

## 협계용접부 강도 불균일을 고려한 소성 $\eta$ 계수 평가(II)

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

### Evaluation of the Plastic $\eta$ -Factor Considering Strength Mismatch in a Narrow Gap Welding Part (II)

Yong Huh, Hyung-Ick Kim, Kwang-Hyeon Lee, Jae-Mean Koo  
and Chang-Sung Seok

**Key Words:** Narrow Gap Welding (협계용접), Leak Before Brake(파단전 누설), Strength Mismatch (강도 불균일), Fracture Toughness(파괴인성), Plastic  $\eta$ -factor(소성  $\eta$ 계수)

#### Abstract

This study would like to evaluate the influences with the strength mismatch and the variation of the welding width of the narrow gap welding for the plastic parameter, the major constant determining the plastic  $\eta$ -factor of  $J$ -Integral, using 3-D FEM. For this, we evaluate the plastic  $\eta$ -factor according to the variation of the strength mismatch of weldment with same materials and welding width through FEM. Also, we proposed the equation of plastic  $\eta$ -factor considering the variation of the strength mismatch of weldment with similar materials and welding width.

#### 1. 서 론

최근 원자력 발전소 배관과 같은 대형 구조물 배관에 대한 협계용접(narrow-gap welding)이 증가되고 있다. 협계용접은 기존 용접법에 비해 용접부의 면적과 폭이 감소하며, 이에 따라 용접시간이 단축될 뿐만 아니라, 용접부의 수축 및 변형, 그리고 이에 따른 잔류응력이 감소되는 장점이 있다. 현재 이러한 협계용접부에 대한 대부분의 연구는 협계용접부의 용접 건전성 평가에 집중되어 있고, 원전 배관 설계 및 수명관리에 중요한 LBB(leak before brake) 해석을 협계용접부에 적용하는 연구가 일부 수행되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

배관에 대한 LBB 해석을 위해서는 재료의 파괴인성( $J$ - $R$ 곡선)을 결정해야 하며, 이를 위해 일반적으로 ASTM에 제시되어 있는 파괴인성 시험법을 적용하여 결정한다. 그러나 ASTM 파괴인성 시험법의 경우, 기본적으로 배관 모재의 물성치 평가를 위한 것으로, 용접부 시험편의 경우, 시험편의 잔여 리가먼트(ligament)가 용접폭보다 아주 작을 경우에만 적용이 가능하다고 알려져 있다. 일반적인 배관 용접부의 경우, 용접폭이 상당히 넓어 위의 조건이 만족되기 때문에 파괴인성 시험에 큰 문제가 없으나, 협계용접부의 경우 용접폭이 기존 용접부의 반 정도 되기 때문에 위의 조건을 만족시킬 수 없다. 이에 따라 기존의 ASTM 시험법에 의한 파괴인성이 실제보다 낮게 측정될 수 있기 때문에 그의 적용에 문제점이 있는 실정이다.

최근에는 그동안 고려하지 못한 여러 불확실성의 영향을 상세해석을 통해 반영함으로써 LBB 해석 결과의 정확성을 향상시키고자 하는 노력이

† 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 |

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 갖는 배관의 경우 그 영향이 매우 복잡하여 아직 구체적인 평가법이 제시되지 못하고 있다.<sup>(3-5)</sup>

본 연구에서는  $J$ -적분의 소성성분을 결정하는 중요한 상수인 소성  $\eta$ 계수에 대한 협계용접부 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 영향을 3차원 유한요소해석을 이용하여 평가하고자 한다. 이를 위하여 동종 용접부 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 소성  $\eta$ 계수의 영향을 유한요소해석을 통하여 평가하였다. 또한 이로부터 동종 용접부의 강도 불균일 및 용접폭 변화를 고려한 소성  $\eta$ 계수 식을 제안하였다.

## 2. 용접부 강도 불균일에 따른 소성 $\eta$ 계수 평가

### 2.1 시험재료

본 연구에서 사용한 재료는 원자력 발전소 1차 계통 배관 구조물에 사용되는 SA508 Cl.1a 탄소강 재료로서 배관의 크기는 직경 1000 mm, 두께 100 mm이며, 협계용접이 적용되었다. Table 1은 화학조성을 나타낸 것이며, Table 2는 용접방법을 나타낸 것이다.

