

# AISI 4130 표면균열 판재의 파괴거동

김재훈\*, 응장우\*, 문순일\*\*, 김성은\*\*, 구송희\*\*

## Fracture Behaviour of the AISI 4130 Surface Cracked Plate

Jae-Hoon Kim\*, Jang-Woo Ong\*, Soon-Il Moon\*\*, Seong-Eun Kim\*\*, Song-Hoe Koo\*\*

### ABSTRACT

In the case of surface cracked plate specimen, we can not measure the fracture toughness of ductile materials by the ASTM E 813 standard method. In this report, using the Acoustic Emission method, we found out crack initiation point and investigated fracture toughness which was calculated by FEM. The method used in this paper shows that fracture toughness by using AE technique is reliable.

**Key Words** : Surface Crack(표면균열), Acoustic Emission(음향방출), Fracture Toughness(파괴인성), Crack Initiation(균열개시)

### 기호설명

- a : 표면균열 깊이
- 2c : 표면균열 길이
- B : 표면균열시편 두께
- w : 표면균열시편 폭
- J : J 적분

### 1. 서론

항공기 및 고압용기 등의 파괴요인이 표면 균열에 인한 것이 많으며, 이 균열들은 제작 또는 사용시에 발생하기 쉬운 실제적인 형태의 것이다. 그리고 항공기 또는 로켓 추진기관용 압력용기 등은 경량화가 요구되는 특성으

로 인하여 고강도의 얇은 판재소재가 많이 사용되어지고 있다.

고강도, 고인성의 얇은 판재 소재는 파괴시에 탄-소성 거동을 나타내므로 탄성이론을 근거로 하여 제정한 표면 균열 규격<sup>(1)</sup>의 적용이 불가능하며, 또한 결합의 영향 분석 연구가 많이 진행되어 있지 못한 상태이다.

근래에 유한요소의 개발로 2차원 탄-소성 해석<sup>(2)</sup>과 더불어 3차원 탄-소성 해석을 수행하여<sup>(3,4,5)</sup> 균열선단에서의 J적분을 이용하여 파손의 발생 기준으로 사용하고 있다. 그러나 표면균열을 갖는 얇은 판재의 경우, 균열선단의 J적분값은 평면응력 및 평면변형상태의 혼재 및 비균열부(ligament)의 길이가 작기 때문에 배면(back surface)의 영향이 상당할 것으로 판단된다. 그리고 얇은 판재는 ASTM E 813<sup>(6)</sup>에 의하여 파괴인성( $J_{1C}$ )을 구할 수가 없

\* 정회원, 충남대학교 기계설계공학과  
 \*\* 국방과학연구소

고, 같은 소재의 두꺼운 시편을 이용하여 구한 파괴인성을 유한요소해석에 의한 J값과 비교하여 파손기준으로 사용하는 것은 오차의 가능성이 높을 것으로 예상된다. 또한 파손기준하중을 균열의 개시점으로 정의할 경우는 균열 개시점에서의 J 값을 기준으로 하여 임의의 균열 크기를 갖는 구조물에서 이 때의 J 값에 해당하는 하중이 파손 발생 하중이 될 것이다. 그리고 파손기준하중을 파단점으로 정의할 경우는 파단점에서의 J 값이 파손기준이 됨으로써 파손기준에 따라 결함을 갖는 구조물의 허용 하중의 차이가 예상된다. 파단하중의 측정은 시편시험시에 쉽게 측정할 수 있지만 균열개시 하중은 표면균열의 특성상 육안 관측이 불가능하므로 다른 측정 수단이 요구된다. 컴팩터 인장시편(CT시편)에 대해서는 음향방출법(AE)을 이용하여 균열의 개시점을 찾아내어 파괴인성을 측정하려는 시도<sup>(7,8,9)</sup>가 있었으나, 표면균열시편에 대한 재료평가에 대해서는 그다지 사용되지 못하였다. Reuter<sup>(10)</sup> 등은 표면균열시편에 대하여 음향방출법을 적용하여 균열개시점에서의 J값( $J_{init}$ )과 파괴인성( $J_{IC}$ ) 사이의 관련성을 찾으려는 시도를 실시하였으나 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다.

