

옥분 압출가공시 이축압출성형기의 운전조건에 따른 System Parameters의 변화

김지용 · 김종태 · 김철진

한국식품개발연구원

Effect of Process Variables on System Parameters in Extrusion Cooking of Corn Grit by Twin Screw Extruder

Ji-Yong Kim, Chong-Tai Kim and Chul-Jin Kim

Korea Food Research Institute

Abstract

To examine the effect of the individual operational variables on extrusion process, test trials of the fractional factorial design of the three process variables at three levels, including feed rate, screw speed and die openings, were carried out by using a laboratory scale twin-screw extruder with three different screw configuration for corn grit with the water addition fixed at 15% of the powder feed rate. As the increase of feed rate, while extrusion temperature(ET), specific mechanical energy input (SME), and residence time(RT) were showed the tendency to decrease, extrusion pressure(EP) was increased and as the increase of screw speed, ET, SME and EP were showed the tendency to increase, but RT was decreased. However, as increase the number of die hole, all system parameters were showed the tendency to decrease. The influence of the change in each process parameters was increased as the increase of the number of reverse element in screw configuration. In case of using the screw configuration with increasing number of reverse element at the condition of same process parameters, ET, SME and RT was increased, but EP was decreased. The functional relationships of the system parameters to the process parameters can be quantified by using multiple regression equations(mostly $R\text{-sq}>0.90$) and mapped on surface response diagrams to expedite evaluation.

Key words : twin-screw extruder, system analysis, corn grit, process parameter, system parameter

서 론

식품의 extrusion cooking 기술은 적당한 수분함량을 갖는 천연 고분자 화합물을 extruder 내부에서 shearing 및 가열함으로써 cooking과 성형이 동시에 이루어지게 하는 기술로서 식품산업 분야에서 다양하게 이용되고 있다. 특히 twin-screw extruder는 두 screw의 intermeshing에 의한 강력한 이송능력과 혼합능력을 이룰 수 있고 아울러 barrel 외부 가열장치를 이용한 온도조절이 용이하여, single screw extruder와 비교할 때, 식품원료의 수분함량 또는 구성성분에 관계없이 폭 넓은 식품원료의 가공조리에 이용할 수 있는 장점이 있다⁽¹⁾.

그러나 실제 twin-screw extruder는 한정된 제품생산에만 이용되고 있는데, 이는 extrusion 작동을 충분히 이해하고 파악하기가 쉽지 않아서 다양한 제품생산에 활용되기 어렵기 때문이다⁽²⁾. 실제로 extrusion 작동을 이해하기 위하여, extruder 내부의 가능 조건들을 물리적

법칙으로 예측 계산하고, 이 예측된 열역학적 및 기계적 처리조건에 따라 투입원료의 특성 변화를 연역적으로 추측할 수 있는 공학적 model을 여러 연구자가 제시하고 있다^(3~6). 그러나, 이러한 model들은 특수한 경우만을 고려한 유속, shear rate, 체류시간 등을 계산할 수 있을 뿐만 아니라, screw간의 마찰 및 물질흐름을 전체 extruder 내부의 현상으로 간주하는 전제하에 계산식을 도출하였기 때문에 die 구조가 큰 영향을 미치는 전반적인 산업적 규모의 extrusion 공정을 해석하기에는 많은 문제점을 내포하고 있다. 한편 Meuser⁽⁸⁾ 등은 extrusion 제품의 특성과 process variables 등과의 관계를 직접 통계분석을 통하여 얻은 함수식으로 나타내는 black-box modeling 방법을 통하여, 비록 실험한 범위내에 한정되지만, extrusion 조건에 따른 제품의 특성변화를 예측할 수 있다고 발표하였다. 즉, extrusion process를 분석하는 방법으로, 기계적 조작을 통해서 조절통제가 가능한 1차적 독립변수인 process parameters(수분 투입량, 분체투입량, 스크류 회전속도, 다이구멍 갯수, 스크류조합, 바렐길이, 바렐 가열온도)의 변화에 따라서 extruder의 현상적인 system parameters(압출온도, 압출압력, 기계

