



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

SUS304의 상온 및 저온에서의
피로균열진전 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on
Fatigue Crack Growth of SUS304
at Room and Cryogenic Temperature

2010年 2月

仁荷大學校 大學院

造船海洋工學科

呂承勳

工學碩士學位論文

SUS304의 상온 및 저온에서의
피로균열진전 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on
Fatigue Crack Growth of SUS304
at Room and Cryogenic Temperature

2010年 2月

指導教授 金 境 洙

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

仁荷大學校 大學院

造船海洋工學科

呂 承 勳

이 論文을 呂承勳의 碩士學位 論文으로
認定함.

2010 年 2 月 日



主 審 金 基 成

副 審 金 境 洙

委 員 李 長 鉉

SUS304의 상온 및 저온에서의 피로균열진전 특성에 관한 실험적 연구

요 약

최근 LNG와 같은 청정에너지의 수요가 증가함에 따라 LNG Tanker의 수요 또한 증가하고 있다. 이에 따라 LNG선은 점차 대형화 추세에 있으며, LNG선의 대형화에 의해서 Sloshing 문제가 최근 대두되고 있다. Sloshing 문제를 해결하기 위해 SPB(Self-supporting Prismatic B) 방식의 tank가 개발 되었다.

본 논문에서는 SPB type에 사용되는 재질인 SUS304(Stainless steel 304)의 상온(25°C) 및 저온(-163°C)에서 기계적 특성 및 피로균열진전 특성에 관해 알아보았다. ASTM E8M을 따라서 상온 및 저온에서 SUS304의 항복응력, 인장강도, 탄성계수를 구하였다. 또한 ASTM E647을 따라서 Crack growth rate test를 수행하여 실험의 유효성 평가를 하고 상온과 저온에서의 균열진전거동을 비교해 보았다.

An Experimental Study on Fatigue Crack Growth of SUS304 at Room and Cryogenic Temperature

ABSTRACT

Due to the increasing trend for clean energy, LNG carrier ship has been built more than ever. Since LNG cargo containment getting longer, LNG cargo container meets the sloshing load. In order to reduce the sloshing load, SPB(Self-supporting Prismatic-B) type tank has been developed by several shipyards.

In this thesis, mechanical properties and fatigue crack growth behavior of SUS304(Stainless steel 304) used for SPB LNG cargo containment system is studied at room temperature (25°C) and cryogenic temperature(-163°C), respectively. Yield stress, ultimate stress and elastic modulus at room and cryogenic temperature are measured based on the ASTM E8M. Crack growth rate experiments were also performed based on the ASTM E647, thereafter the fatigue crack growth behaviors are discussed.

CONTENTS

요 약	I
Abstract	II
Contents	III
List of figures	V
List of tables	VI
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
2. 재료 시험	3
2.1 Monotonic Tensile Test	3
2.1.1 Test Specimen	3
2.1.2 Test Procedure	4
2.1.3 Test Results	6
2.2 Crack Growth Rate Test	9
2.2.1 선형탄성파괴역학(LEFM)의 배경	9
2.2.1.1 응력확대계수	9
2.2.1.2 피로균열 성장	10
2.2.2 시편의 설계	14
2.2.3 균열 길이의 측정	15
2.2.4 응력확대계수(Stress Intensity Factor)의 측정	17
2.2.5 Test Procedure	18
2.2.5.1 Fatigue Pre-crack	18
2.2.5.2 Main Test	19
2.2.6 실험의 유효성 판단	23
2.2.7 Test results	26

3. 결 론 29

4. 참 고 문 헌 30



List of Figures

Fig. 1 Sectional view of SPB LNG tank	1
Fig. 2 Configuration of monotonic tensile test specimen (unit: mm)	3
Fig. 3 Monotonic tensile test at room temperature	4
Fig. 4 Cryogenic chamber for cryogenic test	5
Fig. 5 Nominal stress-Nominal strain curve	6
Fig. 6 Stress-strain diagram for determination of yield stress by the offset method	7
Fig. 7 Basic modes of crack (surface) displacements for isotropic materials	9
Fig. 8 Constant amplitude crack growth data	11
Fig. 9 Three regions of crack growth rate curve	11
Fig. 10 Configuration of crack growth rate test specimen (unit: mm)	14
Fig. 11 Crack measurement locations on the CT specimen	15
Fig. 12 Crack growth rate test at room temperature	22
Fig. 13 Sinusoidal loading for main test	22
Fig. 14 Measuring location of pre-crack	23
Fig. 15 Measuring pre-crack length (RT & Cryogenic temperature test results)	24
Fig. 16 Cycle-crack length curve	26
Fig. 17 ΔK - da/dN curve	27

List of Tables

Table 1 Chemical compositions of SUS304 (wt.%)	3
Table 2 Mechanical properties of SUS304	7
Table 3 Regression coefficient for measuring crack size	16
Table 4 Pre-cracking test procedure	19
Table 5 Main test procedure	21
Table 6 Pre-crack length	24
Table 7 K_{\max} results	25

1. 서론

1.1 연구배경

최근 청정에너지 선호로 인해 LNG 시장이 확대됨에 따라 LNG 선에 대한 관심이 커지고 있으며, 특히나 기존의 부유식 원유 생산시스템인 FPSO(Floating, Production, Storage and Offloading)의 개념을 LNG 생산에 적용한 LNG FPSO의 개발 및 생산에 대한 시장의 관심이 고조되고 있다. 또한 이러한 LNG 수요 증가로 LNG선 및 LNG FPSO는 점차 대형화 추세에 있으며 LNG tank 내에서의 유체의 흔들림으로 인한 파손, 즉 sloshing 문제가 이슈화 되고 있다.

이에 대한 해결책으로 SPB(Self-supporting Prismatic B type) 방식 tank가 제시되고 있는데, 이는 격벽을 화물창에 설치하여 sloshing을 근본적으로 제거하게 되는 구조를 가지고 있기 때문이다. 아래의 Fig. 1은 IHI(Ishikawajima-Harima Heavy Industries)사에서 건조된 SPB LNG FPSO tank의 구조를 나타낸 단면도이다.

