

노즐 이중금속용접부의 내면 보수용접부에서 수치해석법을 이용한 PWSCC 균열성장해석

김 상 철^{*,†} · 김 만 원^{**}

^{*}세명대학교 보건안전공학과

^{**}한국수력원자력(주), 원자력발전기술원

PWSCC Crack Growth Analysis Using Numerical Method in the Inner Surface Repair Weld of A Nozzle

Sang-chul Kim^{*,†} and Mann-won Kim^{**}

^{*}Dept. of Occupational Health & Safety Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

^{**}Nuclear Engineering & Technology Institute, KHNP, Deajeon 305-343, Korea

[†]Corresponding author : sckim@semyung.ac.kr

(Received December 8, 2010 ; Revised February 11, 2011 ; Accepted April 15, 2011)

Abstract

In this paper, crack propagation analyses in the inner diameter (ID) repair weld of the dissimilar metal weldment of a nozzle were performed using a finite element alternating method (FEAM). To calculate the theoretical solution for the crack tip stress intensity factor, a weak type singular integral equation consisted of crack surface traction and dislocation density function was constructed and solved in conjunction with the FEAM. A two-dimensional axisymmetric finite element nozzle model was prepared and ID repair welding was simulated. An initial crack, 10% depth of weld thickness, was assumed and crack propagation trajectory from the initial crack to the 75% depth of thickness was calculated using the FEAM. Crack growth versus time curve was also calculated and compared with the curves obtained from ASME code method. With the method constructed in this paper, crack propagation trajectory and crack growth time were calculated automatically and effectively.

Key Words : Inner diameter repair weld, Dissimilar metal weld, Crack propagation, Finite element alternating method, Weld residual stress

1. 서 론

원자력 발전소의 고에너지배관은 큰 직경의 주배관에 작은 직경의 분지관이 연결된 형태를 취하고 있으며 거의 대부분 용접으로 접합된다. 노즐 용접부 내의 결함을 제거하기 위하여 용접 중 비파괴검사를 수행하고, 결함이 발견된 경우 보수용접을 수행한다. 최근 원자력 발전소 노즐의 보수용접부에서 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking) 결함이 발견되어 심각한 안전현안이 된 사례가 있다¹⁾. 이 사례에서는 보수용

접시 발생한 과도한 용접잔류응력이 일차냉각수 응력부식환경에서 균열의 발생 및 성장의 구동력이 된 것으로 판명되었다. 이에 보수용접부의 용접잔류응력 분포와 균열성장평가에 대한 연구가 수행되었다¹⁻⁴⁾. 국내에서도 용접부의 균열성장 평가를 위한 실험 및 해석적 연구가 수행되었다⁵⁻⁸⁾. 그러나 보수용접부의 균열성장평가를 위한 연구는 거의 없었다.

본 논문에서는 노즐의 이중금속용접부에서 내면보수용접을 시행한 경우에 대하여 내면보수용접부의 PWSCC 균열성장해석을 수행하였다. 먼저 내면보수용접 과정을 유한요소해석을 통하여 모사하고 용접잔류응력분포를 구

한 후, 초기 균열을 가정하여 본 논문에서 작성한 프로그램을 사용하여 PWSCC 균열성장해석을 수행하였다.

본 논문에서 작성한 균열성장해석 프로그램은 균열해 계산부와 균열성장 계산부를 가지고 있다. 용접잔류응력장의 균열성장평가를 위해서는 정확한 균열해가 필요한데, 본 논문의 균열해 계산부에서는 균열면에서의 표면력(traction)의 합력(resultant force)과 전위밀도함수(dislocation density function)로 구성된 특이적분방정식을 풀어서 얻어지는 탄성해를 이용하는 방법⁹⁾을 사용하여 균열해를 계산하였다. 균열성장 계산부에서는 시간 또는 하중 작용 횟수에 따른 균열 성장식을 사용하는데, EPRI MRP-216²⁾에서 제시한 Alloy 82/182/132 소재의 PWSCC 균열 성장식을 적용할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

한편, 노즐 및 배관에 존재하는 균열에 대한 공학적 해로 ASME B&PV Code Sec. XI¹⁰⁾에 제시된 보정 계수를 사용한 해가 많이 사용된다. 비교를 위하여 ASME 코드의 균열해를 사용한 균열성장평가를 수행하고, 두 방법의 특성을 살펴보았다. 이때 동일한 PWSCC 균열 성장식을 식을 사용하였다.

