〈논 문〉

터빈용 Cr-Mo-V강의 고온 환경변화에 따른 피로거동에 관한 연구

송삼홍* · 강명수**

(1996년 1월 9일 접수)

A Study on the Fatique Behaviors of Cr-Mo-V Alloy for Steam Turbine at High Temperature Difference

Sam Hong Song and Myung Soo Kang

Key Words: High Temperature Fatigue(고온피로), Fatigue Crack(피로균열), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열전파속도), Yield Strength(항복강도), Applied Stress(작용응력), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

The high temperature fatigue tests were performed using the specimens taken from Cr-Mo-V steel, widely used as thermal power plant turbine materials for examination fatigue behavior of materials in power plants which have been operated for long periods. The fatigue tests at high temperature were performed at the various temperature and applied stress. The results obtained are summarized as follows : The fatigue crack length increases and the fatigue life decreases with temperature and applied stress according to the same number of stress cycle. The fatigue crack propagation and the fatigue life were much influenced by temperature and applied stress.

1. 서 론

최근, 금속재료의 고온피로에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으나,[1~6] 고온하의 피로균열전파거동과 같이 온도조건이 고온인 경우 크리프의 영향을 고려하여야 하며, 고온 하에서는 재료의 강도가 저하하므로 균열이 진전함에 따라 상당한 소성변형을 수반하게 되어 실험 및 해석상의 어려움으로 인하여 피로균열전파속도를 지배하는 역학적 변수 등에 관해서 충분히 규명되어 있지 않다. 따라서 고온 피로균열전파거동에 대한 신뢰성있는 해석결과가 필요한 실정이다.

*회원, 고려대학교 기계공학과
**회원, 고려대학교 대학원, 현재 한국전력연구원

고온 피로균열전파거동에 대한 기존의 연구를 살펴보면, Shuji 등[7]은 소규모 항복조건이 만족하지 않는 고온하에서 피로균열전파속도를 반복 J-적분(cyclic J-integral) 및 크리프 J-적분(creep J-integral)을 사용하여 정리하였고, Ohtani[8~10]등은 저사이클 피로균열의 전파특성은 입자내 피로파괴를 일으키는 반복수에 의존하는 피로와 입계 크리프파괴를 일으키는 시간에 의존하는 피로로 구별되고, 각각의 균열전파속도는 피로 J-적분 범위 또는 크리프 J-적분 범위에 지배된다고 하였다.

이상의 연구결과를 종합하여 보면, 고온하에서의 대부분의 연구결과는 피로균열전파속도를 J-적분을 사용하여 정리한 것이 많으나, 그 연구들 중에서 작용하는 응력파형을 충분히 고려하여 검토한 연구는 찾아보기 힘들다. 일례로서, 피로파괴와 관련하

여, 응력파형이 첫째, 그 응력의 반복수에만 의존하는 경우, 둘째, 작용응력이 최대 또는 최소일 때, 일정유지시간을 편견적으로 선택할 경우 등에 대하여 피로균열전파거동 및 피로수명거동 등은 어떠한 특성을 나타내는가에 대한 상세한 연구는 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 고온 피로균열의 전파거동을 상세하게 고찰하기 위하여, 우선 작용응력의 파형을 고려하고, 첫째, 작용응력의 최대 또는 최소일 때 일정 유지시간을 주지 않고, 응력의 반복수에만 의존하는 PP형(인장소성-압축소성변형)과 둘째, 작용응력의 최대, 최소중 최대응력에서만 일정시간을 유지시키는 CP형(인장 크리프-압축소성변형)하에서의 피로균열거동을 실제 화력발전소 증기터빈의 사용온도 300℃~550℃ 구간 내에서 상세히 고찰하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 실험재료는 1.5Cr-0.7Mo-0.3V 강으로서, 약 19년간 사용되고 교체된 화력발전소 터빈 케이싱볼트로부터 시험편을 채취하였다. 실험재료의 화학적 조성은 Table 1과 같고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Fig. 1은 사용한 시험편의 형상으로서 표점거리는 15 mm, 바깥지름은 13 mm, 안지름은 10 mm

