

EMAT를 이용한 판재의 소성이방성 평가

안봉영, 김영길, 이승석

한국표준과학연구원 방재기술연구센터 비파괴평가그룹

요 약 소성이방성은 판재의 가공성을 결정하는 중요한 인자로서 주로 기계적인 인장시험에 의해 측정되고 평가되어 왔다. 압연 방향에 대하여 상대적인 방향으로 진행되는 초음파의 속도로부터 집합조직의 결정분포함수를 구할 수 있으며, 결정분포함수의 계수인 결정방위계수는 소성이방성의 평균값들과 상관 관계를 갖는다. 본 실험에서는 초음파 속도로 구한 결정방위계수와 압연장판의 소성이방성을 비교하여 서로의 상관 관계를 구하였으며, 측정결과 average normal anisotropy, \bar{r} 는 ± 0.082 , average planar anisotropy, Δr 는 ± 0.096 의 편차 내에서 예측 가능 하였다. 초음파 속도 측정에는 공진주파수측정법이 적용되었고, 초음파의 송수신에는 EMAT가 이용되었다.

1. 서 론

소성이방성은 판재의 가공성을 결정하는 중요한 인자중의 하나이다. 소성이방성은 재료를 변형시킬 때 두께 방향으로의 변형에 대한 폭 방향의 변형의 비로 평가되며, 이를 r 값($r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}$)이라 한다. 압연 방향에 대하여 각 방향에서 구해진 r 값의 평균값은

$$\bar{r} = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \text{ 과 } \Delta r = \frac{(r_0 - 2r_{45} + r_{90})}{2}$$

로 정의되며, \bar{r} 는 판재의 가공성(ability to be deeply drawing)을 나타내고, Δr 은 가공시 earing의 형성경향(tendency to form ears)을 나타낸다¹⁾. 소성이방성의 측정은 주로 기계적 인장시험으로 행해져오고 있는데, 이 측정법은 파괴적인 방법일 뿐 아니라 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 소성이방성의 평가가 가능한 또다른 방법으로는 고유진동수측정법, X-선 회절법, 그리고 초음파법이 있다^{2,3)}. 고유진동수측정법은 1970년에 미국에서 개발된 기술로써 직사각형으로 추출한 시험편의 각 방향에서의 공진주파수를 측정 후 이로부터

영률을 계산하고, 계산된 영률의 평균값과 소성이방성과의 상관관계를 이용하는 방법이다. 이 방법이 기계적 인장시험보다는 훨씬 간단하게 소성이방성을 평가할 수 있지만 역시 파괴적인 방법이다. X-선 회절법으로 소성이방성을 평가하는 방법은 오래 전부터 많이 이용되어 오고 있던 방법이지만 측정에 소요되는 시간이 길고 특별히 제작된 시험편이 필요하다는 점, 그리고 표면 근처의 집합조직의 영향만이 측정된다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해서 초음파를 이용하는 기술은 방향성을 갖는 집합조직의 탄성계수는 방향에 따라 달라지므로 각 방향으로 진행되는 초음파의 속도도 변한다는 기본적인 생각으로부터 출발한 방법이다. 초음파 속도의 측정은 비파괴적이면서 빠른 시간 내에 가능하므로 생산되는 판재의 소성이방성을 생산 중에 평가할 수 있는 방법으로 인식되어 오고 있다.

일반적으로 초음파는 압전소자의 진동을 접촉매질(couplant)을 통하여 직접 재료에 전달하고 동일한 과정을 통하여 초음파를 수신함으로써 재료 내를 진행한 초음파의 속도 등을 측정한다. 그러나 생산중인 판재

