2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

대형액금로 원자로용기의 크립피로 균열성장 해석

Evaluation of Creep-Fatigue Crack Growth for Large-Scale FBR Reactor Vessel

주영상, 김종범, 김석훈, 유봉

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

500°C 이상의 고온에서 운전되는 액체금속로의 설계에 있어서 원자로용기의 고온 크립피로 균열성장 평가는 매우 중요하다. 본 연구에서는 일본 JNC에서 제안된 크립피로 균열성장 평가법을 이용하여 대형 액체금속로의 원자로용기에 대한 크립피로 균열성장에 대한 해석을 수행하였다. FINAS code를 이용하여 원자로용기에 작용하는 열응력을 계산하고 운전 하중조건에 따른 축방향, 원주방향, 반경방향 및 Von Mises 응력분포를 구하였다. 축방향과 반경방향응력이 최대로 작용하는 지점에서 종방향 및 원주방향 반타원 표면균열을 가정하였다. 결함의 종류는 가압 열충격해석(PTS)에서 사용되는 PTS 균열, 초음파검사에서 탐지 가능한 최소 균열(NDE균열) 그리고 열피로에서 쉽게 발생하는 shallow 균열을 선정하여 이 결함에 대한 크립피로 균열성장을 해석하였다. 종방향 열응력이 크게 작용하기 때문에 원주방향 균열이 종방향 균열보다 더 크게 성장하였다. PTS 균열의 경우에 총 균열 진전량이 2mm 정도로 해석되어 발전소 전 수명기간(427 cycles) 후에도 원자로용기의 구조 건전성이 유지되는 것으로 평가되었다.

Abstract

Creep fatigue crack growth contributes to the failure of FBR reactor vessels in high temperature condition. In the design stage of reactor vessel, crack growth evaluation is very important to ensure the structural safety. In this study, creep-fatigue crack growth evaluation has been performed for the semi-elliptical surface cracks subjected to thermal loading by simplified JNC method. The thermal stress analysis of a large-scale FBR reactor vessel has been carried out for the load conditions by FINAS code. The distributions of axial, radial, hoop, and Von Mises stresses were obtained for the loading conditions. At the maximum point of the axial and hoop stress, the longitudinal and circumferential surface cracks (i.e. PTS, NDE and shallow cracks) were postulated. Using the maximum and minimum values of stresses, the creep-fatigue crack growth of the proposed cracks was simulated. The crack growth rate of circumferential cracks becomes greater than that of longitudinal cracks. Circumferential cracks become more hazardous than longitudinal cracks in the reactor. The total crack growth of the largest PTS crack is about 2mm after 427 cycles. The structural integrity of a large-scale reactor can be maintained for the plant life.

1. 서 론

액체금속로의 원자로용기는 500~550°C의 고온에서 운전되기 때문에 심한 열하중을 받는다. 원자로용기는 실제 제작 과정에서 용접결함이 존재하거나 운전 중에 열피로 균열이 발생하게 되고 고온에서 이 결함들은 크립피로 현상에 의해 균열의 크기가 성장하게 된다. 대형 액체금속로의 경우에 원주방향 용접부와 종방향 용접부가 존재하게 되는데 소듐액면이 종방향 용접부에 접촉하게 되어 용접부에 열하중이 작용하게 된다. 액체금속로 원자로의 구조 설계단계에서 원자로용기의 전 수명기간 동안의 구조건전성을 확보하기 위해서는 결함에 대한 크립피로 균열 성장에 대한 해석이 매우 중요하다. 일본 JNC와 프랑스 CEA에서는 크립피로 균열성장을 예측하는 단순 평가법을 제안하였다.[1,2,3] 이 평가법에 대한 상호비교 시험을 수행한 결과 두 방법은 실제 균열성장을 약간 보수적으로 예측하는 것으로 분석되었다.[4,5] 본 연구에서는 JNC에서 제안된 크립피로 균열 평가법을 분석한다. 그리고 대형 액체금속로 원자로용기에 작용하는 열하중 분포를 유한요소해석으로 구하고 여러 가지 형태의 반타원 표면 균열에 대하여 JNC에서 제안된 크립피로 균열성장 해석방법을 이용하여 크립피로 균열진전에 대한 해석을 수행한다.

2. 크립피로 균열성장 평가법

JNC 크립피로 균열성장 평가법에는 균열성장률이 다음과 같이 피로에 의한 균열성장률과 크립에 의한 균열성장률의 선형 합으로 구해진다:

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_f + \left(\frac{da}{dN}\right)_c . \tag{1}$$

여기서 $(da/dN)_f$ 는 피로균열 성장률이고 $(da/dN)_c$ 는 크립균열 성장률이다.

2.1 피로균열성장

피로 균열성장은 다음과 같이 Paris law를 이용하여 예측될 수 있다:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_f = C_f \cdot \left(\Delta J_f\right)^{m_f} . \tag{2}$$

여기서 대형 액체금속로 원자로용기 재료인 316FR의 경우 $C_f = 1.4935 \times 10^{-5}$ 이고 $m_f = 1.8158$ 이다.

2.1.1 응력확대계수 범위

Fig. 1과 같이 판의 표면에 있는 반타원형 결함에 대한 응력확대계수(SIF) 범위는 다음 식으로 구해진다:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} , \tag{3}$$

$$K_{\max} = \left(F_m \cdot \sigma_{m-\max} + F_b \cdot \sigma_{b-\max} + F_p \cdot \sigma_{p-\max}\right) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} , \tag{4}$$

$$K_{\min} = \left(F_m \cdot \sigma_{m-\min} + F_b \cdot \sigma_{b-\min} + F_p \cdot \sigma_{p-\min}\right) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} . \tag{5}$$

여기서

$\sigma_{m-\max}$, $\sigma_{b-\max}$, $\sigma_{p-\max}$: 최대응력지점에서의 막응력, 굽힘응력 및 피크응력,

$\sigma_{m-\min}$, $\sigma_{b-\min}$, $\sigma_{p-\min}$: 최소응력지점에서의 막응력, 굽힘응력 및 피크응력,

F_m, F_b, F_p : 막응력, 굽힘응력 및 피크응력에 대한 무차원 SIF,

a : 균열 깊이.

