

〈論 文〉

고온 피로균열 성장거동에 관한 파괴역학의 응용에 관한 연구 — 차원해석법을 중심으로 —

서 창 민* · 김 영 호**

(1990년 2월 9일 접수)

Fracture Mechanics Applied to Fatigue Crack Growth Behavior at Elevated Temperatures

— About the Dimensional Analysis —

Chang-Min Suh and Young-Ho Kim

Key Words : Dimensional Analysis(차원해석), Arrhenius Equation(아레니우스식), Paris Equation(파리스 식), CT Specimen(CT 시험편), Crack Growth Rate(균열성장률), Stress Intensity Factor Range(응력 확대계수 범위), Activation Energy(활성화 에너지)

Abstract

A general form of the mathematical function in the fatigue crack growth rate law for CT specimens was determined by means of the dimensional analysis at elevated temperatures. The experimental results can be rigorously described by the combination of rate theory and fracture mechanics. The rate theory approach extends the scope of fracture mechanics through the consideration of the temperature. The fatigue crack growth rates are represented by the Arrhenius type equation. This equation explains fairly well the experimental data for Cr-Mo-V rotor steel and A517-F steel in the comparatively wide temperature regions as affected with the temperature and the stress intensity factor range interaction.

기 호 설 명

$A(\Delta K)$: 열활성화 과정의 재료상수 (mm/cycle)
 a : 균열 길이 (mm)
 B : 파리스식에서의 재료 상수
 c : 차원해석에서의 재료 상수
 da/dN : 균열성장률 (mm/cycle)
 f : 주파수 (cpm 또는 Hz)
 $f(\Delta K, T)$: 함수

$g_1(a/W), g_2(a/W)$: 균열의 기하학적 조건에 의
존하는 상수
 H : Fig. 1에서 정의된 시험편의 높이 (mm)
 n : 파리스 식에서의 재료상수
 p_i, q_i, r_i, s_i : 변수들의 지수 ($i=1\sim 7$)
 N : 피로사이클 수
 Q_0 : 기본 활성화에너지 (kcal/mol)
 $Q(\Delta K)$: 결보기 활성화에너지 (kcal/mol)
 R : 이상 기체상수 (kcal/mol K)
 R : 응력비

*정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과

**정회원, 부산대학교 공과대학 생산기계공학과

- T : 온도 (K)
- T_0 : 일정온도 (K)
- t : 시험편의 두께 (mm)
- t_n : 시험편의 홈 두께 (mm)
- W : CT시험편의 폭 (mm)
- α : 일 인자 (work factor)
- β : 변형경화 지수
- $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도
- ΔK : 응력확대계수범위 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
- ΔP : 작용 하중범위 (N)
- Π_i : 무차원 수 ($i=1\sim 7$)
- $\Psi(\Delta P, \alpha/W)$: 함수

1. 서 론

최근에는 고온에서 사용되는 기기들이 증가함에 따라 고온하의 피로균열 성장거동에 관한 연구의 필요성이 증대 되고 있으나 실험 및 해석상의 어려움으로 인해 상온하의 연구보다는 극히 미흡한 실정이다. 고온하의 균열성장거동은 상온과는 달리 온도, 주파수, 응력부하형식, 평균응력, 하중유지 시간 등에 의하여 크게 영향을 받는다⁽¹⁾. 고온하에서는 피로균열성장거동에 대한 연구의 대부분이 실험적인 연구인 반면 이론적 연구는 상대적으로 적고 파괴거동을 연구하는 데 차원해석법을 도입하게 된 것도 최근의 일이다. 또한 차원해석법은 상온하에서 파리스식과 균열성장률을 지배하는 파라미터를 결정하는데 이용되어 왔다.

즉 Wagner⁽²⁾는 하나의 결함을 포함한 균질한 등방성 재료가 무한평판에서 피로하중을 받을 때 균열 성장에 영향을 미치는 변수들에 대해서 차원 해석법을 통하여 두개의 무차원 변수를 유도하고 이 변수를 결합시켜 그리피스(Griffith)식⁽³⁾을 유도하였다. Navarro들⁽⁴⁾은 Wagner가 그리피스식을 유도할때 도입한 변수에다 결정립 지름, 균열선단의 소성역의 크기, 버그스 벡터 등을 첨가시켜 변수들을 무차원화 시킨 후에 탄성 파괴역학으로 간주하고 파리스 법칙⁽⁵⁾을 유도하였다.

차원해석법은 가스의 점성에 대한 온도의 영향을 분석 조사하기 위하여 사용한 이후 많은 분야에 적용되었다⁽⁶⁾. 이 방법은 실험변수를 줄이고 또 그들을 무차원수의 형태로 만드는 것에 있으며 질량 M , 힘 F , 길이 L , 시간 T 그리고 온도 θ 시스템이 사용된다. 차원해석의 방법 중에 아주 유용한

방법은 버킹햄(Buckingham)이 제안한 π -이론⁽⁷⁾이며 공학적으로 널리 이용되고 있다.

고온하의 피로 균열의 거동과 수명 예측은 상온보다 극히 복잡하다. 즉 주파수, 온도, 응력비, 환경 등의 영향이 크게 작용하며 온도가 상승함에 따라 입내파괴에서 입계파괴로 바뀌는 경향이 있다. 고온 피로와 크리프하에서 산화작용은 또한 중요한 역할을 한다. 자유면에 형성된 산화막은 슬립을 방해하므로 다른 면에서 반대 방향으로 슬립이 일어난다. 이와같은 작용의 산화막은 반복으로 피로 균열을 발생시키며 균열성장률을 증가시키는 역할도 한다. 따라서 진공상태하에서는 산화 작용이 미미하기 때문에 주파수와 파형의 영향은 감소한다⁽⁸⁾.

고온하에서의 피로균열성장거동을 연구하는데 차원해석법을 이용한 연구는 아직 없는 것 같다. 왜냐하면 고온에서는 환경과 크리프현상, 온도에 따른 금속학적 영향 등 균열성장거동에 영향을 미치는 변수들을 선택하기가 용이하지 않기 때문이다. 또한 특정 온도하에서의 피로균열성장률의 실험 및 해석은 많으나, 온도변수를 고려한 일반화된 균열성장 법칙의 적용 예는 극히 드물다.

그러므로 본 논문에서는 로터강(Cr-Mo-V 강)과 저탄소합금강(A517-F강)의 CT시험편을 대상으로 한 고온피로 시험결과^(9~11)를 토대로 차원해석법을 도입시켜 고온하의 균열성장률을 유도한 다음 온도 (T)와 응력확대계수범위 (ΔK)와의 함수 즉 $da/dN=f(\Delta K, T)$ 인 아레니우스⁽¹²⁾ 형태의 식을 유도하였다. 그리고 유도된 균열 성장 법칙을 파리스식과 비교 검토하여 본 연구에서 유도된 이 균열성장법칙의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편 및 실험방법

본 연구에서 실시할 차원해석은 Cr-Mo-V강과 A517-F강을 이용한 실험연구의 결과^(9~11)를 이용한 것이다. Table 1과 2에 이 재료들의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu
Cr-Mo-V	0.32	0.78	0.01	0.01	0.28	0.13	1.20	1.18	0.23	0.05
A517-F	0.16	0.84	0.01	0.01	0.20	0.92	0.61	0.42	0.04	0.27

Table 2 Mechanical properties

Material	Temperature (°C)	0.2%Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
Cr-Mo-V	24	623	776	14
	260	600	735	14
	427	516	625	14
	482	500	592	—
	538	464	523	18
A517-F	24	690	795-930	16

Fig. 1은 Cr-Mo-V강으로 제작된 $H/W=0.486$ 인 CT시험편의 형상을 나타내고 균열성장을 유도하기 위하여 1.27mm의 홈이 가공되었다. 이때 응력 확대 계수 범위 ΔK 는 식(1)을 사용하였다⁽¹³⁾.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a/W)}{(t \cdot t_n)^{1/2} W^{1/2} (1-a/W)^{3/2}} [0.8072 + 8.858(a/W) - 30.23(a/W)^2 + 41.088(a/W)^3 - 24.15(a/W)^4 + 4.951(a/W)^{1/5}] \quad (1)$$

또한 Liaw⁽¹⁰⁾에 의한 Cr-Mo-V강의 연구와 McHenry⁽¹¹⁾에 의한 A517-F강의 CT시험편은 Fig. 1과 같지만, $H/W=0.6$ 이고 균열 성장을 유도하는 데 홈이 없는 시험편이 사용되었다. 따라서 이 시험편에 대한 응력 확대계수 범위 ΔK 는 식(2)을 사용하여 계산하였다⁽¹⁴⁾.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a/W)}{t \cdot W^{1/2} (1-a/W)^{3/2}} [0.886 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4] \quad (2)$$

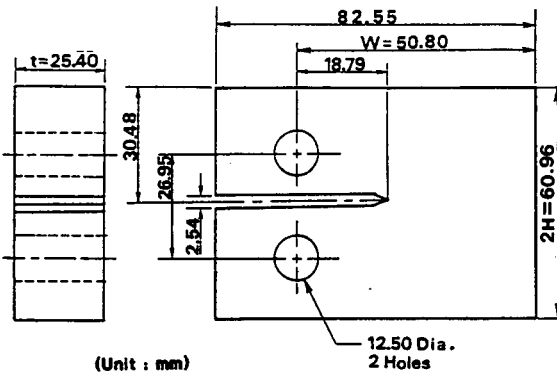


Fig. 1 Compact tension fatigue crack growth specimen

2.2 실험결과

Fig. 2는 Cr-Mo-V강^(9,10)의 온도에 따른 균열 성장률을 ΔK 의 함수로 나타 낸다. 24°C와 121°C 자료사이에는 차이가 거의 없지만 260°C의 자료는 121°C보다 성장률이 약간 감소하였지만 온도가 260°C에서 427°C로 증가하면 성장률이 약 2배 증가함을 알 수 있다. 온도가 427°C에서는 균열 성장률이 2.7의 기울기를 나타내고 482°C와 538°C에서는

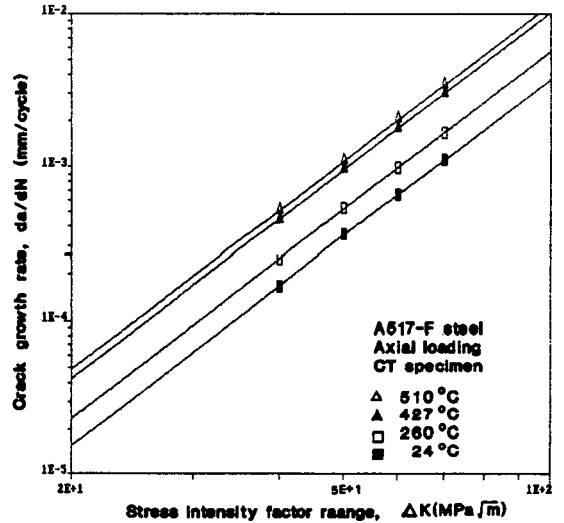


Fig. 2 Fatigue crack growth rate properties for Cr-Mo-V rotor steel at various temperatures in air^(9,10)

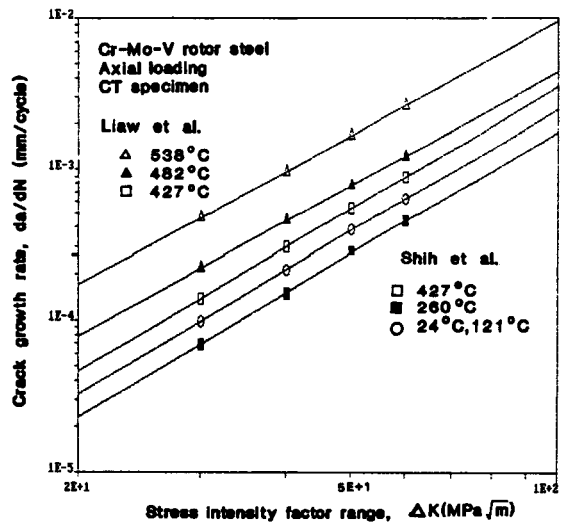


Fig. 3 Fatigue crack growth rate properties for A517-F steel at various temperature

2.51로 일정한 기울기를 보여준다. 그리고 온도가 427°C에서 538°C로 증가할수록 균열 성장률이 증가하고 있다.

Fig. 3은 A517-F강의 실험 결과로 온도가 상승하면 균열 성장률이 증가하고 있다. 즉 24°C에서 260°C로 증가하면 1.6배로 균열 성장률이 증가하였고 260°C에서 427°C로 증가하면 상온에 비해 2.9배로, 427°C에서 510°C로 증가하면 상온에 비해 3.3배로 증가하고 있다.

3. 차원 해석에 의한 피로 균열 성장 식의 유도

고온하의 피로균열 성장에 영향을 미치는 인자들을 포함하는 함수는 식 (3)과 같다.

$$f(da/dN, \Delta P, c, a, W, t, t_n, \dot{\epsilon}, f, T, T_0) = 0 \quad (3)$$

여기서 c : 재료 상수

t_n : 시편 홈 두께

$\dot{\epsilon}$: 변형률 속도

T_0 : 일정 온도

위 식에서 버킹햄 법⁽⁷⁾에 의한 FLT θ 시스템을 이용하여 무차원 변수로 만들기 위해 각 변수의 차원은 Table 3과 같이 된다.

Table 3에서 실험 변수가 11개 이지만 기본 차원은 4개이므로 무차원수는 7개를 얻을 수 있으며 식 (4)~(10)과 같다.

$$\Pi_1 = (da/dN)^1 c^{p_1} W^{q_1} f^{r_1} T_0^{s_1} \quad (4)$$

$$\Pi_2 = (\Delta P)^1 c^{p_2} W^{q_2} f^{r_2} T_0^{s_2} \quad (5)$$

$$\Pi_3 = (a)^1 c^{p_3} W^{q_3} f^{r_3} T_0^{s_3} \quad (6)$$

$$\Pi_4 = (t)^1 c^{p_4} W^{q_4} f^{r_4} T_0^{s_4} \quad (7)$$

$$\Pi_5 = (t_n)^1 c^{p_5} W^{q_5} f^{r_5} T_0^{s_5} \quad (8)$$

$$\Pi_6 = (\dot{\epsilon})^1 c^{p_6} W^{q_6} f^{r_6} T_0^{s_6} \quad (9)$$

$$\Pi_7 = (T)^1 c^{p_7} W^{q_7} f^{r_7} T_0^{s_7} \quad (10)$$

식 (4)에서 Π_1 를 F, L, T, θ 차원으로 나타내면 아래와 같게 된다.

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= F^0 L^0 T^0 \theta^0 \\ &= (L)^1 (FL^{-2})^{p_1} (L)^{q_1} (T^{-1})^{r_1} (\theta)^{s_1} \\ &= F^{p_1} L^{1-2p_1+q_1} T^{-r_1} \theta^{s_1} \end{aligned}$$

Table 3 Dimension of variables

Variable	da/dN	ΔP	c	a	W	t	t _n	ε̇	f	T	T ₀
Dimension	L	F	FL ⁻²	L	L	L	L	T ⁻¹	T ⁻¹	θ	θ

위 식에서 각 차원의 지수를 비교하면 p_1, q_1, r_1, s_1 을 얻을 수 있다. 즉 $p_1=0, 1-2p_1+q_1=0, -r_1=0, s_1=0$ 가 되고 $p_1=0, q_1=-1, r_1=0, s_1=0$ 가 된다.

식 (5)에서 Π_2 를 차원으로 나타내면 아래식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= F^0 L^0 T^0 \theta^0 \\ &= (F)^1 (FL^{-2})^{p_2} (L)^{q_2} (T^{-1})^{r_2} (\theta)^{s_2} \\ &= F^{1+p_2} L^{-2p_2+q_2} T^{-r_2} \theta^{s_2} \end{aligned}$$

여기서 각 차원의 지수를 서로 비교하면 $1+p_2=0, -2p_2+q_2=0, -r_2=0, s_2=0$ 가 되고 $p_2=-1, q_2=-2, r_2=0, s_2=0$ 가 된다. 이와 같은 방법으로 식 (6), (7), (8), (9), (10)의 무차원 수를 구하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4에 표시된 지수들을 이용하여 차원해석의 결과를 정리하면 식 (3)은 식 (11)과 같이 표시할 수 있다.

$$f\left(\frac{da}{dN} \frac{1}{W}, \frac{\Delta P}{cW^2}, \frac{a}{W}, \frac{t}{W}, \frac{t_n}{W}, \frac{\dot{\epsilon}}{f}, \frac{T}{T_0}\right) = 0 \quad (11)$$

식 (11)에서 균열 성장률(da/dN)을 다른 무차원 수들의 함수로 표시하여 보면 식 (12)로 된다.

$$\frac{da}{dN} = W f_0\left(\frac{\Delta P}{cW^2}, \frac{a}{W}, \frac{t}{W}, \frac{t_n}{W}, \frac{\dot{\epsilon}}{f}, \frac{T}{T_0}\right) \quad (12)$$

본 연구의 대상이 되고 있는 Cr-Mo-V강과 A517-F강의 실험조건에서는 f, W, t, t_n, T_0 및 $\dot{\epsilon}$ 가 일정하므로 식 (12)는 식 (13)과 같이 간단화 된다.

$$\frac{da}{dN} = W f_1\left(\frac{\Delta P}{cW^2}, \frac{a}{W}, \frac{T}{T_0}\right) \quad (13)$$

따라서 Cr-Mo-V강의 ΔK 는 식 (1)에 의하여

Table 4 Results of dimension analysis by Buckingham's method

	p_i	q_i	r_i	s_i
Π_1	0	-1	0	0
Π_2	-1	-2	0	0
Π_3	0	-1	0	0
Π_4	0	-1	0	0
Π_5	0	-1	0	0
Π_6	0	0	-1	0
Π_7	0	0	0	-1

식 (14)로 나타낼 수 있고, A517-F강은 식 (2)로부터 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a/W)}{(t \cdot t_n)^{1/2} W^{1/2} (1-a/W)^{3/2}} g_1(a/W)$$

g_1 : 함수 (14)

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a/W)}{tW^{1/2}(1-a/W)^{3/2}} g_2(a/W)$$

g_2 : 함수 (15)

식 (14)와, (15)에서 t , W 가 일정한 상수이면 두 식의 ΔK 는 식 (16)으로 표시될 수 있다.

$$\Delta K = \psi(\Delta P, a/W)$$

ψ : 함수 (16)

따라서 본 연구의 실험결과와 비교하기 위하여 식 (13)은 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = f_2(\Delta K, T)$$
 (17)

즉 균열성장률 da/dN 은 응력확대계수범위 ΔK 와 온도 T 만의 함수로 고려할 수 있다는 것이다. 그리고 함수 f_2 에 가장 가까운 식으로 식 (18)과 같은 아레니우스형태의 식을 들 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K) \exp\left(-\frac{Q(\Delta K)}{RT}\right)$$
 (18)

단 A : 재료 상수(ΔK 에 따른 상수)

Q : 활성화 에너지

R : 이상 기체 상수

4. 실험결과에 의한 피로 균열 성장 식의 유도

4.1 실험 데이터

Fig. 2는 Cr-Mo-V강에 대한 Shih들의 결과⁽⁹⁾와 Liaw들의 결과⁽¹⁰⁾를 동시에 나타낸 것이다. 즉 두 실험결과는 실험조건도 거의 같고 공통 실험온도인 427°C에서는 ΔK 에 따른 균열성장속도가 같게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 Shih들⁽⁹⁾의 260°C와 427°C의 실험결과 데이터와 Liaw들⁽¹⁰⁾의 427°C와 482°C, 538°C의 결과 데이터를 결합시켜 260°C에서 538°C의 온도 범위에 대한 실험 데이터로 이용하였다. 또한 Fig. 3의 A517-F강은 260°C, 427°C, 510°C의 온도 범위에 대한 결과를 실험 데이터로 이용하였다. Table 5는 Fig. 2와 3에 나타낸 각 실험 온도에 따른 균열 성장률의 C, m 결과를 요약하였다.

Table 5의 실험 결과에서 Cr-Mo-V강은 ΔK 가 30 MPa·m^{1/2}에서 60 MPa·m^{1/2}까지의 범위를 선택하여 10 MPa·m^{1/2}간격으로 각 실험 온도에 대한

Table 5 Data of C, m constant

Temperature °C	260	427	482	510	538
Materials					
Cr-Mo-V	c=7.09E-9 m=2.7	c=1.4E-8 m=2.7	c=4.22E-8 m=2.51	—	c=9.08E-8 m=2.51
A517-F	c=8.88E-10 m=3.4	c=1.61E-9 m=3.4	—	c=1.83E-9 m=3.4	—

균열 성장률을 측정하였고 A517-F강은 ΔK 가 40 MPa·m^{1/2}에서 70 MPa·m^{1/2}까지의 범위를 선택하여 10 MPa·m^{1/2}간격으로 각 온도에 대한 균열 성장률을 측정하였다.

4.2 이론해석과 실험결과와의 비교 검토

4.1장에서 분석한 균열성장률의 데이터를 이용하여 $1/T$ 에 대한 균열성장률의 관계를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었고 일정한 ΔK 에 대하여 데이터 점들을 최소자승법으로 직선화 하였다. Fig. 4는 Fig. 5에 비해 선형적관계가 다소 떨어진다. 이와 같이 온도범위가 다소 넓은 경우, 일반적으로 데이터 점들의 분산이 커지는 경향이 있다. 이 직선들의 각각은 3장에서 실시된 차원해석으로 유도한 식 (18)과 같은 아레니우스 형태의 식으로 나타낼 수

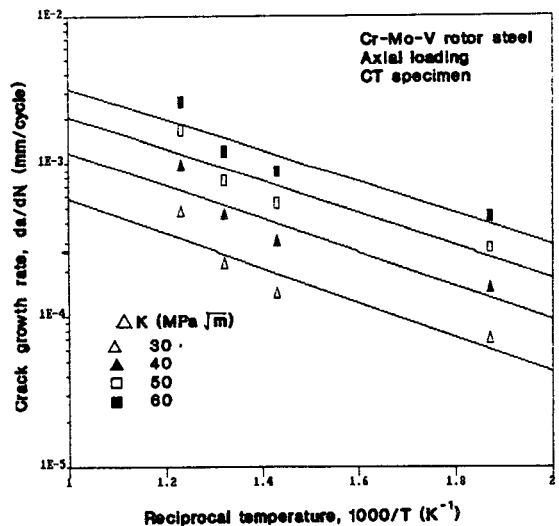


Fig. 4 The temperature dependence of fatigue crack growth rate for various constant ΔK values

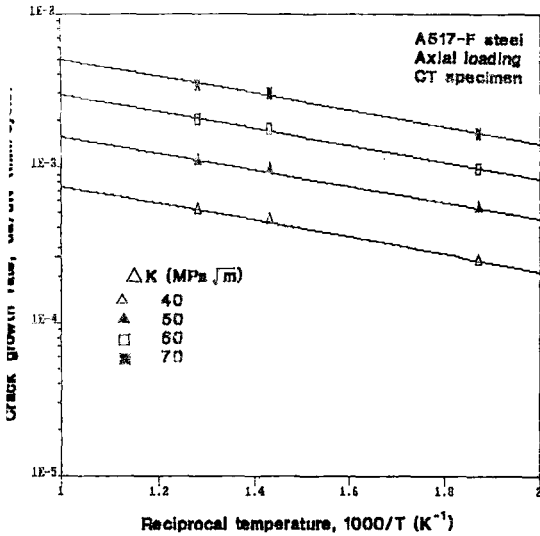


Fig. 5 The temperature dependence of fatigue crack growth rate for various constant ΔK values

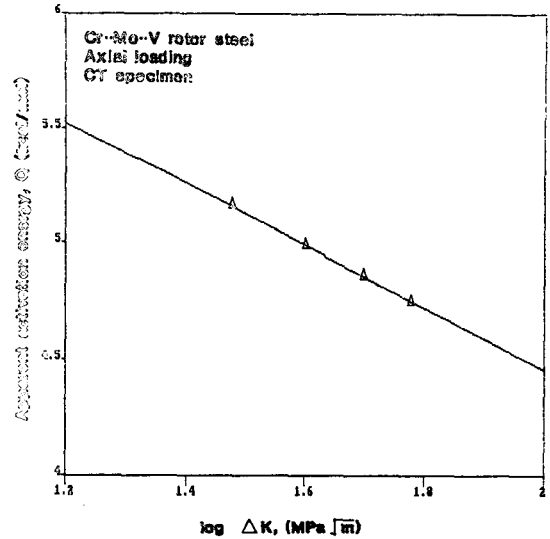


Fig. 6 The ΔK dependence of the apparent activation energy

있다. 즉 고온하의 피로균열성장률에 필요한 에너지는 아레니우스 형태의 식으로 나타낼 수 있는 활성화에너지와 연관시킬 수 있음을 알 수 있다.

위의 식 (18)에 양변에 대수를 취하면 식 (19)와 같이 된다.

$$\log \frac{da}{dN} = \log A(\Delta K) - \frac{Q(\Delta K)}{RT} \cdot \log e \quad (19)$$

우변의 첫째항이 온도와 무관하다고 가정하면 활성화 에너지는 식 (20)을 이용하여 Fig. 4 및 5와 같은 그림의 기울기로 부터 구할 수 있다.

$$Q(\Delta K)|_{\Delta K, const} = -R[\partial \log(da/dN) / \partial(1/T)] \quad (20)$$

즉 식 (19)에서 활성화에너지 $Q(\Delta K)$ 는 Fig. 4와 5에서 일정한 ΔK 에 대하여 직선의 기울기에 해당되고 Q 는 ΔK 의 함수로 나타나며 ΔK 의 증가에 따라 직선의 기울기가 거의 비슷하게 나타나고 있다.

이와 같은 $\log \Delta K$ 와 Q 와의 관계를 Fig. 6과 7에 나타내고 최소자승법으로 직선화한 결과를 식 (21)에 나타내었다.

$$Q(\Delta K) = Q_0 - \alpha \log \Delta K \quad (21)$$

단 Cr-Mo-V강의 $Q_0 = 7125$, $\alpha = 1333$

A517-F강 $Q_0 = 2550$, $\alpha = 36.54$

Fig. 6과 7은 ΔK 가 증가 할수록 활성화에너지는 조금씩 줄어드는 경향이 있으며 피로 균열 성장률

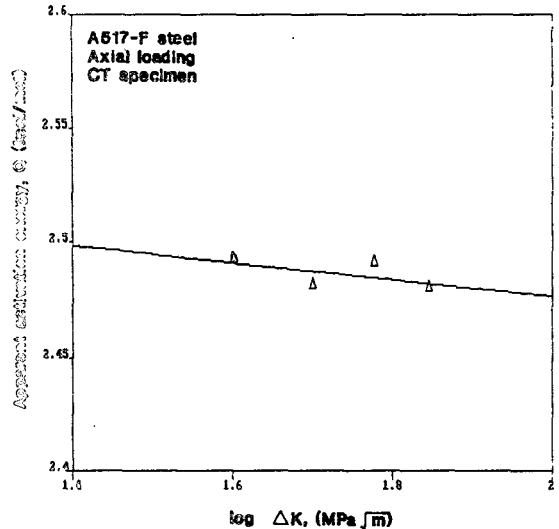


Fig. 7 The ΔK dependence of the apparent activation energy

은 고온에서 금속의 열확산과정에 의하여 영향을 받는다는 것을 말해준다. 그리고 함수 $A(\Delta K)$ 는 Fig. 4와 Fig. 5의 da/dN 과 $1/T$ 의 그래프상에서 수직축과의 교점에서 구해진다. 여기서 구한 ΔK 에 따른 재료상수 A 는 Fig. 8에 나타내었고 최소자승법에 의해 직선화한 것을 식 (22)에 나타낸다.

$$A(\Delta K) = A_0 \Delta K^m \quad (22)$$

단 Cr-Mo-V강의 $A_0 = 4.797 \times 10^{-6}$, $m = 2.174$

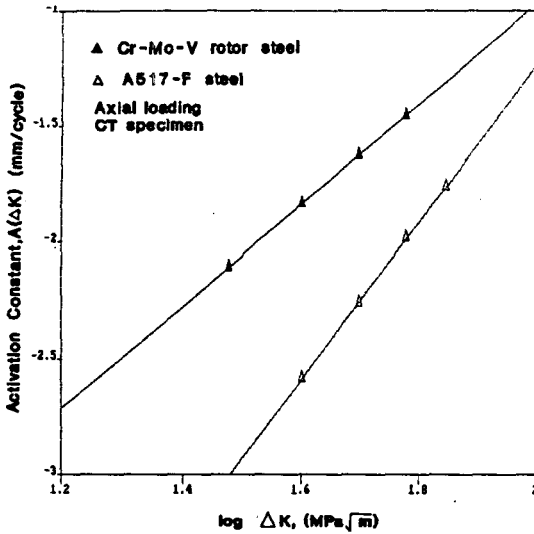


Fig. 8 The ΔK dependence of the activation constant for Cr-Mo-V rotor steel and A517-F steel

A517-F강의 $A_0 = 9.397 \times 10^{-9}$, $m = 3.397$ 따라서 식 (21), (22)을 식 (18)에 대입하면 식 (23)과 같은 아레니우스 형태의 피로 성장식을 얻을 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = A_0 \Delta K \exp \left[-\frac{Q_0 - \alpha \log \Delta K}{RT} \right] \quad (23)$$

단 Cr-Mo-V강의 $A_0 = 4.797 \times 10^{-6}$,

$$m = 2.174, Q = 7125, \alpha = 1333$$

$$A517-F강의 $A_0 = 9.397 \times 10^{-9}$,$$

$$m = 3.397, Q = 2550, \alpha = 36.54$$

또한 식 (23)을 정리하면 파리스 식의 형태인 식 (24)로도 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = B \Delta K^n \quad (24)$$

단 Cr-Mo-V강의

$$B = 4.797 \times 10^{-6} \exp \left[-\frac{7125}{RT} \right], n = 2.174 + \frac{1333}{RT} \log e$$

A517-F강의

$$B = 9.397 \times 10^{-9} \exp \left[-\frac{2550}{RT} \right], n = 3.397 + \frac{36.54}{RT} \log e$$

식 (24)에서 상수 B 와 n 은 온도만의 함수이고 실험 온도 외의 온도에서 ΔK 와 온도 T 만 주어지면 설계에 필요한 특정온도에서의 균열 성장속도를 외삽법과 내삽법으로 구할 수 있으므로 고온기기 설계 응용에 유용한 식으로 평가된다.

Table 6은 Fig. 2와 3상의 실험 결과에서 얻은

Table 6 Comparison of experimental predicted crack growth rate proper at various temperatures

Material	Data Temp.	Experimental data		Predicted da/dN	
		$\log B$	n	$\log B$	n
Cr-Mo-V	260°C	-8.149	2.7	-8.241	2.7
	427°C	-7.851	2.7	-7.544	2.5
	482°C	-7.375	2.51	-7.382	2.51
	538°C	-7.042	2.51	-7.239	2.51
A517-F	260°C	-9.05	3.4	-9.07	3.4
	427°C	-8.79	3.4	-8.82	3.4
	510°C	-8.74	3.4	-8.74	3.4

피로균열 성장률과 식 (23)에서 유도하여 계산된 피로균열 성장률의 결과를 일정한 온도에서 비교하였으며 두 자료간에는 각각의 재료와 온도 따른 균열성장률이 잘 일치함을 알 수 있다. Cr-Mo-V강에서는 2가지의 실험결과를 결합하여 하나의 균열 성장법칙을 유도하였음에도 불구하고 실험 결과 데이터와 유도한 아레니우스 형태의 결과 데이터는 상당히 좋은 일치를 보여주고 있다. 또 A517-F강도 실험 결과와 훌륭한 일치를 보여주고 있다.

이와 같이 유도된 균열 성장속도식은 온도의 수를 포함하는 하나의 파리스 식으로 표시되어 실험 온도에 따라 달리 표시되었던 것이 통일적으로 정리됨을 알 수 있다. Fig. 9와 10은 실험식 유도된 식과의 비교를 나타낸 그림으로 양자간 호환 일치를 보이고 있다. 특히 A517-F강의 경우에는 Fig. 10과 같이 실험식과 유도된 식이 중첩 정도로 잘 일치하였다.

이상과 같이 온도와 파괴역학적 파라미터로 균열성장률 식을 나타낸 결과 피로균열성장률이 열적으로 활성화 과정에 의하여 제어되며, 이 활성화 에너지는 균열선단의 응력확대계수에 강한 의존성 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 피로시험에서 단시간의 실험결과를 이용하여 장시간의 피로거울 예측할 수 있어야 하고, 또한 측정값으로 부근 중간 온도에서의 거동을 예측할 수 있어야 한다.

그러므로 고온에서 온도의 영향은 균열성장률성에 중요한 파라미터이며 균열성장거동에 관한

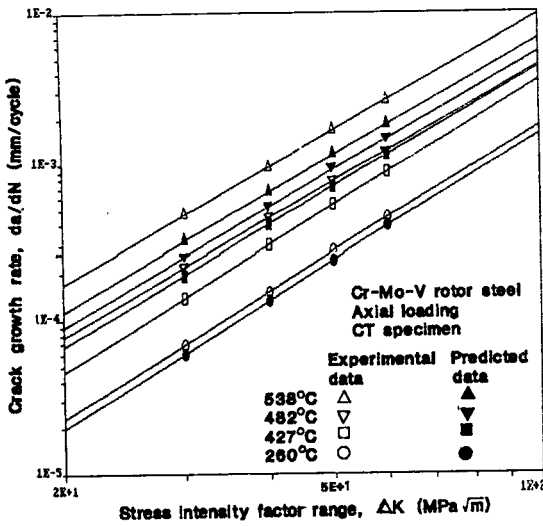


Fig. 9 Comparison of predicted and experimental fatigue crack growth rate for Cr-Mo-V rotor steel

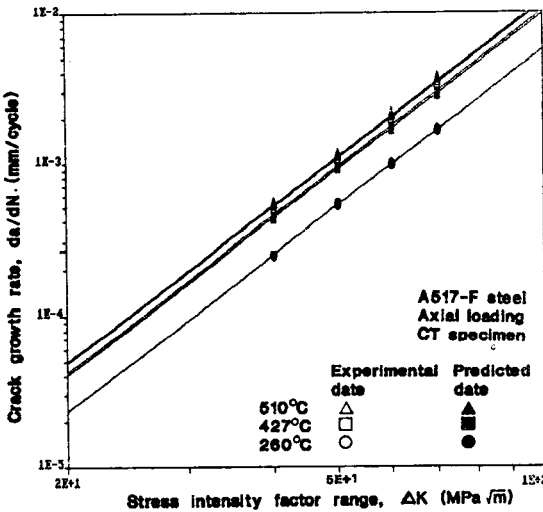


Fig. 10 Comparison of predicted and experimental fatigue crack growth rate for A517-F steel

도의 영향에 관한 역학적 이해는 실험결과를 외삽법과 내삽법에 대한 기초를 제공하는 것은 필수적이다.

재료의 파괴(균열성장)나 유동도 본질적으로 확률현상의 속도과정으로 이해되는 경우가 많으며, 본 연구에서 이 과정은 열적활성화상태로 인식된다. 본 연구에서의 결보기 활성화에너지 Q 는 ΔK

의 의존성 관계, 즉 다음 식의 형태로 나타난다.

$$Q(\Delta K) = Q_0 - a \log(\Delta K)$$

Q_0 는 기본 활성화 에너지를 의미하고 있으며 둘째항은 일 함수(work function)로 나타나는 기계적 에너지로 설명할 수 있다. 즉 작용하중과 내부탄성변화 에너지 변화에 의한 결합된 원자의 파괴 과정에 상당한다고 볼 수 있다. 이것은 Krausz⁽¹⁵⁾에 의한 부식 피로와 유사한 형태임을 알 수 있다.

이상으로 본 연구에서 취급한 차원해석법의 응용은 아직 파괴분야에 거의 응용되지 않고 있는 분야⁽²⁾이고, 이 방법의 도입은 파괴역학의 가장 기초가 되는 Griffith식, Paris식의 유도 등 초기적 단계이므로 앞으로 더욱더 응용확장이 요망되고 있다. 특히 유체분야에서는 무차원변수가 널리 유용하게 쓰이고 있다. 이러한 관점에서 복잡한 인자가 너무도 많은 피로특성 규명 또는 밝혀진 제 현상들을 재정립 혹은 통합적으로 취급하는 데 강력한 해석 수단이 될 수도 있음을 배제하지 못한다. 따라서 본 저자들의 일련의 차원 해석법에 대한 연구 중 일차적으로 기존 법칙을 검토하고 있으며 더욱더 응용, 확대한 연구결과도 보고할 예정이다.

5. 결 론

Cr-Mo-V강과 A517-F강의 CT시험편의 고온피로시험 결과를 이용하여 차원해석법으로 온도변화에 따른 피로균열 성장법칙인 아레니우스 형태의 식을 유도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 차원해석법으로 균열성장거동에 영향을 미치는 온도 T 변수를 고려하여 아레니우스 형태인 피로균열 성장법칙

$$da/dN = A(\Delta K) \exp - Q(\Delta K)/RT$$

식을 유도할 수 있었다. 여기서 재료상수 A 와 활성화 에너지 Q 는 ΔK 만의 함수로 표시되었다.

(2) 차원해석법으로 유도된 균열 성장률은 $da/dN = B\Delta K^n$ 만으로 표시 가능하였다. 단 재료상수 B 와 지수 n 은 온도 T 만의 함수이다.

(3) 실험결과에서 얻은 피로균열 성장률 식과 차원해석법으로 유도된 식은 비교적 넓은 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 있고 표면균열 성장거동에 대해서도 적용 가능

성을 보여주었다.

참 고 문 헌

- (1) Spediel, M.O., 1973, "Fatigue Crack Growth at High Temperatures", Proc. Int. Conf. SCC and HE of Metallic Materials, Firminy, pp. 207~255.
- (2) Wagner, H.D., 1984, "On the Use of Dimensional Analysis in Material Failure", International Journal of Fracture, Vol. 25, R83~86.
- (3) Griffith, A. A., 1921, "Philosophical Transactions of the Royal Society", London A221, pp. 163~198.
- (4) Navarro, A. and De Los Rios, E.R., 1987, "On Dimensional Analysis of Fatigue Crack Growth Rate and Geometrical Similitude of Cracks", Fatigue Fract. Engng. Struct., Vol. 9, No. 5, pp. 373~378.
- (5) Paris, P.C. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", J. Basic Eng., Trans. ASME, Vol. 85, No. 4, pp. 528~534.
- (6) Langhaar, H.L., 1951, "Dimensional Analysis and Theory of Models", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (7) Buckingham, E., 1914, "On Physically Similiar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations", Phys. Rev., Vol. 4, No. 4, pp. 345~376.
- (8) Fuchs, H.O., and Stephens, R.I., 1980, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 241.
- (9) Shih, T.T. and Clarke, G.A., 1979, "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.
- (10) Liaw, P.K. and Swaminathan, V.P., 1989, "Elevated-Temperature Fatigue Crack Growth Behavior of a Rotor Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 34, No. 2, pp. 457~463.
- (11) McHenry, H.I. and Pense, A.W., 1973, "Fatigue Crack Propagation in Steel Alloys at Elevated Temperatures", ASTM STP 520, pp. 345~354.
- (12) Hanley, T.O. and Krausz, A.S., 1974, "Thermally Activated Deformation", Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 5, pp. 2013~2015.
- (13) Newman, J.C., Jr., 1974, "Stress Analysis of Compact Specimens Including the Effects of Pin Loading", ASTM STP 560, pp. 105~121.
- (14) Saxena, A. and Hudak, S.J. Jr, 1978, "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens", Int. J. Fracture Vol. 14, No. 4, pp. 453~468.
- (15) Krausz, A. and Krausz, A.S., 1988, "On the Physical Meaning of the Paris Equation", Int. Journal of Fracture, Vol. 36, R 23~28.
- (16) Yokobori, T. 1969, "A Kinetic of Fatigue Crack Propagation", Rep. Res. Inst. Strength & Fracture of Materials, Tohoku Univ. Vol. 5, pp. 19~24.