

도장공정 휘발성 유기화합물 회수를 위한 분리막 시스템의 현장 적용성 평가

최 휘 문* · 조 순 행* · 김 순 태* · 이 충 섭** · 남 상 용***,†

*아주대학교 환경공학과, **(주)에어레인

***경상대학교 나노신소재공학부, 공학연구원

(2013년 4월 9일 접수, 2013년 4월 17일 수정, 2013년 4월 17일 채택)

Field Application of the Membrane System for the Recovery of VOCs from the Automobile Painting Process

Whee Moon Choi*, Soon Haing Cho*, Soon Tae Kim*, Chung Seop Lee**, and Sang Yong Nam***,†

*Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

**Airrane Co. Ltd, Daejeon 306-791, Korea

***School of Materials Science and Engineering, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University,
Jinju 660-701, Korea

(Received April 9, 2013, Revised April 17, 2013, Accepted April, 17, 2013)

요약: 도장공정에서 발생하는 휘발성 유기화합물의 회수를 위하여 중공사 분리막 모듈을 이용한 공정을 준비하여, 공급 압력과 시간변화에 따른 휘발성 유기화합물의 회수에 대한 특성평가를 실시하였다. 중공사 분리막 모듈을 도장공정에 직접 적용한 결과, 투과된 휘발성 유기화합물의 농도는 투과시간과 압력의 증가됨에 따라 증가되었으며, 단일공정보다 다단공정이 더 우수한 분리성능을 나타내는 것을 확인하였다.

Abstract: To recover of volatile organic compounds (VOCs) induced by painting process, we prepared separation system using hollow fiber membrane modules and evaluated the recovery performance of VOCs with different feed pressure and operating time. Concentration of volatile organic compound in permeate through the membrane increased with increasing operating time and pressure. Performance of the membrane for removing the VOCs when we applied 2-stage process showed better performance than that of single stage process.

Keywords: VOCs, painting process, hollow fiber membrane module, recovery efficiency, concentration ratio

1. 서 론

오존, PAN(peroxy acetyl nitrate) 및 각종 oxidants를 발생시키는 원인이 되는 것으로 알려져있는 휘발성 유기화합물(VOCs; Volatile Organic Compounds)은 산업이 고도화됨에 따라 사용량 증가로 배출량 또한 증가하고 있는 실정이며, 특히 인쇄업, 유기합성공업, 석유정제공업 등 각종 유기용제가 많이 사용되는 산업분야에서 증발되어 배출되는 것이 많은 것으로 알려져 있다. 이 중, 자동차 도장공정은 대규모 시설로, 일반 자동차 정

비업소와는 달리 대형 휘발성 유기화합물 방지시설을 갖추고 있는 배출원이다. 자동차 도장공정에서 사용되는 도료는 대부분 우레탄 계열이며, 주성분은 자일렌과 톨루엔 등이고 희석제로는 신나가 주로 사용된다. 자동차 도장공정은 전착, 전착 및 상도와와 상호 부착성 향상을 위한 중도, 외관 품질 향상을 위한 상도 Base, 상도 Clear로 구분된다. Fig. 1은 자동차 도장공정의 주요 공정도를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 도시한 바와 같이, 현재 자동차 도장공정의 주요 휘발성 유기화합물 배출공정은 도장 부스와 건조 오븐 공정으로 크게 구분될 수 있다. 도장 부스의 단면은 그림에서 나타낸 바와 같

†교신저자(e-mail: walden@gnu.ac.kr)

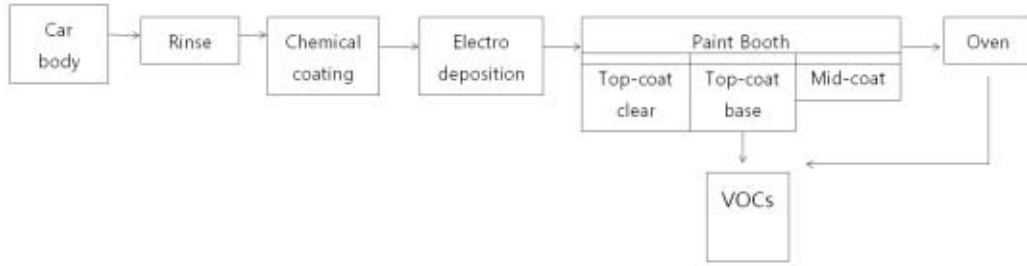


Fig. 1. Schematic diagram of automobile painting processes.

