

초임계 이산화탄소용 계면활성제를 이용한 기술

서울대학교 화학생물공학부 이윤우

1. 계면활성제의 설계

이산화탄소는 무색, 무취에 화학적 안전성을 갖고 인체에 독성이 없는 물질이며 비교적 용이한 임계조건($T_c=31.1\text{ }^\circ\text{C}$, $P_c=72.8\text{ atm}$, $\rho=0.471\text{ g/mL}$), 불활성, 저렴한 가격과 환경적으로 무해한 성질의 장점을 갖고 있다[1-3]. 이산화탄소는 비극성 물질로서, 비교적 비극성 성질을 보이는 유기물의 추출, 세정, 반응용매, 입자제조 등에 적용되어 널리 응용되어 왔다[4]. 그럼에도 불구하고 이산화탄소를 보다 많은 분야에 사용하기 위하여 이에 적합한 계면활성제를 첨가하는 연구가 최근 선진국을 중심으로 매우 활발히 진행되고 있다. 이산화탄소에서 사용할 수 있는 계면활성제는 액체 및 초임계 이산화탄소에 녹는 親이산화탄소 부분(CO_2 -philic part)과 이산화탄소에 용해되지 않는 유기물을 용해시킬 수 있는 親油性 부분(CO_2 -phobic, Lipophilic part)으로 나눌 수 있다(그림 1). 물론 용도에 따라서는 親이산화탄소 부분(CO_2 -philic part)과 이산화탄소에 용해되지 않는 수용액을 용해시킬 수 있는 親水性 부분(CO_2 -phobic, Hydrophilic part)으로 설계하여 합성할 수 있다. 현재까지 잘 알려져 있는 親이산화탄소 부분으로는 지방족 알킬기에서 탄소에 붙어있는 수소(H)대신 불소(F)로 치환된 perfluoro 화합물 또는 실리콘으로 치환된 siloxane 계열 화합물, Poly carbonylated 계열 화합물, Polyether계열 화합물 및 알킬기 말단이 tert-butyl기로 치환된 화합물 등이 효과적이라고 알려져 있다(그림 2). 계면활성제에 의해 형성된 Emulsion의 입체적 안정성은 親이산화탄소 부분의 길이 변화와 용해 정도에 의해 조절된다. 새로운 계면활성제의 설계에 있어 가장 중요한 고려사항은 계면 특성과 콜로이드의 안정성을 연결시켜 해결할 수 있느냐에 달려 있다.

2. 계면활성제의 응용

2.1. 고분자 중합반응

이산화탄소는 무정형의 불소 고분자와 실리콘계 고분자를 제외하고는 대부분의 고분자를 잘 녹이지 못한다. 그러므로 초임계 이산화탄소에서의 분산중합과 유화중합이 널리 이용되며 이때 계면활성제의 역할이 매우 중요하다.

