

研 究 論 文
---------

大韓熔接學會誌  
第8卷第4號 1990年 12月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 8, No. 4, Dec., 1990

## AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구(II)

최병길\* · 박영조\* · 이택순\*\* · 전상윤\*\*\*

### A Study on the Residual Stress Measurements by Hole Drilling Method using Air-abrasive Jet Machine(II)

B. K. Choi\*, Y. J. Park\*, T. S. Lee\*\*, S.Y. Cheon\*\*\*

**Key Words :** Residual Stress(잔류응력), Hole Drilling Method(구멍뚫기 방법), Size Effect of Specimen(시편크기 효과), Hole Eccentricity(구멍편심), Measurement Error(측정오차)

#### Abstract

Lots of research works have been done to improve the accuracy of the hole drilling method to measure residual stress by many investigators. In this study, first, size effect of specimen was analyzed based on the solution of hole in a strip under tension. If the ratio of hole diameter to the strip width is less than 0.2, the stress distribution around hole may be given from the solution of hole in an infinite plate. Second, the residual stress above  $0.6\sigma_y$  (yield stress) may be measured less than the actual stress by 10-15 percent. Third, eccentricity of hole relative to the rosette center effects on the accuracy of residual stress measurements by 10 percent. The error due to eccentricity of hole can be corrected by the iteration method or the direct method.

#### 1. 서 론

용접부, 세라믹-금속 접합부, 기타 열이력이 수반되

는 구조물이나 기계 부품에는 잔류응력이 생성된다. 이러한 잔류응력은 저온균열, 취성파괴 및 피로파괴 등 구조물의 기계적 거동에 영향을 미치기 때문에, 잔

\* 정회원, 한국해사기술연구소

\*\* 정회원, 영남대학교 정밀기계과

\*\*\* 학생회원, 영남대학교 대학원

류응력의 실험적 측정이론과 기술이 꾸준히 개발되어 왔다. 잔류응력의 실험적 측정시 응력 이완법중의 하나인 구멍뚫기 방법(HDM, Hole Drilling Method)에서 응력의 세기, AJM(Air-abrasive Jet Machine, 공기분사 연마기)에 의한 구멍의 모양과 깊이변화 및 구멍지름의 측정오차 등이 본 연구의 첫번째 보고<sup>1)</sup>에서 다루어 졌다.

본 연구에서는 길이 방향으로 긴 유한폭 평판(strip)에 관통 구멍을 뚫었을 때를 가정하여 시편크기 효과, 항복응력 대비 여러가지의 응력수준에서 잔류응력 계측, 구멍중심과 로제트 게이지의 중심이 일치하지 않을 때의 잔류응력 측정에 관한 것이 검토되었다.

본 연구결과 시편의 최소폭은 구멍직경의 5배 이상이어야 하며, 항복응력의 0.6배 이상의 수준에서 실제의 응력보다 10-15% 정도 낮게 측정되고 있다. 또한 구멍의 편심은 잔류응력 계측에 심각한 영향을 미치지 않으나, 계측정도를 약간 떨어뜨리고 있다. 편심구멍에 의한 오차는 반복법 또는 직접법등을 통해 보정할 수 있다.

2. 유한폭 및 무한판에서 응력분포

유한폭의 평판 중심에 구멍을 뚫었을 때의 응력분포는 무한판에 구멍을 뚫었을 때의 응력 분포와 다를 수 있다. Fig.1에서 길이 방향으로 충분히 긴 유한폭의 평판이 길이 방향으로 인장하중을 받을때, 응력함수는 2중 조화함수(biharmonic function)로 나타낼 수 있다<sup>1,2)</sup>.