Corresponding author : Chul-Jin kim, Food Biochemistry Lab., Korea Food Reserach Institute, 39-1 Hawolgok, Sungbuk, Seoul 136-130, Korea

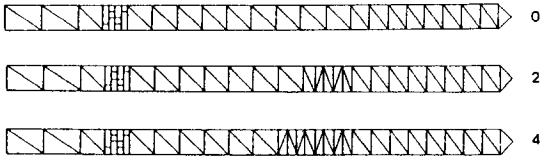


Fig. 1. Screw configuration

- (0) conveying element, (2) reverse element 2
- (3) reverse element 4

적 에너지 소모율, 체류시간 등)가 변하면서 동시에 extrudate 특성인 target parameters(수용성 지수, 수분흡착지수, 성형물의 수분함량, 조직감 특성 등)가 결정된다. 이러한 system parameters 변화에 따른 process parameters의 변화와 이 때의 압출물의 특성인 target parameters에 대한 system parameters의 영향을 고찰하여 이들 parameter간의 함수관계를 분석하여, 제품의 특성 변화를 예측하는 기법을 System Analysis Approach 방법⁽⁹⁾이라 한다.

본 실험에서는 corn grit을 원료로 하여 extrusion cooking할 때 process parameters로서 원료 투입량, 스크류 회전속도 및 die hole 수를 변화시켜, 이 때 extrusion cooking 현상으로 나타나는 system parameters로서 압출온도, 기계적에너지 소모율(SME), 체류시간, 압출압력을 측정하여, 실험결과를 다중회기 분산분석을 반응표면 diagram⁽¹¹⁾으로 나타내는 extrusion cooking 공정 변수를 분석하는 것을 목적으로 하였다.

재료 및 방법

재료

두산곡산(주)의 제품인 corn grit(bulk density 0.827 g/cc, 수분함량 9.8 w.b.)을 사용하였다.

사용 extruder 및 운전 방법

본 실험에 사용한 extruder는 Bühler Brothers Co. (스위스)의 lab. scale corotating, intermeshing screw 형태의 twin-screw extruder이다. 체원은 L/D ratio 20, screw 직경 44 mm이며, 원료 투입장치는 분말원료를 위한 용적식 투입장치인 K-Tron Hopper를 사용하였다. 가수량은 corn grit 투입량의 15 비율로 feed barrel로 직접 주입하였다. 운전 중 스크류 회전속도, 원료 투입량, 가수량, 압출온도 및 압력, 스크류 torque 등을 자동으로 매 10초마다 측정기록하는 control unit가 설치되어 있으며, 수집된 자료를 이용하여 SME를 산출하고 그래프로 나타낼 수 있는 프로그램이 내장된 computer에 의하여 기록되었다. Screw configuration은 conveying element(lead 1.5D, 66R)×2, conveying element(lead 1.0 D, 44R)×1, polygon L(length 20 mm), polygon R, conveying element(lead 1.0D, 44R)×9, conveying element

Table 1. Block experimental design for extruder performance test

Experiment number	Coded variables ^{a)}			Process variables		
	x1	x2	x3	X1	X2	X3
1	1	0	1	60	200	6
2	0	1	1	45	300	6
3	0	-1	1	45	200	6
4	-1	0	1	30	300	6
5	1	1	0	60	400	4
6	1	-1	0	60	200	4
7	-1	1	0	30	400	4
8	-1	-1	0	30	200	4
9	0	0	0	45	300	4
10	0	0	0	45	300	4
11	1	0	-1	60	300	2
12	0	1	-1	45	400	2
13	0	-1	-1	45	200	2
14	-1	1	-1	30	400	2

^{a)}X1 is mass feed rate, X2 is screw speed, X3 is no. of die hole, x1~x3 are the corresponding coded value.

