

## C\*에 기초한 3차원 고온균열 수명평가

한태수\* · 이형일\* · 윤기봉\*\*

(2000년 8월 25일 접수, 2001년 2월 27일 심사완료)

### C\* Based Life Assessment of 3D Crack at High Temperature

Taesooh Han, Hyungyil Lee and Kee Bong Yoon

**Key Words:** Semi-elliptical Surface Crack (반타원 표면균열), C\*-integral (C\*-적분), Life Assessment Program (수명평가 프로그램), Auto Mesh Generation Program (요소망 자동생성 프로그램), Paris-law-type Crack Growth (Paris법칙 형태의 균열진전식)

#### Abstract

In recent years, the subject of remaining life assessment has drawn considerable attention in chemical plants, where various structural components typically operate at high temperature and pressure. Thus a life prediction methodology accounting for high temperature creep fracture is increasingly needed for the components. Critical defects in such structures are generally found in the form of semi-elliptical surface crack, and the analysis of which is consequently an important problem in engineering fracture mechanics. On this background, we first develop an auto mesh generation program for detailed 3-D finite element analyses of axial and circumferential semi-elliptical surface cracks in a piping system. A high temperature creep fracture parameter C\*-integral is obtained from the finite element analyses of generated 3-D models. Post crack growth module is further appended here to calculate the amount of crack growth. Finally the remaining lives of surface cracked pipes for various analytical parameters are assessed using the developed life assessment program.

#### 1. 서론

정부의 경제개발계획에 따른 석유화학공장 건설을 비롯한 발전소 건설 그리고 조선공업, 방위 산업 및 원자력 발전소 건설 등 우리나라 공업은 급속도로 성장하여 왔다. 이들 중 산업규모가 확대된 70년대 중반에 건설되어 석유화학플랜트에서 운용되는 반응로, 저장탱크와 열교환기 등의 압력용기와 배관 등의 시설물들은 장기간 사용으로 인해 고온, 고압, 부식환경, 열응력과 피로 등 여러 요인으로 경년열화되어 있다. 따라서 이들

시설물에 대한 신뢰성 및 안전성 확보는 국가기간 산업에서 매우 중요하며, 이와 관련된 장치의 설계, 시공, 시험검사 및 평가기술도 더불어 중요시되고 있다. 플랜트 시설물에 대한 주기적인 가동중 안전진단은 현상파악뿐만 아니라 인명과 재산손실을 미연에 예방하고 경제적이고 효율적인 운영계획 수립에 필수적인 것이다.

고온·고압에서 사용되는 중화학설비 배관들의 지배적 파괴메카니즘은 크리프이다.<sup>(1)</sup> 크리프 균열성장시 균열선단에서의 응력-변형률장은 시간에 따라 변화하여, 이 결과 탄성변형에 비해 크리프변형이 우세하므로 응력확대계수(K)나 J-적분 등은 적절한 파괴매개변수라 할 수 없다. 하중을 가한 직후 크리프영역은 균열선단부근에 작게 형성되어 있는데, 이를 SSC (small scale creep) 조건이라 부른다. 이 후 일정시간이 경과되어 크리프영역이 균열선단에서부터 구조물 전체로 확

\* 서강대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : hylee@ccs.sogang.ac.kr

TEL : (02) 705-8636 FAX : (02) 712-0799

\*\* 회원, 중앙대학교 기계공학과

장되면, 이를 EC (extensive creep) 조건이라 칭한다. SSC조건에서 EC조건으로 변하는 과정을 TC (transition creep) 조건이라 한다. EC조건에서는 균열선단에서 응력장이 시간에 따라 변하지 않고 일정하므로 EC조건을 정상상태 크리프 (steady state creep) 조건이라고도 부른다.<sup>(1)</sup>

정상상태 크리프조건에서는 크리프변형이 탄성변형에 비해 매우 우세하고, 크리프변형도 2차 크리프 변형만 존재한다. 이와 같은 크리프 현상의 파괴변수로는  $J$ -적분과 유사한 경로적분  $C^*$ -적분이 있는데, 정상상태 크리프조건에 있는 균열체의 크리프균열성장 속도는  $C^*$ -적분에 의해 지배된다.<sup>(2-4)</sup>

중화학설비 배관들은 대단히 가혹한 온도 및 압력조건에서 운전이 요구되는 설비이므로 크리프현상이 지배적인 파괴메카니즘이다. 이를 위해 본 연구에서는 중화학설비 배관을 유한요소 모델링과 이어진 크리프 유한요소해석에 기초하여 배관의 잔여수명평가 프로그램을 개발하고자 한다. 이에 먼저 중화학설비 배관에 원주방향 및 축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 완전 3차원 유한요소망을 자동으로 생성하는 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였다. 이로부터 자동생성되는 유한요소망에 대한 크리프 유한요소해석을 통해  $C^*$ -적분값을 계산하였다. 여기에 Paris법칙 형태의 크리프 균열성장식에 바탕을 둔 균열진전모듈을 첨부하여 전체 수명평가 프로그램을 완성한다. 최종적으로 개발된 통합프로그램을 이용하여 여러 가지 해석변수들이 중화학설비 배관의 잔여수명에 주는 영향을 체계적으로 살펴보았다.

## 2. 요소망 자동생성 프로그램

본 연구의 주요 대상이 되고 있는 반타원 표면균열은 공학문제에서 매우 빈번히 접하게 되며 파괴역학 분야에서는 가장 실체적인 관심사 중의 하나이다. 반타원 표면균열은 형상과 파괴변수의 복잡성으로 인해 3차원 유한요소해석시 수많은 미세한 유한요소와 상응하는 계산시간을 필요로 한다. 또한 이러한 표면균열의 해석모델들은 “특이유한요소”를 필요로 하는 3차원적 형상을 갖고 있기 때문에 수작업에 의한 3차원 유한요소 모델링은 매우 난해하다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 원주방향<sup>(5)</sup> 및 축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관에 대한 완전 3차원 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였다.

### 2.1 원주방향 반타원 표면균열을 갖는 직관

원주방향 반타원 표면균열을 갖는 직관<sup>(5)</sup>은 기하형상과 하중 대칭성을 고려하여 1/4 형상만을 유한요소 모델링하였다. 이 직관의 전체 길이는  $2h$ , 내경은  $R$ , 그리고 두께는  $t$ 이다. 그리고 반타원 표면균열은 내측 및 외측에 위치할 수 있으며 최대균열깊이는  $a$ , 균열길이는  $2c$ 이다.

