

마이크로 분말사출성형에서 바인더 물성이 피드스탁 및 성형공정에 미치는 영향에 관한 연구

이원식¹ · 김용대[†]

한국생산기술연구원 융합공정소재그룹¹ · 한국생산기술연구원 금형기술그룹[†]

A study on the effect of binder properties on feedstock and micro powder injection molding process

Won-sik Lee¹ · Yong-dae Kim[†]

Advanced Process and Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology¹

Mold & Die R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology[†]

(Received September 22, 2017 / Revised November 15, 2017 / Accepted November 24, 2017)

Abstract: The fabrication process of micro pattern structure with high precision and high aspect ratio using powder injection molding (PIM) is developed. In the PIM process, the metal powder is mixed with the binder systems and the mixture is injected into the metal mold. The injection molded green parts are debinded and sintered to reach final shape and properties. In this method, the optimization of physical properties such as fluidity and strength of the binder system is essential for perfect filling the high aspect ratio micro-pattern. For this purpose, the correlation between the properties of the binder system and feedstock and μ -PIM process was investigated, and a binder system with low viscosity at low temperature (about 110°C) and high strength after cooling was investigated and applied. Employing this process, high precision parts with line type micro pattern structure which has pattern size 160 μ m and aspect ratio more than 2 can be manufactured.

Key Words: Binder, Feedstock, Fluidity, Micro pattern, Powder injection Molding, Strength.

1. 서 론

최근 디스플레이, LED 및 차세대 반도체, 초정밀 기계 등 우리의 새로운 성장동력으로 자리매김 하고 있는 신산업의 제품 및 부품이 더욱 소형화, 고기능화 되어 가고 있다. 특히, 의료 및 국방 분야의 핵심 부품 중 높은 종횡비가 요구되는 마이크로 패턴 형상의 구조체 부품의 수요가 증가하고 있다. 마이크로 패턴을 성형하는 기술에는 EDM, 레이저 가공 등 물리적 가공방법과 실리콘 에칭, 마이크로 엠보싱, 전주성형, 마이크로 사출성형 등 다양한 방법이 있다.

분말사출성형은 분말야금과 플라스틱 사출성형

을 결합한 제조방법으로 금속, 세라믹, 금속 간 화합물 및 복합재료 등 거의 모든 유형의 재료를 적용하여 복잡한 형상의 부품을 최종 형상으로 한번에 제작 할 수 있다¹⁾. 특히, 기존의 공정을 적용할 경우 비용이 많이 드는 작은 정밀부품을 일정한 형상과 품질로 대량생산할 수 있어서 초정밀 부품 분야에 경쟁력 있는 제조 공정으로 자리 잡고 있다.

Fig. 1은 분말사출성형공정의 공정순서를 나타낸 것이다. 먼저, 고분자 바인더와 금속 또는 세라믹 분말을 일정한 비율로 균질하게 혼합하여 피드스탁을 만들고, 이렇게 만들어진 피드스탁을 고분자가 용융되는 온도 이상으로 가열한 후 제품의 형상으로 만들어진 금형 캐비티 내로 사출하여 금형 모양으로 성형한다. 이때 제작된 사출성형체를 Green body라 부른다. Green body는 탈 바인더 공정에서 용매추출 또는 열분해를 통해 유기 바인더 성분을

1. 한국생산기술연구원 융합공정소재그룹
[†] 교신저자 : 한국생산기술연구원 금형기술그룹
E-mail: ydkim@kitech.re.kr

제거하고 금속 또는 세라믹 분말만으로 형성된 탈지체(Brown body)를 얻는다. 마지막으로 탈지체를 금속 또는 세라믹이 소결되는 온도로 가열하여 소결을 진행하면 최종 소결체를 얻게 되며 소결체는 바인더의 제거로 사출성형체 형상에 비하여 일정하게 선형적인 비율로 축소된 형상이 얻어 진다²⁾.

