

논문

유기용제 사용 소규모 드라이클리닝 공정의 휘발성유기화합물 배출계수와 배출량 산정에 관한 연구

Estimation of Emissions and Emission Factor of Volatile Organic Compounds from Small-scale Dry Cleaning Operations Using Organic Solvents

이현지, 송무근, 김대근*

서울과학기술대학교 환경공학과

Hyeonji Lee, Muguen Song, Daekeun Kim*

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

접수일 2019년 5월 28일
 수정일 2019년 7월 5일
 채택일 2019년 7월 11일

Received 28 May 2019
 Revised 5 July 2019
 Accepted 11 July 2019

*Corresponding author
 Tel: +82-(0)2-970-6606
 E-mail: kimd@seoultech.ac.kr

Abstract Volatile organic compounds (VOCs) emissions from organic solvents in the small-scale dry cleaning process have been characterized, and their emission factor was defined based on survey results and experimental observation. Fifty sites of the small-scale dry cleaning business (less than 30 kg of capacity) were surveyed; and the real-scale dry cleaning process was tested. During the operation of the drying by tumbling in a hot air stream, highly concentrated VOC laden gas was generated; and was affected by operating conditions. It was finally concluded that the emission factor of VOCs in the small-scale dry cleaning process should be considered as 0.21 kg VOCs/kg laundry. VOC emissions can be estimated to be 1.32×10^3 kg VOCs/site-yr and 3.7844×10^7 kg VOCs of Korean national emission (as of 2015).

Key words: Dry cleaning, VOCs, Organic solvent, Emission factor, Emission

1. 서 론

휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compounds; VOCs)은 대기 중 질소산화물과 함께 광화학반응으로 오존을 형성하는 오존 전구물질로 알려져 있다. 또한, 물질 자체가 갖는 독성으로 인하여 발암성 및 인체와 환경에 위해를 끼치는 화학물질이다. 국내 대기환경 보전법에서는 총 37종의 VOCs 규제 대상 물질을 고시하고 있으며, 이에 따른 VOCs 배출시설을 지정하여 규제하고 있다.

2015년 국내 VOCs 전체 배출량은 1,010,771 ton이며, 이 중 유기용제 사용에 의한 배출량은 555,359 ton으로 전체 배출량의 55%를 차지한다 (NIER, 2018).

세탁시설은 유기용제를 사용하는 대표적인 VOCs 배출원이며, 국내 전체 배출량의 2%에 해당하는 20,407 ton의 VOCs를 배출하고 있다 (NIER, 2018). 세탁시설은 대규모의 유기용제를 취급하는 사업장과는 달리 별도의 오염방지시설 없이 생활주변에 위치하고 있어 VOCs 배출 관리에 어려움이 있다 (MOE, 2015).

2017년 기준으로 국내 세탁시설은 전국 33,176개이며, 이 중 95.7%인 31,764개 사업장이 가정용 세탁업이다 (KOSIS, 2019). 가정용 세탁업의 일반적인 드라이클리닝 공정은 세탁공정과 건조공정으로 구성되며, 세탁공정 중에 섬유제품이나 가죽제품 등의 오염물질 제거용으로 용제가 사용되고 있다 (Lee et al., 2012; Kim et al., 2002). 세탁용제에는 석유계 용제, 퍼클로

로에틸렌, 불소계용제 등이 있으나, 국내 세탁시설의 95% 이상은 석유계 용제를 사용하고 있는 것으로 알려져 있다(MOHW, 2010; Kim *et al.*, 2002). 드라이클리닝 과정 중에 사용되는 석유계 세탁용제는 세탁공정, 용제순환 여과공정, 건조공정 중에 대기 중으로 배출될 수 있으며, 약 82% VOCs가 건조공정 중에 생성되어 대기 중으로 배출되는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2002).

현행 대기환경보전법에서는 세탁용량 30 kg 이상의 세탁시설 만을 대기오염물질 배출시설로 지정하고 있으며, 이에 국내 세탁시설의 약 95.7%를 차지하는 세탁용량 30 kg 미만의 소규모 가정용 세탁시설은 VOCs를 처리하지 않고 대기 중으로 직접 배출하고 있는 실정이다(Kim and Yoo, 2017; Roh *et al.*, 2001). 또한, 공중위생관리법의 용제회수기 설치 의무 대상이 세탁용량 30 kg 이상으로 바뀌고, 용제회수기의 유지 관리 및 안전성의 문제로 실제 사용 업소는 설치 업소보다 적은 것으로 조사되고 있다(MOE, 2015; Choi *et al.*, 2013; Baek *et al.*, 2008).

VOCs 관리 및 규제를 위해서는 배출원에서 발생하는 VOCs의 배출특성과 배출량을 정확하게 파악하는 것이 중요하며, 각 배출원의 특성에 맞는 배출계수 개발이 필요하다. 국가 대기오염물질 배출량은 대기정책지원시스템(Clean air policy support system, 이하 CAPSS)으로 산정하고 있으며, 세탁시설의 대기오염물질 배출량은 드라이클리닝 과정에서 유기용제 사용으로 발생하는 비메탄계 휘발성유기화합물(NMVOCs)을 대상으로 한다. 세탁시설에서 배출되는 VOCs에 관한 연구는 다수 보고(Park *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2012; Jeong *et al.*, 2005; Jeong *et al.*, 2003)된 바가 있으나, 세탁시설 VOCs 배출량에 영향을 줄 수 있는 요인과 세탁시설 드라이클리닝 활동도에 관한 연구는 보고된 바가 없다. 현재 국내 세탁시설 VOCs 배출계수는 연간 업소 당 0.61 ton을 적용하고 있으며, 활동도는 세탁 업소수를 이용한다. 배출계수는 세탁시설 1개당 평균용제 사용량 및 폐용제 발생량에 기초하여 산정된 것이다(NIER, 2005). 하지만, 대기

오염 배출자료의 불확도 평가에 관한 보고서(NIER, 2012)는 국내 세탁시설 배출계수 및 활동도, 배출량의 DARS(Data attribute rating system) 평가점수가 각각 0.66, 0.66, 0.44이며, 자료의 신뢰도가 매우 낮다고 보고하고 있다.

