

금속분말 사출성형 제품의 공정능력분석에 관한 연구

최병기⁺, 이동길*, 최병희**

(논문접수일 2009. 08. 18, 심사완료일 2009. 11. 24)

A Study on the Process Capability Analysis of MIM Product

Byung-ky Choi⁺, Dong-gil Lee*, Byung-hui Choi**

Abstract

Metal Injection Molding (MIM) is attractive because it produces consistent, complex-geometry components for high-volume, high-strength, and high-performance applications. Also MIM using in optical communication field, display field, and semi-conductor field is a cost-effective alternative to metal machining or investment casting parts. It offers tremendous single-step parts consolidation potential and design flexibility.

The objective of this paper is to study the suitability of design, flow analysis, debinding and sintering processes, and capability analysis. The suitable injection conditions were 0.5~1.5 second filling time, 11.0~12.5 MPa injection pressure derived from flow analysis. The gravity of the product is measured after debinding and sintering. The maximum and minimum gravity levels are 7.5939 and 7.5097, the average and standard deviation are 7.5579 and 0.0122; when converted into density, the figure stands at 98.154%. According to an analysis of overall capacity, PPM total, which refers to defect per million opportunities(DPMO), stands at 166,066.3 Z.Bench-the sum of defect rates exceeding the actual lowest and highest limits-is 0.97, which translates into the good quality rate of around 88.4% and the sigma level of 2.47.

Key Words : Metal injection molding(금속분말사출성형), Solvent extraction(용매추출), Thermal debinding(열분해탈지), Sintering(소결), Gravity(비중), Density(밀도)

1. 서론

금속분말사출성형법(MIM : Metal Injection Molding)은

각종 금속분말재료를 적절한 유기바인더 시스템과 혼합하여 균일한 분말혼합체를 제조하는 혼합공정, 분말혼합체를 사출성형공정을 이용하여 원하는 형상의 제품을 만드는 사출

+ 조선대학교 기계공학과 (bkchoi@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

* 한국생산기술연구원

** 조선이공대학 자동차과

성형공정, 사출성형체에 포함되어 있는 바인더를 제거하는 탈지공정 및 최종적인 소결공정을 거쳐 완성된 금속성형 제품을 만드는 소결공정과 같이 여러 가지 복합적인 공정기술로 이루어진 제조공법이다⁽¹⁾.

이러한 MIM은 절삭가공, 정밀주조, 다이캐스팅, 분말야금 등과 같은 기존기술로서는 제조가 곤란하거나 가격이 문제가 되는 고기능성 복잡형상의 금속부품을 양산할 수 있는 신기술로서 제 5세대 금속가공법이라 불리며 최근 크게 주목을 받고 있다^(1,2). 또한, 분말제조기술, 성형기술 및 소결기술의 발전에 따라 저가격의 실현이 가능해져, 최근 많은 나라에서 고급시계 밴드 등의 식품, OA사무기기, 재봉기, AV 기기, 전기기기 등의 복잡형상 부품 등으로 그 용도가 점차 확대되고 있다.

그러나, MIM은 다량의 바인더를 첨가하여 분말의 유동성과 성형성을 높여 플라스틱과 같이 사출성형 후 첨가된 바인더를 후 공정에서 제거하여야 하는데 어떻게 기술적이면서 경제적으로 제거하는가가 MIM의 핵심기술이라 할 수 있다. 따라서 분말사출성형 기술에서 대두되고 있는 가장 큰 문제점은 결합제를 제거하는 탈지공정에서의 시간이 너무 많이 소요되어 제품의 양산시 경제적인 손실을 가져오고 있다는 것이다⁽³⁻⁷⁾.

