

## Duplex ESSO 시험법에 의한 9% Ni강 취성 균열정지 특성 연구

김영균·오병택·양영철·윤인수·<sup>†</sup>김재훈\*

한국가스공사 가스연구원, \*충남대학교 기계공학과 교수  
(2020년 9월 1일 접수, 2020년 12월 18일 수정, 2020년 12월 19일 채택)

### Study on the Brittle Crack Arrest Property for 9% Ni Steel by Duplex ESSO test

Young Kyun Kim·Byung Taek Oh·Young Chul Yang·In soo Yoon·<sup>†</sup>Jae Hoon Kim\*

Gas Research Institute, KOGAS, Ansan 426-790, Korea

\*Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received September 1, 2020; Revised December 18, 2020; Accepted December 19, 2020)

#### 요약

취성파괴는 구조물 손상의 원인 중 하나로 대형사고로 발생할 가능성이 있다. -162℃의 초저온 LNG를 저장하는 저장탱크의 내조는 취성파괴가 발생하지 않도록 반드시 이를 확인 할 수 있도록 성능검사를 하여 건설된다. 파괴역학 관점에서는 구조물의 파괴특성을 균열생성과 균열정지로 구분하고 있다. 취성균열이 발생되지 않도록 설계하고 취성 파괴가 발생하여도 취성 파괴가 정지하는 기능이 확인되는 소재가 사용되어야 한다. 본 논문에서는 LNG 저장탱크의 내조 소재로 널리 사용되는 9% Ni강 33mm, 37mm, 40mm 두께로 준비하여 취성균열정지 특성을 분석하였다. 기본적인 취성 충격 시험특성을 파악하기 위하여 샤르피 충격시험을 상온, -162℃, -196℃ 조건에서 수행하였다. 또한 -196℃ 환경에서 Duplex ESSO 시험을 수행하여 취성균열정지 파괴인성을 평가하고 그 결과를 분석하였다. 이러한 시험결과를 바탕으로 9% Ni강이 LNG 저장탱크 내조소재로 적용되기에 충분한 균열정지 파괴인성을 가지고 있음을 확인하였다.

**Abstract** - A brittle fracture is one of the source of structural damage and can bring a fatal accident. The inner shell of LNG storage tank should be designed and applied to construction by ensure that no brittle crack will occur under -162℃ condition. In point of view of fracture mechanics brittle fracture in the structure could be referred as crack initiation and crack arrest. It should be designed no crack initiation. However, in the unlikely event of a brittle fracture occurring, a back-up function of arresting the brittle crack should be included for the design. In this paper investigated the characteristics of 9% Ni steel thick plates of having a capability of arresting brittle cracks under the thickness of 33 mm, 37mm, 40 mm. First, charpy test has performed to evaluate the fundamental brittle impact fracture property of 9% Ni steel under the temperature of 24℃, -162℃ and -196℃. In addition, Duplex ESSO tests were also performed under -196℃ to evaluate the capability of crack arrest for 9% Ni steel. From the experiments results, it was confirmed that all the thickness of 9% Ni steel plates exhibits sufficient brittle crack arrest fracture toughness for the application of LNG storage tank as a inner shell.

**Key words** : brittle fracture, LNG, 9% Ni steel, crack arrest fracture toughness Kca, duplex ESSO test

<sup>†</sup>Corresponding author: kimjhoon@cnu.ac.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

