

## 외면 보수 용접이 원전 고온관 밀림노즐에서의 결함성장에 미치는 영향

나 경 환<sup>\*,†</sup> · 윤 은 섭<sup>\*</sup> · 박 영 섭<sup>\*</sup>

\*한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

### Effects of Outside Repair Welding on the Crack Growth in the Surge Nozzle Weld on the Hot Leg Side in a Nuclear Power Plant

Kyung-Hwan Na<sup>\*,†</sup>, Eunsub Yun<sup>\*</sup> and Young Sheop Park<sup>\*</sup>

\*Nuclear Engineering & Technology Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Daejeon 305-343, Korea

†Corresponding author : cylomon@khnp.co.kr

(Received November 5, 2010 ; Revised January 3, 2011 ; Accepted March 23, 2011)

#### Abstract

Nickel-based austenitic alloys such as Alloy 82 and 182 had been employed as the weld metals in nuclear power plants (NPPs) due to their high corrosion resistance as well as good mechanical properties. However, since the 2000s, the occurrence of primary water stress corrosion cracking has been reported in conjunction with these alloys in domestic and overseas NPPs. In the present work, we assumed an imaginary crack at the inner surface of a surge nozzle weld that had previously experienced the outside repair welding, and constructed its finite element model. Finite element analysis was performed with respect to the heat transfer, and then to the residual stress for obtaining the total applied stress distributions. These stress distributions were finally converted to the stress intensity factors for estimating crack growth rate. From the comparison of crack growth rate curves for the cases of no repair welding and outside repair welding, it was found that the outside repair welding did not exhibit negative effect on the crack growth for the surge nozzle under consideration in this work; in both cases, the cracks stopped growing before they became the through-wall cracks.

Key Words : Dissimilar metal weld, Repair welding, PWSCC, Alloy 82/182

#### 1. 서 론

원자력발전소의 1차 계통은 압력경계의 건전성이 안전성 측면에서 매우 중요하기 때문에 탄소강 배관 및 노즐 내면에 내부식성 재료인 스테인리스강으로 피복처리하거나, 배관 자체를 스테인리스강으로 제작하기도 한다. 특히 탄소강과 스테인리스강 사이에는 용접성이 좋지 않기 때문에 용접재로 니켈계 오스테나이트 합금인 Alloy 82/182가 과거에 국내 원전에 널리 사용되었는데 그 이유는 이 용접재가 좋은 기계적 특성 이외에도 우수한 내부식성을 가지고 있다고 알려져 있었기 때문이다.

그러나 2000년도 이후에 해외 원전에서 이들 용접

부위에서 일차수응력부식균열(primary water stress corrosion cracking : PWSCC) 사례가 보고되어 원자로냉각재계통의 구조적 건전성 측면에서 이들 재료에서 발생한 PWSCC에 대한 관심이 증가하였으며 관련된 연구가 USNRC, EPRI 등에서 수행되었다<sup>1-3)</sup>. 또한 국내에서도 유사하게 용접부의 균열에 실험적 방법이나 해석적 방법을 적용하여 연구를 수행한 사례가 있었다<sup>4-7)</sup>. 이처럼 PWSCC는 경제적인 관점에서 관심을 받고 있는 원전의 계속운전 및 장기운전 추진에 잠재적인 걸림돌이 될 수 있는 주요한 재료열화 현안 중의 하나로 인식되고 있다.

일반적으로 PWSCC를 야기하는 주요 인자로는 재료, 환경, 인장응력의 3가지로 알려져 있는데 발전소 가동 중에 재료 및 환경에 큰 변화가 없다고 가정하면

인장응력의 존재 여부가 PWSCC 발생에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 인장응력의 크기는 대상 기기의 크기 및 형상 등에 영향을 받기 때문에 관심 대상 부위에 대한 정확한 인장응력분포 계산이 PWSCC의 균열성장평가에 필수적이다.

일반적으로 보수용접이력이 있는 부위는 용접에 의한 잔류응력의 존재 가능성 때문에 PWSCC에 취약하다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 원자로냉각재계통 고온관 측 밀림노즐 이중금속 맞대기 용접부에 외면보수용접을 가상하여 유한요소해석(finite element analysis : FEA)을 수행하여 보수용접을 하지 않은 경우와 서로 비교함으로써 외면 보수용접이 PWSCC 균열성장에 미치는 영향을 평가해보고자 한다.

