

원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐 용접부의 잔류응력 완화를 위한 연구

이승건, 김종성, 진태은 | 한국전력기술

1. 서 론

Alloy 600 계열 합금에서의 일차수응력부식균열(PWSCC)은 가동 원전의 건전성을 저하시킬 수 있는 주요 손상기구이다. 일반적으로 원전기기 제작시 예민화 방지를 위한 용접 후열처리를 수행하지 않기 때문에 봉산수 환경과 접하는 민감재질의 표면에서 발생하는 인장 잔류응력이 일차수응력부식균열의 주된 원인으로 알려져 있다. 2001년 미국 Oconee 2호기 및 3호기 원전의 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐(penetration nozzle) 용접부에서 발생한 냉각수 누출사고^[1]는 대표적인 일차수응력부식균열 발생사례로서, 이전까지 발생된 균열 형태와는 달리 노즐의 양단파단을 발생시킬 수 있는 원주방향 균열이었다. 또한 North Anna 2호기(2002년) 및 Crystal River 3호기(2003년)의 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐에서도 일차수응력부식균열로 인한 원주방향 균열이 발견되었다. 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐은 원자로의 반응도 제어를 위해 사용되는 제어봉을 보호하는 기능을 수행하며, J-그루브(groove) 형상이 가공된 원자로 상부헤드에 냉간박음 기법을 이용하여 끼워진 후 Alloy 82/182 재료로 용접된다. 참고로 Alloy 600 계열 합금인 Alloy 82/182 재료는 용접재료로 널리 사용되고 있으며 Alloy 600 재료와 물리적 특성이 거의 유사하나 Alloy 600보다 일차수응력부식균열에 더 민감한 것으로 보고되고 있다^[2]. 이 용접부분은 ASME Code Sec. III에 따라 열처리가 면제되므로 용접 후 상당 크기의 인장 잔류응력이 존재할 수 있으며 이때 봉산수 환경과 결합된다면 일차수응력부식균열을 발생시킬 필요충분조건을 만족하게 된다. 따라서 미국, 일본 등 해외 연구기관^[3,4]에서는 응력부식균열을 방지하기 위해 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐의 용접과정에서 발생하는 인장 잔류응력을 완화시킬 수 있는 다양한 방법을 고안하여 현장 적용 중에 있으나 국내의 경우 이와 유사한 작업이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 고에서는 일차수응력부식균열 예방을 위해 본 연구팀에서 개발한 인장 잔류응력 완화장치를 소개하고 개발된 장치의 사용 유효성을 입증하기 위해 유한요소해석을 수행하여 인장 잔류응력의 저감 정도를 정량적으로 평가하였다. 이때 실제 용접과정 및 운전 조건을 고려하여 관통노즐 용접부에서 발생하는 초기 인장 잔류응력의 크기를 확인하였고 완화장치의 적용시 균열성장에 미치는 영향을 확인하기 위해 ASME Code, Sec.XI, Code Case N694^[5]에 따른 균열성장평가를 수행하였다.

2. 잔류응력 완화장치

원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐에서 발생하는 응력부식균열을 방지하기 위해서는 용접시 발생하는 인장 잔류응력을 감소시켜야 한다. 현재 해외에서는 제작시 발생한 인장 잔류응력을 감소하기 위해 MSIP(Mechanical Stress Improvement Process), laser peening, cavitation peening, preventative overlay 등 다양한 방안을 고안하여 적용 중에 있다. 상기 방법들 중 MSIP는 미국 원자력규제기관(USNRC)의 승인을 받은 방법으로 상대적으로 간단하고 비용이 저렴한 이유로 1980년대 이후부터 비등경수형원전(BWR)의 가압기 분무노즐 등에 대해 적용되어 왔다. 참고로 MSIP는 부재 외면에 압축하중을 가하여 부재의 소성변형을 발생시켜 부재 내면에 압축응력을 발생시키는 방법이다(그림 1 참조).

