

Q의 실험적 측정법

김동학* · 이정현* · 강기주†

(2003년 5월 9일 접수, 2003년 7월 9일 심사완료)

An Experimental Method for Measuring Q

Dong-Hak Kim, Jeong-Hyun Lee and Ki-Ju Kang

Key Words : J-Q Theory(J-Q 이론), Side Necking(함몰), CT Specimen(CT 시험편), Finite Element Method(유한요소해석)

Abstract

An experimental method to measure Q-parameter in-situ is described. The basic idea comes from the fact that the side necking near a crack tip indicates the loss of stress triaxiality, which can be scaled by Q. From the out-of-plane displacement and the in-plane strain near the surface of side necking, stress field averaged through the thickness is calculated and then Q is determined from the difference between the stress field and the HRR field corresponding to the identical J-integral. To prove the validity, three-dimensional finite element analysis has been performed for a CT configuration with side-groove. Q-value which was calculated directly from the near-tip stress field is compared with that determined by simulating the experimental procedure according to the proposed method, that is, the Q-value determined from the lateral displacement and the in-plane strain. In addition, the effect of location where the displacement and strain are measured is explored.

1. 서론

연성재료의 파괴 거동을 표현하는 재료물성으로는 J_K 와 J-R 곡선이 있으며, 그 측정방법이 ASTM E1737-96 에 규정되어 있다. 이것의 이론적 근거인 탄소성 파괴역학은, 균열선단의 소성영역의 크기가 시편두께 등 다른 크기보다 훨씬 작아 주변의 탄성 영역에 충분히 구속된 상태를 뜻하는 '소규모 항복조건'을 만족하는 경우에만 유효하다. 소규모 항복조건을 만족하지 못하는 경우 균열선단의 응력분포는 J-적분 하나로 지배되는 소위 'HRR 응력장' 대신에 J-적분과 함께 선단근처 소성영역의 구속정도를 나타내는 제 2의 매개변수인 T-응력, A_2 또는 Q를 사용하여 묘사될 수 있다.

제 2 매개 변수들 중 실험적인 측정방법이 보고된 것은 A_2 가 유일하다.⁽¹⁾ 즉, Chao 와 Lam⁽¹⁾은

균열선단 근처 변위인 δ_5 로부터 A_2 를 결정하는 방법을 제안한 바 있다. 본 연구진은 이 방법을 확장하여 디지털 카메라로 시편 측면을 연속적으로 촬영하여 얻어진 화상들로부터 균열 개시뿐 아니라 진전 중에도 A_2 를 측정할 바 있다.⁽²⁾ 그러나 A_2 의 이론은 평면 변형을 상대와 같은 2 차원 응력 하에서만 유효하여, 대변형을 동반하는 연성 파괴 시편에서와 같이 변형 및 응력의 시편두께 방향 변동이 큰 경우에는 적용할 수 없다. 반면에 Q는 비록 이론적인 근거가 빈약하지만 위에서 언급한 3 차원 응력, 변형 상태에 적용할 수 있는 유일한 것이다. 문제는 아직까지 Q 값을 구하기 위한 실험적인 방법이 없어 3 차원 탄소성 유한 요소 해석에만 의존하기 때문에 시간과 비용이 많이 들고 그 정확성도 신뢰할 수 없다는 것이다.

Yuan and Brocks⁽³⁾는 Q 값이 균열선단의 정수압적 응력과 비례함을 입증하였다. Heerens et al.⁽⁴⁾ 과 Pardeon et al.⁽⁵⁾ 은 시편 측면 균열 선단 근처에서의 함몰(Side-Necking)이 시험편의 구속정도를 나타내는 변수인 정수압적 응력과 일정한 관계가 있음을 보였다. 본 연구진은 이 두 가지 사실로부터

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : kjkang@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1668 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 대학원 기계공학과

재료파괴 시 시편 측면 균열선단부의 함몰량으로부터 Q를 구할 수 있을 것으로 기대하였다. 먼저, 측정된 함몰부위의 면의 변위와 면내 변형율로부터 Q를 구하는 간단한 이론을 소개하고 이 이론의 타당성을 3차원 유한요소해석으로 검증하였다. 이와 함께 실험으로 함몰부의 면의 변위와 면내 변형율을 측정하는 구체적인 방법을 제시하여 이렇게 측정된 결과를 유한요소해석에 의한 것과 비교하였다. 본 연구에서 제안하는 측정방법은, 파괴물성 J_{IC} 와 J-R 곡선을 측정하는 통상적인 파괴 실험방법과 병행하여 사용될 수 있다.

2. 기초 아이디어

O'Dowd and Shih^(6,7)는 소규모 항복조건을 만족하지 않는 경우 균열선단 응력장은 다음과 같이 표현할 수 있음을 보였다.

