

〈論 文〉

선형구배 응력장에서 표층의 잔류응력 측정에 관한 연구

최병길* · 전상윤** · 이택순***

(1992년 3월 2일 접수)

A Study on the Measurements of Sub-surface Residual Stress in the Field of Linear Stress Gradient

Byung-Kil Choi, Sang-Youn Jeon and Taik-Soon Lee

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Stress Gradient(응력구배), Uniform Stress(균일응력), Least Square Method(최소자승법), Power Series Method(멱급수법), Incremental Strain Method(증분스트레인법), Average Stress Method(평균응력법)

Abstract

When a blind hole of small diameter is drilled in the field of residual stress, strain relieved around the hole is function of magnitude of stress, patterns of stress distribution and hole geometry of diameter and depth. Relieved strain coefficients can be calculated from FEM analysis of relieved strain and actual stress. These relieved strain coefficients make it possible to measure residual stress which vary along the depth in the subsurface of stressed material. In this study, the calibration tests of residual stress measurement are carried out by drilling a hole incrementally on the cantilever or on the tensile test bar. Residual stresses can be determined from measured strains around a shallow hole by application of power series method. For the sake of reliable measurement of residual stress, much efforts should be done to measure relieved strains and hole depth more accurately comparing with conventional procedures of strain gage subject to the external load. Otherwise linear equations converting strains into stresses may yield erratic residual stresses because of ill-conditions of linear equations. With accurate measurements of relieved strains, residual stress even if varying along the depth can be measured. It is also possible to measure residual stress in the thin film of material by drilling a shallow hole.

1. 서 론

응력 이완법에 의한 잔류응력 측정법은 X-선 회절법등 다른방법에 비하여 여러가지 특징을 지니고

있다. 그 중에서 구멍뚫기 방법 (HDM, holedrilling method)은 측정 대상물을 최소로 손상시킨 상태에서 잔류응력을 측정할 수 있으며, 측정 대상물의 크기나 기하학적 형상에 크게 제한을 받지 않기 때문에 실제 구조물의 잔류응력 측정이 가능하다. 또한 이 방법은 다른방법에 비하여 초기투자가 적어 비교적 값싸게 측정을 수행할 수 있으며, 측정 대상물의 재료특성에 의하여 크게 제약받지 않는

*정회원, 한국기계연구원 용접공정실

**정회원, 한국핵연료(주)

***정회원, 영남대학교 정밀기체공학과

장점이 있다.

잔류응력을 측정하기 위하여 측정 대상물에 잔류응력 측정용 스트레인 게이지를 부착하고 그중심에 대략 직경 2 mm, 깊이 2 mm의 구멍을 뚫고, 이때 이완되는 스트레인으로 부터 잔류응력을 측정하는 방법이 통상적으로 사용되어 왔다. 한편 구멍깊이를 0.6~1.0 mm 정도로 알게 하면, 구멍뚫기 방법은 더욱 비파괴적인 방법으로 접근한다. 또한 구멍깊이 방향으로 응력구배가 있을 경우에도 얇은 구멍깊이에서, 각 구멍깊이에서의 스트레인 이완상수를 실험적으로 또는 유한요소해석법등을 통하여 구하므로서 응력측정이 가능하다.

실험적으로 스트레인 이완상수를 구하고자 한 노력은 Kelsey⁽¹⁾에 의하여 시도되었다. 한편 Rendler⁽²⁾는 직교 3축형 로젯트 스트레인 게이지를 사용하여 두께 방향으로 균일응력일때 구멍의 깊이에 따른 스트레인 이완상수를 실험적으로 구한바 있다. Schajer^(3,4)는 두께 방향으로 균일 응력장인 경우와 선형 구배 응력장인 경우 스트레인 이완상수를 유한요소 해석법을 통하여 구하였다. Schajer가 구한 스트레인 이완상수는 Flaman⁽⁵⁾의 유한요소 해석 결과와는 2.3% 그리고 Shaw⁽⁶⁾의 유한요소법 해석결과와는 4% 범위내에서 서로 일치하고 있다. Schajer에 의해 계산된 스트레인 이완상수를 이용하면, 첫째 얇은 구멍깊이에서도 잔류 응력 측정이 가능하며 둘째 구멍깊이 방향으로 평면응력 ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)이 선형적으로 변할 경우에도 잔류응력 측정이 가능하다.

두께 방향으로 평면 잔류응력이 변할 경우 Kelsey⁽¹⁾에 의하여 잔류응력의 측정이 이루어졌으며, 그의 방법은 오늘날 증분 스트레인법(incremental strain method)으로 불리어지고 있다. 한편 Nikola⁽⁷⁾는 평균응력법(average stress method)을 사용하여 Kelsey⁽¹⁾와 Rendler⁽²⁾의 실험 결과를 해석하였다. 증분 스트레인법은 표면에서 측정되는 이완 스트레인의 증분은 각 해당 구멍깊이의 증분에 존재하는 응력에 의하여 결정된다는 바탕에서 도출되었고, 평균응력법은 표면에서 측정되는 스트레인은 해당 구멍깊이까지 균일하게 분포되는 것으로 간주할 수 있는 상당응력(equivalent stress)에 의하여 결정된다는 바탕에서 도출되었다. 또한 Niku-Lari⁽⁸⁾와 Flaman⁽⁵⁾은 적분법(integral method)을 발표하였다. 즉 구멍의 첫 증분에서 마지막 증분까지의 전층에 존재하는 응력이 구

