

스크루 배열이 쌀 압출성형물의 물리화학적 특성에 미치는 영향

김동은¹ · 고상훈² · 임정대³ · 이범구⁴ · 이강열⁴ · 신말식⁵ · 민주홍 · 강위수*

¹동진식품연구소, ²세종대학교 식품공학과, ³강원대학교 생약자원개발학과, ⁴(주)에코디엔에스
⁵전남대학교 식품영양학과, 강원대학교 생명건강공학과

Screw Configuration Effect on Physicochemical Characteristics of Extrudates Produced by Twin-Screw Extrusion of Rice Grain

Dong Eun Kim¹, Sanghoon Ko², Jung-Dae Lim³, Beom-Goo Lee⁴, Kang-Yol Lee⁴,
Malshick Shin⁵, Joo-Hong Min⁶, and Wie-Soo Kang*

¹ Dongjin Food Laboratory

² Department of Food Science and Technology, Sejong University

³ Department of Herbal Medicine Resource

⁴ ECO D&S Co., Ltd.

⁵ Department of Food and Nutrition, Chonnam National University

Department of Bio-Health Technology, Kangwon National University

Abstract

This study was done to investigate the effects of five screw configurations (config.) on rice grain extrudates. Five different screw configurations, in which the angles (45°, 90°, and 135°) and number of kneading screws were different, were used in extruding rice. The pressure and specific mechanical energy (SME) increased (5,748.76 kPa and 52.80 kJ/kg, respectively) as the angle and number of kneading screws increased. As shown in Config. 5, the angle of two kneading screws increased to 135° from 45°. The expansion ratio (ER) and water solubility index (WSI) increased as shear increased. In Config. 5, the ER increased to 3.06 and the WSI increased 16.2 times, unlike the control item. The results can be applied in producing processed rice, such as rice expansion snack and cereal for breakfast, and solubilizing functional dietary fiber in water.

Key words: twin screw extruder, rice extrudate, screw configuration, specific mechanical energy, water solubility index

서 론

쌀(*Oryza sativa L.*)은 전세계적으로 약 20%를 식품으로 소비하며, 특히 중국, 한국, 일본을 포함한 많은 나라의 사람들에게 가장 중요한 식료품 중의 하나이다(Hagenimana et al., 2006; Choi et al., 2008). 쌀은 알레르기를 유발하지 않는, 글루텐 프리(gluten free) 탄수화물 식품으로 비타민, 지방성분이 있는 미네랄을 포함하며, 약 6-7%의 고품질의 단백질을 포함한다(Dziedzic, 1991). 쌀은 유아식, 아침식사 시리얼, 발효, 제빵 제품, gluten-free 식품과 전분을 얻기

위한 전분 유도체 및 첨가제에 사용된다(Ramirez-Jimenez et al., 2003). 일반적으로 곡물은 전분이 풍부하나, 단백질 함량이 낮다. 그리고, 몇몇 곡물들은 글루텐을 포함하며, 유아기의 식사는 만성소화장애증(ceeliac disease)의 발달을 촉진할지 모른다. 쌀 단백질은 다른 곡류보다 소화성과 영양가가 더 높다. 곡물들에 있는 한정된 아미노산 즉 라이신의 함량은 밀에서는 2.3 mg/100 g 함유되어 있으나 쌀에서는 4.1 mg/100 g로 더 많이 함유되어 있다(Caballero, 2001; Ramirez-Jimenez et al., 2003).

통계청에 의하면, 최근 1인당 1일 국내 쌀 소비량은 2000년 256.6 g/인, 2004년 224.6 g/인, 2008년 207.7 g/인으로 지속적인 하락세를 보이고 있다. 쌀의 새로운 소비방안의 변화가 시급히 요구되고 있으며, 대량소비 방안으로 새로운 쌀 수요 창출 및 새로운 쌀 제품의 개발이 필요하다. 현재 쌀 가공 제품의 품질은 높지 않으며, 고부가가치 쌀 가공 제품의 개발을 위하여 과학화되고, 규격에 적합한

*Corresponding author: Wie-Soo Kang, Department of Bio-Health Technology, Kangwon National University, 192-1, Chuncheon-city, Kangwon-do 200-701, Korea

Tel: +82-33-250-6494; Fax: +82-33-250-6470

E-mail: kangwiso@kangwon.ac.kr

Received November 5, 2012; revised January 7, 2013; accepted February 5, 2013

제조기법이 필요하다. 단일 공정에서 연속적으로 가공하여 기능성 및 조직감이 향상된 쌀 팽화 제품 제조를 위한 새로운 가공 기술의 도입이 필요하다.

압출 성형 공정은 온도, 함수율, 압력, 전단(shear)에 의해 단일 공정에서 연속적으로 가공하는 방법으로 전분을 기초로 한 식품 산업에서 단축 스크루 압출 성형기와 이축 스크루 압출 성형기가 널리 사용되고 있다. 이축 압출 성형기는 단축 압출 성형기와 비교하여 더 좋은 혼합 능력, 균일한 온도 분포, 이송량의 독립성, 체류시간 조절 및 가공의 균질성 등의 장점을 제공하며, 더 좋은 공정 제어와 다양성을 제공한다(Kartika et al., 2006). 이축 압출 성형기는 제품의 특성에 따라 스크루 배열을 변경하여 스넥류, 시리얼류와 노인 및 환자 식품 등과 같은 다양한 제품을 생산한다(Harper, 1981; Bhattacharya & Choudhury, 1994).

이축 스크루 압출성형기는 이송 스크루와 반축 스크루 등을 이용하여 다양한 형태로 배열할 수 있다. 이러한 스크루들은 혼합, 이송 메커니즘 및 기능에서 차이가 있다. 이송 스크루는 정방향 이송 스크루와 역방향 이송 스크루로 나누어진다. 정방향 이송 스크루는 압출성형기의 바렐 내에 압출물을 이송하는 역할을 하며, 역방향 이송 스크루는 흐름에 대한 저항을 주어 전단을 증가시킨다. 이송 스크루의 피치 길이 차이에 따라서 이송량이 다르다. 반축 스크루는 흐름에 대한 저항을 주며, 이송 효과는 작다. 그러나 압출물에 더 많은 전단을 주고, 반축 및 혼합을 증진시키기 위하여 정방향, 중립 또는 역방향으로 결합 및 배열할 수 있다(Gautam & Choudhury, 1999a; Gautam & Choudhury, 1999b; Kartika et al., 2006)

전분과립의 입자크기 감소(size reduction)는 최종 제품의 물리적, 유변학적, 기능적 특성들에 매우 중요한 역할을 하기 때문에 최종 제품의 품질에 결정적인 요인이다(Harper, 1981). 입자크기의 감소는 비표면적을 증진시켜 물리화학적 반응들 빠르게 증진시킬 수 있으며, 좋은 품질을 유지하여 원하는 과립 크기 또는 모양을 가지는 제품을 생산할 수 있다(Zheng et al., 1995). 따라서 압출성형기의 스크루 배열 변화로 전단힘을 부여하여 쌀의 입자크기를 감소시켜 물리적, 화학적 변화를 제어할 수 있는 공정 기술 개발이 필요하다.

