

배관 용접부의 잔류응력이 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구

A Research of Effect on Fatigue Life by Residual Stress at Welds of Pipe

이택순*, 양현태**

* 영남대학교

** 영남대학교 대학원

1 서론

용접은 근대 과학기술의 발달과 더불어 공업기술분야에서 중요한 역할을 담당하는 주목할만한 기술이며, 그 응용범위는 현재 방위산업, 교량, 조선, 원자력 발전, 석유화학, 항공기 등 열거할 수 없을 정도로 광범위하고 다양하다. 용접기술이 더욱 다양화·전문화되어 작업공정시간과 비용이 아주 절감되고, 접합강도와 효율성이 더욱 높아 그 이용이 날로 증가하고 있는 추세이다. 하지만 이러한 용접구조물에도 여러 가지 결함이 존재한다. 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 균열 등 이러한 결함들로부터 균열이 진전되어 최종파단에 이르는 경우가 종종 있다. 또한 용접열로 인하여 국부적으로 팽창·수축 등의 열소성변형이 생긴다. 하지만 구속이나 어떤 힘에 의하여 용접부 주위에 높은 잔류응력이 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 잔류응력과 피로와의 관계에 대하여 여러 분야의 연구자들이 실험적으로 규명해 놓았으나, 그 의견이 분분하다. 하지만 중요한 한가지는 용접구조물에는 작은 균열이 존재하며, 그 균열로부터 피로파괴가 일어난다는 것이다. 그러한 이유로 재료 내에 결함이나 균열 등이 존재하는 경우 육안이나 비파괴검사로 파괴특성의 평가가 가능하나 구속조건이나 열영향으로 인하여 발생하는 잔류응력은 아직 정확한 파악과 해석이 미흡한 상태이며, 특히 정확한 잔류응력의 측정기술과 반복하중에 의한 피로균열 진전시 잔류응력의 이완 등은 이들을 해석하는데 많은 어려움을 주고 있다. 하지만 아직도 용접부의 잔류수명이 저하하는 요인을 뚜렷이 밝혀내지는 못하는 실정이며, 이러한 이유로 현재 용접구조물의 안전설계 및 안전성평가를 위하여 각 분야에서 많은 노력을 기울이고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 원자력 발전소 배관재로 사용되고 있는 SA-304 (SUS-304)강 용접부의 잔류응력을 측정하며, 또한 피로실험과 예측 Program⁽¹⁾을 이용하여 용접부에서의 피로거동을 정확히 파악해 보고자 한다.

2. 실험 재료

본 실험에 사용한 재료는 원자력 배관용이나, 화학 Plant의 배관 또는 용기, 열 교환기 등에 일반적으로 사용되는 SA-304(SUS-304)이다. 이 재료는 18Cr-8Ni의 오스테나이트계 스테인리스강으로, 가공성과 내식성, 내열성이 좋아 여러 공업분야에 많이 이용된다.

SUS-304의 화학적 조성 및 기계적 특성을 Table-1,2에 나타내었다. 또한 용접에 이용한 용접봉의 화학적 조성 및 기계적 특성을 Table-3,4에, 용접조건을 Table-5에 나타내었다. 용접 전 모재에 존재할 수 있는 잔류응력을 제거하기 위하여 전기로에서 350℃로 가열하여 1시간 정도 유지시킨 다음 냉각시켰다⁽²⁾. 용접시험편에 충분한 구속을 주기 위하여 용접 후 Jig에 2시간 정도 유지시킨 뒤 Jig를 제거하였다. 용접재의 균일성을 기하기 위하여 용접에는 자동용접기를 이용하였다.

▶ Table-1. 모재의 화학적 조성(Wt.%)

재 료	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
SUS304	0.03	0.59	1.57	8.5	0.005	0.005	19.3

▶ Table-2. 모재의 기계적 특성

재 료	탄성계수(GPa)	극한강도(Mpa)	항복강도(Mpa)	연신율(%)
SUS304	196.3	751.5	319	62.2

▶ Table-3. 용접봉의 화학적 조성(Wt.%)

용접봉	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
ER 308	0.06	0.31	2.28	19.8	10.0	0.01	0.02

▶ Table-4. 용접봉의 기계적 특성

용접봉	극한강도(Mpa)	항복강도(Mpa)	연신율(%)
ER 308	549	470	35

▶ Table-5. 용접조건(Tig Welding)

용접전압(V)	용접전류(A)	용접속도(mm/sec)	가스유입속도(l/min)
25	153	9	15

3. 잔류응력측정실험

잔류응력을 측정하는 방법에는 X-Ray Diffraction, Ultrasonic, 등 여러 가지 방법이 있으나, 본 실험에서 측정이 용이하며, 비교적 정확한 값을 얻을 수 있는 Hole Drilling Method(아래 HDM)를 이용하였다.

