

## 표준 CT시험편을 이용한 실배관 파괴저항 곡선 예측

박흥선\* · 허 용\* · 구재민\* · 석창성† · 박재실\*\*

(2009년 2월 26일 접수, 2009년 7월 22일 수정, 2009년 7월 30일 심사완료)

### Estimation of the Fracture Resistance Curve for the Nuclear Piping Using the Standard Compact Tension Specimen

Sung-Keun Cho, Hong-Sun Park, Jae-Mean Koo, Chang-Sung Seok and Jae-Sil Park

**Key Words:** Fracture Resistance Curve(파괴저항곡선), Load Ratio Method(하중비법), J-Integral(J-적분), Pipe Specimen(실배관 시험편), CT Specimen(CT 시험편)

#### Abstract

The estimation method of the fracture resistance curve for the pipe specimen was proposed using the load ratio method for the standard specimen. For this, the calculation method of the load - CMOD curve for the pipe specimen with the common format equation(CFE) was proposed by using data of the CT specimen. The proposed method agreed well with experimental data. The *J*-integral value and the crack extension were calculated from the estimated load - CMOD data. The fracture resistance curve was estimated from the calculated *J*-integral and the crack extension. From these results, it have been seen that the proposed method is reliable to estimate the *J*-*R* curve of the pipe specimen.

#### 1. 서 론

배관 재료의 파괴특성치 중, 파괴저항 곡선은 균열의 진전량에 대한 파괴저항값을 *J*-적분으로 나타낸 것으로서 *J<sub>IC</sub>*의 결정이나 탄소성 파괴역학적인 건전성 평가 등에 사용된다. 따라서 배관 계통 구조물의 파괴역학적인 건전성을 평가하기 위해서는 실배관 구조물의 파괴인성치를 구하여야 한다. 하지만 실배관 구조물의 파괴시험을 통하여 파괴특성을 평가하는 것이 매우 어렵기 때문에, 표준 시험편을 이용하여 구한 파괴인성치를 이용하여 실제 구조물의 구조 해석을 수행하고 전체 구조물의 파괴특성을 평가하게 된다.<sup>(1)</sup>

그러나 표준 시험편과 실배관의 시험 결과 사이에는 차이가 있기 때문에 기존의 표준 시험편에 의한 실배관 구조물의 파괴특성 평가법에는 한계가 있다. 따라서 표준 시험편을 이용하여 신뢰성 있는 실배관의 파괴저항 곡선을 예측하는 방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 표준 시험편 시험 결과로부터 배관의 파괴저항 곡선을 예측하기 위하여 표준 시험편의 하중 - 변위 선도로부터 CFE(common format equation)<sup>(2,3)</sup>를 이용하여 배관의 하중 - CMOD(crack mouth opening displacement) 선도를 예측하는 방법을 제시한 후 계산된 배관의 균열 진전량과 *J*-적분 값으로부터 배관의 파괴저항 곡선을 예측하였으며 예측된 파괴저항 곡선을 실제 실배관 파괴저항시험 결과와 비교하여 검증하였다.

#### 2. 표준 시험편 파괴저항 시험

##### 2.1 시험편 및 시험장비

SA312 TP304L 스테인리스강 배관의 두께를 고

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7477 FAX : (031)290-7482

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 삼성전자 디지털미디어총괄 생활가전사업부



재료의 응력-변형률 물성치는 파괴저항 시험에서도 적용될 수 있다. 따라서 시험편의 파괴거동을 하중( $P$ ), 소성변위의 함수 및 리가먼트의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있는데, 이는 CFE의 일반적인 형태이다.

$$P = \{\Omega^*\} \{G\} \{H\} \quad (1)$$

$\Omega^*$  : 구속계수

$G$  : 시험편 형상 함수

$H$  : 재료의 가공경화 함수

이 식의 재료의 가공 경화 함수( $H$ )는 인장 시험에서 구한 재료의 물성치에 의하여 영향을 받기 때문에, 배관의 파괴저항 곡선을 예측하기 위해서 많은 연구자들은 시험편의 형상과 균열 선단의 응력장에 따른 형상 함수( $G$ )와 구속 요소( $\Omega^*$ ) 그리고  $\eta_{pl}$  값을 구하기 위한 연구를 수행하였다.<sup>(5)</sup> 따라서 본 연구에서도 가공 경화 함수( $H$ )보다는 형상 함수( $G$ )와 구속 요소( $\Omega^*$ )를 고려하여 배관 시험편의 하중 - 변위 선도를 예측하고자 한다.