이축 압출 성형기의 스크루 배열은 압출 공정 특성에 중요한 영향을 미친다. 스크루 배열 변화에 따른 압출성형기의 시스템 변수 및 압출물의 물리화학적 특성 변화 등에 대한 다양한 연구들이 수행되었다. Della Valle et al.(1987)은 옥수수 전분을 압출 성형하는 동안 압력 형성에 대한 역방향 스크루의 효과를 연구하였으며, 사출구 전 이송 스크루를 역방향 스크루로 배열 하였을 경우 압력이 50에서 80 bar로 증가하였다고 보고하였다. Altan et al.(2009)는 반축 스크루를 저전단과 고전단로 배열하여 보리 원료를 압출 성형하여 기계적 에너지 투입(SME)에 미치는 영향을

분석하였는데, 저전단 스크루 배열에서 이송 스크루를 반축 스크루로 교체한 고전단 스크루로 배열하였을 때 모터 토크가 증가되었으며, 기계적 에너지 투입이 50 Wh/kg 증가되었다고 보고하였으며, Kirby et al.(1988)도 반축 스크루의 개수를 증가하여 옥수수 분말을 압출 성형 시 비기계적 에너지의 값이 증가되었다고 보고하였다.

압출 성형 동안 전단력에 의하여 다당류의 분해 그리고 결정 구조 붕괴와 같은 전분변형이 발생하여(Fan et al., 1996; Willett et al., 1997), 팽화율, 수분 용해성, 전분 호화 와 같은 제품의 물리화학적 특성 변화에 영향을 준다.

Hakulin et al.(1983)은 역방향 스크루와 반축 스크루를 함께 사용하여 밀전분을 압출 성형하였을 때 밀전분이 호화되었다고 보고하였다. Brenner et al.(1986)은 반축 스크루를 포함하는 고전단 스크루 배열을 사용함으로써 옥수수 전분 입자 구조가 파괴되었다고 보고하였다.

위에서 언급한 것처럼 스크루 배열 변화에 따른 전분 물질의 압출 성형공정은 주로 옥수수, 밀, 보리 등을 이용하여 다양한 연구자들에 의해 연구 되었으나 쌀 압출 성형 공정은 최근에 소수의 연구자들에 의해 수행되었다(Choudhury & Gautam, 1998; Gautam & Choudhury, 1999a; Gautam & Choudhury, 1999b; Onwulata et al., 2001). 또한 이축 압출 성형기의 스크루 배열 설계에 따른 압출 공정 특성에 대한 체계적인 연구도 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 수분함량, 바렐 온도와 스크루 속도를 고정하였을 때 반축 스크루의 배열 변화에 의하여, 시스템 변수(충진길이, 사출구압력, 입자크기, 비기계적 에너지) 및 물리화학적 특성(팽화율, 수분용해지수, 전분 소화율)를 분석하여 쌀 압출 성형 중 혼합, 분배, 분산 등의 전단력의 크기를 제어할 수 있는 기준을 확보하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

실험에 사용한 쌀(*Oryza sativa* L.)은 흥천 농협(Hongcheon-Gun, Gangwon-Do, Korea)에서 구입하였다. 쌀은 100% 대안미로서 성분 및 입자 크기 분포는 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

이축압출성형기

본 연구에 사용한 압출 성형기는 동방향 완전 맞물림형 이축 압출 성형기(STS-25HS, HANKOOK E.M Ltd., Pyeongtaek-Si, Gyeonggi-Do, Korea)로서 바렐 길이와 스크루 직경 (L/D)가 29:1이다. 바렐은 7개의 section으로 구성되어 있으며, open type으로 구성되어 있다. 모터 용량은 A.C. 7.5 kW이며, 1,800 rpm의 회전 속도를 가지며 기어박스의 감속비는 4.40:1 이다. 원료는 이축 압출 성형기에 부착된 용적식 단축 투입장치를 사용하여 투입하였으며, 원

Table 1. Proximate composition of rice.

Components	(%)
Moisture	14.3
Ash	0.4
Crude fat	1.3
Crude protein	6.5
Carbohydrate	77.5

Table 2. Particle size distribution of rice.

	Sieve number (mesh)	Sieve size (mm)	%
Retained on	7	2.80	0
	8	2.36	10.89
	9	2.00	75.12
	10	1.70	13.09
	12	1.40	0.60
Passed through	12	1.40	0.30

료에 가해지는 수분은 정량 펌프(Master flex L/S, Cole-Parmer, IL, USA)로 1 번째 바렐에 주입되었다. 스크루의 바깥 지름은 25 mm이며, 실험에 사용한 스크루는 이송 스

크루 42, 36, 24, 16 mm(Forward)와 반죽 스크루 24 mm (Forward 45°, KS-45F, Neutral 90°, KS-90N, Backward 135°; KS-135B)이다.

스크루 배열 및 압출성형 공정

압출 성형 시 스크루 구간은 공급구간, 조리구간, 계량 구간으로 나누어진다. 공급구간, 조리구간, 계량 구간은 전체 스크루 길이의 각각 20, 50, 30%로 결정하였으며 스크루 배열 변화에 따른 실험 구간은 조리 구간으로 한정하였다(Harper, 1981).

본 연구에서는 5 가지의 다른 스크루 배열을 사용하였으며, Fig. 1과 Table 3에 나타내었다. 실험에 사용한 스크루 배열은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 바렐 3 번 구역(section)에서 5 번 구역의 실험구간에서 사출구 출구 방향으로 KS-45F(forward), KS-90N(neutral), KS-135B(backward)의 각도 및 위치의 변화를 주어서 배열한 5 가지 형태를 사용하였다. 첫 번째 스크루 배열은 바렐 3, 4, 5 구간에 KS-45F를 2 개씩 각각 3 쌍을 배열하였다(config. 1; KS-45F-6). 두 번째 스크루 배열은 바렐 3, 4 구간에 KS-45F를 2 개씩 각각 2 쌍을 설치하였으며, 바렐 5 구간에 KS-45F와 KS-90N을

