

형상기억고분자 복합재료 안테나의 제조 및 전개 거동 분석

안용산* · 김진수* · 구남서** · 박미선*** · 김연태*** · 박종규*** · 유웅열*†

Preparation and Analysis of the Deployment Behavior of Shape Memory Polymer Composite Antennas

Yongsan An*, Jinsu Kim*, Nam Seo Goo**, Miseon Park***, Yeontae Kim***,
Jong Kyoo Park***, Woong-Ryeol Yu*†

ABSTRACT: Shape memory polymer composites have been studied for deployable antennas in space because they have advantages of lightweight, large deformability, good processability, and low cost. In this research, shape memory polymer composites (SMPCs) were manufactured using carbon nanotubes (CNTs) as reinforcements and were used to fabricate SMPC antenna. The SMPCs were prepared by dispersing CNTs in the polymer matrix. Various dispersion methods were investigated to determine the most suitable one, focusing on the mechanical properties of SMPCs including their fracture behavior. The shape memory properties of SMPCs were measured and finally, the deployment behavior of the SMPC antenna was analyzed.

초 록: 형상기억고분자 복합재료는 가볍고, 변형률이 크며, 좋은 가공성과 비용적인 측면에서의 장점으로 우주 환경에서 사용되는 전개형 안테나 재료로의 활용이 검토되고 있다. 본 연구에서는 탄소나노튜브를 보강재로 하여 물성이 향상된 형상기억고분자 복합재료를 제조하고, 이를 사용하여 전개형 안테나를 제작하였다. 탄소나노튜브를 형상기억고분자 기지재 안에 분산시키기 위해 다양한 방법이 사용되었고 물성적인 측면에서 우수한 분산 방법을 탐색하였다. 이렇게 제조된 형상기억고분자 복합재료의 형상기억거동을 평가하였고 형상기억고분자 복합재료 안테나의 전개 거동을 분석하였다.

Key Words: 형상기억고분자 복합재료(Shape memory polymer composite), 탄소나노튜브(Carbon nanotube), 형상기억고분자(Shape memory polymers), 전개형 안테나(Deployable antenna)

1. 서 론

형상기억고분자(Shape memory polymer, SMP)는 임시형상으로 변형된 후 특정한 외부자극에 의해 원래의 모양으로 되돌아가는 성질을 지닌 스마트 고분자를 일컫는다. SMP는 형상기억합금에 비해 가볍고, 변형률이 크고, 비용이 저

렴하며, 가공성이 좋다는 장점이 있어 형상기억합금의 대체 재료로 각광받고 있다[1]. 특히 항공우주재료로서 큰 잠재력을 지니고 있는데, 전개형 안테나[2,3], 모핑 날개[4,5], 태양열 패널[6,7] 등의 우주구조체에 힌지[8-11]와 트러스빔[12-14] 형태로 사용될 수 있다. 전개형 안테나는 파라볼라 안테나의 일종으로 운반이 쉽도록 반사체를 접어 우주

Received 15 October 2018, received in revised form 12 December 2018, accepted 26 December 2018

*Department of Materials Science and Engineering and Research Institute of Advanced Materials, Seoul National University

*†Department of Materials Science and Engineering and Research Institute of Advanced Materials, Seoul National University, Corresponding author (E-mail: woongryu@snu.ac.kr)

**Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University

***Agency for Defense Development

발사체에 적재되고, 발사체가 우주에 도착한 후에 다시 전개되어 임무를 수행하는 안테나를 지칭한다[15]. 기존의 전개형 안테나들은 금속으로 이루어져 있고, 안테나를 접힌 상태로 고정시키기 위한 부품과 안테나를 전개시키기 위한 동력원을 필요로 하기 때문에 무게가 무겁고 부피가 커서 연료 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이에 비해 SMP는 금속에 비해 가볍고 큰 변형이 가능하며, 우주 환경에서 외부 자극(태양복사)에 의해 자가 변형이 가능하기 때문에 높은 연료 효율을 얻을 수 있어 전개형 안테나의 재료로 사용하기 위한 연구들이 진행되어 왔다[2,3].

SMP는 고분자 특성상 금속에 비해 물성이 약하다는 단점이 있다. 그래서 SMP에 보강재를 도입하여 물성이 향상된 형상기억고분자 복합재료(Shape memory polymer composite, SMPC)를 제조하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled carbon nanotube, MWNT)를 보강재로 하여 우주용 안테나에 사용하기 위한 고강도의 나노복합재료를 제조하였다. 나노복합재료의 기계적 물성을 향상시키기 위해서는 나노재료를 고분자 기지재 안에 안정적으로 분산시키는 것이 중요하다[16]. 본 연구에서는 다양한 방법으로 MWNT를 SMP 기지재 안에 분산시키고 특성을 분석하여 효율적인 분산 방법을 탐색하였다. 또한 SMPC 안테나를 제작하고 전개 실험을 수행하여 안테나의 전개 거동을 분석하였다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에서는 에폭시 기반의 SMP와 MWNT를 보강재로 사용하여 SMPC를 제조하였다. 에폭시 수지(Epofix®, Struers, 덴마크, 20°C에서 점도 550 cP), 경화제(Jeffamine D-

230, Huntsman, 미국), MWNT (MR99, (주)카본나노텍, 대한민국, 지름 5~15 nm, 길이 약 10 μ m)는 별도의 처리 없이 사용되었다. 사용한 에폭시 수지와 경화제를 Fig. 1에 표시하였다.