본 논문에서도 균열개시점의 측정을 음향방출법을 이용하였다. 이러한 균열개시 하중과 시편시험시 측정된 파단 하중을 기준으로 유한요소해석에 의한 표면균열 해석을 통하여 J 적분값을 구하여 보았다. 또한 균열형상별 음향방출법에 의한 균열개시하중과 파단하중에 대한 비교를 통하여 얇은 재료의 파괴인성측정 및 손상허용설계 개념에 대한 적용성을 조사하였다.

## 2. 시편 및 실험방법

사용한 AISI 4130 시편은 탄소성 해석을 위한 소재특성을 조사하기 위하여 ASTM E8에 따른 표준형(게이지 길이 50mm) 평판시편을 사용하였다. 인장시험에 의한 기계적 특성은 Table 1과 같고, 탄소성 해석을 위하여 사용된 재료의 응력-변형을 선도는 Fig.1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of AISI 4130 steel

Yield strength $\sigma_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Modulus of elasticity E (kgf/mm <sup>2</sup> )	Modulus of Plasticity $E_p$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio, $\nu$
130.37	21350	214	0.33

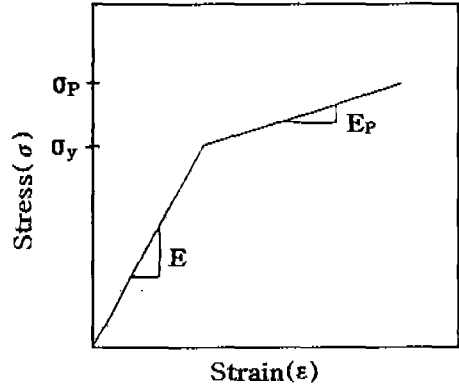


Fig. 1 Stress-strain curve of AISI 4130 steel

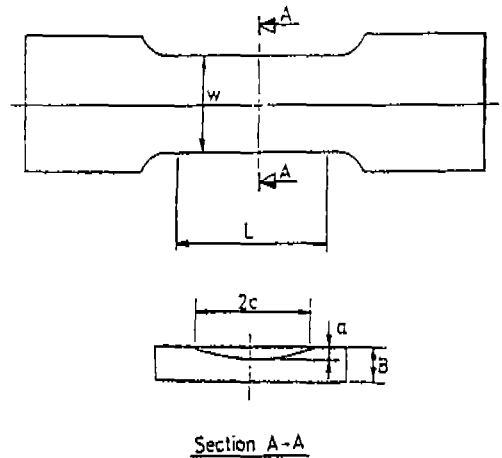


Fig. 2 Configuration of surface crack tension specimen

표면균열인장시편(SCT 시편)은 Fig.2와 같으며, ASTM E740에 따라 표면균열의 생성 및 인장시험을 실시하였으나, 인장 시험장비의 용량 제한으로 시편의 폭을 균열길이의 5배 이상인 조건은 만족시키지 못하였다.

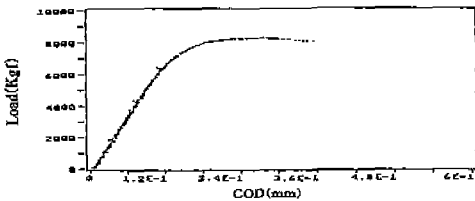
SCT 시편은 균열개구변위(COD)를 측정하기 위하여 균열 근방에 브라켓을 부착하였고, 부착방법은 변형을 스트레인 게이지용 접착제(M-Bond 200)를 사용하였다.

본 논문에서 실시한 표면 균열형상은 Table 2와 같다. 균열개시점을 찾기 위한 AE 시험은 PAC장비를 사용하였고, 공진주파수 150kHz 센서, Total gain 80dB, Threshold level 0.3V로 하였다. 링 다운 카운터(ring-

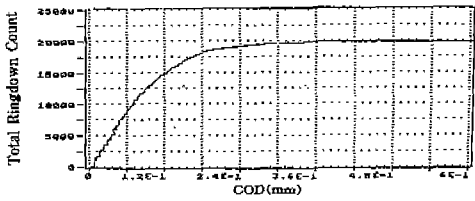
down count), AE 계수(event), 에너지를 시간의 함수로 측정하였다. 또한 Total ringdown counts, Total events 및 Total energy와 COD의 관계를 구하였다.

