

# 형상기억합금 선재가 삽입된 폴리머기지 능동복합재료의 회복력에 미치는 계면 접합강도의 영향

김희연\* · 김경섭\*\* · 홍순형\*\*\*

## Effect of interface bonding strength on the recovery force of SMA reinforced polymer matrix smart composites

Hee Yeoun, Kim<sup>\*</sup>, Kyung Sub Kim<sup>\*\*</sup> and Soon Hyung Hong<sup>\*\*\*</sup>

**Key Words** : Shape Memory Alloy, Smart Composite, Interface Bonding Strength, Recovery Force

### ABSTRACT

The effect of interface bonding strength on the recovery force of SMA wire reinforced polymer matrix composites was investigated by pullout test. Firstly, the recovery forces and transformation temperatures of various prestrained SMA wires were measured and 5% prestrained SMA wires were prepared for the reinforcements of composites. EPDM incorporated with 20vol% silicon carbide particles(SiCp) of 6, 12, 60  $\mu\text{m}$  size were used as matrix. Pullout test results showed that the interface bonding strength increased when the SiCp size decreased due to the increase of elastic modulus of matrix. Cyclic test of composites was performed through control of DC current at the constant displacement mode. The abrupt decrease of recovery force during cycle test at high current was occurred by thermal degradation of matrix. This was in good agreement with temperature related in the thermal degradation of matrix. The hysteresis of recovery force with respect to the temperature was compared between wire and composite and the hysteresis of composites was smaller than the wire due to less thermal conduction.

#### 기호설명

SMA : Shape Memory Alloy  
EPDM : Ethylene-Propylene Diene Monomer  
DC : Direct Current  
SAM : Self-accommodating Martensite  
POM : Preferentially Oriented Martensite

#### 1. 서론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강도와, 내부식성, 이방성 등으로 인해 이미 다양한 분야에서 응용되고 있는 소재이다. 또한, 형상기억합금은 NiTi계 합금을 중심으로 구동기, 클램핑, 의료 분야에

서 널리 적용되어오고 있다. 최근에 200  $\mu\text{m}$ 이하의 작은 지름을 가지는 선재형태로 형상기억합금이 보급되기 시작하면서, 형상기억합금 선재를 금속, 폴리머등 다양한 복합재료내에 삽입하여 형상회복 능력을 가지는 복합재료를 제조하고자 하는 시도가 선진국을 중심으로 추진중에 있다.[1]

형상기억합금이 삽입된 복합재료는 높은 회복 변형률, 감쇠능, 형상회복응력 등의 장점을 가지고 있으며, 현재 고주파 영역에서 널리 사용되고 있는 압전재료와 더불어 저주파 영역에서 향후 능동 복합재료를 위한 강화제로 응용가능성이 높을 것으로 기대된다.

형상기억합금이 삽입된 복합재료의 형상회복기

구는 우선 형상기억합금선재를 일정한 변형률로 변형시킨후 지지내에 삽입한 후 가열하는 동안 복합재료의 변형을 일으키고, 냉각하는 동안 지지재료의 강성에 의해 복구되는 형태를 지닌다. 이러한 작동기구는 기지나 형상기억합금 선재의 재료 설계만으로도 형상회복능을 나타내므로 일반적으로 외력을 필요로 하는 2-way 구동방식에 비해 구조가 단순한 잇점이 있으나, 변형률에 따른 형상기억합금 선재의 변태온도의 변화, 기지내 형상기억합금 선재의 배열, 계면 접합성문제, 냉각시 열전달 부족에 의한 열이력현상 등의 부가적인 문제가 해결하여야 할 과제로 남아있다.

본 연구에서는 형상기억합금 선재가 삽입된 복합재료를 제조하기 위하여 우선 변형률에 따른 형상기억합금 선재의 변태온도와 형상회복능력의 변화를 측정하였다. 적정 변형률로 제조된 형상기억합금 선재를 SiC 입자가 함유된 고분자 기지재료에 삽입하여 능동 복합재료를 제조하였다. 제조된 복합재료를 Pull-out 실험을 행하여 고분자기지재료와 형상기억합금 선재와의 계면 접합강도가 형상회복능력에 미치는 영향과 형상회복능력의 열이력 곡선을 연구하였다. 이를 통하여 형상기억합금 선재가 삽입된 고분자기지 복합재료의 형상기억능력을 향상시키기 위한 방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 형상기억합금 선재의 특성분석

