

전분반죽의 점도에 미치는 수분함량의 영향

이부용 · 이창호 · 이철호*

한국식품개발연구원, *고려대학교 식품공학과

Effect of Moisture Content on Viscosity of Starch Dough

Boo-Yong Lee, Chang-Ho Lee and Cherl-Ho Lee*

Korea Food Research Institute

*Department of Food Technology, Korea University

Abstract

To measure rheological properties of the starch dough, an Extrusion Capillary Viscometer(ECV) cell was self-made and attached to Instron machine(Model 1140). Apparent viscosities of corn and waxy corn starch doughs were measured and their gelatinization degrees were determined by enzymatic analysis. When corn and waxy corn starch doughs with 36~52% moisture content were heated at 60~100C, come-up time of the cold point of doughs decreased from 220 sec to 140 sec with increased in the moisture content. In the measurement range of 36~52% moisture content and 60~100C heating temperature, both corn and waxy corn starch doughs showed pseudoplastic flow behaviors. At the same shear rate, both shear stress and viscosity of starch dough decreased as the moisture content increased. At the moisture content above 44%, the shear stress and viscosity of starch dough decreased as the heating temperature increased from 60C to 70C, but increased as the heating temperature increased from 80C to 100C. When the moisture content increased and heating temperature, the gelatinization degree of starch dough increased from about 10% to about 62%. The gelatinization degree of waxy corn starch dough was 15~20% higher than that of corn starch dough under the same gelatinization conditions. The effects of moisture content on the viscosity of starch dough were examined by Arrhenius equation. As the moisture content increased, viscosity of starch dough decreased. But the effect of moisture content was greater in the range of 80~100C than in the range of 60~70C heating temperature.

Key words: starch dough, rheological properties, moisture content

서 론

오늘날에는 리올로지를 점탄성의 학문이라고도 부를 정도로 이 영역이 크게 개척되어 실험적인 면에서 고분자 물질과 같은 넓은 분야를 대상으로 하고 있다⁽¹⁾. 한편 이와같이 고분자 물질로 구성되어 있으며, 식품에서 점탄성을 나타내는 대표적인 물질중의 하나는 반죽(dough)으로서 식품가공에서 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

반죽의 정의를 살펴보면 보통 반죽이라 하면 밀가루 반죽을 지칭하는데 Webster 사전에서는 dough란 밀가루에 수분과 다른 부재료를 혼합, 반죽하여 밀어서 늘릴 수 있는 정도의 조직감을 갖는 것으로 정의하고 있다⁽²⁾. 일본 식품공업 총합사전에 따르면, 소맥분에 설탕이나 식염, 효모 등의 부원료를 첨가하고 소맥분 중량에 대하여 60% 전후의 수분을 가해서 반죽한 것으로 사람의

컹볼을 만지는 정도의 조직감을 갖는 것으로 정의되어 있다. 수분이 더 첨가되어 이상태 보다 더 부드러운 것은 페이스트(paste)라 하며, 소맥분 중량에 대하여 1.0~1.5 배의 수분을 가해서 유동상으로 한것은 배터(batter)라고 부른다. 이러한 것들은 모두 굽거나, 찌거나, 튀기는 등의 열을 가하지 않은 상태의 반죽된 밀가루를 말한다⁽³⁾. 밀가루 이외에 다른 재료로 반죽을 만들 때는 대개 대두 반죽(soy dough)이나 쌀반죽(rice dough) 같이 그 재료의 명칭을 앞에 붙여서 보통 반죽이라고 표현할 때와 구분하고 있다.

따라서 반죽의 물성을 이해하고 측정하여 수치화 하는것은 제과, 제빵, 식품압출성형 공정 등에서 매우 중요하다⁽⁴⁾. 특히 식품압출성형에서 많은 공정변수들을 설명하기 위해서는 반죽의 물성을 파악하는 것이 반드시 필요하다^(4,5).

지금까지 전분의 물성과 호화에 대한 연구는 주로 수분함량이 높은 고수분계의 현탁액을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 제과, 제빵공정에 사용하는 원료전분은 고수분계가 아닌 중간수분계이며⁽⁶⁾, 특히 최근

Corresponding author: Boo-Yong Lee, Korea Food Research Institute, San 46-1, Baekhyun-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Kyunggi-do 463-420, Korea

에 들어서 식품가공의 첨단기술로 불리우는 식품압출성형 공정은 압출성형기의 장점을 이용하여, 중간수분계 이하의 수분함량을 갖는 전분질을 원료로 파스타 식품, 즉석곡류 조리제품, 비스킷, 크래커, 유아식, 제과류, 빵가루 변성전분, 건조스프, 건조음료믹스 등을 생산하고 있다⁽⁷⁻⁹⁾. 따라서 위와같은 식품가공에 원료로 사용되는 중간수분계의 전분반죽 등에 대한 호화와 물성변화에 관한 연구가 매우 중요함에도 국내에서는 별로 연구되어 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 옥수수전분과 찹옥수수전분을 사용하여 중간수분계의 수분함량으로 반죽을 제조하고 수분함량과 가열온도, 가열시간에 따른 전분반죽의 물성변화를 밝혀보고자 하였다. 이를 위하여 먼저 전분반죽과 같은 반고체(semi-solid) 물질의 물성을 측정할 수 있는 Extrusion Capillary Viscometer(ECV)를 자체 제작하였고, 이것을 이용하여 옥수수전분과 찹옥수수전분 반죽에 대해 수분함량과 가열온도별로 점도와 호화도를 측정하고 점도에 미치는 수분함량의 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

실험재료

실험에 사용한 전분은 옥수수전분과 찹옥수수전분으로서 Sigma Chemical Co.에서 구입하였다. 옥수수전분과 찹옥수수전분의 수분함량은 A.O.A.C.⁽¹⁰⁾ 방법에 따라 정량하였으며, 아밀로펙틴 함량은 Morrison 등⁽¹¹⁾, Williams 등⁽¹²⁾, Wolf 등⁽¹³⁾의 방법을 참고하여 Knutson 방법⁽¹⁴⁾에 따라 비색 정량하였다. 즉 전분시료 일정량(100 mg)에 6×10^{-3} M의 요오드를 함유한 90% dimethyl sulfoxide (DMSO) 용액 100 ml를 가하여 1일 동안 교반하고, 이 용액 1 ml에 8 ml 물을 가하여 완전히 섞는다. 아밀로오스-티몰 복합체의 형성은 30분 내에 완결됨으로 30분 후 600 nm에서 흡광도를 측정하였다. 아밀로스 표준곡선은 순수한 아밀로스를 Sigma Chemical Co.로부터 구입하여 사용하였다.

ECV의 제작

ECV는 Fig. 1과 같이 크게 4부분으로 구성되어 있다. plunger의 재질은 내구성을 고려하여 스테인레스-304이고 extrusion barrel과 capillary, capillary lock-screw cap은 열전도도와 내구성을 함께 고려하여 듀랄루미늄-204를 사용하여 제작하였다. 측정원리는 extrusion barrel안에 측정 시료를 담고 plunger를 이동시켜 시료를 capillary로 밀어내는데 걸리는 힘을 load cell에서 측정하여 점도로 계산한다.