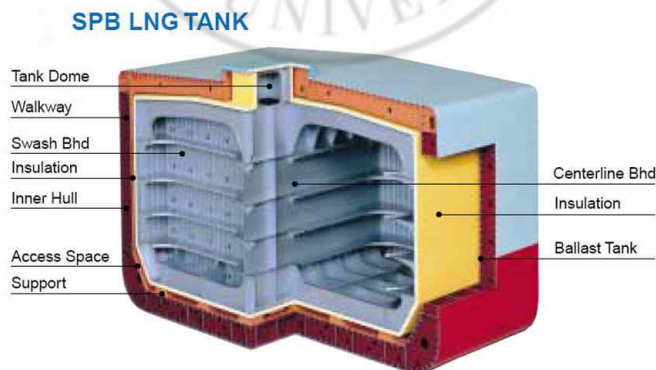


Fig. 1 Sectional view of SPB LNG tank

이 외에도 SPB 방식의 tank는 upper deck 상의 공간을 최대한

활용할 수 있으며, 무게중심이 낮아서 hull stability가 좋다는 장점이 있다.

본 연구에서는 SPB type의 tank에 사용되는 재질인 SUS304에 대하여 상온(25℃) 및 저온(-163℃)에서의 피로균열진전특성에 관하여 실험적으로 비교 및 분석하고자 한다.

이러한 재료 실험의 결과는 이 후 피로실험 및 파괴실험의 기본 자료로 활용 할 수 있으며, 나아가 SPB type tank의 설계기술을 확보하는데 기본 data로 활용할 수 있다.



2. 재료 시험

2.1 Monotonic Tensile Test

본 연구에서 사용한 시편의 재료인 SUS304는 내식성, 내산성 및 용접성이 우수하여 알루미늄, 9% Ni강 등과 함께 극저온 구조물에 이용되고 있다. SUS304의 상온 및 저온에서 기계적 특성 (mechanical property)을 결정하기 위하여 monotonic tensile test를 수행 하였으며, 시편 형상 및 test procedure는 다음과 같다.

2.1.1 Test Specimen

시편은 ASTM E8M-04[1]를 기준으로 제작 되었으며, 압연 방향으로 가공되었다. 시편의 그립부는 저온실험 시 지그(Jig)를 장착하기 위해 임의로 설계되었다. Fig. 2는 설계 된 시편 형상을 보여주며 Table 1은 SUS304의 화학 조성비를 보여준다.

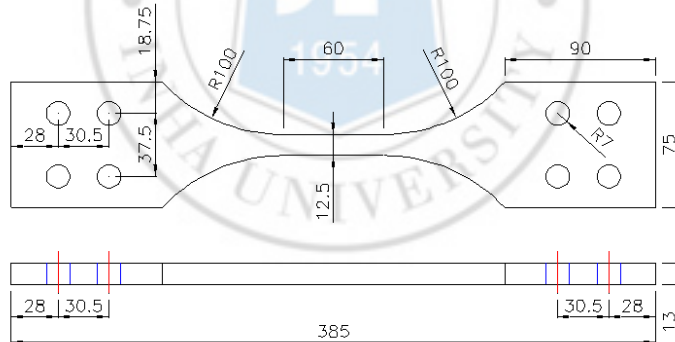


Fig. 2 Configuration of monotonic tensile test specimen
(unit: mm)

Table 1 Chemical compositions of SUS304 (wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
SUS304	0.05	0.61	0.85	0.25	0.01	8.22	18.34

2.1.2 Test Procedure

응력-변형률 거동을 결정하기 위해서 하중제어 방식을 통한 인장시험을 수행하였다. Load rate는 ASTM에서 1.15MPa/sec ~ 11.5MPa/sec로 규정하고 있으며, 시편의 단면적을 고려하여 1.07kN/sec로 정하였다. 표점거리가 50mm인 Extensometer를 이용하여 변형률을 측정하였고, UTM의 load cell을 통해서 시험 중 하중변화를 측정하였다. 응력-변형률 선도를 통해 탄성계수, 항복강도 및 인장강도를 측정하였고 이 모든 과정은 ASTM E8M-04를 따르고 있다. Fig. 3은 상온 인장시험의 세팅사진을 보여주고 있다.

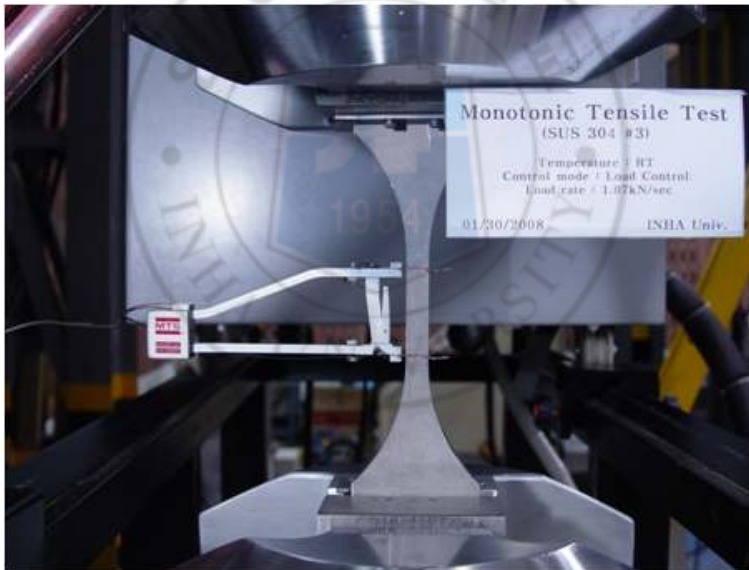


Fig. 3 Monotonic tensile test at room temperature

또한 극저온에서 실험을 수행하기 위해 극저온 챔버를 자체 제작하였다. 온도를 낮추기 위하여 액화질소를 극저온 챔버 내에 직접 분사시키고 분사된 액체질소는 챔버 내에서 기화되면서 온도를 저하시키게 된다. 또한 챔버 내 고른 온도분포를 위하여 챔버내

에 팬을 설치하여 내부 공기가 강제적으로 순환되도록 하였다.. 챔버 내부 온도와 시편의 온도를 측정하기 위하여 온도 센서를 설치하였고 이 센서는 온도조절장치와 연결되어 설정된 온도의 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 되도록 유지해 준다. 실험 중 챔버내의 실험 과정을 볼 수 있도록 뷰 파인더를 설치하였다. Fig. 4는 극저온 챔버의 내부 모습을 보여준다.

