

탄소나노튜브 보강 여부에 따른 자가치료용 마이크로캡슐의 박막 특성 평가

Evaluation of Thin-Shell Properties of Self-Healing Microcapsules by Reinforcement of Carbon Nanotubes

장정근¹, 김현지², 윤성호^{2,#}
Jeong Keun Jang¹, Hyeon Ji Kim², and Sung Ho Yoon^{2,#}

¹ 금오공과대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)

² 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

Corresponding Author / E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr; TEL: +82-54-478-7299

ORCID: 0000-0003-3430-1381

KEYWORDS: Self-healing microcapsules (자기치료용 마이크로캡슐), Carbon nanotubes (탄소나노튜브), Storage capability test (보관성능시험), Micro-compressive test (미소압축시험)

In this study, thin-shell surface observation, storage capability test, and micro-compressive test were performed for self-healing microcapsules using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and a micro-compressive testing machine. A microcapsule having a melamine-urea-formaldehyde thin-shell and a microcapsule having a melamine-urea-formaldehyde thin-shell reinforced with carbon nanotubes were used. Two carbon nanotube contents were considered: 0.17 wt% and 0.50 wt%. Thin-wall shell state was relatively smooth when microcapsules were not reinforced with carbon nanotubes. It was uneven when microcapsules were reinforced with carbon nanotubes. Prepared microcapsules showed little decreases of weights even when the exposure time was increased regardless of whether they were reinforced with carbon nanotubes. Thus, their storage capability was good. When carbon nanotube content was the same, the fracture load was almost constant without being affected by the diameter of the microcapsule. However, fracture displacement increased with increasing diameter of the microcapsule. When diameters of microcapsules were similar, fracture load and fracture displacement increased when carbon nanotube content increased. It was found that self-healing microcapsules had good storage capability and mechanical properties. Thus, they could be applied to repair damage to composite materials if thin-shell formation mechanism for adding carbon nanotubes is supplemented.

Manuscript received: July 17, 2022 / Revised: September 8, 2022 / Accepted: September 15, 2022

1. 서론

섬유강화 복합재는 금속재에 비해 비강성과 비강도가 높고 내부식성도 우수하여 경량화가 요구되는 구조재의 제작에 널리 적용되고 있다. 그러나 복합재 구조재는 외부에서 작용하는 하중 및 충격 등에 의해 내부에 미세 균열이 발생되기도 한다. 이러한 미세 균열은 C-스캔 등의 비파괴 검사를 통해 탐지할 수 있지만 비파괴 검사를 통해서도 탐지가 쉽지 않은 경우가 많으며 설령 미세 균열이 탐지되었더라도 보수가 불가능한 경우가

많다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 복합재 구조재 내에 발생하는 미세 균열을 빠르게 탐지하고 스스로 보수하는 자가치유 기법이 제시된 바 있다[1,2]. 자가치유 기법은 자가치료용 마이크로캡슐과 촉매가 분산되어 있는 복합재 구조재에 과도한 외부하중이 가해져 복합재 구조재 내부에 손상이 발생하면 자가치료용 마이크로캡슐이 손상을 인지하고 마이크로캡슐 내부에 저장된 자가치료제를 손상 부위로 방출하여 주위에 분산된 촉매와 중합반응을 일으켜 손상을 스스로 치유하는 방법이다.

White 등[1]은 Eshelby-Mura Equivalent Inclusion Method를

이용하여 복합재 내의 미세 균열과 마이크로캡슐의 상호작용에 대한 연구를 수행하였다. 이들에 따르면 마이크로캡슐의 박막 탄성계수가 복합재의 기지 탄성계수보다 높으면 균열 진전이 마이크로캡슐로 향하지 못하도록 하는 응력장이 미세 균열 부위에 형성되고, 마이크로캡슐의 박막 탄성계수가 복합재의 기지 탄성계수보다 낮으면 균열 진전이 마이크로캡슐로 향하게 하는 응력장이 미세균열 부위에 형성된다고 하였다.

