

5. 기체 분리막 공정과 환경

(박현채, 강용수 박사, KIST)

기체 분리막 공정과 환경

한국과학기술연구원

고분자연구부

박현재, 강용수

1. 서론

환경오염은 인간이 지구상에서 산업활동을 시작한 이래 계속되어 오고 있는 문제인데, 최근에 들어서 전세계적으로 산업화가 가속되고 또한 인구의 급격한 증가로 인하여 매우 심각한 국면을 맞이하고 있다. 환경오염은 원재료를 가공하여 인간의 일상생활에 필요한 물품을 생산하는 전 산업 영역에서 발생하고 있는데 이러한 환경오염은 토양오염, 수질오염, 대기오염의 세 가지로 분류할 수 있다. 이중 대기오염은 산성비, smog, 지구온난화, 오존층의 파괴 등의 부작용을 유발하여 인류의 생존에 중대한 위협을 야기하고 있는데, 대기오염을 야기시키는 대표적인 물질은 SO_x, NO_x 등의 산성가스, CO₂, 휘발성 유기물질 등이다. 한 예로 이러한 오염 물질들이 지구온난화에 미치는 영향을 표 1에 나타내었는데, 현재 심각한 상태에 이른 지구온난화는 화석연료를 태울 때 발생하는 CO₂에 의해 주도되고 있지만 천연가스나 쓰레기 매립장 등에서 발생하는 biogas로부터 방출되는 CH₄ 가스 등도 그에 못지 않게 문제가 되고 있다.

오늘날의 심각한 환경오염은 환경기술이라는 신조어를 만들게 되었는데, 이는 환경오염을 적게 유발시키는 생산공정을 의미하는 저오염 생산기술(clean technology)과 생성된 오염 물질을 분리·회수하는 오염물질 처리기술(cleaning technology)로 대별할 수 있다. 저오염 생산기술은 자동차의 전착공정 등에서 보듯이 오염물질을 최소한도로 배출하게 설계한 'zero discharge' 개념의 생산공정 등에서 실용화되고 있는데, 최근에는 에너지 효율을 향상시켜 궁극적으로 CO₂의 발생을 억제하려는 시도도 많은 관심을 끌고 있다. 하지만 환경기술이라고 부르는 경우 거의 대부분은 생성된 오염 물질을 처리하는 오염물질 처리기술을 의미한다.

표 1. Contribution of various gases to the greenhouse effect [1]

component	effect	concentration*
CO ₂	1	56
CH ₄	32	25
CFC	~15000	8
O ₃	2000	9
NO	150	2

* concentration relative to the polluting components, i.e. nitrogen and oxygen are excluded.

현재 매우 다양한 오염물질 처리기술이 개발되어 오염물질 처리에 사용되고 있다. 이러한 기술들을 이용하여 특정 오염물질을 처리할 경우 경제성 및 기술적 적합성 등의 제반 여건을 고려하여 가장 적합한 방법을 결정하게 된다. 하지만 그 어떤 경우라도 적용되는 원칙은 오염물질이 발생하는 장소에서 on-site로 처리해야 한다는 것이다. 이는 미국의 'Pollution Prevention Act'에서와 같이 환경보호를 위하여 강제 조항화되고 있을 뿐 아니라, 오염물질의 처리비용이 일반적으로 오염물질의 농도에 반비례하여 기하 급수적으로 증가하기 때문이다. 한 예로 유류저장탱크 등의 off-gas 중에는 상당히 고농도의 휘발성 유기물질이 함유되어 있는데, 이는 막분리기술, 흡착, 또는 응축 등의 방법을 이용하여 회수할 수 있다. 하지만 off-gas의 휘발성 유기물질이 일단 공기 중으로 방출되면 농도가 매우 낮아지며 또한 처리해야하는 대기의 양이 급격히 증가하여 처리가 거의 불가능하여 진다.

2. 막분리 기술에 의한 대기환경 개선

대기오염을 유발하는 오염물질을 처리하기 위하여 막분리 기술 등의 다양한 기술들이 개발되어 사용되고 있다. 이중 막분리 기술은 비교적 최근에 개발된 기술인데 고유의 장점들로 하여 환경기술로서 각광을 받기 시작하고 있다.

일반적으로 막분리 기술은 다른 분리기술에 비해 에너지 소비가 적으며, 제3의 첨가물을 사용하지 않으므로 이차오염을 야기하지 않고, 또한 연속공정이며 운전이 간편하다는 장점이 있다. 그리고 modular system으로 up-scaling이 용이하며 다른 분리기술과 혼합하여 사용하기 쉽다는 장점도 있다. 막분리 기술이 에너지 소비가 적다는 장점은 여타 다른 회수기술과 비교해 볼 때 명확하여 진다. 예를 들면 응축공정에 의해 대기중의 휘발성 유기용매를 회수할 경우 유기용매를 함유하고 있는 전체 대기를 유기용매의 액화온도 이하로 냉각하여야 하지만, 막분리 기술의 경우 분리막에 의해 분리된 유기용매만 응축하므로 냉각에 필요한 에너지의 양이 훨씬 작아지게 된다.

