

배관 원주방향 표면균열에 대한 탄소성 파괴 파라미터의 예측 (II)

김윤재* · 김진수* · 김영진* · 박윤원**

Engineering Estimation of Elastic-Plastic Fracture Parameter for Circumferential Surface Cracked Pipes: Part II

Jin-Su Kim, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

Key Words : Circumferential Cracked Pipe(원주방향 균열배관), C^* Estimation (C^* 예측), Finite Element Analysis(유한요소해석), GE/EPRI Approach(GE/EPRI 방법), J Estimation(J 예측), Reference Stress Approach(참조응력법), Surface crack(표면균열)

Abstract

This paper provides validations of the reference stress based J and C^* estimations, proposed in Part I, for inner, circumferential surface cracked pipes under internal pressure and global bending against detailed 3-D elastic-plastic and elastic-creep FE results. For this purpose, actual tensile properties of two typical stainless steels (TP304 and TP316) are used for elastic-plastic FE analyses and two realistic creep laws are used for elastic-creep FE analyses. For a total of twenty cases considered in this paper, agreements between the proposed reference stress based J and C^* estimations and the FE results are excellent. More important aspect of the proposed estimations is that they can be used to estimate J and C^* not only at the deepest point of the surface crack but also at an arbitrary point along the crack front.

1. 서 론

배관 구조물의 안전성 평가를 위해서는 정확한 J -적분의 계산이 필수적이다. 저자들은 전보⁽¹⁾에서 배관에 존재하는 원주방향 표면균열에 대한 공학적 J -적분 예측식을 제시하였다. 이 예측식은 GE/EPRI 법과 참조응력법(reference stress method) 두가지 방법에 근거한다. GE/EPRI 방법의 경우 Ramberg-Osgood(R-O) 재료에 대해 총 192개에 이르는 3차원 유한요소해석을 통해 J -적분 예측에 필요한 소성 영향 함수(plastic influence function)를 계산하였다. 그러나 GE/EPRI 방법은 R-O 이상화 방법에 따라 부정확한 결과를 초래할 수 있으며, 더욱이 일반배관에 작용하는 내압과 모멘트 복합

하중에 관한 문제로 확장하기 위해서는 엄청난 양의 유한요소해석이 더 필요하다. 따라서 Part I 에서는 이러한 GE/EPRI 방법의 단점을 보완하기 위해 참조응력 개념을 도입한 J -적분 예측식을 제시하였다. 이 방법은 기존 참조응력의 정확성을 높이기 위해 새로운 참조응력인 최적참조하중(optimized reference load)을 도입한 것이다. 이 방법을 본 연구에서는 개선된 참조응력법(enhanced reference stress method; ERSM)이라 정의하였다.

본 연구에서는 ERSM 에 기초한 J -적분 및 C^* -적분 예측식에 대한 다양한 검증을 수행하였다. 이를 위해 먼저 일반 스테인리스 강(stainless steel)에 대한 실제 응력-변형률 데이터를 이용하여 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 예측결과와 비교하였다. 해석결과는 최심점 뿐만 아니라 표면점을 포함한 균열면 임의의 점에서도 비교하였다. 또한 정상상태 크리프(steady state creep)에 대한 C^* -적분 예측 방법의 타당성을 입증하기

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

+ 회원, 한국원자력안전기술원

E-mail : ykim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

위해 일반 크리프 변형률 거동을 보이는 재료에 대한 탄성 크리프 유한요소해석결과를 예측결과와 비교하였다.

2. 최적참조응력법에 기초한 J -적분 예측

2.1 J -적분 예측식

Fig. 1에 나타난 반타원형 원주방향 표면균열을 가진 배관이 내압 p 이나 굽힘 모멘트 M 을 받는 경우에 대한 J -적분 예측식을 전보에서 다음과 같이 제시하였다⁽¹⁾.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E\epsilon_{ref}} \quad (1)$$

여기서 참조응력 σ_{ref} 는 다음과 같이 정의되며,

$$\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} = \frac{p}{p_{oR}} = \frac{M}{M_{oR}} \quad (2)$$

σ_y 는 0.2% 항복응력이다. 또한 식 (1)에서 J_e 는 선형탄성 응력확대계수(stress intensity factor) K 를 이용하여 구한 J -적분의 탄성성분이다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} \quad (3)$$

