

## 초음파를 이용한 용접잔류응력 측정기술

이 승 석\* · 안 봉 영\*

### Welding Residual Stress Measurement by Ultrasonic Method

S. S. Lee and B. Y. Ahn

**Abstract** Welding residual stress was measured by ultrasonic birefringence technique. Acoustoelastic constant was taken by averaging the values in the literature. The initial birefringence from preferred orientation of grains was measured. The EMAT transducers were used to remove couplant effect. The results show that the distribution and magnitude of welding residual stress from ultrasonic measurement are in good agreements with those from semi destructive hole drilling measurement.

#### 1. 서 론

용접구조물에 있어서 잔류응력은 용접물의 수축및 변형을 생기게 하고 취성과파괴 및 응력부식균열이 매우 일어나기 쉽게 한다. 이 용접으로 인한 잔류응력문제를 해결하기 위해서는 잔류응력이 용접부위에 어떻게 분포하고 있는지를 알 필요가 있다. 잔류응력 측정방법은 크게 나누어서 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 나눌 수 있다. 실제 현장에서 용접구조물에 어떠한 손상도 가해지지 않을 경우에 용접으로 인한 잔류응력분포를 알기 위해서는 비파괴적인 방법을 택할 수 밖에 없다. 비파괴적으로 잔류응력을 측정하는 방법들<sup>1)</sup>에는 X-ray 회절, neutron 회절, 초음파, 자기적 방법이 고려될 수 있다. X-ray 회절은 현재까지

개발된 비파괴적으로 잔류응력을 측정하는 방법들 중 가장 신뢰도가 높은 방법이라고 할 수 있으나 측정부위의 표면상태가 매우 좋아야 하기 때문에 지루한 폴리싱 작업이 요구되며 측정부위도 표면부위에 한정된다. 중성자 회절 방법은 재료내부에 존재하는 응력을 측정할 수 있으나 아주 값비싼 중성자 발생원이 필요하다. Barkhausen noise를 이용한 자기적 방법은 상업적 기기가 개발되어 판매되고 있으나 측정대상체가 가지고 있는 열적·기계적 이력과 똑같은 재료로써 보정실험이 필요하고 측정부위 역시 표면부위에 한정된다. 따라서 측정대상체에 전혀 손상을 미치지 않고 값싸고 빠르게 용접으로 인한 내부잔류응력을 측정할 가능성이 있는 방법은 오직 초음파방법이라고 할 수 있다. 초음파를 이용하여 잔류응력을 측정하는 기본

\* 한국표준연구소 비파괴시험연구실  
접수: 1989년 10월 4일

원리는 초음파속도가 응력과 함수관계에 있다는 것이다.

초음파 속도를 이용하여 잔류응력을 측정하는 여러 가지 방법이 개발되고 있는데, 본 연구에서는 birefringence technique<sup>2)</sup>이라는 방법을 사용하여 용접잔류응력을 측정하였다. 이 birefringence technique이라는 방법은 파의 전파방향은 같고 파의 방향이 서로 90°를 이루는 두개의 횡파를 이용하는 방법이다. 이와같이 두개의 파를 사용할 경우에는 두파가 같은 초음파 경로를 가지고 있고, 우리가 잔류응력을 알기 위하여 측정하는 것은 두파사이의 속도 차이이므로, 하나의 파를 사용할 경우에 비해서 측정 정확도를 향상시킬 수도 있고 시편 두께를 알 필요성도 배제된다.

## 2. 이 론

Acoustoelasticity는 파의 속도가 응력에 의존한다는 점에 있어서 photoelasticity와 유사하나 음파의 특성상 분극방향이 세방향이므로 photoelasticity 보다 복잡하다. Murnaghan<sup>3)</sup>은 응력이 없는 상태에서는 탄성적으로 등방적인 고체가 응력을 받게되면 이방적인 특성을 보인다는 것을 밝혔다. Hughes와 Kelly<sup>4)</sup>는 Murnaghan의 finite strain formulation을 사용하여 응력을 받았을 때의 응력에 따라 변하는 초음파 속도를 나타내는 7가지의 식을 유도했다. 이 7개의 식을 Fig. 1과 같은 좌표계에서 살펴보면 다음과 같다.

