

침수조건에 따른 방탄재료의 성능변화와 파괴거동 분석

Failure Mechanism Analysis and Performance Change of Ballistic Resistance Material on Wet Condition

태 원 석* 김 건 인*
Won-Seok Tae Gun-In Kim

ABSTRACT

In this paper, we have verified the performance of ballistic resistance material on wet condition. Considering Korea terrain, soldiers may face many rivers and streams. However, bullet-proof jacket has no waterproofing and there's no water-proof standard in Military. Wearing wet bullet-proof jacket, soldiers can't be protected properly because of the decrement of jacket. Thus, we measure the performance of existing material on wet condition and analyze failure mechanism in order to indicate factors to improve bullet-proof jacket.

Keywords : Ballistic Resistance Material(방탄재), Wedge Through(췌기 현상), Wet Condition(침수조건), Ballistic Limit (방호 탄도한계), Failure Mechanism(파괴거동)

1. 서론

현재 국군에서 사용하는 방탄복은 환경조건을 고려하지 않고 설계가 이루어지고 있다. 이는 한국군에서 적용하고 있는 방탄복 성능시험 기준에 환경요소가 포함되지 않았기 때문이다. 하지만 한국과 같이 강수량이 많고 횡격실 하천이 다수 존재하는 지역에서는 도하 작전이 필수적이고 이를 위해서는 침수조건 등 환경요소를 포함한 방탄복 설계가 반드시 이루어져야 한다. 따라서 본 연구는 부력 방탄복, 육군용 방탄복 등 방탄복 설계에 앞서 환경 요소에 따른 방탄 성능의 변화를 분석하기 위한 연구이다. 본 연구를 통하여

환경 요인에 따른 방탄재료의 거동을 살펴볼 수 있으므로 다수의 논문이 발표될 수 있다.

'00년 군사용 채택 심의 후 '02년 최초 군에 납품하여 해군 함정에서 사용 중인 부력 방탄복의 부력재 소재가 내구성이 약하여 조기에 성능이 저하되는 현상이 발생하였다. 또한, 성능 규격(국방 규격서)에 미달하는 방탄구조체의 구성으로 인해 실전 시 군사력 상실의 우려되는 바 군수물품의 신뢰성 회복을 위해 이에 대한 개선이 시급한 실정이다. 현 부력방탄복 소재인 폴리에틸렌 발포제는 시간이 경과함에 따라 부력성능이 저하되는 현상으로 인해 사용자 불만이 발생되어 부력재를 보충하는 방법으로 보완하여 사용중이나 장기간 사용에 한계가 있다. 또한 부력성능 저하에 따라 부력방탄복 착용 기피 등으로 인한 군사력이 저하되는 문제가 발생할 수 있고 이를 보완, 교체에 따른 예산 낭비 등의 문제가 제기되고 있다.

† 2013년 8월 19일 접수~2013년 11월 15일 게재승인

* 육군사관학교(Korea Military Academy)

책임저자 : 태원석(taewonseok@gmail.com)

또한 '02년 보급된 부력방탄복 방탄소재의 경우 크게 방탄재와 방탄판으로 구성되어 있으며 방탄재와 방탄판 모두 고밀도 폴리에틸렌 UD 소재를 사용하여 왔다. 방탄판 소재인 고밀도 폴리에틸렌 UD 소재는 경량성과 우수한 방호성능으로 방탄판 사용이 적합하며 고압축 프레스 가공을 통해 수분에 의한 영향이 없는 것으로 판단되어 “고밀도 폴리에틸렌 UD” 소재가 방탄판 소재로써는 충분한 성능을 가지고 있다.

그러나 방탄재에 사용되는 고밀도 폴리에틸렌 UD의 경우 침수상태에서의 관통성능에 대한 실효성과 부력재의 부력성능 및 내구성의 문제와 맞물려 정확한 부력 방탄복 구조재로서의 검증과 개량성이 제기되고 있다. 또한 방탄판을 제외한 방탄재만의 구체적인 성능에 대한 제한이 없으며 이에 따라 방탄복의 가격을 낮추기 위하여 저가형 중국산 소재를 사용하거나 고가의 정품과 저가형 중국산 소재를 혼합하여 사용하는 경우가 발생하고 있고 방탄재 소재의 사용을 기준치 이하로 사용하는 경우가 발생하는 실정이다. 더욱이 방탄재의 수분에 의한 영향을 받을 경우 성능 저하가 발생될 수 있음에도 불구하고 물을 흡수하지 않는 소재라는 애매한 제한으로 부력 방탄복의 방탄재 규격으로는 매우 부족한 것이 사실이다.

