

## CT시험편의 크기 변화에 따른 파괴저항곡선의 변화

석 창 성\* · 김 수 용\*\*  
(2000년 1월 8일 접수)

### Variation of the Fracture Resistance Curve with the Change of a Size in the CT Specimen

Soo-Yong Kim and Chang-Sung Seok

**Key Words:** J-R Curve(파괴저항곡선), J-Q Theory(J-Q이론), Constraint Effect(구속효과), Fracture Toughness(파괴인성)

#### Abstract

In order to obtain more realistic fracture resistance curve, research is currently underway to introduce new parameter and to quantify the constraint effect. The objective of this study is to investigate the relationship between the constraint effect of a size(plane size and thickness) and the fracture resistance curve. In this paper fracture toughness tests were performed with various plane size and various thickness of specimens in two materials. The test results showed that the effects of plane size on the J-R curve were significant and the curve was risen with an increase in plane size. However, relatively weak influence was observed from the change of the specimen thickness and size. The stress fields near the crack tip of the specimen is close to the HRR field according to increasing the plane size and the Q stress appears different value according to material properties and the plane size.

#### 1. 서 론

균열이 존재하는 구조물의 안정성을 평가하기 위한 파라미터로 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics)을 기초로 한 응력확대계수(stress intensity factor) K와 탄소성파괴역학(elastic plastic fracture mechanics)을 기초로 한 J-적분(J-integral)이 사용된다. 평가대상의 파괴역학 파라미터(K, J-적분 등)와 그 재료의 불안전 균열 성장이 시작되는 임계값( $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$ )을 비교하여 파괴역학 파라미터가 임계값을 초과할 때 파괴가 일어난다는 개념이다. 이러한 평가를 위해서는 파

괴역학 파라미터의 임계값( $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$ )이나 평가방법에 따라서는 파괴저항곡선(J-R curve)의 결정이 선행되어야 한다.

이러한  $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$ , J-R곡선 등은 같은 재료에서도 실험조건에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다. 많은 연구가들<sup>(1~3)</sup>은 시험편의 크기, 두께, 무차원균열길이(a/W) 등의 구속조건에 따라 파괴인성치가 다르게 나타난다고 보고하고 있으며, 그 원인을 2변수 접근법(two parameter approach)<sup>(5~7)</sup>으로 설명하고 있다.

본 연구에서는 구속효과 중에서 시험편의 크기 변화에 의한 파괴저항곡선의 변화를 조사하고자 한다. A515 Gr.60 탄소강과<sup>(4)</sup> A5116 Gr. 70 탄소강<sup>(3)</sup> 이용한 CT(compact tension)시험편을 대상으로 하여 실험을 수행하였으며 두께와 평면크기를 동시에 변화시킬 경우, 두께만을 변화시킬 경우, 평면크기만을 변화시킬 경우에 대하여 그 영향을 조사하였다. 또한 파괴저항곡선의 변화 원

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

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

\*\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

인을 분석하기 위하여 유한요소해석을 이용한 2 변수 파괴역학의 J-Q이론을 적용하여 시험편 크기효과를 규명하고자 하였다.

2. J-Q 이론

J-Q이론<sup>(7)</sup>은 점근해(asymptotic solution)<sup>(8)</sup>의 형태로 표현되는 아래의 균열선단 응력장 식에 기초를 두고 있다.

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = A_1 \bar{\sigma}_{ij}^{-1}(\theta) r^s + \sum_{m=2}^{\infty} A_m \bar{\sigma}_{ij}^{-m}(\theta) r^{s-m} \quad (1)$$

위 식 (1)의 우변 첫 번째 항은 HRR특이장의 해로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{ij}^{HRR} = \sigma_0 \left( \frac{J}{aI_n r \sigma_0 \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{1+n}} \bar{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 항복강도,  $\epsilon_0$ 는 항복변형률,  $I_n$ 은 무차원 적분상수, 그리고  $\bar{\sigma}_{ij}$ 는 무차원 형상계수이다. 식 (1)의 우변 두 번째 항을 HRR특이장과의 차이를 정량화한 편차응력장(difference field)이라 하며, 식 (1)은 아래의 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sigma_{ij}^{HRR}(r, \theta) + \sigma_{ij}^{DIFF}(r, \theta) \quad (3)$$

한편 Q 파라미터는 식 (3)의 두 번째 항에 해당되는 것으로 HRR특이장과 임의의 균열선단 응력장의 차이를 항복강도로 무차원화시킨 것이며 다음과 같이 정의된다.

$$Q \equiv \frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\theta\theta}^{HRR}}{\sigma_0} \text{ at } \theta=0 \text{ and } \frac{r\sigma_0}{J} = 2 \quad (4)$$

Fig. 1은 Q의 정의를 도식적으로 나타낸 것이다. J-Q이론에서는 J-적분과 식 (4)에서 제시한 Q 파라미터의 2변수를 이용하여 재료의 파괴거동을

설명한다.

