

용접재의 잔류응력 재분포와 피로거동

이 용 복 · 정 진 성

Residual Stress Redistribution and Fatigue Behavior in Weldment

Y. B. Lee and C. S. Chung



이용복/홍익대학교/
1949년생/구조물의 응
력 해석과 용접재료의
피로강도 해석 및 용접
기 개발에 관심이 있음



정진성/홍익대학교/
1968년생/용접부의 피
로 강도 해석 및 구조
물의 건전성 평가에 관
심이 있음

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 모든 구조물은 사용 요건이 가혹해지고 대형화되어 가고 있어 항상 사고의 위험이 증가하고 있다. 대부분 구조물들은 리벳접합, 나사결합 및 용접으로 이루어지고 있으며, 이들 중 작업 공정 및 강도면에서 우수한 용접방법이 점점 그 활용도가 높아지고 있다. 그러나 용접부에는 용접과정중에 생기는 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 균열 등 다양한 형태의 결함들이 존재하기 쉬우며, 이들 결함으로부터 균열이 진전되어 최종파단에 이르는 경우가 많다. 그리고 용접열로 인하여 국부적으로 팽창 및 수축 등의 열 소성변형이 생기고 높은 잔류응력이 용접부위에 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 또한 용접 작업 중 용가재와의 용융상태에서의 화학반응 및 냉각속도 차이에서 오는 조직 변화 등 많은 변수들은 용접부재를 취약하게 하고 안전사용이나 안전설계에 어려움을 주고 있다.

이상과 같이 용접부에는 많은 취약조건들이 존

재하며 파괴의 주 원인이 되고 있어 이들에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁻⁵⁾ 따라서, 현재 용접 재료, 용접 조건 및 용접 방법 등을 개선함으로써 여러 방면에서 좋은 결과를 얻고 있다. 그러나 아직도 용접시의 열소성변형과 구속조건에 따라 분포하는 잔류응력에 의한 피로균열거동에 대한 연구는 정확한 잔류응력 측정의 어려움으로 미흡한 상태이다. 특히 잔류응력의 측정기술과 반복하중에 의한 피로균열 진전시 잔류응력의 이완 등은 이들을 해석하는데 많은 어려움을 주고 있다. 용접시 높은 열에 의한 재료의 팽창과 냉각시의 수축 변형은 용접부재에 인장 및 압축 잔류응력을 유발시키고, 인장잔류응력은 균열 진전을 촉진시키며 압축잔류응력은 오히려 균열을 지연시키기도 한다.⁶⁾ 또한 잔류응력장에서 피로 균열이 진전될 때 잔류응력은 일반적으로 작용 하중의 크기와 반복수 그리고 균열 진전 등으로 인하여 이완되고 재분포된다.⁷⁾

본 해설에서는 용접재의 피로거동중에 발생하는 잔류응력의 재분포 현상을 하중의 범위, 하중 반복수, 균열 진전의 영향으로 구분하여 각각의 영향에 대해서 기술하고자 한다.

2. 잔류응력의 분포 및 측정

용접부의 열소성에 의한 잔류응력은 재료의 파괴강도에 상당한 영향을 주고 때로는 재료의 항복강도보다 높게 분포할 수 있으며 그 부위에 균열이나 결함이 있을때 파손의 원인이 될 수 있다. 따라서 잔류응력의 분포를 정확히 파악하고, 이로 인한 파괴특성을 고찰하는 것은 매우 중요하다. 현재 잔류응력 측정에 이용되는 방법은 약 20여가지가 있으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- ▶ 응력 이완 방법
(Stress-Relaxation Technique)
- ▶ X-ray 회절 방법
(X-ray Diffraction Technique)
- ▶ 응력에 민감한 설질을 이용하는 방법
(Technique Using Stress Sensitive Properties)
- ▶ 균열 전파법 (Cracking Technique)

이들 방법 중 일반적으로 널리 사용되고 있고 용접 재료의 잔류응력 측정에 가장 많이 이용하는 응력 이완 방법 중의 하나인 Mathar⁸⁾의 hole drilling method(천공법)를 자세히 기술하면 다음과 같다.