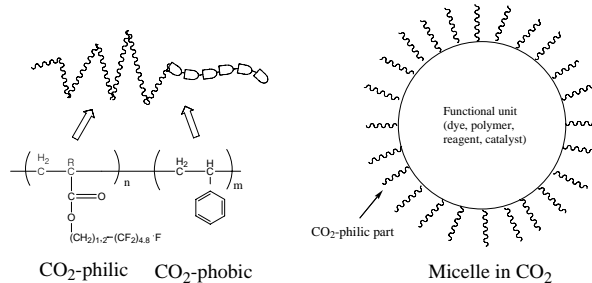


그림 1. 親 CO_2 -친유성 부분을 지닌 공중합체와 CO_2 내에서 마이셀의 구조

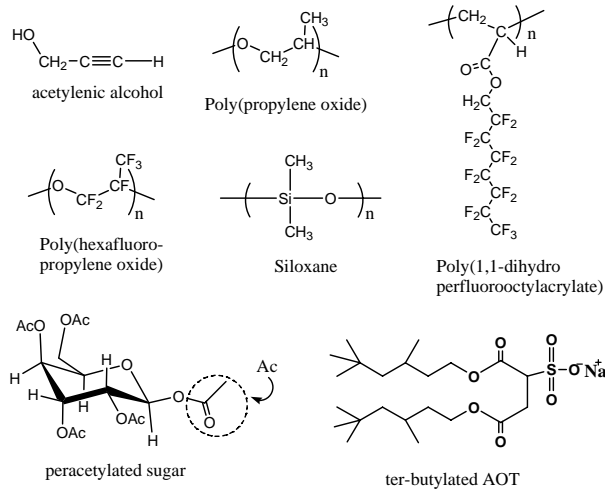


그림 2. 親 CO₂-관능기 그룹

계면활성제는 성장하는 고분자 입자의 표면에 흡착되거나 화학적으로 결합하여 고분자 입자들끼리 뭉치는 것을 막아준다. 지금까지 유화중합 또는 분산중합에서 사용되어온 계면활성제는 수용액이나 유기용매에서 사용할 수 있도록 설계되었고 이산화탄소에는 전혀 불용성이기 때문에 특별히 이산화탄소용 계면활성제를 설계하는 연구가 필요하다. 지금까지 초임계 이산화탄소를 용매로 사용한 고분자 중합에서 계면활성제의 종류로는 이산화탄소에 용해되는 단일 중합체, 이산화탄소에 용해되는 성분과 이산화탄소에 용해되지 않는 성분을 모두를 함유한 공중합체, 그리고 이산화탄소에 용해되는 반응성 거대단량체 (Reactive macromonomers)를 함유하고 있는 것들로 나눌 수 있다.

DeSimone 교수는 1994년 초임계 이산화탄소 (65°C, 207bar) 에서 최초로 메틸메타크릴레이트의 분산중합을 보고하였다[5]. 여기서 사용된 계면활성제는 양쪽 친매성(Amphiphilic)을 갖는 Poly(1,1-dihydroperfluorooctyl-acrylate) (PFOA, Mn=1.1104 or 2.0105 g/mol) 단일 중합체로서 불화탄소 부분이 이산화탄소 연속상으로 뻗어 있어 입체 안정화 효과를 나타내며 입자들끼리 뭉치는 것을 방지하는 한편 이산화탄소에 용해되지 않는 아크릴 부분은 PMMA 입자 표면에 흡착된다. (그림 3) 중합이 종료된 후 반응 혼합물에서 이산화탄소를 빼내고 나면 구형의 고분자 입자 (1-3 μ m)를 얻을 수 있었다. (그림 4) 반면에 동일한 중합을 계면활성제 PFOA 없이 수행한 경우 침전 중합이 일어났으며 얻어진 고분자는 낮은 전환률(<40%)과 비구형(Nonspherical)을 나타내었다. 그림 5에는 이산화탄소에서 사용되는 다양한 종류의 고분자 계면활성제를 나타내었다. 이들의 경우 계면활성제의 블록 사슬 길이, 계면활성제의 농도, 그리고 성장하는 고분자 입자에 흡착된 부분의 블록 길이 등이 고분자 중합도와 입자 형태에 미치는 영향에 대해 연구되었다[4]. 예를 들어 폴리스타이렌과 PFOA의 블록 공중합체를 각각의 블록 길이를 변화시켜 중합한 일련의 실험 결과 각 블록의 길이가 길어지면 얻어진 고분자 입자의 크기와 분포가 작아지는 것으로 보고되었다. 이것은 계면활성제의 길어진 블록 사슬 길이가 고분자 입자를 더욱 안정화 시킨 것으로 여겨진다[6].

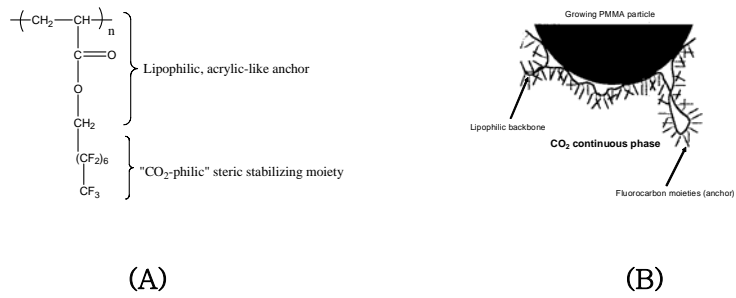


그림 3. (A) 고분자 계면활성제의 화학적구조 poly(1,1-dihydroperfluorooctyl-acrylate) [poly(FOA)] (B) poly(FOA)로 안정화된 PMMA입자

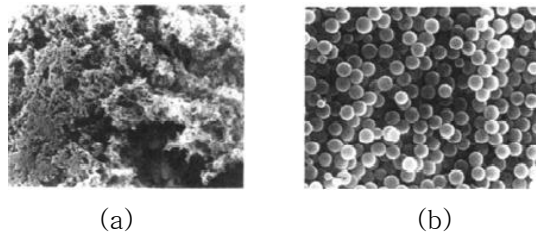


그림 4. CO₂에서 중합한 PMMA (a) PFOA 사용안함, (b) 계면활성제로 PFOA사용함 [4].

