

몬테카를로 모사에 의한 용접 계면에서의 크리프 균열성장 파손 확률 평가

이진상* · 윤기봉**

*중앙대학교 대학원

**중앙대학교 기계공학부

Evaluation of Creep Crack Growth Failure Probability at Weld Interface Using Monte Carlo Simulation

Jin-Sang Lee* and Kee-Bong Yoon**

*Graduate School of Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

Abstract

A probabilistic approach for evaluating failure risk is suggested in this paper. Probabilistic fracture analyses were performed for a pressurized pipe of a Cr-Mo steel reflecting variation of material properties at high temperature. A crack was assumed to be located along the weld fusion line. Probability density functions of major variables were determined by statistical analyses of material creep and creep crack growth data measured by the previous experimental studies by authors. Distributions of these variables were implemented in Monte Carlo simulation of this study. As a fracture parameter for characterizing growth of a fusion line crack between two materials with different creep properties, C_t normalized with C^* was employed. And the elapsed time was also normalized with t_r . Resultingly, failure probability as a function of operating time was evaluated for various cases. Conventional deterministic life assessment result was turned out to be conservative compared with that of probabilistic result. Sensitivity analysis for each input variable was conducted to understand the most influencing variable to the analysis results. Internal pressure, creep crack growth coefficient and creep coefficient were more sensitive to failure probability than other variables.

* Corresponding author : kbyoon@cau.ac.kr

(Received June 22, 2005)

Key Words : Creep, Weld fusion line, Crack, PFM(probabilistic fracture mechanics), Monte carlo simulation, High temperature

1. 서 론

결정론적 파괴역학에 기반을 두고 행해져 왔던 기존 수명평가법은 평가에 필요한 변수를 입력할 때 안전 여유를 고려한 대표값으로 고정 입력하여 수행하였다. 그러나 이러한 값들은 실제로는 일정하다고 가정한 기대값을 중심으로 임의적으로 분산되어 확률분포를 갖게 된다. 따라서 결정론적 파괴역학을 적용하여 수명평가를 수행할 경우 적용 절차는 용이하나 평가 결과는 실

제 파손 확률에 비해 보수적인 결과를 줄 수 있다. 따라서 구조물의 수명을 보다 현실적이고 정량적인 방법으로 예측하기 위해서는 관련된 변수들의 분포 확률을 고려한 확률론적 파괴역학(probabilistic fracture mechanics)을 도입하여야 한다. 확률 개념을 도입한 파괴역학은 1970년대부터 연구되기 시작하여 1980년대에는 미국의 원자력 발전소에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되었으며, 이후 원자력 발전설비의 주요 요소에 대한 다양한 확률파괴 프로그램이 개발되었으며^{1,2)}, 본 연구팀도 크리프 균열성장에 의한 확률적인 점

근에 대한 연구를 수행한 바 있다³⁾. 고온에서 균열성장
에 의한 파괴는 특히 용접으로 제작되어 있는 요소들
에서 빈번하게 발생한다. 용접 균열은 상대적으로 취약한
모재부와 용접부 사이의 열영향부(HAZ) 또는 용선
(fusion line)을 따라서 균열이 발생, 성장하는 경향이
있으므로 용접부 균열에 대한 균열성장 수명평가는 실
제 설비 수명진단에서 매우 중요하다. 이와 같이 경계
면을 가지고 있는 이종재료에 계면 균열(interfacial
crack)이 존재할 경우에는 응력 및 변형률 장이 변할
뿐 아니라 동질재에서 유도된 기존의 파괴매개변수식은
그 의미를 잃게 된다. 따라서 기존의 동질 재료에 대한
 C_t 매개변수만으로는 용접부 균열의 크리프 거동을 설
명하기 불충분하므로 경계면 균열에 대한 새로운 C_t 식
이 정의되어 사용되었다^{4,5)}.