자가 치유 기법을 성공적으로 적용하기 위해서는 자가치료제를 안정적으로 저장하고, 미세 균열을 인지한 경우 자가치료제를 스스로 방출할 수 있는 마이크로캡슐의 제조가 필수적이다 [3,4]. 기존에는 우레아-포름알데히드 박막을 가진 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구가 제시된 바 있지만 마이크로캡슐의 박막 두께가 얇고 강성이 낮아 복합재를 성형하는 과정에서 복합재 내부에 삽입되는 마이크로캡슐이 파손될 우려가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 가진 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구가 수행되어 왔다[5-8]. 최근에는 탄소나노튜브가 보강된 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 가진 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구도 시도되고 있다. Along 등[9]은 LBL (Layer-By-Layer) 공정을 적용하여 탄소나노튜브를 증착시킨 마이크로캡슐을 제조하고 마이크로캡슐에 보강된 탄소나노튜브의 보강 효과를 확인하였다. Ahangari 등 [10]은 탄소나노튜브와 알루미늄으로 보강된 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 나노압입시험을 수행하여 마이크로캡슐의 기계적 특성을 평가하였다. Jagtap 등[11]은 탄소나노튜브가 적용된 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구를 통해 마이크로캡슐의 박막 강성을 증가시키고 수율을 높일 수 있는 방안을 제시하였다. Caruso 등[12]은 이중 구조의 폴리우레탄/폴리우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 미소압축시험 및 TGA 시험을 수행하여 마이크로캡슐의 박막 특성을 조사하였다. Sun 등[13]은 멜라민-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 미소압축시험을 수행하여 파단하중은 마이크로캡슐의 직경에 비례하는 양상을 갖는다고 하였다. Ghaemi 등[14]은 멜라민-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 압축시험을 수행하였으며 마이크로캡슐의 탄성계수는 직경에 무관하지만 파단하중은 직경에 영향을 받는다고 하였다. Keller 등[15]은 우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 미소압축시험을 수행하여 건조 상태와 침지 상태에서의 마이크로캡슐의 탄성계수를 평가하였다.

본 연구에서는 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐과 탄소나노튜브가 보강된 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 전계방출형주사현미경(FE-SEM)을 이용하여 박막 상태를 관찰하고 자가치료제 보관 성능을 조사하였다. 또한 미소압축시험을 수행하여 마이크로캡슐의 직경에 따른 파단하중과 파단변형을 평가하였다.

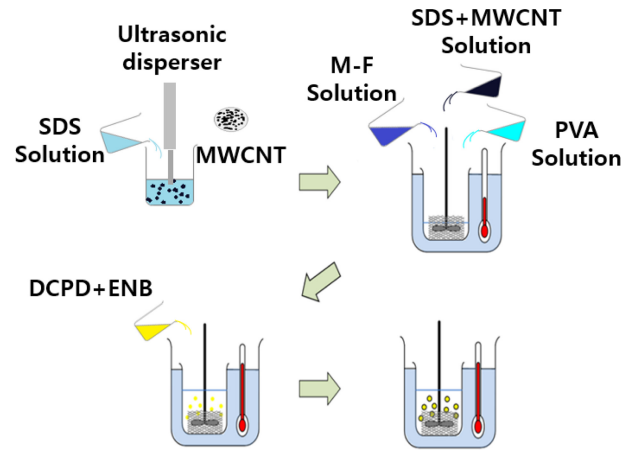


Fig. 1 Schematic diagram of the manufacturing process

2. 마이크로캡슐 제조 및 시험 방법

2.1 마이크로캡슐 제조 방법

탄소나노튜브 함유량을 달리한 마이크로캡슐들을 제작하였다. 이때 탄소나노튜브 함유량은 0.00, 0.17, 0.50 wt%의 3 종류를 고려하였다. 제조 방법은 탄소나노튜브를 첨가하는 절차를 제외하고는 모두 동일하게 적용하였다.

Fig. 1에는 탄소나노튜브가 보강된 마이크로캡슐의 제조 과정이 나타나 있다. 첫째, 100 ml의 초순수에 SDS (Sodium Dodecyl Sulfate, Junsei, Japan)을 넣고 SDS 수용액을 만든다. 둘째, SDS 수용액에 탄소나노튜브를 넣고 초음파 분산기(VC505, Sonics and Materials, USA)를 이용하여 탄소나노튜브-SDS 용액을 만든다. 셋째, 100 ml의 초순수에 PVA (Polyvinyl Alcohol, Sigma-Aldrich, USA)를 용해시켜 안정화제 역할을 하는 PVA 수용액을 만든다. 넷째, 100 ml의 초순수에 멜라민(Melamine, Sigma-Aldrich, USA)과 포름알데히드(Formaldehyde, Sigma-Aldrich, USA)를 혼합하여 박막 구성재인 멜라민-우레아-포름알데히드 수용액을 만든다. 다섯째, 탄소나노튜브-SDS 용액, PVA 수용액, 자가치료제를 혼합하고 HCl (Hydrochloric Acid, Daejung, Korea) 수용액을 이용하여 수소이온농도를 6.2로 유지시킨다. 여섯째, 80°C에서 교반 과정을 통해 만든 자가치료제가 저장된 마이크로캡슐들이 형성되며 이들 마이크로캡슐을 필터링하여 건조시키면 탄소나노튜브가 보강된 마이크로캡슐이 얻어진다.

