모세관 점도계를 이용한 붉은자루 동충하초의 유변물성 측정

Rheological behavior of Cordyceps Pruinosa with capillary rheometer

강위수* 주재홍* 김동은*
정회원
W. S. Kang J. H. Joo D. E. Kim

1. 서론

식품의 가공 분야뿐만 아니라 제약 공정 등의 생물산업 분야에서는 유변학(Rheology)이 차지하고 있는 위치는 매우 중요하며 물질의 유변물성을 정확히 파악하지 않고서는 정밀도를 요하는 가공 공정을 이룰 수 없어 우수한 제품을 생산하기 어렵다. 특히 식품 압출 성형분야에서 생물고분자(biopolymer) 원료의 유변 물성은 압출 성형시 중요한 역할을 하며, 더 좋은 압출 성형 장치의 설계와 압출 공정의 제어를 위해서는 원료에 대한 물리적 성질의 이해와 압출 성형 장치 내에서 일어나는 변화를 이해해야 한다.

생물 고분자 재료인 붉은자루 동충하초는 섬유질을 많이 포함하고 점탄성 성질을 갖고 있어 제품을 가공하기가 어렵다. 성질을 이해하기 위해서는 동충하초의 유변 물성인 변형과 흐름(유동)에 관한 성질을 이해하여야 한다.

본 연구에서는 압출성형공정(특히 다이 부분)의 보충 연구로서 모세관 점도계를 이용하여 붉은자루 동충하초의 유변물성 성질을 분석하였다. 온도, 함수율, 모세관의 지름과 길이의 변화를 주었을 때 전단력(shear stress) - 전단비(shear rate)에 대한 변형에 대하여 점도(viscosity)를 조사하여 성형제품생산에 적합한 압출 성형 가공 조건을 측정 할 수 있는 가능성을 조사하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료 준비

본 연구에 사용되어진 붉은자루 동충하초(Cordyceps pruinosa) 원시료(강원대학교 동충하초 은행에서 수집)는 일반성분이 조단백질 25-30%, 조지방 8.4%, 회분 4.1% 등으로 구성되어 있고, 함수율(wet weight basis, wb)은 원적외선 건조기로 105℃의 온도에서 향량될 때까지 건조한 결과 69.62%로 측정되었다.

* 강원대학교 생물산업공학전공

모세관 점도계를 이용하여 유변물성을 측정하기 위하여 실험 재료는 미분가루(powder, 함수율 5.31%), 원시료(Raw material) 와 미분가루 5:5 혼합(함수율 37%), 원시료와 미분가루 7:3 혼합(함수율 45.94%) 등의 3부분으로 나누어서 만들었다. 분말 가루는 원 시료를 원적외선 건조기에서 60℃로 8시간 건조 후 터보 분쇄기로 분쇄 후 표준 체를 이용하여 30㎛ (>95%)로 채취하였으며, 재료의 혼합은 원시료를 0.5cm×0.5cm×0.5cm로 잘게 파쇄 한 후 미분가루와 같이 각각 5:5 7:3 비율로 혼합기에 넣어 1시간 혼합 후 시료를 만들었다.

2.2 실험 측정 방법

모세관 점도계(그림 1)는 PC로 제어가 가능한 RHEO-TESTER 2000(Goettfert, Germany)으로서 단일 내경의 바렐을 가지고 있으며, 바렐의 길이는 285mm이고 지름은 12mm이다. 피스톤 스피드는 0.0001-20mm/sec까지 조절할 수 있으며, 압출 힘은 최대 20kN까지 줄 수 있고 압력 측정은 최대 1770bar 까지 이다. 온도는 바렐 내의 각각 4개의 heater에서 60~400℃까지 가열하며, 온도제어의 정확도는 ±0.1℃이다.

Fig 1. The photo of capillary rheometer system

붉은 자루 동충하초의 유변학적 물성은 모세관 점도계에 시료 15g을 바렐에 넣고 100, 125 150℃의 온도에서 5분간 항온 시켰고, 압출시 길이와 지름(Length/Diameter, L/D)이 각각 10/1, 20/1, 20/2, 30/1 비를 가지는 모세관 다이를 사용하여 피스톤의 속도는 0.01, 0.02, 0,04, ~ 10.24 mm/s 로 2배 증가시키면서 시료를 압출 공급하였다.

2.3 이론적 고찰

모세관 점도계을 사용하여 붉은자루 동충하초를 압출시 압출조건에 따른 전단율(shear rate)과 전단력(shear stress), 점도(viscosity)를 측정하기 위해서는 지름과 길이가 다른 모세관 다이의 기하학적 형태를 분석해야 한다.