3. 시험편 크기효과 시험

3.1 시험재료

본 연구에서 사용한 시험재료는 압력용기 재료인 A515 Gr. 60 탄소강과 A516 Gr. 70 탄소강이며 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

구속효과의 영향을 연구하기 위한 시험이므로 평판의 제작과정에서 미칠 수 있는 다른 영향을 배제하기 위하여, 동일재료인 경우 열처리나 가공방향 등이 같은 25.4mm 두께의 하나의 평판에서 T-L방향으로 시험편을 채취하였다.

3.2 시험방법

인장시험은 ASTM E8(Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials)<sup>(9)</sup>에 따라 수행되었다. 파괴저항시험은 ASTM E813-89 (Standard Test Method for J<sub>IC</sub>, A Measure of Fracture Toughness)<sup>(10)</sup>와 E1152-95 (Standard Test Method for Determining J-R Curves)<sup>(11)</sup>에 따라 단일시험편법(single specimen method)으로 수행되었다.

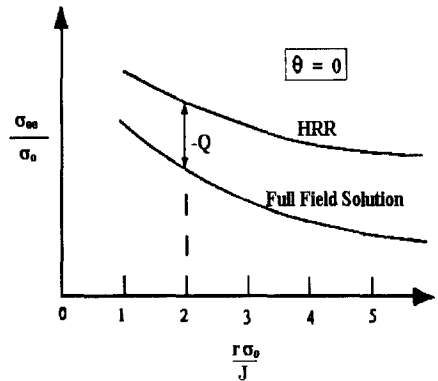


Fig. 1 Schematic illustration of the definition of Q

Table 1 Chemical composition of test materials (Wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ca	Ni	Cr	Mo	V	Nb
A515 Gr. 60 steel	0.17	0.21	0.89	0.015	0.004	0.01	0.02	0.02	0.001	0.003	0.01
A516 Gr. 70 steel	0.21	0.33	1.06	0.019	0.003	0.02	0.01	0.02	0.031	0.016	0.004

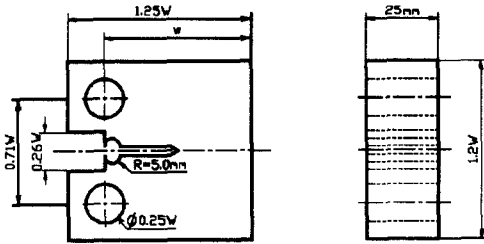


Fig. 2 Dimensions of a compact tension specimen

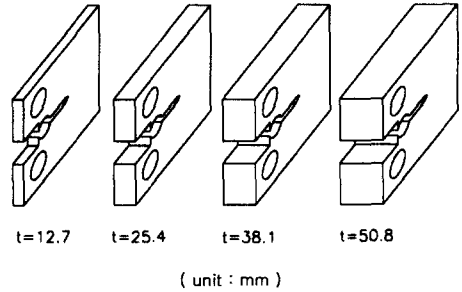


Fig. 4 Schematics for various thickness of specimens

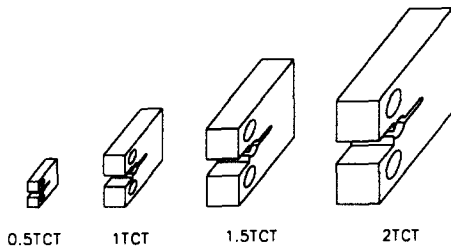


Fig. 3 Schematics for various size of specimens

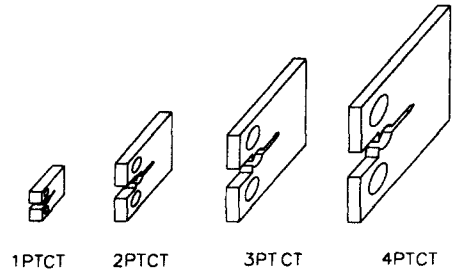


Fig. 5 Schematics for various plane size of specimens

실험 장비로는 Instron사에서 제작한 25ton 용량의 전기유압식 재료시험기를 사용하였으며, 모든 실험의 제어, 데이터 처리 및 결과해석에는 퍼스널 컴퓨터와 A/D변환기를 사용하였다. 시험온도는 시험재료가 사용되는 원전배관의 가동온도인 316℃로 설정되었다.