반죽의 제조

옥수수전분과 찹옥수수전분을 사용하여 건물기준으로 36%, 40%, 44%, 48%, 52%의 수분함량이 되도록 증류수를 첨가하여 각각 반죽을 제조하였다. 반죽제조시 첨

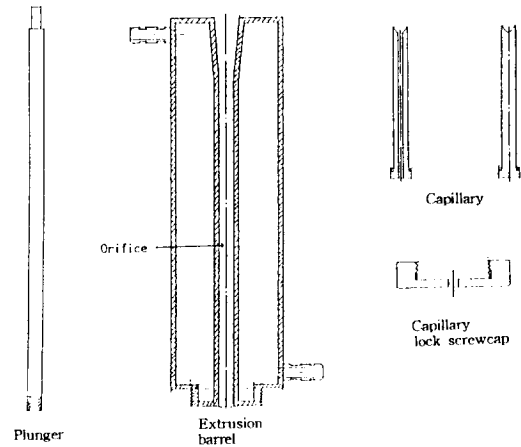


Fig. 1. The drawing of Extrusion Capillary Viscometer

가되는 수분이 잘 혼합되고, 혼합시 수분 증발을 방지하기 위해서 밀폐가 가능한 mixer(급성, Food Mixer)를 사용하였으며 혼합한 반죽을 밀봉후 4°C 냉장고에 1일 동안 방치시켜 혼합된 수분이 전분입자에 충분히 스며들도록 하여 측정 시료로 사용하였다.

반죽의 열전달 측정

위와같이 제조된 반죽을 ECV의 barrel orifice에 담고 circulator를 이용하여 가열하면서 점도를 측정할 때, orifice(φ9)에 담겨진 원통형 반죽의 중심온도가 원하는 가열온도에 도달한 후 측정을 시작하기 때문에 중심점이 원하는 가열온도에 도달하는데 걸리는 시간을 측정할 필요가 있다. 수분함량 36%, 40%, 44%, 48%, 52%의 반죽을 barrel orifice에 100 kg의 일정한 힘으로 충전하고 Fig. 2와 같이 중심에 digital thermocouple(Model DP-500, RKC Co., made in Japan)을 장착하여 반죽의 중심점 온도를 시간별로 측정하였다. 이 때 사용한 thermocouple의 직경은 1.0 mm이었고 가열시 수증기의 증발을 막기 위해서 barrel orifice의 하단 부위는 구멍이 없는 capillary를 끼우고, 상단부에는 실리콘 마개로 밀폐시켰다.

반죽의 점도측정

제작된 ECV를 Fig. 3과 같이 Instron(Model 1140, Instron Co., made in U.S.A.)에 장착하였다. 제조된 반죽을 ECV의 barrel orifice에 담고 orifice 하단부를 구멍이 없는 capillary를 끼운 후, Instron의 힘을 이용하여 100 kg의 일정한 힘으로 반죽을 잘 압축시킨다. 담겨진 반죽의 가열을 위해 circulator(Lauda M3, made in U.S.A.)를 barrel에 부착시키고 광물유를 열매체로 사용하여 가열 시킨다. 반죽의 가열시 plunger를 orifice에 장치하여 수증기의 증발을 막고, 측정된 반죽의 열전도도를

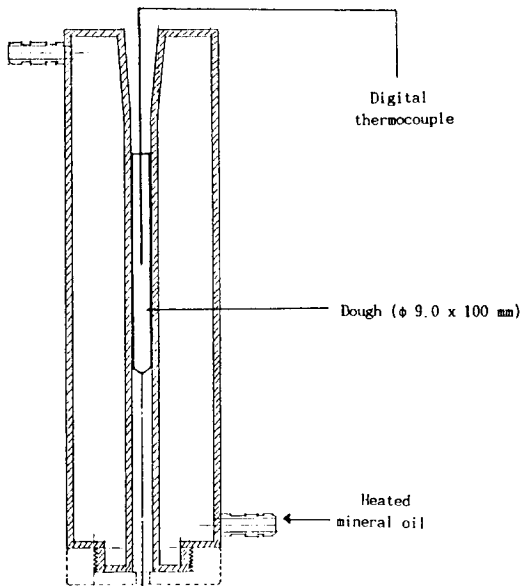


Fig. 2. The schematic diagram of measurement of heat transmission of corn and waxy corn starch doughs

Table 1. Dimension of Extrusion Capillary Viscometer for viscosity measurement of corn and waxy corn starch doughs

Elements	Dimension
Plunger length	250 mm
Plunger diameter	8.9 mm
Extrusion barrel length	240 mm
Extrusion barrel out diameter	69 mm
Extrusion barrel orifice diameter	9.0 mm
Section area of extrusion barrel orifice (A)	$6.3585 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Capillary length (L)	90 mm
Capillary diameter (D)	3.0 mm
Capillary radius (R)	1.5 mm
L/D ratio	30

Table 2. The conditions for measurement of viscosity of corn and waxy corn starch doughs with Instron(Model 1140)

Maximum force of load cell	500 Kg
Chart speed	100 mm/min
Cross head speeds(V)	50 mm/min
	80 mm/min
	100 mm/min
	200 mm/min
	400 mm/min
	500 mm/min

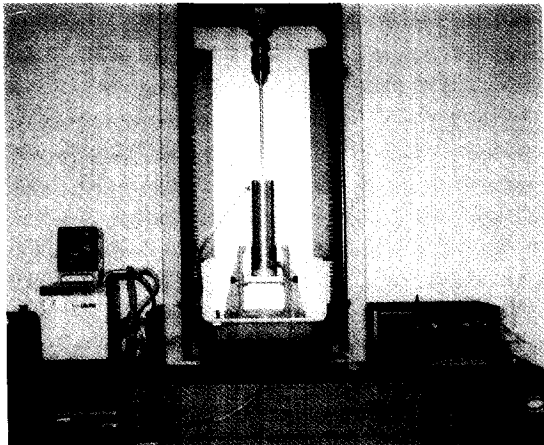


Fig. 3. The photographs of Extrusion Capillary Viscometer fitted to Instron(Model 1140)

참고하여 반죽의 중심온도가 원하는 온도에 도달될 때까지 반죽을 가열시킨다.

반죽의 중심이 원하는 온도에 도달하면 Instron의 cross head 속도를 조절하여 전단 속도를 달리하면서 반죽이 capillary를 통과할 때 걸리는 힘(F_c ; the force required to extrude material through the capillary)과 orifice를 통과할 때 걸리는 힘(F_o ; the force required to extrude material through the orifice)을 측정한다. Load cell은 500 Kg까지 측정 가능한 것을 사용하였다. 한편 반죽의 점도 측정을 위해 사용한 ECV의 재료와

Instron측정조건은 Table 1, 2와 같다. Table 1, 2와 같은 조건으로, 수분함량 36%, 40%, 44%, 48%, 52%로 제조된 옥수수전분과 찹옥수수전분 반죽에 대해 가열온도 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C에서 Instron의 cross head 속도(V)를 50 mm/min, 80 mm/min, 100 mm/min, 200 mm/min, 400 mm/min, 500 mm/min로 조절하여 전단 속도를 달리하면서 반죽의 F_c 와 F_o 를 측정하였다. 측정시 capillary를 통과해서 밀려나오는 반죽은 급속냉동하여 동결 건조한 후 호화도를 측정하였다.