$$\rho V_{ep}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{P}{3K_0}(7\lambda + 10\mu + 6\ell + 4m) \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho V_{sp}^2 = \mu - \frac{\rho}{3K_0}(3\lambda + 6\mu + 3m - n/2) \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho V_{ex}^2 = \lambda + 2\mu + \frac{T}{3K_0} \left( \frac{\lambda + \mu}{\mu}(4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2\ell \right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\rho V_{ey}^2 = \lambda + 2\mu - \frac{T}{3K_0} (2\lambda/\mu[\lambda + 2\mu + m] - 2\ell) \dots\dots\dots (4)$$

$$\rho V_{sx}^2 = \mu + \frac{T}{3K_0} (4\lambda + 4\mu + m + \lambda n/4\mu) \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho V_{sy}^2 = \mu + \frac{T}{3K_0} (\lambda + 2\mu + m + \lambda n/4\mu) \dots\dots\dots (6)$$

$$\rho V_{sz}^2 = \mu - \frac{T}{3K_0} (2\lambda - m + n/2 + \lambda n/2\mu) \dots\dots\dots (7)$$

여기서  $\rho_0$ 는 밀도이고  $V$ 는 초음파 속도,  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 2차 탄성계수인 Lamé 상수이고 1, m, n은 Murnaghan<sup>3)</sup>이

정의한 3차 탄성계수이다. P는 hydrostatic pressure를 나타내고 T는 일축 인장력이며  $K_0$ 는 체적상수인  $1/3(3 + 2\mu)$ 이다. 첫번째 subscript 1은 종파를 s는 횡파를, 두번째 subscript인 p는 hydrostatic pressure를 나타내고 x, y, z는 각 방향으로의 일축 인장력을 나타낸다. 식(1)~(7)로부터 우리는 일축응력 또는 hydrostatic 압력이 걸려 있을때 초음파 속도와 응력과의 관계를 알 수 있다.

식(6)과 (7)을 살펴보면, 응력이 없는 상태에서는  $\rho_0 V^2 = \mu$ 가 되어 두파의 속도가 같다. 하지만 응력이 존재할 경우에는 birefringence 효과에 의하여 두파의 속도가 달라지게 되며,

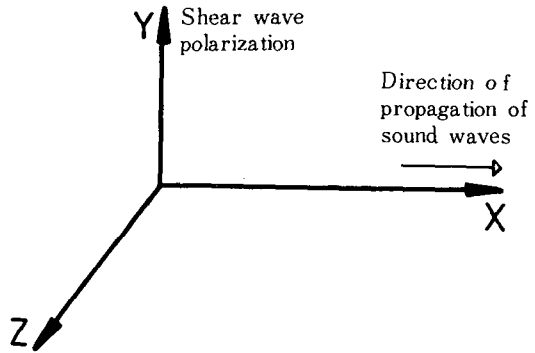


Fig. 1 The coordinates of the system.

$$\rho_0 (V_{sy}^2 - V_{sz}^2) = \frac{T}{4\mu}(4\mu + n) \dots\dots\dots (8)$$

식(8)을 다소 변형시켜서

$$\frac{V_{sy} - V_{sz}}{V_s} = \frac{T}{8\mu^2}(4\mu + n) \dots\dots\dots (9)$$

이때  $V_{sy}$ 와  $V_{sz}$  모두 전파방향은 응력방향과 수직을 이루며 분극방향은  $V_{sy}$ 일 경우에는 응력방향과 평행하고  $V_{sz}$ 일 경우에는 응력방향과 수직이다. 따라서  $V_{sy}$ 를  $V_{11}$ 로 표시하고  $V_{sz}$ 로 표시하면,

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{11} - V_{12}}{V_s} = \frac{T}{8\mu^2}(4\mu + n) \dots\dots\dots (10)$$

여기서 우리는 acoustoelastic 상수인  $K_T^V$ 를 정의할 수 있다.

$$K_V^T = \frac{d\Delta V}{dT} = \frac{V_s}{8\mu^2}(4\mu + n) \dots\dots\dots(11)$$

