

# 첨단 보호복 산업과 기술

윤 기 종

단국대학교 공과대학 공학부 섬유공학전공

## 1. 서 론

보호복(protective clothing)은 개인 보호 장구(personal protective equipment) 중의 하나로 방독면, 산소통, 마스크, 장갑, 신발류 등의 부속 장비(ancillary gear)와 함께 유해한 환경으로부터 사람을 보호하기 위한 것이다. 보호복이라고 하면 방탄복이나 방화복을 쉽게 연상할 수 있으나, 이외에도 다양한 용도로 보호복이 사용되며, 군인, 경찰, 소방관과 같은 특수 집단뿐만 아니라 화학공장 근로자, 조선소 도장 작업자 등의 일반 근로자도 보호복을 사용해야 한다. 특히 최근에는 산업 현장에서의 안전사고 발생률을 낮추기 위해 근로자의 안전을 보장하는 각종 법규 및 규정이 제정되고 있어 산업용 보호복의 수요가 증가하고 있다. 산업용 보호복 및 장구로는 방화복, 방열복, 용접복, 절단 보호복, 화학보호복, 일회용 수술가운, 방사능 보호복, 전기 보호복, 구명복, 전자파 차단용 보호복, 보호용 장갑과 신발 등이 있다.

안전에 대한 인식이 고조됨에 따라 세계 보호복 시장규모는 점차 커지고 있다. Global Industry Analysts가 2004년도에 보고한 세계 보호복 시장 규모는 1991년에 3,452백만 달러, 2000년까지는 연평균 4.33%로 성장하여 5,057백만 달러에 이르렀고, 2001년은 5,301백만 달러 규모였으며, 2010년까지는 연평균 6.46%로 성장하여 9,308백만 달러 규모에 이를 것으로 추정되었다[1]. 미국은 세계에서 가

장 큰 보호복 시장을 갖고 있으며 세계 시장의 1/3 정도이므로 2005년도 미국 보호복 시장 조사 자료 [2]로도 세계 시장을 추정할 수 있다. 이 자료에 의하면 미국시장은 2005년에 총 2,297백만 달러였으며, 향후 연평균 성장률 7.9%로 2010년에는 3,352백만 달러 시장을 형성할 것으로 전망하고 있다.

세계 시장을 주도하는 미국도 보호복 시장이 확대되기 시작한 시기는 최근 10여년 정도이다. 특히 1994년, 피고용인이 불꽃이나 아크에 의한 상해로부터 보호받을 수 있는 옷을 입도록 고용인이 보장해야 한다는 OSHA 29 CFR 1941.269를 제정하는 것을 시작으로 보호복에 대한 관심과 수요가 확대되었다. 1994년 이전에도 Nomex, Kevlar, PBI 등 난연성 섬유들이 있었으나, OSHA의 CFR 1941.269 제정 이후에 그 시장이 확대 되었으며 최근에 성장률이 더욱 현저하게 증가하고 있다. 이와 같이 선도국과의 시간적 차이가 크지 않으므로 각종 보호복용 소재들이 개발될 경우 단기간에 격차를 극복할 수 있을 가능성이 있다. 보호복 시장을 선도하는 DuPont도 Kevlar 및 Nomex 섬유, Sontara spunlaced fabric 및 Tychem 등의 보호복 분야에서의 성장 가능성을 보고 DuPont Protective Apparel Marketing Company를 출범 시킨 것이 불과 6년 전인 2000년이다[3]. DuPont은 2004년 4월 30일 Invista를 Koch Industries에 매각하였으나 Safety and Protection 사업은 확장해 나가고 있다.

국내에서도 법규 및 규정의 제정과 함께 보호복

시장이 형성되고 있으나, 아직까지 국내 보호복 시장은 태동기라 간주할 수 있다. 2002년 한국소방검정관리공단에서 방화복에 대한 규격을 제정하기 전까지 우리 소방원들은 단순히 물만 차단하는 방수복을 착용했었고, 2002년 월드컵 당시 일부 경찰에게 방탄복이 지급되었다. 그 후 노동부 고시 제2004-49호(2004. 10. 21)에 근거를 두고 산업안전관리공단에서는 2005년부터 화학보호복에 대한 인증을 시행중이며 2006년부터는 조선소에서 화학보호복의 사용이 의무화 되었다.

국내 보호복을 사용해야 하는 인원은 군인, 경찰, 소방공무원, 의사 및 간호사, 화학약품 공장, 조선소, 제철소 및 원자력 발전소의 근로자, 자동차 경주자 등 170여 만 명에 이르는 것으로 추산되고 있다. 그럼에도 불구하고 수요기반의 취약과 기술부족 등의 원인으로 현재 특수 기능성 보호복들은 대부분 수입 원자재를 사용하여 제조하고 있다. 현재 산자용 섬유류의 평균 단가는 US\$5.56/kg이나 보호복용 *m*-aramid 및 *p*-aramid 섬유는 US\$25-35/kg으로 판매되고 있어 보호복 분야는 섬유산업에서 부가가치가 가장 높은 분야이다. 또한 최근 안전에 대한 인식의 증가로 보호복 시장이 크게 발전할 수 있는 가능성을 보여 주고 있으므로 국내 섬유산업의 중요한 성장 동력이 될 수 있을 것이다.

더욱이 중국, 인도, 러시아 등 아시아 국가들의 경우에도 산업 현장에서의 보호복 의무화가 가까운 시일 내에 이루어지리라 예상되어 이와 함께 세계 시장이 크게 증가하리라 생각된다. 일본 및 미국도 세계 보호복 시장의 확대를 예측하여 주요 보호복 소재인 *m*-aramid의 생산 시설을 증축하고 있는 것으로 생각된다. Teijin에서는 2006년부터 3년간 산업용 섬유 부문에 대한 투자 확대를 추진함에 따라 *m*-aramid인 Conex의 생산능력 확대를 검토하고 있으며[4], 대부분의 전통 섬유 사업을 매각한 DuPont는 1억 달러를 투자하여 Nomex와 Kevlar의 생산능력을 30% 이상 증설할 계획을 가지고 있는 것으로 파악되고 있다[5].

최근 보호복용 섬유재료 중에 *p*-aramid를 Kolon에서 2005년 부품소재 사업으로 개발하기 시작하였으며, 올해 지원이 시작되는 중기거점과제 중에 *m*-aramid 및 고인성 폴리에틸렌의 개발이 포함되어 있어 보호복용 핵심 섬유 재료의 국내 개발이 기대되고 있다. 현재까지의 국내 보호복 제조 기술은 외국 소재를 수입하여 제품화하는 수준이었으므로 차별화된 제품을 생산하기 어려울 뿐만 아니라 쉽게 후발국들의 추격을 받을 수 있는 실정이었으나, 상기 재료들의 개발이 성공적으로 이루어질 경우, 수입대체 효과가 있을 뿐만 아니라 약 10여년의 기술 격차를 좁히면서 차별화된 제품의 생산이 가능하게 되어 수출 경쟁력을 제고할 수 있으리라 기대한다.

