

분말사출 성형공정에서의 수치해석기술의 응용

강태곤 · 권태현 · 박성진* · 정성택* · Sundar V. Atre** · Randall M. German**

포항공과대학교 기계공학과

*주식회사씨타텍

**CISP, The Pennsylvania State University

Applications of Numerical Analysis Technology in Powder Injection Molding Process

T-G. Kang, T-H. Kwon, S-J. Park*, S-T. Chung*, Sundar V. Atre**, and Randall M. German**

Department of mechanical engineering, Pohang university of science of technology, Pohang 790-784, Korea

*Ceta Tech, Inc., Kyungnam 664-953, Korea

**CISP, The Pennsylvania State University, University Park 16802, USA

(Received July 30, 2002 ; Accepted form August 14, 2002)

Abstract CAE technology is an integrated tool including all aspects such as powder, binder system, mixing, injection molding, debinding and sintering. Therefore, CAE technology is considered as one of core technologies for PIM industry in the future. Recently many researchers are developing not only CAE software itself but also application procedures of CAE software. In this study, the applications for CAE technology in PIM industry are presented including feedstock mixing effect, several cases of troubleshooting and optimization procedure.

Keywords: Powder injection molding, Powder-binder mixture, Computer-aided engineering, Optimization

1. 서 론

분말사출성형(powder injection molding; PIM)은 금속 또는 세라믹 분말을 고분자로 이루어진 바인더 시스템(binder system)과 혼합(mixing)하여 사출성형한 후 고분자 바인더 시스템을 용액으로 녹이거나 열로 분해하는 탈지공정(debinding) 후 소결(sintering)하여 제품을 완성하는 제조방법이다. 실제로 금속 또는 세라믹 재료가 가지고 있는 좋은 기계적, 열적, 전기적 특성을 가지고 있음에도 불구하고 이들의 성형성(moldability)에 대한 한계로 인하여 형상에 대한 제한과 높은 제조비용으로 그 사용처가 제한되어 왔다. 이를 성형성이 좋은 바인더 시스템과 혼합함으로써 극복하여 복잡한 형상을 제조 가능할 뿐만 아니라 제조비용을 절감하게 하는 분말사출 성형고정은 현재 혁신적인 방법으로 산업계에서 받아지고 있다. 즉, 분말사출 성형공정은 금속과 세라믹이 가지고 있

는 좋은 기능을 유지하면서 형상의 복잡성 극복하고 낮은 제조원가의 실현할 수 있는 제조공정으로 받아지고 있다.¹⁻²⁾

분말사출성형의 유용성이 알려지면서 많은 연구 활동들이 활발하게 일어나고 있다. 분말사출성형에 사용되는 재료들의 기본적인 물성들 및 분말사출성형 공정에서 일어나는 기본적인 물리현상들이 실험에 의해 알려지고 있으며 또한 이들에 대한 물리적 모델(physical modeling)들이 제안되고 있다. 이러한 물리적 모델은 실제 분말사출 성형품 제조 현장에서 발생할 문제들을 예측하여 발생 가능한 불량과 비용을 줄이는데 매우 유용하다. 그러나 형상이 복잡하고 관련된 여러 물리적 모델에 필요한 변수들이 서로 연관되어 있는 경우 해석적인 방법으로 실제 제조하기 전 미리 분말사출성형공정을 예측하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 컴퓨터를 이용한 수치해석(numerical analysis)을 이용하면 이러한 물리적 모델의 유용성을

극대화 할 수 있는데 이를 컴퓨터 원용 공학(computer-aided engineering; CAE)라고 한다. 더욱이 최근에는 컴퓨터 기술의 발달로 CAE에 대한 비용 부담이 줄어들고 계산속도는 빨라져서 CAE 기술의 미래는 매우 밝다고 할 수 있다.

