

사출구 구조와 탄산가스 주입이 옥수수 압출성형물의 물리적 특성에 미치는 영향

구본재 · 류기형*
공주대학교 식품공학과

Effect of Die Geometry and Carbon Dioxide Injection on Physical Properties of Extruded Corn Flour

Bon-Jae Gu and Gi-Hyung Ryu*

Department of Food Science and Technology, Kongju National University

Abstract

The objective of this study was to determine the effect of die geometry and carbon dioxide injection on the physical properties of extruded corn flour. The extrusion variables were melt temperatures of 95 and 110°C; carbon dioxide gas flow rates of 0, 100 and 200 mL/min. In die dimension, the length was 2 or 5 mm and the tapered angle of die hole was 57 or 95°. The specific mechanical energy (SME) input was the lowest at 110°C melt temperature, 200 mL/min carbon dioxide gas flow rate and 3.36×10^{-10} m³ die constant. The sectional expansion of corn flour extrudate was higher at 57° than that at 95° tapered angle. Also, the sectional expansion was increased with increasing carbon dioxide injection flow rate from 0 mL/min to 200 mL/min. The specific length was increased with increasing carbon dioxide injection rate. The density, breaking strength and apparent elastic modulus were lower in the low die constant. Extruded corn flour at 95° tapered angle had more pores than one at 57° tapered angle.

Key words: extrusion, die geometry, carbon dioxide injection, physical properties

서 론

일반적인 압출성형공정은 100°C 이상에서 내부 용융물이 사출될 때 급격한 압력감소에 의해 용융물이 함유하고 있는 수분이 수증기로 상변화 되는데, 이 때 비체적의 증가로 용융물은 팽화하여 다공성 구조의 제품이 만들어진다(Ryu, 1995). 또한 저수분(18-28%), 고온(120-180°C), 고전단력의 공정조건으로 압출성형물은 높은 팽화율과 낮은 밀도를 가지며, 고온, 고압, 고전단력이 투입되는 공정조건으로 인해 열과 전단력에 민감한 비타민, 향, 아미노산과 같이 유용한 영양소들이 파괴된다. 또한 스크루와 배럴의 마모율이 높아 보수비용이 많이 들며, 가공에 필요한 에너지 요구량도 비교적 높은 편이다(Launay & Lishch, 1983; Rizvi et al., 1995; Cho & Rizvi, 2008).

반면에 탄산가스 주입 압출성형공정은 수분의 상변화를

이용하는 일반적인 압출성형공정의 팽화와 달리 탄산가스를 이용하여 기체 상태에서 상변화 없이 압력차에 의한 비체적 변화에 의한 것으로 100°C 이하에서도 팽화가 가능하다(Ryu, 1995). 탄산가스 주입 압출성형은 고수분(30-45%) 공정으로 재래식 압출성형공정과 비교하여 낮은 온도에서 팽화가 가능하며, 열에 불안정한 영양소의 파괴를 감소시킬 수 있으며 낮은 전단력으로 스크루 마모율 감소와 에너지 투입량이 낮다. 기공형성제로 탄산가스가 많이 이용되는 이유는 비교적 낮은 임계온도와 무독성, 비인화성, 낮은 가격으로 다른 기체보다 많은 장점을 가지고 있다(Ferdinand et al., 1990; Ryu, 1995; Cho & Rizvi, 2008).

압출성형의 독립변수는 사출구의 구조, 탄산가스 주입량, 탄산가스 주입압력, 수분함량, 원료투입량, 용융물의 온도, 스크루 배열, 스크루 회전속도가 있는데 이 독립변수를 조절하여 목적변수인 압출성형물의 물리적, 화학적 특성을 조절할 수 있다. 독립변수인 사출구는 흐름에 대해 저항하는 역할을 함으로써, 원료의 혼합, 층밀림을 일으키게 되며 일반적으로 원형, 고리형, 평판형이 많이 사용되며 압출성형공정에서 중요한 요소로서 최종 제품의 형태와 조직, 팽화 등 압출성형물의 물리화학적 특성에 영향을 미친다(Isobe, 1988; Ryu et al., 2002). 또한 탄산가스 주입량과

*Corresponding author: Gi-Hyung Ryu, Department of Food Science and Technology, Kongju National University, Yesan, Choongnam, 340-800, Korea

Tel: +82-41-330-1484; Fax: +82-41-335-5944

E-mail: ghryu@kongju.ac.kr

Received January 3, 2012; revised March 20, 2012; accepted March 21, 2012

주입압력은 탄산가스 주입 압출성형에서 중요한 변수로 주입량과 압력을 조절함으로써 제품의 팽화물과 밀도, 기공의 구조 등을 제어할 수 있다(Ryu & Mulvaney, 1995; Ryu et al., 1997).

탄산가스 주입에 따른 압출성형물의 구조를 연구한 Ferdinand et al.(1990)은 낮은 온도와 높은 수분함량에서 낮은 전분사슬의 절단으로 낮은 수분용해지수의 특징을 가진다고 보고하였으며, 이산화탄소 주입에 의한 압출성형공법을 전통한과인 유과에 적용한 Kang(1999)는 탄산가스를 주입하였을 때 밀도는 감소한다고 하였다. 또한 조직감을 비교한 결과 이산화탄소를 주입한 유과가 주입하지 않은 유과보다 겉보기 탄성계수와 파괴력이 낮게 나타났다고 하였으며, Ryu & Mulvaney(1995)는 sucrose와 GMS(glyceryl monostearate)를 첨가하여 옥수수가루 팽화제품의 특성을 검토하였는데 GMS첨가 압출성형에서 0.75% GMS와 1.38 MPa 주입압력에서 최소 밀도(0.23 g/cm³)를 나타냈다고 하였다. 호화전분을 원료로 열경화성 난백 또는 농축유청단백을 첨가하여 초임계 탄산가스 주입 압출성형을 한 Alavi et al.(1999)는 열경화성 난백 7% 또는 농축유청단백 7%를 첨가하여 85°C에서 건조하였을 때 팽화율이 가장 컸으며, 기공이 손상되지 않고 형성되었다고 보고하였고, 사출구 구조가 옥수수가루 압출성형물의 팽화특성에 미치는 영향을 연구한 Gu & Ryu(2011)는 수분함량이 20%에서 사출구상수가 증가할수록 직경팽화지수와 체적팽화지수는 증가한다고 보고하였다.

