

제목 : 탄소 기반 나노물질의 분리막 응용				
작성부서	1차분류	2차분류	자료 유형	① 연구보고서 ② 중장기연구계획서 ③ 연구 프로젝트 ④ 기타
건설환경연구실	상하수도 설계, 처리, 유지관리	상수도 설계, 처리, 유지관리		
작성자 : 황태문 수석연구원				
키워드 : CNT, Membrane				
<p>본 고는 미국 예일대학교의 MENACHEM ELIMELECH 교수가 2008년 Environmental Science & Technology 저널에 투고한 원고를 토대로 최근 이슈가 되고 있는 탄소나노튜브 소재의 분리막 응용에 관한 연구동향을 소개하고자 한다.</p> <p>재래식 삼투압(RO) 담수화막은 조밀한 고분자막 장벽을 통한 용해-확산율을 토대로 구성성분을 분리한다. 이러한 분리 메커니즘은 기본적으로 현행 막 설계의 엄격한 선별성과 투과 유량과 배치된다. 고분자 RO막은 지배적인 담수화 기술로 사용될 가능성이 높지만, 확산 기반 막 성능의 개선이 늘어날 것으로 예상된다. CNT 고유의 속성을 응용하여 만들어지는 분리막은 담수화에 소요되는 에너지와 비용을 크게 절감할 수 있다.</p> <p>정렬된 나노튜브가 불투과 지지 매트릭스에서 세공으로 사용되는 나노튜브 기반 여과막(그림 1)은 Jirage et al.에 의해 최초로 소개되었다. 유기 용질 2개의 혼합물을 이용한 분리 실험에서는 저분량 용질과 투과율이 높은 유량 유지를 위해 맞춤형 형태와 내부 직경이 균일한 황금 나노튜브를 선택했다. 입체적인 선별 막의 추가 개발은 화학 혹은 전하 기반 선별성을 이용한 입체 선택을 강화하기 위하여 CNT의 조정 가능 속성과 광범위한 기능화 경로를 활용하였다. 분리막 응용을 위한 세부 기술로는 세공 직경의 조정과 표면 소수성, 채널 게이팅을 위한 나노튜브 팁 기능화가 포함된다. 이와 같이 정렬되는 나노튜브막 고유의 대칭성 역시 정삼투나 압력 지연 삼투와 같은 신생 담수화 및 기타 삼투 촉진 막 기반 기술에서 재래식 비대칭 막의 실행을 저해한 내부 농도분극을 감소시킨다.</p> <p>최근 실험 연구를 통해 고유량 정렬 CNT 분리막의 정수처리 응용성은 여로 논문을 통해 입증되고 있다. Hinds et al.는 고분자 막 안에 MWNT를 배치하여 나노세공성 막 구조를 형성하였다. 그러나 이러한 초기 막에 보고된 넓은 내부 직경(>4nm)과 세공 크기 분포는 담수화를 위한 분리막 보다 한외여과에 적합하다. Holt et al.은 크기 선별성을 개선하는 한편 내부 직경이 2nm인 정렬 이중벽 CNT 막의 높은 질량 운반 속도를 유지하였다.</p> <p>정렬 CNT 막은 재래식 유체 유동 이론이 예측한 것보다 1,000-10,000배 이상 높은유량을 나타낸다. 이러한 고유량의 원인을 이해하기 위한 이론 연구 결과 나</p>				

노급 채널과 함께 CNT의 소수성과 부드러운 내벽이 물분자를 통과할 때 마찰력을 저하시키는 것으로 나타났다. CNT의 좁은 직경에 구속되는 물분자는 대용량에서는 볼 수 없는 분자 정렬과 상전이를 유도한다. 이러한 정렬은 물 분자의 수소결합을 강화하고 탄소 측벽의 비극 표면에서 물분자의 고리를 분리하는 증기상 장벽을 유도한다. 이전까지의 연구는 비습윤 고형-유체 접점은 Hagen-Poiseuille 방정식이 부과하는 년슬립 경계 조건을 위반한다고 증명했다. 슬립 길이의 연장은 벽체 효과를 완화하여 제한된 세공을 통한 신속한 유동이 가능하다. 제한된 경계 효과는 유체 점도나 나노튜브 세공의 길이와 같은 물리적 속성에 대한 유동 의존도도 완화한다. CNT에 계산된 슬립 길이의 특이한 연장은 소수성 및 원자 평탄과 직접 관계된다. 분자 역학 자극은 개별 CNT와 정렬 CNT 막을 통한 유동 속성에 대해 상세한 정보를 제공한다.

