

## 분말사출재의 Bagley 보정에 관한 연구

이 병 옥

아주대학교 기계·산업공학부  
(1997년 5월 9일 접수)

### A Study on the Bagley End Correction of PIM Feedstocks

Byung Ohk Rhee

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Wonchun-dong san 5, Paldal-ku, Suwon, 442-749, Korea  
(Received May 9, 1997)

#### 요 약

분말 입자 형태가 다른 2 가지 스테인레스 강(SUS 316L) 분말과 조성이 다른 2 가지의 결합제를 이용하여 분말충전율의 변화를 가지도록 제조된 5 가지 분말사출재에 대한 Bagley 보정 실험을 실시하여 Bagley 보정값에 대한 온도, 분말충전율, 분말 입자 형태 그리고 결합제의 영향을 조사하였다. Bagley 보정값을 구하기 위한 자료 처리를 하는 과정에서 길이가 긴 모세관(L/D=60)의 압력 손실이 Thixotropy에 의해서 감소한 현상을 발견하였다. 이는 모세관 점성측정기를 이용한 분말사출재의 점도 측정시 길이가 긴 모세관의 사용이 바람직하지 못하다는 것을 나타낸다. 분말사출재의 Bagley 보정값에 대한 온도와 결합제의 영향은 매우 미약하게 나타났는데, 특히 결합제의 영향은 거의 나타나지 않는 것을 발견하였다. 분말충전율과 분말 입자 형태의 Bagley 보정값에 대한 영향은 매우 크게 나타났으며, 분말충전율이 증가할수록 Bagley 보정값이 증가하고 분말 입자의 형태가 불규칙한 분말을 사용한 분말사출재의 보정값이 구형의 분말에 비해 높은 보정값을 나타냈다. 실험 결과에 대한 고찰 결과, 분말사출재의 모세관 입출구에서 압력 손실의 주 원인은 분말 입자간 마찰과 충돌이라고 판단되었다.

**Abstract**—The 316L stainless steel powders that had different particle shapes were mixed with 2 types of binders to produce 5 PIM feedstocks with varying powder volume fractions. The effects of temperature, powder volume fraction, particle shape and binder on the entry-and-exit pressure drop of capillary and the Bagley end correction of the feedstocks were investigated. During the data processing, it was found that the pressure drop measured at the longest capillary (L/D=60) was reduced by thixotropy. With the result, it was recommended to avoid the use of the long capillary in the characterization of PIM feedstocks. It was found that the effect of temperature was little and the effect of binder was almost none. The effects of powder volume fraction and particle shape were found to be large. As the powder volume fraction increases, the Bagley end correction increases. The feedstock with an irregular particle shape produced a high value of the Bagley end correction, compared with the feedstock with spherical particles. As the result, the main cause of the pressure drop at entry and exit of capillary was believed to be the friction and collision between particles in the feedstock.

**Keywords:** Powder Injection Molding, Capillary Rheometer, Viscosity, Bagley End Correction, PIM Feedstock, Binder, Moldability, Thixotropy, Entry and Exit Pressure Loss, Particulate Suspension

#### 1. 서 론

금속이나 세라믹스 분말을 결합제(Binder)와 혼합한 후 분말사출재(PIM Feedstock)를 제조하여 사출성형공정을 이용하여 성형하고 결합제 제거공정(Debinding process)을 거쳐 최종적으로 소결공정(Sintering process)을 마치면 금속 제품이나 세라믹스 제품을 얻는 분말사출성형공정(Powder Injection Molding)은 복잡한 형상의 금속 제품이나 세라믹스 제품을 대량으로 제조할 수 있다는 장점을 가지고 지속적인 발전을 하고 있다. 분말사출성형공정의 각 요소 기술들은 아직 완숙의 단계에 있지 못 하지만 그 중에서도 분말사출재의 성형성 개선에는 아직도 많은 여지가 남아 있다. 분말사출재의 성형성이 우수하

지 못한 경우 사출성형공정에서 발생하는 결함으로 높은 불량률을 피할 수가 없다. 분말사출재의 성형성을 예측하기 위한 다양한 시험 방법들이 시도되어 왔었는데 [1, 2], 분말사출재의 성형성을 증가시키기 위해서는 분말사출재의 유변학적 거동을 명확히 이해하여야 한다.

분말사출재의 유변학적 거동을 조사하기 위해서 가장 기본적으로 실시하는 시험이 점도측정 시험이며, 점도측정을 위해서 가장 널리 사용하는 방법이 모세관 점성측정기(Capillary Rheometer)를 이용한 점도 측정법이다. 모세관 점성측정기에서 나타나는 오차를 보정하여 정확한 점도를 구하기 위해서 몇 가지 필수적인 보정작업을 행하게 된다. Bagley 보정작업 역시 모세관의 입출구에서의 압력 손실을 보정하는 중요한 보

정작업의 하나로서, 직경이 큰 배럴에서 직경이 작은 모세관으로 급격하게 유로가 좁아지면서 시료에 발생하는 압력 손실과 모세관을 빠져 나온 뒤 급격한 압력 변화에 의한 압력 손실을 측정하여 순수하게 모세관 내부에서 발생한 압력 손실을 구하여 시료의 점도를 측정하는 것이 목적이다.

모세관 내의 유동 중에서 모세관 입구와 출구에서의 유동 상태는 분말사출성형공정에서 금형 내부의 단면이 급격하게 감소하거나 확장되는 부위에서 분말사출재의 유동과 유사한 점을 가지고 있다. 모세관 입출구에서의 압력 손실을 측정하는 Bagley 보정작업은 단순한 점도의 보정 뿐 만이 아니라 급격히 변화하는 유로에서 시료의 압력 손실의 정도를 알아 볼 수 있다. 분말사출재가 금형 내부의 변화 많은 통로를 흐를 때 발생하는 압력 손실도 분말사출재의 점도와 함께 성형성에 중요한 영향을 줄 것이라는 점에 착안하여 Bagley 보정작업을 분말사출재 성형성의 간접적인 판단 시험으로 사용하기 위한 기초연구 결과 분말사출재의 성형성과 Bagley 보정값 사이에는 밀접한 관련이 있다는 것이 발표되었었다[3].

