

원자력 압력용기 이중금속 용접부의 잔류응력  
확대계수 결정 (I) 수학적 방법

\* 노승환, 안희성 (원자력안전기술원)  
음장우 (충남대)

1. 서 언

고온 고압 상태하에서 사용되는 원자력 압력용기 (nuclear pressure vessel) 는 SA 533 B class 1,2 및 SA 508 class 2,3 와 같은 저합금 웨라이트강으로 제작되며 부식을 방지하기 위해 압력용기벽 내면에 austenitic stainless 강으로 피복용접 (cladding) 을 한다.

그러나 austenitic stainless 강으로 피복용접을 하는 경우 온도변화 과정에서 복잡한 구속력과 모재와 용착금속과의 열팽창 계수의 차이에 의해 피복용접부의 표면에 높은 잔류응력이 발생하며 잔류응력 완화를 위한 열처리 수행시 또한 높은 열응력이 발생하게 된다.

피복하부결함 (Underclad crack)의 존재가 원자로 열충격시 원자로의 파괴를 초래한다고 보고되므로 [3,4] 원자로 압력용기의 안전성을 충분히 보장하기 위해서는 피복 하부결함의 거동을 해석하는 것이 필요하며, 잔류응력상에서 결함의 거동을 정량적으로 취급하기 위해서는 먼저 정확한 잔류응력 분포식을 구하여 이를 토대로 응력확대계수를 구하여야 한다.

용접 잔류응력에 의한 응력 확대계수 ( $K_{res}$ ) 는 결함의 기하학적 형상과 함께 잔류응력의 크기와 분포에 의존된다. 복잡한 잔류응력장으로 인해 초기에 2-D 크랙이 연구되어 [5,6] 반타원형 형상의 표면결함 [7]과 내부결함 [8] 에 대한 응력확대계수는 정립되었지만 [9] 이때 사용되는 하중분포식 ( $n$ 차 다항식) 으로 피복용접부에서 발생하는 잔류응력 분포를 표현하는 것은 불충분하였다. 따라서 본 연구는 이러한 관점에서 원자력 압력용기의 이중금속 피복용접부 건전성 확보의 일환으로서 잔류응력에 대한 경계조건들과 물리적 의미를 만족하는 잔류응력 이론분포식을 구하며 이론분포식을 이용하여 결함위치와 결함길이에 따른 잔류응력 확대계수를 결정하는 데 있다.

2. 이론 및 수학적 전개

2.1 잔류응력 분포식의 경계조건 [17]

잔류응력장에서 결함의 거동을 정량적으로 정확히 판단하기 위해서는 먼저 잔류응력장의 분포를 정확히 수식화하여야 하며 이를 근거로 응력확대계수를 구하여야 한다. 경계조건과 물리적인 의미를 만족하기 위해 다음과 같은 조건을 부여하였다.

- 경계조건 -

(a) 용접영향은 표면으로 부터 거리가 증가함에 따라 감소한다.

$$\alpha = \infty \text{ 에서 } f(\alpha) = 0$$

(b) 최대 잔류응력은  $\alpha = 0$  에서 발생한다.

$$\alpha = 0 \text{ 에서 } f(0) = 1 \quad f'(0) = 0$$

(c)  $\alpha = 1$  에서 잔류응력 값은 0 를 갖는다.

$$\alpha = 1 \text{ 에서 } f(1) = 0$$

(d) 표면에서 잔류응력은 h 값을 갖는다

$$f(-e) = h \quad (h = H/\sigma_0, -e = -B/C)$$

여기서 H : 표면에서 잔류응력값  
 $\sigma_0$  : 최대잔류응력값

(e) 잔류응력은 다음과 같은 Energy Balance 를 유지해야 한다.

$$\int_{-e}^{\infty} f(\alpha) d\alpha = 0$$

## 2.2 잔류응력 분포식 유도 및 타당성 확인

경계조건 (a) - (d) 와 경계조건 (e) 에서 적분값이  $\infty$  에서 존재하려면 분모의 차수가 최소 2차 이상 커야한다는 조건으로부터 다음과 같은 식(1)  $f(\alpha)$  를 얻는다.

$$f(\alpha) = \frac{(1 - \alpha) (\alpha^2 + B\alpha + B)}{B (1 + a\alpha^2)^3} \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{여기서 } B = \frac{e^2 (e + 1)}{h (1 + ae^2)^3 + (e^2 - 1)} \quad \text{----- (1a)}$$