본 연구는 세탁시설에서 발생하는 VOCs의 배출량을 산정하고자, 가정용 세탁업소를 대상으로 한 설문 조사와 실제 드라이클리닝 공정을 대상으로 한 VOCs 배출특성을 분석하였다. 또한, 세탁업소의 활동도와 세탁 VOCs 배출량으로부터 세탁 VOCs 배출계수를 도출하여, 세탁 VOCs의 국내 VOCs 총 배출의 기여 정도를 재평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 현장 설문조사

본 연구는 배출량 산정을 위한 활동도 조사를 위하여 세탁처리용량 30 kg 미만 규모의 가정용 세탁업소를 대상으로 세탁시설 현황을 분석하였다. 이를 위하여 임의로 선정된 총 50개 세탁업소를 현장 방문하여 설문조사를 수행하였다. 본 연구를 위한 설문조사는 2018년 8월부터 약 12주간 수행되었다. 설문조사는 세탁업소 현장 종사자를 대상으로 진행되었으며, 자기입식으로 응답하여 회수하는 방식을 이용하였다. 조사내용은 세탁시설의 운영현황과 드라이클리닝의 가동현황에 관한 질문으로 구성하였다. 세탁시설의 운영현황을 파악하기 위한 조사내용에는 드라이클리닝 1일 운전 횟수, 세탁시설 휴무 여부, 보유 세탁기기 현황 및 용량, 드라이클리닝 1일 가동 횟수 및 가동시간, 계절별 세탁 횟수, 대기오염방지시설 및 용제회수기 설치(사용)여부가 포함되었으며, 드라이클리닝의 가동현황을 조사하기 위하여 공정 1회 가동 시 세탁물의 양, 세탁용제 주입량, 건조공정 작동온도 및 작동시간을 설문하였다. 조사결과는 Microsoft Excel(version 2016)와 IBM SPSS statistics 21을 이용하여 통계 분석하였다.

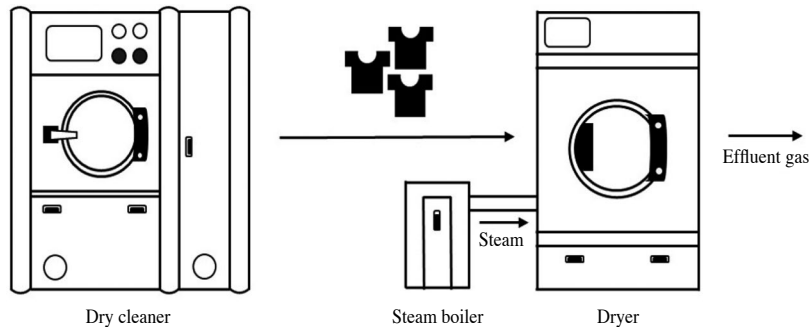


Fig. 1. Dry cleaning process employed in this study.

2.2 드라이클리닝 공정

본 연구는 세탁시설의 현황을 모사하고자 국내 가정용 세탁시설에서 실제 사용되고 있는 드라이클리닝 공정을 실험실에 설치하였다. 그림 1은 세탁시설의 드라이클리닝 공정을 보여준다. 드라이클리닝 공정은 가정용 세탁시설에서 흔히 사용되는 방식으로 세탁기와 건조기 분리된 개방(배출형)구조를 가진다. 공정은 석유계 유기용제를 사용하는 13 kg 용량의 건식 세탁기 (ESE-7313, Eunsung Engineering, Korea), 15 kg 용량의 건조기 (SR-7615, Eunsung Engineering, Korea), 8 kg/hr 용량의 전기스팀 보일러 (PHE-5, Pyeonghwa-boiler, Korea)로 구성되며, 별도의 용제회수기는 장착되어 있지 않다.

드라이클리닝의 가동조건은 현장 설문조사를 근거로 설정하였다. 우선, 세탁은 용제탱크의 용제가 세탁물이 들어있는 세탁기 내에 급유된 후, 10 min 본세탁과 5 min 행굼 세탁 과정을 거쳐 8 min 탈유공정으로 마무리하여 총 23 min 동안 진행되었다. 본 연구에서는 석유계 세탁용제를 선정하고자, 상용되고 있는 5종의 석유계 유기용제를 분석하여, 유사한 성상을 확인하였다(상세 결과는 제시하지 않음). 사용된 유기용제는 현장조사에서 사용빈도가 높은 석유계 용제 1종(공업용 휘발유 중 KS M 2611DML 용제에 해당)을 선정하여 실험에 사용하였다. 건조는 전기스팀 보일러에서 공급되는 열풍을 이용하여 세탁물에 잔존하는 용제를 증발시키는 과정(대부분 VOCs가 건조과정에서 발생됨)이며, 건조기 내부로 공급되는 온풍

과 냉풍의 주입 시간 비율은 1 : 1로 설정하였다. VOCs의 배출 특성에 영향을 미칠 수 있는 드라이클리닝 운전조건을 파악하기 위하여, 다양한 조건을 설정하여 실험을 진행하였다. 실험과정 중 실험실 온도는 25°C를 유지하였다.