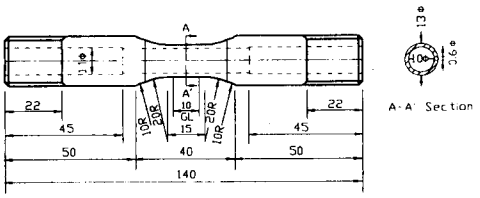


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen

인 중공 시험편이며, 발생·전파하는 균열을 잘 관찰하고자 평형부 중앙에 지름 0.6 mm의 미소원공을 가공하였다. 실험에 사용한 기계는 electro-servo mechanical dynamic fatigue testing machine이고, 또 시험편에 유도가열 및 온도제어 등을 위한 부대설비로는 고주파 발생장치와 시험편 냉각용 공기를 공급하는 공기압축기를 사용하였다. 피로균열 중앙부의 개구변위(변형률)의 측정은 10 mm의 표점거리를 갖는 신장계(extensometer)를 사용하여 측정하였고, 시험편의 온도는 표점거리의 중앙부위에 점용접된 열전대를 사용하여 측정하였다.

고온 피로균열의 전파거동에 대한 실험은 하중제어 하에서 수행하였고, 이 경우 온도조건은 실제 발전설비의 운전조건을 고려하여 300, 425, 550℃를 선정하였다. 실험에 사용한 응력은 각각의 온도에서 항복강도를 기준으로 항복강도의 45~75% 수준 범위내의 것이며, 응력비는 R=-1이다. 그리고 응력파형은 우선, ①작용응력의 최대 또는 최소일

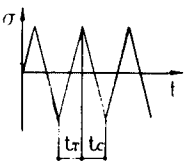
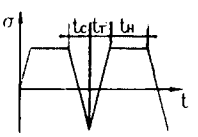
Table 1 Chemical composition of test material

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

Table 3 Test conditions for high temperature fatigue

No	Specimen No.	Symbol	Temp. (℃)	Max. stress (MPa)	Stress ratio	Stress waveform	Loading time (sec)		
							t_T	t_H	t_C
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	CP470	+	425	473.3					
10	CP550	☆	550	297.4					
11	CP555	★		327.1					
12	CP560	△		356.9					

때 일정 유지시간을 주지 않고, 응력의 반복수에만 의존하는 PP형(인장소성-압축소성변형)과 ②작용응력의 최대, 최소중 최대 응력하에서만 일정시간을 유지시키는 CP형(인장크리프-압축소성변형)을 사용하였다. 피로응력 작용시간은 인장 및 압축인 경우 똑같이 1초로 하였다. 그리고, CP형의 경우, 일정 유지시간은 300초이었다. Table 3은 고온 피로시험의 실험조건을 나타낸 것이다.

3. 실험결과

3.1 고온(550℃, 425℃, 300℃)하에서의 피로균열전파 및 파단수명거동

본 절에서는 여러 단계의 고온 레벨에서 피로균열 발생 및 전파거동을 비교, 검토함으로서 온도변화가 피로균열발생 및 전파거동에 미치는 영향을 관찰하였다.

Fig. 2는 PP파형(인장소성-압축소성변형)하에서의 실험결과이다. PP파형이란 작용응력의 최대 또는 최소일때 일정시간을 주어 그 응력을 유지하지 않고, 응력의 반복수에만 의존하는 형태의 것으로서, 이때 각각의 온도에서 작용응력은 항복강도의 50%에 해당하는 것으로 하였다. 온도가 300℃, 425℃, 550℃로 높아짐에 따라서 동일한 응력반복수에 대하여 피로균열길이는 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 일례로서 응력반복수 $N=2\times10^3$일때, 425℃ 조건하에서의 피로균열길이는 a=0.5 mm

