

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.19

용접부 중앙에 원주방향균열이 있는 배관에 대한 강도불일치 한계하중 해석 및 파괴역학 평가

송태광* · 전준영* · 심광보* · 김윤재*† · 김종성** · 진태은***
* 고려대학교 기계공학부, ** 순천대학교 기계우주항공공학부, *** 한국전력기술(주)

Mis-Match Limit Load Analyses and Fracture Mechanics Assessment for Welded Pipe with Circumferential Crack at the Center of Weldment

Tae-Kwang Song*, Jun-Young Jeon*, Kwang-Bo Shim*, Yun-Jae Kim*†, Jong-Sung Kim** and Tae-Eun Jin***

* Korea University

** Sunchon University

*** Korea Power Engineering Company

(Received March 23, 2009 ; Revised December 4, 2009 ; Accepted December 4, 2009)

Key Words : Strength Mis-Match (강도불일치), Mis-Match Limit Load(강도불일치 한계하중), Finite Element Analysis(유한요소 해석), Failure Assessment(파손평가)

초록 : 본 논문에서는 유한요소 해석을 통해 용접부 중앙에 원주방향균열이 있는 배관에 대한 강도불일치 한계하중 해석 및 파괴역학 해석을 수행하였다. 강도불일치 한계하중식을 제시하기 위해 강도불일치 비, 용접부 폭, 균열 길이 및 배관 반경비에 대한 체계적인 변수 해석을 수행하였으며 참조응력법을 바탕으로 스테인리스강 및 페리틱 강에 대한 J-적분 계산을 수행하였다. 본 연구에서 제시한 강도불일치 한계하중을 사용하여 참조응력을 정의할 때, 보다 정확한 J-적분 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract: In this paper, limit load analyses and fracture mechanics analyses were conducted via finite element analyses for the welded pipe with circumferential crack at the center of the weldment. Systematic changes for strength mis-match ratio, width of weldment, crack shape and thickness ratio of the pipe were considered to provide strength mis-match limit load. And *J*-integral calculations based on reference stress method were conducted for two materials, stainless steel and ferritic steel. Reference stress defined by provided strength mis-match limit load gives much more accurate *J*-integral.

- 기호설명 -

- N : 배관에 작용하는 축방향 인장하중
- N_{LB} : 균질배관에 대한 소성한계하중
- N_{LM} : 강도불일치 배관에 대한 소성한계하중
- M_F : 강도불일치 비
- h : 용접부 너비의 반
- ψ : 용접부 균열에 대한 형상변수
(균열 잔여 길이/용접부 너비의 반)
- σ_{ref} : 참조응력
- r : 배관의 평균 반경
- t : 배관의 두께
- θ : 원주방향 균열 크기의 반 각
- a : 원주방향 균열의 깊이

1. 서론

용접부는 서로 다른 강도를 가진 재료가 만나는 지점이므로 용접부 균열 평가 시 이와 같은 특성을 고려해야 한다. 특히 용접부 균열에 대한 한계하중 평가 시 용접 구조물을 균질 구조물로 가정하여 평가를 수행하게 되면 부정확한 평가 결과를 얻을 수 있다. 즉, 용접 구조물을 균질 구조물로 가정 시에는 용접부의 강성이 모재에 비해 높은 경우 보수적인, 용접부의 강성이 모재에 비해 낮은 경우에 대해서는 비보수적인 평가 결과를 얻게 된다.^(1-7,10) 따라서 균열이 존재하는 용접부에 대한 한계하중 해석 시 재료의 강도불일치를 고려할 필요가 있으며 이와 같은 해석을 강도불일치 한계하중 해석이라 정의한다.

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr

강도불일치 한계하중해석은 최근 10 여 년간 유럽을 중심으로 수행되어 왔다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 대부분의 연구는 평판 용접부에 존재하는 균열에 대한 해석이며 특히 2 차원 해석에 한정되었다.⁽²⁻⁶⁾ 최근 저자들은 평판에 대한 3 차원 해석을 수행하여 두께에 따른 구속 효과를 2 차원 해석 결과와 비교하였으며 특히 표면균열에 대한 강도불일치 한계하중을 제시한 바 있다.^(6,7) 그러나 실제 발전 구조물에서는 배관 맞대기 용접부에 발생하는 균열에 대한 관심이 높다. 따라서 본 논문에서는 배관 맞대기 용접부에 존재하는 원주방향 균열에 대한 강도 불일치 한계하중해석을 수행하였다. 이를 위해 다양한 균열 형상 및 용접부 폭, 배관의 두께 비를 고려한 유한요소 해석을 수행하였다. 또한 제시된 한계하중을 통해 참조응력법(reference stress method)을 기반으로 한 J -적분해석을 수행하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 기하 형상

Fig. 1 은 본 연구에서 고려한 맞대기 용접 배관(butt weld pipe)을 나타낸다. 용접부 형상은 단순화를 위해 띠 모양(strap)으로 가정하였으며 용접부 중앙에 존재하는 균열을 고려하였다. 균열은 표면균열, 관통균열 및 360° 내면 표면균열을 고려하였으며 Fig. 1 및 Table 1 에서 확인할 수 있다. Fig. 2 는 관통균열 및 표면균열에 대한 유한요소 망을 나타내며 3 차원 해석을 위해 ABAQUS 에서 제공하는 C3D20R 요소를 사용하였다.⁽⁸⁾

2.2 작용 하중

배관에 작용하는 하중은 축 방향 인장 하중을 고려하였다.

