



## 유한요소법을 이용한 수소충전용 압력용기의 균열에 관한 연구

최하영 · 변성광 · †조승현

동양미래대학교 기계공학부 교수

(2023년 6월 5일 접수, 2023년 9월 22일 수정, 2023년 9월 23일 채택)

### A Study on Crack of Hydrogen Filling Pressure Vessel Using Finite Element Method

Ha Young Choi · Sung Kwang Byon · †Seunghyun Cho

Department of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, Seoul, Korea

(Received June 5, 2023; Revised September 22, 2023; Accepted September 23, 2023)

#### 요약

저탄소 친환경에너지 정책이 진행으로 인해 수소 공급을 위한 수소충전소의 증가됨에 따라 사고발생 위험도 커지고 있다. 실제 압력용기는 제조과정에서 발생할 수 있는 노치와 기공, 개재물 등의 결함이 존재할 수 있다. 따라서 내압이 작용하고 있는 압력용기에 균열이 존재할 경우에 대한 압력용기의 건전성을 평가하는 것은 필요하다. 본 연구에서는 표면균열이 있는 수소충전용 압력용기의 구조안전성을 평가하기 위해 3차원 유한요소해석을 이용하였으며, 표면균열의 형상은 일반적으로 많이 사용되는 반타원 형상을 적용하여 균열의 형상 및 응력비에 대한 균열진전 특성을 비교하였다. 향후, 이러한 결과를 이용하여 파괴역학을 고려한 압력용기의 잔존수명 예측에 활용할 예정이다.

**Abstract** - As the number of hydrogen filling stations for hydrogen supply increases with the progress of low-carbon eco-friendly energy policies, the risk of accidents is also increasing. Actual pressure vessels may have defects such as notches, pores, and inclusions that may occur during the manufacturing process. Therefore, it is necessary to evaluate the integrity of pressure vessels in the case where cracks exist in pressure vessels under internal pressure. In this paper, 3D finite element analysis was used to evaluate the structural safety of hydrogen-filled pressure vessels with surface cracks, and the shape of surface cracks was compared with the commonly used semi-elliptical shape. In the future, these results will be used to predict the remaining life of the pressure vessel in consideration of fracture mechanics.

**Key words** : pressure vessel, FEM, gas pressure, crack

#### 1. 서 론

수소에너지는 친환경적이고 고갈될 우려가 없을 뿐만아니라 매장지역이 편중되어 있지 않는 장점이 있다. 따라서, 수소에너지는 친환경 에너지로써 화석 연료를 대체할 에너지원 중의 하나로 경제성 있는 에너지로 사용이 증가되고 있다[1].

수소에너지를 활용함에 있어 기체인 수소가 수소

압력용기에 많은 양을 저장하기 위해서는 고압으로 충전되며, 수소의 폭발사고가 발생할 경우 대형사고로 이어질 수 있기때문에 수소를 저장하는 용기의 안전성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 압력용기의 파손에 대한 안전성을 확보하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. Kim 등[2]은 유한요소법을 이용하여 압력용기의 열적거동특성을 예측하는 연구를 진행하였고, Kim 등[3]은 가스 저장용기의 누설 안전성에 대한 연구를 진행하였다. Lin 등은 압력 용기에 임의의 모양을 가진 결함에 대한 피로 균열 성장 예측과 피로 균열 성장을 시뮬레이션할 수 있는 수치 시뮬레이션 기

†Corresponding author: coolsh@dongyang.ac.kr  
Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

술에 대한 연구를 진행하였다[4]. Musthaf는 피로하중 하에서 균열성장거동을 기반으로 균열이 존재하는 압력 용기의 파손을 예측하기 위해 산업표준(API 579 Code)과 유한요소 해석을 함께 이용하여 검증과 연구를 진행하였다[5]. O'donoghue 등은 압력용기의 두꺼운 실린더와 얇은 실린더 모두에 대해 내부 타원형 표면 결함의 상호 작용에 대한 연구를 진행하였다[6]. 기체인 수소를 저장하기 위한 압력 용기의 안전한 설계를 위해 다양한 압력 사이클과 수소 취성 피로 손상에 대한 영향을 고려하는 연구가 진행되고 있다[7,8].

