

A Study on the Improvement of Measuring the Residual Stresses in Weldment using Blind-hole Drilling Technique

Ham, won-kuk

School of Naval Architecture and Ocean Engineering

<Abstract>

This study tried out the improvement of the blind-hole drilling technique to measure residual stresses in weldments where stress fields are not uniform by application of the modified calibration function to the current method.

The stress fields in welded structure are very complex, but those in butt jointed weld specimen are simplified by two different stress fields-uniform and linearly varying. The current method is used for calibraion of the uniform stress field and gives the correction factor which is the ratio of released strains due to drilling to the strains from FEM caculations.

The strain fields of linearly varying stress fields obtained by FEM calculations are adjusted by the correction factor from calibration of the uniform stress field. By considering the effects of distances of the hole from the interface of compressive and tensile stresses, the curves for calibration constants as a function of this distance are constructed by calibration.

Final stress fields of weldments are mesured accurately by using calibration curves in conjunction with the iteration schemes.

Blind-hole Drilling 기법을 이용한 용접부의 잔류응력 측정 개선에 대한 연구

함원국

조선 및 해양공학부

<요 약>

본 연구는 응력장이 균일하지 않은, 용접부의 잔류응력을 측정하기 위하여 현재 널리 이용되는 Blind-hole Drilling 기법에 수정된 보정함수를 적용함으로 개선을 시도했다.

용접부의 응력장은 균일응력장과 선형적으로 변하는 응력장의 서로다른 응력장으로 단순화 할 수 있다. 현재의 방법은 균일응력장의 보정을 위하여 사용되며 유한요소법으로 계산된 변형률에 Drilling으로 인한 이완된 변형률의 비인, 수정계수를 준다.

유한요소 해석으로 얻어진, 선형적으로 변하는 응력에 대한 변형장은 균일응력장의 보정으로부터 얻어진 수정계수에 의해 조절된다. 압축응력과 인장응력의 교차점으로부터의 거리의 영향을 고려함으로, 이 거리의 함수로서, 보정곡선이 구축된다. 용접부의 최종 응력장이 Iteration Schemes과 연계하여 보정곡선을 이용함으로 정확히 계측된다.

1. 서 론

1.1 연구의 배경

1934년 작은 구멍을 뚫음으로 잔류응력을 결정할 수 있는 Hole-drilling 기법이 Mather¹⁾에 의해 소개된 이래 Hole-drilling 기법이 산업에 적용되었고 신장계 대신에 뒤이어 Strain Gage의 발전을 도모하였다. Rendler와 Vigness는 이방법의 이론적인 배경을 설립하였고 또 다른 많은 연구에서, 보정을 위한 여러 가지 변수를 고려하였다.²⁾

재료에 대하여 독립적인 보정계수들이 몇몇 탐구자들에 의하여 제안되었고, 유한요소법의 사용으로 수치보정 기법이 Schajer³⁾에 의하여 연구되었다. Sondifer와 Bowie⁴⁾ 그리고 Ajovalasit는 중심에서 벗어난(편심된) 구멍에 대해 계산하는 일련의 방정식을 이끌어 냈다.⁵⁾

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 결과의 정확도를 개선하기 위하여 굽힘시편의 중성축이나 시편의 자유단과 Hole 사이의 거리의 영향을 조사하고 유한요소법을 이용하여 불균일 응력장을 위한 보정함수의 수정 및 실험을 통하여, Blind-hole Drilling 기법에 대한 보정방법을 수정하는 것이다. 더 나아가서 본 연구는 기계절삭 응력의 Drilling 계수에 관한 필요한 정보를 제공한다. 시장구입이 가능한 유용한 게이지들과 최근 Drilling 장비를 가지고 이 방법의 개선을 위해 본 연구를 다음과 같은 가정 하에 수행한다.

- 항복은 일어나지 않는다.
- 유한요소 Model의 Hole은 판의 두께를 관통하여 천공된다.
- 응력은 유한요소 해석에 의한 이론적 연구를 위해 두께 방향으로 균일하다.

2. Blind-hole Drilling 기법의 배경 지식

2.1 Blind-hole Drilling 기법의 기초이론

잔류응력이 발생된 물체에 작은 구멍을 뚫으면 구멍의 가에서는 잔류응력이 영이 되어야 한다는 사실에 따라 그 위치에서의 응력을 완화한다. 구멍 주변의 직응력의 제거는 즉시 구멍 주위의 응력을 감소시키고 국부적인 표면의 변위가 이에 대응하여 나타난다.

이 기법은 Mathar에 의해 제일 먼저 제안되었고 뒤이어 Rendler와 Vigness가 전반적으로 이 방법을 조사 연구하여 실용적인 기법으로 단순화하기 위한 기본 parameter를 설립했다.

2.2 이론적 배경

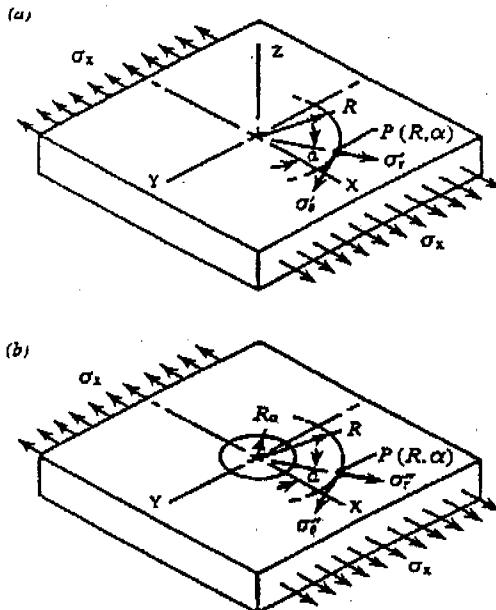


Fig. 1. Stress states at $P(R, \alpha)$, before and the introduction of a hole.

잔류응력이 존재하는 무한평판에 구멍을 뚫으면 Fig. 1.에서와 같이 점 $P(R, \alpha)$ 에서의 변형률의 변화량은 σ_x, σ_y 의 크기, 구멍으로부터의 거리, 응력상태 등에 따라 변한다. Fig. 1.에서 σ_x 만 작용할 때 r 방향의 변형률은 Kirsch해에 의해 다음과 같이 표현된다.⁶⁾

$$\epsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (1a)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (1b)$$

여기서

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$: 점 P에서 이완된 반지름방향과 접선방향의 변형률

σ_x, σ_y : 주응력

$r=R/R_0$: 구멍으로부터 점 P까지의 무차원 반경

E, ν : 탄성계수 와 프와송비

식(1)을 일반식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \quad (2a)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x (-A + C \cos 2\alpha) \quad (2b)$$

여기서

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left\{ \left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right\}$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left\{ -\left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right\}$$

2축 인장을 동시에 받을 경우 식(1)은 다음과 같다.

$$\varepsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_y (A - B \cos 2\alpha) \quad (3a)$$

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \quad (3b)$$

식(3)의 A, B는 이론적인 전개에 따라 계산이 가능하나 실제 적용시에는 이론전개시의 가정들을 보상할 수 있는 \bar{A}, \bar{B} 를 사용하며, 특히 후판의 경우 사용되는 Blind Hole Drilling 방법에서는 적절한 \bar{A}, \bar{B} 가 요구된다.⁷⁾

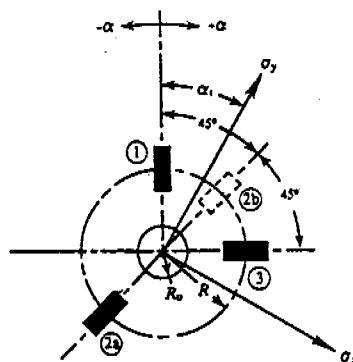


Fig. 2 Strain gage rosette arrangement for determining residual stress.

