

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.67

원전배관 협개선 용접재 파괴인성 평가에 관한 연구[§]

허 용* · 박 수* · 신인환* · 석창성* · 양준석**

* 성균관대학교 기계공학과, ** 한국전력공사 전력연구원 원자력연구소

A Study on the Evaluation of the Fracture Toughness for the Narrow Gap Welding Part of Nuclear Piping

Yong Huh*[†], Soo Park*, In-Hwan Shin*, Chang-Sung Seok* and Jun-Seog Yang**

* Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

** Nuclear Power Research Laboratory, KEPRI/KEPCO

(Received August 10, 2009 ; Revised September 7, 2009 ; Accepted September 9, 2009)

Key Words: Narrow Gap Welding(협개선용접), Heat Affected Zone(열영향부), Strength Mismatch (강도 불균일), Fracture Toughness(파괴인성), Plastic η Factor(소성 η 계수)

초록: 원전 배관의 LBB 해석을 위한 파괴인성(J-R곡선)은 일반적으로 ASTM E1820에 따라 시험을 수행하여 획득한다. 그러나 ASTM E1820에 제시되어 있는 파괴인성에 관한 식은 균질재의 물성 평가를 위한 것이며, 협개선 용접부에 적용할 경우 실제와는 다른 파괴인성을 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ASTM에 제시되어 있는 균질재의 파괴인성 식에 의한 결과와 협개선 용접재의 특성을 고려하여 제안된 소성 η 계수 식에 의한 파괴인성의 차이를 비교 검토하기 위하여 협개선 용접이 적용된 배관에서 CT 시험편을 채취한 후 파괴인성 시험을 수행하였다.

Abstract: The fracture toughness for the LBB analysis of piping is generally determined by the J -integral according to ASTM E1820. However, since this evaluates a base metal, the fracture toughness for narrow gap welding can be differently than the real value. This study evaluated the plastic η factor of the narrow gap welding part of a nuclear piping with SA508 Cl.1a and SA312 TP316. Also, it performed the fracture toughness test for the narrow gap welding part and applied the new plastic η factor equation by Huh, et al. and then compared the results with those according with the ASTM standard.

1. 서 론

원자력 발전소와 같은 대형 구조물의 배관계통을 설계할 때 파단전누설(leak-before-break; LBB) 설계를 적용하면 양단순간파단(doubled ended guillotine break; DEGB) 설계를 적용한 경우 보다 제작 및 설치비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 육중한 배관 구속 장치가 제거되므로, 가동 중 원활하고 신속한 검사가 가능하고 검사자의 안전성을 증가시키는 이점이 있다.⁽¹⁻²⁾ 이러한 LBB 설계를 위한 파괴인성(J-R 곡선)은, 일반적으로 ASTM E1820⁽³⁾에 따라 시험을 수행하여 획득한다.

그러나 ASTM E1820에 제시되어 있는 파괴인성에 관한 식은 기본적으로 균질재의 물성치 평가를 위한 것이기 때문에, 용접 시험편의 경우 시험편의 잔여 리가먼트(ligament)가 용접폭보다 아주 작은 경우에만 적용이 가능하다고 알려져 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

최근 원자력 발전소에 사용되는 배관과 같은 대형 구조물 배관의 용접 방법으로 협개선 용접(narrow gap welding)이 많이 사용되고 있다. 협개선 용접은 용접폭이 기존 용접부에 비하여 좁기 때문에 용접 시 뒤틀림이 많이 발생하는 탄소강과 저합금강의 용접에 효율적이라고 알려져 있다. 기존 용접법에 비해 용접시간이 단축되기 때문에 용접부의 수축 및 변형, 그리고 잔류응력이 감소되는 장점이 있다. 현재 협개선 용접에 대한 대부분의 연구는 용접부의 건전성 평가에 집중되어 있으나 원전 배관 설계 및 수명관리에 중요한 LBB 해석에 적용하는 연구도 수행되고 있다.⁽⁶⁾

§ 이 논문은 2009년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2009. 4. 23-24, 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, yong@skku.edu

기존 배관 용접재에 대한 파괴인성시험의 경우, 용접폭이 넓어서 ASTM E1820에 제시되어 있는 파괴인성에 관한 식의 적용 조건을 만족시키지만 협개선 용접의 경우, 용접폭이 기존 용접부의 반 정도 되기 때문에 조건을 만족시키지 못한다. 따라서 협개선 용접재에 기존 ASTM에 제시되어 있는 파괴인성에 대한 식을 적용할 경우 파괴인성이 실제와는 다르게 측정될 수 있는 문제점이 있다.^(5,6) 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 협개선 용접 특성 중 파괴인성치에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자인 용접부의 강도 불균일(strength mismatch)과 용접폭(weld width) 등의 인자를 고려한 파괴인성에 대한 식이 필요하다.