본 연구에서는 고온에서 사용되는 재료의 크리프 균
열 성장에 의한 파손 확률을 정량적으로 평가하는 이전
연구³⁾의 후속 연구로서 경계면을 가지고 있는 이종 재
료에 대한 파손 확률 평가법에 대하여 연구하였다. 이
를 위하여 저자가 수행한 재료의 고온 물성에 대한 통
계적 분석 결과 및 몬테카를로법 절차를 이용하여 서로
다른 크리프 물성을 가지는 재료의 계면에 존재하는 균
열의 파손 확률을 평가하는 절차를 확립하였다. 정립된
파손 확률 평가 절차를 이용하여 내압을 받는 관 내부
의 축방향 무한 균열에 대한 크리프 균열성장 파손 확
률을 평가하였으며, 주요 변수들이 파손 확률에 미치는
영향을 정량적으로 평가하기 위하여 민감도 분석을 수
행하여 파손 확률에 보다 지배적인 영향을 주는 변수를
결정하였다.

2. 이론적 배경

균열 선단에서의 크리프 균열성장률은 매개변수로는
 C_t 로 특성화하고 있다. 균일재의 경우 탄성-2차 크리
프 거동을 보이는 재료의 C_t 는 크리프 상수와 균열 크
기, 하중 조건으로부터 아래 식을 이용해 구할 수 있는
것으로 알려져 있다⁷⁾.

$$C_t = \frac{4\alpha\beta \tilde{r}_c(\theta, n)}{E(n-1)} \frac{(1-\nu^2)K^4}{b} \frac{F'}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} t^{\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (1)$$

윗 식에서 α, β 는 비례계수, \tilde{r}_c 는 크리프 영역의 형
상 함수, A 는 크리프 계수, n 은 크리프 지수, E 는
탄성계수, ν 는 포아송비, K 는 응력확대계수, t 는 시
간, b 는 시편의 폭을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 균

열 형상인 후속 압력관 내부의 축방향 무한 균열에서의
 C^* 는 J -적분과의 유사성에 의하여 EPRI 핸드북⁸⁾으로
부터 식 (2)와 같이 유도된다.

$$C^* = A(1-a/b)^{-n} a h_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} p \frac{R_i/b+a/b}{1-a/b} \right)^{n+1} \quad (2)$$

또한 이종 재료간의 접합 계면에 균열이 존재하는 경우
에 대한 확장된 C_t 를 평가하기 위하여 서로 다른 크리
프 물성을 가진 재료가 접합된 용접재의 접합 계면에
균열이 존재하는 CT 시편에 대하여 크리프 물성을 변
화시켜 가면서 다양한 유한요소해석을 수행한 결과 시
간에 따른 C_t 곡선에서 시간을 천이시간 t_T 로, C_t 를 C^*
로 무차원화 하면 Fig. 1와 같이 하나의 곡선으로 일치
한다는 것이 알려져 있다^{4,5)}. 이 때 천이시간 t_T 는 다
음 식으로부터 구할 수 있다.

$$t_T = \frac{K^2(1-\nu^2)}{(n+1)EC^*} \quad (3)$$

따라서 용접 접합 계면에서의 특정 시간 t 에서의 C_t
는 모재만으로 이루어진 단일재에서의 C_t 로부터 식
(4)와 같이 구할 수 있다.

$$(C_t)_{welded, t=(t)_{welded}} = \frac{(C^*)_{base}}{(C^*)_{welded}} \cdot (C_t)_{base, t=\frac{(t_T)_{base}}{(t_T)_{welded}}(t)_{welded}} \quad (4)$$

여기서 첨자 weld 는 용접재, base 는 모재, welded
는 이종 접합재를 의미한다. 혹은, 용접재만으로 이루
어진 단일재의 C_t 로부터는 식 (5)와 같이

