

식품 압출성형공정의 열 및 기계에너지 분석

정문영 · 이승주
동국대학교 식품공학과

Analysis of the Thermal/Mechanical Energy in Food Extrusion Process

Moon Young Chung and Seung Ju Lee

Department of Food Science and Technology, Dongguk University

Abstract

The energy supplied by motor of extruder, being known mostly to be dissipated as heat, was classified into two kinds of energy: a thermal energy by heat dissipation and a purely mechanical energy. The thermal energy was defined as a energy in terms of temperature rise and the mechanical energy as the motor energy minus the heat dissipated energy. A method to derive the thermal energy and the relative mechanical energy (the mechanical energy calculated regarding the mechanical energy at the lowest screw speed as zero) under the condition of constant barrel temperature was developed by which an extrusion case was analyzed. When extruding corn grits with moisture (27~37%) at low barrel temperature ($\leq 80^{\circ}\text{C}$), the thermal energy slightly increased with increase in the moisture content, whereas the relative mechanical energy increased to a great extent. When increasing the screw speed, the thermal energy was nearly kept constant, whereas the relative mechanical energy largely varied. It is concluded that as the moisture content increases, the role of the mechanical energy becomes more effective than the heat energy dissipated from the motor energy.

Key words: extrusion, thermal energy, mechanical energy, heat dissipation

서 론

압출성형공정 중 식품은 압출성형기의 스크류 회전 에 의하여 공급되는 모터에너지와, 별도로 장착된 히터로부터 공급되는 히터에너지를 받아 물리적 화학적으로 변화한다. 모터에너지의 대부분은 원료의 자가 발열 에너지로 전환되고 나머지는 순수한 기계에너지의 형태로 식품 원료에 공급되며, 히터 에너지는 자가 발열 에너지와 함께 열에너지의 형태로 공급된다. 식품가공의 일반적인 에너지 형태로는 열에너지를 들 수 있으나 순수한 기계에너지에 의해서도 반응이 일어날 수 있다는 사실이 트라이보·화학(tribo-chemistry) 분야에 의하여 정립되어 왔다¹⁾. 열에너지에 의한 식품 성분 변화의 경우는 에너지원의 정의가 분명하고 성분 변화의 기작이 비교적 잘 밝혀져 있지만, 기계에너지의 경우에는 정의가 모호하고 그에 의한 식품성분

변화의 기작에 대한 규명이 부진한 실정이다^{2,3)}. 분명한 점은 식품 성분의 물리적 화학적 변화에 열에너지와 기계에너지가 종합적으로 작용한다는 사실이다.

한편 압출성형기 스크류를 회전시키는 구동모터에 의해 순수하게 가해진 기계에너지를 측정하고 계산하는 데는 상당한 어려움이 수반된다. 왜냐하면 스크류의 기계적 움직임에 의하여 자가발열(heat dissipation) 현상이 일어나므로, 근본적으로 모터의 기계적인 회전 에너지만 공급될지라도 그 일부가 열에너지로 변환이 되어 결국 식품은 열에너지를 또한 받기 때문이다. 따라서 열로 발산되고 남은 순수한 기계에너지를 정량적으로 분석할 수 있는 방법의 개발이 요구된다.

최근 국내에서도 식품기계의 제작기술이 발달되어 쌍축형(twin) 압출성형기의 생산이 가능하게 되었다. 현재의 개발 방향은 기계의 식품가공 능력의 다양화 및 질적 향상, 압출성형기의 가동에 필요한 에너지 효율 등의 차원에서 이루어지고 있다. 이와같은 시점에서 본 연구에서 열 및 기계에너지를 정량적으로 분석할 수 있는 방법이 개발되어 처리된 열 및 기계에너지

Corresponding author: Seung Ju Lee, Department of Food Science and Technology, Dongguk University, 26 Pil-dong, 3-ga, Chung-gu, Seoul 100-715, Korea

의 양을 알 수 있다면 압출성형기의 공정조건 및 기기 개발, 압출성형물의 제품개발 등에 크게 이바지할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 공급되는 열 및 기계에너지를 측정하는 방법을 정립하고, 투입되는 원료의 조건(수분함량) 및 공정조건(스크류 rpm)을 달리하여 압출성형할 때 공급되는 열 및 기계 에너지의 상대적인 양을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

재료 및 방법

모터에너지를 자가발열 에너지 및 기계에너지로 구분하여 아래와 같은 일련의 과정을 통하여 정량화하였다. 열에너지는 히터에너지와 자가발열 에너지의 합에서 외부로의 열 손실을 감한 값으로 정의하였고, 기계에너지는 모터에너지에서 자가발열 에너지를 감한 값으로 정의하였다. 모든 에너지의 차원은 원료의 단위 무게당 에너지로 표시하였다.

