

〈論 文〉

열충격하에 있는 반타원균열에 대한 파괴건전성 평가

이강용* · 김종성* · 최형석** · 김건영***

(1994년 3월 24일 접수)

Integrity Evaluation of Semi-Elliptical Crack Under Thermal Shock

Kang Yong Lee, Jong Sung Kim, Hyeong Seok Choi and Kun Young Kim

Key Words : Thermal Shock(열충격), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Weight Function Method(가중함수법), Integrity Evaluation(건전성 평가)

Abstract

This paper proposed the method of fracture integrity evaluation for semi-elliptical crack. Plane strain fracture toughnesses are used to compare with the thermal shock stress intensity factors for semi-elliptical crack obtained by Vainshtok weight function method. The method is applied to the finite Cr Mo V and 2.25Cr Mo steel plates with semi-elliptical crack under the thermal shock. For the purpose, tensile property and fracture toughness with respect to the temperature are measured. To verify the method, thermal shock experiments are carried. The theoretical predictions are in good agreement with the experiments.

1. 서 론

열충격하의 균열문제에 대한 연구는 최근에 와서 관심의 대상이 되고 있다. Yagawa 등⁽¹⁾은 반타원 표면균열(semi-elliptical surface crack)을 가지는 PMMA(polymethylmethacrylate) 판에 열충격이 가해질 때의 이론적, 실험적 해석을 하였다. Cheverton 등⁽²⁾은 선형 탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics: LEFM)의 범위에서 PWR(pressurized water reactor)에 긴 축방향 내부 균열이 존재할 때의 열충격 거동을 실험하고 평가하였다. Jung 등⁽³⁾은 방사효과(irradiation effect)로 취성화(embrittlement)된 원자력 압력용기에 열충격이 가해질 때 균열의 동적인 전파와 멈춤(arr-rest)을 LEFM에 의해 해석할 수 있음을 보였다. Kai-

ser 등⁽⁴⁾은 균열이 존재하는 반응로(reactor)용기에 PTS(pressurized thermal shock)현상이 일어나는 경우에 대하여 압력 온도 제한곡선(pressure temperature limit curve)을 선형 탄성파괴 역학을 이용하여 구하였다. Lee 등⁽⁵⁾은 Bueckner⁽⁶⁾의 가중함수법(weight function method)을 이용하여 가장자리 균열(edge crack)의 열충격 응력세기계수(thermal shock stress intensity factor)를 구하고 유리재료를 이용하여 열충격 실험을 행하였다. Matsubara 등⁽⁷⁾은 PTS와 방사효과를 고려하여 LEFM에 의한 원자력 반응로의 건전성 평가법을 개발하였다. 그러나 Yagawa 등의 방법은 열충격 후 경과 시간에 따라 평면변형률 파괴인성치 K_{Ic} 곡선을 그려야 하므로 건전성 평가가 복잡해지고 Cheverton 등의 방법, Jung 등의 방법과 Lee 등의 방법등은 삼차원 표면균열에 대한 건전성 평가법이 아니므로 실제 일반적으로 발생하는 삼차원 표면 균열에 대해 적용할 수 없다. Kasier 등의 방법은 계단강하 천이상태(step down transient state)로

*정회원, 연세대학교 기계공학과

**삼성전자(주)

***정회원, 한국전력공사 기술연구원

가정하여 열충격 응력세기계수를 K_{Ic} 와의 차를 허용 압력 응력세기계수 (allowable pressure stress intensity factor)로 하였기 때문에 보수적 (conservative)인 결과를 준다. Matsubara 등의 방법들은 삼차원 표면균열에 대한 건전성 평가법이 아니고 또한 임계 응력세기 계수 (critical stress intensity factor) K_c 를 사용 하므로 해석 모델마다 임계 응력세기계수를 추정하여야 하는 어려움이 발생한다.

본 논문에서는 실제에 흔히 나타나는 삼차원 표면균열을 반타원 표면균열로 가정하고 열충격 응력세기계수를 Vainshtok⁽⁸⁾의 가중합수법으로 구하고 평면변형을 파괴인성치 (plane strain fracture toughness) K_{Ic} 를 사용하는 건전성 평가법을 개발한다. 또한 개발된 건전성 평가법의 타당성을 검증하기 위해 열충격 실험을 행한다.

2. 이 론

Fig. 1과 같은 내부에 열생성요소가 없고 두께에 B 인 균일 온도 T_o 에서 t_a 시간동안 일정 온도 T_a 의 대기에 노출시킨 후, $x=0$ 인 면에 온도 T_w 의 물로 급속히 냉각하면 넓은 평판의 내부에서는 열의 흐름이 생긴다.

시간 t_a 동안의 온도변화에 대한 열전도방정식, 경계조건 및 초기조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \kappa \frac{\partial^2 \Theta(x, t)}{\partial x^2} &= \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial t} & (0 \leq t \leq t_a) \\ -\frac{\partial \Theta(0, t)}{\partial x} + \mu_a \Theta(0, t) &= 0 & (x=0) \\ \frac{\partial \Theta(B, t)}{\partial x} + \mu_a \Theta(B, t) &= 0 & (x=B) \\ \Theta(x, 0) &= T_o - T_a & (0 \leq x \leq B) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

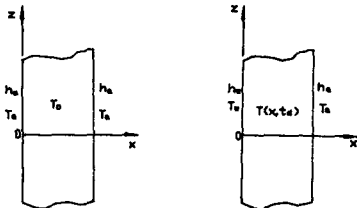


Fig. 1 Uncracked plate under thermal shock loading
(a) Uncracked plate at time $t=0$
(b) Uncracked plate at time $t=t_a$

$$\Theta(x, t) \equiv T(x, t) - T_a \quad (2)$$

$$\kappa \equiv \frac{k_s}{\rho C_p} \quad (3)$$

$$\mu_a \equiv \frac{h_a}{k_s} \quad (4)$$

여기서, k_s 는 유한판 재료의 열전도도 (thermal conductivity), ρ 는 유한판 재료의 밀도 (density), C_p 는 유한판 재료의 비열 (specific heat), h_a 는 대기의 대류 열전달계수 (convection heat transfer coefficient), t 는 유한판을 대기에 노출시킨 순간부터의 경과시간이다. T_o 는 열충격전에 탄성판이 유지한 균일 온도이고, T_a 는 대기의 온도이다. $T(x, t)$ 는 유한판의 두께와 시간에 따른 온도 분포이다.

식 (1)의 열전도방정식을 변수분리법 (separation of variables)으로 풀면 다음과 같은 해를 얻는다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} \Theta(x, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \{ \omega_m \delta_m \cos(\omega_m x) \\ &\quad + \mu_a \delta_m \sin(\omega_m x) \} e^{-h \omega_m t} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \delta_m &\equiv 2(T_o - T_a) \left\{ \sin(\omega_m B) + \frac{\mu_a}{\omega_m} \{1 - \cos(\omega_m B)\} \right\} \\ &\quad \cdot \frac{1}{(\omega_m^2 + \mu_a^2) B + 2\mu_a} \end{aligned} \quad (6)$$

고유치 (eigenvalue) ω_m 은 다음 방정식을 통해 구해진다.

$$\tan(\omega_m B) = \frac{2\omega_m \mu_a}{\omega_m^2 - \mu_a^2} \quad (7)$$

t_a 시간 경과한 후 $x=0$ 인 면에 온도 T_w 의 물로 급속히 냉각할 때의 온도변화에 대한 열전도방정식, 경계조건 및 시간조건은 다음과 같다.

$$\kappa \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (t \geq t_a)$$

$$-\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} + \mu_w (T(0, t) - T_w) = 0 \quad (x=0)$$

$$\frac{\partial T(B, t)}{\partial x} + \mu_a (T(B, t) - T_a) = 0 \quad (x=B)$$

$$T(x, t_a) = \Theta(x, t_a) + T_a \quad (0 \leq x \leq B)$$

$$\mu_w \equiv \frac{h_w}{k_s} \quad (9)$$

h_w 는 물의 대류 열전달계수, T_w 는 물의 온도이다.

