

저온 압력용기용 SA516/60강의 피로균열 진전 속도에 미치는 응력비의 영향

· 박 경 동*, 하 경 준**, 박 상 오***

The Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Rate in SA516/60 Pressure Vessel Steel at Low Temperature

Keyung-Dong Park, Sang-Oh Park

- * 부경대학교 기계공학부
- ** 부경대학교 대학원 기계공학과
- *** 부경대학교 대학원 정밀기계공학과

Abstract: The fatigue crack growth behavior of the SA516/60 steel which is used for pressure vessels was examined experimentally at room temperature 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C with stress ratio of R=0.05, 0.1 and 0.3. Fatigue crack propagation rate da/dN related with stress intensity factor range ΔK was influenced by stress ratio in stable of fatigue crack growth (Region II) with an increase in ΔK .

The resistance of fatigue crack growth at low temperature is higher compared with that at room temperature, which is attributed to the extent of plasticity-induced by compressive residual stress according to the cyclic loads. 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 plasticity induced and roughness induced.

Key words: Crack Propagation Rate(균열진전속도), Low Temperature(저온), Stress Ratio(응력비), $da/dN-K$ (균열진전속도와 응력확대계수), Threshold Stress Intensity Factor ΔK_{th} (하한계 응력확대계수)

1. 서 론

최근 산업의 고도화에 따라 구조재료는 사용 환경과 운전조건이 가혹해지고, 구조물의 수명 및 건전성 평가에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으며, 국내 원자력 발전소 및 극저온에 사용되는 압력용기 건설에 따라 매우 중요시되고 있다.

이러한 구조재료들은 상온에서 연성의 기계적성질을 가지고 있으나 저온에 이르면 취성적 성질을 갖는다. 취성적 거동에서 발생하는 재료의 강도는 재료고유의 결함인 균열 및 개재물 등의 결함에 큰 영향을 받게된다^[1]. 실제로 이러한 구조물의 재료에서는 고유의 결함, 제조결함, 응력집

중부 또는 용접 열영향부에 발생하는 결함 등이 존재하고 있다.

이러한 재료들의 피로균열진전속도에 대한 평가는 매우 많이 이루어지고 있다. 그러나 저온환경에서 발생하는 저온취성으로 인하여 피로균열진전속도에 관한 해석은 매우 미흡한 실정이며, 이러한 가혹한 환경에서 재료의 파괴기구인 저온 피로 균열진전속도의 수명평가는 필수적이라 하겠다.

따라서 저온환경에서 사용되고 있는 저온압력용기, LNG용 탱크, 저장용 탱크 등 실제 구조물들의 저온피로균열진전 특성 등을 연구하여 수명 안정성과 신뢰성을 확보하여 파괴 역학적 관점을

기초로 하여 피로 설계에 필요한 개념 도입이 대단히 중요하다^[2,3].

본 연구에서는 저온압력용기, 저장용 탱크, 원자로 냉각제 배관, 탑조류 등에 사용되는 SA516/60 강에 대하여 저온피로균열진전 특성과 하한계 특성을 실험적 해석으로 규명하여 저온환경에서 피로균열 진전속도에 미치는 응력비의 영향을 고찰하였다. 또한 재료상수 C , m 및 ΔK_{th} 와 응력비의 관계를 규명하여 파면해석을 통한 온도영향에 따른 피로균열 진전의 메커니즘을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 용접성, 절삭성 및 가공성이 양호한 SA516/60 압력용기용 재료이며, Table 1은 화학적 성분을 나타내었으며, Table 2는 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	Mo
0.12	0.23	0.97	0.017	0.04	0.026	0.02	0.03	0.027	0.002

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
310	459	29	66.12

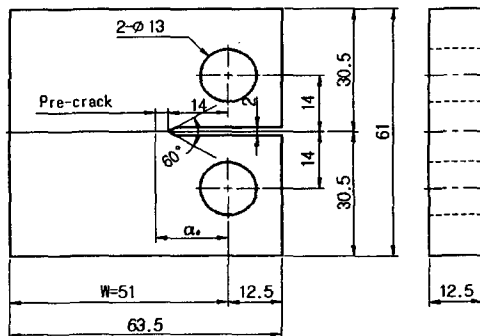


Fig. 1 Configuration of CT-specimen(unit:mm)

실험에 사용된 시험편은 CT시험편으로 두께 12mm이고, 시험편 채취방향은 L-T방향으로 채

취하였으며, 슬로터가공은 와이어커팅을 사용하여 ASTM E647-95a의 규정에 따라 가공하였다^[4]. Fig. 1은 본 연구에 사용된 시험편 형상과 치수를 나타낸 것이다.