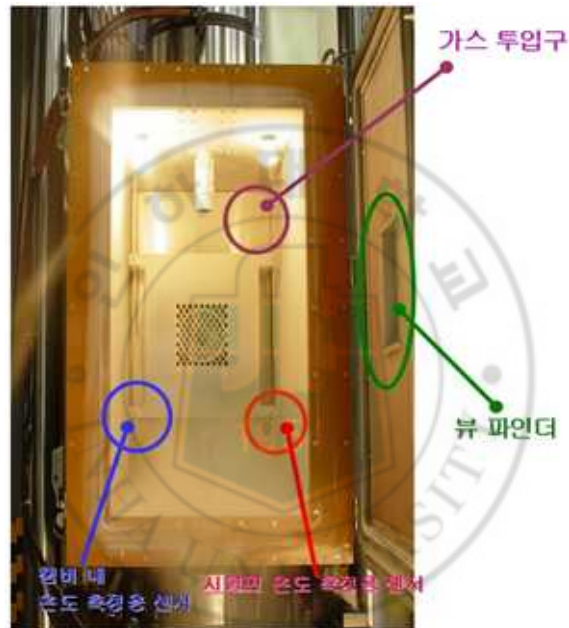


Fig. 4 Cryogenic chamber for cryogenic test

2.1.3 Test Results

UTM과 저온 챔버를 이용한 상온 및 저온에서의 인장실험 결과 응력-변형률 선도는 Fig. 5와 같고 탄성계수, 항복강도, 인장강도는 Table 2에 나타내었다. 또한 비선형 구간에서 항복강도를 구하기 위해서 Fig. 6과 같이 ASTM E8M-04에서 소개되고 있는 0.2% offset 방법을 사용하였다.

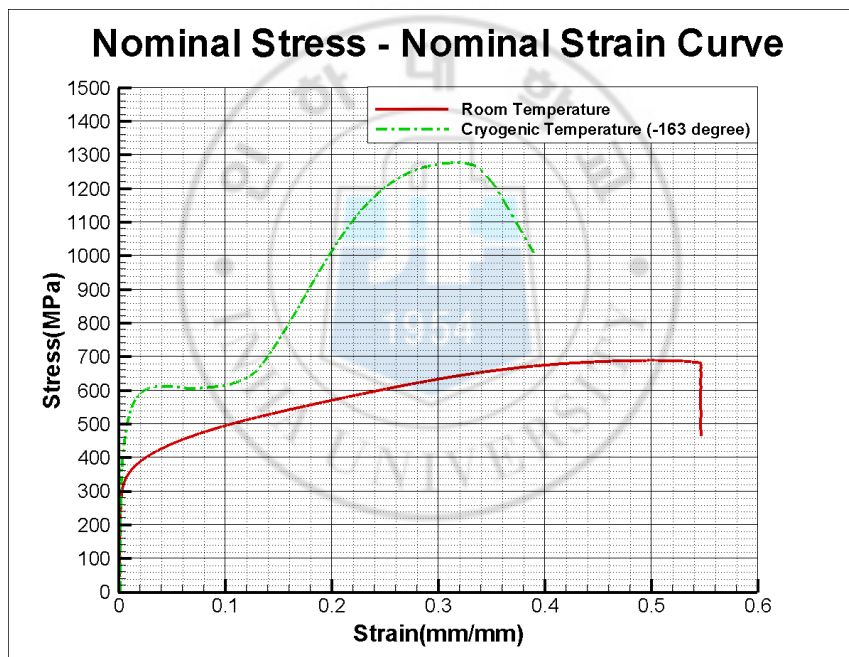


Fig. 5 Nominal stress-Nominal strain curve

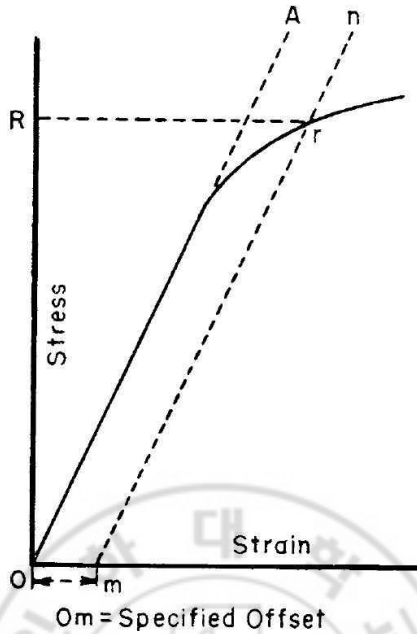


Fig. 6 Stress-strain Diagram for determination of yield stress by the offset method

Table 2 Mechanical properties of SUS304

Temperature	Yield Stress (0.2% offset)	Ultimate Stress	Elastic Modulus
RT	313 MPa	689 MPa	185 GPa
-163°C	423 MPa	1281 MPa	197 GPa

인장실험 결과 전체적으로 상온에 비해 저온에서 항복강도, 인장강도, 탄성계수가 커짐이 보였다. 극저온 -163°C에서는 상온보다 항복강도가 35% 증가 하였고 인장강도는 86%나 증가하는 결과를 나타냈다. 이는 오스테나이트 조직을 갖는 SUS304 스테인리스강의 인장성질은 소성변형에 의해 생성되는 가공유기 마르텐사이트와 밀접한 관계가 있으며 생성되는 마르텐사이트량은 변형온도와 변형량에 따라 달라지기 때문에 인장성질 또한 시험온도에 따

라 다르게 나타난 것으로 판단된다.

또한 상온보다 저온에서 커브의 형상이 S자형으로 바뀌는 것을 확인할 수 있는데 이러한 굴곡현상(inflexion) 역시 마르텐사이트 변태와 관련이 있다고 보고되고 있다.[2]



2.2 Crack Growth Rate Test

2.2.1 선형탄성파괴역학(LEFM)의 배경

2.2.1.1 응력확대계수

부재의 피로수명을 계산하는 것은 피로균열의 성장을 설명하는데 매우 중요하다. 균열성장과 균열선단에서의 응력분포를 설명하기 위해서 파괴 역학 원리를 사용 한다

만일 작용하중의 크기가 작아 탄성범위 내에서 응력이 발생 된다면 균열 부재에서 응력분포는 선형탄성이론(linear elasticity theory)에 의해서 계산되어 질 수 있다. 균열선단 부근에서 응력장(stress field)은 3가지 기본 형태로 나누어 질 수 있다. 각각은 균열 면 변위(crack surface displacement)의 다른 모드와 연결되어진다. 이들 3가지 모드는 다음과 같다.

