

# 용접부 중앙에 균열이 존재하는 인장 평판에 대한 한계하중 해석

송태광\* · 김윤재† · 김종성\*\* · 진태은\*\*

## Limit load analyses of weld-center cracked plates under tension

Tae-Kwang Song, Yun-Jae Kim, Jong-Sung Kim and Tae-Eun Jin

**Key Words :** Finite element analysis(유한요소해석), Strength-mismatch (강도불일치)  
limit load (한계하중), weldment(용접부)

### Abstract

In the present work, the effect of strength mismatch on plastic limit loads is quantified for strength-mismatched plates with constant-depth surface cracks under tension, via three-dimensional, small strain elastic-perfectly plastic finite element analyses. Relevant variables related to plate and crack geometries are systematically varied, in addition to the weld width. An important finding is that a parameter related to the weld width-to-ligament ratio is proposed, based on which limit loads can be uniquely quantified. The proposed limit load solutions is a valuable input to estimate nonlinear fracture mechanics parameters based on the reference stress approach.

### 기호설명

$N_{LB}$	net section limit load assuming the plate is wholly made of base material
$N_{LM}$	net section limit load of mismatch configuration
$M$	strength mismatch factor
$\psi$	ligament-to-weld width ratios $((w-a)/h)$
$\psi_{eff}$	ligament-to-effective weld width ratios $((w-a)/h_{eff})$

### 1. 서론

원전설비와 같은 대형 설비/ 구조물은 구성 요소들간 수많은 접합 부위가 존재한다. 기계적인

접합법에는 리벳팅, 용접, 볼팅 등 다양한 방법들이 있으나 그 중 용접은 다른 방법에 비해 신뢰성, 안전성 등이 높아 대형 구조물에 폭넓게 쓰인다. 그러나 용접재는 기본적으로 모재와 다른 인장물성을 나타내기 때문에 손상사례 발생 가능성 및 손상발생 측면에서도 취약 부분이라 할 수 있다. 일반적으로 대부분의 결함 안전성 평가법은 균일 구조물에 관한 것으로서, 용접부와 같은 강도 불일치(strength mis-match) 구조물에 균열이 존재하는 경우 용접재와 모재 중 낮은 인장 물성 및 파괴인성을 가지는 구조물로 가정하여 평가한다<sup>(1-4)</sup>. 그러나 이러한 평가법은 실제 결함 구조물의 소성 거동과 차이를 가지며 보통 보수적인 결과를 나타낸다. 본 논문에서는 배관 용접 구조물 평가에 대한 선례 연구로 동종 용접 평판(similar welded plate)을 고려하였다. 균열은 용접부 중앙에 존재하며 강도 불일치를 고려한 한계하중 해석을 통해 균일 구조물로 가정한 평가법에서의 보수성을 줄일 수 있었다.

† 책임저자, 회원, 고려대 기계공학과  
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

\* 회원, 고려대학교 기계공학과 원

\*\* 회원, 한국전력기술(주)

## 2. 형상 및 유한요소 해석

### 2.1 문제 정의

Fig. 1은 인장하중을 받는 동종 용접(similar welding) 평판을 나타낸다. 용접부는 사각형 단면적을 가지는 단순한 butt용접으로 가정하였으며 용접부 중앙에 위치하는 균열을 고려하였다. 평판의 폭, 두께, 용접부의 폭은 각각  $2w$ ,  $t$ ,  $2h$ 이며 균열의 크기는  $a$  및  $2c$ 를 통해 나타내었다. 본 연구에서 고려한 평판의 형상 및 균열의 크기, 용접부의 폭의 범위는 Table. 1과 같다.

모재(base plate)의 항복강도( $\sigma_{YB}$ )와 용접재의 항복강도( $\sigma_{YW}$ )의 비는 강도 불일치 비를 나타내는 변수인  $M$ 을 통해 정량화하였으며  $M$ 의 범위는 Table. 1과 같다.

$$M = \frac{\sigma_{YW}}{\sigma_{YB}} \quad (1)$$

모재의 항복강도를 기준으로  $1 < M$  은 under-matching이라 하며  $M > 1$ 은 over-matching이라 한다. 강도 불일치 평판 용접부와 관련한 또 다른 변수로는 균열이 존재하는 단면에서 ligament와 용접부의 폭( $h$ )에 대한 비를 나타내는  $\psi$ 가 있으며 식(2)와 같다<sup>(5)</sup>.