2.2 형상기억고분자 복합재료의 제조

SMPC를 세가지의 제조법을 이용하여 준비하였다. 에폭시 수지와 경화제의 중량비는 7:2가 되도록 하였고, MWNT는 전체 중량의 0.5%가 되도록 하여 SMPC를 제조하였다.

(제조법 1) 에폭시 수지와 경화제, MWNT를 한꺼번에 섞고 bath 타입 초음파 분산 장치(JAC-2010, (주)고도기연, 초음파 주파수 40 KHz, 출력 200 W)로 분산시켰다. 우선, 에폭시 수지와 경화제, MWNT를 계량하여 혼합한 후, 상온에서 30분간 막대자석으로 교반하였다. 혼합물을 20°C에서 60분간 초음파로 분산시키고, 120분간 진공 탈포하는 과정을 거쳤다. 그리고 1 mm 두께의 몰드 위에 부어 130°C에서 120분간 경화 과정을 거쳐 SMPC 시편을 얻었다.

(제조법 2) 에폭시 수지와 MWNT를 섞어 bath 타입 초음파 분산 장치로 분산시킨 후 경화제를 넣어 다시 한번 초음파 분산시켰다. 우선, 에폭시 수지와 MWNT를 계량하여 혼합한 후, 상온에서 30분간 막대자석으로 교반하였다. 혼합물을 20°C에서 60분간 초음파 분산시키고, 경화제를 첨가하여 상온에서 30분간 막대자석으로 교반하였다. 혼합물을 다시 20°C에서 60분간 초음파 분산시키고 120분간 진공 탈포하는 과정을 거쳤다. 그리고 1 mm 두께의 몰드 위에 부어 130°C에서 120분간 경화 과정을 거쳐 SMPC 시편을 얻었다.

(제조법 3) 에폭시 수지와 MWNT를 섞어 프로브 타입 초음파 분산 장치(VCX-750, (주)영진코퍼레이션, 초음파 주파수 20 KHz, 출력 750 W)로 분산시킨 후, 경화제를 넣어 다시 한번 초음파로 분산시켰다. 분산 장치는 초음파 진폭을 30%, 펄스 간격을 5초 ON/15초 OFF로 하여 작동시켰다. 우선, 에폭시 수지와 MWNT를 계량하여 혼합한 후, 상온에서 30분간 막대자석으로 교반하였다. 혼합물을 20°C에서 60분간 초음파 분산시키고, 경화제를 첨가하여 상온에서 30분간 막대자석으로 교반하였다. 혼합물을 다시 20°C에서 60분간 초음파 분산시키고 120분간 진공 탈포하는 과정을 거쳤다. 그리고 1 mm 두께의 몰드 위에 부어 130°C에서 120분간 경화 과정을 거쳐 SMPC 시편을 얻었다. 각각의 제조법으로 얻은 SMPC 시편들을 각각 SMPC1, SMPC2, SMPC3라고 표시하였다.

2.3 형상기억고분자 복합재료의 특성 분석

세 가지 방법으로 SMPC를 제조한 후, SMP 기지재 안에 MWNT가 분산이 잘 되었는지 확인하기 위해 파단면을 주사전자현미경(SEM, JSM-7600F, JEOL)으로 관찰하였다. 그리고 시차주사열량계(200 F3 Maia, NETZSCH)를 이용하여 SMPC의 전이 온도(T_g)를 측정하였다. SMPC의 기계적 물성