2.1.2 유효 응력확대계수 범위

유효응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 는 Walker's formula[2]를 이용하여 다음과 같이 구해진다:

$$\Delta K_{eff} = q_{clos} \cdot \Delta K . \tag{12}$$

여기서 q_{clos}는 균열닫힘계수이고 R은 최대최소 응력비이다.

$$q_{clos} = (1-R)^{n-1}, \tag{13}$$

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} . \tag{14}$$

압축응력이 균열성장에 기여하지 않는다고 가정하면 균열닫힘 효과는 무시할 수 있고 n은 다음과 같이 정의된다:

$R \geq 0$: $n = 1$ $\quad q_{clos} = 1$,

$R < 0$: $n = 0$ $\quad q_{clos} = 1/(1-R)$.

2.1.3 탄성 J-적분 범위

탄성 J 적분 범위 ΔJ_e 는 유효응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 를 이용하여 다음과 같이 구해진다:

$$\Delta J_e = \frac{\Delta K_{eff}^{\ 2}}{E^*} . \tag{15}$$

여기서 평면응력 조건에서는 $E^* = E$ 이고 평면변형율 조건에서는 $E^* = E/(1-\nu^2)$ 이다.

2.1.4 소성변형 영향

소성변형이 고려된 피로 J 적분 범위 ΔJ_{ep}는 탄성 J 적분 범위 ΔJ_e에 탄소성 보정계수 f_{ep}가 반영되어 다음과 같이 계산된다:

$$\Delta J_{ep} = f_{ep} \cdot \Delta J_e , \tag{16}$$

$$f_{ep} = \frac{E \cdot \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{\sigma_{ref}^{\ 3}}{2\sigma_y^{\ 2} \cdot E \cdot \varepsilon_{ref}} . \tag{17}$$

여기서 σ_{ref} 는 기준 응력이고 ε_{ref} 은 기준 변형률이며 σ_y 는 항복응력이다.

JNC 평가법에서 기준응력은 막응력과 굽힘응력에 의해 다음과 같이 구해진다:

$$\sigma_{ref} = F_{net} \cdot (p_m \cdot \sigma_m + p_b \cdot \sigma_b) . \tag{18}$$

여기서 F_{net}은 단면형태함수이고 p_m과 p_b는 보정계수이다. 변형률제어 조건에서의 F_{net}은 하중상태에 따른 상수이다. 즉. 단순인장 조건인 경우에는 F_{net} = 1이고 단순굽힘 조건인 경우에는 F_{net} = 2/3이다. 하중제어 조건에서의 F_{net}은 균열 길이에 따라 달라진다.

2.2 크립균열 성장

크립균열 성장률은 다음 식에 의하여 예측되어 진다:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_c = C_c \cdot \left(\Delta J_c\right)^{m_c}. \tag{19}$$

여기서 316FR재료에 대한 $C_c = 2.2874 \times 10^{-2}$ 이고 $m_c = 0.94487$ 이다.

식 (17)의 탄소성 보정계수 f_{ep} 의 두번째 항을 무시하면 J_{ep} 의 완전소성 J 적분은 다음과 같이 구해질 수 있다:

$$\Delta J_p = \frac{E e_{ref}}{s_{ref}} \cdot \Delta J_e. \tag{20}$$

크립균열 성장을 계산하는데 있어서 윗 식의 기준변형률 e_{ref} 에 기준 크립변형률 e_{c-ref} 을 대입하면 크립 J 적분 $J_c(t)$ 과 크립보정계수 f_c 는 다음과 같이 시간의 함수로 주어진다:

$$J_c(t) = f_c(t) \cdot J_e, \tag{21}$$

$$f_c(t) = \frac{E \cdot \dot{e}_{c-ref}(t)}{s_{c-ref}}. \tag{22}$$

여기서 J_e 는 하중사이클에서 최대 탄성 J 적분이다. J_e 는 최대 하중사이클에서의 응력확대계수 K에 의해서 구해진다:

$$J_e = \frac{K_{\max}{}^2}{E^*}. \tag{23}$$

그러므로 식 (21)은 $K_{\max}$ 로 다음과 같이 구해진다:

$$J_c(t) = \frac{E \cdot \dot{e}_{c-ref}(t)}{E^* s_{c-ref}} \cdot K_{\max}{}^2. \tag{24}$$

하중유지시간이 t_H 이라면 한 주기에서 균열성장에 기여하는 크립 J 적분범위 ΔJ_c 는 다음과 같이 계산된다:

$$\Delta J_c = \int_0^{t_H} J'(t)dt = \frac{EK_{\max}{}^2}{E^* s_{c-ref}} \int_0^{t_H} \dot{e}_{c-ref}(t)\, dt = \frac{EK_{\max}{}^2 e_{c-ref}(t_H)}{E^* s_{c-ref}}. \tag{25}$$

여기서 $e_{c-ref}(t_H)$ 는 $t = t_H$ 일 때의 기준 크립 변형률이다.

s_{c-ref} 는 유지시간 초기의 기준응력에 따라 다음 식에 의해 구해진다:

$$s_{ref} < s_y \text{ (small scale yield)일 때 } s_{c-ref} = s_{ref} \cdot \left(\frac{s_y}{s_{ref}}\right)^p, \tag{26}$$

$$s_{ref} \geq s_y \text{ (large scale yield)일 때 } s_{c-ref} = s_{ref}. \tag{27}$$

그리고 p 는 균열 크기의 함수로 다음 식으로부터 구해진다.

$$p = p_1 + p_2 \cdot \left(\frac{a}{t}\right). \tag{28}$$

여기서 p_1 와 p_2 는 상수로서 각각 0.2이다.

