

압출성형공정 퍼지제어기의 모의실험

이승주·원치선*·한 익**·목철균***·이병상

동국대학교 식품공학과, *전자공학과,

한국식품개발연구원, *경원대학교 식품가공학과

Simulation of Fuzzy Logic Controller for Food Extrusion Process

Seung Ju Lee, Chee Sun Won*, Ouk Han**, Chulkyoon Mok*** and Byeong Sang Lee

Department of Food Science and Engineering,

**Department of Electronic Engineering, Dongguk University,*

***Korea Food Research Institute*

****Department of Food Science and Technology, Kyungwon University*

Abstract

Fictitious experiment to control extrusion process was carried out using the fuzzy theory. Algorithm of the fuzzy logic controller(FLC) was made based on the general principles of extrusion. In the simulation, at first, thickness of extrudate was measured as feedback input variable. Secondly, a set point of screw speed was determined as output variable of extruder operating condition through FLC. Finally, the thickness of extrudate was controlled as a given set point. Barrel heater was simply controlled as on/off state, which was not fuzzy controlled.

Key words: fuzzy theory, fuzzy logic controller, extrusion

서 론

압출성형 공정은 생산성 및 경제성이 우수하여 유망한 식품가공기술로 개발되고 있는데, 현재 자동화는 일반적으로 공정변수(온도, 수분공급량, 스크류 회전속도 등)에 대한 단순한 피드백(feedback) 제어 또는 자동 start-up, shut-down 등에 대한 시퀀스(sequence) 제어 시스템으로 이루어져 있다¹⁻³⁾. 이때 피드백되는 변수는 공정변수의 측정값이므로 압출물의 성질을 직접 제어하기 위해서는 압출물의 성질을 측정변수로 하고 그 성질을 원하는 상태로 얻을 수 있도록 공정조건(제어변수)을 제어할 수 있는 알고리즘(algorithm)의 개발이 요구된다.

최근 공정제어 분야에서는 퍼지(fuzzy) 제어가 광범위하게 적용되고 있다. 퍼지 제어 방식에서 측정변수와 제어변수의 상호관계를 해석하는 제어 알고리즘은 수학적 모델 대신 경험적인 사실 또는 전문가(expert) 지식을 근거로 완성된다^{4,5)}. 압출성형기의 공정조건과 압출물 성질의 상호관계를 나타내는 수학적 모델은 식품 및 압출성형공정 특유의 복잡성에 기인하여 정확성이 떨어지기 때문에 압출성형공정에는 퍼지 제어 방식의 적용이 더 적합하여, 식품 압출성형의 제어에 대한 퍼지 이론의

적용 가능성이 소개되었다^{6,7)}.

식품의 성질과 공정조건들의 관계를 연구할 때 관련된 수학적 모델에 의한 예측치와 실제 값은 일반적으로 많은 차이를 나타낸다. 수학적 모델을 대신하여 퍼지이론을 적용하면 역시 예측치를 추론할 수 있는데 퍼지이론에서는 수학적 모델이 아닌 실제 실험을 통하거나 전문가의 경험으로부터 얻은 변수간의 관계를 이용하여 예측치를 산출하기 때문에 실제 값과의 오차를 줄일 수 있다. 퍼지값이란 단어 뜻과 같이 확실치 하나의 값으로 규정하기 어려운 상태의 변수를 여러 주위값들로 구성된 집합 상태로 대략적으로 표시한 것인데, 퍼지 추론에서는 경험이나 실험을 통하여 얻어진 사실로부터 퍼지변수인 독립변수와 종속변수 사이의 관계(법칙)를 세우고 이 법칙을 일종의 함수식으로 사용하여 임의의 독립변수값에 대응하는 종속변수를 예측한다^{4,5)}.

