

# 고속철도 분기기용 강의 피로균열 진전거동

최성대\* · 남정학\*\* · 이증형\*\*\*

## Fatigue Crack Growth Behavior of Steel for High Speed Rail Crossing

Seong-Dae Choi, Jeoung-Hag Nam and Jong-Hyung Lee

**Key Words:** High manganese steel(고망간강), Cast steel(주강), Crystal grain(결정립), Crack closure(균열단합), Fretting oxide(프레팅 산화)

### Abstract

Fatigue crack growth tests were carried out using high manganese cast steel under constant amplitude loading. Average crystal grain sizes of the material are  $200\mu\text{m}$  and  $1000\mu\text{m}$ . For this material,  $\Delta K_{th}$  is about  $8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  which is quiet large as compared to the general structural steels and the crack growth rate is lower than the general structural steels especilly in the low  $\Delta K$  region. The reason of this behavior is crack closure due to fracture surface roughness and fretting oxide. The relationship between  $da/dN$  and the  $\Delta K_{eq}$  was represented by narrow band regardless of the stress ratio.

### 1. 서 론

고망간강은 0.8~0.3%C, 11~14%Mn을 포함하는 내마모, 내충격재료이다. 1882년 영국인 Hadfield로부터 발견되었기 때문에 헤드필드 망간강이라고 한다.<sup>(1)</sup> 탄소강에 망간을 첨가하면 수%까지는 페라이트 중에 고용하지만 그것을 넘어서면 유이한 탄화물이 생긴다. 망간을 2%정도 포함되게 되면 페라이트강이 되고, 8~20%정도 포함하게 되면, 본 연구에 쓰인 고망간강과 같은 재료가 된다. 고망간강은 주형에 주괴의 주입순도에 따라서 결정입경의 크기가 달라진다.<sup>(2)</sup> 고망간강은 주로 주물로서 고속철도의 분기기용, 광

산기계, 파쇄기의 치판, 로울, 구 회전 파쇄기의 원추 및 자동차의 차축 등에 사용되고 있다. 고망간강은 일반강재에 비하여 고연성, 저항복비, 현저한 가공경화 등의 특징을 가지고 있기 때문에 균열선단의 응력, 변위상태에 지배되는 피로 균열진전 특성 또한 다를 것이라고 생각된다.

본 연구에서는 고속철도 분기기용 고망간강 주조재의 피로균열진전특성을 검토하기 위해서 대기 중 및 주사형전자현미경 (SEM)내에 있어서 일진폭하중에서 실시하여 시험편표면에서의 균열진전경로, 균열진전속도와 균열개폐구거동에 대하여 고찰했다.

\* 금오공과대학교 기계공학부

\*\* 금오공과대학교 기계공학부 대학원

\*\*\* 금오공과대학교 기계공학부

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

시험편은 Table 1에 나타난 것과 같이 Hadfield 조성의 비자성 고망간강의 주조재이다. 고망간강의 결정입경은 주조온도와 Si 함유량에 의존하지만, 본 연구에서는 주조온도를 1117 K 및 1217 K로 하여 평균결정입경이 각각의 주조온도에 대해, 200 $\mu\text{m}$ (이하 200 $\mu\text{m}$ 재) 및 1000 $\mu\text{m}$ (이하 1000 $\mu\text{m}$ 재)이고, 주조 후 1323 K에서부터 급랭하여 오스트나이트단상조직으로 했다. 기계적성질은 Table 2에 나타났다. 피로균열진전특성을 비교하기 위하여 동일한 오스트나이트계 비자성장인 SUS304 및 실제 레일로부터 얻은 탄소강(이하 SC 레일)도 함께 실험했다. Fig. 1에 시험편의 각각의 조직사진을 나타내었다. 시험편은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 폭 b가 100mm, 두께 t가 20mm 그리고 폭 b가 25.4mm, 두께 t가 3mm인 두 종류의 CT시험편을 사용하여 실험하였다.