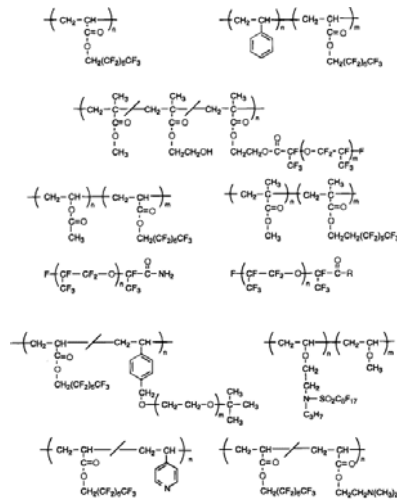


그림 5. Structures of fluorinated polymeric surfactants for CO₂[4].

2.2. 드라이클리닝

지금까지 드라이클리닝에 사용되고 있는 용매는 Perchloroethylene이다. 세탁 공정에서 많은 진보를 이루어 Perc의 사용량이 많이 줄었지만 아직도 미국에서만도 매년 5,300,000 kg 정도가 소모되고 있다[7a]. 퍼클로로에틸렌은 건강, 안전, 그리고 환경적 문제를 안고 있으며 실험실적 동물 연구와 인간 역학 조사에서 모두 발암성 물질로 분류되었다[7b].

초임계 이산화탄소는 기체와 같은 빠른 침투력, 낮은 점도, 높은 확산계수 그리고 액체와 같

은 높은 용해력으로 더러워진 의류로부터 기름 때를 효과적으로 제거하는데 매우 이상적인 용매이다. 즉, 미세한 세공을 가지고 있는 섬유내부에 이산화탄소는 쉽게 침투하여 기름 때를 가지고 나오는 세탁 작용이 뛰어나다.

친환경적인 용매인 이산화탄소가 드라이크리닝 용매로 사용된 것은 1950년 이래 드라이크리닝 역사에서 가히 혁명적인 변화이다.[7c]. 이산화탄소용 계면활성제를 사용하면 기름에 대한 용해력이 우수해지므로 기존의 세제보다 세정 능력이 높고, 의류를 손상시키지 않으며, 퍼클로로에틸렌을 사용하지 않아 환경 부하 저감에 공헌할 수 있고, 용제 등을 송출하는 구동 펌프가 필요 없게 되어 기기의 내구성능이 높아지는 등의 효과를 가지고 있다. 현재 미국에서는 Alliance, Coolclean, Electrolux 와 SailStar 등과 같은 기업에서 세탁 기계를 제작하고 있다. 이산화탄소를 이용한 드라이크리닝에 사용하는 계면활성제는 특히 이산화탄소에서 세척 능력이 향상되도록 고안되었다. 현재는 Hangers, Linde Gases, 와 Uniquema등 에서 이산화탄소용 계면활성제를 개발하여 판매하고 있다. 세탁비용은 비용은 \$1.34/kg으로 기존의 방법에 의한 세탁비용인 \$1.10-\$2.27에 견줄 만 하다. 미국 동부를 중심으로 50개 이상의 이산화탄소를 이용한 드라이크리닝 업소가 체인점 형태로 있으며 이 수는 계속 증가 추세에 있고, Hangers는 유럽에도 진출하였다. 현재 100,000 kg 이상의 고객 의류가 액체 이산화탄소로 세탁되었으며, 세탁업자와 고객이 모두 만족해 하고 있다. 이 기술은 일본에서도 독자적으로 개발이 진행 중에 있다.

2.3. 전기 도금 공정

전기 도금은 전해질 수용액에 중에 두 개의 전극을 넣고 전원에 연결시켜 전류를 흘리면 용액 중의 양이온은 음극으로, 음이온은 양극으로 이동하여 각각의 극에서 방전하는 전기 화학반응을 이용한 것으로, 전해질 내 금속이온이 음극으로 이동된 다음, 환원되어 금속으로 석출되는 과정을 거쳐 이루어진다. 도금공정은 산, 알칼리 수용액과 시안 화합물, 중금속, 발암성 물질 및 부식성 물질 등과 같은 독성물질들을 사용하기 때문에 작업환경이 열악하고 환경문제가 심각하다. 이와 같은 도금 공정에서 발생하는 폐수와 폐기물들을 효과적으로 처리하기 위해 다양한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 니켈 전기도금에서 사용되고 있는 와트(Watt)액은 넓은 전류밀도 범위에 걸쳐 일정한 음극 전류효율을 유지하며 비교적 고농도까지 사용될 수 있다는 장점이 있다. 그러나 미세하거나 복잡한 형태의 구조물에 사용하는 경우 전류밀도가 불균일하게 분포되어 불균일한 도금 층의 원인이 된다.