### 3.1 표준 시험편의 무차원 하중 - 변위 선도

하중비법을 사용하여 표준 시험편의 하중 - 변위 선도로부터 균열 길이를 계산하고 배관의 파괴저항 곡선을 예측하기 위해서는 표준 시험편의 파괴저항 시험 결과로부터 얻은 하중 - 변위 선도를 무차원화 해야 한다.

Fig. 4는 4개의 1/2T CT 표준 시험편의 파괴저항 시험으로부터 구한 하중 - 변위 선도를 무차원화하기 위하여 탄성 컴플라이언스를 구하기 위한 부분을 제거하여 나타낸 것이다. 이렇게 수정된 하중 - 변위 선도들을 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 무차원화 하였다.<sup>(6)</sup>

$$P_{Normalized} = \frac{P}{G\left(\frac{b}{W}\right)}$$

$$v_{Normalized} = \frac{v_{pl}}{W} \quad (2)$$

$$v_{pl} = v - v_{el}$$

$$v_{el} = PC_0$$

여기에서  $P$ 는 하중,  $G(b/W)$ 는 형상함수,  $W$ 는 시험편 폭,  $b$ 는 리가먼트,  $v$ 는 전체 변위,  $v_{el}$ 은 초기 탄성 컴플라이언스에 의한 변위이며  $C_0$ 는 시험편의 초기 탄성 컴플라이언스이다. 식 (3)은 CT 시

험편에 대한 형상함수를 나타낸 것이다.

$$G(b/W)_{CT} = BWC(b/W)^m \quad (3)$$

여기에서  $B$ 는 시험편 두께,  $C$ 와  $m$ 은 상수로써 기존 연구자들의 결과를 참조하였다.<sup>(7,8)</sup> Fig. 5는 표준 시험편 파괴저항 시험 결과로부터 구한 무차원 하중 - 변위 선도를 나타낸 것이다.

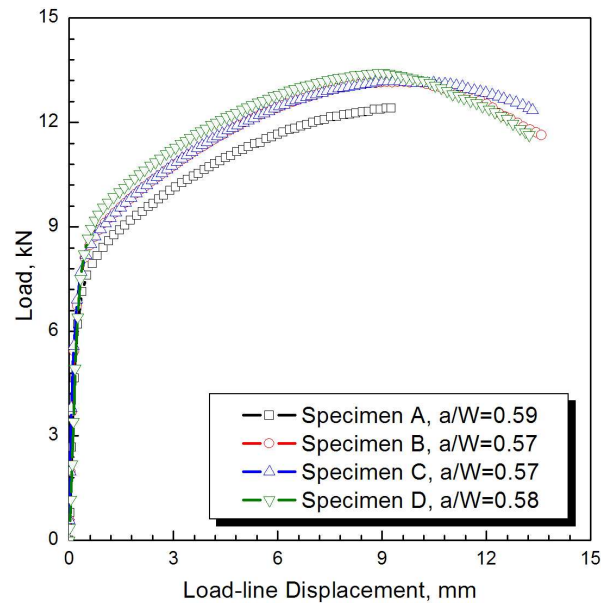


Fig. 4 Modified load - load-line displacement curves for J-R test of various 1/2T CT specimens

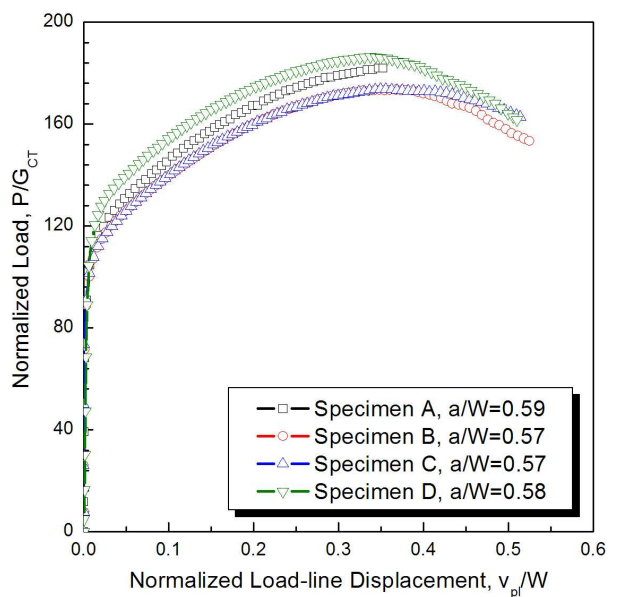


Fig. 5 Normalized load - normalized displacement curves from J-R data of various 1/2T CT specimens