막분리 기술은 대기환경 개선을 위하여 환경오염을 적게 유발시키는 저오염 생산기술(clean technology)과 생성된 오염 물질을 분리, 회수하는 오염물질 처리기술(cleaning technology)에 모두 사용될 수 있는데, 전자의 경우 기체분리막을 이용하여 산소 농축 공기를 제조하고 이를 보일러, 자동차 엔진 등에 조연제로 사용함으로써 에너지 효율을 향상시키고 그 결과 에너지 소비를 줄여 CO₂, NO_x, SO_x 등의 방출을 감소시켜 환경보호 효과를 이룰 수 있다. 하지만 현재 막분리 기술이 환경기술로서 각광을 받고 있는 것은 오염물질 처리기술로서 경제적이며 기술적 장점이 많다는 이유에서이다. 대기오염을 유발시키는 오염물질들과 이를 처리하기 위하여 사용될 수 있는 막분리 기술들을 표 2에 나타내었다.

연소가스 중의 CO₂ 분리는 온실가스 방출을 제거하므로써 지구온난화를 억제하기 위한 세계기후변화협약 발효에 따른 이산화탄소 방출규제 강화 때문에 전세계적으로 심각한 문제로 떠오르고 있으며, 추출법, PSA (pressure swing adsorption)법 및 분리막법 등의 여러 가지 분리방법이

검토되고 있다. 이중 분리막 기술은 앞서 언급한 것과 같은 장점들로 하여 가능성이 매우 높은 것으로 받아들여지고 있으며, 따라서 미국, 유럽, 일본 등의 선진국에서 활발히 연구되고 있다. 특히 일본에서는 1990년부터 10년간 통산성 주관 하에 이산화탄소의 화학적 고정화기술 개발에 관한 연구가 계속되고 있는데, 이산화탄소 분리용 분리막 개발에 큰 기대를 갖고 있다. 쓰레기 매립장에 나오는 방출가스는 주로 메탄과 CO₂로 이루어져 있는데 표 1에서 보듯이 양자 모두 지구온난화에 중대한 위해가 되고 있다. 따라서 이들을 처리하여야만 하는데, 이 경우는 유용한 자원인 메탄가스의 회수 및 재사용이라는 측면에서도 많은 연구가 되고 있다 [12, 13]. 이와 같이 다양한 분야에서 분리막 기술이 대기환경 개선을 위하여 사용될 수 있지만, 오늘날 가장 많은 관심을 끌고 있으며 또한 그 결과 상용화 단계에 들어선 분야는 대기중의 휘발성 유기물질을 분리·회수하는 분야이다.

표 2. Membrane processes for air pollution control [2-14].

pollutant	membrane process
Organic vapors (CFC's, aromatics)	vapor permeation
CO ₂ , SO ₂ , NO _x (combustion products)	gas separation, carrier membranes, membrane contractors
NH ₃ (agriculture)	gas separation, carrier membranes, membrane contractors
H ₂ S (natural gas)	gas separation, carrier membranes, membrane contractors, membrane reactors
CH ₄ , CO ₂ (biogas)	gas separation

3. 대기중의 휘발성 유기물질의 분리.회수

3.1. 휘발성 유기물질의 배출 및 폐해

대기 중에 존재하는 휘발성 유기물질(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 자동차 배기가스 등으로부터 배출되는 NO_x, SO_x 등과 함께 심각한 환경오염 문제를 야기시키고 있다. Benzene, toluene 등의 방향족 화합물, CFC 등의 halogenated hydrocarbon류, 알콜류, ketone류 등이 대표적인 오염 유발 유기용매들인데, 이들은 호흡기를 통해 인체에 유입되어 암 등을 유발시키기도 하며, 대기 중에서 태양 빛에 의한 광화학반응을 통해 스모그를 형성하기도 한다. 또한 이들이 다량 발생하는 화학공장 등에서는 직업병의 원인이 되기도 한다.

휘발성 유기물질의 배출은 용매 및 세정제를 사용하는 산업체에서 광범위하게 이루어지고 있는데, 그 중에서도 제약, 도장, 유기화합물 제조공정 및 플라스틱 관련공정 등에서 매우 많은 양의 휘발성 유기물질이 배출되고 있다. 최근에는 반도체 세정공정, 냉장고 등의 냉매로부터 배출되는 CFC 등의 halogenated hydrocarbon가 심각한 문제로 대두되고 있다. 이러한 halogenated hydrocarbon류는 오존층을 파괴하여 인류의 생존에 심각한 위해가 되고 있어 전세계적으로 생산 및 사용이 규제되기 시작하였다. 산업체에서의 배출 이외에도 일상생활과 밀접한 장소인 세탁소 등에서의 유기물질의 배출 또한 심각한 대기오염의 원인이 되고 있다. 대표적인 예로 화학약품을 사용하는 세탁장에서 나오는 perchloroethylene(속칭 Perc)는 치명적인 암유발 물질로서 일반 대중의 건강에 엄청난 위해가 되고 있다.

현재 국내에서는 대기 중으로 방출되고 있는 휘발성 유기물질의 방출량에 대한 통계자료가 미비하여 정확한 실상을 파악하기가 매우 어렵다. 하지만 미국의 자료로부터 추정해 볼 때 국내에서도 엄청난 양의 휘발성 유기물질이 대기 중으로 방출되고 있을 것으로 사려된다. 미국의 경우 1975년도에 연간 3천만톤이 넘는 휘발성 유기물질이 대기 중으로 방출되었다고 한다 [4]. 따라서 현재 국내의 유기물질 방출량을 1975년도 미국에서의 방출량의 10%라 추정할 경우 연간 3백만톤 이상의 유기물질

이 대기 중으로 방출되고 있음을 알 수 있다. 이는 매우 심각한 대기오염의 원인이 되며, 또한 석유관련 자원을 전량 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 엄청난 자원의 손실이다. 또한 CFC 등의 사용 규제는 오늘날 우리나라의 주 산업으로 떠오르고 있는 반도체 산업의 성장에 큰 장애 요인으로 작용하고 있다. 따라서 이들을 회수하여 재사용하려는 연구가 필요하다.