원주방향 내측 및 외측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 완전 3차원 유한요소모델을 생성시키기 위하여 평판에서 직관으로의 3차원 매핑함수를 사용하였다. 유한요소모델 균열선단에서의 수직특성은 다음과 같은 3차원 매핑<sup>(6)</sup>을 통해서 유지될 수 있다. 평판에서 직관으로의 매핑은 먼저 직관의 기하형상을 입력받은 후, 직관의 기하형상을 평판의 기하형상으로 전환한다. 그 후 전환된 평판에 상응하는 유한요소모델을 생성하고 다시 직관으로의 매핑을 통하여 직관의 유한요소모델을 최종적으로 완성한다. Fig. 1(a)와 같은 폭이  $2\omega'$  인 평판에서 반타원 균열의 단축과 장축 그리고 두께를 각각  $a'$ ,  $2c'$  그리고  $t'$  이라고 하면, 이는 아래식과 같이 계산되어진다.

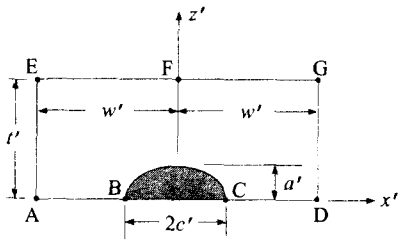
$$\begin{aligned} a' &= \ln\left(\frac{R+t}{R+t-a}\right) \\ c' &= \frac{c}{R+t} ; t' = \ln\frac{R+t}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

이어 식 (1)로 생성된 Fig. 1의 평판 기하형상 (a)에서 직관 기하형상 (b)로의 매핑함수는 아래 식 (2)와 같다.

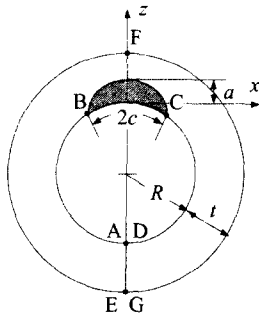
$$\begin{aligned} x &= (R+t)e^{-z'} \cos(\pi/4 - x') ; y = y' \\ z &= (R+t)[1 - e^{-z'} \sin(\pi/4 - x')] \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 3차원 매핑함수를 이용하여 원주방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였다.

원주방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 1/4 형상 [Fig. 2(a)]에 대해 최대균열깊이  $a$ 와 균열길이의 반인  $c$ 가 입력되면 반타원 표면균열선단을 따라 8개의 쉼기모양 특이요소가 11조각 생성되고, 반지름 방향으로 8개, 각도 방향으로 8개의 요소들이 놓이게 된다. 이와 같은 균열선단부의 요소망은 약 3000개의 절점들과 700개의 20절점 C3D20연속체요소 (ABAQUS Library<sup>(7)</sup>)들로 구성



(a) Surface crack in a plate



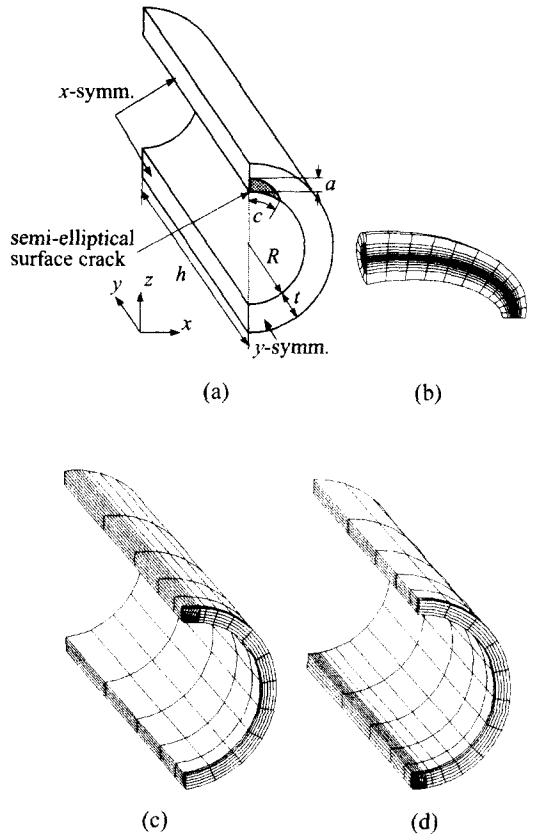
(b) Surface crack in a pipe

**Fig. 1** Conformal transformation of (a) a surface crack in a plate to (b) a circumferential surface crack in a pipe

되어진다 [Fig. 2(b)]. 또한 균열선단부와 직관을 연결하는 요소망 그리고 전체 직관의 요소망이 차례대로 생성된다. 이렇게 얻어진 반타원 표면균열 해석을 위한 원주방향 내측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 전체 3차원 유한요소 모델은 Fig. 2(c)와 같고, 약 7500개의 절점들과 1500개의 C3D20 요소<sup>(7)</sup>들로 구성되어진다. 마찬가지로 Fig. 2(d)는 원주방향 외측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 유한요소모델이다. 이 모델의 절점과 요소수는 원주방향 내측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 유한요소모델과 같고, 매핑함수식 (2)에서  $z'$ 의 부호만 다르다.

2.2 축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관

기하형상과 하중의 대칭성을 고려하여, Fig. 3(a)와 같이 축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 1/4 형상만을 모델링하였다. 이 직관의 전체 길이는  $2h$ , 내경은  $R$ , 그리고 두께는  $t$ 이다. 반타원 표면균열은 내측과 외측에 위치할 수 있으며, 최대 균열깊이는  $a$  그리고 균열길이는  $2c$ 이다.



**Fig. 2** One quarter model of inner circumferential semi-elliptical surface cracked pipe (a) schematic figure (b) crack front detail (c) inner cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ ) (d) outer cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ )

축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관은 원주방향 반타원 표면균열을 갖는 직관과 같이 평판에서 직관으로의 매핑을 사용하여 모델링 하였다. 원주방향과 축방향 모델링의 차이점은 3차원 매핑함수와 절점, 요소의 개수이다. 축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 유한요소모델은 평판의 유한요소모델의 높이방향으로 절점과 요소수를 추가하여 작성되었다. 반타원 표면균열이 배관 안쪽에 위치할 때 평판에서 직관으로의 매핑함수식 (3)과 같다. 이러한 3차원 매핑함수를 이용하여 축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였다.