모터 및 히터에너지의 측정

단상 및 삼상용 전력계(power-meter, Yokogawa Co, Japan)를 Fig. 1과 같이 연결하여 in-line 측정하였다⁽⁶⁾. 압출성형기 스크류 구동모터의 전력(power) 측정에는 삼상용 전력계를 사용하였고 전력을 원료공급속도로 나눈 값을 모터에너지로 간주하였다. 단, 구동모터의 각 회전속도에서 원료의 공급이 없는 공회전 상태에서 측정된 전력(모터 고유 저항)을 실제 압출성형시

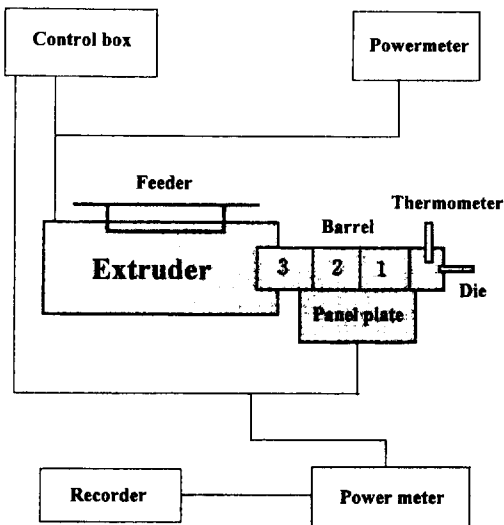


Fig. 1. Schematic diagram for the measuring of the energy in extruder.

모터 전력으로부터 감한 값을 실제 모터 에너지의 산출에 사용하였다.

$$[\text{모터에너지}] = \frac{([\text{모터 전력}] - [\text{모터고유저항 전력}])}{\text{원료공급속도}} \quad (1)$$

압출성형기에는 3개의 전기 히터(heater)가 각 배럴에 설치되어 있는데 히터 가동에 소모되는 총 전력을 측정하기 위하여 단상용 전력계를 전력 공급선이 3개의 히터로 분할되기 직전에 설치하였다. 히터 에너지의 측정은 3개의 히터가 불연속적으로 개폐(on/off)되기 때문에 전력계에 기록계(recorder)를 연결하여 전력 값을 기록하였다. 히터 전력의 산출방법은 Fig. 2와 같았다.

$$[\text{히터에너지}] = [\text{히터 전력}] / \text{원료공급속도} \quad (2)$$

원료 공급속도는 일정한 시간 동안 원료공급 호퍼(hopper)로부터 배럴의 원료 투입구로 떨어지는 원료의 무게를 측정하여 단위 시간당 무게로 나타내었다.

열에너지의 측정

식품원료가 압출성형기를 통과하면서 받게 되는 열에너지는 투입되는 원료와 토출되기 직전의 압출물 간의 온도 차이를 측정하여 식 (3)에 의하여 계산하였고 이때 반응 에너지에 의한 열에너지 흡수는 상대적으로 무시하였다.

$$[\text{열에너지}] = C_p (T_1 - T_2) + [\text{반응 에너지}] \quad (3)$$

여기서 C_p 는 압출성형기 내의 원료의 평균 비열, T_1 및 T_2 는 각각 토출 직전 및 투입구에서 원료의 온도를 의미한다. T_1 은 pt-100 오음의 열전쌍(thermocouple) 센서(sensor)를 다이(die) 직전에 설치하여 그 온도로 간주하여 측정하였으며(Fig. 1), T_2 는 원료의 보관 온도로 가정하였다. 비열은 수분함량의 함수식 (4)를 이용하여 어림적인 값으로 산출하였다(7).

