

# 금속 사출성형에 관한 연구

文仁炯

한양대 재료공학과 교수,  
공학박사

## 플라

스틱 사출성형공정과 분말야금공정을 결합한 금속사출성형(MIM : Metal Injection Molding) 기술은 고성능의 정밀하고 복잡한 부품을 경제적으로 대량생산할 수 있는 분말야금 기술입니다.

이러한 장점때문에 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 MIM은 스테인레스강, 공구강, 중합금등의 다양한 합금계를 이용하여 자동차부품, 기계부품, 무기류 제조에 이르기까지 응용 범위가 급속히 확장되어가고 있습니다.

MIM공정은 금속분말과 결합제의 혼합, 사출성형, 결합제 제거 및 소결 등 일련의 공정을 거치게 되는데, 각 공정에서 많은 변수들이 상호작용하여 최종 소결체의 특성에 크게 영향을 미칩니다.

결합제는 분말을 원하는 형태로 균일하게 충전시키고 소결전까지 사출성형된 모양을 유지하도록 하는 매개물으로써 이러한 결합제에 요구되는 특성은 크게 유동성, 분말과의 혼합, 결합제 제거 특성등이며 MIM공정에서 매우 중요한 영향을 미칩니다.

사출성형성은 분말혼합체의 점도에 크게 의존하므로 MIM에서 사출성형성이 양호한 균질 분말혼합체의 제조가 필수적이고, 금형의 설계 기술 및 사출성형 공정조건의 결정기술에 크게 좌우됩니다.

따라서 균질의 혼합체 제조를 위한 혼합기술을 확립하고, 사출성형성과 관련되어서 분말 혼합체의 유변학적 거동실험과 함께 적절한 유변학적 모델링 및 사출 금형내에서의 분말 혼합체 유동과 열전달 현상의 해석이 필수적으로 요구됩니다.

사출성형체에서 결합제의 제거는 분말제품의 형상 및 후속되는 소결성을 제어하는 중요한 공정으로써 결합없는 성형체를 얻기 위해 세심한 주의가 필요합니다.

특히 thermal debinding에서 승온속도, 탈지온도, 공정분위기등은 debinding 공정 cycle, 결합제 제거거동 및 성형체의 안정성에 큰 영향을 미칩니다.

또한 debinding후 성형체내에 잔류하는 탄소는 소결체의 기계적 특성에 지대한 영향을 주므로 MIM에서 잔류탄소량의 조절은 매우 중요한 문제입니다.

MIM방법에 의해 제조된 성형체는 분말이 균일하게 충전되어 있어 소결후 다른 제조방법에 의해 얻어진 부품보다도 미세조직이 균일하고 더욱 등방적인 특성을 갖습니다.

그러나 결합제를 제거한 사출성형체의 낮은 충전밀도때문에 소결시 과도한 수축이 발생하여 형태의 안정성을 기하는데 다소 문제가 있고 조대한 분말의 경우는 완전조밀화된 소결체를 얻기 힘듭니다.

따라서 형태안정성 및 조대분말의 소결성 감소를 brown part의 재압축 등압성형처리, 액상소결, 활성소결 및 가압소결 공정을 통해 해결하고자 하는 연구가 진행되고 있습니다.

여기서는 금속분말 사출성형 기술에 의한 Fe계 구조용 소결제품의 제조를 목표로 하여 MIM의 각 공정을 최적화함으로써 결합이 없이 정교한 형상제어가 가능하며 치밀한 특성을

갖도록 연구를 수행하였습니다.

실험에 사용한 각 금속분말에 적절한 결합제계를 선택하기 위해 결합제의 열적 특성등을 평가하였으며, 각종 분말혼합체의 혼합 제조후 유변학적 실험 및 모델링을 시도하고 분말 혼합체의 유변학적 거동의 특성을 고려한 사출성형 충전공정의 수치모사를 위한 유한요소해석 시스템의 도입을 시도하였습니다.

결합제 제거거동과 소결체에 미치는 공정분위기의 영향을 조사하기 위해 질소, 수소, 산소, air로 분위기를 달리하여 결합제 제거거동 및 잔류탄소량의 변화를 관찰하였습니다.

