

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.2.081>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

섬유 강화 지능형 연성 복합재 구동기의 재료구성에 따른 거동특성 평가[§]

한민우* · 김형일* · 송성혁* · 안성훈*,**,†

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

Behavior of Fiber-Reinforced Smart Soft Composite Actuators According to Material Composition

Min-Woo Han*, Hyung-II Kim*, Sung-Hyuk Song* and Sung-Hoon Ahn*,**,†

* Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

** Institute of Advanced Machines and Design, Seoul Nat'l Univ.

(Received January 14, 2016 ; Revised October 21, 2016 ; Accepted November 2, 2016)

Key Words: Fiber-reinforced(섬유강화), Polymer Matrix Composite(고분자 복합재료), Shape Memory Alloy(형상 기억합금), Smart Actuator(지능형 구동기), Smart Soft Composite(지능형 연성 복합재)

초록: 섬유강화 고분자 복합재료는 섬유 형태의 강화제와 고분자 형태의 기지재료가 결합된 형태로 이 는 무게 대비 고강도 및 고강성의 구조물 제작에 용이하다. 본 연구에서는 형상기억합금 와이어가 삽입 된 섬유 강화 지능형 연성 복합재 구동기를 제작, 이의 재료 구성에 따른 거동 특성을 평가 하고자 한 다. 구동기는 형상기억합금이 포함된 구동층과 일반 구조층으로 구성되어 한 층씩 적층되는 방식으로 제작되며 재료 구성에 따른 거동 특성을 살펴보기 위하여 일반 구조층으로 사용된 유리섬유 직물의 적 층 수, 기지재료의 종류를 달리한 뒤 구동 특성을 살펴보았다. 또한, 구동 시에 요구되는 인가 전류의 양을 달리하여 최대 구동각과 최대 구동각에 도달하는 구동 시간을 측정하였다.

Abstract: Fiber-reinforced polymer composites, which are made by combining a continuous fiber that acts as reinforcement and a homogeneous polymeric material that acts as a host, are engineering materials with high strength and stiffness and a lightweight structure. In this study, a shape memory alloy(SMA) reinforced composite actuator is presented. This actuator is used to generate large deformations in single lightweight structures and can be used in applications requiring a high degree of adaptability to various external conditions. The proposed actuator consists of numerous individual laminas of the glass-fiber fabric that are embedded in a polymeric matrix. To characterize its deformation behavior, the composition of the actuator was changed by changing the matrix material and the number of the glass-fiber fabric layers. In addition, current of various magnitudes were applied to each actuator to study the effect of the heating of SMA wires on applying current.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 경량화된 구조물의 제작이 용이하면서도 강도, 강성 및 피로수명을 개선할 수 있어, 신소재로써 주목을 받아왔다.⁽¹⁾

특히, 섬유 강화제와 기지재료로 이루어진 구성 요소들은 요구되는 복합재료의 기계적 성질에 따 라 다양하게 조합이 가능하기에 인공 복합재료를 기반으로 하는 구조물 및 구동기에 관한 연구에 다수 활용되었다.^(2,3)

이와 더불어, 기계 시스템을 비롯한 부품 모듈 의 소형 경량화 및 다기능화를 구현하기 위하여 섬 유 강화 복합재 내부에 지능 재료(Smart Materials) 를 삽입하여 내외부의 자극이나 환경변화에 능 동적으로 반응 가능한 지능형 섬유 강화 복합재