따라서 부력성이 우수한 부력재의 개발과 방호성능이 우수한 방탄재 혹은 방탄재 성능 향상 대책 개발이 필요한 시점이다.

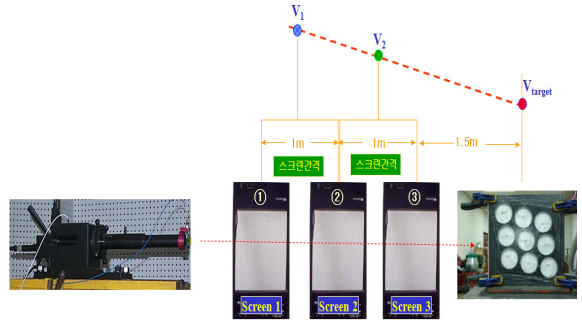
2. 실험 장치 및 시험 기준

가. 실험 장치

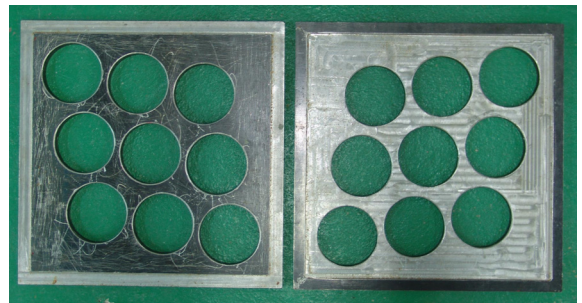
방탄 실험을 위한 장치는 Fig. 1(a)과 같이 탄자를 발사하기 위한 발사장치, 목표물에 대한 탄자의 충돌속도를 측정하기 위한 적외선 스크린, 시편 고정용 지그(Fig. 1(b))로 구성했다.

발사장치는 5.56mm 실험용 총열을 결합하여 파편모의탄(FSP : Fragment Simulating Projectile)을 발사할 수 있도록 구성하였다. 적외선 스크린은 탄자의 속도가 짧은 구간에서 선형으로 감소한다는 가정 하에 충돌속도를 계산하는 장치이다. 충돌속도를 산출하는 개념은 Fig. 2와 같다. 속도 스크린은 1m 간격으로 일정하게 배치되어 있다. 타이머에 의해 탄자가 스크린 1과 2사이를 지나는 동안의 시간 간격과 스크린 2와 3사이를 지나는 동안의 시간 간격을 측정할 수 있고 측정된 시

간간격을 바탕으로 1, 2스크린 사이의 평균속도와 2, 3스크린 사이의 평균속도를 구할 수 있다. 이때 속도의 변화가 선형이라는 가정을 통해 3번 스크린에서 1.5m 떨어진 곳에 설치한 시편에 탄자의 충돌 속도를 계산할 수 있다.



(a) Bullet velocity measurement



(b) Jig(sample fixing tool)

Fig. 1. Experiment System

시편 고정용 지그(Jig)는 동일 시편에 여러 번의 측정을 목적으로 매회 실험마다 동일한 경계조건을 제공하기 위해 제작되었다. 최근 소재 기술의 발전으로 유연성 및 운할도가 증가하는 추세이며, 이러한 시편은 스트랩을 이용하여 Clay에 고정하는 방법을 주로 사용하는데, 이러한 방법은 시편을 고정하는 스트랩의 인장력, 피탄 순서 및 위치에 따라 방탄 성능의 편차가 크게 나타나는 경향을 보인다. 따라서 사용된 지그는 편차를 최소한으로 줄이기 위하여 동일한 경계조건, 동일한 고정하는 힘, 동일한 사격위치를 유지하도록 제작하였다. 특히 한국군의 방탄복 시험조건은 NIJ 규격과는 달리 Clay를 사용하지 않고 방탄성능을 측정하도록 규정되어 있어서, 시편의 고정조건에 따른 측정오차가 클 것으로 판단되어 제작된 시편

고정용 지그를 사용할 경우 이러한 영향을 최소화할 수 있다. 시료는 사각프레임 외곽의 25mm 폭의 돌출부에 의하여 고정되지만, 피탄되는 면에서는 시료가 과도한 압력을 받아 손상되지 않도록 하였으며 원의 모서리도 곡면 가공하여 시료를 보호하였다. 원형의 피탄부는 동일한 경계조건을 유지하며, 원의 배열은 타격위치를 일정하게 함은 물론 사격으로 크게 손상 받는 타격점의 수직/수평 라인이 중첩되지 않도록 배열하였다.