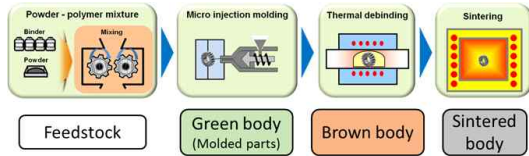


Fig. 1 Process flow diagram of powder injection molding

분말사출성형은 분말야금과는 달리 복잡한 형상의 금형 캐비티 내부로 소재를 완전히 충전시키기 위해 플라스틱 사출공정의 용융 플라스틱과 같이 충분한 유동성을 갖는 소재를 사용해야 한다. 특히, 고중량비 마이크로 패턴과 같이 유로가 좁고 충전 거리가 긴 캐비티를 완전히 충전하기 위해서는 더욱 높은 유동성을 갖는 피드스탁의 적용이 필요하다. 바인더와 분말이 혼합된 피드스탁의 유동성을 결정하는 요인은 점도가 낮은 바인더를 사용하거나, 사출온도를 높이거나 사출속도를 증가시켜 바인더의 점도를 낮추는 방법과 분말 대비 바인더의 함량을 높이는 방법이 있으나, 분말의 함량을 낮추는 것은 탈지·소결 공정중 불량의 발생 가능성이 높아지고 소결시 이방 수축이 발생하는 등 최종 소결체의 결함이 발생하는 경우가 많다.

금형 캐비티 내에 완전 충전되어 성형이 완료된 Green body는 탈지 및 소결공정을 진행하기 위해 금형으로부터 분리하여야 한다. 패턴의 중량비가 크고 패턴의 형상이 작을수록 이형시 성형체에 가해지는 이형력이 더욱 커지게 되고³⁾, 금형 벽면의 표면 거칠기에 따라서도 이형력의 크기는 달라진다⁴⁾. 이형 과정 동안 성형체의 가해지는 이형력에 기인한 변형 및 파단을 방지하기 위해서는 성형체의 강도가 충분히 높아야 한다. 이를 위해 분말사출성형공정에서 사출성형성과 금형으로부터의 이형성을 높이기 위한 연구들이 많이 진행되었다.

Bleyan, D.⁵⁾ 등은 Al_2O_3 고압축성 조경 분말 기반 피드스탁의 열분해 분석을 통해 열분해 특성과 시스템 조성 사이의 상관관계를 입증하였다. Zauner, R.⁶⁾ 등은 분말사출성형에서 사출성형체의 수치 변

동성과 피드스탁의 점도 변동성의 상관관계에 대한 연구를 통해 피드스탁 점도가 증가함에 따라 사출성형체 형상의 변동성도 증가함을 확인하였다. Khalil K. A.⁷⁾ 등은 피드스탁의 분말 함량에 따른 부품의 기계적 특성 및 미세구조 변화 분석하여 고밀도, 극한 강도, 경도 및 내마모성 등 높은 특성은 높은 분말 함량에서 얻어진다는 결과를 발표하였다. 이처럼 기존 연구의 대부분은 피드스탁의 특성과 성형체의 물성간의 상관관계에 대한 연구가 수행되어 왔다.

본 연구에서는 텅스텐 중합금 기반의 고중량비 마이크로 패턴 형상의 사출 성형을 위해서 높은 유동성과 강도를 갖는 피드스탁을 개발하기 위해서 바인더의 성분별 분율에 따른 점도 및 강도 변화를 분석하고 동일한 분말 함량에서 피드스탁의 점도 및 강도와와의 상관관계를 분석하여 바인더 특성이 피드스탁에 미치는 영향을 분석하고 고중량비 마이크로 패턴의 분말성형에 적합한 피드스탁을 제안하였다.

2. 실험방법

2.1. 분말 및 바인더 시스템

본 연구에서 적용한 최종 성형체의 텅스텐 중합금 조성은 텅스텐(W) 95%를 기본으로 니켈(Ni), 철(Fe)의 분율을 각각 6%와 4%로 구성하였다. 마이크로 패턴의 사출성, 탈지·소결 공정에서의 미세조직 특성을 확보하기 위해 각 분말의 입경은 $\sim 5\mu m$ 수준의 분말을 사용하였다. Table 1은 본 연구에 사용한 각 성분 분말의 입도분포를 평가한 결과이다.