2. 균열해 및 균열성장 계산방법

2.1 균열의 탄성해

균열문제를 해석하는 한 방법으로 적분방정식을 구성하여 미지함수를 구하고 이를 이용하여 응력강도계수(stress intensity factor)를 구하는 방법이 있다. 혼합경계치문제에서 특이적분방정식은 다음과 같이 1차원 적분방정식으로 표현된다.

$$\int_L K(t,x)g(t)dt = p(x), \quad x \in L. \quad (1)$$

여기서 $g(t)$ 는 미지함수이고 $p(x)$ 는 기지의 유계함수(bounded function)이다. 적분커널 $K(t,x)$ 는 일반적으로 특이성을 갖는데, 이 특이성은 $g(t)$ 및 $p(x)$ 의 선택에 의해 결정된다. 균열문제의 경우 식(1)의 L 은 적분영역인 균열이 놓인 선을 의미하고 $g(t)$ 는 유계함수이거나 또는 L 의 경계에서 적분 가능한 특이성을 가지는 함수이다. $g(t)$ 및 $p(x)$ 함수의 선택에 따라 적분방정식의 커널이 갖게 되는 일반적인 형태가 결정된다. $g(t)$ 가 전위이고 $p(x)$ 가 합력인 경우, 적분커널 $K(t,x)$ 는 적분 가능한 약한 특이성(singularity)만을 가지므로 계산이 쉽고, 적분이 단지 균열의 한쪽 면만을 따라 수행되며, 기지함수 값이 주어지는 점을 임의로 선정할 수 있어 수치적인 계산이 용이하다는 장점이 있다.

균열상에 임의의 표면력이 작용되고 있는 경우를 고려하자. 적절한 응력함수를 얻기 위하여 균열을 전위의 연속된 분포라고 가정한다. 균열면에서의 합력과 전위밀도함수를 이용하여 특이적분방정식을 구성한 후 이 방정식을 풀어서 균열선단 위치에서의 전위밀도함수를 구하면 응력강도계수를 구할 수 있다.

Burgers벡터 b_x, b_y 인 전위가 $z=z_0$ 의 위치에 존재하는 경우의 복소응력 함수는 다음과 같다¹¹⁾.

$$\begin{aligned} \phi(z) &= \gamma \log(z - z_0), \\ \psi(z) &= \bar{\gamma} \log(z - z_0) - \gamma \frac{z_0}{z - z_0}. \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\gamma = G(b_x + ib_y) / i\pi(\kappa + 1)$ 이다. G 는 전단탄성 계수(shear modulus)이며, ν 를 푸아송비(Poisson's ratio)라고 하면 평면응력의 경우 $\kappa = (3 - \nu) / (1 + \nu)$ 이고 평면변형인 경우 $\kappa = 3 - 4\nu$ 이다.

응력함수로부터 응력 및 변위는 다음 식(3)에서 구해진다¹²⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_x + \sigma_y &= 2[\phi'(z) + \overline{\phi'(z)}], \\ \sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} &= 2[\bar{z}\phi''(z) + \psi'(z)], \\ 2G(u + iv) &= \kappa\phi(z) - z\overline{\phi'(z)} - \overline{\psi(z)}. \end{aligned} \quad (3)$$

또한 곡선상의 일점 A 를 고정된 점이라 하고 곡선 상의 일점 B 의 좌표를 z 라 할 때 곡선 AB 에 작용되는 합력 F_x 와 F_y 는 다음과 같이 표시 된다¹²⁾.

$$F_x + iF_y = -i[\phi(z) + z\overline{\phi'(z)} + \overline{\psi(z)}] + c_1. \quad (4)$$

여기서 c_1 은 복소 적분상수이다.

식(2)의 응력함수를 이용하면 곡선 L 을 따라 연속적으로 분포되어 있는 전위에 대한 응력함수는 다음 식(5)와 같이 표시할 수 있다¹³⁾.

$$\begin{aligned} \phi(z) &= \int_L D(s)\log(z - t)ds, \\ \psi(z) &= \int_L \overline{D(s)}\log(z - t)ds - \int_L \frac{\bar{t}D(s)}{(z - t)}ds. \end{aligned} \quad (5)$$

여기서

$$D(s) = D_1(s) + iD_2(s) = \frac{G[B_x(s) + iB_y(s)]}{i\pi(\kappa + 1)} \quad (6)$$

이고, s 는 곡선상에서의 거리, $B_x(s)$ 및 $B_y(s)$ 는 각각 x 및 y 성분의 전위밀도함수이다. 식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면,

$$i(F_x + iF_y) = \int_L [\log(z-t) + \log(\bar{z}-\bar{t})] D(s) ds + \int_L \frac{z-t}{z-\bar{t}} \overline{D(s)} ds + c_1 \quad (7)$$

이 된다. z 가 곡선상의 한 점 t_0 로 접근하면 식(7)은 다음과 같이 표현된다.