본 논문에서는 분말사출성형공정의 해석을 위하여 개발된 수치해석 프로그램이 실제 공정에 어떻게 응용이 가능한지를 기술하고자 한다. 2장에서는 개발된 CAE 프로그램에서의 기본적인 특징을, 3장에서는 실제 발생하는 문제점들을 어떻게 예측할 수 있는가를, 4장에서는 CAE를 이용하여 어떻게 최적설계를 할 수 있는가를, 5장에서는 앞으로 CAE 기술의 발전 방향에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 수치해석

본 연구에서는 CAE 프로그램으로 CetaTech이 개발한 PIMSolver[®]를 사용하였다. 본 CAE 프로그램에서 사용한 물리적 모델 및 수치해석 기법은 다음과 같다.³⁻⁵⁾

- 지배방정식: Hele-Shaw (2.5차원) 근사법
- 점도모델: 미끄럼 현상(slip phenomena) 및 항복응력(yield stress) 고려
- 수치해석법: FEM/FDM

CAE 해석을 위해 필요한 입력 자료는 형상자료, 재료물성자료, 공정조건자료 및 성형기의 사양이다. 형상자료는 CAD 자료로부터 만들어진 격자(mesh) 형태인데 삼각형 요소와 직선 요소를 사용하였다. 재료물성자료는 미끄럼 현상 및 항복응력을 고려한 분말 바인더 혼합체의 점도, 열적 특성(thermal properties) 및 pvT(pressure-volume-temperature) 자료 등이다. 공정조건자료는 주로 지배방정식에 대한 초기조건과 경계조건을 제공한다. 성형기 사양은 수치해석 중 성형기의 사양을 넘을 경우를 예측하기 위하여 필요한 자료이다.

3. CAE 응용 I: 문제 예측

본 장에서는 CAE를 이용하여 실제 제조 현장에서 발생가능성이 있는 불량 문제들에 대하여 미리 예측할 수 있는 항목에 대하여 기술하고자 한다.

3.1. 혼합조건의 영향 예측

분말 바인더 혼합체는 혼합조건에 따라 밀도와 점도가 변화한다. 혼합이 잘 안된 경우에는 분말 사이에 서로 응집(agglomeration)이 일어나 성형체(green part)의 물성이 저하되어 최종 제품이 불량일 수 있는 가능성이 높아진다.

표 1은 W-Ni-Fe 분말과 Polymer-Wax를 기본으로 하는 바인더 시스템을 혼합하는데 있어서 서로 다른 6가지의 혼합조건(mixing condition)을 보여준다. 그림 1은 일정한 전단변형율(shear rate)에서 시간에 따른 점도를 보여준다. 혼합이 잘 되면 잘 될수록 시간에 따른 변화가 줄어 점도가 안정되어짐을 알 수 있는데, 이는 혼합조건에 따라 혼합체의 균질성(homogeneity)이 높아진다.

각각에 대해 밀도와 점도를 측정하여 CAE 해석을 수행하였다. 그림 2는 각 혼합조건에 대하여 예측된 사출압력(injection pressure)인테 형체력(clamping force) 및 최대전단응력(shear stress) 결과도 이와 비슷하다. 이들은 모두 압력과 관련된 중요한 설계변수(design variables)이다. 본 결과에서 알 수 있듯이 혼합을 잘 하면 사출압력을 약 60% 정도까지 줄일

Table 1. Various mixing conditions with the same powder and binder system

Case	Mixing Machine	Powder	Mixing Condition
1	REACO	as-received	first iteration
2	REACO	as-received	sixth iteration
3	REACO	as-received	tenth iteration
4	REACO	rod-milled	first iteration
5	REACO	rod-milled	second iteration
6	Torque Rheometer	as-received	180 rpm & 45 min.