구속효과의 영향을 관찰하기 위하여 파괴인성 시험편의 크기를 다양하게 변화시키며 시험을 수행하였으며 Fig. 2에 본 연구에서 사용한 CT 시험편의 형상을 나타내었다. 시험편 전체크기의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 3에 보이는 바와 같이 두께를 12.7mm(0.5inch), 25.4mm(1inch), 38.1mm(1.5inch), 50.8mm(2inch)로 하고 ASTM의 규격에 따라 시험편을 폭(W)을 두께의 두배로 한 시험편을 사용하였으며, 이를 각각 0.5TCT, 1TCT, 1.5TCT, 2TCT라 하였다. 시험편 두께의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 4와 같이 시험편의 폭(W)을 101.6mm로 고정하고 두께만을 12.7mm(0.5inch), 25.4mm(1inch), 38.1mm(1.5inch), 50.8mm(2inch)로 변화시킨 시험편을 사용하였다.

또한 시험편 평면크기만의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 5와 같이 두께를 25.4mm(1inch)로 고정하고 시험편 폭(W)을 각각 50.8mm(2inch), 101.6mm(4inch), 152.4mm(6inch), 203.2mm(8inch)로 변화시킨 시험편을 사용하였으며, 이를 각각 1PTCT, 2PTCT, 3PTCT, 4PTCT라 하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 인장실험결과

Fig. 6은 A515 Gr. 60 강의 인장시험으로부터 구한 응력-변형률선도이며 Fig. 7은 A516 Gr. 70 강의 인장시험으로부터 구한 응력-변형률선도이며, Table 2는 재료시험에서 얻은 항복강도( $\sigma_0$ ), 인장강도( $\sigma_u$ ) 및 Ramberg-Osgood 재료상수  $\alpha$ ,  $n$ 을 정리한 것이다. 시험결과 A515 재료의 항복강도는 A516 재료의 50% 정도로 나타났으며, A515 재료의 인장강도는 A516 재료의 80% 정도로 나타났다. 또한 Ramberg-Osgood 상수( $\alpha$ ,  $n$ )도 많은 차이가 있음을 볼 수 있었다.

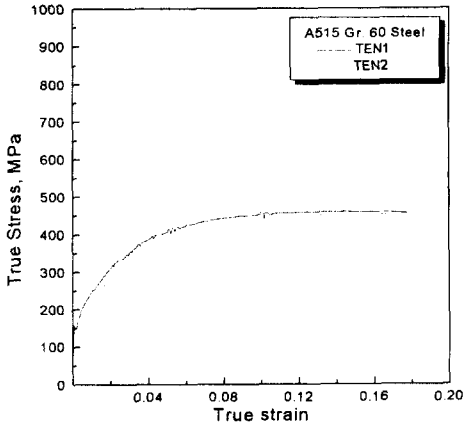


Fig. 6 Stress - strain curves of A515 Gr. 60 steel

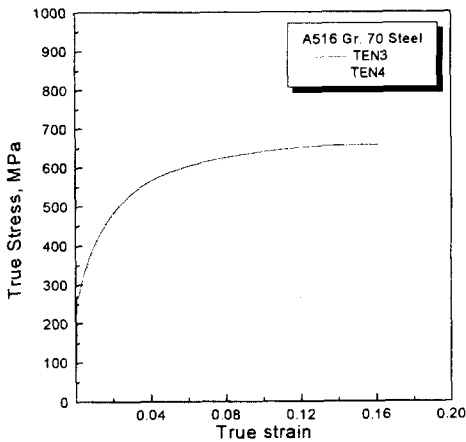


Fig. 7 Stress - strain curves of A516 Gr. 70 steel

Table 2 Summary of  $\sigma - \epsilon$  test results

Material	Specimen	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	$\alpha$	n
A515 Gr. 60 steel	TEN 1	152	455	0.07	5.61
	TEN 2	144	447	0.04	5.41
A516 Gr. 70 steel	TEN 3	324	572	0.20	6.81
	TEN 4	317	565	0.18	6.77

4.2 시험편 크기의 영향

시험편 크기의 변화에 따른 파괴저항곡선의 변화를 알아보기 위해 Fig. 3과 같이 시험편의 폭 (W)이 각각 1inch, 2inch, 3inch, 4inch이고 두께가 폭의 1/2인 A515 Gr. 60 탄소강의 0.5TCT, 1TCT, 1.5TCT, 2TCT 시험편을 이용하여 실험한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 결과에서 보이는 바와 같이 시험편의 크기가 0.5TCT, 1TCT, 1.5TCT, 2TCT로 커짐에 따라  $J_{1c}$ 값이 결정되는 초기에는 그 차이가 미소하였으나 균열진전량이 증가할수록 파괴저항 곡선의 차이는 증가하였으며, 그 경향은 시험편의 크기가 커질수록 파괴저항곡선도 커지는 것으로 나타났다. 그러나 1.5TCT와 2TCT 시험편의 시험결과는 거의 같게 나타났다.

