

원주방향 관통균열이 용접부 중앙에 존재하는 V-그루브 맞대기 용접배관의 한계하중 해석[§]

김상현* · 한재준* · 정진택* · 김윤재*†

* 고려대학교 기계공학과

Mismatch Limit Load Analyses for V-groove Welded Pipe with Through-wall Circumferential Defect in Centre of Weld

Sang-Hyun Kim^{*}, Jae-Jun Han^{*}, Jin-Taek Chung^{*} and Yun-Jae Kim^{*†}

^{*} Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received May 7, 2013 ; Revised July 2, 2013 ; Accepted July 14, 2013)

Key Words: Strength Mismatch(강도불일치), Finite Element Analysis(유한요소해석), Limit Load (한계하중), V-Groove Butt Weld(V-그루브 맞대기 용접)

초록: 본 논문에서는 용접부 중앙에 원주방향 관통균열이 있는 V-그루브 맞대기 용접 배관의 한계하중 해석을 수행하였다. V-그루브 맞대기 용접 배관이 그루브 각 45°, 90° 를 갖는 형상에 대한 한계하중 식을 제시하기 위해 용접 형상의 변화에 따른 용접부 너비를 정의하였고 강도불일치 비, 용접부 너비, 균열 길이 및 배관 반경 비에 대한 체계적인 변수 해석을 수행 하였다. 모재와 용접재는 탄성 완전소성재료로 가정하였으며 상불일치와 하불일치 조건에서의 인장 하중과 굽힘 하중에 대한 강도불일치 한계하중이 강도불일치 비(M_F)와 형상변수(ψ)를 통해 정량화 됨을 유한요소 해석을 통해 확인하였다.

Abstract: The present work reports the mismatch limit loads for a V-groove welded pipe for a circumferential crack using finite element (FE) analyses. To integrate the effect of groove angles on mismatch limit loads, one geometry-related slenderness parameter was modified by relevant geometric parameters including the groove angle, crack depth, and root opening based on plastic deformation patterns in the theory of plasticity. Circumferential through-wall cracks are located at the centre of the weldments with two different groove angles (45°, 90°). With regard to the loading conditions, axial (longitudinal) tension and bending are applied for all cases. For the parent and weld metal, elastic-perfectly plastic materials are considered to simulate and analyze under- and over-matching conditions in plasticity. The overall results from the proposed solutions are found to be similar to the FE results.

- 기호설명 -

a : 균열 깊이
 r : 배관의 평균 반경
 t : 배관의 두께
 h : 용접부 너비의 반
 h_{eff} : 유효 용접부 너비의 반
 ϕ : 그루브 각

2θ : 원주방향 균열 각
 σ_y : 항복강도
 E : 탄성계수
 M_F : 강도불일치 비
 N, N_L : 인장 하중 및 한계인장 하중
 n, n_L : 정규화된 인장 하중과 한계인장 하중
 M, M_L : 굽힘 하중 과 한계굽힘 하중
 m, m_L : 정규화된 굽힘 하중과 한계굽힘 하중
 ψ : 용접부 균열에 대한 형상변수
 ψ_{eff} : 수정된 용접부 균열에 대한 형상변수

§ 이 논문은 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2013 년도 춘계 학술대회 (2013. 4. 25.-26., 디오션리조트) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

하첨자

B : 모재

M : 강도불일치
 W : 용접재

1. 서론

용접부는 강도가 서로 다른 모재와 용접재가 만나는 지점으로 그 취약성으로 인해 균열이 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있다. 이와 같은 특성을 고려하여 균열이 존재하는 용접부에 대한 한계하중 해석 시 재료의 강도불일치를 고려할 필요가 있으며 이를 강도불일치 한계하중(strength mismatch limit load) 해석⁽¹⁻³⁾이라 한다. 지난 10여년간 수행되어온 강도불일치 한계하중 해석에 대한 연구의 대부분은 평판 용접부에 존재하는 균열에 대한 연구이며 2차원 해석에 한정되어 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ Song 등은 평판에 대한 3차원 해석을 수행하여 두께에 따른 구속효과를 2차원 해석 결과와 비교하였으며 특히 표면균열에 대한 강도불일치 한계하중을 제시한 바 있다.⁽⁷⁾ 또한 Kim 등은 발전 구조물에서 관심이 있는 배관 맞대기 용접부에 발생하는 균열에 대한 연구를 진행하였으며 관통균열과 표면균열에 대한 연구가 수행되었다.⁽⁸⁾ 이러한 연구들은 용접부를 이상화하여 그루브 각이 없는 용접부 균열에 대한 한계하중을 다루고 있다. 실제 발전설비의 배관은 용접 시에 V-그루브 맞대기 용접을 수행한다. 따라서 본 논문에서는 V-그루브 맞대기 용접부의 원주방향 관통균열에 대한 강도불일치 한계하중 해석을 수행하였으며 이를 바탕으로 유효 용접부 너비를 제시하여 기존에 제시된 강도불일치 한계하중 식⁽⁸⁾에 적용이 가능하도록 하였다. 이를 위해 다양한 균열 형상 및 용접부 너비, 배관의 반경 비를 고려한 유한요소 해석을 수행하였다.

