

## 구멍뚫기법을 이용한 잔류응력 측정시 경사구멍의 영향

### Influence of the Inclined Hole in Residual Stresses Measurement Using the Hole-Drilling Method

김 철\*, 양 원 호\*\*, 석 창 성\*\*, 허 성 필\*\*\*  
Cheol Kim, Wonho Yang, Changsung Seok, Sungpil Heo

#### ABSTRACT

The hole-drilling method makes a little hole through the metal surface that has residual stress and measures the relieved stress with a strain gage. It is used widely in measuring the residual stress of surfaces. In this method, the inclined hole is one of the source of error. This paper presents a finite element analysis of influence of the inclined hole for the uniaxial residual stress field. The stress differences between measured and applied residual stress increase proportionally to inclined angle of the hole. The correction equations which easily obtain the residual stress taking account of the inclined angle and direction are derived. The measurement error of stress due to the inclined hole can be reduced to around 1% through this study.

주요기술용어 : Hole-drilling method(구멍뚫기법), Finite element analysis(유한요소해석), Residual stress(잔류응력), Inclined hole(경사구멍)

#### 1. 서 론

잔류응력(residual stress)은 외력이 작용하지 않는 상태에서 기계나 구조물 등의 내부에 존재하는 응력을 말한다. 이러한 잔류응력은 작용응력과 중첩되어 기계나 구조물의 피로수명에 큰 영향을 미치는데, 특히 열간 성형을 거친 재료나 용접에 의하여 결합된 구조물의 경우에는 잔류응력의 크기가 항복응력 수준까지 되는 경우도 있으므로 잔류응력이 없는 것으로 가정하고 설계하였을 때에는 안전성에 심각한 문제를 일으킬

수 있다. 따라서, 기계나 구조물의 설계시 잔류응력의 크기를 정확히 파악해야 하며 이를 위해서는 정확한 잔류응력의 측정이 매우 중요하다.

구멍뚫기법(hole-drilling method)은 잔류응력이 존재하는 금속 표면에 작은 구멍을 뚫어 이때 이완되는 응력을 스트레인게이지로 측정하는 방법으로서, 표면의 잔류응력 측정에 널리 사용되고 있는 방법이다. 이 방법은 1930년대에 Mathar<sup>1)</sup>가 최초로 제안한 이후 그 이론과 적용에 있어서 꾸준한 발전이 이루어졌으며, 보다 정확하고 보다 간편한 측정기구와 방법에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.<sup>2,4)</sup>

현재 구멍뚫기법의 표준 시험법은 ASTM E 837<sup>3)</sup>에 규정되어 있는데, 특히 구멍의 위치에 따

\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

라 측정치가 달라지기 때문에 ASTM에서는 수직 구멍뚫기를 전제로 하여 스트레인게이지 중심과 구멍 중심 사이의 편심량을 0.025mm 이내로 제한하고 있다. 그러나, 일반적인 기계나 구조물에서는 측정 대상이 수평하지 않은 경우가 많은데, 이러한 경우 RS-200같은 전용 측정기구를 이용하여도 정확히 수직으로 구멍뚫기 작업을 수행하기 어렵다. 결과적으로 구멍이 경사지게 뚫어지면서 경사구멍으로 인한 오차가 발생된다. 따라서, 이러한 경사구멍 뚫기를 한 경우, 오차의 크기가 어느 정도인지 파악하고 더 나아가 오차를 보정해줄 수 있는 방법이 요구된다. 더욱이 구멍뚫기법의 특성상 동일 위치에서 측정을 다시 하는 것은 불가능하기 때문에 어느 정도 구멍이 경사지게 뚫어졌더라도 측정치를 보정해서 사용할 수 있는 방법이 필요하다 하겠다.

