

피로균열이 전파할 때 용접잔류응력의 재분포와 그 영향

Redistribution of Welding Residual Stresses and the Effects of it during Fatigue Cracking

최연재(홍익대 대학원), 이용복(홍익대), 조남익(전주공업전문대)

1. 서론

용접부에는 용접과정중에 생기기 쉬운 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 균열등 여러형태의 결함들이 존재하기 쉽고 이들 결함으로부터 균열이 진전되어 최종파단에 이르는 경우가 많다. 그리고, 용접열로 인하여 국부적으로 팽창 및 수축등의 열 소성변형이 생기고 뒤틀림이나 높은 잔류응력이 용접부위에 항상 존재하게 되어 용접부의 파괴및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 따라서, 현재 용접재료의 안전사용 및 안전설계를 위하여 파괴및 피로강도의 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있고 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 이완등은 이들을 해석하는데 많은 어려움을 주고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이를 고려하여 자화식 응력지시계(magnetizing stress indicator)를 사용하여 반복하중으로 피로균열이 진전할때 균열선단부의 잔류응력변화를 수시로 측정하고, 이때 잔류응력이 피로균열진전에 미치는 영향을 정확하게 파악하고자 하였다.

2. 잔류응력의 분포 및 응력확대계수

잔류응력은 기계가공등의 소성변형에 의하거나 구조물에서의 구속조건및 열에 의한 팽창, 수축등으로 인하여 재료내에 국부적으로 존재하는 경우가 대부분이다. 이들중 용접부의 열소성에 의한 잔류응력은 재료의 피로강도에 크게 영향을 주며 때로는 재료의 항복강도보다 높게 분포할 수도 있으며 그 근방에 균열이나 결함이 있을때 파손의 원인이 될수 있다. 그리고, 잔류응력은 특성상 인장잔류응력이 분포하면 그 주위에 이에 대치되는 압축잔류응력이 분포하게 되며 인장잔류응력 영역에 결함이 있을 경우에 균열진전에 크게 영향을 줄수 있고 압축잔류응력 영역에 결함이 있을 경우에는 균열진전을 지연시킬수도 있다. 이와같이 재료내의 잔류응력은 복잡한 요인에 따라 분포하며 재료의 파괴에 크게 영향을 미치므로 잔류응력의 분포를 정확히 파악하고 이로인한 파괴특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

현재 잔류응력 분포를 측정하는 방법으로 응력이완방법, X-ray회절방법, 응력감도를 이용한 방법 및 균열방법으로 크게 나누어지며 소분류로 나누면 20여 가지가 있는 것으로 알려지고 있다.

본 연구에서는 용접 시편의 잔류응력을 정확히 측정하기 위하여 최근에 개발된 자화식 응력 지시계(magnetizing stress indicator)를 사용하였다.

Terada는 무한평판의 맞대기용접에서 발생하는 잔류응력에 대한 분포는 다음과 같은 관계식에 의하여 나타난다고 설명하고 있다.

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

여기에서, σ_0 는 용접부의 최대잔류응력값이고 b 는 인장잔류응력의 반폭이다. 여기서 외부응력이 작용할 경우 응력분포식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(1) \sigma_r(x) \leq \sigma_{ys} \quad (|x| \geq a)$$

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

$$(2) \sigma_r(x) > \sigma_{ys} \quad (0 < |x| < a)$$

여기서, a 는 $\sigma_r(x)$ 가 σ_{ys} 와 같아질때 x 의 값이며 이 값은 다음과 같다.

$$\sigma_0 \left[1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{a}{b}\right)^2} = \sigma_{ys} - \sigma_0 \quad (3)$$

균열이 존재하는 재료의 파괴에 가장 중요한 변수는 응력 확대 계수이고 일반식은 다음과 같다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F \quad (4)$$

크랙면에 내압 P 혹은 크랙 중심에 대하여 대칭응력을 받을때 응력 확대 계수는 Green의 함수를 응용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_I = \int_0^a \left[\sqrt{\frac{a+x}{a-x}} + \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} \right] P dx = 2\sqrt{\frac{a}{x}} \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sqrt{a^2-x^2}} dx \quad (5)$$