바인더를 제거하는 가장 일반적인 방법은 성형체를 서서히 가열하여 바인더를 열분해를 통하여 기화 증발시키는 것이다. 그러나 바인더를 가열 증발시켜보면 대부분의 바인더들이 낮은 온도에서는 서서히 증발하다가 어느 온도에 이르면 급격하게 증발하는 특성을 가지며 그 온도는 바인더에 따라 상당한 차이를 보인다. 바인더 제거공정 과정에서 발생하는 결합들은 비틀림이나 휘어짐에 의한 모양의 변화뿐만 아니라, 표면에 파입, 변색 그리고 내부 결합 등이 있다. 단순한 조성으로 된 왁스나 고분자 바인더는 좁은 온도범위에서 제거되기 때문에 성형체 파손의 가능성이 매우 많게 된다. 여러 가지 조성으로 된 바인더는 여러 단계로 제거되어 각 단계에서 잔류하는 바인더가 성형체의 유지를 도와주게 된다. 일반적으로 첫 번째 조성의 바인더가 제거될 때, 부피변화가 작게 일어나면 성형체의 비틀림을 최소화할 수 있다. 이러한 이유로 실제에서는 워킹(wicking), 승화, 용매추출법 등이 유용하게 쓰이고 있다⁽⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 가장 일반적으로 적용되고 있는 기존의 단일 열분해 탈지공정 전에 용매탈지를 실시하여 탈지공정 소요시간 단축 및 금속분말 사출성형 프로세스에 대한 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험

금속분말사출성형에 의한 부품개발 공정은 금속분말과 바인더를 혼합하여 혼련 후 알갱이 모양으로 잘게 부수고, 이를 원하는 모양으로 사출성형한 후 사출성형체에서 바인더를 제거시키고 소결시키는 공정을 거쳐 수행하였다. 물론 소결체를 더 조밀하게 하거나, 열처리 또는 기계가공 등을 거쳐 더욱 정밀한 제품을 양산하기 위한 공정 등이 있으나 본 연구에서는 특별한 후가공 및 후공정 없이 제품을 완성하기 위한 기본 프로세스를 Fig. 1과 같이 수행한 후 비중을 측정하여 공정능력을 분석하였다.

일반적으로 금속분말사출 시 주재료 외에 혼합되는 바인더는 분말을 원하는 모양으로 균일하게 충전시키고 소결이 시작될 때까지 사출 성형된 모양을 유지하도록 하는 순간적인 매개물이다. 따라서 최종제품에는 바인더가 존재하지 않는 것이 보통이나 사출공정에서는 유동특성, 입자들 간의 작용 및 탈결합 특성 등에 중요한 영향을 미친다. 따라서 혼합과 성형이 잘 이루어지기 위해서는 열가소성 화합물, 열경화성 화합물, 수계 화합물, 젤 화합물 및 무기 화합물 등 여러 가지 바인더가 함께 혼합되는 것이 보통이다.

본 연구의 금속분말사출을 위한 금속분말은 약 2.0 μ m 입자 크기의 STS316 금속분말을 사용하였으며, 바인더로서는 PE, PW, SA 디부틸부탈레이트 등을 사용하였다. 금속분말과 바인더의 혼합비는 62:38(Vol.%), 혼합시간은 80min으로 설정하였고, 혼합온도는 바인더의 열적분해가 이루어지

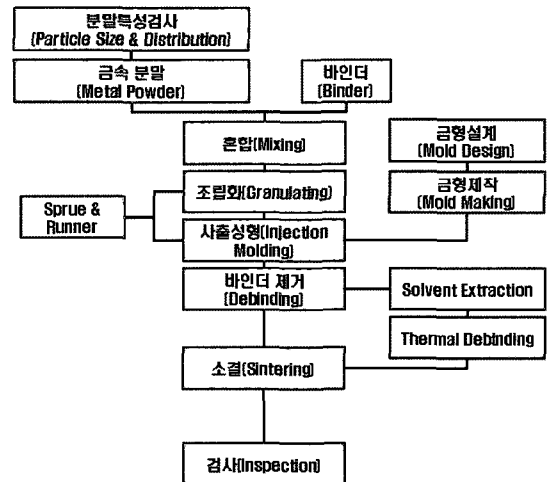


Fig. 1 Process for metal injection molding

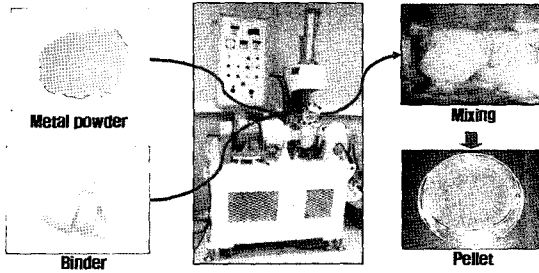


Photo. 1 Mixing and pellet manufacturing process

지 않는 150°C에서 실시하였다. Photo. 1은 금속분말과 바인더의 혼합 및 Pellet의 제조과정을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 사출성형체 설계 및 금형제작

