

## 옴가열이 전분의 레올로지 특성에 미치는 영향

†차 윤 환

승의여자대학교 식품영양과 조교수

### Effect of Ohmic Heating on Rheological Property of Starches

†Yun-Hwan Cha

Assistant Professor, Dept. of Food and Nutrition, SoongEui Women's College, Seoul 04628, Korea

#### Abstract

Ohmic heating is a heating method based on the principle when an electrical current passes through food. Since this method is internal, electrical current damage occurred during heating treatment. The results of ohmic heated starch's external structure, X-ray diffraction, DSC analysis and RVA were differed from those of conventional heating at the same temperature. Several starches changed more rigid by structure re-aggregation. This change in starch was caused by change of physical, chemical, rheological property. The rheology of ohmic heated potato and corn starch of different heated methods were compared with chemically modified starch. After gelatinization, sample starch suspension (2%, 3%) measured flow curves by rheometer. Cross-linked chemically modified starch's shear stress was decreased with degree of substitution reversibly. Ohmic heated more dramatic, at 60°C. Potato starch's shear stress was less than commercial high cross-linked modified starch. Flow curves of potato starches measured at 4°C, 10°C, 20°C. Showed that Ohmic heated potato starch's shear stress ranging between 4°C and 20°C was narrower than modified starch. According to this study, ohmic heated potato starch can be used by decreasing viscosity agent like cross-linked modified starch.

Key words: ohmic heating, conventional heating, modified starch, flow curve, rheometer

#### 서 론

직류나 교류 전류를 식품과 같은 전도체에 흘려주면 식품의 내부 저항에 의해 열이 발생하게 되는 가열 방법을 옴가열법이라 한다(DeAlwis & Fryer 1992). 옴가열을 할 경우, 식품의 내부로 전류가 흘러들어 내부에서부터 발열이 시작되고, 내부 발열 정도는 식품 내부로 유입되는 전류량을 조절하면 쉽게 조절할 수 있다. 전류량을 조절하면 급속도로 혹은 완속도로 발열이 일어나도록 할 수 있기 때문에, 옴가열은 식품을 균일하게 가열하면서도 온도 상승을 쉽게 조절할 수 있는 가열방법이다. 이런 특성 때문에 옴가열을 이용할 경우, 고품질의 제품생산이 가능하다. 열전도율이 서로 다른 고형분과 액상이 혼합되어 있는 식품의 경우에서도 옴가열을 이용할 경

우 고형분과 액상이 동시에 가열되어 효율적으로 가열 생산 처리할 수 있다(Zareifard 등 2003).

재래가열은 온도 상승에 의해 온도에 의한 식품의 변화가 대부분인데 비해, 옴가열은 재래 가열과 같은 온도에서 처리하여도 식품 내부로 들어오는 전류에 의한 특성변화가 온도에 의한 변화와 같이 발생한다. 식물을 전기장에 노출할 경우, 세포의 원형질막이 손상되어 세포막의 투과성이 증가하였고(Rastogi 등 1999), 동일한 가열 속도로 두유를 가열 추출한 경우에도 옴가열을 한 두유는 재래가열한 두유와는 다르게 두유의 고형분 함량, 단백질 회수율과 추출율이 보다 높게 나타났다(Kim & Pyun 1995), 동일한 가열 속도로 대두 단백질을 변성 처리한 후 대두단백질의 열적특성을 DSC(differential scanning calorimeter)로 분석한 결과, 옴가열 처리한 대

† Corresponding author: Yun-Hwan Cha, Assistant Professor, Dept. of Food and Nutrition, SoongEui Women's College, Seoul 04628, Korea. Tel: +82-2-3708-9250, Fax: +82-2-3708-9121, E-mail: hplcms@sewc.ac.kr

