

형상기억합금을 이용한 복합재료 구조물의 저속충격특성 향상

김은호* · 임미선* · 이 인* · 김형원**

Improvement of Impact Resistance of Composite Structures using Shape Memory Alloys

Eun-Ho Kim* · Mi-Sun Rim* · In Lee* · HyungWon Kim**

ABSTRACT

Impact resistance of shape memory alloy hybrid composite(SMAHC) plates were experimentally investigated. Shape memory alloy(SMA) have large failure strain and failure stress and can absorb large strain energies through phase transformation. SMA wires were embedded in composite plates to improve their weak impact resistance. Tensile tests of SMA wires were performed at various temperature to investigate their thermo-mechanical properties. Low-Velocity impact tests of several types of composite plates with SMA/Al/Fe were performed. Embedding SMA wires was most effective to improve impact resistance of composite plates. The effects of SMA position on impact resistance were also investigated.

초 록

복합재료 구조물의 충격 특성을 향상시키기 위해 형상기억합금을 삽입한 복합재료 평판의 충격실험을 수행하였다. 형상기억합금은 일반 금속 재료에 비해 큰 극한 변형율과 강도를 가질 뿐 아니라 변형시에 상변화를 통해서 많은 변형에너지를 흡수할 수 있는 특징을 가진다. 이러한 형상기억합금을 복합재료에 삽입하여 충격에 약한 복합재료의 충격 저항성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 먼저 여러 온도에서 형상기억합금의 인장실험을 수행하여 형상기억합금의 열-기계학적 특성을 파악하였다. 이후 형상기억합금, 철, 알루미늄 선을 삽입한 복합재료 평판의 충격 실험을 통하여 보강재에 따른 충격 특성을 파악하였다. 또한 형상기억합금의 두께 방향으로의 삽입위치에 따른 충격 특성을 파악하였다.

Key Words: Shape Memory Alloy(형상기억합금), Composite material(복합재료), Low-Velocity Impact(저속 충격), Impact Resistance(충격 저항성)

* KAIST 항공우주공학과
연락처, E-mail : inlee@kaist.ac.kr

** 국방과학 연구소 1본부 6부

1. 서 론

섬유 강화 복합재료는 일반 재료에 비해 비강

도와 비강성이 우수할 뿐 아니라 섬유(fiber)와 기지(matrix)의 종류, 적층 각, 적층순서 등을 조절하여 구조물에 적합한 강도와 강성을 갖는 재료를 설계 제작 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 최근 경량화가 요구되는 구조물에 많이 응용되고 있으며, 점차 응용 범위를 넓혀 가고 있는 실정이다. 하지만 복합재료는 특유의 취성으로 인하여 외부의 충격에 약한 특성이 있다. 복합재료의 충격으로 인한 손상을 줄이기 위하여 주로 인성(toughness)이 큰 재료를 복합재료에 혼합하는 방법이 사용되어 왔다. 특히, 기지 파손(matrix crack)과 층간분리(delamination)를 줄이기 위해서는 인성이 큰 기지(matrix)재료를 혼합하거나 섬유와 기지 사이에 열가소성 층을 형성시키는 방법이 효과적으로 사용되어 왔으며, 투과에 의한 저항성을 향상시키기 위해서는 인성이 큰 Kevlar 섬유를 혼합하는 방법이 주로 사용되어 왔다[1]. 복합재료의 충격 저항성을 향상시키기 한 보강재로 에너지 흡수 능력이 큰 형상기억합금은 많은 장점을 가지고 있다. 형상기억합금은 큰 극한 변형율과 극한 응력을 가질 뿐만 아니라 초탄성 거동을 보이며 10%에 가까운 큰 변형 후에도 큰 회복 응력을 발생시키며 초기 상태로 복원되는 특성을 가지고 있다. 형상기억합금을 삽입한 복합재료의 충격 특성에 관한 연구는 1990년대에 시작 되었으며, 실험적, 해석적 연구가 진행되어 왔다[2,3,4,5]. 본 연구에서는 형상기억합금외에 철(Fe), 알루미늄(Al)을 보강재료 사용한 복합재료의 충격 실험을 통하여 보강재료에 따른 충격 특성을 비교 하였으며, 형상기억합금의 두께 방향 삽입위치에 따른 충격 특성을 비교하였다.

2. 형상기억합금의 특성 실험

2.1 실험 조건 및 방법

지금까지 발견된 형상기억합금은 300여 종이 넘는데, 니켈(Ni)과 타이타늄(Ti)을 혼합한 니티놀(NiTi) 계열의 형상기억합금이 대표적으로 많이 사용된다. 본 연구에서는 형상기억합금의 인

장 실험을 위해 NDC(Nitinol Devices & Components)사의 SM495와 SE508을 사용하였다. 실험 장비는 Universal Testing Machine INSTRON 5583을 사용하였으며, SFL Thermal Chamber를 이용하여 -30°C ~ 90°C에서 실험을 수행하였다. 형상기억합금 선(wire)의 인장실험은 ASTM F2516-07 규격에 따라 수행하였다.