식 (8)의 열전도방정식을 변수분리법을 이용하고 정

적인상태 (steady state) 와 천이상태 (transient state) 로 분리하여 풀면 다음과 같은 해를 얻는다. ⁽⁹⁾

$$T(x, t) = \zeta_1 x + \zeta_2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \beta_n d_n \cos(\beta_n x) + \mu_w d_n \sin(\beta_n x) \right\} e^{-k\beta_n(t-t_0)} \quad (10)$$

여기서,

$$d_n \equiv \frac{2e_{mn}}{(\beta_n^2 + \mu_w^2)B + 2\mu_w} \quad (11)$$

$$e_{mn} \equiv \beta_n g_{1mn} + \mu_w g_{2mn} + T_a \beta_n g_{3n} + T_a \mu_w g_{4n} - \beta_n g_{5n} - \mu_w g_{6n}$$

$$e_{1mn} \equiv \sum_{m=1}^{\infty} \{ \omega_m \delta_m \tau_{1mn} + \mu_a \delta_m \tau_{2mn} \} e^{-k\omega_m t}$$

$$e_{2mn} \equiv \sum_{m=1}^{\infty} \{ \omega_m \delta_m \tau_{3mn} + \mu_a \delta_m \tau_{4mn} \} e^{-k\omega_m t} \quad (12)$$

$$g_{3n} \equiv \frac{\sin(\beta_n B)}{\beta_n}$$

$$g_{4n} \equiv \frac{1 - \cos(\beta_n B)}{\beta_n}$$

$$g_{5n} \equiv \zeta_1 \left\{ \frac{B \sin(\beta_n B)}{\beta_n} - \frac{g_{4n}}{\beta_n} \right\} + \zeta_2 g_{3n}$$

$$g_{6n} \equiv \zeta_1 \left\{ \frac{-B \cos(\beta_n B)}{\beta_n} + \frac{g_{3n}}{\beta_n} \right\} + \zeta_2 g_{4n} \quad (13)$$

$$\tau_{1mn} \equiv \frac{\sin\{(\omega_m - \beta_n)B\}}{2(\omega_m - \beta_n)} + \frac{\sin\{(\omega_m + \beta_n)B\}}{2(\omega_m + \beta_n)}$$

$$\tau_{2mn} \equiv \frac{1 - \cos\{(\omega_m - \beta_n)B\}}{2(\omega_m - \beta_n)} + \frac{1 - \cos\{(\omega_m + \beta_n)B\}}{2(\omega_m + \beta_n)}$$

$$\tau_{3mn} \equiv \frac{1 - \cos\{(\omega_m - \beta_n)B\}}{2(\beta_n - \omega_m)} + \frac{1 - \cos\{(\omega_m + \beta_n)B\}}{2(\omega_m + \beta_n)}$$

$$\tau_{4mn} \equiv \frac{\sin\{(\omega_m - \beta_n)B\}}{2(\omega_m - \beta_n)} - \frac{\sin\{(\omega_m + \beta_n)B\}}{2(\omega_m + \beta_n)} \quad (14)$$

$$\zeta_1 \equiv \frac{\mu_a \mu_w (T_a - T_w)}{\mu_a + \mu_w + \mu_a \mu_w B} \quad (15)$$

$$\zeta_2 \equiv \frac{\mu_a T_a + (1 + \mu_a B) \mu_w T_w}{\mu_a + \mu_w + \mu_a \mu_w B} \quad (16)$$

고유치 (eigenvalue) β_n 은 다음 방정식을 통해 구해진다.

$$\tan(\beta_n B) = \frac{(\mu_a + \mu_w) \beta_n}{\beta_n^2 - \mu_a \mu_w} \quad (17)$$

Fig. 1의 판에서 열응력분포식은 다음과 같다. ⁽¹⁰⁾

$$\sigma_z = \frac{1}{(1-\nu)} \left[-E(x) \alpha_t(x) T(x, t) \right.$$

$$\left. + \frac{4B-6x}{B^2} I_1 + \frac{12x-6B}{B^3} I_2 \right] \quad (18)$$

여기서,

$$I_1 \equiv \int_0^B E(x) \alpha_t(x) T(x, t) dx \quad (19)$$

$$I_2 \equiv \int_0^B E(x) \alpha_t(x) T(x, t) x dx \quad (20)$$

여기서, $E(x)$ 는 x 좌표에 따른 영률 (Young's modulus), $\alpha_t(x)$ 는 x 좌표에 따른 열팽창계수 (thermal expansion coefficient), ν 는 푸아송 비 (Poisson's ratio), σ_z 은 z 방향의 열탄성 응력이다. $E(x)$, $\alpha_t(x)$ 를 x 좌표에 따라서 다음과 같은 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$E(x) = \sum_{k=0}^4 \xi_k \left(\frac{x}{B} \right)^k \quad (21)$$

$$\alpha_t(x) = \sum_{s=0}^4 \xi_s \left(\frac{x}{B} \right)^s \quad (22)$$

여기서, ξ_k , ξ_s 는 실험데이터와 최소자승법 (least square method) 을 통해 구해진 탄성계수식의 k 번째와 계수와 열팽창계수식의 s 번째 계수이다.

식(10), (21), (22) 를 식(18) 에 대입하면 열충격 하에서 응력분포식은 다음과 같다.

$$\sigma_z = \frac{1}{(1-\nu)} \left[- \sum_{k=0}^4 \sum_{s=0}^4 \xi_k \xi_s \left(\frac{x}{B} \right)^{k+s} T(x, t) + \frac{4B-6x}{B^2} I_1 + \frac{12x-6B}{B^3} I_2 \right] \quad (23)$$

여기서,

$$I_1 \equiv \sum_{k=0}^4 \sum_{s=0}^4 \xi_k \xi_s \Omega(k, s, 0) \quad (24)$$

$$I_2 \equiv \sum_{k=0}^4 \sum_{s=0}^4 \xi_k \xi_s \Omega(k, s, 1) \quad (25)$$

$$\Omega(k, s, w) \equiv \frac{\zeta_1 B^{w+2}}{k+s+w+2} + \frac{\zeta_2 B^{w+1}}{k+s+w+1}$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \beta_n d_n \sum_{p=0}^{k+s+p} p! \binom{k+s+w}{p} \frac{B^{w-p}}{\beta_n^{p-1}} \right.$$

$$\sin\left(\beta_n B + \frac{1}{2} p\pi\right) - \mu_w d_n$$

$$\cdot \sum_{p=0}^{k+s+p} p! \binom{k+s+w}{p}$$

$$\left. \frac{B^{w-p}}{\beta_n^{p-1}} \cos\left(\beta_n B + \frac{1}{2} p\pi\right) \right\} e^{-k\beta_n^2(t-t_0)} \quad (26)$$

여기서, $p!$ 는 팩토리알함수 (Factorial function) 를, k, p 를 바이노미알계수 (Binomial coefficient)

를 나타내고 있다.

열응력식 (23)를 최소자승법을 통해 다음과 같은 다항식 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_z &\equiv \sum_{i=1}^{15} \epsilon_i \left(\frac{a}{B}\right)^{i-1} \left(\frac{r}{R}\right)^{i-1} \sin^{i-1} \eta \\ &= \epsilon_1 + \sum_{i=2}^{15} \sigma_i \end{aligned} \quad (27)$$

여기서, ϵ_i 는 최소자승법을 통해 구해진 열응력식의 i 번째 계수이다.