2. 유한요소해석

Figure 1은 본 연구에서 고려한 V-그루브 맞대기 용접 배관의 형상이다. 대상 형상은 그루브 각이 없는 경우와 비교하기 위해 그루브 각 ($\phi = 45^\circ$,

90°)를 갖는 용접 형상이며 균열은 용접부 중앙에 원주방향의 관통균열을 고려하였다. 해석에 사용한 자세한 형상의 정보는 Table 1에서 확인할 수 있다. 용접부 너비에 대한 두께 비 (h/t)와 원주방향 균열의 크기 (θ/π)에 대하여 체계적인 변수 해석을 하였다. 그루브 각이 없는 맞대기 용접배관에 대한 한계하중 식⁽⁸⁾이 그루브 각이 존재할 경우에도 적용가능한지 확인하기 위해 선행연구에서 사용한 변수 중 강도불일치 비(M_F)와 대상형상의 반경 비 (r/t)는 대상 변수의 양극값을 사용하였다. 배관에 작용하는 하중은 Fig. 1과 같이 축방향 인장 하중과 굽힘 하중을 고려하였으며 한계하중 해석을 위해 재료는 탄성 완전소성 재료로 가정하였다.

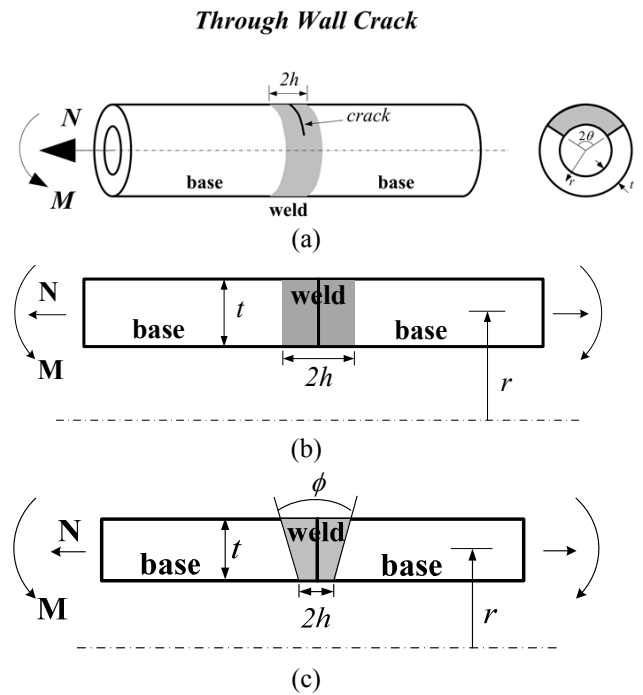


Fig. 1 Schematic illustrations of circumferential cracked pipes under tension N and bending M , considered in the present work; (a) welded pipe (b) idealized welds (c) V-groove welds

Table 1 Analysis parameters considered in this work

| | |
|--------------|----------------------|
| r/t | 5, 20 |
| h/t | 0.125, 0.5 |
| θ/π | 0.35, 0.5, 0.8 |
| ϕ | $45^\circ, 90^\circ$ |

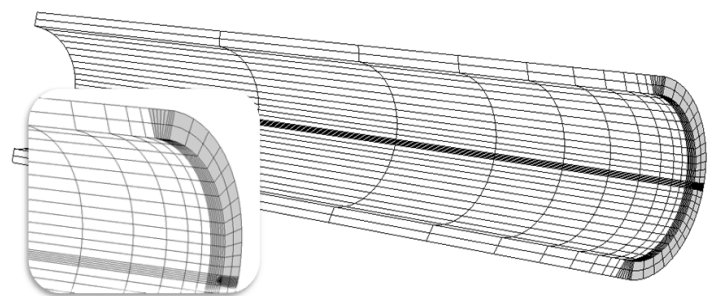


Fig. 2 A typical FE mesh for pipes with a circumferential through-wall cracked pipe ($r/t=5, h/t=0.5, \theta/\pi=0.5$ and $\phi=45^\circ$)

V-그루브 맞대기 용접 배관의 관통균열 형상에 대한 유한요소망은 Fig. 2 에서 확인할 수 있다. 3 차원 해석을 위해 유한요소해석 상용프로그램인 ABAQUS 에서 제공하는 C3D20R 요소를 사용하였으며 총 1272 개의 요소와 7196 개의 절점이 사용되었다.