Table 2 Surface crack specimen size

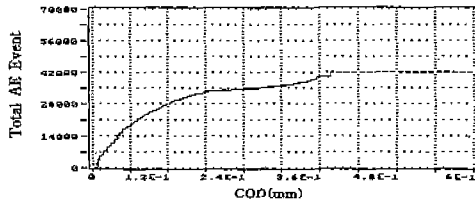
Specimen No.	Dimension (mm)				(a/Q) Me <sup>2</sup>
	a	2c	B	w	
1	1.69	3.05	3.00	20.0	0.71
2	1.48	5.44	2.98	20.0	1.44
3	1.99	6.17	2.97	20.0	1.80
4	1.84	10.12	2.94	25.0	2.95
5	2.44	14.82	3.04	25.0	5.19



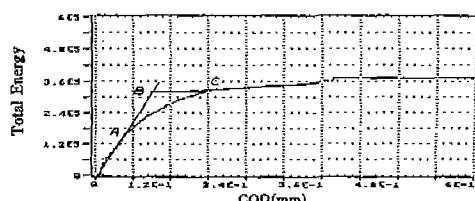
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Acoustic emission results vs. analogue parameter for large crack size

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 균열개시하중 및 파단하중

음향방출법에 의한 AE 파라미터와 균열개구변위(COD)에 대한 대표적인 결과를 Fig.3 및 Fig.4에 나타내었다.

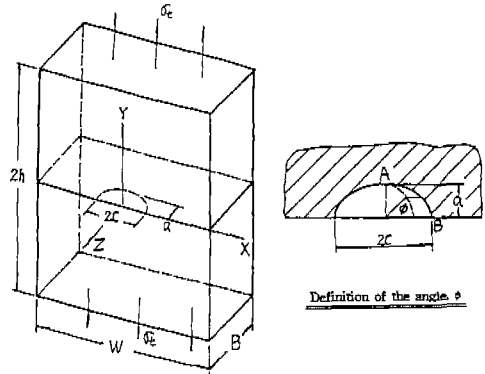


Fig. 4 Shape of semielliptic surface crack

Fig.3 및 4에서 Total ringdown count는 균열개시점의 측정이 용이하지 못하였고, Total AE event 및 Total energy의 결과에서 균열개시점의 고찰이 가능하였다. 표면균열시편에 대한 본 연구 결과에서도 일반적인 저합금강의 균열선단에서의 AE 거동<sup>(7,8)</sup>에서의 같은 분석을 통하여 균열개시점을 찾아보았다. 또한 시험 결과에서 AE event와 AE 에너지는 유사한 경향을 보여주고 있지만 일반적으로 AE 에너지의 경우가 개시점 측정이 용이하여 AE 에너지를 기준으로 고찰하였다. Fig.3은 균열크기가 큰 (시편번호 3번 이상) 경우의 AE 자료로서, AE 에너지 결과에서 "A"점까지는 균열선단의 미시균열형성 단계이며, "A"점부터 "C"점까지는 표면균열면 중에서 균열의 국부적인 안정성장이 시작되어 비균열부(ligament)의 완전 소성변형전까지의 거동으로 판단된다. "C"점 이후부터는 전반적인 항복이 지배하게 되므로 AE의 발생이 급격히 감소하고 있다. 이러한 이유는 본 논문에서의 시편의 균열이 없는 인장시편 시험시에는 소성 변형에 의한 파단직전까지 AE의 발생이 거의 없는 현상으로 설명이 가능하다.

균열의 개시점은 "A"점에서와 같이 표면균열선단 중에서 국부적인 균열의 성장이 시작되는 지점으로 정할 수도

있지만 균열선단이 전반적으로 성장을 개시하기 직전인 지점도 의미가 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 지점을 Fig.3(d)에서와 같이 "A"점에서의 기울기와 "C"점 이후의 기울기를 연장하여 서로 교차하는 "B"점을 균열개시점에 대한 다른 한가지의 개념으로 제시하였다. 결과적으로 균열개시점 하중은 "A"점 및 "B"점에 대한 COD를 이용하여 Fig.3(a)로부터 상당 하중을 구하였다. 파단하중은 표면균열판재의 인장시험시 구한 Fig.3(a)에서 하중-균열개구변위 선도에서의 최대하중값을 사용하였다.