으며, 피도장물에 미부착된 비산도료 및 유기용제는 도장 부스 하부의 wet-scrubber를 통하여 대기중으로 배출된다. 피도장물에 부착되지 않은 도료 중의 용제는 도장 부스 내부에서 휘발하지만, 일부는 wet-scrubber 포착된 도료 미스트와 함께 coagulation tank로 운반되고, 이 과정에서 친수성 유기용제는 wet-scrubber에서 일부 제거되지만, 소수성 유기용제는 대기중으로 배출된다고 알려져 있다. 피도장물은 도장 직후의 세팅 공정에서 용제가 계속 휘발되고, 건조로에 들어가면 온도 상승과 함께 용제는 완전히 휘발한다. 건조로 내에서 휘발한 용제는 건조물로부터 배기와 함께 대기중으로 배출된다. 용제형 메탈릭 베이스코트 도료를 도장했을 때, 도장 영역으로부터 용제 배출비율은 도장부스에서 90%, 건조로에서 약 10%인 것으로 보고되고 있다[1-3]. 도장공정은 모든 산업의 공통적이며 필수적인 공정으로서, 제품의 품질 및 외양 결정에 매우 중요한 공정이다. 그러나 도장 공정에서 사용되는 대부분의 도료는 다량의 유기화합물을 포함하고 있는 관계로, 도장공정에서 배출되는 배기가스 내에는 상당한 양의 VOCs 물질이 포함되어 있는 실정이다. 최근 조사에 따르면, 국내 전체 VOCs 발생량 중 약 40%가 도장공정에서 발생하는 것으로 나타나고 있다[3]. 이러한 VOCs를 처리하기 위한 기술로는 크게 연소기술, 흡착·농축기술, 흡수·응축기술, 생물학적 처리기술 등이 있다. 특히, 도장 오븐에서 배출되는 VOCs는 대풍량, 저농도의 특징으로 주로 흡착·농축 후, 연소에 의한 열분해 처리를 일반적으로 활용하고 있다. 그러나 연소기술은 초기 설치비용이 많이 들고 유입부의 VOCs 농도가 낮은 경우에는 보조 연료를 사용해야 하므로 운영비도 많이 들어 일반적으로 처리 효율은 우수하나, 경제적 측면에서 보장이 필요한 기술로 판단된다. 이러한 이유로 분리막을 이용한 VOCs 회수기술이 많은 연구가 이루어져 왔다[4-5]. 따라서 본 연구에서는 저농도, 대풍량의 특성을 가지고

있어 VOCs 처리에 어려움이 있는 자동차 도장 오븐에 설치비와 운영비가 저렴하고, 2차 오염물질을 배출하지 않으며 에너지 소비율도 낮은 분리막 시스템에 대한 실증 검증을 통해 실제 적용 가능성을 검토하고자 하였으며, 도장 오븐에서 발생하는 VOCs에 대한 농축도와 회수율을 평가하여 자원순환형 VOCs 처리기술로의 가능성을 검토하였다.

2. 실험

2.1. 도장 VOCs 회수를 위한 분리막 모듈

도장 VOCs 회수를 위한 분리막 모듈은 PDMS/PEI 중공사 복합막을 이용하여 제조하였다. PDMS/PEI 중공사 복합막은 PEI 지지체 중공사막을 제조하고 PDMS를 n-hexane에 5 wt%로 용해하여 Dip 코팅한 후 50°C에서 24시간 건조 및 경화하여 제조하였다[3]. 분리막 모듈은 제조된 PDMS/PEI 중공사 복합막을 1,200가닥 하우스징에 장착하고 양끝을 예폭시 수지로 Potting하여 제조하였다. 이때 제조된 분리막 모듈 I, II의 크기는 직경 2 inch, 길이 22 inch였으며 막면적은 약 1.3 m²였다.