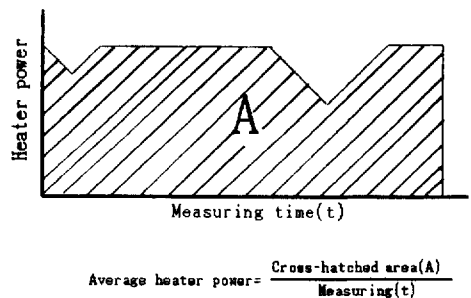


Fig. 2. Graphical method to calculate the heater power.

$$C_p = 4.19 M + 0.84 (1-M) \quad (4)$$

여기서 M 은 수분함량(w/w)이고, 비열의 단위는 $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$ 이다.

기계에너지의 모델링(modeling)

식품원료가 받게되는 순수한 기계에너지를 구하기 위하여 압출성형기의 전동 모터, 전기 히터, 식품원료 및 압출성형기 주위 간의 에너지 수치 관계를 살펴보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [\text{모터에너지}] &= [\text{기계에너지}] + [\text{자가발열 에너지}] \quad (5) \\ [\text{히터에너지}] &+ [\text{자가발열 에너지}] = \\ &[\text{열에너지}] + [\text{주위 열손실}] \quad (6) \end{aligned}$$

여기서 [주위 열손실]은 압출성형기로부터 주위 공간으로 열전달되어 소모되는 에너지를 의미한다. 위의 식 (5) 및 (6)을 기계에너지에 대하여 정리하면 최종적으로 식 (7)이 유도된다.

$$\begin{aligned} [\text{기계에너지}] &= [\text{모터에너지}] - ([\text{열에너지}] \\ &+ [\text{주위 열손실}] - [\text{히터에너지}]) \quad (7) \end{aligned}$$

여기서 [주위 열손실]을 측정하기 위한 실험을 한 결과 매우 어려운 점이 있었으므로 그 항을 삭제하기 위하여, 식 (7)의 모든 항에 변화량(Δ)의 개념을 도입하여 식 (8)을 얻을 수 있었다.

$$\begin{aligned} \Delta[\text{기계에너지}] &= \Delta[\text{모터에너지}] - (\Delta[\text{열에너지}] \\ &+ \Delta[\text{주위 열손실}] - \Delta[\text{히터에너지}]) \quad (8) \end{aligned}$$

실험 전반에 걸쳐 압출성형기의 배럴온도가 일정하게 유지되고, 압출성형기 주위공간의 온도가 일정하다면, 압출성형기와 주위공간과의 열전달로부터 생기는 주위 열손실도 항상 일정하게 되고 이와같은 조건에서는 식 (8)에서 [주위 열손실]항이 삭제되어 결국 식 (9)이 유도된다.

$$\begin{aligned} \Delta[\text{기계에너지}] &= \Delta[\text{모터에너지}] - (\Delta[\text{열에너지}] \\ &- \Delta[\text{히터에너지}]) \quad (9) \end{aligned}$$

최종적으로 식 (9)의 $\Delta[\text{기계에너지}]$ 를 식 (10)과 같이 누적시켜 산출되는 [기계에너지]의 상대적인 값을 얻을 수 있었다. 그러나 [기계에너지]의 절대값을 얻을 수 있는 식의 개발은 불가능하였다. 따라서 일정 수분함량에 대하여 최저 스크류 회전속도인 70 rpm에서의 기계에너지 값을 0으로 기준하고 식 (10)과 같이 각 rpm에서의 기계에너지의 변화량을 더하여 얻은 값을 각 rpm에 대한 [상대기계에너지]로 정의하였다.

$$[\text{상대기계에너지}] = \sum \Delta[\text{기계에너지}], \quad (10)$$

여기서 i 는 rpm 조건을 의미한다.

압출성형 조건

동방향(co-rotating) 쌍축형(twin) 압출성형기(백상기계 제작)를 사용하였으며 스크류 직경은 31 mm, 배럴 길이는 750 mm, 다이(die, 토출구) 직경은 5 mm이며, 스크류 배열은 전진형 완전 맞물림형이고, 3개의 전기 히터가 장착되어 있다. 압출성형기의 작동조건으로 스크류 회전속도는 70, 100, 130, 160, 190, 220 rpm, 그리고 온도 조건은 전 실험 범위에 걸쳐 1, 2, 3배럴을 각각 47, 55, 80°C로 일정하게 제어하였다.

