계장화 압입시험을 이용한 원전 배관 용접부의 파괴인성 평가

Fracture Toughness valuation of the elded uclear Piping Using Indentation

*선광상[1], 허용[1], 조성근[1], 구재민[2], #석창성[2]
*K. S. Seon[1], Y.Huh[1], S.K.Cho[1], J.M.Koo[2], #C.S.Seok[2] (seok@skku.edu)
[1] 성균관대학교 기계공학부 대학원, [2]성균관대학교 기계공학부

Key words : Narrow Gab Weld, Fracture Toughness, Indentation

1. 서론

배관에 대한 LBB 해석을 위해서는 재료의 파괴인성(J-R곡선)을 결정해야 하며, 이를 위해 일반적으로 ASTM에 제시되어 있는 파괴인성 시험법을 적용하여 파괴인성을 결정한다.
그러나 ASTM 파괴인성 시험법의 경우, 기본적으로 배관 모재의 물성치 평가를 위해 제시된 것으로, 용접부 시험편의 경우, 시험편의 잔여 ligament가 용접폭보다 아주 작을 경우에만 적용이 가능하다고 알려져 있다. 기존 배관 용접부의 경우, 용접폭이 상당히 넓어 위의 조건이 만족되기 때문에 파괴인성 시험에 큰 문제가 없으나, 협계용접부의 경우 용접폭이 기존 용접부의 반 정도 되어 위의 조건이 만족되지 않고, 기존의 ASTM 파괴인성 시험법 적용 시 파괴인성이 실제보다 낮게 측정될 수 있기 때문에 기존 ASTM 파괴인성 시험법의 적용에 문제점이 있는 실정이다. 최근에는 그동안 고려하지 못한 여러 불확실성의 영향을 해석을 통해 반영함으로써 LBB 해석 결과의 정확성을 향상시키고자 하는 노력이 진행 중이다. 용접부의 경우, 전체 배관을 모재로 가정하면 해석상에서 모재와 같은 거동을 보이기 때문에 LBB 해석 결과가 보수적일 수 있으나, 용접부를 고려하게 되면 보다 정확한 해석이 수행될 수 있으며 이로 인해 LBB 적용 가능 범위가 넓어질 수 있다. 모재 배관에 대한 균열 평가법은 많은 연구를 통해 정립되었으나 용접부를 고려한 배관의 경우 그 영향이 매우 복잡하여 아직 구체적인 평가법이 제시되지 못하고 있다 [1,2].
본 연구에서는 원전배관 협계용접부에 대한 수정된 파괴인성 시험법을 제시하기 위해 압입시험을 수행하여 보다 정확한 부위별 물성을 획득하고, 이를 유한요소해석에 적용하여 수정된 소성 η계수식을 제시하였다. 또한 이 결과를 적용하여 기존 파괴인성 시험결과를 재평가 하였다.

2. 압입시험

2.1 시험재료 및 압입시험편

본 연구에서 사용된 재료는 원자력발전소 1차계통 배관구조물에 사용되는 SA508 Cl.1a, SA508 Cl.3a 탄소강 재료로서 이종 협계 용접이 적용되었다. 부위별 재료물성을 획득하기 위하여 용접재료에 에칭(etching)을 수행하여 부위 확인한 후, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 모재 및 용접부가 모두 포함되도록 원주방향으로 사각형상의 시험편을 채취하였다. 시험편을 모재 및 용접부가 모두 포함되도록 원주방향으로 사각형상으로 채취하였다. Fig. 1은 시험편의 형상을 나타낸 것이다.