2.2 마이크로캡슐의 박막 관찰

마이크로캡슐의 박막 상태를 관찰하기 위한 시료 준비과정은 다음과 같다. 첫째, 아크릴판에 순간접착제를 뿌린 다음 마이크로캡슐을 분산시킨다. 둘째, 면도날을 이용하여 마이크로캡슐을 깨뜨린 다음 마이크로캡슐에 저장된 자가치료제를 제거한다. 셋째, 백금코팅기(JP/E-1010, Hitachi Technology, Japan)를 이용하여 코팅한 다음 전계방출형주사현미경을 통해 마이크로캡슐 박막을 관찰한다.

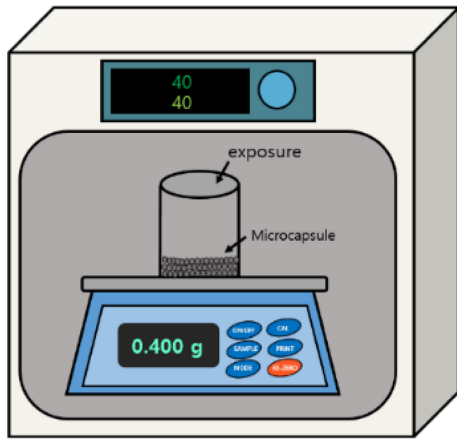


Fig. 2 Schematic diagram of the storage capability test

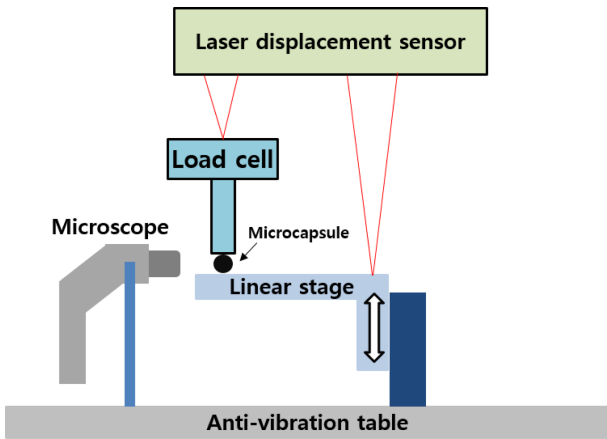


Fig. 3 Schematic diagram of the micro-compressive test

2.3 마이크로캡슐의 보관 성능 평가

Fig. 2에는 마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능을 평가하기 위해 규정된 온도 조건에서 마이크로캡슐의 무게를 측정하는 장치가 나타나 있다. 시험장치는 온도를 제어하는 오븐(SH-DO-149FG, SH_Scientific, Korea), 무게를 측정하는 정밀전자저울(AR2140, OHAUS, USA), 데이터수집장치로 구성되었다. 자가 치료제 보관 성능 평가를 위해 100-200 μm 직경의 마이크로캡슐들을 바이알 병에 넣은 다음 50°C 오븐에서 14일 동안 무게를 측정하였다.

2.4 마이크로캡슐의 기계적 특성 평가

Fig. 3에는 마이크로캡슐의 기계적 특성을 평가하기 위한 미소압축시험기가 나타나 있다. 미소압축시험기는 로드셀(LVS-5GA, Kyowa, Japan), 리니어 스테이지(TD-102, Technohands, Japan), 두 개의 레이저 변위 센서(ZS-LD20 & ZS-HLDC, Omron, Japan)로 구성되어 있다. 마이크로캡슐의 압축 양상은 실체현미경(Icanscope, Sometech, Korea)을 통해 관찰하였으며 하중과 변위는 마이크로캡슐에 하중이 가해지는 순간부터 로드셀과 레이저 변위 센서에서 수집하였다.