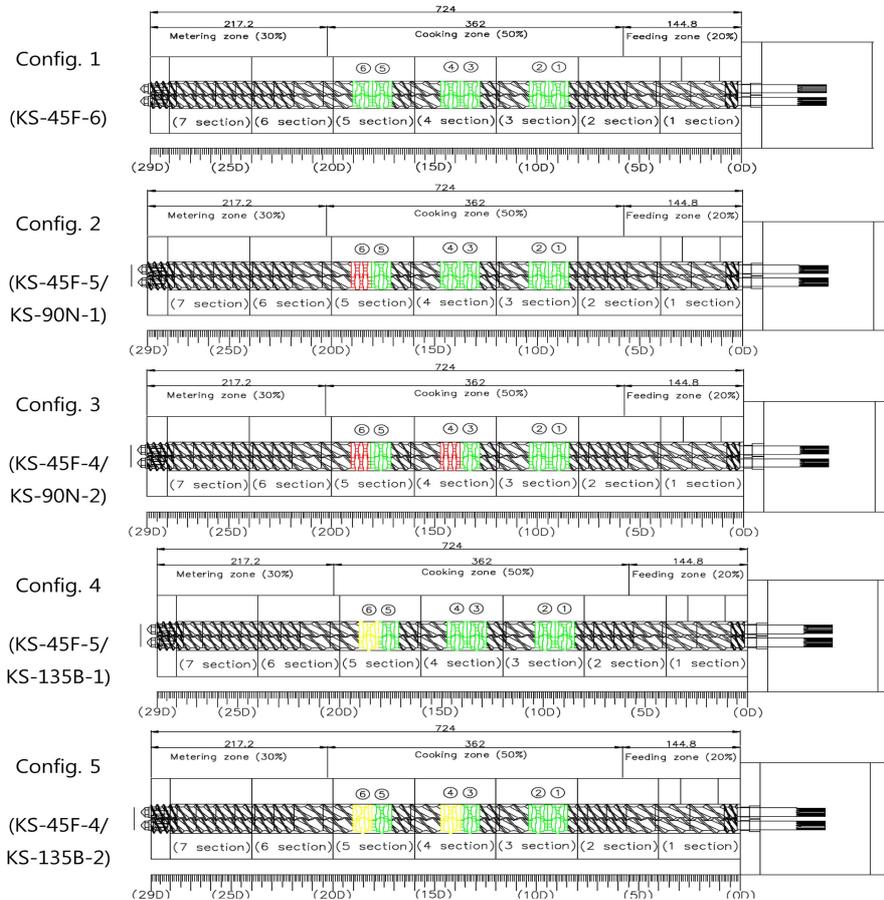


Fig. 1. Schematic drawing of different screw configuration.

*KS = Kneading Screw - stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

Table 3. Screw configurations showing locations of conveying screws and kneading screws.

	Config. 1 (KS-45F-6)	Config. 2 (KS-45F-5/ KS-90N-1)	Config. 3 (KS-45F-4/ KS-90N-2)	Config. 4 (KS-45F-5/ KS-135B-1)	Config. 5 (KS-45F-4/ KS-135B-2)
Feed	CS 16/8/1 ¹⁾	CS 16/8/1	CS 16/8/1	CS 16/8/1	CS 16/8/1
	CS 42/21/2	CS 42/21/2	CS 42/21/2	CS 42/21/2	CS 42/21/2
	CS 36/18/1	CS 36/18/1	CS 36/18/1	CS 36/18/1	CS 36/18/1
	CS 24/12/3	CS 24/12/3	CS 24/12/3	CS 24/12/3	CS 24/12/3
	KS 24/45F/2 ²⁾	KS 24/45F/2	KS 24/45F/2	KS 24/45F/2	KS 24/45F/2
	CS 36/18/1	CS 36/18/1	CS 36/18/1	CS 36/18/1	CS 36/18/1
	CS 24/12/1	CS 24/12/1	CS 24/12/1	CS 24/12/1	CS 24/12/1
	KS 24/45F/2	KS 24/45F/2	KS 24/45F/1	KS 24/45F/2	KS 24/45F/1
	CS 36/18/1	CS 36/18/1	KS 24/90N/1	CS 36/18/1	KS 24/135B/1
	CS 24/12/1	CS 24/12/1	CS 36/18/1	CS 24/12/1	CS 36/18/1
	KS 24/45F/2	KS 24/45F/1	CS 24/12/1	KS 24/45/1	CS 24/12/1
	CS 36/18/2	KS 24/90N/1 ^c	KS 24/45F/1	KS 24/135B/1	KS 24/45F/1
	CS 24/12/6	CS 36/18/2	KS 24/90N/1	CS 36/18/2	KS 24/135B/1
	CS 16/8/2	CS 24/12/6	CS 36/18/2	CS 24/12/6	CS 36/18/2
Die		CS 16/8/2	CS 24/12/6	CS 16/8/2	CS 24/12/6
			CS 16/8/2		CS 16/8/2

¹⁾Conveying element length (mm)/pitch (mm)/number of conveying screw.

²⁾Kneading Screw length (mm)/stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward /number of kneading screw.

결합하여 배열하였다(config. 2; KS-45F -5/KS-90N-1). 세 번째 스크루 배열은 바렐 3 구간에 KS-45F를 2 개씩 1 쌍을 설치하였으며, 바렐 4, 5 구간에 KS-45F와 KS-90N을 결합하여 각각 2 쌍을 배열하였다(config. 3; KS-45F-4/KS-90N-2). 네 번째 스크루 배열은 바렐 3, 4 구간에 KS-45F를 2 개씩 각각 2 쌍을 설치하였으며, 바렐 5 구간에 KS-45F와 KS-135B를 결합 하여 배열하였다(config. 4; KS-45F -5/KS-135B-1). 다섯 번째 스크루 배열은 바렐 3 구간에 KS-45F를 2 개씩 1 쌍을 설치하였으며, 바렐 4, 5 구간에 KS-45F와 KS-135B를 결합하여 각각 2 쌍 배열하였다(config. 5; KS-45F-4/KS-135B-2). 쌀 압출 성형 시 스크루 배열 변화에 따른 시스템 변수 및 쌀 압출물의 물리화학 특성을 측정하기 위하여 바렐 온도는 7 번에서 2 번 section까지 130/130/130/130/130/80°C로 고정하였다. 스크루 속도, 원료 공급량, 함수율은 각각 200 rpm, 10 kg/h, 30 w.b.%로 고정하였다.

바렐 내부의 충전 길이 및 쌀 압출물의 입자 크기 측정

압출성형기 사출구 부분에서 충전 길이 및 쌀 압출물의 입자크기 측정은 Bawiskar & White(1988), Cisneros & Kokini(2002), Zazueta-Morales et al.(2002), Moraru & Kokini(2003), Mudalamane & Bigio(2003)이 실험한 방법을 변형하여 다음과 같이 수행하였다. 쌀 압출 성형 중, 이축 압출 성형기의 사출구 압력이 안정된 상태에서 공급 중인 쌀에 활성탄(Kaya activated carbon Inc., Eumseong-Gun, Korea) 2 g을 같이 투입 후 쌀 압출물과 혼합되어 검은 상태로 색깔이 변해서 나올 때 정지 버튼을 눌러서 압

출성형기를 갑자기 정지시켰다. 활성탄은 조리 및 계량 구역에 분쇄되어서 남아있는 쌀 원재료의 입자크기를 관찰하는데 도움을 준다.

