

저온하에서 LNG저장탱크용 멤브레인재 (STS 304강)의 피로균열진전거동

김정규* · 김철수* · 김도식** · 윤인수***

*한양대학교 기계공학부

한국원자력연구소, *한국가스공사 연구개발원

Fatigue Crack Growth Behavior of Membrane Material for LNG Storage Tank at Low Temperatures

JUNG-KYU KIM*, CHUL-SU KIM*, DOSIK KIM** AND IN-SU YOON***

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Korea Atomic Energy Research Institute, *Korea Gas Corporation, R & D Center

KEY WORDS: LNG storage tank LNG저장 탱크, Fatiguc crack growth rate 피로균열진전속도, Stress intensity factor range 응력확대계수범위, Stress ratio 응력비, Strain-induced martensitic transformation 변형률 유기 마르텐사이트 변태

ABSTRACT: The fatigue crack growth behavior of the cold-rolled STS 304 steel developed for membrane material of LNG storage tank was examined experimentally at 293K, 153K and 111K. The fatigue crack growth rate(da/dN) tends to increase as the stress ratio(R) increases over the testing temperature, when compared at the same stress intensity factor range(ΔK). The effect of R on da/dN is more explicit at low temperatures than at room temperature. The resistance of fatigue crack growth at low temperatures is higher compared with that at room temperature, which is attributed to the extent of strain-induced martensitic transformation at the crack tip. The temperature dependence of fatigue crack growth resistance is gradually vanished with an increase in ΔK , which correlates with a decreasing fracture toughness with decreasing temperature. Fractographic examinations reveal that the differences of the fatigue crack growth characteristics between room and low temperatures are mainly explained by the crack closure and the strengthening due to the martensitic transformation.

1. 서 론

최근 석탄 및 원유와 같은 화석연료를 사용함에 따른 환경 오염 문제가 크게 대두됨에 따라 청정연료인 액화천연가스(liquefied natural gas, LNG)의 사용이 증가하는 추세를 보이고 있다. 이에 따라 내용량의 LNG 운반선이나 저장탱크의 건설이 필요하게 되었지만, 국내에서는 이를 위한 저온상태의 신기술 확보 및 설비부품의 기본적인 설계 자료가 매우 부족한 실정이다(김 등, 1998).

LNG 저장탱크의 내부에 설치되는 멤브레인은 초저온 LNG의 누설을 방지하는 밀봉기능과 액압 또는 자중에 의한 하중을 단열패널에 전달하는 기능을 한다. 이러한 멤브레인의 결함을 위한 용접부 등에서는 제작 및 설치과정 또는 사용 중 결함이 발생할 수 있다. 또한 LNG의 충전위치에 따른 온도(293K~111K)와 액압의 변화, 지진, 파랑 등에 기인한 피로하중이 부하된다. 따라서 저온 환경 하에서 멤브레인의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 LNG 저장탱크의 사용온도에 따른 멤브레인 재료의 피로균열진전거동을 정확하게 파악하는 것이 대단히 중요하다. 그러나 국내에서는 LNG저장탱크용 멤브레인 재료 주목받고 있는 냉간 압연 STS 304 스테인리스강의 저온

피로특성에 대한 연구가 거의 행하여지지 못한 실정이다.

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 운전조건을 고려하여 상온(293K) 및 저온 환경(193K 및 111K) 하에서 STS 304 스테인리스강에 대한 일정하중진폭 피로균열진전시험을 수행하고, 피로균열진전거동에 미치는 저온의 효과를 평가하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 저온 실험장치

사용된 재료는 포항제철(POSCO)에서 생산된 두께 2mm의 STS 304 스테인리스 냉간 압연강판이며, 이의 화학성분과 온도 저하에 따른 기계적 특성은 Table 1 및 Table 2와 같다.

저온실험은 자체 제작한 저온용 챔비를 유압서보식 피로시험기에 설치한 후 액체 질소의 주입량을 조절함으로써 저온 상태에서 실험을 수행하였다. 챔비 내에 유입된 액체질소는 용기 내에서 기화되면서 온도를 저하시키고, 동시에 순환장치에 의하여 순환된 후 배출된다. 이 액체질소는 온도조절장치와 연결된 솔레노이드 밸브에 의하여 유입, 차단되며, 챔비 내부의 분위기 온도는 설정온도의 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되도록 하였다.

