김일성종합대학학보 JOURNAL OF KIM IL SUNG UNIVERSITY
(자연과학) (NATURAL SCIENCE)
주체104(2015)년 제61권 제5호 Vol. 61 No. 5 JUCHE104(2015).

파괴력학의 무게함수방법을 리용한 원형축에서의 잔류응력결정

지 동 환

위대한 령도자 **김정일**동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학자, 기술자들은 사회주의경제발전의 요구에 맞게 인민경제 모든 부문의 생산기술공정과 생산방법, 경영활동을 새로운 과학적토대우에 올려세우는데서 나서는 과학기술적문제를 전망성있게 풀어나가야 하겠습니다.》(《**김정일**선집》 증보판 제11권 138페지)

론문에서는 용접구조물의 나머지 수명을 평가하는데서 제기되는 과학기술적문제를 풀기 위한 연구를 진행하였다.

선행연구[1, 2]에서는 파괴력학의 무게함수방법을 리용하여 경계균렬이 있는 세점구부림시편에서 시편을 절단할 때 측정된 변형으로부터 잔류응력을 결정하였다.

론문에서는 원주방향반타원겉면균렬이 있는 원형축을 당길 때와 구부릴 때의 응력확대결수[3]를 리용하여 무게함수를 새로 얻고 고리형용접부를 가진 원형축의 잔류응력을 무게함수방법으로 결정하였다.

1. 리론적기초

파괴력학에서 임의로 분포된 응력에 대하여 길이가 a인 균렬에 대한 I형응력확대결수 K_I는 무게함수 $m(a,\ x)$와 균렬면에 수직으로 작용하는 응력 $\sigma(x)$를 곱한것을 적분하여 계산할수 있다. 즉

$$K_I(a) = \int_0^a m(a,\ x)\sigma(x)dx. \tag{1}$$

여기서 $m(a,\ x)$는 무게함수이고 $\sigma(x)$는 균렬면에 수직으로 분포된 임의의 응력이며 K_I는 이 응력에 의한 I형응력확대결수를 의미한다.

방정식 (1)에서 응력분포 $\sigma(x)$는 구해야 할 미지수이다.

$\sigma(x)$를 잔류응력 즉 $\sigma(x) = \sigma_{rs}(x)$라고 하면 시편을 인공적으로 절단할 때 잔류응력의 재분배로 인한 변형을 측정하여 그것을 결정할수 있다. 잔류응력에 대한 응력확대결수는 균렬면에 수직으로 분포된 잔류응력에 의존하며 측정된 변형값에도 관계된다.

각이한 절단깊이에 대응한 변형측정값과 무게함수에 기초하여 방정식 (1)에 따라 잔류응력분포를 구하여야 한다.

잔류응력에 의한 응력확대결수 K_{Irs}와 측정된 변형 ε_M 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$K_{Irs}(a) = \frac{E'}{Z(a)}\frac{d\varepsilon_M}{da}$$

여기서 $Z(a)$는 영향함수로서 $Z(a)=\frac{B}{F}\frac{\partial K_{IF}}{\partial s}$로 표시된다. K_{IF}는 가상짐 F에 대한 응력확대결수이다.

그림 1과 같은 모형에 대하여 M점에서의 영향함수는 다음과 같다.($L>2W$)

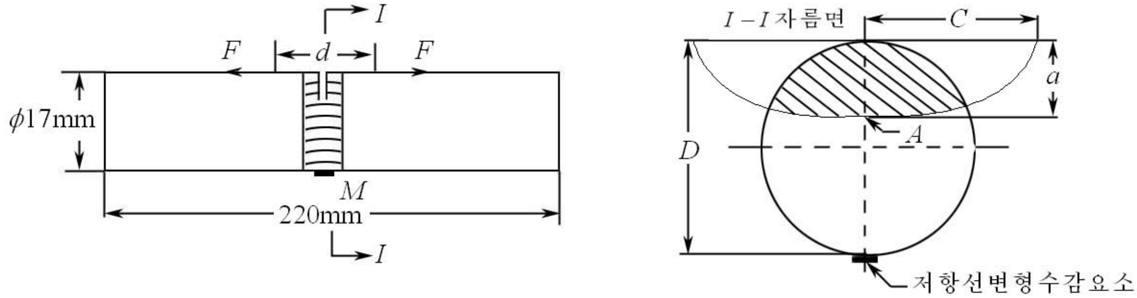

그림 1. 잔류응력측정에 리용한 시편형태

$$Z(a)=\frac{-2.532}{(W-a)^{3/2}}\sqrt{1-25\left(\frac{a}{W}-0.2\right)^2}\left[5.926\left(0.2-\frac{a}{W}\right)^2-0.288\left(0.2-\frac{a}{W}\right)+1\right]\quad (a/W\le 0.2\text{일 때})$$

