응집 영역 모델을 이용한 굴곡 계면을 따르는 균열 진전 거동에 관한 연구

이 현 경¹ · 김 현 규^{1*}

¹서울과학기술대학교 기계자동차공학과

A Study on Crack Propagation Along a Sinusoidal Interface using Cohesive Zone Models

Hyeon-Gyeong Lee¹ and Hyun-Gyu Kim^{1*}

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

Abstract

In this study, finite element analyses of crack propagation along a sinusoidal interface are performed by using cohesive elements. BK law is used for cohesive zone to consider mixed mode traction-separation relation at the crack tip on a sinusoidal interface of a double cantilever beam specimen. The shape of a sinusoidal interface crack and the cohesive strength and the cohesive energies in mixed mode cohesive laws are varied in numerical experiments, and load-displacement curves at the ends of a double cantilever beam specimen are obtained to investigate the crack propagation behavior along a sinusoidal interface.

Keywords : sinusoidal interface crack, crack propagation, cohesive law, cohesive strength, cohesive energy

1. 서 론

계면 균열(interface crack)은 복합재의 층간 분리, 접착 조인트 및 코팅(coating)의 파손과 같은 다양한 분야에서 다루고 있는 중요한 문제이다. 상대적으로 계면 결합이 약한 경우 구조물이 하중을 받으면 균열이 계면을 따라 진전하게 된다. 자연계에 존재하는 계면은 대부분 평면이 아닌 거칠기를 갖는 굴곡 형태의 접합이므로 여기에 대한 균열 진전 거동을 연구하여 활용하는 것은 중요하다. 다양한 기하학적 형상을 갖는 계면 균열에 대한 연구들(Ballarini *et al.*, 1987; Zavattieri *et al.*, 2007; Cordisco *et al.*, 2012)이 진행되었고 응용 문제(Oh *et al.*, 1988; Chan *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2010; Alfano *et al.*, 2012)에 적용하였지만 균열 진전 거동의 원인에 대한 연구는 부족하였다. Li 등(2012)과 Cordisco 등(2014, 2016)은 단일 모드의 하중을 받는 사인 곡선 형태의 굴곡 계면

균열 문제에 응집영역을 도입하여 균열 진전 해석을 수행하였는데, 복합하중에 대하여 상대적으로 단순한 응집법칙을 사용하여 굴곡이 있는 균열 진전 거동을 표현하는데 제한이 있었다. 응집법칙의 형상과 혼합모드 응집 에너지 등의 변화에 따른 굴곡 계면을 따르는 균열 진전 거동에 대한 연구가 필요한데 실험적으로나 수치적인 분석이 아직 부족한 실정이다.

균열 진전 문제에서 특성을 알아보기 위한 연구 방법으로 Dugdale(1960)의 개념을 확장하여 균열면의 응집 트랙션(traction)과 열림(separation) 변위 사이의 관계를 적용한 응집 요소(cohesive element)를 사용한 유한요소 해석이 많이 사용되어 왔는데, 본 연구에서도 계면 균열 문제를 해석하기 위한 방법으로 응집 요소를 사용하였다. 응집 영역 모델은 응집 요소를 균열 선단 앞에 응집 영역을 부여하고 응집 영역에서의 응집 응력과 열림 변위 사이의 관계로 정의하여 거동을 나타내는 방법이다. 본 연구에서는 굴곡 형상의 계면을 가지는 이중외팔보

* Corresponding author:

Tel: +82-2-970-6309; E-mail: khg@seoultech.ac.kr

Received February 5 2018; Revised May 23 2018;

Accepted June 11 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(DCB: double cantilever beam)의 균열 진전 거동에서 굴곡 형상과 응집 강도 그리고 혼합모드 응집 에너지 비율에 따른 영향을 분석하고자 한다.