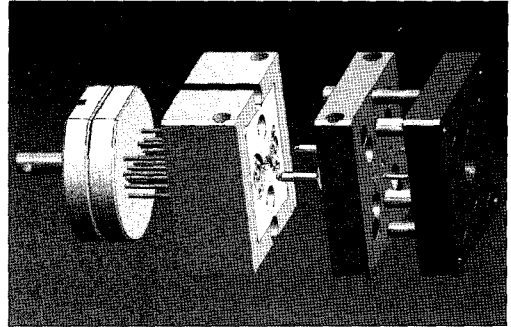
사출성형체에 대한 설계는 금속분말사출에 의한 제품 양산 시 바인더를 제거하는 소결공정을 반드시 거쳐야 하므로 이 공정 중 제품의 수축이 필수적으로 수반되므로 수축률에 대한 고찰이 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 사출된 성형체의 소결에 의한 체적 수축률을 약 18.7%로 선정하여 바인더의 종류 및 혼합비를 조절하였으며⁽⁹⁾, 이 수축률을 고려하여 사출성형체의 형상 및 치수(직경 4.2mm, 길이 18.0mm)를 최종적으로 결정하여 금형설계 및 이를 사출하기위한 2 Cavity 금형을 제작하였다.

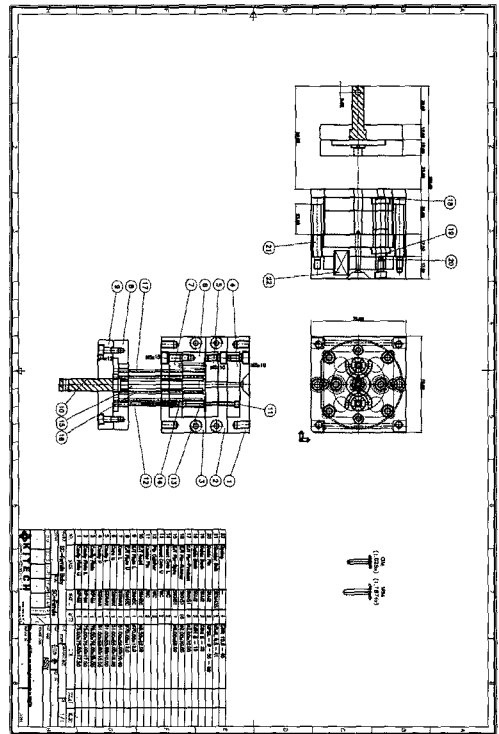
금형설계를 위해서는 최종제품의 치수 및 형상을 설계 후 수축률을 고려한 사출성형체(green body)에 대한 설계를 하였으며, 이후 냉각 및 기계적 메카니즘을 고려한 금형설계를 수행하였다.

금형설계 및 제작 시 대표적으로 중요한 부분으로서는 상코어(upper core)와 하코어(lower core)의 구조적 설계와 각 부품의 형상 및 각 원판들과의 위치결정 등을 들 수 있다. 또한, 본 연구에서 제작된 금형은 상원판, 하원판을 비롯하여 상코어, 하코어, 가이드 핀 부시 등 약 20가지 정도의 부품으로 구성되어있으므로 각각의 캐비티 별로 위치공차 및 내경기준 외경의 동심도 관리에 신중을 기하였다.

Fig. 2 (a)는 설계된 금형의 3차원 형상을, (b)는 금형의 조립도를 각각 나타내고 있으며, Photo. 2는 제작된 금형의 대표적인 사진으로서 전체적인 조립형상 및 상측과 하측의 모습을 나타내고 있다.