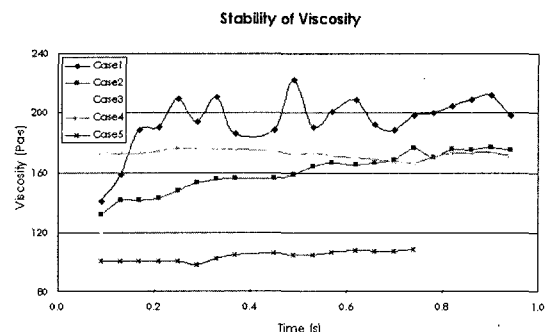


Fig. 1. Viscosity variation with time for various mixing condition.

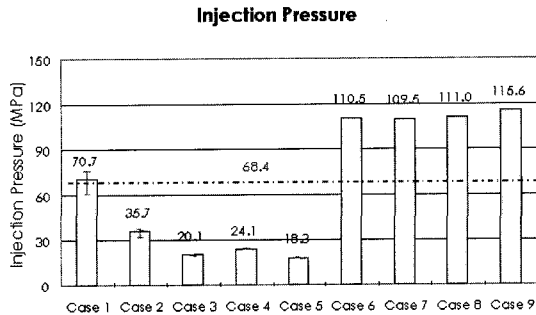


Fig. 2. Injection pressure predicted for various mixing condition.

수 있다. 또한 같은 혼합조건에 대한 사출성형 시 각각 사출할 때마다 사출압력이 변동이 혼합이 잘됨에 따라 20% 정도(Case 1)에서 5% 정도(Case 3)으로 줄어든다.

본 예제에서 알 수 있듯이 사출압력의 변동을 제품의 품질에 대한 사양으로 정한다면, 혼합 후 밀도와 점도의 측정 및 CAE 해석으로 현재 혼합체의 균질성에 대한 기준을 마련할 수 있을 것이다.

3.2. 사출성형 문제점

CAE 해석을 통하여 다음과 같은 기본적인 여러 가지 문제를 예측할 수 있다.

- 미충전(short shot): 성형기의 최대사출압력이 너무 작거나, 너무 느린 사출 또는 너무 빠른 냉각 등으로 발생한다.
- 웰드라인(weldline): CAE를 이용하여 웰드라인 위치를 확인하고 원하지 않은 위치에 있지 않나 확인할 수 있다.
- 플래시(flash): 성형기의 최대형체력이 너무 작아 발생한다.
- 벤팅 및 공기 갇힘(venting & air trap): 최종적으로 충전되는 부분이다. 이 위치에 공기 벤팅 시스템을 만들어 주어야 한다.
- 젯팅(jetting): 게이트(gate)에서의 속도 및 전단 응력을 바탕으로 간접적으로 예측 가능하다.
- 역류(backflow): 너무 빠른 패킹압력(packing pressure)의 제거로 분말-바인더 혼합체가 게이트에서 제품에서 유동주입구(delivery system) 쪽으로 역류한다.
- 분말-바인더 분리(separation): 분말 주위의 레이