한편 원 등⁸⁾에 의하여 압출성형 공정에서 압출물의 영상을 실시간(real time) 측정할 수 있는 in-line 영상 센서시스템이 개발되었는데, 이를 근거로 압출물 성질의 측정값을 직접 피드백하는 제어기의 구상이 가능케 되었다. 본 연구에서는 압출성형기 자동제어의 하드웨어(hardware) 시스템에 궁극적으로 필요하게 될 소프트웨어(software)를 준비할 목적으로, 퍼지이론을 적용하여 압출물의 두께를 측정변수로 하고 원하는 두께를 얻도록 공정조건(스크류 회전속도)을 제어하는 알고리즘을 작성하였고, 그 성능을 가상의 압출성형기를 이용하여 모의

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

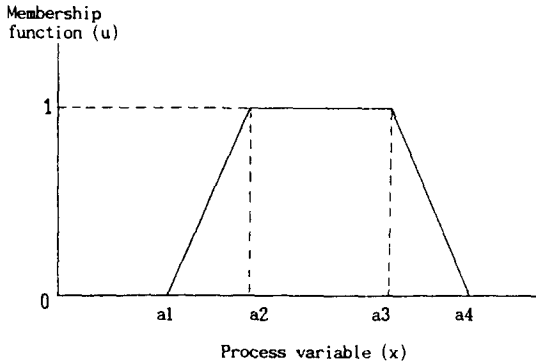


Fig. 1. Trapezoidal type of fuzzy membership distribution

실험하였다. 부가적으로 배럴 온도에 대한 일반적인 on/off 제어를 퍼지 제어와 병행하였다.

재료 및 방법

압출성형공정의 제어 모델링

원료의 수분함량은 14%로 고정하였으며 실시간 제어에 가장 의미있는 조작 공정변수로 스크류 회전속도 조절을 선정하였고, 제 이순위 조작변수로 압출성형기 배럴 온도를 선정하였다. 이때 스크류 회전속도 제어는 압출물 두께에 의한 퍼지 제어로 수행하였으나, 온도 제어는 식품의 조리에 필요한 특정한 온도값을 주위로 하는 단순한 전기히터의 on/off 제어 방식으로 수행하였다.

퍼지 추론과정의 모델링은 다음과 같이 퍼지값의 설정, 변수관계의 퍼지 법칙(rule)화, 입력값(독립변수)과 퍼지 법칙과의 합성에 의한 출력값(종속변수)의 산출, 출력값의 디퍼지화(defuzzification)의 단계로 구성하였다⁽⁴⁾.

퍼지값의 설정

임의의 성질(linguistic values)을 표현할 때 퍼지값은 집합값 및 각 집합값이 그 성질에 해당되는 정도를 나타내는 소속도(membership degree)로 구성되어져서 성질에 대한 변수값의 범위와 각 변수값들이 성질에 소속되는 정도를 동시에 나타낸다(식 (1)).

$$P(Y) = \{(y, u_y(y)) | y \in Y, u_y(y) \in [0,1]\} \quad (1)$$

여기서 P(Y)는 퍼지값, y는 집합값, u는 y의 소속도를 의미한다. 소속도가 1이라함은 그 집합값이 해당되는 정도가 최대이고, 0이라함은 소속정도가 없고, 그 중간값들은 소속정도가 중간정도 즉 애매함을 의미한다. 소속도의 연속적인 값은 식 (2)와 같이 소속함수(membership function)로 나타내는데 본 연구에서는 스크류 회전속도(rpm)의 변화량과 이에 따라 변화하는 압출물의

Table 1. Membership function I of fuzzy values(set point of Y=5.8)

Variable	Fuzzy linguistic values	Membership function ^{b)}			
		a1	a2	a3	a4
Dimensionless thickness(Y)	Extreme small(ES)	-	-	3.4	4.2
	Very small(VS)	3.4	4.2	5.0	5.8
	Nil(N)	5.0	5.8	5.8	6.6
	Very large(VL)	5.8	6.6	7.4	8.2
	Extreme large(EL)	7.4	8.2	-	-
Screw speed change(X1)	Negative high(NH)	-22	-18	-14	-10
	Negative low(NL)	-14	-10	-6	-2
	Nil(N)	-6	-2	2	6
	Positive low(PL)	2	6	10	14
	Positive high(PH)	10	14	18	22