$K_V^T$ 의 단위는 cm/nsec · MPa가 된다. 응력에 대한 두파의 속도 차이 대신, 응력에 대한 두 파의 전파시간의 차이로써 acoustoelastic 상수를 표시하면

$$K_t^T = d\Delta t / (dT \cdot L) \dots\dots\dots(12)$$

여기서 L은 전파 경로가 되며 단위는 nsec/cm · MPa이다.  $K_V^T$ 와  $K_t^T$  사이의 관계는

$$K_V^T = \left(\frac{L}{V}\right)^2 K_t^T = V^2 K_t^T \dots\dots\dots(13)$$

이 birefringence 기술의 큰 장점은 자체보정 된다는 점이다. 즉 두 파의 속도차이만을 측정함으로써 길이, 온도, 측정기 등에서 발생할 가능성이 있는 오차를 줄일 수 있다. 이 방법을 사용하여 응력을 측정하는데 있어서 가장 큰 문제점은 응력이 전혀 없는 상태에서 두파 사이의 속도가 차이가 난다는 것이다. 이것을 initial birefringence라고 하며 이 양이 우리가 응력을 부가했을 경우나 잔류응력이 존재했을 때 발생하는 birefringence의 양과 크기가 같거나 또는 크다는 점이다. 이 initial birefringence의 발생 원인은 재료내에 존재하는 입자들이 어떤 특정한 방향으로 배열됨으로써 발생하는 탄성적인 이방성 때문이다. 따라서,

$$\Delta V_T = \Delta V_0 + K_V^T \sigma \dots\dots\dots(14)$$

여기서  $\Delta V_0$ 는 응력이 존재하지 않을 경우의 두파 사이의 속도차인 initial birefringence라고 하며  $\Delta V_T$ 는 응력이 존재할 경우의 두파사이의 속도차이다.  $\Delta V_0$ 와  $K_V^T$ 를 안다고 한다면 식 (14)를 이용하여 응력을 구할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3-1. 용접시편 제작

용접대상체의 크기가 잔류응력에 미치는 효과<sup>5)</sup>를 고려하여 다음과 같이 용접시편을 제작하였다. 용접모

재는 일본 Sumitomo 회사 제품의 SLT 37로써 이는 JIS G3126과 같으며 저온 압력용기용 강판으로 사용되는 재료이다. 그 기계적 성질을 표 1에 나타내었다. Filler 재료는 일본 Sumikin사 제품인 W-36/BL-55를 사용하였으며 그 기계적 성질을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Mechanical Properties

| Materials  | .2 YS<br>kg f/mm <sup>2</sup> | T. S<br>kg f/mm <sup>2</sup> | Elong.<br>(%) | Impact Values at-60°C<br>(Joule) |
|------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|----------------------------------|
| SLT-37     | 56                            | 65                           | 23            | 228                              |
| W-36/BL-55 | 49.5                          | 57.4                         | 25.8          | 164                              |

시편은 폭 190mm, 길이1000mm, 그리고 두께가 29mm인 강판 2개를 SAW로써 맞대기 용접시켰다. 시편은 두개 제작하였는데 하나는 As-welded 상태의 시편이고 다른 하나는 stress relief annealing 시킨 시편이다. 두 시편 모두 용접하기 전에 가공작업과 600°C로 1시간 열처리 시켰으며 stress relief annealing 시킨 시편은 용접후 600°C로 1시간 응력제거 열처리 시켰다. 용접 변형 방지를 위하여 strong back을 tack welding 시켰으며 용접끝 부분의 결함 생성을 방지하기 위하여 tap piece를 부쳤다. 용접이 다 끝난후 strong back과 tap piece를 gas 절단시켰다. 제작된 용접시편의 형상은 Fig. 2와 같다.

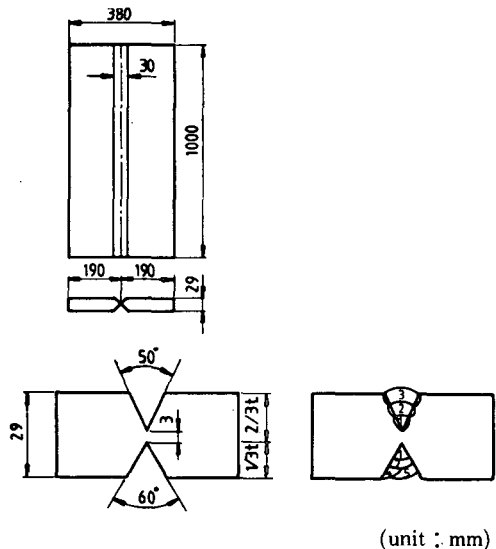


Fig. 2 Configuration of the specimen.

