

研 究 論 文

大韓熔接學會誌  
第6卷, 第3號, 1988年 9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 6, No. 3, Sep., 1988

## AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구(I)

이택순\* · 최병길\*\* · 전상윤\*\*\*

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

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

**Key Words:** Residual Stress(잔류응력), Air-abrasive Jet Machine(공기분사연마기), Hole Drilling Method(구멍 뚫기방법), Cutting Stress(가공응력)

#### Abstract

The Hole Drilling Method(HDM) is widely used to measure residual stresses in the welded structures. The purpose of this study is to evaluate the accuracy of measuring residual stresses when drilling the hole by Air-abrasive Jet Machine(AJM).

Simulated residual stresses were introduced by applying known stresses to steel bars. These known stresses were then compared with measured stresses relaxed from hole drilling.

The obtained results are summarized as follows;

- (1) It was possible to obtain well defined holes with the nozzle designed for this study.
- (2) If the hole shape is not cylindrical, critical errors may occur.
- (3) In the uniaxial strain field, the measurement error of the maximum principal stress was within  $\pm 10$  percent. The orientation angle of the maximum principal stress was within  $8^\circ$  from the given direction.
- (4) Measurements were made varying hole depths. Little or no change of stresses occurs since holes were drilled more than the depth of the 0.6 times diameter.
- (5) The air-abrasive jet machining for drilling holes does not cause appreciable apparent stresses which is critical to measure residual stresses.

\* 영남대학교 정회원

\*\* 한국기계연구소 정회원

\*\*\* 영남대학교 학생회원

1. 서 론

각종 구조물이나 구조물요소에서 압연, 기계가공, 용접등에 의해 발생하는 잔류응력은 사용상태에서 각 구조물의 거동에 중요한 영향을 미친다. 특히 용접에 의한 잔류응력은 용접부 주위의 불균일한 온도 분포에 기인하는 것으로 용접변형, 저온균열, 취성 파괴, 피로파괴, 좌굴강도등에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려졌다.

이러한 잔류응력이 재료의 기계적 성질이나 구조물의 역학적 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 잔류응력의 분포를 정량적으로 평가하는 방법을 확립하여야 한다. 1934년 Mathar<sup>1)</sup>에 의해 제안된 응력이완법의 일종인 구멍뚫기방법 (Hole Drilling Method, HDM)은 간편하고 정확하고 신뢰성이 있으며 경제적이고 준 비파괴적인(semi-destructive) 방법으로서 이에 대한 연구가 지금까지 계속 이루어지고 있다.

본 연구에서는 잔류응력을 측정하기 위한 방법으로 공기분사연마기(Air-abrasive Jet Machine, AJM)를 이용한 HDM에 대해서 그 정확성과 신뢰성을 검토하여 실제에 적용할 수 있도록 하였다. 용접 잔류응력의 재현성 제약때문에 외팔보를 이용하여 가공응력(cutting stress), 구멍의 모양과 깊이 변화, 응력의 세기등이 잔류응력 측정에 미치는 영향에 대해서 연구하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

본 실험에서 사용한 재료는 용접 구조물에서 사용되고 있는 판 두께 6mm의 연강(SS41) 압연 강판이며 시편형상은 Fig.1과 같고 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

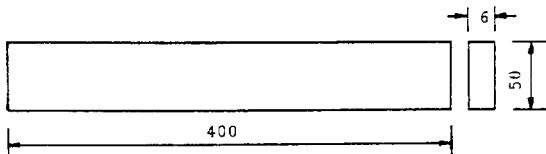


Fig. 1. Shape of specimen

Table 1. Mechanical properties of the specimen

Y. S. (kgf/mm <sup>2</sup> )	26.7
T. S. (kgf/mm <sup>2</sup> )	35.5
EL. (%)	44

먼저 절단, 기계가공등에 의해 시편에 내재하는 잔류응력을 제거하기 위해 600°C에서 1시간 열처리한 후 노냉하였다. 이때 열처리 하기전의 잔류응력과 열처리 한 후의 잔류응력을 측정하여 Fig.2에 나타내었다.

