

용접잔류응력이 용접부 피로강도에 미치는 영향의 정량적 평가방법

김 용 준

Effect of Welding Residual Stress on Fatigue Crack Propagation Behavior

EUNG-JOON KIM



김용준/한국기계연구원
용접기술연구부/1949년
생/용접구조물의 강도평
가 및 설계와 관련한 용
접역학, 파괴역학분야
연구

1. 서 론

구조물의 용접시에는 공작관리상의 문제나 경제성 등의 이유로부터 전혀 결함이 없는 용접이음부를 제작하는 것은 곤란하며 용접구조물의 수명평가시에는 이러한 결함을 기점으로 하는 피로크랙의 성장을 고려하여야 한다. 또한 사용중 파괴를 방지하기 위하여서는 타당한 사용중 검사시간을 설정할 필요가 있다. 이러한 일련의 일들을 높은 정확도로 수행하기 위하여서는 용접구조물에 있어서의 피로크랙 전파속도를 정량적으로 평가할 수 있어야 하며 그 수단을 확립하는 것은 구조물의 안전성 및 경제성 등의 관점에서 매우 중요한 과제이다.

용접이음부에서의 피로크랙 전파거동이 모재와 다르다는 것은 이미 알려져 있으며 그 원인으로서 용접부에 있어서의 금속조직의 변화와 잔류응력 등이 일컬어진다. 금속조직의 변화에 따른 영향에 대하여서는 비교적 그 영향이 작으며 또한 피로크랙 전파속도에 대해서 안전한 쪽으로 역할을

한다고 보고되어져 있다^{1,2)}. 따라서 용접이음부에 있어서의 피로크랙 전파에 대하여서는 주로 잔류응력의 영향에 주목하여, 잔류응력이 피로크랙의 전파속도에 어떻게 영향을 미치는가를 파악하여야 한다. 이러한 관점에서 지금까지 용접잔류응력장을 전파하는 피로크랙을 대상으로 하여 잔류응력이 피로크랙 전파에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하는 시도가 많은 연구진에 의해 수행되어 왔다. 표 1에 이러한 연구의 흐름을 평가방법과 평가에 고려된 사항을 중심으로 나타내었다.

이러한 배경으로부터, 본고에서는 피로크랙 전파거동에 미치는 잔류응력의 영향에 대해서 지금까지 수행된 연구의 내용을 연구 발전형태에 주목하여 검토하였다.

2. 용접부의 피로한계에 미치는 잔류응력의 영향

표 1에서와 같이 용접부에 대한 피로강도를 정량적으로 평가하고자 하는 시도는 그림 1에서 보

표 1. 피로강도에 미치는 용접잔류응력의 영향평가에 관한 연구의 개요

년대	잔류응력의 영향 평가방법	역학적 factor로서의 잔류응력	평가에 고려된 주요현상	평가수단	의 미	
1960	용접이음부 형상에 따른 피로강도평가	-	파괴	실험	실험결과와 규격화 및 설계에의 반영	
1970	피로한계 (fatigue limit) 에 미치는 잔류응력의 영향평가	평균응력	항복	fatigue limit	잔류응력 영향의 이론화	
1980	잔류응력으로 부터 응력확대 계수 (K_{res}) 산정	단순분포 잔류 응력의 영향평가	평균응력	응력비효과	파괴역학	잔류응력 영향의 정량화시도
		압축, 인장, 취이영역에 대한 영향평가	평균응력	partial opening	파괴역학	포괄적 잔류응력장에 대한 대응

인 각각의 용접이음부 형상에 대한 피로실험으로 시작되었으며, 실험으로부터 얻어진 결과는 용접 구조물의 피로설계시 rule에 의한 설계 (design by rule)의 규격으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 규격은 적용 가능한 용접이음 형상이 한정되어 있어 압력용기, 원자력구조물 등과 같이 복잡한 형상의 용접이음이 채용되는 용접구조물에 대하여서는 해석에 의한 설계 (design by analysis)의 도입이 필요하게 되었다.

현재 용접구조물의 피로설계에는 rule에 의한 설계와 해석에 의한 설계가 병용되고 있으나 가능한 후자를 사용하도록 권장하고 있으며, 장차 응력해석 기술의 향상에 따라 용접구조물의 피로설계는 해석에 의한 설계가 주류를 이룰 것으로 생각된다. 따라서 피로크랙 전파에 미치는 잔류응력의 영향을 정량적으로 평가하고자 하는 노력도 이상에서 언급한 바와 같은 맥락으로 생각할 수 있다.

다음에서 설명하는 용접부의 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향에 대한 이론적 고찰³⁾은 용접부의 피로강도의 평가개념을 rule에 의한 설계로부터 해석에 의한 설계로 전환시킬 수 있다는 가능성을 제시한 것으로 피로강도에 대하여 잔류응력이 평균 응력으로서의 역할을 한다는 제안중 대표적인 것이다.

그림 2의 곡선 ①과 같은 용접선 방향의 잔류응력 σ_{res} 가 분포하고 있는 맞대기이음 용접부 (완전탄소성체로 가정)에 탄성범위내의 인장하중이 용접선 방향으로 작용하는 경우를 생각해 보자. 용접선 방향으로 균등한 strain ϵ 를 주면 각점의 응력은

①에서 종방향으로 $E \cdot \epsilon$ 만큼 평행이동하여 용접선 부근의 AB간의 응력은 재료의 항복 응력 σ_v 와 같게 되고 응력분포는 곡선 ②와 같이 된다. 이 때 외하중에 의한 횡단면상에서의 평균응력 (하중÷단면적)은 $E \cdot \epsilon$ 보다 약간 작게 된다. 이 상태에서 외하중을 제거하면 각 위치의 응력은 평균외응력만큼 감소하여 응력분포는 곡선 ③과 같이 된다. 같은 외하중을 반복하면 각점의 응력은 곡선 ③과 곡선 ② 사이를 오가게 된다. 이때 응력진폭 σ_a 는 평균외응력의 $\frac{1}{2}$ 이 되고 반복외하중의 평균응력 σ_m 은 용접선의 부근에서는 잔류응력과 무관하게 $\sigma_m = \sigma_v - \sigma_a \approx \sigma_v - E \cdot \epsilon/2$ 가 되고 용접선에서 떨어진 위치에서는 $\sigma_m = \sigma_{res} + \sigma_a$ 보다 약간 커진다.