3-2. 잔류응력 측정 및 실험 결과

초음파를 이용하여 잔류응력을 측정하는데 있어서 실험적으로 중요한 것은 초음파 속도를 매우 정밀하게 측정할 수 있어야 된다. 표 2는 본 실험에 필요한 acoustoelastic 상수를 계산하기 위하여 논문에 발표된 여러가지 강에 있어서 밀도, 2차탄성계수인  $\mu$ 와 3차 탄성계수  $n$  및  $\text{cm/sec}(\frac{dy^n}{cm^2})$  단위로 표시된 acoustoelastic 상수  $K_I$ 와  $\text{nsec/cm}(\frac{dy^n}{cm^2})$  단위로 표시된 acoustoelastic 상수  $K_I'$ 를 요약 정리한 것이다. 본 실험에 있어서 calibration 실험은 하지 않았기 때문에 표 2에서 구한 acoustoelastic 상수값을 평균하여 본 실험에 적용하였다. 평균값은  $-2.225 \times 10^{-9} \cdot \text{nsec/cm}(\frac{dy^8}{cm^2})$ 을 얻었다. 본 실험에 사용한 재료의 acoustoelastic 상수가 표 2의 범위내에 존재한다고 가정할 때 위 평균값을 사용하면 오차는 최대 16%가 될 수 있다. 본 실험에 있어서 초음파 전파거리는 5.8cm이므로 1 kgf/mm<sup>2</sup>의 잔류응력이 존재할 때 약 1.3nsec 정도의 속도차가 생기게 된다. 따라서 정밀하게 초음파 속도를 측정하려면 할수록 응력측정의 sensitivity는 증가하게 된다. 초음파 발생 및 수신은 EMAT를 사용하였다. EMAT는 coup-

Table. 2 Elastic constants and Acoustoelastic constants for the selected steel

| Material                                 | density<br>kg/m <sup>3</sup> | $\mu$<br>10 <sup>11</sup><br>dyn/cm <sup>2</sup> | $n$<br>10 <sup>11</sup><br>dyn/cm <sup>2</sup> | $K_I$<br>10 <sup>7</sup> cm/sec · 10 <sup>-9</sup> nsec/cm<br>( $\frac{dy^n}{cm^2}$ ) | $K_I'$<br>( $\frac{dy^n}{cm^2}$ ) |
|--|------------------------------|--|--|---|-----------------------------------|
| Steel(rail road),<br>New <sup>6)</sup>   | 7.800                        | 7.99   | -71.4  | -2.464  | -2.406                            |
| Steel(Rail road),<br>1907 <sup>6)</sup>  | 7.799                        | 8.24   | -72.4  | -2.373  | -2.247                            |
| Steel(Hecla37,<br>0.4% C) <sup>7)</sup>  | 7.823                        | 8.21   | -70.8  | -2.227  | -2.121                            |
| Steel(Hecla17,<br>0.6% C) <sup>7)</sup>  | 7.825                        | 8.20   | -66.8  | -2.041  | -1.944                            |
| Steel(Hecla<br>138A) <sup>7)</sup>       | 7.843                        | 8.19   | -70.8  | -2.293  | -2.198                            |
| Steel(Rex535-<br>Ni steel) <sup>8)</sup> | 7.065                        | 7.80   | -73.0  | -2.855  | -2.591                            |

lant가 필요 없는 비접촉 탐촉자이므로 couplant로 인한 오차를 보정해 줄 필요성이 있는 정밀 측정에 아주 유리하다. 본 실험에 사용한 EMAT는 spiral coil과 Sm-

Co 영구자석을 이용하여 Lorentz force를 이용한 회로를 만들었다. Spiral coil의 크기는 지름 1.4cm 크기였으며, Sm-Co 영구자석은 5×10×15mm<sup>3</sup> 크기로서 15mm 방향으로 분극되어 있다. 2개의 영구자석을 사용하여 spiral coil에 수직방향으로 자기유도가 되게하여 결국 EMAT의 크기는 1×1cm<sup>2</sup>이 된다. Fig. 4에 측정 system을 도식적으로 나타내었다. Pulse generator를 사용하여 본 연구소에서 제작된 pulser를 trigger 시켜서 pulser안에 있는 캐퍼시터에 모아져 있는 에너지를 순간적으로 방전시켜서 폭이 좁고 진폭이 큰 pulse를 발생시켜 이것이 EMAT transmitter를 구동시켰다. 발생된 초음파의 주파수는 pulser안에 있는 캐퍼시터와 저항과 코일로 표시될 수 있는 EMAT 사이의 공진회로에서 결정되며 본 실험에서는 400kHz 주파수를 갖는 초음파를 발생시켰다.

