

## 차량용 압력용기용 강철의 피로파괴에 미치는 온도의 영향

박경동\* · 김영대 · 김형자

부경대학교 기계공학부

### The Effect of Temperature on Fatigue Fracture of Pressure Vessel Steel for Vehicle

Kyoungdong Park\* · Youngdae Kim · Hyoungja Kim

Department of Mechanical Engineering, Bukyoung University, Busan 608-739, Korea

(Received 17 March 2003 / Accepted 16 July 2003)

**Abstract** : The fatigue crack growth behavior of the SA516/60 steel used for pressure vessels was examined experimentally at room temperatures 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  $\Delta K$  was influenced by stress ratio in stable than fatigue crack growth (Region II) with an increase in  $\Delta K$ .

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 explained mainly by the crack closure and the strengthening due to the plasticity near the crack tip and roughness of the crack faces induced.

**Key words** : Crack propagation rate(균열진전속도), Low temperature(저온), Stress ratio(응력비),  $da/dN$ - $\Delta K$ (균열진전속도와 응력확대계수), Threshold stress intensity factor  $\Delta K_{th}$ (한계 응력확대계수)

#### 1. 서론

최근 산업의 고도화에 따라 구조재료는 사용 환경과 운전조건이 가혹해지고 있어, 구조물의 수명 및 건전성 평가에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으며, LPG gas 저장용기 및 저온에 사용되는 압력용기 제작이 매우 중요시되고 있다.<sup>1)</sup>

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. 실제로 이러한 구조물의 재료에서는 고유의 결함, 제조결함, 응력집중부 또는 용접열영향부에 발생하는 결함 등이 존재하고 있다.<sup>2)</sup>

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.<sup>3)</sup>

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

\*To whom correspondence should be addressed.  
parkkd@pknu.ac.kr



### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로균열 진전 속도에 미치는 온도 및 응력비의 영향

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

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 각각 동일 응력비  $R=0.05$ ,  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ 에서  $25^\circ\text{C}$ (RT),  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-60^\circ\text{C}$ ,  $-80^\circ\text{C}$ ,  $-100^\circ\text{C}$ ,  $-120^\circ\text{C}$ 에서 피로균열진전속도  $da/dN$ 과 응력확대계수 폭  $\Delta K$ 와의 관계를 양대수 선도상에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 온도가 내려갈수록 피로크랙 진전 제1단계 영역에서의 피로크랙진전 하한계특성  $\Delta K_{th}$  경향이 증가하는 것으로 나타났다. 온도가 상승할수록 저 $\Delta K$  영역까지  $da/dN$ - $\Delta K$  양대수 직선관계가 성립하므로 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$  경향이 저하됨을 나타내었다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5를 서로 비교해보면  $\Delta K$ 가 응력비의 증가와 함께  $da/dN$ 의 관계는 직선적으로 증

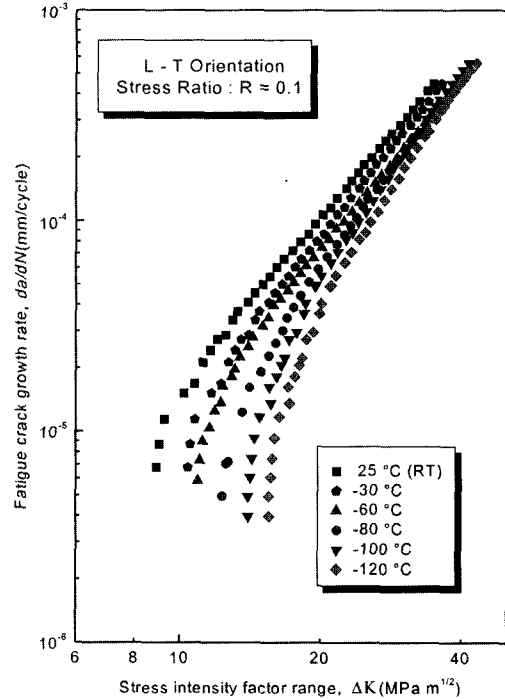


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ( $R=0.1$ )