2. 응집 영역 모델

2.1 응집 영역 법칙

굴곡 계면의 균열 진전을 해석하기 위한 기법으로 응집 영역 모델을 이용하였는데 응집 영역 법칙의 형태에 따른 거동을 나타내기 위하여 비교적 간단하게 정의할 수 있는 Fig. 1과 같은 이중 선형(bilinear) 관계를 이용하는 응집 법칙을 적용하였다.

Fig. 1 Bilinear traction-separation law

2.2 혼합모드 응집 영역 법칙

복합하중을 받는 구조물의 균열은 혼합모드의 거동을 보이게 된다. 계면 균열의 형상에 따라서 단순 하중에서도 균열 선단에서 혼합모드의 양상을 나타내므로 혼합모드 파손 조건을 적용할 필요가 있다. Fig. 2의 혼합모드 응집법칙의 응집 강도는 2차 공칭응력 조건(quadratic nominal stress criterion)을 이용하여 결정하였다.

$$\left(\frac{\langle \sigma_I \rangle}{\sigma_{IC}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{IIC}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{IIIC}}\right)^2 = 1$$

Fig. 2 Mixed mode traction-separation law

여기서, σ_I , σ_{II} , σ_{III} 는 각각 응집 요소에서의 모드 I, 모드 II, 모드 III 공칭응력을 나타내고 σ_{IC} , σ_{IIC} , σ_{IIIC} 는 각 모드에서 정의되는 응집 강도를 나타낸다.

혼합모드에 대한 응집 에너지는 Benzeggagh 등(1960)이 제안한 BK 법칙을 이용하였고 다음과 같이 표현된다.

$$G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left\{ \frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right\}^\eta = G^c \quad (2)$$

여기서, G_{IC} 와 G_{IIC} 는 모드 I과 모드 II에서의 파손 응집 에너지이고 G_I , G_{II} , G_{III} 는 각 모드에서의 응집 에너지이다.

3. 굴곡 계면 균열의 유한요소 모델

3.1 굴곡 계면 형상

본 연구에서 굴곡 계면을 따르는 균열 진전 거동을 파악하기 위하여 이중외팔보에 대한 유한요소 모델을 구성하였다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 균열 진전 시작에 계면 형상의 영향을 제거하기 위하여 초기 균열은 평평한 형태이고 균열은 평평한 계면에서 시작하여 굴곡 형상의 계면으로 진전하도록 하였다.

계면의 굴곡 형상은 Fig. 4와 같이 사인 곡선 형태의 함수인 다음 식을 이용하였다.

$$y = A \{ 1 - \sin [2\pi(x - \lambda/4)/\lambda] \} \quad (3)$$

Fig. 3 FE model of a DCB with a sinusoidal interface

Fig. 4 Geometry of a sinusoidal interface

여기서, A 는 계면을 구성하는 사인 곡선 함수의 파고인 높이를 나타내며 λ 는 굴곡의 파장인 단위 패턴 길이를 나타낸다.

3.2 유한요소해석 모델 및 경계조건

이중외팔보의 유한요소 모델($L=65\text{mm}$, $H=4\text{mm}$, $B=2\text{mm}$)은 상용 프로그램 Abaqus/Standard 6.14의 연속체 요소(C3D8I)를 이용하였고 계면은 응집 법칙에 따라 거동하는 응집 요소(COH3D8)를 이용하여 구성하였다. 재료의 물성은 탄성계수 $E=70\text{GPa}$ 와 푸아송비 $\nu=0.35$ 를 이용하였다. Fig. 3과 같이 왼쪽 끝단에 하중을 변위로 부여하였고 오른쪽 끝단의 가운데 부분을 구속하는 경계 조건을 부여하였다.

