

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.11.1187

## 구형 산소용기 내 표면균열에 대한 수치파괴역학 평가

조두호\* · 김종민\* · 장윤석\* · 최재봉† · 김영진\* · 한상인\*\*

(2008년 10월 14일 접수, 2009년 10월 7일 수정, 2009년 10월 8일 심사완료)

### Numerical Fracture Mechanics Evaluation on Surface Cracks in a Spherical Oxygen Holder

Doo-Ho Cho, Jong-Min Kim, Yoon-Suk Chang, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim and Sang-In Han

**Key Words :** CDFD Method(균열진전력선도법), DPFAD(전변형이론 파손평가선도), FAD(파손평가선도), Oxygen Holder(산소용기), Residual Stress(잔류응력) *J/T* Method(*J/T* 평가법)

#### Abstract

During the last decade, possibility of flaw occurrences has been rapidly increased world-widely as the increase of operating times of petro-chemical facilities. For instance, from a recent in-service inspection, three different sized surface cracks were detected in welding parts of a spherical oxygen holder in Korea. While API579 code provides corresponding engineering assessment procedures to determine crack driving forces, in the present work, numerical analyses are carried out for the cracked oxygen holder to investigate effects of complex geometry, analysis model and residual stress. With regard to the detailed finite element analysis, stress intensity factors are determined from both the full three-dimensional model and equivalent plate model. Also, as an alternative, stress intensity factors are calculated for equivalent plate model by employing the noted influence stress function technique. Finally, parametric structural integrity evaluation of the cracked oxygen holder is conducted in use of failure assessment diagram method, *J/T* method and DPFAD method. Effects of the geometry and so forth are examined and key findings from the simulations are fully discussed, which enables to determine practical safety margins of spherical components containing a defect.

#### 기호설명

$a$  : 균열길이  
 $c$  : 균열반길이  
 $E$  : 탄성계수  
 $F$  : 응력확대계수와 평면변형률 파괴인성치의 비를 나타내는 무차원계수  
 $K_{IC}$  : 평면변형률 파괴인성치  
 $K_{IP}$  : 1 차 응력에 의한 응력확대계수  
 $K_{IS}$  : 2 차 응력에 의한 응력확대계수  
 $K_r$  : 응력확대계수비  
 $K_r'$  : 소성영향을 고려한 응력확대계수비

$L_r$  : 소성붕괴응력비  
 $n$  : 가공경화지수(R-O parameter)  
 $P_{ref}$  : 참조하중  
 $R_i$  : 구형 산소용기의 내반경  
 $R_o$  : 구형 산소용기의 외반경  
 $S_r'$  : 소성영향을 고려한 소성붕괴응력비  
 $t$  : 구형 산소용기의 두께  
 $\alpha$  : 항복 오프셋(R-O parameter)  
 $\theta$  : 균열반각  
 $v$  : 푸아송비  
 $\sigma_i^r$  : 내표면의 잔류응력  
 $\sigma_o^r$  : 외표면의 잔류응력  
 $\sigma_r$  : 구형 형상에서 두께방향의 잔류응력  
 $\sigma_t$  : 인장강도  
 $\sigma_y$  : 항복강도

† 책임저자, 성균관대학교 기계공학부  
 E-mail: boong33@skku.edu  
 TEL: (031)290-7458 FAX: (031)290-5276