Fig. 2에서 보는 바와 같은 반타원 표면균열을 가진 유한 판의 균열면에 수직으로 균일 응력 σ_0 가 작용할때 응력세기계수 K_{I0} 는 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$K_{I0} = \frac{\sigma_0 \sqrt{\pi a}}{L(\lambda)} (\sin^2 \eta + \alpha^2 \cos^2 \eta)^{1/4} f\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) \quad (28)$$

여기서,

$$f\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) \equiv \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{B}\right)^2 + M_4 \left(\frac{a}{B}\right)^4 \right] g f_1$$

$$M_1 \equiv 1.13 - 0.09\alpha$$

$$M_2 \equiv -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \alpha}$$

$$M_4 \equiv 0.5 - \frac{1}{0.65 + \alpha} + 14(1 - \alpha)^{24}$$

$$g \equiv 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{B}\right)^2 \right] (1 - \sin \eta)^2$$

$$f_1 \equiv \left[\sec\left(\frac{b}{2W} \sqrt{\frac{a}{B}}\right) \right]^{1/2}$$

$$\lambda \equiv 1 - \alpha^2$$

$$0 \leq \alpha \leq 1, \quad b/W < 0.5, \quad 0 \leq \eta \leq \pi \quad (29)$$

여기서, a 는 타원균열의 단축길이, b 는 타원균열의 장축길이, $\alpha (\equiv a/b)$ 는 균열비(crack ratio), η 는 타원의 변수각도(parametric angle of ellipse), B 는 판의 두께, W 는 판의 폭의 1/2이고, $L(\lambda)$ 는 제 2종 완전 타원적분(complete elliptical integral of the

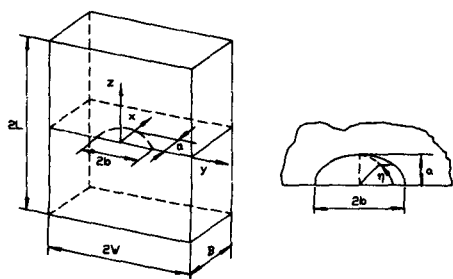


Fig. 2 Semi-elliptical surface crack in a plate

2nd kind)이다.

Vainshtok은 유한체 모델의 반타원 표면균열면에 균일 응력 σ_0 가 균열면에 수직으로 작용할 때 균열면에 수직인 변위의 경계 수정함수 $F(\alpha, a/B, b/W, \eta)$ 를 다음과 같이 제시하였다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} F\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) & \\ &\equiv \frac{5}{2L(\lambda)} \int_0^2 a^2 da \int_0^\pi f^2\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) \\ &\quad \cdot \sqrt{\sin^2 \eta + \alpha^2 \cos^2 \eta} d\eta \\ &\quad - \frac{2}{3\pi} \int_0^\pi f\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) d\eta \\ &\quad - f\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) \end{aligned} \quad (30)$$

식(30)에 식(29)를 대입하면 $F(\alpha, a/B, b/W, \eta)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$F\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) = \frac{5}{3L(\lambda)} Y_1 - f\left(\alpha, \frac{a}{B}, \frac{b}{W}, \eta\right) \quad (31)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Y_1 &\equiv \alpha M^2 [q_1 (1 + f_2)^2 - 4q_2 f_2 (1 + f_2) \\ &\quad + 2q_3 f_2 (1 + 3f_2) - 4q_4 f_2^2 + q_5 f_2^3] \end{aligned}$$

$$Y_2 \equiv M [\pi/2 + (3\pi/4 - 2) f_2]$$

$$f_2 \equiv 0.1 + 0.35 (a/B)^2$$

$$q_i \equiv \frac{1}{2} B e\left(\frac{i}{2}, \frac{1}{2}\right) F_h\left(\frac{i}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{i+1}{2}, \chi\right)$$

$$(i=1, 2, 3, \dots)$$

$$\chi \equiv 1 - 1/\alpha^2 \quad (32)$$

여기서, $Be(i, j)$ 는 베타함수(Beta function)이고 $F_h(i, j, l, m)$ 는 하이퍼지오 메트릭함수(Hypergeometric function)이다.

Fig. 2의 모델은 2자유도 문제이다. Vainshtok은 2자유도 문제에 대해 유한체 모델의 균열면에 균일 응력 σ_0 가 균열면에 수직으로 작용할 때의 응력세기계수 K_{I0} 와 균열면에 불균일 응력 σ_i 가 균열면에 수직으로 작용할 때의 응력세기계수 K_{Ii} 사이의 관계식을 다음과 같이 제시하였다.⁽⁸⁾

$$\int_r \frac{K_{I0} K_{Ii}}{H} \delta R|_{\partial a} \cos \varphi d\Gamma = \int_s \sigma_i \delta u_o|_{\partial a} dS \quad (33)$$

$$\int_r \frac{K_{I0} K_{Ii}}{H} \delta R|_{\partial b} \cos \varphi d\Gamma = \int_s \sigma_i \delta u_o|_{\partial b} dS \quad (34)$$

여기서,

$$K_{Ii} \equiv K_{I0} (A_1^{(i)} + A_2^{(i)} \sin^{i-1} \eta) \quad (35)$$

$$\begin{aligned}\delta R|_{\partial a} &\equiv \frac{\partial R}{\partial a} \delta a \\ &= \sin^2 \theta (\sin^2 \theta + \alpha^2 \cos^2 \theta)^{-3/2} \delta b\end{aligned}\quad (36)$$

$$\begin{aligned}\delta R|_{\partial b} &\equiv \frac{\partial R}{\partial b} \delta b \\ &= \alpha^3 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta + \alpha^2 \cos^2 \theta)^{-3/2} \delta b\end{aligned}\quad (37)$$

$$\begin{aligned}\delta R|_{\partial a} &\equiv \frac{\partial R}{\partial a} \delta a \\ &= \frac{2\sigma_o}{L(\lambda)H} \left[\left[(1-\gamma)f + \alpha \frac{\partial f}{\partial a} \right] \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{1/2} \right. \\ &\quad \left. \cdot \sin^2 \eta + \left[(1-\gamma)F + \alpha \frac{\partial F}{\partial a} \right] \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{3/2} \right] \delta a\end{aligned}\quad (38)$$

$$\begin{aligned}\delta R|_{\partial b} &\equiv \frac{\partial R}{\partial a} \delta b \\ &= \frac{2\sigma_o \alpha}{L(\lambda)H} \left[\left(\gamma f + b \frac{\partial f}{\partial b} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{1/2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + f \frac{r^2}{R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{-1/2} \cos^2 \eta \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 3F \frac{r^2}{R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{1/2} \cdot \cos^2 \eta \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(\gamma F + b \frac{\partial F}{\partial b} \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^{3/2} \right] \delta b\end{aligned}\quad (39)$$

$$\cos \phi = (\sin^2 \theta + \alpha^2 \cos^2 \theta) (\sin^2 \theta + \alpha^4 \cos^2 \theta)^{-1/2}\quad (40)$$

$$d\Gamma = b \sqrt{\sin^2 \eta + \alpha^2 \cos^2 \eta} d\eta\quad (41)$$

$$dS = \frac{abr}{R^2} dr d\eta\quad (42)$$

$$\gamma \equiv \frac{\alpha^2}{\lambda^2} \left[\frac{K(\lambda)}{L(\lambda)} - 1 \right]\quad (43)$$

$$\sin^2 \eta + \alpha^2 \cos^2 \eta = \frac{\sin^2 \theta + \alpha^4 \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta + \alpha^2 \cos^2 \theta}\quad (44)$$

여기서, R 은 타원균열의 중심과 균열 윤곽사이의 거리이고, $\delta R|_{\partial a}$ 는 a 의 증분에 대한 R 의 증분, $\delta R|_{\partial b}$ 는 b 의 증분에 대한 R 의 증분이다. 또한 u_o 는 유한체 모델의 균열면에 균일 응력 σ_o 가 작용할 때의 균열면 변위이고, $\delta u_o|_{\partial a}$ 는 a 의 증분에 대한 u_o 의 증분이고, $\delta u_o|_{\partial b}$ 는 b 의 증분에 대한 u_o 의 증분이다. r, θ 는 타원균열의 중심을 중심으로 하는 극좌표계(polar coordinates)의 좌표들이고, H 는 일반화된 탄성계수(generalized Young's modulus)이고, ϕ 는 타원균열 윤곽에 수직인 성분과 R 사이의 각도이다. dS 는 균열면의 적분요소이며, $d\Gamma$ 는 균열윤곽의 적분 요소이다. $\kappa(\lambda)$ 는 제1종 완전 타원적분이다. $A_1^{(i)}, A_2^{(i)}$ 는 식(35)에서 정의되는 계수이다.

