



## Characteristics of Hybrid Protective Materials with CNT Sheet According to Binder Type

Jihyun Kwon<sup>\*,\*\*</sup> and Euisang Yoo<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>Material & Component Convergence R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology,  
143, Hanggaui-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15588, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Organic and Nano Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

(Received December 7, 2022, Revised December 19, 2022, Accepted December 21, 2022)

**Abstract:** Recently, the demand has increased for protective clothing materials capable of shielding the wearer from bullets, fragment bullets, knives, and swords. It is therefore necessary to develop light and soft protective clothing materials with excellent wearability and mobility. To this end, research is being conducted on hybrid design methods for various highly functional materials, such as carbon nanotube (CNT) sheets, which are well known for their low weight and excellent strength. In this study, a hybrid protective material using CNT sheets was developed and its performance was evaluated. The material design incorporated a bonding method that used a binder for interlayer combination between the CNT sheets. Four types of binders were selected according to their characteristics and impregnated within CNT sheets, followed by further combination with aramid fabric to produce the hybrid protective material. After applying the binder, the tensile strength increased significantly, especially with the phenoxy binder, which has rigid characteristics. However, as the molecular weight of the phenoxy binder increased, the adhesive force and strength decreased. On the other hand, when a 25% light-weight-design and high-molecular-weight phenoxy binder were applied, the backface signature (BFS) decreased by 6.2 mm. When the CNT sheet was placed in the middle of the aramid fabric, the BFS was the lowest. In a stab resistance test, the penetration depth was the largest when the CNT sheet was in the middle layer. As the binder was applied, the stab resistance improvement against the P1 blade was most effective.

**Keywords:** CNT sheet, binder, hybrid protective materials, high-velocity impact test, stab resistance test

### Introduction

최근 방호복은 전쟁 과정에서 총알, 파편, 폭발물 등에 노출되는 군인들의 생명을 보호하는 목적뿐만 아니라 일상 생활을 보호하는 경찰, 경비대 또는 경호원 등에서도 개인보호 장비 및 의류에 대한 필요성이 증가하고 있다. 방호복은 총알, 파편을 방호하는 방탄복과 칼, 창 등을 방호하는 방검복이 대표적이다.<sup>1</sup> 방탄 및 방검용 소재로 사용되고 있는 대표적인 섬유는 aramid fiber, UHMWPE (Ultra high-molecular weight polyethylene, 초고분자량 폴리에틸렌) fiber, glass fiber 등이 있으며 이들 소재는 고강력, 고탄성, 고내열, 저비중 등의 특성을 지닌다. aramid 소재는 강도 및 유연성이 우수하고 착용감이 편안하지만 비중이 상대적으로 높은 반면, UHMWPE 소재는 저비중으로 방호복의 경량화가 가능하지만 뻣뻣하여 착용감이 저하되는 문제점을 가지고 있다.<sup>2,3</sup> 방탄복은 고강도의 섬유로 촘촘하게 짜여진 직물 구조가 날아오는 총알의 모양을 변형시키고 그물과 같은 형상으로 총알을 포획함으로써 총

알로부터의 힘, 즉 운동에너지를 넓은 영역으로 분산 또는 흡수하는 원리로 설명할 수 있다.<sup>4-7</sup> 방검복은 방탄복 대비 상대적으로 저속/저에너지의 충격이 가해지게 되며 직물의 국부적 파괴 및 변형에 의한 관통과 절단의 원리로 설명할 수 있다.<sup>8</sup> 이러한 방탄/방검복의 방호성능을 높이기 위해서는 aramid, UHMWPE 등과 같은 고기능성 소재를 30장 내외로 적층해야 한다. 하지만 수십 장의 직물이 적층된 형태는 방호복의 중량을 증대시킬 뿐만 아니라 부피가 크고 뻣뻣하여 기동성이 떨어지게 된다. 따라서 일상생활에서도 착용가능하도록 가볍고, 얇고 유연한 소재의 개발이 필수적으로 요구되고 있으며 방탄/방검의 기능을 모두 가지는 방호복의 개발을 위해 최근에는 다양한 고기능성 소재의 하이브리드 설계 방법에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

방호소재의 고강도 및 경량화를 위해 세라믹, 실리카, 탄소 소재 등을 적용하는 연구가 진행되고 있으며 특히 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNTs)는 밀도가 낮고, 길이/직경비(aspect ratio)가 크며 뛰어난 기계적 강도와 전기전도도, 열전도도, 열안정성을 가지고 있어 이상적인 복합재료의 충전재로 급부상하고 있다.<sup>9-13</sup> 특히 기계적 성질이 매우 우수하기 때

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: [esyoo@kitech.re.kr](mailto:esyoo@kitech.re.kr)

문에 CNT를 섬유화하여 적용하게 되면 aramid, UHMWPE 등과 같은 기존의 고강도 섬유를 뛰어넘는 소재의 탄생이 가능할 것으로 기대되고 있다.<sup>14-17</sup> 하지만 CNT는 불활성 C-H 결합에 의해 소수성의 표면특성을 가지고 있으며 반데르발스 힘에 의해 응집이 발생하여 수지 내 분산이 어렵고 계면결합력이 낮아 복합소재의 제조에 한계가 있다. 따라서 탁월한 특성의 발현이 가능한 CNT 복합소재 제조를 위해서는 고분자 매트릭스 내에서 CNT의 균일한 분산 및 우수한 계면특성의 확보가 필요하다.<sup>18-23</sup>

본 연구에서는 경량화 및 방탄/방검 성능향상을 위해 CNT sheet를 적용한 하이브리드 복합방호소재를 개발하고자 하였다. CNT sheet 또는 CNT sheet와 aramid 소재간의 층간 결합력 향상을 위해 다양한 종류의 바인더를 적용하여 복합방호소재를 제조하였고 바인더 특성에 따른 CNT sheet 복합방호소재의 물성에 미치는 영향을 인장강도, 고속충격흡수성능 평가, 방검성능 평가 등을 통해 고찰하였다.

