論文 한국정밀공학회지 제14권 제11호 (1997년 11월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 14. No. 11. November. 1997.

본 연구는 1995년도 교육부 학술 연구 조성비(기계공학 ME95-C-04 계속과제)에 의하여 연구되었으므로, 이에 감사드립니다.

터빈용 Cr-Mo-V강의 고온 환경변화에 따른 피로거동
-고사이클 피로균열의 전파특성-

송 삼 홍*, 강 명 수**

Fatigue Behavior of Cr-Mo-V Steel at High Temperature for Turbines
-Propagation Characteristics of High Cycle Fatigue Crack-

Sam-Hong Song*, Myung-Soo Kang**

ABSTRACT

The rotating bending fatigue tests were performed using the specimens taken from Cr-Mo-V steel, widely used in thermal power plant turbines, at various temperatures such as room temperature, 300°C, 425°C and 550°C. The characteristics of fatigue crack propagation were examined and analyzed by using fracture mechanics parameter. The plastic replica method was also applied in order to measure the crack length on the basis of serial observation of fatigue crack propagation behavior on the defected specimen surface. The fatigue crack propagation behavior of Cr-Mo-V steel was investigated within the frame work of elastic-plastic fracture mechanics. The propagation law of fatigue crack is obtained uniquely by using the term σ_a^n where σ_a is the service stress, a is the crack length and n is a constant. The values of constant n are nearly equal to 2.48, 2.60 and 8.61 at room temperature, 300°C and 425°C.

Key Words: Fatigue crack propagation rate(피로균열전파속도), High temperature fatigue(고온피로), Fatigue limit(피로한도), Surface crack(표면균열), Fatigue life(피로수명).

1. 서 론

최근, 산업의 발달과 더불어 고온 환경하에서 운전되고 있는 설비들이 점점 증가하고 있으며, 실제 산업현장에서 발생하는 구조물의 손상 원인이 부재표면에 존재한 표면결함에서 발생한 미소 균열의 성장에 의한 경우가 많으므로 이에 대한 연구의 필요성이 더욱 증대되고 있는 실정이다. 또한, 화력발전설비의 터빈 로타, 터빈 블레이드 및 각종 펌프축 등과 같은 고속 회전기기들에서 발생하는 고사이클 피로에 대한 영향도 중요한 손상의 요인이므로 고사이클 피로거동에 대한 연구의 필요성도 요구되고 있다.

일반적으로 피로균열 전파거동의 특성을 나타내는 수단으로 Paris식[1]을 사용하여 설명하고 있으나, 높은 하중이나 고온 환경에서 발생 성장하는 균열의 경우에는 선형

고려대학교 공과대학 기계공학과, 정회원
* 전력연구원, 수화력발전연구실, 정회원

탄성 파괴역학의 적용 조건인 균열 선단 부의 소규모 항복조건이 만족되기 어려운 경우가 많게 되어 응력확대계수로 정리하는 것이 곤란하다. 이런 경우에는 다른 역학적 변수인 J 적분, COD, 반복 변형률확대계수 범위, 소성역크기와 같은 탄소성 파괴역학 변수를 사용하여 체계적인 정리를 시도한 연구들이 있다.

고온 하에서 전파하는 고사이클 피로균열 거동에 관한 기존의 연구를 살펴보면, James[2]등은 고온 하에서도 소규모 항복 조건이 만족할 때는 피로균열 전파거동을 응력확대계수로 정리할 수 있다고 하였고, Nikbin[3]등은 Rice의 J 적분의 변위 · 변형률 장을 Creep 변의속도 및 변형률속도로 바꾸어 놓은 수정 J 적분 J 를 도입하였다. Kitagawa[4]등은 히스테리시스 곡선에서 안정된 반복변형률 값을 사용한 반복 변형률확대계수 범위 $\Delta K\varepsilon$를 제안하였다. 또한 Nisitani[5],[6]등은 여러 가지 재료의 평활재와 결함재의 피로균열 전파거동을 역학적 변수 $\sigma_a^n a$를 사용하여 정리하였다. 이들의 연구결과를 바탕으로 최근에는 여러 가지 조건에서의 고사이클 피로균열 거동에 대한 연구가 진행되고 있다.[7],[8]