여기서 E' 는 평면응력(plane stress) 조건시 $E'=E$, 평면변형률(plane strain) 조건시 $E'=E/(1-\nu^2)$ 이다. 참조 변형률 ϵ_{ref} 는 진 응력-변형률 선도에서 참조 응력에 해당하는 변형률이다. 참조압력 p_{oR} 과 참조굽힘 모멘트 M_{oR} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} p_{oR} &= \gamma \cdot p_L \quad \text{for internal pressure} \\ \gamma &= 1.767(a/t)(\beta/\pi) - 0.156(a/t) \\ &\quad - 0.101(\beta/\pi) + 0.627 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_{oR} &= \gamma \cdot M_L \quad \text{for global bending} \\ \gamma &= \theta_1(a/t)^2 + \theta_2(a/t) + 1.04 \\ \theta_1 &= 4.26(\beta/\pi)^2 - 1.35(\beta/\pi) + 0.80 \\ \theta_2 &= -2.30(\beta/\pi)^2 - 1.57(\beta/\pi) - 0.77 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 소성 한계압력 p_L 과 모멘트 M_L 은 다음과 같이 정의된다⁽²⁾.

$$p_L = \frac{2\sigma_y t}{R_m} \left(1 - \frac{\beta a/t + 2\sin^{-1}[a\sin(\beta/2)/t]}{\pi} \right) \quad (6)$$

$$M_L = 4R_m^2 t \sigma_y \left(\cos\left[\frac{a\beta}{2t}\right] - \frac{a\sin\beta}{2t} \right) \quad (7)$$

식 (4)~(7)에서 a, t, R_m, β 는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 각각 균열깊이, 배관 두께, 배관의 평균반경, 균열반각을 나타낸다. 식 (1)은 균열면 임의의 점에서 J_e 성분이 계산된다면 균열면 최심점 뿐만 아니라 임의의 점에서도 적용할 수 있다.

2.2 정상상태 크리프 조건에서 C^* -적분 예측

소성역과 정상상태 크리프 사이의 유사성에 기초하여 광범위(wide-spread) 크리프에 대한 C^* -적분식은 J -적분 예측식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C^* = \frac{K^2 E}{E'} \cdot \frac{\dot{\epsilon}_c}{\sigma_{ref}} \quad (8)$$

여기서 σ_{ref} 는 식 (2)에서 정의한 참조응력, $\dot{\epsilon}_c$ 는 크리프-변형률 선도에서 참조응력에 해당하는 크리프 변형률 변화률이다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소모델

Fig. 1은 유한요소 해석에 사용된 반타원형 원주방향 표면균열을 가진 배관을 나타낸다. 배관의

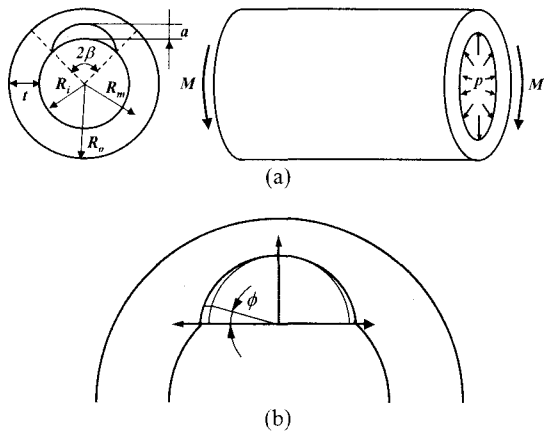


Fig. 1 (a) Schematic illustration for surface cracked pipes in internal pressure p and in global bending M , and (b) definition of the crack angle ϕ .

외반경(R_0)과 두께(t)는 각각 139.7mm와 25.4mm로 설정하였으며, ERSM의 경우 R_m/t 의 영향은 a/t 와 β/π 에 비해 크지 않으므로 $R_m/t=5$ 로 고정하였다.

3.2 탄소성 유한요소해석

유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽³⁾를 이용하여 수행하였다. 사용된 재료는 SA312 TP304 (50°C)와 SA312 TP316 (288°C) 스테인리스 강이며 실험으로부터 얻은 응력-변형률 곡선⁽⁴⁾을 그대로 사용하였다. Fig. 2는 두 재료에 대한 응력-변형률 곡선을 나타낸다.

J -적분에 영향을 미치는 인자 중 균열 길이(a/t)는 0.2, 0.5로 변화시켰으며, 균열길이(β/π)는 0.1, 0.4로 변화시켰다. 하중조건은 내압과 굽힘 모멘트를 고려하여 총 16가지 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 내압 작용시, 배관 끝단에 압력에 해당하는 인장하중을 가하였으며, 균열면 압력 효과를 고려하였다.