분말사출재의 성형성을 증가시키기 위해서는 모세관 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값을 낮추어야 하며, 이를 위해서는 분말사출재를 구성하는 요소들 중 가장 큰 영향을 가진 요소를 조사해야 할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 Bagley 보정작업의 측정 결과인 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값이 분말사출재의 온도, 분말충전율, 입자 형태, 그리고 결합제에 의한 영향을 조사하고 각각의 요소들에 의한 영향의 정도를 비교 분석하였다. 또한 분말사출재가 모세관 유동에서 보이는 특성을 파악하고 모세관 점성측정기를 이용하여 분말사출재의 점도를 측정할 때의 주의점에 대해서도 제시하였다.

## 2. 실험

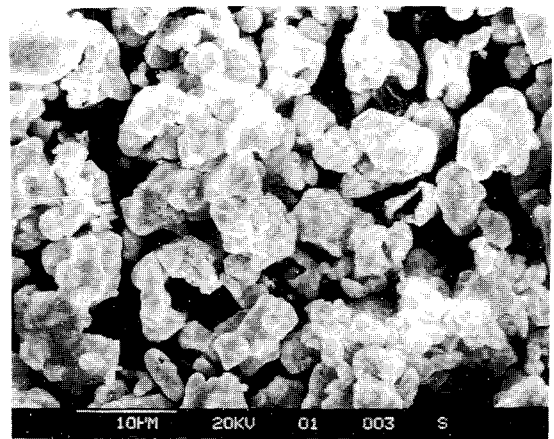
### 2.1. 재료

#### 2.1.1. 금속분말

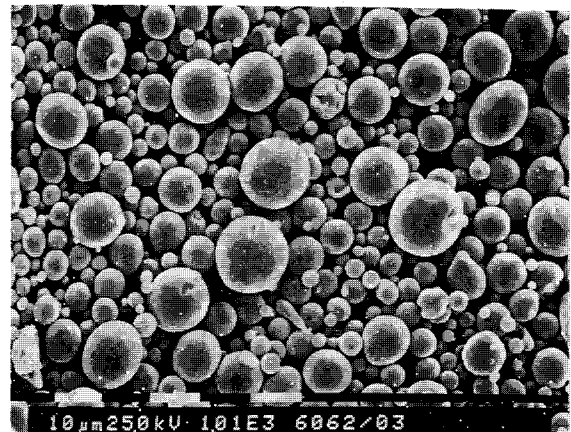
본 실험에서 사용한 2가지 금속분말은 모두 스테인레스 스틸(SUS 316L) 분말로서 Fig. 1에 두 금속분말의 전자 현미경 사진이 나타나 있다. 전자 현미경 사진에서도 볼 수 있듯이 PAMCO사에서 제조한 분말은 수분사법으로 제조된 분말로서 입자의 형태가 불규칙적이며 분말 입도분포의 중간값(Median)이 9  $\mu\text{m}$ 이며, ANVAL사에서 제조한 분말은 가스분사법으로 제조된 분말로서 입자의 형태가 거의 구형에 가깝고 분말 입도분포의 중간값이 10  $\mu\text{m}$ 로서 두 분말의 크기는 서로 비슷하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 두 금속분말을 구분하기 위하여 PAMCO사의 분말에는 P, ANVAL사의 분말에는 V라는 영문 글자를 붙였다.

#### 2.1.2. 결합제

실험에 사용한 결합제는 Table 1에 나타나 있듯이 기본적으로 파라핀 왁스(Paraffin Wax)가 주성분이며 고분자 성분이 EVA(Poly-Ethylene Vinyl Acetate)로서 고분자 함량을 각각 20%와 30%로 조절하고 EVA 함량이 20%인 결합제에만 10%



(a)



(b)

Fig. 1. SEM (Scanning Electron Microscope) Photographs of the two powders used in this experiment (a) PAMCO powder, (b) ANVAL powder.

의 카너바 왁스(Carnauba Wax)를 혼합하였다. 그리고 두 결합제 모두 1%씩의 스테릭산(Stearic Acid)을 포함하고 있다. 고분자 함량이 30%인 결합제의 점도가 상대적으로 높으며, 두 결합제는 분말에 대한 점착력 및 결합제의 성능에서 차이가 나는 특징이 있다. 두 결합제는 이미 분말사출성형에 사용되어 결합제로서의 성능을 평가 받은 조성이다. Table 1에 나타난 명칭은 결합제를 표기하는 영문 알파벳 기호이다.

#### 2.1.3. 분말사출재

본 실험에 사용한 분말사출재들의 분말, 결합제 그리고 분말충전율 등이 Table 2에 나타나 있다. 분말충전율이 두 분말사

Table 1. Binder compositions used in this experiment (Unit=weight percentage, wt %)

Symbol	Component Paraffin wax	EVA (Ethylene Vinyl Acetate)	Carnauba wax	Stearic Acid
S	69	30	0	1
A	69	20	10	1

**Table 2.** Feedstock compositions used in this experiment

Symbol	Powder Manufacturer	Binder symbol	Powder Volume Fraction, Vol %
PS53	PAMCO	S	53
PA53	PAMCO	A	53
PA54	PAMCO	A	54
VS65	ANVAL	S	65
VS69	ANVAL	S	69

출재에서 크게 차이가 나고 있는 것은 두 분말의 입자 형태가 크게 차이가 나고 있기 때문이다. 분말사출성형공정에서 분말 충전율은 사출성형에 알맞도록 최적 분말충전율을 실험을 통해 결정된다. 경험에 의하면 최적 분말충전율은 최대 분말충전율에서 약 2~3% 정도 낮게 결정된다. 분말 입자 형태가 크게 다른 경우 분말의 영향을 비교하기 위해서 동일한 분말충전율의 분말사출재들을 비교하는 것은 실제로 아무런 의미가 없으며, 오히려 실제 분말사출성형공정에서 사용될 수 있는 보편적인 분말충전율을 선택하는 것이 타당성이 높다는 판단에서 Table 2에서와 같은 분말충전율을 선택하였다.

