

구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정시 구멍 편심의 영향

김 철* · 석창성** · 양원호**
(1999년 12월 20일 접수)

Influence of the Hole Eccentricity in Residual Stresses Measurement by the Hole-drilling Method

Cheol Kim, Chang-Sung Seok and Won-Ho Yang

Key Words: Hole-Drilling Method(구멍뚫기법), Finite Element Analysis(유한요소해석), Residual Stress(잔류응력), Hole Eccentricity(구멍편심)

Abstract

The measurement of residual stresses by the hole-drilling method has been commonly used to evaluate residual stresses in structural members. In this method, one of the source of error is due to the misalignment between the drilling hole and strain gage center. This paper presents a finite element analysis of the influence of such misalignment for the uniaxial residual stress field. The stress error increases proportionally to hole eccentricity. The correction equations which easily obtain the residual stress taking account of the hole eccentricity are derived. The stress error due to the hole eccentricity decreases by approximately one percent using this equations.

1. 서 론

잔류응력은 주조, 용접, 성형, 기계가공 등 금속재의 제조, 가공 과정에서 빈번히 발생되는데 이렇게 생성된 잔류응력은 작용응력(service stress)과 중첩되어 기계나 구조물의 피로수명에 큰 영향을 주며, 실제로 구조물이 작은 하중에서 파손되거나 얼마 사용하지도 않은 제품이 갑자기 파손되는 경우에는 그 원인을 잔류응력에서 찾을 수 있는 경우가 많다. 따라서, 기계나 구조물 설계 시 잔류응력의 크기를 정확히 파악해야하며 이를 위해서는 정확한 잔류응력의 측정이 매우 중요하다.

잔류응력의 측정방법은 X-선 회절법, 초음파법,

절단법, 구멍뚫기법 등이 있는데 이 중 표면의 잔류응력 측정에 널리 사용되고 있는 구멍뚫기법(Hole-Drilling Method, HDM)은 잔류응력이 존재하는 금속표면에 작은 구멍을 뚫어 이때 이완되는 응력을 스트레인이게이지로 측정하는 방법이다. 이 방법은 ASTM(American Society for Testing and Materials)에 적용범위, 절차, 조건, 잔류응력 계산법 등에 대해 규정되어 있으며, 이 시험법^(1,2)에 따라 측정하였을 때 측정치의 오차는 ± 10% 이내라고 설명하고 있다. 구멍뚫기법을 이용하여 잔류응력을 측정하기 위해서는 정확한 구멍뚫기작업이 필요한데 이를 위하여 MM 사의 RS-200 같은 드릴과 현미경이 부착된 측정기구를 주로 사용한다. 그러나, ASTM에서 규정하고 있는 구멍의 최대 편심허용치가 0.025mm로서 매우 작기 때문에 전용 측정기구를 이용하여도 이 편심허용치를 만족하기는 쉽지 않으며, 실제로 편심허용치를 어느 정도 초과하여도 무시하고 사용하는 경우도 있다. 따라서, 이러한 경우 오차의 크기가 어느 정도인지 파악하고 더 나아가 오차를 보

* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

E-mail : chlkim@nature.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7496 FAX : (031)290-5849

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

정해줄 수 있는 방법이 요구된다. 더우기, 구멍 뚫기법의 특성상 동일 위치에서 측정을 다시 하는 것은 불가능하기 때문에 편심허용치를 상당히 벗어났더라도 측정치를 보정해서 사용할 수 있는 방법이 필요하다.

구멍뚫기법에 관한 지금까지의 연구는 주로 이완상수를 결정하는 방법에 관한 연구,^(3~5) 구멍뚫기 기법에 관한 연구^(6,7) 그리고 측정오차에 관한 연구^(8~10)가 이루어지고 있으며 특히, 구멍편심의 영향에 대해서는 Ajovalast⁽⁸⁾가 이론적인 방법으로 구멍편심의 영향을 파악하였으나 한정된 편심범위 내에서 유효한 것이었으며, Wang⁽⁹⁾은 수치해석 기법으로 이완상수를 수정하는 방법을 제시한 바 있다. 그러나, 편심량이 상대적으로 큰 경우에 대하여는 오차의 크기 및 그 보정 방법에 대하여 정확하고 손쉬운 방법이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 한편, 실험적인 방법으로 오차를 해석하는데는 측정값 자체에 이미 오차가 포함될 수 있으므로 정확한 오차를 파악하는데 한계가 있다. 이런 경우 유한요소법을 이용하면 알고 있는 응력장을 정확히 설정할 수 있으므로 오차를 해석하는데 효과적이다.

