Appl. Chem. Eng., Vol. 29, No. 2, April 2018, 229-236
https://doi.org/10.14478/ace.2017.1126

Article

섬유산업 배기가스 정화용 Electric Fume Collector 설비의 유지보수를 위한 맞춤형 세정제

김호태* · 유황율* · 전경민* · 송두리 · 김진배†

호서대학교 화학공학과, *씨엔피하이텍(주)
(2017년 12월 16일 접수, 2018년 1월 18일 심사, 2018년 2월 1일 채택)

A Customized Cleaning Agent for the Maintenance of Electric Fume Collector Used for the Purification of Effluent Gas from the Textile Industry

Hotae Kim*, Hwang-Yooll Yoo*, Koung Min Jeon*, Doori Song, and Jin-Bae Kim†

Department of Chemical Engineering, Hoseo University, Asan, Chungnam 31499, Korea
**C&P Hightech Co., Ltd, Asan, Chungnam 31499, Korea*
(Received December 16, 2017; Revised January 18, 2018; Accepted February 1, 2018)

초 록

섬유산업에서 배출되는 오일미스트를 함유한 배기가스를 처리하기 위해 개발되어 실제 현장에 적용되고 있는 electric fume collector (EFC) 설비의 집진판 오염에 의한 성능저하를 개선하기 위한 맞춤형 세정제를 검토하였다. 집진판 표면의 오염물질은 오일미스트가 장기간 축적되면서 심하게 탄화되어 일반 세정제로는 쉽게 제거하기 어려운 상태였다. 오염물질의 특성과 집진판 모재의 손상 등을 고려하여, 알칼리, 알코올, 글리콜 및 비이온계 계면활성제로 구성된 최적의 세정제 성분 조성을 결정하였다. 현장실증실험에는 개발된 세정제 원액을 9.1%로 희석한 용액을 이용하였으며, 단순한 분무방식으로 심하게 점착된 집진판 표면의 오염물질을 성공적으로 제거할 수 있었다. 집진판의 세척에 의하여 EFC 설비의 배기가스 정화성능 개선효과도 크게 향상되었다.

Abstract

A customized cleaning agent was investigated for improving the performance decreased by the pollution of collecting plates in an electric fume collector (EFC) which was developed and applied for the purification of effluent gas including oil mist from the textile industry. The pollutants on the surface of collecting plates were blackened by the condensation of oil mist for a long time and difficult to remove by general cleaning agents. The composition of an optimized cleaning agent consisted of alkali, alcohol, glycol and non-ionic surfactant sources was determined by considering the pollutant properties and effect on the damage of the basic metal of collecting plate and so on. The developed cleaning agent solution diluted by 9.1% was applied to the field test, and also the pollutants strongly adhered on collecting plate surfaces were successfully removed by a simple spraying method. The effluent gas purification efficiency of EFC increased significantly by cleaning of collecting plates.

***Keywords**: textile industry, exhaust purification, electric fume collector, cleaning*

1. 서 론

섬유산업은 물과 에너지의 소비가 방대할 뿐만 아니라 다양한 화학물질을 다량으로 사용하기 때문에 수질 및 대기 환경에 미치는 영향이 매우 크다. 섬유산업의 폐기물 저감 및 처리 기술은 꾸준히 발전하여, 공정을 최적화하여 물질 및 에너지의 소비를 절감하고 기존에 사용되던 유해화학물질 대신 친환경 대체물질을 개발하는 등 다양한 연구결과가 상용화되어 왔다[1-5]. 염색, 날염, 정련, 텐터공정 등에서 다량의 화학약품을 사용하고 폐수로 배출하는 섬유산업의 특성상 수질환경문제에 대해서는 폐수 발생을 최소화하거나 오염물질을 제거 또는 회수하는 공정이 적극적으로 개발되고 산업현장에 적용되고 있다[2-7]. 상대적으로 악취를 유발하는 대기오염물질의 정화처리기술에 대한 연구는 많지 않았지만 최근에는 보다 높은 수준의 악취저감기술에 대한 요구가 증가하고 있다[1]. 국내에서는 2005년부터 악취방지법을 시행하고 있으며, 생활수준의 향상과 함께 점차로 산업단지에서 배출되는 악취 발생의 문제에 대해서도 관심이 증폭되어 이를 방지하기 위한 다양한 논의를 진행하고 있다[8-15].

섬유산업에 사용되는 염료, 유연제 등의 화학물질은 다양하여, 염색공정에서 사용되는 nitroso compounds, phthalocyanine, cyanuric chloride, azo compounds 등의 유기질소화합물, anthraquinone, stilbene 등의 방향족화합물, 유기황화합물 등의 냄새성분이 있으며[1,5-7], 텐터

† Corresponding Author: Hoseo University,
Department of Chemical Engineering, Asan, Chungnam 31499, Korea
Tel: +82-41-540-5757 e-mail: jbkim@hoseo.edu

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2018 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

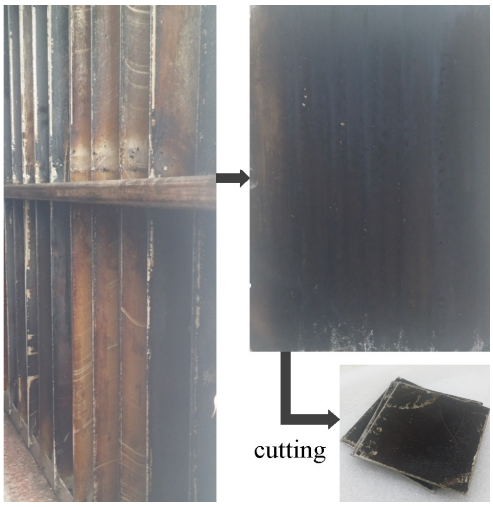


Figure 1. Soiled collecting plates of the EFC and the cleaning test specimens.