최근 폐수 배출을 원천적으로 없앨 수 있는 청정 용매인 이산화탄소를 이용한 도금이 연구되고 있다[8]. 이것은 이산화탄소가 초임계 조건에서 용질을 미세한 나노 공간에 액체 보다 쉽게 이동시킬 수 있다는 점과 액체와 기체 간의 표면 장력이 없어 복잡한 구조의 표면 수축 또는 변형 없이 세척 할 수 있다는 점을 이용한 것이다. 그러나 금속염은 일반적으로 물에 녹고 초임계 이산화탄소에는 녹지 않는다. 더구나 물과 이산화탄소는 거의 서로 섞이지 않는다. 그러므로 순수한 이산화탄소는 전기도금에 적합하지 않다. 이 문제는 계면활성제를 이산화탄소와 도금액에 첨가하여 해결할 수 있다.

비이온성 계면활성제인 Octa(ethylene oxide) dodecyl ether와 Poly(ethylene oxide)-*b*-poly(propylene oxide)를 이산화탄소와 전기도금액에 첨가하여 니켈 도금을 수행한 시도가 보고 되었다[6b]. 여기서 사용되는 계면활성제는 앞서 기술한 계면활성제와는 다르게 한쪽은 친수성과 다른 쪽은 친이산화탄소로 구성되어 있다. 기존의 방법으로 도금된 니켈 필름의 입자가 1 μ m에 이르고 불균일한데 반해 이산화탄소 유화용액에 의해 도금된 것은 100 nm 이

하 범위이며 균일하였다(그림 6). 두 공정의 표면 균일도 차이는 도금이 이루어지는 표면에서 결정 성장의 차이에서 비롯된 것으로 보인다. 또한 이산화탄소 유화용액에 의해 도금된 니켈 필름의 도금 두께는 도금 시간 (1, 3, 10, 그리고 15min)에 따라 각각 0.722, 2.66, 9.24, 그리고 12.8 μm 로 증가하는 반면 도금 표면이 형성된 입자는 크게 성장하지 않았다. 이것은 니켈 전기 도금에 있어서 이례적인 현상이다. 결국 이산화탄소 유화용액으로 도금한 이 방법에 의해 한층 더 매끄러운 니켈도금 필름을 제조할 수 있다.

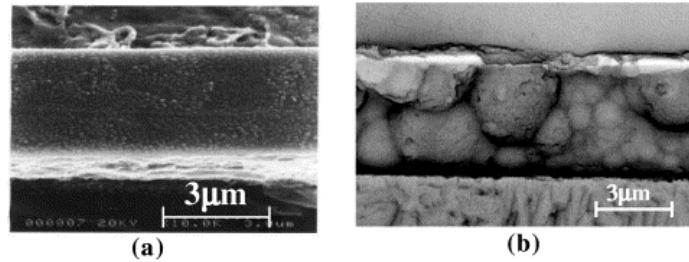


그림 6. 니켈 단면적 SEM 사진 (a) 초임계공정 (b)기존공정

2.4. Photoresist 제거공정

반도체 집적 회로의 제조 공정에서 각 구성요소의 미세구조의 형태를 결정하는 Photolithography는 매우 중요하다. 이 공정에서 Photoresist는 반도체 Wafer의 표면 위에 코팅되고 빛에 의해 경화된다. Wafer의 Topography가 완성되고 나면 딱딱해진 Resist는 제거되어야만 한다. 현재 사용되는 마이크로 칩을 생산 공정에서는 많은 양의 부식성 화학약품과 초순수가 필요하며 방대한 양의 폐수가 부생 된다. 더구나 회로가 더 작아지고 복잡해질수록 초순수와 화학약품을 사용하는 기존 공정은 제조 공정에서 남은 잔류물, 입자, 그리고 화학물질 들을 침투하여 제거하기가 점점 더 어려워진다.