### 2.2 피로시험방법

#### 2.2.1 대기 중 피로시험

피로시험은 전기유압식 피로시험기로 Type 1의 시험편을 이용해서 실시했다. 하중파형은 정현파로, 실온대기중에서 응력비(R)를 0.1 및 0.6으로 일정진폭하중하에서 실시했다. 하중반복주파수는 20Hz로 했다. 또, 저  $\Delta K$  영역에 있어서 균열진전속도 및 하한계응력확대계수범위  $\Delta K_{th}$ 을 조사하기 위해서 하중범위점감시험을 실시했다.

각 단계에서 하중범위의 감소를 5% 이내로 하고, 0.3mm이상의 균열진전을 확인했다.  $\Delta K_{th}$ 를 측정된 뒤, 하중범위  $\Delta P$ 를 5%증가하여, 균열을 진전시켰다. 균열길이의 측정에는 0.01mm까지 읽을 수 있는 현미경을 사용했다. 균열길이는 하중방향에 대한 수직면의 투영장으로 하고 시험편 양쪽면의 평균치로 했다. 균열진전경로의 관찰은 피로시험을 일시중단하고, 금속현미경에 의

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
1.01	0.71	12.14	0.026	0.002	0.06	0.08	0.08	0.02	Bal.

Table 2 Mechanical properties

Grain size	0.2% Proof stress	Tensile strength	Rupture elongation
200 $\mu\text{m}$	353MPa	792MPa	32%
1000 $\mu\text{m}$	322MPa	575MPa	28%

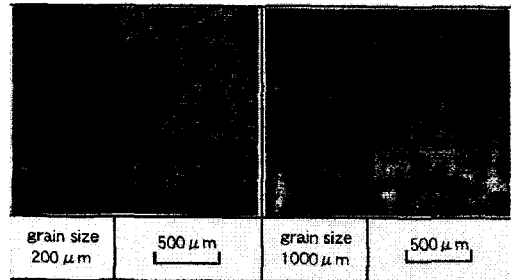
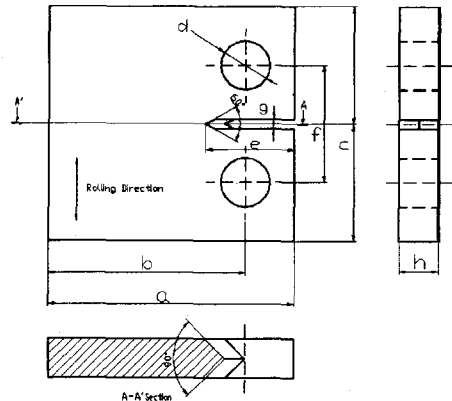


Fig. 1 Micrographs of CT specimen



분류	a	b	c	d	e	f	g	h
Type A	125	100	60	25	45	55	5	20
Type B	31.8	25.4	30.5	6.4	10.2	14	1	3

Fig. 2 Dimension of CT specimen

해서 실시했다. 균열개폐구의 측정은 하중 탄성 컴플라이언스법<sup>(4)</sup>에 의해 실시했으며, 균열개폐구

의 측정 시에는 하중반복속도를 0.1Hz로 했다.

### 2.2.2 SEM 내 피로시험

SEM내 피로시험은 전기유압서보형 피로시험기를 주조형전자현미경의 시료실에 넣을 수 있는 장치와 Type 2의 시험편을 사용하여 실시했다. 진공도는  $7 \times 10^{-4}$ Pa 이상이다. 하중파형은 정현파로, 실온에서 응력비는  $R=0.1$  및  $0.6$ 으로 하고 일정진폭하중하에서 실시했다. 하중반복주파수는 20Hz로 했다. 균열길이의 측정은 SEM의 모니터로 균열의 진전을 확인한 뒤, 400배의 배율로 사진을 찍고, 현미경을 이용해서 0.001mm까지 측정했다. 균열개폐구의 측정은 대기중과 같은 방법으로 실시했다.