압출성형기의 바렐 내부가 상온 상태가 될 때가 냉각을 시킨 후, 오픈 형태(Open type) 구성되어 있고, 바렐을 열어서 조리구간의 바렐 3, 4, 5 구역 부분의 혼합 반죽 스크루를 통과한 쌀 압출물과 바렐 계량 구역의 7 번에 있는 쌀 압출물을 수집하였다. 수집한 쌀 압출물을 광학 현미경(I-Camscope, Somotech, Seoul, Korea)을 이용하여 40 배율로 촬영하였으며, 이미지 측정 소프트웨어(I-Capture, IMT, I-Solution Inc., Vancouver, Canada)를 사용하여 각 구간에서 분쇄되지 않은 쌀 입자의 크기를 측정하였다. 충전 길이의 측정은 바렐 7 구역의 사출구 부분에서 공급부 방향으로 충전된 압출물을 자를 이용하여 충전 길이를 측정하였다.

압출 압력 측정

쌀 압출 성형 시 압출 압력은 실험 조건에서 5 분 이상 압출 성형 후 압력이 안정된 상태에서 바렐 7 번 section 다음의 출구 끝단에 있는 사출구 압력 측정 장치(TPT463E, Dynisco, MA, USA)를 사용하여 측정하였다. 각 실험 조건에서 압출 압력을 3 번 반복 측정 후 평균값 및 표준 편차를 구하였다.

비기계적 에너지 측정

비기계적 에너지(Specific mechanical energy, SME)는 원료가 투입되어 압출 성형기를 통과할 때 원료의 단위 질량

당 소비되는 기계적 에너지의 총 투입량으로 정의된다 (Yuliani et al., 2006; Pansawat et al., 2008).

비기계적 에너지 계산은 아래와 같이 계산하였다.

$$SME = \frac{\text{Mechanical energy input}}{\text{Mass flow rate}} = \frac{N_{act}}{N_{max}} \times \frac{T_{act}}{T_{max}} \times \frac{K_{\omega}}{\dot{m}} \quad (1)$$

N_{act} : Actual screw speed (rpm)

N_{max} : Maximum screw speed (rpm)

T_{act} : Actual torque (Nm)

T_{max} : Maximum torque (Nm)

K_{ω} : Motor power (kW)

\dot{m} : output (kg/h)

압출 성형 시 토크의 변화는 토크 기어박스과 모터 사이에 토크 변환기(TRE-20K, DACELL, Cheongweon-Gun, Chung-Buk, Korea)를 설치하여 측정하였으며, 실험 조건에서 5분 이상 압출 성형 후 토크가 안정된 상태에서 자료를 수집하였다. 각 실험 조건에서 토크를 3번 반복 측정 후 평균값 및 표준 편차를 구하였다.

사출구 압력 및 토크를 자료 수집하기 위하여 DEWEBOOK (DEWETRON, Graz-Grambach, Austria)을 사용하였으며, 데이터 수집 속도는 1000 번/초로 설정하였다. 데이터는 Dewesoft 6.3(DEWETRON, Graz-Grambach, Austria) 프로그램을 사용하였다.

팽화율 측정

압출물(extrudate)의 팽화율은 압출 성형 시 팽화의 정도를 측정하는 지표로서 계산식은 아래와 같다. 압출물의 지름은 전자식 버니어 캘리퍼스(Mitutoyo, Kawasaki, Japan)를 이용하여 20회 측정 후 평균값을 구하였다(Altan et al., 2009).

$$\text{Expansion ratio} = \frac{\text{Height of extrudate}}{\text{Height of slit die}}$$

수분용해지수 측정

수분용해지수(Water solubility index, WSI)는 압출 성형한 시료를 분쇄하여 150-250 μm 의 체를 통과 시킨 후 시료 1g과 증류수 40 ml를 원심 분리 튜브에 투입하여 30°C에서 30분간 교반시킨 후, 원심분리기(MEGA17R Hanil, Incheon, Korea)를 이용하여 상대 원심력 20,000 \times g에서 10분간 원심 분리하였다. 상등액을 건조한 고정분량과 압출 성형물 시료의 무게 백분율을 수분용해지수로 표시하였으며, 2번 반복 측정 후 평균값을 구하였다. 식은 아래와 같다.

$$WSI(\%) = \frac{\text{Weight of supernatant}}{\text{Weight of dry solid}} \times 100 \quad (2)$$

α -amylase를 이용한 전분의 소화율 측정

α -amylase를 이용한 전분의 소화율(Enzymatic digestibility, ED)은 효소에 대한 전분입자의 소화도 및 반응성을 나타내는 값으로 Liu et al.(1999)의 방법을 응용하여 측정하였다. 압출 성형한 시료를 분쇄하여 150-250 μm 의 체를 통과 시킨 후 시료 1g과 Phosphate buffer(0.2 M, pH 6.9) 30 mL을 튜브에 넣고 95°C의 항온 수조에서 30분간 소화 시킨 후 상온(25°C)으로 냉각한다. 냉각 후 360 unit의 α -amylase (A6380, Sigma-Aldrich Co., St. Louis, MO, USA)를 첨가하고 배양기에서 α -amylase의 활성 온도인 30°C로 16 시간을 유지하였다. 튜브에 1.0%(w/v)의 H_2SO_4 를 5 mL 첨가하여 효소 반응을 종결시킨 다음 3000 rpm으로 원심분리하였다. 분리된 튜브는 80% 에탄올을 이용하여 2회 세척 후 다시 80% 에탄올을 첨가하여 원심분리 후 침전물을 105°C에서 건조하여 초기 시료에서 감소된 시료의 무게를 통해 ED 값을 구하였다. 2번 반복 측정 후 평균값을 구하였다.

통계처리

압출압력, 비기계적 에너지 값, 팽화율, 수분용해지수, 전분의 소화율에 대한 실험 결과는 평균 \pm 표준편차로 나타냈으며, 그룹간의 통계적 유의성은 SAS software system. 6.04(SAS Institute, Cary, NC, USA)를 이용하여 $P < 0.05$ 수준에서 Duncan의 다중 비교법에 의해 분석하였다.

결과 및 고찰

충진 길이 및 압출 압력

압출 성형 시 스크루 배열(config. 1-5)의 변화가 압출 압력에 미치는 영향을 Fig. 2와 Table 4에 나타내었다. 압출 압력은 KS-90N, KS-135B의 각도 및 길이를 증가시키기에 따라 증가되는 경향을 나타내었다. Config. 1에서 KS-

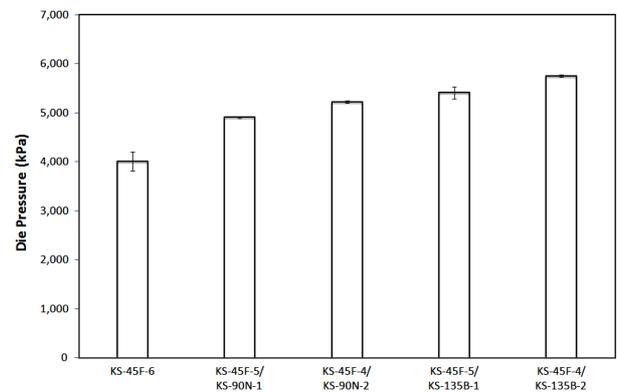


Fig. 2. Effect of different screw configuration on die pressure. *KS = Kneading Screw - stagger angle ($^{\circ}$), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

Table 4. Effect of different screw configuration on system variables.