## Experimental

### 1. 재료

본 연구에서는 복합방호소재의 제조를 위해 중량 300 g/m<sup>2</sup>, 두께 0.30 mm의 Kevlar® XP™ 소재(듀폰 社)를 사용하였으며 (주)제이오에서 직접 방사법(Direct spinning)으로 합성하여 제공한 CNT sheet를 사용하였다. 제공된 CNT sheet의 중량은 21±1 g/m<sup>2</sup>이다.

바인더를 적용한 복합방호소재에서 계면은 바인더에서 각각 방호소재로의 충격전달을 수행하는 중요한 부분으로 바인

더의 특성은 복합방호소재의 설계시 고려되어야 하는 중요한 요소이다. 따라서 각 소재간의 하이브리드 설계를 위해 특성에 따라 4종의 바인더를 선정하였다. 고분자량의 수지인 Phenoxy 수지는 접착강도 및 내충격성 향상을 위해 선정하였으며 Polyvinyl butyral은 수지 내 결합력, 표면 부착력, 강인성의 향상에 적합한 수지로 선정하였다. 또한 Acrylate는 접착력 및 연성(ductility)을 고려하여 적용하였다. 실험에 사용된 바인더는 seechem의 phenoxy, polyvinyl butyral과 Osaka Organic Chemical의 acrylate이며 바인더 종류는 Table 1에 나타내었다. 바인더의 분산 및 희석을 위해 용매는 THF(tetrahydrofuran)를 사용하였다.

### 2. CNT sheet 복합방호소재의 제조

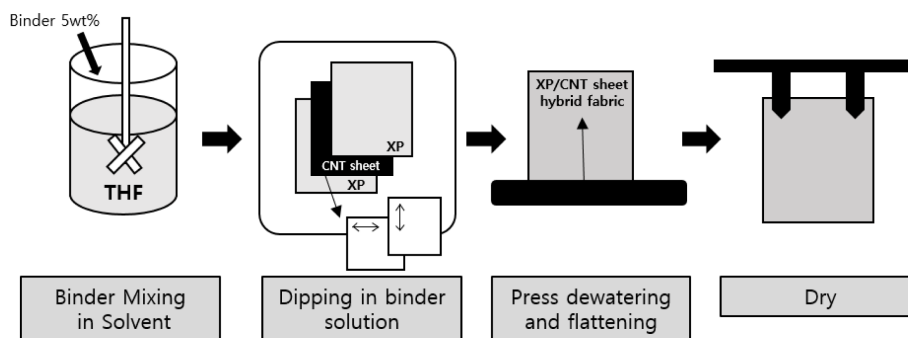
본 연구에서는 CNT sheet와 Kevlar® XP™ 소재간의 하이브리드 방법으로 각 소재간의 접착력을 향상시키기 위해 바인더를 적용하고자 하였다. Table 2와 같이 THF 용매에 5 wt% 바인더를 분산 및 희석하여 바인더 용액을 제조한 이후 Kevlar® XP™ 직물 1장, CNT sheet 6장, Kevlar® XP™ 직물 1장을 한 장씩 순서대로 적층하며 함침하였다. 이 때 CNT sheet는 90° 방향으로 교차적층 하였으며, 6시간 이상 충분히 함침하여 각 sheet층 사이로 바인더가 흡수될 수 있도록 하였다. 다음으로 핸드롤러를 사용하여 제조된 복합방호소재를 압착 탈수 및 평탄화한 후 상온에서 24시간 건조하여 시험편을 제조하였다. 시험편 제조 방법은 Figure 1에 도식으로 표현하였다.

**Table 1.** Properties of Binder

Binder	Product	Molecular weight
phenoxy	PKHC	43,000
phenoxy	PKHH	54,000
polyvinyl butyral	Butvar®	40,000~70,000
acrylate	Suave	-

**Table 2.** Manufacturing Conditions According to Binder Type

Sample code.	Product	Binder content (%)
S0	-	0
S1	PKHC	5
S2	PKHH	5
S3	Butvar®	5
S4	Suave	5



**Figure 1.** Manufacture process of hybrid protective materials with CNT Sheet.

### 3. 평가방법

#### 3.1. SEM 분석

바인더의 특성에 따른 바인더와 CNT sheet, Kevlar® XP™ 직물 사이의 접착성 및 내부 네트워크 구조를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscope, SU8010, Hitach)을 이용하여 CNT sheet 복합방호소재의 표면 및 단면 구조를 분석하였다.