본 연구에서는 측정기술의 간편성과 실용적인 측면에서 유익하다고 생각되는 역학적 매개변수 $\sigma_a^n a$ (σ_a :적용응력, n:지수, a:크랙길이)를 도입하여 고온하의 고사이클 피로균열 전파거동에 통일적 정리의 가능성을 검토해 보았다. 즉, 화력발전소 터빈계통에 널리 사용되고 있는 Cr-Mo-V 강종을 선택하여 운전조건을 고려한 상온, 300℃, 425℃ 및 550℃ 등의 온도에서 작은 원공결함재에서 발생한 표면 피로균열의 성장거동을 레프리카법 (Replica Method)에 의하여 상세히 관찰 측정하여 파괴역학적으로 해석하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 실험재료는 화력발전소 터빈에 널리 사용되고 있는 1.5Cr-0.7Mo-0.3V 합금강으로서, 약 19년간 사용되고 교체된 터빈 케이싱볼트로부터 시료를 채취하였다. 실험재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고, 기계적 특성은 Table 2와 같다.

피로시험편의 형상 및 치수는 Fig.1과 같으며, 시험편의 평형부 중앙에 d=0.6mm, h=0.6mm인 원공결함을 가공하였다. 원공결함은 피로균열 발생의 원인이 되는 초기 결함의 형태를 인공적으로 만들어 준 것이며, 재료 내부의 결함에 의한 응력집중원을 대신하여 균열의 발생영

Table 1 Chemical composition of test material

Material	Composition (Weight %)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Al	Co
SCM432	0.26	0.27	0.69	0.01	0.02	1.49	0.67	0.33	0.12	0.20	0.02	1.46

Table 2 Mechanical properties of the test material

Temp. (℃)	Young's modulus $\times 10^3$(MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
R.T.	253.6	829.8	962.4	21.2	60.1
300	185.3	719.8	866.3	18.9	57.9
425	172.9	676.1	806.8	18.1	56.1
550	166.2	594.8	639.3	23.7	73.6

역을 제한하여 균열의 관찰범위를 국한시켰다.[9] 미소결함재의 표면에서 발생한 고사이클 피로균열의 전파 거동을 고찰하기 위하여 수행한 실험장치는 회전수 3,400 rpm, 최대 굽힘모우멘트 10kg-m의 용량인 고온용 회전굽힘 피로시험기이다.

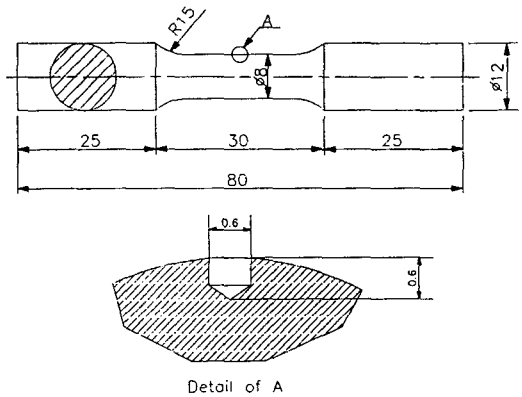


Fig. 1 Geometry of high cycle fatigue test specimen.

피로실험은 같은 응력수준 하에서 온도에 따른 피로균열 전파거동을 살펴보기 위하여 310MPa과 350MPa의 응력에서 수행하여, 동일한 응력 하에서 각각의 온도에 따라 비교 가능하도록 하였다. 온도조건은 발전설비의 운전조건을 고려하여 상온, 300℃, 425℃ 및 550℃로 선

정하였으며, 고온로내에서 온도변동을 수반하지 않는 일정온도 하에서 피로실험을 시행하였다. 또한 고온로 중앙부에 뚫린 구멍으로 0~1200℃까지 측정할 수 있는 K-type의 열전대를 사용하여 시험편 주위 온도를 측정하였다. 그리고 온도 조절장치를 사용하여 설정온도가 ±5℃ 범위를 벗어나지 않도록 하였으며, 실험 전에 시험편 전체의 온도를 일정하게 하기 위하여 실험온도에서 약 1시간 가량 유지시킨 후 피로시험을 50Hz에서 수행하였다.

고사이클 피로균열 전파실험에서 피로균열의 길이를 측정할 때 사용 가능한 방법은 다음과 같은 세 가지 방법이 있는데 필요에 따라서 선택 사용하였다.

① 시험편을 시험기에서 분리하여 금속현미경과 접안이동측미계를 사용하여 피로균열의 길이를 측정하는 방법.

