

< 논문 >

실배관 파괴특성 평가에 관한 연구

박재실* · 석창성[†] · 김영진*
(2004년 9월 2일 접수, 2004년 11월 29일 심사완료)

A Study on the Evaluation of the Pipe Fracture Characteristic

Jae-Sil Park, Chang-Sung Seok and Young-Jin Kim

Key Words : Fracture Characteristic(파괴특성), Four-point Bending Test(4점굽힘시험), Constraint Effect(구속효과), *J-R* Curve(파괴저항곡선), *J-Q* Analysis(*J-Q* 해석)

Abstract

In order to analyze the elastic-plastic fracture behavior of a structure, the fracture resistance curve of the material should be known first. The standard CT specimen was used to obtain the fracture resistance curves of a piping system. However, it is known that the fracture resistance curve by the standard CT specimen is very conservative to evaluate the integrity of a structure. Also the fracture resistance curve is effected by the specimen geometry and the dimensions because of the constraint effect. The objective of this paper is to be certain the conservativeness of the fracture resistance curve by the standard CT specimen and to provide an additional safety margin. For these, the fracture tests using a real pipe specimen and the standard CT specimen test were performed. A 4-point bending jig was manufactured for the pipe test and the direct current potential drop method was used to measure the crack extension and the length for the pipe test. Also finite element analyses were performed with a CT specimen and a pipe in order to prove the additional safety margin. From the result of tests and analyses of the pipe and the standard CT specimen, it was observed that the fracture analysis with the standard CT specimen is conservative and the additional safety margin was proved.

1. 서 론

국내 산업설비의 가동 년 수 증가에 따른 노후화로 인하여 균열 발생 가능성이 높아지고 있으며, 이로 인해 파괴역학적 건전성 평가가 요구되고 있다. 배관의 경우, 엄격한 기준 및 규격에 따라 설계, 제작됨에도 불구하고 많은 파손 사례가 보고되고 있으며, 파손 가능성의 최소화 및 2차적 파급 효과 방지를 위한 건전성 평가를 수행하고 있다. 최근에는 원자력발전소 배관 설계시 파

단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 개념이 신규 및 가동 중인 원자력발전소에 활발하게 적용됨에 따라 이의 타당성 입증 및 검증을 위한 배관 내 균열 안정성 평가법과 파괴물성치의 확보, 그리고 관련 규제지침의 개발 등이 요구되고 있다.⁽¹⁾

현재 국내에서도 몇몇 배관의 설계 시에 LBB 개념을 적용하고 있으나 배관 재료의 파괴인성치와 관련된 문제점, 수치적 *J/T* 평가방법과 관련된 문제점 등으로 인하여 아직 많은 부분에 LBB 개념을 적용하지 못하고 있다. 또한 LBB 개념이 적용되고 있는 배관 중에서도 일부 계통의 경우는 현재 안전여유가 거의 없기에 LBB 설계시 어려움이 많은 실정이다. 그러나 LBB 설계에 현재 사용되는 각종 규제기준이나 해석방법은 균열이 있는 배관의 파괴역학적 거동을 지나치게 보수적으로 고려하고 있기 때문에 이를 정량적으로 설

[†] 책임지자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : seok@skku.edu
TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482
* 성균관대학교 기계공학부

계에 반영하면 추가적인 안전여유를 확보할 수 있으리라고 생각된다.^(2,3)

균열 안정성 평가시 사용되는 파괴인성치의 경우, NUREG 1061, Vol. 3⁽¹⁾에서는 LBB 해석을 위해 시편 두께가 배관의 두께보다 크거나 같고 시편의 잔여 길이가 충분히 큰 시편을 이용해서 파괴인성시험을 수행하도록 하고 있다. 그러나 배관으로부터 큰 시편을 채취하는 것이 어렵기 때문에 1T-CT 표준 시험편을 이용해서 파괴인성치를 구한다. 그러나 기존의 표준 시험편은 실 배관의 파괴 거동을 매우 보수적으로 평가하는 것으로 알려져 있으며 표준 시험편을 이용한 LBB 평가 결과도 매우 보수적이다.⁽⁴⁾ 또한 시험편의 기하학적인 형상 및 가공 방향에 따라라도 변화하는 것으로 알려져 있다.^(5,6) 따라서 앞서 언급한 바와 같이 배관 건전성 평가법의 타당성을 입증하고, 실 배관의 거동을 정확하게 모사하여 추가적인 LBB 안전여유도를 확보하기 위해서는 실 배관을 이용한 배관 파괴인성시험을 수행해야 한다.

