

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(11), 919-926(2014)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.919

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

재료의 취성과 연성이 균열의 진전에 미치는 영향

정재연*, 우경식**

Effect on Material Property on the Frature Propagation Behavior

Jaeyeon Jeong* and Kyeongsik Woo**

Korea Aerospace Research Institute*, Chungbuk National University**

ABSTRACT

In this paper, the effect of material properties on fracture behavior was studied using cohesive zone model and extended finite element method. The rectangular tensile specimen with a central inclined initial crack was modeled by plane stress elements. In the CZM modeling, cohesive elements were inserted between every bulk elements in the predicted crack propagation region before analysis, while in the XFEM the enrichment to the elements was added as needed during analysis. The crack propagation behavior was examined for brittle and ductile materials. For thin specimen configuration, wrinkle deformation was accounted for by geometrically nonlinear post-buckling analysis and the effect of wrinkling on the crack propagation was investigated.

초 록

본 논문에서는 재료의 물성에 따른 파괴 거동을 응집영역모델과 확장유한요소법을 이용하여 예측하였다. 중앙에 경사진 초기 균열을 가지는 직사각형 시편 형상에 대해 평면응력 요소로 모델링하고 인장하중을 가하여 균열의 전파 거동을 모사하였다. 파손 진전이 예측되는 지역에 대해 응집영역모델링 해석에서는 모든 일반 요소들 사이에 응집요소를 삽입하였고, 확장유한요소해석에서는 요소확장영역으로 지정하였다. 취성과 소성 재료에 대해 파괴 형태를 예측하고 파괴 강도를 계산하였다. 시편의 두께가 매우 얇은 경우에 기하학적 비선형 후좌굴해석 기법으로 주름변형을 고려하였고 주름이 파괴 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

Key Words : Brittle Material(취성 재료), Ductile Material(연성 재료), Cohesive Zone Model(응집영역모델), eXtended Finite Element Method(확장유한요소법), Propagation Direction(전파 방향), Wrinkle Analysis(주름 해석)

1. 서 론

공학용 재료들의 파괴 거동을 예측하기 위해 현재 여러 파괴역학적 방법이 사용되고 있다. 재

료의 파괴거동을 예측하는 전산해석적 방법으로 최근 응집영역모델(Cohesive Zone Model, CZM) 방법과 확장유한요소법(eXtended Finite Element Method, XFEM)이 많이 사용되고 있다. CZM 방

† Received : July 5, 2014 Revised : September 22, 2014 Accepted : September 29, 2014

** Corresponding author, E-mail : kw3235@chungbuk.ac.kr

법은 재료의 파손을 계면의 점진적인 분리로 인한 균열 진전으로 나타내는데, Barenblatt[1]와 Dugdale[2] 이론에 따라 취성 및 소성재료의 파손을 예측하는 방법으로 개발되었다[3~4]. 이후 CZM 방법에 대해 많은 연구가 수행되었으며 선형탄성 및 탄소성 균열전파해석에 매우 효과적으로 사용되고 있다. 반면 XFEM의 경우 균열선단 주변의 요소의 모양함수에 선형탄성과파괴역학 해에 기반한 별도의 모양함수로 확장시켜 요소 내부로 균열전파를 모사하는 방법으로서 균열이 메쉬의 형태에 무관하게 전파되는 장점이 있어서 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[5~8].

취성재료(Brittle Material)에서 인장시편의 균열전파 거동 및 방향은 선형탄성과파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM)적 방법으로 비교적 정확히 예측되는 것으로 알려져 있다 [9~11]. 전통적으로 이 방법에서는 균열 선단 근처에서 응력확대계수(Stress Intensity Factor)와 J -적분 등 응력장을 분석하여 재료의 파손을 예측한다. 한편 큰 소성변형을 가지는 연성재료 (Ductile Material)의 경우 균열전파 거동은 취성 재료의 경우와 다를 수 있다. 이 경우 소성변형으로 인하여 균열선단 근처의 응력장이 선형탄성과파괴역학 이론으로 예측한 것과 많이 다르고 또한 파괴의 메커니즘도 취성재료와는 상이하여 파괴응력이나 균열전파 방향 등 파괴진전 거동에 큰 차이가 나타나게 된다.