실험 조건은 세탁용제 투입량 (70~140 L), 세탁물 양 (3~10 kg), 건조온도 (30~52°C), 건조시간 (30~50 min), 세탁섬유 종류(면, 폴리에스테르, 울, 실크)이며, 현장 설문조사 결과의 통계분석을 통하여 얻은 산술 평균값을 기본조건으로 설정하여 비교 분석하였다.

2.3 시료 채취 및 분석

본 연구에서는 드라이클리닝 공정 중 건조과정에서 배출되는 가스를 측정·분석하였다. 건조기의 배출구 후단에 시료채취용 챔버를 설치하여 시료채취 및 분석을 수행하였다. 시료채취용 챔버는 총 부피 30 L(길이 54 cm, 내경 26 cm, 두께 1 cm)의 아크릴 재질로 제작되었다. 챔버는 시료의 직접채취와 온도 및 유량의 실시간 측정이 가능하도록 0.635 cm(내경)의 채취구와 1.5 cm(내경)의 측정구를 배출가스 흐름 방향으로 각각 설치하였다. 건조과정 중 배출가스의 온도와 유량은 가스유속계 (TSI-9535, TSI Incorporated, USA)를 이용하여 2 min 간격으로 측정하였으며, 가스시료는 0.5 mL 가스타이트실린지 (Valco Instruments Company INC., USA)를 이용하여 0.3 mL 분취하였다. 모든 실험은 3회 반복 실험하여 재현성을 확인하였다.

본 연구는 건조과정 중에 배출되는 VOCs를 정량

화하기 위하여 총휘발성유기화합물 (Total volatile organic compounds, TVOCs) 개념을 사용하여 전체 VOCs 농도를 평가하였다. 현행 실내공기질 공정시험 기준은 실내에서 방출되는 VOCs 농도의 측정방법으로 톨루엔으로 환산하여 정량한 TVOCs로 정의하고 있다. 따라서 본 실험은 채취된 가스시료를 불꽃 이온화 검출기 (Flame Ionization Detector, FID)가 장착된 가스크로마토그래피 (YL6500, YL Instruments, Korea)에 직접 주입 후, 톨루엔으로 환산된 TVOCs 농도로 분석하였다. GC 컬럼은 Agilent사의 HP-5 (30 m × 0.32 mm × 0.10 μm)를 사용하였다. 주입구와 검출기의 온도는 각각 200°C와 250°C로 설정하였으며, 오븐 온도는 230°C로 2 min 유지하였다. 이동상 가스는 헬륨 (99.999%)으로, 분당 3 mL로 흘려주었다. GC-FID를 이용한 톨루엔 검량선은 높은 직선성 ($r^2 = 0.999$)을 보였으며, 방법검출한계 (MDL, method detection limit)는 77 ppm이었다.

2.4 배출계수 산정방법

본 연구는 드라이클리닝 공정 중 VOCs 배출에 영향을 주는 인자를 파악하였으며, 현장설문조사를 이용하여 세탁 활동도를 조사하였다. 실험결과 도출된 VOCs 배출농도와 설문조사 결과를 근거로 하여 국내 세탁소 VOCs 배출계수를 산정하였다. 모든 활동도 자료값은 세탁시설의 다양성과 통계자료 분포 결과를 고려하여 정수로 나타내었다. 또한, 활동도 자료 (일일 드라이클리닝 가동 횟수, 세탁 연간 가동일 등)와 통계자료 (세탁업소수)를 이용하여 세탁 VOCs의 국내 및 서울특별시의 배출량을 산출하였다. 본 연구에서 사용된 세탁 VOCs 배출계수 및 배출량의 산출 계산식은 식(1)과 식(2)와 같다.

$$\text{Unit Emission (kg/yr)} = E_v \times W_c \times O_d \times D_b \quad (1)$$

E_v : Emission factor (kg TVOCs/kg clothes cleaned)

W_c : Weight of clothes cleaned per dry-cleaning operation

O_d : Number of operations (dry-cleaning cycle/day)

D_b : Business day (day/year)

National VOC emissions (kg/yr)

$$= \text{Number of laundry facility} \times \text{Unit Emission} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 현장조사 결과

그림 2는 50개 소의 가정용 세탁업소를 대상으로 한 세탁시설 및 운영 현황에 관한 설문조사의 결과를 보여준다. 그림 2a는 일일 가동 횟수의 분포를 보여준다. 공정 가동 빈도는 세탁시설의 규모와 처리 세탁물의 양에 따라 다소의 차이를 보였으며, 계절적 차이는 있었으나 통계적 유의성은 확인되지 않았다 ($p > 0.05$, t-test). 업소 당 일 평균 가동 횟수는 최대 8회에서 최소 0.5회이었으며, 평균 1.85회를 보였다. 따라서 배출량 산정을 위한 세탁 활동도 자료값으로 일평균 공정 가동 횟수는 2회로 설정하였다.

그림 2b는 1회 드라이클리닝 시 평균 세탁물의 양을 보여준다. 세탁물의 양은 업소 규모와 입지 조건에 따라 상이하였으나, 1회 평균 드라이클리닝 세탁물 양은 평균 10 kg로 조사되었다. 배출량 산정을 위한 활동도 자료값으로 1회 드라이클리닝 세탁물 양을 10 kg으로 설정하였다. 기기 보유 현황을 조사한 결과에서는 세탁기와 건조기를 각각 1대씩 보유한 시설이 각각 84%, 76%이었다. 보유 기기의 용량은 최소 8 kg에서 최대 21 kg이었으며, 평균 13.44 kg의 용량을 보였다 (data not shown). 또한, 대상 시설의 연간 평균 영업일수는 313일로 조사되었다.