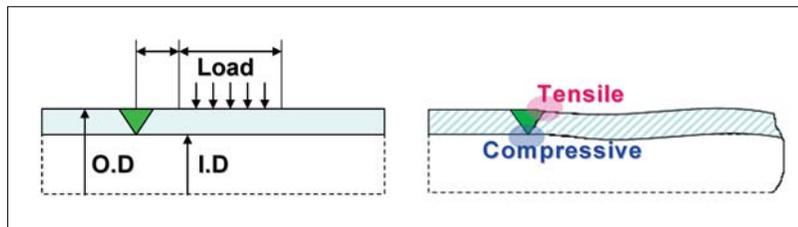


그림 1. MSIP 개념도

한편, 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐의 경우 형상의 제약으로 인해 MSIP 방법을 적용하기가 어렵다. 영국의 AEAT에서는 이러한 단점을 보완하여 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐 제작시 관통노즐에 봉을 삽입한 후 봉의 양쪽을 볼트 체결력을 이용하여 압축하중을 가하는 방법을 고안하였으나 이 방법을 적용하기 위해서는 관통노즐과 제어봉구동장치 하우징과의 연결을 분리시켜야 한다는 점, 인장 잔류응력이 작용하는 부분과 떨어져 있는 부분에 하중을 가하기 때문에 완화효과가 작다는 점, 경사진 관통노즐 용접부에 적용시 원주방향을 따라 원하는 크기의 하중을 가할 수 없다는 점 등의 단점이 발견되어 실제 적용이 이루어지지 않고 있다.

상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 연구팀에서는 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐에서 인장 잔류응력이 발생하는 부위에 기계적으로 압축하중을 직접적으로 가할 수 있는 방법을 그림 2와 같이 개발하였다. 관통노즐 외면에 압축하중을 부가하기 위해서는 그림 2의 (a) 장비를 사용하는데 볼트를 조이게 되면 조(jaw)가 화살표 방향으로 이동하면서 외면에 압축하중을 부가하게 된다. 관통노즐 내면에 압축하중을 부가하기 위해선 그림 2의 (b) 장비를 사용하며 노즐 내면에 압축하중을 부가하기 위해선 먼저 볼트를 조여 췌기 형태의 주축(rod)을 화살표 방향으로 이동시킨다. 이때 췌기 형태의 주축과 접해 있는 조(jaw)가 주축의 이동방향과 수직으로 움직이면서 노즐 내면에 압축하중을 부가하게 된다. 이들 조(jaw)는 탈부착이 가능하며 적용되는 기기의 기하학적 형상을 고려하여 형상을 다양화 시켰다. 또한 다양한 형태의 조(jaw)를 이용하여 노즐내면에서 인장 잔류응력 발생지점이 2곳인 경우에도 적용할 수 있도록 하였고 용접부가 경사진 경우 등에도 원하는 크기의 압축하중을 가할 수 있도록 장치를 개발하였다. 이외에 필요시 구동장치를 볼트 조임형 대신 유압형으로 대체할 수 있도록 고안하였다.

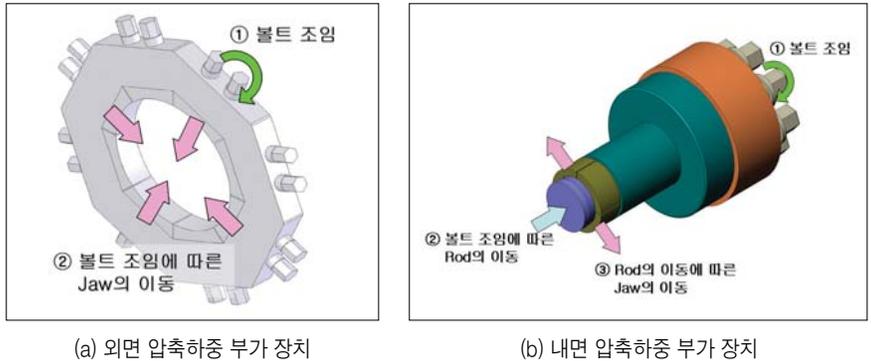


그림 2. 잔류응력 완화장치

3. 용접 잔류응력 해석

3.1 해석모델 및 해석절차

기기 제작시 발생하는 용접 잔류응력의 크기를 확인하기 위해 유한요소법을 이용하여 용접 잔류응력해석을 수행하였다. 그림 3은 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐의 형상을 나타낸 것으로 형상의 비대칭으로 인해 잔류응력이 가장 클 것으로 예상되는 상부헤드 최외각에 위치한 관통노즐을 해석대상으로 선정하였다. 그림에서와 같이 원자로압력용기 상부헤드는 저합금강인 SA508 Gr.3 Cl.1, 관통노즐은 Ni 합금인 Alloy 600, 그리고 버터링 층과 용접부는 Alloy 600 전용 용접재질인 Alloy 82 및 Alloy 182가 사용되었다.