소결분위기·온도 등이 성형체의 소결특성 및 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였고, brown part의 재압축 등압성형 처리에 따른 형태안정성 향상 방안과 합금원소 첨가를 통한 소결체의 완전치밀화 및 물성향상을 위한 연구도 병행하였습니다.

또한 카보닐 철분말이외의 금속분말을 사용하여 MIM에의 응용가능성을 조사하였습니다.

## 연구 내용

### • 최적 binder계의 선택

각 결합제는 DSC나 TGA 및 FT-IR 분석을 통해 열적특성 및 성분원소간 결합형태를 조사하였습니다.

결합제 성분으로 왁스류와 수지류를 적당한 조성비로 조합하여 분말과 혼합시 분리나 응집이 일어나지 않을 뿐더러 결합제에 왁스류를 혼합함으로써 수지류에 의한 결합제의 무게감소율을 완화시킬 수 있었습니다.

또한 저온에서의 결합제 제거 공정에서 왁스류가 제거될 때 수지류의 일부가 함께 제거되어 수지 결합제 제거시 일어나는 높은 내부증기압에 의한 결함의 발생도 막을 수 있었습니다.

### • 금속분말—결합제 혼합체의

#### 유변학적 거동특성

각 금속분말—결합제 혼합체는 MIM에 적합

한 pseudoplastic 점성거동을 나타내었습니다.

분말혼합체의 특성인 apparent slip현상의 이해와 데이터 확보를 위해서 3가지 이상의 다른 직경을 가진 capillary die를 이용하여 동일한 분말혼합체의 점성계수를 실험적으로 측정하였습니다.

따라서 capillary die의 직경에 따른 변화로부터 slip velocity와 slip layer thickness를 구하였고, 분말혼합체의 실질적인 점성계수를 구하였습니다.

Slip velocity를 구하기 위해 기존의 Mooney procedure방식을 적용하였고, slip layer thickness를 구하기 위해서는 새로운 방식을 제안하게 되었습니다.

이러한 방식에 의거하여 capillary die의 직경에 따른 변화로부터 slip velocity와 slip layer thickness를 각각 구하였고, 분말혼합체의 실질적인 점성계수를 구하였습니다.

Apparent slip 현상을 고려하지 않고 1개의 직경을 가진 capillary die로부터 구한 점성계수는 같은 직경의 pipe flow만 제대로 예측할 수 있고 다른 직경의 pipe flow에서는 제대로 예측할 수 없음을 알 수 있었습니다.

반면에 apparent slip 현상을 고려하여 구한 분말혼합체의 실질적인 점성계수는 어떠한 직경의 pipe flow도 제대로 예측할 수 있음을 확인하였습니다.

### • 사출성형 충전공정 수치모사 시스템개발

분말혼합체의 특성인 항복응력을 포함한 Generalized Newtonian Fluid의 구성 방정식과 slip 현상에 대한 모델링을 도입하였고, slip 현상을 모델링하기 위하여 slip layer 혹은 slip velocity를 도입할 수 있도록 해석시스템을 개발하였습니다.

수치모사를 위한 수치해석 방법으로는 유한요소법과 유한차분법을 사용하였습니다.

실험결과 slip layer 혹은 slip velocity가 전단응력의 함수인 것으로 확인되어 이들의 함수관계를 도입하도록 프로그램을 개조중입니다.

개발되고 있는 해석시스템을 우선적으로 3

차원의 재털이 형상 금형에 적용하여 보았을 때, slip layer를 도입한 경우가 실제의 유동 및 열 전달 현상의 해석에 가장 정확할 것으로 판단되어 집니다.

#### • 사출성형체의 debinding 거동 연구

카보닐철분말과 폴리에틸렌-왁스계 결합제로 혼합된 성형체(철분말 부피분율 64vol.%)는 thermal debinding 방법에 의해 다단계로 결합제를 제거하였습니다.