공정에서 사용되는 ester, amine, acetate계의 계면활성제를 함유하는 유연제 또한 악취를 유발하는 주요 성분이다[11-13]. 기존의 악취 방지시설은 단순한 scrubber로 배기가스 중의 악취성분을 흡수 · 제거하는 공정이 대부분이었다[1,12-14]. 일부 먼지류를 저감하기 위한 여과집진기도 사용되지만 악취 저감효과는 거의 없는 것으로 나타났다[12]. 냄새성분은 수용성인 경우가 많아 세정수를 사용하는 단순한 scrubber에 의해 상당부분 제거가 가능하지만 사업장에 따라 차이가 큰 것으로 보고되었다[11-13]. 2005년 악취방지법 시행 이후 섬유산업에서의 악취발생 및 방지시설에 대한 조사도 활발히 진행되어 기존의 scrubber 방식의 방지설비가 가지는 한계와 문제점을 개선하기 위한 연구결과도 보고되었다[11-14]. 섬유산업 중에 특히 원단을 다림질하는 텐터공정에서는 고온의 배기가스와 함께 발생하는 오일미스트를 함유한 백연이 대기오염과 악취발생의 주범으로 지목되어, scrubber에 의한 악취 저감효과는 미미한 것으로 나타났다[12-14]. Hwang 등[14]은 기존 방지시설의 문제점을 보완하여 대체할 수 있는 새로운 방지시설로써 습식전기집진 원리를 이용한 EFC (electric fume collector) 설비를 제안하였다. 실제로 텐터공정의 배기가스정화설비로 700 CMM 규모의 EFC 장치를 설치, 운전하여 다량의 오일미스트를 함유한 백연 및 악취 발생을 저감하고 많은 양의 오일을 회수할 수 있었다[14].

EFC는 효과적인 악취방지 설비로서 적용범위가 확대되고 있지만, 장치의 성능을 유지 · 관리하는 데에 문제점도 발견되었다. 특히 텐터공정에서는 다량의 유기화합물을 사용하고 높은 온도에서 증발된 오일미스트를 배출하므로 EFC 설비의 집진판에 부착된 오염물질이 지속해서 쌓이고 점착되면서 축합반응을 일으켜 심하게 탄화된 복합오염물질을 형성하고 결국 대기방지설비의 기능을 저하시킨다. 따라서 집진판의 오염물질을 효과적으로 세정하는 방법을 검토할 필요가 있다.

세정은 건식세정과 액상용액을 사용하는 습식세정으로 구분할 수 있다. 건식세정은 화학약품을 사용하지 않으므로 세정제에 의한 2차 폐기물을 발생하지 않아 친환경 공정으로 기대되지만 범용으로 사용하기에는 경제성이 낮아 일부 특수 영역에만 적용되며 대부분의 산업공정에서는 보편적으로 습식세정을 적용하고 있다[16-19]. 습식세정제는 그 구성성분에 따라 수계, 준수계 및 용제계(지방산계, 알코올계, 탄화수소계, 할로겐계)로 분류된다. 용제계 세정제 중에서도 trichloroethylene, methylene chlororide, dichloropropane 등의 탄화수소계 화합물은 특히 분자량이 큰 유기오염물의 세정에 뛰어나고 세정부품의 부식이 없고 재활용도 비교적 용이하여 오염물 종류에 따른 다양한 세정제가 개발되어 다양한 산업분야에 광범위하게 적용된다. 그러나 대부분의 탄화수소계 세정제는 인화점이 낮아 화재의 위험성이 크기 때문에 세정시스템에 방폭시설 등의 부대설비가 요구되고 오존파괴, VOC 문제, 유독성 문제 등으로 인해 사용이 제한되어, 일반적으로 물과 계면활성제를 주성분으로 하는 수계/준수계 세정제가 선호된다[17-19]. 이들 수계/준수계 세정제는 친환경 세정제로 평가되지만 물을 함유하고 있어 부식성이 우려되는 부품에 적용하기 어렵고 탄화수소계에 비하여 일반적으로 세정력이 약하기 때문에 세정시간이 길며 세정 후 건조하는 데에도 시간이 소요되는 등의 단점이 있다.