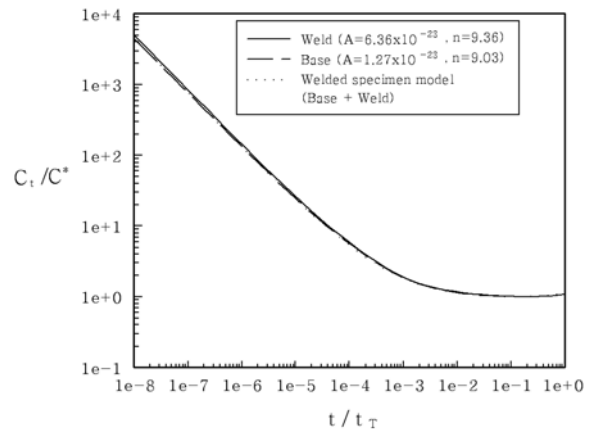


Fig. 1 Normalized C_t vs. time curve for welded specimen⁴⁾

$$(C_t)_{welded, t=(t)_{welded}} = \frac{(C^*)_{weld}}{(C^*)_{welded}} \cdot (C_t)_{weld, t=\frac{(t_T)_{weld}}{(t_T)_{welded}} \cdot (t)_{welded}} \quad (5)$$

구할 수 있다. 이 때 접합 계면에서의 C^* 는 아래 식 (6) 으로 정의된다.

$$(C^*)_{welded} = \frac{1}{2} [(C^*)_{base} + (C^*)_{weld}] \quad (6)$$

식 (4) 또는 식(5)를 이용하여 모재 혹은 용접재만으로 이루어진 재료의 C_t 매개변수로부터 용접 계면에서의 C_t 가 결정되면 식 (7)과 같은 크리프 균열성장식으로부터 균열성장률을 결정할 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = H \cdot C_t^q \quad (7)$$

이 때, H 와 q 는 크리프 균열성장 저항성을 나타내는 재료 상수이다.

3. 파손 확률 평가

3.1 해석 모델

해석에 사용된 모델은 538°C의 고온에서 사용되며 외부 반경 355.6 mm, 내부 반경 309 mm를 갖고 6.89 MPa의 내압을 받는 관의 내부 길이방향(seam) 용접부의 계면에 축방향으로 무한 균열이 존재하는 경우이며 크리프 균열성장에 의한 파손 확률을 예측하였다. Fig. 2에는 본 연구에서 사용된 내압을 받는 관 및 그 결함의 형상을 보여주었다. Table 1에는 압력관 재

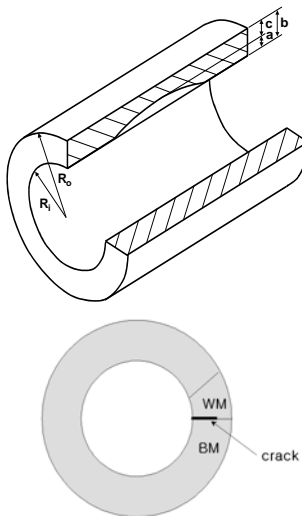


Fig. 2 Schematics of pressurized tube and associated crack

Table 1 Input values used in pressurized tube crack analysis.

Temp. (°C)	538
E (MPa)	140600
A (MPa ⁻ⁿ hr ⁻¹)	4.49E-20
n	8
H	1.66E-2
q	0.714
p (MPa)	6.89
R _o (mm)	355.6
R _i (mm)	309

료인 저합금강의 주요 기계물성과 본 해석에서 사용된 입력값을 나타내었다.

3.2 파손 확률 평가 절차

앞에서 언급한 바와 같이 크리프 균열성장 수명평가에 확률론적 방법을 적용하기 위해서는 입력 변수를 고정된 값이 아닌 분포를 가지는 값으로 입력하여야 한다⁹⁾. 본 연구에서는 크리프 균열성장률을 결정하는 변수 중 크리프 계수 A 와 크리프 균열성장 계수 H , 초기 균열길이 a_i 를 확률 변수로 가정하였다.