오늘날 전세계적으로 휘발성 유기물질의 위해에 대한 인식이 높아지고 있으며 그 결과 휘발성 유기물질의 배출에 매우 엄격한 제한을 가하고 있다. 미국의 경우 1963년에 제정된 'Clean Air Act' 법을 근간으로 하여 대기오염을 규제하고 있는데 특히 1990년에 제정된 동법의 수정조항은 매우 엄격한 제한을 가하고 있다 [15]. 독일에서도 휘발성 유기물질의 배출에 대해 이와 유사한 법적 규제가 가해지고 있는데 'Bundes-immissionsschutzgesetz'법과 그 실제 실천규약인 'TA-Luft'에 의해 규제하고 있다 [16]. 특히 최근에 개정된 TA-Luft에는 매우 엄격한 대기오염방지 관련 조항을 담고 있다. 이 이외에도 여타 다른 선진국에서도 휘발성 유기물질의 배출에 대한 유사한 법적 규제를 가하고 있으며 이들을 중심으로 국제적인 규제를 가하려고 하고 있다. 우리나라에서도 휘발성 유기물질의 배출을 규제하고 있으나 주로 고체폐기물, 폐액, 폐수 등의 가시적인 폐기물에 집중되어 있다. 가스상 물질의 경우에 있어서도 보일러 등에서 배출되는 연소가스 중의 NO_x, SO_x 등이 관심의 대상이 되고 있을 뿐 휘발성 유기물질에 의한 대기오염에 대한 관심은 미미한 상태이다 [17, 18]. 하지만 점점 심각해지고 있는 환경오염과 보다 나은 생활환경에 대한 점증하는 국민들의 욕구에 의해 곧 규제가 가해지리라 예견된다. 또한 다가오는 'Green Round'에 대비하기 위하여서도 이러한 규제가 필요할 것이다.

3.2. 휘발성 유기물질의 처리

오늘날 대기 중에 존재하는 휘발성 유기물질을 처리하기 위하여 다양한 방법들이 개발되어 사용되고 있으며 또한 새로운 고효율 처리기술

에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 휘발성 유기물질 처리기술은 크게 소각, 분해기술과 회수기술로 대별할 수 있다. 대표적인 소각, 분해기술로서는 Thermal Incineration, 촉매소각, Biofiltration 등이 있으며, 회수기술로서는 응축, 용매추출, 활성탄 흡착, 막분리 기술 등이 있다. 이러한 기술들은 각기 장단점이 있어 실제 적용시 제반 여건을 감안하여 가장 적절한 처리 방법을 선택하게 되는데, 대기 중에 존재하는 휘발성 유기물질의 농도가 일차적인 기준이다. 휘발성 유기물질의 농도에 따른 사용 가능한 처리법들을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 대기중의 휘발성 유기물질의 농도가 높을 경우에는 응축, 열소각, 막분리 기술 등이 유리하며, 반대로 농도가 낮을 경우에는 흡착, Biofiltration 등의 처리법이 유리하다.

휘발성 유기물질 처리에 있어 상기의 방법들은 앞서 언급한 바와 같이 각기 장단점이 있어 단순비교 하기는 곤란하며, 각각의 기술적 적합성 및 경제성 등을 종합 평가하여 처리기술을 선택하게 된다. 소각기술을 이용하여 대기중의 휘발성 유기물질을 처리할 경우 일반적으로 유기물질의 농도가 착화농도 이하이고 착화온도 또한 상당히 높으므로 보조연료를 사용하여 소각하여야만 한다. 특히 유기물질의 완전한 연소를 위하여서는 실제 소각로의 온도를 유기물질의 착화온도 보다 훨씬 높게 유지하여야 하므로 많은 양의 보조연료가 필요한데, 이들의 대부분은 대기중의 유기물질의 농도가 수% 이하임을 감안하면 단순히 유기물질을 함유하고 있는 대기를 소각로의 온도까지 가열하는데 소비되어 진다고 할 수 있다 [20]. 따라서 발전, 스팀 생산 등에 소각열을 이용하여야만 경제성을 확보 할 수 있으며, 이러한 소각열의 이용이 기술적으로 불가능한 경우, 예를 들면 근처에 발전 설비 등이 없는 유류저장소 등의 경우에는 경제성 면에서 상당한 문제가 있을 수 있다. 이러한 경제적 측면 이외에도 유기물질 중에 질소, 황 등이 존재할 경우 소각 후 NO_x, SO_x 등의 이차오염물질이 생성되는데 이러한 이차오염물질에 의한 대기오염의 문제 및 이를 해결하기 위한 이차처리가 큰 문제로 대두되고 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 특히 처리하고자 하는 유기물질이 benzene, toluene 등의 비교적 고가의 유기용매일 경우 유용한 유기물질의 손실이라는 측면에서 단점으로 지적되고 있다.

