

인장 실험과 XFEM 을 이용한 금속 균열 성장의 3 차원적 분석

이 성 현* · 전 인 수*†

* 전남대학교 기계공학부

3D Analysis of Crack Growth in Metal Using Tension Tests and XFEM

Sunghyun Lee* and Insu Jeon*†

* School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received January 16, 2014 ; Revised February 11, 2014 ; Accepted February 11, 2014)

Key Words: 3D Crack Growth(3 차원 균열 성장), Microfocus X-Ray CT(마이크로포커스 X-선 단층촬영), Mode I Fracture(모드 I 파괴), XFEM(확장유한요소법)

초록: 구조물의 파괴는 주로 제조 과정에서 생긴 결함이나 사용 중 국부적인 손상의 원인으로 발생하는 균열에 의해 나타난다. 따라서 구조물이나 관련된 부품들의 균열 성장 과정을 분석하는 것은 구조물의 안정성 확보를 위하여 매우 중요하다. 본 논문에서는 균열의 성장을 분석하기 위해 노치가 있는 시편을 인장 실험하며, 마이크로 포커스 X-선 단층촬영을 이용하여 균열 성장을 관찰하였고, 노치가 있는 시편의 단층촬영의 영상으로부터 3 차원 재구성하여 만든 유한요소 모델과 이상적인 모양의 노치를 만든 유한요소 모델을 XFEM 에 적용하여 3 차원 균열 성장의 시뮬레이션을 실시 하였다. 실제 시편의 인장 실험 결과와 시뮬레이션 실험들의 결과를 비교하였고, 보다 정밀한 3 차원적 균열 성장의 분석을 위해서는 실제적인 구조물 및 균열의 형태에 대한 3 차원 모델링이 반드시 실시되어야 함을 확인하였다.

Abstract: To prevent the occurrence of fractures in metal structures, it is very important to evaluate the 3D crack growth process in those structures and any related parts. In this study, tension tests and two simulations, namely, Simulation-I and Simulation-II, were performed using XFEM to evaluate crack growth in three dimensions. In the tension test, Mode I crack growth was observed for a notched metal specimen. In Simulation-I, a 3D reconstructed model of the specimen was created using CT images of the specimen. Using this model, an FE model was constructed, and crack growth was simulated using XFEM. In Simulation-II, an ideal notch FE model of the same geometric size as the actual specimen was created and then used for simulation. Obtained crack growth simulation results were then compared. Crack growth in the metal specimen was evaluated in three dimensions. It was shown that modeling the real shape of a structure with a crack may be essential for accurately evaluating 3D crack growth.

1. 서 론

구조물이 항복점 이상의 과대한 응력을 받아 소성변형이 발생된 후 본래의 형상으로 되돌아오지 않고 그 기능을 상실하는 경우를 파손(Failure)이라고 하며, 소성변형 후 구조물에 균열(Crack)이 발생하고, 균열이 더욱 진전하여 구조물이 분리되는 경우를 파괴(Fracture)라 한다. 구조물의 파괴는 균

열의 성장에 의하여 더욱 더 위험한 상황을 초래하므로 이러한 구조물의 파괴는 보다 안전한 구조물을 만들기 위하여 반드시 해결해야 하는 문제이다. 구조물 내에서의 균열은 구조물을 제작하는 과정 중에 발생한 결함 부위나 구조물의 사용 중에 발생하는 국부적인 손상에서 시작된다. 이러한 균열의 문제는 최근 파괴역학 분야의 발전과 함께 개선되어 왔다. 그러나 구조물에 내재하는 균열 또는 결함의 성장을 예측한 후, 이로 인한 파괴로 발생할 수 있는 손실 규모를 줄이는 방향의 기술 분야는 아직도 많은 연구가 필요한 상황이다.

† Corresponding Author, i_jeon@chonnam.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

균열의 3차원적 분석에 관한 연구로는 Vavrik⁽¹⁾이 X-선 단층촬영을 실시한 후, 시편에 내재하는 균열을 재구축(Reconstruction)하여 균열의 형상에 대한 분석을 실시하고, 광학 디지털 이미지 상관법 등을 이용하여 균열에 대한 파괴인자들을 측정하였다. 균열 성장에 대한 2차원적 시뮬레이션은 Chu 와 Liu⁽²⁾가 실시하였고, Sander 와 Richard⁽³⁾ 역시 순수모드와 혼합모드를 이용하여 2차원적 균열 성장을 시뮬레이션 하였다. 이러한 연구들은 잘 알려져 있는 Paris' law 를 기준으로 피로 균열 성장을 시뮬레이션 한 후, 균열 성장속도를 예측하고, 피로 실험 시 하중의 크기와 방향에 따른 균열 성장의 변화를 관찰하였다.

본 연구에서는 균열 성장 거동의 3차원적 분석을 위하여 하중이 균열면에 수직으로 작용하는 Mode I 균열 성장을 위한 인장 실험을 하였고, XFEM (eXtended Finite Element Method)을 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 균열의 진전을 시뮬레이션 하기 위한 XFEM 기법은 1999년 Ted Belytschko⁽⁴⁾에 의해 처음 소개되었고, 최근 들어 XFEM 기법을 이용한 3차원 균열 해석이 증가하는 추세이다.⁽⁵⁻¹¹⁾

본 연구를 위하여 먼저, 균열을 포함하는 금속 시편을 제작하였고, 재료에 내재 되어있는 실제적인 균열 형상의 모델링을 위하여 시편에 대한 X-선 단층영상을 촬영한 후 3차원 재구축을 실시하였다. 재구축한 시편 모델을 이용하여 시뮬레이션을 위한 기하학적 모델 및 유한요소 모델을 제작하였다. 시편에 대한 인장 실험을 통하여 균열 성장 거동을 관찰하고, 실험 시의 경계조건을 제작된 유한요소 모델에 적용하여 XFEM 을 이용한 시뮬레이션을 실시하였다.

