

〈論 文〉

1.5Cr-0.67Mo-0.33V강의 열피로 크랙전파 거동

송삼홍 · 강명수

(1995년 1월 27일 접수)

Thermo-Mechanical Fatigue Crack Propagation Behaviors of
1.5Cr-0.67Mo-0.33V Alloy

Sam-Hong Song and Myung-Soo Kang

Key Words : Crack Propagation(균열전파), Thermal Stress(열응력), Thermo-Mechanical Fatigue(열피로), Isothermal Low-Cycle Fatigue(등온 저사이클피로), Cycle-Dependent Fatigue(반복수의존적 피로), Time-Dependent Fatigue(시간의존적 피로), Fatigue J-Integral Range(피로 J-Integral 범위), Creep J-Integral Range(크리프 J-Integral 범위)

Abstract

The thermo-mechanical fatigue tests were performed on the specimens extracted from 1.5Cr-0.67Mo-0.33V alloy. The characteristics of thermo-mechanical fatigue crack propagation were examined and reviewed in view of fracture mechanics. The results obtained from the present study are summarized as follows: (I) The propagation characteristics of isothermal low-cycle fatigue crack are dominated by ΔJ_f in case of PP waveform, and ΔJ_c in case of CP waveform. (II) The propagation characteristics of thermo-mechanical fatigue crack are dominated by ΔJ_c for in-phase case, and by ΔJ_f for out-of-phase. The present results were in good agreement with the equation of propagation law for isothermal low-cycle fatigue crack in case of thermo-mechanical fatigue.

기 호 설 명

- $2a$: 크랙길이(mm)
- N : 응력 반복수(cycle)
- $d(2a)/dN$: 피로 크랙전파속도(mm/cycle)
- ΔJ_f : 피로 J-적분 범위(N/mm)
- ΔJ_c : 크리프 J-적분 범위(N/mm)
- ΔK : 응력확대계수 범위(MPa $\sqrt{\text{mm}}$)
- S_b : 하중-변위 히스테리시스 루프상의 인장소성 변형 면적(N·mm)
- S_c : 하중-변위 히스테리시스 루프상의 크리프변

형 면적(N·mm)

- B : 시험편두께(mm)
- b : 리가먼트길이(mm)

1. 서 론

대부분의 고온고압 설비들은 기계적 응력과 함께 열응력을 받게 되고, 특히 응력의 변동과 동시에 온도변화가 수반되는 열피로현상을 보이고 있다.⁽¹⁾ 이러한 고온설비들은 자유로운 열팽창이 구속되면, 가열과 냉각의 반복에 의하여 재질에 손상을 주게

*정회원, 고려대학교 기계공학과

**정회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

되어 균열을 발생시키고, 최종적으로 파손에 이르는 열피로파괴현상이 발생한다.

최근, 발전설비 등과 같이 열피로하중을 받는 기계요소의 재료거동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, (2~6) 이들 연구에서는 주기적인 하중의 변화와 함께 주기적인 온도변화의 영향을 동시에 고려해야 한다. 발전설비 등 대부분의 대형 설비에서는 열효율 향상을 고온고압화에 의존하고 있으므로 열피로에 대한 연구의 중요성이 높아지고 있다. 고온 저사이클피로 크랙전파에 대한 연구는 1970년대부터 진행되어 왔으며, 발전설비 등과 같이 고도의 신뢰성이 요구되는 설비들은 기동·정상운전·정지의 반복에 의하여 온도변동에 따른 열피로가 중요한 문제가 되고 있으므로 이들 고온기기의 신뢰성을 높이기 위하여는 열피로 크랙전파 거동의 고찰이 중요하다.

그리고, 고온 저사이클피로의 크랙전파 특성은 입자내 피로파괴를 일으키는 반복수의존적 피로(cycle-dependent fatigue)와 입계 크리프파괴를 일으키는 시간의존적 피로(time-dependent fatigue)로 구별되고, 각각의 크랙전파속도는 피로 J-integral 범위와 크리프 J-integral 범위에 지배된다고 보고되고 있다. (7~9) 그러나 이러한 고온 저사이클피로의 크랙전파에 관한 파괴역학적 검토는 대부분 등온조건하에서 행하여져 왔으며, 하중의 변화와 함께 온도가 변화하는 열피로 크랙전파에 관한 파괴역학적 검토는 실험이 복잡한 것등의 이유로 최근

에 와서야 연구가 시작되고 있다.