Screw configuration	Filling length (mm)	Die pressure (kPa)	Average particle size in 7 barrel section (mm)	SME (kJ/kg)
Config. 1 (KS-45F-6)	30 (PF ¹⁾)	4,007.72±188.91 ^c	2.93±1.23	19.73±0.16 ^c
Config. 2 (KS-45F-5/ ME-90N-1)	30 (FF ²⁾)	4,906.29±19.96 ^d	0.732±0.48	26.78±0.29 ^d
Config. 3 (KS-45F-4/ KS-90N-2)	50 (FF)	5,219.23±28.34 ^e	1.144±0.52	33.37±0.27 ^c
Config. 4 (KS-45F-5/ KS-135B-1)	80 (FF)	5,408.19±119.43 ^b	0.59±0.37	37.67±0.23 ^b
Config. 5 (KS-45F-4/ KS-135B-2)	115 (FF)	5,748.76±26.57 ^a	0.25±0.02	52.80±0.28 ^a

¹⁾ PF = partially filled, ²⁾FF= fully filled

KS = Kneading Screw - stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

Values are expressed as mean±SD of data obtained from three independent experiments.

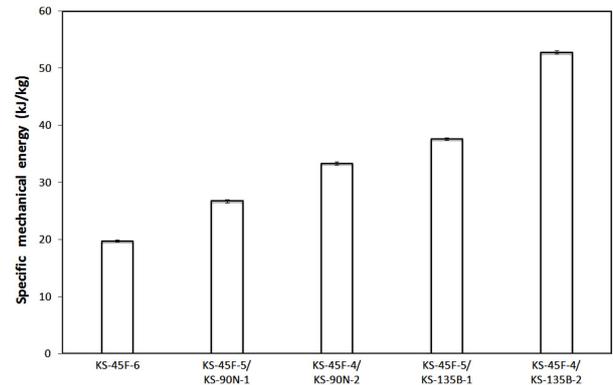
45F의 정방향 반죽의 영향으로 충전 길이는 30 mm로 압출물이 부분적으로 충전되었으며, 압력은 4007.72 kPa로 형성되었다. Config. 3에서 KS-90N의 중립 반죽의 영향으로 전단력이 증가하여 계량구간에서의 충전 길이가 50 mm로 증가함으로써, 압력이 5219.23 kPa로 config. 1보다 높게 형성되었다. Config. 4는 역류 효과를 증가시키기 위하여 KS-135B를 1 개 배열하였으며, 흐름에 대한 저항으로 쌀 압출물의 점도가 증가하여 config. 3보다 계량구간에서 충전 길이가 30 mm 길게 증가하였으며, 사출구 압력도 5408.19 kPa로 높게 형성되었다. Config. 5는 KS-135B를 2 개 배열한 조건으로 계량구간에서 쌀 입자가 충분히 미세화되면서 물이 쌀 입자 사이에서 분산이 증가되어 쌀 입자의 호화, 용융, 붕괴가 발생되어 바렐 내부의 압출물이 팽창되어 충전 길이는 115 mm 로 가장 길게 증가하였으며, 사출구 압력도 5748.76 kPa로 5 가지 스크루 배열중에서 가장 높은 값을 나타내었다.

압출 압력의 증가는 스크루 배열 변화에 따른 바렐 내부의 충전 길이와 관련이 있다. Yam et al.(1994)은 흐름에 대한 저항을 증대시킨 반죽 스크루로 배열함에 따라 충전 길이가 관련이 있으며, 반죽 스크루를 따라서 압출물의 흐름에 대한 저항으로 압력이 증가되고 충전 길이도 증가된다고 설명하였으며, Unlu & Faller(2002)도 충전 길이가 증가됨에 따라 압력이 증가된다고 설명하였다. 본 실험 결과에서도 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

입자 크기 및 비기계적 에너지

스크루 배열(config. 1-5)의 변화에 따라서 조리구간에서 전단력으로 쌀을 미세화시켜서 압출하는데 필요한 소요에너지를 분석하였다. 스크루 배열의 변화에 따라서 입자 크기 및 비기계적에너지(SME)에 미치는 영향을 Fig. 3과 Table 4에 나타내었다. SME는 KS-90N, KS-135B의 각도 및 길이를 증가시킴에 따라 증가되는 경향을 나타내었다.

SME와 입자 크기는 config. 1에서 각각 2.93 mm, 19.37 kJ/kg로 측정되었다. Config. 3에서는 KS-90N의 중립 혼합의 효과로 흐름의 저항이 증가되어서, 33.37 kJ/kg으로 증가되었으며, SME의 증가로 입자크기가 1.14 mm로 감소되었다. KS-

**Fig. 3. Effect of different screw configuration on SME.**

*KS=Kneading Screw - stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

135B를 2 개 증가시켜 배열한 config. 5에서는 역방향 반죽 효과에 의해서 흐름의 저항이 증대되고 전단력이 증가하여 SME는 52.80 kJ/kg의 매우 높은 값으로 증가되었으며 입자크기는 0.25 mm로 매우 작게 감소되었다. SME는 KS-90N, KS-135B의 변화에 따라 흐름의 저항으로 인하여 전단 및 분산이 증진되는 원인이 되었다. Config. 1에서 Config. 5의 고전단으로 스크루를 배열함에 따라 쌀입자가 충분히 미세화되면서 물과의 반응으로 전분의 호화도가 증가되었으며, 압출 성형 시 점도가 증가되면서 흐름에 대한 저항이 증대되어 SME 값이 증가되었다고 사료된다.

Chang & Halek(1991)은 배아가 제거된 옥수수 분말 압출 성형하였으며, 이송 스크루와 반죽 스크루의 배열을 비교시 반죽 스크루에서 점성 열 분산(viscous heat dissipation)이 4-6 배 더 증가되었다고 보고하였다. Yam et al. (1994)은 역방향 스크루가 증가됨에 따라 충전도도 증가된다고 보고하였다. 역방향 스크루는 흐름에 대해서 저항이 매우 강해 스크루 내에서 물질의 압력이 증가되며 따라서 충전도가 증가된다고 설명하였다. Zheng et al.(1995)은 SME 크기는 입자 크기와 관련이 있다고 보고하였는데 SME 투입량이 증가함에 따라 전분 과립 크기가 감소된다고 설명하였으며 본 실험 결과에서도 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

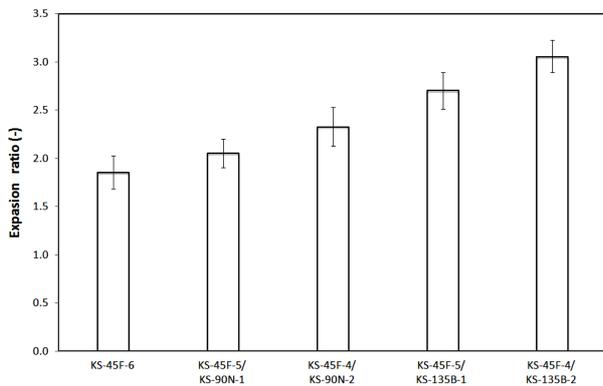
Table 5. Effect of different screw configuration on physicochemical properties.

