

분말 사출 성형 기술

김진곤 · 박민수

포항공대 화학공학과, {jkkim, minsu337}@postech.ac.kr

금속, 세라믹 및 초경 분말사출성형(Powder Injection Molding: PIM)은 분말 야금 기술과 정밀 플라스틱 부품의 대량생산 기술인 사출성형 공정이 접목된 새로운 형태의 성형 기술이다. 이 공정은 개요도에 보인 것처럼 분말의 선정 및 전처리 공정, 결합제(binder) 선정 및 혼합체 제조공정, 충전 모사 및 금형 제작 등의 사출성형공정, 결합제 제거공정, 소결공정 등의 복합공정으로 구성되어 있다. 이러한 PIM 공정은 3차원 정밀부품의 제조와 난가공이나 주조 불가능한 경우에도 생산이 가능하기 때문에 높은 부가가치 제품을 만들 수 있고, 기존의 가공 방법들에 비하여 기술적으로 유리하며 생산원가를 약 20~80% 정도 절감할 수 있어 경제적으로도 유리하다. 예를 들면, 광 파이버를 서로 연결하는 케이스를 만들기 위해서는 길이 약 2cm, 지름 약 3mm의 가운데 약 50마이크론의 크기의 구멍을 내야 한다. 이러한 정밀 치수가 요구되는 제품을 금속 및 세라믹을 용융 상태로 만든 다음 형틀을 사용하는 주물공정으로 만드는 것은 불가능하다. 하지만 금속 혹은 세라믹 분말을 고분자 바인더와 잘 섞어서 사출 성형 후에 고분자를 용매 및 열분해에 의해 제거한 다음 소결하면 손쉽게 제조할 수 있다.

PIM 공정의 응용이 확대되고 있는 이유는 PIM 기술에 사용되는 재료와 형상의 조합에 의한 부품

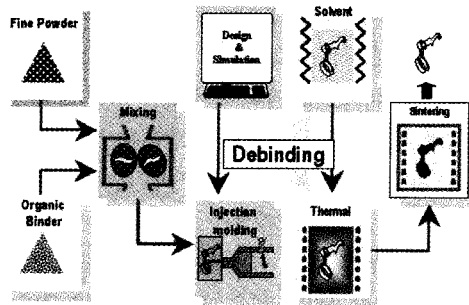


그림 1. 분말사출성형(PIM) 공정의 개요

설계의 자유도가 크다는 장점과 PIM 기술과 관련된 응용재료의 다변화와 경제성이 있는 공정의 개발에 따른 것이라고 할 수 있다. 즉, 금속, 세라믹, 초경, 금속간 화합물 등 모든 분말재료에 의한 3차원 정밀부품의 제조가 가능하며, 난가공재나 주조가 불가능한 재료의 경우에도 후가공이 거의 필요 없이 대량생산이 가능하므로 고부가가치 부품을 경제적으로 생산하는데는 가장 적합하기 때문이다.

PIM 공정에는 금속 및 세라믹 혹은 초경 등이 최종 제품에 사용되기 때문에 재료공학에서 어느 정도 연구가 진행되지만, 분말 선정 및 소결공정 등을 제외한 전 공정에는 화학공학에서 배운 지식의 이용이 필수적이다. 예를 들면, 미세 분말과 유동성의 주체가 되는 고분자 결합제의 혼합에 필수적인 현탁 유변학(suspension rheology), 결합제 선정에 필요한 고분자구조 및 물성과의 상관관계

를 파악하는 연구, 사출공정해석, 결합제를 용매추출에 의해 제거할 때 필요한 물질전달 현상 등이다.

분말사출성형 단위공정

(i) 결합제와 혼합체의 제조

각종 분말에 적합한 결합제 선택과 선정된 결합제와 분말과의 혼합체(Green Part)의 제조는 PIM 공정의 핵심기술이다. 현재 일본과 독일에서는 이러한 혼합체만을 제조하여 공급하는 회사가 설립되고 있어서 이 단계가 PIM 전 공정의 성패를 좌우한다고 하여도 과언이 아니다.

결합제의 역할은 분말과 혼합되어 사출성형 가능한 유동성을 부여하며 사출성형 및 결합제 제거시 형상을 유지하는 역할을 한다. PIM 공정에 사용하는 분말은 매우 미세하므로 결합제가 채워지고 유동되는 공간은 매우 작게 되어 결합제의 특성에 의해 혼합시 입자의 충전, 응집현상, 유변학적 거동, 사출 특성, 결합제 제거 특성, 치수정밀도, 결합, 최종 화학성분 등이 영향을 받게 된다. PIM 공정에 주로 사용되는 결합제의 종류는 다음과 같다.