(a) 3D shape



(b) Assembly drawing

Fig. 2 Drawing of the mold

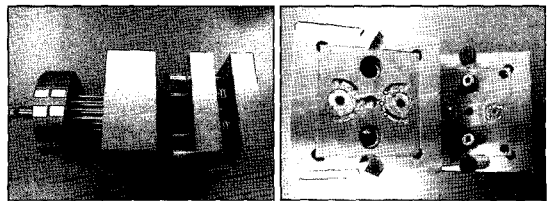


Photo. 2 Manufactured mold

3.2 유동해석 및 사출조건 도출

다수 캐비티 사출금형에서의 충전 불균형은 1997년 Beaumont⁽⁶⁾에 의해 그 현상의 원인이 규명된 바 있으며, 그 원인은 충전 단계에서 러너 내에 발생하는 불균일한 전단분포에 기인하여 발생되므로 점도 변화에 영향을 주는 수지의 물성, 러너(runner)의 배열(layout)과 같은 외부 요인과 사출속도, 수지 온도, 금형온도, 사출압력과 같은 성형공정조건에 의한 요인에 의해 충전 불균형의 양상이 달리 발생하게 된다⁽¹⁰⁾.

일반적으로 사출성형 공정에서 생산성을 향상시키기 위해서는 성형 사이클 타임의 단축과 다수 캐비티 금형 개발이 필수적인데 성형 사이클 타임의 단축을 위해서는 적절한 냉각시스템과 고속 사출성형기 등에 관한 연구가 필요할 것이며^(11,12), 다수 캐비티 금형에서는 각 캐비티에서 성형되는 성형품에 대한 균일한 품질의 확보를 위한 최적 성형조건 탐색과 금형구조의 개선에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다.

금형설계에 대한 적절성 및 검증은 위하여 제품의 모델링 및 유동해석을 병행하여 설계에 반영하였으며, 사용된 소프트웨어는 UGNX4.0, SolidWorks2005, Hyper Mesh7.1, Mold Flow 5.1(MPI)이다.

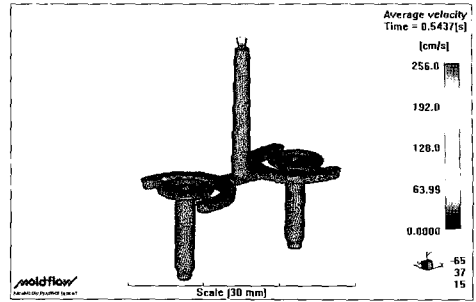
해석을 위해 적용된 조건은 유사한 크기 및 형상의 세라믹 사출금형을 제작한 사전연구 경험 및 데이터를 통하여 검증된 사출조건을 선 부여하고 사출압력, 온도, 속도 등을 변경하며 반복해석에 의해 최적의 해석결과를 도출하는 방식을 적용하였다.

해석에 의하여 조건을 도출한 내용으로서는 충전시간, 사출온도 및 압력 등을 도출하였으며, 이 들 조건은 현재 보유하고 있는 사출기의 사양 및 분말에 최적화 시켰다.

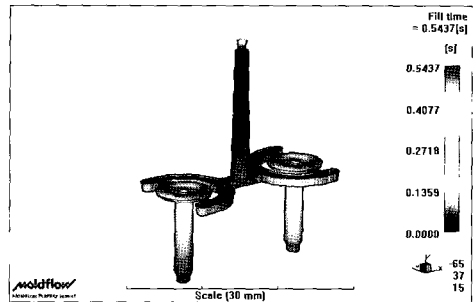
Fig. 3 (a)와 (b)는 유동해석의 대표적 결과인 평균속도와 충전시간을 나타내고 있으며, (c)와 (d)는 해석에 의하여 얻어진 결합의 크기 및 위치 등을 나타내고 있는 웰드라인(weld lines) 및 에어트랩(air traps)의 결과를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 러너의 형상과 게이트의 위치 및 크기 등을 고려하여 해석한 결과 국부적으로 일부 결합이 나타나고 있으나, 존재 가능한 위치가 제품의 기능적인 측면과 정밀도 측면으로 볼 때 극히 미소한 영향을 나타내리라 판단된다. 따라서 유동해석에 의하여 도출된 사출압력 및 시간 등의 최적조건으로 사료되는 결과는 Table 1과 같다.