4. 굴곡 계면을 따르는 균열 진전 해석

4.1 계면 굴곡 형상의 영향

계면의 굴곡 형상이 균열 진전 거동에 주는 영향을 알아보기 위하여 굴곡 균열의 형상비 A/λ 에서 A 를 고정하고 형상비에 따른 균열 진전 해석을 수행하였다. 균열 진전 해석에 사용한 응집 법칙은 인장과 전단 모드의 응집 에너지 $G_{IC}=0.5\text{N/mm}$ 와 $G_{IIC}=G_{IIIC}=2.5\text{N/mm}$ 이며 응집 강도는 각각 $\sigma_{IC}=20.0\text{MPa}$, $\sigma_{IIC}=100.0\text{MPa}$ 와 $\sigma_{IIIC}=100.0\text{MPa}$ 이다. 일반적인 재료에서 전단 모드의 응집 에너지와 응집 강도는 인장 모드에 비하여 크므로 이와 같은 응집 법칙 물성을 적용하였다.

Fig. 5에 서로 다른 형상비에 따라 이중외팔보의 하중-변위 선도를 비교하여 보여주고 있다. 균열 진전 이후 굴곡 형상비가 커지면 하중도 증가하는 경향을 확인할 수 있는데, 이는 굴곡 형상으로 인하여 균열이 진전하기 위하여 필요로 하는 균열면의

Fig. 5 Load-displacement curves of DCBs with sinusoidal interface cracks for different interface aspect ratios

Fig. 6 Distributions of von-Mises stress of DCBs with sinusoidal interface cracks for different interface aspect ratios

면적이 커지고 전단 모드가 더 크게 영향을 주므로 파괴에너지가 증가하고 파손에 도달하기까지의 하중도 증가하게 된다. Fig. 5와 같이 평평한 균열 진전에서 굴곡 균열 진전이 시작되는 부분에 하중-변위 곡선에 굴곡이 나타난다. Fig. 6에 형상비가 다른 굴곡 균열에 대한 응력 분포를 보여주고 있다.

4.2 응집 법칙의 영향

응집 영역의 응집 응력과 열림 변위의 관계인 응집 법칙의 형태가 굴곡 균열 진전 거동에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구에서는 Fig. 1의 이중 선형 모델을 이용하였고 응집 법칙은 최대 응집 응력(응집 강도)과 응집 에너지로 정의할 수 있다. 응집 에너지가 동일한 경우 응집 강도에 따라 응집 법칙의 형태가 달라지는데, 동일한 응집 에너지에 응집 강도를 변화시켜 유한요소해석을 수행하고 균열 진전 거동을 비교하였다. 해석에 사용한 응집 에너지는 $G_{IC}=0.5\text{N/mm}$, $G_{IIC}=2.5\text{N/mm}$ 와 $G_{IIIC}=2.5\text{N/mm}$ 와 응집 강도는 각각 $\sigma_{IC}=2.0\text{MPa}$, $\sigma_{IIC}=10.0\text{MPa}$ 와 $\sigma_{IIIC}=10.0\text{MPa}$ 와 $\sigma_{IC}=20.0\text{MPa}$, $\sigma_{IIC}=\sigma_{IIIC}=100.0\text{MPa}$ 를 적용하였다.

굴곡 균열이 아닌 경우 응집 에너지가 동일하면 응집 강도가 다른 경우에도 동일한 하중-변위 선도를 얻게 되는데(Harper *et al.*, 2012), 굴곡 균열의 경우는 Fig. 7과 같이 응집 강도가 커짐에 따라 이중외팔보의 하중-변위 선도의 굴곡이 나타나게 된다. 이와 같은 하중-변위 선도의 굴곡은 다른 연구들(Cordiso *et al.*, 2012)에서도 보고가 되었다. 굴곡 계면을 따르는 균열 진전은 여러 개의 굴곡에 걸쳐서 응집 영역이 영향을 주는데 응집 강도가 크게 되며 상대적으로 응집 영역의 크기를 감소시켜 굴곡 형상의 특성이 하중-변위 선도에 나타나게 된다. Fig. 8에 동일한 응집 에너지에 응집 강도가 다른 경우에 대한 균열 열림과 응집 영역을 보여주고 있다. 동일한 응집 에너지에

Fig. 7 Load-displacement curves of DCBs with sinusoidal interface cracks for different cohesive strengths with the same cohesive energy

Fig. 8 Distributions of von-Mises stress and cohesive zone of DCBs with sinusoidal interface cracks for different cohesive strengths and the same cohesive energy

응집 강도가 작은 경우 응집 영역의 크기가 상대적으로 크게 되어 균열 진전에 따른 혼합모드 영향이 작지만 응집 강도가 높아지면 Fig. 8과 같이 응집 영역의 크기가 상대적으로 작아져서 혼합모드의 영향이 나오게 되어 이중외팔보의 균열 진전에서 Fig. 7과 같은 하중-변위 선도에 굴곡이 나타나게 된다.