② 시험편을 시험기에서 분리하지 않고 이동현미경을 설치한 후 접안이동측미계를 사용하여 피로균열의 길이를 측정하는 방법.

③ 시험편을 시험기에서 분리하지 않고 레프리카(replica)를 채취하여 금속현미경과 접안이동측미계, 또는 다이알 게이지를 이용하여 피로균열의 길이를 측정하는 방법.

위 세 가지 방법 중 상온의 경우 피로균열 길이 측정은 관찰의 용이함과 시간 절약을 위하여 특수 개조된 이동현미경을 사용한 ②의 방법을 채택하였고, 고온의 경우에는 ③의 방법을 채택하였다.

피로균열 전파속도, *da/dN*은 ASTM E647-88[10]에서 추천하는 방법(seven point incremental polynomial method)을 사용하여 균열전파곡선의 접선의 구배로부터 구하였다.

3. 실험결과

3-1. 고사이클 균열전파거동에 대한 이론적 정리

선형탄성 파괴역학은 균열선단의 소성영역의 크기가 균열길이에 비하여 충분히 작은 소규모 항복(small scale yielding) 상태에 적용된다. 이와 같이 선형탄성 파괴역학이 적용될 수 있는 상태에서는 균열전파속도를 응력확대계수범위 K의 함수로 나타낼 수 있으나, 고온이나 높은 응력하에서 성장하는 피로균열의 전파법칙은 탄소성변형을 고려하여 다음과 같이 표시할 수 있다.[11]

$$da/dN = C\sigma_a^n a \qquad (1)$$

여기서, σ_a :적용응력, C,n :재료상수, a : 표면 균열길이,

식(1)은 실험적으로 일부 보고되고 있지만 해석적, 물리적 근거가 부족하여 제한적으로 사용되고 있다. 일반적으로 고응력 하의 피로균열길이의 *log(a)*는 수명비 N/Nf에 비례한다는 것이 Nisitani[11] 등에 의하여 각종 재료의 피로시험에서 확인되고 있다. 그러므로 피로균열길이와 수명비 사이의 관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\log(a) = Z(N/N_f) + \log(a_i)$$

여기서, Z는 기울기, a_i는 초기균열길이이다.

$$\log(a/a_i) = Z(N/N_f) \qquad (2)$$

또한, S-N선도로부터 응력 σ 와 파단수명 N_f사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = CN_f^{-b} \qquad (3)$$

여기서, b 는 기울기, C는 절편이다.

$$N_f = C^{1/b}\sigma^{-1/b} \qquad (4)$$

식(4)를 식(2)에 대입하면 다음 식과 같이 된다.

$$\log(a/a_i) = ZN/(C^{1/b}\sigma^{-1/b}) \qquad (5)$$

식(5)에서 a 를 N에 대해 미분하여 정리하면, 다음과 같다.

$$da/dN = (Z/C^{1/b})\sigma^{1/b}a = C_1\sigma^n a \qquad (6)$$

여기서, $C_1 = Z/C^{1/b}$, $n = 1/b$ 이다.

Pelloux[12]는 위에서 설명한 피로균열 전파법칙이 균열길이의 좁은 범위 내에서 $\sigma_a^n a$ 관계는 ΔJ 즉, J 적분의 근사치라고 하였으며, Brown[13]등은 차원해석을 이용한 탄소성 이론적 해석을 통하여 상기법칙과 유사한 형태로 도출됨을 설명하였다.

3-2. 고사이클 피로한도 거동

본 연구에서 사용한 1.5Cr-0.7Mo-0.3V강 미소 표면결함재의 회전굽힘 피로시험 결과로부터 얻은 S-N선도는 Fig.2와 같다. Fig.2에서 종축은 최대 공칭응력 σ_{max} 이고, 횡축은 파단반복수이다.

