

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.5.411

# 용접부 중앙에 표면균열이 존재하는 인장 평판에 대한 강도 불일치 한계하중 해석 및 간략 J-적분 예측

송태광\* · 김윤재† · 김종성\*\* · 진태은\*\*  
(2007년 12월 26일 접수, 2008년 3월 24일 심사완료)

## Mis-Match Limit Load Analyses and Approximate J-Integral Estimates for Similar Metal Weld with Weld-Center Crack Under Tension Load

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

**Key Words :** Finite Element Analysis(유한요소해석), Strength-Mismatch(강도불일치), Limit Load Analysis(한계하중해석), J-Integral(J-적분)

### Abstract

In this work, the effect of strength mismatch on plastic limit loads is quantified for similar metal weld plates with cracks under tension load, via three-dimensional, small strain elastic-perfectly plastic finite element analyses. Relevant variables related to plate geometry and crack length are systematically varied, in addition to the weld width. An important finding is that mis-match limit loads can be uniquely quantified through strength mis-match ratio and one geometry-related parameter. Based on the proposed limit load solutions, reference stress based J-integral estimates is also investigated. When the reference stress is defined by the mis-match limit load, predicted J-integral values agree overall well with FE results.

### 기호설명

- $F_{LB}$  : 평판이 모재로만 되었다고 가정하였을 때의 소성 한계 하중
- $F_{LM}$  : 강도 불일치가 고려된 소성 한계 하중
- $M$  : 강도 불일치 비
- $\psi$  : 2 차원 해석에서 정규화된 잔여 길이
- $\psi_{eff}$  : 3 차원 해석에서 정규화된 잔여 길이
- $\sigma_{ref}$  : 참조 응력

### 1. 서론

용접부(weldment)와 모재(base material)와의 강도 불일치가 구조물의 균열 평가에 미치는 영향은 용

접부, 구조물의 형상 및 균열 크기와 관련된 다양한 변수로 인한 복잡성으로 인해 2 차원해석으로 한정되어 왔다.<sup>(1-5)</sup> Kim, Schwalbe 및 Hao 등의 연구결과는 모두 관통균열을 대상으로 평면 변형률 또는 평면 응력 조건에서 구한 연구결과임을 알 수 있다. 그러나 실제로는 관통균열보다 표면균열에 대한 평가가 더 일반적이고 중요하다. 그러나 표면 균열에 대한 평가는 3 차원 조건 및 균열 깊이에 대한 변수가 포함되기 때문에 강도 불일치가 한계하중에 미치는 영향을 정량화하는 것이 쉽지 않다.

본 논문에서는 3 차원 유한요소 해석을 통해 용접부 중앙에 표면균열이 존재하는 평판이 인장하중을 받는 경우에 대해 용접부 강도 불일치가 한계하중에 미치는 영향을 정량화 하였으며 참조응력법을 바탕으로 간략 J-적분 해석을 수행하였다. 2 장에서는 2 차원 조건에서의 관통균열에 대한 기존 연구 결과에 대한 검토를 하였으며 3 장에서는 3 차원 조건에서 관통균열 및 표면균열에 대한 강

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

\* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한국전력기술(주)

도불일치 한계하중 해석을 수행하였다. 그리고 4 장에서는 3 장에서 제시한 강도 불일치 한계하중 결과를 바탕으로 참조응력법<sup>(8)</sup>을 통해 탄소성 파괴역학 해석을 수행하였으며 5 장에서 결과를 정리하였다.

## 2. 강도 불일치 한계하중 해석

Fig. 1은 본 논문에서 고려한 동종 금속 용접 평판(similar metal weld plate)을 나타낸다. 용접 형상은 사각 단면의 맞대기(butt)용접을 고려하였으며 평판의 폭, 두께, 용접부의 폭은 각각  $2w$ ,  $t$ ,  $2h$ 로, 균열 두께 및 길이는  $a$  및  $2c$ 로 나타내었다. 본 연구에서 고려한 평판의 형상 및 균열의 크기, 용접부 폭의 범위는 Table. 1과 같다. 평판의 두께, 용접폭, 균열 크기는 공학적인 관심 범위 내에서 선정하였다.

강도 불일치 평판에 대한 한계하중은 ABAQUS에서 제공하는 MPC 옵션을 통해 구하였다.<sup>(6)</sup> Fig. 2는  $w/t=10$ ,  $c/w=0.5$ ,  $h/t=1.0$  평판에서 강도 불일치에 따른 인장하중-변위 곡선을 나타낸다. 강도 불일치 한계하중( $F_{LM}$ )은 같은 형상 및 균열 크기를 가진 모재로만 이루어진 균질 평판의 한계하중( $F_{LB}$ )으로 무차원화할 수 있으며 이를 통해 강도 불일치 비( $M$ , mismatch ratio)가 한계하중에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 강도 불일치 비는 식 (1)과 같다.

