◉ 論 文

차원해석법에 의한 고온피로 파괴 모델의 기초적 연구

서 창 민* · 김 영 호** · 권 오 헌***

(1991년 2월 10일 접수)

A Basic Study on Fatigue Fracture Model at Elevated Temperatures by the Dimensional Analysis Method

Chang-Min Suh · Young-Ho Kim · O-Heon Kwon

Key Words : Dimensional Analysis(차원해석), Arrhenius Type Equation(아레니우스형의 식), Activation Energy(활성화 에너지), Fracture Mechanics(파괴역학), Fatigue Crack Growth Rate(피로균열 성장률), J-integral(J적분), Elevated Temperatures(고온)

Abstract

The main purpose of this study is to derive a law of fatigue crack growth rate in the region of elastic or elasto-plastic fracture mechanics at elevated temperatures through the application of dimensional analysis. An equation of elasto-plastic fatigue crack growth rate at elevated temperatures appeared a new Arrhenius type equation containing J-integral range and absolute temperature. The elastic or elasto-plastic crack growth rate equation shows a fairly good agreement with the experimental results for Cr−Mo−V rotor steel and Hastelloy−X alloy in the comparatively wide temperature ranges.

Nomenclature

a : Crack length
B, C : Constants
E : Elastic Young's modulus
FLTθ : Force, Length, Time, Temperature System
K : Stress intensity factor
MLTθ : Mass, Length, Time, Temperature System
N : Number of cycles
n : Strain hardening exponent
Q : Activation Energy
R : Gas constant
r : $1+\lambda$
T : Absolute temperature(°K)
$\triangle\sigma$: Stress range

* 경북대학교 기계공학과 교수
** 마산대학교 생산기계공학과 교수
*** 경북대학교 공대

$\triangle J$: J integral range
$\triangle K$: Stress intensity factor range
$\triangle \varepsilon$: Stain range
λ, η : Real number
γ : Surface energy
σ_y : Yield strength

1. 서 론

차원해석법은 어떠한 물리적 현상에 대한 관계식을 얻고자 할 때 실험과 병행하거나 기존의 경험식과 함께 활용하면 손쉽고 빠르게 관계식을 구하거나 현상에 대한 이해를 쉽게 할 수 있다. 특히 잘 알려져 있지 않은 현상에 대한 관계식을 해석적인 방법으로 직접 얻기 곤란한 경우에 차원 해석이 아주 손쉽고 빠르기 때문에 여러 연구자들이 많이 이용하여 왔음에도 불구하고 파괴역학 분야에서만은 거의 응용되지 못하고 있다.

Wagner[1]와 Navarro들[2]은 각각 π정리와 무차원 변수를 이용하여 그리피스(Griffith)식[3]과 Paris 식[4]을 유도하였을 정도이며 차원해석법의 적용은 파괴역학의 기초문제에 국한되어 초기단계에 있으며, 고온하에서의 피로균열의 성장거동을 연구하는 데 차원해석법을 이용한 연구는 아직 없는 것 같다. 또한 특정 온도하에서의 피로균열의 성장률의 실험 및 해석은 많으나, 온도변수를 고려한 일반화된 균열성장 법칙의 적용예는 극히 드물다. 최근 저자들은 차원해석법에 의한 파괴역학적 문제에의 활용에 관한 일련의 연구결과를 발표한 바 있다.[5-7]

그러므로 본 논문에서는 차원해석을 파괴분야에도 체계적으로 적용하려는 시도를 함으로써 앞으로 강력한 해석도구로서의 활용가능성을 새롭게 부각시키고자 한다. 여기서는 로터(rotor)강과 Hastelloy-X합금의 시험편을 대상으로한 고온피로의 실험결과[8-10]를 토대로 차원해석법을 도입시켜 고온하의 균열성장률을 유도한 다음 온도 T와 응력확대 계수범위 $\triangle K$ 또는 J 적분범위 $\triangle J$와의 함수인 아레니우스형태의 식(Arrhenius type equation)을 유도하였다. 여기서 특히 종전의 연구에서 아레니우스 형태의 식이 탄성파괴역학 매개변수 $\triangle K$로만 표현되었으나, $\triangle J$나 함수로도 정식화를 이룰수가 있으므로 탄소성파괴역학의 범위까지 확장하였다. 그리고 유도된 균열 성장법칙을 실험결과와 비교검토하여 본 연구에서 유도된 이 균열 성장법칙의 타당성을 검토하였다.