^{b)}Values of limits of membership funtions for linguistic values

Table 2. Membership function II of fuzzy values(set point of Y=5.8)

Variable	Fuzzy linguistic values	Membership function ^{b)}			
		a1	a2	a3	a4
Dimensionless thickness(Y)	Extreme small(ES)	-	-	3.8	4.6
	Very small(VS)	3.8	4.6	5.4	5.8
	Nil(N)	5.4	5.8	5.8	6.2
	Very large(VL)	5.8	6.2	7.0	8.2
	Extreme large(EL)	7.0	8.2	-	-
Screw speed change(X1)	Negative high(NH)	-22	-18	-14	-10
	Negative low(NL)	-14	-10	-6	-2
	Nil(N)	-6	-2	2	6
	Positive low(PL)	2	6	10	14
	Positive high(PH)	10	14	18	22

^{b)}Values of limits of membership funtions for linguistic values

두께(팽화율)를 퍼지변수로서 선택했으며 이에 대한 퍼지값들을 Fig. 1과 같은 사다리꼴(삼각형 포함)형의 소속함수로서 설정하였다⁽⁹⁾.

$$\begin{aligned}
 u &= 0 && (x < a1) \\
 (x - a1)/(a2 - a1) &&& (a1 \leq x < a2) \\
 1 &&& (a2 \leq x < a3) \\
 (a4 - x)/(a4 - a3) &&& (a3 \leq x < a4) \\
 0 &&& (a4 \leq x)
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 a1, a2, a3, a4는 퍼지값내 집합값의 범위를 나타내는 경계값인데 그 값은 압출성형기 제어에서 실제적인 대상이 될 수 있는 범위에 근거하여 결정하였다 (Table 1, 2).

퍼지 법칙

퍼지 법칙은 압출성형공정 전문가의 경험 또는 압출

Table 3. IF THEN rules in fuzzy model

Rule	IF	Y ¹⁾	X2	THEN	X1 ¹⁾	H
1	EL ²⁾	higher/lower		NH ²⁾	off/on	
2	VL	higher/lower		NL	off/on	
3	N	higher/lower		N	off/on	
4	VS	higher/lower		PL	off/on	
5	ES	higher/lower		PH	off/on	

¹⁾Y=dimensionless thickness of extrudate, X2=temperature(±), X1=screw speed change(rpm), H=heater(*off) means action as cooler)

²⁾EL(extreme large), VL(very large), N(nil), VS(very small), ES(extreme small), NH(negative high), NL(negative low), PL(positive low), PH(positive high)

성형 실험에서 얻어진 결과를 응용하여 관련된 변수에 대한 퍼지 값들 사이의 관계를 다음과 같은 IF-THEN의 문장 형식으로 나타내었다(Table 3).

IF P(Y) AND X2, THEN P(X1) AND H else
 IF P(Y) AND X2, THEN P(X1) AND H else (3)
 --- IF P(Y) AND X2, THEN P(X1) AND H.

여기서 P(Y) 및 P(X1)는 각각 압출물의 두께 및 스크류 회전속도의 변화량에 대한 퍼지값을 나타내고, X2 및 H는 퍼지 추론과 관계없는 변수로서 온도의 높음/낮음 및 전기히터의 on/off를 나타낸다. 식 (3)에서 설정된 퍼지 법칙은 퍼지 연산법에 의하여 식 (4)의 relation matrix, R로 변환되고 R의 각 성분에 대한 소속함수, u_R(y, x1)는 식 (5)에 의하여 산출된다⁽¹⁰⁾.

$$R = P(Y) \times P(X1) \tag{4}$$

$$u_R(y, x1) = \min[u_Y(y), u_{X1}(x1)] \tag{5}$$

여기서 u_Y(y), u_{X1}(x1)는 각각 P(Y), P(X1)의 소속함수를 의미한다.