피로한도의 결정은 결함을 내포한 시험편에 균열이 발생하지 않는 한계응력이 아니라, 결함주위에 발생한 균열이 $N=1\times10^7$ cycle 이상에서 전파를 정지하는 한계응력

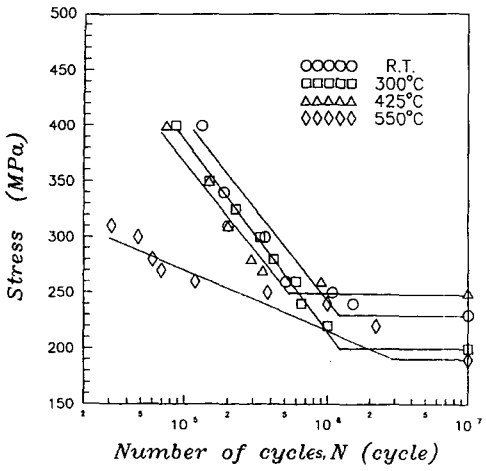


Fig. 2 S-N curves

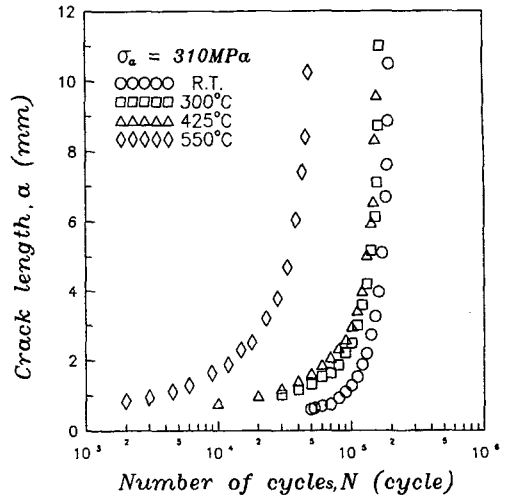


Fig. 3 Relation between crack lenght and number of cycle according to temperature in high cycle fatigue(σ_a =310MPa)

을 피로한도로 채택하였다. 상온의 경우 =400MPa에서 시작하여 응력을 단계적으로 낮추어가며 실험한 결과 상온의 피로한도는 230MPa이었고, 300℃, 425℃ 및 550℃에서도 같은 방법으로 실험한 결과 피로한도는 200MPa, 250MPa 및 190MPa 이다. 즉 425℃에서 피로한도 값이 최대이었다. Kato[14]등은 0.12%C 함유된 탄소강을 상온, 200℃, 375℃ 및 450℃에서 피로실험한 결과 375℃에서 최대 피로한도 270MPa를 얻었다. 이들은 375℃에서 최대 피로한도 값이 나타나는 것은 반복응력이 작용하는 도중에 균열선단 주변의 급속한 변형시효에 기인한다고 하였다.

본 실험의 경우도 425℃에서 최대 피로한도가 나타났는데, 이렇게 상온보다 높은 온도에서 최대 피로한도가 나타나는 이유는 반복응력이 작용하는 도중에 생기는 변형시효에 기인한 균열선단 근처의 국부적 항복응력의 증가가 균열전파를 저지시키기 때문으로 사료된다.

3-3. 고사이클 피로균열의 전파 특성

Fig.3과 Fig.4는 동일한 적용응력 수준에서 균열길이와 하중반복수의 관계를 나타낸 것이다. Fig.3과 Fig.4를 살펴보면, 적용응력 수준이 높아짐에 따라 동일한 하중반복수에 대하여 균열길이가 커지고, 피로수명이 감소하고 있으나, 온도가 높아짐에 따라서는 일정한 피로수명의 감소를 보이지는 않는다.

이는 결함주위의 영향에 의한 것인데, 초기 균열은 결함 주위의 응력과 변위상태에 따라 발생 및 전파에 영향

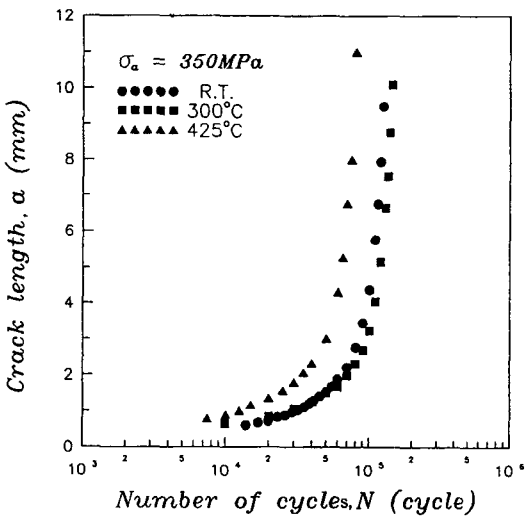


Fig. 4 Relation between crack length length and number of cycle according to temperature in high cycle fatigue(σ_a = 350MPa).