$$i[X(t_0) + iY(t_0)] = \int_L 2\log|t-t_0| D(s) ds + \int_L \frac{t-t_0}{\bar{t}-t_0} \overline{D(s)} ds + c_1. \quad (8)$$

여기서 $t-t_0 = r(t,t_0)\exp[i\theta(t,t_0)]$ 로 나타내면 식(8)로부터 다음 식(9)과 같은 적분방정식을 얻게 된다¹²⁾.

$$\int_L 2\log[r(t,t_0)] D_1(s) ds + \int_L \{D_1(s)\cos[2\theta(t,t_0)] + D_2(s)\sin[2\theta(t,t_0)]\} ds + \text{Re}(c_1) = -F_y(t_0), \quad (9)$$

$$\int_L 2\log[r(t,t_0)] D_2(s) ds + \int_L \{D_1(s)\sin[2\theta(t,t_0)] - D_2(s)\cos[2\theta(t,t_0)]\} ds + \text{Im}(c_1) = F_x(t_0).$$

그리고 유일한 변위장을 가지기 위하여 다음 식을 만족하여야 한다:

$$\int_L D_i(s) ds = 0 \quad (i = 1, 2). \quad (10)$$

식(9)와 식(10)의 각 항의 적분을 계산하기 위하여 다음과 같이 전위밀도함수의 분포를 가정한다. 우선 곡선 균열을 Fig. 1(a)에서와 같이 $(n+1)$ 개의 절점으로 나눈다. 그러면 첫 번째 절점과 $(n+1)$ 번째 절점은 균열 선단에 위치한다. 그리고 절점과 절점 사이의 균열은

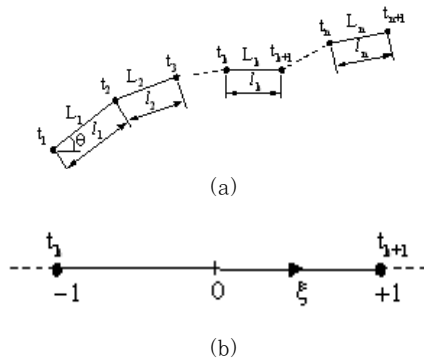


Fig. 1 Configuration of a curved crack (a) A curved crack consisting of n crack elements (b) Local coordinate system for the crack element L_k

직선이라고 가정하고 각각을 균열요소라고 부르기로 한다. 그러면 균열은 n 개의 직선 균열요소로 이루어졌다고 할 수 있을 것이다. 각 균열요소 내의 임의의 점에서의 전위밀도함수 값은 절점에서의 값으로 나타낼 수 있다고 가정하고 다음과 같이 나타내기로 한다. 첫 번째 균열요소 및 n 번째 균열요소에 대해서는,

$$D_i(\xi) = \sqrt{\frac{2}{1+\xi}} \left[\frac{1-\xi}{2} (D_i)_1 + \frac{1+\xi}{2} (D_i)_2 \right] \quad (i = 1, 2)$$

$$D_i(\xi) = \sqrt{\frac{2}{1-\xi}} \left[\frac{1-\xi}{2} (D_i)_n + \frac{1+\xi}{2} (D_i)_{n+1} \right] \quad (i = 1, 2) \quad (12)$$

이다. 여기서 ξ 는 요소 내 선형 국부좌표계로 $-1 \leq \xi \leq 1$ 이다(Fig. 1(b)). 또한 $(D_i)_n$ 은 절점 n 에서의 D_i 값을 나타낸다. 이와 같이 가정하면 균열요소의 두 절점 중 균열의 선단에 위치한 요소에서는 특이성을 가지게 되고 다른 한 절점에서는 식에서 근호 안의 값이 1 이 되므로 특이성을 갖지 않는 형상함수가 된다. 그리고 나머지 균열요소들 중 첫 번째와 n 번째를 제외한 k 번째 균열요소에 대해서는,

$$D_i(\xi) = \frac{1-\xi}{2} (D_i)_k + \frac{1+\xi}{2} (D_i)_{k+1} \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

이 된다. 이러한 형태의 전위밀도함수의 분포는 Zang 과 Gudmundson¹⁴⁾이 꺾인 균열(kinked crack)의 해석에서 사용한 가정과 동일하다.

식(11), 식(12) 및 식(13)으로 표현되는 전위밀도함수의 분포를 식(9) 및 식(10)에 대입한 후, t_0 가 각 절점일 때에 대하여 각 항을 해석적이나 수치적으로 적분하면 $(2n+4)$ 개의 연립방정식이 얻어진다. 이때 미지수는 각 절점에서의 D_1 및 D_2 값과 c_1 의 실수부 및 허수부로 모두 $(2n+4)$ 개이다. 따라서 미지수를 구하기에 충분한 방정식이 존재함을 알 수 있다.