#### 3.2. 인장강도

바인더 종류에 따라 제조된 복합방호소재의 인장강도 및 신도는 UTM (instron 3343)을 이용하여 KS K ISO 9073-3 평가법에 따라 실시하였으며, gauge length 50 mm, test speed 100 mm/min의 조건하에 측정하였다.

#### 3.3. 고속충격흡수성능 평가

CNT sheet가 적용된 복합방호소재의 고속충격흡수성능을 평가하기 위해 Figure 2와 같이 고압가스를 충전한 후 일시적으로 분사하여 발사체로 충격을 가하는 장치를 이용하여 실험을 실시하였다. 폴리카보네이트 재질로 이루어진 발사체 캐리어 내부에 다양한 직경의 발사체가 장착되어 발사관을 통

과하며 본 실험에서는 직경 13 mm, 중량 30.88 g의 반구형의 발사체를 일정한 속도로 발사하여 시험편에 충격을 가한 이후, 후면재인 클레이(clay)의 후면변형(BFS, backface signature)을 측정하였다. 충돌시 발사체의 속도는 발사체가 시험편과 충돌하기 직전에 측정되며 본 실험에서는 타격시 속도 240 m/s, 운동에너지 약 890J의 실험조건으로 실행되었다.

#### 3.4. 방검성능 평가

방호복의 방호 기준은 총알, 파편, 폭발물, 도검류 등에 대한 방호능력을 가지고 있어야 하며 실제 전투시 총알, 파편, 폭발물에 노출되는 군인들의 부상을 분석한 결과에 따르면 실제 총알(19%) 보다 파편 및 폭발물(59%)에 의한 경우가 더 많은 것으로 확인되었다.<sup>24</sup> 현재 파편탄에 대한 성능평가는 방탄복이 갖는 임계속도를 산출하는 것으로 방탄복이 관통되기 직전의 속도를 추정하는 시험인  $V_{50}$ 시험만 수행되고 있다. 하지만  $V_{50}$ 시험으로는 여러 형상의 파편에 대한 성능을 검증하는데 많은 어려움이 있으며 이를 보완하기 위해 방검시험 등을 통해 파편에 의한 파단 매커니즘의 이해 및 평가법 개선이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서도 CNT sheet 복합방호소재에 대해 방검성능을 함께 확인하기 위해 Figure 3과 같이 NIJ Standard-0115.00, stab resistance of personal body



Figure 2. High-velocity impact test equipment and projectiles.



Figure 3. Test equipment of stab resistance test.



armor 규격에 준하여 방검테스트를 실시하였다. 제작된 시험편은 구속이 없는 상태로 후면재 위에 위치시키고 낙하 assembly의 자유낙하 높이를 조절하여 충격에너지 3J의 조건으로 실험을 실시하였다. 이 때 테스트는 한쪽에만 칼날이 있는 형태인 engineered knife blade P1과 송곳과 같은 형태인 spike에 대해 실시하였으며, 칼날을 3J에 해당하는 높이에서 자유낙하한 후, 시험편을 관통하고 뚫고 나온 칼날 깊이에 대해 측정하였다.

## Results and Discussion

본 연구에 사용된 CNT sheet는 Figure 4와 같이 구조를 가지고 있으며 CNT sheet는 제조 후 IPA (Isopropyl alcohol) 함침 및 건조 공정을 적용하였을 때 CNT sheet를 구성하는 단일 레이어가 밀착되어 두께가 감소하고 밀도가 증가하여 fiber 간의 밀집도가 더욱 증가하는 결과를 보여 본 실험에 사용된 CNT sheet는 모두 IPA를 처리하여 적용하였다.

Table 3은 바인더 종류별로 적용된 CNT sheet 복합방호소재의 중량 및 두께를 나타내었다. Kevlar® XP™ 14장을 단순

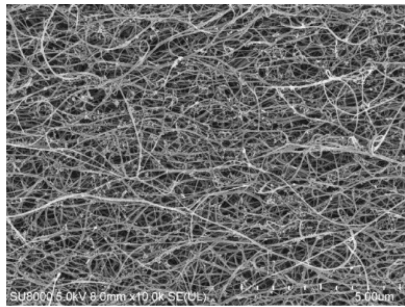


Figure 4. Structure of CNT sheet.

Table 3. Characteristics According to Type of Binder

Sample code.	Weight (g/m <sup>2</sup> )			Thickness (mm)
	Before binder lamination	After binder lamination	Pick up (%)	
XP 14p	169.1	169.1	0	4.2
S1	126.2	129.7	2.7	3.3
S2	126.6	130.7	3.3	3.4
S3	126.6	128.8	1.8	3.3
S4	126.3	129.9	2.8	3.4

적층한 시험편과 비교하여 바인더를 적용한 S1~S4는 25% 수준으로 감량된 조건으로 구성하였으며 Kevlar® XP™ 5장/CNT sheet 6장/ Kevlar® XP™ 5장으로 적층된 하이브리드 솔루션이다. 바인더 처리로 인한 중량 증가는 phenoxy 바인더 적용시 분자량이 높아질수록 중량 증가폭이 컸으며 polyvinyl butyral 적용에 따른 중량 증가폭은 1.8%로 가장 작은 것으로 확인되었다. 또한 바인더를 적용하여 접착함에 따라 두께는 바인더 적용 전 4.2 mm에서 바인더 적용 후 3.3 mm전후로 감소하였으며 바인더 종류에 따른 두께의 차이는 확인되지 않았다.