본 논문에서 사용할 각 분말사출재의 표기법은 2자의 영문 알파벳과 2자의 숫자로 구성되어 있다. 첫번째 영문 알파벳은 분말 종류를 가리키고, 두번째 영문 알파벳은 결합제의 종류를 가리킨다. 그리고 이어지는 두자리의 숫자는 분말충전율의 백분을 값이다. 자료의 분류를 위해서 측정온도를 표시하여야 할 필요가 있을 때 마지막으로 분말사출재 표기 뒤에 하이픈을 붙인 뒤 섭씨의 측정온도를 표기하였다.

**2.1.4. 실제 공정에서의 성형성**

Table 1에 나타난 두 결합제 모두 많은 실험과 경험을 바탕으로 제조된 결합제이다. 그러나, 결합제의 우수함은 결합제만으로 평가 받을 수 없고 반드시 분말과 혼합된 분말사출재 상태에서 평가를 받아야 한다. 실제의 분말사출성형공정에서 평가되는 분말사출제의 성능 혹은 성형성은 일반적으로 복잡한 형상을 성형할 때 발생하는 결합의 발생 빈도와 결합의 크기 등으로 판단한다. 본 실험에 사용한 분말사출재 중에서 실제의 경험상 상대적으로 가장 우수한 성형성을 가지는 분말사출재는 VS65이었다. PS53은 두번째로 우수한 성형성을 보여 주었으나, 분말사출성형공정의 다른 단위 공정에서 요구되는 형상보전성 등의 요구 조건은 VS65보다 잘 만족시켰다.

**2.2. 실험 방법**

**2.2.1. 혼합 과정**

분말과 결합제의 혼합 과정은 크게 두 부분으로서, 첫번째 단계는 결합제 성분들을 미리 녹여 회전식 혼합기에서 충분히 혼합 시키는 과정이다. 본 실험에 사용된 결합제는 약 130°C의 온도에서 20분간 혼합을 하여 결합제 성분들이 충분히 혼합된 상태로 만든 후 얇게 판상으로 굳혀서 잘게 부수기 편하도록 준비하였다.

두번째 단계는 분말과 결합제의 혼합 과정으로서, 사용된 혼합기는 밴버리(Banbury) 방식의 혼합기이며, 1회 충전에

200 cc를 혼합할 수 있는 실험실 규모의 혼합기이다. 혼합 순서는 분말을 혼합기에 전량 넣고 혼합 온도로 일정 시간 예열시킨 후, 미리 혼합되어 잘게 부수어진 상태로 준비된 결합제를 혼합기에 넣고 낮은 회전 속도로 혼합을 시작하였다. 혼합기의 구동 토크가 낮아졌을 때 점점 회전 속도를 증가시켜 높은 회전 속도로 혼합을 하였다. 분말과 결합제의 혼합에 소요되는 시간은 약 1 시간 정도이었다. 분말과 결합제의 혼합이 끝난 후 사출 성형 공정과 모세관 점성 측정에 편리하게 사용할 수 있도록 분말사출재를 입자의 평균 지름이 약 2~3 mm인 작은 입자로 만들었다.

**2.2.2. 모세관 점성 측정 과정**

본 실험에 사용한 모세관 점성측정기는 Instron사 제품이었고, 사용된 모세관의 직경은 1.27 mm(0.05 inches) 이었으며 모세관의 길이는 6.35 mm, 25.4 mm, 50.8 mm 그리고 76.2 mm(각각 0.25 inches, 1.0 inch, 2 inches 그리고 3 inches)이었다. 이 모세관들의 L/D는 각각 5, 20, 40 그리고 60에 해당된다. 분말사출재를 일정한 양으로 배럴에 채우고 플런저 속도를 60, 110, 170, 110, 60, 25, 10, 10, 25, 60, 110, 그리고 170 mm/min의 순서대로 실험을 하였다. 각 속도에서의 압력이 충분히 안정되었을 때 배럴 내부의 압력을 측정하고 다음 속도로 전환하였다. 초기 단계에서는 분말사출재의 배럴 충전 상태 등이 일정하지 못하기 때문에 측정의 오차가 큰 점을 고려하여 초기 2 단계의 플런저 속도에서 측정값은 자료정리 단계에서 사용하지 않았다. 초기 단계의 플런저 속도는 될 수 있는 대로 높은 속도가 배럴 내부의 급속한 압력 안정에 바람직하지만 너무 높은 속도를 선택하면 분말사출재의 소모량이 많아 충분히 많은 측정값을 얻지 못 하였기 때문에 전체 속도 중에서 중간에 해당되는 속도를 선택하였다.

실험에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 될 수 있는 대로 많은 양의 실험을 실시하면 좋겠지만 실험량이 과다하여 본 실험에서는 각 분말사출재에 대해 한 가지 온도 조건에서 2회의 실험을 기준으로 하되 측정값의 편차가 큰 경우 약 3회에서 4회까지 실험을 실시하였다. 일반적으로는 2회의 실험으로도 만족할 만한 편차를 얻었다. 본 실험에서 사용한 속도 순서로 2회의 실험을 실시하면 동일한 전단율에서의 압력이 총 4회가 측정된다.