3. 균열성장 해석 평가

3.1 운전하중조건

원자력발전소의 운전하중조건은 크게 I, II, III, IV로 분류된다.[6] 운전조건 I은 발전소의 정상적인 기동, 운전 및 정지 주기를 가지며 사고 없이 가동되는 정상 운전조건으로 본 연구에서 적용되는 대형 액체금속로의 운전 주기가 총 427회로 가정된다. 운전조건 II은 발전소 운전시 자주 발생할 수 있는 예상사고를 갖는 사고 운전조건이다. 운전조건 III은 비상정지 운전조건으로 총 발생빈도는 3회를 넘지 않는다. 운전조건 IV은 발전소 운전 기간 중에 한번정도 일어날 수 있는 가상 사고시의 운전하중 조건이다. 본 연구에서는 운전하중조건 I 과 II 만을 적용하였으며 총 주기는 427회로 가정하여 수행하였다.

3.2 반타원 표면균열

크립피로 균열진전 해석에서 사용되는 결함은 최대응력이 작용 방향에 수직으로 놓인 반타원형 표면 균열이다. 다음과 같은 세가지 종류의 균열을 가정하여 평가하였다.

(1) PTS 균열

ASME Section III G-2120에 기술되어 있는 경수로 가압열충격 해석(PTS)에서 사용되는 최대 크기의 균열이 가정되었다.[7] 이 균열의 깊이는 용기두께의 1/4이고 길이는 1.5배를 갖는 반타원형 균열이다. 대형로 원자로용기의 두께가 30mm 이므로 PTS 균열의 깊이와 길이는 각각 7.5mm와 45mm이다.

(2) NDE 균열

액체금속로의 주요부품은 ASME XI Division 3에 의해 운전기간중 주기적인 가동중검사가 수행되어 가동 건전성을 입증하여야 한다.[8] 액체금속로의 원자로의 가동중검사에서는 연속누설검사와 누설육안검사와 같은 비파괴검사(NDE: non-destructive examination)가 필수적으로 적용되어야 하며 원자로의 고온 구조건전성을 확보하기 위해서 용접부에 대한 초음파검사가 적용되고 있다. 원자로용기의 초음파검사에서 탐지할 수 있는 최소 결함을 NDE 균열의 크기로 가정하였다. 2MHz 초음파를 사용하였을 때의 탐지 가능한 결함 크기는 1.5mm정도이고 ASME XI Div. 1[9]의 최대허용 길이가 약 0.25 inch(Table IWB 5318-2)이므로 결함 길이를 6 mm로 선정하였다.

(3) Shallow 균열

열피로(thermal fatigue) 파괴에서는 길이가 매우 긴 shallow형태의 균열이 주로 발생한다. Shallow 균열은 NDE 균열보다 aspect ratio가 약 10배 정도 큰 결함으로 가정하였고 균열 깊이는 1.5mm로 균열 길이는 6 mm로 선정하였다.

3.3 원자로용기의 응력해석

대형 액체금속로 원자로용기는 316FR 스테인레스강으로 제작된다. 원자로용기의 상세한 치수는 Table 1과 같다. 운전조건 I과 II의 온도변화 이력은 Fig. 2에 나와 있다. 운전조건 I은 초기 온도 20°C에서 운전온도 550°C까지의 온도상승 속도는 15°C/h이고 운전시간은 1000시간이며 운전온도 550°C에서 200°C까지의 온도하강 속도는 25°C/h이다. 운전조건 II에서는 초기 start-up 운전과 1000시간 hold time 운전만을 고려한다. 운전조건 I과 II은 모두 총 427회 주기를 갖는 것으로 가정한다.

원자로용기의 응력해석을 위한 유한요소망 형성에는 FEMAP (Finite Element Modeling and

Processing)[10]이 사용되었으며 FINAS code[11]를 이용하여 원자로용기의 열응력 해석을 수행하였다. 원자로용기 상부는 고정되어 있으며 100°C 온도를 유지하는 것으로 가정하였다. 운전조건 I 과 II에서 원자로용기에서 최대응력이 발생하는 지점을 예측하기 위하여 axial, radial, hoop, Von Mises응력을 구하였다. 해석결과 운전조건 II가 I보다 더 크게 응력이 작용하는 것으로 분석되었다. Fig. 3은 하중조건 II(소듐온도 550°C)에서의 원자로용기 내면과 외면에서의 응력분포를 보여준다. Axial 응력과 hoop 응력이 최대로 작용하는 지점은 각각 소듐액위 아래 160mm 지점과 소듐액위 위 190mm 지점이다. 이 지점에서의 두께방향 응력분포 해석결과는 Fig. 4와 5에 나와 있다. Axial 응력과 hoop 응력의 최대값은 각각 295 MPa과 164MPa이다. Axial 응력의 인장성분은 원주방향 균열성장에 기여하고 hoop 응력의 인장성분은 종방향 균열성장에 기여한다. Axial 응력이 hoop 응력보다 큰 값을 가지기 때문에 원주방향 균열이 종방향 균열보다 균열 성장률이 더 크다.

3.4 균열성장 모의해석

JNC 해석방법을 이용하여 제안된 세가지 종류의 균열에 대하여 크립피로 균열 성장해석을 수행하였다. Fig. 6의 균열성장 해석 흐름도에 따라 균열성장 해석 프로그램을 작성하였다. 운전조건 I에 대한 원주방향 PTS 균열의 해석결과가 Table 2에 있다. 발전소 총 운전기간 중에 균열의 깊이 및 길이 성장량은 각각 0.198mm과 0.124mm이었다. 운전조건 I에서 다른 두 결함들의 균열 성장량은 PTS 균열보다 더 작게 해석되었다.