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_{HRR} + Q\sigma_0\delta_{ij} \text{ for } 1 \leq \frac{r}{(J/\sigma_0)} \leq 5, \theta = 0 \tag{1}$$

여기서 $(\sigma_{ij})_{HRR}$ 는 HRR 응력장을 나타내며 σ_0 는 항복응력을 나타낸다. 제 2 매개변수인 Q는 통상 다음 식으로 결정된다.

$$Q = \frac{\sigma_{00} - (\sigma_{00})_{HRR}}{\sigma_0} \text{ at } \frac{r}{(J/\sigma_0)} = 2, \theta = 0 \tag{2}$$

Fig. 1의 3차원 시편과 같이 두께 방향으로 응력 변동이 존재하는 경우, Q는 두께 평균값으로 정의될 수 있다. 본 연구에서는 식 (2)를 수정하여 3차원 시편의 Q를 다음식으로 결정하였다.

$$Q = \frac{(\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yy}) - (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})_{HRR \text{ for } \bar{J}}}{2\sigma_0} \tag{3}$$

for $|\theta| \leq \frac{\pi}{2}, 1 \leq \frac{r}{J/\sigma_0} \leq 5$

여기서 ‘ $\bar{\cdot}$ ’는 두께 평균을 의미한다. 만일 파괴 실험에서 J 적분과 함께 $\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yy}$ 를 동시에 측정할 수 있다면 식 (3)에 의하여 Q를 결정할 수 있을 것이다. 본 연구의 주안점은 ‘어떻게 $\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yy}$ 를 결정할 것인가’이다.

변형 소성 이론(deformation theory of plasticity)에 의하면 탄소성 재료에 대한 응력 변형율 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \frac{1}{E_p} \left[\sigma_{xx} - \frac{1}{2}(\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \right]$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] + \frac{1}{E_p} \left[\sigma_{yy} - \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) \right]$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \frac{1}{E_p} \left[\sigma_{zz} - \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \right]$$

(4)

여기서 E는 Young 윌, ν 는 푸아송 비, E_p 는 소성계수로서

$$E_p = \frac{\sigma_{eq}}{\epsilon_{eq}^p}$$

와 같이 등가 응력 σ_{eq} 와 등가 소성 변형률 ϵ_{eq}^p 의 함수로 정의 된다. 식 (4)로부터 면내 응력의 두께 평균 $\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yy}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yy} = \frac{1}{\alpha - \frac{2\beta^2}{\gamma}} \left[(\bar{\epsilon}_{xx} + \bar{\epsilon}_{yy}) + \frac{2\beta}{\gamma} \bar{\epsilon}_{zz} \right] \tag{5}$$

여기서

$$\alpha = \frac{1-\nu}{E} + \frac{1}{2E_p}, \beta = \frac{\nu}{E} + \frac{1}{2E_p}, \gamma = \frac{1}{E} + \frac{1}{E_p}$$

이다. 식 (5)로부터 $\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yy}$ 를 구하기 위해서는 $\bar{\epsilon}_{xx} + \bar{\epsilon}_{yy}$, $\bar{\epsilon}_{zz}$ 와 함께 \bar{E}_p 즉, $\bar{\sigma}_{eq}/\bar{\epsilon}_{eq}^p$ 를 결정하여야 한다. 먼저 Fig. 1의 가상의 원통형 시편에 대하여 표면의 함몰량 u_z 를 측정한다면 두께평균 면의 변형율 $\bar{\epsilon}_{zz}$ 는

$$\bar{\epsilon}_{zz} = \frac{u_z}{B} \tag{6}$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 B는 시험편의 두께를 나타낸다. $\bar{\epsilon}_{xx} + \bar{\epsilon}_{yy}$ 는 소성 부피 변형률, $(\bar{\epsilon}_{xx} + \bar{\epsilon}_{yy} + \bar{\epsilon}_{zz})_{pl} = 0$ 이라는 것과 변형률을 탄성변형률과 소성변형률로 나눌 수 있다는 것을 감안하여

$$\bar{\epsilon}_{xx} + \bar{\epsilon}_{yy} = (\bar{\epsilon}_{xx} + \bar{\epsilon}_{yy} + \bar{\epsilon}_{zz})_{elastic} - \bar{\epsilon}_{zz} \tag{7}$$

와 같이 표현된다. 식 (7)로부터 탄성 부피 변화율

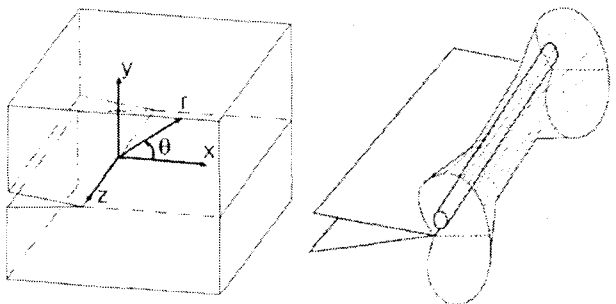


Fig. 1 Three-dimensional crack tip

$(\tilde{\epsilon}_{xx} + \tilde{\epsilon}_{yy} + \tilde{\epsilon}_{zz})_{elastic}$ 을 알고 있다면 $\tilde{\epsilon}_{xx} + \tilde{\epsilon}_{yy}$ 을 간단히 계산할 수 있다.