이와 같이 잔류응력이 존재하는 용접이음부에 반복하중이 작용하면 그 평균응력 σ_m 은 인장잔류응력이 존재하는 부분에서는 상승하고 압축응력이 존재하는 부분에서는 저하한다. 여기서 Goodman의 피로한계선도를 이용하여 피로한계 (fatigue limit)에 미치는 잔류응력의 영향에 대해서 생각해 보기로 한다. 그림 2에서 평균외응력의 최대치 σ_{max} 가 $0 \sim \sigma_v$ 의 사이에서 변화할 때 (σ_a, σ_m)을 나타내는 점은 잔류응력이 존재하지 않는 경우 그림 3의 직선 OA상에 plot되나 높은 인장잔류응력이 존재하는 용접선부근에서는 평균응력 σ_m 의 상승으로 인하여 BCA선상에 plot된다. 따라서 재료의 피로한계가 $\sigma_v/2$ 보다 작은 경우 높은 최대응력의 반복 하중을 받으면 인장 잔류응력의 영향에 의하여 피로한계가 저하한다. 한편 압축잔류응력이 존재하면 평균응력이 저하하므로 피로한계는 잔류응력이 존재하지 않는 경우에 비하여 상승한다.

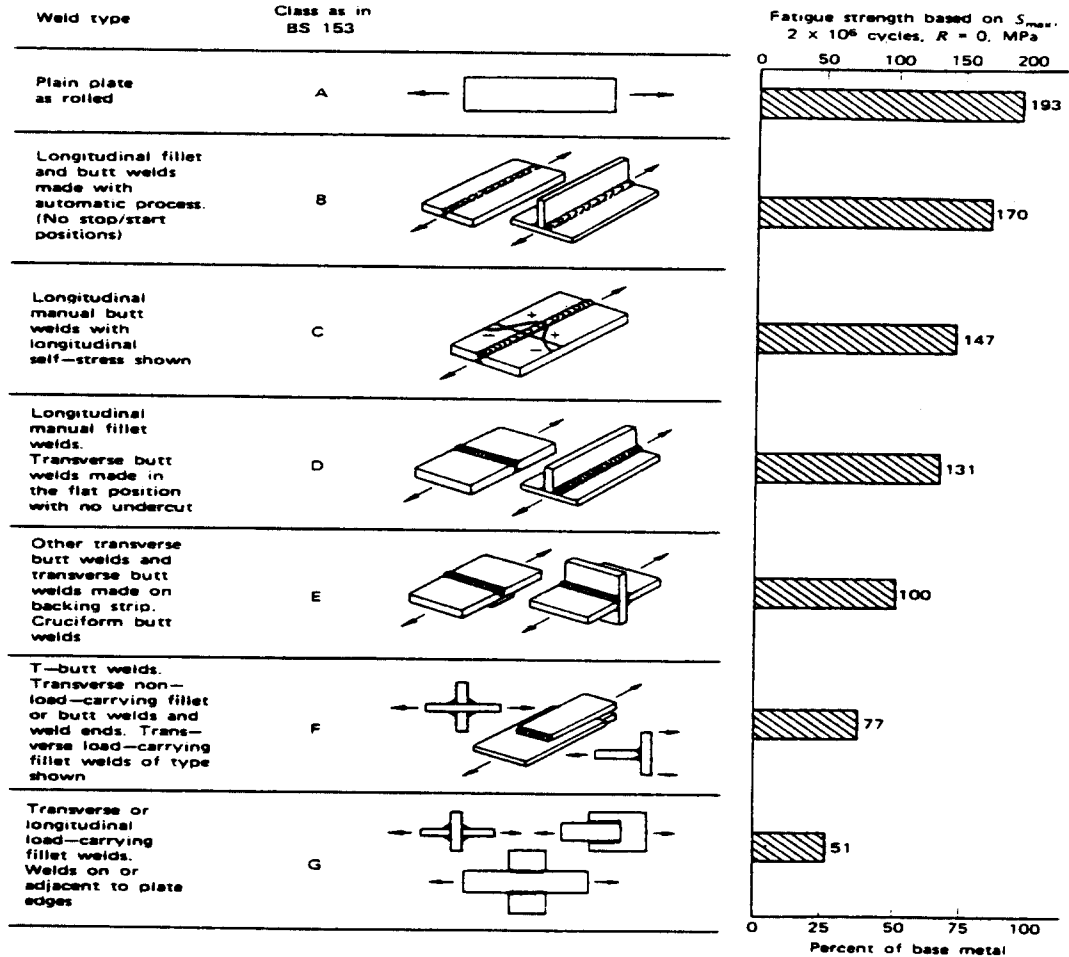


그림 1. 용접 이음부 형상에 따른 피로강도 (BS 153)

이상은 최소하중이 0보다 큰 하중상태에 대한 고찰이나 그림 3에서 예상 할 수 있듯이 피로한계에 미치는 잔류응력의 영향은 $\sigma_m = 0$ 의 양진 (fully reversed) 하중상태에서 가장 현저히 나타나 인장 잔류응력의 존재에 의하여 피로한계는 최대 EF 만큼 저하하게 된다.

이와 같이 피로한계를 고려한 잔류응력의 영향 평가방법은 용접에 의한 용접선 방향 잔류응력이 용접선 근방에는 인장 잔류응력 그리고 용접선에서 떨어진 위치에는 압축잔류응력이 존재하는 용접잔류응력의 분포특성에 주목한 것으로, 인장잔류응력과 외응력의 중첩에 의하여 용접부 근방에

서 국부적인 항복이 일어날 때 용접부의 피로강도는 저하하게 된다는 것을 이론적으로 설명함으로써 피로크랙의 전파를 고려치 않은, 즉 S-N 선도 개념의 용접부 피로강도의 해석적 평가방법을 제시한 것이다.