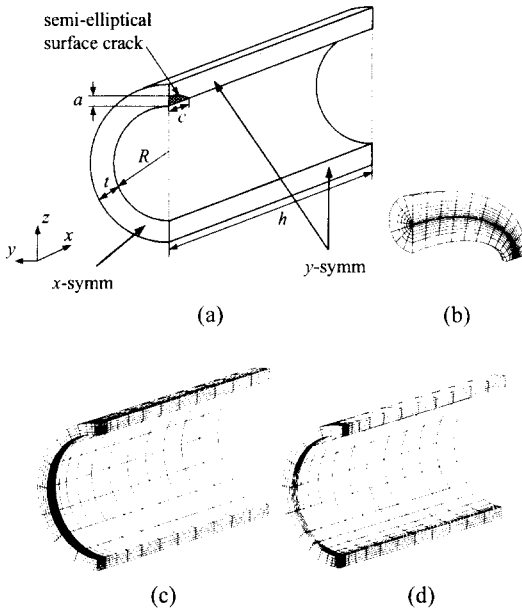


Fig. 3 One quarter model of inner axial semi-elliptical surface cracked pipe (a) schematic figure (b) crack front (c) inner cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ ) (d) outer cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ )

$$\begin{aligned} x &= x' ; y = (R+t)e^{-z} \cos(\pi/4 - y') \\ z &= (R+t)[1 - e^{-z} \sin(\pi - y')] \end{aligned} \quad (3)$$

최대균열깊이  $a$ 와 균열길이  $c$ 가 입력되면 반타원 균열선단을 따라 8개의 쉘기모양 특이요소가 11조각 생성되고, 반지름 방향으로 8개 그리고 각도방향으로 8개의 요소들이 놓이게 된다 [Fig. 3(b)]. 이와 같은 균열선단부의 요소망은 약 3000개의 절점들과 700개의 20절점 연속체요소로 구성되어진다. 또한 균열선단부와 직관을 연결하는 요소망, 전체 직관의 요소망이 차례로 생성된다. 이렇게 해서 얻어진 축방향 내측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 전체 유한요소모델은 Fig. 3(c)와 같고, 약 10000개의 절점들과 2100개의 요소들로 구성되어 있다. 마찬가지로 Fig. 3(d)에는 축방향 외측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 유한요소모델이 나타나있다. 이 모델의 절점과 요소수는 축방향 내측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 유한요소모델과 같고 매핑함수식 (3)에서  $z'$ 의 부호만 다르다.

### 3. 수명평가 프로그램

#### 3.1 수명평가 프로그램의 구성

본 연구의 궁극적인 목표는 중화학설비 배관의 건전성을 효율적이고 경제적으로 수행하는데 유용한 컴퓨터 프로그램을 개발하는 것이다. 이와 같은 목적으로 개발된 수명평가 프로그램은 UNIX 상에서 사용되며 사용자 편의의 GUI (Graphical User Interface)에 의한 입력모듈을 통해 설비배관에서 발견된 반타원 표면균열 형태의 균열형상 및 배관 기하형상을 입력받는다. 그러면 요소망 자동생성 프로그램은 입력된 기하형상 및 균열형상에 상응하는 완전 3차원 유한요소망을 생성한다. 수명평가 프로그램은 자동생성된 요소망으로부터 ABAQUS를 사용한 유한요소해석을 수행하여 반타원 표면균열 선단에서의 크리프 매개변수  $C_t$ 값이 구해진다.  $C_t$  매개변수 값은 시간  $t \rightarrow \infty$  일 때  $C_t = C^*$ 이므로, 크리프 파괴변수  $C^*$ -적분값은 시간  $t$ 에 대한  $C_t$  매개변수를  $\log$ 로 나타내어 천이시간  $t_T$ 를 구했다.  $t_T$  값이 지난 후  $C_t$ 값은 일정한 상수값이므로 이를  $C^*$ -적분값으로 설정하였다. 이와같이 계산된  $C^*$ -적분값은 Paris 법칙 형태의 크리프 균열성장식에 대입되어 반타원 표면균열을 진전시킨다. 이러한 과정들이 적절한 시간중분들에 대해 반복수행되다가 배관파단조건이 만족되면, 수명평가 프로그램은 주어진 구조물에 대한 잔여수명 및 균열형상변화 등을 GUI로 최종 제시한다. Fig. 4는 상술된 수명평가 프로그램의 전체 알고리즘이다. 이는 이형일 등<sup>(8)</sup>의 line-spring 유한요소를 이용한 수명평가 프로그램의 알고리즘과 같은 형태이나,  $C^*$ -적분값에 기초하여 고온균열을 진전시킨다는 점이 다르다. 단 여기서 주목해야 할 점은, 실제 배관균열은 균열선단에서의 기존소성역을 점진적으로 관통하는데 반해, 본 연구에서는 (점진적으로 성장한) 균열이 소성잔류응력 등이 무시된 순수재료 (virgin material) 내에 존재하는 것으로 가정하여 매번 해석된다.

#### 3.2 반타원 표면균열의 성장

수명평가 프로그램의 균열은 Paris법칙 형태의 크리프 균열성장식 (4)에 의해 진전된다. 여기서  $A$ ,  $m$ 은 재료상수들이다. 이 때 크리프 균열성장식에 사용되는  $C^*$ -적분값은 완전 3차원 유한요소해석으로부터 구한 균열선단의  $C^*$ -적분값이다. 여기서

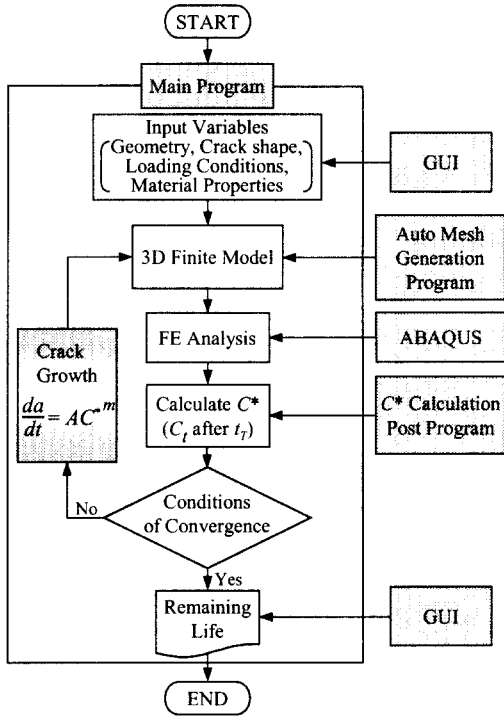


Fig. 4 Flow chart of the program

균열 성장시 반타원 표면균열은 균열진전 후에도 반타원 균열로 형상화된다는 가정을 하였다. 이는 비교적 길이가 긴 반타원 표면균열의 피로 진전실험에서 관찰되는 실제 특징이기도 하다.<sup>(9)</sup> 이를 배경으로 본 해석의 표면균열은 균열중심부의  $C^*|_{x/c=0}$  값과 자유 경계면에서의  $C^*|_{x/c=1}$  값을 기준으로 크리프 균열성장식에 의해 진전하는데 Fig. 5는 이를 도식적으로 보여준다. 즉 수명평가 프로그램의 균열진전모듈은 균열중심부의 최대 균열깊이  $a|_{x/c=0}$  를 균열깊이의 증분  $\Delta a|_{x/c=0}$  만큼 증가시키고 자유경계면의 균열깊이  $c$ 를 균열깊이의 증분  $\Delta c = \Delta a|_{x/c=1}$  만큼 증가시켜, 단·장 반경이 각각  $a + \Delta a$ 와  $c + \Delta c$ 인 반타원 표면 균열로 다시 형상화한다. 즉 수명평가 프로그램은 위의 과정을 반복적으로 수행하고 판단조건을 만족하면 GUI를 사용한 평가결과 제시모듈에 의해 주어진 구조물의 잔여수명 및 균열형상변화 등을 제시한다.