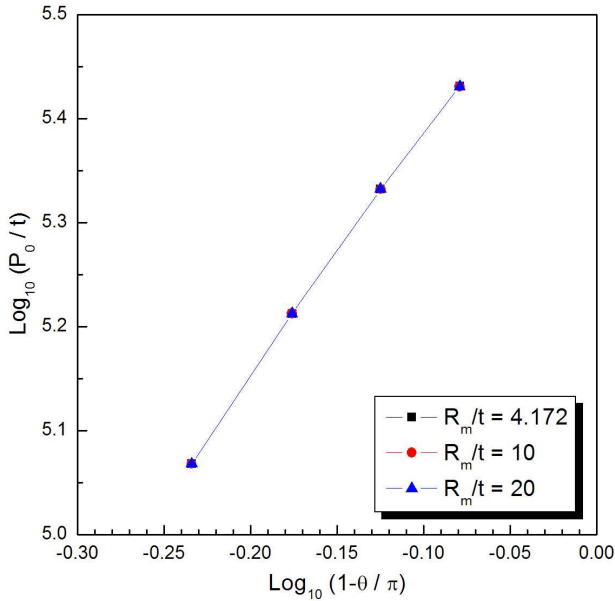


Fig. 6 Variation of the limit load with the normalized ligament

### 3.2 배관의 형상 함수 결정

순수 굽힘 조건을 갖는 4점 굽힘 파괴저항 시험 배관의 주요 형상 인자는 배관의 지름( $D$ ) 및 반지름( $R_m$ )과 두께( $t$ ), 그리고 무차원 균열 길이 ( $\theta/\pi$ )이다.

본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 식 (3)의 형상 함수( $G$ )를 배관에 대한 식 (4)으로 수정하여 제시한다.

$$G\left(\frac{\theta}{\pi}\right)_{pipe} = C \left\{ \pi D t \left( \frac{t}{R_m} \right)^{\frac{1}{n}} \right\} \left\{ 1 - \frac{\theta}{\pi} \right\}^m \quad (4)$$

여기서,  $n$ 은 재료의 가공 경화 지수이다. 식 (4)의 오른쪽 항의 첫 번째 부분은 균열이 없는 배관의 단면적과 관련된 부분이며, 두 번째 부분은 균열이 진전되지 않은 리가먼트에 관한 부분이다.

Fig. 6은 식 (4)의 상수  $m$ 을 구하기 위하여 Donoso 등<sup>(9)</sup>이 제안한 한계 하중과 리가먼트의 관계를 나타낸 것이며, 선도의 기울기로부터  $m=2.35$ 를 획득하였다. 상수  $C$ 는 기존 연구자들의 연구결과<sup>(10)</sup>에서 SENB 시험편과의 유사성을 이용하여 1로 정하였다.

### 3.3 배관 하중 - CMOD 선도 예측

Fig. 5에 제시된 표준 시험편의 무차원 하중 - 변위 선도를 배관의 무차원 하중 - CMOD 선도로 변환하기 위해서는 먼저 표준 시험편과 배관의

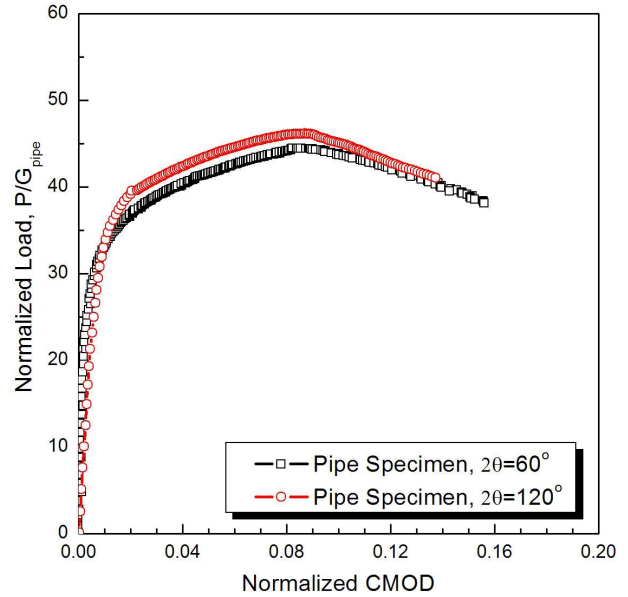


Fig. 7 Normalized load - normalized CMOD curve calculated from common format equation for pipe experiments