3. 피로크랙의 전파거동에 미치는 잔류응력의 영향

1960년대초 Paris가 응력확대 계수 범위 ΔK 를 이용하여 피로크랙의 전파속도 da/dN 을 정리함으

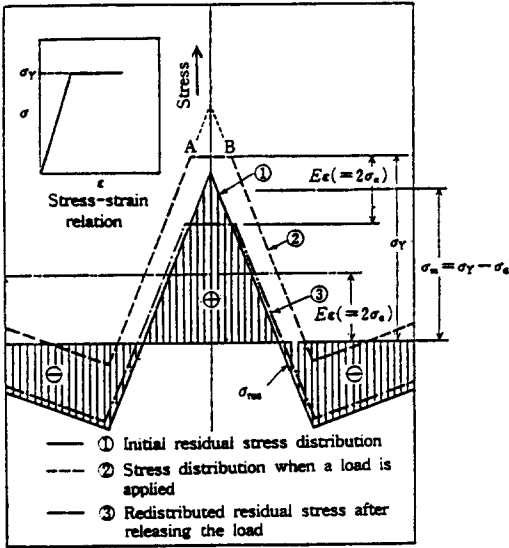


그림 2. 용접잔류응력이 존재하는 경우, 외응력의 부하에 따른 응력분포의 변화

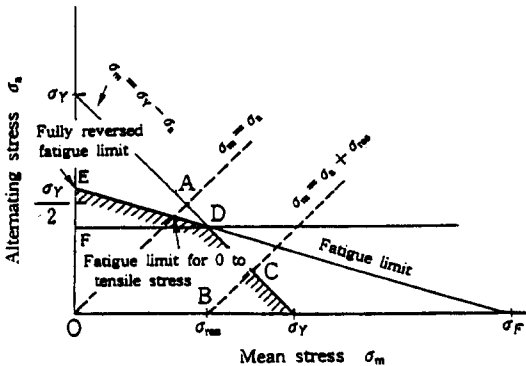


그림 3. 피로강도에 미치는 잔류응력의 영향에 대한 모식도

로서 1950년대 Irwin이 취성파괴의 연구에서 제안한 응력확대계수 K를 피로크랙 전파의 연구에 도입하는 전기를 마련하였다. 따라서 그때까지는 피로크랙의 발생, 전파 그리고 파괴의 전과정이 재료의 피로강도라는 하나의 관점에서 취급되었으나 그 이후 피로강도의 연구방향은 피로크랙의 전파 거동에 주목한 전파속도의 정량적 평가로 바뀌게 되었으며 용접부의 피로강도에 관한 연구에 있어서도 잔류응력이 피로크랙 전파속도에 미치는 영

향을 정량적으로 평가하고자 하는 내용이 주를 이루게 되었다.

3.1 잔류응력 분포의 단순화에 의한 해석

용접잔류응력이 피로크랙 전파속도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여서는 먼저 용접부의 정확한 잔류응력 분포를 파악할 필요가 있으며, 또한 가능하다면 선형파괴역학과 같은 파괴역학에 근거한 해석방법의 수립이 필요하다. 표 1에서 나타낸 바와 같이 1970년 이후 크랙전파 속도에 미치는 잔류응력의 영향을 평가하는 수단으로 그 타당성이 인정되고 있는 해석방법은 잔류응력에 의한 응력확대 계수(K_{res})와 외하중에 의한 응력확대계수(K_{app})의 중첩에 의한 해석방법이다. 여기서 이러한 중첩에 의한 해석방법이 피로크랙 전파거동과 관련하여 어떠한 개념에 근거한 것인가에 대하여 설명키로 한다.

반복하중에 의하여 전파하는 피로크랙은 부하응력의 반복에 따라 열림과 닫힘을 계속하게 된다. 이러한 열림과 닫힘 거동을 상세히 조사해 보면 최대응력 (σ_{max}) 상태에서 크랙이 가장 많이 열리게 되는 것은 당연한 일이지만 크랙이 열리기 시작하는 응력과 닫히기 시작하는 응력이 반드시 최소응력 (σ_{min})과 일치하지 않고 최소응력보다 높은 응력인 것이다. 이러한 현상을 최초로 보고한 Elber⁴⁾는 그 요인을 다음과 같이 생각했다. 이상 크랙(간격이 없는 인공 slit를 가정)에 있어서는 하중부하에 의하여 크랙선단에 형성된 소성변형이 크랙면에 영향을 미치지 않지만 전파하는 크랙에 있어서는 크랙선단에 형성된 소성변형이 크랙전파와 더불어 크랙면에 잔류하여 크랙을 닫히게 하는 압축잔류응력을 생기게 한다. 이 때문에 전파하는 크랙에 있어서는 제하과정에서 크랙이 빨리 닫히게 된다. Elber는 또한 크랙전파 속도에는 크랙개구(開口)부분의 응력만이 기여하므로 다음식으로 정의되는 유효응력 확대계수범위 (effective stress intensity factor range) ΔK_{eff} 가 피로크랙의 전파를 지배한다고 생각했다.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = U \cdot \Delta K \quad (1)$$

여기서 K_{op} 는 크랙개구 응력에서의 K이며, U는

ΔK 의 유효성분비 $\Delta K_{eff}/\Delta K$ 로서 일반적으로 개구비라고 부른다. $K_{op} \leq K_{min}$ 의 경우에는 $U=1$ 이 된다. 따라서 ΔK_{eff} 를 이용한 크랙전파속도의 표시식은

$$da/dN = C(\Delta K_{eff})^m \quad (2)$$

으로 주어진다. 그림 4는 SM50A강 모재 및 용접부의 크랙전파속도를 ΔK 및 ΔK_{eff} 로 정리한 것이다. ΔK 로 정리한 경우 전파속도는 응력비 R ($\sigma_{min}/\sigma_{max} = K_{min}/K_{max}$) 및 용접잔류응력의 영향을 받지만 K_{eff} 로 정리한 경우에는 그와 같은 역학적으로 의존하지 않고 거의 한 개의 전파곡선으로 표시된다.