3. 이상화된 용접배관의 한계하중

기존 연구 결과^(7,8)에 따르면 강도불일치 균열 평판의 한계하중은 강도불일치 비 (M_F) 와 형상 변수 (ψ) 를 통해 정량화 됨을 알 수 있다. 강도 불일치 비는 용접부 항복강도 (σ_{YW}) 와 모재의 항복강도 (σ_{YB}) 의 비로서 식 (1)로 정의된다.

$$M_F = \sigma_{YW} / \sigma_{YB} \quad (1)$$

강도불일치 비 (M_F)가 1 보다 작으면 하불일치 (under-matching), 1 이면 일치(even-matching) 그리고 1 보다 크면 상불일치(over-matching)이라고 정의하며, 본 연구에서는 그루브 각이 없는 이상화된 용접부에 대한 연구⁽⁸⁾에서 다루었던 강도불일치 비의 양극 값인 상불일치 비 ($M_F=2$) 와 하불일치 비 ($M_F=0.5$) 인 경우를 고려하였다. 그루브 각이 없는 관통균열 배관에서는 형상변수 ψ 는 균열잔여길이 (crack ligament) 를 용접너비 ($2h$)으로 나눈 값으로 식 (2)와 같이 정의한다.⁽⁸⁾

$$\psi = \frac{r(\pi - \theta)}{h} \quad (2)$$

인장 하중과 굽힘 하중에 대하여 맞대기 용접 배관의 원주방향 관통균열의 상불일치 소성한계하중 식과 하불일치 소성한계하중은 식 (3)과 (4)와 같이 제시되며 강도불일치 비(M_F) 및 형상변수 (ψ)로 정량화 하였다.⁽⁸⁾

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

where

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

$$\frac{N_{LB}}{(2\pi r t \sigma_{YB})} = n_{LB} = 1 - \frac{\theta + 2 \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\theta)}{2} \right)}{\pi} \quad (3b)$$

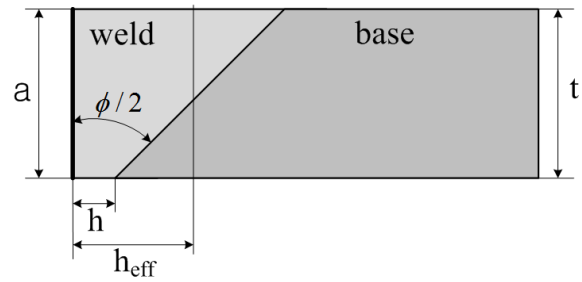


Fig. 3 Schematic illustration of circumferential through-wall crack: h_{eff} (average width of weldment)

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} \left(\text{or } \frac{M_{LM}}{M_{LB}} \right) = \begin{cases} M_F & \text{for } 0 \leq \psi \leq 1.43 \\ M_F (1.1 - 0.2 / \psi) & \text{for } 1.43 \leq \psi \end{cases} \quad (4)$$

4. V 형 용접배관의 한계하중

용접부 그루브 각을 고려하는 경우 용접너비를 정의하는데 있어 형상변화에 따라 변수 h 의 새로운 정의가 필요하다. 본 논문에서는 $2h$ 를 용접부 루트간격으로 정의하며 이는 Fig. 3 에서 확인할 수 있다.

Figure 4 와 5 는 인장 하중에 대하여 기존에 제시되었던 그루브 각이 없는 맞대기 용접배관의 강도불일치 한계하중 식⁽⁸⁾ (3)과 (4)에 관통균열이 있는 V-그루브 맞대기 용접배관을 적용시켜 본 결과를 보여준다. Fig. 6 과 7 은 굽힘 하중에 대한 결과이며 비교적 두꺼운 배관의 경우 ($r/t=5$) 와 얇은 배관 ($r/t=20$) 에 대하여 다양한 원주방향 균열 길이(θ/π)에 따른 결과가 인장 하중과 굽힘 하중 모두 잘 맞지 않으므로 용접부 형상의 변화를 고려한 유효 용접너비 ($2h_{eff}$)를 정의할 필요성을 보여준다. 따라서 Fig. 3 과 같이 유효 용접부 너비의 반 (h_{eff}) 을 정의하며 식은 다음과 같다.

$$h_{eff} = h + (t \times \tan(\phi/2)) / 2 \quad (5)$$

유효 용접부 너비 ($2h_{eff}$)를 식 (5)와 같이 정의함에 따라 형상변수 (ψ) 는 식 (6)과 같이 수정되고 기존에 제시되었던 한계하중 식 또한 식 (7)과 (8) 같이 정의된다.