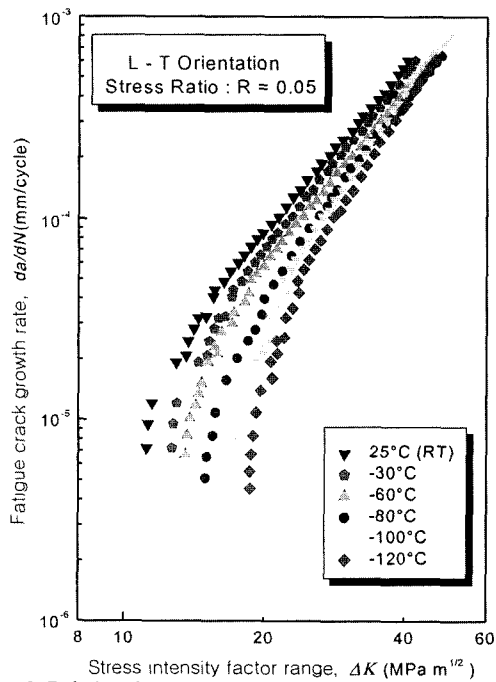


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ( $R=0.05$ )

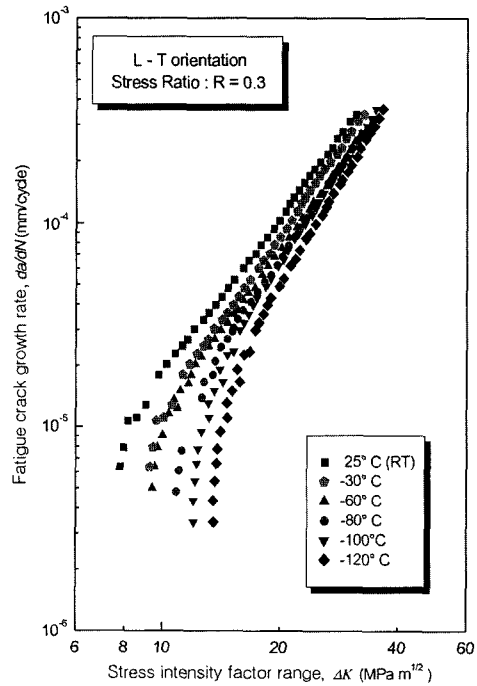


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ( $R=0.3$ )

가하고 있으며, 응력비가 높은 조건이 다른 낮은 조건들보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 응력비가 높을수록 최대하중의 증가로 인하여 균열진전속도가 빨라지는 것으로 일반적으로 알려져있는 사실과 일치한다. 또한, 낮은  $\Delta K$  영역에서는 응력부하시 균열선단에 발생하는 소성역 내의 잔류응력이 작용하여 압축하중이 피로균열진전의 구속력으로 작용하여 진전속도에 영향을 준 것으로 생각된다.

높은  $\Delta K$  영역에서는 응력비의 영향이 거의 보이지 않았으며, 응력비가 높을수록 부하과정에 발생되는 인장소성역내에 발생하는 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 응력비가 높을수록 진전속도가 빠르게 나타나는 것으로 보인다.<sup>6)</sup>

### 3.2 하한계 응력확대계수 범위 $\Delta K_{th}$ 의 온도 및 응력비의 영향

Fig. 6은 각 실험온도에 따른 정량적인 하한계응력확대계수 범위  $\Delta K_{th}$ 와 온도와의 관계를 응력비에 따라서 나타내었다.

그림에 알 수 있듯이 응력비 R=0.05의 경우 -120°C에서 가장 높은  $\Delta K_{th}$ 값을 보이고 있으며, 온도가 상승할수록 하한계 응력확대계수 값은 낮아지고 있으며, 재료의 무연성전이온도(NDTT)인 40°C ~ 60°C 부근에서 감소율이 적어지고 있음을 알 수 있다.<sup>7,8)</sup>

각 응력비에 모두 상온 25°C에서 -60°C까지는 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 완만하게 감소되었으나 -60°C에서 -120°C까지는 크게 증가됨을 나타내었다. 응력비가 낮을수록 각 온도에서 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 증가함을 보였다.

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.<sup>9)</sup>

Table 2는 하한계 응력확대계수의 정량적인 값을 나타내었으며 동일온도조건에서 응력비 변화에 따

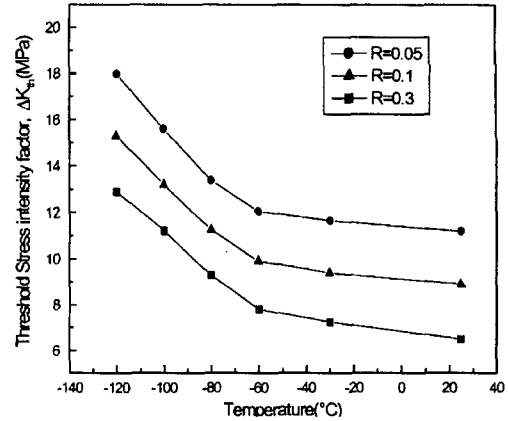


Fig. 6 Effect of threshold stress intensity factor and temperature

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

Stress ratio	Tem.	25°C	-30°C	-60°C	-80°C	-100°C	-120°C
	0.05		11.20	11.65	12.05	13.38	15.59
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

른 하한계 특성은 응력비가 높을수록 낮게 나타났으며, 저온으로 갈수록 크게 나타났다.