본 연구에서는 발전설비용으로 널리 쓰이는 1.5Cr-0.67Mo-0.33V강 재료로부터 시료를 채취하여 고온하에서 등온 저사이클피로시험과 기계적 응력과 열응력을 동시에 고려할 수 있는 열피로시험을 수행하여 등온 저사이클피로 및 열피로 크랙전파 특성을 고찰하고 열피로 크랙전파에 관한 파괴역학적 검토를 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 실험장치

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소 터빈설비에 널리 쓰이고 있는 1.5Cr-0.67Mo-0.33V강으로서, 19년간 약 11만시간 운전되고 교체된 터빈케이싱 볼트로부터 시료를 채취하였으며, 그 화학적 조성 및 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다.

시험편의 형상은 Fig. 1와 같이, 표점거리는 15 mm, 외경은 13 mm, 그리고 내경이 10 mm인 중공의 봉상(hollow cylindrical specimen)으로서 크랙발생의 개시점으로 평행부 중앙에 지름 0.6 mm의 원형구멍을 가공하였다. 그리고, 시험편의 표면 거칠기를 줄이기 위하여 내부와 외부를 각각 세밀하게 연마하였는데, 내면가공은 8.5 mm 드릴을 사용하여 가공하고 선반 내경연마와 래핑을 한후 diamond wheel을 사용하여 내경연마를 하였고, 외부 표면은 #1,500 연마지로 연마한후 6 m 연마

Table 1 Chemical composition of the testing material

Material	Composition(Weight percent : %)											
	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 testing material

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

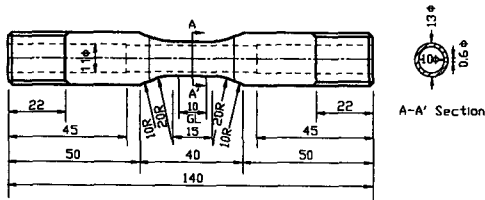


Fig. 1 Geometry of isothermal and thermal fatigue test specimen

제(diamond paste)를 사용하여 마무리 연마를 함으로서 표면의 거칠기를 최대한으로 줄이고자 하였다.

본 실험에 사용된 실험장치는 10톤 용량의 전기·기계식 인장-압축 열피로실험기(closed loop electro-servo mechanical dynamic fatigue testing machine, INSTRON model 1362)로서 실험장치의 구성은 가열용 고주파발생장치(induction heater), 시험편 냉각용 공기압축기, 실험결과 기록계 등으로 구성되어 있으며, 실험장치 제어용 block diagram은 Fig. 2에 도식적으로 나타나 있다.

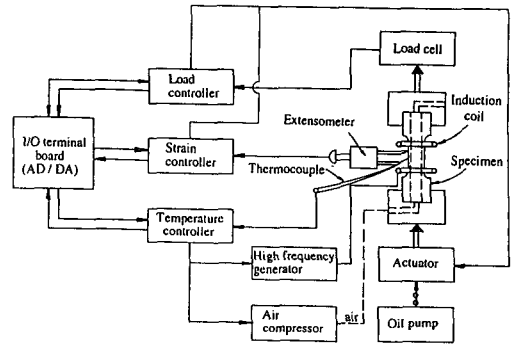


Fig. 2 Block diagram of control system used for isothermal and thermal fatigue test

크랙중앙개구변위 측정은 시험편 평형부 중심에서 측방향으로 놓여 있는 10 mm 표점거리의 접촉형 신장계(extensometer)를 사용하여 측정하였고, 온도의 측정은 표점거리의 중앙부위에 점용접된 열전대에 의하여 측정하였다. 또한 크랙길이는 60배 배율의 현미경을 사용하여 시험중에 수시로 측정하

Table 3 Test conditions for isothermal fatigue and thermal fatigue

(a) Isothermal fatigue

No	Specimen No.	Symbol	Temp. (°C)	Max. stress (MPa)	Stress ratio	Stress waveform	Loading time (sec)			
							tr	th	tc	
1	PP350	○	300	359.9	-1		1	-	1	
2	PP355	⊙		395.9						
3	PP450	⊖	425	338.1						
4	PP455	⊕		371.9						
5	PP545	⊘	550	267.7						
6	PP550	⊙		297.4						
7	CP370	⊗	300	503.9				1	300	1
8	CP375	*		539.9						
9	CP550	☆	550	297.4						
10	CP555	★		327.1						