Type1 형태의 용기는 강 또는 알루미늄의 재료로 제작되며, 가격이 다른 형태의 압력용기에 비해 저렴하여 수소 압력용기로 많이 사용되고 있다. 이 Type1 형태의 용기는 부식과 피로에 의한 파손의 위험이 크다. 그리고 실제 압력용기는 제조과정에서 노치와 기공, 개재물 등의 결함이 존재할 수 있기 때문에 내압이 작용하고 있는 압력용기에 균열이 존재할 경우에 대한 압력용기의 건전성을 평가하는 것은 필요하다.

본 연구에서는 압력용기의 표면균열이 있는 수소충전용 압력용기의 구조안전성을 평가하기 위해 3차원 유한요소해석을 이용하였으며, 압력용기의 재료는 SA-372 Grade J / Class 70을 사용하였고, 해석모델은 압력용기가 축대칭 형상이므로 1/4 형상만 고려하였다. 압력용기의 내부 표면균열의 형상은 일반적으로 많이 사용되는 반타원 형상 균열로 하였으며, 균열의 방향과 위치가 압력용기의 파괴에 미치는 영향을 확인하고, 압력용기에 작용하는 다양한 압력하에서 파손될 때의 균열의 깊이를 비교하였다.

## II. 관련 이론

### 2.1. 응력확대계수

응력확대계수(Stress Intensity Factor),  $K$ 는 균열선단 주위의 국부응력 크기로 정의하며, 하중, 균열크기, 균열형상 및 기하학적 경계조건에 영향을 받는다[9].

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$  는 부재에 작용하는 응력,  $a$  는 균열크기,  $Y$ 는 시편과 균열 형상, 부하방식에 의한 무차원 보정계수이다. 무한크기 평판에 중앙 길이  $2a$ 를 갖는 관통균열인 경우 (Stress Intensity Factor),  $K$ 는 식(3)과 같다. 무한크기 평판에 Edge crack인 경우 응력확대계수는 식(4)와 같다. 균열에 대한 외부 구속력의 차이로 인해 중앙 관통균열에 비해 Edge crack의  $K$ 값이 약 12% 크게 나타난다.

$$Y = 1, K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (b \gg a) \quad (3)$$

$$Y = 1.12, K = 1.12\sigma\sqrt{\pi a} \quad (b \gg a) \quad (4)$$

단순한 형상의 물체의  $K$ 는 이론적인 계산식을 이용하여 계산할 수 있지만, 복잡한 형상의  $K$ 는 유한요소해석법으로 계산할 수 있다. 파괴인성 (Fracture Toughness)은 응력확대계수가 임계값,  $K_C$ 에 도달하면 파괴가 발생하며,  $K_C$ 는 파괴인성이라고 한다.

$$K > constant = K_C \quad (5)$$

파괴인성은 시편의 두께에 영향을 받으며, 일정 두께 이상일 경우 평면 변형률(Plane strain)상태가 되고  $K_C$  값이 일정해지면 이 값을 평면변형률 파괴인성 (Plane strain fracture toughness),  $K_{IC}$ 라고 한다.

### 2.2. J 적분

J 적분은 재료의 균열 선단에 적분 경로와 미소 변형이론을 이용하여 Fig. 1과 같이 J 적분값을 정의하며, J 적분값은 소성체의 균열을 평가하기 위한 파라미터이다[10]. 균열이 있는 재료에 외력이 가해질 때 균열 선단에서의 변형에 소요된 에너지 식(6)과 외력이 재료에 한 일 식(7)의 차이로 식(8)과 같이 나타내며, J 적분값은 식(9)와 같이 적분 경로에 관계없이 J 적분값은 일정하다.

$$\text{Strain energy } U: -dU = da \int_{\Gamma'} w_{n_x} ds \quad (6)$$

$$\text{External work } W: -dW = da \int_{\Gamma'} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \quad (7)$$