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\* 회원, 한국 가스안전연구원 설비연구팀

1. 서 론

석유화학 설비는 굴착장비에 의한 타격, 지반침하, 지진 등의 외부요인과 야금학적 결함, 스팟(spot), 개재물 등의 내부요인에 의해 손상될 수 있다. 1970년대 이후 급속히 활성화된 국내 설비의 경우 구조물의 유지보수를 위해 주기적인 가동중검사(in-service inspection) 및 평가, 체계적인 관리를 수행하고 있음에도 불구하고 최근 노후화에 따른 결함 발생빈도가 점차 높아지고 있는 실정이다. 가동중검사 시 발견되는 결함의 유형은 평면형 결함인 균열과 체적형 결함인 감육 등으로 다양하며, 특히 균열은 구조물의 안전성을 현저히 저해시키고 경제적으로 막대한 피해를 발생시킬 수 있으므로 상세 건전성 평가가 요구된다<sup>(1)</sup>. 이와 더불어 대규모 석유화학 설비의 특성상 필연적으로 용접부를 포함하게 되므로, 정확한 건전성평가를 위해서는 용접에 의한 잔류응력(residual stress)의 영향을 반영하는 것이 필요하다. 압력용기를 포함하는 구조물의 건전성 및 사용적합성(fitness-for-service) 평가를 위해 파손평가선도(FAD; Failure Assessment Diagram) 및 전변형이론 파손평가선도(DPFAD; Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram) 등이 널리 사용되고 있다. 그러나 파손평가선도를 이용한 건전성평가 사례의 대부분은 천연가스배관<sup>(1)</sup>과 원자력 배관<sup>(2-3)</sup>에 집중된 바 있으며, 구형 압력용기의 구조 건전성평가와 관련된 연구결과는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 먼저 원주방향 표면균열이 존재하는 구형 산소용기(oxygen holder)에 대해 유한요소해석을 수행하고, API(American Petroleum Institute) 코드에 제시된 식을 이용하여 잔류응력을 고려한 파손평가선도를 작성한 후 선형탄성 파괴역학 평가를 수행하고자 한다. 또한, 유한요소해석 시 3차원 구형 산소용기 모델의 작성 및 해석 시간을 단축하기 위해 평판 형태의 등가 유한요소해석모델을 제시하고자 한다. 등가 유한요소해석 모델의 타당성 검증을 위해 형상비에 따른 민감도분석을 수행한 후 3차원 구형 산소용기 모델과 등가 유한요소해석모델의 응력확대계수(SIF; Stress Intensity Factor) 계산결과를 비교하는 방식을 취한다. 그리고 검증된 등가 유한요소해석모델을 이용하여 탄소성 유한요소해석을 수행한 후, 최대하중 예측<sup>(4)</sup> 및 DPFAD 작성을 통해 탄소성 파괴역학 평가<sup>(5)</sup>를 수행한다. 이러한 절차를 통해 최종적으로는 표면균열이 내재하는 구형 산소용기에 대해 선형탄성 및 탄소성 파괴역학 특성을 고려한 구조건전성 평가를 수행한다.

Table 1 Detected crack shapes in an oxygen holder

Case	a(mm)	2c(mm)	a/t	a/2c
1	4.5	35	0.110	0.128
2	9.9	37.3	0.240	0.265
3	14.2	100	0.340	0.142

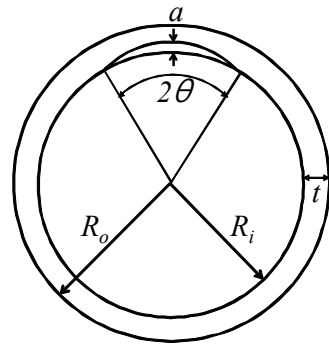


Fig. 1 Schematic illustration of an oxygen holder

2. 산소용기의 관한 선형탄성 파괴역학 해석

Fig. 1은 국내에서 사용중인 구형 산소용기의 단면 형상을 나타낸 것으로서 산소용기의 외반경( $R_o$ ), 내 반경( $R_i$ ) 그리고 두께( $t$ )는 각각 7,000mm, 6,960mm 및 40mm 이다. 산소용기는 SA516 Gr.70 탄소강으로 제작되었으며, 해당 탄성계수( $E$ )는 191GPa, 푸아송비( $\nu$ )는 0.29 이다. 작용하중 형태는 내압이며, 본 해석에서는 산소용기의 내벽에 실제 운전조건과 동일한 2.45MPa 를 사용하였다. 가동중검사를 통해 발견된 산소용기 내 3 개의 원주방향 표면균열을 실제 위치와 동일한 구형 중앙부에 위치시켰으며, 각각의 형상비는 Table 1에 정리하였다.

2.1 유한요소해석 모델

Fig. 2는 해석에 사용된 구형 산소용기의 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로써, X, Y, Z 축 각각에 대한 대칭성을 고려하여 전체의 1/8 만을 모델링하였다. 유한요소해석에는 범용 프로그램인 ABAQUS<sup>(6)</sup>를 사용하였고, 요소 형태로는 20절점 등사각주 요소(20-node isoparametric quadratic brick element; C3D20R)를 채택하였으며, 탄성특이성(elastic crack-tip singularity)을 모사하기 위해 요소의 중간절점을 균열선단의 1/4 지점으로 위치시켰다. 또한 균열면(crack front) 임의의 점에서  $J$ -적분 예측결과를 비교하기 위해 최심점(deepest point) 뿐만 아니라 균열면을 따라  $J$ -적분 값을 계산하였으

며, 이를 위해 5 개의 적분경로를 설정하였다.