는 움직이고 있으므로 압전소자의 진동을 전달하기 위한 접촉매질의 선택에 제한을 받게 되고, 또한 측정시마다 변할 수 있는 접촉매질의 두께 변화는 측정의 정확도를 크게 떨어 뜨린다. 반면 접촉매질 없이 초음파를 송수신할 수 있는 비접촉식 초음파 탐촉자인 EMAT(electromagnetic-acoustic transducer)를 이용하면 생산중인, 즉 움직이고 있는 재료의 초음파 속도를 정밀하게 측정할 수 있다. EMAT를 이용한 소성이방성 평가에는 주로 2가지의 다른 방법이 이용된다. 즉, 판재의 면을 따라 진행하는 Lamb wave의 속도를 측정하는 방법⁴⁾과 판재의 두께 방향으로 진행하는 순수종파 및 횡파의 속도를 측정하는 방법이 있다. 첫번째 방법은 Thompson등이 제안한 이론식³⁾을 이용하는 방법으로 비교적 정확하게 소성이방성을 평가할 수 있다. 일반적으로 여기에 이용되는 탐촉자는 부피가 크고, 송수신을 위해서 별도의 탐촉자를 사용해야 하며, 또한 판재의 면을 따라 진행하는 초음파의 속도를 측정해야 하기 때문에 넓은 부위에 대한 평균적인 성질만을 측정할 수 있다. 반면에 두번째의 방법에 이용되는 탐촉자는 부피가 작고, 하나의 탐촉자로 송수신이 가능하며, 판재의 두께 방향으로 진행한 초음파의 속도를 측정하므로 전체 판재에 대한 국부적인 성질의 변화를 측정할 수 있다.

이 연구에서는 두께 방향으로 진행하는 순수종파 및 횡파의 속도 측정으로부터 판재의 소성이방성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 우선 Lorentz힘을 이용하여 종파와 진동 방향이 수직인 두개의 횡파를 동시에 발생시킬 수 있는 EMAT를 제작하였으며, 초음파의 속도 측정에는 EMAT에 가하는 펄스의 주파수를 연속적으로 변화시키면서 판재의 두께와 초음파 속도와의 관계에 따라 형성되는 공진 주파수의 측정으로부터 초음파의 속도를 측정하는 공진법을 이용하였다. 측정된 초음파 속도로부터 계산된 결정분포계수들은 기계적인 인장시험으로 얻은 소성이방성과 비교하였다.

2. 결정방위분포함수와 초음파 속도와의 관계

판형재료는 일반적으로 무수히 많은 미세한 결정립의 집합체이다. 각각의 결정립은 단결정으로 구성되어 있고, 그 결정립들이 어떤 방향으로 배열되어 있는나에 따라 물리적, 화학적 성질이 달라진다. 결정립의 방향이 완전히 임의적으로 분포되어 있다면 결정립들이

가진 이방성은 서로 상쇄되어 거시적으로는 등방체가 된다. 그러나 일반적으로 다결정재료에서는 제조, 가공 공정 중에 결정의 방향이 특정방향으로 우선적으로 발달하는 경향이 있으며, 이와 같이 다결정체가 우선적인 방향을 가지고 배열하는 상태를 집합조직(texture)이라 한다. 다결정체의 집합조직은 식(1)의 CODF(Crystallite Orientation Distribution Function), $\omega(\xi, \psi, \phi)$ 에 의해 나타낼 수 있다.

$$\omega(\xi, \psi, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} Z_{lmn}(\xi) e^{-im\psi} e^{-in\phi} \dots (1)$$

식에서 $\psi, \theta, \phi(\xi = \cos \theta)$ 는 압연 방향, 축 방향, 그리고 두께 방향의 3개의 직교하는 좌표계에 대한 오일러의 각이며, $Z_{lmn}(\xi)$ 는 일반화된 Legendre함수이고, W_{lmn} 는 방위분포계수, ODC's (Orientation Distribution Coefficients)로서 식(2)와 같이 정의된다.

$$W_{lmn} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \omega(\xi, \psi, \phi) Z_{lmn}(\xi) e^{im\psi} e^{in\phi} \dots (2)$$

입방결정구조의 판재에서 독립적인 ODC's는 W_{000} 와 $W_{4m0}(m=0, 2, 4)$ 이며, W_{000} 와 W_{4m0} 은 각각 재료의 등방성과 이방성을 결정하는 계수이다. 또한 W_{400} 는 $\bar{\gamma}$ 와 관계되는 계수이고, W_{420} 와 W_{440} 는 $\Delta\gamma$ 과 관계되는 계수로 알려져 있다.