일반적으로 재료에 따라 차이는 있으나, 두께

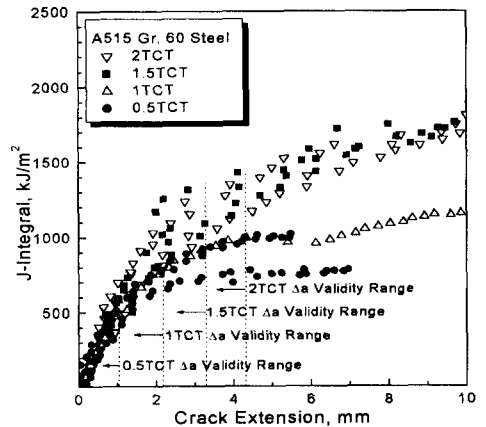


Fig. 8 J-R curves obtained from various size of specimens for A515 Gr. 60 steel

Table 3 Fracture Toughness test results of various specimen size of A515 Gr. 60 steel

Specimen size	$J_c$ (KJ/m <sup>2</sup> )
0.5TCT	427
	465
1TCT	452
1.5TCT	555
	583
2TCT	830
	823

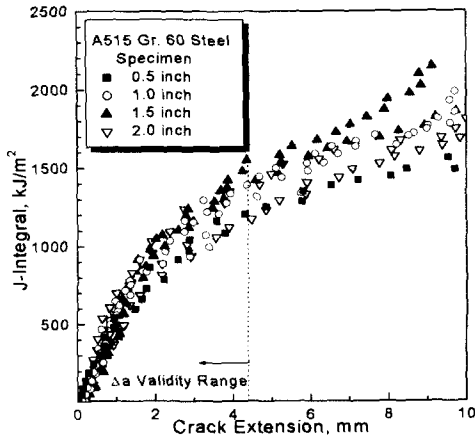


Fig. 9 J-R curves obtained from various thickness of specimens for A515 Gr. 60 steel

가 증가하면 파괴저항곡선은 낮아지고, 평면크기가 증가하면 파괴저항곡선은 높아진다고 보고되고 있다.<sup>(11)</sup> Link<sup>(12)</sup>는 A508재료에 대하여 시험편 크기변화 실험을 수행하였으나 그 영향을 찾을 수 없다고 보고하였는데, 본 연구에서 사용한 A515 재료에서도 그 영향이 뚜렷하지 않았다. 그 이유는 시험편 두께의 증가에 따른 파괴저항곡선의 하강효과와 시험편 폭의 증가에 따른 파괴저항곡선의 상승효과가 복합적으로 나타났기 때문이라고 판단된다. Table 3은 시편의 크기 변화에 따른  $J_{1c}$ 값을 나타낸 것이다 여기에서 시편의 크기가 커질수록  $J_{1c}$ 값이 크게 나타남을 알 수 있다.

4.3 시험편 두께의 영향

두께의 변화에 따른 파괴저항특성의 변화를 알아보기 위하여 Fig. 4와 같이 시험편의 폭을 2TCT 표준 시험편과 같게 하고 두께만을 변화시키면서 파괴저항곡선을 구하였다. Fig. 9는 시험편의 두께가 12.7mm에서 50.8mm까지 변화할 때의 파괴저항곡선의 변화를 나타낸 것이다. 이 12.7mm에서 50.8mm까지의 두께변화시험 결과에서는 시험편의 두께변화에 따른 파괴저항곡선의 변화가 미미하게 나타났으며 일정한 경향도 관찰할 수 없었다.

