9% Ni강의 피로균열진전거동에 관한 연구

심규택* · 김재훈† · 이관희** · 안병욱** · 김영균***

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior of 9% Ni Steels

Kyue-Taek Shim, Jae-Hoon Kim, Kwan-Hee Lee,
Byung-Wook Ahn, Young-Kyun Kim

Key Words: 9% Ni Steel(9% 니켈강), Fatigue crack growth(피로균열진전속도), Load ratio(하중비), Welded metal(용접재).

Abstract

This study is to evaluate the fatigue crack growth characteristics for base metals and welded metal of 9% Ni steels. Since this material has very excellent fracture toughness at low temperature, it has been widely used for inner walls of LNG storage tank. These materials to compare fatigue crack growth (FCG) behaviour are treated with heat by the method of quenching and tempering (QT), and quenching, lamellarizing and tempering (QLT). FCG tests using compact temsion (CT) specimen under stress ratio R=0.1, 0.5, and constant load are carried out. K-increasing tests are conducted by the standard test method described in ASTM E 647. To investigate the effect of welded metal on the crack growth rate, the locations of notch tip were chosen at the center of welded metal and heat affected zone (HAZ). Form the results, FCG rate has almost same tendency according to stress ratio, base and welded metal, the locations of welded metal. FCG rate of welded metal is somewhat faster than base metal. Also scanning electron microscope (SEM) is used to observe the striation of the fractured surface after fatigue crack tests.

1. 서 론

현재 환경문제 및 에너지 위기 대책으로서 열효율이 높고 안전할 뿐 아니라 공해물질이 거의 발생하지 않는 청정연료인 천연가스의 사용이 세계적으로 급증하고 있다. 따라서 높은 효율을 가진 청정 에너지의 장점 때문에 천연가스의 사용은 세계적으로 꾸준히 증가하는 추세이며, 우리나라도 천연가스가 도입된 이래 급격한 경제규모의 증대에 힘입어 사용량이 크게 증가하고 있다. LNG 저장탱크는 LNG가 가진 저온 환경에서도 우수한 강도와 인성을 가진 저온용 재료를 내벽재료로 사용 한다. 현재까지 가장 널리 사용되어지고 있는 재료는 9% Ni강이며, 본 재료는 우수한 저온 인성을 바탕으로 지상형 LNG 저장탱크의 내조로서 전 세계에 널리 사용되어지고 있다. LNG 저장탱크의 구조물은 대부분 용접구조물로 구성되어지며, 온도에 따라서 내구성에도 영향을 미치게 된다. 용접시에 발생되는 용접부의 결함은 대표적으로 기공, 언더컷, 불연속적인 이음부 등의 현상이 유발시켜서 구조물의 피로강도를 크게 감소시키고 있다. 9% Ni강의 경우 용접봉은 모재의 성분과 동일한 성분계가 있지만 대부분의 경우 저온에서 더욱 안정한 오스테나이트계열의 고니켈계가 사용되고 있다. 9% Ni강의 기존 열처

† 회원, 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-7628 FAX : (042)822-7366
* 회원, 충남대학교 기계설계학과
** 한밭대학교 기계공학과
*** 한국가스공사 연구개발원

리 방법과는 다른 QLT (quenching, lamellarizing and tempering) 열처리 공정을 채택하였다. 3단 열처리 공정인 QLT 열처리는 담금질 열처리 (quenching trcatment, Q처리)와 뜨임 열처리 (quenching treatment, T처리) 중간에 A_{C1}과 A_{C3} 사이의 페라이트와 오스테나이트의 2상 영역으로 가열후 공냉시키는 층상화 열처리 (lamellarizing treatment, L처리)를 추가로 행하여 열적으로 안정한 잔류오스테나이트 함량의 증가와 결정립 크기의 미세화를 통하여 저온 인성의 증가를 얻는 열처리방법이다.[1] 이런 재료를 응력확대계수 범위 $\triangle K_{th}$ (near-threshold stress intensity factor range)는 피로균열진전 거동에서 중요한 의의를 갖고 있다. ASTM E 647 에서는 하한계 응력확대 계수범위 ($\triangle K_{th}$)를 구하는 방법으로써 K-증가실험법을 제안하고 있다. 따라서 본 연구에는 K-증가 실험법으로 9% Ni 강의 용접재의 용접부에 대한 피로균열 진전시험을 수행하여 하한계 응력확대 계수 범위를 결정 하였고, 같은 시험조건과 시험법으로 피로균열진전 거동 및 피로 수명에 대해 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 용접