그리고 용접부에 외부작용응력과 잔류응력이 중첩하여 작용할때 유효응력확대계수(K_{eff})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{eff} = K + K_m \quad (6)$$

여기서 K_m 는 잔류응력에 의해 나타나는 응력확대계수값으로 다음과 같다.

$$K_m = \frac{2\sqrt{a}}{x} \int_0^a \frac{\sigma_r(x)}{\sqrt{a^2-x^2}} dx \quad (7)$$

그리고, 유효응력확대계수 폭은 $\Delta K_{eff} = (K_{max} + K_r) - (K_{min} + K_r) = K_{max} - K_{min} = \Delta K$ (8)

와 같고, 유효응력비는,

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_m}{K_{max} + K_m} \quad (9)$$

와 같다.

이들 값을 Forman 식에 적용하면 다음과 같다.

따라서, da/dN 과 ΔK 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$da/dN = \frac{C(\Delta K_{eff})^m}{(1-R_{eff})K_d - \Delta K_{eff}} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R_{eff})K_d - \Delta K} \quad (10)$$

3. 실험방법

3.1 시험편의 준비

본 실험을 위하여 일반구조용 압연강재인 SS41를 사용하였고 시험편의 형상은 두께3mm, 폭 100mm, 길이 360mm로 하여 길이방향과 rolling 방향을 같이 하여 기계가공하였다. 기계가공 등으로 인하여 존재할지도 모르는 잔류응력을 제거하기 위하여 전기로에서 550℃로 가열하여 30분이 상유지시킨 다음 로냉시켰고 다음 용접시험편은 직경2.5mm의 KR3000(AWSE6013, JIS4313)피복 아크용접봉을 사용하여 변형을 막고 좀더 큰 잔류응력을 유발시키고자 zig로 구속한 상태에서 100ampere의 전류세기와 0.25m/min의 속도로 시험편 중앙에 길이방향으로 1 pass하여 용접작업을 하였다. 그리고, 시험편 중앙에 직경2mm의 구멍을 뚫고 양쪽으로 각각 1mm의 notch와 2mm 길이의 피로균열을 내어 시험편으로 사용하였다.

3.2 실험장치 및 방법

본 실험을 위하여 25 ton 용량의 전기유압식 만능 재료 시험기 (Instron, 1332 series)를 사용하였고, sine wave를 사용하여 진동수는 13 Hz로 일정하게 하였다. 응력비(R)는 0.1로 일정하게 하였으며 크랙길이의 측정에는 배율이 20배인 독취현미경을 사용하였다. 잔류응력의 측정에는 최근에 개발된 자화응력 지시계 (Sigmatron, magnetizing stress indicator)를 사용하였다. notch를 만들기전에 초기 용접잔류응력의 분포를 먼저 측정하였고 실험중에 매 20,000 cycle 마다 grip을 풀고 잔류응력 분포변화를 측정하였다. 이때 응력측정기의 재료계수인 gain 값을 2로 하였다. 또한, 용접잔류응력이 분포하는 시편에 반복하중을 작용시킬때 사용한 시편과 동일한 초기 notch를 가공한 다음 실험으로 인위적으로 1mm씩 notch를 진전시키면서 그때 변하는 잔류응력을 측정해 보았으며 초기 notch를 만들지 않고 반복응력만을 작용시켰을때 용접부에서 나타나는 잔류응력분포의 변화를 측정해보았다. 모든 시편의 잔류응력을 측정할때 항상 일정한 폭만큼 세로에 평행한 선을 긋고 중심선을 그어 정확히 probe를 대고 측정하였다. 크랙의 전파길이를 측정할때는 항상 양쪽을 모두 측정하였고 이 두 값에 약간의 차이가 나타날 경우 이들값을 평균하여 그 값을 실험 data로 정하였다.