Figure 5는 CNT sheet 간 접착특성을 확인하기 위해 SEM을 통해 단면을 분석한 이미지이다. 연성이 좋은 acrylate 바인더가 sheet 내부에 비교적 균일하게 분포되어 sheet 간의 결합점이 증가되었으며 단면 형상에서 layer간의 층분리가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 수지내 결합력 및 소재 표면과의 부착력이 우수한 Polyvinyl butyral 바인더는 접착 단면이 매끄러운 형상을 나타내고 있다. 반면 상대적으로 rigid한 특성을 보이는 phenoxy 바인더의 경우 sheet 간의 접착 상태가 좋지 않아 layer 층이 일부 분리되어 있는 형상을 볼 수 있으며

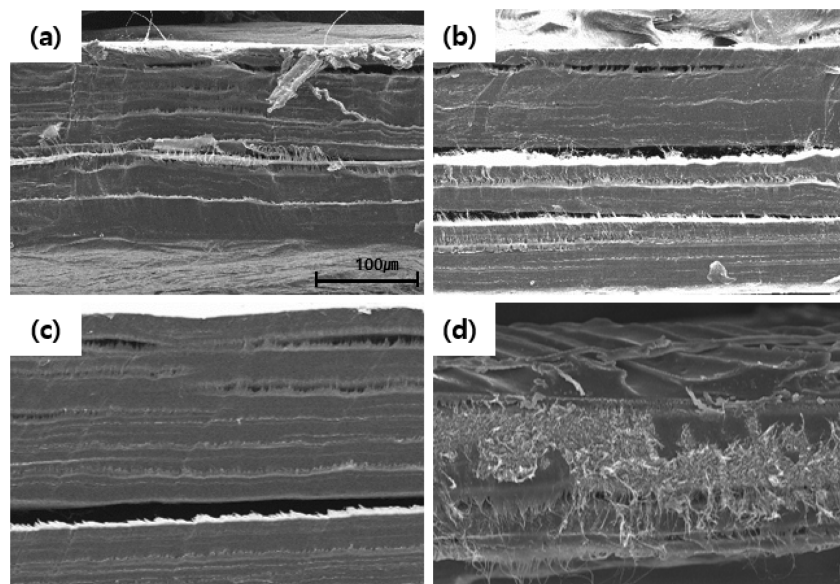


Figure 5. SEM image according to binder type : (a) PKHC, (b) PKHH, (C)Butvar®, (D)Suave.

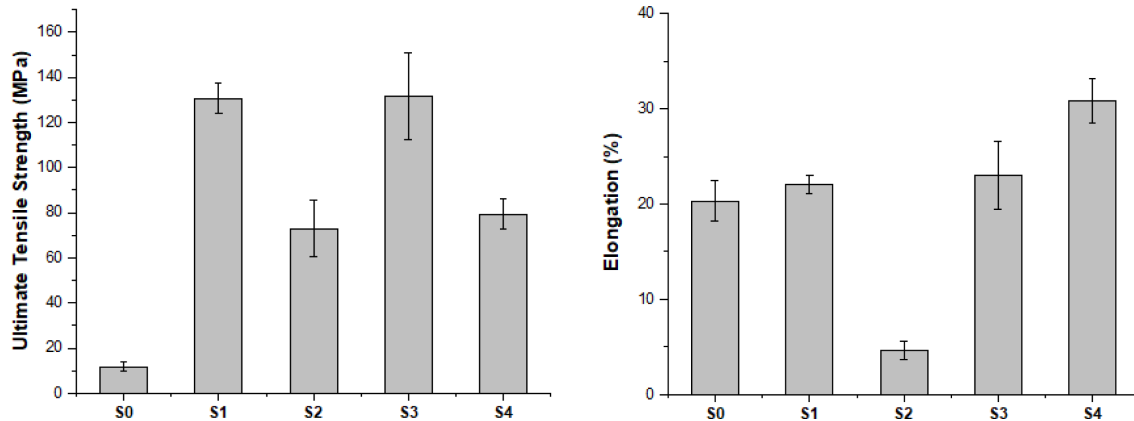


Figure 6. Tensile strength and elongation according to binder type.

phenoxy 바인더의 경우 분자량이 낮은 경우 접착 상태가 비교적 더 좋은 것으로 볼 수 있다.

바인더 처리 이후 CNT sheet의 인장강신도를 측정한 결과 Figure 6과 같이 바인더 처리 이후 인장강도가 확연하게 증가하는 결과를 나타내었다. phenoxy는 분자량이 낮을 경우 강도가 더 높은 결과를 보였는데 이는 앞서 SEM 이미지로 확인한 바와 같이 분자량이 높을수록 CNT sheet 간의 접착이 원활하지 않은 결과로 볼 수 있다. 또한 phenoxy 분자량이 높을 경우 rigid하여 신도가 매우 낮아지며 신축특성이 우수한 acrylate 바인더를 적용하였을 때는 CNT sheet 보다 높은 신도를 나타내었다.