나. 시험 기준

1) 방탄복 규격의 문제점

현재 군에 보급되고 있는 파편 및 소총 방호용 규격(8470-1005-4)은 1997년에 제정되어 2000년과 2005년 일부 결감의 원단과 봉제 방법 내용위주로 개정되고 실제 방탄성능 및 기능성은 현재까지 사용되고 있다. 특히 규격서 3. 필요조건 항목과 도면은 Table 1과 같이 방탄재 재질의 종류와 특정 소재 제품성능 및 원사의 자세한 물성 값까지 제한되어 있으며 제조방법 및 접수도 지정되어 이보다 성능이 우수한 신소재 채택을 제한하는 문제가 있다.

Table 1. Standard of bullet proof material

구분	면밀도 (g/m ³)	섬유감별
물리적 성질	190 이상	초고분자량 폴리에틸렌

또한 방탄복 규격(8470-R4002)는 형상치수가 없고 “제시한 견본 및 모델”로 명시되어 있으며, 무게는 2.2kg 이하로 기준 치수 없이 무게 설정만 하고 있어 충분한 방호면을 제공하지 못한 설계가 이루어지기도 한다. 하지만 무엇보다도 방탄복 규격에 환경요소가 전혀 언급하고 있지 않은 것이 큰 문제이다.

반면 미국의 OTV(Outer Tactical Vest)는 RCC(Right Circular Cylinder) 파편을 이용한 V50 시험을 실시하는데 이는 파편 또는 멀티위협 조건과 여러 환경조건하에서 V50 방탄시험을 하는 것이다. 부위별로 서로 다른 종류의 RCC를 사용하고 서로 다른 각도와 건조 및 침수조건으로 시험평가를 진행하고 있고 고온/저온 조건, 오일 오염상태 등 기타 환경시험 평가를 통해 적합성을 판단한다(Table 2).

Table 2. V50 standard of RCC fragment - V50 Ballistic Limit 조끼/기타(Base Vest assembly, Throat)

구분	Dry Test				Wet Test	
	0°		45°		0°	
무게 (grain)	조끼 (m/s)	기타 (m/s)	조끼 (m/s)	기타 (m/s)	조끼 (m/s)	기타 (m/s)
2	815	920	867	1021	776	884
4	719	802	750	832	701	759
16	610	679	646	716	579	643
64	494	549	506	579	491	518

- * After hot and cold temperatures, accelerated aging after POL
- * Temperature Condition : 155±10° F for 6 ± 1/4 hours / 60±10° F for 6± 1/4 hours.
- * Accelerated aging : chamber at 300±10psi, 158 ± 20° F, 7 days
- * POL contamination : motor oil, and gasoline at 4 hours

미국의 상용 기준인 NIJ(National Institute of Justice) 기준도 한국군 방탄복 규격에 없는 환경조건을 고려하고 있다. Level IIIA는 파편 방탄복 기준과 동일한 방탄 성능을 요구하는 것은 아니지만 비교 가능한 시험 기준으로 Table 3에 그 내용이 나타나 있다. Table 3에서 볼 수 있듯이 conditioned armor라는 항목은 설정한 환경에 노출시킨 후 시험하는 기준으로 New armor에 비해 기준 속도가 낮다는 것은 알 수 있다. 최근 방산 업체에서 수출목적으로 개발하는 방탄복을 대부분 NIJ 기준을 따르고 있어 환경요소를 고려한 설계가 필요한 실정이다.

Table 3. NIJ-0101.06 Level IIIA

Type	Projectile	Conditioned armor 총돌속도	New armor 총돌속도	후면 변형
Level IIIA	.357 SIG FMJ FN (8.1g)	430m/s	448m/s	44mm
	.44 Mag SJHP (15.6g)	408m/s	436m/s	44mm

2) 군용 시험 기준 및 실험 방법

현재 군에 보급되고 있는 방탄조끼의 방호기준은 명확하지 않을 뿐 아니라 시험방법이 구체적이지 않다. 다만 사용되는 시험 방법이 MIL-STD 662에 따라 사용되는 탄자는 MIL-P46593B Caliber .22 Type 2로 무게 17grain, 로크웰 경도 HRC 27 파편모의탄으로 정하였다. Fig. 2는 파편모의탄(FSP : Fragment Simulating Projectile)의 실제 형상이다.



