

연구 논문

수치해석방법을 이용한 이종금속용접부에서의 균열성장해석

김 상 철*† · 김 만 원**

*세명대학교 공과대학 보건안전공학과

**지엔이씨 건전성 평가팀

Crack Growth Analysis of Dissimilar Metal Weld using a Numerical Method

Sang-Chul Kim*† and Maan-Won Kim**

*Dept. of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

**GNEC Inc., Daejeon 305-510, Korea

†Corresponding author : sckim@semyung.ac.kr

(Received December 10, 2009 ; Revised January 11, 2010 ; Accepted January 14, 2010)

Abstract

In this paper crack propagation analyses in the dissimilar metal weldment of a nozzle were performed using a finite element alternating method (FEAM). A two-dimensional axisymmetric finite element nozzle model was prepared and welding simulation including the thermal heat transfer analysis and the thermal stress analysis was performed. Initial cracks were inserted at weld and heat affected zone in the finite element model which has welding residual stress distribution obtained from the welding simulation. To calculate crack propagation trajectories of these cracks, a new fatigue crack evaluation module was developed in addition to the previous FEAM program. With the new FEAM fatigue crack evaluation module, crack propagation trajectory and crack growth time were calculated automatically and effectively.

Key Words : Dissimilar metal welding, Crack propagation, Finite element alternating method, Weld residual stress

1. 서 론

최근 원자력 발전소 노즐의 Alloy 82/182 소재 이종금속용접부에서 발생한 균열 문제가 심각한 안전 사항이 되었다. 따라서 Alloy 82/182 이종금속용접부의 균열 문제 해결을 위한 연구¹⁻³⁾가 수행되었으며, 국내에서도 최근 동 용접부의 균열평가가 수행된 사례가 있다⁴⁾. 용접부에서 발생한 균열은 구조물의 심각한 안전성 저해요소이므로 많은 해외연구사례를 찾아볼 수 있으며, 국내에서도 실험적 방법과 해석적 방법을 통하여 많은 연구가 수행되어 왔다⁵⁻⁸⁾.

이종금속용접부의 건전성평가를 위해서는 정확한 잔류응력분포와 균열해석이 요구되며, 정확한 응력강도계수(stress intensity factor)를 구하는 것이 중요하다.

잔류응력장의 경로의존성 때문에 통상의 J-적분법을 그대로 적용하기에는 제약이 있다⁹⁾. 또한 유한요소모델에서는 균열선단을 조밀하게 모델링해야 하며, 균열성장을 계산하기 위해서는 균열성장 증분마다 재 모델링해야 하므로 많은 노력과 시간이 소요된다. 최근에 유한요소교호법(finite element alternating method: FEAM)이 용접잔류응력 분포하의 균열해석에 사용된 바 있다^{10,11)}. FEAM은 유한요소모델과 균열의 이론해를 교호하여 사용하는 방법으로서 복잡한 균열선단요소 생성이 불필요하며, 특히 피로균열성장에 따른 균열선단요소 재생성이 필요 없으므로 균열성장해석에 매우 효과적인 방법으로 알려져 있으며 그 유효성이 입증된 방법이다¹²⁻¹⁴⁾. 그러나 이들 연구에서는 용접잔류응력장에서 균열 크기에 따른 응력강도계수를 계산하는데 그쳤다.

본 논문에서는 이종금속용접부를 포함하는 노즐을 선정하고 유한요소해석을 통하여 용접잔류응력분포를 구하였다. 그리고 초기균열을 용접부 및 열영향부에 삽입한 후 FEAM을 사용하여 균열성장에 따른 시간 및 균열성장각도 및 균열성장 궤적을 계산하였다. 이를 위하여 기존의 FEAM¹²⁻¹⁴⁾에 균열성장해석을 위한 모듈을 추가하고 잔류응력장에서 균열성장을 해석할 수 있도록 입출력 모듈을 개선하였다.

2. 유한요소교호법

2.1 유한요소교호법

FEAM은 Schwartz-Neumann의 교호법에 기초를 둔 방법으로 주어진 문제의 형상이 복잡한 경우에 보다 단순한 형상의 문제들을 반복하여 품으로써 문제의 해를 얻게 되는 것이다. 이 방법은 유한요소법의 장점과 균열 이론해의 장점을 이용하는 것으로, 유한요소모델에 균열을 포함시킬 필요가 없어 모델링이 간단하고 균열선단 근처에서 아주 정확한 응력 또는 변위장을 구할 수 있는 장점이 있다. 또한 유한요소모델에 균열을 포함시킬 필요가 없으므로 피로균열 성장을 시뮬레이션할 경우에 균열성장에 따른 유한요소격자의 재구성이 필요하지 않는 장점을 지닌다. FEAM에 대한 상세한 일반적인 내용은 참고문헌 12~14에서 볼 수 있다.