2.2. 도장 VOCs 회수를 위한 분리막 시스템

Fig. 2(a), (b)는 분리막 시스템의 자동차 도장 오븐에서 발생하는 VOCs에 현장 적용성 평가를 위한 현장 설치 및 개요도를 나타낸 것이다. 대상 VOCs는 H 자동차 회사의 도장 오븐에서 발생하는 VOCs를 1차 농축시켜, 유량을 조절한 탈착 가스를 활용하였다. 분리막 모듈의 진공도는 70 cmHg, 투과 유량은 3 L/min으로 설계하였으며, 공급 유량은 30 L/min으로 평가하였다. 또한 진공펌프는 VOCs 혼합가스에 사용 적합한, ULVAC-DTC-41 모델을 이용하였다. 현장의 VOCs 총 농도 분석은 TVA-1000 (Thermo Electron Corporation)을 이용하여 실시간 분석하였으며, VOCs의 정성·정량 분석은

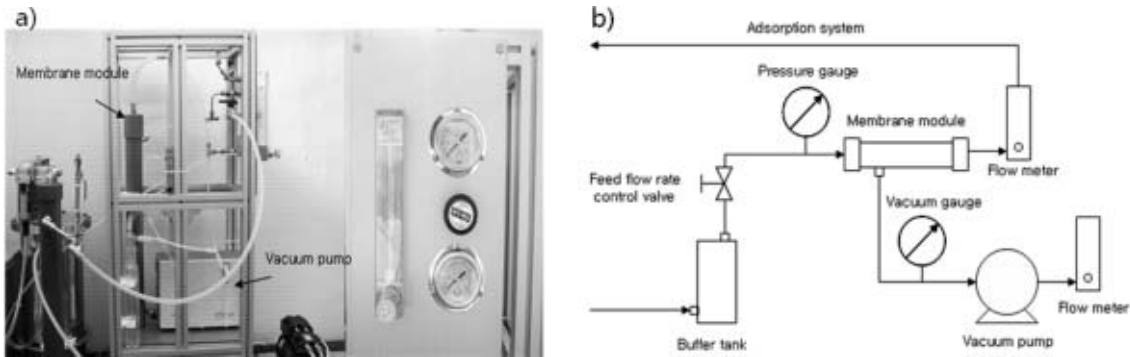


Fig. 2. Permeation apparatus for VOCs removal using membrane module and schematic diagrams.

시간대별 시료를 Tedlar bag에 포집한 후, Gas Chromatograph (G-5000, Hitachi CO., Ltd., Japan)를 활용하여 시행하였다.

2.3. 공급압력 변화에 따른 현장 분리막 시스템의 VOCs 회수 특성

분리막 시스템의 VOCs 회수 효율 향상을 위한, 공급압력 변화 평가는 대기압과 1 kgf/cm²로 진행하였다. 이때 진공도는 약 -70 cmHg로 유지하였으며, 투과 유량은 30 L/min로 고정하였다. 또한 초기 stage-cut은 0.1로 조절하였다. VOCs 농축도와 회수율은 평가 시간 80분 경과 시, Tedlar bag에 시료를 포집하여, 공급가스(Feed), 투과가스(Permeate), 투과하지 않고 배출되는 가스(Retentate)의 주 VOCs 성분인 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 농도를 각각 분석하였다.