운전조건 II는 운전조건 I보다 보수적인 결과를 보여주기 때문에 운전조건 II에서는 자세한 분석을 수행하였다. 하중조건 II에서의 원주방향 및 종방향 결함의 크립피로 균열성장 해석 결과를 Table 3과 4에 수록하였다. 427주기 후의 PTS 결함의 깊이와 길이의 총 성장량은 각각 2.05mm 와 1.74mm이며 8259주기 후에서야 원자로용기 벽을 관통하는 것으로 분석되었다. 대형 액체금속로의 원자로용기는 PTS 결함과 같은 큰 결함이 있어도 발전소 수명기간까지는 구조적 건전성이 유지되는 것으로 판단된다. Shallow 균열인 경우에는 깊이와 길이의 총 성장량은 각각 0.97mm와 0.08mm이다. 결함 깊이 방향의 성장률은 표면방향의 성장률보다 더 크게 분석되었다. NDE 균열에서는 깊이와 길이의 총 성장량은 각각 0.491mm와 0.358mm이다. 길이가 긴 shallow 균열의 성장률은 NDE 균열의 성장률보다 더 크게 나타났다. ASME Code Section XI 은 가동중검사와 결함 평가에 관한 요건을 기술하고 있는데 액체금속로에 적용되는 ASME XI Div. 3에서는 결함 평가기준이 아직 제정되어 있지 않지만 경수로용 가동중검사 적용규격인 ASME XI Div. 1의 기준을 참조하면 스테인레스강 부품의 경우 허용 결함깊이는 약 두께의 10%정도이다. 이 기준을 적용하면 shallow 균열과 NDE 균열은 427주기 후에도 허용한도 내에 있게 된다. Shallow 균열의 성장속도가 빠르기 때문에 길이가 긴 shallow 균열이 길이가 짧은 NDE 균열보다 더 위험하다고 판단된다. 액체금속로 원자로용기의 가동중검사에서는 열피로 파괴에서 발생하기 쉬운 shallow 균열 탐지 위주로 체적검사가 적용되어야 할 것으로 평가되며 원자로 용기에 대한 안전성확보를 위해서는 허용길이를 초과하는 결함은 가능한 보수하여야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

크립피로 균열성장은 500°C 이상의 고온에서 운전되는 액체금속로에서 주요파손 원인이 되므로 원자로용기 설계에서 크립피로 균열성장 평가는 매우 중요하다. 본 연구에서는 일본

JNC에서 제안된 크립피로 균열성장 평가법을 이용하여 대형 액체금속로 원자로용기에 존재하는 반타원형 표면균열에 대한 크립피로 균열성장 해석을 수행하였다. 원자로용기에 작용하는 열응력을 FINAS code로 계산하고 운전 하중조건 I과 II에서의 축방향, 원주방향, 반경방향 및 Von Mises 응력분포를 구하였다. 축방향과 반경방향 응력이 최대로 작용하는 지점에서 종방향 및 원주방향 반타원 균열을 가정하였다. 결함의 종류는 열충격해석에서 사용되는 PTS 균열, 초음파 체적검사에서 탐지 가능한 최소 결함인 NDE 균열 그리고 열피로에서 발생하기 쉬운 shallow 균열 세가지 결함을 선정하여 이 결함의 크립피로 균열성장을 해석하였다. 종방향 열응력이 크게 작용하기 때문에 원주방향의 균열성장이 종방향 결함보다 더 크게 나타났다. 균열깊이가 용기두께의 1/4인 PTS crack의 경우에 발전소 수명으로 예측되는 427사이클 후에도 총 균열진전량이 매우 작은 것으로 해석되어 원자로용기의 구조 건전성이 수명기간동안 유지되는 것으로 평가되었다. 균열 길이가 긴 shallow 균열은 길이가 짧은 NDE 균열보다 반경방향 응력확대계수가 더 크며 균열성장이 빨리 진행되는 것으로 평가되었다. 열피로에 의해 발생하기 쉬운 shallow 형태의 원주방향 결함 탐지 위주로 원자로용기 체적검사가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 원자력중장기 연구개발과 관련하여 일본 과기청(STA)의 과학자 교환프로그램으로 수행되었습니다. 과기부와 일본 과기청 및 JNC-OEC의 기계재료 연구그룹에 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 본 연구에서 수치해석 부분을 도와준 Ando 연구원과 아낌없는 지원과 토의를 하여주신 Asayama 박사와 Morishita 실장님에게 감사 드립니다.

참고 문헌

[1] T. Wakai and K. Aoto, "A Study on the Guideline of Defect Assessment Procedures for Large Scale Fast Breeder Reactor Components (1) – Development of Creep-Fatigue Crack Growth Assessment Procedure," JNC TN9400 2000, JNC, 2000.

[2] T. Wakai and C. Poussard, "Fatigue Crack Growth : Benchmark Problems on Semi-Elliptical Cracks on Bending Plates," PNC ZE0066 98-002, 1998.

[3] T. Wakai and C. Poussard, "Creep Fatigue Crack Growth : Benchmark Problems on Semi-Elliptical Crack on a Bending Plate," PNC ZE0066 98-001, 1998.

[4] T. Wakai, C. Poussard and B. Drubay, "A Comparison between Japanese and French A16 Defect Assessment Procedures for Fatigue Crack Growth," Proc. of the SMiRT 15, G03/1, pp. V-79 ~V-86, 1999.

[5] C. Poussard, T. Wakai and B. Drubay, "A Comparison between Japanese and French A16 Defect Assessment Procedures for Creep-Fatigue Crack Growth," Proc. of the SMiRT 15, G03/3, pp. V-95 ~V-102, 1999.

[6] 原子力設備技術基準, 通商産業省 資源Energy廳, 1994

[7] ASME Code Section III "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components", 1998

[8] ASME Code Section XI Division 3 "Rules for Inspection and Testing Components of Liquid-Metal Cooled Plants", 1998.

[9] ASME Code Section XI Division 1 "Rules for Inspection and Testing Components of Light-Water Cooled Plants", 1998.
[10] FEMAP Users Manual, Version 6.0, Enterprise Software Products Inc., 1998.
[11] FINAS Users Manual, Version 12.0 TNC ZN9520 95-013, PNC, 1994.