멍깊이에 따라 서로 다른 비율로 이완된다는 바탕 위에서 적분법이 도출되었다. 한편 Schajer^{(3),(4)}는 구멍깊이에 따른 응력분포를 멱급수(power series)로 나타내고, 각각의 급수항에 대한 스트레인 이완상수(실제 상수는 균일응력과 선형 구배응력 급수항에 한함)를 구하였다. 또한 그는 스트레인 이완상수와 측정된 스트레인의 함수로 표시되는 응력을 최소 작승법(least square method)으로 정리하는 방안을 제안하고 있다. 그러나 Schajer가 제안한 멱급수법과 실험 자료의 최소자승법 정리 방법에 대하여, 실험적으로 타당성을 조사한 연구나 적용상의 문제점을 검토한 연구가 거의 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 방전가공(electric discharge machining, EDM) 또는 공기연마 분사기(air-abrasive jet machine, AJM) 가공에 의하여 인장 시험편 또는 외팔보 시험편에 구멍깊이를 증가시켜 가면서 구멍을 뚫었다. 여기에서 방전가공(EDM)을 채택한 것은 구멍깊이를 직접 측정하는 것이 가능하여 구멍깊이 측정 오차에 기인하는 잔류응력 측정오차를 최소화 할 수 있기 때문이며, 공기연마 분사기를 채택한 것은 구멍을 뚫는 동안 가공응력을 유발시키지 않기 때문이었다.⁽⁹⁾ 위 인장 시험편 또는 외팔보 시험편을 이용하여 균일한 응력장과 두께 방향으로 변하는 선형적 구배응력장을 구현하고, 이때 각각 구멍깊이가 다른 원통형 막힘 구멍으로부터 이완되는 스트레인을 측정하였다. Schajer가 제안한 멱급수법과 최소자승법을 적용하여 균일응력장 또는 구배 응력장에서 측정되는 스트레인을 잔류응력으로 환산하였으며, 환산된 잔류응력과 실제로 작용하는 응력을 비교하므로서 이론적으로 제시된 멱급수법과 최소자승법의 타당성을 실험적으로 검토하는데 본 연구의 목적이 있다. 이때 얇은 구멍깊이(0.3~1.2 mm)에서 측정되는 스트레인을 이용하여 Schajer의 제안에 따라 잔류응력을 산정하므로서, 잔류응력 측정 대상 구조물을 가급적 덜 파괴시키며 잔류응력을 측정할 수 있는지 여부를 실험적으로 검토하였다.

2. 멱급수법

응력구배가 없는 평면응력 상태의 얇은 무한판에 원통형의 관통구멍을 뚫을 때 구멍주위에는 스트레인 변화가 일어나며, 이 때 주응력과 직교 3축형

스트레인 게이지가 측정하는 값 사이에는 식(1)이 성립한다.⁽¹⁰⁾

$$\sigma_I, \sigma_{II} = \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{A'} \pm \frac{\sqrt{2E}}{B} \times \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_2)^2} \quad (1)$$

- 단, σ_I, σ_{II} : 평면응력 상태에서의 주응력
- E : 무한판의 탄성계수
- ν : 프와송비
- A', B' : 구멍직경과 게이지 반경과의 비에 의하여 결정되는 일종의 스트레인 이완상수
- $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$: 직교 3축형 로젯트 게이지에 의해 측정된 스트레인으로 게이지 1, 2, 3의 방향은 각각 시편길이 방향에 대해 90°, 45°, 0°임, (본 연구에서 사용한 직교 3축형 로젯트 스트레인 게이지는 미국 MM사 제품의 TEA-06-062RK-120으로서, 잔류응력 측정에 많이 사용됨⁽¹¹⁾)

한편 평면응력 상태의 무한판에 원통형의 막힘구멍(blind hole)을 뚫을 때 스트레인 이완 상수는 구멍깊이, 응력의 크기, 구멍직경 및 게이지 반경 등에 의하여 정하여 진다. Schajer에 의하면 구멍의 깊이 방향으로 균일 평면응력인 경우 막힘 구멍에서의 스트레인 이완상수, 측정되는 스트레인 및 주응력 사이에는 식(2a) 및 식(2b)로 표시되는 관계식이 성립될 수 있다.

$$s = \frac{(1+\nu)a_0}{E} P_0 \quad (2a)$$

$$t = \frac{-\sqrt{2}b_0}{2E} Q_0 \quad (2b)$$

- 단, P_0 : 2축 주응력 = $1/2(\sigma_I + \sigma_{II})$
- Q_0 : 최대 전단응력 = $1/2(\sigma_I - \sigma_{II})$
- s : 로젯트 스트레인 게이지에 의해 측정되는 평면 스트레인 = $1/2(\epsilon_1 + \epsilon_3)$
- t : 로젯트 스트레인 게이지에 의해 측정되는 최대 전단 스트레인
 $= -\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_2)^2}$
- a_0, b_0 : 균일응력 성분 (P_0 및 Q_0)과 관련된 스트레인 이완상수

식(2a) 및 (2b)는 두께 방향으로 균일한 응력상태 일 때, 측정된 스트레인으로 부터 잔류응력을 환산하는데 적용될 수 있다. 여기에서 식(1)이 관통형 구멍 또는 충분한 구멍깊이(구멍깊이 ≥ 구멍직경)에 적용될 수 있는데 비하여, 식(2a) 및 식(2b)는 충분한 구멍깊이 외에도 얇은 구멍깊이에서의 스트레인 이완상수를 알면 얇은 구멍깊이 (대략 0.3~1.2 mm)에서도 잔류응력을 측정하는데 적용할 수 있다.

한편 두께 방향으로 응력이 선형적으로 변할 때에 Schajer⁽⁴⁾는 구멍깊이에 불포하는 응력과 측정되는 스트레인 사이에는 선형구배까지만의 응력항을 반영하여 식(3a)~(3d)를 적용하여 잔류응력을 측정하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 Schajer에 의하여 멱급수법(power series method)으로 이름지어진 것으로, 본 연구에서 실험적으로 타당성 검토를 수행하였다.

$$P = P_0 + P_1 h \quad (3a)$$

$$s = \frac{1+\nu}{E} a_0 P_0 + \frac{1+\nu}{E} a_1 P_1 \quad (3b)$$

$$Q = Q_0 + Q_1 h \quad (3c)$$

$$t = \frac{b_0}{E} Q_0 + \frac{b_1}{E} Q_1 \quad (3d)$$

- 단, h : 무차원화된 구멍깊이 (구멍깊이(z)/게이지 반경(r_m))
- a_1, b_1 : 구배응력 성분 (P_1 및 Q_1)과 관련된 스트레인 이완상수
- P_1, Q_1 : 선형구배 응력장에서 깊이 h 에 존재하는 평균응력 (mean stress) 및 최대 전단 응력의 단위 구멍 깊이 ($h=1$) 당 구배성분