반죽의 점도계산

여러조건에서 Instron에 의해 측정된 F_c 와 F_o 는 아래와 같은 과정에 의해 겔보기 점도로 계산된다.

1) 유량(Q: volumetric flow rate)에 대한 압력저하(P: pressure drop)를 계산한다.

$$\Delta P = \frac{F_c - F_o}{A}$$

ΔP : pressure drop (Kg/m² Pa)

F_c : force required to extrude material through the capillary(Kg)

F_o : force required to extrude material through the orifice(Kg)

A : section area of extrusion barrel orifice($6.3585 \times 10^{-5} \text{ m}^2$)

이 때 P를 Pa로 환산하기 위해서 중력환산계수(conversion factor, $9.8067 \text{ Kg}_m \cdot \text{m/Kg}_f \cdot \text{sec}^2$)를 사용하였다.

2) 모세관 벽면에서의 전단응력(τ_w : shear stress)을 계산한다.

$$\tau_w = \frac{\Delta PR}{2L}$$

τ_w : wall shear stress (Pa)

R : capillary radius(0.0015 m)

L : length of capillary(0.09 m)

3) Instron의 cross head속도에 따른 겔보기 전단속도($\dot{\gamma}_{app}$: apparent shear rate)를 계산한다.

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

$\dot{\gamma}_{app}$: apparent shear rate (s^{-1})

Q = V × A

Q: volumetric flow rate(m^3/s)

V: cross head speed(mm/min)

4) τ_w 에 대한 $\dot{\gamma}_{app}$ 를 log-log plot하여 그 기울기(b)를 구한다.

$$b = \frac{d(\log \dot{\gamma}_{app})}{d(\log \tau_w)} = \frac{1}{n}$$

n: flow behavior index

5) Rabinowitch식에 의해 비뉴톤 유체에 대한 벽면의 전단속도($\dot{\gamma}_w$: wall shear rate)를 구한다.

$$\dot{\gamma}_w = \frac{(3+b)4Q}{4\pi R^3}$$

$\dot{\gamma}_w$: wall shear rate (s^{-1})

6) 최종적으로 벽면의 층밀림 속도에 대한 벽면의 전단응력으로부터 전단점도(η : shear viscosity)를 도출함으로써 전단 점도함수를 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w}$$

η : shear viscosity(Pa·s)

반죽의 호화도 측정

옥수수전분과 찰옥수수전분 반죽을 수분함량 36%, 40%, 44%, 48%, 52%, 가열온도 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C에서 ECV로 F_1 와 F_2 를 측정할 때 capillary를 통과해 나오는 시료를 받아 바로 급속 냉동을 시킨 후 동결건조시켰다. 동결건조된 시료를 100 mesh를 통과하도록 마쇄한 뒤 BAP(β -amylase and pullulanase)법^(15,16)으로 호

Table 3. Moisture, amylopectin and amylose content of corn and waxy corn starch

	Moisture content(%)	Amylopectin ¹⁾ content(%)	Amylose ¹⁾ content(%)
Corn starch	9.49	72.1	27.6
Waxy corn starch	8.78	99.8	—

¹⁾Dry basis

—, No detection

화도를 측정하였다. 이 때 사용한 효소는 β -amylase(from barley)와 pullulanase(from *Enterobacter aerogenes*)로서 모두 Sigma Chemical Co.로부터 구입하였다.

반죽의 점도에 대한 수분함량의 영향 분석

수분함량(36%, 40%, 44%, 48%, 52%), 가열온도(60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C)에 따라 ECV로 측정된 옥수수 전분과 찰옥수수전분 반죽의 점도에 대한 수분함량의 영향 분석을 다음과 같은 Arrhenius 식^(17,18)으로 분석하였다.

$$\eta = \eta_\infty \exp(BA)$$

η_∞ : 무한 겔보기 점도(infinite apparent viscosity, Pa·s)

B: 농도의존성 상수

A: 반죽의 수분함량(%)

결과 및 고찰

전분의 아밀로스 정량

시료로 사용한 옥수수전분과 찰옥수수전분의 아밀로스와 아밀로펙틴을 정량한 결과는 Table 3과 같다. 찰옥수수전분은 모두 아밀로펙틴으로 구성되어 있었으며 옥수수전분은 아밀로펙틴과 아밀로스 함량이 각각 72.1%, 27.6%이었다.

반죽의 열전달 특성

반죽의 중심온도가 평형에 도달하는데 걸리는 시간은 가열온도까지 도달하는데 걸린 come-up 시간으로 판단하였다. 반죽의 종류와 가열온도에 상관없이 36% 수분함량에서는 가열온도에 도달하는데 걸리는 시간이 220초로 나타났고, 52% 수분함량에서는 140초 정도로 나타났다. 이와같이 반죽의 중심이 가열온도에 도달하는데 걸리는 come-up 시간을 각 수분함량 별로 요약한 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서 보면 동일한 가열온도에서는 반죽의 수분함량이 증가할수록 come-up 시간이 220초에서 140초로 크게 단축되는 것을 알 수 있다. 따라서 반죽의 중심이 가열온도에 도달하는데 걸리는 come-up 시간은 가열온도에 상관없이 수분함량에 의해 서만 영향을 받아 수분이 열전달의 주요 매체인 것을

Table 4. Changes in come-up time(sec) of the cold point of corn and waxy corn starch doughs by moisture content and heating temperature

Materials	Moisture content(%)	Heating temperature(°C)				
		60	70	80	90	100
Corn starch dough	36	220	220	220	220	220
	40	200	200	200	200	200
	44	180	180	180	180	180
	48	160	160	160	160	160
	52	140	140	140	140	140
Waxy corn starch dough	36	220	220	220	220	220
	40	200	200	200	200	200
	44	180	180	180	180	180
	48	160	160	160	160	160
	52	140	140	140	140	140

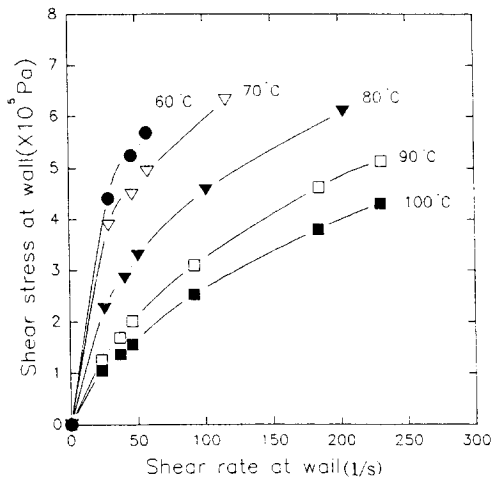


Fig. 4. Plot of shear stress vs. shear rate for corn starch dough with 36% moisture content

알 수 있었으며, 이 결과를 실제 ECV의 barrel에 반죽을 채워 넣고 일정온도로 가열한 뒤 물성을 측정할 때 그 온도에서 반죽의 중심이 가열온도에 도달하는데 걸리는 가열시간으로 사용하였다.