H 값은 기존의 문헌¹⁰⁻¹⁸⁾에 발표된 da/dt 와 C_t 의 관계 곡선을 디지털화하여 얻은 데이터를 가공하여 대수정규분포로 가정하여 상수를 결정하였다⁶⁾. 이 때 디지털화하여 얻은 데이터를 검토한 결과 용접재의 크리프 균열성장 물성은 모재와 큰 차이가 없으며, 용접재와 모재의 크리프 균열성장 물성의 차이를 고려할 수 있는 알려진 모델이 없으므로 용접재를 포함한 모든 수집된 H 값의 데이터로부터 결정하였다. 크리프 계수 A 는 기존 연구 결과로부터 충분한 수의 데이터를 얻기가 어려우므로 문헌에 의하여¹⁾ 대수정규분포로 가정하였고, 용접부의 크리프 계수 A 는 용접부에서 크리프 저항이 감소하는 일반적인 경향을 고려하여 임의의 값으로 가정하였다. 초기균열길이는 문헌을 참고하여¹⁾ 지수분포로 결정하였다. 이상과 같이 결정된 확률변수의 분포형태와 입력값을 Table 2에 정리하였다. 결정된 확률 분포를 바탕으로 각 변수가 결정된 확률밀도함수를 따르도록 난수를 추출하였다. 추출된 난수와 입력값들을 이용하여 앞에서 설명한 방법으로 균열성장 속도를 계산하였다. 균열이 임계균열길이보다 커지면 수명이 다하여 파손하는 것으로 판단하여 크리프 균열성장 수명평가를 수행하였으며 예정된 전체 시뮬레이션

Table 2 Probabilistic variables used in pressurized tube crack analysis.

Probabilistic Variable		Probability Density Function	Mean	Standard deviation
Base	A	Log-normal	4.49E-20	2.00E-20
	H	Log-normal	1.66E-2	1.55E-2
Weld	A	Log-normal	5.50E-20	3.00E-19
	H	Log-normal	1.66E-2	1.55E-2
a_i		Exponential	5	-

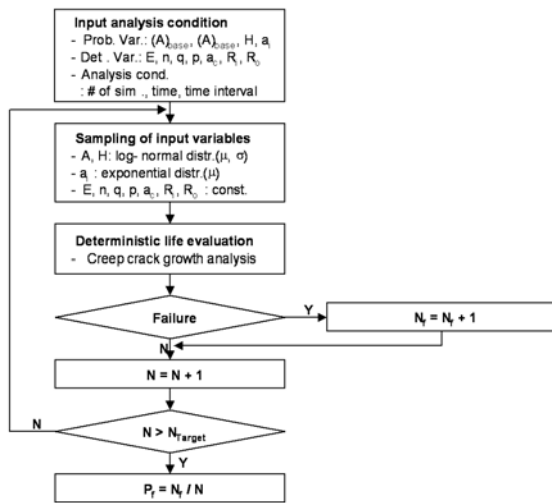


Fig. 3 Flowchart of Monte Carlo simulation

횟수만큼 반복 수행하였다. 본 해석에서는 균열 깊이가 두께의 75%까지 성장하는 경우 파손이 발생하는 것으로 판단하였다. 파손이 발생할 경우 발생할 때까지의 사용 시간을 기억하여 저장하였으며 특정 시간에서의 기억된 파손 횟수를 전체 시뮬레이션 횟수로 나눈 값을 그 시간에서의 파손 확률로 정의하였다. 이러한 전체 프로그램의 순서도를 Fig. 3에 나타내었다.