식(38), (39)에 식(29), (31), (43)을 대입하여 얻은 결과식과 식(28), (35), (36), (37), (40)~(42)와 식(27)의 σ_i 를 식(33), (35)에 대입하고 식(44)을 이용하여 정리하면 다음과 같은 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}P_{11}^{(i)} A_1^{(i)} + P_{12}^{(i)} A_2^{(i)} &= V_1^{(i)} \\ P_{21}^{(i)} A_1^{(i)} + P_{22}^{(i)} A_2^{(i)} &= V_2^{(i)} \quad (i=2, 3, 4, \dots, 15)\end{aligned}\quad (45)$$

여기서,

$$\begin{aligned}P_{11}^{(i)} &\equiv \alpha M^2 [q_3(1+f_2)^2 - 4q_4 f_2(1+f_2) \\ &\quad + 2q_5 f_2(1+3f_2) - 4q_6 f_2^2 + q_7 f_2^2]\end{aligned}\quad (46)$$

$$P_{21}^{(i)} \equiv Y_1 - P_{11}^{(i)}\quad (47)$$

$$\begin{aligned}P_{12}^{(i)} &\equiv \alpha M^2 [q_{i+2}(1+f_2)^2 - 4q_{i+3} f_2(1+f_2) \\ &\quad + 2q_{i+4} f_2(1+3f_2) - 4q_{i+5} f_2^2 + q_{i+6} f_2^2]\end{aligned}\quad (48)$$

$$\begin{aligned}P_{22}^{(i)} &\equiv \alpha M^2 [q_i(1+f_2)^2 - 4q_{i+1} f_2(1+f_2) \\ &\quad + 2q_{i+2} f_2(1+3f_2) - 4q_{i+3} f_2^2 + q_{i+4} f_2^2]\end{aligned}\quad (49)$$

$$\begin{aligned}V_1^{(i)} &\equiv \varepsilon_i \frac{2L(\lambda)}{\pi \sigma_o} \left(\frac{a}{B} \right)^{i-1} \left[D_1^{(i)} [(1-\gamma) Q_1^{(i)} + Q_2^{(i)}] \right. \\ &\quad \left. + D_2^{(i)} Q_1^{(i+2)} + D_3^{(i)} Q_3^{(i+2)} \right. \\ &\quad \left. + D_4^{(i)} [(1-\gamma) Q_3^{(i)} + Q_4^{(i)}] \right]\end{aligned}\quad (50)$$

$$\begin{aligned}V_2^{(i)} &\equiv \varepsilon_i \frac{2L(\lambda)}{\pi \sigma_o} \left(\frac{a}{B} \right)^{i-1} \left[D_1^{(i)} [\gamma Q_1^{(i)} + Q_3^{(i)}] \right. \\ &\quad \left. + D_2^{(i)} [Q_1^{(i)} - Q_1^{(i+2)}] + D_3^{(i)} [Q_3^{(i)} - Q_3^{(i+2)}] \right. \\ &\quad \left. + D_4^{(i)} [\gamma Q_3^{(i)} + Q_4^{(i)}] \right]\end{aligned}\quad (51)$$

$$D_1^{(i)} \equiv \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(i/2 + 1/2)}{4\Gamma(i/2 + 2)}\quad (52)$$

$$D_2^{(i)} \equiv \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(i/2 + 3/2)}{2\Gamma(i/2 + 2)}\quad (53)$$

$$D_3^{(i)} \equiv \frac{3\sqrt{\pi} \Gamma(i/2 + 3/2)}{4\Gamma(i/2 + 3)}\quad (54)$$

$$D_4^{(i)} \equiv \frac{3\sqrt{\pi} \Gamma(i/2 + 1/2)}{8\Gamma(i/2 + 3)}\quad (55)$$

$$\begin{aligned}Q_1^{(i)} &\equiv M \left[2^{i-2} (1+f_2) B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. - 2^i f_2 B_e \left(\frac{i+1}{2}, \frac{i+1}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + 2^i f_2 B_e \left(\frac{i+2}{2}, \frac{i+2}{2} \right) \right]\end{aligned}\quad (56)$$

$$\begin{aligned}Q_2^{(i)} &\equiv M_a \left[2^{i-2} (1+f_2) B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. - 2^i f_2 B_e \left(\frac{i+1}{2}, \frac{i+1}{2} \right) \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+2^i f_2 B_e \left(\frac{i+2}{2}, \frac{i+2}{2} \right) \\
 &+M \left[2^{i-2} (1+f_2') B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) \right. \\
 &-2^i f_2 B_e \left(\frac{i+1}{2}, \frac{i+1}{2} \right) \\
 &+2^i f_2 B_e \left(\frac{i+1}{2}, \frac{i+1}{2} \right) \left. \right] \\
 &+2^i f_2' B_e \left(\frac{i+2}{2}, \frac{i+2}{2} \right) \quad (57)
 \end{aligned}$$

$$Q_3^{(i)} \equiv 2^{i-2} \left[\frac{5Y_1}{3L(\lambda)} - \frac{4Y_2}{3\pi} \right] B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) - Q_1^{(i)} \quad (58)$$

$$Q_4^{(i)} \equiv 2^{i-2} a \left[\frac{5U_1}{3L^2(\lambda)} - \frac{4U_2}{3\pi} \right] B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) - Q_2^{(i)} \quad (59)$$

$$\begin{aligned}
 Q_5^{(i)} \equiv &M_0 \left[2^{i-2} (1+f_2) B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) \right. \\
 &-2^{i-2} f_2 B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) + 2^i f_2 B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) \left. \right] \quad (60)
 \end{aligned}$$

$$Q_6^{(i)} \equiv 2^{i-2} b \left[\frac{5f_1}{3L^2(\lambda)} - \frac{4f_2}{3\pi} \right] B_e \left(\frac{i}{2}, \frac{i}{2} \right) - Q_5^{(i)} \quad (61)$$

$$M_a \equiv a \frac{\partial M}{\partial a}, \quad M_b \equiv a \frac{\partial M}{\partial b} \quad (62)$$

$$f_2' \equiv \partial \frac{\partial f_2}{\partial a} \quad (63)$$

$$U_1 \equiv \frac{\partial Y_1}{\partial a} L(\lambda) - \frac{\partial L(\lambda)}{\partial a} Y_1 \quad (64)$$

$$U_2 \equiv \frac{\partial Y_2}{\partial a} \quad (65)$$

$$J_1 \equiv \frac{\partial Y_1}{\partial b} L(\lambda) - \frac{\partial L(\lambda)}{\partial b} Y_1 \quad (66)$$

$$J_2 \equiv \frac{\partial Y_2}{\partial b} \quad (67)$$

여기서, $\Gamma(i, j)$ 는 감마함수(Gamma function)을 나타낸다.

