

<연구논문>

축방향 변위가 작용하는 가스 파이프라인 용접부에 존재하는 원주방향 외부표면균열의 변형률 기반 J -적분 및 CTOD 계산

김경민^{*,1}·박지수^{*,1}·문지희^{*}·장윤영^{*}·박승현^{**}·허남수^{*,†}

Estimations of Strain-Based J -integral and CTOD for Circumferential Outer Surface Crack in the Weld of Gas Pipeline Under Axial Displacement

Kyoung-Min Kim^{*,1}, Ji-Su Park^{*,1}, Ji-Hee Moon^{*}, Youn-Young Jang^{*}, Seung-Hyun Park^{**} and Nam-Su Huh^{*,†}

(Received 27 May 2020, Revised 22 June 2020, Accepted 22 June 2020)

ABSTRACT

Pipelines subjected to ground movement would be easily exposed to large-scale deformation. Since such deformations may cause the pipeline failure, it is important to ensure the safety of pipelines in various operation conditions. However, crack in weld metal have been considered as one of the main causes that can deteriorate the structural integrity of the pipeline. For this reason, the structural integrity of the pipe containing the crack in the weld should be obtained. In order to assess cracked pipe, J -integral and crack-tip opening displacement(CTOD) have been applied widely as the elastic-plastic fracture mechanics parameters representing crack driving force. In this study, engineering solutions to calculate the J -integral and CTOD of pipes with a circumferential outer surface crack in the weld are proposed. For this purpose, 3-dimensional elastic-plastic finite element(FE) analyses have been performed considering the effect of overmatch and width of weld. The shape of the weld was simplified to I-groove, and axial displacement was employed as for loading condition. Based on FE results, the effects of crack size, material properties and width of weldment on J -integral and CTOD were investigated. Additionally, the J -integral and CTOD for I-groove were compared with those for V-groove to examine the effects of the weld shape, and a proportionality coefficient of J -integral and CTOD was calculated from the results of this paper.

Key Words : Finite element analysis(유한요소해석), Strain-based assessment(변형률 기반 평가), J -integral(J -적분), Crack-tip opening displacement(균열선단열림변위), Surface crack(표면균열)

기호설명

a = surface crack depth

a_0 = initial surface crack depth
 b = bottom width of weldment
 c = half of surface crack length
CTOD = crack tip opening displacement
 D_o = external diameter of pipeline
 E = Young's modulus
 H_1, H_2 = height of double clip gage
 J = J -integral
 l_0 = gage length of remote strain

† 책임저자, 회원, 서울과학기술대학교 기계시스템디자인 공학과

E-mail: nam-su.huh@seoultech.ac.kr

TEL: (02)970-6317 FAX: (02)974-8270

* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

** 성균관대학교 기계공학부

1 Equally contributed to this work

- m = proportionality constant between CTOD and J -integral
- n = strain hardening exponent
- r = roof width of weldment
- t = thickness of pipeline
- T = tensile strength
- V_1, V_2 = displacement measured at double clip gage heights H_1 and H_2
- w = half width of weldment
- Y = yield strength
- ϵ = remote strain
- $\sigma_{y,b}$ = yield strength of base material
- $\sigma_{y,w}$ = yield strength of weld material
- OM = overmatch

1. 서 론

전 세계적으로 에너지 자원의 수요가 증가함에 따라 원활한 자원 수송을 위한 파이프라인의 건설이 활발히 이루어지고 있다. 건설 환경에 따라 일부 파이프라인은 지진대와 같이 지반이 불안정한 지역을 통과하는 경우가 존재하며, 운용 중 산사태 또는 지진 등의 환경적 요인으로 인해 큰 소성변형에 노출될 수 있다. 이에 따라 지반의 움직임에 의해 발생하는 파이프라인의 큰 소성변형에 대한 구조 건전성 평가가 필요하다.

파이프라인의 구조 건전성 평가에는 일반적으로 응력 기반 평가법이 사용된다⁽¹⁾. 그러나 기존의 응력 기반 평가법은 구조물의 거동 범위를 탄성 범위 이내로 제한하여 소성변형을 고려할 수 없다는 한계가 있어, 대규모 소성변형이 일어나는 파이프라인에 적용하기에 적합하지 않다. 따라서 구조물의 소성 변형을 고려할 수 있어 파이프라인의 구조 건전성 평가에 적합한 변형률 기반 평가에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다⁽²⁾.

한편 파이프라인에 존재하는 균열은 구조 건전성을 저하하는 주요 원인 중 하나로 알려져 있다. 특히, 파이프라인의 용접부는 용접 시 발생하는 열응력과 용입 불량 등에 의해 모재부에 비해 균열 발생에 취약하다⁽³⁾. 이에 따라 파이프라인의 용접부에 발생된 균열에 대한 평가가 필요하다. 균열 평가를 수행하기 위해서는 구조물의 균열 진전력을 나타내는 탄소성 파괴역학 매개변수인 CTOD(Crack Tip

Opening Displacement)와 J -적분의 계산이 요구된다. 하지만 실제 파이프라인에서 요구되는 다양한 파이프라인의 직경 및 균열 형상, 재료 물성 등의 설계 인자들을 고려하여 평가를 수행하기 위해서는 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에, 유한요소해석을 기반으로 한 다양한 설계 인자에 대한 CTOD 및 J -적분 계산식의 제시가 필요하다.

본 논문에서는 파이프라인의 I-Groove 형상 용접부에 존재하는 원주방향 외부 표면균열에 대한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 다양한 파이프라인 형상 및 균열 크기, 재료 물성 등을 고려하였으며, 또한 용접부와 모재부의 강도 차이 및 용접부 폭을 고려하였다. 이를 바탕으로 각 변수에 따른 CTOD 및 J -적분 계산식을 제시하였다. 추가적으로 V-Groove 용접부 형상에 대한 CTOD와 비교함으로써 용접부 형상이 파괴역학 매개변수에 미치는 영향을 검토하였으며, 본 논문에서 제시한 계산식을 활용하여 CTOD 및 J -적분의 상관관계를 나타내는 비례계수에 대해 검토하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석 대상

본 논문에서는 파이프라인의 용접부에 존재하는 원주방향 반타원 외부 표면균열을 고려하였으며, 파이프라인 및 균열 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 외경과 두께는 각각 D_o , t 로 나타내었으며, a 와 $2c$ 는 각각 균열 깊이와 길이를 의미한다. 본 연구에서 고려된 형상 변수 및 대상을 Table 1에 정리하였다.