위와 같이 탄산가스 주입 유무, 탄산가스 주입압력, 배합비 등의 압출성형공정 변수에 따른 압출성형물의 물리적 특성에 대한 연구는 다수 발표되었으나 사출구의 구조에 따른 연구는 적으며 사출구의 구조가 탄산가스주입 압출성형물의 물리적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 발표되

지 않았다. 따라서 본 연구는 사출구의 기하학적 구조와 탄산가스 주입량, 용융물의 온도에 따른 옥수수가루 압출성형물의 물리적 특성을 분석하였다.

재료 및 방법

재료

옥수수가루는 (주)동일곡산(Ansan, Korea)에서 롤러 밀(Roller mill)로 건식제분하여 60 mesh를 통과한 호주산 콘그릿스 5 호를 사용하였다. 옥수수가루의 일반성분은 AOAC (1990) 방법에 따라 분석하였으며 Table 1과 같다.

압출성형

실험에 사용된 압출성형기는 실험용 동방향 쌍축 압출성형기(THK31T, Incheon Machinery Co., Incheon, Korea)로 직경은 32.0 mm, 직경과 길이의 비(L/D ratio)는 24:1이었고, 스크루의 배열은 고전단력 스크루를 사용하였으며 (Fig. 1), 수분함량은 펌프로 원료사입구에 직접 물을 주입하여 조절하였다. 용융물의 온도는 전열기와 냉각수를 사용하여 조절하였고 모터용량은 7.5 HP이었다.

압출성형 공정변수는 용융물의 온도(95, 110°C), 탄산가스 주입 압력은 1.4 MPa로 고정시키고 탄산가스 주입량을 0, 100, 200 mL/min하였다. 또한 수분함량 30%, 스크루 회전속도 150 rpm, 원료 투입량 100 g/min으로 고정하였다. 압출성형물을 열풍건조기(DS-FCPO250, DongSeo Sci. Co., Seoul, Korea)에서 80°C로 5시간 건조하여 팽화율, 비 길이, 밀도, 겉보기 탄성계수, 파괴력을 측정하였으며, Micro Hammer-cutter Mill(Type 3, Culatti AG Co., Zurich, Switzerland)로 0.5 mm 체를 사용하여 분쇄한 뒤 60 mesh 표준체(Testing sieve, ChungGye Industrial Mfg. Co., Gunpo,

Table 1. Proximate compositions of corn flour^A.

Material	Composition (%)				
	Moisture	Fat	Protein	Ash	Carbohydrate ^B
Corn flour	11.99±0.11	0.95±0.01	6.26±0.06	0.40±0.01	80.40

^AEach value is mean±SD of three replicates.

^BCarbohydrate contents were calculated as the difference of 100 - (moisture + fat + protein + ash).

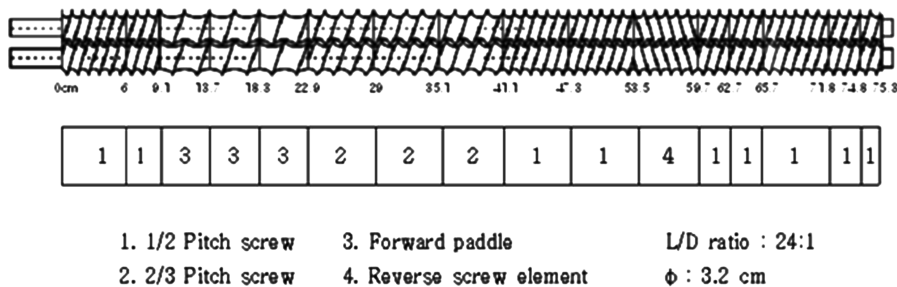


Fig. 1. Screw configuration for extruding corn flour (Model THK 31T).

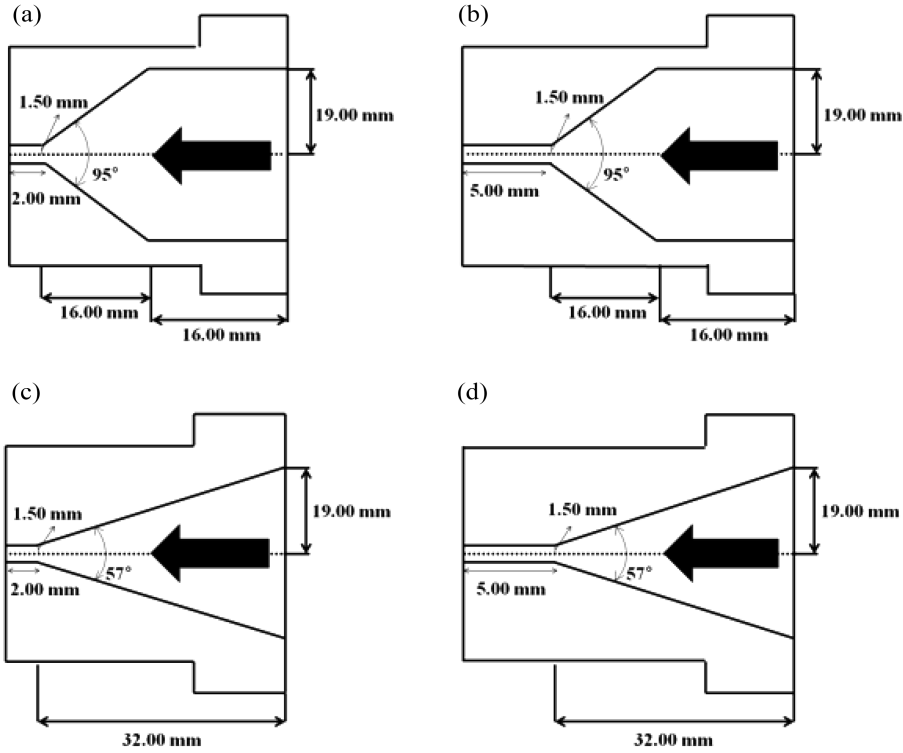


Fig. 2. The various die geometries for extruding corn flour. (a) and (b): 95° taper angle with die land of 2 and 5 mm, respectively; (c) and (d): 57° taper angle with die land of 2 and 5 mm, respectively.