2.4. 다단 투과(2 stage)에 따른 현장 분리막 시스템 VOCs 회수 특성

다단 투과 평가는 분리막 모듈 I 과 분리막 모듈 II를 병렬로 연결하여, 각각에 대한 VOCs 농축도와 회수율을 평가하였다. 분리막 모듈 I (stage 1)에 공급되는 가스의 압력은 1 kgf/cm²로 유지하였고, 이로부터 투과된 가스를 분리막 모듈 II(stage 2)에 대기압으로 공급하였다. 분리막 모듈 II에서의 투과는 진공펌프를 설치하여 이루어지도록 하였다. 이때 분리막 모듈 I의 공급 유량은 30 L/min이었으며, 투과유량은 초기 7.8 L/min이었다. 또한 공급유량과 투과유량의 변화에 따른 Stage-cut의 변화와 그에 따른 VOCs 회수 효율을 분석하였다. 각 단위공정에 대한 VOCs 주성분인 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 농도는 평가시간 120분 경과 후, 주요 지점별 Tedlar bag에 시료를 포집하여 GC로 분석하였다. 분석 지점은

분리막 모듈 I의 공급, 농축, 배출지점과 분리막 모듈 II의 농축, 배출 총 5지점으로 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 공급압력 변화에 따른 현장 분리막 시스템의 VOCs 회수 특성

Fig. 3과 Fig. 4는 대기압 상태에서 분리막 시스템의 시간별, 공급가스와 투과가스의 농도 변화 및 농축비와 회수 효율을 나타낸 것이다. 공급압력이 대기압인 경우, 분리막 시스템으로 유입되는 VOCs 농도는 Fig. 3에서와 같이, 약 100분 경과 시 최대 농도인 1,470 ppm에 도달 후, 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 투과된 VOCs 농도 또한 시간이 경과함에 따라 최대 6,800 ppm까지 증가한 후, 다시 감소하는 경향을 보였다. 이때, 투과유량은 초기 3 L/min에서 1.9 L/min으로 감소하였고, stage-cut 또한 0.1에서 0.063으로 감소하였다. 이는 전단의 농축 시스템에서 VOCs 탈착 시, 발생하는 수분과 타르의 혼합물이 분리막으로 공급되고, 이로 인하여 분리막 표면이 오염되었기 때문으로 판단된다. VOCs 농축비와 회수율은 Fig. 4에 나타난 바와 같이, 공급가스 농도에 대한 투과가스의 농축비는 최대 5.4배였으며, VOCs 회수율은 34.3%로 매우 낮은 수준으로 나타났다. 이 또한 전단의 수분과 타르의 영향으로 예상되며, 분리막 시스템 유입 전단에 전처리 과정이 필요할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 분리막 시스템 자체의 효율을 평가하기 위하여, 분리막 시스템의 공급압력을 변화시켜 VOCs 회수 특성 분석을 실시하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 공급 압력을 대기압에서 1 kgf/cm²로 증가시켰을 때, 분리막 시스템의 시간별, 공급가스와 투과가스의 농도변화 및 농축비와 회수 효율을 나타낸

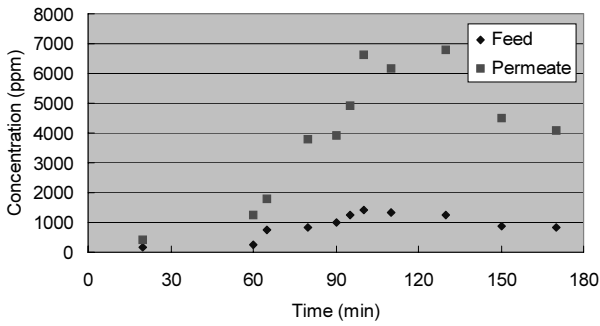


Fig. 3. Effect of operating time on concentration of VOCs in feed and permeate through membrane module at atmospheric pressure.

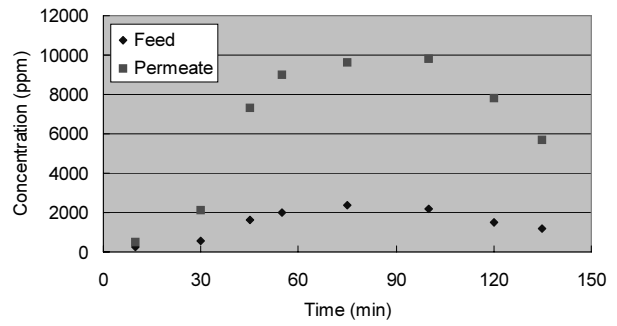


Fig. 5. Effect of operating time on concentration of VOCs in feed and permeate through membrane module at 1 kgf/cm².