2.2 균열의 이론해

FEAM은 균열의 이론해를 사용한다. 노즐 용접부는 2차원 축대칭 모델링이 가능하므로 본 논문의 FEAM에서는 2차원 곡선균열 이론해¹⁴⁾를 사용하였다. 곡선균열 이론해는 등방성 무한판 내에 임의의 형태의 곡선균열이 존재하고 있고 균열면 상에는 임의의 표면 트래క్ష이 작용되고 있는 혼합경계치문제에 대한 해를 구한 것이다. 균열을 전위의 연속된 분포라고 가정하고, Burgers 벡터로 표현된 복소응력함수를 사용하여 곡선균열면을 따라 연속적으로 분포되어있는 전위에 대하여 전위밀도함수로 표현되는 적분방정식을 구성하였다. 곡선균열을 n 개의 직선요소로 나누고 n+1개의 각 절점에서 전위밀도함수를 계산하면 균열선단에서의 응력강도계수를 구할 수 있다.

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

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

$$K_{II} = (2\pi)^{3/2} \sqrt{l} [(D_1)_c \sin\alpha - (D_2)_c \cos\alpha] \quad (1)$$

여기서 D_1 과 D_2 는 균열선단 요소의 두 절점에서의 전위밀도함수 값이며 하첨자 c 는 균열선단임을 나타내고 l 은 균열 선단이 속한 균열요소의 길이이다.

2.3 균열성장 해석방법

본 논문에서는 이종금속용접부에서 균열의 성장을 계산할 수 있도록 기존 FEAM에 피로해석 모듈을 작성하여 추가하였다. 용접잔류응력 분포 하에서 균열성장을 구하기 위해 사용한 식은 다음과 같다.

$$da/dt = C K^n \quad (2)$$

여기서 K 는 응력강도계수이며, da/dt 는 균열성장속도이다. 본 논문에서 용접부로 가정한 재료인 Alloy182의 경우 $C=1.5 \times 10^{-12}$, $n=1.6$ 이다³⁾. 식 (2)에서 균열성장속도의 단위는 m/sec를, 응력강도계수의 단위는 $MPa \sqrt{m}$ 이다.

복합모드에서의 균열의 성장은 최대 주응력 방향으로 된다고 가정하였으며 이때 균열의 성장방향 θ_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$K_I \sin\theta_m + K_{II}(3\cos\theta_m - 1) = 0 \quad (3)$$

여기서 K_I 과 K_{II} 는 각각 모드 I과 모드 II 응력강도계수를 나타낸다. 그리고 식(2)에서 K 를 구할 때에는 다음과 같은 등가 응력강도계수($K_I)_{eq}$)를 사용하였다:

$$(K_I)_{eq} = K_I \cos^3 \frac{\theta_m}{2} - 3K_{II} \cos^2 \frac{\theta_m}{2} \sin \frac{\theta_m}{2} \quad (4)$$

균열의 성장은 식 (2)와 식 (3)으로부터 일정 길이의 균열증분에 대하여 균열성장 시간과 균열성장 경로를 계산할 수 있도록 작성하였다.

3. 용접잔류응력 해석

3.1 유한요소해석 모델 및 해석 방법

노즐에서 이종금속용접부의 용접잔류응력 분포를 계산하기 위하여 축대칭 유한요소해석모델을 작성하고 용접열전달 해석과 열응력해석을 수행하였다. 유한요소해석 모델의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 노즐은 원자력