본 연구에서 퍼지값 및 퍼지 법칙은 일반적인 압출 성형공정 변수들과 압출물의 두께의 관계를 근거로 하여 두 종류의 압출물 두께의 퍼지값과 한 종류의 회전속도 변화량의 퍼지값을 사용하였으며 한 종류의 퍼지 법칙을 적용하였다. Table 3에서 X2는 특정한 온도 목표치와 비교된 온도의 높고 낮음을 나타낸다.

입력값과 퍼지 법칙의 합성

측정변수로서 임의의 두께값이 퍼지 제어기에 입력이 되면 제어를 위한 회전속도 변화량의 출력값이 다음과 같이 산출된다. 퍼지 법칙에서 산출된 relation matrix R과 임의의 퍼지값 P(Y')(독립변수)를 Mamdani 방식으로 합성하여 그에 대응하는 출력 퍼지값 P(X1')(종속변수)를 식 (6), (7)에 의하여 출력값으로 산출하였다⁽¹⁰⁾.

$$P(X1') = P(Y') \circ R \tag{6}$$

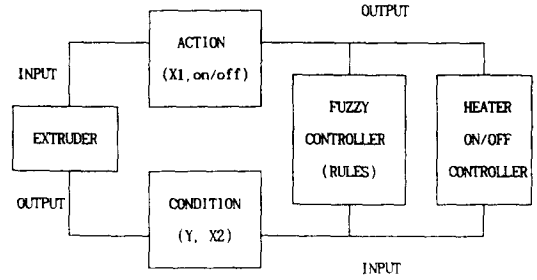


Fig. 2. Extrusion system with fuzzy controller and on/off controller

$$u_{X1}(x1') = \max[\min(u(y'), u_R(y, x1))] \tag{7}$$

여기서 퍼지값 P(Y')는 임의의 압출물 두께값인 y'와 Table 1, 2에 대입하여 구한 u(y')로 구성되고⁽⁴⁾, u_{X1}(x1)는 P(X1')의 소속함수이다.

출력값의 디퍼지화

위와 같은 과정을 통하여 산출된 출력값은 그 형태가 퍼지값으로 되어있기 때문에 압출성형기를 제어하기 위해서는 하나의 수치값으로 변환되어야 한다. 디퍼지화 방법으로 center of gravity of fuzzy set 방식을 택하여 식 (8)과 같이 산출하였다⁽⁶⁾.

$$C = \sum_{i=1}^n x_i \cdot u_{X1}(x1_i) / \sum_{i=1}^n \theta_{X1}(x1_i) \tag{8}$$

여기서 C의 형태는 출력된 퍼지값{(x1_i, u_{X1}(x1_i))|x1_i∈X1, u_{X1}(x1_i)∈[0,1]}을 디퍼지화하여 얻은 하나의 수치값이다.

퍼지 제어기의 모의 실험

퍼지제어 모의 시스템은 Fig.2와 같이 퍼지 제어기와 가상의 이론적인 압출성형기로 구성하였다. 모의실험용 컴퓨터 simulator를 완성하기 위하여 실험적으로 회귀 분석하여 얻어진 수분함량 14%에 대한 팽화율과 스크류 회전속도 및 온도의 함수식 (9)을 가상적인 압출성형기로 대치하여 사용하였다.

$$Y = -8.120250 - 0.076825 X1 + 0.000603 X1 X2 + 0.474425 X2 - 0.003063 X2^2 \tag{9}$$