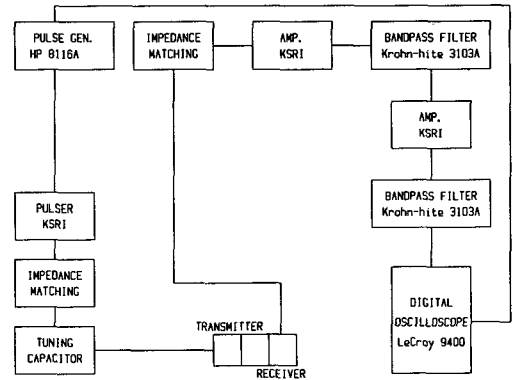


Fig. 3 The block diagram for the velocity measurement system using Lorentz force EMATs.

시편내를 통과한 초음파는 수신용 EMAT에서 수신되어 증폭되어 filtering되어지며 sampling rate 100 MHz를 갖는 digital oscilloscope를 사용하여 속도를 측정하였다.

Fig. 4는 실제 응력을 측정할 재료에서 Fig. 3의 system을 사용하여 측정한 결과이다. 여기서 두개의 화살표(↓, ↑) 사이의 간격을 측정하여 실험값을 얻었다. 화살표 ↓는 초음파가 실험시편내를 한번 왕복한 후에 수신 EMAT로써 잡은 초음파 pulse의 두번째 사이클의 최고 지점을 나타내며 화살표 ↑는 초음파가 실험시편

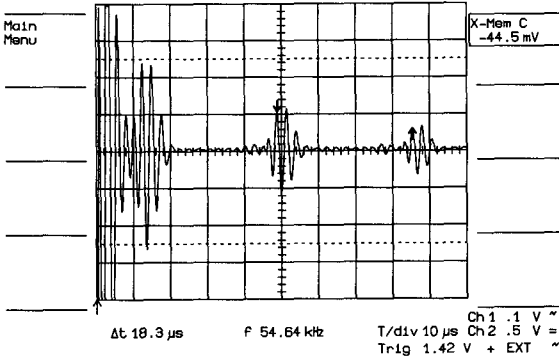


Fig. 4 The actual signal obtained from the velocity measurement system.

내를 두번 왕복한 후에 수신 EMAT로써 잡은 초음파 pulse의 두번째 사이클의 최고 지점을 나타낸다. Digital oscilloscope로써 0.2nsec 간격씩 화살표를 움직이는 것이 가능하며 10 nsec씩 sampling 된 간격사이를 확대시킨 후 눈으로 확인할 수 있는 amplitude가 제일 높은 지점에 화살표를 위치시켰다. 이 system으로써 최소한 5 nsec 이하의 정밀도를 가질 수 있었다. Initial birefringence는 용접모재의 경우 용접을 하지 않은 시편을 사용하여 측정하였고 용접부위의 Initial birefringence는 응력제거 열처리한 용접시편의 용접부위가 완전히 응력이 풀렸다는 가정하에서 그 부위를 측정하여 Initial birefringence를 구하였다. 식(11)과 (14)를 이용하여

$$\left(\frac{V_{t1}-V_{t2}}{V}\right)_{total} = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{total} = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)_0 + \frac{T}{8\mu^2}(4\mu+n) \dots \dots \dots (15)$$

실제로 우리가 측정하는 것은 두 횡과 사이의 시간 차이 이므로 식(15)를 조금 변화시키면

$$\left(\frac{t_L-t_H}{t}\right)_{total} = \left(\frac{\Delta t}{t}\right)_{total} = \left(\frac{\Delta t}{t}\right)_0 + \frac{T}{8\mu^2}(4\mu+n) \dots \dots \dots (16)$$

용접모재일 경우 initial birefringence  $\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_0 = 3.04 \times 10^{-3}$ , 용접부위의 initial birefringence  $\left(\frac{\Delta t}{t}\right)_0 = -4.52 \times 10^{-3}$ 였다. 한편 표 2에서 평균하여 얻은 acoustoelastic 상수  $\left(\frac{4\mu+n}{8\mu^2}\right) = -0.073 \text{ dyn/cm}^2$ , 따라서 용접모재일 경우

$$T = -\frac{1}{0.073} \left(\frac{\Delta t}{t} - 3.04 \times 10^{-3}\right) \text{ dyn/cm}^2 \dots \dots \dots (17)$$