식(45)을 연립하면 각각의 i 에 대해 $A_1^{(i)}$, $A_2^{(i)}$ 를 구할 수 있다. 최종적으로 열충격 응력세기계수는 중첩원리로부터 각각의 i 에 대한 응력세기계수의 합으로 구해질 수 있다. 결과적인 열충격 응력세기계수 식 K_I 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_I &= \sum_{i=0}^{15} K_{Ii} \\
 &\equiv K_{I0} \epsilon_1 / \sigma_0 + \sum_{i=2}^{15} K_{I0} (A_1^{(i)} + A_2^{(i)} \sin^{i-1} \eta) \quad (68)
 \end{aligned}$$

다음 식을 만족하는 온도와 시간에서 균열은 진전하게 된다.

$$K_I(T, t) \geq K_{Ic}(T) \quad (69)$$

건전성 평가방법에 대한 계통도를 Fig. 3에서 나타내고 있다.

3. 실험

사용한 재료는 Cr Mo V강과 2.25 Cr Mo강이며 그 화학 조성과 물성^(12,13)은 Table 1과 2와 같다.

Cr Mo V강과 2.25Cr Mo강의 인장물성치 측정 시험은 ASTM⁽¹⁴⁾과 KSB0802⁽¹⁵⁾를 참고하여 Fig. 4⁽¹⁶⁾의 시험편으로 온도를 변화시키면서 수행하였다.

Cr Mo V강 실험결과 Young's modulus는 Fig. 5와 같다. 2.25Cr Mo강 실험은 200°C, 375°C의 온도에서 수행하였고 이에 따른 Young's modulus는 200°C에서 98 GPa, 375°C에서 96.8 GPa이었다. 실험 결과 각 온도에서의 인장물성치는 기존에 보고된 값들과 비슷한 경향을 보이고 있다.^(17,13)

파괴인성치 K_{Ic} 는 사용기계의 용량을 감안하여 J_{Ic} 시험을 ASTM^(18,19)에 근거하여 수행하여 그 결과로부터 K_{Ic} 를 구하는 간접적인 방법을 채택하였다. Fig. 6은 J_{Ic} 측정용 콤팩트 인장시험편(compact tension specimen)이다.

본 실험에서는 해중 콤플라이언스방법(unloading

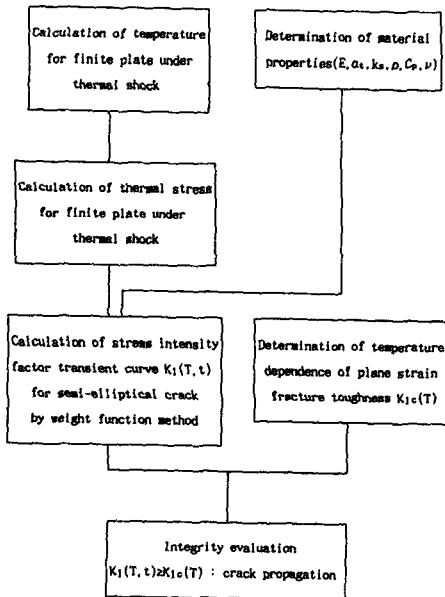


Fig. 3 Flow chart of integrity evaluation

Table 1 Chemical composition and Material characteristics of Cr Mo V steel⁽¹²⁾ (weight %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Fe	
0.26	0.67	0.12	0.005	0.003	1.13	1.38	0.27	Base	
Temperature (°C)					38	121	204	316	427
Density (kg/m ³)					7850				
Specific heat (J/kg°C)					449	492	526	569	621
Thermal conductivity (W/m°C)					37.2	38.1	37.9	36.9	35.0
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ m/m°C)					10.0	11.0	11.9	12.9	13.7

Table 2 Chemical composition and Material characteristics of 2.25Cr Mo steel⁽¹³⁾ (weight %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Fe	
0.12	0.4	0.22	0.007	0.003	2.18	0.97	0-.03	Base	
Temperature (°C)					25	100	200	300	400
Thermal conductivity (W/m°C)					36.36	36.36	36.36	36.36	33.50
Thermal diffusivity (m ² /h)					0.038	0.037	0.036	0.030	0.027
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ m/m°C)					11.7	12.4	13.8	14.2	14.6

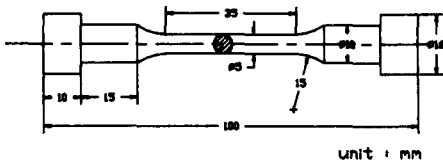


Fig. 4 Tensile specimen

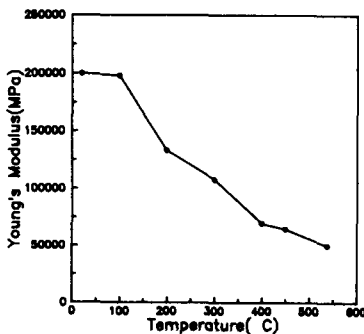


Fig. 5 Young's modulus vs. temperature

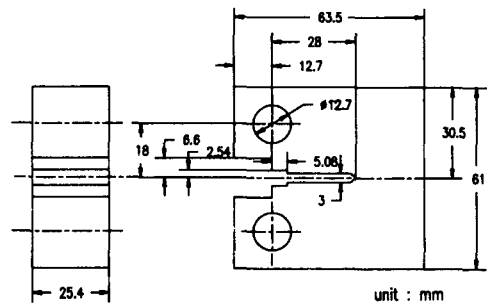


Fig. 6 Compact tension specimen

성치 J_{IC} 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$K_{IC}^2 = \frac{EJ_{IC}}{1-\nu^2} \tag{70}$$

ν 를 0.299로 하였을 때 Cr Mo V강과 2.25Cr Mo강의 K_{IC} 결과는 Table 3과 같다. K_{IC} 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 기존의 결과⁽²⁰⁻²²⁾와 비교적 근사한 값을 나타내었다.

compliance method)을 이용하였으며 각 온도에 따른 J_{IC} 결과는 Table 3과 같다.

평면변형률 파괴인성치 K_{IC} 와 탄성소성 파괴인

열충격실험의 시험편 형상은 Fig. 8과 같으며 방전 가공하여 제작하였다.

열충격실험을 시작하기 전에 제작된 시험편의 노

Table 3 Fracture toughness at each temperature

Temperature(°C)	Cr Mo V		2.25Cr Mo	
	J _{IC} (MPam)	K _{IC} (MPam ^{1/2})	J _{IC} (MPam)	K _{IC} (MPam ^{1/2})
100	0.024	71.00	-	-
150	0.033	76.64	-	-
200	0.063	95.70	0.185	148.25
300	0.195	152.50	-	-
375	-	-	0.192	145.79
400	0.135	103.10	-	-
538	0.280	122.80	-	-

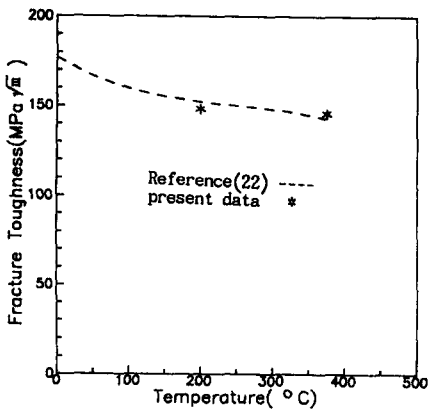
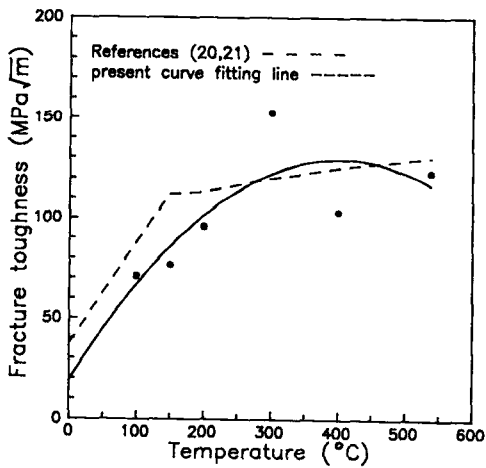


Fig. 7 K_{IC} vs. temperature curve for Cr Mo V & 2.25 Cr Mo steel

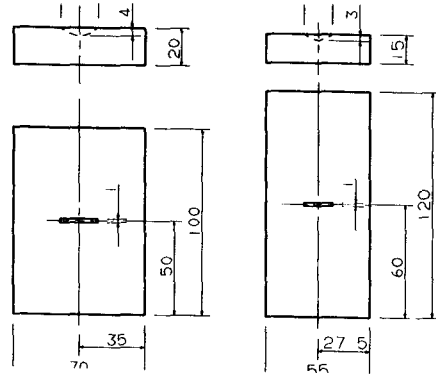


Fig. 8 Thermal shock specimen

치(notch)앞에 소성역이 없는 날카로운 균열 운곽 선단을 얻기 위하여 3점 굽힘 피로하중을 걸어서 선피로균열을 만들었으며 측정된 타원 장축의 길이는 Cr Mo V강은 22.7 mm이고 2.25Cr Mo강은 17.6 mm였다.