[§] 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015.11.10.-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, ahnsh@snu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.⁽⁴⁻¹⁰⁾ 구조물 내부에 삽입되는 지능 재료로는 압전재료 (Piezoelectric Materials),^(4,5) 전기활성 고분자 (Electroactive Polymers),⁽⁶⁾ 형상 기억 고분자 (Shape Memory Polymers),^(7,8) 형상 기억 합금 (Shape Memory Alloys) 등⁽⁹⁾이 있으며, 특히 형상 기억 합금은 온도와 응력에 따라 상대적으로 큰 상변이 변형과 회복력을 지니고 있어 이를 활용한 지능형 구조물이 다수 개발된 바 있다.⁽¹⁰⁾ 형상 기억 합금은 형상 기억 효과 (Shape Memory Effect)와 초탄성 (Pseudoelasticity) 거동의 특성을 지닌 재료로, 재료의 온도나 응력이 변화함에 따라 오스테나이트 상 (Austenite Phase)과 마르텐사이트 상 (Martensite Phase) 간의 상변이가 발생한다. 형상 기억 효과는 최초 오스테나이트 상에 형상 기억 합금이 놓여 있을 때에 오스테나이트 상변이 끝온도와 마르텐사이트 상변이 온도 사이의 임의의 온도환경에서 응력을 가하여 재료를 변형시켜 발생된 잔류 변형율이 다시 오스테나이트 상변이 끝 온도 이상으로 재료를 가열될 때 기억된 형상으로 복원되는 재료의 회복력을 이용하는 것으로, 이러한 특성을 활용한 지능형 복합재 작동기의 개발이 다수 진행되었다.⁽¹¹⁻²⁰⁾

Baz 등⁽¹⁴⁾은 박판 형태의 사각 빔으로 된 형상 기억 합금을 복합 재료 내부에 삽입한 작동기를 제시하였으며, Choi 등⁽¹⁵⁾은 형상 기억 합금 와이어를 유리 섬유 강화 플라스틱 (Glass Fiber Reinforced Plastic)에 삽입한 지능형 구조물을 발표한 바 있다. Zhang 등⁽¹⁶⁾은 형상 기억 합금 와이어의 체적 함유율에 따른 복합재 특성을 연구하였으며, 형상 기억 합금 와이어를 직조한 지능형 직물 층을 복합재 내부에 삽입하여 이의 진동 특성을 관찰한 바 있다.

본 연구에서는 유연 기지재료에 유리 섬유가 포함된 직물 구조물을 함침시켜 무게대비 강도가 향상된 지능형 연성 복합재 구동기를 제작, 이의 재료 구성에 따른 거동특성을 평가하고자 한다. 이를 위하여, 섬유 강화제로는 유리섬유와 형상기억합금 와이어, 기지재료로는 Polydimethylsiloxane (PDMS)과 Ecoflex를 사용하여 각각의 구동기를 제작하였다. 또한 구조물의 추가 보강재로 사용된 유리섬유 직물의 적층 층수를 달리한 뒤, 구동기의 거동 특성을 살펴보았으며 인가 전류량으로 기인되는 형상기억합금 와이어의 가열 속도를 달리하여 구동기의 변형량과 최고 변형지점에 도달하는 속도를 측정하였다.

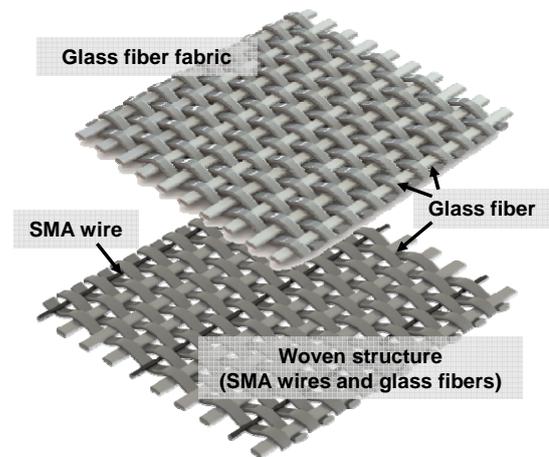


Fig. 1 Concept of the fiber-reinforced smart soft composite actuator

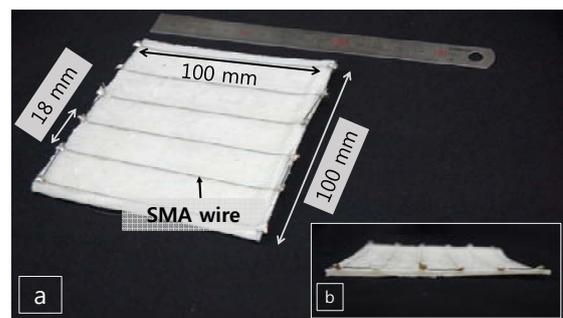


Fig. 2 Glass-fiber reinforced smart soft composite actuator; a: perspective view, b: side view

