

## $C^*$ -적분에 기초한 고온배관 수명평가

이 형 일

서강대학교 기계공학과

(2000년 11월 5일 접수, 2000년 12월 11일 채택)

## $C^*$ -integral Based Life Assessment of High Temperature Pipes

Hyungyil Lee

*Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul*

*(Received 5 November 2000 ; Accepted 11 December 2000)*

요 약

최근 들어 가혹한 온도 및 압력조건에서 운전이 요구되는 고온배관들의 잔여수명예측은 상당히 중요한 관심사로 부각되고 있다. 이에 고온손상을 정량적으로 평가하여 설비를 안전하게 사용하기 위한 유지기술 및 수명평가 기술을 확보하는 것은 매우 중요하다. 한편 이러한 고온배관내 대부분의 균열은 반타원 표면균열의 형태로 형상화되어 파괴역학의 실제응용에서 발견할 수 있는 가장 복잡한 형상과 하중특성을 갖게 된다. 이를 배경으로 본 연구에서는 먼저 축방향 및 원주방향 반타원 표면균열이 존재하는 직관의 완전 3차원 유한요소망 자동 생성 프로그램을 작성하였다. 이렇게 생성된 유한요소 입력자료를 이용하여 3차원 유한요소 해석을 수행하면 반타원 표면균열선단을 따른 고온 크리프 파괴 지배변수  $C^*$ -적분값을 구할 수 있다. 또한  $C^*$ -적분값에 준해 균열진전량을 계산하는 후처리 균열진전 모듈을 추가하여 사용자 편의 수명평가 프로그램을 개발하였다. 최종적으로 개발된 통합 수명평가 프로그램을 이용하여 여러 가지 해석변수들의 반타원 표면균열을 갖는 고온 직관 수명에 대한 영향을 살펴보았다.

**Abstract** - In recent years, the subject of remaining life assessment has drawn considerable attention in power 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.

**Key words** : Semi-elliptical Surface Crack, Pipes,  $C^*$ -integral, Life Assessment Program, Auto Mesh Generation Program, Paris-law-type Crack Growth

## 1. 서 론

정부의 경제개발계획에 따른 석유화학공장 건설을 비롯한 발전소 건설 그리고 조선공업, 방위산업 및 원자력 발전소 건설 등 우리나라 공업은 급속도로 성장하여 왔다. 이들 중 산업 규모가 확대된 70년대 중반에 건설되어 석유 및 발전플랜트에서 운용되는 반응로, 저장탱크와 열교환기 등의 압력용기와 배관 등의 시설물들은 장기간 사용으로 인해 고온, 고압, 부식 환경, 열응력과 피로 등 여러 요인으로 경년 열화되어 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 재산 손실을 미연에 예방하고 경제적이고 효율적인 운영계획 수립에 필수적인 것이다. 고온·고압에서 사용되는 배관들의 지배적 파괴메커니즘은 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 파괴 매개변수라 할 수 없다. 하중을 가한 직후 크리프 영역은 균열선단부근에 작게 형성되어 있는데, 이를 SSC (small scale creep) 조건이라 부른다. 이 후 일정시간이 경과되어 크리프영역이 균열 선단에서부터 구조물 전체로 확장되면, 이를 EC (extensive creep) 조건이라 칭한다. SSC 조건에서 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 경로 적분  $C^*$ -적분이 있는데, 정상상태 크리프조건에 있는 균열체의 크리프균열성장 속도는  $C^*$ -적분에 의해 지배된다.<sup>(2~4)</sup> 가혹한 온도 및 압력조건에서 운전되는 고온배관들에서는 크리프현상이 지배적인 파괴메커니즘이다. 이를 위해 본 연구에서는 고온배관을 유한요소 모델링과 이어진 크리프 유한요소해석에 기초하여 배관의 잔여 수명평가 프로그램을 개발하고자 한다. 이에