### 3.2 J 적분

표면균열시편은 균열선단을 따라 응력상태가 변화하므로 균열선단을 따라 J값이 달라진다<sup>(11)</sup>. 이러한 변화를 확인하여 균열전진거동을 예측하여야 하므로 본 논문에서는 Table 2의 균열형상에 대한 하중단계별(균열개시 및 파단하중) J 적분을 계산하였다. Table 2에서  $(a/Q)Me^2$  은 무차원 균열 크기로서 다음과 같이 시편두께, 균열크기에 관계된다.  $Q=1+1.464(a/c)^{1.65}$ ,  $Me = \{1.13-0.09(a/c) + \{-0.54+0.89(0.2+(a/c))^{-1}\} (a/B)^2 + \{0.5-[0.65+(a/c)]^{-1} + 14(1-a/c)^{24}\} (a/B)^4$  이다. 즉, 균열깊이가 깊을수록, 균열길이가 길수록 큰 값을 나타내고 있다.

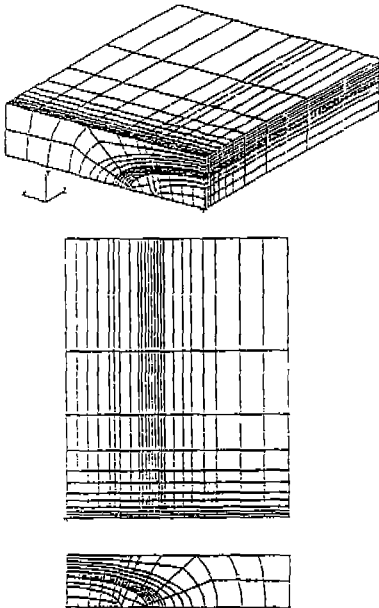


Fig. 5 Finite element model of a plate containing a surface crack

해석은 3차원 탄소성 해석을 ABAQUS 프로그램을 이용하였고, 균열의 탄성해석시 일반적으로 사용하는 특이요소를 사용하지 않고, 20개의 절점을 갖는 등계수 보통요소(iso-parametric regular element)를 사용하였다.

해석 및 결과에 사용된 표면균열의 형상 및 각도의 정의는 Fig.4에 나타나 있다.

해석시 메쉬 전형적인 형태는 Fig.5와 같으며, 결과 출력시 J 적분의 경로는 균열선단에서 가장 인접한 경로를 경로 1로 하였고 균열선단에서 가장 먼 경로를 3으로 하여 3가지의 경로를 선정하였다. 균열선단에 인접한 경로 "1"은 사용치 않고, 경로 "2" 및 "3"을 평균하여 사용하였다. 균열의 표면부에 근접한 J 값들은 경로 별 오차가 발생하였으나, 균열의 개시 및 파단을 지배하는 균열 중심부로 갈수록 경로 별 오차가 줄어 들고 있고 Table 3에서와 같이 경로 2 및 경로 3의 J적분값의 차이가 적으므로 균열의 J 적분의 경로 독립성이 성립하고 있음을 알 수 있었다.

Table 3 J-integral estimates along the contours

$\phi$ (deg.)	Contour1	Contour2	Contour3
90.0	0.44754	0.48563	0.48586
85.5	0.45179	0.49117	0.49117
80.8	0.45764	0.49816	0.49831
78.0	0.46531	0.50753	0.50776
74.0	0.47597	0.52108	0.52140
69.5	0.48607	0.53446	0.53480
65.0	0.49670	0.54762	0.54796
60.0	0.50750	0.56067	0.56100
55.5	0.51509	0.56725	0.56652
50.1	0.53204	0.58828	0.58744
45.0	0.55005	0.61132	0.61056
39.4	0.57164	0.64083	0.64006
32.8	0.60048	0.68273	0.68357
28.0	0.62950	0.71558	0.71740
23.0	0.64625	0.72536	0.72833
12.0	0.58103	0.59660	0.60446