평면 변형률의 경우에 ASTM E1820에 의한 J -적분은 탄성부분과 소성부분을 겹침법을 사용하여 다음과 같이 정의하고 있다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (1)$$

$$\text{여기에서, } J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E}, \quad J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B_N b}$$

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

이때, η 계수라고 부르는 η 는 무차원 상수이며, A_{pl} 는 하중-변위 선도의 소성 면적이고, B_N 은 두께에서 측면 홈(side groove)를 뺀 깊이이며, b 는 리가먼트이다.

허용 등⁽⁸⁾은 CT 시험편을 이용한 파괴인성 시험시 용접부를 포함한 경우와 모재만으로 구성된 경우에 대한 J -적분은 다르게 나타나기 때문에⁽⁴⁾ J -적분의 소성부분을 계산하기 위한 소성 η 계수 또한 영향을 받을 것이라고 생각하여 협개선 용접재를 대상으로 용접부 강도 불균일과 용접폭 변화에 따른 유한요소 해석을 수행하여 용접 특성을 고려한 소성 η 계수 식(4)를 제안하였다.

본 연구에서는 ASTM에 제시되어 있는 균질재의 파괴인성 식에 의한 결과와 협개선 용접재의 특성을 고려하여 제안한 소성 η 계수 식에 의한 파괴인성의 차이를 비교 검토하기 위하여 협개선 용접이 적용된 배관에서 CT 시험편을 채취한 후 파괴인성 시험을 수행하였다.

2. 협개선 용접재 소성 η 계수 식⁽⁸⁾

2.1 강도불균일 및 용접폭 변화에 따른 유한요소 해석

협개선 용접재의 소성 η 계수를 평가하기 위하여

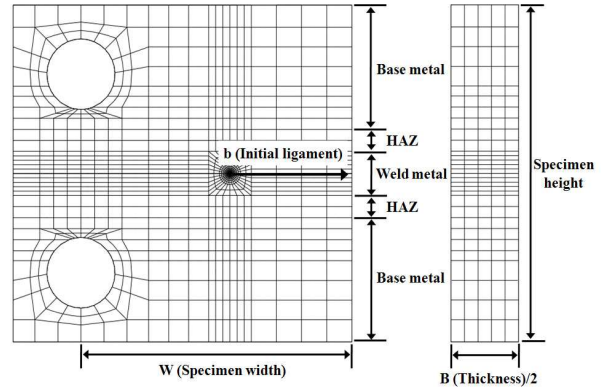


Fig. 1 Finite analysis model for strength mismatch

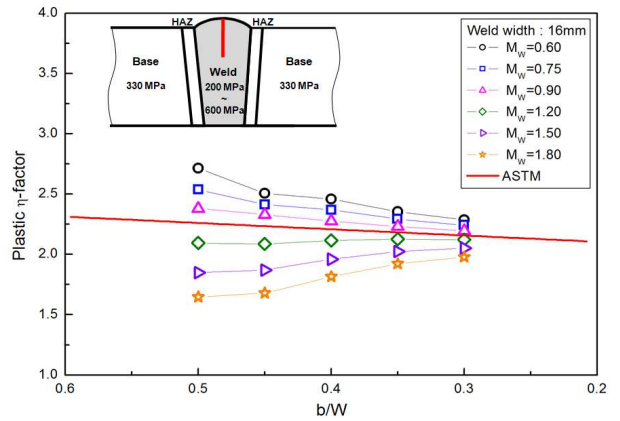


Fig. 2 Relation between plastic η factors and b/W for various strength mismatch (weld width : 16 mm)

Fig. 1과 같은 CT 시험편 형상의 유한요소 모델에 대하여 식 (3)의 용접부 강도 불균일 비 및 용접폭 변화에 따른 유한요소 해석을 수행하였다.⁽⁸⁾

$$M_W = \frac{\sigma_{YW}}{\sigma_{YB}} \quad (3)$$

여기에서, σ_{YB} 는 모재의 항복강도이며, σ_{YW} 는 용접부의 항복강도이다. Fig. 2는 용접폭 16 mm인 경우에 모재와 용접부의 강도비 M_W 변화에 따른 유한요소 해석 결과를 나타낸 것으로서, $M_W > 1$, over-matching인 경우에는 ASTM E1820에 제시되어 있는 소성 η 계수 식(2)보다 낮은 경향을 보였다. 또한 $M_W < 1$, under-matching인 경우에는 ASTM E1820에 제시되어 있는 소성 η 계수 식보다 높은 경향을 보였다.