식(2a) 및 식(2b), 식(3a)~(3d)에 포함된 스트레인 이완상수는 실험적으로 구할 수 있다. 즉 서로 다른 구멍 깊이에서 측정되는 이완스트레인과 해당 깊이에 작용하는 이완상수를 실험적으로 구할 수 있다. 그러나 스트레인 이완상수를 실험적으로 얻기 위하여는 실험의 정도가 충분하게 확보되어야 하며 실험비용도 많이 소요되기 때문에, 실제로 스트레인 이완상수를 얻기 위한 실험적 연구는 거의 없는 실정이다. 그러나 유한요소해석법에 의할 때 이와 같은 실험에 의할 경우의 제약성을 극복할 수 있기 때문에 유한요소 해석법으로 구하는 연구가 이루어진바 있다.^(4,5,6) Schajer^(3,4)는 두께방향으로

선형구배를 갖는 응력장 (예, 4점 굽힘시험)의 표면에 본 연구에서 사용한 직교 3축형 로제트 스트레인 게이지를 부착하고, 그 중앙에 구멍을 증분 (약 0.26 mm)적으로 뚫는 경우를 유한요소법 (FEM)으로 해석하였다. 위 유한 요소법의 해석 결과로부터 스트레인 이완상수 a_0, b_0, a_1, b_1 을 구멍 크기별로 그리고 구멍의 깊이별로 구하였으며 Fig. 1에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 1에 표시된 스트레인 이완상수는 구멍 중심을 로제트 스트레인 게이지 중심에 정확히 일치시켰을 때 적용될 수 있는 것이다. 그러나 구멍을 뚫을 때 특히 지그를 갖추지 않고 AJM으로 구멍을 뚫을 때 구멍 중심과 게이지 중심은 일치하지 않을 수 있다. 이와 같이 구멍이 편심되었을 때 각 구멍 깊이에서 스트레인 이완상수를 도출한 연구는 없는 것으로 조사되었기 때문에, 본 연구에서는 구멍의 실제 편심을 고려하지 않고 Fig. 1에 주어진 스트레인 이완상수를 적용하여 잔류응력 측정을 시도하였다.

한편 Fig. 1에서 보는 바와 같이 무차원화된 구멍 깊이가 0.1~0.4 범위에서 스트레인 이완상수가

급격히 변화하여, 구멍 깊이의 측정오차 또는 구멍 직경의 측정오차가 적정하지 못한 스트레인 이완상수의 적용을 초래할 수 있다. 예로서 $r_a/r_m=0.40$ 인 경우 구멍깊이 0.2에서 a_0 는 -0.104 이나 무차원화된 구멍 깊이를 0.05(실제 구멍깊이 0.13 mm)만큼 잘못 읽으면 a_0 값이 -0.076 으로 상당한 차이가 난다. 따라서 상당히 큰 오차를 갖는 스트레인 이완 상수를 식(4a) 및 (4b)에 적용하게 되면 응력 값의 산정에 오차를 유발할 수 있다.

식(3a) 및 (3b) 그리고 식(3c) 및 (3d)에 입각하여, 2개의 서로 다른 깊이에서 스트레인 s 또는 t 를 측정하면 P_0 와 P_1 그리고 Q_0 와 Q_1 은 연립방정식의 해로 주어진다. 그러나 2개 이상의 서로다른 구멍 깊이에서 이완되는 스트레인을 측정하므로써 최소자승법을 활용할 수 있다. 실제 잔류응력 측정 실험시에 구멍깊이의 측정오차, 구멍 직경의 측정오차, 스트레인 측정오차, 구멍의 편심등이 발생할 수 있으며, 이러한 측정오차는 잔류응력의 측정오차로 연결될 수 있다. 이러한 경우 완전 선형 연립 방정식으로 표시되는 계를 overdetermination 선형 계로 취급하므로써 측정 오차의 영향을 줄일 수 있다⁽¹²⁾. Schajer는 식(3a)~(3d)로 표시되는 완전 선형계의 연립방정식 대신에 최소자승법을 가미한 멱급수법을 제안하였으며, 식(4a)~(4d)로 표시된다.

$$P_0 \sum a_{0i} a_{0i} + P_1 \sum a_{0i} a_{1i} = \frac{E}{1+\nu} \sum s_i a_{0i} \quad (4a)$$

$$P_0 \sum a_{0i} a_{1i} + P_1 \sum a_{1i} a_{1i} = \frac{E}{1+\nu} \sum s_i a_{1i} \quad (4b)$$

$$Q_0 \sum b_{0i} b_{0i} + Q_1 \sum b_{0i} b_{1i} = E \sum t_i b_{0i} \quad (4c)$$

$$Q_0 \sum b_{0i} b_{1i} + Q_1 \sum b_{1i} b_{1i} = E \sum t_i b_{1i} \quad (4d)$$

단, 첨자 i 는 i 번째 구멍 증분을 나타냄.

여기에서 구멍 깊이를 2회 이상 증가시켜 가면서 이 때 이완되는 스트레인 s_i 와 t_i 를 측정하면, 식(4a)~(4d)의 해인 균일응력 성분 P_0 와 Q_0 그리고 구배응력 성분인 P_1, Q_1 이 구하여진다. 이들 P_0, Q_0, P_1 및 Q_1 으로부터 각 해당 깊이에 분포하는 주응력을 산정하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 인장시편 또는 외팔보 시편에 구멍을 증분적으로 점점 깊게 뚫어 스트레인을 실험적으로 측정하였다. 인장시편인 경우는 구멍의 깊이 방향으로 응력구배가 없는 경우이며 외팔보 시편인 경우는 구멍의 깊이 방향으로 응력구배가 선형적으로 존재하는 경우이다. 이러한 두 종류의 시