그런데 응력 함수는 식(1), (2) 및 (3)으로 표시되는 경계조건을 만족시켜야 하며,

$$\sigma_r = \tau_r = 0, \text{ at } r = a \tag{1}$$

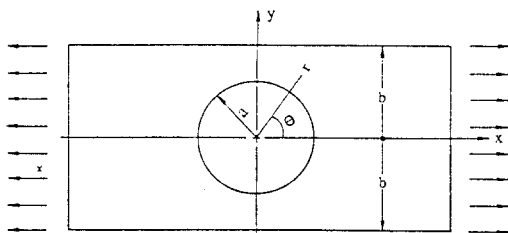


Fig. 1 Hole in the strip of finite width and of infinite width under tension

$$\sigma_x = \text{applied stress}, \sigma_y = \tau_{xy} = 0 \text{ for } x = \pm\infty \tag{2}$$

$$\sigma_y = \tau_{xy} = 0, \text{ at } y = \pm b \tag{3}$$

식(1) 및 (2)는 무한판에 구멍을 뚫었을 때의 경계조건이며 식(3)은 유한폭에 기인하는 경계조건이다. 식(1) 및 (2)를 만족시키는 응력함수로 부터 도출되는 응력은

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \sigma_x [(1 - \rho^2) + (1 - 4\rho^2 + 3\rho^4) \cos 2\theta] \tag{4a}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \sigma_x [(1 + \rho^2) - (1 + 3\rho^4) \cos 2\theta] \tag{4b}$$

단,  $\rho = a/r$

식(4a) 및 (4b)로부터, 직각 3축형 로제트 스트레인 게이지(본 연구에서는 미 MM Group사의 TEA-06-062RK-120)의 각각의 게이지가 계측한 스트레인을 알고 있을때 잔류응력을 계산할 수 있는 식이 유도된다<sup>3)</sup>.

$$\sigma_x, \sigma_y = \frac{E}{2A} (\epsilon_3 + \epsilon_1) \pm \frac{E}{2B} (\epsilon_3 - \epsilon_1) \cos 2\theta \tag{5}$$

단,  $\sigma_x, \sigma_y$  : principal stresses.

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  : measured rosette strains

$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \right)$  ; angle between

$\sigma_x$  - direction and gage#3.

$$A = -(1 + \nu)\rho^2$$

$$B = (-4\rho^2 + 3(1 + \nu)\rho^4)$$

$\nu$  : Poisson's ratio

만일 직각 3축형 로제트 스트레인 게이지의 중심과 구멍중심이 일치되지 않고 편심 되었을때, 직각 3축형 로제트 스트레인 게이지의 각각의 게이지 그리드(Gage grid) 중심에서 응력 성분은

$$\sigma_{r,i} = \frac{1}{2} \sigma_x [(1 - \rho_i^2) + (1 - 4\rho_i^2 + 3\rho_i^4) \cos 2\theta_i] \tag{6a}$$

$$\sigma_{\theta,i} = \frac{1}{2} \sigma_x [(1 + \rho_i^2) - (1 + 3\rho_i^4) \cos 2\theta_i] \tag{6b}$$

단,  $i : i = 1, 2, 3$ , 3축형 로제트 스트레인 게이지의 각각의 게이지

$\rho_i$  : 구멍중심에서 개별 게이지의 그리드 중심까지의 거리

$\theta_i$ : 주응력  $\sigma_x$ 와 각각의 게이지가 이루는 각

구멍이 편심된 경우 식(5)처럼 간결하게 표시되지는 않아도 편심거리 S와 편심각  $\alpha$ 를 이용하여 직접 나타낼 수 있다<sup>4)</sup>. 또한 반복법을 사용하여 충분히 정밀하게 주응력을 계산할 수 있다<sup>5)</sup>. 식(4a), (4b) 또는 식(6a), (6b)는 무한판에 구멍을 뚫었을 경우 구멍주위의 응력분포를 나타낸다. 식(3)으로 표시되는 유한폭과 관련한 경계조건인 식(3)을 만족시키는 2중조화함수는 식(1)로 표시되는 경계조건을 만족시키지 않기 때문에, 식(1), (2) 및 (3)을 만족시키는 응력함수는 급수전개의 형태를 갖는다. 이에 따라 유한폭에서의 구멍주위 응력도 급수형태를 갖는다<sup>1,2)</sup>.