Actual value : Feed rate(kg/hr) = 45 + (15×x1)
 Screw speed(rpm) = 300 + (100×x2)
 No. of die hole(e.a.) = 4 + (2×x3)

(lead 0.75D, 33R)×8, 및 top의 순서로 조립을 하였으며, 또한 필요에 따라 conveying element(lead 1.0D, 44/3R)와 reverse element(lead 1.0D, 44/3L)를 90도 각도로 연결하고 사이에 1 mm 두께의 insert ring을 넣어서 reverse element 2개 또는 4개를 사용한 조합을 행하여 Fig.1에 나타낸 것과 같은 형태를 갖는 3가지 screw 조합으로 실험을 행하였으며, 이 때 모든 조합의 압축비는 2:1이다.

실험 design

원료 투입량(30~60 kg/hr), 스크류 회전속도(200~300 rpm), die hole(orifice type dia. 3 mm×length 9 mm)의 갯수(2~6개)의 3가지 process parameters를 변화시켜 각 스크류 조합에서 3×3 fractional factorial design에 의한 실험계획은 Table 1에 나타낸 것과 같으며, extruder 작동 중 바렐의 외부가열 및 냉각은 행하지 않았다.

체류시간(RT) 측정

기계적 평형에 도달한 후 erythrosine(red color no.5) 0.1g을 feed barrel에 투입하고 시간을 측정하면서 적색이 완전히 사라질 때까지 연속적으로 압출물을 취한 후, 일정 길이마다 10 cm씩 취하여 건조분쇄한 후 Hunter colorimeter로 색도를 측정하여 redness를 시간에 따라 plotting하여 체류시간 분포⁽¹²⁾를 구하였고, 평균 체류시

간은 redness 값이 가장 높게 나타나는 시간으로 하였다.

결과 및 고찰

System parameters에 대한 process parameters의 영향

System parameters 중 extruder 조업 중 비교적 쉽게 측정할 수 있고, 생산된 extrudate의 특성에 큰 영향을 주는 압출온도에 대한 process parameters 중 스크류 회전속도 및 die hole 수의 변화의 영향을 표시하는 3차원 표면반응 및 contour diagram를 그림 2에 나타내었다. 스크류 회전속도 증가 및 die hole 수 감소에 따라 압출온도가 증가하는 경향을 나타내었다. 그림 2의 반응표면 diagram에서 아래 쪽 평면은 die 출구에서 15 cm 후방의 metering zone에서의 압출물의 온도변화를 표시한다. 그림에서 알 수 있듯이 이곳의 온도는 die end에서의 압출온도와는 달리 die hole수가 4개인 경우가 2 또는 6개인 경우보다 높은 온도를 나타내고 있으며, 이러한 현상은 reverse element 수가 증가할 수록 감소하여 reverse element 수가 4개인 경우 이러한 굴곡점이 없어졌을 뿐만 아니라 die hole수 변화에 따른 압출온도 및 metering zone의 온도에 대한 영향이 거의 나타나지 않았다. 이는 Tayeb 등⁽⁷⁾이 reverse element 물질흐름 방해물 극복하기 위해서는 높은 압력구배를 필요로 하며 충분한 압력형성을 위해서 압력형성부분 바

로 전 conveying element의 통로에 압출물이 적체하며, 이 적체된 압출물은 많은 전단을 받아 열발생이 크고 온도가 상승된 압출물의 점도가 낮아지게 되어, die 출구에서의 흐름방해를 적게 받아 die hole 수의 변화에 따른 영향이 상대적으로 작게 된다고 보고한 결과와 일치하는 결과를 보였다.

기계적 에너지 소모율(SME)에 대한 원료투입량 및 스크류 회전속도 변화의 영향을 그림 3에 3차 반응표면 및 contour diagram으로 나타내었다. SME는 원료투입량이 증가할 수록 감소하고, 스크류 회전속도가 증가할 수록 증가하는 경향이 뚜렷하였다. 그러나, reverse element 수가 증가할 수록 투입량 증가에 따른 SME 감소율이 감소하는 반면, 회전속도 증가에 따른 SME 증가율은 반대로 증가하는 경향을 나타내었다.