액화천연가스(LNG)는 화석연료 중 청정에너지라는 장점으로 수요가 지속적으로 증가하고 있으며 미국 셰일가스 개발로 LNG 설비에 대한 발주가 증가할 것으로 예상된다. LNG 액화플랜트와 터미널에서는 저장탱크를 건설하여 LNG를 장기간 안정적으로 저장한다. 천연가스 액화온도인  $-162^{\circ}\text{C}$  초저온 LNG를 저장하는 육상용 저장탱크의 소재는 9% Ni강이 주로 사용된다. 9% Ni강은 1944년 미국의 INCO사에 의해 최초로 개발된 강도가 높고 극저온에서의 충격이 우수하고 경제적으로 유리하여 1952년 액체산소의 저장용기 재료로 사용된 이래, 액체가스의 대형 저장탱크 내조 재료로 주로 사용되고 있다. 최근 토지 면적의 효율적 이용과 건설비용 절감을 위해 LNG 탱크의 저장용량이 대형화되고 사용되는 내조 소재의 두께 또한 증가하고 있다. 금속재료는 두께가 두꺼워질수록 사용되는 재료의 파괴인성 또한 더욱 높은 인성값이 요구되고 있다.[1-3] 또한 저온환경에서는 취성파괴가 심각한 구조물 손상의 원인 중 하나이며 대형사고로 발생할 가능성이 있어 LNG저장탱크 내조 소재로 사용되는 재료의 취성파괴 특성 분석이 필요하다. LNG저장탱크 내조 소재에 대한 기존의 파괴역학적 평가는 초저온 환경에서 발생하는 취성균열 발생의 관점에서 파괴인성과 관련된 많은 연구가 주로 수행되어왔다.[4~5] 파괴역학 관점에서는 구조물의 파괴인성을 균열생성과 (crack initiation fracture toughness) 균열정지(crack arrest fracture toughness)로 구분하고 있다.[6] 취성균열정지는 응력이 집중된 부위나 결함 또는 국부적인 취화영역에서 취성균열이 발생한 경우 균열이 일정길이 이상으로 전파하여 구조물 전체의 안정성에 영향을 끼치기 전에 정지시키는 개념으로 취성균열정지 특성이 우수한 소재가 균열발생부 주변을 둘러싸고 있어야 한다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 균열이 전파하면서 방출하는 균열선단의 탄성에너지와 균열선단에서 소성변형으로 흡수하는 에너지가 평형상태를 이룰 때 취성균열의 정지가 일어나게 되며 이를 균열정지 파괴인성  $K_{ca}$ (Crack arrest toughness) 값으로 평가하게 된다. 이를 실험적으로 검증하기 위하여 Fig.1과 같이 일정한 인장응력을 받는 대형 시험편의 노치부에 햄머를 이용한 충격을 가하여 균열진전판 (crack running plate)에서 취성균열이 발생하고 이 균열이 시험편으로 전파되어 정지되는 특성을 조사하여 평가한다. 균열정지에 대한 연구는 일본 철강회사에서 신제품 개발 시 대형 인장

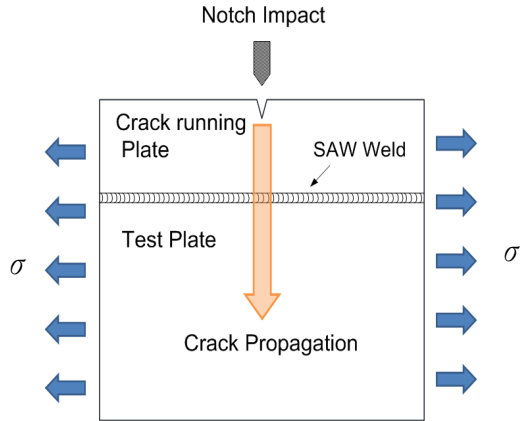


Fig. 1 Configuration of Duplex ESSO test

시험기를 이용한 성능시험으로 주로 수행되어져 왔다. [7~9] 본 연구에서는 LNG저장탱크 내조 재료로서 사용되는 9% Ni강 후판의 파괴역학적 특성을 파악하기 위하여 취성균열 정지특성을 평가하였다. 먼저 9% Ni강의 기본적인 취성파괴특성을 평가하기 위하여 33mm, 37mm, 40mm 두께의 재료에 대해 상온  $24^{\circ}\text{C}$ , LNG온도에 가까운  $-164^{\circ}\text{C}$  그리고 액화질소 온도인  $-196^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 샤르피 충격시험을 수행하였다. 또한 취성균열발생과 유사한 거동을 관찰하기 위하여 대형시험편을 이용한 Duplex ESSO 시험을  $-196^{\circ}\text{C}$  환경에서 수행하여 균열정지 파괴인성을 평가하고 그 결과를 분석하였다.

## II. 실험 및 유한요소 해석방법

### 2.1. 사용재료

본 연구에 사용된 재료인 9% Ni강은 QLT 열처리(quenching, lamellaizing and tempering) 제작되었으며, 화학성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 화학적 성분은 33mm, 37mm, 40mm 두께의 재료에 대하여 두께별로 큰 차이를 보이지 않았으며, 모두 9% Ni강 요구 규격을 만족하였

Table 1. Chemical compositions of 9% Ni (wt%)

Thickness	C	Mn	Si	P	S	Ni
33 mm	0.05	0.70	0.25	0.006	0.003	8.95
37 mm	0.05	0.69	0.24	0.007	0.003	8.84
40 mm	0.06	0.70	0.26	0.004	0.003	8.90

Table 2. Mechanical properties of 9% Ni steel

Temp.	Thickness (mm)	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
24°C	33	631	701	43.4
	37	607	695	45.0
	40	634	713	43
-164°C	33	810	910	36.4
	37	754	899	30.3
	40	782	895	27.6
-196°C	33	944	980	32
	37	941	1,035	30
	40	944	1,117	33.2

다. 특히 불순물 원소인 P, S의 함량이 0.008wt%, 0.005wt% 이내로 조절하여 저온에서의 파괴인성에 큰 문제를 일으키지 않도록 제작하였다.