실험에 사용된 형상기억합금 선재는 미국 NDC 사의 NiTi(SM495,  $\phi=400 \mu\text{m}$ ) 선재를 사용하였다. 정적인장시험기(Instron 5583)를 이용하여 0.1 mm/min의 Crosshead 속도로 하중을 가한 후 제하여 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11%의 최대변형률을 가지는 시편을 준비하였다. 예비변형률에 따른 형상기억합금 선재의 변태온도변화를 관찰하기 위하여 DSC(Mettler-Toledo DSC 851e)를 사용하여 5°C/min의 속도로 관찰하였다. 예비변형률에 따른 형상기억합금 선재의 형상회복능력은 정적인장시험기에 시편을 장착한 후 직류전원공급기로 전류를 인가하며 온도와 하중을 동시에 측정하였다. 이때 선재의 위치에 따른 온도변화를 최소화하기 위하여 선재의 양 끝단에 열전대를 부착하여 측정값을 평균하였다. 본 실험에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다.

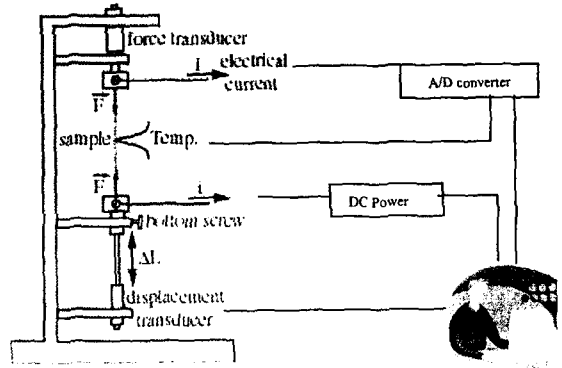


Fig. 1 Experimental set-up for the recovery force measurement of wire and composite

### 2.2 고분자기지 복합재료의 제조

기지재료와 형상기억합금 선재의 계면 접합강도를 측정하기 위해 Fig. 2(a)와 같은 형태로 시편을 제작하였다. 5% 예비변형률로 제조된 형상기억합금 선재를 이용하여 고분자기지 복합재료를 제조하였다. 고분자기지재료로는 기지재료의 탄성계수를 조절하기 위하여 6, 12, 60  $\mu\text{m}$ 의 SiCp 입자가 20%(부피비)함유된 세 종류의 EPDM을 사용하였다. 사용된 고분자기지재료와 형상기억합금 선재의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 능동복합재료는 Fig. 2(b)와 같은 형태의 시편을 설계하였으며, 경화되는 동안 형상기억합금 선재가 회복되지 않도록 금형 양쪽에 일정한 인장력이 걸리도록 금형을 제작하여 형상기억합금 선재를 장착하였다. EPDM 판을 적층하고 공압프레스를 이용하여 가압하면서 180°C에서 20분간 경화시켜 제조하였다.

Table 1. Physical properties of EPDM matrix and SMA reinforcement.

Materials	Young's Modulus (Gpa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Poisson's Ratio
EPDM	0.007	0.86	0.3
SiCp	400	3.02	0.188
SMA (Martensite)	83	6.5	
SMA (Austenite)	28~41	6.5	

\* 박사과정, 한국과학기술원 재료공학과

\*\* 박사과정, 한국과학기술원 재료공학과

\*\*\* 교수, 한국과학기술원 재료공학과.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 형상기억합금 선재의 특성

일반적으로 상온에서 마르텐사이트(SAM) 조성을 가지는 형상기억합금에 외부 응력을 가하게 되면 인장방향에 평행한 방향으로 쌍정경계가 이동하여 마르텐사이트(POM)가 생성되며 온도가  $A_s$  이상일때 오스테나이트상으로 변태되어 형상이 회복되나, 임계변형률 이상으로 응력을 가하게 되면 전위등에 의해 쌍정경계가 고착되어 더 이상 형상이 회복되지 않게 된다. 이러한 임계변형률을 측정하기 위해 Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 1, 3, 5, 7, 9, 11%의 최대 변형률을 가지는 시편에 대해 DSC 실험을 통해 변태온도의 변화를 측정한 결과, 약 5%의 예비변형률 이상일때  $M_s$ ,  $M_f$  온도가 상승하였으며, 이는 임계변형률 이상에서 전위가 대량 생성되어 형상회복이 완전히 일어나지 않음을 의미한다.