지금까지의 구멍뚫기법에 관한 연구는 주로 구멍뚫기 기법에 관한 연구<sup>2,3)</sup> 이완상수를 결정하는 방법에 관한 연구<sup>6-9)</sup> 그리고 측정 오차에 관한 연구<sup>10-12)</sup>가 이루어지고 있다. 이 중에서 측정 오차에 관한 연구는 대부분 구멍 편심의 영향이나 구멍의 진원도의 영향 등에 대하여 이루어졌을 뿐 경사구멍의 영향에 관한 연구보고는 거의 없었다.

따라서, 본 연구에서는 구멍뚫기법에서 경사구멍에 따른 오차의 크기와 경향을 파악하고자 하며, 나아가서 1축 잔류응력장에서 경사구멍에 의한 오차를 보정해 줄 수 있는 보정식을 제안하고 이의 효용성을 검토하고자 한다.

## 2. 구멍뚫기법 개요

일반적으로 구멍뚫기법에 사용되는 게이지는 Fig. 1과 같이 측정 위치를 중심으로 세 개의 로제트 스트레인게이지가 있고 이 스트레인게이지 중심에 작은 구멍(대개 지름이 1.57mm, 3.17mm)을 뚫도록 되어 있다. 일반 금속재료의 경우가 구멍 때문에 구멍 주위 변형률의 재 분포가 발생하며 표면에 부착한 스트레인게이지를 이용하여 이 변화량을 측정한다. 측정된 변형률은

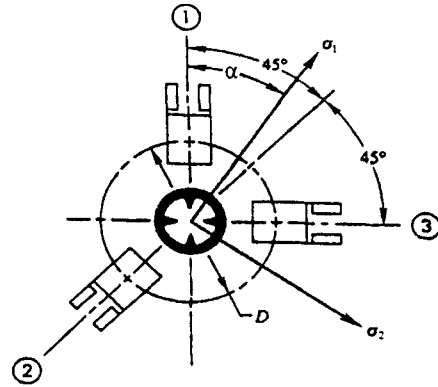


Fig. 1 Typical rosette strain gage for the hole-drilling method

구멍 위치에서 구멍을 뚫기 전에 존재하던 잔류응력의 크기와 관계가 있으며, 식(1)과 식(2)를 이용하여 최대 잔류응력의 크기와 방향을 결정할 수 있다.

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{4A} \pm \frac{\sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2}}{4B} \quad (1)$$

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

여기서,  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ : 이완상수

식(1)에서 이완상수(calibration coefficients)  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ 는 구멍 직경, 게이지 직경 등에 따라 각각 달라진다. ASTM에는 식(3)을 이용하여 이완상수를 구하는 방법이 제시되어 있는데, 해석적인 방법이나 실험적인 방법으로 식(3)의  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_3$  및  $\sigma_c$ 를 구하여 이완상수  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ 를 결정할 수 있다.

$$\bar{A} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2\sigma_c} \quad (3)$$

$$\bar{B} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2\sigma_c}$$

여기서,  $\sigma_c$ : calibration stress

$\epsilon_1$ : relieved strain at gage 1

$\epsilon_3$ : relieved strain at gage 3

### 3. 경사구멍에 대한 유한요소해석

#### 3.1 해석모델 및 방법

실험적인 방법으로 오차를 해석하는 데는 측정값 자체에 이미 오차가 포함될 수 있으므로 정확한 오차를 파악하는데 한계가 있다. 이러한 경우 유한요소법을 이용하면 알고 있는 응력장을 정확히 설정할 수 있으므로 오차를 해석하는데 효과적이다. 본 연구에서는 해석모델을 1축 잔류응력이 작용하는 평판 중앙에 구멍뚫기법용 스트레인게이지를 부착한 경우로 설정하였으며, Fig. 2에 나타내었다. 스트레인게이지 부분의 형상은 현재 널리 사용되고 있는 MM사의 TEA-XX-062RK-120 모델을 기준으로 설정하여 구멍직경  $D_0$ 는  $\phi 1.57\text{mm}$ , 스트레인게이지 직경  $D$ 는  $\phi 5.13\text{mm}$ 로 하였다. 또한, 오차의 크기를 정확히 알기 위해서는 알고 있는 응력 상태를 가정하고 잔류응력을 계산해야 하므로 구멍을 뚫기 전부터 100MPa의 1축 인장응력을 작용시켜서 구멍을 뚫기 전의 응력 상태가  $\sigma_x$ 는 100MPa,  $\sigma_y$ 와  $\tau_{xy}$ 는 0이 되도록 하였다.