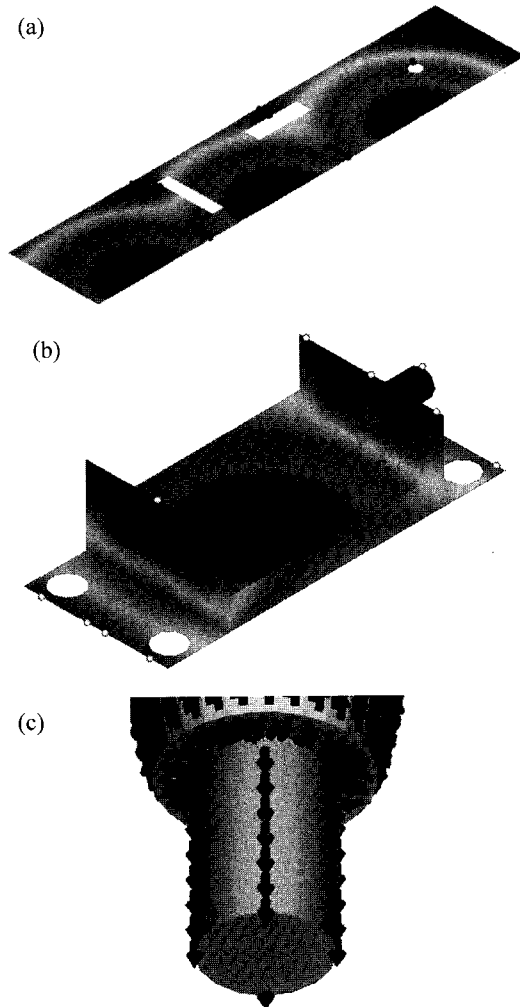


Fig. 3. Troubleshooting: (a) weldline locations, (b) venting locations, and (c) back flow in gate due to too early removal of packing pressure before gate sealing.

놀스 수(Reynold's number)와 전단응력을 바탕으로 간접적으로 예측 가능하다.

그림 3(a), (b), (c)는 각각 웰드라인, 벤팅 위치 및 역류에 대한 예를 보여준다. 이러한 자료를 토대로 금형 제작 전 위의 문제가 발생하지 않도록 제품설계, 금형설계 및 공정조건설계를 변동할 수 있다.

4. CAE 응용 II: 최적 설계

이전 장에서는 CAE를 이용하여 실제 제조 현장에

서 발생 가능성이 있는 불량 문제들에 대하여 미리 예측할 수 있는 항목에 대하여 살펴보았다. 본 장에서는 문제 해결에서 한 걸음 나아가서 CAE를 이용한 최적설계에 대하여 기술하고자 한다.

4.1. 목적함수와 설계변수

최적 설계의 첫 번째 단계는 최적화하고자 하는 우리의 목적을 수량화 하는 것이다. 이 수량화된 목적을 목적함수(objective function)라고 한다. 이와 동시에 이 목적함수를 변화시키는 변수들이 필요한데 이를 설계변수(design variables)라고 한다. 일반적으로 각 설계변수들에 대해서는 변경 가능한 범위에 대한 제한조건들이 있다.

표 2는 사출성형단계에서 잘 알려진 목적함수들과 설계변수들을 보여주고 있다. 우리는 실제 제품설계, 금형설계 및 공정조건설계에 있어서 CAE를 이용하여 이러한 각종 목적함수들과 설계변수들에 대하여 최적설계를 수행할 수 있을 것이다.

만약 우리가 주어진 목적함수에 대하여 어떠한 설계변수가 중요한가를 모른다면, 우리는 민감도 해석을 통하여 중요한 설계변수를 결정할 수 있다. 민감도 값의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Sensitivity} & \\
 & \equiv \frac{\text{percentage change in output}}{\text{percentage change in input}} \\
 & \equiv \frac{\text{incremen in output/initial value of output}}{\text{incremen in input/initial value of input}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Table 2. General Objective functions and design variables

Phase	Objective Functions	Design Variables
	to minimize injection pressure	· filling time · gate location
	to be uniform particle distribution	· ram-speed profile
	to be uniform flow balance	· gate location · runner system design
	to minimize of scrap	· runner system design
	to be uniform shrinkage	· packing pressure profile
	to avoid back flow	· packing time
	to be uniform mold temperature	· cooling system design
	to be fast cooling time	· cooling system design

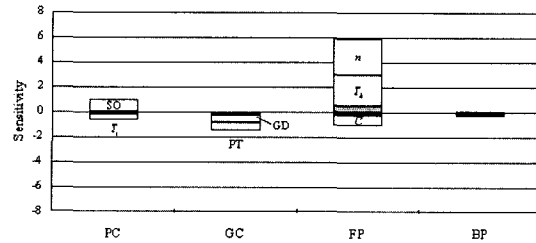


Fig. 4. Sensitivity analysis for injection pressure.

