

협계용접부 강도 불균일을 고려한 소성 η 계수 평가 (I)

허 용* · 김형익* · 선광상** · 구재민* · 석창성†
(2008년 3월 5일 접수, 2008년 4월 14일 심사완료)

Evaluation of the Plastic η -Factor Considering Strength Mismatch in a Narrow Gap Welding Part (I)

Yong Huh, Hyung-Ick Kim, Kwang-Sang Seon, Jae-Mean Koo and Chang-Sung Seok

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

Abstract

This study evaluated the influence of the strength mismatch of HAZ for a plastic η -factor, which is the principle parameter determining the plastic portion of J -integral to assess the fracture toughness of the weldment. The specimen of tensile and hardness test was manufactured from the piping applying narrow-gap welding, and the mechanical properties of weldment, HAZ and a base metal were obtained. To perform the finite element analysis according to the ratio of strength mismatch, the material properties was chosen with the change of strength using the determination method of Ramberg-Osgood constant. Also, the influence of the strength mismatch of HAZ was determined using finite element analysis by those properties.

1. 서론

일반적으로 용접부가 존재하는 배관에 대한 파괴인성의 평가는 배관의 물성치를 균일하게 가정하고 제시되어 있는 ASTM 시험법을 이용하여 평가를 수행한다. 그러나 이런 평가방법은 용접부, HAZ 및 모재의 물성치가 균일하지 않은 용접 배관의 특성을 고려하지 않은 것으로서 불확실한 평가결과를 제시한다고 알려져 있으며, 이에 따라 보다 정확한 파괴인성을 평가하기 위해서는 용접부의 강도 불균일 특성을 고려하여야 한다.^(1~3)

용접부의 건전성을 평가하기 위해 많은 연구자들은 모재와 용접부의 강도 불균일 비(strength mismatch ratio)를 이용하여 평가해왔다. 그러나 이는 용접배관 및 용접 구조물 평가에 있어 열영향부(heat affected zone : HAZ)를 배제하기 때문에 정확한 용접부 특성을 평가하지 못하고 있는 실정이다. 용접 시 모재가 변형되어 생성되는 HAZ는 부위가 협소하고 재료물성이 균일하지 못하여 재료물성 평가에 있어 가장 큰 관심이 되는 부위이며, 이에 따라 용접부의 건전성을 평가하기 위해서는 우선적으로 다른 부위에 대해 크기와 물성이 다른 용접 열 영향부 강도 불균일에 대한 평가가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 협계용접부의 파괴인성 평가를 위해 J -적분의 소성성분을 결정하는 중요한 상수인 소성 η 계수에 대한 HAZ 강도 불균일의 영향

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

* 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 대학원 기계공학과

Table 1 Chemical composition of materials (wt %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
SA508 Cl.1a	0.2	0.22	1.15	0.01	0.002	0.22	0.096	0.056	0.032
SA508 Cl.3a	0.19	0.08	1.35	0.006	0.002	0.82	0.17	0.51	0.009

을 3차원 유한요소해석을 이용하여 평가하고자 한다. 이를 위해 이중 협계용접이 적용된 배관에서 인장 및 경도 시험편을 채취하여 용접부, HAZ 및 모재의 물성을 획득하였으며, 강도비를 고려한 유한요소해석을 수행하기 위하여 항복강도에 따른 Ramberg-Osgood 상수 결정법을 제시하고, 이를 이용하여 강도변화에 따른 재료물성을 결정하였다. 또한 HAZ의 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 영향을 3차원 유한요소해석으로 평가하였다.

2. 협계용접부 부위별 인장 및 경도시험

2.1 시험재료

본 연구에서 사용된 재료는 원자력 발전소 1차 계통 배관 구조물에 사용되는 SA508 Cl.1a, SA 508 Cl.3a 탄소강 재료로서 배관의 크기는 직경 1000 mm, 두께 100 mm이며, 각각의 화학조성은 Table 1과 같다. SA508 Cl.1a와 SA508 Cl.3a를 용접한, 즉 이중재료 협계용접이 적용된 배관을 사용하였고, 용접 방법은 Table 2와 같다.

2.2 인장 및 경도 시험편

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실제 배관 용접부와 모재에서 ASTM E8⁽⁴⁾에 따라 시험편 재료를 채취하여 인장 시험편을 제작하였으며, 부위의 크기가 작은 HAZ의 경우, 인장 시험편을 채취할 수 없기 때문에 경도시험을 통한 인장 물성 획득을 위해 용접부 및 모재 전체 부위가 포함되도록 원주방향으로 단면을 절단한 경도 시험편을 제작하였다. Fig. 2는 경도시험편의 형상을 나타낸 것이다.