2.3 재료 물성

한계하중해석을 위해 재료는 탄성-완전소성재료로 가정하였다.

2.4 한계하중 해석에 대한 검증

강도불일치 한계하중 해석에 앞서 유한요소해석에 대한 검증을 위해 원주방향 균열이 있는 균질배관에 대한 한계하중 해석을 수행하였다.

Table 1 Analysis parameters considered in this work

r/t	a/t	θ/π	h/t	M_F
				0.5
				0.75
5~20	0.25~1.0	0.25~1.0	0.125~2.0	1
				1.5
				2

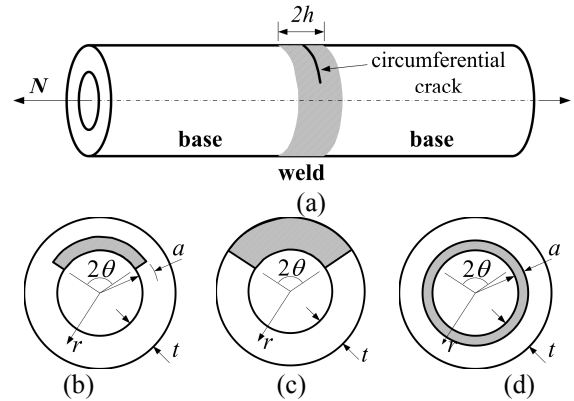


Fig. 1 (a) Schematic pictures of pipe with circumferential crack at the center of weldment. Crack shape considered in this work are (b) part through surface crack, (c) through-wall crack and (d) fully circumferential surface crack

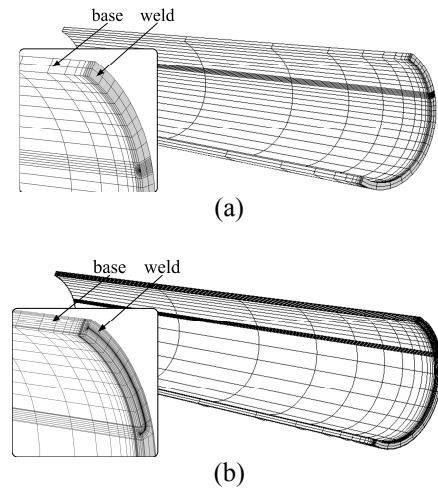


Fig. 2 FE meshes for (a) through-wall crack and (b) part-through surface crack

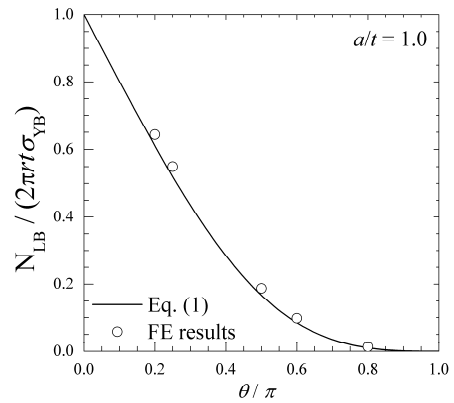


Fig. 3 Validation of limit load analyses for homogeneous pipe with circumferential through-wall crack. Comparisons of finite element analyses with existing results are shown

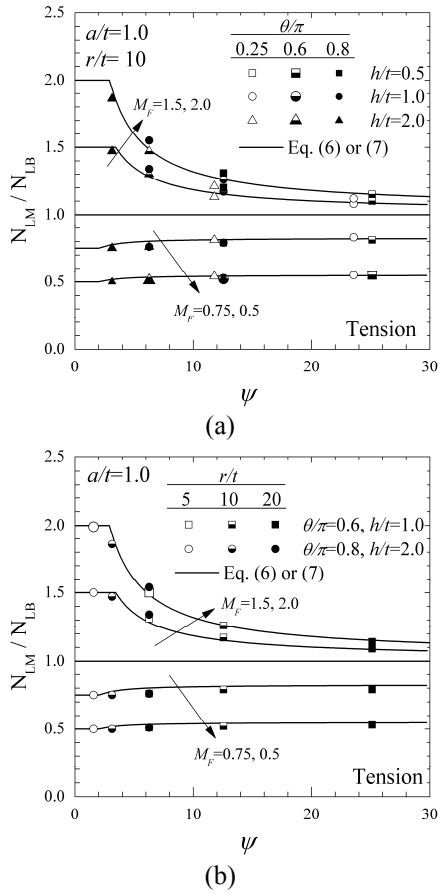


Fig. 4 Mis-match limit loads of pipe with through wall surface crack. (a) is results for $r/t=10$ and (b) shows r/t effect on mis-match limit load