두단백질의 단백질 변성도가 더 높게 나타났다(Cha YH 2011). 옴가열 처리한 전분의 경우도 재래가열한 전분과는 다른 특성변화가 나타났다. 일반적으로 전분은 호화점 이하의 온도에서는 큰 변화를 나타내지 않음에도 불구하고, 호화점 이하의 온도에서 옴가열 처리한 감자전분의 열적특성을 DSC로 분석한 결과, 재래가열 처리한 경우보다 전분의 호화온도가 더 높아졌으며, 호화 개시점과 종결점의 범위가 좁아져 호화 피크가 더 날카롭게 변화하였다(Cha YH 2012). 이런 변화는 전분의 구조가 좀더 단단하고 안정적으로 변하고, 전분의 구성 상태가 변하여 이전보다 비슷한 상태로 변화하였다고 해석가능하다. 옴가열과 재래가열 간의 차이는 고추장 소스를 살균처리했을 때도 나타났는데, 재래가열의 살균도가 65.4~75.4%로 나타났던 비해 옴가열은 89.5~95.0%로 더 높은 살균력을 보였다(Choi 등 2015). 밀전분, 옥수수전분, 고구마전분에서 옴가열과 재래가열을 비교한 실험에서도 가열 방식에 따라 전분은 열적 특성 차이를 보였다(Cha YH 2014). 옴가열한 전분의 외부구조를 광학현미경과 전자현미경을 관찰하고, 내부구조를 엑스 레이 회절 분석을 통해 관찰한 결과, 재래가열한 경우보다 더 큰 구조적 변화가 발생한 것을 확인할 수 있었다(Cha YH 2015).

변성전분은 산업적으로 다양한 용도로 사용되고 있으며, 변성전분 중 대표적인 가교화 변성전분은 전분 분자 사슬을 다양한 화학적 방법에 의해 가교를 만들어 전분입자 사이를 좀 더 견고하게 망상구조화 하여 가열 중 전분입자의 팽윤을 억제하는 역할을 하는데, 이런 가교화 변화에 의해 변성전분은 좀 더 강한 내열성, 내산성, 내전단성을 나타내 전분이 첨가된 제품의 점도와 조직 특성을 변화시킨다(Singh 등 2007). 옴가열 처리한 전분의 pasting 특성을 RVA(rapid visco analyzer)로 측정할 결과, 옴가열 처리 온도가 높아질수록 PV(paste viscosity)가 현저히 감소하고, PT(pasting temperature)는 증가하는데, PV와 PT의 이런 변화는 옴가열 온도가 높아질수록 전분의 구조적 변화가 발생하여 전분이 팽윤이 잘 되지 않는 형태로 바뀌었다는 것을 의미한다(Cha YH 2017). 이런 RVA 결과는 화학적 변성전분이 갖는 특성과 유사한 면이 많다.

그래서 본 연구에서는 옴가열 처리한 감자전분과 옥수수전분의 레올로지 특성을 시판 중인 화학적 변성전분의 레올로지 특성과 비교하여 화학적 변성전분이 갖는 특성을 대한 옴가열 처리 전분의 대체 가능성을 분석하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험 재료

실험에 사용한 감자전분(Junsei, Tokyo, Japan)은 시약급 이상, 감자변성전분은 저치환 인산 가교 감자변성전분인

Perfectamyl P10과 고치환 인산·초산 가교 감자변성전분인 Perfectamyl AC75(Avebe, Veendam, Netherlands)를 구입하여 사용하였다.

옥수수전분(Sigma, St. Louis, Missouri, USA) 역시 시약급을 사용하였고, 옥수수변성전분은 고치환 인산 가교 옥수수변성전분인 DS-P alpha 300(Dae-sang Co., Ltd, Seoul, Korea)을 사용하였다.

### 2. 가열 장치

전분의 옴가열 처리를 위해 고안한 가열장치는 Fig. 1에 도시하였다. 가열 처리조는 유리 실린더( $\varnothing=10$  cm)로 만들었으며, 전체 용량은 1 L가 되도록 하였다. 처리조 외부에는 냉각 자켓을 설치하여 냉각수를 흘려 빠르게 냉각을 할 수 있도록 하였다. 옴가열에는 상용 전압인 220 V를 기본으로 하여 승압기(DLC-5K300, Dae-lim Co., Ltd, Paju, Korea)로 1차 승압하여 250 V로 전압을 조정하고, 다시 전압 증폭기(Dae-lim Co., Ltd, Paju, Korea)로 전압을 증폭하여 500 V로 만들어 옴가열 처리하였다. 옴가열 처리조에 사용한 전극은 탄소소재를 이용하여 판형(150 mm × 25 mm × 5 mm)으로 가공하여 사용하였다. 처리조의 현탁액은 전극의 60% 이상 잠기도록 하였고, 전극간의 거리는 90 mm를 유지하고, 옴가열의 전압구배는 55.5 V/cm로 조정하였다. 가열 처리 중 충격에 의한 전분의 침강을 막기 위해 직렬 교반기(SS-20, Young Co., Seoul, Korea)를 이용하여 교반하였으나, 교반에 의한 전분의 손상을 막기 위해 교반은 최소화하였다.