2. 차원해석법의 적용

2.1 피로 파괴 모델

Fig. 1과 같이 등방성재질로 이루어진 단위 두께의 무한평판에 $\triangle\varepsilon$(또는 $\triangle\sigma$)의 반복 하중이 일정한 주파수 dN/dt로 가해지며 무한평판 및 주위는 온도 T의 등온상태를 이루고 있다고 가정하자.

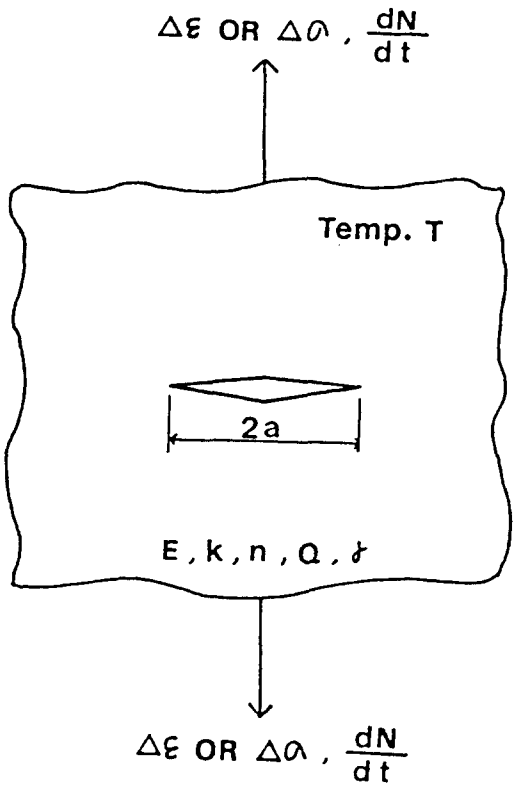

Fig. 1 Fatigue crack model at elevated temperature

고려범위를 고온 탄소성 영역으로 제한하기 위해 dN/dt는 모델에 발생하는 크리프 현상을 무시할 수 있을 정도의 속도로 일정하게 유지한다면 식(1)과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$f(da/dN,\ \triangle\sigma,\ \triangle\varepsilon,\ dN/dt,\ E,\ \gamma,\ k,\ n,\ \sigma_y,\ Q,\ RT,\ a)=0 \quad (1)$$

2.2 Buckingham의 II정리에 의한 해석

파괴역학과정은 질량보다는 힘에 의존하는 현상이므로 식(1)에 Buckingham의 Π정리를 적용하기 위해서는 MLTθ 차원 시스템을 쓰는 것이 Π정리 적용시 변수들의 차원파악이 용이하고 지수식이 비교적 간단하게 정의된다.

△ε 및 n은 무차원 변수이므로 Π정리를 적용할 필요가 없으며 이를 제외한 10개의 변수들에 대해 Π정리를 적용하여 4개의 차원독립 변수를 dN/dt, γ, RT, a로 정하고 6개의 무차원 변수는 i를 1에서 6사이의 정수라 하며 식(2)로 된다.

$$\begin{aligned}\Pi_i&=(dN/dt)^{xi}(\gamma)^{yi}(RT)^{zi}(a)^{wi}(X_i)\\&=(T^{-1})^{xi}(FL^{-1})^{yi}(FL^{-2}\theta)^{zi}(L)^{wi}[D(X_i)]\\&=F^0L^0T^0\theta^0\end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $D(X_i)$는 반복변수 X_i의 차원이며 식(3)과 같다.

$$D(X_i)=(F)^{Fi}(L)^{Li}(T)^{Ti}(\theta)^{\theta i} \quad (3)$$

i=1－6일때 식(3)의 F_i, L_i, T_i, θ_i를 계산하여, x_i, y_i, z_i, w_i를 구한 결과는 Table 1과 같다. 본 연

Table 1 Dimensioless π parameters

i	1	2	3	4	5	6
x_i	0	0	0	0	0	0
y_i	0	−1	−1	−1	−1	0
z_i	0	0	0	0	0	−1
w_i	−1	1	1	1	1	0
π paramet.	$\pi_1=da/adN$ $\pi_3=aE/\gamma$ $\pi_5=a\triangle\sigma/\gamma$ $\pi_2=a\triangle\sigma/\gamma$ $\pi_4=ak/\gamma$ $\pi_6=Q/RT$					

