

균열 진전에 대한 미세 입자의 영향

정보영*, 박성도(전남대 기계공학과), 윤영기(스탠포드대학 기계공학과), 윤희석(전남대 기계공학과)

The effects of microparticles on the crack propagation

B.Y.Jeong, S.D.Park(Mech. Eng. Dept., CNU), Y.K.Yoon(Mech. Eng. Dept., Stanford U), H.S.Yoon(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

Recently, self-healing methods of a cracked matrix, especially polymeric composite materials, became the center of engineering researchers. In this paper, we summarized the self-healing concept for polymeric composite materials and investigated the effect of microparticle on the crack growth behavior in colorless and transparent matrix by experimental observation to describe the crack propagation around the microparticle inside epoxy matrix composite. Compression splitting test for the specimen involving microparticle was conducted. In addition, FE analysis was pursued to present the stress contour around microparticle in the matrix. Through the experiments and FE analysis, we found that the size, relative position, bonding condition and relative stiffness of microparticle are important parameters to decide the direction of crack propagation, which is related to the rupture of microparticle for self-healing.

Key Words : Crack propagation(균열 진전), Double Cleavage Drilled Compression(DCDC) specimen, Compression splitting test(압축 실험)

1. 서론

폴리머 복합재료는 외부에서 작용된 과도한 하중에 의해 발생한 손상이나 자연적인 물성저하로 인한 구조적인 취약성을 가진다는 단점이 있다. 또한 외부에서 작용된 하중에 의해 유발된 손상은 육안으로 감지하기가 어려우며 손상을 발견하더라도 이를 보수하기가 거의 불가능하여 손상발생시 대처가 미흡한 상태이다.

이러한 취약점을 극복하고자 S. R. White 등은 폴리머 복합재료의 자가치료법(Self-healing Technique)을 제시함에 있어 복합재료 내에 삽입이 가능하며 캡슐내에 손상수리 매질(Healing Agent)를 포함하고 있는 마이크로 캡슐을 이용한 방법을 소개하였다[1].

그러나 이러한 연구들은 마이크로 캡슐을 이용한 복합재료의 자가치료 가능성을 제시하기 위해 DCB(Double Cantilever Beam)형태의 시편을 제작하여 실험을 수행함으로써 복합재료 구조물내에 삽입된 마이크로캡슐의 크랙 치료 메커니즘을 설명하였다. 이러한 실험 방법은 실험 종료 후 이루어지는 방

법으로써 복합재료내에 삽입된 마이크로 캡슐의 파괴 메커니즘을 명확하게 설명하고 증명하는 것은 어려움이 있다.

Self-healing 효과를 보기 위해서는 마이크로 캡슐이 진전하는 균열앞에서 균열에 의해 파괴가 이루어지고 마이크로캡슐안에 포함되어 있던 결합제인 Dicyclopentadiene(DCPD)가 균열면으로 빠져나오는 과정이 원활하게 이루어져야 한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 Self-healing 시스템에서 균열과 마이크로 캡슐간의 상호작용에 의한 캡슐 파괴를 관찰할 수 있는 실험 방법을 모색하여 미세 입자를 포함시킨 Double Cleavage Drilled Compression(DCDC) 시편 형태를 이용하여 입자 주변에서의 크랙 진전 양상을 실시간 관찰하였다. 이를 통해 매트릭스내의 균열과 마이크로캡슐의 상호관계와 균열진전에 영향을 미치는 인자들을 파악하고자 한다.

또한, FEM을 통해 균열 선단에 있는 미세 입자 주변의 응력분포를 알아보고 응력집중현상에 따른

균열진전 방향을 예측해보고 균열진전에 영향을 미치는 입자 조건들을 알아보았다.

2. 실험

2.1 시편

본 실험에서는 마이크로캡슐 대신 크기가 다른 유색의 미세 입자 CZC를 이용하였고 매질로는 미세 입자와 균열사이의 관계를 가시적으로 관찰할 수 있도록 투명 에폭시인 에스티렌 MS-200을 사용하였다.