2.2 형상기억합금 선(wire)의 열-기계적 특성

SM495의 대표적인 변형율-응력 그래프는 Fig. 1 과 같다. SM495는 상온에서 형상기억효과를 나타내는 재료로 75°C 이상에서 초탄성 거동을 보였다.

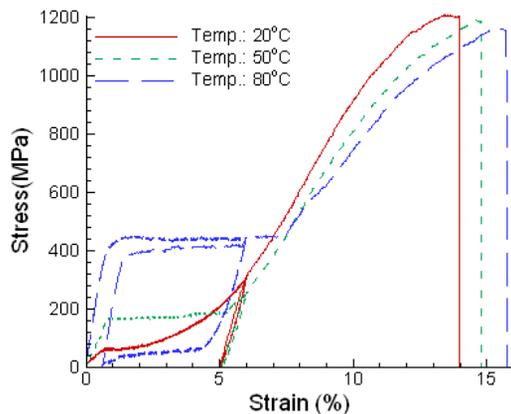


Fig. 1. Stress-Strain Curves of SM495 wire

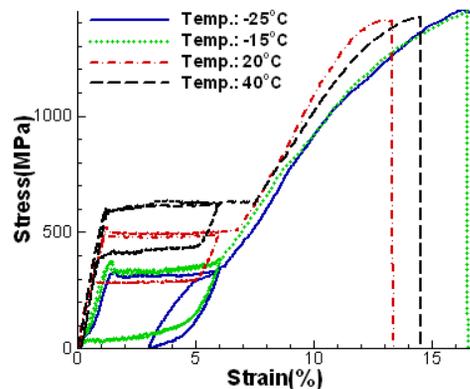


Fig. 2. Stress-Strain Curves of SE508 wire

SE508은 상온에서 초탄성 거동을 보였으며, 대표적인 변형률-응력 그래프는 Fig. 2에 나타내었다. 상온에서 두 재료의 물성은 Table 1과 같으며, SE508이 SM495에 비해 더 큰 강성과 극한 응력을 가진다. 또한 SE508은 상온에서 초탄성 거동을 보이며 SM495에 비해 변형 시에 더 많은 에너지를 흡수할 수 있을 뿐 아니라 더 큰 응력으로 변형을 지지한다. 따라서 복합재료의 충격 특성 향상을 위한 보강 재료로 SE508 선(wire)을 사용하였다.

Table 1. Material properties at 20°C

상온(20°C)	SM495	SE508
phase	martensite	Austenite
Young's modulus	13.75GPa	40.08GPa
Failure Stress	1.18GPa	1.43GPa
Failure Strain	14.9%	14.4%

3. 저속 충격 시험

3.1 시편 제작 및 시험 방법

충격 실험을 위한 복합재료 평판 시편은 한국 카본의 CU-125NS graphite/epoxy prepreg를 적층하여 제작하였으며, 보강재로 사용될 선은 Fig. 3과 같이 시편의 중앙에 2cm 폭으로 삽입하였다. 충격 실험은 낙하형 충격 시험 장비인 INSTRON DYNATUP 8350을 사용하였으며, 지름 15.35mm, 2.38kg의 반구형 steel impactor를 사용하였다.

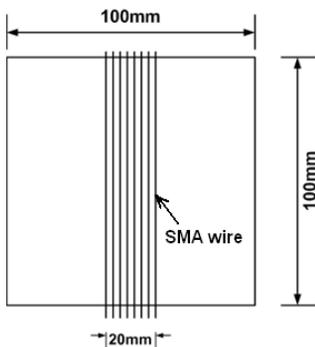
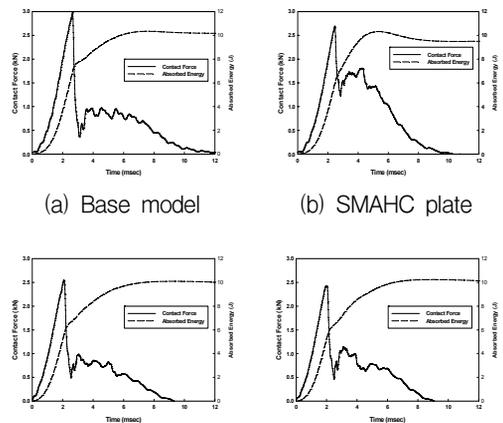


Fig. 3. SMAHC plate for impact test

형상기억합금 선의 지름은 0.2mm로 prepreg 두께 0.125mm 보다 두꺼우며, 이를 삽입할 때 선의 길이 방향이 위아래 prepreg의 섬유 방향과 일치 하도록 하였다. 그렇지 않을 경우 형상기억합금 선 주변에 기지가 밀집된(regin rich) 부분이 나타나고 이는 충격 시에 복합재료의 층간분리(delamination)를 촉진 시키는 원인이 될 수 있다.