을 미친다고 볼 수 있다. 이러한 결함주위의 응력분포 관점에서 살펴보면, 온도가 상승함에 따라 결함 선단과 그 주위의 응력분포가 높아짐으로, 이와 같은 현상은 보통 균열 발생에 기여하지만 어떤 임의의 응력 이상을 갖게 되면, 온도가 상승함에 따라 오히려 균열 발생을 억제시킨다.

Fig.5~Fig.8은 균열전파특성을 검토하기 위하여 균열길이와 시편이 파단될 때까지 응력반복수에 대한 임의의

균열길이에서의 응력반복수의 수명비 N/N_f와의 관계를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 온도조건과 응력수준에 관계없이 피로균열의 전파특성을 a-N/N_f로 도식화시키면

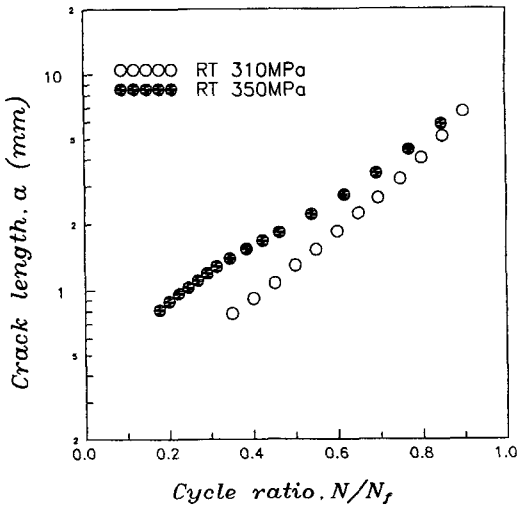
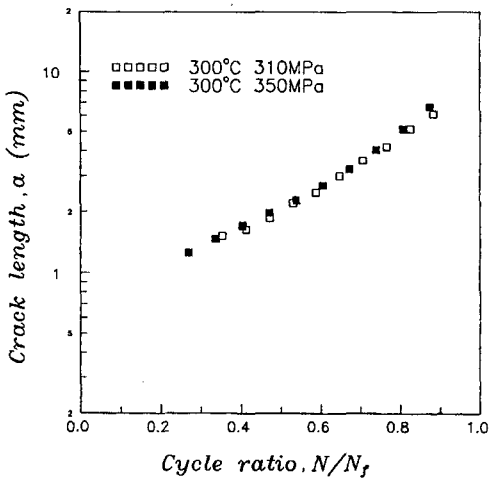


Fig. 5 Relation between crack length and cycle ration at room temperature.



F g. 6 Relation between crack length and cycle ratio at 300°C

B 교적 좁은 밴드 내에서 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 수명비 N/N_f 와 표면균열길이 $log(a)$사이에 비례관계가 있음을 알 수 있으며, Nisitani[15]등은 이들의 관계를 다음과 같이 표시하였다.