$$\psi = \frac{(w-c)}{h} \quad (2)$$

### 2.2 유한요소 해석

Fig. 2는 용접부 중앙에 관통 또는 표면 균열이 존재하는 평판에 대한 유한요소 모델이다. 해석 시간 단축을 위해 대칭성을 이용한 1/8 또는 1/4 모델을 사용하였으며 한계하중 해석은 ABAQUS<sup>(8)</sup>에서 제공하는 3차원 등계수 사각주요소(element : C3D20R)를 사용하여 수행하였다. 균열 끝단의 변형을 표현하기 위해 방사방향으로 썸기 모양 요소를 배치하였으며 두께방향으로는 균열 종류 및 두께 비( $w/t$ )에 따라 2~14개의 요소를 사용하였다. 또한 모재는 충분한 길이를 갖도록 하였으며 본 연구에서 적용된 모재의 길이는 평판 폭( $w$ )의 5배 ( $L=5w$ )로 하였다.

Fig. 3은  $w/t=10$ ,  $c/w=0.5$ ,  $h/t=1.0$  평판에서 강도 불일치에 따른 인장하중-변위 곡선을 나타낸다. 인장하중은 평판 끝단에 ABAQUS에서 제공하는 MPC 옵션을 통해 가하였다. 그래프에서 한계하중( $y$ 축)은 강도불일치 평판의 한계하중( $N_{LM}$ )을 같은 형상 및 균열을 가진 모재(base material)로만 이뤄

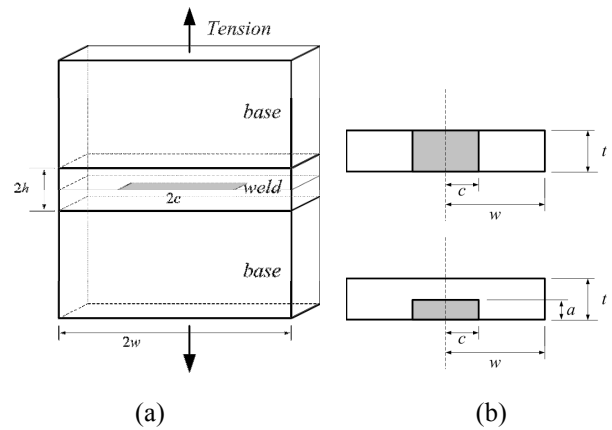


Fig. 1 (a) Schematic illustration of a similar welded plate under tension. Crack is located at weld-center. (b) Crack shape considered in the present work : through-wall crack and part-through surface crack.

w / t	a / t	C / w	h / w	M
				0.5
1, 5,	0.2 ~	0.25 ~	0.025	0.75
10, 20	1.0	0.8	~ 0.2	1.0
				1.5
				2.0

Table 1 Variable considered in this study

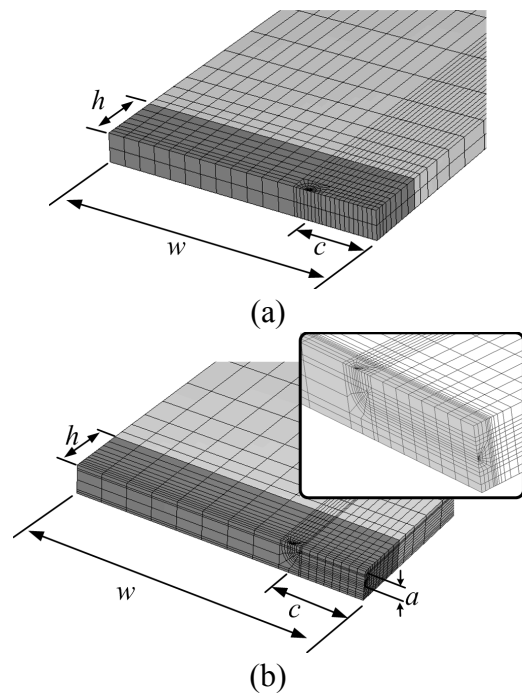
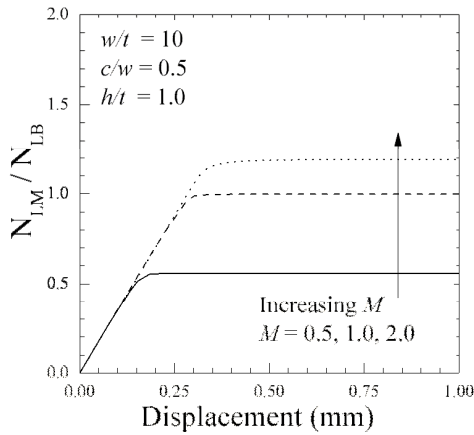


Fig. 2 Typical finite element meshes for similar welded cracked plate : (a) through-wall cracked plate and (b) part-through surface crack plate.