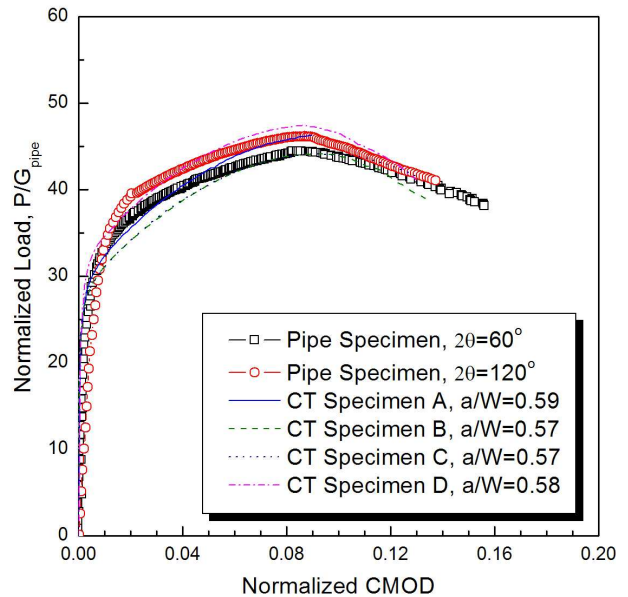


Fig. 8 Normalized load - normalized CMOD curve of pipe experiments and CT specimen tests by the common format equation

구속 계수( $\Omega^*$ )를 결정해야 한다.

원주 방향 관통 균열의 크기가  $60^\circ$ 와  $120^\circ$ 인 배관의 파괴저항 시험 결과로부터 획득한 하중 - CMOD 선도를 형상 함수  $G$ 와 배관 지름  $D$ 를 이용하고 일반화하여 Fig. 7에 나타내었다. 표준 시험편의 무차원 하중 - 변위 선도(Fig. 5)와 배관의 무차원 하중 - CMOD 선도(Fig. 7)를 시행착오법을

적용하여 구속 계수 ( $\Omega^* = 3.93$ )를 구하였다.

Fig. 8은 구속 계수를 적용하여 획득한 표준 시험편의 무차원 하중 - 변위 선도와 배관의 무차원 하중 - CMOD 선도를 비교하여 나타낸 것이며, 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4개의 표준 시험편 결과 중에서 관통균열 60° 및 120° 배관에 대한 시험 결과와 10% 이내에서 일치하며, 선도의 경향이 비교적 잘 일치하는 표

준 시험편 시험결과 B, D를 이용하여 균열의 크기가 60°와 120°인 배관의 하중 - CMOD 선도를 계산하였다.

Fig. 9는 표준 시험편 B의 결과로부터 예측한 배관의 하중 - CMOD 선도와 균열의 크기가 60°인 배관의 시험 결과를 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 10은 표준 시험편 D의 결과로부터 예측한 배관의 결과와 균열의 크기가 120°인 배관의 시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

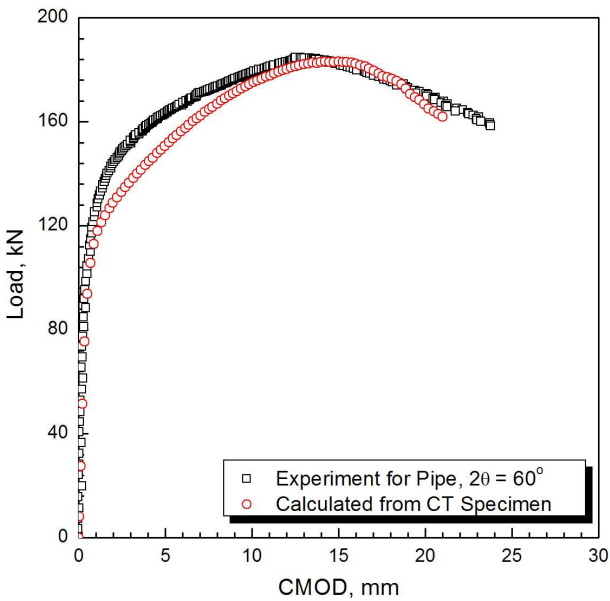


Fig. 9 Load - CMOD curves from the CT specimen B and the experiment,  $2\theta=60^\circ$

