기계적 물성 변이를 고려한 원자로 압력용기(RPV : reactor pressure vessel) 상부 제어봉 구동 장치(CRDM : control rod diver mechanism) 관통 노즐 이종재 용접부의 균열해석

Crack analysis of mis-matched welding at CRDM(control rod drive mechanism) upper penetration nozzles of RPV(reactor pressure vessel) considering the change of mechanical properties

이 용우*, 김 종성, 이 강용*****

* 연세대학교 기계공학부 대학원

** 한국전력기술주식회사

*** 연세대학교 기계공학부

1. 서 론

이종재 용접부는 건전성 확보가 필수적인 1차측 원전기기에 널리 적용되고 있다. V.C. Summer 원전의 원자로 압력용기 출구 노즐 이종재 용접부 경우와 같이 일차수 응력부식균열(PWSCC : primary water stress corrosion cracking) 등이 열영향부, 모재 또는 용착금속부에 발생하는 손상사례가 다수 보고 되고 있을 뿐만 아니라 이종재 용접부의 기계적 물성 변이 특성과 잔류응력 측면에서 손상 발생 가능성이 높다[1]. 본 연구의 해석 대상으로는 PWSCC 손상사례가 다수 발생되고 있다고 보고되고 있으며, 열하중 및 압력에 의해 손상 발생의 가능성이 상대적으로 높은 원자로 압력용기(RPV : reactor pressure vessel) 상부 CRDM(control rod drive mechanism) 관통노즐을 선정하였다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 mock-up 용접부의 모재는 저합금강 SA508 Gr.3 Cl.1과 니켈 기저 합금 Alloy 600이며 용접금속과 버터링부는 Inconel 82로 구성되어 있다. 또한 균열 진전 방향은 그림 1에서 Inconel 82와 SA 508 Gr.3 Cl.1의 계면으로 설정하였다.

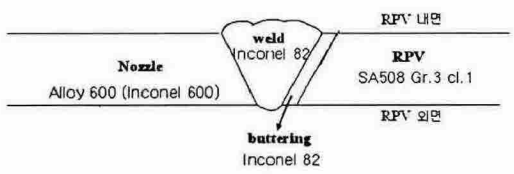

그림 1. Mock-up 해석용 이종재 용접부

2. 본 론

2.1 기계적 물성 변이 결정

온도 변화에 따른 각 재질별 기계적 물성에 관한 ASME B&PV Code Sec.III, Appendices[2]와 handbook[3]을 참조하여 물성을 결정하였다. 재료별 온도에 따른 비열, 밀도, 열전도도, 탄성계수 및 열팽창 계수는 온도에 따라 결정되었으며, 소성변형을 고려하여 도출된 변형률 경화(strain hardening) 거동 또한 온도에 따라 고려되었다. 프와송비는 SA508 Gr.3 Cl.1은 0.29, Alloy 600과 Inconel 82는 0.27을 사용하였으며 소성 변형률이 영이 되는 어닐링 온도는 1200℃로 가정하였다. 저합금강인 SA508 Gr.3 Cl.1은 용접 입열로 인한 탄화물 조대화에 기인하여 열영향부에서 항복/인장 강도와 파괴인성치가 동시에 저하되는 국부 취약부가 발생되어진다[4]. 기존 연구결과들[4, 5]을 수집 검토한 결과, SA508 Gr.3 Cl.1은 그림 2와 같이 용융선으로부터 5mm 정도 떨어진 미변태 열영향부에서 기계적 강도가 모재보다 약 5-10% 정도 저하되어짐을 확인하

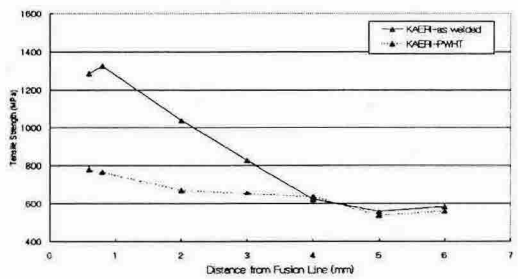

그림 2. 국부 취약부 및 기계적 물성 저하의 확인

였다. 따라서 본 연구에서는 국부 취약부의 기계적 강도 저하가 균열 거동에 미치는 영향을 분석할 때 용융선으로부터 5mm 정도 떨어진 유한요소의 항복강도 등 인장 물성을 10% 저하시켜 잔류응력/균열 해석을 수행하였다.