본 논문에서는 초기 균열이 있는 직사각형 시편을 이용하여 재료의 물성에 따른 파괴 거동을 수치적으로 연구하였다. 해석방법으로는 CZM 방법과 XFEM 방법을 사용하였다. 경사진 형태의 초기 균열을 가진 시편의 경우 재료 특성에 따라 균열의 전파거동 및 경로가 달라지기 때문에 파손 진전이 예측되는 지역에 대해 CZM 모델링의 경우 이 지역의 모든 요소들 사이에 응집요소를 삽입하였고 XFEM 방법에서는 모양함수 확장영역으로 지정하고 해석을 수행하였다. 취성 재료와 연성 재료에 대하여 각각 균열의 진전경로와 파괴응력을 계산하여 재료의 물성이 파괴거동에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 두께가 얇은 경우 발생하는 주름변형을 쉘요소에 의한 기하학적 비선형 후좌굴 해석기법을 통하여 고려하였고 주름이 균열의 전파에 미치는 거동을 연구하였다.

II. 해석 방법

2.1 해석 형상

Figure 1은 본 연구에서 고려한 중앙에 초기

균열을 가지는 시편형상을 보이고 있다. 시편의 크기는 가로(L) 25 mm, 세로(H) 50 mm, 두께 (t) 1 mm, 균열길이($2a$) 6.25 mm이고 0° 와 45° 의 두 가지 초기 균열 각도를 가지고 있다. 형상의 양 끝단에는 y -방향으로 인장하중이 작용한다.

본 연구에서 해석은 범용 유한요소 패키지인 Abaqus 버전 6.12를 사용하여 수행하였다. 취성 재료로 SiC를, 연성재료로 알루미늄(6061-T6)을 고려하였으며 각 재료의 물성치는 Table 1에 정리되어 있다. 연성재료의 소성변형은 Mises 항복 지표와 등방경화이론을 따르는 이중직선 모델로 가정하였고 소성변형률과 진응력을 계산하여 입력 하였다[12].

0° 와 45° 의 초기 균열 각도를 가지는 형상은 각각 대칭 및 역대칭이므로 Fig. 1에 회색으로 표시된 것과 같이 형상의 부분만을 모델링하고 대칭 경계조건과 역대칭 경계조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 또한 상하 양 끝단에서는 실험시의 그림조건을 모사하기 위하여 y -방향 변위 이외의 모든 자유도를 구속하였다.

유한요소 메쉬는 평면응력요소(CPS3/CPS4)를

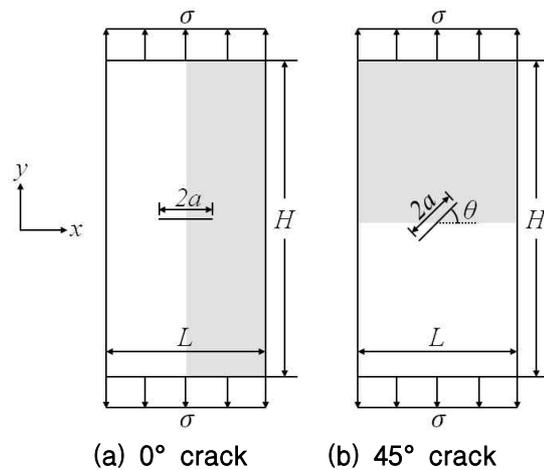


Fig. 1. Analysis configuration with initial center cracks

Table 1. Material properties

	SiC	6061-T6 Al
E	410 GPa	68.9 GPa
ν	0.14	0.33
σ_y	-	276 MPa
σ_{ult}	410 MPa	310 MPa
ϵ_{ult}	-	12%
G_c	0.0516 N/m	12.2 N/m

사용하여 모델링 하였다. CZM의 경우에는 균열 전파는 매쉬의 형태에 의존하므로 보다 다양한 균열전파 경로를 제공하기 위하여 주로 삼각형 요소를 사용하였고, 2차원 응집요소(COH2D4)를 일반요소들 사이에 삽입하였다. 균열전파가 예상되는 지역에서는 매쉬의 형태가 전파경로에 미치는 영향을 최소화하기 위해 규칙성이 없는 균일 크기 요소로 구성하였으며 그 외의 지역에서는 점차 요소의 크기가 증가되도록 하였다. 최소요소의 크기는 다음 식으로 예측되는 응집영역의 크기를 고려하여 결정할 수 있다[13].

$$l_{cz} = M \frac{EG_c}{\tau_0^2} \quad (1)$$

여기서 l_{cz} 는 응집영역의 크기, E , G_c 및 τ_0 는 각각 재료의 탄성계수, 파괴에너지 및 파괴응력을 나타낸다. 본 연구에서는 위 식에서 M 을 1로 하고 응집영역의 크기에 대해 10개 정도의 요소가 사용되도록 최소요소의 크기를 정한 후 (i.e., $l_{cz}/h^e \sim 10$) 이를 기준으로 하여 사전 수렴연구를 통하여 요소망의 최종 상세도를 결정하였다.