2축 인장상태에서 선형탄성적이고 등방성이며, 평면응력상태인 판에 구멍을 뚫기 전 0점을 기준으로 하는 작은 원 주위의 잔류응력 분포는

$$\begin{aligned} \sigma_{r,0} &= \frac{1}{2} (\sigma_{x,0} + \sigma_{y,0}) + \frac{1}{2} (\sigma_{x,0} - \sigma_{y,0}) \cos 2\theta \\ \sigma_{\theta,0} &= \frac{1}{2} (\sigma_{x,0} + \sigma_{y,0}) - \frac{1}{2} (\sigma_{x,0} - \sigma_{y,0}) \cos 2\theta \\ \tau_{r,\theta} &= \frac{1}{2} (\sigma_{x,0} - \sigma_{y,0}) \sin 2\theta \end{aligned} \quad (1)$$

와 같다.

여기에서, $\sigma_{r,0}$ 는 반경방향의 성분이고, $\sigma_{\theta,0}$ 는 직각방향의 성분이며, $\tau_{r,\theta}$ 는 각 θ 인 원주방향의 전단 잔류응력성분이다. 그리고 $\sigma_{x,0}$ 와 $\sigma_{y,0}$ 는 극좌표에서의 x 및 y방향의 잔류응력성분이다.

구멍을 뚫은 후, 윗 식으로부터 Kirsh⁹⁾는 단축인장하에서 구멍 주위의 응력분포식을 다음과 같이 해석하였다(그림 1).

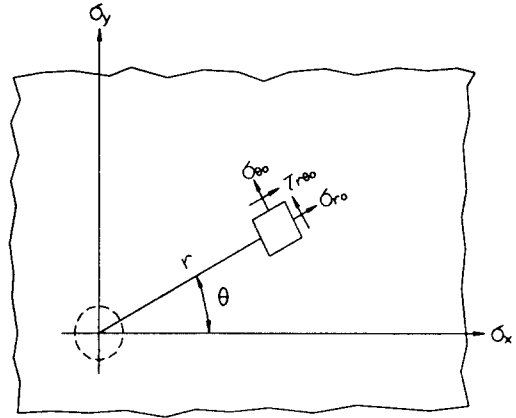


그림 1. 구멍 뚫기 전후의 응력 분포

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_{r,\theta} \left[\left(1 - \frac{\lambda^2}{4} \right) + \left(1 - \lambda^2 + \frac{3}{16} \lambda^4 \right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_\theta &= \sigma_{r,\theta} \left[\left(1 - \frac{\lambda^2}{4} \right) - \left(1 + \frac{3}{16} \lambda^4 \right) \cos 2\theta \right] \\ \tau_{r,\theta} &= -\frac{\sigma_{r,\theta}}{2} \left[\left(1 - \frac{\lambda^2}{2} - \frac{3}{16} \lambda^4 \right) \sin 2\theta \right] \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 σ_r , σ_θ 및 $\tau_{r,\theta}$ 는 각각 구멍을 뚫은 후의 반경방향, 직각방향, 그리고 각 θ 인 원주방향의 잔류응력성분이다. 또한 λ 는 구멍 직경과 구멍중심에서 gage 중심까지의 거리 r과의 비($\lambda=d/r$)이며, 윗 식은 적어도 구멍직경의 5배판폭 이상에 대하여 성립한다.

구멍을 뚫기 전의 strain분포는,

$$\begin{aligned} \epsilon_{r,\theta} &= \frac{\sigma_{r,0}}{E} (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) \\ \epsilon_{\theta,0} &= \frac{\sigma_{r,0}}{E} (\sin^2 \theta - \nu \cos^2 \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

로 주어지고, 구멍을 뚫은 후 구멍주위의 strain 분포는 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta), \quad \epsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) \quad (4)$$

strain gage는 구멍을 뚫을 때 생기는 strain변화를 측정하고, 이러한 변화는 이완변형으로서 다음과 같다.

$$\varepsilon_R = \varepsilon_r - \varepsilon_{r0}, \quad \varepsilon_{R'} = \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_{\theta 0} \quad (5)$$

식 (5)에 식 (2), (3), (4)를 대입하면,

$$\varepsilon_R = C_r \frac{\sigma_{x0}}{E}, \quad \varepsilon_{R'} = C_{\theta} \frac{\sigma_{x0}}{E} \quad (6)$$

와 같이 되고, 잔류응력식으로 정리하면,

$$\sigma_x = \frac{E \cdot \varepsilon_R}{C_r}, \quad \sigma_x = \frac{E \cdot \varepsilon_{R'}}{C_{\theta}} \quad (7)$$

와 같이되므로 이 식으로부터 잔류응력을 구할 수 있다. 뒷 식에서

$$C_r = -\frac{(\nu+1)}{8} \lambda^2 - \left[\frac{1}{2} \lambda^2 - \frac{3(\nu+1)}{32} \lambda^4 \right] \cos 2\theta$$

$$C_{\theta} = -\frac{(\nu+1)}{8} \lambda^2 + \left[\frac{1}{2} \lambda^2 - \frac{3(\nu+1)}{32} \lambda^4 \right] \cos 2\theta \quad (8)$$

이며, $\lambda = d/r \leq 1.15$ 이다.

