

# SMA 복합재료 특성 실험 고찰

## Experimental Study of SMA Composite Characteristics

김형진\*      김재훈\*\*      강기원\*\*\*      정성균\*\*\*\*      박영철\*\*\*\*\*  
Kim, Hyeong Jin   Kim, Jae Hoon   Kang, Ki Weon   Jung, Sung Kyun   Park, Young Chul

---

### ABSTRACT

We have investigated mechanical behaviors of composite materials containing Ni-Ti shape memory alloy(SMA) wires by performing several experimental methods. In this study, several sample specimens were fabricated in order to perform photo-elasticity tests and impact tests under various test conditions for investigating the mechanical behaviors of the SMA composite materials. From the test results, the shape memory effect of SMA in composite materials can be considered as one of possible ways in controlling crack growth in the materials.

---

## 1. 서론

최근 들어 철도차량용 구조물에 복합재료를 사용하여 차체를 경량화하고 강도 등의 기계적 특성을 향상시키는 방법 등에 대한 연구가 추진되고 있으나 복합재료는 충격 하중에 의해 쉽게 파손되는 결점이 있으며 저온에서 강한 취성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 복합재료 구조물의 이러한 약점을 보완하고 균열억제 등의 기능을 가질 수 있는 복합재료의 지능화 연구의 필요성이 점차 증대되고 있는 현실이다. 본 연구에서는 복합재료를 지능화 하기위한 방법 중 하나로 복합재료 내부에 Ni-Ti 형상기억합금 와이어를 삽입한 하이브리드 복합재료의 특성을 실험적 방법으로 고찰하였다. 하이브리드 복합재료는 금속재료의 강도 및 연성을 활용할 수 있고 온도에 따라 형상기억합금의 물성이 변하므로 기존 복합재료의 약점을 보완할 수 있을 것으로 생각되고 있다. 또한 형상기억합금의 형상복원효과를 이용, 복합재 내부에 발생한 손상의 성장을 억제할 수 있을 것으로 예측된다.

## 2. Ni-Ti SMA 복합재 지적효과 가시화 시편 제작

### 2.1 프리프레그의 적층

적층판(laminated panel)은 몇 개의 프리프레그로 만들어진다. 프리프레그를 원하는 방향과 크기로 절단한 후 각각의 프리프레그를 방향과 순서(stacking sequence)에 맞추어 적층한다. 적층 시 섬유 각도를 정확히 유지하여야 하며 시험편의 제작과정 중에 제작 환경을 청결하게 유지하여야 한다. 그림 1은 Ni-Ti SMA 복합재 시편 제작을 위해 고안된 지그를 나타내고 있으며 그림 2는 프리프레그를 적층한 후의 형상(Ni-Ti SMA wire 직경: 0.4mm)을 나타내고 있다. Ni-Ti 합금은 조성비에 따라 상변화 온도 및 인장특성이 변하는데 표 1은 본 연구에서 사용된 Ni-Ti SMA의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

---

\* 정회원, 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 책임연구원

E-mail : [hjkim@krri.re.kr](mailto:hjkim@krri.re.kr)

TEL : (031)460-5241 FAX : (031)460-5289

\*\* 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 주임연구원

\*\*\* 체육과학연구원 스포츠산업연구실 선임연구원

\*\*\*\* 서울산업대 기계공학과 교수

\*\*\*\*\* 동아대학교 기계공학부 교수

표 1. Ni-Ti SMA의 기계적 물성치

Yield Stress(MPa)		Elastic Modulus(GPa)	Poisson's ratio
상온	280	41	0.43
363 K	710	83	0.43



그림 1. SMA 복합재 시편 제작 JIG

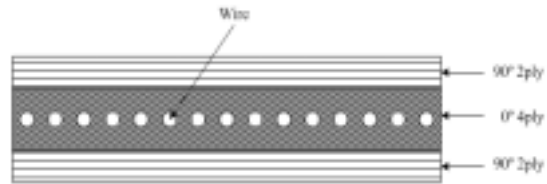


그림 2. SMA 복합재 시편 단면

## 2.2 성형(Curing)



그림 3. Autoclave

복합재료 적층판은 그림 3과 같은 오토클레이브(autoclave)를 사용하여 성형하였으며 이와 같은 오토클레이브 성형 법은 시험편을 성형하는 과정에서 적층판에 열과 압력을 가하는데 가해지는 압력은 층(ply)들 간에 결합력을 강화시키며 기공을 감소키는 역할을 하게 된다.