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

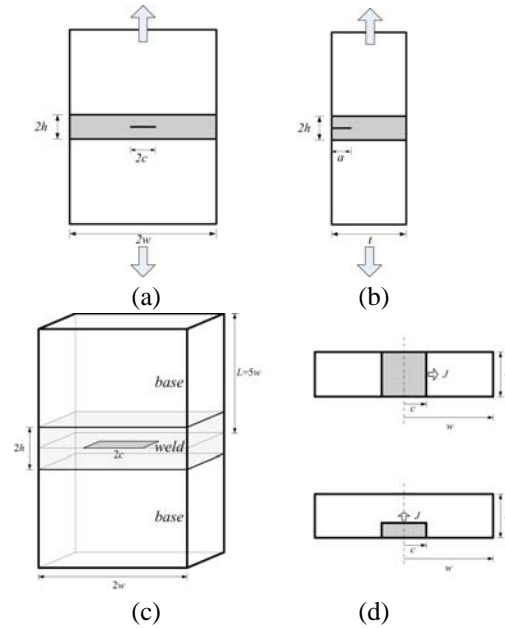
여기서  $\sigma_{YW}$ 는 용접부의 항복강도를,  $\sigma_{YB}$ 는 모재의 항복강도를 나타낸다. 그리고 모재의 항복강도를 기준으로  $M < 1$ 은 under-matching,  $M > 1$ 은 over-matching 이라 한다.

표면균열을 포함한 용접평판에 대한 평가는 기존 용접 폭 및 균열 길이 외에 균열 깊이 및 3차원 영향을 포함하기 때문에 변수의 복잡성으로 인해 체계적인 평가가 힘들다. 따라서 관통균열을 대상으로 2차원 해석을 수행한 선행 연구 결과 검토는 표면균열 평가에 대한 좋은 지침이 될 수 있다고 판단한다.

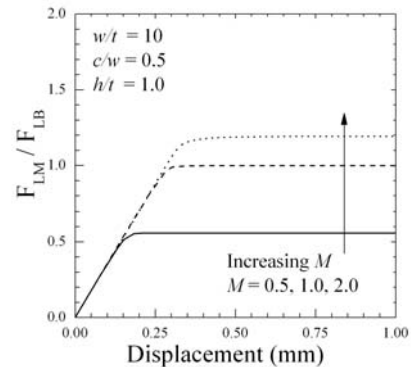
표면균열에 대한 2가지 극한 경우(limit case)는 균열 깊이가 평판의 두께와 같아진 경우( $a=t$ , Fig. 1(a))와 균열 길이가 평판 폭과 같아진 경우( $c=w$ , Fig. 1(b))이다. 각각의 경우 용접폭-균열 길이 관련 무차원 변수,  $\psi$ ,는 식 (2), (3)과 같이 정의된다.

**Table 1** Variable considered in this study

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



**Fig. 1** Schematic illustration of a similar metal weld plate with weld center crack under tension. 2 dimension condition is considered with (a) middle cracked plate and (b) single edge cracked plate. (c) shows 3 dimensional condition with thickness,  $t$  and (d) crack shape, through wall crack and part through surface crack. Note that arrow means direction for  $J$ -integral calculation



**Fig. 2** Typical tension-displacement curves from FE analyses for 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  $2.0$

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

$$\psi = \frac{(t-a)}{h} \quad (3)$$

$\psi$ 는 균열이 존재하는 면에서 균열 잔여면 (ligament)의 길이를 용접폭의 반( $h$ )으로 나눈 값이다.

2.1 용접부 중앙에 관통 균열이 있는 평판에 대한 강도 불일치 한계하중 해석

Fig. 1(a)와 같이 표면균열의 깊이가 평판의 두께와 같은 경우에 대한 2차원 한계하중 해석 결과는 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다.<sup>(2)</sup> Fig. 3은 다양한 강도 불일치 비 및  $\psi$ 값에 대해 평면 변형률 및 평면 응력 조건에서의 강도 불일치 한계하중을 나타낸다. 두 조건 모두 균열 길이 및 용접 폭이 클수록(낮은  $\psi$ 값) 강도 불일치 비가 한계하중에 미치는 영향은 크며 over-matching에서는 유사한 값을 나타낸다. 반면 under-matching에서는 충분히 큰  $\psi$  값에 대해 평면 변형률 조건에서는 모재의 한계하중에 수렴하는 반면 평면 응력조건에서는 용접재의 한계하중에 수렴하는 것을 알 수 있다. 각각의 조건과 관련된 한계 하중식은 다음과 같다.<sup>(2)</sup>

2차원 over-matching 강도불일치 평판의 평면 변형률 조건 한계하중은 식 (4)와 같다.