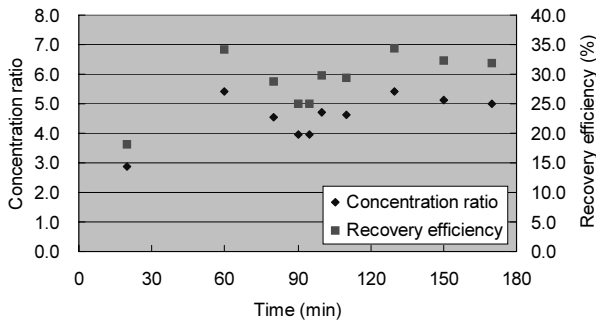


Fig. 4. Effect of operating time on concentration ratio of VOCs and recovery efficiency through membrane module at atmospheric pressure.

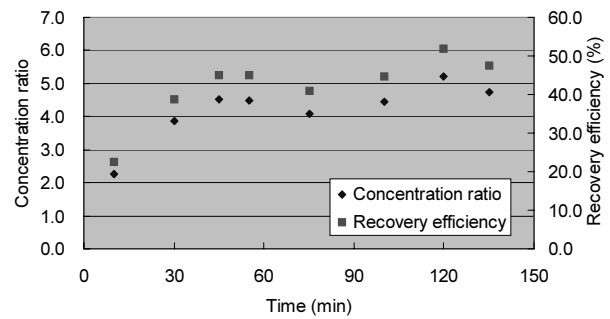


Fig. 6. Effect of operating time on concentration ratio of VOCs and recovery efficiency through membrane module at 1 kgf/cm².

것이다. 공급되는 VOCs의 농도는 최대 2,350 ppm까지 상승하였으며, 시간에 따라 증가하다가 감소하는 경향은 대기압 실험에서와 동일하였다. 이때 투과되는 VOCs의 최대 농도는 약 9,800 ppm이었으며, 투과 VOCs의 농축비는 최대 5.2배, VOCs 회수율은 52%인 것으로 분석되었다. 대기압 조건에서 실험한 결과와 비교하면, 농축비는 유사하나 VOCs 투과 효율은 증가한 것을 알 수 있었다[6]. 따라서 현장에서 공급되는 VOCs 회수 효율 향상을 위해서, 공급 압력을 증가시키는 것은 효율적인 방안으로 판단되며, 경제성을 고려한 적정 공급압력 설정이 필요할 것으로 사료된다. Table 1과 2는 공급압력 대기압과 1 kgf/cm²에서 공급가스(feed), 투과가스(permeate), 투과하지 않고 배출되는 가스(retentate)를 포함하여, VOCs 주성분을 분석한 결과이다. Table 1에 나타난 바와 같이, 분리막 시스템으로 공급되는 VOCs의 주성분은 벤젠, 톨루엔, 자일렌이며, 총 농도는 95.19 ppm이었다. 분리막 시스템에서 투과되는 농도는 총 753.1 ppm으로 약 7.9배 농축되었으며, 이때의 회수율은 50.1%인

것으로 분석되었다. 특히, 톨루엔은 벤젠과 자일렌에 비해 상대적으로 낮은 농도로 유입되기 때문에 농축효율이 상대적으로 저하되는 것으로 사료된다. Table 2는 공급압력을 1 kgf/cm²로 변화시켰을 때, 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 농도, 농축도 및 회수율을 나타낸 것이다. 공급되는 VOCs 성분의 총 농도는 243.2 ppm이었으며, 투과된 VOCs의 농도는 1,950 ppm이었다. 이때 투과된 VOCs의 농축비는 8배이며, 회수율은 80.2%인 것으로 분석되었다. 이와 같이 공급가스의 압력이 증가함에 따라 투과가스의 농축비는 큰 변화가 없으나, 회수율은 약 30% 정도 증가하는 경향을 나타내었다.