실험에 사용된 재료는 9% Ni강은 국내 LNG 저장탱크에 공급되는 재료의 강과 동일한 강이다. QT와 QLT를 사용하였으며, 판 두께는 12.7mm 이다. 화학 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에서 나타내었으며, ASTM A 553 규격을 따른다.[2,3]

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

Materials	C	Mn	P	S	Si	Ni	Fe
QT	0.05	0.67	0.004	0.003	0.25	9.02	Bal.
QLT	0.05	0.69	0.006	0.003	0.25	8.90	Bal.

Table 2 Mechanical property of 9% Ni steel.

Materials	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H_{RC})
QT	651.9	705.9	20.0	99.87
QLT	657.7	713.2	20.0	93.20

시험에 사용된 재료는 모재에 대하여 SMAW (shielded metal arc welding) 용접을 이용하였으며, 용접 공정의 경우 입열량이 낮기 때문에 균열에 대한 문제가 적어 Inconel계 용접봉을 사용하였다. 따라서 사용된 용접봉은 Inconel계 용접봉인 AWS 511 E NiCrFe-4계의 YAWATA WELD B(M)이 사용하였다. 실제 LNG 저장탱크 건설 시의 용접부와 동일한 조건으로 행하였다. 용접자세는 전자세로 실시하였다. Fig. 1은 시험에 사용된 모재에 대해 용접한 X-groove의 형상이며, 용접 후 액체침투탐상검사 및 X-선 투과검사를 통하여 용접결함이 없음을 확인하였다.

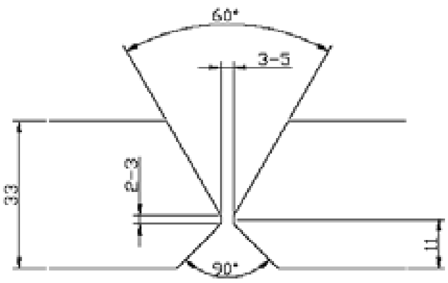


Fig. 1 Schematic view of X-groove preparation

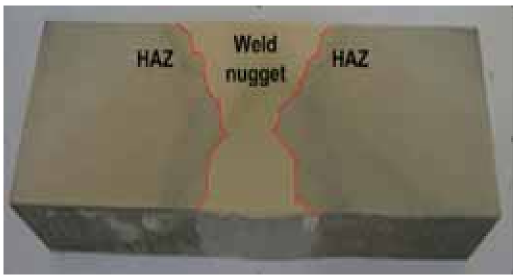


Fig. 2 Macrostructure of the 9% Ni welded metal

Fig. 2에서는 용접부 중 열영향부 HAZ (heat affected zone)는 용접공정 중 발생되는 열에 의해 다양한 조직으로 변태되어 모재와는 완전히 다른 특성을 나타낸다. Fig. 2에 대해서 Fag. 3에서는 로크웰 경도기(Rockweel hardness)를 사용하여 H_{RB}를 측정하였다. 그 값은 용접부에서는 83~90 H_{RB}를 보이고 있다. 특히 용접 열영향부는 후속 용접에 의한 tempering 효과에 의하여 경도값이 높아지므로 이점을 유의 하여야한다. 따라서 HAZ부분에서는 경도값이 높은 결과를 것을 볼 수 있다.

