

# 용접부 강도불균질을 고려한 원주방향관통균열 배관의 파괴역학 해석법

박보규<sup>†</sup>·오창균\*·김윤재\*·김영진\*\*·김종성\*\*\*·진태은\*\*\*

## The Analysis of Circumference Through-Wall Cracked Pipe Considering Weld Characteristic

Bo Gyu Park, Chang Kyun Oh, Yun Jae Kim, Young Jin Kim,  
Jong Sung Kim and Tae Eun Jin

**Key Words :** Strength mismatch(강도불균질), Reference stress method(참조응력법)

### Abstract

Defective components of interest include not only homogeneous components, but also components with weldments where tensile properties vary across the weldment. Noting that the region near the weldment is the most vulnerable place for crack initiation and subsequent growth, defect assessment methods for homogeneous structure. Moreover, weldment width and crack location also affects the deformation and fracture behavior of the welded joints. These weld characteristics can evaluate using plastic limit load. So in this paper, evaluate plastic limit load both full circumference part-throughwall cracked pipes and circumference through-wall cracked pipes considering weld characteristics. And using evaluate results, proposed J-integral and crack opening displacement(COD) estimate method based on reference stress method.

### 1. 서 론

원자력발전소 배관에 대한 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 해석을 위해서는 감지가능한 누설균열(detectable leakage crack)길이를 계산하고, 누설균열의 안정성을 파괴역학적으로 입증하여야 한다. 이를 위해서는 탄소성 파괴역학 매개변수인  $J$ -적분과 균열개구변위(Crack Opening Displacement; COD)를 정확하게 계산해야 한다. 현재 배관에 대

한 LBB 해석법에서는  $J$ -적분과 COD 를 계산하기 위하여 배관의 인장 물성치를 모재로 가정한다[1]. 그러나 실제 원자력 배관은 모재부와 용접부로 구성되어 있으며 일반적으로 모재부에 비해 용접부가 취약하므로 균열은 용접부에 발생할 가능성이 매우 큰 것으로 알려져 있다. 모재 물성치를 사용한 현재의 LBB 해석법은 보수적인 평가결과를 제시하며 용접부의 특성을 정확하게 고려할 수 없기에 부정확한 해석의 요인이 되고 있다. 특히 최근에는 그 동안 고려하지 못한 여러 불확실성의 영향을 상세해석을 통해 반영함으로써 LBB 해석 결과의 정확성을 향상시키고자 하는 노력이 진행 중이다. 용접부의 경우도 전체 배관을 모재로 가정하면  $J$ -적분이 크게 계산되어 LBB 해석 결과 보수적일 수 있으나, 용접부를 고려하게 되면 기존의 보수성을 개선하여 보다 정확한 해석이 수행될 수 있으며 이로 인해 LBB 적용 가능 범위가 넓어질 수 있다.

<sup>†</sup> 고려대학교 기계공학과  
E-mail : cabins78@hanmail.net  
TEL : (02)3290-3749 FAX : (02)926-9290

\* 고려대학교 기계공학과

\*\* 성균관대학교 기계공학과

\*\*\* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

모재 배관에 대한 균열 평가법은 20 여년 정도의 많은 연구를 통해 정립되어 있으나 용접부 균열의 경우는 그 영향이 매우 복잡하여 아직까지 체계적인 평가법이 제시되지 못하고 있다. 용접부의 특성 중 LBB 해석 결과에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자는 용접부 및 열영향부의 강도불균질(strength mismatch), 용접부의 폭(weld width), 균열의 위치(crack location), 잔류응력(residual stress) 등이 있다.

