

# 형상기억합금(NiTi)을 함유한 복합재료의 특성 분석

## A Study on the Characteristics of NiTi SMA Composites

김형진\*  
Kim, Hyeong Jin

---

### ABSTRACT

Mechanical characteristics of composite materials containing NiTi shape memory alloy(SMA) have been analyzed in this study by conducting tensile, photo-elasticity and impact tests for the specimens. From the test results, the SMA composite materials can be considered as one of possible ways in detecting and controlling damages in the materials.

---

### 1. 서론

지능형 구조물은 일반적으로 복합재 구조물에 감지기(sensor), 작동기(actuator), 제어기(controller)가 내재되어 구조물 스스로 감지, 작동, 제어하는 기능을 수행하므로 지능형 구조물과 관련된 국내의 연구들은 복합소재(Composite Materials) 기술개발과 함께 많이 진행되고 있다. 최근까지 관련 기초기술 연구는 일부 대학에서 진행되어 왔으나 실제 구조물에서의 실용화 적용기술은 상당히 취약한 실정이며 앞으로 기반 기술에 대한 연구 및 다양한 분야 적용을 위한 연구가 많이 필요하다.

현재까지의 주요 연구 주제는 지능형 복합재 구조 요소의 변형 측정, 파손검출기술에 관한 것들이며, 토목구조물(교량, 터널)의 상시 감시 시스템 개발 등도 연구되고 있다. 하지만 지능 재료의 철도차량 적용에 관한 연구는 상당히 미흡한 실정으로 향후 철도차량에 지능 재료를 적용함으로써 주요 구조요소의 변형이나 손상, 이상진동 등을 실시간으로 감시하여 주행 중 안정성을 유지하고 유지보수 비용을 절감할 수 있는 연구들이 앞으로 이루어 져야 할 부분이다.

실시간 건전성감시는 주기검사에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 실시간 감시는 긴급한 보수를 필요로 하는 우발적인 손상의 감시나 손상상태의 악화를 사전에 예방할 수 있다는 측면에서 효과적이며 주기적 감시 및 서비스 중단에 따른 비용을 감소시킬 수 있으므로 철도차량의 경량화 및 복합재료 사용시에는 이러한 실시간 감시의 필요성이 높아진다.

최근 철도차량의 경량화 추세에 따라 철도차량 구조물에 알루미늄 압출재 나 복합재료 등 경량화 재질을 채택하는 사례가 증가되고 있고 이러한 재질의 기계적 특성이나 유지보수에 대한 연구가 일부 추진되고 있으나 복합재료는 충격 하중에 상대적으로 취약하다. 따라서 복합재료 구조물의 이러한 약점을 보완하고 균열 검지나 억제 등의 기능 추가 가능성을 검토하기 위해 본 연구에서는 복합재료 내부에 Ni-Ti 형상기억합금을 삽입한 복합재료의 특성을 분석하였다.

---

\* 정희원, 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 책임연구원  
E-mail : [hjkim@krri.re.kr](mailto:hjkim@krri.re.kr)  
TEL : (031)460-5241 FAX : (031)460-5289

## 2. 형상기억합금의 특성 분석

최근, 철도차량 경량화 추세에 따라 차체를 탄소섬유강화 복합재(CFRP)와 알루미늄 언더 프레임을 이용하여 제작하는 연구가 현재 활발히 진행 중인데, 철도차량의 안전 운행 및 유지보수 비용의 절감을 위해 실시간 손상 감지 및 억제에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 섬유강화 복합재의 손상 감지 및 억제기능에 대한 기초연구로서 변형률 측정 및 액추에이터로 작동할 수 있는 지능형 재료인 형상기억합금의 상 변태 온도 및 온도별 변형 거동을 검토하였다.

NiTi(니켈티타늄) 합금은 조성비에 따라 상변화 온도 및 인장 특성이 변하는데, 형상기억합금 특성 분석용 실험에 사용된 합금은 상온에서 형상기억효과를 나타내는 50 대 50 (atomic %) 합금(직경 0.6mm, 1.0mm 와이어와 두께 1mm 판재)에 대하여 재료특성을 실험을 통해 분석하였다. 상 변태 온도 측정은 가열 및 냉각속도 10°C/min 조건에서 150°C부터 -120°C의 온도범위에 걸쳐 수행하였고 변태온도는 DSC(Differential Scanning Calorimeter) 피크의 접선과 기준선의 교점온도를 이용, Ms (마르텐사이트변태 개시온도): 35°C, Mf (마르텐사이트변태 종료온도): 21°C, As (역변태 개시온도): 50°C, Af (역변태 종료온도): 68°C 로 각각 측정하였다.