## 2. 평가 방법

본 연구에서는 용접에 따른 열전달해석과 열응력 구조해석을 유한요소해석방법을 이용하여 수행하여 용접 잔류응력분포를 우선 계산하였다. 여기에 자중(dead weight) 및 열성층 하중(thermal stratification)에 의한 응력 등의 운전하중을 선형 중첩하여 총응력분포(total stress distribution)를 구하였다. 계산된 총응력분포 하에서 초기가상균열을 가정하여 균열 선단에서의 응력강도계수(stress intensity factor)를 계산하고 이를 최근의 PWSCC 균열성장속도식인 MRP-115식<sup>8)</sup>에 대입하여 균열증분 및 소요시간을 계산함으로써 PWSCC 전파의 결과로 파괴에까지 걸리는 시간을 예측하였다. 전체적인 평가 순서는 다음과 같으며 EPRI에서 개발한 방법<sup>1,2,9)</sup>을 참고로 하였다.

- 1) 용접잔류응력 해석
- 2) 총응력분포 계산
- 3) PWSCC 균열성장 해석

### 2.1 용접잔류응력 해석

유한요소해석을 통하여 용접잔류응력을 계산하고자 EPRI 보고서 및 최근의 용접잔류응력해석에 관한 논문<sup>1,2,9-14)</sup>들을 참고하였다. 고온관 측 밀림노즐 부위의 형상은 Fig. 1과 같다. 이에 대한 유한요소 격자 형상을 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2에서 SMW는 동종금속용접(similar metal weld)을, DMW는 이종금속용접(dissimilar metal weld)을 의미한다. ABAQUS 프로그램을 이용하여 2차원 축대칭 4-절점 열전달요소(DCAX4) 및 연속체요소(CAX4)를 사용하여 유한요소 격자를 구성하였으며 총 요소수는 4685개, 총 절점수는 4882개이다. Fig. 3은 용접부의 패스 형상 및 비

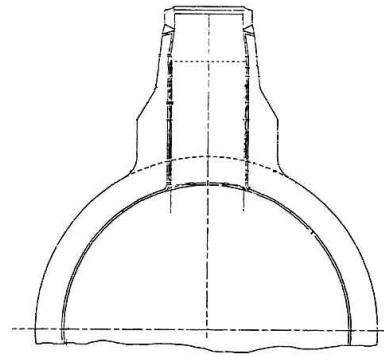


Fig. 1 Typical surge nozzle on the hot leg side

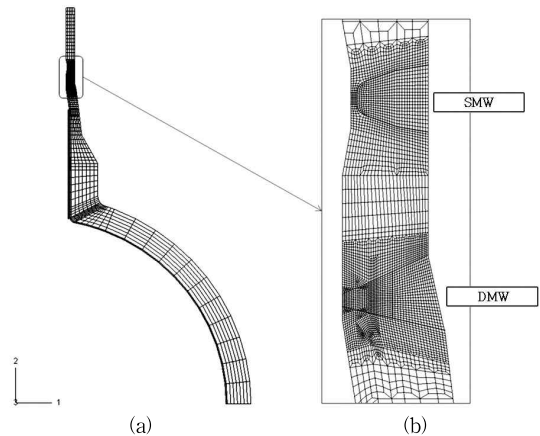


Fig. 2 Modeling of butt weld area : (a) finite element mesh for the nozzle, (b) detailed configuration for the weld area

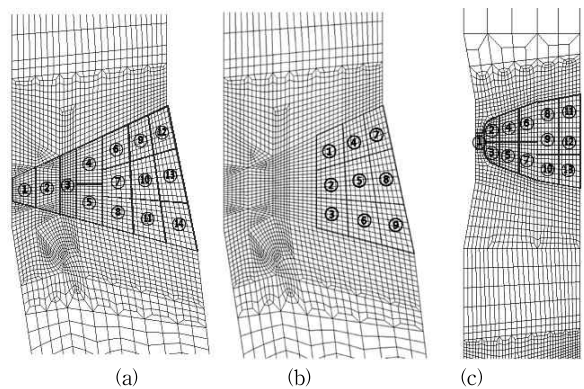


Fig. 3 Modeling of weld area : (a) DMW area, (b) OD repair weld area, (c) SMW area

드 용입 순서를 나타내었다. Fig. 3 (b)에서의 OD repair는 외면보수(outside diameter repair)를 의미한다.