### 2.2.3 파면관찰 및 파면거칠기측정

피로파면의 관찰에는 주조형전자현미경을 이용했다. 또, Type 1의 시험편의 피로파면에 대해서 주사형초점레이저현미경을 이용해서 파면거칠기를 측정했다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 피로균열진전거동

Fig. 3에 Type 1 시험편의 피로시험에서 얻은, 피로균열진전속도  $da/dN$ 과 응력확대계수범위  $\Delta K$ 의 관계를 나타내었고, 이것과 비교하기 위해 SUS304와 SC 레일의 결과 및 일반강재5종(SB42, SM50B, SPV50, HT50, SUS304)의 평균 피로균열진전곡선을 함께 표시했다. 하한계응력확대계수범위  $\Delta K_{th}$ 는 응력비  $R=0.6$ 의 쪽이 0.1의 경우보다도 낮게 되었지만, 그 값은  $200\mu m$ 에서  $6.9MPa\sqrt{m}$ ,  $1000\mu m$ 에서  $8.7MPa\sqrt{m}$ 이고, 이것들은 일반강재5종의 평균  $\Delta K_{th}$ 의 값이 약  $2.4MPa\sqrt{m}$ 와 비교해서 약 3배의 큰 값이다. 고방간강과 같은 오스트나이트조직을 갖는 SUS304의 피로시험결과는 일반구조용강의 평균피로균열진전곡선과 거의 같은 결과가 되었다. 즉, 고방간강

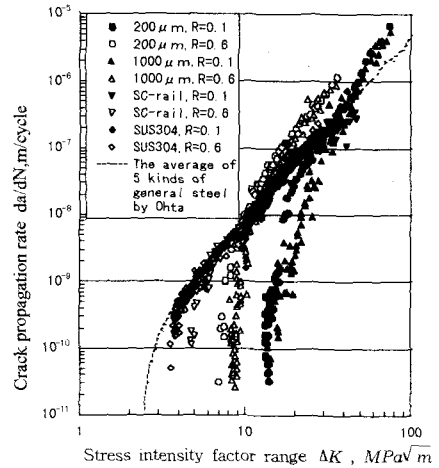


Fig. 3 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K$

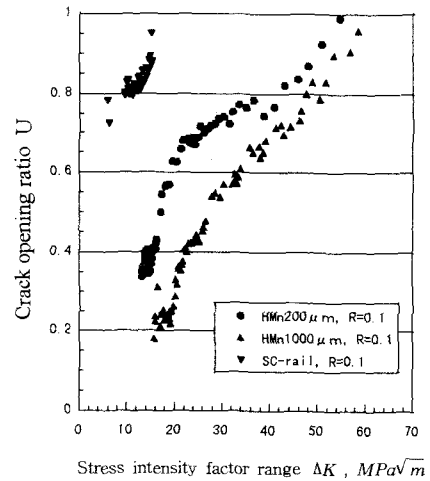


Fig. 4 Crack opening range

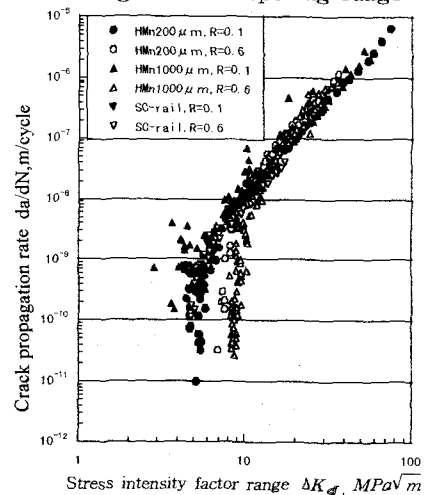


Fig. 5 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K_{eff}$

은  $da/dN$ 이 저  $\Delta K$ 값영역에서 늦은 원인은 오스트나이트조직인 것이 주된 원인은 아니라고 생각된다. 또, SC레일의 피로시험결과도 일반구조용강의 평균피로균열진전곡선과 거의 같은 결과가 되었다. 또, 고망간강에서는 입경이 큰 쪽이 균열진전속도가 약간 늦었다. 응력비  $R$ 이  $da/dN$ 에 미치는 영향은 상당히 크고,  $R=0.6$ 의 쪽이 0.1의 경우보다도 빠른 결과가 되었다.