Fig. 2. FSP(Fragment Simulating Projectile)

현재 실험 방법은 MIL-STD 662에서 제시하고 있는 V50 Test방법을 사용하였다. V50은 표적의 관통 확률이 50%인 속도로 유효속도 범위 내에서 완전관통속도와 부분관통속도의 산술평균으로 구한다. 탄자의 속도는 추진제의 양을 조절하여 조절하며 up-and-down 방법을 이용하여 유효범위내 속도값을 산출해낸다.

3. 침수조건하 방탄실험 결과

가. 시료 구성

시료 구성은 Table 4와 같다. 시료는 총 5가지로 UHMWPE UD(Ultra High Molecular Weight Polyethylene Uni- Directional) 3종류와 Aramid UD 2종류이다. Table 4에 있는 V50은 침수조건하 방탄실험 결과와 비교하기 위한 대조군의 결과이고 면밀도는 방탄재의 무게 비교를 위한 수치로 일정한 범위(3700±50g/m²)로 제한하여 무게가 방탄성능에 미치는 영향을 최소화하였다. Fig. 3은 Table 4의 V50 결과를 그래프화한 것으로 시료 B가 건조상태에서는 가장 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있고 전반적으로 UHMWPE가 Aramid보다 더 좋은 방탄성능을 가진 것을 알 수 있다.

PE와 Aramid 섬유는 원사를 이용하여 직조한 직물이다. 직물의 경우 직조 형태에 따라서 방탄성능의 차

이를 보이는데 그 이유는 방탄 성능이 원사자체의 인장력뿐 아니라 원사간의 마찰에 의해서도 결정되기 때문이다. 그래서 현재 직물 형태의 섬유보다 원사에 matrix를 첨가한 복합재형태의 시료를 많이 사용하고 있다. 실험에 사용된 시료는 모두 복합재(composite)에 해당하며 woven fabric에 비해 원사간의 slip은 상대적으로 적다고 할 수 있다.

Table 4. Test sample

시료종류	시료 범례	V50 (m/s)	기준무게 (g)	면밀도 (g/m ²)
UHMWPE UD	A-시간	512.09	603.2	3,770
	B-시간	531.75	594.7	3,717
	C-시간	502.82	592.8	3,705
Aramid UD	D-시간	481.36	593.9	3,712
	E-시간	486.26	593.9	3,712

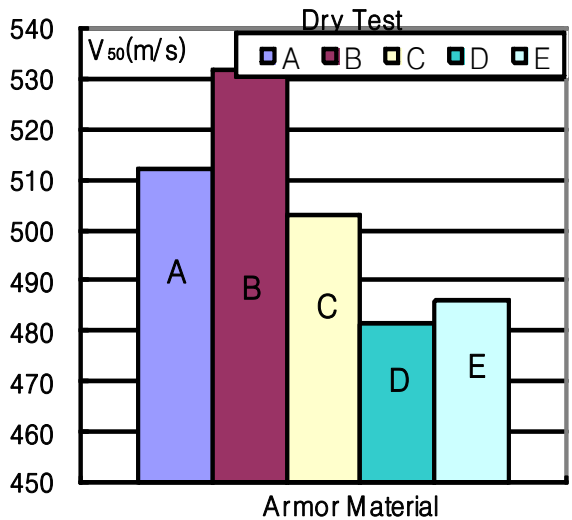


Fig. 3. V50 of test materials(dry condition)

나. 침수처리 및 건조

침수환경은 시료가 완전 침수가 되는 조건으로 수돗물을 사용하였으며 온도 21℃에서 1시간, 5시간, 24시간 동안 완전 침수 후 약 30분간 수직으로 고정 자연 배수후 시험을 실시하였다.

다. 실험 결과

Table 5. V50 of test material(Wet condition)

시료종류	시료번호	침수시간 (hr)	평균 V50(m/s)	비교 (%)
UHMWPE UD A	A-T0	0	512.09	100
	A-T5	5	509.61	99.5
	A-T24	24	496.66	97.0
UHMWPE UD B	B-T0	0	531.75	100
	B-T5	5	435.21	81.8
	B-T24	24	436.30	82.1
UHMWPE UD C	C-T0	0	502.82	100
	C-T5	5	389.34	77.4
	C-T24	24	393.71	78.3
Aramid UD D	D-T0	0	481.36	100
	D-T1	1	418.59	87.0
	D-T5	5	374.79	77.9
	D-T24	24	359.01	74.6
Aramid UD E	E-T0	0	486.26	100
	E-T1	1	355.29	73.1
	E-T5	5	334.66	68.8
	E-T24	24	331.07	68.1