따라서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 일축 잔류응력장(uniaxial residual stress field)을 설정하고 구멍편심에 따른 오차의 크기 및 경향을 파악하고자 한다. 또한, 구멍이 편심되었을 경우 오차가 포함된 잔류응력 측정값을 참값으로 보정해 줄 수 있는 보정식을 제안하고, 제안한 보정식의 효용성을 검토하고자 한다.

2. 구멍뚫기법 개요

일반적으로 구멍뚫기법에 사용되는 게이지는 Fig. 1과 같이 측정 위치를 중심으로 세 개의 로제트 스트레인게이지(rosette strain gage)가 있고 이 스트레인게이지 중심에 작은 구멍(대개 지름이 1.57mm, 3.17mm)을 뚫도록 되어 있다. 일반 금속재료의 경우 이 구멍 때문에 구멍 주위 변형률의 재분포가 발생하며 표면에 부착한 스트레인게이지를 이용하여 이 변화량을 측정한다. 측정된 변형률은 구멍 위치에서 구멍을 뚫기 전에 존재하던 잔류응력의 크기와 관계가 있으며, 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 최대잔류응력의 크기와 방향을 결정할 수 있다.

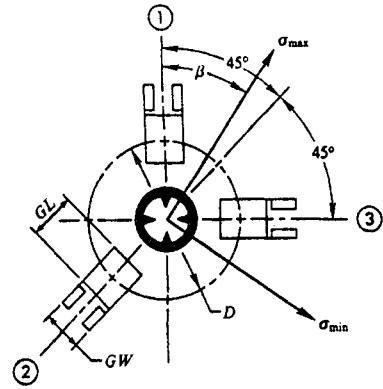


Fig. 1 Typical rosette strain gage for the hole-drilling method

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

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

여기서, \bar{A} 와 \bar{B} 는 이완상수(calibration constants)이며 구멍 직경, 스트레인게이지의 직경 및 크기 등에 따라 각각 다르다. 이완상수는 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 구할 수 있는데 ASTM에 실험적으로 구하는 방법이 제시되어 있다. 즉, 측정대상과 동일한 재질로 된 봉에 길이방향과 폭방향으로 스트레인게이지를 부착하고 일축 인장응력을 가한 상태에서 구멍을 뚫기 전후의 변형률을 측정하여 식 (3)과 같이 구멍을 뚫기 전후의 변형률 변화량을 구한 후, 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 \bar{A} 와 \bar{B} 를 구한다.

$$(\epsilon_i)_{cal} = (\epsilon_i)_{after} - (\epsilon_i)_{before} \quad (3)$$

$$\bar{A} = \frac{(\epsilon_3)_{cal} + (\epsilon_1)_{cal}}{2\sigma_{cal}} \quad (4)$$

$$\bar{B} = \frac{(\epsilon_3)_{cal} - (\epsilon_1)_{cal}}{2\sigma_{cal}} \quad (5)$$