3.3 용매탈지

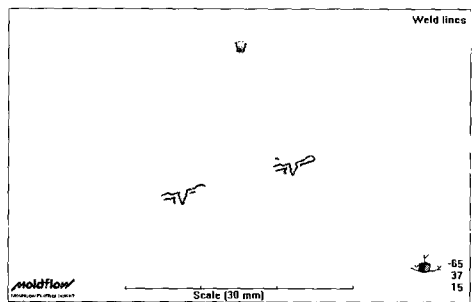
용매탈지 공정에 사용한 용매는 노말 헥산(N-hexan)을 사용하였으며, 시료는 임의로 10개씩 채취하여 40℃, 50℃,



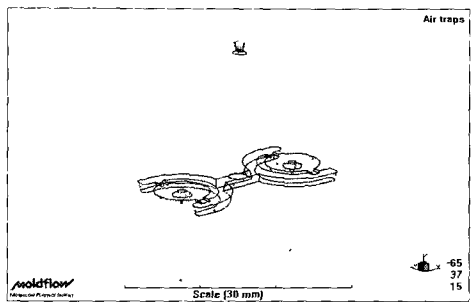
(a) Analyzed result of average velocity



(b) Analyzed result of fill time



(c) Analyzed result of weld lines



(d) Analyzed result of air traps

Fig. 3 Results of the flow analysis

Table 1 Driven condition from flow analysis

Conditions	Values
1st Injection pressure & time	10.0 MPa & 3.0sec
2nd Injection pressure & time	9.5 MPa & 1.5sec
1st & 2nd injection speed	100% & 70%
Cooling and cycle time	30sec & 50sec
Temperature(H1/H2/H3)	110°C/170°C/240°C
Injection T/return T/pressure	0.5sec/0.2sec/10.0MPa

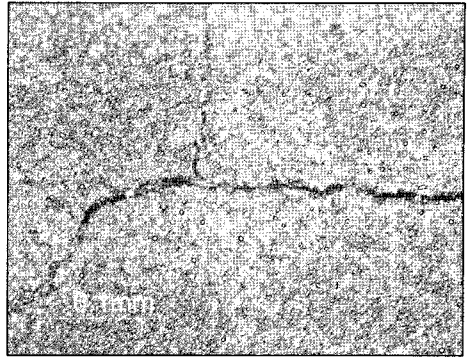
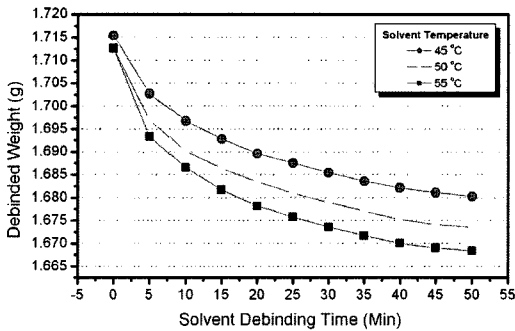
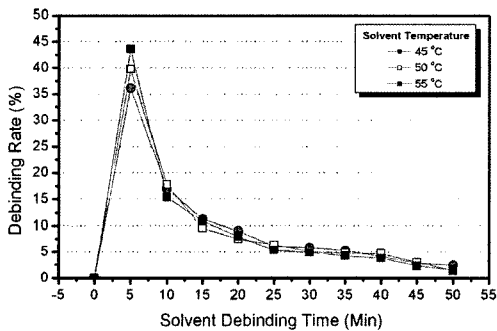


Photo. 3 Crack during solvent extraction at 55°C



(a) Relation between solvent temp. and debinded wight



(b) Relation between solvent temp. and debinding rate

Fig. 4 Solvent extraction profiles

55°C 조건에서 약 1시간 가량 실시하여 5분마다 중량차이를 관찰하였다, 또한, 용매의 일정한 온도유지를 위해 핫플레이트(hot plate)를 사용하였으며 용매의 균일한 온도분포 및 열전달을 위해 교반기(stirrer)를 바닥면에 설치하여 지속적인 회전이 이루어질 수 있도록 하였다.