라. 실험 결과 분석

결과를 바탕으로 침수시간에 따른 방탄성능의 변화를 보면 Fig. 4의 그래프와 같다. 결과는 시료 종류별 편차는 있으나 침수되면 방탄성능 저하가 일어나고, Aramid 계열의 성능 저하가 PE계 보다 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 건조 상태에서는 모든 시료가 파편 방탄복의 성능기준인 'V50 470m/s 이상'을 만족하지만 침수 후 그 성능은 바로 저하되어 UHMWPE UD 한 종류(시료 A)를 제외하고 모두 만족시키지 못하였다. 성능을 만족시키지 못하는 시료를 이용하여 파편 방탄복을 제작할 경우 도하작전이나 우천 시 작전 등에서 큰 사고를 일으킬 가능성이 있다. 따라서 현재의 실험결과를 분석한 내용을 근거로 볼 때 시료 A가 부력 방탄복 등 침수조건을 만족해야하는 경우에 가장 적합한 방탄재라고 볼 수 있다.

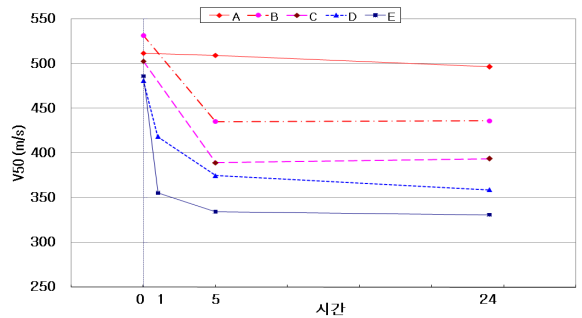


Fig. 4. V50 in accordance with Wetted Time

4. Failure Mechanism 분석

가. UHMWPE UD의 Macro view

Fig. 5는 침수시간에 따른 UHMWPE UD의 관통현상을 나타내는 그림이다. 각 시료에서 완전관통한 부분을 차단하고 탄자가 출동하는 면을 기준으로 첫 번째 층(ply)과 두 번째 층 그리고 마지막 층을 분리하여 탄자가 지나간 영역을 Macro 수준에서 분석하였다.

각 시료의 첫 번째 층인 (a), (d), (g), (j)를 비교하면 침수시간이 경과될수록 탄자의 충돌면에 가까운 층들은 관통된 영역(탄자가 지나간 자리)의 넓이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 두 번째 층인 (b), (e), (h), (k)도 동일하게 관통된 영역의 넓이가 침수된 시간에 반비례하는 것은 알 수 있다. 하지만 마지막 층(시료의 후면)은 반대의 경향을 보인다. 다시 말해 침수시간에 비례하여 관통영역의 넓이가 늘어나는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

나. Aramid UD의 Macro view

Fig. 6은 침수시간에 따른 Aramid UD의 관통현상을 나타내는 그림이다. Aramid UD도 UHMWPE UD와 비슷한 경향을 보인다. 침수시간과 관통영역의 넓이가 반비례의 경향을 가지며 마지막 층의 관통영역은 5시간 침수후 시험한 시료를 제외하고 충돌면에 가까운 층보다 더 넓은 관통영역을 보였다.

하지만 UHMWPE UD의 관통영역과 충돌면에서의 모습이 다소 상이하다는 것을 알 수 있다. 침수 시간에 따라 관통영역이 줄어들고 원사들이 엉켜있는 모습은 비슷하지만 UHMWPE UD에 비해 Aramid UD는 원사들이 비교적 적게 끊어져 있고 상대적으로 많은 원사들이 늘어져 엉켜있는 것을 알 수 있다.