유량은 최종 공정과 나노튜브 채널 유입구 및 유출구의 물리적 장벽에 의해 결정된다. 소수성 기능군이 있는 CNT 팁의 산화나 화학적 변형은 물과 나노튜브의 결합 에너지를 제거하여 막 유량을 증가시킨다. 팁 기능화는 막 합성 과정에서 불가피하게 나노튜브 말단의 개방에 따라 진행되지만, 그로 인한 카르복실산 그룹은 다양한 화학작용 하에서 유도체화 될 수 있다. 대형 나노튜브 세공의 작용기 채널 게이팅은 CNT 막의 선별 용량을 세분화했다. Madjumder et al.은 나노튜브 팁의 작용기 길이와 구조를 변형하여 크기는 다르지만 하였다는 동일 et자를 분리하였다.

앞에서 언급한 분리막은 나노여과와 밀접한 관계가 있지만, 정렬 나노튜브 막에 관한 연구는 담수화와 관련된 농도의 염배제율을 증명하지 못했다. CNT 팁의 음전하 작용기는 전하(Donnan) 배제에 의해 염제거를 유발하지만, 이러한 메커니즘의 효율은 이온 강도나 이가 양이온 농도가 증가하면 크게 감소된다. 따라서 해수의 고이온 강도는 채널 게이팅 CNT 막에 대한 실용적인 분리 메커니즘인 전하 배제를 제거한다. 나트륨 이온의 수화 반경은 이온 강도나 pH, 수온을 비롯한 환경 조건에 따라 0.178부터 0.358까지 다양하다. 담수화를 달성하려면 나노미터급 이하 세공이나 입체 채널 게이팅을 이용한 SWNT 막 조립을 통하여 세공 크기 분포를 좁혀야 한다. CNT 막 설계의 후속 반복은 막 오손 작용과 막 모듈에 대한 스케일링, 막 조립 비용도 고려해야 한다. 정렬 CNT 막은 나노 및 마이크로 유체 시스템에도 사용될 수 있으며, 여기에서는 분석 분리나 랩온칩(laboratory-on-chip) 장치를 위해 소형 표본의 정밀한 취급이 중요하다. 정렬 CNT 막 전체에 전압이 적용될 경우, 나노튜브 팁은 전하를 띠지 않는 초소수성에서 전하 소수성으로 전환된다.

Gold nanotubule
(Jirage et al., 1997)

Macromolecular separation.

Bottle-neck tubule
(Jirage et al., 1997)

Narrow entrance, wide pore for increased flux.

Aligned MWNT membrane
(Hinds et al., 2004)

Oxidized nanotube tips for high-flux separation.

Functionalized MWNT membrane
(Majumder et al., 2005)

Macromolecular functionalization for tunable nanofiltration.

Aligned DWNT
(Holt, 2006)

Narrowed diameter for nanofiltration and potential brackish H₂O desalination.

Polarized and voltage-dependent wetting
(Wang et al., 2007)

Controllably wicks fluids for nanofluidics applications.

Next generation membranes:

Aligned SWNT

Desalination.

Functionalized SWNT

Functionalization for tailored selectivity and fouling resistance.

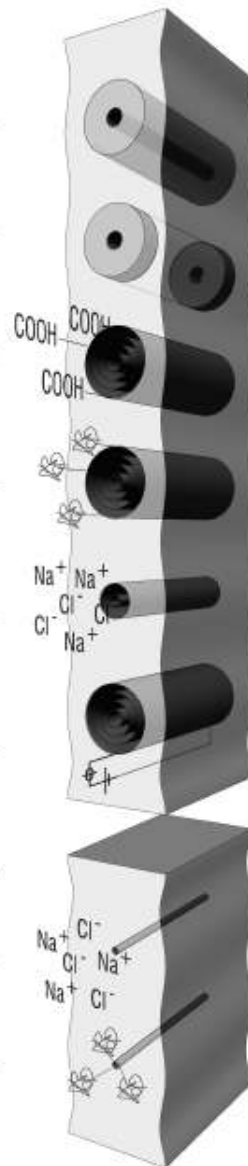


FIGURE 3. Evolution of aligned nanotube membranes for chemical separation and water treatment applications. Carbon nanotube membranes have evolved from size exclusion sieving devices to tunable membranes for nanofiltration. Future research is focused around the development of a high-flux, antifouling SWNT membrane for desalination applications.

그림 1. 탄소기반 나노물질의 분리막 응용 사례

관련(참고)사이트 : <http://pubs.acs.org/journal>

출처: Mauter, M.S., and Elimelech, M. "Environmental Applications of Carbon-Based Nanomaterials", Environmental Science & Technology, Volume 42, August 2008, pages 5843-5859