2. 재료 및 설계

섬유강화 복합재 구동기에 사용되는 섬유는 유리 섬유와 형상기억합금 와이어 (Ni: 55wt%, Ti: 45wt%, Dynalloy Inc. Ltd., USA)이며, 이들은 평직 방식으로 직조되어 구동기의 구동층으로 구성된다.⁽²¹⁻²³⁾ 경사로는 유리섬유, 위사로는 유리섬유와 형상기억합금 와이어가 사용되며 형상기억합금은 18 mm 간격으로 한 가닥씩 사용되어 총 6가닥이 삽입되었다. 또한, 구동층 이외에 구동기의 구조 강성을 보강하고 구동층에 편심을 주기 위한 유리섬유 직물층이 직조물 위에 적층되며 이들을 기지재료인 PDMS와 Ecoflex에 각각 함침시켜 구동기로 제작하였다. 시험에 사용된 구동기의 크기는 100 mm × 100 mm이며, 삽입된 형상기억합금 와이어의 수는 6가닥으로 이들간의 간격은 18 mm이다. Fig. 1은 섬유 강화 지능형 연성 복합재 구동기의 개념도를 보여주고 있으며, Fig. 2는 제작된 시편의 모습을 보여준다. 또한 Table 1은 구동기 제작에 사

Table 1 Properties of matrix materials

	PDMS (Sylgard 184)	Ecoflex (0030)
Young's modulus	1.8 MPa	68.9 kPa (100% modulus)
Tensile Strength	6.7 MPa	1.4 MPa

Table 2 Properties of glass fibers

Parameter	Value
Tensile strength	1470 MPa
Thickness	0.1 mm
Weight	160 g/m ²
Thermal conductivity	1.00 W/m·k

Table 3 Detailed specifications of each actuators

No.	Specification
#1	PDMS matrix, Woven layer (Glass fiber/SMA wires), 1 layer of the glass fiber fabric
#2	Ecoflex matrix, Woven layer (Glass fiber/SMA wires), 1 layer of the glass fiber fabric
#3	Ecoflex matrix, Woven layer (Glass fiber/SMA wires), 2 layer of the glass fiber fabric

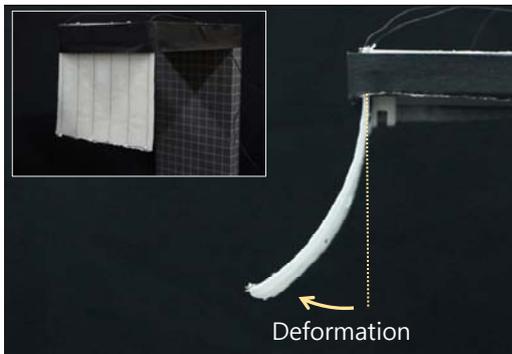
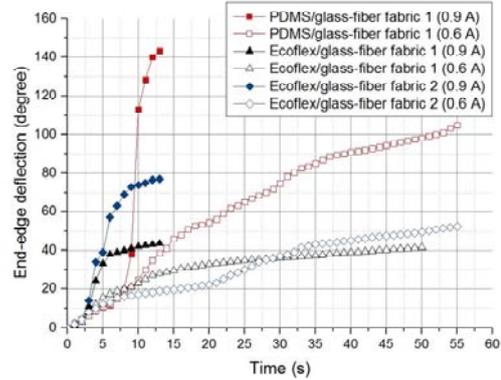


Fig. 3 End-edge deflection of a composite actuator achieved by the embedded SMA actuation

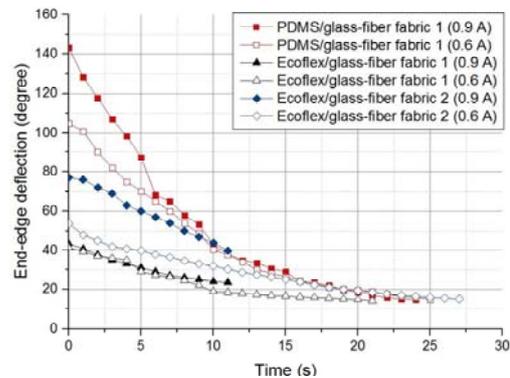
용된 기지재료의 물성을 보여주며, Table 2에는 유리 섬유 강화 복합재의 물성이 정리되어 있다.