W_{4m0} 를 초음파 속도 측정으로부터 계산할 수 있는 이론적인 계산은 여러 논문에 이미 보고되어 있으며, 그 중에서 순수종파와 순수횡파, 그리고 판에 평행한 진동모우드(SH 모드)를 갖는 판파의 속도로부터 W_{4m0} 를 계산하기 위한 수식은 아래의 식(3)~(5)와 같다⁵⁾.

$$W_{400} = \frac{7}{16\sqrt{2}\pi^2} \left(\frac{5C_{44}^0 + C^0}{C^0} \right) \left[1 - \left(\frac{5C_{11}^0 + 10C_{44}^0}{2C^0 + 10C_{44}^0} \right) K_p \right] \dots (3)$$

$$W_{420} = \frac{-7}{16\sqrt{5}\pi^2} \left(\frac{5C_{44}^0 + C^0}{C^0} \right) \left(\frac{5C_{11}^0 + 10C_{44}^0}{2C^0 + 10C_{44}^0} \right) K_m \dots (4)$$

$$W_{440} = \frac{7}{8\sqrt{35}\pi^2} \left(\frac{5C_{44}^0 + C^0}{C^0} + \frac{4\sqrt{2}\pi^2 W_{400}}{7} \right) \left(1 - \frac{1}{K_3} \right) \dots (5)$$

식에서 $C_{11}^0, C_{12}^0, C_{44}^0$ 는 단결정의 탄성계수이며, $C^0 = C_{11}^0 - C_{12}^0 - 2C_{44}^0$ 이다. 그리고 $K_p = \frac{K_1^2 + K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2}$, $K_m = \frac{K_1^2 - K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2}$ 이며, $K_1 = \left(\frac{m}{n} \right) \left(\frac{f_{2ym}}{f_{2zm}} \right)$, $K_2 = \left(\frac{m}{n} \right) \left(\frac{f_{2xn}}{f_{2zm}} \right)$ 이다.

여기서 f_{ijk} 는 아래 식(6)에 정의되어 있는 공진주파수를 나타내고 있으며, i 는 진행 방향, j 는 진동 방향을 나타내며, k 는 공진주파수의 차수를 나타낸다. 식에서 x 와 y 는 압연강판의 평면좌표이고, z 는 두께 방향을 나타낸다. 그리고 K_3 는 압연 방향과 압연 방향에 대하여 45° 방향으로 진행하는 SH파의 비로 정의되며,

$$K_3 = \frac{V_{SH_0}(45^\circ)}{V_{SH_0}(0^\circ)}$$

$$f_{zxm} = \frac{mV_{zz}}{2d}, \quad f_{zym} = \frac{nV_{zy}}{2d}, \quad f_{zxn} = \frac{nV_{zx}}{2d} \quad \dots\dots (6)$$

식에서 V_{ij} 는 j 방향의 진동모우드로 i 방향으로 진행하는 초음파의 속도를 의미하며, d 는 시험편의 두께이다.

식(6)을 보면 측정된 공진주파수와 시험편의 두께, 그리고 공진주파수의 차수로부터 초음파의 속도를 구할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 식(3)~(5)의 W_{4m0} 을 계산하기 위해서 필요한 측정값은 절대적인 속도가 아니고, 속도의 비(ratio), 즉 공진주파수의 비인 K_1, K_2, K_3 이므로 시험편의 두께에 대한 측정이 필요없이 공진주파수와 이의 차수만으로 W_{4m0} 을 계산할 수 있다.

3. 실험

3.1. EMAT의 제작

EMAT는 정자기장과 동자기장의 상호 작용에 의한 Lorentz힘을 이용하여 전기전도체에 초음파를 송수신하는 비접촉식 초음파 탐촉자이다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 EMAT의 구조와 이로부터 발생하는 각 성분들의 방향을 나타낸 그림이다.

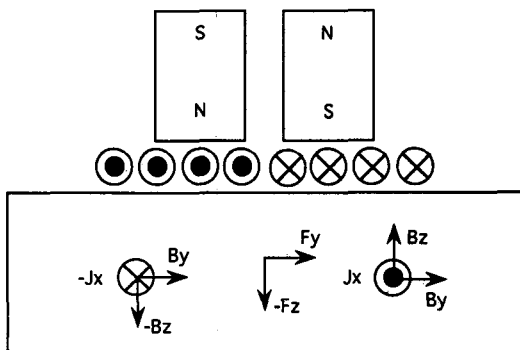


Fig. 1. Structure of EMAT and the wave generation mechanism

두 개의 자석은 서로 다른 극이 가까이 위치할 수 있도록 배열하여, 강력한 정자기장을 시험편에 부가할 수 있도록 자기회로를 구성하였으며, 자석 밑에 배치한 원반형의 코일은 같은 부위에 동자기장을 부가하여 시험편의 표면에 와전류를 형성시킨다. 동자기장에 의한 와전류와 정자기장 사이의 상호작용으로 시험편 표면의 입자들은 식(7)의 Lorentz힘을 받게 되며, 힘의 방향이 동자기장의 영향으로 주기적으로 바뀌게 되므로 초음파가 발생된다.

$$F = J \times B_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

식에서 F 는 Lorentz힘이고, J 는 와전류 밀도이며, B_0 는 정자기장을 나타낸다.

