

순간강화 지능형 개인 방호 시스템

조영준, 박종렬, 강태진

서울대학교 재료공학부

1. 서 론

미래의 병사 체계와 전쟁의 양상은 보다 많은 병력을 살상하는 것에서 부상을 입히는 데에 중점을 두는 방향으로 변화하고 있다. 이는 생명의 소중함에 기인한 것이기도 하며, 한 명의 병사가 부상을 입으면 적어도 2~3명 이상이 간호와 수송에 동원되어 병력의 기동력이 떨어지기 때문에 임무수행에 차질이 생기게 할 목적도 있다. 그러나 현재 전세계적으로 평화와 화해의 분위기가 정착되어 가고 있어서 국지전 등의 전쟁 발발 가능성이 감소하고 있다. 따라서 단지 전쟁 과정에서 총탄과 포탄의 파편으로부터 군인들의 생명을 보호하는 목적으로의 방탄복이 아닌 실제 생활속에서 사회를 보호하고 정의를 수호하는 경찰 경비나 경호 체계에도 적절한 보호장비의 필요성이 상대적으로 증가하고 있다. 그러므로 미래의 병사와 경찰 혹은 보호 장구가 필요한 이들에게 혁신적이고 유용한 개인 방호재료의 개발이 필수적이다.

일반적으로 섬유재료는 그 우수한 물성으로 인해 군사용으로도 광범위하게 사용되고 있는데 특히 우수한 내충격성을 이용하여 방탄재료로 사용되고 있다. 또한 전투헬멧이나 방탄복, 방검복(防劍服)과 같은 개인 방호제에서 경량 전투차량 및 장갑차, 헬기와 같은 방탄구조재에도 널리 적용되고 있다.

개인용 방호복은 기능별로 총알이나 포탄의 파편을 방호하는 방탄복과 칼이나 창을 방호하는 방검

복으로 크게 구분할 수 있다. 현재 개인방호복에 많이 사용되는 섬유소재로는 폴리아미드 계열의 Kevlar[®], Twaron[®], Goldflex[®], Stabond[®] 등과 폴리에틸렌 계열의 Dyneema[®], Spectra[®], Famostone[®], Aristone[®] 등이 있으며 이들은 고강력(3 GPa 이상), 고탄성(172 GPa 까지), 고내열(amide계열), 저비중(ethylene 계열)의 특성을 지닌다. 폴리아미드 계열은 유연성이 우수하여 착용감이 좋은 장점이 있으며 폴리에틸렌 계열은 상대적으로 더 가볍고 방탄성능도 우수하나 20% 이상 가격이 비싸고 유연성이 떨어져 착용감이 떨어지는 단점이 있다. 향후에는 이들의 장점을 취합하여 방호복으로 이용될 전망이다.

이들 섬유소재를 이용한 방호복, 특히 방탄복의 원리는 높은 강도를 지닌 섬유를 촘촘하게 압축하고 그물 형태로 엮갈려 제직함으로써 재료의 인장 강도를 향상시켜 총탄의 운동에너지를 흡수하는 것이다. 방호능력을 높이기 위해서는 많은 수의 방호 소재 적층이 필수적인데 케블라의 경우 20~30 겹의 적층이 필수적이다. 이러한 섬유소재와 형태는 방호복의 중량을 증대시킬 뿐만 아니라 착용자의 활동성과 쾌적성에 영향을 주어 순조로운 임무수행을 저해하게 된다. 따라서 병사의 생존성과 기동성 향상을 위해서 가볍고 얇으며 유연성과 방탄성능이 우수하고 경제적인 개인 방호재료가 필수적으로 요구되며 이러한 지능형의 신개념 소재에 관한 연구가 진행되고 있다.

이러한 신개념의 방호재료로서 기존의 hard body

armor가 아닌 soft body armor의 일종으로 이른바 개인 액체방호재료(LBA, liquid body armor)에 대한 관심이 높아지고 있으며 미 국방성을 중심으로 기초적인 연구가 진행되고 있다. LBA 중 대표적인 소재로 크게 세 가지로 구분할 수 있는데 전단농화 유체(shear thickening fluid, STF), 자기유변 유체(magnetorheological fluid, MRF), 전기유변 유체(electrorheological fluid, ERF)가 그것이다. 이 물질들은 평상시 외부 자극이 없는 상태에서는 액체상으로 존재하여 충분한 활동성을 보장할 수 있을 만큼 유연성을 갖고 있으나, 전단력, 자기장, 전기장 등 외부에서 자극이 가해지면 강성이 순간적으로 변하여 견고해지는 특성이 있다. 이 현상은 외력이 제거되면 원상태로 완전히 회복되는 가역적인 반응이다. 이러한 신개념의 물질을 기존 방호재료인 섬유직물과의 복합화를 통해 유연성과 경량성을 획득하는 동시에 방탄성능도 향상시키려는 연구가 진행되고 있다.

본 고에서는 방호성능 향상을 위한 이러한 신개념의 물질들과 이들의 응용에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 개인 방호복의 기준

방탄의 원리는 방탄소재의 높은 인장강도를 이용해 총알의 운동에너지를 흡수하여 움직임을 멈추게 하는 것이다. 날아오는 총알에서 발생하는 고열로 섬유가 녹으면서 응집하여 총알의 운동에너지를 감소시켜 총알의 속도를 줄일 수 있다. 따라서 ‘섬유를 어떤 구조로 배열하는가’ 하는 섬유 적층 방식, ‘얼마만큼의 힘으로 압축시키는가’ 하는 압력 정도, ‘총알에서 나오는 열을 어떻게 처리하는가’ 하는 내열성, 그리고 ‘어떤 소재를 사용하는가’ 하는 재질 문제가 방탄복 성능을 좌우하는 핵심 인자가 된다.

방탄복에 총알이 명중할 때 총알이 버섯처럼 납작하게 탄두가 뭉개져 퍼져버리는 현상을 발견할 수 있다. 방탄복의 저항에 의해 탄두가 뭉개지는 “머

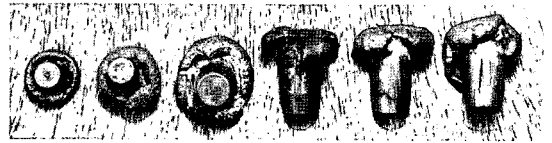


Figure 1. Schematic view of mushroom effect.

시름 효과(mushroom effect)”로 탄두가 뭉개지면서 표면적이 늘어나고, 표면적이 늘어나면서 압력은 그에 반비례해 급격하게 감소, 총알은 결국 진행을 멈추게 된다(Figure 1).

개인용 방호재료에 대한 성능과 규격에 대한 국제 기준을 정하고 있는 대표적 기관은 미국 법무부 산하 국가사법 기구(NIJ, National Institute of Justice)이다. 이곳은 각국에서 생산되는 방탄, 방검 보호복의 성능을 테스트하여 합격된 제품에 한해 인증서를 발급하고 있다. NIJ는 개인용 방탄복 기준에 대해 사용되는 탄두에 따라 레벨 1~4까지 규정하고 있다. Table 1에는 NIJ-Standard-0101.04(Ballistic Resistance of Personal Body Armor)에서 제시한 탄두의 규격과 속도에 따른 레벨 수준을 보여주고 있다. 기본적으로 제시하는 규정은 총알이 방탄복에서 진행을 멈추고 방탄복을 뚫은 깊이(후면변형)가 레벨을 막론하고 1.73 인치(44 mm) 이상으로 일어나서는 안 된다[1]. 이 이상의 변형이 일어나게 되면 방탄복 착용자에게 신체적 부상 외에도 심각한 정신적인 충격이 가해지기 때문이다[2].