2.2 실험장치

Fig. 2는 본 실험에 사용한 전기유압식 피로시험기(INSTRON 8501 : 100KN)이며, 파괴역학 파라미터 ΔK 는 시험기에 장착된 컴퓨터를 이용하여 산출하였다.

저온실험을 위한 장치는 열전대, 챔버(chamber) 액체질소용기, 질소 봄베 등으로 구성하였다.

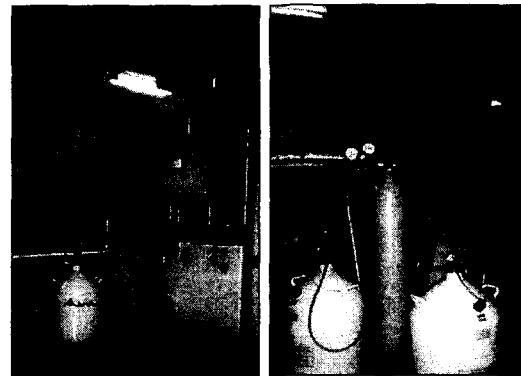


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

2.3 실험방법

실험은 전기유압식 피로시험기를 사용하여 하중 제어방식으로 실험을 수행하였다. 또한 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착하여 액체질소용기의 압력이 0.5 kg/mm^2 이 되도록 유지하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온 환경을 조성하였다.

실험 중 액체질소의 감소에 따른 액체 질소의 유입을 정상적으로 하여, 실험온도 유지를 위하여 전자식밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 하였다. 온도 편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, 하중파형은 정현파를 선택하였다. 또한 응력비 $R=0.05, 0.1, 0.3$ 주파수 20Hz, 실험온도는 $25^\circ\text{C}, -30^\circ\text{C}, -60^\circ\text{C}, -80^\circ\text{C}, -100^\circ\text{C}, -120^\circ\text{C}$ 로 하였다. 실험하중은 하중감소방법으로 하였으며, 크랙길이는 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 측정하고 피로균열진전시험은 ASTM E 647-95a규정에 따라 일정 진폭하중하에서 수행하였다^[4].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열 진전 속도에 미치는 온도 및 응력비의 영향

구조용 재료에 균열의 존재를 가정한 피로균열 진전 거동은 균열진전속도(da/dN)와 응력확대계수폭(ΔK)의 상호 관계식으로 표현된다. Paris는 피로균열진전속도와 응력확대계수폭 관계를 다음과 같이 제한하였다. $da/dN=C\Delta K^m$ 여기서 C 와 m 은 재료상수이다.

Fig. 3는 동일 응력비 $R=0.05$, $R=0.1$, $R=0.3$ 에서 $25^\circ\text{C}(\text{RT})$, -30°C , -60°C , -80°C , -100°C , -120°C 에서 피로균열진전속도 da/dN 과 응력확대계수 폭 ΔK 와의 관계를 양대수 선도상에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 온도가 내려갈수록 피로크랙 진전초기영역(제1단계 영역)에서의 피로크랙진전 하한계특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 피로수명의 대부분이 피로크랙 진전초기에 소비된다는 점을 감안한다면, 이는 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문에 크랙초기 피로저항성이 증가한 것으로 판단된다. 온도가 상승할수록 저 ΔK 영역까지 da/dN - ΔK 양대수 직선관계가 성립하므로 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 값이 저하됨을 나타내었다.

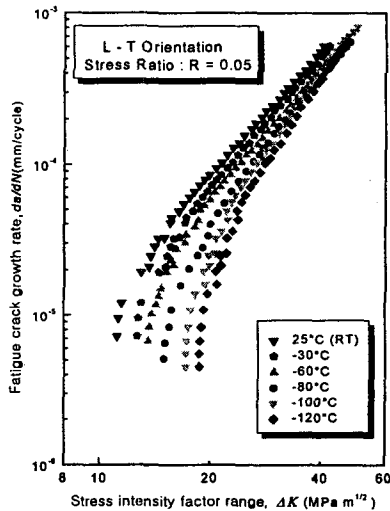


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ($R=0.05$)