균열 선단이 속해 있는 균열요소에서 균열선단에 해당하는 절점을 t_c , 다른 점을 t_a 이라 하고 $t_c-t_a = l \exp(ia)$ 로 표시된다고 하면 응력강도계수는 다음 식으로부터 구해진다.

$$K_I = (2\pi)^{3/2} \sqrt{l} [(D_1)_c \cos\alpha + (D_2)_c \sin\alpha] \quad (14)$$

$$K_{II} = (2\pi)^{3/2} \sqrt{l} [(D_1)_c \sin\alpha - (D_2)_c \cos\alpha]$$

여기서 D_1 과 D_2 는 균열선단 요소의 두 절점에서의 전

위밀도함수 값이며 하첨자 c 는 균열선단임을 나타내고 l 은 균열 선단이 속한 균열요소의 길이이다.

식(14)와 같은 형태의 균열해는 유한요소교호법(finite element alternating method: FEAM)의 이론해로 적용된 바 있다¹⁵⁻¹⁷⁾. 일반적으로 유한요소해석에서 응력강도계수를 구하기 위하여 특이요소(singular element)를 사용하는데, 이때 균열선단에 요소격자를 조밀하게 구성해야 하며 균열의 성장을 모사하기 위하여 요소격자를 재구성해야 하므로 많은 시간과 노력이 요구된다. 반면에 FEAM의 균열해는 이론해로부터 적분방정식을 이산화하여 계산하므로 균열선단의 복잡한 요소격자구성이 필요하지 않고 따라서 균열성장해석이 편리하다는 장점이 있다. FEAM에서 균열을 삽입하여 균열해를 구하는 과정은 저자들의 이전 논문¹⁷⁾에서 상세히 소개하였다. FEAM의 균열해는 이론해 이므로 유한형상의 노즐에서 원주방향의 무한균열을 계산하는 것이 되어, 균열의 존재로 인한 유한 노즐의 경계에서 잔류 트래션(traction)이 존재하게 된다. FEAM은 이 트래션을 역으로 가하여 다시 균열해를 계산하는 반복 방법을 사용한다. 이전의 논문¹⁵⁻¹⁷⁾에서 FEAM의 반복 수렴성이 매우 높은 것이 증명되었다.

2.2 ASME Code 균열해

ASME B&PV Code Section XI¹⁰⁾에서는 표면균열에 대하여 균열면에 수직인 응력분포를 다음 식(15)와 같이 다항식으로 적합한 후 계수를 구하여 다음 식(16)과 같이 표현되는 식에 대입함으로써 표면균열에 대한 해를 계산한다.

$$\sigma = A_0 + A_1\left(\frac{x}{a}\right) + A_2\left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3\left(\frac{x}{a}\right)^3 \quad (15)$$

$$K_I = f\sqrt{\pi a/Q} \quad (16)$$

$$f = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3]$$

여기서 x 는 균열 끝부분에서부터 두께내의 임의의 깊이, a 는 균열깊이, A_i, G_i ($i=0,1,2,3$)는 상수 및 보정계수, Q 는 형상계수를 나타낸다. 보정계수 G_i 값은 ASME Code의 Table A-3320-1,2에 제시되어있다.

2.3 PWSCC 균열성장 해석방법

용접잔류응력 분포 하에서 PWSCC 균열성장률을 구하기 위해 사용한 식은 다음과 같다.

$$da/dt = C(\Delta K)^n \quad (17)$$

여기서 K 는 응력강도계수로 식(14) 및 식(16)에서 계산되는 값이며, da/dt 는 균열성장속도이다. 본 논문에서 용접부로 가정한 재료인 Alloy182의 경우 $C=1.5 \times 10^{-12}$, $n=1.6$ 이다²⁾. 식(17)에서 균열성장속도의 단위는 m/sec를, 응력강도계수의 단위는 MPa√m이다. 균열의 성장은 식(17)으로부터 일정 길이의 균열증분에 대하여 균열성장 시간과 균열성장 경로를 계산할 수 있도록 작성하였다.

한편 식(14)를 사용하여 K 를 계산할 때, K_{I} 과 K_{II} 가 얻어지므로 다음 식(18)의 등가 응력강도계수(K_{I})_{eq}를 사용하였다.

$$(K_I)_{eq} = K_I \cos^3 \frac{\theta_m}{2} - 3K_{II} \cos^2 \frac{\theta_m}{2} \sin \frac{\theta_m}{2} \quad (18)$$

균열성장해석시 식(14)로 주어진 균열의 탄성해를 사용하여 자동으로 균열성장을 모사하는 방법을 사용하였다. 용접잔류 응력장에서의 균열성장 계산을 위한 피로해석부의 구성에 대한 상세 내용은 참고문헌 17에 나타나있다.

