

# 구속효과를 고려한 Curved CT 시험편의 파괴인성 평가

## An Evaluation of the Fracture Toughness of the Curved CT Specimen by Constraint Effect

\*유상수<sup>1</sup>, 민권기<sup>2</sup>, 박수<sup>2</sup>, 구제민<sup>2</sup>, #석창성<sup>2</sup>

\*S. S. Yoo<sup>1</sup>, J. K. Min<sup>2</sup>, S. Park<sup>2</sup>, J. M. Koo<sup>2</sup>, #C. S. Seok<sup>2</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup>성균관대학교 기계공학과

Key words : Constraint Effect, Curved Compact Tension Specimen, Fracture Toughness, Unloading Compliance Method, J-R Curve

### 1. 서론

원전배관의 건전성 평가를 위해서는 탄소성 파괴역학 이론에 기초한 평가 방법을 사용하고 있다. 탄소성 파괴역학은 J-적분에 기초한 HRR 응력장을 사용하여 균열부위의 응력상태를 예측한다. 그러나 구조물의 기하학적 형상, 균열깊이, 하중상태, 재료물성치 등에 따른 구속효과의 차이로 인해 실제 구조물의 응력장은 HRR 응력장과 다르게 나타날 수 있으며, J-적분에 의한 평가방법이 실제와 다른 결과를 초래할 수 있다. 균열선단에서의 구속은 하중형태가 굽힘인 경우가 인장인 경우보다 크며, 균열이 깊은 경우가 얇은 경우보다 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 구조물의 구속상태를 평가하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔으며, 새로운 매개변수를 이용한 J-Q 해석법이 제시되어 있다.

구속효과에 대해서 일반적으로 ASTM에 제시되어 있는 CT 시험편은 실 배관의 파괴 거동을 매우 보수적으로 평가하는 것으로 알려져 있으며, 이로 인해 표준 시험편을 이용한 LBB 평가 결과도 보수적이다. 선행연구에서는 실제 원전배관에서 채취한 비표준 시험편인 Curved CT 시험편에 대한 파괴인성을 평가하여 파괴저항곡선을 구하였다.

본 논문은 3차원 유한요소해석을 이용하여 비표준 시험편인 Curved CT 시험편과 CT, 실배관의 균열부의 구속상태를 비교 평가하였다.

### 2. 관념이론

#### 2.1. 구속효과

J-적분은 균열 선단에서의 응력장 해석을 위해 Rice가 제안한 탄소성 파괴역학 매개변수이며, 식(2-1) 같이 정의된다.

$$J = \int_{\Gamma} \left( w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (2-1)$$

여기서, w는 변형에너지밀도로 식(2-2) 다음과 같이 정의된다.

$$w = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2-2)$$

$\Gamma$ 는 2차원 변위장내의 임의의 적분 경로로서 반시계 방향으로 설정되며, T는  $\Gamma$  상에서의 외향법선응력벡터, u는 변위벡터, ds는 적분경로상의 미소길이이다.

Hutchinson, Rice, Rosengren은 비선형 탄성 재료에 대해 J-적분 값을 이용하여 균열 선단의 특성을 규명하였으며, 이때 비선형 탄성 재료는 식(2-3) 아래와 같은 Ramberg-Osgood 응력-변형률 관계식을 만족하는 재료이다.

$$\frac{\epsilon}{\sigma_o} = \frac{\sigma}{\sigma_o} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (2-3)$$

여기서,  $\sigma_o$ 는 기준 응력으로 대부분의 경우 항복 응력을 사용한다.  $\epsilon_o$ 는 기준 변형률로서  $\sigma_o$ 를 탄성 계수 E로 나눈 값이며,  $\alpha$ 는 재료상수, n은 가공경화지수이다.

J-적분값을 이용하여 균열 선단에서의 응력장 및 변형률장을 해석하는 것은 선형탄성 파괴역학에서 응력확대계수를 이용하는 것과 유사하다. 소규모 소성상태나 대규모 소성 상태에 있는 정지균열의 균열 선단 부근에서의 응력, 변형률 그리고 변위는 식(2-4-5) 같이 정의된다.

$$\sigma_{ij} = \sigma_o \left[ \frac{J}{\alpha \sigma_o \epsilon_o I_n r} \right]^{1/n+1} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (2-4)$$

$$\epsilon_{ij} = \alpha \epsilon_o \left[ \frac{J}{\alpha \sigma_o \epsilon_o I_n r} \right]^{n/n+1} \tilde{\epsilon}_{ij}(\theta, n) \quad (2-5)$$

여기서,  $I_n$ 은 가공경화지수에 따른 적분상수,  $\tilde{\sigma}_{ij}$ ,  $\tilde{\epsilon}_{ij}$ ,  $\tilde{u}_i$ 는 n과  $\theta$ , 으로 표현되는 무차원함수값으로서, 평면응력상태와 평면변형률상태에 따른 값들이 주어져 있다. Shih[6]는 이를 Table화하여 발표하였다.