Table 1. Diameter distributions of three types of microcapsules

Type \ μm	>100	100-150	150-200	<200
MWCNT_0.00	3.2	28.5	51.8	16.6
MWCNT_0.17	6.3	47.5	34.3	12.0
MWCNT_0.50	0.3	53.7	38.3	7.8

3. 시험결과

3.1 마이크로캡슐의 크기 분석

탄소나노튜브의 함유량을 달리하여 제조된 마이크로캡슐의 수율과 직경을 조사하였다. 탄소나노튜브의 함유량은 0.00, 0.17, 0.50 wt%의 3종류로 MWCNT_0.00, MWCNT_0.17, MWCNT_0.50으로 각각 표기하였다. 제조된 마이크로캡슐은 100, 150, 200 μm의 테스트 시브(Testing Sieve, Chunggyesanggongsa, Korea)를 사용하여 4종류로 분류하였다.

Table 1에는 탄소나노튜브의 함유량에 따른 마이크로캡슐의 직경별 수율이 나타나 있다. 마이크로캡슐의 직경별 수율은 마이크로캡슐의 전체 무게에 대한 직경별 무게 비로 정의하였다. MWCNT_0.00인 경우 100-150 μm는 28.5%, 150-200 μm는 51.8%, MWCNT_0.17인 경우 100-150 μm는 47.5%, 150-200 μm는 34.3%, 그리고 MWCNT_0.50인 경우 100-150 μm는 53.7%, 150-200 μm는 38.3%로서 제조된 마이크로캡슐의 80-90%가 100-200 μm 범위에 있음을 알 수 있다.

3.2 마이크로캡슐의 박막 분석

Fig. 4에는 탄소나노튜브의 함유량을 달리한 마이크로캡슐의 박막 상태가 나타나 있다. 여기에서 보면 MWCNT_0.00의 박막은 비교적 매끄러운 표면으로 되어 있지만 탄소나노튜브가 보강된 박막은 요철 상태의 표면을 가지며 박막 표면에서는 비교적 균일하게 분산되어 있는 탄소나노튜브들이 관찰된다.

Fig. 5와 Table 2에는 탄소나노튜브의 함유량을 달리하여 제조된 마이크로캡슐의 박막 상태와 박막 두께 측정 결과가 나타나 있다. 이때 박막 두께는 각 범주별 10개의 시편에 대한 시험 결과이다. 여기에서 보면 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 박막 두께는 마이크로캡슐의 직경에 무관하고 두께 변화는 5% 이내이다. 그러나 탄소나노튜브의 함유량은 박막 두께에 영향을 미치며 박막 두께는 MWCNT_0.00에 비해 MWCNT_0.17인 경우 21-24%, MWCNT_0.50인 경우 36-37% 감소한다. 이는 탄소나노튜브가 박막 구성재의 중합반응에 영향을 미치지 않으므로 판단되며 박막 형성 메커니즘에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

3.3 마이크로캡슐의 보관 성능 평가 결과

마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능이 양호하면 내부에 저장된 자가치료제가 안정적으로 저장되지만, 마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능이 떨어지면 내부에 저장된 자가치료제가