본 연구에서는 염색단지의 대기방지시설 중에서 특히 EFC 설비의 심하게 오염된 집진판을 단순한 분무 등의 방법만으로 간편하게 세정하기 위한 맞춤형 세정제를 개발하고 기존 설비를 활용하여 주기적으로 유지 · 관리하는 방법을 검토하였으며, 집진판의 세정이 악취성분 제거 효율의 향상에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 집진판의 재질 및 운전조건 등을 고려하면 수계/준수계 세정제의 단점은 크게 문제되지 않을 것으로 추측된다. 장기간 축적되어 심하게 탄화된 유기계 오염물질이 주성분인 집진판의 특성을 고려하여 이에 적합한 수계/준수계 세정제 조성물을 개발하고자 하였다. 유기계 복합오염물질의 비누화 반응, 펩윤작용 등에 의한 세정효과를 나타내는 알칼리계(KOH, NaOH, Na_2CO_3, K_2CO_3)를 주성분으로 검토하였으며, 오염물의 해리 · 분산을 촉진시키기 위한 계면활성제 및 글리콜계 또는 알코올계 보조제를 첨가하여 수계/준수계 세정제를 배합하고, 오염된 집진판 시편을 사용하여 이들의 세정성능을 평가하였다.

2. 실 험

2.1. 오염 시편 제작 및 오염물질 성분 분석

현재 텐터공정에 연결된 대기방지시설로 EFC를 적용하여 장기간 가동하고 있는 S사의 현장에서 심하게 오염된 집진판(1.6 m × 1.2 m) 2매를 샘플로 취득하였으며, 오염된 집진판을 가로세로 10 cm 크기로 절단하여 세정제 성능평가 실험용 시편을 제작하였다(Figure 1). 장기간에 걸쳐 집진판에 축적된 오염물질의 특성을 파악하기 위하여 실험용으로 취득한 시편의 오염물질을 유기용제에 녹여서 GC-MS (gas chromatography mass spectrometry, Shimadzu GC/MSD QP-2010 Ultra) 분석을 실시하였다.

2.2. 세정제 제조 및 성능 분석

알칼리류, 글리콜류, 알코올류, 계면활성제 등 세정제를 구성하는 각 성분의 개별적인 세정 효과를 확인하여, 세정제 구성성분을 선정하고 이들 성분의 배합비율을 조절하여 EFC의 오염된 집진판 세정에 적합한 조성을 검토하였다. 각 개별 성분을 1~5 wt%의 비율로 물에 녹인 수용액을 사용하여 수동 분무기로 시편 정면 약 10 cm 거리에서 5회(약 5 g) 분무하고 5 min 후에 같은 방법으로 물을 10회 분무하여 표면을 씻어내고 건조하여 세정 전과 후의 표면상태를 관찰하였다. 남아있는 오염물질을 완전히 제거한 시편의 무게를 기준으로 세정 전 · 후의 오염물질의 무게를 산정하여 중량법에 의해 다음의 식으로 세정효율을 계산하였다.

Table 1. Fabric Softeners Used Mainly in Tenter Process of S Textile Company

Product Name	Components
SD-160B	Dimethyl siloxane, (aminoalkyl)methoxymethylsiloxy-and dimethylalkoxy-terminated, polyoxyethylene alkyl ether, water
SILI A-908S	Octadecanamide, polyoxyethylene alkyl ether dimethyl siloxane, (aminoalkyl)methoxymethylsiloxy-and dimethylalkoxy-terminated, water

$$E = \frac{W_{before} - W_{after}}{W_{before}} \times 100\%$$

E : Cleaning efficiency (%)
W_{before} : Weight of contaminant before cleaning
W_{after} : Weight of contaminant after cleaning

알칼리성분에 알코올 또는 글리콜계의 보조제 및 소량의 계면활성제를 혼합한 수용액을 제조하여, 개별 성분의 세정실험과 같은 방법으로 오염시편에 대한 세정효율을 확인하여 최적의 혼합조성을 검토하였다.

2.3. 집진판 세정 실증실험 및 효과 분석

현장에 가동 중인 집진판을 세정한 효과를 검증하기 위한 세정 전・후 EFC 배출구의 복합악취는 국립환경연구원 고시(제2007-17호) 악취공정시험방법의 공기희석관능법에 준하여 측정하고, 취기한계를 희석배수로 나타내는 dilution-to-threshold (D/T) ratio를 산정하였다[8-12,15]. 텐터공정에서 배출될 가능성이 높은 12종의 aldehyde계 악취성분에 대해서는 상기 악취공정시험방법의 기기분석법에 준하여 성분별 농도분석을 실시하였다. 한편, 현장에서 측정되는 복합악취의 경우 악취유발 공정의 작업조건 등에 의하여 큰 편차가 발생할 수 있기 때문에, 집진판 세정효과를 검증하기 위한 복합악취 배출 경향은 지속적인 모니터링을 통해 검토할 필요가 있다[14]. 현장의 EFC의 집진판 세정 후에는 18주에 걸쳐 복합악취 분석을 3회 실시하였으며, 세정하기 전 1년 이내에 측정된 3회의 복합악취 분석 결과를 표본으로 선택하여 세정 전・후의 악취저감 성능의 변화를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 집진판 오염 성분 분석