이상의 피로크랙 개폐(開閉)현상의 설명으로부터, 잔류응력장을 전파하는 피로크랙에 미치는 잔류응력의 영향을 K_{res} 와 K_{appl} 의 중첩에 의하여 해석하는 방법은 '용접잔류응력'을 Elber의 개념에서의 '소성변형으로 인하여 생성된 잔류응력'과 역학적으로 동등하게 취급한 것임을 알 수 있다.

그림 5는 edge 크랙이 존재하는 용접부에 외하중이 부하되었을 때 용접잔류응력에 의한 응력확

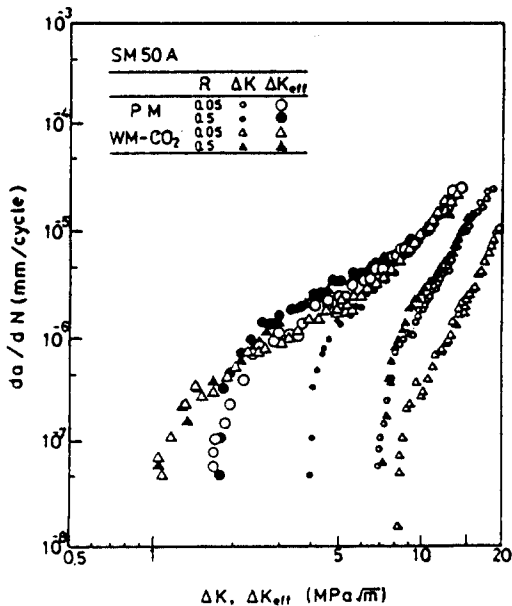
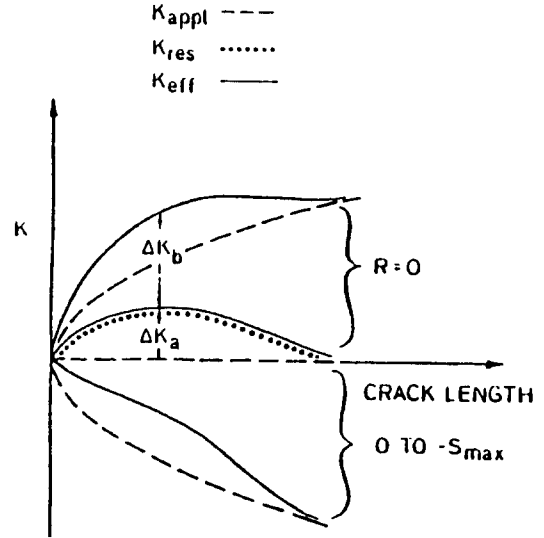
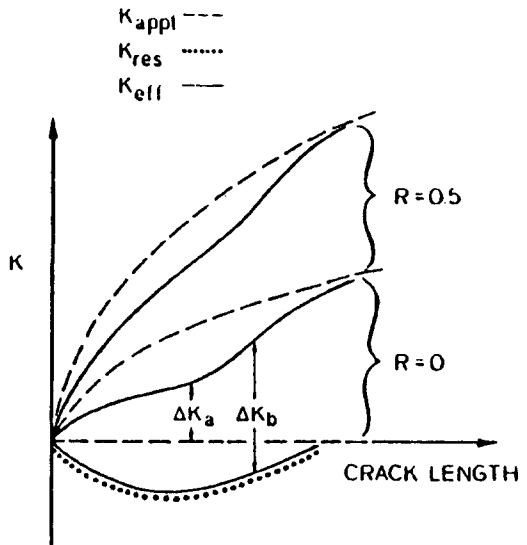


그림 4. SM50강 모재 및 용접부의 크랙전파 속도



(a) 인장잔류응력장에 크랙이 존재하는 경우



(b) 압축잔류응력장에 크랙이 존재하는 경우

그림 5. 크랙이 존재하는 용접잔류응력장에 외하중이 부하되었을 때의 유효응력 확대계수의 산정법

대계수 (K_{res})와 부하하중에 의한 응력확대계수 (K_{appl})를 중첩함으로써 얻어진 크랙길이의 변화에 따른 유효응력 확대계수 ($K_{eff} = K_{res} + K_{appl}$)의 변화를 나타낸 것이다.⁵⁾

먼저 피로크랙이 인장잔류응력장을 전파하는 경우 (그림 a)를 생각해 보자. 외하중의 진폭이 일정하고 응력비가 0인 경우 하중범위가 0에서 압축이면 $\Delta K_{eff} = \Delta K_b (=K_{res})$ 로 되어 이론적으로 모재에서라면 전파하지 않을 크랙이 인장잔류응력에 의하여 전파하게 된다. 또한 하중범위가 0에서 인장이면 $\Delta K_{eff} = \Delta K_b = \Delta K_{app}$ 가 되어 결국 인장잔류응력은 실제 부하응력에서보다 응력비를 상승시키는 역할을 하게 된다.

다음 피로크랙이 압축잔류응력장을 전파하는 경우(그림 b)를 생각해 보자. 외하중의 진폭이 일정하고, 응력비가 0인 경우에는 압축잔류응력으로 인하여 $\Delta K_{eff} = \Delta K_a$ 가 되며 그 값이 ΔK_{app} 보다 훨씬 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 응력비가 0.5인 경우에는 $\Delta K_{eff} = \Delta K_b = \Delta K_{app}$ 가 되며 압축잔류응력은 실제 부하응력에서 보다 응력비를 감소시키는 역할을 하게 된다.

3.2 실제 잔류응력분포를 고려한 해석 방법

용접부의 잔류응력 분포와 외하중으로부터 산출된 ΔK_{eff} 를 사용하여 임의의 크랙 길이에서의 전파속도를 정리한 결과가 모재로부터 얻어진 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 의 특성곡선 상에 plot 되었다는 사실로부터 3.1에서 언급한 평가방법의 타당성은 입증되었다고 할 수 있다. 그러나 이 평가방법은 그림 5에서 보는 바와 같이 해석의 대상을 인장잔류응력장 또는 압축잔류응력장 만을 전파하는 피로크랙으로 한정하고 있으며, 특히 이러한 해석을 실제 수행한 일예(그림 6)에서는 인장잔류응력장에서 전파를 시작한 피로크랙이 압축잔류응력장에 진입한 이후에 K_{res} 의 계산을 포기하고 있다.

