

결함해석에 기초한 배관용접부 수명평가

이형일* · 한태수** · 정재현***
(1999년 9월 2일 접수)

Flaw Analysis Based Life Assessment of Welded Tubular Joint

Hyungyil Lee, Taesoo Han and Chae-hon Chong

Key Words: Life Assessment Program (수명평가 프로그램), Automatic Mesh Generation Program (요소망 자동생성 프로그램), Line-spring Finite Element (Line-spring 유한요소), T-joint (T-형 배관), L-joint (L-형 배관), Experimental Creep Crack Growth Law (실험 크리프균열 성장식)

Abstract

In power generation systems a variety of structural components typically operate at high temperature and pressure. Therefore a life assessment methodology accounting for gradual creep fracture is increasingly needed for these components. The most critical defects in such structure are generally found in the form of semi-elliptical surface cracks in the welded tubular joints. Therefore the analysis of a semi-elliptical surface crack in a plate or a shell is an important problem in engineering fracture mechanics. On this background, via shell/line-spring finite element analyses of such surface cracks in the welded T and L joints under various loadings, we investigate J -integral along the crack front. We first develop T and L joints auto mesh generation program providing ABAQUS input file composed of shell/line-spring finite elements. We then further develop a T and L joints life assessment program based on the experimental creep crack growth law and auto mesh generation programs in a graphical user interface format. Finally the remaining life of T and L joints for various analytical parameters are assessed using the developed life assessment program.

1. 서 론

근자에 국내 원전 및 화력발전소, 석유화학공장 등의 가동기간이 오래 누적되어 각종 주요 설비들의 사용시간이 설계수명에 다다르고 있다. 이에 따라 노후 설비의 교체 및 기존설비의 유지보수를 위한 잔여수명 평가가 필요하게 되었다. 여기서 잔여수명이란 단순히 설계수명에서 현재까지의 사용시간을 감한 것을 의미하지는 않음을 주목해야 한다. 이러한 수명평가기술의 목적은 노후설비의 예기치 않은 파괴로 인한 산업재해를 방지하고, 설비의 정상운전

시의 안전성을 지속적으로 평가하거나 잔여수명 평가를 통해 새 설비의 설치시기를 조절함으로써 경제적 부담을 감소시키는데 있다. 이를 위해 기기의 환경 조건, 하중조건 그리고 재료물성치들을 효율적으로 관리하기 위한 데이터 베이스의 구축과 이를 처리·활용하기 위한 시스템의 개발이 요구되고 있다.

가혹한 환경하에서의 장기사용시, 대부분의 기기내 실제결함은 배관용접부에 반타원 표면균열의 형태로 발생한다.⁽¹⁾ 이에 본 연구에서는 발전소 배관의 주요 형태인 T-형 및 L-형 배관 용접부에 반타원 표면 균열이 존재할 때, 셸/line-spring 유한요소를 사용한 ABAQUS⁽²⁾의 입력파일을 자동으로 생성하는 프로그램을 작성하여 다양한 하중조건에 대한 J 값을 정량적으로 평가하였다. 또한 크리프균열성장 이론에 바탕을 둔 T-형, L-형 배관의 수명평가프로그램을 개발하여 배관 잔여수명에 대한 해석변수들의 영향을 살펴보았다.

* 회원, 서강대학교 기계공학과
E-mail : hylee@ccs.sogang.ac.kr
TEL : (02)705-8636 FAX : (02)712-0799

** 서강대학교 대학원 기계공학과
*** 한국중공업 주식회사 피로파괴연구팀

2. Line-spring 유한요소

2.1 Line-spring 모델의 배경

본 연구의 주요대상이 되고 있는 표면균열은 공학문제에서 매우 빈번히 접하게 되며 파괴역학 분야에서는 가장 실제적인 관심사 중의 하나이다. 이러한 표면균열의 해석은 복잡한 3차원적 기하형상으로 인하여 주로 수치적인 방법에 의존하고 있다. 이 경우 우선적으로 생각할 수 있는 완전 3차원 연속체 유한요소해석은 반타원 표면균열의 형상과 파괴변수의 복잡성으로 인해 3차원 유한요소해석시 수많은 미세한 유한요소와 이에 상응하는 계산시간을 필요로 한다. 그러나 이와 같은 제반 문제점들은 Rice와 Levy⁽³⁾에 의해 개발된 "line-spring"이라 불리는 간단하며 동시에 매우 효율적인 모델에 의하여 해결될 수 있다.

Line-spring 모델은 평판이나 관형 구조물에서 부분관통 표면균열의 응력확대계수 (stress intensity factor, K_I)를 효율적으로 계산하기 위해 Rice와 Levy에 의해 개발되었다. Parks⁽⁴⁾는 일반적인 유한요소 코우드에 선형 탄성 line-spring 모델을 이용하여 얻어진 K_I 값이 표면균열선단의 거의 모든 영역에서 정확하다는 것을 보였다. 또한 Parks와 White,⁽⁵⁾ White 등⁽⁶⁾은 이 모델을 증분소성이론 (incremental theory of plasticity)에 기초하여 탄·소성 문제해석에 확장 응용하였다. Lee와 Parks⁽⁷⁾는 한 걸음 더 나가 line-spring 모델을 이용하여 표면균열 선단을 따라 분포하는 탄·소성 균열선단 응력들을 두 개의 변수 [$J-T$]로써 설명하였다. 이러한 line-spring 모델의 가장 큰 장점은 복잡한 3차원 문제를 다루기 쉬운 2차원 문제로 단순화시킴에 있다.

2.2 Line-spring 모델

부분관통 표면균열이 있는 평판이 셸에서는 균열이 없는 경우와 비교했을 때, 부분관통 표면균열이 존재함으로써 추가적 컴플라이언스 (compliance)가 존재한다. Line-spring 모델의 주요 특징은 관통균열 양쪽편을 연결시켜주는 요소가 있다고 가정하여 이러한 추가적 컴플라이언스를 고려하는 것이다. 이러한 추가적 컴플라이언스는 Fig. 1에 도식적으로 나타난 두께 t 의 관형구조에 존재하는 전체균열 길이 $2c$ 의 부분관통 표면균열에 의해 설명되어진다. 여기서 x 좌표는 반타원 표면균열의 중심 ($x = 0$)

으로부터의 거리이고 $a(x)$ 는 각 위치 x 에서의 균열 깊이이다. 하중과 기하학적 형상이 대칭일 경우, 추가적인 컴플라이언스를 갖는 요소에 의해, 셸에 전달되는 합력은 x -방향으로의 단위길이당 힘 $N(x)$ 와 모우멘트 $M(x)$ 이고, 이들로부터 변위 $\delta(x)$ 와 회전 $\theta(x)$ 가 계산되어진다. Fig. 1에 나타난 요소의 컴플라이언스는 표면균열에서 각 균열깊이 $a(x)$ 에 따라 변하게 된다. 만약 $2c \gg t$ 이면 표면균열은 평면변형률 SEC (single edge crack) 시편으로 볼 수 있고 이 경우 균열깊이 $a(x)$ 는 일정한 상수가 된다. 이러한 극단적인 경우에 착안하여, 위치 x 에서 요소의 추가적인 컴플라이언스는 동일한 균열깊이 $a(x)$ 와 두께 t 를 갖는 평면변형률 SEC 시편의 컴플라이언스 값으로 취해진다.^(2,3) 이러한 모델 특성으로 인해, line-spring 유한요소는 일반적으로 셸 두께에 대한 균열길이 비 ($2ct$)가 크고, 균열깊이 $a(x)$ 가 점진적으로 변할 때 더욱 정확하다. 결국 line-spring 유한요소는 추가적 컴플라이언스의 도입으로 인해 복잡한 3차원 표면균열문제를 일반화된 2차원 경계치 문제로 단순화한다.