Table 1 Particle size distribution of metal powder

		W	Fe	Ni
Particle size (μm)	D10	2.774	2.625	3.046
	D50	6.644	5.526	16.75
	D90	36.30	45.99	54.07

성분별 입도평가 결과 각 분말의 D_{50} 값은 $5\mu m$ 보다 큰 것으로 평가되었으며, 특히 니켈 분말의 경우 $16.755\mu m$ 로 3배 이상 큰 값을 나타내고 있음을 확인하였다. 분말 입도에 대한 보다 정확한 확인을 위해서 SEM을 통해 분말의 미세구조를 관찰하여 분말의 형태 및 입자의 크기를 분석하였다. Fig. 2는

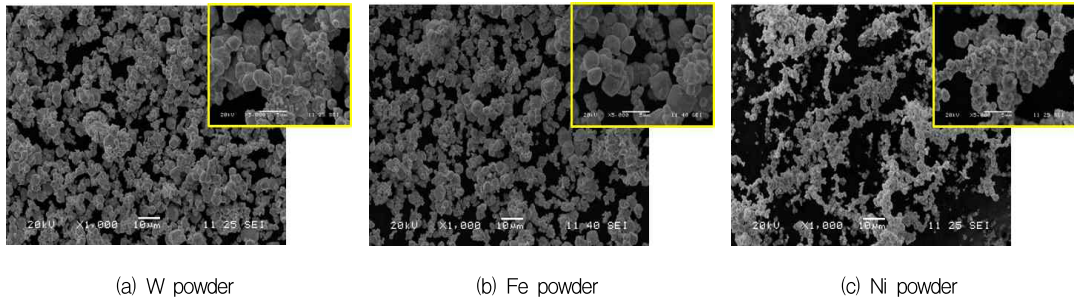


Fig. 2 SEM micrographs of metal powder

SEM을 통해 관찰한 분말의 형상을 나타낸 것이다. SEM 결과를 통해 확인할 수 있는 바와 같이 각 분말의 개별 입자의 입도는 $5\mu\text{m}$ 보다 작지만 입자들의 응집으로 인하여 입도분포는 보다 큰 입도를 분석한 것을 알 수 있다. 특히, 니켈 분말의 경우 개별 분말의 입자 크기는 $2\mu\text{m}$ 수준으로 판단되나 응집으로 인하여 입도 평가결과의 값은 $16.75\mu\text{m}$ 로 7배 이상 높게 평가되었다.

분말은 피드스탁 제조과정에서 바인더와의 균질한 혼합을 위해 혼합기 내에서 충분한 시간동안 높은 전단력을 받게 되며 이러한 과정에서 응집된 분말들의 분산이 일어날 것으로 예상되어 분말에 대한 해쇄(Deagglomerate) 공정을 진행하지는 않았다.

분말사출 바인더에 요구되는 일반적인 특성은 첫째 급형 캐비티내 충전을 위해 높은 유동성이 있을 것 둘째, 취출시 변형과 파손 방지를 위해 충분한 강도 및 강성을 가질 것 셋째, 낮은 분자량과 방향성이 없을 것 넷째, 금속분말과의 젖음성이 좋을 것, 다섯째, 금속과 새로운 화합물을 이루는 것을 방지하기 위해 화학적 안정성과 탈지공정 제거하기 위해 열, 용매 등에 의한 분해가 용이할 것 여섯째, 분해산물 및 유해성이 없을 것 마지막으로 재활용이 가능한 소재여야 한다는 것이다. 특히 중횡비가 큰 마이크로 패턴의 충전 및 취출을 위해서는 가급적 낮은 온도에서도 낮은 점도 특성을 통한 높은 유동성과 냉각후 급형으로부터 취출시 큰 비표면적에서 발생하는 표면 전단저항을 극복하기 위한 충분한 강도가 가장 중요한 요인으로 판단된다.