현재까지 진행된 연구는 시편에 대한 것[2,3]으로서 아직까지 배관에 대해서는 용접부를 특성을 고려한 평가가 수행된 적이 없다. 따라서, 용접부에 균열이 존재하는 경우에 대해 용접부의 특성을 고려한  $J$ -적분과 COD 를 계산할 수 있는 방법이 제시되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 용접부의 특성을 고려하여 용접부의 균열이 존재하는 배관의  $J$ -적분 및 COD 를 계산하는 것이다. 이를 위하여 용접부의 폭, 강도 불균질, 하중 형태 등의 영향을 유한요소 소성한계하중 해석을 수행하고, 각각의 경우에 대한 소성한계하중을 평가한다. 또한 평가된 소성한계하중을 이용하여 참조응력 개념기반의  $J$ -적분 및 COD 계산식을 제시하고자 한다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 참조응력법[4~6]

참조응력개념 기반의  $J$ -적분 및 COD 계산식은 배관 재료의 인장 특성 보유율에 따른 2 가지의 식으로 구성된다. 만약 재료의 응력-변형률 곡선이 있으면 옵션 2 의 식을 사용하며, 재료의 항복강도와 인장강도만을 보유하고 있으면 옵션 1 식을 사용한다.

#### 2.1.1 옵션 2 계산식

옵션 2 의  $J$ -적분 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (2.6)$$

여기서  $J_e$  는  $J$ -적분의 탄성 성분이며  $\varepsilon_{ref}$  는 참조응력에서 정의되는 변형률이다.  $L_r$  은 소성붕괴 또는 소성역을 성장 정도를 나타내는 매개변수로써 다음과 같이 정의된다.

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} = \frac{P}{P_o} = \frac{M}{M_o} \quad (2.7)$$

여기서,  $\sigma_{ref}$  는 참조응력이며,  $P$  와  $M$  은 작용 하중 및 작용 모멘트이며  $P_o$  와  $M_o$  는 참조하중으로 원주방향 관통균열이 존재하는 배관인 경우 한계 하중 및 한계 모멘트로 다음과 같이 정의된다.

$$P_L = 2R_m t \sigma_Y \left[ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left( \frac{1}{2} \sin \theta \right) \right] \quad (2.8)$$

$$M_L = 4R_m^2 t \sigma_Y \left[ \cos \left( \frac{\theta}{2} \right) - \frac{1}{2} \sin \theta \right] \quad (2.9)$$

옵션 2 의 COD 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{\delta}{\delta_e} = \begin{cases} \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} & \text{for } 0 \leq L_r \leq 1 \\ \left( \frac{\delta}{\delta_e} \right)_{L_r=1} (L_r)^{n_1-1} & \text{for } 1 < L_r \end{cases} \quad (2.10)$$

여기서,  $\delta_e$  는 COD 의 탄성 성분이며  $(\delta/\delta_e)_{L_r=1}$  은  $L_r = 1$  에서 정의되는  $(\delta/\delta_e)$  를 의미한다. 식 (10)에서 가공경화지수  $n_1$  은 다음의 식으로부터 구한다.

$$n_1 = \frac{\ln[(\varepsilon_{u,t} - \sigma_{u,t}/E)/0.002]}{\ln[\sigma_{u,t}/\sigma_Y]} \quad (2.11)$$

여기서,  $\sigma_{u,t}$  와  $\varepsilon_{u,t}$  는 진인장강도(true tensile strength)와 그때의 변형률을 의미한다.

#### 2.1.2 옵션 1 계산식

배관 재료의 인장 특성 가운데 항복강도와 인장강도만이 있다면 다음과 같은 하한계(lower bound) 곡선을 사용하여  $J$ -적분을 계산한다.

$$\frac{J}{J_e} = \left[ \frac{1}{(1-0.14L_r^2)(0.3+0.7\exp(-0.65L_r^6))} \right]^2 \quad (2.12)$$

옵션 1 의 COD 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{\delta}{\delta_e} = \begin{cases} 1 + \frac{1}{2} L_r^2 & \text{for } L_r < 1 \\ \frac{3}{2} (L_r)^{n_2-1} & \text{for } L_r > 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

여기서,  $n_2$  는 항복강도와 인장강도의 비  $(\sigma_Y/\sigma_u)$  를 이용하여 다음의 식으로 구한다.

