

## 이축 압출성형 공정에 의한 밀기울의 물리화학적 변형 I. 스크류의 조합과 공정변수 조절에 따른 시스템 변수의 변화

김종태 · 황재관 · 조성자 · 김철진 · 김해성\*  
한국식품개발연구원, \*명지대학교 화학공학과

### Modification of Physico-chemical Properties of Wheat Bran by Twin-screw Extrusion Process

#### I. Effect of Screw Configuration and Process Parameters on System Parameters

Chong-Tai Kim, Jae-Kwan Hwang, Sung-Ja Cho, Chul-Jin Kim and Hae-Sung Kim\*

*Korea Food Research Institute*

*\*Department of Chemical Engineering, Myongji University*

#### Abstract

System parameters (extrusion temperature, extrusion pressure, specific mechanical energy, mean residence time) were analysed on three different screw configurations during twin-screw extrusion of wheat bran. Experiments were conducted over a screw speed of 280~380 rpm, feed rate of 22~38 kg/hr and moisture content of 17~33% using screws assembled with 3, 4, and 5 reverse screw elements (RSE) adjacent to the heating zone of the barrel. Extrusion temperature increased with increasing RSE, but it decreased with increasing feed rate and moisture content. Decreasing the filling ratio of the screw resulted in a lower extrusion pressure, and increasing the length of the RSE gave similar results due to the higher temperature and lower viscosity of melted dough. It was also observed that increasing the feed rate and decreasing moisture content resulted in the reduced extrusion pressure. Specific mechanical energy (SME) decreased when the feed rate and moisture content increased, and SME increased when using RSE passes from 3 to 5. Screw configuration passes with 4 RSE yielded the longest RT, and the smaller the die hole, the higher the RT. In contrast, RT decreased when the feed rate increased. With increasing moisture content RT for 3 RSE increased, but that for 4 and 5 RSE decreased.

Key words: Twin-screw extrusion, wheat bran, system parameter, screw configuration

#### 서 론

이축 압출성형 장치(Twin-screw extruder)중 최근 식품공정에 많이 사용되고 있는 기종은 동방향 완전 맞물림형(corotating, self-wiping type)으로서, 선택적으로 인기가 있는 이유는 완전 맞물림 형태의 스크류가 큰 이송각(conveying angle)을 갖고 바렐 통로에서 물질의 적재가 일어나지 않게 하여 큰 밀립(surging)과 이송력(conveying action) 방해가 수반하여 다양한 형태의 식품원료 처리가 가능하기 때문인 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 또한 통로 깊이를 가로 지르는 일정한 전단속도, 일정한 온도분포와 체류시간의 용이한 조절 및 이송 스크류(conveying screw)와 혼합 스크류(reverse element or

kneading disks)를 다양한 형태로 조합하여 사용함으로써 스크류 통로에서 높은 혼합능력과 처리능력을 갖는다<sup>2)3)</sup>.

이와 같은 가공능력을 갖는 이축 압출성형 공정은 곡류와 곡류의 브랜, 전분 및 추출한 섬유소재를 사용하여 전분의 변형이나 식이섬유 소재 등의 기능 개선에 응용되어 널리 사용되고 있다. 보리의 압출성형 가공을 통하여 전분과 식이섬유의 변화 연구<sup>4)</sup>에서는 압출물의 생산 온도, 원료의 수분함량과 공급량 및 스크류의 회전속도 등 공정변수의 조합조건을 달리한 실험을 통하여 최종 압출제품에 있어서 식이섬유의 수용화가 일어나지 않았음을 보고하고 있고, Wang 등<sup>5)</sup>은 통밀과 밀기울을 비교적 격렬한 조건의 스크류 속도로 가공시 수용성 식이섬유의 함량 증가가 크게 일어남을 보고하여 최종 제품이 요구하는 품질기능을 갖게하기 위하여는 압출공정 변수의 적절한 조합범위가 설정되어야 하는 것으로 설명할 수 있다. 그리고 옥수수과 콩 섬유소 혼합원료의

Corresponding author: Chong-Tai Kim, Korea Food Research Institute, San 46-1, Baekhyun-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Kyonggi-do 463-420, Korea

압출성형시 스크류의 회전속도를 증가시킬 경우 압출물의 온도와 기계적 에너지 소모는 증가하나 압출시 압력은 감소함을 보고하고 있고<sup>6)</sup>, 옥수수에 모노아실글리세롤 유화제와 콩 섬유소를 첨가하여 압출성형시는 유화제에 의한 전분과의 불용성 착화합물 형성으로 인하여 모터의 토크, 기계적 에너지 소모율 및 반죽의 온도가 감소되었으나 압출압력은 증가한다고 하였다<sup>7)</sup>.

또한 사탕무 펄프, 섬유소 및 사탕무 섬유소와 옥수수의 혼합원료 압출성형시 섬유소 입자의 크기, 섬유소 첨가량 및 스크류의 회전속도에 따른 가공을 통하여 물리화학적 성질의 변화를 유도하였고, 식이섬유의 용해도가 되었음을 확인한 보고<sup>8) 10)</sup>도 있다. Artz 등<sup>11)</sup>은 옥수수 섬유소와 옥수수 전분의 혼합원료를 압출성형에 의하여 생산한 압출물의 특성을 반응표면 분석법에 의하여 해석한 결과를 통하여 압출온도를 90~150°C의 범위에서 가공하였을 경우, 압출온도가 높아지면 전분의 보수력은 증가하나, 섬유질의 보수력은 감소한다고 하였다. Edwards 등<sup>12)</sup>은 kneading disks의 조합을 달리한 3가지 스크류 조합에 의한 환공의 압출성형 실험에서 원료의 수분함량, 압출온도 및 기계적에너지 소모율 등의 변수와 압출물의 특성과의 관계를 보고하고 있다.

이처럼 다양한 원료에 대하여 효율적인 가공을 통하여 요구하고자 하는 가공 제품을 생산하는데 있어서는 압출성형 조절변수의 범위가 넓어지게 되며, 변수의 범위 설정이 가공정도 즉, 최종 제품의 특성을 좌우하기 때문에 압출성형중 변수의 변화를 예측하는 것은 대단히 중요하다. 특히 곡류나 브랜의 섬유질 성분은 셀룰로오

스가 주성분을 이루고 있어 압출성형 가공시 변형력에 강한 것으로 판단되며 곡류의 종류에 따라서도 다른 특성을 보인다.