Fig. 1은 저온 실험장치의 모식도를 나타낸 것이다. 각각의

Table 1 Chemical compositions of cold-rolled STS 304 steel (wt %)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
0.05	1.2	0.021	0.008	0.41	18.02	8.6

Table 2 Mechanical properties of cold-rolled STS 304 stainless steel

Temperature	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
293K (20°C)	306.8	720.5	63.2
193K (-80°C)	496.9	1162.5	32.7
153K (-120°C)	507.5	1245.0	31.4
111K (-162°C)	550.7	1495.0	28.9

실험은 시험편이 원하는 설정온도로 안정화되고 또한 변위신장개 및 클램프-온 게이지의 출력 값이 최소에 이른 후 시작하였다.

2.2 시험편 및 피로시험

피로균열진전시험은 상온(293K)과 저온(153K, 111K) 분위기를 만들기 위한 피로시험장치를 구성하고(김 등, 1999), ASTM E647-95a(ASTM, 1995)의 규정에 따라 일정신속하중 하에서 수행하였다. 작용하중은 응력비가 0.1과 0.5 그리고 시험주파수는 6Hz인 정현파형이다. 시험편은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 폭이 40mm이고, 두께는 2mm인 CT형이다.

균열길이의 측정은 킴플라이언스법을 이용하였으며, 균열진전속도는 7점증분다항법으로 평가하였다.

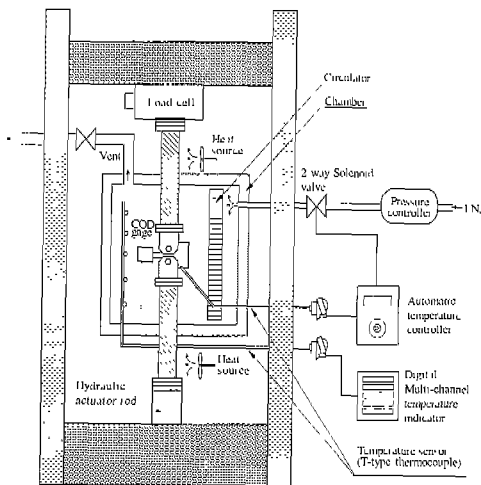
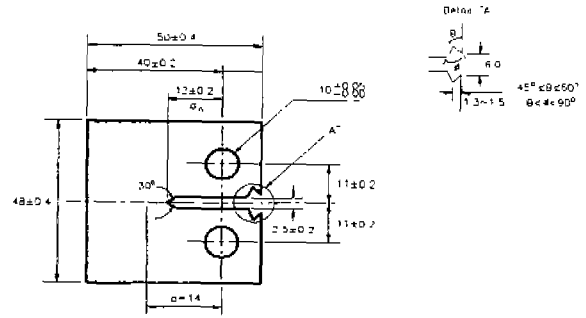
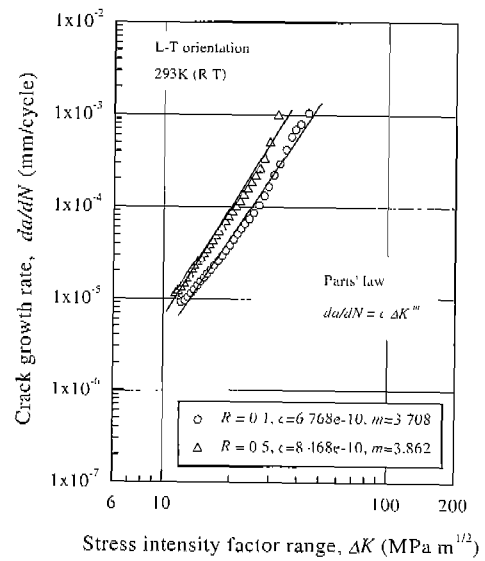


