

원자력 배관 이종금속 용접부 응력부식균열의 역학적 평가

Mechanics Evaluations of Stress Corrosion Cracking for Dissimilar Welds in Nuclear Piping System

박 준수*, 나 복균*, 김 인용*

* 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

ABSTRACT Fracture mechanics evaluation of stress corrosion cracking (SCC) in the dissimilar metal weld (DMW) for the nuclear piping system is performed; simulating the transition joint of the ferritic nozzle to austenitic safe-end fabricated with the Inconel Alloy A82/182 buttering and welds. Residual stresses in the DMW are computed by the finite element (FE) analyses. Then, to investigate the SCC in the weld root under the combined residual and system operation stresses, the fracture mechanics parameters for a semi-elliptical surface crack are evaluated using the finite element alternating method (FEAM). As a result, it is found that the effect of weld residual stresses on the crack-driving forces is dominant, as high as three times or more than the operation stresses.

1. 서 론

원자로 배관계통에는 니켈합금 용가재로 탄소강 및 스테인리스강을 접합시키는 이종금속 용접 방식이 적용되고 있다. 경수로 일차계통의 고 니켈합금 모재(A600)와 용가재(A182/82)는 높은 인장응력이 작용하면 일차냉각수 환경에서도 응력부식균열(SCC)이 발생할 수 있으며, 또한 이종금속 용접부는 재료의 열적·기계적 물성 차이로 인해 열적 피로에도 취약성을 나타낸다¹⁾.

본 논문은, 경수로 원자로계통에 사용된 이종금속 용접의 예로서 페라이트계와 오스테나이트계의 이종금속 용접부(ferritic-to-austenitic dissimilar weld)를 다루고 있다. 용접공정의 열·탄소성 유한요소법(FEM) 모델링을 통하여 용접부 잔류응력 수치해를 구하고 정수압시험에 의한 잔류응력의 이완효과를 평가했으며^{2, 3)}, 계통의 사용조건에 따른 운전응력(operation stress)을 별도로 평가하였다. 용접부 응력부식균열의 거동을 분석하기 위하여 잔류응력 및 운전응력 해석 결과를 토대로 하여 배관 용접부 내면에 존재하는 하나의 반타원 표면균열을 대상으로 응력확대계수(stress intensity factor, K)를 평가하였는데, 이를 위해 용접부의 아임계균열 분석에 효율적인 유한요소교호법(FEAM)을 적용하였다^{4, 5)}.

2. 용접 잔류응력 및 운전응력 해석

범용 유한요소법 전산코드(ABAQUS 6.4)를 이용하여 용접공정의 비선형 열전달 및 용접부의 역학적 해석을 수행하였는데, 용접중 열응력이

공작물의 온도분포에 미치는 영향이 매우 적다는 가정하에 열전달 해석과 역학 해석을 분리하였다^{6, 7)}. 용접부의 축 대칭 유한요소 모델을 Fig. 1에 제시하였다(총 2430 절점 및 2310 요소).

배관 원주용접 루트부의 가스텅스텐아크용접(GTAW)과 나머지 부분의 피복금속아크용접(SMAW) 조건들을 각각 고려하였으며(Table 1 참조), 서로 다른 용착방법으로서 1) 표준형: 노즐의 전 두께를 용착한 후에 루트부를 파내고(gouge) 다시 용착하는 공정과, 2) 개선형: 노즐 두께의 1/3 까지 용착한 후 루트부를 파내고 재 용착하는 공정을 모사하였다. 용접아크 에너지에 해당하는 입열(heat input)로서 용가재의 체적 및 표면 열속(heat flux)을 일정한 비율로 조합하여 적용하였다. 배관 원주상 V 형 홈의 용착에 소요되는 총 50 개 용접패스를 18 개 군으로 묶었으며, 각 패스군은 'Model Change' 옵션에 의해 수치해의 영역에 순차적으로 추가된다.

추가적으로, 용접상태(as-welded) 잔류응력을 초기조건으로 해서 계통의 정수압시험용 압력(3125 psi, 70 °F)을 적용한 탄·소성 해석을 수행하고 또한, 정상운전 조건에서 용접부에 작용하는 계통의 압력(2235 psi)과 열하중(650 °F)에 대해서 전통적인 응력해석을 수행하였다.

용접 잔류응력 해석결과의 일부로서 원자로의 가동전 원주 방향 잔류응력을 Fig. 2에 도시하였다. 여기서, dsw-me01b는 표준형 용착을 dsw-me01c는 개선형 용착을 가리키는데, 표준형은 내면의 루트부가 마지막 용착부인 반면에 개선형은 노즐외면이 마지막으로 용착된 것이다. 이종재료의 탄성 특이성 때문에 노즐의 안전단과

용착금속의 경계에서 용접 잔류응력의 급등현상 (stress jump)이 나타났으며 용접 루트부에서 원주방향 인장 잔류응력이 최대 90 ksi 에 이르고 있다. 잔류응력 수준이 용가재 A182/82 의 항복강도를 상회하는 수준인데, 재료의 변형경화 효과가 기여한 것으로 간주된다. 용착순서 변경에 의한 잔류응력 수준의 저감효과는 노즐내면에서 현저한데(dsw-me01c), 원주 방향의 경우 용접 루트부를 중심으로 효과가 두드러졌다.

3. 응력부식균열의 파괴역학적 평가

용접 잔류응력과 운전응력의 축대칭 유한요소법 해석결과를 토대로, 용접부 표면에 존재하는 반타원형 응력부식균열의 응력확대계수를 유한요소교호법을 이용하여 계산하였다. 이 방법을 이용하면, 3차원 균열의 J적분을 계산하기 위해 유한요소 모델에 균열 요소망을 포함시킬 필요가 없고 또한 균열성장 해석을 위해서 요소망 변경이 필요하지 않기 때문에 매우 경제적이다.

유한요소교호법에 의하면, 균열을 갖는 유한체의 응력확대계수(K) 해는 균열이 없는 유한체의 유한요소법 응력해와 무한체 내의 균열에 대한 이론해에 의해서 계산된다. 즉, 균열이 없는 노즐의 기준평면($\theta=0$)에서 응력의 원주 방향의 성분을 $\sigma_{\theta}(r, z)$ 라고 할 때, 기준평면에 놓인 노즐 축 방향 균열의 모드 I(mode I) 응력확대계수(K_I)는 균열의 상부 및 하부 면에 $-\sigma_{\theta}(r, z)$ 에 해당하는 외력을 작용시켜 계산한다. 본 논문연구의 유한요소교호법 응력확대계수 평가는 사내 전산코드 GCS1 을 이용하여 수행되었다⁸⁾.

이종금속 용접(루트)부 내면에 노즐의 축 방향으로 존재하는 반타원형 균열의 구동력 즉 균열 선단의 응력확대계수 계산결과를 Fig. 3 에 제시하였다. 이 결과는, 용접 잔류응력을 유한요소교호법 모델의 초기응력으로 하고 계통의 정상 운전 압력과 온도(2250 psi at 570 °F) 하중을 고려한 것이며, 탄성계수(E)와 포아송비(ν)는 원자로계통의 정상운전 온도조건에서 A82/182 의 물성을 고려하여 각각 26,000 ksi 와 0.29 로 가정하였으며, 축 대칭 잔류응력과 운전응력을 각각 3 차원 유한요소교호법 모델에 매핑(mapping)시켜 3 차원 균열의 응력확대계수를 계산하고 총 응력확대계수 값은 중첩원리에 의해 산출하였다.

용접 잔류응력, 운전압력 및 온도하중에 의한 반타원 표면균열의 구동력 분포를 Fig. 3 에 제시하였다. 균열의 응력확대계수(K_I)는 잔류응력에 의해 14.7 ksi in^{1/2}, 운전압력에 의해 2.82 ksi in^{1/2}, 운전온도에 의해 1.78 ksi in^{1/2} 로 각각 계산되었으며 총 $K_I = 19.4$ ksi in^{1/2} 로 나타났다. 즉, 이종금속 용접부에 존재하는 응력부식균열

의 구동력은 계통의 정상 운전조건에서 잔류응력에 의해 3 배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

- 1) 고 니켈합금 용가재를 사용한 원자력 배관의 이종금속 용접부는 재료의 열적·기계적 물성 상이성과 용접수축에 대한 높은 구속도로 인해 항복점 이상의 인장 잔류응력이 초래되어 재료의 균열감수성이 높으면 용접부 표면에 응력부식균열이 발생할 수 있다.
- 2) 고 니켈합금 용접부의 응력부식균열 구동력에 미치는 잔류응력의 기여도가 계통의 운전하중 응력보다 3배 이상 큰 것으로 나타나, 용접으로 인한 인장 잔류응력의 수준을 낮게 관리하는 방안이 운전중 용접부 응력부식균열 발생을 최소화하는 관건이다.
- 3) 잔류응력과 운전응력이 함께 작용하는 용접부에 존재하는 균열의 파괴역학적 분석법으로서 응력해석용 유한요소법과 파괴역학적 평가용 유한요소교호법을 이용하면 시간·인력을 크게 절약할 수 있다.

참 고 문 헌

1. W. H. Bamford and J. F. Hall: A review of Alloy 600 cracking in operating nuclear plants: Historical experience and future trends, Proceedings of Conference on Vessel Head Penetration Inspection, Cracking and Repairs, 2003, pp.1-8
2. L. Karlsson: Thermal stresses in welding, Mechanics and Mathematical Method, Volume 1, Thermal Stress I, R.B. Hetnarski, ed., North-Holland, Amsterdam, 1986, pp. 299
3. P. Dong and J. K. Hong: Recommendations for Determining Residual Stresses in Fitness-for-Service Assessment, WRC Bulletin 476, 2002, Welding Research Council, Inc., New York
4. J. H. Park, S. Y. Park, M. W. Kim, J. S. Park and T. E. Jin: Development of a code for 2-D elasto-plastic fracture mechanics analyses using the finite element alternating method, Key Engineering Materials, v.270-273, 2004, pp.1159-1164
5. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.4, 2003, Providence, RI
6. H. D. Hibbitt and P. V. Marcal: A numerical, thermal-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure, Computers and Structures, v.3, n.5, 1973, pp. 1145-1174
7. E. Friedman: Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method, J. Pressure Vessel Tech., v.97, 1975, pp. 206-213
8. Korea Power Engineering Company, Inc.: General Crack Solver 1 User's Manual, Version 1.01, 2004, Daejeon, Republic of Korea