구에서 크리프 현상은 다른 인자들(예로써 반복응력 △σ에 의한 dN/dt가 큰 경우)에 비해 영향이 작은 탄소성 문제만을 고려대상으로 하므로 dN/dt나 π_7에 의한 영향을 무시하기로 한다. 또한 변형율 범위 △ε은 탄성성분과 소성성분의 합이므로 식(4)로 나타낼 수 있는 종속변수이므로 생략 가능하다.

$$\begin{aligned}&\triangle\varepsilon=\triangle\varepsilon_e+\triangle\varepsilon_p=(\triangle\sigma/E)+(\triangle\sigma/k)^{1/n}\\&\triangle\varepsilon=f(\triangle\sigma,\ E,\ k,\ n)\end{aligned} \quad (4)$$

이상의 결과를 무차원 매개변수의 지수 승 및 그들의 곱으로 가정한다면 식(5)와 같이 표현 가능하다.

$$\frac{1}{a}\frac{da}{dN}=C\left(\frac{a\triangle\sigma}{\gamma}\right)^{\alpha}\left(\frac{aE}{\gamma}\right)^{\beta}\left(\frac{aK}{\gamma}\right)^{x}\left(\frac{a\sigma_y}{\gamma}\right)^{y}\left(\frac{Q}{RT}\right)^{z}(n)^{w} \quad (5)$$

여기서 α=m, β=−1/2m, x+y=−1, w는 임의의 값이며, 즉 z=−(Q/RT)/ln(Q/RT)일 경우 고온하 선형 탄성 파괴역학(LEFM)의 피로파괴식인 Paris-Arrhenius 복합형태의 식(6)으로 나타내어짐을 알 수 있다.

$$\frac{da}{dN}=C(\triangle K)^m\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

2.3 탄소성 파괴역학(EPFM)의 응용

식(5)에서 지수를 적절히 선택하여 고온하 탄소성영역에서의 균열성장식을 결정하기 보다는 EPFM의 역학적 매개변수인 J－적분의 범위 △J 및 δ(CTOD : 균열선단 개구변위)로서 da/dN을 나타내는 것이 더 바람직해 보인다. 따라서 우선 식(1)에서 dN/dt 및 △ε을 제외하면 고온하 EPFM의 균열성장법칙은 식(7)로 표현이 가능하다.

$$f(da/dN,\ \triangle\sigma,\ E,\ \gamma,\ K,\ n,\ \sigma_y,\ Q,\ RT,\ a)=0 \quad (7)$$

또한 사용 응력 대 인장강도의 비, 즉 σ/σ_u가 낮을 경우 식(8)로 표시 가능하다[11]. 또한 J는 식(10)과의 관계가 있다.

$$\delta\simeq\frac{K^2}{2E\sigma_u}+\frac{\pi}{2}\frac{K^2\triangle\varepsilon_p}{\sigma_u^2(1+n)} \quad (8)$$

$$\delta=f(k,\ \sigma_u,\ E,\ \triangle\varepsilon_p,\ n)$$

$$=f(\triangle\sigma,\ a,\ E,\ \sigma_u,\ \triangle\varepsilon_p,\ n) \quad (9)$$

$$J \propto \sigma_y\delta \quad (10)$$

따라서 식(7), (9), (10)을 서로 비교하여보면 식(10)은 $\triangle\sigma$, E, K, n, σ_y, a등의 변수들이 전부 식(9) 및 (10)에 반영되어 있고 또한 J적분 및 δ가 탄소성역에서 파괴역학적 매개변수이므로 이를 이용하면 식(11)과 같이 정리 가능하다.

$$f(da/dN,\ \gamma,\ \triangle J,\ \delta,\ Q,\ RT)=0 \quad (11)$$

식(11)에 Buckingham의 Π정리를 적용하여 앞에서와 같은 방법으로 정리하면 Table 2과 같다.