냉각재 계통배관의 재질은 SA-508 Cl.1A이고, 노즐은 SA-182 Gr.F1, 이종금속 용접부와 동종금속 용접

부 사이의 안전단과 밀림관의 재질은 SA-312 TP316 이며, 탄소강배관의 내면 피복 부위는 SA-182 F347 이다.

유한요소해석에 사용한 재료 물성치는 ASME B&PV Code Sec. II, 제작사 자료 및 기존연구결과들<sup>15,16</sup>로부터 활용하였다.

### 2.2 총응력분포 계산

운전하중에는 자중, 선형 열팽창 및 열성층에 의한 하중 등이 있다. 이들 운전하중 중 선형열팽창에 대한 하중은 유한요소해석에서 이미 고려하였으므로 유한요소해석으로부터 얻은 잔류응력분포에 설계문서에서 제시된 자중과 열성층 하중을 선형중첩하여 총 응력분포를 구하였다.

용접잔류응력의 경우 정확한 예측을 위하여 용접, 수압시험 및 정상운전조건을 고려하여 다음과 같은 순서로 유한요소해석을 수행 하였으며, 열전달 해석과 열응력 해석으로 나누어서 수행하였다.

- 1) 노즐과 안전단 사이의 이중금속용접 모사
- 2) 보수용접 모사
- 3) 안전단과 배관사이의 동종금속용접 모사
- 4) 수압시험
- 5) 정상운전조건

안전단과 배관 사이의 동종금속용접은 이중금속용접 이후에 진행되는 절차로 비록 동종금속용접부가 위치상으로는 이중금속용접부와 조금 떨어져 있다라도 동종금속용접에 의하여 기존의 이중금속용접부가 열적 영향을 받을 수 있기 때문에 이를 유한요소해석에 고려하였다. 용접과 관련된 해석은 용접비드 생성을 모사하기 위해 모든 비드에 해당하는 요소를 비활성화 시킨 후 다시 비드에 해당하는 부분을 순차적으로 활성화 시키는 방법을 이용하여 열용입을 모사하였다. 열용입은 DFLUX 서브루틴을 작성하여 구현하였으며, 이때 용접부의 최대 온도 및 주변 금속의 온도는 EPRI 연구결과<sup>1)</sup>를 적용하여 실제 측정값에 유사하도록 해석을 수행하였다. 보수용접의 경우에는 보수용접에 해당하는 부위를 다시 비활성화 시킨 후 위와 동일한 방법으로 비드에 해당하는 부분을 순차적으로 활성화 시키면서 다시 한 번 열용입을 모사하였다.

공장 및 현장에서 각각 수행하는 수압시험은 해당 온도 및 압력을 적정시간 동안 유지시켰다가 감소시키는 방법을 적용하였다. 정상운전 조건은 대상 부위의 설계값을 사용하였으며, 두 번의 발전소 기동과 정지를 모사한 후 세 번째 기동 이후 정상운전 조건을 유지할 때까지를 응력계산에 고려하였다.

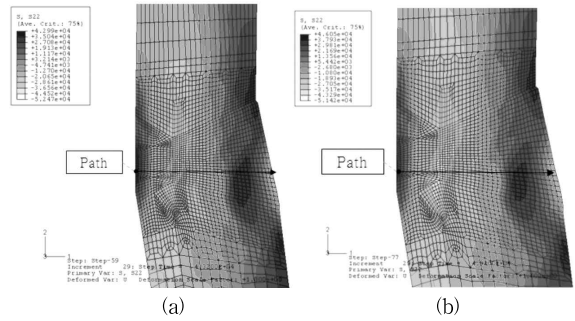


Fig. 4 Residual axial stress profile : (a) No repair weld case, (b) OD repair weld case

### 2.3 PWSCC 균열성장 해석

2.2절에서 계산된 용접부의 두께방향 최종 응력분포를 사용하여 우선 응력강도계수(K)를 계산하였으며 이를 기초로 하여 PWSCC 균열성장 해석을 수행하였다. 응력강도계수를 계산하기 위해 다음과 같은 R6 Code Rev. 4 식<sup>17)</sup>을 사용하였다.