수분함량과 가열온도에 따른 반죽의 호화도와 물성변화
 옥수수전분 반죽 : 옥수수전분 반죽을 수분함량 36%, 40%, 44%, 48%, 52%, 가열온도 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C에서 ECV로 F와 F₁를 측정하고, 계산식에 의해 구한 벽면의 전단속도(shear rate at wall)에 따른 벽면의 전단응력(shear stress at wall) 변화는 대표적으로 Fig. 4, 5, 6과 같다. Fig. 4는 36% 수분함량에서 벽면의 전단속도가 증가할 때 그에 따른 벽면의 전단응력 변화를 측정된 것으로써 흐름 형태로 볼 때는 각 온도에서 모두 의가소성 유체의 흐름 특성을 보여 주었다. 가열온도가

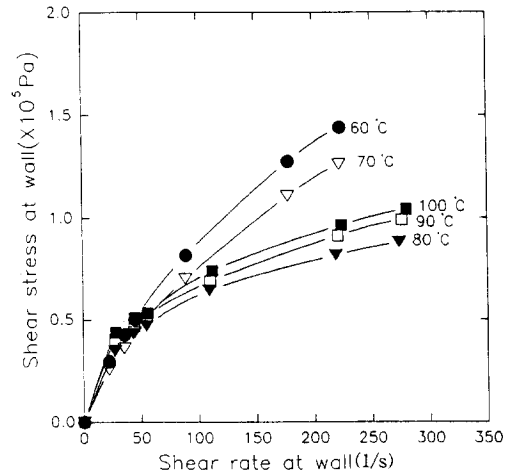


Fig. 5. Plot of shear stress vs. shear rate for corn starch dough with 44% moisture content

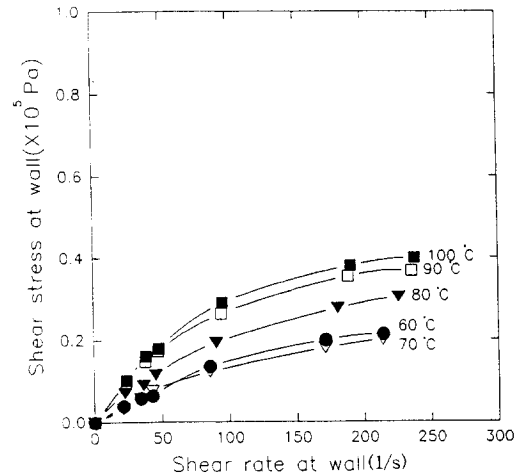


Fig. 6. Plot of shear stress vs. shear rate for corn starch dough with 52% moisture content

60°C에서 100°C로 증가할 때 벽면의 전단응력은 오히려 감소하여 전단점도(shear viscosity)가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 36% 수분함량에서는 가열온도가 증가하면 반죽의 전분이 호화되어 벽면의 전단응력이나 전단점도가 증가하는 영향보다는 온도증가에 따른 반죽의 유동성(flowability)증가 영향이 더 크기 때문에 온도증가에 따라 벽면의 전단응력이 감소하는 것으로 판단되었다. 수분함량 40%에서 측정된 옥수수전분 반죽도 Fig. 4와 같은 경향을 보여 주었다. Fig. 5에서, 수분함량이 44%로 증가하면 60°C에서 80°C로 가열온도가 증가할 때는 수분함량 36%나 40%에서와 같이 벽면의 전단응력이 감소하나, 80°C에서 100°C로 증가할 때는 벽면의

Table 5. Viscosity functions and flow behavior indexes of corn starch doughs measured by Extrusion Capillary Viscometer in various moisture contents and heating temperatures

