

파괴인성시험의 유한요소 시뮬레이션

주 석 재^{*†} · 류 충 호^{*}

* 울산대학교 기계공학부

Finite Element Simulation of Fracture Toughness Test

Seok Jae Chu^{*†} and Conghao Liu^{*}

* School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan

(Received August 30, 2012 ; Revised December 4, 2012 ; Accepted December 4, 2012)

Key Words: Plane Strain Fracture Toughness(평면변형률 파괴인성치), Finite Element Simulation(유한요소 시뮬레이션), Equivalent Stress(등가응력), Equivalent Plastic Strain(등가소성변형률)

초록: 인장시험을 유한요소 시뮬레이션하여 등가응력-등가소성변형률 곡선, 임계 등가응력과 임계 등가소성변형률을 결정하였다. 그리고, 이 곡선을 입력하여 파괴시험을 유한요소 시뮬레이션하여 평면변형률 파괴인성치를 결정하여 보려고 하였다. 균열선단절점에서 등가소성변형률이 임계 등가소성변형률에 도달할 때 균열개구변위를 임계 균열개구변위로 취하여 균열성장조건으로 사용되었다. 임계 등가소성변형률이나 단면감소율과 파괴시험 임계 균열개구변위와 관련성을 찾아보고, 임계 등가응력과 임계 등가소성변형률을 동시에 적용하여 파괴시험 파괴인성치와의 관련성도 찾아보았다.

Abstract: Finite element simulations of tensile tests were performed to determine the equivalent stress - equivalent plastic strain curves, critical equivalent stresses, and critical equivalent plastic strains. Then, the curves were used as inputs to finite element simulations of fracture toughness tests to determine the plane strain fracture toughness. The critical COD was taken as the COD when the equivalent plastic strain at the crack tip reached a critical value, and it was used as a crack growth criterion. The relationship between the critical COD and the critical equivalent plastic strain or the reduction of area was found. The relationship between the plane strain fracture toughness and the product of the critical equivalent stress and the critical equivalent plastic strain was also found.

- 기호설명 -

- a : 파괴시편의 균열길이
- B : 파괴시편의 두께
- COD_1 : 균열개구변위(균열선단에서 1 mm 뒤)
- COD_{40} : 균열개구변위(균열선단에서 40 mm 뒤)
- E : 탄성계수
- K_{Ic} : 평면변형률 파괴인성치
- $K_{Ic\ ref}$: 참고문헌에 실린 평면변형률 파괴인성치
- P_c : 임계하중
- S_u : 극한강도
- W : 파괴시편의 너비

- $\bar{\epsilon}_p$: 등가소성변형률
- $\bar{\epsilon}_{p\ crack\ tip}$: 균열선단절점에서 등가소성변형률
- $\bar{\epsilon}_{p\ fracture}$: 파단 될 때(임계) 등가소성변형률
- $\bar{\sigma}$: 상당응력
- $\bar{\sigma}_{fracture}$: 파단될 때(임계) 등가응력

1. 서 론

평면변형률 파괴인성치를 측정하는 작업은 까다로운 편이다. 균열선단 소성역이 충분히 작도록 파괴시편의 너비, 균열길이와 두께가 충분히 커야 하고, ASTM-E399 표준에 따라 노치에 피로 균열을 만들어야 하기 때문이다. 파괴인성시험을 직접 하지 않고도, 파괴인성시험을 유한요소 시

† Corresponding Author, sjchu@ulsan.ac.kr
 © 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

물레이션하여 평면변형률 파괴인성치를 예측하는 방법을 개발하면 유용하게 사용될 것이다.

선동주 등⁽¹⁾은 파괴인성시험을 유한요소 시물레이션하였다. 하중 - 균열개구변위 곡선과 초기 직선구간 기울기를 5% 낮춘 직선이 만나는 점에서 균열이 개시한다는 단순한 방법을 사용하였다.