탄성 영역에서 응력확대계수  $K$  는  $J$ -적분값과 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$K = \sqrt{EJ} \quad (1)$$

본 연구에서는 식 (1)을 사용하여 유한요소해석으로부터 얻은  $J$ -적분값을  $K$  값으로 환산하였으며, 3 차원 구형 산소용기 모델의 타당성 검토를 위하여 API579<sup>(7)</sup>에 제시된 KSSCCE1 및 KSSCCE2 를 이용한 계산결과와 비교하였다. 여기서 KSSCCE1 은 단순히 내압을 입력변수로 활용하고, KSSCCE2 는 유한요소해석으로 구한 응력분포를 이용하여 보다 정확하게 응력확대계수를 계산하는 방법이다. Fig. 3(a)는 Case 1 인 경우의 해석결과를 나타낸 것으로써, 횡축은 균열선단에서의 위치를 무차원화 한 값( $\theta/\pi$ )이고 종축은 응력확대계수를 SA 516 Gr.70 강 of 평면변형을 파괴인성치의 비로 무차원화한 값( $F=K/K_{IC}$ )을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 Case 1 인 경우의 유한요소해석 및 API579 에 수록된 공학식을 통해 계산된 각각의 응력확대계수들은 전 균열면에 걸쳐 최대 5% 이내의 차이로 잘 일치하였다. 따라서 구형 산소용기의 3 차원 전체 모델을 건전성평가에 사용하는데 무리가 없는 것으로 판단된다.

2.2 해석결과

Fig. 3은 Table 1에 제시한 3가지 표면균열이 존재하는 3차원 구형 산소용기모델에 대한 유한요소해석 결과와 API579 KSSCCE1 및 KSSCCE2에 따른 결과를 비교한 것이다. 무차원계수  $F$  값은 3가지 균열 모두 표면근처( $\theta \approx 0^\circ$ )에서 최소값을 보였으며 최심점( $\theta = 90^\circ$ )에서 가장 큰 값을 나타내었다. 다만 Case 2의 경우 반원 형태의 균열 형상을 가지고 있기 때문에 최심점과 표면점에서의 응력확대계수 차이가 미미한 것으로 생각된다.

두께비의 영향 측면에서는,  $a/t$ 가 증가할수록 구조물의 하중 지지능력이 감소되어 최심점에서의  $F$  값이 증가하였다. 가장 취약한 형태인 Case 3의 경우 API579에 제시된 공학식을 기반으로 계산한 응력확대계수와 유한요소해석으로 구한 결과 사이에 최대 10%의 차이가 발생하였으며, 전체적으로 KSSCCE2 를 사용하였을 때 KSSCCE1의 결과보다 보수적인 결과를 얻었다. 아울러 예상하였던 바와 같이 구형 산소용기 모델을 이용한 3차원 상세 유한요소해석 결과에 비해 산업계에서 널리 사용되고 있는 API579 식을 이용한 해석결과는 다소 보수적인 값을 제시함을 확인하였으나, 그 차이는 3가지 경우의 평균 6% 정도로 크지 않았다.

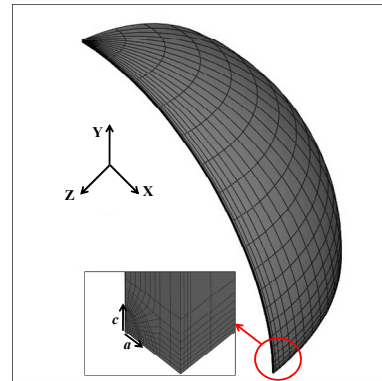
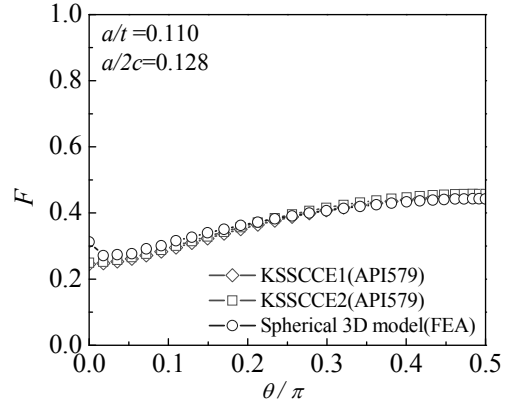
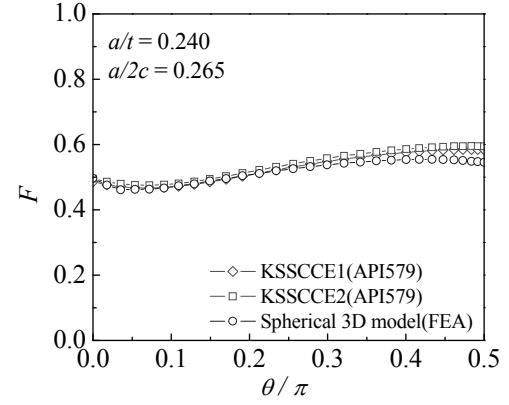