일반적으로 위의 구조를 갖는 EMAT를 상자성재료에 적용하면, 시험편의 표면에서의 정자기장의 방향이 표면에 수직한 방향으로 형성되므로 힘의 방향은 표면에 평행한 방향으로 형성되어 횡파가 발생되지만, 두께가 얇은 강자성재료에 적용될 경우에는 정자기장이 재료의 경계면 사이로 집속되므로 이때 정자기장은 시험편의 표면에 평행한 성분과 수직한 성분을 함께 가지게 된다.

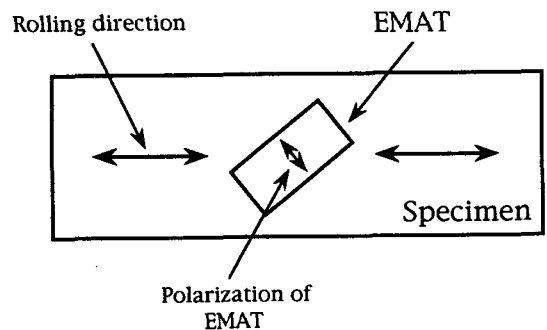


Fig. 2. Relative position of EMAT to the rolling direction for the generation of two shear waves simultaneously

결국 와전류의 방향을 고려하면 힘의 방향도 시험편에 수직한 성분과 평행한 성분을 가지므로 하나의 탐촉자로 종파 및 횡파를 동시에 발생시킨다.

또한 Fig. 2와 같이 압연 방향에 대하여 45° 방향으로 탐촉자를 비스듬히 위치시키면 압연 방향의 진동모우드와 이에 수직한 진동모우드의 횡파가 동시에 발생된다. 결국 하나의 탐촉자로부터 종파와 진동 방향이 서로 수직인 두 개의 횡파를 하나의 탐촉자로 송수신할

수 있게 된다.

앞의 식(5)의 W_{440} 를 계산하기 위해서는 초음파의 진행 방향과 진동 방향이 표면에 평행하면서 서로 수직인 판파, 즉 SH파(Horizontally polarized shear wave)의 송수신이 필요하며, 이를 위하여 제작된 EMAT는 Fig. 3과 같다.

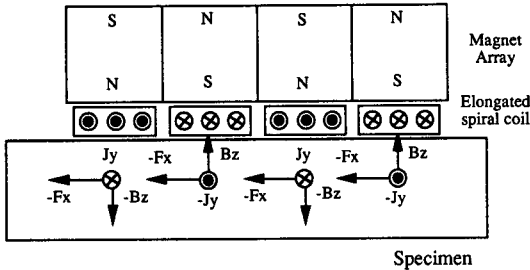


Fig. 3. EMAT for the generation and detection of horizontally polarized shear wave

3.2. 시험편 및 실험 장치

실험에 사용된 시험편은 각기 다른 이력을 갖는 20개의 냉연강판이 이용되었으며, 시험편의 두께는 0.7mm~1.6mm이다.

측정 장치로는 미국 Ritec사의 RAM 10000 시스템을 사용하였으며, 장비의 구성은 Fig. 4와 같다. EMAT를 구성하는 코일의 공진주파수는 EMAT의 사용주파수 영역을 결정하는 주된 인자이며, 본 실험에 사용한 EMAT는 약 8MHz 이하의 주파수 영역에서 사용가능하였다. 측정은 EMAT를 시험편의 한쪽 면에 올려놓고 EMAT코일에 tone-burst펄스를 가한다. Burst의 갯수 및 폭은 주파수에 따라 달라질 수 있지만 본 실험

에서는 폭을 40μs로 일정하게 유지하였다. 한편 정확한 공진주파수의 측정을 위해서 burst의 주파수는 100Hz의 간격으로 연속적으로 변화시켰으며, 수신된 신호의 처리는 시스템이 보유하고 있는 superheterodyne receiver의 기능을 이용하였다. 이때 적분대(integrator gate)의 폭과 지연 시간은 oscilloscope를 관찰하며 적절하게 선택하였다.