Table 2에 정리된 기계적 특성은 모재의 인장강도와 항복강도 모두 저온으로 갈수록 더 크게 증가하였으며 연신율은 저온에서 약간 감소하는 것으로 나타났으며, 제품두께에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

### 2.2. 샤르피 충격시험

샤르피 충격시험은 펜들럼의 회전으로 충격을 가해 시편에서 흡수한 운동에너지를 측정하여 시험편을 파괴하는데 소요되는 순수한 에너지를 환산하여 재료의 충격에 대한 인성값을 얻을 수 있다. 시험이 간단하고 저비용으로 수행 할 수 있으나 신뢰성이 높은 결과는 얻기 어렵고 상호 비교 평가 등에 제한적으로 사용되고 있다. 시험은 ASTM E23 [10] 규격의 V-notch 시편을 이용하여 실시하였으며, 시험 온도는 상온, -164°C, -196°C의 세 온도에서 실시하였는데, 시험편 형상은 Fig. 2와 같다.

### 2.3. Duplex ESSO 시험

취성균열의 전파정지특성을 시험하기 위하여 Duplex ESSO 시험을 실시하였고 시험편과 노치의 형상은 Fig. 3과 같다. 취성균열의 발생 및 전진을 위해 시험판에 균열진전판을 (crack running plate) 용접하여 접합 하였으며, 이때 용접은 3.5% Ni강용 용접재료를 사용하였다. 시험은 POSCO사가 보유한 3,000톤급 대형시험기를 이용하였다.

Duplex Esso 시험방법은 시험 전 시험편에 393MPa



Fig. 2. Configuration of Charpy impact specimen.

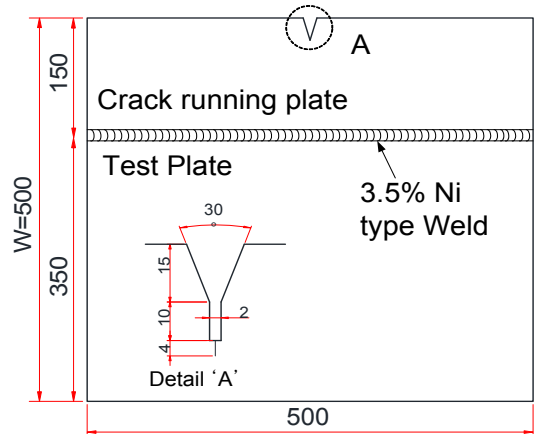


Fig. 3. Configuration of Duplex ESSO test specimen.

의 인장하중을 가한 상태에서 노치부위에 햄머로 충격하중을 가하여 균열을 생성 전파시키도록 하였다. 시험온도는 특수제작 한 챔버에 액체질소를 충전하여 -196°C로 냉각 한 취성상태에서 균열생성 및 균열전파가 발생하도록 하였다. [11] 시험편 두께별로 각각 2개 씩 총 6개 시험편에 대하여 시험을 실시하였다. 시험완료 후 균열이 정지한 부분의 균열 길이를 측정하여 응력확대계수  $K_{ca}$  값을 계산하였고 이 값을 실제 운전환경에서 요구되는 값과 비교하여 평가하였다. 또한 시험편이 취성균열이 시험판에 도달하기 직전의 전파속도를 확인하기 위하여 균열진전판에 스트레인이게지를 부착하여 균열전파속도를 확인 할 수 있도록 하였다.

