

미소압축시험기를 이용한 마이크로캡슐의 압축 거동 평가 Compression Behavior of Microcapsule Using a Micro-compressive Tester

*이길형¹, #윤성호²

*G. H. Lee¹, #S. H. Yoon(shyoon@kumoh.ac.kr)²

¹ 금오공과대학교 기계공학부, ² 금오공과대학교 기계공학부

Key words : Microcapsules, Compression test

1. 서론

복합재는 우수한 기계적 특성으로 인해 항공우주, 자동차, 해양선박 및 스포츠 산업등에 폭넓게 적용되고 있다. 그러나 외부에서 작용하는 하중이나 충격은 복합재 내부에 미세한 손상을 유발시켜 계면이나 층간분리 등의 물성저하를 야기시킨다. 복합재의 손상보수를 위한 기법 중 자가치료기법에 적용되고 있는 마이크로캡슐에 대한 연구가 진행되고 있다.

마이크로캡슐을 이용한 복합재 구조물의 손상보수기법은 복합재 구조물을 제작할 때 치료제가 저장된 마이크로캡슐과 촉매를 각각 미리 분산시켜 놓고 외부하중이나 충격에 의해 복합재 내부에 손상이 발생하는 경우 진전되는 균열이 분산되어있던 마이크로캡슐을 터뜨리면서 모세관 현상을 통해 균열 안으로 치료제가 들어가게 되고 주위의 촉매와 반응하여 균열을 접합시킴으로서 손상을 치료하는 개념이다. 마이크로캡슐을 이용한 복합재의 자가치료기법이 실제 구조물에 적용되기 위해서는 다음과 같은 요구조건들이 평가되어야 한다.

첫째, 마이크로캡슐의 박막은 알맞은 강성을 가져야 한다. White[1]는 Eshelby-Mura equivalent inclusion method를 이용하여 복합재 내부에 일어날 수 있는 균열과 마이크로캡슐의 상호작용에 대해 소개하였다. 결과에서 보면 마이크로캡슐과 복합재 기지간의 강성비가 균열 확산 경로에 영향을 끼치는 것을 알 수 있는데 마이크로캡슐이 복합재 기지보다 더 높은 강성을 가지면 마이크로캡슐 쪽으로 균열 경로를 방해하는 응력장이 형성되고 마이크로캡슐이 복합재 기지보다 낮은 강성을 가지면 마이크로캡슐 쪽으로 균열을 유도하는 응력장이 형성된다고 하였다.

둘째, 마이크로캡슐의 박막은 알맞은 두께 및 파손 강도를 가져야 한다. 이 경우 박막의 두께가 두껍고 강도가 강하면 손상에 의한 균열의 진전 과정에서 마이크로캡슐의 계면을 따라 이동하여 마이크로캡슐을 파손시키기 어렵고 반대로 박막이 얇고 강도가 약하면 복합재에 마이크로캡슐을 적용할 때 파손되기 쉽고 복합재 내부에 안정적 저장이 어려워 자가치료 효과를 기대하기 어렵다. 이밖에도 마이크로캡슐의 크기 및 사용되는 치료제등이 자가치료기법에 영향을 끼치는 요인으로 작용한다.

이러한 요구조건들의 평가 방법 중 마이크로캡슐의 기계적 특성을 평가할 수 있는 대표적인 방법으로 압축 시험이 있다. Keller[2]은 Urea-formaldehyde로 구성된 박막을 가지는 마이크로캡슐(U-F microcapsules)의 기계적 특성에 대한 실험적 방법과 이론적 방법을 소개하였다. 실험적 방법의 경우 압축에 의해 마이크로캡슐이 받는 하중과 변위를 측정할 수 있는 압축시험장치를 제작하고 압축 시험 동안 현미경을 통해 마이크로캡슐의 형태를 관찰하였다. 이론적 방법의 경우 strain energy function을 토대로 이론적 모델을 제시하고 압축 시험을 통해 얻은 결과와 비교함으로써 마이크로캡슐 박막의 기계적 물성을 예측하였다.

본 연구에서는 미소 하중 및 변위제어가 가능한 미소압축시험기를 사용하여 마이크로캡슐의 압축 거동을 평가하였다. 이때 압축 시험 동안 실제현미경으로 통해 마이크로캡슐의 변형 양상을 관찰하였다.

2. 캡슐제조

본 연구에서 melanin, urea, 그리고 formaldehyde로 구성된 박막을 가지는 마이크로캡슐(M-U-F microcapsules)을 이용하여 압축 시험을 수행하였다. 마이크로캡슐은 Fig. 1의 공정순서에 따라

제조 되었고 DCPD(dicyclopentadiene) 투입 이후 반응 시간동안 교반 속도를 300rpm으로 적용하였다. 압축 시험에는 평균 직경이 약 300 μ m인 캡슐을 적용하였다.

