

선택적 레이저 소결 3차원 인쇄공정을 위한 Poly(ether imide)의 미세구 제조에 관한 연구

최범순 · 박정빈 · 강호종 · 이동현[†]

단국대학교 고분자공학과

(2017년 2월 10일 접수, 2017년 3월 1일 수정, 2017년 3월 2일 채택)

Fabrication of Poly(ether imide) Microspheres for Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing Process

Beom Sun Choy, Jeongbin Park, Ho-Jong Kang, and Dong Hyun Lee[†]

Department of Polymer Science and Engineering, Dankook University,
152 Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16890, Korea

(Received February 10, 2017; Revised March 1, 2017; Accepted March 2, 2017)

초록: 본 연구에서는 선택적 레이저 소결 3차원 인쇄공정에 활용하기 위해 poly(ether imide)(PEI)의 균일 용액에서 침전 작용을 통해 미세구(microspheres)를 제조하였다. 이를 위해 PEI와 poly(vinyl alcohol)(PVA)가 용해된 dimethylacetamide(DMAc) 용액에 PVA 수용액의 액적을 천천히 공급하여 PEI 미세구 입자가 형성하도록 유도하였다. 미세구의 크기 및 크기분포는 PEI와 안정제로 사용한 PVA의 농도, 교반속도 및 용액의 온도를 조절함으로써 결정되는 것을 광학현미경 및 주사전자현미경 실험을 통해 확인하였다. 또한 제조된 PEI의 미세구는 선택적 레이저 소결 공정에 적용하기 위해 Hausner 수를 결정함으로써 미세구의 우수한 흐름특성을 확인하였으며, 이를 필름형태로 3차원 인쇄된 시편을 인장실험하여 이들의 기계적 특성을 분석하였다.

Abstract: In this work, we describe an effective method to produce uniform microspheres of poly(ether imide) (PEI) via precipitation behavior of polymers from homogeneous solutions. The PEI microspheres were obtained by dropwise addition of a precipitant that was an aqueous solution of poly(vinyl alcohol) (PVA) as a stabilizer into a dimethylacetamide (DMAc) solution of PEI and PVA. The size and size-distribution of PEI microspheres could be determined by precisely controlled concentrations of PEI and PVA, agitation speeds, and temperatures. For applications of selective laser sintering (SLS) process, flow properties of PEI microspheres were characterized by measuring the Hausner numbers. In addition, mechanical properties of the PEI microspheres were measured by conducting tensile tests.

Keywords: selective laser sintering, 3D printing, microspheres, poly(ether imide), Hausner number.

서 론

적층가공(additive manufacturing(AM) 또는 3D printing) 공정은 다양한 소재를 적층하여 3차원 구조체를 제조하는 공정으로서 기존의 가공 공정에 비해 시제품 제작 용이, 공정 간소화, 맞춤형 제품 제작 등의 장점들을 갖고 있어 전자, 항공, 자동차, 의료, 교육 등 다양한 분야에서 적용이 시도되고 있다.¹ 기존에 개발된 여러 적층가공 공정들 중 선택적 레이저 소결(selective laser sintering; SLS) 공정이 최근 각광받고

있는데, SLS 공정은 입자(또는 파우더) 형태의 원재료를 도포하여 균일하게 입자층을 형성한 후 선택적으로 레이저를 입자층에 조사하여 제공된 열에너지에 의해 소결함으로써 3차원 구조체를 인쇄하는 방식으로, 소결되지 않은 주위의 입자들이 지지대 역할을 하여 별도의 지지대가 필요하지 않으며, 적용 가능한 재료가 다양하고, 구조체 인쇄 속도가 상대적으로 빠르다는 장점을 갖고 있다.²⁻⁶ 따라서 이론적으로 SLS 공정은 소결 가능한 다양한 소재들을 사용하여 3차원 성형이 가능하다. 하지만, 현재까지 SLS 공정용 소재로서 고분자의 사용에 관한 연구는 제한적으로 진행되었는데, 이는 레이저 소결 공정에 적합한 입자 크기, 흐름특성, 기계적 특성 및 열 특성 등을 갖는 고분자 소재 개발에 어려움이 있기 때문이다.⁷⁻¹² SLS 공정의 특성상 균일한 입자층 형성을 위해서는 입