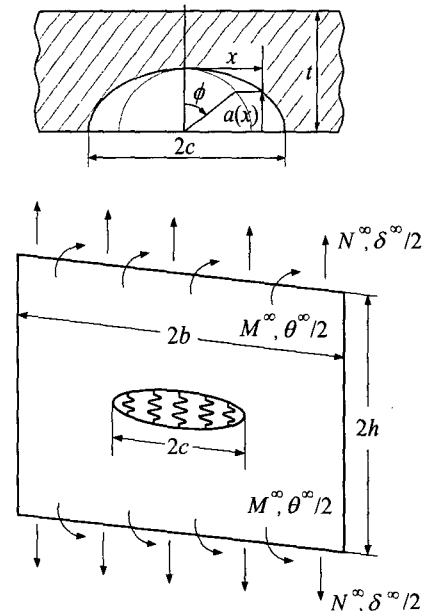


Fig. 1 Cross section of a part-through surface crack with a length $2c$ and varying depth $a(x)$ in a shell of thickness t (above). Schematic illustration of line-spring model which covers the part-through surface crack to the through-crack with a generalized foundation (below)

3. 크리프성장모델

고온에서 상당한 크리프변형이 발생하는 경우 헤더의 잔여수명평가를 위해서는 헤더재료의 크리프 균열 성장속도 데이터가 필요하다. 이들 데이터로부터 크리프성장모델은 주로 크리프매개변수 C^* 에 의해 식 (1)과 같이 Paris 법칙형태로 표현된다.

$$\frac{da}{dt} = BC^* p \quad (1)$$

여기서 B , p 는 재료상수이다. 그런데 본 연구에서는 크리프성장모델에 사용되는 매개변수로써 C^* 대신에 응력확대계수 K 를 사용하였다.

상온 소규모 항복시 K 가 유효한 영역이 존재 하듯이 고온에서도, 비교적 저하중시, 크리프변형역이 탄성영역으로 둘러 쌓이면 실용적인 관점에서 K 를 크리프매개변수로 생각해 볼 수 있다. 즉 예리한 균열이 시간이 지남에 따라 연속적으로 재생성되며 성장한다면, K 만으로도 시간에 따른 균열성장을 잘 표현할 수 있다. 균열선단에서 짧은 시간동안의 크리프균열성장은 미시적으로 결정입계를 따라서 연속적으로 예리한 균열의 형태로 성장할 수 있다. 이 경우, 결국 균열성장애 따른 순간적인 응력분포는 응력확대계수 K 에 의해 표현될 수 있다. 이는 Su 등⁽⁸⁾의 실험을 통한 크리프균열 성장식에서도 확인할 수 있다. Su 등은 840°C에서 8만 시간동안 작동한 HK40 재료의 개질로 (reformer) 튜브에 대한 871°C에서의 고온실험으로부터 파괴변수 K 나 크리프 매개변수 C^* 로써 크리프균열 성장속도를 나타냈는데 이는 Figs. 2-3과 같고, 이를 보간하여 표현해보면 식 (2)-(3)과 같다. 평균오차는 K 의 경우 0.35, C^* 의 경우 0.29이다. 결국 크리프균열진전률은 C^* 를 사용한 식에 비해 K 를 사용한 식의 편차가 크지만, 본 연구의 수명평가 목적으로서는 적용가능한 크리프균열 성장식이라 할 수 있다. 이는 Siverns와 Price⁽⁹⁾ 그리고 Sadananda와 Shahinian⁽¹⁰⁾의 실험을 통한 크리프성장모델에서도 확인할 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = 1.3 \times 10^{-6} K^{5.7} \quad (2)$$

$$\frac{da}{dt} = 2.29 \times 10^{-4} C^{*0.87} \quad (3)$$

이로부터 본 연구에서 사용된 크리프균열성장식은, 응력확대계수 K 와 J 의 관계 ($J = E'K_I^2$)로부터, 식 (4)와 같다.

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

즉 위와 같은 크리프성장모델에서, 실험을 통한 크리프균열 성장속도 데이터를 확보하여, 재료물성치 A 와 m 을 알 수 있다면 J 값에 관한 크리프균열 성장식을 적용할 수 있다.

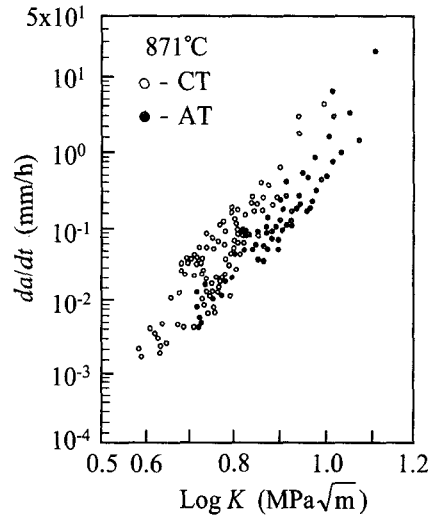


Fig. 2 Creep crack growth rates of specimens vs. stress intensity factor K for two different specimens⁽⁸⁾

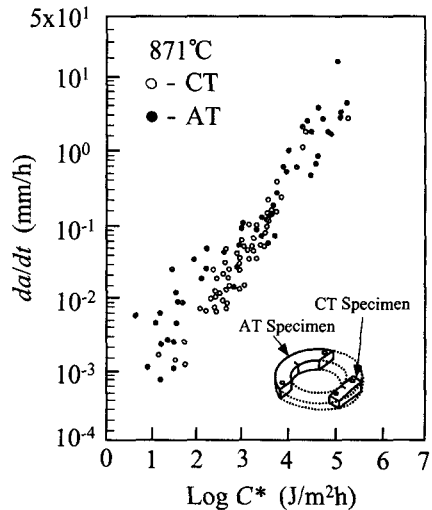


Fig. 3 Creep crack growth rates of specimens vs. C^* for two different specimens⁽⁸⁾

4. T-형 배관의 반타원 표면균열 해석

4.1 요소망 자동생성 프로그램

Fig. 4와 같은 반타원 표면균열을 갖는 T-형 배관은 복잡한 기하형상으로 인하여 모델링에 많은 시간과 노력이 요구된다. 이에 본 연구에서는 주어진 기하형상 및 균열형상에 맞는 셸/line-spring 유한요소망을 자동으로 생성하는 T-형 배관 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였다. 이러한 요소망 자동생성 프로그램으로부터 얻어진 ABAQUS 입력파일로 배관용접부에 생성되는 반타원 표면균열의 탄성 유한요소해석을 수행하였다.