Fig. 3의 SH파의 송수신을 위해서는 두 개의 탐촉자가 이용되며, pulser와 receiver로는 위와 동일한 RAM 10000 시스템을 이용하였다. 발생한 판파의 파장과 사용 주파수는 각각 5mm와 660kHz이었으며, 이 때에는 SH판파중 가장 낮은 차수의 SH₀모우드의 판파가 발생된다. 그리고 SH파의 경우에도 압연 방향과 압연 방향에 대하여 45°방향으로 진행하는 초음파 속도의 비(ratio)만이 필요하므로 두 개의 탐촉자 사이의 거리를 고정하고 두개의 탐촉자 사이를 초음파가 진행하는데 소요된 시간의 측정만이 필요하다. 초음파 진행 시간의 측정은 디지털 oscilloscope로 수신된 신호중 진폭이 가장 높은 시간을 기준으로 하였다.

4. 결과 및 논의

Fig. 5는 측정에 사용한 시험편에서 공진주파수를 측정한 예이다. 그림에서 A는 종파에 의한 차수 m=1의 공진모우드를 나타내며, B와 C는 진동 방향이 압연 방향과 같은 횡파와 압연 방향에 수직인 횡파에 의한 차수 n=2의 공진모우드를 나타낸다. 하나의 탐촉자로 송수신이 동시에 이루어지면서 한꺼번에 3가지 모우드의 공진주파수가 측정됨을 확인할 수 있다. Fig. 6은 Fig. 4의 SH파용 EMAT로 시험편에서의 판파의 속도를 측정한 결과이다. SH₀파는 입방결정구조에서 압연 방향에 대하여 4-fold 대칭성을 갖는다고 알려져 있다. 측정 결과에서 이를 뚜렷이 볼 수 있다. 각 대칭점들에서 측정한 초음파 진행시간은 ±50ns의 정확도내에서 측정되었다.

측정된 공진주파수와 SH파의 속도로부터 ODC's를 계산하기 위해서는 시험편의 밀도와 단결정의 탄성계수를 알아야 하며, 본 실험에서는 시험편의 밀도로는 7850kg/m³을 사용하였고, 단결정의 탄성계수로는 순철의 탄성계수를 이용하였으며, 이 때 $C_{11}^0 = 237 GPa$, $C_{12}^0 = 141 GPa$, $C_{44}^0 = 116 GPa$ 을 사용하였다. 한편 ODC's의 계산에는 Voigt approxi-

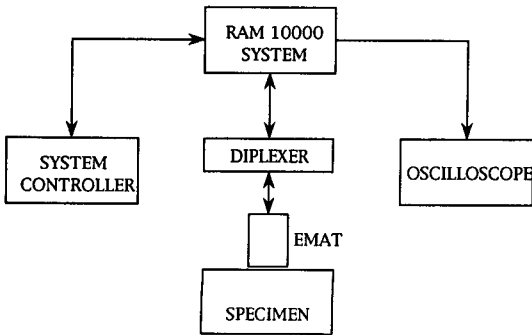


Fig. 4. System for acoustic resonance frequency measurement

mation을 적용하였다. 판재의 소성특성인 \bar{r} 및 Δr 와 탄성적 특성인 ODC's와의 사이에 명확한 이론적인 설명은 확립되어 있지 않지만, 여러 연구그룹에서 실험에 의한 서로의 상관 관계를 발표해 오고 있다^{6~8)}.