선피로균열을 낸 후 Fig. 1(b)와 같은 열충격을 가할때 온도구배가 시험편의 두께방향으로만 생기도록 시험편의 옆면들을 단열재 카오울(kaowool)과 알루미늄 테이프(aluminum tape)로 봉하였다.

그리고 아론세라믹(aron ceramic)으로 열전대(thermocouple)을 균열이 없는 시험편의 후면 중앙에 부착시킨 후 고온로에 넣어 570°C까지 가열하였다. 그후 물로 균열면에 열충격을 가하였으며 물과 대기의 온도는 수은온도계로 측정하였다. 물과 대기 온도 측정결과는 각각 8°C와 25°C였다. 시험편이 대기에 노출될 때부터 열충격을 받을 때까지의 시

간과 열충격을 받은 후 시험편이 파괴될 때까지의 시간은 AE(acoustic emission) 장비로 측정하였다. 열충격 실험의 장비연결은 Fig. 9와 같다.

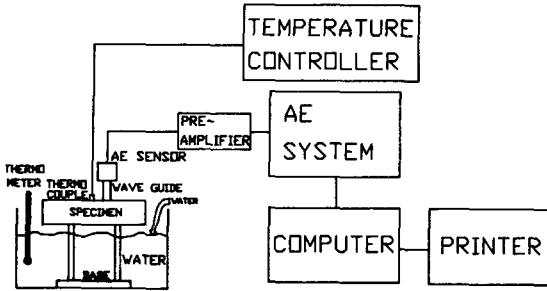
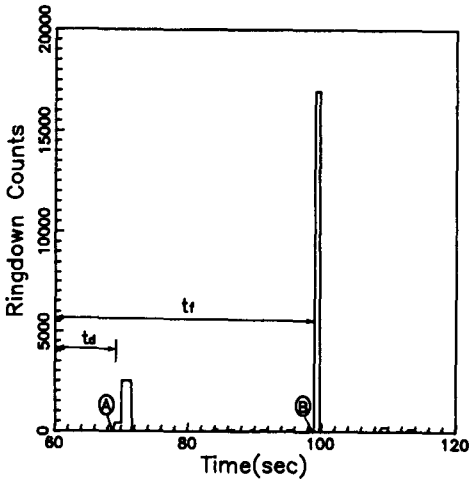
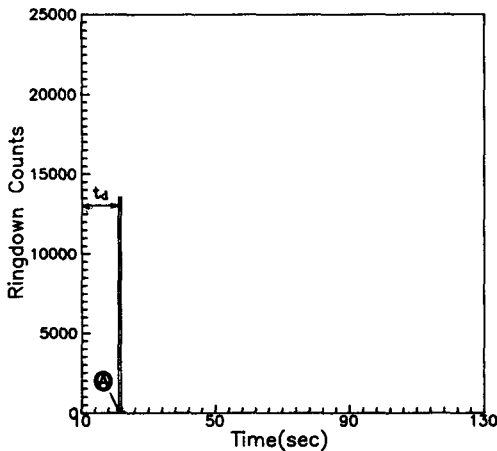


Fig. 9 Block diagram of equipments for thermal shock test



(a) Cr Mo V steel



(b) 2.25Cr Mo steel

Fig. 10 RDC vs. time.

AE센서는 공진주파수가 375 KHz인 고온 압전형 센서 (high temperature piezoelectric type sensor)를 사용하였으며 시험편을 고온로에서 꺼낸 후 Fig. 9에서와 같이 base에 올려놓은 후 부착하였으며 시험편에 부착할 때는 센서에 무리한 열이 가해지지 않도록 웨이브 가이드(wave guide)을 이용하여 균열이 없는 시험편의 후면에 부착하였다.

이러한 준비가 완료된 후 물을 균열이 없는 시험편의 전면까지 부어서 열충격을 주었다. Cr Mo V강의 경우 물이 시험편의 전면에 닿을 때의 작은 충격으로 Fig. 10(a)의 ㉠점과 같이 RDC(ring down count)가 발생되고 균열이 열충격에 의해 전파할 때의 충격으로 Fig. 10(a)의 ㉡점과 같이 RDC가 발생되었다. 이 결과로부터 시험편이 대기중에 노출된 때부터 열충격을 받기 전까지의 시간 t_d 와 균열이 전파할 때의 시간 t_r 를 Fig. 10(a)와 같이 측정하였다. 측정결과는 t_d 가 69초이고 t_r 가 99초였다. 또한 물이 시험편의 전면에 닿기 바로 전의 시험편 온도와 균열이 전파하는 순간의 시험편 온도를 열전대를 이용하여 측정하였다. 측정결과는 t_d 시에 451°C이고 t_r 시에 301°C였다.

2.25Cr Mo강의 경우 물이 시험편의 전면에 닿을 때의 충격으로 Fig. 10(b)의 ㉠점과 같이 상당한 RDC가 발생되고 그 후 RDC는 발생하지 않았다. 이러한 결과로부터 균열성장은 열충격 순간에 발생된 것으로 보인다. 또한 물이 시험편에 닿는 순간의 시간 t_d 는 21초이고 t_d 시의 온도는 469°C였다.

열충격실험을 끝낸 후 3점 굽힘피로하중으로 시험편을 완전 파괴시켰다. Fig. 11은 Cr Mo V강 시험편의 파단면인데 열충격 전의 반타원 표면균열의 크기 a 와 b 는 각각 4.8 mm, 11.35 mm로 측정되었다. 이러한 결과로 보아 열충격으로 인한 균열성장은 미시적인 것으로 판단되며 이 미시적인 균열 성장으로 인해 상당한 RDC(Fig. 10)가 발생된

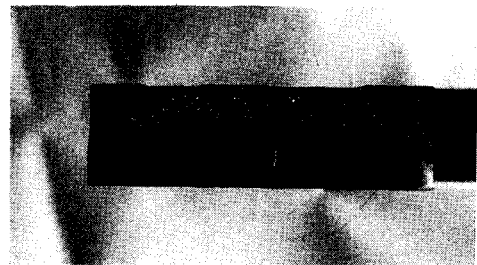


Fig. 11 Fracture surface

것 같다.

4. 검토

Fig. 12(a)는 Cr Mo V강의 경우로 식(5)에 $B=20$ mm, $W=70$ mm, $T_o=507^\circ\text{C}$, $T_a=25^\circ\text{C}$, $\rho=7850$ kg/m³, $C_p=531$ J/kg $^\circ\text{C}$, $k_s=37$ W/m $^\circ\text{C}$, $h_a=0.04$ KW/m² $^\circ\text{C}$, $t=69$ sec을 대입하여 얻은 온도 분포이다. Fig. 12(a)로부터 $x=20$ mm인 곳, 즉 시험편의 후면의 온도가 450°C 임을 알수 있다. 이는 측정치 451°C 와 잘 일치하고 있다.