코어드 (chord)와 브레이스 (brace)로 이루어져 있는 기본적인 T-형 배관에서 균열의 위치는 각각 배관 중심 [Fig 4(a)]과 모서리에 존재하는 경우 [Fig 4(b)]로 분류하였다. 그리고 표면균열은, 주로 용접끝단에 생성되므로, 코어드와 브레이스 경계면에서 용접거리만큼 떨어진 곳에 위치한다. 또한 균열이 용접부 양쪽에 두 개 존재할 경우 기하형상 및 하중대칭 조건을 고려하여 1/4모델링을 하였고, 한 개만 존재할 때는 1/2모델링을 하였다. 전체 모델은 배관부의 경우 8절점 셸요소 (S8R: ABAQUS Library⁽²⁾) 그리고 반타원 표면균열부는 비대칭 line-spring 요소 (LS6: ABAQUS Library⁽²⁾)를 사용하였다.

반타원 표면균열이 T-형 배관의 중심에 두 개 존재하는 경우와 한 개 존재하는 경우의 유한요소 모델은 각각 Fig. 5(a)-(b)와 같고, 모서리에 두 개 존재하는 경우와 한 개 존재하는 경우의 유한요소 모델은 각각 Fig. 6(a)-(b)와 같다. 1/4모델은 약 6500개의 절점들과 2000개의 요소들로 구성되어 있고, 1/2모델의 절점과 요소는 1/4모델의 2배정도이다.

균열위치와 균열개수에 대한 하중의 영향을 평가하기 위하여 배관의 기하형상과 균열형상이 $r/R = 0.7$, $r/t = 5.83$, $a/t = 0.6$ 그리고 $a/c = 0.2$ 일 때, T-형 배관 요소망 자동생성 프로그램을 이용하여 ABAQUS 입력파일을 생성한 후 유한요소 해석을 수행하였다. 하중조건으로 코어드 양단을 고정하고 브레이스 끝에 인장하중 (F)을 가하였고 유한요소해석 후 반타원 표면균열선단에서의 J 값을 $EJ/(\sigma_a^2 t)$ 로 무차원화시켜 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서 E 는 영률이고 σ_a 는 작용응력으로 $F/2\pi r t$ 이다. 인장하중하에서는 균열이 배관중심에 두 개 존재할 경우 다른 경우들과 비교하여 가장 큰 J 값을 갖는다. 또한 균열이 배관중심에 존재할 경우,

균열중심부 ($x/c = 0$)에서 경계자유면 ($x/c = 1$)으로 갈수록 J 값은 감소하는데 반해 모서리에 존재할 경우의 J 값은 균열중심에서 자유경계면으로 갈수록 증가한다.

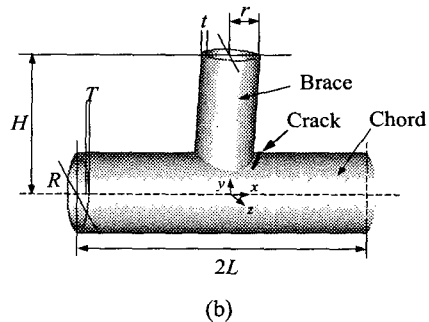
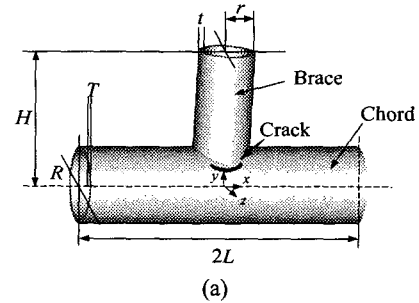


Fig. 4 Geometry of welded T-joint and location of crack. (a) center surface crack (b) edge surface crack

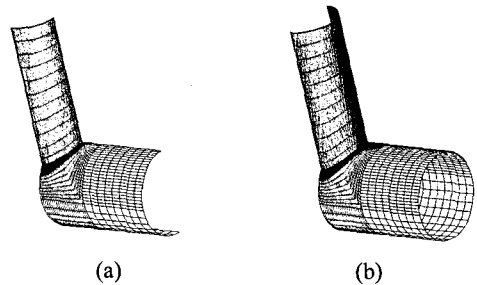


Fig. 5 FE model of welded T-joint with (a) double (b) single center crack

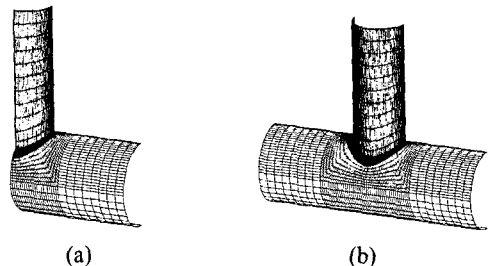


Fig. 6 FE model of welded T-joint with (a) double (b) single edge crack

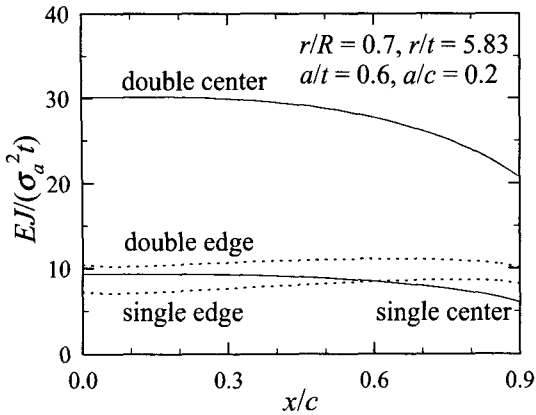


Fig. 7 Normalized J -integral distribution along the crack front of surface cracked T-joint under remote tension for various crack positions and number of crack

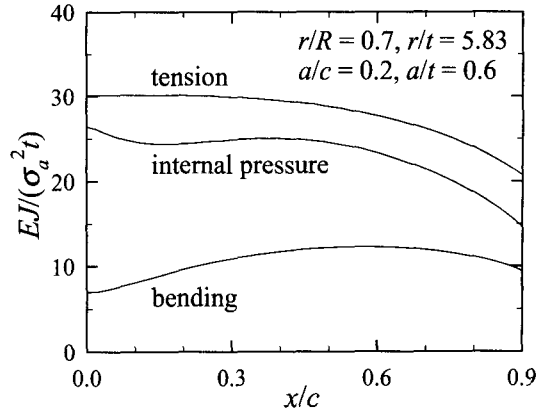


Fig. 8 Normalized J -integral distribution along the crack front of surface cracked T-joint under various loading conditions

4.2 하중조건에 따른 J -적분

반타원 표면균열이 T-형 배관중심 앞·뒤로 두 개 존재할 때 인장하중, (브레이스 끝 고정상태에서 코어드 양단에) 순수 굽힘하중 그리고 내압하중 조건에서 표면균열전단을 따른 J 값 분포를 살펴보기 위하여, T-형 배관의 재료를 탄성계수 $E = 200$ GPa, 포아송비 $\nu = 0.3$ 그리고 항복응력 $\sigma_y = 300$ MPa인 배관용 철강으로 가정하였다. 배관의 기하형상 및 균열형상이 $r/R = 0.7$, $r/t = 5.83$, $a/l = 0.6$ 그리고 $a/c = 0.2$ 일 때 요소망 자동생성 프로그램을 사용하여 T-형 배관 요소망을 작성하고 상용유한요소 코우드인 ABAQUS를 사용한 탄성해석을 수행하였다.