마지막으로 소성계수 \tilde{E}_p 를 구하기 위해서는 등가 소성 변형률 $\tilde{\epsilon}_{eq}^p$ 과 등가 응력 $\tilde{\sigma}_{eq}$ 을 구해야 한다. 이를 위하여 Fig. 1 안의 가상 원통형 시편의 표면 변형률과 두께 평균 변형률 성분 사이에 다음과 같은 관계가 성립한다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} \tilde{\epsilon}_{xx} &= (\tilde{\epsilon}_{xx} + \tilde{\epsilon}_{yy}) \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}} \Big|_{surface} \\ \tilde{\epsilon}_{yy} &= (\tilde{\epsilon}_{xx} + \tilde{\epsilon}_{yy}) \frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}} \Big|_{surface} \\ \tilde{\epsilon}_{xy} &= \epsilon_{xy} \Big|_{surface} \end{aligned} \quad (8)$$

또한 시험편의 x-y 평면을 중심으로 z 축에 대해서 대칭이므로 $\tilde{\epsilon}_{xz} = \tilde{\epsilon}_{zx} = 0$ 이다. 즉, 합물부의 면외 변위 u_z 와 함께 표면 변형률 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$ 를 측정하여 식 (6)~(8)로부터 가상 시험편의 모든 변형률 성분의 두께 평균을 계산한다. 이 결과를 식 (9)와 같이 등가 변형률 $\tilde{\epsilon}_{eq}$ 을 구하고 다시 Ramberg Osgood 식에 대입하여 등가 응력 $\tilde{\sigma}_{eq}$ 과 소성 등가 변형률 $\tilde{\epsilon}_{eq}^p$ 를 구하여 소성 계수 \tilde{E}_p 를 결정한다.

$$\tilde{\epsilon}_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\tilde{\epsilon}_{xx} - \tilde{\epsilon}_{yy})^2 + (\tilde{\epsilon}_{yy} - \tilde{\epsilon}_{zz})^2 + (\tilde{\epsilon}_{zz} - \tilde{\epsilon}_{xx})^2 + 6(\tilde{\epsilon}_{xy}^2 + \tilde{\epsilon}_{yz}^2 + \tilde{\epsilon}_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \frac{\tilde{\sigma}_{eq}}{E} + \alpha \left(\frac{\tilde{\sigma}_{eq}}{\sigma_0} \right)^{n-1} \frac{\tilde{\sigma}_{eq}}{E} = \frac{\tilde{\sigma}_{eq}}{E} + \tilde{\epsilon}_{eq}^p \quad (10)$$

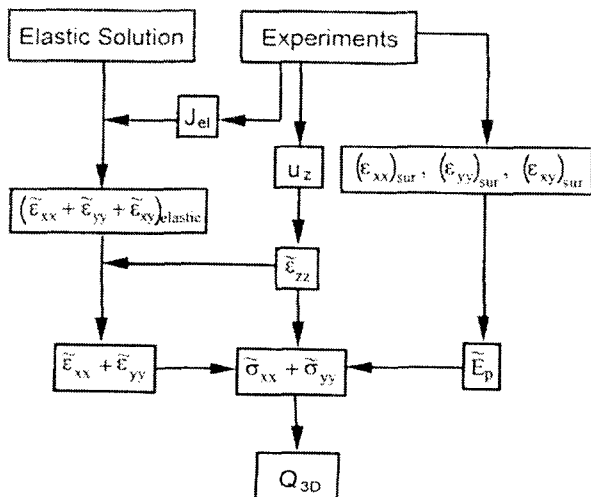


Fig. 2 The schematic diagram of measurement of Q

Q 를 구하는 과정을 흐름도로 나타내면 Fig. 2 와 같다. 합물부에서의 면외 변위와 표면 변형률을 실험으로부터 측정하고 별도로 시험편 탄성 변형할 때의 부피 변화율을 구하여 시험편 두께 평균 변형률 성분과 등가 응력, 변형률을 결정한다. 그 다음 두께 평균 면외 응력을 구하여 최종적으로 Q 를 결정한다. 이 아이디어의 타당성은 소규모 항복조건을 만족하지 못하는 시험편에 대한 변형소성 이론의 적용가능성과 식 (8)의 가정의 합리성 여부에 달려있다. 이를 검증하기 위해서 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