또한 재구축한 시편을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하기 위하여 이상적인 형태의 균열을 내포하고 있는 시편에 대한 유한요소 모델을 제작하여 균열 진전에 대한 시뮬레이션을 실시하고, 실험 및 각각의 시뮬레이션 결과들을 바탕으로 균열 성장 시의 세부적인 재료 거동을 분석하였다.

본 연구를 위하여 실시한 실험과 시뮬레이션에 대한 간단한 설명은 다음과 같다.

- Experiment: 노치가 있는 시편을 제작하여 균열 성장 시뮬레이션 모델의 제작을 위한 단층 영상을 촬영하고, 인장실험을 실시하여 Mode I 균열 성장을 발생시킨다.
- Simulation-I: 마이크로 포커스 X-선 단층 촬영 장비로 노치(notch)가 있는 시편의 단층 영상을 획득한 후, 시편에 대하여 3차원 재구축을 하고,

재구축한 모델로 유한요소 모델링 및 시뮬레이션을 실시하여, 균열 성장 결과를 획득한다.

- Simulation-II: 실험 시편과 동일한 모양의 이상적인 3 차원 모델 내부에 이상적인 균열을 포함시켜 유한요소 모델을 만들고, 시뮬레이션을 실시하여 균열 성장 결과를 획득한다.

2. 연구 방법

2.1 XFEM (eXtended Finite Element Method)

상용 유한요소 해석 코드인 Abaqus(Dassault Systems Inc.)의 균열 해석 기법 중 하나인 XFEM 은 비선형 재료 및 기하학적 비선형성에 대한 시뮬레이션이 가능하며, 균열선단 주변에 요소 재분할이 필요 없는 장점이 있다.⁽¹²⁾ Fig. 1과 같이 유한요소 모델 상에 균열을 표현하는 방법도 쉽고 간단하게 정의할 수 있다.⁽¹³⁾

균열 해석을 위한 각각의 절점에서의 변위 계산을 위한 구성방정식은 식 (1)과 같다.^(14,15)

$$u = \sum_{l=1}^N N_l(x) \left[u_l + \underbrace{{}_l H(x) a_l}_{l \in N_f} + \sum_{\alpha=1}^4 \underbrace{F_{\alpha}(x) b_l^{\alpha}}_{l \in N_a} \right] \quad (1)$$

여기서, $N_l(x)$: 형상함수, $H(x)$: Heaviside 함수, $F_{\alpha}(x)$: 탄성 점근 균열선단함수들, u_l : 변위벡터, a_l : 불연속 Heaviside 함수에 대한 절점 보강 DOF 벡터, b_l^{α} : 점근 균열선단 함수에 대한 절점 DOF 벡터이다.

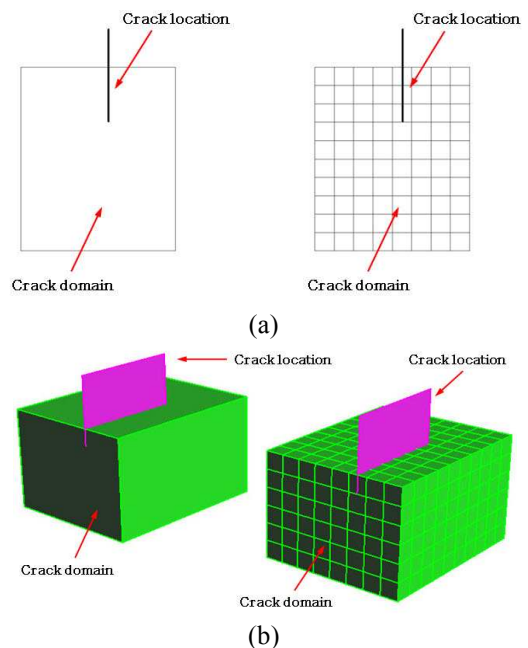


Fig. 1 Defining a crack in (a) 2D model and (b) 3D model for XFEM

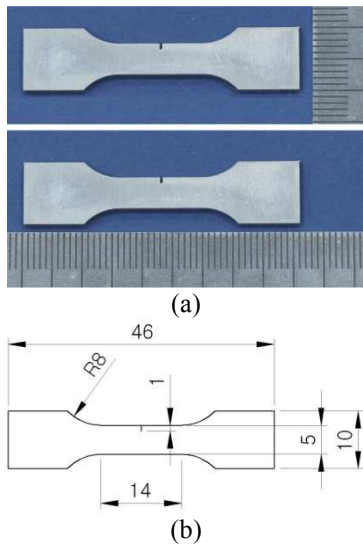


Fig. 2 (a) Images of specimen, (b) design of specimen

XFEM 시뮬레이션의 Damage modeling 은 “Cohesive segments approach”와 “Linear elastic fracture mechanics(LEFM) approach”가 있는데 전자는 취성 또는 연성 파괴 문제의 해석에 사용되고, 후자는 취성 파괴 문제에만 사용이 가능하다. “Cohesive segments approach”의 파손개시 기준 (Damage initiation criteria)는 다음과 같은 3 가지의 응력과 3 가지의 변형률을 기준으로 한다.⁽¹⁶⁾

1. Maximum principal stress(MAXPS) and maximum principal strain (MAXPE)
2. Maximum nominal stress(MAXS) and maximum nominal strain (MAXE)
3. Quadratic nominal stress(QUADS) and quadratic nominal strain (QUADE)