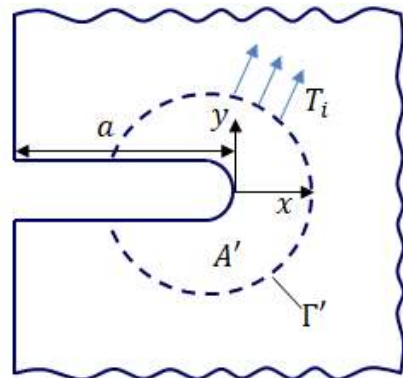


Fig. 1. Definition of J-integral

$$d\Pi = dU - dW \tag{8}$$

$$= da \int_{\Gamma'} w n_x ds - da \int_{\Gamma'} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds$$

$$J = \frac{d\Pi}{da} = \int_{\Gamma'} \left( w n_x - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) ds \tag{9}$$

$w$  : strain energy density

$T_i$  : components of the traction vector

$u_i$  : displacement vector components

$ds$  : length increment along the contour  $\Gamma$

### III. 압력용기의 유한요소 해석

유한요소해석에 사용된 압력용기 해석모델은 국내에서 수소 압력용기로 사용되고 있는 형상으로 하였으며, 압력용기의 해석모델이 축대칭 형상이므로 Fig. 2와 같이 1/4형상을 고려하여 6면체 메쉬로 모델링을 하였다. 해석모델의 격자수는 397,440개로 하였으며, 압력용기의 양끝단을 Z방향으로 고정하고 21°C의 온도에서 유한요소해석을 하였다. 해석모델인 압력용기의 재료 물성치는 SA-372 Grade J / Class 70을 적용하였으며, 물성치는 Table 1과 같이 탄성계수는 200 GPa, 항복강도는 485 MPa, 인장강도는 825 MPa, 포와송비는 0.3이고 밀도는 7,750 kg/m<sup>3</sup>이다.

압력용기 내부면에 존재하는 균열의 방향과 위치에 대해 압력용기의 안전성에 미치는 영향을 비교하였다. 균열은 Fig. 3과 같은 압력용기 내부면의 반타원형상이며, 균열 방향에 대한 파괴 영향을 확인하기 위한 균열의 크기는 초음파탐상시험법으로 검출할 수 있는 작은 균열의 크기인 압력용기 두께의 3%에 해당하는 균열깊이 1.5 mm, 균열길이 4.5 mm로 균열깊이와 균열길이의 비인 균열형상비(a/c)를 1/3로 하였다.

압력용기에 작동압력 50 MPa, 설계압력 55.6 MPa, 수압시험압력 72.3 MPa, 항복응력발생 압력 93.66 MPa로 다양한 가스 압력조건에서 압력용기에 발생하는 응력 분포를 Fig. 4에서 보여주고 있다.

압력용기에 내부압력을 가했을 때 압력용기의 가스 투입구로부터 693.89 mm 위치에서 최대 응력 발생하였으며, 압력용기의 내부에 작동압력 50 MPa로 가해질 때 최대응력이 발생하는 위치의 균열이 압력용기 내부면에 압력용기의 길이방향에 대해 0도 방향, 45도 방향, 90도 방향으로 존재하는 경우의 응력확대계수와 J 적분값을 비교하였다.

균열 위치에 대한 파괴영향을 확인하기 위한 압력용기 내부면의 균열 위치는 압력용기에 50 MPa의 내압을 가했을 때 Fig. 5와 같이 최대응력이 발생하는 압력용기에서의 위치①, 압력용기 전체 길이의 중간 위

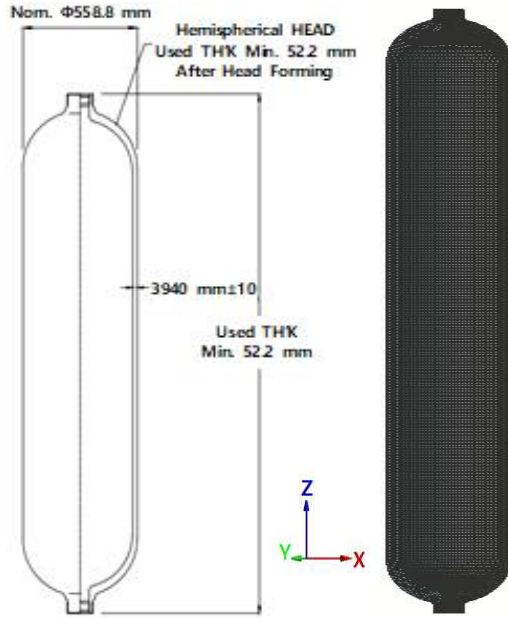


Fig. 2. Finite Element Modeling.