방검소재는 칼이나 창과 같이 끝 날의 날카로움으로부터 인체를 보호할 수 있는 소재를 말한다. NIJ standard 0115.00에서 제시하는 개인 방검복에 관한 국제 기준은 Table 2와 같이 레벨 1~3까지 나뉘어지고 방검시험에 사용되는 검은 칼날이 있는 칼(knife blade)과 끝이 뾰족한 창(spike)을 사용하여 다른 두 개의 에너지준위 E1과 E2에서 충격실험을 통해서 방검성능을 확인한다. E1을 통한 충격에서는 칼과 창이 뚫고 들어간 최대깊이가 0.28 인치이고, 방검재료의 안정성을 확실하게 확보하기 위해 재실험하는 E2는 E1보다 높은 에너지 하에서 충격을 가하고 이때 무기가 들어간 깊이는 0.79 인치를 넘지 않

Table 1. NIJ-standard protection levels for ballistic resistant body armor

Armor Type	Test Bullet	Bullet Weight	Bullet DIA.	Reference Velocity (± 30 ft/s)
I	.22 caliber LR LRN	2.6 g(40 gr.)	5.6 mm	329 m/s(1,080 ft/s)
	.380 ACP FMJ RN	6.2 g(95 gr.)	9 mm	322 m/s(1,055 ft/s)
IIA	9 mm FMJ RN	8.0 g(124 gr.)	9 mm	341 m/s(1,120 ft/s)
	40 S&W FMJ	11.7 g(180 gr.)	10 mm	322 m/s(1,055 ft/s)
II	9 mm FMJ RN	8.0 g(124 gr.)	9 mm	367 m/s(1,205 ft/s)
	.357 Magnum JSP	10.2 g(158 gr.)	9.1 mm	436 m/s(1,430 ft/s)
IIIA	9 mm FMJ RN	8.0 g(124 gr.)	9 mm	436 m/s(1,430 ft/s)
	.44 Magnum STHP	15.6 g(240 gr.)	10.9 mm	436 m/s(1,430 ft/s)
III	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g(148 gr.)	7.62 mm	847 m/s(2,780 ft/s)
IV	.30 caliber M2 AP	10.8 g(166 gr.)	7.62 mm	878 m/s(2,880 ft/s)

Table 2. NIJ-standard protection levels for stab resistant body armor

Protection Level	E1 Strike Energy		E2 Overtest Strike Energy	
	J	ft*lbf	J	ft*lbf
1	24 \pm 0.50	17.7 \pm 0.36	36 \pm 0.60	26.6 \pm 0.44
2	33 \pm 0.60	24.3 \pm 0.44	50 \pm 0.70	36.9 \pm 0.51
3	43 \pm 0.60	31.7 \pm 0.44	65 \pm 0.80	47.9 \pm 0.59

이야 한다[3].

3. 전단농화 유체(shear thickening fluid, STF)

현탁액(suspension) 또는 액체상의 입자 분산계는 연속상인 용매에 미세한 입자가 분산되어 있는 것으로, 페인트, 잉크, 종이 코팅제, 화장품, 전자산업 등에 광범위하게 이용되고 있다[4]. 이러한 유체는 그 특성에 따라 전단속도의 변화에 관계없이 일정한 점도를 보이는 뉴턴유체(Newtonian fluid)와 전단속도가 변할 때 점도도 함께 변하는 비뉴턴유체(non-Newtonian fluid)로 나뉜다. 대부분의 고분자 용융체나 용액은 전단속도 증가에 따라 점도가 감소하는 전단담화(shear thinning) 현상이나 임계 전단속도 이상에서 점도가 급격하게 증가하는 전단농화(shear thickening) 현상을 일으키는 비뉴턴유체이다.

이 중 STF(shear thickening fluid)라 불리는 전단농화 유체는 뉴턴유체와 달리 전단속도가 변화할 때 점도가 변하는 비뉴턴유체의 일종으로 전단응력이 증가함에 따라 유체의 점도가 급격히 증가하여 임계 전단속도 이상에서는 액상에서 고상으로 변화가 일어나는 유체를 말한다(Figure 2). 특히 응력이

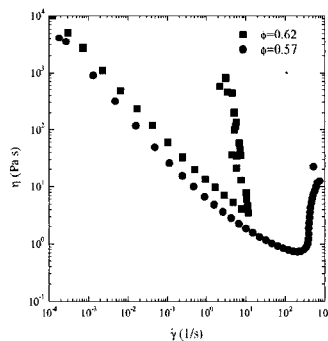


Figure 2. Shear thickening behavior of 57 and 62 volume % colloidal silica dispersed in ethylene glycol for steady shear flow[5].

제거되면 원 상태로 돌아가는 가역적인 반응이며 이러한 변화는 수 밀리초(milli-seconds) 내에 순간적으로 일어난다. 전단농화 현상은 입자의 응집과 같은 분산액의 미세구조 변화가 일어나 유체의 유동성이 저하되고 코

팅 품질이 떨어지는 등 품질과 운영 장비에 악영향을 주기도 한다. STF는 일반적으로 EG(ethylene glycol)나 PEG(polyethylene glycol)와 같은 연속상인 용매에 수십나노에서 수백나노 크기의 실리카(silica)와 같은 입자가 분산된 형태로 존재한다(Figure 3).

고농도의 입자 분산액은 용액 내에서 입자들이 차지하는 부피가 크기 때문에 입자간의 간격이 좁아지게 되고 빈 공간이 적어져서 외부로부터 변형을 받을 때에 입자들 사이의 상호작용이 강해짐으로써 응

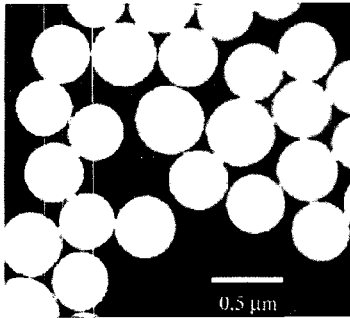


Figure 3. TEM micrograph of the HS450 silica particles [6].

Order-Disorder Transition(ODT) 이론[7-9]과 Hydrocluster 이론[10-12]이다.

Order-Disorder Transition 이론에서는 일정하게 증가하는 전단응력 하에 존재하는 입자들은 ordered 상태로 레이어를 형성하고 이 때 계속 증가하는 전단응력에 의해서 입자간의 상호작용력이 생겨서 레이어가 붕괴되고 disordered 상태로 바뀌면서 shear thickening 거동을 나타낸다고 본다. Hoffman은 미세구조의 변화에 의한 전단농화 기여 정도를 광회절법을 통해 확인했다. Hydrocluster 모델은 입자간의 상호작용으로 jamming이 일어나고 이것들이 뭉쳐서 hydrocluster를 형성하여 shear thickening이 일어난다고 해석하고 있다(Figure 4). Hydrocluster의 현상학적 해석이 좀 더 일반화되고 있으며 ordered 레이어 형성이 어려운 시스템 해석에 이 모델이 도입되고 있다. 콜로이드에서의 전단농화는 rheo-optical experiments, neutron scattering, stress-jump rheological measurements 등을 통해 확인할 수 있다.

3.1. 개시점(onset)에 영향을 미치는 인자

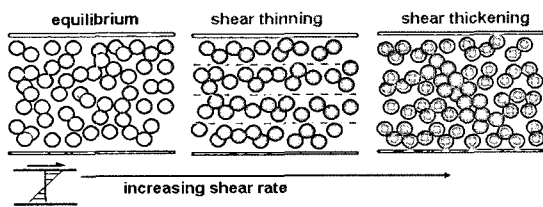


Figure 4. Schematic diagram of shear thickening phenomenon.

력과 점도가 커지게 된다. 비뉴턴유체의 전단담화 거동과 전단농화 거동의 현상학적인 분석을 통해 제시된 모델은 Hoffman (1972)의 Order-Disorder Transition(ODT) 이론[7-9]과 Hydrocluster 이론[10-12]이다.