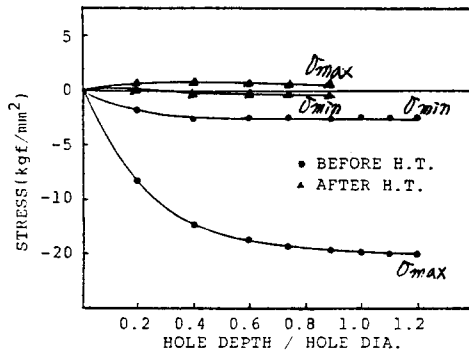


Fig. 2. Residual stress in the specimen before and after heat treatment

응력측정에 사용된 스트레인게이지는 미국 Micro-Measurements사 제품의 rosette strain gage이다. 일반적인 2축 응력상태의 응력성분을 알기 위해서 3개의 게이지를 일정한 pattern(90°-135°-135°)에 따라 배열시킨 rosette strain gage를 많이 사용한다. 특히, Micro-Measurements사의 게이지는 HDM을 이용한 잔류응력 측정연구에 많이 사용되고 있다. 이 rosette strain gage의 형상은 Fig.3과 같고 게이지 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Strain gage specifications

Gage Type	TEA-06-062RK-120
Gage Resistance in ohms at 24°C	120±1.0%
Gage Factor at 24°C	2.04±1.0%
Gage Diameter	5.15(mm)
Gage Length	1.59(mm)

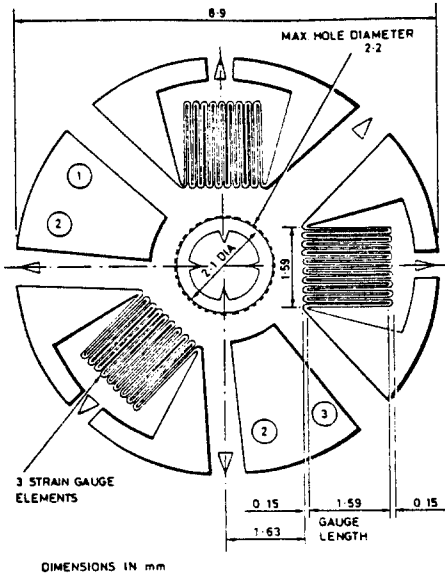
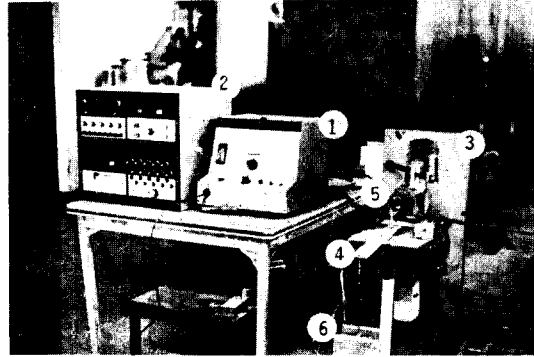


Fig. 3. Shape of rosette strain gage

2.2 실험 방법

2.2.1 실험 장치

실험장치는 Photo. 1에 나타낸 바와 같이 외팔보 장치, 공기분사연마기(AJM), 노즐 그리고 스트레인 인디케이트(strain indicator) 등으로 구성되어 있다. 외팔보 장치는 하중상태를 정확히 하기 위해서 사진에서와 같이 대형 바이스를 이용하여 제작하였으며 보 끝부분의 중앙에 구멍을 내어 볼트를 체결하고 볼트 하단에 기저의 하중을 가하였다. 가해진 기저의 하중으로부터 보 이론에 근거하여 게이지 접촉 위치에서의 이론응력계산이 가능하였으며, 이론적인 계산치와 측정응력(잔류응력으로 대체)과의 비교가 가능하였다. AJM에 사용된 분말인 알루미늄( $Al_2O_3$ )은 입자크기가 50micron 이었다. 이 알루미늄과 공기를 혼합하여 분사시킬때 사용되어지는 노즐은 본 연구에 사용하기 위해 Fig.4에서와 같이 설계하여



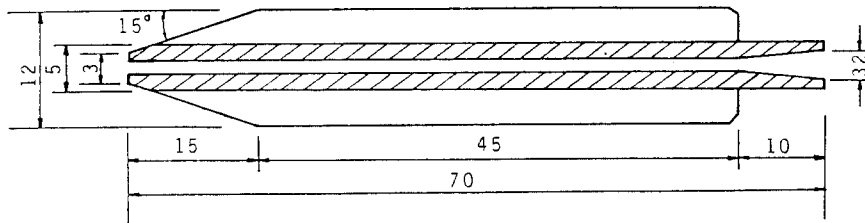
- ① AJM
- ② Strain indicator
- ③ Vise supporter
- ④ Cantilever beam
- ⑤ Nozzle
- ⑥ Weight(10kg)

Photo 1. Test equipments used for measuring residual stresses

제작하였으며 중앙부분을 텅스텐 카바이드 한 것은 분사되는 알루미늄에 의해 노즐이 마모되는 것을 방지하기 위함이었다.