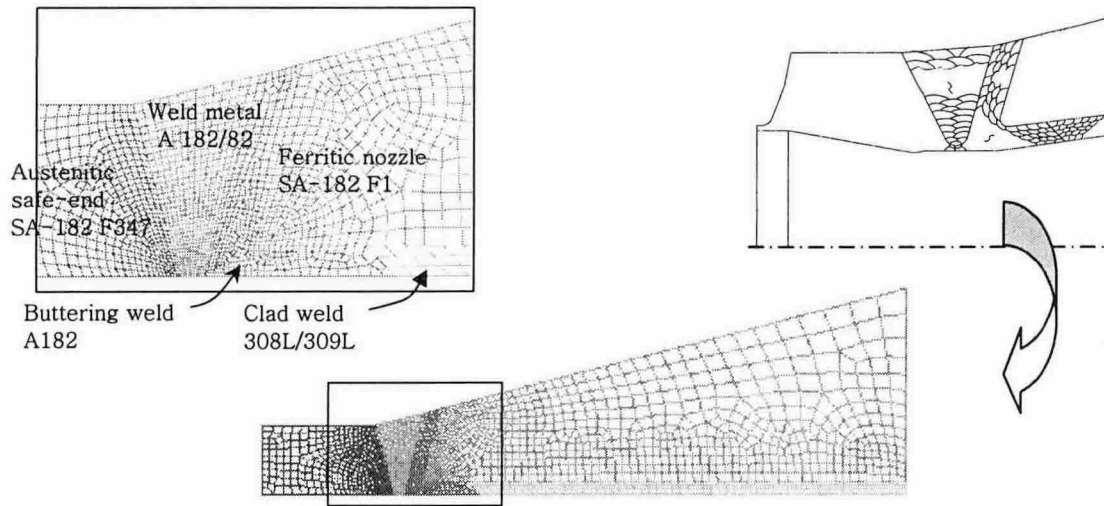


Fig. 1 Physical model of dissimilar nozzle-to-safe end weld joint (top right), axisymmetric FE model (bottom) and details of weld zone (top left) used for weld mechanics analyses

Table 1 Welding process parameters used for the dissimilar nozzle-to-safe end joint

| Process | Current (A) | Voltage (V) | Welding rod diameter (mm) | Welding speed (mm/min, ave.) | Remark |
|---------|-------------|-------------|---------------------------|------------------------------|----------------|
| GTAW | 100-180 | 12-17 | φ 2.4 | 90 | Root weld only |
| SMAW | 80-110 | 20-28 | φ 3.2 | 120 | |

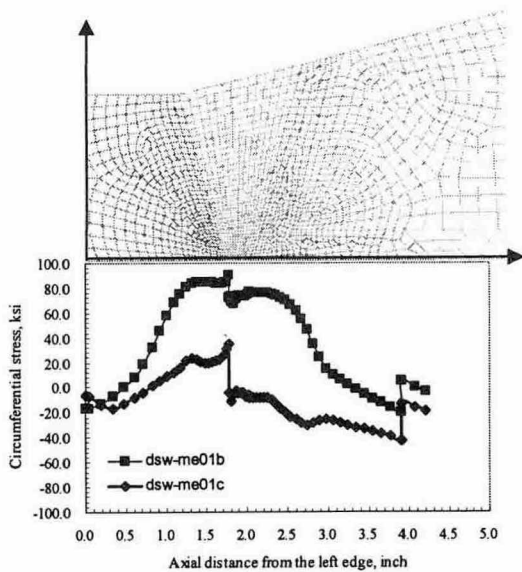


Fig. 2 Residual circumferential stresses produced on the inner surface of the dissimilar nozzle-to-safe end weld for two types of weld sequence (dsw-me01c & dsw-me01b)

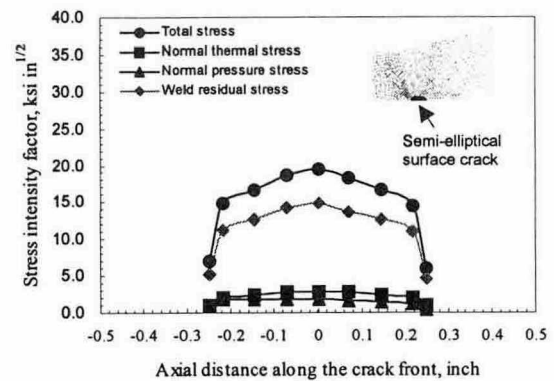


Fig. 3 The mode I stress intensity factors (K_I) determined using the FEAM for the semi-elliptical surface crack ($c/a=2$) located in the weld root inside the nozzle