Table 1 Material Properties of MS-200 and CZC

MS-200	
Strength	6.1kgf/mm ²
Tensile Elongation	3.1%
CZC(ZrO ₂)	
Strength	60kgf/mm ²
Density	6.20g/cm ³
Standard size	0.5, 1, 2mm

투명 에폭시인 에스티렌 MS-200에 미세 입자를 균일하게 분포시켜 자체 제작한 몰드에 넣어 핫프레스를 이용해 온도와 압력을 조절하여 DCDC시편을 제작하였다. 각각 0.5, 1, 2mm 크기의 미세 입자가 삽입된 시편과 미세입자를 넣지 않은 시편을 각각 제작하였다. 시편크기는 40(w)×40(w)×10(t)mm³이며 시편형상은 Fig. 1과 같다.

이 시편은 균열진전을 서서히 하여 균열 진전 현상을 직접적으로 관찰하기 위해 사용되었다. 초기 크랙길이는 2mm이고 초기 크랙길이와 구멍의 길이 비 $a/r=0.25$ 이다.

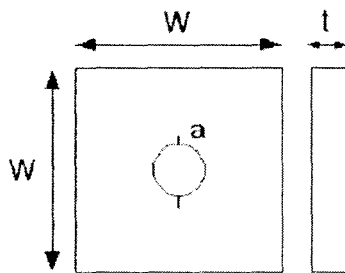


Fig. 1 Shape of the DCDC specimen

2.2 실험 장치 및 방법

본 논문에서 압축 실험을 위한 장비 구성은 Fig. 2와 같다. 압축실험을 위해 Instron 8872 시험기를 이

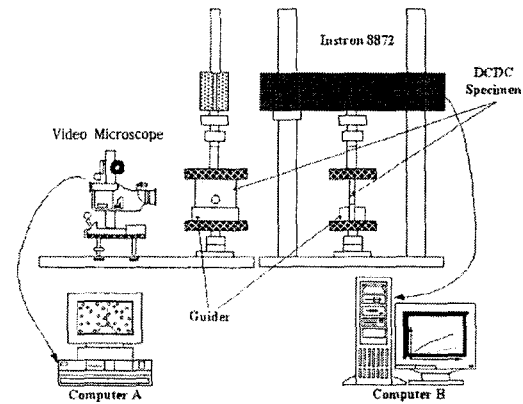


Fig. 2 Experimental setup for the compression splitting test

용하였고 균열진전양상을 자세히 관찰하고자 시편의 정면에 Video Microscope를 설치하였고 Video Microscope로 10초당 한 장씩 100배율로 사진을 찍었으며 컴퓨터와 연결하여 바로 파일로 저장시킬 수 있도록 하였다.

균열진전에 대한 미세 입자의 영향을 관찰하기 위해서 미세입자의 크기와 미세입자의 상대적 위치를 변수로 설정하였다.

상온에서 0.01m/s로 변위제어하여 Instron시험기를 이용해 균열 방향으로 압축력을 가하여 균열에 수직인 방향으로 인장 응력이 생기게 하여 균열이 서서히 진전되도록 실험을 하였다.

이 방법은 직접적으로 인장응력을 가하는 비례 균열이 서서히 진전하게 하므로 비교적 약한 재료의 균열을 가시적으로 관찰할 수 있는 방법이다.

3. 실험 결과

3.1 압축 실험

0.5, 1, 2mm 크기의 미세입자를 각각 삽입시킨 시편을 균열에 평행하게 압축을 가하는 실험을 한 결과 입자 크기의 영향에 상관없이 균열이 진전해 나갔다.

균열과 미세입자의 중심이 일직선상에 있는 경우 (Fig.3a)와 같이 균열은 입자를 향해 진전해 나가는 결과를 보였다. 점차 균열이 진전되어 입자에 다다랐을 때 입자와 매질의 경계면이 분리되는 것을 시각적으로 확인할 수 있었다. 이러한 실험결과를 통해 만약 입자가 아닌 Healing agent를 포함하고 있는 마이크로 캡슐일 경우 균열 진전시 캡슐 표면의 파괴로 인해 균열면에 Healing agent가 빠져나올 것을 예상할 수 있다.