$$\begin{aligned} \sigma_r = \sigma_x \{ & \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta) + 2m_0 - d_0 \left(\frac{b}{r}\right)^2 + 2 \sum_{n=1} \\ & [n(2n+1)d_{2n} \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^{2n+2} + (n+1)(2n-1) \\ & e_{2n} \cdot \left(\frac{b}{r}\right)^{2n} + n(2n-1)l_{2n} \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^{2n-2} + (n- \\ & 1)(2n+1)m_{2n} \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^{2n}] \cos 2n\theta \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = \sigma_x \{ & \frac{1}{2}(1 - \cos 2\theta) + 2m_0 + d_0 \left(\frac{b}{r}\right)^2 \\ & - 2 \sum_{n=1} [n(2n+1)d_{2n} \cdot \left(\frac{b}{r}\right)^{2n+2} + (n-1) \cdot \\ & (2n-1)e_{2n} \cdot \left(\frac{b}{r}\right)^{2n} + n(2n-1)l_{2n} \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^{2n-2} \\ & + (n+1)(2n+1)m_{2n} \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^{2n}] \cos 2n\theta \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} = -\sigma_x \{ & \frac{1}{2} \sin 2\theta + 2 \sum_{n=1} [n(2n-1) \cdot \\ & (l_{2n} \cdot \left(\frac{r}{b}\right)^{2n-2} - \left(\frac{b}{r}\right)^{2n} \\ & + n(2n+1) \cdot (m_{2n} \left(\frac{r}{b}\right)^{2n} \\ & - d_{2n} \cdot \left(\frac{b}{r}\right)^{2n+2})] \sin 2n\theta \} \end{aligned} \quad (7)$$

구멍 중심으로 부터 r 만큼 떨어진 스트레인게이지(single strain gage)가 관통형 구멍을 뚫었을 때 게이지의 그리드 중심에서 읽는 스트레인은

$$\epsilon_{RR} = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) - \epsilon_0^* \quad (8)$$

단,  $\epsilon_0^*$ : 구멍이 없는 상태에서 외력( $\sigma_x$ ) 작용할 때 스트레인 게이지가 측정하는 스트레인

혹은

$$\begin{aligned} \frac{E\epsilon_{RR}}{\sigma_x} = & \{ 2(1-\nu)m_0 - (1+\nu)d_0 \left(\frac{b}{r}\right)^2 \\ & + 2(1+\nu) \sum_{n=1} n(2n+1)d_{2n} \left(\frac{b}{r}\right)^{2n+2} \cdot \\ & \cos 2n\theta + 2 \sum_{n=1} \{ (n+1)(2n-1) + \nu \\ & (n-1)(2n-1) \} e_{2n} \cdot \left(\frac{b}{r}\right)^{2n} \cos 2n\theta \\ & + 2 \sum_{n=1} \{ n(2n-1) + \nu \cdot n(2n-1) \} \\ & l_{2n} \left(\frac{b}{r}\right)^{-2n+2} \cdot \cos 2n\theta + 2 \sum_{n=1} \{ (n-1) \\ & (2n+1) + \nu(n+1)(2n+1) \} m_{2n} \left(\frac{b}{r}\right)^{-2n} \\ & \cdot \cos 2n\theta \} \end{aligned} \quad (8)$$

단,  $d_0, m_0, d_{2n}, e_{2n}, l_{2n}, m_{2n}$ 은 구멍 반경/폭에 의해 결정되는 상수<sup>1,2)</sup>