텐터공정은 염색한 원단을 약 200 ℃ 가까운 온도에서 건조・다림질하는 공정이며, 염색된 섬유를 세탁할 때 발생하는 수축과 이완을 고려하여 섬유유연제, 대전방지제, 발수제, 광택제 등의 약품을 사용한다. 특히 많이 사용되는 유연제는 섬유의 부드러운 특성을 향상시키며, 대전방지, 봉제성 향상 등에도 효과가 있다[3-5,14]. EFC를 적용하여 장기간 가동하고 있는 S사의 텐터공정에서 최근에 주로 사용하고 있는 두 종류의 유연제 구성성분을 Table 1에 정리하였다. 두 개의 유연제는 모두 실리콘계 유연제로 휘발성 siloxane oligomer를 함유하고 있으며, 휘발성 유화제와 함께 배출되어 공기오염문제를 일으킨다[14]. S사에 설치된 EFC의 초기 성능은 우수하여 오일 미스트를 다량 함유한 백연 발생을 억제하고 악취분석 결과도 평균 80% 이상의 저감효과를 나타내는 것으로 보고되었다[14]. S사의 텐터공정 배출가스 정화에 적용된 EFC의 집진판은 일상적으로 스프레이 노즐을 사용하여 집진판 상부에서 공업용수를 뿌려 세척하고, 주기적으로 인위적인 물리세척하는 등의 관리를 하고 있었지만 장기간 사용하는 동안 심하게 오염되어 있는 상태였다(Figure 1). Figure 2에 집진판에 부착된 오염물질을 유기용제에 녹여 GC-MS로 분석한 결과를 나타냈다. GC-MS 분석에서 확인된 물질은 비교적 최근에 부착된 화합물이 변형되어 생성된 것으로, 유연제 성분에 직접적으로 기인하는 ether류 외에 ketone류, aldehyde류 등이 있었으며 dibenzyl ether와 같이 탄소사슬이 방향족화된 물질도 확인되었다. 그러나 Figure 2에 보이는 것처럼 집진판 표면에 부착된 대부분의 검은색 오염물 층은 장기간 사용하면서 그 구조를 특정할 수 없을 정도로 심하게 탄화가 진행된 상태로 보인다.

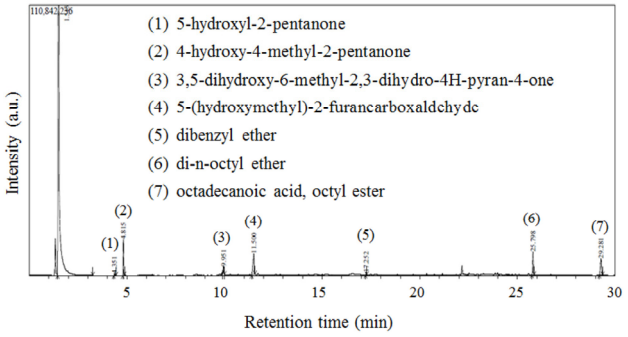


Figure 2. GC-MS analysis of pollutants accumulated on the collecting plate of the EFC.

3.2. 세정제 성분별 특성 분석 및 맞춤형 세정제 제조

탄화가 심하게 진행되고 두꺼운 층을 형성하고 있는 유기계 오염물에 대해서는 trichloroethylene, methylene chlororide, dichloropropane 등의 탄화수소계 세정제가 효과적이라고 알려져 있지만 최근에는 환경문제 등으로 인하여 그 사용이 제한되고 있으며, 인화성이 높기 때문에 스프레이 노즐 등을 사용하는 분무세정에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다[17-19]. 특히 S사와 같은 섬유업종에서는 안전성의 문제도 있어 수계/준수계 세정제를 적용할 필요가 있다. 수계세정제의 기본적인 구성은 산 또는 알칼리 성분과 계면활성제로 이루어지며 알코올류, 글리콜류(준수계), 산화제, 효소 등의 보조제가 첨가되기도 한다[17-19]. 산 성분은 무기염, 금속산화물 또는 수산화물 등의 오염물질을 녹이는 데에 주로 사용되며, NaOH, KOH 등의 강알칼리는 기름 등의 오염물에 대해 비누화반응을 일으켜 제거하고 유기산을 중화하고, 단백질 등의 고분자를 팽창시키거나 가수분해하여 세정효과를 증진시킨다[17-20]. 따라서 본 연구에서는 수계세정제 중에서 유기계 복합오염물질의 세정에 적합한 알칼리계 세정제를 선택하였으며, 그 구성성분과 조성을 결정하기 위하여 각 성분별 세정 효과를 확인하였다. 검토한 알칼리 성분은 강알칼리(KOH, NaOH)와 약알칼리(Na_2CO_3, K_2CO_3)로 구분된다. 약알칼리 성분을 사용한 경우에는 세정효과가 거의 확인되지 않았으며, 강알칼리 성분으로 KOH와 NaOH를 사용한 결과를 Table 2에 나타냈다. KOH와 NaOH는 단독으로 사용한 경우에도 심하게 탄화된 오염층을 제거해주는 효과가 있었고, NaOH에 비하

Table 2. Cleaning Efficiency of Alkali Compounds and Influence of Concentrations

Alkali Source		Concentration (wt%)		
		1	3	5
KOH	Before Cleaning			
	After Cleaning			
	Efficiency (%)	24.8	48.3	67.6
NaOH	Before Cleaning			
	After Cleaning			
	Efficiency (%)	13.7	50.0	50.8

여 KOH의 세정력이 다소 높은 결과를 보였다. NaOH 및 KOH의 농도가 높을수록 세정효과도 높아졌지만, 고농도로 사용할 경우 금속 부식성이 증가할 뿐만 아니라 이들을 5% 이상을 함유한 혼합물질의 경우 유해화학물질로 분류되어 화학물질관리법의 규제 적용대상이 되므로 최대 5% 이내의 농도 범위에서 검토하였다.

