

옥분 압출가공시 이축압출성형기의 System Parameters에 따른 압출물의 특성변화

김지용 · 김종태 · 김철진

한국식품개발연구원

Effect of System Parameters on Target 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 analyze the effects of the system parameters on the target parameters, which include the amount of water evaporation, water solubility index(WSI) and water absorption index(WAI), test trials of fractional factorial design of the three process variables at three levels were carried out for corn grit with a laboratory twin-screw extruder with three different screw configurations. The system parameters collected from the trials, such as extrusion temperature, specific mechanical energy input(SME) and mean residence time(RT), were showed the ranges of 129~182°C, 67~163 kwh/ton and 12~34 sec, respectively. Within these ranges of the system parameters, the target parameters were able to be quantified by using multiple regression equations. The correlation of results with the system parameters blocked by the screw configuration as dependent variables, yield correlation coefficients above 0.90, and the correlation using the system parameters obtained from whole experiment system as the dependent variables yield correlation coefficients around 0.80. The functional relationship, which can be quantified by second order polynomial regression equation with only two system parameters within necessary degree of accuracy, can be graphed in three dimensional surface response and contour diagrams.

Key words : target parameter, surface response, twin-screw extruder, corn grit, system parameter

서 론

최근 식품공업에서 extrusion-cooking 공정을 사용한 제품개발이 활발히 진행되고 있으며, extruder의 다양한 기능이 문헌상으로 많이 발표되고 있고, 여러 단위공정을 복합한 기존의 제조공정을 extrusion-cooking 공정으로 대체할 때, 에너지 절약, 생산성 향상 및 제품품질 향상 등 여러 이점이 소개되고 있다¹⁾.

국내 식품업계에서도 extrusion-cooking 공정의 관련 기술에 많은 관심을 나타내고 있으며, 실제로 한정된 제품의 생산에 extrusion cooking 공정을 이용하고 있다. 그러나, 고가의 extruder 장비를 도입할 때 기계제작 업체가 제공한 응용기술을 이용하는 수준을 벗어나지 못하여, extruder의 다양한 기능을 충분히 활용치 못하고 있는 실정이다²⁾.

Extruder의 다양한 기능을 충분히 활용하기 위해, ext-

ruion 중 내부에서 일어나는 열역학적 및 기계적인 현상을 파악하고, 이 현상을 바탕으로 제품의 특성변화를 예측할 수 있는 여러 가지 실험 model이 소개되고 있으며, 크게 나누어 두 가지의 접근방법이 문헌상에 소개되고 있다.

그 하나는 extruder 내부의 물질흐름 및 shearing 현상을 스크류와 스크류 사이의 물질흐름 방해가 존재하는 연속적 통로를 투입 원료반죽이 통과할 때 일어나는 현상을 물리학적으로 분석하고 thermomechanical history를 예측하여, 투입 원료물질의 특성변화를 예측하는 기법으로 plastic extruder 등에서 널리 사용되어 실제 산업공정에 이용하고 있으나³⁾, 식품공업에서는 원료 구성성분의 다양성 및 열 및 진단에 의한 물성변화가 복잡하여 아직 시도 단계에 있다⁴⁾.

다른 한 분석기법은 extruder 내부의 현상을 계측할 수 있는 변수 즉, 압출온도 및 압력과 기계적 에너지 소비율과 체류시간 등 system parameters로 나타내고, 이 system parameters의 변화에 따른 제품특성 변화를 통계분석에 의한 회귀식으로 나타내어 process parameters(원료물성, 스크류회전속도, 원료투입량, 바렐가열온

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

도, 스크류조합 등)의 조절 및 선택에 따른 system parameters의 변화를 관찰함으로써, 제품의 특성(target parameters)을 조절 및 예측할 수 있는 방법으로 이를 System Analysis Approach 방법이라 한다⁽⁶⁾. 이 방법은 process parameters의 조절범위 내에서만 유효하며, extruder의 기종 및 scale이 달라지면 전혀 유효하지 못하다는 단점이 지적되고⁽⁵⁾ 있는 반면에, scale이 다른 extruder를 사용하여 전분을 extrusion cooking하였을 때, system parameters에 따른 전분 압출물의 이화학적 특성은 거의 비슷한 양상을 보였다는 보고도 있다⁽⁷⁾. 본 실험에서는 System Analysis Approach 방법에 의하여 extrusion cooking 공정을 분석하는 실험의 일환으로, 스크류조합을 달리한 실험실적 규모의 twin-screw extruder를 사용하여 일정 수분함량을 갖는 corn grit을, process parameters의 범위를 일반적으로 산업계에서 사용하는 전체 범위로 하여, extrusion cooking할 때 측정된 system parameters의 변화에 따른 target parameters의 변화양상을 유의성이 있는 회귀함수식으로 나타낼 수 있는 가능성을 발견하였기에 보고하는 바이다. 앞으로 scale이 다른 extruder를 사용하여 이 기법을 통하여 분석한 연구 결과를 계속 수행할 예정이다.