Fig. 2. 에서 스트레인 게이지 Element 1, 2, 3에서의 반지름방향 변형율을 ε_{r} , 이라 하여 Fig. 1과 비교하면 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_1 = \bar{A}(\sigma_x + \sigma_y) + \bar{B}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \quad (4a)$$

$$\varepsilon_2 = \bar{A}(\sigma_x + \sigma_y) + \bar{B}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 45^\circ) \quad (4b)$$

$$\varepsilon_3 = \bar{A}(\sigma_x + \sigma_y) + \bar{B}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 90^\circ) \quad (4c)$$

그러므로 주응력 σ_x , σ_y 와 주응력의 방향 α 는 ε_1 , ε_2 , ε_3 를 이용하여 다음과 같은 수식으로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4\bar{A}} + \frac{1}{4\bar{B}} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (5a)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{4\bar{A}} + \frac{1}{4\bar{B}} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (5b)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (5c)$$

여기서

$\varepsilon_3 > \varepsilon_1 : \alpha$ refers to σ_{\max}

$\varepsilon_3 < \varepsilon_1 : \alpha$ refers to σ_{\min}

$\varepsilon_3 = \varepsilon_1 : \alpha = \pm 45^\circ$

$\varepsilon_2 < \varepsilon_1 : \sigma_{\max} \text{ at } +45^\circ$

$\varepsilon_2 > \varepsilon_1 : \sigma_{\max} \text{ at } -45^\circ$

실제 실험에서 사용하는 \bar{A} , \bar{B} 는 스트레인 게이지 제작사에서 제공하는 Fig. 3과 같은 데 이터로부터 아래식에서 구한다.⁸⁾

$$\bar{A} = \frac{1+\nu}{2E} \times \bar{a} \quad (6a)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{2E} \times \bar{b} \quad (6b)$$

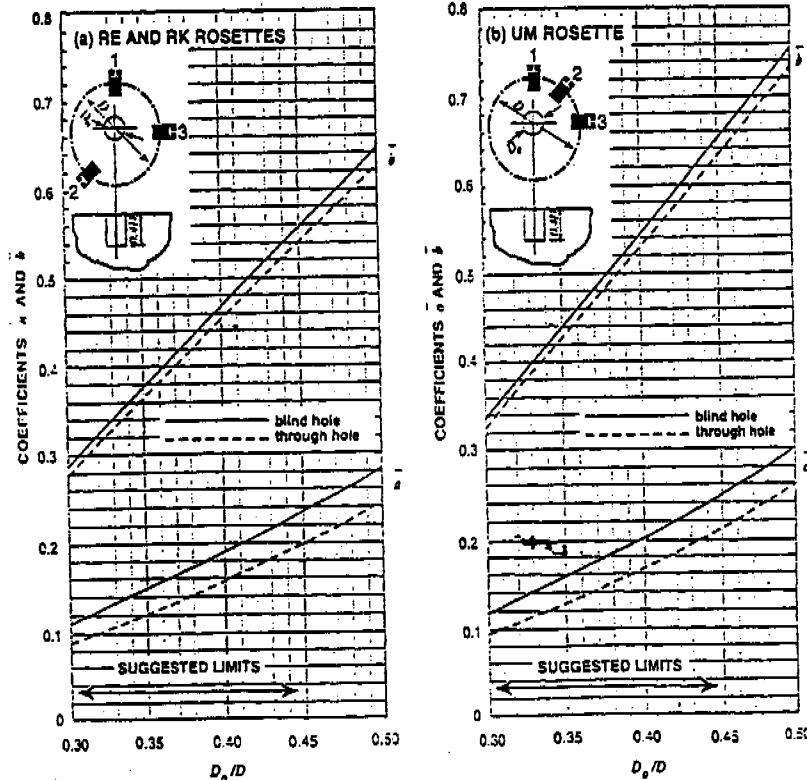


Fig. 3 Data-reduction coefficients \bar{a} and \bar{b} versus dimensionless hole diameter(typical) for measurement Group residual rosettes.

2.3 용접부에 현재의 기법을 적용하기 어려운 이유

용접부 주위의 응력분포는 이음의 형상과 용접매개 변수에 따라 매우 복잡하다. 단순한 맞대기 이음에서조차 용접선 방향의 잔류응력의 변화는 대략 1 in.폭 이내에서 항복응력 수준에서 응력이 영인 범위에 있다. 이 응력장은 균일 응력장과는 너무 거리가 멀다.

현재의 Blind-hole Drilling 기법은 응력장이 두께와 표면 전반에 균일하다는 가정하에 잔류응력을 측정하는데 사용될 수 있다. 그러나 임의의 응력장에 대한 반경방향의 변위는 결코 대칭이 아니다. 이같은 이유로, 균일 분포응력장에 대한 수정 자료는 응력장이 대단히 복잡한 용접부에서의

잔류응력 측정결과를 그릇 판단케 한다. 또한 인장과 압축 응력장의 계면의 효과도 현재의 기법에서는 고려되지 않으며, 이것이 계측 결과의 정도를 저하시킨다.

3. 용접부의 잔유응력 측정을 위한 개선된 기법

3.1 이론의 전개

단순한 맞대기 용접의 응력분포는 Fig. 4에 나타내었다. σ_y 의 변화는 Rosette 게이지의 크기에 비하여 매우 적다. 그래서 게이지의 크기에 흡사한 σ_y 의 부분은 매우 적은 경사를 갖는 직선으로 취급될 수 있다.

결과적으로 σ_y 의 분포는 국부적으로는 균일응력에 가깝다. 반면, y축에 따른 σ_x 의 응력장은 급경사를 가지고 변한다. 용접중심선으로부터 인장잔류응력의 너비는 1" 범위 안에 있다.⁹⁾ y 축 방향에 있어서의 잔류응력의 변화율은 σ_x 의 변화를 무시할 만큼 더 이상 근소한 것은 아니다.

y축을 따라 변화하는 σ_x 의 응력장을 갖는 용접부의 잔류응력을 측정하기 위하여는, 현재의 Blind-hole Drilling 방법으로는 오차가 발생한다. 천공함으로 구멍에서의 Strain의 변화는 X, Y 축 각각에 따른 일축응력으로 이루어진 타원과 게이지원 사이의 반경방향의 길이의 차로 나타난다. (Fig. 5.참조.)

따라서 수정 방법은 균일응력장과 불균일 응력장 각각을 위한 2개의 서로 다른 보정과정을 필요로 한다.

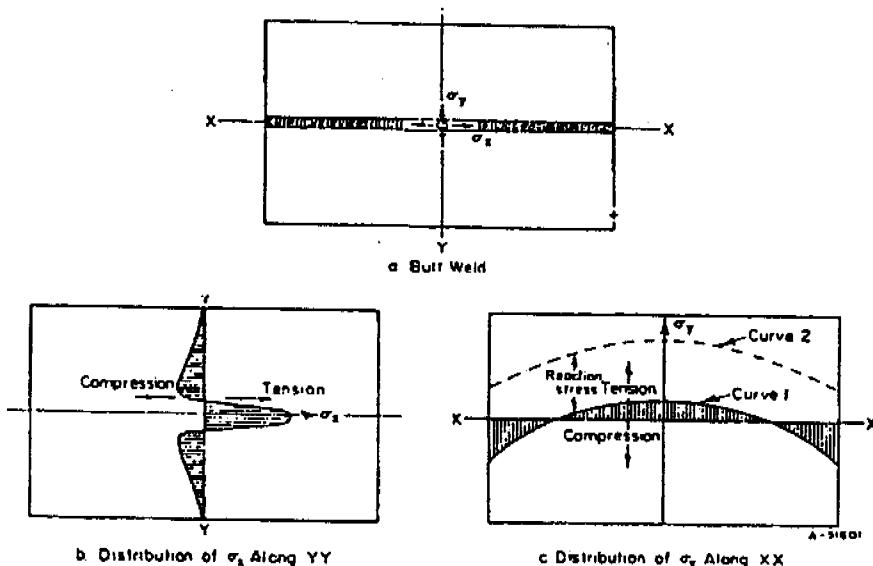


Fig. 4 Typical distributions of residual stresses in butt weld.