2.2.2 AIM을 이용한 HDM

HDM은 응력이완법 중의 하나로서 측정하고자 하는 응력장에 구멍을 뚫었을때 이완된 스트레인을 측정하여 잔류응력을 측정한다. HDM중 AJM을 이용한 방법은 첫째, 잔류응력을 측정하고자 하는 위치에 스트레인게이지를 붙인다. 둘째, AJM에 의해 발생하는 고압고속의 공기에 연마재로 사용되는 알루미늄을 혼합한후 노즐을 통하여 스트레인게이지의 중앙에 분사시키면 칩삭작용(chipping out)으로 구멍이 뚫린다. 셋째, 이때 이완되는 스트레인을 읽어서 잔류응력을 측정한다. 본 실험에서는 내경이 1.8 mm인 노즐을 이용하여 여러번의 예비실험 결과, Table 3과 같은 구멍뚫기조건(hole drilling condition)에서 원통형의 구멍을 뚫을 수 있었다.



▨ : 텅스텐 카바이드    □ : steel(S45C)

Fig. 4. Nozzle shape(nozzle dia. = 1.8mm) (단위 ; mm)

Table 3. Hole Drilling conditions of AJM

Air pressure(psi)	70
Powder flow	4
Nozzle clearance(mm)	1
Drilling time(min.)	12

## 2.2.3 구멍의 진원도

알루미늄과 공기의 분사에 의해 뚫린 구멍의 진원도를 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 4곳에서 지름을 측정하였다. 이때 구멍의 지름측정은 0.02mm까지 측정가능한 광학현미경을 사용하였다.

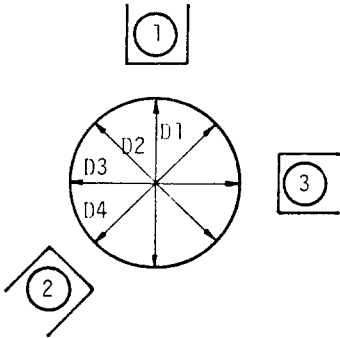


Fig. 5. Measuring hole diameter through different directions.

## 2.2.4 가공응력(Cutting stress)

구멍을 뚫을때 발생하는 가공응력을 측정하기 위해 먼저 시편을 600°C에서 1시간 동안 열처리 한 후 노냉하였다. 열처리 한 시편에 게이지를 붙이고 구멍을 뚫으면서 발생하는 스트레인을 측정하였다. 구멍을 뚫을때에는 일반 기계공작용 탁상드릴링머신인, Micro-Measurements사 제품인 Milling guide와 핸드드릴, 그리고 AJM등을 이용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

## 3.1 응력의 측정 및 비교

Fig. 6은 의팔보 장치를 이용하여 내경이 1.8mm인 노즐로 실험한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 응력의 측정오차가  $\pm 10\%$ 의 범위에 속하고 있어 Bynum<sup>2)</sup> 등의 결과와 잘 일치한다.

이때 응력계측은 Fig. 7과 같은 응력상태에서 스트레인게이지를 붙이고 스트레인게이지의 중앙에 딱힘 구멍(blind hole)을 가공하고 계측된 스트레인으로

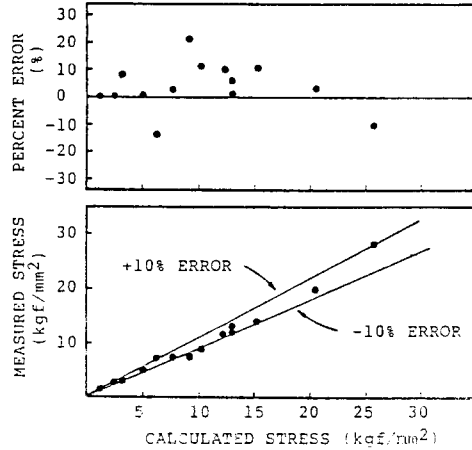


Fig. 6. Uniaxial test of cantilever beam specimens using air-abrasive hole drilling with a 1.8mm nozzle.

