

# 설배관 파괴특성 평가에 관한 연구 (I)

박재실\*·석창성\*\*

## A Study on the Evaluation of the Pipe Fracture Characteristic (I)

Jae-Sil Park and Chang-Sung Seok

**Key Words** : Fracture Characteristic(파괴특성), Four-point Bending Test(4점굽힘시험), DCPD Method(직류전위차법), J-R Curve(파괴저항곡선), Leak-Before-Break(파단전누설)

### Abstract

In order to perform elastic-plastic fracture mechanical analyses, fracture resistance curves for concerned materials are required. 1T-CT specimen was used to obtain fracture resistance curves. But the fracture resistance curve by the 1T-CT specimen was very conservative to evaluate the integrity of the structure. And fracture resistance curve was affected by the specimen geometry and crack plane orientation. The objective of this paper is to be certain the conservativeness of the fracture resistance curve by the 1T-CT specimen and to provide the additional safety margin. For these, the fracture tests using the real pipe specimen and standard 1T-CT specimen test were performed. 4-point bending jig was manufactured for pipe test and direct current potential drop method was used to measure the crack extension and length for pipe test. From the pipe and the 1T-CT specimen test results, it was observed that the J-integral of the 1T-CT specimen test at the crack initiation point was very small compare to that of the pipe specimen test.

### 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 파단전누설 (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, 그리

고 관련 규제지침의 개발 등이 요구되고 있다.<sup>(1)</sup>

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 설계에 반영하면 추가적인 안전여유를 확보할 수 있으리라고 생각된다.<sup>(2,3)</sup>

균열 안정성 평가시 사용되는 파괴인성치의 경우, NUREG 1061, Vol. 3<sup>(1)</sup>에서는 LBB 해석을 위해 시편 두께가 배관의 두께보다 크거나 같고 시편의 잔여 길이가 충분히 큰 시편을 이용해서 파괴인성시험을 수행하도록 하고 있다. 그러나 배

\* 성균관대학교 기계공학과 대학원

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

TEL: (031)290-7446 FAX: (031)290-7482

관으로부터 큰 시편을 채취하는 것이 어렵기 때문에 IT-CT 표준 시험편을 이용해서 파괴인성치를 구한다. 그러나 기존의 표준 시험편은 실배관의 파괴 거동을 매우 보수적으로 평가하는 것으로 알려져 있으며 표준 시험편을 이용한 LBB 평가 결과도 매우 보수적이다.<sup>(4)</sup> 또한 시험편의 기하학적인 형상 및 가공 방향에 따라서도 변화하는 것으로 알려져 있다.<sup>(5,6)</sup> 따라서 앞서 언급한 바와 같이 배관 건전성 평가법의 타당성을 입증하고, 실배관의 거동을 정확하게 모사하여 추가적인 LBB 안전여유도를 확보하기 위해서는 실배관을 이용한 배관 파괴인성시험을 수행해야 한다.

국외에서 수행된 배관 시험은 막대한 비용과 시간으로 인해 제한된 경우에 대해서만 시험을 수행하거나 축소 배관을 이용한 시험을 수행하고 있으며<sup>(7)</sup>, 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 보수적인 기존의 표준 시험편을 이용한 시험 방법을 개선하여 실배관 균열부의 거동을 정확하게 탄소성 파괴역학적인 해석에 반영하기 위한 기초 자료를 마련하고자 한다. 이를 위해 배관 파괴저

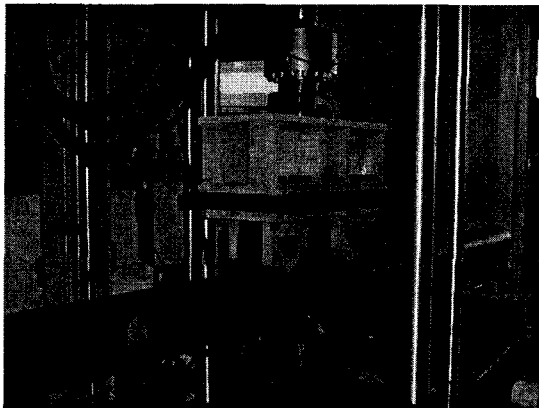


Fig. 1 Pipe testing system

항 시험을 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 4점 굽힘 시험을 위하여 별도의 지그를 제작하였다.