Hole Drilling시 기계적, 열적 잔류응력을 최소화하기 위하여 AJM(Air Jet Machine)⁽³⁾을 사용하였으며, 잔류응력 측정용 Gage로는 M-M사의 062RK -120, 062UM-120을 이용하였다.

본 시험편에서 잔류응력의 측정은 Fig. 1에 나타낸 위치(용접선 중심에서 5mm간격으로)에서 행하였으며, 그 해석은 ASTM E837-92⁽⁴⁾에 따라 실시하였다. 구멍의 깊이와 지름에 따른 계수 A, B는 M-M사의 TN-503⁽⁵⁾를 이용하여 식(1)에 적용하였다. 이렇게 구한 잔류응력의 크기를 Fig.2에 나타내었다.

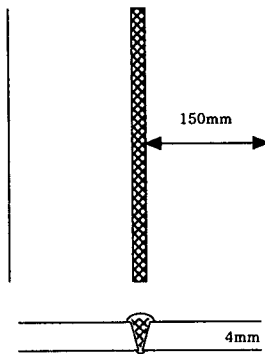


Fig. 1 실험시편

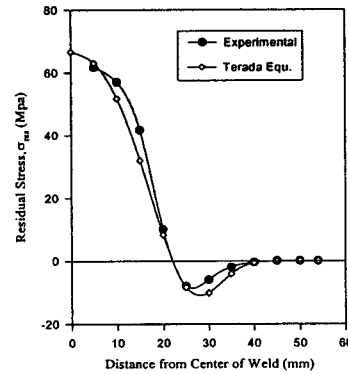


Fig. 2 잔류응력 분포

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} \mp \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2) + (\epsilon_2 - \epsilon_3)}$$

$$\tan \gamma = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2}{2(\epsilon_1 - \epsilon_3)} \quad (1)$$

$$A = -\frac{1 + \nu}{2E} \bar{a}$$

$$B = -\frac{1}{2E} \bar{b}$$

Terada⁽⁶⁾는 무한평판의 맞대기 용접에서 발생하는 잔류응력의 분포를 아래와 같은 관계식(식(2))으로 설명하고 있다.

$$\sigma_{res}(x) = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \text{Exp} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right\} \right] \quad (2)$$

여기서, σ_0 는 시편에 존재하는 최대잔류응력이며, b 는 잔류응력 중 인장잔류응력 만의 폭이다. 이 식으로 구한 잔류응력의 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

3. 피로실험

피로실험에는 유압식 만능재료시험기를 이용하였으며, 실온에서 정현파를 이용하여, 진동수를 10Hz로 일정하게 하였다. 응력비는 0.1로 하였고, 균열 길이 측정에는 20배 이동식 현미경을 이용하였다. 하중조건을 Table-6에 나타내었다.

▶ Table-6. Experimental Condition

$P_{max}(kgf)$	$P_{min}(kgf)$	$\Delta P(kgf)$	$P_{mean}(kgf)$	Stress Ratio	Test Freq.	Control Mode	Wave Form
6.000	6.00	5.400	3.300	0.1	10	Load	Sine

3-2. 피로균열진전거동

이러한 잔류응력을 가진 시험편을 피로시험을 행한 경우, Cycle 대 Crack 길이는 Fig. 3에, da/dN 대 ΔK 선도는 Fig. 4에 나타내었다.