Fig. 3 은 관통균열에 대한 한계하중해석 결과로서 다양한 균열크기(θ/π)에 대해 기존 문헌 식에서 제시하는 한계하중과 유한요소 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 그림에서 균열배관에 대한 소성한계하중(N_{LB})은 균열이 없는 배관의 소성한계하중($2\pi r t \sigma_{YB}$)로 정규화하였으며 관통균열에 대한 한계하중식은 식 (1)과 같다.⁽⁹⁾

$$\frac{N_{LB}}{(2\pi r t \sigma_{YB})} = 1 - \frac{\theta + 2 \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{2} \right)}{\pi} \quad (1)$$

이 밖에 360° 내면 표면균열에 대한 균질배관의 한계하중식은 식 (2)와 같으며⁽¹⁰⁾ 표면균열에 대한 유한요소 해석 기반의 한계하중식은 참고문헌⁽¹¹⁾을 통해 확인할 수 있으며 식의 복잡성으로 인해 본 논문에서는 생략하였다.

$$\frac{N_{LB}}{2\pi r t \sigma_{YB}} = \begin{cases} \left(1 - \frac{a}{t}\right) \left\{ \left[\frac{a}{2(t-a)} \right] + \left[1 - \frac{3}{4} \left(\frac{a}{t-a} \right)^2 \right]^{0.5} \right\} & \text{for } a \leq \frac{t}{1+\sqrt{3}} \\ \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{a}{t}\right) & \text{for } a > \frac{t}{1+\sqrt{3}} \end{cases} \quad (2)$$

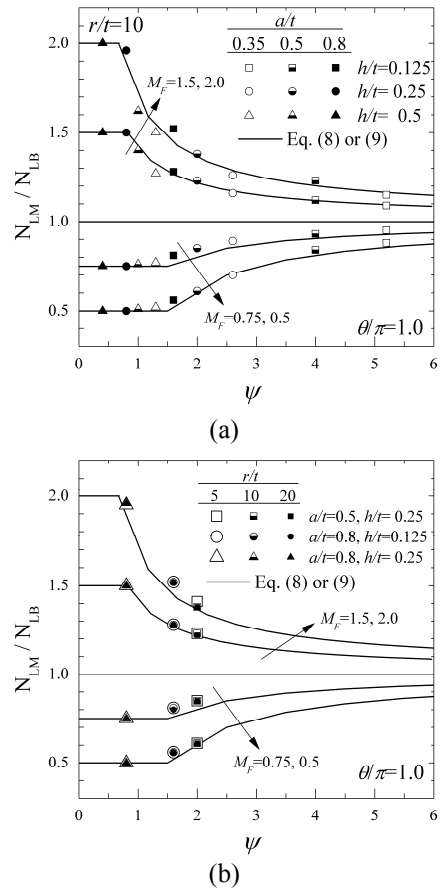


Fig. 5 Mis-match limit loads of pipe with fully circumferential surface crack. (a) is results for $r/t=10$ and (b) shows r/t effect on mis-match limit load

3. 강도불일치 배관에 대한 한계하중해석

강도불일치 균열 평판에 대한 기존 연구 결과 강도불일치 한계하중은 두 가지 변수, 즉 강도불일치 비 (M_F) 및 형상 변수 (ψ)를 통해 정량화됨을 알 수 있었다.^(1~7) 강도불일치 비는 용접부 항복강도(σ_{Yw})를 모재의 항복강도(σ_{YB})로 나눈 값으로서 식 (3)과 같다. M_F 가 1보다 큰 경우 over-match, 1보다 작은 경우 under-match라고 정의하며 본 연구에서는 두 가지의 under-match ($M_F=0.5, 0.75$) 및 over-match($M_F=1.5, 2.0$)을 고려하였다.

$$M_F \equiv \frac{\sigma_{Yw}}{\sigma_{YB}} \quad (3)$$

형상에 대한 변수인 ψ 는 균열잔여길이(crack ligament)를 용접부 너비의 반(h)으로 나눈 값으로 정의한다. 따라서 ψ 는 균열형상에 따라 다양하게 정의된다. 관통균열(Fig. 1(c))에 대한 ψ 는 식 (4)와

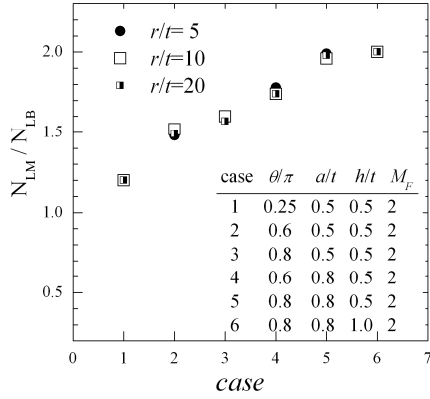


Fig. 6 Effect of r/t ratio on mis-match limit load for various conditions including crack length, depth and weld width

같이 정의할 수 있으며 360° 내면 표면균열(Fig. 1(d)) 대한 ψ 는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$\psi = \frac{r(\pi - \theta)}{h} \quad (4)$$

$$\psi = \frac{(t-a)}{h} \quad (5)$$

반면 표면균열(Fig. 1(b))에서는 깊이 방향 및 길이 방향으로 균열 잔여길이 존재하므로 식 (4) 또는 (5)와 같이 명확하게 정의할 수 없다. 본 연구에서는 유한요소 해석 결과를 바탕으로 표면균열에 대한 형상변수(ψ)를 제시하였으며 3.3 절에서 확인할 수 있다.