3. 용접잔류응력 해석

3.1 유한요소 모델링

노즐에서 내면보수용접부의 용접잔류응력 분포를 계산하기 위하여 실제 원자력발전소의 노즐을 대상으로 축대칭 유한요소해석모델을 작성하고 용접 열전달해석과 열응력해석을 수행하였다. 유한요소해석 모델의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 유한요소모델은 노즐부(SA-508), 이중금속용접부(Alloy182), 버터링부(Alloy82), 안전단(TP347 스테인리스강), 동중금속용접부(F347) 및 배관(TP347 스테인리스강)으로 이루어져 있다. 이

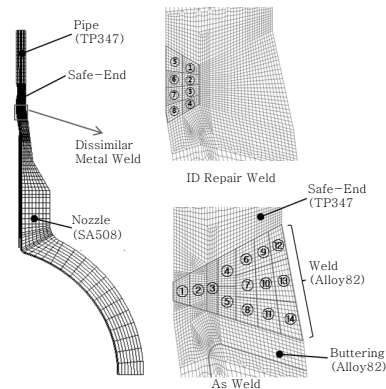


Fig. 2 FE mesh and weld pass-profiles of dissimilar metal weld and inner diameter (ID) repair weld

중금속용접부의 내경은 257.302 mm이며 안전단의 두께는 35.687 mm 이다. 이중금속용접부와 내면보수용접부의 상세 격자형상과 용접패스를 Fig. 2에 나타내었다. 버터링은 미리 용접되었고 잔류응력이 없는 상태로 가정하였다.

유한요소해석은 ABAQUS V6.5¹⁸⁾를 사용하여 천이 열전달해석과 응력해석을 순차적으로 수행하였다. 먼저 열전달해석을 수행하여 절점온도를 계산하고, 계산된 절점온도를 입력하여 열응력 구조해석을 수행하였다. 유한요소해석의 경계조건과 사용된 물성치 및 해석 방법은 참고문헌 1과 17에서 사용된 방법과 동일하게 하였다.

3.2 잔류응력분포

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 유한요소해석 결과 얻어진 보수용접하지 않은 경우와 내면보수용접한 경우의 용접부와 그 주변의 축방향 및 원주방향 최종 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 응력의 단위는 psi 이다. Fig. 5는 용접부 루트부 중심에서부터 반경방향으로 그은 직선상의 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 3 ~ Fig. 5로부터 보수용접하지 않은 경우에 비하여 내면 보수용접을 하는 경우 보수용접부에서 높은 인장응력이 형성됨을 알 수 있다. 한편, Fig. 6은 EPRI

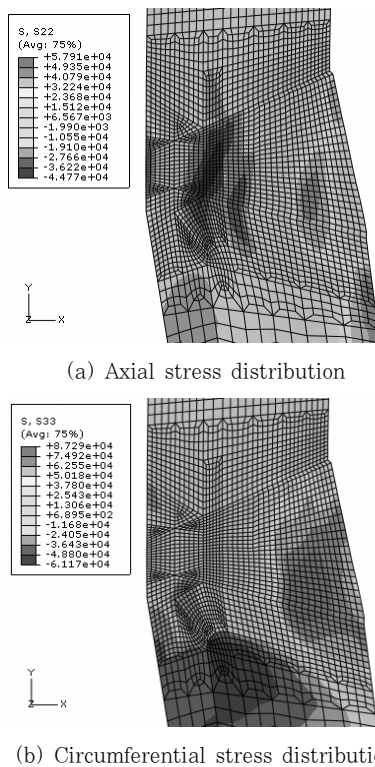


Fig. 3 Stress distribution in as weld: (a) axial stress and (b) circumferential stress

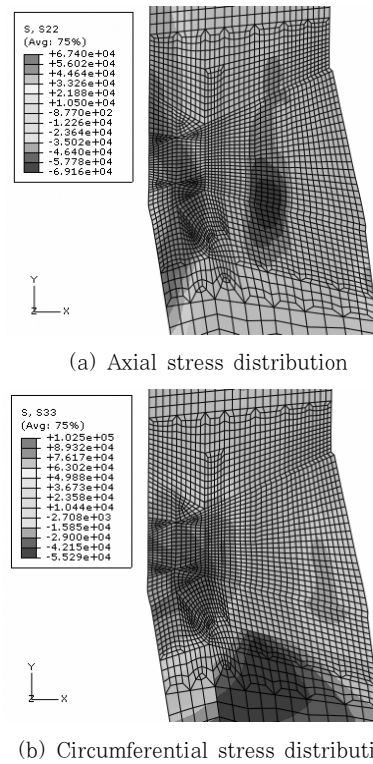


Fig. 4 Stress distribution in ID repair weld: (a) axial stress and (b) circumferential stress