### 2.2 부위별 재료 물성

실제 배관 용접부와 모재에서 ASTM E8<sup>(6)</sup>에 따라 시험편 재료를 채취한 후 인장 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. Table 3은 인장시험 결과를 나타낸 것이다.

부위의 크기가 작은 HAZ의 경우, 기존 연구에서 모재보다 약 5~10% 높은 강도를 나타내며, 강도 불균일에 따른 영향이 거의 없는 것으로 나타났다기 때문에 유한요소 해석 시 적용되는 항복강도를 모재보다 10% 높게 적용하였다.<sup>(7)</sup>

**Table 2** Welding condition

| Material               | Welding Method         | Filler Metal |            |
|------------------------|------------------------|--------------|------------|
|                        |                        | AWS class    | Size (mm)  |
| 508 Cl.1a to 508 Cl.1a | GTAW (machine Welding) | ER70S-6      | $\phi$ 0.9 |

**Table 3** Results of tensile test

| Material   | $\sigma_Y$ (MPa) | $\sigma_U$ (MPa) | Ramberg-Osgood Constant |       |
|------------|------------------|------------------|-------------------------|-------|
|            |                  |                  | $\alpha$                | $n$   |
| Base metal | 330.4            | 517.9            | 5.280                   | 4.845 |
| Weldment   | 397.7            | 645.0            | 3.386                   | 5.188 |

**Table 4** Material properties for finite element analysis

| Region     | Young's modulus (GPa) | Poisson's ratio | Yield strength (MPa) | Ramberg Osgood Constant |       |
|------------|-----------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|-------|
|            |                       |                 |                      | $\alpha$                | $n$   |
| Base metal | 200                   | 0.3             | 330.4                | 5.280                   | 4.845 |
| Weldment   |                       |                 | 397.7                | 3.386                   | 5.188 |
| HAZ        |                       |                 | 361.6                | 5.386                   | 5.018 |

탄소성 유한요소해석을 위한 부위별 Ramberg-Osgood 상수  $\alpha$ ,  $n$ 은 재료의 항복강도만을 알고 있을 때를 위한 본 저자들의 식 (1), (2)을 이용하여 획득하였다.<sup>(7)</sup> Table 4는 시험을 통하여 획득한 인장 물성을 유한요소해석에 적용하기 위하여 정리한 것이며, 이를 유한요소해석의 기준 물성으로 사용하였다.

$$n = 0.01\sigma_Y + 1.8 \quad (1)$$

$$\alpha = 196.7 \sigma_Y^{-0.7} \quad (2)$$

2.3 유한요소 모델 및 해석 방법

협계용접부 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 소성  $\eta$ 계수를 평가하기 위하여 1T-CT 시험편 중앙에 용접부가 위치하고, 양측으로 HAZ 및 모재가 포함되며, 용접부 폭을 변화시킨 3차원 유한요소 모델을 사용하였다. 본 연구의 협계용접이 적용된 배관의 경우, 용접폭은 약 16 mm, HAZ는 약 4 mm로 측정되었기 때문에 HAZ폭은 4 mm로 고정하고 용접폭은 8, 16, 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 사각주요소 (20-node qua-dratic brick integration element : C3D 20)를 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 재료는 Ramberg-Osgood 관계식을 만족한다고 가정하였다. Fig. 1은 유한요소 모델의 형상을 나타낸 것이며, Table 5는 유한요소 모델의 형상치수를 나타낸 것이다.

범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.7을 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, ABAQUS에서 제공하는 영역 적분법을 사용하여 유한요소해석 결과로부터  $J$ -적분을 계산하였다<sup>(8)</sup>.

용접폭 및 용접부의 강도 불균일에 따른 소성  $\eta$ 계수를 평가하기 위해 식 (3)과 같은 강도 불균일비(mismatch factor :  $M_W$ )와 용접폭을 변화시켜가며 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 시 적용되는 Ramberg-Osgood 상수는 기존 연구에서 제시한 식 (1), (2)를 이용하여 항복강도 변화에 따른 Ramberg-Osgood 상수를 계산하여 적용하였다<sup>(7)</sup>. Table 6은 해석 대상을 나타낸 것이다.