미국의 Micell Technologies Inc.와 Los Alamos National Laboratory등에서는 초임계 유체 기술을 이용하여 Photoresist, 잔여물, 그리고 복잡한 구조 속에 들어있는 입자까지 제거할 수 있는 기술을 개발하였다[9]. 이 공정을 통하여 거칠고 들쭉날쭉한 Wafer(그림 7)를 매끄럽고 작은 입자가 모두 제거된 Wafer를 얻어 냈다. 특히 초임계 유체는 기체와 액체간의 계면이 없어지기 때문에 낮아진 Capillary force가 없어서 Photolithography제조분야에 혁명을 일으킬만한 새로운 기술로 주목 받고 있다. 이 기술은 광기록 매체 (CDs, DVDs 및 CD-ROMs)의 정보 밀도를 높이는데 사용될 수 있고 MEMS (Micro-electromechanical systems)에서 표면장력의 차 때문에 표면끼리 접착이 일어나는 단점도 제거하였다. 이 기술은 또한 현재의 직접회로 제조공정에 있는 행공과 건조 공정을 생략할 수 있어 여기에 사용되는 막대한 양의 초순수 뿐 아니라 무기산과 유기용매의 사용이 필요 없게 되어 기존 공정에 의한 것보다 생산단가를 낮출 수 있다. 이 기술은 폐순환 시스템으로 설계되어 이산화탄소를 계속 재사용하므로 환경 내로 온실가스를 방출하는 일이 없다. 첨가된 공용매는 증기압이 낮기 때문에 혼합물로부터 쉽게 분리가 가능하여 역시 회수와 재사용이 용이하다. 이 공정의 핵심 요소는 실리콘 웨이퍼 위로 초임계 이산화탄소/공용매 펄스를 가하여 포토레지스트를 제거하는 소형의 고압 분무기이다. 이 분무기로 초임계 이산화탄소/공용매 혼합물에 미리 1분간 담궈 부드러워진Photoresist 의 미세한 조각들을 제거한다. 담금과 분무를 결합한 이 공정과 초임계 이산화탄소만을 사용하는 세척

공정으로 현재 산업계가 요구하는 제조기준이 만족된다. 이 기술과 관련한 초기의 연구는 컴퓨터 제조업체인 Hewlett-Packard 와 공동연구개발협약에 따라 수행되었으며, 이어 IBM 및 GT Equipment Technologies Inc. 와 더불어 연구개발이 지속되었다. 국내에서도 이 분야에 대한 연구가 성공적으로 이루어져 국제 경쟁력을 갖는 기술의 개발이 활발히 진행되고 있다 [10].

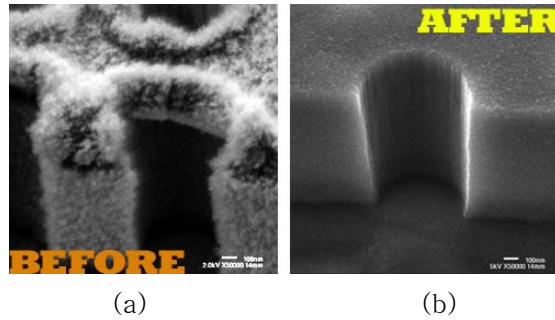


그림 7. 초임계 이산화탄소를 이용한 웨이퍼세정

2.5. 금속 나노입자 제조

초임계 유체 기술을 금속 용해에 응용하기 위한 가장 큰 문제점은 금속 이온이 초임계 이산화탄소에 녹지 않는다는 점이었다. 금속 이온을 이산화탄소에 녹는 금속 킬레이트로 둘러싸는 것이 초임계 유체에서 금속 이온을 추출하는 한 가지 방법이다. 이러한 기술은 1990년대 초 미국 아이다호 대학의 Wai 교수와 그의 동료에 의해 개발되었다. 이것은 금속 이온이 역마이셀 (Reverse-micelle, Water-in-CO₂ micro-emulsion)에서 안정화되기 때문이다. 그는 금속 나노입자를 초임계 이산화탄소에 녹아 있는 금속 전구체의 환원반응에 의해 만들었으며, 다음의 두 가지 방법 즉, 물/이산화탄소 마이크로에멀전 (Water-in-CO₂ micro-emulsion)과 탄소 나노튜브 (Carbon nanotube)를 이용하였다[11].

첫 번째 접근 방법은 기존의 Sodium bis(2-ethylhexyl)sulfosuccinate (AOT)와 불소를 함유한 Co-surfactant인 Perfluoropropolyether phosphate(PFPE-PO₄)을 이용하여 높은 농도의 금속 염을 포함한 물/이산화탄소 마이크로에멀전을 대단히 안정한 형태로 만드는 것이다. 금속 나노입자가 유체 상에서 이산화탄소 마이크로에멀전에 의해 균일하게 분포되어 있기 때문에 불균일 반응이 균일 반응으로 되고 반응성도 향상되었다. 이 마이크로에멀전에 의해 안정화된 팔라듐(Palladium)과 로듐(Rhodium)은 올레핀과 아렌(Arene)을 환원시키는 강력한 촉매이다.