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dlee@dankook.ac.kr

©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

자들의 우수한 흐름특성이 필수적이며,^{13,14} 이를 위해서는 구형 입자의 제조가 필수적이며, 또한 소결공정을 위해서는 입자 표면, 입자 크기, 체적 밀도, 유변학적 및 광학적 거동과 같은 조건들이 필요하다.¹⁵⁻¹⁹ 구형 고분자 입자의 제조를 위해 두 가지 방식이 주로 사용되고 있다. 여기에는 syringe에서 고분자 용액의 액적(droplet)을 형성하여, 이를 응축시켜 입자를 제조하는 방식과 고분자 용액과 안정제 용액의 혼합에 따른 상분리(phase separation) 현상을 이용하여 입자를 제조하는 방식이 사용되고 있다.^{20,21} 그러나 전자의 경우 입자의 크기가 syringe에서 형성된 액적의 크기에 의존하여 효과적인 입자의 크기조절에 어려움이 있는 반면에, 후자의 상분리 현상을 사용하는 경우 용매에 대한 고분자의 용해도 조절로 다양한 미세구 입자의 제조가 가능하여 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 poly(ether imide)(PEI)와 dimethylacetamide(DMAc)의 용액과 poly(vinyl alcohol)(PVA) 수용액의 상분리 현상을 효과적으로 조절하여 구형 미세 입자들을 제조하고 농도, 온도, 및 교반조건 등과 같은 실험 인자들을 제어하여 이들의 크기 및 크기분포 등에 대한 영향을 확인하였다. 또한 제조된 PEI 구형 미세 입자들의 흐름특성 및 열적특성 등을 분석하고 SLS 공정을 통해 제조된 3차원 조형물의 기계적 특성을 분석하여 최종적으로 PEI 구형 미세 입자들의 적층가공 공정용 소재로서의 가능성을 확인하였다.

실 험

재료. 본 연구에서 미세구(microspheres) 입자 제조를 위해 SABIC사의 poly(ether imide) (PEI, ULTEM 1000-1000, melt flow rate = 337 °C/6.6 kgf)를 사용하였다. 또한 Sigma-Aldrich사의 poly(vinyl alcohol) ($M_w = 30000 \sim 70000$ g/mol, 겔화도 87~90%)을 안정제로 사용하였다. 용매로는 Sigma-Aldrich사의 dimethylacetamide(DMAc, 99%)와 증류수를 사용하였다. 위 실험에서 사용된 재료들은 추가적인 정제과정을 거치지 않고 사용되었다.

분석 및 측정. 본 연구에서 PEI 미세구의 크기, 형태 및 크기분포 등을 측정하기 위해 광학현미경(optical microscope (OM), Olympus BX51)과 주사전자현미경(scanning electron microscope(SEM), Hitachi S-4700, accelerating voltage = 20 kV)을 사용하였다. 광학현미경으로 관측된 미세구의 크기 및 분포는 TOMOR ScopeEye 3.6프로그램을 사용하여 측정되었다. 선택적 레이저 소결 3차원 인쇄공정(selective laser sintering 3D printing)은 Sentrol사의 SLS 인쇄장비(SP250)를 30 W의 laser power와 6000 mm/s의 scan rate을 이용하여 수행하였다. SLS 공정으로 제조된 PEI 필름의 기계적 특성을 확인하기 위해 만능시험기실험(universal testing machine (UTM), LLOYD LR30K, 인장속도 = 1 mm/min)을 사용하여 시료의 Young 탄성률 및 인장강도를 측정하였다.

미세구의 제조. 500 mL 등근 플라스크를 사용하여 DMAc 250 mL에 정량된 PEI와 PVA를 용해하여 용액을 제조하였으며, 또한 250 mL 등근 플라스크를 사용하여 증류수 250 mL에 정량된 PVA를 용해하여 수용액을 제조하였다. PVA 수용액은 먼저 80 °C로 가열된 PEI 용액(DMAc/PEI/PVA)에 한 방울씩 첨가되었으며, 앞서 첨가된 액적으로 생성된 침전물이 사라질 때 다음 액적이 첨가되었다. 부피비 10%의 PVA 수용액이 첨가되었을 때, 침전물은 더 이상 사라지지 않고 미세구의 생성을 확인하였으며, 이후 나머지 PVA 수용액을 모두 넣어 부피비 1:1을 맞추고 12시간 동안 80 °C의 온도에서 100 rpm의 속도를 유지하면서 hot plate 위에서 교반시켰다. 교반이 끝난 후 제조된 PEI 미세구를 여과하고 증류수로 세척하여 잔존 PVA와 DMAc를 완전히 제거한 후, 건조된 최종 결과물을 얻었다.