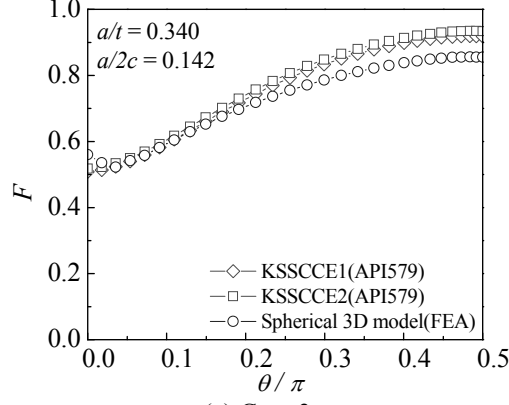
Fig. 2 1/8 FE mesh of an oxygen holder



(a) Case 1



(b) Case 2



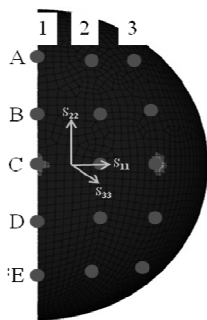
(c) Case 3

Fig. 3 Comparison of normalized SIFs obtained from FEA(Spherical 3D model) and API code

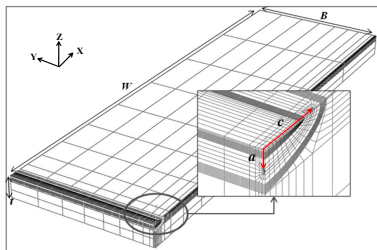
**Table 2** Structural analysis results of an oxygen holder

Point	1			2			3		
	S <sub>11</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>33</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>33</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>33</sub>
A	213	126	79	186	157	66	217	135	43
B	217	183	11	179	204	41	224	195	4.2
C	432	436	19	174	218	30	432	437	20
D	216	190	26	177	208	39	224	191	4.0
E	213	126	90	184	159	59	212	114	40

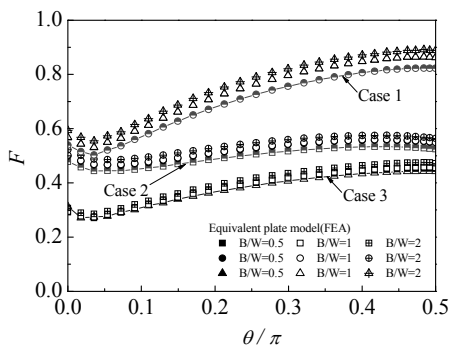
Unit : MPa



**Fig. 4** Stress points for determining the load condition of equivalent plate model



**Fig. 5** FE mesh for equivalent plate model



**Fig. 6** Effect of B/W on normalized SIFs

### 3. 등가 유한요소모델을 이용한 선형탄성 파괴역학 해석

전술한 3차원 구형 산소용기 모델을 작성하고 해석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 모델 작성과 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위한

방법의 하나로 본 연구에서는 구형 산소용기가 여러 개의 평판을 잇대어 제작되는 점에 착안하여 평판의 형상을 갖는 등가 유한요소모델을 제안하고자 한다.

등가 유한요소모델의 형상치수는 민감도분석을 통해 구형 산소용기에 대한 유한요소해석 결과와 가장 잘 일치하는 모델로 결정하고자 하며, 이를 위한 유한요소해석에 사용된 재료물성치는 2장에서 제시한 값과 동일하다.

한편 등가 유한요소모델의 하중조건을 결정하기 위하여 구형 산소용기에 대한 응력해석을 수행하였다. Table 2는 해석결과를 정리한 것으로써, 각각의 계산 위치는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 최종적으로 경계조건에 의한 영향이 가장 적고 균열이 존재하는 산소용기 중심부에 해당하는 위치(C, 2)에서의 원주방향 및 자오선 방향 응력해석 결과를 등가 유한요소모델의 하중조건으로 결정하였다. 이는 실제 구형 산소용기에 대한 가동중검사를 통해 균열이 발견된 부위와 일치한다. 또한 발견된 균열이 판재간 용접부에서 발견되었음을 감안하여 식 (2)에 따른 용접부 잔류응력의 영향을 고려하였으며, 검증된 등가 유한요소모델을 이용한 선형탄성 파괴역학 해석을 수행하였다.

$$\sigma_r(x/t) = \sigma_o + \sigma_1(x/t) + \sigma_2(x/t)^2 \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_o = \sigma_i^r$