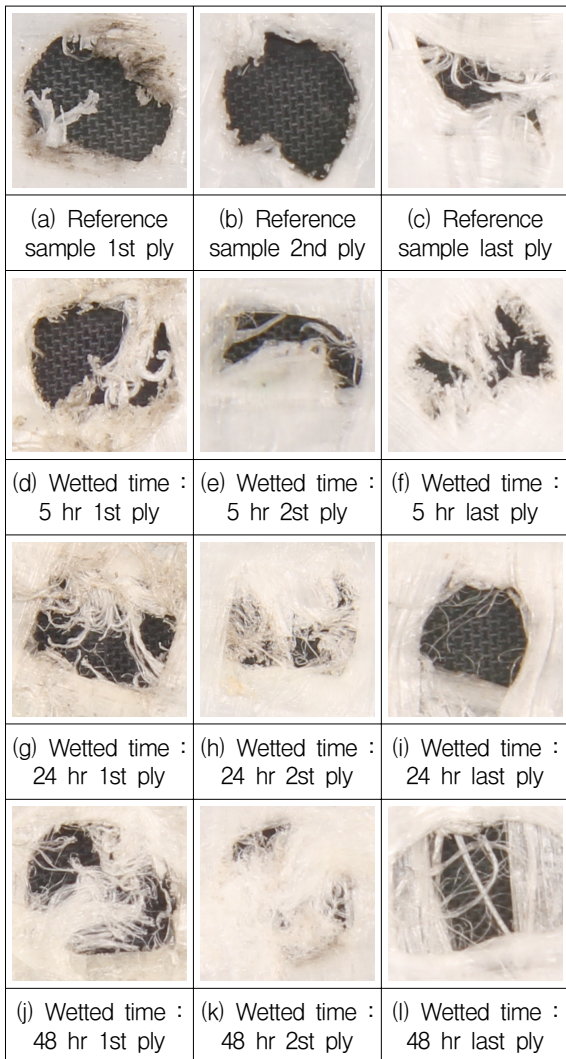


Fig. 5. Perforated area of UHMWPE UD(Macro view)

다. UHMWPE UD 현미경 관찰

Macro 수준에서 관찰 후 관통영역의 일부분을 현미경을 이용하여 관찰하였다. 현미경 관찰을 통해 각 직물의 Failure mechanism을 분석하고자 한다. 일반적으로 Failure mechanism은 재료의 파괴거동을 의미하며 방탄 재료의 경우 탄자의 속도를 줄이고 탄자의 관통을 막기 위해 재료가 파괴되는 현상을 의미한다. 통상의 직물형태 재료는 원사와 원사의 마찰과 원사 자체의 인장력에 의해 탄자의 에너지를 흡수한다. 따라서 탄자의 관통영역을 관찰해보면 원사가 끊어지거나 늘어져 있는 것을 볼 수가 있다.

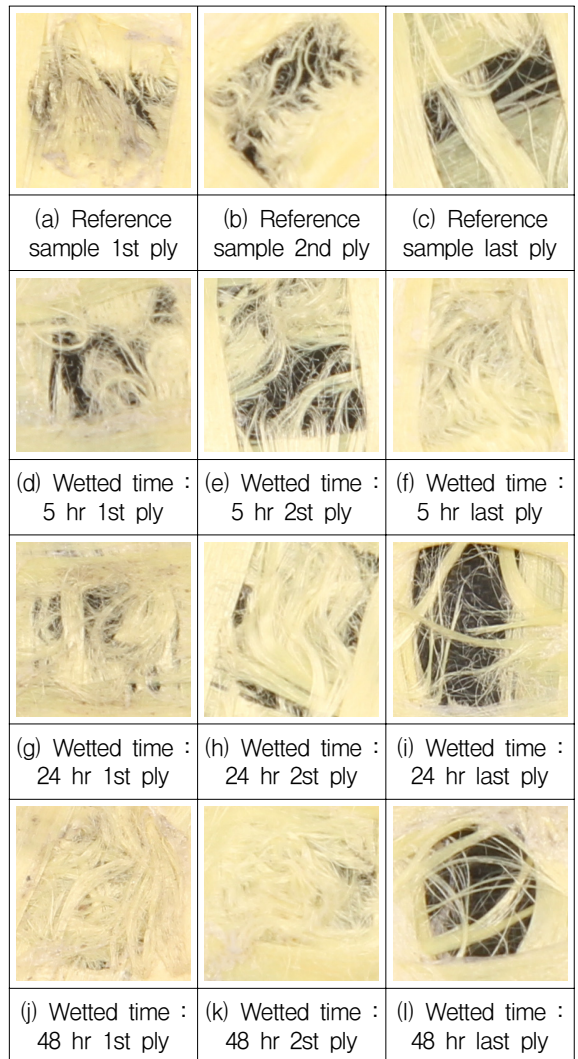


Fig. 6. Perforated area of Aramid UD(Macro view)

Fig. 4의 실험 결과를 보게 되면 침수 여부가 재료의 방탄 성능에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 직물이라도 침수 여부에 따라 재료의 파괴거동이 다르다는 것을 의미한다. Fig. 7은 UHMWPE UD의 현미경 사진이다. 탄자가 충돌한 영역 확대한 사진으로 기준 시료부터 48시간 침수 시료까지 충돌 영역의 모습이 상이한 것을 알 수 있다.