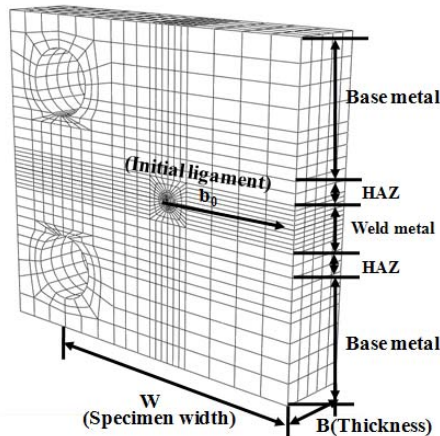


Fig. 1 Finite analysis model for strength mismatch

$$M_W = \frac{\sigma_{YW}}{\sigma_{YB}} \tag{3}$$

2.4 용접부 강도 불균일에 따른 소성  $\eta$ 계수 평가

Fig. 2는 용접폭 16 mm인 경우에 모재와 용접부의 강도비  $M_W$  변화에 따른 유한요소해석 결과를 나타낸 것으로서,  $M_W > 1$ , 즉 over-matching인 경우에는 ASTM E1820<sup>(8)</sup>에 제시되어 있는 소성  $\eta$ 계수 식 (4)보다 낮은 경향을 보였다.

$$\eta = 2 + 0.522(b/W) \tag{4}$$

이에 따라 용접부가 존재하는 재료의 파괴인성 시험 시 모재와 용접부가 over-matching의 형태를 보일 때의  $J$ -적분은 보수적으로 평가되며, 용접부에 균열이 존재하는 배관의 건전성 평가 시 over-matching된 용접부의 특성이 배관의 건전성 평가에 미치는 영향이 작음을 확인하였다. 또한,  $M_W < 1$ 일 때, 즉 under-matching인 경우에는 용접부의 특성이 배관의 건전성에 미치는 영향이 큼을 확인하였으며, 이 결과는 박보규 등<sup>(9)</sup>이 제시한 결과와 일치한다.

Table 5 Geometry of an analysis model

| $a/W$ | $B$<br>(mm) | $W$<br>(mm) | $b_0$<br>(mm) | HAZ<br>Width<br>(mm) | Weld Width<br>(mm) |    |    |    |
|-------|-------------|-------------|---------------|----------------------|--------------------|----|----|----|
|       |             |             |               |                      | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.50  | 25.4        | 50.8        | 25.40         | 4                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.55  | 25.4        | 50.8        | 22.86         | 4                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.60  | 25.4        | 50.8        | 20.32         | 4                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.65  | 25.4        | 50.8        | 17.78         | 4                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.70  | 25.4        | 50.8        | 15.24         | 4                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |

Table 6 Summary of finite element analysis for strength mismatch ( $M_W$ )

| $M_W$ | $\sigma_{YB}$<br>(MPa) | $\sigma_{YH}$<br>(MPa) | $\sigma_{YW}$<br>(MPa) | Weld Width<br>(mm) |    |    |    |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|----|----|----|
|       |                        |                        |                        | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.60  | 330                    | 363                    | 200                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.75  | 330                    | 363                    | 248                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 0.90  | 330                    | 363                    | 300                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 1.20  | 330                    | 363                    | 400                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 1.50  | 330                    | 363                    | 500                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |
| 1.80  | 330                    | 363                    | 600                    | 8                  | 16 | 24 | 32 |

over-matching과 under-matching인 경우 모두  $M_W$  증가에 따라 같은 리가먼트와 시험편 넓이의 비  $b/W$ 에 대해서 소성  $\eta$ 계수는 감소하는 경향이 나타났으며, 또한 균열길이가 증가할수록 ASTM에 제시되어 있는 소성  $\eta$ 계수에 근접하는 경향이 나타났다. 이는  $M_W=1$ 에 가까워질수록 강도의 분포가 모재와 유사해지면서 모재의 소성  $\eta$ 계수에 가까워지는 것으로 판단된다.  $b/W = 0.5$ 에서 모재와 용접부의 강도비  $M_W$ 가 0.6~1.8로 변화할 때의 소성  $\eta$ 계수는 최대 40%의 차이를 보이며,  $M_W=0.6$ 과  $M_W = 1$ 인 ASTM 기준과의 차이가 약 17% 발생함에 따라 모재와 용접부의 강도차이는 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