시중에서 구입한 콘그리트(corn grit, 평균 20 mesh)에 물을 첨가하여 36, 33, 30, 27%의 수분함량(w/w)으로 조절하여 밀봉된 상태에서 1일 냉장보관한 후 압출성형에 사용하였다. 조제된 원료는 호퍼(hopper) 하부에 설치된 이송스크류의 회전속도를 일정하게 하여 압출성형기의 원료투입구에 공급하였다.

실험 순서로서 먼저 원료를 공급하지 않고 공회전을 시키면서 각 rpm에서 모터의 전력을 측정하였고, 그 다음 히터를 키고 원료공급을 시작하여 배럴 온도가 정상 상태(steady state)에 도달한 후에 모터 및 히터의 전력과 다이 직진의 온도를 측정하였다.

결과 및 고찰

먼저 원료를 공급하지 않은 상태에서 압출성형하였을 때 소모되는 전력은 Fig. 3과 같았다. 회전속도가

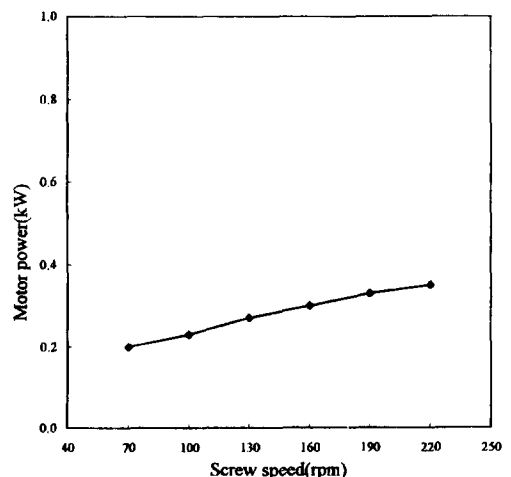


Fig. 3. Electrical power of motor when running extruder without feeding at each screw speed.

증가할수록 모터 자체에 의해 소모되는 고유의 저항은 증가하였다. 원료공급속도는 Fig. 4와 같이 원료의 수분함량이 30% 이상일 때는 급격히 감소하였는데

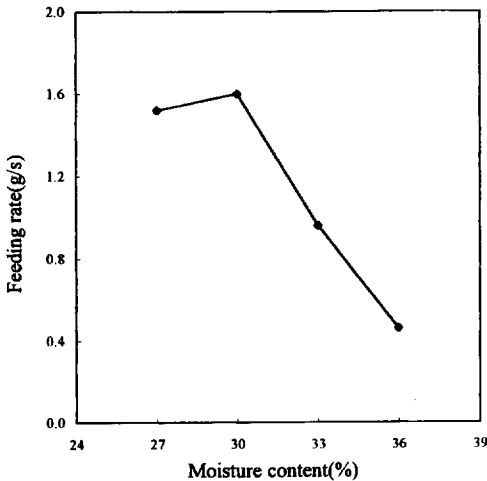


Fig. 4. Feeding rate of corn grits with different moisture contents.

그 이유는 원료의 수분함량(>30%)이 높을수록 원료공급장치인 호퍼 하부의 이송 스크류에 부하가 걸리게 되어 단위시간당 원료 공급량이 감소하기 때문이다.

배럴의 온도를 일정하게 제어하며 서로 다른 수분함량과 구동모터의 회전속도 조건에서 압출성형하였을 때 측정된 모터 및 히터 전력, 토출 직전의 원료 온도는 Table 1과 같았다. 전반적으로 회전속도가 증가할수록 모터 전력은 증가하였고, 히터 전력은 감소하였다. 토출직전의 원료 온도는 일정한 경향을 나타내지는 않았으나 그 차이는 미소하였다. 또한 수분함량이 증가할수록 모터 및 히터의 전력은 작게 나타났다. 그러나 이들 전력은 원료공급속도가 일정하지 않은 조건에서 얻어진 측정값이기 때문에, 원료공급속도로 나눈 값인 단위 무게당 에너지의 차원으로 나타낸 결과, 수분함량 및 회전속도가 높을수록 모터에너지는 상대적으로 많이 공급됨을 알 수 있었다(Fig. 5). 이에 비하여 히터에너지는 회전속도 및 수분함량이 낮을수록 많이 소모되었는데, 수분함량에 따른 차이는 미소하였다(Fig. 6). 한편 일반적으로 수분함량이 작을수록