결합제의 evaporation이 발생하는 3차 debinding 공정을 수소분위기에서 행하였을 때(105%의 중량 감소) 질소분위기(95%의 중량감소)에 비해 중량감소면에서 다소 우수한 debinding 특성을 보였으나 두 분위기 조건에서의 잔류탄소량은 1.3~1.9wt.%로서 거의 동일한 값을 나타내었고, 전 debinding 공정을 노내부의 기체 흐름없이 대기분위기에서 행하였을 때 중량감소는 81%로서 binder가 모두 제거되지 않았습니다.

또한 debinding 과정중 각 온도구역을 세분하여 결합이 발생하지 않는 임계승온속도를 구하고 결합제를 제거함으로써 전체 공정시간을 단축할 수 있었습니다.

폴리아미드계 결합제로 혼합된 성형체(철분말 부피분율 60vol.%)에서 결합제의 제거는 열풍 순환식에 의해 대기중에서 행하였을 경우 결합제가 표면에 편석되는 반면 질소분위기에서는 성형체에 균일한 결합제의 분포를 나타내었으며, 표면에 박리되는 탄화물층을 형성하여 잔류탄소량은 2.1%정도였습니다.

대기나 질소로 전처리 후 수소로 결합제를 제거하는 경우에 잔류탄소량은 0.1%이하로 가장 효과적이었습니다.

#### • 소결거동 및 기계적 특성 조사

카보닐 철분말과 폴리에틸렌-왁스류 결합제로 제조된 성형체를 debinding한 후 1200°C, 수소 및 진공분위기에서 1시간동안 소결하였을 때 소결체 밀도는 각각 7.67, 7.58g/cm<sup>3</sup>로 99% 이상의 이론밀도를 나타내었으며, 잔류탄소량은 0.59, 1.33wt.%이었습니다.

소결체를 인장시험한 결과 UTS는 각각 300~380MPa, 627MPa이었으며, 연신율은 각각 23~35%, 1.25%였습니다.

또한 전체 공정시간의 단축 및 성형체의 안정성을 도모하기 위하여 결합제 제거 및 소결 공정을 연속적으로 행하였는데 1000°C, 수소분위기에서 1시간동안 소결하였을 때 소결밀도는 7.10g/cm<sup>3</sup>(이론밀도의 93%)로 기존의 분리공정과 거의 비슷한 밀도값을 나타내었습니다.

카보닐 철분말-폴리아미드계 결합제 성형체의 경우는 1200°C, 수소분위기에서 1시간동안 소결하였을 때 소결밀도는 7.68g/cm<sup>3</sup>(이론밀도의 97%)를 나타내었으며, 인장시험의 UTS는 320MPa, 연신율은 50%였습니다.

#### • 소결체의 조밀화 및

##### 형태안정성 향상 방안 연구

카보닐 철분말에 0.4%Fe-70.8%Ni-9.52%B의 합금분말을 첨가함으로써 1200°C에서 1시간 소결하였을 때 기공은 합금분말을 1%만 첨가하여도 상당히 감소하였습니다.

합금분말을 전혀 첨가하지 않은 경우 바이론 밀도가 약 90%이었으나, 첨가량이 4%일 경우 약 96%까지 증가하였습니다.

합금분말 첨가량이 증가할수록 입도가 조대해졌으며 경도는 0%일때 67로부터 4%인 경우 127kg·f/mm<sup>2</sup>까지 증가하였습니다.

Debinding 한 성형체의 소결시 발생하는 과도한 수축을 방지함으로써 형태안정성을 향상시키기 위하여 brown part를 550MPa로 재압축 등압성형 처리하였습니다.

등압성형 처리한 성형체를 1000°C, 수소분위기에서 1시간동안 소결하였을 때 선수축률은 등압성형처리하지 않았을 때 13.3%에서 7.6%로 줄일 수 있었습니다.

#### • 조직제어를 통한 소결체의 물성향상

성형체내에 잔류하는 탄소는 소결체의 기계적 특성에 지대한 영향을 미치므로 이러한 잔류탄소량을 조절하기위해 공정분위기를 수소와 질소의 혼합가스로 하여 결합제제거 및 소결을 행함으로써 혼합가스내 수소조성의 변화

에 따른 영향을 조사하였습니다.