Korea)를 통과한 분말을 시료로 사용하였다.

사출구 구조

자체 제작한 사출구(Incheon Machinery Co., Incheon, Korea)는 사출구 직경을 3 mm로 고정하고 사출구 길이를 2, 5 mm으로 하여 사출구의 길이와 직경비(L/D)는 0.67, 1.67이었고 내벽에서 좁아지는 각을 57°와 95°로 달리하여 4 개의 사출구를 제작하였다(Fig. 2).

4 개의 사출구의 기하학적 구조는 Miller(1990)의 식을 이용하여 사출구상수(k)를 산출하였다(Fig. 3). 또한 사출구의 구조에 따른 사출구상수를 Table 2에 나타내었다.

비기계적 에너지 투입량

비기계적 에너지 투입량은 Ryu & Mulvaney(1997)의 방법을 이용하여 압출성형기 내부가 정상상태일 때 원료의

Table 2. The die constant of extrusion die at different die geometries.

Land length (mm)	Land length/Land diameter (L/D)	Angle (°)	Die constant (m ³)
5	1.67	57	3.36×10 ⁻¹⁰
		95	3.64×10 ⁻¹⁰
2	0.67	57	6.82×10 ⁻¹⁰
		95	8.09×10 ⁻¹⁰

단위 질량당 소비된 전기에너지(HS-RMH, HwaShin Co., Seoul, Korea)로 나타내었다. 즉 원료투입 시의 전력에서 모터 공회전 시의 전력을 제외한 실제 원료에 투입된 전력을 구하였다(식 1).

$$SME\ input = \frac{E - E_0}{P_R} \tag{1}$$

SME input: specific mechanical energy input (kJ/kg)

E: electric power when input to material (kJ/s)

E₀: electric power when idling (kJ/s)

P_R: production rate (kg/s)

직경팽화율

압출성형물의 직경팽화율은 직경을 캘리퍼스(CD-15C,

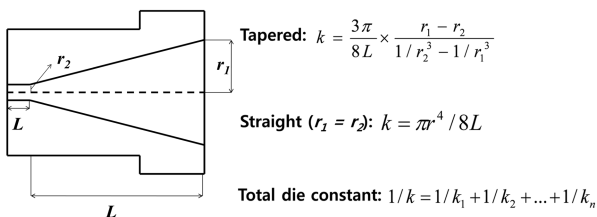


Fig. 3. Formula for die constant of circular die hole geometry.

Mitutoyo Co., Kawasaki, Japan)로 3 회 측정하여 사출구 직경과 압출성형물 직경비의 평균값으로 산출하였다.

비길이

비길이는 압출성형물 무게와 길이를 3 회 측정하여 단위 질량당 길이의 비(m/kg)를 평균치로 산출하였다(Ryu & Ng, 2001).

체적밀도

압출성형물의 체적밀도는 차조를 이용한 종자치환법(Jin et al., 2010)으로 3 회 반복하여 평균값을 산출하였다. 계량 컵을 이용하여 무게를 측정해 압출성형물의 부피를 구한 후 밀도를 계산하였다. 압출성형물의 체적밀도는 식(2)와 같다.

$$\rho_e = \frac{M}{M + M_0 - M_1} \rho_m \quad (2)$$

ρ_e : Bulk density of extrudate (g/cm³)

ρ_m : Bulk density of millet (g/cm³)

M: Mass of extrudate (g)

M_0 : Mass of millet in cup (g)

M_1 : Mass of extrudate and millet in cup (g)

파괴력과 걸보기탄성계수

압출성형물의 파괴력과 걸보기탄성계수는 Sun Rheometer (Compac-100II, Sun Sci. Co., Tokyo, Japan)를 사용하여 3 회 측정하여 평균값을 산출하였다. 측정조건은 probe angle type(65°), 최대응력 10 kg, 지지대 이동속도 60 mm/min, 지지대간의 거리 3 cm이었다. 측정치를 Launary & Lisch (1983)과 Ryu & Ng(2001)이 제시한 아래의 식을 이용하여 파괴력(F_{bs})과 걸보기탄성계수(E_{app})를 각각 식(3)와 식(4)으로 계산하였다.

$$F_{bs} = \frac{F_m}{S} \quad (3)$$

F_{bs} : Breaking strength (N/m²)

F_m : Maximum stress of extrudate (N)

S: Cross-sectional area (m²)

$$E_{app} = \left(\frac{dF}{dl} \right) \left(\frac{64d^3}{48\pi D^4} \right) \quad (4)$$

E_{app} : Apparent elastic modulus (N/m²)

dF/dl: Slope of the linear section of the force-distance curve (N/m)

D: Diameter of extrudate (m)

d: Distance between two supports (m)

미세구조

압출성형물의 단면을 백금으로 코팅 후 고분해능 주사전 자현미경(MIRA LMH, Tescan Co., Ltd., Brno, Czech)으로 가속전력 5 kV에서 미세 구조를 관찰하였다.

결과 및 고찰

비기계적 에너지 투입량

사출구 상수, 탄산가스 주입량, 용융물의 온도에 따른 비기계적 에너지 투입량은 Table 3과 같다. 사출구 상수 $3.36 \times 10^{-10} \text{ m}^3$, 탄산가스 주입량 200 mL/min, 용융물의 온도가 110°C 일 때 149.31 kJ/kg으로 가장 낮은 비기계적 에너지 투입량을 나타내었으며, 용융물의 온도가 110°C일 때 95°C보다 낮은 비기계적 에너지 투입량을 나타내었다. 이는 Ryu & Ng(2001)가 일반적인 압출성형공정으로 밀가루와 옥수수를 압출성형 하였을 때 사출구 온도가 증가하면 내부 반죽의 점도가 감소하여 비기계적 에너지 투입량이 감소하였다는 연구결과와 일치하였다.