Table 1. Measured electrical power at different process variable conditions and the corresponding energy estimated by Eqs. (1)-(10)

Moisture content (%)	Screw speed (rpm)	Measured value				Calculated value (kJ/kg)						
		Motor power (kW)	Heater power (kW)	Extrudate temp. (°C)	Motor energy	Change degree of motor energy	Heater energy	Change degree of heater energy	Thermal energy	Change degree of thermal energy	Change degree of mechanical energy	Relative mechanical energy
27	70	0.36	0.49	73	237	-	322	-	91	-	-	0
	100	0.39	0.45	77	257	20	296	-26	96	5	-11	-11
	130	0.40	0.40	78	263	6	263	-33	96	0	-27	-38
	160	0.44	0.36	78	289	26	237	-26	96	0	0	-38
	190	0.55	0.25	80	362	73	164	-73	98	2	-2	-40
	220	0.58	0.20	84	382	20	132	-32	105	-7	-19	-59
30	70	0.30	0.52	83	188	-	325	-	107	-	-	-
	100	0.32	0.50	83	200	12	312	-13	107	0	-1	-1
	130	0.36	0.47	84	225	31	294	-16	109	2	7	6
	160	0.43	0.39	84	269	94	244	-50	109	0	-6	0
	190	0.49	0.30	85	306	31	188	-56	111	2	-21	-21
	220	0.53	0.26	85	331	42	163	-25	111	0	0	-21
33	70	0.26	0.30	81	271	-	313	-	111	-	-	0
	100	0.29	0.28	82	302	31	292	-21	113	2	8	8
	130	0.32	0.24	84	333	31	250	-42	117	4	-15	-7
	160	0.41	0.20	85	427	94	208	-42	119	2	50	43
	190	0.44	0.15	86	458	31	156	-52	121	2	-23	20
	220	0.48	0.12	86	500	42	125	-31	121	0	11	31
36	70	0.21	0.14	76	457	-	304	-	117	-	-	0
	100	0.24	0.13	81	521	64	283	-17	121	4	43	43
	130	0.28	0.11	82	609	88	239	-44	123	2	42	85
	160	0.39	0.09	83	848	239	196	-43	125	2	194	279
	190	0.41	0.06	81	891	43	130	-66	123	-2	-21	258
	220	0.45	0.05	81	978	87	109	-21	123	0	66	324

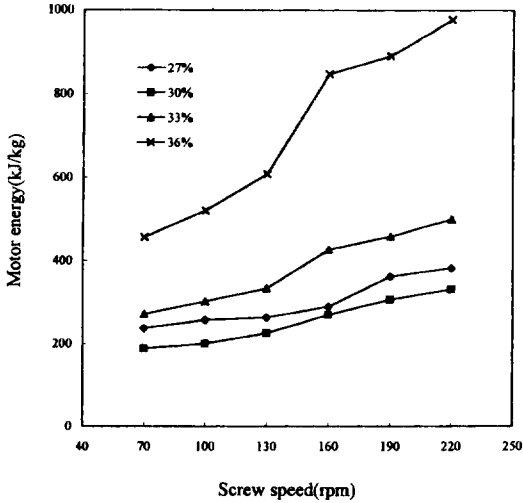


Fig. 5. Motor energy vs. the corresponding process variables of extrusion.

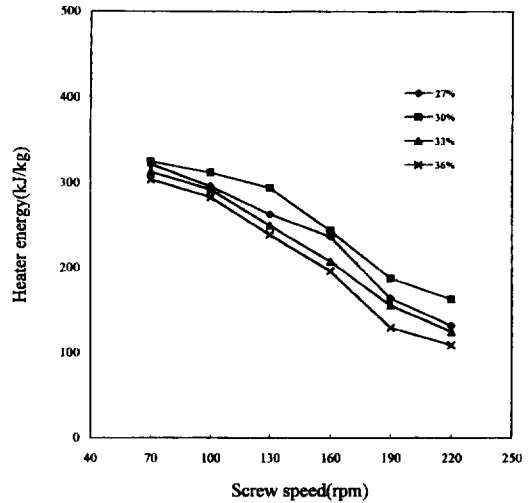


Fig. 6. Heater energy vs. the corresponding process variables of extrusion.