Farahmand 등⁽²⁻⁶⁾은 인장시험으로 얻는 기계적 성질을 사용하여 파괴인성치를 예측하는 방법을 발표하였다. Griffith 이론을 일반화하여 소성변형이 존재하는 재료에도 적용하게 하였다. 인장시험으로 얻은 공칭응력 - 공칭변형률 곡선을 극한응력 이전 영역은 균일 소성변형영역, 이후는 불균일 소성변형영역 나눠 파괴시편 균열선단부근은 불균일 소성변형영역, 그 밖은 균일 소성변형영역에 대응시키고 균열이 진전할 때 에너지보존원리를 사용하여 임계균열길이를 계산하였다. 그러나, 관계식이 너무 복잡하고 slip band의 너비 등과 같이 추가적으로 입력할 것이 많다.

본 저자 등⁽⁷⁾은 인장시험을 유한요소 시물레이션하여 등가응력 - 등가소성변형률 곡선, 임계 등가응력과 임계 등가소성변형률을 구하였다. 본 논문에서는 이 곡선을 이용하여 파괴인성시험을 유한요소 시물레이션하거나 임계 등가응력과 임계 등가소성변형률을 사용하여 평면변형률 파괴인성치를 예측하려고 한다.

2. 평면변형률 파괴인성치의 예측

2.1 인장시험의 유한요소 시물레이션

등가 응력-등가 소성변형률 곡선을 결정하고 임계 등가응력이나 임계 등가소성변형률 등의 정보를 얻기 위하여 인장시험을 유한요소 시물레이션하였다. Fig. 1은 Farahmand 등^(4,5)이 다룬 5 가지 금속에 대한 공칭응력 - 공칭변형률 곡선을 수치화하여 그린 것이다.

MSC.Marc를 사용하여 봉상시편이라고 가정하고 Fig. 2와 같이 반만 모델링하였다. 좌측단이 네킹이 발생하는 시편의 중앙이고 우측단은 그림에 물리는 부분이다. 봉상시편 평행부의 반지름은 5 mm로 가정하였고 이 평행부에는 반경방향 길이가 1 mm인 요소 5 개를 배치하였다.⁽⁷⁾