2.2 유한 요소 모델링 및 경계조건

유한요소 모델의 요소수와 절점수는 각각 3159개 와 8198개이며, 모델의 용접 패스는 그림 3과 같이 26패스로 구성되어 있다. 요소의 해석은 ABAQUS[6]를 이용하였다.

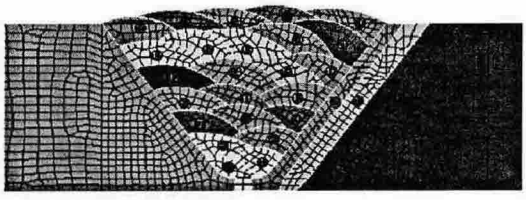

그림 3. 유한요소 모델

열적 경계조건으로 잔류응력 해석을 위한 온도 해석시 열전도 근거 해석(thermal conduction based analysis)[7]하였으며, 용접부의 내외면과 끝단은 각각 자연대류 조건(열대류계수 10W/m2℃)과 단열 조건으로 가정하였으며, 용접방법이 잠호용접(SAW)이므로 각 용접 패스별로 용접 비드의 외면은 단열 조건으로 가정하였으며 최종 용접 완료후의 용착금속 외면은 자연대류 조건으로 가정하였다. 기계적 경계조건으로는 용접부의 한쪽 끝단은 길이 및 두께 방향으로의 변위를 구속하였고 다른 한쪽 끝단은 두께 방향으로의 변위를 구속하였다. 균열 해석시 운전중 정상상태 하중을 고려할 때 작용응력 σ_m(kPa)을 식 (1)에 제시하고 있으며 이는 용접부 한 쪽 끝단에 횡방향으로 작용되어진다. 식(1)은 운전중 정상상태 하중 하에서의 실제 형상의 RPV CRDM 관통노즐 용접부의 응력해석 결과[8]로부터 도출한 식들이다. 식(1)의 x는 균열 개시 위치로부터 균열면을 따른 거리(mm)이다.

$$\sigma_m = -0.1931x^6 + 17.152x^5 - 604.7x^4 + 10656x^3 - 97330x^2 + 419576x - 589013 \quad (1)$$

2.3 잔류응력 해석

횡방향 잔류응력 해석 결과를 균열 진전 예상방향에 대해 British Energy의 기존 연구결과[9]와 비교한 결과를 그림 4에 제시하고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 본 연구를 통해 계산한 잔류응력 분포는 British Energy에 의한 잔류응력 분포와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

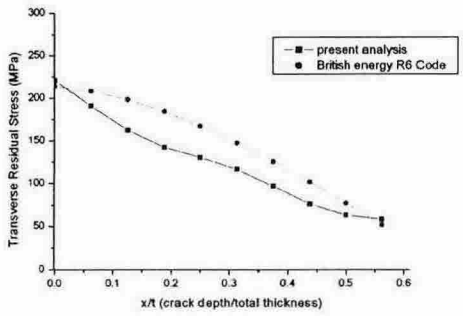

그림 4. 횡방향 잔류응력 분포에 대한 British Energy와 본 해석의 결과 비교

2.4 균열 해석

균열 진전에 따른 응력세기계수 변화를 고찰하기 위해 ABAQUS[6]의 debond 기능(절점 분리기법)을 활용하여 유한요소 모델의 가상 균열면 상의 절점들을 분리시켰다. 본 연구방법의 타당성을 검증하기 위해 ASME B&PV Code Sec.XI[10]에 제시된 균열 해석절차를 이용한 결과와 비교하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 응력세기계수는 ASME Code의 규정을 잘 만족하고 있음을 볼 수 있다.

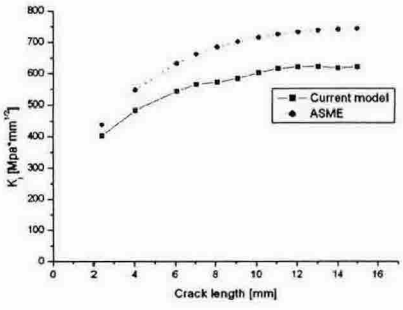

그림 5. 해석결과와 ASME Code에 의한 응력세기계수 비교

그림 6은 균열위치별 균열 진전에 따른 응력세기계수를 잔류응력만 고려한 경우, 전체응력을 작용시킨 경우 및 운전 응력만 작용한 경우에 대해 제시하고 있다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 잔류응력이 균열 거동에 미치는 영향이 전체 응력 영향의 대부분을 차지함을 알 수 있다.