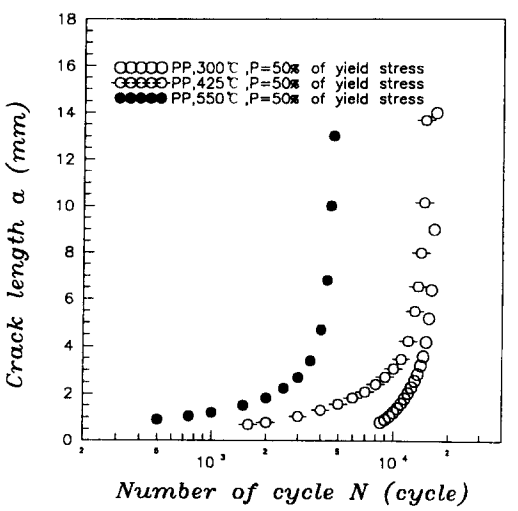


Fig. 2 Relation between crack length and number of cycle according to temperature in PP type ($\sigma_a=0.5\times\sigma_y$)

임에 비하여, 550℃ 조건하에서의 피로균열길이는 a=0.8 mm이다.

한편, 최종 파단수명은 300℃인 경우는 N=16,800 cycle이고, 425℃ 및 550℃에서는 각각 N=14,730 cycle 및 N=4,630 cycle이었다. 따라서 300℃의 피로파단수명을 기준으로 피로수명 감소율은 425℃ 및 550℃ 순으로 각각 12.3%, 72.4%이다. 따라서 PP파형에서의 피로균열전파 및 피로파단수명에는 온도레벨의 영향은 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3은 CP파형(인장크리프-압축소성변형)하에서의 실험결과이다. CP파형이란 작용응력이 최대로 작용하는 경우에 한하여 일정 시간동안 그 응력의 크기를 유지시키는 형태의 것이다. 이때 각각의 온도에서 작용응력은 항복강도의 60~70%에 해당하는 것으로 하였다. 온도가 300℃, 425℃, 550℃로 높아짐에 따라서 동일한 응력반복수에 대하여 피로균열길이는 점점 커지고 있음을 관찰할 수 있었다.

그리고, 각 온도레벨에 따라서 최종 파단수명은 300℃인 경우는 N=798 cycle이고, 425℃ 및 550℃인 경우는 각각 N=445 cycle 및 N=197 cycle이었다. 따라서 300℃의 피로파단수명을 기준으로 피로수명의 감소율은 425℃ 및 550℃ 순으로 각각 44.2%, 75.3%이다. 이상과 같이 피로균열의 전파거동 및 피로파단수명은 온도변화의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 고온(550℃, 425℃, 300℃)하에서의 피로균열전파속도 거동

본 절에서는 온도변화에 따른 피로균열전파속도 거동을 고찰하고자 한다. Fig. 4는 PP파형 하에서의 실험결과이고, Fig. 5는 CP파형 하에서의 실험결과이다. 우선, Fig. 4를 살펴보면, 피로균열이 안정 성장하는 균열길이 a=2 mm를 기준으로 하

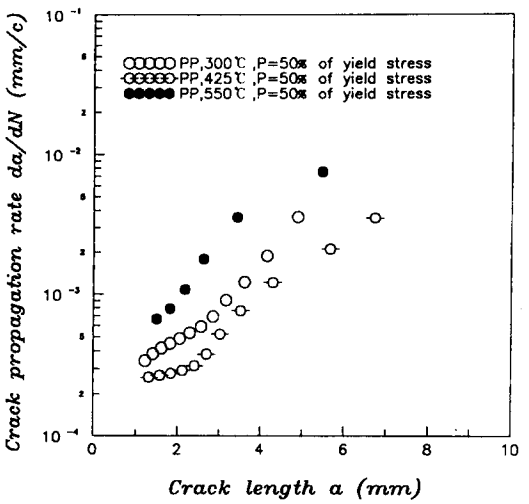


Fig. 4 Relation between crack propagation rate and crack length according to temperature in PP type

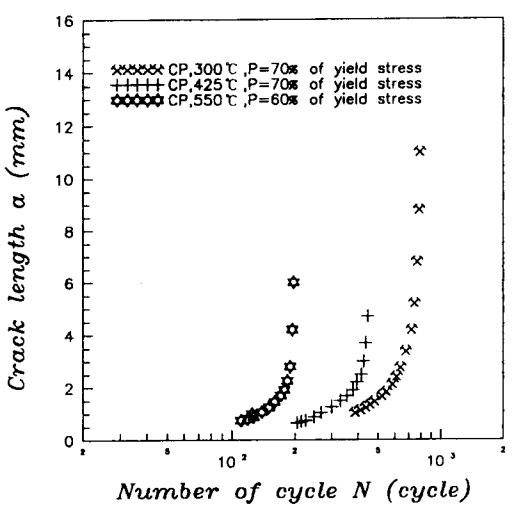


Fig. 3 Relation between crack lenght and number of cycle according to temperature in CP type ($\sigma_a = 0.6 \sim 0.7 \times \sigma_y$)