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 진전량의 측정을 위하여 직류전위차법을 사용하였다. 50암페어(A) 용량의 직류 전원 공급기(DC power supply)를 사용하여

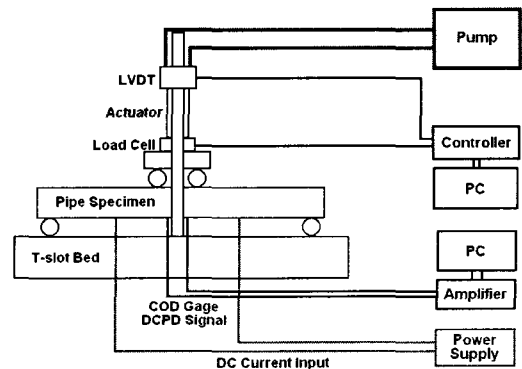


Fig. 2 Schematic diagram of a pipe testing system

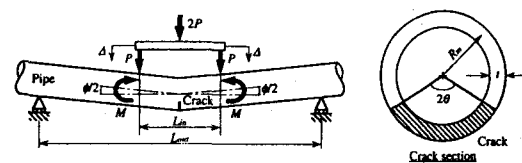


Fig. 3 Circumferentially through-wall-cracked pipe

Table 1 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, $L_{in}$
SM45C	152.5	11.0	50	65	2800	300

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 잡음을 제거한 후 선증폭기를 사용하여 5,000배 증폭하였다. 시험기의 제어, 데이터 수집, 처리 및 결과 해석에는 A/D 변환기와 32비트 PC를 사용하였다. Fig. 2은 본 연구에서 사용한 배관 파괴 저항 시험용 실험 장치의 개략도이다.

## 2.2 시험편 준비

본 연구에서 사용된 시험편은 SM45C 탄소강 배관이며, Table 1에 배관 시험편의 치수 및 피로 예비 균열 길이 등을 나타내었다. Fig. 3에 균열 면의 형상과 4점 굽힘 시험 방법에 대하여 개략적으로 나타내었다. 배관 시험편은 먼저 기계적 가공을 통하여 관통 균열을 삽입한 후 원주 방향으로 65° 까지 4점 굽힘 시험용 지그를 사용하여 피로 예비 균열을 가공하였다.

## 3. 균열 길이 측정

### 3.1 DCPD법을 이용한 균열 길이 측정

본 연구에서는 균열 길이 및 진전량의 측정을 위하여 직류전위차법을 사용하였다. 전류 공급부와 전압측정부의 위치는 Fig. 4에 나타내었다. 배관 시험의 경우 양쪽 균열 선단에서의 균열 진전량과 균열 성장 개시 시점이 서로 다르기 때문에 균열의 중앙부에서만 전위차를 측정할 경우에는 정확한 균열 진전 개시 시점을 측정하기가 어렵다. 따라서 Fig. 4에서와 같이 균열 선단 양 끝단에서 CMOD 값과 전위차를 동시에 측정하여 균열 양 끝단에서의 균열 성장 개시 시점을 측정하였다.

DCPD 시스템은 정전류를 공급하기 위한 50A 용량의 직류 전원 공급 장치와 측정된 전위차의

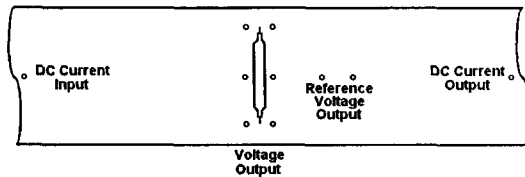


Fig. 4 Configuration of DCPD signal output location

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.

### 3.2 유한요소 모델 및 해석 방법

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.

먼저 실제 배관 파괴 저항 시험에 사용할 배관에 대한 3차원 유한 요소 해석 모델을 구성하였다. Fig. 5는 60° 원주 방향 관통 균열을 포함한 배관의 3차원 유한 요소 모델에서 균열 진전면을 따른 리가먼트 부의 요소 형상이다. Fig. 5와 같이 원주 방향의 전체 60° 균열로부터 140° 균열까지 균열의 중앙으로부터 5° 씩 14 단계의 균열 진전 단계를 설정하였다.

배관에서 실제 균열의 성장은 균열 진전면과 평행하게 진행되는 것이 아니라 타원형으로 성장할 것이므로 이를 유한 요소 해석에 적용하기 위하여 실제 배관의 균열 형상에 적합한 유한요소 모델을 구성하여야 한다. 따라서 Fig. 5와 같이 균열 진전면이 타원형의 형상이 되도록 유한 요소 모델을 구성하였다.