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

여기서

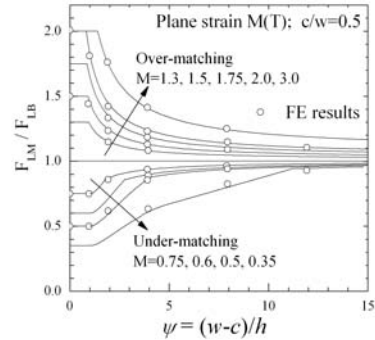
$$\frac{F_{LM}^{(1)}}{F_{LB}} = \frac{24(M-1)}{25} \left( \frac{\psi_1}{\psi} \right) + \frac{(M+24)}{25}$$

$$\psi_1 = \exp^{-(M-1)/5}$$

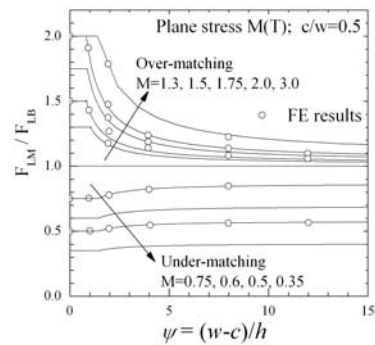
2차원 under-matching 강도불일치 평판의 평면 변형률 조건 한계하중은 식 (5)와 식 (6)중 작은 값이다.

$$\frac{F_{LM}}{F_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.0 \\ 1 - \frac{(1-M)}{\psi} & \text{for } 1.0 \leq \psi \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{F_{LM}}{F_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.0 \\ M \cdot \left[ 1.0 + 0.462(\psi-1)^2/\psi - 0.044(\psi-1)^3/\psi \right] & \text{for } 1.0 \leq \psi \leq 3.6 \\ M \cdot [2.571 - 3.254/\psi] & \text{for } 3.6 \leq \psi \leq 5.0 \\ M \cdot [1.291 + 0.125\psi + 0.019/\psi] & \text{for } 5.6 \leq \psi \end{cases} \quad (6)$$

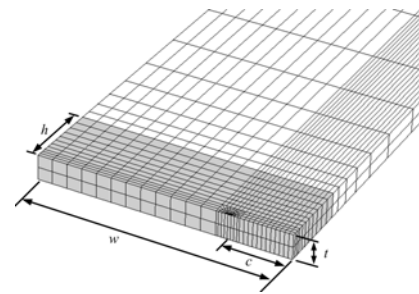


(a)

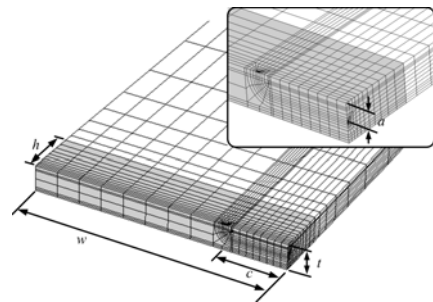


(b)

Fig. 3 Normalized mis-match limit load for middle cracked plate. (a) plane strain and (b) plane stress



(a)



(b)

Fig. 4 Typical finite element meshes for similar metal weld cracked plate : (a) through-wall cracked plate and (b) part-through surface crack plate

2차원 over-matching 강도불일치 평판의 평면 응력 조건 한계하중은 식 (7)과 같다.

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

여기서

$$\frac{F_{LM}^{(2)}}{F_{LB}} = \frac{24(M-1)}{25} \left(\frac{\psi_2}{\psi}\right) + \frac{(M+24)}{25}$$

$$\psi_2 = \left(1 + 0.43 \exp^{-5(M-1)}\right) \exp^{-(M-1)/5}$$

2차원 under-matching 강도불일치 평판의 평면 응력 조건 한계하중은 식 (8)과 식 (9)중 작은 값이다.

$$\frac{F_{LM}}{F_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.43 \\ M(1.155 - 0.2212/\psi) & \text{for } 1.43 \leq \psi \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{F_{LM}}{F_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.43 \\ 1 - 1.43 \frac{(1-M)}{\psi} & \text{for } 1.43 \leq \psi \end{cases} \quad (9)$$

여기서  $F_{LB}$ 는 균질 재료에서의 한계하중으로 식 (10)과 같으며 평면 변형률 조건에서는  $\alpha = 4/\sqrt{3}$ , 평면 응력 조건에서는  $\alpha = 2$  이다.<sup>(7)</sup>

$$F_{LB} = \alpha(w-c)B\sigma_Y \quad (10)$$

## 2.2 용접부 가장자리에 관통 균열이 있는 평판에 대한 강도 불일치 한계하중 해석

표면균열에 대한 또 다른 극한 경우는 균열 길이가 평판 폭의 길이와 같아지는 상태( $c=w$ )로서 Fig. 1(b)와 같다. 이 때 강도 불일치 한계 하중은 Fig. 3과 유사한 경향을 나타내며 식 (4)~(9)와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 단 평판 가장자리에 균열이 있는 경우에 적합한  $F_{LB}$  및  $\psi$ (식 (3))를 사용해야 한다.<sup>(4)</sup>

지금까지 용접부에 존재하는 표면균열에 대한 두 가지 극한 조건에서의 2차원 한계하중을 검토하였으며 이를 통해 다음과 같이 두 가지 중요한 의미를 파악할 수 있다. 첫 번째는 강도 불일치 한계하중은 강도 불일치 비( $M$ ) 및 무차원 형상 변수( $\psi$ )를 통해 정량화 할 수 있다는 점이다. 이 때  $\psi$ 는 균열 잔여면의 길이를 용접부의 폭의 길이로 무차원화한 값으로 2차원에서는 쉽게 정의할 수 있다. 두 번째는 평면 변형률 및 평면 응력과 같은 2차원 조건에 따라 over-matching에 대해서는 유사하나 under-matching에 대해서는 차이가 발생한다는 점이다. 이는 두께에 따른 영향이 존재함을 의미한다.