### 2.3. 유한요소해석

균열정지인성 값 평가 시 통상 Tangent Formula라고 칭하는 (1)식의 균열길이  $a$ 와 폭  $W$ 를 적용한 계산식을 이용한다. [11]

본 논문에서는 기존의 수식과 유한요소해석으로 구한 응력확대계수 값을 비교하여 검토하였다. 취성균열전파에 따른 정지균열에 대한 균열정지 인

성값  $K_{ca}$ 를 정량적으로 구하고 비교 검토하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. ABAQUS 6.14 프로그램을 이용하여 Fig. 4와 같이 균열을 포함하고 초기인장을 부하하는 2차원 유한요소해석을 수행하여, 실제 실험에서 구한 균열길이에 대한 균열정지 파괴인성값을 계산하였다.

$$K_{ca} = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \quad (1)$$

$K_{ca}$  : Crack arrest toughness ( $\text{MPa} \cdot \sqrt{m}$ )  
 $a$  : Arrested crack length (mm)  
 $W$  : width of specimen

또한 균열정지 인성값을 갖을 때의 균열선단의 응력분포를 분석하기 위하여 1/4 모델에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였고 그 모델은 Fig. 5와 같다. 이때  $-196^\circ\text{C}$  환경에서의 탄성계수 210 GPa과 프와송의 비 0.3을 적용하였다.

### III. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 샤르피 충격시험 결과

초저온 환경인 LNG 온도에서 사용하기 위해서는 샤르피 충격 에너지 값이 일정한 값 이상임을 확인해야 실제 건설에 적용 될 수 있다. 33mm, 37mm 그리고 40mm 두께의 9% Ni강 시험편을 사용하여 상온, LNG온도인  $-162^\circ\text{C}$  그리고 액화질소 온도인  $-196^\circ\text{C}$  환경에서 샤르피 충격시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실험으로 구한 충격 에너지 값은 온도 저하에 따라 감소하였다. 상온 대비  $-164^\circ\text{C}$  결과 값은 뚜렷하게 감소했으나  $-164^\circ\text{C}$  대비  $-196^\circ\text{C}$ 의 결과 값은 작게 감소하는 것으로 나타났다. 9% Ni강 원재료의 두께차이가 미치는 영향을 평가하면 상온과  $-162^\circ\text{C}$  환경에서는 두께의 차이로 인한 결과 값의 편차가 약간 있었으나  $-196^\circ\text{C}$  온도환경에서는 결과 값의 편차가 감소하였다. 이는 두께 영향보다는  $-196^\circ\text{C}$ 라는 극저온의 환경조건이 지배적으로 작용하였기 때문인 것으로 사료된다. 두께에 따라 샤르피 충격 흡수에너지 값이 편차를 갖는 것으로 나타났으나, 기존 문

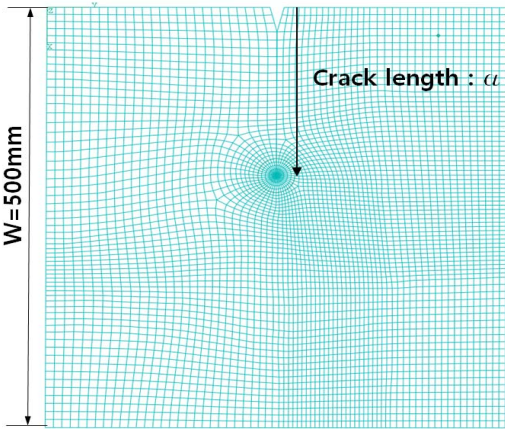


Fig. 4. FE analysis model of crack arrest specimen for stress intensity factor.

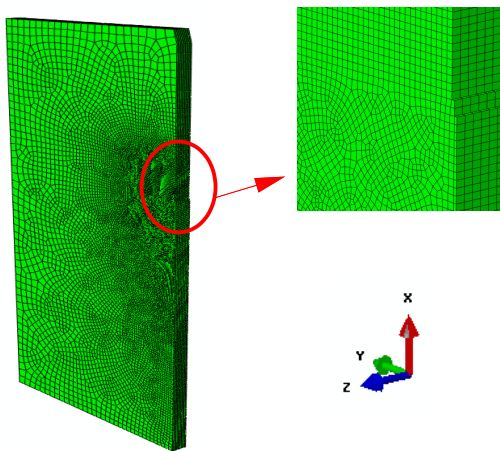


Fig. 5. FE analysis model of crack arrest specimen for stress analysis.