따라서 본 연구에서는 밀기울을 전단력, 열 및 압력이 수반되는 압출성형 공정에 의한 밀기울 구성 성분의 변형을 유도하여 식품소재로의 개발을 위한 압출성형 공정의 연구를 실시하여 System analysis approach 방법<sup>13)</sup>으로 밀기울 압출물의 생산조건과 특성 변화를 관찰하였다. 본보에서는 제 1보로서 3가지 형태의 스크류 조합을 달리하여 밀기울을 압출성형함에 있어서 공정변수(스크류의 회전속도, 원료의 공급속도, 원료의 수분함량)에 따른 시스템 변수(압출온도, 압출압력, 기계적 에너지 소모율, 평균 체류시간)의 변화를 분석하여 보고 하는 바이다.

### 재료 및 방법

#### 재료

밀기울은 우리밀 가공공장(전남 무안)에서 수거한 것으로 -10°C 냉동창고에 저장하면서 실험에 사용하였으며, 밀기울의 일반성분은 수분 12.62%, 조지방 3.87%, 조단백질 16.55%, 회분 4.17%, 탄수화물 52.82% 및 Klason lignin 5.97%이었다.

#### 압출성형

본 연구에 사용한 압출성형기는 동방향 완전 맞물림형 이축압출성형기(Corotating, intermeshing type twin-sc-

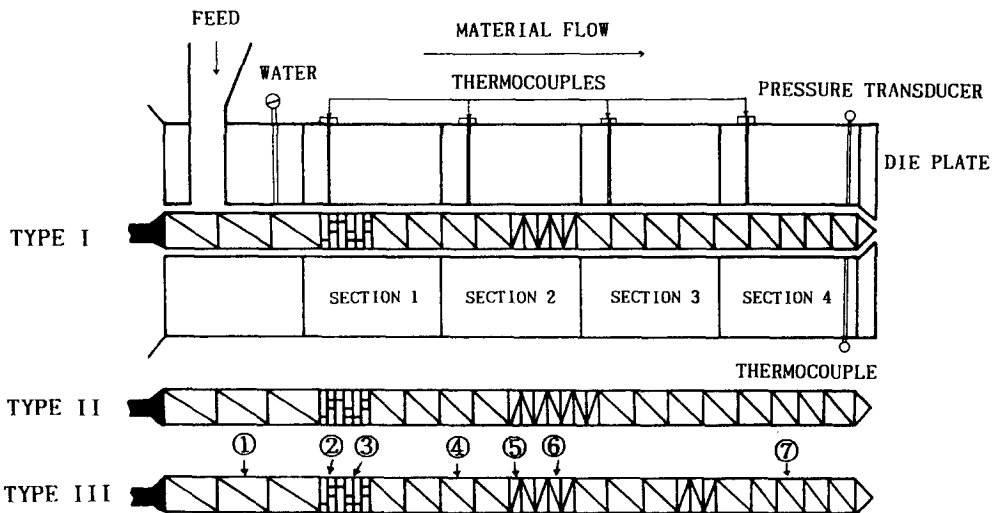


Fig. 1. Schematic diagram of the Bühler brothers DNDL-40 twin-screw extruder barrel sections and 3 different screw configurations

- ① Conveying screw element (44/27.2/66/66), ② Kneading disk element (right handed; 44/27.2/20/14.7), ③ Kneading disk element (left handed; 44/27.2/20/14.7), ④ Conveying screw element (44/27.2/44/44), ⑤ Reverse screw element (left handed; 44/27.2/33/33), ⑥ Reverse screw element (right handed; 44/27.2/33/33), ⑦ Conveying screw element (44/27.2/33/33), A/B/C/D: A=screw diameter; B=root diameter; C=length; D=pitch lead

**Table 1. Screw configurations and die holes used for wheat bran extrusion**

Experiment No.	Screw types	Die holes
1	Type I	φ 5 mm, orifice type
2	Type I	φ 3 mm, orifice type
3	Type II	φ 3 mm, orifice type
4	Type III	φ 3 mm, orifice type

rew extruder, Biex-DNDL 44, Bühler brothers Co., Swiss)로서 L/D의 비가 20 : 1이고 20 kw의 직류전동기로 구동되며, 바렐부분과 본 실험에 사용한 여러가지 형태의 스크류를 Fig. 1에 나타내었다. 원료의 투입은 분말원료용 용적식 투입장치인 K-tron L-10을 사용하였고, 원료에 가해지는 수분은 powered valve와 flow meter를 통하여 barrel내부로 주입하여 조절하였다. Barrel의 외부는 열매체 가열순환장치(Regloplas temperature control unit, 250KL, Swiss)를 사용하여 바렐 2, 3, 4구역의 온도를 180°C로 일정하게 유지하였다.

운전중의 스크류 회전속도, motor torque, 압출온도, 압출압력, 원료공급량, 가수량 및 기계적 에너지소모율 등의 자료는 LCD display panel에 표시됨과 동시에 interface를 이용하여 10초 간격으로 컴퓨터에 수록하였다.

실험에 사용한 스크류의 조합은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 바렐 2번 구역에서 3번 구역의 다이 출구 방향으로 reverse screw element(RSE)를 3개, 4개 및 5개 연결한 3가지 형태를 사용하였으며 우리밀 밀기울의 압출성형시 사용한 스크류의 조합과 die hole은 Table 1과 같다.

### 실험설계

예비실험을 통하여 압출물의 특성지표인 target parameters에 영향을 주는 압출성형 공정변수 즉, 스크류의 회전속도( $X_1$ ), 원료의 공급량( $X_2$ ) 및 원료반죽의 수분함량( $X_3$ ) 등 3개의 독립변수를 결정하였다. 최적화 실험은 3요소, 5수준의 central composite design<sup>(14)</sup>을 변형한 Cui 등<sup>(15)</sup>의 방법에 의하여 실시하였으며 종말값과 중앙값은 예비실험의 결과로 선정하였다. Table 2에 실험설계를 나타내었는데 독립변수의 코드화한 값의 범위는 -1.68(최저값), -1, 0(중앙값), +1 및 +1.68(최고값)이다.

완전한 실험설계는 중앙점에 대한 6번의 반복실험을 포함하여 20번의 실험값으로 구성되었으며 실험은 무작위 순서에 의하여 실시하였다.