Fig.6에는 균열개시 및 파단하중에 대한 균열선단에 따른 J 적분값의 경향을 나타내고 있다. Fig.6에서 A점을 기준으로 한 하중에 대한 J 적분값은 균열선단을 따라 최대값이 0.5~1.0kgf/mm의 값을 나타내고 있으며, B점을 기준으로 한 J 적분값은 2.0~2.8kgf/mm의 값을 나타내고 있다. 또한 파단하중에 대한 J 적분값은 4~9.5kgf/mm의 값을 나타내어서 큰 편차를 보이고 있다. 이러한 파단하중에 대한 편차는 시편번호 1번의 하중증가에 대한 균열중심부에서의 J 적분값을 나타내고 있는

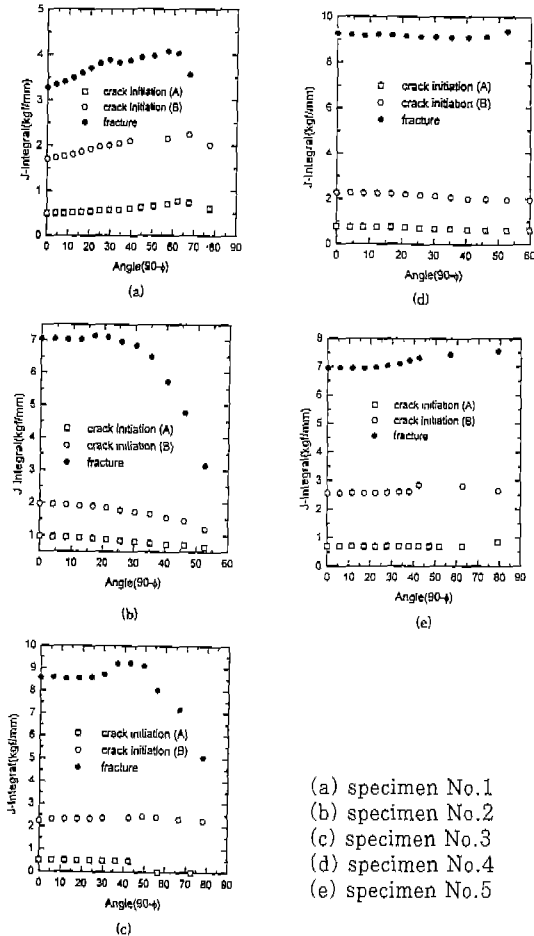


Fig. 6 J-integral of various crack size along the crack front

Fig. 7에서 설명이 가능하다. 하중 증가시 파단응력에 이를수록 J 적분값의 변화가 급격히 증가하고 있기 때문에 파단하중의 90% 수준에서 파단하중까지 J 적분값이 약 2배가 되고 있다.

이러한 J 값들은 본 논문에서와 동일한 소재를 이용하여 CT 시편에 대하여 측정 한 파괴인성값<sup>(8)</sup>이 4.5kgf/mm 이었으므로, CT 시편의  $J_{IC}$  값을 기준으로 한 파괴기준 판단은 균열개시보다는 파단조건에 근사함을 알 수 있었다.

본 논문에서 사용한 재료는 B점을 기준으로 한 균열개시점에 해당하는 J 적분값이 최소의 편차를 나타내고 있으므로 표면균열에 대한 재료의 파괴인성값으로 사용할 것으로 판단된다. 결함에 대한 과도한 안정성이 요

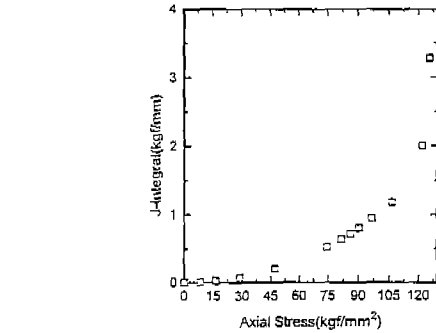


Fig. 7 J-integral variation according to the stress increasing of the specimen No.1

구되는 경우에는 A점을 기준으로 한 J 적분값을 파괴인성값으로 하여 표면균열에 대한 사용하중의 J 적분값이 이 파괴인성값 이하가 되도록 규제하여야 할 것이다.

균열형상에 따른 균열개시점(A 및 B) 하중의 파단하중에 대한 비율은 표면균열의 개념적인 설계에 유용할 것으로 생각되어 분석하여 보았다.