Screw configuration	Expansion ratio ¹⁾	WSI ²⁾ (%)	Enzymatic digestibility ²⁾ (%)
Control	-	1.36±0.21 ^f	10.53±0.21 ^f
Config. 1 (KS-45F-6)	1.85±0.17 ^c	10.92±0.33 ^c	11.65±0.38 ^c
Config. 2 (KS-45F-5/ KS-90N-1)	2.05±0.15 ^d	12.61±0.45 ^d	12.55±0.09 ^d
Config. 3 (KS-45F-4/ KS-90N-2)	2.33±0.20 ^c	15.68±0.32 ^c	13.78±0.19 ^c
Config. 4 (KS-45F-5/ KS-135B-1)	2.70±0.19 ^b	17.39±0.37 ^a	14.88±0.06 ^b
Config. 5 (KS-45F-4/ ME-135B-2)	3.06±0.17 ^c	22.08±0.28 ^a	16.57±0.13 ^a

KS = Kneading Screw - stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

¹⁾Values are expressed as mean±SD of data obtained from twenty independent experiments.

²⁾Values are expressed as mean±SD of data obtained from two independent experiments.

**Fig. 4. Effect of different screw configuration on expansion ratio.**

*KS=Kneading Screw - stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

팽화율

스크루 배열 변화에 따라 팽화율의 변화를 Table 5와 Fig. 4에 나타내었다. Config. 1-5에서, KS-90N, KS-135B의 각도 및 개수를 증가시키기에 따라 팽화율이 증가되는 경향을 나타내었다. Config. 1에서 KS-45F를 6개 배열하여 압출 하였을 경우 팽화율이 1.85로 측정되었다. KS-90N을 2개 배열한 config. 3은 중립 반죽의 영향으로 충전 길이와 압력이 증가되어 팽화율이 2.33의 증가된 값을 나타내었다. Config. 5에서 KS-135B를 2개 배열하여 압출 하였을 경우, 역방향 반죽의 효과로 계량구간에서 압력이 급격히 증가되어 충전 길이도 가장 높게 증가되었으며, 팽화율도 3.06로 5가지 스크루 배열 중에서 가장 높은 값을 나타내었다.

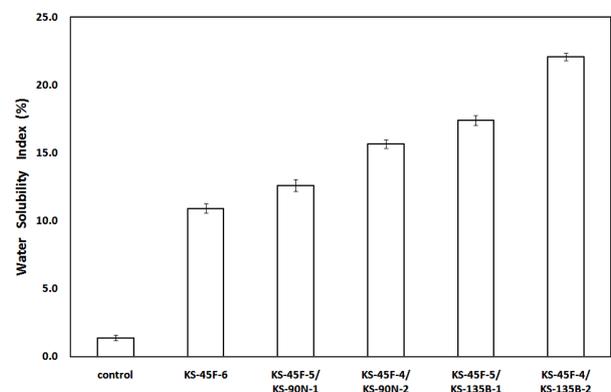
Kokini et al.(1991)은 팽화율은 압출물이 사출구에서 나온 후 팽창이 되면서 기포생성과 붕괴에 의한 결정핵생성(nucleation)으로 설명하였다. 이 현상은 호화 정도와 전분의 붕괴에 영향을 미친다(Gautam & Choudhury, 1999b; Kirby et al., 1988). 전분의 호화는 스크루 배열에 영향을 받는다고 보고하였다(Owusu et al., 1983; Gogoi et al., 1996). Altan et al.(2009)은 보리 분말을 고전단의 스크루 배열 조

건에서 압출 성형 시 팽화율이 증가되었다고 보고하였으며, Gogoi et al.(1996)도 고전단 조건의 스크루 배열 조건에서 압출 성형 시 팽화율이 최대로 증가된다고 보고하였다. 스크루 배열에 의한 비기계적 에너지값의 증가에 따라 바렐 내부에서 쌀 전분입자의 호화로 팽화가 증가된 것으로 사료 된다.

수분용해지수

스크루 배열의 변화에 따라서 수분용해지수(WSI)에 미치는 영향을 Table 4, 5와 Fig. 5에 나타내었다. Config. 1에서 WSI는 10.92%가 측정되었으며, Config. 3호름의 저항이 증가되어, SME가 45.85 kJ/kg로 증가되었고, 물과 쌀 입자와의 혼합도가 증가되면서, 전분의 호화도가 증가되어 WSI는 15.68%로 증가하였다. Config. 5에서는 KS-135B의 역방향 반죽 효과에 의해서 SME가 가장 크게 증가 되었으며, 쌀입자가 충분히 미세화되면서 물과 쌀 입자와의 분산이 증가되어 WSI는 각각 22.08%의 매우 높은 값으로 증가되었다. Config. 5에서 WSI는 원재료(1.36%) 보다 16.23 배 증가한 22.08%를 나타내었다.

WSI는 쌀 압출물의 변화를 추측할 수 있는 지표로서 전분 구조의 파괴의 정도를 알 수 있다. WSI는 전분의 붕괴

**Fig. 5. Effect of different screw configuration on WSI.**

*KS=Kneading Screw - stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

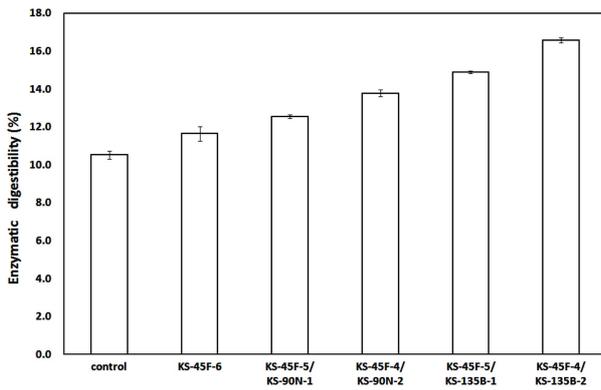


Fig. 6. Effect of different screw configuration on enzymatic digestibility.

*KS=Kneading Screw - stagger angle (°), F=forward, N=neutral, B=backward - number of kneading screw.