Fig. 12(b)는 2.25Cr Mo강의 결과로 식(5)에 $B=15$ mm, $W=55$ mm, $T_o=511^\circ\text{C}$, $T_a=25^\circ\text{C}$, $k_s=36.36$ W/m $^\circ\text{C}$, $\alpha=0.0369$ m²/h, $h_a=0.04$ KW/

m² $^\circ\text{C}$, $t=21$ sec을 대입하여 얻은 온도분포이다. Fig. 12(b)로부터 $x=15$ mm인 곳, 즉 시험편의 후면의 온도가 472°C 임을 알 수 있다. 이는 측정치 469°C 와 잘 일치하고 있다.

Fig. 13(a)는 식(10)에 $B=20$ mm, $W=70$ mm, $T_o=507^\circ\text{C}$, $T_a=25^\circ\text{C}$, $T_w=8^\circ\text{C}$, $\rho=7850$ kg/m³, $C_p=531$ J/kg $^\circ\text{C}$, $k_s=37$ W/m $^\circ\text{C}$, $h_a=0.04$ KW/m² $^\circ\text{C}$, $h_w=0.65$ KW/m² $^\circ\text{C}$, $t_d=69$ sec을 대입한 Cr Mo V강 시험편의 시간 지남($t > t_d$)에 따른 온도 분포를 나타내고 있다. Fig. 13(a)로부터 $x=20$ mm인 곳, 즉 시험편의 후면 온도가 $t_f=99$ sec일 때 291°C 임을 알수 있다. 이러한 결과는 측정치 301°C 와 잘 일치하고 있다.

Fig. 13(b)는 식(10)에 $B=15$ mm, $W=55$ mm,

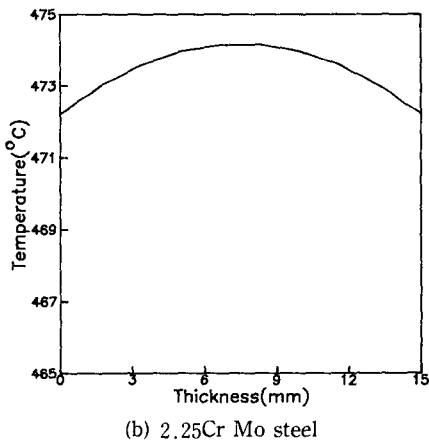
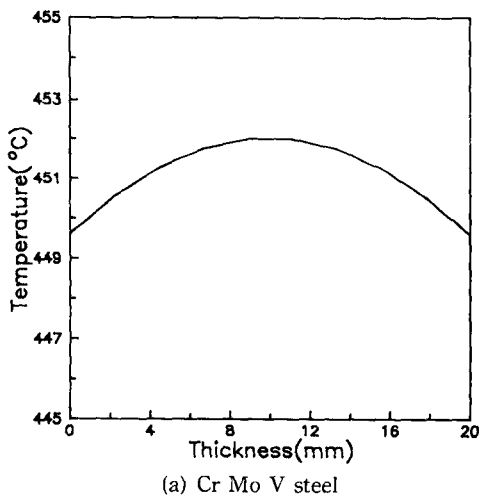


Fig. 12 Temperature distribution vs. thickness before thermal shock

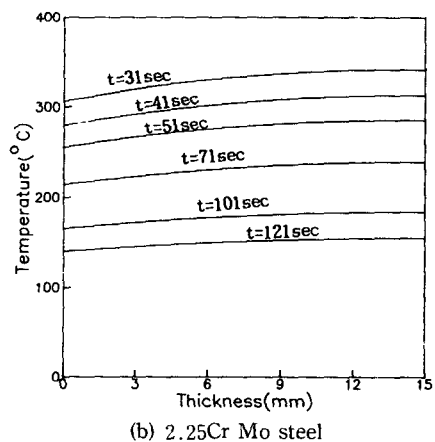
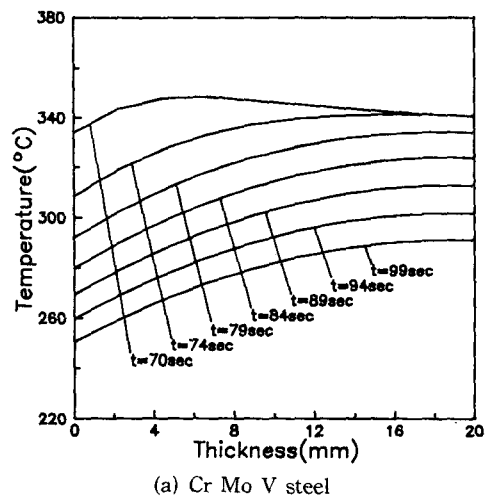


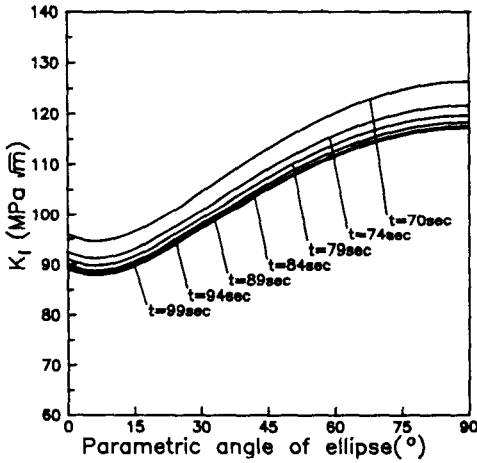
Fig. 13 Temperature distribution vs. thickness after thermal shock for various times t

$T_o=511^{\circ}\text{C}$, $T_a=25^{\circ}\text{C}$, $T_w=22^{\circ}\text{C}$, $\alpha=0.369\text{ m}^2/\text{h}$, $k_s=36.36\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, $h_a=0.04\text{ KW/m}^2\text{C}$, $h_w=0.65\text{ KW/m}^2\text{C}$, $t_d=21\text{ sec}$ 을 대입할 때 2.25Cr Mo강 시험편의 시간 지남($t > t_d$)에 따른 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 13(b)로부터 $x=15\text{ mm}$ 인 곳, 즉 시험편의 후면 온도를 시간에 따라 알 수 있다.

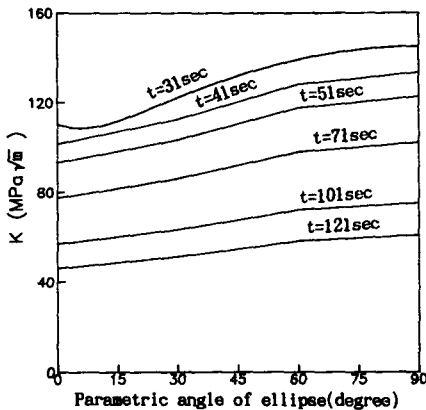
Fig. 14(a)은 Table 2의 열팽창계수들과 Fig. 5의 영률들을 이용하고 $a=4.8\text{ mm}$, $b=11.35\text{ mm}$, $B=20\text{ mm}$, $W=70\text{ mm}$, $T_o=507^{\circ}\text{C}$, $T_a=25^{\circ}\text{C}$, $T_w=8^{\circ}\text{C}$, $\nu=0.299$, $\rho=7850\text{ kg/m}^3$, $C_p=531\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, $k_s=37\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, $h_a=0.04\text{ KW/m}^2\text{C}$, $h_w=0.65\text{ KW/m}^2\text{C}$, $t_d=69\text{ sec}$ 을 식(68)에 대입할 때 Cr Mo V강 시험편의 시간 지남에 따른 열충격 응력세기계수를 균열 윤곽 η 에 대해 나타내고 있다.