압출압력에 대한 원료 투입량 및 die hole 수 변화의 영향은 그림 4에 나타난 것과 같았다. 압출압력은 원료 투입량이 증가할 수록 증가하고, die hole 수가 증가할 수록 감소할 것으로 예측되었으나, die hole 수가 4개인 경우 압출압력의 최저값을 나타내었다. 이는 압출온도의 상승에 의한 점도강하의 영향으로 일부 설명될 수 있겠으나 보다 상세한 분석연구가 필요한 것으로 생각된다. 실제로 그림 4에 나타난 것과 같이 reverse element가 증가하면 같은 조건하에서 온도상승의 영향으로 전반적인 압출압력이 감소되었다.

평균체류시간(RT)에 대한 스크류 회전속도 및 원료

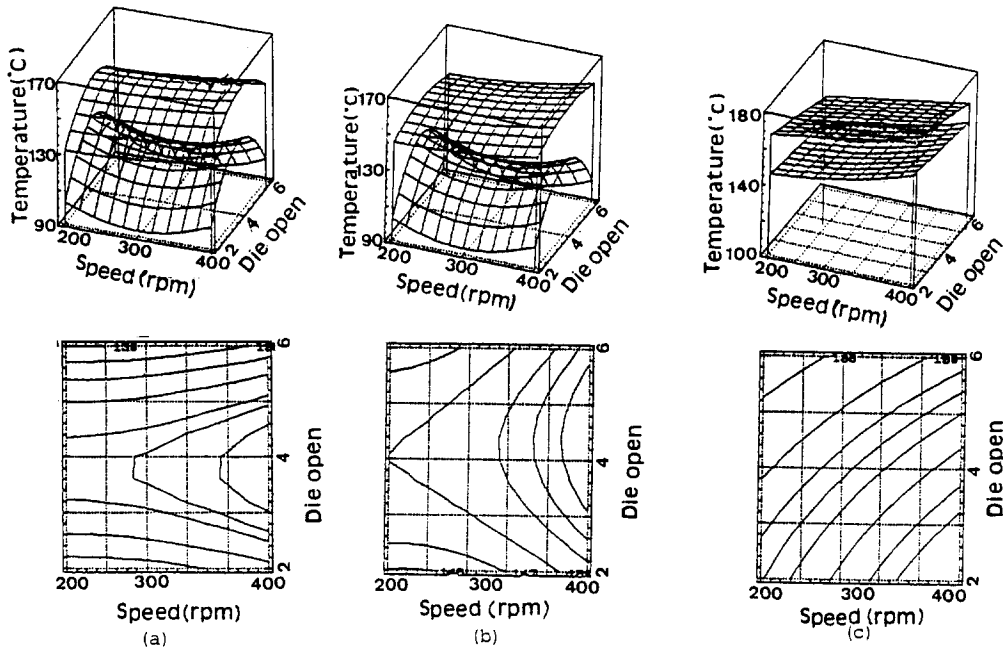


Fig. 2. Effects of screw speeds and die openings on the extrusion temperatures with various screw configurations