한편, 수계세정제의 경우 세정대상 부품의 재질에 따라 금속의 부식 등으로 인한 모재의 손상의 우려가 있다[17]. 본 연구에서 대상으로 한 EFC 집진판에는 비교적 내부식성이 높은 SUS 소재를 적용하고 있지만, 세정제의 알칼리 농도(pH)에 따른 금속 모재의 안정성을 실험적으로 검토했다. 모재 부식의 영향을 가속화하여 확인하기 위하여 오염되지 않은 집진판 시편을 알칼리 용액에 24 h 침적한 후, 세척 · 건조하여 표면 상태를 육안으로 관찰하였다. pH 12 미만의 용액에서는 금속 표면 상태에 변화가 없었지만 그 이상이 되면 부분적으로 약간의 변색이 관찰되었다. 따라서 세정효과를 높이기 위해 강알칼리를 그대로 사용할 경우에는 부식방지제를 첨가하거나 오염물질을 제거한 후에 바로 충분한 세척을 실시하는 등의 주의가 필요할 것으로 사료된다.

물과 기름에 가용성인 글리콜류 첨가제로 평균분자량 200 정도의 polyethylene glycol (PEG 200), di(propylene glycol) methyl ether (DPGME)를 1, 3, 5 wt%의 농도로 제조한 수용액을 사용하여 개별 성분의 세정효과를 검토한 결과를 Table 3에 나타냈다. 두 성분 모두 유사한 결과를 나타내고 있으며, 5 wt% 이상으로 농도를 높여도 세정효율은 5% 미만이었다. 그러나 글리콜류는 단독으로 높은 세정효과를 보이지는 않지만 오염물의 용해성을 높이는 증진제로 첨가된다[18]. 알칼리 용액에 글리콜을 첨가한 경우 세정효율이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 특히 PEG 200을 5 wt% 이상 첨가한 경우 가장 높은 증진효과를 나타냈으며, 세정제 분무 5 min 후에 물을 분무하였을 때 헹굼성도 크게 향상되는 것을 확인하였다.

글리콜류와 유사한 용해성 증진효과와 함께 세정효과도 있는 알코올류로는 에탄올과 isopropyl alcohol (IPA)를 선택하여 집진판 세정을 검토한 결과를 Table 4에 나타냈다. 다소 편차는 있지만 에탄올에 비해 IPA의 세정효과가 높은 결과를 보였다. 농도를 더 높이면 세정효과도 약간 증가하는 경향은 있었지만, 알칼리계에 비하면 매우 부족하였다. 또한 글리콜계와는 달리 알칼리 용액에 알코올계를 첨가한 경우에는 세정효율의 증진효과가 미미하였다.

집진판 오염물질의 상태와 세정제 성분별 특성에 대한 기초조사 및 실험결과를 고려하여 알칼리계(NaOH 또는 KOH) 1~5 wt%와 글리콜

Table 3. Cleaning Efficiency of Glycols and Influence of Concentrations

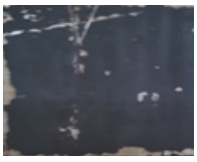
Glycol Source		Concentration (wt%)		
		1	3	5
PEG 200	Before Cleaning			
	After Cleaning			
	Efficiency (%)	2.7	3.6	4.0
DPGME	Before Cleaning			
	After Cleaning			
	Efficiency (%)	2.7	3.0	3.3

Table 4. Cleaning Efficiency of Alcohols and Influence of Concentrations

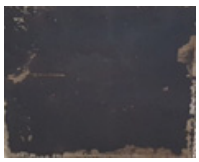
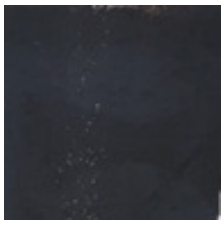
Alcohol Source		Concentration (wt%)		
		1	3	5
Ethanol	Before Cleaning			
	After Cleaning			
	Efficiency (%)	7.7	11.5	11.7
IPA	Before Cleaning			
	After Cleaning			
	Efficiency (%)	10.6	8.5	12.4

Table 5. Cleaning Efficiency of Developed Cleaning Agent Diluted with Water by 30 wt%

	Amount of Diluted Cleaning Agent (g)			
	5	10	20	30
Before Cleaning				
After Cleaning				
Efficiency (%)	27.0	58.3	88.9	100

(a) before (b) after

Figure 3. Cleaning efficiency of the developed cleaning agent.