**2.3. 자료 처리**

각각의 전단율에서 측정된 압력을 직경에 대한 길이의 비율 (L/D)의 함수로 그래프에 나타낸 후 실험값들을 충실하게 근사할 수 있도록 직선 혹은 2차식의 근사식을 얻었다. 직선 혹은 곡선의 근사식을 수직축(압력 손실을 나타내는 축)까지 연장하여 수직축과 교차하는 값을 계산한다. 수직축과 교차하는 값이 이론적으로 모세관 입출구에서의 압력 손실에 해당되며, 다시 근사식을 더욱 연장시켜 수평축(L/D를 나타내는 축)과의 교차하는 값을 계산한다. 수평축과 교차하는 값이 Bagley 보정 값(L/D<sub>0</sub>)으로서, 측정된 총 압력 손실이 모두 관 내부에서 발생하였다고 가정할 때의 비관길이의 실제 비관길이의 차이가 된

다[4,5]. 이 과정을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P_{cap} + \Delta P_{end} = 4\tau_w(L/D + L/D_e)$$

위의 식에서  $\tau_w$ 는 관 내부 벽에서의 전단 응력이며,  $L/D_e$ 는 Bagley 보정값이다. 전체 압력 손실은 모세관의 입출구에서의 손실( $\Delta P_{end}$ )과 순수한 관 내부에서의 손실( $\Delta P_{cap}$ )로 이루어져 있다. 위의 식에서 수직축과 교차하는 값이 입출구 압력 손실( $\Delta P_{end}$ )이며 수평축과 교차하는 값의 절대값이 Bagley 보정값( $L/D_e$ )임을 알 수 있다[4,5].

위의 방법으로 모세관 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값을 구하는 과정에서, Fig. 2에서와 같이 4가지의 길이에서 측정된 압력 손실들을 2차 곡선(2nd-order polynomial)식으로 근사 시킨 경우 근사식이 수직축과 음수에서 교차하는 현상이 발견되었다. 또한 동일한 측정값들을 1차 직선으로 근사 시킨 경우에도 역시 음수의 입출구 압력 손실을 얻었다. 음수의 입출구 압력 손실은 물리적으로 인정할 수 없는 결과로서, 측정값들을 모두 사용하여 직선 혹은 곡선으로 근사시키는 방법으로는 올바른 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값을 구할 수 없었다.

본 문제점을 해결하기 위하여 현탁액(Particulate Suspension)의 유변학적 거동에 관한 연구 결과들에 대한 문헌 조사 결과, 본 실험에서 발생한 것과 동일한 현상에 대한 연구 결과가 발표되었었다[6]. 참고문헌에 의하면 종이 코팅(Paper coating) 재료에 대한 Bagley 보정 실험을 실시한 결과, 길이가 긴 모세관에서 Thixotropy에 의한 총 압력 손실의 감소현상이 특히 심하게 발생하였으므로 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값을 계산할 때 짧은 모세관에서 측정된 자료만을 사용하여 근사식을 구하였다. 본 연구에서도 참고 문헌의 방법과 동일한 방법을 적용할 수 있는지를 알아보기 위해 가장 긴 모세관( $L/D=60$ )을 제외한 3개의 짧은 모세관( $L/D=5, 20$  그리고  $40$ )에서 측정된 총 압력 손실만을 직선식으로 근사 시킨 결과 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 음수의 입출구 압력이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 길이가 큰 모세관( $L/D=60$ )에

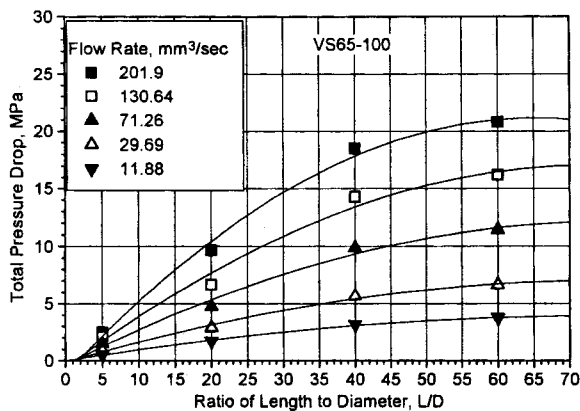


Fig. 2. Example of the data fitting with 2<sup>nd</sup> order polynomial, resulting negative pressure drop at the entry and exit of capillary by using the data of the 4 capillaries (feedstock=VS65-100).

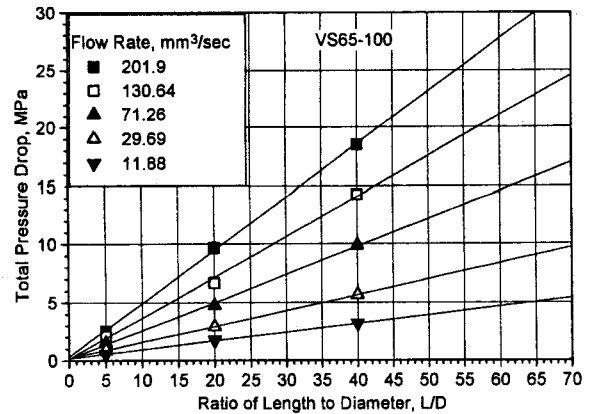


Fig. 3. Example of the data fitting with a linear line, resulting positive pressure drop at the entry and exit of capillary by using the data of the shortest 3 capillaries (The data is the same as the one of Fig. 2).