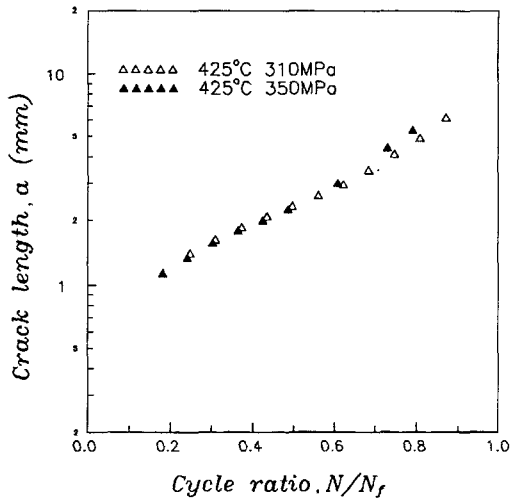


Fig. 7 Relation between crack length and cycle ratio at 425°C

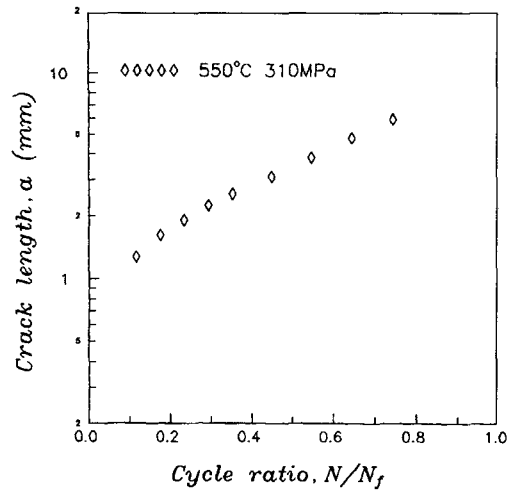


Fig. 8 Relation between crack length and cycle ratio at 550°C

$$\log(a) = A + B(N/N_f) \tag{7}$$

Nisitani등은 d=h=0.3mm인 미소원공을 갖는 일반강재 및 황동재에서, 표면에 존재하는 미소원공의 유무가 균열전파에 미치는 영향이 없는 0.5mm이후의 반복수 범위에서 비례상수 B 값은 1.0~1.3 범위라고 보고하였다. 본 실험에서 얻은 B 값의 범위는 0.9-1.6이었다. 이러한 피로균열의 전파특성은 표면 피로균열의 발생 및 전파 거

동을 파악하는데 중요하며, 이것의 정량적인 분석 검토에 의하여 피로균열의 발생, 전파 특성 및 피로수명 평가 등에 활용될 수 있다.

3-4. 고사이클 피로균열의 전파속도 및 응력의존성

Fig.9와 Fig.10은 적용응력이 310MPa, 350MPa인 경우 균열길이와 균열전파속도의 관계를 나타내는 선도이다. 두 경우 모두 550℃를 제외하고는 거의 같은 균열전파속도를 보이고 있다. 550℃에서 다른 온도에서 보다 다소 높은 전파속도를 보이는 것은 550℃에서 급격한 파단수명의 감소가 있기 때문이다.

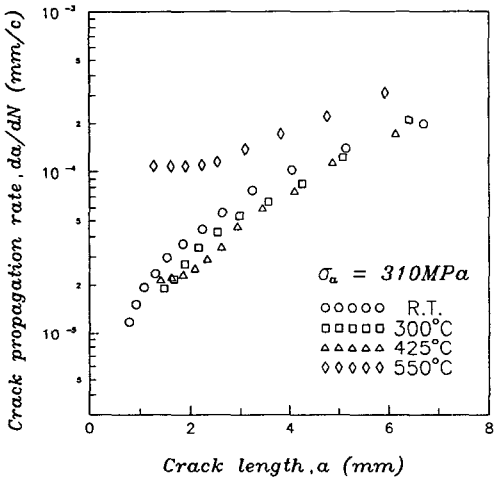


Fig. 9 Relation between crack propagation rate and crack length in high cycle fatigue (σ_a=310MPa).

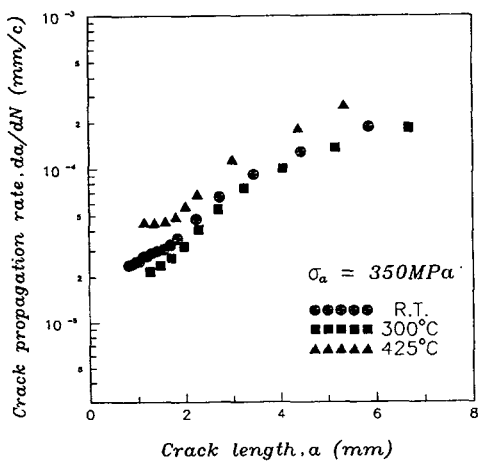


Fig. 10 Relation between crack propagation rate and crack length in high cycle fatigue (σ_a=350MPa).

피로균열의 전파수명을 평가하기 위하여 선형탄성 파괴역학의 기본적 조건인 소규모 항복을 만족시키는 경우 일반적으로 Paris식이 사용된다. 그러나, 고응력이나 고온하의 탄소성 범위인 경우 표면 피로균열의 성장거동은 응력확대계수 범위로서는 통일적인 정리가 불가능함으로 고온 하의 경우 탄소성변형을 고려한 $\sigma_a^n a$를 역학적 변수로 도입하여 균열전파거동을 살펴보았다.

Fig.11은 각각의 온도에서 피로균열 전파속도의 응력의존성을 균열길이 a=1.2mm에 대하여 피로균열 전파속도와 적용응력과의 관계를 나타내고 있다. 여기서 피로균열 전파속도와 응력의 관계는 모든 온도에서 직선이므로 각 온도에서 피로균열 전파속도는σ_a^n에 비례한다.