Fig. 2는 식(8)에 의해 결정되는 유한폭인 경우의 변형률-응력 상수( $E\epsilon_{RR}/\sigma_x$ )를 무한폭인 경우의 변형률-응력 상수(식(4a) 및 (4b)로 부터 결정됨)로 나눈 값을 나타낸다. 또한 유한폭의 길이 방향으로 인장응력( $\sigma_x$ )이 작용할 때 각도  $\theta$ 는  $\sigma_x$ 와 이루는 각도를 나타내며, 3축형 로켓트 스트레인 게이지에서 각각의 게이지의 방향과 일치하는 방향이다. Fig. 2로 부터 관통형 구멍인 경우 구멍직경/평판폭의 비가 0.2 이하에서는, 10%의 오차범위내에서 무한폭에서 성립하는 이론식을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

한편 Rendler<sup>6)</sup>에 의하면, 구멍직경/평판폭의 비를 0.06으로 정하여 잔류응력을 측정했을 경우 시편의 크기 효과는 없었으나 구멍직경/평판폭의 비를 0.2까지 증가시켜 시편의 크기 효과를 연구하지는 않았다. 구멍직경/평판폭의 비를 0.2로 하고 막힌구멍에 의해 잔류응력을 측정할 때, 응력 집중계수가 관통 구멍의 것에 비하여 작을 것으로 예상된다. 따라서 그 비가 0.2이하인 막힌 구멍의

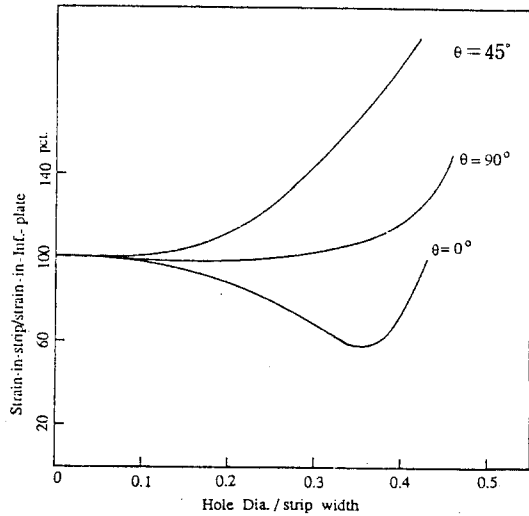


Fig. 2 Percentage of radial strains near a hole where the hole is in a strip and in an infinite plate

경우, 무한판에 근거한 변형률-응력상수를 실험오차(10%) 범위내에서 적용할 수 있다.

### 3. 실험재료 및 방법

#### 3.1. 실험재료

일반 기계 공작용 탄상 드릴링 머신 또는 다른 방법에 의해 구멍을 뚫을때 가공응력이 발생하며, 이 가공응력은 계측하고자 하는 잔류응력과 함께 이완된다. 한편 외팔보에 하중을 가할 때, 보에 발생하는 응력을 잔류응력으로 간주하고 구멍뚫기 방법에 의한 잔류응력 측정에 관하여 실험적으로 연구하였다.

본 실험에서 사용된 재료는 항복강도가 30kgf/mm<sup>2</sup>인 열간 압연 강판(SS41)이다. 시편은 2절에서 논한 유한폭에 의한 응력집중의 변화를 최소화하기 위해, 길이 340mm, 넓이 40mm, 두께 6mm의 치수로 하였다. 본 시편의 구멍직경/평판폭의 비는 0.05로서 시편의 크기 효과는 2절에서 기술한 바와 같이 무시할 수 있다.

준비된 시편은 압연, 절단 또는 기타 기계가공에 의한 잔류응력을 제거하기 위해 응력 풀림처리를 행하였다. 응력 풀림처리는 600°C에서 1시간 동안 유지한후, 전기로의 전원을 끊고 서서히 노

냉하였다. 응력 풀림처리를 하지 않은 시편에서 15kgf/mm<sup>2</sup>의 압축응력이 계측되었으나 위와 같은 열처리 후에는 0.5kgf/mm<sup>2</sup>이하의 인장 잔류응력이 계측되고 있다<sup>7)</sup>. 압축 응력은 시편재료의 열간 압연 과정에서 발생한 것으로, 위와 같은 응력 풀림처리를 통해 시편에 남아 있는 잔류응력은 없는 것으로 간주하였다.