- Thermoplastic compound
- Thermosetting compound
- Water-based systems
- Gellation systems
- Inorganics

상기 결합제 시스템 중 가장 많이 사용되는 것은 열가소성 고분자 계로, 우수한 성형성, 러너, 스푸루의 재활용성 및 가격이 저렴하기 때문이다. 결합제의 전형적인 구성성분은 결합제 제거의 최종시점까지 형상을 유지하고 유동의 주체가 되는

주결합제(backbone), 혼합체의 점도 감소와 금속과의 윤활을 촉진하는 부결합제, 고분자의 유연성을 향상시키는 가소제, 분말과 고분자의 wetting이나 접착을 향상시키기 위한 표면활성제 등이다.

결합제의 선정시 첫번째의 고려 사항은 점도이다. 결합제의 점도가 낮을수록 혼합체의 점도를 낮게 유지할 수 있어 사출성형시 유동성이 좋게 된다. 그러나 점도 감소를 위하여 저점도의 성분을 다량 첨가하게 되면 사출성형시 분말과 결합제의 박리가 발생할 수 있다. 둘째, 분말과의 wetting 특성이 우수해야 한다. wetting 특성은 고분자의 표면장력의 크기에 따라 달라지게 된다. 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌과 같은 폴리올레핀계의 표면장력은 낮으며, 나일론이나 에폭시 수지 등은 큰 값을 나타낸다. 흔히 사용되는 폴리올레핀의 경우 비극성이며 표면장력도 낮아, 표면 에너지가 높은 분말과의 wetting은 좋지 않으므로 stearic acid 등의 표면활성제로 wetting을 향상시킬 수 있다. 셋째, 결합제 제거 공정시 용이하고 완전하게 제거되어야 한다. 결합제 제거 공정에서 상세히 설명하겠지만 결합제는 결합제 제거방법에 따라 제거되는 속도 및 양이 달라지지만 최종 단계에서는 모든 방법이 열분해로 완전히 제거되어야 한다.

이와 같은 요구특성에 맞게 선택된 결합제는 금속, 세라믹 분말과 혼합되어 혼합체를 만들게 되는데, 결합제의 성질과 분말의 크기 및 분포, 모양에 의하여 그 특성이 결정된다. 혼합체는 용융상태에서 유동성이 없는 입자가 유동성이 있는 매체에 분산된 현탁액의 형태가 되는데, Epoxy Molding Compound 등의 입자가 높은 충전율을 가지는 현탁분야와 마찬가지로, 분말입자의 최대 충전율과 안정적인 유변학적 성질을 갖는 충전율의 결정이 중요하다. 사출체의 형체유지와 소결

시 높은 밀도를 얻기 위해선 충전율이 높을수록 좋다. 그러나 충전율이 최대충진율에 가까워지면서 점도가 급격히 상승하고, 불균일 혼합 및 결합제와 분말의 박리현상이 일어나므로 적정 충전율은 최대충진율보다 약간 낮은 범위에서 결정된다. 또한 분말의 성상에 따른 성질로는 분말입자의 모양, 크기 및 분포가 있다. 분말입자의 모양이 구형에 가까울수록 혼합체의 충전율이 높아지나, 점도, 형태유지 능력, 강도는 낮아진다. 그리고 분말입자의 크기가 클수록 점도와 소결에 의한 부피수축이 작아지나 성형결합이 증가하고, 크기분포가 넓을수록 충전율이 증가하고 부피수축이 적으나, 불균일혼합의 가능성은 커진다.

(ii) 사출공정

사출 성형 가능한 분말혼합체가 준비되면 성형체를 제조하는 사출성형공정을 수행하게 된다. 만일 완벽한 분말혼합체가 준비되었다면 사출성형의 제반 변수들이 최종 제품의 수율을 결정하게 된다. 사출성형 사이클은 일반적인 플라스틱 사출성형과 마찬가지로 크게 호퍼로 투입된 분말 혼합체의 가소화(plasticizing), 노즐을 통과한 분말혼합체가 스푸루, 러너, 금형을 채우는 충전과정(filling), 충전 후 재료의 수축으로 발생한 금형공간을 채우는 보압과정(packing), 성형품의 취출을 위한 냉각과정(cooling), 냉각 후 성형체를 취출하는 ejecting으로 구성된다.