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left( \sum_{i=0}^3 \sigma_i f_i \left( \frac{a}{t}, \frac{2c}{a}, \frac{R_i}{t} \right) + \sigma_{bg} f_{bg} \left( \frac{a}{t}, \frac{2c}{a}, \frac{R_i}{t} \right) \right) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_i$ 는 다음 식 (2)와 같이 최대칭 응력분포로 정의되는 응력성분이다.

$$\sigma = \sigma(u) = \sum_{i=0}^3 \sigma_i \left( \frac{u}{a} \right)^i \quad \text{for } 0 \leq u \leq a \quad (2)$$

또한  $\sigma_{bg}$ 는 전역굽힘응력(global bending stress)으로서 외경부의 축방향 최대굽힘응력,  $u$ 는 내면으로부터 반경 방향으로의 거리,  $f_i$  및  $f_{bg}$ 는 R6 Code Rev. 4에 값이 테이블로 제시된 형상함수이다.

균열성장 해석 시에는 이중금속용접부 내면에 두께의 4%에 해당하는 깊이의 초기 가상균열을 가정하였으며, 균열의 원주방향 표면길이 대 두께방향 깊이 비가 6:1인 원주방향 반타원 표면 균열 형태로 가정하였다. 또한 균열이 두께의 75%까지 성장하는 경우 관통된 것으로 가정하였다.

축방향 균열의 경우 이중금속용접부와 모재의 경계에서 성장을 멈추기 때문에 건전성에 미치는 영향이 미미하다고 판단되어 본 연구에서는 원주방향 균열에 대한 성장평가만을 수행하였다. 응력강도계수로부터 균열성장속도를 계산하기 위하여 EPRI MRP-115 보고서에서 제시하는 다음의 Alloy 82/182 재질에 대한 PWSCC

균열성장 식을 사용하였다<sup>8)</sup>.

$$CGR(inch/hr) = 2.47 \times 10^{-7} K^{1.6} (K : ksi\sqrt{in}) \quad (3)$$

### 3. 평가 결과

#### 3.1 응력 분포

원주방향 균열 평가를 위하여 계산한 축방향 잔류응력분포를 Fig. 4에 나타내었다. PWSCC가 발생할 수 있는 지점인 Alloy 82/182 재질 부위는 이중금속용접부와 버터링 부위이므로 Figs. 5, 6과 같이 배관 내면을 따라 잔류응력 분포를 구한 후, 이중금속용접부 및 버터링 부위 중 인장응력이 높은 부위를 Fig. 4와 같이 선정하여, 이 위치에서 PWSCC가 발생한다고 가정하였다.