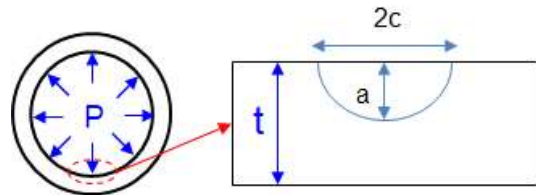


Fig. 3. Inside crack in pressure vessel

Table 1. Physical property of SA-372 Grade J / Class 70

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| Elastic modulus  | 200 GPa                 |
| Yield strength   | 485 MPa                 |
| Tensile strength | 825 MPa                 |
| Poisson's ratio  | 0.3                     |
| Density          | 7,750 kg/m <sup>3</sup> |

치③, 그리고 위치①과 위치③사이 길이방향의 중간 위치②로 하였다. 균열의 위치①, ②, ③에서의 응력 확대계수와 J 적분값을 비교하였다.

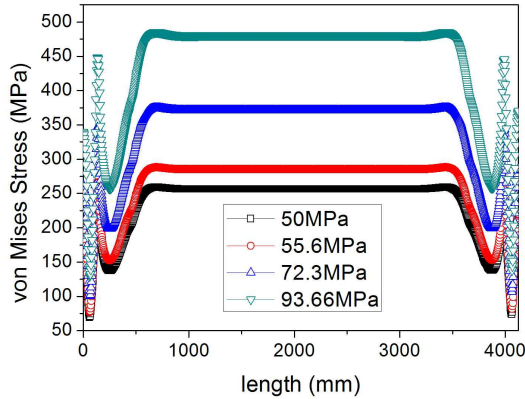


Fig. 4. Distribution of von Mises stress

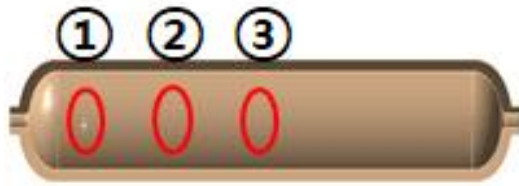


Fig. 5. Position of the crack

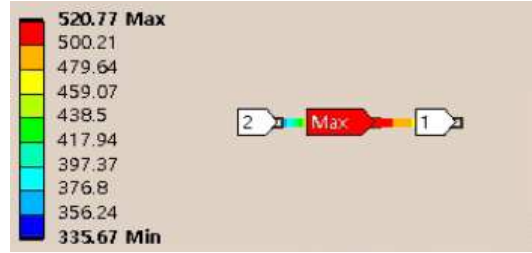
#### IV. 결 과

수소충전소의 수가 확대함에 따라 수소압력용기의 안전성을 확보

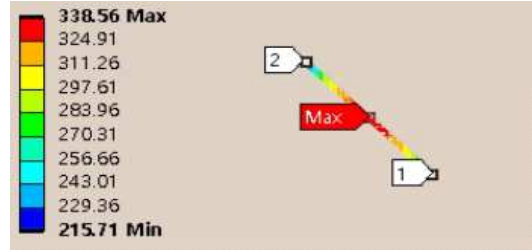
할 필요성이 있다. 수소압력용기의 안전성을 평가하기 위해 본 연구에서는 이음매 없는 용기가 고압의 압력 환경에서 압력용기의 파괴가 발생하지 않도록 ASME BPVC Sec.VIII, Div.3 [11]을 참고하여 수소 압력용기의 안전성을 확인하였다.