용접부위에 있어서도 용접모재와 같은 acoustoelastic 상수값을 사용하여

$$T = -\frac{1}{0.073} \left(\frac{\Delta t}{t} + 4.52 \times 10^{-3}\right) \text{ dyn/cm}^2 \dots \dots \dots (18)$$

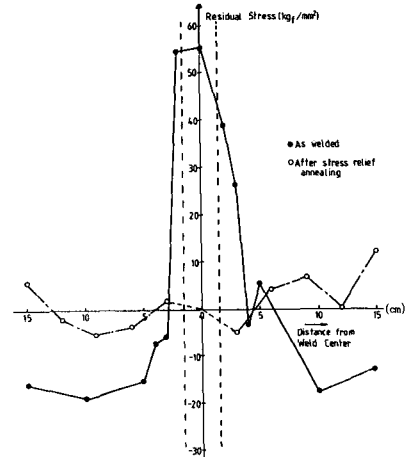


Fig. 5 Distribution of residual stress by ultrasonic measurement.

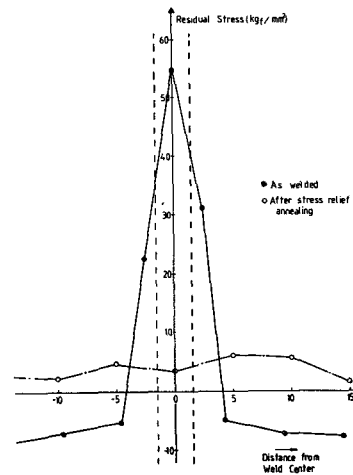


Fig. 6 Distribution of residual stress by blind hole measurement.

Fig. 5에서 나타낸 각 위치별로, 용접선과 평행한 방향으로 분류되는 횡파와 용접선과 수직된 방향으로 분류되는 횡파 사이의 전파시간을 측정하여 식(17)과 (18)을 이용하여 잔류응력을 구한 결과가 Fig. 5이다. 초음파로 잔류응력을 측정할 후 현재 많이 사용되고 있는 Blind hole technique로 잔류응력을 측정할 결과 Fig. 6이다.

#### 4. 결 론

Fig. 5와 Fig. 6을 비교하여 본다면 as welded 상태의 시편에서 Blind hole technique로 측정할 잔류응력 분포와 초음파 방법으로 측정할 잔류응력 분포가 유사한 형태를 보여준다. 초음파 방법으로 잔류응력을 측정할 것이 압축 잔류응력이 존재하는 영역에서 보다 큰 값을 보이고 있지만 인장 잔류응력이 분포하는 범위라든가, 최고 인장잔류응력의 크기가 거의 같다. 응력제거 열 처리시킨 시편일 경우에도 초음파를 사용하여 잔류응력을 측정할 결과와 Blind hole technique로 잔류응력을 측정할 결과가 비슷한 양상을 보인다. Blind hode technique로 측정할 방법이 응력의 분포가 균일한데 반하여 초음파 방법의 경우에는 다소 fluctuation이 심하다. Birefringence를 이용하여 잔류응력을 측정할 때 기본적

으로 내재되어 있는 오차와 측정 system상에서 발생할 수 있는 오차를 고려하여 볼 때 초음파를 이용하여 측정된 잔류응력 분포와 Blind hole technique을 이용하여 측정된 잔류응력 분포와의 유사성은 대단히 좋다고 할 수 있다.

#### References

1. M. James, O. Buck., Crit. Rev. Solid State Mat. Sci. Vol. 9, 1980, pp 62~105.
2. N. N. Hsu., Exp. Mech. May 1974, pp 169~176.
3. T. D. Murnaghan., Finite Deformation of an Elastic Solid, John Wiley and Sons, Inc., New York 1951.
4. D. S. Hughes, J. L. Kelly, Phy. Rev. Vol. 92, 1953, pp 1145~1149.
5. K. Masubuchi., Analysis of Welded Structures, Pergamon Press 1980.
6. D. M. Egle, D. E. Bray., J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 60, 1976, pp 741~744.
7. R. T. Smith, R. Stern, R. W. B. Stephens., J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 40, 1966, pp 1002~1008.
8. D. I. Crecraft., J. Sound Vib. Vol. 5, 1967, pp 173~192.