본 실험에서 사용한 스트레인 게이지는 직각 3축형 로제트 스트레인 게이지로서, 구멍중심에서 게이지 중심까지 2.57mm이며 최대 구멍직경은 3.2mm까지 가능하다. 그러나 구멍직경은 2±0.2mm의 범위에서 잔류응력 계측 실험이 진행되었다.

#### 3.2. 실험방법

AJM에 의하여 외팔보 시편에 구멍을 뚫을때 노즐을 통과하는 공기압은 200g 이하의 힘으로 직각 3축형 게이지를 누르는 작용을 한다. 그러나 공기압에 의한 하중은 외팔보의 끝에 작용하는 외력에 비하여 매우 작고, 주의할 만한 외팔보의 상하 진동도 야기시키지 않는다. 따라서 본 실험에서는 외팔보에 하중을 가한 상태에서 AJM의 방법으로 구멍을 뚫었다.

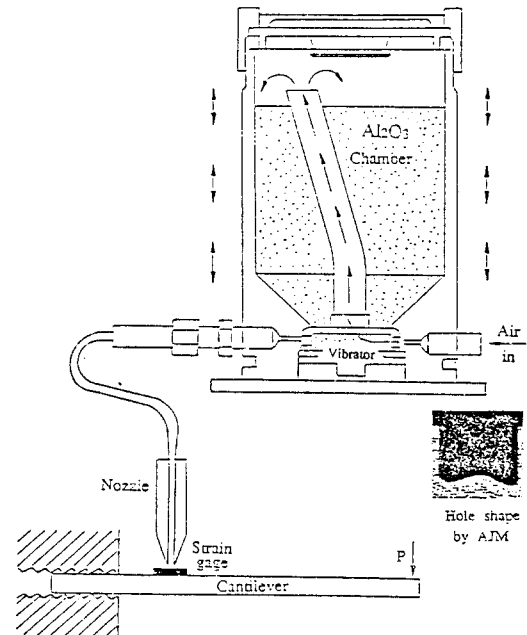


Fig. 3 Hole drilling on the rosette strain gage by air-abrasive jet machine

AJM은 압력 5kg/cm<sup>2</sup>의 공기와 입자크기 50미크론의 알루미늄을 혼합하여 노즐을 통해 분사할 때 가공 재료를 침식하여 결국 구멍을 뚫을 수 있게 되어 있다. 노즐은 로켓트 스트레인 게이지 중앙에 위치하도록 하며, 노즐과 외팔보의 표면간의 거리는 1mm를 유지하도록 하였다. 노즐의 직경은 1.6mm이며 구멍뚫기는 10~12min동안 지속하여 막힌구멍(blind hole)을 형성하였다. 이와 같은 조건하에서 구멍깊이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 구멍뚫기 시간에 비례하고 있다<sup>8)</sup>. 또한 Photo. 1에서 보는바와 같이 구멍뚫기 시간에 비례하여 원통형 구멍이 형성되어지며, 표면에서의 구멍직경과 바닥에서의 구멍직경의 비(구멍의 테이퍼)는 2% 범위내에서 서로 일치하고 있다.