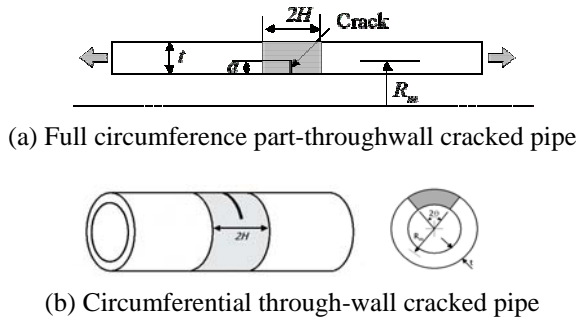


Fig. 1 Schematic illustration of (a) full circumference part-throughwall cracked pipe (b) circumferential through-wall cracked pipe.

$$\frac{1}{n_2} = 0.629 - 1.536(\sigma_Y/\sigma_u) + 1.723(\sigma_Y/\sigma_u)^2 - 0.814(\sigma_Y/\sigma_u)^3 \quad (2.14)$$

식 (2.13)의 첫 번째 식은 식 (2.10)의 첫 번째 식을 선형 탄성으로 고려한 경우와 동일하며 옵션 1을 사용한 해석 결과가 옵션 2를 사용한 경우보다 항상 보수적이다. 즉, 옵션 1을 사용하면 옵션 2를 사용한 경우보다  $J$ -적분값이 커지며, COD 값은 작아진다.

### 3. 용접부를 고려한 소성한계하중 평가

일반적으로 용접부가 존재하는 배관의 평가는 배관의 물성치를 균일하게 가정하고 평가를 수행한다[6,7]. 그러나 이런 평가방법은 용접부의 특성을 고려하지 않은 것으로 보수적인 평가결과를 제시한다. 따라서 상세한 평가를 하기 위해서는 용접부의 특성을 고려하여야 한다.

#### 3.1 해석 대상

Fig.1은 본 논문에서 고려한 해석대상을 나타낸 것이다. 균열의 위치는 용접부 중앙에 발생한 경우를 고려하였으며, 배관은 원주방향 표면 균열 배관(Fig.1(a))과 원주방향 관통 균열 배관(Fig.1(b))를 고려하였다. 용접부의 강도 불균질비(Mismatch Factor; MF)는 모재의 항복강도  $\sigma_{YB}$ 와 용접부의 항복강도  $\sigma_{YW}$ 의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$MF \equiv \frac{\sigma_{YW}}{\sigma_{YB}} \quad (3.1)$$

$MF > 1$ 인 경우를 over-matching,  $MF < 1$ 인 경우를 under-matching으로 나타낼 수 있다. 또한 용접부의 폭은 배관의 리가먼트를 용접부의 폭으로 나

Table 1 Geometry of full circumference part-throughwall cracked pipe

$t$	$a/t$	$R_m/t$	$H$	MF	$(t-a)/H$
16.95	0.75	10	22.48	2	0.19
16.95	0.75	10	11.24		0.38
33.91	0.5	10	22.48	1.5	0.75
33.91	0.5	10	11.24		1.51
33.91	0.5	10	3.75	0.5	4.53

Table 2 Geomtry of circumferential through-wall cracked pipe

$t$	$\theta/\pi$	$R_m/t$	$H$	MF	$R(\pi - \theta)/H$
16.95	0.125	10	11.24	2	41.47
16.95	0.125	10	22.48		20.73
16.95	0.25	5	22.48	1.5	8.89
16.95	0.5	5	22.48		5.92
16.95	0.75	5	22.48	0.75	2.96
5.65	0.5	4	22.48		1.58
5.65	0.75	4	22.48	0.5	0.79

눠서 다음과 같이 나타내었다.

$$\Psi = (t - a)/h \quad (3.2a)$$

$$\Psi = R_m(\pi - \theta)/h \quad (3.2b)$$

식 (3.2a)는 원주방향 표면균열배관, 식 (3.2b)는 원주방향 관통균열 배관의 경우를 나타낸다. 배관의 크기, 균열 길이, 배관의 두께는 여러가지  $\Psi$  값을 고려하여 변화시켰다. Table 3.1은 원주방향 표면 균열배관에 대한, Table 3.2는 원주방향 관통 균열 배관의 해석 대상을 정리하여 나타낸 것이다.