위의 식에서 알 수 있듯이 민감도 값이 무차원화(dimensionless) 되어 있기 때문에 서로 서로 비교할 수 있다. 그림 4는 인장시편금형에서 사출압력에 대한 각 변수들에 대한 민감도 해석 결과를 보여준다. 공정조건에서는 Switch-over Point(SO)와 사출온도(T_1)가, 형상에서는 게이트 지름(GD)과 제품 두께(PT)가, 혼합제 물성에서는 점도에 관련된 변수들(n, C, T_b)이 사출압력에 대하여 민감하다는 것을 알려준다. 바이너리 시스템의 물성은 사출압력에 대하여 크게 중요하지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 실제로 사출압력이 중요한 설계변수라면, 제품의 품질을 일정하게 유지하기 위하여 이러한 중요한 변수들은 항상 관리하여야 할 것이다.

4.2. 최적화 알고리즘

CAE를 이용한 최적화 과정에서 사용될 수 있는 알고리즘은 다음과 같다.

- 해석적 방법: 해석과 민감도 해석을 통한 수학적 인 방법
- 통계적 방법: 강건설계(robust design) 개념을 도입한 실험계획법(design of experiment)
- 기타: 학습기능을 이용한 신경망(neural network), 퍼지(fuzzy), 유전자 알고리즘(genetic algorithm) 등

그림 5는 최적화 예제에 사용된 형상자료료를 나타내고 있다. 그림 6은 그림 5의 형상자료에 대한 충전시간에 대한 사출압력 그래프이다. 이 결과 0.8초가 사출압력을 최소로 하는 최적충전시간임을 알 수 있다. 표 3은 그림의 형상자료에 대한 최적설계를 위하여 설정된 목적함수와 설계변수를 보여준다. 또한 표 3은 주어진 목적함수를 최소화하기 위하여 실험

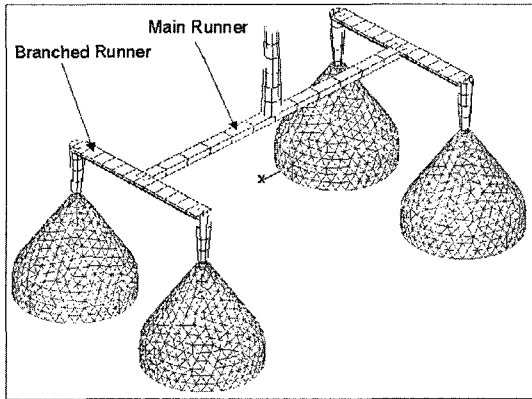


Fig. 5. Geometry for optimization example.

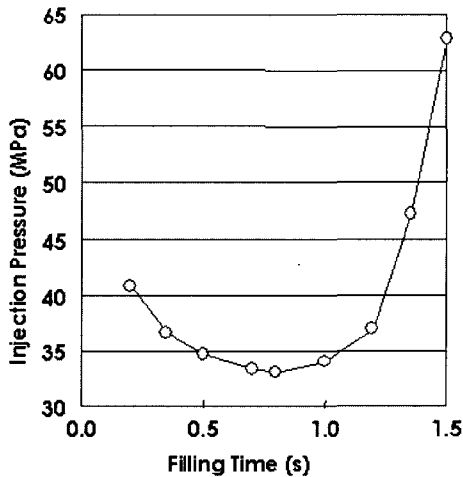


Fig. 6. Injection pressure vs. filling time.

계획법을 사용하여 얻은 최적설계변수를 보여준다. 본 최적설계를 통하여 같은 사출압력에서 25% 정도의 재료 절감을 기대할 수 있다.

5. CAE 기술의 발전 동향

지식기반사회에서의 CAE 기술의 중요성 및 필요성에 대한 인식은 대부분의 학계와 산업계에서 인정하고 있다. 이러한 CAE 기술이 어떠한 방향을 발전할 것인가에 대해 간단히 기술하고자 한다.

5.1. CAE 기술 자체의 발전 동향

예상되는 CAE 기술 자체의 발전 동향에 대하여 기술하면 다음과 같다.