류(PEG 또는 DPGME) 1~10 wt%, 알코올류(에탄올 또는 IPA) 0~5 wt%의 범위에서 최적의 조성을 검토하였으며, 유기계 오염물질의 용해도 및 헹굼성을 높이기 위하여 계면활성제를 첨가하여 현장 실증실험을 위한 맞춤형 세정제 혼합물을 제조하였다. 음이온계 및 비이온계 계면활성제를 검토하여 거품이 적게 일고 헹굼성 향상에 효과적인 비이온계 계면활성제를 선정하여 소량(3 wt% 미만) 첨가하여 최종적으로 세정액 혼합물의 조성을 확정하였다. 알칼리계 용액에 대한 용해도가 낮고 주로 산계 세정제에 첨가되며, 음전하를 띄는 표면에 강하게 흡착되는 특성을 가지는 양이온계 계면활성제[20]는 검토에서 제외하였다. 맞춤형으로 제조된 세정제를 사용하여 오염된 집진판 시편을 세정한 결과를 Figure 3에 나타냈다. 중량법으로 측정된 세정효율은 96%로 각 성분별 세정효율에 비해 매우 높은 결과를 보였으며, 충분히 현장에 적용이 가능한 수준으로 판단하였다. 동일한 조성의 혼합용액에 계면활성제를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우를 비교한 기초실험에서는 세정효율에 거의 차이가 나타나지 않았다. 그러나 계면활성제가 부식에 의한 모재 표면의 변색을 방지하는 효과가 높은 것을 확인하였으며, 헹굼성을 크게 향상시키기 때문에 현장에서 큰 면적의 집진판을 세정할 경우에 우려되는 오염물질의 재부착을 방지하는 등의 부수적인 효과를 기대할 수 있다.

세정제의 성분별 효율을 비교하기 위한 기초실험에서는 약 1 g의 용액을 5회 분무하여 세정하였지만, 실제 현장에 적용할 경우에는 광범위한 면적에 세정액이 골고루 분사되어야 하기 때문에 보다 많은 양의 세정액을 필요로 한다. 상기 세정제 원액을 사용할 경우 고농도의 2차 폐수발생 등의 문제도 있다. 따라서 혼합 세정제 원액을 물에 희석하여 사용하는 방법을 검토하였으며, 세정제 원액을 30 wt% 함유하는 용액을 사용하여 오염된 집진판 시편을 세정한 결과를 Table 5에 나타냈다. 희석용액을 사용하였으므로 세정액 분무횟수를 늘려서 5, 10, 20, 30회(약 1 g/회) 분무하였으며 이후 과정은 동일하게 처리하였다. 원액과 동일하게 5회 분무하여 세정한 결과 약 27%의 세정효율을 보였으며, 분무횟수를 늘려 30회(약 30 g) 분무한 결과 완벽하게 오염물질을 제거하여 거의 100%의 세정효율을 보였다. 집진판 시편의 면적을 고려하여 단위면적당 필요한 세정액의 양은 30% 희석 기준으로 약 3 kg/m^2 (원액 기준 0.9 kg/m^2) 정도로 계산되었다.

한편, 세정제 원액 중의 알칼리성분의 농도(1~5 wt%)는 모두 pH 12 이상의 강알칼리로서 모재손상 실험에서 SUS 표면에 부분적인 변색이 확인된 pH 범위에 속한다. 따라서 알칼리 성분에 다른 첨가제를 모두 배합하여 제조된 세정제를 사용하여 24 h 침적에 의한 모재부식에 대한 영향을 확인하였다. 혼합세정제 원액에서는 약간의 변색이 확인되었지만 순수한 알칼리용액과 비교하면 그 정도가 크게 줄었으며, 30% 희석 용액의 경우에는 육안으로 확인 가능한 변화는 발견할 수 없었다. 따라서 실제 현장에 적용할 경우 원액을 희석하여 사용하고, 세정 후에 충분한 헹굼 처리를 하면 모재 손상에 대한 우려는 거의 없을 것으로 판단된다.

3.3. 집진판 오염물 제거 실증실험 및 효과 분석

현장 실증실험 대상으로 선정한 S사에서 가동 중인 EFC에는 1.6 × 1.2 m 사이즈의 집진판이 총 144장 설치되어 있다. 집진판은 양면으로 사용되므로 세척해야 할 총면적은 약 553 m^2 정도이다. 기초실험 결과로부터 세정제 원액 기준으로 계산하면 약 498 kg의 세정제를 사용하면 거의 모든 오염물질을 제거할 수 있을 것으로 예측되었다. 현장실험에서는 원액의 사용량을 최소화하기 위하여 약 1/3 정도인 180 kg의 혼합세정제 원액을 약 1,800 kg의 공업용수에 혼합하여 총 1,980 kg (원액 함유량 약 9.1%)으로 희석된 세정액을 EFC 집진판 위에 설치되어 있는 스프레이 노즐을 통하여 약 30 min에 걸쳐 분사하고, 30

Table 6. Threshold Olfactometry Results of Effluent Gas from EFC Before and After Cleaning

Air Dilution Sensory (ADS) Test		Dilution-to-Threshold (D/T) Ratio		
		Inlet	Outlet	Efficiency (%)
Before Cleaning	1	173	100	42.2
	2	284	173	39.1
	3	300	249	17.0
	Average	252	174	31.0
After Cleaning	3 Weeks	300	144	52.0
	10 Weeks	448	208	53.6
	18 Weeks	208	100	51.9
	Average	319	151	52.7