Table 3 Continued

(b) Thermal fatigue

No	Specimen No.	Symbol	Temp. range (°C)	Max. stress (MPa)	Stress ratio	Stress waveform	Loading time (sec)		
							t_r	t_h	t_c
1	IP550	△	300 ~ 550	297.4	-1		60	300	60
2	IP555	▲		327.1					
3	IP560	▲		356.9					
4	OP360	□		435.9					
5	OP365	▣		467.9					
6	OP370	■		503.9					

였으며, 크랙전파속도는 크랙전파곡선의 점선의 구배로 구하였다.

2.2 실험조건

고온하의 등온 저사이클피로 크랙전파 실험의 경우 온도조건은 300, 425, 550°C이고, 적용응력은 각각의 온도에서 항복강도의 45~75% 수준하에서 응력비, $R=-1$ 로 시행하였다. 그리고 응력파형은 등온 저사이클피로의 크랙전파 특성을 반복수의존적 피로와 시간의존적 피로로 구별하여 고찰하고자 일정 유지시간(hold time)을 주지않은 PP파형과 최고응력하에서 유지시간을 준 CP파형으로 선정하였다.

그리고, 열피로 크랙전파실험은 온도와 하중의 관계가 동상(in-phase, IP파형) 및 역상(out-of-phase, OP파형)인 경우에 대하여 시행하였으며, 열피로시험 온도범위는 실제 발전설비의 정지 및 운전 온도 범위인 300°C와 550°C 사이를 선정하였다. 응력조건은 동상의 경우 최고온도 항복강도의 50~60%

수준이며, 최고온도에서 5분의 유지시간을 주었다. 그리고, 역상의 경우는 최저온도 항복강도의 60~70% 수준이며, 최저온도에서 5분의 유지시간을 주었다. 이와 같은 등온 저사이클피로 및 열피로시험의 실험조건을 정리하여 Table 3에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 등온 저사이클피로 크랙전파 특성

등온 저사이클피로 크랙전파 특성은 반복수의존적 피로와 시간의존적 피로로 구별되었으며, 크랙전파속도, $d(2a)/dN$ 은 비선형 파괴역학 변수인 피로 J-integral 범위, ΔJ_I 및 크리프 J-integral 범위, ΔJ_c 에 의하여 지배된다는 것을 알 수 있었다.

유지시간을 주지 않은 PP파형의 경우 피로시험의 결과는 Fig. 3와 같으며, 이 경우 크랙전파 특성은 반복수의존적 피로의 특성을 보였으며, 크랙전파속도, $d(2a)/dN$ 은 피로 J-integral 범위, ΔJ_I

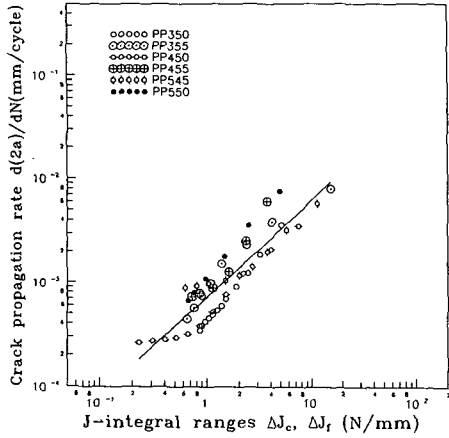


Fig. 3 Relation between crack propagation rate and J-integral range in isothermal fatigue(PP stress waveform)

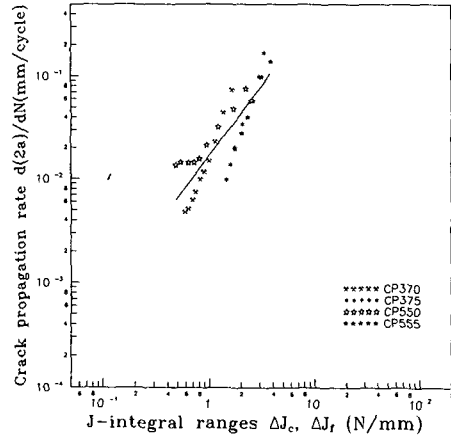


Fig. 5 Relation between crack propagation rate and J-integral range in isothermal fatigue(CP stress waveform)