2.2 파괴 해석 모델링

균열의 진전을 모사하기 위하여 CZM 방법을 이용한 모델에서는 균열이 진전될 것이라고 예상되는 구역에 응집요소를 삽입하고, XFEM에서는 초기 균열을 포함한 균열 전파 구역을 지정해주어야 한다. 본 연구에서는 파괴모델링 및 매쉬 상세도의 관점에서 해석형상을 부분으로 나누어 모델링하였다. CZM 모델에서 0°의 초기균열을 가진 경우에는 초기균열이 수평으로 진전될 것으로 가정하여 응집요소를 한 줄로 삽입하였고 45°의 초기 균열을 가진 경우에는 균열이 전파될 가능성이 있는 균열선단 앞부분의 넓은 지역의 모든 일반요소들 사이에 응집요소를 삽입하였다.

XFEM 모델의 경우 0°의 초기균열 모델은 균열선단 앞의 수평방향의 상하 2줄의 요소들에 대해서만 직사각형 형태로 균열전파영역으로 정의하였다. 45° 초기균열 모델은 초기 균열이 포함되어야 하므로 이 지역과 균열 전파가능 영역이 동시에 포함 되도록 균열 전파영역을 지정하였다.

균열의 발생과 진전을 모사하기 위해서는 트래クション-분리 관계식(Traction-Separation Law, TSL)을 정의해 주어야 한다. TSL에는 크게 지수형(Exponential)[4], 삼각형(Triangular)[14], 사다리꼴(Trapezoidal)[3] 등이 있는데 보통 취성재료에는 삼각형이, 그리고 연성재료에서는 사다리꼴

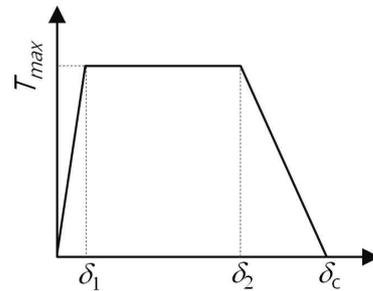


Fig. 2. Trapezoidal TSL

트래クション-분리 관계식이 많이 사용된다(Fig. 2 참조). 연성 재료의 경우 취성 재료에 비해 파괴 거동이 보다 복잡하기 때문에 특정 트래クション-분리 관계식과 파괴 매개변수들이 재료의 파괴 해석 결과에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다(e.g., Refs. [15~17]).

균열의 전파경로가 사전에 알려져 있다면 해당 경로를 따라서 응집요소를 삽입하면 되므로 트래クション-분리관계식의 형태는 상대적으로 중요하지 않게 된다. 그러나 전파경로가 알려져 있지 않다면 전파가 예상되는 지역 전체에 응집요소를 삽입하여야 하는데 이는 취성재료의 경우 연성추가(Added Compliance) 문제 등을 야기하여 해의 정확도에 영향을 미칠 수 있게 된다. 특히 연성재료의 경우에는 사다리꼴 선도의 평평한 영역(Fig. 2의 δ_1 과 δ_2 사이)으로 인하여 응집요소들에서 큰 변형이 발생하여 수렴이 되지 않아 해석 자체를 매우 어렵게 한다.

Figure 3은 중앙에 45°로 경사진 균열을 가진 연성재료로 된 직사각형 시편에 수직방향으로 인장하중을 가하여 균열의 전파경로를 예측하는 문제로서, 균열 앞부분의 지역의 일반 요소들 사이에 응집요소를 삽입하고 사다리꼴 트래クション-분리관계식을 사용하여 해석을 수행한 결과 균열선단 부근의 변형을 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 T_{max} 에 도달한 모든 응집요소에서 δ_1 부터

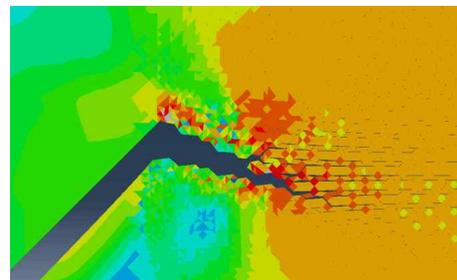


Fig. 3. Deformed shape of ductile material model with 45° initial crack with trapezoidal TSL

δ_2 까지의 변형이 생기기 때문에 그림과 같이 균열 선단의 많은 요소에서 큰 변형이 발생하였고 이 시점에서 심각한 수렴 문제가 발생하였다.

따라서 본 논문에서는 삼각형 트랙션-분리 관계식을 사용하고 (Fig. 2에서 $\delta_2 \rightarrow \delta_1$) 정확한 결과를 얻기 위해서 사전 연구를 통해 적절한 값의 초기 강성 및 파괴 매개변수를 결정하였다.