- ▶ Mode I - Opening or tensile mode
- ▶ Mode II - Sliding or shearing mode
- ▶ Mode III - Tearing or antiplane mode

각각의 모드에 대한 하중 및 변위 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

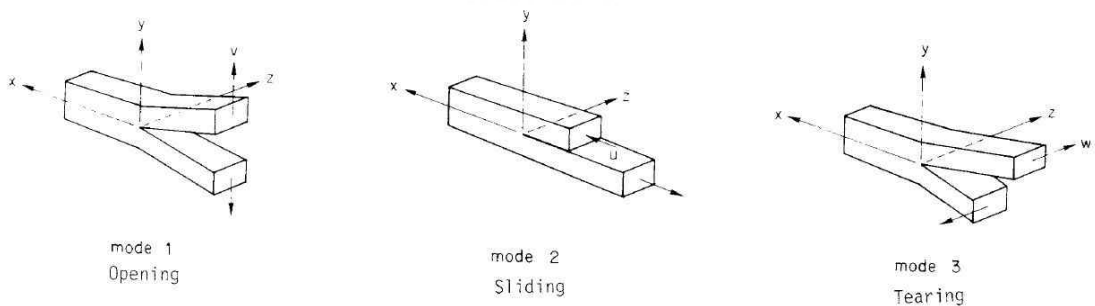


Fig. 7 Basic modes of crack (surface) displacements for isotropic materials

피로파괴 해석에서 mode I 은 가장 기본이다. 선형 탄성이론을 사용 하는 경우 부재의 모든 점에서 응력은 계산이 가능하다. 만일 균열선단 근처 응력에 관심이 있다면 다음과 같은 비교적 간단한 σ_{ij} 에 관한 식으로 표현 되어질 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \dots$$

여기서 r 과 θ 는 균열선단에서 cylindrical coordinates 이다. 그리고 K 는 응력 확대 계수(stress intensity factor)이다. K 는 균열선단에서 국부 응력 성분의 크기를 의미하고 하중, 균열크기, 균열 형상, 그리고 시편 geometry 등에 의존한다. 일반적으로 응력 확대 계수(stress intensity factor)는 다음과 같다.

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\theta a}$$

여기서,

a = 균열길이

σ = 먼 거리에서 부재에 작용하는 응력

$f(g)$ = 시편과 균열의 기하학적인 형상에 의존하는 보정계수

-너비효과(Finite width effect)

-두께효과(Front wall effect)

-균열형상(Crack shape)

2.2.1.2 피로균열 성장

전형적인 일정 진폭 피로균열전과 데이터는 Fig. 8과 같다. 균열 길이(a)에 대응하는 반복수(N)로 그려지고, 작용응력이 증가함에 따라 균열 성장 속도는 증가한다.

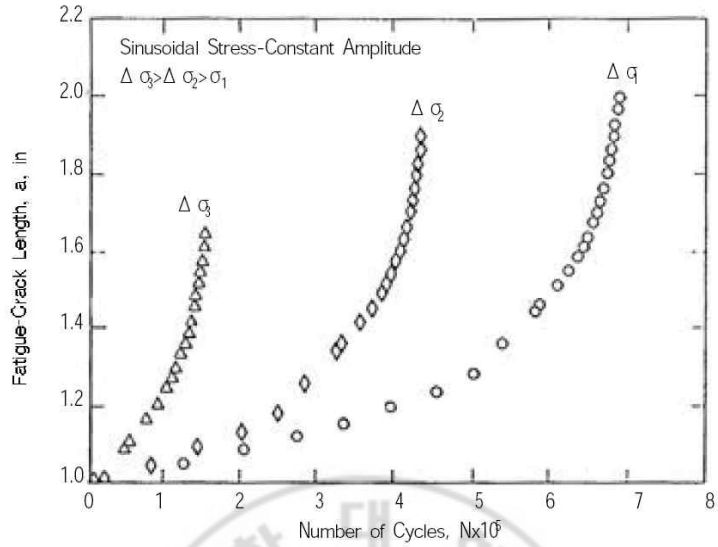


Fig. 8 Constant amplitude crack growth data

균열진전속도(da/dN)는 위의 균열길이(a)대 반복수(N)의 곡선을 미분하여 얻어진다. $\log(da/dN)$ 대 $\log\Delta K$ 의 곡선은 Fig. 9처럼 나타내지고, 이 곡선은 세 영역으로 구분된다.

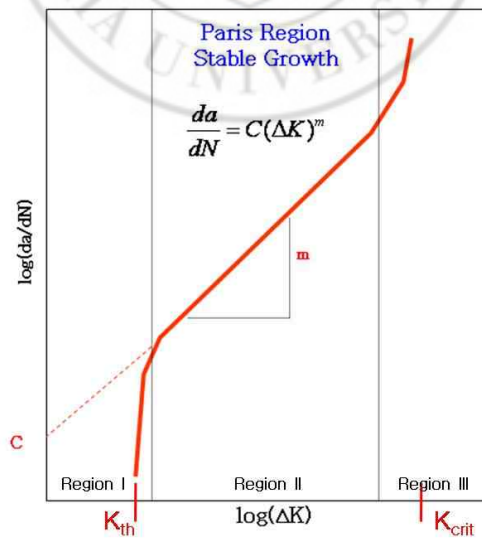


Fig. 9 Three regions of crack growth rate curve

낮은 응력의 I 영역에서 균열거동은 초기값 K_{th} 의 영향을 받는다. 중간 부분은 많은 구조물 등에 적용되는 II 영역으로 곡선은 선형성을 나타낸다. 마지막으로 높은 ΔK 에서, 높은 균열성장속도와 작은 피로수명을 나타내는 III 영역이 있다.

▶ 영역(Region) I

I 영역의 균열성장속도 곡선은 하한계 영향(threshold effect)과 관련된다. 하한 응력확대계수(threshold stress intensity factor) ΔK_{th} 보다 낮은 값에서는 피로균열성장은 일어나지 않거나 너무 느려서 측정이 곤란하다. 하한 피로값은 응력 비 R (stress ratio, $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$)에 의존한다.

▶ 영역(Region) II

대부분의 균열성장거동에 적용되는 LEFM의 개념은 II 영역에 관계된다. 이 영역에서 $\log da/dN$ 대 $\log \Delta K$ 의 기울기는 거의 직선이며, 이 영역에 대한 많은 추세선 공식들이 제안되었다. 1960년대 초에 발표된 Paris의 식이 가장 널리 사용되고 있으며 이 식은 아래와 같다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

재료상수인 C 와 m 은 보통 3과 4사이에 있는데 이들의 범위는 보통 2.3에서 6.7까지 인데 평균값은 3.5이다. 또한 실험을 수행할 수도 있는데 ASTM E647에서는 시험의 기준을 정하고 있다. 본 논문에서 Crack growth rate test는 ASTM E647-05를 기준으로 실험을 수행되었다.

▶ 영역(Region) III

III영역에서는 급속한 불안정균열성장이 일어난다. 실제의 많은 공학적 상황에서는 전체균열전파수명에 특별한 영향을 주지 않으므로 이 영역은 무시된다.