3.3 해석 결과

Fig. 4 에는 앞에서 설명한 해석조건에서 수행된 몬테카를로 모사법을 이용한 경계면 균열에서의 가동 시간에 따른 재료의 파손 확률을 각각 용접재와 모재만으로 구성된 단일재의 파손 확률 및 결정론적 수명평가에 의한 파손수명과 비교하여 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 크리프에 대한 저항이 작은 용접재의 파손 확률이 모재의 파손 확률보다 큰 값을 나타내며, 경계면 균열에서의 파손 확률은 시간의 경과에 따라 용접재와 모재의 파손 확률의 사이값을 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한, 결정론적 해석에서 평가된 경계면

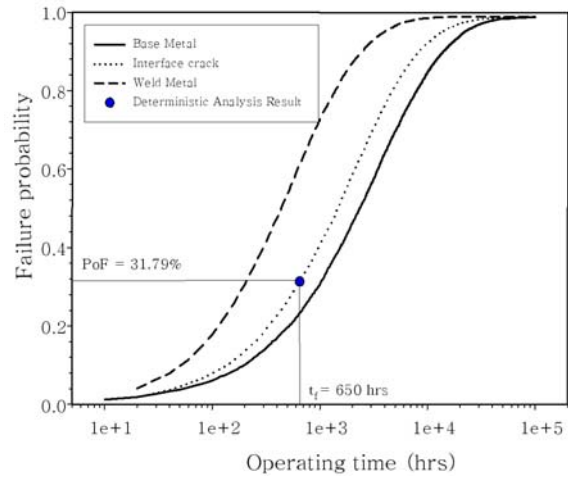


Fig. 4 Failure probability of interface crack

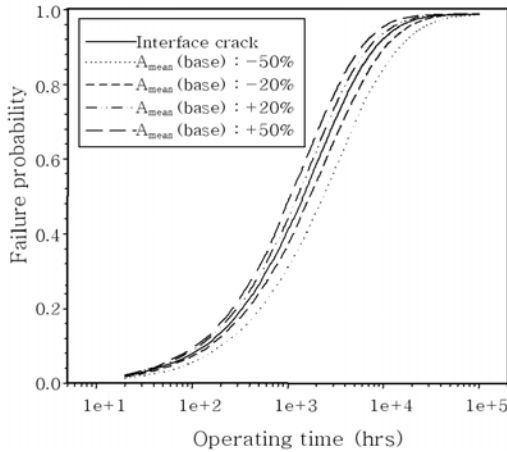
균열에서의 파손수명 650시간에서의 파손 확률은 약 31.79%로 상당히 보수적인 결과를 보이고 있다.

3.4 민감도 분석

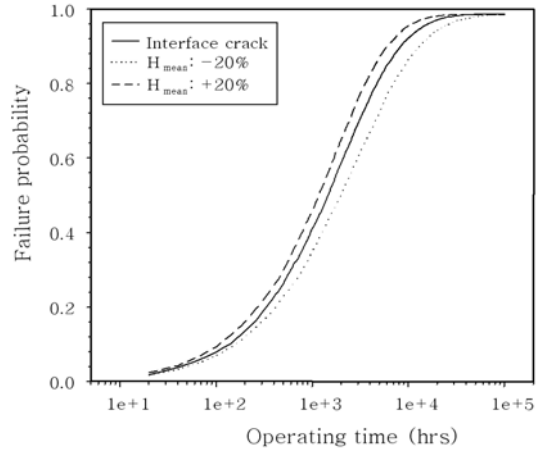
주요 변수들이 파손 확률에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 파손 확률에 보다 지배적인 영향을 주는 변수를 파악하기 위하여 주요 변수의 값을 변화시켜 가면서 시간에 따른 파손 확률을 평가하는 민감도 분석을 수행하였다. Table 3 에는 민감도 분석에 사용된 변수와 그 변화량을 나타내었다. Fig. 5(a), (b) 에는 각각 확률변수인 모재부의 A 값과 H 값에 대한 민감도 분석 결과를 나타내었고, Fig. 5(c) 에는 결정변수인 탄성계수 E, 내압 p, 크리프 균열성장 지수 q 값에 대한 민감도 분석의 결과를 경계면 균열의 기본 모델의 파손 확률과 비교하여 나타내었다. Fig. 5(d) 에는 민감도 분석의 결과를 정량적으로 알 수 있도록 결정론적 수명 해석에서의 파손 수명인 650 시간에서의 파손 확률을 기준으로 파손 확률의 변량을 정리하였다. Fig. 5(d) 에서 보는 바와 같이 운전 조건인 내압 p 가 파손 확률에 가장 큰 영향을 주는 것으로 평가되었으며, 크리프