사출구 모양에 따라 유속분포를 연구한 Yeh & Hwang (1995)은 사출구는 압출물의 흐름을 조절하는 밸브와 같은 역할을 하는 중요한 요인이라고 보고하였는데 본 연구에서 사출구의 내벽이 좁아지는 각이 57°(3.36×10^{-10} , $6.82 \times 10^{-10} \text{ m}^3$)인 경우 95°(3.64×10^{-10} , $8.09 \times 10^{-10} \text{ m}^3$)보다 비기계적 에너지 투입량이 낮았다. 이 결과를 통해 내벽에서 좁아지는 각이 57°(3.36×10^{-10} , $6.82 \times 10^{-10} \text{ m}^3$)일 때 95°(3.64×10^{-10} , $8.09 \times 10^{-10} \text{ m}^3$)보다 압출성형기 내부의 흐름의 저항이 적어 비기계적 에너

Table 3. The SME input (kJ/kg) of extruded corn flour at different die constant.

Extrusion parameters		Die constant (m ³)			
Temp. (°C)	CO ₂ (mL/min)	3.36×10^{-10}	3.64×10^{-10}	6.82×10^{-10}	8.09×10^{-10}
95	0	228.57±3.50	228.35±2.55	235.71±2.14	264.19±0.75
	100	235.20±3.74	270.10±2.31	223.07±2.43	239.87±7.47
	200	232.50±7.90	233.90±5.22	230.35±1.37	238.92±0.76
110	0	156.58±11.97	232.96±2.22	151.53±9.78	234.63±6.53
	100	152.54±3.89	232.51±5.40	158.89±14.22	231.17±7.04
	200	149.31±5.03	226.84±8.75	152.16±6.74	227.68±3.53

Each value is mean±SD of three replicates.

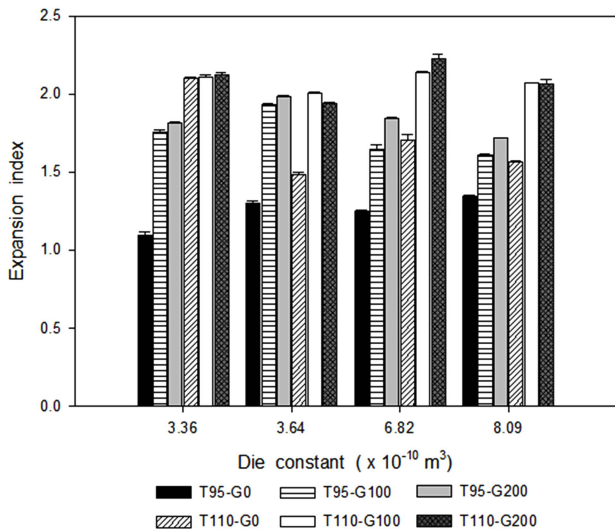


Fig. 4. Expansion index of extruded corn flour with CO₂ gas injection at different die constant. T95-G0: Extruded corn flour at 95°C without CO₂ gas; T95-G100 and T95-G200: Extruded corn flour at 95°C with 100 and 200 mL/min CO₂ gas flow rate, respectively; T110-G0: Extruded corn flour at 110°C without CO₂ gas; T110-G100 and T110-G200: Extruded corn flour at 110°C with 100 and 200 mL/min CO₂ gas flow rate, respectively.

지 투입량이 낮은 것으로 사료된다.

압출성형 온도가 백삼과 홍삼의 팽화에 미치는 영향에 대해 연구한 Kim & Ryu(2005)는 미세구조, 현탁액의 점도 및 고유점도를 분석한 결과 압출성형 온도가 115°C일 때 100°C보다 압출성형 백삼의 분자량이 작아 사출구 내부 용융반죽 점도의 감소 및 평균유속이 증가하였다고 보고하였다. 본 연구결과와 일반적인 압출성형공정을 이용한 Kim & Ryu(2005)와 마찬가지로 용융물의 온도가 110°C일 때 95°C보다 용융물의 점도가 낮아 흐름저항이 감소하여 110°C일 때 95°C보다 비기계적 에너지 투입량이 낮은 것으로 사료된다.

직경팽화율

사출구 상수, 탄산가스 주입량, 용융물의 온도에 따른 압출성형물의 직경팽화율을 Fig. 4에 나타내었다. 용융물의 온도가 110°C일 때 95°C보다 직경팽화율은 높았으며, 탄산가스 주입량이 0 mL/min에서 200 mL/min으로 증가할수록 직경팽화율은 증가하였다. 또한 용융물의 온도 110°C, 탄산가스 주입량 200 mL/min, 사출구 상수가 6.82×10⁻¹⁰ m³(L/D 0.67)에서 2.23으로 직경팽화율이 가장 높았다. 반면에 용융물의 온도 95°C, 탄산가스 주입량 0 mL/min, 사출구 상수가 3.36×10⁻¹⁰ m³(L/D 1.67)일 때 1.10으로 직경팽화율이 가장 낮았다. 또한 사출구의 길이와 직경비(L/D)가 0.67에서 1.67로 증가할 때 직경팽화율이 높은 경향을 나타냈으며, 내벽에서 좁아지는 각이 57°(3.36×10⁻¹⁰, 6.82×10⁻¹⁰

m³)일 때 95°(3.64×10⁻¹⁰, 8.09×10⁻¹⁰ m³)보다 높은 직경팽화율을 나타내었다.

사출구의 길이와 직경비(L/D 3.05, 4.29, 6.21)와 초임계 탄산가스 주입량(0, 0.25, 0.5, 0.75%(w/w) SC-CO₂)을 달리하여 사출 후 시간에 따른 직경팽화율을 연구한 Cho & Rizvi(2008)는 사출구의 직경비가 6.21 이고 초임계 탄산가스 주입량이 0.75%(w/w)에서 팽화율 가장 높다고 보고 하였다. 또한 호화된 쌀가루를 원료로 탄산가스 주입 압출성형 공정을 한 압출팽화물은 탄산가스 주입압력이 0.1 MPa에서 0.5 MPa로 증가함에 따라 7.39에서 11.02로 증가한다고 보고하였다(Jeong et al., 2002). 이는 사출구의 직경비와 탄산가스 주입량이 증가함에 따라 팽화율이 증가한 본 실험의 결과와 일치하였다.