$$\frac{da}{dt} = AC^*{}^m \quad (4)$$

### 3.3 배관파단기준

#### 3.3.1 배관두께에 대한 최대균열깊이비 (a/t)

배관 건전성 평가방법 중 첫 번째 파단기준으로 배관두께에 대한 최대균열깊이 비 (a/t)를 사용하였다. 수명평가 프로그램은 수렴조건을 판단하기 위하여 일정한 배관두께에 대한 최대균열깊이 비를 계산한다. 식 (5)와 같이 배관두께에 대한 최대균열깊이비가 임계값보다 커지게 되면 불안정 파단이 일어난다고 가정하였다. 이 때 임계비  $(a/t)_{critical}$  은 입력변수 중 하나로 프로그램의 초기값으로 입력 받는다.

$$(a/t) \geq (a/t)_{critical} \quad (5)$$

#### 3.3.2 찢김계수

Hutchinson과 Paris,<sup>(10)</sup> 고봉환 등<sup>(11)</sup>은 결합안정성 평가법으로 J-T 평가법<sup>(10,11)</sup>을 추천하고 있다. J-T 평가법은 재료의 저항 J-적분값 ( $J_{mat}$ )을 균열길이로 미분하여 구한 찢김계수 (tearing modulus,  $T_{mat}$ )와 작용하중에 의한 J-적분값 ( $J_{app}$ )을 균열길이로 미분하여 구한 찢김계수 ( $T_{app}$ )의 값을 비교함으로써 결합이 있는 배관의 안정성을 평가하는 방법이다.  $J_{app}$ 는 탄·소성 유한요소해석을 통하여 구하고,  $J_{mat}$ 는 파괴저항 측정시험에 의하여 얻은 데이터를 식 (6)과 같이 곡선적합하여 결합 깊이변화 ( $\Delta a$ )의 함수로 나타낸다. 따라서 재료의 찢김계수는 식 (6a)을 결합깊이에 대해 식 (6b)와 같이 미분하여 구한다.

$$J_{mat} = D(\Delta a)^k \quad (6a)$$

$$\frac{dJ}{da} \Big|_{mat} = Dk(\Delta a)^{k-1} \quad (6b)$$

수명평가 프로그램에서  $J_{app}$ 를 구할 때에는 크리프 균열 진전식에 의해 균열을 진전시킨 후 균열진전 전·후에서의 J-적분값과 a값의 변화량을 각각  $\Delta J$ 와  $\Delta a$ 로 하여 찢김계수를 구한다. 결국 결합이 존재하는 배관에 대한 안전성은 식 (7)을 이용하여 평가할 수 있다.

$$T_{app} \left( \equiv \frac{\sigma_0^2}{E} \frac{dJ_{app}}{da} \right) \geq T_{mat} \left( \equiv \frac{\sigma_0^2}{E} \frac{dJ_{mat}}{da} \right) \quad (7)$$

### 4. 수명평가 프로그램의 응용 예

위와 같은 알고리즘을 갖는 수명평가 프로그램 (LAP3D: Life Assessment Program with 3D finite elements)을 이용하여, 축방향 및 원주방향 균열을 갖는 중화학설비 고온배관의 잔여수명 특성을 다양한 해석변수에 대해 살펴보았다.

#### 4.1 배관 해석모델 및 하중모델

본 수명평가 프로그램을 사용한 실제문제의 해석은 중화학 개질로관에 주로 쓰이는 HK40강을 사용하였다. Fig. 6은 사용온도에 따른 HK40강의 영률 및 푸아송비 등의 변화를 보여준다. 본 수명평가 응용예제들에서의 영률과 푸아송비 등은 871°C에서의 재료물성치<sup>(12)</sup> 134GPa, 0.34를 사용하였다. 응력과 변형률속도 식 (8)의 계수  $B$ 와  $n$ 은 Wang 등<sup>(13)</sup>에 따라 각각  $1.47 \times 10^{-15} \text{ MPa}^n \cdot \text{hr}^{-1}$ , 7.17을 사용하였다. 그리고 Paris법칙 형태의 크리프 균열 성장식 (4)의 계수  $A$ 와  $m$ 은 Su 등<sup>(14)</sup>에 따라 각각  $9.90 \times 10^{-3} (\text{m}^{2m+1} \cdot \text{hr}^{m-1})/\text{Joule}^m$ , 0.87을 사용하였다.

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n \quad (8)$$

중화학설비 배관은 고온에서 사용되므로 열응력을 고려한 유한요소해석을 수행하였다. 중화학 개질로관은 외부열원 버너로부터 열을 공급받으므로 외부온도가 내부온도에 비하여 높다. 개질로관의 온도는 대략 외부온도 1200°C, 내부온도 900°C로 설정하였다.

#### 4.2 중화학 개질로관의 수명평가

반타원 표면균열을 갖는 중화학 개질로관의 수명평가는 작성된 수명평가 프로그램을 사용하여 수행하였고, 기본적인 배관의 기하형상은  $(h, R, t) = (500, 110, 20) \text{ mm}$ 으로 가정하였다.

Fig. 7은 최대균열깊이와 균열길이를 각각 9, 21 mm로 했을 때의 기본적인 배관의 기하형상과 재료물성치를 입력하는 대화상자이다. 또한 배관의 파단조건은 최대균열깊이비로 설정하여  $at \geq 0.7$ 이면 파단된다는 가정을 하였다. 이는 금속조직법에 의한 개질로관 모재부의 손상등급 분류를 근거로 하여 설정한 것이다.<sup>(15)</sup>

수명평가 프로그램에서의 균열진전은 초기입력값으로 준  $C^*$ -적분값 계산횟수 (=반복수)만큼 반복적으로 수행된다. 즉 수렴조건을 배관두께에 대한 최대균열깊이비 ( $a/t$ )로 설정하였다면, 초기

배관두께에 대한 최대균열깊이비가 0.2이고 반복수가 5번이라면 유한요소해석을 5번 수행하게 된다. 수명평가 프로그램은 각 경우에 대한 균열중심에서의  $C^*$ -적분값과 자유경계면에서의  $C^*$ -적분값을 구한 후, (수렴조건이  $at \geq 0.7$ 이라면)  $at=0.2$ 에서 0.6 까지  $\Delta a/t = 0.1$ 씩 증가하는 시간을 측정하게 된다. 이 모든 시간을 합한 것이 배관의 잔여수명으로 간주된다.