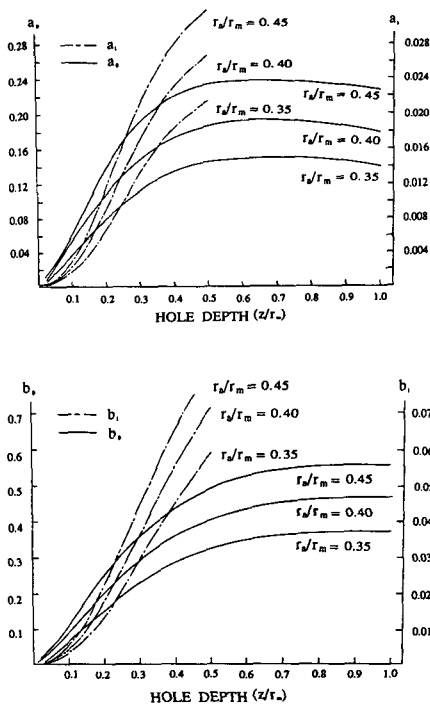


Fig. 1 Relieved strain coefficients from the FEM analysis of linear stress gradient (after Schajer⁴⁾)

편 모두 실제 작용하는 응력 성분은 하중조건으로부터 알 수 있으며, 측정된 스트레인을 식(4a)~(4d)에 대입하여 해를 구하면 잔류응력으로 간주되는 응력 성분이 계측된다. 여기서 실제 작용하는 응력과 계측된 응력을 비교하므로써 역급수법의 타당성을 검토할 수 있다.

3. 시편준비 및 실험방법

3.1 시편준비

본 실험에 사용된 시편재료는 항복강도가 30 kgf/mm² 인 구조용강으로, 시편 형상은 Table 1에 나타낸 바와 같이 외팔보 또는 인장시험을 할 수 있도록 길이 340 mm, 너비 40 mm, 두께 3 mm, 6 mm, 11 mm의 치수로 밀링가공하였다. 외팔보등을 이용한 잔류응력 보정시험시 시편의 폭에 대한 구멍의 직경비가 너무 크면 구멍주위에서 시편의 크기 효과를 받기 때문에,⁽¹³⁾ 본 실험에서는 너비 40 mm 구멍직경 2mm로 그 비를 0.05로 하여 시편의 크기 효과를 무시할 수 있었다.

또한 준비된 시편은 압연, 절단 또는 기계가공에 의하여 발생하는 잔류응력이 충분히 제거되도록 응력 풀림처리를 하였다. 응력풀림은 600°C에서 1시간 동안 유지한 후 서서히 냉각되도록 처리하였다. 특히 방전가공 시편은 1차로 풀림처리하여 방전가공을 하였으며, 방전가공후에 600°C에서 30분간 풀림처리를 다시 하므로써 방전가공에 의한 잔류응력을 제거하였다.

3.2 실험방법

방전가공 시편은 0.3 mm, 0.7 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 1.9 mm의 구멍 깊이별로 각각 다른 5개의 시편에 방전가공에 의하여 막힘구멍이 만들어졌다. 이 때 각 구멍의 표면에 구멍의 중심과 게이지의 중심의 0.2 mm이내에서 일치하도록 직교 3축형

로젝트 스트레인 게이지를 부착하였다. 이때 로젝트 스트레인 게이지의 3번 게이지가 시편의 길이 방향과 일치하도록 하였으며, 로젝트 스트레인 게이지와는 별도의 1축 스트레인 게이지를 3번 게이지와 나란히 부착하여 참고 게이지로 삼았다. 참고 게이지는 방전가공 시편에만 부착시킨 것으로, 인장시험시 또는 외팔보 시험시 하중을 검증하는데 사용되었다. 즉 참고 게이지에 의한 스트레인과 이미 알고 있는 하중으로부터 보이론에 의거 계산되는 스트레인을 비교하므로써 하중을 검증할 수 있었으며, 3% 범위내에서 서로 일치하였다. 또한 인장 시험시에도 참고 게이지는 하중을 검증하는데 사용되었다. 이와 같이하여 만들어진 시편을 이용하여 외팔보 시험시 여러가지 하중 조건에서 이완되는 스트레인을 계측할 수 있었다. 또한 외팔보 시험이 끝난 방전가공 시편을 1축 인장시험기를 사용하여 인장시험을 행하였다. 이때 비틀림 등의 영향을 적게하기 위해 시편의 양쪽 끝을 핀 연결 구조로 하였다. 본 인장시험의 목적은 두께 방향으로 응력구배가 없는 경우와 있는 경우를 비교하는데 있었다.

한편 AJM 시편은 선형구배 응력장에서 잔류응력을 측정할 때 사용되었으며, 이 때 참고 게이지는 부착하지 않았다. 대신 구멍을 뚫기전에 하중상태를 로젝트 스트레인 게이지의 3번 게이지에 의하여 검증하였으며 대체적으로 3~4% 범위내에서 계측된 스트레인과 보이론에 의한 스트레인과 일치하였다.

공기연마 분사기 (AJM)는 구멍을 뚫을 때 가공을 유발시키지 않기 때문에 잔류응력 계측 또는 보정 시험시 보편적으로 사용되고 있다. 그러나 AJM을 이용하여 구멍을 뚫는 동안 구멍의 깊이를 각 증분별로 계측하기 위하여 AJM의 노즐을 비켜 움직여 놓고 버니어 캘리퍼로 깊이를 측정한 후 노즐을 원래의 위치로 돌려 놓아야 한다. 이 때 원래

Table 1 Specimen size and preparation

Specimen	Length(mm)	Width(mm)	Thickness(mm)	Application	Heat treat
AJM	340	40	3, 6, 11	cantilever	stress relief 1 times
EDM	340	40	6	cantilever & tensile test	stress relief 2 times

의 위치로 돌려 놓을 때 약간의 위치 오차가 발생할 수 있으며 그 결과 구멍 중심이 일치하지 않을 수 있다. 이러한 단점은 구멍 깊이를 간접적으로 추정하는 방법을 통하여 보정하였다. 즉 구멍 뚫기 시간과 구멍 깊이 사이에 비례관계가 있음⁽¹³⁾을 이용하여 구멍 깊이를 산정하므로써 노즐의 위치를 바꾸는 번거로움과 오차를 피할 수 있었다. Fig. 2는 방전가공 (EDM)과 AJM 가공에 의하여 형성된 구멍 깊이와 구멍의 형상을 나타낸다. EDM 시편이 구멍의 바닥에서 곡률 반경을 갖는 반면에 AJM 가공은 구멍 바닥의 중심부가 볼록한 형상이나, 2가지 경우 모두 양호한 원통 형상을 유지하고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 균일응력장에서 잔류응력 측정

