

조대결정 비자성강의 피로균열진전특성

남정학*(금오공대 대학원), 최성대(금오공대), 이종형(금오공대), 정선환(금오공대)

Fatigue Crack Growth Behavior of Non-Magnetic Steel with Large Grain Size

J. H. Nam(Mech. Eng. Dept., KNUT), S. D. Choi(Mech. Eng. Dept., KNUT),
J. H. Lee(Mech. Eng. Dept., KNUT), S. H. Cheong(Mech. Eng. Dept., KNUT)

ABSTRACT

Fatigue crack growth tests were carried out using high manganese cast steel under constant amplitude loading. Crystal grain size of the material is about $1000\mu\text{m}$. For this material, the fatigue crack growth mechanism of high manganese steel was clarified from results such as observation of crack growth path and fracture surface. ΔK_{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 especially in the low ΔK region. The reason of this behavior is crack closure due to fracture surface roughness.

Key Words : Fatigue crack growth (피로균열진전), High manganese steel (고망간강), Crack closure (균열닫힘)

1. 서론

고망간강은 비자성이라고 하는 성질을 안정하게 유지하기 때문에, 기초적 연구단계로부터 실용적인 연구단계로 핵융합로와 자기부상식철도의 구조용재로서 유망 시 되고 있다. 강력한 자장주위에 강자성의 강재를 사용하면 자력선의 자장이 손실되고 자성 재료종의 누전류가 발생하여 재료가 가열되므로 전력손실, 열발생 등의 원인이 되기 때문에 주변구조물이나 주변기기는 자력선을 혼란하지 않게 하는 비자성체가 사용된다. 비자성강에는 고망간강이나 오스테나이트계 스테인레스강 등이 있지만, 전자는 후자에 비하여 강도가 높고 저자성의 성질이 안정하고, 또한 경제적인 잇점도 있다⁽¹⁾. 그러나 고망간강은 구조물재료로서의 실적이 없는 관계로 기계적성질, 절삭성, 용접이음특성과 구조물의 파괴역학적 특성 등을 명확하게 할 필요가 있다. 특히 고망간강은 일반강재에 비하여 고연성, 저항복비, 현저한 가공경화 등의 특징을 가지고 있기 때문에 균열전단의 응력, 변위상태에 지배되는 피로균열진전 특성도 일

반적인 것과 다르다고 생각되지만, 이러한 피로균열진전메커니즘에 관한 보고는 적다.

본 연구에서는 고속전철의 레일에 사용되는 평균 결정입경이 약 $200\mu\text{m}$ 과 약 $1000\mu\text{m}$ 인 비자성 고망간강을 이용하여 피로균열진전실험을 실시하고, 또한 균열진전경로 및 표면해석을 통하여 조대결정을 가진 비자성강의 피로균열진전 메커니즘에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

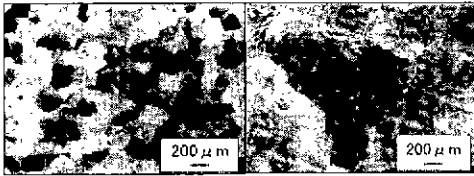
본 연구에 사용한 재료는 Hadfield⁽²⁾ 조성의 고망간강의 단조재를 이용하였다. 화학성분과 기계적성질은 Table 1, Table 2에 각각 나타내었다. 시험편은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 평균입경의 크기가 약 $1000\mu\text{m}$ 과 약 $200\mu\text{m}$ 인 두 종류의 조직을 가진, 두께가 각각 20mm, 9mm, 3mm인 3종류의 CT시험편을 사용하여 조대결정 고망간강의 피로균열진전특성에 대하여 고찰하였다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

Mn	Si	Cr	P	S	Fe
12	0.71	0.08	0.026	0.002	Bal.

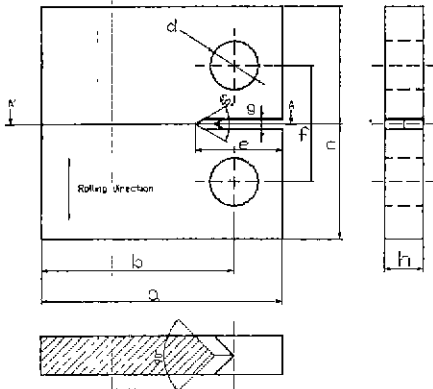
Table 2 Mechanical properties

Grain size	0.2% Yield point	Tensile strength	Elongation
200 μm	353MPa	792MPa	32%
1000 μm	322MPa	575MPa	28%
SUS304	205MPa	540MPa	42%