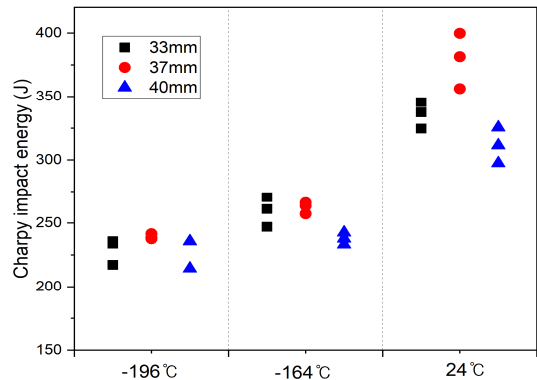


Fig. 6. Results of Charpy impact tests performed at various temperature.

현의 제시 결과가[1~2] 본 시험결과와 차이가 거의 없어 본 연구에 사용된 9% Ni강 원 제품 두께에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단하였다.

### 3.2. 취성균열 정지 시험 결과

Dupelx ESSO 시험편에 인장하중을 가한 상태에서 충격장치에 의해 균열을 발생시키는데 이때의 균열전파속도 확인을 위해 균열진전판에 스트레인 게이지를 설치하여 균열진전 속도를 측정하였고 그 결과를 Fig.7에 나타냈다. 측정된 균열 전파속도가 1,000 m/s를 상회하는 것으로 나타나고 있어 시험판에서도 1,000 m/s 이상으로 균열이 전파되었음을 확인할 수 있었다. 시험결과는 Table 3에 나타나

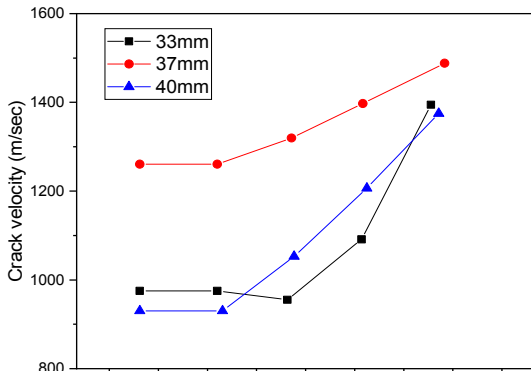


Fig. 7. Velocity of crack propagation in crack running plate.

었는데 균열이 전파되어 균열진전판의 크기 150mm를 넘어 9% Ni강 시험판까지 전파되었고, 최종적으로 모든 취성균열이 185mm~192mm까지 진전한 후 멈췄다. 본 시험결과로 9% Ni강은 취성균열이 시험재내로 전파된 후 정지되는 우수한 균열 정지 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이 시험에서도 시험편 두께에 의한 영향은 나타나지 않았다. 취성균열 정지능력을 나타내는 균열정지 파괴인성  $K_{ca}$  값을 식(1)을 이용하여 구하였는데 최소 318  $MPa\sqrt{m}$ 을 얻을 수 있었다. 기존의 연구결과에 [12~14] 의하면 두께가 40 mm인 9% Ni 강 경우 LNG 온도에서 전파균열을 정지시키기 위해서는 통상 운전환경에서는 127  $MPa\sqrt{m}$  그리고 지진이 발생하는 비상 시 159  $MPa\sqrt{m}$ 로 보고되고 있는데 본 연구의 시험결과에서 모든 시험편이 기준 값을 훨씬 상회하는 높은 값을 갖는 것으로 나타나 우수한 균열정지 특성을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.

각각의 두께에 대한 시험편 파단면을 Fig. 8에 나타내었는데 전체형상에서 전형적인 인장모드의 균열형상을 보여주고 있다. 모든 두께의 시험편이 노치에서 시작된 균열이 취성균열형태로 균열진전판을 전파하여 시험판인 9% Ni강에서 연성파면을 나타내며 균열이 정지하는 것으로 나타났다. Fig. 8 (a)~(c)와 같이 파단면을 자세히 보면 모든 시험편 내부에서의 균열길이가 시험편 표면보다 더 크게 진전되어 나타나는 균열 터널링 (crack tunneling) 현상을 보이고, 시험표면으로 갈수록 미파단 사이드-리가먼트가 (uncracked side-ligament) 두껍게 형