먼저 고온배관에 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 Paris 법칙 형태의 크리프 균열성장식에 바탕을 둔 균열진전모듈을 첨부하여 전체 수명평가 프로그램을 완성한다. 최종적으로 개발된 통합프로그램을 이용하여 여러 가지 해석변수들이 고온 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 실제적인 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. 평판에서 직관으로의 매핑은 먼저 직관의 기하형상을 입력받은 후, 직관의 기하형상을 평판의 기하형상으로 전환한다. 그 후 전환된 평판에 상응하는 유한요소 모델을 생성하고 다시 직관으로의 매핑을 통하여 직관의 유한요소 모델을 최종적으로 완성한다. 원주방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 1/4

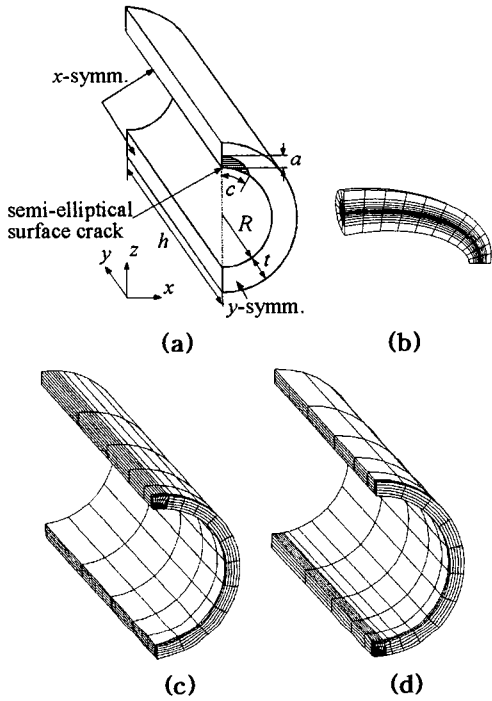


Fig. 1. One quarter model of inner circumferential semi-elliptical surface cracked pipe (a) schematic figure (b) crack front detail (c) inner cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ ) (d) outer cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ ).

형상 [Fig. 1(a)]에 대해 최대균열깊이  $a$ 와 균열 길이의 반인  $c$ 가 입력되면 반타원 표면균열 선단을 따라 8개의 썩기모양 특이요소가 11 조각 생성되고, 반지름 방향으로 8개, 각도 방향으로 8개의 요소들이 놓이게 된다. 이와 같은 균열선단부의 요소망은 약 3000개의 절점들과 약 700개의 20절점 C3D20 연속체요소 (ABAQUS Library<sup>(6)</sup>, 1998)들로 구성되어진다 [Fig. 1(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. 1(c)와 같고, 약 7500개의 절점들과 1500개의 C3D20 요소<sup>(6)</sup>들로 구성되어진다. 마찬가지로 Fig. 1(d)는 원주방향 외측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 유한요소모델이다.

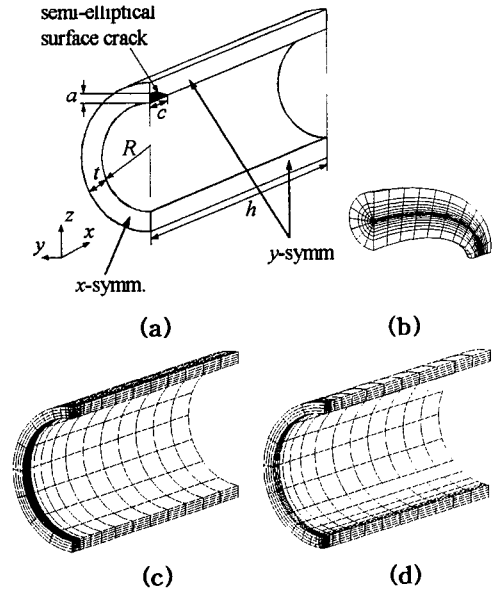


Fig. 2. One quarter model of inner axial semi-elliptical surface cracked pipe (a) schematic figure (b) crack front (c) inner cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ ) (d) outer cracked FE model ( $a/t = 0.5$ ,  $a/c = 0.3$ ).