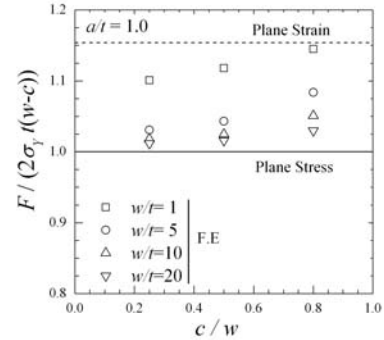


Fig. 5 Effects of thickness on the normalized mis-match limit loads

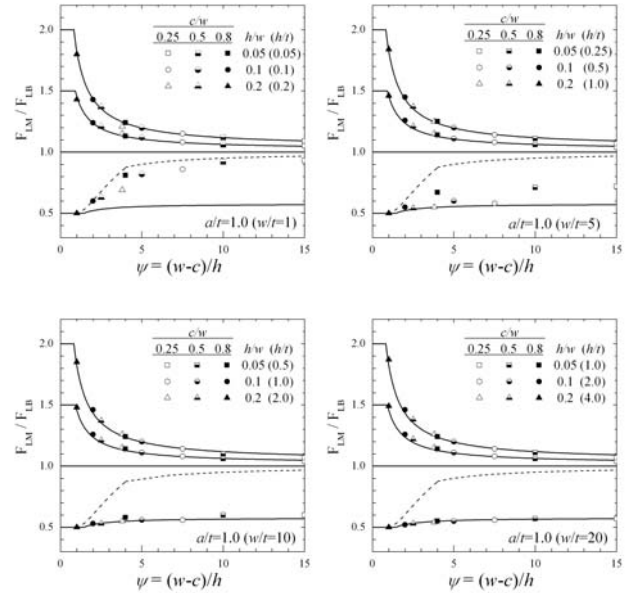


Fig. 6 Comparisons of the mis-match limit load solutions with FE results for through-wall cracked plate. Various parameters associated with strength mis-matched weld were considered systematically

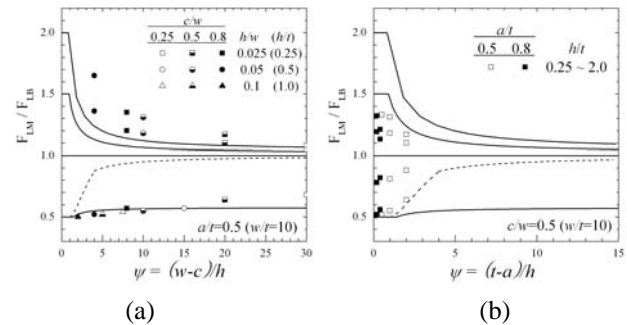


Fig. 7 Variations of normalized mis-match limit loads for part-through surface cracks with (a)  $\psi = (w-c)/h$  and (b)  $\psi = (t-a)/h$

### 3. 3 차원 조건에서의 강도 불일치

#### 한계하중 해석

2차원에서의 선행 연구 검토를 통해 강도 불일치 한계하중은  $M$  및  $\psi$ 를 통해 정량화 할 수 있으며, 두께 방향으로의 구속의 영향이 존재함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 표면균열을 포함한 평판에서 균열크기, 강도 불일치 및 용접 폭이 한계하중에 미치는 영향을 정량화하기 위해 Table 1과 같이 해석 변수를 선정하였다. Fig. 4는 관통균열 또는 표면균열을 포함하는 3차원 유한요소 망을 나타낸다. 해석 시간 단축을 위해 대칭성을 이용한 1/8 또는 1/4 모델을 사용하였으며 ABAQUS<sup>(6)</sup>에서 제공하는 3차원 등계수 사각주요소(element : C3D20R)를 사용하여 해석을 수행하였다. 균열 끝단의 변형을 모사하기 위해 방사방향으로 썸기 모양 요소를 배치하였으며 두께방향으로는 균열 종류 및 두께 비( $w/t$ )에 따라 2~14개의 요소를 사용하였다. 또한 끝단 영향(end effect)을 피하기 위해 모재의 길이는 평판 폭( $w$ )의 5배 ( $L=5w$ )로 설정하였다. 관통균열의 경우 약 300개, 표면균열의 경우 약 2000개의 요소가 사용되었다.