$$Z(a)=\frac{-2.532}{(W-a)^{3/2}}\quad (a/W>0.2\text{일 때})$$

이로부터 변형만 측정하면 응력확대결수 K_{Irs}를 계산할수 있다.

2. 반타원겉면균렬이 있는 원형축의 무게함수

반타원겉면균렬이 있는 원형축에 대한 무게함수는 다음과 같이 표시된다.[3]

반타원균렬의 제일 깊은 점 A에서의 무게함수는

$$m_A(x,\ a)=\frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}}\left[1+M_{1A}\left(1-\frac{x}{a}\right)^{1/2}+M_{2A}\left(1-\frac{x}{a}\right)+M_{3A}\left(1-\frac{x}{a}\right)^{3/2}\right].$$

여기서 M_{iA}는 원기둥시편을 균일하게 당기거나 구부릴 때의 응력확대결수와 균렬입구($x=0$)에서 곡률의 령조건으로부터 결정한다.

$$M_{1A}=\sqrt{2}\left[\frac{3}{2\beta}(Y_0-Y_1)-Y_0\right]\pi-\frac{24}{5},\ M_{2A}=3,\ M_{3A}=\sqrt{2}\left[\frac{3}{\beta}(Y_1-Y_0)+3Y_0\right]\pi+\frac{8}{5}$$

$$Y_0=A_0+A_1\alpha+A_2\alpha^2,\ Y_1=B_0+B_1\alpha+B_2\alpha^2$$

$$A_0=0.22+28.513\beta-354.782\beta^2+2\,178.632\beta^3-7\,140.202\beta^4+$$
$$+12\,957.447\beta^5-12\,227.977\beta^6+4\,721.868\beta^7$$

$$A_1=-0.326-3.78\beta+79.489\beta^2-571.094\beta^3+1\,976.265\beta^4-$$
$$-3\,583.421\beta^5+3\,216.97\beta^6-1\,163.158\beta^7$$

$$A_2=0.266-9.118\beta+85.381\beta^2-465.013\beta^3+1\,475.911\beta^4-$$
$$-2\,794.532\beta^5+2\,878.868\beta^6-1\,261.348\beta^7$$

$$B_0 = 1.346 - 9.627\beta + 82.244\beta^2 - 360.65\beta^3 + 841.678\beta^4 - 973.482\beta^5 + 449.146\beta^6$$

$$B_1 = -0.64 + 6.435\beta - 36.062\beta^2 + 102.765\beta^3 - 151.83\beta^4 + 107.831\beta^5 - 27.262\beta^6$$

$$B_2 = -0.022 + 0.207\beta - 22.436\beta^2 + 148.962\beta^3 - 426.773\beta^4 + 554.803\beta^5 - 276.533\beta^6$$

걸면점 B에서의 무게함수는 다음과 같다.

$$M_B(x,\ a) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}}\left[1 + M_{1B}\left(\frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_{2B}\left(\frac{x}{a}\right) + M_{3B}\left(\frac{x}{a}\right)^{3/2}\right]$$

$$M_{1B} = 3\left[\frac{5}{2\beta}(F_1 - F_0) + 2F_0\right]\pi - 8,\ \ M_{2B} = 15\left[\frac{3}{2\beta}(F_0 - F_1) - F_0\right]\pi + 15,\ \ M_{3B} = 3\left[\frac{5}{\beta}(F_1 - F_0) + 3F_0\right]\pi - 8$$

$$F_0 = C_0 + C_1\alpha + C_2\alpha^2,\ \ F_1 = D_0 + D_1\alpha + D_2\alpha^2$$

$$C_0 = -0.066 + 19.26\beta - 228.269\beta^2 + 1\,431.985\beta^3 - 4\,794.7\beta^4 + 8\,505.88\beta^5 - \\ -8\,490.938\beta^6 + 3\,322.448\beta^7$$