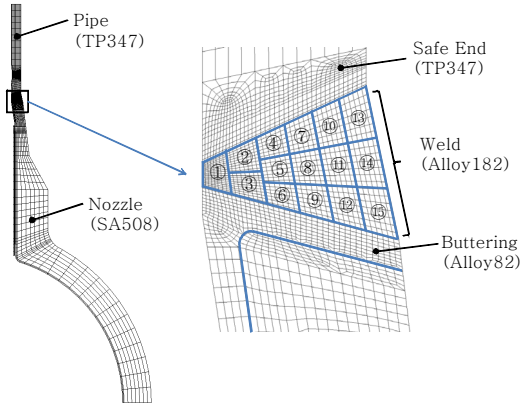


Fig. 1 FE mesh and weld pass-profiles

발전소의 한 노즐을 선정하여 실제 치수를 사용하였다. 노즐의 소재는 SA-508이며, 이종금속용접부는 Alloy 182, 버터링부는 Alloy 82, 안전단은 TP 347 스테인리스강으로 이루어져 있다. 이종금속용접부의 내경은 257.302 mm이며 안전단(safe end)의 두께는 35.687 mm 이다. 이종금속용접부의 용접패스는 Fig. 1에 나타낸 순서로 적층하여 총 15 패스로 하였다. 버터링부는 미리 용접되었고 잔류응력이 없는 상태로 가정하였다.

유한요소해석은 ABAQUS V6.5¹⁵⁾를 사용하여 천이 열전달해석과 응력해석을 순차적으로 수행하였다. 먼저 열전달해석을 수행하여 절점온도를 계산하고, 계산된 절점온도를 입력하여 열응력 구조해석을 수행하였다. 원자력 발전소의 실제 노즐 모델을 사용하였으므로 노즐이 용접 제작되어 수압시험을 거쳐 실제 환경에서 사용되는 온도와 압력 조건을 해석에 포함시켰다.

열전달해석에서는 용접열전달, 수압시험조건, 가열가압 후 정상상태 운전조건의 온도 및 열적 경계조건을 고려하였으며, 응력해석에서는 열전달해석의 각 단계에서 열응력, 내압 및 변위 구속조건을 고려하였다. 용접패스의 적층은 ABAQUS에서 제공하는 요소 Remove/Add 명령어를 사용하여 구현하였다.

용접열전달 해석에서 사용된 온도변화에 따른 밀도, 열전도도, 비열 물성치와 응력해석에 사용된 온도변화에 따른 탄성계수, 열팽창계수, 응력-변형률곡선 데이터는 ASME B&PV Code Section II, Part D¹⁶⁾ 및 참고문헌 17, 18의 데이터를 참조하였다. 유한요소해석에서 Alloy 82의 경우 Alloy 182와 동일한 재료물성치를 사용하였다.

열전달해석 동안 모델의 공기와 맞닿은 표면에서는 대기로 대류열전달이 발생한다. 유한요소해석 모델에서는 온도가 21.1℃ 인 공기중으로 자연대류에 의한 냉

각이 일정하게 일어나는 것으로 가정하여 열전달계수 28.37 W/m²-℃를 균일하게 적용하였다. 열용입이 되는 용접비드의 경우 용접부에서 모재로의 열전도가 우세한 것으로 가정하여 용접비드 표면에서의 대류열전달에 의한 냉각은 고려하지 않았다. 수압시험 시 물의 온도는 21.1℃로 가정하였으며 모델의 외면은 공기와 접촉하고 있다고 가정하였다. 정상운전 시에는 노즐 내면에 온도와 유량의 변화에 따른 열전달 계수 및 내압을 적용하였고, 외면에는 보온재로 싸여 있다고 가정하여 단열조건을 적용하였다.

용접과정에서 열용입된 Alloy 82/182 용접부는 짧은 시간에 급격히 온도가 상승하여 약 1650~1925℃ 까지 상승하며 용융부 바로 근처의 열영향부에서는 약 1090℃ 정도인 것으로 알려져 있다¹⁾. 따라서 본 해석에서는 이러한 온도를 얻을 수 있도록 전압을 22~30V, 전류를 80~190A, 용접속도는 10~22cm/min으로 조절하여 다음 식으로부터 계산하여 입력하였다.

$$q = \frac{\eta VI}{SH} \tag{5}$$

여기서 V는 전압(Volt), I는 전류(A), η는 효율을 의미한다. S는 용접비드 단면적(mm²), H는 두께를 의미한다. Fig. 2와 같이 시간에 따른 열유속 함수로 나타낸 열공급량을 고려하면, 시간 t₁, t₂, t₃는 다음과 같이 구해진다.

$$t_1 = 0.1t_2, \quad t_2 = 1/v, \quad t_3 = t_2 + 0.1t_2 \tag{6}$$

여기서 v는 용접속도이다. 효율 η=0.8~0.9를 적용하고, 열유속과 열용입 시간은 DFULX user 서브루틴을 작성하여 구현하였다. 열량이 가해질 때 비드 주위의 고온에 의한 상변태(용융)는 용융점 근처에서 잠열(latent heat)을 고려하여 조정하였다.