### 3.2 유한요소 모델 및 해석

#### 3.2.1 해석 대상

Fig.2는 본 연구에서 사용한 대표적인 유한요소 모델을 나타낸 것이다. Fig.2(a)는 원주방향 표면 균열 배관의 대표적인 유한요소 모델을 나타내었다.

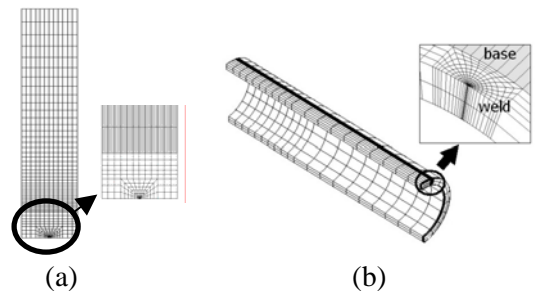


Fig. 2 Typical FE mesh employed in present work. (a) full circumference part-throughwall cracked pipe (b) circumferential through-wall cracked pipe.

사용된 요소는 축대칭 요소(8-node axisymmetry reduced integration element: CAX8R)이다. Fig.2(b)는 원주방향 관통균열배관의 유한요소 모델을 나타내었다. 사용된 요소는 20 절점 등계수사각주요소 (20-node isoparametric brick reduced integration element: C3D20R)이다. 균열은 용접부 중 앙에 존재하므로 대칭성을 고려하여 원주방향 표면 균열 배관의 경우 1/2 만을 원주방향 관통균열 배관의 경우 1/4 만을 모델링을 하였다. 유한요소 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4 를 사용하였다. 소성한계해석에 사용된 재료는 탄성-완전소성(elastic-perfectly plastic) 재료로 가정하며, 소성한계하중 해석을 위하여 ABAQUS 프로그램에서 제공하는 RIKS 옵션을 사용하였다[8].

3.3 유한요소 모델의 검증

사용된 유한요소 모델의 검증을 위하여 균질배관인 경우에 대한 소성한계하중 해석을 수행하고, 알려져 있는 한계하중 식과 비교하였다. 원주방향 표면 균열배관에 인장하중이 작용하는 경우는 다음의 식과 비교를 통해 결과를 검증하였다[9].

$$P_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \pi [R_0^2 - (R_i + a)^2] \quad (3.3)$$

원주방향 관통균열 배관의 경우 인장하중은 식 (2.8)과 굽힘하중은 식 (2.9)와 비교를 통해 결과를 검증하였다.

Fig.3 은 각각의 하중상태에 대하여 한계하중 식과 비교한 결과를 나타낸 것으로 모든 경우에 대

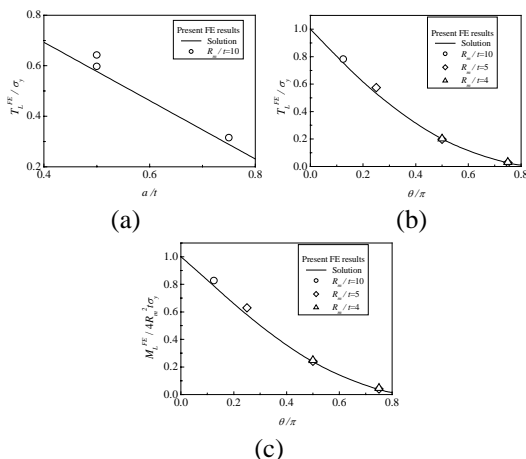


Fig. 3 Comparison of the FE limit load with limit load solution, (a) full circumference part-throughwall cracked pipe under tension. (b) circumference through-wall cracked pipe under tension (c) circumference through-wall cracked pipe under bending

