저온환경에서 압력 구조용 강의 피로균열특성

◦최 용 범**, 박 원 조*, 이 광 영*, 허 선 철*, 김 정 호***

Fatigue Crack Properties of Pressure Structural Steel at Low Temperature

Yong Bum Choi, Won Jo Park, Kwang Young Lee, Sun Chul Huh, Jung Ho Kim

* 경상대학교 수송기계공학부
** 경상대학교 대학원 정밀기계공학과
***동의대학교 산업기술연구소

Abstract: Low temperature fatigue crack propagation ratio and characteristics of the pressure structural steel which is used for the low temperature pressure vessels. Fatigue crack properties was studied at room temperature of 25℃ and low temperature ranges -60℃, -80℃ and -100℃ with stress ratio of R=0.05, 0.1, 0.3 in the logarithmic relationship between the fatigue crack propagation rate (da/dN) and stress intensity factor ΔK, in low temperature case the relationship was extend to the range of low crack propagation rate. The fractured specimens were examined by SEM tested. That results showed specimen failed at low temperature exhibit the quasi-cleavage fracture formation, however, considerable ductility proceed final fracture

Key words: Crack propagation(균열진전), Stress ratio(응력비), Quasi-cleavage(벽개)

1. 서 론

최근 산업이 발전함에 따라 구조용 재료는 사용 환경과 운전조건이 가혹해지고, 구조물의 수명 및 건전성 평가에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다. 국내 원자력 발전소 및 극저온에 사용되는 압력 용기 등은 안전성 때문에 매우 중요시되고 있다. 이러한 구조재료들은 상온에서는 연성의 기계적 성질을 가지고 있으나, 저온에 이르면 취성적인 성질을 갖는다. 취성적인 거동에서 발생되는 재료의 강도는 재료고유의 결함인 균열 및 개재물등의 결함에 큰 영향을 받게 된다[1]. 실제로 이러한 구조물의 재료에서는 고유의 결함, 제조결함, 응력 집중부 및 용접 열영향부에 발생하는 결함 등이 존재하고 있다 .

이러한 재료들의 피로 균열 진전속도에 대한 평가는 매우 많이 이루어지고 있다. 그러나 저 온환경에서 발생되는 저온취성으로 인한 해석은 매우 미흡한 실정이며, 이러한 가혹한 환경에서 재료의 파괴기구인 저온 피로 균열 진전 속도의 수명평가는 필수적이라 하겠다.

따라서 저온환경에서 사용되고 있는 저온압력용기, LNG용 탱크 및 저장용 탱크 등 실제 구조물들의 저온피로균열진전 특성 등을 연구하여 수명 및 안정성과 신뢰성을 확보하여 파괴 역학적 관점을 기초로 하여 피로강도설계에 필요한 개념 도입이 대단히 중요하다[2)~3)]. 본 연구에서는 저온 압력용기, 저장용 탱크, 원자로 냉각제 배관 및 탑조류 등에 사용되는 SA516/70 강에 대하여 저온피로균열진전 특성을 실험적 해석으로 규명하여 저온환경에서 피로균열 진전속도에 미치는 응력비의 영향을 고찰하였다. 또한 재료의 파면해석을 통한 온도영향에 따른 피로균열피로균열 진전의 메커니즘을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

시험 재료는 용접성, 절삭성 및 가공성이 양호한 SA516/70 압력용기용 재료이며, **Table 1**은 화학적 성분을 나타내었으며, **Table 2**는 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of specimen(wt.%)

C	Si	Mr	P	S	Ni	Cr	Cn	V	Mo	Nb	Al
0.06	0.30	1.14	0.008	0.001	0.36	0.07	0.20	0.027	0.097	0.018	0.028

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
390	558	26	71.37

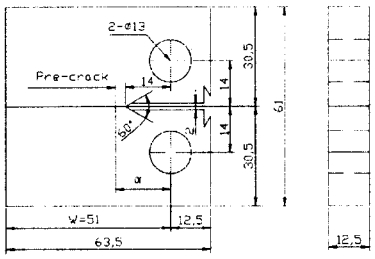


Fig. 1 Configuration of CT-specimen(unit:㎜)

Fig. 1은 본 연구에 사용된 시험편 형상과 치수를 나타낸 것으로써 시험편 채취방향은 L-T 방향으로 하였으며, 슬로터 가공은 와이어 커트를 사용하여 ASTM E647-95a 의 규정에 따라 가공하였다[4].