Ni-Ti 합금의 형상기억효과 및 초탄성 거동 분석을 위해 인장시험(시편 길이: 50mm, 초점거리: 30mm)을 수행 하였는데 온도조절을 위해 실리콘 용액을 이용, 16°C부터 77°C의 온도범위에 걸쳐 수행하였다. 그림 2의 시편 온도별 변형을 곡선에서 Ms 이하의 온도인 16°C, 29°C, 35°C에서는 3% 변형 후 하중을 제거하면 0.5% 내외의 탄성변형이 회복되지만 2.5% 이상의 변형이 잔류하였고 잔류변형은 Af 이상의 온도인 100°C로 가열하면 완전히 회복되어 형상기억효과를 나타냄을 알 수 있었다. 또한, Ms 이상, Af 이하의 온도인 50°C에서는 3%의 변형 후 하중을 제거하면 회복되는 변형량이 증가하여, 약 1.8%의 변형이 회복(잔류 변형 약 1.2%)되는데 잔류 변형은 100°C 까지 가열하면 모두 회복되어 부분적인 초탄성과 형상기억효과가 관찰되었다. Af 이상의 온도인 68°C, 77°C에서는 3%의 변형 후 하중을 제거하면 변형의 상당부분이 초탄성 효과에 의해 회복되고 잔류 변형은 100°C로 가열하면 회복되는 부분적인 형상기억효과가 발생되었다.

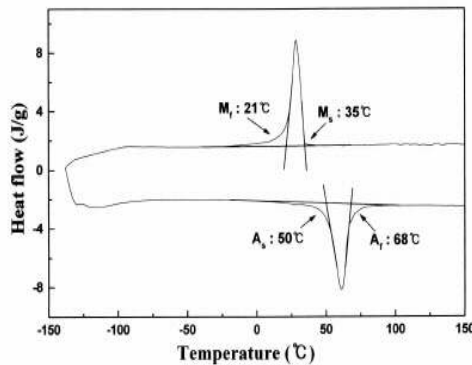


그림 1. DSC 시험 결과

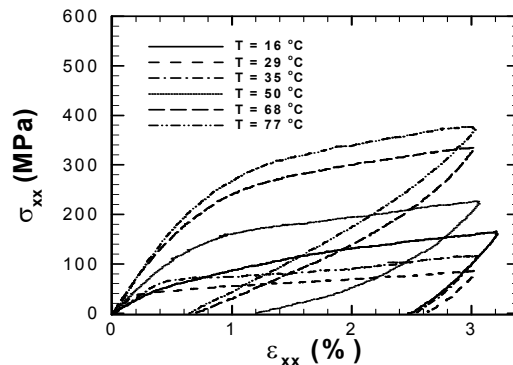


그림 2. NiTi 합금의 온도별 변형 거동

## 3. Ni-Ti SMA 복합재 균열제어 가시화 시험

균열제어 가시화 시험을 위한 SMA 복합재 시편을 제작하기 위하여 복합재 프리프레그를 절단한 후 각각의 프리프레그를 방향과 순서에 맞추어 적층하고 가운데 층에는 NiTi SMA wire를 삽입하였다. 그림 3은 SMA 복합재 시편 제작을 위해 고안된 지그를 나타내며 그림 4는 프리프레그 적층 후의 SMA 복합재 시편 단면 형상을 나타낸다. 균열제어 가시화 시험을 위해 사용된 NiTi SMA wire의 직경은 0.4mm 이다(기계적 물성치: 표 1 참조). 복합재료 적층판은 오토클레이브를 사용, 성형하였으며 성형 과정에서 적층판에 열과 압력을 가하는데 가해지는 압력은 층(ply)들 간의 결합력 강화 및 기공 감소 역할을 한다. 성형완료 후 크랙을 모사하기 위하여 시험편 중앙에 다이아몬드 테이블 절단기를 이용하여 U형 노치를 생성하였다.