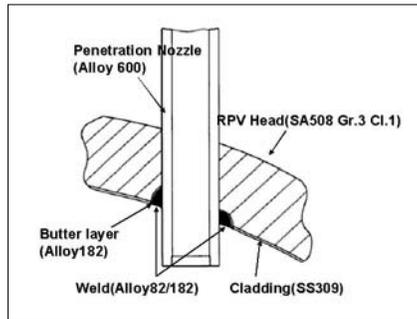


그림 3. 최외각 제어봉구동장치 관통노즐의 형상

그림 4는 해석용 유한요소모델을 나타낸 것으로 형상의 비대칭을 모사하기 위해 3차원 모델을 사용하였고, 23,939개의 3차원 연속체 8절점 요소와 55,110개의 절점으로 구성되어 있다. 용접부는 해석시간 및 계산의 효율성을 위하여 집중 모델(lumped model)^[6]을 사용하여 3개 층으로 구성하였고 각 층은 8개의 bead로 구성하였다.

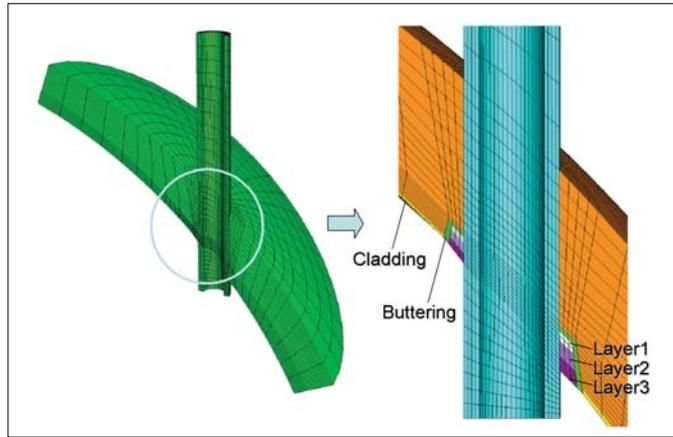
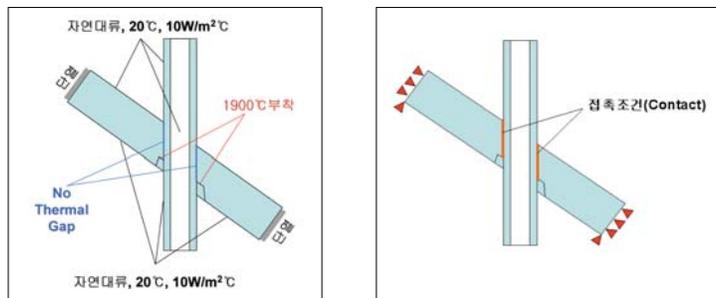


그림 4. 유한요소해석시 사용된 유한요소모델

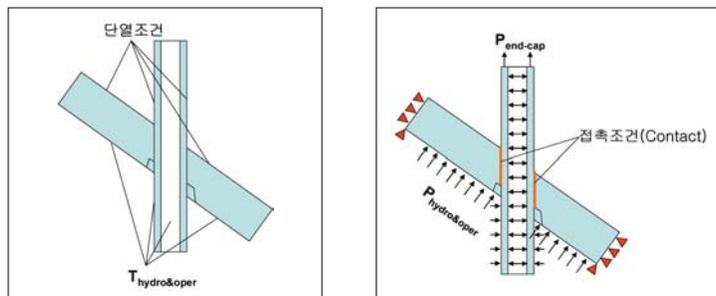
다층 용접과정을 모사하기 위해 요소 추가 및 제거 (element add and remove) 기법을 사용하였다. 용접 잔류응력 해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS^[7]를 사용하여 용접 열원에 의한 가열 및 냉각을 포함하는 온도분포 해석을 수행한 후 온도분포 결과를 이용하여 응력을 구하는 열탄소성 해석을 수행하였다. 이때의 열 및 기계적 경계조건을 그림 5에 제시하였다. 또한 정상 운전조건에서의 인장 잔류응력 변화를 확인하기 위하여 그림 6과 같은 경계조건하에서 실제 운전조건의 열수력 이력을 반영하여 응력해석을 수행하였다.