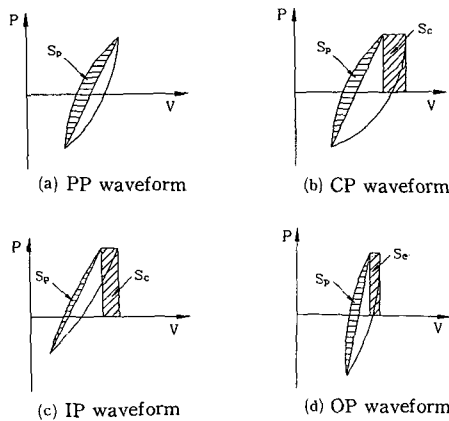


Fig. 4 Schematic diagrams of load(P)-crack center opening displacement(V) hysteresis loop

에 의하여 다음 식과 같은 크랙전파법칙이 성립함을 알 수 있었다.

$$\frac{d(2a)}{dN} = 7.20 \times 10^{-4} \Delta J_r^{0.94} \quad (1)$$

식(1)에서 2a는 원공노치를 포함한 전체 크랙길이이며, ΔJ_r 는 하중과 크랙중앙개구변위 사이의 히스테리시스 루프를 사용하여 다음 식에 의하여 구하였다.

$$\Delta J_r = \frac{\Delta K^2}{E} + \frac{S_p}{Bb} \quad (2)$$

여기서, S_p 는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 히스테리

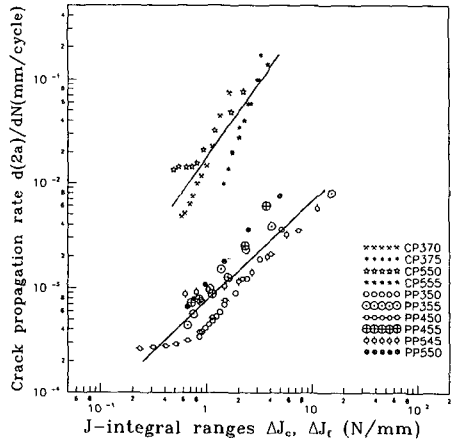


Fig. 6 Relation between crack propagation rate and J-integral range in isothermal fatigue(PP and CP stress waveform)

시스 루프상의 인장소성변형 면적이고, ΔK 는 응력확대계수범위, B는 시험편두께 그리고 b는 리가멘트길이이다.

최고응력(σ_{max})하에서 유지시간을 준 CP파형의 경우 피로시험의 결과는 Fig. 5과 같으며, 이 경우 크랙전파 특성은 시간의존적 피로의 특성을 보였으며, 크랙전파속도, $d(2a)/dN$ 은 크리프 J-integral 범위, ΔJ_c 에 의하여 다음 식과 같은 크랙전파법칙이 성립함을 알 수 있었다.

$$\frac{d(2a)}{dN} = 1.68 \times 10^{-2} \Delta J_c^{1.37} \quad (3)$$

식(3)에서 ΔJ_c 는 하중과 크랙중앙개구변위 사이의 히스테리시스 루프를 사용하여 다음 식에 의하여 구하였다.

$$\Delta J_c = \frac{S_c}{2Bb} \quad (4)$$

여기서, S_c 는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 히스테리시스 루프상의 크리프변형 면적이다.

Fig. 6은 이상과 같이 등은 저사이클피로시험의 결과를 하나의 선도로 표시한 것이며, 다음과 같은 크랙전파법칙이 성립함을 알 수 있었다.

$$\frac{d(2a)}{dN} = C_i (\Delta J_i)^{m_i} \quad (5)$$

여기서, 첨자 i 는 반복수의존적 피로의 경우에는 f , 시간의존적 피로의 경우에는 c 이며, C_i 와 m_i 는 재료상수이다. 위와 같은 관계식은 온도와 응력에 거의 의존하지 않음을 알 수 있었다.