### 통계처리

측정된 자료는 STATGRAPHICS<sup>(16)</sup> 프로그램을 사용하여 처리하였고, 다중회기 방식식에 의하여 독립변수(공정변수: 스크류의 회전속도, 원료의 공급량, 원료의 수분함량)의 변화에 따른 종속변수(압출온도, 압출압력, 기계적에너지 소모율, 평균 체류시간)간의 관계를 분석

**Table 2. Central composite design for wheat bran extrusion**

Treatment No.	Process variables <sup>1)</sup>			Coded value <sup>2)</sup>		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	360	35	20	+1	+1	-1
2	330	30	33	0	0	+1.68
3	330	38	25	0	+1.68	0
4	360	25	20	+1	-1	-1
5	330	30	25	0	0	0
6	330	30	25	0	0	0
7	380	30	25	+1.68	0	0
8	330	30	17	0	0	-1.68
9	330	22	25	0	-1.68	0
10	360	25	30	+1	-1	+1
11	330	30	25	0	0	0
12	330	30	25	0	0	0
13	300	25	20	-1	-1	-1
14	280	30	25	-1.68	0	0
15	300	35	30	-1	+1	+1
16	300	25	30	-1	-1	+1
17	330	30	25	0	0	0
18	330	30	25	0	0	0
19	360	35	30	+1	+1	+1
20	300	35	20	-1	+1	-1

<sup>1)</sup>Process variables:  $X_1$ =screw speed,  $X_2$ =feed rate,  $X_3$ =dough moisture

<sup>2)</sup>Coded value: corresponding value to process variables  
Actual value: screw speed(rpm)=330+(30× $x_1$ ), feed rate (kg/hr)=30+(5× $x_2$ ), dough moisture(%)=25+(5× $x_3$ )

하여 종속변수의 변화에 큰 영향을 끼치는 독립변수를 2차 다항식으로 표현하여 반응표면 및 contour plot 곡선을 구하였다.

### 평균 체류시간(Mean residence time)

압출물의 바렐내에서의 체류시간은 자극응답법(stimulus-response technique)<sup>(17)</sup>을 사용하여 구하였다. 평균 체류시간  $\bar{t}$ 는 다음식과 같이 정의되며 계산할 수 있다.

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} CE(t)dt}$$

여기서 C는 die 출구에서 압출물내에 포함되어 있는 염료의 농도이고 t는 체류시간이다.

자극응답법에 사용한 식용염료는 Blue No.1(#91080 03, 보락)으로 0.1g을 운전조건이 정상상태에 도달된 후 원료 투입구에 정확히 투입하고 투입한 순간부터 매 5초 간격으로 시료를 취하여 압출물이 푸른색을 띠지 않는 시점까지 시료 채취를 한 다음 분쇄하여 Colorimeter (CR-200, Minolta Co., Japan)로 황색도 b(yellowness) 값을 읽어 E(t) 곡선을 결정하였다.

결과 및 고찰

압출온도(EXT)의 변화

스크류의 조합이 각기 다른 4개의 실험에 대하여 스크류 회전속도와 원료공급량 및 원료반죽의 수분함량등 3개 공정변수가 시스템 변수인 압출온도에 미치는 영향을 유의성 5% 수준에서 선택적 다중회기 분석에 의하여 구한 함수식을 Table 3에 나타내었으며, 압출온도에 대한 다중회기 방정식의 상관계수는 0.82~0.96의 범위를 보였다. 공정변수(스크류의 회전속도, 원료의 공급량, 원료의 수분함량)의 조절에 따른 압출온도의 변화를 비교하기 위하여 회기방정식에 나타난 시스템 변수들의 상수(constant)의 값을 살펴보면 압출온도의 경우 동일한 RSE를 3개 조합하고 die hole를 5 mm와 3 mm 크기로 각각 사용한 실험 (1)과 (2)를 보면 die hole이 큰 실험 (1) 보다는 (2)가 큰 값을 보여 die hole의 크기가 작을수록 바렐내부에서 압출물이 큰 흐름방해를 받아서 압출온도의 상승에 영향을 끼침을 알 수 있었다. 또, 3 mm 크기의 동일한 die hole를 사용하고 RSE를 3, 4 및 5개 조합한 실험 (2), (3), (4)에 있어서는 RSE가 3개 사용된 실험 (2)가 RSE가 4개인 실험 (3)보다 높은 상수값을 보이고 있고, 실험 (4)가 가장 큰 상수를 나타내고 있다. 그러나 실측된 압출온도는 RSE를 조합한 갯수가 많은 실험순으로 높은 범위를 보이고 있기 때문에 실험 (2)와 (3)의 차이는 회기방정식을 통한 분산분석 과정에서 발생하는 오차로 설명할 수 있겠다. 또한 공정변수중 압출온도에 가장 큰 영향을 미치는 순서는 실험 (1)~(4)에 있어서 전반적으로 밀기울 원료의 수분함량, 원료의 공급량 및 스크류의 회전속도순으로 작용하고 있으며, 동일한 die hole을 사용한 실험 (2)~(4)에서는 RSE가 3, 4 및 5개로 증가될수록 압출온도에 대하여 원료의 수분함량이 작용하는 효과가 작아지는 결과로 미루어 볼때 사용한 RSE의

수가 많아 질수록 압출온도가 증가함을 알 수 있다.

원료의 공급량과 수분함량 변화에 따른 압출온도 변화를 반응표면 및 contour plot을 Fig.2에 나타내었다. 원료의 공급량과 원료에 가해지는 수분함량이 증가할수록 압출온도는 감소한 경향을 보이고 있는데 이러한 원인은 원료의 공급량과 수분함량이 증가됨으로서 스크류 회전에 의한 마찰과 외부에서 가해지는 열의 복합 작용에 의하여 밀기울이 함유하고 있는 전분의 호화와 섬유질 성분의 변형에 요구되는 충분한 열의 발생이 되지 않았기 때문에 일어난 결과라고 생각된다. 이와 유사한 결과로서 옥수수 분말의 압출가공시 섬유질의 첨가에 따른 압출온도의 변화를 관찰한 실험에서 섬유질의 첨가량이 증가할수록 압출온도가 감소함을 보고하고 있어<sup>17)</sup>, 물리적 변형력에 강한 구조를 갖는 섬유질의 압출가공시 물질의 충분한 용융이 일어나고 이에 따라서 점도가 감소하면서 압출온도가 증가한다는 결과가 제시되고 있다<sup>18)</sup>.

한편, Miller<sup>19)</sup>는 압출공정 변수와 시스템 변수간에 아주 다양한 상호작용을 설명하고 있는데, 먼저 바렐의 온도를 높일 경우 물질의 조리온도와 호화 및 구조변형에 증가하는 영향을 미치나, 압출압력이나 점도에 대하여는 감소효과로 작용하여 체류시간이 짧아진다고 하고 있다. 또 스크류의 회전속도가 증가하면 전단속도와 에너지의 증가효과로 작용하여 조리온도에는 감소효과를 보임으로서 압출압력이나 점도에 증가효과가 있으며, 체류시간과 조리시간에 감소효과를 보여 호화도가 낮아지는 관계를 설명하였다. 그리고 원료수분의 함량을 증가시키면 압출압력과 물질의 점도에 감소효과를 보이고, 외부가열이 요구되어 조리온도와 호화도에 감소효과를 보이며, 제품의 수분은 증가함을 보고하고 있다.