응력해석 시에는 Fig. 1의 최 하단부에서 축방향 변

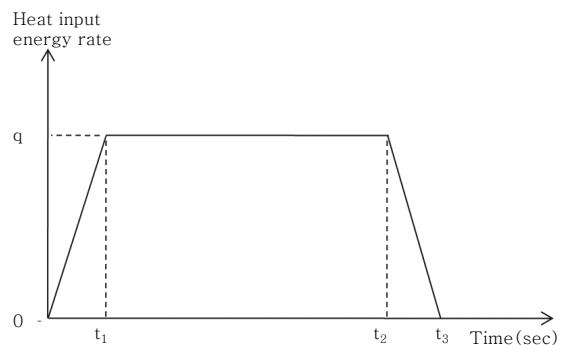


Fig. 2 Heat input model

위를 고정하였고, 최 상단부에서 축방향으로 동일한 변위를 갖도록 구속(축방향 변위 coupling) 조건을 부여하였다.

3.2 잔류응력 해석 결과

유한요소해석 결과, 최종 정상운전상태에서의 잔류응력 분포를 구하였다. Fig. 3은 이중금속용접부와 그 주변의 축방향 및 원주방향 최종 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 용접부의 축방향응력 분포는 내면에서 외면으로 두께를 따라 인장-압축-인장의 분포를 나타내었다. 그림에서 응력의 단위는 psi 이다.

용접잔류응력 해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 노즐 내면의 가장 큰 축방향 인장응력이 발생하는 위치에서부터 외면까지 두께방향의 직선 경로를 설정하였다. Fig. 5는 설정된 경로를 따라 응력을 계산하여 ASME 식¹⁹⁾과 비교한 것이다. Fig. 5에서 ASME 식과 경향은 일치하나 값이 다른 것은 ASME 식의 경우 노즐과 안전단의 용접만 고려된 반면, 본 해석에서는 안전단과 분지관의 동중금속용접부가 유한요소해석에 포함되었기 때문이다. 최근 국내 라운드로빈 해석 결과¹⁷⁾에 의하면 동중금속용접을 고려하는 경우 Fig. 5와 같은 결과가 얻어짐이 확인되었다. 따라서 본 해석 결과를 사용하여 균열성장 계산을 수행하였다.

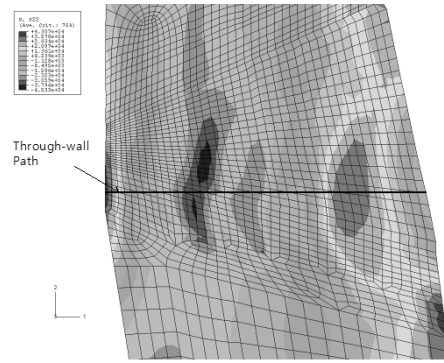


Fig. 4 Through-wall path

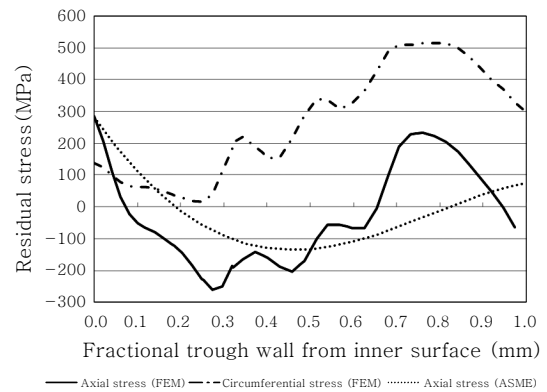


Fig. 5 Stress distribution along through-wall path shown in Fig. 4

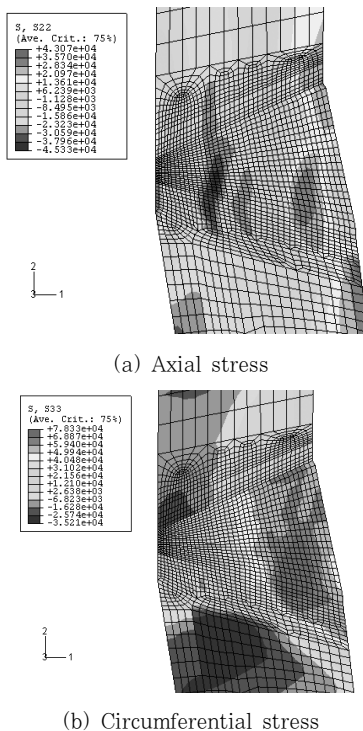


Fig. 3 Final stress distribution

4. 균열성장평가

용접 잔류응력장에서의 균열성장 계산을 위한 FEAM의 피로해석부는 다음과 같이 작성하였다.