2.3 주름 해석

두께가 매우 얇은 연성재료 시편은 강성이 거의 없기 때문에 하중이 가해지게 되면 면내방향 변위뿐만 아니라 면외방향의 변위가 발생하여 시편에 주름이 생성된다. 주름이 발생하면 하중의 경로가 변화하기 때문에 두께가 얇은 시편의 해석 시 주름의 영향을 고려해야 한다.

본 연구에서는 두께가 25 μm 로 매우 얇은 시편의 파괴 거동을 모사하기 위하여 사용자 셀요소를 구성하여 Abaqus에 삽입한 후 기하학적 비선형 셀 요소의 후좌굴 방법으로 주름 해석을 수행하였다[18-19]. 좌굴을 유발시키기 위하여 셀 요소 메쉬의 절점에 면외방향으로 두께의 0.1~1%에 해당하는 무작위한 기하학적 결함 (geometric imperfection)을 가하였으며, 계산의 안정성을 위하여 작은 수준의 댐핑(*Static, Stabilize)을 사용하였다.

III. 해석 결과 및 검토

3.1 취성 재료의 파괴 거동

Figure 4는 취성재료 시편형상에 대해 해석을 수행한 결과 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 CZM 및 XFEM 방법으로 구한 곡선은 거의 동일한 분포를 보이고 있으며 파괴 시점까지 선형으로 거동하는 것으로 나타났다. CZM 및 XFEM 방법으로 구한 최대응력은 각각 44.21 MPa 와 46.06 MPa 이다. 취성 재료의 0° 중앙균열 시편 형상에서 파괴강도는 선형탄성파괴역학적 방법으로 예측할 수 있다. 변형률에너지방출률에 대한 식을 사용하여 Fig. 1(a)의 시편 형상에 대해 Table 1의 취성 재료 물성치를 사용하여 역산하면 시편의 임계응력을 46.42 MPa로 계산되는데 이는 해석치와 거의 일치하였다.

45°의 초기 균열을 가지는 시편은 전술한 바와 같이 재료의 특성에 따라 그 파괴 형태가 달라지기 때문에 파괴 거동을 예측하기가 쉽지 않다. 취성재료의 균열진전 방향은 에너지 방출률이 최대인 방향을 구하는 방법(MERR)[2], 균열의

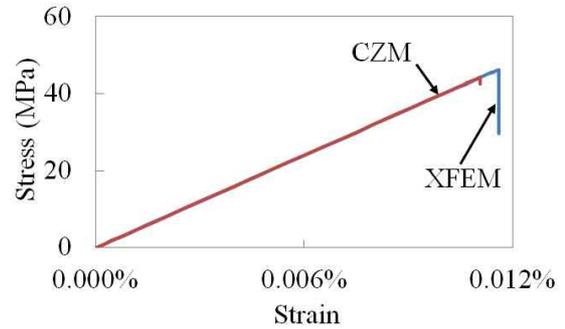


Fig. 4. Stress-strain curves for brittle material model with 0° initial crack

진전에 따라 KII의 값이 0을 나타내는 방향을 구하는 방법(KII0)[4], 그리고 접선응력이 최대인 방향을 구하는 방법(MTS)[3]을 사용하여 예측할 수 있다. 예를 들어 MTS 방법으로 균열의 진전방향 (θ_c)은 현재 균열방향을 기준으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{3K_I^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \quad (2)$$

위 식으로 Table 1의 물성치를 사용하여 계산한 45° 초기 균열을 가지는 취성 재료 모델의 최초 균열 전파 방향은 약 -52°로 예측된다. (초기 균열 각도가 45°이므로 수평방향을 기준으로 하면 약 -7°이다.)

Figure 5는 초기 균열 각도가 45°인 취성재료 모델에 대해 CZM과 XFEM으로 구한 균열전파 경로를 보이고 있다. (XFEM의 결과 그림에서 균열 원편의 실선은 효율적인 메쉬 모델링을 위하여 영역분할의 경계선 이다.) 최초 균열 전파 각도는 CZM에서 6.644°, XFEM에서 6.760°로 두 방법 모두 최초 균열 전파 방향은 이론적으로 예측한 각도와 거의 유사하게 나타났다. 그러나 균

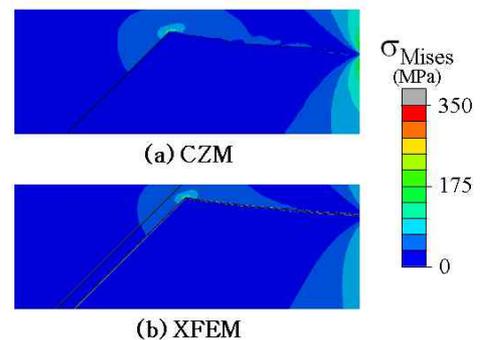


Fig. 5. Failure shapes of brittle material model with 45° initial crack.