200 $\mu m$ 재, 1000 $\mu m$ 재 모두  $R=0.6$ 에서는 균열폐구는 검출되지 않았지만,  $R=0.1$ 에서는 균열진전과정의 전 영역에 있어서 균열폐구가 검출되었다. Fig 4에 균열진전과정에 있어서 균열개구비  $U(= \Delta P_{\infty}/\Delta P)$ 의 변화를 나타냈다. 고망간강과 SC 레일재의 균열개구비  $U$ 는  $\Delta K$ 의 증가에 따라서 단조 증가하는 경향을 나타내고, 고망간강 쪽이 균열개구비가 현저하게 생기고 있는 것을 알 수 있다. 이것이 고망간강의 균열진전속도가 일반강재 보다 늦게 되는 하나의 원인이라고도 할 수 있다. 또한 입경이 클수록 균열폐구레벨이 보다 낮고, 파면거칠기유기균열폐구비가 보다 뚜렷하게 생기는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 5에  $da/dN$ 과 균열폐구를 고려한 유효응력 확대계수범위  $\Delta K_{eff}$ 로 정리한 결과를 나타냈다. 이 경우, SC 레일에서는  $da/dN$ 은 응력비의 영향을 받지 않고 데이터가 정리된다. 그러나 고망간강에서는  $da/dN$ 가 약  $3 \times 10^{-9} m/cycle$  이상의 고  $\Delta K_{eff}$ 영역에서는 응력비의 영향을 받지 않고 데이터가 정리되지만,  $da/dN$ 가 약  $3 \times 10^{-9} m/cycle$  이하의 저  $\Delta K_{eff}$ 영역에서는 데이터가 정리되지 않는다. 따라서, 저  $\Delta K_{eff}$ 영역에 있어서 응력비의 차이에 의한 균열진전속도의 차이는 균열개구에서 설명할 수 없다는 것을 알 수 있었다.

### 3.2 피로균열진전경로

Fig. 6에 Type 1 시험편표면의 균열진전의 양상을 관찰한 결과를 나타냈다. Fig. 6(a)에 나타난 것 같이 2차균열은 주로 결정입내에서 생기고 있었다.

균열의 분기현상은 주 균열선단의 응력집중을 완화시키는 움직임은 한다. 그 밖에, Fig. 6(b)에

나타낸 것 같이 균열이 크게 굴곡하는 현상이 보였다. 또, Fig. 6(c)에 나타난 것같이 상하파면의 요철의 형상이 서로 다르기 때문에 균열이 단힐 때, 윗면과 아랫면이 서로 어긋나게 부딪히는 켜기(bridging)현상이 보였다. 또, Fig. 6(d)에 나타난 것 같이 1000 $\mu m$ 재는 균열이 입내의 두 방향의 슬립(slip)선에 연결되어 계단식으로 진전하고 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6은  $R=0.1$ 의 경우이지만,  $R=0.6$ 의 경우에도 균열진전양상에 관해서  $R=0.1$ 의 경우와 같은 특징이 관찰되었다. 따라서 200 $\mu m$ 재, 1000 $\mu m$ 재의 2차균열이 균열선단의 응력집중을 분산시켜 굴곡이나 슬립면과 파가 균열진전경로를 증대시켜, 켜기효과가 나타나는 파면거칠기유기균열폐구가 균열개구변위를 감소시키기 때문에 본 재료의 피로균열진전저항이 높아지게 된다고 생각된다.