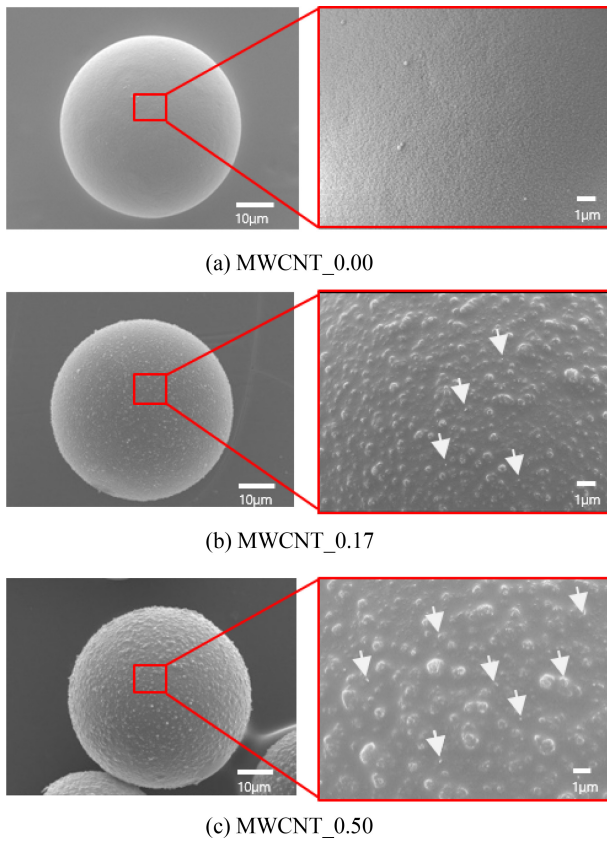


Fig. 4 Thin-shell surface of microcapsules observed by FE-SEM

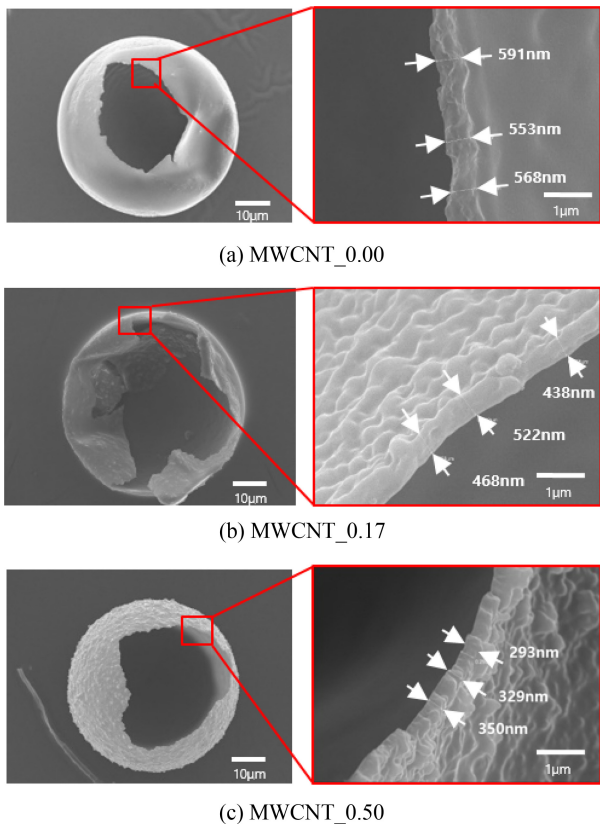


Fig. 5 Measurement of thin-shell thickness of microcapsules

Table 2 Thin-shell thicknesses of microcapsules

Type \ μm	>100	>100-150	>150-200
MWCNT_0.00	589 (39.8)	607 (37.1)	619 (28.7)
MWCNT_0.17	463 (21.9)	460 (25.3)	477 (26.8)
MWCNT_0.50	376 (18.5)	385 (17.9)	389 (13.1)

() : standard deviation, unit : nm

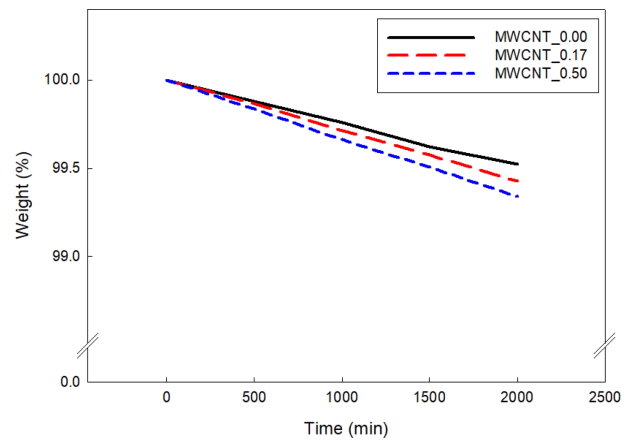


Fig. 6 Storage capability test results of microcapsules

쉽게 방출된다. 마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능을 평가하기 위해 50°C 오븐에서 15일 동안 100-200 μm 직경의 마이크로캡슐에 대해 노출시간에 따른 무게를 측정하였다.