Fig. 1 Schematic diagram of the low temperature experimental apparatus

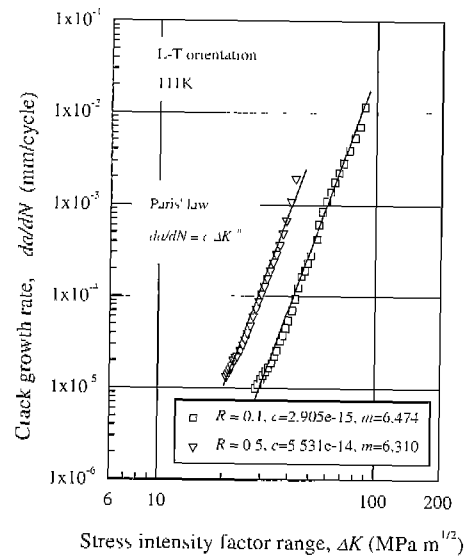


thickness: 2mm

Fig. 2 Configuration of fatigue crack growth specimen (unit: mm)



(a) 293K



(b) 111K

Fig. 3 Effect of stress ratio on the fatigue crack growth rates

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열진전거동

일반적으로 균열을 가진 부재의 피로균열진전거동은 균열진전속도(da/dN)와 선형탄성 파괴역학 파라미터인 응력확대계수범위(ΔK)의 상관식으로 표현된다. Paris 등은 피로균열진전의 중간영역에 대하여 식 (1)과 같은 피로균열진전속도와 응력확대계수범위의 관계를 제안하였다(Paris and Erdogan, 1960).

$$da/dN = c \Delta K^m \tag{1}$$

여기서 c 와 m 은 재료상수이다.

Fig. 3은 상온(293K)과 저온(111K)의 각 온도분위기 하에서 da/dN 과 ΔK 의 관계를 나타낸 것이며, 이 그림에서 실선은 최소자승법을 사용하여 구한 회귀직선이다. 이들의 관계로부터 얻어진 c 와 m 은 Table 3에 정리하였다. 온도분위기와는 상관없이 동일한 ΔK 에서 da/dN 은 응력비(R)가 증가함에 따라 상승하는 경향을 보이며, 이는 기존의 연구경향과 유사한 결과이다(Chang, 1983; Tshegg and Stanzl, 1981). Fig. 4는 각 응력비에 대한 c 와 m 값의 변화를 나타낸 것으로, 이들은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R = 0.1; \log c &= -1.94m - 1.98 \\ R = 0.5; \log c &= -1.71m - 2.49 \end{aligned} \tag{2}$$

Table 3 The constants in Paris' law, Eq. (1)

Temperature	Stress ratio	c	m
293K	0.1	6.768e-10	3.708
(20°C)	0.5	8.486e-10	3.862
193K	0.1	3.966e-15	6.413
(-80°C)	0.5	4.848e-13	5.788
111K	0.1	2.905e-15	6.474
(-162°C)	0.5	5.531e-14	6.310