모터에너지가 더 많이 소모되는 것으로 알려져 있는데⁽⁸⁻¹⁰⁾ 이런 현상은 압출성형온도가 충분히 높고 수분함량이 낮을 때 일어나는 것으로서, 본 실험에서는 온도와 수분함량 조건의 차이로 인하여 이와 다른 현상이 일어난 것으로 생각된다⁽¹¹⁾.

Fig. 5에서 낮은 수분함량(<30%)보다 높은 수분함량(>33%)의 경우에 스크류 회전속도가 증가할 때 모터에너지의 증가량이 크게 나타났는데, 그 이유는 수분함량이 높은 원료는 낮은 원료보다 그 유체의 물성이 액체에 더 가깝기 때문으로 생각된다. 일반적으로 액체가 변형될 때 그 응력은 변형속도에 따라 영향을 받지만, 고체는 변형속도와는 무관하게 변형도(변형되는 길이)에 따라 응력이 결정되는 성질을 갖는다⁽¹²⁻¹⁵⁾. 압출성형기에 의해 원료에 가해지는 변형도는 스크류 및 배럴의 크기에 따라 정해지고 변형속도는 모터의 스크류 회전속도에 의하고 응력은 모터에너지으로 표현된다고 볼 때, 액체 성질에 더 가까운 높은 수분함량의 원료가 낮은 수분함량의 원료보다 회전속도에 따라 더 큰 모터에너지의 변화를 보이는 현상으로 생각된다.

Fig. 5와 6을 비교하여 볼 때 회전속도가 증가할 때 모터에너지는 증가하였으나 히터에너지는 감소하는 현상이 나타났다. 즉 히터에너지가 감소함에도 불구하고 배럴 온도가 일정하게 유지되는 것은 모터에너지의 상당량이 자가발열 에너지로 전환되기 때문이다. 높은 수분함량의 경우에는 모터에너지의 증가량이 히터에너지의 감소량에 비하여 훨씬 크게 나타났고, 낮은 수분함량으로 갈수록 모터에너지의 증가량

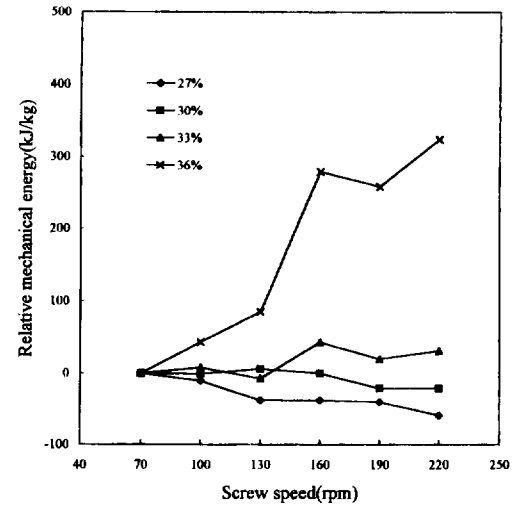


Fig. 7. Relative mechanical energy vs. the corresponding process variables of extrusion.

이 감소하여 결국 히터에너지의 감소량보다 작아지는 것으로 나타났다. 이와같은 현상은 배럴온도가 일정하게 유지되는 조건 하에서 일어났기 때문에 낮은 수분함량의 경우는 높은 수분함량보다 회전속도가 증가하면서 모터에너지로부터 자가발열 에너지로 전환되는 정도가 더 커짐을 알 수 있다⁽¹⁶⁾. 또한 전체적으로 높은 수분함량의 원료는 앞에서 언급한 바와 같이 낮은 수분함량보다 더 액체에 가깝기 때문에 점성에 의한 자가발열이 높게 되지만, 스크류 회전속도가 높아지면서 낮은 수분함량의 원료도 점차적으로 분체의 집단 상태에서 액체에 가까운 유체 상태로 변하기 때