국외에서 수행된 배관 시험은 막대한 비용과 시간으로 인해 제한된 경우에 대해서만 시험을 수행하거나 축소 배관을 이용한 시험을 수행하고 있으며,⁽⁷⁾ 또한 국내에서는 현재까지는 배관 파괴인성시험을 위한 시험기술 및 설비의 미비 등으로 인해 이에 대한 연구를 수행하지 못하고 있었다.

따라서 본 연구에서는 실 배관의 거동에 준한 탄소성 파괴역학적인 해석을 수행하기 위해서 기존의 표준 시험편을 이용한 해석 방법의 보수성을 입증하고 실 배관 균열부의 거동을 정확하게 탄소성 파괴역학적인 해석에 반영하기 위한 기초 자료를 마련하고자 한다. 이를 위해 실배관에 대한 파괴저항 시험 및 $J-Q$ 해석을 수행하여 표준 시험편으로 구한 파괴인성치의 보수성을 확인하고 추가적인 안전여유도를 확보하고자 한다.

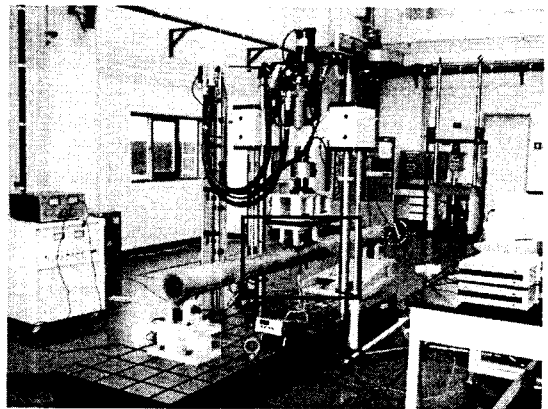
2. 시험 장비 및 시험편

2.1 시험 장비 구성

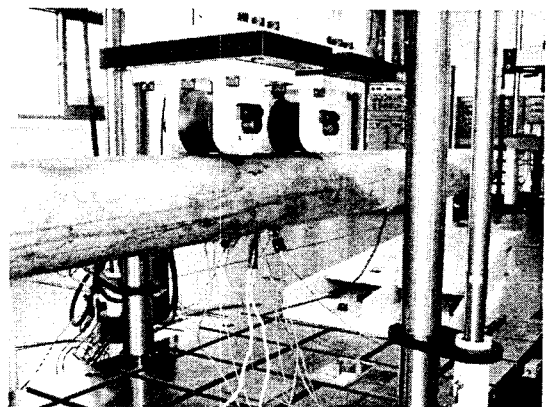
본 연구에서는 배관의 파괴저항 측정을 위하여 4점 굽힘 시험 방법을 사용하였다. 시험에 사용된 재료시험기는 25톤 용량의 전기유압식 만능시험기이며, Fig. 1에 보이는 바와 같이 4

점 굽힘 시험을 위하여 별도의 지그를 제작하였다. Fig. 1 (a)에는 전체 배관 시험 시스템을 나타내었고, 사각형 A 영역을 Fig. 1 (b)에 자세히 나타내었다.

하중과 하중선 변위의 측정은 시험기의 로드셀과 LVDT를 사용하였고, 3개의 COD 게이지로부터 균열 양 선단부와 중앙부에서의 CMOD (crack mouth opening displacement) 값을 측정하였다. 또한 균열 길이 및 전진량의 측정을 위하여 직류전위차법을 사용하였다. 50암페어(A) 용량의 직류 전원 공급기(DC power supply)를 사용하여 배관 시험편에 50A의 전류를 공급하였다. 균열이 진전함에 따라 4개의 채널(균열 양 선단부, 중앙부, 참조부)을 통하여 전위차를 측정하였고 1Hz 저역 통과형 필터(low pass filter)를 사용하여 잡



(a) Pipe testing system



(b) Detailed test system

Fig. 1 Pipe testing system

음을 제거한 후 선증폭기(pre-amplifier)를 사용하여 5,000배 증폭하였다. 시험기의 제어, 데이터 수집, 처리 및 결과 해석에는 A/D 변환기와 PC를 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 배관 파괴저항 시험용 실험 장치의 개략도이다.