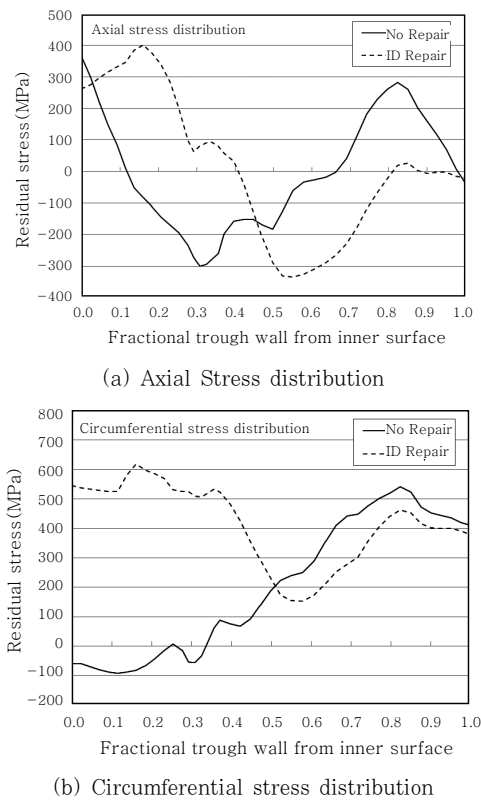
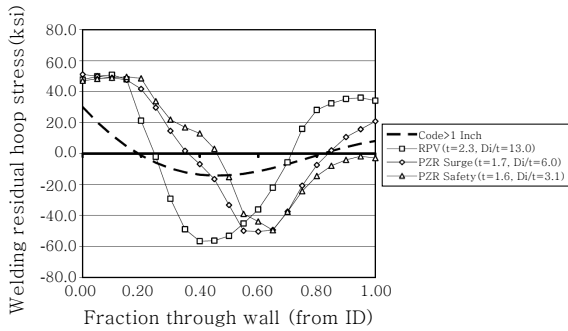
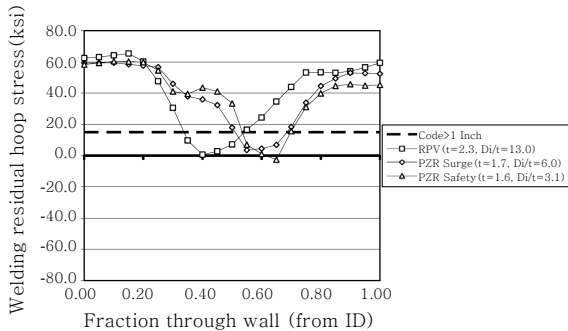


Fig. 5 Stress distribution along the radial strait path from the ID of weld root center to the OD of weld: (a) axial stress and (b) circumferential stress



(a) Axial stress distribution



(b) Circumferential stress distribution

Fig. 6 Through-Wall residual axial and hoop stresses; (a) axial stress and (b) circumferential stress (Figures from EPRI MRP-106)

MRP-106¹⁹⁾의 이중금속용접부 내면보수용접부의 유한 요소해석 결과로서 루트부 중심에서부터 반경방향으로 그은 직선상의 용접잔류응력분포를 나타낸 것이다. 본 논문의 해석결과 얻어진 내면보수용접부의 잔류응력분포와 Fig. 6의 결과를 비교해 볼 때 같은 분포 경향을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 용접잔류응력 해석 결과가 타당함을 확인하였다.

4. 균열성장평가

Fig. 3 및 4의 용접부 잔류응력분포를 사용하여 노즐의 내면보수용접부의 PWSCC 균열성장 해석을 수행하였다. 원주방향의 균열은 성장하면 배관의 양단과 같은 심각한 사고로 이어질 수 있기 때문에 전전성 측면에서 축방향으로 성장하는 균열에 비하여 더 중요하다. 따라서 본 논문에서는 용접부에서의 성장하는 원주방향의 균열을 고려하였다. 그리고 유한요소해석 모델에서 원주방향으로는 축대칭을 가정하였으므로 360도 균열로 가정하였다. 응력강도계수는 식(14)를 사용하여 구하였으며, 초기 균열은 용접부 두께의 약 10% 깊이로 가정하였다. 식(17)을 사용하여 두께의 3/4 깊이까지 PWSCC 균열성장을 계산하였다.