#### 3.1 관통균열에 대한 결과

Fig. 5는 4가지 두께 비( $w/t=1, 5, 10, 20$ )에서 균질 배관에 대한 한계하중 결과를 나타낸다. 평면 변형률 및 평면 응력 조건에서 균질 평판의 한계하중은 식 (10)과 같으며  $w/t=1$ 인 경우 평면 변형률 조건,  $w/t=20$ 인 경우는 평면 응력 조건과 유사함을 알 수 있다. 또한 균열 크기가 증가할수록 평면 변형률 조건에 가까워 짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로 각각의 두께 비에서 유한요소 해석을 통해 구한 강도 불일치 한계하중은 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 실선은 평면 변형률 조건에서의 제안식 (식 (4), (5), (6))이며 점선은 평면 응력 조건에서의 제안식 (식 (7), (8), (9))이다. Over-matching의 경우는 평면 변형률 조건에서의 제안식이 평면 응력 조건에서의 제안식과 거의 같으며 그래프에서는 실선만 나타나 있다. 반면 under-matching에서는 두께 비에 따른 강도 불일치 한계하중이 기존 평면 변형률 및 평면 응력 조건 사이의 값으로 나타나며,  $w/t=1$ 의 경우 평면 변형률 조건,  $w/t=20$ 의 경우 평면 응력 조건과 유사함을 알 수 있다.

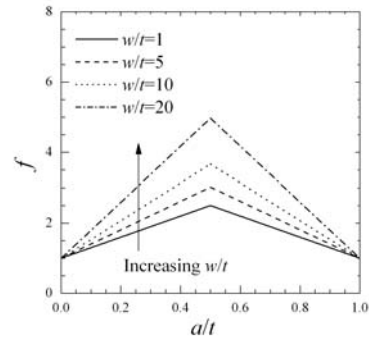


Fig. 8 Variations of non-dimensional factor,  $f$  with  $a/t$  and  $w/t$

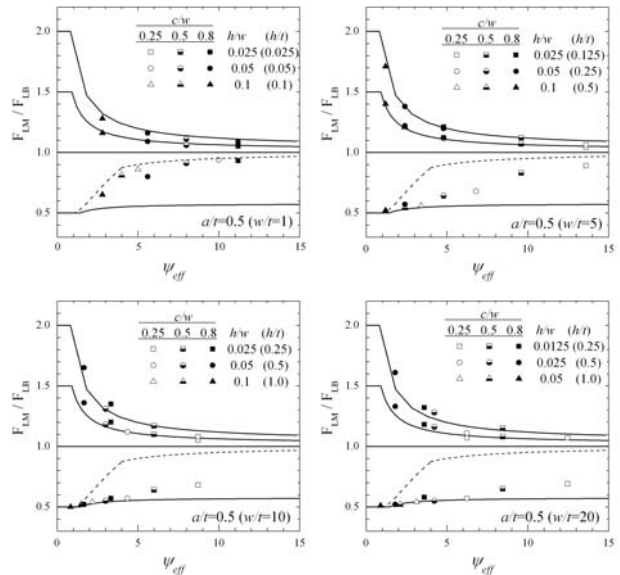


Fig. 9 Comparison of mis-match limit load solutions with FE results defined by  $\psi_{eff}$  for part-through surface cracked plates ( $a/t=0.5$ ) with various thickness, (a)  $w/t=1$ , (b)  $w/t=5$ , (c)  $w/t=10$ , (d)  $w/t=20$ . Refer  $\psi_{eff}$  in Eq. 12

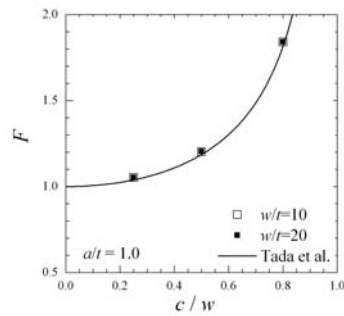


Fig. 10 Verification for stress intensity factor with existing solution

### 3.2 표면균열에 대한 결과

표면 균열의 경우 균열은 길이 방향 및 두께 방향으로 존재하기 때문에 용접 변수  $\psi$ 를 정의하는 것이 2차원에서 같이 단순하지 않다. Fig. 7은 표면 균열 평판에 대해 식 (2) 및 (3)을 통해  $\psi$ 를 정의하였을 때의 무차원화된 강도 불일치 한계하중 결과를 보여준다. 이 때 균질 배관에서의 한계하중 ( $M=1$ )은 식 (11)과 같으며<sup>(7)</sup> 이를 통해 강도불일치 한계하중을 무차원화 하였다.

$$F_L = \left(1 - \frac{a}{t} \frac{c}{w}\right) w t \sigma_Y \quad (11)$$

Fig. 7을 통해 기존 2차원에서 정의된  $\psi$ 를 통해서 3차원 표면균열 평판에서의 강도 불일치 한계하중을 정량화하기 힘들음을 알 수 있다. 또한 3차원 표면균열은 두께 방향으로의 구속 또한 포함한다. 식 (12)는 이와 같은 특성을 고려할 수 있는 무차원 변수,  $\psi_{eff}$ 를 나타낸다.  $\psi_{eff}$ 는 기존 2차원에서 두 가지 극한 경우에서의  $\psi$ 값을 무차원 변수  $f$ 를 통해 보정한 값으로  $f$ 는 식 (13) 및 Fig. 8과 같다.