(a) Grain size 200 μm (b) Grain size 1000 μm

Fig. 1 Micrographs of specimen



단위 [mm]

분류	a	b	c	d	e	f	g	h
A	125	100	60	25	45	55	5	20
B	67.5	54	64.8	13.5	18.9	29.7	2	9
C	31.8	25.4	30.5	6.4	10.2	14	1	3

Fig. 2 Dimension of CT specimen

2.2 실험방법

2.2.1 피로균열진전시험

피로시험기는 전기유압식 피로시험기(용량98kN)

를 이용하였다. 하중 파형은 정현파, 주파수는 20Hz의 하중제어로 실시하였다. 균열 길이의 측정은 0.01mm까지 측정 가능한 이동현미경을 이용하고, 균열개폐구의 거동은 배면 strain gage와 감산회로를 이용한 제하 탄성 컴플라이언스법으로 관찰하였다⁽⁴⁾. 균열개폐구 거동의 관찰 시에는 반복주파수를 0.2Hz로 하였다.

2.2.2 피로균열경로진전관찰

균열진전경로의 관찰은 시험기에 시험편을 부착한대로 관찰하기 위하여 고배율 CCD카메라를 이용하여 실시하였다. 또한, SEM내에서의 피로균열진전관찰실험은 Fig. 2에 나타낸 Type C시험편을 이용해서 실험하였다. 진공도는 7×10^{-4} Pa 이상이다. 하중파형은 정현파로, $R=0.1$ 으로 하고 일정진폭하중하에서 실시했다. 하중반복주파수는 20Hz로 했다. 균열길이의 측정은 SEM의 모니터로 균열의 진전을 확인한 뒤, 400배의 배율로 사진을 찍고, 측정기를 이용하여 0.001mm까지 측정했다. 균열개폐구의 측정은 대기중에서와 같은 방법으로 실시했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 결정입경이 균열진전속도에 미치는 영향

Fig.3에 각 시험편에서 얻은 균열진전선도 (da/dn)와 응력확대계수 (ΔK)와의 관계를 나타내었다. 이 그래프는 균열진전속도에 있어서 고망간강의 결정립의 크기에 따른 진전거동과 비자성강인 SUS304와의 비교를 하여 나타내었다. 고망간강과 같은 오스트나이트조직을 갖는 SUS304의 피로시험 결과는 일반구조용강의 평균피로균열진전곡선과 거의 같은 결과가 되었다. 고망간강에서는 결정립의 크기 1000 μm 재가 200 μm 재 보다 저 ΔK 값 영역에서는 늦어지는 것을 확인 하므로써 결정립의 크기가 크면 균열진전속도가 느리다는 것을 알 수 있었다. 또한, 이 그래프는 두께방향의 결정립수에 따른 비교 그래프로서 결정립의 수가 작을 수록 균열진전속도는 빠르고 지그재그식의 진전거동을 나타낸다. 하나의 결정입내를 통과하는 균열의 저항은 슬립의 방향에 의존하며 이 슬립은 결정립수에 따라 다양화의 정도로 표현될 수 있다. 따라서 조대결정립의 수가 많으면 슬립방향의 저항이 랜덤방향으로 이루어지므로 저항 성분이 많아지게 되기 때문에 균열진전속도가 늦어지는 것이라고 생각된다. Fig. 4에는 균열진전파장에 있어서 균열개구비($U = \Delta K_{eff} / \Delta K$)의 변화를 나타내었다. SUS304에서는 균열폐구가 거의 검출되지 않았지만, 고망간강에 경우는 전 영역에 있어서 균열폐구가 검출되었다. 균열닫힘현상⁽⁶⁾은 결정립의