본 연구에서는 파손 개시 기준으로서 최대 주 응력(MAXPS)과 주 변형률(MAXPE)을 사용하였으며, 파손 진전(damage evolution)의 기준(criteria)으로는 에너지 방출률(energy releaserate(G))을 사용하였다.⁽¹⁷⁾

2.2 인장실험

2.2.1 시편의 제작

균열 성장 실험을 위한 시편은 항공기 및 압력 용기에 주로 사용되고 있는 Al 5052 합금 재료를 사용하였다. 초기 균열은 와이어 커팅기(wire cutting machine)를 이용하여 시편에 Fig. 2(a)와 같이 노치를 만들었다. 시편의 전체적인 크기는 Fig. 2(b)에 나타내었고, 두께는 1.5mm 이다.

2.2.2 시편의 단층촬영

제작된 시편에 대한 3차원 재구축 모델을 제작

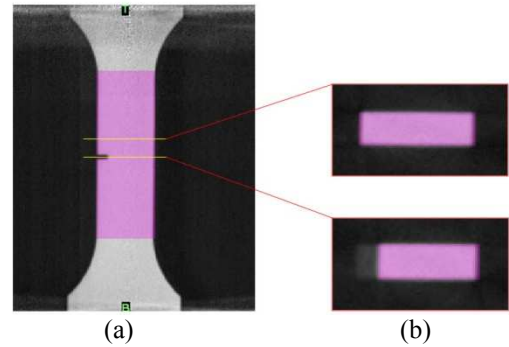


Fig. 3 CT images of the specimen obtained using microfocus X-ray CT system: (a)X-ray image of the specimen (b) CT images of the specimen

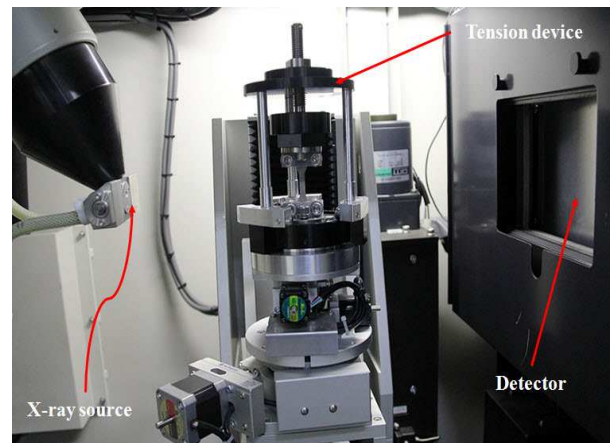


Fig. 4 Setup of the tension test device in the microfocus X-ray CT system

하기 위하여 microfocus X-ray CT system(SMX-225 CT, Shimadaz Corp.)을 이용하여 시편의 표점거리 14mm 영역을 수직 방향으로 0.02082mm 간격의 횡단면(transverse plane) 단층 영상을 얻었다(Fig. 3(a)). 획득한 단층 영상은 Fig. 3(b)에 나타내었다.

2.2.3 인장 실험 장비 제작

노치가 있는 얇은 판재형 시편을 이용하여 Mode I 파괴 실험을 진행하면서 동시에 균열 성장을 마이크로 포커스 X-선 단층촬영 장비를 이용하여 확인하고자 하였다. 이를 위해서는 균열 성장 실험과정 중에 X-선 단층촬영을 실시하여야 하므로 마이크로 포커스 X-선 단층촬영 장비의 검사대 위에 균열 성장을 발생시킬 수 있는 인장 실험 장치(Tension device)를 제작하여 설치하였으며, 변위 제어로 균열 성장 실험이 가능하다(Fig. 4).

2.2.4 균열 성장 실험

인장실험 장치는 스패너(Spanner)의 조작에 의한 나사 운동에 의해 시편의 상측을 잡고 있는 클램

프(Clamp)가 상하 직선 운동을 하여 인장 하중이 가해지며 이러한 하중을 이용하여 균열 성장 실험을 실시하였다.

Fig. 5부터 7은 Mode I 실험에 의한 시편의 균열 성장 단계를 3단계로 구분하여 나타내었다. 각각의 균열 성장 단계에 대한 시편을 0.020882mm 간격으로 단층 영상을 얻었고, Fig. 8에 그 결과를 나타내었다.

2.3 Simulation-I: real crack model

2.3.1 3 차원 재구축

시편에 대한 3차원 유한요소 모델을 만들기 위해서는 시편의 기하학적 모델이 필요하며, 이를 위해서는 시편에 대한 3차원 재구축 모델이 필요하다. 본 연구에서는 시편으로부터 얻은 단층영상

들과 상용 프로그램인 Mimics(Materialise Inc.)를 이용하여 시편에 대한 3차원 재구축을 실시하였다 (Fig. 9).