따라서 잔류응력이 피로크랙의 전파속도에 미치는 영향의 정량적 평가방법을 완성하기 위하여서는 잔류응력의 분포가 인장에서 압축으로 천이하는 영역에 피로크랙이 존재하는 경우등 잔류응력장 전체에 걸친 포괄적인 크랙전파 거동에 대한 검토가 필요하다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 압축잔류응력이 분포해서 존재하면 면 AB에 인장응력이 부하된 경우, 면 AB에서의 응력 분포의 변화를 중첩원리를 이용하여 모식적으로 나타낸 것이다. (I)은 면 AB에 압축잔류응력

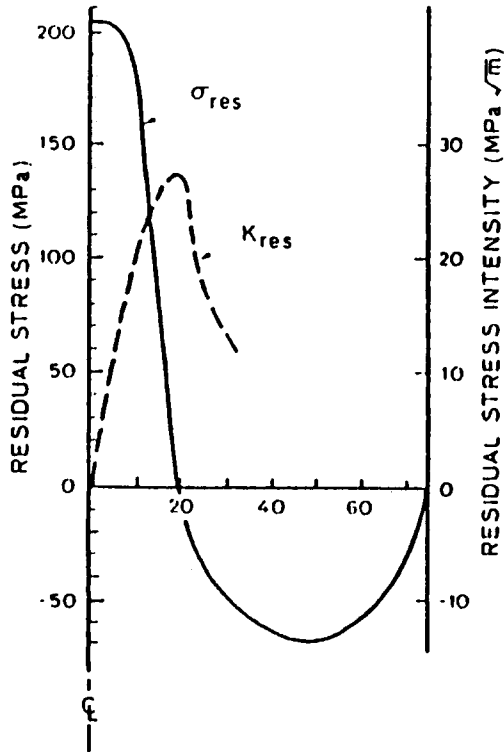


그림 6. 잔류응력 분포를 이용한 K_{res} 의 산출

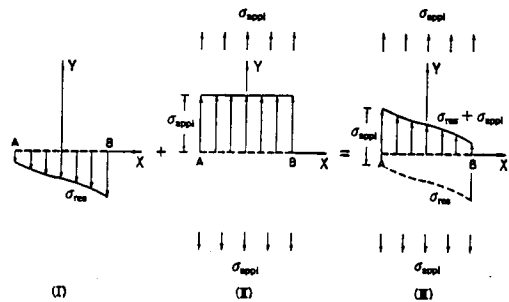


그림 7. 잔류응력과 외하중의 중첩원리를 나타내는 모식도

(σ_{res})이 분포해서 존재하는 경우이고, (II)는 면 AB에 외력(σ_{app})가 부하된 것으로, 이 때 외응력값과 면 AB에 작용하는 응력값은 등가이다. 따라서 (I)과 (II)를 중첩시키면 (III)과 같이, 면 AB에서는 ($\sigma_{res} + \sigma_{app}$)의 분포응력이 작용하게 된다. 여

기서 (Ⅲ)의 경우, 면 AB를 크랙면으로 생각하면 크랙면에 연해서 존재하는 인장응력 ($\sigma_{res} + \sigma_{appl}$)로 인하여 크랙은 열리게 된다. 이때, 크랙의 양선단 A, B에 있어서의 K값 (K_A, K_B)은 $A \leq X \leq B$ 구간의 분포응력 ($\sigma_{res} + \sigma_{appl}$)을 다음 식의 $\sigma_0(X)$ 에 대입함으로써 구할 수 있다.

$$K_T = \frac{1}{\pi a} \int_{-a}^a \sigma_0(K) \left[\frac{x \pm a}{x \mp a} \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (3)$$

단, 이 경우의 식(3)의 $2a$ 는 $(B-A)$ 가 된다.

다음, 그림 7의 경우 (Ⅱ)의 σ_{appl} 가 작아서 (Ⅱ)의 면 AB에 작용하는 분포응력 ($\sigma_{res} + \sigma_{appl}$)이 그림 8의 형상으로 된 경우를 생각하면, 크랙선단부의 인장잔류응력 때문에 크랙은 어느 길이만큼 열리게 된다. 이 크랙의 개구구간을 $A \leq X < D$ 라고 하면 A, D에 있어서의 K값은 $A \leq X < D$ 구간의 분포를 크랙면에 내압으로서 작용시킨 경우의 K값, 즉 식(3)에 의해서 구할 수 있다. 따라서 D의 위치가 정해지면 A, D에 있어서의 K값이 구해진다. 그런데, 크랙이 닫혀져 있는 구간인 면 DB에 있어서, 그 면이 크랙면이므로 $A \leq X < D$ 구간에서 크랙이 열려져 있어도 D에서는 당연히 응력의 특이성이 생기지 않게 되어 D위치에서의 K는 제로가 된다. 계산에 의해 D의 위치 및 크랙선단 A에서의 K값을 구할 때는 그림 8에 나타난 크랙개구부 $A \leq X < D$ 구간만을 크랙으로 간주하여 그 크랙면에 응력 $\sigma_{res}(X)$ 가 작용하는 경우의 크랙선단 A, D에 있어서의 K값을 구한다. 여기서 A, D에 있어서의 K값을 각각 K_A, K_D 라고 하면 K_A, K_D 는 다음 식에 의해서 구해진다.

$$K_A = \frac{1}{\pi a} \int_{-a}^a \sigma_{res}(K) \left[\frac{x+a}{x-a} \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (4)$$

$$K_D = \frac{1}{\pi a} \int_{-a}^a \sigma_{res}(K) \left[\frac{x-a}{x+a} \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (5)$$

따라서, 식(5)로부터

$$K_D = 0 \quad (6)$$

가 되는 크랙길이 $2a$ 에 의해 D의 위치를 구할 수 있다. 또한 그 크랙길이를 식(4)에 대입함으로써

크랙선단 A에서의 K값, K_A 를 구할 수 있다.