$$\psi_{eff} = \frac{1}{f} \left[ \frac{(t-a)}{h} + \frac{(w-c)}{h} \right] \quad (12)$$

$$f = \begin{cases} 2 \left( g \left( \frac{w}{t} \right) - 1 \right) \left( \frac{a}{t} - 0.5 \right) + g \left( \frac{w}{t} \right) & 0 \leq \frac{a}{t} \leq 0.5 \\ -2 \left( g \left( \frac{w}{t} \right) - 1 \right) \left( \frac{a}{t} - 0.5 \right) + g \left( \frac{w}{t} \right) & 0.5 \leq \frac{a}{t} \leq 1.0 \end{cases} \quad (13)$$

$$g \left( \frac{w}{t} \right) = 0.13 \left( \frac{w}{t} \right) + 2.37$$

Fig. 9는 식 (12)와 같이 제안된  $\psi_{eff}$ 를 사용하여  $a/t=0.5, M=0.5, 1.5, 2.0$  경우에서의 강도 불일치 한계하중 결과를 4가지 두께 비에서 나타낸다. Over-matching에서의 무차원화된 강도 불일치 한계하중은 기존 평면 변형률 또는 평면 응력 조건에서의 제안식과 잘 일치하며 under-matching에서 무차원화된 강도 불일치 한계하중은 평면 변형률 조건 및 평면 응력조건에서의 제안식 사이에 분포하며  $w/t=1$ 은 평면 변형률 조건,  $w/t=20$ 은 평면 응력 조건과 유사하다.

이와 같이 표면균열에 대한 한계하중은 제안된 무차원 변수  $\psi_{eff}$ 를 통해 정량화 할 수 있으며 다른 균열 길이( $a/t$ )에 대해서도 동일한 결과를 보여주었다.

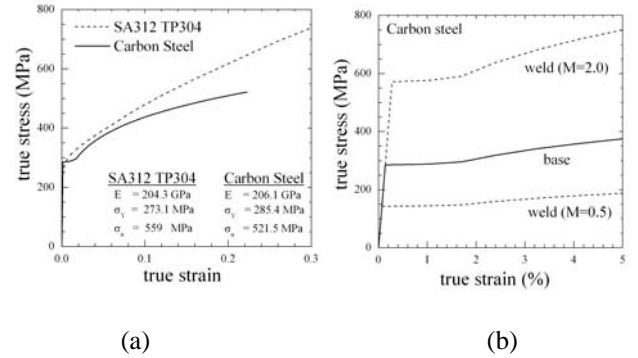


Fig. 11 (a) True stress-strain curves and tensile properties for SA312 TP304 and carbon steel considered in this work. (b) illustration of generation tensile properties of weld metal

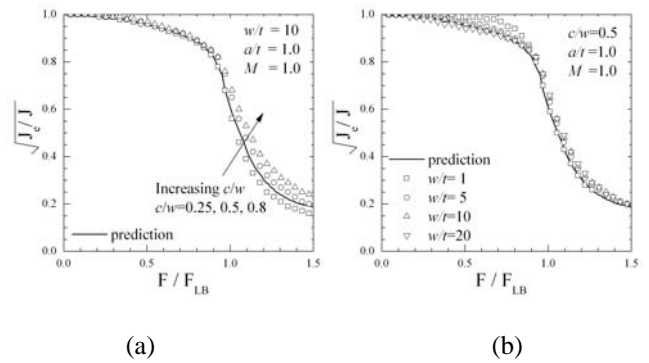


Fig. 12 Comparisons of reference stress based  $J$  estimates with FE results for homogeneous tensile plates made of SA312 TP304

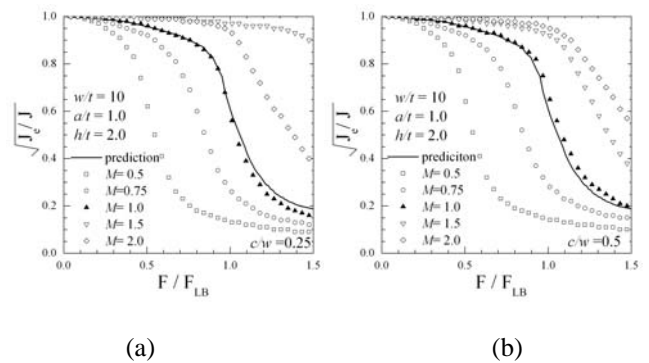


Fig. 13 Comparisons of reference stress based  $J$  estimates with FE results for mis-matched plate with through-wall crack made of SA312 TP304. Note that reference stress is defined by  $F_{LB}$

#### 4. 탄·소성 파괴역학 해석

소성 한계 하중 해석이 구조물이 지지할 수 있는 최대 하중을 평가한다면 탄소성 파괴역학 해석은 균열 진전 등에 대한 정보를 제공한다. 탄·소성 파괴역학 해석 시 중요한 변수인  $J$ -적분은 참조 응력법(Reference Stress Method, R6, 2007)을 통해 구할 수 있으며 식 (14)과 같다.<sup>(8)</sup>

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2}{2} \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (14)$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} = \frac{F}{F_L} \quad (15)$$

식 (14)에서  $J_e$ 는 선형탄성으로 구한  $J$ -적분으로 식 (16)과 같다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} \quad (16)$$

여기서 탄성계수,  $E'$ 은 평면 변형률 조건에서  $E'=E/(1-\nu^2)$ , 평면 응력 조건에서  $E'=E$  이며  $\nu$ 는 프와송 비를 나타낸다.  $\sigma_Y$ 는 재료의 항복강도이며  $F_L$ 은 균열을 포함한 구조물의 한계하중으로 일반적으로 소성한계하중을 나타낸다.  $\varepsilon_{ref}$ 는 재료의 인장 물성에서  $\sigma_{ref}$ 에 해당하는 변형률 값이다.