Fig. 6에는 노출시간에 따른 마이크로캡슐의 무게 측정 결과가 나타나 있다. 마이크로캡슐의 노출시간이 15일 경과되면 MWCNT_0.00인 경우 초기 무게의 0.5%, MWCNT_0.17인 경우 초기 무게의 0.6%, MWCNT_0.50인 경우 초기 무게의 0.7% 무게 감소가 나타난다. 이로 미루어 보면 탄소나노튜브의 보강 여부에 무관하게 제조된 마이크로캡슐의 보관 성능은 양호한 것으로 판단된다.

3.4 미소압축시험 결과 분석

Fig. 7에는 탄소나노튜브의 함유량을 달리하여 제조한 마이크로캡슐에 대한 전형적인 하중-변위 선도가 나타나 있다. 이때 시험에는 125 μm 직경을 갖는 마이크로캡슐을 적용하였다. MWCNT_0.00인 경우 파단하중은 7.8 mN, 파단변형은 28.3 μm , MWCNT_0.17인 경우 파단하중은 9.0 mN, 파단변형은 31.9 μm , MWCNT_0.50인 경우 파단하중은 10.9 mN, 파단변형은 33.5 μm 이다.

Fig. 8에는 MWCNT_0.50인 마이크로캡슐에 대해 얻은 하중-변위 선도와 미소압축시험이 진행되는 동안 실제현미경을 통해 관찰한 변형 양상이 나타나 있다. 이때 마이크로캡슐의 상부는 로드셀 팁에 접촉되어 있고 마이크로캡슐의 하부는 리니어

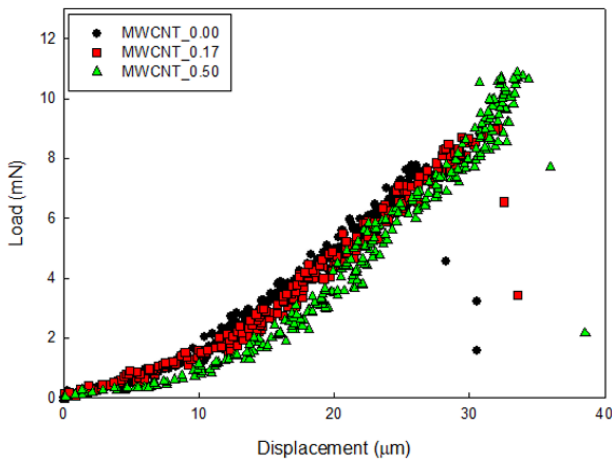


Fig. 7 Typical load-displacement curves conducted by micro-compressive test

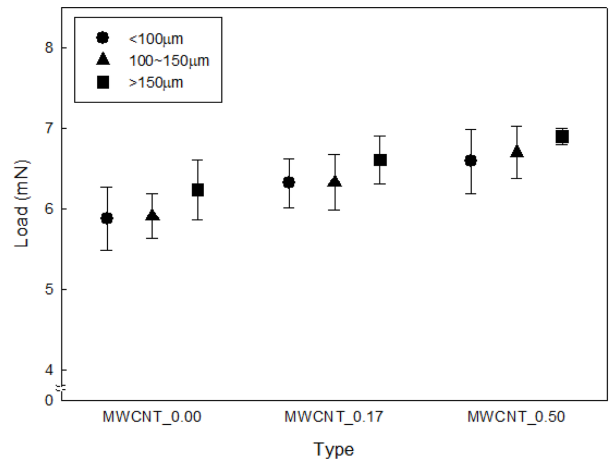


Fig. 9 Test results obtained by micro-compressive test

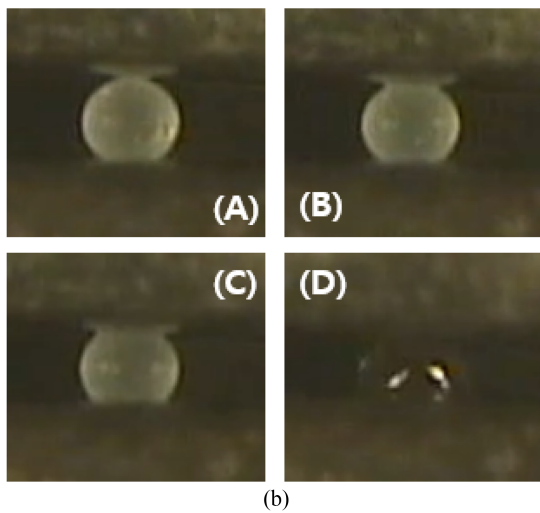
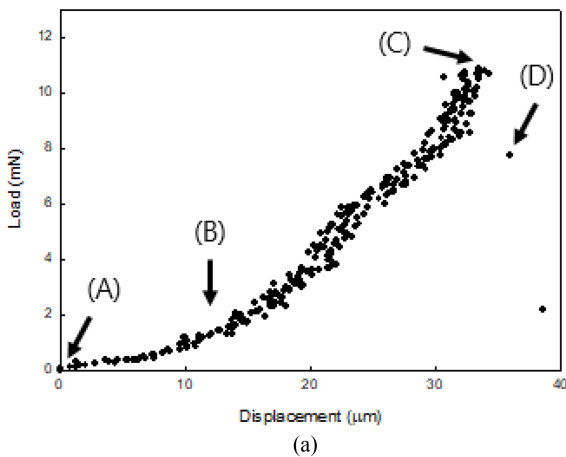