이에 본고에서는 중기거점과제를 준비하면서 조사된 자료[6]에 근거하여 보호복 분야의 시장 현황 및 전망과 보호복용 소재 기술 동향을 검토함으로써 보호복 분야의 성장 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 시장 현황 및 전망

보호복 시장은 국내 뿐만 아니라 미국, EU를 제외한 대부분의 나라에서도 성숙기에 이르지 않았으므로 세계시장 규모는 앞으로 크게 늘어날 것으로 예측된다. Global Industry Analysts, Inc.가 2004년에 제시한 세계 보호복 시장전망[1](Figure 1)을 보면 2010년에 예상되는 세계 보호복 시장규모는 93

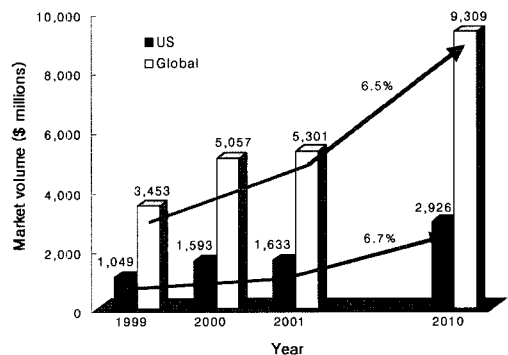


Figure 1. Protective clothing market volume forecast.

억불, 미국 보호복 시장규모는 약 29억불로 전망하고 있다.

일 년 후인 2005년에 미국 보호복 시장을 조사한 Business Communications Company, Inc.(BCC)의 자료[2]를 보면 2010년 미국 보호복 시장규모를 약 34억불로 전망하고 있다. 일 년 사이에 예측치가 약 15% 증가된 것을 보면 보호복 시장이 급성장하고 있는 현황을 알 수 있다. Figure 1을 보면 세계시장은 미국 시장의 약 3배 규모라고 볼 수 있으므로 2005년 자료를 참조하면 2010년 세계 보호복 시장 규모를 약 100억불 정도로 추정할 수 있다. 또한 10년 후의 세계시장 규모는 약 150억불(15조원)로 전망할 수 있다.

세계시장을 선도하고 있는 미국 보호복 시장을 분야별로 분석한 Table 1을 보면 향후 세계시장의 전개 방향을 예측할 수 있다. BCC 자료에서는 보호복을 방탄/방검, 방화/내열, 화학/생물, 보조 장비로 구분하였다. 이를 보면 2001년 9.11테러 이후 방탄/방검 시장이 급격히 커졌으며, 방화, 내열복 및 화학/생물 보호복도 지속적인 성장을 하고 있다(Table 1). 미국의 방화, 내열복 시장 규모는 2005년에 429백만 달러였으며 연평균 성장률 7.2%로 확대되어 2010년에는 6억불 정도로 증가할 것으로 전망하고 있다. 방화/내열 분야의 경우 세부항목에 따른 전망을 보면 structural/proximity 방화복, 방열복 시장이 연평균성장률 10.0%를 보일 것으로 전망하고 있으며, 기타 wildland 및 industrial 관련한 시장이 약 3~4%의 시장 성장을 보일 것으로 전망되고 있다.

방화/내열 보호복 제품 관련 미국 시장의 리더는 Lion, Globe, Morning Pride 3개 회사로 미국 시장

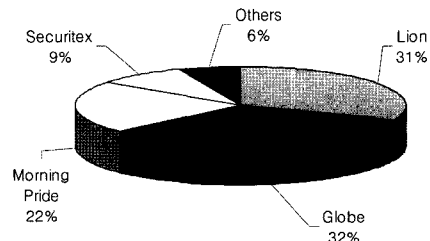


Figure 2. Market shares of leading US fire protective clothing.

의 market share가 85%이다(Figure 2). 각 제조사는 안전 보호 장구를 전문적으로 취급하고 있으며 방화, 내열복과 같은 의류 이외에도 두건(hood), 신발 및 기타 보조 장비 및 미국 가정에서도 사용할 수 있는 보호 의류까지 다양하게 판매하고 있다.

국내 시장의 경우 보호복 관련 통계자료가 파악되어 있지 않으며 보호복용 섬유 소재는 대부분 국내에서 생산이 안되고 수입에 의존한다. 최근에 Kevlar와 유사한 p-aramid 섬유와 초고분자량 폴리에틸렌 섬유와 같은 고강도 섬유의 개발이 시작되었고, 방화/내열 소재로 사용되는 Nomex와 유사한 m-aramid의 개발이 시작되었다. 또한 미국서 경량 방화/내열 소재로 Nomex와 Kevlar를 spunlace한 Sontara가 사용되고 있는데 국내에서도 이의 개발이 시작되고 있다. 화학/생물 보호용 필름/멤브레인 소재는 대부분 국내에서도 생산 가능한 고분자 재료이다. 이와 같이 대부분의 보호복용 섬유 및 고분자 재료들이 최근에 개발되고 있거나 이미 개발되었기에 보호복 산업의 성장이 기대되고 있다.

고강도 섬유는 주로 방탄복 및 방검복에 사용하나 국내의 경우는 개인이 충격을 소지할 수 없기 때

Table 1. Value of US advanced protective clothing by type

(단위: \$ Millions)

Sector	2001	2004	2005	2010	AAGR% 2005~2010
Armor	135	279	356	628	12.0
Fire protection	331	406	429	606	7.2
Chemical/biological	250	315	340	500	8.0
Ancillary	905	1,112	1,172	1,618	6.7
Total	1,621	2,112	2,297	3,352	7.9

\* BCC report, 2005

문에 방탄복보다 방검복에 대한 수요가 높은 실정이다. 방검복 시장은 빈번하게 강력사건이 발생하고 이와 함께 검문 및 수사를 진행하는 과정에서 경찰관이 신체상 상해를 입거나 목숨을 잃는 사례가 증가하고 있어서 경찰관을 중심으로 국내시장을 형성하고 있다. 또한 금융가, 상점, 기업, 연구소 등 고용역계약을 맺고 경비하는 Secom, 캡스, KT 텔레캅 등 보안업체가 전국적인 네트워크를 형성하여 영업활동을 전개하면서 이에 따른 경비요원들이 증가하였다. 또한 이들에 대한 신체보호의 필요성에 의하여 방검복의 수요가 급증하고 있다. 또한 작업장에서 칼날 등으로부터 보호하기 위한 장갑, 토시 등의 사용도 향후 의무화되면 그 시장은 매우 커질 것으로 예측된다. 현재 방검복 관련 산업은 연간 300억원대의 국내시장이 형성되어 있으며 시장규모가

더욱 커질 것으로 예상된다.