먼저 (a), (b)는 기준 시료의 충돌 영역 사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 탄자의 관통부위의 원사들이 모두 끊겨있고 끊겨진 끝부분이 녹아 있는 것을 알 수 있다. 이는 사용된 탄자가 파편모의탄(FSP)이기 때문인

데, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 파편모의탄은 경도가 높고 외형상 각이 진 형태여서 직물과 충돌 시 탄자의 변형은 거의 없는 상태에서 원사를 끊고 지나간다. 또한 탄자 충돌 시 국소적으로 발생한 열에 의해 원사의 끝부분이 녹아 붙어 있는 현상도 나타난다.

하지만 (c)~(h)는 그 모습이 (a), (b)와 상이한데 이것은 침수에 따른 마찰력의 감소로 나타난 현상이다. 앞서 언급했듯이 직물의 경우 원사와 원사의 마찰에 의해 탄자의 에너지를 흡수하는데 직물 사이에 수분에 침투됨에 따라 마찰력이 줄어들고 탄자가 충돌할 때

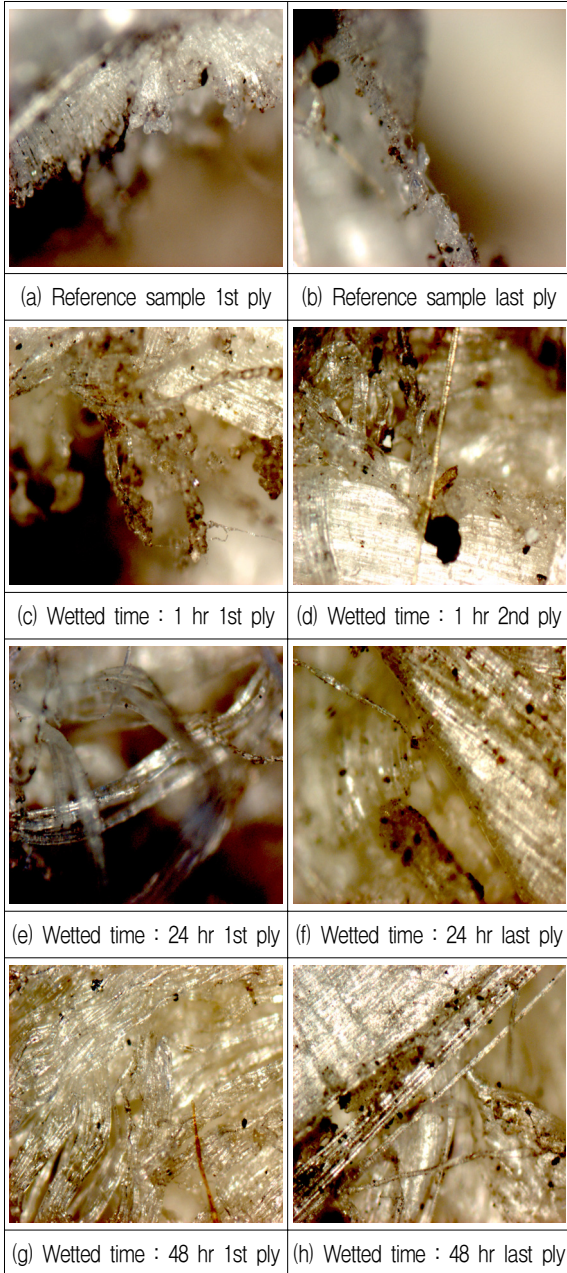


Fig. 7. Perforated area of UHMWPE UD(Micro view)