3. 아이디어의 검증 - 유한요소해석

3.1 모델링

연성 금속 CT 시험편의 파괴 실험 과정을 유한요소해석으로 모사하였다. 시험편의 형상 및 크기는 ASTM 표준 E1737-96 의 규정을 준수하였다. 시험편의 두께 $B=25.4\text{mm}$, 폭 $W=50.8\text{mm}$ 이며 시험편의 양면에 각각 두께의 10%깊이(합계 20%)만큼 홈(side groove)이 있다. 시험편 재질은 원자력발전소의 주증기 배관계로 사용되는 저합금페라이트강인 SA106 Grade C 이다. 이 재료의 파괴인성/항복응력 비 J_I/σ_0 는 0.81875mm 로서 파괴시 소규모항복조건인

$$B, b_0 \geq 200 \frac{J_I}{\sigma_0}$$

을 전혀 만족시키지 못하는 전형적인 연성금속이다.⁽⁸⁾

재료의 물성은 Table 1 에 나열되어있다. 항복점 이후의 탄소성 변형은 다음과 같은 Ramberg Osgood 관계식에 의하여 표현하였고, 균열선단 근처의 대변형을 정확히 모사하기 위해서 증분소성 이론(incremental theory of plasticity)를 적용하였다.

$$E\epsilon = \sigma + \alpha \left(\frac{|\sigma|}{\sigma_0} \right)^{n-1} \sigma$$

시험편의 대칭성에 의하여 전체의 1/4 단을 모델링하였으며 Fig. 3 은 이러한 유한요소 모델을 보

Table 1 Mechanical properties of SA106 Grade C ferritic steel⁽⁹⁾

E (GPa)	σ_0 (MPa)	ν	α	n	J_I (KJ/m ²)
219	320	0.29	6.68	3.80	260 ± 30

여준다. 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQ-US 를 사용하여 해석을 수행하였으며 사용된 요소는 20-node quadratic brick, reduced integration 요소 (C3D20R)로 요소 수는 3990 개, 절점의 수는 19141 개이며 두께에 대하여 10 개의 요소로 이루어져 있다.

3.2 해석결과

이 시험편에서 J-Q 이론이 타당한 것인지를 확인하기 위하여 균열선단으로부터의 위치(r, θ)에 따라 두께 평균 Q가 어떻게 변하는지 조사하였다. Fig. 4는 유한요소해석을 통하여 직접 계산된 두께 평균 응력 $\bar{\sigma}_{xx} + \bar{\sigma}_{yy}$ 를 이용하여 구한 Q_{direct} 를 보여준다. 동일 재료의 실제 파괴 인성은 $J_c \approx 260 \pm 30 \text{ KJ/m}^2$ 이지만 보다 높은 하중까지도 측정방법을 적용할 수 있는지를 조사하기 위해 $J = 702 \text{ KJ/m}^2$ 을 최대값으로 하여 하중이 $\tilde{J}/\sigma_0 B = .034 \sim 0.086$ 범위에서 Q_{direct} 를 식 (3)에 의하여 계산하였다. 그림 내의 r 변화범위 $0.07 < r/B < 0.16$ 은 위와 같은 \tilde{J} 변화 시 J-Q 이론의 적용 범위인 $1 \leq \frac{r}{J/\sigma_0} \leq 5$ 내에 포함된다. 제안

된 방법에서 Q를 측정하기 위하여 합물부의 면외 변위 u_z 와 함께 표면 변형률 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$ 를 측정하여야 한다. $\theta = 0^\circ$ 와 15° 의 경우 $r < 5.473 \text{ mm}$ 인 범위에서 측정점이 시험편의 측면에 존재하는 홈안쪽에 위치하여 측정할 수 없다. 시험편의 측면에 홈이 있는 영역 ($\theta = 0^\circ, 15^\circ$)을 제외하고, $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 등 5 가지로 변함에 따라 Q_{direct} 의 변화양상도 함께 도시되었다. 또한 하중의 영향을 살펴보기 위해 3 가지 크기의 \tilde{J} 에 대하여 각각 도시되었다(Fig. 4(a)~4(c)). 먼저 θ 의 r에 대한 변동이 상대적으로 크다. 이것은 측면