본 연구에서는 높은 유동성 확보를 위해 파라핀

왁스(Paraffin wax, PW)를 기반으로 사출성형체의 강도 및 탈지공정에서 형상을 유지하는 역할을 위해 저밀도 폴리에틸렌 (Low Density Polyethylene, LDPE)을 적용하고 사출공정 중 금속분말과 바인더와의 분리를 방지하기 위해 금속분말에 대한 젖음성을 높이고 접착력을 향상시키는 계면활성제인 스테아릭 산(Stearic acid, SA)를 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용한 바인더 성분이다.



Fig. 3 Components of binder system

각각의 바인더 성분의 열적 특성을 확인하기 위해 시차열분석(Differential Thermal Analysis, DTA)와 열중량분석(ThermoGravimetric Analysis, TGA)을 실시하였다. 각 바인더 성분은 모두 용융온도에서 첫째 흡열반응이 일어나고 두번째 흡열반응 온도에서 분해가 시작되는 양상을 나타내고 있으며, 이를 통해 용융온도와 분해온도를 확인하여 향후 혼합 바인더의 열특성과의 연관 관계를 확인할 수 있다. 열중량 분석을 통해 각 바인더 성분의 분해반응 온도 및 양상을 확인할 수 있으며 이는 탈지과정에서 금속분말 형체 유지의 중요한 인자가 된다. Table 2는 분석을 통해 확인 바인더 성분별 물성을 나타낸 것이다.

Table 2 Thermal properties of binder components

Binder	Density (g/cm ³)	Melting Temp.(°C)	Decomposition(°C)	
			Start	Finish
PW	0.900	49.2 / 65.2	226.6	415.6
LDPE	0.910	111.54	381.8	500.0
SA	0.847	60.01	174.1	326.6

바인더 성분별 분율에 따른 바인더 시스템 및 최종적으로 분말을 혼합한 피드스탁의 유동성과 강도와의 상관관계를 분석하기 위해 유동성에 관련된 파라핀 왁스와 강도와 관련된 저밀도 폴리에틸렌의 비율을 75:15, 65:25, 55:35로 변화시킨 3가지의 바인더 시스템을 설계하였다. Table 3은 본 연구에서 분석한 바인더 시스템을 나타낸 것이다. 바인더 요소들은 모든 성분들이 충분히 용융될 수 있는 온도인 140°C로 가열하여 기계식 stirrer를 통해 500rpm으로 30분 이상 충분히 혼합하였다.

Table 3 Design of binder systems

Role	Flowability	Backbone	surfactant
Components	Paraffin Wax	LDPE	Stearic Acid
#1	75 vol.%	15 vol.%	10 vol.%
#2	65 vol.%	25 vol.%	10 vol.%
#3	55 vol.%	35 vol.%	10 vol.%

2.2. 실험방법

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 바인더 점도 측정시스템으로 Brookfield 회전식 점도계(Viscometer DV-II+) 및 온도제어를 위한 Thermosel과 온도제어 장치로 구성되어 있다.



Fig. 4 Binder viscosity measurement system

혼합된 바인더를 용융시킨후 온도를 변화시키면서 점도를 측정하였다. 점도를 측정하는 동안 용융된 바인더 시스템이 외부의 차가운 공기로부터 충분히 단열되어 외기에 의한 영향을 최소화 하고 바인더의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 Thermosel을 이용하여 10cc의 바인더를 샘플 실린더 내에 담아 가열로에 위치시키고 실린더 내부에 스피ن들을 회전하면서 진단속도에 따른 점도를 측정하였다.

피드스탁의 점도는 Brabender의 Internal mixer를 이용하여 바인더와 분말의 혼합시에 발생하는 혼합토크를 통해 상대 비교하였다. 바인더와 분말이 충분히 혼합되어 토크값이 안정된 이후의 혼합토크를 통해 균질하게 혼합된 피드스탁의 상대점도를 평가하였으며, Fig. 5는 피드스탁의 혼합과 혼합토크 측정을 위해 사용한 혼합믹서이다.