여기서 Y는 팽화율(압출물 두께/다이의 직경), X1은 rpm, X2는 온도(°C)이다. 퍼지 제어기는 측정변수의 입력 인터페이스, 퍼지 추론기, 제어변수의 디퍼지화 인터페이스로 구성하였고 각각의 구성원 및 크로즈-루프 연결 방식에 대하여 프로그래밍(Fig.3)하여 컴퓨터 simulator를 완성하였다. 단 히터(off시 냉각기로 작동)의 on/off 조작에 의한 온도변화는 히터의 용량에 따라 결정되므로 임의의 온도 상승 및 하강 변화율을 정하여 시간에 따른 온도를 계산하여 사용하였으며 스크류의 회전속도 변화

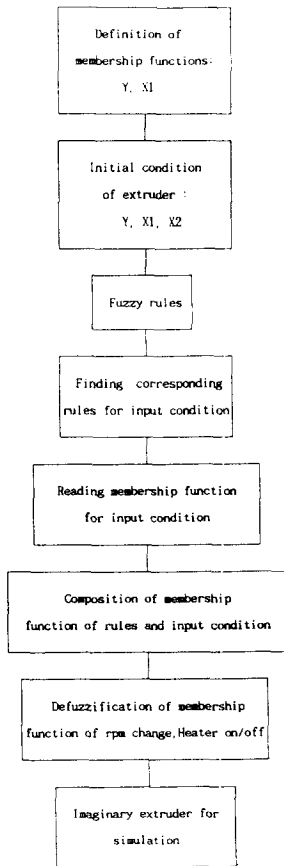


Fig. 3. Flow chart of computer simulation of fuzzy control

에 의한 열발산 효과는 본 모의실험에서는 무시하였다. 임의의 조건에서 압출성형기가 가상으로 작동할 때 압출물 두께와 압출성형기의 온도가 측정되어서 제어기에 피드백 입력되고 퍼지 제어기로부터 스크류 회전속도 변화량이 출력되고 on/off 제어기로부터 히터의 작동유무의 명령이 출력된다. 그 다음 출력값에 의하여 가상의 압출성형기가 제어되어 새로운 압출물 두께 및 온도가 생성되고 이들이 측정값으로 다시 제어기에 피드백 입력된다. 이와같은 일련의 반복 과정이 컴퓨터 simulator에 의하여 수행되었고, 모의실험에서 압출성형기가 임의의 조건에서 작동을 시작해서 압출물 두께가 원하는 목표치로 제어되는 과정을 관찰하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 하나의 예로서 원료 수분함량을 14%로 제한한 범위에서 퍼지제어를 수행하였다. 압출물의 두께를 제어할 때 조작할 수 있는 공정변수로는 원료의 수분함량, 압출성형기 배럴의 온도 및 스크류 회전속도가

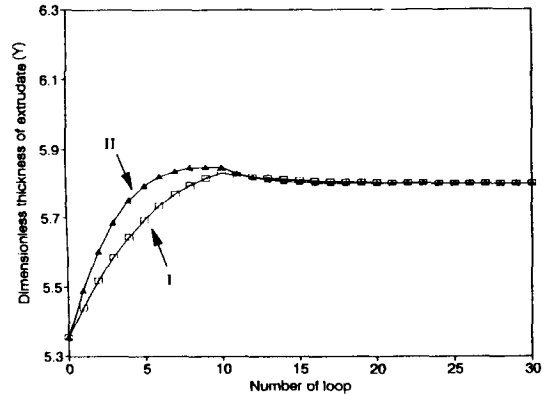


Fig. 4. Dimensionless thickness of extrudate as a function of control actions

Initial conditions: $Y=5.35(190 \text{ rpm}, 105^\circ\text{C})$

I:fuzzy control from membership function I(Table 1)

II:fuzzy control from membership function II(Table 2)

