

폴리이미드 기반 입자 제조 및 응용

Preparation and Applications of Polyimide Based Particles

박진영¹ · 김병각¹ · 정현민² · 원종찬¹ · 김용석¹

| Jin Young Park · Byoung Gak Kim · Hyun Min Jung · Jong Chan Won · Yong Seok Kim

¹Advanced Functional Materials Group, Division of Advanced Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology, P. O. Box 107, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

²Department of Applied Chemistry, Kumoh National Institute of Technology, Sanho-ro 77, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea
E-mail: yongskim@kricr.re.kr

1. 서론

고분자 소재로부터 유래하는 유기입자는 전통적으로 생산공정에서 크기를 특정하는 표준물질, 크로마토그래피용 패킹물질, 기능성 코팅, 잉크 및 토너, 식품첨가물, 촉매 지지체, 단백질 및 약물 전달체 및 전기전자 특성 발현 기능성 첨가제 등 전통적인 산업에서 바이오 및 첨단 전기전자산업까지 넓게 응용이 가능한 기능성 소재로 분류된다.^{1,2} 특히 나노 과학의 발전으로 기존의 마이크로 크기의 고분자 입자보다 향상된 물성을 나타내는 고분자 나노 입자의 제조방법과 응용개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 나노미터 크기를 갖는 고분자 소재들이 관심을 끌고 있는 큰 이유는 벌크(bulk) 소재에 비해 특이한 입자 특성을 갖고 있어 응용분야에 있어서 많은 장점과 특장을 가지고 있기 때문이다. 대표적인 예로 전도성 고분자 복합체 입자, 광고분자 입자, 약물전달시스템에 사용되는 의료용 고분자 입자 등을 들 수 있다.

본 총설에서는 고분자 입자의 기본적인 제조방법 및 응용과 더불어 최근 주목을 받고 있는 초고내열 엔지니어링 플라스틱인 폴리이미드를 이용한 입자의 합성방법과 응용분야에 초점을 맞추어 소개하고자 한다.

Author



박진영

2006 충남대학교 섬유공학과 (학사)
2009 연세대학교 화공생명공학과 (석사)
2009-현재 연세대학교 화공생명공학과 (박사과정)
한국화학연구원 (학연과정)



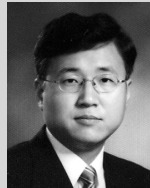
김병각

2000 서울대학교 화학생물공학부 (학사)
2008 서울대학교 화학생물공학부 (박사)
2009 서울대학교 재료공학부 (Post-Doc.)
2010 한국과학기술원 (Post-Doc.)
2010-현재 한국화학연구원 선임연구원



정현민

1996 POSTECH 화학과 (학사)
1998 POSTECH 화학과 (석사)
2001 POSTECH 화학과 (박사)
2001-2003 Cornell Univ. (Post-Doc.)
2003-2006 LG화학기술연구원 차장
2006-2010 한국화학연구원 선임연구원
2010-현재 금오공과대학교 응용화학과 조교수



원종찬

1986 서울대학교 화학교육과 (학사)
1994 서울대학교 과학교육과 화학전공 (석사)
1999 Univ. Lyon 1 고분자재료학과 (박사)
2006 Kent State Univ. 방문연구원
1986-현재 한국화학연구원 책임연구원



김용석

1994 연세대학교 화학과 (학사)
1996 POSTECH 신소재공학과 (석사)
2001 POSTECH 신소재공학과 (박사)
2011 미국 국립표준연구소(NIST) 방문연구원
2002-현재 한국화학연구원 책임연구원

2. 고분자 입자를 위한 일련의 연구

일반적으로 고분자 입자 합성 기술은 에멀전 중합(emulsion polymerization), 분산중합(dispersion polymerization), 현탁중합(suspension polymerization)이 있으며, 입자의 크기 조절 및 형상구조를 조절하기 위한 유화중합의 계열인 미니에멀전 중합(miniemulsion polymerization)과 시드 중합(seeded polymerization), 마이크로에멀전 중합(microemulsion polymerization)으로 제조된다.³ 이러한 다양한 합성 기술로부터 그림 1과 같이 다양한 종류의 고분자 입자를 합성할 수 있다. 이러한 방법 외에도 초임계 상태의 유체를 중합 전후 입자제조에 적용하거나, 사용되는 surfactant의 변화를 통해 제어되는 자기조립 특성을 이용하여 고분자 입자의 형상을 조절하는 연구가 진행되고 있다. 이렇게 제조된 고분자 입자들은 주로 바이오 분야에서는 코어-셸(core-shell) 구조의 단분산 콜로이드로 진단 또는 약물 전달체로 사용되거나 전자소재로서 전자기 특성 발현 필러, 광학소재, 광소자로서 응용연구가 활발하게 진행되고 있다. 최근에는 더 다양한 기능성 고분자의 입자 및 복합입자 형성을 위한 새로운 합성기술들이 보고되고 있다.⁴⁻⁷