2.2 시험편 준비

본 연구에서 사용된 배관은 SA312 TP304L 스테인리스강이며, Table 1에 재료물성치를 나타내었다. 인장시험으로부터 구한 항복강도와 인장강도는 각각 269, 530MPa이다. 또한 본 연구에서 사용할 배관 시험편의 균열면 형상과 4점 굽힘 시험 방법을 Fig. 3에 개략적으로 나타내었다.

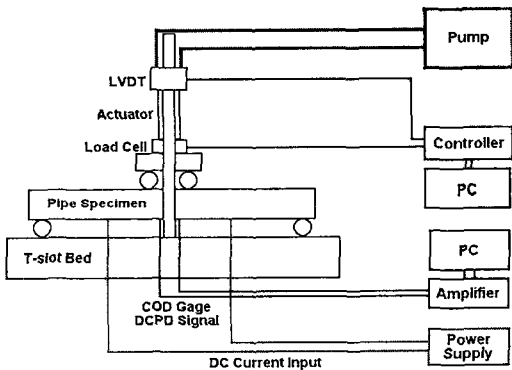


Fig. 2 Schematic diagram of the pipe testing system

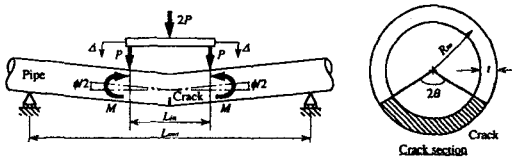


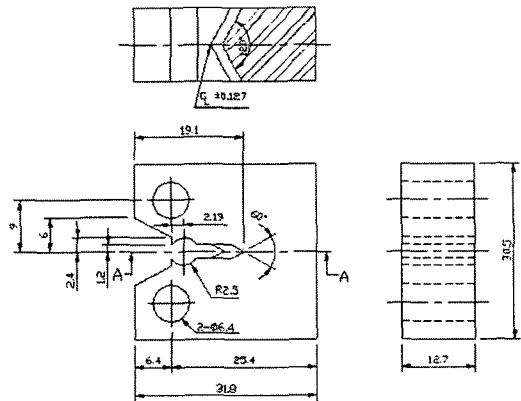
Fig. 3 Circumferentially through-wall-cracked pipe

Fig. 4에 표준 시험편 시험에 사용된 0.5T-CT 시험편의 형상을 나타내었고 Table 2에 본 연구에 사용된 배관 시험편의 치수 및 피로 예비 균열 길이 등을 나타내었다. 배관 시험편은 먼저 기계적 가공을 통하여 관통 균열을 삽입한 후 원주 방향으로 60°, 120°까지 4점 굽힘 시험용 지그를 사용하여 피로 예비 균열을 가공하였다. 또한 표준 시험편은 배관 파괴저항 시험을 수행한 후 파단된 배관으로부터 재료를 채취하여 가공하였다.

3. 균열 길이 측정

3.1 DCPD법을 이용한 균열 길이 측정

본 연구에서는 균열 길이 및 진전량의 측정을 위하여 직류전위차법(DCPD)을 사용하였다. 배관 시험의 경우 양쪽 균열 선단에서의 균열 진전량이 서로 다르기 때문에 균열의 중앙부에서만 전위차를 측정할 경우에는 정확한 균열 진전량을 측정하기



1/2TCT $a/w=0.5$

Fig. 4 Geometry of 0.5T-CT standard specimen

Table 1 Chemical composition of the test material

Material	Chemical Composition, (wt%)							
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Fe
SA312 TP304L	0.023	1.44	0.32	0.035	0.006	10.10	18.35	Bal.

Table 2 Details of pipe test specimen

Material	Outer Diameter, (mm)	Wall Thickness, (mm)	Current Input, (A)	Pre-crack Angle, (degree)	Span, (mm)	
					Outer, L_{out}	Inner, L_{in}
SA312 TP304L	168.3	18.3	50	60	2800	300
				120		

가 어렵다. 따라서 균열 선단 양 끝단에서 전위차를 동시에 측정하여 균열 양 끝단에서의 균열 진전량을 측정하였다.