등가응력-등가소성변형률 곡선을 단계적으로 조정하며 인장시험을 유한요소 시물레이션하였다. 최종적으로 Fig. 3과 같은 등가응력-등가소성

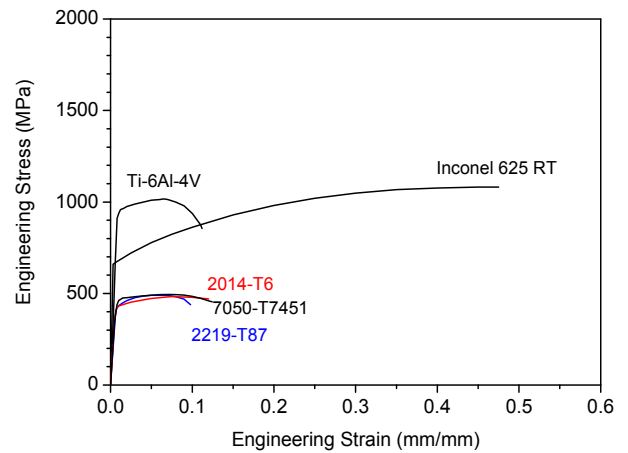


Fig. 1 Engineering stress - engineering strain curves

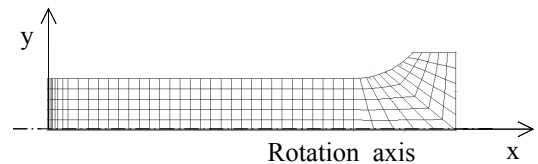


Fig. 2 Finite element mesh for tensile test specimen

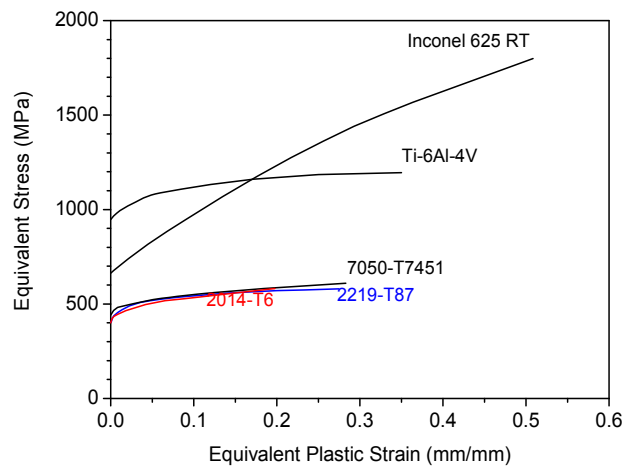


Fig. 3 True stress - true plastic strain curves

변형률 곡선으로 Fig. 4와 같이 일치하게 하였다. 인장시편이 파단될 때 변형형상은 Fig. 5와 같다. 모두 네킹이 좌측단에서 잘 발생하였다. 단면 감소율은 (a) 18%, (b) 23%, (c) 24%, (d) 27%, (e) 40%이었다.

Table 1 탄성계수 E 와 극한강도 S_u 는 Fig. 1에서 구한 것이고, 임계 등가응력 $\bar{\sigma}_{fracture}$ 와 등가소성변형률 $\bar{\epsilon}_{pfracture}$ 는 Fig. 3의 최종파단점에서 구한 것이다.

Table 1 Mechanical properties related to tensile test

| Material | E (GPa) | S_u (MPa) | $\bar{\sigma}_{fracture}$ (MPa) | $\bar{\epsilon}_{pfracture}$ |
|----------------|--------------|----------------|------------------------------------|------------------------------|
| 2014-T6 | 72.4 | 483 | 581 | 0.1978 |
| 2219-T87 | 72.4 | 462 | 580 | 0.2746 |
| 7050-T7451 | 71.7 | 495 | 609 | 0.2831 |
| Ti-6Al-4V | 113.8 | 1020 | 1195 | 0.3481 |
| Inconel 625 RT | 207.0 | 1081 | 1799 | 0.5086 |