분말혼합체의 사출 성형시 일반적인 플라스틱 재료와는 다른 특성으로, 분말이 다량 함유되어 있어 세라믹 혼합체인 경우에도 열전도도가 플라스틱 재료보다 10배 가량 크므로 냉각속도가 매우 빠르다는 점을 들 수 있다. 또한 유동 특성의 대표적인 현상인 항복응력의 존재와 미끄럼층(wall slip layer)의 존재이다. 분말혼합체는 응력이 일정한

수준에 이르기 전에는 마치 고체와 같은 성질을 보인다. 또한, 분말혼합체는 유동시 벽면에서 미끄럼층을 형성하여 대부분의 전단변형이 벽면 근처에 국한되어 있다. 항복응력과 미끄럼층의 존재로 분말혼합체는 유동이 대부분 plug flow 형태를 보인다고 알려져 있다. 그러나 미끄럼층에 대한 특성조사는 단면이 일정한 유로를 통과할 때의 유동성에 대한 정보를 제공하지만, 단면의 크기나 형태가 변하는 곳에서의 유동에 대하여는 정보를 제공하지 못한다. 금형 내에는 단면적의 변화가 대단히 많으며 특히 게이트를 통과할 때의 단면적의 변화는 매우 급격하여 예측하지 못하는 비정상 유동이 자주 일어나며, 이러한 비정상 유동은 플라스틱 재료의 사출공정에서도 흔히 관찰될 수 있다. 분말 사출성형공정에서는 여러 가지 사출불량 중에서도 게이트 주변의 불량에 눈에 띄게 많이 나타나는데, 이러한 현상으로써 분말혼합체가 게이트를 통과할 때 정상적인 유동을 하지 않는다는 것을 쉽게 예상할 수 있다.

분말 혼합체의 사출성형에서 나타나는 여러 가지 사출 결함들을 관찰하여 보면, 상당히 많은 부분이 게이트 부위와 노즐 후방, 즉 스푸루 부위에서 결함이 자주 발견되고 있다. 이 부위들에서는 결합제 분리현상에 의한 표면박리, 분말 밀도 저하 등이 발견된다. 이 부위들은 위에서 설명한 유로의 유효 직경이 급격히 변화하는 부위와 일치하고 있다.

(iii) 결합제의 제거공정

PIM 공정에서 결합제 제거공정은 가장 장시간을 요구하는 공정의 하나로서 공정의 70%를 요하는 단계였으나, 최근 많은 연구개발에 의해 기존의 2~3일 소요되던 열분해 공정이 현재는 많이 단축되어 4mm 두께를 갖는 성형체를 3시간 이내

에 완료하는 BASF 공정이 독일에서 개발되었다. 결합제 제거 방법은 결합제 구성과 밀접한 관계가 있어 결합제 설계시 동시에 고려되어야 한다. 결합제 제거공정은 크게 용매추출법(solvent extraction)과 열분해(thermal debinding)법으로 분류할 수 있다. 모든 결합제 제거공정의 공통법은 초기단계에서 단시간 내에 성형체에 충분한 기공을 형성시켜 증발이나 분해되는 물질들이 성형체 내의 증기압 상승 없이 원활히 제거되도록 두 가지 이상의 성분으로 이루어진 결합제로 구성되며, 한 성분의 결합제를 선택적으로 추출한 후 최종적으로 열분해시켜 제거한다.

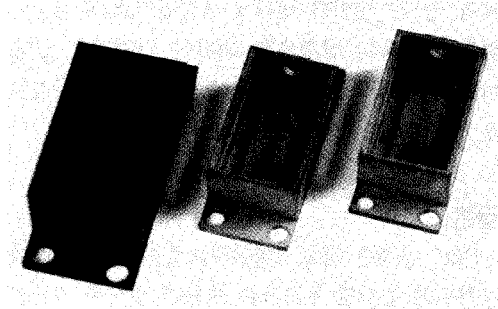
용매추출방법은 크게 두 종류로서, 용매에 시편을 담그는 함침법과 용매를 휘발시켜 시편 표면을 응축시켜 제거하는 방법으로 나눌 수 있다. 용매추출방법은 결합제 성분 중에 용매와 반응하는 성분만을 선택적으로 제거하는 것인데 추출하고자 하는 결합제와 용매간의 용해도 지수가 유사한 값을 가져야 하며, swelling 없이 용해되어야 사출체에 결합을 최소화할 수 있다. 함침법의 경우 반응온도가 추출되는 결합제의 용점보다도 낮은 온도에서 행하게 되므로 시편형상의 유지에 매우 유리하고 소요시간도 상압 열분해 공정보다 매우 짧아지는 장점이 있다 (두께 12mm 의 경우 약 6시간 소요). 하지만 열분해 장비 외에 추가적인 추출장비를 필요로 하는 것과 환경 친화성이 떨어지는 용매를 사용해야 하는 문제가 있었지만, 최근에는 석유계용제, 알코올, 물 등을 사용하여 이러한 문제점을 해결하고 있다