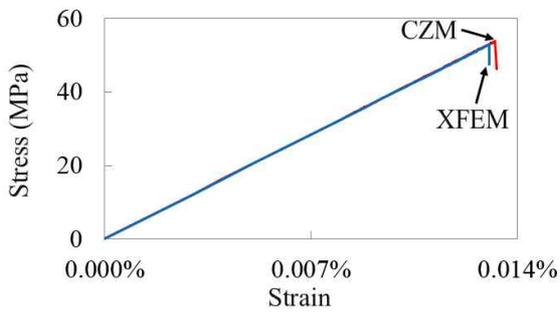


Fig. 6. Stress-strain curves for brittle material model with 45° initial crack

Table 2. Predicted failure strengths of brittle material (Unit = MPa)

	0° initial crack	45° initial crack
CZM	44.21	53.76
XFEM	46.06	52.48

열이 진전함에 따라서 점차 그 전파 방향각이 수평에 가깝게 감소하는 것을 보였다.

Figure 6은 45° 초기 균열을 가지는 취성재료 모델의 응력-변형률 선도를 보이고 있다. CZM과 XFEM 방법으로 구한 선도는 거의 일치하였고 최대응력은 각각 53.76 MPa 및 52.48 MPa 로 나타났다. Table 2는 0° 및 45°의 초기 균열을 가지는 시편형상의 최대응력을 정리하고 있는데 45°의 초기 균열 형상이 0° 모델에 비하여 증가된 값을 보였다.

3.2 연성 재료의 파괴 거동

Figure 7~8은 연성 재료의 0° 및 45°의 초기 균열을 가지는 시편형상에 대해 해석을 수행하여 구한 명목응력-변형률 선도를 보이고 있는데, 취성 재료와 달리 초기 균열이 발생한 이후에도 하중증가에 계속적으로 저항하여 비선형 선도를 가지는 것으로 나타났다. 이는 연성재료의 파괴에너지가 매우 커 응집영역내의 많은 응집요소에서 동시에 파손이 진행되며 각각의 응집요소에서 파괴가 시작된 이후에도 파괴에너지를 모두 소비하여 완전파괴에 이르기까지 지속적으로 하중을 전달하기 때문으로 생각된다. 한편 CZM과 XFEM에 의한 선도가 거의 비슷하게 나타나 두 방법상 큰 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. CZM 결과가 약간 더 큰 최대응력 및 최대 변형률을 보이고 있는데 이는 수렴을 위해 가한 하중증분에 역비례하게 가해지는 인위적 댐핑효과로서 XFEM 보다 CZM이, 그리고 0° 보다 45°의

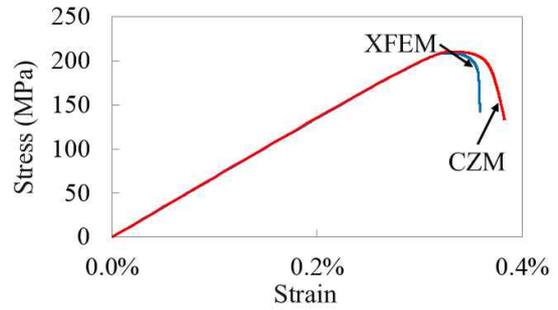


Fig. 7. Stress-strain curves for ductile material model with 0° initial crack

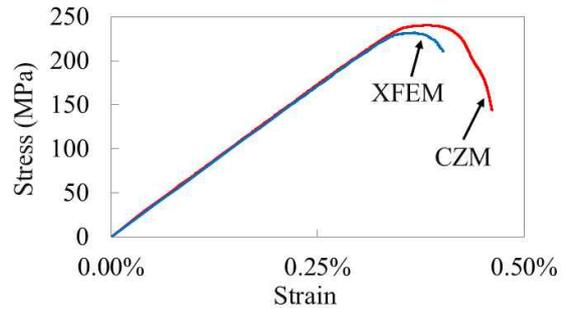


Fig. 8. Stress-strain curves for ductile material model with 45° initial crack

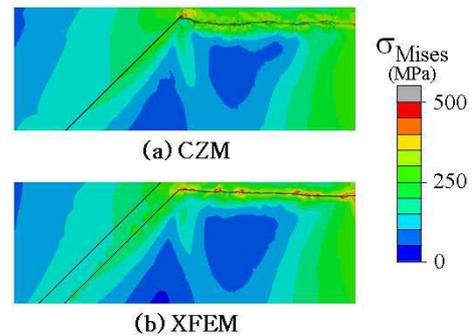


Fig. 9. Failure shapes of ductile material model with 45° initial crack

경우가 수렴을 위해 작은 하중증분의 크기가 요구되었기 때문으로 보인다.