방전가공된 시편에 2 kgf/mm²으로부터 10 kgf/mm²까지 인장응력을 변화시켜 가면서 인장시험을 행하였다. Fig. 3은 인장하중이 8 kgf/mm²일때 각 구멍 깊이의 증분에서 측정되는 스트레인을 나타낸다. Fig. 3에서 ϵ_1 은 직교 3축형 로켓트 게이지중 인장방향과 직각인 스트레인게이지의 측정값이고, ϵ_2 는 45° 방향인 게이지의 측정값 그리고 ϵ_3 는 인장방향과 평행인 게이지의 측정값이다. 또한 ϵ_3/ϵ_1 는 인장방향과 같은 방향에서 구멍에 의하여 이완되는 스트레인과 단순인장에 의하여 측정되는 스트레인(참고 게이지에 의해 측정된 스트레인)과 의비로서, 구멍에 의한 스트레인의 이완정도를 나타낸다.

Fig.3에서 보는바와 같이 구멍에 의하여 이완되는 스트레인 (ϵ_3)은 구멍이 없는 상태에서 같은 크기의 외력하에서 측정되는 스트레인 (ϵ_1)에 비하여 작으며 특히 얇은 구멍에서는 매우 작다. 따라서

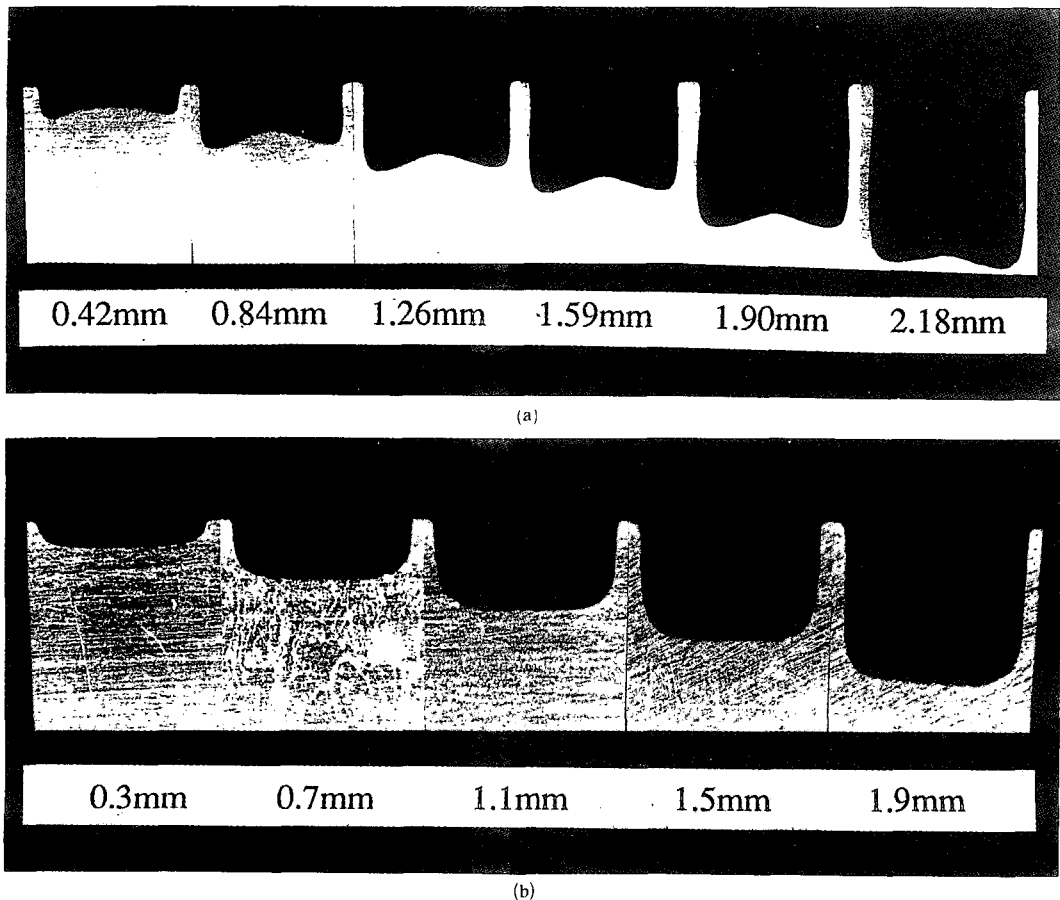


Fig. 2 Variation of hole depth where hole diameter is 2mm (a) By AJM, (b) By EDM

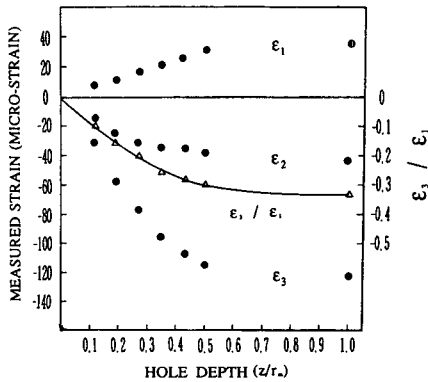


Fig. 3 Relieved strain from the hole of EDM where applied tensile stress is 8 kgf/mm^2 and hole diameter is 2 mm

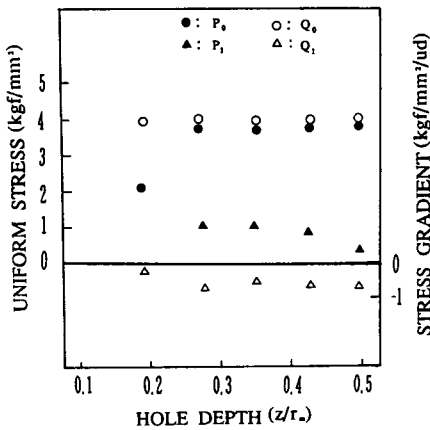


Fig. 4 Uniform stress and gradient stress from measured strain of EDM specimen by application of power series method where applied load $P_0 + Q_0$ is 8 kgf/mm^2 and applied stress gradient $P_1 + Q_1$ is zero (Uud:unit depth = 2.575 mm)

구멍에 의하여 이완되는 스트레인을 계측하기 위해서는 감도가 좋고 (예, $2\mu\epsilon$) 안정적인 계측기가 요구되며, 계이지 연결 도선(lead wire)의 길이를 짧게 하는 등 측정에 세심한 주의가 요구된다. 또한 구멍깊이의 정확한 측정도 요구되는 바 EDM시편에서는 0.05 mm 까지 정밀하게 가공되었다.