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 3. SMA 복합재 시편 제작 JIG

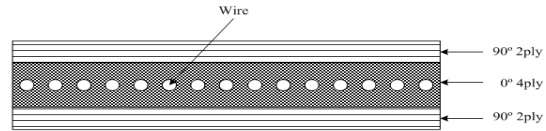


그림 4. SMA 복합재 시편 단면

SMA 복합재의 복원력 효과를 가시적으로 측정하기 위하여 시편표면에 광탄성 피막을 입히고 하중과 온도를 가함에 따라 발생하는 광탄성 프린지(fringe)의 변화를 관찰하였다. 시험 장치는 그림 5와 같은 소형 인장시험기를 이용하였으며, SMA 복합재 시험편의 크기는 폭 25mm, 두께가 1mm이며, 균열의 길이는 3mm이다. 그림 6은 형상기억합금의 복원력을 정성적으로 측정하기 위한 SMA 복합재 예비실험 결과로 시편에 하중을 걸어 변형이 발생한 상태에서 온도를 가하면 형상기억합금의 복원력에 의해 시편의 변형이 회복되었다가 온도를 제거하면 다시 변형이 일어나는 과정을 측정한 결과를 나타낸 것이다.



그림 5. 인장시험기

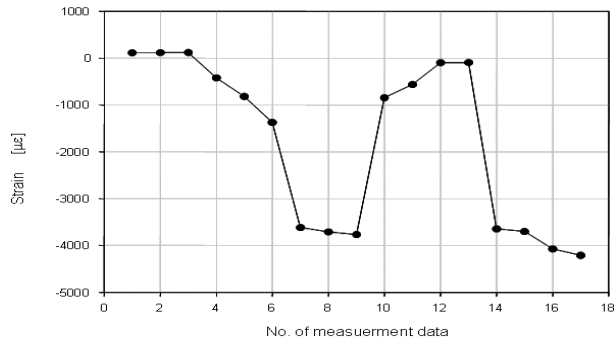
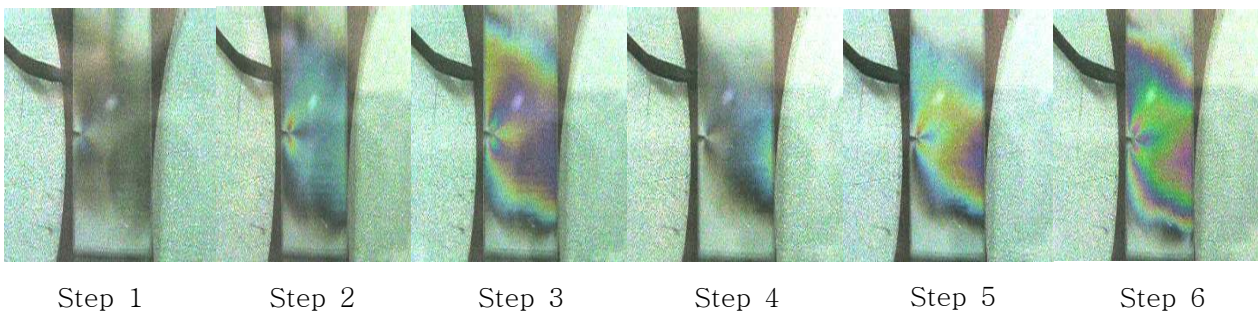


그림 6. 온도변화에 따른 변형률 거동

SMA 복합재 균열 제어 가시화 시험은 SMA 복합재 시편에 하중을 가하고, 적정 프린지가 생성되면 가열기(plate heater)를 이용하여 시편의 온도를 60℃로 올리고 형상기억합금 복원력 효과를 프린지의 분포를 통해 관찰하였다(그림 7 참조). 하중을 가한 상태에서는 응력이 집중되는 시편의 균열선단 근방에서 프린지가 조밀하게 나타났으나 시편에 온도를 가열하면 프린지가 감소하여, 균열이 억제되는 복원력이 형상기억합금의 효과에 의해 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며 이를 통해 복합재에 손상이 발생할 경우, 외부제어를 통한 균열의 억제 가능성을 확인하였다.



Step 1

Step 2

Step 3

Step 4

Step 5

Step 6

- Step 1: 시편 표면에 프린지 생성개시(상온, 하중부과 개시).
- Step 2: 프린지 성장(상온, 부과하중 증가).
- Step 3: 상온, 부과하중 유지.
- Step 4: SMA 복원력으로 프린지 감소(온도높임, 부과하중 유지)
- Step 5: SMA 복원력 효과가 사라져 시편표면의 프린지 생성 증가(온도낮춤, 부과하중 유지).
- Step 6: Step 3과 유사한 형태의 프린지가 생성(상온, 부과하중 유지).