Table 7. Concentrations of 12 Aldehydes in Effluent Gas from EFC

Odor Substances	Concentrations (ppb)			
	Before EFC Cleaning			After EFC Cleaning
	1	2	Average	
Formaldehyde*	54.4	216	135	29.0
Acetaldehyde	167	210	189	190
Acrolein*	ND	4.2	2.1	5.3
Acetone*	29.2	53.7	41.5	41.9
Propionaldehyde	116	24.5	70.3	15.5
Crotonaldehyde*	ND	10.6	5.3	8.3
Butyraldehyde	6.7	23.8	15.3	9.6
Benzaldehyde*	ND	9.31	4.7	17.6
i-Valeraldehyde	ND	32.1	16.1	ND
n-Valeraldehyde	ND	ND	ND	42.7
Octanal*	10.8	13.4	12.1	17.8
Nonanal*	52.4	37.8	45.1	34.6
Total	437	635	536	412

* Specified offensive odor substances by Korean Ministry of Environment (KMOE)

min 후에 약 1,800 kg의 공업용수를 30 min간 분사하여 헹굼 처리를 하였다. 집진판 표면 상태를 확인하여 동일한 작업을 2~3회 반복할 예정이었으나, 1회 작업 후 세정효과를 확인한 결과 대부분의 오염물이 깨끗하게 제거된 것을 확인하고 세정작업을 종료하였다. 집진판 단위면적 당 사용된 세정제 원액의 양은 0.33 kg/m^{2}이었으며, 희석용액(9.1%) 기준으로는 3.6 kg/m^2 정도였다. 기초실험에 비하여 적은 양의 세정제 원액을 사용하고도 효과적으로 세정이 가능했던 것은 현장실험에서의 스프레이 노즐에 의한 희석세정액 분사력이 강하고 상부에서부터 흘러내리는 흐름에 의한 물리적인 세정효과 등이 부가되었기 때문으로 사료된다.

세정 후 주기적으로 EFC 성능 및 집진판의 오염상태를 관찰하고 있으며, 20주가 지난 시점까지 집진판 표면은 비교적 깨끗한 상태를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었다(Figure 4). 집진판의 세정에 의한 EFC 성능의 변화를 확인하기 위하여 세정 후에 주기적으로 복합악취를 분석하였다. 세정 전 1년 이내에 측정된 복합악취 분석결과(3회)를 기준으로 세정 후에 측정한 결과와 비교하여 Table 6에 정리하였다. EFC 입구와 출구의 복합악취 한계희석배율(D/T ratio)의 차이에서 산정된 효율을 비교하면 세정 전 평균 31%에서 세정 후에는 약 53%로 복합악취 저감효율이 크게 개선되었음을 알 수 있다. 이 결과는 평균 80% 이상의 복합악취 저감효율을 보이는 것으로 보고된

(a) before (b) 10 weeks after (c) 20 weeks after

Figure 4. Comparison of surface conditions of collecting plates in EFC before and after cleaning.

Hwang 등의 문헌[14]과는 상당한 차이가 있다. 문헌[14]에 보고된 결과에 따르면 EFC 입구의 복합악취 D/T ratio가 1,000~3,000 정도의 큰 값을 보이는 데 비하여 본 연구를 통하여 최근 분석된 결과에서는 173~448 정도로 10배 가까이 큰 차이가 있었다. 이는 세부공정의 부

분적인 변경 외에도 텐터공정에서 처리하는 섬유 제품의 종류에 따라 달라지는 유연제의 차이 등 다양한 요인이 작용하여 측정 시기에 따라 변화가 크기 때문으로 사료된다. 그러나 국립환경연구원고시 공기희석관능법의 복합악취 배출허용기준이 배출구 기준으로 희석배수 500 이하인 점을 고려하면 Table 6의 결과는 높은 수준으로 악취를 저감하고 있는 것으로 판단된다. Table 7에는 텐터공정에서 배출 가능성이 높은 12종의 aldehyde계 개별 악취성분에 대한 집진판 세정 전・후의 농도분석 결과를 나타냈다. 성분별 분석 결과는 집진판 세정 전・후에 다소 편차가 있었지만, 12종의 화합물 농도를 더한 총합을 비교하면 집진판 세정 후에 개별 악취성분의 농도 저감 효과가 약 20% 이상 향상된 것을 확인할 수 있었다. 복합악취의 희석배율이나 성분별 농도분석 결과는 실제 공정의 사용조건에 따라 큰 편차를 보이기 때문에 지속적인 데이터의 축적과 관찰이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 섬유산업에서 배출되는 오일미스트를 다량 함유한 배기가스를 처리하기 위해 개발되어 실제 현장에 적용되고 있는 EFC 설비의 집진판 오염에 의한 성능저하를 개선하고 간편하기 유지・관리하기 위한 맞춤형 세정제 및 그 사용방법을 제안하였다. 오염물질의 특성과 집진판 모재의 손상 등을 고려하여 최적의 세정제 성분 배합비율을 결정하였다. 실제 공정현장에 적용하는 과정에 별도의 장치를 사용하지 않고 기존에 설치되어 있는 세척용 공업용수 분무를 위한 스프레이 노즐 설비를 활용하였으며, 세정액을 분사하는 힘 외에 다른 물리적인 세척을 병행하지 않는 단순한 방법으로 매우 심하게 점착된 집진판 표면의 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있었다. 집진판의 세척에 의한 EFC 설비의 텐터공정 배기가스 정화성능 개선효과도 우수하였으며, 집진판 세정 후 20주까지 그 효과가 유지되는 것을 확인하였다. 집진판의 세정작업 주기 결정과 체계적인 유지・보수를 위해서는 향후 집진판 표면 오염상태, 배기가스의 분석 등 지속적인 관찰이 요구된다.