$$\psi_{eff} = \frac{r(\pi - \theta)}{h_{eff}} \quad (6)$$

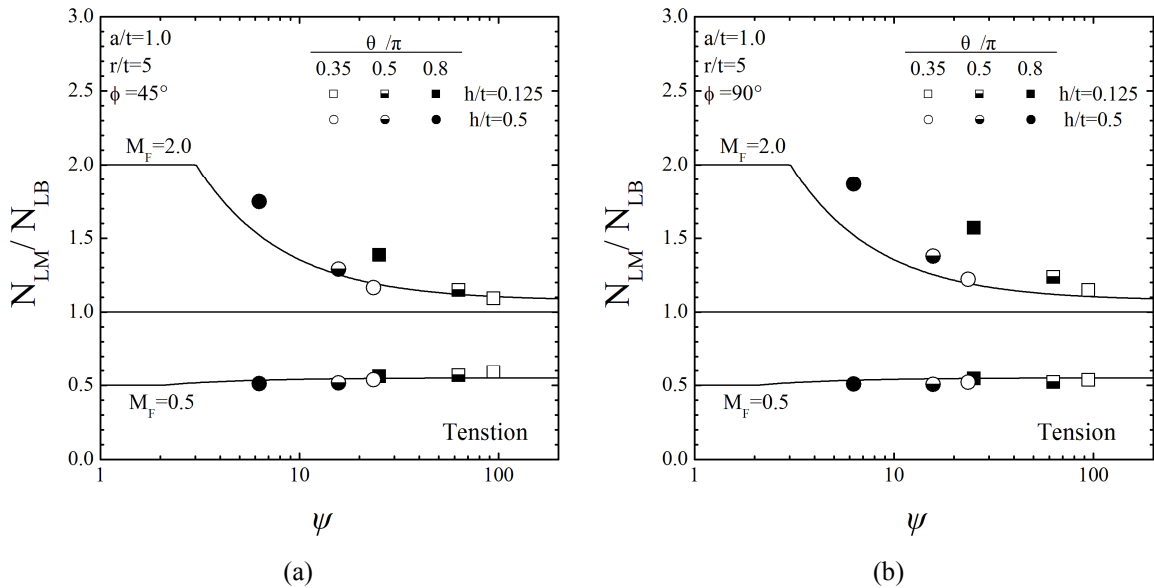


Fig. 4 Variations of normalized FE mismatch limit loads N_{LM}/N_{LB} for circumferential through-wall cracked pipes for V-groove weldments with ψ . (tension): (a) $r/t=5$, $\phi=45^\circ$ (b) $r/t=5$, $\phi=90^\circ$

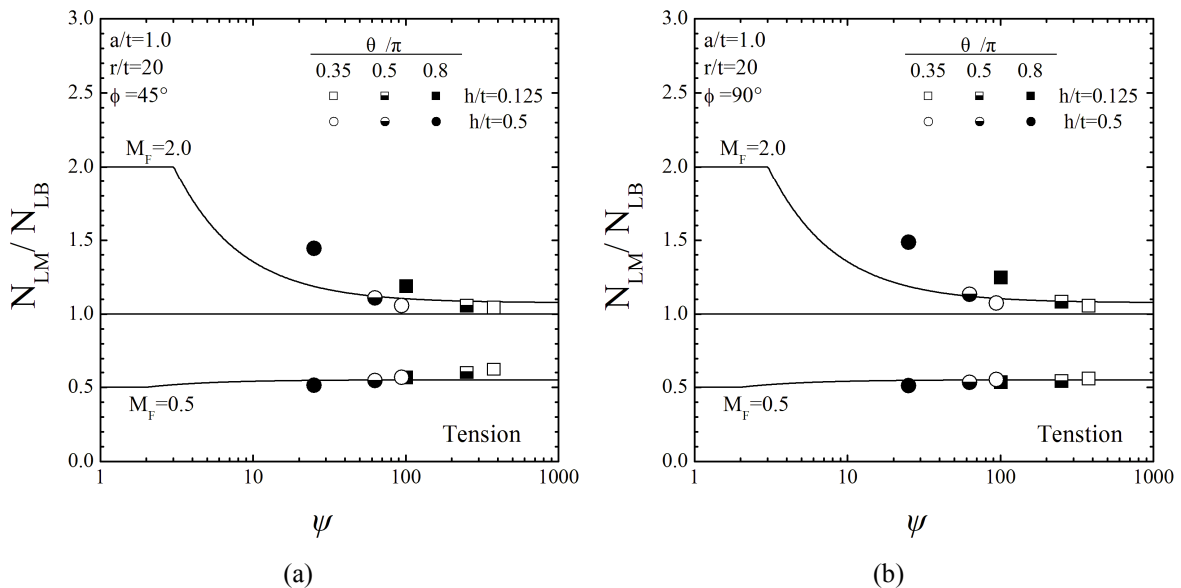


Fig. 5 Variations of normalized FE mismatch limit loads N_{LM}/N_{LB} for circumferential through-wall cracked pipes for V-groove weldments with ψ . (tension): (a) $r/t=20$, $\phi=45^\circ$ (b) $r/t=20$, $\phi=90^\circ$

4.1 인장 하중

Figure 8 과 9 은 인장 하중이 가해질 때의 V-그루브 맞대기 용접부의 원주방향 관통균열에 대한 한계하중 해석 결과를 나타낸다. $r/t=5, 10, 20$ 인 배관에 다양한 원주방향 균열길이 (θ/π)와 용접부 루트간격 ($2h$)에 따라 어떠한 영향이 있는지 보여준다. 유효 용접부 너비 ($2h_{eff}$)를 사용한 수정된 형상변수 (ψ_{eff})와 강도불일치 배관 그리고 강도 균일 배관의 한계하중 비 (N_{LM}/N_{LB})와의 관계