그림 4. 복합재 시편

## 2.3 적층판의 기계가공

복합재료 적층판의 가공은 일반적으로 수냉식 다이아몬드 테이블 절단기가 사용된다. 커팅 시에는 시편의 규격에 맞도록 정확히 잘라내며, 복합재료는 방향성을 가지므로 정확하게 원하는 방향으로 제작 가공한다. 본 연구에서는 광탄성 실험을 위해서 시험편의 중앙에 다이아몬드 테이블 절단기를 이용하여 U형 노치를 생성하였다.

## 3. Ni-Ti SMA 복합재 지적효과 가시화 시험

### 3.1 시험장치 및 시험편

SMA 복합재의 지적효과를 가시적으로 측정하기 위하여 광탄성 피막을 이용, 광탄성 프린지(fringe)로 지적효과를 평가하였다. 시험 장치는 그림 5와 같은 소형 인장시험기(동아대 보유)를 이용하였으며, 형상기억합금이 충전된 복합재 시험편의 크기는 폭 25mm, 두께가 1mm이며, 균열의 길이는 3mm이다. 이 경우 시험편의 폭(W)과 균열길이(a)의 비율은  $a/W=0.12$  이다.



그림 5. 인장시험기

### 3.2 시험방법

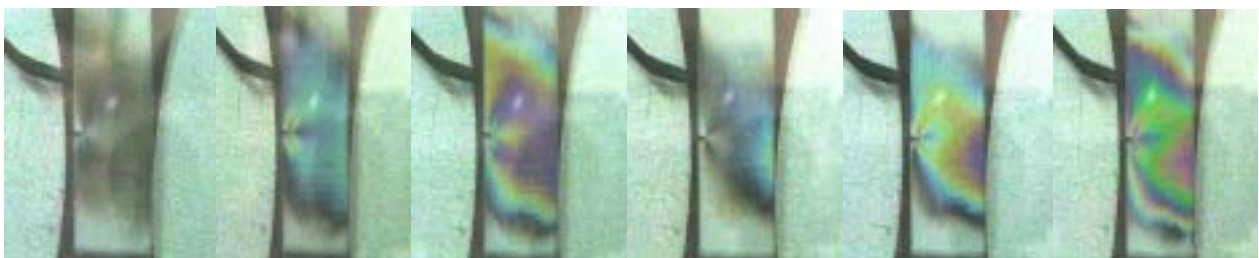
시험방법은 소형 인장 시험기를 이용하여 하중을 가하고, 적정 프린지가 생성되면 가열기(plate heater)를 이용하여 기준 온도 60°C로 제어하여 복합재의 지적 효과를 관찰하였다. 이때 가시화 현상은 하중을 유지한 채 온도를 가하였을 때의 프린지 상태를 촬영하였다. 실험의 순서는 다음과 같다.

- Step 1: 하중에 의해 복합재 표면에 프린지가 생성되기 시작한다.
- Step 2: 프린지는 하중이 증가할수록 점점 성장한다.
- Step 3: 프린지가 적당하게 성장하면 하중을 일정하게 유지시킨다.
- Step 4: 하중을 일정하게 유지시킨 상태에서 가열기로 온도를 높이면, 형상기억합금의 복원력에 의해 프린지가 점점 사라지는 것을 확인할 수 있다.
- Step 5: 가열기의 작동을 멈추면 시편의 온도가 점차 내려가, 온도에 의한 형상기억합금의 지적효과에 의해 사라졌던 프린지가 다시 생성되기 시작한다.
- Step 6: 가열기로부터 열 공급이 완전히 제거된 상태이며 Step 3과 유사한 형태의 프린지가 생성된다.

### 3.3 시험결과

형상기억합금이 함유된 복합재의 지적효과를 광탄성 실험을 통해서 시편의 균열선단 부근에 생성되는 광탄성 프린지를 측정하고 시편을 적정온도로 가열하여 시편 균열선단 부근의 회복응력 패턴을 관찰하였다.

시험결과 응력집중이 극심한 에지-균열판(edge-cracked plate)의 균열선단 근방에서는 응력집중으로 프린지가 조밀하게 나타났다. 또한, 부가적인 하중이 작용하지 않는 상태에서 복합재에 온도를 가열해 주면 응력이 회복됨을 관찰할 수 있었다. 그림 6 - 7은 형상기억합금 충전 복합재의 균열 종류에 의한 (싱글, 듀얼 균열) 프린지의 변화 과정을 나타내는 그림이다. 시험 결과 가열에 의한 복합재의 지적효과는 프린지의 분포를 통해 확인이 가능하였다. 이를 통해 복합재 내에 충전된 형상기억합금에 의해 복합재 내부에 손상 발생 시 외부 제어를 통한 손상량의 억제 가능성이 확인되었다.