용제 회수기를 보유한 시설은 전체 조사 대상 중에서 20%에 해당하는 10개 시설이었으나, 용제 회수기의 가동여부 및 적정 관리여부는 확인할 수 없었다. 또한, 별도의 대기오염설비를 설치한 시설은 없는 것으로 확인되었다. 따라서 대부분의 가정용 세탁시설은 세탁과정 중 사용된 유기용제가 별도의 처리 없이 대기 중으로 배출되는 것으로 파악되었다.

3.3절 (VOCs 배출계수 산정)에서는 설문조사를 통

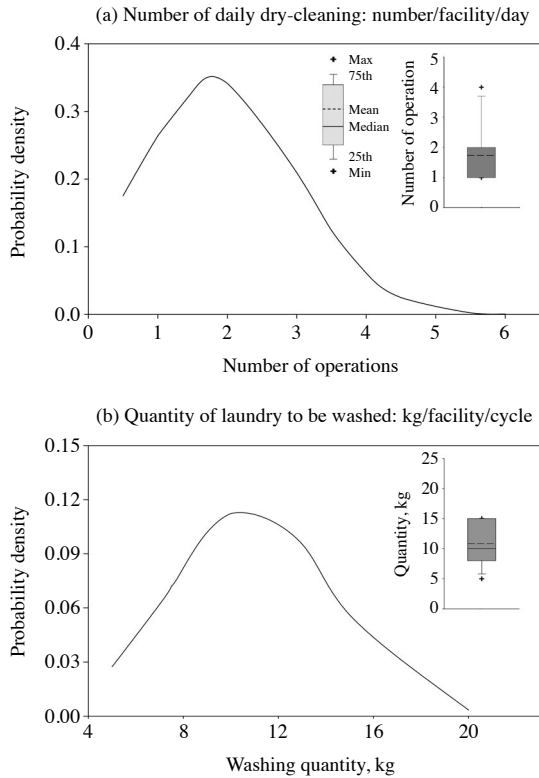


Fig. 2. Probability density distribution of survey data: (a) number of daily dry-cleaning; (b) quantity of laundry to be washed in a dry-cleaner.

해 도출된 일일 드라이클리닝 횟수, 1회 드라이클리닝에 투입되는 세탁물의 양, 연간 영업일수가 배출계수 산정을 위한 세탁 활동도 자료로 이용되었으며 상세한 내용은 3.3절에서 언급하고자 한다.

3.2 배출가스 특성

3.2.1 가스 온도 및 유량

그림 3a는 세탁 후 건조과정에서 배출되는 가스의 온도 변화를 보여준다. 현장설문에서 건조온도는 30~50°C 범위로 조사되었으며, 최빈값은 40°C로 분석되었다(data not shown). 본 연구에서는 건조기를 40°C로 설정하여 배출가스를 분석하였다. 배출가스 온도는 초기 31.7°C에서 점차적으로 증가하여 39.4°C에 도달하였으며 평균 38.4°C를 보였다. 배출가스의

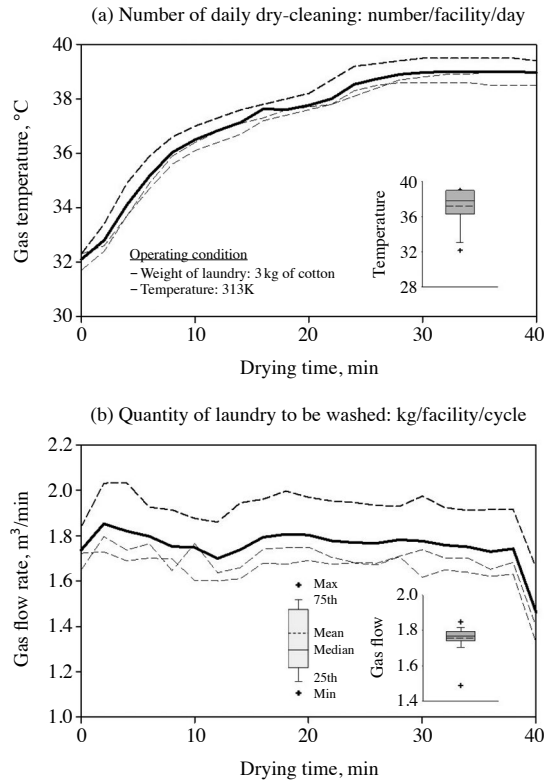


Fig. 3. Temperature and flow rate of exhaust gas from the dryer integrated with the dry-cleaner as a function of time: (a) gas temperature; (b) gas flow rate. All experiments were performed in triplicate, and each experimental run was setup for 40 min. The average values are shown in bold.

온도는 건조장치의 설정조건에 의해 결정된다고 볼 수 있다.

그림 3b는 배출가스 유량의 변화를 보여준다. 배출가스는 건조기와 연결된 보일러 가동으로 증기가 공급됨에 따라 배출되기 시작하여, 보일러 가동 종료와 동시에 가스는 배출되지 않았다. 배출가스는 다소 변화의 폭을 보였으나, 평균 1.6 m³/min로 배출되었다. 총 건조시간 40분 동안 발생된 총 가스량은 70.5 ± 6.8 m³으로 분석되었다. 총 가스 발생량은 건조기의 운전 조건과 세탁물에 흡수된 용제의 휘발정도에 따라 영향을 받는 것으로 보이며, 이러한 경향을 파악하고자 건조기 운전조건을 달리하여 가스 발생량을 실험하였다.