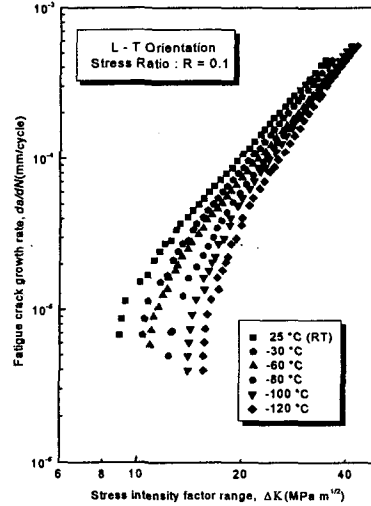


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ($R=0.1$)

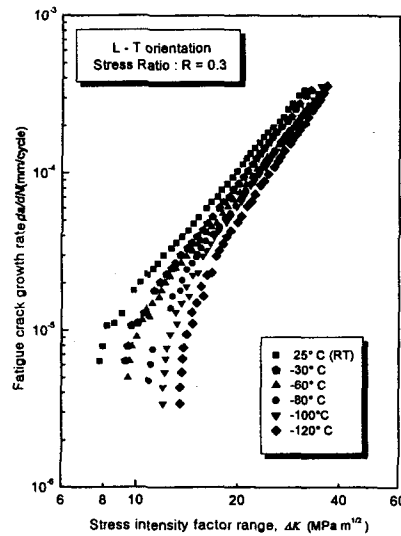


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ($R=0.3$)

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에서 ΔK 가 응력비의 증가와 함께 da/dN 의 관계는 직선적으로 증가하고 있으며, 응력비가 높은 $R=0.3$ 의 조건이 $R=0.1$, $R=0.05$ 보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 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 단합에 의한 피로균열 진전속도의 감소에 기인한 것으로 생각된다. 또한, 낮은 ΔK 영역에서는 응력부하시 균열선단에 발생하는 소성역 내의 잔류응력이 작용하여 압축하중이 피로균열진전의 구속력으로 작용하여 진전속도에 영향을 준 것으로 생각된다. 피로균열진전 구동력은 외부응력과 내부인장잔류응력의 합이 되어 피로균열 진전을 방해하는 작용을 하게 된다.

높은 ΔK 영역에서는 응력비의 영향이 거의 보이지 않았으며, 응력비가 높을수록 부하과정에 발생하는 인장소성역내에 발생하는 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 응력비가 높을수록 진전속도가 빠르게 나타났다.

Fig.4, Fig. 5, Fig. 6은 -80°C , -100°C , -120°C 에서 실험분위기 온도가 극저온으로 이동함에 따라 ΔK 는 고영역으로 이동되어지는 경향이 상온에 비하여 현저하게 나타났으며 동일 ΔK 를 기준으로 하한계영역과 제2영역에서 피로균열 진전속도를 고찰하여 보아도 유사한 경향이 나타남을 알 수 있다. 따라서 온도저하에 따른 피로균열진전에 대한 저항력이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 원인은 하한계 응력확대계수 범위부근(near threshold stress intensity factor range region)에서 온도저하에 따른 균열단합현상이 일어나며, 온도감소에 의한 피로균열 구동력의 약화는 기계적 물성치중 항복강도와 응력비등의 원인으로 생각되며, 각 인자들은 독립적인 상관관계가 아닌 것으로 판단된다.

3.2 하한계 응력확대계수 범위 ΔK_{th} 와 온도에 따른 응력비의 영향

Fig. 6은 각 실험온도에 따른 정량적인 하한계응력확대계수 범위 ΔK_{th} 와 온도와의 관계를 응력비에 따라서 나타내었다.

그림에 알 수 있듯이 응력비 R=0.05의 경우 극저온인 -120°C 에서 가장 높은 ΔK_{th} 값을 보이고 있으며, 온도가 증가할수록 하한계 응력확대계수 값은 낮아지고 있으며, 재료의 무연성천이온도(NDTT) 부근에서 감소율이 적어지고 있음을 알 수 있다.^[6,7]

각 응력비에 모두 상온 25°C 에서 -60°C 까지는

하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 완만하게 감소되었으나 -60°C 에서 -120°C 까지는 크게 증가됨을 나타내었다. 응력비가 낮을수록 각 온도에서 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 증가함을 보였다.