이때, 크랙의 전파에 의한 파괴인성치 값인 K_{Ic} 는 다음과 같은 식을 사용하여 구하였다.

$$K_{Ic} = \sigma\sqrt{\pi a} \left[1 - 0.025 \left(\frac{2a}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{2a}{W} \right)^4 \right] \sqrt{\sec \frac{2\theta}{W}} \quad (11)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 균열의 진전과 반복 하중수에 따른 용접잔류응력의 재분포

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. 이와같이 복잡한 요인으로 잔류응력에 의한 피로균열의 진전을 정확하게 파악하는것은 매우 어려우며, 특히 지금까지 측정방법이 간단하여 많이 이용하던 Mather법 (hole drilling method) 으로는 시험재료를 파손하면서 잔류응력을 측정해야 하기때문에 엄청난 수의 시험편과 시간이 요구되고, 또한 정확한 잔류응력 값을 얻는것이 곤란하였다. 그러나, 자화식 응력지시계를 사용함으로써 시험중에 수시로 잔류응력 변화및 분포상태를 digital형식으로 간단하게 측정할수 있어 본 연구 수행을 가능케 하였다. 이 자화식 응력 지시계를 사용하여 우선 용접부위의 잔류응력분포를 알아보고, 이 결과를 Terada식을 이용하여 나타내면 Fig.1 과 같다.

본 연구에서 잔류응력이 피로균열에 주는 영향을 정확하게 파악하기 위하여 같은 하중조건에서 잔류응력의 변화특성을 알아볼 필요가 있다고 생각되어 우선 잔류응력이 분포하는 시험편에 notch 없이 반복하중을 작용시켜 보았다. 그 결과 240,000 cycle 수 이상에까지 잔류응력 변화는 거의 없음을 알수 있었다. 그리고, 균열길이가 증가할때 잔류응력의 변화를 알아보기 위하여 용접 시험편 중앙에 notch 를 만들고 실험을 이용하여 slit 형태의 notch 길이를 증가시키면서 잔여 폭에서의 잔류응력 변화를 측정하여 보았다. 이와 병행하여 실제 피로시험중에 균열길이가 증가할 때 같은 길이에서 시험편 내의 잔류응력 변화를 측정하여 보았다. 그 결과, 위 두경우 notch 및 crack 길이가 같은 위치에서 잔여폭내의 잔류응력 분포가 거의 같게 나타나고 있음을 알수 있었다. 이와같은 결과로부터 본 실험의 하중조건하에서 용접부의 잔류응력 변화는 반복하중수의 영향을 별로 받지 않고 균열이 진전됨에 따라 영향을 받으며 이는 잔류응력이 주로 균열진전에 영향을 주고 있음을 알수 있다. 또한 균열이 진전됨에 따라 초기 잔류응력은 계속 변하여 재분포하고 있음을 알 수 있다(Fig.2). 이상의 결과로부터 용접부의 잔류응력은 반복하중 cycle에 영향을 받지 않고 다만 균열 진전에 기여하므로써 이완되고 있음을 알수 있다.

4.2 용접잔류응력에 의한 피로균열 진전특성

용접재료나 구조물에 분포하는 잔류응력이 피로균열에 미치는 영향에 대하여 많은 연구결과가 발표되고 있으나 지금까지 대부분의 연구는 초기분포 잔류응력과 외부하중에 의한 잔류응력이 중첩되어 피로균열에 영향을 주는것으로 해석되어왔다. 그러나, 본 연구에서의 실험결과 앞에서 언급한 바와 같이 피로균열이 증가함에 따라 초기잔류응력 분포는 변하여 재분포하고 있음을 알수 있다. 따라서, 용접잔류응력이 피로균열에 미치는 영향을 정확하게 파악하기 위하여는 피로균열에 따른 잔류응력의 재분포를 고려하여야 한다.

Fig.3 및 Fig.4는 각각 초기 잔류응력과 피로균열전파에 따라 재분포되는 잔류응력에 의한 응력비와 응력확대계수 값의 변화를 나타낸 것이다. 초기 잔류응력분포에 비하여 균열전파에 따른 인장잔류응력 폭이 용접중심위치로부터 크게 나타나게 되는데 이것은 피로균열이 전파되면서 잔류응력이 재분포되어 인장으로부터 압축잔류응력으로의 변환점(잔류응력이 0인 위치)이 용접중심 위치로부터 멀리 이동하는 결과이다. 그리고, 그결과로부터 응력비 값은 낮게 나타나고 응력확대계수는 완만하게 변하고 있음을 나타낸다. 이로부터 초기잔류응력의 경우보다 피로균열전파와 함께 낮은 잔류응력이 재분포하는 경우가 낮은 응력비를 갖게 되어 실제로 피로균열전파에 낮은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Fig.5는 모재 및 용접시험편의 하중 cycle수에 대한 균열전파길이를 나타낸 것으로 초기 균열길이로부터 균열이 진전될때 용접 시험편은 대체적으로 240,000 ~ 250,000cycle 에서 완전 분리 파괴되었고 용접하지 않은 시험편은 400,000~500,000 cycle 에서 완전 분리 파괴 되었다. 이 결과는 용접 시험편의 경우 인장 잔류응력이 분포하는 용접부 중앙으로