- 물성 및 기본 물리 현상에 대한 보다 정확한 모델을 통한 CAE 프로그램 개발(예: 분말의 분포, 사출성형품의 변형 등)
- 컴퓨터 기술의 발달과 병행한 수치해석법의 발전을 통한 빠르고 정확한 CAE 프로그램 개발(예: 3차원 해석, Parallel Processing 기술 등)
- CAD 및 성형기와 연계되어 User가 보다 사용하기 쉬운 CAE 개발(User를 CAE 전문가에서 일반 설계자로 확대하려는 노력으로 Desktop CAE로 불린다. 예: Mesh가 필요 없는 CAE)

이러한 CAE 기술 자체의 발전 동향은 과거 학계에서 주도하던 시기에서 CAE 기술이 산업화되면서 산업계에서 CAE 제품화 및 CAE 소비자들의 필요성이 많이 대두하면서 그 주도권이 점점 옮겨지고 있다.

5.2 CAE 기술의 사용 확대에 대한 동향

CAE 기술이 산업화되면서 대두된 주요 질문은 어떻게 이 CAE를 활용할 것인가 및 어떻게 CAE의 사용을 확대할 것인가 하는 것이다. 이러한 CAE 사용 확대에 대한 동향에 대하여 기술하면 다음과 같다.

Table 3. Objective function, design variables and optimum conditions

Category	Contents	Initial Value	Optimum Value
Objective Function	to be minimize F: F = (normalized weight of scrap) + (normalized injection pressure)	2.00	1.75
Constraint	Machine Specification	-	-
Design Variables	Injection Temperature	130°C	140°C
	Mold Temperature	40°C	45°C
	Diameter of Main Runner	6.0 mm	5 mm
	Diameter of Branched Runner	5.0 mm	4 mm

- 초기에는 CAE 인식의 확대를 위한 시기로 주로 기본적인 발생 가능한 문제의 예측을 통한 품질, 제조비용 및 납기 등과 연관된 CAE의 필요성을 강조함
- 둘째 단계는 CAE의 활용 방법이 크게 개발된 시기로 CAE가 제품 제조 후 문제 해결에서 설계 단계에서의 최적설계 도구로써 사용됨
- 마지막 단계는 CAE가 회사의 제품 개발에 완전히 접목되어 ISO와 같은 회사의 내부규정에 CAE가 들어감으로써 응용기술로써 완성됨(이 단계에 이르러 많은 CAE 컨설턴트가 생겨 CAE 시장이 성숙단계에 들어감)

현재 플라스틱 사출성형산업에서의 CAE 위치는 둘째 단계에서 마지막 단계로 나아가고 있으며 분말 사출성형산업에서의 CAE의 위치는 첫째 단계에서 둘째 단계 사이에 있다고 할 수 있다.

6. 결 론

분말, 바인더, 혼합, 성형, 탈지 및 소결 등 많은

분야의 지식이 필요한 분말사출성형 기술은 제품의 형상이 복잡하면서 모든 것을 통합하여 최적의 제품을 설계하여 생산할 수 있는 통합기술 중 하나가 CAE 기술이다. 이 CAE 기술의 중요성은 점점 부각되어지고 CAE 기술의 응용 방법이 점점 다양화해지면 실제 사업체에서 CAE 기술이 사용되어 유용성을 증면하고 있습니다. 본 논문에서는 이러한 CAE 기술의 응용에 대한 부분을 문제 해결과 최적설계라는 관점에서 살펴보았으며 앞으로의 발전 동향에 대하여 간단하게 기술하였습니다.

참고문헌

1. R. M. German: Int. J. Powder Metall., **23** (1987) 237.
2. S. T. Lin and R. M. German: Powder Metall. Int., **21** (1989) 20.
3. T. H. Kwon and J. B. Park: Polym. Eng. Sci., **35** (1995) 741.
4. T. H. Kwon and S. Y. Ahn: Int. J. Powder Metall., **85** (1985) 45.
5. T. H. Kwon and A. Ahn: Int. J. Powder Metall., **40** (1997) 174.