Table 2 Dimensionless π parameters

i	1	2	3
x_i	0	−1	0
y_i	−1	0	0
z_i	0	0	−1
Dimensionless π parameters	$\pi_1=\frac{1}{\delta}\frac{da}{dN}$	$\pi_2=\frac{\triangle J}{\gamma}$	$\pi_3=\frac{Q}{RT}$

즉 6개의 변수와 3개의 독립차원 및 3개의 무차원 Π 매개변수가 존재한다. 식(11)을 무차원 Π 매개변수의 지수승 및 그들의 곱으로 가정한다면 식(12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{\delta}\frac{da}{dN}=C\left(\frac{\triangle J}{\gamma}\right)^{\lambda}\left(\frac{Q}{RT}\right)^{\eta} \quad (12)$$

식(10)에서 $\delta \propto \triangle J/\sigma_y$인 관계이므로 식(12)에 대입한 후 σ_y 및 γ를 상수속에 포함시키면 식(13)와 같이 표현이 가능하다[11].

$$\frac{da}{dN}=B(\triangle J)^{r}\left(\frac{Q}{RT}\right)^{\eta} \quad (13)$$

여기서 $r=1+\varepsilon$, B : 상수

식(13)에서 $Q=Q(\triangle J)$이면, 주어진 재료에 대해 균열성장은 $\triangle J$, T만의 함수로 되며 식(14)와 같은 아레니우스 형태 식으로 취할 수 있다. 또 ln(da/dN)은 식(15)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{da}{dN}=C(\triangle J)^{m}\exp-\frac{Q_a-\alpha\ln\triangle J}{RT} \quad (14)$$

$$\ln(da/dN)=f(\triangle J,\ T) \quad (15)$$

이것은 열역학적 관계의 응용에서 자주 사용되는 순환관계(cyclic relation)인 식(16)이 성립한다.

$$\left.\frac{\partial \ln(da/dN)}{\partial \ln \triangle J}\right|_{1/T}\cdot\left.\frac{\partial \ln \triangle J}{\partial(1/T)}\right|_{\ln(da/dN)}\cdot\left.\frac{\partial(1/T)}{\partial \ln(da/dN)}\right|_{\ln\triangle J}=-1 \quad (16)$$

균열성장률 da/dN가 오직 온도 T와 $\triangle J$만에 의존한다는 가정을 유용하게 확인할 수 있는 것은 3개의 편미분 값이 실험적인 데이타에서 측정하므로써 식(16)의 관계식이 증명된다. 여기서 각 항은 식(17), (18), (19)의 형태로 되며 식(16)이 성립함을 알 수 있다.

$$\left.\frac{\partial[\ln(da/dN)]}{\partial(\ln \triangle J)}\right|_{1/T}=m+\frac{\alpha}{RT}\ln e \quad (17)$$

$$\left.\frac{\partial(\ln \triangle J)}{\partial(1/T)}\right|_{\ln(da/dN)}=\frac{(Q_o-\alpha\ln\triangle J)}{R(m+\alpha/RT)} \quad (18)$$

$$\left.\frac{\partial(1/T)}{\partial[\ln(da/dN)]}\right|_{\ln\triangle J}=-\frac{R}{Q_o-\alpha\ln\triangle J} \quad (19)$$

3. 실험결과의 적용예 및 고찰

Fig. 2는 Cr−Mo−V강에 관한 Liaw등에 의한

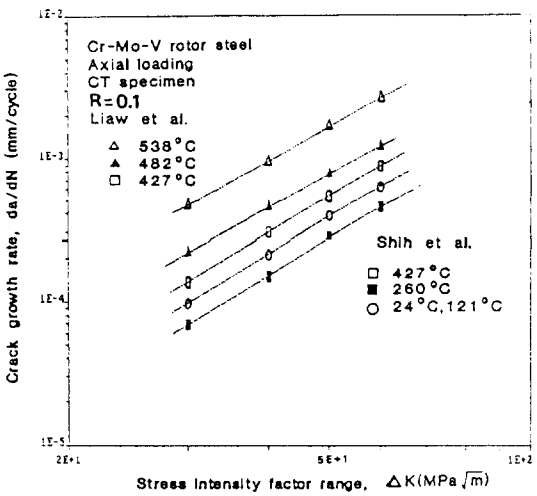

Fig. 2 Fatigue crack growth rate properties for Cr−Mo−V rotor steel at various temperature in air[8,9]

실험결과[8]와 Shih들의 실험결과[9]를 동시에 나타낸 것이다. 즉 두 실험결과는 실험조건도 거의 같고 공통 실험온도인 427℃에서는 △K에 따른 균열의 성장속도가 같게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서는 Liaw등[8]의 260℃와 427℃의 실험결과 데이타와 Shih등[9]의 427℃와 482℃, 538℃의 결과 데이타를 결합시켜 260℃에서 538℃의 온도 범위에 대한 실험 데이타로 이용하였다. 또한 탄소성 파괴역학적 개념을 실험결과에 적용하기 위하여 높은 연성과 낮은 강도를 가진 가스터빈 등에 쓰이는 Hastelloy-X 합금[10]인 Fig. 3의 실험결과를 이용하였다.