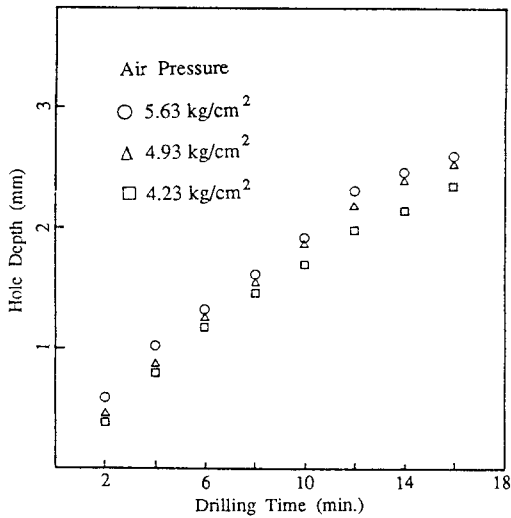


Fig. 4 Variation of hole depth over drilling time of AJM

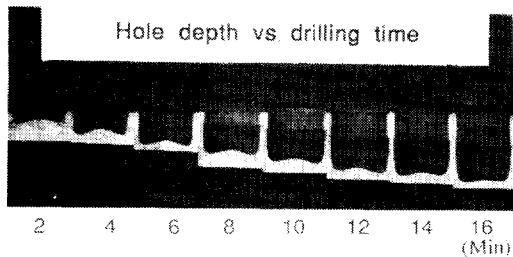
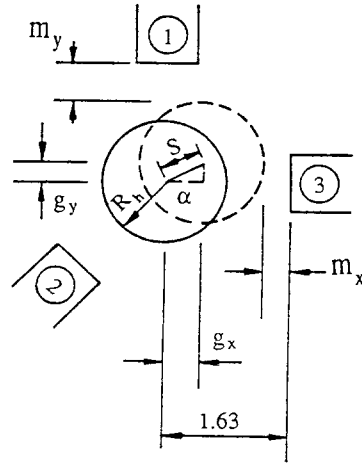


Photo. 1 Variations of hole shapes over drilling time of AJM

구멍의 편심은 스트레인 측정이 끝난 후에 저배율 광학현미경을 이용하여 Fig. 5와 같은 요령으로 실측하였다. 직각 3축형 게이지에서 #1 게이지와 구멍과의 거리를  $g_y$ , #3게이지와 구멍과의 거리를,  $g_x$ 로 표시하여 계측하면, 편심거리 S와 편심각  $\alpha$ 는

$$S = \{(1.63 - g_x - a)^2 + (1.63 - g_y - a)^2\}^{0.5}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(g_y/g_x) \tag{9}$$



$$S_x = (1.63 - m_x) - R_h$$

$$S_y = (1.63 - m_y) - R_h$$

Fig. 5 Measurement of hole eccentricity

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1. 응력 수준에 따른 잔류응력 측정

외팔보 시편에 하중을 가하여, 스트레인 게이지 부착 위치에서 굽힘응력(잔류응력으로 대체되는 응력)을 서로 다른 수준으로 변화시킬때, 이완되는 스트레인을 식(5)에 의거 잔류응력을 계측하였다. Fig. 5는 가로축에 굽힘응력을 나타내고 세로축에 구멍을 뚫어 계측되는 응력(계측된 잔류응력)을 나타내고 있다.