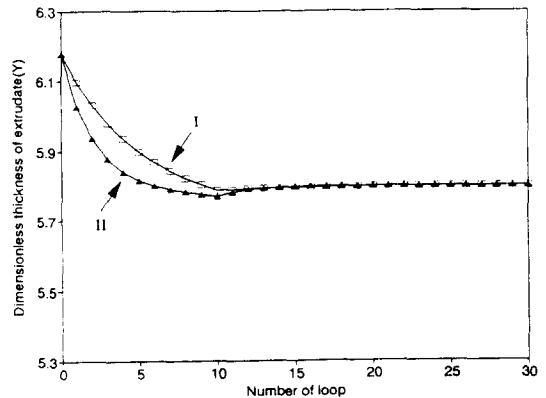


Fig. 5. Dimensionless thickness of extrudate as a function of control actions

Initial conditions: $Y=6.18(160 \text{ rpm}, 95^\circ\text{C})$

I:fuzzy control from membership function I(Table 1)

II:fuzzy control from membership function II(Table 2)

모두 가능하나, 실제 원료의 수분함량 및 압출성형기의 온도를 조절할 때 압출물 두께는 일정한 시간이 경과한 후 반응하게 되고 온도 역시 전기히터의 경우 on/off에 의하여 조절되기 때문에 즉각적인 반응이 지연된다. 따라서 실시간 제어에 가장 의미있는 조작 공정변수로 스크류 회전속도 조절을 선정하였고, 제이순위 조작변수로 압출성형기 온도를 선정하였고, 원료수분함량의 조절은 제외하였다.

수분함량 14%에 대한 팽화율(Y)과 회전속도 사이의 일반적인 관계를 분석하여 퍼지 법칙을 작성하였다 (Table 3). 퍼지 법칙은 퍼지 모델링의 노-하우 부분으로 퍼지 법칙의 양과 질에 의하여 퍼지추론 과정의 속도

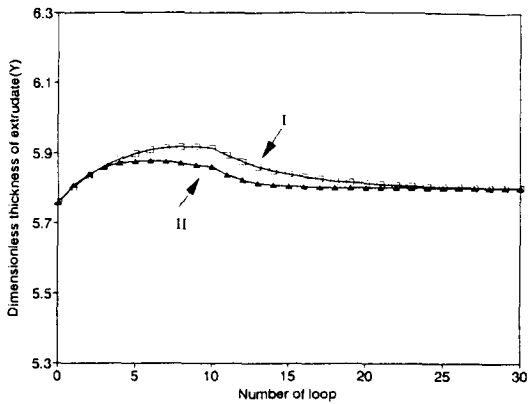


Fig. 6. Dimensionless thickness of extrudate as a function of control actions

Initial conditions: $Y=5.76$ (160 rpm, 105°C)
 I:fuzzy control from membership function I(Table 1)
 II:fuzzy control from membership function II(Table 2)

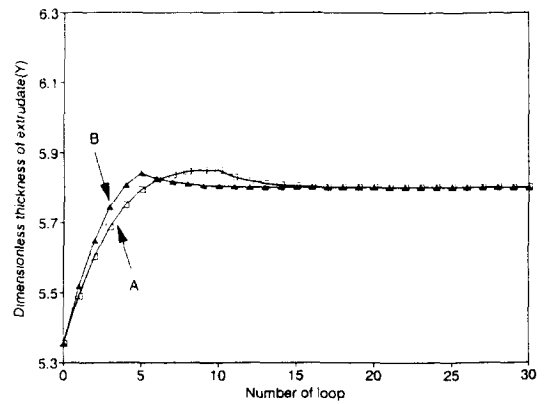


Fig. 8. Dimensionless thickness of extrudate as a function of control actions from Table 2

Initial conditions: $Y=5.38$ (190 rpm, 105°C)
 A: control with $-0.5^{\circ}\text{C}/\text{loop}$ of cooling
 B: control with $-1.0^{\circ}\text{C}/\text{loop}$ of cooling