이에 따라 모재와 용접부가 over-matching의 형태를 보일 때에 ASTM에 의한 식(2)를 사용한다면 파괴인성치가 용접 특성을 고려한 경우보다 큰 값을

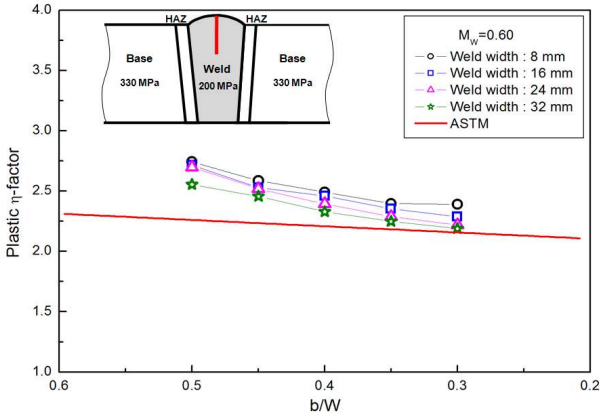


Fig. 3 Relation between plastic η factors and b/W for various weld width ($M_w = 0.6$)

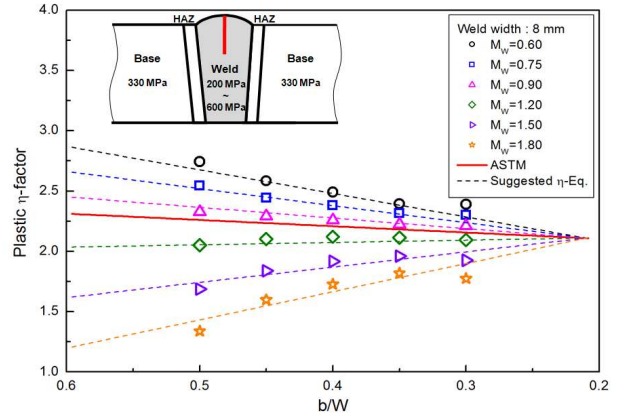


Fig. 5 Verification of the suggested plastic η factor equation (weld width : 8 mm)

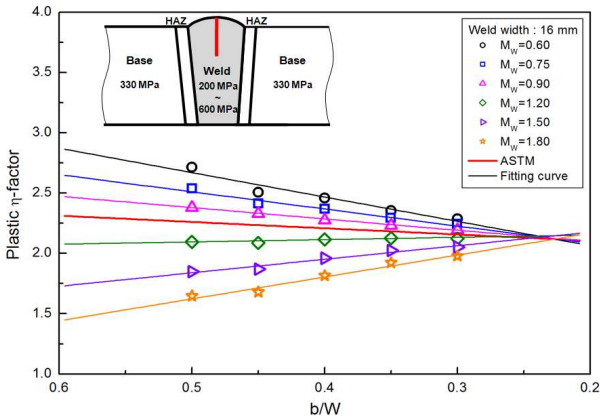


Fig. 4 Curve fitting of η factors

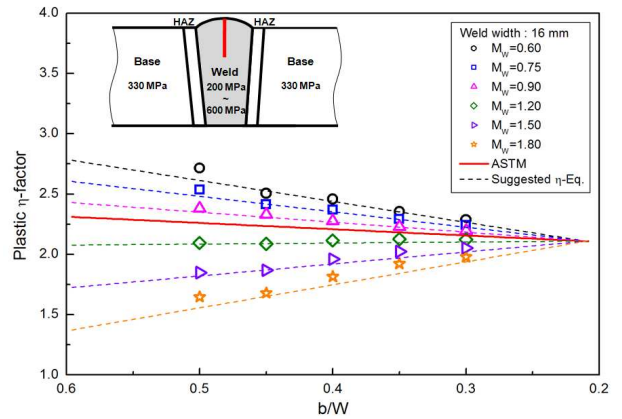


Fig. 6 Verification of the suggested plastic η factor equation (weld width : 16 mm)

갖게 되며, $M_w < 1$ 일 때, under-matching 인 경우에는 용접 특성을 고려한 경우보다 작은 값을 갖음을 알 수 있다.