**Fig. 3** Typical tension-displacement curves from FE analyses of the strength mis-matched plate with  $w/t=10$ ,  $c/w=0.5$ ,  $h/t=1.0$ . Three different mis-match factor is considered,  $M=0.5, 1.0$  and  $2.0$ .

진 균질 평판의 한계하중( $N_{LB}$ )으로 무차원화한 값으로 강도 불일치 정도( $M$ )가 한계하중에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 한계하중을 구하였으며 탄성-완전소성 물성을 사용한 유한요소 한계하중 해석을 기초로, 3장에서는 용접부 중앙에 관통균열이 존재하는 평판의 한계하중을, 4장에서는 같은 위치에 표면균열이 존재하는 배관의 한계하중을 제시하였다.

### 3. 관통균열이 용접부 중앙에 위치한 평판의 한계하중 해석

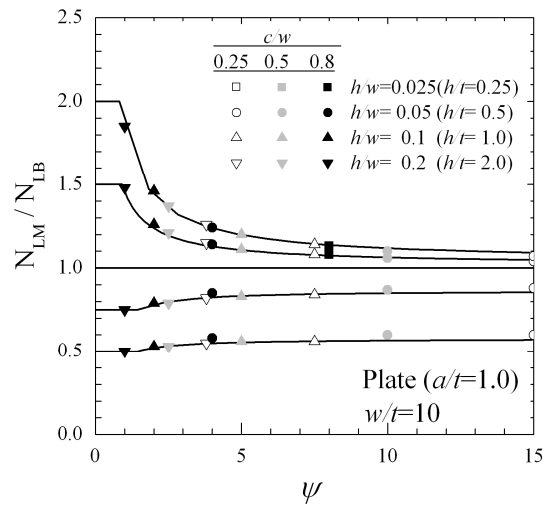
#### 3.1 2차원 조건에서의 한계하중 해석

2차원 평면응력(plane stress)조건에서 모재로만 이루어지고  $2c$ 의 균열 폭을 가지는 평판의 한계하중은 이론적으로 식(3)과 같으며 유한요소 한계하중 해석을 통해 확인할 수 있다.

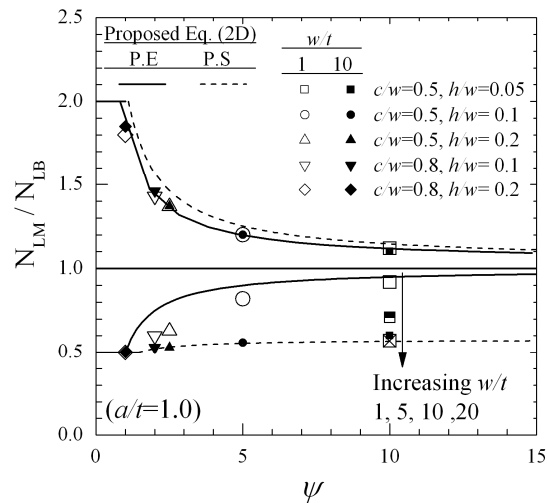
강도 불일치 평판의 한계하중( $N_{LM}$ )은 유한요소 해석을 통해 구할 수 있으며, 균질 평판의 한계하중( $N_{LB}$ )으로 무차원화하여 균열 및 용접부 폭의 영향( $\psi$ 변수 해석) 및 강도 불일치 정도( $M$ )의 영향을 확인할 수 있다.

over-matching 된 평판에서의 한계하중은 식(4)와 같으며<sup>(6,7)</sup> Fig. 5에서  $M=2$ 일 때의 한계하중을 확인할 수 있다.

under-matching된 평판에서의 한계하중은 식(5)와 같으며<sup>(6,7)</sup> Fig. 5에서  $M=0.5$ 일 때의 한계하중을 확인할 수 있다.



**Fig. 4** Comparison of the mis-match limit load solutions with FE results for through-wall cracked plate. Various parameters associated with strength mis-matched weld were considered systematically.