2.5 용접폭 변화에 따른 소성  $\eta$ 계수 평가

Fig. 3은  $M_W = 0.6$ 일 때, 용접폭 변화에 따른 소성  $\eta$ 계수의 변화를 비교하여 나타낸 것으로서

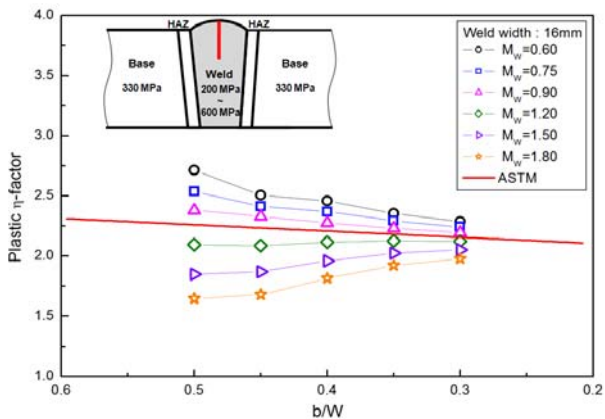


Fig. 2 Relation between plastic  $\eta$ -factors and  $b/W$  for various strength mismatch (weld width : 16 mm)

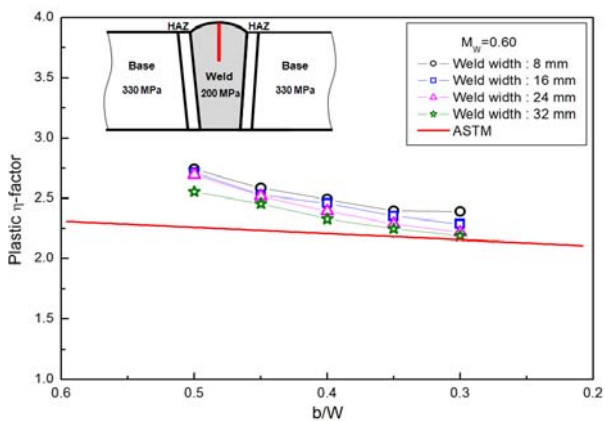


Fig. 3 Relation between plastic  $\eta$ -factors and  $b/W$  for various weld width ( $M_W=0.6$ )

$b/W=0.5$ 에서 용접폭 8 mm의 소성  $\eta$ 계수가 32 mm의 소성  $\eta$ 계수에 비하여 약 8% 크며, 모재기준인 ASTM의 식보다 약 17% 큰 결과를 나타내고 있다. 따라서 소성  $\eta$ 계수는 용접폭 변화에 따라 영향을 받는 것을 확인할 수 있었으며, 용접폭이 일반 용접에 비해 현저히 좁은 협계용접부의 파괴인성 평가 시 소성  $\eta$ 계수는 반드시 고려되어야 함을 나타내고 있다.