Lai와 Ferguson<sup>(14)</sup>과 John<sup>(15)</sup>은 시험편의 두께가 증가함에 따라 파괴인성치는 감소하고 일정두께 이상에서는 파괴인성치가 일정한 값을 나타낸다

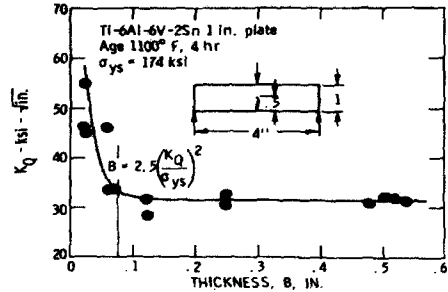


Fig. 10 Effect of thickness on fracture toughness  $K_Q$  by John and et al<sup>(15)</sup>

Table 4 Fracture Toughness test results of A515 Gr. 60 steel

Specimen thickness(mm)	$J_Q$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$K_Q$ (MPa√m)
12.7 (A)	749	26.4
12.7 (B)	-	38.2
25.4 (A)	843	45.4
25.4 (B)	848	35.7
38.1 (A)	890	38.4
38.1 (B)	994	37.9
50.8 (A)	626	41.9
50.8 (B)	989	47.8

고 보고하였고, Fig. 10은 이를 나타낸 것이다. 본 연구의 결과에서는 일반적인 두께의 변화에 따른 파괴저항치의 변화와 다소 다른 경향이 나타나고 있다.

이러한 변화의 원인을 분석하기 위하여 파괴인성치인  $K_{Ic}$ 와  $J_{1c}$ 를 구해 보았으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 여기에서  $J_{1c}$ 를 구할 때 대부분의 영역에서  $J_{1c}$ 가 ASTM의 유효범위인  $J_{max}$ 를 초과하였으므로  $J_Q$ 로 표시하였으며,  $K_{Ic}$ 도 ASTM의 두께조건을 만족하지 못하였으므로  $K_Q$ 로 표시하였다. Fig. 11에는 두께와  $J_Q$ 의 관계를 나타내었는데, 두께의 증가에 따른  $J_Q$ 값의 감소를 관찰할 수 없었다. Fig. 12에는 두께의 변화에 따른  $K_Q$ 의 변화를 나타내었는데, 이 결과에서도 두께의 변화에 영향을 받지 않음을 볼 수 있었다. 그러나 본 연구에서 구한  $J_Q$ 와  $K_Q$ 는 ASTM의 유효

효범위를 벗어났으므로 이 결과의 신뢰성에는 문제가 있는 것이 사실이다.

두께에 따른 파괴인성치의 변화가 일반적으로 알려진 Fig. 10과 같은 거동을 보이지 않는 이유는 본 연구에서 사용한 시험편의 두께가 이미 평면변형률(plane strain) 조건을 만족하고 있기 때문일 수도 있으며, 이 경우 두께가 더 얇은 시험편을 사용한 추가시험이 필요하다고 생각된다.

4.4 평면크기의 영향

시험편 평면의 크기변화에 따라 A515 Gr. 60 탄소강 재료의 시험결과를 Fig. 13에, A516 Gr.

70 탄소강 재료의 시험결과를 Fig. 14에 나타내었다.

A515 Gr. 60 탄소강의 경우 파괴저항곡선이 평면크기 증가에 따라 비례적인 증가의 경향을 보이지는 않지만, 2PTCT 시험편과 3PTCT 시험편의 파괴저항곡선이 1PTCT 시험편의 파괴저항곡선보다 1.5배 정도 더 높게 나타났다. A516 Gr. 70 탄소강의 경우에도 시험편의 크기가 증가함에 따라 파괴저항곡선이 높게 나타났다. 그러나 1PTCT의 파괴저항곡선은 2PTCT 시험편의 파괴저항곡선과 비슷하게 나타났다.

Table 5는 이 파괴저항곡선으로부터  $J_{IC}$  를 구

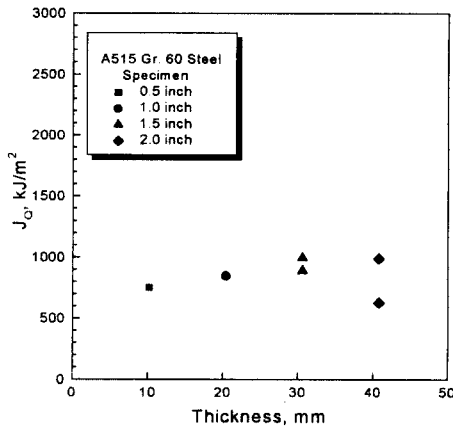


Fig. 11 Effect of thickness on fracture toughness  $J_{IC}$  for A515 Gr. 60 steel