경계조건 (e) 로 부터 식 (2)의 결과를 얻는다 [21,22]

$$\begin{aligned} \int_{-e}^{\infty} f(\alpha) d\alpha &= \int_{-e}^{\infty} \frac{(1 - \alpha) (\alpha^2 + B\alpha + B)}{B (1 + a\alpha^2)^3} \\ &= C \left[ -\frac{A^6}{2B} + \frac{A^4(1-B)e}{8B} + \frac{3}{8} A^2 e \right] \\ &+ C^2 \left[ \frac{A^8}{4B} + \frac{A^6(1-B)e}{4B} + \frac{A^4 e}{4} \right] e \\ &+ \left[ A^3 \frac{1-B}{B} + 3A \right] \left[ \frac{\pi}{16} + \frac{\tan^{-1} \frac{A}{e}}{8} \right] \quad \text{----- (2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } A &= a^{-1/2} \\ B &= \frac{e^2 (e+1)}{h (1+ae^2)^3 (e^2-1)} \\ C &= \frac{1}{e^2 + A^2} \end{aligned} \quad \text{----- (2a)}$$

경계조건 (e) 를 만족시키기 위해 식 (2) 는 0 이 되어야 하며 식 (2) 가 0 이 되는 a 값과 B 값을 구하기 위해 Bisectional Method 를 사용하였다.

잔류응력분포식의 타당성을 확인하기 위해 SA 508 Class 3 재질을 사용하여 구한 본 실험의 data 와 비교하였다. 비교한 결과는 Fig. 3-5 와 같으며 인장 영역에서는 측정치와 잘 일치하고 있으며 압축영역에서는 이론식이 다소 낮은 값을 나타내고 있다. 그 이유는 이론식은 잔류응력이 반무한체에 존재한다고 가정하였기 때문이며 실험 data 도 시편 두께와 약 100 mm 정도로 실제 원자로 두께 200 mm 와는 차이가 있다.

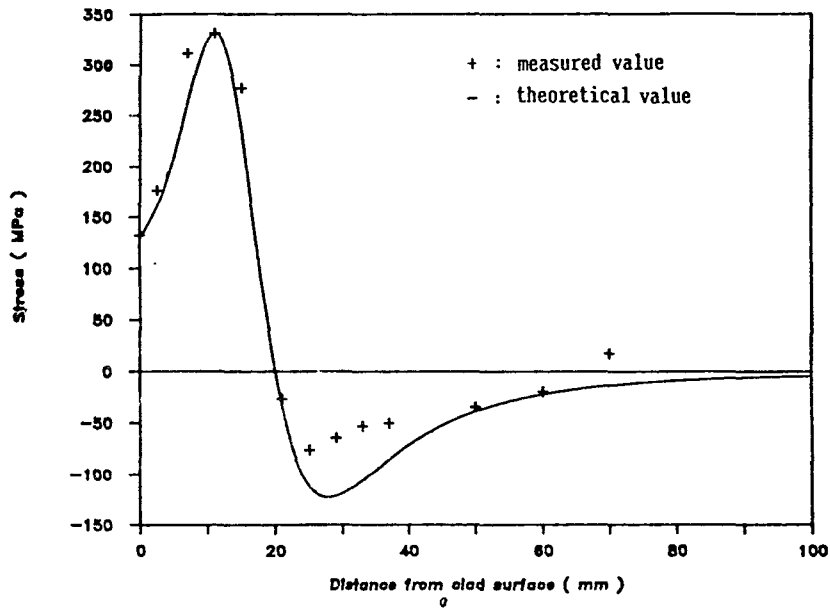


Fig. 3-5 Residual stress distribution comparison with measured value

### 2.3 응력확대계수 (Stress Intensity Factor) 해석

#### 2.3.1 Edge Crack 에 대한 응력확대계수 [23]

먼저 Fig. 3-6 과 같이 결함중심에 대해 응력분포가 대칭인 무한체를 생각하면 점 A 에서 응력확대계수는 다음과 같다 [23]

$$K = \frac{1}{\sqrt{(\pi a)}} \left[ \int_{-a}^0 \sigma(-x) \left[ \frac{a+x}{a-x} \right]^{1/2} dx + \int_0^a \sigma(-x) \left[ \frac{a+x}{a-x} \right]^{1/2} dx \right] \quad (3)$$

식 (3) 에서

$$\int_{-a}^0 \sigma(-x) \left[ \frac{a+x}{a-x} \right]^{1/2} dx = \int_0^a \sigma(x) \left[ \frac{a-x}{a+x} \right]^{1/2} dx$$

이므로 식 (3) 은 식 (4) 와 같이 표현된다.

$$K = \frac{1}{\sqrt{(\pi a)}} \int_0^a \sigma(x) \left[ \left[ \frac{a+x}{a-x} \right]^{1/2} + \left[ \frac{a-x}{a+x} \right]^{1/2} \right] dx$$

$$= \frac{2}{\sqrt{(\pi a)}} \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sqrt{(a^2 - x^2)}} dx \quad \text{----- (4)}$$

식 (4) 는 무한체의 중심관통 결함의 응력확대계수이므로 Fig. 3-7 과 같은 edge crack 의 경우는 식 (4) 의 값에 계수 1.12 [24] 를 곱하면 edge crack 에서의 응력확대계수를 구할 수 있다. 식 (4)에 식 (1)로 부터 구한 잔류응력식을 대입하였으며 a, b 값은 실제 측정 실험에서 구한 값과 같은, 피복용접부 5mm, h=0.4, e=1.2, c=9mm 를 사용하였다 결함크기를 증가시키면서 구한 응력확대 값 [23] 은 Fig. 3-8과 같다.