부터 피로균열이 진전될때 중앙부의 인장 잔류응력이 피로균열 진전에 기여하므로서 재료의 피로 수명을 단축시킨 결과임을 알 수 있다. 이 결과를 이용하여 응력확대계수 폭에 대한 피로균열전파속도를 모재 및 용접시험편에 대하여 나타내면 Fig.6과 같다. 그림에서 모재의 피로균열전파속도에 비하여 용접시험편의 피로균열전파속도가 높게 나타나고 있는데 이것은 균열초기에 분포하는 인장잔류응력이 피로균열전파에 영향을 주고 있는 결과이며, 용접시험편의 경우 초기 잔류응력분포에 의한 것보다 균열전파와 더불어 재분포하는 잔류응력을 고려한 것이 균열전파속도가 낮게 나타나고 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 초기 잔류응력분포에 비하여 균열전파와 더불어 잔류응력이 재분포하는 경우 응력비의 영향이 작아지므로 피로균열전파속도가 낮게 나타나고 있다. 그리고 초기에는 용접선 중앙부의 높은 인장잔류응력 영향을 받아 균열 전파 속도가 모재의 경우보다 매우 높게 나타나고 균열이 전파함에 따라 잔류응력이 줄어들어 점점 모재의 균열전파 속도에 접근하는 경향을 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 일반구조용압연강재(SS41)를 선택하여 arc용접으로 비드를 내고 시험편으로 사용하여 피로균열전파시 용접잔류응력의 재분포와 그에 따른 피로 균열 특성에 대하여 고찰해보았다. 그결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 용접부의 잔류응력은 균열전파와 더불어 균열선단의 최대잔류응력과 인장에서 압축잔류응력의 변환점(잔류응력이 0인 지점)이 균열 방향으로 이동하며 재분포한다.
2. 피로균열시 용접잔류응력은 작용하중에는 별로 영향을 받지 않고 대부분 균열증가에 기여하므로서 이완되어 재분포한다.
3. 용접하지 않은 재료에 비하여 용접재료는 균열 전파속도가 낮게 나타나고 초기에는 높은 인장잔류응력의 영향을 받아 그 차이가 높게 나타나며 점점 균열전파와 더불어 그 차이는 줄어든다.
4. 균열이 전파되면서 잔류응력은 재분포되고 따라서 응력비의 영향이 작아지므로 실제 잔류응력이 피로균열전파에 미치는 영향은 초기잔류응력분포를 고려한 경우보다 작다.

참고문헌

- (1) 大田昭彦, 佐々木悦男, 鎌倉將英, 二瓶正俊, 小菅通雄, 金尾正雄, 稻垣道夫, "SM50B 突合せ鋸接継手おけろ渡勞き裂傳播しき値に 及ぼす引張 殘留應力の影響," 日本鋸接學會誌, 第 50卷(1981), 第 2 號, p. 161.
- (2) Kihara,h and Masubuchi,k., "Effect of Residual Stress on Britte Fracture", Welding Journal, 38(4), Research Suppl., 1959, pp.159-168
- (3) Vosikovsky,o., Trudeau, L.P. and Rivard,A., "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Threshold",nt. Journal of Fracture, 16(1980), pp.187-190.
- (4) Masubuchi,k., "Effect of Residual Stress on Fatigue Fracture",Analysis of Welded Structure, Vol.33, 1980, pp.466-468.
- (5)김상철, 이용복 "熔接잔류응력 영역에서의 피로균열전파에 대한 Forman식의 적용", 대한용접학회지, 제5권 1호, 1987, pp42-56.
- (6) Terada, H., "Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead", Engineering Fracture Mechanics, Vol.8, 1976, pp.441-444.
- (7) Tada, H., and P.C.Paris, "The Stress Intensity Factor for a Crack perpendicular to the Welding Bead," International Journal of Fracture, Vol.21, pp.279-284, 1983.