DCPD 시스템을 정전류를 공급하기 위한 50A 용량의 직류 전원 공급 장치와 측정된 전위차의 잡음을 제거하기 위한 저역 통과형 필터, 측정된 신호를 증폭하기 위한 선증폭기, 측정된 아날로그 신호를 디지털화 하기 위한 A/D 변환기, 디지털화된 측정된 전위차를 저장하고 균열 길이로 환산하기 위한 PC 등으로 구성하였다.⁽⁸⁾

3.2 균열길이 관계식의 결정

직류전위차법을 이용하여 측정된 전위차를 균열 길이로 변환하기 위해서는 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 구해야 한다. 본 시험에서는 전기장 유한 요소 해석 방법을 이용하여 관계식을 유도하였다.⁽⁸⁾

전기장 유한 요소 해석 결과를 종합하여 실제 배관 파괴인성 시험 시 균열 길이 측정을 위하여 사용할 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의 관계식을 다음과 같이 산출하였다.

$$\frac{\theta}{\pi} = 0.0116 + 0.0857 \left(\frac{V_c}{V_{Ref.}} \right) - 0.00501 \left(\frac{V_c}{V_{Ref.}} \right)^2 + 1.93445 \times 10^{-4} \left(\frac{V_c}{V_{Ref.}} \right)^3 \quad (1)$$

$\frac{\theta}{\pi}$: Normalized average crack length

$\frac{V_c}{V_{Ref.}}$: Normalized centerline electric potential

4. 파괴 저항 시험

4.1 표준시험편 시험 결과

실 배관에 대한 파괴 특성을 평가하기 위하여 먼저 실 배관 재료에 대한 표준 시험편 시험을 수행하였으며 그 결과를 Table 3에 정리하였다. J_{IC} 는 ASTM E1820⁽⁹⁾에 따라 균열 진전 개시점에

서 측정된 J -적분 값이고, C_1 , C_2 는 시험으로부터 구한 J - R 곡선을 멱급수로 곡선 적합하여 얻은 상수이다.

표준 시험편 시험은 3개의 시험편에 대해서 ASTM E1820⁽⁹⁾의 표준 시험법에 따라 수행되었으며, 얻어진 0.5TCT 시험편의 파괴저항 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 시험에 사용된 재료가 연성이 매우 좋은 재료이므로 균열 선단의 둔화로 인한 균열 진전량이 상당히 크게 나타났다.

4.2 배관 시험편 시험 결과

Table 2에 주어진 2가지 조건의 실 배관 시험편에 대한 파괴저항 시험을 수행하였고, 하중-하중선 변위 선도로부터 구한 모멘트와 배관의 회전각에 대한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 모멘트 값은 측정된 하중 값과 Fig. 6에 나타낸 하중 부하점과 배관 지지점 사이의 거리 $((L_{out} - L_{in})/2)$ 로부터 산출하였고, 배관 회전각은 하중선 변위의 증가에 따른 배관 지지점과의 각 변화량 $(\theta/2)$ 으로부터 산출하였다.

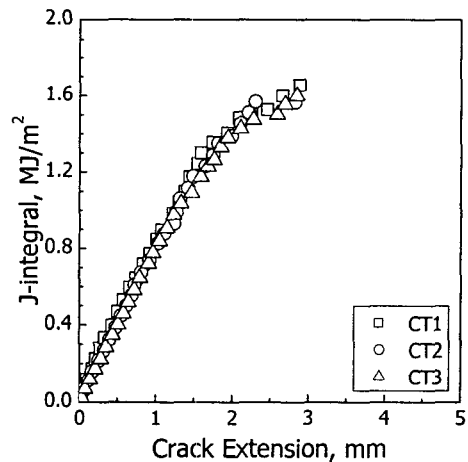


Fig. 5 J-R curve for 0.5T-CT specimen of SA312 TP304L stainless steel

Table 3 Fracture resistance test results of CT specimen

Specimen Identification Number	J_{IC} kJ/m ²	C_1 kJ/m ²	C_2
CT1	1350.1	951.5	0.55
CT2	1340.2	950.2	0.54
CT3	1243.1	909.5	0.56

Fig. 7은 파단된 배관 시험편의 균열부 형상으로 파단된 배관 시험편의 파단면 형상이다. 파괴예비균열은 배관 두께 방향과 평행하게 진전하였으나 파괴저항 시험 중에는 균열 선단의 가운데 부분이 바깥 부분에 비해 빠르게 진전함을 알 수 있다. Fig. 8에는 하중-하중선 변위 선도와 직류전위차법으로 구한 균열 길이로부터 산출된 배관의 J - R 선도를 나타내었다. 균열 진전량의 산출을 위해 먼저 무차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식으로부터 균열 진전면에 투영시킨 균열 길이를 산출한 후에 초기 균열 길이로부터 균열 진전량을 계산하였다.