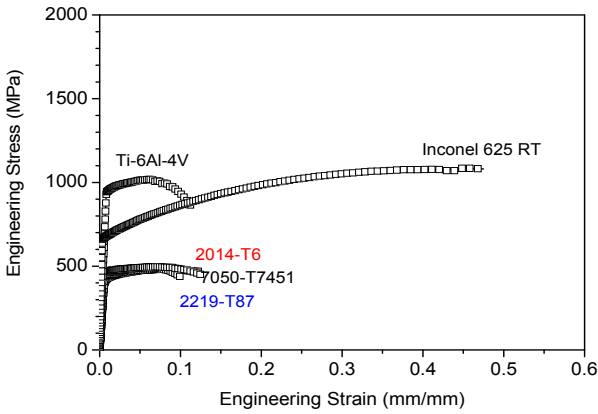


Fig. 4 Simulated engineering stress - strain curves

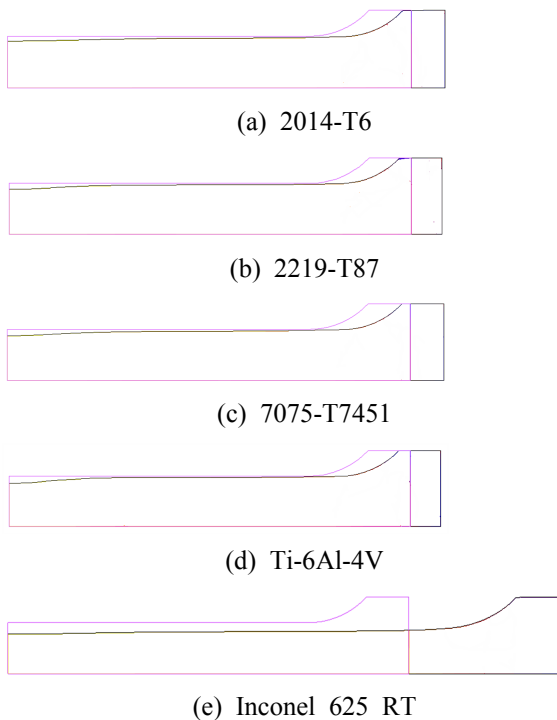


Fig. 5 Deformed shape of specimen at fracture

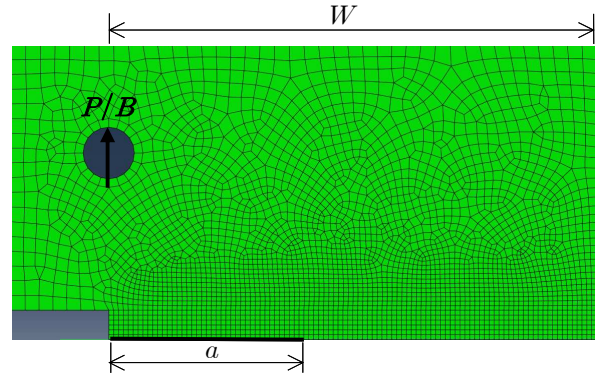


Fig. 6 Finite element mesh for compact tension specimen

2.2 파괴인성시험의 유한요소 시뮬레이션

ABAQUS를 사용하여 Compact Tension 시편을 Fig. 6과 같이 상반부만 모델링하였다. $W=100$ mm, $a=40$ mm이고 평면변형을 상태를 선택하였다. 균열선상부근은 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 인 정사각형 요소를 배치하여 인장시험 시뮬레이션용 요소크기와 같게 하였다.

응력확대계수는 식 (1)과 같이 주어진 것을 이용하였다.

$$K_I = \frac{P}{B} \sqrt{\frac{\pi}{W}} \left[16.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 104.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 369.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 573.8 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 360.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (1)$$

균열선단 뒤 균열개구변위를 측정하는 곳까지 거리는 1 mm 로 균열선단 뒤 이웃 절점을 지정하였다. $COD_1/2$ 이 임계 $COD_1/2$ 에 도달하면 절점이 균열선에서 떨어져 균열이 성장한다고 가정하였다. 하중점에는 하중 대신 변위조건을 지정하였고 하중은 하중점의 반작용력을 읽어 구하였다. Table 2에 제시한 평면변형률 파괴인성치 K_{Icref} 는 해석값으로 NASGRO 시험결과와 잘 일치함이 확인된 값이다.^(4,5) 임계 균열개구변위 $COD_1/2$ 를 임의로 입력하여 파괴인성시험을 시뮬레이션하고 단위두께 당 임계하중 P_c/B 을 식 (1)에 대입하여 K_{Ic} 를 구하였다. K_{Ic} 가 K_{Icref} 에 가까워질 때까지 $COD_1/2$ 를 변경하며 반복하여 Table 2 $COD_1/2$, P_c/B , K_{Ic} 를 결정하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 균열선단 뒤 40mm 위치와 1mm 위치에서의 단위두께당 하중에 대한 균열개구변위를 나타낸 것이다. 최대하중에 도달하면

Table 2 Mechanical properties related to fracture test

| Material | $COD_{1/2}$ (mm) | P_c/B (N/mm) | K_{Ic} (MPa mm ^{1/2}) | $K_{Ic,ref}$ (MPa mm ^{1/2}) |
|----------------|---------------------|-------------------|--------------------------------------|--|
| 2014-T6 | 0.01806 | 1196 | 869 | 870 |
| 2219-T87 | 0.02199 | 1439 | 1045 | 1040 |
| 7050-T7451 | 0.02438 | 1580 | 1147 | 1150 |
| Ti-6Al-4V | 0.02173 | 2283 | 1657 | 1660 |
| Inconel 625 RT | 0.03389 | 4574 | 3319 | 3310 |