인장시험을 위해 INSTRON사에서 제작한 25 ton 전기 유압식 만능 재료시험기를 사용하였으며, 경도시험을 위해 AKASHI사에서 제작한 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하였다.

2.3 모재 및 용접부 강도 특성

ASTM E8에 준하여 1 mm/min의 속도로 상온 인장시험을 수행하였고, 최대하중을 원단면적으로 나누어 인장강도를 결정하였다. 또한 시험에서 얻

Table 2 Welding condition

Material	Welding Method	Filler Metal	
		AWS class	Size (mm)
508 Cl.1a to 508 Cl.3a	GTAW (machine Welding)	ER70S-6	ϕ 0.9

Table 3 Results of tensile test

Material	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)	Ramberg-Osgood Constant	
			α	n
Weldment	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

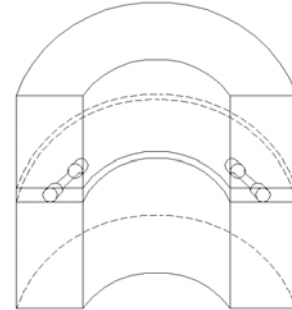


Fig. 1 Schematic illustration showing how to collect tensile specimen

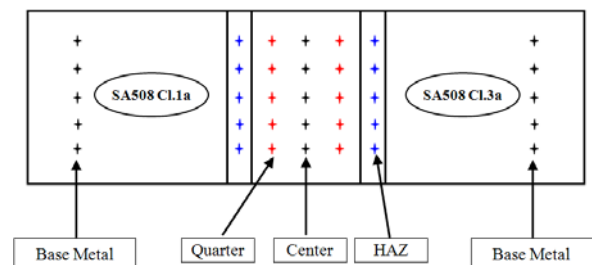
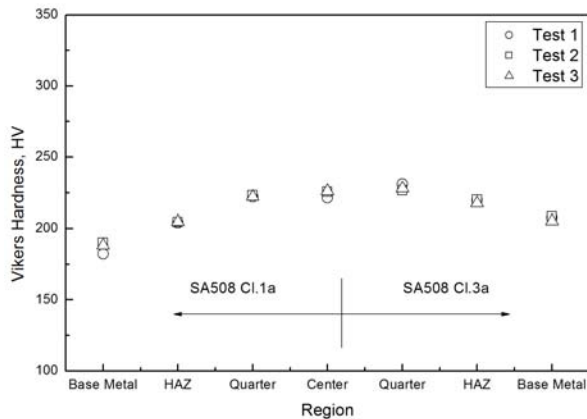


Fig. 2 Micro vickers hardness test specimen

어진 하중-변위선도로부터 공칭응력-공칭변형률, 진응력-진변형률 선도 및 Ramberg-Osgood 상수를 얻었다. 응력-변형률 선도에서 상항복점 및 하항복점이 명확히 구분되어 하항복점을 항복강도로 결정하였으며, 시험 결과를 Table 3에 나타냈다.

Table 4 Summary of hardness test results

Direction	Region	Vickers hardness (HV)		
		1st	2nd	3rd
SA508 Cl.1a	Base metal	192.2	199.9	198.3
	HAZ	204.2	204.6	204.7
Weldment	Quarter	222.0	223.1	222.1
	Center	221.3	225.6	226.1
	Quarter	230.9	226.6	227.9
SA508 Cl.3a	HAZ	202.0	202.1	203.4
	Base metal	197.7	200.5	197.1

**Fig. 3** Comparison of vickers hardness

2.4 열영향부 강도 특성

경도 시험편에 에칭(etching)을 하여 용접부, 모재 및 HAZ 등의 부위를 확인하였으며, 인가된 하중에 대해 압흔이 선명히 관찰될 수 있도록 시험편의 표면을 매끄럽게 연마(polishing)하고, ASTM E384에 준하여 마이크로 비커스 경도시험을 수행하였다.⁽⁵⁾ 시험 하중을 2 kg, 하중 유지시간을 12 초로 하였으며, 부위별 5회 시험을 수행하여 최대값과 최소값을 제외한 경도 분포는 Fig. 3과 같으며, Table 4는 경도시험 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

HAZ는 용접 시 모재가 용접열에 의해 그 조직이 변형된 부분으로서 모재보다 약 5~10% 상승한 경도값이 측정되어 유한요소해석 시 HAZ의 항복강도를 모재의 항복강도보다 10% 높게 적용하였다. 또한 용접부 1/4(quarter)의 경도는 용접부 중앙의 경도와 유사하여 유한요소 해석 시 필요한 인장 물성을 용접부 중앙과 동일하게 적용하였다.