Figs. 4~6은 용접폭 8, 24, 32 mm인 경우에 강도 불균일 비  $M_W$  변화에 따른 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다. 용접폭 8 mm의 경우, 균열이 진전함에 따라 소성  $\eta$ 계수가 감소하는 경향이 나타나지만  $b/W=0.3$ 이후 일정한 값을 갖으면서 ASTM 식에 근접하지 않는 경향이 나타났다. 이는  $b/W=0.3$ 일 때, 즉 리가먼트 15.24 mm보다 용접폭이 작은 경우로서 시험편의 잔여 리가먼트(ligament)가 용접폭보다 아주 작을 경우에만 ASTM의 식을 적용할 수 있다는 조건에 부합되지 않기 때문이다. 또한 ASTM에 제시되어 있는 CT시험편의 균열길이의 비  $a/W=0.45\sim 0.7$ , 리가먼트의 비로  $b/W=0.55\sim 0.3$ 에서 파괴인성 시험을 수행하도록 규정되어 있는 것을 고려한다면, 이와 같이 작은 용접폭을 갖는 협계용접부의 파괴인성 평가를 위해 ASTM에 제시되어 있는 소성  $\eta$ 계수식의 사용은 적절하지 못함을 알 수 있다. 용접폭 24, 32 mm의 경우, 균열이 진전함에 따라 소성  $\eta$ 계수가 감소하는 경향이 발생하며,  $b/W=0.3$ 에서 ASTM의 식에 근접하는 경향이 나타났다. 이는 용접폭이 잔여 리가먼트 크기보다 클 경우 ASTM의 시험법을 사용할 수 있다는 기존 연구내용과 일치하는 결과이다.<sup>(3,4,10)</sup>

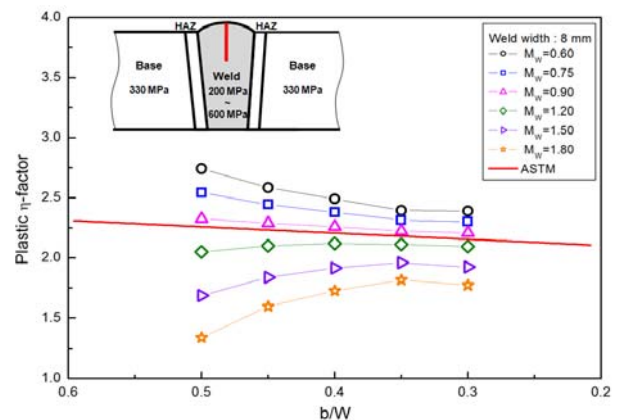


Fig. 4 Relation between plastic  $\eta$ -factors and  $b/W$  for various strength mismatch (weld width : 8 mm)

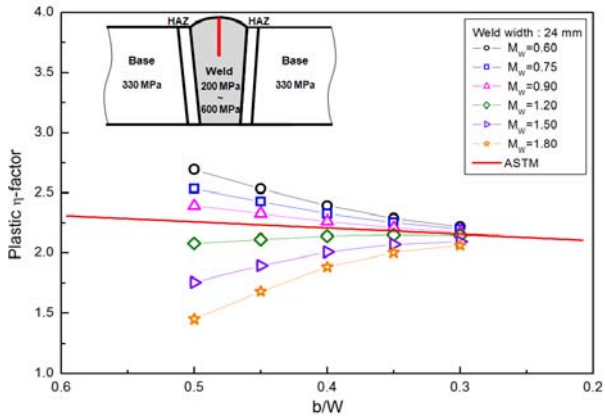


Fig. 5 Relation between plastic  $\eta$ -factors and  $b/W$  for various strength mismatch (weld width : 24 mm)