$$\sigma_1 = -\sigma_o^r + 0.4(\sigma_i^r + \sigma_o^r) - 3\sigma_i^r$$

$$\sigma_2 = 2\sigma_o^r - 0.4(\sigma_i^r + \sigma_o^r) + 2\sigma_i^r$$

Fig. 5는 대표적인 등가 유한요소모델을 나타내며, X축 및 Y축의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4로 모델링하였다. 형상치수를 결정하기 위하여 Fig. 6에서와 같이 두께(t)를 고정한 후 총 3가지 균열 형상에 대하여 평판의 폭(B)과 너비(W)의 비를 각각 B/W=0.5, 1, 2로 변화시키면서 유한요소해석을 수행하였으며, 각 형상의 균열선단에서의 F 값을 3차원 구형 산소용기모델의 유한요소해석으로부터 얻은 결과와 비교하였다. B/W=2인 경우 구형 산소용기 모델의 유한요소해석결과와 차이가 크게 나타났으나 B/W=0.5인 경우 등가 유한요소모델의 결과와 가장 잘 일치하였다. 결정된 폭과 너비의 비를 이용하여 최종적인 치수를 결정하기 위해 B/W를 0.5로 고정하고 너비를 총 3가지로 변화시켜 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 이 때, W/R=0.012인 경우 균열길이가 증가할수록 구형 산소용기의 유한요소 해석결과와 차이가 증가함을 확인하였고, W/R=0.122인 경우 3차원 구형 산소용기 모델의 유한요소해석결과와 차이가 작음을 확인하였다. 따라서 등가 유한요소모델의 최종치

수는 구형 산소용기의 유한요소해석 결과와 가장 유사한  $W=848\text{mm}, B=424\text{mm}$  인 경우로 결정하였다.

3.1 등가 유한요소해석

최종 결정된 등가 유한요소모델의 형상 및 하중 조건을 고려하여 2.1절의 절차와 동일하게 총 3가지의 균열형상에 대해 해석을 수행하였다. 타당성 검증을 위해 2.2절에서 얻은 3차원 구형 산소용기 모델의 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 등가 유한요소모델을 이용한 해석결과는 3차원 구형 산소용기의 탄성해석 결과에 비해 다소 보수적이며, 각 균열선단에서 최대 3% 이내의 차이를 보였다. 이를 통해 해석에 따른 비용 및 시간의 감소를 고려할 때, 등가 유한요소해석 방법이 제한적인 범위에서 이용 가능하다고 판단하였다. 따라서 이후 수행된 유한요소 해석의 경우 등가 유한요소해석 방법을 이용하여 해석을 수행하였다.

3.2 잔류응력을 고려한 응력확대계수 계산

균열이 용접부에 위치함에 따라 구조물의 건전성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 식 (2)와 같이 API579 에 제시된 용접부의 두께 별 잔류응력 분포식을 이용하였다. 관련 상수는 API579 에 제시된 절차에 의해 다음과 같이 결정하였다.

$$\sigma_r(x/t) = 66.25 - 178.39(x/t) + 122.38(x/t)^2 \quad (3)$$

Fig. 8은 잔류응력을 고려한 응력확대계수 계산 결과를 나타낸 것이다. 모든 경우에 대해 잔류응력을 고려하였을 때 고려하지 않았을 때보다 응력확대계수 값이 약 20% 정도 증가함을 확인 하였다. 이때, Case 1 및 2인 경우 안정기준( $F=1$ )에 최소 30% 여유를 가짐을 확인하였다. 그러나 Case 3 경우, 안전기준( $F=1$ )을 벗어나는 것으로 예측되어 추가적인 건전성 평가가 필요하다고 판단하였다.