그림 7. SMA 복합재 시편의 균열선단 프린지 패턴

#### 4. SMA 복합재 충격 저항성 검토

이중소재 결합체인 SMA 복합재의 충격저항성을 검토하기 위해 순수 복합재 시편과의 충격특성을 비교 분석하였다. 충격시험에 사용된 복합재료의 소재는 내부 손상을 육안으로 확인 할 수 있는 s-glass 계열의 유리 섬유와 #2500계열의 epoxy resin으로,  $[0_6/90_6/SMA/90_6/0_6]$ 의 형태로 적층하였고 SMA 복합재 와 순수 복합재용 시험편을 각각 제작하였다. 시험편의 크기는 가로, 세로 각각 120, 90mm이며 SMA 복합재 시험편에 삽입된 SMA 와이어의 직경은 0.4mm이다. 시험편의 온도조건은 +20℃, -10℃, -40℃이고 표 2는 glass/epoxy 복합재의 기계적 물성치를 나타내고 있다.

표 2. glass/epoxy 복합재료 기계적 물성치 (ASTM 규정에 의거한 시험시험 결과)

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



그림 8. 충격시험기

충격시험은 그림 8의 낙하식 충격시험기를 이용하였는데 낙하 체의 총질량은 6.45kg, 사용된 충격체 선단은 반원형(곡률반경 6.35mm) 이며 충격속도는 충격체와 시험편의 접촉 직전에 광센서를 이용하여 측정하였다.

복합재료 구조물에 일정수준 이상의 충격에너지가 가해지면 구조물에 손상이 발생하는데 이는 구조물의 강성과 밀접한 관계가 있으며 강성이 크면 동일 에너지 수준에서도 강성이 작은 경우보다 상대적으로 높은 충격하중이 작용한다. 구조물에 충격손상이 발생하지 않을 때는 복합재료 구조물의 강성이 변화하지 않으므로 충격하중선도가 매끈한 사인과 형태로 나타나는 것이 일반적이지만 충격손상이 발생한 경우는 충격하중 상승 단계에서 국부적인 하중의 저하 현상이 발생하는 경우가 많다. 이는 복합재 구조물의 국부적 불 연속 부로 생각되는 충격 손상부(섬유파단, 모재균열, 층간분리 등)에서의 순간적 강성저하 및 충격하중 감소로 이어지나 충격체가 이러한 충격손상 발생부위를 지나 계속해서 충격을 가하면 강성이 저하되지 않은 충격손상 발생부위 하단부에 이르게 되어 하중은 다시 증가하게 되고 최대 하중에 도달한 이후 충격시간의 경과에 따라 점차 감소하게 된다. 그림 9는 -40℃ 온도조건하에서 입사충격에너지 별, SMA 복합재에 발생하는 충격하중 선도 측정치를 나타낸 것이다.