스크류의 조합에 따른 압출온도의 범위는 실험 (1)~(4)의 순서대로 살펴보면 160~193°C, 172~198°C, 173~

Table 3. Model equations fitted by selective multiple regression for system parameters of EXT<sup>1)</sup> and EXP<sup>2)</sup>

Dep. Var. <sup>3)</sup>	EXT				EXP			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Exp. No.								
Constant	171.657	192.218	188.7	196.422	21.689	43.3	35.55	36.816
X <sub>1</sub>	1.006	2.034	-	1.178	-0.879	-1.469	-3.011	-4.875
X <sub>2</sub>	-2.084	-2.281	-1.891	-1.911	1.302	5.074	4.799	3.233
X <sub>3</sub>	-8.68	-9.393	-8.117	-6.789	-3.289	-6.939	-5.543	-3.808
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	1.382	-0.98	-	-1.278	0.968	-	-	-2.58
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	-0.875	-	-2.125	-2.0	-	-	-	-2.375
X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub>	1.125	-	-	-	-	-	-	3.625
X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub>	-1.625	-	-	-	-	-	-2.125	-
R <sup>2</sup>	0.957	0.936	0.818	0.834	0.667	0.939	0.837	0.731

<sup>1)</sup>EXT: Extrusion temperature (°C)

<sup>2)</sup>EXP: Extrusion pressure (bar)

<sup>3)</sup>Dependent variables are noted as a coded values

X<sub>1</sub>=(Screw speed-330)/30, X<sub>2</sub>=(Feed rate-30)/5, X<sub>3</sub>=(Dough moisture-25)/5

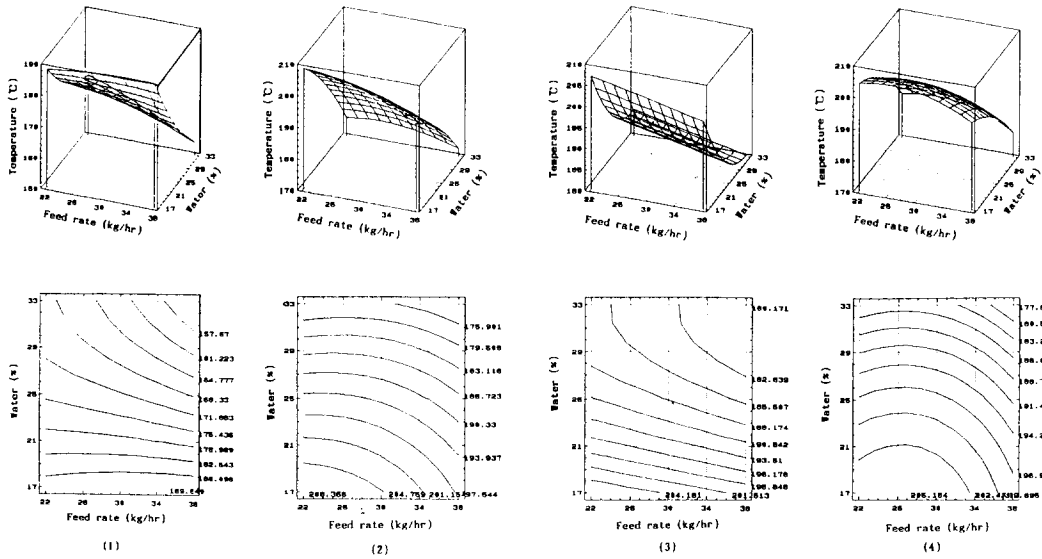


Fig. 2. Response surfaces and contour plots of feed rate and dough moisture content on the extrusion temperature for wheat bran extrusion

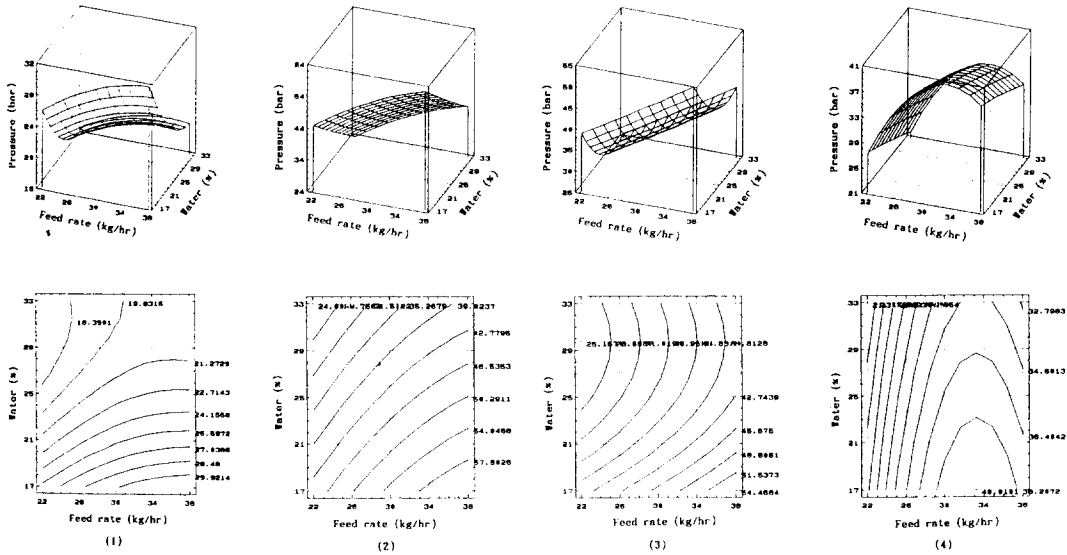


Fig. 3. Response surfaces and contour plots of feed rate and dough moisture content on the extrusion pressure for wheat bran extrusion

205°C, 184~207°C의 순으로 RSE가 증가함에 따라서 압출온도의 최소 또는 최대범위도 증가한 결과를 보였다. Edwards 등<sup>(12)</sup>도 이축압출성형기의 스크류 조합을 달리 하여 흰콩을 압출성형할 경우 RSE의 개수가 증가함에 따라서 압출온도와 기계적에너지 소모율이 전체적으로 증가함을 보고하고 있어 본 연구의 결과와 일치하고 있다.