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 운전방법

전보⁽⁸⁾와 동일한 extruder를 같은 운전방법으로 조업하였으며, 스크류조합도 동일한 3조합 즉, conveying elements(압축비 3:1)만 사용한 조합, reverse element를 2개 및 4개 사용한 3종류를 사용하여, process parameters의 범위는 원료투입량 30~60 kg/hr, 스크류 회전속도 200~400 rpm 및 수 2~6개 범위에서 변화시킨 조건에서 extrusion cooking할 때 system parameters(압출온도 및 압력, 평균체류시간, 기계적 에너지소모율)를 측정 기록하였고, 각 조건에서의 압출물을 target parameters 측정용 시료로 채취하였다.

압출물의 분석방법

수분흡수지수(WAI)는 건조 압출물 0.6g을 마쇄하여 25℃ 증류수에 1시간 동안 용해한 후, 3,000×g의 원심력으로 10분간 원심분리하여 침전물을 평량하고, 이 침전물을 진공건조기(50℃)에서 건조한 후 평량하여, 건조시료 g당 흡수된 수분량으로 표시하였다⁽⁹⁾.

수분용해도지수(WSI)는 상기 WAI 측정시 회수한 상등액을 증발접시에 옮긴 후, 건조시켜 얻어진 고형분의 무게를 건조시료에 대한 백분율로 나타내었다⁽⁹⁾.

통계처리 방법

Statcal Graphic Corporation의 통계프로그램인 STA-TGRAPHIC⁽¹⁰⁾을 사용하여, 각 처리조건에서 측정된 system parameters 중 압출온도, 기계적 에너지 소모율 및 평균체류시간을 각각 $x_1 = (\text{Ext. Tem}-155)/25$, $x_2 = (\text{SME}-110)/50$ 및 $x_3 = (\text{RT}-20)/10$ 의 식에 의하여 code화한 값을 독립변수로 하여, 대응하는 각 target parameter, 즉 WAI, WSI 및 수분증발량을 종속변수로한 다중회귀식 및 각 target parameter에 대한 가장 큰 영향을 미치는 2개의 독립변수를 2차 반응표면 polynomial 식에 의하여 3차 표면반응 및 contour diagram을 구하였다.

결과 및 고찰

측정된 system parameters의 범위

Extruder 운전 전 또는 운전 중 조절가능한 변수인 process parameters, 즉 원료투입량, 스크류 회전속도 및 die hole 갯수를 각각 30~60 kg/hr, 200~400 rpm, 및 2~6개의 범위에서 15% 수분을 첨가한 corn grit를 원료로 하여 extrusion cooking할 때 측정된 각 system parameters의 값은 표 1에 나타낸것과 같이, 일반적으로 extrusion 공정에서 사용되고 있는 전 범위의 값을 보였고, 스크류조합에 reverse element의 수가 증가할 수록

Table 1. Range and mean value of the system parameters obtained from the various operation conditions^{a)}

System parameters ^{b)} Screw config.		Range	Mean± s.d.
Ext. temp (°C)	0	129~157	144.6± 10.1
	2	145~161	151.1± 4.8
	4	151~182	165.5± 9.5
	total	129~182	153.7± 12.0
SME (Kwh/ton)	0	67~120	100.2± 16.1
	2	81~150	107.0± 19.5
	4	94~163	122.9± 13.4
	total	67~163	109.6± 20.7
RT (sec)	0	12~25	18.1± 4.0
	2	15~30	21.1± 4.4
	4	16~34	22.9± 6.5
	total	13~34	21.2± 5.1

^{a)}The operation conditions are the ranges of process parameters, 30~60 kg/hr for feed rate, 200~300 rpm for screw speed and 2~6 e.a. for number of die openings with the screw configuration having 0) ; only conveying elements, 2) ; two reverse elements and 4) ; four reverse elements at metering zone.