비길이

사출구 상수와 탄산가스 주입량, 용융물 온도에 따른 옥수수가루 압출성형물의 비길이는 Fig. 5과 같다. 탄산가스 주입량이 0 mL/min에서 200 mL/min로 주입량이 증가 할수록 비길이는 증가하는 경향을 보였으며, 사출구 상수와 용융물의 온도에 따른 영향은 받지 않았다.

Ryu & Mulvaney(1997)는 유제품 분말과 옥수수가루를 원료로 탄산가스 주입 압출성형하였을 때 주입 압력이 0 MPa에서 0.7 MPa로 증가함에 따라 팽화율과 비길이는 증가하는 경향을 보였는데, 이는 탄산가스 주입압력의 증가와 함께 원료 용융물의 점도가 감소하여 용융물이 사출되는 순간 유속이 증가하기 때문이라고 보고하였다. 본 연구

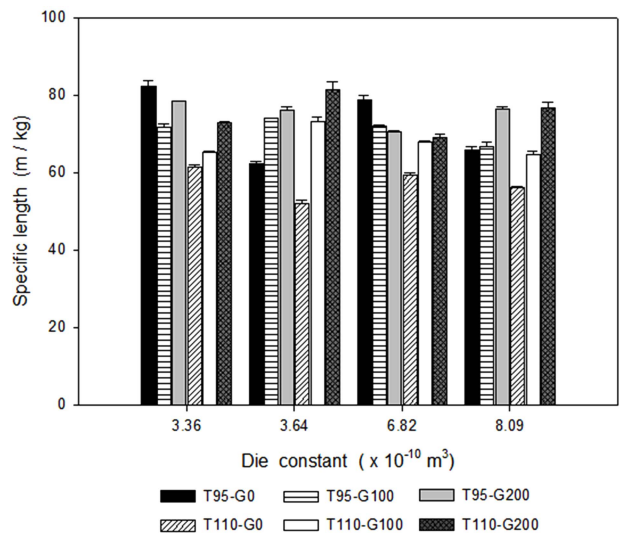


Fig. 5. Specific length of extruded corn flour with CO₂ gas injection at different die constant. T95-G0: Extruded corn flour at 95°C without CO₂ gas; T95-G100 and T95-G200: Extruded corn flour at 95°C with 100 and 200 mL/min CO₂ gas flow rate, respectively; T110-G0: Extruded corn flour at 110°C without CO₂ gas; T110-G100 and T110-G200: Extruded corn flour at 110°C with 100 and 200 mL/min CO₂ gas flow rate, respectively.

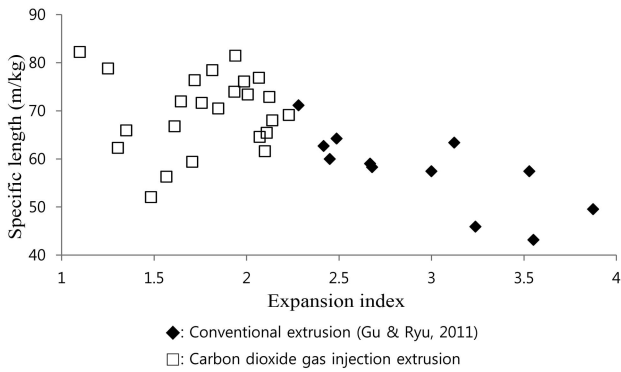


Fig. 6. Relationship between specific length and expansion index of extruded corn flour from two extrusion methods.

에서 용융물의 온도 95°C와 110°C에서 내벽에서 좁아지는 각이 95°(3.64×10^{-10} , 8.09×10^{-10} m³)일 때 탄산가스 주입량이 증가함에 따라 비길이는 증가하였다. 그러나 내벽에서 좁아지는 각이 57°(3.36×10^{-10} , 6.82×10^{-10} m³)일 때 용융물의 온도 95°C에서는 증가하지 않았다.

Fig. 6은 직경팽화율과 비길이의 상관관계로 직경팽화율이 증가하면 비길이는 증가하였다. 옥수수가루의 탄산가스 주입 압출성형 공정에서 비길이의 증가와 함께 직경팽화율이 증가했다고 보고한 Ryu & Mulvaney(1997)의 결과와 일치하였다. 그러나 밀과 옥수수가루를 이용한 일반적인 압출성형 공정에서 직경팽화율이 증가하면 비길이는 감소하는 음의 상관관계를 갖는다고 보고하였다(Gu & Ryu, 2011; Ryu & Ng, 2001).

밀도

사출구 상수와 탄산가스 주입량, 용융물의 온도에 따른 압출성형물의 밀도를 Fig. 7에 나타내었다. 사출구 상수가 감소 할수록 밀도는 감소하는 경향을 보였는데 사출구 상수 3.36, 3.65×10^{-10} m³일 때 사출구 길이가 5 mm(L/D 1.67)이며, 6.82, 8.09×10^{-10} m³의 사출구 길이는 2 mm(L/D 0.67)로 사출구 상수가 작을 때 사출구 길이는 길다. 그리하여 사출구 상수가 감소함에 따라 사출구의 길이가 길어 용융물의 체류시간이 늘어나고 탄산가스와 용융물의 혼합시간이 증가하여 탄산가스에 의한 기공 형성 시간이 증가함에 따라 밀도가 감소한 것으로 사료된다.