3. 실험결과

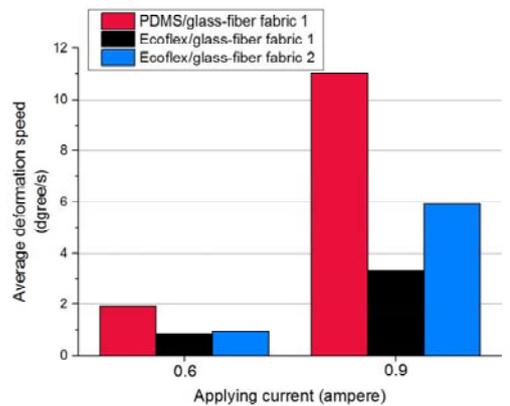
형상기억합금은 외기온도와 하중에 따라 결정학적인 상변이를 일으키며, 이러한 결정학적 구조 변화는 거시적인 변형을 발생시킨다. 본 연구에서는 형상기억합금의 형상기억효과를 활용하여 구동기의 굽힘변형을 발생시키며, 인가 전류에 의한



(a) End-edge deflection by heating of the SMA wires



(b) Recovery by cooling of the SMA wires



(c) Average deformation speed for reaching the maximum deformation as a function of applying current

Fig. 4 End-edge deflection variation with the matrix material, the number of the glass-fiber fabric layers, and the magnitudes of applying current

전기 저항열을 활용하여 형상기억합금이 상 변이 온도에 도달토록 하였다.

실험에 사용된 구동기들의 각 구성요소는 Table 3에 정리되어 있으며, Fig. 3은 구동기의 구동실험시의 모습을 보여주고 있다. 구동기의 실험을 위하여, 구동기 상단부는 지그에 고정되어 있으며 전류를 인가하여 구동기에 굽힘 변형이 발생하도

록 하였다.

실험 결과는 Fig. 4에서 보여주고 있으며, 지지 재료의 탄성계수가 높은 PDMS 시편에서 가장 큰 변형(143.3°)이 관찰되었고, Ecoflex 시편에서는 2장의 유리섬유가 적층된 구동기에서 최대 77.1°의 변형량이 측정되었다. 실험에서의 전류 인가 조건은 0.9 A와 0.6 A이었으며, 전류 인가량에 따라 최대 143 % (시편 #3)까지 차이가 발생하였다. 0.6 A 전류 인가 시에는 시간에 따라 비교적 선형으로 변형량이 증가하는 반면, 0.9 A의 경우 변형이 급격히 발생하는 구간이 존재함을 확인할 수 있었다.

또한 0.9 A 전류 인가 시에는 전류의 인가가 시작된 이후 13초 내의 지점에서 최대 변형에 도달하였으며, 0.6 A 전류 인가 시에는 최대 변형량 도달 시점이 50초~57초 가량으로 측정되었다[Fig. 4(a)] 소모되는 전기 에너지를 고려하였을 때, 0.9 A의 전류를 인가할 경우엔 11.7 A·s, 0.6 A를 인가하였을 때엔 평균적으로 32.6 A·s가 최대 굽힘에 도달하기까지 필요하였다. 0.6 A 전류를 인가하는 경우엔 0.9 A 전류의 경우보다 최대 굽힘에 이르기까지 최대 4.3배 가량의 시간 동안 전류를 더 공급해야 하기에 전기 에너지 소비가 2.8배 가량 증가하게 된다.

형상기억합금 와이어에 전류 인가를 중단하였을 경우, 섬유 강화제와 지지재료에 의하여 변형 전 상태로 구동기의 형상 복원이 이루어졌으며, 변형량이 큰 시편일수록 형상 복원 속도가 빠름이 관찰되었다. 모든 시편은 전류 인가를 중단하고 20초 가량이 지나면 시편 끝단의 변형량이 20° 이내인 상태로 수렴하며 이후에는 복원속도가 급격히 감소하였다.[Fig. 4(b)] 이는 형상기억합금 와이어를 구동 전의 상태로 돌려주기 위한 지지 재료 및 구동기 구조의 탄성복원력이 뒷받침되지 못하기 때문으로 고려된다.