### 3.3 온도변화에 따른 재료상수(C, m)관계

Fig. 7은 피로균열진전거동 중 제2영역을 Paris식  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 따른 재료상수  $m$ 을 온도 및 응력비 변화에 따른 정량적인 값을 비교하여 나타내었다. 상온, -30°C 및 -60°C의 경우 응력비의 변화에 따른  $m$ 값은 응력비에 관계없이 일정한 값을 가졌으며, 온도가 저온에 도달할수록  $m$ 값의 분포는 응력비가 낮아짐에 따라 증가되는 현상을 보였으며, 특히 -120°C에서 증가현상이 뚜렷하게 나타났다.

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

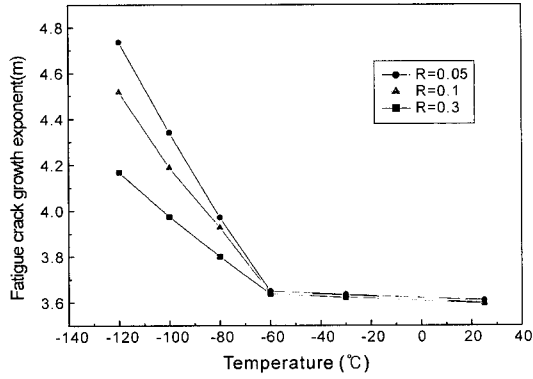


Fig. 7 Relations between fatigue crack growth exponent  $m$  and temperature

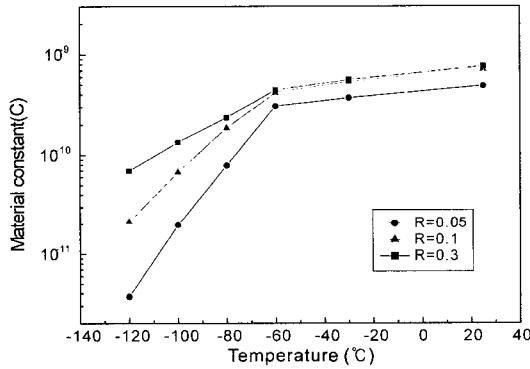


Fig. 8 Relations between material constant  $C$  and temperature

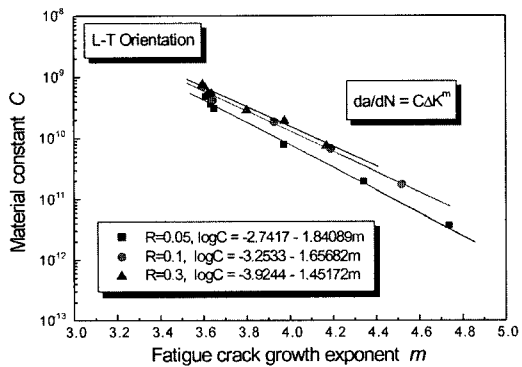


Fig. 9 Correlations between material constant and fatigue crack growth exponent,  $C$ ,  $m$  in Paris' equation  $da/dN = C(\Delta K)^m$

로 재료상수  $C$ 가 급격히 저하되고 있고  $R=0.3$ 일 때  $C$ 값은 증가폭이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 각 응력비와 온도에 따른 재료상수  $m$ 과

Table 3 The gradient and constant of Paris equation

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

$C$ 를 피로균열진전의 2단계 영역에서 Paris 식에 의한 지수값을 정량적으로 나타내었다.