결과 및 토론

Figure 1은 미세구 입자 제조에 관한 전반적인 공정을 보여주고 있다. 균일한 크기와 크기 분포를 갖는 미세구 입자 제조를 위해 본 연구에서는 안정제인 PVA의 수용액(Solution A)과 PEI와 PVA의 DMAc 용액(Solution B)을 각각 제조하였다. 사용된 용매들은 고분자들에 대해 모두 좋은 용매(good solvent)이기 때문에, 두 용액 모두 침전물이 존재하지 않는 균일상(homogeneous phase)으로 제조되었다.^{20,21} PEI의 미세구 입자 제조를 위해 먼저 PVA 수용액의 액적(droplet)을 DMAc 용액에 천천히 첨가하였다. 이때 DMAc용액의 PEI가 물에 접촉하면서 고분자의 suspension이 발생하는데, PVA 수용액의 10 vol% 이내에서는 suspension이 지속되지 못하였다. 따라서 안정적인 미세구의 제조를 위해 본 연구에서는 PVA 수용액을 10 vol% 이상 첨가하였다. 용액 내 PEI 및 PVA의 농도 변화에 따른 미세구의 크기 및 크기분포를 확인하기 위해 우선 10 vol%의 PVA 수용액(Solution A)을 Solution B에 첨가하여 미세구가 형성됨을 확인한 후 나머지 PVA 수용액을 모두 첨가하여 두 용액간 부피비를 1:1로 조절하고 12 시간 동안 교반하여 미세구를 제조하는 방법(Method 1)과 10 vol%의 PVA 수용액을 첨가한 후 24시간 교반하고 다시 추가로 PVA 수용액을 첨가하여 1:1의 부피비를 만들어 미세구를 제조하는 방법(Method 2)의 두 가지 실험들을 진행하였다. 앞서 기술한 상분리 과정을 통한 미세구 입자 제조 과정은 우선 Solution A를 Solution B에 첨가하면서, PEI를 포함한 액체상(liquid phase)이 형성되고, 이는 구형을 형성하게 되며 궁극에는 구형의 액체상이 고체상(solid phase)으로 전이하여 미세구 입자를 형성하게 된다.^{20,21} 이때 두 용액들에 존재하는 PVA는 형성된 구형의 액체상 표면을 안정화시켜주는 안정제(stabilizer) 역할과 용액의 점도(viscosity)를 증진시켜 형성된 미세구 입자를 유지시키는 역할을 동시에 수행하

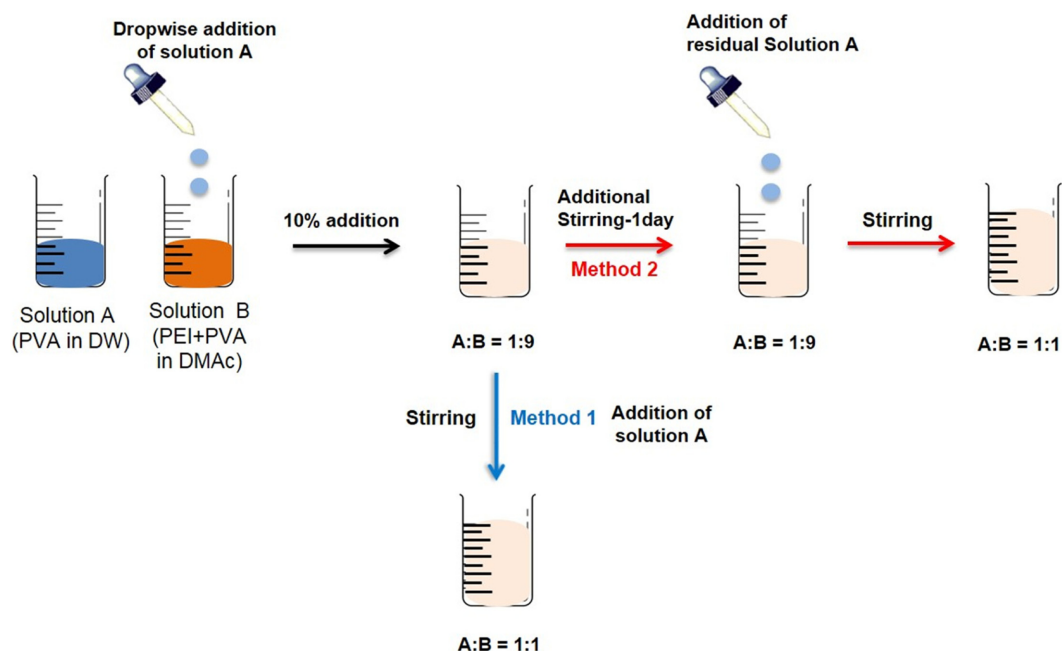


Figure 1. Schematic illustration of fabrication of PEI microspheres.