서 총 압력 손실 감소현상이 심하게 발생하는 경우  $L/D=60$ 의 모세관을 제외한 나머지 모세관에서 측정된 총 압력 손실만을 사용하여 직선의 근사식을 얻어 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값을 구하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 온도의 영향

Fig. 4는 90, 100, 그리고 110°C에서 PS53의 입출구 압력 손실을 나타내고 있다. Fig. 4에서 온도 변화에 따른 입출구 압력 손실의 뚜렷한 차이가 나타나지는 않고 있으나, 온도 변화에 따른 변화가 크지 않다는 것은 쉽게 알 수 있다. Fig. 5는 90, 100, 그리고 110°C에서 VS65의 입출구 압력 손실을 나타내고 있는데, Fig. 4에서와 같이 온도 변화에 따른 입출구 압력 손실의 변화가 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 두 분말사 출재의 결과를 비교하면 VS65의 온도 변화에 따른 입출구 압력 손실의 변화는 PS53에 비해 더욱 감소한 것을 알 수 있다. 일반적으로 온도가 증가하면 결합제의 점도가 감소하고 또한

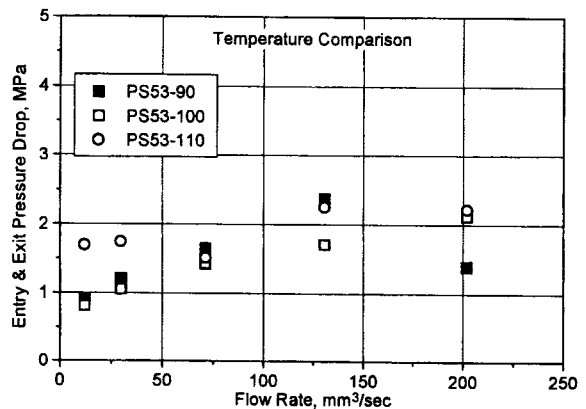


Fig. 4. Entry & Exit Pressure drop of PS53 feedstock at 90, 100, and 110°C as a function of flow rate (Temperature effect).

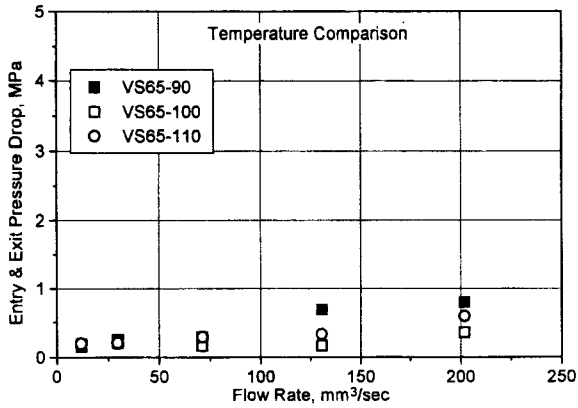


Fig. 5. Entry & Exit Pressure drop of VS65 feedstock at 90, 100, and 110°C as a function of flow rate (Temperature effect).

분말사출재의 점도도 감소할 것으로 추정되지만, 본 실험의 결과 온도 변화에 따른 입출구 압력 손실 변화는 뚜렷이 나타나지 않았다.

Fig. 6은 90, 100, 그리고 110°C에서 PS53의 Bagley 보정값을 보여 주고 있으며, Fig. 7은 90, 100, 그리고 110°C에서 VS65의 Bagley 보정값을 보여 준다. 두 Figure들에서 온도 변화에 따른 Bagley 보정값의 변화가 모두 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. PS53는 온도 변화에 따라 낮은 유량에서는 차이가 다소 보이고 있으나 유량의 증가에 따라 차이가 나지 않고 있다. 반면 VS65는 유량의 증가에도 온도 변화에 따른 차이를 구별하기 어려운 정도로 작은 차이가 있는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 분말충전율의 영향

Fig. 8과 Fig. 9에는 각각 PA53과 PA54, 그리고 VS65와 VS69의 100°C에서 측정된 입출구 압력 손실이 비교되고 있는데, PA 분말사출재와 VS 분말사출재 모두 분말충전율이 증가함에 따라 입출구 압력 손실이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. PA54는 PA53에 비해 조금 증가된 입출구 압력 손실을 보여 주고 있으나, VS69는 VS65에 비해 큰 증가를 보여 주고 있으며 유

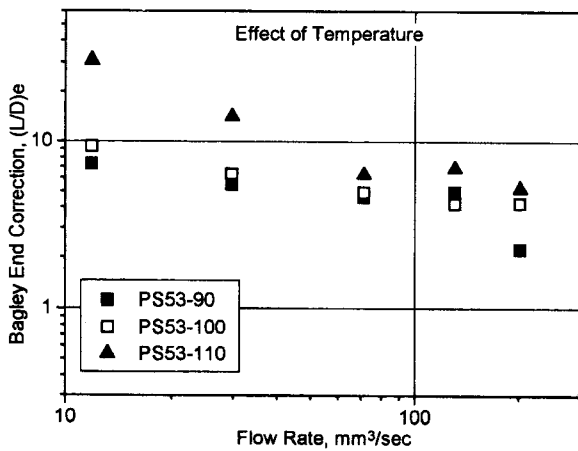


Fig. 6. Bagley end correction of PS53 at 90, 100, and 110°C as a function of flow rate (Temperature effect).

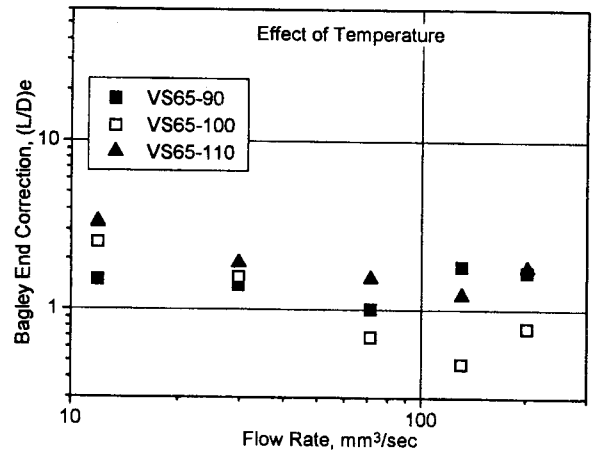


Fig. 7. Bagley end correction of VS65 at 90, 100, and 110°C as a function of flow rate (Temperature effect).