## 2.2. 축방향 반타원 표면균열을 갖는 직관

기하형상과 하중의 대칭성을 고려하여, Fig. 2(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, 최대균열깊이는  $a$  그리고 균열길이는  $2c$ 이다. 최대균열깊이  $a$ 와 균열길이  $c$ 가 입력되면 반타원 균열선단을 따라 8개의 썩기모양 특이요소가 11조각 생성되고, 반지름 방향으로 8개 그리고 각도방향으로 8개의 요소들이 놓이게 된다 [Fig. 2(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 유한요소 모델은 Fig. 2(c)와 같고, 약 10000개의 절점들과 2100개의 요소들로 구성되어 있다. 마찬가지로 Fig. 2(d)에는 축방향 외측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 유한요소모델이 나타나있다.

### 3. 수명평가 프로그램

#### 3.1. 수명평가 프로그램의 구성

본 연구의 궁극적인 목표는 고온배관의 건전성을 효율적이고 경제적으로 수행하는데 유용한 컴퓨터 프로그램을 개발하는 것이다. 이와 같은 목적으로 개발된 수명평가 프로그램은 UNIX상에서 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 표면 균열선단에서의 크리프 파괴변수  $C^*$ -적분값을 계산해 낸다. 계산된  $C^*$ -적분값은 Paris법칙 형태의 크리프 균열성장식에 대입되어 반타원 표면균열을 진전시킨다. 이러한 과정들이 적절한 시간증분들에 대해 반복수행되다가 배관파단 조건이 만족되면, 수명평가 프로그램은 주어진 구조물에 대한 잔여수명 및 균열형상변화 등을 GUI로 최종적으로 제시한다. Fig. 3은 상술된 수명평가 프로그램의 전체 알고리즘이다. 이는 이형일 등<sup>(7)</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 (1)에 의해 진전된다. 여기서  $A$ ,  $m$ 은 재료상수들이다. 이 때 크리프 균열 성장식에서 사용되는  $C^*$ -적분값은 완전 3차원 유한요소해석으로부터 구한 균열선단의  $C^*$ -적분값이다. 여기서 균열 성장시 반타원 표면 균열은 균열진전 후에도 반타원 균열로 형상화 된다는 가정을 하였다. 이는 비교적 길이가 긴 반타원 표면균열의 피로진전실험에서 관찰되는 실제 특징이기도 하다.<sup>(8)</sup> 이를 배경으로 본 해석의 표면균열은 균열중심부의  $C^*|_{x/c=0}$

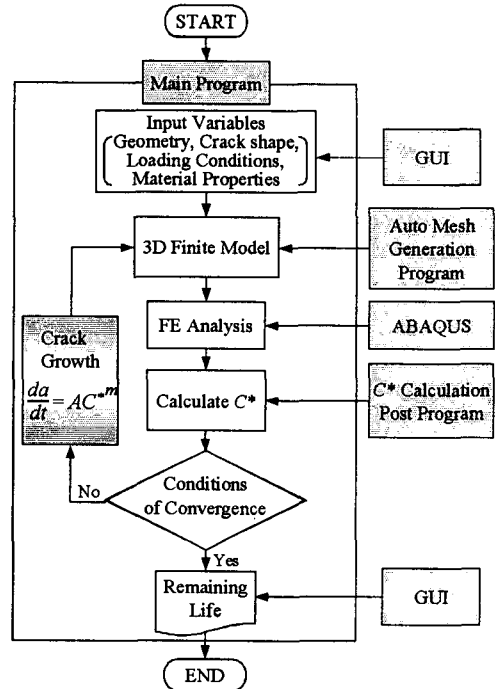


Fig. 3. Flow chart of the program.