복합방호소재의 설계에 있어서 직물의 적층 방식 또한 중요한 요소로 작용한다. 따라서 최적의 방호 솔루션을 설계하기 위해 직물의 적층 방식 및 CNT sheet의 적층 위치에 따른 고속충격흡수성능 평가를 수행하였다. Kevlar® XP™ 직물의 효율적인 적층 설계를 위해 경사/위사 방향이 서로 교차되도록 각 직물을 90° 교차 적층한 결과 Figure 7와 같이 90° 적층시 BFS는 44.45 mm에서 36.48 mm로 큰 폭으로 감소하였다. 또한 CNT sheet의 위치에 따른 고속충격흡수성능을 확인

한 결과 CNT sheet가 전면에 배치되는 경우 직물이 모두 관통되었으며 CNT sheet가 Kevlar® XP™ 직물 사이에 위치하였을 때 (Kevlar® XP™/CNT sheet/Kevlar® XP™) BFS가 가장 작은 것으로 확인되었다. 방탄복의 원리는 고속으로 날아오는 총알이 직물과 충격시 모양이 변형되고 직물이 그물과 같은 형상으로 총알을 포획함으로써 총알로부터의 힘을 넓은 영역으로 분산하는 것으로 설명할 수 있다. Kevlar® XP™ 직물을 단일방향으로 적층시보다 경/위사를 교차로 적층하였을 때 직물이 더욱 촘촘한 그물과 같은 형상을 만들어 총알을 포획함으로써 BFS를 감소시킨 결과로 볼 수 있다. 또한 CNT sheet의 경우 불규칙하게 엉켜있는 fiber들 사이의 공극이 많고 개별 튜브에 작용하는 반데르발스 힘에 의해 응집이 발생하여 전면에 배치된 경우 효율적으로 충격을 흡수 및 분산하지 못한 결과로 판단된다. 따라서 본 연구에서 바인더를 적용한 CNT sheet 복합방호소재의 설계시 CNT sheet는 Kevlar® 직물 사이에 배치하고, Kevlar® 직물 및 CNT sheet는 적층시 모두 90°로 교차적층 하였다.

Figure 8은 바인더 종류에 따른 고속충격흡수성능 평가를 실시한 결과로 고분자량의 phenoxy 또는 polyvinyl butyral 바

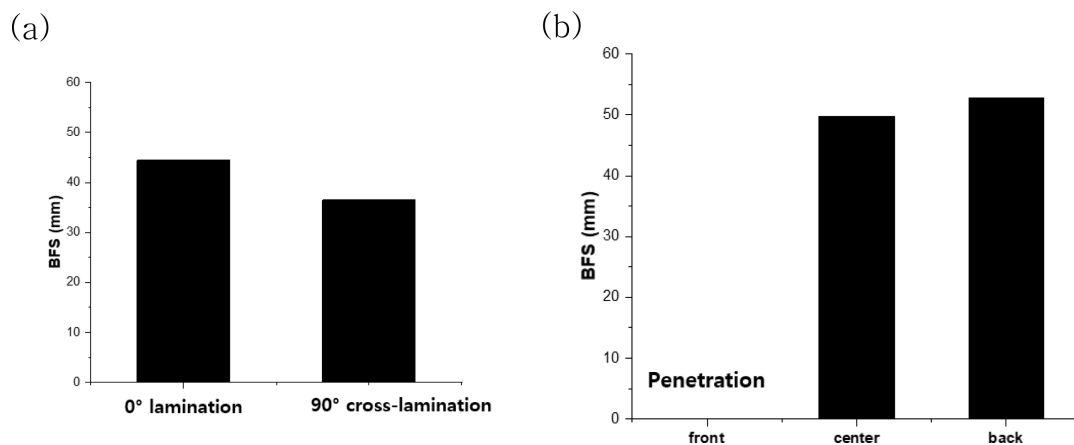


Figure 7. High-velocity impact test according to lamination method : (a) Kevlar®, (b) CNT sheet.

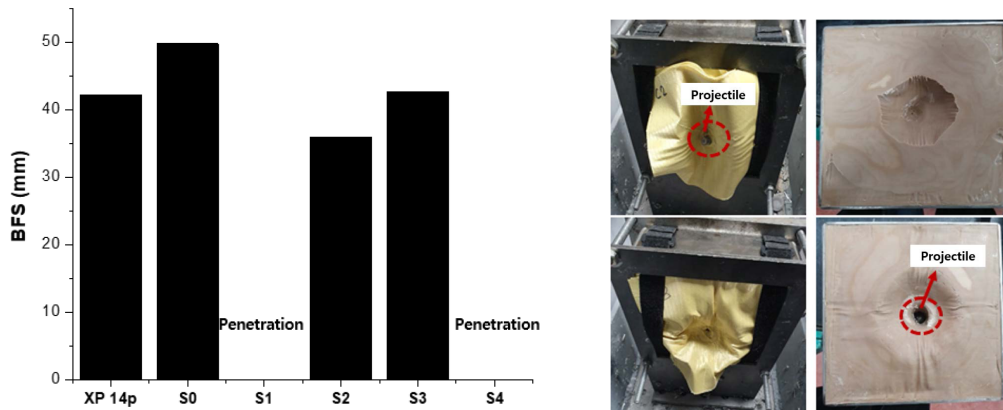


Figure 8. High-velocity impact test according to binder type.