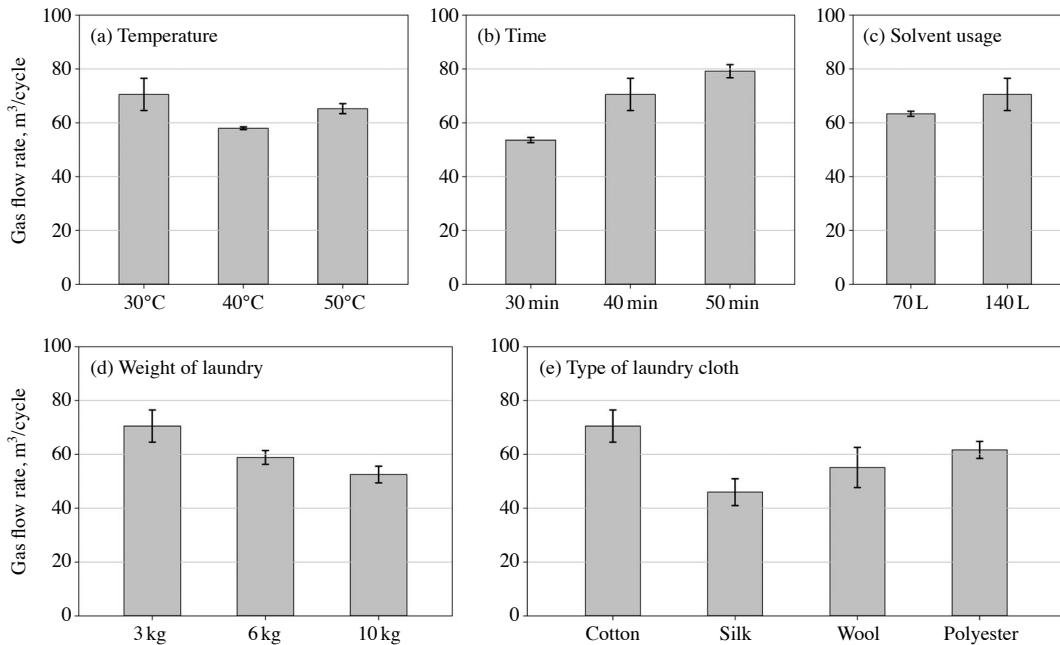


Fig. 4. Effects of operational conditions of the laundry process on exhaust gas flow rate: (a) operating temperature in dry unit; (b) operating time in dry unit; (c) usage of organic solvent; (d) weight of laundry; (e) type of laundry cloth. For the operating condition in the dry-cleaning process, defaults were applied except for the variable parameter; Defaults were 3 kg of laundry weight (cotton); 40 min of dry time; 40°C of temperature.

그림 4는 건조기의 운전조건(온도, 시간, 용제 주입량, 세탁물의 양, 세탁 섬유)에 따른 가스 발생량을 보여준다. 가스 발생량은 건조시간과 비례하여 증가하였으며 세탁물의 양에 반비례하여 감소하였다. 세탁물의 양이 증가할수록 건조기 내 세탁물이 차지하는 부피가 증가하여, 건조기 내부가스의 순환이 원활하지 못한 결과를 초래한 것으로 사료된다. 섬유 종류 중에는 면을 세탁할 경우에 가스 발생량이 가장 높았는데, 이는 섬유의 용제 흡수 정도가 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 건조온도는 실험온도의 범위가 크지 않아서 용제 휘발에 큰 영향을 주지 않은 것으로 보인다. 또한, 드라이클리너 장치 내에서 용제가 순환하며 세탁되기 때문에 주입 용제의 양은 가스발생에 영향을 미치지 않았다.

3.2.2 TVOCs

세탁용 유기용제는 세탁기에 해당하는 드라이클리

너에 투입되어 순환되고, 세탁완료 후 세탁물에 흡수된 일정량의 용제는 건조과정에서 주름제거용으로 투입되는 수증기와 함께 휘발하게 된다. 대기 중으로 배출되는 세탁 VOCs의 약 82%가 건조과정에서 생성되는 것으로 알려져 있으며, 그 외 경로는 세탁공정, 용제순환공정, 여과공정이 포함된다(Kim *et al.*, 2002). 그림 5는 건조과정에서 배출되는 가스 내 TVOCs 농도 변화를 보여준다. 건조기 가동 초기에 TVOCs의 평균농도는 4,800 ppm이었으며 초기 8분까지 최대 8,900 ppm로 증가한 후, 점차적으로 감소하는 경향을 보였고, 경시적 농도변화는 왜도(1.07)가 양수인 왼쪽으로 치우쳐진 분포를 보였다. 또한, 배출농도에 대한 연속확률분포는 로그정규분포(log-normal distribution)를 보였다.

동일 조건에서 조사된 가스 총 발생량 $70.5 \pm 6.8 \text{ m}^3$ 을 적용하여 추정된 TVOCs 총 발생량은 $0.64 \pm 0.04 \text{ kg}$ 이었다. 즉, 3 kg 세탁물을 드라이클리닝을 할 경우

건조과정 총 40분 동안 약 0.64 kg의 TVOCs가 발생될 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 세탁조건이 발생가스 유량에 영향을 주었던 것과 같이 TVOCs 발생량

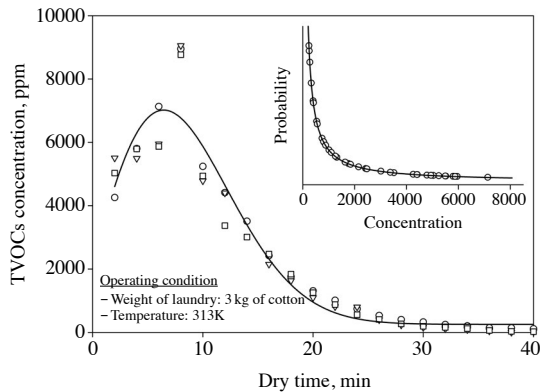


Fig. 5. TVOCs concentration in exhaust gas as a function of the drying time: All experiments were performed in triplicate, and each experimental run was setup for 40 min. The dynamic curve fitting was created by the Weibull function ($R^2 = 0.938$) in SigmaPlot (version 12.5, Systat Software, Inc).