Ryu et al.(1997)은 옥수수전분을 이용하여 탄산가스 주입 압출성형 하였을 때 가스를 주입하지 않은 옥수수전분 압출성형물의 밀도는 1.64 g/cm³이었으나 탄산가스 주입 압력(0.03-0.09 MPa)이 증가함에 따라 0.80-0.98 g/cm³으로 감소하였고 0.10 MPa 이상에서 탄산가스를 주입하면 밀도가 증가하였다고 보고하였다. 또한 Jeong et al.(2002)은 탄산가스 주입량이 0.1-0.5 MPa로 증가함에 따라 밀도는 0.95-0.39 g/cm³으로 감소했지만 0.6 MPa로 증가시킴에 따라

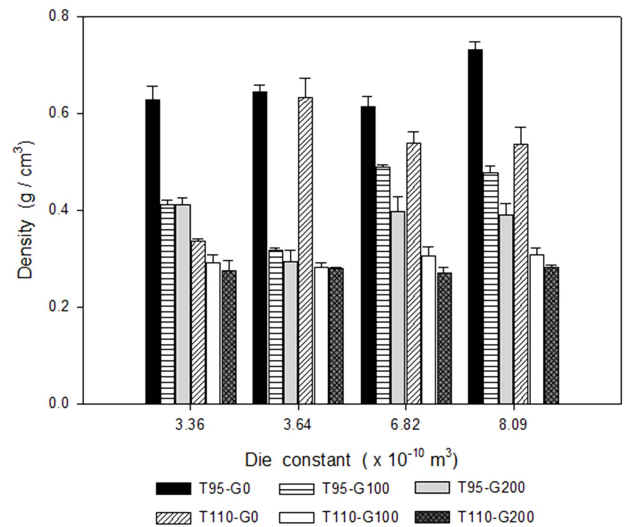


Fig. 7. Density of extruded corn flour with CO₂ gas injection at different die constant. T95-G0: Extruded corn flour at 95°C without CO₂ gas; T95-G100 and T95-G200: Extruded corn flour at 95°C with 100 and 200 mL/min CO₂ gas flow rate, respectively; T110-G0: Extruded corn flour at 110°C without CO₂ gas; T110-G100 and T110-G200: Extruded corn flour at 110°C with 100 and 200 mL/min CO₂ gas flow rate, respectively.

0.62 g/cm³로 증가한다고 보고하였다. 이는 탄산가스 주입량이 증가할수록 밀도가 감소한 본 실험 결과와 일치하였다.

쌀과 삼중실을 이용하여 압출성형 하였을 때 배럴온도가 증가함에 따라 밀도는 감소하였다고 하였으며(Gu et al., 2010), Choi et al.(2008)이 쌀의 품종을 달리하여 압출성형 하였을 때 배럴온도가 증가할수록 밀도는 감소하는데 이는 배럴온도가 증가할수록 전분의 호화도와 과열증기의 함량이 증가하여 압출성형물은 낮은 밀도를 가진다고 보고하였다. 본 연구결과 또한 Gu et al.(2010)와 Choi et al.(2008)의 일반적인 압출성형공정과 마찬가지로 용융물의 온도가 95°C에서 110°C로 증가함에 따라 옥수수가루 압출성형물의 밀도는 감소하였다.

파괴력과 겉보기 탄성계수

옥수수가루 압출성형물의 파괴력과 겉보기 탄성계수는 각각 Tables 4, 5와 같다. 파괴력과 겉보기 탄성계수는 사출구 길이가 5 mm(L/D 1.67)일 때 2 mm(L/D 0.67)보다 낮은 파괴력과 겉보기 탄성계수를 보였는데 이는 체류시간이 증가함에 따라 탄산가스와 용융물의 혼합시간이 증가해 탄산가스에 의한 기공 형성의 시간이 증가해 낮은 파괴력과 겉보기 탄성계수를 나타낸 것으로 사료된다. 또한 탄산가스 주입량이 0 mL/min에서 200 mL/min으로 증가할수록 겉보기 탄성계수는 감소하였다.

Serge et al.(2011)은 카사바 전분을 압출성형할 때 배럴온도가 110°C에서 130°C로 증가하였을 때 파괴력과 겉보

Table 4. Breaking strength (N/m²) of extruded corn flour at different die constant.

Extrusion parameters		Die constant (m ³)			
Temp. (°C)	CO ₂ (mL/min)	3.36×10 ⁻¹⁰	3.64×10 ⁻¹⁰	6.82×10 ⁻¹⁰	8.09×10 ⁻¹⁰
95	0	2.21E+05	2.17E+05	1.35E+06	1.71E+05
	100	6.57E+05	5.81E+05	8.71E+05	9.89E+05
	200	7.05E+05	4.94E+05	6.70E+05	7.79E+05
110	0	2.31E+05	2.49E+05	1.14E+06	7.84E+05
	100	2.97E+05	5.13E+05	4.33E+05	4.76E+05
	200	2.96E+05	5.66E+05	4.38E+05	5.07E+05

Each value is mean of three replicates.

Table 5. Apparent elastic modulus (N/m²) of extruded corn flour at different die constant.

Extrusion parameters		Die constant (m ³)			
Temp. (°C)	CO ₂ (mL/min)	3.36×10 ⁻¹⁰	3.64×10 ⁻¹⁰	6.82×10 ⁻¹⁰	8.09×10 ⁻¹⁰
95	0	1.81E+09	1.23E+09	1.70E+09	1.32E+09
	100	4.98E+08	3.20E+08	7.37E+08	7.22E+08
	200	4.27E+08	2.76E+08	3.20E+08	4.61E+08
110	0	3.10E+08	1.07E+09	6.39E+08	8.23E+08
	100	1.78E+08	3.02E+08	1.83E+08	2.73E+08
	200	1.35E+08	2.89E+08	1.63E+08	2.42E+08

Each value is mean of three replicates.

기 탄성계수는 감소하는 경향을 나타냈다고 보고하였고, Han et al.(2007)은 수분함량과 배럴온도에 따른 압출성형물의 비타민C 매트릭스의 특성의 변화를 살펴보기 위해 전분을 원료로 일반적인 공정으로 압출성형 하였는데 배럴온도가 80°C에서 130°C로 증가할수록 파괴력이 감소하였다고 보고하였다. 이는 용융물의 온도가 95°C에서 110°C로 증가하였을 때 파괴력과 겔보기 탄성계수가 감소한 본 실험과 동일한 결과였다.