^{b)}Ext. Temp., SME and RT are extrusion temperature at die end, specific mechanical energy input and mean residence time, respectively.

Table 2. Model equations fitted by selective multiple regression for target parameters blocked by different screw configurations

Dep. Var. ^{b)}	DWC ^{a)}			WSI ^{a)}			WAI ^{a)}		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4
Config. ^{c)}	0	2	4	0	2	4	0	2	4
Constant	10.10	11.10	13.26	25.1	30.1	32.2	6.93	7.27	7.16
x1	-5.51	-	-	-	-	22.6	0.654	-	-
x2	1.87	2.43	1.31	21.4	9.20	7.98	-	2.04	3.14
x3	-	-3.35	-	-	-	-	-	1.03	1.33
x1 ²	-16.8	-	6.23	-	-52.3	-29.3	-	-3.25	-
x2 ²	-5.55	-	5.22	15.8	-	-	-4.65	.501	-.917
x3 ²	3.73	2.93	-	-7.26	-	6.02	-2.55	.855	.799
x1 * x2	17.0	5.15	-9.49	-	31.6	27.3	-	-	-
x1 * x3	2.77	-4.11	-	-3.28	-26.7	-4.61	-5.29	1.28	-2.23
x2 * x3	-	-	-	-	24.8	-	-	-	-
R-sq.	.9164	.8131	.9525	.9015	.8714	.9844	.9170	.9413	.9542

^{a)}Target parameters are amount of water evaporation(DWC g water/g solid), water solubility index(WSI) and water absorption index(WAI).

^{b)}System parameters were coded by using equations, x1=(Ext. Temp.-155)/25, x2=(SEM-110)/50 and x3=(RT-20)/10.

^{c)}Screw configurations are 0 ; only conveying elements, 2 ; two reverse elements and 4 ; four reverse elements at metering zone.

높은 값을 나타내는 경향을 보였다.

Target parameters에 대한 system parameters의 model식

각 스크류조합에 따라 구획된 target parameters를 종속변수로하고, 2차 polynomial 식에 의한 0.05의 유의성 범위내의 선택적 다중 회귀분산 분석에 의하여 결정된 각 model식을 표 2, 그리고 스크류조합과 관계없이 측정된 모든 target parameters를 종속변수로하여 결정된 model식을 표 3에 나타내었다. 스크류조합에 따라 구획한 target parameters를 종속변수로한 경우 extrudate의 특성 중 수분 증발량, 수분용해도 지수 및 수분 흡착 지수를 extruder 운전 중 extruder내에서 일어나는 현상 즉, 압출온도, 기계적 에너지 소모율 및 평균 체류시간 등 system parameter를 독립변수로하는 상관계수가 0.90 이상인 다중회귀식으로 나타낼 수 있었고(표 2), 스크류조합을 구분하지 않은 경우는 상관관계가 0.80으로 낮아졌다(표 3). 결론적으로 extrudate의 특성은 extruder의 기종에 상관없이 system parameters의 변화로부터 예측이 가능하나, extruder의 기종 및 스크류의 종류가 바뀔 경우 그 예측의 정확도는 약간 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

수분 증발량

수분 증발량은 표 2에서 보듯이, 스크류조합에 따라 독립변수 중 크게 영향을 미치는 독립변수가 변화됨을 보였으나, 공통적으로 압출온도 및 기계적에너지 소모율의 상호작용에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, extrusion-cooking시 반죽에 함유된 수분은 extruder

Table 3. Model equations fitted by selective multiple regression for target parameters of whole system

Dep. Var. ^{b)}	DWC ^{a)}	WSI ^{a)}	WAI ^{a)}
Constant	12.1	29.4	7.15
x1	4.30	10.2	-
x2	1.20	10.8	3.13
x3	0.964	4.86	1.67
x1 ²	-0.550	8.19	-
x2 ²	-	-	-1.03
x3 ²	-	-	-0.319
x1 * x2	-	-	-
x1 * x3	-1.07	3.10	-
x2 * x3	-	-	-0.959
R-sq.	.8276	.7925	.8584

^{a), b)} Target parameters and coded system parameters are the same to Table 2.