동일한 분위기로 결합제 제거 및 소결하였을 때 5% 수소의 경우 1200°C까지 소결후에도 탈탄은 거의 발생하지 않았으며 이러한 잔류탄소의 영향으로 액상선에 근접하여 형상제어가 되지 않았습니다.

25%수소에서 1200°C까지 소결 후에 잔류탄소는 0.6%이었으며, 50% 수소의 경우 0.02%, 75% 이상에서는 0.01%이하로 극저 탄소량을 나타내었습니다.

기계적 성질은 50% 수소의 경우 1200°C에서 310~350MPa, 연신율은 40~45% 정도로 불균일 하였으나, 1300°C에서는 약 1% 밀도의 상승과 인장강도는 320MPa 정도로 균일하였으며, 연신율은 상승되어 47% 정도를 나타내었습니다.

소결시 75%와 100% 수소분위기의 경우 잔류탄소량과 인장강도 및 연신율은 유사하였으며 1200°C에서 인장강도는 320MPa, 연신율은 48~50% 정도였습니다.

25% 수소분위기의 경우 결합제 제거공정을 다단계로 처리하여 소결하였을 때 상기의 소결 결과와는 상이한 결과를 나타내었으며, 1300°C, 1시간 소결후 잔류탄소량은 0.2%, 인장강도 390MPa 및 연신율 25%의 값을 나타내어 결합제 제거공정이 소결특성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었습니다.

### 맺 는 말

1차년도 연구과제에서는 MIM 공정에서 가장 중요한 것으로 간주되고 있는 최적 원료 철분말의 선택, 철분말-결합제 혼합체의 유변학적 거동과 결합제 제거공정의 연구를 통해 MIM에 관한 기초적인 자료를 제공하고자 하였습니다.

평균입도 4.4 $\mu$ m인 구형의 카보닐철분말과 폴리에틸렌-왁스계의 결합제를 사용하였을 때 최적 사출성형과 결합제 제거 조건을 확립하였습니다.

혼합체의 유변학적 거동 측정과 모델식에 의 fitting을 통하여 사출성형에 응용할 수 있는

기초자료를 확립하였습니다.

결합제의 제거는 thermal debinding 방법으로 공정변수들이 결합제 제거거동에 미치는 영향을 조사하였습니다.

2차년도 연구과제에서는 과학적인 사출성형의 이해와 설계를 위해서 혼합체의 특성인 항복응력을 포함한 generalized Newtonian fluid의 구성방정식을 도입하고 slip 현상을 고려한 신소재의 사출성형 충전과정 해석용 시스템을 개발하고자 하였습니다. 폴리에틸렌-왁스계 및 폴리아미드계 결합제와 카보닐철분말을 사용한 MIM에서 결합제 제거분위기에 따른 결합제 제거거동과 소결체에 미치는 영향을 조사하기 위해 공정분위기를 질소, 수소, 대기 및 산소로 각각 달리하여 결합제 제거거동 및 잔류탄소량의 변화를 관찰하였습니다.

소결분위기·소결온도들이 MIM 성형체의 소결특성 및 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였으며, 미세한 카보닐철분말이 아닌 조대한 입도의 통상적인 시브사이즈 철분말을 원료로 MIM 소결부품을 얻을 수 있었습니다.

3차년도 연구과제에서는 각종의 분말혼합체의 혼합 제조 후에 유변학적 실험을 수행하여 모델링을 시도하였고, 분말혼합체의 유변학적 거동의 특성을 고려한 사출성형충전공정의 수치모사를 위한 유한요소해석 시스템에의 도입과 적용에 진전이 있었습니다.

Brown part를 재압축 등압성형처리함으로써 형태안정성을 향상시킬 수 있었고, 카보닐 철분말에 Fe-Ni-B 합금분말을 첨가하여 조밀한 소결체를 얻을 수 있었습니다.

결합제 제거 및 소결시 분위기를 조절하여 Fe-Ni 합금계에서 잔류탄소량을 제어함으로써 소결체의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사 하였습니다.

카보닐철분말이외에 조대한 분사철분말을 사용하여 MIM 공정을 적용하였으며, 기간의 연구결과를 바탕으로 heat sink재등으로 쓰이는 W-Cu 합금계에 대한 MIM의 응용을 조사중입니다. \*