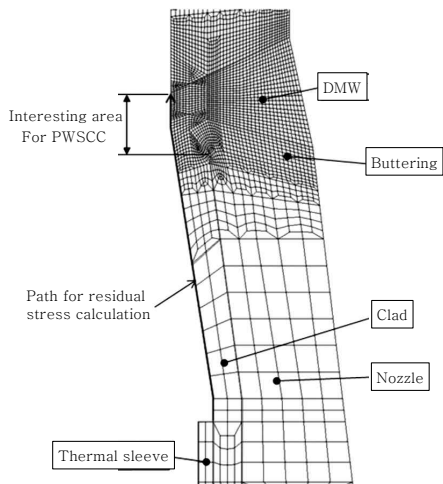


Fig. 5 Path for residual stress calculation

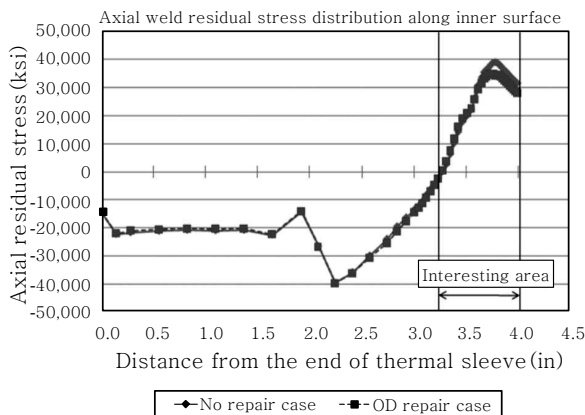
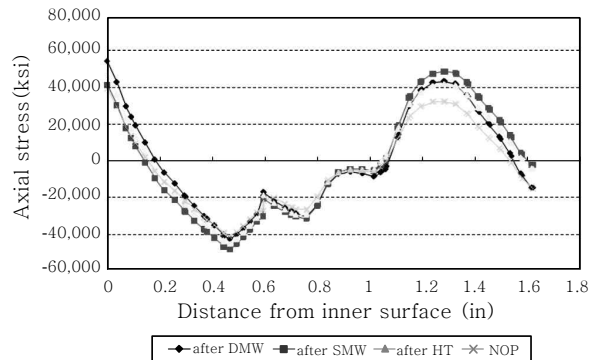


Fig. 6 Residual axial stress distribution along inner surface

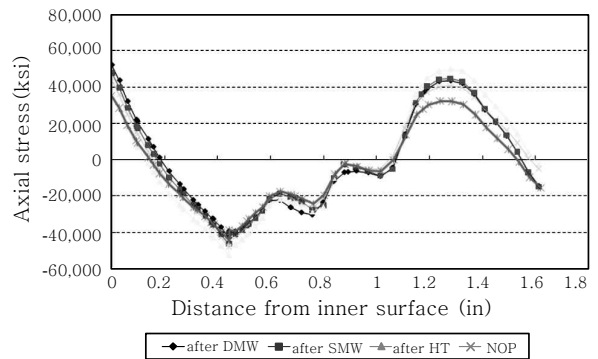
이 위치에서 두께방향으로 이중금속용접, 외면보수용접, 동중금속용접, 수압시험(hydrostatic test : HT), 정상운전조건(normal operating pressure : NOP) 순서에 따라 잔류응력분포의 변화 추이를 Fig. 7에 나타내었다. 보수용접하지 않은 경우와 외면 보수용접한 경우 모두 대체적으로 배관 내면에서는 인장응력이 작용을 하고, 두께방향으로 갈수록 인장응력은 압축응력으로 바뀌게 되며, 외부 표면에 가까워지면 다시 일차적으로 인장응력으로 바뀌게 됨을 알 수 있다. 보수용접을 하지 않은 경우와 외면 보수용접한 경우를 서로 비교해 본 결과 전체적인 응력분포는 크게 변화하지 않은 것으로 나타났다.

총응력분포는 PWSCC균열성장평가 시 균열선단의 응력강도계수를 계산하는데 사용되는 최종응력분포값이다. 총응력분포를 구하기 위하여 자중(0.33 ksi) 및 열성층 하중(7.73 ksi)을 용접잔류응력에 선형중첩한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 또한 ASME에서는 오스테나이트강 배관 용접부에 대한 용접잔류응력분포 식을 제시하였는데 이를 Fig. 8 (a)에 실선으로 같이 나타내었다.

EPRI의 MRP보고서들에서 사용된 ASME 곡선과 본 유한요소해석을 통하여 구한 응력분포를 서로 비교

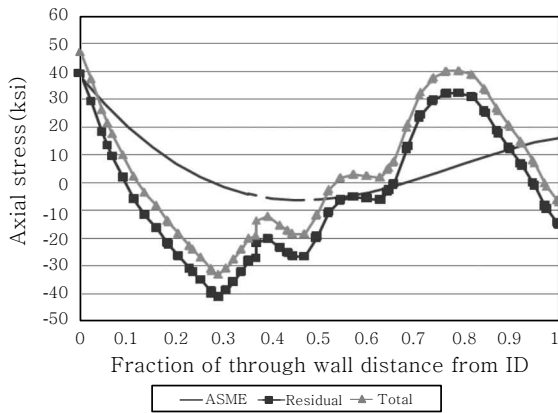


(a)

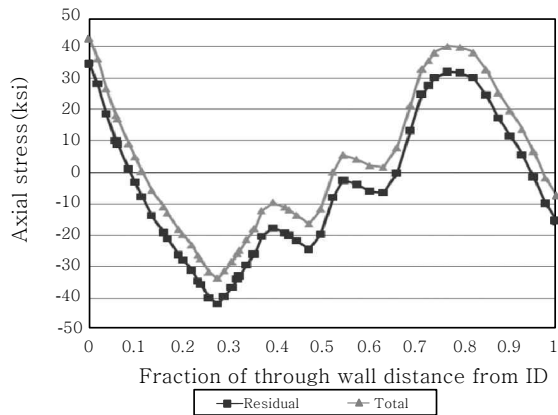


(b)