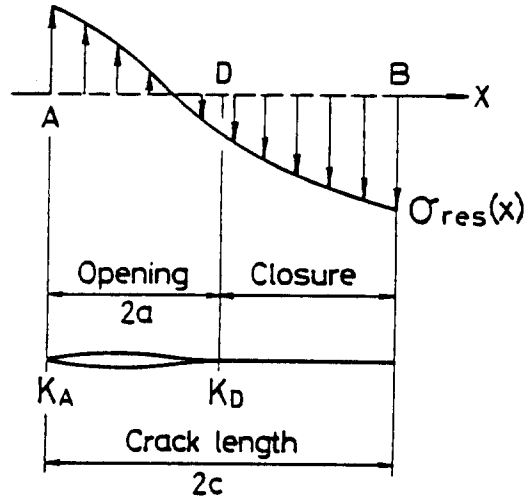
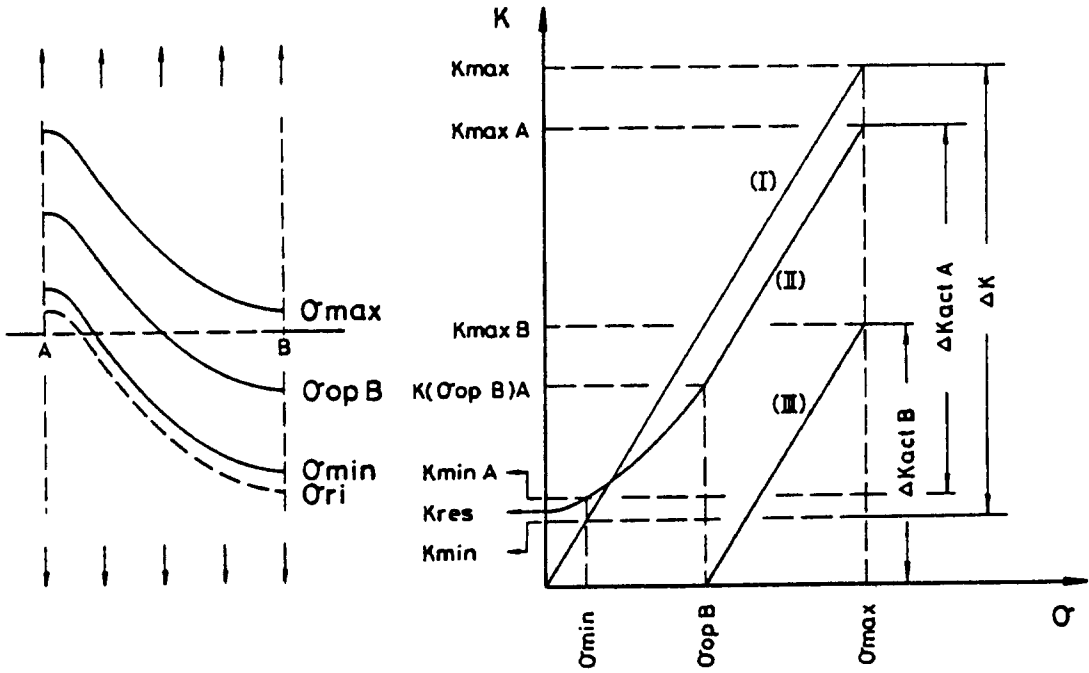


그림 8. 분포된 잔류응력장에 존재하는 크랙의 부분 개구 모델

그림 9는 크랙이 초기 압축잔류응력장과 초기 인장잔류응력장에 걸쳐서 존재하여 크랙선단부에 부분개구부가 생긴 경우, 외하중부하에 따른 크랙의 양선단 A, B에 있어서의 K값의 변화를 나타낸 diagram이다. (b)의 선(I)은 (a)의 면 AB와 같은 길이의 크랙이 무부하 상태에서 완전히 열려져 있고, 거기에 인장응력이 부하된 경우의 크랙선단에 있어서의 K값의 변화이다. 선(Ⅱ)는 크랙선단 A에 있어서의 K값의 변화이고 (Ⅲ)은 크랙선단 B에 있어서의 K값의 변화이다. (b)에 나타난 $K_{max} A$ 및 $K_{max} B$ 는 (a)의 σ_{max} 에서의 응력분포로부터 구한 값이다. 무한 무부하 상태에서의 크랙선단 A에 있어서의 K값, $K_{res} A$ 는 (a)의 초기 잔류응력분포 σ_{ri} 를 사용하여 식(4), (5), (6)으로부터 구한 것이다. $\sigma_{op} B$ 는 크랙선단 B에 있어서의 K값이 +값을 갖기 시작하는 외응력 level이며, $\sigma_{op} B$ 이상의 외응력 level에서는 크랙이 완전히 열려, 외응력부하에 따른 K값의 변화는 A, B 어느 크랙선단에 있어도 선(I)과 평행하게 증가한다. $K_{min} A$ 는 (a)의 σ_{min} 에서의 응력분포로부터 식(4), (5), (6)을 이용하여 구한 값이다. 또한 크랙선단 A는 무부하 상태에서 이미 열려져 있고, 크랙이 완전히 열리는 $\sigma_{op} B$ 까지의 외응력 구간에서 크랙의 열림은 B를 향해서 진행된다. 따라서 이 응력구간에서의 크랙선단 A



(a) 인장 하중 부하에 의한 응력분포의 변화

(b) ΔK_{eff} 의 개념

그림 9. 잔류응력장에 존재하는 크랙에 대한 ΔK_{eff} 의 개념도

에 있어서의 K의 변화는 아래로 볼록한 곡선이 된다. 이와 같이 구한 크랙선단 A, B에 있어서의 하중 부하를 의한 K값의 변화량을 $\Delta K_{eff} A$, $\Delta K_{eff} B$ 라고 하였다^{6,7)}.