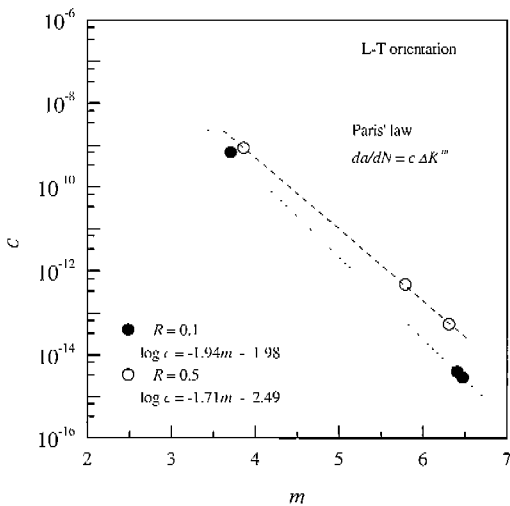
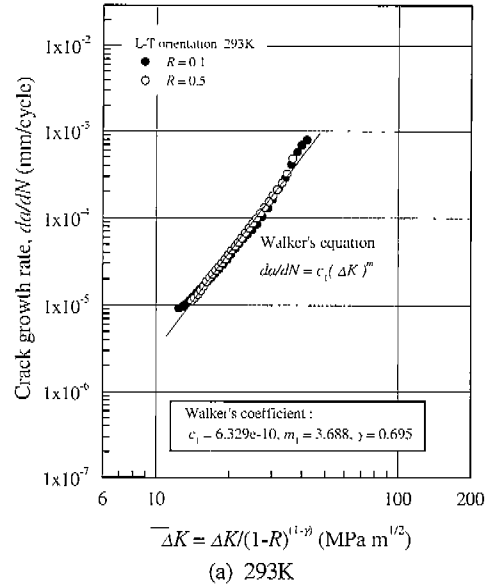
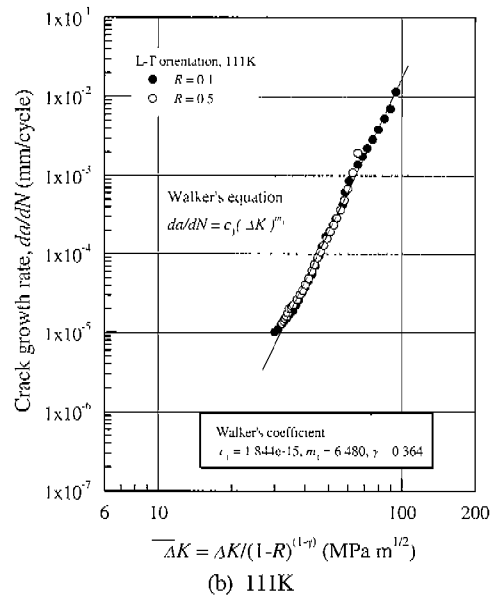


Fig. 4 Correlation between c and m



(a) 293K



(b) 111K

Fig. 5 Representation of data by a single relationship based on the Walker's equation

한편 피로균열진전거동에 미치는 응력비의 효과는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 상온보다 저온환경 하에서 현저하게 나타난다. 그러나 이 효과는 Paris가 제안한 식 (1)에 의하여 평가될 수 없으므로, 이러한 문제점을 고려하여 Walker는 피로균열진전속도에 미치는 응력비의 영향을 검토하기 위한 식을 제안하였다(Walker, 1970). 최대응력확대계수(K_{max})와 응력비(R)의 관계로부터, $R = 0$ 에서의 응력확대계수 값을 $\Delta \bar{K}$ 라고 하면, 식 (3)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{K} &= K_{max} (1-R)^\gamma \\ &= \frac{\Delta K}{(1-R)^{1-\gamma}} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 γ 는 응력비($R > 0$)의 효과를 나타내는 상수로서 $0 \leq \gamma \leq 1$ 의 범위를 가지며, $\gamma=1$ 이면 응력비의 효과가 없음을 의미한다. 또한 식 (1)에서의 재료상수(c, m)를 $R = 0$ 의 조건에서 c_1 및 m_1 이라고 하면, $R = 0$ 에서는 $\Delta \bar{K} = \Delta K$ 가 된다. 이로부터 피로균열진전속도는 식 (4)으로 표현된다.

$$da/dN = c_1 (\Delta \bar{K})^{m_1} \quad (4)$$

Fig. 5는 상온과 저온(111K)에서의 da/dN 과 식(3)으로부터 계산된 $\Delta \bar{K}$ 의 관계이다. 이 그림은 Fig. 2에서 나타난 응력비의 효과가 Walker 식(4)에 의하여 고려될 수 있다는 것을 보여준다. 또한 Table 4는 각 시험온도에 있어서 식(3), (4)의 상수 c_1, m_1 및 γ 값을 정리한 것이며, Fig. 6은 온도와 m_1, γ 값 사이의 관계를 나타낸 것이다. 저온에서의 γ 값이 상온의 값에 비하여 거의 1/2로 감소하였다. 따라서 피로균열진전 속도에 미치는 응력비의 영향은 상온보다 저온에서 더 현저함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 링 마디 식 멤브레인의 주름(corrugation of ring knot membrane)을 만들 때에 생성될 수 있는 잔류응력은 상온보다 저온하에서 피로균열진전속도에 미치는 영향이 현저하다고 할 수 있으며, 이는 LNG 저장탱크의 피로설계시 고려되어야 할 사항이다.