3.2 보강재 종류에 따른 충격 특성

형상기억합금(SMA), 철(Fe),알루미늄(Al), 선은 각각 [45/-45/90/0]_s로 적층된 복합재료 평판의 중간층에 평판 전체의 7.6%의 부피비로 삽입되었으며, 충격에너지 10J에서 실험을 수행하였다. 각 경우에 대한 충격력과 흡수된 에너지는 Fig.4와 같다. 복합재료는 취성이 커 손상이 나타나는 임계에너지 이상에서 손상이 시작되면, 손상이 급격하게 진전되며 Fig. 4에서와 같이 지지하는 충격력이 급격히 떨어지게 된다. 복합재료에 알루미늄과 철 선(wire)을 삽입한 경우 복합재료의 손상이후에 보강재료가 큰 힘을 지지하지 못하였으며, 보강재를 삽입하지 않은 경우와 비교하여 충격 저항성을 향상시키지 못하였다. 반면, 형상기억합금 선을 삽입한 경우 복합재료의 손상 이후 형상기억합금선이 큰 충격력을 지지하며 투과에 대한 저항성을 향상시켰다.

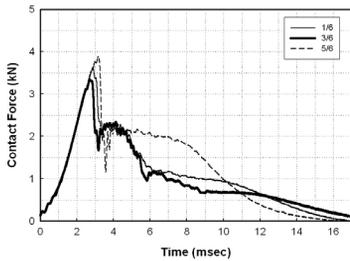


(a) Base model (b) SMAHC plate (c) Embedding Fe wires (d) Embedding Al wires

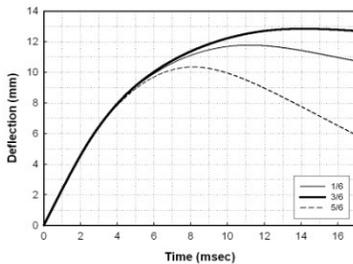
Fig. 4. Contact Force and Absorbed Energy

3.3 형상기억합금의 삽입 위치에 따른 충격 특성

형상기억합금의 두께 방향으로의 삽입위치에 대한 영향을 파악하기 위하여 형상기억합금을 $[90^\circ/0^\circ_2/90^\circ_2/0^\circ]$ 적층된 복합재료 평판에 각각 0°_2 사이에 삽입하여 18J의 충격에너지에서 충격 실험을 수행하였다. 충격력과 충격지점의 변위는 Fig. 5와 같이 나타났다.



(a) Contact Force



(b) Central Deflection

Fig. 5. Contact Force and Central Deflection

형상기억합금이 위쪽(1/6) 즉 충격 면에 가까운 위치에 삽입된 경우와 중앙(3/6)에 삽입된 경우는 큰 차이를 보이지 않았으며, 아래쪽(5/6)에 삽입된 경우 다른 두 경우에 비해서 큰 힘을 지지하며, 충격이후 더 큰 변형을 복원시켰다. 이는 저속 충격 시에 나타나는 평판의 굽힘 현상으로 인하여 아래쪽에 더 큰 변형이 나타나므로 아래쪽에 형상기억합금을 삽입하였을 경우 형상기억합금이 더 큰 응력을 지지할 수 있었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

실온에서 초탄성 거동을 보이는 형상기억합금

선을 삽입하여 복합재료의 충격특성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 철, 알루미늄 보강재를 사용한 경우와 비교한 결과 형상기억합금을 삽입하였을 경우 투과에 대한 저항성을 향상시킬 수 있었다. 또한 형상기억합금을 삽입할 경우 충격면의 반대쪽에 삽입하는 것이 더 효율적임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 지원으로 수행중이며, 연구를 지원해주신 1본부 6부의 문순일 부장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J.S.N. Pain and C.A. Rogers, "Shape Memory Alloys for Damage Resistant Composite Structures," Proceeding of SPIE, Vol. 2427, 1994.
2. K.A. Tsoi, R. Stalmans, J. Schrooten, M. Wevers, Y.W. Mai, "Impact Damage Behavior of Shape Memory Alloy Composites," Material Sci Eng., Vol. 324, 2003.
3. K.-W. Kang, J.-K. Kim, "Effect of Shape Memory Alloy on Impact Damage Behavior and Residual Properties of Glass/Epoxy Laminates under Low Temperature," Composite Structures, Vol.88, No. 3, 2009, pp.455-460.
4. E.-H. Kim, J.-H. Roh, I. Lee, "Dynamic Behaviors of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Structures Subjected to the Low Velocity Impact," Proceeding of ACCM-6, 2008, pp.271-274.
5. J.-H. Roh, J.-H. Kim, "Hybrid Smart Composite Plate under Low Velocity Impact," Composite Structures, Vol. 56, No. 2, 2002, pp.175-182.