Terada¹⁰⁾는 무한평판의 맞대기용접에서 발생하는 잔류응력에 대한 분포를 다음과 같은 식으로 해석하고 있다.

$$\sigma_x(x) = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{b} \right)^2} \quad (9)$$

여기에서 σ_0 는 용접부의 최대잔류응력이며, b 는 인장잔류응력의 반폭이다.

용접물에 존재하는 잔류응력을 평가하기 위한 시편을 제작할 때 잔류응력이 실구조물에 존재하는 잔류응력만큼 존재하기 위해서는 시편이 어느 정도 이상의 크기가 되어야 한다. 여기서 고려되어야 할 사항은 시편의 폭과 길이이다. 시편의 폭의 길이가 응력분포에 미치는 영향에 대해서

Masubuchi가 computer simulation 작업을 통하여 고찰해 본 결과 시편의 넓이가 잔류응력이 존재하는 구역의 몇 배 이상이면 시편의 폭의 효과를 무시할 수 있다고 보고되었으며, 용접물의 길이가 최소한 450mm 이상 되어야 용접물에 높은 인장력이 걸려 이 응력이 용접물의 길이에 따라 변하지 않는다고 보고되었다¹¹⁾.

그림 2와 3은 MIG 용접된 연강의 길이(longitudinal) 방향의 초기 용접잔류응력 분포를 자화식 응력지시계(Magnetizing stress indicator)를 사용하여 측정한 것이다. 여기서 잔류응력은 용접 중앙부위에서 최대가 되며 대칭성을 갖는 것을 알 수 있다.

3. 용접잔류응력의 재분포

인장잔류응력장에서 피로균열이 진전할 경우 초기에 압축잔류응력이 존재했던 위치까지 균열이 진전해도 균열선단 부근에는 인장잔류응력이 분포한다고 보고되어 있으며¹²⁾, 잔류응력과 작용응력이 중첩되어 피로균열에 영향을 미치는데 외부하중의 크기와 반복수에 따라 피로균열에 미치는 영향의 정도가 다르며 피로균열이 진전됨에 따라 잔류응력의 분포도 수시로 변하게 되어 그 영향이 달라진다. 이와 같은 복잡한 요인으로 잔류응력에 의한 피로균열의 진전을 정확하게 파악하는 것은 매우 어려우며, 잔류응력 측정법 중 가장 많이 사용되는 Mathar의 hole drilling method로는 시험편을 파손하면서 잔류응력을 측정해야 하기 때문에 수많은 시편과 시간이 요구된다. 반면 자화식 응력지시계를 사용하여 잔류응력을 측정할 경우 수시로 잔류응력 변화 및 분포상태를 간단하게 측정할 수 있지만, 탐침촉(probe) 전체면적(200mm²)에 대한 통합응력이 측정되므로 시험편에 불연속 구간이 존재 할 경우는 측정오차가 커지는 단점이 있다.