2.3.2 유한요소 모델 제작 및 시뮬레이션

XFEM 을 이용한 균열 성장 시뮬레이션은 1 단계: 균열 시작, 2 단계: 균열 진전, 3 단계: 파손으로 이루어진다. XFEM 에서 적용되고 있는 일반적인 금속의 파손 과정에 대한 응력-변형률 선도를 Fig. 10 과 같이 나타내었고, 각 구간을 다음과 같이 분류하였다.⁽¹⁵⁾

- Undamaged material response (a - b - c - d')
- Damage initiation criterion (c)
- Damage evolution (c - d)

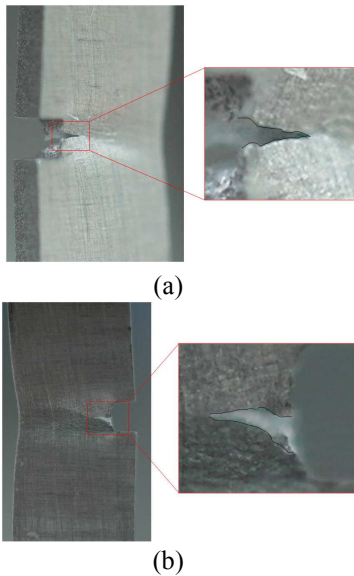


Fig. 5 The first step of crack growth test: (a) front side and (b) back side of specimen

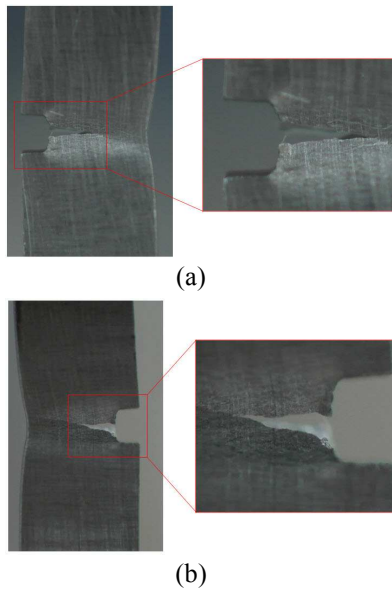


Fig. 6 The second step of crack growth test: (a) front side and (b) back side of specimen

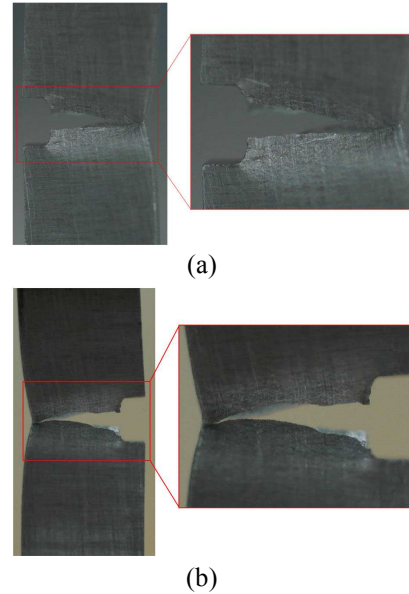


Fig. 7 The third step of crack growth test: (a) front side and (b) back side of specimen

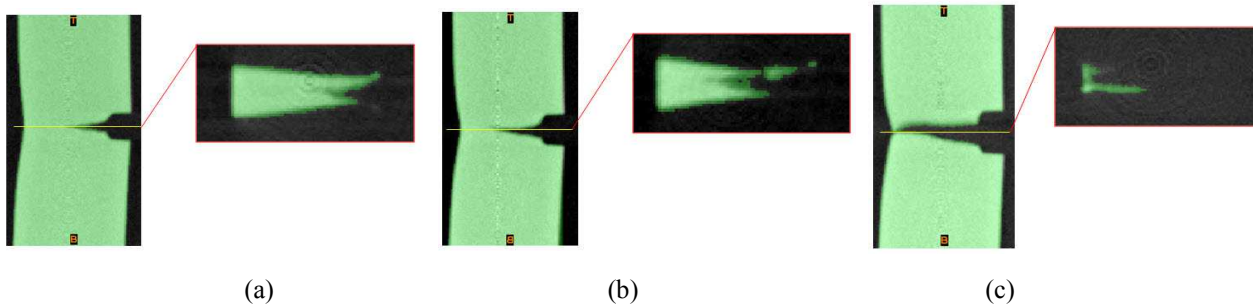


Fig. 8 CT images during crack growth: (a) the first step, (b) the second step and (c) the third step

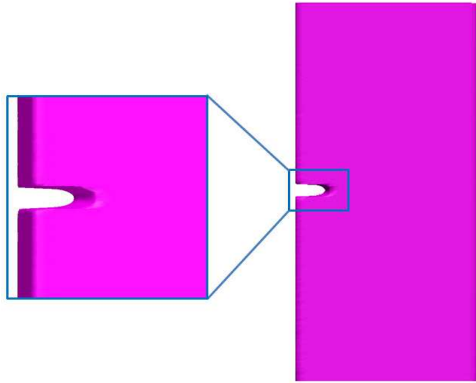


Fig. 9 3D-reconstruction of the specimen

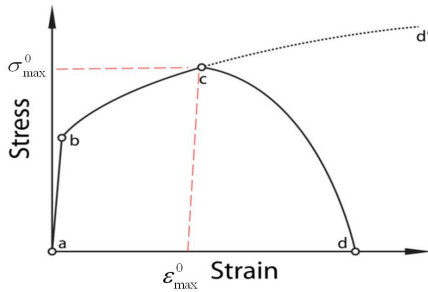


Fig. 10 Typical uniaxial stress-strain response of a metal specimen

본 연구에서는 XFEM 을 이용한 시뮬레이션을 위하여 파손개시기준은 최대 주변형률을 이용하였으며, 식 (2)에서 $f=1$ 일 때 파손이 개시된다.^(15,16)

$$f = \frac{\langle \epsilon_{max} \rangle}{\epsilon_{max}^0} \quad (2)$$

여기서, ϵ_{max}^0 : 최대허용 주변형률, $\langle \rangle$: Macaulay bracket 이며, 순수 압축응력 상태에서는 파손이 시작되지 않는 것을 위해 사용된다.

파손 진전 기준(Damage evolution criterion)으로는 식 (3)과 같은 에너지 방출률(Energy release rate(G))를 사용하였다.