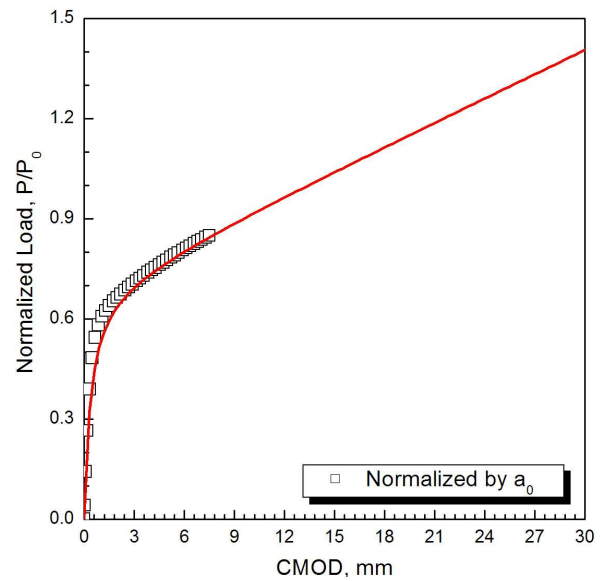


Fig. 11 Normalized load - CMOD curves normalized by the limit load using initial crack length and fitted data,  $2\theta=60^\circ$

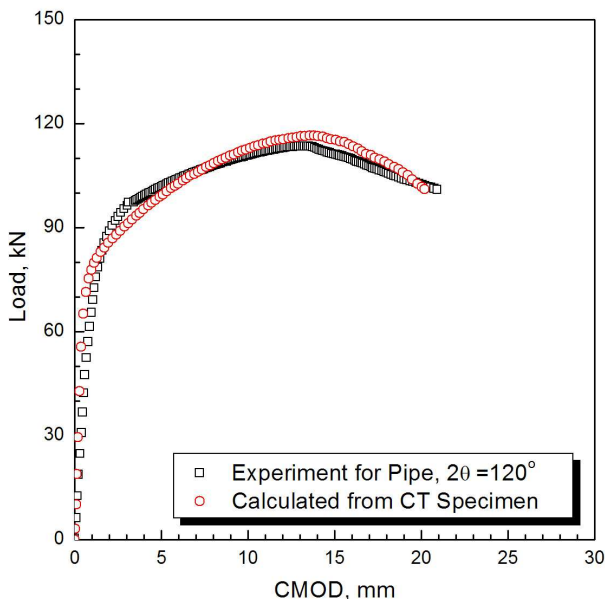


Fig. 10 Load - CMOD curves from the CT specimen D and the experiment,  $2\theta=120^\circ$

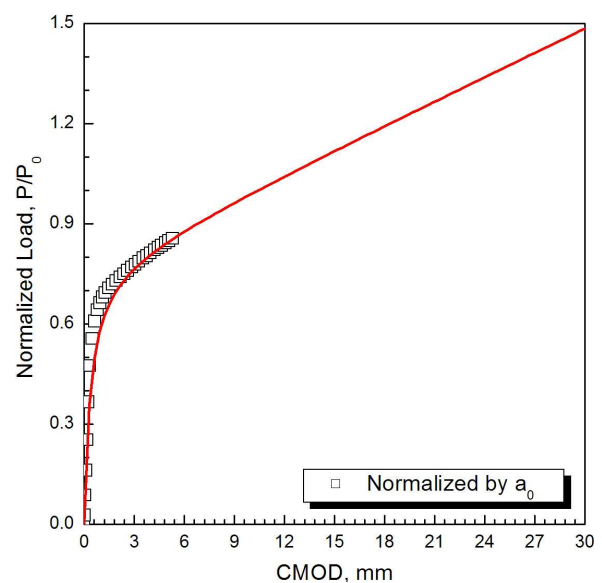


Fig. 12 Normalized load - CMOD curves normalized by the limit load using initial crack length and fitted data,  $2\theta=120^\circ$

## 4. 배관의 균열 길이 계산

## 4.1 배관의 참조 곡선 산출

Figs. 11과 12는 하중 - CMOD 선도 (Figs. 9와 10)를 초기 균열 길이( $a_0$ )에 대한 한계 하중으로 무차원화하여 얻은 균열 크기가  $60^\circ$ 와  $120^\circ$ 인 변형 곡선의 일정 부분을 LMN 함수<sup>(12)</sup>를 사용하여 곡선 적합한 결과를 나타낸 것이다. Figs. 13과 14는 Figs. 11과 12의 결과와 진전하는 균열( $a_i$ )에 대한 한계 하중으로 무차원화하여 얻은 참조 곡선의 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

## 4.2 배관의 균열 길이 계산

Figs. 13과 14의 참조 곡선으로부터 수정된 하중비법<sup>(1)</sup>을 적용하여 균열 길이를 산출하기 위해서 식 (5)를 사용하여 점진적인 컴플라이언스 변화를 계산하였다.

$$C_i = C_{i-1} \times \frac{\left(\frac{P_i}{P_{0,i}}\right)}{\left(\frac{P_i}{P_{0,i-1}}\right)} \quad (5)$$

여기서,  $P_{0,i}$ 는  $i$ 번째 점에서 식 (6)으로 계산한 한계 하중이다.