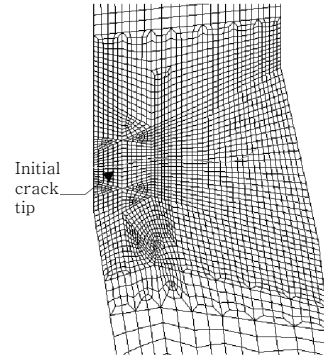


Fig. 7 Calculated PWSCC crack propagation trajectory in ID repair weld

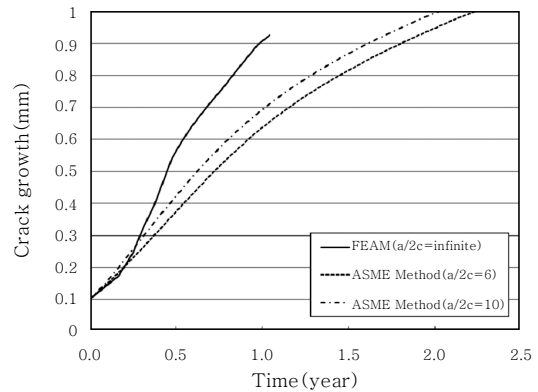


Fig. 8 Predicted crack growth versus time curve

Fig. 7은 내면보수용접부의 균열성장궤도를 나타낸 것이다. 용접부에서 축방향 응력성분만 존재한다면 직선 균열성장궤도가 얻어질 것이다. 그러나 용접부에는 반경방향과 원주방향의 응력성분도 존재하므로 식(18)로부터 등가 응력강도계수와 균열성장각을 계산하여 균열의 선단에 균열요소를 하나씩 증가시키므로써 곡선 균열성장궤도를 계산하였다. 이때 초기균열은 그림에 나타낸 바와 같이 삽입하여 해석하였으며, 직선 두께의 10% 균열을 가정하였다. 균열성장은 두께의 75% 깊이까지 조사하였으며, 균열선단 균열요소 증분은 두께의 75% 깊이까지 길이를 총 20 등분하여 적용하였다. Fig. 7에서 초기에 균열성장은 K_{II} 의 값이 0이 되려는 방향으로 성장하여 하기 때문에 약간 굽었다가 다시 초기 균열방향으로 돌아왔다. 약 70% 깊이 지점부터는 외경부의 형상과 응력분포에 의하여 다시 굽어져 성장한 것으로 판단된다.

다음으로 내면 보수용접부에서 균열성장을 계산할 때 균열해로 식(14)의 본 논문의 방법과 식(16)의 ASME 코드의 방법을 사용하는 경우를 비교하였다. 이를 위하여 식(14)에서 구해진 응력강도계수 중 K_{II} 를 0으로 놓음으로써 균열성장각도를 0으로 하였다. 이 경우 균

열성장계도는 직선이 된다.

Fig. 8은 시간에 따른 균열성장길이를 나타낸 것으로 ASME 코드의 방법과 본 논문의 방법(FEAM)을 비교하여 나타내었다. ASME 코드의 방법에서 균열의 형상은 균열깊이(a)와 균열길이(2c)의 비가 1:6 및 1:10인 타원형 표면균열을 가정하였다. 초기 균열길이에서 75% 깊이의 균열길이까지 성장하는데 소요된 시간은 FEAM 방법으로 약 0.73년, ASME 코드의 방법으로 약 1.29년(a/2c=6인 경우) 및 1.14년(a/2c=10인 경우)으로 계산되었다. 두 방법의 차이는 다음과 같은 이유에서 비롯되었을 것으로 생각된다. 첫째, 응력강도 계수 계산의 차이이다. ASME 코드 방법의 응력강도계수는 축방향 응력만 고려하여 계산하지만 FEAM 방법은 혼합모드의 응력을 고려하여 계산된다. 둘째, 균열형상의 차이이다. FEAM에서는 360도 균열이지만 ASME 코드 방법은 형상비(a/2c)가 제한적인 균열을 고려하였다.

두 방법의 차이에도 불구하고 두 방법으로 계산된 시간-균열성장곡선의 형상은 거의 같은 경향을 나타냈으며, 균열의 길이가 원주방향으로 길어지는 형상이 될수록(a/2c=6→a/2c=10) ASME 방법으로 계산된 값이 FEAM 방법으로 구한 값에 가까워짐을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 방법이 ASME 코드의 방법에서와 같이 유한 형상비의 균열을 고려하지는 못하나 노즐에서 길이 방향으로 긴 균열의 경우 비교적 정확하게 예측할 수 있으리라고 판단된다. 또한 ASME 코드의 방법을 사용하는 것에 비하여 직접 용접잔류응력 유한요소해석 모델에서 초기균열만 삽입하면, 자동으로 균열성장계산을 수행하므로 시간과 인력을 절약할 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 노즐의 내면보수용접부에 존재하는 PWSCC 균열의 균열성장평가를 수행할 수 있도록 균열해 계산부와 균열성장 계산부를 가지는 프로그램을 작성하였다. 균열해 계산부에서는 균열면에 작용하는 표면력의 합력과 전위밀도함수로 구성된 특이적분방정식을 구성하고 균열선단의 전위밀도함수를 구함으로써 균열해를 계산하였으며, 균열성장 계산부에서는 Alloy 182의 PWSCC 균열성장식을 적용하여 균열성장을 자동으로 계산할 수 있도록 프로그래밍하였다. 노즐 내면보수용접부의 용접잔류응력은 상용 유한요소해석코드를 사용하여 구하였으며, 계산된 응력분포를 사용하여 본 논문에서 작성한 프로그램으로 혼합모드 하에서의 균열성장을 계산하였다.