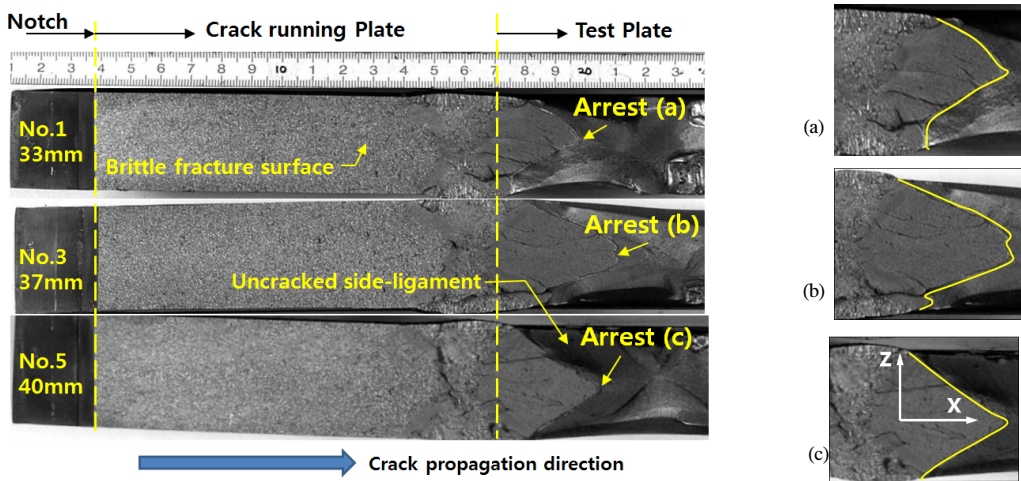


Fig. 8. Example of fracture appearance of the Duplex ESSO tests for 9% Ni steel.

**Table 3.** Results of Duplex ESSO test

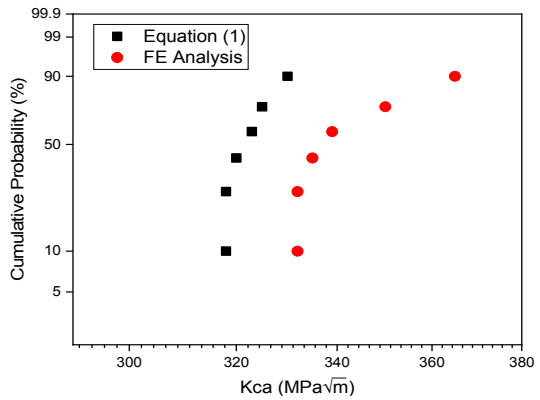
No.	Thick. (mm)	Width W (mm)	Applied Stress $\sigma$ (MPa)	Arrested Crack Length a (mm)	Kca (MPa $\sqrt{m}$ )	Judgement
1	33.7	500	393	192	325	Arrest
2	33.7	500	393	187	320	Arrest
3	37.8	500	393	196	330	Arrest
4	37.8	500	393	185	318	Arrest
5	40.9	500	393	185	318	Arrest
6	40.9	500	393	190	323	Arrest

성되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 미파단 사이드-리가먼트는 전파중단 균열에 대해 단힘응력 작용을 하여 최종 균열선단 후면에서 연성적 파단 거동을 하는 시어립 (Shear lip) 역할을 한 것으로 판단되는데 이 현상은 모든 시험편에서 거의 동일하게 나타났다.

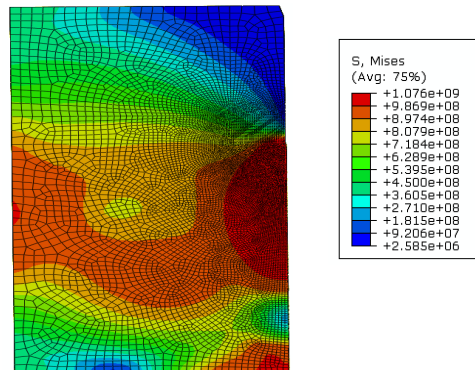
**3.3. 유한요소해석 결과**

선형파괴역학에서는 취성균열전파의 구동력으로 응력확대계수 K와 재료의 균열정지 파괴인성  $K_{ca}$ 를 비교하여  $K > K_{ca}$ 일 경우에 균열이 전파하고  $K=K_{ca}$ 일 때 균열이 정지된다고 보고하고 있다. 통상적으로 재료의 정지 특성  $K_{ca}$  값은 Duplex ESSO 테스트를 수행하여 취성균열이 발생하고 전파되어 정지되는 길이를 구하고 이를 (1)식에 대입하여  $K_{ca}$ 를 구한다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 유한요소해석법을 사용하여  $K_{ca}$ 값을 구하고 기존의 방법과 비교하고자 하였으며 그 결과를 Fig.9와 같이 나타내었다. Fig. 9는 식 (1) 그리고 유한요소해석으로 각각 구한 균열정지 파괴인성  $K_{ca}$ 의 값의 와이를 분포를 비교하고 있다. 식(1)로 구한  $K_{ca}$  값이 유한요소법 결과보다 낮은 분포를 나타내고 있어 기존의 실험적 평가법이 유한요소해석 보다 보수적으로 평가하고 있음을 확인할 수 있다.