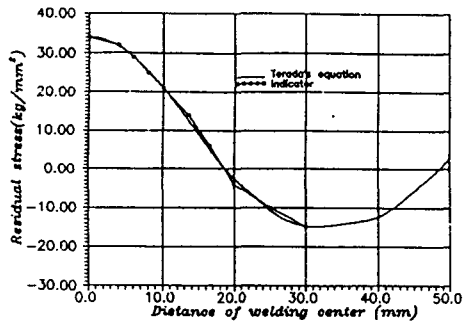


Fig. 1 Initial residual stress by magnetizing indicator and Terzda's equation

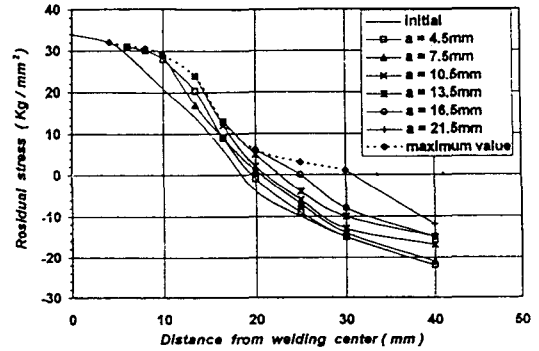


Fig. 2 Redistribution of residual stress caused by fatigue cracking

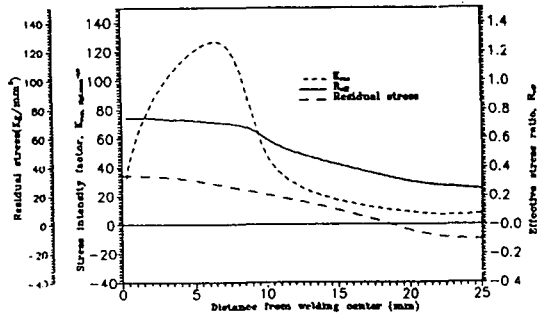


Fig. 3 Stress intensity factor, K_{I0} and stress ratio, R_{eff} by initial stress

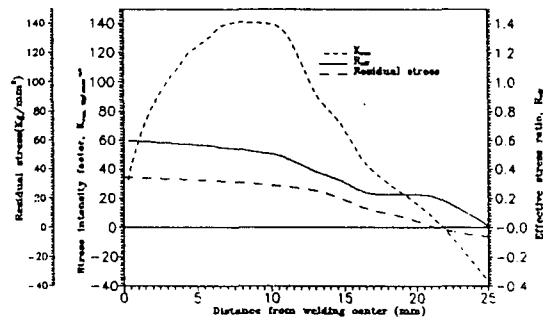


Fig. 4 Stress intensity factor, K_{I0} and stress ratio, R_{eff} by residual stress redistributed during fatigue cracking

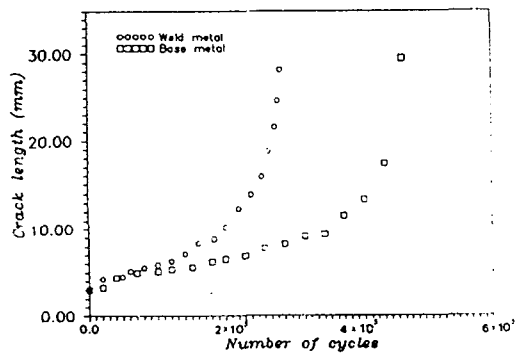


Fig. 5 Crack length vs. number of cycle

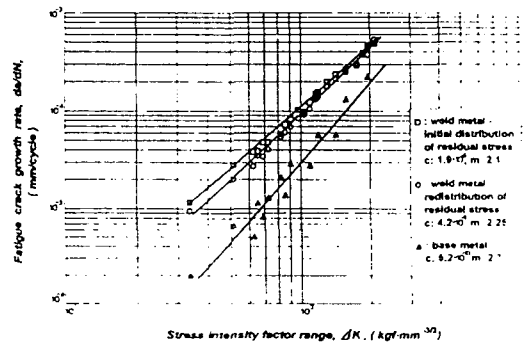


Fig. 6 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range