이러한 해석방법의 타당성은 다음과 같은 실험에 의하여 입증되고 있다. 그림 10은 80MPa급 고장력강판에 전자 beam 용접에 의하여 잔류응력을 분포시킨 피로크랙 전파 실험용 시험편의 형상을 나타낸 것이다. 크랙전파속도를 ΔK 로 정리한 그림 11에서는 모재와 비교해서 인장잔류응력장으로부터 크랙이 전파한 경우의 전파속도가 약간 빠르며 압축잔류응력장으로부터 크랙이 전파한 경우는 그 전파속도가 매우 느린 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 다시 그림 12와 같이 ΔK_{eff} 로 정리하면 모재와 인장잔류응력장으로부터 크랙이 전파한 경우의 결과는 그림 (a)에서와 같이 잘 일치하고 있으나 압축잔류응력장으로부터 크랙이 전파한 경우는 그림 (b)에서와 같이 크랙이 압축잔류응력장을 전파하는 동안에는 $U=1$ 의 직선에 거의 일치하지만 크

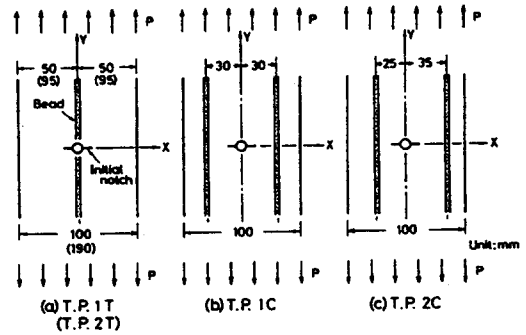


그림 10. 용접잔류응력장을 전파하는 피로크랙 전파실험의 시험편 형상

랙이 압축잔류응력장에서 인장잔류응력장에 진입 (그림중 화살표로 나타낸 위치)함에 따라 $U=1$ 의 직선으로부터 크게 벗어나고 있어 이 경우에는 크랙전파속도가 ΔK_{eff} 로 정리되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 압축잔류응력장으로부터 전파를 시작한 크랙의 선단이 인장잔류응력장에 진입하면

그림 8에서 보인 바와 같이 크랙선단부가 인장잔류응력에 의하여 부분적으로 열리기 때문이며, 이러한 부분 개구현상을 고려한 해석방법으로부터 도출된 ΔK_{eff} 를 이용하여 전파속도를 정리한 결과는 그림 13에서와 같이 $U=1$ 의 직선과 잘 일치하고 있다.

이상에서 언급한 부분개구 현상은 그 실험예로부터 피로크랙이 압축잔류응력장에서 인장잔류응력장으로 진입하는 경우에 한정하여 나타나는 현상으로 간과할 수도 있다. 즉 피로크랙의 발생을 유발하고 전파를 촉진시키는 주요인은 용접부의 결함이나 용접부 부근의 인장잔류응력이므로 용접구조물에서의 크랙의 발생, 전파는 용접부에서 비롯되는 경우를 상정하게 된다. 그러나 실제 용접구조물의 설계시에는 사용목적이나 제작공정 등을 고려하여 때때로 용접선의 배치가 복잡한 양상을 나타낼 수가 있으며, 이러한 구조물에 있어서는 용접부에서 발생한 크랙이 이웃한 다른 용접부로 전파해 나가는 가능성도 생각할 수 있다. 따라서 이상의 부분개구 현상을 고려한 해석방법은 피로크

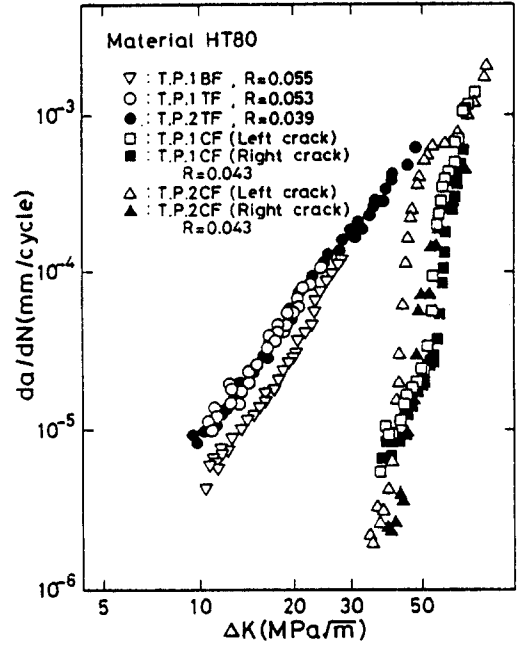
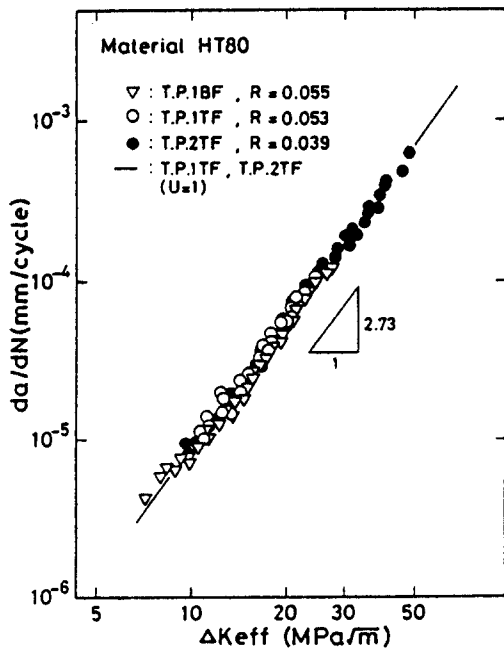
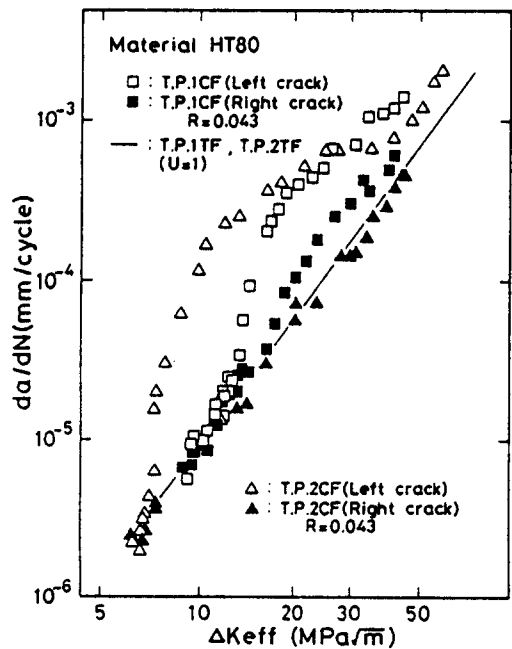