내부의 고압(10~30 bar)에 의하여 과열 수분상태로 존재하나, 대기압으로의 압출시 급격한 압력강하로 인하여 수증기로 되면서 급격히 증발된다. 이 때 증발량은 압출온도에 크게 좌우되나, extrudate의 물리적 성질에 의하여서도 큰 영향을 받는 것으로 생각된다. 이 물리적 성질은 원료 물질내로 투입된 에너지양에 의하여 크게 영향을 받으므로⁽¹¹⁾, 스크류조합 중 shearing을 적게 받는 conveying element만을 갖는 경우는 전체적으로 압출온도가 낮은 이유도 있겠으나 온도의 영향이 크며, reverse element를 갖는 경우는 SME의 영향이 커서, 전체적으로 압출온도와 기계적 에너지 소모율의 상호작용에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다(표3). 한편 압출온도와

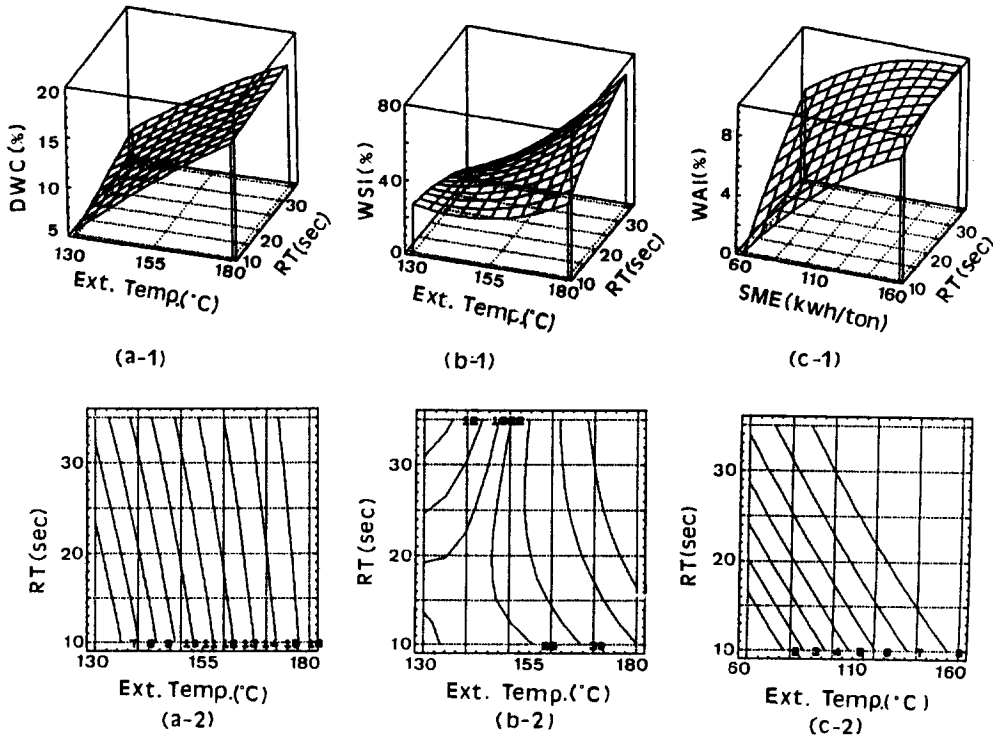


Fig. 1. 3D-Surface response(1) and contour(2) diagrams for target parameters

a) Amount of water evaporation, b) Water solubility index(WSI) and c) Water absorption index (WAI) as function of a,b) Extrusion temperature(Ext. Tem) and Mean residence time(RT) and c) Specific mechanical energy input(SME) and RT

평균 체류시간의 상호작용을 살펴보면 그림 1에 나타난 것과 같이 낮은 압출온도에서는 평균 체류시간이 길수록 증발량이 증가하는 경향을 나타내었으나, 압출온도가 증가할 수록 이러한 경향이 크게 감소되어 180°C 부근에서는 체류시간의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

WSI 및 WAI

스크류조합별 WSI에 대한 system parameters의 영향은 전반적으로 SME의 영향이 크며, reverse element를 갖는 스크류조합의 경우는 압출온도의 영향도 크게 나타났다. 스크류조합별로 구분하지 않을 때에는 압출온도, SME, 체류시간 순으로 영향을 주는 것으로 나타났으며 (표 3), 압출온도와 체류시간의 상호작용을 살펴보면 그림 1에서 보듯이 압출온도가 낮은 경우 체류시간이 증가할 수록 WSI는 약간 감소하는 경향을 보였으나 압출온도가 높으면 체류시간이 길어짐에 따라 WSI가 크게증가하는 경향을 나타내었다.