Fig. 3은 $M_w = 0.6$ 일 때, 협개선 용접폭 변화에 따른 소성 η 계수의 변화를 비교하여 나타낸 것으로서 $b/W = 0.5$ 에서 용접폭 8 mm의 소성 η 계수가 32 mm의 소성 η 계수에 비하여 약 8% 크며, ASTM의 식보다 약 17% 큰 결과를 나타내고 있다. 따라서 소성 η 계수가 강도 불균일과 용접폭 변화에 따라 영향을 받기 때문에, 협개선 용접재의 파괴인성 평가 시 강도 불균일과 용접폭의 영향을 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

2.2 용접부 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 소성 η 계수 식

유한요소해석을 통해 구한 동종 용접부 강도 불균일 비 M_w 변화에 따른 소성 η 계수의 교차점이 Fig. 4와 같이 ASTM 소성 η 계수 식의 선상에 위치함을

확인할 수 있었다. CT 시험편을 이용한 협개선 용접부의 파괴인성 시험 시 균열진전에 따라 리가먼트의 크기가 줄어들게 되는데, 이에 따라 ASTM 시험법 적용 가능 조건인 잔여 리가먼트가 용접폭보다 아주 작은 경우를 만족하게 되므로 b/W 가 감소하면 협개선 용접부의 소성 η 계수가 ASTM에 제시된 소성 η 계수 식과 일치하여야 한다. 따라서 시행착오법을 이용하여 ASTM 소성 η 계수 식 선상에 위치하고 선형 곡선 접합이 가능한 교차점 $b/W = 0.21$, $\eta = 2.11$ 을 정하였으며, 이를 기준하여 다음과 같이 소성 η 계수 식 (4)를 제안하였다.

$$\eta = [3.43(\omega - 1.2)][(M_w - 1) + 0.522] \quad (4)$$

$$((b/W) - 0.21) + 2.11$$

여기서, $\omega = \frac{W_{weld\ width}}{W_{specimen\ height}}$

Table 1 Chemical composition of materials

(wt %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SA508 Cl.1a	0.20	0.22	1.15	0.01	0.002	0.22	0.096	0.056
SA312 TP316	0.08	0.75	2.00	0.04	0.03	12.0	17.0	1.50

Table 2 Welding condition

Materials	Welding Method	Filler Metal	
		AWS class	Size (mm)
508 Cl.1a to 508 Cl.1a	GTAW (machine Welding)	ER70S-6	ϕ 0.9
SA312 TP316 to SA312 TP316		ER308L	

Table 3 Mechanical properties of the narrow gap welding part

Region	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
SA508 Cl.1a Base metal	330	518
SA508 Cl.1a Weld Part	398	527
SA312 TP316 Base metal	276	557
SA312 TP316 Weld part	420	625

Figs. 5-6은 소성 η 계수 식의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 구한 소성 η 계수와 제안한 소성 η 계수 식을 이용한 결과를 비교하여 나타낸 것으로서 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 유한요소 해석 결과와 약 5%안에서 일치하는 것으로 나타났다.

3. 협개선 용접재 파괴인성 시험

3.1 시험재료

본 연구에서 사용된 재료는 원자력 발전소 배관 구조물에 사용되는 SA508 Cl.1a, SA312 TP316 재료로서 협개선 용접이 적용되었다.

각각의 화학조성은 Table 1과 같으며, 용접 방법은 Table 2와 같다.

3.2 시험편 및 부위별 재료 물성

각각의 용접부와 모재에서 시험편 재료를 채취한 후 ASTM E8⁽⁹⁾과 E1820에 따라 인장 및 파괴인성 시험편을 제작하였다. 파괴인성 시험편의 경우 시험편 채취 시 1T-CT 시험편에 포함되는 용접폭의 크기를 확인하기 위해 시험편 양쪽 표

면에 에칭을 수행하여 용접폭의 넓이를 확인하였다. SA508 Cl.1a 용접재 파괴인성 시험편의 경우 용접폭이 16 mm 이며, SA312 TP316 용접재 파괴인성 시험편의 용접폭은 8 mm이다.

ASTM E8에 따라 1 mm/min의 속도로 인장시험을 수행하였으며 Table 3에 인장시험 결과를 나타내었다.