두 번째 방법은 초임계 이산화탄소 조건 하에서 다층 벽을 가진 탄소 나노튜브 (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs) 표면을 금속 입자로 장식하는 것이다. 이 방법에 의하면 금속 전구체의 수소 환원반응에 의해 금속 입자가 탄소 나노 튜브에 형성된다. (그림 8). 굴곡이 있는 표면에 형성된 금속 나노입자는 탄소 나노튜브의 표면 굴곡에 의해 좁은 크기 분포를 나타내었다. 탄소 나노튜브에 붙어 있는 팔라듐(Palladium) 나노입자는 촉매로 작용하여 초임계 이산화탄소에서 올레핀 트랜스 스틸벤(Tran-stillbene)의 환원 반응 속도를 향상시킨다. 이 연구는 초임계 이산화탄소 조건에서 팔라듐 나노입자(지름 5-10 nm)가 Pd(hfa)₂의 수소 환원반응에 의해 MWCNTs 에 성공적으로 형성됨을 보여주었다.

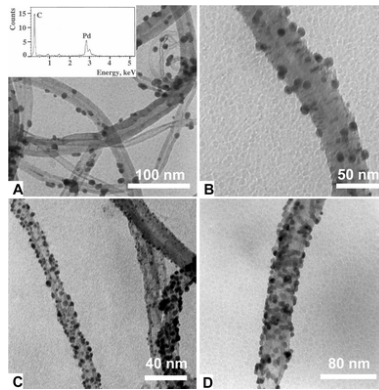


그림 8. Pd 나노입자로 치장한 MWCNTs 의 TEM사진.

수소환원처리조건 (a) 10 mg, (b) 20 mg, (c) 30 mg, and (d) 50 mg Pd(hfa)₂[8].

2.6. 염색

칼라 복사기(Photocopier)에 사용되는 칼라 토너는 종이에 옮겨 붙어 이미지를 나타내는 미세한 고분자 입자를 기초로 하고 있다. 칼라 토너를 제조하기 위해서는 이 미세 입자들은 기본적으로 4가지 색상으로 염색되어야 한다. 합성고분자를 염색하기 위해서는 단단히 밀착되어 있는 분자 사슬 내부로 염료 분자를 침투시켜야 하기 때문에 현재로서 고분자 입자의 염색은 비용이 많이 들 뿐 아니라 기술적으로도 어렵다. 인쇄와 라벨링(Labeling) 뿐만 아니라 생물학 분야에서 응용되고 있는 폴리스타이렌 (PS) 입자는 복사기의 토너에 사용될 수 있다. 색을 지닌 PS를 제조하기 위한 가장 손쉬운 방법은 염료를 단량체에 용해시킨 후 중합하는 것이지만, 염료가 중합반응에 영향을 미치어 균일한 PS 입자가 얻어지지 않는다. 또한 PS 입자를 얻은 다음 염색하는 방법도 있는데, 이 경우 염색에 사용한 유기용매를 제거하기 위해 냉동건조(Freeze drying) 공정을 사용하며 따라서 비용이 많이 드는 문제점을 가지고 있다.

미국의 Los Alamos National Laboratory에서는 액체 이산화탄소가 PS 알갱이를 선홍색으로 염색하는데 도움을 준다고 보고하였다[12]. 그들은 액체 이산화탄소를 이용하여 PS 입자를 팽윤(Swelling)시켜 염료가 입자 안으로 침투하기 용이하게 만들었다. 계면활성제로는 불소화된 탄화수소를 사용하였다. 하루가 지난 후 알갱이는 선명한 붉은 색으로 착색되었으며, 색은 메탄올로 여러 차례 씻어도 빠지지 않았다(그림 9). 고분자 입자의 균일한 모양과 크기는 복사기용 토너와 같은 응용에 있어 매우 중요하다. 이 기술에서 계면활성제의 핵심 역할은 이산화탄소 에멀전이 입자의 형상(Morphology)에 영향을 주지 않은 채 염료의 침투성을 크게 향상시키는 데 있다.

초임계 상태에서 Micelle을 이용한 기술은 섬유 염색분야에도 사용되고 있다. 물 분자가 중심(Core)에 있고, 계면활성제가 물 분자 주위에 붙어서 물이 이산화탄소와 같은 유기용매에 골고루 퍼져있게 Micelle을 형성하게 되는 Reverse-micelle은 반응성 염료와 산성 염료와 같은 수용성 염료를 역마이셀 안에 충분히 녹일 수 있다[13]. 역마이셀 시스템에 비이온성 계면활성제를 사용하여 산 염료가 단백질 조직, 실크, 그리고 울(Wool) 등에 다른 특별한 조작 없이 깊게 염색된다. 염료와 Cotton 사이의 정전기적 반발력을 제거하고 나면 반응성 염료 또한 Cotton cellulose fabric에 염색된다.