유한요소 해석을 통해 구한  $J$ -적분은 작용하중에 따른 영역 적분 값이며 Fig. 1(d)에서 관통균열 및 표면균열에서  $J$ -적분을 구한 방향을 확인할 수 있다. 유한 요소 해석을 통해 구한  $J$ -적분은 기존 응력 확대 계수(stress intensity factor)식과의 비교를 통해 정확성을 검증하였다. Fig. 10은 관통균열에 대한 Tada<sup>(9)</sup>의 응력 확대 계수식과의 비교 결과로서  $J$ -적분이 정확하게 구해졌음을 알 수 있다.

$J$ -적분 해석을 위한 재료 물성으로는 SA312 TP304 및 탄소강(carbon steel)을 사용하였으며 상온에서의 값이다.(Fig. 11) 재료 물성의 강도 불일치는 항복강도의 불일치만을 의미하며 따라서 변형 경화율(strain hardening)은 강도 불일치와 상관없이 일정하게 유지된다. 이와 같은 방법으로 정의할 수 있는 강도 불일치 용접부 재료 물성은 Fig. 11(b)와 같다.

강도 불일치 평판에서의 참조하중은 식 (17)과 같다.

$$\left(\sigma_{ref}\right)_M = \frac{F}{F_{LM}} \sigma_{YB} \quad (17)$$

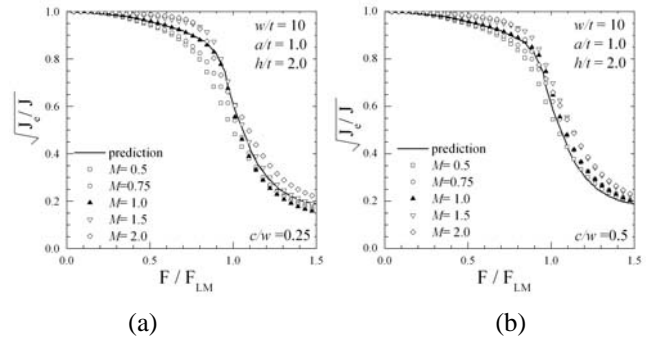


Fig. 14 Comparisons of reference stress based  $J$  estimates with FE results for mis-matched plate with through-wall crack made of SA312 TP304. Note that reference stress is defined by  $F_{LM}$

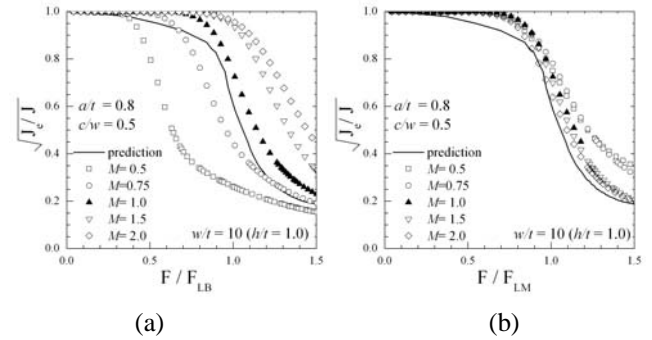


Fig. 15 Comparisons of reference stress based  $J$  estimates with FE results for mis-matched plate with part-through surface crack made of SA312 TP304. Note that reference stress is defined by (a)  $F_{LB}$  and (b)  $F_{LM}$

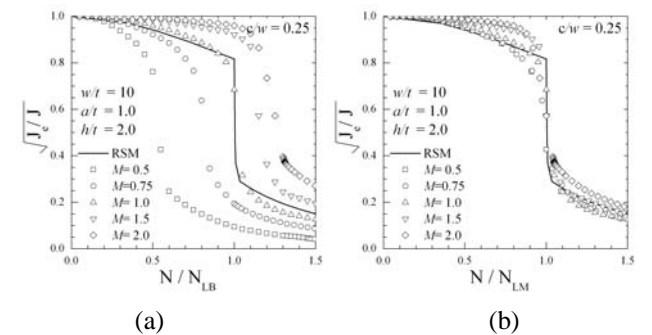


Fig. 16 Comparisons of reference stress based  $J$  estimates with FE results for mis-matched plate with through-wall crack made of carbon steel. Note that reference stress is defined by (a)  $F_{LM}$  and (b)  $F_{LM}$