3.3 시험편 및 부위별 재료 물성

파괴인성시험에 사용된 장비는 INSTRON사에서 제작한 25 ton 용량의 전기유압식 만능시험기와 클립게이지 등을 사용하였다.

ASTM E1820에 따라 단일 시험편(single specimen method)으로 부위별 파괴인성 시험을 수행하였다. 원자력 발전소 가동 온도인 316°C로 온도를 유지하며 시험을 수행하였으며, 시험 속도는 1 mm/min으로 하였다. 또한 균열길이의 측정은 제하 컴플라이언스법(unloading compliance method)을 이용하였다. Table 4는 각각의 파괴인성시험 결과를 나타낸 것이다.

4. 협개선 용접재 소성 η 계수 식 적용 평가

4.1 시험재료에 따른 소성 η 계수

유한요소해석을 통하여 제안된 협개선 용접재에 대한 소성 η 계수 식의 적용성을 평가하기 위하여 기존 ASTM 시험법을 이용하여 구한 $J-R$ 선도와 본 논문의 소성 η 계수 식을 적용한 $J-R$ 선도를 비교하여 파괴인성의 차이를 평가하였다.

인장시험 결과로부터 식 (4)에 적용되는 강도 불균일 비 M_W 를 구하였으며, 이 때 SA508 Cl.1a SA312 TP316 용접재의 강도 불균일비는 각각 $M_W = 1.21$, $M_W = 1.52$ 이다.

각각의 시험편에 대한 소성 η 계수 식을 식 (5), (6)에 나타내었다.

$$508NGW : \eta = 2.140 - 0.141(b/W) \quad (5)$$

$$316NGW : \eta = 2.402 - 1.391(b/W) \quad (6)$$

Table 4 Summary of fracture toughness test results

Region	Test Temp. (°C)	Specimen No.	Weld Width	J_{IC} (kJ/m ²)	C_1 (kJ/m ²)	C_2
SA508 Cl.1a to SA508 Cl.1a Narrow gap weld part	316	508NGW-J1	16	482.5	557.4	0.485
		508NGW-J2		302.5	436.4	0.596
316NGW-J1		8	1398.7	1062.4	0.372	
316NGW-J2			1546.8	1094.6	0.416	

Table 5 Results of the fracture toughness test by the suggested plastic η equation

Region	Test Temp. (°C)	Specimen No.	Weld Width	J_{IC} (kJ/m ²)	C_1 (kJ/m ²)	C_2
SA508 Cl.1a to SA508 Cl.3a	316	508NGW-J1	16	422.3	515.3	0.504
		508NGW-J2		313.3	410.9	0.547
316NGW-J1		8	1014.9	841.8	0.411	
316NGW-J2			1033.1	809.8	0.517	

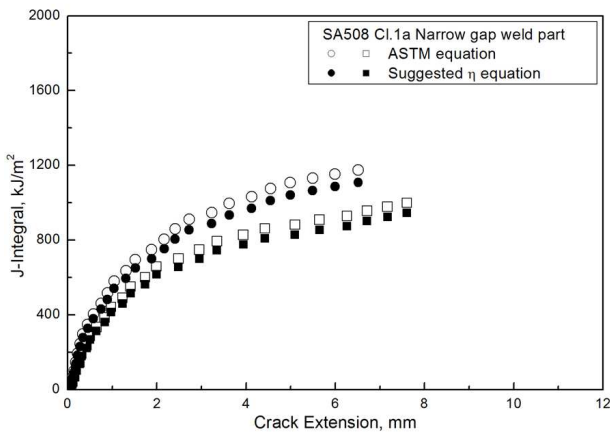


Fig. 7 Comparison of J - R curves between ASTM and suggested plastic η equation(SA508 Cl.1a)

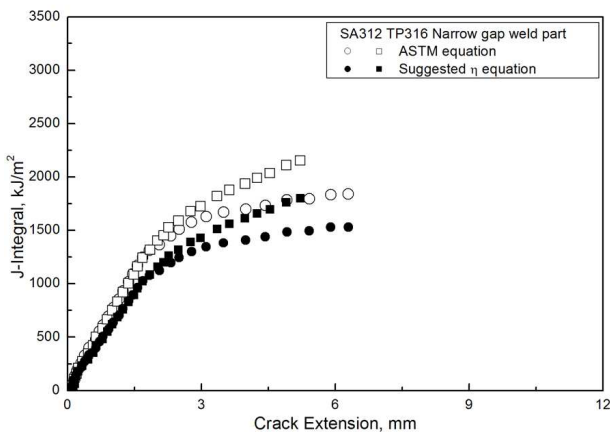


Fig. 8 Comparison of J - R curves between ASTM and suggested plastic η equation(SA312 TP316)

4.2 협개선 용접재 소성 η 계수 식 적용 평가

Figs. 7~8은 ASTM의 파괴인성 시험법에 의한 결과와 제안된 소성 η 계수 식을 적용한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 제안된 소성 η 계수 식을 적용하였을 때 SA508 Cl.1a 용접재의 경우 약 6%, SA312 TP316 용접재의 경우 약 16% 파괴인성이 낮아지는 것으로 나타났다.