미세구조

사출구상수, 탄산가스 주입량, 용융물의 온도에 따른 옥수수가루 압출성형물의 기공의 구조를 Fig. 8, 9에 나타내었다. 탄산가스 주입량이 0 mL/min, 용융물의 온도가 95°C에서 기공형성제인 물의 상변화가 일어나지 않아 기공이 형성되지 않음을 관찰할 수 있었다. 또한 탄산가스 주입량이 0 mL/min에서 200 mL/min으로 증가할수록 기공의 수와 크기가 증가하였다. 이는 탄산가스 주입량(0.1-0.5 MPa)이 증가할수록 압출성형물의 단면적에 대한 기공 단면적의 비가 40.13%에서 81.16%로 증가하였다는 Jeong et al.(2002)의 보고와 일치하였다.

용융물의 온도가 115°C, 탄산가스 주입량 0 mL/min에서 수분이 기공 형성제 역할을 하여 기공이 형성된 것을 관찰할 수 있었으며, 용융물의 온도가 95°C일 때와 비교하여 기공의 크기가 다양한 것을 관찰할 수 있었다. 또한 내벽에서 좁아지는 각이 95°(3.64×10⁻¹⁰, 8.09×10⁻¹⁰ m³)일 때 57°

(3.36×10⁻¹⁰, 6.82×10⁻¹⁰ m³)보다 탄산가스와 용융물의 혼합시간이 증가하여 기공의 수가 많았으며, 기공의 크기도 작았다.

요 약

사출구의 기하학적 구조와 탄산가스 주입량이 압출성형물의 물리적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 사출구의 기하학적 구조를 사출구상수로 산출하여 사출구상수와 수분함량, 용융물의 온도, 탄산가스 주입량에 따른 압출성형물의 물리적 특성을 분석하였다. 압출성형 공정변수는 수분함량 30%, 스크루 회전속도 150 rpm, 원료 투입량 100 g/min, 용융물의 온도(95, 110°C), 탄산가스 주입량(0, 100, 200 mL/min), 사출구 길이(2, 5 mm), 내벽에서 좁아지는 각(57, 95°)이었다. 비기계적 에너지 투입량은 사출구 상수 3.36×10⁻¹⁰ m³, 탄산가스 주입량 200 mL/min, 용융물의 온도가 110°C일 때 159.31 kJ/kg으로 가장 낮은 비기계적 에너지 투입량을 나타내었다. 또한 직경팽화율은 내벽에서 좁아지는 각이 57°(3.36×10⁻¹⁰, 6.82×10⁻¹⁰ m³)일 때 95°(3.64×10⁻¹⁰, 8.09×10⁻¹⁰ m³)보다 높은 경향을 보였으며, 탄산가스 주입량이 0 mL/min에서 200 mL/min으로 증가함에 따라 직경팽화율은 증가하였다. 탄산가스 주입량이 증가할수록 비길이는 증가하는 경향을 나타냈으며, 사출구 상수가 낮을 때 밀도와 파괴력, 겔보기 탄성계수는 낮은 경향을 나타내었다. 압출성형물의 미세구조를 관찰하였을 때 용융물의 온도 110°C에서 내벽에서 좁아지는 각이 95°(3.64×10⁻¹⁰, 8.09×10⁻¹⁰ m³)일 때 57°

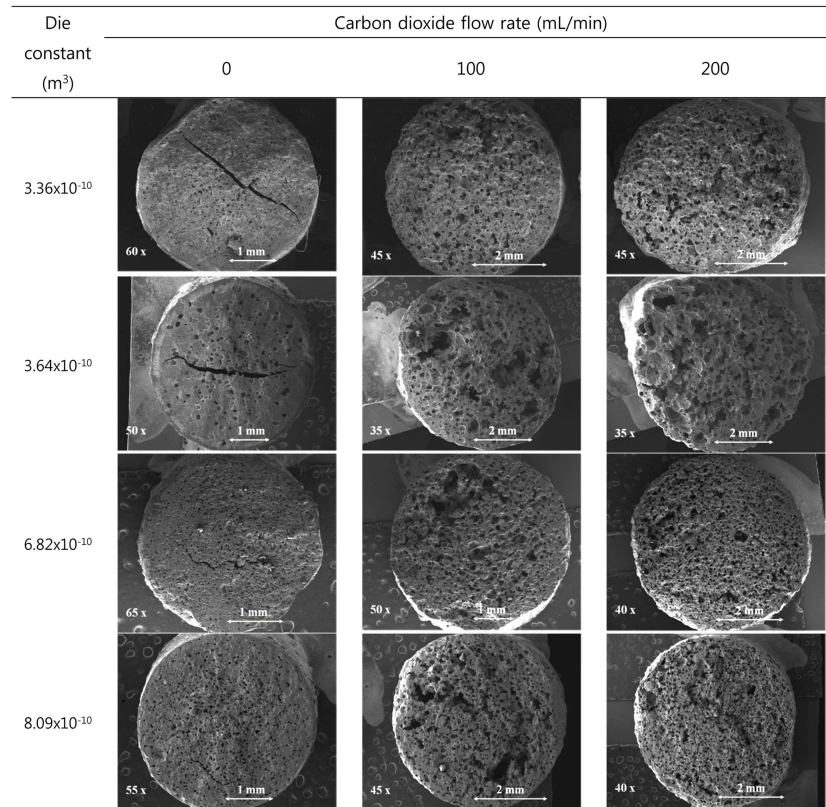


Fig. 8. Scanning electron micrographs of extruded corn flour at 95°C melt temperature with CO₂ gas injection.