3. 내열 고분자로서 폴리이미드의 특징

폴리이미드는 현재 시판되고 있는 고분자 재료 중 다른 어떤 고분자보다 뛰어난 내열성을 가지며, 내열성 기준에 의해 슈퍼 엔지니어링 플라스틱으로 분류된다. 폴리이미드는 1960년대에 미국의 듀폰사에 의해서 개발되어 초기에는 항공 우주라고 하는 특수한 용도에 이용되어 우주선의 외부 표면 보호막이나 우주비행사의 우주옷의 소재에 적용되었다. 그 후, 폴리이미드는 특수한 항공 우주 산업용도로부터, 핵심 민간산업분야인 전기, 전자, 정보 등의 각 산업에 용도가 크게 확대되고 있다. 특히, PC, 휴대 전화, LCD-TV 등 산업적으로 큰 시장에 도입되어, 우리의 사회 생활에 대해 필수 불가결한 재료가 되고 있다.

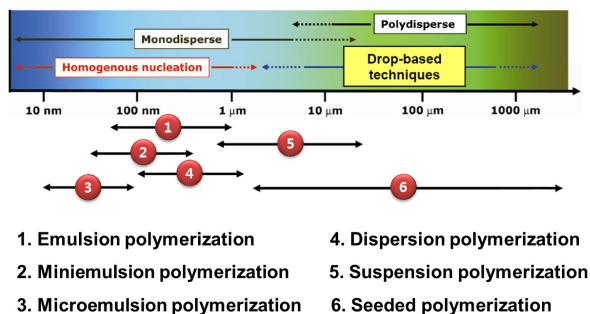


그림 1. 합성기술에 따른 고분자 입자크기.

폴리이미드는 이미드 결합을 반복 단위에 포함한 고분자의 총칭이며, 일반적으로 방향족 화합물이 이미드 결합으로 연결된 방향족 폴리이미드를 나타낸다. 폴리이미드를 구조와 특성으로부터 분류하면, 직쇄형 열가소성 폴리이미드, 직쇄형 비열가소성 폴리이미드, 열경화형 폴리이미드 등의 세 종류로 분류할 수 있다.

폴리이미드는 디아민과 테트라카르본산 이무수물을 원료로 비플로톤극성 용매(polar aprotic solvent) 중에서 무촉매의 개환 부가 반응으로 용이하게 폴리이미드의 전구체인 폴리아믹산의 용액을 얻고, 이 용액을 기판상에 도포해, 용매를 건조 후, 가열 등에 의한 이미드화 반응(탈수 고리화 반응)에 의해 필름화할 수 있다. 또 다른 방법으로는 테트라카르본산 이무수물과 디이소시아네이트를 단량체로 적용하여 고리형 중간체인 폴리이소이미드를 경유하여, 이산화탄소를 발생하면서 폴리이미드를 생성하는 것으로 완결된다. 이소시아네이트법은 폴리이미드 입자를 형성하는데도 매우 효과적인 중합과정으로 알려져 있다. 또한 화학공정으로서 폴리이미드 중합 반응은 촉매나 첨가제를 필요로 하지 않고, 반응율도 높고, 잔류 모노머도 없는 깨끗한 반응이다. 그림 2에 pyromellitic dianhydride (PMDA)와 4,4'-oxydianiline(ODA)의 중합에 의해 상품화된 폴리이미드 필름인 KAPTON®의 일반적인 제조공정을 나타내었다.

전통적인 폴리이미드 필름은 FCCL(flexible copper clad laminate)등 첨단 전자산업의 핵심소재로 사용되고 있으며, 필름 형태 이외에 개발 초기보다 열강화성 기능을 부여한 폴리이미드가 섬유 강화 복합재료의 매트릭스로서 항공 우주 관련 용도에 활용되고 있다. 게다가 최근 연구는 입자, 섬유,

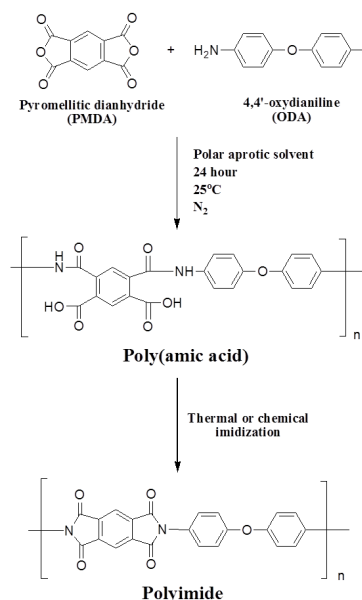


그림 2. KAPTON® 폴리이미드 제조방법.

젤, 탄성체 및 발포체 등 새로운 형태로 응용 가능한 폴리이미드의 가능성을 보여주고 있다.

즉, 폴리이미드는 향후 많은 연구가 진행된다면, 기존 고분자 재료가 가질 수 있는 다양한 형태로의 가공 및 응용이 가능한 소재이다.