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

### 3.4 동일한 $\Delta K$ 영역에서 저온피로균열진전속도와 응력비 관계

Fig. 10은 동일한  $\Delta K$ 영역에서  $da/dN$ 과  $R$ 의 관계를 나타낸 선도이다. 이 선도에서 동일한 응력확대 계수 범위  $\Delta K$ 에서의 저온피로 균열진전속도  $da/dN$ 는 응력비  $R$ 가 증가함에 따라 증가하고  $\Delta K$ 가 높아짐에 따라 응력비의 영향이 감소하였다. 따라서 동일한  $\Delta K$  영역에서  $da/dN$ 은 온도저하에 따라 감소함은 저온 취성에 따른 가속이 생긴다고 판단되며, 응력비 감소에 따라서 저온의 영향을 크게 받는 것으로 알 수 있으며 이런 현상<sup>10-12)</sup>은 Ohta, Sasaki, Vosikovsky 등의 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

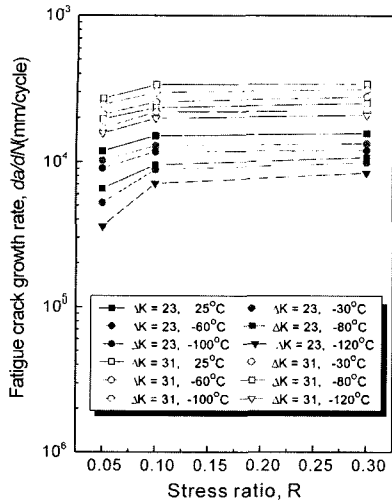


Fig. 10 Relations between fatigue crack growth rate and stress ratio

### 3.5 파단면 해석

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

그림 (a), (d), (g), (j), (n), (p)는 응력비 R=0.05에서 온도의 분포 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C를 비교하여 보면 상온의 경우 전형적인 피로파괴 기구를 가지고 있으며, -120°C의 경우는 저온환경 분위기에 따른 재료의 미시조직의 조대화에 따라 균열에 대한 저항성을 갖는 것으로 판단된다.<sup>13)</sup>

그림 (b), (e), (h), (k), (m), (q)는 응력비 R=0.1에서 온도의 분포 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C의 파단면을 나타내고 있으며, 앞서 기술한 온도조건에 대해 비교하여 보면 피로파괴면은 그림 (a), (d), (g), (j), (n), (p)와 유사한 형태로 미시 조직의 조대화에 따라 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 0.05보다는 크게 나타난 것으로 생각된다.

그림 (c), (f), (i), (l), (o), (r)는 응력비 R=0.3에서 온도의 분포 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C에 따라 비교한 피로파괴면이며, 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.

## 4. 결론

차량용 압력용기용 SA516/60 강의 사용중에 피로하중에 의한 파괴거동에 대한 저온의 영향을 검토하기 위한 일정하중진폭 피로균열 진전실험을 시행하여 저온 환경하에서 균열진전 속도에 미치는 응력비의 영향을 고찰하고 재료상수 C, m 및 하한계 응력확대 계수범위  $\Delta K_{th}$ 의 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 는 온도가 저하할수록 증가하다가 -60°C부터 급격하게 증가함을 보였다. 이는 저온취성의 영향으로 생각된다. 또 응력비가 감소할수록  $\Delta K_{th}$ 가 증가하였으며 모두 같은 경향을 보였다.
- 2) 응력비의 영향은 온도가 저하할수록 더 현저함을 알 수 있다. 이는 저온의 경우 균열진전에 대한 저항성이 재료강도의 증가와 더불어 소성유기현상이 균열단합 현상으로 작용한 것으로 생각된다.
- 3) 재료상수 C와 m도 온도가 저하할수록 크게 차이를 보였으며 25°C에서 -60°C까지는 큰 변화를 보이지 않았으나 -60°C에서 -120°C 사이는 급격한 변화를 보였다.
- 4) 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 저하할수록 피로균열진전속도는 온도 및 응력비에 관계없이 균열진전이 감소되었다. 이는 파면 표면의 산화물이 균열개폐에 영향을 준 것으로 파면 관찰에서 나타났다.