인더를 적용한 시험편의 경우 바인더 처리 없이 CNT sheet 6layer와 Kevlar® XP™를 단순적층하여 하이브리드한 방탄재 (S0)의 BFS 49.8 mm과 비교하여 35.9 mm, 42.6 mm로 큰 폭으로 감소하며 고속충격흡수능이 향상되는 결과를 나타내었다 특히 phenoxy 바인더 중 분자량 높은 바인더를 적용한 시험편의 경우 Kevlar® XP™ 14장을 적층한 시험편과 비교하였을 때 약 25% 경량화된 하이브리드 조건임에도 불구하고 BFS가 42.1 mm에서 35.9 mm로 6.2 mm 감소되어 경량화 및 고속충격흡수능이 눈에 띄게 향상되었음을 확인할 수 있었다. 고속충격흡수능 평가 이후 BFS를 확인한 결과 Figure 8과 같이 미관통시 발사체가 직물의 구성사 사이에 포획되어 있는 반면 저분자량의 phenoxy 또는 acrylate 바인더를 적용한 시험편과 같이 관통된 경우 발사체가 직물의 구성사를 파단하고 뚫고 나가 backing material인 clay에 정지해 있는 모습을 확인할 수 있었다.

Figure 9, 10은 복합방호소재의 방검성능 평가를 실시한 결과를 나타낸 그래프로 각 칼날별로 3회씩 테스트하여 그 결과를 모두 나타내었다. Kevlar® XP™ 직물 10장과 CNT sheet 6장을 하이브리드 한 경우 CNT sheet 적층 위치에 따른 방검

성능을 확인한 결과 Kevlar® XP™ 직물의 전면 또는 후면에 배치된 경우 방검성능이 개선됨을 확인하였다. 이 결과는 앞서 고속충격흡수능 평가결과에서 CNT sheet가 중간에 배치되었을 때 방탄성능이 개선되었던 결과와 상반되는 결과이다. 이와 같이 방탄과 방검은 그 매커니즘이 다르고 충격체의 형상 및 충격에너지도 다르기 때문에 방탄과 방검을 모두 방호할 수 있는 소재의 개발에 많은 어려움이 있다. 따라서 이를 위해 각 방호소재간의 하이브리드 설계 방법, 복합 바인더를 적용 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

또한 방검성능 평가를 통해 CNT sheet가 적용된 복합방호소재는 spike 보다 P1 blade에 더 취약함을 확인할 수 있었다. 이는 CNT sheet 구조상 개별 나노 fiber의 내절삭성은 약하지만 fiber들이 부직포와 같이 불규칙하게 얹혀있는 구조로 날카로운 송곳형태의 spike 관통을 저지하는 특성에 따른 것으로 판단된다. CNT sheet 복합방호소재의 바인더 종류에 따른 방검성능을 확인한 결과 바인더 적용 후 P1 blade에서 전반적으로 침투깊이가 감소하였으며 고분자량의 phenoxy 바인더를 적용하였을 때 침투깊이가 가장 낮아지는 것을 확인하였다. 칼날이 자유낙하에 의해 직물에 충격을 가할 때 칼날

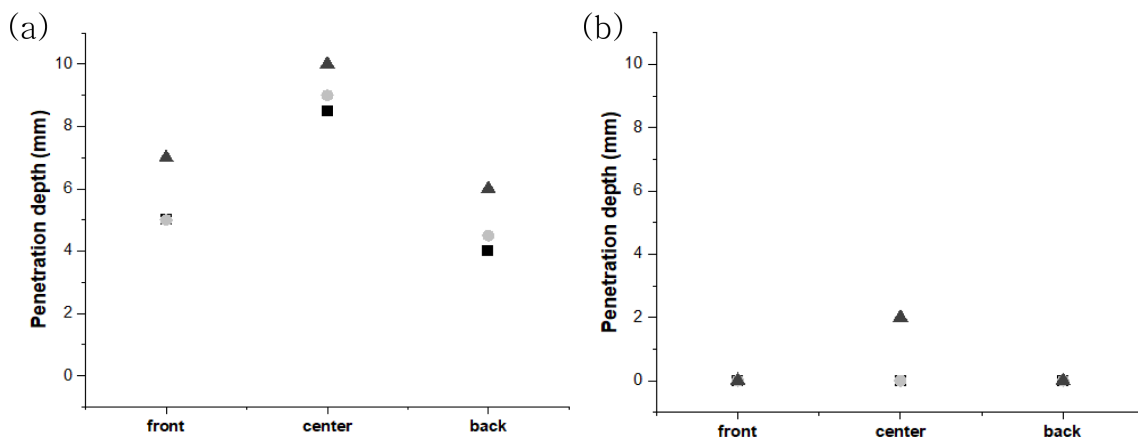


Figure 9. Stab resistance test according to lamination method : (a) P1 blade, (b) Spike.