(a) 열적 경계조건

(b) 기계적 경계조건

그림 5. 용접 해석시 사용된 경계조건



(a) 열적 경계조건

(b) 기계적 경계조건

그림 6. 정상운전조건 해석시 사용된 경계조건

3.2 잔류응력 해석 결과

그림 7 (a)는 용접 종료후 상온으로 냉각된 상태에서의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 최대 축방향 잔류응력은 426MPa로 downhill쪽 용접부 하단에서 발생하였고, 최대 원주방향 잔류응력은 758MPa로 uphill쪽 용접부 상단에서 발생하였다.

수압시험 및 정상운전 조건을 통해 완화되는 인장 잔류응력의 정도를 확인하기 위해 실제 수압시험 및 정상운전 조건의 열수력 이력을 반영하여 응력해석을 수행하였고 그 결과를 그림 7 (b)에 제시하였다. 그림에서 보듯이 수압시험 및 정상운전 조건을 고려하였을 경우 최대 축방향 잔류응력은 392MPa로 uphill쪽 용접부 하단부에서 나타났고, 최대 원주방향 잔류응력은 697MPa로 uphill쪽 용접부 상단에서 발생하였다.

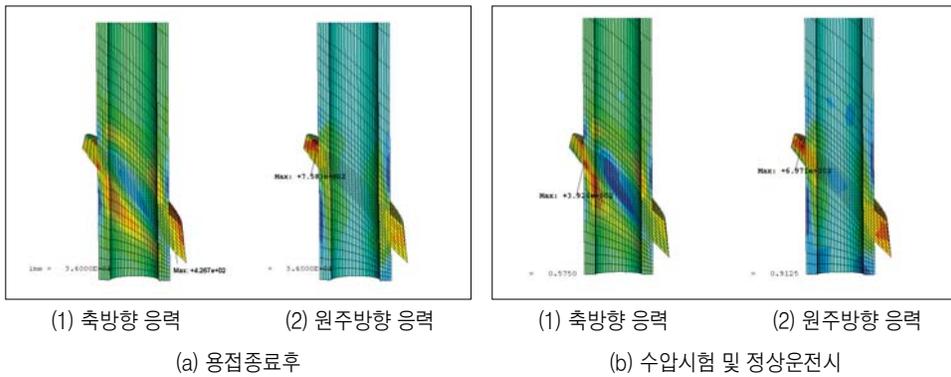


그림 7. 용접 잔류응력 분포 결과

4. 잔류응력 완화장치의 적용

4.1 잔류응력 완화장치 적용 절차

인장 잔류응력이 최대로 완화되는 최적의 하중 값 및 부가조건을 결정하기 위해 다양한 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구팀에서 수행한 해석결과에 따르면 그림 8과 같이 180MPa의 압축하중을 노즐 내면의 인장 잔류응력 발생부위에 부가한 후 90MPa의 압축하중을 노즐 외면 인장잔류응력 발생부위에 부가하였을 때 최적의 잔류응력 완화 결과를 얻을 수 있었다. 참고로 용접조건 및 관통노즐의 부착 위치에 따라 최적 조건이 변할 수 있으므로 사항별로 달리 해석을 수행하여 최적의 조건을 도출하는 것이 적절하다.

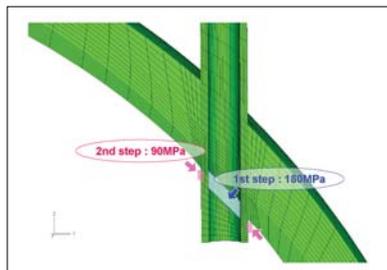


그림 8. 최외각 제어봉구동장치 관통노즐의 형상

4.2 잔류응력 완화장치 적용 결과

4.1절에서 살펴본 바와 같이 180MPa의 압축하중을 노즐내면에 부가한 후 90MPa의 압축하중을 노즐외면에 부가하였을 때의 잔류응력분포를 그림 9에 제시하였다. 그림에서 보듯이 완화 처리를 수행한 결과 발생하는 최대 응력은 축방향 잔류응력의 경우 329MPa, 원주방향 잔류응력의 경우 673MPa로 이전 상태(그림 7(b))에 비해서 최대 응력값이 감소했음을 확인할 수 있었다.

