

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(12), 1007-1012(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.12.1007

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 우주 안테나 설계용 형상기억 폴리머 시편의 전개 시험

구남서\*, 레반르영\*\*, 안용산\*\*\*, 유웅열\*\*\*, 황진옥\*\*\*\*, 박종규\*\*\*\*

Deployment test of shape memory polymer specimens  
for space antenna designNam Seo Goo\*, Van Luong Le\*\*, Yongsan An\*\*\*, Woong-Ryeol Yu\*\*\*, Jin Ok Hwang\*\*\*\*  
and Jongkyoo Park\*\*\*\*

Konkuk University\* \*\*, Seoul National University\*\*\*, Agency for Defense Development\*\*\*\*

## ABSTRACT

In this study, we performed the deployment test of shape memory polymer specimens for space antenna design. Poly(cyclooctene) was cross-linked by dicumyl peroxide to make a PCO shape memory polymer. A miniature specimen with 120 mm diameter for a deployable antenna was fabricated with the PCO shape memory polymer. To investigate the deployment performance, the folded specimen as a temporary shape was heated by two heaters to the 15 °C higher temperature than the glass transition temperature of shape memory polymer. Firstly, the specimen was installed horizontally and tested. The deploying motion was captured by a digital camera and analyzed by a Tracker program. To reduce the effects of gravity, the specimen was installed vertically and tested again. The deployment performance of a shape memory polymer was investigated by comparing the results of horizontal and vertical installation tests.

## 초 록

본 연구에서는 우주 안테나 설계용 형상기억 폴리머 시편의 전개 시험을 수행하였다. Poly(cyclooctene)을 dicumyl peroxide를 이용하여 가교시켜 PCO 형상기억 폴리머를 제조하고, 이를 이용하여 지름이 120 mm인 전개형 안테나의 축소 모델을 제작하였다. 전개 성능 시험을 위하여 원형 형태의 형상기억 폴리머 시편을 반으로 접어 임시 형상을 만든 후 두 개의 히터로 형상기억 폴리머의 유리 전이 온도보다 15°C 높은 온도로 시편을 가열하였다. 먼저 시편을 수평 설치하여 전개 실험을 수행하였다. 시편의 전개 영상을 디지털 카메라를 사용하여 촬영한 후 트래커 프로그램을 이용하여 분석하였다. 중력의 효과를 최소화하기 위하여 수직 설치하여 다시 실험을 수행하였다. 두 실험의 결과를 비교하여 형상기억 폴리머 시편의 전개 성능을 고찰하였다.

**Key Words** : Space antenna(우주 안테나), Shape memory polymer(형상기억 폴리머), Glass transition temperature(유리 전이 온도), Deployment(전개)

† Received : January 23, 2017 Revised : November 6, 2017 Accepted : November 14, 2017

\* Corresponding author, E-mail : nsgoo@konkuk.ac.kr

## I. 서 론

형상기억 폴리머(shape memory polymers, 이하 SMP)[1]란, 형상기억 성능을 갖는 고분자 화학물의 총칭이다. 최초의 형상기억 폴리머는 폴리노보넨(polynorbornene)으로, 1980년대 초에 Nippon Zeon 사에서 개발한 것으로 알려져 있다. 이후 Kuraray 사에서는 트랜스-아이소폴리프렘(trans-isopoly-preme)을 기반으로 한 형상기억 폴리머를 개발하였으며, Asahi 사는 스티렌-부타디엔(styrene-butadiene)을 기반으로 한 형상기억 폴리머를 개발하였다[2,3].

SMP는 형상기억 합금(shape memory alloys, 이하 SMA)과 비교할 때 밀도가 작고(SMP : 1100~1200 kg/m<sup>3</sup>, Ni-Ti SMA : 6400~6500, Cu-Zn-Al SMA : 7700 ~ 8000 kg/m<sup>3</sup>) 상대적으로 형상 회복 성능이 우수할 뿐만 아니라 가격이 저렴하고 가공이 쉬워 다양한 응용 가능성을 지니고 있다.