Fig. 4는 계측된 스트레인 (Fig. 3에 표시됨)을 식(4a)~(4d)에 대입하여 해로 얻어진 P_0, P_1, Q_0 및 Q_1 을 구멍깊이의 증분별로 나타낼 것으로, $P_0 + Q_0$ 는 인장하중 시험시 작용하중 (8 kgf/mm^2)을 근사적으로 잘 나타내고 있다. 또한 응력구배항인 $P_1 + Q_1$ 는 균일응력장에서 영으로 표시되어야 되는 양으로, Fig. 4에서 $P_1 + Q_1$ 은 영에 매우 가깝게

계측되고 있다.

4.2 구멍깊이 방향으로 응력이 선형적으로 변할 때 잔류응력의 계측

외팔보에 이미 알고 있는 하중을 가하므로써 평면잔류응력($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)이 구멍깊이 방향을 따라 선형적으로 변하는 경우를 재현하였다. 본 실험에서는 EDM 시편과 AJM 시편을 이용하여 외팔보 실험을 하였다. 외팔보에 작용하는 응력은 본 연구에서 계측하고자 하는 잔류응력으로 간주되는 것으로서, 구멍뚫기에 의하여 이완되는 스트레인으로 부터 산정되는 응력과 비교하므로써 잔류응력의 측정 정도를 연구할 수 있다.

Fig. 5는 방전가공 시편을 외팔보로 하여 구멍위치의 표면에 4.85 kgf/mm^2 의 인장응력이 작용하도록 하였을 때 계측된 스트레인을 나타낸다. 일반적으로 응력장에 구멍을 뚫을 때, 이완되는 스트레인은 구멍깊이가 깊어질수록 스트레인 증분은 급격히 감소한다. Flaman⁽¹⁴⁾에 의하면 두께방향으로 균일 응력에 직경 1.6 mm 의 구멍을 뚫는 경우 무차원화된 구멍깊이 (z/r_m) 0.3 에서 전체 이완 스트레인의 90% 정도가 이완되며, 외팔보에서 처럼 응력이 두께방향으로 감소하면 이완 스트레인의 비는 더욱 증가할 것으로 믿어진다.

Fig. 6은 Fig. 5의 계측된 스트레인을 식(4a)~(4d)에 대입하여 얻은 응력값을 나타내고 있다. 또한 계측된 스트레인을 평균응력법⁽⁷⁾과 증분스트

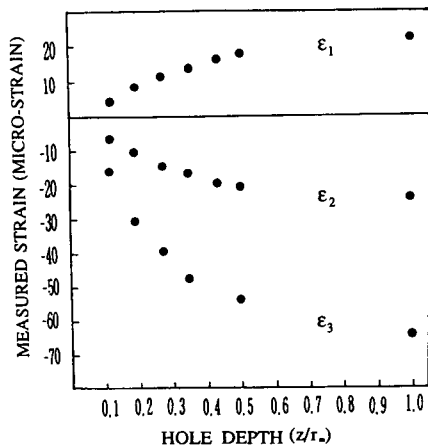


Fig. 5 Relieved strain from the hole of EDM specimen where applied stress is 4.85 kgf/mm^2 on the cantilever of thickness 6 mm and hole diameter is 2 mm

레인법⁽¹⁵⁾에 의거 환산된 잔류응력을 나타내고 있다. Fig. 6중 평균응력법과 증분 스트레인법으로 구한 응력값이 P_0 와 Q_0 의 2배 정도로 표시되는 것은 식(2)에서 보는바와 같이 최대 주응력의 합과 차의 2분지 1을 P_0 와 Q_0 로 정의한데 기인하여 구배응력이 음의 값으로 표시됨은 두께방향으로 응력이 감소함을 나타낸다. 또한 평균응력법과 증분 스트레인법으로 구한 응력값은 구멍깊이가 깊어질수

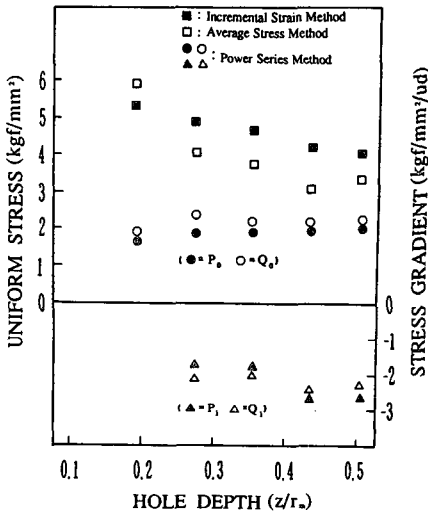


Fig. 6 Surface stresses and stresses gradients from measured strains of EDM specimen by application of power series method, average stress method and incremental strain method where applied uniform stress $P_0 + Q_0 = 4.85 \text{ kgf/mm}^2$, applied stress gradient $P_1 + Q_1 = -4.16 \text{ kgf/mm}^2/\text{ud}$ (ud:unit depth=2.575 mm)

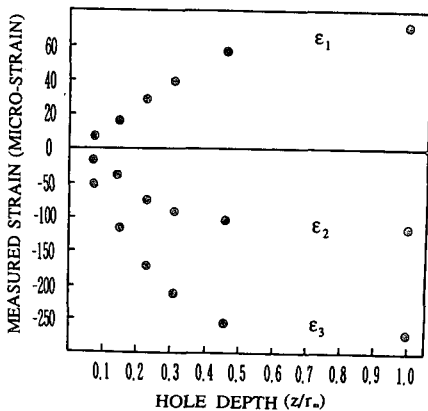


Fig. 7 Relieved strain during AJM hole drilling where applied stress is 20 kgf/mm^2 on the cantilever of thickness 6 mm, and hole diameter is 2 mm

록 감소하며, Fig. 6으로 부터 평균응력법에 의한 경우 $4.7 \text{ kgf/mm}^2/\text{ud}$ (ud:unit depth;1) 증분 스트레인법에 의한 경우 $3.8 \text{ kgf/mm}^2/\text{ud}$ 의 구배응력 값을 도출할 수 있다.