Fig. 4는 용매탈지 온도와 탈지율과의 관계를 나타낸 것으로서 이때 적용된 시료는 각각의 온도조건에서 10개씩 실험 후 평균하여 조사한 결과를 나타내고 있다. 그림에 나타난

Table 2 Applied schedule for thermal debinding

Debinding Pattern (°C)	Time(hr)	Atmosphere
Room→250°C	2 hr	Vacuum (10 ⁻³ Torr)
250°C→Keep	3 hr	
250°C→450°C	3.5 hr	
450°C→Keep	3 hr	
450°C→250°C	2 hr	
250°C→0°C	1 hr	

바와 같이 용매탈지 시작 후 약 10분 이내에서 전체 탈지되는 바인더량의 약 70%가 이루어지며, 시간이 지날수록 중량의 변화가 점차 감소하여 약 25분 이후부터는 그 양이 현저히 저하됨을 알 수 있다. 또한 용매의 온도가 높을수록 바인더의 탈지되는 속도가 현저히 높아짐을 알 수 있었다. 그러나 Photo. 3에 나타난 바와 같이 고온인 55°C에서 탈지한 시료 중 미세한 크랙이 발생하는 현상이 있었으므로 결과적으로 50°C에서 용매탈지 조건이 가장 적절하였다고 할 수 있다.

3.4 2차 열분해 탈지

2차 열분해 탈지공정 실험을 위해 용매탈지된 시료를 이용하여 열분해 탈지 후 결함이 발생되지 않는 범위내의 몇 가지 스케줄을 적용하여 실험하였으며, 최종적으로 Table 2와 같은 스케줄을 도출 및 적용하였고, 도출된 스케줄과 기존의 오랜 시간이 소요되었던 단일열분해 탈지와와의 비교를 해 본 결과 Fig. 5와 같은 선도를 얻을 수 있었다. 그림에 나타난 바와 같이 2차 열분해 탈지는 기존 단일 열분해 탈지에 비교하여 그 소요시간이 약 32%의 수준인 약 14시간이

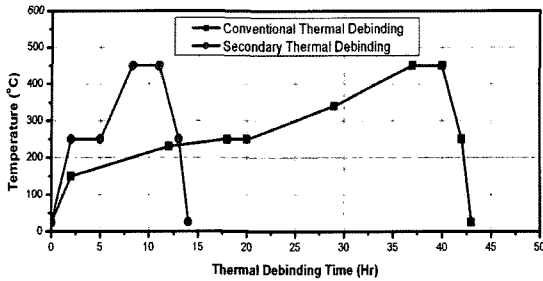


Fig. 5 Comparison of conventional method with secondary thermal debinding process

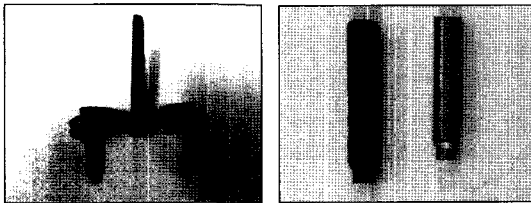


Photo. 4 Green body(left) and sintered sample(right)

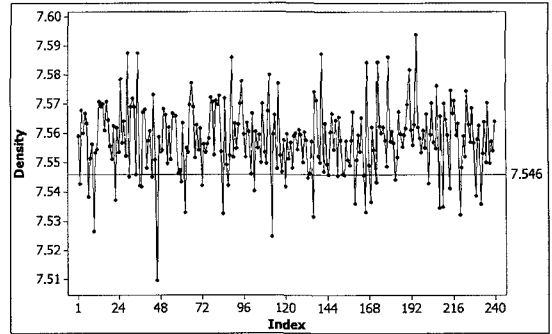
소요됨을 알 수 있었으며, 용매탈지에 소요된 시간을 고려하더라도 약 35% 미만인 15시간 정도가 소요됨을 알 수 있었다.