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (3)$$

여기서, K_{IC} 는 파괴인성치(Al 5052의 경우, 13.61 (MPa√m)⁽¹⁸⁾)이고, E는 탄성계수이다.

시뮬레이션을 위하여 사용한 재료 물성치는 참고문헌 및 물성측정 실험을 통하여 확보하였으며 Table 1에 그 값을 나타내었다.⁽¹⁹⁾ 또한, 시편은 연성재료로서 균질(Homogeneous), 등방성(Isotropic) 재료로 가정하였다.^(20,21)

Table 1 The mechanical properties of Al 5052

E (GPa)	Poisson's ratio ν	σ_y (MPa)	ϵ_{max}^0
70	0.3	175	0.006693

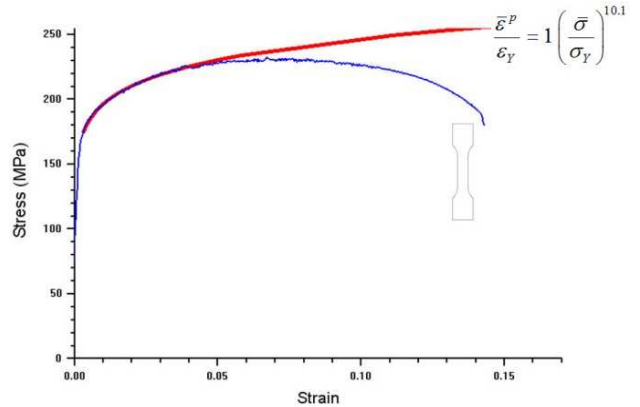


Fig. 11 Elastic-plastic stress-strain curve and fitted curve

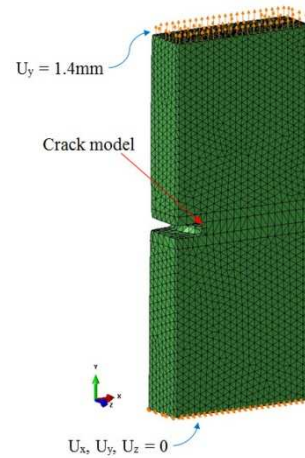


Fig. 12 FE model with load and boundary condition for Simulation-I

금속의 탄소성(Elastic-plastic) 거동을 고려한 해석을 위해 멱급수 경화 가정을 이용하였다.(식 4) Fig. 11 은 물성측정 실험을 통하여 얻은 탄소성 거동에 관한 선도를 나타낸다.

$$\frac{\bar{\epsilon}^p}{\epsilon_Y} = \alpha \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_Y} \right)^m \quad (4)$$

여기서, σ_y : 단축항복응력, $\bar{\sigma}$: Mises 응력, $\bar{\epsilon}^p$: 소성등가 변형률, $\epsilon_Y = \sigma_Y / E$: 기준변형률, α : 무차원 재료상수, m : 멱급수 경화지수이다.

시뮬레이션을 위한 물성으로서, $\alpha = 1$ 로 가정하였고, 응력변형을 선도상의 비선형 거동에 대한 곡선 맞춤(Curve fitting)으로부터 $m=10.1$ 을 결정하였다(Fig. 11).

노치가 있는 시편의 3차원 재구축 모델을 기반으로 C3D4의 사면체 요소(Tetrahedral elements)로 유한요소 모델링 프로그램인 Patran(MSC software)을 이용하여 정밀하게 모델링 하였으며, 하중으로서 변위를 적용하여 균열 성장을 시뮬레이션 하였다.⁽⁷⁾ 노치가 있는 시편을 이용하여 만능재료 시험기(Universal testing machine)로 인장시험을 실시할 경우, 완전 파단 되었을 때의 변위인 1.34mm를 참고하여 Fig. 12과 같이 시편의 밑단은 완전 고정을 하였으며, 상단에는 $U_y=1.4mm$ 의 변위를 적용하였다.

2.4 Simulation-II: ideal crack model

이상적인 균열을 포함한 시편에 대한 시뮬레이션을 위하여 Fig. 2(b)에 나타난 표점거리 14mm의 구간을 3차원 모델링 프로그램인 Rhinoceros

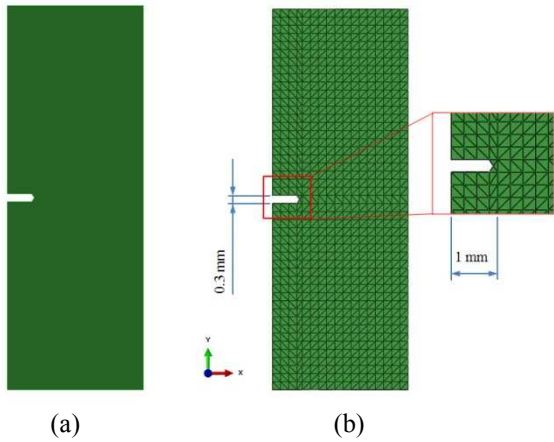


Fig. 13 (a) Geometric model, (b) FE model for Simulation-II

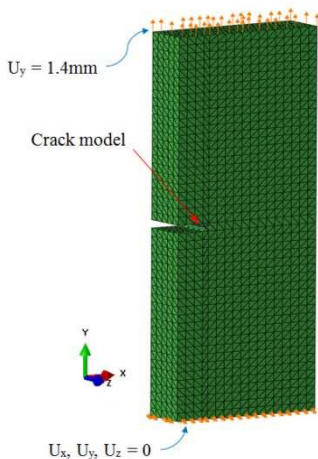


Fig. 14 Load and boundary condition for Simulation -II

(McNeel Inc.)를 이용하여 실제 시편과 동일한 크기로 모델링 하였다(Fig. 13(a)). 또한 Simulation-I과 동일한 방법으로 C3D4의 사면체 요소로 Patran을 이용하여 정밀하게 모델링 하였다(Fig. 13(b)).