Fig. 8 Deformation of microcapsules observed in micro-compressive test

스테이지와 접촉되어 있다. 총 4단계에 따라 마이크로캡슐의 변화를 나타내었는데, Figs. 8(A)는 마이크로캡슐이 로드셀 팁과

접촉되기 시작하는 단계, 8(B)는 마이크로캡슐이 로드셀 팁에 의해 압축하중을 받는 단계, 8(C)는 마이크로캡슐이 파손되기 직전 단계, 그리고 8(D)는 마이크로캡슐이 파손되어 하중이 급격히 감소되는 단계로서 마이크로캡슐이 파손되면 내부에 저장된 자가치료제가 외부로 방출되는 양상이 관찰된다.

Fig. 9에는 마이크로캡슐의 직경과 탄소나노튜브의 함유량에 따른 미소압축시험 결과가 나타나 있다. 이때 미소압축시험은 각 시험조건 별 10개씩의 시료에 대해 수행하였다. 여기에서 보면 MWCNT_0.00인 경우 파단하중과 파단변위는 100 μm 이하에 비해 100-150 μm에서는 0.5%와 53.1%, 150-200 μm에서는 6.1%와 138.4% 증가한다. MWCNT_0.17인 경우 파단하중과 파단변위는, 100-150 μm에서는 0.2%와 54.3%, 150-200 μm에서는 4.6%와 122.9% 증가한다. MWCNT_0.50인 경우 파단하중과 파단변위는 100-150 μm에서는 1.7%와 67.7%, 150-200 μm에서는 4.7%와 140.8% 증가한다. 이와 같이 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 파단하중은 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받지 않지만 파단변위는 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받는다. 또한 100 μm 이하인 경우 파단하중과 파단변위는 MWCNT_0.00에 비해 MWCNT_0.17에서는 7.5%와 6.4%, MWCNT_0.50에서는 12.1%와 7.4% 증가한다. 100-150 μm인 경우 MWCNT_0.17에서는 7.1%와 7.2%, MWCNT_0.50에서는 13.4%와 17.7% 증가한다. 150-200 μm인 경우 MWCNT_0.17에서는 파단하중은 5.9% 증가하지만 파단변위는 변화가 거의 나타나지 않는다. MWCNT_0.50에서는 파단하중과 파단변위는 10.6%와 8.5% 증가한다. 이로 미루어 보면 마이크로캡슐의 직경이 유사한 경우 탄소나노튜브의 함유량이 높아지면 파단하중과 파단변위는 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐과 탄소나노튜브가 보강된 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는

마이크로캡슐에 대한 전계방출형주사현미경 관찰, 보관 성능 시험, 그리고 미소압축시험을 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 제시된 마이크로캡슐의 제조공법을 적용하면 100-200 μm 직경을 갖는 마이크로캡슐을 전체 무게 대비 80-90 wt% 얻을 수 있었다.

(2) 탄소나노튜브가 보강되지 않은 마이크로캡슐의 박막 상태는 비교적 매끄럽게 나타났지만, 탄소나노튜브가 보강된 마이크로캡슐의 박막 상태는 요철 상태로 나타나며 박막 표면에 비교적 균일하게 분산된 탄소나노튜브가 관찰되었다.

(3) 제조된 마이크로캡슐은 탄소나노튜브의 보강 여부에 무관하게 자가치료제 보관 성능이 양호함을 알 수 있었다.