Figure 9는 45°의 초기 균열을 가진 시편의 균열 전파 경로를 나타내고 있는데, 취성 재료와 연성 재료의 균열 형태가 큰 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. 이는 취성재료의 경우 균열선단에서 응력의 특이점이 발생하고 주변의 작은 영역내에 응력이 고도로 집중되는데 반하여 연성재료의 경우 균열 선단 주변의 상대적으로 큰 영역에서 소성 변형이 발생하여 응력의 집중이 완화되고 균열전파 방향도 LEFM에 의해 예측된 방향과는 다르게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 5

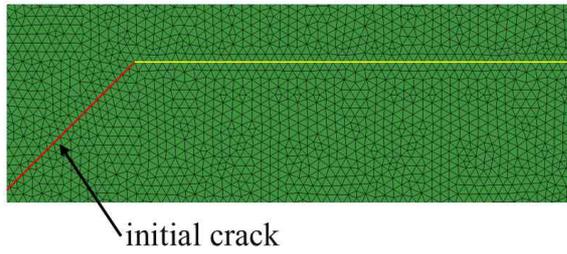


Fig. 10. Mesh shape of new CZM model (CZM-II)

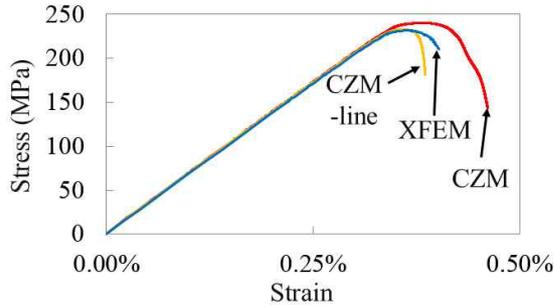


Fig. 11. Comparison of stress-strain curves of ductile material model with 45° initial crack

Table 3. Failure strengths of ductile material (Unit = MPa)

	0° initial crack	45° initial crack
CZM	210.22	240.14
CZM -line	-	231.45
XFEM	208.34	230.72

에서 취성재료의 경우 완만하게 아래 방향으로 균열이 전파했던 것과 달리 연성 재료는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 균열이 거의 하중에 수직한 방향으로, 즉, 그림에서 수평에 가까운 방향으로 진전하였다. CZM의 결과에서는 XFEM에 비해 균열이 구불구불하게 진전되는 것을 볼 수 있는데, 이는 메쉬 형태에 관계없이 균열이 전파되는 XFEM과 달리 CZM은 요소의 경계를 따라 균열이 전파되기 때문이다.

CZM 방법에서 이와 같은 전파경로가 응력-변형을 선도에 어떠한 영향을 주는지를 알아보기 위해 CZM의 메쉬 의존도 해석을 수행하였다. 소성변형이 큰 연성재료의 XFEM 결과로부터 균열이 수평으로 전파하는 것으로 나타났으므로 Fig. 10과 같이 메쉬를 제작하고 균열이 수평 방향으로만 진전할 수 있도록 응집요소를 배치하였다(CZM-line). Fig. 11에 CZM-line 모델의 응력-변형을 선도를 함께 나타냈는데, 기존의 CZM의

결과보다 XFEM과 거의 유사하게 나타났다. Table 3에 최대응력값이 정리되어 있다. 이상의 결과로부터 CZM 해석 시에는 메쉬 의존도가 크므로 메쉬의 형태를 신중하게 결정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