Table 4에는 파단하중을 기준으로 했을 때, 균열개시점(점 "A" 및 "B")에서의 하중 비율(%)을 나타내었다. 표면균열에 대한 균열개시점의 의미는 상당히 중요하며 단순 인장하중 작용시 이 하중이하에서는 균열이 진전되지 않으므로 설계 하중의 기준으로 사용 가능하다. Table 4의 "A"점을 기준으로 한 균열개시점은 균열 크기가 큰 경우는 국부적인 균열개시 때문에 파단하중에 비하여 낮은 수준(35%)에서 설계 하중으로 사용되어야 함을 알 수 있다. 균열선단에서 약간의 균열진전을 인정하는 "B"점을 기준으로 설계할 경우, 파단하중에 대하여 약 70% 수준을 설계하중으로 사용하여야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

음향방출자료(AE) 및 파단하중을 이용하여 AISI 4130 소재의 표면균열 판재시편에 대한 J 적분을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AE에 의하여 측정된 균열개시점의 하중을 이용하여 구한 J 적분값은 소재의 표면균열에 대한 설계 하중의 설정 개념으로 이용 가능하다.

(2) 파단하중에 대한 J 적분값은 파단하중 부근에서 급격한 변화를 보였고, 균열형상별 J 적분값의 차이가 크므로 본 실험소재의 표면균열 파단하중에 대한 파괴인성값

으로 사용할 수 없다.

(3) 콤팩터 인장(CT)시편을 이용하여 얻은 파괴인성값 ( $J_{IC}$ )을 기준으로 한 표면균열의  $J$  값은 파단하중의 수준에 도달하였다.

(4) 균열전단을 따라 구속조건이 변화하는 표면균열 판재의 경우, 균열성장을 어느 정도 허용한(B점 기준) 균열개시점의 AE에 의한  $J$  값의 측정은 표면균열에 대한 재료의 파괴인성 측정 및 파손 기준에 관한 유용한 방법으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. ASTM E740-80, "Fracture Testing with Surface Crack Tension Specimens", 1983.
2. Bleackley, M.H. and Luxmoore, A.R., "Comparison of Finite Element Solutions with Analytical and Experimental Data for Elastic-Plastic Cracked Problems", Int. J. of Fracture, Vol.22, pp. 15-39, 1983.
3. White, C.S., Ritchie, R.O. and Parks, D.M., "Ductile Growth of Part-Through Surface Cracks : Experimental and Analysis", ASTM STP 803, pp. I-384-409, 1983.
4. Trantina, G.G., deLorenzi, H.G., and Wilkening, W. W., "Three-Dimensional Elastic-Plastic Finite Element Analysis of Small Surface Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, No. 5, pp. 925-938, 1983.
5. Gensheimer, V.M. and Packman, P.F., "Variation in Stress-Intensity Factor and Back-Surface Displacement for Surface Cracks", Experimental Mechanics, June, pp.182-187, 1988.
6. ASTM E 813-89, "Standard Test Method for J1C, A Measure of Fracture Toughness", 21 Dec., pp.732-746, 1989.
7. Takahashi, H., Khan, M.A., Kikuchi, M. and Suzuki, M., "Acoustic-Emission Cracking Monitoring in Fracture-Toughness Tests for AISI 4340 and SA533B Steels", Experimental Mechanics, March, pp.89-99, 1981.
8. 웅장우, 문순일, 설창원, 이기범, "AISI 4130 균열 판재 시편의 파괴 인성평가" 대한기계학회 논문집, 제19권, 제10호, pp. 2431-2439, 1995.
9. Teruo Kishi, Hideto Ohyama and Kyo-han Kim, "針狀の組織をする Ti-6Al-4V 合金のき裂進展機構と破壊靱性" 鐵と鋼, 第72年, 第1號, pp.123-130, 1986.
10. Reuter, W.G., Chung, D.T. and Eiholzer, C.R., "Evaluation of Plate Specimens Containing Surface Flaws Using  $J$ -Integral Methods", ASTM STP 803, pp. I-480-502, 1983.
11. Brocks, W. and Noack, H.D., "Elastic-Plastic  $J$  Analysis for an Inner Surface Flaw in a Pressure Vessel", Experimental Mechanics, June, pp.205-209, 1983.