3.1 균열진전에 따른 재분포

균열 진전에 의한 잔류응력의 변화를 알아보기 위하여 용접시험편 중앙에 노치를 만들고 실험을 이용하여 slit 형태의 노치를 증가시키면서 잔여 시

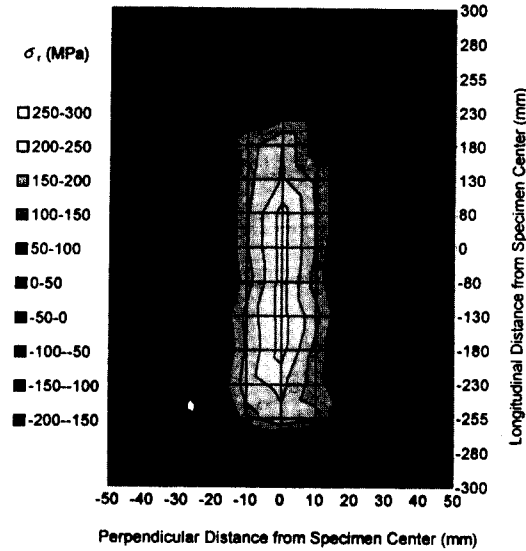


그림 2. 한줄 용접한 시험편의 초기 잔류응력 분포

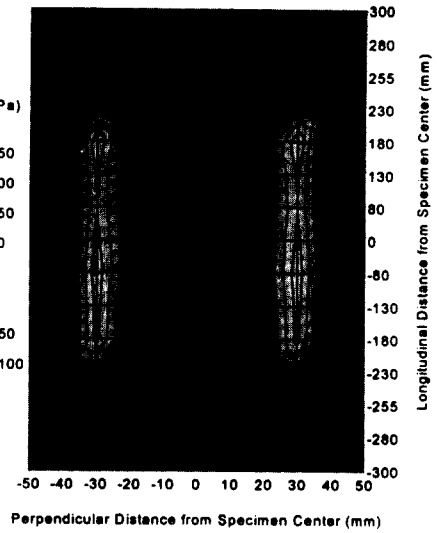


그림 3. 두줄 용접한 시험편의 초기 잔류응력 분포

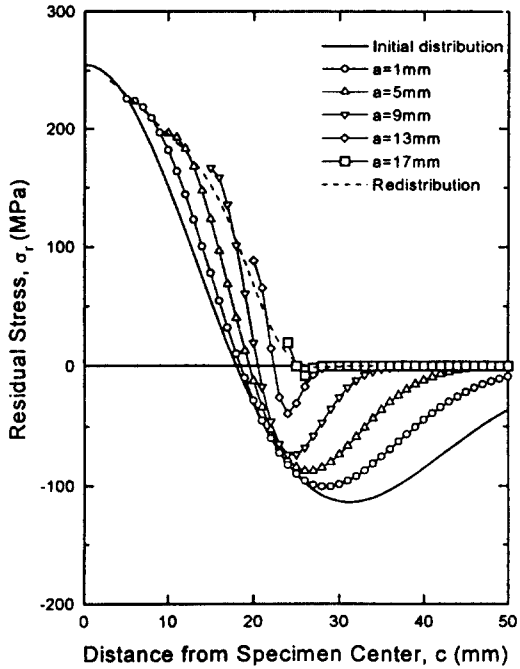


그림 4. 인장잔류응력장에서 균열 전파에 의한 잔류응력의 재분포

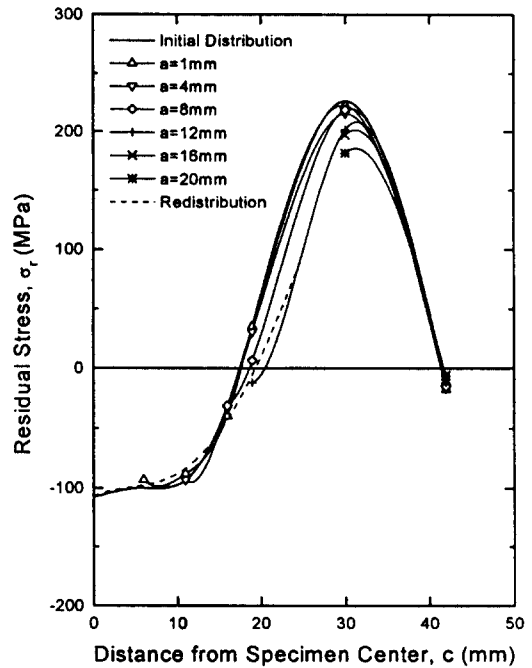


그림 5. 압축잔류응력장에서 균열 전파에 의한 잔류응력의 재분포

험편에서의 잔류응력 변화를 측정하는 방법이 이용된다. 균열진전에 따른 잔류응력의 재분포실험

에서 자화식 응력지시계를 사용할 경우에는 재료에 손상을 입히지 않고 측정할 수 있는 장점이 있

지만 균열전단의 응력측정에는 오차가 크므로 균열전단의 국부적인 응력상태를 정확히 평가할 수 있는 strain gage를 이용한 hole drilling method가 사용된다. 그림 4는 인장잔류응력장에서 균열이 차츰 전파할수록 인장잔류응력 영역에서는 잔류응력의 절대값이 증가하며 재분포하고 압축잔류응력 지역에서는 잔류응력이 이완되는 것을 보여주며, 압축잔류응력장에서 균열이 전파할 경우에도 그림 5와 같이 유사한 현상을 보여준다.