실험에 사용된 구동기들은 전류 0.6 A를 인가하였을 경우보다 0.9 A의 전류를 인가하였을 때에 4~6배 가량의 변형 속도 향상을 보였다. 인가 전류 대비 최대 굽힘량에 도달하기까지 구동기의 평균 변형 속도는 PDMS 기반 구동기(시편 #1)에 0.9 A를 인가하였을 경우에 가장 빠른 것으로 측정되었으며(11.1°/s) 이는 같은 구동기에 0.6 A를 인가하였을 경우보다 5.8배 빠른 속도이다.[Fig. 4(c)]

4. 결 론

본 연구에서는 섬유강화 복합재 기반 지능형 구

동기를 제작, 이의 구동특성을 살펴보았다. 구동기의 구동 특성을 살펴보기 위하여, 구동기 제작에 사용된 지지재료, 수동층으로 사용된 유리섬유 직물의 적층 층수, 인가 전류량을 달리 하여 발생하는 구동기의 끝 단 변형량을 측정하였다. 실험 결과,

(1) 복합재 구동기 지지재료의 탄성계수가 높고, 삽입된 형상기억합금 와이어의 수축력을 충분히 지지가능한 구조적 강성을 지닌 구동기일수록 굽힘 변형량이 크을 알 수 있었다.

(2) 변형량이 큰 구동기일수록 전류인가 중단에 의한 형상복원속도도 상대적으로 빠름을 관찰할 수 있었다.

(3) 전류 인가량에 따라 최대 굽힘 변형량에 차이가 발생하였으며, 0.9 A 전류를 PDMS기 복합재 구동기에 인가하였을 때에 143.3°의 굽힘 변형이 관찰되었다.

(4) 전류 0.6 A의 전류를 인가하였을 경우보다 0.9 A의 전류를 인가하였을 때에 4~6배 가량 구동 변형 속도의 향상을 보였으며, 최대 143 %의 최대 변형량 증가도 확인되었다.

본 연구에서 수행한 복합재 구동기의 구조적 형상과 변형량간의 상관관계에 대한 기초연구를 바탕으로 향후에는 거동 예측이 가능한 복합재 구동기의 설계와 이의 활용에 대한 응용연구를 수행하고자 한다.

후 기

This work was supported by the Industrial Strategic technology development program (10049258) funded by the Ministry of Knowledge Economy(MKE, Korea), the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST) (No.NRF-2015R1A2A1A13027910), a grant to Bio-Mimetic Robot Research Center funded by Defense Acquisition Program Administration(UD130070ID).

참고문헌

(References)

- (1) Mallick, P.K., 2007, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, CRC press.
- (2) Rogers, C., Liang, C. and Jia, J., 1989, "Behavior of Shape Memory Alloy Reinforced Composite Plates Part 1: Model Formulation and Control Concepts," *Proceedings of the 30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*.
- (3) Kim, J.W. and Lee, D.G., 2014, "Study on the Fiber Orientation During Compression Molding of