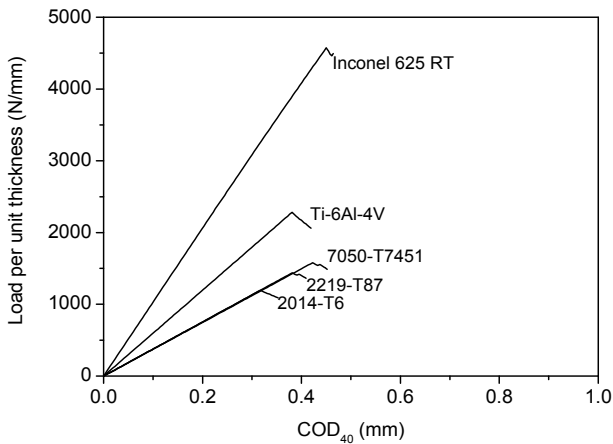


Fig. 7 Simulated load- COD_{40} curves

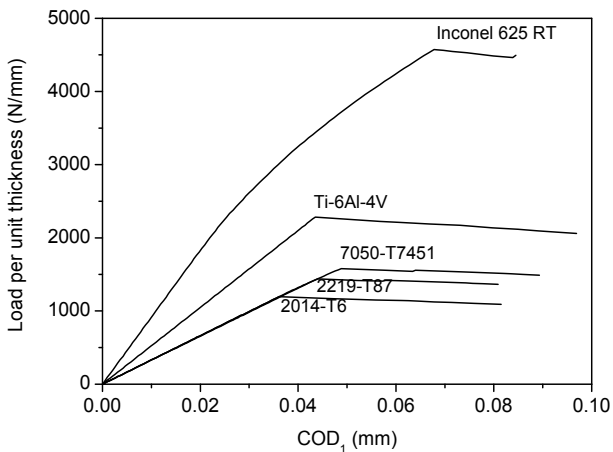


Fig. 8 Simulated load- COD_1 curves

균열이 연장되며 하중은 감소하여 실제 파괴인성 시험과 비슷한 거동을 보였다.

2.2.1 인장시험 등가소성변형률과 파괴시험 등가소성변형률의 비교

인장시험을 시뮬레이션하여 구한 $\bar{\epsilon}_{p, fracture}$ 을

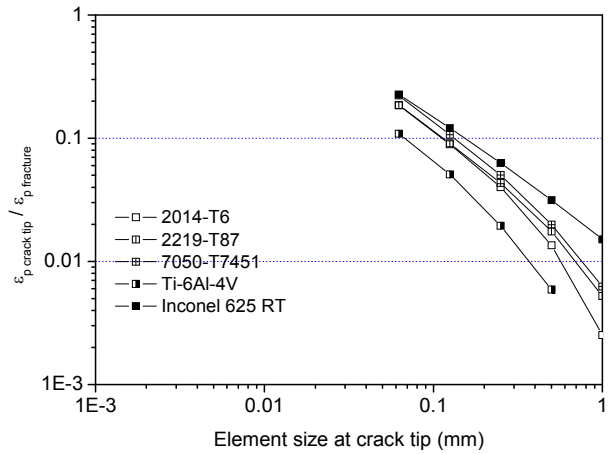
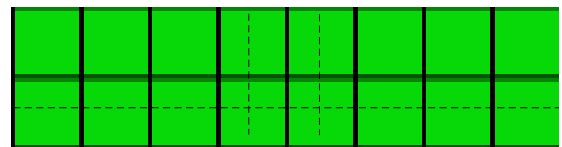
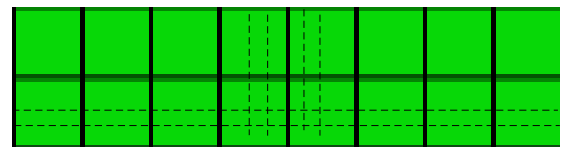