게 된다.²⁰ 이러한 상분리 현상을 통한 미세구 입자 형성 과정을 기반으로 본 실험의 Method 1과 Method 2의 방법을 진행하였다. 이를 위해 본 연구에서 사용된 Solution B의 PEI 농도는 0.1 g/mL로 고정하였다. 먼저, Figure 2는 앞서 기술한 Method 1의 방법을 통해 제조된 PEI 미세구의 PVA 농도에 따른 크기 및 크기분포 변화와 이에 대응되는 SEM 사진들이다. PVA 농도의 증가와 함께 제조된 미세구의 크기가 점진적으로 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 초기 PVA를 첨가하지 않고 순수한 증류수를 PEI의 DMAc 용액에 추가할 경우 PEI 미세구의 평균 반지름은 약 38.55 μm 였으나, PVA 수용액에서 PVA의 농도를 0.05 g/mL까지 증가시킬 경우 PEI 미세구의 평균 반지름은 약 11.94 μm 로 감소함을 확인하였다. 이는 안정제로 사용된 PVA의 첨가로 인해 PEI가 DMAc에 용해되는 것을 용이하게 해주는 동시에 형성된 PEI 미세구 표면을 안정화시키기 때문이다. 그러나 Figure 2의 SEM 사진들로부터 확인할 수 있듯, PEI 미세구는 완벽한 구형을 형성하지 못하고 타원형 또는 막대 형태의 미세구들이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Method 1의 방법에서 PVA 수용액인 Solution A가 초기에 Solution B에 첨가되는 순간 완전하게 응축되지 못한 PEI 미세구가 형성되고, PVA 분자들에 의해 미세구의 표면이 안정화되었음에도 이들이 교반 과정 중 변형되기 때문이다. 따라서 균일한 구형의 PEI 미세구 제조를 위해 본 연구에서는 Method 2 방법을 적용하였다. Figure 3은 Figure 1에서 기술된 Method 2 방법을 통해 제조된 PEI 미세구의 PVA 농도에 따른 크기 및 크기분포 변화와 이에 대응되는 SEM 사진들이다. Method 2 방법에서는

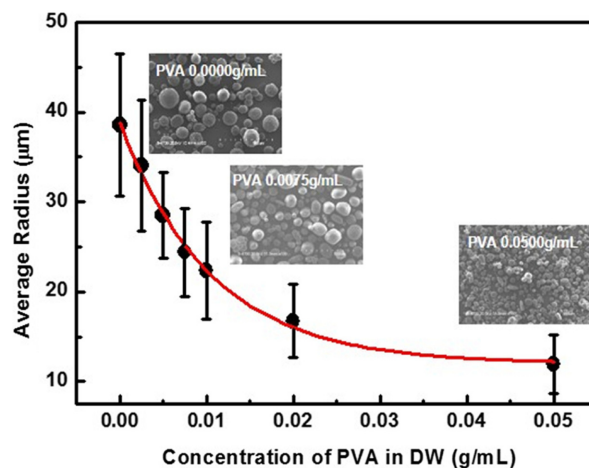


Figure 2. A plot of average radius as a function of PVA concentration in distilled water at Method 1.

Solution A가 Solution B에 10 vol%까지 첨가된 후 24시간의 추가 교반을 진행한 후 다시 Solution A를 추가하여 두 용액의 부피비율을 1:1로 제조하였다. 따라서 Figure 3의 SEM 사진들은 최종적으로 Solution A와 Solution B의 부피비율이 1:1인 조건에서 획득하였다. Figure 3에서 PVA가 포함되지 않은 순수한 증류수를 첨가하였을 때 제조된 PEI 미세구의 반지름은 약 18.97 μm 이다. Method 1을 통해 제조된 Figure 2의 미세구의 반지름 38.55 μm 와 비교 시 반지름이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한 PVA의 농도가 증가함에 따라 미세구 반지름의 감소를 확인할 수 있는데, Figure 2에서

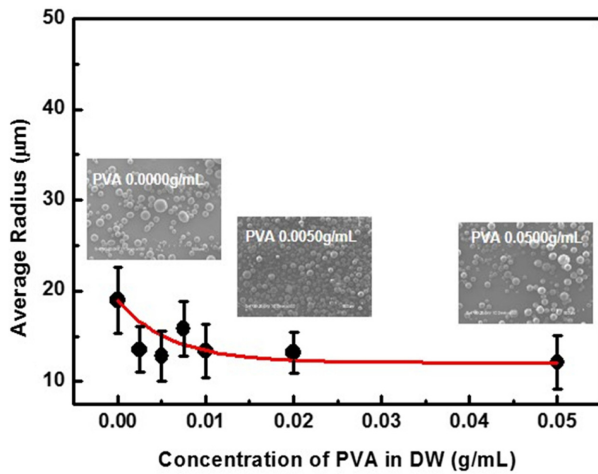


Figure 3. A plot of average radius as a function of PVA concentration in distilled water at Method 2.