Table 1. Dimension of large-scale reactor vessel

Inner Diameter	Inner Diameter	Height	Thickness	Sodium level
9660mm	9600mm	7500mm	30mm	1700mm from top of RV

Table 2. Creep-fatigue crack growth simulation results of circumferential cracks for load condition I

Crack type : PTS circumferential crack (Initial size : a = 7.5 mm $2c$ = 45 mm)

N (cycles)	a (mm)	c (mm)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{da}{dN}$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{dc}{dN}$ (mm/cycle)
0	7.50	22.50	2.87E-04	1.78E-04	4.65E-04	1.54E-04	1.28E-04	2.83E-04
50	7.523	22.514	2.87E-04	1.78E-04	4.64E-04	1.56E-04	1.29E-04	2.85E-04
100	7.546	22.528	2.87E-04	1.78E-04	4.64E-04	1.57E-04	1.29E-04	2.86E-04
150	7.569	22.540	2.87E-04	1.78E-04	4.64E-04	1.58E-04	1.30E-04	2.88E-04
200	7.592	22.560	2.87E-04	1.78E-04	4.64E-04	1.60E-04	1.30E-04	2.90E-04
250	7.616	22.572	2.87E-04	1.77E-04	4.64E-04	1.61E-04	1.31E-04	2.92E-04
300	7.639	22.586	2.86E-04	1.77E-04	4.63E-04	1.62E-04	1.31E-04	2.93E-04
350	7.662	22.601	2.86E-04	1.77E-04	4.63E-04	1.63E-04	1.32E-04	2.95E-04
400	7.685	22.616	2.86E-04	1.77E-04	4.63E-04	1.64E-04	1.33E-04	2.97E-04
427	7.698	22.624	2.86E-04	1.77E-04	4.63E-04	1.65E-04	1.34E-04	2.99E-04

Table 3. Creep-fatigue crack growth simulation results of circumferential cracks for load condition II

(a) Crack type : PTS circumferential crack (Initial size : a = 7.5 mm $2c$ = 45 mm)

N (cycles)	a (mm)	c (mm)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{da}{dN}$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{dc}{dN}$ (mm/cycle)
0	7.50	22.50	1.66E-03	3.26E-03	4.92E-03	8.91E-04	2.36E-03	3.25E-03
100	7.99	22.84	1.64E-03	3.25E-03	4.89E-03	1.05E-03	2.57E-03	3.63E-03
200	8.47	23.22	1.62E-03	3.22E-03	4.83E-03	1.23E-03	2.79E-03	4.02E-03
300	8.95	23.64	1.58E-03	3.18E-03	4.76E-03	1.41E-03	2.99E-03	4.40E-03
400	9.42	24.10	1.53E-03	3.13E-03	4.67E-03	1.61E-03	3.20E-03	4.80E-03
427	9.55	24.24	1.52E-03	3.12E-03	4.64E-03	1.66E-03	3.26E-03	4.92E-03
8259	29.997	223.57	7.64E-04	2.18E-03	2.94E-03	5.76E-02	2.07E-02	7.83E-02

(b) Crack type : Shallow circumferential crack (Initial size : a = 1.5 mm $2c$ = 60 mm)

N (cycles)	a (mm)	c (mm)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{da}{dN}$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{dc}{dN}$ (mm/cycle)
0	1.50	30.00	3.44E-04	1.43E-03	1.78E-03	2.48E-06	1.10E-04	1.13E-04
100	1.69	30.012	4.12E-04	1.58E-03	1.94E-03	3.77E-06	1.37E-04	1.41E-04
200	1.90	30.028	4.95E-04	1.73E-03	2.23E-03	5.74E-06	1.71E-04	1.76E-04
300	2.13	30.05	5.90E-04	1.90E-03	2.49E-03	8.69E-06	2.12E-04	2.20E-04
400	2.40	30.07	6.99E-04	2.08E-03	2.80E-03	1.31E-05	2.62E-04	2.75E-04
427	2.47	30.08	7.30E-04	2.13E-03	2.86E-03	1.46E-05	2.80E-04	2.93E-04

(c) Crack type : Detectable circumferential crack by NDE (Initial size : a = 1.5 mm $2c$ = 6 mm)

N (cycles)	a (mm)	c (mm)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{da}{dN}$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{dc}{dN}$ (mm/cycle)
0	1.500	3.000	1.48E-04	9.27E-04	1.07E-03	7.50E-05	6.30E-04	7.00E-04
100	1.608	3.072	1.56E-04	9.50E-04	1.10E-03	8.20E-05	6.80E-04	7.60E-04
200	1.721	3.152	1.65E-04	9.82E-04	1.15E-03	9.49E-05	7.35E-04	8.31E-04
300	1.838	3.238	1.74E-04	1.01E-03	1.18E-03	1.09E-04	7.89E-04	8.98E-04
400	1.958	3.332	1.83E-04	1.22E-03	1.22E-03	1.24E-04	8.44E-04	9.68E-04
427	1.991	3.358	1.85E-04	1.23E-03	1.23E-03	1.28E-04	8.59E-04	9.86E-04

Table 4. Creep-fatigue crack growth simulation results of longitudinal cracks for load condition II

(a) Crack type : PTS longitudinal crack (Initial size : a = 7.5 mm $2c$ = 45 mm)

N (cycles)	a (mm)	c (mm)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{da}{dN}$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{dc}{dN}$ (mm/cycle)
0	7.50	22.500	2.16E-04	1.03E-05	2.26E-04	6.00E-05	5.27E-06	6.05E-05
427	7.597	22.529	2.19E-04	1.03E-05	2.29E-04	6.24E-05	5.38E-06	6.70E-05

(b) Crack type : Shallow longitudinal crack (Initial Size : a = 1.5 mm $2c$ = 60 mm)