2.2 시험장치 및 시험방법

본 실험에 사용한 시험기는 MTS 10ton$_f$ 용량, 컴퓨터 제어 유압 서보식 피로시험기이며, 파괴역학 파라미터인 ΔK는 시험기에 장착된 컴퓨터를 이용하여 산출하였다.

유압 서보식 피로 시험기에 챔버를 부착하여 액체질소용기의 압력이 0.5 kg/㎟^{2} 이 되도록 유지하여 액체질소를 챔버 내로 유입시켜 저온 환경을 조성하였다.

실험 중 액체질소의 감소에 따른 액체 질소의 유입을 정상적으로 하여, 실험온도 유지를 위하여 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 하였다. 온도 편차는 ±1℃로 유지하였으며, 하중 파형은 정현파를 선택하였다. 또한 응력비 R=0.05, 0.1, 0.3 주파수 20Hz, 실험온도는 25℃, -60℃, -80℃, -100℃로 하였다. 실험하중은 P=10.2 kN으로 일정하게 하였으며, 시험 전 25℃에서 3mm 예비크랙을 삽입하였다. 그리고 크랙길이는 COD게이지를 이용한 컴플라이언스 법으로 측정하고 피로균열진전시험은 ASTM E647-95a규정에 따라 일정 진폭 하중 하에서 수행하였다[4].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열진전속도에 미치는 온도와 응력비의영향

Fig. 2는 상온에서 응력비 R=0.05, R=0.1 및 R=0.3 에서 피로균열진전속도 da/dN과 응력 확대계수 폭ΔK와의 관계를 나타내었다. 동일한ΔK에서 응력비의 증가와 함께 da/dN의 관계는 직선적으로 증가하고 있으며, 응력비가 높은 R=0.3의 조건이 R=0.1 및 R=0.05 보다 진전속도가 빠름을 알 수 있다. 이러한 현상은 응력비가 높을수록 최대하중의 증가로 인하여 균열진전속도가 빨라지는 것으로 생각되며, 응력비 0.05 및 0.1의 경우 0.3에 비하여 최대하중에 따른 균열 닫힘에 의한 피로균열 진전속도의 감소에 기인한 것으로 생각된다. 피로균열진전 구동력은 외부 응력과 내부인장 잔류응력의 합이 되어 피로 균열 진전을 방해하는 작용을 하게 된다. 또한 높은 ΔK영역에서는 응력비의 영향이 거의 보이지 않았으며, 응력비가 높을수록 부하과정에 발생되는 인장소성 역내에 발생하는 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 응력비가 높을수록 진전속도가 빠르게 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 3은 저온 -60℃ 에서 동일한 응력비로 피로균열진전속도 da/dN과 응력확대계수 폭ΔK와의 관계를 나타내었다. **Fig. 2**와 비교하면 실험온도가 저온으로 내려갈수록 균열진전의 거동

은 고⊿K의 영역으로 이동함을 알수 있다. 응력비는 온도에 의존하지 않는 영역으로 천이 되고 있음을 알 수 있다. 또한 극저온으로 환경이 변하여도 고⊿K의 영역은 응력비의 영향이 없으며, 재료의 물성치 변화에 따른 균열진전의 구동력은 더욱 감소되어 진전을 지연시키는 것으로 생각된다.

Fig. 4, Fig. 5는 -80℃, -100℃에서 da/dN-⊿K 관계를 나타내었다. 실험분위기 온도가 극저온으로 이동함에 따라 ΔK는 고 영역으로 이동되어지는 경향이 상온에 비하여 현저하게 나타났으며, 동일 ΔK를 기준으로 하한계영역과 제2영역에서 피로균열진전속도를 고찰하여 보아도 유사한 경향이 나타남을 알 수 있다. 따라서 온도저하에 따른 피로 균열 진전에 대한 저항력이 증가됨을 알 수 있다.