그리고, 식(1)과 식(3)을 사용하여 반복수의존적 피로와 시간의존적 피로의 천이조건 식을 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$\Delta J_c = 1.00 \times 10^{-1} \Delta J_f^{0.69} \quad (6)$$

Fig. 7에서 직선은 위에서 구한 천이조건을 의미하며, CP파형의 ΔJ_c - ΔJ_f 관계를 표시하였는데, 전술한 바와 같이 시간의존적 피로의 특성을 나타내어 직선의 위쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 등은 저사이클피로 크랙전파에 있어서 전형적인 파단면을 보여주고 있는 주사전자현미경

사진인데, 반복수의존적 피로특성을 보인 PP파형의 경우 스트라이에이션을 볼수 있는 입내파괴 형태인 반면, 시간의존적 피로특성을 보인 CP파형의 경우 입계파괴 형태로 되어, 등은 저사이클피로 크랙전파 특성은 파괴양식과 대응관계가 있음을 알 수 있었다.

3.2 열피로 크랙전파 특성

열피로 크랙전파 특성을 고찰하고자 하중의 변화와 함께 온도의 변동을 동반하는 열피로조건하에서 피로시험을 수행한 결과 열피로 크랙전파속도, $d(2a)/dN$ 도 등은 저사이클피로 크랙전파속도의 경우와 같이 비선형 파괴역학 변수인, ΔJ_f 및 ΔJ_c 를 적용하고 그 크랙전파법칙을 검토하였다.

온도와 하중의 관계가 동상인 IP파형의 경우 열피로시험의 결과는 Fig. 9와 같으며, 이 경우 크랙전파 특성은 시간의존적 피로의 특성을 보였으며, 크랙전파속도, $d(2a)/dN$ 은 크리프 J-integral 법

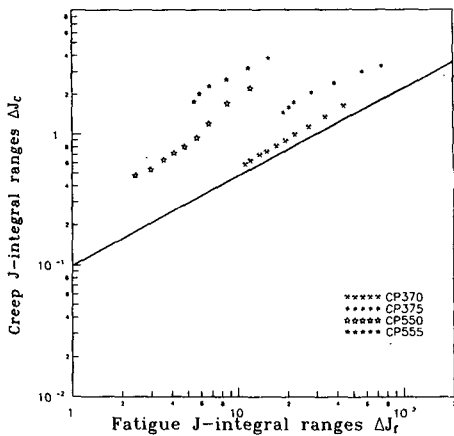
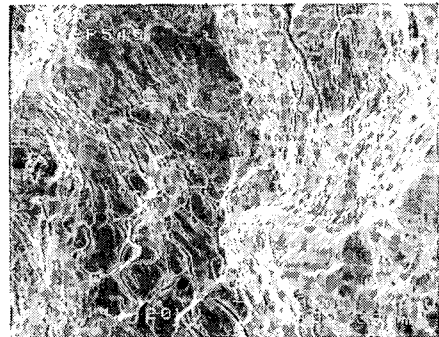
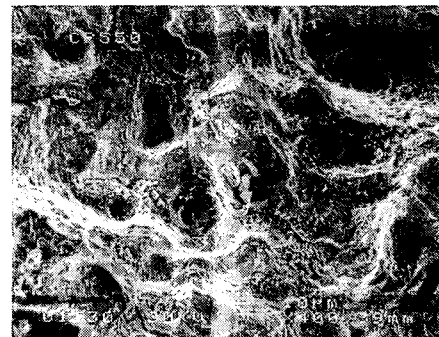


Fig. 7 Transition condition between cycle dependent fatigue and time dependent fatigue in isothermal fatigue



(a) Cycle-dependent fatigue(PP stress waveform)



(b) Time-dependent fatigue(CP stress waveform)

Fig. 8 SEM photographs showing typical fracture surface in isothermal fatigue crack propagation(X400)

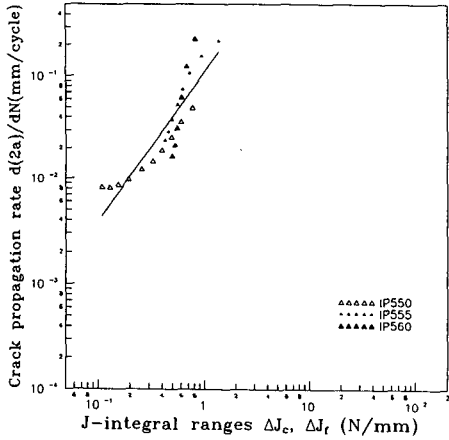


Fig. 9 Relation between crack propagation rate and J-integral range in thermal fatigue(in-phase)