피스톤 지름(D_s), 피스톤 면적(A), 피스톤 진행거리(s), 시간(t)가 주어졌을 때 모세관 점도계에서 체적 흐름량은 다음과 같다.

$$\dot{V} = A\frac{s}{t} = A\,\dot{v} \tag{1}$$

$$A = D_s^2\,\frac{\pi}{4} \tag{2}$$

$\dot{v}$ = poston rate (cm/s)

겉보기 전단율(apparent shear rate, γ_{app})은 전단이 시간과 함께 증가하는 비율을 말하며, 전단력을 주어졌을 때 유체가 특별한 형태로 흐를 수 있는 원인을 제공한다. 모세관 반지름(R)이 주어졌을 때 겉보기 전단율의 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{A\dot{V}}{\pi R^3} \tag{3}$$

실제 벽 전단률(true wall shear rate, $\dot{\gamma}_w$)은 Rabinowitsch 보정식에 의해서 다음과 같이 구해졌다.

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3}{4}\dot{\gamma}_{app} + \frac{1}{4}\tau_{app}\frac{d\dot{\gamma}_{app}}{d\tau} \tag{4}$$

겉보기 전단력(Apparent shear stress, τ_{app})는 유체의 단위 면적 당 작용하는 힘을 말하며, 전단력은 유체가 흐름을 일으키게 하는 힘을 말하며, 용융압력(p), 모세관 길이(L), 모세관 지름(d)가 주어졌을 때 겉보기 전단력 계산식은 다음과 같다.

$$\tau_{app} = \frac{pd}{4L} \tag{5}$$

실제 벽 전단응력(true wall shear stress, τ_w)은 Ryder-Bagley 보정식에 의해서 다음과 같이 구해졌다. 여기서 △P는 압력강하 곡선이다.

$$\tau_w = \frac{\triangle pd}{4L} \tag{6}$$

점도(Viscosity, ηapp) 는 흐름에 대한 저항을 나타내는 재료의 성질로, 점성은 탄성과는 달리 응력이 변형의 양에 관련된 것이 아고 변형률에 관련된 것이다. 전단응력과 전단율이 주어졌을 때 점도 계산식은 다음과 같다.

$$\eta_{app} = \frac{\tau_{app}}{\gamma_{app}}\ (Ns/m^2) \tag{7}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 붉은 자루 동충하초의 유동성 분석

그림 2는 바렐온도 100℃에서 모세관 길이 및 지름 비 변화(L/D)에 따른 점도 측정값이다.

섬유질이 많이 포함된 붉은자루 동충하초 분말은 Bingham 유동 특성을 갖고 있어, 압출 성형시 유동성을 주기 위해서는 전단력이 요구됨이 분석되었다. 일반적으로 압출 성형하기 위해서는 전단비 100 - 1000 [1/s] 범위에서 500 - 100 Pa · s 점도가 되어야 압출 성형시 유동성을 부여하여 원하는 성형체를 생산 할 수 있다.

L/D 비가 10/1 경우 전단비 11.4 [1/s]에서 2,540 Pa · s 점도가, 150 [1/s]에서 <100 Pa · s로 감소되었고, L/D 비를 20/1, 30/1로 증가시키면 전단비 11.4 [1/s]에서 각 각 2배 정도 점도가 증가되었고, 600 [1/s], 1,300 [1/s]에서 점도가 <100 Pa · s 되었다. 압출 성형시 die의 구멍의 크기가 유동성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1mm에서 2mm로 증가 시킨 L/D 비 = 20/2 경우 전단비 3,000 [1/s]에서 100 Pa · s 정도가 되었다.

즉, capillary의 L/D가 10/1에서 30/1로 증가되면서 점도가 증가되었고, capillary의 구멍이 커지면서 점도는 L/D 비 증가보다 더 크게 커 짐을 분석 할 수 있었다.

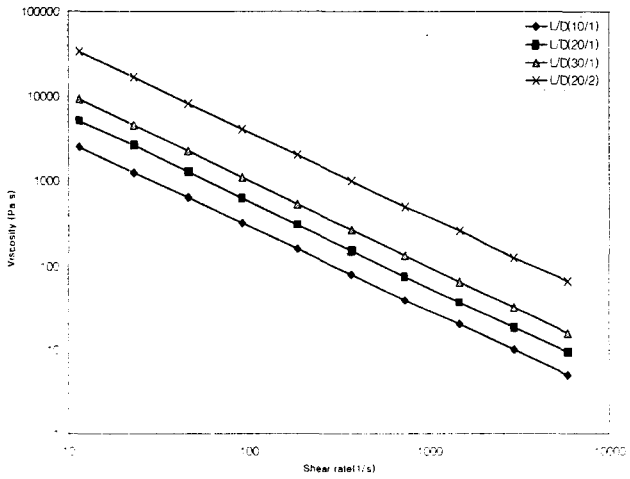

Fig. 2 The Apparent viscosity for Cordyceps pruinosa powder with moisture content 5.31% wb and temp. 100℃, using capillary length/diameter ratio = 10/1, 20/1, 30/1, 20/2

3.2 붉은 자루 동충하초 가열 온도가 유동 특성에 미치는 영향

그림 3은 붉은자루 동충하초 분말을 100℃에서 125℃로 증가시켰을 경우 전단비 증가에 따른 점도측정 결과이다. 가열 온도 100℃ 보다 25℃ 증가 시켰을 경우 점도는 약 1.5배 정도 낮아졌고, 50℃ 더 가열한 시료에서는 점도가 1.5배 증가되었다. Bio-polymer로 구성된 식품재료는 유리전이 온도 범위에서는 점도가 작아지고, 유리전이 온도 이상에서는 결정화 조직이 형성되어 즉, 경화되어 점도는 증가되었다고 사료됨.