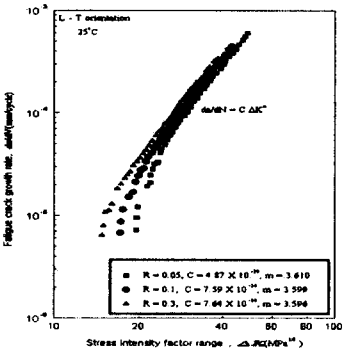


Fig. 2 Relations between fatigue crack growth rate and ⊿K at 25℃

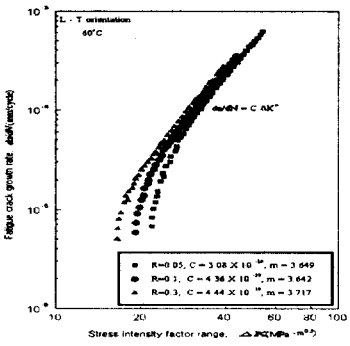


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and ⊿K at -60℃

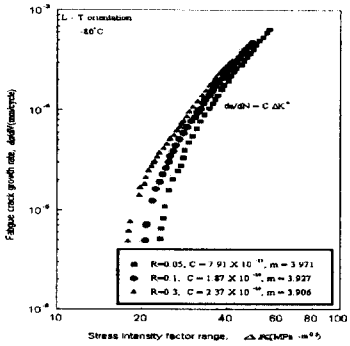


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and ⊿K at -80℃

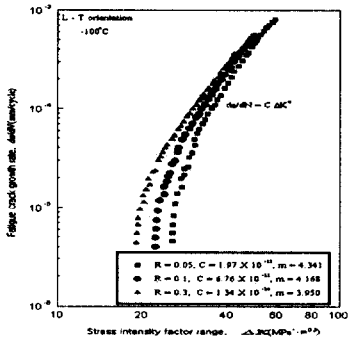


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and ⊿K at -100℃

3.2 동일한 ΔK영역에서 저온피로균열 진전속도와 응력비 관계

Fig. 6은 동일한 ⊿K영역에서 da/dN과 R의 관계를 명확하게 하기 위하여 동일한 ⊿K에서의 da/dN와 R에 대하여 나타낸 선도이다. 여기에서 동일한 응력확대계수 범위 ⊿K에서의 저온피로균열진전속도 da/dN는 응력비 R이 성장함에 따라 증가하고, ΔK가 높아짐에 따라 응력비의 영향이 감소하였으며, 특히, 응력비 R=0.05, 0.1및 0.3

에서 ΔK=26MPa-$m^{0.5}$일 때 da/dN가 크게 증가되는 현상을 보이고 있다. 이와같이 동일한 ΔK 영역에서 da/dN은 온도저하에 따라 감소하는 현상은 저온 취성에 따른 가속이 생긴다고 생각되며, 응력비 상승에 따라서 저온의 영향을 크게 받는 것으로 알 수 있으며, 이런 현상은 Ohta[10], Vosikvosky[11], Murakami[12]등의 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

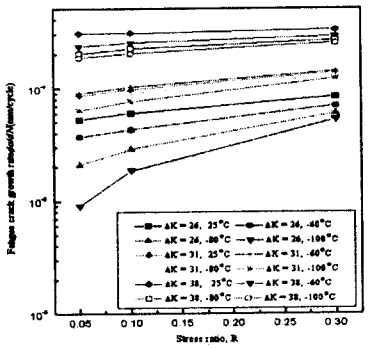


Fig. 6 Relations between fatigue crack growth rate and stress ratio

3.3 피로균열진전 길이와 사이클의 관계

Fig. 7은 응력비 (R)=0.05에서 온도 25℃, -60℃, -80℃ 및 -100℃에 대한 피로균열진전 길이와 사이클의 관계를 나타낸 것이다. 상온 25℃의 경우 저⊿K영역에서 응력부하 시 균열선단에 발생되는 소성역내의 잔류응력이 작용하여 압축하중이 피로균열진전의 구속력이 되어 서서히 성장하다가 2×10^5정도의 사이클에서 급속하게 성장하는 것을 알 수 있으며, 저온 -60℃, -80℃ 및 -100℃로 저온 환경으로 바뀌면서 균열길이에 비하여 사이클수가 4×10^5정도로 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. **Fig. 8**은 응력비 R=0.1에서 온도 25℃, -60℃, -80℃ 및 -100℃에 대한 피로균열진전 길이와 사이클의 관계를 나타내었다. 상온 25℃에서는 응력비 0.05에 비하여 응력비0.1일 때 1.90×10^5정도의 사이클에서 급속하게 성장하는 것으로 나타났다. 응력비가 0.05에 비해 균열진전속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 이는 저온 피로균열진전의 구동력 약화가 사이클의 가속에 원인이 되는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 응력비 R=0.3에서 온도 25℃,-60℃,-80℃ 및 -100℃에 대한 피로균열진전 길이와 사이클의 관계를 나타내고 있다. 동일온도이면서도 응력비 0.05, 0.1 및 0.3에 따라서 상온 25℃에서는 사이클 수가 크게 저하되는 현상이 나타나며 1.75×10^5의 사이클에서 성장이 급속하게 나타났다. 저온 -60℃, -80℃ 및 -100℃에서는 마찬가지로 응력비 성장이 최대하중의 증가로 사이클의 가속이 원인으로 극저온 -100℃에서는 3.65×10^5정도의 피로균열진전이 더욱 가속화됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 저온 피로균열진전의 구속력과 저항력이 크게 감소되어 저온 취성이 크게 증가되고 기계적 성질인 항복강도와 인성이 저하된 것으로 생각된다.