4.3 혼합모드 응집 에너지 비의 영향

계면에서 나타나는 굴곡 형상으로 계면을 따르는 균열 진전에서 균열 선단에 혼합모드가 나타나게 된다. 본 연구에서는 혼합모드 하에서 거동을 모사하기 위하여 모드 I과 모드 II 하중의 비로 혼합모드 하중을 나타내었고 식 (1)의 혼합 모드의 응집 강도와 식 (2)의 응집 에너지를 적용하였다. 혼합모드 응집 에너지 비 G_{IIc}/G_{Ic} 변화에 따른 균열 진전 해석을 수행한 결과의 이중외팔보의 하중-변위 선도를 Fig. 9에 보여주고 있다.

Fig. 9 Load-displacement curves of DCBs with sinusoidal interface cracks for different cohesive energies of mode I and mode II

Fig. 10 Distributions of von-Mises stress and cohesive zone of DCBs with sinusoidal interface cracks for different cohesive energies of mode I and mode II

여기서 $G_{Ic}=0.5J/m^2$ 로 고정하고 G_{IIc} 와 G_{IIIc} 를 변화시켰다.

혼합모드 응집 에너지 비가 커짐에 따라 전단 모드의 응집 에너지가 커지고 균열이 진전하는데 필요로 하는 파괴 인성도 상승하였으며 굴곡 균열의 형상에 따른 이중외팔보의 하중-변위 선도에 굴곡이 나타났다. 즉, 전단 모드의 응집 에너지가 상승함에 따라 동일한 응집 영역의 크기에 대하여도 균열 진전에 따른 계면 형상으로 인한 하중-변위 선도의 변화가 보다 명확히 나타나게 된다. Fig. 10에 혼합모드 응집 에너지 비율에 따른 균열 열림과 응집 영역을 응력 분포와 같이 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 굴곡 계면의 균열 진전 거동을 알아보기 위하여 혼합모드 거동을 반영한 응집 모델을 이용하여 이중외팔보의 계면 굴곡 형상, 응집 강도 그리고 혼합모드 응집 에너지 비에 따른 균열 진전 거동을 해석하고 비교하였다. 굴곡 균열의