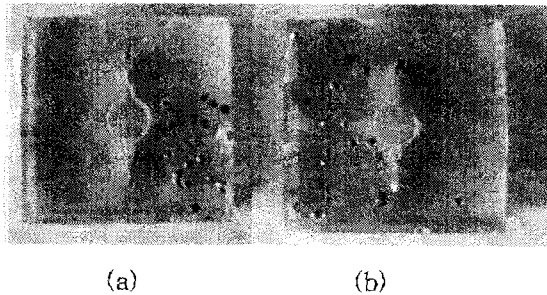


Fig. 3 The picture of the experiment result

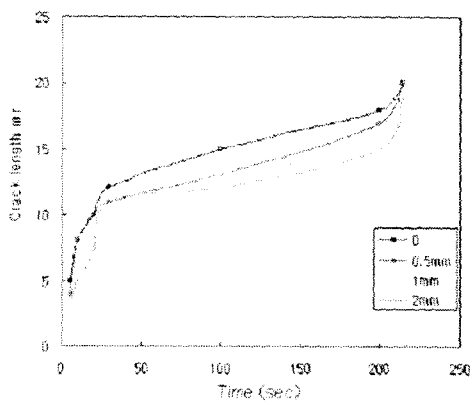


Fig. 4 Comparison of the crack propagation with the size of particles

균열과 미세입자의 중심이 일직선상에 있지 않은 경우 균열면이 입자를 향해 방향을 전환하는 것을 확인하였다. 또한 균열방향으로 압축응력이 점점 가해질수록 입자와 에폭시의 경계면이 분리되는 것을 볼 수 있었다.

4. FEM

4.1 모델링

FEM을 통해 초기균열과 입자사이의 상대적 위치와 입자 크기가 균열진전 경로에 주는 영향을 알아 보았다. 매질 내에서 진전하는 균열선단에 미세입자가 존재할 때 응력분포를 알아보기 위해서 PATRAN을 이용하여 2-D 모델링을 하였다.

균열진전에 대한 미세입자 위치의 영향을 알아보기 위해 균열과 미세입자의 중심이 일직선상에 놓인 경우(Fig. 5a)와 그렇지 않은 경우(Fig. 5b)에 대한 두 가지 경우를 다루어 보았다. 초기 균열과 미세입자가 일직선상에 있지 않은 경우는 상대적 거리(y)를

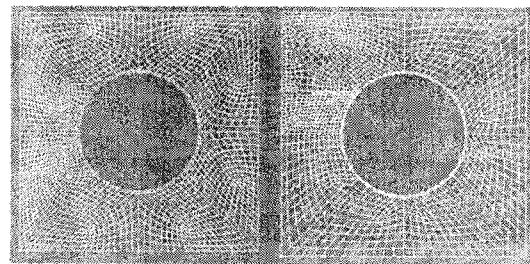


Fig. 5 Finite element meshes for analysis

2mm로 하여 모델링하였다. Fig. 5는 균열과 입자사이를 모델링한 것으로 시편에 비해 매우 작은 부분이다.

균열과 미세입자 주변의 응력분포를 더욱 자세히 관찰하고자 다른 부분에 비해 Mesh를 잘게 나누었다. 이 문제에서는 평면 응력상태로 가정하고 두께 방향의 응력변화는 무시하였다. 또한, 입자와 매질의 접착이 완전하다고 가정하였고 균열과 입자사이가 매우 가깝다고 가정하였다.

균열면과 수직인 방향으로 인장응력 σ 를 가하고 하단면을 y방향으로 고정시키고 하단면의 가장 오른쪽 노드를 x, y방향을 고정시키는 경계조건을 주었다.

4.2 해석결과

본 논문에서는 NASTRAN을 이용하여 해석하였으며 해석결과는 Fig. 6와 같다. 균열과 입자의 중심이 일직선상에 있는 경우의 해석 결과는 Fig. 6a이고, 일직선상에 있지 않은 경우의 결과는 Fig. 6b이다.