유한요소망은 스트레인게이지 모델과 일치시키기 위하여 3차원으로 구성하였으며, 총 7개의 층으로 나누어서 깊이방향으로 구멍부 요소를 제거해 갈 수 있도록 하였다. 재료 물성치로 탄성계수  $E$ 는 205GPa, 푸아송 비  $\nu$ 는 0.3을 적용하였다. Fig. 3은 본 해석에 사용된 유한요소망을 나타낸 것이며, Fig. 4는 (a)에 구멍을 뚫기 전, (b)에 수직 구멍뚫기를 한 경우를 나타낸 것이며, (c)는 60° 방향으로 경사구멍을 뚫은 경우의

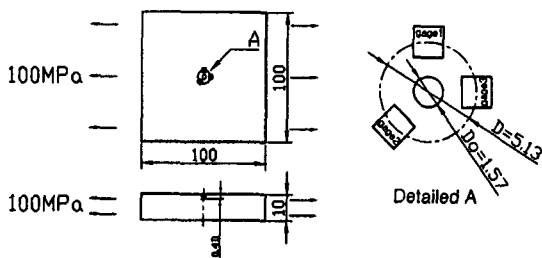


Fig. 2 Model configuration

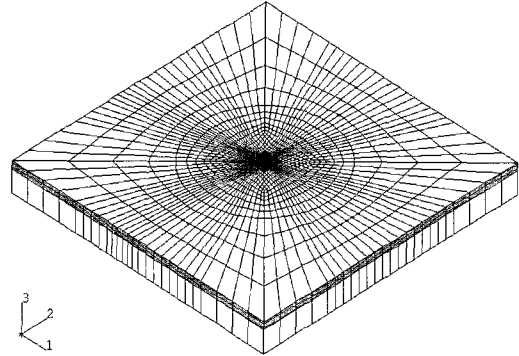


Fig. 3 3-Dimensional finite element model

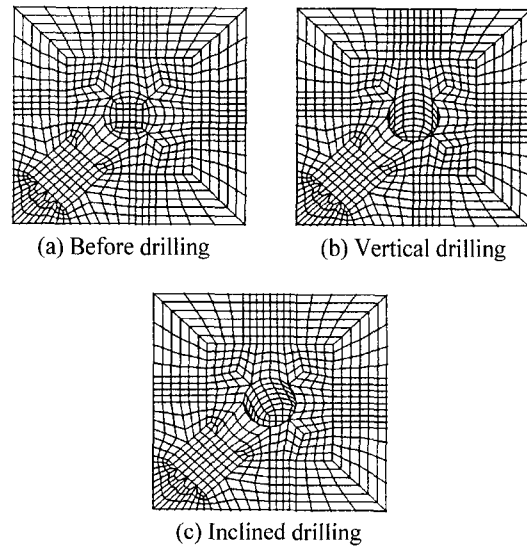


Fig. 4 Strain gage and hole part

스트레인게이지 부분을 자세히 나타낸 것이다. 특히 1개의 스트레인게이지를 48개 요소로 구성하였으며, 이들 48개 요소에서의 평균변형률을 계산하여 각 스트레인게이지 위치에서의 변형률로 하였다. 요소로는 8절점 솔리드 요소(solid element)를 14,210개 적용하였고 절점 수는 16,648개이다. 본 연구의 해석 프로그램에는 상용 유한요소해석 코드인 ABAQUS/Standard를 사용하였다.