본 논문의 균열성장해석 방법을 ASME Code Section XI의 균열해를 이용한 균열성장계산 방법과 비교할 때, 거의 유사한 균열성장 경향이 얻어졌다. 본 논문의 방법은 균열의 길이가 원주방향으로 긴 경우 균열성장을 효과적으로 계산할 수 있으며, 보수용접부의 용접잔류응력 하에서 균열성장평가를 위한 연구에 기초자료로 사용되어질 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 세명대학교 교내학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Materials Reliability Program : Alloy 82/182 Butt Weld Safety Assessment for U. S. PWR Plant Designs (MRP-113), EPRI, Palo Alto, CA: 2004, 1009549
2. Materials Reliability Program : Crack Growth Rates for Evaluating Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) of Alloy 82, 182, and 132 Welds (MRP-115), EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1006696
3. Materials Reliability Program : Advanced FEA Evaluation of Growth of Postulated Circumferential PWSCC Flaws in Pressurizer Nozzle Dissimilar Metal Welds (MRP-216): Evaluations Specific to Nine Subject Plants, EPRI, Palo Alto, CA, 2007, 1015383
4. M.W. Kim, Y.J. Kim, E.S. Yoon, K.H. Na and Y.S. Park : Effect of Curve Fitting of Residual Stress on Crack Growth Analysis in Alloy 82/182 Repair Weld of a Nozzle, Proceedings on 2009 KPVP Annual Conference, 2009, 277-278 (in Korean)
5. E.J. Park, E.J. Kim and S.H. Yoo : An Analysis of the Fatigue Crack Opening Behaviour in the Welding Residual Stress Field by the Finite Element Method, J. of the Korean Welding Society, **21-6** (2003), 77-83 (in Korean)
6. S.C. Kim and Y.B. Lee : The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Region, J. of the Korean Welding Society, **5-1** (1987), 42-48 (in Korean)
7. Y.B. Lee and N.I. Cho : Redistribution of Welding Stress and its Effects on Fatigue Crack Propagation, J. of the Korean Welding Society, **13-4** (1995), 155-162 (in Korean)
8. S.H. Song, H. Kim and J.S. Bae : The Study of Fatigue Crack Propagation Behavior in the Welding Residual Stress Field by Superposition Method, J. of the Korean Society of Precision Engineering, **11-4** (1994), 47-52 (in Korean)
9. J.H. Park, M.W. Kim, and S.N. Atluri : Analysis of multiple curved cracks embedded in an isotropic plate using the finite element alternating method,

- Computer Modeling and Simulation in Engineering, **4** (1999), 58-63
10. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, 2010
 11. M.H. Santare and L.M. Keer, : Interaction Between an Edge Dislocation and a Rigid Elliptical Inclusion, *J. Appl. Mech.*, **53** (1986), 382-385
 12. N.I. Muskhelishvili : Some Basic Problems in the Theory of Elasticity, Noordoff, Groningen, 1951
 13. Y.K. Chung and Y.Z. Chen : New Integral Equation for Plane Elasticity Crack Problems, *Theoretical and Applied Fracture Mech.*, **7** (1987), 177-184
 14. W.L. Zang and P. Gudmundson : Kinked Cracks in an Anisotropic Plane Modeled by an Integral Equation Method, *Int. J. Solids Structures*, **27** (1991), 1855-1865
 15. J.H. Park and S.N. Atluri : Mixed mode fatigue growth of curved cracks emanating from fastener holes in aircraft lap joints, *Computational Mechanics*, **21** (1998), 477-482
 16. J.H. Park, M.W. Kim, and S.N. Atluri : Analysis of multiple curved cracks embedded in an isotropic plate using the finite element alternating method, *Computer Modeling and Simulation in Engineering*, **4** (1999), 58-63
 17. S.C. Kim and M.W. Kim : Crack Growth Analysis of Dissimilar Metal Weld Using a Numerical Method, *J. of KWJS*, **28-1** (2010), 100-106 (in Korean)
 18. ABAQUS/Standard Version 6.5, HK&S Inc, 1997
 19. Materials Reliability Program: Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), EPRI, Palo Alto, CA: 2004, 1009378