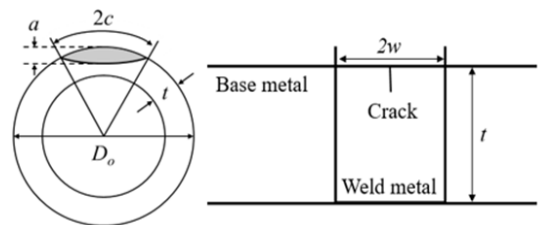


Fig. 1 Schematics of cross-section for an outer surface cracked pipe and I-Groove girth welding configuration

Table 1 Pipe geometries and width of weldment

| D_o/t | a/t | a/c | w/t |
|------------|--------------------|---------------|---------------|
| 30, 40, 60 | 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 | 1/2, 1/4, 1/8 | 0.5, 1.0, 2.0 |

변형률 기반 J -적분 및 CTOD의 계산에는 외경에 따른 영향이 미미한 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾. 따라서 본 연구에서는 실제 활용되고 있는 가스 파이프라인의 외경인 762 mm를 대표적으로 고려하였다. 또한 축방향 길이(L)는 해석시 경계조건에 의한 영향을 피할 수 있도록 2,000 mm로 충분히 길게 고려하였다.

2.2 재료 물성

변형률 기반 J -적분 및 CTOD의 계산에는 항복강도의 변화에 따른 영향이 적으며, 항복강도와 인장강도의 비(Y/T)의 영향이 지배적이라고 알려져 있다⁽⁴⁾. 따라서 본 연구에서는 국내에서 상용되는 X70 파이프라인의 항복강도(σ_y)와 탄성계수(E)를 사용하였으며, 각각 550 MPa, 209 GPa로 적용하였다. 식 (1)은 본 연구에서 사용된 CSA-Z662⁽⁴⁾ 재료모델을 나타내는 수식이다. 본 논문에서는 모재부와 용접부의 물성을 모두 아래의 수식으로 정의하였으며, 모재와 용접부의 소성경화가 동일하다고 가정하였다.

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma_y}{E} & \text{if } \varepsilon < \sigma_y/E \\ \varepsilon = \frac{\sigma_y}{E} + \left(0.005 - \frac{\sigma_y}{E}\right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n & \text{if } \varepsilon > \sigma_y/E \end{cases} \quad (1)$$

재료모델의 가공경화지수(n)는 실험 데이터를 기반으로 재료의 항복강도(σ_y 또는 Y)와 인장강도(T)의 비의 관계식으로 나타낼 수 있으며⁽⁵⁾, 이를 식 (2)에 나타내었다.

$$n = 3.28 / (1 - (Y/T)) \quad (2)$$

용접부의 항복강도는 모재의 항복강도($\sigma_{y,b}$)와 용접부의 항복강도($\sigma_{y,w}$)의 차이에 대한 $\sigma_{y,b}$ 의 비를 통해 Overmatch(OM)로 정량화하였다.

$$OM = (\sigma_{y,w} - \sigma_{y,b}) / \sigma_{y,b} \quad (3)$$

Y/T 의 상한값은 API 기술기준에 따라 0.93으로 제한되며⁽⁶⁾, Y/T 의 하한값과 OM 의 범위는 국내/외에서 사용되는 파이프라인의 인장시험 데이터^(4,5)를 기반으로 결정되었다. 본 연구에 적용된 재료 물성을 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Base and weld material properties

| E | $\sigma_{y,b}$ | Y/T | OM |
|---------|----------------|------------------|----------------|
| 209 GPa | 550 MPa | 0.76, 0.85, 0.93 | 0.0, 0.15, 0.3 |

2.3 해석 조건

본 연구에서는 탄소성 파괴역학 매개변수를 계산하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 유한요소모델은 해석의 효율성을 위해 파이프라인과 균열의 대칭형을 고려하여 1/4 대칭모델을 사용하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 각 대칭면에는 X축, Z축 방향 대칭조건을 적용하였다.

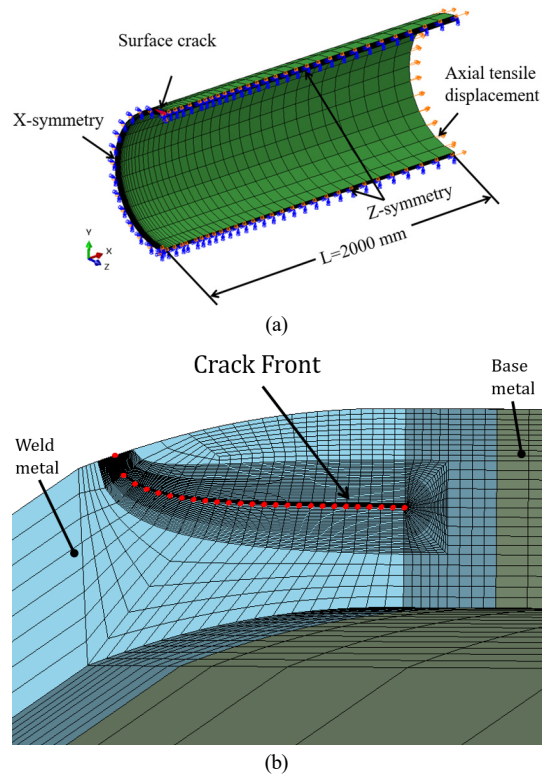


Fig. 2 3-D finite element model employed in the present study : (a) boundary condition and loading condition and (b) details of the mesh near the crack region

국내/외에 운용 중인 가스 파이프라인은 일반적으로 외경이 크고 두께가 얇기 때문에 굽힘 하중에 의해 발생하는 파이프라인의 외면과 내면의 응력 차이가 적으며, 이에 따라 균열 선단에서 작용되는 응력은 축방향 인장 하중에 의한 응력과 유사하게 나타난다. 또한 기존 연구에 따르면⁽⁷⁾ 인장 하중을

고려할 때 굽힘 하중보다 다소 보수적인 J -적분 및 CTOD가 계산되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 보수적인 유한요소해석 결과를 얻기 위해 축방향 인장 변위를 고려하였다. 또한 파이프라인의 관심 변형률 범위⁽⁸⁾를 고려하여 전체 길이의 4%에 해당하는 변위를 파이프라인의 끝단에 적용하였다.

본 연구에서는 경로 독립 특성이 유지되는 J -적분을 계산하기 위해서 소변형 해석 기법을 사용하였다. 또한 CTOD 계산에는 균열 선단의 변형을 정확히 모사하기 위한 대변형 해석 기법을 사용하였다. 대변형 해석에서는 수치적 수렴성을 증진시키기 위하여 균열 선단에 초기 blunt 형상을 적용하는 것이 권고되고 있으며⁽⁹⁾, 변형에 따른 CTOD의 크기가 초기 blunt 반경의 5배보다 큰 경우 이에 따른 수치적 영향이 없다고 검토된 바 있다⁽¹⁰⁾. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 50 μm 반경의 초기 blunt 형상을 균열 선단에 적용하였다.

유한요소해석에는 8절점 사각 감차적분 요소 (8-nodes brick reduced integration element, C3D8R in ABAQUS)를 적용하였으며, 44,010~52,086개의 요소가 사용되었다.