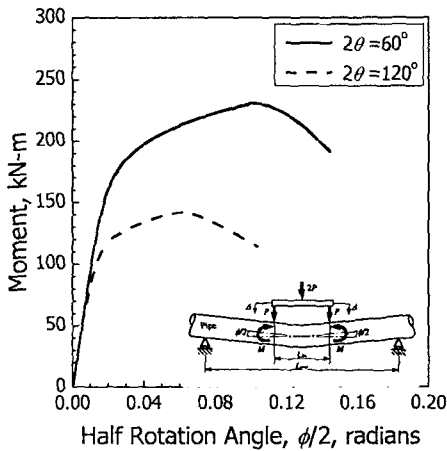


Fig. 6 Moment - half rotation angle curve for pipe specimens

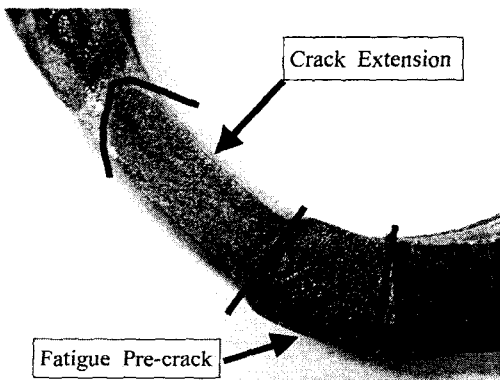


Fig. 7 Fracture appearance of a pipe specimen, $2\theta=60^\circ$

4.3 시험 결과 고찰

현재의 원자력 발전소 배관 계통의 LBB 설계에서는 표준 시험편으로 구한 J - R 선도를 사용하므로 이를 실 배관 시험으로 구한 결과와 비교하여 보수성을 입증한다면 추가적인 안전여유도를 확인할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 SA312 TP304L 스테인레스강 재료에 대한 표준 시험편 시험 결과와 배관에 대한 시험 결과를 비교하였다. 실제 배관의 LBB 해석 시에는 1T-CT 표준 시험편의 결과가 사용되지만 본 연구에서는 1T-CT 표준 시험편의 두께보다 작은 배관에서 직접 시험편을 채취하여 시험편을 가공하였으므로 0.5T-CT 시험편의 결과와 배관 시험 결과를 비교하였다.

Fig. 9에 배관 시험편과 0.5T-CT 표준 시험편의 결과를 나타내었다. 0.5T-CT 시험편의 경우에는 균열 진전량이 배관 시험편에 비해 작기 때문에 시험 결과를 표준 시험편⁽⁹⁾에 따라 곡선 적합한 결과를 나타내었다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 둔화 과정 및 균열 진전 초기에는 배관 시험편의 J - R 곡선과 표준 시험편의 J - R 곡선이 거의 유사하게 나타나지만 균열 진전량이 커질수록 배관 시험편의 J - R 곡선이 높게 나타남을 볼 수 있다. 따라서 실제 균열 진전 시의 J - R 곡선은 배관의 경우가 표준 시험편의 경우보다 높게 나타나게 된다.

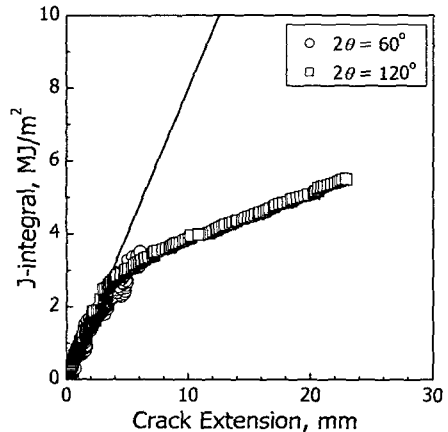


Fig. 8 J - R curve for pipe specimens

5. 구속 상태 해석

5.1 J-Q 해석법

O'Dowd와 Shih⁽¹⁰⁾는 구속이 낮은 경우와 높은 경우에 있어서 균열 선단의 수직 응력의 차이가 항상 일정하다는 사실을 밝혀내고, 그 차이의 수정 계수(correction factor)로 Q-응력을 도입한 J-Q 해석법을 제안하였다. Q-응력은 균열 선단에서의 3축 응력(triaxial stress) 상태를 나타내는 매개변수로서, 균열 선단에서의 응력을 표현하면 다음과 같다.