량의 증가에 따라 더욱 증가 폭이 커지고 있는 것을 알 수 있다. 두 분말사출재에서 모두 분말충전율 변화에 따른 입출구 압력 손실의 변화가 뚜렷이 나타나고 있는 것을 알 수 있는데, 분말 충전율이 증가하면 분말사출재의 점도가 증가하고 입출구 압력 손실도 증가하는 것이 일반적이다.

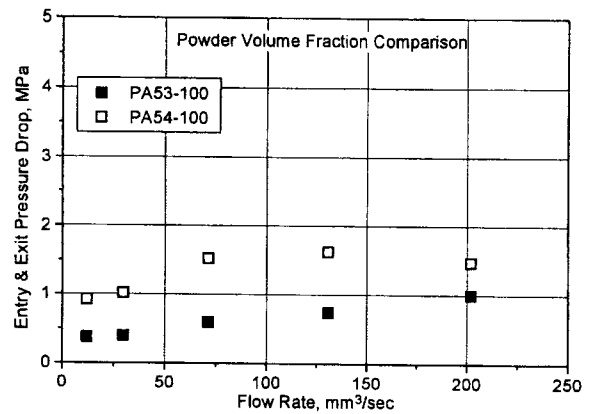


Fig. 8. Entry & Exit Pressure drop of PA53 and PA54 at 100°C as a function of flow rate (Powder volume fraction effect).

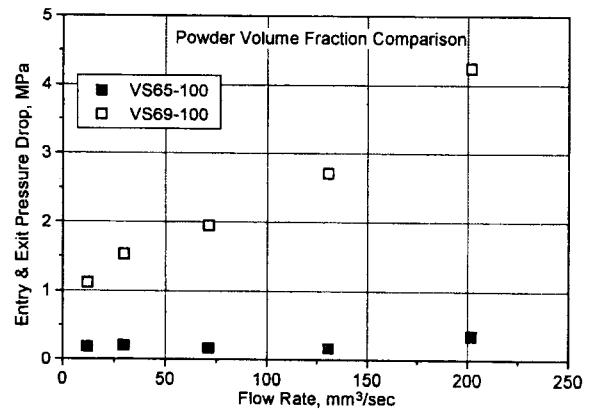


Fig. 9. Entry & Exit Pressure drop of VS65 and VS69 at 100°C as a function of flow rate (Powder volume fraction effect).

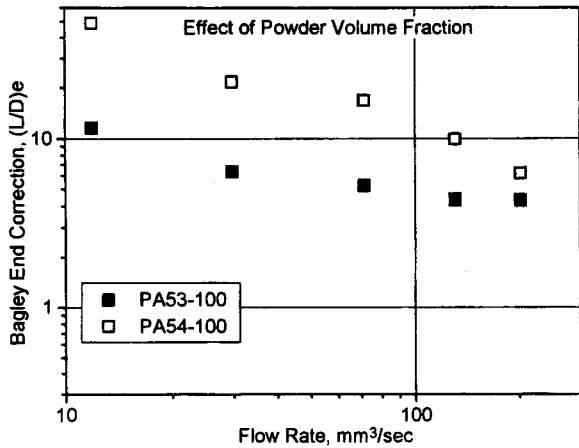


Fig. 10. Bagley end correction of PA54 and PA54 at 100°C as a function of flow rate (Powder volume fraction effect).

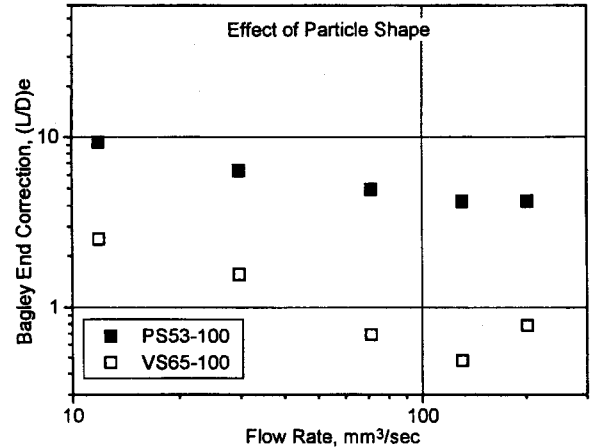


Fig. 12. Bagley end correction of PS53 and VS65 at 100°C as a function of flow rate (Particle shape effect).

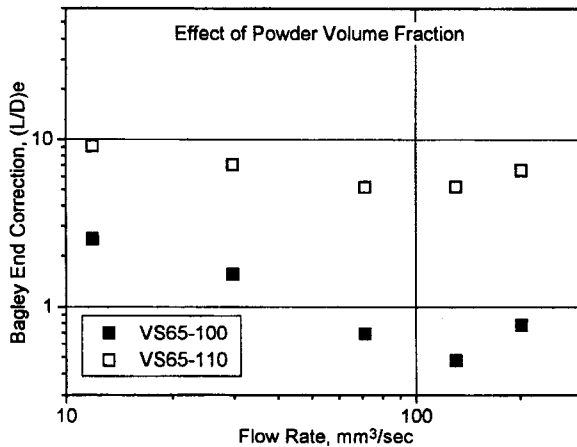


Fig. 11. Bagley end correction of VS65 and VS69 at 100°C as a function of flow rate (Powder volume fraction effect).