이와 같은 모델을 이용해서 구멍 경사도에 따른 오차를 해석하기 위하여 경사각을 3°, 6°, 9° 및 12°로 증가시켜가면서 해석을 수행하였다. 또한, 경사진 구멍은 2개의 변수인 구멍의 경사각

Table 1 Verification results for FE model

Applied residual stress(MPa)		HDM analysis result (MPa, deg)			Stress error (%)
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\alpha$	
100	0	99.95	0.0	0.07	0.05
100	100	99.43	99.43	0.01	0.57
100	-100	100.09	-100.04	0.01	0.09

(inclined angle)과 경사방향(direction of incline)이 제시되어야 정확한 위치가 정의될 수 있으며, 이 때의 경사방향은 스트레인게이지의 구멍에 대한 상대적인 각도를 의미한다. 따라서, Fig. 1의 1번 스트레인게이지 방향을 경사방향의 기준으로 하여 시계방향으로 30°씩 경사방향을 변화시켜가면서 경사방향의 변화에 따른 오차를 해석하였다.

### 3.2 해석모델 검증

본 연구에서 사용한 유한요소망의 타당성을 검증하기 위하여 먼저, 수직 구멍뚫기를 한 경우의 잔류응력 해석을 수행하였다. 구멍을 뚫기 전 후에 각 스트레인게이지 위치에 있는 요소에서의 평균 변형률 값을 계산하여 변화량을 구하고, 식(1)과 식(2)에 이 값들을 대입하여 최대응력의 크기와 방향을 계산하였다. 한편, 이완상수  $\bar{A}$ 와  $\bar{B}$ 는 식(3)의  $\epsilon_1, \epsilon_3$  및  $\sigma_c$ 를 유한요소해석으로 구하여 결정하였는데,  $\bar{A}$ 는  $-3.0225 \times 10^{-7}$ ,  $\bar{B}$ 는  $-6.5565 \times 10^{-7}$ 으로 계산되었다.

세 가지 잔류응력 분포에 따라 해석을 수행한 결과 수직 구멍뚫기를 한 경우의 오차는 1% 이내로 잘 일치하였으며 Table 1에 그 결과를 정리하였다.

## 4. 해석결과 및 오차 보정식

### 4.1 경사구멍에 의한 오차 해석

본 연구에서는 먼저 경사구멍으로 인한 오차

의 크기와 그 경향을 해석하였다. Fig. 5는 경사방향의 변화에 따른 오차를 나타낸 것으로서, 경사각을 증가시켜가면서 해석한 결과이다. 해석 결과 가장 큰 값을 기준으로 볼 때 12°의 경사구멍을 뚫으면 최대 10% 정도의 측정 오차가 발생하였다. 또한, Fig. 5에서 구멍의 경사각이 증가할수록 측정되는 잔류응력 값에 포함되는 오차도 커지고 있으며, 1번 스트레인게이지 방향을 기준으로 하여 구멍이 0°~180° 방향으로 경사진 경우에는 실제 잔류응력 보다 과대평가 되고, 180°~360° 방향으로 경사지게 되면 잔류응력이 과소평가 됨을 알 수 있다.

특히, 90°와 270° 방향으로 경사구멍을 뚫었을 때 가장 큰 오차가 발생하였는데, 이는 최대 잔류응력 방향과 같은 방향으로 구멍이 경사지게 되어 스트레인게이지 위치에서의 변형률의 변화가 크게 발생하기 때문이다. 반면에 최소 잔류응력 방향인 0°와 180° 방향으로 경사구멍을 뚫은 경우에는 스트레인게이지 위치에서의 변형률의 변화가 상대적으로 작게 발생하기 때문에 가장 작은 오차가 발생되었다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 경사각의 크기에 따른 오차를 경사방향에 따라 나타낸 것으로서, 오차의 크기는 경사각의 크기에 따라 선형적으로 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다.