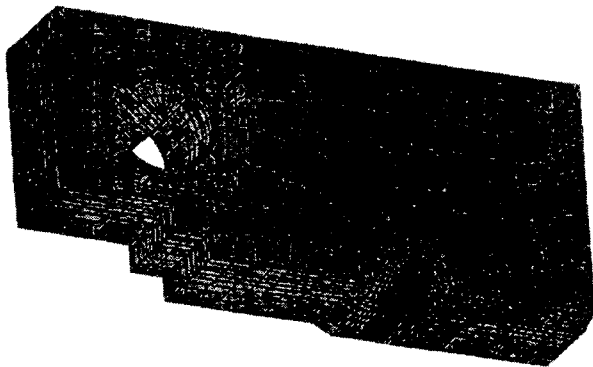


Fig. 3 Finite element mesh

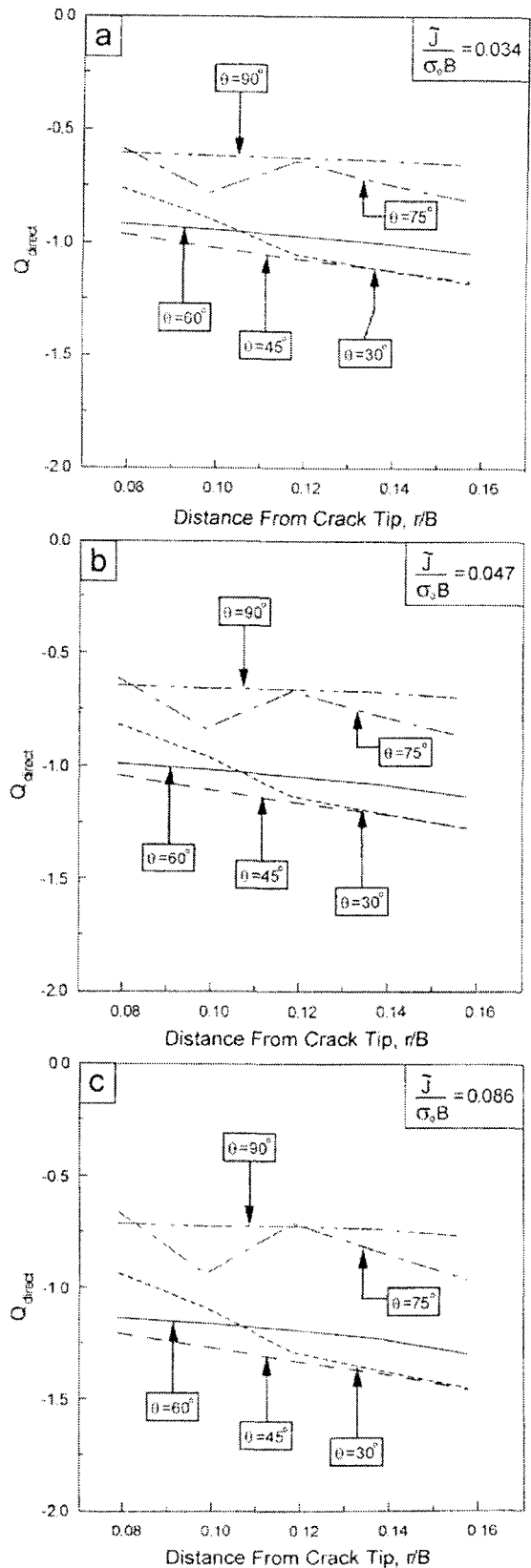


Fig. 4 Finite element results for Q_{direct} with crack distance and load

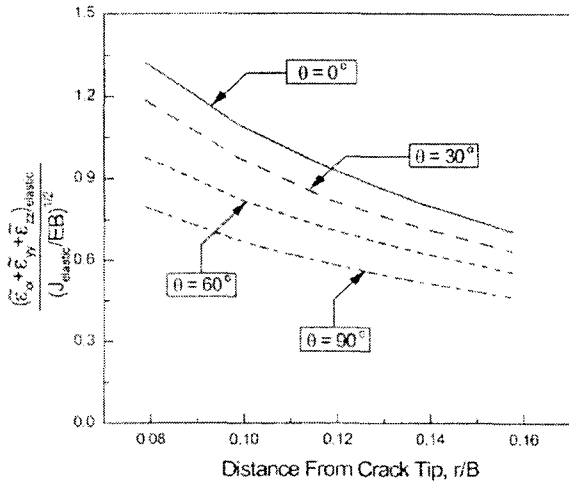


Fig. 5 Elastic volumetric strain

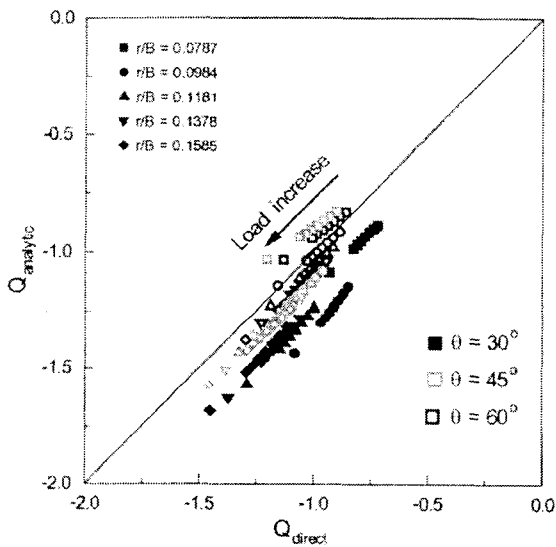


Fig. 6 Comparison of Q_{direct} and $Q_{analytic}$

홈(side groove)에 의한 것으로 보인다. 또한 $\theta = 75^\circ, 90^\circ$ 에서는 다른 θ 와는 다르게 Q의 크기가 작다. 이것은 J-Q 이론 자체가 $|\theta| \leq \frac{\pi}{2}$ 에서만 유효하기 때문이다. 그 밖의 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 에 대해서는 Q가 거의 일치하며 r에 대한 변동도 작아서 본 시험편이 J-Q 이론에 충실히 따르고 있음을 알 수 있다. 이후에 Q는 측면홈이 없는 영역 중에서 $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 인 범위에서 계산 또는 측정되었다.