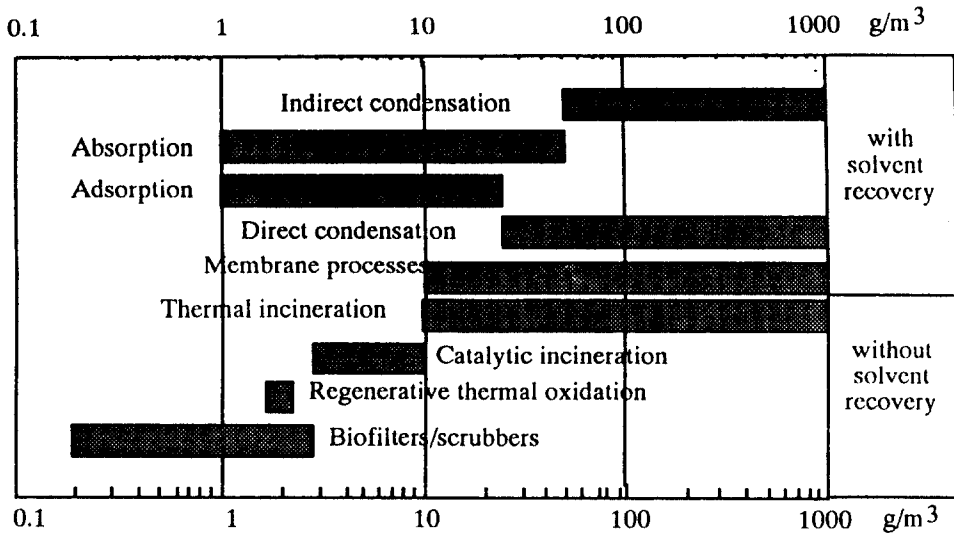


그림 1. Separation processes to treat solvent loaded air streams [19]

3.3. 막분리 기술

회수기술은 소각기술에 비해 대기오염방지 뿐 아니라 유용한 자원인 유기물질의 재활용이라는 측면에서 큰 장점이 있으며, 또한 이차오염문제를 야기시키지도 않는다. 따라서 대기중의 유기물질 처리에 많이 활용이 되고 있는데, 특히 처리하고자 하는 대기중의 유기물질이 단일 성분일 경우 경제성이 매우 높다.

현재 회수기술로서 응축공정, 흡착공정 등이 많이 사용되고 있는데, 최근 들어 막분리 기술에 대한 관심이 급증하고 있다. 막분리 기술의 장점은 다른 흡수기술에 비해 에너지 소비가 적다는 점이다. 예를 들면 응축공정에 의해 휘발성 유기용매를 회수할 경우 유기용매를 함유하고 있는 전체 대기를 유기용매의 액화온도 이하로 냉각하여야 하지만, 막분리 기술의 경우 분리막에 의해 분리된 유기용매만 응축하므로 냉각에 필요한 에너지의 양이 훨씬 작아지게 된다.

활성탄 등을 이용한 흡착 회수공정의 경우 흡착된 유기용매를 고온의 수증기 등을 이용하여 흡착제로부터 탈착한 뒤 다시 응축 등의 이차

처리가 필요하며, 따라서 회수비용의 증가 및 공정상의 복잡성 등의 문제가 야기된다. 그러나 막분리 기술의 경우에는 이러한 이차처리가 불필요하므로 공정이 간단하여 지고 따라서 조작 또한 간편하여 진다.

막분리 기술을 이용한 유기물질 회수 공정을 그림 2에 도식적으로 나타내었다. 이 공정은 코팅공정과 이에 이어지는 건조공정 등의 생산공정에서의 전형적인 예로서 유기물질을 함유하고 있는 뜨거운 공기는 분리막 모듈을 통과하면서 정제되어 건조공정에 재사용되어 진다. 이 경우 유기물질을 회수하기 위하여 냉각 등을 행하지 않아도 되므로 공기뿐만 아니라 열, 즉 에너지도 재사용되어 진다. 그리고 분리.회수되어진 유기물질도 코팅공정에 재사용된다.

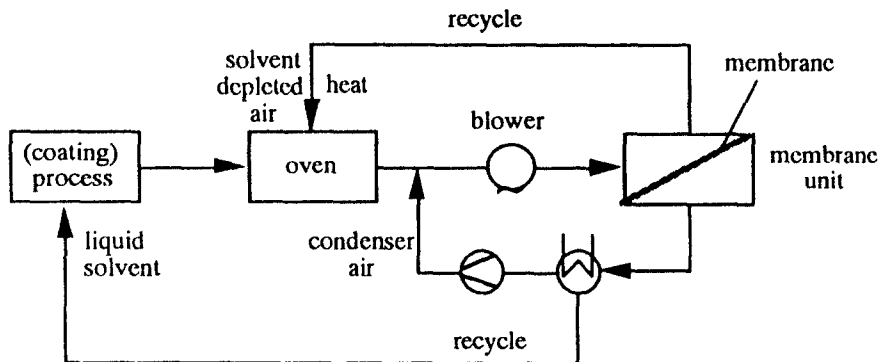


그림 2. Schematic drawing of a vapor separation unit in which both solvent and heat are recovered [2].

이러한 에너지 절약 및 저오염 생산기술(clean technology)에의 폭넓은 응용 가능성 때문에 선진 제국에서는 막분리 기술을 이용한 대기 중에 존재하는 휘발성 유기용매의 분리.회수에 대한 연구개발이 상당히 많이 진행되고 있다. 일 예로 미국의 경우 Membrane Technology & Research Inc.에서 Department of Energy (DOE)의 지원 하에 1982년도

부터 이에 대한 연구를 시작하였으며 현재 상용화 단계에 있다 [2-4]. 유럽의 경우에도 독일의 GKSS에서 상용화에 성공하였으며 [5, 21], 이외에도 독일의 RWTH, 화란의 TNO 등에서 매우 활발한 연구개발을 진행하고 있다.