이러한 장점들 때문에 형상기억 폴리머로 우주용 전개형 안테나(deployable antenna)를 제작하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 전개형 안테나는 접힌 상태로 발사체에 탑재된 후 발사되고 우주 공간에서 전개되어 임무를 수행하는데, 형상기억 폴리머로 제작할 경우 경량화 및 소형화의 관점에서 큰 장점을 발휘한다. 2007년, Composite Technology Development Inc. (CTD) 는 그라파이트 복합소재 멤브레인과 탄성기억복합재로 이루어진 전개형 리플렉터를 개발하였고[4], Yang 등은 2011년 SMP 테이프를 이용하고 전기로 구동되는 새로운 형태의 메쉬 안테나를 개발하였다[5]. 또한 안테나의 포물면 자체를 탄소섬유 강화형상기억복합재로 제작한 연구도 보고되었다[6].

본 연구에서는 원형 형태의 형상기억 폴리머 시편을 반으로 접어 임시 형상을 만든 후 두 개의 히터로 열을 가하여 전개 실험을 수행하였다. 동적기계분석기(dynamic mechanical analysis, DMA 800)를 사용하여 계측된 형상기억 폴리머의 유리전이 온도(glass transition temperature, 이하 T<sub>g</sub>, 본 연구에서는 45°C)보다 높은 최적의 가열 온도를 결정한 후 이 온도로 가열하였다. 먼저 시편을 수평 설치하여 전개 실험을 수행하였다. 시편의 전개는 디지털 카메라를 사용하여 촬영한 후 트랙커 프로그램을 이용하여 분석하였다. 중력의 효과를 최소화하기 위하여 수직 설치하여 다시 실험을 수행하였다. 두 실험의 결과를 비교하여 형상기억 폴리머의 전개 성능을 고찰하였다.

## II. 본 론

### 2.1 형상기억 폴리머 제조용 PCO/DCP 혼합물 제조

본 연구에서는 기존의 연구를 참고하여 Poly(cyclooctene) (PCO) 형상기억폴리머를 제조하였다[7]. PCO (Evonik Industries Vestenamer 8012), dicumyl peroxide (DCP, Aldrich), Tetrahydrofuran (THF, 대정화학)를 사용하였다. PCO 형상기억 폴리머를 제조하기 전에 먼저 PCO와 DCP가 혼합되어 있는 가교 전 물질을 제조하였다. Fig. 1에 PCO와 DCP의 구조식을 나타내었다.

PCO:DCP:THF의 중량비를 14.7:0.3:85가 되도록 섞은 후, 100°C에서 4시간 동안 기계식 교반기로 느린 속도로 교반하여 PCO 용액을 제조하였다. THF를 증발시키기 위해 PCO 용액을 흡후드(fume hood)에서 24시간 동안, 80°C의 진공 오븐에서 3시간 동안 방치하고 PCO/DCP 혼합물을 얻었다. 이 혼합물을 170°C 이상의 온도에서 경화과정을 거쳐 화학적 가교를 시키면 형상기억 성능을 지니는 PCO 형상기억 폴리머가 된다.

형상기억 폴리머는 원래의 형상을 결정하는 넷포인트(netpoints)와 외부 자극에 반응하는 분자 스위치(molecular switches)로 구성된다. PCO 형상기억 폴리머의 경우 170°C 이상의 온도에서 DCP가 라디칼을 만들어 선형의 PCO 고분자에 가교를 형성하고 공유결합으로 형성된 가교점이 넷포인트 역할을 한다. 가교점 사이의 고분자 사