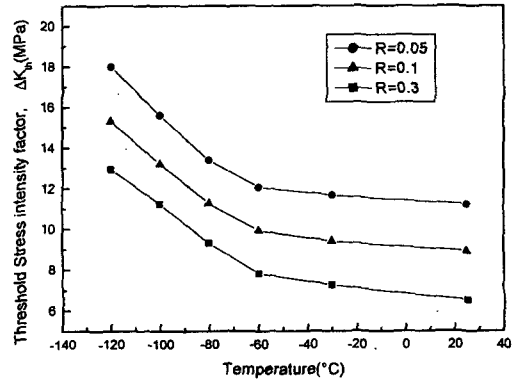


Fig. 6 Effect of Threshold stress intensity factor and temperature

또한 응력비의 변화에 따른 하한계 특성변화는 뚜렷한 차이를 보였다. 이러한 현상은 앞서 기술한 바와 같이 응력비의 영향이 온도의 영향에 의하여 지배적인 관계를 보여주고 있으며, 저온환경에 따른 기계적 물성치변화와 재료가 가지는 미시조직의 문제 및 피로균열 구동력의 문제인 잔류응력 및 반복피로에 의한 표면거칠기에 따른 소성유기에 비롯된 결과로 생각된다^[8,9].

Table 2는 하한계 응력확대계수의 정량적인 값을 나타내었으며 동일온도조건에서 응력비 변화에 따른 하한계 특성은 응력비가 높을수록 낮게 나타났으며, 극저온으로 갈수록 크게 나타났다.

Table 2 The value of fatigue crack growth threshold - ΔK_{th} (Mpa \sqrt{m})

Stress ratio \ Temp.	25°C	-30°C	-60°C	-80°C	-100°C	-120°C
0.05	11.20	11.65	12.05	13.38	15.59	17.98
0.1	8.89	9.39	9.91	11.25	13.19	15.29
0.3	6.49	7.24	7.79	9.29	11.22	12.92

3.3 온도변화에 따른 재료상수(C, m)관계

Fig. 7는 피로균열진전거동 중 제2영역을 Paris 식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 따른 재료상수 m을 온도 및 응력비 변화에 따른 정량적인 값을 비교하여

나타내었다. 상온 및 -60°C 의 경우 응력비의 변화에 따른 m 값은 응력비에 관계없이 일정한 값을 가졌으며, 온도가 극저온에 도달할 수록 m 값의 분포는 응력비가 낮아짐에 따라 증가되는 현상을 보였으며, 특히 -120°C 에서 증가현상이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상은 극저온으로 갈수록 파괴 거동이 취성적인 거동을 보임으로써 1차적으로 재료의 기계적 성질이 변화를 가져오고 저온 강도 및 피로강도증가와 인성의 저하로 벽개파괴 기구를 가지는 것으로 생각된다.

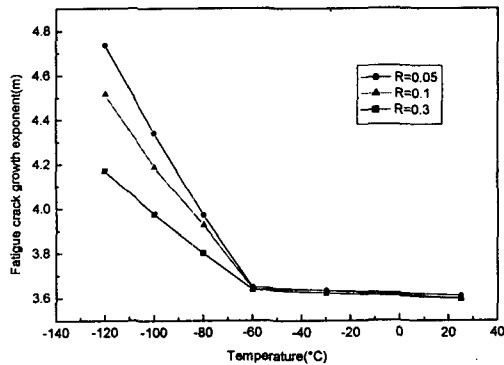


Fig. 7 Relations between fatigue crack growth exponent m and Temperature

Fig. 8는 재료상수 C 의 온도변화에 따른 응력비의 거동을 나타내었으며, 재료상수 m 의 경향과는 다른 경향을 보여주고 있다. 응력비 $R=0.1, 0.3$ 의 경우 상온에서 -60°C 까지는 C 값이 일정하였으며, 이후 온도범위에서는 $R=0.3$ 이 $R=0.1$ 보다 증가되는 현상을 알 수 있다. 또한 $R=0.05$ 와 $R=0.1, 0.3$ 을 비교하면 전자가 후자들에 비하여 낮게 나타남을 알 수 있다. 즉 저온환경으로 진행되면서 $R=0.05$ 일 때 -60°C 이후로 재료상수 C 가 급격히 저하되고 있고 $R=0.3$ 일 때 C 값은 증가폭이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서 동일 응력비에서 온도저하에 따라 재료상수 C 가 저하되고 균열진전지수 m 가 증가하는 것은 균열진전 구속력이 약화됨을 의미하며, 취성 재료 일수록 m 의 값이 커지는 연구 결과와 일치하며, 온도가 저하될수록 취성파괴기구를 가진다. 또한 피로균열진전 속도가 가속이 되는 현상이 나타나게 되어 재료상수 m 는 증가되고 C 는 감소되어 피로균열 진전속도에 대한 파괴저항성이 감소된다.