### 3.3 균열 길이 관계식

전기장 유한 요소 해석 결과를 종합하여 실제 배관 파괴인성 시험 시 균열 길이 측정을 위하여 사용할 무차원 전위차와 무차원 균열 길이와의

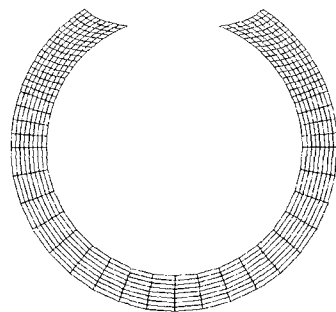


Fig. 5 Detailed mesh of ligament part,  $\theta=30^\circ$

관계식을 산출하였다. 정전류 공급부 위치에 따라서 측정되는 전위차의 값이 변화하게 되므로 최적의 위치를 찾아야 한다. 따라서 배관 양단 끝으로부터 균열쪽으로 정전류 공급부의 위치를 변화시켜가며 유한 요소 해석을 수행하여 최적 위치를 배관 양 끝단에서 816.18mm 안 쪽으로 정하였다.

유한 요소 해석 결과로부터 균열 중심선에서 측정된 전위차를 기준으로 무차원 전위차와 무차원 균열 길이에 대하여 Fig. 6과 같은 선도를 구하였으며 관계식은 다음과 같다.

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

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

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

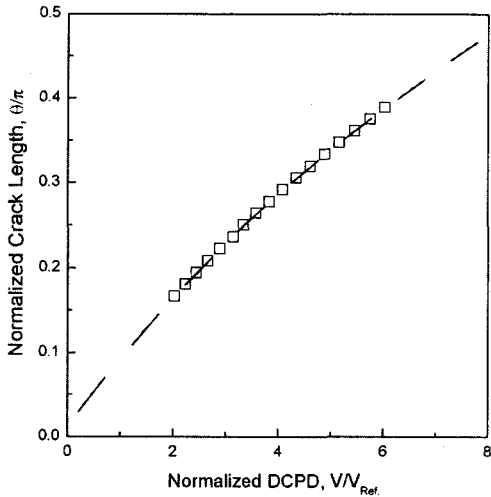


Fig. 6 Calibration curve for normalized crack length

#### 4. 배관 파괴 저항 시험

##### 4.1 시험 결과

실배관에 대한 파괴 특성을 평가하기 위하여 실배관 시험편에 대한 파괴 저항 시험을 수행하였으며 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

Fig. 7은 실배관 파괴 저항 시험에서 얻은 하중-하중선 변위 선도로부터 구한 모멘트와 배관의 회전각에 대한 그래프이다. 모멘트 값은 측정된 하중 값과 하중 부하점과 배관 지지점 사이의 거리로부터 산출하였고, 배관 회전각은 하중선 변위의 증가에 따른 배관 지지점과의 각 변화량으로부터 산출하였다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 최대 모멘트는 109.1 kN-m이고 시험 장비의 하중선 변위가 제한되어 있기 때문에 배관의 불안정 파괴 시까지의 회전각은 얻을 수가 없었다.

Fig. 8은 파단된 배관 시험편의 균열부 형상이며 Fig. 9는 실배관 파괴 저항 시험에서 얻은 하중-하중선 변위 선도와 직류전위차법으로 구한 균열 길이로부터 산출된 배관의 J-R 선도를 나타낸 것이다. 균열 진전량의 산출을 위해 먼저 무

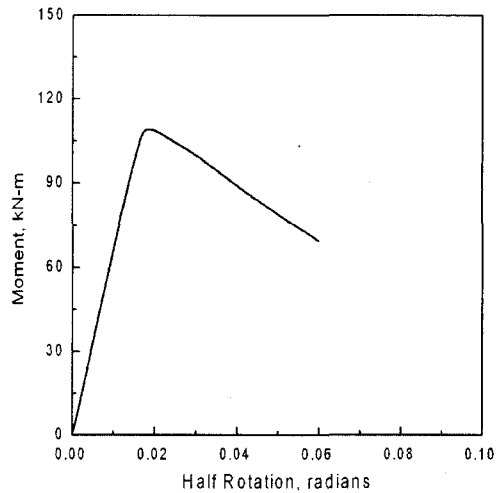


Fig. 7 Moment - half rotation angle curve for pipe fracture test

Table 2 Summary of pipe fracture test results

Moment at Crack Initiation, (kN-m)	Maximum Moment, (kN-m)	Yield Strength, (MPa)	Ultimate Strength, (MPa)	J-integral at Crack Initiation, (kJ/m <sup>2</sup> )	Loading Rate	Load Ratio
105.7	109.1	635.5	823.5	245.9	Quasi Static	Monotonic

차원 균열 길이와 무차원 전위차와의 관계식으로부터 균열 진전면에 투영시킨 균열 길이를 산출한 후에 Fig. 10에 나타난 바와 같이 초기 균열 길이로부터 균열 진전량을 계산하였다.