3.2. 다단 투과(2 stage)에 따른 현장 분리막 시스템 VOCs 회수 특성

Fig. 7은 운전시간에 따른 공급 VOCs의 농도와 분리막 모듈 I, II의 투과 VOCs 농도를 나타낸 것이다. 공급 VOCs의 농도는 초기 340 ppm에서 80분 경과 후, 최대 1,220 ppm까지 증가하고, 다시 점차 감소하는 경

Table 1. Permeation Properties of Hollow Fiber Membrane Modules with Various VOCs Components at Atmospheric Pressure

Stage cut : 0.063	Benzene	Toluene	Xylene	Total
Feed conc. (ppm)	84.1	0.96	10.13	95.19
Permeate conc. (ppm)	652.5	5.4	95.2	753.1
Retentate conc. (ppm)	48.1	0.68	4.74	53.52
Concentration ratio	7.8	5.6	9.4	7.9
Recovery efficiency (%)	49.1	35.6	59.5	50.1

Table 2. Permeation Properties of Hollow Fiber Membrane Modules with Various VOCs Components at 1 kgf/cm²

Stage cut : 0.063	Benzene	Toluene	Xylene	Total
Feed conc. (ppm)	196.4	4.60	42.20	243.2
Permeate conc. (ppm)	1,531.1	39.9	379.3	1950
Retentate conc. (ppm)	48.1	0.68	4.74	53.52
Concentration ratio	7.8	8.7	9.0	8.0
Recovery efficiency (%)	78.0	86.7	89.9	80.2

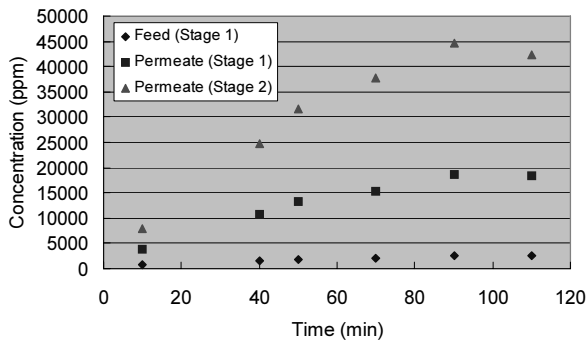


Fig. 7. Effect of operating time on concentration of VOCs in feed and permeate with different membrane stages.

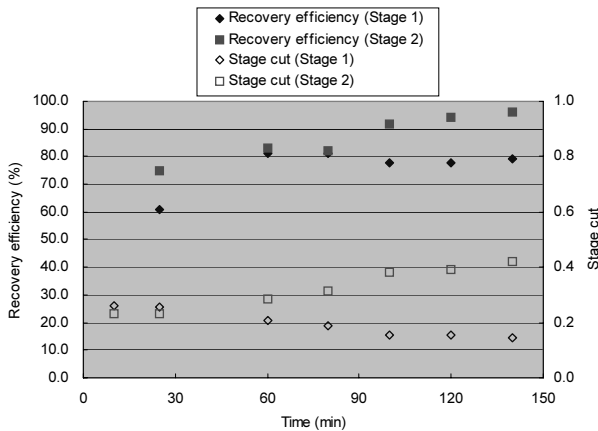


Fig. 8. Effect of operating time on recovery efficiency and stage cut with different membrane stages.

향을 나타내었다. 이때 분리막 모듈 I의 투과 VOCs 농도는 운전시간 경과에 따라 최대 5,700 ppm으로, 약 5배 농축되는 것으로 분석되었으며, 분리막 모듈 II는 13,680 ppm, 농축도는 약 2.4배를 나타내었다. 결론적으로 다단 투과에 의한 공급 VOCs의 최대 농축도는 약 12배 정도이며, 이때 VOCs 농도는 약 13,680ppm으로 분석되었다.