2.4 J -적분과 CTOD 및 원거리 변형률 계산

Fig. 3은 90° 기반 CTOD($CTOD_{90^\circ}$)와 Double Clip Gage 기반 CTOD($CTOD_{DCG}$) 방법을 도식화한 것이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, $CTOD_{90^\circ}$ 는 균열 선단으로부터 90° 가상선에 맞닿는 두 균열면의 변위로 정의되며, $CTOD_{DCG}$ 는 초기 균열 선단 위치의 변위로 정의된다. $CTOD_{DCG}$ 는 위치가 다른 두 clip gage의 변위와 삼각형 비례식을 통해 계산되며, 계산식을 식 (4)에 나타내었다.

$$CTOD_{DCG} = V_1 - \frac{H_1 + a_0}{H_2 - H_1} (V_2 - V_1) \quad (4)$$

J -적분은 ABAQUS의 contour integral 옵션을 사용하여 계산되었으며, 총 20개의 contour를 적용하였다. 유한요소해석 결과, 각 contour 별로 J -적분이 4% 이내로 일치하였으며, 이를 통해 J -적분의 특성인 경로독립성이 확인되었다. 본 연구에서는 경로독립성이 충분히 확인된 마지막 20번째 contour의 J -적분을 사용하였다.

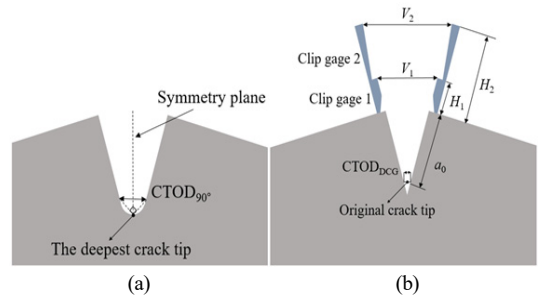


Fig. 3 Schematics of (a) $CTOD_{90^\circ}$ and (b) $CTOD_{DCG}$ approach

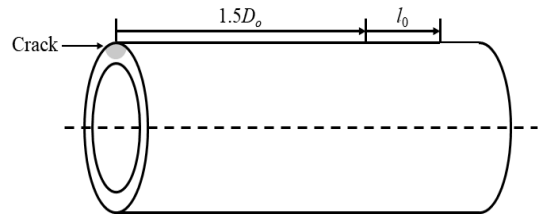


Fig. 4 Schematic of the calculating position and gage length of the remote strain

변형률 기반의 J -적분 및 CTOD를 정확하게 계산하기 위해서는 파이프라인의 축방향 변형률이 균일하게 나타나는 영역에서 변형률을 정의해야 한다. 강주연 등⁽¹¹⁾은 유한요소해석을 통해 파이프라인 외면에서 축방향 변형률이 균일하게 나타나는 영역에 대해 보인 바 있다. 이에 따라 원거리 변형률은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 균열 선단으로부터 축방향으로 $1.5D_o$ (1,143 mm) 떨어진 지점에서 계산하였으며, 두 지점 사이 길이의 변화율($\Delta l_0/l_0$)로 정의되었다. Gage length(l_0)는 $0.5D_o$ (381 mm)로 고려되었다.

3. 해석 결과

3.1 균열 크기의 영향

유한요소해석을 통해 계산된 CTOD 결과를 Fig. 5에 나타내었으며, CTOD는 파이프라인 두께(t)로 무차원화 되었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 전체적으로 균열 깊이(a/t)가 증가할수록 CTOD가 증가하는 것이 확인되었다. 또한 Fig. 5(a), (b) 및 Fig. 5(c), (d)의 비교를 통해 균열 길이 증가(또는 a/c 감소)에 따라서 CTOD가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

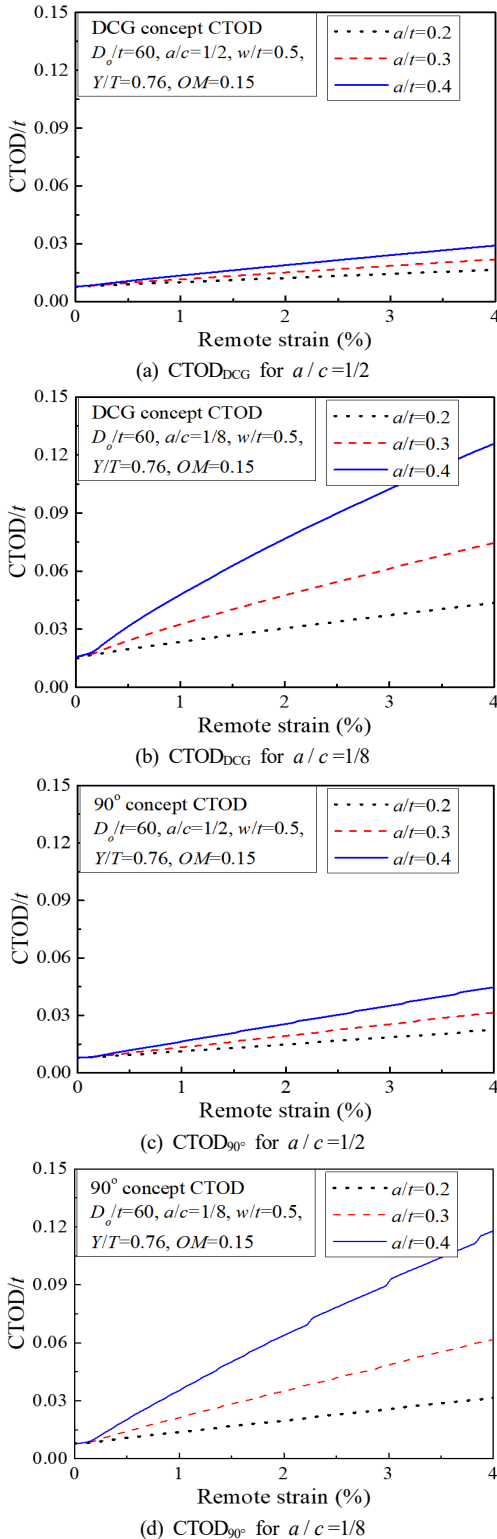


Fig. 5 FE results of CTOD for the different a/t

3.2 Overmatch에 따른 항복강도와 인장강도 비의 영향

Fig. 6은 모재 및 용접부 재료 물성의 변화가 J -적분 및 CTOD에 미치는 영향을 나타낸 것이다. J -적분은 항복강도(σ_y)와 파이프라인 두께(t)의 곱으로 무차원화 되었다. Fig. 6(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 $OM=0.0$ 인 경우 Y/T 가 증가함에 따라 J -적분 및 CTOD가 증가하는 경향을 보였다. 반면에, Fig. 6(c)와 (d)에 나타난 바와 같이 용접부와 모재의 Overmatch가 나타나는 $OM=0.3$ 인 경우 Y/T 가 증가함에 따라 J -적분 및 CTOD가 감소하는 경향을 보였다.

3.3 용접부 폭 및 Overmatch의 영향

Fig. 7은 Overmatch(OM) 및 용접부 폭(w/t)의 변화가 CTOD에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 전체적으로 용접부 폭이 증가할수록 CTOD가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 7(a), (c) 및 Fig. 7(b), (d)의 비교를 통해 Overmatch가 증가할수록 CTOD 선도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 모재에 비해 용접부의 강도가 높을수록 균열 선단의 변형이 상대적으로 작아지고, 용접부 폭이 증가할수록 Overmatch 범위가 상대적으로 넓어지기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.