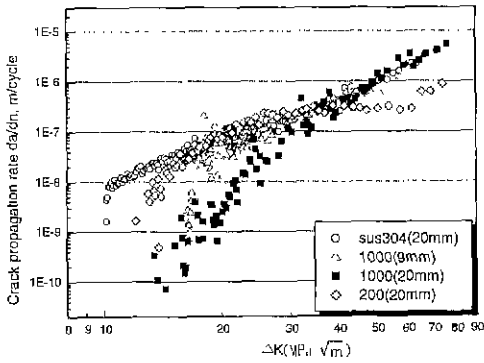


Fig. 3 Relation between da/dn and ΔK at R=0.1

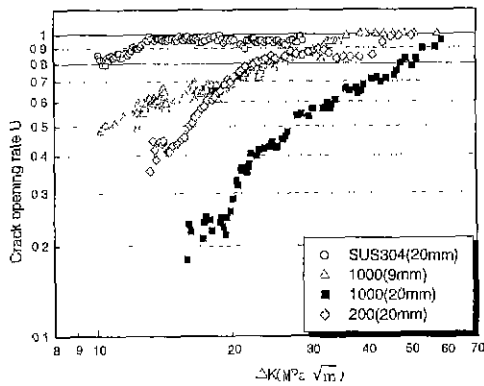


Fig. 4 Crack closure behavior

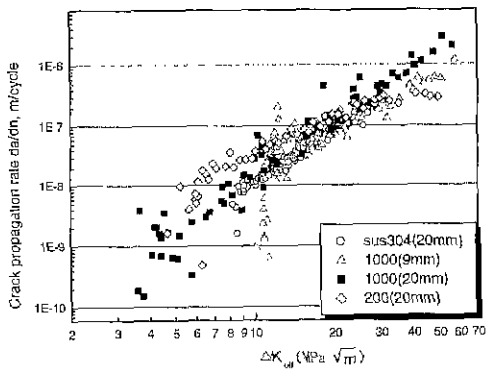


Fig. 5 Relation between da/dn and ΔK_{eff} at R=0.1

크기가 큰 재료일수록 현저히 나타나고, 두께방향의 결정립수가 많을 수록 균열단합현상이 현저히 발생한다는 것을 알 수 있었다. 이것이 고망간강의 균열진전속도가 일반강재보다 늦게 되는 하나의 원인이 라고 말할 수도 있다. 또한 파면거칠기유기균열단합

현상⁽⁷⁾과 일치할 것으로 생각되어 균열단합현상을 고려한 Fig. 5에서와 같이 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 로 정리하여 보면, 거의 일직선의 형태로 정리됨을 알 수 있었다. 이것으로 조대조직을 가진 고망간강의 균열진전특성은 결정립의 크기와 두께방향의 결정립수에 의해 피로파면거칠기가 상이하므로써 이 거칠기에 의한 균열단합현상이 나타나는 것이라고 생각된다.

3.2 피로균열진전거동

Fig. 6에 200 μ m재의 피로시험에서의 균열길이 a와 균열진전속도 da/dn과의 관계를 나타낸다. 균열 길이가 길어짐에 따라 균열진전속도는 지그재그이지만, 전체적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 임계를 가로지를 때, 균열진전속도가 떨어지는 부분도 있지만, 증가하는 부분 또한 나타나고 있다. Fig. 6으로부터 2차 균열발생 시에 균열진전속도가 저하하고 있는 것을 알 수 있다. 피로균열의 분기(2차균열)를 상세하게 Fig. 8(a)에 나타내었다. Fig. 7에는 1000 μ m재의 피로 시험에서 얻은 균열길이 a와 da/dn과의 관계를 나타낸다⁽⁸⁾. da/dn은 결정립 A~B사이 및 결정립 F~H사이에서 증가하고 있다. 이것은 결정립간에서 슬립방향이 가깝기 때문에 임계를 넘어서 진전하는 경우도 거의 영향을 받지 않았다고 생각되어진다. 역으로 결정립 D~F사이에서는 균열진전속도는 감소하고 있다. 이것은 Fig. 8(b)에 나타낸 것과 같이 결정립간에서 슬립방향이 각도가 서로 다르기 때문이라고 생각되어진다. Fig. 8에는 200 μ m재에서의 균열의 분기와 1000 μ m재에서의 슬립방향이 이방성을 나타내었다.

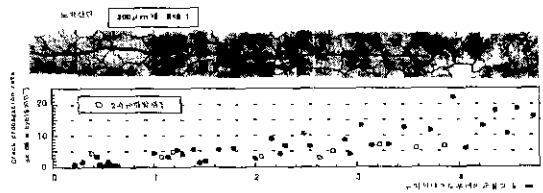


Fig. 6 Relation between crack length and da/dn

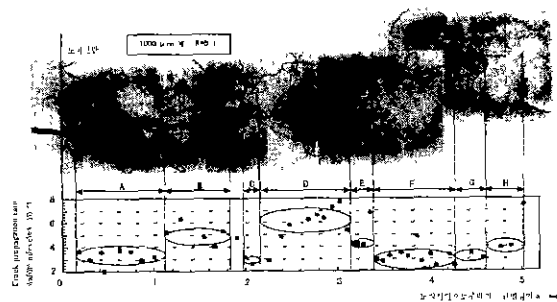
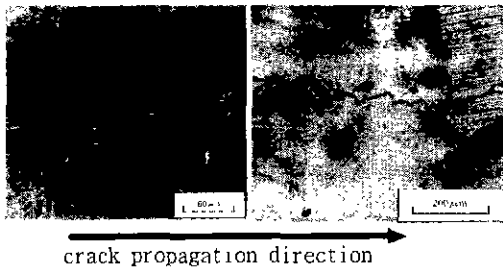