압출압력(EXP)의 변화

스크류의 조합이 각기 다른 4개의 실험에 대하여 스크류 회전속도와 원료공급량 및 원료반죽의 수분함량등 3개 공정변수가 시스템 변수인 압출압력에 미치는 영향을 유의성 5% 수준에서 선택적 다중회기 분석에 의하여 구한 함수식을 Table 3에 나타내었다. 압출압력에 대한 다중회기 방정식의 상관계수는 0.67~0.94의 수준을 보

였는데, 압출압력도 die hole이나 RSE에 영향을 받는 것으로 나타났다. Table에서 알 수 있듯이 동일한 스크류의 조합으로 작은 die hole을 사용한 실험 (2)가 (1)보다 약 2배의 높은 상수를 보이고 있어 압출압력의 형성이 die hole에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 그리고 3 mm 크기의 동일한 die hole를 사용하고 RSE의 개수를 각기 달리한 실험 (2), (3), (4)의 경우를 살펴보면, 실험 (2)는 압출온도의 영향에서 볼 수 있는 바와 같이 (3)과 (4)에 비하여 RSE의 개수가 적음으로 인하여 체류시간이 짧고 반죽의 용융이 덜 진행됨으로서 발생 압력이 상대적으로 높아 큰 상수값을 보이고 있다. 실험 (4)의 경우는 5개의 RSE 조합을 3개와 2개씩 두 영역으로 조합하여 중간에 이송공간이 확보됨으로서 4개의 RSE를 사용한 경우보다 충전율이 증가하면서 압력 증가를 가져 오고, 생성된 수증기가 양쪽의 RSE에 의하여 일시적으로 정체되었다가 바レル의 출구로 이송되면서 압력 누출이 없이 발생한 압력이기 때문에 4개의 RSE가 연속적으로 연결된 경우보다 높은 값을 보인 것으로 생각된다. 그리고 압출압력에 영향을 미치는 공정변수는 압출온도에서와 마찬가지로 원료의 수분함량, 원료의 공급량 및 스크류의 회전속도 순이며, 압출압력에 작용하는 원료의 공급량과 수분의 함량은 RSE의 개수가 증가함에 따라서 감소하는 결과를 보인 것을 알 수 있다.

압출압력의 변화를 반응표면 및 contour plot으로 나타낸 Fig. 3을 보면 스크류 조합을 달리한 실험 (1)~(4)의 모든 경우에 있어서 원료의 공급량이 증가하고 원료반죽의 수분함량이 감소할수록 압출압력이 증가한 결과를 보이고 있다. 원료 공급량의 증가에 따른 압출압력의 증가는 바レル내에서의 원료 충전율과 반죽물질의 형성이 커짐으로서 일어나며<sup>(18)</sup>, 원료수분의 함량 증가에 따른 압출압력 감소는 혼합부에서 반죽의 점도가 작아짐으로서 상대적으로 마찰 에너지가 낮게 소모되어 물질의

점도가 감소됨으로서 오는 결과<sup>(19)</sup>로 설명된다. 압출압력의 변화는 실험 (1), (2), (3) 및 (4)의 순대로 17~33 bar, 29~59 bar, 24~54 bar, 17~53 bar의 범위를 보여 RSE의 조합이나 die hole이 압출온도와 압출압력에 영향을 끼침을 알 수 있었다.

압출성형중 온도와 압력과의 관계에 대해서는 많은 보고가 있는데 Colonna 등<sup>(20)</sup>은 RSE 영역에서 전분질의 변형은 전단력, 열 및 압력의 복합작용에 의하여 이루어진다고 하였으며 RSE의 수가 증가할수록 바レル내에서 스크류에 의한 물질의 충전율이 증가된다고 하였다. 그리고 바レル 내료물질의 충전율이 감소하면 압출압력도 감소한다는 결과<sup>(20,21)</sup>로 미루어 볼때 앞에서 서술한 실험 (1)과 (2)는 사용한 RSE의 수는 동일하지만 die opening의 차이로 충전율이 감소하여 낮은 압출압력을 보인 것을 알 수 있다. 또 실험 (3)과 (4)는 RSE의 개수가 많음으로서 충전율이 큼에도 불구하고 실험 (2)보다 낮은 압력 범위를 보인 것은 스크류의 회전속도나 RSE의 영향으로 물질이 용융되는 부근에서 온도가 상승하거나 물질의 붕괴에 이은 점도가 떨어짐으로서 압출압력은 감소하게 된다고 보고<sup>(9,10)</sup>와 일치하는 결과이다.

기계적에너지 소모율(Specific mechanical energy; SME)

Table 4에 스크류 회전속도, 원료공급량 및 수분함량 변화가 기계적에너지 소모율에 미치는 영향을 다중회기 분산 분석하여 나타내었으며, 기계적에너지 소모율에 대한 다중회기 방정식의 상관계수는 스크류의 조합에 따른 실험 (1)~(4)에 있어서 0.74~0.96의 수준을 보였다. 시스템 변수의 값인 상수의 변화를 살펴 보면 RSE의 개수가 3~5개로 증가할수록 상수도 증가하여 SME가 많이 소요됨을 알 수 있었으며, die의 크기가 다른 실험 (1)과 (2)의 비교에 있어서도 die의 크기가 작은 실험 (2)

Table 4. Model equation fitted by selective multiple regression for system parameters of SME<sup>1)</sup> and RT<sup>2)</sup>

Dep. Var. <sup>3)</sup>	SME				RT			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Exp. No.								
Constant	207.32	233.883	245.15	262.398	26.055	30.39	31.447	32.560
X <sub>1</sub>	5.787	8.241	10.096	4.614	-0.947	-0.206	-0.893	-1.298
X <sub>2</sub>	-8.211	-	-	-2.715	-2.132	-1.606	-2.15	-1.739
X <sub>3</sub>	-11.279	-14.907	-27.761	-20.661	-1.033	-0.037	-0.716	-0.32
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-	-	12.016	-	-0.537	0.886	0.407	0.256
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	-	-6.718	-	-5.127	0.154	-	-	-
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	-9.925	-	-	-	-0.338	-0.125	0.675	-
X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub>	-	-	-	2.25	-	-	-	-
X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub>	-	-4.375	-17	-7.5	-	-	-	-
R <sup>2</sup>	0.735	0.809	0.693	0.957	0.657	0.88	0.831	0.884

<sup>1)</sup>SME: Specific mechanical energy (kwh/ton)

<sup>2)</sup>RT: Mean residence time (sec)

<sup>3)</sup>Dependent variables are noted as a coded values X<sub>1</sub>=(Screw speed - 330)/30, X<sub>2</sub>=(Feed rate - 30)/5, X<sub>3</sub>=(Dough moisture - 25)/5