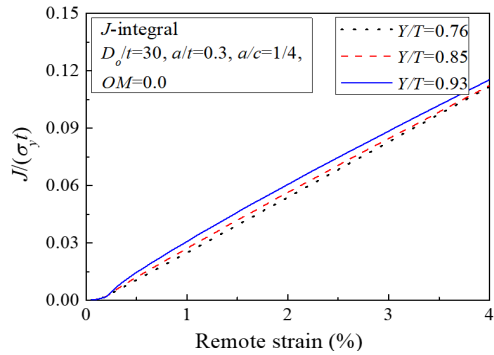
3.4 변형률 기반 J -적분 및 CTOD 계산식

Fig. 5~7에 나타난 바와 같이, J -적분 및 CTOD는 0.5~4%의 원거리 변형률에서 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 원거리 변형률에 대한 J -적분 및 CTOD의 공학적 계산식을 식 (5)와 (6)과 같이 1차 선형식으로 제시하였다.

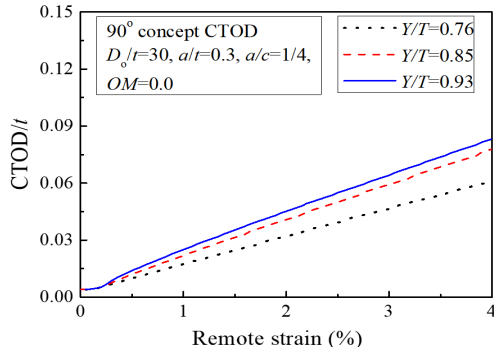
$$CTOD/t = C_1\varepsilon + C_2 \quad (5)$$

$$J/(\sigma_y t) = C_3\varepsilon + C_4 \quad (6)$$

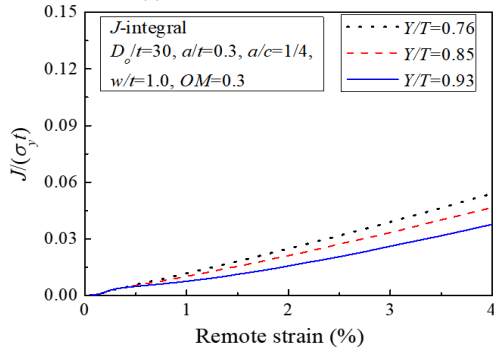
식 (5)와 (6)에 나타난 바와 같이, CTOD와 J -적분을 계산하기 위해서 파이프라인 형상과 균열 크기, 재료 물성에 따른 상수 $C_1 \sim C_4$ 가 필요하다. 위 상수는 관심 원거리 변형률인 0.5~4% 범위에서 유한요소해석 결과를 이용한 곡선적합(curve fit)을 통해 계산되었다. 대표적으로 $Y/T=0.85$, $OM=0.15$ 일 때의 CTOD 및 J -적분에 대한 $C_1 \sim C_4$ 를 Table 3~5에 정리하였다.



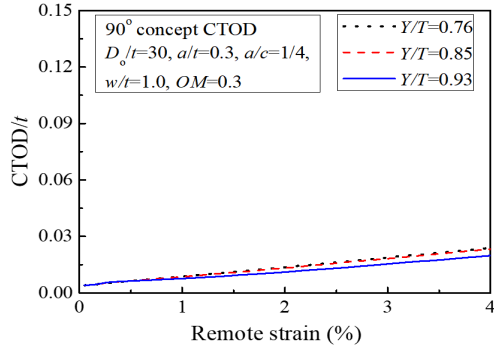
(a) J -integral for $OM=0.0$



(b) $CTOD_{90^\circ}$ for $OM=0.0$

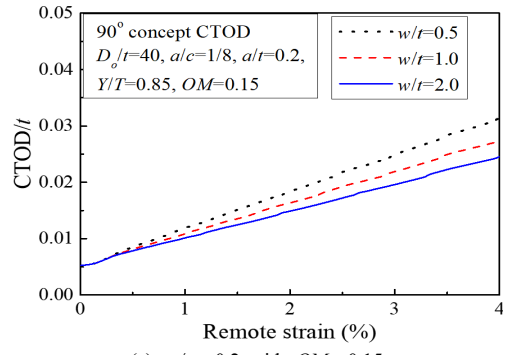


(c) J -integral for $w/t=1.0$ and $OM=0.3$

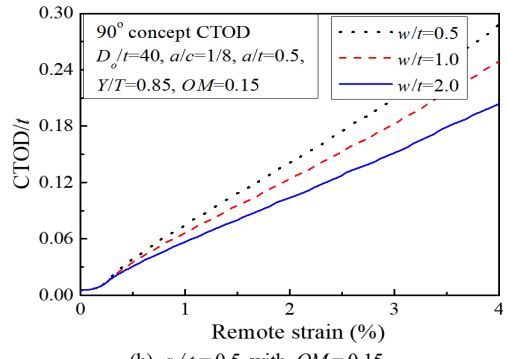


(d) $CTOD_{90^\circ}$ for $w/t=1.0$ and $OM=0.3$

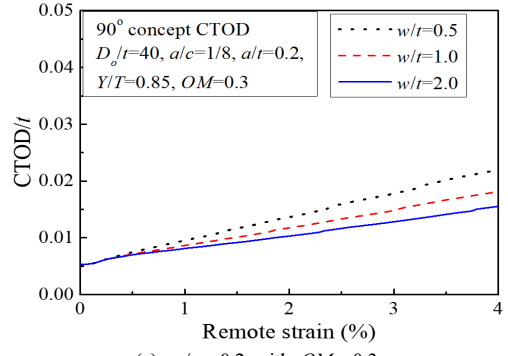
Fig. 6 FE results of J -integral and $CTOD_{90^\circ}$ for the different Y/T