N (cycles)	a (mm)	c (mm)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{da}{dN}$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{dc}{dN}$ (mm/cycle)
0	1.5	30.0	2.12E-05	2.85E-06	2.40E-05	1.38E-07	2.08E-07	3.46E-07
427	1.5103	30.00015	2.14E-05	2.87E-06	2.43E-05	1.41E-07	2.10E-07	3.50E-07

(c) Crack type : Detectable longitudinal crack by NDE (Initial size : a = 1.5 mm $2c$ = 6 mm)

N (cycles)	a (mm)	c (mm)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{da}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{da}{dN}$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_f$ (mm/cycle)	$\left(\frac{dc}{dN}\right)_c$ (mm/cycle)	$\frac{dc}{dN}$ (mm/cycle)
0	1.5	3.0	9.21E-06	1.85E-06	1.10E-05	3.93E-06	1.19E-06	5.12E-06
427	1.505	3.002	9.23E-06	1.85E-06	1.10E-05	3.96E-06	1.19E-06	5.12E-06

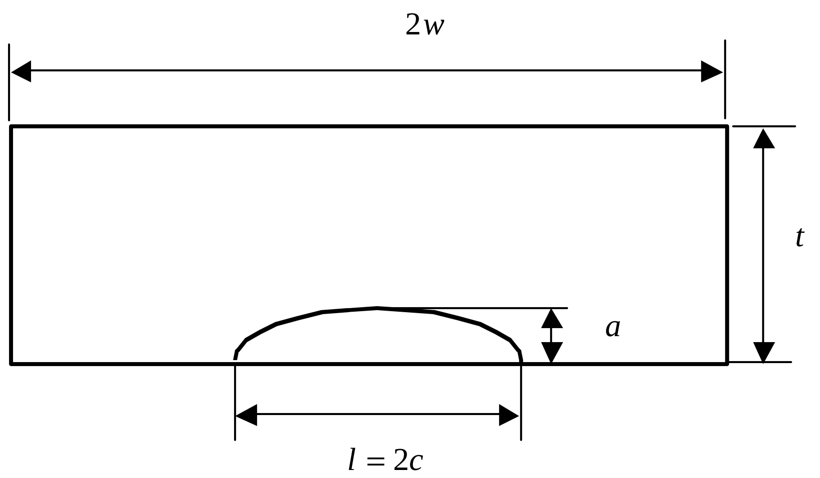
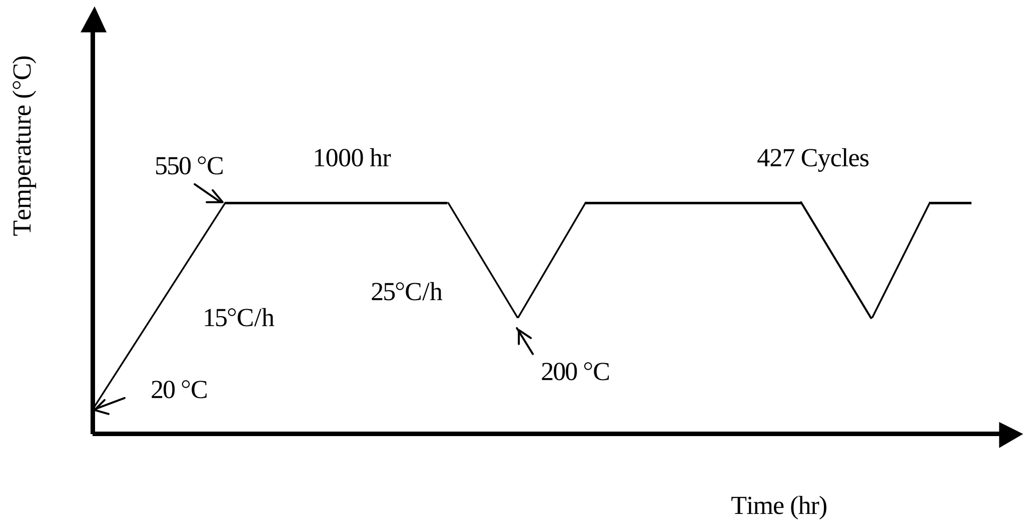
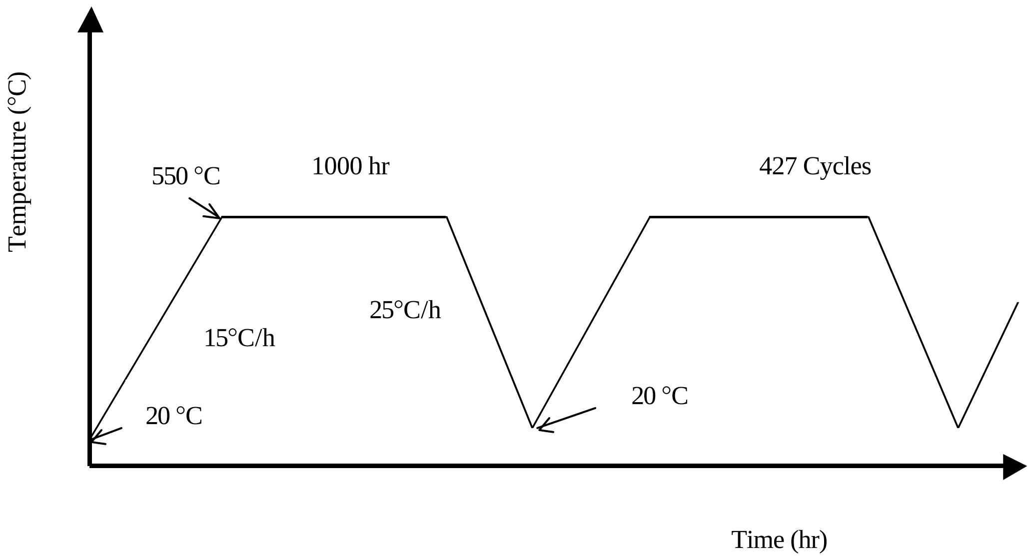


Fig. 1 Shape of the semi-elliptical crack in a plate.