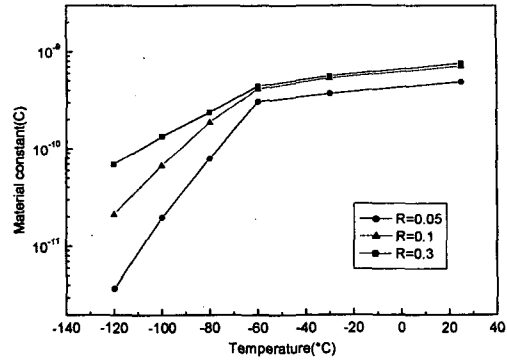


Fig. 8 Relations between Material constant C and Temperature

Table 3은 각 응력비와 온도에 따른 재료상수 m 과 C 를 피로균열진전의 2단계 영역에서 Paris 식에 의한 지수값을 정량적으로 나타내었다.

Fig. 9은 각 응력비에 대한 재료상수 C 와 m 값의 변화를 나타내었다.

Table 3 The gradient and constant of Paris equation

Stress ratio	Temp(°C)	m	C
0.05	25°C	3.610	4.87×10^{-10}
	-30°C	3.634	3.71×10^{-10}
	-60°C	3.649	3.08×10^{-10}
	-80°C	3.971	7.91×10^{-11}
	-100°C	4.341	1.97×10^{-11}
	-120°C	4.739	3.72×10^{-12}
0.1	25°C	3.599	7.09×10^{-10}
	-30°C	3.632	5.35×10^{-10}
	-60°C	3.642	4.16×10^{-10}
	-80°C	3.927	1.87×10^{-10}
	-100°C	4.188	6.76×10^{-11}
	-120°C	4.517	2.12×10^{-11}
0.3	25°C	3.596	7.64×10^{-10}
	-30°C	3.622	5.64×10^{-10}
	-60°C	3.637	4.44×10^{-10}
	-80°C	3.801	2.37×10^{-10}
	-100°C	3.975	1.34×10^{-10}
	-120°C	4.169	6.95×10^{-11}

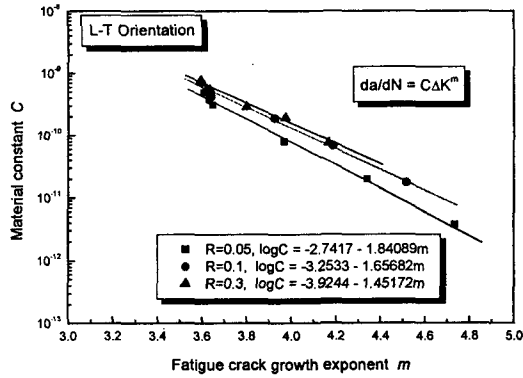


Fig. 9 Correlations between Material constant and fatigue crack growth exponent

3.4 동일한 ΔK 영역에서 저온피로균열 진전속도와 응력비 관계

Fig. 10은 동일한 ΔK 영역에서 da/dN 과 R 의 관계를 명확하게 나타내기 위하여 동일한 ΔK 에서의 da/dN 와 R 에 대하여 나타낸 선도이다.

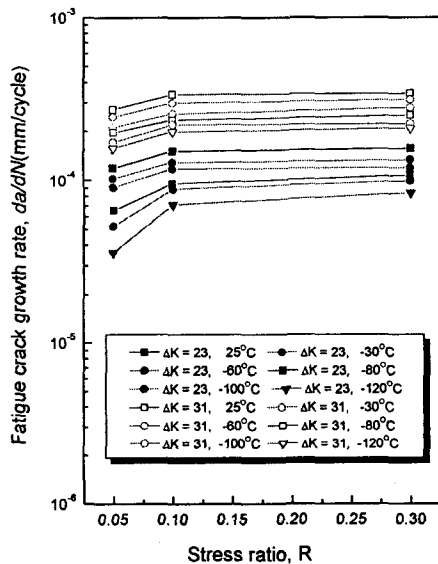


Fig. 10 Relations between Fatigue crack growth rate and stress ratio

이 선도에서 동일한 응력확대계수 범위 ΔK 에서의 저온피로 균열진전속도 da/dN 는 응력비 R 가 성장함에 따라 증가하고 ΔK 가 높아짐에 따라 응