3.1 관통균열에 대한 해석 결과

Fig. 4(a)는 관통균열에 대한 한계하중해석 결과를 나타낸다. 그림에서 N_{LM} 은 강도불일치 배관에 대한 한계하중을, N_{LB} 는 배관이 모재로만 만들어졌다고 가정하였을 때의 한계하중을 나타낸다. Fig. 4(a)는 두께 비(r/t)가 10인 배관에 대해 다양한 균열 크기 ($\theta/\pi=0.25, 0.6, 0.8$) 및 용접부 너비($h/t=0.5, 1.0, 2.0$)를 고려한 강도불일치 한계하중 해석 결과를 나타내며, 그림에서와 같이 강도불일치 소성한계하중은 M_F 및 ψ 를 통해 정량화할 수 있음을 확인할 수 있다. Over-match에 대한 소성한계하중식 및 under-match에 대한 소성한계하중식은 식 (6) 및 (7)과 같다.

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} \min\left(M_F, \frac{1}{n_{LB}}\right) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_1 \\ \min\left(\frac{24(M_F-1)\left(\frac{\psi_1}{\psi}\right) + (M_F+24)}{25}, \frac{1}{n_{LB}}\right) & \text{for } \psi_1 < \psi \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi_1 = \exp\left(-\frac{M_F-5.2}{3}\right)$$

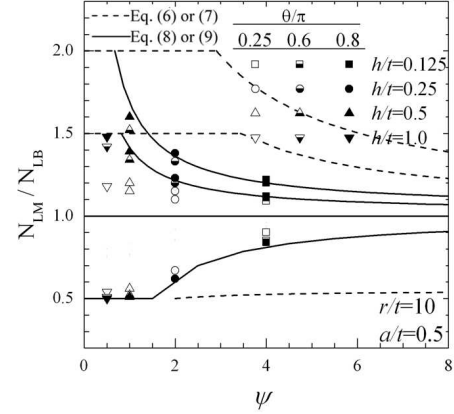


Fig. 7 Mis-match limit loads for part-through surface crack defined by $\psi=(t-a)/h$

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} M_F & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.43 \\ M_F \left[1.1 - \frac{0.2}{\psi}\right] & \text{for } 1.43 < \psi \end{cases} \quad (7)$$

여기서, N_{LB} 는 식 (1)에서 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)는 특정 균열 크기 및 용접부 너비에 대해 배관의 두께 비가 미치는 영향을 보여준다. 그림에서와 같이 두께 비가 증가하면 ψ 가 증가하게 되며 따라서 두께 비의 영향이 존재함을 알 수 있다.

3.2 내면 360° 표면균열에 대한 해석 결과

Fig. 5(a)는 내면 360° 표면균열에 대한 강도불일치 한계하중을 보여준다. 3.1 절에서와 같이 다양한 균열 크기, 용접부 너비, 강도불일치 비를 고려하였으며 제시된 형상변수(식 (5))를 통해 강도불일치 한계하중을 정량화할 수 있음을 알 수 있다. 내면 360° 표면균열에 대해 over-match 및 under-match에 대한 한계하중식은 식 (8) 및 (9)와 같다.

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} \min\left(M_F, \frac{1}{n_{LB}}\right) & \text{for } 0 \leq \psi \leq \psi_1 \\ \min\left(\frac{24(M_F-1)\left(\frac{\psi_1}{\psi}\right) + (M_F+24)}{25}, \frac{1}{n_{LB}}\right) & \text{for } \psi_1 < \psi \end{cases} \quad (8)$$

$$\psi_1 = \exp\left[-\frac{2(M_F-1)}{5}\right]$$

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} = \begin{cases} M & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.5 \\ 1 - \frac{1.5(1-M)}{\psi} & \text{for } 1.5 < \psi \end{cases} \quad (9)$$

여기서, N_{LB} 는 식 (2)에서 확인할 수 있다.

Fig. 5(b)는 특정 균열 크기 및 용접부 너비에 대해 배관의 두께 비가 미치는 영향을 보여준다. 그림에서와 같이 360° 내면 표면균열에 대해서는 두께 비에 상관없이 N_{LM}/N_{LB} 값이 동일함을 알 수 있다.