Eq. 1<sup>3)</sup>에서 스트레스로 계산하고 Eq. 2에 의해 계산된 이론 스트레스 값과 비교 검토하였다.

$$\sigma_{x,y} = \frac{E}{2A} (\epsilon_3 + \epsilon_1) \pm \frac{E}{2B} (\epsilon_3 - \epsilon_1) \quad (1)$$

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

단,  $A = -(1+\nu)\rho^2$

$\rho = a/r$  ( $a$ =구멍반경,  $r$ =게이지 중심선까지의 반경)

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

$\sigma_{x,y}$ =최대주응력, 최소주응력

$\theta$ : 최대주응력과 3번째게이지가 이루는 각

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ : 이완된 스트레인

$E$ : 탄성계수,  $\nu$ : 프와송 비

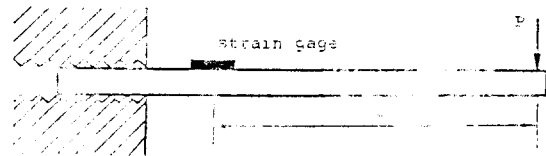


Fig. 7. Cantilever beam test used for measuring residual stresses.

Eq. 1은 면내 하중상태에 있는 무한평판에 관통구멍(through hole)을 뚫었을때의 응력재분포에 관한 Kirsch<sup>4)</sup>의 해에 입각하여 이완된 스트레인을 응력으로 환산하는 관계식이다.

$$\sigma = My/I, \quad \text{단 } M = Px, \quad I = bh^3/12, \quad y = h/2 \quad (2)$$

단,  $M$ : 모우멘트,  $I$ : 관성2차 모우멘트,  $b$ : 시편폭,  $h$ : 시편두께

3.1 구멍의 진원도

Table 4는 여러개의 구멍에서 측정된 지름을 나타내고 있다. Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 4곳에서 측정된 지름이 거의 같게 나타나고 있어 실험에 사용한 노즐은 진원도가 정확한 것을 알 수 있었다.

Table 4. Diameter of the holes(measured through 4 different directions)

No.	Hole dia.	D 1 (mm)	D 2 (mm)	D 3 (mm)	D 4 (mm)	갯 수
1	2.14	2.14	2.12	2.14	2.14	1
2	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2
3	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2
4	2.04	2.02	2.04	2.04	2.04	2
5	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2
6	2.08	2.08	2.08	2.10	2.08	2
7	2.00	2.00	2.02	2.00	2.00	2

3.3 구멍의 형상

Fig. 6과 같이 응력의 측정오차가  $\pm 10\%$  안에 들려면 가공된 구멍의 형상이 Photo. 2 (a)와 같이 원통형이 되어야 한다.<sup>2)</sup> 실제로 이번 실험에서는 거의 모든 구멍이 원통형으로 나타났다. 그러나 Photo 2(b)와 같이 구멍모양이 원통형이 아닌 시편의 실험에서는  $\pm 30\%$  정도의 측정오차가 발생했다. 이것은 노즐의 내부가 알루미늄의 분사에 의하여 마모되어서 균일한 분사가 이루어지지 않기 때문에 발생하는 것으로서 노즐을 Fig. 3에서와 같이 다시 설계, 제작함으로써 Photo. 2(a)와 같은 원통형의 구멍을 뚫을 수 있었다.<sup>5)</sup>

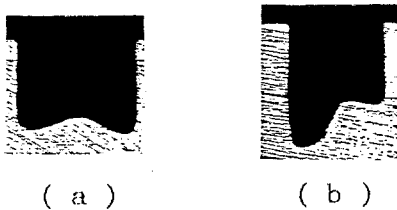


Photo 2. Hole shape

3.4 구멍의 깊이 변화

Fig. 8에서는 구멍의 깊이변화에 따라서 측정된 응력의 변화를 나타내고 있다. 잔류응력을 측정하기 위해 구멍을 뚫었을 때 이완되는 응력은 구멍의 깊이에 따라 변한다. 그림에서 알 수 있듯이 구멍의 깊이가 증가함에 따라 측정응력은 점점 증가하여 구멍의 깊이와 지름의 비가 0.6에 도달한 이후에는 측

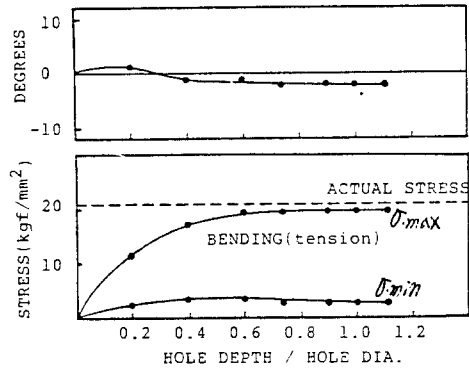


Fig. 8. Stresses measured as a function of hole depth.