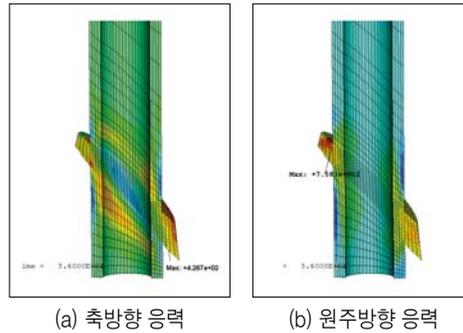


그림 9. 잔류응력 완화 처리후의 잔류응력 분포

일차수응력부식균열은 붕산수 환경과 접하는 지점에서 발생하므로 붕산수와 접하는 부위 중 최대 응력값을 보이는 지점을 그림 10과 같이 선정하여 잔류응력 완화처리 전후의 응력변화를 부재의 두께별로 그림 11 및 그림 12와 같이 표시하였다. 그림 11에서 보듯이 관통노즐의 경우, 잔류응력 완화처리 전후로 해서 붕산수 환경과 접하는 지점에서의 축방향 잔류응력은 약 75% 감소(392MPa→98MPa), 원주방향 잔류응력은 약 54% 감소(370MPa→170MPa)하였다. 또한 그림 12에서와 같이 용접부의 경우, 붕산수 환경과 접하는 지점에서의 축방향 잔류응력은 약 71% 감소(225MPa→58MPa), 원주방향 잔류응력은 약 54% 감소(330MPa→150MPa)하였다. 해외 연구결과^[8]에 따르면 325℃에서 Alloy 600 재료에 인장응력이 210~240MPa 이상 작용할 경우 일차수응력부식균열이 발생할 가능성이 매우 높다고 보고되고 있다. 따라서 개발된 완화장치를 사용할 경우 일차수응력부식균열을 발생시키는 임계응력 이하로 잔류응력값이 저하되므로 일차수응력부식균열을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