를 분석한 결과 배관의 반경 비 (r/t)가 작은 두꺼운 배관에서는 원주방향 균열길이 (θ/π)와 두께에 대한 용접부 루트간격의 비 (h/t)에 관계없이 다양한 균열 형상에 대하여 FE 결과가 기존에 제시한 한계하중 식⁽⁸⁾과 동일한 식 (7) 과 (8)에 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 배관의 반경 비 (r/t)가 증가함에 따라 형상변수 (ψ_{eff}) 값이 커지는 경향을 볼 수 있으며 원주방향 균열 (θ/π)이 작아질수록 식과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

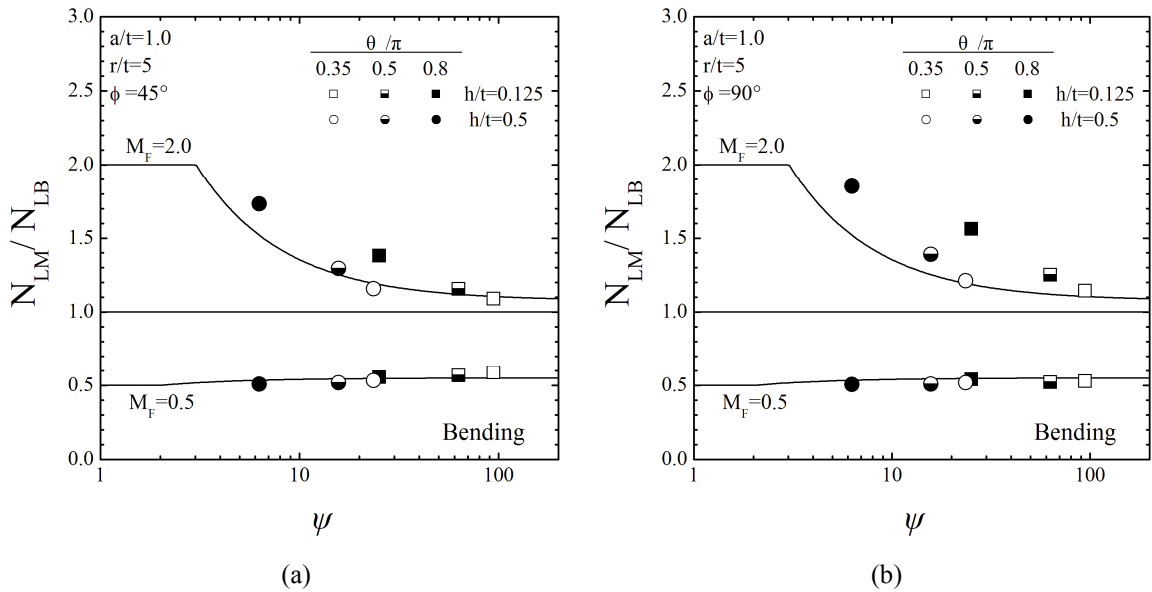


Fig. 6 Variations of normalized FE mismatch limit loads N_{LM}/N_{LB} for circumferential through-wall cracked pipes for V-groove weldments with ψ . (bending): (a) $r/t=5$, $\phi=45^\circ$ (b) $r/t=5$, $\phi=90^\circ$