4. 다양한 형태의 폴리이미드 입자 및 그 제조기술

일반적으로 고분자 입자의 제조 방법은, 앞서 언급하였듯이 고분자의 중합시에 반응계에 대해 입자화시키는 화학 합성적인 방법(분산 중합, 유화 중합, 침전 중합 등), 고분자의 덩어리진 상태물을 기계적으로 분쇄하는 방법, 고분자의 용액을 반응매와 혼합하여 고분자 입자를 재침전 시키는 방법이 일반적이며 폴리이미드에 대해서도 이러한 방법을 이용해 입자화할 수 있어 조제 방법에 따라 얻을 수 있는 입자의 형태, 입자 지름이나 입도 분포가 다르다. 이와 더불어 본 특집에서는 최근에 많은 관심을 받고 있는 전기분무법에 의한 폴리이미드 입자제조의 최신 동향도 소개하고자 한다.

4.1 전통적 폴리이미드 입자제조

듀폰 등에서 이미 상용화되어 있는 분말성형용 폴리이미드 입자를 제조하는 방법은 크게 중합침전법과 기계적 분쇄 방법으로 나눌 수 있다. 중합침전법은 기존의 이무수물 및 디아민을 단량체로 적용하고, 메타 크레졸과 같은 특수한 용매를 적용하여 폴리이미드 단계를 거치지 않고 단일공정에서 탈수고리화 반응인 이미드화 반응까지 완결하는 공정으로서 편리하게 폴리이미드 입자를 얻을 수 있다. 기계적 분쇄 방법은, 대량으로 제조하는 것이 가능하지만, 분쇄기 등 특수한 장치를 필요로 하기 때문에 얻을 수 있는 폴리이미드

입자 역시 구형보다는 부정 형상으로 얻어지며 입도 분포가 커지는 경향이 있다. 일반적인 분쇄법에도 폴리이미드 고형물을 분쇄하는 방법과 폴리이미드산 고형물을 분쇄한 후 이미드화하는 방법이 있다.

상기 방법을 통하여 얻어지는 폴리이미드 입자는 주로 분말 성형에 이용된다. 분말 성형용의 폴리이미드 입자는 단독으로 이용하지 않고, 타 재료의 입자와 복합화를 통하여 기능성 및 물성이 향상된 수지를 제조할 수 있다. 이러한 예들로서, 불소 수지, 카본 블랙 또는 금속 산화물 등의 입자와 복합화하여, 전기적 특성, 기계적 특성이나 내약품성이 뛰어난 성형품을 제작할 수 있고 이러한 성형품은 베어링, 기어 등 금속 대체 고내열 부품에 적용 가능하다.⁸

4.2 침전법(Precipitation Method)

4.2.1 공중합체에 의한 폴리이미드 입자의 제조방법

폴리이미드의 전구체인 폴리이미드산이 용해되어있는 비플로톤 극성 용매의 용액을 교반하면서 열적 이미드화하면 폴리이미드의 용해도가 급격히 저하하면서 침전이 발생하여, 입자가 생성된다. 이때, 용매에 일반적인 불용성의 폴리이미드와 가용성 폴리이미드(soluble polyimide)를 적당히 공중합하면, 입자 지름이 110 nm 정도의 범위에서 구형입자의 균일도가 매우 우수한 폴리이미드 입자를 제조할 수 있다. 그 중 하나의 반응식을 그림 3에 나타내었다.

특히 제조된 공중합체의 불용 부분과 가용 부분의 비가 1:1인 경우, SEM 실험으로 평가된 폴리이미드 입자의 평균 입자 직경은 3.74 μm 로 상대적으로 큰 입자가 형성되었으며 이때 표면은 기존의 입자에 비해 표면 거칠기가 증가된 입자를 얻을 수 있음이 알려져 있다.