### 2.3.2 Subsurface crack 에 대한 응력확대계수

#### 2.3.2.1 결함전단 A 에서 응력확대계수

(a) size effect 를 고려한 응력확대계수 [25]

결함 전단 A 에서 Size effect 를 고려한 응력확대값 [25] 은 다음 식 [5] 로 부터 계산되며 그 결과는 Fig. 3-10 과 같다.

$$K_r^A = \int_{-a}^a \sigma_r(x) \left[ \frac{2 \sin \frac{\pi(a+x)}{W}}{W} \frac{1}{W \sin \frac{2\pi a}{W} \sin \frac{\pi(a-x)}{W}} \right]^{1/2} dx \quad \text{----- (5)}$$

(b) 무한체 (infinite body) 에서 응력확대계수 [26]

무한체 (infinite body) 에서 응력확대계수 [26] 는 다음 식 [6] 으로 부터 계산되며 그 결과는 Fig. 3-11 과 같다.

$$K_r^A = \frac{1}{\sqrt{(\pi a)}} \int_{-a}^a \sigma_r(x) \left[ \frac{a+x}{a-x} \right]^{1/2} dx \quad \text{----- (6)}$$

#### 2.3.2.2 결함 전단 B 에서 응력확대계수

(a) Size effect 를 고려한 응력확대계수 [25]

결함 전단 B 에서 size effect 를 고려한 응력확대값 [25] 은 다음 식 [7] 으로 부터 계산되며 그 결과는 Fig. 3-12 와 같다.

$$K_r^B = \int_{-a}^a \sigma_r(x) \left[ \frac{2 \sin \frac{\pi(a-x)}{W}}{W \sin \frac{2\pi a}{W} \sin \frac{\pi(a+x)}{W}} \right]^{1/2} dx \quad (5)$$

(b) 무한체 (infinite body) 에서 응력확대계수 [26]

무한체 (infinite body) 에서 응력확대계수 [26]는 다음 식 [8]로 부터 계산되며 그 결과는 Fig. 3-13 과 같다.

$$K_r^B = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_r(x) \left[ \frac{a-x}{a+x} \right]^{1/2} dx \quad (8)$$

### 2.3.3 응력확대계수에 대한 고찰

Edge crack 은 유도된 식 (4) 로 부터 정확한 값을 얻을 수 있으나 subsurface crack 의 경우는 현재로서는 정확한 해석이 불가능하여 size effect 를 고려한 방법과 infinite body 에 결함이 존재할 경우로 분리하여 계산하였다. 실제값은 이 두 방법에 의해 구한값 사이에 존재한다. 보수적인면에서는 size effect 를 고려한 응력확대값을 사용하는 것이 바람직 하다. 단 결함전단 B 에서의 응력확대값은 Fig. 3-14 와 같이 반결함 크기가 약 15mm 에서는 무한체 (infinite body) 값이 크게 나타나는데 그 이유는 결함 전단 A 가 압축 영역에 진입함에 따라 압축응력에 의한 응력확대값 감소가 size effect 에 의해 infinite body 보다 크게 감소하기 때문이다. 따라서 결함 전단 B 에서 결함크기가 15mm 보다 큰 결함은 무한체 에서 구한 응력 확대값을 사용하는 것이 보수적이다.

### 3. 결론

- 1) 경계조건들과 물리적의미를 만족하는 이론적인 잔류응력분포식을 구하였으며, 이론식에 의한 잔류응력분포와 실험에 의한 잔류응력 분포와는 잘 일치하였다.
- 2) Edge crack 및 subsurface crack 에 대한 응력확대계수를 구하였으며 edge crack 의 경우 결함크기가 약 15mm 에서, subsurface crack 경우 반결함 크기가 전단 A 에서 약 3.5mm, 전단 B 에서 약 7mm 에서 각각 최대 응력확대값을 나타내었다.
- 3) 본 연구에서 얻은 이론 잔류응력분포식을 사용할 경우, 화학용 압력 용기는 물론 원자력 압력용기 피복용접시 발생하는 잔류응력분포를 고려한 결함해석이 가능하다.