Duplex Esso 시험편 균열선단이 균열 전파 후 정지 된 상태에서의 응력분포를 분석하고자 유한요소해석을 수행하였고 Fig. 10과 같이 상당응력에 대한 응력분포를 얻었다. 또한 이러한 상당응력의 균열선단 거리에 따른 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 최대 균열정지 파괴인성 값  $K_{ca}=323 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 상당응력이 항복응력 이상 값을 가지는 범위가 균열선단을 중심으로 200mm 가깝게 고응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 다른 균열정지 파괴인성 값이 감소함에 따라 항복응력 이상 값을



**Fig. 9.** Comparison of Kca value between obtained by equation(1) and FE analysis.



**Fig. 10.** Equivalent stress contour of crack arrest specimen. (a=190mm, Kca=323MPa $\sqrt{m}$ )

가지는 거리가 감소하고 있으나 가장 낮은 값에서도 150mm 이상으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

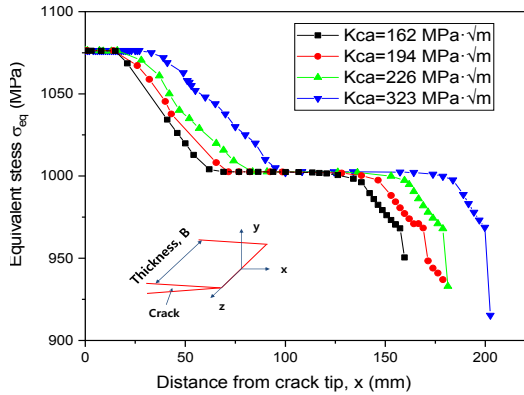


Fig. 11. Equivalent stress distribution under various crack arrest fracture toughness.

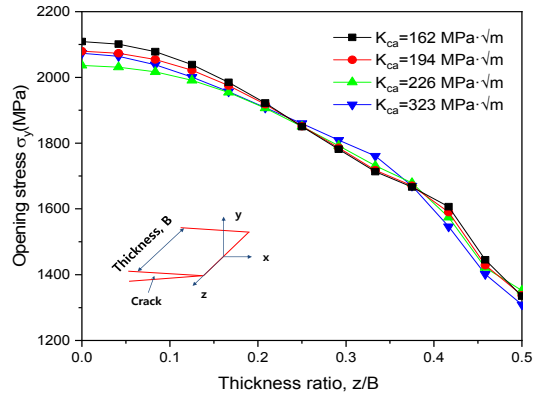


Fig. 13. Opening stress distribution depend on the thickness under various crack arrest fracture toughness.

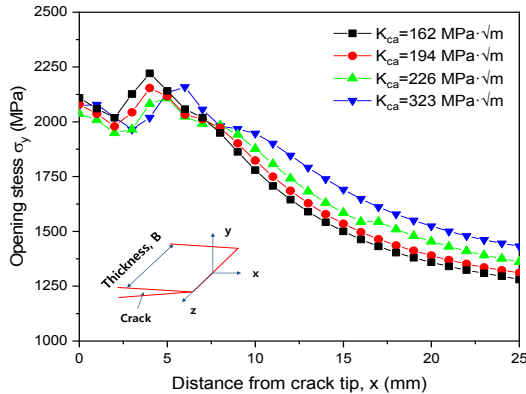


Fig. 12. Opening stress distribution under various crack arrest fracture toughness.

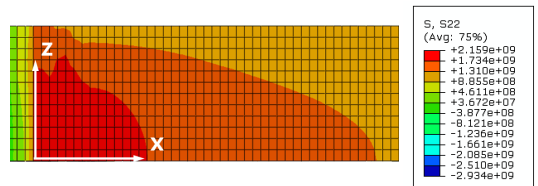


Fig. 14. Opening stress distributions from FE analysis of crack arrest test. ( $K_{ca}=323MPa \sqrt{m}$ )