**Fig. 5** Comparison of the mis-match limit load solutions with FE results for various plate thickness. Thickness constraints effect arises in under-matching, which is not in over-matching.

2차원 평면변형률(plane strain)조건에서 모재로만 이루어지고  $2c$ 의 균열 폭을 가지는 평판의 한계하중은 이론적으로 식(6)과 같으며 유한요소 한계하중 해석을 통해 확인할 수 있다.

평면 응력에서와 같은 방법으로 용접 관련 변수가 용접구조물의 한계하중에 미치는 영향을 알 수 있으며 over-matching 및 under-matching에서의 한계하중은 식(7) 및 식(8)과 같다<sup>(6,7)</sup>.  $M=2$  및  $M=0.5$ 에서의 한계하중을 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

<2D plane stress condition>

$$N_{LB} = 2(w-c)B\sigma_o \quad (3)$$

- Over-matching

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} \min\left(M, \frac{1}{1-c/W}\right) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_1 \\ \min\left(\frac{N_{LM}^{(1)}}{N_{LB}}, \frac{1}{1-c/W}\right) & \text{for } \psi_1 \leq \psi \end{cases} \quad (4)$$

where

$$\frac{N_{LM}^{(1)}}{N_{LB}} = \frac{24(M-1)}{25} \left(\frac{\psi_1}{\psi}\right) + \frac{(M+24)}{25}$$

$$\psi_1 = \left(1 + 0.43 \exp^{-5(M-1)}\right) \exp^{-(M-1)/5}$$

- Under-matching

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.43 \\ M(1.155 - 0.2212/\psi) & \text{for } 1.43 \leq \psi \end{cases} \quad (5)$$

<2D plane strain condition>

$$N_{LB} = \frac{4}{\sqrt{3}}(w-c)B\sigma_o \quad (6)$$

- Over-matching

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} \min\left(M, \frac{1}{1-c/w}\right) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_2 \\ \min\left(\frac{N_{LM}^{(2)}}{N_{LB}}, \frac{1}{1-c/w}\right) & \text{for } \psi_2 \leq \psi \end{cases} \quad (7)$$

where

$$\frac{N_{LM}^{(2)}}{N_{LB}} = \frac{24(M-1)}{25} \left(\frac{\psi_1}{\psi}\right) + \frac{(M+24)}{25}$$

$$\psi_2 = \exp^{-(M-1)/5}$$

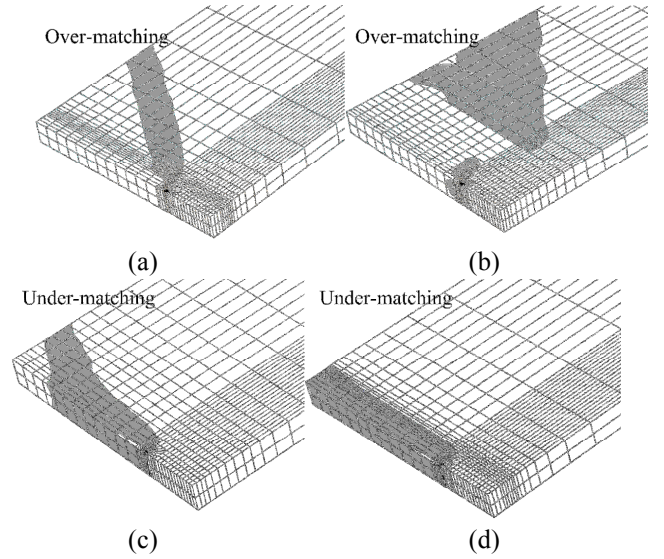
- Under-matching

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.0 \\ 1 - \frac{(1-M)}{\psi} & \text{for } 1.0 \leq \psi \end{cases} \quad (8)$$

### 3.2 3 차원 조건에서의 한계하중 해석

Fig. 4는  $w/t=10$ 에서 강도 불일치 평판에서의 유한요소 한계하중과 평가식과의 비교를 나타낸 결과다.  $w/t=10$ 에 대해 over-matching에서는 2D-P.E 조건과 잘 맞으며 under-matching에서는 2D-P.S 조건과 비슷함을 확인할 수 있다.