에도 영향을 줄 수 있다고 판단하여 추가 실험을 진행하였다.

그림 6은 운전 조건에 따른 TVOCs 발생량을 보여준다. 건조온도와 건조시간, 용제 주입량, 섬유종류는 TVOCs 발생에 미치는 영향이 미비하였으며, 이는 세탁물에 흡수된 용제의 총량은 동일하거나 유사하였기 때문에 휘발 가능한 용제의 총량이 유사했을 것으로 판단된다. 특히, 세탁물 양이 각각 3 kg, 6 kg, 9 kg 일 경우 TVOCs 발생량은 각각 1.66 ± 0.17 kg, 1.16 ± 0.19 kg, 0.64 ± 0.04 kg이었으며, 세탁물 양이 배출가스 내 TVOCs 발생량에 가장 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있었다.

3.3 VOCs 배출계수 및 배출량

3.2.1절과 3.2.2절에서 드라이클리닝 운전인자 중에서 건조시간과 세탁물의 양이 가스발생량(m^3)과 TVOCs 발생량(kg)에 영향을 미침을 확인하였다. 그림 7은 그 관계를 3차원 등고선 그래프로 보여주고

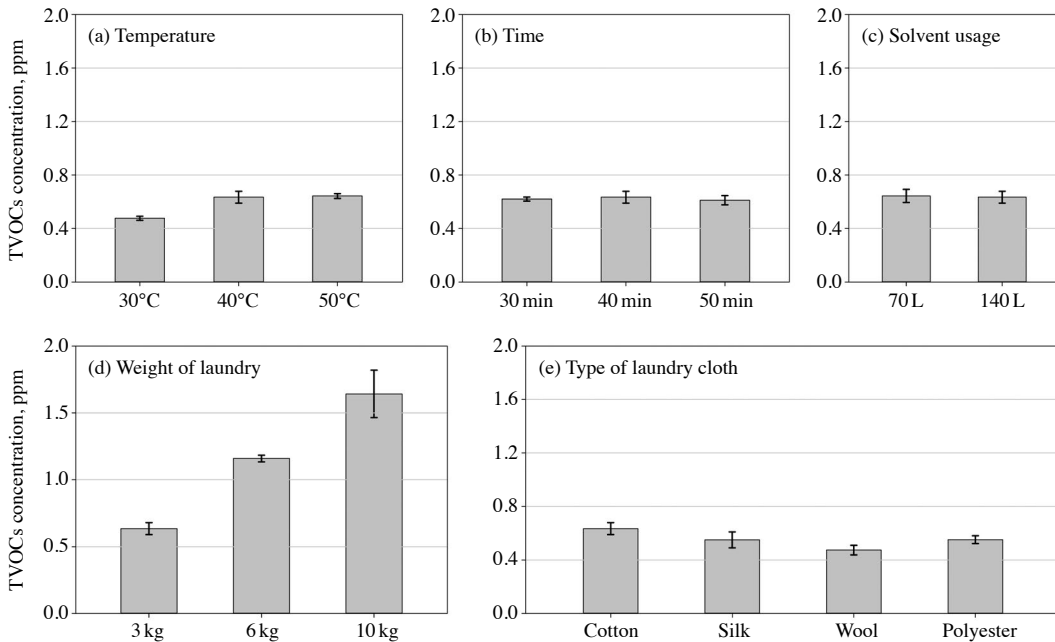


Fig. 6. Effects of operational conditions of the laundry process on the concentration of TVOCs in exhaust gas: (a) operating temperature in dry unit; (b) operating time in dry unit; (c) usage of organic solvent; (d) weight of laundry; (e) type of laundry cloth. For the operating condition in the dry-cleaning process, defaults were applied except for the variable parameter; Defaults were 3 kg of laundry weight (cotton); 40 min of dry time; 40°C of temperature.

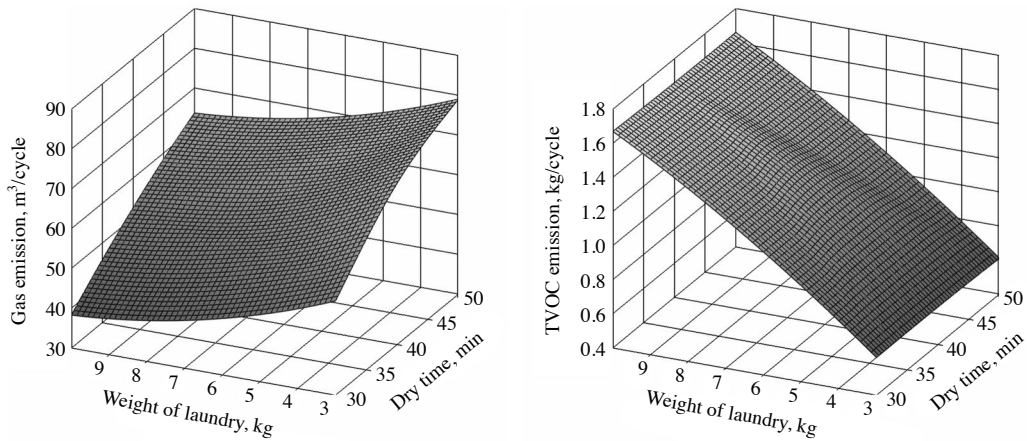


Fig. 7. 3D contour plot presenting the effect of operating parameters (weight of laundry and dry time) on gas emission (m^3/cycle) and TVOCs emission (kg/cycle).