Fig. 7 Changes in residual axial stress in the thickness direction : (a) No repair weld case, (b) OD repair weld case



(a)



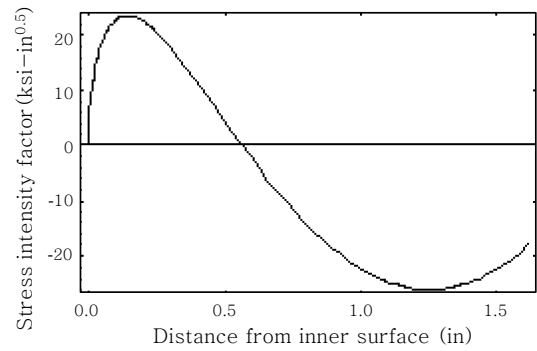
(b)

Fig. 8 Changes in total axial stress in the thickness direction : (a) No repair weld case, (b) OD repair weld case

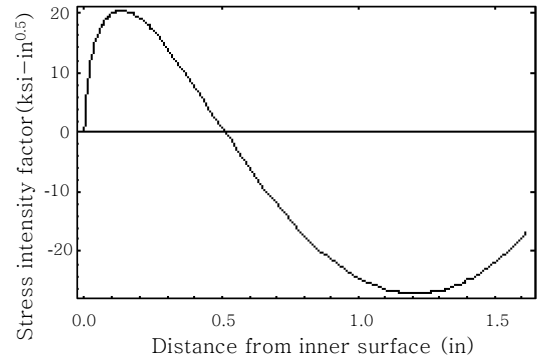
해보면 대체적으로 잔류응력분포 형태는 내면에서 외면으로 가면서 인장-압축-인장으로 유사한 경향을 나타냈으며 따라서 유한요소해석을 통한 잔류응력분포 평가가 비교적 타당하게 수행되었음을 확인할 수 있다.

### 3.2 가상균열 성장평가

Fig. 8의 축방향 최종응력분포를 바탕으로 가상 PWSCC 균열성장평가를 수행하였다. 2.3절에서 이미 언급한 바와 같이 응력강도계수를 계산하기 위하여 R6 Code Rev. 4 식<sup>17)</sup>을 사용하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 보수용접하지 않은 경우와 외면 보수용접한 경우 모두 배관 두께 방향의 축방향 총응력분포는 유사하였으며 이에 따라 응력강도계수의 변화 역시 유사하였다. MRP-115식을 사용하여 응력강도계수로부터 구한 균열성장 곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 보수용접하지 않은 경우와 외면 보수용접한 경우 모두 배관 두께 깊이 방향으로 각각 0.63 inch 및 0.57 inch 성장한 후 더 이상

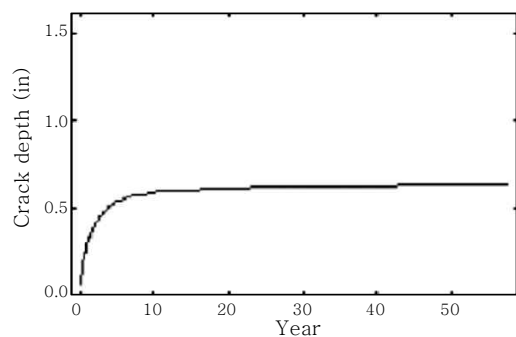


(a)

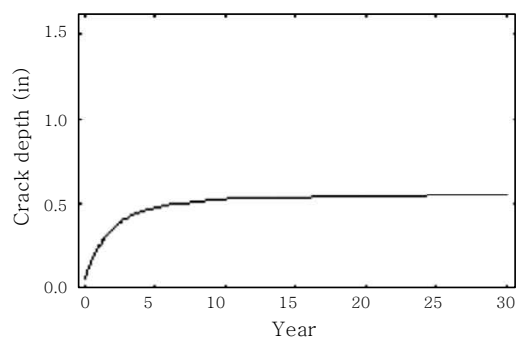


(b)

Fig. 9 Changes in stress intensity factor in the thickness direction : (a) No repair weld case, (b) OD repair weld case



(a)



(b)

Fig. 10 Changes in stress intensity factor in the thickness direction : (a) No repair weld case, (b) OD repair weld case

성장하지 않았는데 이는 배관 두께 중간부의 압축응력에 의하여 응력강도계수값이 음수가 되었기 때문이다.