(a) conveying element, (b) reverse element 2, (c) reverse element 4

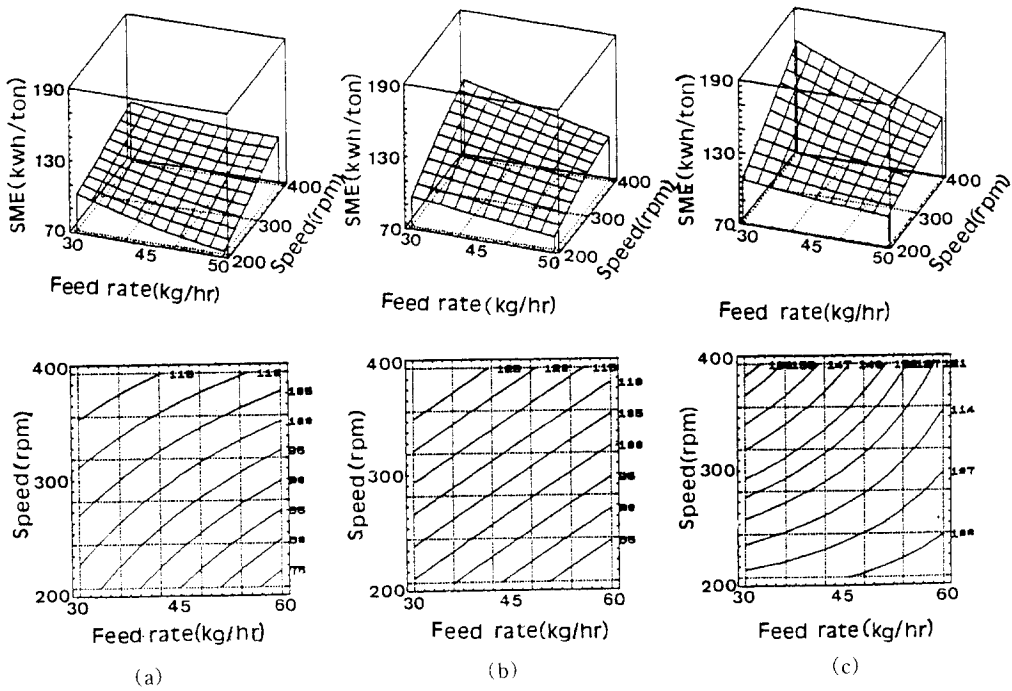


Fig. 3. Effects of feed rates and screw speeds on the specific mechanical energy(SME) with various screw configurations

(a) conveying element, (b) reverse element 2, (c) reverse element 4

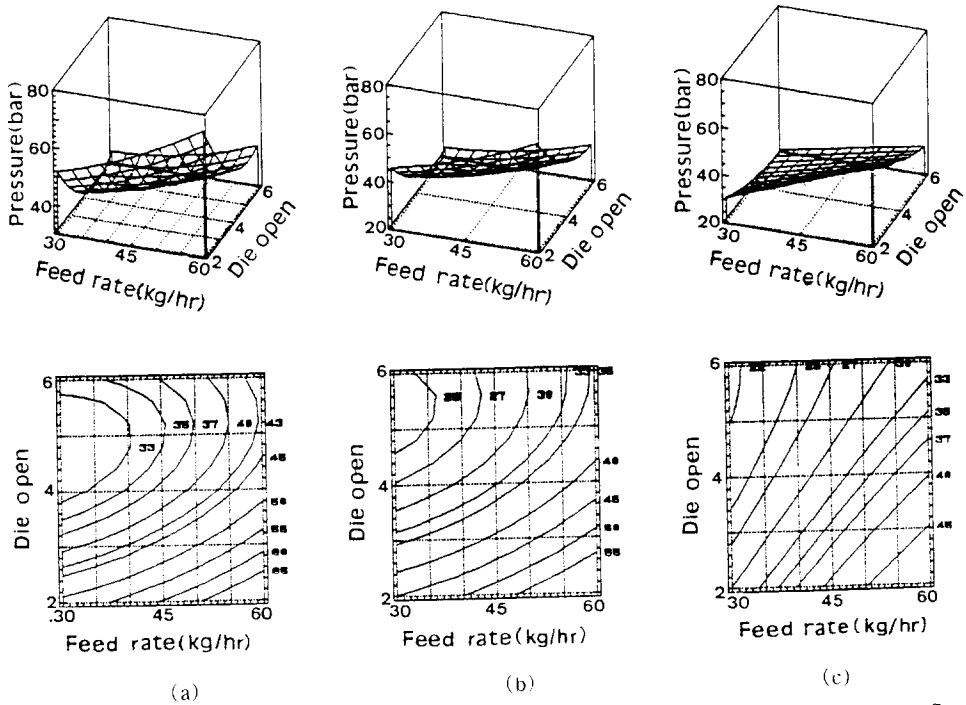


Fig. 4. Effects of feed rates and die openings on the extrusion pressures with various screw configurations