고농도의 입자 분산계에서 입자의 부피분율에 따라 복잡한 유변학적 거동이 나타난다. 입자들의 농도가 증가할수록 입자들은 움직일 수 없이 꽉 들어찬 상태가 되는 시점이 생기며, 현탁액 전체에는 연속적인 3차원 접촉이 이루어져 흐름이 불가능하게 된다. 이렇게 점도가 무한대가 되는 순간의 입자 부피를 최대 충전분율(maximum packing factor)이라 한다. 최대 충전분율은 입자들의 크기와 분포, 입자의 형상, 입자간의 상호작용 등에 의해서도 매우 민감하게 결정된다. STF에 있어서 전단속도(또는 전단응력)에 따라 전단농화 현상이 시작되는 개시점은 매우 중요한 의미를 가지며 이는 STF의 조성 조건에 따라 달라진다. 이렇게 개시점에 영향을 미치는 주요한 인자들은 다음과 같다.

3.1.1. 입자 부피 분율(particle volume fraction)

Figure 2는 EG에 분산된 실리카 입자의 부피분율에 따른 전단속도와 유체점도와의 관계를 나타낸 것으로 부피분율이 높아짐에 따라 낮은 전단속도에서 개시점이 나타나며 점도의 증가가 급격히 일어난 것을 볼 수 있다.

3.1.2. 입자 크기(particle size)

Figure 5는 고분자와 무기입자를 포함한 모든 현탁액계에서 부피분율을 0.5로 하였을 때 입자의 크기와 전단농화 개시점과의 관계를 나타낸 것으로

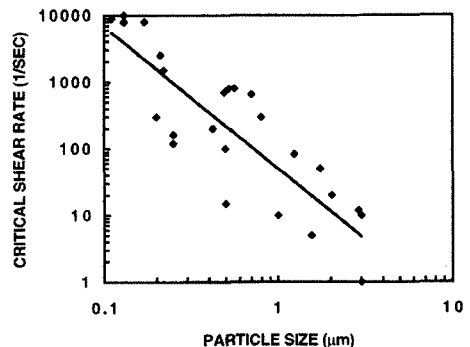


Figure 5. Effect of particle size on the critical shear rate at which shear thickening is initiated. ($\Phi = 0.5$)[13].

입자크기가 작아질수록 임계전단속도가 높아지는 것을 볼 수 있다.

3.1.3. 입자 크기 분포(particle size distribution)

진한 현탁액에서 점도에 영향을 미치는 입자의 최대 충전분율은 충전 형태 뿐만 아니라 입자의 크기 분포에도 매우 민감하게 결정된다. 입자의 크기 분포가 넓을수록 최대 충전분율이 커지게 되는데 이는 상대적으로 작은 입자들이 큰 입자들 사이에 채워지기 때문이다. 따라서 서로 다른 크기의 입자를 혼합하게 되면 유체의 전단농화 시작점에 영향을 미친다. Figure 6은 크기가 다른 두 종류의 실리카(300 nm, 1000 nm)를 고정 부피분율($\Phi = 0.53$)로 섞어 전단속도와 점도와의 관계를 나타낸 것이다. 낮은 전단속도 영역에서는 혼합액의 점도가 낮아지는 반면 임계 전단속도 영역에서는 전단농화가 뚜렷이 관찰됨을 볼 수 있다. 이 그림에서는 입자의 크기효과 뿐만 아니라, 혼합에 따른 최대 충전분율의 증가와 이에 의한 상대 충전비율의 감소로 인한 점도의 감소가 관찰된다. 개시점은 혼합시 통상 300~1000 nm 사이에서 일어나야 맞겠지만 위에 언급한 충전분율의 감소로 인해 오른쪽으로 이동하는 효과 때문에 Figure 6을 얻게 된다.

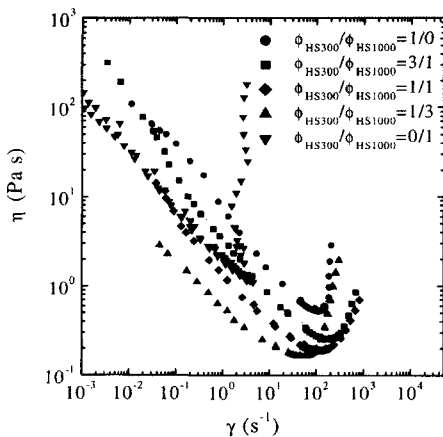


Figure 6. Steady state viscosity curves of the bimodal suspensions of HS300 and HS1000 at various mixing ratios as indicated and constant volume fraction 0.53[14].

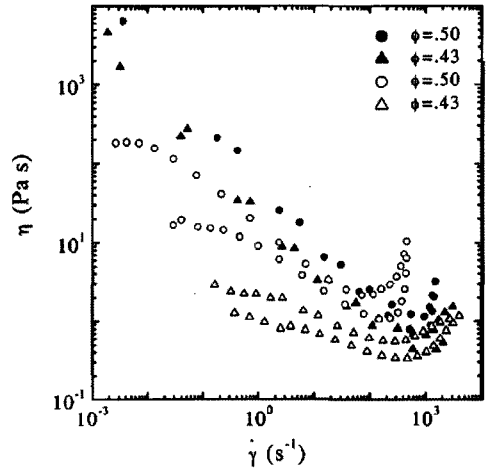


Figure 7. Viscosities plotted against applied shear rate for the unneutralized(filled symbols) and neutralized(open symbols) dispersions at two particle concentrations ($\Phi = 0.5$ and $\Phi = 0.43$)[15].

3.1.4. 입자간 상호작용(interparticle interaction)

실리카 입자들의 분산 안정화를 위해 통상 정전기적 혹은 입체장애적 반발을 이용한다. Figure 7은 분산액을 0.066M의 질산(HNO_3)으로 중화시켰을 때 전단속도와 점도와의 관계를 두 가지 입자 부피분율에 대해 나타낸 것이다. 여기서 흰색 마크는 질산으로 처리한 경우를, 검은 마크는 아무 처리하지 않은 경우를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 표면의 해리된 실라놀기를 질산으로 중화시켜 입자간의 반발력을 감소시키면 전단농화는 더 낮은 전단속도에서 일어나며 입자간의 반발력이 클수록 더 높은 전단속도 영역에서 일어난다. 실리카 입자의 단위 중량당 표면 실라놀기의 함량이 특정의 pH영역에서 반발력에 기여한다고 보았을 때, 입자의 크기가 작아질수록 반발력에 기여하는 표면 실라놀기 함량이 증가하므로 전단농화는 더 높은 전단응력에서 일어나게 된다.

3.1.5. 입자의 형태(particle shape)

진한 현탁액 속에서 점도에 영향을 미치는 입자의 최대 충전분율은 입자들의 형태와 배치에 따라

Table 3. 구형 입자 배열형태에 따른 최대 충전분율 (단분산)

입자 배열형태	최대 충전분율
simple cubic	0.52
hexagonally packed sheets just touching	0.548
random close packing	0.605
body-centered cubic packing	0.68
hexagonal close packing	0.74

Table 4. 비구형 입자 형상비에 따른 전단농화 임계 충전분율 (단분산)

	PCC(2:1)/PEG	PCC(4:1)/PEG	PCC(7:1)/PEG
Φ_c	0.454	0.378	0.308

서 달라지는데 단분산 구인 경우에는 대략 0.5에서 0.75 사이에 분포한다(Table 3). 또한 비구형 입자의 비대칭성은 고유점도와 최대 충전분율에 영향을 준다. Table 4에서 볼 수 있듯이 PEG와 혼합된 침강형 CaCO₃ (PCC) 등과 STF의 경우 이방성 입자의 형상비(aspect ratio)가 커질수록 더 낮은 입자 부피분율에서 전단농화가 발생한다[16].