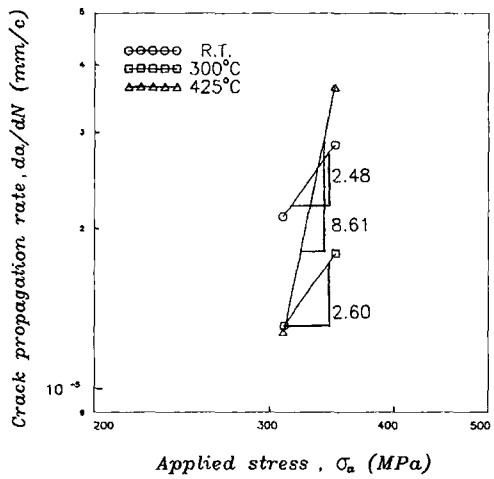


Fig.11 Relation between crack propagation rate and applied stress.

여기서 직선의 기울기인 지수 n 값은 상온, 300℃, 425℃에서 2.48, 2.60, 8.61이다. 그러므로, 앞 절에서 균열길이와 피로균열 전파속도와의 관계, 즉 $da/dN \propto a^1$, 와 피로균열 전파속도와 σ_a^n 과의 관계로부터 피로균열 전파속도 da/dN와 σ_a^n 의 관계를 유도해 낼 수 있다. Fig.12 ~Fig.14는 위의 n 값을 토대로 피로균열 전파속도와 역학적 변수 $\sigma_a^n a$의 관계로 나타내고 있다. 여기서 피로균열 전파속도와 역학적변수 $\sigma_a^n a$는 각각의 온도에서 기울기가 약 1의 직선으로 모임을 알 수 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 피로균열 전파속도는 응력의존성이 없어져 직선적으로 표시되어 통일적인 정리가 가능함을 알 수 있다.

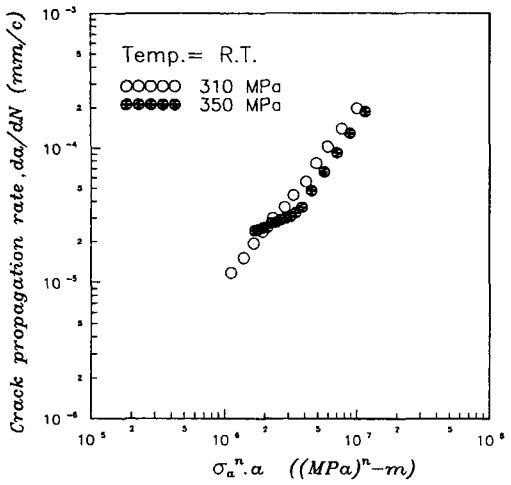


Fig. 12 Relation between crack propagation rate and $\sigma_a^n \cdot a$ at room temperature.

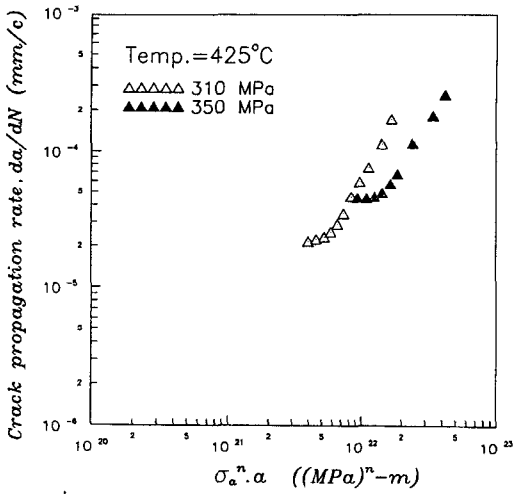


Fig. 14 Relation between crack propagation rate and $\sigma_a^n \cdot a$ at 425°C