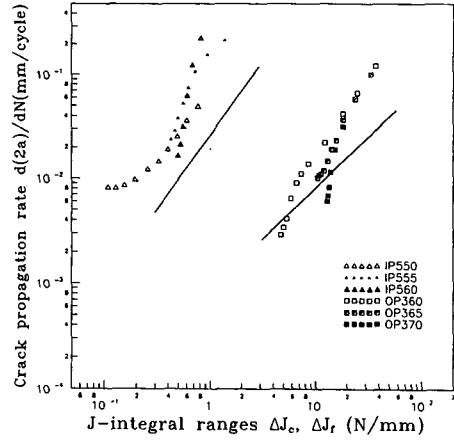


Fig. 11 Comparison of isothermal fatigue crack propagation behavior with thermal fatigue

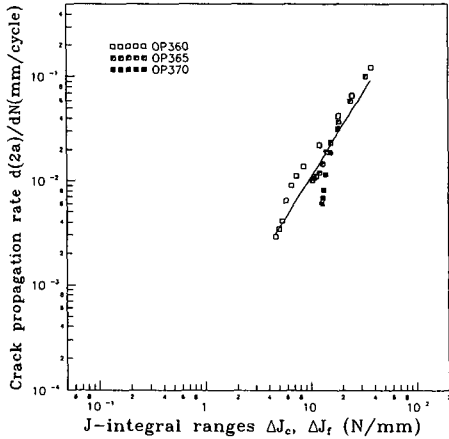


Fig. 10 Relation between crack propagation rate and J-integral range in thermal fatigue(out-of-phase)

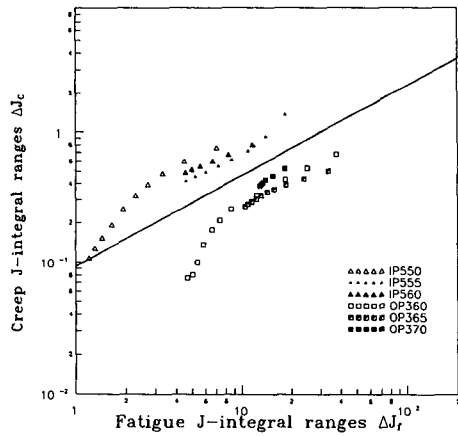


Fig. 12 Transition condition between cycle dependent fatigue and time dependent fatigue in thermal fatigue

위, ΔJ_c 에 의하여 지배되었으며, 다음 식과 같은 크랙전파법칙이 성립함을 알 수 있었다. 즉

$$\frac{d(2a)}{dN} = 1.10 \times 10^{-1} \Delta J_c^{4.6} \quad (7)$$

그리고, 온도와 하중의 관계가 역상인 OP파형의 경우 열피로시험의 결과는 Fig. 10와 같으며, 이 경우 크랙전파 특성은 반복수의존적 피로의 특성을 보였으며, 크랙전파속도, $d(2a)/dN$ 은 피로 J-integral 범위, ΔJ_r 에 의하여 지배되었고, 다음 식과 같은 크랙전파법칙이 성립함을 알 수 있었다. 즉,

$$\frac{d(2a)}{dN} = 2.07 \times 10^{-5} \Delta J_r^{2.17} \quad (8)$$

Fig. 11은 열피로시험의 결과를 등은 저사이클피로 시험의 결과와 함께 표시한 것인데, 그림중의 실선은 등은 저사이클피로시험에서 얻어진 $d(2a)/dN-\Delta J_r$ 및 $d(2a)/dN-\Delta J_c$ 의 관계에 대한 선도이며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 열피로 크랙전파 특성 또한 등은 저사이클피로 크랙전파법칙을 적용할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 12은 열피로 크랙전파에 대한 천이조건을 관계를 표시하였는데, 그림에서 직선은 등은 저사