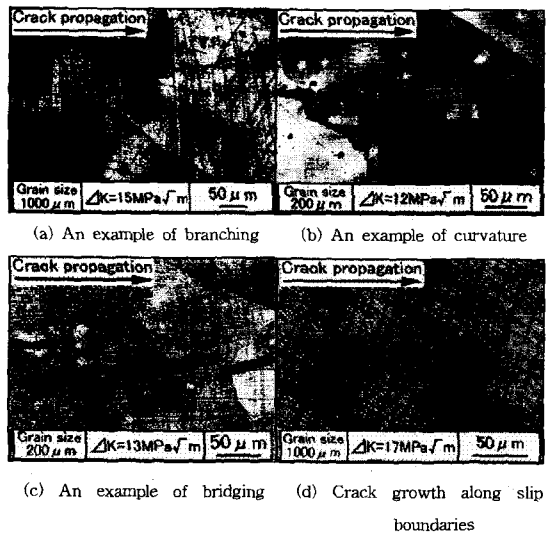


Fig. 6 Fatigue crack growth aspects observed on the specimen surface. ( $R=0.1$ )

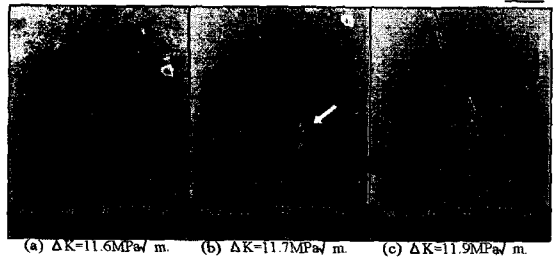


Fig. 7 An example of secondary crack growth process. (Grain size 1000 $\mu m$ ,  $R=0.6$ )

SEM내 피로시험에서의 결과는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 Fig. 7(a)에서 주 균열이 정지하고, Fig. 7(b)에서 정지한 주 균열의 근처에 새로운 균열이 발생하고, Fig. 7(c)에서 새롭게 발생한 균열이 주 균열이 되고, 진전해 가는 과정이 관찰되었다. 이것은, 응력비에 관계없이 200 $\mu$ m, 1000 $\mu$ m재 모두에게 2차균열의 발생 시에 관찰되었다. 따라서, Type 1의 시험편에서 관찰된 2차 균열도 주 균열이 두 갈래로 분기하는 것이 아니고, 여기에서의 관찰결과와 같은 진전과정의 결과로서, 균열이 두 갈래로 분기한 것과 같이 보였다고 생각된다.

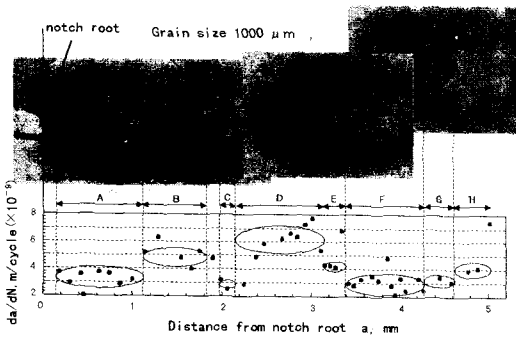


Fig. 8 Relationship between  $da/dN$  and crack length

Fig. 8에 1000 $\mu$ m재의  $R=0.6$ 에 있어서 피로시험에서 얻었다. 노치(notch)에서부터의 균열길이  $a$ 와  $da/dN$ 과의 관계를 나타낸다.  $da/dN$ 은 결정립단위로 변화하는 경향이 있다.  $da/dN$ 은 결정립 A ~ B사이, 및 결정립 F~H사이에서는 증가하고 있다. 이것은 결정립간에서 슬립방향이 균열진전 방향과 서로 일치하기 때문에 입계를 넘어서 진전하는 경우도 거의 영향을 받지 않았다고 생각되어진다. 그러나 결정립D~F사이에서는  $da/dN$ 이 감소하고 있다. 이것은 결정립간에서 슬립방향이 균열진전방향과 서로 크게 달라서 균열진전저항이 크게 되므로  $da/dN$ 이 감소하고 있다고 생각된다.