식 (2-4)과 식 (2-5)에서 J-적분값은 각각 응력 특이성의 정도와 변형률 특이성의 정도를 나타내고 있으며, Hutchinson, Rice와 Rosengren은 두 식을 균열 선단에서의 HRR 특이성(HRR singularity)이라 정의하였다. 이 식들은 실제 균열부 해석에 널리 적용되었으며, 특히 굽힘 하중이 균열부에 작용하는 경우 실제에 근접한 응력 분포를 예측하는 것으로 알려져 있다.

#### 2.2. J-Q 해석법

O'Dowd와 Shih는 구속이 낮은 경우와 높은 경우에 있어서 균열 선단의 수직 응력의 차이가 항상 일정하다는 사실을 밝혀내고, 그 차이의 수정 계수로 Q-응력을 도입하여 J-Q 해석법을 제안하였다. Q-응력은 균열 선단에서의 3축 응력상태를 나타내는 매개변수로서, 이를 고려하여 식 (2-5)로 표현되는 균열 선단에서의 응력을 다시 표현하면 식 (2-6)과 같다.

$$\sigma_{ij} \approx \sigma_{ij, HRR} + Q \sigma_o \delta_{ij} \quad \left( \theta < \frac{\pi}{2} \right) \quad (2-6)$$

여기서,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이며, 식 (2-6)을 이용하여 Q-응력은 식 (2-7)과 같이 정의할 수 있다.

$$Q \equiv \frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\theta\theta, HRR}}{\sigma_o} \quad \text{at } \theta = 0, r = 2 \frac{J}{\sigma_o} \quad (2-7)$$

여기서,  $\sigma_{\theta\theta}$ 는 균열 선단에서의 실제 수직 응력값이며,  $\sigma_{\theta\theta, HRR}$ 은 해당 지점에서 HRR식으로 계산되는 수직 응력값이다. Q-응력은 유한 변형률이 발생하는 영역밖이며 균열 진전의 특성을 대표할 수 있는  $r/(J/\sigma_o)=2$ 에서의 값을 이용한다. Fig. 1은 Q-응력의 정의를 도식적으로 나타낸 것이다.

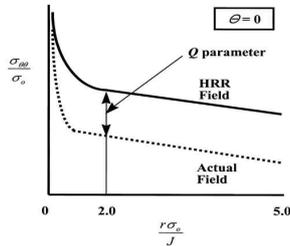


Fig. 1 Definition of the Q-stress

### 3. 유한요소해석

유한요소해석을 수행하기 위해 시험편과 동일한 형상의 3차원 모델을 구성하였다. 해석 대상의 대칭성을 고려하여 전체의 1/2만을 모델링하였다. 재료는 탄성-완전 소성 재료로 가정하였으며, ABAQUS 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 20절점 등계수 사각주요소이며, 균열선단에서의 응력장과 변형률을 해석하기 위해서 전체 8,344개의 요소로 구성하였다. curved CT 시험편의 균열 길이비가 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70이 되도록 변화시키면서 해석을 수행하였다. 탄소성 해석시 균열선단에 유한한 반경을 설정하여 모델링함으로써 소성 변형시 균열선단부의 변형을 근사하게 모사하였다. 해석모델의 물성치는 Table.1에 제시되어 있다.

Fig. 2 대표적 유한요소해석 모델을 나타내었다. 해석의 정밀도를 높이기 위해서 모든 경우 균열선단 부근에 특이요소(singular element)를 삽입하였다. 핀은 강체로 가정하였으며 시험의 홀과 핀의 접촉면에 접촉요소를 배치하였다.