여기서, σ_{cal} : 가한 잔류응력

$(\epsilon_i)_{after}$: 구멍 뚫은 후의 변형률

$(\epsilon_i)_{before}$: 구멍 뚫기 전의 변형률

3. 유한요소해석

3.1 해석모델 및 방법

본 연구에서는 해석모델을 일축 인장응력이 작

용하는 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)은 1.57mm, 스트레인게이지 직경(D)은 5.13mm로 하였다. 또한, 오차의 크기를 정확히 알기 위해서는 알고 있는 응력상태를 가정하고 잔류응력을 계산해야 하므로 구멍을 뚫기 전부터 100MPa의 일축 인장 응력을 작용시켜서 구멍을 뚫기 전의 응력 상태가 σ_x 는 100MPa, σ_y 와 τ_{xy} 는 0이 되도록 하였다. 유한요소망은 스트레인게이지 모델과 일치시키기 위하여 3차원으로 구성하였으며, 7개의 층으로 나누어서 깊이방향으로 구멍부 요소를 제거해 갈 수 있도록 하였다. 재료 물성치로 탄성계수 (Young's modulus) E 는 205GPa, 푸아송 비 (Poisson's ratio) ν 는 0.3을 적용하였다. Fig. 3은 본 해석에 사용된 유한요소망을 나타낸 것이며, Fig. 4는 구멍과 스트레인게이지 부분을 자세히 나타낸 것이다. 특히, 1개의 스트레인게이지를 48개 요소로 구성하였으며, 이들 48개 요소에서 평균변형률을 계산하여 각 스트레인게이지에서의 변형률로 하였다. 8절점 솔리드 요소(solid element)를 14210개 적용하였고 절점 수는 16648개이다. 본 연구에 사용한 프로그램으로는 모델링에 PATRAN Ver. 7.0을, 유한요소해석에 ABAQUS Ver. 5.8을 사용하였다.

이와 같은 모델을 이용해서 구멍의 편심에 따른 오차를 해석하기 위하여 편심량의 크기를 먼저 ASTM 최대허용치인 0.025mm에 대하여 해석한 후, 최대허용치의 5배(0.125mm), 10배(0.25mm), 15배(0.375mm)로 편심량을 증가시켜가면서 해석을 수행하였다. 또한, 1번 스트레인게이지에서 시계방향으로 30° 씩 편심방향을 변화시켜가면서 편심방향의 변화에 따른 오차를 해석하였다.

3.2 해석모델 검증

본 해석에서 사용한 유한요소망의 타당성을 검증하기 위하여 먼저 구멍이 편심되지 않은 경우의 잔류응력 해석을 수행하였다. 구멍을 뚫기 전후에 각 스트레인게이지 위치에 있는 요소에서 변형률의 평균값을 계산하여 변화량을 구하고 식 (1)과 식 (2)에 이 값을 대입하여 최대응력을 계산하였다. 한편, 식 (3)~식 (5)를 이용하여 실험적

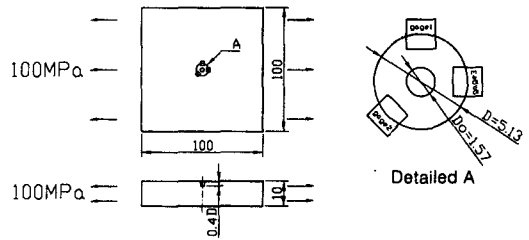


Fig. 2 Model configuration

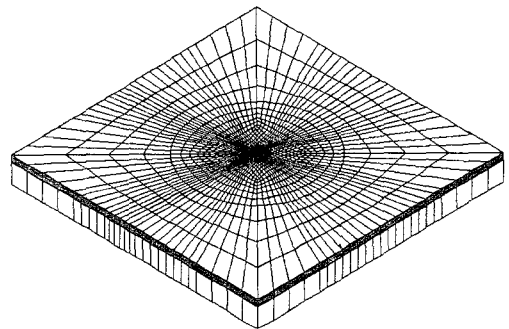
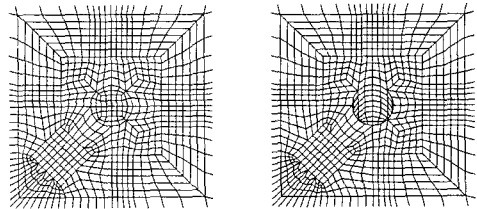


Fig. 3 3-Dimensional finite element model



(a) Before drilling (b) After drilling

Fig. 4 Strain gage and hole parts

인 방법과 동일하게 유한요소해석을 수행하여 이완상수를 구하였는데 \bar{A} 는 -3.0225×10^{-7} , \bar{B} 는 -6.5565×10^{-7} 으로 계산되었다. 세 가지 잔류응력 분포에 따라 해석을 수행한 결과 구멍을 편심시키지 않았을 경우의 오차는 1% 이내로 매우 잘 일치하였으며 Table 1에 그 결과를 정리하였다.