Table 3 Variation range of parameters used in sensitivity analysis

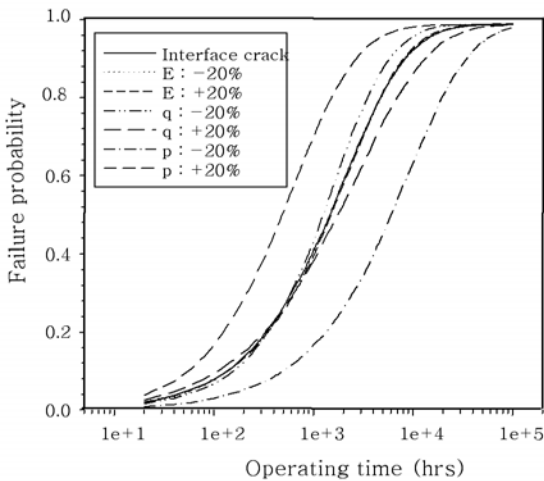
Variable		Variation range
Probabilistic Variables	A_{mean} (base)	$\pm 20\%$, $\pm 50\%$
	H_{mean}	$\pm 20\%$
Deterministic Variables	q	$\pm 20\%$
	p	$\pm 20\%$
	E	$\pm 20\%$



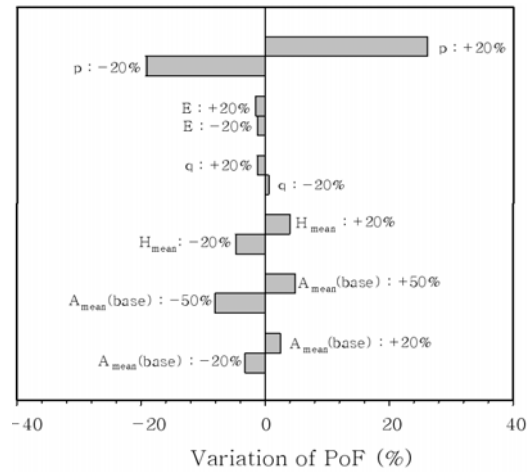
(a) Failure probability for various PDF of creep coefficient, A



(b) Failure probability for various PDF of CCG coefficient, H



(c) Failure probability for various E , q and p values



(d) Comparison of PoF variation

Fig. 5 Sensitivity analysis of interface crack

균열성장 계수 H , 크리프계수 A 의 평균값이 다음으로 중요한 영향을 주는 것으로 판단되었다. 반면 탄성계수는 파손 확률에 영향을 거의 주지 않았으며, 크리프 균열성장 지수 q 값은 가동 초기보다는 후기에서의 파손 확률에 더 많은 영향을 주는 것으로 해석되었다. 선형 좌표계에 표현되는 내압, 탄성계수 등과 멱함수 형태로 대수 좌표계에 표시되는 크리프 계수나 크리프 균열성장 계수 등의 민감도 분석을 같은 변화율 범위로 놓고 민감도 분석을 수행하였으므로 실제 크리프 계수나 크리프 균열성장 계수의 중요성은 Fig. 5(d)에서 보는 것보다는 훨씬 클 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 축방향 무한균열이 저합금강 소재의 내압을 받는 관 내부의 용접부 경계면에 존재하는 경우

에 대하여 몬테카를로 모사법을 이용한 확률론적 잔여 수명 수명평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 몬테카를로법을 이용하여 고온에서 사용되는 후속 내압관의 내부 경계면 균열에서의 크리프 균열성장에 의한 파손 확률을 평가하는 방법을 제시하였다. 기존의 결정론적 수명평가법으로부터 얻은 잔여수명 평가 결과는 상당히 보수적인 것으로 나타났다.