II영역에서 III영역 거동으로 천이하는 점은 재료의 항복응력, 응력확대계수, 응력비에 의존한다. Forman의 식은 III영역의 거동을 모델화하기 위해 전개 되었는데 이 식은 평균응력영향 모델에 자주 사용된다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_c - \Delta K}$$



2.2.2 시편의 설계

BS(British Standard)와 ASTM에서는 나름대로의 기준에 의해 Crack growth rate test의 실험 방법 및 과정을 정의하였다. BS 6835[3]와 ASTM E647-05[4]가 그 기준인데, 본 논문에서는 monotonic tensile test와 마찬가지로 ASTM 기준인 ASTM E647-05를 따라서 시편을 제작하였으며, 형상은 Fig. 10에 나타내었다. 시편의 두께에 대해서는 특별히 정해진 요구조건이 없다. 그러나 피로특성은 파괴인성이 두께에 의존하는 것과 마찬가지로 두께에 의존할 수 있다. 따라서 시편의 두께는 구조물에서 관심 있는 부분의 두께와 같아야 한다.

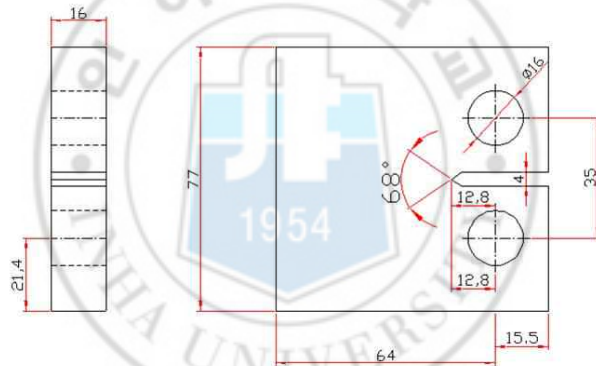


Fig. 10 Configuration of crack growth rate test specimen
(unit: mm)

ASTM E647-05에서 정의하고 있는 시편은 CT(compact tension)시편, middle tension시편, single edge crack tension 시편 등이 있으나, 1축 인장 및 압축 하중이 작용되는 mode I 상태의 실험에 가장 적합한 CT 시편을 선택하여 실험을 수행했다.

2.2.3 균열 길이의 측정

실험 중 시편의 균열길이를 측정하기 위하여 MTS사의 COD gage(Model No. 632.03 F-31)를 이용하였다. 균열 입구에 부착되어 있는 클립 게이지는 한 쌍의 외팔보에 접촉된 네 개의 저항형 변형률 게이지로 구성된다. 보의 처짐이 발생하면 변형률 게이지를 통하는 전압이 변하며, 이 전압은 변위에 대하여 선형적으로 변한다. 클립 게이지는 각 보의 끝단이 자유롭게 움직일 수 있도록 날카로운 나이프 에지(knife edge)에 부착되어야 한다. 나이프 에지는 시험편에 직접 가공될 수도 있고, 시험편의 균열 입구에 부착 될 수도 있다. 본 논문에서 사용된 방법은 시험편에 직접 부착하는 방식으로 사용되었으며 ASTM E647-05에 의한 균열측정위치 및 regression coefficient를 Fig.11과 Table 3에 나타내었다.

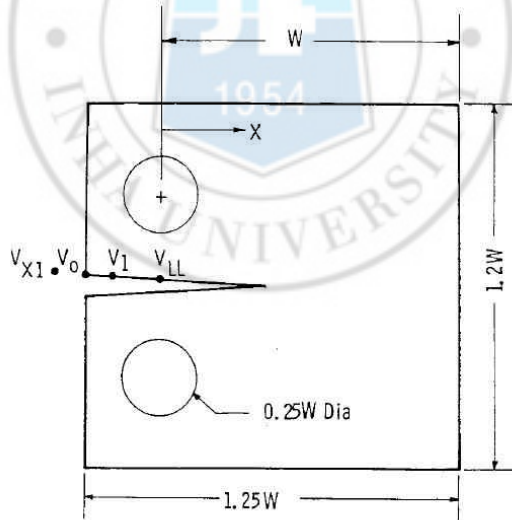


Fig. 11 Crack measurement locations on the CT specimen

Table 3 Regression coefficient for measuring crack size

Meas. Location	X/W	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
V ₀	-0.250	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6

균열측정 위치에서의 regression coefficient를 이용하여 균열 길이를 측정하는 식은 아래와 같다.

$$\alpha = a/W = C_0 + C_1u_x + C_2u_x^2 + C_3u_x^3 + C_4u_x^4 + C_5u_x^5$$

$$u_x = \left\{ \left[\frac{E\nu B}{P} \right]^{\frac{1}{2}} + 1 \right\}^{-1}$$

여기서,

a = Length from center of hole to end of crack

E = Elastic Modulus

ν = Displacement between measurement points

B = Specimen thickness

P = Applied force

W = Width from hole center

본 실험에서 사용한 MTS사의 crack growth rate test software에서는 균열길이를 위의 식을 이용하여 load cell에서 얻은 하중정보와 COD gage로부터 얻은 displacement 정보를 이용하여 자동 계산하여 준다.

2.2.4 응력확대계수(Stress Intensity Factor)의 측정

응력확대계수(stress intensity factor) 역시 측정 방법 및 다항식이 ASTM E647-05에서 정의 하고 있으며, 아래와 같다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

여기서 사용된 파라미터들은 2.2.3에서 사용된 파라미터들과 동일하다. MTS사의 crack growth rate test software에서는 응력확대계수 역시 자동 계산하여 준다.



2.2.5 Test Procedure

ASTM E647-05에서는 두 가지 형태의 피로시험에 대하여 기술하고 있다. K증가 일정진폭하중 시험과 K 감소시험이다. K 감소 시험의 경우 하중진폭은 음(-)의 K 기울기에 따라 감소한다. 그러나 K 증가시험은 균열진전속도가 10^{-8} m/cycle보다 클 경우에 적합하지만, 피로예비균열 삽입 조건으로 인하여 10^{-8} m/cycle보다 낮은 속도에 대해서는 적용하기 힘들다. 따라서 K 감소시험은 하한계 근처의 데이터가 필요할 때 선호된다.

본 논문에서는 대부분의 균열성장거동에 적용되는 영역 II에 관하여 알아보기 위해, K증가 일정진폭하중 시험을 고려했다.