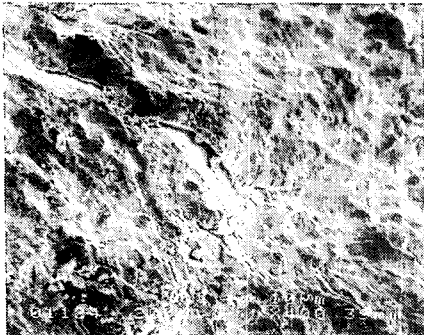
이클피로의 반복수의존적 피로와 시간의존적 피로의 천이조건을 의미하며, IP파형의 경우 시간의존적 피로특성을 나타내어 직선의 위쪽에 위치하고 있음을 알 수 있고, OP파형의 경우 반복수의존적 피로특성을 나타내어 직선의 아래쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다. 열피로 크랙전파에 있어어도 천이는 직선을 경계로 발생하고 있으며, 등은 저사이클피로의 천이조건식을 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서, 열피로 크랙전파 특성도 등은 저사이클피로 크랙전파의 파괴역학 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 열피로 크랙전파에 있어서 전형적인 파단면을 보여주고 있는 주사전자현미경 사진인데, 시간의존적 피로특성을 보인 IP파형의 경우 입계 파괴 형태인 반면, 반복수의존적 피로특성을 보인 OP파형의 경우 스트라이에이션을 볼수 있는 입내 파괴 형태로 되어, 등은 저사이클피로의 경우와 마



(a) Time-dependent fatigue(in-phase)



(b) Cycle-dependent fatigue(out-of-phase)

Fig. 13 SEM photographs showing typical fracture surface in thermal fatigue crack propagation(X400)

찬가지로 크랙전파 특성은 파괴양식과 대응관계가 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전소 터빈설비에 널리 쓰이는 1.5Cr-0.67Mo-0.33V강 재료로부터 시료를 채취하여 등은 저사이클피로 및 열피로시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 등은 저사이클피로 및 열피로 크랙전파 특성은 반복수의존적 피로에서는 피로 J-integral 범위, ΔJ_f 에 지배되고, 시간의존적 피로에서는 크리프 J-integral 범위, ΔJ_c 에 지배되었으며, 크랙전파 법칙 $\frac{d(2a)}{dN} = C(\Delta J)^m$ 가 성립하였다.

(2) 등은 저사이클피로 크랙전파 특성은 유지시간을 주지 않은 PP파형의 경우 ΔJ_f 에 지배되었고, 최고응력에서 유지시간을 준 CP파형의 경우 ΔJ_c 에 지배되었다.

(3) 열피로 크랙전파 특성은 온도와 하중의 관계가 동상인 경우 시간의존적 피로의 특성을 보이고, 역상의 경우 반복수의존적 피로의 특성을 보였으며, 등은 저사이클피로 크랙전파법칙을 적용할 수 있었다.

(4) 반복수의존적 피로와 시간의존적 피로의 천이조건은 등은 저사이클피로 및 열피로의 경우 모두에 적용할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Spera, D. A., 1976, "What is Thermal Fatigue?," *ASTM STP 612*, pp. 3~9.
- (2) Embley, G. T. and Russel, E. S., 1984, *Thermal Mechanical Fatigue of Gas Turbine Bucket Alloys*, Ireland, pp. 157~164.
- (3) Russel, E. S., 1985, "Practical Life Prediction Methods for Thermal Mechanical Fatigue of Gas Turbine Buckets," *Proc. of Life Prediction for High Temperature Gas Turbine Materials*, EPRI, Palo Alto, CA, pp. 1~17.
- (4) 新田明人, 1993, "發電フロント用耐熱金屬材料の熱疲労に関する研究," 博士學位論文, 京都大學校, pp. 159~179.
- (5) 송삼홍, 강명수, 박창수, 1993, "고온환경하에서의 표면크랙 전파거동에 관한 연구," 대한기계

- 학회, '93년도 추계학술대회 논문집(1), pp. 354~357.
- (6) 송삼홍, 강명수, 김건영, 1994, "발전설비용 재료의 열피로 크랙전파 거동," 대한기계학회 '94년도 추계학술대회 논문집(1), pp. 196~201.
- (7) Ohtani, R., 1980, "Crack Propagation under Creep-Fatigue Interaction," IMech E, pp. 17~22.
- (8) Ohtani, R., Kitamura, T. and Tada, N., 1987, "High-Temperature Fatigue Crack Propagation Under Cyclic Temperature," *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. (Ser. A)*, Vol. 53, No. 490, pp. 1030~1036.
- (9) Kitamura, T. and Ohtani, R., 1986, "Crack Propagation under Creep-Fatigue Interaction Condition," *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. (Ser. A)*, Vol. 52, No. 480, pp. 1816~1823.