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

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker delta이며, 식 (2)를 이용하여 Q-응력을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q \equiv \frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\theta\theta, HRR}}{\sigma_o} \quad \text{at } \theta = 0, \quad r = 2 \frac{J}{\sigma_o} \quad (3)$$

여기서, $\sigma_{\theta\theta}$ 는 균열 선단에서의 실제 수직 응력값이고, $\sigma_{\theta\theta, HRR}$ 은 해당 지점에서 HRR식으로 계산되는 수직 응력값이다. 유한 변형률이 발생하는 영역(finite strain region)의 바깥 부분이고 균열 진전의 특성을 대표할 수 있는 $r/(J/\sigma_o) = 2$ 에서의 값을 이용하여 Q-응력을 결정하였다.

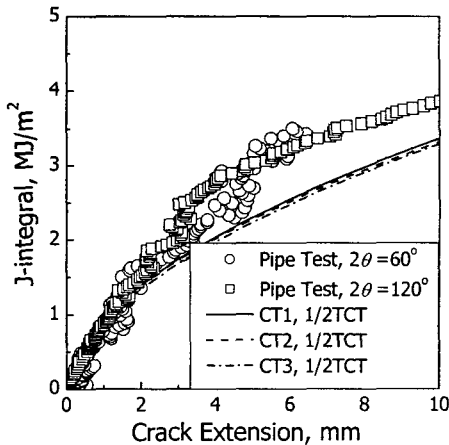


Fig. 9 Comparison of J-R curve for pipes and CT specimens

5.2 CT시험편 구속 상태 해석

파괴인성치 측정시험에 사용되는 높은 구속 상태의 표준 시험편인 CT 시험편의 구속 상태를 정량적으로 분석하기 위해서 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 10에는 구속 상태 해석을 위해 구성된 CT 시험편의 3차원 유한요소모델을 나타내었다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/2만을 모델링 하였다. 해석에는 20절점 등계수요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였으며, 전체 요소수는 3,364개이다. 유한요소해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾를 사용하였다.

균열부를 20개의 적분 경로와 32개의 레이어(layer)로 구성하였으며, 모든 경우에 소규모 변형을 해석을 적용하였다. 또한 두께 방향으로는 4개의 요소를 사용하였다. a/W가 0.5인 경우에 대

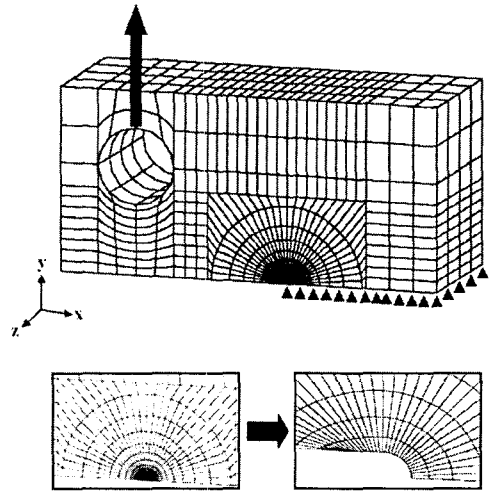


Fig. 10 Three-dimensional mesh and boundary conditions for a CT specimen

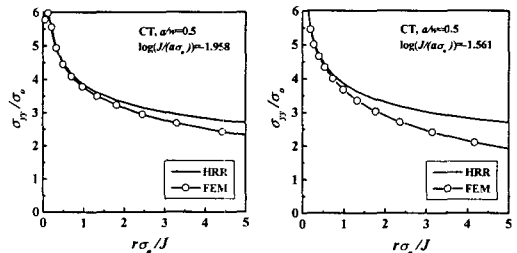


Fig. 11 J-Q stress field for a CT specimen (SA312 TP304)

하여 유한요소해석을 수행하였으며, Fig. 10에 나타난 바와 같이 변위 제어(displacement control)를 통해 하중을 작용시켰다. 해석 결과로부터 식 (3)을 이용하여 Q 값을 계산하였다.