3.2. 방호복에의 응용

위와 같은 성질을 가지고 있는 전단농화 유체(STF)를 개인 방호복에 응용하기 위한 연구는 미 육군연구소(ARL)와 Delaware 대학 연구팀들이 중심이 되어 기초연구를 진행하였고 현재 방탄과 방검성능에 대한 일부 연구결과가 발표되고 있다. 서울대학교 복합재료 연구실을 포함한 국내 일부에서도 기초연구가 시작되어 진행되고 있다[17-18].

전술한 바와 같이 개인 보호를 위한 방호복은 총탄이나 포탄 파편 등으로부터 몸을 보호하는 방탄복과 칼과 스파이크 등으로부터 몸을 보호하는 방검복으로 크게 구분할 수 있다. 이들 방호복에 가해지는 충격자의 속도 수준이 다르기 때문에 다른 에너지 흡수 메커니즘이 작용하는데 STF에 의한 기전은 유사하다고 볼 수 있다. STF를 이용한 방호복의 원리는 STF를 기존 방호재료인 케블라 직물에 도포하여 방호성능을 향상시키는 것이다. 여기에는 방호성능의 향상과 함께 방호복의 중량 절감과 유

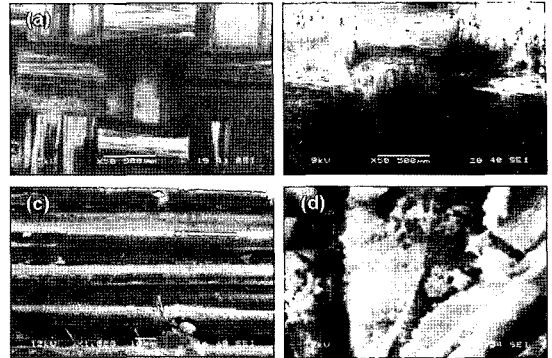


Figure 8. SEM images of (a) neat Kevlar ($\times 50$) and Kevlar impregnated with 20wt% STF (b) $\times 50$ (c) $\times 1000$ (d) $\times 7500$.

연성을 확보하여 착용자가 원활히 활동할 수 있도록 돕는데에도 그 목적이 있다. 방호복에 낮은 전단속도가 가해지는 정상 활동 시 STF는 액체상으로 있기 때문에 방호복이 유연성을 잃지 않아 활동에 큰 지장을 주지 않는다. 그러나 방호복에 총탄이나 스파이크에 의한 충격이 가해지면 직물에 변형이 생기며 실(yarn)과 실, 또는 실과 섬유(fiber)의 상대적인 움직임에 의해 직물에 도포된 STF와 그 주변에서 squeeze flow를 비롯한 전단흐름이 순식간에 발생하게 되며 고체상으로 전이가 일어나는 전단농화 현상이 발생하여 방호복의 강성을 증가시켜 방호성능을 향상시키는 것이다. 이때 직물은 충격하중을 전달하는 동시에 shear thickening 효과를 넓은 영역에 걸쳐 분산시키는 역할을 한다.

Figure 8은 fumed silica(Aerosil 200)와 EG를 사용한 STF를 케블라에 도포한 후 균일한 함침여부를 확인하기 위하여 EG를 제거하고 케블라 표면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 순수 케블라(a)와 달리 직물 표면에 실리카 입자가 부착되어 있음을 볼 수 있고(b) 고배율로 관찰 시 실리카 입자가 직물 표면만이 아닌 섬유 내부로도 침투되어 있음을 확인할 수 있다. 이렇게 표면에 부착된 실리카와 섬유 내부로 침투된 실리카는 쉽게 떨어지지 않고 지속적으로 작용을 하게 된다.

미국 Delaware 대학의 복합재료 연구팀은 STF가

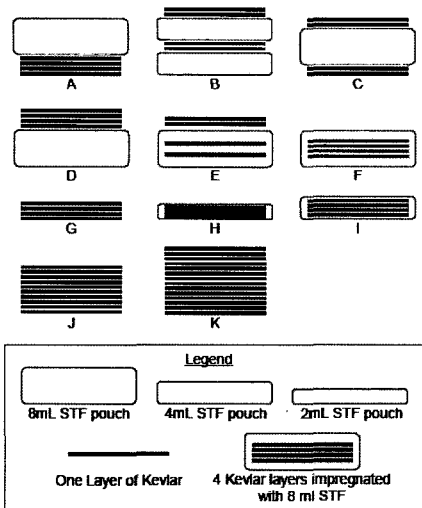


Figure 9. Target geometries for ballistic tests. In all cases the projectile impacts the top surface.

방탄성능에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Kevlar/STF 복합체를 제조하여 광범위한 방탄실험을 수행하였다[5]. 연구팀은 450nm 크기의 콜로이드상 구형 실리카 입자를 EG와 PEG에 분산시켜 STF를 제조하고 이를 케블라 직물에 도포하여 직물 복합체를 만들고 여기에 약 초당 800 피트 속도의 파편탄(fragment simulation projectile, FSP)을 가하여 방탄실험을 하였다. 이 때 사용한 케블라 직물은 600 데니어의 KM-2 직물이다. 연구팀은

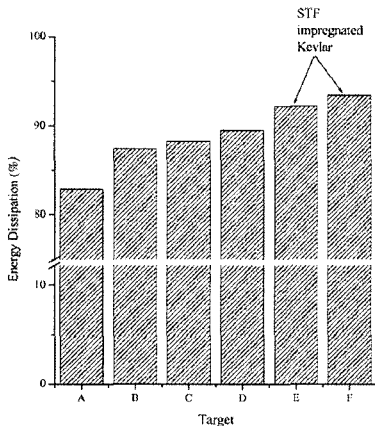


Figure 10. Result of energy dissipation with different target design.

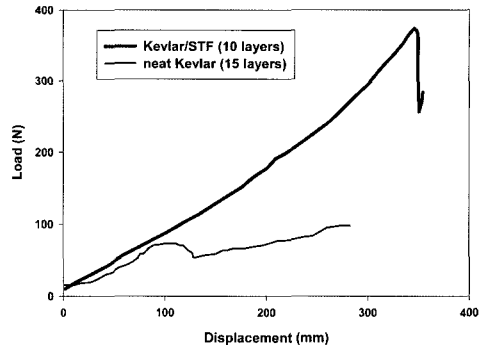


Figure 11. Load-displacement curves for quasistatic loading of Kevlar and Kevlar/STF targets against spike impactor.

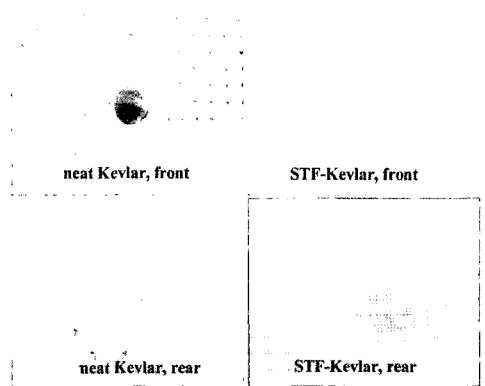


Figure 12. Photographs of fabric damage after testing against spike impactor.

Figure 9와 같이 케블라 직물 4층과 STF 파우치를 단순 적층하거나 함침시키는 등 배열을 달리하면서 (A~F) 시편을 제작하여 방탄실험을 하였고 총탄이 시편을 관통하기 전후의 속도차를 측정하여 시편이 흡수한 에너지 비율(energy dissipation, %)을 계산하였다.