#### 4.2 균열 진전 시점 결정

표준 시험편에 대한 파괴 저항 시험에 대한 기준을 제시하고 있는 ASTM E813<sup>(8)</sup>과 ASTM E1737<sup>(9)</sup>에서는 균열 진전 시점에서의 J-적분 값인  $J_{IC}$ 를 구하도록 하고 있으며, 이러한  $J_{IC}$  값은 구조물의 건전성을 평가하는 기준을 설정하는데 기초 자료로 사용된다. 따라서 본 연구에서는 배관 파괴 저항 시험에서 얻은 CMOD 값으로부터 균열 개시 시점을 결정하고 균열 개시 시점의 J-적분 값을 산출하였다.

Fig. 11에 배관 균열 부의 중심선과 균열 선단

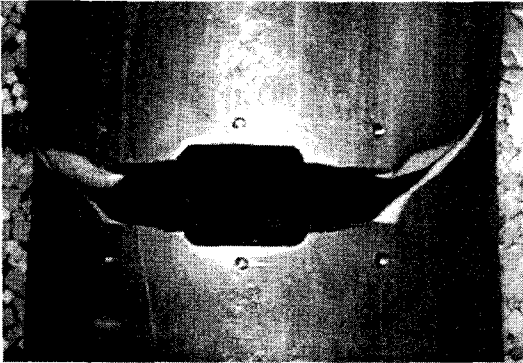


Fig. 8 Fracture appearance of pipe specimen

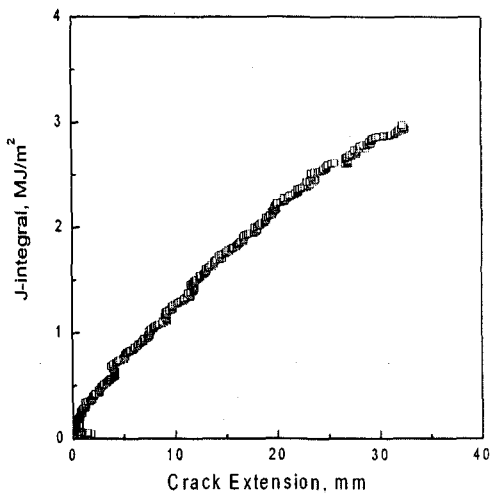


Fig. 9 J-R curve for pipe fracture test

에서 측정된 CMOD 값과 하중선 변위를 나타내었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 하중선 변위 증가에 대해 CMOD 값이 증가되는 기울기가 변화하는 점이 균열 성장 개시점이므로<sup>(10)</sup> 이 지점에서의 J-적분 값으로부터 균열 성장 개시점에서의 J-적분 값을 산출하여 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