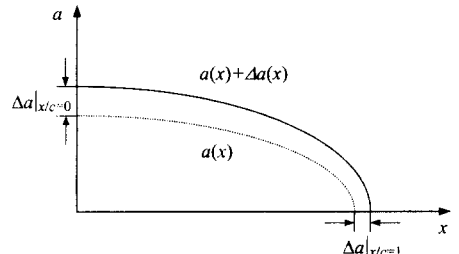


Fig. 5 Schematic illustration of semi-elliptical surface crack growth pattern

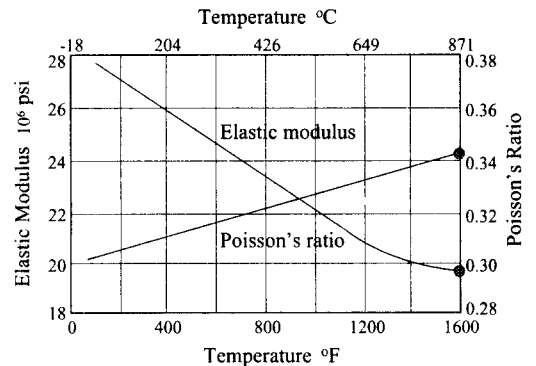


Fig. 6 Variation of elastic modulus and Poisson's ratio of HK40 steel with respect to the temperature

**Circumferential part-through wall inner crack**

Height (H):

Radius (R):

Thickness (t):

Initial crack depth (a):

Initial crack length (c):

Stress & strain rate relation dot  $\epsilon = A \sigma^n$

B:       Boundary condition:

n:       Boundary value:

Creep crack growth law  $da/dt = BC^* m$

A:       Time step (hr):

m:       Iteration No.:

Young's modulus:

Poisson's ratio:

Fig. 7 Dialog box of circumferential part-through wall inner crack

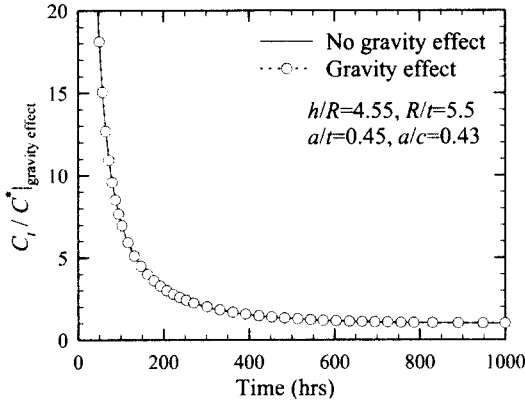


Fig. 8 Variation of crack center  $C_t$  with respect to the elapsed time  $t$  under internal pressure and thermal stress with and without gravity

먼저 하중조건으로 열응력과 내압하중을 함께 가한 경우, 원주방향 내측 반타원 표면균열을 갖는 직관에서 자중의 영향을 알아보았다. 열응력과 내압하중을 함께 가한 경우 배관의 잔여수명은 모두 4.9년으로, 자중은 열응력과 내압하중에 비하여 배관 잔여수명에 거의 영향을 주지 못함을 Fig. 8에서 알 수 있다. Fig. 8은 시간에 따른 균열 중심에서의  $C_r$ 매개변수값을 자중을 고려했을 때의  $C^*$ 적분값으로 무차원화하여 나타낸 것이다.  $C_r$ 매개변수값은 천이시간  $t_T$  이후  $C_r=C^*$ 이다. Fig. 8의  $C^*$ 적분값은 해석종료시간인  $t=1000\text{hr}$  일때의  $C_r$ 매개변수의 값과 같다.  $C_r$ 매개변수값의 시간에 따른 변화는 자중유무에 따라 무관하며, 자유경계면에서도 같은 결과를 확인할 수 있었다.

두 번째는 첫 번째 예제와 같은 기하형상을 갖는 배관에 일정한 열응력을 가하고, 내압하중의 크기에 따라 배관의 잔여수명을 살펴보았다. 내압하중은  $p=2.0\text{MPa}$ 에서  $4.0\text{MPa}$ 로  $0.4\text{MPa}$  간격으로 증가시켰다. Fig. 9은 내압하중에 따른 잔여수명의 차이를 나타내는데, 일정한 기하형상, 균열형상 그리고 열응력을 갖는 원주방향 내측 반타원 표면 균열을 갖는 직관의 잔여수명은 내압에 매우 민감하게 의존하는 것을 확인할 수 있다.

세 번째로 균열형상 변화에 따른 배관잔여수명을 살펴보았다. 일정한 열응력과  $2.8\text{MPa}$ 의 내압하중을 가했을 때 최대균열길이  $a$ 를 일정하게 하고 균열길이  $c$ 를 변화시켜  $a/c=0.2, 0.4$  그리고  $0.6$ 의 비로 균열형상의 변화에 따른 배관의 잔여수명을 살펴보았다. 해석모델은 원주방향 내측 반타원 표면

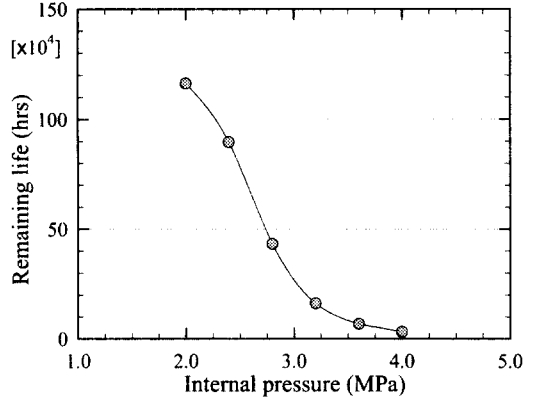
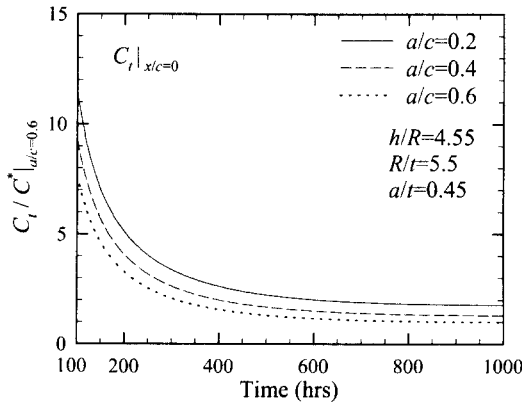


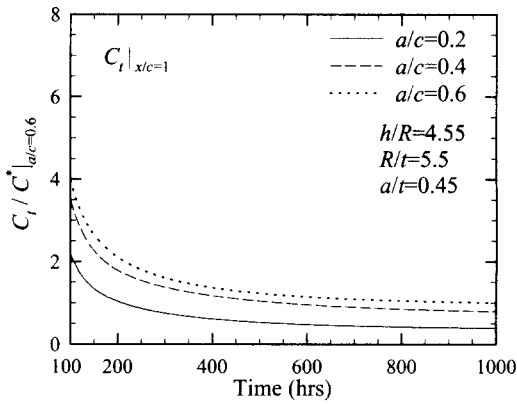
Fig. 9 Remaining life for various value of internal pressure