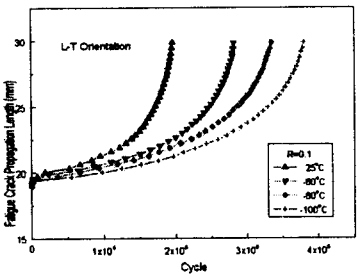


Fig. 8 Relations between fatigue crack propagation length and cycle (Stress Ratio : 0.1)

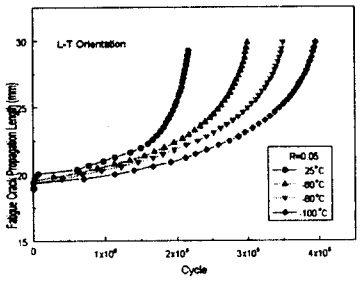


Fig. 7 Relations between fatigue crack propagation length and cycle (Stress Ratio : 0.05)

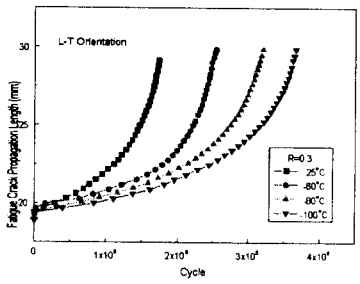


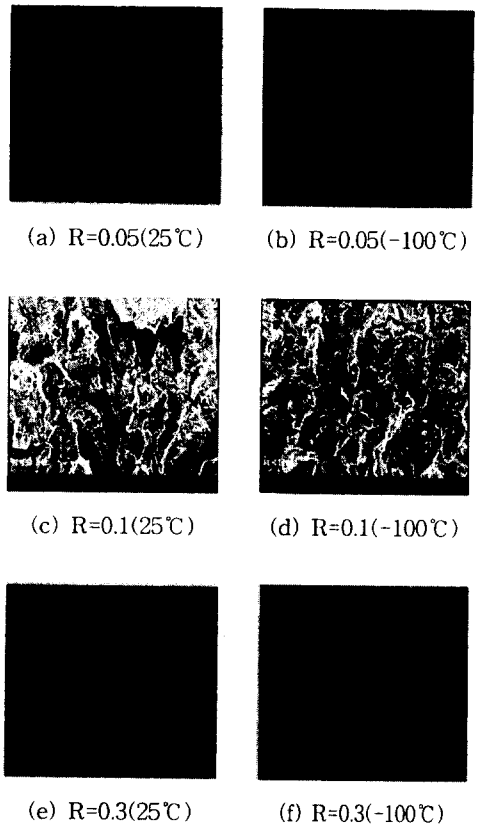
Fig. 9 Relations between fatigue crack propagation length and cycle (Stress Ratio : 0.3)

3.4 파단 해석

Fig. 10은 응력비 R=0.05, 0.1 및 0.3에서 실험 후 파단 시켜 최종 응력 확대계수 ΔK값을 갖는 영역에 대하여 주사식전자현미경(SEM)을 이용하여 촬영한 사진이다. 그림 (a)및 (b)은 응력비 R=0.05에서 온도의 분포를 상온과 -100℃ 경우를 비교하여 보면 상온의 경우 다소 스트라이에이션이 관찰되는 것으로 보아 전형적인 피로파면을 가지고 있음을 알 수 있다. -100℃의 경우는 저온 환경 분위기에 따라 유사 벽개면을 관찰 할 수 있으며 이로 인해 균열에 대한 저항성을 갖는 것으로 생각된다.[13)~(14)]

그림 (c) 및 (d)는 응력비 R=0.1에서 파단면을 나타내고 있으며, 앞서 기술한 온도조건에 대한 비교를 하면 피로파면은 그림 (a) 및 (b)와 유사한 형태로 미시 조직의 조대화에 따라 피로균열 진전의 구동력을 약화시키고 균열에 대한 저항성을 갖는 것으로 생각된다.