스크류조합별 WAI에 대한 system parameters 영향은 conveying element만 갖는 스크류조합의 경우 압출온도의 영향이 크며, reverse element를 갖는 경우에는 SME의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으나 (표 2), 전체적으로 보면 SME와 평균체류시간에 큰 영향을 받는

것으로 나타났다(표 3). 이들 영향의 상호작용은 짧은 체류시간과 낮은 SME에서는 이들 값이 증가할 수록 WAI가 크게 증가하는 것을 볼 수 있으나, 높은 값들을 갖는 조건에서는 WAI값 8.0을 최고점으로 하여 더 이상의 증가는 보이지 않았다. 이는 extrusion 조건에 따라 전분의 WAI는 최고값을 보이다가, 보다 높은 압출온도 및 shearing에 의하여 전분의 분자쇄가 파괴되어 WSI, 점도 등이 감소한다는 여러 보문(9,12)과 일치하는 결과로써 본 실험 범위 내에서는 원료 반죽의 비교적 높은 수분함량으로 인하여 WAI가 감소하는 격렬한 조건까지는 도달하지 못하였기 때문에 WAI의 감소하는 결과가 나타나지 않은 것으로 생각된다.

요 약

스크류조합을 달리한 실험실용 twin-screw extruder를 사용하여 corn grit를 원료 투입량(30~60 kg/hr), 스크류 회전속도(200~400 rpm) 및 die hole 수(2~6개) 범위에서 압출하면서 측정된 system parameters(압출온도, 기계적 에너지 소모율, 평균 체류시간)가 압출물의 특성을 나타내는 target parameters(수분 증발량, 수분 용해도지수 및 수분 흡착지수)에 미치는 영향을 스크류

조합별과 전체 실험결과를 다중회귀분석을 통하여 회귀식으로 나타내면, 스크류조합별 관계식에서는 상관계수가 0.90 이상이었으며, 구획하지 않은 전체 회귀식에서는 0.80 정도의 상관계수를 보였다. 이상의 결과는 system analysis approach을 이용하면, 상이한 extruder사이의 조업자료 중 system parameters의 분석을 통하여 목적 제품의 특성을 예측할 수 있는 가능성을 보여준다고 생각된다.

문 헌

1. Linko, P., Colonna, P. and Mercier, C. : High temperature short time extrusion cooking. *Cereal Sci. Technol.*, **4**, 45(1981)
2. 권태완, 이철호, 김철진, 이현유, 김동철, 한억, 김영호, 이상효, 류기형 : 한국형 식품 twin-screw extruder의 개발 및 보급에 관한 연구. -식품 extrusion관련기술의 국내업체현황 조사. 한국식품개발연구원 보고서 E3032-0027, (1989)
3. Rauwendaal, C. : *Polymer Extrusion*. Hanser Verlag, Munich, p. 46(1986)
4. Colona, P., Melcoin, J.P., Vergnes, 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**, 15(1983)
5. Tayeb, J., Vergnes, B. and Della valle, G. : A basic model for twin-screw extruder. *J. Food Sci.*, **53**, 1047 (1988)
6. Meuser, F. and Van Lengerich, B. : System analytical model for the extrusion of starch. In *Thermal Processing and Quality of Food*, Zuethen, P. and Cheftel, J. C.(ed.), Elsevier Applied Science Publ., London, p. 175(1984)
7. Mueser, F., Van Lengerich, B. and Rheimers, H. : Extrusion cooking of starch. Comparison of experimental result from laboratory extruder and full scale extruder by means of system analysis. *Starch*, **36**, 194 (1984)
8. 김지용, 김종태, 김철진 : 옥분압출가공시 이축압출성형기의 운전조건에 따른 System Parameters의 변화. 한국식품과학회지, **23**, 81(1991)
9. Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, V. F. and Griff, E. L. Jr. : Gelatinization of corn grit by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today*, **14**, 4(1969)
10. Statal Graphics Corporation : User's guide. *statgraphics. Statistical Graphics System*. STSC Inc., USA (1987)
11. Della Valle, G., Kozlowski, A., Ccolonna, P. and Tayeb, J. : Starch taransformation estimated by energy balance on a twin screw extruder. *Lebens. Wiss, U Technol.*, **22**, 279(1989)
12. Fletcher, S. I., Richmond, P. and Smith, A. C. : An experimental study of twin-screw extrusion cooking of maize grits. *J. Food Eng.* **4**, 291(1985)

(1990년 10월 22일 접수)