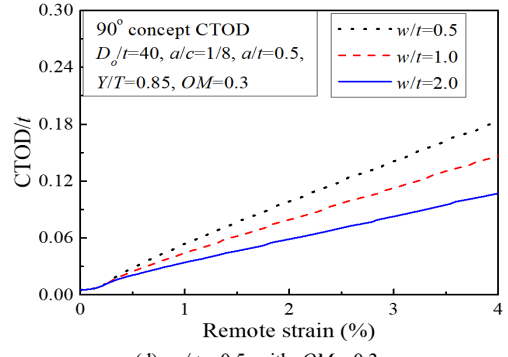
(a) $a/t=0.2$ with $OM=0.15$



(b) $a/t=0.5$ with $OM=0.15$



(c) $a/t=0.2$ with $OM=0.3$



(d) $a/t=0.5$ with $OM=0.3$

Fig. 7 FE results of $CTOD_{90^\circ}$ for the different w/t

Table 3 Values of C_1 and C_2 of Eq. (5) for CTOD_{90°} estimations ($Y/T=0.85, OM=0.15$)

| a/t | a/c | w/t | D ₀ /t | | | | | |
|-----|-----|-----|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | 30 | | 40 | | 60 | |
| | | | C ₁ | C ₂ | C ₁ | C ₂ | C ₁ | C ₂ |
| 0.2 | 1/2 | 0.5 | 0.3719 | 0.0033 | 0.3911 | 0.0047 | 0.4111 | 0.0073 |
| | | 1.0 | 0.3094 | 0.0033 | 0.3190 | 0.0047 | 0.3540 | 0.0073 |
| | | 2.0 | 0.2233 | 0.0039 | 0.2379 | 0.0049 | 0.3070 | 0.0072 |
| | 1/4 | 0.5 | 0.4874 | 0.0036 | 0.5182 | 0.0050 | 0.5336 | 0.0076 |
| | | 1.0 | 0.4105 | 0.0034 | 0.4205 | 0.0049 | 0.4541 | 0.0076 |
| | | 2.0 | 0.2982 | 0.0040 | 0.3239 | 0.0050 | 0.4004 | 0.0073 |
| | 1/8 | 0.5 | 0.6451 | 0.0038 | 0.6874 | 0.0054 | 0.6911 | 0.0081 |
| | | 1.0 | 0.5235 | 0.0038 | 0.5516 | 0.0052 | 0.5872 | 0.0078 |
| | | 2.0 | 0.3818 | 0.0041 | 0.4314 | 0.0052 | 0.5180 | 0.0075 |
| 0.3 | 1/2 | 0.5 | 0.6316 | 0.0032 | 0.6864 | 0.0045 | 0.7008 | 0.0071 |
| | | 1.0 | 0.5251 | 0.0033 | 0.5687 | 0.0043 | 0.6135 | 0.0069 |
| | | 2.0 | 0.3691 | 0.0037 | 0.4198 | 0.0045 | 0.5253 | 0.0066 |
| | 1/4 | 0.5 | 1.0185 | 0.0036 | 1.1440 | 0.0048 | 1.1238 | 0.0076 |
| | | 1.0 | 0.8568 | 0.0032 | 0.9338 | 0.0045 | 0.9692 | 0.0071 |
| | | 2.0 | 0.5788 | 0.0039 | 0.7011 | 0.0044 | 0.8293 | 0.0065 |
| | 1/8 | 0.5 | 1.5577 | 0.0058 | 1.8419 | 0.0067 | 1.8113 | 0.0087 |
| | | 1.0 | 1.3020 | 0.0043 | 1.5042 | 0.0054 | 1.5351 | 0.0079 |
| | | 2.0 | 0.8930 | 0.0040 | 1.1606 | 0.0046 | 1.3169 | 0.0066 |
| 0.4 | 1/2 | 0.5 | 1.0433 | 0.0031 | 1.1508 | 0.0043 | 1.1260 | 0.0070 |
| | | 1.0 | 0.8988 | 0.0024 | 0.9600 | 0.0040 | 0.9941 | 0.0065 |
| | | 2.0 | 0.5826 | 0.0035 | 0.7056 | 0.0039 | 0.8423 | 0.0059 |
| | 1/4 | 0.5 | 2.0156 | 0.0038 | 2.2793 | 0.0051 | 2.2080 | 0.0068 |
| | | 1.0 | 1.6815 | 0.0026 | 1.8696 | 0.0043 | 1.9155 | 0.0060 |
| | | 2.0 | 1.0861 | 0.0036 | 1.3883 | 0.0035 | 1.5866 | 0.0049 |
| | 1/8 | 0.5 | 3.3217 | 0.0097 | 4.0492 | 0.0107 | 3.9370 | 0.0107 |
| | | 1.0 | 2.8334 | 0.0076 | 3.4024 | 0.0082 | 3.4417 | 0.0086 |
| | | 2.0 | 2.4437 | 0.0021 | 2.5679 | 0.0069 | 2.9102 | 0.0055 |
| 0.5 | 1/2 | 0.5 | 1.6201 | 0.0031 | 1.7970 | 0.0045 | 1.7066 | 0.0069 |
| | | 1.0 | 1.3862 | 0.0022 | 1.5049 | 0.0037 | 1.5051 | 0.0060 |
| | | 2.0 | 0.8819 | 0.0033 | 1.1016 | 0.0031 | 1.2570 | 0.0050 |
| | 1/4 | 0.5 | 3.3676 | 0.0041 | 3.8066 | 0.0064 | 3.6308 | 0.0069 |
| | | 1.0 | 2.8146 | 0.0028 | 3.0769 | 0.0059 | 3.1519 | 0.0055 |
| | | 2.0 | 2.1189 | 0.0025 | 2.2649 | 0.0048 | 2.5758 | 0.0038 |
| | 1/8 | 0.5 | 7.0812 | -0.0012 | 9.8204 | -0.0112 | 7.6200 | 0.0052 |
| | | 1.0 | 5.7639 | 0.0048 | 7.4531 | 0.0017 | 6.7932 | 0.0034 |
| | | 2.0 | 4.7255 | 0.0001 | 5.1942 | 0.0099 | 5.5374 | 0.0039 |

Table 4 Values of C_1 and C_2 of Eq. (5) for CTOD_{DGC} estimations ($Y/T=0.85, OM=0.15$)