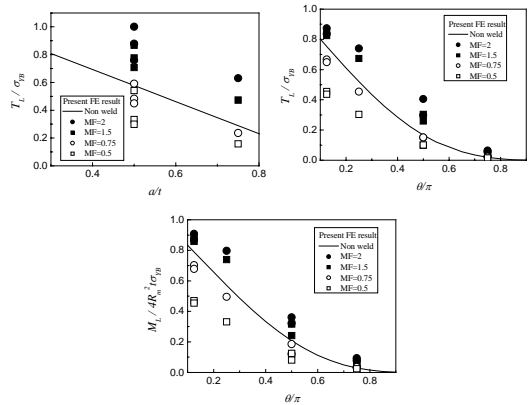
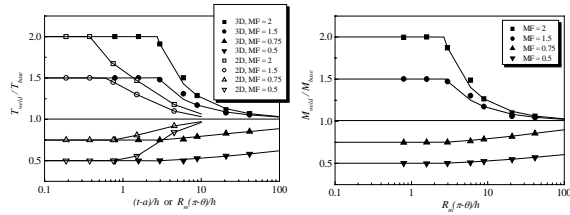


Fig. 4 Comparison of the mismatch limit load with homogeneous limit load. (a) full circumference part-throughwall cracked pipe under tension. (b) circumference through-wall cracked pipe under tension (c) circumference through-wall cracked pipe under bending

하여 한계하중 식과 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 사용된 유한요소 모델은 타당한 것으로 판단된다.

3.4 소성한계하중 해석 결과

Fig. 3.7~11 은 유한요소해석으로 구한 소성한계 하중을 나타낸 것이다. Fig. 3.7~9 는 소성한계하중을 균열길이와 유한요소해석으로 구한 하중을 균질배관의 하중으로 무차원화 하여 나타낸 그래프이다. 소성한계하중은 over-matching 인 경우 모재의 한계하중 보다 크게, under-matching 인 경우 모재의 한계하중 보다 작게 평가되었다. 인장하중을 받는 원주방향 관통균열 배관과 원주방향 표면 균열 배관의 경우 원주방향 균열배관이 강도불균질비의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. Fig. 3.10 은 용접부의 특성을 나타내는 변수  $\Psi$  에 대하여 용접부를 고려한 소성한계하중을 균질배관의 한계하중으로 무차원화하여 나타낸 결과이다. 원주방향 관통균열 배관에서 인장하중과 굽힘모멘트의 경우 용접부 강도불균질비와 용접폭이 배관의 한계하중에 미치는 영향은 비슷함을 알 수 있다. Over-matching 인 경우  $\Psi$  가 커질수록 강도불균질비의 영향은 작아지며 실제 배관의 경우  $\Psi$  값이 일반적으로 20~40 정도의 값을 가지므로 용접부 중앙에 원주방향 관통균열이 존재할 때 용접부 특성이 J-적분에 미치는 영향은 미미하다는 것을 알 수 있다. 그러나 under-matching 인 경우  $\Psi$  가 소성한계하중에 미치는 영향은 미미하며 용접부 균열의 J-적분은 용접부 강도불균질비에 의해 결정



**Fig. 5** Comparison of the proposed mismatch yield load solutions for weld center cracks both full circumference part-throughwall cracked pipes and circumference through-wall cracked pipes

된다. 원주방향 표면 균열의 경우  $\Psi$ 가 증가할수록 over-matching 과 under-matching 모두 강도불균질의 영향이 작아지나, 실제 배관의 경우  $\Psi$ 는 0.1~0.8 정도의 값을 가지므로 용접부의 강도불균질비가 배관의 소성한계하중에 미치는 영향은 원주방향 관통균열배관에 비해 크을 알 수 있다.  $J$ -적분 또한 용접부 강도불균질비에 의해 결정된다

#### 4. 참조응력법을 이용한 $J$ -적분 및 COD 계산식

##### 4.1 실배관 데이터를 이용한 $J$ -적분 및 COD 평가

참조응력법을 이용하여  $J$ -적분 및 COD 계산식을 제시하기 위해서는 정확한 참조하중의 정의가 필요하다. 이를 위해서 우선 실배관 데이터를 이용하여 전장에서 구한 소성한계하중의 검증이 수행되어야 한다. 소성한계하중의 검증은 실제 배관의 형상을 이용하여  $J$ -적분 및 COD의 평가를 수행하였다.

##### 4.1.1 해석 대상

Table는 해석대상을 정리하여 나타낸 것이다. 균열의 위치, 균열 길이, 강도불균질 비는 전장에서 고려한 바와 같으며, 배관의 한계하중은 Fig. 5의 결과를 사용하였다.