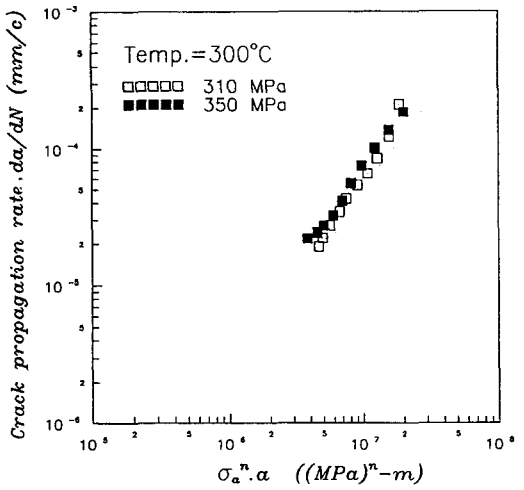


Fig. 13 Relation between crack propagation rate and $\sigma_a^n \cdot a$ at 300°C

4. 결 론

(1) 상온, 300℃, 425℃ 및 550℃에서 피로한도를 고찰해본 결과 425℃에서 피로한도 값이 가장 높았는데, 이와 같이 상온보다 높은 온도에서 최대 피로한도 값을 보이는 것은 반복응력이 작용하는 도중에 생기는 변형시효에 기인한 균열선단 근처의 국부적 항복응력의 증가가 균열전파 저항의 증가를 유발하는 것이라고 사료된다.

(2) 피로수명비 N/N_f와 표면균열길이 $log(a)$사이에 $\log(a) = A + B(N/N_f)$ 비례관계가 성립하였으며, B 값의 범위는 0.9-1.6이었다.

(3) 피로균열 전파속도를 역학적변수 $\sigma_a^n a$를 사용하여 정리하였으며, 피로균열 전파속도는 각각의 온도에서 응력의존성이 없어져 직선적으로 표시되어 통일적인 정리가 가능하였다.

참 고 문 헌

1. P. C. Paris, F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", J. Basic Engineering, Trans. ASME, Vol.85, No.4, pp.528, 1963.
2. Lee A. James, Earl B. Schwenk JR, "Fatigue Crack Propagation Behavior of Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperatures", Vol.2, pp.491~496 , 1971.
3. Nikbin, K. M., Webster, K. M. and Turner C. E., "Relevance of Nonlinear Fracture Mechanics to Creep Cracking" ASTM STP 601, p.47~62, 1976.
4. Kitagawa, H., Suh, C. M., "Crack Growth Behavior of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels", Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol.9, No.6, pp.409

~424, 1987.

5. 西谷弘信, 皮籠石 紀雄, "炭素鋼の高溫回轉曲げにおける微小疲勞き裂傳ば則", 日本機械學會論文集(A編), 第53卷, 第491號, pp.1163~1166, 1987.
6. 西谷弘信, 皮籠石 紀雄, "炭素鋼の高溫回轉曲げにおける微小疲勞き裂傳ば則(續報)", 日本機械學會論文集(A編), 第54卷, 第500號, pp.663~669, 1988.
7. 송삼홍, 박창수, "고온환경하에서 2.25Cr-1Mo강의 표면크랙 전파거동에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회논문집(Ⅰ), 대한기계학회, 1993.
8. 송삼홍, 김동곤,, "고온에서 표면크랙 전파거동에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회논문집(Ⅰ), 대한기계학회 1994.
9. 村上敬宣, 遠藤正治, "疲勞强度に及ぼす微小缺陷の影響の評價法", 日本機械學會論文集(A編), 第49卷, 第438號, pp.127, 1983.
10. Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rate above 10-8 m/cycle, ASTM E647-86, 1986.
11. Nisitani, H., "Unifying Treatment of Fatigue Crack Growth Laws in Small, Large and Nonpropagating Cracks", Mechanics of Fatigue-AMD, ASME, Vol.43, pp.151~166, 1981.
12. Pelloux, R. M., Huang, J. S, "Low Cycle Fatigue Crack Propagation in Hastelloy-X at 25℃ and 760℃", Metallurgical Transaction A, Vol.11A, pp.899-904, 1982.
13. Brown, M. W., Liu, H. W. and Miller, K. J., "An Analysis of Fatigue Crack Growth under Yielding Conditions", Advances in Fracture Research (Fracture 81), Vol.2, pp.891-898, 1981.
14. 加藤容三, 長谷川典彦, "小さな疲勞き裂の發生と進展の兩擧動におよぼす繰返しひず時效の影響", 日本機械學會論文集(A編), 50卷, 456호, pp.1461-1468, 1984.
15. 西谷弘信, 森光武則, "小穴付き試驗片の回轉曲げ試驗によるき裂傳ば特性の評價", 日本機械學會論文集, 第42卷, 第354號, pp.328, 1983.