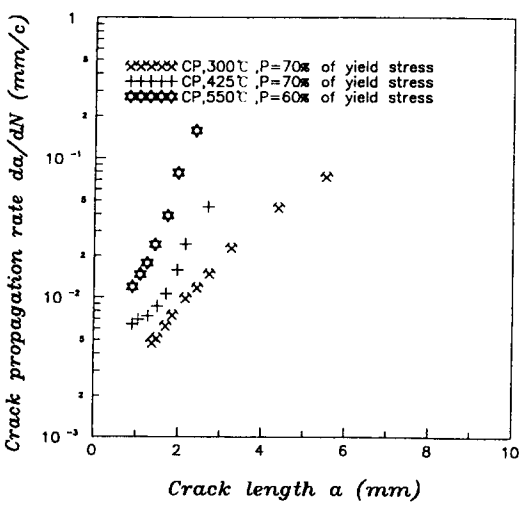


Fig. 5 Relation between crack propagation rate and crack length according to temperature in CP type

여 온도에 따른 균열전파속도는 300℃, 425℃ 및 550℃순으로 da/dN=4.5×10^{4}, 3.1×10^{4}, 9.2×10^{4} mm/cycle이다. 이러한 결과는 Fig. 5에 제시된 CP파형 하에서의 실험결과에서도 그 경향은 동일하게 관찰할 수 있다. 따라서 피로균열전파속도는 고온 영역에서는 온도의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 각각의 온도조건에서 작용응력수준은 각 온도에서의 항복강도에 대한 일정한 비율로 선정되었는데도, 온도가 높아짐에 따라 동일한 응력반복수에 대하여 균열길이가 커지고 피로수명이 감소하고 있다. 이런 현상이 나타나는 원인은 온도변화에 따른 재료적인 변화, 즉 조직의 조대화 또는 산화의 영향에 의한 것으로 판단되며, 그 결과 조직간의 결합력을 감소시킴으로서 피로수명의 저하를 유발한다고 생각된다.

3.3 응력의 크기에 따른 피로균열전파거동

본 절에서는 응력의 크기에 따른 피로균열전파거동을 상호 비교함으로써 응력의 크기가 피로균열전파거동에 어떤 영향을 미치는가에 대하여 고찰하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 동일 온도조건하에서 응력의 크기에 따른 응력반복수와 피로균열길이와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6은 응력파형이 PP형인 경우, 온도가 550℃일 때의 응력반복수와 피로균열길이와의 관계에 대한 실험결과이다. 작용응력이 높을 때 동일한 응력반복수에 대하여 피로균열길이가 커짐을 알 수 있다. 그리고, 응력의 크기를 항복강도의 45%로 결정했을 경우의 최종 파단은 N=9,850 cycle에서 일어났고, 응력의 크기를 항복강도의 50%로 결정했을 경우의 최종 파단은 응력반복수 N=4,630 cycle에서 일어났다. 응력의 크기를 항복강도의 50%로 결정했을 경우의 피로수명 감소율은 응력의 크기를 항복강도의 45%로 결정했을 경우보다 높다. Fig. 7은 최고 응력하에서 일정 유지시간을 준 CP형인 경우, 온도가 550℃일 때의 응력반복수와 피로균열길이와의 관계에 대한 실험결과이다. 최종 파단수명은 응력의 크기가 항복강도의 50%일때 N=638 cycle이고, 항복강도의 55% 및 60% 일때 각각 N=320 cycle 및 N=197 cycle이었다. 작용응력의 크기가 항복강도의 50%의 경우에 대한 항복강도의 55% 및 60% 일때 피로수명 감소율은 각각 49.8%, 69.1%이다.