있다. 드라이클리닝 공정의 VOCs는 세탁물에 흡수된 용제가 건조과정에서 수증기와 함께 발생되며, 1회 드라이클리닝 투입되는 세탁물의 양이 VOCs의 발생량을 결정한다고 볼 수 있다. 따라서 세탁시설의 드라이클리닝 공정에서 VOCs 발생계수는 세탁물의 양을 기준으로 $0.21 \text{ kg VOCs}/\text{kg laundry}$ 로 산출되었다. 세탁활동도(3.1절 결과)를 반영하여 VOCs 배출량을 산출하면 가정용 세탁업소(시설) 1개당 VOCs 연간 배출량은 $1.32 \times 10^3 \text{ kg}$ 이며, 전국 단위(2015년 기준)로는 총 $3.7844 \times 10^7 \text{ kg}$ 이다.

3.4 고찰

본 연구에서 도출된 결과를 현행 국가 대기오염물질 배출량 산정기준과 대기오염물질 배출기여도 측면에서 구분하여 고찰하고자 한다.

첫째, 현행 세탁시설의 대기오염물질 배출량 산정기준인 배출계수의 개선이 요구된다. 현행 CAPSS에서는 세탁시설 1개당 평균 용제 사용량과 폐용제 발생량에 기초하여 산정한 배출계수 $610.368 \text{ kg}/\text{yr}$ 를 이용하고 활동도는 세탁시설수를 이용한다. 하지만, 현행 배출계수는 2005년에 산정되었을 뿐만 아니라 실제 유기용제 사용을 고려한 것이 아니므로 실제 배출된 양과 상당한 차이가 있다고 본다(NIER, 2018,

2012). 세탁부분의 미국의 배출량 산정방법은 해당시설의 세탁물의 무게를 기준으로 하며, 세탁 공정단계와 방식에 따라 세분화하고 있다. 석유계 용제를 사용하는 드라이클리닝의 건조과정에서는 $0.18 \text{ kg VOCs}/\text{kg laundry}$ 가 배출되며, 대기오염제어장치가 설치될 경우에는 $0.02 \text{ kg VOCs}/\text{kg laundry}$ 를 적용하고 있다(U.S. EPA, 1995). 유럽은 회수공정을 적용한 Tier1 시설은 $0.04 \text{ kg VOCs}/\text{kg laundry}$, 배출형 공정을 적용한 Tier2 시설은 $0.177 \text{ kg VOCs}/\text{kg laundry}$ 를 배출계수로 산정하고 있다(EEA, 2016). 본 연구에서 제시한 배출계수($0.21 \text{ kg VOCs}/\text{kg laundry}$)는 세탁물을 기준으로 하며, 국외 기준과 유사한 값을 보이고 있다. 따라서 현행 세탁 VOCs의 배출량 산정기준을 용제 기준에서 세탁물량 기준으로 수정하는 것이 타당할 것으로 본다. 다만, 건조과정의 배출구의 경로를 통해 배출되는 VOC를 포함해야 하는 과제가 남아 있으며, 용제 회수기를 설치하거나 폐쇄형 공정을 채택한 시설에서는 별도의 산정기준이 요구된다.

둘째, 세탁 VOCs 배출량 산정을 위한 활동도 자료에 대한 재검토가 필요하다. 현행 산정기준과 본 연구에서 활동도로 세탁 업소수를 기본값으로 이용하고 있다. 하지만, 국내 세탁시설의 수는 매년 감소하고 있으며, 이를 근거로 한 배출량은 지속적인 감소 경향

을 보이고 있다. 기존 배출량 산정 방식에서 세탁시설 수의 변화에 따른 배출계수의 변화가 반영되지 않았기 때문에 실제 세탁시설의 VOCs 배출량의 증가 또는 감소는 확인할 수 없는 실정이다. 배출량의 신뢰도를 높이기 위하여 새로운 활동도 선정 방법론이 필요하다. 세탁시설의 입지 조건과 규모 등의 다양성을 고려하여 활동도를 일반화하는 것은 현실적으로 한계가 있다. 본 연구는 배출량 산정을 위한 방법론이 정확하고 표준화된 자료를 구축하기 위한 기본을 제공할 것으로 기대한다.

셋째, 세탁 VOCs의 국가 대기오염물질 배출량 기여도가 기존 보고된 자료와 비교하여 상당히 높으며 소규모 가정용 세탁시설에 대한 관리방안의 제시가 절실하다. 본 연구에서는 2015년도 기준으로 연간 37,844 ton의 VOCs가 가정용 세탁시설에서 배출된다고 추정하며, 이는 전체 VOCs 배출량(2015년 기준)의 3.7%, 유기용제 사용부문의 6.8%에 해당된다. 기존 배출량 산정기준의 약 1.8배 이상에 해당하는 기여도를 보이고 있다. 특히, 산업시설에 의한 VOCs 배출이 제한적이라고 볼 수 있는 서울시의 경우에는 총 배출량(2015년 기준)이 8,703톤으로 재산정되며, 이는 서울시 VOCs 총 배출량의 13%에 해당된다. 현행 세탁 VOCs의 배출량은 적절하지 못한 산정기준으로 인하여 과소평가되고 있다고 볼 수 있으며, 정확한 배출량 산정을 근거로 한 적절한 대기환경 관리가 요구된다. 또한, 현행 법규상에서 처리용량 30kg 미만의 세탁시설은 관리 대상이 아니며, VOCs가 미세먼지와 오존 생성의 전구물질로 인식되고 그 중요성이 커지고 있다는 점에서 소규모 가정용 세탁시설에 대한 관리 및 지원 정책이 요구된다.