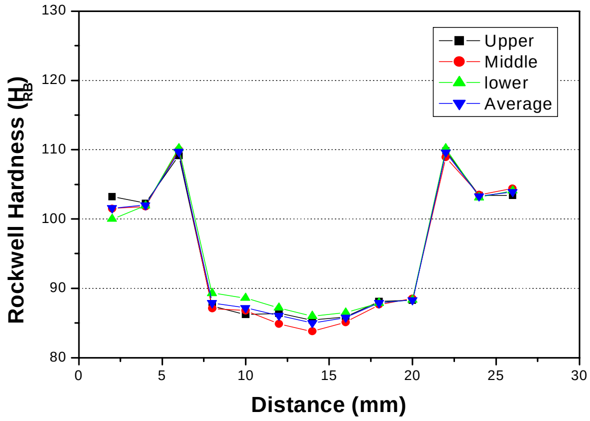


Fig. 3 Distributions of Rockwell hardness measurement

2.2 실험장치 및 실험방법

본 시험에 사용된 피로 시험기는 MTS사의 MTS 810 유압식 만능시험기로서 최대 용량은 10 ton이다. 균열 길이는 Microscope로 앞 · 뒷면을 측정하였으며, 전체 데이터값의 평균값을 사용하였다. 시험 조건은 응력비 R=0.1, 0.5의 인장-인장 하중형태로 모재와 용접재를 같은 조건으로 수행하였다. 시험 주파수는 6Hz, 8Hz를 사용하였으며, 파형은 정현파(sine wave)로 시험하였다. 응력비 R=0.1의 하중비 1200~120 kgf, 6Hz로 실험 하였고, R=0.5의 하중비 1500~150 kgf, 8Hz로 실험을 하였다. 시험편의 예비균열을 노치로부터 1.0~1.3 mm 까지 주었다. 재료의 노치는 Fig. 5와 같이 가공하였다.

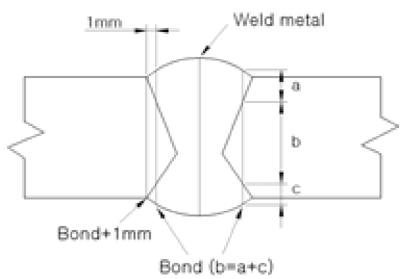


Fig. 4 Notch location

용접재료는 HAZ 부분의 피로균열 진전속도를 시험하기위해 노치를 Fig. 4와 같이 용착금속의 경계부에서 1~1.5 mm 떨어진 곳에 노치를 주어 시험을 실시하였다. 피로 시험편은 ASTM E 647, CT (Compact Tension Specimen) 규격에 따라 Fig. 5와 같이 가공하였으며, 노치부는 와이어 방전가공 (EDM : Electric discharge machining)을 사용하여 가공하였다.

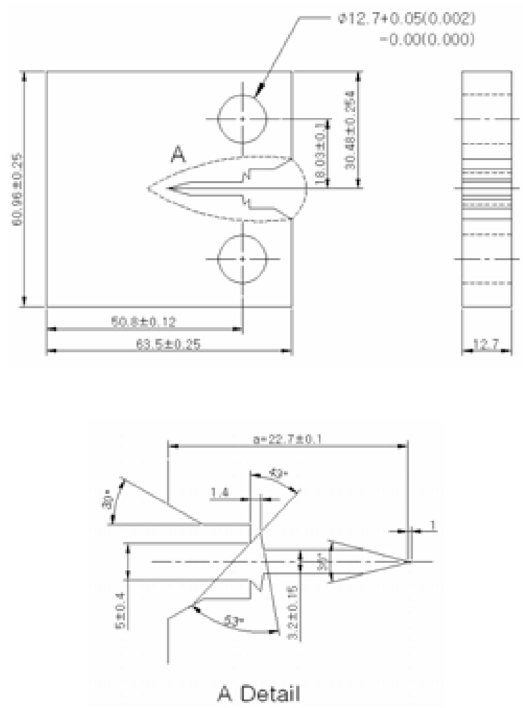


Fig. 5 Configuration and dimensions of specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 응력비 영향

본 실험은 응력비 R=0.1, 0.5로 실험 하였으며, $\triangle K$는 ASTM E 647에 명시되어있는 조건으로 식 (1) 에서 계산하였다.[4]

