

# 대형배관의 Curved CT 시편을 이용한 파괴저항특성평가에 관한 연구

## A Study on the Evaluation of Fracture Resistance Characteristics of Large Pipe by using the Curved CT Specimen

김익현<sup>1</sup>, 신인환<sup>1</sup>, 박건태<sup>1</sup>, 홍석우<sup>1</sup>, 박승순<sup>1</sup>, 윤승현<sup>1</sup>, 구재민<sup>2</sup>, 석창성<sup>2</sup>✉  
Ik Hyun Kim<sup>1</sup>, In Hwan Shin<sup>1</sup>, Kweon Tae Park<sup>1</sup>, Suk Woo Hong<sup>1</sup>, Seon Soon Park<sup>1</sup>, Seon Hyun Yoon<sup>1</sup>,  
Jae Mean Koo<sup>2</sup>, and Chang Sung Seok<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> 성균관대학교기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

<sup>2</sup> 성균관대학교기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: +82-31-290-7446

Manuscript received: 2013.12.18 / Revised: 2014.5.9 / Accepted: 2014.5.21

*The LBB (Leak Before Break) concept is based on evaluating the fracture toughness. NUREG 1061, Vol.3 announced that the specimen for evaluating fracture resistance needs to have same thickness or thicker than pipe. Therefore, it is difficult to collect specimen from pipe which has same thickness as a pipe. So, ASTM standard suggested the use of standard specimen with 1 inch thickness. However, it has been known that an application of LBB by test results of standard specimen is conservative compare with that by real pipe. In this study, to supplement such conservatism, the evaluation of fracture resistance characteristics was performed with curved CT specimen, which has same thickness and curvature as a pipe. In addition, fracture resistance characteristics of curved CT specimen were compared with those of CT specimen. For this, shape factor  $F$ ,  $h_{pl}$  and  $g$  were obtained from FEM analysis using the limit load method.*

Key Words: Fracture Toughness (파괴인성), Curved CT (곡면형 CT), J-R Curve (J-R 곡선), Conservative (보수적인)

### 기호설명

$R_m$  = Average of radius

$t$  = Thickness

$\sigma_Y$  = Yield stress

$P$  = Load

$P_L$  = Limit load

### 1. 서론

NUREG 1061, Vol. 3에 의하면 원전배관의 안정성평가 시 사용되는 파괴인성치를 구하기 위해서

는 배관의 두께와 동일한 시험편을 이용하여 파괴저항시험을 수행하도록 권장하고 있다.<sup>1</sup> 그러나 배관과 동일한 두께의 시험편을 배관으로부터 채취하는 것이 어렵기 때문에 두께가 1inch인 CT표준 시험편을 이용해서 파괴인성치를 구한다. J-적분 식은 식(1)과 같으며 J 적분의 소성성분은 식(2)~(4)와같다. 이 식들은 하중-하중선변위 선도로부터 파괴저항곡선을 도출하는데 이용된다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (1)$$

$$J_{pl} = \int_0^{\Delta a} \eta_{pl} P d\Delta_{pl} + \int_{a_0}^a \gamma J_{pl} da \quad (2)$$

$$\eta_{pl} = -\frac{\partial P_L}{\partial A} \frac{1}{P_L} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\partial^2 P_L / \partial a^2}{\partial P_L / \partial a} \quad (4)$$

일반적으로 ASTM<sup>2</sup>에 제시되어 있는 CT 시험편에 의한 파괴저항특성 평가방법은 실패관의 파괴거동을 매우 보수적으로 평가하는 것으로 알려져 있다.<sup>3</sup> 따라서 본 연구에서는 실패관과 동일한 두께와 곡률을 갖는 비표준 시험편인 curved CT 시험편을 사용하여 파괴저항특성을 평가하였다.

## 2. Curved CT 시험편의 유한요소해석

### 2.1 유한요소해석방법

본 연구에서는 대칭성을 고려하여 전모델의 1/2을 3차원으로 모델링하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 재료는 탄성-완전소성재료로 가정하였으며, Abaqus<sup>4</sup> 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. curved CT 시험편의 균열길이비가 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 이 되도록 변화시키며 해석을 수행하였으며, 이로부터 J값 계산을 위한 형상보정계수와 한계하중식을 유도하였다.