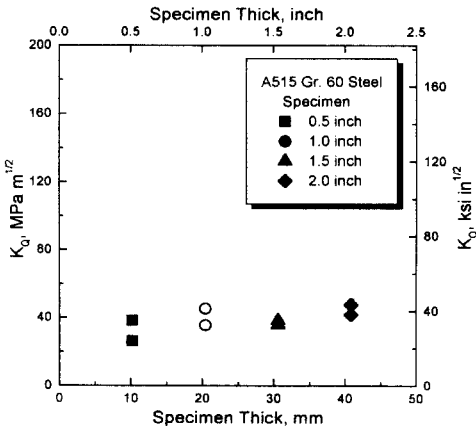


Fig. 12 Effect of thickness on fracture toughness  $K_Q$  for A515 Gr. 60 steel

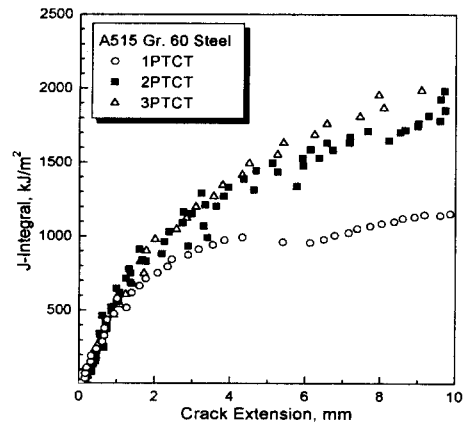


Fig. 13 J-R curves obtained from various plane size of specimens for A515 Gr. 60 steel

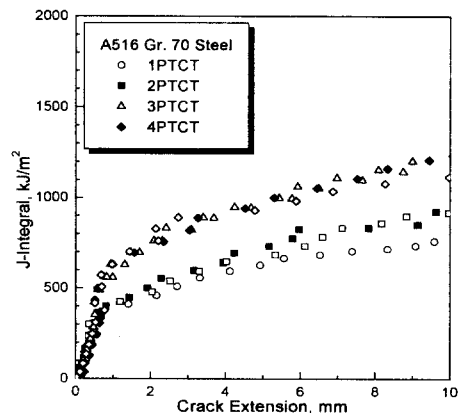


Fig. 14 J-R curves obtained from various plane size of specimens for A516 Gr. 70 steel

**Table 5**  $J_{IC}$  values of various plane size specimens

	$J_{IC}(KJ/m^2)$	
	A515 Gr. 60 steel	A516 Gr. 70 steel
1PTCT	452.04	236
		250
2PTCT	748.70	372
		365
3PTCT	835.42	449
		453
4PTCT		488
		492

하여 정리한 것이다.  $J_{IC}$  값도 J-R 곡선의 경향과 비슷하게 나타났다. 평판의 크기가 증가할수록 그 값이 크게 나타났다.

### 5. 파괴저항곡선의 변화 원인 분석

#### 5.1 유한요소 모델 및 해석방법

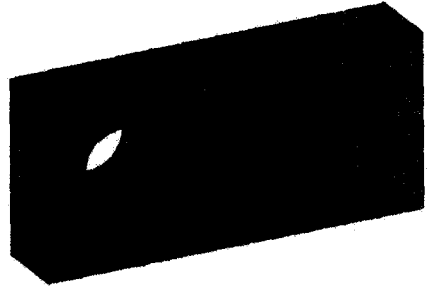
평면크기를 변화시킨 시험편에 J-Q이론을 적용하여 구속효과를 조사하기 위하여 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 15은 해석에 사용된 모델의 형상이며, 해석에 사용된 모델은 3차원 CT 시험편으로 무차원균열길이( $a/W$ )를 0.55로 하였으며, 시험편의 1/4을 모델링하였다.

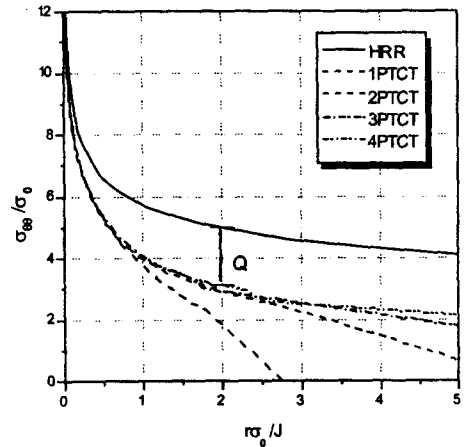
#### 5.2 균열선단의 탄소성 응력장 해석

HRR 특이장을 구하여 항복강도와 J값으로 무차원화한 균열선단에서의 거리를 횡축으로 하고 균열에 대하여 수직방향( $\theta=0$ ) 응력( $\sigma_{\theta\theta}$ )을 항복강도( $\sigma_0$ )로 나누어 무차원화한 응력을 종축으로 하여 Fig. 16와 Fig. 17에 나타내었다. 또한 모델링한 시험편의 탄소성 유한요소해석으로부터 얻은 응력장을 HRR 특이장과 비교하기 위하여 같은 방법으로 무차원화 하여 나타내었다.