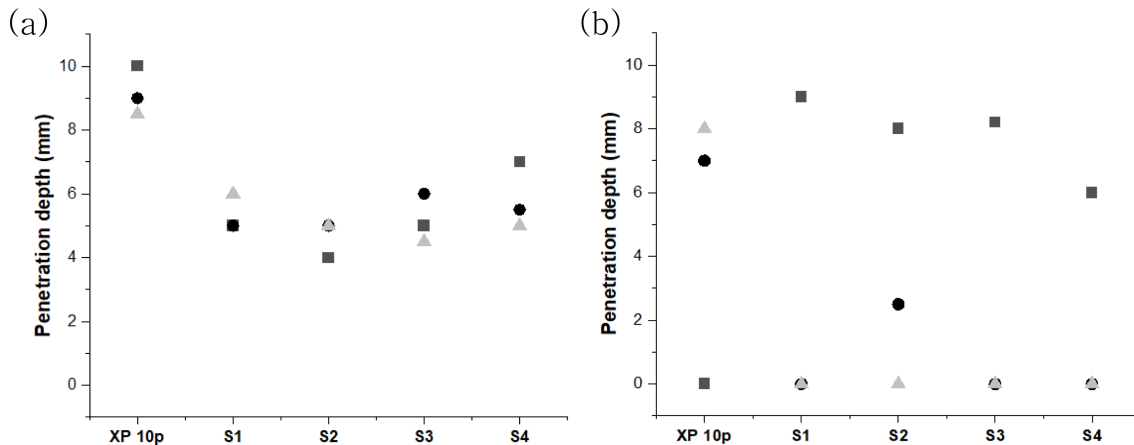


Figure 10. Stab resistance test according to binder type : (a) P1 blade, (b) Spike.

에 의해 구성사들이 이동하고 섬유들이 파손된다. 이 후 원사의 절단이 이루어지며 칼날이 침투하게 되는데 rigid 한 phenoxy 바인더가 구성사들의 슬라이딩을 억제함에 따라 칼날의 침투를 제한함에 따른 결과로 생각된다. 반면 spike에서는 acrylate 바인더 처리시 방검성능이 향상됨을 확인 할 수 있었으며, 이는 spike의 관통을 저지하는 특성이 acrylate 바인더의 특성에 의해 더 강화되었음을 의미한다. acrylate 바인더는 phenoxy 바인더에 비해 연성은 우수하며 초기탄성율 (young's modulus) 은 낮은 것으로 알려져 있으며 본 실험에서 CNT sheet간 접착에 더 우수한 성능을 나타내어 충격시 fiber간의 충격전달 및 강도보강 효과 따른 것으로 판단된다.

## Conclusions

본 연구에서는 경량화 및 방탄/방검 성능이 향상된 하이브리드 복합방호소재 개발을 위해 CNT sheet 또는 CNT sheet와 Kevlar® XP™ 소재간의 접착에 다양한 종류의 바인더를 적용하였다. 바인더 특성에 따른 CNT sheet 복합방호소재의 방호성능을 인장강도, 고속충격흡수성능 평가, 방검성능 평가 등의 시험을 통해 비교 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

바인더 적용 이후 인장강도는 크게 증가하였으며 신도는 acrylate 바인더를 제외하고 감소하거나 유사한 결과를 나타내었다. 분자량이 큰 phenoxy 바인더의 경우 접착성이 떨어져 분자량이 작은 phenoxy 바인더에 비해 강도가 낮은 결과를 보였다.

직물 적층 방식에 따른 고속충격흡수성능 평가 결과 Kevlar® XP™ 및 CNT sheet를 90°로 교차적층 했을 때 직물을 구성하는 경/위사가 사방으로 촘촘한 그물형태를 형성하여 충격시 발사체를 포획하고 충격을 넓은 면적으로 전파함에 따라 BFS가 크게 감소하였다. 또한 CNT sheet가 반데르발스 힘에 의해 응집이 발생하여 전면에 배치되는 경우 충격을 효과적으로 분산하지 못해 관통되는 결과를 보였으며,

Kevlar® XP™ 층 중간 또는 후면에 배치되었을 때 충격흡수 성능이 향상되는 결과를 나타내었다.

바인더를 적용한 CNT sheet 복합방호소재의 고속충격흡수성능 평가 결과 25% 경량화 설계 조건임에도 불구하고 polyvinyl butyral 바인더를 적용한 시험편의 BFS는 유사한 결과를 나타내었으며, 고분자량의 phenoxy 바인더를 적용했을 때 BFS가 6.2 mm 감소하는 결과를 보였다.

방검성능 평가 결과 CNT sheet는 한쪽에만 칼날이 있는 P1 blade 보다 송곳형태의 spike에 대한 방호성능에 더 효과적이었다. 바인더를 적용함에 따라 P1 blade에 대한 방호성능이 크게 향상되었다. 특히 고분자량의 phenoxy 바인더 적용한 경우 구성사들의 이동을 제한하여 침투깊이가 가장 낮아지는 결과를 나타내었다.