최대응력이 발생하는 위치에서 균열의 응력확대계수는 Fig. 6과 같이 압력용기의 길이방향의 0도 방향은  $14.67 MPa\sqrt{m}$ , 45도 방향은  $10.71 MPa\sqrt{m}$ , 90도 방향은  $4.95 MPa\sqrt{m}$ 으로써 같은 조건일 때 길이 방향 균열의 응력확대계수값이 크게 발생하였다. 균열의 J 적분값은 Fig. 7과 같이 압력용기 길이 방향의 균열은  $1.230 mJ/mm^2$ , 길이방향에 45도 방향의 균열은  $0.687 mJ/mm^2$ , 90도 방향의 균열은  $0.183 mJ/mm^2$ 으로써 같은 조건일 때 길이방향의 균열의 J 적분값이 가장 크게 발생하였다.

Fig.5의 균열의 위치①, ②, ③에서의 응력확대계수 값과 J 적분값을 비교하였으며, 그 차이가 1% 미만으



(a) Crack direction 0°



(b) Crack direction 45°



(c) Crack direction 90°

Fig. 6. Stress Intensity Factor KI  
(c=4.5 mm, a=1.5 mm)

로 유사하게 나타났다. 균열의 응력확대계수가 압력 용기에서 위치①는  $16.47 MPa\sqrt{m}$ , 위치②는  $16.29 MPa\sqrt{m}$ , 위치③은  $16.30 MPa\sqrt{m}$ 으로써 같은 조건 일 때 위치①의 균열의 응력확대계수값이 다소 크게 발생하였다. 균열의 J 적분값이 압력용기에서 위치①은  $1.230 mJ/mm^2$ , 위치②는  $1.202 mJ/mm^2$ , 위치③은  $1.205 mJ/mm^2$ 으로써 같은 조건일 때 위치①의 균열의 J 적분값이 가장 크게 발생하였다. 위치①, ②, ③에서의 두께가 거의 일정하기 때문에 응력확대계수와 J 적분값의 차이가 크지않았으며, 위치①이 두께 변화와 변곡이 있는 위치이므로 위치②, ③보다 응력확대계수와 J 적분값이 다소 크게 나타났다.

일반적으로 균열 형태로 많이 사용되고 있는 반타원형태로 압력용기의 초기 균열 깊이에 따른 파괴영향을 비교하였다. 균열의 위치는 내부에 압력을 적용했을 시 최대응력이 발생하는 위치로 하였다. 균열의

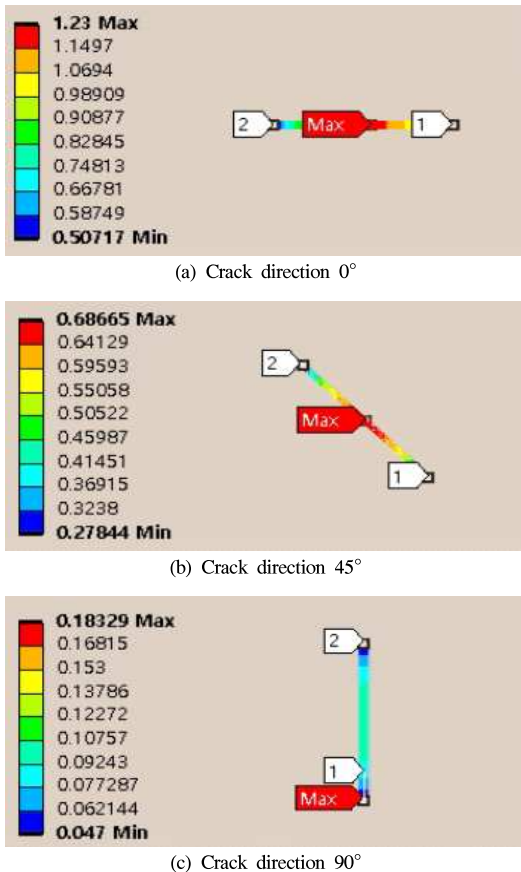


Fig. 7. J-integral (c=4.5 mm, a=1.5 mm)