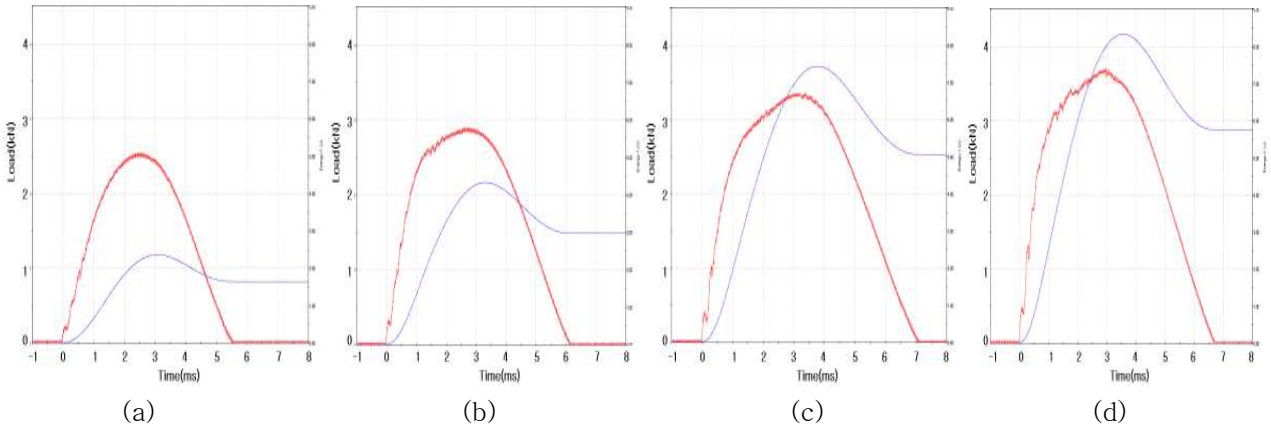


그림 9. 충격하중선도[SMA 복합재, -40°C, 입사충격에너지: (a)1.93J, (b)3.88J, (c)6.9J, (d)7.85J]

그림 10에 나타난 충격손상 발생하중( $P_{inc}$ ) 분석 결과를 보면, 순수 복합재의 경우 상온조건에서 충격손상 발생 하중은 대체로 입사충격에너지의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나 고 입사충격에너지 영역에서는 온도가 저하 될수록 이러한 경향이 두드러지게 약화되었다. SMA 복합재의 경우는 충격손상 발생하중에 대한 온도의 영향이 순수 복합재에 비해 상대적으로 적음을 알 수 있었는데 이는 glass fiber/epoxy 복합재료의 저온 취화현상을 SMA 와이어가 상당부분 상쇄하기 때문으로 판단된다.

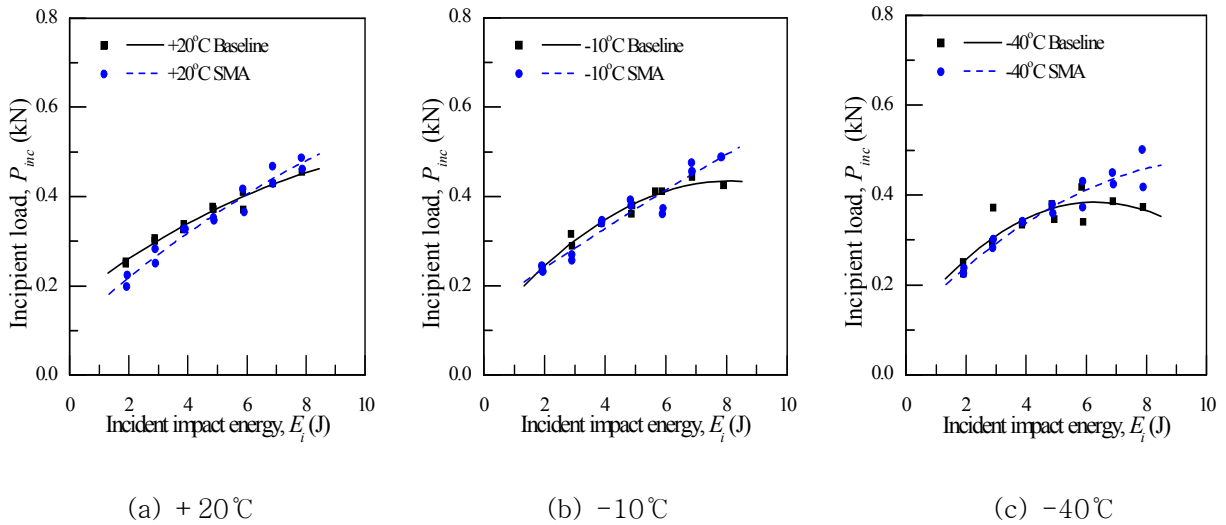


그림 10. 온도별 충격손상 발생하중

그림 11의 최대 충격하중( $P_{max}$ , 충격에너지 작용 시 복합재료 구조물이 받는 충격하중의 최대값) 분석결과를 보면 순수 복합재의 경우, 최대충격하중은 입사충격에너지의 증가에 따라 점차 증가하다가 고 에너지 영역에서 증가세가 둔화되고 저온(-40°C) 조건에서 감소함을 알 수 있었다. 상온 시험의 경우, 순수 복합재 시험편의 최대 충격하중은 중 입사충격에너지 수준까지는 SMA 복합재 시험편에 비하여 높으나 고 충격에너지 영역에서는 역전현상을 보이고 있다. 고 입사충격에너지 영역에서 +20°C, -10°C 온도조건과 비교할 때, 저온(-40°C) 조건에서 SMA 복합재 시험편과 순수 복합재 시험편간 최대 충격하중 차이가 더 크게 나타나 SMA 복합재가 상대적으로 순수 복합재보다 온도의 영향을 덜 받는 것으로 분석되었다. 이는 고 충격 에너지 영역 및 저온조건에서 SMA 와이어의 온도 의존성이 저온 취화 현상을 보이는 glass/epoxy 복합재료보다 낮고 SMA 와이어가 일종의 보강재 역할을 하기 때문으로 사료 된다.