Fig. 5는  $M=0.5$  및  $2.0$ 인 강도 불일치 평판에서 무차원화 한계하중 범위를 두루 나타낼 수 있는 몇 가지  $\psi$ 에 대해 평판의 두께가 한계하중에 미치는 영향(thickness constraint)을 보여준다. Over-matching에서는 평판의 두께비( $w/t$ )에 상관없이 강도 불일치 한계하중은 평면변형률 조건에서의 한계하중과 일치하며 under-matching에서는 평판의



**Fig. 6** Classification of plasticity deformation patterns for mis-matched plates. A dark region indicates the region where plastic strain is over 5% : (a) deformation penetrating to the base material ( $w/t=10, c/w=0.25, h/t=0.5, M=2.0$ ), (b) base plate deformation ( $w/t=10, c/w=0.25, h/t=3.0, M=2.0$ ), (c) deformation penetrating to the base material ( $w/t=10, c/w=0.25, h/t=2.0, M=0.75$ ), (d) deformation confined to the weld metal ( $w/t=10, c/w=0.25, h/t=1, M=0.5$ )

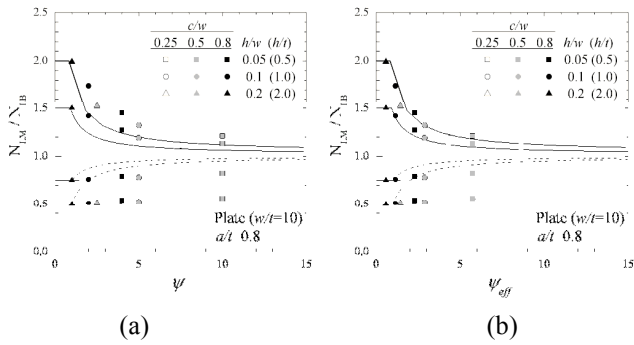
두께에 따라 평면응력 조건 및 평면변형률 조건에서의 한계하중 사이값이 됨을 알 수 있다. 이는 균열로 인해 소성변형이 발생하는 용접부가, over-matching에서는 모재에 비해 강성이 상대적으로 높기 때문에 두께 방향으로의 변형이 적어 평면변형률 조건과 유사하며, under-matching에서는 모재에 비해 강성이 상대적으로 낮아 용접부에서 소성변형이 더욱 뚜렷하게 나타나기 때문에 두께의 영향(thickness constraint)이 발생하기 때문이라 생각된다.  $\psi=10$ , under-matching에서  $w/t=10, 20$ 의 한계하중이 평면 응력조건과 가까우며  $w/t=1$ 의 한계하중이 평면변형률 조건과 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 경향을 바탕으로 두께의 영향이 고려된 용접부 중앙에 균열이 존재하는 평판에 대한 한계하중을 식(9), (10)과 같이 제안한다.

- Over-matching

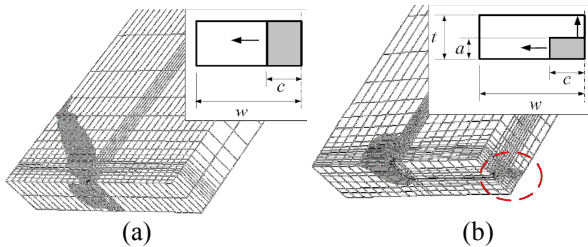
$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} \min\left(M, \frac{1}{1-(a/t)(c/w)}\right) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_2 \\ \min\left(\frac{N_{LM}^{(2)}}{N_{LB}}, \frac{1}{1-(a/t)(c/w)}\right) & \text{for } \psi_2 \leq \psi \end{cases} \quad (9)$$

- Under-matching

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.0 \\ \text{Between} \left[ M(1.155 - 0.2212/\psi), 1 - \frac{(1-M)}{\psi} \right] & \text{for } 1.0 \leq \psi \end{cases} \quad (10)$$



**Fig. 7** Comparison of mis-match limit load solutions with FE results for part-through surface cracked welded plate. FE mis-match limit load is defined by (a) ligament-to-weld width ratio,  $\psi$ , and (b) proposed effective  $\psi$ ,  $\psi_{eff}$