3.2 반복하중에 따른 재분포

잔류응력이 피로균열에 주는 영향을 정확히 파악하기 위한 동일 하중조건하에서의 잔류응력의 변화특성에 대한 인식이 필요하다. 잔류응력이 분포하는 시험편에 노치 없이 반복하중을 작용시킬 때 그림 6에 나타난 바와 같이 10^5 cycle까지는 잔류응력 변화가 미소하였지만 그후 부터는 잔류응력이 차츰 이완되어 재분포됨을 알 수 있다. 그림 6에서 각각의 반복수에서의 인장 및 잔류응력의 재분포 면적을 초기분포의 면적으로 나누어 반복

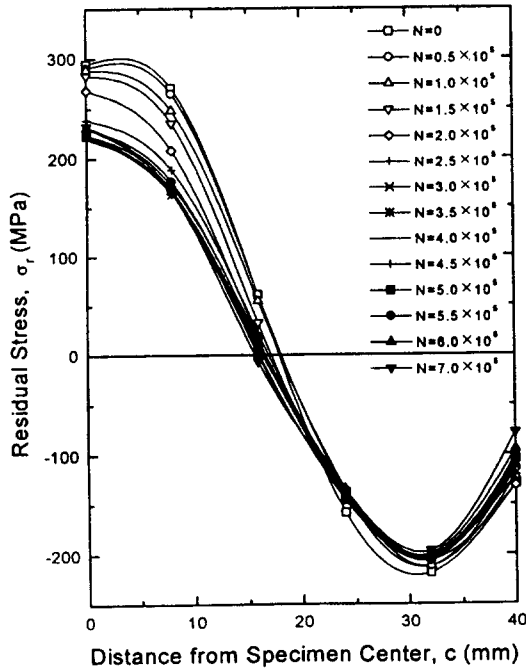


그림 6. 반복하중에 의한 잔류응력의 재분포 선도

수에 의한 잔류응력의 이완량을 그림 7에 나타내었다. 이와같은 실험은 자화식 응력지시계와 같이 재료에 손상을 입히지 않는 비파괴적 방법만이 정확하게 측정 가능하며 hole drilling method와 같이 파괴적인 방법으로는 측정이 곤란하다.

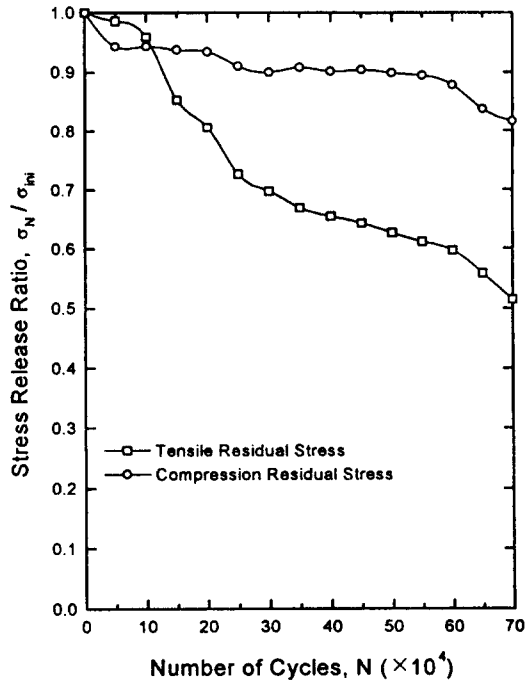


그림 7. 하중반복수와 잔류응력의 이완 관계

이상과 같은 결과로부터 균열이 진전됨에 따라 초기 잔류응력은 계속 변하여 재분포하고 또한 하중반복수에 의해서 이완된다. 연강을 사용하여 최대응력을 고정한 상태에서 응력비를 증가시키면서 피로실험을 수행한 결과(그림 8, 9) 응력비의 증가에 따라 긴 피로수명을 갖게 되고 이로 인한 반복하중수의 증가는 잔류응력의 이완을 가중시킨다(U-모재, T-한줄용접재).