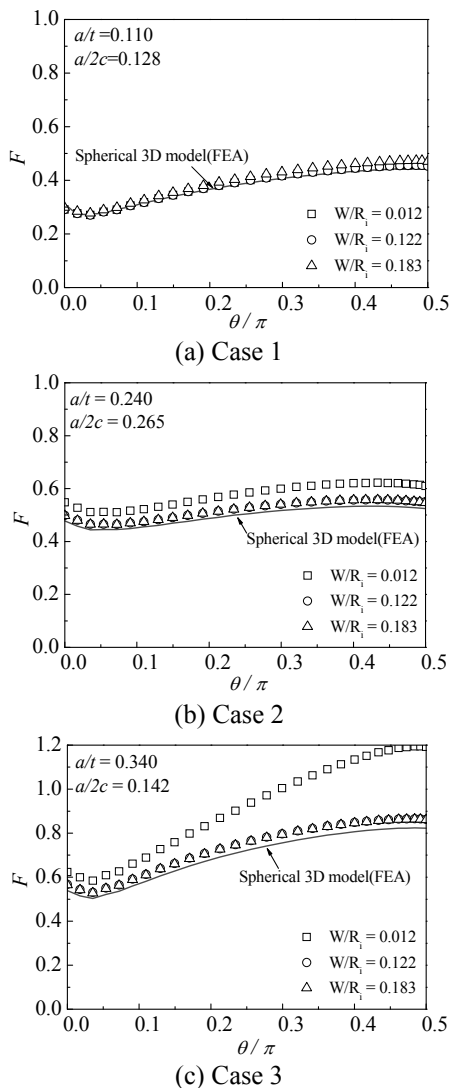


Fig. 7 Effect of  $W/R_1$  on normalized SIFs

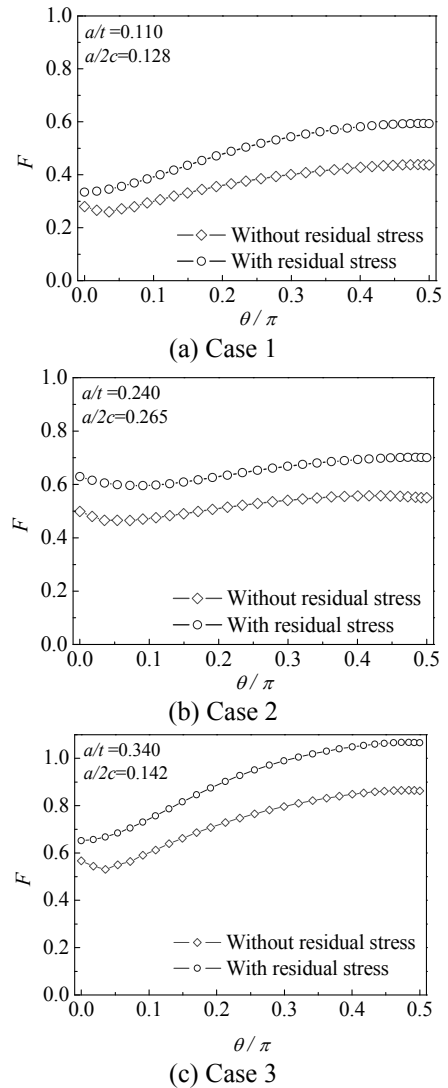


Fig. 8 Effect of residual stress on normalized SIFs

3.3 파손평가선도

선형탄성 파괴역학 해석을 통해 구한 응력확대 계수를 R6<sup>(8)</sup>에 제시된 파손평가선도법에 적용하여 건전성평가를 수행하였다. SA516 강의 경우 불연속 항복이 발생하므로 Approximate option 2 curve를 이용하여 파손평가곡선(FAC; Failure Assessment Curve)을 결정하였다. 균열조건 및 잔류응력 고려 여부에 따른  $K_r$  및  $L_r$  은 식 (4)를 이용하여 계산하였고, 참조하중  $P_{ref}$  는 식 (5)에 따라 결정하였다. Fig. 9 는 3 가지 균열 형상에 대한 평가결과를 나타낸 것으로써, 잔류응력에 대한 고려 유무에 따른 안전여유를 확인하였다. 잔류응력을 고려할 경우( $K_{IS}>0$ )가 고려하지 않은 경우( $K_{IS}=0$ )보다 안전여유가 평균 4% 정도 감소함을 확인하였다.

$$K_r = \frac{K_{IP} + K_{IS}}{K_{IC}} \tag{4}$$

$$L_r = \frac{P}{P_{ref}}$$

$$P_{ref} = 2wt\sigma_y \left[ \frac{h}{\gamma + \sqrt{\gamma^2 + h}} \right] \tag{5}$$

여기서,  $h = (1 - \gamma^2) + 2\gamma(\psi - \gamma)$

$\psi = a/t, \quad \gamma = ac/wt$

4. 탄소성 파괴역학 해석

3.3절의 파손평가선도로부터 잔류응력을 고려할 경우 Case 3에 해당하는 균열형상의 경우 안전여유가 거의 없음을 확인하였다. 따라서 Case 3을 선정하여 균열진전 시 정상 운전조건에서의 불안정 파괴 여부 및 최대하중을 예측하고 DPFAD를 이용한 평가를 함께 수행하였다.

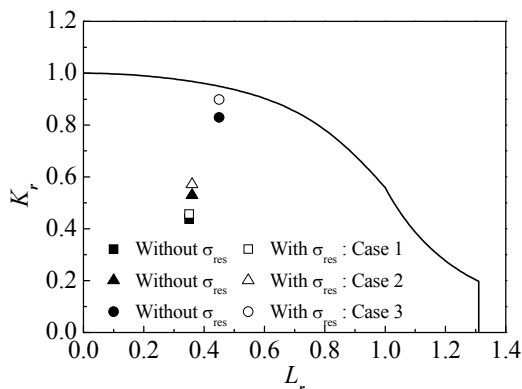


Fig. 9 Failure assessment diagram of specific flaw cases

4.1 유한요소모델

표면균열이 내재된 구형 산소용기의 J-적분 해석을 위해 3장에서 제안한 등가 유한요소모델을 이용하였으며, 탄소성 파괴역학 해석을 위한 재료물성으로 석창성의 실험연구<sup>(9)</sup> 결과를 이용하였다. Fig. 10은 데이터를 곡선적합(curve fitting)하여 구한 J-R선도를 나타낸 것으로써, 관련 재료물성치는 Table 3에 정리하였다. 해석 시 하중은 재료의 항복강도 이상의 응력을 발생시킬 수 있도록 충분히 크게 작용하였으며, 균열 미소증분의 영향을 고려하였다.