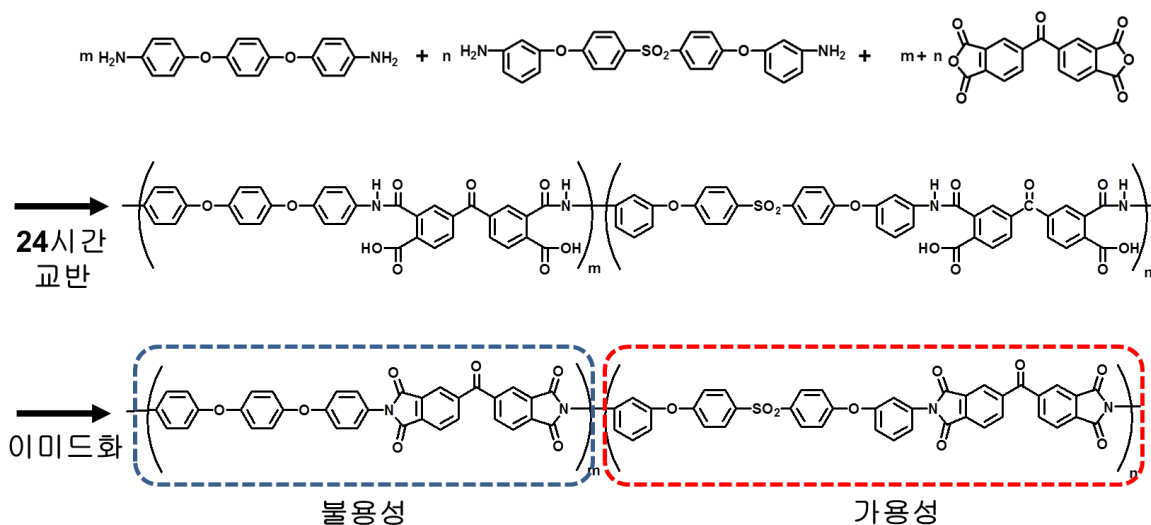


그림 3. 폴리이미드 입자제조를 위한 공중합체 폴리이미드산 합성.

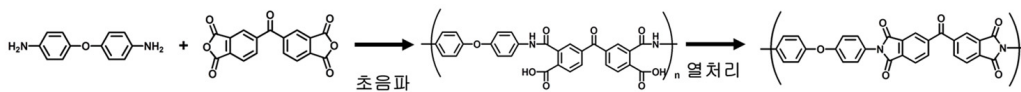
4.2.2 초음파(Ultrasonic) 조사에 의한 폴리이미드 입자의 제조방법

단분산이며 구형인 폴리이미드 입자의 제조는 원료인 디아민과 테트라카르본산 이무수물을 각기 개별적으로 반응 용매에 용해한 후, 두 가지 용액을 혼합해, 초음파를 조사하면서 반응시켜 폴리이미드 입자를 우선 제조한다(그림 4).^{9,10} 얻은 폴리이미드 입자를 원심 분리법 등에 의해서 분리하고, 반응에 사용한 용매를 이용해 반복 세정해 정제한다. 반응에 이용하는 용매는, 아세톤이나 초산에틸 등, 원료는 용해하지만 폴리이미드를 용해하지 않는 것을 이용한다. 폴리이미드 입자를 화학적 및 물리적으로 영향을 미치지 않는 용매에 분산한 후, 열적 이미드화(thermal imidization)과정을 통해 폴리이미드 입자를 얻는다. 덧붙여 이미드화에 이용하는 용매는, 비점이 이미드화 개시 온도(onset temperature of imidization) 이상인 *n*-decane, *n*-dodecane 등의 용매가 사용된다. 제조된 폴리이미드 입자와 폴리이미드 입자의 구조와 주사 전자현미경 사진(SEM)을 그림 4에 나타내었다. 각각 평균 입자 지름은 431 nm와 410 nm이고, 이러한 입자는 서브 마이크론으로 단분산 구상이며 이미드화의 전후로 입자 지름과 형태가 거의 변화하고 있지 않는 것을 알 수 있다. 덧붙여 이 폴리이미드 입자의 열분해 온도는 555 °C, 유리 전이 온도는 301 °C으로, 입자화 되어도 뛰어난 열특성을 유지한다. 대부분의 폴리이미드 입자는, 입자 지름과 형태를 유지한 상태로 이미드화할 수 있다. 따라서, 폴리이미드 입자의 입자 지름과 형태를 제어하면, 필연적으로 폴리이미드 입자의 입자 지름이나 형태를 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다. 폴리이미드 입자의 지름은 이미드화 반응시에

있어서의 용매의 종류, 조사하는 초음파의 주파수나 조사 에너지량, 반응 온도, 원료의 농도, 원료의 종류 등에 영향을 받고, 이러한 반응 조건을 최적화하면 서브 마이크론의 입자를 얻을 수 있다. 이와 관련된 연구는 일본 오사카부립 산업기술종합연구소의 T. Hideki에 의해서도 진행되었다. 이 연구 그룹은 이소시아네이트법을 이용하여 신규 폴리이미드 입자를 제조하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 이소시아네이트를 이용한 반응시에 초음파를 조사하여, 반응을 균일하게 유지하고, 핵(seed)의 형성을 용이하게 하여 이를 입자로 성장시키고 교반을 통하여, 폴리이미드 입자를 용액내에 석출시키는 연구를 진행한 바 있다.

일례로서 톨루엔-2,4-디이소시아네이트(TDI)와 3,3', 4,4'-벤조페논테트라카르본산 이무수물(BTDA)을 이용한 폴리이미드 입자는 BTDA, TDI 및 트리에틸렌 디아민(TEDA)이 혼합된 아세톤 용액으로부터 교반을 통하여 폴리이미드 입자를 얻고 위의 폴리이미드 전구체 입자를 *n*-dodecane에 분산해, 210 °C로 5 시간 동안 열적 이미드화를 실시해 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 폴리이미드 입자는 전방향측 폴리이미드이며 기존 폴리이미드와 동등한 내열성을 가지고 있고 농도나 초음파 조사 후의 반응 시간 등의 반응 조건을 바꾸는 것에 의해 평균 입자 지름을 0.5~30 μm의 범위에서 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 방법을 적용하면 다공성 폴리이미드 입자의 제조도 가능한 것으로 알려져 있다. Trans-1,4-cyclohexane diisocyanate (CHDI)와 수소 첨가 피로메리트산 이무수물(hydrogenated PMDA, HPMDA)을 단량체로 적용하면 다공성의 폴리이미드 전구체가 형성되고, 이의 열적 이미드화를 통하여 평균 입경 640 nm인 다

(a) 디아민과 이무수물 단량체를 이용한 합성법



(b) 이소시아네이트와 이무수물 단량체를 이용한 합성법

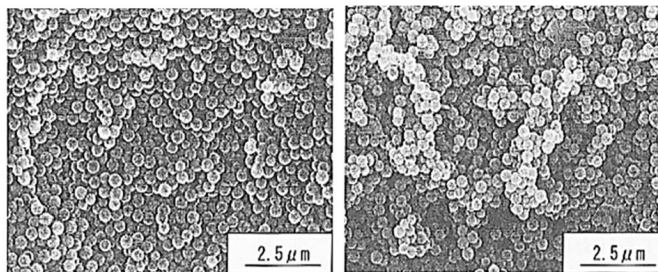
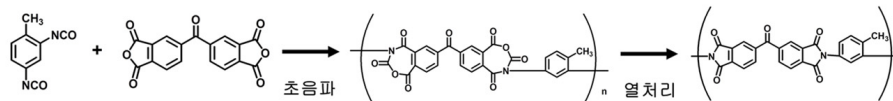


그림 4. 초음파 조사에 의한 폴리이미드 입자합성법.

공성 폴리이미드 입자를 제조한 예가 있다. 상기 공정의 특징은 초음파를 조사하는 것인데 그렇지 않을 경우 덩어리 상태의 폴리아믹산 전구체가 얻어지지만, 초음파 조사를 통하여 입자의 핵생성이 촉진된 것을 시사하고 있다. 이상의 결과로부터, 다공성 폴리이미드 입자의 생성 메커니즘은, 다음과 같이 예상된다. 생성한 폴리아믹산 입자중에는 분자량이 낮은 올리고머 성분이나 촉매가 다량으로 포함되어 있어 입자내에 균일하게 분산한 마이크로상분리 구조를 형성하고 있다고 생각할 수 있다. 용매에 의한 세정과 추출을 반복하는 것에 의해서, 입자내부로부터 상분리된 물질이 제거되어 연속 기포를 가지는 다공성 폴리아믹산 입자가 되고 이 폴리아믹산 입자를 열적 이미드화하는 것으로 분자 내 가교와 상분리가 진행해, 다공성 폴리이미드 입자가 생성된다.

이러한 다공성 폴리이미드 입자의 높은 내열성과 비표면적을 살리는 것으로, 내열성 컬럼용 충전재나 흡착제 등의 용도에 응용 가능하다. 또, 높은 절연성을 살리면 저유전율 특성을 가지는 재료, 예를 들면 중간 절연막, 저유전 폴리이미드 기판 첨가제 등으로서의 용도를 기대할 수 있다.

4.2.3 재침전법(Reprecipitation Method)에 의한 폴리이미드 입자 제조방법

최근에는 재침전법을 이용하여 보다 정교하게 폴리이미드 입자의 형상을 조절하는 연구가 진행되고 있다. 도호쿠 대학의 T. Ishizaka 그룹에서는 최근 그림 5와 같은 실험실적 공정을 적용하여 폴리이미드 입자 및 표면 구조를 변화시키는 일련의 연구결과를 발표한 바 있다.¹¹⁻¹⁴ 재침전법에 의한 표면 구조 변화는 폴리아믹산 전구체와 second phase를 갖는 고분자 소재 사이의 마이크로상 분리현상(microphase separation)을 이용한 방법으로 더욱 다양한 형태의 폴리이미드 나노 입자 형성이 또한 가능하다. 실험적으로는 폴리아믹산 용액을 빈용매(poor solvent)에 적가하여 폴리아믹산 입자를 침전 생성시키고, 이것을 화학적 이미드화 반응하여 폴리이미드 입자를 얻는다. 혹은 가용성 폴리이미드(soluble

polyimide)의 용액을 빈용매에 적가하여 입자화 시키는 것도 가능하다.

위 그룹에서는 cyclohexane, carbon disulfide 또는 두 개의 용매의 혼합물 등과 같은 빈용매(poor solvent)를 사용하여 구형 형태를 갖는 폴리아믹산 나노 입자의 침전에 의한 분산을 유도한다. 분산용매에 분산되어 있는 폴리아믹산 나노 입자는 pyridine과 acetic anhydride 혼합물에 의한 화학적 이미드화 과정을 통해 폴리이미드 나노 입자로 전환된다. 이러한 폴리이미드 나노 입자의 크기는 폴리아믹산 용액의 농도와 분산용매의 온도조건에 의존하는 것으로 알려져 있다.

또한, 특정한 농도 조건 등과 더불어 이차적으로 상분리할 수 있는 포로젠(porogen)등을 도입하여 hollow하거나 표면이 porous한 구조를 형상화할 수도 있다. 특히 porous 구조를 가지는 폴리이미드 입자는 특성상 매우 낮은 유전상수를 가지기 때문에 전자소재분야에서의 활용이 기대된다.

하지만, 이러한 재침전법은 연속적이고 대량으로 생산하는데 제한점이 있다. 그래서 최근에는 마이크로유체 공정(microfluidic process)을 이용한 방법이 소개되었다.¹⁵ 폴리이미드 나노입자는 마이크로혼합기(micromixture)와 마이크로열교환기(micro heat exchanger)에 의한 빠른 혼합과 열교환을 통하여 형성된다. 마이크로혼합기에서는 사용되는 dimethyl-acetamide(DMAc)와 *n*-hexane 두가지 용매로부터 마이크로에멀전의 액적(droplet)들을 만들어 내고, 마이크로열교환기에서 빠른 재침전으로 폴리아믹산 나노입자를 형성시킬 수 있다. 이 방법은 에멀전의 입자의 크기조절에 의한 조건으로 폴리이미드 입자크기를 조절할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로, 앞으로 기능성 폴리이미드 나노입자를 제조하는데 있어서 효과적으로 사용될 것으로 보인다.

4.3 전기분무법(Electrospraying Method)

전기분무법은 최근 나노 기술발전에 의해서 전기방사법(electrospinning)과 더불어 주목을 받고 있는 나노구조체 제조 기술이다.¹⁶ 그림 6과 같이 일반적인 전기분무법은 노즐을 통해 주입된 용액에 전압을 걸어주면, 유체용액 표면에 전하가 유도되어 표면장력과 반대되는 힘이 발생하기 시작한다. 그리고 액체의 표면장력을 넘어서는 임계전압이 인가되었을 때, cone-jet로 알려진 원추형 모양으로 분무되고, 분무된 균일한 크기의 액적들은 용매의 증발과 함께 입자로 얻어진다. 이러한 전기분무법은 용액의 농도, 유기용매의 종류, 전기장의 세기, 용액의 주입속도에 따라 수십 나노미터에서 크게는 수백 마이크로미터까지 입자의 크기를 다양하게 조절할 수 있다. 결과적으로, 전기분무법은 장비가 간단하고, 다양한 고분자로부터 마이크로캡슐 및 나노입자를 연속적이고 대량으로 생산할 수 있어 산업적 응용이 가능하다.

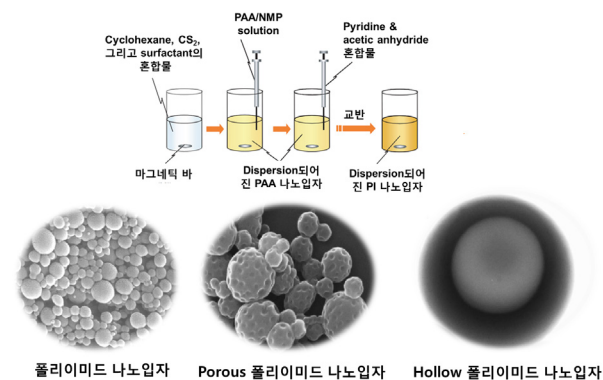


그림 5. 재침전법에 의한 폴리이미드 입자.

하지만 공정상 많은 변수가 존재하여 jet이 불안정해질 경우 균일한 형태의 입자 제조가 어렵다는 단점을 갖고 있다.

이러한 단점에도 불구하고, 전기분무법이 고분자입자 제조에 많이 사용되는 이유는 기존의 입자제조 기술보다 쉽게 새로운 고분자 입자를 형성이 가능하기 때문이다. 한가지 예로 이중노즐을 이용한 전기분무법을 통하여 간단한 방법으로 두개의 고분자상이 존재하는 야누스(Janus) 형태의 고분자 입자를 제조하였다.¹⁷ 또한 이러한 전기분무법을 이용하여 기판소재에 고분자 입자들을 직접 증착시킬 수 있다. 이러

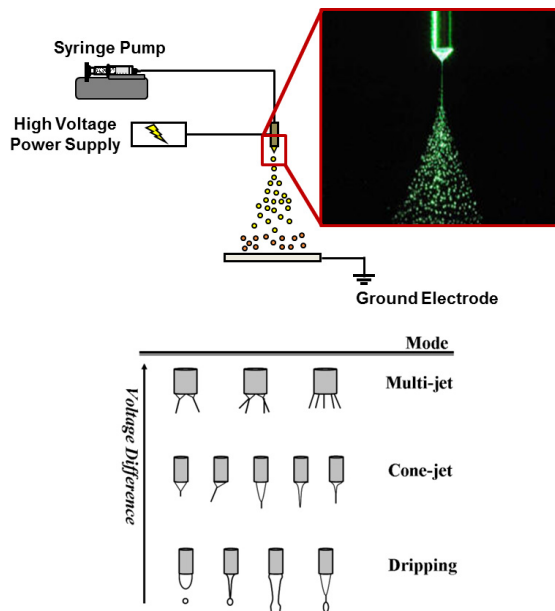


그림 6. Electro-spray 장치 모식도와 jet modes.

한 기술은 전기분무증착(electrospraying deposition)이라 일컬어지며, 이러한 코팅기술은 입자제조부터 코팅까지 한 번에 해결이 가능하고, 각종 기판 표면위에 새로운 마이크로 구조체(microstructure)를 형성 할 수 있다.¹⁸

최근에는 이러한 전기분무법을 사용하여 폴리이미드 입자를 얻기 위한 시도들이 보고 되고 있다.^{19,21} 이전 폴리이미드 입자 제조방법들과 다른 특징은 어떠한 첨가제 및 계면활성제 없이도 폴리아믹산 전구체로부터 폴리이미드 입자를 얻을 수 있다는 것이다. *N,N*-dimethylformamide(DMF)를 사용하여 합성된 폴리아믹산 전구체의 경우 안정적인 cone-jet의 형성이 가능하고, 분무되어지는 동안 용매의 증발로 인해 수집기(collector)에서 폴리아믹산 입자가 얻어진다. 이러한 폴리아믹산 입자는 열적 이미드화를 통하여 서브마이크로의 단분산성을 갖는 입자로 제조할 수 있다. 또한 열적 이미드화 온도를 갖는 수집기를 사용할 경우에는 그림 7과 같이 용매와 폴리아믹산 사이의 상분리 현상과 *in situ* 이미드화를 유도하여 porous한 형상의 폴리이미드 입자가 생성된다. 또한 porous한 형상의 폴리이미드 입자를 형성과정 중에 기판소재 표면에 바로 코팅을 하게 되면, 내열성을 갖는 초발수 코팅막으로 응용이 가능한 구조체를 형성할 수 있어 폴리이미드 입자의 새로운 응용분야를 기대할 수 있다.

5. 결론

폴리이미드 입자는 최근 들어 연구되기 시작한 새로운 형태의 재료이다. 일반적인 범용 고분자수지로 제조된 입자는 상대적으로 활발히 연구되어 많은 것이 이미 상용화되어 있

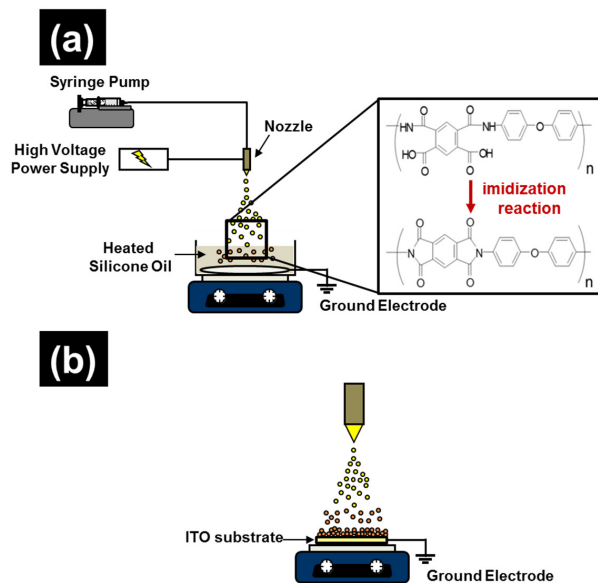
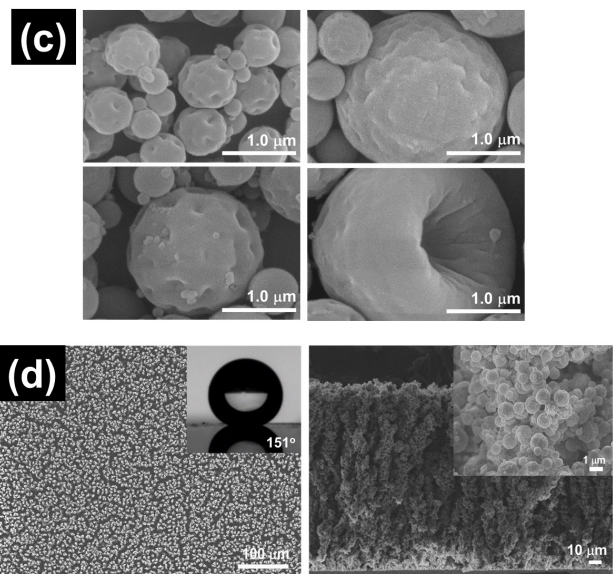


그림 7. 전기분무법을 이용한 폴리이미드 입자제조: (a) 폴리이미드 입자제조를 위한 전기분무법 모식도; (b) 전기분무증착 모식도; (c) 용액주입 속도에 따른 폴리이미드 입자 구조변화; (d) 전기분무증착법에 의한 초발수성 특성을 갖는 폴리이미드 입자 코팅구조체.



다. 범용 수지 입자의 특징은 표면특성 변화가 용이하고, 비중이 작고 비표면적이 커서 표면의 화학적 특성을 잘 활용할 수 있으며, 다른 재료와의 복합화가 용이하다는 장점이 있다. 그러나 내열성, 기계적 성질 및 내화학약품성 등에 단점이 있고, 또 제조 시에 있어서 첨가제에 의한 영향 등의 문제점 때문에, 신뢰성이나 내구성을 필요로 하는 분야에서의 이용이 상대적으로 어렵다. 이에 반해 폴리이미드 입자는 범용 수지 입자의 특징을 모두 겸비하고 있을 뿐 아니라 슈퍼엔지니어링 플라스틱의 우수한 특성을 그대로 유지하고 있다는 특징이 있다. 또한 입자 지름 제어가 가능하며 다양한 기능성 재료로 화학적 변화를 수반할 수 있다. 따라서, 폴리이미드 입자는 크기 및 균일도 조절이 가능한 형태적 특징, 뛰어난 신뢰성 및 내구성을 바탕으로 한 물리적 특징, 다양한 화학적 기능성을 보유한 재료로서 광범위한 분야에서 이용을 기대할 수 있는 새로운 형태의 소재라고 할 수 있다. 향후 상용화 연구 및 적용성 연구가 뒷받침된다면, 현재 제시된 전기 전자 분야의 응용뿐 아니라 에너지, 촉매, 바이오 등 새로운 응용분야를 확대할 수 있는 분야라고 판단된다.

참고문헌

1. 홍재민, 이혁재, *나노입자의 개요와 기술동향 및 전망*, 한국과학기술정보연구원 (2005).
2. 이준웅, 강상규, *기능성 나노입자 제조기술 연구동향*, 한국과학기술정보연구원 (2005).
3. J. H. Kim, J. S. Shin, and I. W. Cheong, *Trends in Metals & Materials Engineering.*, **17**, 47 (2004).
4. H. Kawaguchi, *Prog. Polym. Sci.*, **25**, 1171 (2000).
5. J. Zhang, S. Xu and E. Kumacheva, *J. Am. Chem. Soc.*, **126**, 7908 (2004).
6. W. H. Suh and K. S. Suslick, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 120074 (2005).
7. Y. Wu and R. L. Clark, *J. Colloid Interface Sci.*, **310**, 529 (2007).
8. M. H. Yi, *Polym. Sci. Technol.*, **18**, 26 (2007).
9. K. Asao, *Osaka Furitsu Sangyo Gijutsu Sogo Kenkyujo Hokoku.*, **20**, 69 (2006).
10. H. Tachi, 대판부립산업기술총합연구소보고, **21**, 17 (2007).
11. M. Suzuki, H. Kasai, T. Ishizaka, H. Miura, S. Okada, H. Oikawa, T. Nihira, H. Fukuro, and H. Nakanishi, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **7**, 2748 (2007).
12. H. Kasai, H. Mitsui, G. Zhao, T. Ishizaka, M. Suzuki, H. Oikawa, and H. Nakanishi, *Chem. Lett.*, **37**, 1056 (2008).
13. G. Zhao, T. Ishizaka, H. Kasai, H. Oikawa, and H. Nakanishi, *Chem. Mater.*, **19**, 1901 (2007).
14. G. Zhao, T. Ishizaka, H. Kasai, M. Hasegawa, T. Furukawa, H. Nakanishi, and H. Oikawa, *Chem. Mater.*, **21**, 419 (2009).
15. T. Ishizaka, A. Ishigaki, M. Chatterjee, A. Suzuki, T. M. Suzuki, and H. Kawanami, *Chem. Comm.*, **46**, 7214 (2010).
16. A. Jaworek, *Powder Technol.*, **176**, 18 (2007).
17. K. H. Roh, D. C. Martin, and J. Lanham, *Nature Mater.*, **4**, 759 (2005).
18. L. Jiang, Y. Zhao, and J. Zhai, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43**, 4338 (2004).
19. F. B. Tar, M. Sahimi, and T. T. Tsotsis, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**, 3348 (2007).
20. C. J. Weng, Y. S. Jhuo, Y. L. Chen, C. F. Feng, C. H. Chang, S. W. Chen, J. M. Yeh, and Y. Wei, *J. Mater. Chem.*, **21**, 15666 (2011).
21. J. Y. Park, K. O. Oh, J. C. Won, H. S. Han, H. M. Jung, and Y. S. Kim, *J. Mater. Chem.*, **22**, 16005 (2012).