- 1) ABAQUS 유한요소해석 모델의 절점 및 요소정보를 FEAM에 입력한다. FEAM은 ABAQUS 와 동일한 유한요소모델을 사용한다. 이 모델에는 균열이 포함되어 있지 않다.
- 2) ABAQUS 해석 결과로부터 각 요소별 적분점에서 응력값을 FEAM으로 읽어들이는다.
- 3) FEAM의 유한요소모델에 초기균열을 삽입한다. 초기균열은 절점번호와 절점좌표 및 절점들을 잇는 소데이터로 입력한다.
- 4) 유한요소모델의 요소들 중 균열이 위치한 요소를 찾아 요소 적분점에서의 응력값으로부터 최소자승법을 이용하여 균열요소 적분점에서의 응력값을 구한다.
- 5) 균열요소 응력값을 적분하여 균열면에서의 합력을 계산하고 FEAM의 균열 이론해를 풀어 식 (1)로부터 응력강도계수를 계산한다.
- 6) 응력강도계수와 균열 절점좌표를 이용하여 식 (3)

으로부터 균열 진전각을 계산하고, 식 (2)로부터 균열 진전 증분량을 계산하여 새로운 균열선단 절점좌표를 계산한다.

7) 새 균열선단 절점좌표를 3)의 균열요소에 추가하여 새로운 균열요소를 생성한다.

8) 최종 균열길이가 될 때 까지 위 4) ~ 7)을 반복한다.

구성된 FEAM 피로해석부를 검증하기 위하여 Fig. 6과 같이 집중하중으로 인해 굽힘모멘트가 작용하고 있는 세 개의 리벳구멍이 있는 보에 에지균열이 존재하는 경우에 대하여 균열성장계적을 구하였다. 시편에는 반경이 12.7mm인 세 개의 구멍이 있으며 초기균열의 위치가 $b=25.4\text{mm}$ 인 경우에 대하여 해석하였다. 시편의 재료는 탄성계수와 푸아송비가 각각 2.76GPa 와 0.38 인 PMMA 이다. 이 예제에서 사용된 균열성장률 식은 식 (2)의 좌변을 da/dN (한 사이클 당 균열길이 증분)으로 놓고, 균열길이의 단위를 m로, 응력강도계수의 단위를 $MPa\sqrt{m}$ 로 할 때 $C=6.3\times 10^{-9}$, $n=3$ 이다. Fig. 7은 해석에 사용된 유한요소 격자를 나타낸 것이며, Fig. 8은 FEAM해석결과를 Ingraffea 등²⁰⁾의 시험결과와 비교한 것이다.

상기 해석을 통하여 본 논문에서 작성한 FEAM 피로해석부의 정확성이 검증되었다. 다음으로 3.2절의 이중금속용접부 잔류응력장에서의 균열의 성장을 해석하였다. 노즐에서는 원주방향 및 반경방향의 균열은 성장하면 누설이나 파단과 같은 심각한 사고로 이어질 수