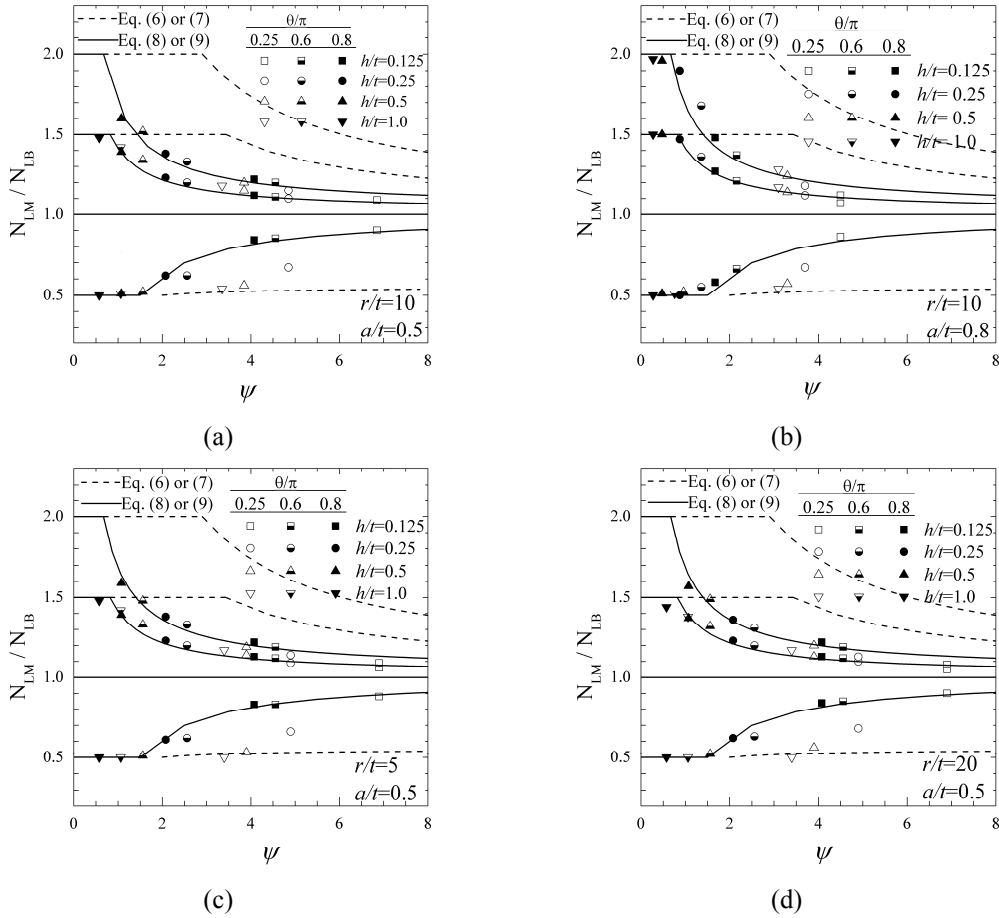


Fig. 8 Mis-match limit loads for part-through surface crack defined by ψ proposed in this paper, see Eq. (10). (a) and (b) is for $a/t=0.5$ and 0.8 respectively with $r/t=10$. (c) and (d) is $a/t=0.5$ with $r/t=5$ and 20 respectively

3.3 표면균열에 대한 해석 결과

균열 깊이, a 및 균열 길이, 2θ 를 가지는 표면균열은 $a \rightarrow t$ 일 때, 3.1 절에서 고려한 관통균열이 되며 $\theta \rightarrow \pi$ 일 때, 3.2 절에서 고려한 360° 표면균열이 된다. 그러나 표면균열에 대한 두 가지 단순화 모델은 서로 다른 특성을 보여준다. 즉, over-match에 대해서 관통균열의 경우 두께 비가 N_{LM}/N_{LB} 값에 영향을 미쳤지만 360° 표면균열에서는 두께 비의 영향이 없었다. 그리고 under-match에 대해서 관통균열에서는 ψ 에 관계없이 N_{LM}/N_{LB} 값이 M_F 값과 거의 동일하지만 360° 표면균열에서는 ψ 에 따라 N_{LM}/N_{LB} 값이 변한다. 이와 같은 경향은 2 차원 평판에 대한 두 가지 가정, 즉 평면응력(plane stress) 및 평판 변형률(plane strain) 가정에 따라 나타나는 경향과 동일하다. 평면응력 가정에서는 두께 방향 구속이 없으므로 ψ 에 상관없이 동일한 N_{LM}/N_{LB} 값을 나타내지만 평면 변형률에서는 균열 크기에 따라(또는 ψ 에 따라) 두께방향 구속 정도가 달라지므로 N_{LM}/N_{LB} 값이 달라진다. 즉, under-match에서 관통균열은 평면 응력 거동을 나타내

며 360° 내면균열은 평면 변형률 거동을 나타낸다.