| a/t | a/c | w/t | D ₀ /t | | | | | |
|-----|-----|-----|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | 30 | | 40 | | 60 | |
| | | | C ₁ | C ₂ | C ₁ | C ₂ | C ₁ | C ₂ |
| 0.2 | 1/2 | 0.5 | 0.4139 | 0.0081 | 0.4228 | 0.0107 | 0.4392 | 0.0159 |
| | | 1.0 | 0.3476 | 0.0082 | 0.3677 | 0.0107 | 0.3947 | 0.0158 |
| | | 2.0 | 0.2828 | 0.0081 | 0.3129 | 0.0107 | 0.3606 | 0.0158 |
| | 1/4 | 0.5 | 0.5486 | 0.0085 | 0.5669 | 0.0111 | 0.5767 | 0.0163 |
| | | 1.0 | 0.4646 | 0.0082 | 0.4904 | 0.0110 | 0.5123 | 0.0162 |
| | | 2.0 | 0.3615 | 0.0084 | 0.4210 | 0.0109 | 0.4693 | 0.0160 |
| | 1/8 | 0.5 | 0.6992 | 0.0092 | 0.7170 | 0.0116 | 0.7184 | 0.0168 |
| | | 1.0 | 0.5898 | 0.0087 | 0.6176 | 0.0114 | 0.6369 | 0.0166 |
| | | 2.0 | 0.4556 | 0.0085 | 0.5339 | 0.0113 | 0.5852 | 0.0164 |
| 0.3 | 1/2 | 0.5 | 0.7050 | 0.0085 | 0.7163 | 0.0111 | 0.7241 | 0.0162 |
| | | 1.0 | 0.6046 | 0.0082 | 0.6385 | 0.0108 | 0.6576 | 0.0161 |
| | | 2.0 | 0.4517 | 0.0082 | 0.5384 | 0.0107 | 0.5947 | 0.0159 |
| | 1/4 | 0.5 | 1.0862 | 0.0101 | 1.1271 | 0.0118 | 1.1059 | 0.0171 |
| | | 1.0 | 0.9392 | 0.0090 | 0.9874 | 0.0115 | 0.9401 | 0.0165 |
| | | 2.0 | 0.6845 | 0.0086 | 0.8326 | 0.0112 | 0.8975 | 0.0163 |
| | 1/8 | 0.5 | 1.5620 | 0.0134 | 1.6456 | 0.0138 | 1.6126 | 0.0178 |
| | | 1.0 | 1.3463 | 0.0114 | 1.4466 | 0.0129 | 1.4510 | 0.0179 |
| | | 2.0 | 1.0270 | 0.0090 | 1.2497 | 0.0120 | 1.3019 | 0.0172 |
| 0.4 | 1/2 | 0.5 | 1.1082 | 0.0098 | 1.1402 | 0.0116 | 1.1101 | 0.0167 |
| | | 1.0 | 0.9791 | 0.0086 | 1.0165 | 0.0112 | 1.0087 | 0.0165 |
| | | 2.0 | 0.6687 | 0.0086 | 0.8441 | 0.0109 | 0.9074 | 0.0160 |
| | 1/4 | 0.5 | 1.9737 | 0.0129 | 2.0546 | 0.0134 | 1.9711 | 0.0180 |
| | | 1.0 | 1.7119 | 0.0110 | 1.8226 | 0.0124 | 1.7890 | 0.0173 |
| | | 2.0 | 1.2489 | 0.0089 | 1.5207 | 0.0114 | 1.5768 | 0.0164 |
| | 1/8 | 0.5 | 3.0548 | 0.0227 | 3.4043 | 0.0168 | 3.2201 | 0.0218 |
| | | 1.0 | 2.6402 | 0.0189 | 2.9669 | 0.0161 | 2.9298 | 0.0204 |
| | | 2.0 | 1.9809 | 0.0111 | 2.5392 | 0.0145 | 2.5940 | 0.0188 |
| 0.5 | 1/2 | 0.5 | 1.6560 | 0.0111 | 1.6785 | 0.0127 | 1.5806 | 0.0176 |
| | | 1.0 | 1.4365 | 0.0101 | 1.4960 | 0.0119 | 1.4489 | 0.0170 |
| | | 2.0 | 1.0439 | 0.0086 | 1.2420 | 0.0111 | 1.2898 | 0.0161 |
| | 1/4 | 0.5 | 3.0852 | 0.0174 | 3.2445 | 0.0152 | 3.0762 | 0.0194 |
| | | 1.0 | 2.7338 | 0.0127 | 2.8540 | 0.0143 | 2.7733 | 0.0184 |
| | | 2.0 | 2.0676 | 0.0121 | 2.3459 | 0.0131 | 2.4159 | 0.0170 |
| | 1/8 | 0.5 | 6.3005 | 0.0151 | 6.3153 | 0.0172 | 5.8253 | 0.0209 |
| | | 1.0 | 5.2545 | 0.0189 | 5.5081 | 0.0177 | 5.3137 | 0.0198 |
| | | 2.0 | 3.7233 | 0.0177 | 4.5022 | 0.0185 | 4.6067 | 0.0190 |

4. 고찰

4.1 I-Groove 및 V-Groove 용접부 형상의 영향

앞서 3장에서 언급한 바와 같이, 용접재와 모재의 강도 불일치와 용접부 폭이 파이프라인의 CTOD 및 J-적분에 영향을 주는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 용접부의 형상을 I-Groove로 이상화하였으나, 실제 용접부의 형상은 V-Groove와 유사하다.

따라서 용접부 형상이 CTOD 및 J-적분에 미치는 영향을 검토하기 위해, I-Groove와 V-Groove 용접부 형상에 따른 차이를 추가적으로 검토하였다.

Fig. 8은 V-Groove 용접부의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 용접부 상단 폭(r)과 하단 폭(b)의 길이로 V-Groove 용접부 형상을 정량화할 수 있으며, 상단 폭과 하단 폭이 같은 경우는 I-Groove 형상에 해당된다. 비교를 수행한 V-Groove와

Table 5 Values of C_3 and C_4 of Eq. (6) for J-integral estimations ($Y/T=0.85$, $OM=0.15$)

| a/t | a/c | w/t | D_o/t | | | | | |
|-------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|
| | | | 30 | | 40 | | 60 | |
| | | | C_1 | C_2 | C_1 | C_2 | C_1 | C_2 |
| 0.2 | 1/2 | 0.5 | 0.7366 | -0.0017 | 0.7358 | -0.0013 | 0.7376 | -0.0012 |
| | | 1.0 | 0.6345 | -0.0017 | 0.6334 | -0.0012 | 0.6517 | -0.0012 |
| | | 2.0 | 0.5251 | -0.0016 | 0.5399 | -0.0011 | 0.5943 | -0.0013 |
| | 1/4 | 0.5 | 0.9848 | -0.0016 | 0.9793 | -0.0010 | 0.9659 | -0.0009 |
| | | 1.0 | 0.8541 | -0.0017 | 0.8473 | -0.0010 | 0.8520 | -0.0009 |
| | | 2.0 | 0.7213 | -0.0017 | 0.7531 | -0.0011 | 0.8017 | -0.0012 |
| | 1/8 | 0.5 | 1.3089 | -0.0016 | 1.3067 | -0.0009 | 1.2614 | -0.0007 |
| | | 1.0 | 1.1337 | -0.0018 | 1.1308 | -0.0009 | 1.1159 | -0.0008 |
| | | 2.0 | 0.9412 | -0.0019 | 1.0185 | -0.0012 | 1.0585 | -0.0012 |
| 0.3 | 1/2 | 0.5 | 1.2577 | -0.0025 | 1.2581 | -0.0018 | 1.2405 | -0.0018 |
| | | 1.0 | 1.1103 | -0.0029 | 1.1036 | -0.0019 | 1.1147 | -0.0019 |
| | | 2.0 | 0.8745 | -0.0026 | 0.9161 | -0.0018 | 0.9913 | -0.0021 |
| | 1/4 | 0.5 | 2.0431 | -0.0024 | 2.0430 | -0.0016 | 1.9695 | -0.0015 |
| | | 1.0 | 1.8287 | -0.0034 | 1.8194 | -0.0021 | 1.7795 | -0.0019 |
| | | 2.0 | 1.4426 | -0.0035 | 1.5692 | -0.0027 | 1.6153 | -0.0026 |
| | 1/8 | 0.5 | 3.2498 | -0.0015 | 3.3060 | -0.0011 | 3.1353 | -0.0008 |
| | | 1.0 | 2.9213 | -0.0034 | 2.9724 | -0.0023 | 2.8674 | -0.0020 |
| | | 2.0 | 2.2858 | -0.0042 | 2.6311 | -0.0038 | 2.6327 | -0.0035 |
| 0.4 | 1/2 | 0.5 | 1.9854 | -0.0028 | 1.9789 | -0.0021 | 1.9039 | -0.0021 |
| | | 1.0 | 1.7957 | -0.0038 | 1.7812 | -0.0026 | 1.7431 | -0.0025 |
| | | 2.0 | 1.3623 | -0.0036 | 1.4648 | -0.0027 | 1.5260 | -0.0029 |
| | 1/4 | 0.5 | 3.8238 | -0.0024 | 3.8443 | -0.0022 | 3.6275 | -0.0025 |
| | | 1.0 | 3.5336 | -0.0049 | 3.5408 | -0.0038 | 3.3628 | -0.0037 |
| | | 2.0 | 2.6982 | -0.0055 | 3.0104 | -0.0052 | 2.9672 | -0.0049 |
| | 1/8 | 0.5 | 6.9219 | 0.0022 | 7.1579 | -0.0006 | 6.6406 | -0.0012 |
| | | 1.0 | 6.5126 | -0.0029 | 6.7399 | -0.0040 | 6.3289 | -0.0043 |
| | | 2.0 | 5.0206 | -0.0054 | 5.9108 | -0.0075 | 5.7160 | -0.0077 |
| 0.5 | 1/2 | 0.5 | 2.8712 | -0.0020 | 2.8560 | -0.0017 | 2.6883 | -0.0020 |
| | | 1.0 | 2.6373 | -0.0039 | 2.6067 | -0.0028 | 2.4743 | -0.0028 |
| | | 2.0 | 1.9897 | -0.0040 | 2.1528 | -0.0036 | 2.1445 | -0.0035 |
| | 1/4 | 0.5 | 5.9216 | 0.0011 | 5.9536 | -0.0004 | 5.5330 | -0.0020 |
| | | 1.0 | 5.5224 | -0.0028 | 5.5144 | -0.0025 | 5.1481 | -0.0038 |
| | | 2.0 | 4.3144 | -0.0041 | 4.6956 | -0.0049 | 4.4670 | -0.0050 |
| | 1/8 | 0.5 | 11.184 | 0.0206 | 11.645 | 0.0103 | 10.611 | 0.0043 |
| | | 1.0 | 10.646 | 0.0134 | 11.103 | 0.0065 | 10.257 | -0.0001 |
| | | 2.0 | 8.4842 | 0.0080 | 9.8321 | 0.0011 | 9.2263 | -0.0042 |