균열선단에서의 수직 응력값을 분석하고자 유한 요소해석 결과를 Fig. 12와 같이 얻었다. 본 연구에 적용된 범위의 균열정지 파괴인성 값  $K_{ca}$  범위에서는 균열선단에서의 수직 응력값이 비슷하게 분포하였으며 균열선단에서 10mm 정도 떨어진 거리에서 부터는 균열정지 파괴인성 값 크기에 따라 수직 응력의 유한요소해석 결과가 비례하여 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 균열선단에서의 수직응력값의 두께방향 분포를 분석하고자 수행 한 유한요소해석 결과를 Fig. 13~14와 같이 얻었다. 유한요소해석으로 구한 수직응력은 Fig. 13와 같이 두께 중심부에서 크게 나타나고 시험편 표면에 가까워질수록 감소하고 있으며 이를 균열선단 FEM해석 결과 분포도로 나타낸 것이 Fig. 14와 같다. 이러한 유한요소 해석

결과가 Fig. 8의 실제 시험에서 얻은 Duplex Ezzo 시험편 파단면에 보여주는 결과와 비슷하게 나타나고 있어 실험과 해석결과가 어느 정도 일치하고 있음을 확인하였다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 내조재료로 사용되는 9% Ni강의 취성 파괴 특성을 평가하기 위하여 초저온 환경에서 샤르피 충격시험과 취성균열정지 시험인 Duplex ESSO 시험을 수행하였다. 두께 34 mm, 37 mm, 40 mm의 QLT 열처리 9% Ni강은 액화질소 환경의 초저온 환경에서 양호한 샤르피 충격에너지 값과 취성균열정지 특성을 가지고 있음을 실험과 유한요소해석을 수행하여 확인할 수 있었다. 본 논문의 연구결과로 40mm 두께의 9% Ni강을 LNG 저장탱크의 내조 소재로 적용하여도 초저온 환경에서 충분한 안전성을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] S. Machida, N. Ishijura, N. Kubo and K. Arimochi, "Brittle Fracture Characteristics of Heavy Thickness 9% Ni steel Plate and its Applicability to Large Scale LNG Storage Tanks", *JHPI*, 29(6), 25-39, (1991)
- [2] S. Machida, A. Deguchi and H Kagawa, "Brittle Fracture Characteristics of Heavy Gauge 9% Ni Steel Plate for Large Scale LNG Storage Tank" *JHPI*, 31(6), 31-38, (1993)
- [3] J.B. Lee and JK Han, "Welding Characteristics of Recently Developed 9% Ni Steel", *Korea Welding Journal*, 13(3), 34-45,(1995)
- [4] J.I. Jang, Y.C Yang, and D.I. Kwon, "Evaluation of Cryogenic Fracture Toughness in SMA-Welded 9% Ni Steels through Modified CTOD test", *Metals and Materials*, 3(4), 230-238, (1997)
- [5] J,H, Baek, Y,P, Kim, W,S, Kim and Y,T, Kho, "Effect of Temperature on the Charpy Impact and CTOD Values of Type 304 Stainless Steel Pipeline for LNG Transmission", *KSME International Journal*, 16(8), 1064-1071, (2002)
- [6] Fracture mechanics 3rd edition T.L. Anderson
- [7] K. Naoshige, T. Masanori, Y. Maki, and K. Takahiro, "Development of 7% Ni-TMCP Steel Plate for LNG storage tanks", *Japan Welding Journal*, 28(1), pp130-140, (2010)
- [8] T. Fukui, H. Kitada and K. Hirota, "Arrestability Requirement for Crack Arrestor in Hull structure", *Pressure Technology*, 41(6), 13-25, (2003)
- [9] J.S. Park, B.Y. Jung, G.B. An and J.B. Lee, "Crack Arrest Toughness of Thick Steel Plate Welds for Ship Building", *Korea Welding Society*, 25(4), 347-352, (2007)
- [10] ASTM E23, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, (2018)
- [11] *Test method for brittle crack arrest toughness  $K_{ca}$ , WES 2815*, The Japan Welding Engineering Society, (2014)
- [12] *Recommended Practice for Above Ground LNG Storage Tank*, Japan Gas Association, (2012)
- [13] Consortium of Five Japanese Companies (OG, IHI, TKK, NSC, SMI), "Crack Arrest Properties of 9% Ni Steel and Relation between Crack-Initiation and Crack-Arrest Test", GRI-86/0007, Gas Research Institute, Feb. (1986)
- [14] Nippon Steel Technical Report, *Development of Heavy 9% Nickel Steel Plates with Superior Low-Temperature Toughness for LNG Storage Tanks*, (1993)