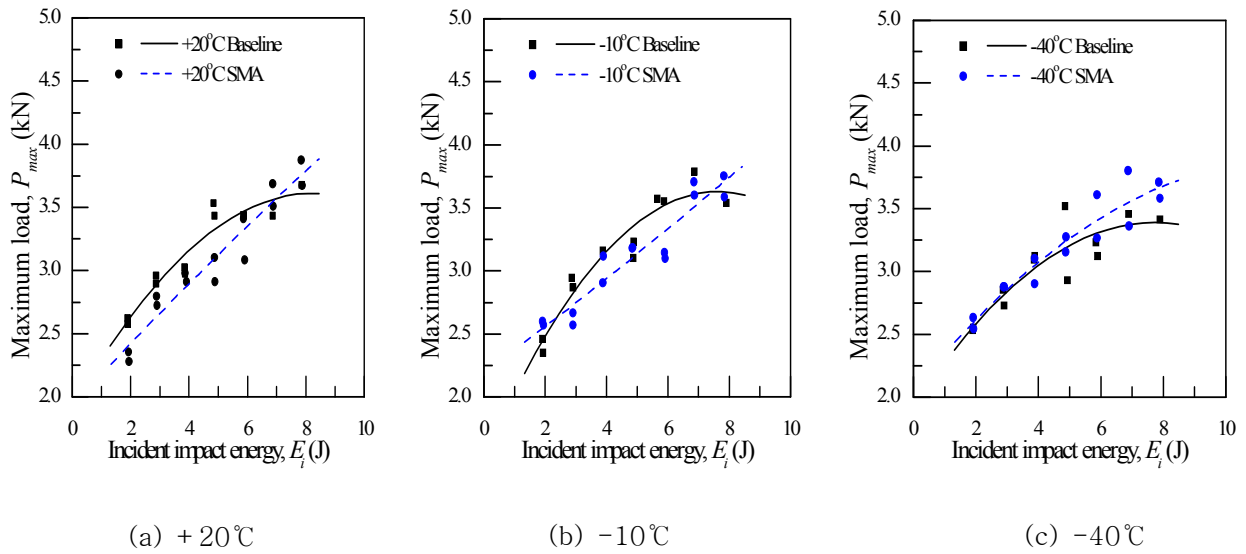


그림 11. 온도별 최대 충격하중

## 5. 결론

경량화 차량 재질에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있는 추세에 따라 향후 경량화 차량, 특히 복합재료로 제작된 차량 운영을 염두에 두고 충격하중에 상대적으로 취약한 복합재료 구조물의 취약점을 보완하고 균열 검지나 억제 등의 기능 추가 가능성을 검토하기 위해 복합재료 내부에 Ni-Ti 형상기억합금을 삽입한 SMA 복합재료의 특성을 분석하였다. 본 연구에서 검토한 시험편 형상 및 시험온도 조건에서는 SMA 복합재료의 충격 손상은 크게 저하되지 않았고 오히려 저온(-40°C), 고 입사충격에너지 하에서는 SMA 복합재료의 충격저항성이 순수 복합재료보다 다소 우수한 것으로 나타났다. 또한, SMA 복합재료 내 형상기억합금의 변형 복원효과를 이용해 SMA 복합재료에 손상 발생 시 외부 제어를 통한 손상 억제가 가능할 것으로 예측되었다. 그러나 본 연구는 실험실 차원에서 제한적으로 수행한 기초연구이고 이를 실제 차량 구조물에 통합 적용하기에는 현 기술수준이 매우 취약한 실정이므로 앞으로 관련 기반 기술 연구 및 적용성을 높이기 위한 연구가 많이 필요하다.

## 참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2005), “철도시스템 smart기술 연구” 보고서
2. Abrate, S.(1991), "Impact on Laminated Composite Materials", Applied Mechanics Rev. Vol. 44, No 4, pp. 155-190