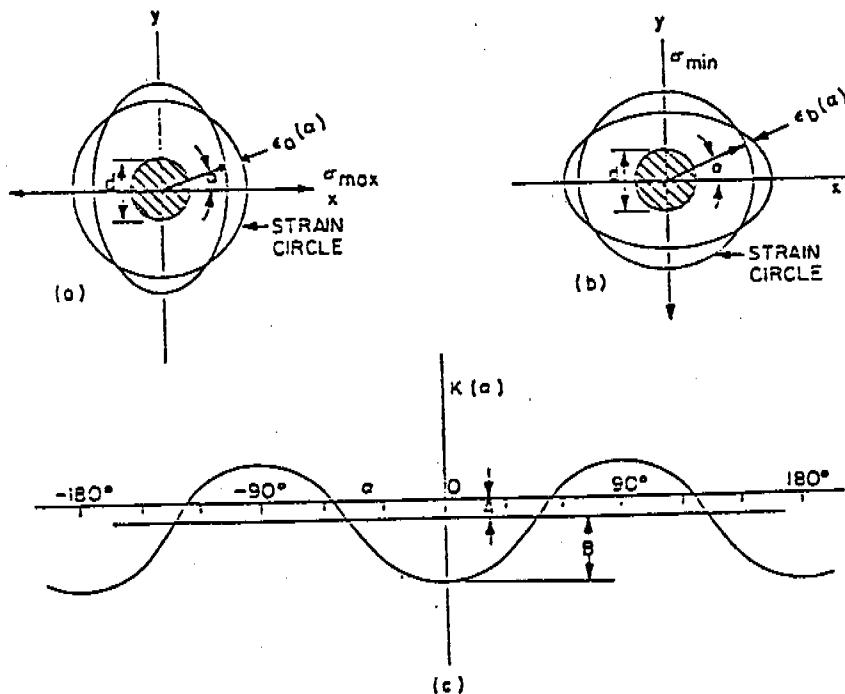


Fig. 5 Strain as the Radial Distance between Gage Circle and Ellipse for Uniaxial Stress.

(a) the X-axis

(b) the Y-axis

(c) the Strain, Proportional to $K(\alpha)$ in Rectangular Coordinates

1) 균일 응력장을 위한 보정

Rendler와 Vigness의 접근법에 따르면 천공으로 인한 구멍에서의 반지름 방향의 변위는 보정함수 $K(\alpha)$ 와 관련하여 시편에서의 균일응력의 항으로 표현된다.

$$\epsilon(\alpha) = K(\alpha) \sigma \quad (7)$$

$$\text{여기서 } K(\alpha) = A + B \cos 2\alpha \quad (8)$$

$K(\alpha)$ 의 상수 A , B 는 알려진 응력레벨을 가지고 있는 일축인장시편에 구멍을 뚫고 스트레인 Rosette 게이지의 각 Element로부터 이완된 변위를 측정하므로 결정된다.

2) 선형적으로 변하는 응력장의 보정

이완된 변위량은 변화하는 응력장에서는 구멍중심에 있는 응력에 비례한다고 가정한다.

$$\epsilon(\alpha) = K'(\alpha) \sigma_0 \quad (9)$$

여기서 $K'(\alpha)$ = 변화하는 응력장에서의 수정된 보정함수

$$\sigma_0 = \text{변화하는 응력장에서의 구멍 중심점의 응력}$$

Fig. 5(c)에 표현된 반지름 방향의 변위는 균일응력에서 선형적 변화에까지 응력의 변화로 인한 수정이 필요하며, 아래와 같은 요구조건이 만족되어야 한다;

1. 단 3개의 상수만이 협용된다. 현재 상용 Rosette 케이지는 단지 3개의 요소만을 가지고 있기 때문이다.
2. 이 합수는 주기성을 갖는다. $K(a)$ 의 값은 $a = \pi, -\pi$ 에서 같아야 하기 때문이다. 사실상 이 두점은 같은 점이기 때문이다.

아래 표시된 근사식과 같이 수정된 보정함수 $K'(a)$ 는 위의 조건들을 만족해야하며, 선형적으로 변화하는 응력장을 갖는 시편에 구멍을 뚫음으로 이완된 변위로 부터 얻을 수 있다.

$$K'(a) = C_1 \cos(2\pi |\frac{a}{\pi}| + C_2) + C_3 \quad (10)$$

$$\text{여기서 } -\pi < a < \pi$$

상수 C_1, C_2 및 C_3 는 선형적으로 변하는 응력장을 갖는 시편에 한 개의 구멍을 뚫는 보정작업으로 얻어진다. 이 선형적으로 변하는 응력장은 4점 단순지지 굽힘장치에서 순수굽힘을 함으로 발생될 수 있다. 하지만, $K'(a)$ 는 아직 몇 개의 제한이 있다.

1. $a = 0, \pi$ 및 $-\pi$ 에서 $K'(a)$ 의 상이한 값들은 고려되지 않는다. 그러므로 계측하는 응력들은, 주응력의 방향이 케이지를 부착하기 전에 알려져 있다면, 정확한 것이다.
2. 시편에서의 인장 또는 압축 잔류응력의 너비는 적어도 Rosette 케이지 춘법보다 크지 않으면 안된다.

3) 용접부의 잔류응력 측정을 위한 보정

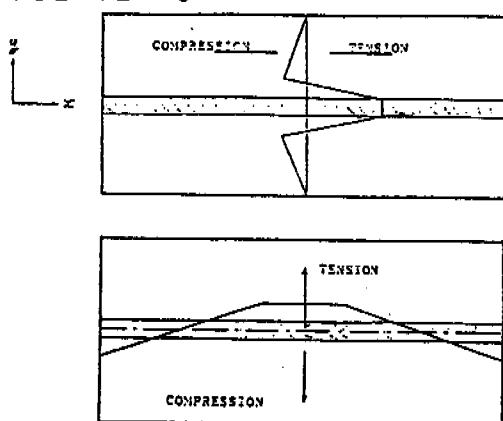


Fig. 6 Simplified Residual Stresses in Butt Weld

단순 맞대기이음 용접에서의 σ_x, σ_y 의 분포는 근사적으로 직선의 부분들로 Fig. 6.로 나타내었다. 구멍에서의 σ_x 의 분포는 Fig. 7에 도시했다. 결과적으로, 스트레인 게이지가 붙어 있는 영역에서의 σ_x, σ_y 에 의해 유발된 응력장들은 X, Y축에서의 균일 및 선형적으로 변하는 응력들로 인한 변위를 포함으로 얻어질 수 있다. 변위의 결과치는 다음 식으로 주어진다.

$$\varepsilon(\alpha) = K(\alpha)\sigma_{x0} + K(\alpha - \frac{\pi}{2})\sigma_y \quad (11)$$

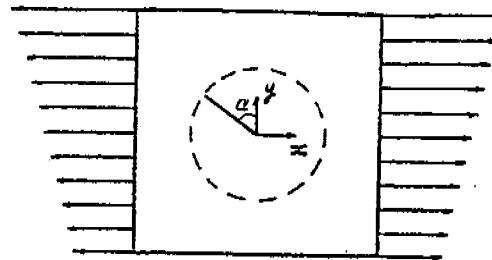


Fig. 7(a). Distribution of σ_x at the hole Area before Drilling.

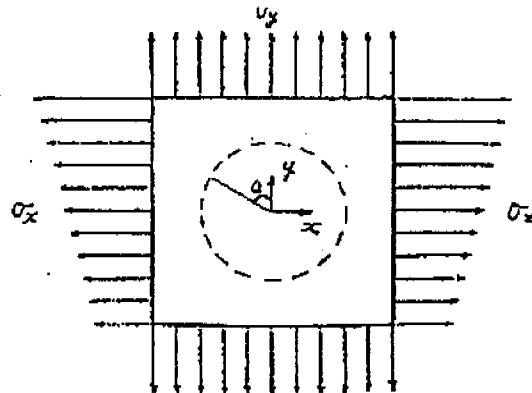


Fig. 7(b). Simplified biaxial Residual Stress Field at the hole Area before Drilling.

여기서

$$K(\alpha) = C_1 \cos(2\pi |\frac{\alpha}{\pi}|^{C_2}) + C_3 \quad (10)$$

$$K(\alpha) = A + B \cos 2\alpha \quad (12)$$

σ_{x0} = 구멍 중심에서 x거리위치의 응력

α = Fig. 7.에 나타낸 각도

$K(\alpha)$ 와 $K(\alpha)$ 의 상수 C_1, C_2, C_3 , 및 A, B 는 각각 2개의 서로 다른 형태의 응력의 보정과정을 통해 별개로 결정된다.

3.2 FEM 해석

1) Modeling

유한요소 해석을 박판인 경우, Blind-hole 주변의 스트레인의 변화는 관통공 주변의 경우와 같다는 가정에 기초하여 행해진다. 또한 시편의 재료도 응력의 전 범위를 통하여 단지 선형적 탄성변형만을 허용한다. 2차원 Model이 FEM 해석에 사용된다. (Fig. 8.참조) 그러므로 두께방향의 스트레인의 변화는 고려되지 않는다. 사변형과 사각형 및 삼각형의 요소들이 사용되며 스트레인 Rosette 게이지가 놓일 것이 예상되는 부분은 더 작은 Mesh로 분할한다.

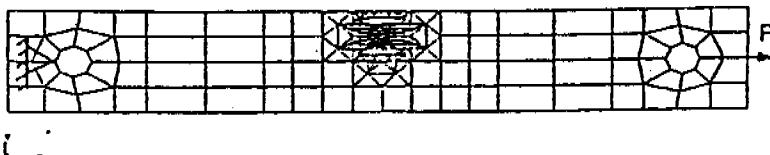


Fig. 8(a). Numerical Model for FEM Calculations for Tensile Loads.

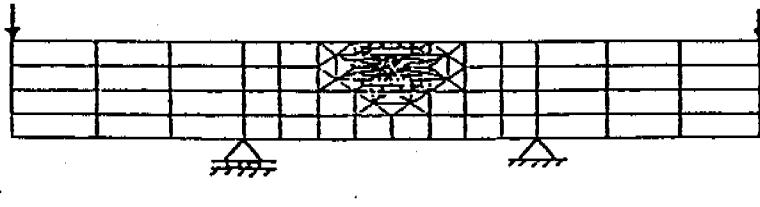


Fig. 8(b). Numerical Model for FEM Calculations for Bending Load.

A. 인장시편에 의한 보정

인장시편에 구멍을 뚫음으로 인한 스트레인의 변화에 대응한 응력의 관계는 함수(7)에 주어진다. 보정계수 A, B 는 각 게이지의 Element로 부터 반경방향의 이완된 스트레인과 알려진 응력값을 식(7)에 대입함으로 결정된다.

Rosette Gage는 3 개의 Element를 가지고 있으므로 3개의 스트레인 측정이 가능하다. 보정을 수행하는 동안, 주응력의 방향이 즉 α 의 값이 알려진다. 그러므로 2 개의 보정계수 A, B 가 3 개의 반경방향의 스트레인 중 어느 2 개에 의하여 결정될 수 있다.

인장 시편을 위한 균일응력장은 구멍 끝부분의 소성변형을 피하기 위해 시편의 항복응력의 1/3이하의 하중을 적용한다.

B. 굽힘 시편에 의한 보정

시편에 선형적으로 변하는 응력장의 형성은 순수 굽힘을 사용함으로 이루어진다. 응력장의 두 변수는 이 응력장에서 고려될 수 있다. 첫째 변수는 응력의 크기이고 두 번째 변수는 응력의 경사도이다. 응력의 경사도의 변화는 보정을 위해 조사되어야 한다. 굽힘시편에서의 응력구배의 변화는 서로 다른값의 굽힘모멘트를 적용함으로 이루어진다. 굽힘보정에 포함되는 3개의 상수가 있다. 3개의 상수들인 C_1 , C_2 , C_3 는 구멍에서의 항복응력의 1/3이하로 적용된 응력값과 구멍을 뚫음으로 인한 이완된 반경방향의 스트레인 값을 사용함으로 식(8,9)에 의해 결정된다.

시편의 자유단과 중성축으로부터의 영향을 피하기 위하여 C_1 , C_2 , C_3 를 결정하기 위한 보정을 위한 구멍의 위치는 ASTM E-837에서 요구하는바에 따라 시편의 중성축과 자유단으로부터 $0.5 r_m$ ($r_m = D/2$; D = 게이지 원의 지름) 보다 더 멀어진 시편 위의 점으로 제한한다. 구멍의 중심으로부터 굽힘 시편의 중성축까지 굽힘보정을 위해 다른 변수와 같이 거리의 변량에 따른 영향을 조사한다.

수정된 보정함수에 대한 보정계수(상수) C_1 , C_2 및 C_3 가 시편의 중성축과 관련하여 구멍의 각 위치에서 계산된다. 이 값들은 중성축의 영향으로 인해 구멍과 중성축 사이의 거리 d 에 따라 변하기 때문이다.

C_1 , C_2 및 C_3 에 대한 곡선들은 각 구멍의 위치에서 계산된 값들로부터 구성된다. 최종 잔류응력은 C_1 , C_2 및 C_3 에 대한 곡선을 근거로 계산하며 미지의 응력장을 갖는 시편에 2개의 구멍을 뚫음으로 수정된다.

2) Blind-hole Drilling 기법에 대한 유한요소해석 의 요약

A. 보정(Calibration)

a. 일축응력장

해석은 선형탄성시스템으로 제한되므로 이완된 변형률은 시편안에서 응력수준에 비례한다. 구멍은 자유단의 영향을 배제하기 위해 시편의 중앙에 위치한다. Table 1.에서 나타낸 바와 같이 균일인장하에 있는 알미늄과 강의 시편에 대한 한 쌍의 보정계수 A, B를 찾을 수 있다.

Table 1. Calibration Constants of Aluminium and Steel Specimens for Uniform Stress Fields

Constant Specimen	FEM Calibration	Experimental Calibration	Calibration Factor
ALUMINIUM	$A=-7.467 \times 10^{-9}$ $B=-2.060 \times 10^{-8}$		
STEEL	$A=-2.855 \times 10^{-9}$ $B=-8.570 \times 10^{-9}$	$A=-2.444 \times 10^{-9}$ $B=-7.337 \times 10^{-9}$	0.85586

b. 선형적으로 변하는 응력장

ASTM E-837 요구조건을 만족하는 최소 시편규정은 실제 잔류응력장과 관련하여 사용되기

때문에, 시편의 자유단의 영향은 고려되지 않는다. 하지만 Fig. 9에 지시된 것과 같이 굽힘시편의 중성축과 관련하여 구멍의 위치는 구멍 인근의 응력변형을 영향을 끼친다. 이완된 변형을 구멍이 시편의 중성축에 가까이 감에 따라 선형적으로 변하지 않는다. Fig. 10, 11, 12는 서로 다른 구멍위치에서 보정계수 C_1 , C_2 및 C_3 의 변량을 나타낸다. 곡선은 거리(d)가 대략 0.2in보다 적은 구멍위치에서 급격하게 변화되고 있다.

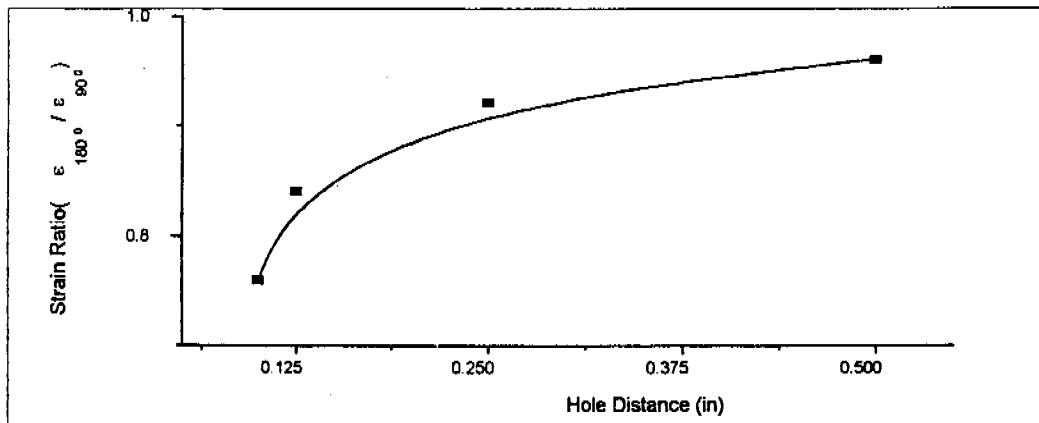


Fig. 9 Effect of Distance(d) with respect to Neutral Axis of Bending Specimen on the Shape of Strain Circle after Drilling.

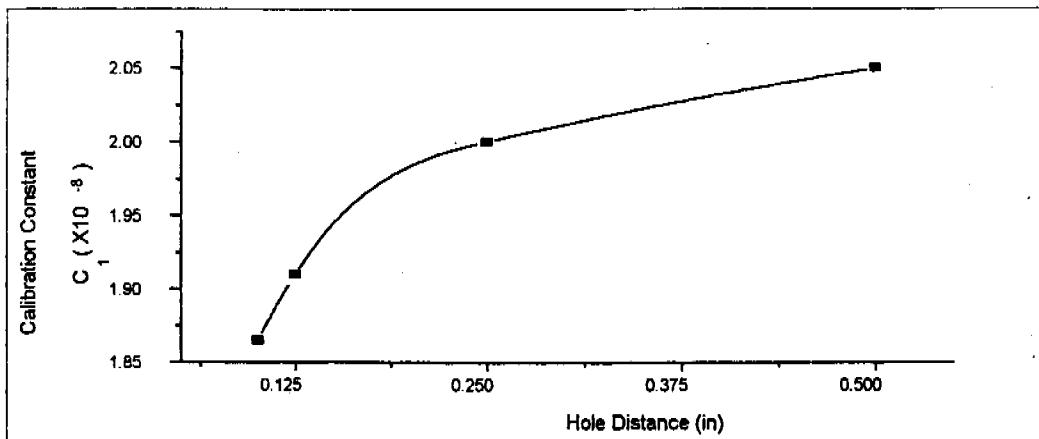


Fig. 10 Calibration Constant C_1 for Aluminium based on FEM Calculations.

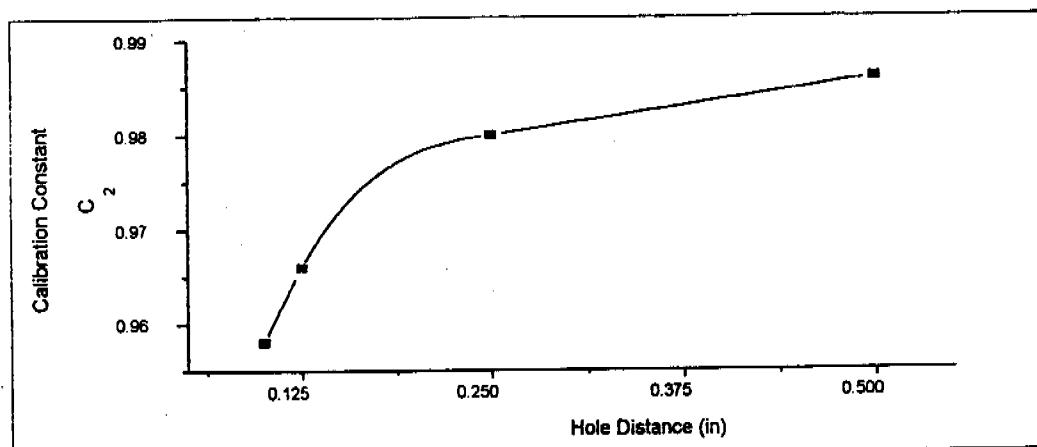


Fig. 11 Calibration Constant C_2 for Aluminium based on FEM Calculations.

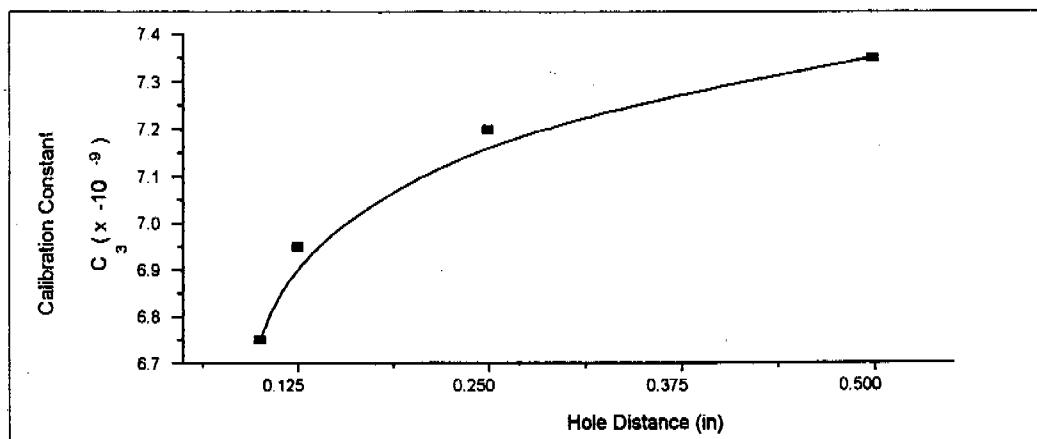


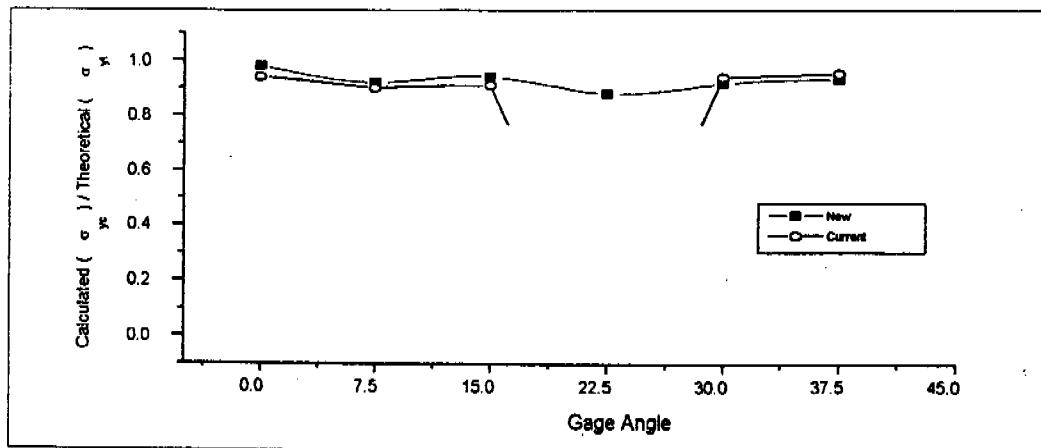
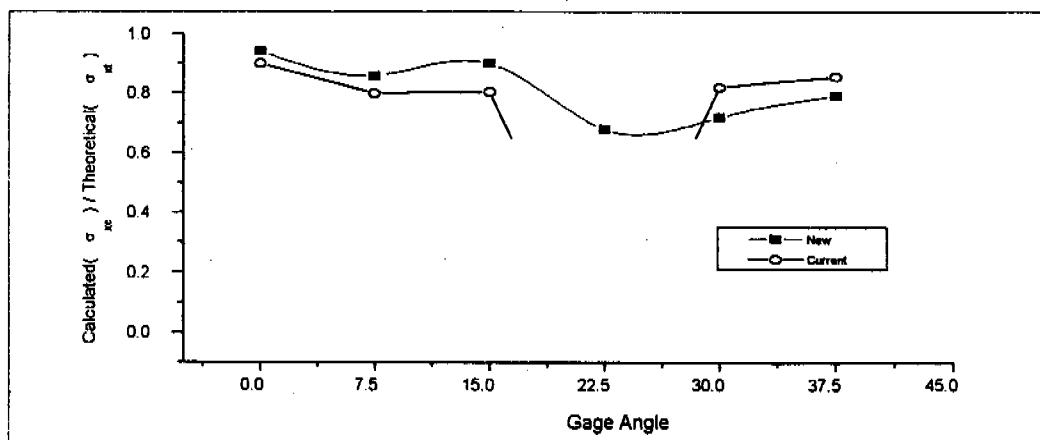
Fig. 12 Calibration Constant C_3 for Aluminium based on FEM Calculations.

B. 이축 응력장에서의 이완된 변형율로 부터 응력 환산

a. Gage 회전각

Fig.13.과 14.는 결과의 정확성에 있어서 X, Y방향 각각에 대한 시편의 주축에 관한 계이지의 회전각도의 영향을 나타낸다. Fig. 13.에서와 같이, 천공으로 인한 스트레인의 변화로부터 Y축에 서의 계산된 응력값들의 차이는 현저하지 않다. 그러나 $\theta=22.15^\circ$ 에서만은 현재의 방법으로는 실 값과 틀린값을 나타낸다.

새로운 방법은 현재의 방법보다 2.2-4.3% 더 좋은 값을 얻을 수 있다. 반면, Fig. 14.는 새로운 방법이 X축 방향에 대해 현재의 방법보다 4.4-6.2% 더 정확한 값을 얻는다.

Fig. 13 Effect of Gage Angle on Calculated stress(σ_{yc}) Calibration at $d=0.5"$.Fig. 14 Effect of Gage Angle on Calculated stress(σ_{xc}) Calibration at $d=0.5"$.

b. 응력의 기울기

응력의 기울기의 변화는 Fig. 15에서와 같이 결과치의 정도에 거의 영향을 끼치지 않는다. 그리고 새로운 방법은 현재의 방법보다 거의 5-11%정도 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

또한 Fig. 16과 같이 $d=0.125\text{in}$ 구멍위치에서 $\theta = 0^\circ$ 에서 약 19%, $\theta = 15^\circ$ 에서는 대략 36%의 개선이 이루어 졌다.

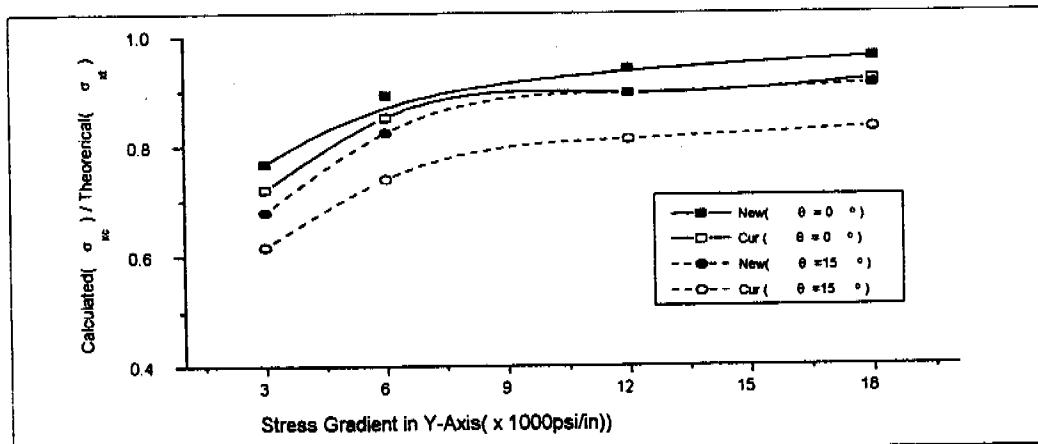


Fig. 15 Effect of Stress Gradient on Calculated stress(σ_{xc}) Calibration at $d=0.5''$.

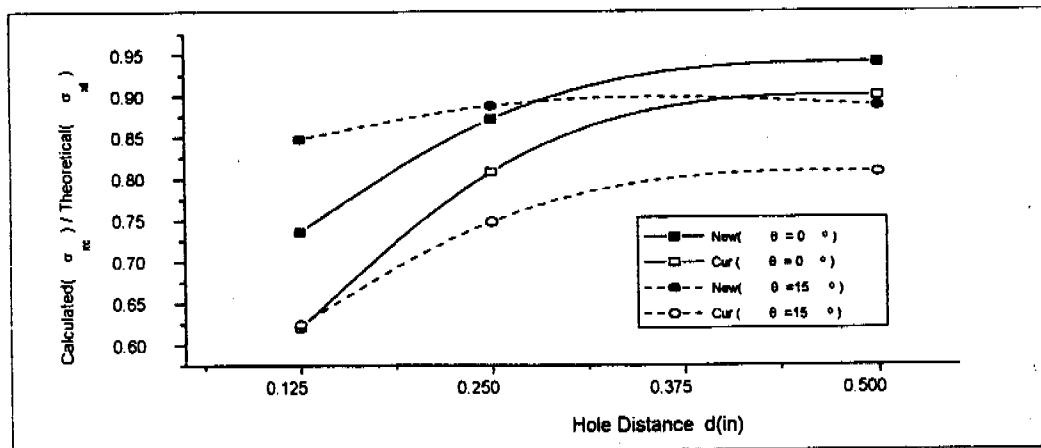


Fig. 16 Effect of Hole Distance on Calculated stress(σ_{xc}) Calibration at $d=0.5''$.

3.3 실험적인 검증

1) 시편의 준비

A. 재료

Aluminium 5083-O

Steel C-1081 cold rolled flat bar

Stainless steel SUS-304

B. 시편규격 및 응력의 제거

시편의 촌법은 굽힘시편의 중성축 영향에 대한 고려와 ASTM-E837(Table 2.)의 요구조건에 근거하여 선택한다.

시편의 폭	2 in
하중점간의 거리	11 in(인장시편)
	3 in(굽힘시편)
시편의 두께	0.25 in

모든 시편은 제조과정에서, 그리고 시편 준비를 위한 기계가공 때문에 잔류응력을 갖고 있다. 보정중 천공으로 인한 실제 스트레인을 위하여 이들 잔류응력을 제거되어야 한다. 현미경 조직의 변화와 기계적 성질 가운데 인장과 충격치에 관계없이 시편의 잔류응력을 최대한 이완시키기 위해 가장 높은 가능한 온도와 각 재료를 위한 비교적 긴 시간이 선택되었다.(Table 3)

Table 2. Requirements for the Calibration Specimen by ASTM E - 837

Dimension Requirements of a Calibration Bar by ASTM - E 837
The Width Dimension, W \geq 10 D (Gage Circle)
The Length between Grips \geq 5 W
The Thickness, T \geq 4 D ₀ (Hole Diameter)

Table 3. Stress Reliving Heat Treatment Date

MATERIAL	SOAKING		COOLING METHOD
	TEMPERATURE	TIME	
ALUMINUM	650°F	-	IN THE AIR
STEEL	1700°F	5 Hr.	IN THE FURN.
STAINLESS STEEL	1900°F	5 Hr.	IN THE FURN.

2) 스트레인 게이지

이 연구에서는 Strain Gage 062RE가 사용되었다. 보정시편(Calibration Specimen)에 가해진 응력을 측정하기 위하여 하나 또는 두 개의 Control Gage를 인장 및 굽힘시편 각각에 부착한다. 인장시편에 Control Gage는 표면 응력을 계측하기 위하여 표면 중앙에 부착한다. Strain Rosette Gage에는 서로 다른 방향의 세 개의 Element가 있다. Element 1, 3의 방향은 시편의 종횡 방향과 각각 일치한다. 이 Gage의 배열은 다른 어떤 Gage의 배열보다 더 민감한 계측치를 제공한다.