이와 같이 관통균열 및 360° 표면균열은 서로 다른 특성을 나타내므로 이와 관련하여 표면균열의 거동 특성을 확인해 보았다. Fig. 6은 $M_F=2$ 일 때, 다양한 표면균열 형상 및 용접부 두께에 대한 두께 비에 따른 N_{LM}/N_{LB} 값을 나타낸다. 고려한 6가지 경우에 대해 표면균열은 두께 비의 영향이 없었으며 따라서 360° 표면균열과 비슷한 거동을 나타내었다. 따라서 표면균열에 대한 형상 변수(ψ)를 식 (5)와 같이 정의하여 강도불일치 한계하중을 나타내었으며 Fig. 7에서 확인할 수 있다. Fig. 7에서 실선은 360° 내면균열에 대한 평가식으로 식 (8) 및 (9)이며 점선은 관통균열에 대한 평가식으로 식 (6) 및 (7)을 나타낸다. 그러나 360° 표면균열에 대한 형상변수는 균열길이(2θ)의 영향을 나타내지 못하므로 그림에서와 같이 식 (5)를 통해 표면균열에 대한 강도불일치 한계하중을 정량화할 수 없었다. 또한 식 (4)를 통해 정의한 표면균열에 대한 강도불일치 한계하중 역시 규칙성을 찾을 수 없었다.

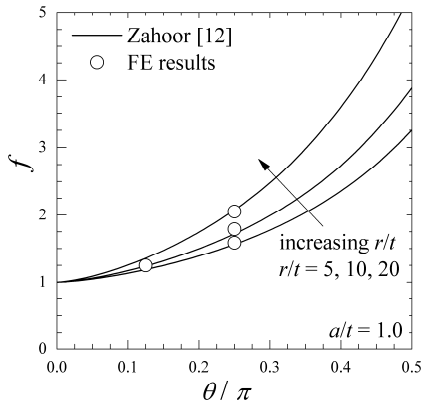


Fig. 9 Comparisons of stress intensity factor calculated from finite element analyses with those of literature

따라서 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 표면균열에 대한 형상변수를 식 (10)에서와 같이 제안하였다. 식 (10)은 360° 표면균열에 대한 형상변수(식 (5))에 균열길이(2θ)의 영향을 보정하였으며 유한요소 해석결과를 바탕으로 만들어진 식이다.

$$\psi = \frac{(t-a)}{h} + 5 \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{\sin\theta}{2} \right] \quad (10)$$

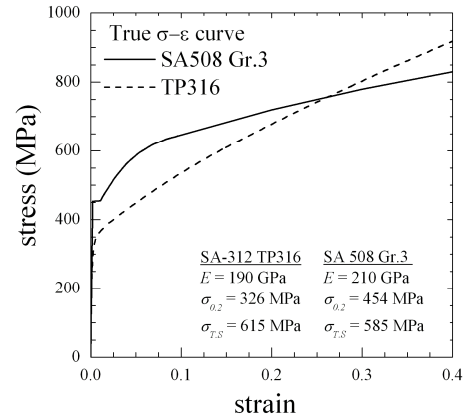
Fig. 8(a) 및 (b)는 r/t=10 일 때 a/t=0.5 및 0.8 인 표면균열에 대해 식 (10)으로 정의한 강도불일치 한계하중을 나타낸다. 그림에서와 같이 표면균열에 대한 강도불일치 한계하중은 제안식(식 (8) 및 (9))과 잘 일치함을 알 수 있으며 이와 같은 결과는 r/t=5 및 20 배관에 대해서도 잘 적용되었다. 그러나 under-match 에서 균열크기가 작은 경우는 강도불일치 한계하중 제안식과 차이를 나타낼 수 있는데, 이는 균열크기가 작은 경우는 앞서 확인한 바와 같이 평면 응력 거동을 나타내기 때문이라고 판단된다.

4. 참조응력 기반 J-적분 해석

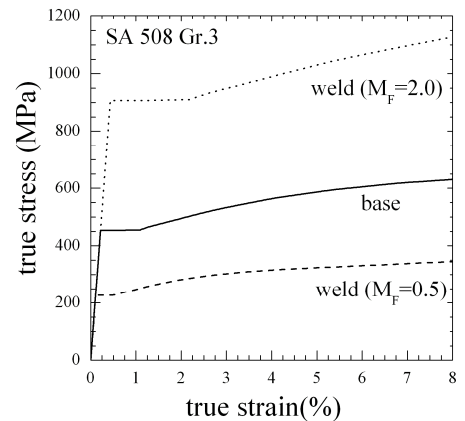
4.1 참조응력법

탄·소성 재료에서 균열 끝단의 응력 및 변형률의 특이성을 나타내는 매개변수인 J-적분에 대해 R6 코드는 참조응력법을 바탕으로 식 (11)과 같이 제시하고 있다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (11)$$



(a)



(b)

Fig. 10 (a) Tensile curves for stainless steel and ferritic steel and (b) tensile curves for mis-match configuration