유한요소모델은 Fig. 3과 같이 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링하였으며 20 절점 등사각 주요소(20-node isoparametric quadratic brick element; C3D20R)를 사용하여 1,800개의 요소와 8,817개의 절점으로 구성하였다.

J -적분은 ABAQUS에서 제공하는 영역적분법(domain integral)을 사용하여 유한요소해석결과로부터 얻었다.

3.3 탄성 크리프 해석

참조응력법에 기초한 C^* -적분 예측식의 타당성을 검증하기 위해 $a/t=0.5$, $\beta/\pi=0.4$ 인 원주방향 반타원 표면균열이 존재하는 배관에 대한 탄성 크리프 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 일반 크리프 변형률 법칙은 θ 투영 법칙(θ -projection law)과 RCC-MR 법칙(RCC-MR law)이다. θ 투영

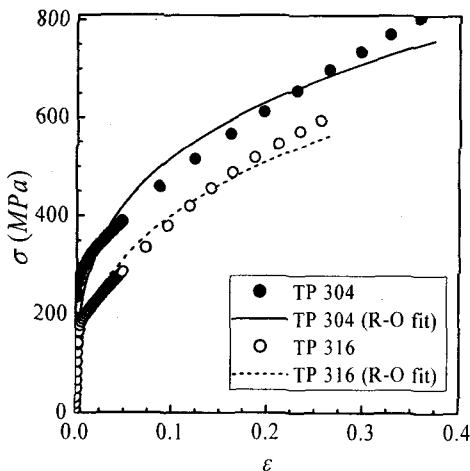


Fig. 2 Stress-strain curves for TP304 and TP316 stainless steels

법칙⁽⁵⁾은 일반적인 Cr-Mo-V 페라이트 강에 대한 크리프 변형을 나타내며 3차 크리프 거동이 지배적이다. RCC-MR 법칙⁽⁶⁾은 일반적인 TP316 스테인리스 강에 대한 크리프 변형을 나타내며 1차-2차 크리프 거동을 보인다. 하중조건은 최적참조하중(식(4) 참조)의 40%에 해당하는 내압을 초기에 가한 후 하중을 일정하게 유지시키면서 크리프 해석을 수행하였다. 크리프 계산에 대한 상세한 설명은 저자들의 다른 논문⁽⁷⁾에 제시되어 있다.

4. 해석결과

4.1 J -적분

Fig. 4는 내압 작용시 유한요소해석결과를 GE/EPRI 방법과 ERSM에 기초한 예측식과 비교한 것이다. 그림에서 J -적분은 다음과 같이 항복강도와 균열크기로 무차원화하였다.

$$J_n = \frac{J}{\sigma_y(t-a)(a/t)} \quad (9)$$

또한 작용 하중은 식 (4), (5)와 같은 최적참조하중으로 무차원화하였다.

먼저 GE/EPRI 방법의 경우, J -적분을 예측하기 위해서는 재료의 인장데이터가 R-O 관계식으로 곡선적합되어야 한다.

본 연구에서는 극한강도까지의 전체 진응력-변형률 데이터에 대해 Battelle에서 개발한 ROFIT⁽⁸⁾을 사용하여 R-O 파라미터를 결정하였다. 결정된 R-O 파라미터 α , n 로부터 곡선적합 결과를 나타내면 Fig. 2와 같다. R-O 파라미터가 결정되면 J -적분

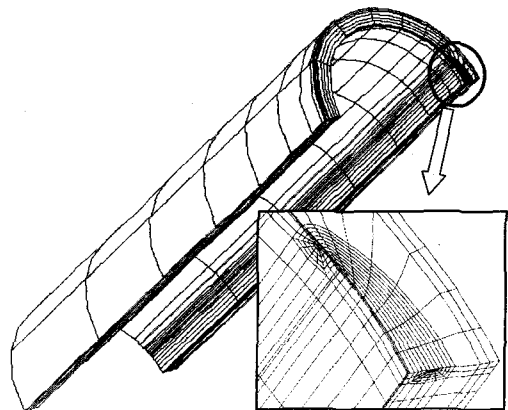


Fig. 3 A typical FE mesh for $R_m/t=5$, $a/t=0.3$ and $\beta/\pi=0.1$.