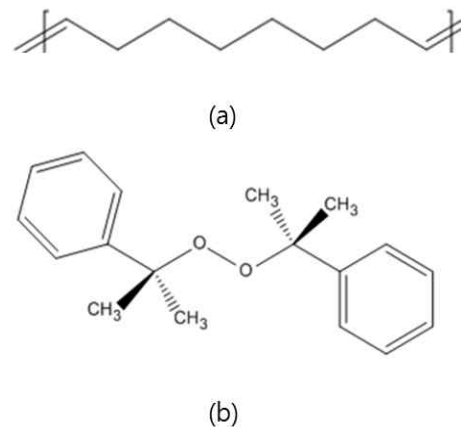


Fig 1. The chemical structures of (a) poly(cyclooctene), (b) dicumyl peroxide

슬은 분자 스위치 역할을 하는데 상온에서는 반결정(semi-crystalline) 형태로 존재하여 형상을 유지한다. 이 원래의 형상을 영구 형상(permanent shape)이라고 한다. 분자 스위치의 녹는점 이상으로 온도가 올라가면 외력에 의해 쉽게 변형이 되고, 다시 온도가 내려갔을 때 변형된 형상으로 고정되어 임시 형상(temporary shape)을 만든다. 온도를 전이 온도 이상으로 올리면 분자스위치의 탄성 엔트로피에 의해 영구형상으로 되돌아간다[7,8]. 이전의 연구에서 PCO 형상기억폴리머의 형상기억거동을 관찰하였고, 유리 전이 온도는 약 45°C가 됨을 확인하였다[9].

## 2.2 시편

PCO/DCP 혼합물을 이용하여 전개시험용 시편을 제조하였다. PCO/DCP 혼합물을 지름 120mm, 두께 1mm의 원형 몰드에 넣은 후 80°C에서 5분간 가열하여 원형 시편의 형상을 만들었다. 그 후 170°C에서 30분 동안 핫 프레스로 눌러 경화시켰고, 시편을 핫 프레스에서 제거하여 상온에서 냉각시켰다. 전개 실험 시 시편을 고정할 수 있도록 한 번의 길이가 10mm인 정사각형의 구멍을 뚫었다. Fig. 2 (a)에 원형 시편의 형태를 나타내었다.

전개 시험용 원형 시편은 작은 부피로 변형하여 발사체에 탑재 할 수 있는 전개형 안테나의 축소 모델로 Fig. 2 (b), (c), (d)에 나타난 것과 같이 2-fold, 4-fold, 8-fold의 형태로 변형시킬 수 있다. 4-fold, 8-fold 시편 제작을 위해서는 치구 제작이 필요하고 시야 확보가 어려워 실험이 어렵기 때문에 반으로 접는 2-fold 모델로 전개실험을 수행하였다.

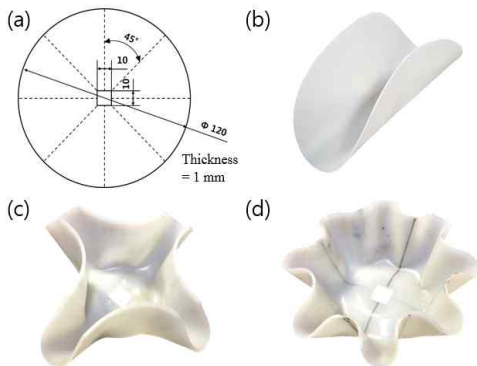


Fig. 2. (a) The design of the circular specimen and their (b) 2-fold, (c) 4-fold, and (d) 8-fold model

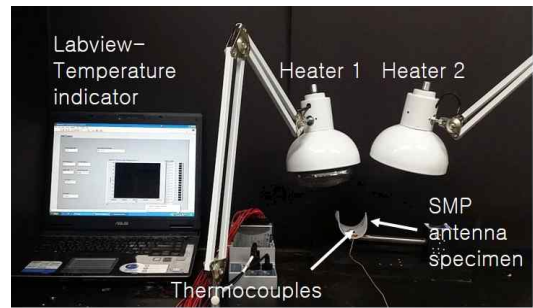


Fig. 3. Experimental setup for deployment test of space antenna specimen installed horizontally

## 2.3 실험 장치 및 방법

형상기억 폴리머의 형상회복능을 이용하기 위해서는 적절한 가열이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 두 개의 1kW 히터, 열전대, Labview 프로그램을 이용한 실험 장치를 구성하였다. 형상기억 폴리머의 물성 실험 결과인 유리전이 온도를 고려하여 가열 온도를 조절하였다. 또한 원형 시편의 온도가 최대한 균일하게 되도록 히터의 위치를 조절하였다.