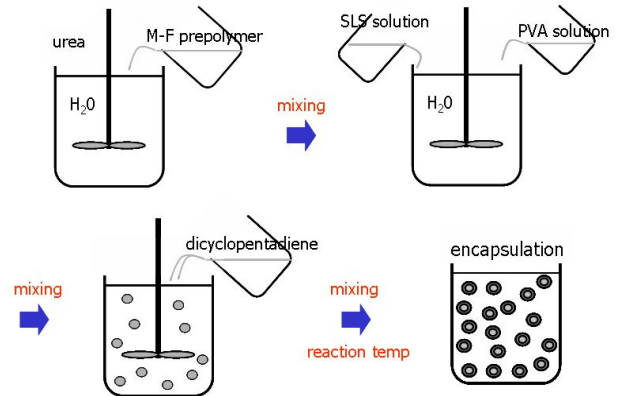


Fig. 1 Manufacturing process of M-U-F microcapsule

3. 실험방법

Fig. 2에는 미소압축시험기에 대한 개략도가 나타나있다. 여기에서 전체 장비는 외부 환경요인에 의한 진동을 방지하기 위해 공압 방진 테이블 위에 장착되었다. 압축 시험동안 마이크로캡슐에 작용하는 압축 하중을 정밀하게 측정하기 위해 최대 용량이 50mN인 외팔보 형식의 로드셀(LVS-5GA / Kyowa)을 적용하였고 미소 변위제어가 가능한 분해능이 0.5 μ m인 리니어 스테이지(PSV-X40D / Piezo-tech)를 이용하여 마이크로캡슐을 압축하였다. 마이크로캡슐의 변형량은 분해능이 0.1 μ m인 레이저 변위 센서(ZS-LD20 & ZS-HLDC / OMRON)를 사용하여 측정하였다. 이때 두 개의 레이저 변위 센서를 이용하여 로드셀에 장착된 압축팁의 변위와 리니어 스테이지의 변위를 측정하고 각각 측정된 변위 값의 차를 통해 정확한 마이크로캡슐의 변위를 측정하였다. 실험이 진행되는 동안 실제현미경을 통해 마이크로캡슐의 변형을 실시간으로 관찰하였다. Fig. 3에는 실제 압축 시험을 위해 제작된 장치사진이 나타나있다.

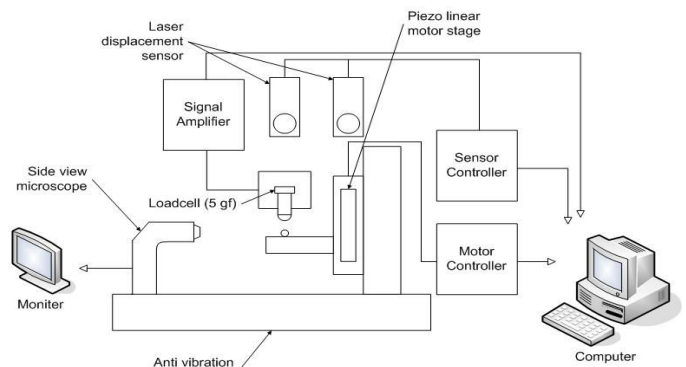


Fig. 2 Schematic diagram of micro compressive testing system

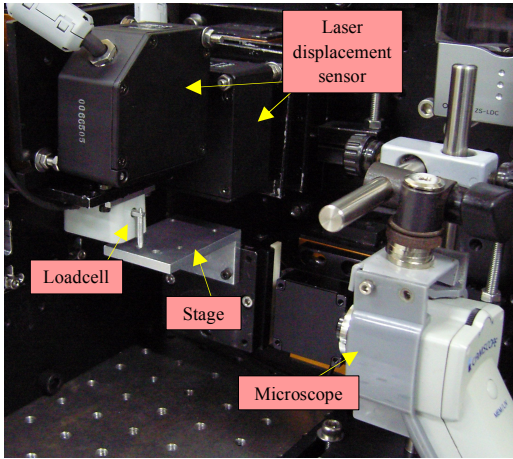


Fig. 3 Photograph of micro-compressive tester

4. 실험결과

Fig. 4는 302 μ m의 직경을 가지는 MUF 마이크로캡슐의 전형적인 하중-변위 선도가 나타나 있다. 여기에서 마이크로캡슐의 변형이 54.75 μ m에서 최대 파손 하중이 5.86mN이다.