Fig. 10와 Fig. 11에서는 각각 PA53과 PA54, VS65와 VS 69의 Bagley 보정값의 비교를 보여 주고 있다. Fig. 10에서 PA54와 PA53의 Bagley 보정값은 유량이 증가할수록 비슷한 값으로 변하고 있는데 비해, Fig. 11의 VS69와 VS65의 Bagley 보정값은 거의 일정한 간격을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 두 분말사출재 모두 분말충전율의 변화에 따른 Bagley 보정값의 변화는 앞서서 비교한 온도 변화에 따른 차이 보다 매우 크게 나타났다. 분말충전율의 변화에 따른 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값의 변화가 모두 크게 발생하고 있는 점으로 온도 변화에 의한 영향보다 분말충전율의 변화에 의해 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값이 더욱 민감하게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

3.3. 분말 입자 형태의 영향

Fig. 12에 PS53과 VS65의 Bagley 보정값을 비교함으로써, 분말 입자 형태가 분말사출재의 Bagley 보정값에 미치는 영향을 나타내고 있다. 분말 입자 형태에 따른 입출구 압력 손실은 비교하지 않고 Bagley 보정값만을 비교한 것은 두 분말사출

재의 입출구 압력 손실에 대한 점도의 효과가 다르기 때문에 직접 비교하기 어렵기 때문이었다. 그리고, 다른 분말충전율을 가진 분말사출재의 Bagley 보정값을 직접 비교하여 결론을 내리는 것 역시 비교에 대한 타당성을 요구하는 점이지만, 이 점에 대해서는 다음의 두 가지 점에서 타당성을 가지고 있다고 판단하였다. 첫째로 PS53과 VS65은 오랜 경험에 의해서 해당 분말과 결합제의 조합으로는 분말사출성형공정에 최적이라고 판단되는 분말충전율을 가지도록 제조되어 현실적인 면에서의 비교 타당성을 가지고 있으며, 둘째로 Bagley 보정값은 입출구 압력 손실과는 달리 무차원화 되어 특정한 점도에 따른 영향을 덜 받기 때문이다.

실험 결과에 따르면 VS65의 분말충전율이 PS53에 비해 대단히 높으면서도 Bagley 보정값이 PS53에 비해 매우 낮은 결과를 보였다. Fig. 12에서 나타나 있듯이 두 분말사출재의 Bagley 보정값이 거의 일정한 비율의 차이를 보이고 있다. 분말충전율의 영향에 따른 Bagley 보정값이 크게 나타났듯이 분말 입자 형태가 Bagley 보정값에 주는 영향 역시 다른 영향 요소들에 비해 매우 큰 것으로 나타났는데, 이 사실은 모세관 입출구에서 발생하는 분말사출재 압력 손실의 주 원인이 분말 입자들의 입자간 마찰이나 충돌에 의한 것이라는 추정을 강하게 뒷받침하여 주었다.

3.4. 결합제의 영향

Fig. 13에서는 결합제에 따른 Bagley 보정값의 영향을 나타내기 위하여 동일한 분말을 사용하되 조성이 다른 결합제와 혼합한 2 가지 분말사출재들의 Bagley 보정값을 비교하고 있다. 앞서의 결합제 조성에서 소개하였듯이 S 결합제에 비해 높은 점도를 가지고 있기 때문에 PS53이 PA53에 비해 높은 점도를 가지고, 입출구 압력 손실의 비교에서도 PS53이 높은 값을 보였다. 그러나, Fig. 13에 나타나듯이 Bagley 보정값은 거의 차이가 나지 않고 있음을 알 수 있었으며, 결과적으로 분말사출재의 Bagley 보정값에 대한 결합제의 영향은 매우 미약하다는 결론을 얻을 수 있었다.

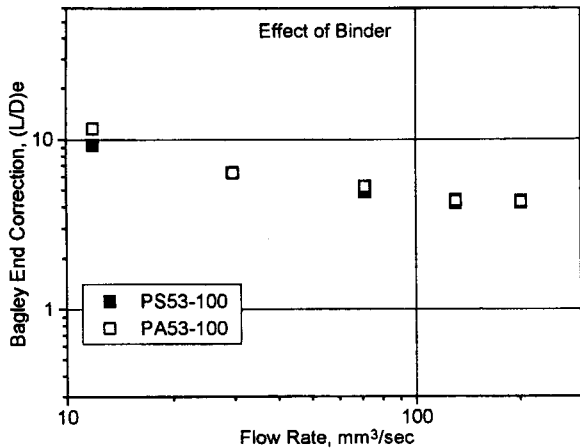


Fig. 13. Bagley end correction of PS53 and PA53 at 100°C as a function of flow rate (Binder effect).

3.5. 실험 결과에 대한 고찰

이상의 실험 결과들에 대한 비교 분석을 통해 모세관 입출구에서의 압력 손실과 Bagley 보정값에 대한 분말에 의한 영향이 결합체에 비해 대단히 크게 나타나고 있는 것을 확인하였다. 결론적으로 모세관 입출구에서 발생하는 압력 손실은 분말 입자 간의 마찰이나 충돌에 의한 에너지 손실이 주 원인일 것이라는 추정이 설득력을 가진다고 판단된다. 이런 추정은 다음의 몇 가지 고찰을 통해 더욱 명확해 질 수 있다.

실험에 사용된 분말사출재에서 모두 온도 변화에 따른 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값의 변화는 작게 나타났다. 분말사출재를 구성하는 성분 중에서 온도 변화에 민감하게 영향을 받는 것은 분말 입자보다는 결합체이다. 그러나 분말사출재는 일반적으로 분말충전율이 50~70% 정도로 제조되어 결합체의 함량이 대단히 낮다. 따라서 온도 변화에 따른 영향이 작은 것은 당연한 결과로 판단된다. 이 점은 결합체의 양이 PS53보다 상대적으로 적은 VS65가 PS53에 비해 온도의 변화에 따른 영향을 적게 받고 있는 사실로도 입증될 수 있다.