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

재료의 열처리는 실험의 차이를 보기위하여, QT와 QLT를 한 열처리 재료를 모재와 용접재를 실험하여 피로균열 진전시험을 평가 하였다. 일반적으로 균열을 가진 재료의 피로균열진전거동은 균열진전속도 (da/dN)와 선형탄성 파괴역학 파라미터인 응력확대계수범위 ($\triangle K$)의 상관식으로 표현된다. Paris는 피로균열진전의 중간영역에 대하여 식 (2)와 같은 피로균열진전속도와 응력확대

계수범위의 관계를 제안하였다.(5)

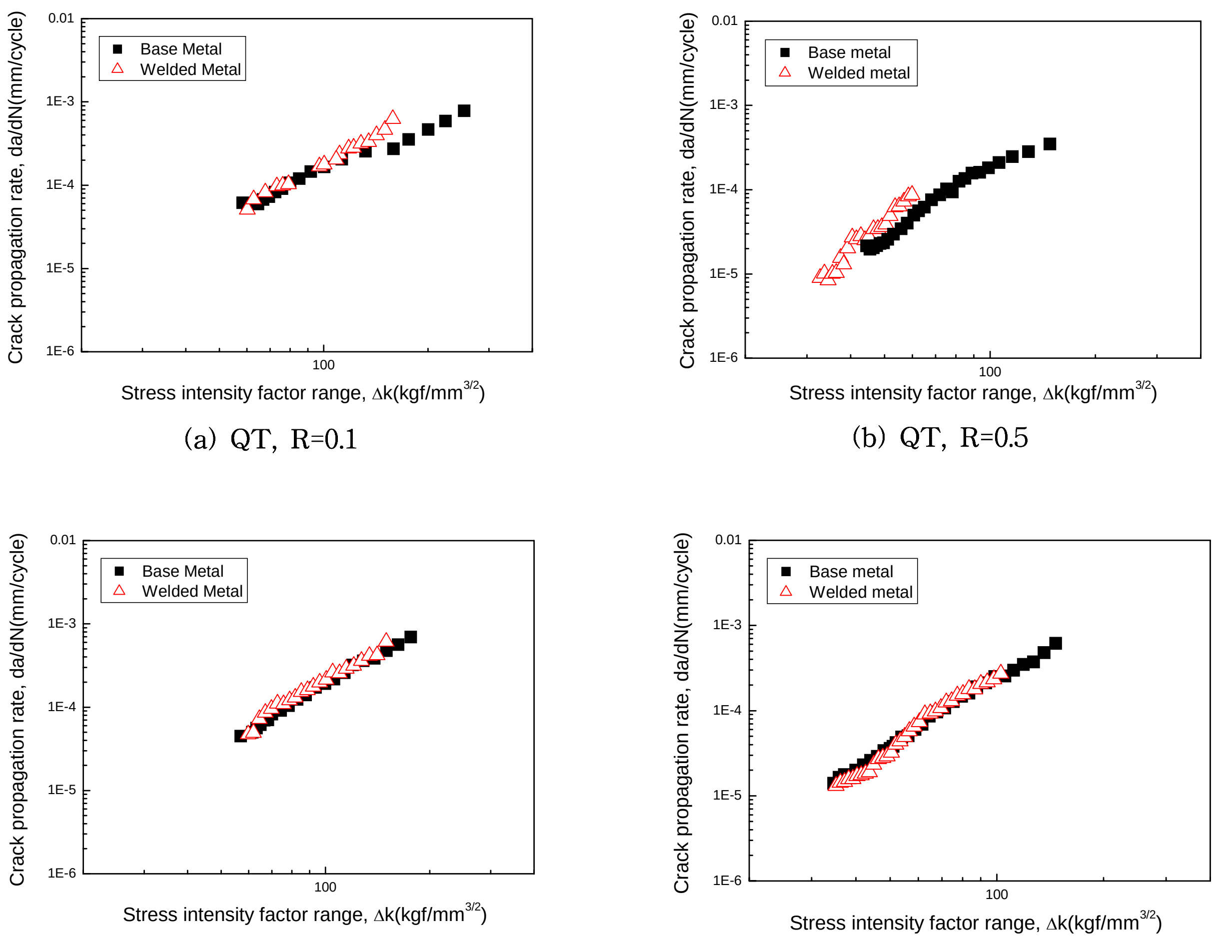
$$da/dN = c \triangle K^{m} \qquad (2)$$

여기서 c 와 m 은 재료상수이다. 이들의 관계로부터 얻어진 c 와 m은 Table 3에 정리하였다.