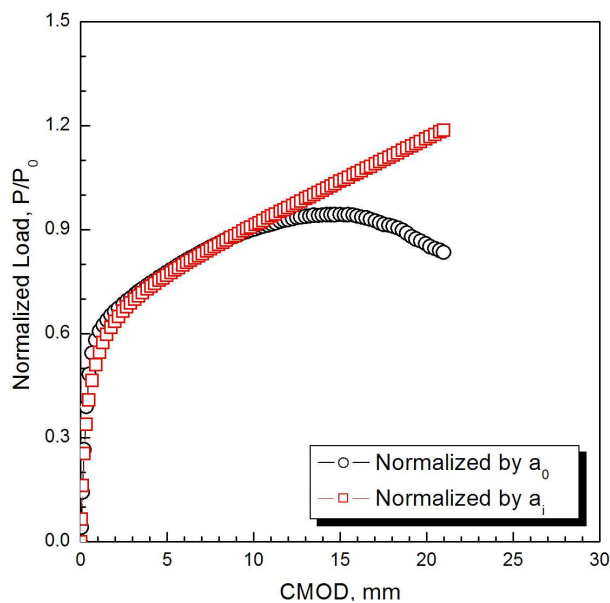


Fig. 13 Normalized load - CMOD curves normalized by the limit load using initial and growing crack length,  $2\theta=60^\circ$

$$P_{0,i} = 1.455\sigma_{YS}B\beta b \quad (6)$$

여기에서,  $\sigma_{YS}$ 는 항복강도이고,

$$\beta = \sqrt{4\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 4\left(\frac{a}{b}\right) + 2 - \left(\frac{2a}{b} + 1\right)}$$

이며,  $a$ 는 균열 길이,  $b$ 는 리가먼트이다.

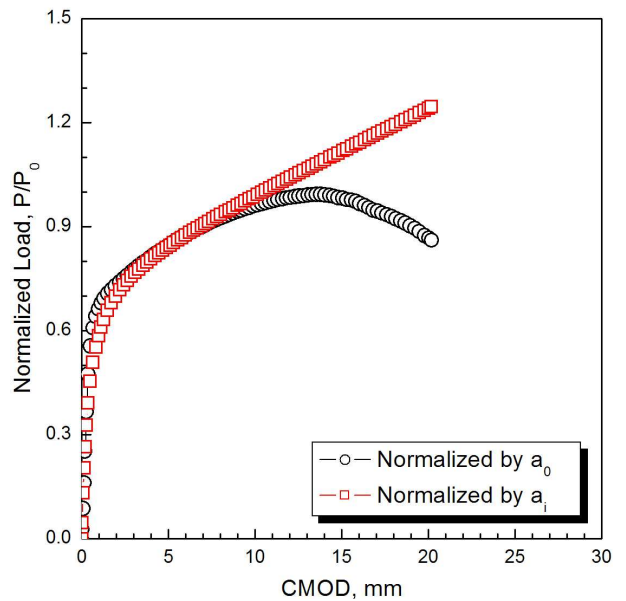


Fig. 14 Normalized load - CMOD curves normalized by the limit load using initial and growing crack length,  $2\theta=60^\circ$

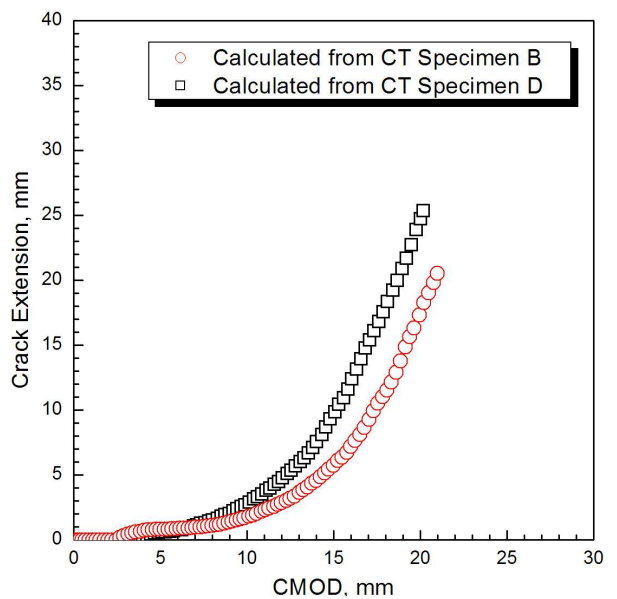


Fig. 15 Calculated crack extension using the load ratio method,  $2\theta=60^\circ$  and  $2\theta=120^\circ$