(a) conveying element, (b) reverse element 2, (c) reverse element 4

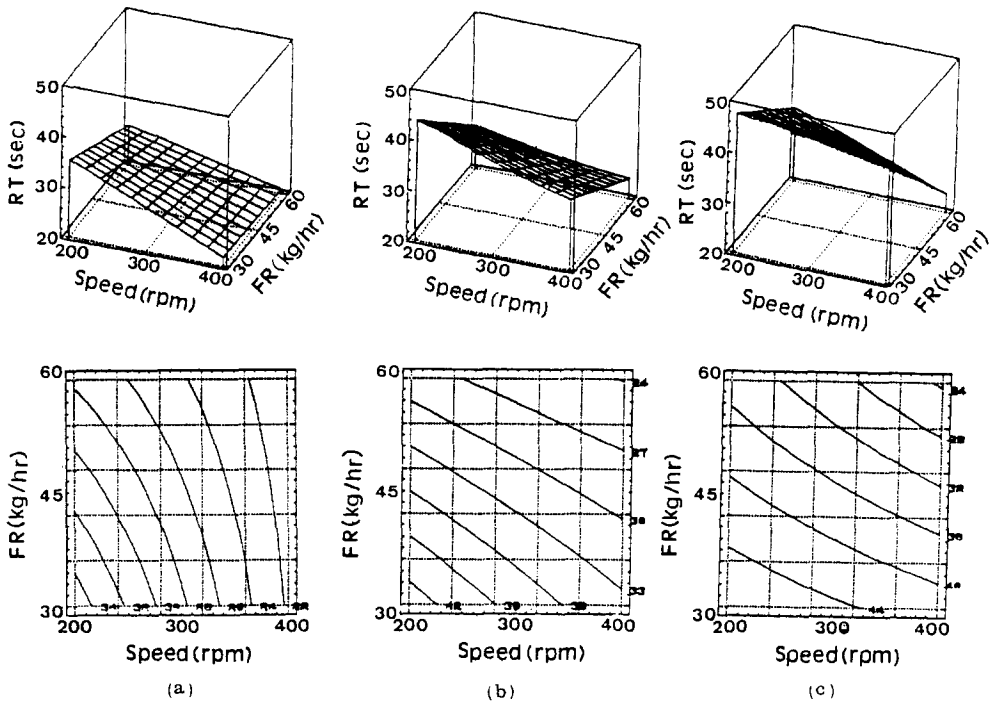


Fig. 5. Effects of screw speeds and feed rates on the residence times with various screw configurations (a) conveying element, (b) reverse element 2, (c) reverse element 4

Table 2. Model equations fitted by selective multiple regression for system variables

Dep. Var. ^{a)}	Extrusion Temp.(°C)			SME (kwh/ton)		
Configuration	0	2	4	0	2	4
Constant	154.3	157.7	165.3	102.7	105.7	117.6
x1	-2.440	-1.479	-3.958	-9.130	-10.27	-13.42
x2	3.089	4.438	6.029	14.99	17.84	20.08
x3	-3.190	-3.896	-8.208	-2.880	-1.895	-5.044
x1 ²	-0.7656	-	2.691	-	-	-1.648
x2 ²	1.035	1.728	-	-	-	-0.0214
x3 ²	-17.77	-4.942	-	-5.787	-	3.898
x1 * x2	0.8203	0.8731	-	-	-	-7.668
x1 * x3	-0.6211	-	-	-4.740	-10.46	-3.912
x2 * x3	-0.1797	1.123	-	3.027	-	-1.918
R-sq.	0.9387	0.9047	0.8840	0.8161	0.7869	0.9588

^{a)}Dependent variables are same as in the coded values in Table 1.