Fig. 6은 각각의 응력비를 모재와 용접재의 값을 비교한 그래프이다. 대부분 모재보다 용접재가 $\triangle K$에서 da/dN은 응력비(R)가 증가함에 따라 상승하는 경향을 보이고 있다. 이는 수동용접이기 때문에 작업자의 숙련도 또는 노하우에 등에 영향을 받는 것으로 생각된다.

Table 3 Results of material constants C and m obtained from Paris equation

Material	Stress ratio	Crack growth	Material	Stress ratio	Crack growth
QT	R=0.1	$da/dN = 2.064 \times 10^{-8} (\triangle K^{1.931})$	WQT	R=0.1	$da/dN = 4.705 \times 10^{-9} (\triangle K^{2.286})$
QT	R=0.5	$da/dN = 9.42 \times 10^{-10} (\triangle K^{2.63})$	WQT	R=0.5	$da/dN = 4.032 \times 10^{-7} (\triangle K^{3.892})$
QLT	R=0.1	$da/dN = 2.382 \times 10^{-9} (\triangle K^{2.446})$	WQLT	R=0.1	$da/dN = 2.403 \times 10^{-9} (\triangle K^{2.476})$
QLT	R=0.5	$da/dN = 2.749 \times 10^{-9} (\triangle K^{2.468})$	WQLT	R=0.5	$da/dN = 2.26 \times 10^{-10} (\triangle K^{3.092})$



(a) QT, R=0.1

(b) QT, R=0.5

(c) QLT, R=0.1

(d) QLT, R=0.5

Fig. 6 *da/dN-△K* of base and welded metals for QT and QLT specimens.

따라서 모재를 수동 용접할 때 발생하는 고온균열, 재열균열, 저온균열, 기공(blow hole), 용입부족 등 여러 가지 결함 발생의 가능성이 있기 때문이다. Fig. 7은 피로균열진전시험을 통하여 실시한 모재와 용접재에 대한 *da/dN-△K*를 나타낸 것이다.

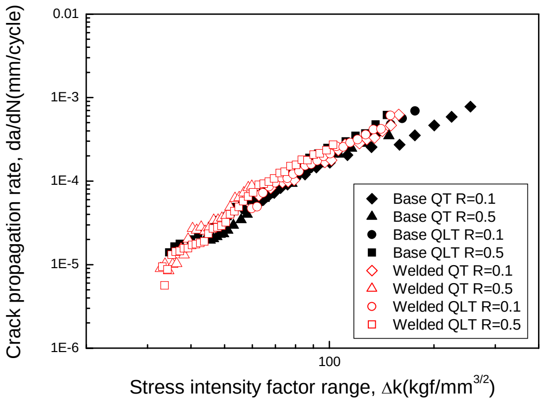


Fig. 7 *da/dN-△K* of all specimens for 9% Ni steel

3.2 파단면의 형상

Fig. 8, 9는 본 실험에 시행된 모재의 응력비 R=0.1, 0.5 와 용접재 R=0.1, 0.5의 파단면을 Topcon사의 MS-500을 사용하여 관찰하였다. 본 SEM 에서는 균열시에 발생된 비치마커를 확인 할 수 있었다. 측정 구간은 예비균열에서 1.0 ~ 1.5 mm 떨어진 곳에서 측정을 하였으며, 속도는 2.33 x 10^{-5}으로 측정 되었다.