각 하중조건에 대한 파괴변수 J 값을 $EJ/\sigma_a^2 t$ 로 무차원화시켜 나타내면 Fig. 8과 같다. 여기서 σ_a 는 인장하중시 $F/2\pi r t$, 굽힘하중시 $4MR/\pi(r_o^4 - r_i^4)$ 그리고 내압하중시 $pr/2t$ 로 작용응력이다. 반타원 표면균열을 갖는 T-형 배관의 J 값은 인장하중시 균열중심 ($x/c = 0$)에서 최대가 되며, 자유면의 경계근처 ($x/c = 1$)로 갈수록 감소하는 경향을 보이게 된다. 이는 균열전단에 동일한 하중을 전달하는 인장하중에서 하중을 버틸 수 있는 리가먼트의 길이가 균열중심부에서 가장 짧기 때문이다. 굽힘하중이 작용하는 경우 $x/c < 0.6$ 인 영역에서는 증가하는 경향을 보이나 이 후에는 다시 감소하는 경향을 보이게 된다. 또한 내압하중시 J 값은 잠시 감소하였다가 다시 증가하나 $x/c = 0.4$ 에서 경계자유면으로 갈수록 다시 감소한다.

5. L-형 배관의 반타원 표면균열 해석

5.1 요소망 자동생성 프로그램

Fig. 9와 같은 L-형 배관을 완전 3차원 연속체 요소로 모델링 하는 것은 상당히 많은 시간과 노력이 요구된다. 이에 주어진 기하형상에 맞는 셀/line-spring 요소망을 자동으로 생성하는 L-형 배관 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였다. 이러한 요소망 자동생성 프로그램으로부터 얻어진 ABAQUS⁽²⁾의 입력과일로 배관용접부에 생성되는 반타원 표면균열의 유한요소해석을 수행하였다. 기하형상과 하중의 대칭성을 고려하여, 반타원 표면균열을 갖는 L-형 배관의 유한요소모델을 Fig. 10과 같이 1/2형상만 모델링하였다. L-형 배관의 길이와 높이는 H 로 같고, 배관 반경은 r 그리고 두께는 t 이다. 반타원 표면균열은 균열길이 $2c$ 그리고 최대균열깊이 a 로 L-형 배관 굽힘부의 안쪽에 위치한다. 또한 용접끝단에 균열이 주로 생성되므로 균열은 용접거리만큼 떨어진 곳에 위치한다. L-형 배관 모델은 배관부의 경우 8절점 (S8R) 및 6절점 셀 요소 (STR165: ABAQUS Library⁽²⁾)를 사용하였고, 반타원 표면균열부에는 비대칭 line-spring 유한요소 (LS6)를 사용하였다. Fig. 10은 L-형 배관 입력 변수값들 비율이 $H/r = 5$, $r/t = 3.33$, $a/l = 0.6$ 그리고 $a/c = 0.2$ 일 경우 요소망 자동생성 프로그램을 이용한 유한요소해석 모델 중 대표적 한 예이다. 이 유한요소모델은 약 2100개의 8절점 셀요소, 6개의 6절점 셀요소, 38개의 비대칭 line-spring 유한요소들과 약 6800개의 절점으로 구성되어 있다.

5.2 하중조건에 따른 J-적분

반타원 표면균열을 갖는 L-형 배관을 요소망 자동생성 프로그램을 이용하여 인장하중, 굽힘하중 그리고 내압하중에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 이 때 L-형 배관의 기하형상 및 균열형상은 $H/r = 5$, $r/t = 5$, $a/t = 0.5$ 그리고 $a/c = 0.2$ 로 가정하였고, 탄성계수 $E = 200$ GPa, 푸아송비 $\nu = 0.3$ 그리고 항복응력 $\sigma_y = 300$ MPa인 일반 배관용 철강으로 가정하였다. 각 하중조건에 대한 파괴변수 J 값을 $EJ/\sigma_a^2 t$ 로 무차원화시켜 나타내면 Fig. 11과 같다. 여기서 σ_a 는 T-형 배관의 경우와 같이 작용응력이다. 인장하중과 굽힘하중시 균열 중심부에서 자유경계면으로 갈수록 값이 증가하였으나, 내압하중시에는 균열중심부에서 $x/c = 0.2$ 인 영역까지는 감소하였다가 그 이후에는 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다.

6. 수명평가 프로그램

6.1 수명평가 프로그램의 구성

본 연구의 궁극적인 목표는 발전소 배관의 대표적 형태인 T-형 및 L-형 배관의 건전성을 효율적이고 경제적으로 수행함에 있어서 유용한 컴퓨터 프로그램을 개발하는 것이다. 이와 같은 목적으로 개발된 수명평가 프로그램은 UNIX상에서 사용되는 프로그램으로 사용자 편의의 GUI (Graphical User Interface)를 사용한 입력 모듈에 의해 배관 용접부에서 발견된 균열형상 및 배관 기하형상을 입력받는다. 그리고 요소망 자동생성 프로그램은 주어진 기하형상에 맞는 셀/line-spring 요소망을 생성한다. 수명평가 프로그램은 자동생성된 요소망으로부터 유한요소해석을 수행하고 반타원 표면 균열선단에서의 J 값을 계산할 수 있다. 반타원 표면균열은, 계산된 J 값을 이용하여, 크리프균열 성장식에 의해 진전된다. 이러한 과정은 정해진 파단조건을 만족시킬 때까지 반복적으로 수행되며, 모든 과정이 끝나면 GUI를 사용한 평가결과제시 모듈에 의해, 주어진 구조물에 대한 잔여수명 및 균열형상변화 등이 제시된다. Fig. 12는 수명평가 프로그램의 전체알고리즘이다.