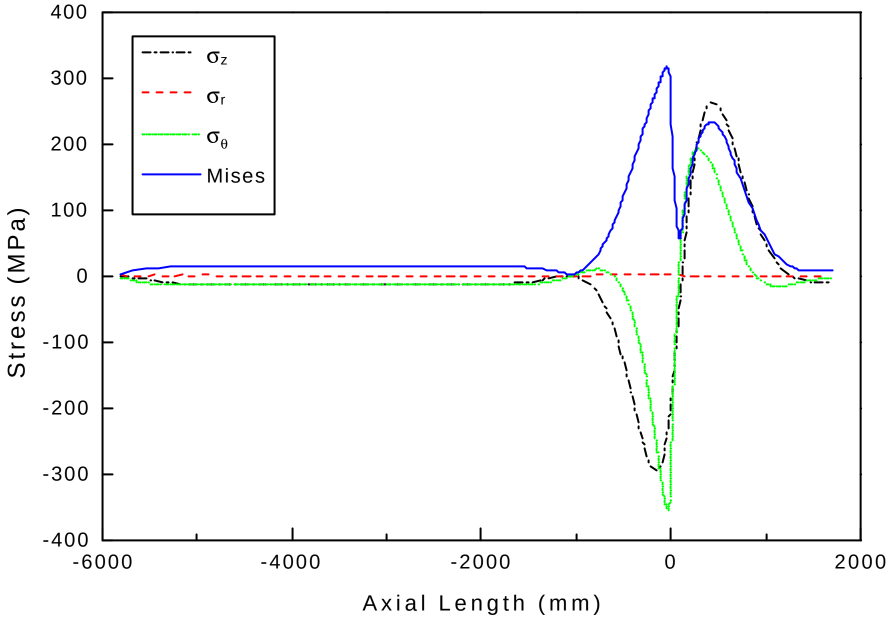


(a) Loading condition I (normal operation)

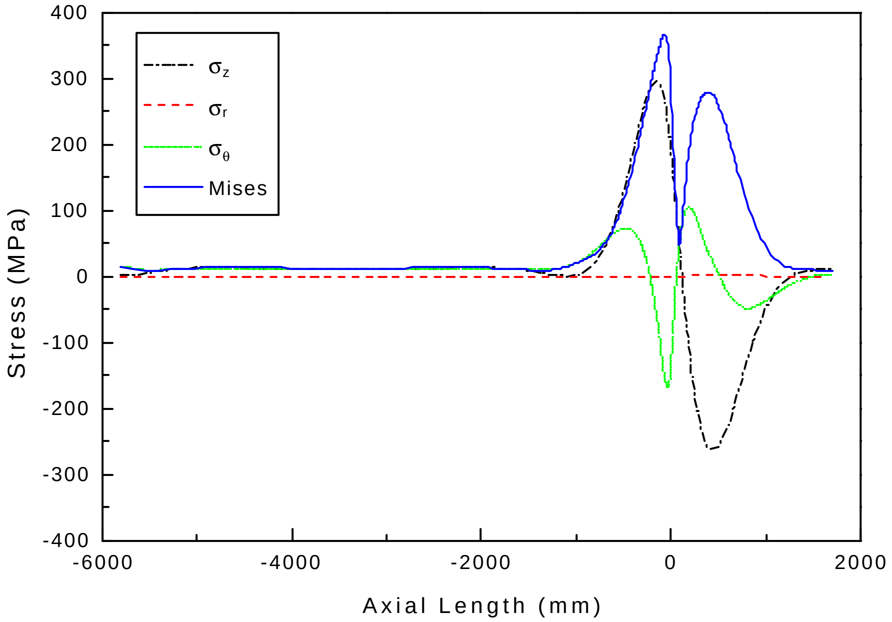


(b) Loading condition II

Fig. 2. Loading history of loading condition I and II.



(a) Inside surface of vessel



(b) Outside surface of vessel

Fig. 3. Stress distribution on the vessel along axial length at 550 °C for Condition II. (Zero point is sodium level)

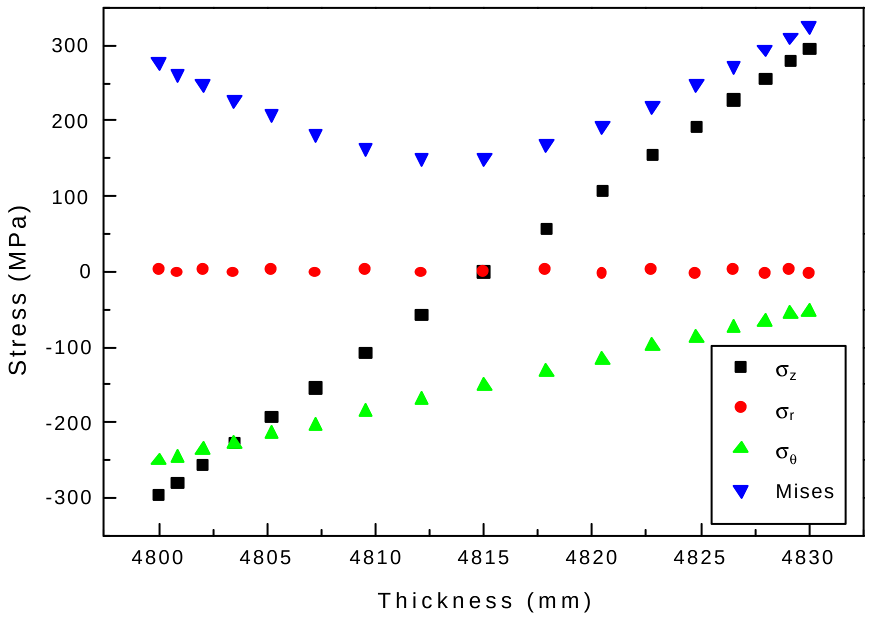


Fig. 4. Stress distribution at the point of maximum axial stress for Condition II. (at 160mm under sodium level)