균열을 갖는 직관이다. Figs. 10(a)-(b)는 각각 균열 형상변화에 따른 균열중심과 자유경계면에서 시간에 따른  $C_r$ 매개변수값을  $a/c=0.6$ 일 때의  $C^*$ 적분값으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 여기서 Figs. 10(a)-(b)도 Fig. 8과 같은 방법과 같고  $C_r$ 매개변수값은  $t_T$  이후  $C_r=C^*$ 이므로  $C^*$ 적분값은 해석종료시간인  $t=1000\text{hr}$  일때의  $C_r$ 매개변수의 값과 같다. 균열형상 변화에 따른 균열 중심부에서의  $C^*$ 적분값은 균열비가 작을수록 커지고 이에 따라 배관 잔여수명은 감소한다. 그런데 균열중심부와는 달리 자유경계면은 균열비가 작을수록  $C^*$ 적분값은 작다. 즉 일정시간에 대해서 균열비가 작을수록 균열중심부의 증가량은 크지만 자유경계면의 증가량은 감소한다. Fig. 10(c)는 균열형상이 변화함에 따른 배관의 잔여수명을 나타낸 것이다. 균열비 ( $a/c$ )가 증가함에 따라—균열형상이 원형에 가까울수록—배관의 잔여수명은 증가한다.

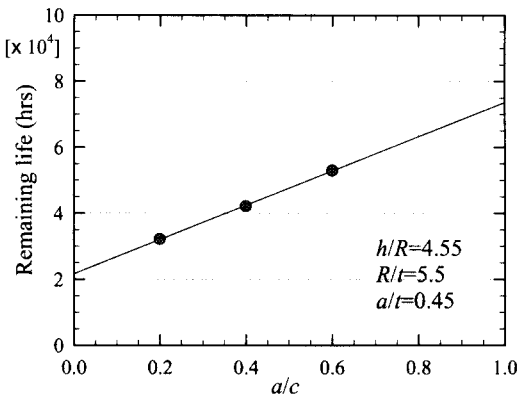
네 번째로  $C^*$ 적분값 계산횟수 (=반복수, iteration)에 따른 배관잔여수명 평가를 위하여 수명평가 프로그램의 반복수를 1번, 2번 그리고 3번으로 설정한 후 잔여수명의 차이를 살펴보았다. 배관의 기하형상은 첫 번째 경우의 기본형상과 같다. Fig. 11(a)는 3번의 반복수로 배관잔여수명 평가했을 때 GUI를 사용하여 나타나는 수명평가 프로그램의 결과화면으로, 반복수에 따른 균열중심과 자유경계면에서의  $C^*$ 적분값, 최대균열길이 및 균열길이 그리고 균열증가 시간 등을 나타낸다. 여기서 잔여수명은 각 반복수에 따른 균열증가시간의 합이다. 또한 Fig. 11(b)는 각 단계의 유한요소해석을 통한 균열의 성장을 개략적으로 보여주는 GUI화면이다.



(a)



(b)

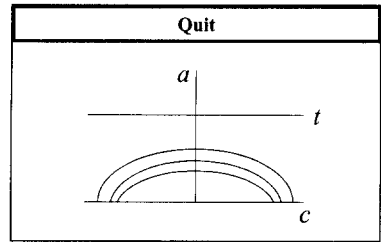


(c)

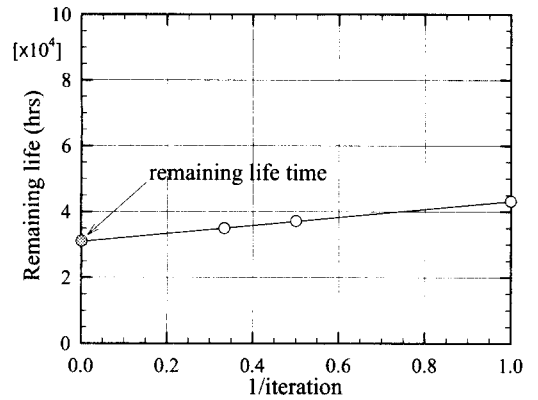
**Fig. 10** Variation of  $C_t$  with respect to the elapsed time  $t$  under internal pressure and thermal stress for various crack lengths at the (a) crack center and (b) free surface (c) remaining lives for various crack shapes

menu					
RESULTS OF LIFE ASSESSMENT PROGRAM USING 3D FINITE ELEMENTS					
$h = 500 \quad R = 110 \quad t = 20$					
initial crack depth = 9.0					
initial crack length = 21					
Iteration	$C^*_a$	$C^*_c$	crack depth (a)	crack length (c)	time
1	6.01E-3	4.26E-3	1.07E+1	2.20E+1	1.44E+4
2	8.39E-3	8.55E-3	1.23E+1	2.38E+1	1.08E+4
3	9.34E-3	1.17E-2	1.40E+1	2.42E+1	9.81E+3

(a)



(b)



(c)

**Fig. 11** Result screen of iteration number 3 (a) text form (b) crack growth shape, (c) remaining life for various iteration number

Fig. 11(c)는 반복수에 대한 배관잔여수명을 나타낸 것이다. Fig. 11(c)로부터 반복수가 증가함에 따라 잔여수명은 감소하는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 반복수가 증가할수록 균열이 증가하고 이에 따라  $C^*$ -적분값이 증가하는 것을 고려하기 때문이다. 이로부터 수명평가 프로그램의 반복수는 잔여수명 예측의 중요한 인자임을 확인할 수 있었다. 수명평가의 정확성을 위하여 반복수는  $\infty$ 에 가까운 값으로 주어야 하나 이는 시간과 비용의 측면에서 현실적이지 못하다. 이에 반복수에 따른 오차를 줄이기 위해 다음과 같은 방법을 생각할 수 있다.

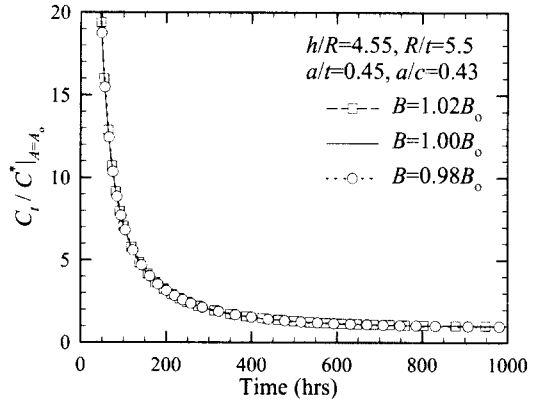


즉 본 예제와 같이 유한한 여러 가지 반복수에 대하여 각각 수명평가를 수행하고 Fig. 11(c)와 같이 선형의삽법을 이용하여 반복수가 ∞에 가까울 때의 잔여수명을 예측하는 것이다.

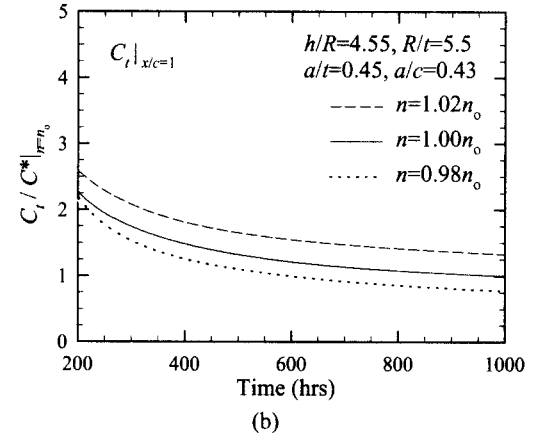
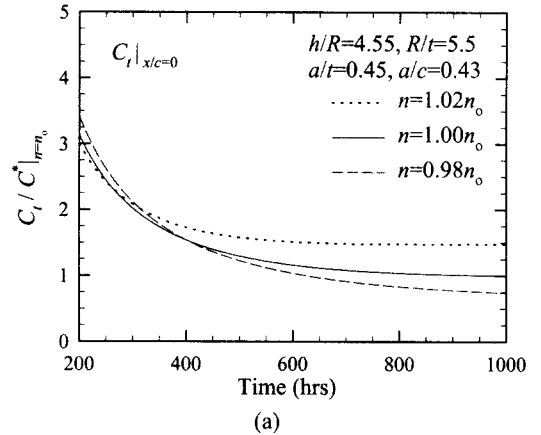
다섯 번째로 수행한 해석은 응력과 변형률속도에 관련된 크리프상수 ( $B$ , creep constant)와 크리프지수 ( $n$ , creep exponent)에 따른 배관의 잔여수명평가이다. 이를 위하여 HK40재료의 크리프상수 ( $B_0$ )와 크리프지수 ( $n_0$ )에 2%씩 변화를 주어 각각 배관 잔여수명평가를 수행하였다. Fig. 12는 각각 크리프상수 변화에 따른 균열중심에서의  $C_t$ 값을, Figs. 13(a)-(b)는 각각 크리프지수 변화에 따른 균열중심과 자유경계면의  $C_t$ 값을 시간에 따른 HK40강의  $C^*$ -적분값으로 무차원화시켜 나타낸 것이다. 크리프상수의 값을 2% 증가시키거나 감소시켰을 때 시간에 따라 큰 차이를 보이지 않고, 자유경계면에서도 이와같은 결과를 얻는다. 이에 반하여 크리프지수의 값을 2% 증·감시키면  $C^*$ -적분값이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 2% 증가하였을 경우, 균열중심에서는 HK40에 비하여  $C^*$ -적분값은 48% 증가하였으나 자유경계면에서는 23% 감소하였다. 그런데 2% 감소하였을 경우에는 균열중심에서는 26% 감소하고 자유경계면에서는 33% 증가한다. 보통 크리프상수와 크리프지수는 재료의 크리프 파단실험을 통하여 얻어진 값이다. 본 예제로부터 크리프상수의 오차는 일정범위내에서 허용할 수 있으나, 크리프지수의 오차에 따라 재료의 수명이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이에 실험을 통한 재료상수값들을 구할 때 세심한 주의가 요구된다. Table 1에는 크리프상수와 크리프지수의 변화에 따른 균열중심과 자유경계면에서의  $C^*$ -적분값과 잔여수명을 요약한 것이다.

**Table 1** Effect of creep constants and exponents on  $C^*$ -integral and remaining life

	$C^*$ -integral (crack center, $\times 10^{-3} \text{ J/m}^2 \cdot \text{hr}$ )	$C^*$ -integral (free surface, $\times 10^{-3} \text{ J/m}^2 \cdot \text{hr}$ )	Remaining life (hrs)
$B=B_0$ $n=n_0$	6.01	4.26	43,173
$B=1.02B_0$	6.09	4.30	42,705
$B=0.98B_0$	5.91	4.20	43,863
$n=1.02n_0$	8.91	5.64	30,663
$n=0.98n_0$	4.45	3.29	56,134



**Fig. 12** Variation of  $C_t$  with respect to the elapsed time  $t$  under internal pressure and thermal stress for various creep constants at the crack center



**Fig. 13** Variation of  $C_t$  with respect to the elapsed time  $t$  under internal pressure and thermal stress for various creep exponents at the (a) crack center and (b) free surface

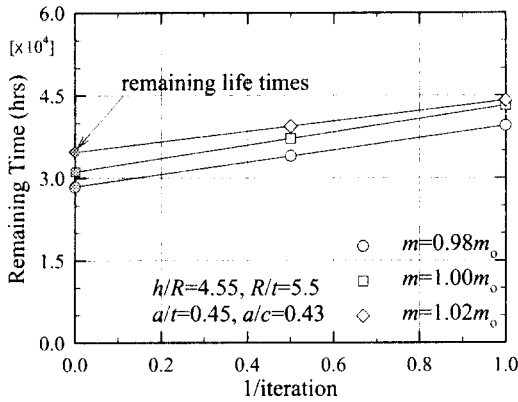


Fig. 14 Remaining life time for various creep crack growth exponent

여섯 번째로 수행한 해석은 크리프 균열성장식 지수에 따른 배관의 잔여수명을 평가하였다. 일반적으로 균열성장식의 계수 및 지수는 실험을 통한 데이터 보간으로 인해 오차가 발생할 수 있다. 이에 이번에는 기본적인 기하형상과 균열 형상을 갖는 직관의 크리프 균열성장식 지수 ( $m_0$ , 0.87)를 2% 감소 (0.8526) 및 2% 증가 (0.8874)에 따른 차이를 줄임으로써 배관의 잔여수명의 변화를 살펴보았다. Fig. 14는 균열성장식 지수에 따른 배관의 잔여수명을 나타낸 것으로 네 번째 예제와 같이 여러 가지 반복수에 대한 유한요소해석을 수행한 후 선형외삽법을 사용하여 배관의 잔여수명을 구한 것이다. 배관잔여수명은  $m=0.98m_0$ 일 경우  $2.84 \times 10^4$  hrs (약 3.24년),  $m=1.0m_0$ 일 경우  $3.12 \times 10^4$  hrs (약 3.56년) 그리고  $m=1.02m_0$ 일 경우는  $3.47 \times 10^4$  hrs (약 3.96년)이다. 즉 균열성장식 지수가 증가함에 따라 잔여수명도 증가한다. 이는  $C^*$ -적분값이 주어진 기하형상과 하중조건에서 1보다 작은 값을 갖기 때문이다.