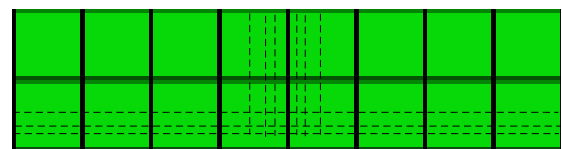
Fig. 9 Equivalent plastic strains at the crack tip under the critical load P_c/B



(a) Element size = 0.5 mm



(b) Element size = 0.25 mm



(c) Element size = 0.125 mm

Fig. 10 Mesh refinement process around the crack tip

이용하여 임계 $COD_{1/2}$ 를 구하여 보려고 하였다. 앞에서 구한 임계 하중 P_c/B 를 작용하고 균열선단 절점에서 등가소성변형률 $\bar{\epsilon}_{p, crack\ tip}$ 을 살펴보았다. Fig. 9와 같이 요소크기 1 mm일 때 $\bar{\epsilon}_{p, crack\ tip}$ 는 $\bar{\epsilon}_{p, fracture}$ 의 0.3~1.5%에 불과하였다. 파단점 부근에서 응력분포상태를 보면 인장시편은 비교적 균일분포상태이나 파괴시편은 그렇지 않으므로 파괴시편은 균열선단 부근 요소를 분할하여 자유도를 늘리면 $\bar{\epsilon}_{p, crack\ tip}$ 이 정확하여질 것으로 기대되었다. Fig. 10과 같이 균열선단 부근 요소를 분할하니 $\bar{\epsilon}_{p, crack\ tip}$ 은 증가하여