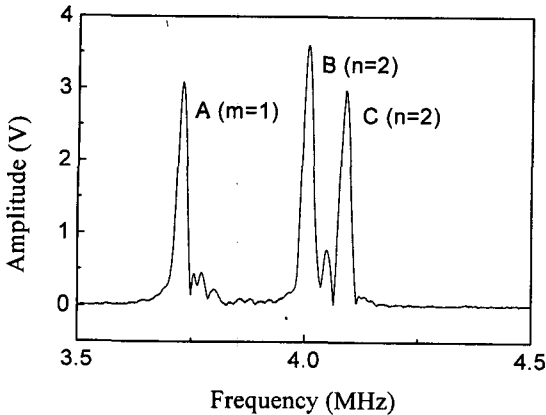


Fig. 5. Example of acoustic resonant frequency measurement in a steel sheet

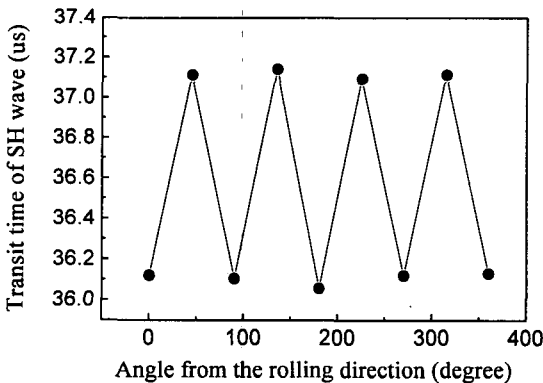


Fig. 6. Angular dependence of SH waves in a steel sheet

Table 1에는 시험편의 두께와 기계적 시험으로부터 구한 \bar{r} 와 Δr , 그리고 초음파로부터 구한 ODC's를 정리하여 수록하였다. Fig. 7은 \bar{r} 와 ODC's를 비교한 결과이고, Fig. 8은 Δr 과 ODC's를 비교한 결과이다. 그림에서 실선은 두 측정값 사이에 계산한 선형회귀곡선이며, 각 회귀곡선들의 식과 상관계수 (correlation coefficient), 그리고 상관계수의 곱을 Table 2에 나타내었다. 판재의 성형성을 나타내는 \bar{r} 는 W_{400} 와 가장 좋은 상관 관계를 가지며, earing의

형성경향을 나타내는 Δr 는 W_{440} 와 가장 좋은 상관 관계를 갖는다. Δr 과 W_{440} 사이의 상관계수가 \bar{r} 과 W_{400} 사이의 상관계수보다 상대적으로 작은 이유는 W_{440} 의 계산에는 공진주파수뿐 아니라 SH파의 속도 비가 이용되었기 때문에 측정오차의 폭이 커졌기 때문이라고 생각되는데, 이는 SH파 속도의 경우는 판재의 국부적인 부위에서의 측정값이 아니고 비교적 넓은 부위에서의 평균값이며, EMAT와 판재와의 lift-off의 영향으로 인한 오차 때문이다. 실제 Fig. 6의 측정 결과에서도 각 측정점에서의 측정값들이 ± 50 ns의 편차를 가지고 있음을 볼 수 있었다.

Table 1. Plastic anisotropy by mechanical tests and ODC's by ultrasonic methods

시험편 번호	두께 (mm)	\bar{r}	Δr	W_{400}	W_{420}	W_{440}
1	0.78	1.458	0.766	0.00289	-0.00118	0.00283
2	0.98	1.288	0.816	0.00283	-0.00098	0.00305
3	0.80	1.562	0.289	-0.00044	-0.00128	0.00085
4	0.96	1.520	0.210	0.00128	-0.00175	0.00049
5	0.75	1.788	0.566	-0.00234	-0.00132	0.00136
6	0.70	1.926	0.485	-0.00264	-0.00103	0.00126
7	0.80	1.676	0.475	-0.00125	-0.00106	0.00141
8	0.90	1.654	0.193	0.00022	-0.00149	0.00105
9	0.58	1.193	0.669	0.00443	-0.00163	0.00224
10	0.80	1.157	0.753	0.00483	-0.00149	0.00299
11	0.70	1.959	0.011	-0.00297	-0.00273	0.00032
12	0.70	1.644	0.255	-0.00074	-0.00131	0.00102
13	1.20	1.633	0.598	-0.00131	-0.00120	0.00179
14	0.75	1.913	0.298	-0.00204	-0.00334	0.00083
15	0.90	1.700	0.114	-0.00155	-0.00230	0.00040
16	0.80	1.874	0.437	-0.00223	-0.00144	0.00078
17	1.00	1.631	0.572	-0.00093	-0.00094	0.00141
18	1.20	1.130	0.554	0.00574	-0.00173	0.00247
19	0.60	1.700	0.345	-0.00317	-0.00135	0.00109
20	0.77	1.178	0.679	0.00405	-0.00170	0.00269