옴가열의 온도 조절은 차단기를 이용하여 조절하였다. T형 온도계가 부착되어 있는 온도 조절기(DX9, Hanyoung Co., Ltd, Busan, Korea)가 처리조 안의 온도를 확인하여 설정 온도 이상으로 가열된 경우 전원 on/off 스위치(HiMC22, Hyundai industrial Co., Ltd, Ulsan, Korea)에 의해 전원을 차단하여 설

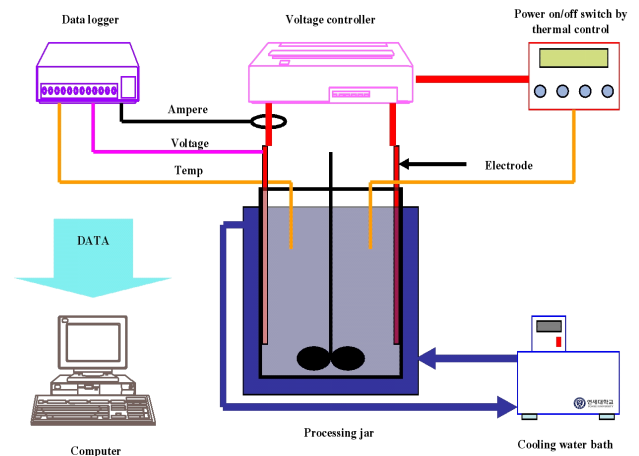


Fig. 1. Schematic diagram of ohmic heating apparatus.

정온도 이상의 과열을 막도록 하였다. 설정온도 이하로 냉각될 경우, 다시 전원을 켜고 가열하여 과도한 냉각을 막도록 하였다.

재래가열 방법은 근본적으로 옴가열 처리조와 동일한 온도가 설정된 드라이오븐 속에서 처리하였다.

### 3. 실험 방법

#### 1) 전분현탁액의 가열 전 후 전처리

##### (1) 전분현탁액의 제조

감자전분과 옥수수전분으로 20%(w/v) 전분 현탁액 만들었다. 옴가열 처리 시 전류가 잘 흘러들어 가도록 전해질로 약간의 NaCl(Duksan Co., Ltd, Ansan, Korea)을 첨가하여 0.1% NaCl 용액이 되도록 하였다.

##### (2) 옴가열 처리

실험에 사용된 감자전분과 옥수수전분의 호화점을 DSC로 분석한 후 그 온도보다 낮은 온도인 감자전분(55°C, 60°C, 65°C), 옥수수전분(45°C, 55°C, 60°C, 65°C)에서 가열처리하였고, 가열 처리시간은 12 h, 24 h, 72 h로 하였다.

##### (3) 재료의 분말화

가열 처리 후 전분 현탁액 속에 전해질로 넣은 NaCl은 많은 양의 증류수로 희석하여 제거하고, 마지막에 부호너 깔대기로 가열 처리한 전분을 분리했다. 분리한 전분은 열에 의한 변화를 막기 위해 상온에서 건조시킨 후 분쇄하여 60 mesh 이상의 분말 전분만 실험에 사용하였다.

#### 2) 전분 현탁액의 물성 측정

가열 처리한 전분과 변성전분은 현탁액(2~4%)을 각각 만든 후, DSC에 의해 구한  $T_p$  온도보다 25°C 정도 높은 온도에서 때때로 흔들며, 60분간 호화를 시켰다. 호화가 끝난 후 HCl 용액(Duksan Co., Ltd, Ansan, Korea)으로 pH 4.0으로 조절한 후, 몇 시간 동안 방치시켰다. 이렇게 만든 현탁액을 rheometer(AR 1000, TA Instrument Ltd., England)를 이용하여 4°C, 10°C, 20°C의 측정온도에서 유동곡선을 각각 측정하였다. 유동곡선 측정에는 cone(6 cm, 2°)과 plate를 사용하였으며, 전단속도(shear rate)는 1~250s<sup>-1</sup> 범위에서 ramp duration을 5분으로 하여 측정하였다.