Fig. 11에는 CT 시편에 대한 HRR 응력장과 유한요소해석으로 구한 실제 응력장을 비교하여 나타내었다. 작용 하중이 한계하중의 10%인 경우와 90%인 경우에 대해 각각 나타내었다. 작용하중이 한계하중 이내인 경우에는 모두 J - Q 해석이 가능하였으나, 작용 하중이 CT 시험편의 한계하중 이상이 되면 균열 선단으로부터의 거리가 증가할수록 실제 응력값이 급격히 감소하여 J - Q 해석이 불가능하였다. Fig. 11과 같이 J - Q 해석이 가능한 경우에는 식 (3)을 이용하여 Q 값을 계산하였다.

5.3 실배관 구속 상태 해석

기존 표준 시험편과 실배관의 구속 상태를 비교하기 위해 실배관 균열부의 구속 상태를 평가하였다. 실배관 파괴인성시험에 사용된 배관과 동일한 크기의 배관에 대한 해석을 수행하였으며, 배관의 외경과 두께는 각각 168.3mm(6.625in), 18.3mm(0.719in)이다. Fig. 12에는 실배관의 구속 상태 해석을 위해 구성한 대표적인 유한요소 모델을 나타내었으며, 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링 하였다. 전체 요소수는 3,568개이다. 균열 길이가 구속 상태에 미치는 영향을 평가하기 위해서 균열 길이가 전체 원주

의 6.25%($\theta/\pi=0.0625$), 12.5%($\theta/\pi=0.125$), 25%($\theta/\pi=0.25$), 그리고 40%($\theta/\pi=0.4$)인 4가지 경우에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 4점 굽힘법을 이용하여 굽힘 하중이 작용하도록 해석을 수행하였다. 재료물성치로는 표준 시험편과 동일한 SA312 TP304 스테인리스강의 값을 사용하였다.

Fig. 13에는 θ/π 가 0.125인 경우 실배관에 대한 HRR 응력장과 유한요소해석으로 구한 실제 응력장을 비교하여 나타내었다. 표준 시험편의 경우와 달리 실배관의 경우에는 작용 하중의 크기에 관계없이 모든 경우에 대해 J - Q 해석이 가능하였다. 따라서 전 하중 구간에 대해 식 (3)을 이용하여 Q 값을 계산하였다. 실배관의 경우에는 하중 증가에 따라 Q 값이 -0.5에서 -1.25로 변화하였다.

Fig. 14에는 CT 시험편과 실배관에 대한 Q 값을 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 깊은 균열을 가진 CT 시험편의 경우에는 실배관