방화복 및 방열복의 경우 2002년 이후에 국내 시장이 형성되기 시작했다. 2002년 한국소방검정관리공단에서 방화복에 대한 규격을 제정하기 전까지 우리 소방원들은 단순히 물만 차단하는 방수복을 착용했기 때문이다. 현재 전체 방화, 내열복용 원단 및 완제품 시장규모는 약 430억원으로 추정되나, 최근에는 한국전력공사에서도 내열성 안전복을 사용하고 있어 향후 시장이 확대될 전망이다.

생물/화학 보호복 관련 국내 산업구조 역시 매우 취약하다. 최근 화학 보호복이 포함되는 coated garments와 rubberized garments의 수입이 37.6% 증가한 것은 산업안전법규의 강화로 인하여 기업의 산업안전복 수요가 늘어난 것으로 분석되어 수입대체의 필요성이 매우 크다. 현재 우리나라의 생물/화

Table 2. Manufacturers of protective clothing and component materials

업체명	주 생산품목과 주요특징	비고
(주)코오롱	p-aramid 섬유 개발 및 생산 초고분자량 고강도 폴리에틸렌 섬유	2005년 2006년
(주)효성	m-aramid 섬유개발	2006년
(주)재호화성	생물/화학보호복 용 코팅 및 라이네이션 원단 제조	
(주)BSG	생물/화학보호복 용 코팅 및 라이네이션 원단 제조	
(주)나노필	생물/화학보호복 용 나노 멤브레인 제조	연구개발단계
(주)산청	방열복, 소방용 방화복, 소방용 헬멧제조	수입 원자재 사용
(주)파이로	방열복, 소방용 방화복, 소방용안전장갑	수입 원자재 사용
(주)행운산업	소방용 방화복	수입 원자재 사용
(주)진양 ISC	방열복, 방화복, 방염복, 내열장갑	수입 원자재 사용
(주)에스티아글로벨	소방용 방화복	
(주)엠씨통상	소방용 방화복	
(주)풍신레포츠	소방용 방화복	
(주)삼공물산	소방용 방화복	
(주)파소나기	소방용 방화복	
(주)한일피복공업	소방용 방화복	
경진산업사	소방용 방화복	
동광산업사	소방용 방화복	
삼덕안전기구공사	소방용 방화복	
삼한섬유	소방용 방화복	
아이엘씨기업	소방용 방화복	
영진실업	소방용 안전화	
대신화학	소방용 안전화	
이글코리아	방검복, 방탄복	
EMCEE	방화복, 방검복, 방탄복	

학 보호복 업체는 대부분 중소기업으로, 자본금 10억원 미만의 업체는 82.4%, 10억원 이상 업체는 17.6%로 조사되고 있다. 2005년 산업안전보호법에 산업안전보건법 제35조, 같은 법 시행령 제28조 및 같은 법 시행규칙 제60조의 규정에 의하여 보호구 성능 검정규정(노동부고시 제2003-19호)이 국회에서 통과되어 2006년부터 본격적으로 시행이 되기 때문에 권고사항이 아니라 의무사항으로 변경되었다. 2006년부터 유해물질을 취급하는 전 사업장의 작업자들에게 산업용 화학보호복이 제공되어야 하기 때문에 시장규모가 약 81억원대로 형성될 것으로 추정된다.

현재 보호복 소재 및 제품 관련 업체는 Table 2에 열거하였다.

### 3. 보호복용 소재 기술 동향

보호복용 소재는 크게 고강도 섬유, 내열성 섬유 및 차단(barrier) 소재로 나눌 수 있으며 각각에 사용되는 대표적 소재들에 대해 아래에 약술한다.

#### 3.1. 고강도 섬유

일반적인 고강도 섬유는 매우 다양하나 방탄, 방검, 절단 보호 등의 보호복에 이용하는 고강도 섬유는 주로 *p*-aramid(39%) 및 초고분자량 폴리에틸렌(33%)이 사용되고 있으며 polypyridobisimidazole(M5)가 검토되고 있다. PBO는 한때 매우 우수한 방탄복 재질로 알려졌었으나 근래에는 경시변화로 인해 사용이 제한된다.

##### 3.1.1. *p*-Aramid

*p*-aramid는 고강도 보호복 소재로 가장 많이 이용되며 방탄/방검복은 대부분 이를 사용하여 제조한다. *p*-aramid는 1971년 DuPont사에서 처음 개발하였으며 Kevlar란 상품명으로 판매하고 있다. 이 외에도 Twaron(Teijin), Technora(Teijin, co-polymer) 등이 판매되고 있으며 filament, staple, yarn 등의

형태로 판매되고 있다. *p*-aramid는 TPC(terephthaloyl chloride)와 PPD(*p*-phenylene diamine)을 NMP에 녹인 후 기계습식 방사하여 제조하며 선형 분자쇄의 배향도가 높아 고강도를 나타내며 파단신도가 낮다. 그 외에 전기전도율이 낮고, 내화확성이 강하고 열수축이 적어 형태안정성이 우수하며 내염성과 자기소화성을 지니고 있다.

##### 3.1.2. 초고분자량 폴리에틸렌

초고분자량 폴리에틸렌은 강도가 매우 높으나 낮은 용점으로 인해 내열성이 요구되는 용도로는 사용할 수 없는 단점이 있다. 네덜란드의 DSM사(Dyneema)가 개발한 섬유로 일본의 Toyobo가 Dyneema를, 미국의 Honeywell, Advanced Fibers and Composites가 Spectra를 생산한다. 방탄 부분에서 기존 사용되고 있는 유리섬유나 케블러 섬유의 대체소재로 활발히 전개되고 있다. 이는 경량이면서 면적당 강도가 월등히 뛰어난 특성을 가지고 있기 때문이다. 군용의 두꺼운 장갑으로부터 방탄조끼, 방탄 모자, 방한 마스크 등 향후 응용분야는 점점 확대될 것으로 예측된다. 내열성이 요구되지 않는 절단보호 장갑 등에 이용될 가능성이 높다.

##### 3.1.3. 폴리피리도비스이미다졸(M5, polypyridobisimidazole, PIPD)

폴리피리도비스이미다졸(M5)(Figure 3)은 Akzo-Nobel에서 개발한 섬유로 2,3,5,6-tetraaminopyridine과 2,6-dihydroxyterephthalic acid의 축합에 의해 중합된다.

인장뿐만 아니라 압축 강도/탄성율이 우수한 섬유

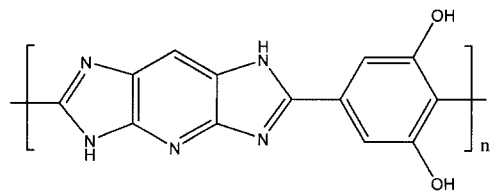
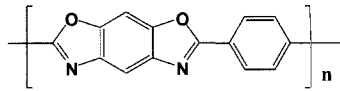


Figure 3. polypyridobisimidazole (M5 or PIPD).



Polybenzoxazole(PBO)

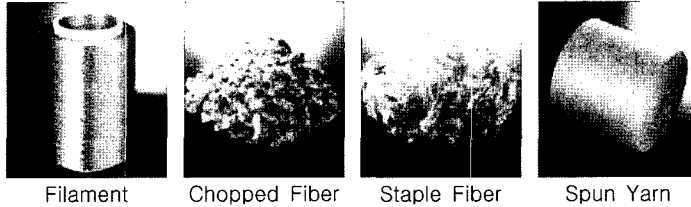


Figure 4. Chemical structure of PBO and the various forms of PBO fiber.

유로 비중이 낮으며 내열성 또한 우수한 재질로 방탄복뿐만 아니라 armor 용 복합재료에도 사용이 기대되는 재질이다. X-ray 분석을 통한 결정 탄성률 (crystalline modulus)은 410GPa로[7] 이를 사용하여 만든 복합재료는 충격강도가 높으며 내후성이 매우 우수하다. 특히 UV에 대한 안정성이 뛰어나 장시간 노출 시에도 오히려 강도가 약간 증가한다. 이에 대해 M5의 분자 구조가 UV 안정제들과 유사하기 때문이라는 해석도 있다. 최근 미 육군에서 방탄 재료용 섬유로 검토되고 있다.

일본 도요보사에서 독점 생산하는 폴리파라페닐렌벤조비스옥사졸은 분자쇄의 유연성을 완전히 없애 *p*-aramid보다도 강도를 더욱 향상시킨 고분자 (Figure 4)로 Zylon이란 상품명으로 판매된다. Zylon은 강도가 42 g/d(5.8GPa)로 파라아라미드 섬유 2배 수준이며, 내크리프성, 내약품성, 내광성, 난연성, 형태안정성이 우수하다(Table 3). 높은 인장 강도를 지녀 한때 방탄복 재질로 사용되었으나 높은 온도 및 습도 하에 장기간 노출시 물성저하가 있는 단점이 있어 사용이 제한되어 있다. 복합재료의 보강 재료로 사용할 수 있다.

### 3.1.4. 폴리파라페닐렌벤조비스옥사졸(PBO)

Table 3. Typical properties of textile materials for protective clothing[8]

Fibers	Creep	Strength	Modulus	Density	Moisture	Elongation at break	Max. usage T	Remarks
	%/log t	GPa	GPa	g/cm <sup>3</sup>	%	%	°C	
UHMPE	Susceptible	Excellent				Very Low	Low	dynamic toughness
Spectra (1000)	creeps	3	171	.97		2.7, 3.3	100	
Spectra (2000)		3.25	116	.97		2.9		(probably hard splice)
LCP (6)	Zero	Excellent					High	good flex fatigue
Vectran	0.00	3.2	91	1.47	0.1	3.3	150	easy to splice
Aramid	Negligible	Excellent					Excellent	
Kevlar (49)	0.016	2.9	135	1.45	3-4	2.8	250	
Twaron (2200)		3.0	110					
Technora		3.3	70	1.39		4.3	250	
PBO	Negligible	Best					Best	Poor UV
Zylon	Steel		7.6	150	7.8		4.8	500

### 3.2. 내열성 섬유

다양한 내열성/난연성 섬유가 보호복에 이용되나 *m*-aramid 가 가장 많이 사용되며 기타 재질은 제한적으로 사용된다. 방화복의 경우 outer shell, moisture barrier 및 thermal barrier의 세 기능으로 분류되며 moisture barrier는 흔히 thermal barrier 표면에 합포하여 사용한다. 미국의 경우 outer shell 재료로서는 aramid가 45%, polybenzimidazole이 35%, melamine이 15%가 사용되며 moisture barrier로는 대부분이 polytetrafluoroethylene(PTFE) membrane을 사용하며 약 75%의 시장을 점유한다. Thermal barrier는 방화복 등의 열차단 기능의 73%를 기여하며 재료로서는 아라미드가 75%, 멜라민 섬유가 21% 사용된다.

#### 3.2.1. 메타-아라미드(*m*-aramid) 섬유

메타-아라미드는 1967년 DuPont사에서 개발하였으며 상품명은 Nomex다. 그 후 1969년부터 Teijin에서 Conex를 생산하기 시작하였고 최근에는 중국 Yantai에서도 생산하고 있다. filament, staple, yarn, paper 등의 다양한 형태로 판매되고 있다. 주용도는 방화복, 방열복, 방화장갑 등이며 고온용 filter 재질, 절연 paper 및 tape로도 이용된다.

메타-아라미드 섬유는 isophthaloyl chloride(IPC)와 *m*-phenylene diamine(MPD)을 DMAc에서 용액 중합한 후 건식방사를 이용하여 제조한다. 메타 치환 구조로 인해 고분자쇄는 굴곡이 있어 파단 신도가 22~45%로 비교적 높은 편이며(Table 4) 염색도 가능하다.

Table 4. Comparison of the properties of Nomex and Conex

Fiber property	Nomex 450	Conex
Fiber denier	1.5	2.0
Density, g/cm <sup>3</sup>	1.37	1.38
Tenacity, g/denier	2.9	5.0-5.5
Elongation at break, %	22	35-45
Moisture content, %	4.5	5-5.5
Limiting oxygen index (LOI)	28	29-32
Thermal conductivity, btu*in/(h*ft <sup>2</sup> *F)	0.23	-

#### 3.2.2. 파라-아라미드(*p*-aramid) 섬유

파라-아라미드 섬유의 주 용도는 고강도 섬유이나 내열성 *m*-aramid와 함께 사용하는 경우가 많다. 예를 들면 자동차 경주용 보호복의 경우 화재뿐만 아니라 사고가 났을 때 발생할 수 있는 날카로운 금속에 대해서도 운전자를 보호해야 하기 때문에 두 aramid의 혼방 또는 교직물을 사용한다. 최근에는 flash fire에 대비한 경량 방화복으로 spunlaced 부직포를 제조하는데 이 때 *p*-aramid를 사용하여 부직포의 강도를 향상시키기도 한다.

#### 3.2.3. 폴리벤즈이미다졸(polybenzimidazole, PBI) 섬유

폴리벤즈이미다졸은 1950년대에 처음 알려졌으나, 60년대에 Celanese에 의해 중합공정이 개발되고, 1967년 이후 NASA와 합동으로 섬유가 개발되었으며, 1983년 섬유제품이 출시되었다. 현재 PBI 섬유는 *m*-aramid에 비해 약 2배 정도 비싸다. 섬유는 금속이며 강도는 상대적으로 낮지만 내열성이 우수하여 고가의 방화복 등에 혼방 제품으로 이용된다(Figure 5).

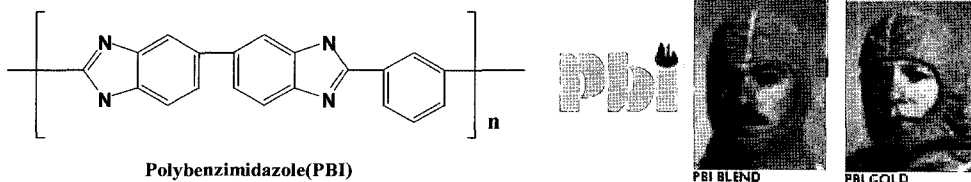


Figure 5. Chemical structure, logo and products of PBI.

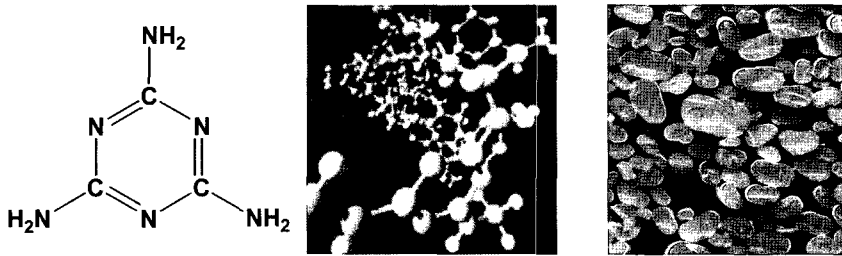


Figure 6. Chemical Structure and cross-section of Basofil.

Table 5. Typical properties of Basofil

Fiber property	Basofil
Fiber denier	2.5, variable
Staple length	2 inch, variable
Density	1.4 g/cm <sup>3</sup>
Tenacity	2.0 g/denier
Elongation at break	18%
Moisture regain, (23°C, 65% RH)	5%
Limited oxygen index (LOI)	32
Hot air shrinkage, (200°C, 1 hr)	<1%

### 3.2.4. 멜라민 섬유

멜라민 섬유(Figure 6)는 BASF에 의해 상용화 되었으며 Basofil이란 상품명으로 판매되고 있다. 멜라민과 멜라민 유도체를 포름알데히드와 축합중합

한 열경화성 3차원 네트워크 구조를 갖어 가공이 어렵기 때문에 일반적으로 아라미드 등과 혼방하여 사용한다. 멜라민 섬유의 물성을 Table 5에 나타내었다. 다른 내열성 섬유에 비해 저가인 장점이 있다.

### 3.2.5. 폴리벤즈옥사졸(polybenzoxazole, PBO) 섬유

폴리벤즈옥사졸 역시 내열성이 우수한 고강도 섬유로 1991년 Dow Chemical과 Toyobo가 공동으로 개발하였으나 98년 Dow chemical은 사업을 철수하였다. Toyobo가 98년 200톤/년 규모로 상품명 Zylon으로 상업생산 시작하여 1999년에는 약 180톤을 생산하여 원사 가격 \$100~200/kg에 판매하였다. PBO의 제 특성을 Table 6에서 볼 수 있다. 전술한 바와

Table 6. Properties of PBO fibers

Type		Regular	High Modulus
		AS	HM
Filament linear density	dtex	1.7	1.7
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.54	1.56
Moisture regain (65% RH)	%	2.0	0.6
Tensile strength	cN/dtex	37	37
	GPa	5.8	5.8
	KSI	840	840
Tensile modulus	cN/dtex	1150	1720
	GPa	180	270
	MSI	26	39
Elongation at break	%	3.5	2.5
Melting temperature	°C	none	none
Decomposition temperature in air	°C	650	650
Coefficient of thermal expansion	ppm/°C		-6
Limiting oxygen index		68	68
Dielectric constant at 100kHz			3.0
Dissipation factor			0.001



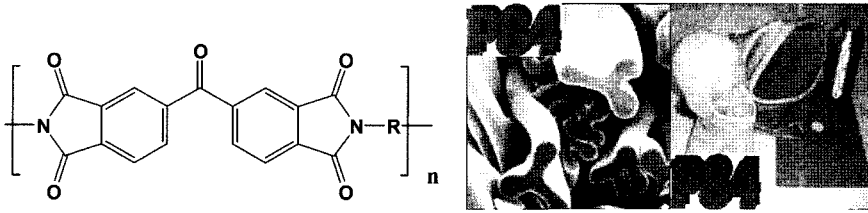


Figure 7. Chemical structure of PI and pictures of the fiber and its products.

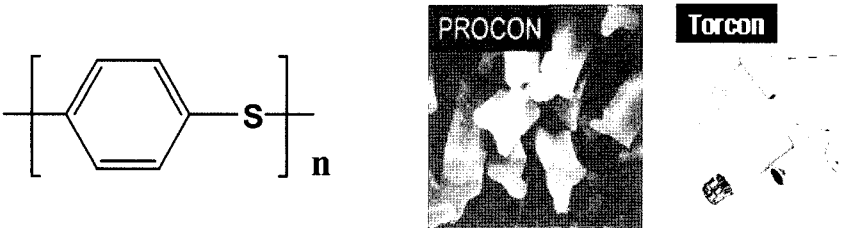


Figure 8. Chemical structure of PPS, fiber cross-section and products.

같이 PBO는 높은 온도 및 습도 하에 장기간 노출 시 물성저하가 있는 단점이 있어 사용이 제한되어 있다.

3.2.6. 폴리이미드(polyimide, PI) 섬유

Lenzing AG에 의해 개발되었으며 현재 자회사인 Inspec Fibers GmbH에서 상품명 P84로 생산 판매하고 있다(Figure 7). 주 용도는 고온 가스 필터, 방화복, 우주선의 마감재료 등이다.

3.2.7. 폴리페닐렌설파이드(polyphenylene sulfide, PPS) 섬유

폴리페닐렌설파이드 섬유(Figure 8)는 Ryton (Phillips), Procon(Toyobo), Torcon(Toray) 등의 상품명으로 생산되고 있으며 LOI 값은 높으나 내열성은 보통이다. 방화복에도 사용되고 있으나 낮은 수분율로 착용감이 좋지 않은 반면 내화학성이 우수하여 필터 등의 산업용으로 사용됨.

3.2.8. 폴리테트라플로로에틸렌(polytetrafluoroethylene, PTFE) 섬유

폴리테트라플로로에틸렌 섬유는 강도와 마찰계수가 낮아 가공이 매우 어렵고 기타 섬유와 혼방이 어렵지만 LOI 값은 95로 가장 높다(Table 7, Figure 9).

Table 7. Comparison of the properties of thermally resistant fibers

	<i>m</i> -aramid	<i>p</i> -aramid	PBO	PBI	Basofil	PI	PPS	PTFE
Tenacity(g/d)	2.9~7.2	22~26	42	2.7	2.0	4.2	3.5~4.5	2
Modulus(g/d)	140	460~1100	1300~2000	32	-	-	-	13
Elongation(%)	22~45	2.4~4.4	3.5	29	18	30	32~49	25
Continuous operating temp.(°C)	204	190	288~315	250	204	260	260	260
LOI(%)	28~32	25~28	68	41	32	38	34	95
Chemical resistance	Mild-Good	Mild-Good	Mild-Good	Good-Excellent	Mild-Good	Good	Very Good	Excellent

(출처: Industrial Textile Association '99.9)

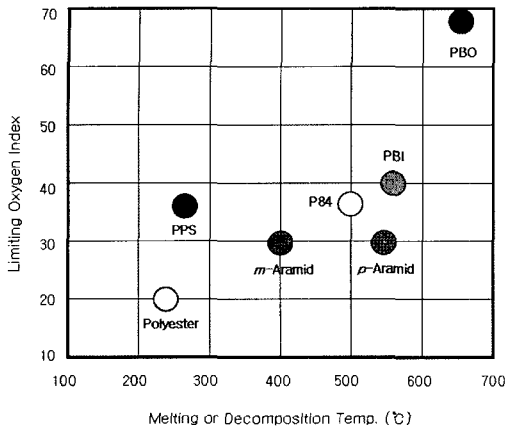


Figure 9. LOI(%) of thermally resistant fibers.

### 3.3. 생물/화학물질 차단 재료

생물/화학 보호복은 해로운 생물/화학물질로부터 인체의 일부가 직접적인 접촉을 하지 않도록 하는 것이 그 목적이다. 현재 사용되는 해로운 생물/화학물질과 약품의 수를 생각해 보면, 보호복의 중요성을 보다 명백히 알 수 있다. 생물/화학 보호복이 사용되는 분야는 유기화학물질을 다루는 산업현장에서부터, 수술복, 농업용 보호복, 선적/하적 중에 유독/가연성 소재에 대한 보호복, 화학물질로부터도 소방관을 보호할 수 있는 방화복, 반도체 산업용(클린룸) 보호복에 이르기까지 매우 광범위 하다.

미국 환경보호국(Environmental Protection Agency,

E.P.A)은 생물/화학물질 및 약품으로부터의 보호를 위해 4가지 단계를 규정하고 있다(Table 8).

생물/화학 보호복은 침투형(비기밀형)과 불침투형(기밀형)으로 분류할 수 있다. 불침투형 작업복은 호흡장치를 포함하여 신체 전부를 둘러싼다. 침투형 시스템은 분리된 요소의 조합이고, 호흡장치는 작업복 위에 착용할 수 있다. 불침투형 의복이 일반적으로 보다 더 나은 화학적인 보호를 한다. A단계와 B단계 보호복 모두 불침투형 시스템이다. 침투형 시스템은 보통 B단계나 더 낮은 단계에서 사용한다.

이와 같은 보호목적을 달성하기 위한 생물/화학 보호복의 고분자 소재 및 적용분야는 Table 9에 열거하였다. 기본적으로 다공성 직물을 사용하여 미립자로부터 보호하고, 코팅이나 라미네이트된 직물을 이용하여 액체나 가스로부터 보호한다.

현재 산업용 화학보호복으로 널리 활용되는 것은 DuPont 사의 것이며 Tychem® ThermoPro 등이 있다.

### 3.4. 투습방수 재료

#### 3.4.1. PTFE 멤브레인

PTFE 멤브레인은 PTFE 필름을 연신하여 필름에 미세한 기공을 형성되는데, 1평방 인치당 약 90억 개의 미세공(微細孔)이 형성된다. 다양한 종류의 생화학 작용제의 공격을 효과적으로 방어하기 위해

Table 8. EPA level of protection

Level	Types of PPE	Uses
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vapor protective suit</li> <li>- Totally encapsulating chemical protective suit</li> <li>- Self-contained breathing apparatus</li> <li>- Chemical resistant gloves/boots</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Highest level of dermal, respirator protection</li> <li>- Unknown situations</li> </ul>
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemically resistant liquid splash suit</li> <li>- Self-contained breathing apparatus</li> <li>- Chemical resistant gloves/boots</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High respirator hazards</li> <li>- Low skin hazards</li> </ul>
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chemically resistant splash suit</li> <li>- Air-purifying respirator</li> <li>- Chemical resistant gloves/boots</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Low respirator</li> <li>- skin hazards</li> </ul>
D	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coveralls, hardhat, safety glasses</li> <li>- Optional gloves/footwear</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No contaminants expected</li> </ul>

**Table 9.** Materials used in chemical/biological protective clothing and their application area

Material	Type of material	Application
부틸(Butyl)/나일론	보조 엘라스토머	스플래시, 캡슐처리 슈트
부틸 고무	엘라스토머	장갑
Challenge® 5200(Teflon®/유리섬유)	플라스틱 라미네이트	캡슐처리 슈트
Chemrel®	플라스틱 라미네이트	스플래시 슈트
Chlorinated 폴리에틸렌(CPE)	플라스틱 필름	스플래시, 캡슐처리 슈트
Fluorinated 에틸렌 프로필렌(Teflon®)	플라스틱 필름	마스크
천연 고무	엘라스토머	장갑, 슈트 개스킷
Neoprene®	엘라스토머	장갑, 슈트 개스킷
Neoprene® 나일론	보조 엘라스토머	스플래시 슈트
니트릴 고무	엘라스토머	장갑
폴리카보네이트	플라스틱 필름	마스크
폴리에틸렌 Coated Tyvek®	보조 플라스틱	스플래시 슈트
폴리메타아크릴레이트	플라스틱 필름	마스크
폴리비닐 클로라이드(PVC)	플라스틱 필름	장갑, 마스크
PVC/나일론	보조 플라스틱	스플래시 슈트
Responder®	플라스틱 라미네이트	캡슐처리 슈트
Saranex® Coated Tyvek®	보조 플라스틱	스플래시 슈트
Silvershield®	플라스틱 라미네이트	장갑
Viton®	엘라스토머	장갑
Viton®/Nomax®/클로로부틸 고무	엘라스토머릭 라미네이트	캡슐처리 슈트
Viton®/나일론/네오프렌	엘라스토머릭 라미네이트	캡슐처리 슈트

다층으로 구성된 barrier 필름을 3~5개를 적층하여 사용하는 것이 일반적이다.

고어텍스라고 알려져 있는 PTFE 멤브레인을 생산할 수 있는 업체는 현재 국내에 없다. 이러한 PTFE 멤브레인을 원단과 라미네이트한 제품을 생산하는 업체인 신한산업, 케이피아이 등이 있으며 PTFE 멤브레인을 일본과 미국 등지에서 수입하고 있다. 또한 케이피아이는 소방용 방화복에 사용되는 PTFE 멤브레인을 노멕스 부직포에 라미네이트한 제품을 국내에 독점 공급하고 있다. 군에서 사용되는 보호복용 PTFE 멤브레인은 Goretex의 독일공장에서 라미네이트 공정을 거친 후, 한국업체에 공급되고 있다.

### 3.4.2. 나노웹

최근 보호복 원단을 침투한 유해물질 및 생화학 작용제를 물리적으로 흡수하여 기능을 발휘하지 못하게 하거나 제독 기능의 물질과 화학반응을 통해서 독성을 무력화시킬 수 있는 제독 물질을 가능한

많이 흡착시킬 수 있는 나노섬유 웹을 설계하는 기술이 부각되고 있다. 나노 기술은 극미세 영역을 다루는 분야로서 향후 2010년에는 전세계적인 시장 규모가 약 1조 달러에 육박할 것으로 예상되고 있다. 특별히 나노섬유관련 연구가 상당히 진행되어서 (주)나노필에서는 폭 1 m 크기로 나노섬유 웹을 생산할 수 있는 상용화 단계에 들어섰다.

일반적으로 나노 파이버는 섬유직경이 20 nm~1µm사이의 섬유로 정의되며 제조 방법은 낮은 점도의 폴리머를 정전기력(electrostatic force)에 의해 순간적으로 가속시키면서 휘발성이 높은 용매를 제거하여 섬유형태로 전환시키는 전기방사법(electrospinning)을 이용한다. 현재 나노 입자, 필터 및 의료 분야에 적용 가능하지만 향후 다양한 용도로 사용될 것으로 예상된다.

나노섬유는 극세 크기의 직경을 갖고 기존 섬유에 비해 큰 표면적을 갖는 장점이 있기 때문에 흡착제 및 필터용으로 사용할 경우 그 효과가 매우 좋다.

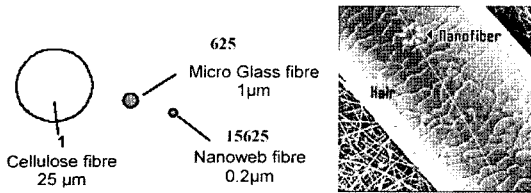


Figure 10. Comparison of regular and nano fibers.

배열과 순서가 다른 여러 전극쌍을 이용하면 초극세 필터에 사용될 수 있는 나노 섬유 생산이 가능하며, 필터분야에서 전기 전도성 특징을 가지고 있기 때문에 유용하게 사용할 수 있다. 나노섬유는 높은 공극률과 표면적을 갖고, 세포의 착상, 성장, 증식에 큰 도움을 줄 수 있기 때문에 biomedical implantable material로서 각광 받고 있으며 생분해성을 지니고 있어 세포의 증식과정에서 조직구성 역할을 하며, 이식시 면역성을 감소시킬 수 있어 방호복, 향균성 상처 드레싱, 약전달 물질 등에도 사용될 수 있다.

### 3.4.3. 기타 투습방수 재질

상기 PTFE 및 나노웹 외에도 다양한 투습방수 재료가 있으나 대부분 내열성이 낮아 아직까지 보호복에서는 주로 PTFE 멤브레인이 주로 사용된다. 폴리에테르에스터 공중합체인 Hytel, Sympatex 등의 친수성 투습방수 필름의 경우에는 내열성이 낮아 보호복에의 활용도가 낮다. 최근 내열성이 향상된 폴리에테르에스테르 공중합체에 대한 연구가 진행 중이다[9-11].

## 3.5. 기타 재료

### 3.5.1. 강도 보강 재료

고강도 섬유로 구성된 보호복 소재를 보강하기 위해 검토되고 있는 재질로 shear thickening fluid(STF), magnetorheological fluid, aluminum oxynitride (ALON) 등이 있다.

이중 STF를 활용한 제품을 미 육군과 U. Delaware의 Norman J. Wagner 교수가 STF-armor™을 개발하여 상용화 단계에 있다. Shear thickening 현상(dilatancy)은 변형이 느리게 일어날 때는 점성이 낮으나 변형이 급격할 때는 점성이 매우 높아져 변형에 대해 저항하는 재질이다. Kevlar에 STF fluid를 패딩하면 칼이나 총알에 의해 관통되던 Kevlar 직물이 방탄/방검 특성을 갖게 된다. 평균 입자 크기 450 또는 120 nm의 colloidal silica 입자를 에틸렌 글리콜이나 폴리에틸렌글리콜에 55-65%(vol.)로 분산한 액으로 KM-2 Kevlar 직물(180g/m<sup>2</sup>)을 패딩하여 제조한 방탄 재질에 대한 동영상이 웹에 게시되어 있다(Figure 11)[12].

2004년 d3o Labs의 운동복용 충격 흡수 재료도 유사한 현상을 이용한 예라고 생각된다. 영국 d3o Labs의 Richard Palmer와 Dr. Phil Green도 1999년부터 University of Hertfordshire의 R&D Center에서 충격 흡수 재료에 대한 연구개발을 시작하여 2001 및 2003년에 영국 정부의 SMART award를 받아 개발에 성공하였다. 평상시에 흐르는 재료를 형태가 안정한 플라스틱 제품으로 성형하는 기술을 개발하여 지난 Turin, Italy에서의 2006 동계 올림픽에서 미국 및 캐나다 선수들의 보호용 스키복에 사용되었다(Figure 12)[13].

국내에서의 STF에 대한 연구는 서울대학교 지능형 텍스타일시스템 연구센터의 센터장 강태진 교수가 연구를 진행하고 있고 이번에 시작하는 중기거점과제, “첨단 방호·보호기능 섬유소재 및 제품개발”에서도 연구가 시작되고 있다.



Figure 11. Application of shear thickening fluid to bullet/stab proof vest.

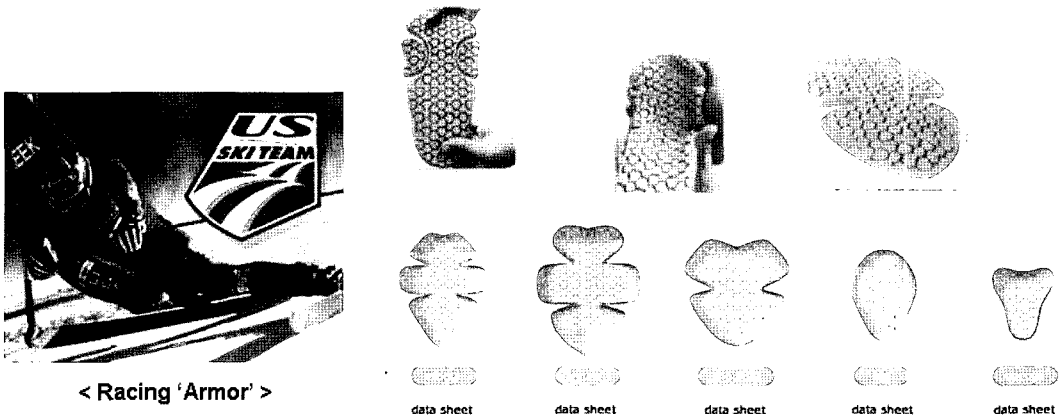


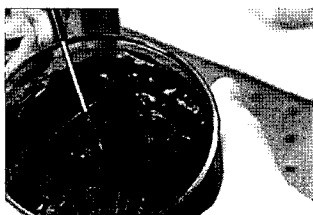
Figure 12. Application of impact protection plastic material in sportswear.