투입량 변화의 영향은 그림 5에 나타난 것과 같다. 스크류 회전속도 및 원료 투입량이 증가할 수록 RT는 감소하는 경향을 보였으나, reverse element가 없는 스크류 조합을 사용한 경우 원료 투입량의 영향이 아주 작고 스크류 회전속도 영향이 큰 반면에, reverse element수가 4개인 경우 원료 투입량의 영향이 크고 스크류 회전속도의 영향이 감소한 결과를 보였다. 이는 twin-screw extruder는 일반적으로 conveying element chan-

nel 용적의 10~20% 가량만이 투입 반죽 물질로 충전된 상태에서 운전되고 있어 conveying element만의 스크류 조합을 사용할 경우 원료 투입량의 증가는 충전율의 증가를 수반하여 RT에의 영향은 미미한 반면에, reverse element와 연결된 conveying element의 1~2개 channel 충전율은 1.0에 이르므로⁽¹⁴⁾ 같은 투입량의 조건하에서는 reverse element 수가 많은 스크류 조합을 사용한 경우 평균체류시간은 증가하며, 이 때 스크류 회전수 영향은

Table 3. Model equations fitted by selective multiple regression for system variables

Dep. Var. ^{a)}	Residence time(sec)			Ext. pressure(bar)		
	0	2	4	0	2	4
Configuration						
Constant	40.10	45.40	48.36	38.16	32.52	31.32
x1	-6.299	-8.648	-10.71	6.343	7.146	7.686
x2	-5.969	-3.930	-5.073	-8.205	-6.527	-5.160
x3	-2.424	-0.2554	-2.139	-13.28	-12.98	-5.160
x1 ²	1.223	0.6591	3.577	4.742	2.475	0.7343
x2 ²	-4.624	0.9127	-0.1559	-2.982	-	-0.2148
x3 ²	-4.497	-0.5659	2.522	12.49	8.225	2.734
x1 * x2	2.530	1.673	0.9657	-1.090	-2.696	-3.180
x1 * x3	6.084	-2.147	1.073	0.5644	-	-1.871
x2 * x3	7.010	1.583	0.6457	3.160	-	1.320
R-sq.	0.9454	0.9372	0.9845	0.9373	0.9285	0.9141

^{a)}Dependent variables are same as in the coded values in Table 1.

감소하고, 원료투입량의 영향은 증가하게 된다고 보고한 Kao⁽¹³⁾와 Altomare⁽¹²⁾의 결과와 잘 일치하였다.

System parameters에 대한 함수식

각 system parameters에 대한 process parameters 영향을 정량화하고 예측을 위해 각 system parameters에 대한 전체 3개 process parameters의 영향을 다중 회기분산분석 방법을 사용하여 구한 함수식은 표 2 및 3에 표시한 것과 같다. 각 표에서 상수값(Constant)은 각 process parameters의 중간 level 즉, 원료 투입량 45 kg/hr, 스크류 회전속도 300 rpm 및 die hole 수 4개 조건에서 각 system parameters의 값을 나타낸다. 이들 값에서 알 수 있듯이 압출온도, SME 및 RT는 reverse element 수가 증가할 수록 증가하는 경향을 보였고, 압출압력은 감소하는 경향을 보였다. 한편, process parameters 중 원료 투입량의 증가는 압출온도, SME 및 RT를 감소시켰고, 압출압력은 증가시켰으며, 또한 스크류 회전속도의 증가는 압출온도, SME 및 압출압력을 증가시켰고, RT는 감소시켰으며, die hole 수의 증가는 모든 system parameters의 값을 감소시키는 결과를 나타내었다. 그리고, 각 process parameters의 system parameters에 대한 영향은 reverse element의 수가 증가할 수록 크게 나타났다.