3.5 기계적 성질 및 공정능력 분석

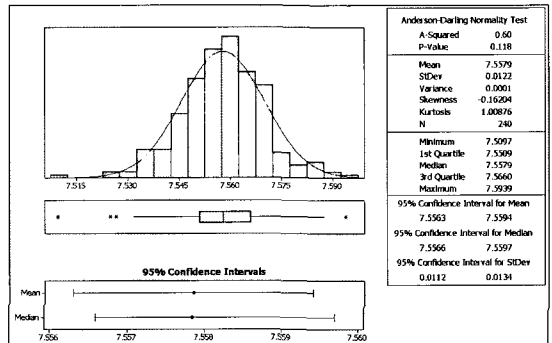
용매탈지 및 2차 열분해 탈지를 거친 성형체들을 최종 온도 1,300°C에서 3시간 동안 수소 분위기에서 소결을 실시한 후 제품을 무작위 샘플링하여 인장시험 및 비커스 경도시편을 제작 및 물리적 특성시험을 실시하였다. 비커스 경도계를 이용하여 총 30회를 시험한 결과 평균 556.1(HV 0.1)의 경도값을 나타내었으며, 인장강도는 약 477.3Mpa의 값을 나타내었다.

Photo. 4는 사출에 의하여 얻어진 성형체와 탈지 및 소결 공정이 완료된 제품의 형상을 나타내고 있다. 이와 같이 사출된 성형체의 용매탈지 및 열분해탈지와 소결을 모두 동일 조건으로 수행하였으며, 최종적으로 Lot별 40개씩 6회에 걸쳐 총 240개의 시료를 임의적으로 채취하여 시료에 대한 비중을 측정 후 통계적 분석을 실시하였다.

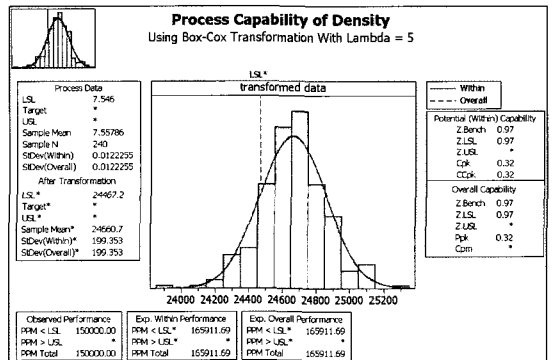
Fig. 6은 사출된 성형체를 탈지 및 소결을 연속적으로 수행한 후 채취한 샘플의 비중을 측정하여 MINITAB R14를 이용한 분석결과를 나타내고 있으며, Table 4는 분석결과와 통계값을 나타내고 있다.



(a) Time series plot of gravity



(b) Summary of gravity



(c) Process capability of gravity

Fig. 6 Results of the capability analysis

Fig. 6 및 Table 3에 나타난 바와 같이 전체적인 비중의 평균값은 7.579로 밀도로 나타내면 약 98.154%에 해당하며, 표준편차는 0.0122로 나타났다. 측정된 비중의 최소값과 최대값은 7.510 및 7.594로서 이를 밀도의 범위로 표현하면

Table 3 Descriptive statistics

Item	Value	Item	Value
Total Count	240	Minimum	7.5097
Mean	7.55786	Q1	7.5509
SE Mean	0.0007883	Q3	7.5560
StDev	0.0122128	Maximum	7.5939

Table 4 Capability analysis results

Result	Value	Result	Value
Z.Bench	0.97	DMPO	166,066.3
Sigma Level	2.47	Yield(%)	0.834

약 97.529~98.622%이며, 구간별 개체수 분포에서는 비중이 약 7.55~7.57 사이에 대체적으로 많은 개체수가 분포되어 전체적으로 정규분포 형태를 보임을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 STS316의 경우 7.7 정도의 비중으로 알려져 있으나 본 연구에서는 평균적으로는 약 98.154%를 나타내었다.