Magnetorheological fluid는 자장이 가해졌을 때 액체 속의 자석이 배향하는 액체이다. 오래 전부터 이와 같은 현상이 알려져 있었으나 자장에 대한 응답 시간이 길어 활용되지 못하였다. 최근 Delaware 대학의 John Q. Xiao 교수가 자석을 수 백 나노미터 크기로 준비하는 방법을 개발해 응답 시간을 줄여 활용 가능성을 제시하였으나 아직 개발 단계이다(Figure 13).

한편 “Transparent Aluminum armor”라 불리는 재료는 투명하면서도 압축강도가 매우 높은 세라믹 재료로 방탄유리에 활용될 가능성이 있다. Aluminum oxynitride 재질을 유리와 고분자 필름 사이에 넣어 방탄유리를 제조할 경우 무게 및 두께를 반감할 수 있다고 보고되고 있다. 이 재질도 보호복에 hard body armor로 사용될 가능성이 있는 것으로 생각된다.

### 3.5.2. 화학/생물 보호 재료

미군의 경우는 고기능 NBC(nuclear, biological and chemical) 보호복을 이미 사용하고 있으나 국내에서는 아직 개발이 안 되었다. 핵심 기술은 NBC 화합물을 신속히 흡착, 불활성화 시키는 재료의 개발이다. 현재 선진국에서 사용하는 재료는 주로 비드상 활성탄이며 폴리우레탄 등의 수지를 사용하여 군복 안감과 겉감 사이에 고정한다. Blücher GmbH 사의 Saratoga가 주로 사용되며 Saratoga JSLIST(Joint Service Lightweight Integrated Suit Technology) suit 는 가벼운 상하의로 Saratoga 흡착제를 활용한 제품이며 1997년 이후 미국 국무성에서 인증 받은 유일한 화학/생물 보호복이다. Blücher GmbH 사의 미국 지사는 Tex-Shield, Inc.이며 Washington DC 에 있다.



< Oily fluid full of tiny iron particles >



< Fluid aligned to magnet >

Figure 13. Magnetorheological fluid in the absence and presence of a magnetic field.

#### 4. 결 론

보호복 시장 및 기술 동향을 살펴본 결과 보호복 용 첨단 소재의 개발과 기존 섬유·의류 기술을 접목할 경우 우리 섬유 산업이 국제적으로 경쟁력을 키울 수 있는 분야로 생각된다. 특히 전세계적으로 생활의 질이 향상됨에 따라 안전에 대한 인식이 고조되고 있기 때문에 보호복 시장은 큰 성장 가능성을 갖고 있다. 정부의 지원으로 보호복 분야에서 주로 사용되는 *m-aramid*, *p-aramid*, 고강도 폴리에틸렌 섬유 등의 개발이 이루어지고 있으므로 이들이 성공적으로 개발될 경우 국제 경쟁력이 강화될 수 있을 것으로 생각된다. 즉, 외국의 원자재를 수입하여 보호복을 생산하는 의류 기술만으로는 외국 제품과 경쟁할 수 없으나, 국내에서 소재 원천 기술이 있을 경우 차별화된 제품의 생산이 가능해져 국제 시장에서 경쟁력을 갖출 수 있을 것이다.

**감사의 글 :** “첨단 방호·보호기능 섬유소재 및 제품 개발” 중기거점 과제 계획서를 함께 준비한 영남대학교 손태원 교수님, 부산대학교 안승국 교수님, 효성 김범준 박사님, 코오롱 김시민 소장님, 산청 윤병선 소장님, BSG 홍종윤 사장님, 재호화성 변복수 전무님, 생산기술연구원 정기수 박사님, 나노필 천석원 소장님, 의류시험연구원 김도식 과장님 등 여러 분에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Industrial Protective Clothing - A Global Strategic Business Report, Global Industry Analysts, 2004.
2. Anna W. Crull and Richard D.Hooker, “Protective Clothing and Gear: Body/Vehicle Armor, Fire, Chem/Bio”, Business Communication company, Inc., 2005.
3. Adrian Kinnane, “DuPont: From the Banks of the Brandywine to Miracles of Science”, p. 254, E. I. du Pont de Nemours and Company, Delaware, 2002.
4. 화학저널, 2006. 4. 17.

5. 화학저널, 2006. 9. 9.
6. 산업자원부 중기거점과제 사업계획서, “첨단 방호·보호기능 섬유소재 및 제품개발”, 2006.
7. M.A. Montes-Morn, C. Riekkel, R. J. Young, ‘Deformation studies on PBT and PIPD rigid rod polymer fibres by Synchrotron radiation’, International Conference, Polymer Fibres 2000, UMIST, 5-7 July 2000, Manchester, UK.
8. R. B. Fette and M. F. Sovinski, “Vectran Fiber Time-Dependent Behaviour and Additional Static Loading Properties”, NASA/TM-2004-212773.
9. 서영삼, 박우리, 윤기종, “폴리부틸렌나프탈레이트/폴리프로필렌글리콜 공중합체의 합성”, 2006년 한국섬유공학과 추계 학술대회 논문집(2006).
10. Young Sam Seo, Woo Lee Park, Kee Jong Yoon, “Synthesis of Poly(butylene 2,6-naphthalate) / Poly(ethylene glycol)-b-poly(propylene glycol)-b-poly(ethylene glycol) Copolymers”, ICIT (International Conference on Intelligent Textiles)(2006).
11. Young Sam Seo, Woo Lee Park, Kee Jong Yoon, “Water Vapor Transmission of Poly(butylene 2,6-naphthalate) / Poly(ethylene glycol)-b-poly(propylene glycol)-b-poly(ethylene glycol) Copolymers”, ICIT (International Conference on Intelligent Textiles)(2006).
12. <http://discoveriesandbreakthroughs.org/dbis/stories/2006/15201.html>
13. <http://en.epochtimes.com/news/6-2-23/38584.html>

#### 저자 프로필

#### 윤기종



1974-1978. 서울대학교 섬유공학과 졸업  
 1978-1981. 서울대학교 섬유공학과(석사)  
 1981-1983. Georgia Institute of Technology, School of Textiles(석사)  
 1983-1989. North Carolina State University, College of Textiles(박사)  
 1989-1990. USDA northern Regional Research Center, Research Chemist  
 2005-현재. 단국대학교 보호복연구소 소장  
 2006-현재. 단국대학교 공학교육혁신센터 센터장  
 1990-현재. 단국대학교 섬유공학과 교수  
 전화: 02-709-2608  
 e-mail: keeyoon@dku.edu