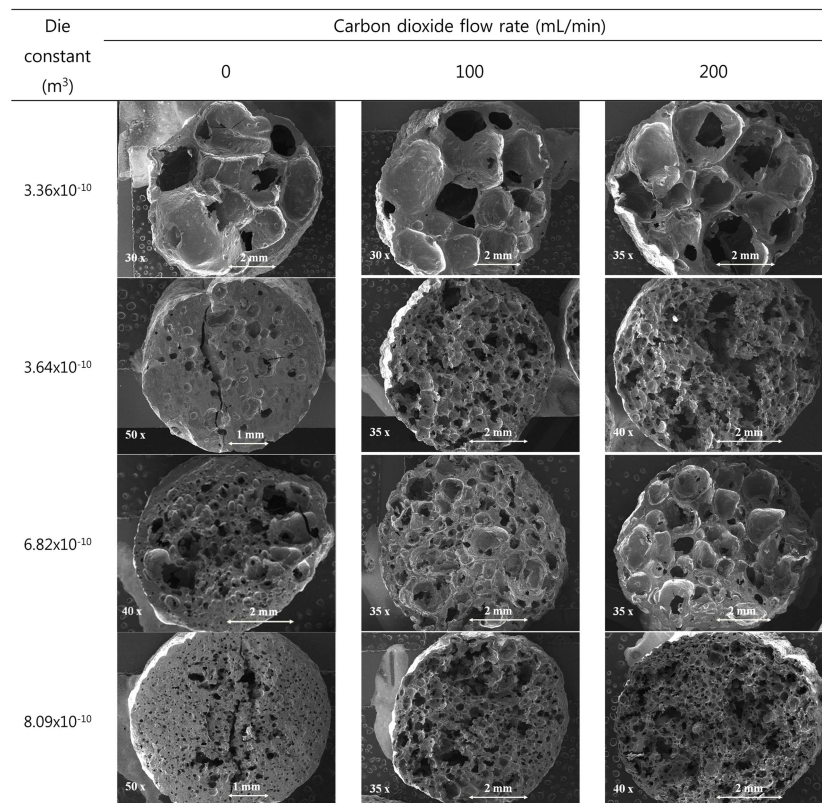


Fig. 9. Scanning electron micrographs of extruded corn flour at 110°C melt temperature with CO₂ gas injection.

(3.36×10^{-10} , 6.82×10^{-10} m³)보다 기공의 수가 많았다.

참고문헌

- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA. pp. 8-35.
- Alavi SH, Gogoi BK, Khan M, Bowman BJ, Rizvi SSH. 1999. Structural properties of protein-stabilized starch-based supercritical fluid extrudates. *Food Res. Int.* 32: 107-118.
- Cho KY, Rizvi SSH. 2008. The time-delayed expansion profile of supercritical fluid extrudates. *Food Res. Int.* 41: 31-42.
- Choi I, Song J, Lee CK, Kim KJ, Suh SJ, Son JR, Ryu GH, Kim JH. 2008. Effects of moisture and barrel temperature of extrusion process on physicochemical and functional properties of specialty rice cultivars. *Food Sci. Biotechnol.* 17: 319-323.
- Ferdinand JM, Lai-Fook RA, Ollet AL, Smith AC, Clark SA. 1990. Structure formation by carbon dioxide injection in extrusion cooking. *J. Food Eng.* 11: 209-224.
- Gu BJ, Norajit K, Ryu GH. 2010. Physicochemical properties of extruded defatted hemp seed and its energy bar manufacturing. *Food Eng. Prog.* 14: 127-134.
- Gu BJ, Ryu GH. 2011. Effects of die geometry on expansion of corn flour extrudate. *Food Eng. Prog.* 15: 148-154.
- Han JY, Kim MH, Jin T, Kim SJ, Kim MH, Ryu GH. 2007. Change in characteristics of extruded vitamin C cornstarch matrix by moisture content and barrel temperature. *Food Eng. Prog.* 11: 253-260.
- Isobe S. 1988. Design of die and injection molding metallic pattern. In: *Food Extrusion Technology II*. Lee CH, Korea food extrusion association (eds). Yu Han Publishing, Co. Seoul, Korea. pp. 197-208.
- Jeong HS, Min YK, Toledo RT. 2002. Effects of low temperature extrusion method on the physical properties and cell structure of pregelatinized rice flour extrudate. *Food Eng. Prog.* 6: 145-151.
- Jin T, Gu BJ, Ryu GH. 2010. Manufacturing of hemp seed flake by using extrusion process. *Food Eng. Prog.* 14: 99-105.
- Kang SH. 1999. Study on process for extruded yukwa by injecting CO₂ gas. Mater Thesis. Kongju National University, Yesan, Korea.
- Kim BS, Ryu GH. 2005. Effect of extrusion temperature on puffing of white and red ginseng. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 34: 1109-1113.
- Launay B, Lisch JM. 1983. Twin-screw extrusion cooking of starches: Flow behavior of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates. *J. Food Eng.* 2: 259-280.
- Miller RC. 1990. Unit operations and equipment. IV. Extrusion and extruders. In: *Breakfast Cereals and How They Are Made*. Fast RB, Caldwell EF (eds). American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, MN, USA, pp. 135-193.
- Rizvi SSH, Mulvaney SJ, Sokhey AS. 1995. The combined application of supercritical fluid and extrusion technology. *Trends Food Sci. Tech.* 6: 232-240.
- Ryu GH. 1995. Extrusion process with gas injection. *Food Sci. Ind.* 28: 30-38.
- Ryu GH, Kang SH, Lee EY, Lim ST. 1997. Effect of CO₂ gas injection on properties of extruded corn starch. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 26: 436-442.
- Ryu GH, Kim BS, Mulvaney SJ. 2002. Optimization of extrusion process for dairy ingredient fortification of cornmeal puffed via CO₂ gas injection. *Food Sci. Biotechnol.* 5: 552-556.
- Ryu GH, Mulvaney SJ. 1995. Cornmeal puffing with CO₂ gas: effect of sucrose and glyceryl monostearate (GMS). *Korean J. Food Sci. Technol.* 27: 251-256.
- Ryu GH, Mulvaney SJ. 1997. Analysis of Physical properties and mechanical energy input of cornmeal extrudates fortified with dairy products by carbon dioxide injection. *Korean J. Food Sci. Technol.* 29: 947-954.
- Ryu GH, Ng PKW. 2001. Effects of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch-Starke* 53: 147-154.
- Serge EO, Gu BJ, Kim YS, Ryu GH. 2011. Effects of feed moisture and barrel temperature on physical and pasting properties of cassava starch extrudate. *Korean J. Food Preserv.* 18: 271-278.
- Yeh AI, Hwang JU. 1995. The effect of die shape on velocity profile of extrudate using a single-screw extruder. *J. Food Eng.* 25: 209-222.