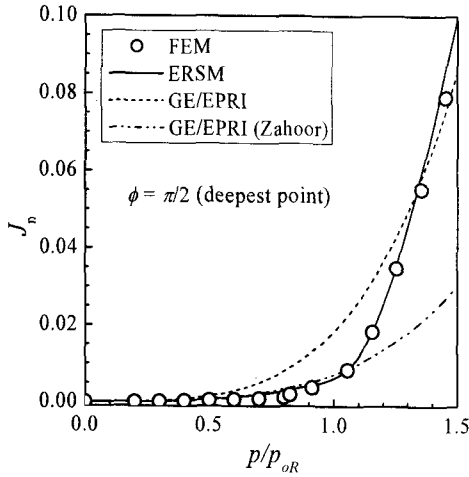


Fig. 4 Comparison of the FE J results with those estimated from the proposed ERSM and from the GE/EPRI method for the TP316 material under internal pressure: $a/t=0.2$, $\beta/\pi=0.1$

은 Kumar 와 German⁽⁹⁾이나 Zahoor⁽¹⁰⁾에 제시된 식 으로부터 결정할 수 있다:

$$J = \frac{(1-\nu^2)}{E} [K(a_e)]^2 + J_p$$

$$a_e = a + \varphi r_y$$

$$\varphi = \frac{1}{1+(p/p_L)^2} = \frac{1}{1+(p/p_L)^2} \quad (10)$$

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2$$

$$J_p = \alpha \frac{\sigma_y^2}{E} (t-a) \frac{a}{t} h_1(n) \left(\frac{p}{p_L} \right)^{n+1} \quad (11)$$

여기서 소성 영향함수 $h_1(n)$ 은 Part I 에서 제시한 값들을 사용하였다. 이렇게 구한 J 적분값들은 Fig. 4에 "GE/EPRI"라고 표시하였다. 실제 내압이 작용하는 균열배관에 대한 J 적분 예측은 내압을 증가 축방향 인장하중으로 변환하여 사용하는 것이 일반적이므로, 본 연구에서는 축방향 인장하중에 대한 Zahoor 예측식⁽¹⁰⁾도 동시에 나타내었다. 참고로 Zahoor 식은 $R_m/t=10$ 인 경우에만 적용할 수 있지만 본 연구에서 사용된 $R_m/t=5$ 의 경우에도 적용할 수 있다고 가정하였다. 이렇게 구한 J 적분값들은 Figs. 4에 "GE/EPRI(Zahoor)"이라고 표시하였다. 마지막으로 본 연구에서 제시한 ERSM 에 기초한 J 적분은 식 (1)-(7)을 이용하여 구하였으며, J_n 는 최

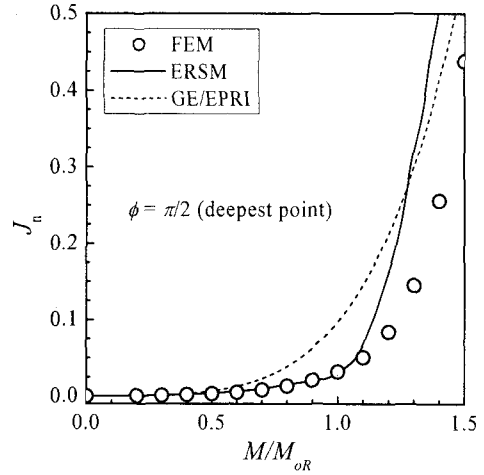


Fig. 5 Comparison of the FE J results with those estimated from the proposed ERSM and from the GE/EPRI method for the TP304 material under global bending: $a/t=0.5$, $\beta/\pi=0.4$.

심점에서 유한요소해석으로부터 얻은 K 로부터 구 하였다.

모든 경우에 대해 ERSM 에 기초한 J 적분 예측식은 유한요소해석결과와 잘 일치하였다. 그러나 GE/EPRI 방법에 기초한 J 적분 예측식은 정확성이 떨어지며 요소해석결과에 비해 높게 나타난다. 이는 R-O 곡선 적합이 실제 응력-변형률 선도를 제대로 모사하지 못하기 때문이다. 인장하중에 대한 Zahoor 식은 유한요소해석결과와 큰 차이를 나타낸다. 이는 Zahoor 식이 등가 축방향 인장 하중을 사용함으로써 내압으로 인한 원주방향 응력 영향을 고려하지 않기 때문이다⁽¹¹⁾. 이 경우 Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 실제 유한요소해석 결과에 비해 비보수적인 해석결과를 초래한다.