한편 구한 열충격 응력세기계수를 시간에 따라 균열 윤곽의 온도에 대해 나타내고 Fig. 7(a)의 온도에 따른 K_{Ic} 곡선을 첨가하면 Fig. 15(a)와 같다. Fig. 15(a)로부터 K_{Ic} 이 처음으로 K_{Ic} 보다 큰 값을 보이는 경우는 $\eta=90^{\circ}$, $t=96\frac{26}{60}\text{ sec}$ 에서 얻어졌다. 이 결과는 측정치 $t_f=99\text{ sec}$ 와 잘 일치하고 있다.

Fig. 14(b)는 Table 2의 열팽창계수들과 참고문헌⁽¹³⁾의 영률들을 이용하고 $a=3.2\text{ mm}$, $b=8.8\text{ mm}$, $B=15\text{ mm}$, $W=55\text{ mm}$, $T_o=511^{\circ}\text{C}$, $T_a=25^{\circ}\text{C}$, $T_w=22^{\circ}\text{C}$, $\nu=0.299$, $\alpha=0.369\text{ m}^2/\text{h}$, $k_s=36.36\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, $h_a=0.04\text{ KW/m}^2\text{C}$, $h_w=0.65\text{ KW/m}^2\text{C}$, $t_d=21\text{ sec}$ 을 식(68)에 대입할 때 2.25Cr Mo강 시험편의 시간 지남에 따른 열충격 응력세기계수를 균열 윤곽 η 에 대해 나타내고 있다. 한편 구한 열

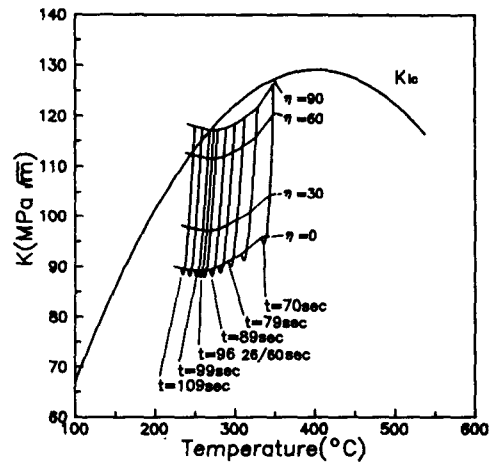


(a) Cr Mo steel

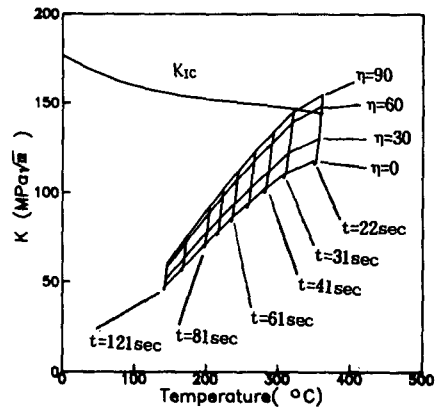


(b) 2.25Cr Mo steel

Fig. 14 Thermal stress intensity factor K_{Ic} vs. parametric angle of ellipse for various times t



(a) Cr Mo V steel



(b) 2.25Cr Mo steel

Fig. 15 Integrity evaluation under thermal shock

충격 응력세기계수를 시간에 따라 균열 윤곽의 온도에 대해 나타내고 참고문헌⁽²²⁾의 온도에 따른 K_{Ic} 곡선을 첨가하면 Fig. 15(b)와 같다. Fig. 15(b)로부터 $t=31$ sec 이전의 열충격 초기에 K_I 이 K_{Ic} 보다 큰 값을 보이는 경우가 일어났다. 그리고 $t=31$ sec 이후에는 K_I 이 K_{Ic} 보다 큰 값을 보이는 경우가 나타나지 않았다. 뿐만 아니라 $t=21$ sec, 즉 열충격 순순에 이미 $K_I > K_{Ic}$ 이므로 열충격 순간 균열이 전파하는 것으로 예측하고 있다. 이러한 결과는 열충격 순간 상당한 AE발생과 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

열충격하에 있는 반타원 표면균열의 건전성 평가에 대한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 반타원 표면균열에 대한 열충격 열응력세기계수를 결정하였다.

(2) 열충격후 경과시간에 상관없는 평면변형률 파괴 인성치를 이용하여 균열이 전파하는 균열윤곽 위치와 균열전파 시간을 쉽게 알 수 있는 반타원 표면균열에 대한 건전성 평가법을 개발하였다.

참고문헌

- (1) Yagawa, G., Ichimiya, M. and Ando, Y., 1979, "Theoretical and Experimental Analysis of Semi-Elliptical Surface Cracks Subject to Thermal Shock," *ASTM STP 677*, pp. 381~398.
- (2) Cheverton, R. D., Caonico, D. A., Iskander, S. K., Bolt, S. E., Holtz, P. P. and Nanstad, W. J., 1983, "Fracture Mechanics Data Dedeuced from Thermal Shock and Related Experiments with LWR Pressure Vessel Material," *J. of Press. Vess. Tech.*, Vol. 105, pp. 102~110.
- (3) Jung, J. and Kannien, M. F., 1983, "An Analysis of Dynamic Crack Propagation and Arrest in an Nuclear Pressure Vessel under Thermal Shock Conditins," *J. of Press. Vess. Tech.*, Vol. 105, pp. 111~116.
- (4) Kasier, W. T. and Monty, B. S., 1986, "Emergency Response Guidance for Reactor Vessel Pressurized Thermal Shock Events," *J. of Press. Vess. Tech.*, Vol. 108, pp. 346~351.
- (5) Lee, K. Y. and Sim, K. B., 1990, "Thermal Shock Stress Intensity Factor by Bueckner's Weight Function Method," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 37, No. 4, pp. 799~804.
- (6) Bueckner, H. F., 1970, "A Novel Principle for the Computation of Stress Intensity Factors," *Zeischrift fur Angewandte Mathematik and Mechanik*, Voll. 50, No. 9, pp. 529~546.
- (7) Matsubara, M. and Okamura, H., 1988, "An Integrity Evaluation Mehod of the Pressure Vessel of Nuclear Reactors under Pressurized Thermal Shock," *JSME Int. J.*, Series, I, Vol. 31, No. 4, pp. 732~737.
- (8) Vainshotok, V. A., 1991, "Application of the Weight Function Method to Solving Multiparametric Three-Dimensional Fracture Mechanics Problems," *Int. J. of Frac.*, Vol. 47, pp. 201~212.
- (9) Carslaw, H. S., 1959, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford Press, London, pp. 114~120.
- (10) Boley, B. A. and Weiner, J. H., 1960, *Theory of Thermal Stresses*, John Wiley & Sons. Inc., New York, p. 278.
- (11) Newman, Jr. J. C. and Raju, I. S., 1981, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 15, No. 1~2, pp. 185~192.
- (12) ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 1989, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Appendices.
- (13) Rothman, M. F., 1988, "High-Temperature Property Data : Ferrous Alloys", *ASM International*.
- (14) *ASTM E 8M-89b*, "Standard Test Method for Tensile Tesing of Metallic Materials."
- (15) *KS B 0802*, "금속재료 인장시험방법"
- (16) *KS B 0801*, "금속재료 인장시험편"
- (17) *EPRI NP-1023*, 1979, Fracture and Fatigue Properties of 1Cr-Mo-V Bsinitic Tubine Rotor Steels.
- (18) *ASTM E 813-89*, "Standard Test Method for J_{Ic} , A Measure of Fracture Toughness."
- (19) *ASTM E 1152-87*, "Standard Test Method for Determining -R Curves."
- (20) Steiner, J. E., Swaminatha, V. P. and Jaffee,

- R. I., 1980, "Evaluation of Advanced Melting Technology for Large High Temperature Steam Turbine Rotor Forgings," *In Proc. of the Forge Masters Conference*, Dusseldorf.
- (21) *ERRI CS/EL-5593*, March, 1988, Vol. 2, Project 2481-3, 2785-1, Final Report.
- (22) Viwanathan, R., 1989, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," *ASM International*.