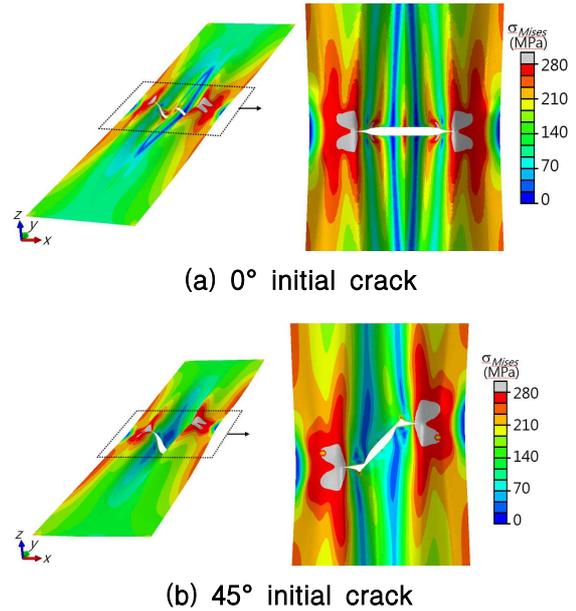
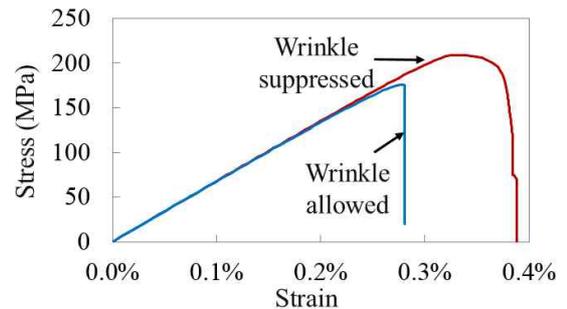
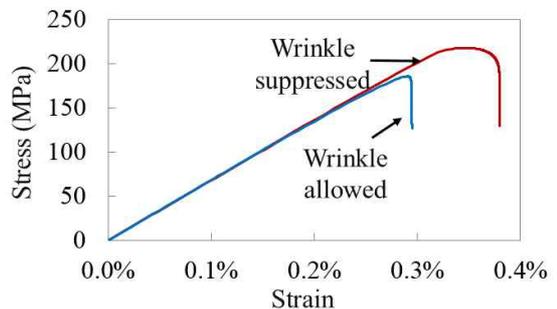


Fig. 12. Wrinkle deformation and stress distributions of thin specimens



(a) 0° initial crack



(b) 45° initial crack

Fig. 13. Stress-strain curves of thin specimen

3.3 매우 얇은 시편의 파괴 거동

시편의 두께가 매우 얇아지면 인장하중 하에서도 좌굴이 발생하는데 이를 주름(Wrinkle)이라고 한다. 주름이 발생하면 하중전달 경로가 크게 바뀌게 되므로 균열전파 거동에도 큰 영향을 주게 된다. Fig. 12는 주름발생을 허용한 시편의 양단에 인장하중을 주었을 때의 주름형상과 응력분포를 보이고 있다. 이 그림의 결과는 이전과 동일한 시편크기에 두께가 25 μm 이고 초기균열의 크기는 $2a = 8 \text{ mm}$ 인 경우에 대한 것이다. 하중은 주름의 산과 골을 따라 주로 전달되므로 따라서 주름의 산과 골 지역에 더 큰 응력이 분포하였고 균열선단 주변에서도 큰 응력분포를 가지는 것으로 나타났다.

Figure 13은 주름 허용 여부에 따른 응력-변형률 곡선을 보이고 있는데, 주름 발생 여부에 따라 파괴시의 거동이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 주름이 발생하지 않았을 때에는 두꺼운 시편의 경우와 같이 연성 파괴 형태를 보이지만 주름이 발생한 경우 매우 감소된 최대응력을 가졌으며 파괴의 양상도 취성파괴와 유사한 형태를 보였다. 이는 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 주름발생에 의해 균열선단 주변에 응력집중 현상이 더욱더 강화되었기 때문이라고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 CZM과 XFEM을 통하여 재료의 물성이 균열전파 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 중앙에 0°와 45°의 초기 균열을 가진 시편형상에 대해 양단에 인장하중을 가하고 해석을 수행하여 파괴 거동을 알아보았다. 취성 재료와 연성 재료에 대해 유한요소해석을 수행하여 응력-변형률 선도와 균열의 전파경로를 예측하였다. 취성재료에 대해서는 이론적인 방법을 통하여 파괴 임계응력 및 균열전파 방향을 계산하고 유한요소해석 결과와 비교하였다.

해석 결과, 취성재료의 경우 0°의 초기균열을 가지는 모델에서 이론적 방법과 유한요소방법으로 구한 파괴응력 값이 거의 일치하였다. 또한 45°의 초기균열 모델의 경우 우측 균열선단은 아래 방향으로 완만한 곡선을 그리며 진행하였으며, 최초 균열 전파 방향이 이론적 방법으로 예측한 결과와 동일하게 나타나는 것을 확인하였다. 연성 재료의 경우 취성재료와 달리 균열선단 주변영역에서 발생하는 소성변형으로 응력분포가 변경되고 또한 많은 응집요소에서 큰 파괴에너지

를 소모하기 위해 균열의 전파가 점진적으로 발생하였다. 이에 따라 연성 재료의 파괴시 증가된 최대 응력값을 보였으며 45°의 초기 균열을 가지는 형상에서 균열은 거의 하중에 수직한 방향으로 진전하였다. CZM과 XFEM의 결과를 비교하면 균열의 형태와 최대 응력값에서 큰 차이는 없었으나 CZM의 매쉬 의존도가 XFEM에 비하여 더 큰 것으로 나타났다.