Fig. 5은 압축 실험이 진행되는 동안 연속적으로 촬영한 영상 중 대표적인 4가지 형태에 대해 나타나 있다. 사진에서 마이크로캡슐의 위쪽 부분은 로드셀의 압축팁 끝부분을 나타내고 아래쪽 부분은 리니어 스테이지를 나타낸다. 1번 사진은 마이크로캡슐이 압축되기 전 단계를 나타내고 2번 사진은 마이크로캡슐이 압축팁에 의해 압축이 진행되는 초기 단계를 나타낸다. 3번 사진은 마이크로캡슐이 파손을 일으키기 직전의 단계를 나타낸다. 마지막으로 4번 사진은 최대 파손 하중이후 마이크로캡슐의 파손에 의해 하중이 감소하는 단계로, 이때 마이크로캡슐과 압축팁 사이의 접촉영역에서 파손이 일어나 캡슐에 싸여있던 치료제가 새어나오고 이후 빠르게 캡슐의 표면을 덮기 시작하는 것이 관찰되었다.

하중-변위 선도에서 2번째 단계 이후 기울기가 점차 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 마이크로캡슐을 이루는 박막의 물성이 초탄성(hyperelastic)인 것으로 판단된다.

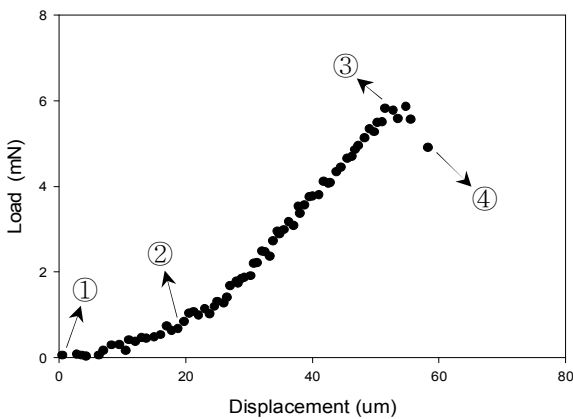


Fig. 4 Result of compressive test by micro-compressive tester

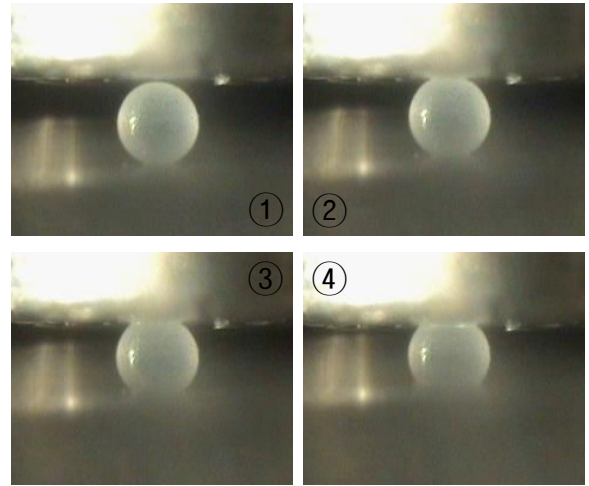


Fig. 5 Photograph of compression test

5. 결론

본 연구에서는 미소압축시험기를 이용하여 복합재의 손상보수기법 중 자가치료기법에 적용되고 있는 마이크로캡슐의 압축 거동에 대해 평가하였다. 마이크로캡슐의 파손 여부는 압축 시험 동안 실제현미경을 통해 촬영된 영상에서 캡슐에 싸여있던 치료제가 새어나오는 것이 관찰 될 때의 변위를 기준으로 판단하였다. 압축 시험을 통해 얻은 하중-변위 선도는 마이크로캡슐 박막의 재료 특성을 예측하기 위한 이론적 압축 모델과의 비교자료로 사용된다.

참고문헌

1. White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N. and Viswanathan, S. "Autonomic Healing of Polymer Composites," Nature, 409, 794-797, 2001.
2. Keller, M. W. and Sottos, N. R., "Mechanical Properties of Microcapsules Used in a Self-Healing Polymer," Experimental Mechanics, v.46, no.6, 725-733, 2006.
3. 윤성호, "제조공정변수에 따른 자가치료용 마이크로캡슐의 특성 고찰," 한국복합재료학회지, v.16, no.2, 54-61, 2003
4. 윤성호, 박희원, 홍순지, "폴리머 복합재의 자가치료용 마이크로캡슐 제조공정 연구," 한국복합재료학회지, v.15, no.2, 32-39, 2002.