Step 1

Step 2

Step 3

Step 4

Step 5

Step 6

그림 6. Single edge-crack 시편의 균열선단 프린지 패턴

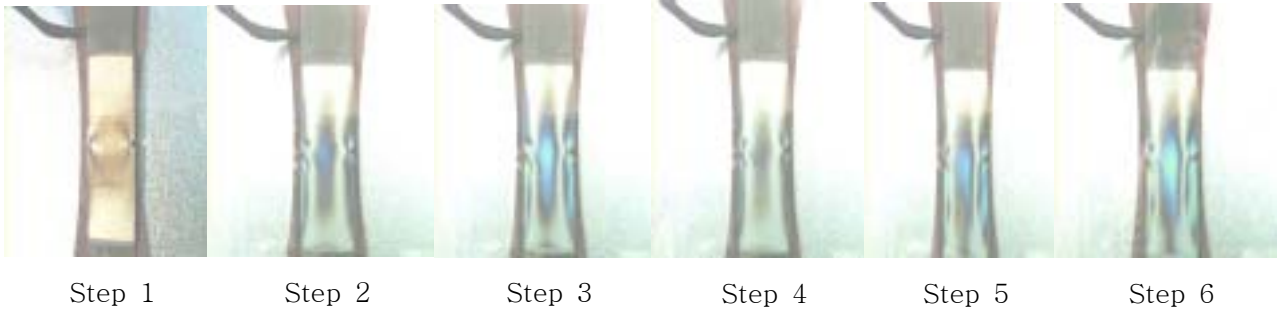


그림 7. Dual edge-crack 시편의 균열선단 프린지 패턴

#### 4. Ni-Ti SMA 복합재 충격특성

##### 4.1 충격시험편

SMA 복합재는 복합재 내부에 SMA라는 이종 소재가 포함되어 있으므로 충격에 취약할 소지가 있어 SMA를 포함하고 있지 않은 복합재 시편과의 충격특성을 비교 분석하기 위하여 충격시험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 복합재료는 s-glass 계열의 유리 섬유와 #2500계열의 epoxy resin으로 구성되었다. 이러한 glass/epoxy prepreg를 이용하여 적층 평판(laminated plate)형태로 제작하기 위하여  $[0_6/90_6/SMA/90_6/0_6]$ 의 적층 순서(stack sequence)에 따라 적층하였으며 형상기억합금이 포함된 시험편(SMA 복합재 시험편)과 포함되지 않은 시험편(기본시험편)으로 구분하여 제작하였다. 사용된 SMA 와이어의 직경은 0.4mm이며 적층판을 120×90mm의 크기로 절단하여 시험편을 준비하였다. 본 연구에서 고려한 시험조건은 기본 및 SMA 복합재 시험편의 2종과 온도조건(+20℃, -10℃, -40℃) 3종의 총 6종이다. 표 2는 ASTM 규정에 의거, 수행한 시험으로부터 얻은 glass/epoxy 복합재의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

표 2. glass/epoxy 복합재료 기계적 물성치

섬유방향 Elastic Modulus( $E_{xx}$ , GPa)	섬유수직방향 Elastic Modulus( $E_{yy}$ , GPa)	Poisson's ratio
28.54	1.43	0.31

##### 4.2 충격시험

충격시험은 그림 8에 나타난 낙하식 충격시험기(instrumented drop-type impact testing machine, 체육과학연구원 보유)를 활용, 충격시험을 수행하였다.



그림 8. 충격시험기



그림 9. Pneumatic fixture

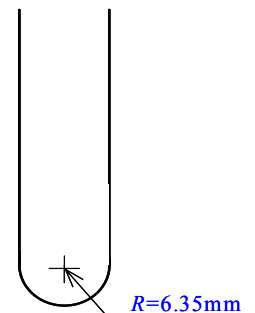


그림 10. Impactor

사이즈가 120mm×90mm인 시험편은 그림 9와 같은 공압식 시험편 고정 장치에 고정되었으며 가운데 개구부(opening)는 원형으로서 직경은 76.2mm이다. 낙하 체의 총질량은 6.45kg이며 사용된 충격체(impactor)의 선단은 곡률반경 6.35mm인 반원형 형상을 지니고 있다. 충격속도는 충격체와 시험편의 접촉 시작 직전에 광센서(photo sensor)를 이용하여 측정하였으며 시험에 충격을 가한 후, 충격손상을 정밀히 관찰하기 위하여 초음파 현미경(Scanning Acoustic Microscope, SAM)을 사용하였다.