Fig. 5는 구멍 깊이에 따른 이완변형률(relieved strain)의 변화를 나타낸 것으로서 이완변형률은 구멍 깊이에 따라 증가하다가 구멍 깊이가 2mm(0.4D) 이상이 되면 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 즉, 구멍 깊이가 스트레인게이지 직경의 0.4배 이상이 되면 깊이가 증가하여도 표면 응력에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 의미하며, 이것은 ASTM에서 규정하고 있는 구멍 깊이

Table 1 Verification result for FE model

Applied residual stress (MPa)		HDM analysis result (MPa, deg)			Stress error (%)
σ_x	σ_y	σ_1	σ_2	β	
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

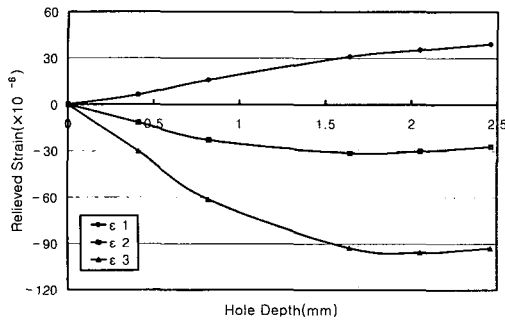


Fig. 5 Relieved strain calculated by FE analysis

0.4D와도 잘 일치하는 것이다.

4. 해석결과 및 보정식 제안

4.1 유한요소해석 결과

ASTM 시험법에서 최대 편심허용치인 0.025mm 편심시 측정되는 잔류응력의 오차해석 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서, 최소 잔류응력과 그 방향은 해석 모델과 동일하게 0에 가까운 값이 계산되었으며 최대 잔류응력의 경우 -1.81%에서 +1.84%의 오차를 나타내었다. Fig. 6은 편심량이 0.025mm인 경우에 대하여, 1번 스트레인게이지로부터 시계방향을 +각도로 설정하고 편심방향 변화에 따른 최대응력의 오차를 나타낸 것이다. Table 2와 Fig. 6으로부터 편심에 의한 오차는 90°와 270° 방향으로 구멍이 편심되었을 때 가장 크게 발생됨을 알 수 있으며, 그 크기는 각각 +1.84%와 -1.81%이었다. 따라서, ASTM 시험법의 규정에 준하여 잔류응력을 측정하였을 때 측정치에는 구멍편심에 의한 오차가 최대 1.84%까지 포함될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 편심방향의 변화에 따른 오차를 편심량의 크기를 증가시켜가면서 해석한 결과이다.

Table 2 HDM analysis result in case the hole eccentricity is 0.025mm

Eccentricity direction (deg)	HDM analysis result (MPa, deg)			Stress error (%)
	σ_1	σ_2	β	
0	99.76	-0.64	0.65	0.24
90	101.84	0.67	0.05	1.84
180	100.15	0.52	-0.54	0.15
270	98.19	-0.67	0.14	1.81

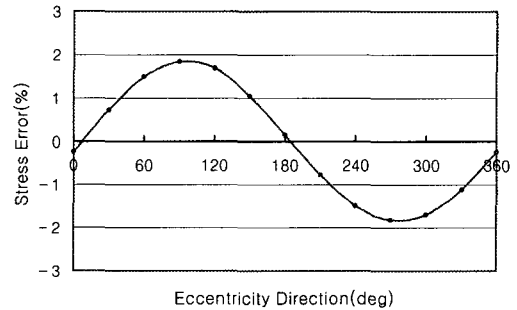


Fig. 6 Residual stress error in case the hole eccentricity is 0.025mm

이 그림에서 편심량은 편심거리(e)를 구멍반경(R_0)으로 나누어 무차원화한 값으로써 편심량이 증가할수록 측정되는 잔류응력값에 포함된 오차도 커졌으며, 구멍의 편심방향이 대략 0° ~ 180° 방향에서는 실제 잔류응력보다 과대평가 되었고 180° ~ 360° 방향에서는 과소평가 되었다.