열분해 방법은 PIM 공정에 사용되는 분말의 사이즈가 일정하지 않기 때문에 기공의 구조가 매우 미세하고 복잡하여 그 기구를 정확하게 설명할 수 있는 모델은 아직 없다. 주요 영향 인자로는 온도, 분말의 입도, 기공구조, 성형체의 두께, 결합

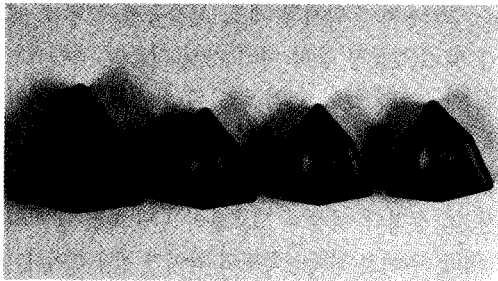
제의 증기압, 결합제 증기의 점도, 분위기 등을 들 수 있다. 결합제 제거를 위해 가열할 때 분말혼합체에 존재하는 결합제는 연화되고 항복 강도를 잃게 되면 변형되기 시작한다. 변형은 분말의 비중이 증가됨에 따라 중력 영향이 더욱 커지게 되며, 분말의 형상이 구형일수록 혼합체의 점도가 낮아지므로 변형될 수 있는 확률이 커지게 된다. 또한 고온일수록 결합제의 점성이 작아질 뿐만 아니라 결합제가 팽창하여 분말 충전율의 감소 효과를 초래하여 변형에 대한 저항성이 더욱 작아지게 된다. 따라서 상압에서 순수한 열에 의한 결합제 제거공정은 저온에서 장시간 처리하게 된다.

(iv) 소결공정

뒤틀림이나 표면 결함이 없이 결합제 제거공정을 거친 성형체는 소결 중 내부기공 소멸과 첨가합금 원소간의 균질화를 통해서 목적하는 최종제품의 기계적 특성 요구치를 만족시켜야 한다. 상용 분말야금의 다이 성형의 경우, 다이 벽과의 마찰과 수직 방향이 폭 방향보다 압력을 더욱 많이 받으므로 고온 소결시 뒤틀림과 수직 방향과 폭 방향의 불균일한 수축이 불가피하다. 사출성형은 등압성형이 가능하여 이러한 불균일 수축은 최소화할 수 있으나, 결합제 제거 후 초기 소결이 진행되는 저온에서는 결합력이 약하여 진동이나 중력에 의한 결함이 발생할 수 있으므로 목성장이 빠른 미세한 분말이 바람직하다. 통상적인 사출성형체의 소결밀도는 기계적인 특성의 큰 저하가 없는 이론밀도의 95%를 최소한의 목표로 한다. 완전치밀화(이론밀도의 100%)를 위하여는 HIP(열간등압성형)등의 후처리를 필요로 한다. 결국 완전치밀화도의 소결체를 제조하기 위해서는 소결 후기 단계에서의 미량 잔류기공의 소멸과정에 대한 정확한 이해가 선행되어야만 가능하다. 따라서 소결



W-Cu 980nm Pump LD Module



WC Milling Insert

그림 2 분말사출성형 제품.

체의 완전치밀화 기구 규명을 바탕으로 하여 소결 과정 중에서의 균일한 수축을 동반한 치밀화를 유도하기 위해서 소결온도, 소결시간 그리고 가열속도 및 냉각속도 등이 고려된 최적의 열 사이클을 도출하여야 한다.

이러한 단위공정들을 거치게 되면 최종제품을 얻게 된다. 사진에 보인 분말 사출 성형 제품은 저자와 공동연구 수행중인 포항산업과학연구원에서 제작한 전자부품에 사용되는 package와 난가공의 절삭용 부품의 일례이다. 좌측의 부피가 큰 것은 사출체이고, 우측의 것은 소결에 의해 부피가 수축하면서 조직이 치밀해진 최종제품이다.