#### 4.3 시험 결과 고찰

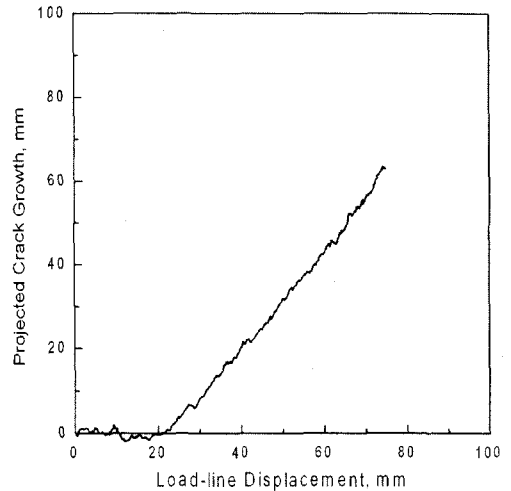


Fig. 10 Average projected crack growth versus load-line displacement

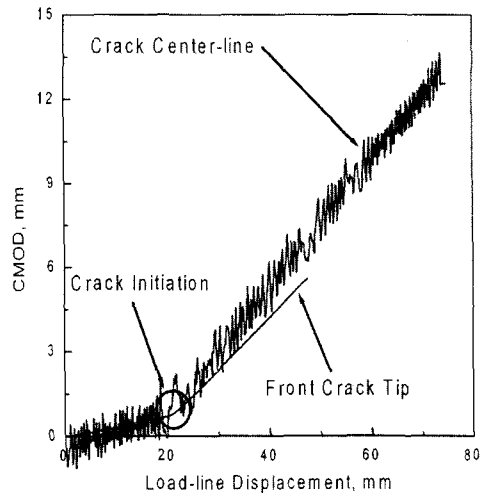


Fig. 11 Crack-mouth-opening displacement versus load-line displacement

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

따라서 본 연구에서는 SM45C 재료에 대한 표준 시험편 시험 결과와 배관에 대한 시험 결과를 비교하였다. 상온에서의 파괴 저항 시험 시에 불안정 균열 성장으로 인하여  $J_{IC}$  값을 얻을 수 없었으므로  $K_{IC}$  해석을 통하여 균열 진전 시점에서의 J-적분 값을 구하였다. 표준 시험편 시험 결과로부터 구한 K 값이  $K_{IC}$ 의 조건을 만족하지 못하였으므로  $K_Q$  값을 J-적분 값으로 환산하여 표준 시험편의 균열 진전 개시점에서의 J-적분 값을 산출하였다.

표준 시험편에서 구한  $K_Q$  값은  $36.8\text{MPa}\sqrt{m}$ 이며 이를 선형 탄성 재료에 대한 변환식을 사용하여 J-적분 값으로 환산한 결과, J-적분 값은  $6.8\text{kJ/m}^2$ 로 배관 시험에서 구한 균열 성장 개시점에서의 J-적분 값인  $245.9\text{kJ/m}^2$ 에 비해 작은 값으로 나타났다. 배관의 균열 성장 개시 시점의 J-적분 값이 표준 시험편의 J-적분 값의 36배 정도로 크게 나타났는데 이는 표준 시험편이 측면 홈 가공의 영향으로  $K_{IC}$  조건을 만족하지 못하여 K 값이 과소 평가되었기 때문으로 생각된다.

## 5. 결론

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

(1) 배관에 대한 파괴 저항 시험을 위하여 4점 굽힘 시험용 지그를 제작하였으며 이를 이용하여 배관 파괴 저항 시험을 수행하였다.

(2) 배관의 균열 길이 및 균열 진전량의 측정을 위하여 직류전위차법을 사용하였으며 무차원 저위차의 무차원 균열 길이로의 변환식을 산출하였다.

(3) 배관 파괴 저항 시험을 수행하여 배관에 대한 J-R 선도를 구하였으며 하중선 변위에 대한 CMOD 값이 증가되는 기울기 변화로부터 균열 진전 개시점을 측정하였다.

(4) 배관과 표준 시험편에 대한 균열 개시 시점에서의 J-적분 값 계산 결과, 표준 시험편의 J-적

분 값이 배관 시험편에 비해 작은 값으로 나타났으므로 표준 시험편을 통한 탄소성 파괴역학적 해석의 추가적인 안전여유도를 확인할 수 있었다.

## 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) R. J. Fabi and D. A. Peck, 1994, "Leak Before Break Piping Evaluation Diagram", *ASME Conference, PVP-Vol. 283*, pp. 111-115.
- (3) Y. J. Yu, S. H. Park, G. H. Sohn, Y. J. Kim and W. Urko, 1995, "Application of LBB to a Nozzle-Pipe Interface", *LBB 95*, Lyon-France.
- (4) J. A. Joyce, E. M. Hackett and C. Roe, 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) 홍준화, 이봉상, 오중명, 1993, "영광 3/4호기 1차계통 배관 소재의 파괴저항(J-R) 특성," 제1회 배관건전성 평가기술 Workshop 논문집, 한국원자력안전기술원, pp. 41~52.
- (6) 석창성, 강병구, 1999, "SA508 Cl.1a 탄소강 배관소재의 파괴저항특성 평가," 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제7호, pp. 1147~1154.
- (7) G. M. Wilkowski, et al., 1996, "The Secondary International Piping Integrity Research Group Program Final Report", *NUREG/CR-6452*.
- (8) "Standard Test Method for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness", *ASTM E813-89*, 1995, pp. 646~660.
- (9) "Standard Test method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness", *ASTM E1737-96*, pp. 67~90.
- (10) Ad. Bakker, 1985, "A DC Potential Drop Procedure for Crack Initiation and R-Curve Measurements During Ductile Fracture Tests", *Elastic-Plastic Fracture Test Method, ASTM STP 856*, pp. 394-410.