6.2 반타원 표면균열의 진전

6.2.1 자유경계면에서의 J값 예측

셀/line-spring 유한요소모델은 탄성해석을 통해 반타원 표면균열선단에서의 J 값을 구할 수 있다. 그런데 균열선단 중 자유경계면 ($x/c = 1$)에서의 J 값은 0에 가까운 값을 갖는다. 이에 본 수명평가

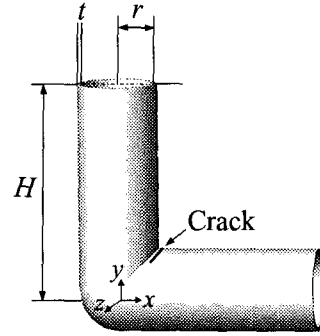


Fig. 9 Geometry of welded L-joint and location of surface crack

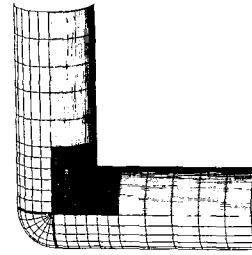


Fig. 10 A FE model of the welded L-joint by automatic mesh generation program

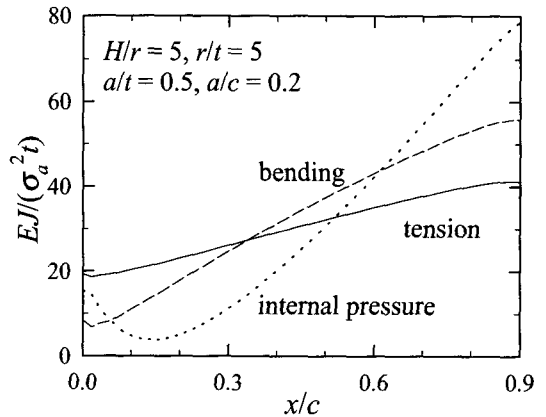


Fig. 11 Normalized J -integral distribution along the crack front of surface cracked L-joint under various loading conditions

프로그램의 균열진전 모듈에서는 $x/c < 0.8$ 인 영역의 균열선단 J 값 데이터를 3차다항식으로 곡선 접합한 후, 이 곡선접합식의 외삽값으로 자유경계면의 J 값을 근사적으로 구한다. Fig. 13은 T-형 배관 기하형상 및 균열형상이 $r/R = 0.2$, $r/t = 5.83$, $a/t = 0.6$, $a/c = 0.2$ 이고, 하중조건으로 내압하중을 가했을 때 균열선단에서 얻어진 J 값과 이를 외삽하여 얻은 J 값을 무차원화 시켜 나타내고 있다.

6.2.2 반타원 표면균열의 성장

수명평가 프로그램의 균열은 Siverns와 Price⁽⁹⁾의 크리프시험에서 구한 크리프균열 성장식에 의해 진전된다. 이 때 크리프균열 성장식에 사용되는 J 값은 셸/line-spring 유한요소해석으로부터 구한 균열 선단의 J 값을 외삽한 값이다. 균열 성장시 반타원 표면균열은 균열진전 후에도 반타원 균열로 형상화된다는 가정을 하였다. 이는 비교적 길이가 긴 반타원 표면균열의 피로진전실험에서 관찰되는 실제 특징이기도 하다.⁽¹¹⁾ 표면균열은 균열중심부의 J 값 ($J_{x/c=0}$), 외삽으로 구한 자유경계면에서의 J 값 ($J_{x/c=1}$)을 기준으로 크리프균열 성장식에 의해 진전하고, 이를 Fig. 14에 도식적으로 나타내었다.

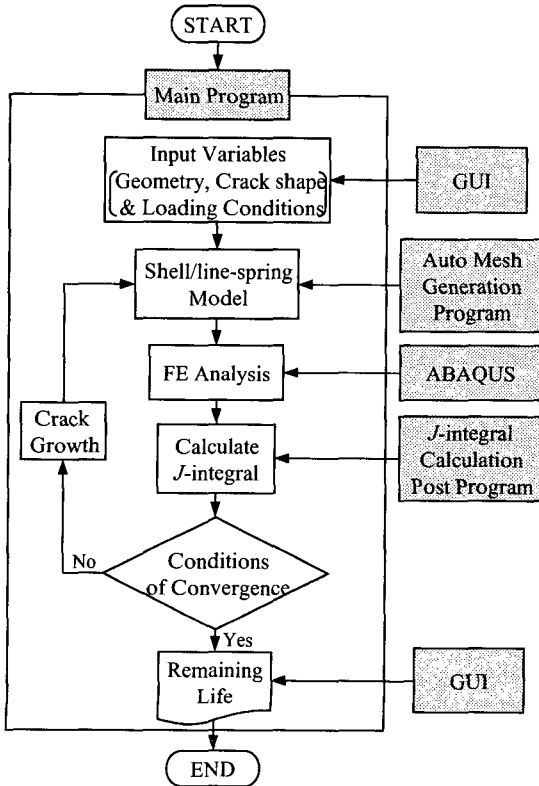


Fig. 12 Life assessment program flow-chart

수명평가 프로그램의 균열진전모듈은 균열중심부의 최대균열깊이 (a)를 균열깊이의 증분 (Δa)만큼 증가시키고 자유경계면의 균열길이 (c)를 균열 길이의 증분 (Δc)만큼 증가시켜, 단·장반경이 각각 $a + \Delta a$ 와 $c + \Delta c$ 인 반타원 표면균열로 다시 형상화한다. 즉 수명평가 프로그램은 위의 과정을 반복적으로 수행하고 파단조건을 만족하면 그래픽 사용자 인터페이스 (GUI)를 사용한 평가결과 제시 모듈에 의해 주어진 구조물의 잔여수명 및 균열 형상 변화 등을 제시한다.

6.3 배관의 안전성 평가

6.3.1 파괴인성치 (J_{IC})

셸/line-spring 모델로 유한요소해석을 수행하면 균열선단에서의 J 값을 알 수 있다. 파괴인성치에 의한 배관의 안전성평가는 셸/line-spring 모델의 유한요소해석 후 구해지는 균열선단의 J 값 중

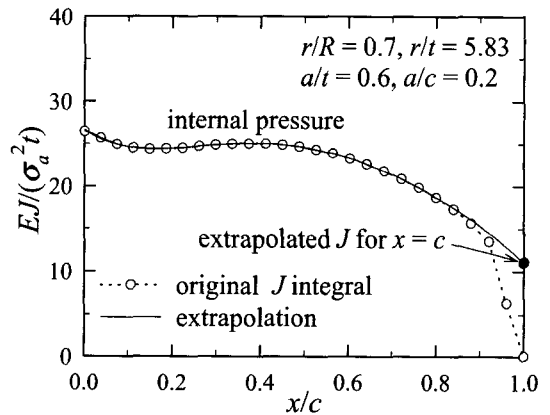


Fig. 13 Normalized J -integral distribution along the crack front of surface cracked T-joint under internal pressure and normalized J -integral distribution by extrapolation

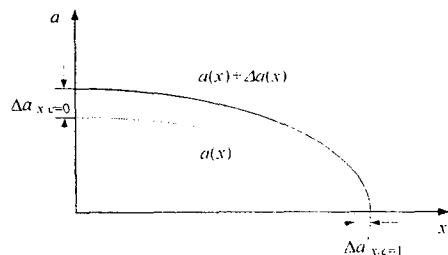


Fig. 14 Schematic illustration of semi-elliptical surface crack growth

가장 큰 값이 임계치인 J_{IC} 보다 클 경우 불안정 파단한다고 가정한 것이다 [식 (5)]. 이 때 임계값 J_{IC} 는 입력변수 중 하나로 프로그램의 초기값으로 입력받는다.