Fig. 5 에서는 굽힘 모멘트 작용시 유한요소해석 결과와 본 연구에서 제시한 ERSM, 그리고 Part I 에서 구한 소성 영향함수를 기초로 한 GE/EPRI 를 비교하였다. 내압의 경우와 마찬가지로 ERSM 에 기초한 J 적분 예측식은 유한요소해석결과와 잘 일치하였다.

열응력이 존재하는 가압배관과 같은 일반 배관의 경우, 최대 균열진전하중은 최심점이 아니라 표면점을 포함한 임의의 위치에서 발생할 수 있다. 본 연구에서 제시한 ERSM 에 기초한 J 적분 예측식은 균열면 임의의 점에서 J 적분 계산이 가능하다. 예측결과의 타당성을 입증하기 위해 균열면을 따라 몇 개의 점에서 유한요소해석결과를 예측결과와 비교하였다. ERSM 에 기초한 J 적분 예측식

의 경우 균열면 임의의 점에서 J -적분을 예측하기 위해서는 해당 지점에서의 J_e 값이 필요하다. 본 연구에서는 J_e 를 탄성 유한요소해석으로부터 결정하였다. Fig. 6, Fig. 7은 각각 내압과 굽힘 모멘트 하중에 대한 해석결과를 비교한 것이다. J -적분 예측결과와 표면점을 포함한 균열면 임의의 점에서 유한요소해석결과와 잘 일치하였다.

4.2 C*-적분

Fig. 8은 내압하중 하에서 일반 크리프 법칙에

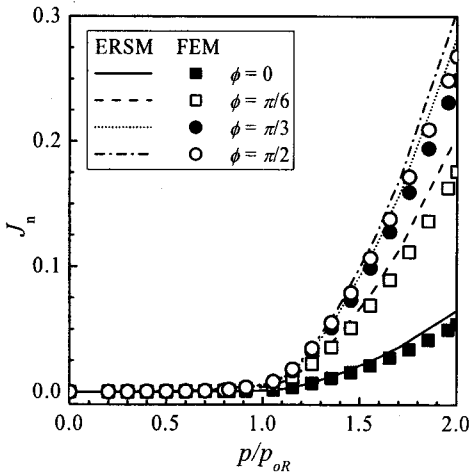


Fig. 6 Comparison of the FE J results at various points along the crack front ($\phi=0, \pi/6, \pi/3$ and $\pi/2$) with those estimated from the proposed ERSM for global bending: TP 316 with $a/t=0.2$ and $\beta/\pi=0.1$.

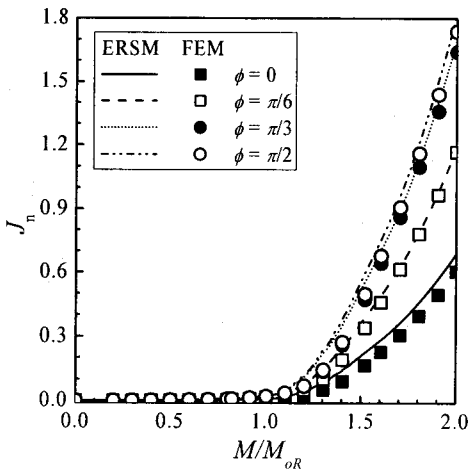


Fig. 7 Comparison of the FE J results at various points along the crack front ($\phi=0, \pi/6, \pi/3$ and $\pi/2$) with those estimated from the proposed ERSM for global bending: TP 304 with $a/t=0.5$ and $\beta/\pi=0.1$.

대한 유한요소해석결과를 예측결과와 비교한 것이다. 시간은 재분배 시간 t_{red} 으로 무차원화하였으며, $C(t)$ -적분은 $t=t_{red}$ 일 때 유한요소해석으로부터 얻은 $C(t)$ -적분($C^*_{FE}(t_{red})$)으로 무차원화하였다. 재분배 시간은 전체 크리프 변형률이 탄성 변형률과 같아지는 시간으로 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_c(\sigma_{ref}, t_{red}) = \frac{\sigma_{ref}}{E}; \sigma_{ref} = \frac{p}{p_{OR}} \sigma_y = \frac{M}{M_{OR}} \sigma_y \quad (12)$$

여기서 $\varepsilon_c(\sigma_{ref}, t_{red})$ 는 $\sigma=\sigma_{ref}$, $t=t_{red}$ 에서의 크리프 변형률, p_{OR} 은 최적 참조응력, M_{OR} 은 최적 참조 굽힘 모멘트이다. 재분배시간의 정의에 따라 정상상태 조건(혹은 광범위 크리프 조건)은 $t > t_{red}$ 인 경우에 발생한다.