2.2.5.1 Fatigue Pre-crack

파괴역학 이론은 하중을 가하기 전에 생성된 매우 날카로운 균열에 적용된다. 실험실에서 사용되는 시험편이 항상 이러한 이상적인 조건을 만족시킬 수 없지만, 실제적인 목적인 가공 시 시험편에 발생한 잔류응력을 제거하기 위하여 매우 날카로운 균열을 삽입하는 것은 가능하다. 이러한 날카로운 균열을 생성시키기 위한 가장 효과적인 방법은 피로하중을 가하는 것이다.

피로하중에 의한 피로균열은 기계 가공된 노치의 선단에서 시작되고 반복하중을 적절히 조절함으로써 원하는 크기까지 성장한다. 연구실에 보유하고 있는 유압 시험기는 정현파 하중 파형뿐만 아니라 그 외의 여러 하중 파형을 생성시킬 수 있다.

Pre-crack의 길이에 대한 제약 또한 시험의 유효성을 판단하는데 중요한 요소이다. Fatigue pre-crack 시험 중 pre-crack의 길이는 $0.1B$, h (initial displacement between cod measurement points) 혹은 1mm 3개의 값 중 가장 큰 값보다 커야하며, 시험편의 양 측면에서 측정된 pre-crack의 길이가 $0.25B$ 이상이면 시험은 유효하지 않다고 판단한다.

또한 main test시 처음 가해지는 loading cycle에 의해서 발생하는 K_{max} 값은 pre-crack 발생 시 마지막 loading cycle에 의해 발생하는 K_{max} 값보다 커야 한다는 제약사항이 있다. 자세한 유효성 판단 기준은 ASTM E647-05를 참고하도록 한다.

이러한 제약사항을 기준으로 설정한 상온 및 저온에서의 pre-cracking test procedure는 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Pre-cracking test procedure

Temp.	Test frequency	Final crack length	Final K_{max}	Load ratio
RT	10 Hz	17.3 mm	$20 \text{ MPa} \sqrt{m}$	0.1
-163°C	10 Hz	17.3 mm	$40 \text{ MPa} \sqrt{m}$	0.1

Main test가 끝난 뒤 실제 pre-crack의 길이를 측정하여 입력 값과 비교하는 과정을 거친다. pre-crack의 길이 측정법 역시 ASTM E647-05에서 규정하고 있으며, 측정결과 상온에서 17.56mm, -163°C에서 18.9mm로 pre-crack test시 입력 값과 차이가 있었다. 하지만 이 값은 ASTM E647-05의 제약조건을 만족하는 값이며, 실제 측정한 pre-crack의 길이를 MTS사의 crack growth rate test software내에 수정하여 입력할 수 있으므로 실험 결과에는 문제가 없다.

2.2.5.2 Main Test

Main test의 procedure 또한 ASTM E647-05를 따른다. 피로균열 진전량의 측정을 위한 이 표준은 시험편이 주로 탄성거동을 해야 한다고 요구한다. 이 표준은 CT시험편의 균열이 진전하지 않은 ligament에 대하여 아래와 같은 요구조건을 제시하고 있다.

$$W-a \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{FS}} \right)^2$$

여기서,

$$\sigma_{FS} = \text{Effective yield stress} \left(\frac{\sigma_{YS} + \sigma_{ULT}}{2} \right)$$

일반적으로 stainless steel과 같이 가공경화의 정도가 클 경우 effective yield stress를 사용하도록 한다.[5] $\sigma_{ULT}/\sigma_{YS} \geq 1.3$ 의 조건일 때는 effective yield stress를 사용하도록 ASTM에 정의 되어있다. SUS304의 실험결과 인장강도와 항복강도의 비가 상온에서는 2.2, 저온에서는 3이므로 effective yield stress를 사용하도록 한다. 만약 1.3 이하일 때는 effective yield stress 대신 항복강도 (σ_{YS})를 사용한다.

또한 균열 길이 a 와 하중반복수 N 곡선과의 관계인 da/dN 을 구하기 위해서 두 가지 수치적인 방법을 ASTM에서 제안하고 있다. 한 가지 방법은 incremental polynomial method로 2차 방정식을 균열 길이와 N 곡선의 국소 부분에 회기 시키고, 수학적으로 이의 미분 값을 구하는 것이다. $(2n+1)$ 개의 인접한 점들의 그룹이 선택되고 (여기서 n 은 일반적으로 1,2,3 혹은 4), (a_i, N_i) 는 $(2n+1)$ 개의 점들의 중앙값이다. 아래의 식은 $a_{i-n} \leq a \leq a_{i+n}$ 범위에서 회기 된다.

$$\hat{a}_j = b_0 + b_1 \left(\frac{N_j - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_j - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (i-n \leq j \leq i+n)$$

또 다른 방법은 secant method가 있다. 이는 매우 간단하지만, 흠여짐이 심하다. 아래의 식은 secant method를 이용하여 da/dN 값을 얻는 식을 나타낸다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\bar{a}} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}$$

여기에서 $\bar{a} = (a_{i+1} + a_i)/2$ 이다.

본 논문에서는 da/dN 값을 얻기 위하여 흠어짐이 심한 secant method를 사용하지 않고, incremental polynomial method를 사용하였다.

ASTM의 제약조건을 따라서 상온 및 저온에서의 main test procedure는 아래의 Table 5에 나타내었고, 실험 세팅사진을 Fig. 12에, 일정진폭하중의 형상을 Fig. 13에 나타내었다.

Table 5 Main test procedure

Temp.	Test frequency	Final crack length	Control mode	Load ratio
RT	10 Hz	47 mm	Load control	0.1 (1.8kN/18kN)
-163°C	10 Hz	41 mm	Load control	0.1 (3.6kN/36kN)