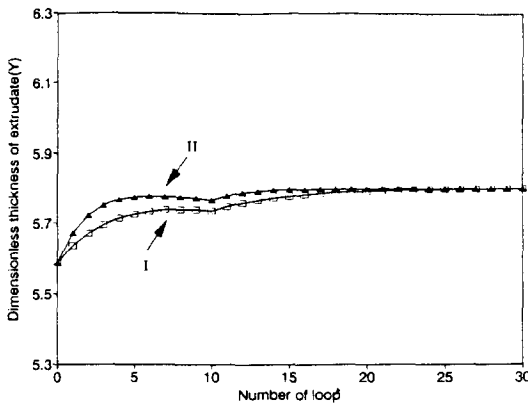


Fig. 7. Dimensionless thickness of extrudate as a function of control actions

Initial conditions: $Y=5.59$ (190 rpm, 95°C)
 I:fuzzy control from membership function I(Table 1)
 II:fuzzy control from membership function II(Table 2)

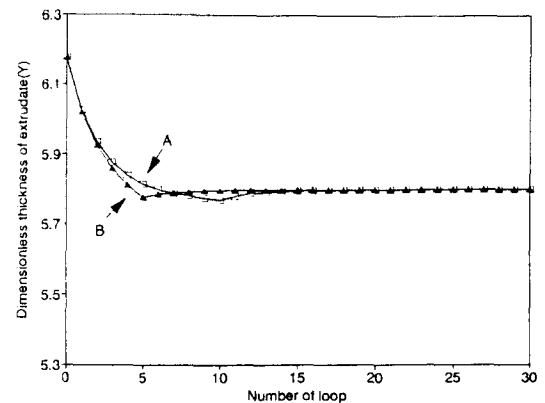


Fig. 9. Dimensionless thickness of extrudate as a function of control actions from Table 2

Initial conditions: $Y=6.18$ (160 rpm, 95°C)
 A: control with $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{loop}$ of heating
 B: control with $+1.0^{\circ}\text{C}/\text{loop}$ of heating

및 정확성이 결정된다. 퍼지 법칙을 작성하기 위한 전 처리 작업으로 관련 변수들에 대한 퍼지값을 설정하여야 한다. 예를 들어 압출물의 팽화율과 압출성형기의 스크류 회전속도(rpm) 사이의 관계를 나타낼 때 팽화율 4.6에 대응하는 rpm의 변화량이 8이라기 보다는 4.6 부근은 8 부근에 대응한다는 표현이 사실과 더 가깝다. 이와 같이 사실을 법칙화하기 위해서는 먼저 관련된 변수를 하나의 값보다는 일정범위의 집합으로 되어 있고 집합내 집합값들이 그 변수에 각각 얼마나 해당하는지를 표현하는 수단으로 퍼지값이 요구된다. 퍼지값은 Table 1, 2 두가지 경우 Y의 목표치(set point)가 모두 5.8이 되도록 설정하였다. 이때 온도 목표치는 100°C 로 정하였다.

Fig. 4, 5, 6, 7은 압출성형기가 가동중 임의의 여러 조건에 놓일 때 압출물의 두께가 피드백 입력되어 퍼지 제어되는 과정을 보여준다. 이때 하나의 팽화율이 피드백 입력되서 rpm 및 heater on/off가 한번 제어되었을 때를 1 loop로 정하였고, 모의실험 과정에서 소요되는 제어의 수를 control loop의 수로 나타내었다. 전반적으로 Table 1의 퍼지값의 경우 제어속도는 낮았고, Table 2의 경우는 그 제어속도가 빠르게 나타났다. 퍼지값의 설정시 소속함수의 모양, 폭 및 위치에 의하여 제어속도 및 그 정확도가 결정되는데 Table 1과 같이 소속함수의 폭을 비교적 크게 정한 경우에는 그 제어속도가 낮음을 알 수 있다. 이에 반하여 Table 2와 같이 Y값이 목표치와

멀리 떨어져 있을 때는 소속함수의 폭이 크고 목표치에 근접할 때는 소속함수의 폭이 점점 작아지게 소속함수를 정한 경우에는 제어의 속도가 빠름을 알 수 있다. Table 1, 2의 경우 제어의 목표치에서의 퍼지값은 사다리꼴이 아닌 삼각형으로 정하였는데 만일 목표치에서도 사다리꼴으로 정하면 제어의 정확도가 떨어지게 된다⁽¹¹⁾. 일반적인 경우 관련 공정의 특성에 따라 필요한 제어의 속도, 목표치에 접근 정도(정확도) 및 퍼지 법칙을 고려하여 퍼지값을 결정하여야 한다.