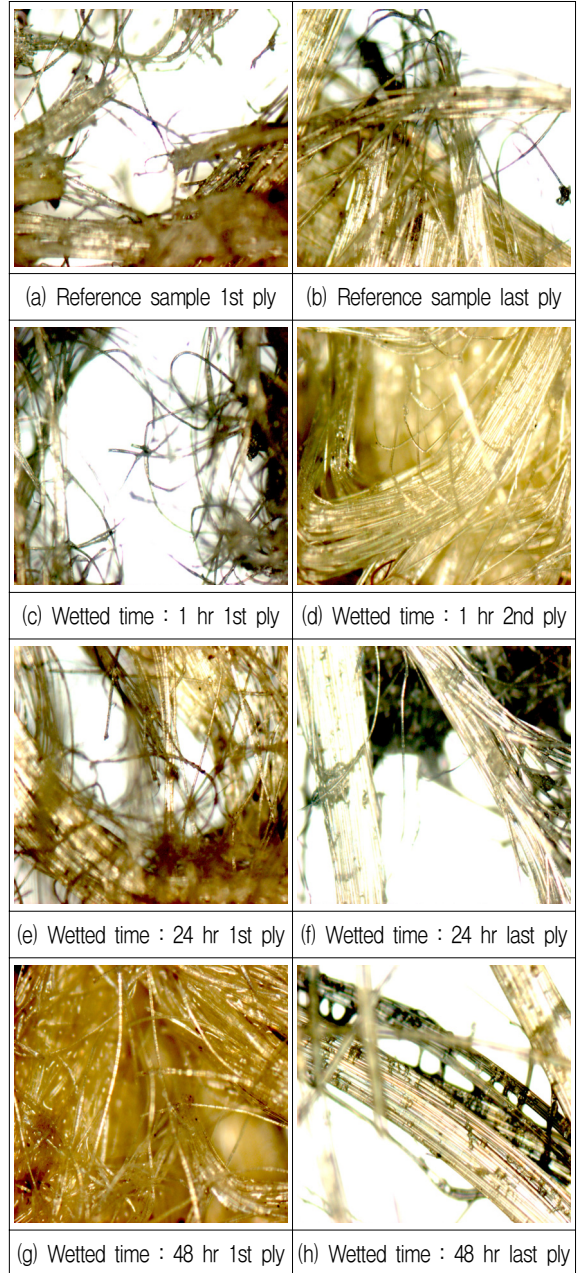


Fig. 8. 8 Perforated area of Aramid UD(Micro view)

원사와 원사 사이가 벌어져 탄자가 미끄러져 들어가는 현상이 발생하게 된다. 이것을 Wedge Through라고 하는데 (c)~(h)에서 볼 수 있듯이 원사의 끊어진 부분보다 풀어 헤쳐진 모습을 확인할 수 있고 그 현상이 (c), (d)에 비해 (e)~(h)에서 더 크다는 것을 알 수 있다.

따라서 침수 시간에 따른 재료의 파괴거동이 상이하고 이것이 방탄 성능에 영향을 미쳤다는 것을 확인할 수 있었다.

라. Aramid UD 현미경 관찰

Aramid UD의 경우도 Fig. 4의 실험 결과에서 알 수 있듯이 침수 여부가 재료의 방탄 성능에 큰 영향을 주었다. Fig. 8은 Aramid UD의 현미경 사진으로 탄자가 충돌한 영역을 확대한 사진이다. Aramid UD 또한 UHMWPE UD와 비슷하게 기준 시료부터 48시간 침수 시료까지 충돌 영역의 모습이 상이하고 Wedge Through 현상이 있는 것을 확인했다. 하지만 Aramid UD는 UHMWPE UD에 비해 충돌영역의 원사가 녹아 없어지기보다 끊어진 흔적을 더 많이 찾을 수 있다. 또한 후면의 관통영역은 침수시간이 길어질수록 넓어지는 것을 확인할 있는데 이것은 Wedge Through현상으로 탄자가 직물의 원사를 좌우로 밀어내고 관통하였기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 침수조건 하에서 방탄재로 사용되는 직물의 방탄 성능을 실험을 통해 분석하고 그 원인을 규명

하고자 실시하였으며 그에 따라서 침수조건하에서도 적절한 방탄 성능을 유지할 수 있는 방탄재를 선택하였다.

사격 시험을 통해 침수 여부에 따라 방탄 성능이 급격히 차이난다는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 현미경을 통한 관통영역 분석으로 침수 여부에 따른 재료의 파괴거동의 차이도 확인할 수 있었다. 대부분의 시편이 5시간 이상 침수조건을 유지하게 되면 거의 성능 발휘를 할 수 없는 것으로 확인했고 한국군에서 제시하는 기준 이하로 성능이 저하됨을 알 수 있었다.

따라서 현재 사용 중이 방탄복에 대한 침수방지대책이 필요한 실정이고 앞으로 방탄복을 설계할 때 실험에서 사용된 A시료(UHMWPE UD)나 이와 유사한 성능의 재료를 사용해야 할 것이다.

현재 군에서는 방탄복의 환경조건을 전혀 고려하고 않고 설계가 이루어지고 있다. 하지만 황격실의 지형과 동서로 하천이 많이 발달한 우리나라 지형을 고려해볼 때 침수 조건을 고려한 방탄복 개발은 매우 필요한 실정이다. 따라서 현재 다른 국가에서 사용 중인 군용 방탄복의 Wet Test 및 환경시험 방법에 대한 자료를 수집하고 이를 바탕으로 한국군 방탄복 규격에 대한 수정보완이 요구된다.

References

- [1] 파편 및 소총 방호용 규격(8470-1005-4)
- [2] MIL-STD 662F
- [3] NIJ Standard-0101.06