### 3.3 파면해석

Fig. 9에,  $R=0.1$ 에 있어서의 Type 1시험편의

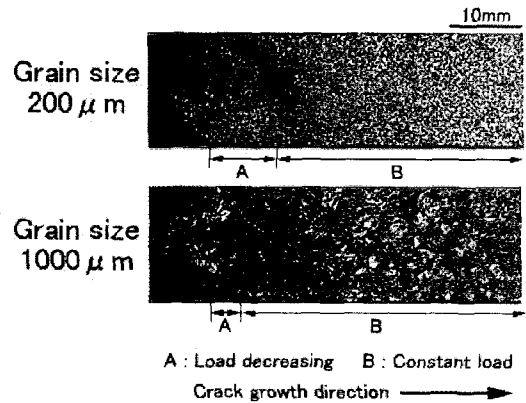
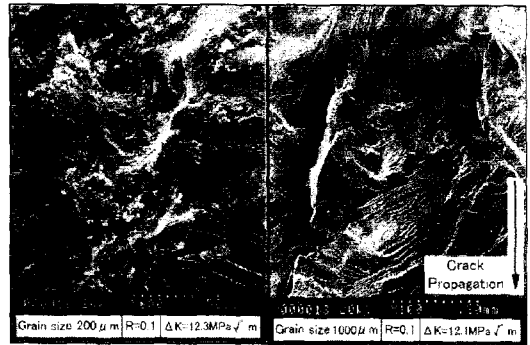
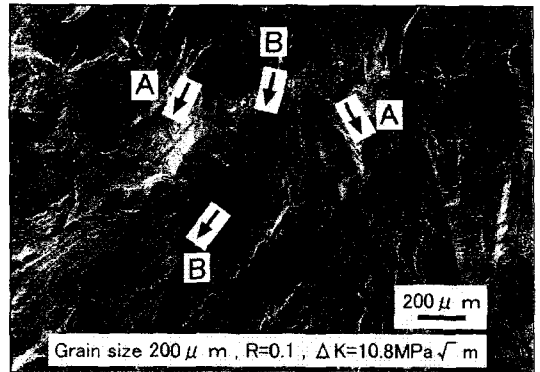


Fig. 9 Macrographs of fracture surface



(a) Fretting oxide (b) Secondary crack



(c) Ductile fracture(A) and brittle fracture(B)

Fig. 10 SEM photographs of fatigue fracture surface

2000 $\mu$ m재, 1000 $\mu$ m재의 거시적인 피로파면의 양상을 나타낸다. Fig. 9에 기입한 것과 같이 나타난 파면사진은 하중 점감 및 하중진폭일정시험에 있어서의 두 개의 실험조건의 파면을 포함하고 있다. 1000 $\mu$ m재의 쪽이 분명히 파면거칠기가 크

고 또, 양쪽모두 저  $\Delta K$  영역에서 파면이 검은 색의 산화물에 덮여있는 양상을 보였다. 이 영역에서는 균열진전속도가 일반강재 보다도 저속측에 있는 영역과 대응하고 있다. Fig. 10(a)는  $200\mu\text{m}$  재의  $R=0.1$ 의 파면에 있어서의 검은 색 영역의 확대사진이다. 이 영역은 점착물에 덮여있는 것을 확인할 수 있다. 이 점착물은 균열폐구가 일어나지 않았던  $R=0.6$ 에서의 시험파면과, 진공중인 SEM내에서의 피로시험에 있어서의 파면에서는 관찰되지 않았던 것이어서, 균열폐구에 의한 파면접촉에 의해서 생겼던 프레팅(fretting)산화물인 것으로 생각된다. 또, Fig. 10(b)에 나타난 것과 같이 파면상에서도 2차균열이 확인되었다. 파면의 대부분은 Fig. 10(c)의 화살표 표시 B 보이는 것과 같은 입내 취성파면인 벽개파괴가 대부분이었다.