Figure 10은 이 방탄실험의 결과를 보여주는 것으로 STF에 완전히 함침된 시편 E, F가 다른 시편에 비해 총탄에 의한 시편의 관통이 적고 따라서 총탄의 운동에너지를 많이 흡수하여 우수한 방탄 성능을 나타내었다. STF의 양을 달리하며 실험한 결과 STF의 양이 증가할수록 에너지 흡수 비율이 증가함을 확인하였다. 10층의 순수 케블라 시편과 2

ml의 STF에 함침한 4층의 케블라 시편의 중량은 유사하며 에너지 흡수 비율도 같다. 그러나 간단한 실험을 통하여 시편의 유연성을 측정된 결과 STF에 함침한 케블라 시편의 유연성이 월등함을 확인하여 방탄성능과 유연성 확보라는 목적에 부합함을 확인하였다.

한편, 서울대학교 연구팀은 케블라 KM-2 직물에 fumed silica/EG STF를 함침한 시편(10층의 케블라)과 미처리 순수 케블라 시편(15층의 케블라)을 면밀도가 동일하게 제작한 후 저속의 스파이크 충격을 가하여 방검성능을 고찰하였다[18]. Figure 11은 스파이크에 의한 충격 시 하중-변위 곡선이며 Figure 12는 충격 후 시편 앞·뒤의 모습을 보여주고 있다. 스파이크가 시편을 통과할 때 Kevlar/STF 시편의 경우 미처리 케블라 시편에 비해 상당한 하중이 필요함을 알 수 있다. 또한 미처리 케블라 시편은 충격자 주변부에 상대적으로 큰 변형이 생겼으며 시편 앞·뒷면에 걸쳐 완전 관통이 일어났음을 알 수 있다. 반면 STF를 처리한 시편의 경우 충격자 주변부의 변형이 적었으며 뒷면의 관통이 일어나지 않았다. 이는 시편 후면부에 위치해 놓았던 witness paper를 통해서도 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 이 두 시편의 중량은 동일하며 시편의 굽힘각을 측정하는 유연성 테스트 결과 Kevlar/STF 시편의 굽힘각이 2배 이상 큰 결과를 얻어 유연성이 우수함을 확인하였다.

이상의 방탄, 방검성능에 대해 진행되어온 연구 결과를 고찰해 보았을 때, 전단농화 성질을 이용한 Kevlar/STF 복합체의 경우 순수 케블라 방호재에 비해 비교적 우수한 방호성능과 함께 착용자의 활동성을 위해 유연성 확보라는 목적에 부합함을 확인할 수 있었다. 그러나 실제 고속의 총탄에서도 방호성능을 발현할 수 있기 위해서는 아직 고려해야 할 사항이 많으며 전단농화의 개시점을 조절해야 할 뿐만 아니라 절대 점도를 높일수 있는 조건을 확립하는 등 관점을 달리한 연구가 계속 수행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 전기유변 유체(electrorheological fluid, ERF)와 자기유변 유체(magnetorheological fluid, MRF)

외부장(external field)에 의해 물성이 변하거나 바뀌는 물질을 스마트 재료라고 하며 ferroelectricity, pyroelectricity, piezoelectricity, shape memory effect, electrostriction, magnetostriction, electrochromism, photomagnetism, photochromism 등의 성질을 포괄하고 있다[19]. 이러한 재료들은 대부분 벌크 상태나 얇은 필름 형태인 고체상으로 이용되고 있다. Field responsive fluid(FRF)라고 불리는 스마트 재료는 고체상의 전통적인 스마트 재료와 달리 분산액이나 겔 형태의 소프트한 형태로 이용되고 있으며 magnetorheological fluid(MRF), ferrofluid, electrorheological fluid(ERF) 등을 포함하고 있다. FRF는 일반적으로 입자들이 용매에 분산되어 있는 현탁액 형태이며 이들의 유변학적 물성은 외부의 전기장이나 자기장에 의해 조절되게 된다.

4.1. 전기유변 유체와 자기유변 유체

전기유변 유체(electrorheological fluid, ERF)는 일반적으로 수 내지 수백 μm 와 0.05~0.50 부피분율을 가진 반도체성 입자들이 비전도성 용매에 분산되어 있으며, 전기장 하에서 점도나 응력 같은 유변 물성이 수 밀리초의 짧은 시간 내에 급격히 증가한다. 또한 전기장이 제거되면 본래의 유변물성으로 돌아가는 가역적인 반응을 보이는 물질로, 전기유변 물질 또는 전기유변 현탁액이라고 한다[4, 20-22].

자기유변 유체(magnetorheological fluid, MRF)란 전기유변 유체와 유사하게 자기장이 부여되면 유변 물성이 급격히 증가하고 자기장이 사라지면 이러한 유변물성이 감소되어 본래의 유체와 같은 성질을 가지는 가역적으로 반응하는 유체를 말한다. 이러한 자기유변 유체는 자기장 하에서 자기 편극화를 보이는 입자들로 이루어진 현탁액이며, 자기장 하에서 자화된 입자들 사이의 상호 작용력에 의해 사

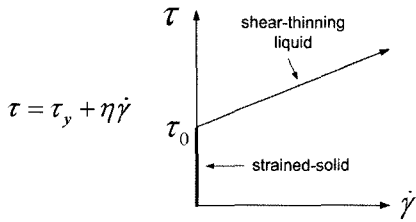


Figure 13. Stress versus strain rate for a Bingham plastic. 슬 모양의 미세구조를 형성하고, 수 밀리초의 빠른 응답과 높은 항복응력을 가진다[4,21-23].

이 두 가지 유체는 Figure 13에서 보는 바와 같이 Bingham 모델로 표시할 수 있으며[24-26] 최근에는 변형된 Herschel-Berkley 모델, Cross 모델 등이 제시되고 있다[27-28].

여기서, τ 는 전단응력, τ_y 는 전기력이나 자기력 세기에 비례하는 동적 항복응력, η 는 소성점도(plastic

viscosity), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도를 나타낸다.

전기유변 유체를 구성하는 물질의 경우 특별히 정해진 입자는 없으며, Table 5에는 현재 상용화된 전기유변 유체와 구성 목록을 제시하였다[4].

이와 달리 자기유변 유체는 대부분 직경이 1~10 μm 의 철(iron) 입자나 Fe_3O_4 의 마그네타이트(magnetite)로 구성되며, 흔히 자기력에 관계하는 마그네틱 물질이라고 하면 반자성체(diamagnetic), 상자성체(paramagnetic), 강자성체(ferromagnetic), 페리자성체(ferrimagnetic), 반강자성체(antiferromagnetic)의 5가지 종류가 있다. 자기유변 유체에는 일반적으로 강자성체와 페리자성체가 사용된다. 이들 각각의 자성체 특성을 Table 6에 제시하였다.

이런 ERF와 MRF 두 유체는 응용장치에서 중요한 요소인 낮은 초기점도, 외부장 하의 높은 전단

Table 5. The list of commercial ER fluids

연구자	전기유변물질
Ishino et al. (1995) Sakurai et al. (1996, 1999)	carbonaceous particles / silicone oil
Saito et al. (1997)	polymer core surrounded by an inner layer silver and an outer layer of silica/silicone oil
Kawakami et al. (1997) Ikazaki et al. (1997)	sulfonated poly(styrene-co-divinylbenzene) particles / insulating oil
Bloodworth et al. (1996)	polyurethane particles /silicone oil
Havelka et al. (1994)	coated polyaniline particles

Table 6. Classification of magnetic materials

Magnetism	Susceptibility	Atomic / Magnetic behavior		Example
dia-magnetism	small negative	Atoms have no magnetic moment		Au Cu
para-magnetism	small positive	Atoms have randomly oriented magnetic moments		Pt Mn
ferro-magnetism	large positive	Atoms have parallel aligned magnetic moments		Fe
antiferro-magnetism	small positive	Atoms have mixed parallel and anti-parallel aligned magnetic moments		Cr
ferri-magnetism	large positive	Atoms have anti-parallel aligned magnetic moments		Ba ferrite Fe_3O_4

응력, 낮은 전력소모 등의 장점을 가지고 있기 때문에 자동차, 항공, 광학, 로봇, 기타 기계장치 등으로의 응용범위가 매우 넓다[29-30].

이러한 유사성이 있는 반면 두 유체는 몇 가지 뚜렷한 차이점도 가지고 있다. 예를 들어, 전기유변 유체가 높은 외부장력 하에서는 전기적 절연과피 같은 현상이 나타나는 반면, 자기유변 유체에서는 일어나지 않는다. 그리고 자기유변 유체는 자기장이 사라져도 잔류자력이 남아 온오프(on-off) 응답이 다소 지연되는데 비해, 전기유변 유체에서는 그와 같은 현상이 발생하지 않는다. 그러나 전기유변 유체는 응용장치에 다양하게 쓰이기에는 온도범위가 좁아 이로 인한 항복응력의 감소, 외부환경에 쉽게 반응하는 문제 등의 단점이 있어 유체나 제품으로 상용화되는 경우는 극히 드물었다. 이런 단점 때문에 이에 대한 대체물로서 자기유변 유체가 주목받기 시작하였다. 반면 자기유변 유체는 광범한 온도범위에서 사용이 가능하고 상대적으로 더 큰 항복응력을 가지고 있기 때문에 이를 바탕으로 한 상용화된 유체와 장치가 최근에 보고되고 있다[31-33]. 그러나 자기유변 유체 역시 비중 높은 분산입자로 인한 응집, 침강, 낮은 재분산성 등의 단점으로 장시간 사용에는 제한성이 있기 때문에 실제 상용화된 제품은 아직까지 많지 않은 실정이다[34-35]. Table 7은 일반적인 전기유변 유체와 자기유변 유체의 물

성을 비교한 것이다[4].

4.2. 메커니즘 및 물성

전기유변 유체와 자기유변 유체의 구조변화를 설명하고자 하는 모델은 유동장 하에서 물질의 구조변형이 어떤 이유로 일어나는지 규명하려는 시도와 이들 유체의 입자상에 어떤 물리적/화학적 원칙이 작용하여 유변물성이 향상되는지 규명하려는 시도로 구분된다. 기본적으로 두 가지 메커니즘의 공통점은 외부장에 의해 유체의 입자들이 편극화가 되면서 유체 내 입자가 전기장이나 자기장 방향으로 정렬하게 되고 이 입자들이 가느다란 섬유형태로 응집이 되면서 전단저항이 증가하게 된다. 전단응력이 더욱 강하게 가해지면 이러한 응집이 붕괴되면서 에너지를 흡수하게 된다는 것을 기본적인 메커니즘으로 본다. 전기유변 현상의 경우는 이러한 현상을 1949년에 Willis Winslow가 주장하여 “Winslow Effect”로도 언급되는데[20], 최초 3 kV/mm의 전기장에서 현탁액은 섬유의 형상을 보이며, 전기장에 평행하게 신장되면서 응집된다[36]. 이때의 힘은 전기장의 제곱에 비례하며 낮은 전단응력에서 고체와 유사한 거동을 하게 된다(Figure 14).

그러나 이러한 현상을 설명하는 모델은 전기유변 유체의 경우 입자편극화(bulk polarization) 모델, 전기적 이중층 편극화(double-layer polarization) 모델,

Table 7. Comparison of properties between ER and MR fluids

	전기유변 유체	자기유변 유체
항복응력(장)	2~5 kPa (3~5 kV/mm) field limited by breakdown	50~100 kPa (150~250 kA/m) Field limited by saturation
점도(외부장 없음)	0.2~0.3 Pa · s at 25 °C	0.2~0.3 Pa · s at 25 °C
조업온도	10~90 °C (ionic DC) -25~125 °C (non-ionic AC)	-40~150 °C (Limited by carrier fluid)
전류밀도	2~15 mA/cm ² (4kV, 25 °C)	Can energize with permanent magnet
비중	1~2.5	3~4
입자종류	any (conductive surfaces)	Iron / Steel
색	any, opaque or transparent	brown, black, gray opaque

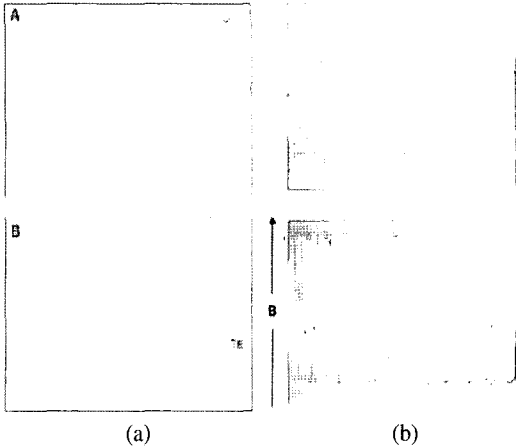


Figure 14. (a) Chains or columns of particles ($0.7\mu\text{m}$) before and after applying an electric field[36], (b) MR suspensions (2 vol. %, $50\mu\text{m}$ dia. iron particles in silicone oil) before and after applying a magnetic field[37].

계면편극화(interfacial polarization) 모델 등으로 입자 간에 작용하는 힘의 본질이 편극화에 의한 정전기력이라고 가정하여 이 힘이 바인더(binder)로서 작용한다는 주장한다[38].

최근에는 비선형 전도(nonlinear conduction) 효과가 주장되면서 전기유변 현상에 더욱더 힘을 실어주고 있다. 즉, 가깝게 접근한 입자들 사이의 전기장력은 표면적으로 나타나는 장력에 비해 매우 크고, 이러한 영역에서는 유체 내 해리에 의해 장력과 함께 유체의 전도도가 증가하게 되고, 입자들 사이의 장력은 부여된 전기장에 비해 느리게 증가하다가 마침내 높은 영역에서 포화되고, 그 결과 전기장력과 응력은 전기장의 $n(<2)$ 제곱에 비례하게 된다[35].

자기유변 유체의 경우도 전기유변 유체를 설명하는 모델과 흡사하지만 차이점은 자기장 세기와 입자간 힘은 세 영역으로 나뉜다. 자기장 세기가 매우 낮은 영역에서는 입자자화는 선형적이며 중간 영역에서는 자기적으로 포화된 영역이 입자들의 편극화된 부분으로부터 커지게 되고, 높은 영역에서는 입자자화가 완전히 포화되고 입자들은 고정된 입자간 힘의 간단한 이중극자로 다루어진다. 낮은

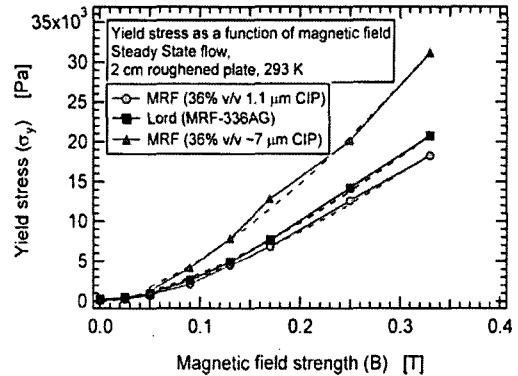


Figure 15. Yield stress comparison for three MR fluids, one commercially available and two synthesized in laboratory. The dotted lines show the sub-quadratic dependence of yield stress on the magnetic field strength.

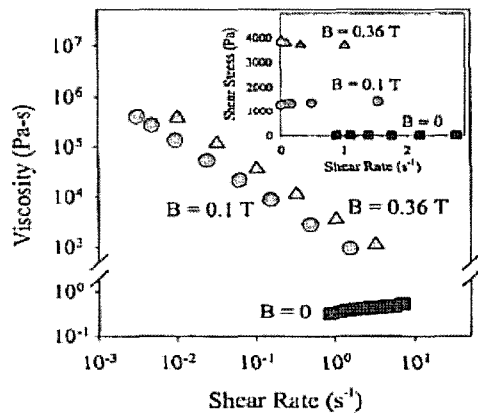


Figure 16. Apparent viscosity as a function of shear rate for an MR fluid composed of carbonyl iron particles ($50\mu\text{m}$ dia) in silicone oil (10 vol%) for different applied magnetic field strengths[34].

장력이 부여되면 입자들은 선형적으로 늘어선 기둥이 되거나, 또는 자기력에 따라 선형적으로 배열된 타원형 집합체로서 표현되며 이 영역에서는 입자간 힘, 전단응력, 강성이 부여된 자기장 세기나 자속밀도의 세 제곱에 비례하는 것으로 묘사되고 있다. 입자자화가 부분적으로 포화된 영역에서는 전단강성이 자기장 세기에 대해 선형적으로 증가한다. 이때는 자기비선형(magnetic nonlinearity)과 자기포화(magnetic saturation)의 효과가 지배적이며, 항복응

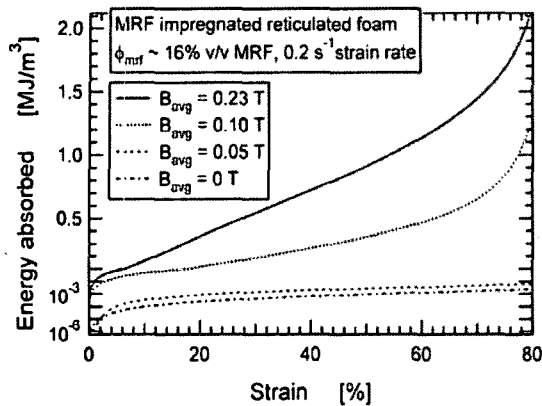


Figure 17. Variation of energy absorption capacity by modulating the magnetic field strength for 16% v/v MR fluid-filled open cell foam[43].

력은 자기장의 3/2 제곱에 비례하는 것으로 묘사된다[32,35,39-40](Figure 15).

또한, Figure 16에서 볼 수 있듯이 자기장이 없는 상태에서는 유체는 전단속도와 무관하게 뉴튼거동을 보이지만, 외부 자기장이 가해졌을 때 점도가 증가하게 되며, 자기장을 증가시키게 되면 점도는 더욱더 급격히 증가되는 것을 확인할 수 있다[27-28,

41-42].

특히 최근 MIT에서 자기유변 유체를 폴리우레탄 폼에 함침시켜 역학적 특성을 측정된 결과를 보게 되면 0.2 Tesla의 자기장으로 30~50 배의 에너지 흡수 효과를 얻을 수 있다(Figure 17). 이러한 결과는 앞으로의 자동차나 항공기 산업분야는 물론이며, 앞에서 기술한 STF와 더불어 방탄복 분야에서도 액체방탄재로서의 활용가능성을 보여주고 있다[43].

4.3. 전기유변 유체와 자기유변 유체의 응용

지난 수년간 전기유변 유체의 실용화는 거대시장을 형성하고 있는 자동차나 항공기 산업 같은 운송 장치에 집중되어 왔다. 유변학적 변화를 응력이송에 전달하는 방법의 차이에 따라 진동댐퍼, 동력전달/클러치, 위치제어, 밸브 등으로 나눌 수 있다. 이러한 전기유변 장치가 이용 가능한 주된 원인은 빠른 반응속도와 적은 전력 소모량, 쉬운 조절능력 등이다. 따라서 공학기술적인 관점에서 전기유변 유체의 응용분야는 매우 광범위하다[31,44].

전기유변 유체가 매우 큰 전압을 필요로 하는데 비해 자기유변 유체는 자동차 배터리 전압처럼 보

Table 8. Current and Potential Applications of MR fluids[37]

Application	Reference
<i>Current Applications :</i>	
Automotive clutch	Sakai (1988)
Brakes for exercise equipment	Carlson and Sproston (2000)
Polishing fluids	Kordonsky and Golini (2000)
Seat dampers	Carlson and Sproston (2000)
Prosthetic knee damper	Carlson and Sproston (2000)
Actuator systems	Lewis (1999)
	Carlson and Sproston (2000)
Shock absorbers	Corbett (2000)
<i>Potential Applications :</i>	
Engine mounts	Hartsock et al. (1991)
	Ginder (1996)
Earthquake damper	Dyke et al. (1996)
Automotive clutches	Hartsock et al. (1991)
	Ginder (1996)
MR Elastomer dampers	Ginder (1996)
	Davis (1999)

다 작은 전압 하에서도 작동이 가능하다. 따라서 전기유변 유체의 설계에서는 필수적인 안정성과 집약성 문제가 자기유변 유체의 설계 경우에는 상대적으로 적다. 또한 자기유변 유체가 전기유변 유체보다 훨씬 큰 항복응력을 나타낸다는 연구결과와 보고되고 있다. 이 외에도 자기유변 유체는 조업온도 범위나 외부 환경오염에 대한 반응성도 전기유변 유체보다 우수하기 때문에 보다 실용화 가능성이 전기유변 유체보다 크다고 할 수 있다[26,34].

실제로 자기유변 유체를 이용한 쇼크 업소버, 클러치, 엔진 마운트, 브레이크, 조절 밸브, 선형구동장치 등의 실용화가 연구되었으며, 특히 회전 브레이크와 승차감을 향상시키는 데 사용되는 선형 댐퍼는 실제 상용화 되었다[33]. Table 8은 현재와 향후 자기유변 유체의 응용 분야에 대해 정리한 것이다.

최근 2-3년간 가장 주목할 점은 자기유변 유체를 방탄복에 응용하려는 시도가 미국의 MIT대학과 미 국방성 중심으로 시작되었다는 것이다. 현재 미국 내의 과학과 관련된 기사 면에는 "Instant Armor", "Liquid Body Armor(LBA)"라는 제목의 기사들이 세계인의 주목을 받고 있다. 특히 MIT 연구팀은 앞으로의 전쟁에 있어서는 무겁고 불편한 방탄복에서 얇고 가벼우면서 유연하며 기존의 방탄복보다 더욱더 효율성이 높은 "Liquid Body Armor"쪽으로 바뀌어야 한다는 슬로건을 기치로 활발한 연구를 진행해가고 있다[43,45]. 2002년부터 시작된 LBA 연구는 초기에는 field responsive fluid에 대한 기초적인 연구로부터 출발했다. 이를 바탕으로 2004년부터는 splints와 injury protection을 위한 LBA가 진행 중이며, 올해부터는 기존의 연구를 바탕으로 blast protection을 위한 연구가 시작되었다. 이 연구는 4년 정도의 기간이 소요될 것으로 보이며 그 이후에 최종 목적인 adaptive armor에 도달할 계획을 수립하고 있다. 아직까지는 방탄에 대한 자기유변 유체에 대한 논문이나 기타 자료가 제시되고 있지는 못하지만, 향후에는 MIT대학 뿐 아니라

기타 다른 기관에서도 많은 연구가 시도될 것으로 예상된다. 이러한 LBA에 자기유변 유체를 응용하는 시도는 충분히 가능성 있으며 연구할 가치 또한 상당히 높다고 생각된다.

전술한 바와 같이 미 국방성은 STF를 이용한 방탄복에 대한 연구도 진행하고 있는데 향후에는 이러한 LBA 액체방탄을 기반으로 한 방탄복이 기존의 방탄복을 빠른 속도로 대체할 것으로 예상되며 국내에서도 이러한 연구의 필요성이 시급히 요구되고 있다.