PVA의 농도가 증가할수록 미세구 반지름이 점진적으로 감소하는 반면, Method 2를 통해 제조된 미세구들은 PVA의 낮은 농도에서 소폭의 반지름 감소를 보이다가 PVA의 양이 증가하면서 일정해져 반지름이 12.08 μm 에 이르는 것을 확인하였으며, 또한 비교적 완벽한 구형을 형성하고 있음을 확인하였다. 이는 Method 2에서 수행된 추가적인 교반 과정에서 형성된 미세구들이 서로 충돌하면서 크기 감소를 겪게 되고 이후 추가된 Solution A에서 공급된 PVA에 의해 표면이 안정화되면서 나타난 결과로 생각된다. 또한 Table 1에서 위에서 제시된 두가지 단계들에서 형성된 PEI 미세구의 PVA 농도에 따른 크기 및 크기분포 값들이 정리되었다. 본 연구에서 제조된 PEI 미세구의 흐름특성(flowability)을 측정하기 위하여, 이들의 Hausner 수를 측정하였다. Hausner 수는 파우더 또는 구형 입자의 흐름특성을 측정하기 위하여 사용되는데, 입자가 원통형 column(직경~8 mm)에 tapping에 의해 쌓인 경우의 밀도인 tapped density를 자유로이 놓였을 경우의 밀도인 bulk density로 나누어 얻은 값이다. Hausner 수는 식 (1)에 의해 정의할 수 있다.

$$\text{Hausner number (H)} = \frac{\text{Tapped density } (\rho_T)}{\text{Bulk density } (\rho_B)} \quad (1)$$

Table 1에서 제조된 PEI 미세구의 Hausner 수가 정리되었다. 측정된 PEI 미세구 입자의 Hausner 수가 모두 1.25 이하일 경우 흐름특성이 우수한 것으로 이해할 수 있다.²² 따라서 Table 1의 결과로부터 본 연구를 통해 제조된 PEI 미세구들은 모두 우수한 흐름특성을 갖고 있다는 점을 확인할 수 있었으며, 특히 Method 2를 통해 제조된 PEI 미세구들은 구형의 모폴로지 형성에 따른 전반적으로 낮은 Hausner 수를 갖는 것으로 확인되었다.

Figure 4는 Method 1 방법을 통해 PEI 미세구 제조 시 Solution A의 PVA 농도가 0.02 g/mL일 때 Solution A와 Solution B의 상대적인 혼합비에 따른 미세구의 SEM 사진들과 크기 및 크기분포 값을 보여준다. Figure 4의 SEM 사진들의 비교를 통해 미세구 제조 시 Solution A의 양이 감소할수록 PEI 미세구의 반지름이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Figure 4(a)에서 두 용액들간 비율이 동일할 경우 PEI 미세구의 반지름은 16.72 μm 이다. Solution A에 대한 Solution B의 비율이 4:5인 Figure 4(b)의 경우 미세구의 반지름이 23.61 μm 였으며, 그 비율이 2:5인 Figure 4(c)의 경우 미세구의 반지름이 33.53 μm 였다. Figure 4(d)는 각 조건에서 측정된 SEM 사진들을 통해 얻은 PEI 미세구의 반지름 및 그 분포를 나타낸다. 이러한 결과는 Solution A의 양이 상대적으로 감소하면서 공급된 PVA의 양이 감소하게 되어 야기된 것으로 생각된다.

Figure 5는 온도 조건에 따른 PEI 미세구 형성의 영향을 나타내는 SEM 사진들이다. 3가지 미세구들 모두 Method 2 방법을 통해 제조되었다. Figure 5(a)는 실험온도가 10 $^{\circ}\text{C}$ 에서 제조된 PEI 미세구의 SEM 사진이다. 낮은 온도의 경우에서는 초기 Solution A(PVA 0.005 g/mL)가 추가될 때 상대적으로 형성된 미세구의 점도가 높아져 교반과정 중 PEI의 미세구들의 크기가 효과적으로 감소되지 않아 Figure 5(b)의 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 제조된 미세구(반지름 = 12.79 μm)의 비해 비교적 큰 미

Table 1. Average Radius, Standard Deviation and Hausner Number of PEI Microspheres

Concentration of PVA in DW (g/mL)		0.000	0.0025	0.0050	0.0075	0.0100	0.0200	0.0500
Method 1	Average radius (μm)	38.55	34.02	28.49	24.39	22.37	16.72	11.94
	Standard deviation (μm)	15.77	14.58	9.57	9.73	10.76	8.17	6.50
	Hausner number	1.213	1.217	1.192	1.194	1.215	1.138	1.099
Method 2	Average radius (μm)	18.97	13.53	12.79	15.80	13.38	13.17	12.08
	Standard Deviation (μm)	7.25	5.01	5.58	6.13	5.81	4.57	5.93
	Hausner number	1.167	1.144	1.172	1.164	1.168	1.206	1.138