값과 자유경계면에서의  $C^*|_{x/c=1}$  값을 기준으로 크리프 균열성장식에 의해 진전하는데 Fig. 4는 이를 도식적으로 보여준다. 즉 수명평가 프로그램의 균열진전모듈은 균열중심부의 최대균열 깊이  $a|_{x/c=0}$  를 균열깊이의 증분  $\Delta a|_{x/c=0}$  만큼 증가시키고 자유경계면의 균열길이  $c$ 를 균열 길이의 증분  $\Delta c = \Delta a|_{x/c=1}$  만큼 증가시켜, 단·장 반경이 각각  $a + \Delta a$  와  $c + \Delta c$  인 반타원 표면균열로 다시 형상화한다. 즉 수명평가 프로그램은 위의 과정을 반복적으로 수행하고 파단조건을 만족하면 GUI를 사용한 평가결과 제시모듈에 의해 주어진 구조물의 잔여수명 및 균열형상변화 등을 제시한다.

$$\frac{da}{dt} = AC^*{}^m \quad (1)$$

수명평가 프로그램에서 파단기준으로는 배관 두께에 대한 최대균열깊이 비 ( $a/t$ )와 임계값을 비교하는 방법과 재료의 저항과 작용하중에 의한  $J$ -적분값을 각각 균열길이로 미분하여 구한 찢김계수를 비교하는 두 가지 방법을 사용하였다.

#### 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 고온배관의 잔여 수명 특성을 다양한 해석변수에 대해 살펴 보았다.

##### 4.1. 배관 해석모델 및 하중모델

본 수명평가 프로그램을 사용한 실제문제의 해석은 고온 개질로관에 주로 쓰이는 HK40강을 사용하였다. 본 수명평가 응용예제들에서의 영률과 푸아송비 등은 871°C에서의 재료물성치<sup>(9)</sup> 134GPa, 0.34를 사용하였다. 응력과 변형률속도식 (2)의 계수  $B$ 와  $n$ 은 Wang 등<sup>(10)</sup>에 따라 각각  $1.47 \times 10^{-15} \text{MPa}^{-n} \text{hr}^{-1}$ , 7.17을 사용하였다. 그리고 Paris법칙 형태의 크리프 균열성장식 (1)의 계수  $A$ 와  $m$ 은 Su 등<sup>(11)</sup>에 따라 각각  $9.90 \times 10^{-3} (\text{m}^{2m+1} \cdot \text{hr}^{-m}) / \text{Joule}^m$ , 0.87을 사용하였다.

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^n \quad (2)$$

고온 개질로관은 외부열원 버너로부터 열을 공급받으므로 관의 내부와 외부의 온도구배가 심하기 때문에 열응력을 고려하여 유한요소 해석을 수행하였다. 개질로관의 온도는 대략 외부온도 1200°C, 내부온도 900°C로 설정하였다. 이 온도를 바탕으로 배관의 모든 절점에서의 온도를 구한다음 이어서 응력을 계산하는 두 단계를 거쳐 열응력은 계산된다.

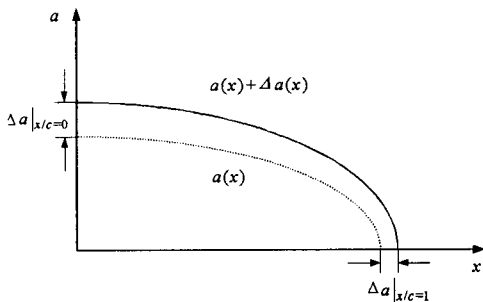


Fig. 4. Schematic illustration of semi-elliptical surface crack growth pattern.

##### 4.2. 고온 개질로관의 수명평가

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

Fig. 5는 최대균열깊이와 균열길이를 각각 9, 21 mm로 했을 때의 기본적인 배관의 기하형상과 재료물성치를 입력하는 대화상자이다. 또한 배관의 파단조건은 최대균열깊이비로 설정하여  $a/t \geq 0.7$ 이면 파단된다는 가정을 하였다. 이는 금속조직법에 의한 개질로관 모재부의 손상등급 분류를 근거로 하여 설정한 것이다.<sup>(12)</sup>

수명평가 프로그램에서의 균열진전은 초기 입력값으로 준  $C^*$ -적분값 계산횟수 (=반복수) 만큼 반복적으로 수행된다. 즉 수렴조건을 배관 두께에 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  $a/t \geq 0.7$ 이라면)  $a/t=0.2$ 에서 0.6 까지  $\Delta a/t = 0.1$  씩 증가하는 시간을 측정하게 된다. 이 모든 시간을 합한 것이 배관의 잔여 수명으로 간주된다.