히터(off시 냉각기로 작동)의 on/off에 의한 가열/냉각 용량을 0.5, 1.0°C/loop로 달리하여 제어의 특성을 관찰하였다(Fig. 8, 9). 그 결과 전반적으로 가열/냉각 용량이 클수록 제어 속도가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 실제 압출성형기를 제작함에 있어서 히터 또는 냉각기의 용량은 제어의 목적 및 양상에 따라 결정되어야함을 알 수 있다.

앞으로 회전속도에 의한 가열 효과까지 포함시킨 모의실험이 요구되고 또한 보다 여러 형태의 퍼지 값 및 범위를 설정하고 퍼지 제어기의 적용범위를 수분 14% 뿐만 아니라 그 밖의 범위까지 확장하여 그에 수반되는 퍼지 법칙을 작성하여 보다 효과적이고 적용범위가 넓은 퍼지제어기의 완성이 요구된다.

요 약

퍼지 이론을 적용하여 압출성형공정을 제어하는 모의 실험을 수행하였다. 압출물의 두께(팽화율)가 측정변수로 피드백 입력되고 퍼지제어기를 통하여 스크류 회전속도의 set point가 출력되었다. 얻어진 set point로 가상의 압출성형기가 작동하여 또 다른 두께값이 측정값으로 입력되었다. 이와같은 일련의 과정이 반복되면서 최종적으로 원하는 두께값을 얻을 수 있었고 퍼지제어기의 알고리즘은 압출성형 전문가로부터 얻어진 기본 법칙을 이용하여 작성하였다.

감사의 글

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제

연구비에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서 이에 감사드리는 바입니다.

문 헌

1. O'connor, C.: *Extrusion Technology for the Food Industry*. Elsevier Applied Science, London (1987)
2. Linko, P. and Harper, J.M.: *Extrusion Cooking*. American Association of Cereal Chemists, USA (1989)
3. Wiedmann, W. and Strecker, J.: Process control of cooker-extruders. In *Proceedings of the International Symposium on the Automatic Control and Optimisation of Food Processes*, Paris, France, 12-13 November, p. 201 (1986)
4. Zimmermann, H.J.: *Fuzzy Set Theory and its Applications*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts (1991)
5. Klir, G.J. and Folger, T.A.: *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*. Prentice-Hall International, Inc., London (1988)
6. 변증남: 퍼지(Fuzzy) 이론의 응용. 식품 Extrusion 기술 하계강좌, 한국식품 Extrusion 연구회, p.66 (1991)
7. Eerikainen, T., Linko, S. and Linko, P.: The potential of fuzzy logic in optimization and control:fuzzy reasoning in extrusion cooker control. In *Proceedings of the International Symposium on the Automatic Control and Optimisation of Food Processes*, Paris, France, 12-13 November, p.183 (1986)
8. 원치선, 이승주, 한 익, 목철균: 압출성형물의 두께 측정을 위한 In-line 영상처리 시스템. 한국식품과학회지, 26, 448 (1994)
9. Zhang, Q. and Litchfield, J.B.: Applying fuzzy mathematics to product development and comparison. *Food Technol.*, 45, 108 (1991)
10. Singh, R.K. and Ou-Yang, F.: Knowledge-based fuzzy control of aseptic processing. *Food Technol.*, 48, 155 (1994)
11. 전인홍, 이광로: 퍼지 이론과 응용. 교학사 (1992)

(1994년 10월 5일 접수)