한국염색가공학회지
연구논문(학술)

pISSN 1229-0033, eISSN 2234-036X
https://doi.org/10.5764/TCF.2020.32.2.73

아민화 표면 처리된 면직물의 제독 성능 연구

Detoxification Properties of Surface Aminated Cotton Fabric

*Corresponding author
Euigyung Jeong
(wolfpack@knu.ac.kr)

김창규, 권 웅, 정의경*
경북대학교 섬유시스템공학과

Changkyu Kim, Woong Kwon and Euigyung Jeong*
Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Dague, Korea

Received_June 02, 2020
Revised_June 22, 2020
Accepted_June 23, 2020

Abstract Pursuing the fabric materials for military chemical warfare protective clothing with the improved detoxification properties, this study investigated the simple and effective cotton treatment method using pad-dry-cure process and 3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS) solution for surface amination. Detoxification properties of the untreated and treated cotton fabrics were evaluated via decontamination of chemical warfare agent simulant, DFP (diisopropylfluorophosphate). The surface aminated cotton fabric increased the rate of the hydrolysis of DFP by the factor of 3 and the decontamination ratio reached 88.2% after 24h. Therefore, the surface amination of the cotton fabric with APTMS can be an effective pathway to prepare the material for protective clothing against chemical warfare agents.

Keywords *surface amination, silane treatment, chemical warfare agent, organic phosphorus nerve agents, diisopropylfluorophosphate*

Textile Coloration and Finishing
TCF 32-2/2020-6/73-79
ⓒ 2020 The Korean Society of Dyers and Finishers

1. 서 론

군사용 화학 작용제는 생리학적 효과를 통하여 사람을 살상시키거나, 무력화시키기 위한 목적으로 사용하는 독성을 가진 유기화합물을 말한다. 군사용 화학 작용제는 혈액, 질식, 수포, 신경 작용제로 분류되며, 이 중 신경작용제는 신경섬유 말단에 존재하는 아세틸콜린분해효소인 아세틸콜린에스터레이스(acetyl cholinesterase)와 결합하여 아세틸콜린(acetylcholine) 분해를 억제함으로써 신경전달체계를 마비시키고 근육의 수축 상태를 지속시켜 전신마비, 호흡곤란 등의 인체에 치명적인 증상을 유발한다[1-3]. 따라서 이러한 군사용 화학 작용제로부터 병사들을 보호하기 위한 군사용 화생방 보호복이나 방독면 등이 사용되며 그 성능의 향상이 지속적으로 요구되고 있다[4-5].

군사용 화생방 보호복의 성능 향상과 관련된 연구는 주로 인계 신경 작용제(organic phosphorus nerve agents)에 대한 보호 성능을 중심으로 연구되고 있다[6]. 인계 신경 작용제는 인(phosphorus)을 중심으로 전기음성도 차이가 큰 불소(fluorine)이나 황(sulfur)과 결합한 화학구조를 가지며 이들 극성 작용기가 아세틸콜린분해효소와 결합하여 작용하므로 극성 작용기가 S_N2 반응으로 다른 작용기로 치환되면 신경 작용제는 독성을 상실하게 된다. 인과 불소 또는 황 사이의 결합은 일반적으로 물에 의해서 서서히 가수분해가 되지만, 그 결합에너지가 수백 kJ/mol에 달하기 때문에 상온에서의 치환반응에는 수일에서 수주 이상의 긴 시간이 요구된다[7].

비록 긴 시간이 필요하더라도 가수분해에 의하여 인계 신경 작용제의 독성은 저하가 가능하므로 가수분해에 의한 제독 반응을 촉진시키기 위한 다양한 촉매를 섬유에 적용하여 군사용 화생방 보호복의 성능을 향상시키고자 하는 연구들이 진행되고 있다[8-13]. 이러한 연구들은 인계 신경 작용제의 모사체로 DFP (diisopropylflourophosphate)를 사용하여 가수분해에 의한 독성 제거 성능을 평가한다. DFP는 촉매에 의하여 촉진된 가수분해 반응으로 수 시간 이내에 HF(hydrogen fluoride)와 DHP(diisopropylhydrogenphosphate)로 분해되며 이러한 가수분해 반응의 속도가 빠르면 빠를수록 우수한 제독 성능을 가

www.kci.go.kr

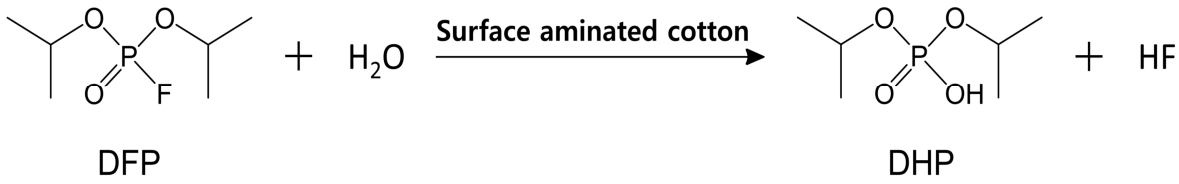


Figure 1. Detoxification reaction of DFP by catalytic hydrolysis of surface aminated cotton.

지는 것으로 평가된다[14]. 가수분해 촉매로는 아민계 작용기, 전이금속 촉매, MOF(Metal Organic Framework) 등에 대한 연구들이 보고되었다[8-13]. 아민계 작용기는 구아니딘기를 많이 함유하고 있는 고분자를 합성하여 나일론과 혼합전기방사[15]하거나 기상화학증착법을 이용하여 섬유 표면에 아민기를 도입하는 연구[16]가 보고되었다. 전이금속 촉매와 MOF는 촉매 자체를 이용한 DFP 가수분해 관련 연구[17]는 보고 되었으나, 이를 섬유에 적용한 연구는 보고된 바 없다. 따라서 지금까지 보고된 소수의 선행 연구들은 주로 복잡한 방법을 이용하여 섬유에 염기성 작용기인 아민기나 구아니딘기를 도입하거나 고열 또는 복잡한 제조공정이 요구되는 무기계 촉매에 관한 것으로 보다 실용성이 우수한 간단한 공정이 제시될 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 DFP의 가수분해를 촉진하는 기능을 섬유에 부여하기 위한 방법으로 아미노프로필트리메톡시실란((3-aminopropyl)trimetoxysilane, APTMS)의 처리를 제안하고자 한다. APTMS는 아민기를 포함한 실란 커플링제로 섬유에 간단한 방법으로 적용 가능하며 아민기를 이용하여 일부 반응에서 염기성 촉매로 사용할 수 있다[18-19].

따라서 APTMS를 섬유에 처리하면 섬유 표면의 아민기에 의하여 인계 신경 작용제의 가수분해를 촉진할 수 있을 것으로 기대된다. 그러므로 본 연구에서는 군사용 화생방 보호복에 사용되는 원단 중의 하나인 면직물에 APTMS를 처리하여 표면에 아민기가 도입된 면직물의 DFP 분해 반응(Figure 1)에 의한 제독 성능을 고찰하여 추후 인계 신경 작용제 분해가 가능한 국방용 화생방 섬유 소재로의 응용 가능성을 연구하고자 하였다.

2. 실 험

2.1 시료 및 재료

본 연구에서는 면직물(40수, 1/1 63 inch), (3-aminopropyl)trimetoxysilane(APTMS, Sigma-Aldrich, USA), 염산(hydrochloric acid 35~37 %, DUKSAN, Korea), potassium bicarbonate(DUKSAN, Korea)를 면직물의 아민화 표면 처리에 사용하였으며 인계 신경 작용제 모사체로 diisopropylfluorophosphate(DFP, Sigma-Aldrich, USA)를 사용하였다.

2.2 면직물의 아민화 표면 처리

1 % hydrochloric acid 수용액에 1 wt.%의 APTMS를 첨가하고 가수분해 및 중합 시간을 1, 12, 24 시간으로 달리하여 APTMS 용액을 제조한 샘플과 가수분해 시간을 12 시간으로 고정하고 APTMS 함량을 1 wt.%, 5 wt.%, 10 wt.%로 달리한 용액을 각각 제조하였다. 제조된 용액에 9 cm x 9 cm 크기의 면직물을 넣어 12 시간 동안 침지 후 침지된 면직물을 Wet Pick Up %가 약 100 %가 되도록 패딩하고 90 ℃에서 30 분간 건조 후 180 ℃에서 3 분 동안 고착하여 APTMS로 아민화 표면 처리된 면직물을 제조하였다. 아민화 표면 처리 면직물은 처리 과정 중 사용된 hydrochloric acid 수용액으로 인하여 산성을 나타내어 염기에 의한 DFP의 가수분해 촉매 작용을 할 수 없으므로 5 % potassium bicarbonate 수용액으로 3회 수세하여 중화시키고 70 ℃에서 중량의 변화가 없을 때까지 건조시켰다.

2.3 아민화 표면 처리 면직물의 DFP 분해 실험

미처리 및 아민화 표면 처리 면직물(1 cm x 1 cm)을 바이알에 넣은 뒤 샘플 위에 0.5 μL의 DFP와 25 μL의 증류수를 적하하고 32 ℃의 온도에서 1, 2, 4, 8, 12, 24 시간 동안 유지한 후에 800 μL의 증류수를 바이알에 첨가하여 DFP 및 DFP가 가수분해되어 생성되는 DHP를 추출하였다.

2.4 아민화 표면 처리 면직물의 표면 분석

미처리 및 아민화 표면 처리 면직물을 FT-IR(Thermo Scientific, iS-5, USA)을 이용하여 면직물의 작용기 변화를 분석하였으며, XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy, Thermo Scientific, K-alpha, USA)를 이용하여 표면 화학 조성을 분석하였다. 또한 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy, Hitachi, SU8220, Japan)으로 표면 모폴로지를 분석하였다.

2.5 DFP의 분해율 분석에 의한 제독 성능 평가

군사용 화학 작용제 모사체 DFP의 분해율을 분석하여 제독 성능을 평가하기 위하여 DFP 분해 실험으로부터 추출한 용액을 FID(Flame Ionization Detector)가 달린 Gas chromatography(GC, Shimadzu, GC-2300, Japan)로 Elite-1(dimethylpolysiloxane, 30 m, 0.25 mm I.D., 0.25 μm, PerkinElmer, USA) 컬럼을 사용하여 분석하였다. 분석에 사용된 모든 샘플은 신뢰성 높은 정량 분석을 위하여 자동시료주입기(Autosampler, Shimadzu, AOC-20, Japan)를 통하여 주입하였다.

www.kci.go.kr

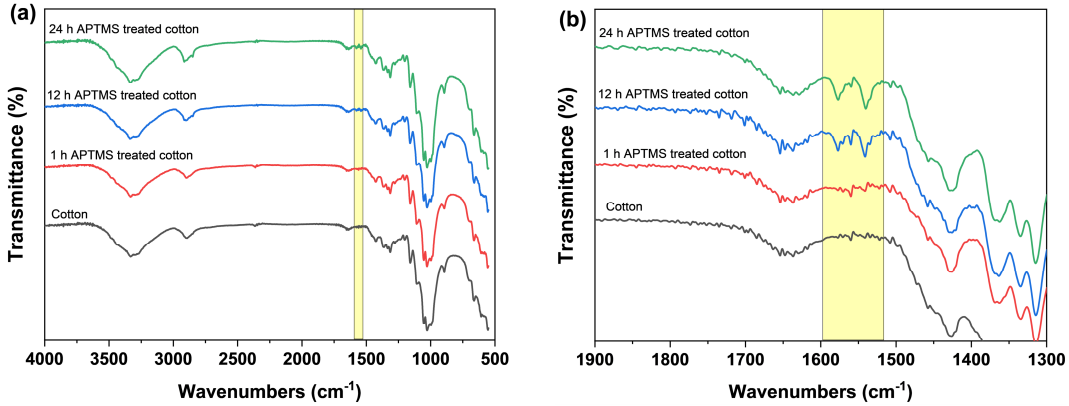


Figure 2. FT-IR spectra of the untreated and surface aminated cotton fabrics with various hydrolysis and polymerization time of APTMS; (a) FT-IR spectra of the untreated and treated fabrics and (b) the expansion of N-H peaks in the range of 1900 cm^{-1} to 1300 cm^{-1}.

3. 결과 및 토론

3.1. 아민화 표면 처리에 따른 면직물의 화학 작용기 분석

1 wt.% APTMS 용액의 가수분해 및 중합 시간을 달리하여 제조한 용액이 처리된 면직물과 미처리 면직물의 작용기를 FT-IR을 사용하여 확인하였고 그 결과를 Figure 2에 나타내었다.

Figure 2-(a)의 APTMS 가수분해 및 중합 시간이 12 시간, 24 시간인 용액을 처리한 샘플의 FT-IR 결과에서는 미처리 면섬유와 비교하였을 때, 1540 cm^{-1}와 1580 cm^{-1}에서 APTMS의 말단 아민기에서 기인한 N-H 피크가 관찰되었으나 가수분해 및 중합 시간이 1 시간인 용액을 처리한 샘플에서는 N-H 피크가 관찰되지 않았다. APTMS의 가수분해 및 중합 시간이 12 시간과 24 시간인 용액이 처리된 면섬유의 N-H 피크를 확대한 결과를 FIgure 2-(b)에 나타내었고, 이로부터 N-H피크 면적을 계산한 결과 피크 면적은 각각 4.2, 4.1로 처리 시간과 관계 없이 나타났다. 이를 통하여 APTMS의 가수분해 및 중합 시간이 1 시간인 경우에 가수분해와 중합이 충분히 이루어지지 않아 APTMS가 면섬유 표면에 고정되지 않고 potassium bicarbonate 용액 수세 후에 모두 제거된 것으로 판단되며, 가수분해 시간이 12 시간 이상일 경우에는 그 이상 처리하여도 섬유 표면에 처리된 양이 비슷함을 알 수 있다.

미처리 면직물과 가수분해 및 중합 시간을 12 시간으로 고정 후 APTMS 용액의 농도를 1, 5, 10 wt.%로 달리하여 처리한 면직물의 작용기를 FT-IR로 확인하고 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3-(a)의 APTMS가 처리된 면직물들의 스펙트럼에서는 미처리 면직물에서 나타나지 않은 N-H 피크가 약 1540 cm^{-1}와 1580 cm^{-1}에서 관찰되었다. Figure 3-(b)에는 N-H 피크가 나타나는 부분의 스펙트럼을 확대하여 나타내었다. APTMS 용액의 농도가 1 wt.%에서 5 wt.%, 10 wt.%로 증가할 때, N-H 피크의 면적은 각각 4.2, 3.6, 4.8로 APTMS 용액의 농도와 유의미한 상관관계를 나타내지 못하였다. 이는 12 시간의 APTMS 가수분해 및 중합 반응을 실시하면 1 wt.%

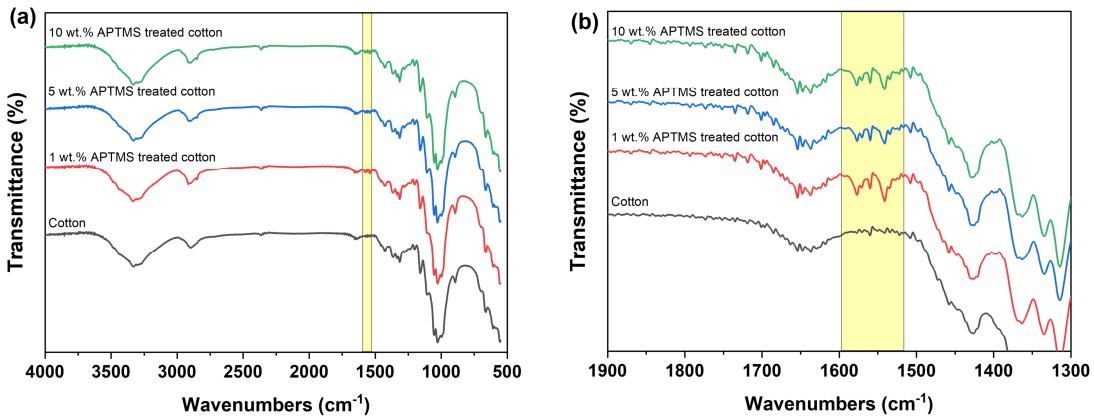


Figure 3. FT-IR spectra of the untreated and surface aminated cotton fabrics with various APTMS solution concentrations; (a) FT-IR spectra of the untreated and treated fabrics and (b) the expansion of N-H peaks in the range of 1900 cm^{-1} to 1300 cm^{-1}.

www.kci.go.kr

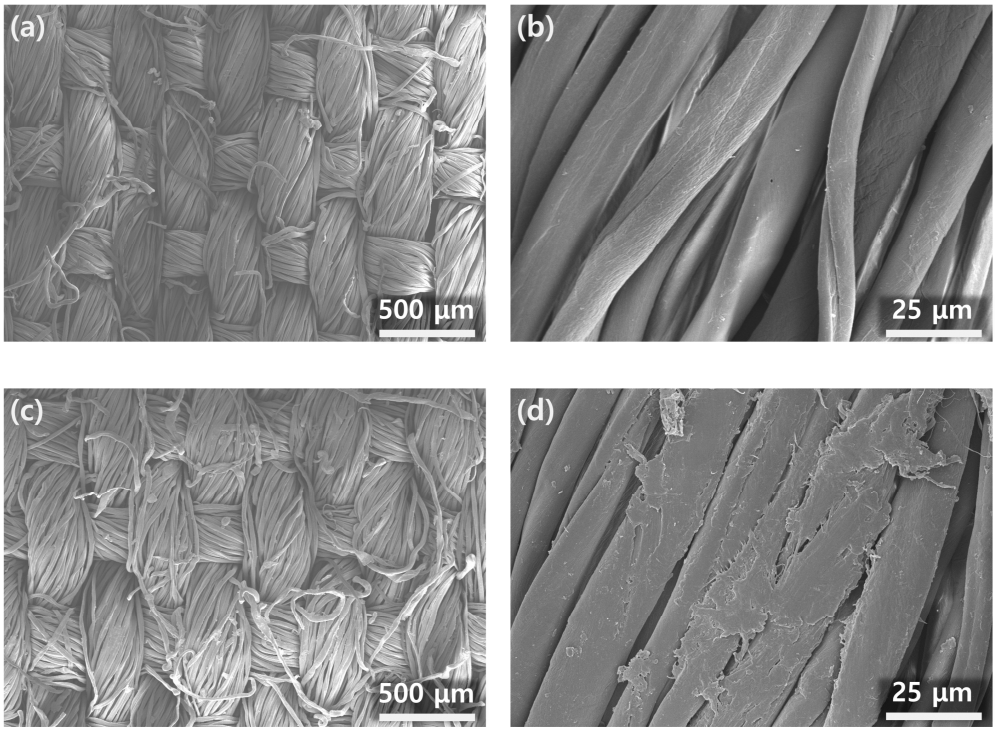


Figure 4. SEM images of the untreated and surface aminated cotton fabrics with different magnifications; (a–b) untreated cotton fabric and (c-d) surface aminated cotton fabric.

의 APTMS 용액만으로도 면직물 표면에 충분한 양의 아민화 표면처리가 가능함을 보여 준다.

FT-IR 스펙트럼으로부터 확인한 결과로 보아 본 연구의 실험 조건에서 최적의 아민화 표면처리 방법은 1 wt.% APTMS 용액을 12 시간 동안 가수분해 및 중합한 용액을 처리하는 것으로 판단되었다.

3.2. 아민화 표면 처리된 면직물의 표면 모폴로지 및 화학구조

3.1절에서 서술한 바와 같이 본 연구의 실험 조건에서 최적의 아민화 표면처리 방법은 1 wt.% APTMS 용액을 12 시간 동안 가수분해 및 중합한 용액을 처리하는 것으로 판단되어 해당 조건으로 아민화 표면 처리된 면직물과 미처리 면직물만으로 표면 모폴로지 및 화학구조를 조사하였다.

FE-SEM으로 미처리 면섬유와 아민화 표면 처리된 면직물의 표면 모폴로지를 확인하고 Figure 4에 나타내었다. Figure 4에서 미처리 면직물의 경우 면섬유 표면의 주름이 관찰되지만 아민화 표면 처리된 면직물의 경우에는 표면의 주름이 관찰되지 않고 비교적 매끈한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 아민화 표면 처리 면직물에서는 섬유와 섬유 사이의 공간이 채워져 있는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 APTMS의 중합체인 것으로 판단된다.

아민화 표면처리 면직물의 FE-SEM 사진에서 면섬유 표면의 주름이 관찰되지 않는 이유가 APTMS 중합체가 코팅되었기 때문인지 단순히 섬유 표면이 APTMS 가수분해 및 중합 용액 처리 시 노출된 산성 조건 때문인지 확인하기 위하여 EDS mapping을 수행하였고 그 결과를 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에서 나타난 것처럼 EDS mapping 결과 미처리 면섬유 표면에는 존재하지 않는 규소 원소와 질소 원소가 섬유의 표면에 고르게 분포되어있는 것으로 나타났다. 이는 APTMS가 가수분해와 중합 후 면섬유에 처리되면서 면섬유의 하이드록실기와 반응하며 빈 공간을 채우며 표면에 입자 형태가 아닌 얇은 코팅층을 형성하였음을 보여준다.

미처리 및 아민화 표면 처리 면직물의 표면 화학 조성을 확인하고자 XPS 분석을 수행하고 그 결과를 Figure 6과 Table 1에 나타내었다.

Figure 6의 XPS 스펙트럼에서 두 샘플 모두 285 eV에서 탄소 원소로 인한 C1s 피크와 533 eV 부근에서 산소 원소로 인한 O1s 피크가 확인되었다. 아민화 표면 처리된 면직물의 XPS 스펙트럼에서는 미처리 면직물과는 달리 아민기의 질소 원자로 인한 N1s 피크와 실란기의 규소로 인한 Si2p 피크를 각각 400 eV와 102 eV에서 확인하였다.

XPS 분석으로부터 미처리 및 아민화 표면 처리된 면직물의 표면 원소 조성을 Table 1에 나타내었다. 아민화 표면 처리 후 면섬유의 원소 중 질소 함량이 0.84 %에서 2.20 %로 1.36 % 증가하였고, 규소 함량 또한 1.18 %에서 2.61 %로 1.43 %의 비슷한 비율로 증가하였다. 또한 질소 원소와 탄소 원소간의 비율을 나타낸 N/C가 0.011에서 0.033으로, 규소 원소와 탄소 원소간의 비율을 나타낸 Si/C가 0.015에서 0.039로 증가하여

www.kci.go.kr

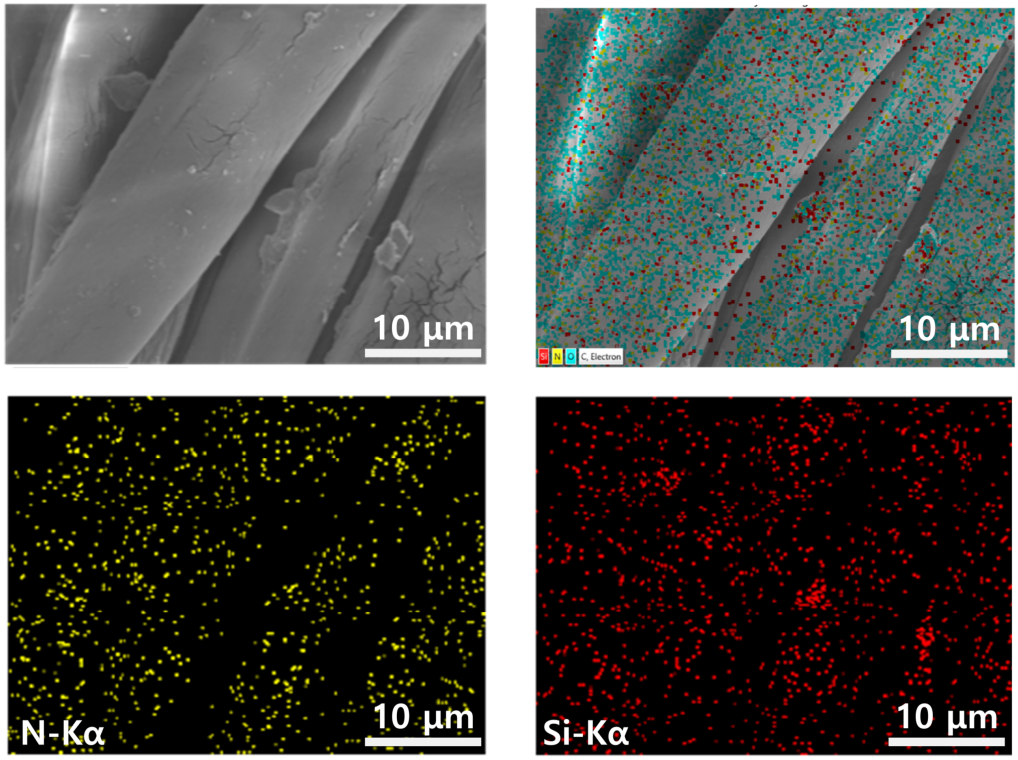


Figure 5. EDS mapping of the nitrogen and silicon element for the surface aminated cotton fabric.

APTMS의 중합체의 질소와 규소간의 비율인 1:1과 유사한 비율의 질소와 규소가 표면 처리 후 도입 되었음을 확인 하였다.

3.3. 아민화 표면 처리에 따른 면직물의 제독 성능 변화

미처리 면직물과 1 wt.%, 5 wt.%, 10 wt.% APTMS 용액을 12시간 동안 반응시켜 처리함으로써 아민화 표면 처리된 면직물의 DFP 분해율을 GC 분석을 이용하여 선행 연구와 같은 방법으로 계산하였다[11].

앞서 보고된 바와 같이 DFP의 가수분해 반응 후 생성되는 DHP는 DFP에 비해 휘발성이 낮아 GC 컬럼의 정지상의 분해 온도보다 높은 온도로 가열하여야 하므로 분석이 어려워 DFP 피크의 면적 변화로부터 분해율을 계산하였다. 선행연구에서는 DHP 피크가 GC 크로마토그램에 나타나지 않더라도 DFP의 피크 면적만으로 DFP의 농도별 분해율을 계산하였고 이에 따른 상관계수를 구하여 DFP 면적만으로 계산한 분해율의 신뢰성을 확인하였다[11].

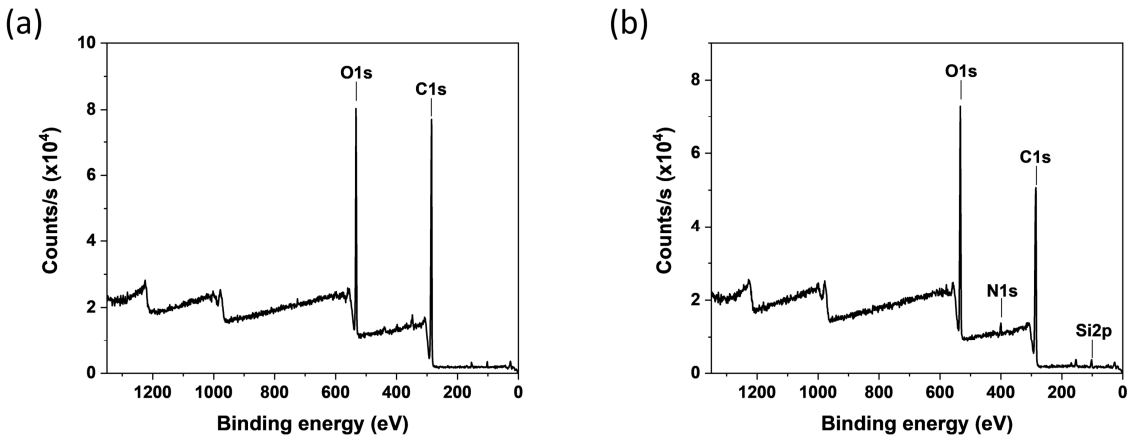


Figure 6. XPS spectra of the prepared fabrics; (a) untreated cotton fabric and (b) surface aminated fabric.

www.kci.go.kr

Table 1. Surface elemental composition of the untreated and surface aminated fabrics from XPS spectra

Sample	Atomic percent			Atomic ratios		
	C	O	N	Si	N/C	Si/C
Cotton	75.44	22.54	0.84	1.18	0.011	0.015
APTMS treated cotton	66.15	29.03	2.2	2.61	0.033	0.039

Figure 7에는 GC분석을 통해 미처리 및 아민화 표면처리된 직물의 2 시간 후 DFP 분해율을 계산한 결과를 나타내었다. 미처리 면직물의 2 시간 후 분해율은 약 17.9 %로 확인되었고 이는 면직물에 영향을 받아 분해된 것이 아닌 단순히 DFP를 32 ℃의 온도에서 방치하였을 때 가수분해되어 나타나는 분해율로 판단된다. 아민화 표면처리된 면직물은 APTMS의 농도가 1 wt.%에서 5 wt.%, 10 wt.%로 증가함에도 불구하고 DFP 분해율이 각각 37.6 %, 33.6 %, 35.1 %로 유사한 것으로 나타났다. 이는 FT-IR 결과에서 확인한 바 와 같이 아민화 표면 처리 시 APMTS는 1 wt.%의 농도만으로 면직물 표면을 충분히 코팅하고 그 이상의 농도로 처리하면 염기에 약한 APTMS의 중합체인 폴리실록산계 화합물이 표면 중화를 위하여 사용한 potassium bicarbonate에 의하여 제거되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 1 wt.% 이상의 APTMS 용액으로 아민화 표면 처리될 경우에는 표면 아민기의 수가 증가하지 않고 유사하기 때문에 DFP의 가수분해를 촉진하는 촉매 작용의 변화가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

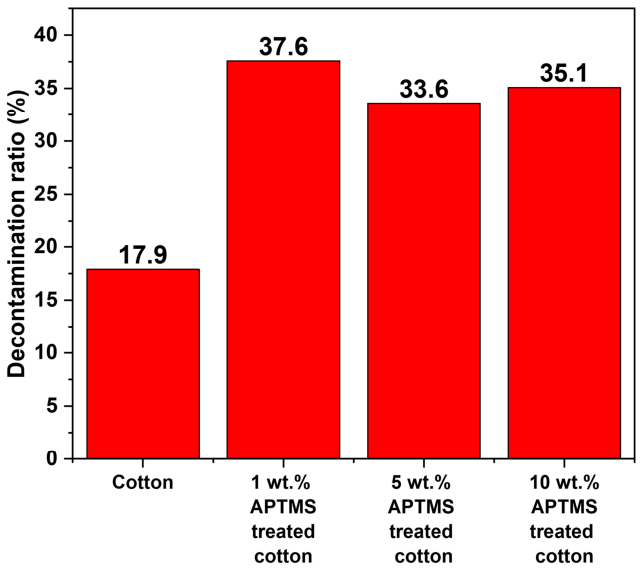


Figure 7. DFP decontamination ratios of the prepared samples obtained by GC chromatograms.

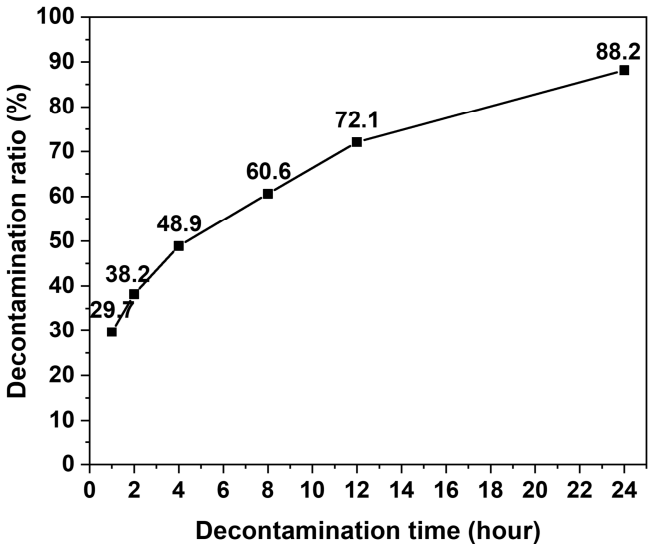


Figure 8. DFP decontamination ratios of the surface aminated cotton fabric obtained by GC chromatograms with increased decontamination reaction time.

Figure 8에는 1 wt.% APTMS 용액으로 아민화 표면 처리된 면직물의 DFP 분해 반응 시간을 1, 2, 4, 8, 12, 24 시간으로 달리하였을 때의 DFP 분해율을 GC 분석으로부터 계산하여 나타내었다. 1 h에서 29.7 %의 DFP 분해율을 보였고 시간이 지날수록 분해가 진행되며 24 시간에서는 88.2 %의 분해율을 보였는데 이는 촉매가 없는 상태에서 분해에 수 일이 걸리는 DFP의 분해 시간을 유의미하게 단축시킨 것으로 판단된다[7].

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 복잡한 제조 방법이 아닌 단순하고 간단한 방법으로 일반적인 실란커플링제인 APTMS를 면직물에 처리하여 섬유 표면을 아민화하고 처리된 면직물의 DFP 분해율을 평가하여 인계 신경 작용제에 대한 제독 성능이 부여된 군사용 화학 작용제 보호복용 섬유를 제조하고자 하였다. 이를 위하여 APTMS 용액의 가수분해 및 중합 시간과 농도를 달리하여 제조하고 이를 면섬유에 처리하였다. 다양한 조건에서 아민화 표면 처리된 면섬유의 화학구조 및 제독 성능을 평가하여 본 결과, 본 연구에서 수행한 처리 조건에서는 1 wt.% APTMS 용액을 12 시간 가수분해 및 중합하여 면섬유에 처리 시에 최적의 아민화 표면 처리가 가능함을 알 수 있었다. 또한, 인계 신경작용제 모사체인 DFP의 분해 반응을 1 시간부터 24 시간까지 진행하여 분해 정도를 비교한 결과 24 시간 후에는 DFP의 88.2 %가 분해되어 제거됨을 알 수 있었다.

따라서 APTMS를 이용하여 아민화 표면 처리된 면직물은 군사용 화학 작용제 모사체의 가수분해를 촉진하는 제독 성능이 있음을 확인하였고 추후에 APTMS의 아민기 말단에 구아니딘과 같은 더 강한 염기성 촉매 작용기를 부여하거나 APTMS를

www.kci.go.kr

나노섬유 등에 처리하여 표면적을 증가시키는 등의 제독 성능을 향상시키는 심화 연구가 이루어진다면 실용화 가능한 고성능 군사용 화생방 보호복 소재를 제조할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07044885).

References

1. K. Ganesan, S. K. Raza and R. Vijayaraghavan, Chemical Warfare Agents, *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, **2**(3), 166(2010).
2. K. Kim, O. G. Tsay, D. A. Atwood, and D. G. Churchill, Destruction and Detection of Chemical Warfare Agents, *Chemical Reviews*, **111**(9), 3245(2011).
3. F. R. Sidell, "Military Preventive Medicine: Mobilization and Deployment, Volume 1", Dept. of Defense, Washington, DC., 611, 1992.
4. M. Boopathi, B. Singh, and R. Vijayaraghavan, A Review on NBC Body Protective Clothing, *The Open Textile Journal*, **1**(1), 1(2008).
5. M. Bhuiyan, L. Wang, A. Shaid, R. A. Shanks and J. Ding, Advances and applications of chemical protective clothing system, *Journal of Industrial Textiles*, **49**(1), 97(2019).
6. R. T. Delfino, T. S. Ribeiro and J. D. Figueroa-Villar, Organophosphorus Compounds as Chemical Warfare Agents: a Review, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **20**(3), 407(2009).
7. Y. S. Kye, D. W. Kim, K. H. Jeong, Recent Trend in Catalysis for Degradation of Toxic Organophosphorus Compounds, *Applied Chemistry for Engineering*, **30**(5), 513(2019).
8. Y. S. Kye, W. Y. Chung, D. W. Kim, Y. K. Park, S. U. Song and K. H. Jeong, A study on the Decomposition of DFP using Cu(II)-Chitosan Complex, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, **15**(5), 699(2012).
9. Y. S. Kye, K. H. Jeong and W. Y. Chung, Decomposition Studies of DFP Using Transition Metal Catalysts, *Applied Chemistry for Engineering*, **21**(1), 1(2010).
10. A. Gugliuzza and E. Drioli, A Review on membrane engineering for innovation in wearable fabrics and protective textiles, *Journal of Membrane Science*, **446**, 350(2013).
11. W. Kwon, M. Han and E. Jung, Chemical Warfare Agent Simulant Decontamination of Chitosan Treated Cotton Fabric, *Textile Coloration and Finishing*, **32**(1), 51(2020).
12. S. Kim, W. B. Ying, H. Jung, S. G. Ryu, B. Lee, and K. J. Lee, Zirconium Hydroxide-coated Nanofiber Mats for Nerve Agent Decontamination, *Chemistry, an Asian Journal*, **12**(6), 698(2017).
13. M. K. Kim, S. H. Kim, M. P, S. G. Ryu and H. Jung, Degradation of chemical warfare agents over cotton fabric functionalized with UiO-66-NH_2, *RSC Advances*, **8**(72), 41633(2018).
14. S. L. Bartelt-hunt, D. R. Knappe and M. A. Barlaz, A Review of Chemical Warfare Agent Simulants for the Study of Environmental Behavior, *Criticla Reviews in Environmental Science and Technology*, **38**(2), 112(2008).
15. W. B. Ying, S. Kim, M. W. Lee, N. Y. Go, H. Jung, S. G. Ryu, B. Lee and K. J. Lee, Toward a Detoxification Fabric Against Nerve Gas Agents: Guanidine-Functionalized Poly[2-(3-butenyl)-2-oxazoline]/Nylon-66 Nanofibers, *RSC Advances*, **7**(25), 15246(2017).
16. Y. K. Kim, H. S. Yoo, M. C. Kim, H. C. Hwang, S. G. Ryu and H. W. Lee, Decontamination of Chemical Warfare Agent Simulants using Vapor-phase Hydrogen Peroxide, *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(3), 360(2014).
17. D. B. Dwyer, D. T. Lee, S. Boyer, W. E. Bernie and W. E. Jones, Jr., Toxic Organophosphate Hydrolysis Using Nanofiber-Templated UiO-66-NH_2 Metal-Organic Framework Polycrystalline Cylinders, *Applied Materials and Interfaces*, **10**(30), 25794(2018).
18. T. Yokoi, Y. Kubota and T. Tatsumi, Amino-functionalized Mesoporous Silica as Base Catalyst and Adsorbent. *Applied Catalyst A: General*, **421**, 14(2012).
19. R. Guo, Y. Li, J. Lan, S. Jiang, T. Liu and W. Yan, Microwave-Assisted Synthesis of Silver Nanoparticles on Cotton Fabric Modified with 3-Aminopropyltrimethoxysilane, *Journal of Applied Polymer Science*, **130**(6), 3862(2013).

Authors

김창규 경북대학교 섬유시스템공학과 석사과정 학생
권 웅 경북대학교 섬유시스템공학과 박사과정 학생
정의경 경북대학교 섬유시스템공학과 교수

www.kci.go.kr