첫 번째로 균열형상 변화에 따른 배관잔여 수명을 살펴보았다. 일정한 열응력과 2.8MPa의 내압하중을 가했을 때 최대균열깊이  $a$ 를 일정하게 하고 균열길이  $c$ 를 변화시켜  $a/c=0.2, 0.4$  그리고 0.6의 비로 균열형상의 변화에 따른 배관의 잔여수명을 살펴보았다. 해석모델은 원주방향 내측 반타원 표면균열을 갖는 직관이다.

**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  $da/dt = B C^{*m}$       Time step (hr):

A:       Iteration No.:

m:

Young's modulus:

Poisson's ratio:

Fig. 5. Dialog box of circumferential part-through wall inner crack.

Fig. 6(a)-(b)는 각각 균열형상변화에 따른 균열중심과 자유경계면에서 시간에 따른  $C_t$ -매개변수값을  $a/c = 0.6$ 일 때의  $C^*$ -적분값으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 균열형상 변화에 따른 균열중심부에서의  $C^*$ -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. 6(c)는 균열형상이 변화함에 따른 배관의 잔여수명을 나타낸 것이다. 균열비( $a/c$ )가 증가함에 따라—균열형상이 원형에 가까울수록—배관의 잔여수명은 증가한다는 것을 알 수 있다.

두 번째는 앞에 설명한 것과 같은 기본 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. 7은 내압하중에 따른 잔여수명의 차이를 나타내는데, 주어진 기하 및 균열형상 그리고 열응력을 받는 원주방향 내측 반타원 표면균열을 갖는 직관의 잔여수명은 내압에 매우 민감하게 의존하는 것을 확인할 수 있다.

세 번째로  $C^*$ -적분값 계산횟수 (=반복수)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. 8(a)는 3번의 반복수로 배관잔여수명 평가했을 때 GUI를 사용하여 나타나는 수명평가 프로그램의 결과화면으로, 반복수에 따른 균열중심과 자유경계면에서의  $C^*$ -적분값, 최대 균열깊이 및 균열길이 그리고 균열증가시간 등을 나타낸다. 여기서 잔여수명은 각 반복수에 따른 균열증가시간의 합이다. 또한 Fig. 8(b)는 각 단계의 유한요소해석을 통한 균열의 성장을 개략적으로 보여주는 GUI화면이다.

Fig. 8(c)는 반복수에 대한 배관잔여수명을 나타낸 것이다. Fig. 8(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