4. 결 론

본 연구는 가정용 세탁업소(세탁용량 30 kg 미만)의 VOCs 배출량을 평가하고자 현장 설문조사와 드라이클리닝 공정의 VOCs 배출특성을 분석하였다. 본

연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 현장 설문조사를 세탁공정의 배출량 산정을 위한 기초자료로 활용하였으며, 일평균 세탁회수와 세탁물량은 각각 2 cycle/시설과 10 kg/시설로 조사되었다.
- 2) 드라이클리닝 공정의 건조과정에서 수증기와 VOCs가 함유된 가스가 배출되며, 가스발생량은 운전조건에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 총 가스발생량은 40분 건조시간과 3 kg 세탁물을 건조하는 조건에서 $70.5 \pm 6.8 \text{ m}^3/\text{cycle}$ 이었다.
- 3) 배출가스 중 TVOCs의 경시적 농도변화는 왜도 1.07의 왼쪽으로 치우쳐진 분포이고 배출농도의 확률밀도분포는 지수분포를 보였다. TVOCs 농도와 발생량은 세탁조건에 영향을 받았다. TVOCs 발생량은 40분 건조시간과 3 kg 세탁물을 건조하는 조건에서 $0.64 \pm 0.04 \text{ kg}/\text{cycle}$ 이었다.
- 4) 세탁 VOCs의 배출계수는 세탁물의 양을 기준으로 하는 것이 타당한 것으로 분석되었으며, 운전조건과 VOCs 배출특성을 반영한 VOCs 배출계수는 0.21 kg VOCs/kg laundry이었다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2017M1A2A2086647).

References

- Baek, S.H., Lee, U.g., Oh, M.D. (2008) Study on recycling of VOCs from cleaner with thermoelectric module unit, Journal of Korean Society for Indoor Environment, 5(4), 290-297. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.M., Son, B.S., Kim, D.S. (2013) An experimental study on explosion hazard of dry cleaning solvent recovery machine in laundry, Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, 27(1), 39-45. (in Korean)

- with English abstract), DOI: <https://doi.org/10.7731/kifse.2013.27.1.039>.
- European Environmental Agency (EEA) (2016) EMEP/EES Air pollution emission inventory guidebook 2016: Technical guidance to prepare national emission inventories, EEA Report, No 21.
- Jeong, J.J., Yi, G.Y., Lee, N.R., Jepm, H.J., Kim, S.J., Lee, I.S., Kim, K.J. (2003) Characterization of petroleum-based dry cleaning solvents used in commercial dry cleaning shops for occupational exposure limit application, *Journal of Korean Industrial Hygiene Association*, 13(1), 74-81. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J.Y., Yi, G.Y., Lee, N.R., Lee, B.K., Kim, B.Y., Kim, K.J. (2005) An evaluation of exposure to petroleum based dry cleaning solvent used in commercial dry cleaning shops, *Journal of Korean Industrial Hygiene Association*, 15(1), 19-26. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., Yoo, K.K. (2017) Study on the enhancement of VOCs management at laundry facilities in Korea, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(3), 139-171. (in Korean with English abstract), DOI: <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.3.139>.
- Kim, M.G., Jong, E.R., Park, J.J., Yun, I.K., Kim, J.S. (2002) A Study on the Contribution of Air Pollution for Petroleum Laundry Solvent, Department of the Environment Press, 2-70.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2019) The Current Working State of Industry (City/Industry/Workers), http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1K52C02&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=K22_4&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE (accessed on Jan. 24, 2019).
- Lee, J.H., Kim, Y.J., Lee, S.K., Woo, K.S., Im, J.Y., Park, H.J., Hong, E.J., Guo, X.B., Son, B.S. (2012) A study on VOCs concentration in laundries of local area in Korea, *Journal of Natural Sciences of Soonchunhyang*, 18(2), 133-139. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Environment (MOE) (2015) Study on Management of VOCs (Volatile organic compounds) in Living Environments, <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/091/025/003/5626562.pdf> (accessed on Mar. 26, 2019).
- Ministry of Health and Welfare (MOHW) (2010) Research on Safety Standard and Management Method for the Recollection of Organic Solvents, 2-4.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2005) A Study on Atmospheric Emission Inventory Development, and the Estimation of Air Pollutant Emission Factors and Quantity, 1007-1037.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) A Planning Study on the Improvement of VOC Emission Factor for Atmospheric Emission Sources. NIER-SP20123-091.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) 2015 National Air Pollutants Emission. NIER-GP2017-210.
- Park, O.H., Lee, K.S., Min, K.W., Cho, G.W., Yoon, K.J., Jeong, W.S., Cho, Y.G., Kim, E.S., Yang, J.S. (2016) Generating characteristics of VOCs in a commercial laundry shop and the effects on the health of workers, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 26(2), 159-169. (in Korean with English abstract), DOI: <https://doi.org/10.15269/jksoeh.2016.26.2.159>.
- Roh, Y.M., Kwon, G.B., Park, S.H., Jeong, J.Y. (2001) A survey on the management of chemical substances and airborne concentration in laundries exposed to organic solvent, *Journal of Korean Industrial Hygiene Association*, 11(1), 70-77. (in Korean with English abstract)
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1995) Compilation of air pollutant emissions factors (AP-42), Fifth Edition, Volume I, Chapter 4: Evaporation Loss Sources, 4.1 Dry cleaning (final section-April 1981).

Authors Information

이현지 (서울과학기술대학교 석사과정)
 송무근 (서울과학기술대학교 석사과정)
 김대근 (서울과학기술대학교 교수)