Moisture content(%)	Heating temp.(°C)	Viscosity function		Flow behavior index
		$\tau_w = f(\dot{\gamma}_w)$	$\eta_w = f(\dot{\gamma}_w)$	
36	60	$\log\tau_w = 0.3641\log\dot{\gamma}_w + 5.1140(0.9999)^{1)}$	$\log\eta_w = -0.6359\log\dot{\gamma}_w + 5.1140(-0.9999)^{1)}$	0.3641
	70	$\log\tau_w = 0.3536\log\dot{\gamma}_w + 5.0682(0.9901)$	$\log\eta_w = -0.6461\log\dot{\gamma}_w + 5.0684(-0.9990)$	0.3542
	80	$\log\tau_w = 0.4799\log\dot{\gamma}_w + 4.6869(0.9982)$	$\log\eta_w = -0.5204\log\dot{\gamma}_w + 4.6877(-0.9985)$	0.4816
	90	$\log\tau_w = 0.6155\log\dot{\gamma}_w + 4.2678(0.9991)$	$\log\eta_w = -0.3843\log\dot{\gamma}_w + 4.2686(-0.9987)$	0.6167
	100	$\log\tau_w = 0.6225\log\dot{\gamma}_w + 4.1678(0.9994)$	$\log\eta_w = -0.3782\log\dot{\gamma}_w + 4.1687(-0.9992)$	0.6232
40	60	$\log\tau_w = 0.3823\log\dot{\gamma}_w + 4.9739(0.9988)$	$\log\eta_w = -0.6177\log\dot{\gamma}_w + 4.9740(-0.9995)$	0.3832
	70	$\log\tau_w = 0.3558\log\dot{\gamma}_w + 4.9789(0.9926)$	$\log\eta_w = -0.6441\log\dot{\gamma}_w + 4.9788(-0.9977)$	0.3543
	80	$\log\tau_w = 0.4736\log\dot{\gamma}_w + 4.6398(0.9998)$	$\log\eta_w = -0.5263\log\dot{\gamma}_w + 4.6397(-0.9998)$	0.4738
	90	$\log\tau_w = 0.6114\log\dot{\gamma}_w + 4.2187(0.9998)$	$\log\eta_w = -0.3885\log\dot{\gamma}_w + 4.2185(-0.9996)$	0.6117
	100	$\log\tau_w = 0.6323\log\dot{\gamma}_w + 4.1265(0.9988)$	$\log\eta_w = -0.3677\log\dot{\gamma}_w + 4.1265(-0.9964)$	0.6339
44	60	$\log\tau_w = 0.6857\log\dot{\gamma}_w + 3.5605(0.9992)$	$\log\eta_w = -0.3144\log\dot{\gamma}_w + 3.5607(-0.9959)$	0.6869
	70	$\log\tau_w = 0.6902\log\dot{\gamma}_w + 3.4900(0.9994)$	$\log\eta_w = -0.3103\log\dot{\gamma}_w + 3.4908(-0.9968)$	0.6910
	80	$\log\tau_w = 0.4040\log\dot{\gamma}_w + 3.9685(0.9984)$	$\log\eta_w = -0.5959\log\dot{\gamma}_w + 3.9683(-0.9993)$	0.4053
	90	$\log\tau_w = 0.3965\log\dot{\gamma}_w + 4.0278(0.9994)$	$\log\eta_w = -0.6033\log\dot{\gamma}_w + 4.0273(-0.9997)$	0.3969
	100	$\log\tau_w = 0.3898\log\dot{\gamma}_w + 4.0643(0.9978)$	$\log\eta_w = -0.6100\log\dot{\gamma}_w + 4.0639(-0.9990)$	0.3854
48	60	$\log\tau_w = 0.6398\log\dot{\gamma}_w + 3.3074(0.9975)$	$\log\eta_w = -0.3599\log\dot{\gamma}_w + 3.3070(-0.9923)$	0.6430
	70	$\log\tau_w = 0.6605\log\dot{\gamma}_w + 3.2298(0.9967)$	$\log\eta_w = -0.3388\log\dot{\gamma}_w + 3.2283(-0.9876)$	0.6648
	80	$\log\tau_w = 0.5901\log\dot{\gamma}_w + 3.4171(0.9978)$	$\log\eta_w = -0.4092\log\dot{\gamma}_w + 3.4159(-0.9955)$	0.5810
	90	$\log\tau_w = 0.5678\log\dot{\gamma}_w + 3.5267(0.9958)$	$\log\eta_w = -0.4312\log\dot{\gamma}_w + 3.5251(-0.9929)$	0.5726
	100	$\log\tau_w = 0.5418\log\dot{\gamma}_w + 3.6007(0.9940)$	$\log\eta_w = -0.4586\log\dot{\gamma}_w + 3.6016(-0.9915)$	0.5484
52	60	$\log\tau_w = 0.7658\log\dot{\gamma}_w + 2.5819(0.9925)$	$\log\eta_w = -0.2348\log\dot{\gamma}_w + 2.5829(-0.9297)$	0.7774
	70	$\log\tau_w = 0.7516\log\dot{\gamma}_w + 2.5887(0.9825)$	$\log\eta_w = 0.2491\log\dot{\gamma}_w + 2.5901(-0.8691)$	0.7786
	80	$\log\tau_w = 0.6517\log\dot{\gamma}_w + 2.9695(0.9950)$	$\log\eta_w = -0.3475\log\dot{\gamma}_w + 2.9683(-0.9834)$	0.6583
	90	$\log\tau_w = 0.5659\log\dot{\gamma}_w + 3.2604(0.9857)$	$\log\eta_w = -0.4354\log\dot{\gamma}_w + 3.2626(-0.9761)$	0.5824
	100	$\log\tau_w = 0.5575\log\dot{\gamma}_w + 3.3098(0.9894)$	$\log\eta_w = -0.4417\log\dot{\gamma}_w + 3.3080(-0.9835)$	0.5695

¹⁾: Correlation coefficient

전단응력이 증가하는 경향을 보여 주었다. 이것은 44% 수분함량부터는 36%나 40% 수분함량보다 옥수수전분 반죽이 어느정도 호화되는데 필요한 수분함량이라고 생각되어 호화온도인 80°C를 기점으로 가열온도 증가에 따른 반죽의 유동성 증가 영향보다 반죽의 호화에 의한 벽면의 전단응력 증가 영향이 더 크기 때문인 것으로 판단되었다. 수분함량 48%에서는 가열온도 70°C부터 벽면의 전단응력이 가열온도가 증가할수록 증가하는 경향을 보여 주었고, Fig. 6의 수분함량 52%에서는 가열온도 70°C부터 수분함량 48%에서 보다 더 큰 폭으로 벽면의 전단응력이 증가하는 경향을 보여 주었다. 이와같이 수분함량 36~52% 범위, 가열온도 60~100°C 범위에서 벽면의 전단속도에 따른 벽면의 전단응력을 측정하여 종합평리한 전단점도 함수식과 반죽의 유동지수(flow behavior index)는 Table 5와 같다. 반죽의 유동 지수는 0.3542~0.7786 범위의 값들로서 모든 측정범위에서 의 가소성 유체의 흐름 특성을 나타내었다. 한편, 옥수수전분 반죽을 수분함량과 가열온도에 따라 ECV로 물성을 측정하면서 capillary를 바로 통과해 나온 반죽을 냉동 건조시켜 효소측정법(BAP법)으로 호화도를 측정할 결과는 Table 6과 같다. 가열온도 60°C에서는 모든 수분함량 범위에서 10~11%의 호화도를 나타내었다. 이는

가열에 의해 호화된 것이 아니라 가열하기 이전에 생 전분이라 하더라도 전분입자가 전분 세조시 milling에 의해 약간의 손상을 받기 때문에 이 손상전분(damaged starch)이 효소에 의해 가수분해되어 효소 측정법으로 호화도를 측정할 때 어느 정도 호화된 것으로 나타나는 것이지 실제 60°C 가열에 의해 전분이 호화되어 나타난 호화도는 아니라고 판단되었다^{19, 20}. 따라서 10~11%의 호화도를 기준으로 하여 볼 때 동일 수분함량에서는 가열온도가 증가할수록 호화도가 증가하나 그 증가폭은 수분함량이 36%에서 52%로 증가함에 따라 급격히 증가하여 52% 수분함량, 100°C 가열온도에서는 약 53% 정도의 호화도를 나타내었다. 동일한 가열온도라 할지라도 수분함량에 따라 호화도가 다르게 나타나는 것은 온도가 반죽을 호화시키기엔 충분한 가열온도라 할지라도 수분함량이 충분치 못하기 때문에 수분함량의 증가에 따라 전분호화에 필요한 수분이 더 공급된 만큼씩 비례적으로 반죽의 호화도가 증가하는 것으로 생각되었다. 반죽의 호화도는 수분함량과 가열온도에 따라 비례적으로 증가하지만, Fig. 4, 5, 6에서의 전단속도가 동일할 때 벽면의 전단응력 변화는 반죽의 수분함량이 증가할 수록 전체적으로 감소하여 수분함량 증가에 따라 반죽의 유동성증가 영향이 매우 큰 것으로 나타났으며, 44% 수

Table 6. Changes in gelatinization degree of corn and waxy corn starch doughs determined from enzymatic analysis

Moisture content(%)	Heating temp.(°C)	Gelatinization degree(%)	
		Corn starch dough	Waxy corn starch dough
36	60	10.15	10.09
	70	11.96	11.77
	80	18.84	21.11
	90	22.21	25.95
	100	24.12	28.17
40	60	10.72	11.01
	70	13.02	13.27
	80	25.16	28.59
	90	29.23	34.35
	100	31.71	36.42
44	60	10.52	11.52
	70	12.35	13.11
	80	28.36	32.69
	90	35.74	42.83
	100	38.15	44.05
48	60	10.89	11.45
	70	12.75	12.67
	80	32.87	41.37
	90	42.12	51.46
	100	44.33	53.96
52	60	10.64	11.85
	70	14.15	13.17
	80	36.15	50.74
	90	49.87	60.47
	100	52.25	62.78