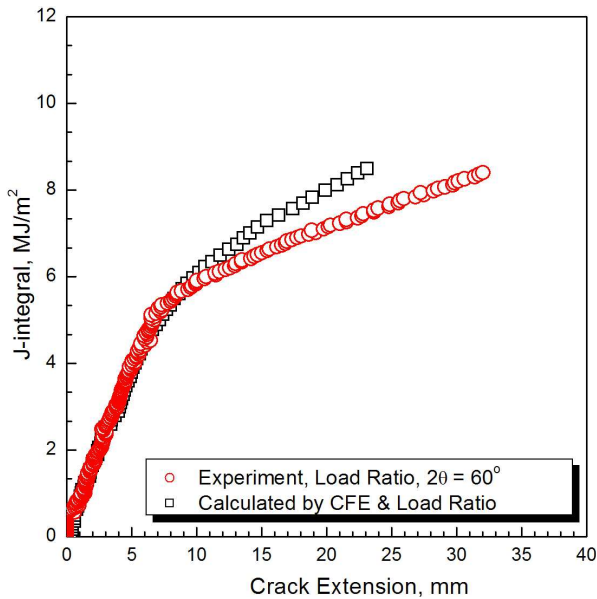


Fig. 16 Comparison of the calculated fracture resistance curve with that of the experiment result for the pipe,  $2\theta=60^\circ$

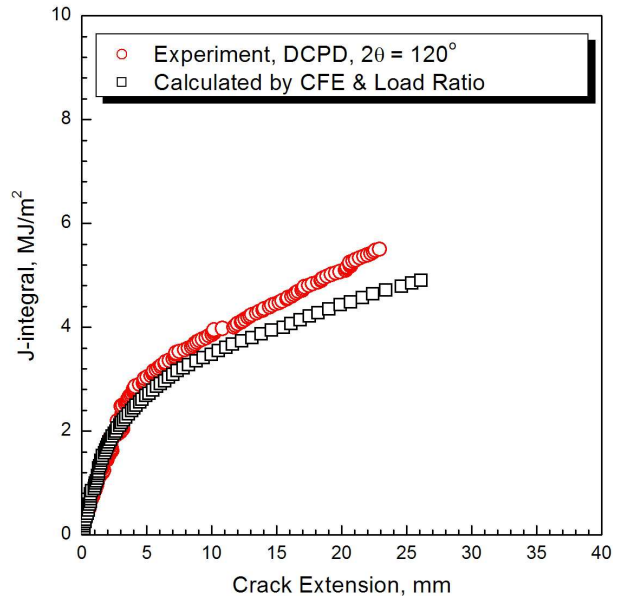


Fig. 17 Comparison of the calculated fracture resistance curve with that of the experiment result for the pipe,  $2\theta=120^\circ$

이렇게 구해진 배관의 탄성 컴플라이언스와 식 (7)을 이용하여 균열 진전량을 계산하였다.<sup>(1)</sup>

무차원 균열길이 식은

$$\frac{\theta}{\pi} = 0.47 + 1.52u - 13.52u^2 + 19.29u^3 \quad (7)$$

이다. 여기에서  $u$ 는 무차원 컴플라이언스이며, 식 (8)과 같다.

$$u = \frac{1}{\left[ EtC \left( \frac{t}{R_m} \right)^{\frac{1}{n}} + 1 \right]} \quad (8)$$

Fig. 15는 하중비법으로 계산된 균열 진전량을 초기 균열 길이 별로 나타낸 것이다.

### 5. 배관의 파괴저항 곡선 예측

#### 5.1 배관 시험편의 J-적분 계산

계산된 균열 진전량을 사용하여 파괴저항 곡선을 산출하기 위해서는 J-적분 값을 구하여야 하는데, Zhoor 등<sup>(12)</sup>이 제시한 식을 사용하였다.