Figure 3에는 안테나 시편이 수평 설치된 모습을 나타내고 있다. 이 상태에서 옆에서 전개 형상을 카메라로 촬영하였다. 수직 설치한 안테나 시편을 90도 회전시킨 후, 위쪽에 카메라를 설치한 후 전개 형상을 촬영하였다.

실험 절차로는 먼저 원형 시편을  $T_g + 20^\circ\text{C}$ 로 가열하여 임시 형상을 만든 후 이를 10°C의 차가운 물에서 고정하였다. 이렇게 고정된 시편을 거치대에 장착한 후  $T_g$  이상의 온도로 가열하였다. 이렇게 가열된 시편은 형상회복능 때문에 영구형상으로 회복 되는데, 이러한 과정을 디지털 카메라로 촬영하였다.

## III. 결과 및 토의

### 3.1 전개 실험 결과

Figure 4에는 실험에서 온도를 측정한 지점과 데이터를 분석한 위치를 나타내었다. Point 1, Point 2, Point 3에 열전대를 부착하여 시편 전체의 온도가 고르게 분포하는지를 확인하였다. Point 4는 접힌 부분의 끝점으로 디지털 카메라로 촬영한 영상을 분석할 때의 기준점이다.

임시 형상에서 영구 형상으로 회복하는 최적의 온도는 형상기억 폴리머의 특성에 따라 달라지며

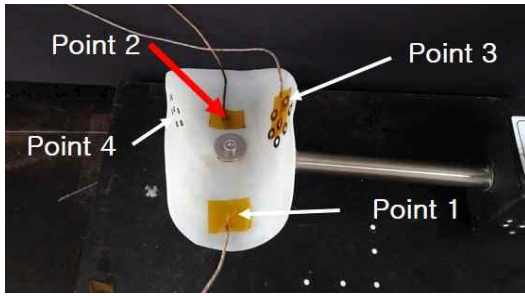


Fig. 4. Positions of thermocouples and data processing point

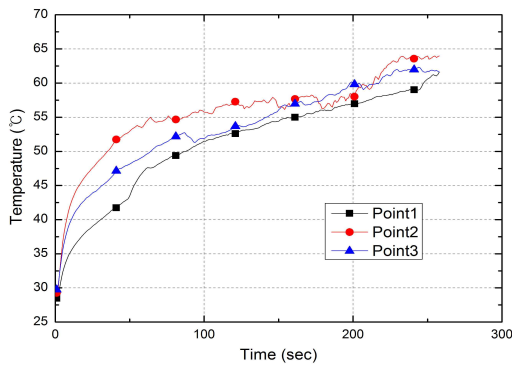
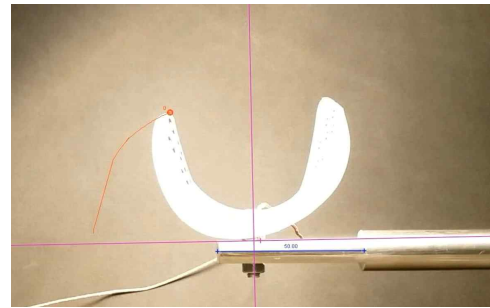


Fig. 5. Temperature profile of specimen

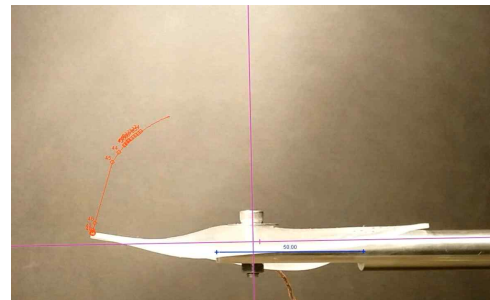
온도가 낮으면 전개 속도가 낮아지고 높으면 폴리머의 온도가 급격히 올라가 열화 현상이 발생하였다. 여러 온도에 대한 실험 결과,  $T_g$  보다  $15^\circ\text{C}$  높은 온도인  $60^\circ\text{C}$ 가 최적 온도임을 확인하였다.

Figure 5에는  $60^\circ\text{C}$ 를 설정 온도로 하고 가열 시험을 수행한 결과로 중앙점 및 모서리 두 점 (Fig. 4의 Point 1~3)의 온도를 계속한 결과를 나타내었다. 중앙점인 Point 2를 기준으로 시편 표면 온도가  $60^\circ\text{C}$ 에 도달하는 시간은 220초 정도였으며, 중앙점인 Point 2의 온도가 모서리 부분에 위치한 Point 1과 Point 3보다 빠르게 온도가 상승하며 150초 이후부터 세 점의 온도가 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있어 전반적으로 가열이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 6에는 시편을 수평으로 설치하였을 때 디지털 카메라를 이용하여 획득한 전개 영상을 나타내었다. (a)는 임시 형상, 즉 접혀 있는 상태이고, (b)는 회복 형상 (recovered shape)이다. 참고로 [https://youtu.be/PVIy6\\_M5IS4](https://youtu.be/PVIy6_M5IS4)에 23배속으로 처리된 영상을 업로드 하였다. 동영상의 오른쪽에는 Tracker 프로그램으로 계산한 왼쪽 끝점 (Fig. 4의 point 4)의 변위, 속도, 가속도가 나타나 있다.



(a) Temporary shape



(b) Recovered shape

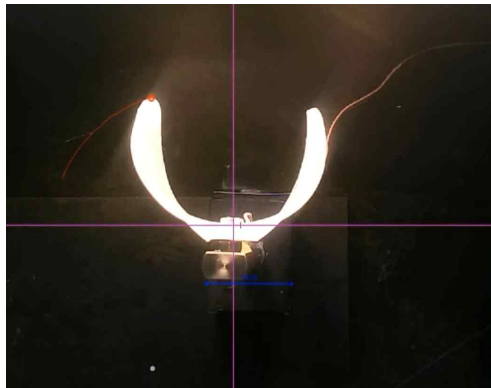
Fig. 6. Deployment shape of the specimen in case of horizontal setup.

타나 있다. Fig. 8에 속도와 가속도를 수직 설치 경우의 결과와 비교하여 나타내었다.

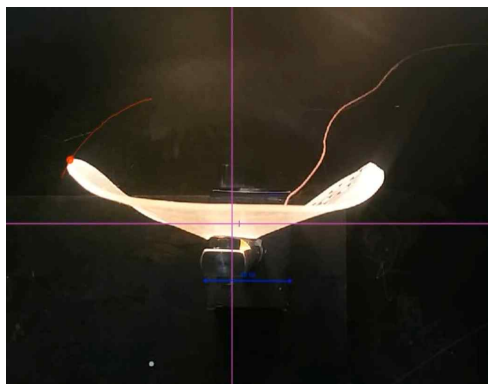
시편이 완전히 전개하는 데 걸린 시간은 300초 이었다. 대략 250초 정도까지는 초당 0.2mm의 완만한 전개가 이루어지고 있으나 250초 대에서 속도가 갑자기 증가하는 것을 확인하였다. 250초 부근은 전개 각도가 수직선에 대하여 50도 정도 되는 지점으로 이때부터 급격히 전개 되었다. 전개 영상을 보면 전개가 비대칭적으로 이루어짐을 관찰하였다.