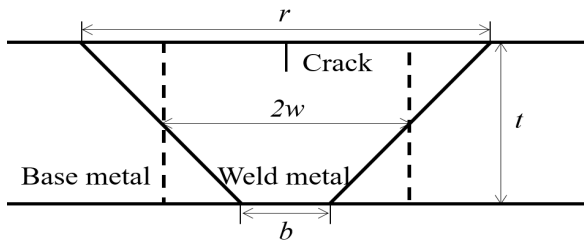
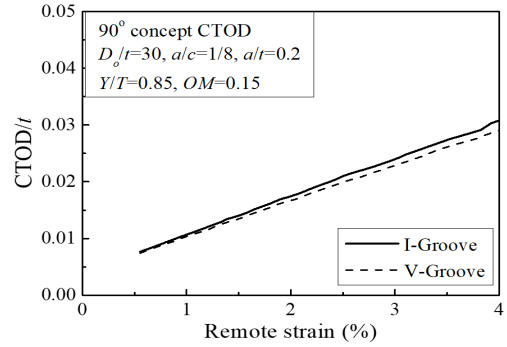
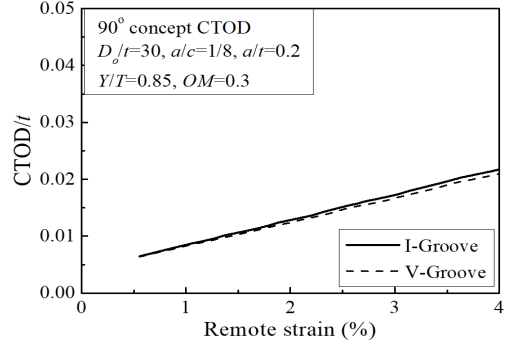


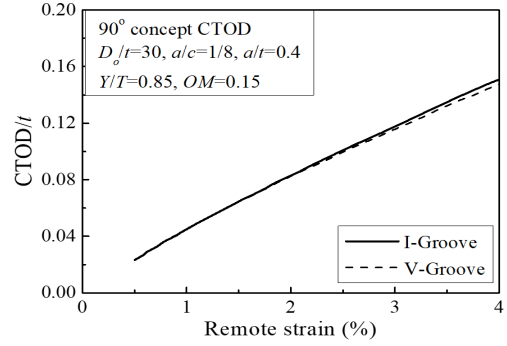
Fig. 8 Schematic of V-Groove girth welding configuration



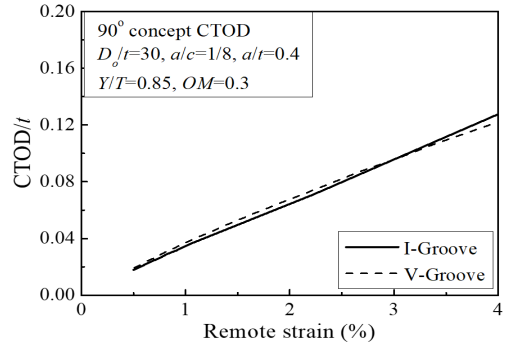
(a) $a/t=0.2$ with $OM=0.15$



(b) $a/t=0.2$ with $OM=0.3$



(c) $a/t=0.4$ with $OM=0.15$



(d) $a/t=0.4$ with $OM=0.3$

Fig. 9 Comparison of $CTOD_{90^\circ}$ for the different weld shape

Table 6 Geometric sizes of I-Groove and V-Groove weld

| $2w = 20.79$ mm | b (mm) | r (mm) |
|-----------------|----------|----------|
| I-Groove | 20.79 | 20.79 |
| V-Groove | 3 | 38.58 |

I-Groove 용접부 형상 정보를 Table 6에 정리하였다. Table 6에 나타난 바와 같이, 평균 용접부 폭($2w$)은 20.79 mm로 동일하게 적용하였다.

Fig. 9는 Table 6에 제시된 용접부 형상에 대한 CTOD_{90°} 선도를 나타낸 것이다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, I-Groove형상의 CTOD_{90°}가 V-Groove 형상보다 최대 6 % 크게 나타났다. 따라서 보수적인 평가를 위해 용접부의 형상을 V-Groove에서 I-Groove로 이상화 할 수 있으며, 본 논문에서 제안한 CTOD 및 J -적분의 공학적 계산식을 사용하여 보수적인 균열 평가가 가능하다고 판단된다.