Fig. 8은 운전시간 경과에 따른 분리막 모듈 I, II의 VOCs 회수율과 stage-cut 변화를 나타낸 것이다. Stage-cut 변화는 분리막 모듈 I의 공급 유량을 30 L/min으로 일정하게 유지한 상태에서 평가하였으며, stage-cut은 0.26에서 0.14로 감소하였다. 이로 인한 VOCs 회수율 또한 약 81%에서 78%로 감소하였다. 또한 분리막 모듈 II의 공급 VOCs는 분리막 모듈 I의 투과 VOCs로, 분리막 모듈 II의 공급 유량이 감소하여 stage-cut이 0.23에서 0.42로 증가하는 경향을 나타내었고, VOCs 회수율은 약 75%에서 96%로 증가하였다. 결과적으로 다단 투과 실험결과, stage-cut 0.06에서 VOCs 최대 회수율은 75.8%로 나타났다.

Table 3은 분리막 모듈 I의 공급, 투과, 배출지점과 분리막 모듈 II의 투과, 배출지점의 VOCs를 120분 경과 후, 샘플링 하여 분석한 결과이다. 분리막 모듈 I의 공급 VOCs 중의 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 농도는 각각 88.9, 2.9, 22.4 ppm으로, 총 농도는 114.2 ppm인 것으로

Table 3. Permeation Properties of Hollow Fiber Membrane Modules with Various VOCs Components with Different Stage Process

Stage 1 (Stage cut : 0.15)	Benzene	Toluene	Xylene	Total
Feed conc. (ppm)	88.9	2.90	22.40	114.20
Permeate conc. (ppm)	505.79	10.08	96.39	612.26
Retentate conc. (ppm)	13.4	1.60	9.00	24.00
Concentration ratio	5.69	3.48	4.30	5.36
Recovery efficiency (%)	87.24	53.29	65.98	82.21
Stage 2 (Stage cut : 0.39)	Benzene	Toluene	Xylene	Total
Feed conc. (ppm)	505.79	10.08	96.39	612.26
Permeate conc. (ppm)	1,259.44	14.87	227.20	1501.51
Retentate conc. (ppm)	21.3	7.00	12.30	40.60
Concentration ratio	2.49	1.48	2.36	2.45
Recovery efficiency (%)	97.44	57.72	92.23	95.96
Stage 1 + 2 (Stage cut : 0.06)	Benzene	Toluene	Xylene	Total
Feed conc. (ppm)	88.9	2.90	22.40	114.20
Permeate conc. (ppm)	1259.44	14.87	227.20	1501.51
Concentration ratio	14.17	5.13	10.14	13.15
Recovery efficiency (%)	85	30.76	60.86	78.89

나타났다. 이때 분리막 모듈 I의 투과 농도는 612.2 ppm으로 약 5.4배 농축되었고, VOCs 회수율은 82.21%이었다. 분리막 모듈 II의 투과 농도는 1,501.5 ppm으로 약 2.45배 농축되고, VOCs 회수율은 약 96%인 것으로 확인되었다. 결과적으로 다단 투과에 의한 현장 VOCs 투과 특성은 stage-cut 0.06에서 초기 농도 114.2 ppm에서 1,501.5 ppm으로 약 13배 농축되었으며, VOCs 회수율은 최종 79%인 것으로 확인할 수 있었다.

4. 결 론

유기화합물의 회수를 위하여 분리막 모듈을 이용한 시스템을 자체적으로 구성하였으며 실제 현장에 적용가능성의 확인 및 효율을 올릴 수 있는 방안을 모색하고자 도장공장에서 실제 발생하는 VOCs에 대한 농축도와 회수율 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 분리막을 통하여 투과된 VOCs의 농도는 구동 시간이 흐름에 따라 최고 농도에 도달한 후 막 표면의 오염으로 인해 감소되었다.

2) 분리막 공정의 공급압력을 증가시킬 경우 공급물과 투과물의 농도 및 회수율이 증가되는 경향을 나타내었지만 농축비의 변화에는 큰 영향을 미치지 않았다.

3) 공정 후 포집된 가스는 벤젠, 톨루엔, 자일렌 3종이었으며 공급압력이 증가될 경우 투과가스의 농축비 변화는 거의 없으나 회수율이 상당량 증가되었다.