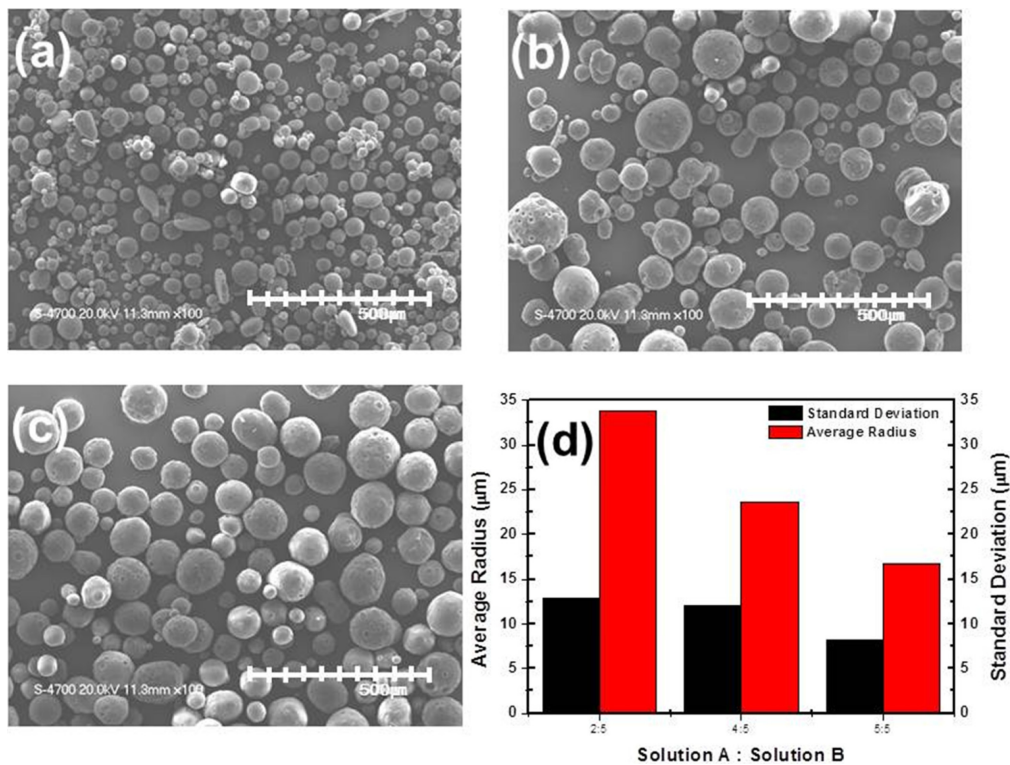


Figure 4. SEM images of PEI microspheres as a function of the ratio of Solution A to Solution B at Method 1. ((a) 5:5; (b) 4:5; (c) 2:5); (d) a plot of average radius and standard deviation of PEI microspheres as a function of the ratio of DMAc to DW.

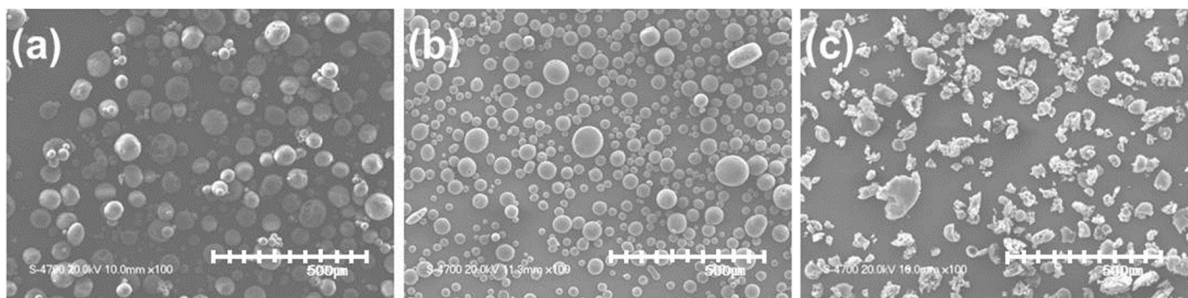


Figure 5. SEM images of PEI microspheres formed at three different temperatures: (a) 10 °C; (b) 80 °C; (c) 90 °C.

세구(반지름 = 15.94 μm)들이 형성되었다. 하지만, 실험 온도인 80 °C보다 높은 온도인 90 °C에서는 반대로 용액의 점도가 감소하게 되며 PVA에 의한 미세구의 안정화가 어렵기 때문에, 구형의 미세구를 형성하지 못하는 것으로 판단된다 (Figure 5(c)). 앞서 언급한 바와 같이 구형이 미세구 형성은 3차원 구조체 형성을 위한 SLS 공정에서 미세구의 흐름특성을 결정하는 중요한 요소이기 때문에, 본 연구에서는 전반적으로 80 °C의 온도에서 실험이 진행되었다.

Figure 6은 Method 1 방법을 통해 제조된 PEI 미세구 (Hausner 수 = 1.215)를 bar coating하여 형성된 미세구층의 사진과 이에 대한 광학현미경 사진이다. Figure 6(a)의 사진으로부터 PEI 미세구층이 균일하게 형성된 것을 확인할 수 있

다. 또한 Figure 6(b)의 고배율의 광학현미경 사진으로부터 PEI 미세구들이 균일하게 적층되어 빈 공간이 형성되지 않는 것을 확인할 수 있었다. SLS 공정은 균일하게 형성된 미세구층에 레이저를 통한 재료의 소결(sintering)을 통해 3차원 구조체를 형성하게 된다. 따라서 Figure 6과 Table 1의 결과로부터 본 연구에서 제조된 PEI 미세구들이 SLS 공정에 적용 가능한 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 무정형 고분자인 PEI의 유리전이온도 (glass transition temperature, T_g)는 DSC실험 결과 약 219 °C로 확인되었으며, TGA 분석 결과로부터 약 500 °C에서 열분해가 진행됨을 확인하였다. 따라서 SLS 공정 중 레이저 소결 공정은 PEI의 유리전이온도 이상에서 충분한 열에너지의 공

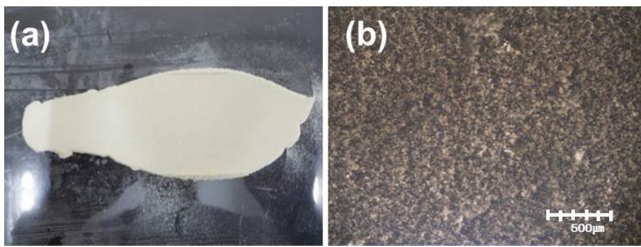


Figure 6. (a) Photograph; (b) OM image of layers of PEI microspheres.

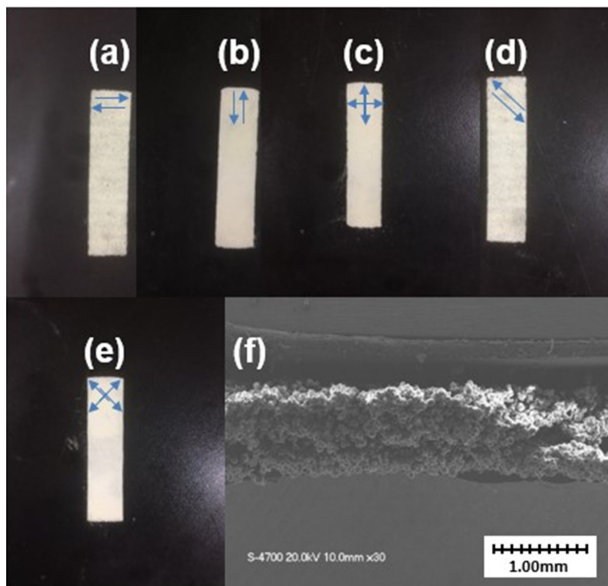


Figure 7. OM images of PEI films produced by SLS process with different scanning modes ((a) parallel; (b) perpendicular; (c) cross; (d) diagonal; (e) diagonal + diagonal); (f) cross-sectional SEM image of 2-layer PEI films.

급 하에서 진행되어야 한다. Figure 7은 SLS 공정을 통해 제조된 PEI 미세구의 시편들에 대한 사진들이다. 모든 시편은 PEI 미세구를 1층으로 적층하여 Sentrol사의 SLS용 장비 (SP250)를 활용하여 30 W의 laser power와 6000 mm/s의 scan rate를 사용하여 20 mm(가로)×80 mm(세로)×0.3 mm(높이)의 크기로 총 5개의 시편들이 제조되었다. 시편의 제조를 위해 본 연구에서는 Table 2에서 제시된 바와 같이 총 5가지 유형의 scanning direction가 시도되었으며, 또한 Figure 7의 사진에 파란색 화살표를 사용하여 각 시편에 대한 scanning direction을 표시하였다. Figure 7(f)는 SLS 공정에서 Method 2 방법으로 제조된 미세구를 2층으로 적층하여 diagonal 방향으로 소결한 시료의 단면 SEM 사진으로 PEI 미세구들이 소결과정을 거쳐 서로 잘 연결된 것을 확인할 수 있다. 모든 인쇄 공정들에서 요구되는 크기의 시편들이 성공적으로 제조되었으며, 이들 시편들의 인장시험(tensile test)을 진행하여 각

Table 2. Mechanical Properties of PEI Films Produced by SLS Process

Scanning direction	Young's modulus (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)
Parallel	11.34	0.025
Perpendicular	32.74	0.29
Diagonal	14.58	0.22
Diagonal+Diagonal	36.23	0.50
Cross	49.94	0.53

시편에 대한 Young 탄성률 및 인장강도를 측정하였다. 따라서 측정된 시편의 scanning direction에 따른 Young 탄성률 및 인장강도 값들이 Table 2에 정리되었다. 결과적으로 직교 (cross) 방향으로 소결된 시료가 가장 높은 Young 탄성률 (49.94 N/mm²)과 인장강도(0.53 N/mm²)를 갖는 것으로 확인되었다.

결론

본 연구에서 3차원 적층가공 공정 중 선택적 레이저 소결 (selective laser sintering(SLS)) 공정을 위해 poly(ether imide) (PEI)의 균일 용액에서 침전 작용을 통해 미세구(microspheres)를 제조하였다. 농도, 온도, 및 교반조건 등을 제어하여 제조된 PEI 미세구의 크기 및 크기분포를 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 측정하였으며, 그 결과 반지름이 약 40~10 µm을 갖는 균일한 구형 미세구의 제조가 가능하였다. PEI 미세구의 흐름특성을 확인하기 위해 Hausner 수를 측정하였으며, 그 결과 제조된 PEI 미세구가 SLS 공정에 매우 적합한 흐름특성을 갖고 있음을 확인하였다. 또한 PEI 미세구를 사용하여 SLS 공정을 통해 구조체를 성공적으로 성형하였으며, 이들 구조체의 기계적 물성을 측정하여 3차원 인쇄 공정용 소재로의 응용성을 확인하였다.

감사의 글: 본 연구는 산업통상자원부가 지원한 장비연계형 3D 프린팅 소재기술 개발사업(과제명: 플라스틱/금속 3차원구조 일체형 3D 전자회로 프린팅 장비 및 소재 개발 (10053838))과 경기도가 지원한 경기도 지역협력연구센터 (GRRC) 사업 (과제명: 유연소재 정밀성형용 기능성 미세복합 소재 개발(GRRC단국2016-B02))의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. B. P. Conner, G. P. Manogharan, A. N. Martof, L. M. Rodomsky, C. M. Rodomsky, D. C. Jordan, and J. W. Limperos, *Addit. Manuf.*, **1-4**, 64 (2014).
2. M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang, *Int. J. Adv. Manuf.*, **67**, 1721 (2013).

3. I. Gibson and D. Shi, *Rapid Prototyp. J.*, **3**, 129 (1997).
4. M. Schmid, A. Amado, and K. Wegener, *J. Mater. Res.*, **29**, 1824 (2014).
5. S. Kenzari, D. Bonina, J. M. Dubois, and V. Fournée, *Mater. Des.*, **35**, 691 (2012).
6. J. P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, and L. Froyen, *Assem. Autom.*, **23**, 357 (2003).
7. E. Goode, *Adv. Mater. Process.*, **161**, 66 (2003).
8. K. M. Fan, W. L. Cheung, and I. Gibson, *Rapid Prototyp. J.*, **11**, 188 (2005).
9. Y. Shi, Z. Li, H. Sun, S. Huang, and F. Zeng, *Proc. Inst. Mech. Eng. L J. Mater.*, **218**, 247 (2004).
10. C. Yan, Y. Shi, J. Yang, and J. Liu, *Polym. Mater. Sci. Eng.*, **26**, 145 (2010).
11. L. Hao, M. M. Savalani, Y. Zhang, K. E. Tanner, and R. A. Harris, *Proc. Inst. Mech. Eng. D J. Automob.*, **220**, 125 (2006).
12. R. L. Simpson, F. E. Wiria, A. A. Amis, C. K. Chua, K. F. Leong, U. N. Hansen, M. Chandrasekaran, and M. W. Lee, *J. Biomed. Mater. Res. B Appl.*, **84B**, 17 (2008).
13. R. D. Goodridge, C. J. Tuck, and R. J. M. Hague, *Prog. Mater. Sci.*, **57**, 229 (2012).
14. K. Shahzad, J. Deckers, S. Boury, B. Neirinck, J.-P. Kruth, and J. Vleugels, *Ceram. Int.*, **38**, 1241 (2012).
15. B. Van Hooreweder, D. Moens, R. Boonen, J.-P. Kruth, and P. Sas, *Polym. Test.*, **32**, 972 (2013).
16. G. V. Salmoria, R. A. Paggi, A. Lago, and V. E. Beal, *Polym. Test.*, **30**, 611 (2011).
17. C. Z. Yan, Y. S. Shi, J. S. Yang, and J. Liu, *J. Reinf. Plast. Compos.*, **28**, 2889 (2009).
18. J. S. Yang, Y. S. Shi, and C. Z. Yan, *J. Appl. Polym. Sci.*, **117**, 2196 (2010).
19. P. Keller, *Kunstst.-Plast Eur.*, **89**, 58 (1999).
20. Z. Chai, X. Zheng, and X. Sun, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **41**, 159 (2002).
21. G. Wang, P. Wang, Z. Zhen, W. Zhang, and J. Ji, *Mater. Des.*, **87**, 656 (2015).
22. R. B. Shah, M. A. Tawakkul, and M. A. Khan, *AAPS Pharm. Sci. Tech.*, **9**, 250 (2008).