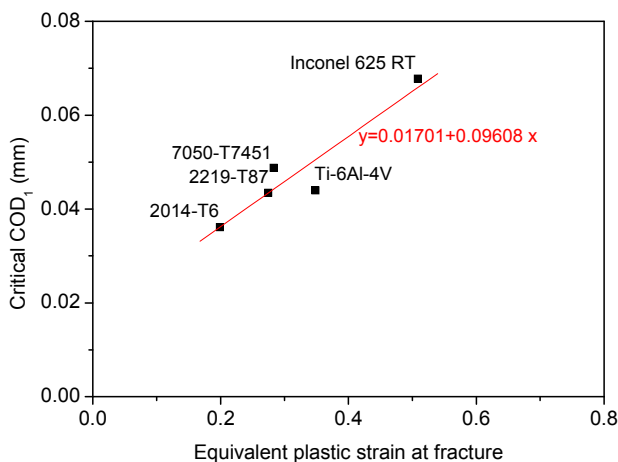


Fig. 11 Critical COD₁ vs. equivalent plastic strain at fracture

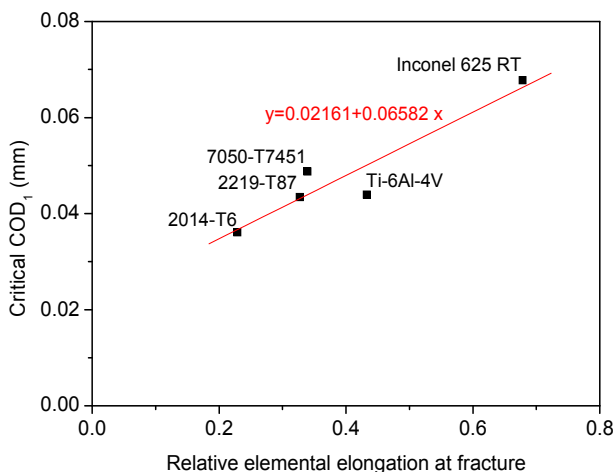


Fig. 12 Critical COD₁ vs. equivalent element elongation at fracture

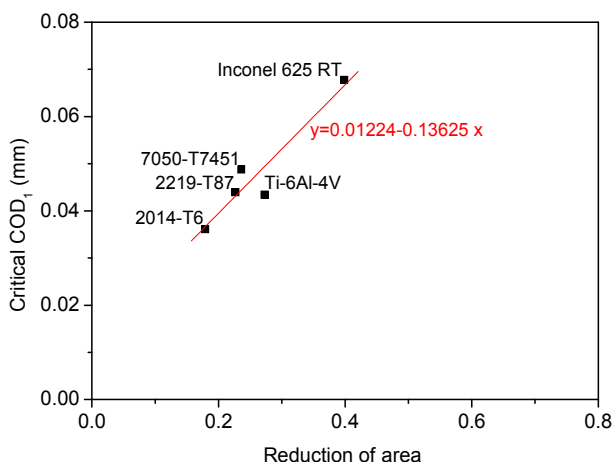


Fig. 13 Critical COD₁ vs. relative sectional area at fracture

요소의 크기 1/16 mm일 때 $\bar{\epsilon}_{p\ crack\ tip}$ 는 $\bar{\epsilon}_{p\ fracture}$ 의 19~23%까지 증가하였다. 100% 가까이까지 증

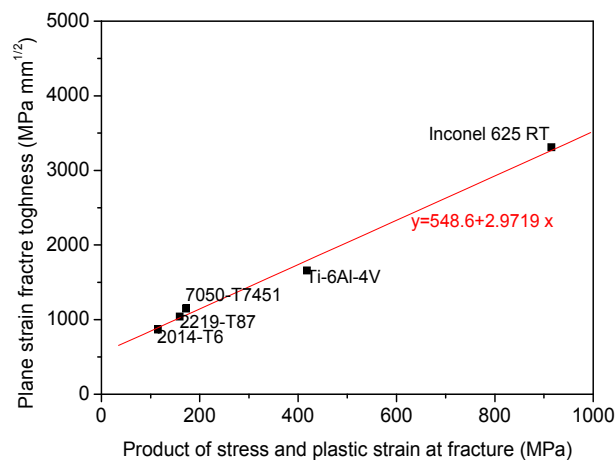


Fig. 14 Plane strain fracture toughness vs. product of equivalent stress and equivalent plastic strain at fracture

가하게 하려면 균열선단 부근 요소의 크기를 1/256이나 1/512 mm까지 줄여야 할 것으로 추정된다.

2.2.2 인장시험 특성과 임계 균열개구변위의 비교

인장시험을 시뮬레이션하여 구한, 임계 등가소성변형률 $\bar{\epsilon}_{p\ fracture}$, 연신율, 단면감소율과 임계 균열개구변위의 관련성을 찾아보았다. 연신율은 네킹이 발생한 단면의 중심에 배치한 요소의 축방향 길이 증가량을 초기길이로 나눈 것이고, 단면감소율은 네킹이 발생한 단면의 단면적 감소량을 초기단면적으로 나눈 것이다.

균열선단 뒤 1 mm 위치 임계 균열개구변위를, Fig. 11은 임계 등가소성변형률에 대하여, Fig. 12는 연신율에 대하여, Fig. 13은 단면감소율에 대하여 그려보았다. 본 논문에서 다른 금속 5가지에 대하여 선형맞춤식을 사용할 때 임계 균열개구변위의 최대오차는 Fig. 11에서 15%, Fig. 12에서 14%, Fig. 13에서 14% 이내로 서로 비슷하였다.

2.2.3 인장시험 등가응력과 등가소성변형률의 곱과 파괴인성치의 비교

파괴인성치는 임계 등가응력과 임계 등가소성변형률 양쪽에 관련될 것으로 예상된다. 인장시험을 시뮬레이션하여 구한, 임계 등가응력 $\bar{\sigma}_{fracture}$ 과 임계 등가소성변형률 $\bar{\epsilon}_{p\ fracture}$ 을 동시에 적용하여 평면변형률 파괴인성치와의 관련성을 찾아보았다. 즉, Fig.