차량용 압력용기용 강의 피로파괴에 미치는 온도의 영향

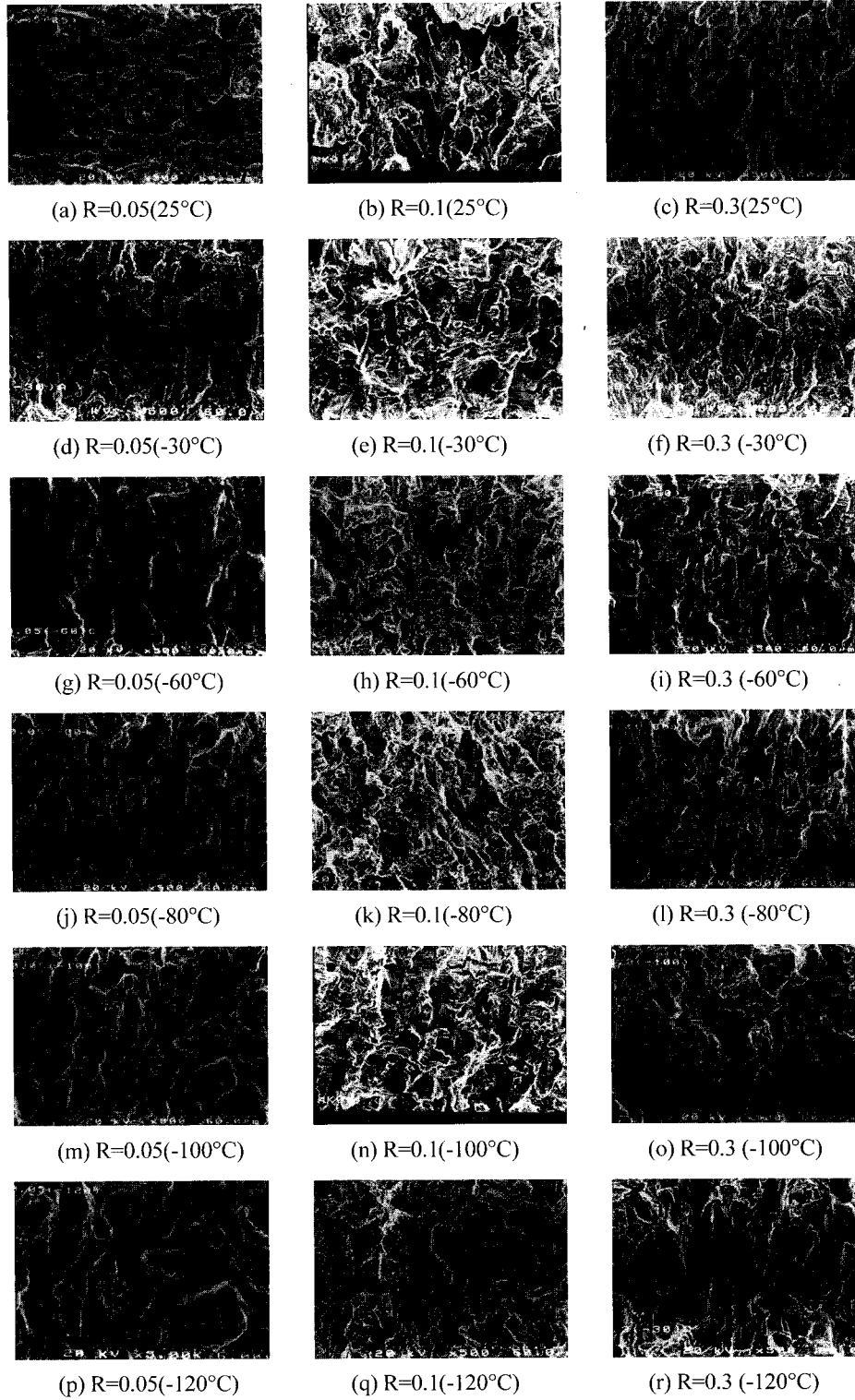


Fig. 11 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C for R = 0.05, 0.1 and 0.3

### References

- 1) L. N. Person, C. G. Wolfer, "In Properties of Materials for Liquefied Natural Gas Tankage," ASTM, pp.80-95, 1975.
- 2) R. N. Moody, W. W. Gerberich, "Materials Science and Engineering," pp.35-46, 1977.
- 3) K. Park, C. Jung, "A Study on the Effect of compressive Residual Stress on Fatigue Crack Propagation Behavior of the Shot-peened Spring Steel," 2003 KSAE Autumn Conference Proceeding, pp.1024-1032, 2002.
- 4) ASTM Standard, E647-95a, 1997.
- 5) Fatigue Crack Growth Threshold Concept, AIME, pp.110-112, 1983.
- 6) E. Tshegg, S. Stanzl, Acta Metallurgical, Vol.29, pp.33-40, 1981.
- 7) K. Tanaka, Y. Akinwa, and M. Yamashita, "Fatigue Growth Threshold of Small Cracks.," International Journal of Fracture, Vol.17, pp.519-533, 1981.
- 8) K. Tanaka, "Mechanics and Micromechanics of Fatigue Crack Propagation.," ASTM STP 1020, pp.51-183, 1989.
- 9) Y. Kitsunai, "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperatures," ASTM STP 857, pp.274-292, 1985.
- 10) A. Ohta, 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, K. Inoue, "Mechanism of Low Temperature Brittle Fracture in High Nitrogen Bearing Austenitic Steels," Acta Mater, Vol.46, No.5, pp.1557-1587, 1998.