감 사

본 연구는 시흥녹색환경지원센터의 2017년도 연구개발사업비 지원에 의해 수행되었으며, 현장실증연구의 진행과정에 많은 도움을 주신 박희재 박사에게 감사드립니다.

References

1. A. Müezzinoğlu, Air pollutant emission potentials of cotton textile manufacturing industry, *J. Clean. Prod.*, **6**, 339-347 (1998).
2. A. Hasanbeigi and L. Price, A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry, *J. Clean. Prod.*, **95**, 30-44 (2015).
3. E. Alay, K. Duran, and A. Korlu, A sample work on green manufacturing in textile industry, *Sustain. Chem. Pharm.*, **3**, 39-46 (2016).
4. C. R. Holkar, A. J. Jadhav, D. V. Pinjari, N. M. Mahamuni, and A. B. Pandit, A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches, *J. Environ. Manage.*, **182**, 351-366 (2016).
5. L. Chen, L. Wang, X. Wu, and X. Ding, A process-level water conservation and pollution control performance evaluation tool of cleaner production technology in textile industry, *J. Clean. Prod.*, **143**, 1137-1143 (2017).
6. E. Hassanzadeh, M. Farhadian, A. Razmjou, and N. Askari, An efficient wastewater treatment approach for a real woolen textile industry using a chemical assisted NF membrane process, *Environ. Nanotechnol. Monit. Manage.*, **8**, 92-96 (2017).
7. M. Fatima, R. Farooq, R. W. Lindström, and M. Saeed, A review on biocatalytic decomposition of azo dyes and electrons recovery, *J. Mol. Liq.*, **246**, 275-281 (2017).
8. C.-J. Park, The study on the regional odor production & method for abatement of odors in Incheon area, *J. Korean Soc. Environ. Adm.*, **11**, 37-47 (2005).
9. K.-H. Kim and S.-Y. Park, A comparative analysis of malodor samples between direct (olfactometry) and indirect (instrumental) methods, *Atmos. Environ.*, **42**, 5061-5070 (2008).
10. K.-H. Kim, The need for practical input data for modeling odor nuisance effects due to a municipal solid waste landfill in the surrounding environment, *Environ. Int.*, **87**, 116-117 (2016).
11. J.-I. Paeng, S.-J. Cho, and H.-M. Kim, Evaluation of odor characteristics in leather manufacture factories system, *J. Korean Soc. Environ. Adm.*, **11**, 241-248 (2005).
12. J.-I. Paeng, S.-J. Cho, and H.-M. Kim, Ordor characteristics of dyeing and finishing textile factories, *J. Korean Soc. Environ. Adm.*, **14**, 45-54 (2008).
13. C.-S. Park, Y.-J. Yu, H.-Y. Chae, J.-H. Yu, I.-H. Lee, J.-H. Ha, and M.-G. Kim, Identification of individual odor characteristic and odor-active compounds from a dye company, *Korean J. Odor Res. Eng.*, **8**, 144-150 (2009).
14. Y. S. Hwang, H. J. Park, G. H. Chung, D. H. Kim, and B.-K. Na, Full-scale EFC study on oil recovery and reuse from discharge gas of tenter facility in textile industry, *Clean Technol.*, **17**, 259-265 (2011).
15. M. Brancher, K. D. Griffiths, D. Franco, and H. M. Lisboa, A review of odour impact criteria in selected countries around the world, *Chemosphere*, **168**, 1531-1570 (2017).
16. A. C. Kogawa, B. G. Cernic, L. G. D. do Couto, and H. R. N. Salgado, Synthetic detergents: 100 years of history, *Saudi Pharm. J.*, **25**, 934-938 (2017).
17. J. H. Bae and J.-S. Kim, Environmentally friendly aqueous/semi-aqueous cleaning technology, *Clean Technol.*, **3**, 36-46 (1997).
18. S.-W. Han, H.-Y. Lee, J.-H. Bae, J.-H. Ryu, B.-D. Park, and S.-D. Jeon, Analysis of monitoring and recycling technologies of cleaning solution and rinse water in the aqueous cleaning system, *Clean Technol.*, **7**, 225-242 (2001).
19. H. Kim and J. H. Bae, Evaluation of cleaning ability of aqueous cleaning agents according to their additives, *Clean Technol.*, **12**, 1-9 (2006).
20. X. Shi, G. Tal, N. P. Hankins, and V. Gitis, Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review, *J. Water Process Eng.*, **1**, 121-138 (2014).