Bagley 보정값에 대한 결합체의 영향이 거의 나타나지 않은 것은 온도 변화에 의한 영향이 작게 나타난 것과 같이 낮은 결합체 함량이 한 원인일 것이다. 또 다른 원인을 추정하여 보면 결합체의 낮은 점도를 생각할 수 있다. 분말사출재에 사용되는 결합체 만의 점도는 약 1~5 Pa 정도로 낮다[1]. 이렇게 낮은 점도를 가진 결합체에 분말을 혼합하여 제조된 분말사출재는 약 800~1000 Pa의 높은 점도를 가진다. 결국 분말사출재의 점도를 증가시키는 주 원인이 분말이며 또한 모세관 입출구에서의 압력 손실에 기여하는 것도 분말일 것이다.

이상의 비교 분석에서는 모세관 입구와 출구에서의 압력 손실을 함께 표시하였는데, 실제로 분말사출재의 압력 손실의 주 원인이 분말 입자 간의 마찰과 충돌에 의한 것이라면 출구보다는 입구에서의 압력 손실이 훨씬 클 것이라 생각된다. 참고 문헌에 의하면 분말사출재는 일반적으로 항복응력을 지니고 있다고 알려져 있으며[7], 항복응력을 지닌 유체들은 모세관 출구에서 갑자기 압력이 저하될 때 직경 방향으로의 부풀어짐

현상(Extrudate Swelling)이 대단히 작으며 출구 압력 손실이 무시될 수 있을 정도로 작다고 보고 되어 있다[8,9]. 결합체의 낮은 점도와 낮은 탄성으로 출구에서의 부풀어짐 현상이 거의 없는 상태에서는 출구에서 유체 내의 분말 입자 재구성이 발생하지 않을 것이고, 모세관 입구에서는 좁아지는 유로를 따라 급격하게 유체 내의 분말 입자 재구성이 일어나면서 큰 압력 손실을 발생시킬 것으로 생각된다. 실제로도 분말사출성형공정에서 공정 결함을 발생시키는 원인의 하나로서 분출유동(Jetted Flow)이 지적되고 있으며, 분출유동은 재료가 좁은 곳을 빠져 나오며 충분히 부풀지 못하는 경우 더욱 심각하게 발생한다고 알려져 있다[1]. 결론적으로 분말사출재의 Bagley 보정 작업에서 발생하는 입출구 압력 손실의 대부분은 입구에서의 압력 손실이라고 볼 수 있다. 분말사출성형용 금형을 설계할 때 이러한 분말사출재의 유변학적 성질을 이해하고 금형 설계를 한다면 공정 결함을 가능한 감소시킬 수 있을 것이며, Bagley 보정값이 감소할수록 분말사출재의 성형성이 개선되는 점을 이용하여 Bagley 보정실험을 성형성에 대한 간접 시험법으로 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 분말사출재의 성형성과 밀접한 관련을 보이는 Bagley 보정값에 대한 온도, 분말충전율, 분말 입자 형태 그리고 결합체의 영향을 조사하기 위하여 실험적 연구를 실시하였다. 분말 입자 형태가 구형과 비구형적인 2가지의 분말과 2가지의 다른 조성을 가진 결합체를 사용하여 분말충전율의 차이를 가지도록 제조한 5가지 분말사출재들에 대한 모세관 점성 측정기에서의 Bagley 보정 작업을 3가지 온도에서 실시하였다. 사용한 모세관의 비관길이는 5, 20, 40 그리고 60이었으며, 실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 길이가 긴 모세관을 사용하는 경우 Thixotropy 현상으로 인한 오차가 증가하므로 분말사출재의 점도 측정 시 L/D = 40 이하의 모세관을 사용하는 것이 바람직하다.
2. 분말사출재의 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값은 분말 입자 형태와 분말충전율에 의해 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이러한 결과 모세관 입출구에서의 에너지 손실이 대부분 분말의 입자간 마찰과 충돌로 발생하고 있다고 판단된다.
3. 분말사출재의 입출구 압력 손실과 Bagley 보정값에 대한 온도의 영향은 상대적으로 작게 나타났다.
4. 분말사출재의 Bagley 보정값에 대한 결합체의 영향은 다른 영향 요소들에 비해 상대적으로 매우 미약하다고 결론지을 수 있으며, 분말충전율이 증가할수록 결합체의 영향은 더욱 작아질 것으로 예측된다.

감 사

끝으로 본 실험에 도움을 준 정영찬, 이장훈, 그리고 이상훈

군에게 감사하고, 모세관 점성 측정기를 사용하도록 허락하여 주신 포항대의 김진곤 교수님과 실험 결과에 대한 조언을 아끼지 않으신 권태현 교수님, 안상호 박사님, 그리고 윤태식 연구원께 고마운 뜻을 전합니다. 본 연구는 포항산업과학연구원에서 진행하는 G7과제의 위탁 연구 과제로서 수행하였습니다.

### 참고 문헌

1. B.O. Rhee, Ph.D Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y., 1992.
2. M.Y. Cao, B.O. Rhee and C.I. Chung, "Advances in Powder Injection Molding", Vol. 2, MPIF, Princeton, NJ, 1991, p. 59.
3. 이병옥, 아주대학교 부설 공학연구소 논문집, **18**, 77 (1995)
4. R. Darby, "Viscoelastic Fluids", Marcel Dekker, New York, NY, 1976, p. 283.
5. J. Dealy and K.F. Wissbrun, "Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing", Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1990, p. 298.
6. H.M. Laun and G. Hirsch, *Rheologica Acta*, **28**, 267 (1989).
7. I.R. Roscoe, "Flow Properties of Disperse Systems", Ed. J. J. Hermans, North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 1953.
8. S.S. Abdali, E. Mitsoulis and N.C. Markatos, *Journal of Rheology*, **36**(2), 389 (1992).
9. E. Mitsoulis, J. Vlachopoulos and F.A. Mirza, *Polymer Engineering and Science*, **24**(9), 707 (1984).