4. 잔류응력 재분포를 고려한 피로거동의 평가

본 해설에서 피로균열이 증가함에 따라 초기잔류응력이 재분포함을 보여주었다. 따라서 용접잔

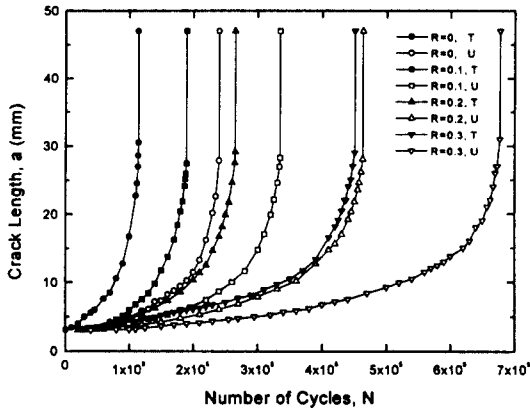


그림 8. 다양한 하중조건에서 모재와 용접재의 균열 전파 (a-N 선도)

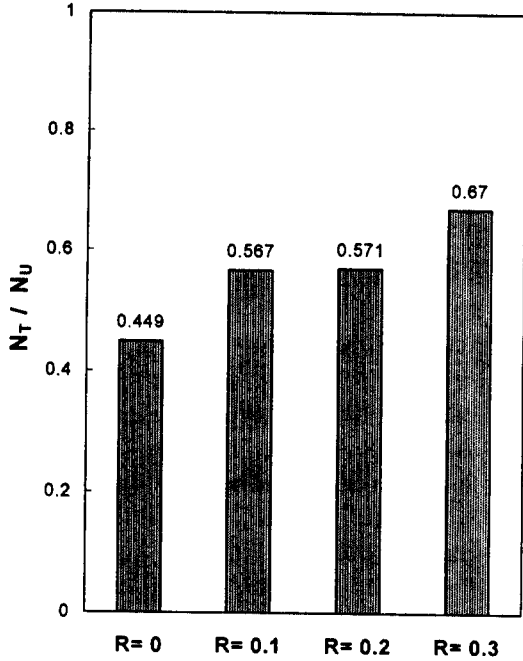


그림 9. 응력비의 변화와 수명비(용접재수명/모재 수명)의 관계

류응력이 피로균열에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 피로균열에 따른 잔류응력의 재분포를 고려해야 할 필요가 있다.

응력확대계수범위 ΔK 와 용접부에 외부작용

력과 잔류응력이 중첩하여 작용할때 전응력확대계수범위 $\Delta K'$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \Delta K' &= K'_{\max} - K'_{\min} \\ &= (K_{\max} + K_{res}) - (K_{\min} + K_{res}) = \Delta K \end{aligned} \tag{11}$$

또한, 응력비 (R)와 유효응력비 (Reff)는 다음과 같다.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \tag{12}$$

$$R_{eff} = \frac{K_{\min} + K_{res}}{K_{\max} + K_{res}} = \frac{K'_{\min}}{K'_{\max}} \tag{13}$$

잔류응력에 의한 응력확대계수값은 Green¹²⁾의 함수를 이용하여 다음과 같다¹³⁾.

$$K_{res} = 2 \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma_r(x) dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} \tag{14}$$

유효응력비를 잔류응력의 초기분포와 재분포로 각각 구하였으며, Kres로 구한 유효응력비와 비교하여 그림 10, 11에 나타내었다. 이상의 결과를 Forman식¹⁴⁾에 적용하면 균열진전속도는 그림 12, 13과 같다. 그림 12, 13은 da/dN- ΔK 에 대하여 인장잔류응력 영역 및 압축잔류응력 영역으로부터 균열이 전파할 때 모재 및 용접시험편에 대한 실험결과와 Terada의 식으로 구한 초기잔류응력 및 재분포 잔류응력을 이용하여 구한 예측, 그리고 Green함수로 구한 응력확대계수식에 의한 예측을 비교하고자 함께 나타낸 것이다. 각 경우를 보면 모재시험편보다 용접시험편의 균열진전속도가 균열 초기에 가장 큰 차이를 보이고 서서히 그 차이가 줄어들며 나중에는 모재의 경우에 접근하는 경향을 보인다. 이것은 균열 초기에 높은 인장잔류응력 및 압축잔류응력이 균열 전파에 크게 영향을 주고 있고 잔류응력 재분포 특성에 따라 서서히 감소하므로 그 영향을 받아 나중에는 잔류응력의 이완으로 모재의 경우와 일치하는 결과를 알 수 있