250초 근처에서 속도가 급격히 증가하는 것이 중력의 영향일 가능성이 제기되어 시편을 수직으로 설치하여 실험을 진행하였다. Fig. 7에는 시편을 수직으로 설치한 후 카메라를 위쪽에 설치하여 촬영한 나타내었다. Fig. 6과 마찬가지로 (a)는 임시 형상, 즉 접혀 있는 상태이고, (b)는 회복 형상 (recovered shape)이다. 참고로 <https://youtu.be/7Z3s7LZZm4s>에 23배속으로 처리된 영상을 업로드 하였다. 동영상의 오른쪽에는 Tracker 프로그램으로 계산한 왼쪽 끝점 (Fig. 4의 point 4)의 변위, 속도, 가속도가 나타나 있다.

Figure 8에는 시편을 수평 및 수직으로 설치하였을 때의 속도와 가속도를 비교하였다. 시편을 수직으로 설치하였을 때 전개하는 데 걸리는 시



(a) Temporary shape



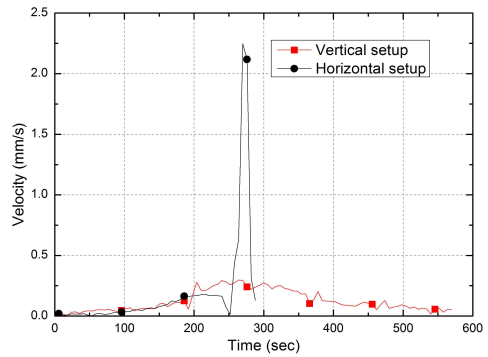
(b) Recovered shape

Fig. 7. Deployment of the specimen in case of vertical setup

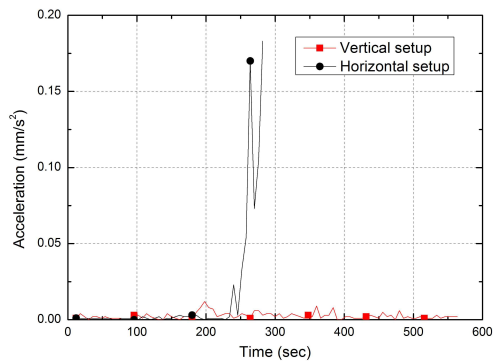
간은 570초로 수평 설치하였을 때 보다 두 배 가까이 증가되었다. 수평 설치 때와는 달리 전개 속도가 급격히 증가하지 않고 서서히 전개되다가 전개 각도가 45도일 때 속도가 빨라지다 다시 속도가 줄어드는 경향을 나타내었다. 따라서 수평 설치 시의 급격한 전개는 중력의 영향이라고 판단된다. 우주에서는 중력이 작으므로 수직 설치하였을 경우와 유사한 전개 양상을 나타낼 것으로 판단된다. 참고로 수평 설치 시 그래프가 일찍 끝나는 것은 형상 회복이 빠르게 일어나 실험이 일찍 종료되었기 때문이다.

### 3.2 결과 고찰

본 연구 결과를 실제 우주 환경에서 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 수행되어야 한다. 첫째, 우주에서는 가열 히터를 설치하여 전개하기 어렵기 때문에 실제 응용을 위해서는 가열 요소를 SMP 안테나 표면에 부착한다든지 태양열 복사를 이용하여 가열한다든지 하는 방법을 고안하



(a) Velocity



(b) Acceleration

Fig. 8. Velocity and acceleration comparison of Point4 for horizontal and vertical setup

여야 할 것으로 판단된다. 둘째, 폴리머의 전개 성능만을 고찰하였는데, 통신 기능을 가지는 폴리머의 개발 또는 전도성 피막 도포 등의 연구가 필요하다. 셋째, 진공 챔버에서의 전개 실험 및 무중력상태에서의 전개 실험이 필요하다.