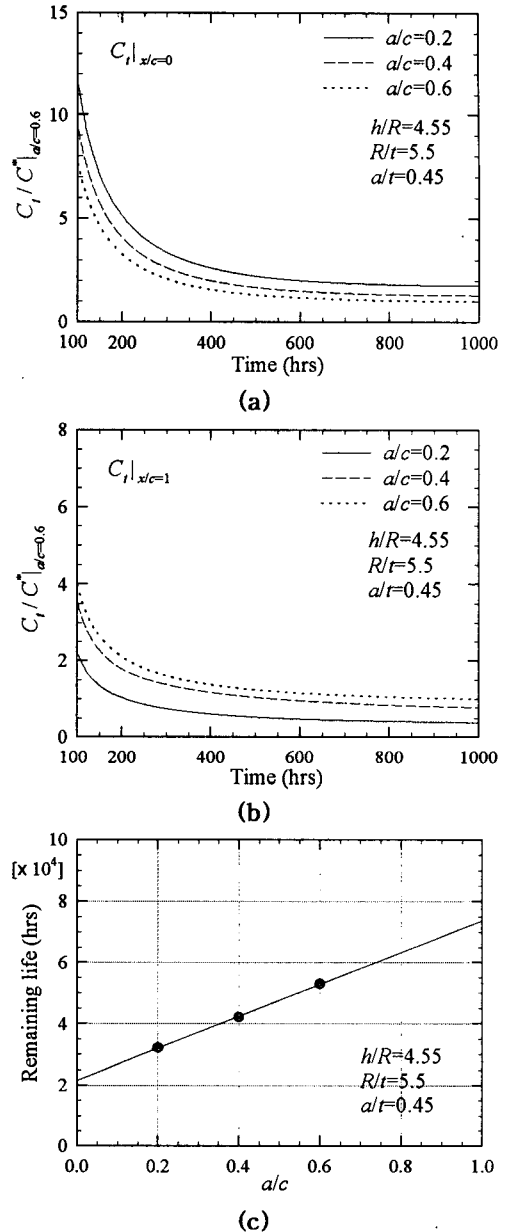


Fig. 6. Variation of  $C_t$  with respect to the elapsed time  $t$  under internal pressure and thermal stress for various crack lengths at the (a) crack center and (b) free surface (c) remaining lives for various crack shapes.

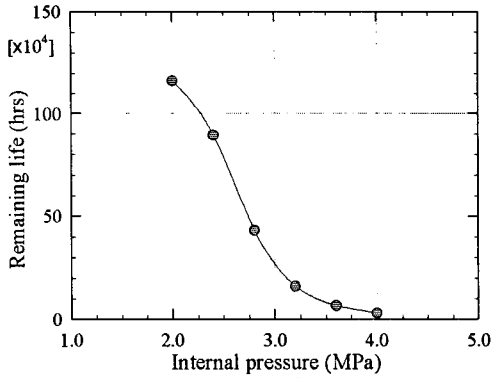
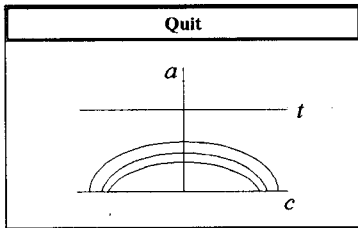


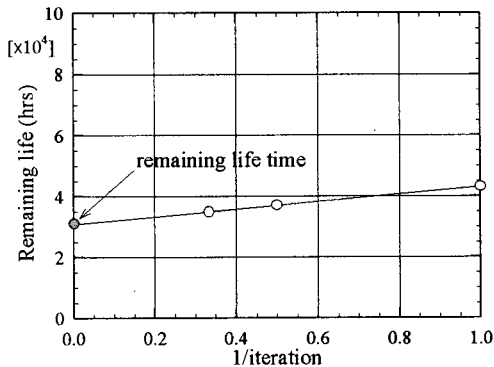
Fig. 7. Remaining life vs pressure.

menu					
RESULTS OF LIFE ASSESSMENT PROGRAM USING 3D FINITE ELEMENTS					
h = 500 R = 110 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. 8. Result screen of iteration number 3 (a) text, (b) crack growth shape, (c) remaining life for various iteration.

프로그램의 반복수는 잔여수명 예측의 중요한 인자임을 확인할 수 있었다. 수명평가의 정확성을 위하여 반복수는  $\infty$ 에 가까운 값으로 주어 야 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. 8(c)와 같이 선형외삽법을 이용하여 반복수가  $\infty$ 에 가까울 때의 잔여수명을 예측하는 것이다.

네 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 균열형상을 갖는 직관의 크리프 균열성장식 지수 ( $m_0$ , 0.87)를 2% 감소 (0.8526) 및 2% 증가 (0.8874)에 따른 차이를 줌으로써 배관의 잔여수명의 변화를 살펴보았다. Fig. 9는 균열 성장식 지수에 따른 배관의 잔여수명을 나타낸 것으로 세 번째 예제와 같이 여러 가지 반복수에 대한 유한요소해석을 수행한 후 선형외삽법을 사용하여 배관의 잔여수명을 구한 것이다. 배관 잔여수명은  $m=0.98m_0$ 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.

다섯 번째로 수행한 수명평가는 수렴조건에 대한 것이다. 앞까지의 예제는 모두 최대균열 깊이비가 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 열 응력과 내압하중 2.8MPa을 가하였다. Fig. 10은 반복수에 따른 잔여수명을 나타낸 것으로 최대 균열깊이비 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 작았다. 이는 균열깊이가 증가함에 따라 C\*-적분값의 증가폭이 커지게 되고 이에 균열증분이 커지기 때문이다.