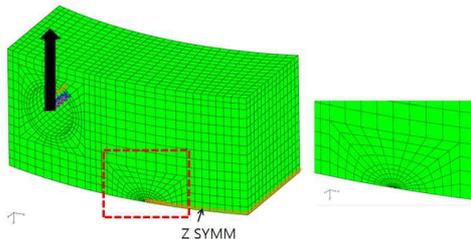


Fig. 2 Typical finite element model for curved CT specimen

Table 1 Mechanical properties of material

material	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield Strength (MPa)	Ramberg-Osgood Constant	
				strain-hardening exponent(n)	Material Coeff.(n)
SA312 TP304L	204300	0.3	264	4.67	4.62

### 4. J-Q 해석 결과

J-적분은 영역적분법에 의해 계산된 값을 사용하였으며, 이를 식(2-4)에 대입하여 HRR응력장을 구하였다. 균열선단의 실제 응력장은 유한요소모델의 리가먼트(Ligament)를 구성하는 각 절점에서의 평균 수직응력값을 이용하여 계산하였다. 작용하중은  $\log(J/(a\sigma_y))$ 로 무차원화하였다. Fig. 3은 Curved CT 시험편의 균열길이에 따른 Q값을 비교한 것이다. 이결과를 바탕으로 균열 길이가 구속효과에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

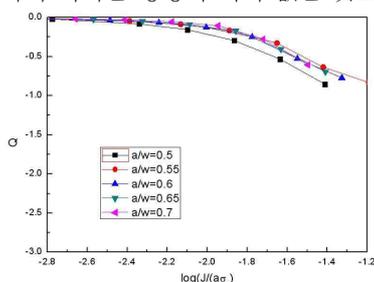


Fig.3 The Q value of Curved CT specimens

기준에 수행되었던 실배관의 균열선단에 대한 구속효과와 표준CT시험편에 대한 구속효과 데이터를 바탕으로 본 논문에서 제시한 Curved CT 시험편, 시험편 종류에 따른 동일 균열길이(0.5 기준)를 비교하여 Fig.4에 나타내었다.

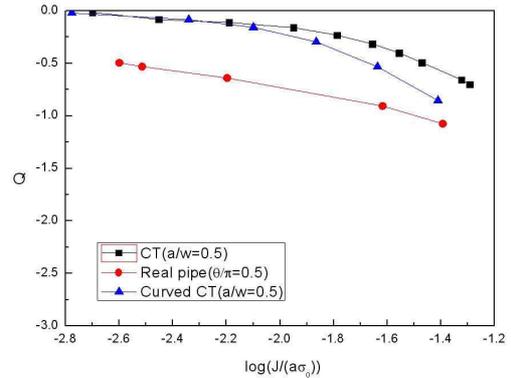


Fig.4 The Q value of specimens

Fig.4에서는 Curved CT 시험편의 구속효과가 표준 CT 시험편보다는 낮으며 실배관 보다는 높은 것으로 나타났다.

### 5. 고찰 및 결론

본 논문에서는 실배관 균열부의 파괴거동을 표준 CT 시험편보다 정확하게 모사할 수 있는 새로운 비표준 시험편인 Curved CT를 제시하였다. 기존의 배관균열 평가나 LBB 해석시에는 높은 구속상태의 표준CT 시험편으로 구한 파괴저항곡선을 사용하므로 평가 결과가 매우 보수적이지만 Curved CT 시험편을 사용하면 LBB 해석시 기존방법보다 설계 안전여유도를 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

(1) 표준 CT 시험편, 실배관, Curved CT 시험편의 균열부 구속상태를 평가한 결과. 기존의 표준 CT 시험편에 비해 구속상태가 낮게 평가되지만 실배관 보다는 높은 구속상태를 유지하였다.

(2) 이러한 결과로 Curved CT 시험편이 실배관의 파괴거동을 정확히 평가할 수는 없지만 표준 CT 시험편 보다는 정확도가 높을 것이라고 판단된다.

### 후 기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업과 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2009-0081802)

### 참고문헌

1. 유상수, 허 용, 구재민, 석창성, "Curved CT 시험편을 이용한 파괴 인성평가에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 2009. 10, pp. 475~476
2. 허남수, 김윤재, 최재봉, 김영진, 임혁순, 정대윤, "원 광폭평판 시험을 이용한 원자력 배관의 파괴거동 예측" 대한기계학회 논문집 A권, 제 28권 제 4호, pp. 352-361, 2004
3. U.S.NRC Piping Review Commission, 1983, "Evaluation of Potential for Pipe Break," Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, NUREG-1061, Vol.3.
4. Shih, C.F, O'Dowd, N.P. and Kirk, M.T, 1993, "A Framework for Quantifying Crack Tip Constraint," Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, pp.2~20,
4. Jae Sil Park, Chang Sung Seok and Young Jin Kim, 2005, "A Study on the Evaluation of the Pipe Fracture Characteristic", KSME, Vol.29, No.1, pp.107~114.