$$C_1 = 0.75 - 14.604\beta + 168.335\beta^2 - 1\,007.73\beta^3 + 3\,275.884\beta^4 - 5\,723.544\beta^5 + \\ +5\,050.318\beta^6 - 1\,737.284\beta^7$$

$$C_2 = -1.2 + 32.929\beta - 392.494\beta^2 + 2\,269.87\beta^3 - 7\,139.002\beta^4 + 12\,268.785\beta^5 - \\ -10\,812.56\beta^6 + 3\,789.215\beta^7$$

$$D_0 = 0.61 - 4.183\beta + 47.827\beta^2 - 229.509\beta^3 + 562.614\beta^4 - 669.104\beta^5 + 315.017\beta^6$$

$$D_1 = 0.412 - 1.074\beta + 16.549\beta^2 - 90.835\beta^3 + 237.503\beta^4 - 291.519\beta^5 + 139.573\beta^6$$

$$D_2 = -0.301 + 0.972\beta - 17.733\beta^2 + 98.463\beta^3 - 256.398\beta^4 + 312.891\beta^5 - 148.615\beta^6$$

잔류응력분포는 구해야 할 미지수이다.

잔류응력분포는 그림 2에서 보는바와 같이 미소구간들의 합으로서 근사시킬수 있다.

이때 매개 미소구간에서는 균일한 응력이라고 가정하면 잔류응력확대결수는 다음과 같이 표시된다.

$$K_{Irs}(a_i) = \sum_{j=1}^{i}\sigma_j\int_{a_{j-1}}^{a_j} m(x,\ a_i)dx$$

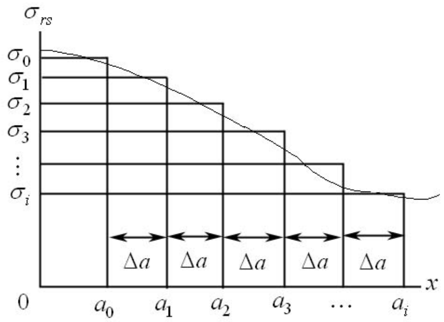

그림 2. 잔류응력분포의 리산화

3. 잔류응력측정실험

잔류응력을 측정하기 위하여 그림 1과 같은 고리형용접시편을 제작하였다.

변형측정점 M에 저항선변형수감요소를 붙이고 절단깊이에 따르는 변형을 측정하였으며 측정된 변형값은 표와 같다.

측정된 변형값에 따르는 잔류응력분포는 선행연구[1, 2]에서와 같은 방법으로 결정하였다.

그림 3에서 보는바와 같이 결면잔류응력은 175MPa로서 당김응력이며 내부로 들어가면서 급격히 누름응력상태로 넘어간다.

표. 측정된 변형값

a/mm	$\varepsilon(\times10^{-6})$	a/mm	$\varepsilon(\times10^{-6})$
0.8	−23.89	5.35	−584.07
1.5	−106.19	6.2	−610.62
2.3	−243.36	7.0	−663.71
3.4	−309.73	7.5	−676.99
4.2	−486.72	8.2	−398.23

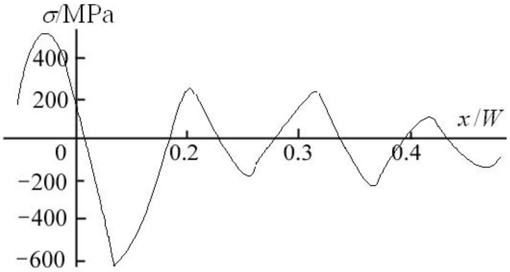

그림 3. 측정된 변형에 따라 결정된 잔류응력분포

참 고 문 헌

[1] 지동환; 기계공학, 1, 13, 주체101(2012).

[2] Чжи Тонь Хван; Вестник инженерной школы ДВФУ, 19, 2, 87, 2014.

[3] C. S. Shin et al.; Int. J. Fract., 129, 239, 2004.

주체104(2015)년 1월 5일 원고접수

Determination of the Residual Stress in the Circular Shaft using Weight Function Method of the Fracture Mechanics

Ji Tong Hwan

We determined residual stresses in deeper regions by weight function method of the fracture mechanics and measured deformation during introduction of saw-cuts in circular shaft.

Key words: residual stress, weight function method