(4) 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 박막 두께는 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받지 않지만, 탄소나노튜브의 함유량이 증가하면 박막 두께는 감소하였다. 이는 탄소나노튜브가 박막 구성재의 중합반응에 영향을 미치지 않으므로 탄소나노튜브가 첨가된 경우에 대한 박막 형성 메커니즘에 대한 연구가 체계적으로 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

(5) 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 파단하중은 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받지 않지만, 파단변위는 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 마이크로캡슐의 직경이 유사한 경우 탄소나노튜브의 함유량이 증가하면 파단하중과 파단변위는 증가하는 양상이 나타났다.

REFERENCES

- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S., Brown, E. N., Viswanathan, S., (2001), Autonomic healing of polymer composites, *Nature*, 409, 794-797.
- Yoon, S. H., Kim, M. S., Jang, S. Y., (2015), Effects of microcapsules on mechanical properties and thermal stability of microcapsule embedded polymeric resins, *Composites Research*, 28(5), 316-321.
- Nam, J.-O., Choi, C.-H., Kim, J., Kang, S.-M., Lee, C.-S., (2013), Fabrication of polymeric microcapsules in a microchannel using formation of double emulsion, *Korean Chemical Engineering Research*, 51(5), 597-601.
- Thakur, V. K., Kessler, M. R., (2015), Self-healing polymer nanocomposite materials: A review, *Polymer*, 69, 369-383.
- Ahangari, M. G., Fereidoon, A., Jahanshahi, M., Sharifi, N., (2014), Effect of nanoparticles on the micromechanical and surface properties of poly (urea-formaldehyde) composite microcapsules, *Composites part B: Engineering*, 56, 450-455.
- Guang, Y., Lee, J. K., (2013), Microcapsules containing self-healing agent with red dye, *Polymer (Korea)*, 37(3), 356-361.
- Ihm, D., Kwon, W. H., (2015), Preparation and characterization of functional microcapsules containing suspensions of conducting materials, *Applied Chemistry for Engineering*, 26(1), 40-46.
- Kim, D.-M., Lee, J.-S., Ryu, B.-C., Chung, C.-M., (2020), A study on remaining formaldehyde concentration in the synthesis of self-healing microcapsules, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8(1), 129-133.
- Xiong, A., Lu, X., Ma, Y., Qin, Y., Zhang, P., Shi, J., Guo, Z.-X., (2013), Cross-linked multilayer composite films and microcapsules embedded carbon nanotubes, *Materials Letters*, 105, 132-135.
- Ahangari, M. G., Fereidoon, A., Jahanshahi, M., Sharifi, N., (2014), Effect of nanoparticles on the micromechanical and surface properties of poly (urea-formaldehyde) composite microcapsules, *Composites Part B: Engineering*, 56, 450-455.
- Jagtap, S. B., Patil, V. D., Suresh, K., Ram, F., Mohan, M. S., Rajput, S. S., Patil, S., Shukla, P. G., Shanmuganathan, K., (2018), Functionalized carbon nanotube reinforced polymer nanocomposite microcapsules with enhanced stiffness, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 550, 82-89.
- Caruso, M. M., Blaiszik, B. J., Jin, H., Schelkopf, S. R., Stradley, D. S., Sottos, N. R., White, S. R., Moore, J. S., (2010), Robust, double-walled microcapsules for self-healing polymeric materials, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2(4), 1195-1199.
- Sun, G., Zhang, Z., (2002), Mechanical strength of microcapsules made of different wall materials, *International Journal of Pharmaceutics*, 242(1-2), 307-311.
- Ghaemi, A., Philipp, A., Bauer, A., Last, K., Fery, A., Gekle, S., (2016), Mechanical behaviour of micro-capsules and their rupture under compression, *Chemical Engineering Science*, 142, 236-243.
- Keller, M. W., Sottos, N. R., (2006), Mechanical properties of microcapsules used in a self-healing polymer, *Experimental Mechanics*, 46(6), 725-733.



Jeong Keun Jang

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Research interests are structural analysis and advanced composite materials.

E-mail: jjjjunk@kumoh.ac.kr



Hyeon Ji Kim

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Research interests are structural analysis and advanced composite materials.

E-mail: rlagusw10389@kumoh.ac.kr



Sung Ho Yoon

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Research interests are design, analysis, testing, evaluation, and life prediction of advanced composite structures.

E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr