

섬유의 항균 기능화 공정 개발 동향



한태희

- 2004. 한양대학교 섬유고분자공학과 (학사)
- 2006. KAIST 생명화학공학과 (석사)
- 2010. KAIST 신소재공학과 (박사)
- 2010. KIST 기능성고분자센터 (Post-Doc.)
- 2012. Northwestern Univ. (Post-Doc.)
- 2012-현재. 한양대학교 유기나노공학과 부교수



김유중

- 2020. 한양대학교 유기나노공학과 졸업 (학사)
- 2021-현재. 한양대학교 유기나노공학과 석사과정



이경섭

- 2020. 한양대학교 유기나노공학과 졸업 (학사)
- 2021-현재. 한양대학교 유기나노공학과 석사과정



이현후

- 2019. 한양대학교 유기나노공학과 졸업 (학사)
- 2021-현재. 한양대학교 유기나노공학과 석사과정

1. 서 론

현재 섬유는 의류뿐만 아니라 산업, 의료, 공기 필터, 가구 등 다양한 분야에서 목적에 맞게 가공되어 사용되고 있다. 하지만 섬유 직물은 큰 비표면적을 갖고 피부 또는 외부 환경의 습도에 쉽게 영향을 받아 생육조건이 맞으면 박테리아, 곰팡이 등의 미생물의 생장 번식이 활발히 이루어진다. 증식된 미생물들은 악취를 발생시키고 섬유의 강도 및 변색을 유발한다. 또한 섬유는 우리의 몸을 보호하기도 하지만 증식된 미생물의 운반체 역할 또한 가능해 전염병의 요인으로 작용 가능하다. 즉, 섬유의 균에 대한 취약성은 인간의 질병 및 상품 가치에 지대한 영향을 끼친다. 따라서, 코로나 19 팬데믹 영향으로 개인위생 및 공중 보건에 대한 관심이 증가하면서 사람들의 청결성에 대한 요구가 커지고 있다. 이에 따라 미생물 증식에 의해 야기되는 악영향 해결을 위해 섬유제품의 항균 기능성 부여 연구가 진행되고 있다.

섬유의 항균 기능 부가 가공 방법으로는 고분자 단계에서 항균제를 첨가하여 방사하는 혼합법, 염색가공 단계에서 적용하는 후처리 가공법이 있으며 또한, 최근에는 방사선 그래프트 반응을 이용하여 고분자 표면에 특정 단기를 도입하는 가공법이 연구되고 있다. 일반적으로 섬유에 사용되는 항균제로는 유기계 항균제, 무기계 항균제, 유기 금속 화합물 등이 주로 사용되고 있고 최근에는 합성 항균제의 인체와 환경에 미치는 악영향을 줄이고자 인체에 대한 안전성이 우수하고 환경오염의 문제가 없는 키토산과 같은 천연 항균제를 이용하거나 섬유 자체를 변화시켜 항균성을 부여하는 방법이 연구되고 있다.

섬유는 인류가 미래에도 반드시 사용하여야 하는 소재이며, 코로나-19와 같은 바이러스나 미생물에 의한 감염에 대응하기 위하여 항균성을 가지고 있어야 한다. 따라서, 본 논고에서는 섬유 가공 방법을 중심으로 살펴

보며 앞으로 국내 섬유학계가 가져야 할 항균성 섬유 연구 방향에 대해 제시해 보고자 한다.

2. 항균 기능성 부여 섬유 가공 방식

섬유의 이상적인 항균 개질을 위해선 다양한 요구 조건을 충족해야 한다. 선택적으로 바람직하지 못한 유기체에 대해 항균 작용이 이루어져야 하며, 인체 및 환경에 대한 위험성이 낮아야 한다. 직물의 손상 없이 다리미질, 드라이클리닝, 세탁 등에 대한 내구성이 우수해야 한다. 섬유 가공 과정에서의 화학 반응에 대한 친화성 및 안정성, 생산성, 비용 효율성 또한 매우 중요하다.

항균성이란 넓은 의미에서는 세균, 박테리아, 진드기 같은 모든 미생물들의 발생, 증식의 억제에서 사멸시키는 살균, 멸균하는 능력을 의미한다. 항균의 메커니즘은 미생물 내의 특정 작용기와의 화학적, 구조적 성질 및 친화도 수준에 따라 다양하다. 섬유의 항균 개질 방식은 넓은 범위에서 2가지로 나뉜다.

- 1) 항균제와의 물리적 혼합
- 2) 후처리 가공

2.1. 물리적 혼합 방식

물리적 혼합 방식은 가공 과정의 간단함, 낮은 비용 등의 이유로 섬유의 항균성 기능 부여를 위해 많이 쓰인다. 방사 전 과정에서 항균제를 첨가하여 물리적으로 혼합하여 분산시킨 후 방사 과정을 통해 항균 섬유를 생성한다. 물리적 혼합 방식에 쓰이기 위해 항균제는 반드시 고분자, 용액 또는 다른 첨가제들과 화학적으로 비활성이여야 하며 방사 과정에서 안정한 상태로 친화성 있게 분산이 되어야 한다.

폴리에스터, 나일론, 폴리프로필렌 등의 용융 방사 섬유 제조 시 방사 공정에 항균제를 첨가하는 방법으로 열 안정성이 높은 무기 항균제를 주로 사용한다. 나노 입자의 무기 항균제는 극소량 사용하여도 우수한 항균효과를 나타내기 때문에 인체 및 환경에 대한 독성도 거의 나타나지 않으므로, 환경 친화적이고 인체 및 자연 환경에도 유익한 재료로 각광받으며 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만 현재 많이 쓰이는 무기계 고체 항균제의 경우 항균제 자체는 우수한 항균효과를 나타내나 고분자와 무기 또는 금속 나노 입자와 낮은 상용성으로 인해 용출 제어가 어렵고 응집 및 불균일 분포로 인해 제조된 항균섬유에서 본래 항균제의 항균효과를 내기 어렵다. 따라서, 용출 제어가 가능한 물질과 미리 마스터 칩을 만들어서 섬유 방사 과정에서 혼합하여야 한다는 단점이 있다.

따라서, 근래에는 이러한 단점들을 해결하기 위해 무기계 나노 입자의 전처리(pre-treatment) 연구가 활발히 진행되고 있다. 나노 입자 합성은 일반적으로 용액상에서 핵 생성, 클러스터 형성, 결정 성장의 3가지 과정으로 이루어진다. 각각의 과정에서 반응의 열역학, 동역학 변수 조건을 바꿔주면서 입자의 크기 및 모양을 설계할 수 있다[1].

대표적으로 많이 쓰이는 무기 항균제로는 은-나노 입자(Ag nanoparticle, AgNP)가 있다. AgNP의 항균 능력은 입자 크기에 따라 달라진다. 20 nm까지의 작은 크기의 AgNP는 큰 나노 입자에 비해 더욱 큰 항균 활성을 갖으며, 삼각형 → 디스크 → 구형 모양 순으로 항균 활성이 커진다. 합성 방법에 대한 활발한 연구로, 가장 큰 활성을 갖는 작고 구형의 AgNP 합성이 이루어 졌지만 작은 크기로 인한 작은 크기로 인해 합성 후 수거 및 응집 문제는 여전히 문제가 되고 있다.

이를 해결하기 위해 최근에 다공성 실리카 나노 입자(mesoporous silica nanoparticle, MSN)를 담체(carrier)로 활용한 은-나노 입자의 분산성 향상 방안이 보고되었다[2]. MSN은 그 자체로 항균성을 갖으며 큰 비표면적과 더불어 AgNP의 훌륭한 담체로써 작용 가능하다. 담체의 표면에서 AgNP를 결정 성장시킴으로써 응집을 최소화하고 다공성의 특성으로 부피 대비 많은 양의 Ag⁺를 형성하며 Ag⁺의 방출을 용이하게 도와 줌 AgNP가 섬유에 분산되었을 때의 활성 감소 단점을 최소화한다. 결정핵 형성 과정에서 MSN을 합성하는 데 주로 쓰이는 Cetyltrimethylammonium bromide를 통해 만들어진 MSN을 분산시켜 이를 담체로 활용해 MSN/Ag 나노복합재료를 합성했다. 12시간의 배양 후 박테리아의 성장 정도를 관찰한 결과, MSN 자체도 항균성을 갖으며 MSN/Ag 나노복합재료에는 박테리아의 성장 억제 및 살균이 완벽히 이루어졌다(Figure 1).

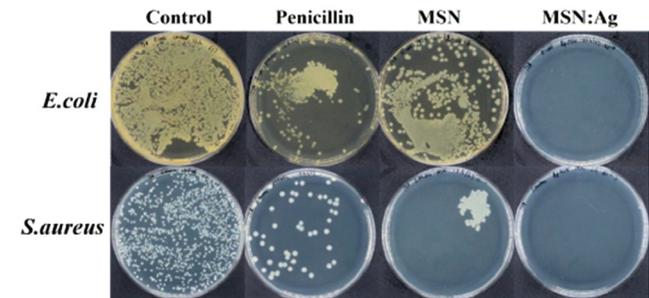


Figure 1. 1 mg/mL Control, penicillin, MSNs, MSN/Ag에서 12시간의 배양 후 박테리아의 생존 분석[2].

또 다른 담체로써 주목받고 있는 물질로는 그래핀 옥사이드

(Graphene Oxide, GO)가 있다. GO는 흑연의 산화를 통해 얻어지며 다양한 산소 기능기(하이드록시기, 카복실기, 카보닐기, 에폭시기 등)를 갖고 있다. GO는 우수한 생체적합성, 넓은 비표면적을 갖는 동시에 탄소나노튜브와 같이 박테리아의 세포막을 파괴하고 활성 산소 종을 형성해 항균성을 갖는 등 우수한 담체인 동시에 항균제로써 또한 기능을 할 수 있다[3] (Figure 2).

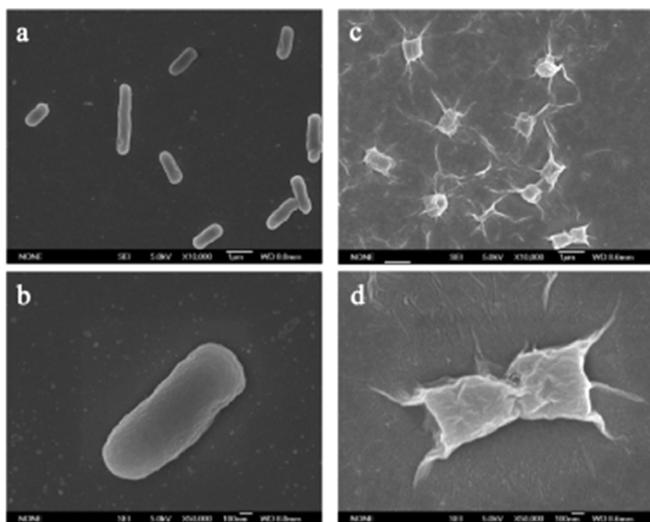


Figure 2. (a, b) graphene-based material 없이 박테리아 배양 후, (c, d) GO dispersion에서 박테리아 배양 후 SEM 사진[3].

최근에 우수한 항균성을 나타내는 GO-polyethyleneimine(PEI)-Ag가 보고되었다[4]. GO를 담체로 사용하여 AgNP를 형성할 경우 상승 효과가 나타나 AgNP 홀로 쓰일 때 보다 우수한 항균성을 보인다. GO-PEI-Ag는 GO의 카복시기 관능기와 PEI의 아민화 반응(amination reaction)을 통해 GO-Ag 보다 용액 분산성을 더욱 향상 시켰다(Figure 3).

또한 GO-PEI-Ag/PAN 직물을 형성해 직물내에서도 항균성의 저하없이 우수한 항균성을 나타냈고, 또한 GO-Ag와 같은 항균 메커니즘을 따르지만 보다 좋은 항균성을 나타내어 분산성의 중요성을 보였다(Figure 4).

이처럼 물리적 혼합 가공방식에서 근래에는 높은 항균 활성의 무기계 나노 입자들의 합성 방안에 대한 연구가 많이 진척되어 있어 분산성의 중요성이 강조되고 있고 담체의 활용뿐만 아니라 직접적으로 항균제를 화학적 개질하거나[5], 나노 입자의 캡슐화, 리간드 교환, 표면 그래프팅 등 많은 분산성 향상 방안들이 연구되고 있다[6-7].

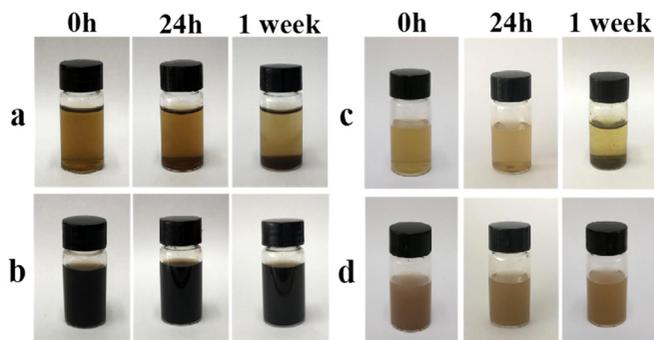


Figure 3. 수용액 상태의 (a) GO, (b) GO-PEI, (c) GO-Ag, and (d) GO-PEI-Ag Digital images of (a) GO, (b) GO-PEI, (c) GO-Ag, and (d) GO-PEI-Ag 서로 다른 시간에서의 디지털 사진[4].

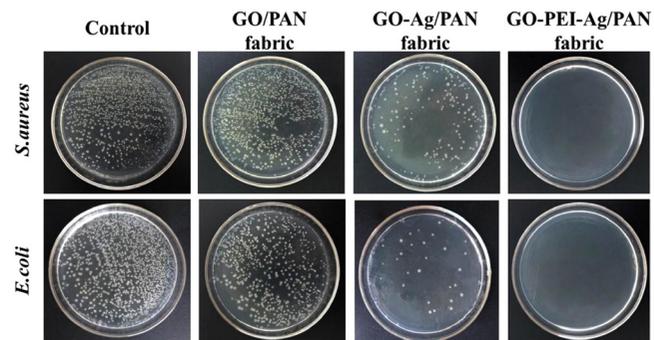


Figure 4. Control, GO/PAN, GO-Ag/PAN, GO-PEI-Ag/PAN fabrics에 노출된 박테리아 군집[4].

2.2. 후처리 가공

항균성을 갖는 섬유제품을 개발하는 방법으로는 물리적 혼합과 더불어 표면 개질 및 화학적, 물리적 후가공 방법 등이 있다. 그 중 표면 그래프팅 방법이 많이 시도되었으며 섬유의 특성에 따라 가공 방식에 차이가 존재한다. 대표적으로 많이 쓰이는 그래프팅 방법으로는 화학적 그래프팅, 고주파 또는 마이크로웨이브 플라즈마 그래프팅, 고에너지 조사 그래프팅, 자외선 그래프팅 등이 있다[8].

근래에 주목받고 있는 후처리 가공법 중 하나는 N-halamine을 통한 항균성 부여 방법이다[9]. N-halamine은 넓은 범위의 항균 스펙트럼 및 빠른 항균 작용, 자가 회복성, 생체적합성, 등 우수한 항균제의 조건을 모두 갖추어 주목을 받고 있다. N-halamine은 N-H의 할로젠 치환 반응으로 얻어진 한 개 또는 그 이상의 질소-할로젠 공유결합을 포함한 질소의 할로젠 치

환 합성물이다. *N*-halamine의 우수한 항균 특성은 이러한 분자 구조의 특성으로부터 나타난다.

항균 메커니즘에 대해선 아직까지 논의되고 있지만 근래에는 3가지의 메커니즘이 제시되고 있다[10](Figure 5). 첫번째는 박테리아와 접촉하여 살균하는 방식이다. 용액 상에서 활성 할로겐의 방출없이 직접적으로 *N*-halamine에서 박테리아로 접촉하여 활성 할로겐을 전달하는 방식이다. 반면에 두번째는 *N*-halamine에서 용액으로 할로겐 양이온의 해리를 통해 박테리아의 항균이 이루어진다. 마지막 방식은 *N*-halamine에서 특정 매질로 할로겐 양이온을 전달하여, 할로겐 양이온이 전달된 매질을 통해 항균 작용을 하는 방식이다. 산화된 할로겐은 희석된 가용용 표백제 등에 의한 가역반응을 통해 다시 *N*-halamine 구조를 회복할 수 있다. 이는 *N*-halamine 항균제의 큰 장점 중 하나로 화학적 구조로부터 기인한 뛰어난 항균 기능 회복성을 갖는다.

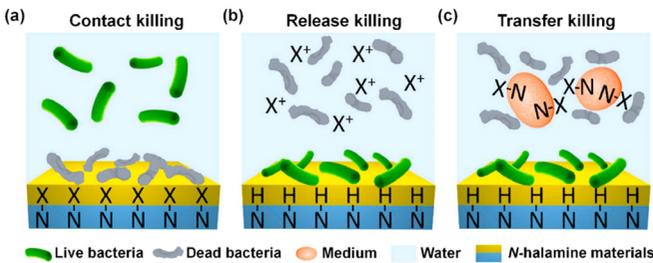


Figure 5. *N*-halamine의 항균 메커니즘 삽화[10].

근래에 보고된 *N*-halamine을 통한 항균 개선 방안은 *N*-halamine의 처리 방식에 따라 화학적 처리 방식과 물리적 처리 방식의 2가지가 있다. 두 가지 처리방식은 다양한 종류의 섬유 물질에 *N*-halamine을 어떻게 효과적으로 결합시킬 수 있는지에 핵심 초점을 두고 있다. 또한 섬유 외에도 나노 입자, 비드, 필름 등 다양한 물질에 적용이 가능해 큰 잠재성을 지니고 있다.

2.2.1. 화학적 개선 방안

화학적 개선 가공 방법은 화학적 결합을 통하여 *N*-halamine과 섬유와의 화학적 흡착을 통해 섬유에 항균 기능성을 부여하는 방식이다[10]. 일반적으로 기판 섬유를 *N*-halamine을 포함하는 용액에 함침 시키거나 방사 전 화학 반응을 통해 *N*-halamine을 도입한다. 단분자의 *N*-halamine을 섬유에 결합시키거나, 그라프팅 시키는 방법이 주로 사용되고 있다. 의료용 섬유 소재의 70% 이상이 일회용 부직포인 만큼 최근 부직포의 항균성 부

여 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 의료 용도이기 때문에 높은 항균성과 더불어 필수적으로 생체 안정성이 우선시되어야 하기 때문에 사용 가능한 항균제가 상당히 제한되어 있다. 그렇기 때문에 환경 친화적인 합성 과정, 높은 생체 안정성 및 넓은 범위의 항균 스펙트럼, 구조적 안정성을 갖는 *N*-halamine이 특히 주목받고 있다.

대표적인 부직포 소재 중 하나인 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)의 *N*-halamine을 통한 항균 기능 부여 방안이 최근 보고됐다[11]. 라디칼 그라프트 중합을 통해 압출기 내에서 acrylic halamine 전구체로써 methylacrylamide(MAM)를 성공적으로 그라프팅 시켜 PP-grafted methacrylamide(PP-g-MAM) 합성했고(Figure 6), 이를 통해 형성된 부직포를 chlorination 용액에 함침시켜 *N*-halamine을 형성해 항균성을 부여했다. 부직포 내에서도 *N*-halamine은 활성 감소없이 우수한 항균성 및 구조 회복성을 나타내었다. 부직포 내에서도 *N*-halamine은 우수한 항균성 및 구조 회복성을 나타내었다(Figure 7). Chlorination 된 PP-g-MAM-Cl 및 되지 않은 PP-g-MAM의 비교 결과 질소-할로겐 그룹이 항균성을 부여하는 주된 기능기임을 확인함과 더불어 뛰어난 항균성을 나타내었다. 또한 5회의 항균성 실험을 통해 재-할로겐화 반응을 통해 구조 회복한 부직포가 첫 항균성 실험과 비교했을 때, 항균성의 감소가 없음을 확인 해 *N*-halamine의 항균 기능 회복성이 부직포내에서도 유지됨을 확인했다.

합성 섬유는 대부분 화학적 안정성이 우수하기 때문에 펠렛 상태로 제조된 소재를 다시 용융 상태에서 라디칼 개시제 및 *N*-halamine 전구체와 함께 넣어 재압출을 통해 펠렛으로 제조하거나 그 상태로 방사하는 방법이 주로 사용되고 있다[12-13].

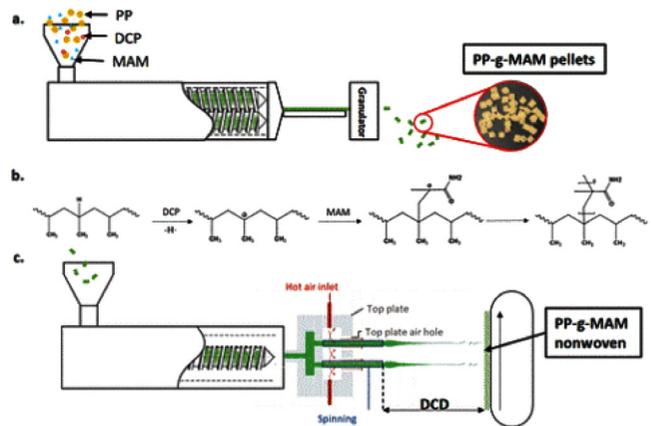


Figure 6. PP-g-MAM polymers의 압출 과정[11].

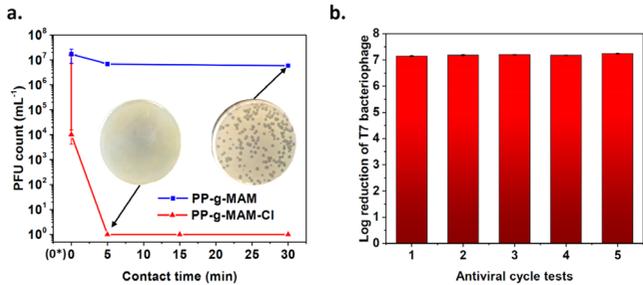


Figure 7. PP-g-MAM nonwovens의 항균성 및 구조 회복성 실험[11].

N-halamine 전구체 용액과 직물의 간단한 함침을 통한 천연 섬유인 목면의 화학적 표면 처리 방안이 최근에 발표됐다[14]. s-triazine 기반의 *N*-halamine 전구체(TIAPC)를 통해 항균성 및 carboxylate와 금속 양이온 간의 배위 결합을 통해 난연성 또한 부여했다(Figure 8).

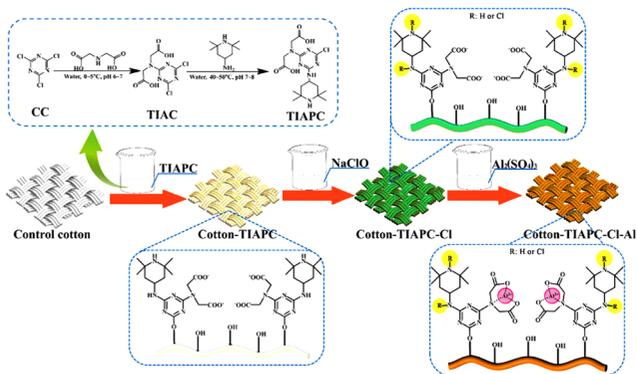


Figure 8. s-triazine 기반의 *N*-halamine 전구체(TIAPC)의 합성 및 다기능성 섬유 코팅 과정[14].

N-halamine는 그 특성으로 인해 뛰어난 항균제로 근래에 연구가 많이 되고 있고 관능기를 활용해 난연성 등 새로운 기능성을 부여할 수 있는 장점이 있다. 단분자 *N*-halamine 도입 또는 그래프팅 방법 모두 섬유의 화학적 항균성 부여 방안으로 연구되고 있고 이는 섬유의 특성에 따라 방식을 결정한다. 화학적 안정성이 우수한 합성 섬유의 경우 라디칼 개시제를 통한 그래프팅 방안이 주로 사용되고 있고 주쇄에 산소 작용기가 존재하는 천연 섬유 같은 경우 둘 모두 활용되고 있다. 완성된 직물의 표면에 간단한 함침 과정을 통해 *N*-halamine을 도입하는 방안은 환경 친화적, 낮은 비용, 쉬운 대량 생산 등 장점이 있지만 고향균성을 나타내기 부족할 수 있다. 반면에 용융 상태의 소재에 화학적 처리하는 방안은 고향균성을 기대

할 수 있지만 생성된 결가지로 인해 섬유의 내구성 및 강도 저하를 초래할 수 있다. 따라서 제품의 목적에 따라 적절한 항균 부여 방안을 활용한다면 미래 잠재성이 있다.

2.2.2. 물리적 개선 방안

비록 화학 처리 방안이 다양한 제품에 대해 수년 동안 실용적인 방안으로써 주목받고 있지만, 필수적으로 반응 작용기가 존재해야 한다는 제한점이 존재한다. 이런 면에서 단순히 섬유에 *N*-halamine을 디포지션하는 표면 개선 방안은 *N*-halamine의 다양성 및 용량, 제품의 대량화 및 공정 간소화 등에서 상당한 이점을 가진다. 일반적으로 표면 코팅, 임계 함침 방법을 통해 화학 결합 없이 섬유 제품에 항균성을 부여한다.

미생물들이 생존 및 번식하기 위해서는 습도, 영양분, 온도 등 여러 조건들이 맞아야 하며, 이런 조건이 충족된 환경에서 매우 빠르게 증식한다. 따라서, 특히 친수성인 천연 섬유의 경우 흡습성이 합성 섬유보다 뛰어나기 때문에 기본적으로 미생물이 성장하기 좋은 환경을 제공해준다. 이에 대한 해결책으로 *N*-halamine을 활용한 항균성 및 소수성 코팅 방안이 제시되었다.

N-halamine의 또다른 장점은 암모니아 분해 능력이다. 암모니아는 매우 적은 농도라도 인체에 해를 끼칠 수 있기 때문에 관련 산업에서 보호용 마스크, 옷 등의 암모니아 트래핑 섬유 개선 방안이 주목을 받고 있다. 이와 관련 다공성 실리카 입자와 결합시킨 *N*-halamine의 물리적 코팅 방법을 통해 항균성, 소수성과 더불어 암모니아 제거 능력까지 물리적 개선 방안이 보고됐다[15].

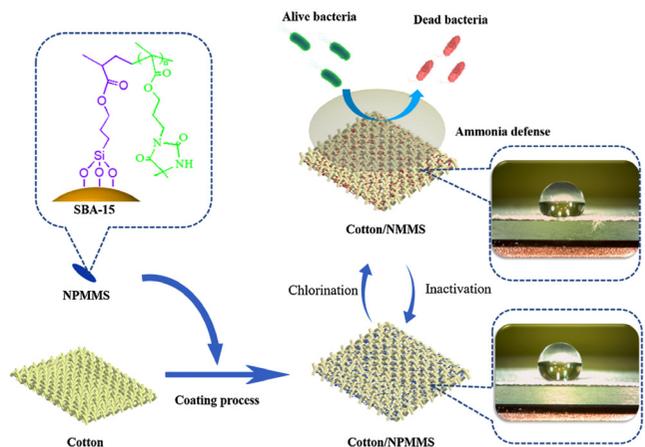


Figure 9. 다공성 실리카 입자와 결합시킨 *N*-halamine의 코팅 과정[15].

실리카 나노 입자의 다공성, 넓은 비표면적 장점을 갖고 있어 기체 확산을 용이하게 해주어 암모니아 제거 효율에 매우 유용하다. 특히 많은 실란올 작용기를 갖고 있어 손쉽게 *N*-halamine의 결합이 가능하다. 간단한 코팅 프로세스를 거쳐 개발된 *N*-halamine 전구체가 면직물에 디포지션 되고 클로린화를 통해 *N*-halamine 구조를 형성시켜 주변 항균성, 소수성, 암모니아 제거 능력 등 다양한 기능을 갖는 면직물을 얻을 수 있다(Figure 9).

3. 결 론

공중 위생 및 보건의 관심이 커지면서 사람들의 항균 기능에 대한 관심과 요구가 증가하면서 항균성 제품 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 섬유 제품은 다양한 분야에서 쓰이고 있고 항상 접하는 만큼 항균성이 요구된다. 항균성을 부여하는데 있어서 문제는 섬유 제품을 형성하는 과정에서 항균제의 능력이 많이 감소되어 항균성을 어떻게 부여할 것인지가 중요하다. 물리적 혼합에서는 항균제의 분산성이 특히 중요하다. 이에 대한 방안으로 효과적으로 분산시키기 위해 고효율의 나노 입자 합성 방안을 기반으로 담체를 활용하는 연구가 진행 중이다. 후처리 방법에서는 *N*-halamine을 기반으로 다기능 항균성 섬유 제작 방안이 보고되고 있다. 섬유에 항균성을 부여하는 방안은 매우 오래전부터 연구되어 왔고 높은 효율의 항균제 또한 많이 개발되었다. 이를 기반으로 어떻게 섬유 제품을 가공하여 활용할 것인지가 국내 항균 섬유 시장 확장에 중요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2016R1A6A1A03013422).

참고문헌

1. Arya G., Sharma N., Mankamna R., Nimesh S. (2019) Antimicrobial Silver Nanoparticles: Future of Nanomaterials. In: Prasad R. (eds) Microbial Nanobionics, Nanotechnology in the Life Sciences. Springer, Cham.
2. Abduraimova, A.; Molkenova, A.; Duisembekova, A.; Mulikova, T.; Kanayeva, D.; Atabaev, T.S. Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB)-Loaded SiO₂-Ag Mesoporous Nanocomposite

as an Efficient Antibacterial Agent. *Nanomaterials* 2021, 11, 477.

3. Qian Wang, Hualin Wang, Tingting Zhang, Zheng Hu, Li Xia, Linlin Li, Junfeng Chen, and Shaotong Jiang, Antibacterial Activity of Polyvinyl Alcohol/WO₃ Films Assisted by Near-Infrared Light and Its Application in Freshness Monitoring. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(3), 1068–1078.
4. Wen Yu, Xiang Li, Jianxin He, Yuankun Chen, Linya Qi, Pingping Yuan, Kangkang Ou, Fan Liu, Yuman Zhou, Xiaohong Qin, Graphene oxide-silver nanocomposites embedded nanofiber core-spun yarns for durable antibacterial textiles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, Volume 584, 164–173.
5. Sourav Das, Leader Langbang, Mahabul Haque, Vinay Kumar Belwal, Kripamoy Aguan, Atanu Singha Roy, Biocompatible silver nanoparticles: An investigation into their protein binding efficacies, anti-bacterial effects and cell cytotoxicity studies. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2020.
6. Zhengxin Ma, Jie Liu, Yanchun Liu, Xuejing Zheng, Keyong Tang, Green synthesis of silver nanoparticles using soluble soybean polysaccharide and their application in antibacterial coatings. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, Volume 166, 567–577.
7. Xu Dongdong, Lv Hao, Liu Ben, Encapsulation of Metal Nanoparticle Catalysts Within Mesoporous Zeolites and Their Enhanced Catalytic Performances: A Review. *Frontiers in Chemistry*, 2018, 6, 550
8. 한국화섬협회, 항균 섬유 제품(기술자료), 2016.
9. Alideertu Dong, Yan-Jie Wang, Yangyang Gao, Tianyi Gao, and Ge Gao, Chemical Insights into Antibacterial *N*-Halamines. *Chemical Reviews*, 2017, 117(6), 4806–4862.
10. Fei Wang, Liqian Huang, Peng Zhang, Yang Si, Jianyong Yu, Bin Ding, Antibacterial *N*-halamine fibrous materials. *Composites Communications*, 2020, 22, 100487.
11. Ma Y, Wisuthiphaet N, Bolt H, Nitin N, Zhao Q, Wang D, Pourdeyhimi B, Grondin P, Sun G, *N*-Halamine Polypropylene Nonwoven Fabrics with Rechargeable Antibacterial and Antiviral Functions for Medical Applications. *ACS Biomater*

Sci Eng. 2021.

12. Rouhollah Ahmadi, Hossein Fashandi & Vajihe Akbari Development of *N*-halamine Low-Melting Point Poly(ethylene terephthalate) Fibers via Melt Spinning: Structural Characterization and Demonstration of Rechargeable Antibacterial Properties. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2021.
13. Mei Liu, Fei Wang, Mingguang Liang, Yang Si, Jianyong Yu, Bin Ding, In situ green synthesis of rechargeable anti-bacterial *N*-halamine grafted poly(vinyl alcohol) nanofibrous membranes for food packaging applications. *Composites Communications*, 2020, 17, 147.
14. Xu, D., Wang, S., Hu, J. et al. Enhancing antibacterial and flame-retardant performance of cotton fabric with an iminodiacetic acid-containing *N*-halamine. *Cellulose*, 2021, 28, 3265-3277.
15. Wang, Y., Yin, M., Ma, W. et al. *N*-halamine modified mesoporous silica coated cotton as multipurpose protective fibrous materials. *Cellulose*, 2020, 27, 10461-10471.