화학공학과 의 상관성

PIM 공정은 여러 가지 공정으로 이루어져 있

어, 여러 분야의 기술이 유기적으로 결합되어야 한다. 그러나 최종제품이 금속 또는 세라믹이므로 금속, 재료공학 분야에서 주로 연구하였지만, 분말의 선택과 소결공정을 제외하면 PIM 공정은 모두 화학공학에서 다루는 분야이다. 핵심기술인 결합제는 다성분계 혼합물인 고분자 블렌드이며, 고기능 플라스틱 제품을 생산하기 위해 지난 수십 년간 화학공학에서 다뤄왔던 분야이다. 아울러 결합제의 최종제품의 물성을 파악하려면, 다성분계 고분자 블렌드의 상분리와 결정화 거동 등에 대한 지식과 고분자 가공에 관한 전반적인 지식이 필수적이다. 또한 혼합제 제조에 있어, 현재까지 기술 수준이 시행착오에 의존하고 있는데 결합제 각 성분과 분말의 표면에너지 등에 기본을 두고 적절한 결합제와 분말을 선택하기 위해선 또한 화학공학의 지식이 절대적이다. 또한 사출공정에 사용되는 전달현상에 관한 지식과 획일적인 시스템의 해석이 아닌 재료의 성질과 결합제와 분말의 상호작용에의 공정해석도 화학공학 분야의 참여가 필요하고 용매추출공정의 용액열역학 및 물질전달의 평형과 속도론 등도 기여할 수 있는 분야이다.

기술 현황과 향후 전망

지난 몇 년간 PIM 기술과 시장에 있어서 많은 발전이 진행되어 현재는 기술성숙기의 초기 단계로 진입된 것으로 평가되고 있다. 현재 전 세계적으로 PIM 제품을 생산하는 업체는 200개사 이상이며 이와 관련된 원료와 설비 관련 업체도 증가하고 있다. 세계시장은 연간 22%의 높은 성장률을 기록하고 있으며, 매출액은 1985년도의 5백만 달러 정도에서 현재는 4억 달러로 성장하였으며, 향후 2010년도에는 21억 달러로 전망되고 있다.

국내의 경우 PIM 산업화가 매우 늦은 편이다. 국내 업체로는 상호세라믹, DSI, 평창무역, 오리엔

트 시계공업 등이 있으며, 연구소나 대학은 포항 산업과학연구원과 포항공과대학교, 아주대, 한양대 등이 참여하고 있다. 국내 기술수준은 고분자가공분야와 사출공정해석은 앞서 있는 편이나, 핵심기술인 결합제와 혼합제 제조기술은 미미하다. 대부분 결합제와 혼합제 제조 기술은 특허권에 묶여 있거나 자체 노하우로 공개하지 않기 때문에 자체기술 확보가 중요하다. 국내에선 본 연구자를 제외하고는 거의 없어 화학공학도의 많은 참여가 필요하다.

국외의 경우 미국의 Penn State 대학의 German 교수가 활발히 연구하고 있으며, Advanced Processing Via Powder Injection Molding(APPIM) 프로그램을 수행하고 있고 많은 기업이 지원하고 있다. 기업체로는 미국 Parmatech, Allied Signal 사, 독일 BASF, Arburg와 일본의 Kumamoto 대학과 우수 기업이 참여하고 있다.

현재 기술수준에서 재료와 공정의 신뢰성이 아직 부족하고 표준시험방법이나 시편규격이 없다는 것이 향후 해결하여야 할 문제로 지적되었으나 PIM 공정의 효과가 매우 크기 때문에 이를 개선하기 위한 연구가 계속될 것이다. 앞으로 PIM 기술은 시장확대와 함께 대형부품 등의 적용범위의

확대, 용매추출이나 열분해 공정을 단순화하거나 없앤 고효율의 공정으로 전환이 기대되고 있다. 이러한 개선은 결합제 개발에 따른 공정혁신이므로 화학공학도의 참여와 기여가 기대된다.

결론

PIM 공정은 작고 3차원적으로 복잡한 부품과 난가공의 고강도 초경금속 제품의 생산에 기존의 어떤 방법보다 유리하다고 알려져 있다. 이 공정은 결합제와 혼합제의 제조, 사출공정, 결합제 제거 및 소결공정 등의 여러 가지 기술이 복합적으로 이루어져 있어 여러 분야의 유기적인 협력이 필요하다. 이중에서도 결합제의 선택과 혼합제 제조기술은 핵심기술이며, 환경친화적인 결합제 선정 및 공정의 개발과 고효율의 단순화된 공정의 개발을 위해선 화학공학도의 참여가 필수적이다.

현재 전 세계 기술로 아직 완숙된 수준이 아니므로 국내에서도 충분히 경쟁력 있는 기술력 확보가 가능하다고 생각된다. 향후 시장확대와 더불어 많은 부분에서 금속과 세라믹 가공기술이 PIM에 의한 방법으로 전환될 것이 예상되며, 소규모 작업 공간에서도 생산이 가능하므로 기술력을 기본으로 한 벤처기업의 설립과 성공이 기대된다.