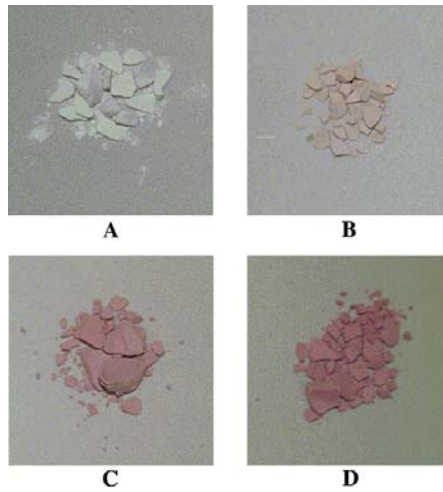


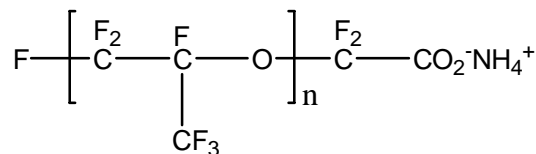
그림 9. Sudan Red 7B로 염색된 polystyrene 입자

(A) 수용액 (B) CO₂ 단독, (C) CO₂ + PEO-*b*-PEO (D) CO₂ + PFPE-NH₄[9].

2.7. 다공성 Emulsion template 제조

Emulsion Template공정은 다공성의 고분자 및 무기물 구조체 물질을 제조하기에 좋은 방법이다. 일반적으로 기존의 이 기술에서는 74% 이상의 에멀전 상태인 넓은 내부 기름상이 외부 수용액상에 의해 닫힌 구조(Oil-in-water, O/W)를 갖는다. 외부 상에서 고분자 중합 반응을 유도시키고 반응 종결 후 내부 상을 제거하면 다공성 골격을 형성하게 된다. 이 Template은 분리 매개체 (Separation media), 조직공학용 Scaffolds, 그리고 서방성 재료(Controlled release devices)에 사용되는 다공성인 친수성의 고분자 물질을 만들 수 있다. 그러나 이 방법은 기름상(일반적으로 유기 용매)이 전체 반응 부피의 75-90%에 이르므로 유기 용매가 많이 드는 방법이다. 더구나 이것은 반응 종결 후 만들어진 Template를 제거하기 힘든 방법이기도 하다.

영국의 Cooper 교수는 초임계 유체 에멀전을 이용 이산화탄소가 넓은 내부 상을 이루고 물상이 외부를 이루는(CO₂-in-water, C/W) Template을 제조하여 다공성 물질을 만드는 새로운 방법을 제시하였다[14]. 계면활성제 Perfluoropolyether (PFPE) ammonium carboxylate (아래 구조식 참조, Mw = 567g/mol)를 사용하여 그림 10에서 설명한 바와 같이 C/W 에멀전 상태에서 Acrylamide를 물 상에서 중합하고 이산화탄소를 빼낸 후 물을 제거하였다. 이 방법은 물과 이산화탄소만을 사용하기 때문에 어떤 휘발성의 유기 용매를 사용하지 않고도 잘 정렬된 다공성 구조의 물질을 만들 수 있었다.



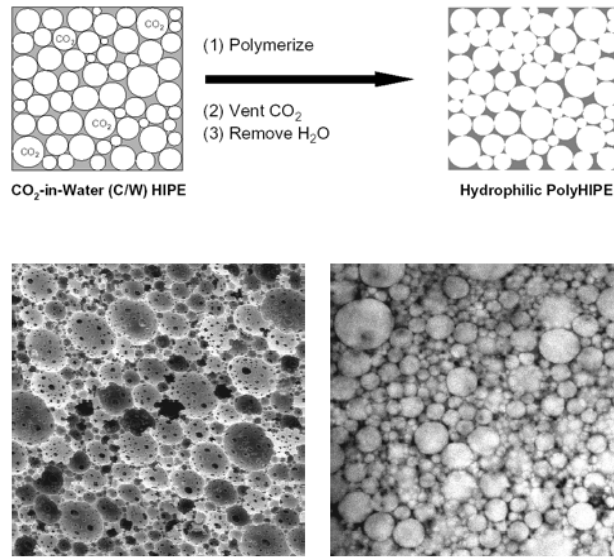


그림 10. 초임계유체 emulsion templating을 이용한 다공성 구조체 제조
외부상은 수용액이며 내부 액적은 scCO₂. 전자현미경 사진 (왼쪽)과 confocal microscope 사진 (오른쪽) (양쪽 이미지 모두 230x230 μm 크기임)[11].

3. 결론

기존의 휘발성 유기 용매 사용으로 인한 환경문제 해결을 위한 청정 용매로서 이산화탄소를 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이산화탄소는 독특한 이산화탄소의 용매 물성으로 인하여 지금까지는 제한된 분야에서만 사용되고 있다. 따라서 이산화탄소의 응용 범위를 확장하기 위해서는 이산화탄소의 용해력을 넓히기 위한 새로운 개념의 이산화탄소용 계면활성제의 개발이 요구된다. 미국 등 선진국은 이미 상업적으로 이용 가능한 저가의 이산화탄소용 계면활성제를 개발하기 위한 연구가 오랫동안 진행되어 왔다. 이산화탄소용 계면활성제의 이용은 기존의 환경 오염이 심각한 용매 의존성이 높은 공정 중 특히 고분자 합성, 드라이클리닝, 전기 도금, 반도체 제조, 나노 물질 제조, 염색, 그리고 Template 제조 등에서 기존의 용매의 업적과 한계를 뛰어 넘는 훌륭한 성과로 나타나고 있다. 요즘 대부분의 학문이 그러하지만, 특히 이 분야는 많은학문 분야가 서로 관련되어 있어 대학의 여러 학과 간의 그리고 산업체와의 긴밀한 공동 연구를 필요로 한다.

참고문헌

- [1] Clifford, A. A. *Fundamentals of Supercritical Fluids*, Oxford University Press: Oxford, 1998.
- [2] Lee, Y.-W. *HWAHAK KONGHAK* 41(6), 679(2003).
- [3] Leitner, W. *Nature*405, 129(2000).
- [4] [4a] Lee, Y.-W. *News & Information for Chemical Engineers* 19(3), 325(2001); [4b] Lee, Y.-W. *News & Information for Chemical Engineers* 19(4), 457(2001); [4c] Lee, Y.-W.; Hur, Y.-J. *Polymer Science and Technology* 13(6), 737(2002); Joung, S.N.; Kim,

- S.Y.; Yoo, K.-P. *Clean Technology*, 7(1), 13(2001).
- [5] DeSimone, J. M.; Maury, E. E.; Menciloglu, Y. Z.; McClain, J. B.; Romack, T. J.; Combes, J. R. *Science* 265, 356(1994).
- [6] [6a] Kendall, J. L.; Canelas, D. A.; Young, J. L.; DeSimone, J. M. *Chem. Rev.* 99, 543(1999); [6b] Hsiao, Y. L.; Maury, E. E.; DeSimone, J. M.; Mawson, S.; Johnston, K. P. *Macromolecules* 28, 8159(1995).
- [7] [7a] Mannsville. Mannsville Perchloroethylene Chemical Products Synopsis. Mannsville Chemical Products Corporation: Asbury Park, NJ, 1997; [7b] IARC (International Agency for Research on Cancer). Tetrachloroethylene. In Dry Cleaning, Some Chlorinated Solvents and Other Industrial Chemicals; IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans; IARC: Lyon, France, 1995, Vol. 63, pp. 159-221; [7c] Stewart, G. In *Green Chemistry Using Liquid and Supercritical Carbon dioxide* DeSimone, J. M.; Tumas, W.; Oxford University Press: Oxford, 2003, p 215-227.
- [8] [8a] Park, J. Y.; Lee, C. H.; Lee, Y.-W.; Lim, J. S. Proceeding of the 2nd International Symposium on Supercritical Fluid Technology for Energy and Environmental Applications, 2003; [8b] Yoshida, H.; Sone, M.; Mizushima, A.; Yan, H.; Wakabayashi, H.; Abe, K.; Tao, X. T.; Ichihara, S.; Miyata, S. *Surface and Coatings Technology*, 173, 285(2003).
- [9] DeYoung, J. P.; McClain, J. B.; Gross, S. M., U.S. Patent 6,562,146 B1 2003
- [10] Yoo, K.-P; Lim, J.S Kim, S.Y. Han, J.H. Lee, Y.-W. 11th International Symposium & Exhibit on Supercritical Fluid Chromatography, Extraction, and Processing, Pittsburgh, 2004.
- [11] Ye, X. R.; Lin, Y. L.; Wai, C. M. *Chem. Comm.*, 642(2003).
- [12] Yates, M. Z.; Birnbaum, E. R.; McCleskey, T. M. *Langmuir*, 16, 4757(2000).
- [13] Swada, K.; Takagi, T.; Jun, J. H.; Ueda, M. Lewis, D. M. *Color. Technol.*, 18, 233(2002).
- [14] Butler, R.; Davies, C. M.; Cooper, A. I. *Adv. Mater.*, 13, 1459(2001).