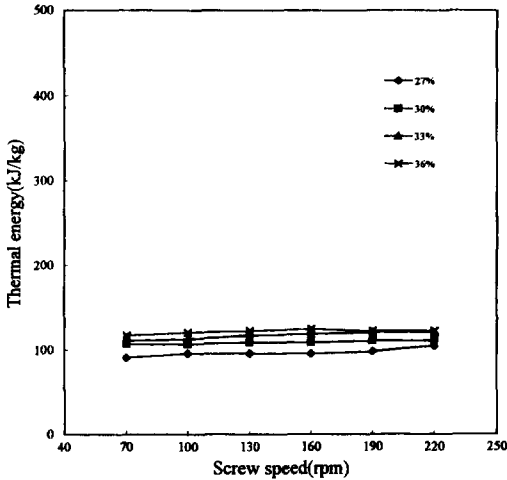


Fig. 8. Thermal energy vs. the corresponding process variables of extrusion

문에 그에 따른 자가발열의 증가량이 커짐을 추론할 수 있다⁽¹⁷⁾.

압출성형기의 배럴 온도를 일정하게 제어하는 조건 하에서 모터에너지 중 자가발열로 전환된 에너지를 제외한 순수한 기계에너지의 식은 얻을 수 없었으나, 그에 준하는 상대기계에너지를 산출할 수 있는 식 (10)을 유도할 수 있었다. 여기서 상대기계에너지란 일정 수분함량에 대하여 최저 회전속도에서의 기계에너지를 0으로 기준하여 얻어진 상대적인 기계에너지 값을 의미한다. Fig. 7에서와 같이 회전속도가 증가함에 따라 높은 수분함량의 상대기계에너지는 크게 증가하였으나, 낮은 수분함량의 경우에는 감소하였다. Fig. 5에서 모터에너지는 수분함량에 관계없이 증가한 현상과 비교해 볼 때, 수분함량이 낮을수록 모터에너지에서 순수하게 기계적으로 작용하는 에너지 부분은 작아지고 자가발열로 전환되는 에너지는 증가하는 사실을 추론할 수 있고 이것은 앞에서 언급한 사실과 일치함을 알 수 있다.

열에너지의 공급원인 히터와 자가발열에 의하여 원료의 온도가 상승하여 열에너지를 받게되고 일부는 주위로 손실된다. 높은 수분함량의 열에너지는 낮은 수분함량의 경우보다 크게 나타났으며, 회전속도의 증가에 따라 열에너지는 전반적으로 다소 증가하는 경향을 보였으나 27% 경우외에는 그 차이가 미소하였다(Fig. 8). 앞에서 언급한 바와 같이 높은 수분함량의 원료는 점성에 의한 자가발열로 인하여 상대적으로 높은 열에너지를 유지하고, 낮은 수분함량의 원료

는 높은 회전속도에서 비로서 유체 상태로 바뀌기 때문에 열에너지가 증가함을 알 수 있다. 이것은 상대기계에너지의 결과로부터 추론된 낮은 수분함량의 경우 모터에너지로부터 전환되는 자가발열이 증가한다는 사실과 일치한다^(18,20).

본 연구에서는 기계에너지의 소개와 이를 얻을 수 있는 방법의 모델링에 주안점을 두었는데 이 결과를 기초로 하여 기계에너지가 작용할 수 있는 대표적인 가공법인 압출성형공정의 에너지 분석이 앞으로 보다 정량적으로 이루어질 수 있을 것으로 생각된다^(21,22). 또한 압출성형공정에 의하여 일어나는 여러 식품성분의 반응기작을 기계에너지의 관점에서 연구하는데⁽²³⁾ 필수적인 기초자료가 될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 본 논문에서 달성하지 못한 기계에너지의 절대값을 얻을 수 있는 방법론에 관한 연구가 앞으로 필요하며, 또한 기계에너지의 구체적인 정량화를 위해서는 에너지 수지의 분석과정 중에 무시된 반응에너지와 단순히 공식에 의해 계산된 비열에 대한 보완이 이루어져야 할 것이다.

요 약

압출성형공정에서 주로 자가발열로 전환되는 것으로 알려진 모터에너지를 자가발열 에너지와 기계에너지로 구분하였다. 온도 상승에 의한 에너지를 열에너지로 간주하였고, 모터에너지에서 자가발열로 전환된 에너지를 감한 나머지 에너지를 기계에너지로 정의하여, 일정한 배럴온도를 조건으로 할 때 열에너지 및 상대기계에너지(최저 스크류회전속도에서의 기계에너지를 0으로 기준하여 계산된 값)를 정량화할 수 있는 방법을 완성하였다. 콘그리트(corn grit)를 수분함량 27~36%의 범위에서 압출성형하였을 때, 스크류회전속도가 증가할수록 상대기계에너지는 크게 변화하였고, 열에너지는 거의 비슷하게 유지되었다. 수분함량이 높아질수록 상대기계에너지는 크게 증가하였고, 열에너지는 약간 증가하였다. 이로부터 수분함량이 높아질수록 모터에너지로부터 자가발열보다는 상대기계에너지의 작용이 커짐을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 수행된 연구결과로서 이에 감사드리 는 바입니다.