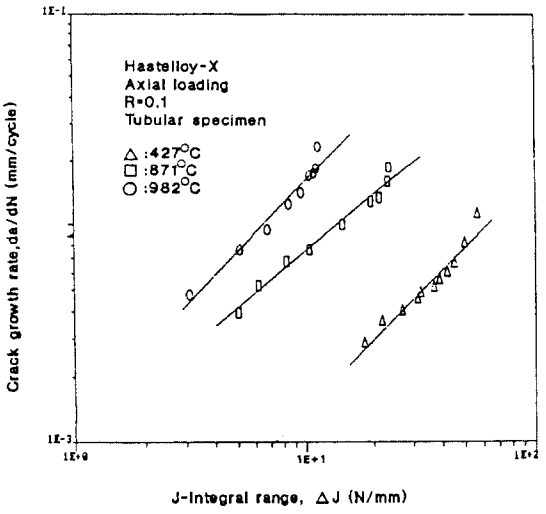

Fig. 3 Fatigue crack growth rate properties for Hastelloy-X at various temperature[10]

Fig. 2의 균열성장률의 데이타를 이용하여 1/T에 대한 균열성장률의 관계로 정리하면 Fig. 4와 같으며 일정한 △K에 대하여 데이타 점들을 최소자승법으로 직선화하였다. 이 경우 고온측, 즉 1000/T가 1.2근방에서 두드러진 비선형성을 보이고 있는 것은 일반금속의 통상적인 특성이나 근사적으로 직선화하였다. 이 직선들은 차원해석으로 유도한 식과 같은 아레니우스 형태의 식으로 나타낼 수 있으며 고온하의 피로균열성장률에 필요한 에너지는 아레니우스 형태의 식으로 활성화에너지와 연관시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉 식(6)에 양변에 대수를 취하면 식(20)와 같이 된다.

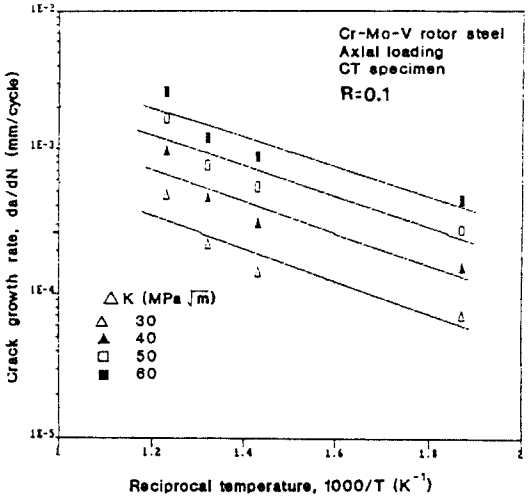

Fig. 4 The temperature dependence of fatigue crack growth rate on various constant △K values for Cr-Mo-V rotor steel

$$\ln \frac{da}{dN} = \ln A(\triangle K) - \frac{Q(\triangle K)}{RT} \qquad (20)$$

우변의 첫항이 온도와 무관하다고 하면 활성화에너지는 식(18)을 이용하여 Fig. 4와 같은 그림의 기울기로 부터 구할수 있다.

$$Q(\triangle K) = -R[\partial \ln(da/dN/\partial(1/T)] \mid_{\triangle K=const} \qquad (21)$$

즉 식(21)에서 활성화에너지 Q(△K)는 Fig. 4에서 일정한 △K에 관한 직선의 기울기에 해당되고 Q는 △K의 함수이다. 이와같은 ln△K와 Q와의 관계를 Fig. 5에 나타내고 최소자승법으로 직선화하면 식(22)과 같다.

$$Q(\triangle K) = Q_o - \alpha \ln \triangle K \qquad (22)$$

단 Cr-Mo-V 강의 $Q_o = 7125$, $\alpha = 1333$

Fig. 5의 △K가 증가 할수록 활성화 에너지는 선형적으로 조금씩 줄어들며 피로균열 성장률은 고온에서 금속의 열확산과정에 의하여 영향을 받는다는 것을 의미한다. 그리고 함수 A(△K)는 Fig. 3의 da/dN과 1/T의 그래프상에서 수직축과의 교점에서 구해진다. 여기서 구한 △K에 따른 활성화 상수 A는 Fig. 6에 나타내고 최소자승법에 의해 직선화하면 식(23)과 같다.