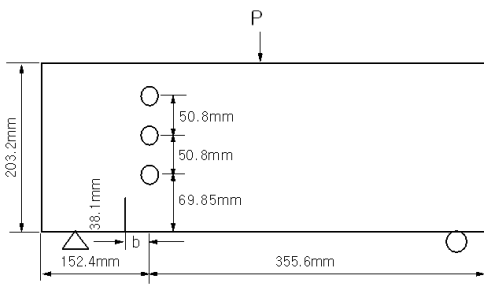


Fig. 6 Schematic of cracked beam with holes

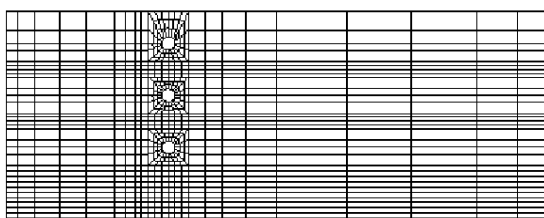


Fig. 7 Finite element mesh for beam with holes

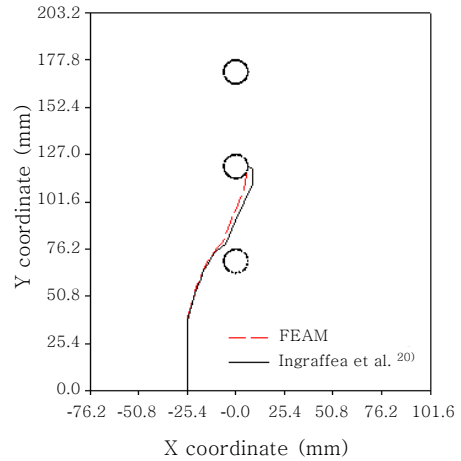


Fig. 8 Simulated and experimental crack growth trajectories when $b=25.4\text{mm}$

있다.

따라서 본 논문에서는 용접부에서의 반경방향으로 성장하는 균열을 고려하였다. 원주방향으로는 축대칭을 가정하였으므로 360도 균열로 가정하였다. 이중금속용접부에서 균열은 모재부인 탄소강 노즐이나 스테인리스강 안전단에서 보다 버터링부와 용접부의 Alloy82/182 소재에서 훨씬 잘 발생하므로 버터링부와 용접부의 내면에만 초기균열이 존재한다고 가정하였다. 초기 균열은 Fig. 9에서와 같이 노즐 내면으로부터 약 2.05mm 깊이의 균열을 버터링부(A)와 용접부(B)에 각각 하나씩 삽입하였다. Fig. 9에서 내면 쪽 공간에 위치한 균열 부분은 FEAM의 정확도 향상을 위하여 삽입한 가상균열 부분으로 FEAM 내부에서 응력강도계수가 0 으로 계산된다. 초기균열 이후의 곡선은 FEAM을 이용하여 계산한 균열의 성장계적을 나타낸 것이다.

Fig. 10과 11은 각각 초기균열의 위치가 (A)인 경우와 (B)인 경우에 대하여 균열의 진전에 따른 응력강도계수를 나타낸 것이다. 여기서 수평축 은 균열의 성장에 따른 반경방향의 좌표값을 나타낸 것이다. 잔류응