따라서, CP파형을 사용했을 경우도 PP파형을 사용한 경우와 마찬가지로 작용응력이 높을수록 동일한 응력반복수에 대하여 피로균열길이가 커지고, 피로수명 감소율도 커지고 있음을 관찰할 수 있다.

한편, Fig. 8에는 PP파형에서의 피로균열전파속도에 대한 실험결과이고, Fig. 9에는 CP파형 하에서의 피로균열전파속도에 대한 실험결과를 각각 나타냈다. Fig. 8의 PP파형에서의 피로균열 전파속

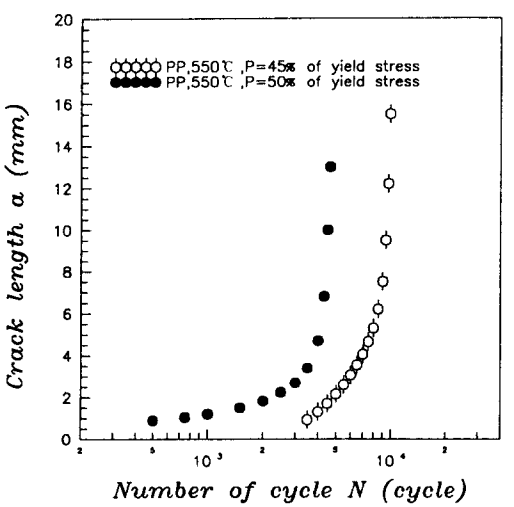


Fig. 6 Relation between crack length and number of cycle according to applied stress in PP type (T =550℃)

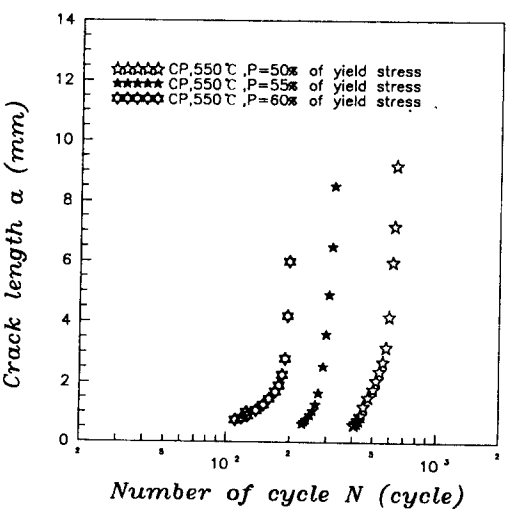


Fig. 7 Relation between crack length and number of cycle according to applied stress in CP type (T =550℃)

도는 균열길이 a=2 mm를 기준으로 하여 응력의 크기가 항복강도의 45%, 50%순으로 da/dN=7.5 $\times 10^{4}$, 8.0×10^{4} mm/cycle이다. 그리고, Fig. 9의 CP파형에서의 피로균열전파속도는 응력의 크기가 항복강도의 50%, 55% 및 60% 순으로 각각 da/dN=1.4×10^{2}, 7.0×10^{2}, 8.0×10^{2} mm/cycle이다. 이러한 실험결과로부터 피로균열전파속도는 응력의 크기가 커짐에 따라서 빨라지고 있음을 알 수 있다.

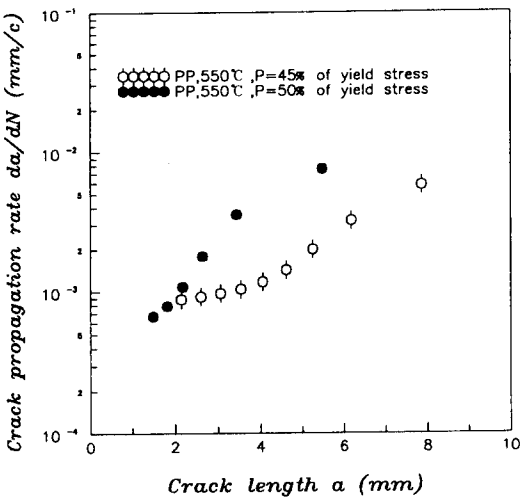


Fig. 8 Relation between crack propagation rate and crack length according to applied stress in PP type