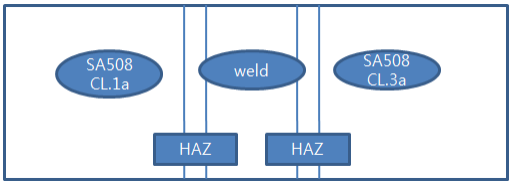

Fig. 1 Indentation test specimen

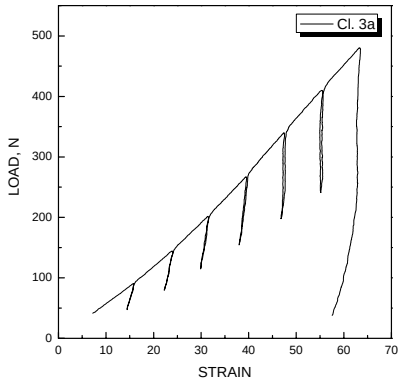

Fig. 2 Load-Strain curve

2.2 시험방법

ABI 시험기(Auto Ball Indentation Tester)를 이용하여 압입시험을 수행하였다. 하중-변위선도로부터 항복강도와 Ramberg-Osgood 상수 α,n 값을 획득하였다. 인장 시험으로 구하지 못한 HAZ의 물성치 구하였다.

2.3 시험결과

Table 1은 각 부위별 압입시험 결과를 나타낸 것이다. SA508 Cl.3a 모재의 물성이 가장 높게 평가되었으며, SA508 Cl.1a 모재, HAZ 및 용접부 center의 물성은 거의 유사한 경향을 나타내었다.

2.3 인장시험결과와 비교

Table 1의 압입시험에 의한 결과와 비교하면 인장강도는 30MPa 정도 차이가 난다. 그 차이는 인장시험 값을 기준으로 할 때 약 10%이다.

Table 1 Summary of indentation test results

Direction	Part	σ_y(MPa)	α	strain-hardening exponent, n
SA508 Cl.1a	Base metal	338	5.91	0.21
	HAZ	331	6.04	0.21
Welds	Center	396	5.05	0.18
SA508 Cl.3a	HAZ	554	3.61	0.15
	Base metal	454	4.41	0.17

Ta le 2 Results of tensile test

	σ_y(MPa)	σ_u(MPa)	α	n
Weld Center	397.7	645.0	3.386	5.188
SA508 Cl.1a	330.4	517.9	5.280	4.845
SA508 Cl.3a	499.3	645.6	2.622	7.727

3. 유한요소해석

3.1 해석 대상 및 유한요소 모델

Fig. 3은 본 연구에서 고려한 해석 대상을 나타낸 것으로서, CT시험편의 균열 길이를 0.5에서 0.7까지 0.05간격으로 변화시켰다. 약 4,200개의 element와 약 21,000개의 node로 구성된 C3D20을 사용하였다. 재료는 Ramberg-Osgood 식을 만족시키는 재료로 가정하였다.

ABAQUS Ver. 6.7를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, ABAQUS에서 제공하는 영역 적분법을 사용하여 유한요소해석 결과로부터 J-적분을 계산하였다. 그러나 3차원 모델의 경우, J-적분은 경로에 독립적이지만 두께방향으로의 값은 변화하기 때문에 J-적분의 두께방향 평균값을 사용하여 소성 η계수를 결정하였다.

3.2 유한요소해석 결과

Fig. 3는 용접부 center에 균열이 위치하는 CT시험편에 대해 균열길이 변화에 따른 소성계수 η의 변화와 ASTM에서 제시하고 있는 모재를 기준으로 한 소성 η계수 식(1)을 비교하여 나타낸 것이다.

$$\eta = 2 + 0.522(b/W) \quad (1)$$

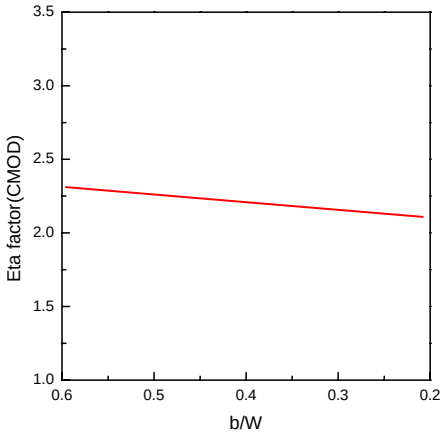

Fig. 3 FEM results of η-factor with b/W

균열이 증가할수록 ASTM 수식과 일치하는 경향을 나타내고 있다. 이는 용접폭이 잔여 ligament보다 클 경우 ASTM에 제시된 시험법을 사용할 수 있다는 기존 연구내용과 일치하는 결과이며, 또한 용접폭이 일반 용접에 비해 현저히 좁은 협계용접부의 파괴인성 평가 시 소성 η계수는 반드시 고려되어야 함을 나타내고 있다.