Table 2. Correlation between plastic anisotropy and ODC's

Average plastic anisotropy	ODC's	Equation of regression curve	Correlation coefficient, R	Square of R
\bar{r}	W_{400}	$y = 0.0165 - 0.0103x$	-0.95	0.91
	W_{420}	$y = -0.0011 - 0.0003x$	-0.15	0.02
	W_{440}	$y = 0.0056 - 0.0026x$	-0.79	0.63
Δr	W_{400}	$y = -0.0031 + 0.0074x$	0.60	0.35
	W_{420}	$y = -0.0020 + 0.0012x$	0.61	0.37
	W_{440}	$y = -0.0001 + 0.0035x$	0.92	0.84

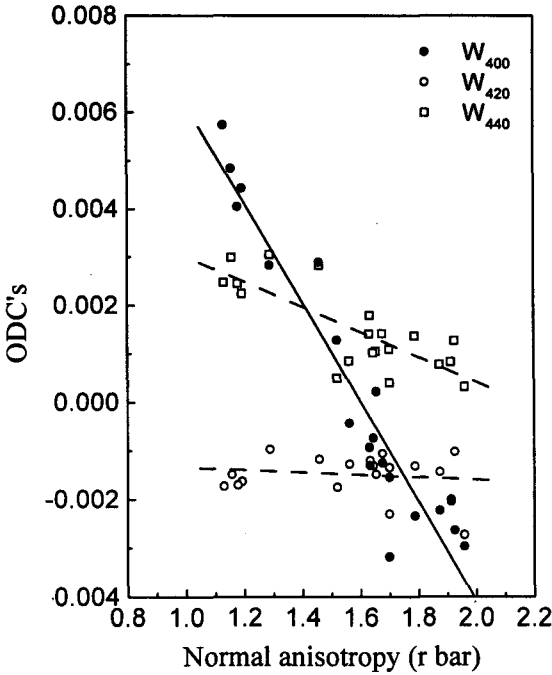


Fig. 7. Comparison of the average normal anisotropy, \bar{r} with three ODC's

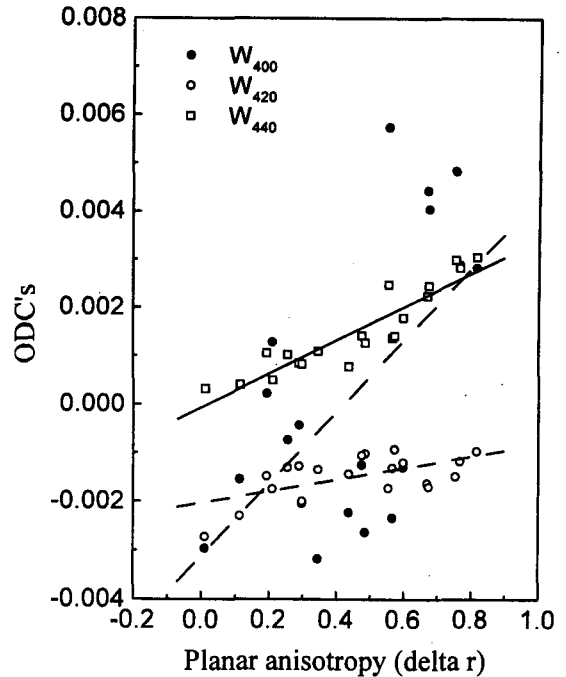


Fig. 8. Comparison of the planar anisotropy, Δr with three ODC's

한편 \bar{r} 와 W_{400} 사이의 회귀곡선의 표준편차는 0.082 이고, Δr 과 W_{440} 사이의 회귀곡선의 표준편차는 0.096이었으므로, 본 실험에서의 초음파 측정 결과들을 이용하면 얇은 판재의 소성이방성을 \bar{r} 의 경우 ± 0.082 내에서, Δr 의 경우 ± 0.096 의 정확도내에서 예측할 수 있다.

기계적인 시험법으로는 소성이방성을 $\pm 0.05 \sim \pm 0.08$ 정도의 정밀도로 측정할 수 있다고 알려져 있고, AISI에서는 약 3m/s의 속도로 움직이고 있는 생산공정 중에 소성이방성을 ± 0.05 의 정밀도로 측정할 것을 제안하고 있다⁹⁾. 본 실험에서의 측정은 실험실에서 정지해 있는 시험편에 대한 측정 결과이고, AISI의 제안을 만족할 만큼의 정밀도를 얻지는 못하였지만, 큰 폭의 오차를 보이지는 않고 있으므로 계속해서 움직이고 있는 판재에 대한 실험과 정밀도 향상을 위한 연구가 계속되면 본 실험에 사용된 방법은 철강 생산 공정에서 판재의 소성이방성 예측에 적용될 수 있을 것이다.