### 4.3 시험편 충격손상 결과

기본 시험편의 충격손상(그림 11 참조)은 동일 시험온도조건의 경우 입사 충격에너지가 증가함에 따라 손상 면적 역시 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한 동일 입사충격에너지의 경우 온도 저하에 따른 손상 면적은 근소하지만 증가가 관찰되고 있다. 이러한 경향은 SMA 복합재 시험편(그림 12 참조)의 충격손상의 경우에서도 동일하게 관찰되고 있다.

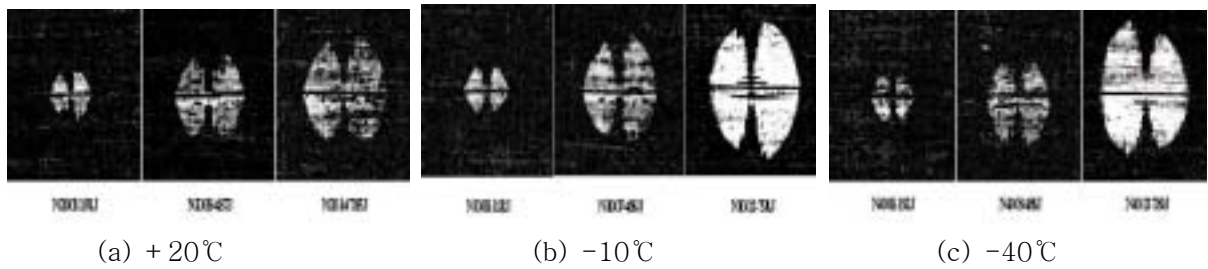


그림 11. 기본시험편 충격손상

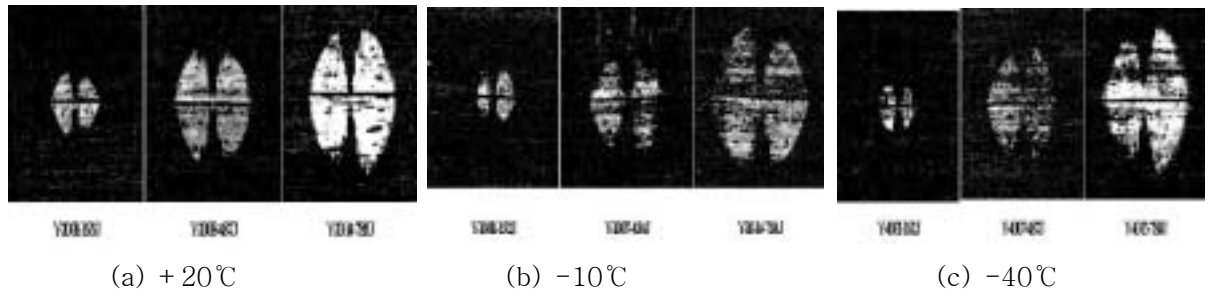
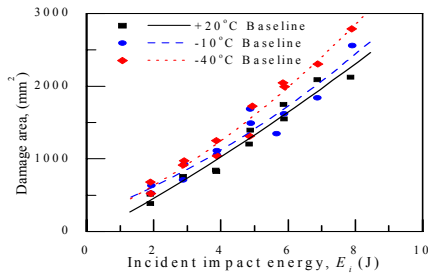
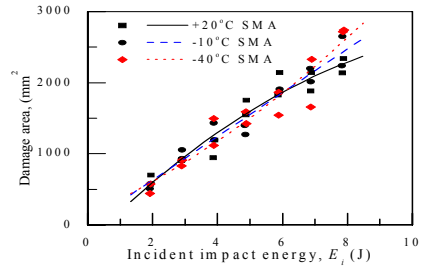