4.2 J -적분과 CTOD의 비례계수 검토

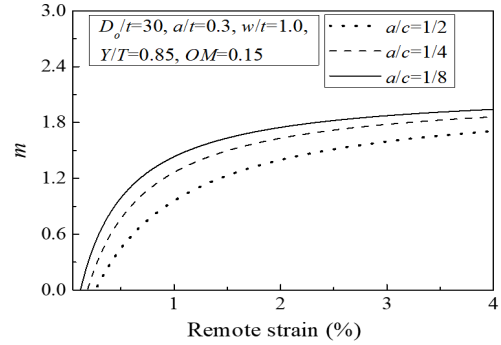
J -적분과 CTOD는 σ_y 와 무차원 상수인 m 을 통해 비례관계를 가지며, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{J/\sigma_y}{CTOD} \quad (7)$$

최근 연구에 따르면 m 은 J -적분과 CTOD의 비례관계를 나타낼 뿐 아니라, 균열 선단에서의 구속 상태를 나타내는 변수로 활용되고 있다⁽¹²⁾. 식 (7)에 본 연구에서 제시된 변형률 기반 J -적분 및 CTOD의 계산식인 식 (5)와 (6)을 대입하여, m 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{C_3 \varepsilon + C_4}{C_1 \varepsilon + C_2} \quad (8)$$

Fig. 10은 식 (8)과 Table 3, 5를 사용하여 계산한 원거리 변형률 및 균열 길이에 따른 m 을 대표적으로 나타낸 것이다. Fig. 10에 나타난 바와 같이, 원거리 변형률이 증가함에 따라서 m 의 증가가 점차 감소하며, 이러한 경향은 기존 연구문헌⁽¹³⁾과 동일하다. 또한 균열 길이가 증가할수록 m 은 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 균열 길이가 증가하면 균열 선단의 구속 상태가 높아지게 되므로, 이에 따라 m 이 증가하는 것으로 판단된다⁽¹²⁾.

**Fig. 10** The variations of m for the different a/c as a function of remote strain

5. 결론

본 연구에서는 축 방향 인장 변위가 작용하는 파이프라인의 용접부 중앙에 위치하는 외부 표면균열에 대한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 파이프라인 및 균열의 형상에 대한 J -적분 및 CTOD를 계산하였다. 또한 용접부 폭이 J -적분과 CTOD에 미치는 영향을 체계적으로 검토하여 원거리 변형률에 대한 J -적분 및 CTOD의 공학적 계산식을 각각 제시하였다.

추가적으로 I-Groove 및 V-Groove의 CTOD를 비교하여 용접부 형상의 영향을 검토함으로써, 균열 평가 시 용접부 형상을 I-Groove로 단순화할 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서 제시된 CTOD 및 J -적분 공학적 계산식은 다양한 용접부 형상의 균열 평가에 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 균열 선단에서의 구속 상태를 나타내는 m 의 계산에 본 논문에서 제시한 CTOD 및 J -적분 계산식의 계수를 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 보인 바와 같이 파이프라인의 용접부 균열 평가에는 고려되어야 할 설계 변수가 매우 다양하기 때문에 용접부 균열 평가에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 이러한 시간과 비용을 절약하기 위하여 상용되는 파이프라인에 대해 발생 가능한 균열이 고려된 CTOD 및 J -적분을 계산하였으며, 본 연구에서 제시된 CTOD 및 J -적분 계산식은 파이프라인의 용접부 균열에 대한 변형률 기반 평가에 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Wang, Y. Y., Liu, M., Long, X., Stephens, M., Petersen, R. and Gordon, R., 2011, "Validation and Documentation of Tensile Strain Limit Design Models for Pipelines," *Pipeline Research Council International, Inc.*, Houston, TX, *DTPH56-06-T000014*
- (2) Zhang, Y. M., Xiao, Z. M., Zhang, W. G. and Huang, Z. H., 2014, "Strain-Based CTOD Estimation Formulations for Fracture Assessment of Offshore Pipelines Subjected to Large Plastic Deformation," *Ocean Eng.*, Vol. 91, pp. 64-72.
- (3) Dake, Y., Sridhar, I., Zhongmin, X. and Kumar, S. B., 2012, "Fracture Capacity of Girth Welded Pipelines with 3D Surface Cracks Subjected to Biaxial Loading Conditions," *Int. J. Press. Vés. Pip.*, Vol. 92, pp. 115-126.
- (4) Wang, Y. Y., Liu, M., Song, Y., Stephens, M., Petersen, R. and Gordon, R., 2011, "Second Generation Models for Strain-Based Design," *Pipeline Research Council International, Inc.*, Houston, TX, *DTPH56-06-T000014*
- (5) Jang, Y. Y., Kang, J. Y., Huh, N. S., Kim, I. J., Kim, C. M. and Kim, Y. P., 2019, "Predictions of Tensile Strain Capacity for Strain-Based Pipelines with a Circumferential and Internal Surface Flaw," *Proc. of ASME 2019 OMAE Conference*, Glasgow, June. 9-14, OMAE2019-96480.
- (6) Liu, B., Liu, X. J. and Zhang, H., 2009, "Strain-Based Design Criteria of Pipelines," *J. Loss Prevent. Proc.*, Vol. 22(6), pp. 884-888.
- (7) Jia, P., Jing, H., Xu, L. and Han, Y., 2016, "A Modified Reference Strain Method for Engineering Critical Assessment of Reeled Pipelines," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 105, pp. 23-31.
- (8) Jayadevan, K. R., Østby, E. and Thaulow, C., 2004, "Fracture Response of Pipelines Subjected to Large Plastic Deformation Under Tension," *Int. J. Press. Vés. Pip.*, Vol. 81, No. 9, pp. 771-783.
- (9) Kumar, V., German, M. D. and Shih, C. F., 1983, "Elastic-Plastic and Fully Plastic Analysis of Crack Initiation, Stable Growth, and Instability in Flawed Cylinders," *In Elastic-Plastic Fracture: Second Symposium, Volume I—Inelastic Crack Analysis. ASTM International.*, West Conshohocken, January., 0-I-353.
- (10) McMeeking, R. and Parks, D. M., 1979, "On Criteria for J -Dominance of Crack-Tip Fields in Large-Scale Yielding," *In Elastic-plastic fracture. ASTM International.*, West Conshohocken, pp. 175-194.
- (11) Kang, J. Y., Jang, Y. Y., Huh, N. S., Kim, K. S. and Cho, W. Y., 2018, "Limit Strains of X70 Pipes with a Semi-Elliptical Crack Based on Initiation and Ductile Tearing Criteria," *Proc. of ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference*, Prague, Czech Republic, July. 15-20, PVP2018-84641.
- (12) Xiao, J. Y., Wang, G. Z., Tu, S. T. and Xuan, F. Z., 2020, "Engineering Estimation Method of Unified Constraint Parameters for Semi-Elliptical Surface Cracks in Plates," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 229, 106935.
- (13) Sarzosa, D. F., Souza, R. F. and Ruggieri, C., 2015, " J -CTOD Relations in Clamped SE(T) Fracture Specimens Including 3-D Stationary and Growth Analysis," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 147, pp. 331-354