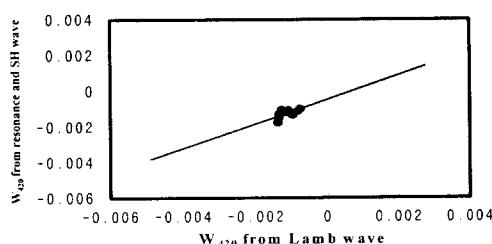
$$K_3 = \frac{V_{SH}(45^\circ)}{V_{SH}(0^\circ)} = \frac{(D/t_{45})}{(D/t_0)} = \frac{t_0}{t_{45}} \quad (5.7)$$

## 6. 측정결과

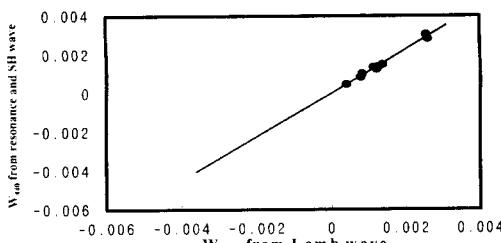
시험편은 모두 두께가 0.7~1.4mm의 범위에 있는 9개의 냉연강판을 대상으로 행하였다. Fig. 6.1에 위의 두 가지 방법에 의해서 구해진 ODCs의 값들의 관계를 각각 표시했다. 구해진 결과는 대체적으로 일정한 경향을 나타내고 있다.



(a)  $W_{400}$



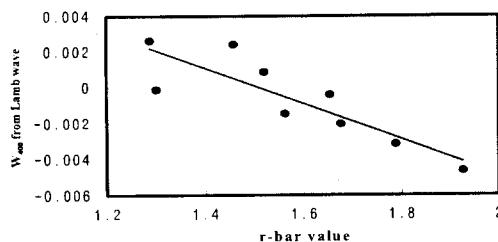
(b)  $W_{420}$



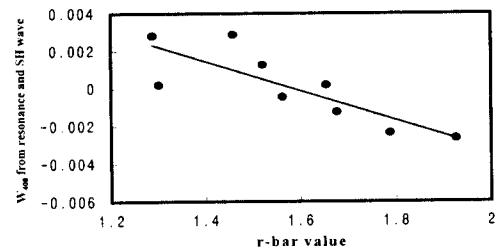
(c)  $W_{440}$

Fig. 6.1 The relation of between two methods

Fig. 6.2에  $\bar{r}$  value와 직접 관련이 있는  $W_{400}$ 으로 써 본 연구의 궁극적인 목적인  $\bar{r}$  value와의 경향을 각각 나타내었다.



(a) The result of using Lamb wave method



(b) The result of using resonance and SH wave method

Fig. 6.2 The relation of between  $W_{400}$  and  $\bar{r}$  value

두 가지 방법에 의해 측정한 결과와 기계적으로 측정한 결과는  $W_{400}$ 이  $\bar{r}$  value와 아주 밀접한 관계가 있음을 보여주고 이것으로 초음파를 이용한 비파괴 시험법은  $\bar{r}$  value 측정에 적용 가능하다는 것을 보여준다.

## 7. 결론

1. Lamb wave를 이용한 측정이 SH wave와 공진법으로 측정한 결과보다 안정적으로 이뤄졌으나 두 가지 방법으로 측정한 OIDs는 대체적으로 좋은 일치성을 보여줬다
2. 파괴 시험인 기계적 인장시험과 자왜시험으로  $\bar{r}$  value를 측정하는 것보다, 본 연구의 두 가지 방법에 의해서 측정한 결과들의 편차가 적은 것으로 미루어 더 정량적인 측정법이라 할 수 있다.
3. 본 연구의 결과는 on-line 측정에 충분히 적용 가능하게 나타났고 on-line 측정에 적용된다면 모든 제품에 대해서  $\bar{r}$  value를 평가 할 수 있다.

## 참고문헌

1. M. Hirao, H. Fukuoka, Journal of NDE., Vol. 12, No. 1, p27, 1993.
2. R. B. Thompson, E. P. Papadakis, Journal of NDE., Vol. 12, No. 1, p45, 1993.
3. Katsuhiro Kawashima, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 87(2), p681, 1990
4. B. D. Cullity, "Introduction to magnetic materials", Addison Wesley Publishing Company.
5. C. M. Fortunko, G. L. Peterson, B. B. Chick, Rev. Sci. Instrum. Vol. 63, No. 6, June, p3477, 1992
6. C. M. Sayers, J. Phys. D. 15, p2157, 1982