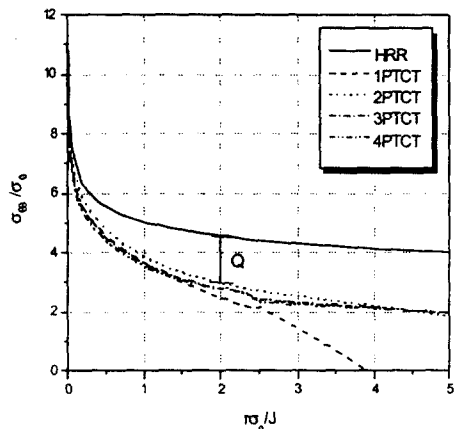
A515 Gr. 60 탄소강의 해석결과인 Fig. 16에서 3PTCT 시험편의 응력장은 HRR 특이장의 응력장과 유사한 반면 1PTCT 시험편의 응력장은 HRR 특이장으로부터 이탈되었음을 알 수 있다. 다시



**Fig. 15** Mesh design of a CT specimen



**Fig. 16** Comparison the stress field with the HRR field of A515 Gr. 60 steel



**Fig. 17** Comparison the stress field with the HRR field of A516 Gr. 70 steel

말하면 평판의 크기가 상대적으로 큰 3PTCT와 4PTCT의 결과는 해석결과는 무한체의 해석결과인 HRR 응력장과 근사한 결과를 보이는 반면, 시험편의 평면크기가 상대적으로 작은 1PTCT 시험편의 경우에는 평면크기가 큰 시험편에 비하여 구속이 증가하여 응력이 작게 나타난 것으로 생각된다. 즉 HRR 특이장과 실제 작용되는 응력의 차이인 Q응력의 절대값이 커지면 구속효과가 커져서 J-R곡선이 낮게 나타나는 것으로 생각된다.

같은 방법으로 A516 Gr. 70 탄소강에 대한 해석을 수행하여 HRR 특이장과 함께 Fig. 17에 나타내었다. A516 Gr. 70 탄소강의 경우 시험편의 크기가 1PTCT, 2PTCT, 3PTCT, 4PTCT로 커짐에 따른 균열선단의 응력장 분석결과에는 Q응력의 절대 크기가 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 시험결과를 Table6와 Fig. 18에 나타내었다.

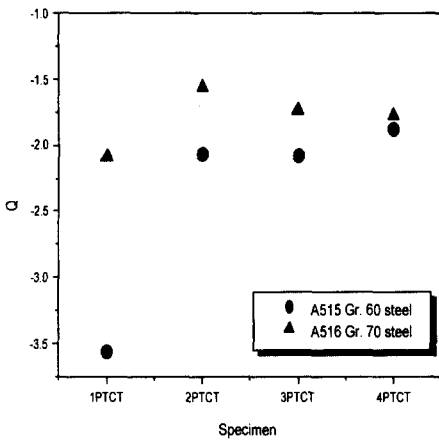


Fig. 18 Comparison the Q values with various plane size specimens

Table 6 Q values of various plane size specimens

	A515 Gr. 60 steel	A516 Gr. 70 steel
1PTCT	-3.56	-2.08
2PTCT	-2.06	-1.56
3PTCT	-2.07	-1.74
4PTCT	-1.87	-1.77

5.3 해석 결과 비교

시험에 사용된 두 소재의 해석결과를 비교해 보면 유한요소해석에서 구한 Q응력의 절대값의 크기와 파괴저항곡선의 상승과 하강 사이에는 일정한 관계가 성립함을 알 수 있었다. 즉 시험편 평면의 크기가 증가하면 두 경우 모두 파괴저항곡선이 높아지지만, 정량적으로는 A515 Gr. 60 탄소강의 증가가 A516 Gr. 70 탄소강의 증가량보다 크게 나타났다.