특히, 구멍이 90°와 270° 방향으로 편심되었을 때 가장 큰 오차가 발생하였는데 이는 최대잔류응력 방향과 같은 방향으로 구멍이 편심되어 스트레인게이지 위치에서의 변형률의 변화가 크게 발생하기 때문이며, 반면에 최소잔류응력 방향인 0°와 180° 방향으로 구멍이 편심되었을 경우에는 스트레인게이지 위치에서의 변형률의 변화가 상대적으로 작게 발생하기 때문에 가장 작은 오차가 발생된 것으로 판단된다. 한편, Fig. 7에서 e/R_0 가 0.16(편심량이 0.125mm) 이상이 되면 측정되는 잔류응력에는 10% 이상의 오차가 포함되므로 측정을 다시 하거나 측정치의 보정이 반드시 필요하다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 편심량에 따른 오차의 크기

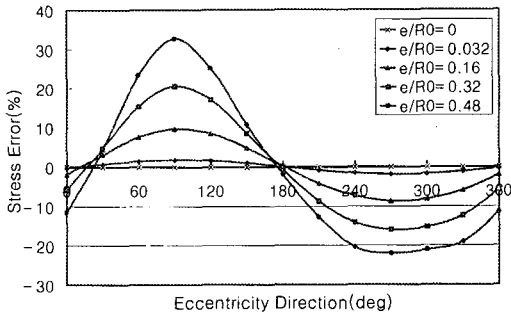


Fig. 7 Residual stress error along the hole eccentricity

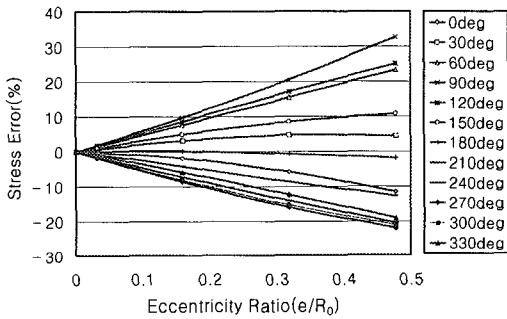


Fig. 8 Stress error versus eccentricity ratio along the eccentricity direction

를 편심방향에 따라 나타낸 것으로서, 오차의 크기는 편심량에 따라 선형적으로 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다.

4.2 편심오차 보정식 제안

구멍이 스트레인게이지 중심으로부터 편심되었을 경우 측정치는 반드시 오차를 포함하게 된다. 그러나, 구멍뚫기법의 특성상 동일부위에서 다시 측정하는 것은 불가능하므로 측정결과에 편심오차를 보정해 주어야 실제 잔류응력을 알 수 있다. Fig. 8에서 편심량과 오차의 크기 사이에는 선형적인 관계가 있으므로 일축 잔류응력이 존재하는 경우 편심량과 오차와의 관계는 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$error(\%) = m(e/R_0) \quad (6)$$

여기서, m : 직선의 기울기

e : 편심량(mm)

R_0 : 구멍의 반지름(mm)

식 (6)에서 기울기 m 은 구멍의 편심방향에 따라 다르므로 Fig. 8에서 각각의 직선을 최소제곱법으로 곡선적합(curve fitting)한 후 기울기값을

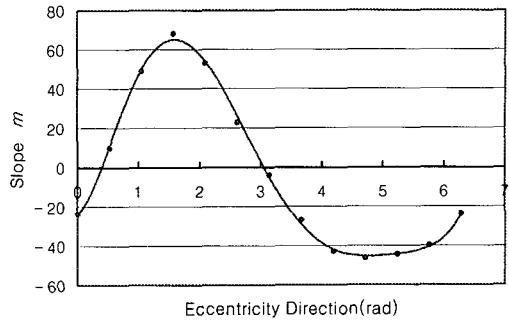


Fig. 9 Slope m of the stress error lines in Fig. 8

Table 3 Verification result for the correction equations

Applied residual stress (MPa)	Hole eccentricity (mm)	Eccentricity direction (deg)	HDM analysis result			
			Before correction		After correction	
			Residual stress (MPa)	error (%)	Residual stress (MPa)	error (%)
100	0.3	210	89.6	10.4	99.5	0.5
200	0.1	90	215.4	7.7	197.5	1.25
-100	0.2	150	-107.5	7.5	-100.3	0.3

편심방향에 따라 나타낸 것이 Fig. 9이다. Fig. 9의 곡선은 식 (7)과 같은 6차 다항식으로 곡선적합을 시킬 수 있으며, 이 때 결정계수(coefficient of determination) R^2 이 0.998로서 양호한 곡선적합 결과를 얻었다.