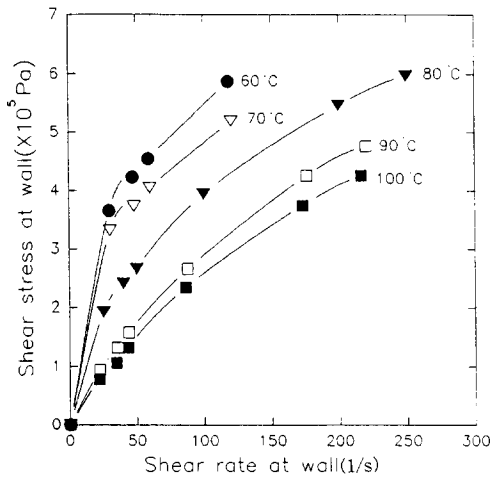


Fig. 7. Plot of shear stress vs. shear rate for waxy corn starch dough with 36% moisture content

분함량 이상에서는 동일수분함량에서는 80°C 가열온도 이상부터 반죽의 호화에 의해 동일한 전단속도에서 80°C 이하로 가열한 반죽에 비해 전단응력과 전단점도가 증

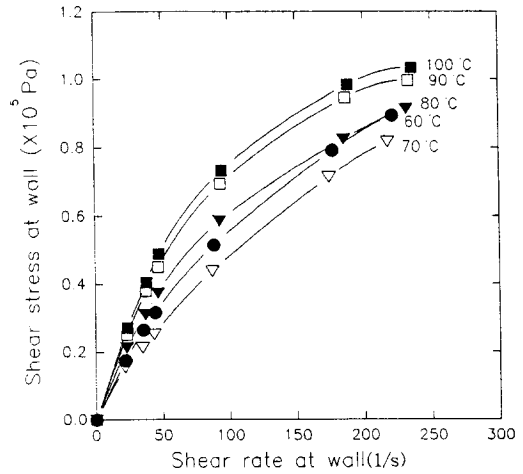


Fig. 8. Plot of shear stress vs. shear rate for waxy corn starch dough with 44% moisture content

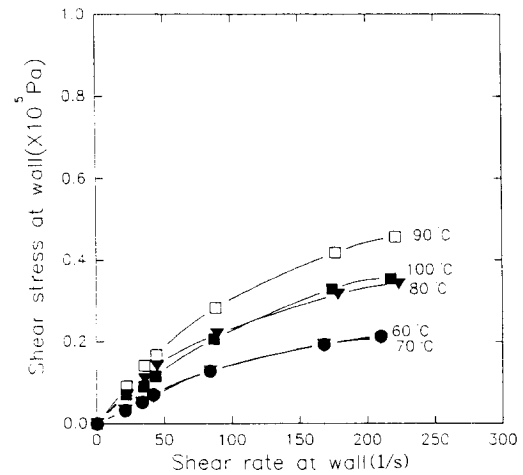


Fig. 9. Plot of shear stress vs. shear rate for waxy corn starch dough with 52% moisture content

가하는 것으로 나타났다. 즉, 고수분계의 호화액과 같이 전단속도에 따라 전단응력이 비례적으로 증가하지 않고, 수분함량과 가열온도에 따라 전단응력이 변화하는 것이 중간 수분계의 전분 반죽이 갖는 물성학적 특성으로 판단되었다.

이와같이 전분의 호화가 수분함량에 의해 제한을 받는다는 연구 결과는 Donovan⁽²³⁾, Wootton⁽²⁴⁾, Nakazawa⁽²⁵⁾ 등의 DSC를 이용한 전분의 호화기작 연구에서도 많이 보고되어 있다. 즉 전분이 호화온도 이상의 충분한 가열 온도라면 전분의 호화 정도는 수분함량의 증가에 따라 비례적으로 증가하며, 전분의 종류에 따라 약간씩의 차이가 있지만 대개 전분 대 수분의 비율이 1:2 이상은

Table 8. Values of η_a and B of corn starch dough at 20 s⁻¹ apparent shear rate

Heating temperature (°C)	Moisture content(%)	η_a ($\times 10^6$ Pa·s)	B (-)	r ¹⁾
60	36~52	907.1936	-0.2967	-0.9774
70	36~52	896.3962	-0.2988	-0.9723
80	36~52	42.3643	-0.2287	-0.9708
90	36~52	3.4834	-0.1738	-0.9803
100	36~52	1.5042	-0.1548	-0.9785

¹⁾r: Correlation coefficient

Table 9. Values of η_a and B of corn starch dough at 80 s⁻¹ apparent shear rate

Heating temperature (°C)	Moisture content(%)	η_a ($\times 10^6$ Pa·s)	B (-)	r
60	36~52	62.5893	-0.2480	-0.9811
70	36~52	49.3515	-0.2451	-0.9764
80	36~52	9.1812	-0.2078	-0.9601
90	36~52	1.5513	-0.1678	-0.9600
100	36~52	0.6899	-0.1498	-0.9573

Table 10. Values of η_a and B of corn starch dough at 200 s⁻¹ apparent shear rate

Heating temperature (°C)	Moisture content(%)	η_a ($\times 10^6$ Pa·s)	B (-)	r
60	36~52	24.8199	-0.2377	-0.9835
70	36~52	16.8578	-0.2313	-0.9802
80	36~52	4.8529	-0.2047	-0.9506
90	36~52	1.6413	-0.1801	-0.9543
100	36~52	0.8095	-0.1648	-0.9535

되어야 그 안에 존재하는 전분을 모두 호화시킬 정도의 충분한 수분량이라고 보고하고 있다.

찰옥수수전분 반죽 : 찰옥수수전분 반죽을 수분함량 36%, 40%, 44%, 48%, 52%, 가열온도 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C에서 ECV로 F₁와 F₂를 측정하고 계산식에 의해 구한 벽면의 전단속도에 따른 벽면의 전단응력의 변화는 대표적으로 Fig. 7, 8, 9와 같다. 찰옥수수전분 반죽도 수분함량 별로 가열온도에 따라 벽면의 전단응력 변화는 옥수수전분 반죽과 같은 경향을 보여 주었다. 36%의 수분함량에서 Fig. 4의 옥수수전분 반죽과 Fig. 7의 찰옥수수전분 반죽의 전단응력을 비교하면 최고치가 6.3 $\times 10^5$ Pa에서 5.9 $\times 10^5$ Pa로 약간 감소하였고, 40% 수분함량에서도 전반적으로 옥수수전분 반죽보다 찰옥수수전분 반죽의 벽면전단응력이 약 8~10%씩 감소하는 것으로 나타났다. 44%, 48% 수분함량도 위와 같은 경향을 나타내는데 이것은 동일한 수분함량과 가열온도에서 옥수수전분 반죽보다 찰옥수수전분 반죽의 유동성(flowability)이 더 증가하여 벽면의 전단응력이 감소하는 것으로 판단되었다. 수분함량 52%에서는 Fig. 6의 옥수수전분 반죽과는 달리 Fig. 9의 찰옥수수전분 반죽은 100°C로 가열하여 전단응력 측정시 전분의 압출 성형시와 같은