Q를 식 (5)~(10)을 통하여 계산하기 위해서는 시험편 측면 함몰부의 변형을 측정해야 할 뿐 아니라, 탄성 부피 변형율 ($\tilde{\epsilon}_{xx} + \tilde{\epsilon}_{yy} + \tilde{\epsilon}_{zz}$)_{elastic}을 알아야 한다. Fig. 5는 탄성 부피 변형율의 θ 및 r에 따른 변화양상을 나타내고 있다. 재료가 탄성 변형일때

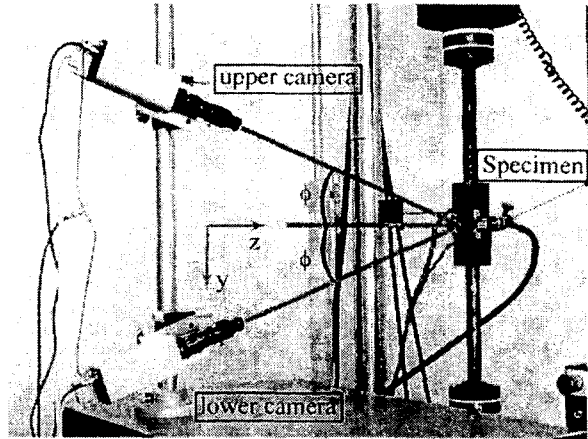


Fig. 7 The experimental set-up

는 응력 및 변형율은 단순히 하중에 비례하고, 그림에서 탄성부피 변형율을 하중과 재료의 영향을 포함하는 $\sqrt{J_{elastic}}/EB$ 로 무차원화(normalize)하여 나타내었으므로 이 결과는 같은 형태를 가진 모든 CT 시험편에 대하여 적용할 수 있다.

Fig. 6은 유한요소해석에서 응력 $\tilde{\sigma}_{xx} + \tilde{\sigma}_{yy}$ 을 직접 계산하여 결정한 Q_{direct} 와 함몰부 표면의 변형으로부터 식 (5)~(10)에 의하여 결정한 $Q_{analytic}$ 을 비교하여 보여주고 있다. 하중 크기의 영향과 함몰 변형 측정점의 위치 r, θ 의 영향을 함께 묘사한 것이다. $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ 이고, $0.0787 < r/B < 0.1585$, $\tilde{J}/\sigma_0 B = 0.034 \sim 0.087$ 범위에서 $Q_{analytic}$ 은 Q_{direct} 와 최대오차 $\pm 12\%$ 범위에서 잘 일치한다. 반면에 $\theta = 30^\circ$ 의 경우 최대 28%의 오차를 보이므로 시험편의 측면에 홈이 없는 영역 중에서 $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ 인 영역에서 Q를 측정하는 것이 타당하다.

4. 실험결과

통상적인 파괴실험과 병행하여 균열진전 시 측면 함몰량을 측정하기 위해서 두 대의 디지털 CCD 카메라를 이용한 SDP(Stereoscopic Digital Photography)가 사용되었다. Fig. 7은 사용된 카메라 장치를 보여주고 있다. 시험편으로부터 각각 $\pm\phi$ ($=\pm 20^\circ$)만큼 기울어진 두 대의 카메라로 파괴실험과정의 시험편 측면을 촬영하고, 각 화상으로부터 변위 A_x, A_y 를 측정하여, 시험편 측면부의 면내 변위 u_x, u_y 와 면외 변위 u_z 를 측정한다. 다음은 화상 변위와 실제 물체의 변위사이의 관계식이다.

$$A_x(\phi) = A_x(-\phi) = \frac{u_x}{M}$$

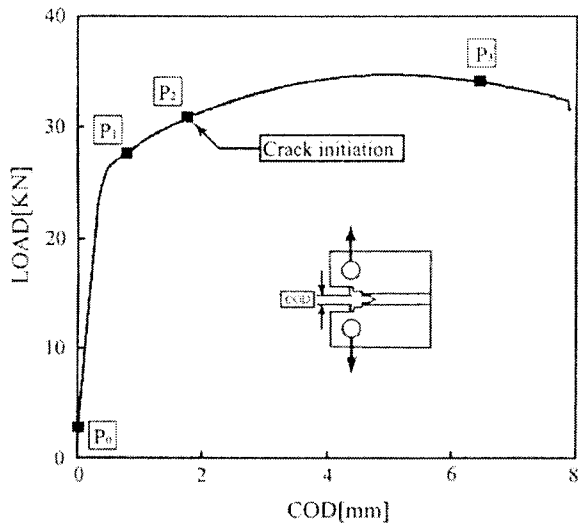
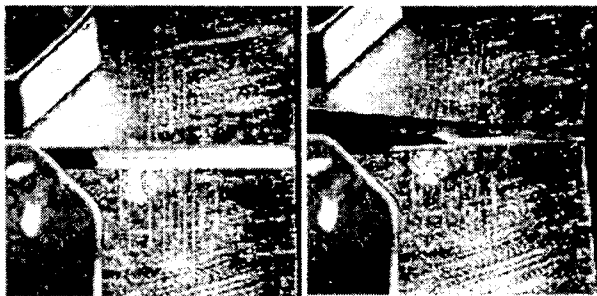