력비의 영향이 감소하였고, 특히 응력비 $R=0.05$, 0.1 및 0.3 에서 $\Delta K=23MPa\sqrt{m}$ 일 때 균열진전속도 da/dN 가 크게 증가되는 현상을 보이고 있다. 따라서 동일한 ΔK 영역에서 da/dN 은 온도저하에 따라 감소함은 저온 취성에 따른 가속이 생긴다고 판단되며, 응력비 성장에 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.

3.5 파단면 해석

Fig. 11은 응력비 $R=0.05$, 0.1 및 0.3 에서 실험 후 파단을 시켜 최종 응력확대계수 ΔK 값을 갖는 영역에 대하여 주사식 전자 현미경(SEM)을 이용하여 촬영한 사진이다.

그림 (a), (d), (g), (j), (n), (p)는 응력비 $R=0.05$ 에서 온도의 분포 25°C , -30°C , -60°C , -80°C , -100°C , -120°C 를 비교하여 보면 상온의 경우 전형적인 피로파괴 기구를 가지고 있으며, -120°C 의 경우는 저온환경 분위기에 따른 재료의 미시조직의 조대화에 따라 피로균열 진전의 구동력을 약화시키고 균열에 대한 저항성을 갖는 것으로 판단된다.^[13,14]

그림 (b), (e), (h), (k), (m), (q)는 응력비 $R=0.1$ 에서 온도의 분포 25°C , -30°C , -60°C , -80°C , -100°C , -120°C 의 파단면을 나타내고 있으며, 앞서 기술한 온도조건에 대해 비교하여 보면 피로파면은 그림 (a), (d), (g), (j), (n), (p)와 유사한 형태로 미시 조직의 조대화에 따라 피로균열진전의 구동력을 약화시키고 균열에 대한 저항성을 갖는 것으로 사료된다.

특히 응력비가 증가됨에 따라 피로파괴기구는 약간 다른 현상을 보이지만 미시조직의 조대화는 더욱 더 뚜렷이 나타나고 또한 균열에 대한 저항성도 응력비 0.05 보다는 크게 나타난 것으로 생각된다.

그림 (c), (f), (i), (l), (o), (r)는 응력비 $R=0.3$ 에서 온도의 분포 25°C , -30°C , -60°C , -80°C , -100°C , -120°C 에 따라 비교한 피로파면이며, 그림에서 알 수 있듯이 $R=0.05$, $R=0.1$ 보다 피로파괴 기구는 조직의 조대화 뿐만 아니라 벽계파괴 양상을 보임을 알 수 있다. 따라서 각 응력비 및 온도에 따른 파면관찰에서 알 수 있듯이 조직의 조대화의 영향이 피로균열진전의 구동력을 감소시켜 피로강도를 증가시켰으며 온도가 저하함에 따라 그 현상이 뚜렷이 나타난 것으로 생각된다.