### 2.2 형상계수함수 F

탄성영역에서 FEM 해석을 하여  $J_{el}$  값을 구하였다.  $J_{el}$ 값은 식(5)와 같다.

$$J_{el} = \frac{1-\nu^2}{E} K^2 = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{P^2 a}{4\pi R_m^3 t^2} F^2(a/w) \quad (5)$$

여기에서  $R_m$ 은 시험편의 평균반경을 나타내며  $t$ 는 시험편의 두께,  $P$ 는 작용하중을 의미하며, 응력확대계수  $K$ 는 다음과 같다.<sup>5</sup>

$$K = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} F \quad (6)$$

$$\sigma^\infty = \frac{P}{2\pi R_m t} \quad (7)$$

새로운 시험편에 대한 형상계수식이 제시되어있지 않기 때문에 탄성 J-적분을 구하기 위해서는 이를 유도해야 한다. 본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 통하여 형상계수식을 새롭게 제시하였다. 유한요소해석으로 구한  $J_{el}$ 으로부터 식(5), 식(6)과 식(7)을 사용하여 형상보정계수  $F$ 를 구하여 Fig. 2에 나타내었다. 식(8)은 곡선접합에 의하여 구한 결과이다.

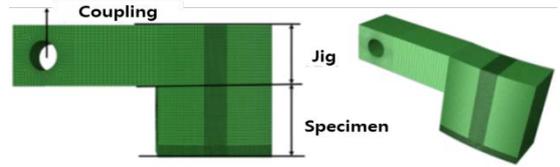


Fig. 1 Typical finite element model for curved CT specimen

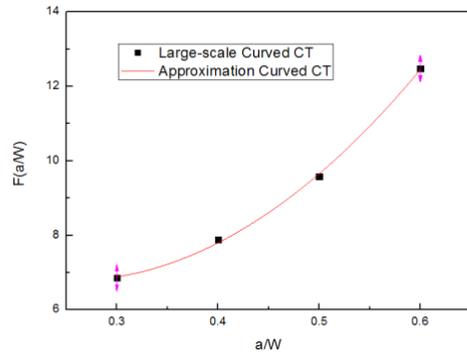


Fig. 2 The values of the shape factors, F for stress intensity factor

$$F(a/w) = 55.341(a/w)^2 - 30.10(a/w) + 10.987 \quad (8)$$

### 2.3 보정계수 $\eta_{pl}$ 와 $\gamma$

식(3)과 식(4)의  $\eta_{pl}$ 와  $\gamma$ 는 균열이 진전하는 경우 실험결과로부터  $J$ -integral의 소성성분, 즉  $J_{pl}$ 을 얻기 위한 보정계수이며 이를 얻기 위해서는 소성 한계하중인  $P_L$ 에 관한 식을 구해야 한다. 따라서 curved CT 시험편에 대한 탄성-완전소성 유한요소 해석을 수행하여 소성한계 하중식을 유도하였다. Fig. 3은 유한요소해석 결과를 나타낸 것으로서 유한요소해석으로 구한 한계하중을 무차원화 하여 그 결과를 균열길이 비에 대해 3차식으로 곡선 접합하여 식(9)를 얻었다.

$$\frac{P_L}{\sigma_y R_m t} = 0.036(a/w)^3 + 0.185(a/w)^2 - 0.402(a/w) + 0.194 \quad (9)$$

여기서  $P_L$ 은 한계하중이며,  $\sigma_y$ 는 항복강도이다.

식(3)과 (4)의 관계에 식(9)를 적용하여 curved CT 시험편에 대한  $\eta_{pl}$ 과  $\gamma$ 를 식(10), (11)과 같이 구하였다.

$$\eta_{pl} = \frac{0.108(a/w)^2 + 0.37(a/w) - 0.402}{0.036(a/w)^3 + 0.185(a/w)^2 - 0.402(a/w) + 0.194} \quad (10)$$