Glinka⁽⁷⁾는 이론적 해석에서 외부 작용응력에 의한 응력확대계수, K 를 식(3)과 같이 나타내었으며, 잔류응력에 의한 응력확대계수, K_{res} 를 식(4)과 같이 나타내었다. 유효응력확대계수는 이 두 식을 중첩함으로써 얻어진다(식 (5)).

$$K = \sigma \sqrt{aY} \quad (3)$$

$$= \sigma \sqrt{a} \cdot \left[1.77 + 0.227 \left(\frac{2a}{W} \right) - 0.51 \left(\frac{2a}{W} \right)^2 + 2.7 \left(\frac{2a}{W} \right)^3 \right]$$

$$K_{res} = \int_{-a}^a \sigma_{res}(x) \cdot \left[\frac{2 \sin \left\{ \frac{\pi(a+x)}{W} \right\}}{W \cdot \sin \frac{2\pi a}{W} \cdot \sin \frac{\pi(a-x)}{W}} \right]^{1/2} dx \quad (4)$$

$$K_{eff} = K + K_{res} \quad (5)$$

여기서, a 는 균열길이의 반폭이며, W 는 시험편의 폭이다. x 는 판 중심으로부터의 거리이며, $\sigma_{res}(x)$ 는 잔류응력이다. 또한 영향함수법을 이용한 피로수명 평가법을 사용하였을 경우의 균열진전속도를 Fig. 4에 도시하여 실험치와의 차이를 도시하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서 구조물에서의 용접이 잔류응력을 발생시키며, 그러한 잔류응력이 피로수명에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

- 1) 피로균열진전속도는 같은 응력확대계수범위(ΔK)에서 용접열영향부가 모재부 보다 빠르게 진행하고 있다. 이것은 잔류응력과 열영향부의 미세구조변화의 영향에 기인한 것이라 사료된다.
- 2) 영향함수법을 이용한 피로수명예측을 한 결과가 실험치와 잘 일치하였다.

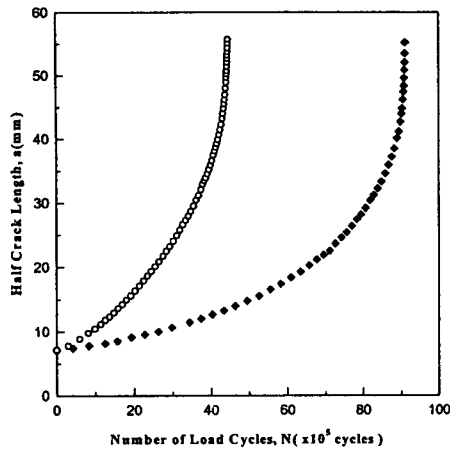


Fig. 3 Crack Length vs. Number of Cycle

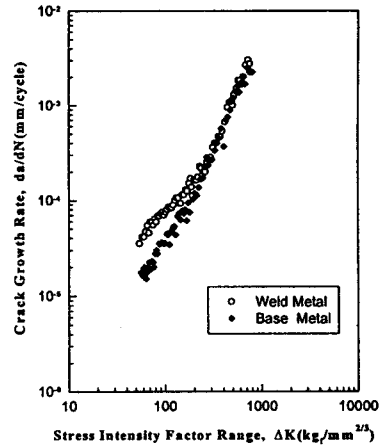


Fig. 4 Crack Growth Rate vs. Stress Intensity Factor Range

이러한 실험결과를 이용하여 현재 사용중인 구조물의 잔존수명을 평가할 수 있으며, 해석 Program 을 이용하여 좀 더 발전되고, 신속한 Data를 얻을 수 있으리라 생각된다.

6. 참고문헌

- 1) 조창희, 김상태, 권재도, "복합응력장 하의 균열부재에 대한 잔류수명 평가방법 개발", 대한기계학회 추계학술대회, 1996, pp. 138~143
- 2) 長谷川正義, "스테인리스강 편람", 1992년
- 3) 최병길, 박영조, 이택순, 전상운, "AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 측정에 관한 연구", 대한용접학회지, Vol. 8, No. 4, 1990.12
- 4) "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", ASTM Standard E837-92, Amer. Soc. for Test. and Mat., 1992
- 5) "Measurement of Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", Tech. Note TN-503-4, Micro-Measurement Group, Inc. Raleigh, NC, 1993
- 6) 이용복, 조남익, "피로균열이 진전할 때 용접잔류응력의 재분포와 그 영향", 용접 학회지 1995, pp410~416
- 7) Grzegorz Glinka, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments Under Constant and Variable Amplitude Loads", ASTM STP 677, 1979, pp198~214
- 8) J. Woodtli and W. Muster, "Residual Stress Effects in Fatigue Crack Growth", Eng. Frac. Mech., Vol. 24 pp399~412, 1986
- 9) B. K. Jones, A. F. Emery and S. J. Marburger, "An Analytical and Experimental Study of the Effects of Welding Parameters on Fusion Welds", Welding Research Supplement, pp51~59, Feb. 1993