Fig. 12 Crack growth rate test at room temperature

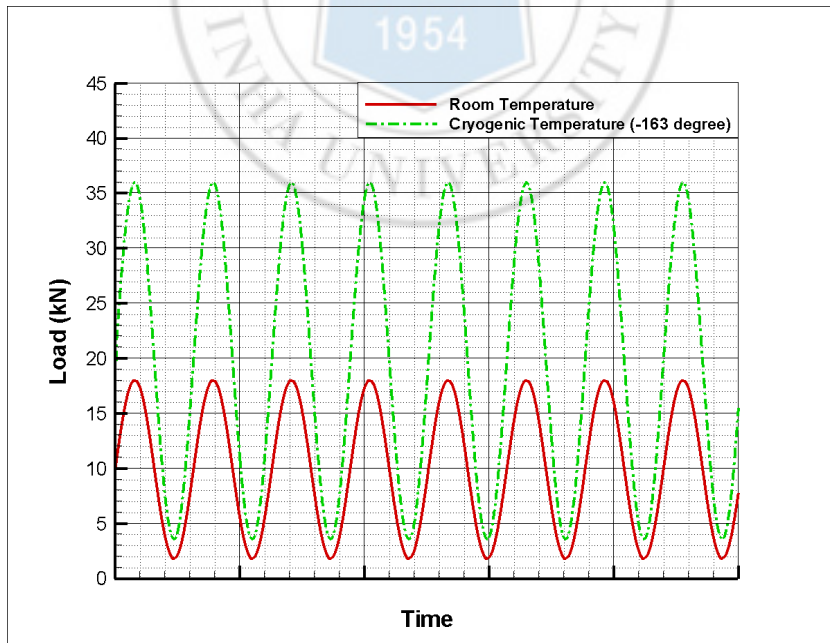


Fig. 13 Sinusoidal loading for main test

2.2.6 실험의 유효성 판단

ASTM E647-05에서는 실험 후 실험 결과를 이용하여 엄격한 유효성 판단을 하도록 되어 있다. 대표적으로 notch의 사이즈를 결정한다거나 pre-crack의 형상과 길이에 대한 제한 및 피로예비균열 삽입에서 최종 K_{max} 와 피로실험 초기 K_{max} 의 관계가 대표적이다.

먼저 실험 전 시편의 형상을 설계하기 위해서 notch의 사이즈를 결정하게 되는데, notch의 사이즈는 $0.2w(12.8\text{mm})$ 이상으로 설계를 하도록 되어 있다. 이는 시편 설계 시 고려한 사항이므로 문제가 없다.

다음으로, pre-crack length를 측정하여 실험의 유효성을 판단 하도록 되어 있으며, 그 기준은 pre-crack을 총 9등분 하여 시편의 앞과 뒤의 (Fig. 14의 1번, 9번) pre-crack length의 차이가 $0.25B(4\text{mm})$ 이내의 범위에 들어오도록 하고 있다. Fig. 15 및 Table 6은 실험의 유효성을 판단하기 위하여 pre-crack의 길이를 측정할 값을 보여주고 있다.

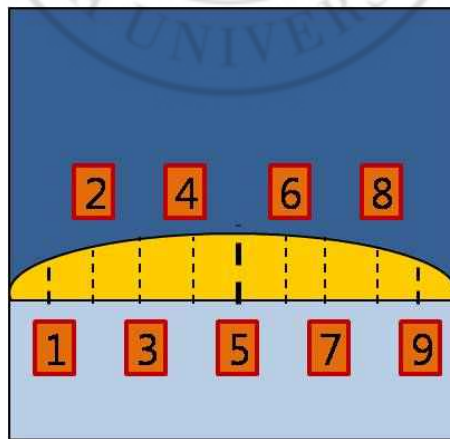


Fig. 14 Measuring location of pre-crack

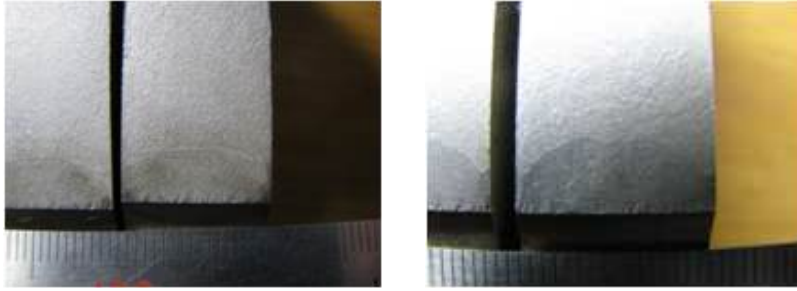


Fig. 15 Measuring pre-crack length (RT & Cryogenic Temperature test results)

Table 6 Pre-crack length

Temp.	Location (from center of hole, mm)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RT	16.11	17.08	17.90	18.14	18.15	18.20	17.88	17.11	15.72
-163°C	16.13	17.39	18.55	19.34	18.67	19.05	18.62	17.34	16.04

시편의 pre-crack 길이의 측정결과, 상온과 저온에서 location 1 과 9의 길이차이가 4mm를 벗어나지 않기 때문에, 상온 및 저온에서의 실험 결과는 유효하다고 판단할 수 있다.

또 한 가지의 pre-crack에 대한 제약사항으로 pre-crack의 진전 길이는 notch의 끝단으로부터 0.1B(1.6mm), h(4mm) 혹은 1mm 3 개의 값 중 가장 큰 값보다 커야 한다는 조건이 있다. ASTM에서 규정한 균열길이 측정법을 따라 균열진전 길이를 평가한 결과, 상온과 저온에서 각각 4.76mm, 6.1mm로 앞의 3개 값 중 가장 큰 값인 4mm 이상 pre-crack의 길이가 진전하였으므로 또 하나의 pre-crack에 대한 제한 조건을 만족 시키고 있다.

마지막으로 피로예비균열 삽입에서 최종 K_{max} 와 피로실험 초기 K_{max} 의 관계가 있는데 실험 중 측정 된 K_{max} 을 Table 6에 정리하였다.

Table 7 K_{max} results

Temp.	Final pre-crack $K_{max}(MPa\sqrt{m})$	Initial main test $K_{max}(MPa\sqrt{m})$
RT	20.14	23.33
-163℃	40.57	47.79

K_{max} 의 측정 결과, 상온 및 저온에서 main test의 initial K_{max} 값이 pre-crack의 final K_{max} 값 보다 큰 결과를 보였다. 이로써 ASTM에서 규정하고 있는 K_{max} 에 대한 제약사항 또한 만족하고 있음을 보여준다.



2.2.7 Test Results

최종 실험 결과를 이용하여, cycle-crack length, ΔK - da/dN 두 가지 선도를 실험 시 온도에 따라서 Fig. 16와 Fig. 17에 나타내었다.