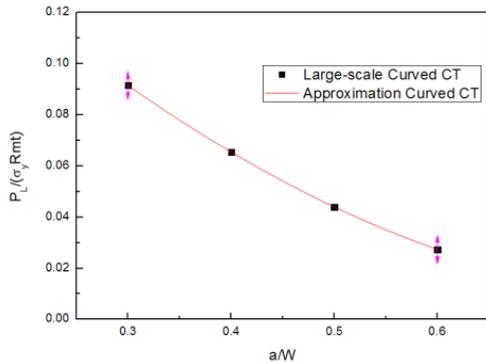


Fig. 3 Limit load solution for curved CT specimen under axial tension

Table 1 Mechanical properties of material

Material		SA508
Elastic Modulus(GPa)		204.3
Poisson's ratio		0.3
YieldStrength(MPa)		340
Ramberg-OsgoodConstant	Strain-hardening exponent(α)	4.67
	Material Coeffi.(n)	4.62

$$\gamma = \frac{0.216(a/w)^{0.37}}{0.108(a/w)^2 + 0.37(a/w) - 0.402} \quad (11)$$

### 3. Curved CT 시편의 파괴저항시험

#### 3.1 Curved CT 시편의 물성과 형상

본 연구에 쓰인 배관은 SA508 탄소강배관이며 Table 1에 기계적 물성을 나타내었다. 배관의 외경은 640.0mm이며 103mm의 두께를 갖는다. 실험에 쓰인 실배관과 같은 두께를 갖는 curved CT 시편의 형상을 Fig. 4에 나타내었다.

파괴저항실험을 위해 a/W 값이 0.45가 되는 지점까지 기계노치를 삽입하였으며 a/W 값이 0.5가 되는 지점까지 피로예비균열을 삽입하였다.

Curved CT 시험편의 파괴저항시험을 위한 시험장치는 Instron사의 490kN 용량의 유압식 만능시험기를 이용하였다. Fig. 5에 시험시스템 및 하중부가지그를 나타내었다.

#### 3.2 파괴저항시험

Curved CT 시편의 파괴저항시험을 위해 피로예비균열을 삽입한 시편을 5mm/min의 속도로 변위컨트롤하여 Fig. 5와 같이 시험을 수행하였다. 하중-하중선변위 선도로부터 하중비법을 이용하여 균

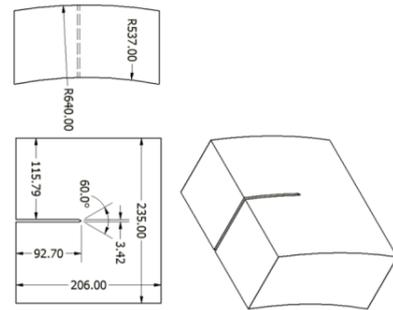


Fig. 4 Geometry of curved CT specimens

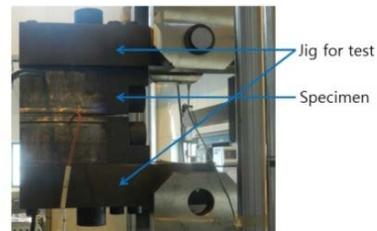


Fig. 5 Fracture toughness test for curved CT specimen



Fig. 6 Fracture appearance curved CT specimens

열길이를 계산하였으며, 시편의 실제균열길이를 측정하기 위하여 시편의 파단부를 가열 착색한 후, 피로하중을 가하여 Fig. 6과 같이 시편을 파단하였다. 파단면으로부터 9점법을 이용하여 각 구간의 초기 균열길이와 균열진전량을 측정하여 실제균열길이를 구했다. Fig. 7은 curved CT 시편과 표준시편의 파괴저항곡선이다.

#### 3.3 고찰

Fig. 7과 같이 동일한 crack extension 에서 curved CT 시편이 표준시편에 대하여 J값이 더 크게 나타나고 있다. 이는 실배관과 동일한 두께와 곡률을 갖는 curved CT 시편의 형상으로 인해 표준시편에 비해 실배관의 응력상태와 구속상태를 모사하였기 때문에 나타난 결과라고 판단된다. 일

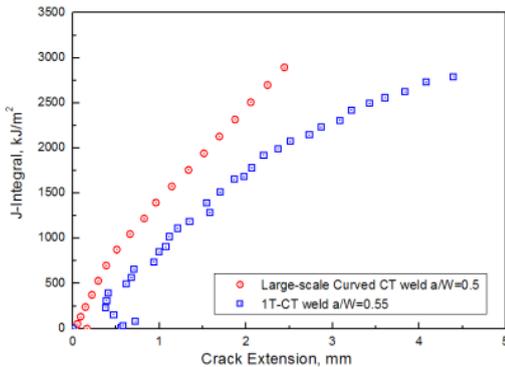


Fig. 7 Comparison of J-R curves between weld curved CT specimen and 1T-CT specimen