$$J(x/c) |_{max} \geq J_{IC} \quad (5)$$

6.3.2 찢김계수

Hutchinson 등,⁽¹²⁾ 고봉환 등⁽¹³⁾은 결합안정성 평가법으로 J/T 평가법^(12,13)을 추천하고 있다. J/T 평가법은 재료에 대한 J 값 (J_{mat})을 균열길이로 미분하여 구한 찢김계수 (tearing modulus, T_{mat})와 작용하중에 대한 J 값 (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 다음 식으로 곡선적합하여 결합깊이변화 (Δa)의 함수로 나타낸다.

$$J_{mat} = A(\Delta a)^n \quad (6)$$

따라서 재료의 찢김계수는 식 (6)을 결합깊이에 대해 아래 식 (7)과 같이 미분하여 구한다.

$$\left. \frac{dJ}{da} \right|_{mat} = An(\Delta a)^{n-1} \quad (7)$$

수명평가 프로그램에서 J_{app} 를 구할 때에는 크리프 균열 진전식에 의해 균열을 진전시킨 후 균열진전 전의 J 값과 a 값, 균열진전 후의 J 값과 a 값의 변화량을 각각 ΔJ , Δa 로 하여 찢김계수를 구한다. 결국 결합이 존재하는 배관에 대한 안전성은 아래 식 (8)을 이용하여 평가할 수 있다.

$$T_{app} \left(\equiv \frac{\sigma_0^2}{E} \frac{dJ_{app}}{da} \right) \geq T_{mat} \left(\equiv \frac{\sigma_0^2}{E} \frac{dJ_{mat}}{da} \right) \quad (8)$$

6.3.2 배관두께에 대한 최대균열깊이 비 (a/t)

배관 건전성 평가방법 중 세 번째 방법으로는 배관두께에 대한 최대균열깊이 비 (a/t)를 사용하였다. 수명평가 프로그램은 수렴조건을 판단하기

위하여 일정한 배관두께에 대한 최대균열깊이 비를 계산한다. 배관두께에 대한 최대균열깊이 비의 계산값이 임계값보다 클 경우 [식 (9)]에는 불안정 파단이 일어난다고 가정하였다. 이때 임계비 (a/t)_{critical}은 입력변수 중 하나로 프로그램의 초기값으로 입력받는다.

$$(a/t) \geq (a/t)_{critical} \quad (9)$$

7. 수명평가 프로그램 응용 예

위와 같은 알고리즘을 갖는 수명평가 프로그램 (LAPL: Life Assessment Program with Line-spring elements)을 이용하여 T-형 및 L-형배관의 다양한 예제에 대하여 수명평가를 수행하였다.

7.1 T-형 배관 해석모델 및 하중모델

계산 예로서 고려한 T-형 배관은 발전소 배관에 주로 쓰이는 2.25 Cr 1 Mo 재료를 사용하였다. 이 재료의 물성치는 Liaw⁽¹⁴⁾ 등을 참고하여 (K_{IC} , E , ν) = (150 MPa \sqrt{m} , 158 GPa, 0.3)이다.

균열진전시 사용한 Siverns와 Price⁽⁹⁾의 실험적인 크리프 균열진전식은 식 (10)과 같고, 2.25 Cr 1 Mo 재료의 경우 계수 (A , m) = (672.6, 2.6)이다. 하중조건으로 내압하중을 가하였으며 T-형 배관의 기하형상은 (r , R , H , $2L$, t) = (0.376, 0.791, 1.726, 3.390, 0.0381)이다.

$$\frac{da}{dt} = A J^m \quad (10)$$

7.2 T-형 배관 수명평가

위와 같은 기하형상을 갖는 T-형 배관 용접부의 반타원 표면균열에 대하여 수명평가 프로그램을 사용한 수명평가를 수행하였고, 여러가지 해석 변수에 대하여 살펴보았다.

Fig. 15는 Table 1의 1번 경우에 대해 기하형상 및 균열형상을 입력하는 대화상자이고 Fig. 16은 대화상자의 입력값으로부터 생성된 유한요소모델이다. 이와 같은 입력값을 받아 수명평가를 수행하면 Fig. 17과 같이 균열선단에서의 최대 J 값, 균열진전 양상 그리고 잔여수명을 알 수 있다. 1번 경우와 같은 해석변수에 내압하중을 가한 경우 잔여수명은 2.6×10^4 시간 (약 3년)이다. 최대 J 값은 초기에는

증가하는 폭이 작았으나 2.0×10^4 시간 이후에는 J 값의 증가량이 급속히 증가하며 이에 따른 균열 전진양상은 초기에는 균열 중심부에서 조금씩 전진하였으나 일정시간 후에는 자유경계면에서 급속도로 전진한다. 균열중심부와 자유경계면의 J 값을 비교하면, 초기에는 균열중심부에서의 J 값이 크나 일정시간 후에는 자유경계면의 J 값이 크다는 것을 확인할 수 있다.

2번, 3번은 시간증분에 대한 영향을 알아보기 위한 예제이다. 1번과 같은 T-형 배관의 기하형상, 균열형상 그리고 하중에 대하여 시간증분만을 변화시켜 수명평가를 수행하면 2는 1에 비해 약 3%의 수명이 증가하였고, 3은 약 5% 증가하였다. 이로부터 시간증분의 변화에 따라 잔여 수명은 달라지게 된다는 것을 확인할 수 있다. 수명평가의 정확성을 위해 시간증분은 0에 가까운 값이어야 하나, 실제적으로는 계산량을 고려하여 어느 정도의 유한 크기를 가져야 한다. 이에 본 연구에서는 시간증분에 따른 해석오차를 줄이는 방법으로 시간증분을 변화시켜 수명평가를 각각 수행한 후 Fig. 18과 같이 1차 다항식을 사용한 선형 외삽법으로 시간증분이 0에 가까울 때의 잔여수명을 예측할 수 있을 것이다. 이 경우 잔여 수명은 2.5×10^4 시간 (약 2.9년)이다.

4번은 균열형상 변화에 따른 잔여수명을 비교하기 위한 예로써 T-형 배관의 기하형상 및 하중을 1과 같이 일정하게 하고 균열길이만을 2배 증가시켰다. 이 때 수명평가 프로그램을 수행하여 잔여수명을 예측하면 2.44×10^4 시간 (약 2.8년)이다.