## Acknowledgements

본 연구는 민군협력진흥원의 민군기술이전사업 “탄소나노튜브(CNT)슈트 적용 하이브리드 경량 방탄재 기반 경호용 방탄복 및 장비 실용화 기술개발(21-PD-CO0-2)”의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## References

1. T. J. Kang, K. H. Hong, and M. R. Yoo, “Preparation and properties of fumed silica/Kevlar composite fabrics for application of stab resistant material”, *Fibers and Polymers*, **11**, 719 (2010).
2. R. Laible (Ed.), “Ballistic materials and penetration mechanics”, *Elsevier*, **5** (2012).
3. M. J. N. Jacobs and J. L. J. Van Dingenen, “Ballistic protec-



- tion mechanisms in personal armour”, *Journal of Materials Science*, **36**, 3137 (2001).
4. D. Roylance, “Ballistics of transversely impacted fibers”, *Textile Research Journal*, **47**, 679 (1977).
  5. D. Roylance, “Stress wave propagation in fibres: effect of crossovers”, *Fibre Science and Technology*, **13**, 385 (1980).
  6. R. C. Laible, F. Figucia and W. J. Ferguson, Cunniff “The application of high-modulus fibers to ballistic protection”, *Journal of Macromolecular Science—Chemistry*, **7**, 295 (1973).
  7. P. M. Cunniff, “An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact”, *Textile Research Journal*, **62**, 495 (1992).
  8. R. G. Egres Jr, M. J. Decker, C. J. Halbach and Y. S. Lee, J. E. Kirkwood, K. M. Kirkwood and E. D. Wetzel, “Stab resistance of shear thickening fluid (STF)–Kevlar composites for body armor applications”, *In Transformational Science and Technology For The Current And Future Force*, 264 (2006).
  9. N. Hiremath, J. Mays and G. Bhat, “Recent developments in carbon fibers and carbon nanotube-based fibers: a review”, *Polymer Reviews*, **57**, 339 (2017).
  10. I. A. Kinloch, J. Suhr, J. Lou, R. J. Young, and P. M. Ajayan, “Composites with carbon nanotubes and graphene: An outlook”, *Science*, **362**, 547 (2018).
  11. S. Imtiaz, M. Siddiq, A. Kausar, S. T. Muntha, J. Ambreen and I. Bibi, “A review featuring fabrication, properties and applications of carbon nanotubes (CNTs) reinforced polymer and epoxy nanocomposites”, *Chinese Journal of Polymer Science*, **36**, 445 (2018).
  12. M. J. Treacy, T. W. Ebbesen and J. M. Gibson, “Exceptionally high Young’s modulus observed for individual carbon nanotubes”, *Nature*, **381**, 678 (1996).
  13. B. Fiedler, F. H. Gojny, M. H. Wichmann, M. C. Nolte, and K. Schulte, “Fundamental aspects of nano-reinforced composites”, *Composites Science and Technology*, **66**, 3115 (2006).
  14. J. Lee, T. Kim, Y. Jung, K. Jung, J. Park, D. M. Lee, H. Y. Jeong, J. Y. Hwang, C. R. Park, K. H. Lee, and S. M. Kim, “High-strength carbon nanotube/carbon composite fibers via chemical vapor infiltration”, *Nanoscale*, **8**, 18972 (2016).
  15. S. Ryu, Y. Lee, J. W. Hwang, S. Hong, C. Kim, T. G. Park, H. Lee, and S. H. Hong, “High-strength carbon nanotube fibers fabricated by infiltration and curing of mussel-inspired catecholamine polymer”, *Advanced Materials*, **23**, 1971 (2011).
  16. O. K. Park, H. S. Chae, G. Y. Park, N. H. You, S. Lee, Y. H. Bang, H. David, B. C. Ku, and Lee, J. H, “Effects of functional group of carbon nanotubes on mechanical properties of carbon fibers”, *Composites Part B: Engineering*, **76**, 159 (2015).
  17. H. G. Chae, B. A. Newcomb, P. V. Gulgunje, Y. Liu, K. K. Gupta, M. G. Kamath, K. M. Lyons, S. Ghoshal, C. Pramanik, L. Giannuzzi, K. Sahin, J. Chasiotis, and S. Kumar, “High strength and high modulus carbon fibers”, *Carbon*, **93**, 81 (2015).
  18. B. Krause, R. Boldt, L. Häußler, and P. Pötschke, “Ultralow percolation threshold in polyamide 6.6/MWCNT composites”, *Composites Science and Technology*, **114**, 119 (2015).
  19. K. Fu, W. Huang, Y. Lin, L. A. Riddle, D. L. Carroll, and Y. P. Sun, “Defunctionalization of functionalized carbon nanotubes”, *Nano Letters*, **1**, 439 (2001).
  20. S. Choi and Y. Jeong, “Carbon nanotubes reinforced poly (ethylene terephthalate) nanocomposites”, *Polymer*, **38**, 240 (2014).
  21. K. M. Shin, C. U. Sim, J. S. Lee, and Y. C. Kim, “Effects of the carbon fillers on the EMI shielding performance and physical properties of Nylon66 composite”, *Polymer-Korea*, **41**, 524 (2017).
  22. M. Theodore, M. Hosur, J. Thomas, and S. Jeelani, “Influence of functionalization on properties of MWCNT–epoxy nanocomposites”, *Materials Science and Engineering: A*, **528**, 1192 (2011).
  23. M. Nadler, J. Werner, T. Mahrholz, U. Riedel, and W. Hufenbach, “Effect of CNT surface functionalisation on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy-composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **40**, 932 (2009).
  24. J. I. Yuk, B. I. Yun, J. G. Baek, and H. S. Song, “개인방호용 복합재료의 기술동향”, *Composites Research*, **22**, 52 (2009).

**출판자 공지사항:** 한국고무학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.