4.2 균열진전 및 최대하중 예측

표면균열이 존재하는 산소용기의 최대하중 예측을 위하여 J/T 평가법을 이용하였다. J/T 평가법은 재료 저항성을 나타내는 J-적분값( $J_{mat}$ ) 및 찢김계수( $T_{JR}$ )의 관계를 균열 진전성을 나타내는 J-적분값( $J_{app}$ ) 및 찢김계수( $T_J$ )의 관계와 비교함으로써 균열이 존재하는 구조물의 안정성을 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 재료에 대한 J-적분값과 찢김계수의 관계를 구하기 위해 Fig. 10의 J-R선도를 균열진전량( $\Delta a$ )의 함수로 미분하여 구하였다. 또

Table 3 Mechanical properties of SA516 Gr.70 steel

E(GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	Elongation
191	383	569	22 %

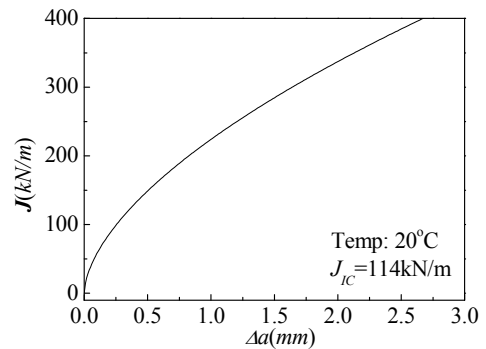


Fig. 10 J-R curve of A516 Gr.70 steel

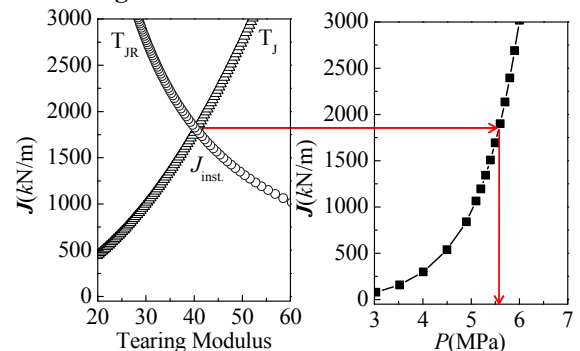


Fig. 11 J/T Diagram for critical flaw in an oxygen holder (Case 3)

한 유한요소해석을 통해 구한  $J$ -적분값과 균열길이의 관계를 2차 다항식으로 계산하여 결정하였으며, 작용하중에 의한 찢김계수는 이를 균열길이로 미분하여 구하였다.

Fig. 11는  $J/T$  평가 결과를 도시한 것으로써, 불안정 균열성장이 시작되는 순간의  $J$ -적분값( $J_{inst.}$ )으로부터 최대하중을 결정하였다. 평가결과, Case 3의 균열이 존재하는 경우, 운전조건보다 약 2배 이상의 하중이 작용할 때 불안정 균열성장이 발생할 수 있음을 확인하였다. 이와 병행하여 정상 운전 조건일 때, 균열진전에 따른 탄소성 파괴특성을 균열진전력선도법(CDFD; Crack Driving Force Diagram)으로 확인하여 보았다. Fig. 12는 CDFD 평가결과를 나타낸 것으로써, 정상운전 조건하에서는 불안정 균열성장이 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

4.3 DPFAD 평가

재료 가공경화지수의 영향을 고려한 평가방법인 전변형이론 파손평가법<sup>(10)</sup>을 이용하여 산소용기 내 균열이 성장함에 따라 구조건전성에 미치는 영향을 파악하였으며, 관련 매개변수들은 식 (6)~(9)로부터 결정하였다. Fig. 13은 DPFAD 평가결과를 도시한 것으로써, 균열이 성장함에 따라 파손가능성이 증가할 수 있다.

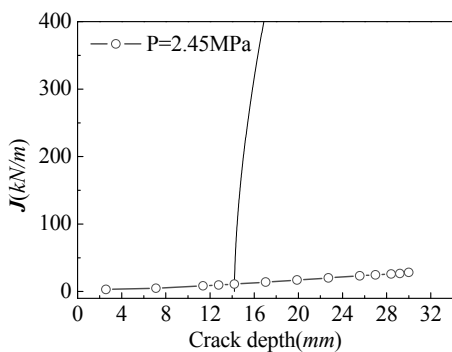


Fig. 12 CDFD for critical flaw in an oxygen holder(Case 3)