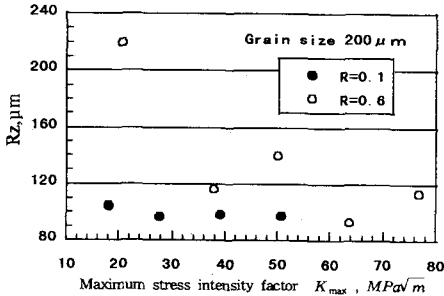


Fig. 11 Relationship between Rz and  $K_{max}$

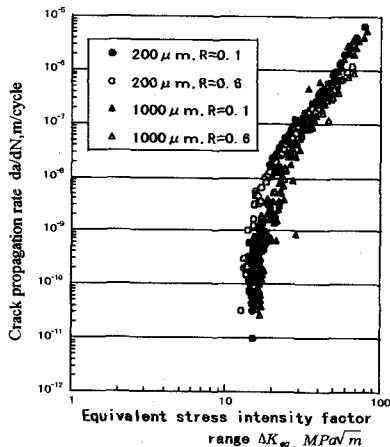


Fig. 12. Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K_{eq}$ .

10점평균거칠기 Rz와  $K_{max}$ 에는 Fig. 11에 나

타낸 것 같이  $K_{max}$ 가 저하함에 따라 Rz에 응력비의존성이 보였다. 결국, Rz는  $K_{max}$ 와 응력비 R로 표현하는 것이 가능하다. 또, Fig. 4에 나타난 것 같이  $\Delta K_{eq}$ 에 관계되는 균열개구비 U는,  $\Delta K$ 와 응력비 R로 표현하는 것이 가능하다.  $\Delta K$ 와  $K_{max}$  양쪽을 고려하면,  $K_{max}(1-R)=\Delta K$ 식에 의해서,  $R=1-\Delta K/K_{max}$ 가 된다. 등가응력확대계수범위  $\Delta K_{eq} = K_{max}^\gamma \Delta K^{1-\gamma}$ 로 균열진전속도  $da/dN$ 의 정리를 시도했다. 이 결과를 Fig. 12에 나타냈다.  $\gamma=0.65$ 일 때,  $da/dN$ 은 입경과 응력비의 영향을 받지 않고, 거의 하나의 선도위에 모이는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

- 1) 본 연구에서 이용한 고망간강의  $\Delta K_{th}$ 는, 약  $7\sim 9\text{MPa}\sqrt{m}$ 이고, 일반적인 구조용강재 및 레일용 탄소강의 약 3배 차이로 크다.
- 2) 2차균열이 주균열선단의 응력집중을 완화하고, 파면거칠기유기균열폐구와 파면접촉에 의한 프레팅산화물이 균열폐구변위를 감소시킨다. 이것이 본 재료의 균열전과저항이 크게되는 원인이다.
- 3)  $\Delta K$ 와  $K_{max}$  양쪽을 고려한  $\Delta K_{eq}$ 로  $da/dN$ 을 정리하면, 입경과 응력비의 영향을 받지 않고, 하나의 선도에서 정리가 되는 것을 알았다.

#### 참고문헌

- (1) 西田, 服部, 島田, 材料, Vol. 43. No. 486. pp. 324~329, 1994.
- (2) 日本鐵鋼協會. "非磁性鋼における最近の進歩", 1990.
- (3) 小田, 材料, Vol. 33. No. 370. pp.820~827, 1984.
- (4) 秋田, 兒玉, 三澤, Vol. 456. No. 7. pp.732~737, 1997.
- (5) 太田, 日本容接學會論文集, Vol. 7. pp. 391~398, 1989.
- (6) Choi, Mayama, Misawa, Akita, Lee, Fatigue '99. Vol. 1. pp. 427~432, 1999.