시뮬레이션을 위한 하중 및 경계조건 역시, Simulation-I과 동일한 방법으로 시뮬레이션을 진행하였다(Fig. 14).

3. 결과 및 고찰

3.1 3차원 재구축 및 시뮬레이션 결과

인장 실험으로부터 크게 3단계로 균열 성장을

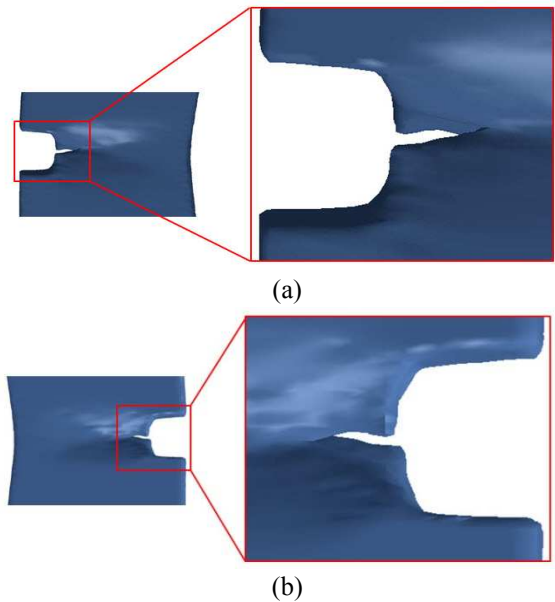


Fig. 15 3D-reconstructed model for the first-step of crack growth : (a)front and (b)back side

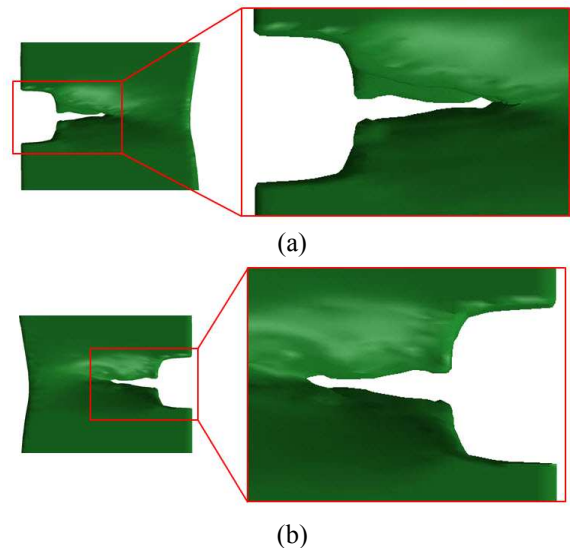


Fig. 16 3D-reconstructed model for the second step of crack growth : (a)front and (b)back side

발생시킨 후, 각각의 단계에 대하여 획득한 단층 촬영 영상을 이용하여 3 차원 균열의 형상을 재구축하였다(Figs. 15~17).

Fig. 15 에서 17 로부터 각각의 단계에서 균열 크기가 증가되고 있음을 확인할 수 있었고, 균열 선단의 두께, 방향, 형상 변화를 확인할 수 있다.

Fig. 18 에는 Simulation-I 에 대한 결과를 나타내었다. 실제적인 초기 노치의 모델로부터 시뮬레이션을 통하여 얻은 균열의 성장 형태가 균일하지 않으므로 실제적인 금속재료의 균열 성장과 비교적 유사한 형태의 균열 성장 형상을 얻게 됨을 알 수 있다.

Simulation-II 의 결과는 Fig. 19에 나타내었다. 이상적인 노치 및 균열에 대한 모델링으로부터 균열

성장 시 두께 방향으로의 균열 형태가 비교적 균일함을 알 수 있으며 이러한 결과는 실제적인 금속재료의 균열 진전 상황과는 상당히 거리가 있는 것을 확인할 수 있다.

3.2 인장 실험과 Simulation-I, II 의 비교

보다 세부적인 3차원적 균열 형상의 비교를 위

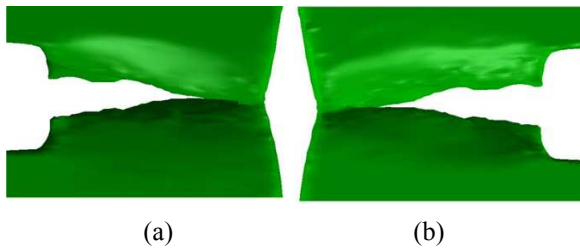


Fig. 17 3D-reconstructed model for the third step of crack growth: (a) front and (b) back side

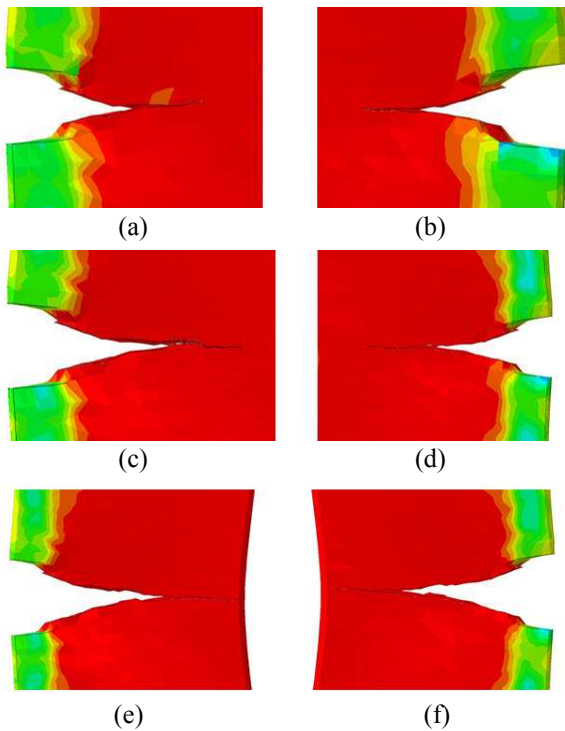


Fig. 18 Crack growth of Simulation-I: (a)front and (b)back side of the first step, (c)front and (d)back side of the second step and (e)front and (f)back side of the third-step