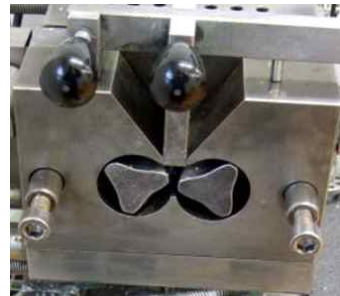


Fig. 5 Feedstock mixing torque measurement system

바인더 시스템과 피드스탁의 강도 측정은 사각시편 (30×10×7)을 제작하여 시편의 굽힘강도 측정을 통해 평가하였다. 사각시편은 수직형 사출기를 이용하여 사출성형으로 제작하였다. Fig. 6은 강도측정을 위해 사용한 3점 굽힘 시험장치 및 실험 모습을 나타낸 것이다.



Fig. 6 3-point bending test

3 실험결과

3.1. 바인더 시스템의 점도 측정

각 바인더 시스템의 온도에 따른 점도변화를 분석하기 위해 Thermosel을 이용하여 바인더 시료의 온도를 충분히 높은 온도인 145도를 시작으로 5도씩 낮추어 가며 점도를 측정하였다. 온도 하강 이후 점도계가 지시하는 값이 충분히 안정된 이후의 점도값을 측정하였으며 데이터 로거를 이용하여 1 sec 간격으로 점도값을 저장하고 120sec간의 평균값을 계산하였다. Fig. 7은 각 바인더 시스템의 온도에 따른 점도의 변화를 나타낸 그래프이다. back-bone 역할을 하는 LDPE의 함량이 증가할수록 점도가 급격히 증가함을 알 수 있다. LDPE 35%인 바인더의 경우 110도 이하의 온도에서 점도가 급격히 상승하여 회전식 점도계의 측정 범위를 벗어나는 점도에 도달하였고 LDPE 25%의 바인더는 100도 이하의 온도에서 급격한 점도 상승이 나타났다. 그에 비하여 LDPE 15%의 바인더 시스템은 90도 이하에서 동일한 결과를 확인하였다. 이는 분자량이 크고 점도가 높은 LDPE의 함량이 바인더 시스템 전체의 점도에 지배적 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

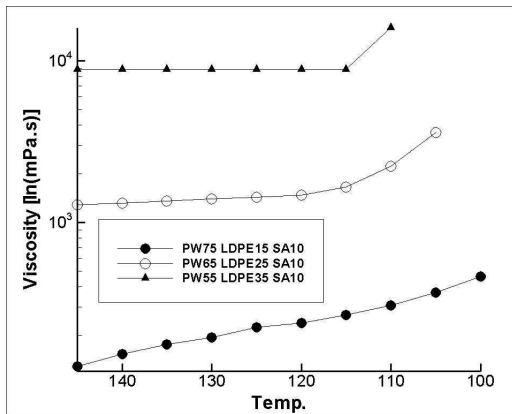


Fig. 7 Variation of binder viscosity as a function of temperature

3.2. 피드스탁 혼합토크 측정

일반적으로 분말사출성형에서 피드스탁 중 분말의 함량은 바인더가 분말의 주위를 완전히 감싸면서 최대한 분말의 함량이 높은 것이 제품의 형상정밀도를 높이고 내부 결합 및 밀도를 높이는 방법이

다. 이러한 최적의 분말 함량을 결정하는 방법 중 가장 일반적인 방법은 분말의 함량을 일정하게 증가 시키면서 혼합토크를 측정하여 토크의 변화를 통해 분말 함량의 임계점을 찾는 것이다. 본 연구에서도 분말의 함량을 체적 기준 47%에서 2%씩 증가 하면서 혼합토크의 거동을 분석하여 토크의 변화율이 바뀌는 변곡점을 임계 분말 함유량으로 판단하였다. Fig. 8은 각각의 바인더 시스템에서 분말의 함유량 증가에 따른 혼합토크 변화를 나타낸 것이다.