에 의해 발생하는 수용성 물질의 양에 비례한다고 하였다. WSI는 쌀을 포함한 전분 압출물의 변화를 추측할 수 있는 지표로서 전분 구조의 파괴의 정도를 알 수 있으며, 압출 성형 후 전분의 붕괴에 의해 발생하는 수용성 다당류의 양이다(Kirby et al., 1988). WSI는 반죽 스크루 배열 조건에 따라 큰 영향을 받으며, 비기계적 에너지 값이 증가함에 따라 수분용해지수도 체계적으로 증가된다고 보고하였다(Choundhury & Gautam, 1998). Bindzus et al.(2002)은 쌀 전분 압출 성형 시 비기계적 에너지 투입이 높을수록 아밀로펙틴의 분자 붕괴가 증가되었다고 보고하였으며, Barres et al.(1990), Kirby et al.(1988) 및 Meuser et al.(1991)등도 고전단 조건으로 스크루 배열을 하여 압출 성형 시 WSI가 높은 값으로 증가 된다고 보고하였다.

전분의 소화율

스크루 배열(config. 1-5)의 변화에 따라서 전분의 소화율(ED)에 미치는 영향을 Table 4, 5와 Fig. 6에 나타내었다. Config. 1에서 ED는 11.65%가 측정되었다. Config. 3에서는 KS-90N의 중립 반죽의 효과로 흐름의 저항이 증가되어, SME가 45.85 kJ/kg로 증가되었고, 물과 쌀 입자와의 혼합도가 증가되면서, 전분의 소화도가 증가되어 ED는 13.78%로 증가하였다. Config. 5에서는 KS-135B의 역방향 반죽 효과에 의해서 흐름의 저항이 증대되어 SME가 63.38 kJ/kg로 증가되었으며, 쌀 입자가 충분히 미세화되면서 물과 쌀 입자와의 분산이 증가되어 전분의 소화도 증가로 점도가 증가하여 ED는 16.57%로 매우 높은 값으로 증가되었다. Config. 5에서 ED는 원재료(10.53%)보다 1.57배 증가한 16.57%를 나타내었다.

쌀은 많은 부분의 전분을 함유하고 있다. 전분은 붕괴되기 쉬운 아밀로스(amylose)와 아밀로펙틴(amylopectin)의 2 종류의 거대 전분분자로 분류된다. Senouci & smith(1988)는 압

출성형기에서 기계적 전단력에 의한 전분 붕괴의 효과는 고온의 효과보다 더 중요하다고 설명하였으며, Davidson et al.(1984)도 고온에서 열적 효과에 의한 전분의 붕괴가 중요하지만, 또한 저온에서 기계적 효과 의한 전분의 붕괴가 중요하다고 보고하였다. 반죽 스크루의 각도 및 길이의 증가는 압출성형기에서 충전도와 체류시간을 증가시키고, 또한 기계적 처리의 강도(intensity)를 증가시켜 전분의 붕괴를 유도하여 ED를 증가시킨다. Yeh & Whang(1992)등은 입자 크기가 작아짐에 따라 전분 소화 및 변형이 많이 발생된다고 보고하였다. 본 실험에서도 유사한 결과를 나타내었는데 압출 성형 후 config. 1의 바렐 7 구역에서의 입자크기는 0.58 mm에서 2.64 mm를 나타내었다. 그런데 전단력을 증가시키는 config. 5로 배열 하였을 경우 계량구간에서의 입자크기는 0.22 mm에서 0.28 mm로 감소하였으며, ED는 16.57%로 증가되었다.

요 약

본 연구에서는 쌀 이축 압출 성형 중 반죽 스크루의 배열의 변화가 압출 시스템 변수 및 압출물의 물리화학적 특성에 미치는 영향을 분석하였으며 수행한 결과는 다음과 같다.

스크루 배열 변화시 조리 구간에 배열한 반죽 스크루의 각도 및 길이의 변화에 따라 충전도 및 입자크기를 관찰하면서 압력형성과 비기계적 에너지 소요 변화와 관계를 파악할 수 있었다. 충전도 및 압력은 config. 1에서 고전단 처리가 가능한 config. 5로 증가함에 따라 규칙적으로 증가되는 결과를 나타내었으며, 고전단력이 발생하는 config. 5에서 충전길이는 115 mm의 가장 높은 값을 나타내었으며 압력은 5,748.76 kPa로 가장 높은 값을 형성하였다. 입자크기 및 비기계적 에너지 관계는 압력은 config. 1에서 config. 5로 증가함에 따라 비기계적 에너지 증가되었으며, 쌀의 입자 크기는 감소되었다. Config. 5에서 비기계적 에너지 값이 52.80 kJ/kg이며 입자크기는 0.22에서 0.28 mm 범위로 감소되었다.

팽화율, 수분용해지수, 전분 소화율은 config. 1에서 고전단력 처리가 가능한 config. 5로 증가함에 따라 규칙적으로 증가되는 결과를 나타내었다. 팽화율은 config. 1에서 1.85를 나타내었으나 config. 5에서 충전 길이 및 압력 증가의 영향으로 3.06으로 증가되었다. 수분용해지수와 전분 소화율도 원재료에서 각각 1.36%, 10.53%를 나타내었으나 config. 5에서 입자크기 감소 및 SME 증가의 영향으로 수분용해지수는 22.08%, 전분소화율은 16.57%로 증가되었다.

본 연구를 통하여 스크루 배열 변화는 시스템 변수 및 물리화학적 특성에 영향을 미치는 중요한 공정 변수임을 확인하였다. 압출 성형공정에서 스크루 배열 변화에 따라 저전단에서 고전단 공정을 제어 할 수 있으며, 사출구 압력, 비기계적 에너지, 압출물의 물리화학적 특성 등의 변수

를 결정하는데 중요한 역할을 한다는 것이 이 연구를 통하여 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ00754204)의 지원에 의해 수행된 것이며 이에 감사드립니다. 또한 본 논문이 완성될 때까지 압출 성형기로 많은 도움을 주신 한국이엠주식회사에 감사드립니다.