포물면 형태의 외형을 가지는 안테나는 수동형의 위성 SAR(synthetic aperture radar)에 주로 사용되는데 미국 TRW사의 Sunflower와 독일 Astrium사의 'DAISY' (deployable antenna integral system)가 대표적이다[10].

이러한 안테나의 직경은 용도에 따라 다르나 작은 것은 1m에서 큰 것은 10m가 넘는 것도 있는 것으로 보고되고 있다[11]. 본 연구는 120mm의 축소형 모델을 가지고 전개 실험한 결과로 큰 크기의 시편에 대해서는 접는 방법, 가열 방법 등 별도의 연구가 진행되어야 할 것이다. 그러나 크기가 커지게 되더라도 시편을 충분히 가열하여 온도를 빨리 올릴 수 있다면 전개 시간은 유사할 것으로 예측된다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 우주 안테나 설계용 PCO 형상 기억 폴리머 시편의 전개 시험을 수행하였다. PCO 형상기억 폴리머를 제조하고, 이를 이용하여 지름이 120mm인 전개형 안테나의 축소 모델을 제작하였다. 시편을 수평 및 수직으로 설치하여 전개 실험을 수행하였다. 실험 결과를 보면 수평 설치 시에는 중력의 영향으로 형상회복이 두 배 정도 빠르게 발생하였다. 따라서 중력의 효과를 최소화하기 위해서는 시편을 수직으로 설치하여 실험하여야 함을 확인하였다. 본 연구를 통하여 PCO 형상기억 폴리머 시편의 기본적인 전개 성능을 고찰하였으며 향후 실제 적용을 위해서는 다중으로 접는 방법, 가열 방법, 다중 기능 폴리머 개발 및 무중력 상태 시험 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 선행핵심기술개발 과제의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- 1) Lendlein, A. and Kelly, S., "Shape-memory polymers," *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 41, No. 12, 2002, pp.2034~2057.
- 2) Kusy, R. P. and Whitley, J. Q., "Thermal characterization of shape memory polymer blends for bio-medical implantation," *Thermochimica Acta*, Vol. 243, No. 2, 1994, pp.253~263.
- 3) Liang, C., Rogers, C. A., and Malafeev, E., "Investigation of shape memory polymers and their hybrid composites," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 4, 1997, pp.380~386.
- 4) Barrett, R., Taylor, R., Keller, P., Codell,

D., and Adams, L., "Deployable reflectors for small satellites," *21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2007.

5) Liu, Y., Du, H., Liu, L., and Leng, J., "Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review," *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 2, 2014, 2023001.

6) Keller, P. N., Lake, M. S., Codell, D., Barrett, R., Taylor, R., and Schultz, M. R., "Development of elastic memory composite stiffeners for a flexible precision reflector," *Collection of Technical Papers-AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference* Vol. 10, 2006, pp.6984~6994.

7) Liu, C., Chun, S. B., Mather, P. T., Zheng, L., Haley, E. H., and Coughlin, E. B., "Chemically cross-linked polycyclooctene: synthesis, characterization, and shape memory behavior," *Macromolecules*, Vol. 35, No. 27, 2002, pp.9868-9874.

8) Wolfgang, W., Karl, K., Matthias, H., and Lendlein, A., "Shape-memory polymers and shape-changing polymers," *Adv Polym Sci*, Vol. 226, 2010, pp.97-145.

9) Park, H., Harrison, P., Guo, Z., Lee, M. G., and Yu, W. R., "Three-dimensional constitutive model for shape memory polymers using multiplicative decomposition of the deformation gradient and shape memory strains," *Mechanics of Materials*, Vol. 93, 2016, pp.43-62.

10) Jeong, S. Y., Lee, S. Y., Bae, M. J., and Cho, K. D., "Configuration design of a deployable SAR antenna for space application and tool-kit development," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 4, No. 8, 2014, pp.683~691.

11) Tibert, G., "Deployable Tensegrity Structures for Space Applications," PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, 2002.