- Reinforced Thermoplastic Composites," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 1, No. 4, pp. 335~339.
- (4) Gibson, R.F., 2010, "A Review of Recent Research on Mechanics of Multifunctional Composite Materials and Structures," *Composite Structures*, Vol. 92, No. 12, pp. 2793~2810.
- (5) Mallik, N. and Ray, M., 2003, "Effective Coefficients of Piezoelectric Fiber-reinforced Composites," *AIAA journal*, Vol. 41, No. 4, pp. 704~710.
- (6) Bar-Cohen, Y., 2002, "Electroactive Polymers as Artificial Muscles: a Review," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 39, No. 6, pp. 822~827.
- (7) Meng, Q. and Hu, J., 2009, "A Review of Shape Memory Polymer Composites and Blends," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, No. 11, pp. 1661~1672.
- (8) Liu, Y., Du, H., Liu, L. and Leng, J., 2014, "Shape Memory Polymers and Their Composites in Aerospace Applications: a Review," *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 2, 023001.
- (9) Bettini, P., Riva, M., Sala, G., Di Landro L., Airoldi, A. and Cucco, J., 2009, "Carbon Fiber Reinforced Smart Laminates with Embedded SMA Actuators — Part I: Embedding Techniques and Interface Analysis," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18, No. 56, pp. 664~671.
- (10) Chopra, I., 2002, "Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems," *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 11, pp. 2145~2187.
- (11) Lagoudas, D.C. and Tadjbakhsh, I.G., 1992, "Active Flexible Rods with Embedded SMA Fibers," *Smart Materials and Structures*, Vol. 1, No. 2, p. 162.
- (12) Choi, S. and Lee, J.J., 1998, "The Shape Control of a Composite Beam with Embedded Shape Memory Alloy Wire Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, No. 6, p. 759.
- (13) Bergamini, A., Christen, R. and Motavalli, M., 2007, "Electrostatically Tunable Bending Stiffness in a GFRP-CFRP Composite Beam," *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 3, p. 575.
- (14) Baz, A., Chen, T. and Ro, J., 2000, "Shape Control of NITINOL-Reinforced Composite Beams," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, No. 8, pp. 631~642.
- (15) Choi, S., Lee, J.J., Seo, D.C. and Choi, S.W., 1999, "The Active Buckling Control of Laminated Composite Beams with Embedded Shape Memory Alloy Wires," *Composite Structures*, Vol. 47, No. 1, pp. 679~686.
- (16) Zhang, R.X., Ni, Q.Q., Masuda, A., Yamamura, T. and Iwamoto, M., 2006, "Vibration Characteristics of Laminated Composite Plates with Embedded Shape Memory Alloys," *Composite Structures*, Vol. 74, No. 4, pp. 389~398.
- (17) Chu, W.S., Kim, M.S., Jang, K.H., Song, J.H., Rodrigue, H., Chun, D.M., Cho, Y.T., Ko, S.H., Cho, K.J., Cha, S.W., Min, S., Jeong, S.H., Jeong, H., Lee, C.M., Chu, C.N. and Ahn, S.H., 2016, "From Design for Manufacturing (DFM) to Manufacturing for Design (MFD) via Hybrid Manufacturing and Smart Factory: A Review and Perspective of Paradigm Shift," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 209~222.
- (18) Han, M.W. and Ahn, S.H., 2017, "Blooming Knit Flowers: Loop-linked Soft Morphing Structures for Soft Robotics," *Advanced Materials*, Accepted.
- (19) Wang, W., Li, C.Z., Rodrigue, H., Yuan, F.P., Han, M.W., Cho, M.H. and Ahn, S.H., 2017, "Kirigami/Origami-based Soft Deployable Reflector for Optical Beam Steering," *Advanced Functional Materials*, Accepted.
- (20) Wang, W., Kim, N.G., Rodrigue, H. and Ahn, S.H., 2017, "Modular Assembly of Soft Deployable Structures and Robots," *Materials Horizons*, Accepted.
- (21) Ahn, S.H., Lee, K.T., Kim, H.J., Wu, R., Kim, J.S. and Song, S.H., 2012, "Smart Soft Composite: An Integrated 3D Soft Morphing Structure using Bend-twist Coupling of Anisotropic Materials," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 4, pp. 631~634.
- (22) Han, M.W., Rodrigue, H., Cho, S., Song, S.H., Wang, W., Chu, W.S. and Ahn, S.H., 2016, "Woven Type Smart Soft Composite for Soft Morphing Car Spoiler," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 86, No. 1, pp. 285~298.
- (23) Han, M.W., Rodrigue, H., Kim, H.I., Song, S.H. and Ahn, S.H., 2016, "Shape Memory Alloy/Glass Fiber Woven Composite for Soft Morphing Winglets of Unmanned Aerial Vehicles," *Composite Structures*, Vol. 140, No. 15, pp. 202~212.