Brace radius (r): 0.376475
 Chord radius (R): 0.79295
 Height (H): 1.726337
 Chord length (2L): 3.3902
 Thickness (t): 0.0381
 Initial crack depth (a): 5.0E-04
 Initial crack length (c): 5.0E-02
 Crack position: 1. Double center crack
 Inside or outside: 2. Outside crack
 Boundary condition: 4. Internal pressure
 Boundary value: 4.03
 Young's modulus: 158
 Poisson's ratio: 0.3
 A: 672.57
 m: 2.6
 Time step: 4.0E+02
 Criterion: 1. Fracture toughness
 Buttons: Apply, OK, Quit

Fig. 15 Dialog box for data input (T-joint)

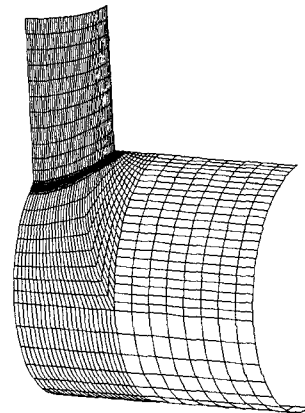


Fig. 16 Shell/line-spring FE model

Table 1 Crack shape and input variables

No.	Maximum crack depth (a)	Crack length (2c)	Time step (hrs)	Crack position	Crack number
1	5×10^{-4}	0.05	4.0×10^2	center	2
2	5×10^{-4}	0.05	6.0×10^2	center	2
3	5×10^{-4}	0.05	8.0×10^2	center	2
4	5×10^{-4}	0.1	4.0×10^2	center	2
5	5×10^{-4}	0.05	4.0×10^2	center	2
6	5×10^{-4}	0.05	4.0×10^2	center	1
7	5×10^{-4}	0.05	4.0×10^1	edge	2

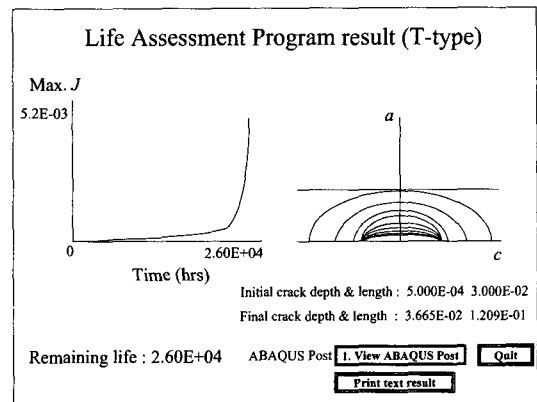


Fig. 17 Output box of LAPL (T-joint)

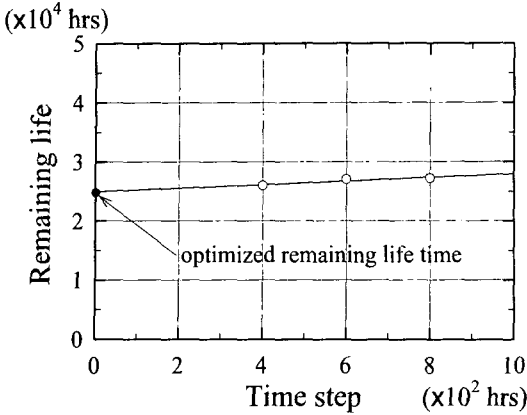


Fig. 18 Optimization of remaining life

5번은 1번과 같은 배관 기하형상 및 균열형상에 대하여 내압하중과 굽힘하중을 가한 경우에 대한 것이다. 하중으로 내압하중과 자중을 고려한 굽힘하중을 함께 가한 경우 배관 잔여수명은 8.1×10^2 시간 (약 1개월)이 나왔다. 이는 내압하중과 굽힘하중의 증첩효과로 균열이 균열깊이 방향으로 급속도로 진전하였기 때문인 것으로 볼 수 있다. 굽힘하중의 영향을 알아보기 위하여 내압 및 굽힘하중을 가한 경우와 같은 기하형상에 대하여 하중으로 자중을 고려한 굽힘만을 가한 경우 배관 잔여수명은 5.3×10^4 시간 (약 6년)의 잔여수명이 나오고, 내압만 가한 경우는 2.6×10^4 시간 (약 3년)의 잔여수명이 나온다. 그런데 내압과 굽힘 하중을 동시에 가하면 내압과 굽힘만을 하중으로 가한 경우의 조화평균값인 1.75×10^4 시간 (약 2년)보다 훨씬 작은 수명이 나온다. 이로부터 두 개 (이상)의 하중이 동시에 가해지면 시너지효과로 인해 배관 잔여수명은 매우 급속히 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

6번은 균열개수에 따른 배관수명을 평가하기 위한 예제로써 배관의 기하형상, 균열형상 그리고 하중조건을 1번과 같게 하고 균열의 개수만을 1개로 설정하였다. Fig. 19는 6번의 기하형상 및 균열형상에 대해 요소망 자동생성 프로그램을 수행하여 얻은 요소망을 나타내고 있다. 균열이 1개만 존재할 경우 잔여수명은 2.68×10^4 시간 (약 3.1년)으로 균열이 2개 있을 경우에 비하여 배관잔여수명은 증가하지만 큰 차이가 없다.

7번은 균열위치에 대한 배관잔여수명 평가이다. 배관의 기하형상, 균열형상 그리고 하중조건을

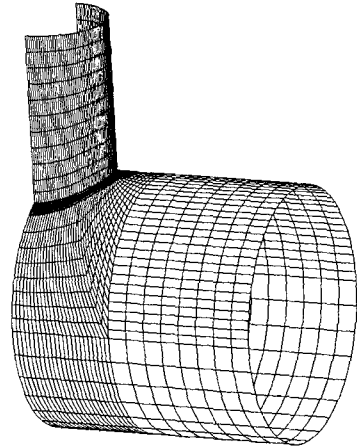


Fig. 19 Shell/line-spring FE model of No. 6

1번과 같게 하고 균열의 위치를 배관 모서리에 있다고 가정한 결과 배관 잔여수명은 8.8×10^2 시간이다. 이로부터 배관중심이 아닌 모서리에 균열이 존재하는 경우 배관은 매우 급속히 파단된다.

7.3 L-형 배관 해석모델 및 하중모델

계산 예로서 고려한 L-형 배관은 T-형 배관과 같이 발전소 배관에 주로 쓰이는 2.25 Cr 1 Mo 재료를 사용하였다. 이 재료의 물성치는 T-형 배관과 같으며 크리프균열진전식 또한 Siverns와 Price⁽⁹⁾의 실험적인 균열진전식을 사용하였다. L-형 배관의 기하형상 및 균열형상은 $(r, H, t, a, 2c) = (1.0, 5.0, 0.3, 4.0 \times 10^{-2}, 8.0 \times 10^{-2})$ 이다.

Fig. 20은 L-형 배관의 입력대화상자이며 기하형상 및 균열형상을 입력하였을 때 수명평가를 수행하면 Fig. 21과 같이 최대 J 값, 균열진전양상 그리고 잔여수명을 알 수 있다. 하중조건으로는 내압하중을 가하였다. L-형 배관의 수명평가 수행 후, 결과제시 모듈의 균열진전양상으로부터 균열은 균열중심에 비해 균열깊이 방향으로 급속히 진전하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 배관의 잔여수명은 균열깊이방향을 균열이 성장하여 용접부 균열선단의 반을 성장하였을 때까지의 시간으로 가정하였다. L-형 배관의 수명평가를 수행하였을 때 잔여수명은 2.10×10^3 시간 (약 4개월)이다.