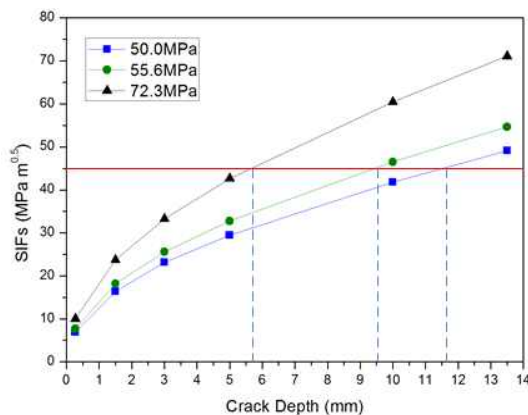


Fig. 8. Crack depth and stress intensity factor according to operating pressure

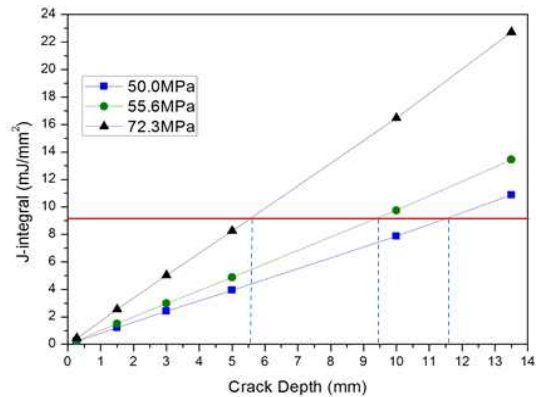


Fig. 9. Crack depth and J-integral according to operating pressure

Table 2. Failure prediction based on stress intensity factor according to pressure

| Pressure                        | Depth (mm) |
|---------------------------------|------------|
| Operation pressure : 50.0 MPa   | 11.52      |
| Design pressure : 55.6 MPa      | 9.45       |
| Hydro. Test pressure : 72.3 MPa | 5.67       |

Table 3. Failure prediction based on J-integral according to operating pressure

| Pressure                        | Depth (mm) |
|---------------------------------|------------|
| Operation pressure : 50.0 MPa   | 11.43      |
| Design pressure : 55.6 MPa      | 9.35       |
| Hydro. Test pressure : 72.3 MPa | 5.57       |

크기는 초음파탐상시험법으로 검출할 수 있는 작은 균열의 크기인 압력용기 두께의 3%에 해당하는 압력용기 내부면으로 부터의 균열 깊이 1.5 mm와 4.5 mm, 7.5 mm, 10.5 mm, 13.5 mm에 해당하는 깊이의 균열 크기로 하였으며, 균열형상비(a/c)는 1/3로 하였다. Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이 균열의 깊이 및 길이가 증가함에 따라 응력확대계수값과 J 적분값이 증가하였다.

수소 환경에서의 파괴 저항 (Fracture resistance)  $K_{JH}$  를 초과하면 균열성장속도가 가속되고 불안정한 균열성장을 하는 III단계 피로 균열 성장으로 전환된다. SA372 Gr. J / Class 70의 파괴 저항  $K_{JH}$ 가 약 45.0

$MPa\sqrt{mm}$  이고, 이에 해당하는 J 적분값이 약  $9.2 mJ/mm^2$ 이다[12,13]. 파괴 저항  $K_{IH}$ 가 약  $45.0 MPa\sqrt{mm}$ 이므로 Fig. 8에서와 같이 운전조건 50 MPa, 55.6 MPa, 72.3 MPa인 경우 균열깊이가 각각 약 11.52 mm, 약 9.45 mm, 약 5.67 mm일 때 파손이 발생할 것으로 예상된다. J 적분값도 Fig. 9에서와 같이 균열의 길이 및 깊이가 증가함에 따라 증가하였다. 파괴 저항에 해당하는 J 적분값이 약  $9.2 mJ/mm^2$ 이므로 Table 3과 같이 운전조건 50 MPa, 55.6 MPa, 72.3 MPa인 경우 균열깊이가 각각 약 11.43 mm, 약 9.35 mm, 약 5.57 mm일 때 파손이 발생할 것으로 예상된다. 압력용기의 운전조건 50 MPa, 55.6 MPa, 72.3 MPa인 경우 응력확대계수값과 J 적분값으로 예상된 균열깊이의 차이가 2%이하로 유사하였다.