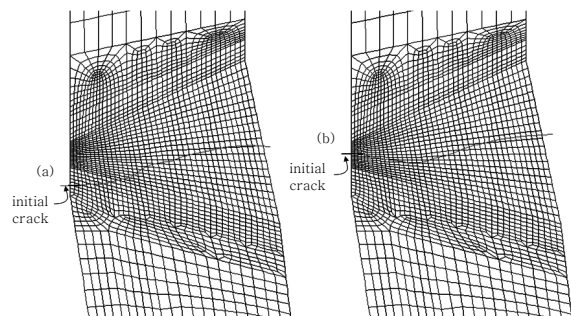


Fig. 9 Simulated crack growth trajectories

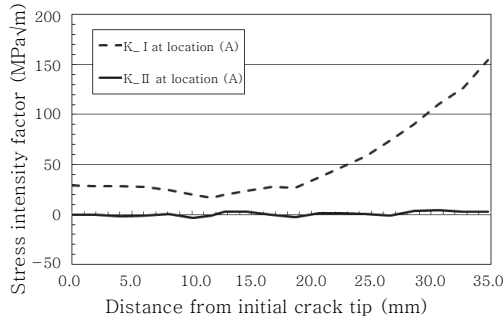


Fig. 10 Crack tip stress intensity factors along the crack (A) trajectory

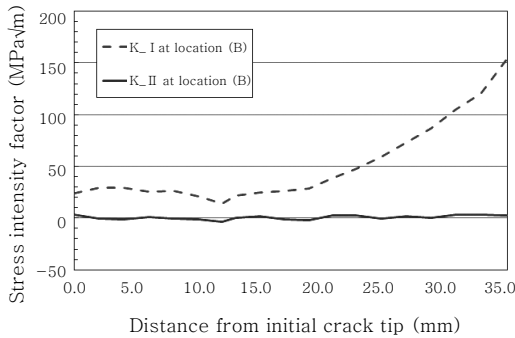


Fig. 11 Crack tip stress intensity factors along the crack (B) trajectory

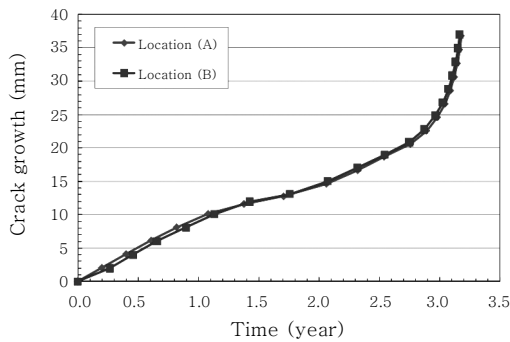


Fig. 12 Predicted crack growth versus time curve

력장의 응력은 균열을 벌리는 방향(모드 I)과 균열이 미끄러지는 방향(모드 II)의 응력이 혼합되어 있다. 따라서 균열 성장에 따른 균열선단의 방향각이 식 (3)에 의하여 계산되므로 구불구불한 경로를 나타내며, 구불구불한 균열 형상으로부터 모드 II 응력강도계수가 0이 되는 방향으로 진전하려는 경향을 가짐을 알 수 있다. 균열이 진전하여 크기가 커지면 잔단면적이 감소하므로 균열선단의 모드 I 응력강도계수는 급격히 증가함을 볼 수 있다. Fig. 12는 시간에 따른 두 균열의 균열성장 깊이(반경방향)를 나타낸 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 노즐의 이중금속용접부의 잔류응력장 내에 존재하는 균열평가를 위하여 수치해석적인 방법을 개발하여 적용하였다. 이를 위하여 FEAM에 피로해석 부를 작성하여 자동으로 균열의 성장을 모사할 수 있도록 하였다. 예제 해석을 통하여 개발된 FEAM 피로해석부가 응력강도계수를 정확하게 계산하고 혼합모드 하에서 균열의 성장경로를 정확하게 예측하는 것을 확인하였다. 따라서 노즐 용접부의 축대칭 유한요소모델을 작성하여 용접잔류응력해석을 수행하고, 계산된 잔류응력장에서 Alloy 82/182 이중금속용접부의 균열성장속도식을 적용하여 노즐에서 균열의 위치에 따른 균열성장경로를 계산하고 응력강도계수의 변화를 구하였다. 본 논문에서 개발된 FEAM 피로해석부는 축대칭 모델로 작성된 유한요소 용접잔류응력 해석결과로부터 용접부의 균열성장을 평가하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

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, Journal of the KWS, **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, Journal of the KWS, **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, Journal of the KWS, **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 Welding Society Precision Engineering*, **11-4** (1994), 47-52 (in Korean)
9. P. Dong and F.W. Brust : Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium Review and Beyond, *Journal of Pressure Vessel Technology*, **122** (2000), 329-338
10. F.W. Brust, P. Dong and J. Zhang : Influence of Residual Stresses and Weld Repairs on Pipe Fracture, *ASME PVP*, **347** (1997), 173-191
11. P. Dong, J. Zhang and G. Rawls : Crack Growth Behavior in Residual Stress Field in Vessel Type Structures, *WRSC-MS- 2003-00113* (2003)
12. S.N. Atluri : *Computational Methods in the Mechanics of Fracture*, Amsterdam, North Holland, 1986
13. 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
14. 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
15. ABAQUS/Standard Version 6.5, HK&S Inc (1997)
16. ASME Boiler & Pressure Vessel Committee : *ASME B&PV Code, Sec. II, Part D, Properties* (2001)
17. Tae-Kwang Song, et. al. : Results and analyses for simulational round robin on welding residual stress prediction in nuclear power plant nozzle, 2008 KSME Autumn Conference, KSME, 2008 (in Korean)
18. KEPRI-94Z-J12, Development of A Crack Growth Analysis Program for Reactor Vessel Head Penetration, KEPRI, 1996 (in Korean)
19. Section XI Task Group for Piping Flaw Evaluation of ASME Code : Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping, *Transactions of the ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, **108** (1986), 352-366
20. A.R. Ingraffea, M.D. Grigoriu and D.V. Swenson : Representation and Probability Issues in the Simulation of Multi-Site Damage, in *Structural Integrity of Aging Airplanes*, Springer-Verlag, Berlin (199), 183-197