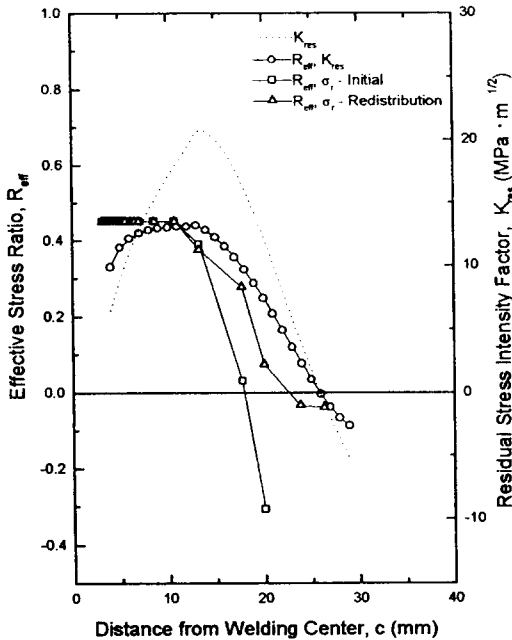


그림 10. 인장응력장에서 균열전파에 따른 잔류응력확대계수와 유효응력비의 변화

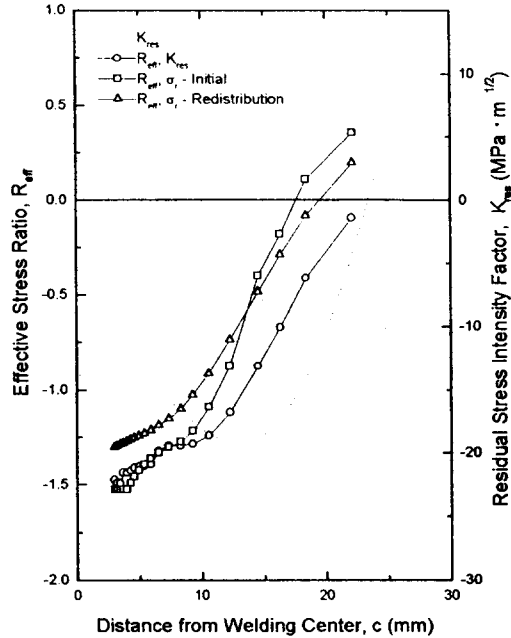


그림 11. 압축응력장에서 균열전파에 따른 잔류응력확대계수와 유효응력비의 변화

다. 그리고 작용하중과 잔류응력의 중첩으로 균열 전파속도를 예측한 경우 재분포된 잔류응력을 고려하여 예측한 값이 용접재의 균열전파속도 실험치에 가장 잘 일치하고 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾

5. 결 론

잔류응력분포의 측정과 잔류응력에 의한 피로균열거동을 평가하고 예측하는 연구는 오래전부터 계속되어 왔다. 그러나 잔류응력의 측정기술과 기존 잔류응력의 외부하중 및 균열전파에 따라 이완되고 재분포되는 특성의 정확한 파악이 어려워 아직까지 이에 대한 연구가 미흡한 상태이다.

현재 이와 관련된 연구들은 대부분 외부작용하중 크기에 따른 잔류응력의 이완특성 해석, 슬릿(slit)이나 균열 전파에 따른 잔류응력 이완에 의한 재분포 현상 분석, 그리고 초기잔류응력 분포값과 작용하중의 중첩에 의한 피로균열 전파특성 파악 등 각각 별도의 방향에서 연구하고 있으며 이들을 종합한 체계적인 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

1. Masubuchi, K., 1980, "Analysis of Welded Structure," Pergamon Press, pp. 466~468.
2. Lawrence, F. V., Jr., Burk, J. D., and Yung, J-Y., 1982, "Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments," Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776.
3. Nelson, D. V., 1982, "Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation," Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, pp. 172~194.
4. 송삼홍, 김현, 1991, "잔류응력의 재분포와 피로크랙 전파거동," 대한기계학회 '91년도 춘계학술대회논문집 (1), pp. 27~30.
5. 송지호, 1990, "변동하중하의 피로파괴," 대한기계학회지, 제 30권, 제 2호, pp. 115~130.
6. 이용복, 김상철, 1987, "용접잔류응력 영역