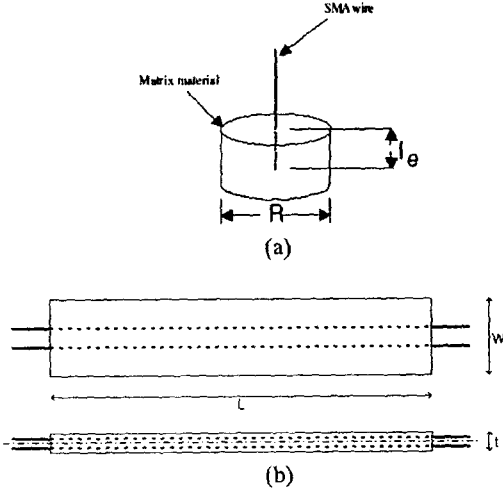


Fig. 2. Specimen shape for (a) pull-out test ( $R \times l = 25\text{mm} \times 15\text{mm}$ ) and (b) smart composite ( $L \times W \times t = 100\text{mm} \times 20\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ ).

#### 2.3 고분자기지 복합재료의 특성분석

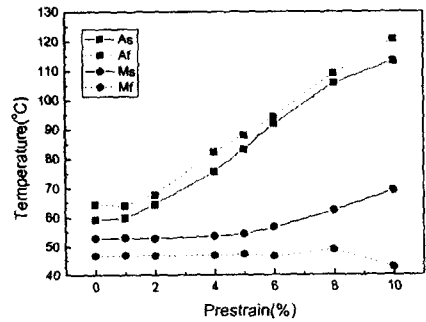
기지재료와 형상기억합금 선재의 계면 접합강도를 측정하기 위해 정적인장시험기에서  $0.1 \text{ mm/min}$ 의 Crosshead 속도로 Pull-out 실험을 행하고, 파단면을 주사전자현미경(Philips XL30-FEG)을 사용하여 관찰하였다. 이때 계면접합강도는 아래 식에 의해 계산되어진다.[2]

$$n^2 = \frac{E_m}{E_f(1 + \nu_m) \ln(R/r)}$$

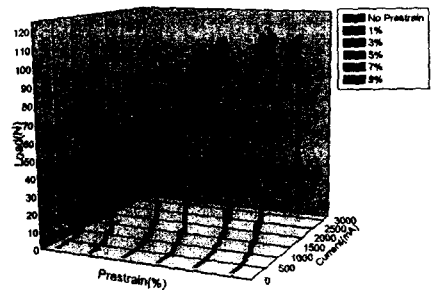
$$\tau_d = \frac{n \sigma_p \coth(nl/r)}{2}$$

$n$ : Shear-lag parameter  
 $E_m$ : Elastic modulus of matrix  
 $E_f$ : Elastic modulus of reinforcement  
 $\nu_m$ : Poisson's ratio of matrix  
 $r$ : Radius of matrix  
 $l$ : Embedded length of reinforcement  
 $\tau_d$ : Interfacial debonding strength

능동복합재료의 형상회복응력은 Fig. 1 과 동일한 방법으로 측정하였다. 제조된 시편에 직류전류를 인가하면서 온도와 회복응력을 측정하였다. 능동복합재료의 온도변화에 의한 응력변화의 동적응답 특성을 측정하기 위하여 전류를 주기적으로 인가하였다. 이때 전류인가 주기는 시편이 충분히 냉각되어 응력이 일정하게 되는 시간으로 정하였고, 능동복합재료의 이력곡선과 형상기억합금선재의 이력곡선을 비교하여 냉각속도에 따른 이력곡선의 변화를 고찰하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Changes of transformation temperatures and (b) force-prestrain-current relationships of each prestrained specimens.

각 예비변형률을 가지는 선재에 대해 일정변위

모드에서 회복력을 측정된 결과, Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 전류와 예비변형률이 증가함에 따라 회복력은 증가하였으나, 5%이상의 예비변형률에서는 그 증가율이 미미하였고, 이것은 변태온도 실험과 일치하는 결과를 나타낸다.

### 3.2 계면 접착강도의 영향

기지재료의 탄성계수에 따른 계면 접착강도의 영향을 분석하기 위해 Pull-out 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, 각 시편에서 모두 전형적인 탄성변형, 계면분리, 마찰변형의 3 단계 변형을 보여준다. 일반적으로 SiCp 입자의 크기가 작아질수록 탄성계수가 증가하고 식 (1)에 의해 탄성계수가 증가함에 따라 계면 접착강도가 향상되는 것으로 생각된다. 6  $\mu\text{m}$ 의 SiCp 입자를 가지는 시편의 계면 접착강도는 식 (1)에 의해 약 4~5MPa로 계산되어 있는데, Sottos et al. 등에 의하면 폴리우레탄 기지에서의 계면전단강도는 약 9MPa 정도로 보고되고 있는데, EPDM 기지의 경우 이보다 다소 낮은 값을 알 수 있다.