Fig. 6에서 알 수 있는바와 같이 균일응력은 얇은 구멍깊이에서도 실제의 하중인 균일응력값($P_0 + Q_0 = 4.8 \text{ kgf/mm}^2$)과 대체적으로 10% 범위내에서 일치하고 있으며 구배응력은 실제의 구배응력값($P_1 + Q_1 = -4.16 \text{ kgf/mm}^2/\text{ud}$)과 15%의 범위내에서 서로 일치하고 있다.

Fig. 7은 두께 6 mm의 외팔보에 로켓트 게이지 부착위치에서 20 kgf/mm^2 의 인장응력이 작용하도록 하중을 가한 상태에서 AJM에 의한 구멍뚫기 동안 각 깊이 증분에서 측정된 스트레인을 나타낸다. 이 경우 무차원화된 구멍깊이가 0.45(실제 구멍깊이는 1.2 mm)이후에는 스트레인 변화가 거의 없다. 한편 본 AJM 시편에서 구멍 깊이는 구멍뚫기 시간으로 부터 산정한 것으로, 스트레인이 완만하게 변하는 것으로 보아 구멍 깊이는 적정하게 산정된 것으로 믿어진다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 각 구멍 깊이의 증분에서 측정된 스트레인을 식(4a)~(4d)에 대입하여 얻은 균일응력과 구배응력을 나타낸다. 여기에서 외팔보에 작용하는 균일응력은 20 kgf/mm^2 로서 Fig. 8에서 보는 바와 같이 측정된 균일응력은 4.7 kgf/mm^2 수준에서 깊이를 따라 크게 변하지 않으며, 또한 측정된 구배 응력은 -

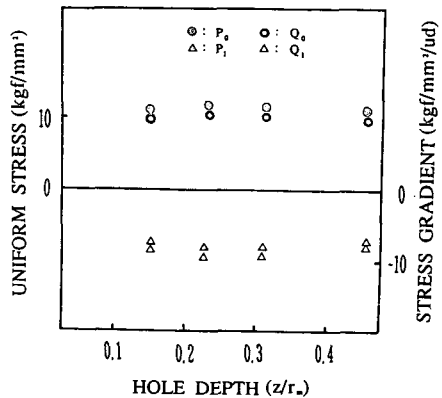


Fig. 8 Uniform stress and gradient stress from measured strains of AJM specimen by application of power series method where applied uniform stress $P_0 + Q_0 = 20 \text{ kgf/mm}^2$, applied gradient stress $P_1 + Q_1 = -17 \text{ kgf/mm}^2/\text{ud}$ (ud:unit depth=2.575 mm)

16.7~19.5 kgf/mm²/ud로서 외팔보에 작용하는 응력 구배인 -17 kgf/mm²/ud와 근사적으로 일치한다.

Table 2는 EDM 시편을 이용한 인장시험, 외팔보 시험 그리고 AJM 시편을 이용한 외팔보 시험 결과를 종합적으로 나타낸 것으로 어느 것이나 측정치는 무차원화된 구멍깊이 $h=0.45$ 까지의 계측치를 반영한 것이다. EDM 인장시험인 경우 계측된 균일응력은 실제의 균일응력(applied uniform stress)과 잘 일치한다. 그러나 실제의 구배응력이 없음에도 계측된 구배응력은 -0.9 kgf/mm²/ud까지 측정되었으나 그 크기가 크지 않았다. EDM 외팔보 시험의 경우 계측된 균일응력과 구배응력이 실제 응력과 각각 1 kg/mm² 및 0.2~1.6 kgf/mm²/ud 범위내에서 일치한다.

한편 AJM 시편인 경우 계측된 균일응력은 대체적으로 1 kgf/mm² 범위내에서 일치하나 계측된 구배응력은 1~3 kgf/mm²/ud의 차이가 나타나고 있다. 특히 SG0601 시편인 경우 구배응력은 9.7 kgf/mm²/ud의 차이가 나고 있으며, 그 원인은 구멍깊이의 측정오차와 특히 구멍의 편심에 기인하는 것으로 믿어진다. 대부분 시편의 편심의 대체적으로 0.15 mm 이하인데 비하여 SG0601 시편인 경우 0.25 mm로 계측되었다. 또한 시편 SG0302에서 처럼 구멍의 표면과 바닥에서의 응력차이가 심할 경우 구멍깊이 산정의 오차는 구배응력의 측정에 영향을 크게 미칠 것으로 믿어진다.

실험에서 구멍 깊이의 증분을 0.2 mm로, 첫번째 구멍 깊이를 0.16~0.3 mm로 하여 구멍의 깊이 방향으로 변하는 평면응력의 계측을 시도하였다. 이

Table 2 Uniform and gradient stresses from AJM specimen and electric discharge machining specimen (ud:unit depth=2.575 mm)

Specimen No.		Applied load		Measured load	
		Uniform stress (kgf/mm ²)	Stress grad. (kgf/mm ² /ud)	Uniform stress (kgf/mm ²) ($P_0 + Q_0$)	Stress grad. (kgf/mm ² /ud) ($(P_1 + Q_1)$)
Tensile test (EDM)	UN0602	2	0	1.9	-0.9
	UN0604	4	0	3.8	-0.7
	UN0606	6	0	5.8	-0.4
	UN0608	8	0	7.6	-0.13
	UN0610	10	0	9.7	-0.7
Canti- lever test (EDM)	GR0602	2.43	-2.08	2.0	-2.26
	GR0604	4.85	-4.16	4.4	-4.5
	GR0606	7.3	-6.26	6.5	-7.9
	GR0608	9.7	-8.3	8.7	-9.2
	GR0610	12.1	-10.4	10.8	-12.3
Canti- lever test (AJM)	SG0301	5	-8.6	6.0	-7.2
	SG0302	7	-12.0	7.9	-13.0
	SG0303	12	-20.0	11.2	-14.0
	SG0601	15	-12.9	13.6	-22.6
	SG0602	13.2	-11.3	12.2	-14.4
	SG0603	20	-17.0	21.1	-19.2
	SG1101	10	-4.7	9.2	-7.4

때 제측된 스트레인으로 부터 잔류응력을 산정하는데 식(4a)~(4d)를 적용하였는바 식(4a) 및 (4b) 그리고 (4c) 및 (4d)는 불량조건계(ill-condition system)⁽¹⁶⁾로 될 수 있음이 실제 해를 구하는 과정에서 추출되었다. 불량조건(ill-condition)인 경우에도 균일 하중은 Table 2., Fig. 4, Fig. 6 그리고 Fig. 8에서 보는 바와 같이 비교적 정확히 산정되어지고 있으나 구배응력은 오차 범위가 크게 산정되는 경우가 있다.