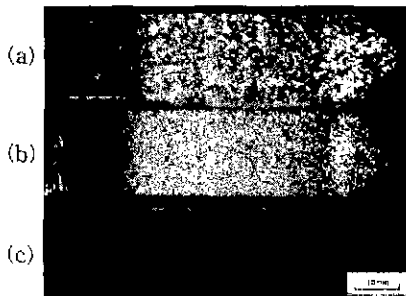
Fig.7 Relation between crack length and da/dn



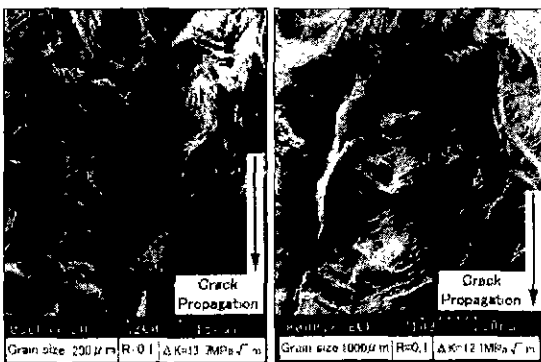
(a) Grain size 200µm (b) Grain size 1000µm
Fig. 8 Fatigue crack growth observed on the specimen surface

3.3 파면해석

Fig. 9에 각각의 피로파면의 거시적인 사진을 나타내었다. 세 종류의 시험편은 K값의 변화에 따라 파면의 형태의 변화는 관찰되지 않았지만, 파면거칠기가 SUS304재보다는 200µm재가, 200µm보다는 1000µm재가 확실하게 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, 앞서 3.1절에서 언급한 바와 같이, 큰 결정립을 가진 결정립일수록 피로파면의 거칠기가 크고, 이 거칠기에 의한 균열단합현상이 균열진전속도지연에 영향을 끼친다고 생각한다.



(a) 1000µm (b) 200µm (c) SUS304
Fig. 9 Macrographs of fracture surface



(a) Grain size 200µm (b) Grain size 1000µm
Fig. 10 SEM photographs of fracture surface

Fig. 10은 시험편내부에 나타난 2차 균열의 대표적인 예로써, 이것은 입경에 관계없이 관찰되었다. 2차 균열이 시험편 표면만이 아니고 내부에도 발생했음을 잘 보여주고 있다. 정류한 균열의 근방에 발생한 주 균열은 시험편 내부에서 분기한 균열이 내부에서 먼저 진전하고, 후에 표면에서 관찰이 되었다. 이러한 2차 균열 발생으로 인하여 균열전단의 응력집중이 완화되어 진전하게 되므로 2차 균열의 형성과정 또한 균열진전속도지연에 영향을 미치는 원인으로 생각된다.

4. 결론

조대조직을 갖는 비자성 고망간강의 피로균열 진전시험을 통하여 피로균열진전거동의 특성을 검토한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 비자성강에서는 결정립이 크고, 두께방향의 결정립수가 많을 수록 피로파면의 거칠기가 크고, 이 거칠기에 의한 균열단합현상이 원인이 되어 균열열립변위를 감소시키기 때문에 피로균열진전속도에 있어서 지연을 일으킨다.
- 2) 결정립이 같은 재료에서 두께방향의 결정립수가 많을 수록, 각 결정립의 슬립방향의 이방성에 의한 저항성분 때문에 피로균열진전속도가 늦어진다고 생각된다.
- 3) 피로균열진전과정에 있어서 균열의 분기(2차균열)가 현저하게 발생함에 따라 균열진전저항이 높아짐으로 인하여 일반강제보다 저속측에 위치한다.

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, 日本溶接學會論文集. Vol. 7. pp 391~398, 1989.
6. 崔, 三澤, 秋田, 兒玉, 材料, vol. 48 no. 6. pp. 616~622, 1999.
7. Choi, Mayama, Misawa, Akita, Lee, Fatigue '99 Vol. 1. pp. 427~432, 1999.
8. 최성대, 이종형, 남정학, 三澤 啓志, "비자성 고망간강의 피로균열 진전거동". 대한기체학회는 문집A, pp. 78~83, 1999.