#### 5.2 배관의 파괴저항 곡선 결정

Figs. 16과 17은 CFE와 하중비법을 사용하여 구한 배관의 파괴저항 곡선과 본 연구에서 수행된

원주 방향의 관통 균열이  $60^\circ$ 와  $120^\circ$ 인 배관 시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

본 연구에서 CFE와 하중비법을 사용하여 예측된 결과와 시험 결과의 오차는 균열 진전량이 20mm인 지점을 기준으로 약 15% 정도로 나타났다. 하지만 탄소강이나 스테인리스강 재료에서 채취한 시험편의 파괴저항 시험 결과들<sup>(13,14)</sup>의 오차를 고려한다면 신뢰성 있는 결과라고 판단된다. 또한 계산된 J-적분과 균열 진전량은 예측된 하중 - CMOD 선도에 영향을 많이 받기 때문에 오차의 경향이 균열 길이 별로 다르게 나타난 것으로 판단된다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 표준 시험편의 하중 - 변위 선도로부터 하중비법을 사용하여 균열 진전량을 계산하고 배관의 파괴저항 곡선을 예측하는 방법을 제시하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 획득하였다.

(1) 배관 재료에 대한 표준 시험편 시험 결과로부터 CFE를 이용하여 배관의 하중 - CMOD 선도를 예측하는 방법을 제시하였으며 배관의 파괴저항 시험으로부터 얻은 하중 - CMOD 선도와 비교할 때 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

(2) 계산된 하중 - CMOD 선도로부터 수정된 하중비법을 적용하여 균열 길이 별로 배관의 파괴저항 곡선을 예측하였으며 기존의 배관에 대한 파괴저항 시험으로부터 구한 파괴저항 곡선과 비교할 때 표준시험편의 시험의 결과로부터 배관의 파괴저항 곡선을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업과 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842)

## 참고문헌

- (1) Jae-Sil, Park and Chang-Sung, Seok, 2003, "Calculation of the Crack Length for a Pipe Specimen using the Modified Load Ratio Method," Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting, pp. 138~143
- (2) Donoso, J. R., Labbe, F. and Argomedo, H., 1996, "A Calibration Function for Notched Cylindrical Tension Specimens, Based on the Common Format Equation: Numerical and Experimental Data Analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 54, Issue 5, pp. 617~628
- (3) Donoso, J. R. and Landes, J. D., 1996, "The Common Format Equation Approach for Developing Calibration Functions for Two-Dimensional Fracture Specimens from Tensile Data," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 54, Issue 4, pp. 499~512
- (4) ASTM, 2001, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", ASTM standard E1820-01
- (5) Schuler, X., Blind, D., Eisele, U., Herter, K. H. and Stoppler, W., 1994, "Fracture Mechanics Evaluation of Cracked Components with Consideration of Multi-axiality of Stress State," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 151, pp. 291~305
- (6) Wilson, C. D. and Mani, P., 2002, "Plastic J-Integral Calculations Using the Load Separation Method for the Center Cracked Tension Specimen," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, Issue 8, pp. 887~898
- (7) Donoso, J. R. and Landes, J. D., 1994, "Common Format for Developing Calibration Curves in Elastic-plastic Fracture Mechanics," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 47, pp. 619~628
- (8) Landes, J. D., Zhou, Z. and Brown, K. H., 1993, "An Application Methodology for Ductile Fracture Mechanics," *Fracture Mechanics: Twenty-Third Symposium*, ASTM STP 1189, pp. 229~264
- (9) Zhou, Z., Landes, J. D., Lee, K. and Herrera, R., 1991, "Normalization: an Experimental Method for Developing J-R Curves," in *Elastic-Plastic Fracture Test Methods: The User's Experience*, ASTM STP 1114, pp. 42~56
- (10) Landes, J. D., Zhou, Z. and Brown, K. H., 1993, "An Application Methodology for Ductile Fracture Mechanics," *Fracture Mechanics: Twenty-Third Symposium*, ASTM STP 1189, pp. 229~264
- (11) Zahoor, A. and Kanninen, M. F., 1981, "A Plastic Fracture Mechanics Prediction for Fracture Instability in a Circumferentially Cracked Pipe in Bending - Part I. J-Integral Analysis," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 352~358
- (12) Landes, J. D., Zhou, Z., Lee, K. and Herrera, R., 1991, "Normalization method for developing J -R Curves with the LMN Function," *J. Test. Eval* 19, pp. 305-311.
- (13) Hopper, A., Wilkowski, G. M., Scott, P., Olson, R., Rudland, D., Kilinski, T., Mohan, R., Ghadiali, N. and Paul, D., 1996, "The Secondary International Piping Integrity Research Group Program - Final Report," NUREG/CR-6452
- (14) Rudland, D. L., Brust, F. W. and Wilkowski, G. M., 1996, "The Effect of Cyclic and Dynamic Loading on the Fracture Resistance of Nuclear Piping Steels," NUREG/CR-6440