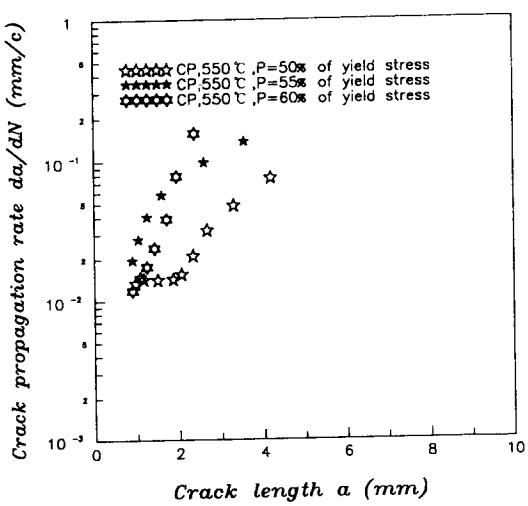


Fig. 9 Relation between crack propagation rate and crack length according to applied stress in CP type

이상과 같은 실험결과에 대하여는 다음과 같이 생각된다. 즉, 재료의 피로수명은 시험편의 재료적 특성과 외력에 의하여 영향을 받게 되는데, Fig. 6 ~Fig. 9와 같이 응력의 크기가 커짐에 따라 동일한 응력반복수에 대하여 피로균열길이는 커지고, 균열전파속도는 빨라진다. 또, 피로수명이 감소하는 것은 일정한 항복강도와 탄성계수를 갖는 시험편에서 나타나는 일반적인 현상으로서 응력의 크기가 커짐에 따라 피로균열전파를 더욱 용이하게 하여 피로균열길이는 커지고, 피로균열전파속도는 빨라지며, 피로수명은 감소하는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온하에서의 피로거동을 고찰하기 위하여 화력발전소 증기터빈 재료에 널리 쓰이고 있는 1.5Cr-0.7Mo-0.3V강 재료를 시험편으로 하고, 고온 피로시험을 수행하여 피로균열의 전파거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) PP파형(인장소성-압축소성) 및 CP파형(인장크리이프-압축소성) 공히 피로파단 수명의 감소율은 온도가 300℃~550℃로 상승함에 따라서 점차적으로 커진다.

(2) PP파형 및 CP파형 공히 피로균열전파속도는 온도가 300℃~550℃로 상승함에 따라서 빠르다.

(3) 작용응력의 크기가 증가함에 따라 동일한 응력반복수에 대하여, 피로균열길이는 커지고, 피로파단수명은 감소하였다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME95-C-04)에 의하여 연구되었으므로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Nitta, A. and Kuwabara, K., 1988, "Thermal-Mechanical Fatigue Failure and Life Prediction," *High Temperature Creep-Fatigue, Current Japanese Materials Research*, Vol. 3, New York, pp. 203~222.

(2) Guedou, J. Y. and Honnorat, Y., 1993,

"Thermomechanical Fatigue of Turbo-Engine Blade Superalloys," *ASTM STP 1186*, pp. 157~175.

(3) Song, S. H. and Kang, M. S., 1995, "Thermal -Mechanical Fatigue Crack Propagation Behaviors of a Turbine Casing Bolt," *Thermal Stresses* '95, pp. 485~488.

(4) 송삼홍, 강명수, 1995, "Cr-Mo-V 강의 고온 저사이클 피로균열전파거동 해석," 대한기계학회 '95년도 춘계학술대회 논문집(Ⅰ), pp. 224~229.

(5) 송삼홍, 강명수, 1995, "1.5Cr-0.67Mo-0.33V 강의 열피로 균열전파거동," 대한기계학회논문집, 제19권, 제9호, pp. 2133~2141.

(6) 新田明人, 1993, "發電フラント用耐熱金屬材料の熱疲勞に關する硏究," 博士學位論文, 京都大學校, pp. 159~179.

(7) Shuji Taira, Ryuichi Ohtani, and Tomio Komatsu, 1979, "Application of J-Integral to High-Temperature Crack Propagation," *Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp. 162~167.

(8) Ohtani, R., 1980, "Crack Propagation under Creep-Fatigue Interaction," *IMech E*, pp. 17~22.

(9) 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.

(10) 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.