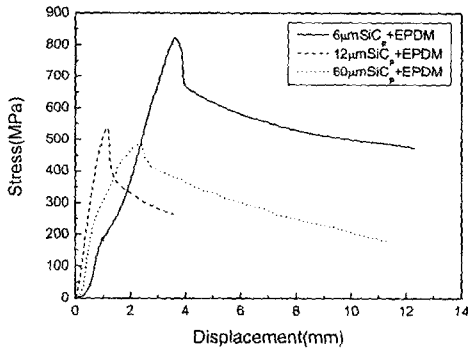


Fig. 4. Results of pull-out tests in various EPDM matrix.

### 3.3 고분자복합재료의 열이력곡선

형상기억합금 선재의 임계변형률과 계면접착강도를 고려하여 5%의 예비변형률을 가지는 형상기억합금 선재를 6  $\mu\text{m}$ 의 SiCp 입자가 함유된 EPDM 기지내에 삽입하여 능동복합재료를 제조하고, 전류를 주기적으로 인가하면서 능동복합재료의 동적 변형거동을 조사하였는데, 1.8A(150 $^{\circ}\text{C}$ ) 이상의 온도에서는 오히려 회복력이 저하하였는데, 이것은 EPDM 기지의 열화온도와 거의 일치하는 것으로 보아 기지의 열화에 의해 계면의 박리가 일어난 때문인 것으로 판단된다. 온도와 회복력을 측정하여 Fig. 5의 열이력곡선을 구하고, 형상기억합금 선재의 결과와 비교하였다. 형상기억합금 선재의 경우 주위로의 냉각 속도가 높아서 가열속도와 냉

각속도의 차이에 기인하여 상당히 큰 이력곡선을 나타내었으나, 복합재료의 경우 상대적으로 느린 가열, 냉각 속도와 계면에서의 응력전달에 기인하여 작은 이력곡선을 나타내었다. 형상기억합금 선재의 이력곡선과 선재가 삽입된 복합재료의 이력곡선은 Brinson, Stalmans, Sittner[3] 등 다양한 연구자들이 이론적으로 접근하기 위하여 시도하였으나, 선재의 수나 배열방법, 예비변형률 등 다양한 인자들에 의해 영향을 받을 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

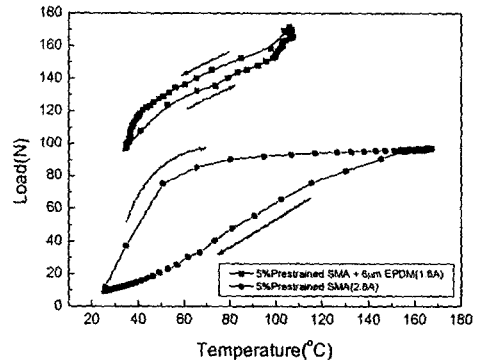


Fig. 5 Comparison of hysteresis curves of SMA reinforced composite and SMA wire

## 4. 결론

본 연구에서는 5%의 임계변형률을 가지는 형상기억합금 선재가 삽입된 고분자 복합재료를 제조하였다. Pull-out 실험결과 기지재료의 탄성계수가 증가할수록 계면접착강도가 증가함을 확인하였다. 고분자복합재료의 온도-회복력 이력곡선은 형상기억합금 선재에 비해 큰 폭을 가졌고, 이것은 상대적으로 느린 가열, 냉각속도와 계면으로의 응력전달에 기인한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) R. Stalmans, V. Michaud, J.E. Bidaux, R. Gotthardt and J.A. E. Månson, "Adaptive Composites with embedded shape memory alloy wires", in Proceedings of the 4th European Conference on Smart Structures and Materials, pp. 801-804, 1998.
- (2) T.W. Clyne, P.J. Withers, An Introduction to Metal Matrix Composites, pp. 180-183, 1993.
- (3) J. Schrooten, K.A. Tsoi, R. Stalmans, Y. Zheng and P. Sittner, "Comparison between generation of recovery stresses in shape memory wires and composites: theory and reality", SPIE's Smart Materials and MEMS, pp. 13-15, 2000.