### 4.2 오차 보정식

구멍뚫기법으로 잔류응력을 측정할 때 경사

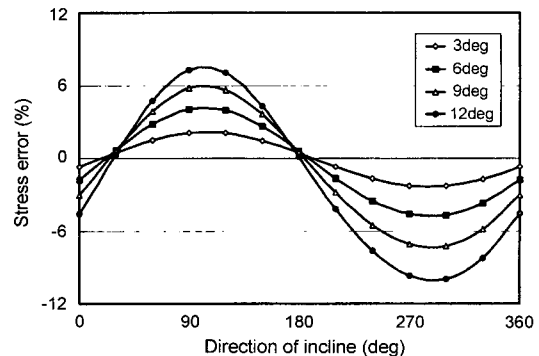


Fig. 5 Stress error along the direction of incline

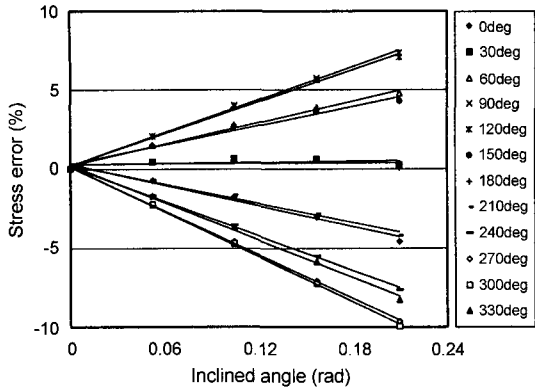


Fig. 6 Stress error versus inclined angle along the direction of the incline

구멍을 뚫었을 경우 측정치에는 어느 정도 오차를 포함하게 된다. 그러나, 구멍뚫기법의 특성상 동일 위치에서 다시 측정하는 것은 불가능하므로 측정결과에 경사구멍에 따른 오차를 보정해 주어야 정확한 잔류응력의 크기를 알 수 있다. Fig. 6에서 구멍의 경사각과 오차의 크기 사이에는 선형적인 관계가 있으므로 1축 잔류응력장에서 구멍 경사각과 오차와의 관계는 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$error(\%) = m \times \psi \tag{4}$$

여기서,  $m$  : 직선의 기울기

$\psi$  : 경사각(rad)

식(4)에서 기울기  $m$ 은 구멍의 경사방향에 따라 다르므로 Fig. 6에서 각각의 직선을 최소제곱법으로 곡선적합(curve fitting)한 후 기울기를 경사방향에 따라 나타낸 것이 Fig. 7이다. Fig. 7의 곡선은 식(5)와 같은 5차 다항식으로 곡선적합을 시킬 수 있으며, 이때 결정계수(coefficient of determination)  $R^2$ 이 0.998로서 양호한 곡선적합 결과를 얻었다.

$$m = -0.2224 \theta^5 + 3.6275 \theta^4 - 17.381 \theta^3 + 14.210 \theta^2 + 43.773 \theta - 22.412 \tag{5}$$

여기서,  $\theta$ : 경사방향(rad)

결과적으로 구멍뚫기법에서 경사구멍을 뚫

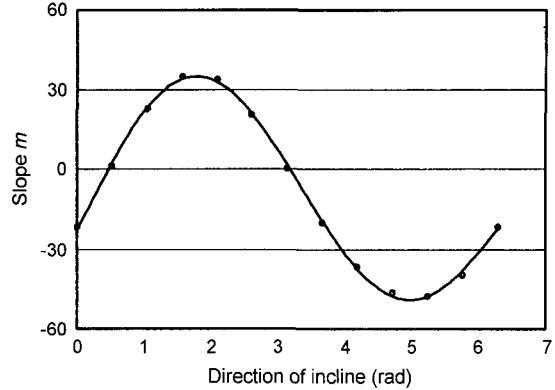


Fig. 7 Slope  $m$  of the stress error lines in Fig. 6

어서 측정되었을 경우에는 경사각의 크기와 방향을 확인하고, 식(5)로부터 기울기  $m$ 을 구한 후 이 값을 식(4)에 적용하여 오차의 크기를 구할 수 있다. 따라서, 이 오차만큼 잔류응력 측정치를 보정하여 경사구멍으로 측정된 경우에도 잔류응력의 참값  $S_{true}$ 를 식(6)과 같이 얻을 수 있겠다.

$$S_{true} = S_{measure} \left( 1 - \frac{error(\%)}{100} \right) \tag{6}$$

식(4)~(6)을 이용하여 1축 잔류응력장에서 경사구멍을 뚫었을 경우 오차의 크기 및 잔류응력 참값을 계산할 수 있는데, 몇 가지 경우에 대하여 이들 식의 효용성을 검토하였다. Table 2에 오차를 보정하지 않은 경우와 보정한 경우의 결

Table 2 Verification results for the correction equations

Applied residual stress (MPa)	Inclined angle (deg)	Direction of incline (deg)	HDM analysis results			
			Before correction		After correction	
			Residual stress (MPa)	error (%)	Residual stress (MPa)	error (%)
100	10	80	105.9	5.9	100.1	0.1
-200	15	250	-178.2	10.9	-197.6	1.2
300	10	90	322.0	7.3	299.1	0.3

과를 비교하였는데, 임의의 잔류응력, 경사각 및 경사방향에 대하여 구멍뚫기법을 적용한 결과 10% 내외의 경사구멍에 의한 오차가 발생되었으나, 식(4)~(6)을 이용하여 보정한 후에는 1% 내외의 오차를 포함하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 이 보정식을 이용한 경사구멍 오차의 보정은 효과적임을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 1축 잔류응력이 존재하는 경우에 경사구멍으로 인한 오차 해석과 오차의 보정식을 제안하고, 이에 대한 효용성 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1축 잔류응력장에서 구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정시 측정오차는 구멍 경사각의 크기에 따라 선형적으로 증가한다.
- 2) 구멍의 경사 방향이 최대 잔류응력 방향과 일치할 때 가장 큰 오차가 발생한다.
- 3) 경사구멍 뚫기를 한 경우 경사각 및 경사방향에 따라 오차를 보정해 줄 수 있는 보정식을 제안하였다.
- 4) 1축 잔류응력장에서 경사구멍을 뚫었을 경우 본 연구에서 제안한 보정식을 이용하면 잔류응력의 측정 오차를 1% 내외로 줄일 수 있다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) J. Mathar, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes," *Trans. ASME, Iron & Steel*, Vol.56, pp. 249-254, 1934.
- 2) M. T. Flaman, J. A. Herring, "Ultra-high-speed Center-hole Technique for Difficult Machining Materials," *Experimental Technique*, Vol.10, pp.34-35, 1986.
- 3) M. Tootoonian, G. S. Schajer, "Enhanced Sensitivity Residual-stress Measurements Using Taper-hole Drilling," *Experimental Mechanics*, pp. 124-129, 1995.
- 4) G. S. Schajer, M. Tootoonian, "A New Rosette Design for More Reliable Hole-drilling Residual Stress Measurements," *Experimental Mechanics*, pp.299-306, 1997.
- 5) "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method," *ASTM E 837*, 1992.
- 6) 주진원, 박찬기, "구멍뚫기법을 이용한 깊이방향으로 변하는 잔류응력 측정방법," *대한기계학회논문집(A)*, 제22권 제2호, pp.268-277, 1998.
- 7) G. S. Schajer, "Application of Finite Element Calibrations of Residual Stress Measurement," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.110, pp.338-343, 1981.
- 8) G. S. Schajer, "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I-Stress Calculation Procedures," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.103, pp.157-163, 1988.
- 9) D. Vangi, "Data Management for the Evaluation of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol.116, pp.561-566, 1994.
- 10) A. Ajovalastt, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Method : Influence of Hole Eccentricity," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 14, No.4, pp.171-178, 1979.
- 11) G. S. Schajer, E. Altus, "Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-drilling Residual Stress Measurements," *Transactions of the ASME*, Vol.118, pp.120-126, 1996.
- 12) 김 철, 석창성, 양원호, "구멍뚫기법을 이용한 잔류응력 측정시 구멍 편심의 영향," *대한기계학회논문집(A)*, 제24권 제8호, pp.2059-2064, 2000.