5. 결 론

이상으로 기존의 방호복을 대체할 미래의 신개념 방호재로 그 가능성에 대해 주목받고 있는 개인 액체방호재료(LBA, liquid body armor)의 대표적인 세 가지 유체와 응용에 대해 고찰해 보았다. 전단농화 유체는 방호재료의 응용 가능성에 대해 미국과 국내 일부를 중심으로 상당한 연구가 진행되고 있으며 방호성능과 유연성과 활동성 확보라는 목적에 부합할 수 있다는 사실에 굉장한 주목을 받고 있다. 반면 전기유변 유체와 자기유변 유체를 방호복에 응용하기 위해서는 아직도 많은 연구가 필요한 실정이다. 그러나 이들 모두 실용화에 대한 잠재성과 예상되는 시장 조건은 매우 무궁무진하다고 할 수 있다. 왜냐하면 굳이 전쟁을 예를 들지 않더라도 평화와 질서를 기반으로 하는 복지사회를 최우선 가치로 삼는 현 국가 시스템에서 사회의 정의와 법질서를 수호하고 유지하는데 효과적인 보호장비의 필요성은 아무리 강조해도 지나치지 않기 때문이다.

오래전부터 STF, ERF, MRF 유체의 가능성에 대해 주목하고 기초 연구를 진행해 왔으나 아직까지 성질 발현 메커니즘 등에 대해서는 명확히 규명되어 있지 않았다. 아직도 해결해야 할 문제들이 많다. 따라서 이들 유체에 대한 기초확립과 실용화를 위해서는 명확한 유변학적 이해가 고려되어야 할 것이며, 기존의 자동차나 항공기 산업 이외에도 섬

유 분야에 있어서도 새로운 적용과 시도가 이루어져야 할 것이다. 관련 대학과 기관들에게 연구에 대한 관심과 분발이 촉구된다.

참고문헌

1. NIJ standard-0101.04, "Ballistic resistance of personal body armor", 2001.
2. S. Bazhenov, *J. Mater. Sci.*, 32, 4167(1997).
3. NIJ standard-0115.00, "Stab resistance of personal body armor", 2000.
4. 한국유변학회, 유변학의 이론과 응용, 2001.
5. Y. S. Lee, E. D. Wetzel and N. J. Wagner, *J. Mater. Sci.*, 38, 2825(2003).
6. S. S. Shenoy and N. J. Wagner, *Rheol. Acta*, 44, 360(2005).
7. R. L. Hoffman, *Trans. Soc. Rheol.*, 16, 155(1972).
8. H. A. Barnes, *J. Rheol.*, 33, 329(1989).
9. W. H. Boersma, J. Laven, and H. N. Stein, *J. Colloid Interface Sci.*, 149, 10(1992).
10. J. W. Bender, and N. J. Wagner, *J. Colloid Interface Sci.*, 172, 171(1995).
11. G. Bossis and J. F. Brady, *J. Chem. Phys.*, 91, 1866(1989).
12. J. Bender and N.J. Wagner, *J. Rheol.*, 40, 899(2001).
13. R. L. Hoffman, *J. Rheol.*, 42(1), 111(1998).
14. B. J. Maranzano and N. J. Wagner, *J. Chem. Phys.*, 114(23), 10514(2001).
15. B. J. Maranzano and N. J. Wagner, *J. Chem. Phys.*, 117(22), 10291-10302(2002).
16. R. G. Egres and N. J. Wagner, *J. Rheol.*, 49(3), 719-746(2005).
17. 유미란, 조영준, 김창연, 박종렬, 강태진, 하현승, 백종규, 유변학의 이론과 응용, 9(2), 117-120(2005).
18. 유미란, 석사학위 논문, 서울대학교, 2006.
19. P. P. Phule, *Smart Materials Bulletin*, 7-10(2001).
20. W. Winslow, *J. Appl. Phys.*, 20, 1137(1949).
21. J. D. Carlson and J. L. Sproston, "Controllable Fluids in 2000 - Status of ER and MR Fluid Technology", *Actuator 2000-7th Int. Conference on New Actuators*, in press, 2001.
22. R. G. Larson, "The Structure and Rheology of Complex Fluids", Oxford University Press, 1999.
23. J. Rabinow, "The Magnetic Fluid Clutch", *AIEE Trans.*, 67, 1308(1948).
24. S. J. Dyke, B. F. Spencer, Jr. M. K. Sain, and J. D. Carlson, *Smart Mater. Struct.*, 5, 565-575(1996).
25. A. P. Gast and C. F. Zukoski, *Adv. Coll. Int. Sci.*, 30, 153(1989).
26. J. M. Ginder, "Rheology Controlled by Magnetic Fields", *Encyclopedia of Applied Physics*, 16, 487(1996).
27. D. J. Klingenberg, *AIChE J.*, 47, 246(2001).
28. S. Genc and P. P. Phule, *Smart Mater. Struct.*, 11, 140(2002).
29. Z. P. Shulman, R. G. Gorodkin, E. V. Korobko, and V. K. Gleb, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, 8, 29(1981).
30. L. C. Davis, *J. Appl. Phys.*, 85, 3348(1999).
31. D. L. Hartssock, R. F. Novak, and G.J. Chaundy, *J. Rheol.*, 35, 1305(1991).
32. W. I. Kordonski and D. Golini in "Proc. of 7th Int. Conference on Electro-rheological Fluids and Magnetorheological Suspensions", (R. Tao Ed., World Scientific, Singapore, p.682, 2000.
33. M. R. Jolly, J. W. Bender, and J.D. Carlson, *J. Intel. Mat. Sys. Struct.*, 10, 5(1999).
34. P. J. Rankin, A. T. Horvath, and D. J. Klingenberg, *Rheol. Acta.*, 38, 471(1999).
35. P. J. Rankin, Ph.D Thesis, University of Wisconsin, 2000.
36. T. C. Halsey, *Science*, 258, 761(1992).
37. D. J. Klingenberg, *AIChE J.*, 47, 246(2001).
38. M. Parthasarathy and D.J. Klingenberg, *Mater. Sci. Eng. R-Rep.*, 17, 57-103(1996).
39. R. E. Rosensweig, *Sci. Am*, 247, 124(1982).
40. H. A. Barnes, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 81, 133-178(1999)
41. J. M. Ginder, "Encyclopedia of Applied Physics", 16, p.487, VCH Publishers Inc., 1996.
42. H. Uetake, N. Hiroto, J. Nakagawa, Y. Ikezoe, and K. Kitazawa, *J. Appl. Phys.*, 87, 6310(2000).
43. S. S. Deshmukh and G. H. McKinley, "presented at the 75th Annual Meeting of the Society of Rheology", October pp.13-16, Pittsburgh, USA, 2003.
44. J. Lewis, "Put the Brakes on Pneumatics", *Design News*, 1999.
45. S. S. Deshmukh and G. H. McKinley, *US Patent Application No. 10/378 129*(2002).

저자 프로필



조 영 준

1997. 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업
1999. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
2006. 서울대학교 재료공학부(박사)
2006. 서울대학교 지능형텍스타일시스템
연구센터(ITRC) 박사후 연구원
(151-742)서울 관악구 신림동 산 56-1
전화: 02-880-7197, Fax: 02-885-1748
e-mail: jaussi@naver.com



박 종 렬

1993. 서울대학교 섬유고분자공학과 졸업
1995. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
1995-2001. 태광산업 중앙연구소 연구원
2001-현재. 서울대학교 재료공학부 박사
과정



강 태 진

1983. 미국 NCSU(박사)
1985-현재. 서울대학교 재료공학부 교수
2001-2005. 서울대학교 최고산업전략과정
(AIP) 주임교수
2003-현재. 서울대학교 패션신소재연구
센터(FIC) 소장
2005-현재. 서울대학교 지능형텍스타일
시스템 연구센터(ITRC) 소장
2006-현재. 한국섬유공학회 회장