Fig. 8 Load- COD curve



(a) P₀ from upper camera (c) P₃ from upper camera



(b) P₀ from lower camera (d) P₃ from lower camera

Fig. 9 The out-of-plane displacement for P₁, P₂ and P₃

$$A_y(\phi) - A_y(-\phi) = -\frac{2u_y \sin \phi}{M} \tag{11}$$

$$A_y(\phi) + A_y(-\phi) = \frac{2u_x \cos \phi}{M}$$

여기서 M 은 카메라 렌즈와 시편과의 거리에 의해 결정되는 배율이다. 디지털 화상에서의 변위 A_x, A_y 를 높은 해상도로 측정하기 위해서 디지털 화상 관련법(DIC; Digital Image Correlation)을 사용하였다. 상용 DIC 소프트웨어인 VIC-2D 를 사용하여 최고 해상도 1/100 픽셀을 얻을 수 있다. 변위

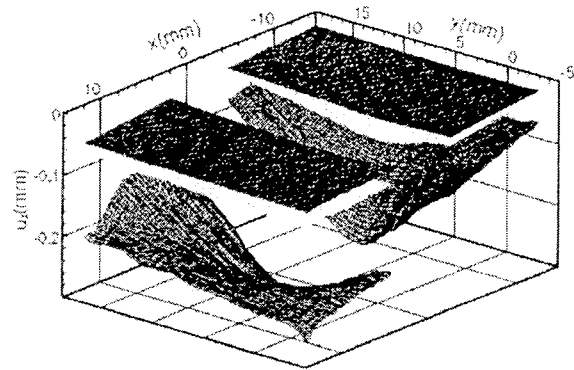


Fig. 10 The photography of specimen

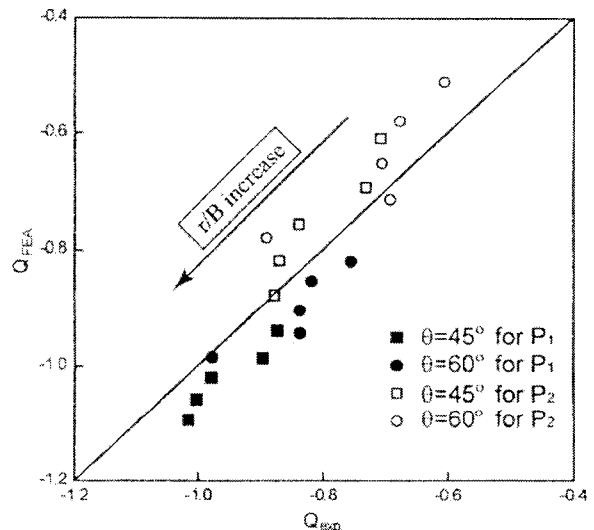


Fig. 11 Difference of Q_{exp} and Q_{FEA}

측정 방법에 대한 자세한 사항은 Lee et al.⁽¹⁰⁾에 기술되어 있다.

유한요소해석에서와 동일한 재료인 원자력 발전소 주증기 배관재 SA106 Grade C 를 ASTM 표준 E1737-96 에 의거하여 파괴실험하였다. Kim et al.⁽¹¹⁾에 실험방법에 대한 보다 자세한 기술이 있다. Fig.8 은 시험에서 얻어진 하중-변위(COD) 곡선이다. Fig. 9 의 (a)-(d)는 각각 Fig. 8 에서 하중-변위 곡선상의 P₀, P₃ 점에서 두 대의 카메라 (θ = ±20°) 로 촬영된 시편 측면 사진이다. P₁, P₂, P₃ 점에 대하여 이와 같이 촬영된 디지털 화상을 VIC-2D 프로그램으로 해석하고 식 (11)에 대입하여 변위 u_x, u_y, u_z 를 측정하였다. Fig. 10 은 P₁, P₂, P₃ 점에서 측정된 면의 변위 u_z 를 보여주고 있다. 균열선단에 가까운 지점에서 가장 큰 함몰이 나타남을 알 수 있다. Fig. 10 에서 보여주는 면의 변위 u_z 는 상하 그림사이의 치우침 등에 의하여 발생하는 강제운동을 포함하고 있으므로 이러한 강제운동을 가감