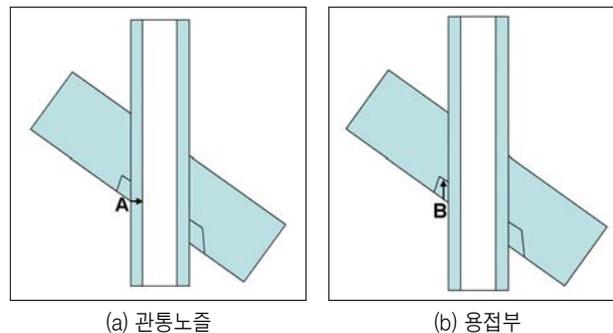


그림 10. 붕산수와 접하는 부위 중 최대 응력 지점

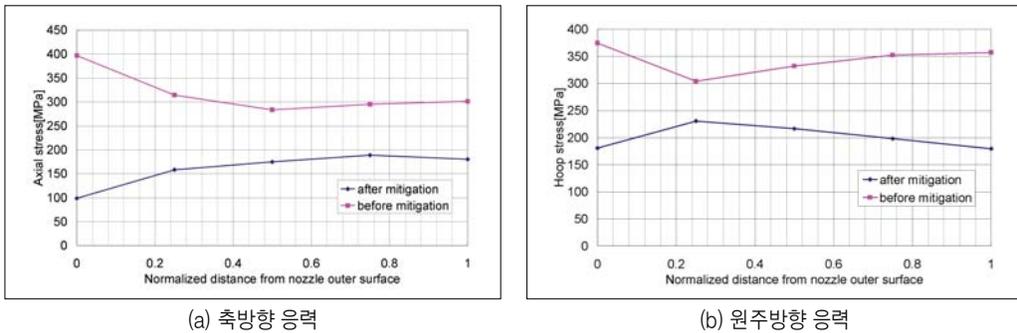


그림 11. 관통노즐의 두께별 잔류응력 변화

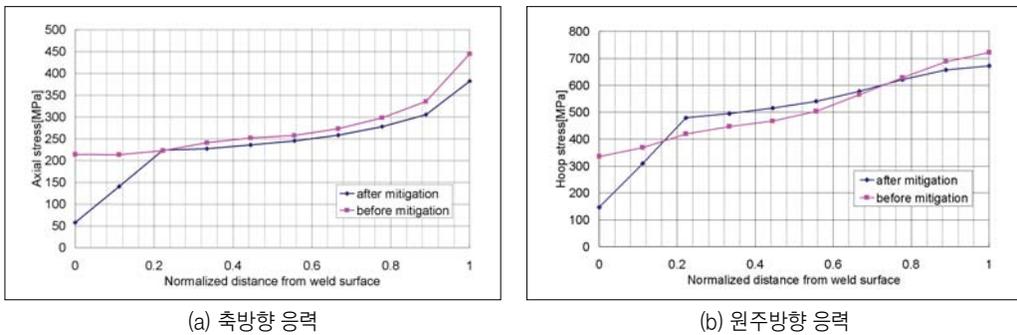


그림 12. 용접부 표면에서부터 내부로의 깊이별 잔류응력 변화

잔류응력 완화를 위해 하중을 가하게 되면 응력의 재분포가 일어나며, 완화장치의 유효성을 확인하기 위해서는 응력 재분포에 따른 일차수응력부식균열의 진전 거동을 평가하여야 한다. 이를 위해 Alloy 600계열 합금의 균열 성장 평가 지침인 ASME Code, Sec.XI, Code Case N694와 해외 보고서^[9]에 제시된 아래의 균열성장식에 따라 균열 성장 정도를 평가하였다.

$$\frac{da}{dt} = \exp\left[-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \alpha (K_I - K_{th})^n \quad (\text{Alloy 600}) \quad (1)$$

$$\frac{da}{dt} = 1.5 \times 10^{-12} K^{1.6} \quad (\text{Alloy 182}) \quad (2)$$

그림 13은 관통노즐에 반타원의 축방향 표면균열이 존재한다고 가정하였을 경우(그림 10(a)) 시간에 따라 일차수응력부식균열 성장 결과를 나타낸 것이고, 그림 14는 용접부에 반타원 축방향 표면균열이 존재한다고 가정하였을 경우(그림 10(b))의 일차수응력부식균열 성장 결과를 나타낸 것이다. 해석시 균열성장 동안에도 가상결함은 1:6의 형상비(결함 길이:결합 길이)를 유지한다고 가정하였다. 관통노즐의 경우(그림 13) 잔류응력 완화 처리를 통해 균열성장속도가 매우 느려졌음을 확인할 수 있었다. 또한 용접부의 경우(그림 14) 관통노즐에 비해 감소량이 작기는 하나 잔류응력 완화 처리를 통해 균열성장속도가 느려졌음을 확인할 수 있었다.

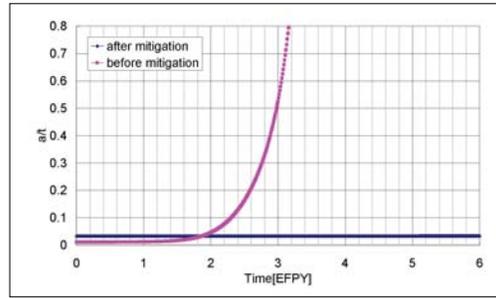


그림 13. 잔류응력 완화처리 전후의 PWSCC 성장률 비교(관통노즐)

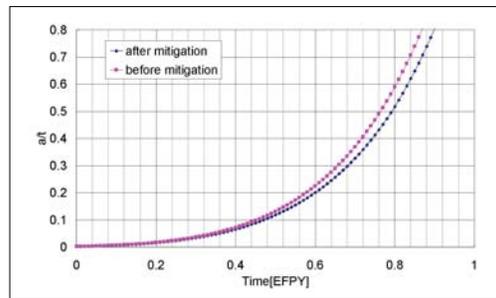


그림 14. 잔류응력 완화처리 전후의 PWSCC 성장률 비교(용접부)