5. 결론

압연장판의 소성이방성은 압연 방향에 대하여 상

대적인 방향으로 진행되는 초음파 전파 속도로부터 계산되는 결정방위분포계수, ODC's로부터 예측할 수 있다. 초음파 전파 속도의 측정은 자동화가 가능하고, 시험편의 국부적인 부위에서의 속도 측정이 가능한 공진주파수 측정법을 적용하였으며, 초음파의 송수신에는 비접촉식 초음파 탐촉자인 EMAT가 이용되었다. 기계적 인장시험으로부터 구한 average normal anisotropy, \bar{r} 와 planar anisotropy, Δr 은 ODC's중 W_{400} 와 W_{440} 의 측정으로부터 각각 ± 0.082 와 ± 0.096 의 편차내에서 예측 가능함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 1) R.B. Thompson, E.P. Papadakis, D.D. Bluhm, G.A. Alers, K. Forouraghi, H.D. Skank, and S.J. Wormley, "Measurement of Texture and Formability Parameters with a Fully Automated, Ultrasonic Instrument", J. Nondestr. Eval. 12(1), 45 (1993)
- 2) E.P. Papadakis and R.B. Thompson, "An

- Automatic Instrument for the Ultrasonic Measurement of Texture", Proceedings of Nondestructive Characterization of Materials IV, edited by C.O. Ruud et al., Plenum Press, New York, 447 (1991)
- 3) R. B. Thompson, J.F. Smith, S.S. Lee, and G.C. Johnson, "A Comparison of Ultrasonic and X-Ray Determinations of Texture in Thin Cu and Al Plates", Metall. Trans. A 20A, Nov., 2431(1989)
 - 4) M. Hirao, H. Fukuoka, K. Fujisawa, and R. Murayama, "Characterization of Formability in Cold-Rolled Steel Sheets Using Electromagnetic Acoustic Transducers", Metall. Trans. A 20A, Nov., 2385 (1989)
 - 5) K. Kawashima, "Nondestructive Characterization of Texture and Plastic Strain Ratio of Metal Sheets with Electromagnetic Acoustic Transducers", J. Acoust. Soc. Am. 87(2), 681 (1990)
 - 6) P.R. Mould and T.E. Johnson, "Rapid Assessment of Drawability of Cold-Rolled Low-Carbon Steel Sheets", Sheet Metal Industries 328 (1973)
 - 7) Y.C. Liu and G.A. Alers, "The Anisotropy of Young's Modulus in Cold-Rolled Sheets of Binary Cu-Zn Alloys", Trans. Met. Soc. AIME 236, 489 (1966)
 - 8) C.A. Stickels and P.R. Mould, "The Use of Young's Modulus for Predicting the Plastic-Strain Ratio of Low-Carbon Steel Sheets", Metall. Trans. 1, 1303 (1970)
 - 9) A.V. Clark, Y. Berlinsky, N. Izvorski, Y. Cohen, D.V. Mitrakovic, and S.R. Schaps, "Methods to Improve the Accuracy of On-Line Ultrasonic Measurement of Steel Sheet Formability", J. Nondest. Eval. 12(1), 33 (1993)

Evaluation of Plastic Anisotropy in the Steel Sheets Using EMAT

B. Y. Ahn, Y. G. Kim. and S. S. Lee

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon, 305-600

Abstract Plastic anisotropy is one of important factors which determine the drawability of a steel sheet. It has been mainly measured by mechanical tensile test. From the ultrasonic velocities propagating along the relative directions to the rolling direction, CODF(crystallite orientation distribution function) can be measured and ODC's(orientation distribution coefficients) has some correlations with the plastic anisotropy. In this study the correlations between the plastic anisotropy and ODC's of the cold rolled steel sheet were measured. From the results of ultrasonic velocity measurements the average normal anisotropy, \bar{r} and the average planar anisotropy, Δr could be predicted within the accuracy of ± 0.082 and ± 0.096 , respectively. Acoustic resonance method was applied to measure the ultrasonic velocities and EMAT's were used for generating and detecting the ultrasonic waves.