해 주어야 한다. 균열선단에서 멀리 떨어진 위치에서의 면외변위 u_z 에는 재료의 강제운동만이 존재하므로 이러한 위치에서의 면외 변위 u_z 를 이용하여 균열선단부분의 면외 변위 u_z 에서 강제운동을 가감시켜주었다. 측정된 면내 변위 u_x, u_y 로부터 7 점 최소자승법(Seven point least square method)를 이용하여 면내 변형율을 구하여 면외 변위 u_z , 탄성 부피 변형율 $(\tilde{\epsilon}_{xx} + \tilde{\epsilon}_{yy} + \tilde{\epsilon}_{zz})_{elastic}$ 과 함께 식 (5)~(10)에 대입함으로써 Q 를 결정하였다. Fig. 11 은 하중 P_1, P_2 에서 $\theta = 45^\circ, 60^\circ, 0.118 < r/B < 0.197$ 에 대하여 실험에서 구한 Q, Q_{exp} 와 유한요소해석을 통하여 구한 Q, Q_{FEA} 를 비교하여 보여주고 있다. 최대 $\pm 18.5\%$ 의 오차범위에서 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

대규모 항복조건 하에서의 파괴거동을 표현하기 위한 Q 값을 실험을 통하여 측정할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 연성금속인 SA 106 Grade C 에 대한 20%의 측면홈이 있는 CT 시험편의 3 차원 유한요소해석을 수행하여 검증하였고 Q 를 측정하기 위한 위치에 대한 영향을 알아보았다. 또한 실험으로부터 측정된 Q 값과 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 측면홈이 있는 연성금속의 CT 시험편에 대한 J-Q 이론의 적용이 타당하다.
- (2) 측정점의 위치가 측면홈 바깥쪽에 있어야 하며 그 중에서도 $\theta \leq 60^\circ$ 에서의 Q 값을 적용하는 것이 타당하다.
- (3) 유한요소해석을 통하여, 제안된 방법에 의하여 Q 를 계산하는 것이 가능하며 $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ 에서 시험편 두께평균응력으로부터 결정된 Q 값과 최대 $\pm 12\%$ 의 오차범위에서 잘 일치함을 알 수 있었다.
- (4) 파괴물성, J_{IC} 와 J-R 곡선을 측정하는 통상적인 파괴 실험과 병행하여 SDP 법을 적용하여 하중의 증가나 균열진전에 따른 시험편 측면의 함몰량을 성공적으로 측정하였다.
- (5) 실험적으로 측정된 함몰량으로부터 Q 를 계산한 결과, $\theta = 45^\circ, 60^\circ, 0.118 < r/B < 0.197$ 에서 유한요소해석을 통하여 계산된 Q 값과 최대 $\pm 18.5\%$ 의 오차범위에서 일치한다.

후 기

본 연구는 2002 년 전남대학교 BK 사업단 연구

비 지원(BK21 2002)과 2002 년 과학기술부의 원자력 기초연구 사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Chao, Y. J. and Lam, P. S., 1998, "On the Use of Constraint Parameter A_2 Determined from δ_5 Technique in Predicting Fracture Event," *Fatigue, Fracture, and Residual Stress ASME*, pp. 197~205.
- (2) Kim, H.J. Kim, D.H., Yang, K.J. and Kang K.J., 2003, "Variation of A_2 with Crack Propagation in a Ductile Metal; Experimental Evaluation," *Transaction of the KSME*, Vol. 27, pp. 119~125.
- (3) Yuan H. and Broocks, W., 1998, "Quantification of Constraint Effects in Elastic-Plastic Crack Front Fields," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 46, pp. 219~241.
- (4) Heerens, J., Hellmann, D. and Zerbst, U., 1996, "Probendicken- und Ligamenteinschnürung, zwei Größen zur Erfassung der Constraintabhängigkeit von R-Kurven," *Proceedings for 28. Vortragsveranstaltung, des DVM-Arbeitskrieses Bruchvorgänge*, ed. W. Broocks, pp.389~400. Deutscher Verband für Material Prüfung, Feb. 1996 in Bermen.
- (5) Pardoen, T., Marchal, Y. and Delannay, F., 1999, "Thickness Dependence of Cracking Resistance in Thin Aluminium Plates," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 47, pp. 2093~2123.
- (6) O'Dowd, N.P and Shih, C.F., 1991, "Family of Crack-Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-I. Structure of Field," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 39, pp. 989~1015.
- (7) O'Dowd, N.P and Shih, C.F., 1992, "Family of Crack-Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-II. Fracture Application," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 40, pp. 939~963.
- (8) Kang, Ki-Ju, Kim, Si-Young, Kim, Heon-Joong and Jeung Dae-Yeul, 2003, "Effect of Loading Rate Upon Fracture Behavior of Ferritic Steel Under Large Scaled Yielding," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 219, pp. 11~18.
- (9) Earmme, Y.Y. and Lee, Y.B., 1996, "Study of Effect of Dynamic Strain Aging on Fracture Toughness for Main Stream Line Piping of Nuclear Power Plant," Korea Electric Power Corporation.
- (10) Lee, Jeong-Hyun, Jeon, Moon-Chang and Kang, Ki-Ju, 2003, "Evaluation of Displacement Measurement Technique Using Laser Speckle and Digital Image Correlation Method," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, pp. 47~54.
- (11) Kim, Dong-Hak, Lee, Jeong-Hyun and Kang, Ki-Ju, 2003, "The Application of the Experimental Method of Measuring Q to Ductile Material," in preparation.