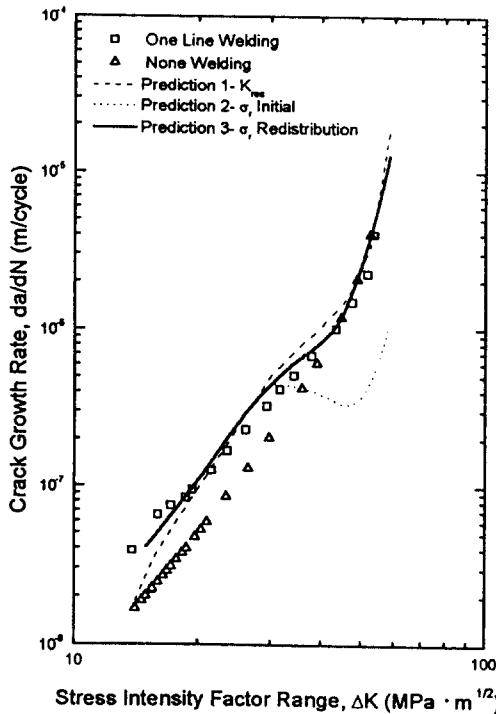


그림 12. 인장응력장에서 균열이 전파할때 잔류응력의 재분포를 이용한 균열전파속도의 예측

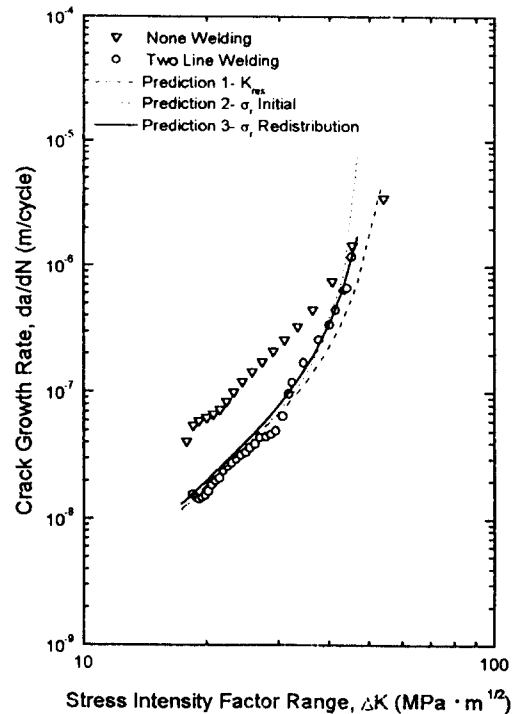


그림 13. 인장응력장에서 균열이 전파할때 잔류응력의 재분포를 이용한 균열전파속도의 예측

에서의 피로균열전파에 대한 Forman식의 적용," 대한용접학회지, 제 5권, 제 1호, pp. 42~56.

7. 向井喜彦, 西村新, 1987, "溶接残留应力場の再分布と疲労き裂傳播方向に関する研究," 溶接學會論文集, 第 5卷, 第 2號, pp. 280~284.
8. Mathar, J., 1934, "Determination of metal stress by measuring the deformation around drill holes," Trans. ASME, Vol. 86, pp. 249~254.
9. Nawwar, A. M., Malachaln, Kirch and Shewchuk, J., 1976, "A Modified Hole-Drilling Technique for Determine Residual Stress in Thin Plates," Experimental Mechanics, June, pp. 226~232.
10. Terada, H., 1976, "Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead," Engineering Fracture

Mechanics, Vol. 8, pp. 441~444.

11. 向井喜彦, 西村新, 1986, "引張残留应力場からき裂が傳播する場合の溶接残留应力場の再分布に関する研究," 溶接學會論文集, 第 4卷, 第 1號, pp. 154~159.
12. Green, O. V., 1930, Trans. of American Society for Steel Treating, Vol. 18, pp. 369.
13. Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R., 1985, The Stress Analysis of Cracks Handbook, Paris Productions, Inc., St. Louis.
14. Forman, R. G., Kearney, V. E. and Engle, R. M., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures," Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 9, pp. 459.
15. 이용복, 정진성, 조남익, 1996, "SS330 용접재에서 인장잔류응력 및 균열단형영향을 고려한 피로거동에 관한 연구," 대한기계학회

- 논문집 (A), 제 20권, 제 7호, pp. 2234~2245.
16. Yong-Bok Lee, Chin-Sung Chung, Ho-Kyung Kim, Se-Won Sohn and Won-Kyun Lim, 1996, "A Study of Fatigue Behavior Considering Effects of Redistributing Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment," Proceedings of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Kyongju, Korea, pp. 349~354.
 17. Yong-Bok Lee, Chin-Sung Chung, Nam-Ik Cho and Ho-Kyung Kim, 1997, "Effect of Redistributing Residual Stress on the Fatigue Behavior of SS330 Weldment," 1997 TMS Annual Meeting & Exhibition/TMS General Abstract Session, Orlando, USA.