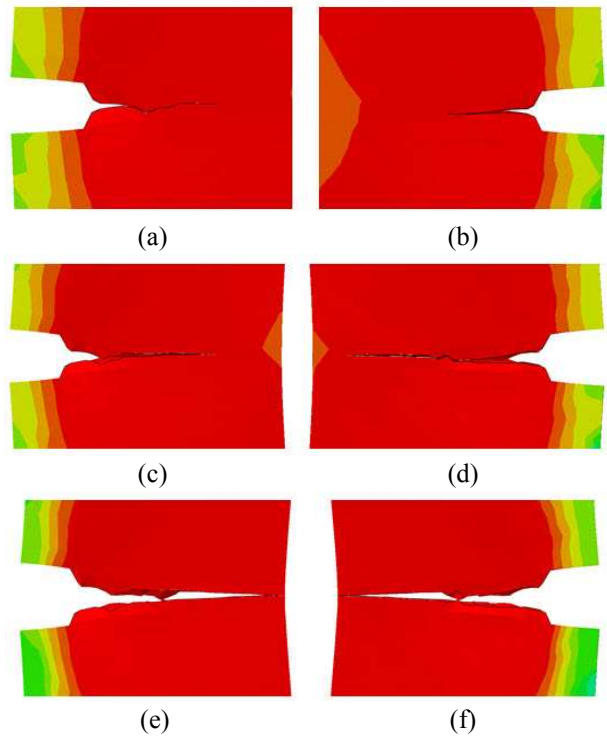


Fig. 19 Crack growth of Simulation-II: (a)front and (b)back side of the first step, (c)front and (d)back side of the second step and (e)front and (f)back side of the third-step

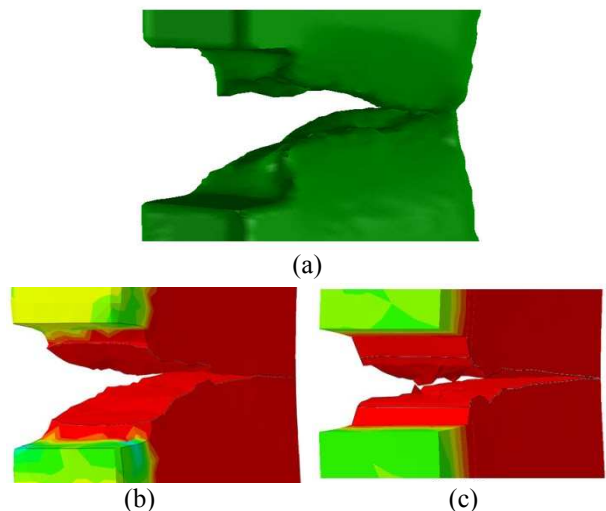


Fig. 20 Front side shape comparisons: (a) Tension test, (b) Simulation-I, (c) Simulation-II

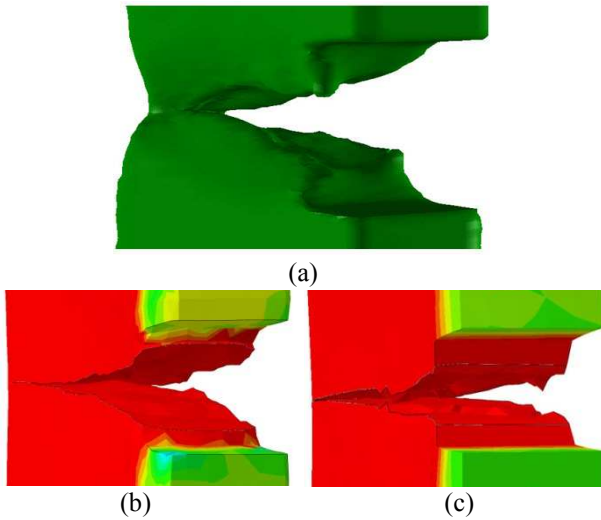


Fig. 21 Back side comparison results: (a) Tension test, (b) Simulation-I, (c) Simulation-II

하여 Fig. 20, 21 에 균열 성장 3단계에 대하여 인장 실험 실시 후의 시편을 이용하여 획득한 3차원 재구축 모델과 Simulation-I 및 II 의 결과를 비교하였다. Simulation-II 에 비해, Simulation-I 이 보다 실제적인 균열의 형태인 3차원 재구축 모델과 근접한 3차원적 균열의 형상을 획득할 수 있음을 알 수 있고, Simulation II 의 경우 비교적 균질한 3차원적 균열 성장 형태를 얻게 됨을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션의 경우, 시편의 두께 방향으로의 변형은 정확하게 묘사되기 어려운 단점을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

구조물의 균열 성장에 대한 3차원적인 분석을 위해 Al 5052 합금 재료를 사용하여 시편을 제작하고, 인장 실험 및 두 가지 방법의 시뮬레이션을 통하여 균열 성장에 대한 분석을 실시하였다. 인장 실험으로는 노치가 있는 시편에 인장을 가하여 Mode I 균열 성장을 유도하였다.

Simulation-I 의 경우, 노치가 있는 실제 시편에 대하여 마이크로 포커스 X-선 단층촬영 장비를 이용하여 얻은 단층 영상으로부터 3차원 재구축 모델을 제작한 후 유한요소 모델을 형성하여 균열 성장에 대한 시뮬레이션을 실시하였으며, 마지막으로 Simulation-II 의 경우, 이상적인 시편과 이상적인 노치 형상을 이용하여 유한요소 모델을 제작하고 균열 성장을 시뮬레이션 하였다. 인장 실험으로부터 얻은 균열 성장에 대하여 3차원 재구축 모델들을 기준으로 Simulation-I 과 Simulation-II 의

시뮬레이션 결과를 비교하였다.

Simulation-I 의 균열 성장 결과는 Simulation-II 의 결과보다 실제적 인장 실험 결과와 보다 더 유사한 3차원적 균열 성장 거동을 보였다. 이에 반해 Simulation-II 의 결과는 거의 균일한 균열 성장 형상을 관찰할 수 있었고 실제 균열 형상과는 많은 차이를 보였다.

본 연구 결과를 통하여 탄소성 거동을 보이는 금속 시편에 대한 균열 성장의 3차원적인 분석을 실시할 수 있었고, 보다 정밀한 균열 형태 분석을 위해서는 Simulation-I 과 같이 구조물 상에 실제적으로 내재하고 있는 균열 및 실제적인 구조물의 형태에 대한 모델링이 반드시 실시되어야 함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012R1A2A2A01046128)

참고 문헌 (References)

- (1) Vavrik, D., 2012, "Crack Behavior in Ductile Thin Wall Materials," *Technology for Next Generation Vehicle*, Vol. 15, pp. 27~33.
- (2) Chu, S. J. and Liu, C., 2012, "Finite Element Simulation of Fatigue Crack Growth: Determination of Exponent m in Paris Law," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 7, pp. 713~721.
- (3) Sander, M. and Richard, H. A., 2005, "Finite Element Analysis of Fatigue Crack Growth with Interspersed Mode I and Mixed Mode Overloads," *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, No. 8, pp. 905~913.
- (4) Moes, N., Dolbow, J. and Belytschko, T., 1999, "A Finite Element Method for Crack Growth Without Remeshing," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 131~150.
- (5) AlloysKeswani, K., Singh, K. L. and Arokkiaswamy, A., 2012, "Computation of SIF and Crack Growth Simulation Using XFEM Techniques," *International Conference on Advanced Research in Mechanical Engineering*.
- (6) Das, P., Singh, I. V. and Jayaganthan, R., 2012, "Crack Growth Simulation of Bulk and Ultrafine Grained 7075 Al Alloy by XFEM," *International Journal of Materials & Product Technology*, Vol. 44, No. 3~4, pp. 252~276.
- (7) Gigliotti, L., 2012, "Assessment of the Applicability of XFEM in Abaqus for Modeling Crack Growth in

- Rubber,” Master Thesis, *KTH School of Engineering Sciences*.
- (8) Jiang, Y., Tay, T. E., Chen, L. and Sun, X. S., 2013, “An Edge-Based Smoothed XFEM for Fracture in Composite Materials,” *International Journal of Fracture*, Vol. 179, No. 1~2, pp. 179~199.
- (9) LEVEN, M., 2012, “Stationary 3D Crack Analysis with Abaqus XFEM for Integrity Assessment of Subsea Equipment,” Master Thesis, *Chalmers University of Technology*.
- (10) Seabra, M. R., Sustaric, P., Cesar de Sa, J. A. and Rodič, T., 2012, “Damage Driven Crack Initiation and Propagation in Ductile Metals Using XFEM,” *Computational Mechanics*, pp. 1~19.
- (11) Ye, C., Shi, J. and Cheng, G. J., 2012, “An eXtended Finite Element Method (XFEM) Study on the Effect of Reinforcing Particles on the Crack Propagation Behavior in a Metal–Matrix Composite,” *International Journal of Fatigue*, Vol. 44, pp. 151~156.
- (12) Mesh-Independent Fracture Modeling Using the Extended Finite Element Method(XFEM), <http://www.simulia.com/services/training/wbtAbaqus69>.
- (13) ABAQUS Ver. 6.10, Abaqus/CAE User's Manual.
- (14) Belytschko, T. and Black, T., 1999, “Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 45, No. 5, pp. 601~620.
- (15) ABAQUS Ver. 6.10, Abaqus Analysis User's Manual.
- (16) Du, Z., “eXtended Finite Element Method (XFEM) in Abaqus,” <http://www.simulia.com/download/rum11/UK/Advanced-XFEM-Analysis.pdf>.
- (17) Reinhardt, L. and Cordes, J., 2010, “XFEM Modeling of Mixed-Mode Cracks in Thin Aluminum Panels,” *2010 Simulia Customer Conference*, pp. 1~13.
- (18) Kim, Y. S., 2000, “Fracture Characteristics of Aluminum Alloy Composites Reinforced with Carbide Particles,” *School of Metallurgical and Materials Engineering, Kookmin Univ.*, Vol. 22, pp. 43~51.
- (19) <http://www.matweb.com>.
- (20) Pourmodheji, R. and Mashayekhi, M., 2012, “Improvement of the Extended Finite Element Method for Ductile Crack Growth,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 551, pp. 255~271.
- (21) Sobotka, J. C., 2010, “Steady Crack Growth Through Ductile Metals: Computational Studies,” Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.