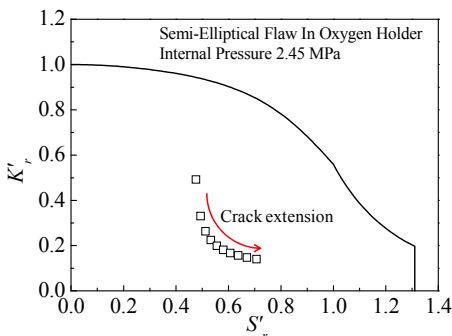


Fig. 13 DPFAD for critical flaw in an oxygen holder (Case 3)

$$K_r = \sqrt{\frac{J_I^e(a, P)}{J_I^e(a_{eff}, P) + J_I^p(a, n, P)}} = f(S_r) \quad (6)$$

$$S_r = \frac{P}{P_o} \quad (7)$$

$$K_r'(a_o + \Delta a) = \sqrt{J_I^e(a_o + \Delta a) / J_R(\Delta a)} \quad (8)$$

$$S_r'(a_o + \Delta a) = \sigma / \sigma_f(a_o + \Delta a) \quad (9)$$

5. 결론

본 연구에서는 가동중인 석유화학 설비에서 검출된 3가지 원주방향 표면균열을 대상으로 유한요소해석 기반의 구조건전성을 평가를 수행 하였으며, 이를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 결함이 존재하는 곡면 형태의 특이한 구형 산소용기에 대해 상세 유한요소해석을 수행하고, 그 결과를 API의 2가지 공학식을 이용한 해석결과와 비교하여 적용성과 차이점을 평가하였다.

(2) 구형 산소용기 모델에 소요되는 해석비용 및 시간의 저감을 위해 등가 유한요소해석 모델을 제시하였고, 형상변수( $B, W$ )에 관한 민감도 분석을 통해 최적의 형상치수를 결정하였다. 그 결과 해석에 소요되는 시간이 약 1800sec에서 200sec로 90%정도 단축되었으며, 등가 유한요소해석 방법을 이용하여 계산된 응력확대계수는 3차원 구형 산소용기에 대한 유한요소해석 결과와 각 균열 선단에서 최대 3% 이내의 차이로 잘 일치하였다. 또한 용접 잔류응력을 고려할 경우 응력확대계수는 약 20% 정도 증가함을 확인하였다.

(3) 본 연구대상 중 가장 취약한 경우에 해당하는 Case 3의 경우 안전여유가 거의 없는 것으로 평가되었기 때문에 추가적인 탄소성 파괴역학 해석을 수행하였다. 등가 유한요소 해석모델 및  $J/T$  평가법을 이용하여 예측한 불안정 균열성장의 시작은 정상 운전조건 2배 이상의 내압이 작용할 때로 예측되었으며, DPFAD 평가를 통해 구한 안전여유는 1.65로써 FAD 평가결과에 비해 60% 정도 향상된 것으로 나타났다.

참고문헌

(1) Lee, J. S., Ju, J. I., Kwon, D. K. and Kim, W. S., 2002, "Integrity Assessment for the Crack-like Flaw of Welded Structures by Using Failure Assessment Diagram," *Proceeding of the Korea Society of*

- Mechanical Engineering (KSME) 2002 Annual Spring Conference.*
- (2) Kim, Y. J., Seok, C. S., Lee, J. S. and Park, Y. W., 1995, "Defect Assessment for Integrity Evaluation of CANDU Pressure Tubes," *Korea Society of Mechanical Engineers (KSME)*, Vol. 19, No. 3, pp. 731~740.
- (3) Chang, Y. S., Kim, Y. J., Hwang, S. S. and Kim, J. S., 2006, "Burst Pressure Estimation of Steam Generator Tubes Based on Fracture Mechanics Analyses," *Key Engineering Materials*, Vols. 321-323, pp. 666~669.
- (4) Huh, N. S., Kwak, D. O., Lee, J. H., Kim, Y. J. and Pyo, C. R., 1997, "Effects of Finite Element Modelling Technique on the J/T Analysis Results in Nuclear Piping," *Korea Society of Mechanical Engineers (KSME) Transaction (A)*, Vol.2, No. 1, pp. 979~984.
- (5) Kim, Y. J., Choi, J. B., Son, S. H., Lee, J. J. and Huh, Y. H., 1990, "A Development of Integrity Evaluation System Based on Elastic Plastic Fracture Mechanics," *Korea Society of Mechanical Engineers (KSME)*, Vol. 14, No. 3, pp. 646~655.
- (6) ABAQUS User's manual, Dassault Systems, 2007.
- (7) API Recommended Practice 579, 2000, Fitness-for-Service, American Petroleum.
- (8) CEGB R/H/R-6-Revision, 1998, Assessment of the Integrity of Structures, Containing Defects, CEGB.
- (9) Seok, C. S., 2000, "Effect of Temperature on the Fracture Toughness of A516 Gr70 Steel," *Korea Society of Mechanical Engineers (KSME) International Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 11~18.
- (10) Son, S. H., Lee, T. J., Kim, Y. J. and Chung, H. D., 1991, "A Modified J/T Approach for Elastic-Plastic Integrity Evaluation System," *Structure Mechanics in Reactor Technology 1991 Conference*, Vol. G.