팽화현상이 일어나 90°C로 가열할 때 보다 반죽의 전단응력이 감소하였다. 48% 수분함량에서도 100°C에서는 팽화현상이 일어나 48% 수분함량의 옥수수전분 반죽과는 달리 90°C보다 전단응력이 감소하는 것으로 나타났다. 위와같이 측정하여 구한 찰옥수수전분 반죽의 전단점도 함수식과 유동지수를 정리해 보면 Table 7과 같다. 반죽의 유동 지수는 0.3304~0.8314 범위의 값으로서 모든 측정범위에서 의가소성 유체의 흐름특성을 나타내었다. 찰옥수수전분 반죽의 수분함량과 가열온도 별로 ECV로 불성을 측정하면서 capillary를 바로 통과해 나온 반죽을 냉동건조시켜 효소측정법(BAP 법)으로 호화도를 측정할 결과는 Table 6과 같다. 수분함량과 가열온도가 증가할 수록 호화도가 증가하여 약 10~63% 범위의 호화도를 나타내었다. Table 6에서 옥수수전분과 찰옥수수전분 반죽의 호화도를 비교해 보면 수분함량이 같을 때 70°C 이하의 가열온도에서는 호화도의 차이가 거의 나타나지 않았으나 80°C 이상의 가열온도에서는 찰옥수수전분 반죽의 호화도가 옥수수전분 반죽에 비해 약 15~20% 정도씩 증가하는 것으로 나타났다. 이와같은 현상은 전분의 호화온도 이상의 가열온도에서는 반죽의 수분함량이 같은지라도 찰옥수수전분이 더 잘 호화되는 현상을

Table 11. Values of η_s and B of waxy corn starch dough at 20 s⁻¹ apparent shear rate

Heating temperature (°C)	Moisture content(%)	η_s ($\times 10^6$ Pa·s)	B (-)	r ¹⁾
60	36~52	739.7756	-0.2995	-0.9696
70	36~52	457.4040	-0.2896	-0.9656
80	36~52	21.7570	-0.2189	-0.9697
90	36~52	1.6018	-0.1618	-0.9788
100	36~52	1.7754	-0.1680	-0.9793

¹⁾r: Correlation coefficient

Table 12. Values of η_s and B of waxy corn starch dough at 80 s⁻¹ apparent shear rate

Heating temperature (°C)	Moisture content(%)	η_s ($\times 10^6$ Pa·s)	B (-)	r
60	36~52	40.2068	-0.2442	-0.9659
70	36~52	21.8122	-0.2315	-0.9610
80	36~52	4.5614	-0.1937	-0.9673
90	36~52	0.8279	-0.1514	-0.9764
100	36~52	1.3101	-0.1682	-0.9831

Table 13. Values of η_s and B of waxy corn starch dough at 200s⁻¹ apparent shear rate

Heating temperature (°C)	Moisture content(%)	η_s ($\times 10^6$ Pa·s)	B (-)	r
60	36~52	12.2208	-0.2272	-0.9703
70	36~52	7.4851	-0.2170	-0.9637
80	36~52	2.3588	-0.1887	-0.9622
90	36~52	0.6856	-0.1594	-0.9685
100	36~52	0.9936	-0.1707	-0.9796

나타내주는 것으로서 호화가 진행되면서 호화에 의한 점도증가 영향보다는 반죽의 유동성이 증가하여 벽면의 전단응력이나 전단점도가 감소하는 현상으로 나타난다고 판단되었다. 즉, 반죽이 호화되기 이전의 유동성이 매우 작은 상태에서 보다 호화되면 유동성이 조금씩 증가하여 벽면의 전단응력이나 점도는 감소하는 현상을 나타내었고 이러한 감소효과는 동일한 수분함량과 가열온도에서 옥수수전분 반죽보다 찰옥수수전분 반죽이 15~20% 정도 더 호화되어, 그 만큼 유동성이 증가하고 벽면의 전단응력이나 점도가 감소되는 것으로 나타났다고 판단되었다.

반죽의 점도에 미치는 수분함량의 영향

옥수수전분 반죽 : 옥수수전분 반죽을 수분함량 36~52%, 가열온도 60~100°C에서, 겔보기 전단속도를 20 s⁻¹, 32 s⁻¹, 40 s⁻¹, 80 s⁻¹, 160 s⁻¹, 200 s⁻¹로 변화시키면서 겔보기 점도를 측정하였다. 이 측정값들을 Arrhenius식을 이용하여 수분함량의 영향을 조사한 대표적인 결과는 Table 8, 9, 10과 같다. Table 8에서 볼 때 전체적으로는 겔보기 전단속도 20 s⁻¹에서 보면 B값이 모두 (-)로서 수분함량이 증가할 수록 겔보기 점도가

감소하는 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 앞에서 측정된 반죽의 물성에서도 수분함량이 증가할수록 벽면의 전단응력이 감소하는 것과도 일치하는 경향이었다. 즉, 반죽의 수분함량이 증가하면 반죽의 유동성이 크게 증가하여 전체적으로 전단응력이나 겔보기 점도가 감소하는 것으로 나타나지만 가열온도가 반죽의 호화온도 이상인 80°C부터는 수분함량 증가에 의한 반죽의 유동성 증가에 상반되는 전분호화에 의한 전단응력이나 점도증가에 기인하여 B값이 상당히 증가하고, 60°C나 70°C의 가열온도보다도 수분함량의 영향이 적게 미치는 것으로 판단되었다. 이와 같은 경향은 겔보기 전단속도가 80 s⁻¹, 200 s⁻¹로 증가한 Table 9, 10에서도 같은 경향을 보여 주고 있으며 겔보기 전단속도가 증가할 때 수분함량의 영향을 나타내는 B값은 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다.

찰옥수수전분 반죽 : 찰옥수수전분 반죽을 수분함량 36~52%, 가열온도 60~100°C에서, 겔보기 전단속도를 20, 32, 40, 80, 160, 200 s⁻¹로 변화시키면서 겔보기 점도를 측정하였다. 이 측정값들을 Arrhenius식을 이용하여 수분함량의 영향을 조사한 대표적인 결과는 Table 11, 12, 13과 같다.