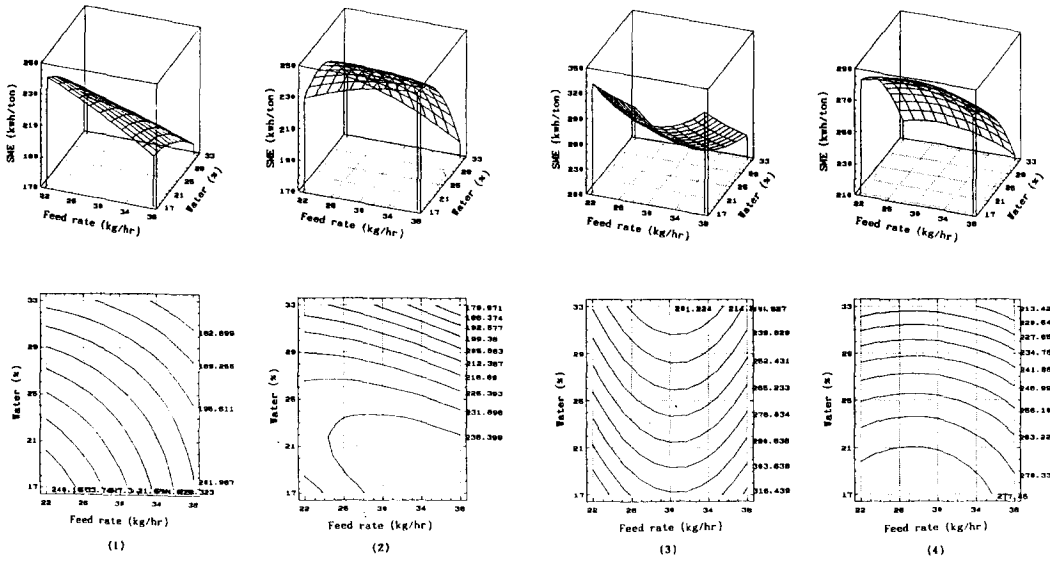


Fig. 4. Response surfaces and contour plots of feed rate and dough moisture content on the specific mechanical energy for wheat bran extrusion

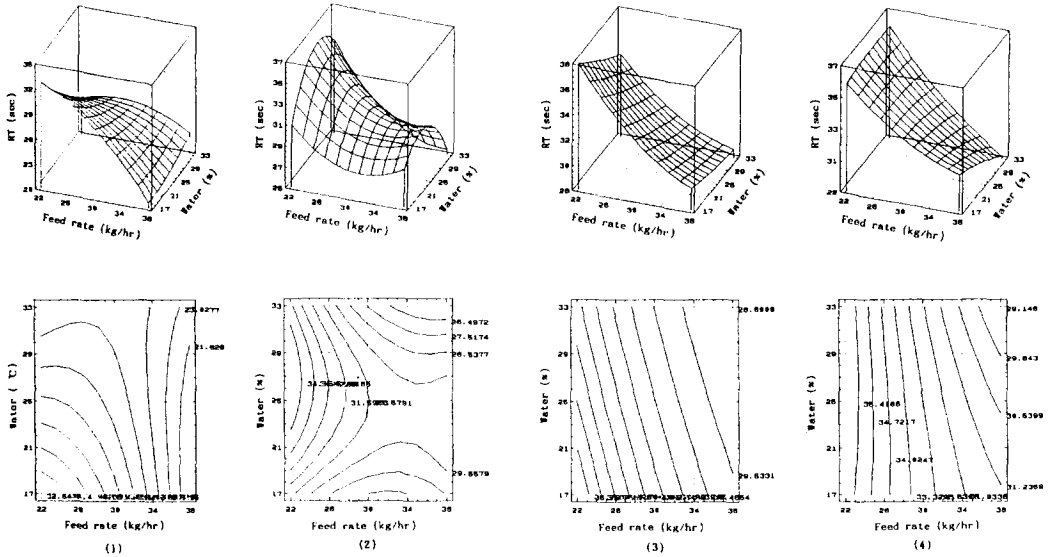


Fig. 5. Response surfaces and contour plots of feed rate and dough moisture content on the residence time distribution for wheat bran extrusion

의 경우가 큰 상수값을 보여 높은 SME를 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 RSE의 조합이 다른 실험 (2)~(4)에 있어서 SME에 크게 영향을 미치는 공정변수는 원료의 수분함량과 스크류의 회전속도였으며, 특히 실험 (3)의 경우는 4개의 RSE를 연속적으로 배열함으로써 큰 전단력이 발생할 수 있는 스크류 조합을 갖기 때문에 실험 (2)와 (4)에 비하여 두가지 공정변수가 가장 크게 작용한

결과를 보여 주고 있다. 일반적으로 RSE의 수가 증가 하게 되면 SME는 증가하며 이에 따른 체류시간도 증가하여 물질변형에 중요한 작용을 하는 것으로 보고되고 있다<sup>(20,24)</sup>.

Fig. 4에 원료의 공급량과 원료반죽의 수분함량 변화에 따른 SME의 변화를 반응표면 및 contour plot을 나타 내었는데 원료공급량과 가해 주는 수분함량을 증가시킬

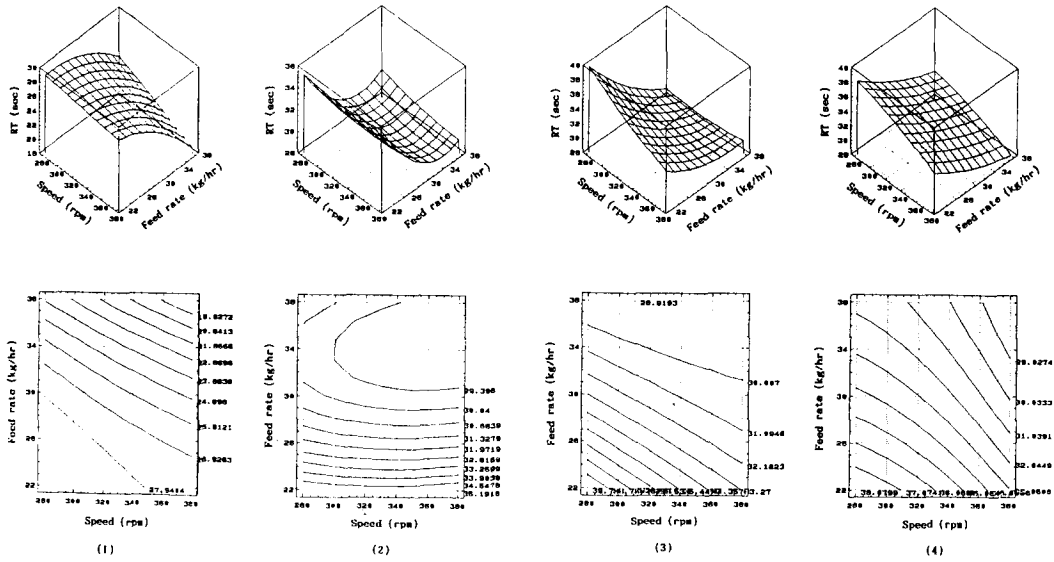


Fig. 6. Response surfaces and contour plots of screw speed and feed rate on the residence time distribution for wheat bran extrusion

수록 SME는 감소하였다. 그리고 실험 (1)~(4)의 SME 변화를 보면 185~256 kwh/ton, 185~250 kwh/ton, 207~321 kwh/ton 및 225~286 kwh/ton의 범위를 보여 곡류나 전분의 압출성형시 소요되는 SME 보다는 높은 범위를 보였다. 일반적으로 이축압출성형 공정에 소요되는 기계적에너지의 소모는 50~400 kwh/ton의 범위를 보이는데 생산제품, 사용 기기의 용량 및 측정 기술 등에 좌우된다고 한다<sup>(23, 25)</sup>.