#### 4. 결 론

Alloy 82/182 용접부에 대하여 보수용접하지 않은 경우와 외면 보수용접한 경우에 대하여 각각 용접, 시험 및 운전조건을 고려한 유한요소해석을 통해 잔류응력분포를 계산하였으며 최종적으로는 배관 두께의 4% 깊이의 원주방향 가상균열을 가정하여 일차수응력부식균열(PWSCC)에 대한 가상균열성장평가를 수행하였다.

보수용접하지 않은 경우와 외면 보수용접한 경우를 서로 비교해 본 결과 응력분포, 응력강도계수 및 균열 성장곡선에서 비슷한 양상을 보였다. 특히 두 경우 모두 초기 가상균열이 배관 두께의 일정 비율까지 성장하다가 더 이상 성장을 멈추었는데 이는 배관 두께 중간부의 압축응력에 의하여 균열성장의 구동력인 응력강도계수값이 음수가 되었기 때문이다. 한편 본 연구에서 고려한 이중금속용접부 외면 보수용접은 균열성장에 부정적인 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. Materials Reliability Program : Alloy 82/182 Pipe Butt Weld Safety Assessment for U.S. PWR Plant Designs(MRP-113), EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1009804
2. Materials Reliability Program : Evaluation of the Effect of Weld Repairs on Dissimilar Metal Butt Welds(MRP-114), EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1009559
3. USNRC : Regulatory Approach for PWSCC of Dissimilar Metal Welds in Pressurized Water Reactor Primary Coolant System Piping, Regulatory Issue Summary 2008-25, 2008
4. 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)
5. 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)

6. E. J. Park, E. J. Kim and S. H. Yoo : An Analysis of the Fatigue Crack Opening Behavior in the Welding Residual Stress Field by the Finite Element Method, Journal of the KWS, 21-6 (2003), 77-83 (in Korean)
7. S. C. Kim and M. W. Kim : Crack Growth Analysis of Dissimilar Metal Weld Using a Numerical Method, Journal of the KWS, 28-1 (2010), 100-106 (in Korean)
8. Materials Reliability Program : Crack Growth Rates for Evaluating Primary Water Stress Corrosion Cracking of Alloy 82, 182, and 132 Welds(MRP-115), EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1006696
9. Materials Reliability Program : Welding Residual and Operating Stresses in PWR Alloy 182 Butt Welds (MRP-106), EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1009378
10. Section XI Task Group for Piping Flaw Evaluation of ASME Code : Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 108 (1986), 352-366
11. Materials Reliability Program : Alloy 82/182 Pipe Butt Weld Safety Assessment for U. S. PWR Plant Designs: Westinghouse and CE Design Plants (MRP-109), EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1009804
12. Materials Reliability Program : Alloy 82/182 Pipe Butt Weld Safety Assessment for U. S. PWR Plant Designs: Babcock and Wilcox Design Plants (MRP-112), EPRI, Palo Alto, CA, 2004, 1009805
13. AREVA : Safety Evaluation of Alloy 82/182 Welds in LBB Applications, Document No. 51-5052759-00, 2005
14. Materials Reliability Program : Leak-Before-Break Evaluation for PWR Alloy 82/182 Welds (MRP-140), EPRI, Palo Alto, CA, 2005, 1011808
15. W.J. Mills, C. M. Brown : Fracture Toughness of Alloy 600 and RN82H Weld in Air Water, U.S. DOE, Contract DE-AC11-98PN38206, 1999
16. C. Jang : Spatial Variation of Mechanical Properties in Alloy 82/182 Dissimilar Metal Welds, Proceedings of 6th International Workshop on Integrity of Nuclear Components, 2006
17. BEGL and British Energy Generation (UK) Ltd. : Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects(Revision 4), 2003, Chapter IV.3.4.5, IV.3.29-IV.3.34