옥수수전분 반죽과 마찬가지로 20 s⁻¹~200 s⁻¹까지 전 범위의 겉보기 전단속도에서 모든 Arrhenius plotting은 기울기(B: 농도의존성 상수)가 (-)로 나타났다. Table 11의 겉보기 전단속도 20 s⁻¹에서 보면 B값이 모두 (-)로서 수분함량이 증가할수록 전체적으로는 겉보기 점도가 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 가열온도 100°C에서 보면 찹옥수수전분 반죽은 옥수수전분 반죽과는 달리 Table 12, 13에서도 B값(기울기)이 90°C 가열온도보다 감소하는 것을 보여주고 있다. 이것은 찹옥수수전분 반죽의 경우 옥수수전분 반죽과는 달리 수분함량 44%를 기점으로, 수분함량이 더욱 증가되면 수분함량에 따른 유동성의 증가현상과 더불어 수분함량 48%와 52%의 경우 100°C에서 물성 측정시 팽화현상이 일어나 유동성이 크게 증가하여 전단응력이나 점도가 감소하는 영향이 더욱 커지기 때문이라고 판단되었다.

요 약

옥수수전분과 찹옥수수전분을 사용하여 중간 수분계의 수분함량으로 반죽을 제조하고 수분함량과 가열온도, 가열시간에 따른 전분 반죽의 물성 변화와 호화양상을 밝혀보고자 하였다. 이를 위하여 먼저 전분반죽과 같은 반고체(semi-solid) 물질의 물성을 측정할 수 있는 Extrusion Capillary Viscometer(ECV)를 자체 제작하였다.

ECV를 사용하여 수분함량 36~52% 범위로 제조된 옥수수전분과 찹옥수수전분 반죽의 물성측정 시 반죽의 열전달 특성은 가열온도 60~100°C 범위에서 수분함량이 36%에서 52%로 증가할수록 반죽의 중심온도가 원하는 가열온도에 도달하는데 걸리는 시간이 220초에서 140초로 크게 단축되었다. 가열 후 ECV로 물성을 측정할 결과, 수분함량과 가열온도의 모든 범위에서 반죽은 의가소성 유체의 흐름 특성을 나타내었다. 동일한 전단속도에서는 반죽의 수분함량이 증가할수록 전단응력과 전단점도가 전체적으로 감소하여 수분함량 증가에 따른 반죽의 유동성(flowability) 증가 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 그러나 44% 이상의 동일 수분함량 내에서는 80°C 이상의 가열온도부터는 동일한 전단속도에서 80°C 이하로 가열한 반죽에 비해 전단응력과 전단점도가 증가하는 경향을 보여 주었다.

반죽의 점도에 미치는 수분함량의 영향은 수분함량이 증가할수록 반죽의 유동성의 크기가 증가하여 전체적으로 전단응력이나 점도가 감소하는 것으로 나타나지만, 가열온도가 호화온도 이상인 80°C부터는 전분호화에 의한 점도 증가에 의하여 수분함량에 따른 농도 의존성 지수(B)값이 크게 감소하고 60°C나 70°C 가열온도보다도 수분함량의 영향이 적게 미치는 것으로 나타났다.

문 헌

1. 조순채 역 : 레올러지(Rheology), 2판, 대한교과서주식회사, 서울, p.5 (1985)
2. Webster's third new international dictionary: G & C. Merriam Company Publishers, Massachusetts, p.573 (1967)
3. 식품공업총합사전: 일본 식품공업학회, 동경, p.386 (1988)
4. Weipert, D.: The benefits of basic rheometry in studying dough rheology. *Cereal Chem.*, **67**, 311 (1990)
5. Clark, J.P.: Texturization by extrusion. *J. Texture Studies*, **9**, 109 (1978)
6. Faubion, J.M.: Dough rheology (Its benefits to cereal chemists). In *Fundamentals of Dough Rheology*, Faridi, H. and Faubion, J.M.(ed), American Association of Cereal Chemist Inc., Minesota, p.1 (1986)
7. Linko, P., Linko, Y.Y. and Olkku, J.: Extrusion cooking and bioconversions, *J. Food Eng.*, **2**, 243 (1983)
8. Harper, J.M.: Extrusion processing of food. *Food Technol.*, **32**, 67 (1978)
9. Hauck, B.W.: Is the single screw extruder about to become a dinosaur?. *Petfood Industry*, **30**, 16 (1988)
10. A.O.A.C.: *Official methods of analysis*, 14th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C., p.249 (1984)
11. Morrison, W.R. and Laigenlet, B.: An improved colorimetric procedure for determining apparent and total amylose in cereal and other starches. *J. Cereal Sci.*, **1**, 9 (1983)
12. Williams, P.C., Kuzina, F.D. and Hlynka, I.: A rapid colorimetric procedure for estimating the amylose content of starches and flours. *Cereal Chem.*, **47**, 411 (1970)
13. Wolf, M.J., Melvin, E.H., Garcia, W.J., Oimler, K.J. and Kwolek, W.F.: Amylose determination in dimethylsulfoxide extracts of maize. *Cereal Chem.*, **47**, 437 (1970)
14. Knutson, C.A.: A simplified colorimetric procedure for determination of amylose in maize starches. *Cereal Chem.*, **63**, 89 (1986)
15. Kamoi, I., Shinozaki, T., Matsumoto, S., Tanimura, W. and Obara, T.: Changes of gelatinization degree and physical properties of stored gelatinized-rice after cooking. *Nippon Shokukin Kogyo Gakkaishi*, **25**, 43 (1978)
16. Matsunaga, A. and Kainuma, K.: Studies on the retrogradation of starchy foods (part D): Retrogradation of cooked rice. *J. Home Economics of Japan*, **32**, 131 (1981)
17. Harper, J.C. and Lebermann, K.W.: Viscometric behavior of tomato concentration. *J. Food Sci.*, **30**, 470 (1965)
18. Kim, S.K., Lee, S.Y. and Park, Y.K.: Gelatinization properties of heat moisture treated potato and sweet potato starches. *Korean J. Food Sci. Technol.*, **19**, 485 (1987)
19. Bean, M.M.: Rice flour: Its functional variations. *Cereal Foods World*, **31**, 477 (1986)
20. Nishita, K.D. and Bean, M.M.: Grinding methods: Their impacts on rice flour properties. *Cereal Chem.*, **59**, 46(1982)
21. Craig, S.A.S. and Stark, T.R.: The effect of physical damages on the molecular structure of wheat starch.

- Carbohydrate Res.*, 125, 117 (1984)
22. Park, Y.K., Seog, H.M., Nam, Y.J. and Shin, D.H.: Physicochemical properties of various milled rice flours. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 20, 504 (1988)
23. Donovan, J.W., Lorenz, K. and Kulp, K.: Differential scanning calorimetry of heat-moisture treated wheat and potato starch. *Cereal Chem.*, 60, 381 (1983)
24. Wootton, M. and Kensington, A.B.: Application of differential scanning calorimetry to starch gelatinization (II. Effect of heating rate and moisture level). *Starch*, 31, 262(1979)
25. Nakazawa, F., Noguchi, S., Takahashi, J. and Takada, M.: Gelatinization and retrogradation of rice starch studies by differential scanning calorimetry. *Agric. Biol. Chem.*, 48, 201(1984)
-

(1995년 4월 20일 접수)