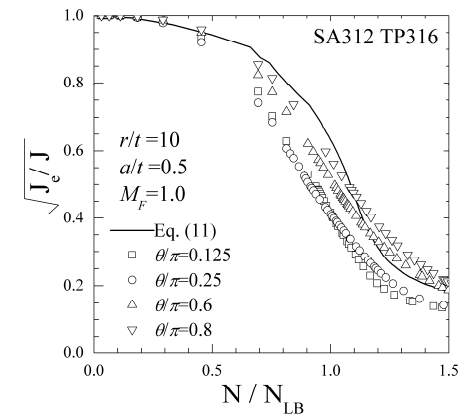
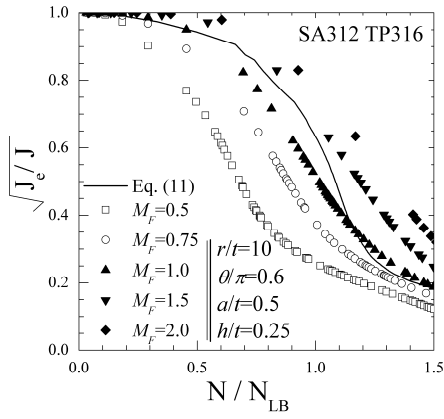
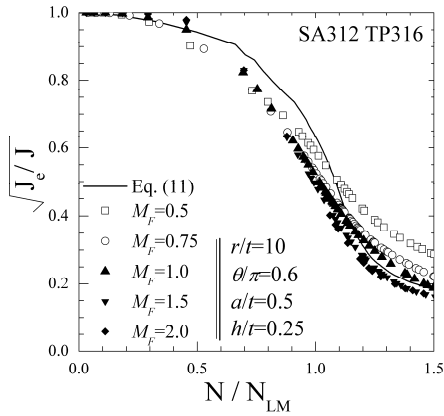


Fig. 11 Failure assessment diagram for homogeneous pipe with part-through surface crack

여기서 J_e 는 탄성재료에서 구한 J-적분으로 식 (12)와 같으며 E 는 탄성계수를 나타낸다. E' 는 평면변형률 조건에 대한 탄성계수로서 $E'=E/(1-\nu^2)$ 조건을 만족한다. σ_{ref} 는 참조응력으로서 한계하중을 통해 정의할 수 있으며 식 (13)과 같다. ε_{ref} 는



(a)



(b)

Fig. 12 Failure assessment diagram for strength mis-match pipe made of stainless steel. Reference stress is defined by (a) plastic limit load for homogeneous pipe and (b) strength mis-match limit load

재료의 인장곡선에서 σ_{ref} 에 해당하는 변형률을 나타낸다.

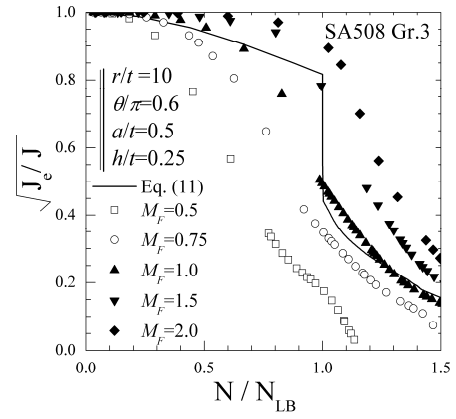
$$J_e = \frac{K^2}{E'} \quad (12)$$

$$\sigma_{ref} = \frac{N}{N_{LB}} \sigma_{YB} \quad (13)$$

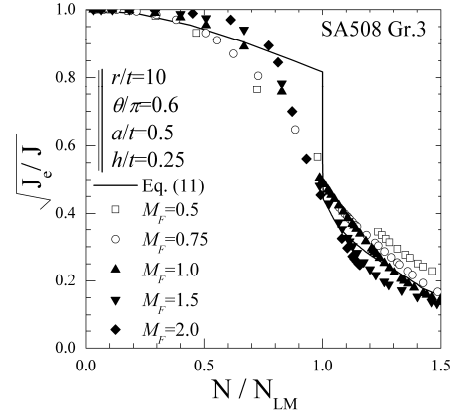
식 (13)에서와 같이 균열구조물의 한계하중을 알면 참조응력을 정의할 수 있으며, 따라서 J -적분을 구할 수 있다. 그러나 강도불일치 구조물에서의 참조응력 ($\sigma_{ref,M}$)은 식 (14)와 같이 정의할 수 있으며 ($\sigma_{ref,M}$ 은 균질배관에 대한 참조응력인 ($\sigma_{ref,B}$)와 관계가 있음을 알 수 있다. (식 (15)) 즉, 균질배관에 대한 참조응력을 알고 있으면 N_{LM}/N_{LB} 를 통해 강도불일치 배관에 대한 참조응력을 알 수 있다.

$$(\sigma_{ref})_M = \frac{N}{N_{LM}} \sigma_{YB} \quad (14)$$

$$(\sigma_{ref})_M = \left(\frac{N}{N_{LB}} \sigma_{YB} \right) / \left(\frac{N_{LM}}{N_{LB}} \right) = (\sigma_{ref})_B / \left(\frac{N_{LM}}{N_{LB}} \right) \quad (15)$$



(a)



(b)

Fig. 13 Failure assessment diagram for strength mis-match pipe made of ferritic steel. Reference stress is defined by (a) plastic limit load for homogeneous pipe and (b) strength mis-match limit load