Chang과 Halek<sup>(26)</sup>는 기계적에너지 소모율에 크게 작용하는 변수는 스크류의 속도, 바렐의 온도, 원료반죽의 수분함량이며 바렐의 온도가 낮을 경우 압출물의 온도가 낮아지고, 기계적에너지는 높은 값을 보인다고 보고하였다. 본 실험에서는 바렐의 온도를 180°C로 가열하여 온도는 높게 유지되었음에도 불구하고 높은 기계적에너지의 소모를 보인 것은 밀기울의 구성성분이 주로 섬유질로 이루어져 있고 일부 전분질을 포함하고 있기 때문에 곡류나 전분질의 변형에 소요되는 SME보다 더 큰 에너지가 소모된 것으로 예측된다.

김 등<sup>(27)</sup>은 옥수수 그리츠를 이축 압출성형에 의하여 스크류 조합에 따른 SME 변화를 관측하였는데 결과에 의하면 SME의 변화는 67~163 kwh/ton의 범위를 보였고 원료공급량과 스크류의 회전속도를 증가시킬수록 SME가 증가한다고 하였다.

평균체류시간(Mean residence time; RT)

스크류의 회전속도, 원료의 공급속도 및 원료반죽의 수분함량 변화가 물질의 바렐내 체류시간에 미치는 영향을 다중회기분산 분석하여 결과를 Table 4에 나타내

었는데, 체류시간에 대한 다중회기 방정식의 상관계수는 실험 (1)~(4)에 있어서 0.66~0.88의 수준을 보였다. RSE의 수가 3개, 4개 및 5개 조합하여 실시한 실험 (2), (3), (4)에 있어서 RSE가 3개에서 5개로 증가될수록 상수값이 약간씩 증가한 경향을 보여 RSE에 의한 물질 흐름의 방해가 이루어져서 물질의 체류시간이 길어짐을 알 수 있었고, 동일한 갯수의 RSE를 3개 조합하고 die hole의 크기를 달리한 실험 (1)과 (2)의 경우는 실험 (2)가 큰 상수값을 보여 die hole이 작을수록 바렐내에서 물질의 이송방해과 혼합으로 인하여 체류시간에 길어짐을 보여주었다. 그리고 실험된 평균 체류시간을 살펴보면 18~34.2 sec, 26.1~34.6 sec, 28~37.7 sec 및 23.4~36.2 sec의 범위로, RSE의 조합을 4개로 하여 실시한 실험 (3)의 평균 체류시간이 최소 또는 최대에 있어서 제일 높은 시간을 나타내고 있어, RSE를 연속적으로 4개 조합한 경우가 5개의 RSE를 3개와 2개씩 분리하여 조합한 경우보다 체류시간에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

원료의 공급량과 원료반죽의 수분함량 변화에 따른 RT를 반응표면 및 contour plot 하여 Fig.5에 나타내었다. 실험 (1), (2), (3) 및 (4) 모두 원료의 공급량이 증가함에 따라서 RT는 감소하였다. 그러나 실험 (1)과 (2)의 경우 원료반죽에 가해지는 수분함량이 증가함에 따라서 약간씩 RT가 증가한 결과를 보였고 실험 (3)과 (4)의 경우는 수분이 증가함에 따라서 RT가 약간씩 감소한 경향을 보였다. 이러한 결과는 원료에 가해지는 수분함량이 RT에 미치는 영향은 크지 않다는 결과<sup>(28)</sup>와는 일치하나 곡류 혼합원료와 밀전분 등의 압출성형시 원료수분이 RT를 증가시킨다는 보고<sup>(29,30)</sup>와는 상반된



결과로서 밀기울의 주성분이 셀룰로오스로 구성되어 있는 것을 고려할때 전분질이 주성분인 원료와는 다른 수분흡수 특성을 보여 발생하는 결과라고 예측되며, 원료 구성물질과 가수량에 따른 체류시간 변화에 대한 좀더 세밀한 보충연구가 요구된다. 또한 Gogoi와 Yam<sup>(31)</sup>에 의하면 옥수수가루의 압출성형시 스크류의 회전속도의 증가와 원료투입량의 감소가 RT 증가에 크게 영향을 미치며, 수분함량을 20%에서 30%로 증가시킬 경우 RT가 약 47% 정도 증가하고 압출온도나 압력은 큰 효과가 없음을 보고하고 있다.

한편, 스크류의 회전속도와 원료의 공급량에 따른 RT 변화를 Fig. 6에 나타내었는데 실험 (1)의 경우는 원료의 공급량이 작은 범위에서는 스크류의 회전속도가 RT 변화에 큰 영향을 주지 않았고, 원료의 공급량이 많은 조건에서는 스크류의 회전속도가 증가할수록 RT가 감소하는 현상을 알 수 있었다. 실험 (2)는 원료의 공급량의 범위에 큰 상관없이 스크류의 회전속도 변화는 RT의 변화에 영향을 주지 않았고, 원료의 공급량이 감소할수록 RT가 증가하는 경향을 보였다. 그러나, RSE가 4개 및 5개 조합한 실험 (3)과 (4)에 있어서는 스크류의 회전속도를 증가시키고 원료공급량을 감소함에 따라서 RT가 증가하였는데 이러한 사실은 Altomare와 Ghossi<sup>(28)</sup>의 연구 및 Kao와 Allison<sup>(32)</sup>의 보고와 일치하는 결과를 보여 RSE의 갯수를 증가시킬 경우 바렐내에서의 원료의 충전율은 증가하지만 원료 공급량의 감소에 따른 원료 이송율의 감소가 RT를 더욱 감소시키는 원인으로 작용한 것으로 생각된다.