형상비가 커져서 균열 진전을 위하여 더 많은 굴곡의 계면 분리 에너지가 요구되는 경우 하중-변위 선도의 하중이 증가하는 것을 보여주었다. 동일한 응집 에너지에 응집 강도가 커지는 경우 응집 영역의 크기가 상대적으로 작아지게 되어 계면을 따르는 균열 진전에서 하중-변위 선도에 굴곡이 나타날 수 있게 되는 것을 보여 주었다. 또한 인장과 전단 응집 에너지의 비율에 따라서 이중외팔보의 계면 균열 진전에 따른 하중-변위 선도에서 하중의 증가와 굴곡이 나타날 수 있다는 것을 보여 주었다. 본 연구 결과를 바탕으로 굴곡 계면을 따르는 균열 진전에 대한 특성 연구의 다양한 연구와 활용이 이어질 것으로 기대가 된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Alfano, M., Lubineau, G., Paulino, G.H. (2012) Study on the Role of Laser Surface Irradiation on Damage and Decohesion of Al/epoxy Joints, *Int. J. Adhesion & Adhesives*, 39, pp.33~41.
- Ballaribi, R., Plesha M.E. (1987) The Effects of Crack Surface Friction and Roughness on Crack Tip Stress Fields, *Int. J. Fracture*, 34(3), pp.195~207.
- Benzeggagh, M.L., Kenane, M. (1996) Measurement of Mixed-mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus, *Compos. Sci. Tech.*, 56(4), pp.439~449.
- Carlson, B.E. (2016) Mode I Fracture Along Adhesively Bonded Sinusoidal Interfaces, *Int. J. Solids Struct.*, 83, pp.45~64.
- Chan, E.P., Smith, E.J. (2008) Surface Wrinkles for Smart Adhesion, *Adv. Mater.*, 20, pp.711~716.
- Cordisco, F.A., Zavattieri, P.D., Hector, L.G., Bower, A.F. (2012) Toughness of a Patterned Interface between Two Elastically Dissimilar Solids, *Eng. Fracture Mech.*, 96, pp.192~208.
- Cordisco, F.A., Zavattieri, P.D., Hector, L.G., Bower, A.F. (2014) On the Mechanics of Sinusoidal Interfaces between Dissimilar Elastic-Plastic Solids Subject to Dominant Mode I, *Eng. Fracture Mech.*, 131, pp.38~57.
- Dugdale, D.S. (1960) Yielding of Stress Sheets Containing Slits, *J. Mech. Phys. Solids*, 8, pp.100~104.
- Harper, P.W., Sun, L., Hallett, S.R. (2012) A Study on the Influence of Cohesive Zone Interface Element Strength Parameters on Mixed Mode Behaviour, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufacture.*, 43(4), pp.722~734.
- Kim, W.S., Yun, I.H., Lee, J.J., Jung, H.T. (2010) Evaluation of Mechanical Interlock Effect on Adhesion Strength of Polymer-Metal Interfaces using Micro-Patterned Surface Topography, *Int. J. Adhesion & Adhesives*, 30, pp.408~417.
- Oh, T.S., Rodel, J., Cannon, M., Ritchie, R.O. (1988) Ceramic/metal Interfacial Crack Growth: Toughening by Controlled Microcracks and Interfacial Geometries, *Acta Mater.*, 36, pp.2083~2093.
- Seo, H.S., Baek, H.C., Kim, H.G. (2014) A Study on the Effect of Cohesive Laws on Finite Element Analysis of Crack Propagation Using Cohesive Elements, *Korean Soc. Mech. Eng.*, 38(4), pp.401~407.
- Zavattieri, P.D., Hector J., L.G., Bower, A.F. (2007) Determination of the Effective Mode-I toughness of a Sinusoidal Interface between Two Elastic Solids, *Int. J. Fracture*, 145(3), pp.167~180.

요 지

본 연구에서는 굴곡 계면을 따른 균열 진전을 응집 요소를 사용하여 유한요소 해석을 수행하였고 균열 선단에서 복합 모드 하중을 고려하기 위하여 BK 법칙을 적용하였다. 정현파 굴곡 계면을 갖는 이중 외팔보에 하중을 부여하고 복합 모드 응집 법칙에서 응집 강도와 응집 에너지에 따른 하중-변위 선도의 변화를 알아 보았다. 응집 강도가 커지면 응집 영역 크기가 상대적으로 작아지고 균열 진전에 따른 하중-변위 선도에 굴곡이 나타나는 것을 보여 주었으며 인장과 전단 응집에너지 비율에 따라 하중의 증가와 하중-변위 선도에 굴곡이 나타나는 것을 보여 주었다. 또한 굴곡 계면의 형상에 따른 균열 진전 거동의 영향을 분석하였는데 균열의 형상비가 커지면 균열 진전을 위한 더 큰 균열 분리 에너지가 요구되는 것을 보여 주었다. 굴곡 계면의 형상과 응집 법칙을 변화시켜 파괴 인성을 크게 향상시킬 수 있으며 균열 진전 거동을 변화시킬 수 있게 된다.

핵심용어 : 균열 진전, 응집 법칙, 굴곡 계면, 응집 에너지, 응집 강도