3) 천공 및 strain 측정 장비

RS-200 Milling Guide

역상 원추형 Carbide 팁 Cutter (1/16" dia.)

양날형 Milling Cutter

고속 에어 터빈 드릴

Data Acquisition System 4000

Compressor(소형) 및 압력조절 장치

전동 Hand 드릴

4) 하중

구조물에 존재하는 Notch는 구조적 불연속을 유발하며 응력집중계수의 크기에 따라 국부적으로 항복이 발생할 수 있다. 이 연구에서는 보정을 위한 어떤 하중도 오차를 피하기 위해 재료의 1/3 항복응력보다 적은 하중을 사용한다.

응집부의 응력장은 Y-축 방향으로 하나의 균일 인장 응력장과 X-축에 방향으로 두 개의 선형적으로 변하는 인장응력으로 단순화된다. 요구되는 응력장을 발생시키기 위해 단순인장과 순수 굽힘장치가 보통 사용된다. 정확한 응력장을 만들기 위해 실제 시편이 사용되며, 장치에 의해 발생된 응력장을 수치계산에 의해 확인한다.

5) 측정결과의 요약

End-mill Cutter에 대한 천공변수를 연구하기 위하여 알루미늄 시편이 선택되었다. 천공압력, 천공속도(RPM) 그리고 냉각 방식을 포함한 3개의 주된 변수들이 조사되었다. Table 4..는 RPM의 변화에 따른 천공으로 인한 스트레인의 현저한 변화는 없는 것으로 나타난다. 이는 알루미늄 시편에서의 천공작업에서는 RPM이 유발된 응력에 거의 영향을 미치지 않음을 의미한다.

절삭응력에 대한 천공압력의 효과는 Table 4.와 같다. 그 결과는 천공압력이 천공하는 동안 절삭응력의 사실상의 총계의 발생원인임을 보여준다. 이같은 이유 때문에 천공을 위해 불필요하게 높은 압력이 적용되어서는 안된다. 세 번째 변수인 냉각방식은 중간 압력하에서 천공할 때 공기냉각으로부터 수냉에 이르기까지 절삭응력을 변화시킨다. 그러나 다른 변수들, 특히 천공압력이 정확하게 선택되는 한 절삭응력을 감소시키기 위한 수냉각방식을 사용하는 것은 그리 중요하지 않다. 결론적으로 천공변수의 조사는 최소의 천공압력이 절삭응력을 감소시키기 위한 가장 중요한 점임을 보여준다.

고속 천공장비는 단지 연강과 스텐레스강 시편에 천공할 때만 사용된다. 이 장비를 위한 RPM과 천공압력을 미리 결정해야하고 변경되어서는 안된다. 고속 천공장비용 탄소강 Cutter의 공구 수명은 알루미늄과 같은 연질재료 천공용 End-mill Cutter의 수명보다 짧다. 그러므로, Fig. 17.에 나타난 것 같이 절삭응력에 있어서 서로 다른 Cutter에 의해 천공된 구멍의 변화에 대한 영향이 조사되었다. 그 결과는 직경이 큰 Cutter에 의한 구멍이 더 작은 직경의 Cutter 경우보다 절삭응력이 더 크게 나타남을 보인다.

연강이나 스텐강의 시편의 천공을 위한 탄소강 Cutter의 공구수명이 Fig. 18.과 19.에 나타나 있다. 결과는 스텐강의 천공이 연강의 경우보다 더 빨리 공구가 마손됨을 나타낸다. 공구가 손

상을 받자마자 절삭이 갑자기 느려지고 매우 높은 절삭응력이 발생된다. 공구의 예리함은 절삭하는 동안 절삭속도에 의해 체크 될 수 있다.

Table 4. Variation of Machining Strains of the Aluminium Specimen due to Changes of Drilling Parameters.

Drilling Parameter a~d	Air Cooling/Water Cooling Released Strain ($\mu\epsilon$)		
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
a	-46.0/-40.5	-74.0/-31.5	-30.0/-5.0
b	-8.6/-3.6	13.6/-31.8	3.0/-23.5
c	-43.6/-6.0	-56.0/1.8	-12.0/13.8
d	-11.0/10.8	-18.0/8.1	9.0/13.5

a : 5-10 RPM, Med. Drilling Pressure.

b : 5-10 RPM, Light Drilling Pressure.

c : 150-200 RPM, Med. Drilling Pressure.

d : 150-200 RPM, Light Drilling Pressure.

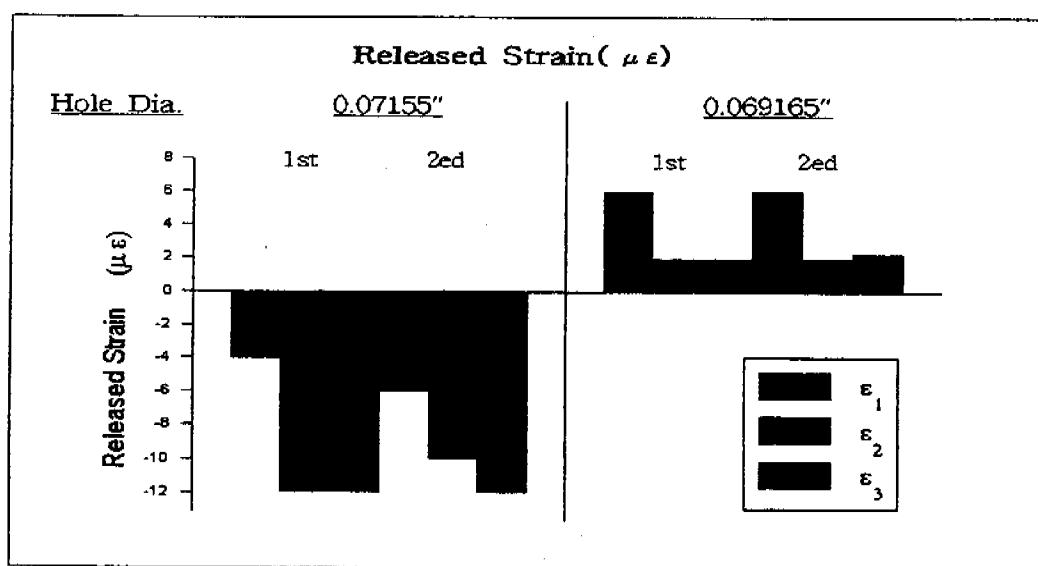


Fig. 17 Variation of Machining Strains of Steel Specimen due to Change of Diameter of Cutter.

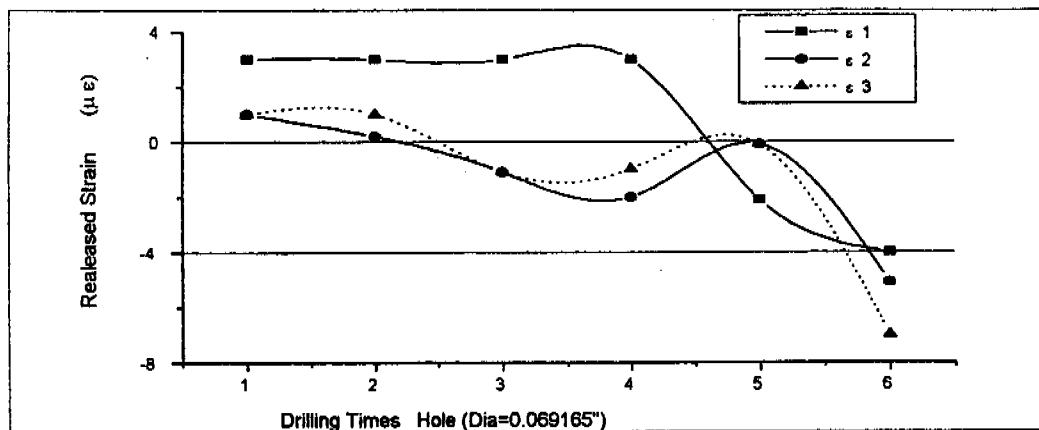


Fig. 18 Change of Machining Strains of Steel Specimen by Drilling Hole using One Cuttre.