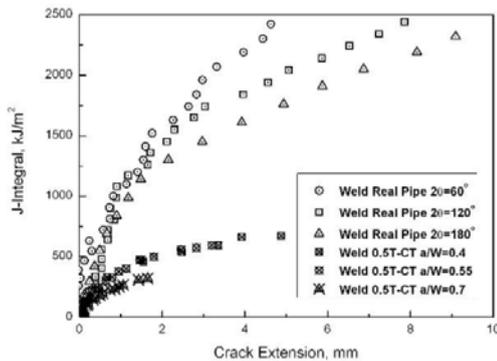


Fig. 8 Comparison of J-R curves between real pipe and IT-CT specimen(SA312 TP304L)

반적으로 CT 표준시편이 실패관과 구속조건이 달라서 J-R 곡선이 실패관에 비하여 낮게 나타나는 것으로 알려져 있는데, Fig. 8은 SA312 TP304L의 용접재인 경우에 6inch 배관과 CT 시편에 대한 J-R 곡선<sup>6</sup>으로, CT 시편의 J-R 곡선이 실패관의 J-R곡선에 비하여 25% 수준의 값을 가짐을 볼 수 있으며 이는 실패관의 J-R곡선이 CT 시편의 J-R곡선보다 높게 나타나는 경우에 대한 예이다.

본 연구의 실패관과 같은 두께와 곡률을 갖는 curved CT 시편의 경우 CT 시편보다는 J-R 곡선이 높게 나타나기 때문에 실패관에 의한 결과와 좀더 비슷할 것이라고 예측할 수 있다. 또한, CT 시편에 의한 결과값이 작기 때문에 CT 시편에 의한 LBB 설계는 보수적이어서 과다설계 가능성이 있다고 알려져 있는데, 본 연구의 curved CT 시편을 사용하는 경우에는 실패관 시험에 비하여 간편하면서도 비용절감의 효과가 있을 뿐만 아니라, 실

배관의 두께와 곡률을 모사할 수 있기 때문에, 본 연구의 curved CT 시편을 사용함으로써 기존표준시편의 보수적인 결과를 해결 할 수 있다.

#### 4. 결론

Curved CT 시편과 표준시편의 J-R 곡선을 비교하였으며, 그 결과 표준시편에 비해 비표준시편의 경우 동일 crack extension 에서 파괴인성치가 높게 나타났다. 이 결과 실패관 실험에 비해 보수적인 결과를 갖는 표준시편의 결과 대신에 배관의 두께와 곡률이 모사 가능한 curved CT 시편이 표준시편이 갖는 보수성을 보완할 수 있는 대체 시험편이 될 수 있다고 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012M2A8A1029423, 2011-0020024).

#### REFERENCES

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Evaluation of Potential for Pipe Break," Vol. 3, Document ID: NUREG-1061, 1984.
2. ASTM E1820-99, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," 2006.
3. Park, S., Yoo, S.-S., Min, J.-K., Koo, J.-M., and Seok, C.-S., "Evaluation of Fracture Toughness Characteristics for Nuclear Piping using Various Types of Specimens," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 90-91, pp. 9-16, 2012.
4. Dassault Systemes, "Abaqus Version 6.10 - Analysis User's Manual," [http://abaqusdoc.ucagary.ca/pf\\_boos-ALYSIS\\_1.pdf](http://abaqusdoc.ucagary.ca/pf_boos-ALYSIS_1.pdf) (Accessed 18 June 2014)
5. Yoo, S. S, Huh, Y., Koo, J. M., Seok, C. S., "A Study on the Fracture Toughness Characteristic using the Curved CT Specimen," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp.475-476, 2009.
6. Kim, J. K., Shin, I. H., Li, H. C., Koo, J. M., Seok, C. S., "A Study on the Evaluation of Fracture Toughness of Welding Part of Nuclear Real Piping and Specimen," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 853-854, 2012.