일곱 번째로 수행한 수명평가는 수렴조건에 대한 것이다. 앞까지의 예제는 모두 최대균열깊이비가 0.7일 때 파단된다고 가정하였으나 이번에는 0.7, 0.8 그리고 0.9일 때 파단된다고 가정하여 잔여수명의 변화를 알아보았다. 배관의 기하형상 및 균열형상은 기본조건과 같고 열응력과 내압하중 2.8MPa를 가하였다. Fig. 15는 반복수에 따른 잔여수명을 나타낸 것으로 최대균열깊이비 수렴조건이 증가할수록 배관의 잔여수명도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그런데 수렴조건이 0.7에서 0.8로 변화하는 것에 비하여 0.8에서 0.9로 변화할 때 수명증가폭이

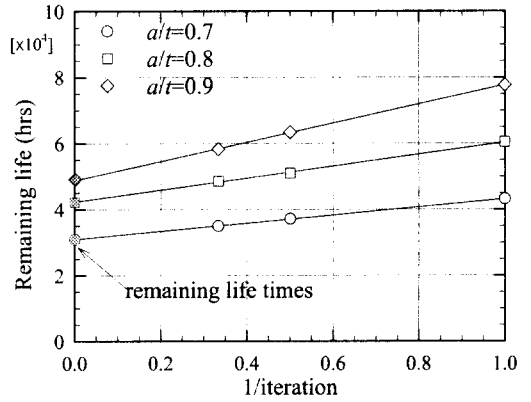


Fig. 15 Remaining life for various crack depth ratio criterion

작았다. 이는 균열깊이가 증가함에 따라  $C^*$ -적분값의 증가폭이 커지게 되고 이에 균열증분이 커지기 때문이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 3차원적 기하형상으로 인하여 모델링하기 힘든 축방향 및 원주방향 반타원 표면 균열을 갖는 직관의 완전 3차원 요소망 자동생성 프로그램을 개발하였다. 또한 여기에 포스트를 더해 중화확설비 배관의 수명평가 프로그램을 개발하였고, 이를 토대로 중화확설비 배관에 쓰이는 HK40강을 사용하여 여러 가지 해석변수들이 잔여수명에 주는 영향을 살펴보았다.

열응력이 가해진 경우 내압하중에 잔여수명은 상당히 민감하다. 즉 내압하중이 약 3.0MPa 이상이 되면 잔여수명은 급속히 감소하게 된다. 그리고 균열형상에 따른 잔여수명은 균열비 ( $a/c$ )가 클수록, 균열이 원형에 가까울수록, 증가하는 것을 알 수 있다. 크리프상수와 크리프지수에 따른 배관의 잔여수명의 변화는 크리프상수에 따라 크게 변화하지 않지만, 크리프지수에 상당히 민감하다. 또한 실험을 통한 데이터 보간의 방법으로 구하는 균열성장식 지수에 따른 수명 평가에서, 균열성장식 지수가 증가함에 따라 잔여수명도 큰 폭으로 증·감하는 것을 확인할 수 있었다. 최대균열깊이비의 수렴조건에 따른 잔여수명평가를 수행하였을 때 수렴조건  $[(a/t)_{critical}]$ 이 클수록 증가하였고, 수렴조건이 0.7에서 0.8로 변화하는 것에 비하여 0.8에서 0.9로 변화할 때 증가폭이 작았다.

이는 균열깊이가 증가함에 따라  $C^*$ -적분값의 증가폭이 커지게 되고 이에 균열의 증분이 커지기 때문이다. 한편 일정한 시간에서 균열형상변화에 대한 균열증가량을 살펴보면, 균열비 ( $a/c$ )가 작을수록 균열중심부로의 균열증가량은 크지만 자유경계면의 증가량은 감소한다.

## 후 기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 과학기술 기초중점연구 (1998-018-E00091) 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 윤기봉, 1992, "보일러 헤더의 잔여수명 평가," 대한기계학회지, 제32권, 제4호, pp. 358~370.
- (2) Saxena, A., 1980, "Evaluation of  $C^*$  for the Characterization of Creep Crack Growth Behavior of A470 Class 8 Steel," ASTM STP 833, pp. 131~151.
- (3) Landes, J. D. and Begley, J. A., 1976, "A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth," *Mechanics of Crack Growth*, ASTM STP 590, pp. 128~148.
- (4) Nikbin, K. M., Webster, G. A. and Turner C. E., 1976, "Relevance of Nonlinear Fracture Mechanics to Creep Cracking," *Cracks and Fracture*, ASTM STP 601, pp. 47~62.
- (5) 이형일, 서현, 2000, "용접부 3차원 표면균열 선단에서의 구속상태," 대한기계학회논문집(A), 제24권, 제1호, pp. 144~155.
- (6) Raju, I. S. and Newman, J. C., 1977, *Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Finite-Thickness Fracture Specimens*, NASA TN D-8414, Washington, DC.
- (7) ABAQUS *User's Manual*, 1998, Version 5.8 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (8) 이형일, 한태수, 정재현, 2000, "결합해석에 기초한 배관용접부 수명평가," 대한기계학회논문집(A), 제24권, 제5호, pp. 1331~1342.
- (9) Hodulak, D., 1990, "Growth of Surface Cracks under Fatigue and Monotonic Increasing Load," *Surface-Crack Growth : Models, Experiments, and Structures*, ASTM STP 1060, Reuter, W. G. et al., Eds., pp. 315~332.
- (10) Hutchinson, J. W. and Paris, P. C., 1979, "Stability Analysis of  $J$ -controlled Crack Growth," *Elastic-Plastic Fracture*, ASTM STP 668, Landes, J. D., Begley, J. A. and Clarke, G. A. Eds., pp. 37~64.
- (11) 고봉환, 김영진, 석창성, 1996, "하중감소효과를 고려한 원자력 주증기 배관의 균열 안정성 평가," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제6호, pp. 1843~1853.
- (12) Roach, D. B., and VanEcho, J. A., 1982, *Comparison of Properties of the HK40 and HK45 Cast Heat-resistant Alloys*, Stainless Steel Casting, ASTM STP 756, pp. 275~312.
- (13) Wang, Y. L., Shen, F. Z. and Tu, S. H., 1994, "A Study of Creep Crack Growth Propagation of HK40 Furnace Tubes with C-Shaped Specimens," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 47, No. 1, pp. 39~47.
- (14) Su, X. W., Shu, S. J., Li, X. H., Wang, L. and Wang, F. G., 1992, "Life Assessment of HK40 Reformer Tube by Fracture Mechanics," *Materials at High Temperatures*, Vol. 10, No. 4, pp. 221~225.
- (15) 심상훈, 윤기봉, 1998, 개질로관 및 분해로관 유지 기술 동향, 기계저널, 제38권, 제11호, pp. 24~30.