참고문헌

- Altan A, McCarthy KL, Maskan M. 2009. Effect of screw configuration and raw material on some properties of barley extrudates. *J. Food Eng.* 92: 377-382.
- Altomare RE, Ghossi P. 1986. An analysis of residence time distribution patterns in a twin screw cooking extruder. *Biotechnol. Progr.* 2: 157-163.
- Barres C, Vergnes B, Tayeb J, Della VG. 1990. Transformation of wheat flour by extrusion cooking: Influence of screw configuration and operating conditions. *Cereal Chem.* 67: 427-433.
- Bawiskar S, White LJ. 1998. Melting model for modular self wiping co-rotating twin screw extruders. *Polym. Eng. Sci.* 38: 727-740.
- Bhattacharya S, Choudhury GS. 1994. Twin-screw extrusion of rice flour: Effect of extruder length-to-diameter ratio and barrel temperature on extrusion parameters and product characteristics. *J. Food Process. Pres.* 18: 389-406.
- Bindzus W, Living S, Gloria-Hernandez H, Fayard G, Lengerich BV, Meuser F. 2002. Glass transition of extruded wheat, corn and rice starch. *Starch-Starke.* 54: 394-400.
- Brenner PE, Richmond P, Smith AC. 1986. Aqueous dispersion rheology of extrusion cooked maize. *J. Texture Stud.* 17: 51-60.
- Caballero BA. 2001. Efecto de la harina de arroz sobre las propiedades funcionales de masas de harina de trigo. *Alimentacion, equipos y tecnologia.* 20: 49-56.
- Choudhury GS, Gautam A. 1998. Comparative study of mixing elements during twin screw extrusion of rice flour. *Food Res. Int.* 31:7-17.
- Chang KLB, Halek GW. 1991. Analysis of shear and thermal history during co-rotating twin-screw extrusion. *J. Food Sci.* 56: 518-531.
- Choudhury, GS, Gautam A. 1998. Comparative study of mixing elements during twin-screw extrusion of rice flour. *Food Res. Int.* 31: 7-17.
- Cisneros FH, Kokini JL. 2002. A generalized theory linking barrel fill length and air bubble entrapment during extrusion of starch. *J. Food Eng.* 51: 139-149.
- Davidson VJ, Paton D, Diosady LL, Rubin LJ. 1984. A model for mechanical degradation of wheat starch in a single-screw extruder. *J. Food Sci.* 49: 1154-1157.
- Della Valle G, Tayeb J, Melcion JP. 1987. Relationship of extrusion variables with pressure and temperature during twin screw extrusion cooking of starch. *J. Food Eng.* 6: 423-444.
- Dziezak JD. 1991. Romancing the kernel : a salute to rice varieties. *Food Technol. Chicago.* 45: 74-80.
- Fan J, Mitchell JR, Blanshard JMV. 1996. The effect of sugars on the extrusion of maize grits: II. Starch conversion. *Int. J. Food Sci. Technol.* 31: 67-76.
- Gautam A, Choudhury GS. 1999a. Screw configuration effects on residence time distribution and mixing in twin-screw extruders during extrusion of rice flour. *J. Food Process Eng.* 22: 263-285.
- Gautam A, Choudhury GS. 1999b. Screw configuration effects on starch breakdown during twin-screw extrusion of rice flour. *J. Food Process Pres.* 23: 355-375.
- Gogoi BK, Choudhury GS, Oswalt AJ. 1996a. Effects of location and spacing of reverse screw and kneading element combination during twin-screw extrusion of starchy and proteinaceous blends. *Food Res. Int.* 29: 505-512.
- Hagenimana A, Ding X, Fang T. 2006. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *J. Cereal Sci.* 43: 38-46.
- Hakulin S, Linko YY, Linko P, Seiler K, Seibel W. 1983. Enzymatic conversion of starch in twin-screw HTST-Extruder. *Starch-Starke.* 35: 411-414.
- Harper JM. 1981. *Extrusion of Foods.* vol. 2. CRC Press Inc., Boca Raton, FL, USA.
- Kartika IA, Pontalier PY, Rigal A. 2006. Extraction of sunflower oil by twin screw extruder: Screw configuration and operating condition effects. *Bioresource Technol.* 97: 2302-2310.
- Kirby AR, Ollett AL, Parker R, Smith AC. 1988. An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion-cooking of maize grits. *J. Food Eng.* 8: 247-272.
- Kokini JL, Chang CN, Lai LS. 1991. The role of rheological properties on extrudate expansion. In: *Food Extrusion Science and Technology.* Marcel Dekker, NY, USA, pp. 345-360.
- Liu H, Corke H, Ramsden L. 1999. Functional properties and enzymatic digestibility of cationic and cross-linked cationic ae, wx, and normal maize starch. *J. Agr. Food Chem.* 47: 2523-2528.
- Meuser F, Gimmler N, Van Lengrich B. 1991. A system analytical approach to extrusion. In: *Food Extrusion Science and Technology.* Marcel Dekker, NY, USA, pp. 619-630.
- Morarur, CI, Kokini JL. 2003. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* Blackwell publishing Ltd., MA, USA, pp. 147-165.
- Mudalamane R, Bigio DI. 2003. Process variations and the transient behavior of extruders. *AICHE J.* 49: 3150-3160.
- Onwulata CI, Smith PW, Konstance RP, Holsinger VH. 2001. Incorporation of whey products in extruded corn, potato or rice snacks. *Food Res. Int.* 34(8): 679-687.
- Owusu-Ansah J, Van de Voort, FR, Stanley DW. 1983. Physico-chemical changes in cornstarch as a function of extrusion variables. *Cereal Chem.* 60: 319-324.
- Pansawat N, Jangchud K, Jangchud A, Wuttijumnong P, Saalia FK, Eitenmiller RR, Phillips RD. 2008. Effects of extrusion conditions on secondary extrusion variables and physical properties of fish, rice-based snacks. *LWT-Food Sci. Technol.* 41: 632-641.
- Ramirez-Jimenez A, Guerra-Hernandez E, Garcia Villanova B. 2003. Evolution of non-enzymatic browning during storage of infant rice cereal. *Food Chem.* 83: 219-225.

- Senouci A, Smith AC. 1988. An experimental study of food melt rheology., I. Shear viscosity using a slit die viscometer and a capillary rheometer. *Rheol. Acta.* 27: 546-554.
- Unlu E, Faller JF. 2002. RTD in twin-screw food extrusion. *J. Food Eng.* 53: 115-131.
- Willett JL, Millard MM, Jasberg BK. 1997. Extrusion of waxy maize starch - melt rheology and molecular-weight degradation of amylopectin. *Polymer* 38: 5983-5989.
- Yam, KL, Gogoi BK, Karwe MV, Wang SS. 1994. Shear conversion of corn meal by reverse screw elements during twin-screw extrusion at low temperatures. *J. Food Sci.* 59: 113-114.
- Yeh AI, Whang SJ. 1992. Effect of screw profile on extrusion-cooking of wheat flour by a twin-screw extruder. *Int. J. Food Sci. Technol.* 27: 557-563.
- Yuliani S, Torley PJ, Bruce D'Arcy B, Nicholson T, Bhandari B. 2006. Extrusion of mixtures of starch and d-limonene encapsulated with β -cyclodextrin: Flavour retention and physical properties. *Food Res. Int.* 39: 318-331.
- Zazueta-Morales J, Martinez-Bustos F, Jacobo-Valenzuela N, Ordorica-Falomir C, Paredes-Lopez O. 2002. Effects of calcium hydroxide and screw speed on physicochemical characteristics of extruded blue maize. *J. Food Sci.* 67: 3350-3358.
- Zheng X, Chiang WC, Wang SS. 1995. Effect of shear energy on size reduction of starch granules in extrusion. *Starch-Starke* 47: 146-151.