2) 확률변수의 민감도를 평가하기 위하여 민감도 분석을 수행하였으며, 내압과 크리프 균열성장 계수, 크리프 계수의 순서로 파손 확률에 민감한 영향을 주는 것으로 해석되었다.

3) 본 연구의 결과를 응용하면 위험도 기반 검사(RBI, risk based inspection)의 정량적인 해석시 파손 빈도가 높은 설비의 파손 확률을 예측할 수 있으며,

부족한 파손 확률 일반 데이터(generic data)를 보완하는 기법에 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 전력산업기반기금 전력산업 연구개발사업인 "화력발전소 위험도 기반 진단 절차 개발" 과제(R-2004-1-134)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. Sundararajan : Probabilistic Structural Mechanics Handbook (1995), Champman & Hall
2. D. O. Harris : A Probabilistic Fracture Mechanics Computer Code for Piping Reliability Analysis (1992), research report, NUREG/CR-5864
3. J. S. Lee and K. B. Yoon : Evaluation of Creep Crack Growth Failure Probability for High Temperature Pressurized Components Using Monte Carlo Simulation, submitted
4. K. B. Yoon and K. Y. Kim : High temperature fracture parameter for a weld interface crack, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, **32** (1999), 27-35
5. K. B. Yoon and J. S. Lee : Characterization of Creep Fracture for Weld Fusion Line Cracks, Key Engineering Materials, **171-174** (2000), 43-50
6. K. B. Yoon, T. G. Park, A. Saxena : Creep crack growth analysis of elliptic surface cracks in pressure vessels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, **80** (2003), 465-479
7. J. L. Bassani, D. E. Hawk and A. Saxena : Evaluation of the C_t Parameter for Characterizing Creep Crack Growth Rate in The Transient Regime, ASTM STP **995** (1986), 7-26
8. V. Kumar, M. D. German and C. F. Shih : An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis (1981), EPRI NP 1931
9. A. H.S. Ang and W. H. Tang : Probability Concepts in Engineering Planning and Design (1984), John Willey & Sons
10. R. Viswanathan : Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components (1989), ASM International
11. A. Saxena, J. Han, K. Banerji : Creep crack growth behavior in power plant boiler and steam pipe steels", Journal of pressure Vessel Technology Transaction ASME, **110** (1998), 137-146
12. K. B. Yoon, A. Saxena and P. K. Liaw : Characterization of creep fatigue crack growth behavior under trapezoidal waveshape using C_t -parameter, International Journal of Fracture, **59** (1993), 95-114
13. R. H. Norris, A. Saxena : Creep crack growth behavior in chromium molybdenum steel weldments, Mater Ageing Component Life extension, **I** (1995), 713-723
14. M. Tabuchi, K. Kubo, K. Yagi : Effect of specimen size on creep crack growth rate using ultra-large CT specimens for 1Cr-Mo-V steel, Engineering fracture mechanics, **40-2** (1991), 311-321
15. A. Saxena, K. Yagi, M. Tabuchi : Crack growth under small scale and transition creep conditions in creep-ductile materials, ASTM STP **1207** (1994), 381-497
16. P. S. Grover, A. Saxena : Characterization of creep fatigue crack growth behavior in 2.25Cr-1Mo steel using $(C_t)_{avg}$, International journal of fracture, **73** (1995), 273-286
17. A. Saxena : Creep fatigue crack growth in power plant materials and components, Adv Fracture Res, ICF9, **1** (1997), 51-62
18. P. S. Grover, A. Saxena : Modeling the effects of creep fatigue interaction on crack growth, Fatigue and fracture of engineering materials and structures, **22** (1999), 111-122