여기서 강도 불일치 평판에 대한 참조하중,  $(\sigma_{ref})_M$ 은 균질 평판에 대한 참조 하중과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$(\sigma_{ref})_M = \left( \frac{F}{F_{LB}} \sigma_{YB} \right) / \left( \frac{F_{LB}}{F_{LM}} \right) = (\sigma_{ref})_B / \left( \frac{F_{LB}}{F_{LM}} \right) \quad (18)$$

이는 2장, 3장을 통해 구한  $F_{LB}/F_{LM}$ 비를 통해 균질 재료에서 구한 탄·소성  $J$ -적분을 강도 불일치 구조물에 적용할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 12 (a)는  $w/t=10$ 인 관통균열이 있는 균질 평판에서 균열 길이에 따른 파손평가도(Failure Assessment Diagram)를, Fig. 13(b)는  $c/w=0.5$ 인 평판에서 두께 비에 따른 파손평가도를 나타낸다. 일반적으로 참조응력법은 균열 길이 및 형상에 민감한 것으로 알려져 있으며 두께 비의 영향도 거의 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 13은  $w/t=10$ ,  $h/t=2.0$ 인 관통균열 평판에서 강도 불일치에 따른  $J$ -적분을 나타낸다. 이 때 참조하중은 균질 평판에서의 한계하중을 이용하였다. 참조응력법을 통한  $J$ -적분은 over-matching에서 유한요소 결과에 비해 보수적으로 예측하며 under-matching에서는 비-보수적으로 예측하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 2장, 3장을 통해 구한 강도 불일치 한계하중을 통해 참조하중을 정의하면 Fig. 14와 같이 다양한 강도 불일치 비에 상관없이 유한요소 해석을 통해 구한  $J$ -적분과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 정확한 탄·소성 파괴역학 해석을 위해 강도 불일치 한계하중을 정확히 구하는 것이 중요함을 알 수 있다.

이와 같은 경향은 표면균열에서도 나타난다. Fig. 14는  $w/t=10$ ,  $a/t=0.8$ ,  $c/w=0.5$ ,  $h/t=1.0$  평판에서 균질 배판에서의 한계하중을 통해 정의한 참조응력 및 강도 불일치 한계하중을 통해 정의한 참조응력을 사용하여 구한 파손 평가도를 나타낸다. 강도 불일치 한계하중을 통해 정의한 참조응력법은 유한요소해석 결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

이러한 경향은 Lüders 구간을 포함하는 인장물성을 가지는 재료에도 전반적으로 잘 일치하며 이를 통해 참조응력법이 재료물성에 민감하지 않음을 알 수 있다. Fig. 16은 탄소강에 대한 파손평가도를 보여준다.

## 5. 결론

본 논문에서는 용접부 중앙에 표면균열이 존재하는 평판에 대해 인장하중 하에서의 균열 평가를 수행하였다. 이를 위해 표면균열의 극한 경우(limit

case)인 관통균열을 선정하여 2차원 조건에서의 강도 불일치 한계 하중식<sup>(2)</sup>을 검토하였으며, 강도 불일치 한계하중은 강도 불일치 비( $M$ ) 및 하나의 형상관련 변수( $\psi$ )를 통해 정량화할 수 있음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 3차원 표면균열에 적용 가능한 형상 관련 무차원 변수,  $\psi_{eff}$ 를 제안하였으며 체계적인 변수 해석을 통해 적용 가능성을 검증하였다.

또한 제시된 강도 불일치 한계하중을 바탕으로 참조응력법을 통한  $J$ -적분 예측을 수행하였다. 강도 불일치 한계하중으로 정의한 참조응력을 통해 over-matching 강도 불일치 용접 평판에서는 평가식의 보수성을 줄일 수 있으며 under-matching 강도 불일치 용접 평판에서는 평가식의 비보수성을 줄일 수 있었다. 이를 통해 용접 평판에서 보다 정확한 탄소성 파괴역학 해석이 가능하였다.

## 참고문헌

- (1) 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*, pp. 99~134.
- (2) Kim, Y-J, Schwalbe, 2001, "Mismatch Effect on Plastic Yield Loads in Idealized Weldments : I. Weld Centre Cracks," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, pp. 163~182.
- (3) Kim, Y-J, Schwalbe, 2001, "Mismatch Effect on Plastic Yield Loads in Idealized Weldments : II. Heat Affected Zone Cracks," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.68, pp. 183~199.
- (4) Kim, Y-J., Schwalbe, K-H., "Compendium of Yield Load Solutions for Strength Mis-Matched SE(T), SE(B) and C(T) Specimens," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 68, pp. 1137~1151.
- (5) Hao, S., Cornec, A., and Schwalbe, K-K., "Plastic Stress and Strain Fields and Limit Loads of a Plane Strain Cracked Tensile Panel with a Mis-Matched Welded Joint," *International Journal of Solids and Structure*, 34, pp. 297~326.
- (6) ABAQUS, 2003, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4," Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA.
- (7) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (8) British Energy Generation Ltd., 2007, "R6:Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," *Rivision 4*.
- (9) Tada, H., Paris, PC. and Irwin, GR., 1985, "The stress Analysis of Cracks Handbook," Paris production Incorporated.