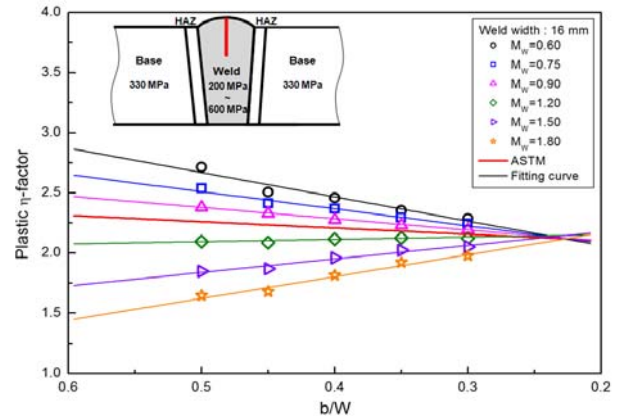


Fig. 7 Curve fitting of  $\eta$ -factors

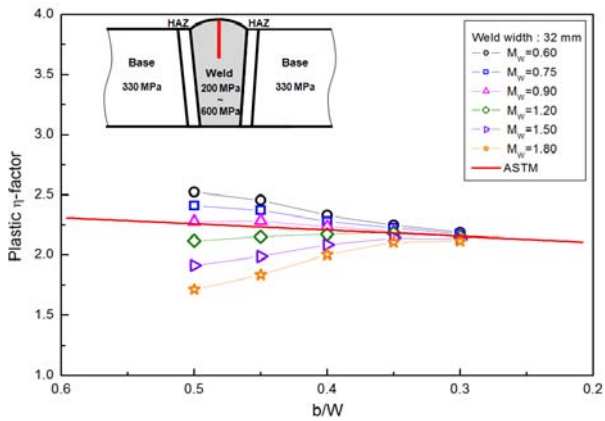


Fig. 6 Relation between plastic  $\eta$ -factors and  $b/W$  for various strength mismatch (weld width : 32 mm)

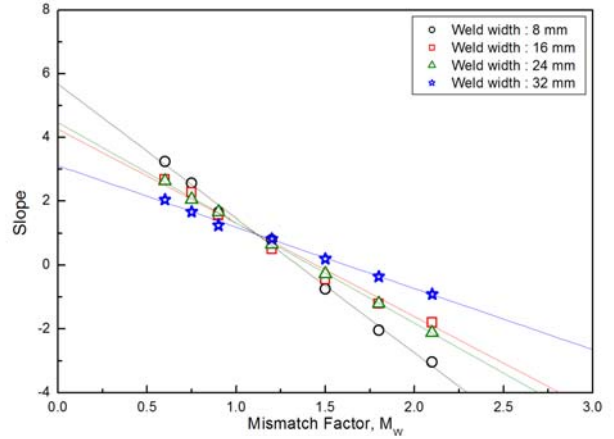


Fig. 8 Curve fitting of slope

$$\eta = S [(b/W) - 0.21] + 2.11 \quad (5)$$

$$S = g(M_W - 1) + 0.522 \quad (6)$$

### 3. 용접부 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 새로운 소성 $\eta$ 계수식

#### 3.1 용접부 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 소성 $\eta$ 계수 식

유한요소해석을 통해 구한 동종 용접부 강도 불균일 비  $M_W$  변화에 따른 소성  $\eta$ 계수의 회전 기준점(pivot point)이 Fig. 7과 같이 ASTM 소성  $\eta$ 계수 식의 선상에 위치함을 확인할 수 있었다. 강도 불균일 비와 용접폭 변화를 동시에 고려하기 위해 ASTM 소성  $\eta$ 계수 식 선상에 최적의 곡선접합이 가능한 회전 기준점을  $b/W=0.21$ ,  $\eta=2.11$ 로 선정하고 다음과 같이 소성  $\eta$ 계수 식 (5), (6)를 제안한다.

$S$ 는 용접부 강도 불균일 비  $M_W$  변화에 따른 기울기 식으로서  $M_W=1$ 인 경우에는 전체가 모재가 되므로 ASTM 소성  $\eta$ 계수 식의 직선 기울기인 0.522가 되도록 하였다. 회전 기준점  $b/W=0.21$ ,  $\eta=2.11$ 을 지나는 곡선 접합을 수행하여 이들의 기울기를 Fig. 8과 같이 각각의 용접폭에 따라  $M_W$ 와  $S$ 의 선도로 도시하였으며, 이들을  $S$ 의 관계식을 이용하여 곡선 접합하고 용접폭 변화에 따른 각각의 기울기  $g_8, g_{16}, g_{24}, g_{32}$ 를 획득하였다.

ASTM에 제시되어 있는 시험편의 넓이는  $1.2W$ 이며, 용접폭이 증가하여 식 (7)의  $\omega$ 가 1.2가 되면 전체가 모재가 되기 때문에 용접폭 변화에 따른



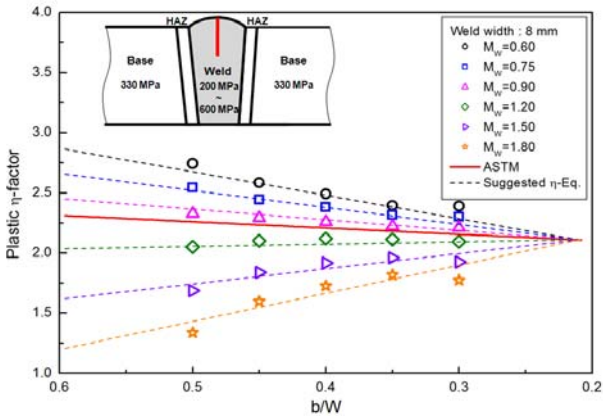


Fig. 9 Verification of the suggested plastic  $\eta$ -factor equation (weld width : 8 mm)

기울기  $g_8, g_{16}, g_{24}, g_{32}$ 를  $\omega$ 에 대하여 도시한 후,  $\omega=1.2$ 일 때  $g=0$ 이 되도록 곡선 접합하여 식 (8)과 같이  $g$  관계식을 구하였다.

$$\omega = \frac{W_{weld\ width}}{W_{specimen\ width}} \quad (7)$$

$$g = 3.43(\omega - 1.2) \quad (8)$$

위의 과정을 수행하고 최종적으로 동종 용접부 강도 불균일과 용접폭 변화를 고려한 소성  $\eta$ 계수 식 (9)를 제안한다.

$$\eta = [3.43(\omega - 1.2)][(M_W - 1) + 0.522] \left( \frac{b}{W} - 0.21 \right) + 2.11 \quad (9)$$

### 3.2 소성 $\eta$ 계수 식의 타당성 검증

협계용접부 강도 불균일과 용접폭 변화를 고려하여 제안한 소성  $\eta$ 계수 식의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 구한 소성  $\eta$ 계수와 제안한 소성  $\eta$ 계수 식을 이용한 결과를 비교하여 Figs. 9~12에 나타냈다. 용접폭 32 mm인 경우,  $M_W=1.8$ 에서 개별적으로 곡선 접합을 수행하였을 때보다 약 5% 정도의 오차가 발생하였으며, 용접폭 8 mm의 경우에는 개별적으로 곡선 접합을 수행하였을 때와 거의 유사하게 나타났다. 따라서 용접폭이 좁은 협계용접부에 대한 소성  $\eta$ 계수 식은 타당하다고 판단되며, 이를 통하여 용접부 강도 불균일과 용접폭 변화를 고려할 수 있으며, 기존 시험법을 이용한 파괴인성 평가의 불확실성을 개선할 수 있으리라 판단된다.

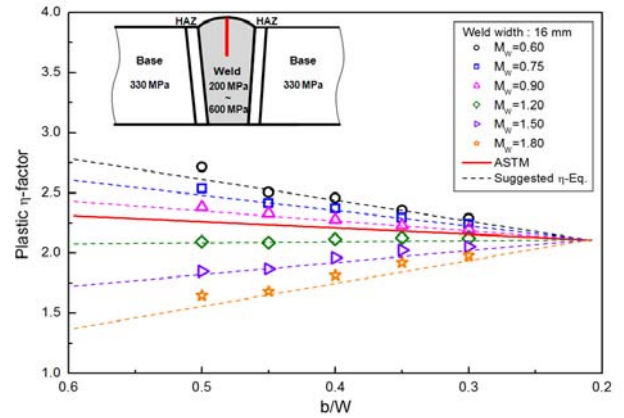


Fig. 10 Verification of the suggested plastic  $\eta$ -factor equation (weld width : 16 mm)

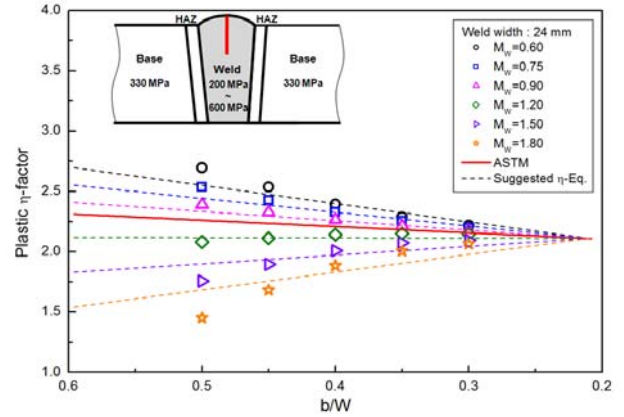


Fig. 11 Verification of the suggested plastic  $\eta$ -factor equation (weld width : 24 mm)

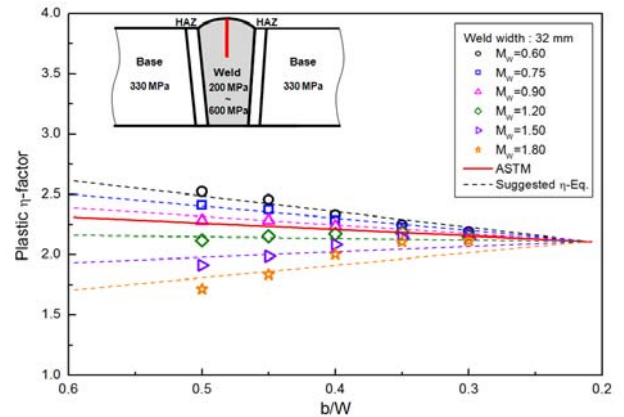


Fig. 12 Verification of the suggested plastic  $\eta$ -factor equation (weld width : 32 mm)

## 4. 결론

본 연구에서는  $J$ -적분의 소성성분을 결정하는

중요한 상수인 소성  $\eta$ 계수에 대한 강도 불균일 및 용접폭 변화에 따른 영향을 3차원 유한요소 해석을 이용하여 평가하기 위해 동종 용접부에서 용접폭 변화에 따른 유한요소 모델을 구성하였으며, 모재와 용접부의 강도 불균일을 고려한 유한요소 해석을 통해 용접폭 변화에 따른 수정된 소성  $\eta$ 계수 식을 제안 하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 동종 용접부 강도 불균일에 따른 유한요소 해석 결과, 용접부에 균열이 존재하는 배관의 건전성 평가 시  $M_W > 1$ , 즉 over-matching된 용접부의 특성이 배관의 건전성 평가에 미치는 영향이 작음을 확인하였으며,  $M_W < 1$  일 때, 즉 under-matching인 경우, 용접부의 특성이 배관의 건전성에 미치는 영향이 큼을 확인하였다

(2) 용접폭 8 mm와 16 mm에서, 균열이 진전함에 따라 소성  $\eta$ 계수가 감소하는 경향이 나타나지만 ASTM에 제시되어 있는 시험구간에서 소성  $\eta$ 계수가 ASTM 기준에 근접하지 않는 경향이 나타나 용접폭이 작은 협계용접부의 파괴인성 평가에 있어서 ASTM에 제시되어 있는 소성  $\eta$ 계수 식의 사용은 적절하지 못하다.

(3) 동종 협계용접부에서 용접폭과 용접부 강도 불균일을 고려한 소성  $\eta$ 계수 식을 제안하였으며, 이를 유한요소해석 결과에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

## 후 기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업과 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2007-03205)

## 참고문헌

(1) 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.

- (2) Huh, Y., Cho, S. K., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2007, "Plastic  $\eta$ -factor for Fracture Toughness Test of SA508 Narrow-gap Welds," *2007 Spring Conference of KSME*
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) ASTM, 2001, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," *ASTM E8-01*.
- (7) Huh, Y., 2008, "A Study on the Evaluation of the Fracture Toughness for the Narrow Gap Welding," *Doctoral thesis of Sungkyunkwan University*
- (8) 2007, "ABAQUS User's manual," *SIMULIA Inc*
- (9) Park, B. G., Oh, C. K., Kim, Y. J., Kim, Y. J., Kim, Y. S. and Jin, T. E., 2004, "The Analysis of Circumference Through-Wall Cracked Pipe Considering Weld Characteristic," *2004 Spring Conference of KSME*
- (10) Hao, S., Schwalbe, K. H. and A, Cornec., 2000, "The Effect of Yield Strength Mis-Match on the Fracture Analysis of Welded Joints: Slip-Line Field Solutions for Pure Bending," *International Journal of Solids and Structures* 37, pp. 5385 5411.