요 약

15% 비율로 가수한 corn grit 원료를 reverse element 수를 달리한 스크류 조합을 사용한 실험실용 동방향 회전 이축 압출성형기로 extrusion cooking할 때, 각 스크류 조합에서 원료 투입량(30~60 kg/hr), 스크류 회전속도(200~400 rpm) 및 die hole 수(2~4개) 등의 process parameters 변화에 대한 system parameters(압출온도 및 압력, 기계적 에너지 소모율 및 평균체류시간)의 변화 양상을 다중회기분산 분석을 통하여 분석하였다.

원료 투입량이 증가할 수록, 압출온도, 기계적 에너지 소모율 및 평균체류시간이 감소하는 경향을 보인 반면에 압출압력은 증가하였다. 그리고, 스크류 회전속도가 증가할 수록, 압출온도, 기계적 에너지 소모율 및 압출압력이 증가하는 경향을 보였으나, 평균체류시간은 감소하였다. 그러나 die hole 수가 증가할 수록, 측정된 4가지 system parameters는 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 reverse element의 수를 증가시킨 스크류 조합을 사용한 경우에 더욱 뚜렷이 나타나는 결과를 보여 주었다. 이상의 결과를 각 스크류 조합에서 각각의 system parameters와 process parameters를 독립변수로 하는 함수식으로 나타낼 수 있었고, 이 때 각 함수식의 상관관계는 0.90 이상 이었다.

문 헌

1. Van Zuilichem, D.J., Ablas, B., Reinders, P.M. and Stolp, W.: A comparative study of the operational characteristics of single and twin screw extruder. In *Thermal Processing and Quality of Foods*, Zeuthen, P. et. al.(ed), Elsevier Applied Science Publ., London, p. 155(1984)
2. 권태환, 이철호, 김철진, 이현유, 김동철, 한억, 김영호, 이상효, 류기형: 한국형 twin-screw extruder의 개발 및 보급에 관한 연구. 식품 extrusion 관련기술의 국내업체 현황조사. 한국식품개발연구원 보고서 E 3032-0027, (1989)
3. Harmann, D.V. and Harper, J.M.: Modeling a forming extruder. *J. Food Sci.*, **39**, 1099(1974)
4. Bruin, S., Van Zuilichem D.J. and Stolp, W.: A review of fundamental and engineering aspects of extrusion of biopolymers in a single screw extruder. *J. Food Proc. Eng.*, **2**, 1(1978)
5. Pisipati, R. and Friche, A.L.: Computer simulation of a single screw extruder. In *Food Process Engineering*. Linko, P. (ed), Applied Science Publ., London, Vol. 1, p. 757(1980)

6. Yacu, W.A. : Modeling a twin-screw co-rotating extruder. *J. Food Eng.*, 4, 1(1985)
7. Tayeb, J., Vergenes, B. and Della Valle, G. : A basic model for twin-screw extruder. *J. Food Sci.*, 53, 1047 (1988)
8. 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, J.C.(ed), Elsevier Applied Science Publ., London, p. 175 (1984)
9. 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)
10. Harper, J.M. : Extrusion Measurements and experimentation. In *Extrusion of food*, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, Vol. 1, p. 107(1981)
11. Henika, R.G. : Simple and effective system for use with response surface methodology. *Cereal Sci. Today*, 17, 10(1972)
12. Altomare, R.E. and Ghossi, P. : An analysis of residence time distribution patterns in a twin-screw cooking extruder. *Biotech. Progress*, 2, 3(1986)
13. Kao, S.V. and Allison, G.R. : Residence time distribution in a twin-screw extruder. *Polymer Eng. Sci.*, 24, 9(1984)
14. Wiedmann, W. and Strobel, E. : Processing and Economic advantages of extrusion cooking in comparison with conventional in the food industry. In *Extrusion Technology for the Food Industry*, O' Connor, C.(ed.), Elsevier Applied Science Publ., London, p. 132(1987)

(1990년 10월 22일 접수)