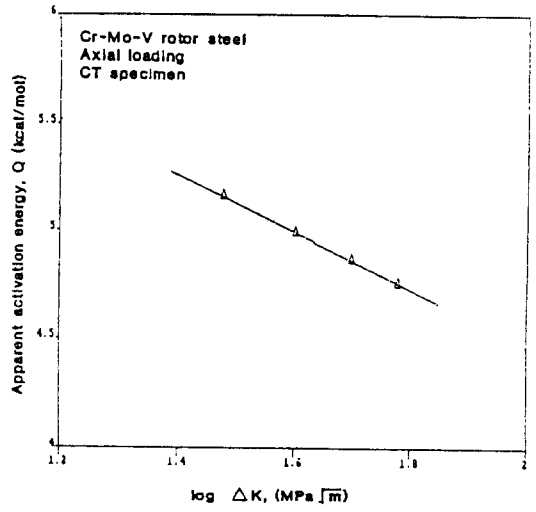

Fig. 5 The △K dependence of the apparent activation energy for Cr−Mo−V rotor steel

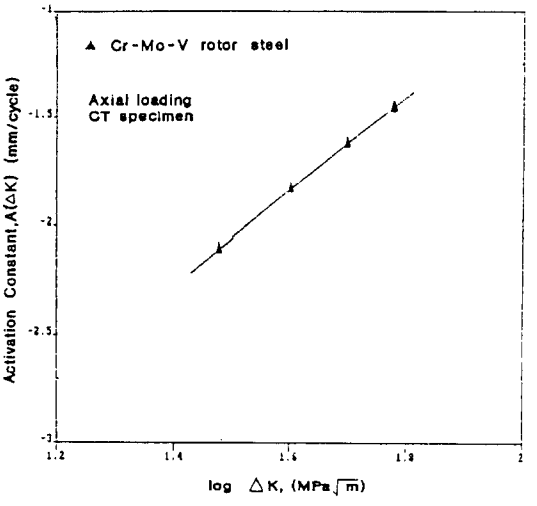

Fig. 6 The △K dependence of the activation constant for Cr−Mo−V rotor steel

$$A(\triangle K)=A_o\triangle K^m \qquad (23)$$

단 Cr−Mo−V강의 $A_o=4.797\times10^{-6}$, m=2.174

따라서 식(22), (23)을 식(6)에 대입하면, 식(24)과 같은 최종적인 아레니우스 형태의 피로균열 성장식을 얻을 수 있다.

$$\frac{da}{dN}=A_o\triangle K^m \exp-\frac{Q_o-\alpha\ \ln\triangle K}{RT} \qquad (24)$$

단 Cr−Mo−V 강의 $A_o=4.797\times10^{-6}$,
m=2.174, Q=7125, α=579

또한 식(24)을 정리하면 파리스 식의 형태인 식(25)로도 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN}=B\triangle K^n \qquad (25)$$

단 Cr−Mo−V 강의 B, n는 아래와 같다.

$$B=4.797\times10^{-6}\exp-\frac{7125}{RT},\ n=2.174+\frac{579}{RT}$$

식(20−25)와 같은 동일한 과정으로 탄소성 파괴역학적 매개변수 J를 관련시켜 최종적으로 구하면 아레니우스형태의 결과식은 식(26)로 나타내어진다.

$$da/dN=2.685\times10^{-2}(\triangle J)^{0.8986}\exp-\{[7501-207.4\ \ln(\triangle J)]RT\} \qquad (26)$$

식(26)은 본 연구의 해석연구에서 각각의 온도에서 식(27)과 같은 형태로 표현 가능하며 이 때의 B 및 n은 각각 아래의 관계가 성립한다.

$$da/dN = B\triangle J^n \qquad (27)$$

$$B=2.685\times10^{-2}\ \exp-(7501/RT)$$

$$n=0.8986+207.4/RT$$

식(25) 또는 (27)에서 상수 B와 n은 온도만의 함수이므로 △K와 온도 T만 주어지면 설계에 필요한 특정온도에서의 균열성장속도를 외삽법과 내삽법으로 구할 수 있으므로 고온기기 설계 응용에 유용한 식으로 평가된다.

이와같이 유도된 균열성장속도식은 온도의 변수를 포함하는 하나의 파리스형태의 식으로 표시되어 각 실험 온도에 따라 달리 표시되었던 것이 통일적으로 정리가능함을 알수있다. Fig. 7, 8은 로터강인 경우 약 500−800°K, Hastelloy−X의 경우 700−1200°K범위에서 실험식과 유도된 식의 결과를 그림상에서 서로 비교한 것으로 양자간 비교적 양호한 일치를 보이고 있다.

이상과 같이 온도와 파괴역학적 파라미터로 균

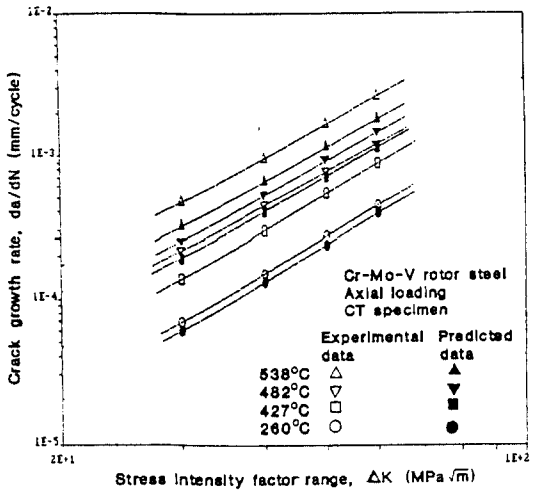

Fig. 7 Comparison of experimental and predicted fatigue crack growth rate for Cr−Mo−V rotor steel

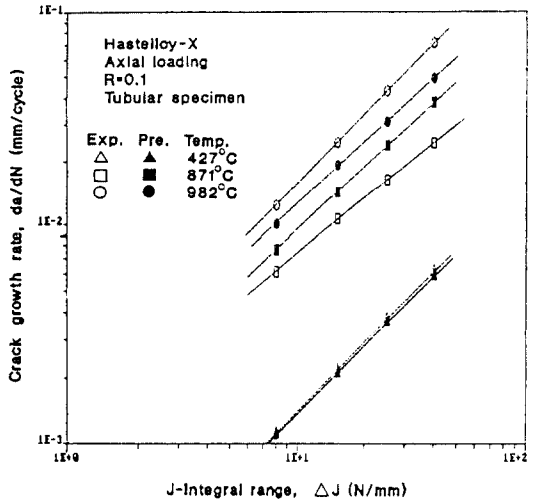

Fig. 8 Comparison of experimental and predicted fatigue crack growth rate for Hastelloy-X

열성장률 식을 나타낸 결과 피로균열의 성장률이 열적으로 활성화과정에 의하여 제어되며, 이 활성화 에너지는 균열선단의 응력 확대계수 범위 또는 J적분범위에 강한 의존성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 피로시험에서는 짧은 시간의 실험결과를 이용하여 장시간의 피로거동을 예측할 수 있어야 한다. 따라서 고온에서 온도의 영향은 균열성장률 특성에 중요한 파라미터이며 균열성장거동에 관한 온도의 영향에 관한 역학적인 관계를 이해하는 것에는 실험결과를 외삽법과 내삽법에 대한 기초를 제공하는 것은 필수적이다.

Kocanda[12]에 의하면 54개의 균열성장식이 언급되고 있다. 이 모든 식들은 제한된 범위에서는 적합한 식으로 간주되나, 때로는 균열성장 특성관계가 서로 모순이 되는 경우도 있다. 이와 같이 많은 식이 언급되고 있다는 것은 역학적 특성이 명쾌하게 해결되지 않고 있으며 피로파괴 현상이 너무도 복잡한 문제임을 의미한다. 그러므로 파괴현상에 관한 완전해가 아직 알려져 있지 않으므로 이를 알기 위하여 차원해석을 파괴현상에 적용하는 것은 차원해석 고유의 목적과 부합되며 따라서 그 기본적인 의미가 있으므로 앞으로 더욱더 연구가치가 있는 분야로 판단된다.

이 분야가 제대로 발전될 경우 궁극적으로는 피로특성 규명과 물질의 파괴현상에 관한 완전해를 구할 수 있을지도 모르며 그 원동력이 될 가능성을 배제하지 못한다. 최소한 유체역학에 중요한 무차원 변수 Reynold Number 등과 같은 의미있는 무차원 π 매개변수들의 확립을 통하여 파괴현상 및 그 실험에 대한 이해를 깊게 할 수 있을 것이며, 현재까지 실험 또는 분석으로 인하여 밝혀진 파괴현상들은 통합적으로 취급하여 균열성장법칙을 연구하는 자연스러운 방법중의 하나가 차원해석적인 방법이 아닌가 생각된다. 크게 보아 차원해석을 궁극적 목적이 어떠한 물리적 현상의 완전해를 구하기 위한 것이며 그 기본 과정이 차원에 대한 기본 개념을 견지함과 동시에 현재까지 밝혀진 모든 경험과 지식을 충분히 이용한다는 점에서 차원해석법의 파괴현상에의 적용은 지극히 자연스러운 것으로 생각된다.

4. 결 론

로터 강과 Hastelloy−X강의 시험편의 고온피로 시험 결과를 이용하여 차원해석법으로 온도변화에 따른 피로균열 성장법칙인 아레니우스 형태의 식을 유도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 차원해석법으로 균열성장거동에 영향을 미치는 온도 변수를 고려하여 아레니우스 형태인 피로균열 성장법칙을 유도한 하나의 식으로 통일적 정리가 가능하였다.

2) 차원해석법으로 유도된 균열성장률은 파리스 형태의 식만으로 표시 가능하였다.

3) 실험결과에서 얻은 피로균열 성장률 식과 차원해석법으로 유도된 식은 로터강인 경우 500°-800°K, Hastelloy-X의 경우 700°-1200°K의 온도 범위에서 비교한 결과 상당히 잘 일치하였다.

4) 차원해석법을 이용하여 고온하에서의 피로균열 성장거동을 연구할 때 금속학적 요소와 환경적 영향을 고려한다면 효율적인 균열성장 특성을 구할 수 있다.

참 고 문 헌

1) Wagner, H. D., "On the Use of Dimensional Analysis in Material Failure", International Journal of Fracture, Vol. 25, pp. R83-86, 1984.

2) Navarro, A. and De Los Rios, E. R., "On Dimensional Analysis of Fatigue Crack Growth Rate and Geometrical Similitude of Cracks", Fatigue Fract. Engng. Struct., Vol. 9, pp. 373-378, 1987.

3) Griffith, A. A., "Philosophical Transactions of the Royal Society", London A221, pp. 163-198, 1921.

4) Paris, P.C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", J. Basic Eng., Trans. ASME, Vol. 85, pp. 528-534, 1963.

5) Suh, Chang-Min and Kim, Young-Ho, "Fracture Mechanics Applied to Fatigue Crack Growth Behavior at Elevated Temperature -About the Dimensional Analysis-", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 1552-1560, 1990.

6) Suh, Chang-Min and Kim, Young-Ho, "Application of Dimensional Analysis on Fatigue Fracture at Elevated Temperature" Proceedings of Spring Conference on The Korea Committee for Ocean Resources & Engineering, Pusan, Korea, pp. 65-69, May 11, 1991.

7) Suh, Chang-Min, Kim Young-Ho, and Park, Hyun-Koo, "A Fracture Mechanics Study on Fatigue Crack Growth Behavior at Elevated Temperature", APCS-91, Proceedings of 4th Conference of ASIAN-PACIFIC Congress on Strength Evaluation-91, Beijing, China, pp. 1025-1029, Oct 8-10, 1991.

8) Liaw, P.K. and Swaminathan, V.P., "Elevated Temperature Fatigue Crack Growth Behavior of a Rotor Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 34, pp. 457-463, 1989.

9) Shih, T.T. and Clarke, G.A., "Effects of Temperature and Frequency on the Fatigue Crack Growth Rate Properties of a 1950 Vintage Cr-Mo-V Rotor Material", ASTM STP 677, pp. 125-143, 1979.

10) Jordan, E.H. et al, "Fracture Mechanics Applied to Elevated Temperature Crack Growth, "Trans. ASME, J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, pp. 306-313, 1989.

11) Bressers, J. et al., "Creep and Fatigue in High Temperature Alloys", pp. 99-103, Applied Science Publishers, London, 1981.

12) Kocanda, S., "Fatigue Failure of Metals", Sijthoff and Noordhoff International Publishers, 1978.