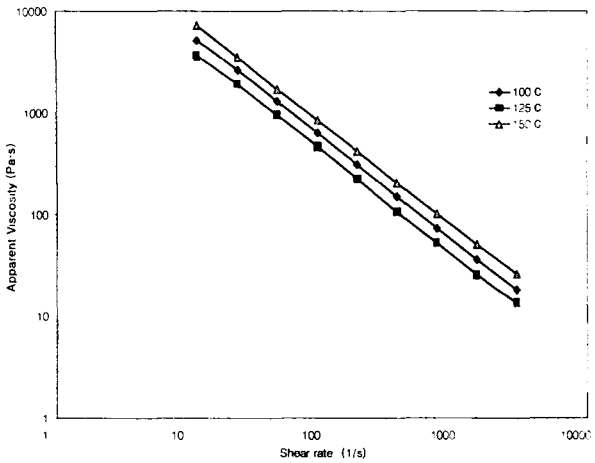

Fig. 3. The Apparent viscosity for Cordyceps pruinosa powder with moisture content 5.31% wb and temp. 100℃, 125℃, 150℃ using capillary length/diameter = 20/1

3.3 붉은 자루 동충하초의 수분 함량이 유동성 특성에 미치는 영향

그림 4는 capillary rheometer의 온도 125℃에서 붉은 자루 동충하초의 수분 함량이 점도에 미치는 영향을 측정한 결과이다.

붉은자루 동충하초 원 재료의 함수율은 75% 정도이어서 공시재료를 압출 성형하기가 어려워 본 연구에서는 건조한 5.3 %wb 분말 공시 재료에 원재료 30%, 50%을 각 각 첨가하여 압출 성형시 공시재료의 유동 특성을 분석하고자 하였다. 그림 4는 함수율 증가에 따라 점도에 미치는 영향을 측정한 결과이다.

함수율 37%wb 공시재료는 5.3 % wb 함수율을 갖은 분말 공시의 점도 보다 약 50% 정도 감소되었고, 45.9% wb인 공시재료는 25% 정도 점도가 더 낮아졌다. 본 측정 결과로 30% - 50% 정도의 함수율을 포함한 붉은자루 동충하초는 압출 성형시 점도에 큰 영향을 미치지 않음을 분석할 수 있었다.

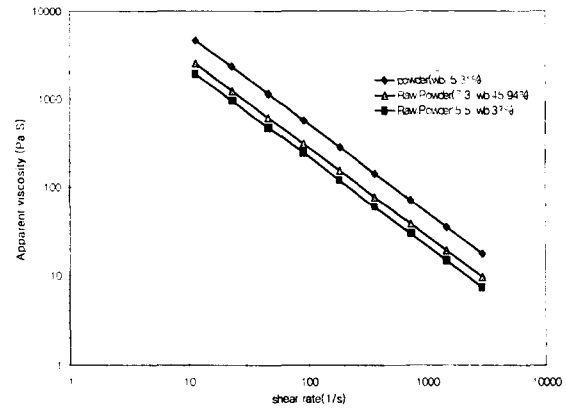

Fig. 4. The Apparent viscosity for Cordyceps pruinosa powder with moisture content 5.31%, 37%, 45.94% wb and temp. 125℃, using capillary length/diameter = 20/1

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 섬유질이 많이 포함된 붉은자루 동충하초를 압출 성형하기 위하여 압출 성형조건은 Capillary rheometer의 온도 및 함수율, 압출 성형 조건인 L/D 비, 다이의 구멍 크기 따라 붉은 자루의 동충하초 유동성 특성을 분석하여 기초자료로 이용 할 수 있음을 조사할 수 있었다.

5. 참고 문헌

1. Narpinder Singh, Andrew C. Smith. (1999). Rheological behaviour of different cereals using capillary rheometry. Journal of Food Engineering
2. Sehyun Shin, Do-Young Keum. (2002). Viscosity measurement of non-Newtonian fluid foods with a mass-detecting capillary viscometer. Journal of Food Engineering
3. Lawrence E. Nielsen. (1977). Polymer rheology Marcel. Dekker, Inc
4. Gebhard Shramm. A practial Approach to Rheology and Rheometry. Haake
5. Aroon V. Shenoy, (1990) Rheology of filled polymer systems Kluwer Academic Publishers