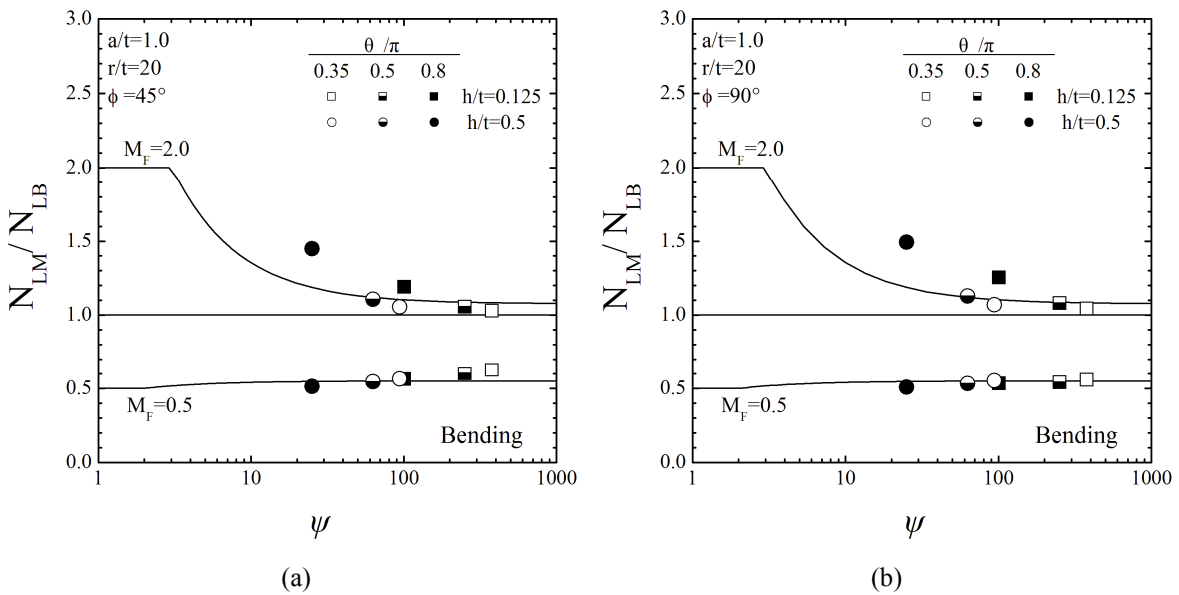


Fig. 7 Variations of normalized FE mismatch limit loads N_{LM}/N_{LB} for circumferential through-wall cracked pipes for V-groove weldments with ψ . (bending): (a) $r/t=20$, $\phi=45^\circ$ (b) $r/t=20$, $\phi=90^\circ$

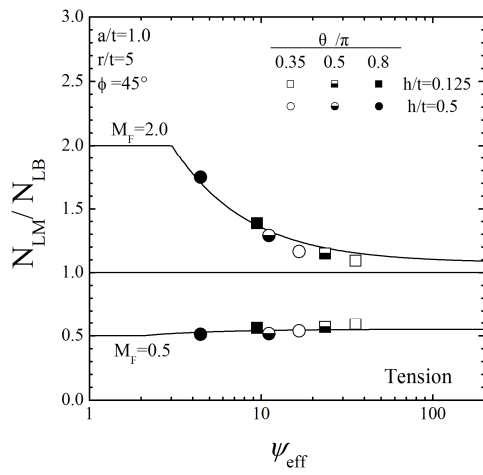
4.2 굽힘 하중

굽힘 하중의 경우 또한 식(7) 과 (8) 을 통해 강도불일치 한계하중을 정량화 가능하며 그 결과는 Fig. 10 과 11 에서 볼 수 있다. 굽힘 하중의 경우에도 각 변수 (r/t , θ/π)에 따라 인장 하중의 경우와 같이 배관의 반경 비(r/t)가 상대적으로 작을수록 다양한 균열형상에 대한 소성한계하중이 제시된 식에 더 잘 맞는 것을 알 수 있다.

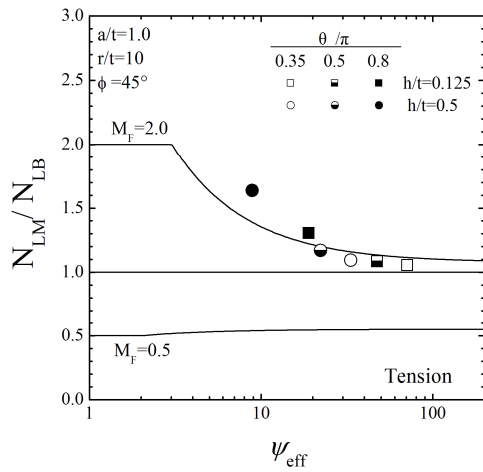
$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} \left(\text{or } \frac{M_{LM}}{M_{LB}} \right) = \begin{cases} \min(M_F, n_{LB}^{-1}) & \text{for } 0 \leq \psi_{\text{eff}} \leq \psi_1 \\ \min\left(\frac{24(M_F - 1)}{25} \left(\frac{\psi_1}{\psi_{\text{eff}}} \right) + \frac{(M_F + 24)}{25}, n_{LB}^{-1} \right) & \text{for } \psi_1 \leq \psi_{\text{eff}} \end{cases}$$

where

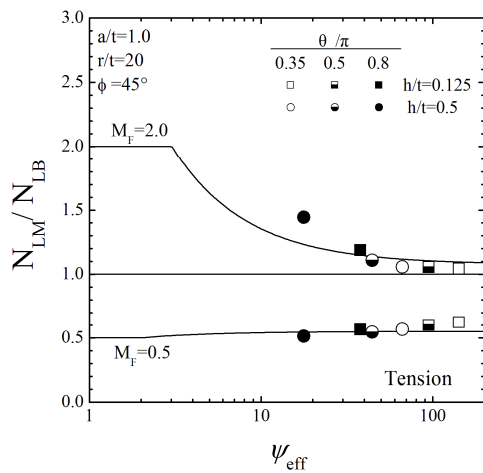
$$\psi_1 = \exp\left(-\frac{M_F - 5.2}{3}\right) \tag{7}$$



(a)

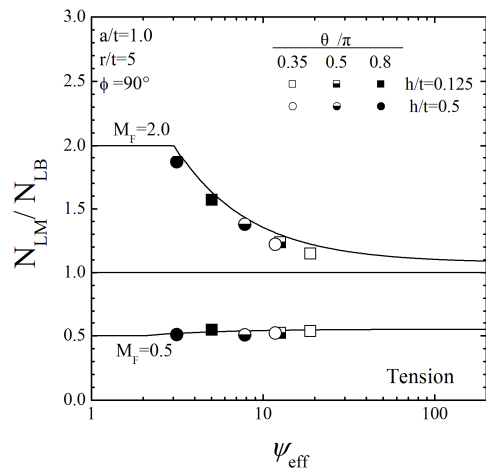


(b)