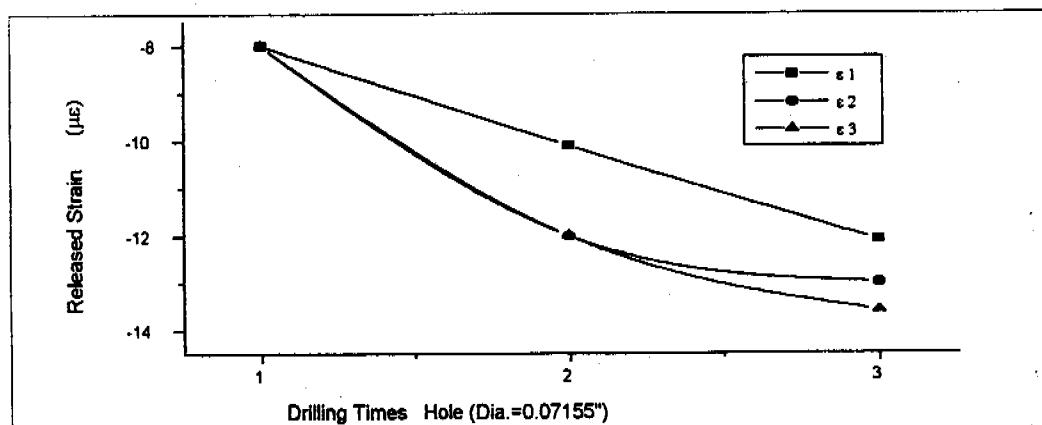


Fig. 19 Change of Machining Strains of Stainless Steel Specimen by Drilling Hole using One Cutter.

4. 결 론

- Blind-hole 천공기법에 의한 보정시편은 절삭응력과 보정상수를 정확하게 결정하기 위해 열처리를 통한 응력완화가 이루어져야 한다. 그렇지 않으면, 천공으로 인한 스트레인 기록은 하중과 시편과의 잔류응력 및 절삭응력으로 인한 스트레인을 포함하게 될 것이다.

- 2) End-mill Cutter로 알루미늄 시편에 구멍을 뚫을 때, RPM의 변화는 절삭응력에 그리 큰 영향을 주지 않는다. 수냉방법도 약간 좋은 결과를 주긴 하지만 공냉방법과 비교해 볼 때, 무시 할만하다. 가장 중요한 변수는 천공압력이다. 그래서 절삭율을 제어하는 천공압력이 천공전에 주의 깊게 계측되어야 하며 천공중에도 계속 유지되어야 한다.
- 3) 공구의 직경의 변화는 절삭응력의 불만족스런 수준을 야기한다. Cutter의 직경도 보정경우와 같이 동일한 절삭응력을 유지하도록 선택되어야 한다. Cutter의 사용기간도 시편의 재질에 따라 결과치에 영향을 미칠 수 있다. 시편에서는 천공과정에서의 급속한 절삭응력의 변화는 없다. 반면 가공 경화된 재료(예를 들면 스테인레스 SUS304)를 천공할 때 절삭응력은 급속히 증가하고, 공구의 수명 또한 매우 짧다.
- 4) Blind-hole Drilling방법에 의해 계측된 균일 응력장의 정도는 선형적으로 변하는 응력장의 정도보다 효과적이다. Gage 각도의 변화는 15° 이내에서 4% 내지 6% 까지 결과치의 정도에 영향을 끼친다. 새로운 방법에 의한 결과치의 개선은 각도 22.5° 에 다다르기까지 더 커진다. 그러므로 정도 유지를 위해 적은 Gage 각도에서 사용되어야 한다.
- 5) 응력구배는 결과에 오차를 유발시킬 또 하나의 계수이다. 비록 현재의 방법보다 새로운 방법이 더 좋은 결과를 준다고 하더라도, 기지의 응력구배를 가지고 있는 보정시편을 사용함으로 더 개선의 여지가 있다.
- 6) 압축과 인장의 경계로부터 구멍까지의 거리에 대한 오차의 영향은 새로운 기법을 사용하므로 거리변화에 대해 4%~19%까지 최소화된다. Gage 각도가 증가됨에 따라, 결과치는 개선 된다.
- 7) End-mill Cutter는 속도 조절이 가능한 전기 수동 드릴로 취급이 간편도록 설계되어 있다. 절삭응력의 평가에서 논의 된바와 같이 천공압력은 현저하게 절삭응력에 영향을 끼친다. End-mill Cutter를 통해 절삭응력을 감소시키고 더 좋은 제어를 위해 천공하는 동안 최적의 천공압력을 유지 및 조정할 수 있는 장치가 도움이 될 것이다.
- 8) 이 연구에 사용된 Model과 계산에는 국부적인 항복으로 인한 소성변형의 효과가 포함되어 있지 않다. 그러므로 구멍가족에서 응력 집중으로 인하여 항복응력이 초과되지 않도록 하중이 적용되어야 한다. 또한 Strain Gage의 부착위치도 보정시편에서와 똑같은 응력방향을 유지하는데 어려움이 있다. 균일 또는 인장응력의 합력이 고려될 때 여기에 사용된 보정함수는 인장 및 압축응력 경계에 가까운 계면 영역에서는 정확한 결과치를 기대하기 어렵다.

REFERENCES

- (1) Mather, J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation around Drilled Hole," Trans. ASME, Vol.56, 1934, pp. 249-254.

- (2) Rendler, N. J. and Vigness, I., "Hole-drilling Strain Gage Method of Measuring Residual Stresses." Experimental Mechanics, Vol.6, No.12, 1972, pp.577-586.
- (3) Schajer, G. S., "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurement." Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.103, 1981, pp. 157-163.
- (4) Sandifer, J. P. and Bowie, G. E., "Residual Stress by Blind-hole Method with Off-center Hole." Experimental Mechanics, Vol.18, 1978, pp. 173-179.
- (5) Ajovalasit, A., "Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Method : Influence of Hole Eccentricity." Journal of Strain Analysis, vol. 14, No.4, 1979, pp. 171-178.
- (6) Measurement Group, 1985, "Measurement of Residual Stresses by Hole-drilling Strain Gage Method." TECH NOTE TN-503-1, U.S.A.
- (7) Rendler, N. J. and I. Vigness, "Hole-drilling Strain Gage Method of Measuring Residual Stresses." Proc. SESA XXIII, No.2, pp. 577-586(1981)
- (8) Masubuchi, K., Analysis of Welded Structures. First Edition. New York: Pergamon Press, 1980.
- (9) "Measurement of Residual Stresses by the Blind Hole Drilling Method." Technical Bulletin T-403. Photoelastic Inc., Malvern, Pa.
- (10) "Instruction Manual Model RS - 200 Milling Guide," Measurement Group Inc., 1983.
- (11) Nawwer, A. M., McLachlan, K., and Shewchuk, J., "A Modified Hole-drilling Technique for Determining Residual Stresses in Thin Plates," Experimental Mechanics, Vol.16, 1976, pp.226 -232.
- (12) Lee, J.Y. "Determination of Residual Stresses in Weldments using Blind-hole Drilling Technique," M.S. Thesis at O.S.U., Summer, 1985.
- (13) Kelsey, R. A., "Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method." Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, Vol. 14, No.1, 1956, pp. 181-194.
- (14) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., Theory of Elasticity. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 1970.
- (15) "Strain Gage Installations with M-Bond 200 Adhesive," Instruction Bulletin B-127-6. Measurements Group Inc., Raleigh, NC, 1979.