국내에서는 아직까지 막분리 기술에 의한 대기중의 휘발성 유기용매의 분리회수에 관한 연구가 전혀 없는 실정으로 대기오염방지 및 자원재활용의 측면에서 여기에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

4. 휘발성 유기물질 처리용 막분리 공정

상용화된 휘발성 유기물질 처리용 막분리 공정에 사용되는 분리막은 거의 대부분이 실리콘, 즉 poly(dimethyl siloxane)(PDMS)로 만들어지고 있는데, 이는 고무상의 PDMS가 유기물질에 대하여 매우 높은 투과도를 보일 뿐만 아니라 공기에 대한 상대적인 투과도, 즉 선택도 또한 상당히 높을 값을 보이기 때문이다. 그림 3에 PDMS로 이루어진 분리막의 유기물질의 질소, 즉 공기에 대한 선택도를 나타내었다 [21]. 그림에서 알 수 있듯이 대부분의 유기물질은 PDMS로 이루어진 분리막을 공기보다 수십 배 빨리 통과한다.

분리막을 이용하여 휘발성 유기물질을 처리하는 막분리 공정의 경우 분리막의 투과도와 선택도가 일차적인 고려 사항이지만, 실제 공정의 설계에 있어서는 대기중의 유기물질의 농도, feed와 permeate의 압력, 온도 등도 필수적으로 고려되어야 한다. 이러한 요소들을 고려하여 이루어지는 공정설계의 개념도를 그림 4에 나타내었다 [21]. 이러한 개념 하에 GKSS에서 설계, 제작되어 유럽 내에서 20여 곳에서 사용되고 있는 막분리 공정들을 예로 들어 막분리 기술이 이용되고 있는 대기중의 유기용매 회수, 분리 공정을 간략히 소개하고자 한다.