Table 4 The constants in Walker's Eq. (4)

Temperature	c_1	m_1	γ
293K (20°C)	6.329e-10	3.688	0.695
193K (-80°C)	6.442e-15	6.186	0.320
111K (-162°C)	1.844e-15	6.480	0.364

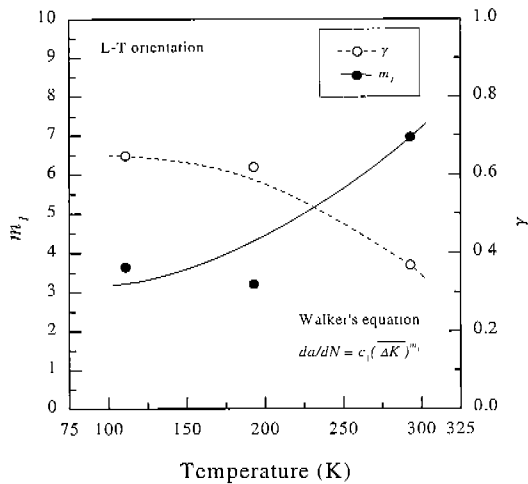
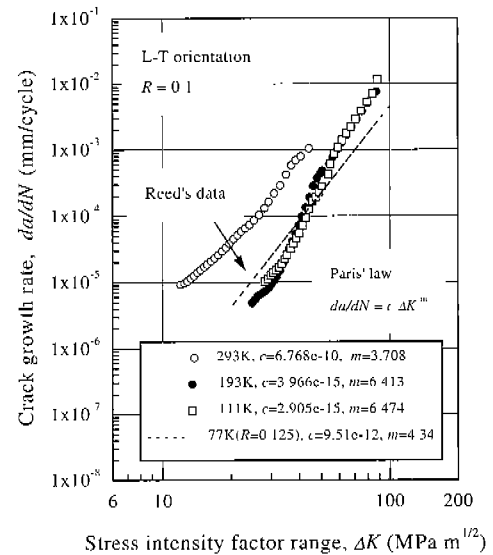


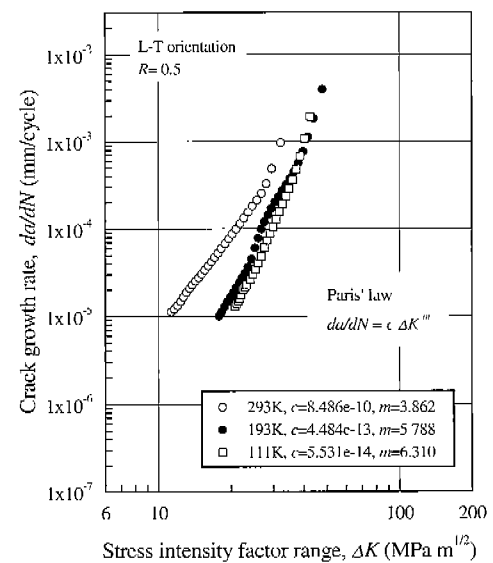
Fig. 6 Low temperature effects on m_1 and γ

3.2 온도변화에 따른 피로균열진전거동

Fig. 7은 상온(293K)과 저온(193K 및 111K)환경 하에서 응력비(R)가 0.1 및 0.5인 경우에 대한 da/dN 과 ΔK 사이 관계를 정리한 것이다. 이 그림에서 점선은 Reed 등이 본 재료와 유사 강종인 SUS 304강에 대하여 77K(-196°C)에서 수행한 실험결과이다(Reed and Reed, 1979). 저온 환경하에서의 da/dN 은 상온의 결과에 비하여 낮게 평가되었으며, 특히 낮은 ΔK 영역에서는 저온에서 피로균열진전 저항력이 상온보다 현저함을 알 수 있다.



(a) $R=0.1$



(b) $R=0.5$

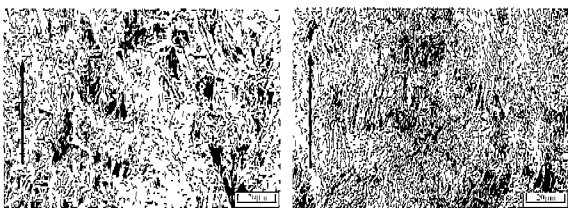
Fig. 7 Effect of low temperature on the fatigue crack growth rates

이와 같은 현상에 대하여 Suresh 등과 Mei 등은 냉간 압연 SUS 304L강의 경우 하한계 응력확대계수범위 영역 부근에서 온도 저하에 따라 마르텐사이트 변태에 의한 균열단합이 발생함을 보고하였다(Suresh and Ritchie, 1984; Mei and Morris, 1990). 또한 Tschegg 등은 피로균열진전의 하한계 영역에서 온도감소에 따른 강도증가로 인하여 이러한 결과가 초래되었다고 설명하였다(Tschegg and Stanzl, 1981). 이상의 연구결과를 살펴볼 때, 피로균열진전거동에 미치는 온도의 영향을 단일변수로 규정짓기는 어렵지만, 마르텐사이트 변태로 인한 강도상승 또는 균열단합이 피로균열진전거동에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

한편 Fig. 7에서 알 수 있듯이, 저온하의 피로균열진전속도는 낮은 ΔK 영역에서 상온에 비하여 낮지만, 높은 ΔK 영역으로 감에 따라 점차 그 차이가 줄어든다. 이는 저온의 경우가 상온에 비하여 정적하중 하의 파손과정을 겪게 되는 $da/dN - \Delta K$ 곡선에서 세 3영역으로의 천이가 빨리 일어남을 의미한다. 즉 저온영역에서 파괴인성이 저하되므로, 저온에서의 재료상수 m 이 상온에 비하여 거의 2배 가량 증가되는 결과를 초래하였다고 생각된다(김 등, 1999).

3.4 파면 해석

저온에서의 피로균열진전거동은 연성-취성 천이 온도(ductile-brittle transition temperature, DBTT)를 경계로 하는 전후의 영역에 따라 전혀 다른 거동을 나타낸다. 일례로 시 필라이트 강들의 경우 온도감소에 따른 피로균열진전 저항력은 DBTT까지는 거의 영향이 없거나 증가한다. 그러나 이 온도보다 저하하게 되면 피로균열진전 기구가 취성으로 천이되고, 피로균열진전속도 관계식인 Paris 식의 지수 m 이 증가하게 되어 상온에 비하여 저항력이 감소하게 된다. 이러한 저온에서의 불안정한 거동은 DBTT의 존재로 인한 것이며, 이 천이온도는 파괴인성시험에서 온도 저하에 따라 인성값이 급격히 감소하는 온도로서 파면을 관찰할 경우 벽계(cleavage) 파괴의 양상을 보인다. 그러나 상온에서 FCC결정구조를 갖는 본 재료와 유사 강종인 SUS 304강에 대한 연구에 따르면, 이 재료는 DBTT가 존재하지 않고 극저온에서도 좋은 파괴저항을 보여주므로 피로균열진전 기구에는 커다란 차이가 없을 것으로 생각된다(Suresh and Ritchie, 1984).



(a) 293K (b) 111K

(※Arrows indicate macrocrack growth direction)

Fig. 8 SEM micrographs of the fracture surfaces ($\Delta K \approx 21.5 \text{MPa m}^{1/2}$)

Fig. 8은 동일한 ΔK 에서 온도저하에 따른 미시파면 양상의 변화를 관찰한 SEM 사진이다. 저온(111K)에서의 미시파면은 상온(293K)에 비해 더욱 조밀하고 매끄러우며, 이는 마르텐사이트 변태에 의한 것으로 보고되고 있다(Ogawa and Morris, 1985). 일반 기체 구조용 강에 있어서는 미시조직의 조대화에 따라 피로균열진전이 굴절하게 되고, 이로부터 파면양상은 거칠게 되며 피로균열진전에 대한 저항력의 증대를 가져옴이 보고되고 있으나 본 연구의 결과는 이와 정반대의 양상이다(Dury et al., 1995; 김과 황, 1988). 따라서 온도의 저하에 따른 피로균열진전속도의 저하는 피로균열진전 경로의 변화에 의한 것이라기보다 앞에서 기술한 바와 같이 마르텐사이트 변태에 의한 강도상승과 균열단합이 주요한 요인으로 생각된다(Suresh and Ritchie, 1984; Mei and Morris, 1990).

4. 결 론

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 멤브레인 재료로 사용될 STS 304 강에 대한 상온 및 저온환경 하에서의 일정하중진폭 피로균열진전시험을 수행하였다. 이로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 동일한 응력확대계수범위에서 피로균열진전속도는 응력비가 증가함에 따라 상승하는 경향을 보였다.
- (2) 상온에서 Walker식의 지수 γ 값이 저온의 경우 보다 약 2배 증가였다. 따라서 피로균열진전속도에 미치는 응력비의 영향은 상온보다 저온에서 더 현저하게 나타났다.
- (3) 피로균열진전속도는 동일한 ΔK 에서 저온의 경우가 상온보다 전체적으로 낮게 나타났으며, 특히 낮은 ΔK 영역에서 피로균열진전에 대한 재료의 저항력은 온도가 감소함에 따라 현저히 증가됨을 알았다. 이는 파면해석을 통해서도 알 수 있듯이 마르텐사이트 변태로 인한 강도상승 및 균열단합 현상이 피로균열진전거동에 영향을 미쳤음을 의미한다.
- (4) 낮은 ΔK 영역에서 저온 하의 피로균열진전속도는 상온에 비하여 낮지만, 높은 ΔK 영역으로 감에 따라 점차 그 차이가 줄어든다. 이는 저온의 경우 불안정파괴에 이르는 파괴인성이 상온에 비하여 저하되었기 때문이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김영식, 조상명, 김종호(1998). "LNG 탱크용 알루미늄합금 A5083-o의 관통균열 전파거동 예측모델", 한국해양공학회지, Vol. 12, No. 1, pp 50~57.
 김정규, 황돈영(1988). "복합조직강의 피로균열 진전거동과 균열단합에 미치는 응력 및 미시 조직 크기의 영향", 대한기계학회 논문집, Vol. 12, No. 6, pp 1343~1349.

- 김철수, 조동혁, 윤인수, 김도식, 김정규(1999). “멤브레인재 (STS304강)의 기계적 특성에 미치는 저온효과”, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp 27~32.
- Chang, G. M.(1983). M.S. Thesis, University of California, Berkeley, CA.
- Dury, W. J., Gokhale, Arun M. and Antolovich, S. D.(1995). “Effect of Crack Surface Geometry on Fatigue Crack Closure”, Metallurgical and Material Transaction A, Vol. 26A, pp 2651~2663.
- Mei, Z. and Morris, J. W. Jr.(1990). “Influence of Deformation-Induced Martensite on Fatigue Crack Propagation in 304-Type Steels”, Metallurgical Transactions A, Vol. 21A, No. 12, pp 3137~3152.
- Ogawa, R. and Morris, J. W., Jr.(1985). “Fatigue Crack Growth Behavior in a Nitrogen-Strengthened High-Manganese Steel at Cryogenic Temperatures”, ASTM STP 857, pp 47~59.
- Paris, P. C. and Erdogan, F.(1960). “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp 257~270.
- Reed, D. T. and Reed, R. P.(1979). “Materials Studies for Magnetic Fusion Energy Applications at Low Temperatures”, NBSIR79-1609, National Bureau of Standards, Boulder, Co, p 81.
- Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials(1995). Annual Book of ASTM Standards, E647-95a.
- Suresh, S. and Ritchie, R. O.(1984). “in Fatigue Crack Growth Threshold: Concepts”, Davidson, D. L. and Suresh, S., eds., TMS-AIME, Warrendale, PA, pp 227~261.
- Tsheg, E. and Stanzl, S.(1981). “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.
- Walker, K.(1970). “The Effects of Stress ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum”, ASTM STP 462, pp 1~14.

1999년 11월 11일 원고 접수

2000년 12월 20일 수정본 채택