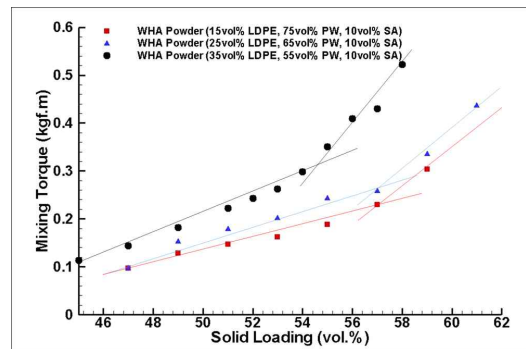


Fig. 8 Mixing torque value vs. powder solid loading

LDPE 15%와 25% 바인더를 적용한 피드스탁은 분말 함량 약 57%의 임계값을 나타내고 있으나, LDPE의 함량이 35%로 증가하면 분말 함량 55%에서 혼합토크의 증가율이 변화되고 있어 55% 부근이 임계 분말함량임을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 분말 함량의 영향을 배제하기 위하여 모든 바인더 시스템에 적용이 가능한 55%의 분말 함량으로 피드스탁을 제조하여 동일한 분말 함량에서 바인더 특성과 피드스탁 특성간의 상관관계를 분석하였다.

3.3. 상관관계 분석

바인더 시스템에 따른 피드스탁의 유동성 변화를 분석하기 위하여 텅스텐 중합금 피드스탁의 사출온도인 110도에서 바인더 시스템의 점도와 55 vol.%를 혼합한 피드스탁의 혼합토크를 비교하여 LDPE 비율에 따른 유동성 변화를 분석하였다. Fig. 9는 LDPE 함량에 따른 바인더 점도와 피드스탁 혼합토크를 나타낸 그래프이다. LDPE함량이 증가함에 따라 바인더 점도와 피드스탁의 혼합토크는 지수적으로 증가하고 있으며 그 증가 양상이 매우 유사한 양

상을 나타내고 있다. 이를 통해, 바인더의 유동특성이 피드스탁에서도 그대로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

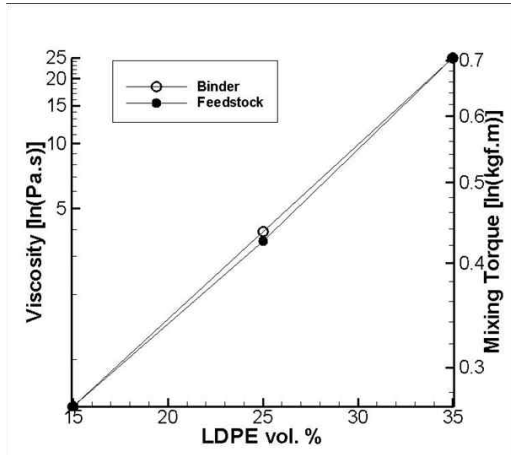


Fig. 9 Binder viscosity & Feedstock mixing torque vs. LDPE vol. %

Fig. 10은 LDPE 체적 분을 변화에 따른 바인더와 피드스탁의 굽힘강도를 측정된 결과이다. LDPE의 함량이 증가함에 따라 굽힘강도도 증가하고 있으며 증가하는 양상도 매우 유사하다. 그러나 강도의 증가량은 바인더에 비하여 피드스탁이 작다는 것을 알 수 있다.

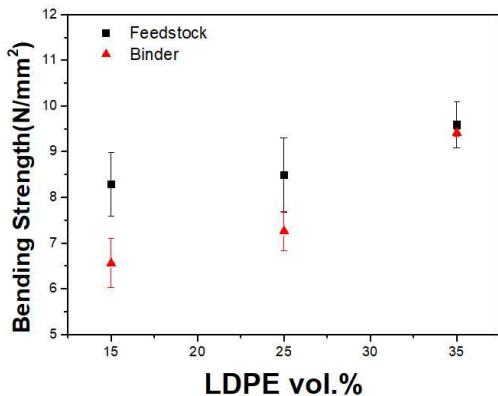
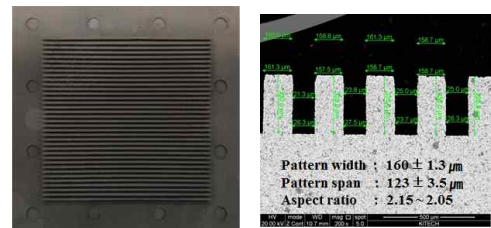