## 요 약

밀기울의 물리화학적 변형을 유도하기 위하여 3가지 형태의 스크류 조합을 달리한 이축 압출성형 가공시 수반되는 시스템 변수(압출온도, 압출압력, 기계적에너지 소모율, 평균 체류시간)의 변화를 분석하였다. 스크류는 reverse screw element(RSE)를 바렐의 중앙부에 3, 4 및 5개를 조합한 형태를 사용하여 스크류의 회전속도 280~380 rpm, 원료의 공급속도 22~38 kg/hr, 원료의 수분함량 17~33%의 범위에서 압출성형을 실시하였다. 압출온도는 RSE의 갯수가 증가할수록 상승하였고, 원료의 공급량과 수분함량이 증가할수록 감소하였다. 압출압력은 원료의 충전율이 감소하면 낮아졌으며, RSE가 많을수록 압출온도가 상승함으로써 용융물질의 점도가 떨어져 압력이 감소하였다. 또 원료의 공급량이 증가하고 원료의 수분함량이 낮을수록 압출압력이 감소하였다. 기계적에너지 소모율(specific mechanical energy;SME)은 원료의 공급량과 수분함량이 증가할수록 감소하였으며, RSE의 갯수를 3개에서 5개로 조합하여 사용함에 따라서 SME가 증가하였다. 평균체류시간(RT)은 RSE를 4개 조합한 경우가 가장 길었고, die hole의 크기가 작을수록 RT도 증가하였다. 원료의 공급량이 증가함에

따라서 RT는 감소하였으며, 원료의 수분함량이 증가될수록 RSE가 3개인 경우에는 RT가 증가하였고 4개 및 5개인 경우는 감소하였다.

## 문 헌

- Janssen, L.P.B.M.: Engineering aspects of food extrusion. In *Extrusion cooking*, Mercier, C. and Linko, P. (ed.), American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, p.17 (1989)
- Harper, J.M.: *Extrusion of foods*, vol. I and II, CRC press, Boca Raton, FL. (1981)
- Lin, J.K. and Armstrong, D.J.: Process variables affecting residence time distribution of cereals in an intermeshing, counter-rotating twin-screw extruder. *Trans. ASAE* **33**, 1971 (1990)
- østergard, K., Björck, I. and Vainionpää, J.: Effects of extrusion cooking on starch and dietary fibre in barley. *Food Chemistry*, **34**, 215 (1989)
- Wang, W.M., Klopfenstein, C.F. and Ponte, J.G.: Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chem.*, **70**, 707 (1993)
- Jin, Z., Hsieh, F. and Huff, H.E.: Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt, and sugar. *Cereal Chem.*, **71**, 227 (1994)
- Hu, L., Hsieh, F. and Huff, H.E.: Corn meal extrusion with emulsifier and soybean fiber. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **26**, 544 (1993)
- Ralet, M.C., Thibault, J.F. and Della Valle, G.: Solubilization of sugar-beet pulp cell wall polysaccharides by extrusion-cooking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **24**, 107 (1988)
- Lue, S., Hsieh, F. and Huff, H.E.: Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber : Effect of expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. *Cereal Chem.*, **68**, 227 (1991)
- Hsieh, F., Huff, H.E., Lue, S. and Stringer, L.: Twin-screw extrusion of sugar beet and corn meal. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **24**, 495 (1991)
- Artz, W.E., Warren, C. and Villota, R.: Twin-screw extrusion modification of a corn fiber and corn starch extruded blend. *J. Food Sci.*, **55**, 746 (1990)
- Edwards, R.H., Becker, R., Mossman, A.P., Gray, G.M. and Whitehand, L.C.: Twin-screw extrusion cooking of small white beans (*Phaseolus vulgaris*). *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **27**, 472 (1994)
- Meuser, F. and Wiedmann, W.: Extrusion plant. In *Extrusion cooking*, Mercier, C. and Linko, P.(ed.), American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, p.91 (1989)
- Haaland, P.D.: *Experimental design in biotechnology*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, p.243 (1989)
- Cui, W., Mazza, G., Oomah, B.D. and Biliaderis, C.G.: Optimization of an aqueous extraction for flaxseed gum by response surface methodology. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, **27**, 472 (1994)

16. Statistical Graphics Corporation: Statgraphics, Statistical Graphics System, STSC Inc., USA (1987)
17. Levenspiel, O.: *Chemical Reaction Engineering*, Wiley, New York (1972)
18. Harper, J.M., Rodest, T.P. and Wanniger, L.A.: Viscosity model for cooked cereal doughs. *Am. Inst. Chem. Eng. Sym. Series*, 67(108), 40 (1971)
19. Miller, R.C.: Unit operation and equipment. IV. Extrusion and extruders. In *Breakfast cereals and how they are made*. Fast, R.B. and Caldwell, E.F.(ed.), AACC, Inc., St. Paul, Minnesota, USA, pp.185-189 (1990)
20. Colonna, P., Melcion, J.P., Vergene, B. and Mercier, C.: Flow, mixing and residence time distribution of maize starch within a twin-screw extruder with a longitudinally-split barrel. *J. Cereal Sci.*, 1, 115 (1983)
21. Fletcher, S.L., Richmond, P. and Smith, A.C.: An experimental study of twin-screw extrusion-cooking of maize grits. *J. Food Eng.*, 4, 291 (1985)
22. Anderson, Y., Hedlund, B., Jonsson, L. and Svensson, S.: Extrusion cooking of high-fiber cereal product with crispbread character. *Cereal Chem.*, 58, 370 (1981)
23. Meuser, F. and Van Lengerich, B.: System analytical model for the extrusion of starches. In *Thermal processing and quality of foods*. Zeuthen, P. and Cheftel, I.C.(ed.), Elsevier, London (1984)
24. Meuser, F. and Van Lengerich, B.: Possibilities of quality optimization of industrially extruded flat breads. In *Thermal processing and quality of foods*. Zeuthen, P. and Cheftel, I.C.(ed.), Elsevier, London (1984)
25. Senouchi, A. and Smith, A.C.: The extrusion-cooking of potato starch material. *Starch*, 38, 78 (1986)
26. Chang, K.L.B. and Halek, G.W.: Analysis of shear and thermal history during co-rotating twin-screw extrusion. *J. Food Sci.*, 56, 518 (1991)
27. Kim, J.Y., Kim, C.T. and Kim, C.J.: Effect of system parameters on the target parameters in extrusion cooking of corn grit by twin-screw extruder. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 23, 88 (1991)
28. Altomare, R.E. and Ghossi, P.: An analysis of residence time distribution patterns in a twin screw cooking extruder. *Biotechnology progress*, 2, 157 (1986)
29. Meuser, F., Pfaller, W. and van Lengerich, B.: Technological aspects regarding specific changes to the characteristic properties of extrudates by HTST-extrusion cooking. In *Extrusion technology for the food industry*. Connor, C.O'(ed.), Elsevier Applied Science, New York, pp.35-53 (1987)
30. Jager, T., van Zuilichem, D.J., Stolp, W. and van't Riet, K.: Residence time distribution on extrusion cooking. Part V: The compression zone of a conical counter-rotating twin-screw extruder. *J. Food Eng.*, 9, 203 (1989)
31. Gogoi, B.K. and Yam, K.L.: Relationship between residence time and process variables in a corotating twin-screw extruder. *J. Food Eng.*, 21, 177 (1994)
32. Kao, S.V. and Allison, G.R.: Residence time distribution in a twin-screw extruder. *Polym. Eng. Sci.*, 24, 645 (1984)

---

(1995년 3월 9일 접수)