4) 다단공정으로 시스템을 구성할 시 공급 VOCs의 최대 응축도는 약 12배 정도로 단일공정보다 향상되었으며 stage-cut 0.06에서 최대 회수율은 약 76%를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. C. K. Yeom, S. H. Lee, J. H. Choi, and J. M. Lee, "Evaluation of Concentration Polarization at Feed in the Permeation of VOCs/N₂ Mixture through PDMS Membrane", *Membrane Journal*, **11**, 2 (2001).
2. S. H. Lee, C. K. Yeom, H. Y. Song, and J. M. Lee, "Influence of Concentration Polarization Phenomenon on the Vapor Permeation Behavior of

- VOCs/N₂ Mixture through PDMS Membrane”, *Membrane Journal*, **11**, 1 (2001).
3. S. J. Kim, C. S. ee, H. C. Koh, S. Y. Ha, S. Y. Nam, J. W. Rhim, and W. M. Choi, “Solvent Resistance and Gas Permeation Property of PEI-PDMS Hollow Fiber Composite Membrane for Separation and Recovery of VOCs”, *Membrane Journal*, **22**, 1 (2012).
 4. R. W. Baker, J. Kaschemekat, and J. G. Wijmans, “Membrane Systems for Profitable VOC Recovery”, *Chemtech*, **26**, 7 (1996).
 5. F. I. Khan and A. Kr Ghoshal, “Removal of Volatile Organic Compounds from Polluted Air”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **13**, 6 (2000).
 6. T. K. Poddar and K. K. Sirkar, “A Hybrid of Vapor Permeation and Membrane-based Absorption-Stripping for VOC Removal and Recovery from Gaseous Emissions”, *J. Membr. Sci.*, **132**, 2 (1997).
 7. S. I. Noh, S. B. Lee, K. M. Cho, Y. M. Lee, and J. K. Shim, “Removal of Polluants using Amphiphilic Polymer Nanoparticles in Micellar-Enhanced Ultrafiltration”, *Membrane Journal*, **1**, 59 (2006).
 8. S. Deng, K. Lang, J. Wang, A. Tremblay, and T. Matsuura, “Membrane for the Removal of Volatile Organic Compounds from Air”, *Membrane Journal*, **7**, 22 (1997).
 9. J. S. Cha, “Removal/Recovery of VOCs using a Rubbery Polymeric Membrane”, *Membrane Journal*, **6**, 173 (1996).
 10. S. Y. Nam, Y. J. Kim, S. W. Cheon, and J. W. Rhim, “Removal of VOCs from Water by Vapor Permeation through PU/PDMS Membrane”, *Membrane Journal*, **14**, 157 (2004).
 11. S. W. Cheon, T. I. Yun, H. S. Shin, B. A. Kim, R. I. Chung, and J. W. Rhim, “Removal of Volatile Organic Compounds from Water using PU/PDMS-PTFE Composite Membrane by Vapor Permeation Separation Process”, *Membrane Journal*, **15**, 44 (2005).
 12. L. Gales, A. Mendes, and C. Costa, “Removal of Acetone, Ethyl Acetate and Ethanol Vapors from Air Using a Hollow Fiber PDMS Membrane Module”, *J. Membr. Sci.*, **197**, 211 (2002).
 13. T. K. Poddar, S. Majumdar, and K. K. Sirkar, “Membrane-Based Absorption of VOCs from a Gas Stream”, *AIChE J.*, **42**, 3267 (1996).
 14. S. Liu, W. K. Teo, X. Tan, and K. Li, “Preparation of PDMS^{vi}-Al₂O₃ Composite Hollow Fibre Membranes for VOC Recovery from Waste Gas Streams”, *Sep. Purif. Technol.*, **46**, 110 (2005).
 15. L. Zhang, H. X. Weng, C. J. Gao, and H. L. Chen, “Remove Volatile Organic Compounds (VOCs) with Membrane Separation Techniques”, *J. Environ. Sci. Eng.*, **14**, 181 (2002).
 16. X. Wang, R. Daniels, and R. W. Baker, “Recovery of VOCs from High-Volume, Low-VOC-Concentration Air Streams”, *AIChE J.*, **47**, 1094 (2001).