그림 11. da/dN 과 ΔK 의 관계



(a) 인장잔류응력장에서 크랙이 전파하는 경우



(b) 압축잔류응력장에서 크랙이 전파하는 경우

그림 12. da/dN 과 ΔK_{eff} 의 관계

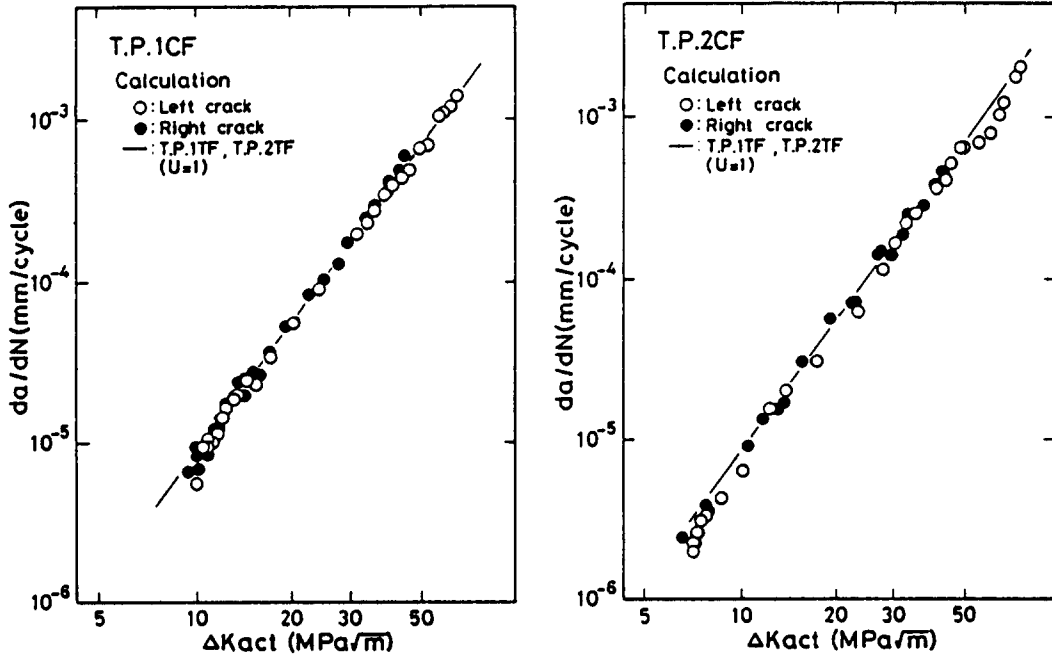


그림 13. da/dN 과 ΔK_{act} 의 관계

랙 전파에 미치는 잔류응력의 영향을 포괄적으로 검토하는 계기를 마련하였다고 할 수 있다.

4. 결 론

용접이음부에 대한 성능이 용접이음 형상이나 하중조건 등에 따른 실험적 수단에 의하여 평가됨에 따라 일반적인 용접구조물의 대부분이 전(全) 용접구조물의 형태로 정착하게 되었다. 또한 용접구조물의 대형화에 따라서 중량의 경감이나 용접시공비의 절감을 위하여 고강도강을 사용하는 추세로 가고 있는 것이 현실이다. 따라서 최근 용접구조물의 설계, 제작상의 제반 여건은 용접구조물의 형상의 복잡화와 더불어 용접부의 설계 개념을 용접이음부의 실험적 성능평가에 의한 설계로부터 해석에 의한 설계로의 변화를 요구하고 있다. 특히 반복하중을 받는 용접구조물에 있어서 피로크랙 전파속도를 정확히 평가하기 위한 해석방법을 수립하는 것은 용접부의 결함이나 용접부 근방의 잔류응력의 존재를 무시할 수 없는 용접구조물의

특성을 감안할 때 매우 중요한 일이다.

본 고에서는 용접잔류응력이 피로크랙 전파에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방법에 대하여 지금까지 수행된 연구내용을 중심으로 검토하였다. 이러한 검토결과가 향후 관련 연구의 방향 설정에 도움이 되기를 바란다.

참 고 문 헌

1. S. J. Maddox ; Fatigue Crack Propagation Rate Obtained from Parent Plate, Weld Metal and HAZ in Structural Steel, Weld. Res. Int., Vol. 4, 1974, No. 1, 36-60
2. W. G. Clark, Jr. ; Fatigue Crack Growth Characteristics of Heavy Section ASTM A533 Grade B, Class I Steel Weldment, ASME Paper 70-PVP-24, ASME, N. Y. 1970
3. 佐藤邦彦, 向井喜彦, 豊田政男 ; 溶接工學, 理工學社, 1979, P184~P186
4. W. Elber ; The Significance of Fatigue Crack

- Closure, ASTM STP486, 1981, 230~242
5. D.V. Nelson ; Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation, ASTM STP776, 1982, 172~194
 6. 向井喜彦, 村田雅人, 金應俊 ; 溶接残留應力場における疲労き裂の部分開口モデルによる
 7. 佐藤邦彦 ; 溶接強度ハンドブック, 理工學社, 1988 P(6-17) ~P(6-20)
- 應力擴大係數範圍算定法の提案とそのき裂傳播舉動の推定, 溶接學會論文集, 5 (1987), 269