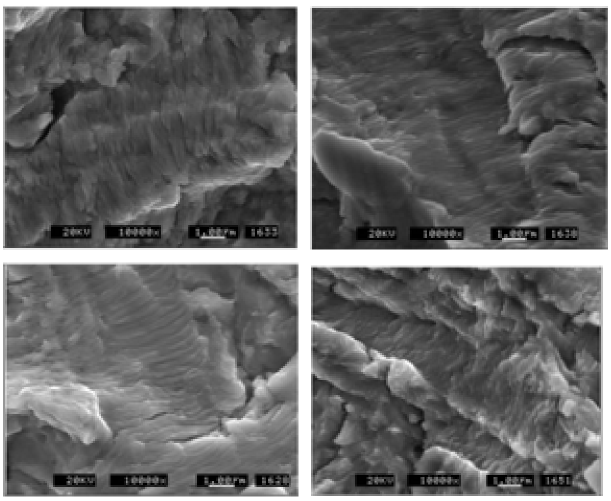


Fig. 8 Fatigue fracture surfaces of base and welded metals (QT)

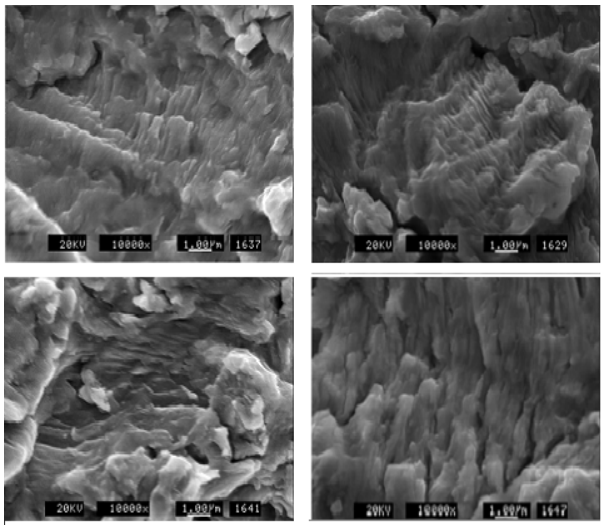


Fig. 9 Fatigue fracture surfaces of base and welded metals (QLT)

4. 결 론

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 맴브레인 재료로 사용될 QT와 QLT강에 대하여 일정하중진폭 피로균열진전시험을 수행하였다. 이로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 모재와 용접재는 동일한 응력확대 계수범위에서 피로균열진전속도는 응력비가 증가함에 따라 상승하는 경향을 보였으며, 용접재는 모재보다 파단되는 점이 현저하게 빠르게 나타났다.
2) 경도시험 결과 모재는 일정한 경도값을 보이는 반면에 용접재는 모재에서와 용접부에서 다른 경도값을 보였으며 HAZ부분에서는 높은 경도값을 보여주었다.
3) 시험 재료로 선정된 QT와 QLT재료에서 시험 주파수 8Hz 보다 6Hz가 파단이 빠르게 진행 되었다.

후 기

본 연구는 2007년 한국 가스공사의 연구비 지원으로 수행한 과제이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. J-I. Jang, J-B. Ju, B-W. Lee, D. Kwon, W-S, Kim, 2003, “Effects of microstructural change on fracture characteristics in coarsegrained heat-affected zones of QLT-processed 9% Ni steel” *Materials Science and Engineering* A340 68~79
2. ASTM A553, 2005, Annual Book of ASTM-Standards Section 1, Iron and Steel Products
3. ASTM A353, 2006, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Stainless, Heat-Resisting, Maraging, and Other Similar Chromium-Nickel-Lron Alloys
4. ASTM E647, 1999, "ASTM E647: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", *In Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, ASTM-American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 591-630
5. Paris PC, 1961, “Gomez MP, Anderson WE. A rational analytic theory of fatigue. The Trend Engng”, 13:9-14
6. D.P. Fairchild, 1990, “Fatigue and Fracture Testing of Weldments”, ASTM STP 1058, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, pp. 117-141
7. Korea gas Corporation Homepage : *www.kogas.or.kr*
8. Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage"
9. J-H. Baek. Y-P. Kim, W-S. Kim, Y-T. Kho, 2001, “Fracture toughness and fatigue crack growth properties of the base metal and weld metal of a type 304 stainless steel pipeline for LNG transmission”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping 78*, pp. 351-357