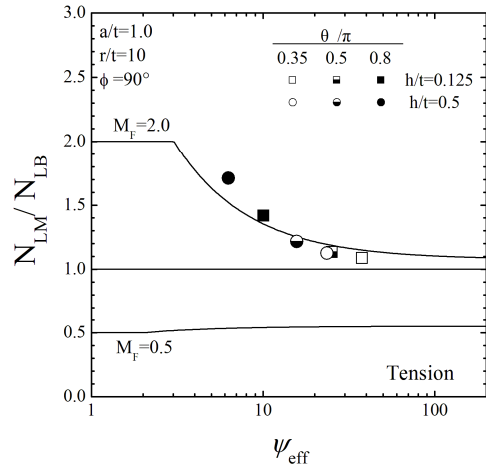


(c)

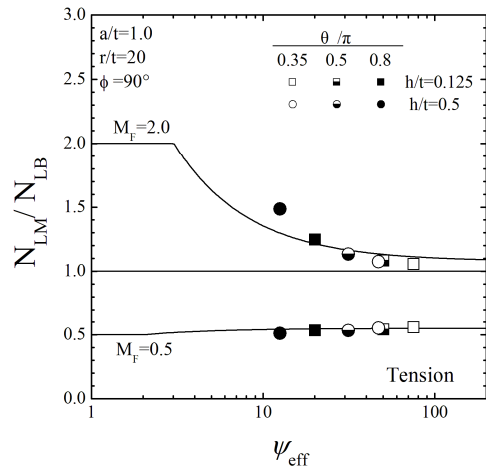
Fig. 8 Variations of normalized FE mismatch limit loads N_{LM}/N_{LB} for circumferential through-wall cracked pipes with ψ_{eff} . Effects of r/t are shown. ($\phi=45^\circ$): (a) $r/t=5$ (b) $r/t=10$ (c) $r/t=20$



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Variations of normalized FE mismatch limit loads N_{LM}/N_{LB} circumferential through-wall cracked pipes with ψ_{eff} . Effects of r/t are shown. ($\phi=90^\circ$): (a) $r/t=5$ (b) $r/t=10$ (c) $r/t=20$

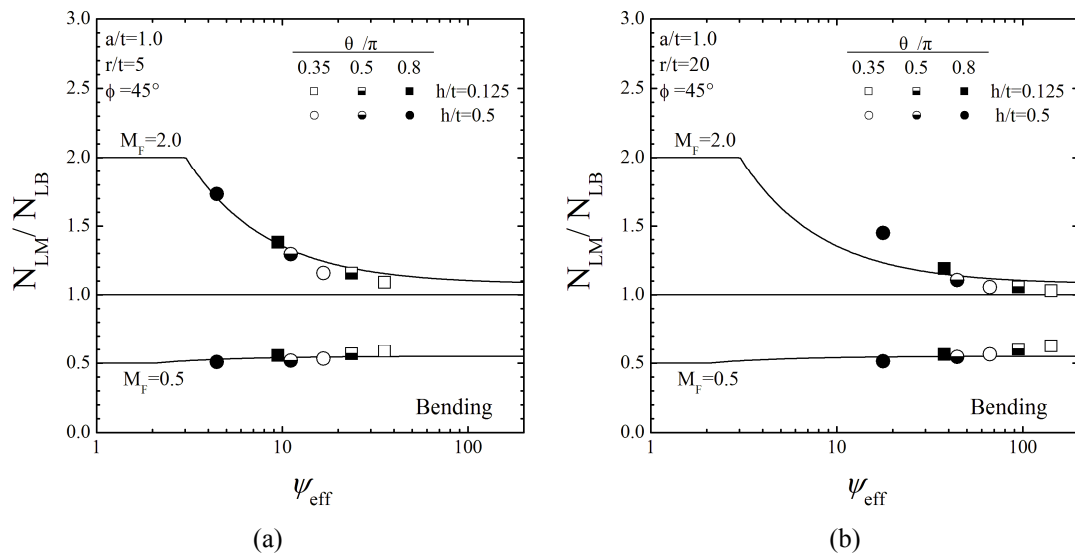


Fig. 10 Variations of normalized FE mismatch limit loads M_{LM}/M_{LB} for circumferential through-wall cracked pipes with ψ_{eff} . Effects of r/t are shown. ($\phi=45^\circ$): (a) $r/t=5$ (b) $r/t=20$