먹급수법에 의해 균일응력장 또는 선형구배 응력장에서 잔류응력을 측정하고자 하는 경우 스트레인 제측은 $2\mu\epsilon$ 범위내에서, 구멍 깊이의 측정은 0.05 mm의 오차 범위내에서 구멍 편심은 0.15 mm이내에서 제측하였을 때 Table 2에서 보는 바와 같이 비교적 양호한 결과가 얻어졌다.

공기연마분사기(AJM)에 의하여 구배응력을 갖는 표면에 구멍을 증분적으로 뚫을 때, 구멍의 깊이를 간접적으로 산정함에 따른 구멍깊이의 측정오차와 구멍의 편심등이 발생할 수 있다. 특히 잔류응력 측정 환경이 좋지 못한 현장 측정인 경우, 구멍의 편심은 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 경우 구멍의 편심을 최소화 할 수 있는 지그개발 또는 편심을 고려한 스트레인 이완상수를 FEM 해석에 의하여 구하는 것이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 Schajer가 제안한 먹급수법을 실제 실험을 통하여 검증하고 나아가 현장적용 가능성을 연구한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 방적가공(EDM) 시편과 공기연마분사기(AJM)시편을 통한 보정실험에 의하여, 먹급수법은 구배응력장에서 잔류응력 측정 방법으로 적절하게 사용될 수 있다.

(2) 먹급수법에 의해 잔류응력을 측정하고자 할 때 모든 변수 측정은 정확하게 제측되어야 한다. 예로서 스트레인은 $2\mu\epsilon$, 구멍깊이 0.05 mm, 구멍편심은 0.15 mm 범위내에서 제측되어야 한다.

(3) 먹급수법은 얇은 구멍(예: 구멍깊이 0.3~1.2 mm)에서도 잔류응력의 측정이 가능하기 때문에 종래의 방법(예: 구멍깊이 2~2.5 mm)에 비하여 훨씬 비파괴적인 잔류응력 측정방법이다. 이때 구멍 뚫는 방법으로 AJM이 유효하게 이용될 수 있다.

(4) 앞으로 구멍의 편심등을 고려하여 먹급수법에 적용할 수 있도록 유한요소해석에 의한 스트레인 이완상수를 구하거나 또는 계산 프로그램의 개발이 이루어지는 것이 요구된다.

참고문헌

- (1) Kelsey, R.A., 1956, "Measuring Non-uniform Residual Stress by the Hole Drilling Method," Proc. SESA, XIV(1), pp. 181~194.
- (2) Rendler, N.J. and Vigness, I., 1966, "Hole-drilling strain-gage Method of Measuring Method," Experimental Mechanics Vol. 6, No. 12, pp.577~586.
- (3) Schajer, G.S., 1981, "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements," Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME Vol. 103, pp. 157~163.
- (4) Schajer, G.S., 1988, "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method," Part 1-Stress Calculation Procedures, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, Vol. 110, pp. 338~343.
- (5) Flaman, M.T. and Manning, B.H., 1985, "Determination of Residual-Stress Variation with Depth by the Hole-Drilling Method," Experimental Mechanics, Vol.25, No.9, pp. 205~207.
- (6) Shaw, D. and Chen, H.Y., 1990, "A Finite-element Technique to Analyze the Data Measured by the Hole-Drilling Method," Experimental Mechanics, Vol. 30, No. 2, pp. 120~123.
- (7) Nickola, W.E., 1986, "Practical Subsurface Residual Stress Evaluation by the Hole Drilling Method," Proceedings of the Spring Conference on Experimental Mechanics, New Orleans, pp.47~58, Society of Experimental Mechanics.
- (8) Niku-Lari, A. Lu, J. and Flavenot, J.F., 1985, "Measurement of Residual-Stress Distribution by the Incremental Hole-Drilling Method," Experimental Mechanics, Vol. 25, No.6, pp. 175~185.

- (9) Bush, A.J. and Kromer, F.J., 1972, "Simplification of the Hole-Drilling Method of Residual Stress Measurement," ISA Transactions, Vol. 12, No. 3, pp. 249~259.
- (10) Choi, Byung-Kil, Park, Young-Jo, Lee, Taik-Soon and Moon, Hai-Am, 1991, "Measurements of Residual Stress by the Hole Drilling Method," Proceedings of the International Conference on New Advances in Welding and Allied Processes, WI CMES and DVS, 8~10 May, Beijing, Vol. 2, pp. 183~187.
- (11) 이택순, 최병길, 전상윤, 1988, "AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구 (I)", 대한용접학회지, 제 6 권, 제 3 호, pp. 37~42.
- (12) Dahlquist, G. Bjork, A. and Anderson, N., 1974, "Numerical Methods," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., Ch4.
- (13) 최병길, 박영조, 이택순, 전상윤, 1990, "AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구(II)", 대한용접학회 제 8 권 제 4 호, pp. 76~82.
- (14) Flaman, M.T. Mills, B.E. and Boag, J.M., 1987, "Analysis of Stress Variation-with-Depth Measurement Procedures for the Center-Hole Method of Residual Stress Measurement," Experimental Technics, Vol. 11, No. 6, pp. 35~37.
- (15) Measurements Group Inc., 1986, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gauge Method," Measurement Group Tech. Note 503~2.
- (16) Gerald, C.F., 1978, "Applied Numerical Analysis," 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, p. 108.