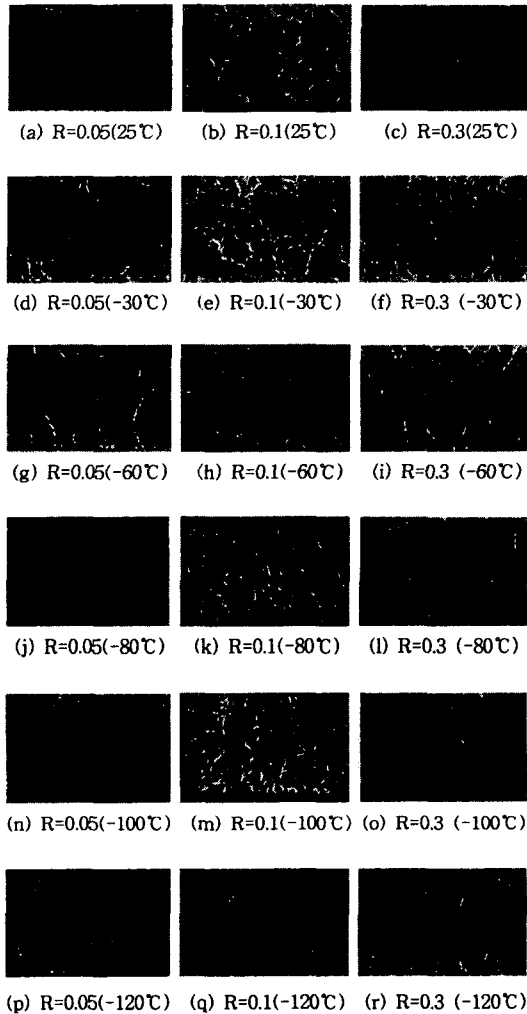


Fig. 11 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C for R = 0.05, 0.1 and 0.3

4. 결 론

원자로 구조용재인 SA516/60 강은 사용중에 피로하중에 의한 파괴거동에 대한 사용온도가 광범위하고 특히 저온의 영향을 검토하기 위한 일정 하중진폭 피로균열 진전실험을 시행하여 저온 환경하에서 균열진전 속도에 미치는 응력비의 영향을 고찰하고 재료상수 C , m 및 하한계 응력확대 계수범위 ΔK_{th} 와 응력비에 관한 연구결과는 다음과 같다.

(1) 동일한 ΔK 에서의 저온피로 균열진전 속도는

응력비가 증가함에 따라 상승하고 ΔK 가 증가함에 따라 응력비의 영향이 적었으며, 응력비의 영향은 상온보다 저온에서 더 현저함을 알 수 있다.

- (2) 재료상수 C 와 m 의 관계에서 응력비의 영향이 현저하게 나타났다. 이는 저온의 경우 균열진전에 대한 저항성이 재료강도의 증가와 더불어 표면거칠기에 따른 소성유기현상이 균열단합 현상으로 작용한 것으로 생각된다.
- (3) 피로균열진전속도는 동일한 ΔK 에서 저온의 경우가 상온보다 응력비에 관계없이 낮게 나타났다으며, ΔK_{th} 영역에서 피로균열진전에 대한 저항력은 온도가 감소함에 따라 증가됨을 알 수 있다.
- (4) 저 ΔK 영역에서 피로균열진전속도는 응력비에 관계없이 균열진전의 구동력이 감소되었으며 이것은 파면관찰에서 알 수 있듯이 온도변화에 따라 조직의 조대화가 피로강도에 영향을 주었다.

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] Stewart. A.T, Eng.Fracture Mech. Vol. 13, p.463, 1980
- [4] ASTM Standard, E647-95a, 1997
- [5] Tshegg, E. and Stanzl, S., Acta Metallurgical, Vol.29, pp.33~40, 1981
- [6] Tanaka,K., Akinwa,Y., and Yamashita, M., "Fatigue Growth Threshold of small Cracks." International Journal of Fracture, Vol. 17 pp.519~533, 1981
- [7] Fatigue Crack Grow Threshold Concept, AIME, pp.110~112, 1983
- [8] Tanaka,K., "Mechanics and Micromechanics of Fatigue Crack Propagation." ASTM STP 1020, pp. 51~183, 1989.
- [9] Kitsunai, Y., "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperatures," Fatigue at Low Temperatures, ASTM STP 857, pp.274~292, 1985.
- [10] A. Ohta and E. Sasaki, "Influence of Stress Ratio on the Threshold Level for

- Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels” ,Eng. Fracture Mech., Vol. 9, pp. 307~315. 1974.
- [11] O. Vosikovsky, “The Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rates in Steels” , Eng. Fracture Mech., Vol. 11, pp. 595~602, 1979.
- [12] R. Murakami, H. Kobayashi and H. Nakazawa, “Influence of Microstructure and the Microscopic Fracture Mechanisms on Fatigue Crack Growth Rates in Steel Plates” , Trans. JSME, Vol. 44, No. 381, pp. 1415-1423, 1978.
- [13] Y. Tomota, Y. Xia. and K. Inoue, Mechanism of Low Temperature Brittle Fracture in High Nitrogen Bearing Austenitic Steels, Acta Mater, Vol. 46, No. 5. pp. 1557~1587. 1998
- [14] 김정규, 김철주, 조동혁, 윤인수, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(A), pp 703~708, 1999