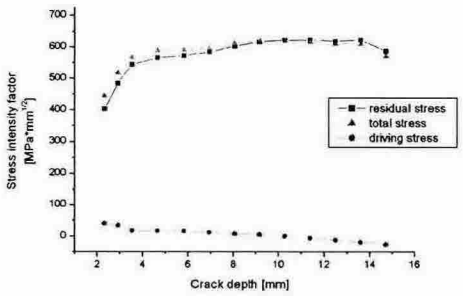

그림 6. 하중 조건에 따른 응력세기계수 변화

2.5 기계적 물성 변이의 영향

국부 취약부의 영향을 고려하여 용융선으로부터 SA508 Gr.3 Cl.1 열영향부 유한요소의 항복강도 등 인장물성을 모재보다 10% 저하시켜 잔류응력 및 균열 해석을 수행하였다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 국부 취약부의 기계적 강도 저하가 응력세기계수에 미치는 영향은 거의 없음을 볼 수 있다. 다음으로 용접금속(Inconel 82)의 기계적 강도가 20% 증가되어진다고 가정하여 계산을 수행하였으며 그림 8에서 보듯이, 용접금속의 강도를 20%를 증가시켰을 때 응력세기 계수가 전체 균열 길이에 걸쳐서 15~24% 정도 증가함을 알 수 있었다.

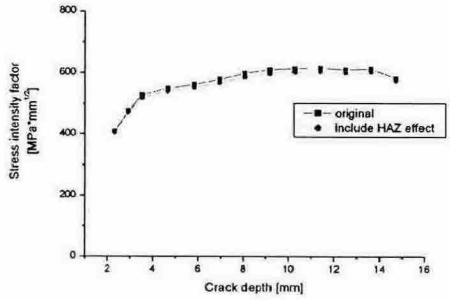

그림 7. 국부 취약부 고려 여부에 따른 응력세기계수 변화

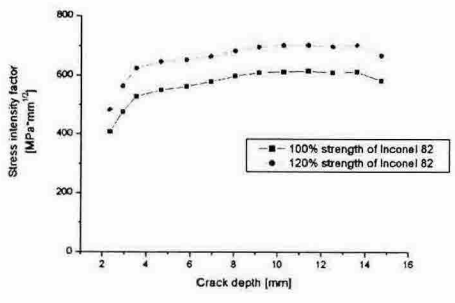

그림 8. 용접금속 강도 증가에 따른 응력세기계수 변화

3. 결 론

이종재 용접부의 기계적 물성 변이와 잔류응력 등 이종재 용접부 상태를 고려하여 균열 거동을 고찰한 본 연구를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다. 전체응력 대비 잔류응력이 응력세기계수에 미치는 영향은 87~96%로 상당부분을 차지하는 것을 볼 수 있었으며, 용접시 발생하는 국부 취약부의 기계적 강도 저하가 응력세기계수에 미치는 영향은 거의 없었으나, 용접 금속의 기계적 강도가 증가하는 경우 응력세기계수가 전체 균열 길이에 걸쳐 증가함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

1. CSA : Stress Corrosion Cracking of Nuclear Reactor Components, Materials Information/ Cambridge Scientific Abstracts, 2004.
2. ASME B&PV Committee : ASME B&PV Code Sec.Ⅲ, Appendices, 2001.
3. ASM International : ASM handbook 10th ed., 1990.
4. 김종성, 이승건, 진태은 : 압력용기 강 용접 열영향부에서의 미세조직 및 기계적 물성 예측 모델의 개발과 평가, 대한기계학회 논문집 A권, 26권, 11호, 2002, pp.2399-2408.
5. 강석영, 김상호, 김주학, 홍준화 : SA508 강 용접 열영향부의 미세조직과 충격인성의 상관관계, 대한금속학회지, Vol.37, No.4, 1999.
6. HKS Inc., 2000 : ABAQUS User's Manual, Ver. 6.2
7. P. Dong and J.K. Hong : Recommendations for Determining Residual Stresses in Fitness-For-Service Assessment, WRC Bulletin 476, 2002.
8. 이승건, 김종성, 진태은 : 원자로 압력용기 관통노즐 용접부의 잔류응력 완화기구 고찰, 11회 원전기기 건전성 심포지엄 및 3회 증기발생기 안전성 심포지엄, 2004.
9. British Energy : Assesment of the integrity of structures containing defects, 2000.
10. ASME B&PV Committee : ASME B&PV Code Sec.Ⅺ, Appendices, 2001.