$$m = 0.2133\alpha^6 - 4.362\alpha^5 + 33.23\alpha^4 - 110.4\alpha^3 + 127.4\alpha^2 + 24.67\alpha - 23.89 \quad (7)$$

여기서, α 는 편심방향의 라디안(radian)값이다. 그런데, 실제 잔류응력을 측정할 때에는 최대응력 방향을 알 수 없기 때문에 편심방향 α 와 최대응력 방향 β 의 시작점이 일치하지 않을 것이다. 따라서, 실제 측정 시에는 이를 고려한 편심방향 γ 를 써서 기울기 m 을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$m = 0.2133\gamma^6 - 4.362\gamma^5 + 33.23\gamma^4 - 110.4\gamma^3 + 127.4\gamma^2 + 24.67\gamma - 23.89 \quad (8)$$

여기서, $\gamma = \alpha - \beta$ (rad)

결과적으로 구멍이 편심되어 측정되었을 경우

에는 최대응력 방향, 편심량 및 편심방향을 확인하여 먼저, 식 (8)로부터 기울기 m 을 구하고 이 값을 식 (6)에 적용하여 오차의 크기를 구할 수 있다. 따라서, 이 오차만큼 잔류응력 측정치를 보정하여 구멍이 편심되어 측정된 경우에도 잔류응력의 참값(S_{true})을 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$S_{true} = S_{measure} \left(1 - \frac{error(\%)}{100} \right) \quad (9)$$

식 (6), (8), (9)를 이용하여 구멍이 편심되었을 때 오차의 크기 및 잔류응력 참값을 계산할 수 있는데, 몇 가지 경우에 대하여 식의 효용성을 검토하였다. Table 3에 오차를 보정하지 않은 경우와 보정한 경우의 결과를 비교하였다. 여기에서 임의의 잔류응력, 편심량 및 편심방향의 경우에 구멍뚫기법 적용결과 10% 내외의 편심오차가 포함되었으나, 식 (6), (8), (9)를 이용하여 보정한 후에는 1%내외의 오차를 포함하는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 이 보정식을 이용한 편심오차의 보정은 매우 효과적임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 일축 잔류응력이 존재하는 경우에 구멍편심으로 인한 오차 해석과 편심오차의 보정식을 제안하고 이에 대한 효용성 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정 시 측정오차는 구멍 편심량에 따라 선형적으로 증가한다.
- (2) 구멍의 편심방향이 최대잔류응력 방향과 일치할 때 가장 큰 편심오차가 발생한다.
- (3) 구멍편심시 편심량과 편심방향의 크기에 따라 오차를 보정해 줄 수 있는 보정식을 제안하였다.
- (4) 구멍이 편심되었을 경우 본 연구에서 제안한 보정식을 이용하면 잔류응력의 측정오차를 1% 내외로 줄일 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감

사드립니다.

참고문헌

- (1) "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method," 1992, ASTM E 837-92.
- (2) "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method," 1989, ASTM E 837-89.
- (3) 주진원, 박찬기, 1998, "구멍뚫기법을 이용한 깊이방향으로 변하는 잔류응력 측정방법," 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제2호, pp. 268~277.
- (4) Schajer, G. S., 1981, "Application of Finite Element Calibrations of Residual Stress Measurement," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol 103, pp. 157~163.
- (5) Vangi, Dario, 1994, "Data Management for the Evaluation of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 116, pp. 561~566.
- (6) Flaman, M. T., Herring, J. A., 1986, "Ultra-high-speed Center-hole Technique for Difficult Machining Materials," *Experimental Technique*, Vol. 10, pp. 34~35.
- (7) Tootoonian, M, Schajer, G. S., 1995, "Enhanced Sensitivity Residual-stress Measurements Using Taper-hole Drilling," *Experimental Mechanics*, pp. 124~129.
- (8) Ajovalastt, A., 1979, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Method : Influence of Hole Eccentricity," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 14, No. 4, pp. 171~178.
- (9) Schajer, G. S., Altus, E., 1996, "Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-Drilling Residual Stress Measurements," *Transactions of the ASME*, Vol. 118, pp. 120~126.
- (10) Wang Jia-Yong, 1990, "Refined Analysis of the Relieved Strain Coefficients for the Off-center Hole-drilling Case," *Experimental Mechanics*, pp. 367~371.