4.2 J-적분 해석 결과

유한요소 해석을 통해 J -적분을 구하기 위해 관통 균열이 있는 균질배관에서의 응력확대계수(K , stress intensity factor)를 확인하였으며 기존 문헌 결과^[12]와의 비교는 Fig. 9 에서 확인할 수 있다. 무차원계수 f 는 식 (16)과 같이 정의되며 그림에서와 같이 응력확대계수 계산 결과는 문헌결과와 잘 일치하였으며 문헌에서 제안하는 응력확대계수 식은 본 논문에서는 생략하였다.

$$K = \frac{N}{2\pi r t} f \sqrt{\pi r \theta} \quad (16)$$

Fig. 10(a)은 본 연구에서 고려한 두 가지 재료물성인 TP316 및 SA508의 인장물성을 나타낸다. 각각의 재료는 원전 배관 및 기기에서 사용되는 대표적인 스테인레스 강 및 저합금강이다. Fig. 10(b)는 SA508에 대한 강도 불일치를 고려한 재료 인장 물성으로서 항복강도에 대한 불일치(mis-match)만을 고려하여 인위적으로 만든 재료 인장물성을 나타낸다.

Fig. 11 은 TP316 재료로 만들어진 균질배관에 여러 가지 균열크기에 대한 파손평가도 (FAD, Failure Assessment Diagram)를 나타낸다. 그림에서 실선은 TP316 재료 물성을 바탕으로 식 (11)을 통해 구한 J -적분을 나타내며 그림에서와 같이 식 (11)은 균열 크기에 상관없이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 12 는 TP316 재료로 만들어진 강도불일치 배관에서의 파손평가도를 나타낸다. Fig. 12(a)는 참조응력을 균질배관에서의 한계하중(N_{LB})으로 정의하였으며 Fig. 12(b)는 강도불일치 한계하중(N_{LM})으로 정의하였다. 그림에서와 같이 강도불일치를 고려한 J -적분 제안식은 유한요소 해석 결과와 잘 일치하였다. 반면 강도불일치 특성을 고려하지 않으면 Fig. 12(a)에서와 같이 over-match 에 대해서는 보수적인, under-match 에 대해서는 비보수적인 결과를 제시함을 알 수 있다. 이와 같은 특성은 SA508 재료에서도 확인할 수 있으며 SA508 에 대한 파손평가도는 Fig. (13)과 같다.

5. 결 론

본 연구에서는 용접부 중앙에 존재하는 원주방향 균열에 대해 용접부의 강도불일치 특성을 고려한 한계하중 해석 및 탄·소성 파괴역학 해석을 수행하였다. 다양한 균열형상, 강도불일치 비, 용접부 폭 및 배관의 두께 비에 대한 체계적인 유한요소 해석을 수행하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 강도불일치 한계하중은 강도불일치 비(M_F) 및 형상변수(ψ)를 통해 정량화 할 수 있다.

(2) 관통균열 및 360° 표면균열에서는 한 방향으로의 균열 잔여길이가 발생하므로 ψ 에 대한 정의가 용이하며 식 (4) 및 (5)와 같다.

(3) 표면균열은 균열 깊이 및 길이 방향으로의 균열 잔여길이가 발생하므로 유한요소해석 결과를 바탕으로 표면균열에 대한 형상변수를 제한하였다. 제시된 표면균열에 대한 형상변수는 균열길이, 균열 깊이, 용접부 폭, 배관의 두께 비에 관계없이 제안식과 잘 일치하는 강도불일치 한계하중을 제시하였다.

(4) 강도불일치 배관에 대한 J -적분을 구할 시에는 강도불일치를 고려한 참조응력을 사용해야 유한요소 해석결과와 일치하는 J -적분을 얻을 수 있다. 강도불일치 배관에 대한 J -적분 평가 시 균질 배관에 대한 한계하중을 사용하게 되면 over-match 에 대해서는 보수적인, under-match 에 대해서는 비보수적인 평가결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- (1) Schwalbe, K.H., Ainsworth, R.A., 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, K.H., 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, K.H., 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.H., "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) Park, B.K., Oh, C.K., Kim, Y.J., Kim, Y.J., Kim, J.S., Jin, T.E., 2004, "The Analysis of Circumference Through-Wall Cracked Pipe Considering Weld Characteristic," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*, pp. 31~36.
- (7) Song, T.K., Kim, Y.J., Kim, J.S., Jin, T.E., 2008, "Mis-Match Limit Load Analyses and Approximate J-integral Estimates for Similar Metal Weld with Weld-Center Crack Under Tension Load," *Trans. of the KSME(A)*, Vo.32, No. 5, pp.411~418.
- (8) ABAQUS, 2003, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.4," Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA.
- (9) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (10) British Energy Generation Ltd., 2007, "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," *Rivision 4*
- (11) Kim, Y.J., Shim, D.J., Nikbin, K., Kim, Y.J., Hwang, S.S., Kim, J.S., 2003, "Finite Element Based Plastic Limit Loads for Pipes with Part-Through Surface Cracks Under Combined Loading," *Int J. of Pres. Ves. and Pip.*, Vol. 80, pp.527~540.
- (12) Zahoor, A. *Ductile Fracture Handbook*. Novetech; 1991.