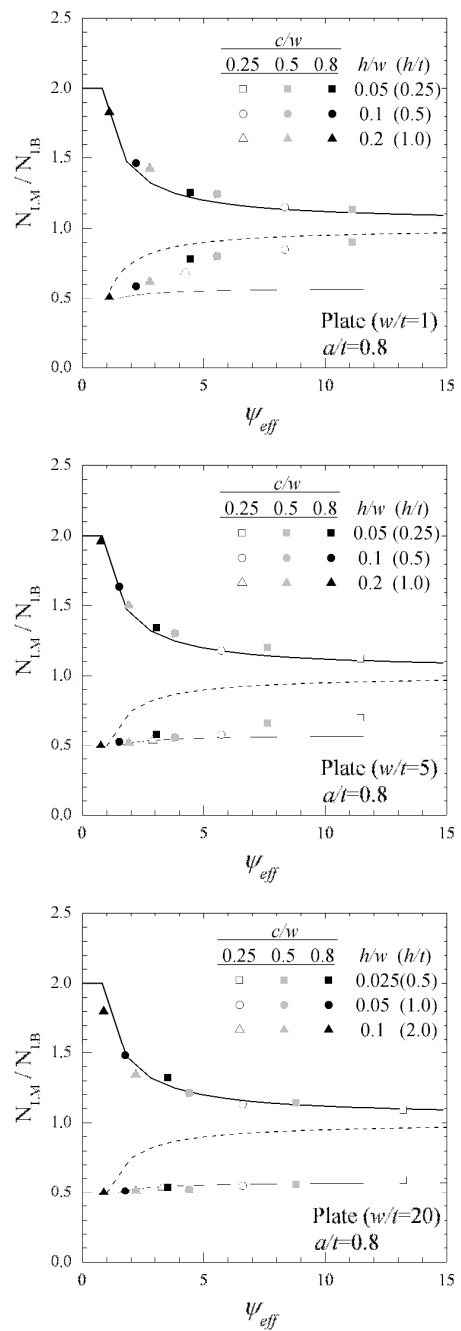
**Fig. 8** Comparison of plasticity deformation patterns of cracked plate ( $w/t=5$ ,  $c/w=0.5$ ,  $h/w=0.25$ ,  $M=1$ ): (a) Through-wall cracked plate ( $a/t=1.0$ ), (b) part-through surface cracked plate ( $a/t=0.5$ )

Fig. 6은 용접부에 관통균열이 존재하는 평판에서 균열의 크기, 용접부의 폭, 강도 불일치 정도 ( $M$ )에 따라 소성 변형이 발생하는 모양을 보여준다. 그림에서 어두운 부분은 소성변형이 5%이상인 영역을 나타낸다. Over-matching 및 under-matching에서 균열로 인해 발생한 소성역이 모재로 관통하는 양상이 일반적이나, 균열로 인한 용접부의 강성이 균열 없는 모재의 강성보다 크면 모재 부분에서 소성변형이 발생할 수 있으며(Fig. 6(b)) 반대의 경우 소성역이 용접부에 한정되는 양상을 보이기도 한다(Fig. 6(d)).

#### 4. 표면균열이 용접부 중앙에 위치한 평판의 한계하중 해석

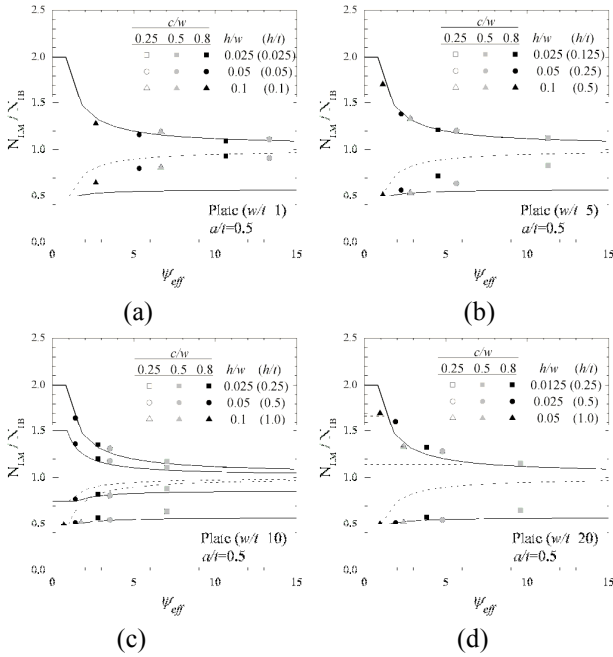
용접부 중앙에 표면균열이 존재하는 경우도 관통균열과 마찬가지로 잔여길이 대 용접 폭 비값 (ligament-to-weldment ratio)인  $\psi$ 를 사용하여 강도 불일치 평판의 한계하중을 균열길이, 용접폭, 강도 불일치 정도에 따라 정량화할 수 있다.