특히 응력비가 증가됨에 따라 피로파괴 기구는 약간 다른 현상을 보이지만 미시조직의 조대화는 더욱더 뚜렷이 나타나고 또한 균열에 대한 저항성도 응력비 0.05 보다는 크게 나타난 것으로 생각된다. 그림 (e) 및 (f)는 응력비 R=0.3에서 각 온도에 따라 비교한 피로파면 이며, R=0.05 및0.1 보다 피로파괴 기구는 조직의 조대화 뿐만 아니라 벽계파괴 양상을 보임을 알 수 있다. 따라서 각 응력비 및 온도에 따른 파면관찰에서 조직의 조대화의 영향이 피로균열진전의 구동력을 감소시켜 피로강도를 증가시켰으며 온도가 저하함에 따라 그 현상이 뚜렷이 나타난 것으로 생각된다.



(a) R=0.05(25℃) (b) R=0.05(-100℃)

(c) R=0.1(25℃) (d) R=0.1(-100℃)

(e) R=0.3(25℃) (f) R=0.3(-100℃)

Fig. 10 Fractography of fatigue crack growth surface at 25℃, -100℃

4. 결 론

원자로구조 용재인 SA516/70 강에 대한 저온의 영향을 검토하기 위한 일정하중진폭 피로균열진전실험을 시행하여 균열진전속도에 미치는 응력비의 영향 및 온도에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상온에서의 응력비의 영향은 거의 없었으나 극저온으로 내려갈수록 응력비 0.05일 때 응력비 0.3에 비해 온도의 영향을 많이 받았으며 -100℃에서 응력비의 영향을 가장 많이 받았다.

2. 피로균열진전속도는 상온에 비해 저온으로 내려 갈수록 낮게 나타났으며, -100℃에서 피로균열진전속도가 가장 낮게 나타났다.

3. 동일한 ΔK에서 피로 균열진전속도는 저온의 경우가 상온보다 응력비에 관계없이 낮게 나타났으며, 이는 저온 강도와 인성의 증가로 저온 파괴인성에 크게 영향을 주는 것으로 생각된다.

4. 상온 25℃의 경우 파면에 스트라이에이션이 관찰되었으며, 극저온으로 갈수록 스트라이에이션이 부분적으로 관찰되었으나 전체적으로 의벽계면을 관찰할 수 있었다.

후 기

본 논문은 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Bucci. R. J,Clark. W.G. ASTM STP. pp. 177~178, 1972
2. Elber. W. ASTM STP. 486(1971), pp. 142~230, 1971
3. Stuart. A.T, Eng.Fracture Mech. Vol. 13, p. 463, 1980
4. ASTM Standard, E647-95a, 1997
5. Tanaka, K., "Mechanics and Micromechanis of Fatigue Crack Propagation." ASTM STP 1020, pp. 51~18 3, 1989.
6. A. Ohta and E. Sasaki, "Influence of Stress Ratio on the Thre-Shold Level for Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels", Eng. Fracture Mech., Vol. 9, pp. 307-315. 1974.
7. O. Vosikovsky, "The Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rates in Steels" , Eng. Fracture Mech., Vol. 11, pp. 595-602, 1979.
8. R. Murakami, H. Kobayashi and H, Nakazawa, "Influence of Microstructrure and the Microscopic Fracture Mechanisms on Fatigue Crack Growth Rates in Steel Plates", Trans. JSME, Vol. 44, No. 381, pp. 1415-1423, 1978.
9. Y.Tomota, Y. Xia. and K. Inuoue, Mechanic sm of Low Tem perature Brittle Fracture in High Nitrogen Bearing Austenitic Steels, Ac ta Meter, Vol. 46, No. 5. pp. 1557-1587. 1998
10. 김정규, 김철주, 조동혁, 윤인수 , "저온하에서 LNG 저장탱크용 멤브레인재(STS304강)의 피로균열진전거동"대한기계학회 춘계학술대회 논문집(A), pp 703-708, 1999