그림 12. SMA 복합재 시험편

기본 및 SMA 복합재 시험편의 충격손상 면적(그림 13 참조)을 보면 기본 시험편의 경우는 온도 저하에 따른 충격손상 면적의 증가가 확연하나 SMA 복합재 시험편의 경우 온도 저하에 따른 충격손상의 면적은 고 에너지 영역에서만 일부 증가가 관찰되며 기타 영역에서는 관찰되지 않았다. 이러한 경향은 온도 저하에 따라 glass/epoxy 복합재료의 취성 강화로 인한 손상 면적의 증가가 발생하지만 이러한 취성 강화의 상당부분은 SMA 와이어에 의하여 상쇄되기 때문이라고 판단된다. 온도별 충격손상면적(그림 14 참조)을 보면, 20°C의 경우 기본 시험편의 손상 면적이 SMA 복합재 시험편의 경우보다 작게 측정되었는데 이는 SMA 와이어가 앞에서 설명한 보강재의 역할보다는 이종 결합의 역할이 강하기 때문이라고 판단된다. 그러나 온도가 저하될수록 이러한 기본 및 SMA 시험편의 차이는 거의 없어지고 특히 -40°C의 경우는 미미한 수준이지만 SMA 복합재 시험편의 손상면적이 작게 나타났다. 이는 상온에서는 이종 결합의 역할을 하였던 SMA 와이어가 온도가 저하됨에 따라 보강재의 역할을 하고 이는 온도 저하에 따른 glass/epoxy 복합재료의 취성 강화 현상과 SMA 와이어의 탄성과의 상관관계에 기인한다고 판단된다.

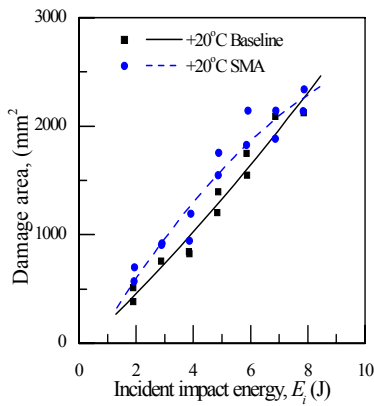


(a) 기본시험편

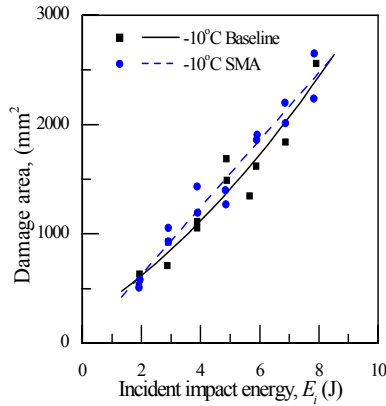


(b) SMA 복합재 시험편

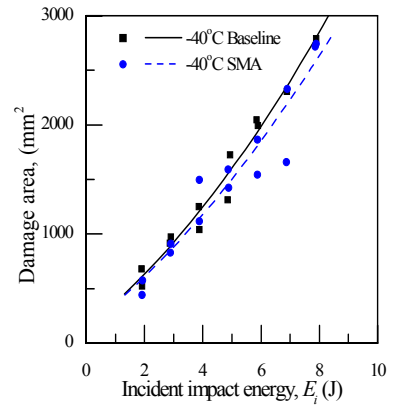
그림 13. 충격손상 면적



(a) + 20°C



(b) -10°C



(c) -40°C

그림 14. 온도에 따른 충격손상 면적

## 5. 결론

철도차량은 신속하면서도 정시성을 갖는 대량 교통수송 수단의 강점을 지니는 동시에 사고 발생 시 막대한 인적 물적 손실을 유발한다. 최근의 철도차량 기술개발 동향은 고속화, 고 기능화, 고 효율화 추세로, 차량재질로 알루미늄 압출재, 복합소재 등 경량화 재질의 사용이 점차 확대되고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 복합재료로 제작된 차량 운영을 대비하여 복합재료 구조물의 취약점을 보완하고 균열억제 등의 기능을 가질 수 있는 복합재료의 지능화 방안에 대해 일부 검토하였다.

본 연구에서는 제한된 크기의 시험편 형상 및 시험온도 조건에서 철도차량용 복합재료로 glass/epoxy 복합재료에 Ni-Ti SMA 와이어를 삽입할 경우 이의 충격 손상은 크게 저하되지 않음을 확인할 수 있었다. 광탄성 시험결과 복합재의 지적효과는 프린지의 분포를 통해 확인을 하였으며 이를 통해 복합재 내에 충전된 형상기억합금에 의해 복합재 내부에 손상 발생 시 외부 제어를 통한 손상 억제 가능성을 예측해 볼 수 있었다.

## 참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2005), “철도시스템 smart기술 연구” 보고서