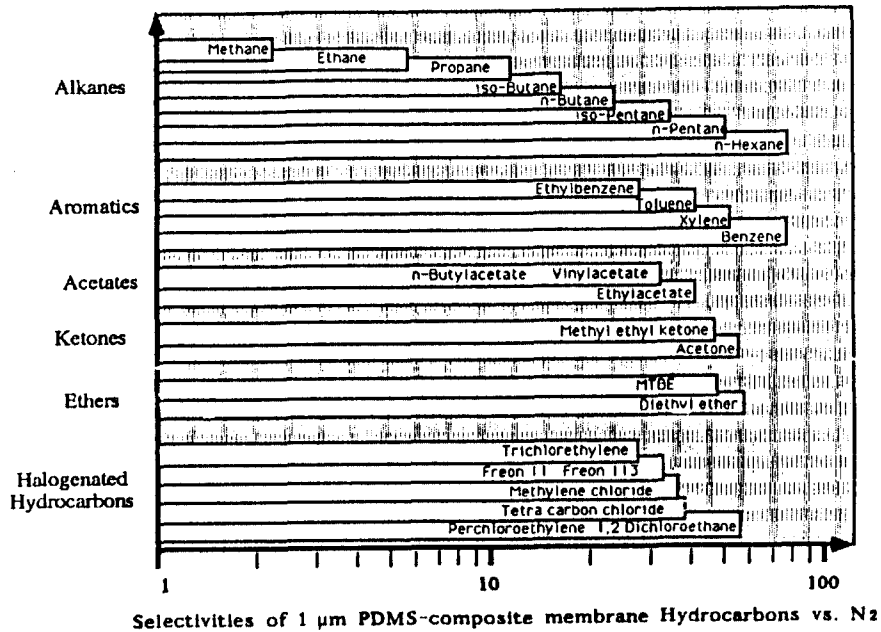


그림 3. PDMS-membrane selectivity of organic vapor vs. nitrogen

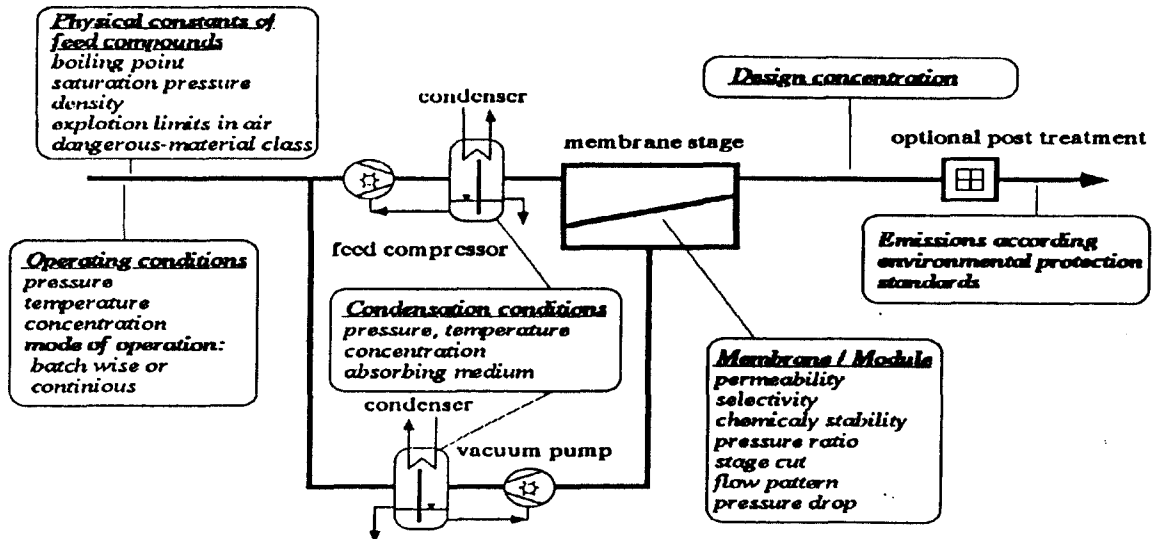


그림 4. Design criteria for membrane system

4.1. VTG tank farm München-Milbertshofen

그림 5에 독일 VTG사의 원유 저장소에서 나오는 off-gas내의 휘발성 유기물질 처리용으로 설치되어 1989년부터 사용되어 지고 있는 VRU(vapor recovery unit)장치를 나타내었는데, 독일에 설치된 최초의 휘발성 유기물질 처리용 막분리 장치이다. 20% 이상의 유기물질을 함유하고 있는 off-gas를 막분리 장치를 통과시켜 대부분의 유기물질을 회수한다. 막분리 장치에서 유기물질이 제거된 off-gas에는 미량의 유기물질($10\text{-}20\text{g/m}^3$)이 남아 있는데 이는 촉매소각장치(catalytic incinerator)에서 소각한다. VTG사의 Duisburg 소재 원유 저장소에 같은 설비가 사용되고 있는데, 현재 이 장치에서는 off-gas에는 남아 있는 미량의 유기물질 제거용으로 촉매소각장치 대신 gas engine을 사용하기 위한 작업을 하고 있다.

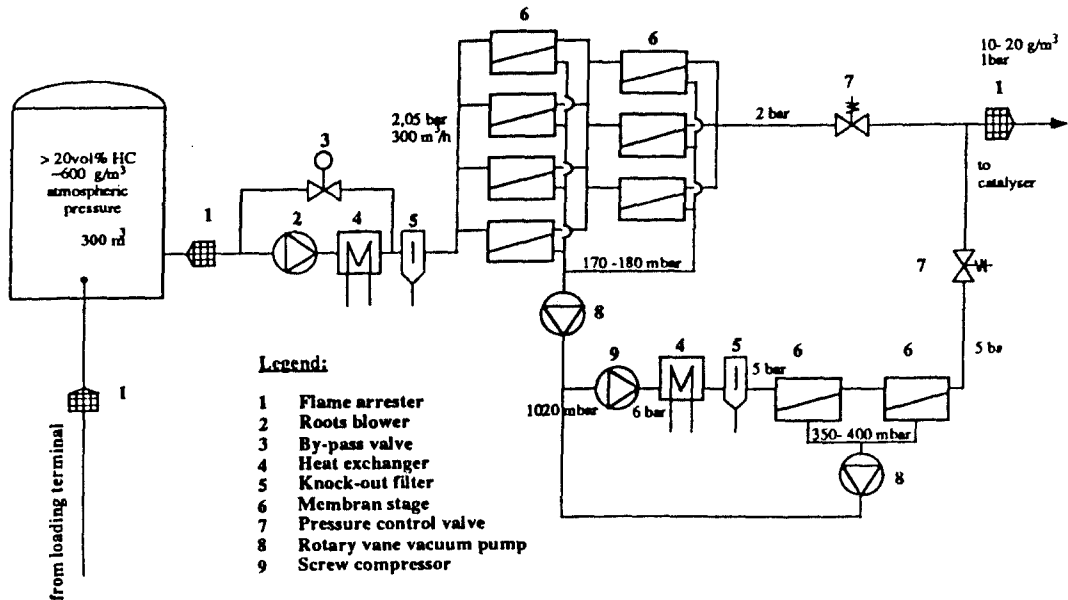


그림 5. Flow scheme VRU VTG München-Milbertshofen

4.2. Membrane process with integrated pressure swing adsorption

이 설비는 분리막 공정에서 off-gas중의 유기용매의 대부분을 회수하고, 남아 있는 미량의 유기물질 제거용으로 pressure swing adsorption (PSA) 장치를 사용하고 있는 hybrid 공정이다.