균열면에 수직인 방향으로 인장응력이 가해졌을 때의 균열과 입자 주변의 응력분포를 알아보았다. 응력이 높게 나타나는 부분이 응력 집중이 생기는 부분으로 응력집중 현상에 의해 균열진전경로를 예상해 볼 수 있다.

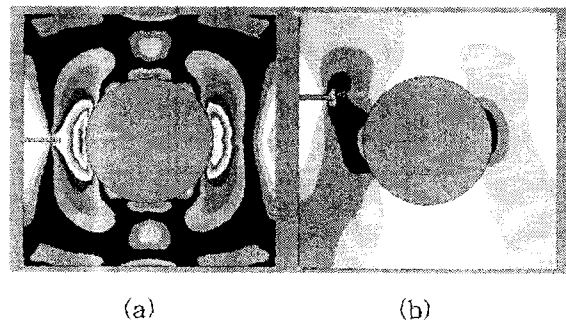


Fig. 6 Analysis results of tensile force

Fig. 6a에서의 응력분포는 균열면을 기준으로 상하가 대칭을 이루었으며 균열면의 중심에서 입자사이 부분의 응력분포가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 균열면과 입자의 중심이 일직선상에 존재하지 않는 경우(Fig. 6b)는 균열면에서 입자의 왼쪽 중심벽을 향해 응력이 집중되는 현상을 보였다.

따라서 입자가 마이크로캡슐일 경우 응력집중현상에 의해 마이크로캡슐 주변에 균열 발생시 마이크로캡슐이 깨지면서 캡슐안에 내재되어 있던 Healing제가 균열면으로 빠져나올 수 있음을 예측할 수 있다.

5. 결론

균열진전에 대한 미세입자의 영향을 알아보았다. 미세입자의 크기, 균열과의 상대적 위치의 영향을 실험과 FEM을 통하여 알아보았다. 미세입자의 크기는 균열 진전 방향에 대해서 직접적인 영향을 주지 않았다. 그러나 미세입자의 크기는 재료자체의 결함이 될 수 있는 요소로 작용할 수 있기 때문에 재료강도면에서는 간과할 수 없다. 균열과 미세입자의 상대적 위치는 Self-healing개념에서 임의로 분포되어있는 마이크로캡슐이 손상 발생시 적절하게 역할을 수행할 수 있는지를 알아보기 위한 중요한 요소이다. 따라서, 상대적 위치의 영향을 알아보기 위해 마이크로캡슐 대신 미세입자인 CZC를 통해 알아본 실험 결과에서는 균열면과 미세입자의 중심이 일직선상에 있는 경우와 그렇지 않은 경우가 모두 균열이 미세입자를 향해 진전하였다.

그러나 Self-healing개념을 직접적으로 적용시키기 위해서는 CZC이외의 마이크로캡슐과 비슷한 미세입자에 대해서도 적용시켜 보아야 할 것이며 더욱 나아가서는 마이크로캡슐을 포함시켜 시편을 제작하여 균열진전을 직접적으로 관찰할 수 있는 구체적인 방법을 모색하거나연구가 수행되어야 한다.

후기

이 연구는 BK21(Brain Korea)사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Scott R. White et al., "Autonomic Healing of Polymer Composites", Nature, Vol.409, 2001, pp.794~797.

2. Michael R. Kessler and Scott R. White, "Self-Activated Healing of Delamination Damage in Woven Composites", Composites: Part A, Vol.32, 2001, pp.683~699.
3. E. N. Brown, N. R. Scottos and S. R. White, "Fracture testing of a self-healing polymer composites", An International Journal (2001).
4. 윤영기, 윤희석, "복합재료의 자가치료용 캡슐제작시 공정변수들의 영향", 한국정밀공학회지 제18권 제4호.
5. 윤성호, 윤영기, M. R. Kessler, S. R. White, "Self-healing Techinque을 적용한 폴리머 복합재의 손상 보수 연구".
6. Yutaka Kagawa, Ken Goto, "Direct observation and modeling of the crack-90fibre interaction process in continuous fibre-reinforced ceramics:model experiments", Materials Science and Engineering, Vol.A250, 1998, pp 285-290.