Fig. 10 Bending strength of Binder & Feedstock vs. LDPE vol. %

3.4. 고종횡비 마이크로 패턴의 성형

본 연구의 바인더 시스템을 종횡비 2의 라인형 마이크로 패턴의 성형에 적용한 결과 LDPE의 함량

이 작을 경우 열탈지 중 형상이 무너지는 현상이 발생 하였다. 이는 LDPE의 양이 충분하지 않을 경우 비중이 큰 텅스텐 분말을 충분히 지지하지 못해서 발생하는 문제인 것으로 판단되며, 본 연구의 바인더 시스템 중 LDPE 함량이 35%로 가장 높은 바인더 시스템에서 형상이 유지됨을 확인할 수 있었다. 이를 적용하여 탈지 및 소결 공정을 성공적으로 수행하였으며 종횡비 2 이상의 마이크로 패턴 소결체를 성공적으로 성형하였다. Fig. 11은 라인형 마이크로 패턴 사출성형체 및 최종 소결체 단면의 미세구조를 나타낸 것이다. 최종 소결된 패턴의 폭은 160 μm , 종횡비는 2.15 ~ 2.05이다.



(a) Green body (b) Section of sintered body

Fig. 11 line-pattern micro structure by μ -MIM

4. 결론 및 토의

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) LDPE 체적분율이 증가함에 따라 바인더의 점도의 지수적 증가하며, 피드스탁 혼합토크 역시 지수적으로 증가하는 양상을 보이므로 바인더 점도는 피드스탁 점도에 직접적 영향을 미친다.
- 2) LDPE가 증가함에 따라 바인더의 강도가 증가하며 피드스탁의 강도 역시 증가하고 있으나, 그 증가폭은 바인더의 강도 증가에 50% 이하로 상대적으로 작다.
- 3) 바인더 내 LDPE의 함량이 많아지면 분말과 바인더의 젖음성이 저하되어 분말의 임계 함유량이 감소하고 피드스탁의 점도가 증가한다.
- 4) LDPE 35%, PW 55%, SA 10%의 바인더 시스템을 이용하여 종횡비 2 이상, 패턴 크기 160 μm 의 고종횡비 마이크로 구조체를 성공적으로 성형하였다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 산업핵심기술개발 사업으로 진행 중인 “금속 및 세라믹 마이크로 구조체 부품 제조를 위한 패턴 폭 150 μ m이하 고중횡비 분말사출 금형 및 성형기술개발”, 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) German, R. M., Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industrial Federation, Princeton, NJ, 1984.
- 2) German, R. M., Bose, A., “Injection molding of metals and ceramics”, Metal Powder Industrial Federation, Princeton, NJ, 1997.
- 3) Sasaki, T., Koga, N., Shirai, K., Kobayashi, Y., Toyoshima, A., “An experimental study on ejection forces of injection molding”, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 24, pp. 270-273, 2000.
- 4) Worgull, M., He’tu, J. F., Kabanemi, K. K., and Heckeke, M., Hot embossing of microstructures: characterization of friction during demolding, Microsyst. Technol., Vol. 14, pp. 767-773, 2008.
- 5) Bleyan, D., and Hausnerova, B. The Role of Polymer Binder in Ceramic Injection Moulding, Key Engineering Materials, Vol. 581, pp. 82-88, 2014.
- 6) Zauner, R., Binet C., Heaney, D. F., and Piemme J., Variability of feedstock viscosity and its correlation with dimensional variability of green powder injection moulded components, Powder Metallurgy, Vol .47, No. 1, pp. 1-6, 2004.