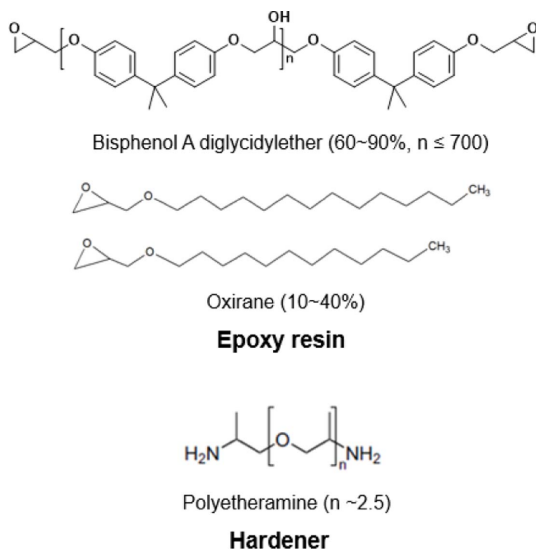


Fig. 1. Materials used to synthesize shape memory polymer

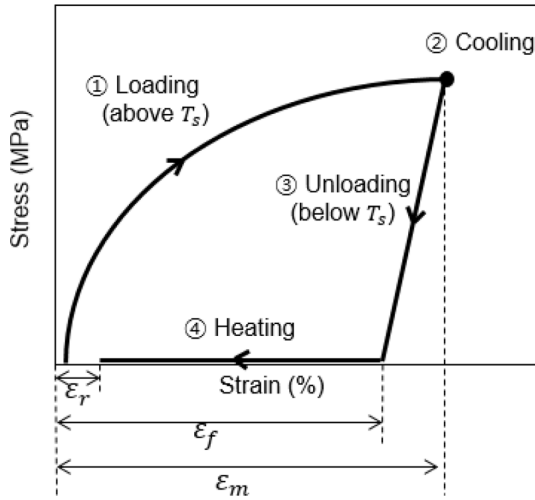


Fig. 2. Typical stress-strain curve of the shape memory test of SMP

분석을 위해 ASTM D-638 규격을 따라 만능재료시험기 (QUASAR 5, Galdabini)를 활용해 전이 온도 이하와 전이 온도 이상의 환경에서 인장 시험을 수행하였다. 또한 같은 장비를 이용해 형상기억성능 시험을 수행하였다. 형상기억성능 시험을 통해 얻어지는 일반적인 응력-변형을 곡선의 개형을 Fig. 2에 나타내었다. SMPC시편을 전이 온도 이상(70°C)으로 가열한 후 시편을 10%까지 인장하고(①) 전이 온도 이하(25°C)로 냉각시킨다(②). 그 후 시편에 가해졌던 힘을 제거하여 변형된 형상을 고정시킨다(③). 이 과정을 프로그래밍 과정이라고 한다. 이 시편을 다시 전이 온도 이상(70°C)으로 가열하여 회복시키는데(④), 이 과정을 회복 과정이라고 한다. 형상기억성능 시험을 수행한 후 SMPC의 고정률(R_f)과 회복률(R_r)을 식 (1)과 (2)를 이용해 계산하였다.

$$R_f(\%) = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_m} \times 100 \quad (1)$$

$$R_r(\%) = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_r}{\varepsilon_m} \times 100 \quad (2)$$

이 때, ε_m 은 최대변형률, ε_f 는 프로그래밍 과정을 거친 후의 고정된 변형률, ε_r 은 회복 과정을 거친 후의 회복 변형률을 의미한다.

2.3 형상기억고분자 복합재료 안테나의 제작 및 전개 실험

2.2절의 제조 방법 중 분산 효율이 좋은 방법을 이용하여 SMPC 안테나 축소 모델을 제작하였다. 축소 모델은 원판형으로, Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 지름 165 mm, 두께 약 1.1 mm가 되도록 제작하였다. 안테나 축소 모델과 자체 제작한 접힘(folding) 장치(Fig. 4)를 이용하여 전개 실험을 수

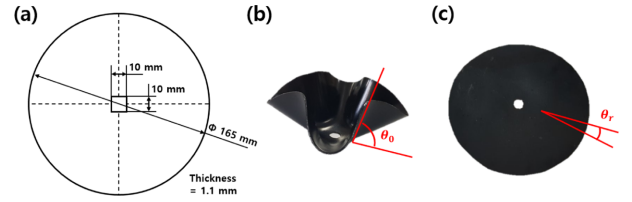


Fig. 3. (a) Dimensions of an antenna, (b) angle of the folded antenna, and (c) angle of the recovered antenna

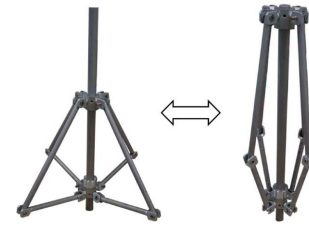


Fig. 4. Folding device of SMPC antenna for deployment test

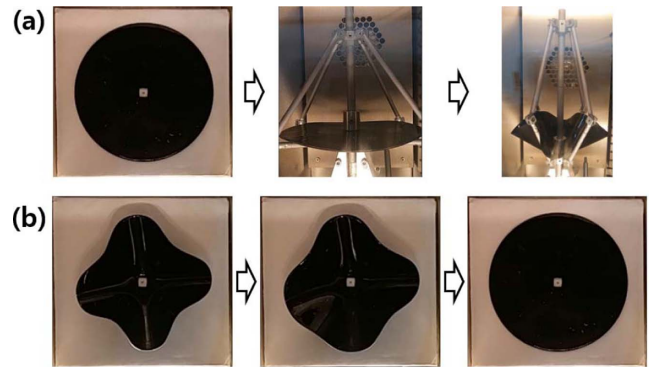


Fig. 5. Procedure of folding-deploying test of SMPC antenna. (a) folding (programming) process, (b) deploying (recovery) process