얇은 연성 재료 시편에 주름이 발생하는 경우도 고려하였는데, 주름형상을 따라 응력이 집중되기 때문에 주름이 발생하지 않았을 때보다 더 낮은 응력에서 파손이 시작되었으며 또한 파괴거동도 취성재료와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 시편의 두께가 얇아지면 주름 발생 여부에 따라 재료의 파괴 거동이 달라지므로 주름을 고려한 해석이 필수적이라고 판단되었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2010-0023614).

Reference

- 1) Barenblatt, G. I., 1962, "The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture", *Adv in Appl Mech*, Vol. 7, pp. 55-129.
- 2) Dugdale, D. S., 1960, "yielding of Steel Sheets Containing Slits", *J Mech & Phys of Solids*, Vol. 8, No. 2, pp. 100-104.
- 3) Tvergaard, V., Hutchinson J. W., 1992, "The Relation between Crack Growth Resistance and Fracture Process Parameters in Elastic-Plastic Solids", *J Mech & Phys of Solids*, Vol. 40, pp. 1377-1397.
- 4) Xu, X. P., and Needleman, A., 1994, "Numerical Simulations of Fast Crack Growth in Brittle Solids", *J Mech & Phys of Solids*, Vol. 42, pp. 1397-1434.
- 5) Sukumar, N., Moes, M., Moran, B. and Belytschko, T., 2000, "Extended Finite Element Method for Three-dimensional Crack Modeling", *Int J Num Meth in Eng*, Vol. 48, No. 11, pp. 1549-1570.
- 6) Moes, N. and Belytschko, T., 2002, "Extended Finite Element Method for Cohesive

Crack Growth", *Eng Frac Mech*, Vol. 69, No. 7, pp.813-833.

7) Ji, H., Chopp, D., Dolbow, J. E., 2002, "A Hybrid Extended Finite Element/Level Set Method for Modeling Phase Transformations", *Int J numer Mech Eng*, Vol. 54, p. 1209-1233.

8) Belytschko, T., Gracie, R., Ventura, Giulio., 2009, "A Review of Extended/Generalized Finite Element Methods for Material Modeling", *Modeling & Simul in Mat Sci & Eng*, Vol. 17, No. 4, pp. 1-31.

9) Goldstein, R. V. and Salganik, R. L., 1974, "Brittle Fracture of Solids with Arbitrary Cracks", *Int J Frac*, Vol. 10, pp. 507-527.

10) Nuismer, R., 1975, "An Energy Release Rate Criterion for Mixed Mode Fracture", *Int J Frac*, Vol. 11, pp. 245-250.

11) Sih, G., 1974, "Strain-Energy-Density Factor Applied to Mixed-mode Crack Problems", *Int J Frac*, Vol. 10, pp. 305-321.

12) ABAQUS User's Manual, version 6.12, 2012.

13) Turon, A., C.G. Davila, Camanho, P.P, and Costa, J., 2007, "An Engineering Solution for Mesh Size Effects in the Simulation of Delamination Using Cohesive Zone Models," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp.

1665-1682.

14) Geubelle, P.H. and Baylor, J, 1998, "Impact-induced Delamination of Laminated Composites: a 2D Simulation," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 589-602.

15) Volokh, K. Y., 2004, "Comparison between Cohesive Zone Models", *Num Meth in Biomed Eng*, Vol 20, pp. 845-856.

16) Song, K., Davila, C.G., and Rose, A., 2008, "Guidelines and Parameter Selection for the Simulation of Progressive Delamination," *2008 Abaqus User's Conference*

17) Nielsen, K. L., and John W. Hutchinson, 2012, "Cohesive Traction - Separation Laws for Tearing of Ductile Metal Plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 48, pp. 15-23.

18) Tessler, A., Sleight, D., and Wang, J. T., 2005, "Effective Modeling and Nonlinear Shell Analysis of Thin Membranes Exhibiting Structural Wrinkling", *Journal of Spacecrafts and Rockets*, Vol. 42, No. 2, pp. 287-298.

19) Woo, K., Zignego, D. L., and Jenkins, C. H., 2011, "Tearing of Thin Sheets with Wrinkling", *52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA 2011-2089.