##### 4.1.2 유한요소 모델 및 해석

유한요소 모델은 3.21에서 사용한 유한요소 모델과 동일한 모델을 사용하였으며, 해석에 사용된 재료는 Ramberg-Osgood 관계를 만족하는 재료로서 가공경화지수  $n$ 은 5,  $\alpha$ 는 1로 가정하였다. 유한요소 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4를 사용하였다.

##### 4.1.3 해석 결과

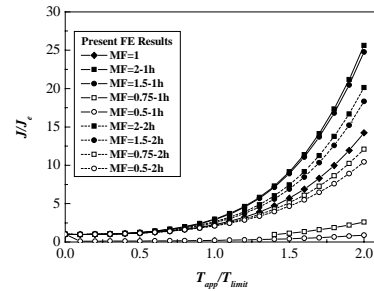
Fig. 6은 원주방향 표면 균열 배관의  $J$ -적분 계산

**Table 4.1** Geometry of full circumference part-throughwall cracked pipe

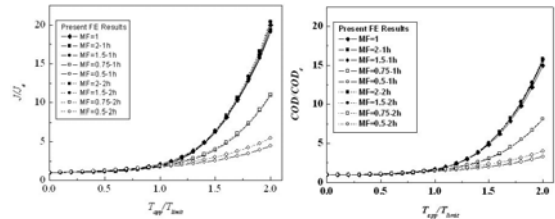
$R_m/t$	10	$E$	190 GPa
$T$	16.95238	$\nu$	0.3
$a/t$	0.25	$H$	22.475, 45.3
$\sigma_y$	165 MPa	MF	2, 1.5, 1, 0.75, 0.5

**Table 4.2** Geometry of circumference through-wall cracked pipe

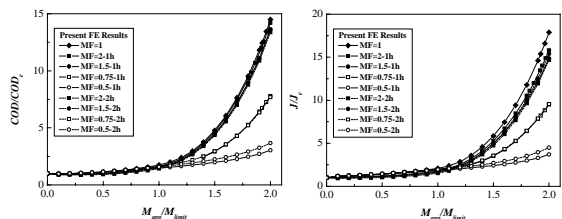
$R_m/t$	10	$E$	190 GPa
$t$	16.95238	$\nu$	0.3
$\theta/\pi$	0.25	$H$	22.475, 45.3
$\sigma_y$	165 MPa	MF	2, 1.5, 1, 0.75, 0.5



**Fig. 6** Comparison of the FE  $J$ -integral results with various mismatch factor for full circumference part-throughwall cracked pipes,  $R_m/t=10$ ,  $a/t=0.5$



**Fig. 7** Comparison of the FE results with various mismatch factor for full circumference through-wall cracked pipes; under axial tension,  $R_m/t=10$ ,  $\theta/\pi=0.25$  (a)  $J$ -integral and (b) COD



**Fig. 8** Comparison of the FE results with various mismatch factor for full circumference through-wall cracked pipes; under bending,  $R_m/t=10$ ,  $\theta/\pi=0.25$  (a)  $J$ -integral and (b) COD

결과를 나타낸 그래프로서 균질배관의  $J$ -적분에

비해 over-matching 인 경우는  $J$ -적분결과가 보수적으로 계산되며, under-matching 인 경우는  $J$ -적분결과가 비보수적으로 계산이 되었다. Fig. 7,8 은 원주방향 관통균열배관의  $J$ -적분 및 COD 계산 결과를 나타낸 것으로 over-matching 인 경우 균질배관의  $J$ -적분이나 COD 의 결과와 매우 비슷하게 나타났다. 그러나 under-matching 인 경우는 원주방향 표면 균열 배관의 경우와 비슷하게 모두 균질 배관의  $J$ -적분결과 보다 작게 계산되는 비보수적인 평가가 되었다. 따라서 용접부에 균열이 존재하는 배관의 건전성 평가 시 over-matching 인 배관의 경우 용접부의 특성이 배관의 건전성 평가에 미치는 영향이 작음을 확인 할 수 있다. 그러나 under-matching 인 경우 용접부의 특성이 배관의 건전성에 미치는 영향이 크음을 알 수 있으며, 용접부의 강도불균질 비가 배관의 건전성평가에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4.2 참조응력 기반의  $J$ -적분 및 COD 계산식