Fig. 7(a)는  $w/t=10$ ,  $a/t=0.8$ ,  $0.25 \leq c/w \leq 0.8$ ,  $0.5 \leq h/t \leq 2.0$ 인 용접평판에서 식(2)를 사용하여 정의한



**Fig. 9** Comparison of mis-match limit load solutions with FE results defined by  $\psi_{eff}$  for part-through surface cracked welded plate ( $a/t=0.8$ ). Various thickness was considered, (a)  $w/t=1$ , (b)  $w/t=5$ , (c)  $w/t=20$

유한요소 강도 불일치 한계하중 결과 및 평가식 (식(9), 식(10))과의 비교 결과다. 그림에서와 같이 관통균열에서 적용한  $\psi$ 를 그대로 사용하는 데 문제가 있음을 알 수 있다. 이는 표면균열에서의 소성변형이 두 개의 ligament 방향으로 복합적으로 발생하기 때문이라 판단된다(Fig. 8). 따라서 본 연구에서는 표면균열 두께 비( $a/t$ ) 및 평판의 두께 비( $w/t$ )에 대한 다양한 변수 해석을 통해 식(11)과



**Fig. 10** Comparison of mis-match limit load solutions with FE results defined by  $\psi_{eff}$  for part-through surface cracked welded plate ( $a/t=0.5$ ). It shows good agreement for various thickness : (a)  $w/t=1$ , (b)  $w/t=5$ , (c)  $w/t=10$ , (d)  $w/t=20$

같이 보정계수를 적용한  $\psi_{eff}$ 를 제안하였으며 Fig. 7(b)에서  $\psi_{eff}$ 로 정의된 강도 불일치 한계하중이 기존 관통균열 평가식과 잘 일치함을 확인할 수 있다.

$$\psi = \frac{(w-c)}{h_{eff}}$$

with

$$h_{eff} = f(a/t, w/t)h \quad \text{식(11)}$$

$$f\left(\frac{a}{t}, \frac{w}{t}\right) = 0.35\left(\frac{w}{t}-2\right)\left(1-\frac{a}{t}\right)+1$$

Fig. 9 및 10은  $a/t=0.8$  및  $0.5$ 에서  $\psi_{eff}$ 로 정의된 강도 불일치 한계하중 및 평가식과의 비교 결과이며 제안한  $\psi_{eff}$ 가 유효함을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 강도 불일치(strength mis-match) 동종 용접(similar welding) 평판에서 용접부 중앙에 관통 또는 표면 균열이 존재할 때의 한계하중을 소변형 해석을 통해 구하였다. 강도불일치 한계하중은  $\psi$  및  $\psi_{eff}$ 를 통해 정의하였으며 이를 통해 균열 크기(c) 및 용접부 폭(h), 강도 불일치 정도(M)

가 한계하중에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다. 이를 통해 균일 구조물로 가정하는 기존 평가식의 보수성을 줄일 수 있었으며 향후 한계하중 결과를 바탕으로 용접부 균열에 대한 파괴역학해석을 수행할 수 있다고 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Zahoor, A., 1991, "Ductile Fracture Handbook", Novotech Corp, USA
- (2) Kumar, V., German, M. D., 1988, "Elastic-plastic fracture analysis of through-wall and surface flaws in cylinder", EPRI Report, NP-5596
- (3) Wilkowski, G., Ahmad, J., Brust, F., Ghadiali, N., Krishnaswamy, P., Landow, M., Marchall, C., Scott, P., 1991, "Short cracks in piping and piping welds", NUREG/CR-4599, USNRC
- (4) British Energy Generation Ltd., 2001, "R6:Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", Revision 4
- (5) Schwalbe, K-H, Ainsworth, RA, Eripret, C, Gilles, P, Koçak M, Pisarski H, Wang Y-Y, 1997, "Common views on the effects of yield strength mis-match on testing and structural assessment", GKSS Research Centre Publications, p.99-134
- (6) Kim, Y-J, Schwalbe, 2001, "Mismatch effect on plastic yield loads in idealized weldments : I .Weld centre cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol.68, p.163-182
- (7) Kim, Y-J, Schwalbe, 2001, "Mismatch effect on plastic yield loads in idealized weldments : II.Heat affected zone cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol.68, p.183-199
- (8) ABAQUS, 2003, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4", Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA.