

〈논 문〉

# 입계기공의 확산성장 모델을 이용한 고온 기기의 크립균열전파 해석(3) - 기공크기에 의존하는 소결응력의 영향 -

전 재 영\*

(1995년 7월 3일 접수)

## Analysis of Creep Crack Growth at High-Temperature Components by Diffusive Growth Model of Grain Boundary Cavities (Ⅲ) - Effect of Sintering Stress Depending on Cavity Size -

Jae-Young JEON

**Key Words :** Sintering Stress(소결응력), Cavity Growth(기공성장), Damage Zone(손상역), Stress Field(응력장)

### Abstract

For the case of creep-fatigue interaction, the damage zone developed in front of the growing crack-tip during creep regime is important because it can affect the damage mechanism to be occurred by the following fatigue load. These are studied in this paper through proper consideration of the cavity-size dependent sintering stress which is approximated by polynomials. It is shown that the inclination of reversed damage zone size with respect to the applied load parameter can be explained by considering realistic sintering stress distribution. However, the resultant stress field has  $r^{-1/2+\theta}$  singularity, regardless of the profile of variable sintering stress, which is the same to that case solved for constant sintering stress.

### 1. 서 론

고온 기기의 주손상기구는 정상운전상태에서의 크립변형과 반복되는 기동과 정지시에 발생하는 천이응력에 의한 피로손상의 종합이다. 전고<sup>(1,2)</sup>에서 크립하중하에서 입계기공의 확산성장에 의한 균열전파속도를 해석하는 새 모델을 제시한 바 있다. 이때 균열전방 입계면에서 기공의 발생 및 성장이 진행중인 손상영역이 제시되었는데 이는 피로하중하에서 일반적인 연속체 역학의 적용을 곤란케 하는

요소로 작용할 수 있다. 왜냐하면 대부분의 고온 기기에서와 같이 크립과 피로하중을 반복적으로 받는 구조물에서 크립하중하에서 발달한 균열전방의 손상역은 피로하중 작용시에는 연속체역학의 그것과는 다른 새로운 응력장과 그에 따른 손상발달 과정을 따르게 될 것이므로 전체적인 균열성장속도를 평가하는데 결정적인 인자로 작용할 수도 있기 때문이다. 이 경우 균열성장에 관한 정확한 해석을 위해서는 균열전방 기공의 거동을 기기의 전 운전 이력 전반에 걸쳐서 추적 및 평가하는 것이 필요할 것이다.

연구자들의 관심이 어디에 있던 입계기공의 성장 기구에 의해 진전하는 크립균열 전방에서의 손상역

\*회원, 삼성항공(주) 항공우주연구소

의 크기 및 모양은 균열성장 기구의 이해를 위해서 정확히 규명될 필요가 있다. 왜냐하면 파손된 시편의 균열전방에서 관찰되는 기공의 분포형태만이 연구자가 얻을 수 있는 균열전방 손상기구에 관한 직접적인 증거인데 반해 아직까지 손상기구의 발달과정에 관해서는 충분히 납득할만한 해석이 이루어지지 못하고 있기 때문이다. 실험적인 관찰의 한 예로서 Hong<sup>(3)</sup>은 NiCrMo 강에서 크립균열 시험편의 파단면에 분포하는 크립기공의 관찰을 통하여 하중변수가 커짐에 따라 (따라서 균열속도도 증가) 균열전방의 손상역과 성장된 기공의 크기가 오히려 작아지는 모습을 보고한 바 있으나 아직까지 그에 대한 해석이 충분히 이루어지지 못하고 있다. 손상역의 크기에 관한 해석에서 손상과 응력장과의 상호작용을 무시할 경우 이와 같은 역전현상은 설명될 수 없다. 본고는 입계기공과 응력장간의 상호작용을 고려함으로써 구해진 새로운 응력장과 손상역 크기에 대한 전고<sup>(1,2)</sup>의 결과를 바탕으로 해석상의 제한으로 인해 충분히 고려하지 못한 소결응력을 실제에 가깝게 고려할 수 있다면 그에 대한 해석의 전기를 마련할 수 있을 것이라는 기대로부터 출발한다. 전고<sup>(1,2)</sup>의 해석과정에서는 소결응력과 기공성장이력과의 상호연관성(coupling)을 모두 고려할 경우 해석적 해는 불가능하기 때문에 특이적분 방정식의 해석을 위해 소결응력의 크기를 일정 상수로 가정할 수 밖에 없었던 부득이한 점이 있었다. 본고에서는 전고의 해석을 이용하여 소결응력과 기공이력과의 직접적인 상호작용은 배제하되 공학적으로 타당한 근사방법을 적용하기로 한다.

## 2. 문제정립

### 2.1 근사함수에 의한 소결응력의 모사

해석에 사용된 입계확산에 의한 기공성장식

$$\dot{V} = 2\pi D(\sigma_{22} - \sigma_s) \quad (1)$$

에서 기공의 성장에 저항하는 소결응력은 기공과 입계와의 접점에서 화학적 에너지 포텐셜 연속조건으로부터 기공의 크기에 의존하는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\sigma_s = \frac{2\gamma_s}{r} = \frac{2\gamma_s \sin\psi}{a} \quad (2)$$

$$\cos\psi = \frac{\gamma_b}{2\gamma_s}$$

여기서,  $r$ ,  $a$ ,  $\psi$ 는 Fig. 1에서와 같은 준평형상 입계기공의 형상과 관련된 기공의 곡률반경 및 입계면에 투사된 반경, 그리고 입계면과의 접촉각을 표시하고  $\gamma_s$ ,  $\gamma_b$ 는 각각 재료의 표면 및 입계에너지이다. 그 외에 사용되는 부호들은 전고<sup>(1,2)</sup>와 동일하므로 설명을 생략하기로 한다.

만약 기공생성시의 기공크기( $a_n$ )를 알거나 반대로 기공생성을 위한 응력( $\sigma_n$ )을 알 수 있다면 식 (2)로부터 각각 그 상대편 값을 계산할 수 있다. 여기서는 기공생성 응력  $\sigma_n$ 이 주어진 경우에 대해 해석하기로 하고 생성시의 기공크기를 생성응력으로 표현하면

$$a_n = 2\gamma_s \sin\psi / \sigma_n \quad (3)$$

소결응력에 관한 식 (2)를 기공크기에 대한 표현식으로 다시 쓰면

$$\sigma_s(\xi) = \frac{a_n \sigma_n}{a(\xi)} \quad (4)$$

실제 기공의 크기는 생성후 현재에 이르기까지 기공이 받아온 작용응력의 함수이다. 그러나 특이적분 방정식 해석상의 제한에 의해 소결응력과 작용응력간의 간섭을 배제할 필요가 있다. 소결응력의 분포는 이론상 다음과 같이 Taylor의 무한 급수 전개 형태로 표현할 수 있는데

$$\sigma_s(\xi) = \sigma_n = \sigma_n \sum_{i=1}^{\infty} A_i \xi^i \quad (5)$$

이때 식 (5)에는 기공생성시의 크기와 균열진전 조건으로부터 기공크기에 의한 제한조건이 다음과 같이 부과된다.

$$a = a_n \text{ i. e. } \sigma_s = \sigma_n \text{ at } \xi = 1 \quad (6)$$

$$a = a_c \text{ i. e. } \sigma_s = \frac{a_n}{a_c} \sigma_n \text{ at } \xi = 0 \quad (7)$$

소결응력의 실제 분포를 완전하게 모사할 수 있는 식 (5)의 형태를 채택하기는 곤란하므로 해석을 위하여 식 (6), (7)의 경계조건을 만족하는 2개의 항만을 갖는 근사함수 형태를 취하기로 한다. 즉,

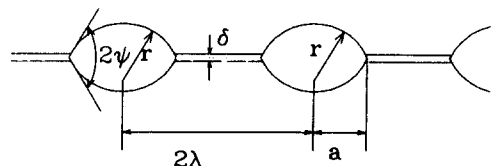


Fig. 1 Quasi-equilibrium shape of grain boundary cavity

$$\sigma_s = (A_1 + A_2 \xi^m) \sigma_n \quad (8)$$

여기서,

$$A_1 = \frac{a_n}{a_c}, A_2 = 1 - \frac{a_s}{a_c} \quad (9)$$

$$a_c = \lambda f_c^{1/2}$$

본고에서는 임의의  $m$ 값에 대하여 식 (6), (7)의 조건은 만족되므로 일정 정수값  $m$ 에 대하여 해석을 수행하고 주어진 소결응력상태에 대한 응력장과 그때의 기공크기 분포를 구한다. 그 다음 실제로 성장한 기공의 크기로부터 식 (4)에 의한 소결응력의 실제값을 구하여 식 (8)로 가정하였던 값과의 차이를 계산하여 비교분석 한다. 각각의  $m$ 값을 취할 때 기공성장이 일어나는 구간 내에서 근사적으로 적용되는 소결응력의 분포형태는 Fig. 2와 같다.

2.2 응력장 지배방정식

전고<sup>(1)</sup>의 모델링과정을 거쳐 입계기공에 의해 성장하는 크립균열 전방에서의 응력장에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\sigma(\xi) = \frac{K}{\sqrt{2\pi l \xi}} - \alpha \int_0^1 [\sigma(\xi') - \sigma_s] \sqrt{\frac{\xi'}{\xi} \frac{d\xi'}{\xi - \xi'}} \quad (10)$$

식 (8)의 형태로 나타나는 소결응력에 대해서 전고<sup>(2)</sup>의 해석과정을 따를 때 관련 함수들은

$$f(\xi) = \frac{K}{\sqrt{2\pi l \xi}} - A_1 \sigma_n \sqrt{\xi} - A_2 \sigma_n \xi^{m+1/2} \quad (11)$$

$$\phi(\xi) = \sqrt{\xi} [\sigma(\xi) - \sigma_n (A_1 + A_2 \xi^m)] \quad (12)$$

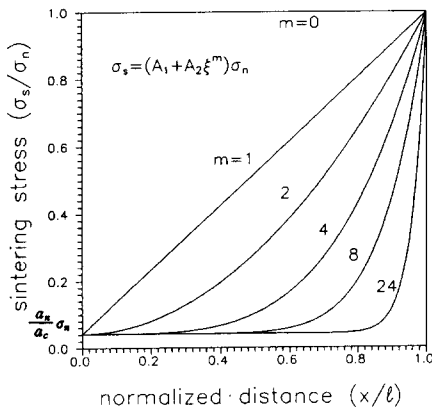


Fig. 2 Used approximating polynomials to consider cavity size dependent sintering stress distributions

가 되고 전고<sup>(2)</sup>와 같은 복소함수를 이용한 해석과정을 따라 특이적분 방정식을 풀어 그 해를 구하면

$$\phi(t_0) = \frac{1}{1 + \alpha^2 \pi^2} \frac{K}{\sqrt{2\pi l}} [1 - 1 \alpha t_0^\theta (1 - t_0)^{1-\theta} Q_1(t_0)]$$

$$+ \frac{A_1 \sigma_n t_0^{1/2}}{1 + \alpha^2 \pi^2} [1 - \alpha t_0^{\theta-1/2} (1 - t_0)^{1-\theta} Q_2(t_0)]$$

$$- \frac{A_2 \sigma_n t_0^{1/2-m}}{1 + \alpha^2 \pi^2} [1 - \alpha t_0^{\theta-1/2-m} (1 - t_0)^{1-\theta} Q_3(t_0)] \quad (13)$$

여기서,

$$Q_1(t_0) = \int_0^1 \frac{t^{-\theta} (1-t)^{\theta-1} dt}{t-t_0} \quad (14)$$

$$Q_2(t_0) = \int_0^1 \frac{t^{1/2-\theta} (1-t)^{\theta-1} dt}{t-t_0} \quad (15)$$

$$Q_3(t_0) = \int_0^1 \frac{t^{1/2+m-\theta} (1-t)^{-1+\theta} dt}{t-t_0}$$

$$= -\alpha \pi^2 t_0^{1/2+m-\theta} (1-t_0)^{-1+\theta}$$

$$\frac{\Gamma(\theta) \Gamma(1/2+m-\theta)}{\Gamma(1/2+\theta)} \times {}_2F_1(\theta, \theta-m-1/2$$

$$; \theta-m+1/2 : t_0) (1-t_0)^{-1+\theta} \quad (16)$$

여기서,  $Q_1(t_0)$ ,  $Q_2(t_0)$ 는 각각 전고<sup>(2)</sup>에서 구한 값이고  $Q_3(t_0)$  역시 복소평면 상에서 적절한 적분 경로를 취할때 잔여값 이론을 사용하여 계산된다. 식 (12)의 함수  $\phi$ 의 거동 역시 적분구간  $L$ 의 양끝  $\xi=0$ ,  $\xi=1$ 에서 그 값이 0인 유한값(bounded)이 되므로 전고<sup>(2)</sup>의 식 (22)의 동차해를 갖기 위한 전제조건들을 만족함이 확인된다.

3. 응력장과 기공생성 영역

식 (12)와 (13)을 이용하여 응력장을 계산하면

$$\sigma(\xi) = \sigma_n \xi^{-1/2+\theta} \left[ \frac{A_1 \sqrt{\pi}}{\Gamma(1-\theta) \Gamma(1/2+\theta)} \times {}_2F_1(\theta, \theta-1/2; \theta+1/2; \xi) \right.$$

$$+ \frac{A_2 \Gamma(1/2-m)}{\Gamma(1-\theta) \Gamma(1/2-m+\theta)} \times {}_2F_1(\theta, \theta-m-1/2; \theta-m+1/2; \xi) \left. \right] \quad (17)$$

적분구간  $L$ 의 양단에서의 응력장 거동은

$$\sigma(\xi; \xi \rightarrow 0) = \left[ \frac{A_1 \sqrt{\pi}}{\Gamma(1-\theta) \Gamma(1/2+\theta)} \right.$$

$$\left. \frac{A_2 \Gamma(1/2-m)}{\Gamma(1-\theta) \Gamma(1/2-m+\theta)} \sigma_n \xi^{-1/2+\theta} \right] \quad (18)$$

$$\sigma(\xi; \xi \rightarrow 1) = \sigma_n \quad (19)$$

식 (18)에서 소결응력의 분포형태를 결정짓는  $m$  값의 크기에 무관하게  $\xi \rightarrow 0$ 일 때의 응력장 특이도는 일정 소결응력의 경우와 마찬가지로  $(-1/2 + \theta)$ 가 된다.

또  $\theta$ 의 극한값의 경우에 대해서는

(1)  $\theta \rightarrow 0$ 의 경우

$$\sigma(\xi) = \sigma_n \xi^{-1/2+\theta} \quad (20)$$

$\xi$ ,  $l$ 의 정의를 이용하면 식 (20)은 원래의 K-응력장의 표준화된(normalized) 표현식임을 알 수 있다. 즉,

$$\sigma(x) = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}} \quad (21)$$

(2)  $\theta \rightarrow 1/2$ 의 경우

$$\sigma(\xi) = \left[ A_1 + \frac{A_2 \Gamma(1/2-m)}{\sqrt{\pi} \Gamma(1-m)} \right]^2 \times F_1(1/2, -m, 1-m; \xi) \sigma_n \quad (22)$$

에서 hypergeometric 함수특성<sup>(4)</sup>의 9.101식을 사용하면

$${}_2F_1(1/2, -m, -m; \xi) = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(1-m)}{\Gamma(1/2-m)} \xi^m$$

가 되므로 식 (22)는

$$\sigma(\xi) = \sigma_n (A_1 + A_2 \xi^m) \quad (23)$$

로 사용된 소결응력과 동일한 분포를 한다. 따라서 일정 소결응력조건에서와 같이 기공성장의 구동력을 상실케 되어 균열성장이 중단하는 임계하중 조건에 해당한다.

기공생성 영역의 크기변화는 유일해 존재조건<sup>(2)</sup>의 식 (25)에 의해

$$\frac{l}{l_0} = \left[ \Gamma(1-\theta) \left\{ \frac{2A_1 \Gamma(3/2-\theta)}{\sqrt{\pi}} + \frac{A_2 \Gamma(3/2+m-\theta)}{\Gamma(3/2+m)} \right\} \right]^2 \quad (24)$$

여기서,

$$l_0 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_n} \right)^2 \quad (25)$$

$m=0$ 일 경우 식 (24)는 일정 소결응력조건에 대한 전고<sup>(2)</sup>의 식 (25)가 된다.

#### 4. 균열성장속도 및 임계 하중변수

응력장과 기공생성 영역에 관한 식 (17)과 (24)를 균열진전조건 식 전고<sup>(2)</sup>의 식 (3)에 대입하고 정리하면

$$K = \left[ \frac{2\pi E h f_c^{3/2} \lambda \sigma_n}{3(1-\nu^2) \tan(\pi\theta)} \right]^{1/2} [\Gamma(1-\theta)]^{-1} \times \left[ \frac{2A_1 \Gamma(3/2-\theta)}{\sqrt{\pi}} + \frac{A_2 \Gamma(3/2+m-\theta)}{\Gamma(1-\theta) \Gamma(3/2+m)} \right] \times \left[ A_1(1-2\theta) - \frac{A_2}{m+1} + \frac{A_2 \Gamma(1/2-m)}{\Gamma(1-\theta) \Gamma(1/2-m+\theta)} \right] {}_3F_2(1/2-m, 1, 1/2+\theta; 5/2, \theta-m+1/2; 1)^{-1/2} \quad (26)$$

여기서,

$${}_3F_2(1/2-m, 1, 1/2+\theta; 5/2, 1/2-m+\theta; 1) = \int_0^1 \xi^{-1/2+\theta} {}_2F_1(\theta, \theta-m-1/2; \theta-m+1/2; \xi) d\xi \quad (27)$$

식 (26)은 임의의 하중변수  $K$ 에 대해  $\theta$ 를 매개변수로 하는 K-v 관계식이다.

$\theta$ 의 극한값에 대해서는

(1)  $\theta \rightarrow 0$ 의 경우

$$v = C_m K^2 \quad (28)$$

여기서,

$$C_m = \frac{3D \left( A_1 + \frac{2m+1}{m+1} A_2 \right)}{4\pi h f_c^{3/2} \lambda^3 \sigma_n} \quad (29)$$

$m=0$ 일 경우에는 식 (29)의  $C_m$ 은 일정 소결응력 조건에 대한 전고<sup>(1)</sup>의 식 (25)의  $C_0$ 가 된다.

(2)  $\theta \rightarrow 1/2$ 의 경우

$${}_3F_2(\theta \rightarrow 1/2) = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(1-m)}{\Gamma(1/2-m)} \frac{1}{m+1} \quad (30)$$

$$K_{th} = \lim_{\theta \rightarrow 1/2} K(\theta) = \left[ \frac{2A_1}{\sqrt{\pi}} + \frac{A_2 \Gamma(1+m)}{\Gamma(3/2+m)} \right] \left[ \frac{\pi E h f_c^{3/2} \lambda \sigma_n}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2}$$

$m=0$ 일 경우에는

$$K_{Ia}(m=0) = \left[ \frac{4Ehf_c^{3/2} \lambda \sigma_n}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (32)$$

가 되어 전고<sup>(1)</sup>의 식 (26)과 일치한다.

### 5. 결과 및 논의

#### 5.1 응력분포 변화

Fig. 3에서 응력분포를 도시하였는데 그림에서 점선은 응력장 계산을 위하여 가정한 소결응력을 나타낸다. 기공의 크기에 따른 소결응력 값의 변화

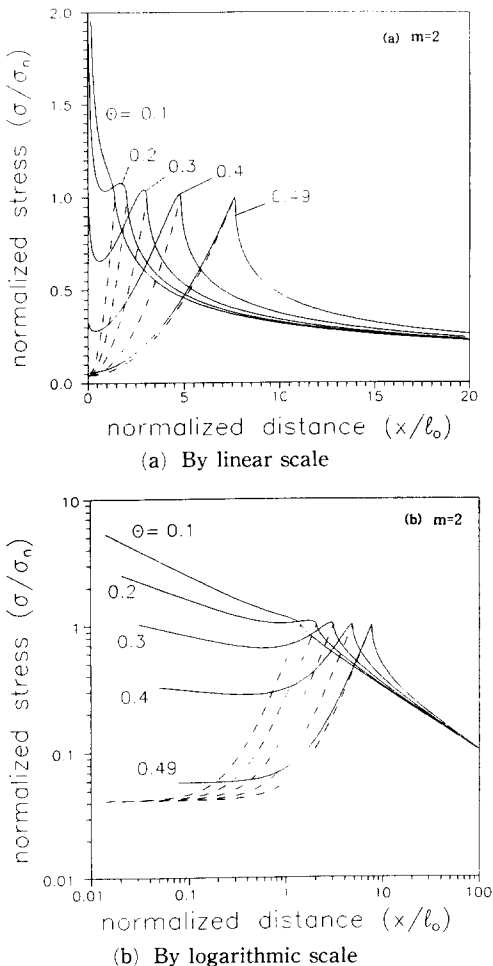


Fig. 3 Stress field in the presence of grain boundary cavitation for the assumed form of sintering stress(solid : resultant stress, dashed : assumed sintering stress)

를 고려하는 경우 기공발생 영역의 끝( $x=l$ )에서 그 값의 정점을 갖는 특별한 응력분포를 보인다.  $x=l$ 에서 기공발생조건( $\sigma=\sigma_n$ )을 만족하여 일단 기공이 생성되면 기공성장의 구동력( $\sigma-\sigma_s$ )에 의해 기공이 성장하고, 이에 따른 비탄성변형 효과를 유발하여 작용응력장을 이완시킨다. 따라서 실제 작용하는 응력은 이러한 효과들이 상호 균형을 이루는 선에서 결정된다. 즉, 기공성장에 의한 응력이완 효과가 적은 경우( $\theta \rightarrow 0$ )에는 응력장은 원래의 K-응력장에 가까운 분포를 보이고 그 반대의 경우에는 기공성장의 구동력을 소멸케 하는 요소인 소결응력의 형태에 가까운 분포를 한다.

균열첨단에서의 응력장 특이도를 알기 위하여 log-log 도서를 살펴보면 원래의 K-응력장 특이도  $r^{-1/2}$ 에서  $r^{-1/2+\theta}$  특이도로 이완된 응력분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다.  $\theta$ 가 커짐에 따라 응력장 특이도는 점점 감소하여  $\theta=1/2$ 에서 완전히 소멸하게 되는 것은 일정 소결응력조건인 경우와 같다. 소결응력의 형태에서  $m$  값이 증가하는 경우(2에서 8로) 작용응력이 기공생성 영역의 끝( $x=l$ ) 부근에서 더욱 예리한 모양의 정점값을 갖는다. 이는 소결응력 분포형태의 영향이 그대로 반영된 결과이다.

#### 5.2 기공생성 영역의 크기

Fig. 3에서 특이응력분포를 보이는 균열첨단으로부터 감소한 응력이 소결응력의 분포형태를 닮아 다시 증가하여 정점을 갖는  $\sigma/\sigma_n=1$ 이 되는 지점까지가 기공이 발생 및 성장하는 영역에 해당한다. 기공발생 영역중( $0 < x < l$ )에서도 작용응력이 기공생성 응력( $\sigma_n$ )보다 작은 구간도 있지만 이때는 기공성장에 의해 소결응력의 크기가 기공생성 응력보다는 물론 실제 작용응력 값보다도 작게 된 상태이므로( $\sigma-\sigma_s > 0$ ) 기공성장은 계속 가능하다.

소결응력의 형태에서  $m$ 이 증가하면 기공성장의 구동력( $\sigma-\sigma_s$ )이 증가하게 되므로 기공생성 영역도 커진다. 기공에 의한 응력이완효과를 무시한 경우의 크기( $l_0$ )에 대한 실제 기공생성 영역의 크기( $l$ )의 확장비에 관한 Fig. 4에서  $m$ 값이 증가하면  $l/l_0$ 가 커지는 것도 같은 이유에서이다. 같은 재료에서 하중의 변화에 따른 기공생성 영역의 실제길이를 도시한 Fig. 5를 보면 하중  $K$ 가 매우 큰 경우에는  $K$ 값이 증가할 때 응력장의 절대치가 증가함에 따라  $l$ 도 증가한다는 식의 통상적인 관념과

같은 분포를 보이거나  $K$ 가 점점 감소하여  $K_{th}$  부근에 이르게 되면 상반된 현상이 나타나고 있다. 즉 하중  $K$ 가 일정값에서  $l$ 이 극소값을 갖고 그 이하로  $K$ 가 감소할 경우  $K_{th}$ 에 이를 때까지  $l$ 은 오히려 증가하게 된다. 이는 Hong<sup>(3)</sup>의 NiCrMo강에 대한 크립균열성장 후의 파단면 관찰에서 하중변수 ( $C_l$ ) 값은 작아지는데도 균열첨단으로부터 기공이 관찰되는 영역의 크기가 오히려 증가하고, 또 균열첨단으로부터 같은 거리일 경우에는 관찰된 기공의 평균크기도 증가하였던 실험결과와 일치하는 경향을 보여주고 있다.

Hong<sup>(3)</sup>은 이러한 현상의 원인으로 균열전파속도를 지목하고 빠른 균열성장의 경우에는 기공성장을 위한 경과시간이 작기 때문에 관찰되는 손상도 작은 것으로 추정하였다. 그러나 이 경우 역시 대부분의 해석자들과 마찬가지로 기공의 성장에 의해

응력장 자체가 바뀌는 효과를 간과한 채 손상이 누적되는 시간의 요소만을 고려하고 있다. 그러나 본 해석의 결과에 의하면 낮은 하중상태에서 오히려 더 큰 손상영역이 관찰되는 현상은 균열의 진전속도가 작을 경우 (낮은 하중) 응력장의 특이도 자체가 소멸하고 이때 감소한 하중이 손상영역을 확장시키는 방향으로 전이된 결과임을 알 수 있다. 또 이러한 손상영역의 역전현상은, 임제하중을 크게 초월하지 않을 경우, 응력이완효과가 두드러진 하중범위에서만 가능하고 하중이 매우 큰 경우에는 응력장 이완의 효과가 미미하므로 예상할 수 없는 경우이다.

5.3 소결응력의 모양과 기공의 크기분포

주어진 소결응력의 모양에 대해 구해진 응력장 하에서 성장한 기공의 크기분포가 Fig. 6에 있다.

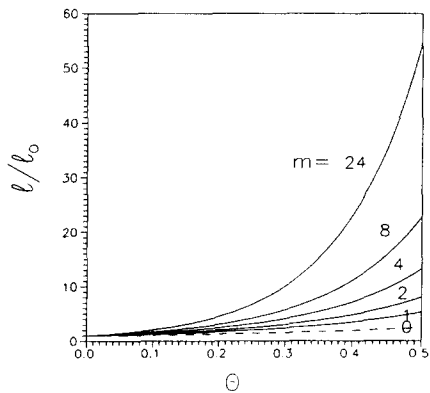


Fig. 4 Expansion of cavitating zone size vs  $\theta$

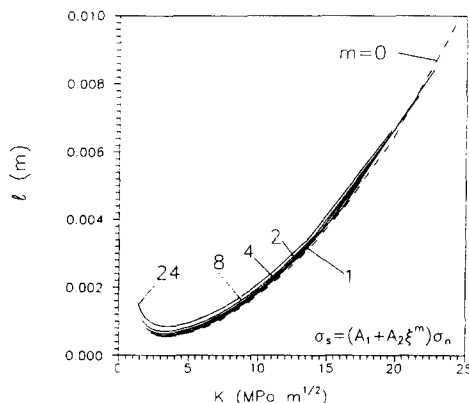


Fig. 5 Resultant cavitating zone size vs applied load for several assumed forms of sintering stresses

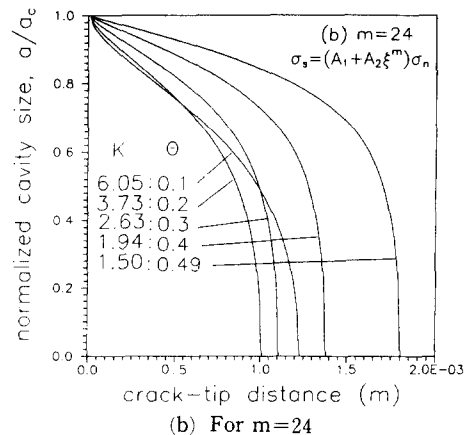
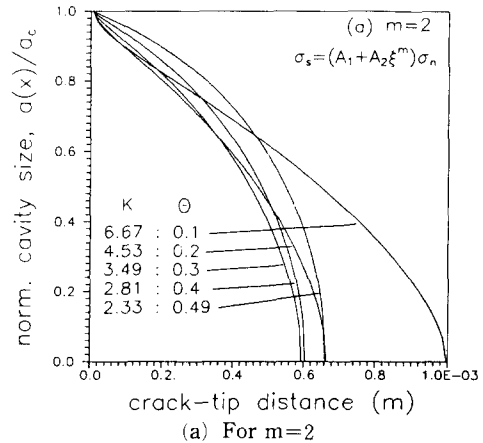


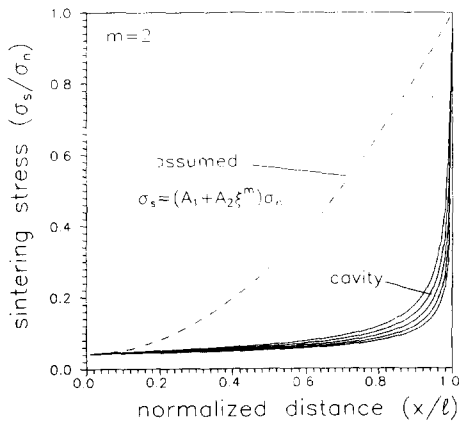
Fig. 6 Cavity size distribution ahead of crack-tip with respect to applied load parameters

이렇게 구해진 기공의 실제 크기로부터 식 (4)에 의해 얻어지는 소결응력을 Fig. 7에 도시하였다. 여기서 점선은 응력장 계산시 가정된 소결응력의 모양을 나타낸다. 응력장 계산을 위하여 가정한 소결응력과 실제 기공으로부터 구한 그 값의 차이가  $m$ 이 증가할수록 줄어들고  $m=24$ 의 경우 그 차이가 무시할 수 있을 정도로 줄어들고 있다. 각각의  $m$  값에 대하여 균열첨단으로부터 실제 거리에 대한 기공의 크기 분포를 살펴보면  $\theta$ 가 클 경우에는 하중  $K$ 가 줄어들 때  $l$ 이 증가하고 또 같은 거리에서 기공의 크기도 증가하는 경우가 발생하고 있다.  $m$  값을 바꾸어가며 해석해 보면, 이러한 현상은  $m=2$ 의 경우 약간 보이기 시작하고  $m$ 이 8, 24로 증가한 경우 매우 현저해진다. 가정된 소결응력의

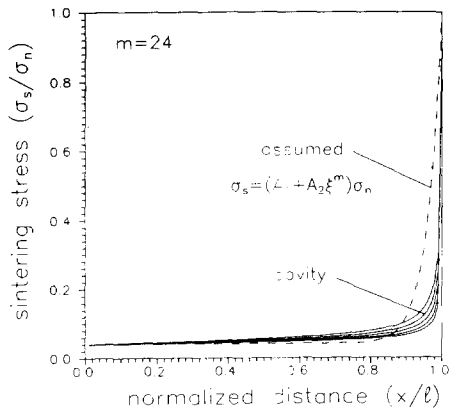
모양과 기공크기로부터 계산한 값과의 차이가  $m$ 이 증가할수록 줄어들고 있음은 보다 실제값에 가까운 해석임을 입증하고 있다.

5.4 하중변수와 균열속도와의 관계 및 임계 하중 변수

$K-\theta$ 에 관한 식 (26)을 Fig. 8에 도시하였고 이를  $K-v$  관계로 변환한 것이 Fig. 9이다.  $K$ 가 상당히 큰 경우, 즉 기공에 의한 응력이완효과가 무시할만한 경우, 균열성장속도는  $K^2$ 에 비례하는 양상을 보인다. 이때 같은 하중에 대해서 소결응력의 분포형태중  $m$  값이 증가할수록 균열의 성장속도는 더욱 크다. 또 응력장에서 살펴보았듯이 소결응력의 변화를 고려할 경우에도 완전한 응력이완이 일어나는  $\theta=1/2$ 에서 균열의 성장이 중단하는  $K_{th}$ 가 존재한다.  $K_{th}$ 의 경우에는 소결응력의 모양중  $m$ 이 증가하면  $K_{th}$ 는 감소한다. 이는  $m$  값이 증가할수



(a) For  $m=2$



(b) For  $m=24$

Fig. 7 Comparison of the assumed sintering stress profile with those calculated from resultant cavity size distribution

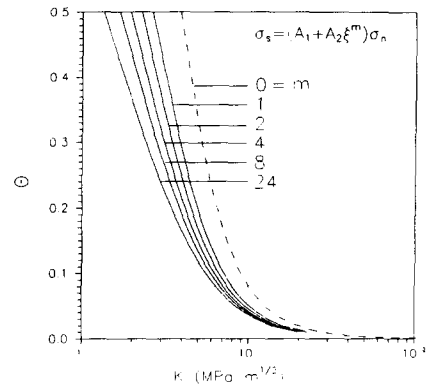


Fig. 8 Relaxation parameter vs applied load

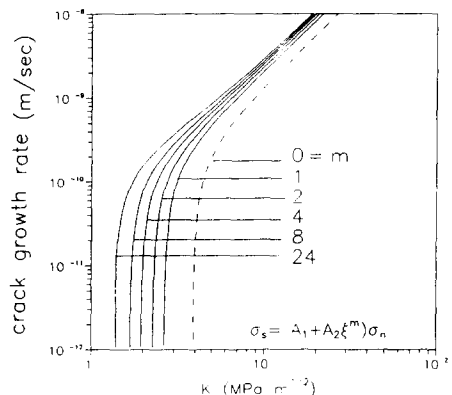


Fig. 9 Crack velocity vs applied load

록 기공성장 식에서 소결응력에 의한 억제효과가 줄어들어 기공성장속도가 더욱 커지므로 균열의 성장속도나  $K_{th}$  값 결정 모두에 손상을 촉진하는 방향으로 작용하기 때문이다.

## 6. 결 론

정상상태 일정속도로 진전하고 있는 균열전방의 입계에서 기공이 생성하여 입계확산기구에 의해 성장하는 경우 기공크기에 따른 소결응력의 변화를 고려한 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입계기공의 영향을 고려한 응력장과 기공생성 영역의 변화 및 그때의 균열성장속도 그리고 균열성장이 중단하는 임계 하중변수  $K_{th}$ 를 해석적으로 구하였다. 균열전방의 응력장 형태는 근사된 소결응력 형태와 상관없이 원래의  $K$ -응력장  $r^{-1/2}$  특이도에서 매개변수  $\theta$ 만큼 이완된 새로운 특이도  $r^{-1/2}$ 를 갖는 분포를 하였다.

(2) 임의의 하중변수  $K$ 에 대하여 해석적으로 구해진 균열속도  $v$ 는 일정 소결응력의 경우와 동일한 경향을 보였으나 동일하중변수에 대해서 균열성장속도가 약간 증가하고 임계하중변수값은 약간 작아진다.

(3) 기공의 크기에 따른 소결응력의 변화를 고려할 때 하중의 크기가  $K_{th}$  부근에서는 하중변수  $K$

와 기공 생성영역의 크기  $l$  사이의 관계가 역전되어  $K$ 가 감소하는데도  $l$ 은 오히려 증가하는 영역이 출현함을 확인하였다. 이는 기공생성 영역을 결정하는 요소중 응력장 이완에 의한 하중 전이효과가 하중변수의 증가에 의한 응력증가 효과를 능가하기 때문이다.

## 참고문헌

- (1) 전재영, 1996, "입계기공의 확산성장 모델을 이용한 고온기기의 크립균열전파 해석(1), -응력장 및 균열전파속도에 미치는 입계기공의 영향-, " 대한기계학회논문집, 제20권, 제4호, pp. 1177~1785.
- (2) 전재영, 1996, "입계기공의 확산성장 모델을 이용한 고온기기의 크립균열전파 해석(2), -특이적분 방정식 해를 통한 응력장 해석-, " 대한기계학회논문집, 제20권, 제4호, pp. 1186~1193.
- (3) Hong, S. H. and Jin Yu., 1989, "The Crack Tip Cavitation Damage in a NiCr Steel," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 23, pp. 1481~1486
- (4) Gradshteyn, I. S. and Ryzhik, I. M., 1963, *Table of Integrals, Series and Products*, Academic Press, NY, p. 1039.