정응력의 변화가 없거나 매우 작다.

3.5 가공응력(Cutting stress)

잔류응력을 측정할 때 밀링머시인이나 드릴링머시인 등을 이용하여 구멍을 뚫으면 소성응력이 가공물에 잔류하게 되고 이 소성응력이 잔류응력 측정시 잔류응력과 함께 이완되기 때문에 가공응력을 정확히 평가할 수 없는한 잔류응력을 정확히 계측하는 것은 불가능하다.

Fig. 9는 응력풀림처리(600°C, 1시간)한 시편에 하중을 가하지 않는 상태에서 구멍을 뚫었을 때 계측된 스트레인을 나타낸다. Fig. 10은 구멍을 뚫을 때 생긴 가공응력을 포함한 경우와 포함하지 않는 경우에 측정된 잔류응력을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 구멍을 뚫었을 때 발생하는 가공응력은 잔류응력 계측시에 심각한 측정오차를 유발시킬 수 있다.<sup>5),6)</sup>

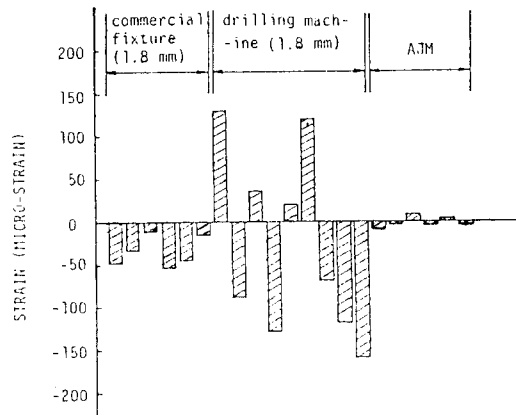


Fig. 9. Cutting stresses due to various methods of hole drilling.

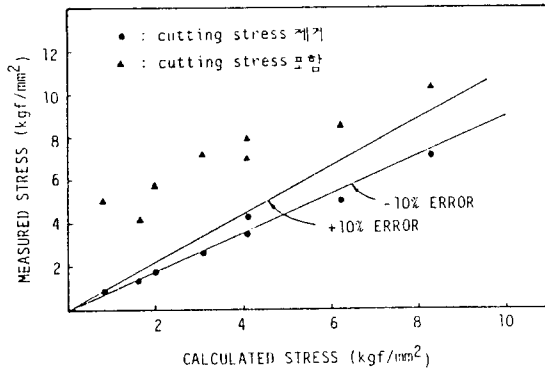


Fig. 10. Comparison of stress measurement between excluding and including cutting stresses.

#### 4. 결 론

AJM을 이용한 HDM에 의해서 잔류응력 측정실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구를 위해 제작한 노즐은 충분한 진원도가 확인 되었다.
- (2) 실험에 사용한 시편은 600°C에서 1시간 동안 열처리 함으로서 절단, 기계가공 등에 의한 잔류응력을 제거 할 수 있었다.
- (3) 구멍을 뚫을때 발생하는 가공응력은 다른 방법에 비하여 AJM으로 뚫었을 때 제일 작게 나타났다.

- (4) 여러가지 응력수준에서 측정된 응력은 이론응력과 잘 일치하였고 주응력의 방향은 8° 안에 속했다.
- (5) 구멍의 깊이와 지름의 비가 0.6 이상에서는 측정응력값의 변화가 매우 작게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. J. Mathar, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformations Around Drilled Holes", Trans. ASME, Vol. 56, No. 4(1934)
2. J. E. Bynum, "Modification to the Hole Drilling Technique of Measuring Residual Stresses for Improved Accuracy and Reproducibility", EXPERIMENTAL MECHANICS, Vol. 21, No. 1 (Jan. 1981)
3. 최병길, "잔류응력 측정법 개발에 관한 연구", 한국기계연구소 연구보고서(1982)
4. G. Kirsch, V. D. I., Vol. 42(1898)
5. E. M. Beaney, "Accurate Measuring of Residual Stresses on any Steel Using the Center Hole Method", STRAIN, Vol. 12, No. 3(1976)
6. A. J. Bush and F. J. Kromer, "Simplification of the Hole Drilling Method of Residual Stress Measurement", IAS Transactions, Vol. 12, No. 3(1973)