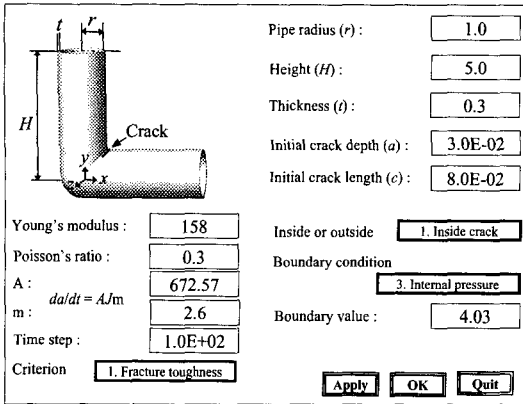


Fig. 20 Dialog box for data input (L-joint)

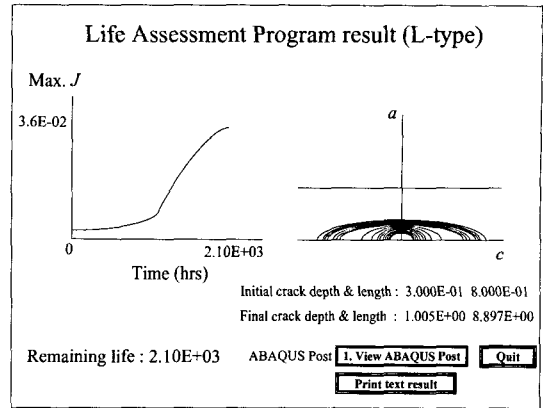


Fig. 21 Output dialog box of LAPL (L-joint)

8. 결론

본 연구에서는 3차원적 기하형상으로 인하여 모델링하기 힘든 반타원 표면균열을 완전 3차원 연속체 모델이 아닌 2차원 셸/line-spring 유한요소를 사용함으로써 복잡한 3차원 표면균열문제를 일반화된 2차원 경계치 문제로 단순화 하였다. 이를 토대로 발전소 배관에 주로 쓰이는 주요 배관형태인 T-형 및 L-형 배관의 요소망 자동생성 프로그램을 작성하였고, 반타원 표면균열을 갖는 T-형 및 L-형 배관의 유한요소해석을 수행하였다. 그리고 한 걸음 더 나아가 T-형 및 L-형 배관 수명평가용 통합 프로그램을 개발하여 T-형, L-형 배관에 대한 잔여 수명을 평가하였다.

먼저 요소망 자동생성 프로그램을 이용하여 T-형 배관 중심에 앞·뒤로 두 개의 표면균열이 존재할 때 여러 가지 하중상태에서의 유한요소해석을 수행하였다. 인장하중과 내압하중시 반타원 표면균열의 중심에서 J 값은 최대가 되며, 자유경계면 근처로 갈수록 J 값은 감소한다. 그리고 굽힘하중이 작용하는 경우 $x/c = 0.6$ 에서 최대 J 값을 갖는다. 그리고 L-형 배관에 인장, 굽힘 그리고 내압하중이 가해지는 경우 균열중심부에서 자유경계면으로 갈수록 J 값은 증가한다.

Table 2는 수명평가 프로그램을 수행한 후 T-형 배관의 각 경우에 대한 잔여수명을 정리하여 나타낸 것이다. 시간증분이 증가함에 따라 배관 잔여수명은 증가하지만 이는 1차 다항식으로 보간함으로써 시간증분에 따른 오차를 수정할 수 있고, 균열형상이 커지거나 중첩하중이 가해진 경우 잔여

Table 2 Estimated remaining lives of T-joint examples

No.	Remaining life (hrs)	No.	Remaining life (hrs)
1	2.60×10^4	5	8.10×10^2
2	2.70×10^4	6	2.68×10^4
3	2.72×10^4	7	8.80×10^2
4	2.44×10^4		

수명은 감소한다는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 중첩하중이 작용하는 경우는 시너지효과에 의해 배관의 잔여수명은 급속히 감소한다. 균열이 배관 중심에 한 개만 존재할 경우 두 개 존재할 경우에 비하여 배관잔여수명은 연장되지만, 이는 미소한 차이를 보인다. 내압하중시 배관 모서리에 균열이 존재할 경우는 배관중심에 존재할 경우에 비하여 배관잔여수명은 매우 줄어들어 급속히 파단된다.

L-형 배관의 경우 균열은 균열깊이보다는 균열길이 방향으로 급속히 진전함으로써 파단된다는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같은 T-형 및 L-형 배관의 수명평가에서 J -적분값은 초기에는 완만히 증가하나 일정한 크기의 균열이 생성되면 급속히 증가하여 균열성장폭이 커지고 이로 인하여 급속히 파단된다.

참고문헌

- (1) 최현창, 1999, 1차 크리프 속도를 고려한 크리프 균열 진전의 유한요소 해석, 대한기계학회논문집, 제23권, 제6호, pp1120~1128.
- (2) ABAQUS *Users's Manual*, 1995, Version 5.5 Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (3) Rice, J. R. and Levy, N., 1972, "The Part-through Surface Crack in an Elastic Plate," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 39, pp. 185~194.
- (4) Parks, D. M., 1981, "The Inelastic Line-Spring: Estimates of Elastic-Plastic Fracture Mechanics Parameters for Surface-Cracked Plates and Shells," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 246~254.
- (5) Parks, D. M. and White, C. S., 1982, "Elastic-Plastic Line-Spring Finite Elements for Surface-Cracked Plates and Shells," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 104, pp. 287~292.
- (6) White, C. S., Ritchie, R. O. and Parks D. M., 1983, "Ductile Growth of Part-through Surface Cracks : Experiment and Analysis," *Elastic-Plastic Fracture : 2nd Symposium, Vol. I - Inelastic Crack Analysis*, ASTM STP 803, pp. 1384~1409.
- (7) Lee H. and Parks D. M., 1995, "Enhanced Elastic-Plastic Line-Spring Finite Element," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 32, pp. 2393~2418.
- (8) Su, X. W., Zhu, 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. 251~255.
- (9) Siverns, M. J. and Price, A. T., 1973, "Crack Propagation under Creep Conditions in a Quenched 2.25 Chromium 1 Molybdenum Steel," *International Journal of Fracture*, Vol. 9, No. 2, pp. 199~207.
- (10) Sadananda, K. and Shahinian, K., 1978, "Creep Crack Growth in Udimet 700," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 9A, pp. 79~84.
- (11) 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.
- (12) Hutchinson, J. W. and Paris, P. C., 1979, "Stability Analysis of J-Controlled Crack Growth," *Elastic-Plastic Fracture*, ASTM STP 668, J. D. Landes, J. A. Begley, and G. A. Clarke, Eds., pp. 37-64.
- (13) 고봉환, 김영진, 석창성, 1996, "하중감소효과를 고려한 원자력 주증기 배관의 균열 안정성 평가", 대한기계학회논문집, 제20권, 제6호, pp. 1843~1853.
- (14) Liaw, P. K., Saxena, A. and Schaefer, J., 1997, "Creep Crack Growth Behavior of Steam Pipe Steels: Effects of Inclusion Content and Primary Creep," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 57, No. 1, pp. 105~130.