참조응력 기반의  $J$ -적분 및 COD 계산식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\delta}{\delta_e} = \frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (4.1)$$

여기서,  $J_e$  는  $J$ -적분의 탄성성분,  $\delta_e$  는 COD 의 탄성성분,  $\varepsilon_{ref}$  는 참조응력으로 정의되는 변형률이다.  $J_e$  와  $\delta_e$  는 Zahoor 핸드북 등에 이미 알려져 있는 식이며,  $\varepsilon_{ref}$  는 참조응력으로부터 계산 가능하므로  $J$ -적분 및 COD 는 참조응력의 정의로부터 계산을 할 수 있다. 참조응력은 3 장에서 구한 소성한계하중을 사용할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ref} = \frac{M}{M_{ref}} \sigma_y = \frac{T}{T_{ref}} \sigma_y \quad (4.2)$$

여기서,  $M$  과  $T$  는 각각 균질 배관의 한계모멘트와 한계하중을 나타내며,  $\sigma_y$  는 배관의 항복강도이다.

5. 결론

본 연구에서는 배관의 용접부 중앙에 균열이 존재하는 경우에 대하여 여러가지 강도불균질을 고려한 균열 평가를 수행하였다.

(1) 용접부의 특성을 고려한 소성한계하중을 평가하였고, 이를 실패관에 적용하여 검증하였다.

(2) 용접부의 특성은 over-matching 인 배관에 대해서는 평면 변형률 상태를 나타내며 배관의 건전성 평가에 미치는 영향이 작음을 알 수 있었다.

(3) 용접부의 특성은 under-matching 인 배관에 대해서는 원주방향 관통균열배관은 평면 응력 상태를 원주방향 표면 균열 배관은 평면 변형률 상태를 나타내며, 특히 배관의 강도불균질비가 배관의 건전성평가에 있어 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

(4) 소성한계하중을 사용하여 참조응력 기반의  $J$ -적분 및 COD 계산식을 제시하였다.

참고문헌

- [1] 허남수, 이철형, 김영진, 석창성, 표창률, 1999, “원전배관의 LBB적용을 위한 간략설계기법의 개발,” 한국산업안전학회 논문집, 제 14권, 제 2 호, pp.32-41
- [2] Yun-Jae Kim, K.H. Schwalbe, 2001, “Mismatch Effect on Plastic Yield Loads in Idealised Weldments I – Weld Center Cracks,” Engineering Fracture Mechanics, Vol.68, pp.163-182
- [3] Yun-Jae Kim, K.H. Schwalbe, 2001, “Mismatch Effect on Plastic Yield Loads in Idealised Weldments II – Heat Affected Zone Cracks,” Engineering Fracture Mechanics, Vol.68, pp.183-199
- [4] 김윤재, 허남수, 김영진, 2001, “원주방향 관통균열이 존재하는 배관의  $J$ -적분 및 COD 계산을 위한 새로운 공학적 계산식,” 대한기계학회 논문집 A권, 제 25권, 제 3호, pp.548-553
- [5] Yun-Jae Kim, Peter J.Budden, 2002, “Reference Stress Approximations for J and COD of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes,” International Journal of Fracture, Vol.116, pp.195-218
- [6] 김윤재, 허남수, 김영진, , 2001, “파손평가도를 이용한 용접구조물의 건전성 평가법,” 대한용접학회 논문집, 제 19권, 제 5권, pp.18-25
- [7] 허남수, 김영진, 표창률, 유영준, “유한요소 해석모델이 원자력 배관의 건전성 평가에 미치는 영향,” 한국산업안전학회지, 제 15권, 제 2호, pp.51-58, 2000
- [8] “ABAQUS User’s manual,” Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC., 1999
- [9] Zahoor, A., 1991, “Ductile Fracture Handbook,” Novotech Corp.