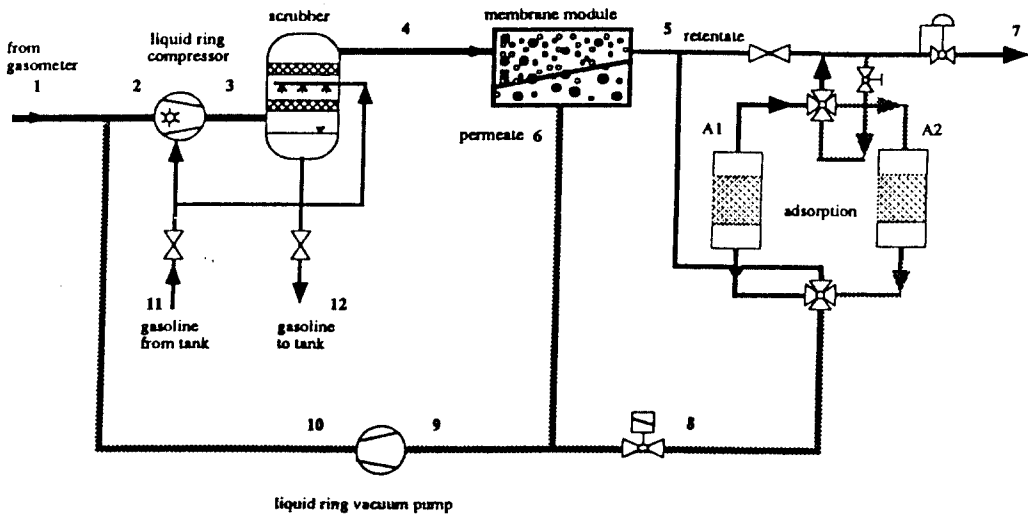


그림 6. Membrane stage with integrated pressure swing adsorption

4.3. Vapor return system at gas stations

미국이나 독일 등에서 시행중인 'Clean Air Regulations'에는 주유소에서 자동차에 연료를 채울 때 대기 중으로 방출되는 가솔린을 모두 회수하도록 의무화하고 있다. 따라서 상기 국가를 위시한 선진국에서는 방출되는 가솔린을 회수할 수 있는 주유기가 널리 보급되어 사용되기 시작하고 있다. 초기에 'balance system' 방식 및 'open vacuum assisted system' 방식의 가솔린 회수장비가 개발되었는데, 전자는 문제점이 많아 사용되지 못하고 후자가 보급되어 사용되기 시작하고 있다. 하지만

'open vacuum assisted system' 방식의 가솔린 회수장비의 경우 기술적인 한계가 있어 가솔린 회수율이 68 ~ 74% 정도이다. 따라서 가솔린을 완전히 회수할 수는 없다. 이를 보완하기 위하여 분리막을 이용한 새로운 가솔린 회수장비가 개발되어 시험 사용되고 있다 (그림 7). 분리막 가솔린 회수장비는 1993년 1월 독일의 Lübeck의 한 주유소에 설치되어 시험 사용되고 있는데, 현재까지의 시험결과 90 ~ 95%의 가솔린 회수율을 보여 주고 있다. 또한 이 장비는 1년 동안 아무런 정비 없이 연속적으로 사용되고 있는데, 이는 주유소에 전문인력이 배치될 수 없음을 감안하면 운전상의 큰 장점이 될 수 있다.

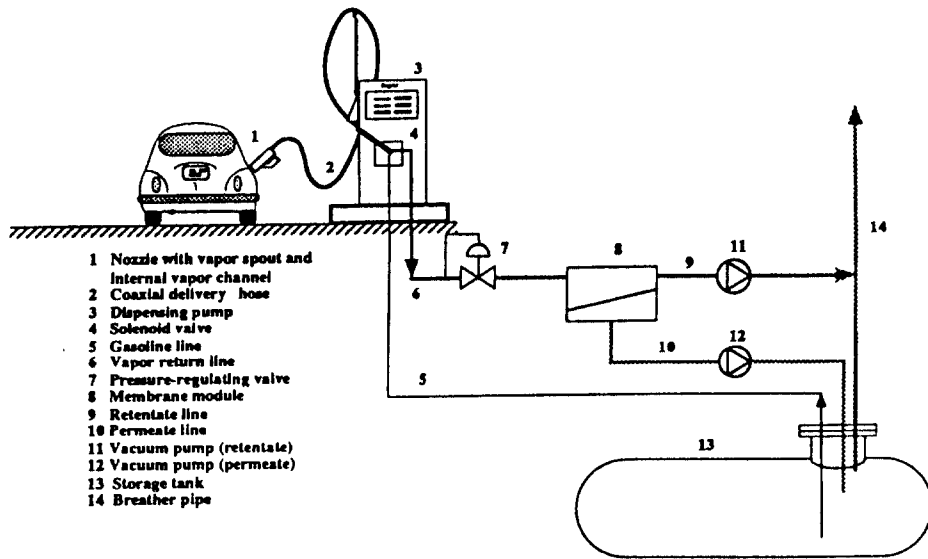


그림 7. Flow scheme of vapor return systems with integrated membrane module

4.4. End of pipe installations in the chemical and pharmaceutical industry

화학 또는 제약 공장 등에서 toluene, 1,2-dichloroethane, methyl ethyl ketone 등의 유기용제를 회수하기 위한 소규모의 분리막 설비가 많이 사용되고 있다. 그림 8에 이러한 설비의 전형적인 예인 1,2-dichloroethane 회수용 막분리 설비를 나타내었다. 1,2-Dichloroethane는 최종적으로 소각에 의해 완전히 처리되는데, 소각로로 들어가는 기체중의 1,2-dichloroethane의 농도는 5 mg/m^3 이하로 유지되어야 한다. 일반적으로 생산공정에서 나오는 기체혼합물에는 1,2-dichloroethane이 약 80 mg/m^3 정도의 고농도로 함유되어 있고, 또한 수증기에 의해 포화되어 있으므로 응축법으로는 1,2-dichloroethane를 원하는 농도 이하로 제거할 수가 없다. 따라서 이러한 공정에서 막분리 설비를 많이 사용하고 있다.