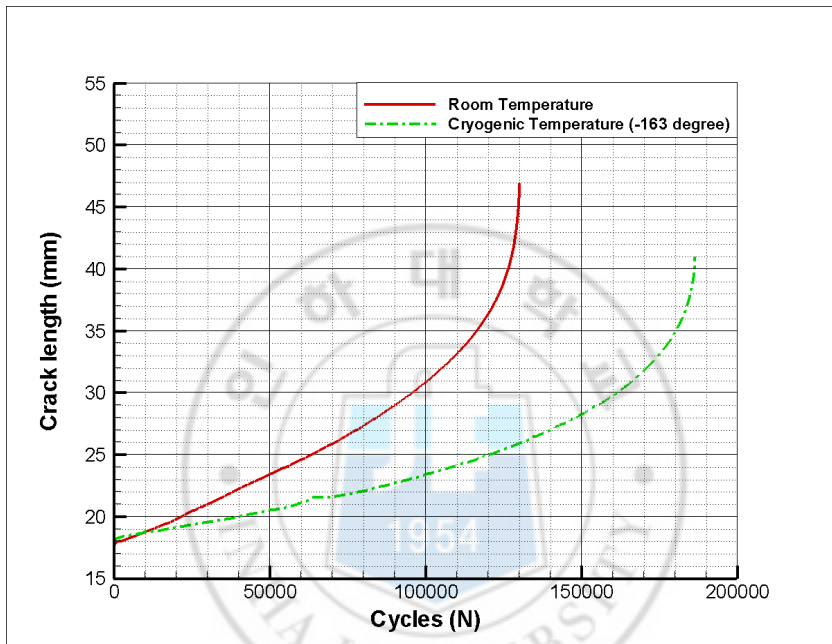


Fig. 16 Cycle-crack length curve

Fig. 16는 cycle당 균열 진전의 형상을 보여주고 있다. 상온에서 작용하중이 1.8kN~18kN이고 저온에서 작용하중이 3.6kN~36kN 임을 감안한다면 저온에서 큰 하중 범위에도 불구하고 확실히 균열 진전이 느리게 진전함을 확인할 수 있다.

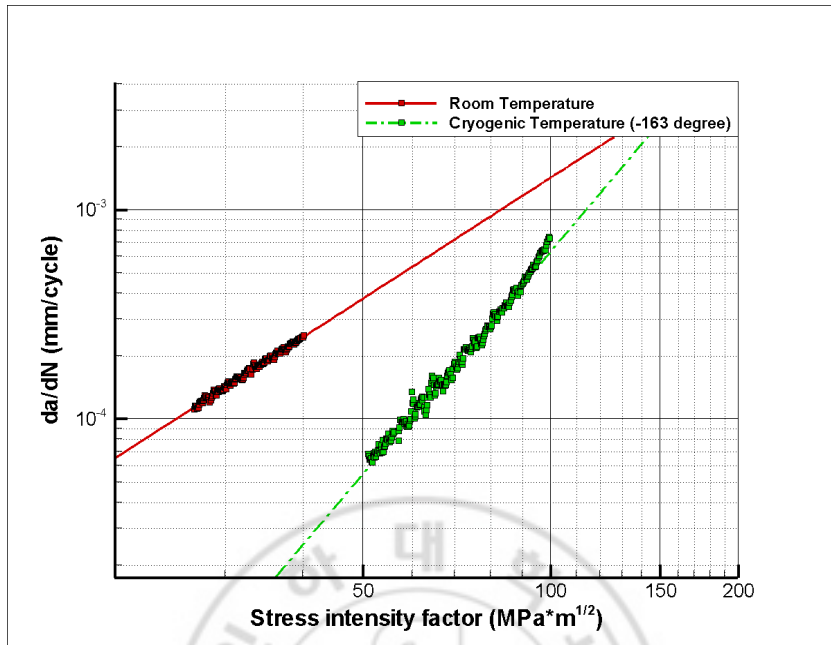


Fig. 17 ΔK -da/dN curve

Fig. 17을 통하여 저온 환경 하에서의 da/dN값은 상온의 결과에 비하여 낮은 값을 보이고 있음이 확인된다. 특히 낮은 ΔK 의 영역에서는 더 낮은 da/dN값을 보여주고 있는데, 이는 저온에서 피로 균열진전의 저항력이 상온에 비해서 뚜렷하게 크다는 것을 의미한다.

저온에서의 이와 같은 현상에 대하여 Suresh 등과 Mei 등은 낮은 ΔK 영역 부근에서 온도 저하에 따른 마르텐사이트 변태에 의해서 균열 단합이 발생함을 확인하였다.[6] 또한 Tschegg 등은 피로균열진전의 낮은 ΔK 영역에서 온도감소에 따른 material의 강도증가로 인하여 이러한 결과가 초래된 것으로 설명하였다.[7] 이러한 설명에 의해 마르텐사이트 변태로 인한 강도 상승이나 균열 단합이 피로균열진전거동에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

또한 Fig. 15에 나타났듯이, 저온에서의 피로균열 진전속도는 낮은 ΔK 영역에서 상온에 비해 낮지만, 높은 ΔK 영역으로 갈수록 그

차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 저온영역에서 파괴인성이 저하되므로, III영역으로의 천이가 빨리 일어남을 의미한다.



3. 결론

본 연구에서는 상온 및 저온에서 SUS304의 monotonic tensile test 및 crack growth rate test를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- SUS304의 상온(25°C) 및 저온(-163°C)에서의 인장실험 결과, 저온에서 항복강도가 35%, 인장강도가 86% 증가하는 결과를 보였다.

- 저온 인장실험 결과 Nominal stress-Nominal strain curve에서 급격한 굴곡현상(inflexion)을 보임을 확인하였고, 상온 결과와는 전혀 다른 형태로 변형하고 있음을 보였다.

- 저온 하에서 da/dN 값은 상온에 비해 낮은 값을 가지는 것을 확인하였고, 이를 통해 저온에서의 균열진전 저항력이 상온에 비해서 현저하게 큼을 보였다.

- 저온 하에서 파괴인성의 저하로 인해, 균열진전 속도는 낮은 ΔK 영역에서는 상온에 비해 낮지만, 그 차이가 높은 ΔK 영역으로 갈수록 줄어들고 있음을 확인하였다.

4. 참고문헌

[1] ASTM E8M-04, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials, 2004.

[2] Reed, R. P. and Tobler, R. L., "Deformation of Metastable Austenitic Steels at Low Temperature," Advances in Cryogenic Engineering - Materials, vol. 28, pp. 49~56, 1982.

[3] BS 6835, Method for the determination of the rate of fatigue crack growth in metallic materials, British standard, 1998.

[4] ASTM E647-05, Standard Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, American Society for Testing and Materials, 2005.

[5] Paris, P. C. and Erdogan F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. D85, pp. 528-534, 1963.

[6] Mei, Z. and Morris, J. W. Jr., "Influence of Deformation-Induced Martensite on Fatigue Crack Propagation in 304-Type Steels", Metallurgical Transactions A, Vol. 21A, No. 12, pp 3137~3152, 1990.

[7] Tshegg, E. and Stanzl, S., "Fatigue Crack Propagation and Threshold in b.c.c. and f.c.c. Metals at 77 and 293K", Acta Metallurgica, Vol. 29, pp 33~40, 1981.