본 연구의 협개선 용접재는 모재와 용접부의 강도 불균일 비가 $M_w > 1$, over-matching의 경우이기 때문에 ASTM E1820에 제시되어 있는 소성 η 계수 식을 적용하였을 때보다 파괴인성이 낮게 평가되는 것이다. 또한 Fig. 2의 강도 불균일 비 변화에 따른 유한요소해석 결과와 Fig. 3의 용접폭 변화에 따른 유한요소해석 결과에서 나타난 바와 같이 용접폭 변화에 따른 영향에 비해서 강도 불균일 비 변화에 따른 영향이 크게 나타났다. 따라서 $M_w = 1.21$ 인 SA508 Cl.1a 용접재보다 $M_w = 1.52$ 인 SA312 TP316 용접재의 파괴인성이 더 크게 차이나는 것으로 판단된다.

Table 5는 유한요소해석을 통하여 제안된 소성 η 계수 식을 적용하여 기존 파괴인성 시험 결과를 재해석한 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 ASTM에 제시되어 있는 모재 기준 파괴인성 시험법에 의한 시험 결과와 협개선

용접재의 특성을 고려하여 제안된 소성 η 계수 식을 적용한 결과의 차이를 고찰하기 위하여 협개선 용접재에서 시험편을 채취하고 파괴인성 시험을 수행하여 평가하였으며 이로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 협개선 용접재에 대한 유한요소해석 결과로부터 협개선 용접재의 파괴인성 평가 시 강도 불균일, 용접폭은 반드시 고려되어야 함을 확인하였다.

(2) ASTM과 협개선 용접재의 강도 불균일 및 용접폭을 고려한 소성 η 계수 식에 의한 파괴인성치를 비교하여 제안된 소성 η 계수 식의 적용성을 검증하였다.

(3) 제안된 소성 η 계수 식을 적용한 결과, 기존 ASTM에 의한 식을 적용한 경우보다 파괴인성치가 감소하였다.

(4) 본 연구에서 제안된 소성 η 계수 식은 협개선 용접재의 강도 불균일, 용접폭 등을 고려하였기 때문에 보다 정확한 협개선 용접부의 파괴인성평가를 수행할 수 있으며 이로 인해 LBB 적용 가능 범위가 넓어지는데 기여할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업과 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0081802)

참고문헌

- (1) U.S. NRC, 1983, "Evaluation of Potential of Pipe Break," Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061, Vol. 3.
- (2) Seok. C. S., Kang. B. K., 1999, "Evaluation of Fracture Resistance Characteristics of SA508 CL.1a Carbon Steel for Piping System," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 23, No. 7, pp. 1147~1154.
- (3) ASTM, 2001, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," ASTM E1820-01.
- (4) Huh. Y., Cho. S. K., Koo. J. M. and Seok. C. S., 2007, "Plastic η -factor for Fracture Toughness Test of SA508 Narrow-gap Welds," 2007 Spring Conference of KSME
- (5) Kim. Y. J. and 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.
- (6) Kim. Y. J. and Schwalbe. K. H., 2001, "Mismatch Effect on Plastic Yield Loads in Idealised Weldments II- Heat Affected Zone Cracks," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, pp.183~199.
- (7) Korea Institute of Nuclear Safety(KINS), 2004, "Evaluation of the Integrity of the Narrow Gap welds," Regulatory research on the integrity of reactor components, HR-571.
- (8) Huh. Y., Lee. K. H., Kim. H. I., Koo. J. M. and Seok. C. S., 2008, "Evaluation of the Plastic η -Factor Considering Strength Mismatch in a Narrow Gap Welding Part(II)," *KSME(A)*, Vol.32, No.6, pp.512~518.
- (9) ASTM, 2001, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM E8-01.

- (1) U.S. NRC, 1983, "Evaluation of Potential of Pipe Break," Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061,