문헌

1. Heinicke, G.: *Tribochemistry*, Carl Hanser Verlag München, Wien (1984)
2. O'Connor, C.: *Extrusion Technology for the Food Industry*, Elsevier Applied Science Publisher, London (1987)
3. Linko, P. and Harper, J.M.: *Extrusion Cooking*, American Association of Cereal Chemists, USA (1989)
4. 이철호, 김동철, 전제현, 김철진, 김종배, 김재득, 손중천 : 식품 Extrusion 기술(I), 유림문화사, 서울 (1987)
5. 한국식품 Extrusion 연구회 편: 식품 Extrusion 기술(II), 유림문화사, 서울 (1988)
6. Say, M.G.: *The Electrical Engineer's Reference Book*, Hamlyn, Feltham, Middlesex (1968)
7. Earle, R.L.: *Unit Operation in Food Processing*, Pergamon Press, New York (1983)
8. Lai, L.S. and Kokini, J.L.: Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion. *Biotechnol. Prog.*, **7**, 251 (1991)
9. Chiang, B.Y. and Johnson, J.A.: Gelatinization of starch in extruded products. *Cereal Chem.*, **54**, 436 (1977)
10. Davidson, V.J., Paton, D., Diosady, L.L. and Rubin, L.: A model for mechanical degradation of wheat starch in a sing-screw extruder. *J. Food Sci.*, **49**, 1154 (1984)
11. Bhattacharya, M. and Hanna, M.A.: Kinetics of starch gelatinization during extrusion cooking. *J. Food Sci.*, **52**, 764 (1987)
12. Dickinson, E. and Stainsby, G.: *Colloid in Food*, Elsevier Applied Science Publishers, New York (1982)
13. Prentice J.H.: *Measurements in the Rheology of Food-stuffs*, Elsevier Applied Science Publishers, New York (1984)
14. Bourne, M.C.: *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*, Academic Press, New York (1982)
15. Sherman, P.: *Food Texture and Rheology*, Academic Press, New York (1979)
16. Gomez, M.H. and Aguilera, J.M.: Changes in the starch fraction during extrusion cooking of corn. *J. Food Sci.*, **48**, 378 (1983)
17. Gomez, M.H. and Aguilera, J.M.: A physicochemical model for extrusion of corn starch. *J. Food Sci.*, **49**, 40 (1984)
18. Likimani, T.A., Sofos, J.N., Maga, J.A.: Extrusion cooking of corn/soybean mix in presence of thermostable-Amylase. *J. Food Sci.*, **56**, 99 (1991)
19. El-Dash, A.A., Gonzales, R., and Ciol, M.: Response surface methodology in the control of thermoplastic control of starch. In *Extrusion Cooking Technology*, Jowitt, R.(Ed.), Elsevier Applied Science Publisher, London (1984)
20. Wang, S.S., Chiang, W.C., Zheng, X., Zhao, B.L., and Cho, M.H.: Application on energy equivalent concept to the studies of the kinetics of starch conversion during extrusion. In *Extrusion Science and Technology*, Kokini, J., Ho, C.T., and Karwe, M.(Ed.), Marcel Dekker, New York (1992)
21. Zheng, X. and Wang, S.S.: Shear induced starch conversion during extrusion. *J. Food Sci.*, **59**, 1137 (1994)
22. Wang, S.S.: Gelatinization and melting of starch and tribochemistry in extrusion. *Starch/Starke*, **45**, 388 (1993)
23. Wang, S.S., Zheng X., Ho, C.T., and Qu, D.: Cold extrusion-tribochemistry. In *Proceeding of the 6th International Congress on Engineering and Food*, May 23-27, Kyoto, Japan (1993)

(1996년 11월 5일 접수)