Fig. 5에 의하면 잔류응력이 항복응력의 60% 수준(18kgf/mm<sup>2</sup>) 이상에서 실제응력보다 10-15%

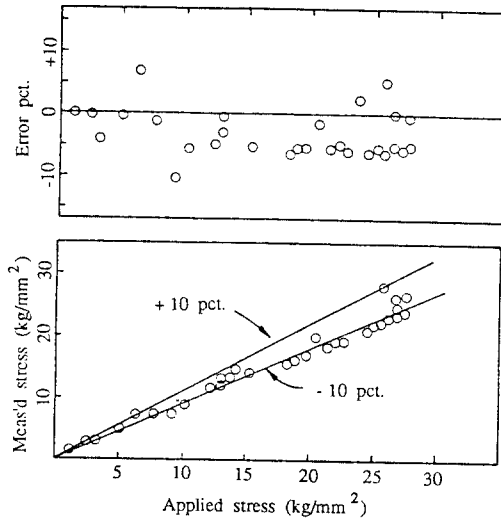


Fig. 6 Measurement of residual stress at the various level of applied stress

정도 낮게 계측되고 있다. 낮게 계측된 값을 응력으로 표시하면 2-4kgf/mm<sup>2</sup>이다. 낮게 계측된 것은 첫째 소성역 발생에 기인하는 것으로 믿어진다. 식(4b)에 의하면 구멍 가장 자리의 원주 방향 응력은 공칭 응력의 3배까지 될 수 있기 때문에, 잔류응력이 10kgf/mm<sup>2</sup>이면 구멍가장자리에 부분적으로 소성역이 발생한다. 재료의 소성적 거동은 구멍에 의한 스트레인의 이완을 둔화시키기 때문에, 구멍주위의 소성역이 넓어질수록 잔류응력은 낮게 평가된다. Beany<sup>8)</sup>에 의하면 구멍의 직경이 작을수록 소성에 의한 영향이 크며, 2mm 직경의 구멍에서 소성역 발생에 의하여 약 10%의 계측오차가 예상된다. 둘째 낮게 평가되는 요인은 본 실험에서 외팔보를 사용하였기 때문에, 구멍이 깊어질수록 구멍 바닥면 상의 굽힘응력은 직접적으로 낮아진다. 그러나 구멍깊이를 구멍직경의 0.2배(구멍깊이 0.4mm에 상당)까지 뚫었을때, 이완되는 스트레인은 충분한 길이에서의 것에 비하여 약 50-60%에 이른다. 따라서 본 실험에서 외팔보의 두께가 6mm인점을 고려하면 길이 방향으로 응력구배에 의하여 낮게 평가되는 양은 소성역 발생에 의하여 야기되는 낮은 계측값에 비하여 작을 것으로 판단된다. 그러나 구멍바닥에서의 응력이완이 표면에 부착된 스트레인 게이지의 변형율 이완에 미치는 영향이 규명되면, 둘째 요인은 정량적으로 보정될 수 있다.

4.2. 편심 구멍에 의한 잔류응력 계측

구멍을 뚫을때 구멍중심을 게이지 중심에 정밀하게 일치시키는 지그(예; 밀링가이드)를 사용하지 않을 경우 구멍의 편심은 예상된다. Fig.5에 표시한 편심을 편심거리 S로 표시할 때, Table 1은 32개 시편의 편심비도를 나타낸다.

Table 1 Hole eccentricity in case of AJM drilling without drilling jig

Eccen. (mm)	0.01-0.06	0.06-0.11	0.11-0.16	0.16-0.28	Avg. (mm)
Freq.	8	3	9	12	0.13

편심거리 S가 0.28mm이면, 항복응력 수준의 잔류응력 수준에서 편심되지 않은 경우에 비하여 3.5kgf/mm<sup>2</sup>의 계측오차를 초래할 수 있다. Fig.7은 식(5a) 및 식(5b)에 근거하여 직접 계산법<sup>9)</sup>(direct method)으로 편심에 기인하는 오차를 보정한 것이다.

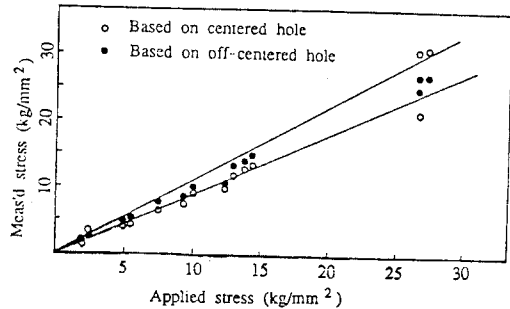


Fig. 7 Comparison of stress measurement between including and excluding hole eccentricity

Rendler<sup>6)</sup>는 0.025mm오차 범위내에서 구멍중심을 일치시키는 것을 추천하고 있다. 또한 Beany<sup>10)</sup>에 의하면 0.013mm의 구멍 편심이 2%의 계측오차를 유발한다.