유한요소해석 결과도 HRR 특이장으로부터의 이탈량인 Q응력은 파괴저항곡선의 상승이 상대적으로 적은 A516 Gr. 70 탄소강의 해석결과보다 파괴저항곡선의 상승이 두드러진 A515 Gr. 60 탄소강의 해석결과에서 현저하게 크게 나타났다. Q값이 재료에 따라 차이가 나는 것은 해석시 사용되는 인장 데이터가 응력장 평가와 J-적분값 계산에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 Q응력이 현저하게 나타나는 재료에서는 평면크기 변화에 의한 구속효과의 변화에 기인한 파괴저항특성의 변화도 현저하며, 유한요소해석결과 Q응력이 미미하게 나타나는 경우에는 평면크기의 변화에 의한 파괴저항특성의 변화도 미미함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 A515 Gr. 60 탄소강과 A516 Gr. 70 탄소강의 두께 12.7mm 이상인 시험편에 대하여 시험편의 전체 크기, 평면크기, 두께 등의 변화가 파괴저항곡선에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고, 이변수파괴역학의 J-Q 이론을 적용하여 Q응력의 값과 파괴저항곡선의 변화와의 관계를 고찰해 보았다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시험편의 평면크기가 증가할수록 파괴저항곡선은 높게 나타나며 이것은 구속효과 파라미터인 Q응력의 절대값이 작아지기 때문이다.
- (2) 시험편 두께의 변화는 파괴저항 곡선에 큰 영향을 미치지 않았으며, 두께와 평면크기의 효과가 복합적으로 작용하는 전체 크기변화에 대해서도 파괴저항곡선의 변화는 미미하였다.
- (3) 파괴저항곡선의 변화 원인인 Q응력은 A515 Gr. 60 탄소강과 A516 Gr. 70 탄소강에 대하여 해석결과가 다르게 나타났으며, 이것은 두 재료의 파괴저항특성과 잘 일치하였다. 이는 Q응력을



이용하여 파괴저항곡선의 구속효과를 평가할 수 있음을 의미한다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Chao, Y. J., Lam, P. S. and Zhang, L., 1998, "Effect of Constraint on Fracture Controlled by Stress or Strain," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics Vol. 30*, pp. 75~86.
- (2) 조연제, 장윤석, 석창성, 김영진, 1996, "동일 두께의 CT 시험편에서 구속효과가 파괴저항곡선에 미치는 영향," 대한기계학회, 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제2호, pp. 529~539.
- (3) 김수용, 김영진, 석창성, 1996, "CT시험편의 구속효과가 파괴저항곡선에 미치는 영향," 대한기계학회, 96 춘계학술대회 논문초록집(A), pp. 83~93.
- (4) Kirk, M. T. and Dodds, R. H., 1991, "An Analytical and Experimental Comparison of  $J_i$  Values for Shallow Through and Part Through Surface Cracks," *Engineering Fracture Mechanics, Vol. 39*, No. 3, pp. 535~551.
- (5) Leever, P. S. and Radon, J. C., 1982, "Inherent Stress Biaxiality in Various Fracture Specimen Geometries," *International Journal of Fracture, Vol. 19*, pp. 311~325.
- (6) Betegon, C. and Hancock, J. W., 1991, "Two Parameter Characterization of Elastic-Plastic Crack-Tip Fields," *Journal of Applied Mechanics, Vol. 58*, pp. 104~110.
- (7) O'Dowd, N. P. and Shih, C. F., 1992, "Family of Crack-Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter," *Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 40*, No. 5, pp. 939~963.
- (8) Williams, M. L., 1958, "On the Stress Distribution at the Base of Stationary Crack," *International Journal of Applied Mechanics, Vol. 24*, pp. 111~114.
- (9) 1995, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," *Annual Book of ASTM Standards ASTM E8-95*, pp. 56~76.
- (10) 1995, "Standard Test Method for  $J_{IC}$ , a Measure of Fracture Toughness," *Annual Book of ASTM Standards ASTM E 813-89*, pp. 646~660.
- (11) 1995, "Standard Test Method for Determining J-R Curves," *Annual Book of ASTM Standards ASTM E1152-95*, pp. 763~773.
- (12) Seok, C. S. and Kim, S. Y., 1999, "A Study on the Characteristics of Fracture Resistance Curve of Ferritic Steels," *KSME International Journal Vol. 13*, No. 11, pp. 827~835.
- (13) Link, R. E. and Lander, J. D., 1991, "Something New on Size and Constraint Effects for J-R Curves," *Mechanical Engineering Publications*, pp. 707~721.
- (14) Lai, M. O., and Ferguson, W. G., 1986, "Effect of Specimen Thickness on Fracture Toughness," *Engineering Fracture Mechanics, Vol. 23*, No. 4, pp. 649~659.
- (15) John, M. H. and et al., 1970, "The Influence of Crack Length and Thickness in Plane Strain Fracture Toughness Tests," Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing, *ASTM STP 463*, pp. 160~190.