상기의 결과를 종합해 보면 개발된 잔류응력 완화장치의 적용을 통해 일차수응력부식균열을 발생시키는 임계 응력 이하로 잔류응력을 저감시킬 수 있으며, 균열성장속도도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 잔류 응력 완화장치의 적용을 통해 일차수응력부식 균열의 발생을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

1. 원자로 압력용기 상부헤드 관통노즐에서 발생하는 응력부식균열을 방지하기 위하여 MSIP 개념을 도입하여 잔류응력 완화장치를 개발하였다. 개발된 장치는 인장 잔류응력이 작용하는 부분에 직접적으로 하중을 가할 수 있고 경사진 관통노즐 용접부에도 하중을 가할 수 있다는 장점이 있다.

2. 원자로 압력용기 상부헤드 최외각 관통노즐을 대상으로 실제 제작과정 및 운전조건을 고려하여 잔류응력 해석을 수행한 결과 봉산수와 접하는 용접부 표면 및 관통노즐 표면에서의 잔류응력값이 일차수응력부식균열의 발생 기준인 210-240MPa를 초과하였다.

3. 개발된 잔류응력 완화장치를 적용하면 관통노즐의 경우 봉산수와 접하는 지점에서의 축방향 잔류응력은 약 75% 감소(392MPa→98MPa)하였고, 원주방향 잔류응력은 약 54% 감소(370MPa→170MPa)하였다. 용접부의

경우 축방향 잔류응력은 약 71% 감소(225MPa→58 MPa), 원주방향 잔류응력은 약 54% 감소(330MPa→150MPa)하였다.

4. 개발된 잔류응력 완화장치를 적용하였을 경우 일차수응력부식균열 성장량을 평가한 결과 관통노즐 및 용접 부 모두 균열성장속도가 저하되었음을 확인하였다.

5. 따라서 본 연구팀에서 개발한 잔류응력 완화장치를 적용할 경우 인장 잔류응력을 완화시킬 수 있으므로 일차 수응력부식균열의 발생을 효과적으로 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

❁ 참고 문헌

- [1] USNRC, 2001, "Circumferential Cracking of Reactor Pressure Vessel Head Penetration Nozzles", SECY-01-0141.
- [2] Warren H. Bamford, Lee Tunon-sanjur and Robert Hsu, 2000, "Integrity Evaluation for Future Operation: Virgil C. Summer Nuclear Plant Reactor Vessel Nozzle to Pipe Weld Regions", WCAP 15617, pp2-1.
- [3] USNRC, 1988, "NRC Position on IGSCC in BWR Austenitic Stainless Steel Piping", GL 88-01.
- [4] K. Enomoto, "Water Jet Peening for Residual Stress Improvement", 2003, Proceeding of Conference on Vessel Head Penetration Inspection, Cracking and Repairs, Sep. 29-Oct. 2, 2003.
- [5] ASME Boiler & Pressure Vessel Committee, 2001, ASME B&PV Code, Sec.XI, Code Case N-694, Evaluation Procedure and Acceptance Criteria for PWR Reactor Vessel Upper Head Penetration Nozzles.
- [6] Dong, P., Zhang J. and Bouchard P. J., 2002, "Effects of Repair Weld Length on Residual Stress Distribution", Transaction of the ASME, Vol.124, No.1, pp.74-80.
- [7] HKS Inc., 2006, ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.6.
- [8] Dominion Engineering, inc., 1994, "PWSCC of Alloy 600 Materials in PWR Primary System Penetrations", EPRI TR-103696, pp.4-4.
- [9] EPRI, TR-1006695, 2002, Material Reliability Program: Crack Growth Rates for Evaluating Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) of Thick-Wall Alloy 600 Materials, (MRP-55), Rev.1.



이 승 건

- 한국전력기술 재료기술연구그룹 책임연구원
- 관심분야 : 산업설비 건전성 평가, 소재 물성평가
- E-mail : gun@kopec.co.kr



김 종 성

- 한국전력기술 재료기술연구그룹 책임연구원
- 관심분야 : 산업설비 건전성 평가
- E-mail : kimjs@kopec.co.kr



진 태 은

- 한국전력기술 재료기술연구그룹 수석연구원
- 관심분야 : 발전설비 계속운전
- E-mail : jinte@kopec.co.kr