균열이 증가할수록 ASTM 수식과 일치하는 경향을 나타내고 있다. 이는 용접폭이 잔여 ligament보다 클 경우 ASTM에 제시된 시험법을 사용할 수 있다는 기존 연구내용과 일치하는 결과이며, 또한 용접폭이 일반 용접에 비해 현저히 좁은 협계용접부의 파괴인성 평가 시 소성 η계수는 반드시 고려되어야 함을 나타내고 있다. 따라서 상기 시험결과와 용접부에 균열이 위치하는 CT시험편에 대한 수정된 소성 η계수 식을 식(2)와 같이 제안한다.

용접부 center :

$$\eta = 2.801 - 4.232(b/W) + 7.140(b/W)^2 \quad \text{for } 0.3 \le b/W \le 0.5 \quad (2)$$

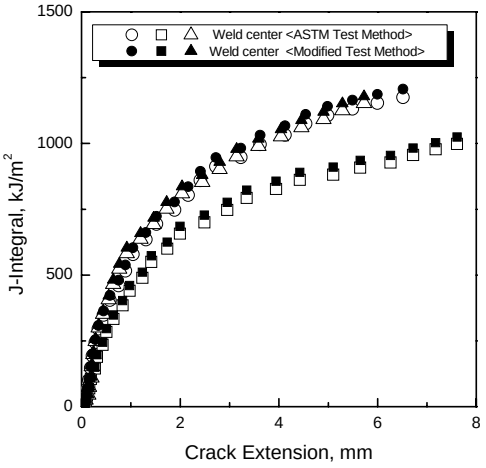

Fig. 4 Comparison of J-R curves

3.3 파괴인성 시험결과 재평가

유한요소 해석 결과를 통하여 제시한 협계용접부에 대한 수정된 파괴인성 시험법을 이용하여 기존에 수행한 파괴인성 시험 결과를 재평가 하였다. 기존 ASTM 시험법을 이용하여 구한 J-R선도와 수정된 시험법에 의한 J-R선도를 비교하여 동일 균열길이에서 파괴인성치의 차이를 평가하였다. 용접부 center에서 약 5%의 파괴인성치 차이를 보였으며, 기존 ASTM 시험법에 의한 결과보다 파괴인성치가 상승하는 결과가 나타났다. 이는 수정된 파괴인성 시험법이 HAZ 물성을 고려하여 파괴인성을 평가하였기 때문에 모재를 기준으로 한 ASTM 시험법의 결과보다 파괴인성치가 상승하는 결과를 얻은 것이라 판단된다.

4. 결론

(1) 용접부의 강도 불균질과 균열 길이를 고려한 용접부에 균열이 위치한 CT시험편의 소성 η계수 식을 제시하였다.

(2) 압입 시험을 이용하여 HAZ 물성측정 후 소성 η계수를 사용한 CT시험편의 수정된 파괴인성 시험법을 제시하였고, ASTM 시험법과 비교한 결과, 그 차이는 용접부 center에서 약 5%이다.

후기

본 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2007-03205)

참고문헌

1. Kim. Y. J., Schwalbe. K. H., 2001, "Mismatch Effect on Plastic Yield Loads in Idealised Weldments Ⅰ - Weld Center Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol.68, pp.163 ~ 182.
2. Yun-Jae Kim, K.-H. Schwalbe, 2001, "Mismatch Effect on Plastic Yield Loads in Idealised Weldments Ⅱ - Heat Affected Zone Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol.68, pp.183 ~ 199..
3. 허남수,김윤제, 김영진, 최영환, 양준석, 2003, "정확한 비선형 파괴역학 해석을 위한 Ramberg-Osgood 상수 결정법",대한기계학회 논문집, 제 27권, 제 9호, pp.1571~1578.