해석결과 θ 투영 법칙의 경우 예측결과 중 일부가 과대 평가되었지만 전체적으로 모든 경우에 대해 예측결과와 유한요소해석결과와 잘 일치하였다.

5. 결론

본 연구에서는 내압이나 모멘트를 받는 배관의 원주방향 표면균열에 대한 안전성 평가를 위해 Part I⁽¹⁾에서 제시한 공학적 J -적분과 C^* -적분 예측식에 대한 타당성을 입증하기 위해 3 차원 유한요소해석결과와 비교하였다. J -적분을 계산하기 위한 탄소성 유한요소해석은 두 가지 일반적인 스테인리스 강(TP304, TP316)에 대한 실제 응력-변형률

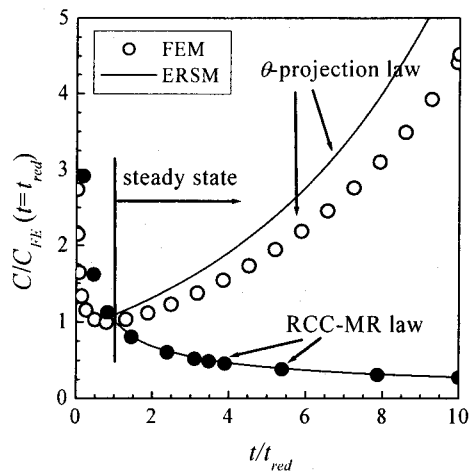


Fig. 8 Comparison of the FE C^* results with those estimated from the proposed ERSM for internal pressure with $a/t=0.5$ and $\beta/\pi=0.4$

데이터를 사용하여 수행하였다. 또한 탄성 크리프 해석의 경우, α -투영법칙과 RCC-MR 법칙과 같은 일반 크리프 법칙에 대한 해석을 수행하였다.

유한요소 해석과 비교한 결과, 제시된 ERSM 에 기초한 J-적분과 C*-적분 예측식은 간단함에도 불구하고, 균열 최심점 뿐만 아니라 균열면 임의의 점에서 유한요소 해석결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 예측식은 표면균열이 존재하는 배관의 건전성 평가에 널리 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

후 기

본 논문은 한국과학기술원 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김진수, 김윤재, 김영진, “배관에 존재하는 원주방향 표면균열에 대한 파괴거동해석: Part I-J-적분 예측식,” 대한기계학회 논문집, 심사중.
- (2) Miller, A.G., 1988, “Review of Limit Loads of Structures Containing Defects,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (3) ABAQUS, 1998, *ABAQUS Standard/User's Manual, Version 5.8-1*, Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA US.
- (4) 김영진, 석창성, 전현규, 최영환, 이정배, 1996, “원자력 배관 건전성 평가 전문가 시스템 개발

- I-평가법 제시 및 재료 물성치 추론,” 대한기계학회 논문집 A 권 제 20 권 제 2 호, pp. 575~584.
- (5) R66, 1999, *AGR Materials Data Handbook, Issue 5. C D Hamm (ed.)*, British Energy Generation Ltd.
- (6) RCC-MR, 1985, *Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands*, AFCEN, Paris.
- (7) 김진수, 김윤재, 김영진, “일반 크리프 거동을 고려한 균열 구조물의 C*-적분 공학적 계산식,” 대한기계학회 논문집, 심사중.
- (8) Pipe Fracture Encyclopedia, 1997, *Volume 1: Computer Program to Calculate Ramberg-Osgood Parameters for a Stress-Strain Curve*, Battelle.
- (9) Kumar, V. and German, M.D., 1998, *Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders*, EPRI Report, NP-5596.
- (10) Zahoor, A., 1991, *Ductile Fracture Handbook*, Novotech Corp. 3 Volumes.
- (11) Y-J Kim, N-S Huh and Y-J Kim, 2001, “Quantification of Pressure-Induced Hoop Stress Effect on Fracture Analysis of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes”, Submitted for publication to *Engineering Fracture Mechanics*.
- (12) R6, 1999, *R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Revision 3, Amendment 10*, British Energy.
- (13) R5, 1998, *R5: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 2*, British Energy.
- (14) API, 2000, *Fitness-for-Service Recommended Practice 579*, First Edition, American Petroleum Institute.
- (15) SINTAP, 1999, *SINTAP Final Procedure: Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry*, Project number BE-1426, Contract number BRPR-CT95-0024.