Tieu<sup>11)</sup>는 항복응력의 0.82배 응력수준에서, 편심거리를 0.05mm로 부터 0.55mm까지 변화시켜가며 응력을 측정하였다. 위 연구결과에 의하면 편심거리 0.05mm에서 1%, 0.27mm에서 6%, 0.32mm에서 8%, 0.55mm에서 25%의 응력계측의 오차가 발생할 수 있다. Tieu가 사용한 게이지의 크기가 본 연구에서 사용한 게이지의 약 2배인 점을 감안하면, 본 연구에서 평균 편심거리가 0.13mm인 경우 약 6%의 응력계측 오차가 발생할 수 있다. 그러나 본 실험에서와 같이 지그를 사용하지 않고 구멍을 뚫을때에 Fig.6에서

보는 바와 같이 서로다른 응력 수준에서 10%의 계측 오차를 초래할 수도 있다.

## 5. 결 론

공기분사연마기(AJM)를 사용하여 구멍뚫기 방법(HDM)으로 잔류응력 측정에 관한 보정실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유한폭 평판을 길이 방향으로 인장시키거나 보로 사용하여 잔류응력 측정에 관한 보정실험을 할 때, 시편의 크기효과는 구멍의 직경/평판폭의 비에 의하여 결정되며 그 비가 0.2 이하일 때 무한판에 적용되는 구멍주위에서의 응력분포식을 적용할 수 있다.

2) 잔류응력 수준이 항복응력의 0.6배인 응력장에서 구멍을 뚫어 측정된 잔류응력은 실제 응력에 비하여 10-15% 낮게 측정된다. 낮게 측정되는 주된 이유는 구멍주위에서의 소성역 발생에 기인한다. 한편 구멍의 깊이 방향으로 응력 구배가 있을때의, 잔류응력 측정 정도에 관하여 앞으로의 연구가 필요하다.

3) 직교 3축형 로켓트 스트레인 게이지의 중앙에 구멍을 뚫을때 편심이 발생하며, 평균 편심거리는 0.13 mm이다. 또한 편심을 고려하지 않고 응력 계측을 할 때 약 10%의 계측오차를 일으킬 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1989학년도 영남대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다. 또한 본 연구에 연구기자재 등을 제공하여준 해사기술연구소에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

1) G.N. Savin: Stress distribution around holes,

A translation of the Russian Original of 1968, NASA TT F-607, pp.119-128

- 2) R.C.J. Howland: On the stresses in the neighborhood of a circular hole in a strip under tension, Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A, Vol.229, (1930), pp.49-86
- 3) 최병길: 잔류응력 계측법 개발에 관한 연구, 한국기계연구소 연구보고서, 1982
- 4) A.K. Tieu: A direct method to evaluate hole-alignment error in residual-stress measurement, Experimental Mechanics, Mar. (1985), pp.43-47
- 5) J.P. Sandifer and G.E. Bowie: Residual stress by blind-hole method with off-center hole, Experimental Mechanics, Vol.18, No.5, May, (1978), pp.173-179
- 6) N.J. Rendler, I Vigness: Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses, Proc. SESA XXIII, No.2, (1966), pp.577-586
- 7) 이택순, 최병길, 전상운: AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구(I), 대한용접학회, 제6권, 제3호, (1988), pp.37-42
- 8) 전상운: 구멍뚫기방법(HDM)에 의한 잔류응력測定에 관한 研究, 석사학위 논문, 영남대학교, (1989), pp.25
- 9) E.M. Beany: Accurate measurement of residual stress on any steel using the centre hole method, Strain, July, (1976), pp.99-106
- 10) E.M. Beany, E Procter: A critical evaluation of the centre hole techiu for the measuent oredsul streses, Strain, Jan., (1974), pp.7-14