14는 평면변형률 파괴인성치를 $\bar{\sigma}_{fracture}$ 과 $\bar{\epsilon}_{pfracture}$ 의 곱인 $\bar{\sigma}_{fracture} \cdot \bar{\epsilon}_{pfracture}$ 에 대하여 그려본 것이다. 본 논문에서 다른 금속 5가지에 대하여 선형맞춤식을 사용할 때 파괴인성치의 최대오차는 8% 이내이었다.

3. 결 론

참고문헌에 주어진 공칭응력-공칭변형률 곡선과 일치하도록 인장시험을 유한요소 시뮬레이션하여 등가응력-등가소성변형률 곡선을 결정하고 이것만을 사용하여 파괴인성시험을 유한요소 시뮬레이션하여 평면변형률 파괴인성치를 결정하여 보려고 하였다.

(1) 참고문헌에 주어진 평면변형률 파괴인성치와 일치하도록 파괴인성시험을 유한요소 시뮬레이션하여 임계 균열개구변위와 임계하중을 구하였다. 한편, 균열선단절점 등가소성변형률이 인장시험을 시뮬레이션하여 구한 임계 등가소성변형률에 도달할 때 임계 균열개구변위를 구하여 비교하였다. 그러나, 임계하중을 작용하여도 균열선단절점 등가소성변형률은 임계 등가소성변형률의 1% 전후에 불과하였고, 균열선단부근 요소를 분할하여 요소크기를 1/16로 축소하여도 20%에 불과하였다. 100% 가까이까지 증가하게 하려면 균열선단 부근 요소의 크기를 1/256이나 1/512 mm 까지 줄여야 할 것으로 추정된다.

(2) 인장시험을 유한요소 시뮬레이션하여 구한, 임계 등가소성변형률이나 단면감소율과 파괴인성시험 임계 균열개구변위와의 관련성을 살펴보았다. 선형맞춤식을 사용할 때 본 논문에서 다른 5가지 금속에 대한 파괴인성치의 최대오차는 15% 이내이었다.

(3) 인장시험을 유한요소 시뮬레이션하여 구한, 임계 등가응력과 임계 등가소성변형률을 동시에 적용하여 파괴인성시험 파괴인성치와의 관련성을 살펴보았다. 인장시험의 반지름은 5 mm이고 요소의 크기는 반경방향 1 mm로 모델링하여 해석하고 $K_{Ic} = 548.6 + 2.9719 \bar{\sigma}_{fracture} \bar{\epsilon}_{pfracture}$ 선형맞춤식을 사용할 때 본 논문에서 다른 5가지

금속에 대한 파괴인성치의 최대오차는 8% 이내이었다.

후 기

본 연구는 2011년도 울산대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행된 것으로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Sun, D. J., Park, M. K., Bahk, S. M. and Choi, Y. T., 1977, "Prediction of Elastic-Plastic Fracture Toughness for Metallic Material Using Finite Element Method," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 1, No. 1, pp. 95~100.
- (2) Farahmand, B. and Bockrath, G. E., 1996, "A Theoretical Approach for Evaluating the Plane Strain Fracture Toughness of Ductile Metals," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 53, No. 6, pp. 975~990.
- (3) Farahmand, B., 1997, *Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Parts*.
- (4) Farahmand, B., Saff, C., Xie, D. and Abdi, F., 2007, "Estimation of Fatigue and Fracture Allowables For Metallic Materials Under Cyclic Loading," *48th AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.
- (5) Farahmand, B. and Nikbin, K., 2008, "Predicting Fracture and Fatigue Crack Growth Properties Using Tensile Properties," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 2144~2155.
- (6) Farahmand, B. ed., 2009, *Virtual Testing and Predictive Modeling*.
- (7) Chu, S. J. and Liu, C., 2011, "Determination of True Stress-True Strain Curves from Tensile Tests with the Aid of Finite Element Analysis Simulation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 1, pp. 25~31.