Table 5 Material properties for finite element analysis

Region	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Ramberg Osgood Constant	
				α	n
SA508 Cl.1a	200	0.3	330.4	4.845	5.280
SA508 Cl.3a			499.3	7.727	2.622
Weld center			397.7	5.188	3.386
HAZ			361.6	5.018	5.386

SAE J 417⁽⁶⁾에 제시되어 있는 환산표를 이용하여 인장 시험편 채취의 어려움으로 인하여 구하지 못한 HAZ의 인장 물성을 구하였다. 인장 및 경도시험을 통하여 획득한 인장 물성을 유한요소 해석에 적용하기 위하여 Table 5에 이를 정리하였으며, 이를 유한요소해석의 기준 물성으로 하였다.

3. 항복강도를 이용한 Ramberg-Osgood 상수 결정

GE/EPRI법 등과 같은 변형소성이론(deformation plasticity)에 기반한 공학적 계산식으로 균열 구조물에 대한 탄소성 파괴역학(elastic plastic fracture mechanics : EPFM) 매개변수인 J -적분을 구하는 경우에는 입력 조건으로 구조물 및 균열의 형상, 그리고 인장 물성에 대한 Ramberg-Osgood 상수가 사용된다. 따라서 J -적분 계산을 위해서는 먼저 해석 대상의 응력-변형률 곡선을 Ramberg-Osgood 관계식으로 이상화하여야 한다. 그러나 Ramberg-Osgood 상수는 응력-변형률 곡선의 곡선 접합(curve fitting) 구간 및 방법에 따라 변하며 이로 인해 J -적분 계산결과도 크게 변한다는 문제가 있다. 이로 인해 정확한 EPFM 매개변수를 구할 수 있는 최적의 Ramberg-Osgood 곡선 접합 방법은 아직 제시되지 못하고 있으며, 해석 대상과 평가자에 따라 다양한 방법이 사용되고 있는 실정이다.⁽⁷⁻⁹⁾

본 연구에서는 협계용접부의 부위별 강도 불균일을 고려한 소성 η 계수의 평가를 수행하기 위하여 강도 변화에 따른 Ramberg-Osgood 상수를 획득하여야 한다. 그러나 강도 변화에 따른 Ramberg-Osgood 상수를 획득하기 위해서는 강도 변화에 따른

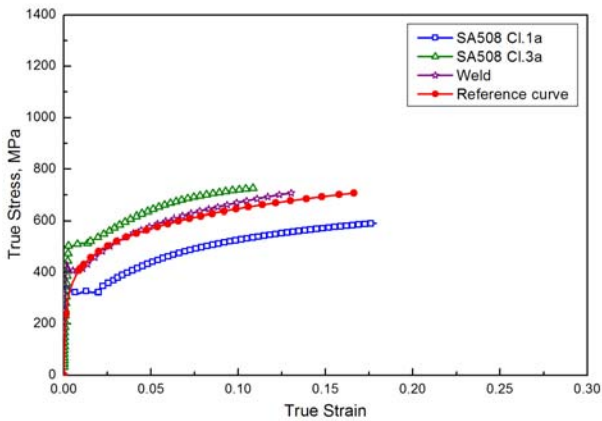


Fig. 4 True stress - true strain curve of base metal, weld & reference curve

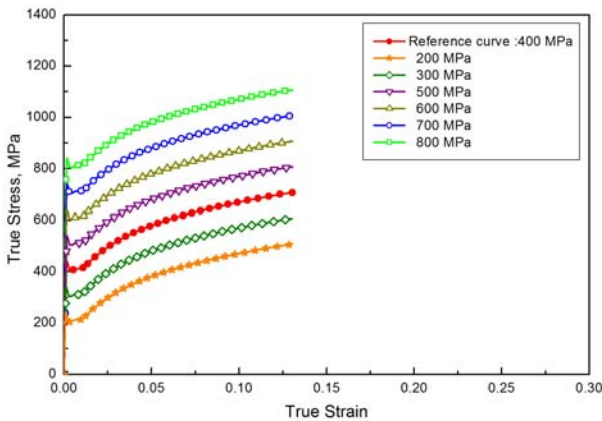


Fig. 5 Reference curve offset

인장 시험을 모두 수행해야 하기 때문에 본 장에서는 인장시험을 수행하지 않고 항복강도 값만을 알고 있는 경우에 Ramberg-Osgood 상수 α , n 값을 획득하기 위한 방법을 제시하려 하며, 이를 위해 실제 응력-변형률 데이터와 Ramberg-Osgood 관계식을 이용하여 Ramberg-Osgood 상수를 획득하였고, 이 결과를 기반으로 참조선도를 작성하였다. 또한 항복강도를 변화시켜 획득한 참조선도가 재료의 종류에 영향을 받지 않도록 고려하였으며, 재료의 항복강도만을 알고 있는 경우에 Ramberg-Osgood 상수를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

3.1 참조선도를 이용한 Ramberg-Osgood 상수 결정

일반적인 Ramberg-Osgood 상수의 결정은 인장시험을 수행하고 진응력-진변형률 선도에 Ramberg-Osgood 관계식 (1)을 곡선 접합하여 결정한다. 이에 따라 인장시험을 수행하여 모재 및 용접부의 진응력

Table 6 Determination of the Ramberg-Osgood constant using reference curve

Yield Strength (MPa)	Ramberg-Osgood Fitting		Fitting		Function Fitting	
	α	n	α	n	α	n
312 (SA508 Cl.1a)	6.23	4.47	3.13	4.92	3.53	4.92
499 (SA508 Cl.3a)	3.77	6.34	2.11	6.79	2.54	6.79
403 (Weld Center)	3.80	4.99	2.53	5.83	2.95	5.83
200	4.25	3.91	4.66	3.80	4.82	3.80
300	3.51	4.87	3.66	4.80	3.63	4.80
400	2.96	5.82	3.00	5.80	2.97	5.80
500	2.49	6.84	2.53	6.80	2.54	6.80
600	2.15	7.83	2.18	7.80	2.23	7.80
700	1.83	8.94	1.91	8.80	2.01	8.80
800	1.59	10.0	1.70	9.80	1.83	9.80

-진변형률 선도를 구하였으며, 항복강도를 400 MPa로 고정하고, Ramberg-Osgood 상수 α , n 을 변화시켜가며 모재 및 용접부의 진응력-진변형률 선도 형태와 유사한 참조선도를 결정하였다. Fig. 4는 모재 및 용접부의 진응력-진변형률 선도와 획득한 참조선도를 나타낸 것이다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

여기서, σ_0 는 기준 응력으로서 일반적으로 재료의 항복강도를 사용하며, ϵ_0 는 기준 변형률이다.

Fig. 5는 참조선도가 재료의 종류에 영향을 받지 않도록 고려하기 위하여 항복강도의 변화(200~800 MPa)에 따라 참조선도를 offset한 결과를 나타낸 것이다. 식 (1)을 이용하여 offset된 선도에 대한 Ramberg-Osgood 상수 α , n 을 획득하였으며, 그 결과를 Table 6의 Ramberg-Osgood fitting에 나타냈다.

Ramberg-Osgood fitting의 α 와 n 에서 α 를 고정하고 상수 n 을 항복강도에 대한 식 (2)로 표현하였으며, 획득한 식을 이용하여 다시 항복강도 변화에 따른 n 값을 획득하였다. 또한, 추출된 n 값을 고정하고 상수 α 를 항복강도에 대한 식 (3)으로 표현하였으며, 획득한 식을 이용하여 다시

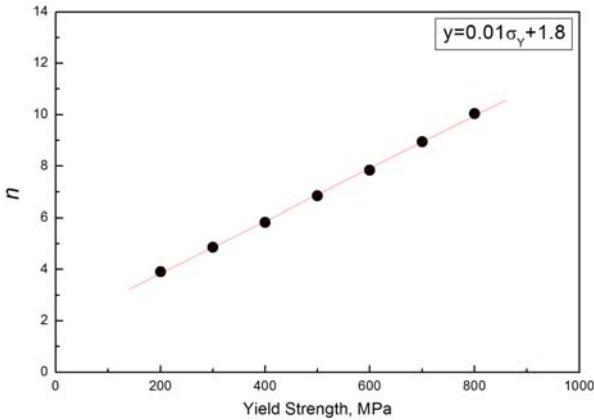


Fig. 6 Curve fitting of Ramberg-Osgood constant n

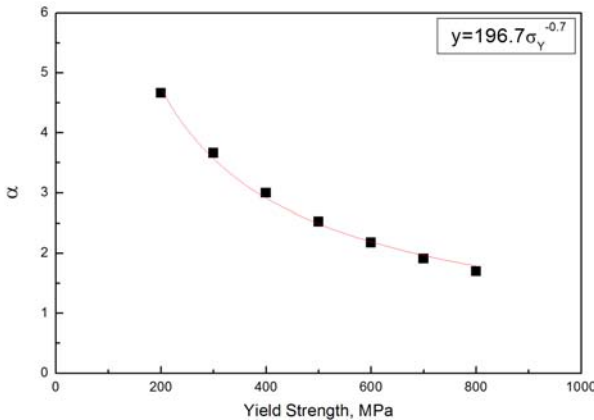


Fig. 7 Curve fitting of Ramberg-Osgood constant α

항복강도 변화에 따른 α 값을 획득하여 Table 6의 fitting에 나타냈다. Table 6의 function fitting과 Fig. 6과 Fig. 7은 최종적으로 획득한 결과와 관계식을 구하기 위한 곡선 집합을 나타낸 것이다.

$$n = 0.01\sigma_Y + 1.8 \quad (2)$$

$$\alpha = 196.7\sigma_Y^{-0.7} \quad (3)$$

3.2 Ramberg-Osgood 상수 결정법 검증

제시한 참조선도를 이용한 Ramberg-Osgood 상수 결정법을 검증하기 위해 모재 및 용접부의 진응력-진변형률 선도를 곡선 집합하여 구한 Ramberg-Osgood 상수와 식 (2)와 (3)을 이용하여 구한 Ramberg-Osgood 상수를 비교하여 Figs. 8~10에 나타냈다. 변형률이 점차 증가할수록 인장시험을 통한 결과와 식 (2)와 (3)에 의한 결과의 차이가 최대 약 5% 정도 나타났으나, 변형률이 작은 영역에서는 3% 이내로 일치하였다. 기존의 연구⁽⁸⁾에서 변형률

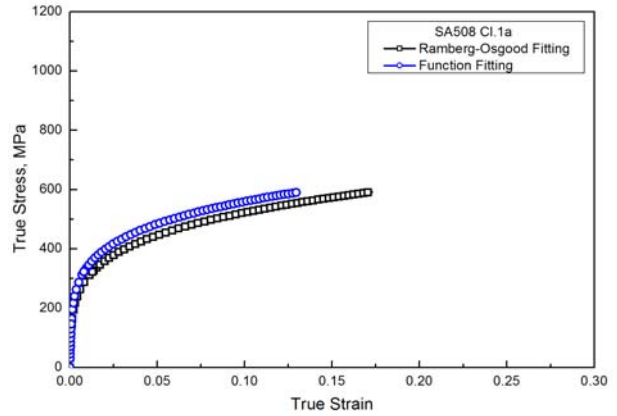


Fig. 8 Comparison of the Ramberg-Osgood fitting and function fitting (SA508 Cl.1a)

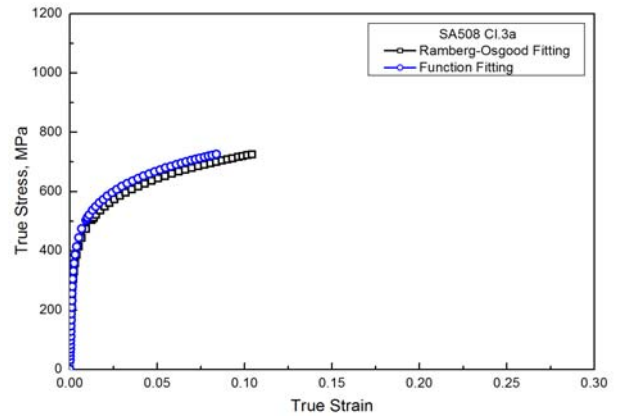


Fig. 9 Comparison of the Ramberg-Osgood fitting and function fitting (SA508 Cl.3a)

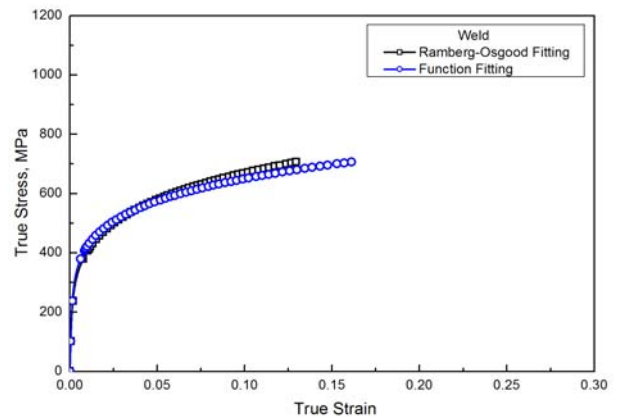


Fig. 10 Comparison of the Ramberg-Osgood fitting and function fitting (Weld)

이 작은 영역에서 Ramberg-Osgood 곡선 집합 결과가 정확하다고 알려져 있으며, 이에 따라 본 절의 참조선도를 이용한 Ramberg-Osgood 상수 결정법의 타당성을 검증하였다.

4. 열영향부 강도 불균일에 따른 소성 η 계수 평가

4.1 평가 방법

용접부의 강도 불균일에 따른 소성 η 계수를 평가하기 위해서는 모재와 용접부, 모재와 HAZ의 강도비를 고려해야 한다. 일반적으로 기존 연구자들은 모재와 용접부의 강도 불균일 비를 mismatch factor(M_W)라 하며, 식 (4)와 같이 정의하여 용접부 강도 불균일에 대한 평가를 수행하여 왔다. 이 때 $M_W = 1$ 은 대상 전체가 모재로 설명되며, $M_W > 1$ 인 경우, 즉 모재의 항복강도가 용접부의 항복강도보다 낮을 때에는 over-matching이라 하며, $M_W < 1$ 인 경우, 즉 모재의 항복강도가 용접부의 항복강도보다 높을 때를 under-matching이라 한다.^(1,2) 그러나 이러한 평가는 용접부에서 HAZ의 영향을 검증하지 않은 것이기 때문에 정확한 평가라 볼 수 없으며, 이로 인해 평가의 불확실성을 개선하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 HAZ의 영향을 평가하기 위해 동중용접이 적용된 경우에 모재와 HAZ의 강도 불균일 비를 식 (5)로 정의하였다. 여기서, σ_{YB} , σ_{YW} , σ_{YH} 는 각각 모재, 용접부 및 HAZ의 항복강도이다.

$$M_W = \frac{\sigma_{YW}}{\sigma_{YB}} \quad (4)$$

$$M_H = \frac{\sigma_{YH}}{\sigma_{YB}} \quad (5)$$

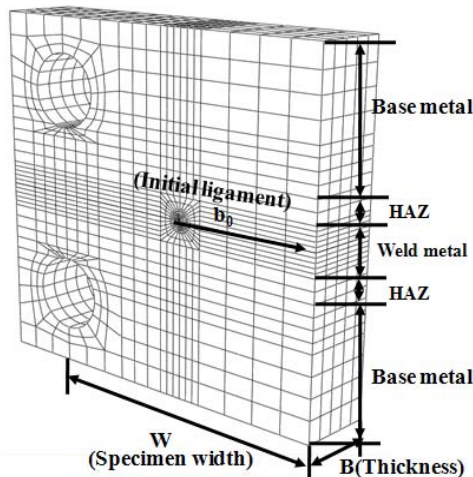


Fig. 11 Finite analysis model for strength mismatch

4.2 유한요소 모델 및 해석 방법

HAZ 강도 불균일에 따른 소성 η 계수를 평가하기 위하여 Fig. 11과 같이 1T-CT 시험편 중앙에 용접부가 위치하고, 양측으로 HAZ 및 모재가 포함되며, 두께방향의 대칭성을 고려한 3차원 유한요소모델을 구성하였다. 본 연구의 협계용접이 적용된 배관재료의 경우, 용접폭은 약 16 mm, HAZ는 약 4 mm로 측정되었기 때문에 유한요소 모델 또한 기존 용접폭과 HAZ 폭을 측정치와 같게 하였으며, 용접폭 변화에 따른 HAZ의 강도 불균일을 고려하기 위하여 HAZ 폭은 4 mm로 고정하고 용접폭은 8, 24, 32 mm로 변화시켰다.

균열 선단에서의 구속효과를 정량화하기 위해 균열 선단에 매우 조밀한 유한 요소망을 구성하였으며, 약 4,000 개의 요소(element)와 약 21,000 개의 절점(node)으로 구성된 20절점 등계수 사각 주요소 (20-node qua-dratic brick integration element : C3D 20)를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 재료는 Ramberg-Osgood 관계식을 만족한다고 가정하였다. 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.7을 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, ABAQUS에서 제공하는 영역 적분법을 사용하여 유한요소해석 결과로부터 J -적분을 계산하였다.

3차원 유한요소 모델의 경우 J -적분은 경로에 독립적이지만, 두께방향의 값은 변화하기 때문에 J -적분의 두께방향 평균값을 사용하여 소성 η 계수를 결정하였다.

용접부에서 HAZ의 영향만을 평가하기 위하여 모재와 용접부는 동일한 항복강도로 고정하였으며, 인장 및 경도시험 결과 HAZ의 강도가 모재보다 약 10% 정도 증가되었기 때문에 모재와 HAZ의

Table 7 Summary of finite element analysis for strength mismatch (M_H)

M_H	σ_{YB} (MPa)	σ_{YW} (MPa)	σ_{YH} (MPa)	HAZ Width (mm)	Weld Width (mm)			
0.8	330	330	264	4	16			
0.9	330	330	297	4	16			
1.2	330	330	396	4	16			
1.1	330	330	363	4	8	16	24	32
1.1	500	550	500	4	8	16	24	32

강도비인 M_H 를 $\pm 20\%$ 로 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 또한 동일한 M_H 에서 용접폭 변화에 따른 영향을 평가하였다. Table 7은 해석 대상을 나타낸 것이다.

4.3 유한요소 모델 검증

본 연구에서 사용된 유한요소 모델의 검증을 위해 모재, HAZ 및 용접부로 구성되어 있는 유한요소 모델을 동일한 물성을 갖는 모재로 가정하였다. CT시험편에 대한 응력확대계수(stress intensity factor) K 값에 대하여 ASTM E1820⁽¹⁰⁾에 제시되어 있는 이론해인 식 (6)과 3차원 유한요소 해석 결과를 균열길이에 따라 Fig. 12(a)에서 비교하여 나타냈으며, 최대 5% 이내로 일치하였다. 또한 Fig. 12(b)는 ASTM E1820에 제시되어 있는 소성 η 계수에 대한 식 (7)과 유한요소해석을 통해 구한 소성 η 계수의 경향을 나타낸 것으로서, 그 차이는 최대 2% 이내였다. 따라서 이 결과를 통해 유한요소 모델의 타당성을 검증하였다.

$$J = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \eta \frac{A_{pl}}{(W-a)B} \quad (6)$$

$$\eta = 2 + 0.522(b/W) \quad (7)$$

4.4 유한요소 해석 결과

HAZ 강도 불균일에 따른 소성 η 계수를 평가하기 위하여 모재와 HAZ의 강도비인 M_H 를 변화시켜가며 유한요소해석을 수행하였다. 이에 대한 결과를 ASTM에 제시되어 있는 소성 η 계수 계산식 (7)과 비교하여 Figs. 13~15에 나타냈다.

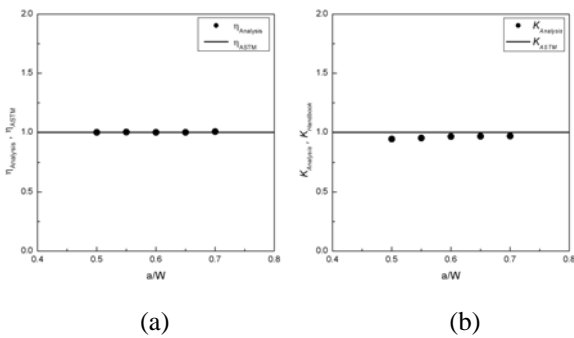


Fig. 12 Comparison of FEM results with (a) hand-book solution and (b) ASTM E1820

Fig. 13은 모재와 HAZ의 강도비 M_H 를 모재에 대하여 $\pm 20\%$ 변화시키며 유한요소해석을 수행한 결과를 나타낸 것으로서, 강도 변화에 따라 소성 η 계수는 약간의 차이를 보였으나, 그 차이는 3% 이하이며, 이에 따라 HAZ 강도변화에 따른 영향은 적은 것으로 나타났다.

Fig. 14와 Fig. 15는 HAZ의 강도 불균일 비 M_H 를 고정하고 용접폭을 변화시키면서 유한요소해석을 수행한 결과이며, 용접폭이 증가할수록 소성 η 계수는 동일 균열길이에서 감소하는 경향이 나타나 용접폭의 영향이 있는 것으로 보이나, 최대 차이는 약 2%로 매우 작은 것으로 나타났다.

이에 따라 HAZ의 강도 불균일, 용접폭 및 HAZ 폭 변화에 따른 영향은 적다고 할 수 있으며, 이처럼 HAZ의 영향이 적은 것은 HAZ의 크기가 전체 시험편 형상의 유한요소 모델에서 모재나 용접부

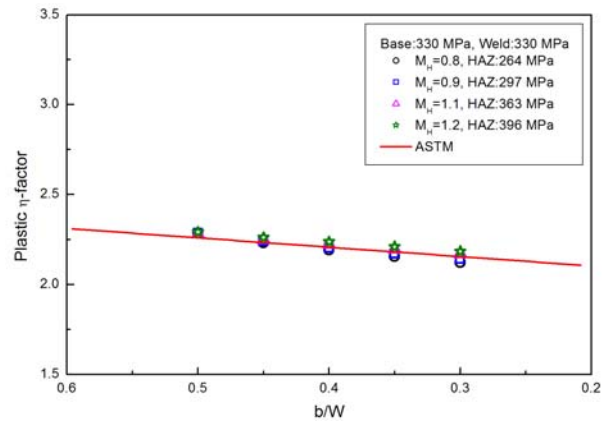


Fig. 13 Relations between plastic η -factors and b/W for various M_H values

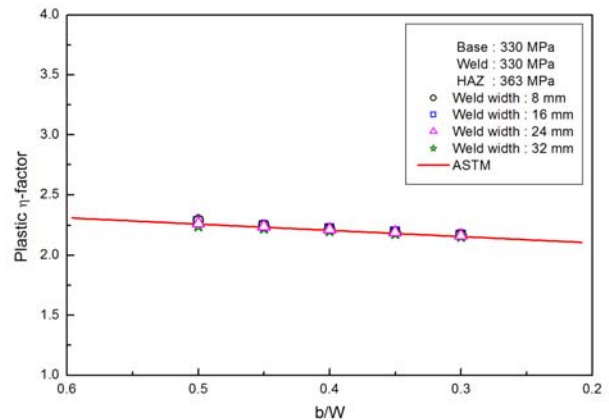


Fig. 14 Relations between plastic η -factors and b/W for various weld width ($M_H=1.1$) values

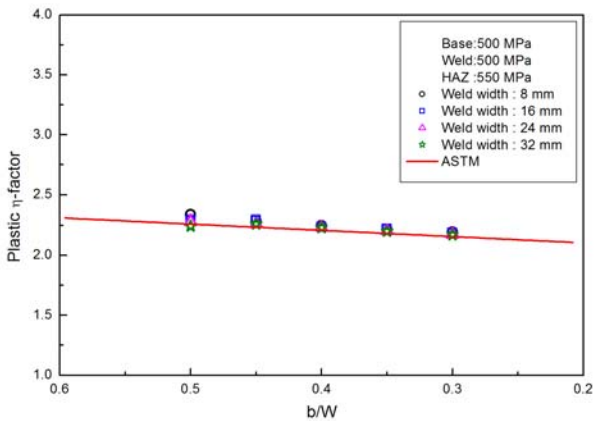


Fig. 15 Relations between plastic η -factors and b/W for various weld width ($M_H=1.1$) values

에 비하여 좁아 그 영향이 적은 것으로 판단된다. 또한 향후 협계용접부의 강도 불균일 평가 시 HAZ의 영향은 배제하여도 무방할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 협계용접부에 대한 인장 및 경도 시험을 수행하여 부위별 재료 물성을 획득하였으며, 참조선도를 이용하여 재료의 항복 강도만을 알고 있는 경우에 Ramberg-Osgood 상수를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 HAZ의 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 유한요소해석을 수행하여 협계용접부 소성 η 계수에 대한 HAZ의 영향을 평가하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) HAZ 강도 변화에 따라 소성 η 계수는 약간의 차이를 보였으나, 그 차이는 3% 이하이기 때문에 용접부의 파괴인성 평가 시 HAZ 강도 변화에 대한 영향은 무시해도 될 만큼 적은 것으로 나타났다.

(2) 용접폭 변화에 따라 소성 η 계수 또한 약간의 차이를 보였으나, 최대 차이는 약 2~3%로 나타났으며, 이에 따라 용접폭 변화에 따른 HAZ의 영향 또한 적은 것으로 나타났다.

(3) 향후 협계용접부의 강도 불균일 평가 시 HAZ 강도의 영향은 배제하여도 무방할 것이다.

후 기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업과 2007년도 정

부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2007-03205)

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Song, T. K., Oh, C. K., Kim, Y. J., Kim, J. S. and Jin, T. E., "Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analyses For Circumferential Part-Through Surface Cracks At The Interface Between Elbows and Pipes," *KSME(A)*, Vol. 31, No. 6, pp. 710~717.
- (4) ASTM, 2001, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," *ASTM E8-01*.
- (5) ASTM, 2001, "Standard Test Method for Micro-indentation Hardness of Materials," *ASTM E384- 99*.
- (6) Kirk, M. T. and Dodds, R. H., 1993, "J and CTOD Estimation Equations for Shallow Cracks in Single Edge Notch Band Specimens," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.21, No.4, pp. 228~238
- (7) Kumar, V. and German, M. D., "Elastic-Plastic Fracture Anlysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders," *EPRI Report*, NP-5596.
- (8) Huh, N. S., Kim, Y. J., Kim, Y. J., Choi, Y. H. and Yang, J. S., 2003, "On Relevant Ramberg-Osgood Fit to Engineering Non-Linear Fracture Mechanics Analysis," *KSME(A)*, Vol. 27, No. 9, pp. 1571~1578.
- (9) Rahman, S., Brust, F., Ghadiali, N. and Wilkowski, G., 1998, "Crack- Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes-Part I: Analytical Models," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 357~373.
- (10) ASTM, 2001, "Standard test method for measurement of fracture toughness," *ASTM E1820-00*.