## V. 결론

본 논문은 구조해석 상용프로그램을 사용하여 수소압력용기의 파괴 해석을 수행하였으며, 압력용기 내부면에 존재하는 균열의 방향과 위치가 압력용기의 안전성에 미치는 영향을 비교하였다.

압력용기에 내부압력은 작동압력 50 MPa를 가했을 때 최대응력이 발생하는 위치에서 길이방향의 균열의 응력확대계수와 J 적분값이 가장 크게 나타나 압력용기의 두께 변화와 변곡이 발생하는 위치의 길이 방향 균열이 파손위험이 클 것으로 예상된다. 압력용기에 반타원 균열이 존재하는 경우 압력용기의 운전조건 50 MPa, 55.6 MPa, 72.3 MPa에 대해 응력확대계수값과 J 적분값에 의해 파괴가 예상되는 균열깊이를 유사하게 예측하는 것을 확인하였다.

향후 본 연구의 결과는 압력용기의 제작과정 혹은 사용환경 요인으로 발생하는 균열을 고려하여 피로 균열진전 연구와 압력용기의 사용수명을 판단하는데 활용할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다(NO. 2021581 0100040).

## REFERENCES

[1] Lee, B., Lee, H., Moon, C., Moon, S., and Lim, H., "Preliminary Economic Analysis for H<sub>2</sub> Transportation Using Liquid Organic H<sub>2</sub> Carrier to Enter H<sub>2</sub>

Economy Society in Korea". *Transactions of the Korean hydrogen and new energy society*, 30(2), 119-127, (2019)

[2] Kim, C. K. and Cho, S. H., "FE Analysis on the Design Safety of Inner Tank Bottom Plate in Terms of Cryogenic Temperature Loadings", *KIGAS*, 8(3), 8-15, (2004)

[3] Kim C.K., Cho S. H., Suh H. S., Hong S. H., Lee S.R., Kim Y.G., and Kwon B.G., "On the Leakage Safety Analysis of 9% Nickel Type LNG Storage Tank with Thermal Resistance Effects", *KIGAS*, 9(1), 1-9, (2005)

[4] Lin, X. B., Smith, R. A. An improved numerical technique for simulating the growth of planar fatigue cracks. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 20, 1363-1373, (1997)

[5] Musthaf, M. "Failure Prediction of Cracked Pressure Vessel under Fatigue Load Based on API 579 Standard and Finite Element Method", *Science and Engineering*, 37, (2016)

[6] O'donoghue, P. E., Nishioka, T., and Atluri, S. N., "Multiple surface cracks in pressure vessels", *Engineering Fracture Mechanics*, 20(3), 545-560, (1984)

[7] Sims, J. R. "Standards and codes to control hydrogen-induced cracking in pressure vessels and pipes for hydrogen gas storage and transport" *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies*, Woodhead Publishing, 177-192, (2012)

[8] San Marchi, C., Somerday, B. P., & Nibur, K. A., "Development of methods for evaluating hydrogen compatibility and suitability", *International journal of hydrogen energy*, 39(35), 20434-20439, (2014)

[9] Irwin, G.R., "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate," *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361-364, (1957)

[10] J. R. Rice, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379-386, (1968)

[11] ASME Section VIII, Division 3, Code 2019 Edition, "Alternate Rules for Construction of High Pressure Vessels", ASME New York 10016 USA.

[12] KGS AC111, Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Storage Tanks and Pressure Vessels for High-pressure Gases, South Korea, (2023)

- [13] San Marchi, C., Ronevich, J., Bortot, P., Wada, Y., Felbaum, J., & Rana, M., "Technical Basis for Master Curve for Fatigue Crack Growth of Ferritic Steels in High-Pressure Gaseous Hydrogen in ASME Section VIII-3 Code," *In Pressure Vessels and Piping Conference*, 58929, American Society of Mechanical Engineers, (2019)