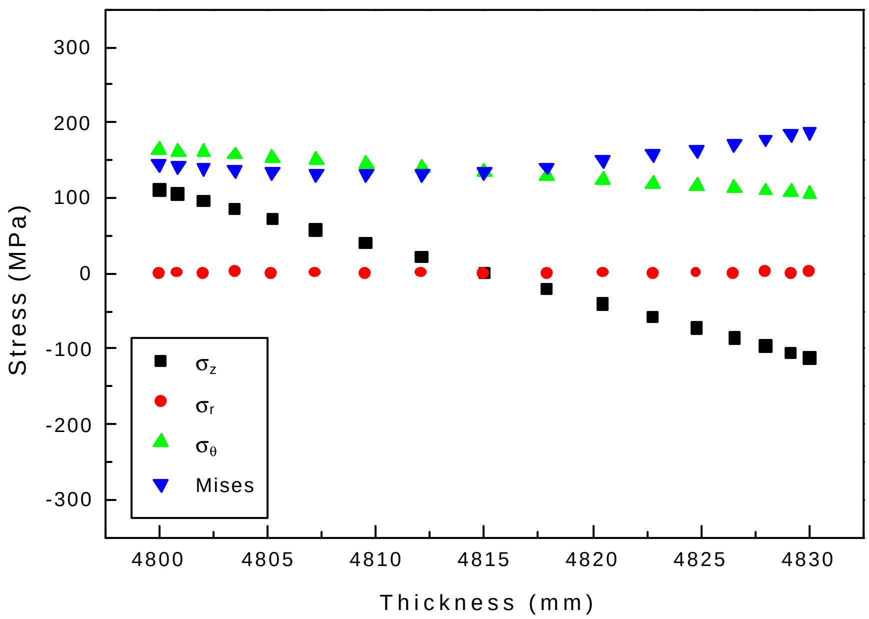


Fig. 5. Stress distribution at the point of maximum hoop stress for Condition II. (at 190mm over sodium level)

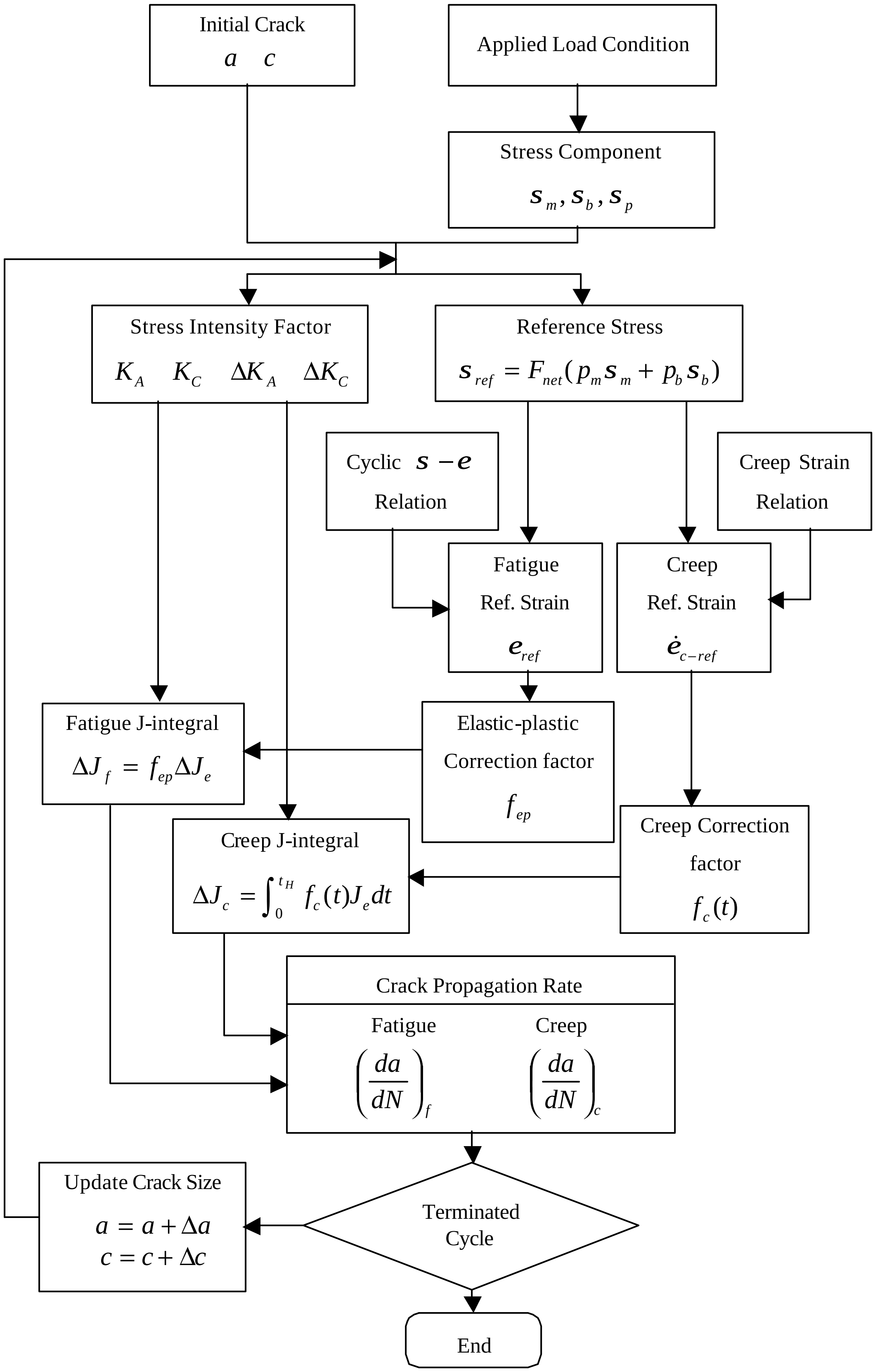


Fig. 6. Evaluation flow of creep-fatigue crack propagation.