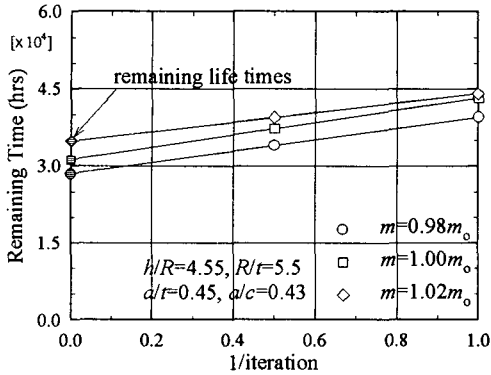


Fig. 9. Remaining life time for various creep crack growth exponent.

### 5. 결론

본 연구에서는 3차원적 기하형상으로 인하여 모델링하기 힘든 축방향 및 원주방향 반타원 표면균열을 갖는 직관의 완전 3차원 요소망 자동생성 프로그램을 개발하였다. 또한 여기에 포스트를 더해 고온배관의 수명평가 프로그램을 개발하였고, 이를 토대로 고온배관에 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. 실험을 통한 데이터 보간의 방법으로 구하는 균열성장식 지수에 따른 수명평가에서, 균열성장식 지수가 증가함에 따라 잔여수명도 큰 폭으로 증·감하는 것을 확인할 수 있었다. 최대균열깊이비의 수렴 조건에 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.

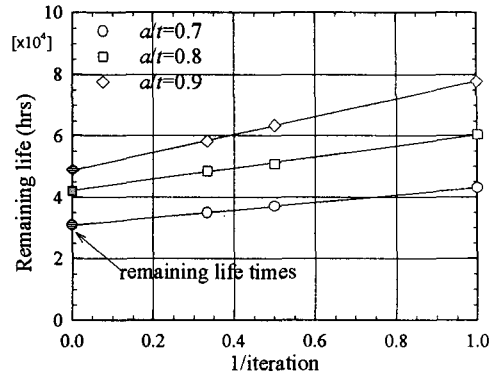


Fig. 10. Remaining life for various crack depth ratio criterion.

### 감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 1999년 전력기술 기초연구에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] 윤기봉, "보일러 헤더의 잔여수명 평가," 대한기계학회지, 제32권, 제4호, pp. 358~370 (1992).
- [2] Saxena, A., "Evaluation of  $C^*$  for the Characterization of Creep Crack Growth Behavior of A470 Class 8 Steel," ASTM STP 833, pp. 131~151 (1980).
- [3] Landes, J. D. and Begley, J. A., "A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth," *Mechanics of Crack Growth*, ASTM STP 590, pp. 128~148 (1976).
- [4] Nikbin, K. M., Webster, G. A. and Turner C. E., "Relevance of Nonlinear Fracture Mechanics to Creep Cracking," *Cracks and Fracture*, ASTM STP 601, pp. 47~62 (1976).
- [5] 이형일, 서현, "용접부 3차원 표면균열선단에서의 구속상태," 대한기계학회논문집(A), 제24권, 제1호, pp. 144~155 (2000).
- [6] ABAQUS *User's Manual*, 1998, Version 5.8 Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.



- [7] 이형일, 한태수, 정재현, “결합해석에 기초한 배관용접부 수명평가,” 대한기계학회논문집 (A), 제24권, 제5호, pp. 1331~1342 (2000).
- [8] Hodulak, D., “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 (1990).
- [9] Roach, D. B., and VanEcho, J. A., *Comparison of Properties of the HK40 and HK45 Cast Heat-resistant Alloys*, Stainless Steel Casting, ASTM STP 756, pp. 275~312 (1982).
- [10] Wang, Y. L., Shen, F. Z. and Tu, S. H., “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 (1994).
- [11] Su, X. W., Shu, S. J., Li, X. H., Wang, L. and Wang, F. G., “Life Assessment of HK40 Reformer Tube by Fracture Mechanics,” *Materials at High Temperatures*, Vol. 10, No. 4, pp. 221~225 (1992).
- [12] 심상훈, 윤기봉, 개질로관 및 분해로관 유지기술 동향, 기계저널, 제38권, 제11호, pp. 24~30 (1998).