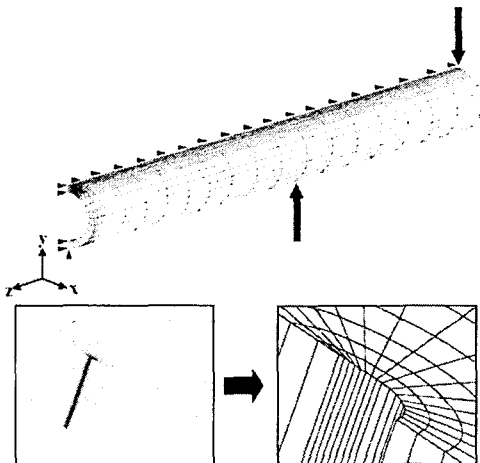


Fig. 12 Three-dimensional mesh and boundary conditions for a full-scale pipe

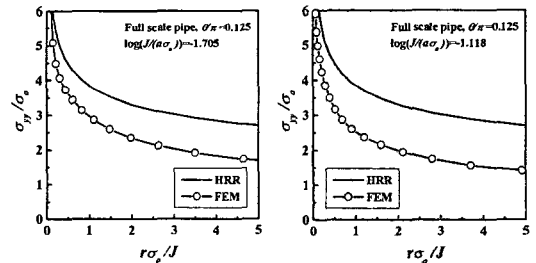


Fig. 13 J-Q stress field for a full-scale pipe

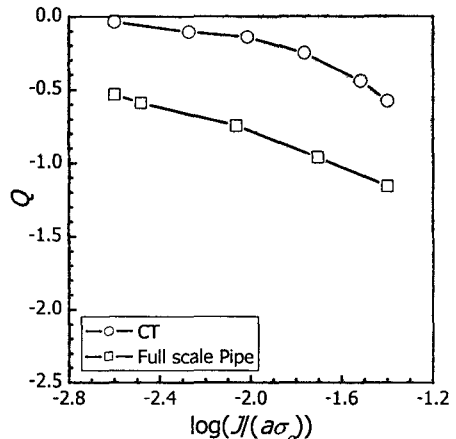


Fig. 14 Comparison of Q values between a CT specimen and a full-scale pipe

에 비해 높은 구속 상태를 보였다. 이는 높은 구속 상태의 표준 시편으로 구한 J -적분값이 실배관의 균열 선단의 응력장을 과대 예측할 수 있음을 의미한다. 따라서 표준 시험편의 결과를 이용한 파괴역학적 해석은 실배관의 파괴 거동을 매우 보수적으로 평가할 수 있음을 입증하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 실 배관 시험편에 대한 파괴 저항 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 배관의 파괴 저항 시험을 위하여 4점 굽힘 시험 방법 및 직류전위차법을 사용하였다. SA312 TP304L 스테인레스 강 배관에 대한 파괴 저항 시험을 수행하여 실 배관에 대한 J - R 선도를 구하였으며, 이를 통하여 본 연구에서 사용된 시험 방법 및 시험 장치의 유효성을 확인하였다.

(2) 배관과 표준 시험편에 대한 파괴저항 곡선을 비교해 본 결과, 표준 시험편의 J - R 곡선이 배관 시험편에 비해 낮게 나타났다. 따라서 표준 시험편을 통한 LBB 해석의 보수성을 입증하였으며 탄소성 파괴역학적인 해석의 추가적인 안전여유도를 확인할 수 있었다.

(3) 표준시험편과 실배관에 대하여 J - Q 해석법을 이용하여 구속 상태 해석을 수행하였으며, 표준 시험편을 이용한 파괴역학적인 해석은 실배관의 파괴 거동을 매우 보수적으로 평가할 수 있음을 입증하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터 및 두뇌한국 21 사업의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 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.
- (2) Fabi, R. J. and Peck, D. A., 1994, "Leak Before Break Piping Evaluation Diagram", *ASME Conference*, PVP-Vol. 283, pp. 111-115.
- (3) Yu, Y. J., Park, S. H., Sohn, G. H., Kim, Y. J. and Urko, W., 1995, "Application of LBB to a Nozzle-Pipe Interface", *LBB 95*, Lyon-France.
- (4) Joyce, J. A., Hackett, E. M. and Roe, C., 1993, "Effects of Crack Depth and Mode of Loading on the J-R Curve Behavior of a High-Strength Steel", *Constraint Effects in Fracture*, ASTM STP 1171, pp. 239-263.
- (5) Hong, J. H., Lee, B. S. and Oh, J. M., 1993, "Fracture Resistance (J-R) Characteristics of the Primary Piping Materials for Yonggwang 3/4 Nuclear Power Plants," *Proceedings of 1st KINS Workshop on the Integrity of Piping*, pp. 41-52.
- (6) Seok, C. S. and Kang, B. G., 1999, "Evaluation of Fracture Resistance Characteristics of SA508 Cl.1a Carbon Steel for Piping System," *Transactions of the KSME A*, Vol. 23, No. 7, pp. 1147-1154.
- (7) Wilkowski, G. M., et al., 1996, "The Secondary International Piping Integrity Research Group Program Final Report", *NUREG/CR-6452*.
- (8) Park, J. S. and Seok, C. S., 2004, A Study on the Measurement of the Crack Length Using the DCPD Method for the Fracture Test of the Pipe Specimen", *Transactions of the KSME A*, Vol. 28, No. 5, pp. 640-647.
- (9) ASTM International, 2001, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," *Annual Book of ASTM*, E1820-01.
- (10) 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.
- (11) Hibbitt Karlsson and Sorensen Inc., 1999, *ABAQUS version 5.8 User's manual*.