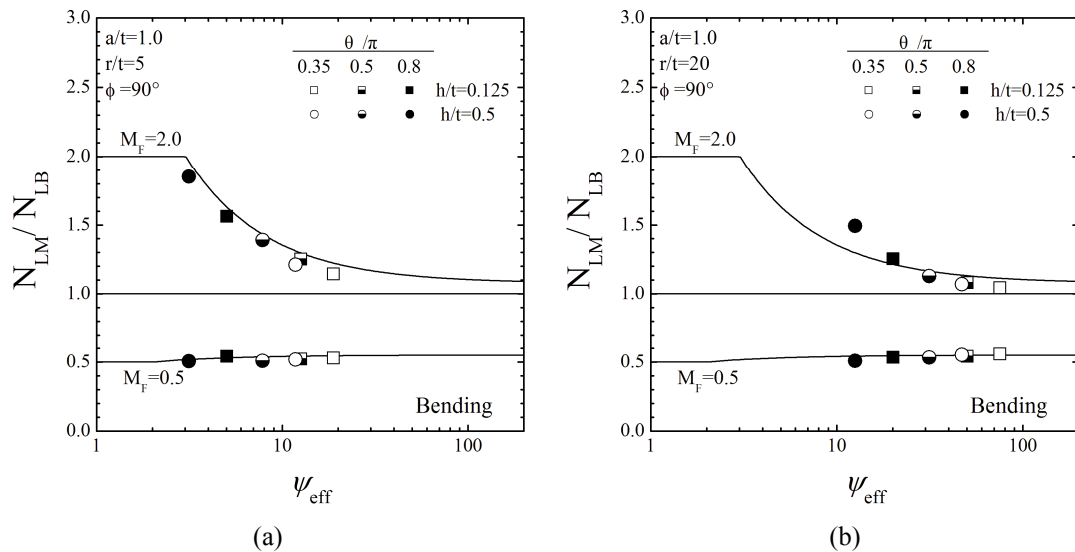


Fig. 11 Variations of normalized FE mismatch limit loads M_{LM}/M_{LB} for circumferential through-wall cracked pipes with ψ_{eff} . Effects of r/t are shown. ($\phi=90^\circ$): (a) $r/t=5$ (b) $r/t=20$

$$\frac{N_{LM}}{N_{LB}} \left(\text{or } \frac{M_{LM}}{M_{LB}} \right) = \begin{cases} M_F & \text{for } 0 \leq \psi_{eff} \leq 1.43 \\ M_F (1.1 - 0.2/\psi_{eff}) & \text{for } 1.43 \leq \psi_{eff} \end{cases} \quad (8)$$

5. 결론

본 연구에서는 V-그룹 맞대기 용접부 중앙에 존재하는 원주방향 관통균열에 대하여 용접부의 강도불일치 특성을 고려한 한계하중 해석을 수행하였다. 기존에 제시되었던 이상화된 단순 띠 형

태의 용접부에서의 한계하중 식을 이용하여 V-그룹 용접부 형상에 대해 적용이 가능하도록 형상 변수를 수정하였다. 이를 검증하기 위하여 이미 다루어진 강도불일치 비 및 배관의 반경 비의 양 극값 ($r/t=5, 20$) ($M_F=0.5, 2$) 대하여 다양한 균열 형상과 용접부 너비에 대한 해석을 수행하였으며 그 연구 결과는 다음과 같다.

강도불일치 한계하중은 강도불일치 비 및 형상 변수를 통해 정량화 할 수 있다. 용접부 형상 변화에 따라 유효 용접부 너비 ($2h_{eff}$) 를 용접부의

평균너비로 정의함으로써 수정된 형상변수 (ψ_{eff})를 통해 기존에 제시되었던 한계하중 식에 적용이 가능하며 이를 한계하중 해석을 통해 검증하였다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2011T100200202)

참고문헌

- (1) Schwalbe, K.H., Ainsworth, R.A., Eripret, C., Gilles, P., Koçak M., Pisarski H. and Wang Y.Y., 1997, "Common Views on the Effects of Yield Strength Mismatch on Testing and Structural Assessment," *GKSS Research Centre Publications*, pp. 99~134.
- (2) Joch, J., Ainsworth, R.A. and Hyde, T.H., 1993, "Limit Load and J-Estimates for Idealized Problems of Deeply Cracked Welded Joints in Plane-Strain Bending and Tension," *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, Vol. 16, pp. 1061~1079.
- (3) Lei, Y. and Ainsworth, R.A., 1997, "A J Integral Estimation Method for Cracks in Welds with Mismatched Mechanical Properties," *Int J Pres Ves Pipe*, Vol. 70, pp. 237~45.
- (4) Kim, Y.J. and 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.
- (5) Kim, Y.J. and 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.
- (6) Kim, Y.J. and 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.
- (7) Song, T.K., Kim, Y.J., Kim, J.S. and Jin, T.E., 2007, "Mismatch Limit Loads and Approximate J Estimates for Tensile Plates with Constant-Depth Surface Cracks in the Centre of Welds," *Int J Fract*, No. 4, Vol. 148, pp.343~60.
- (8) Kim, J.S., Song, T.K., Kim, Y.J. and Jin, T.E., 2009, "Strength Mismatch Effect on Limit Loads for Circumferential Surface Cracked Pipes," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 76, pp.1074~1086.
- (9) ABAQUS, 2011, "ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.11," *Dassault Systemes Simulia Corp.*, RI,