행하였다. 전개 실험은 Fig. 5의 과정을 거친다. 전이 온도 이상(70°C)에서 접힘 장치를 이용하여 안테나를 우산처럼 접고 전이 온도 이하(25°C)로 냉각시켜 형상을 고정시킨다(Fig. 5(a)). 접힌 상태로 고정된 안테나를 접힘 장치에서 제거하고 다시 전이 온도 이상(70°C)으로 가열하면 SMPC의 회복력에 의해 원래의 형상으로 회복하며 전개된다(Fig. 5(b)). 이 때 Fig. 3(b), (c)에서 보는 바와 같이 안테나가 접히는 각도의 변화를 측정하고, 식 (3)을 이용하여 회복률(R_r)을 계산하였다.

$$R_r(\%) = \frac{\theta_0 - \theta_r}{\theta_0} \times 100 \quad (3)$$

이 때, θ_0 는 안테나가 접힌 후 고정된 각도, θ_r 은 회복된 후 각도를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 탄소나노튜브의 분산성

MWNT의 분산성을 확인하기 위해 SMPC의 파단면의 SEM 이미지를 얻었고, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 제조법 1로 제조한 SMPC1은 MWNT가 크게 응집된 부분이 관찰되었지만, 제조법 2로 제조한 SMPC2는 응집된 크기가 작았다. 제조법 1에서는 에폭시 수지와 경화제를 한 번에 섞은 후 초음파 분산을 하는데 충분히 분산이 되지 않았음을 알 수 있다. 분산성을 높이기 위해 60분 이상 초음파 분산시킬 경우 혼합물의 온도가 올라가 분산시키는 중에 경화가 일어나 버려 시편을 제조할 수 없었다. 제조법 2는 분산 도중 경화가 일어나는 것을 방지하기 위해 먼저 에폭시 수지 내에 MWNT만 분산시킨 후 경화제를 가하여 다시 60분까지만 초음파에 의해 분산시키는 과정을 거치기 때문에 MWNT가 충분히 분산될 수 있는 에너지가 공급되어 MWNT가 더 잘 분산된 것으로 보인다. 제조법 3은 bath 타입의 초음파 분산 장치 대신 프로브 타입 초음파 분산 장치를 사용한 것을 제외하고 제조법 2와 같은 제조과정을 거쳤다. SMPC3은 MWNT가 응집된 부분의 크기가 작았을 뿐만 아니라 그 주변에 넓은 범위에 걸쳐 개별적으로 분리되어 있는 MWNT가 존재했다. 확대한 이미지에서도 SMPC2에서는 관찰되지 않는, 응집되지 않은 MWNT들이 관찰되었다. Bath 타입

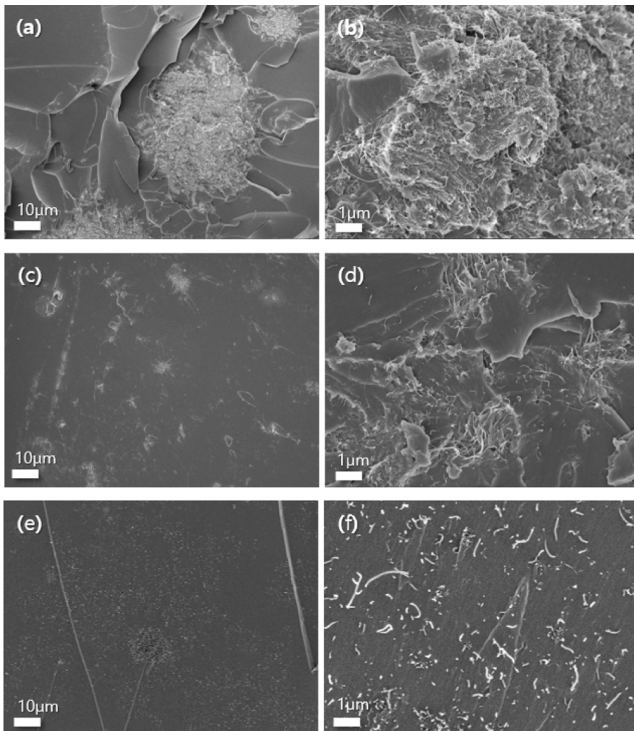


Fig. 6. Morphologies of the fracture surfaces of (a) SMPC1, (c) SMPC2, and (e) SMPC3. (b), (d), and (f) are high-resolution images of (a), (c), and (e), respectively

Table 1. Transition temperatures of the SMP and SMPCs

Specimen	Transition temperature (°C)
SMP	52.1
SMPC1	55.5
SMPC2	55.1
SMPC3	54.3

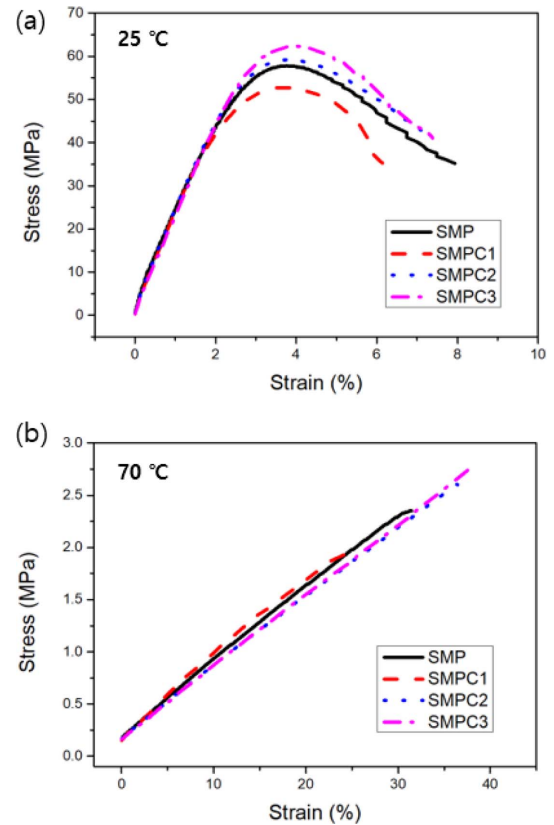


Fig. 7. The stress-strain curve of SMPCs (a) above the transition temperature and (b) below the transition temperature

초음파 분산 장치는 물을 매질로 하여 초음파가 전달되는 반면, 프로브 타입 초음파 분산 장치는 초음파를 발생하는 프로브가 직접 혼합물에 접촉하여 초음파를 전달하기 때문에 초음파를 더 효율적으로 전달한 것으로 보인다[17]. 제조법 1, 2 보다 제조법 3이 MWNT를 에폭시 기지재 안에 좀더 효율적으로 분산시키는 것을 확인하였다.

3.2 기계적 성질

DSC로 SMPC의 유리 전이 온도를 확인하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. SMPC는 순수한 SMP에 비해 전이 온도가 약 3°C 정도 높았고, 제조법에 따라 큰 차이를 보이지는 않았다. 전이 온도를 기준으로 전이 온도 이하(25°C)와 전이 온도 이상(70°C)에서 인장 시험을 진행하였고, 응력-변형률 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 이로부터 인장 강도와

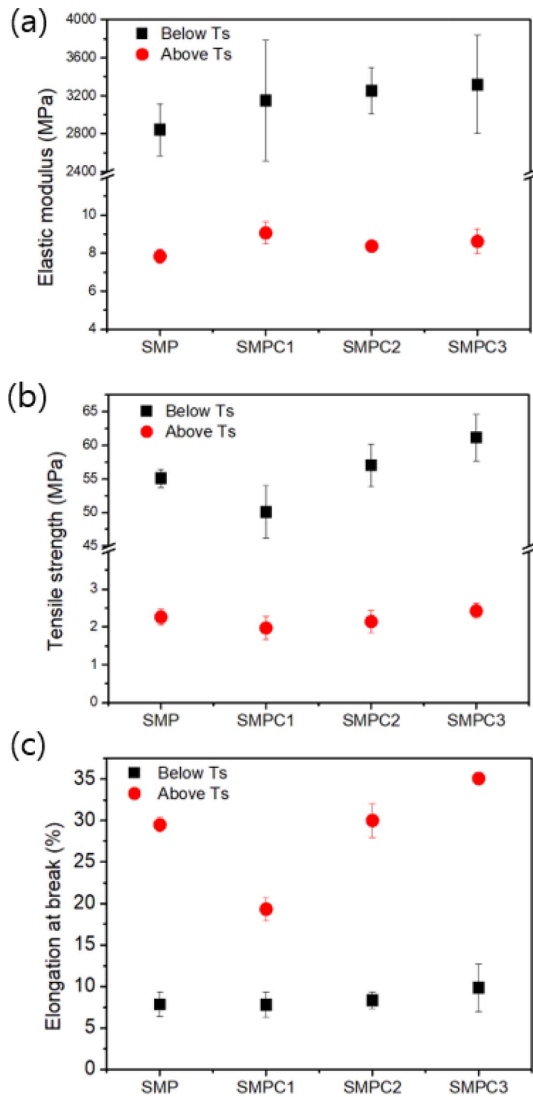


Fig. 8. The mechanical properties of SMPCs. (a) Elastic modulus, (b) tensile strength, and (c) elongation at break. The red circles and the black squares represent the test results above and below the transition temperature, respectively

인장 탄성률, 파단 신율을 Fig. 8에 나타내었다. SMPC의 탄성률은 전이 온도 이상과 이하에서 모두 순수한 SMP보다 높았고, MWNT의 분산성에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 인장 강도와 파단 신율의 경우 분산성에 따라 큰 차이를 보였다. 전이 온도 이하에서 분산성이 좋지 않은 SMPC1 시편은 순수한 SMP에 비해 인장 강도가 작았지만 분산성이 향상될수록 인장 강도가 증가하여 분산성이 가장 좋은 SMPC3 시편은 인장강도가 SMP에 비해 약 11% 증가하였다. 파단 신율의 경우 전이 온도 이상에서 분산성이 좋지 않은 시편은 순수한 SMP에 비해 현저히 줄어들었고, 분산성이 좋아질수록 증가하여 분산성이 가장 좋은 SMPC3 시편은 순수한 SMP에 비해 20% 증가하였다. 복합재료의

탄성률은 분산성이 좋지 않아도 강화 효과를 보이지만, MWNT가 응집되어 큰 입자로 작용할 경우 쉽게 균열을 만들어 전파시키기 때문에 인장 강도와 파단 신율을 감소시키게 된다[18]. 분산성이 좋은 SMPC3 시편이 높은 탄성률, 강한 인장 강도, 긴 파단 신율을 가져 우주용 안테나에 사용하기 가장 적합한 기계적 성질을 보였다.

3.3 형상기억성능

SMP와 SMPC의 형상기억성능 시험을 수행하여 응력-변형률 곡선을 Fig. 9에 나타내었고, 시험 결과로부터 식 (1)과 (2)를 이용하여 고정률과 회복률을 계산하고 Table 2에 나타내었다. SMPC의 고정률은 순수한 SMP에 비해 증가하였고, 분산성이 향상될수록 더 크게 증가하는 경향을 보였다. 반면에 SMPC의 회복률은 SMP에 비해 소폭 감소하는 경향을 보였다. SMP의 고정률과 회복률은 형상기억고분자의 분자 엉킴점(net points)에 의해 제어되는데, 잘 분산된 MWNT가 더 많은 SMP의 분자 엉킴점과 상호작용하여 고분자 사슬의 슬립을 방해하여 고정률이 향상되고, 응집된 MWNT가 형상 회복 시 고분자 사슬의 움직임을 방해하여 회복률이 감소하였다[19]. SMPC3는 회복률이 감소했지만 고정률이 크게 증가하여 전개형 안테나에 사용하기 적합한 형상기억성능을 보였다.

3.4 안테나의 전개 거동

본 연구에서 수행한 SMPC 제조법 중 제조법 3이 분산 효율이 뛰어나고 전개형 우주 안테나에 가장 적합한 물성을 갖는 SMPC를 얻을 수 있는 제조법이라 판단하여, 이를 이용하여 안테나 축소 모델을 제작하였다. SMPC3 안테나의 접힘-전개 실험을 수행하였고, 전개 과정을 시간 흐름에 따라 Fig. 10에 나타내었다. 전개 과정에서 안테나가 접히는 부분의 각도를 측정하고 식 (3)을 이용하여 안테나의 회복률을 계산하여 Table 3에 나타내었다. 고정된 형상의 안테나를 전이 온도 이상의 환경에 노출시켰을 때 SMPC 안테나는 30초 이후부터 점차 전개하기 시작해서 110초의 시간을 거쳐 완전히 회복되었고, SMP 안테나는 100초의 시간 만에 완전히 회복되었다. SMPC 안테나와 SMP 안테나는 각각 100%에 가까운 회복률을 보였다. SMPC 안테나의 회복률이 더 작게 나타났는데, 이는 앞서 형상기억성능 시험에서 관찰한 바와 같이 SMP 기지재 안의 MWNT가 고분자 사슬의 움직임을 방해하여 회복 속도를 느리게 하고 원 상태로의 회복을 제한했기 때문인 것으로 생각된다. SMPC로 제작한 안테나는 고정률이 높아 발사체의 제한된 공간 안에 적재하기 좋고 회복률은 100%에 가깝지만 반사체로써 역할을 할 수 있는 원래의 형상으로 완전히 회복하지는 못할 가능성이 있다. 이를 보완하기 위해 안테나의 회복률을 높이기 위한 연구, 또는 안테나의 회복률을 고려하여 영구 형상을 설계하고 회복되었을 때 최적의 효율을 갖는 반사체

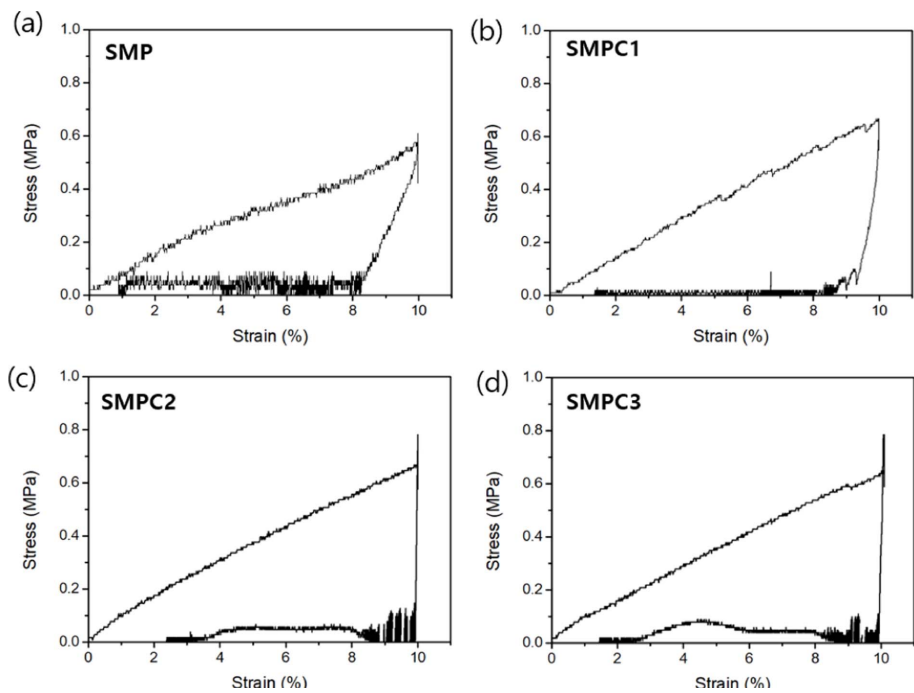


Fig. 9. Shape memory test results of the SMP and SMPCs

Table 2. Shape memory properties of the SMP and SMPCs

Specimen	Fixity ratio (%)	Recovery ratio (%)
SMP	74	91
SMPC1	78	86
SMPC2	81	82
SMPC3	91	85

형상을 갖추도록 하는 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 우주 환경은 가혹한 온도 변화, 자외선과 감마선 복사, 활성 산소, 우주 잔해 등이 있어 고분자로 이루어진 부품의 물성을 감소시키는 원인이 된다. 이에 따라 가혹한 우주 환경에 따른 형상기억고분자 복합재료 안테나의 내구성을 검증하는 연구가 뒤따라야 할 것이다.

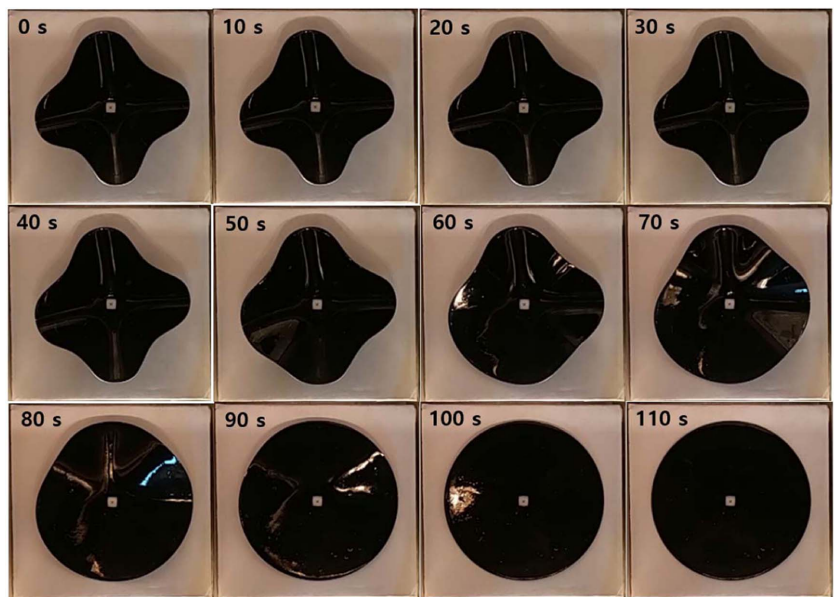


Fig. 10. The deployment behavior of the SMPC antenna

Table 3. Shape recovery ratio of the SMP and SMPC antenna

Specimen	Recovery ratio (%)
SMP antenna	99.5
SMPC3 antenna	98.4

4. 결 론

본 연구에서는 탄소나노튜브를 보강재로 하여 우주용 안테나에 사용하기 위한 고강도의 형상기억고분자 복합재료 안테나를 제조하였고 전개 실험을 통해 전개 성능을 평가하였다. 다양한 제조법 중 프로브 타입 초음파 분산 장치를 활용한 제조법이 탄소나노튜브를 고분자 기지재 안에 가장 잘 분산시켰다. 제조한 복합재료는 순수한 형상기억고분자에 비해 형상 회복률이 감소했지만 고정률과 기계적 물성이 크게 향상되었다. 안테나의 전개 실험 결과 안테나가 100%에 가까운 형상 회복률을 보였으며 반사체로써 역할을 하기 위해서는 더 많은 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 선행핵심기술개발 과제의 지원을 받아 수행된 것이며, 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF- 2015R1A5A1037627). 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Lendlein, A., and Kelch, S., "Shape-Memory Polymers," *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 41, No. 12, 2002, pp. 2034-2057.
- Keller, P., Lake, M., Codell, D., Barrett, R., Taylor, R., and Schultz, M., "Development of Elastic Memory Composite Stiffeners for a Flexible Precision Reflector," *47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- Lin, J., Knoll, C., and Willey, C., "Shape Memory Rigidizable Inflatable (RI) Structures for Large Space Systems Applications," *47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- Bye, D., and McClure, P., "Design of a Morphing Vehicle," *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- Yin, W., Liu, J., and Leng, J., "Deformation Analysis of Shape Memory Polymer for Morphing wing Skin under Airflow," *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, Vol. 4, No. 4, 2009, p. 447.
- Arzberger, S.C., Tupper, M.L., Lake, M.S., Barrett, R., Mallick, K., Hazelton, C., Francis, W., Keller, P.N., Campbell, D., Feucht, S., Codell, D., Wintergerst, J., Adams, L., Mallioux, J., Denis, R., White, K., Long, M., Munshi, N.A., and Gall, K., "Elastic Memory Composites (EMC) for Deployable Industrial and Commercial Applications," *Proceeding of the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, California, United States, May 2005. p. 23.
- Barrett, R., Taylor, R., Keller, P., Lake, M., Stern, T., Freebury, G., and Beidleman, N., "Design of a Solar Array to Meet the Standard Bus Specification for Operation Responsive Space," *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- Beavers, F., Munshi, N., Lake, M., Maji, A., Qassin, K., Carpenter, B., and Rawal, S., "Design and Testing of an Elastic Memory Composite Deployment Hinge for Spacecraft," *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- Francis, W., Lake, M., Mallick, K., Freebury, G., and Maji, A., "Development and Testing of a Hinge/Actuator Using Elastic Memory Composites," *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- Tupper, M., Munshi, N., Beavers, F., Gall, K., Miluls, M., and Meink, T., "Developments in Elastic Memory Composite Materials for Spacecraft Deployable Structures," *Proceeding of the 2001 IEEE Aerospace Conference*, Montana, United States, Mar. 2001, pp. 2541-2547.
- Lan, X., Liu, Y., Lv, H., Wang, X., Leng, J., and Du, S., "Fiber Reinforced Shape-memory Polymer Composite and Its Application in a Deployable Hinge," *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 2, 2009, p. 024002.
- Campbell, D., Lake, M., Scherbarth, M., Nelson, E., and Six, R., et al., "Elastic Memory Composite Material: An Enabling Technology for Future Furlable Space Structures," *46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- Keller, P., Lake, M., Francis, W., Harvey, J., Ruhl, E., Winter, J., Murphey, T., Scherbarth, M., Barrett, R., and Wintergerst, J., "Development of a Deployable Boom for Microsatellites Using Elastic Memory Composite Material," *45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- Lake, M., Munshi, N., Meink, T., and Tupper, M., "Application of Elastic Memory Composite Materials to Deployable Space Structures," *AIAA Space 2001 Conference and Exposition*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- An, Y., Kim, J., Goo, N.S., Kim, Y., Park, J.K., and Yu, W.R., "Quantitative Evaluation of the Three-dimensional Deployment behavior of a Shape Memory Polymer Antenna," *Smart Materials and Structures*, Vol. 27, No. 10, 2018, p. 105007.
- Choe, C.R., "Nanocarbon Polymer Composites," *Composites*

- Research*, Vol. 26, No. 3, 2013, pp. 147-154.
17. Liao, Y.H., Marietta-Tondin, O., Liang, Z., Zhang, C., and Wang, B., "Investigation of the Dispersion Process of SWNTs/SC-15 Epoxy Resin Nanocomposites," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 385, No. 1, 2004, pp. 175-181.
 18. Song, Y.S., and Youn, J.R., "Influence of Dispersion States of Carbon Nanotubes on Physical Properties of Epoxy Nanocomposites," *Carbon*, Vol. 43, No. 7, 2005, pp. 1378-1385.
 19. Meng, Q., Hu, J., and Zhu, Y., "Shape-memory Polyurethane/multiwalled Carbon Nanotube Fibers," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 106, No. 2, 2007, pp. 837-848.