Table 4는 Fig. 6을 통하여 도출된 통계 결과를 집계하여 나타낸 것으로서 전체 공정능력(Overall Capability)을 나타내는 PPM 총합은 166,066.3, Z.Bench 값은 0.97로 나타났다. 이와 같은 결과 중 PPM 총합이 나타내는 값의 의미는 DPMO(Defect Per Million Opportunity) 숫자를 나타내는 것으로서 본 프로세스를 이용하여 백만개를 양산하였을 경우 비중 7.546 미만을 나타내는 숫자를 나타내며, 이를 양품률로 환산하면 약 88.4%에 해당하며, 2.47 시그마 레벨로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 가장 일반적으로 적용되고 있는 기존의 단일 열분해 탈지공정 전에 용매탈지를 실시하여 탈지공정 소요시간 단축 및 금속분말 사출성형 프로세스에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 사출성형체를 노말핵산 용매를 사용하여 40℃, 50℃, 55℃ 조건에서의 용매탈지를 실시한 결과 탈지 시작 후 약 10분 이내에서 전체 탈지되는 바인더양의 약 70%가 이루어지며, 용매온도가 높을수록 탈지되는 속도가 높아지나 고온인 55℃에서는 일부의 제품에서 크랙이 발생하였으므로 50℃에서 용매탈지한 경우가 가장 우수

하였다.

- (2) 2차 열분해 탈지는 기존 단일 열분해 탈지에 비교하여 용매탈지에 소요되는 시간을 포함하여 약 35% 미만인 15시간 정도가 소요됨을 알 수 있다.
- (3) 최종소결된 제품의 물리적 특성은 평균 556.1(HV 0.1)의 경도값과, 약 477.3 Mpa의 인장강도 값을 나타내었으며, 전체적인 비중의 평균값은 7.558로 이를 밀도로 나타내면 약 98.154%에 해당하였으며, 표준편차는 0.0122로서 정규분포를 나타내어 프로세스의 적정함을 알 수 있었다.
- (4) 본 연구에서 수행한 프로세스의 전체 공정능력(Overall Capability)을 나타내는 PPM Total은 166,066.3, Z.Bench 값은 0.97로 나타났으며, 이를 양품률로 환산하면 약 83.4%에 해당하며, 2.47 시그마 레벨로 분석되었다.

후 기

본 연구는 2009년 조선대학교 교내 학술 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- (1) Kim, S. W. and Donotzuka, 2000, "Actual Status of Metal Injection Molding Technology," *Journal of the KSHT*, Vol. 13, No. 2, pp. 126~131.
- (2) Kwon, T. H., 1995, "Development of Metal Injection Molding Processing Technologies," *Spring Conference of the KIMM*, p. 111.
- (3) Koo, Y. D., Kil, S. C., and Na, D. B., 2002, "Metal powder Injection Molding," *KISTI Report*, pp. 4~34.
- (4) Hwang, C. J., Park, H. P., Koh, Y. B., Jung, S. T., and Lee, B. O., 2005, "CAE Analysis of Powder Injection Molding Process for Dental Scaler Mold," *Proceedings of the KPMI Conference*, pp. 47~49.
- (5) KISTI, 2004, "Process for Producing Ceramic Molding," *KISTI Report*, pp. 9~12.
- (6) Young, J. H and Beaumont, J. P, 1997, "Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner System," *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 133~143.
- (7) Yoon, T. S. and Ahn, S. H., 1992, "Preparation and

- Characterization of Feedstock for Metal Injection Molding," *KIMM 4th Powder Metallurgy Symposium*, pp. 137~145.
- (8) Eun, K. Y., 1988, "Metal Injection Molding," *KIMM Powder Metallurgy Tech.(2)*, pp. 47~57.
- (9) Lee, D. G., Jang, K. C., Jung, M. G., Kim, M. H., and Lee, J. B., 2009, "Multi-type Sleeve Combination CIM Manufacturing Technology," *The Arabian Journal for Sci. and Eng.*, Vol. 34, No. 1C, pp. 47~56.
- (10) Beaumont, J. P., Young, J. H., and Jawoski, M. J., 1998, "Solving Mold Filling Imbalance in Multi-Cavity Injection Molds," *Journal of Injection Molding Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 47~58.
- (11) Cho, W. S., 1997, *Injection Molding design Technology*, GJEON Books, Republic of Korea, pp. 381~404.
- (12) Rhee, B. O., Choi, J. H., and Tae, J. S., 2009, "Reduction of Design Variables for Automated Optimization of Injection Mold Cooling Circuit," *Journal of the KSMTE*, Vol. 18, No. 4, pp. 417~422.