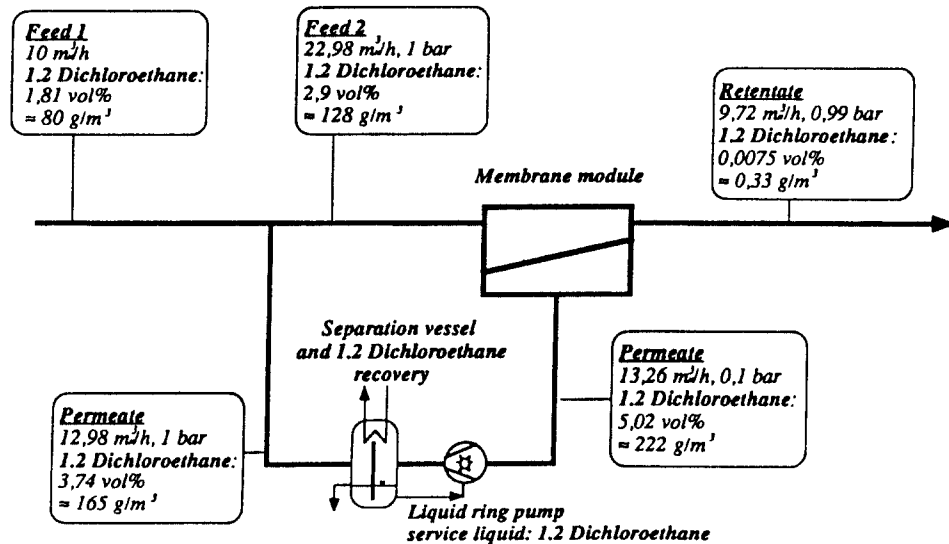


그림 8. Process data of 1,2-dichloroethane recovery

5. 결론

분리막 기술은 최근에 개발된 분리기술로서 그 역사는 짧지만 환경 기술로서 큰 장점을 가지고 있어 오늘날 많은 분야에서 응용이 급격히 확대되고 있다. 대기중의 휘발성 유기물질을 분리·회수하는 분야에서도 기체분리막 기술의 사용이 환경기술로서 큰 기대를 모으고 있으며, 일부 분야에서는 이미 상용화되어 사용되고 있다. 이는 분리막 기술이 본질적으로 에너지 저소비 기술이며 또한 회수 기술로서 환경보호 뿐만 아니라 자원의 재활용이 가능하기 때문이다. 현재 많은 분야에서 분리막 기술을 이용하여 대기중의 휘발성 유기물질을 분리·회수하려는 시도가 계속되고 있는데, 대규모 장치의 상용화를 위하여 필요한 현장시험 결과를 얻고 있는 단계이다.

참고문헌

1. R.E. Dickinson and R.J. Cicerone, *Nature*, 1986, p.109
2. R.W. Baker, K. Hibino, J.M. Mohr, and T. Kuroda, "Membrane research in solvent and energy recovery from industrial effluent streams", DOE Report, DE 85-014583 (1985)
3. H. Wijmans and V. Helm, "A membrane system for the separation and recovery of organic vapors from gas streams", *AIChE Symp. Ser. No. 272, Vol. 85* (1989) 74.
4. R.W. Baker, N. Yoshioka, J.M. Mohr, and A.J. Kahn, "Separation of organic vapors from air", *J. Membr. Sci.*, 31 (1987) 259.
5. R.D. Behling, K. Ohlrogge, K.V. Peinemann, and E. Kyburz, "The separation of hydrocarbons from waste vapor streams", *AIChE Symp. Ser. No. 272, Vol. 85* (1989) 68.
6. U. Sander and H. Jassen, "Industrial application of vapor permeation", *J. Membr. Sci.*, 61 (1991) 113.
7. H. Paul, C. Philipsen, F.J. Gerner, and H. Strathmann, "Removal of organics from air by selective membrane permeation", *J. Membr. Sci.*, 36 (1987) 368.
8. K. Kimmerle, C.M. Bell, W. Gudernatsch, and H. Chmiel, "Solvent recovery from air", *J. Membr. Sci.*, 36 (1987) 477.
9. Y.I. Dytnerskii, G.G. Kagramanov, I.P. Storozhuk, and N.F. Kovalenko, "SO₂ separation from gaseous mixtures by membranes", *J. Membr. Sci.*, 41 (1989) 49.
10. R. Klaassen, "SO₂ removal from flue gas with gas absorption membranes", *Proceedings of 'Large Chemical Plants', Oct. 12-14, 1992, Antwerp, Belgium*, p. 75.
11. P.H.M. Feron, A.E. Jansen, and R. Klaassen, "Membrane technology in carbon dioxide removal", *Energy Cons. Manag.*, 33 (1992) 421.
12. A. Sengupta, B. Raghuramann, and K.K. Sirkar, "Liquid

- membranes for flue gas desulfurization", J. Membr. Sci., 51 (1991) 105.
13. R. Rautenbach and K. Welsch, "Treatment of landfill gas by gas alternatives", Desalination, 90 (1992) 193.
 14. R. Rautenbach and H. Ehresmann, "Upgrading of landfill gas by membranes - Process design and cost evaluation", AIChE Symp. Ser. No. 272, Vol. 85 (1989) 48.
 15. E.C. Moretti and N. Makhopadhyay, Chem. Eng. Prog., 89 (1993) 20.
 16. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27 (1986)
 17. 손용권, 김형택, "국내외 에너지 환경연구 현황 분석", 한국 에너지기술연구소 보고서, KE-90(B)-9, 과학기술처 (1990).
 18. 손재익 등, "대기오염 저감기술 조사 분석 및 기술개발 계획", 한국 에너지기술연구소 보고서 (1990).
 19. M. Nitsche and V. Nitsche, Chemie Umwelt Technik, 19 (1990) 65.
 20. 이시훈, 손용권, "휘발성 유기물질의 처리기술", 화학공업과 기술, 12 (1994) 128.
 21. K.V. Peinemann and K. Ohlrogge, "Separation of organic vapors from air with membranes", in "Membrane processes in separation and purification", J.G. Crespo and K.W. Boddeker (Eds.), NATO ASI Ser.:E Vol. 272, Kluwer Academic Publishers (1994), p. 357-372.