## 결과 및 고찰

#### 1. 옴가열 처리한 감자전분의 레올로지 특성

#### 1) 동일 측정온도에서 감자전분과 감자변성전분의 레올로지

옴가열 처리한 감자전분 시료와 시판 중인 가교 처리된 감자변성전분을 구입하여 레올로지 물성을 비교하였다. 감자전분 내에는 자연적으로 0.052%(w/w)의 인이 포함되어 있다(Craig 등 1989). 감자전분 속 인은 포도당 370개당 인산 모노에스터(phosphate monoester)의 형태로 1개씩 포함되어 있고, 이 인산 모노에스터들은 아밀로펙틴에 직접 결합하고 있기 때문에 다른 전분과는 다른 감자전분의 특성이 나타난다(Muhrbeck 등 1991). 이런 감자전분의 특성 때문에 다양한 변성전분 중 인산 가교화된 변성전분을 비교대상으로 선택하였고, 가교 치환 정도에 따른 비교를 위해 고치환 인산·초산 가교 감자변성전분과 저치환 인산 가교 감자변성전분을 선택하여 비교하였다. 물성 측정을 위해 옴가열 처리된 감자전분 현탁액(2~4%)과 치환 감자변성전분을 90°C까지 가열하여 호화시킨 후 10°C에서 유동곡선을 측정하였다(Fig. 2, 3). 옴가열 처리된 감자전분의 2%, 3% 현탁액은 유동곡선이 잘 나타났으나, 4% 현탁액은 부분적 겔화로 측정이 어려워 실험에서 제외하였다.

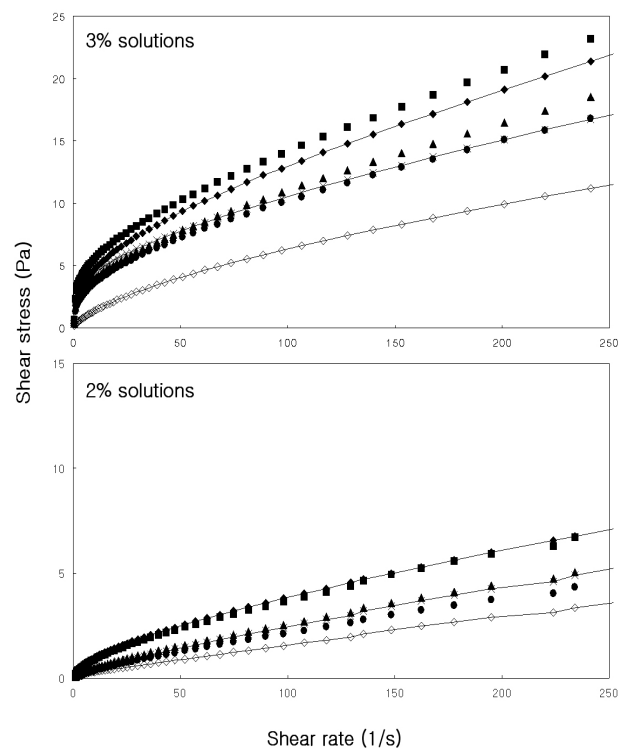
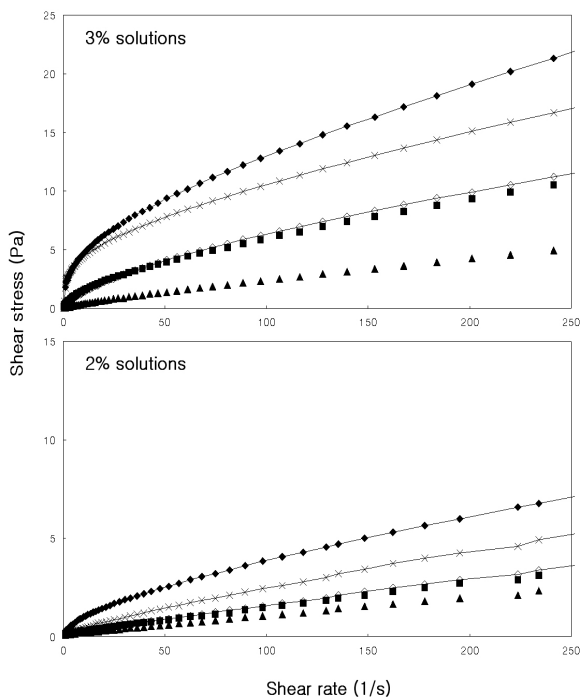


Fig. 2. Flow curves of conventional heated potato starch solutions measured at 10°C after gelatinization at 90°C. ◆: native potato starch, ■: heated at 55°C, ▲: at 60°C, ●: at 65°C, X: low cross-linked potato starch, ◇: high cross-linked potato starch.



**Fig. 3.** Flow curves of ohmic heated potato starch solutions measured at 10°C after gelatinization at 90°C. ◆: native potato starch, ■: heated at 55°C, ▲: at 60°C, X: low cross-linked potato starch, ◇: high cross-linked potato starch.

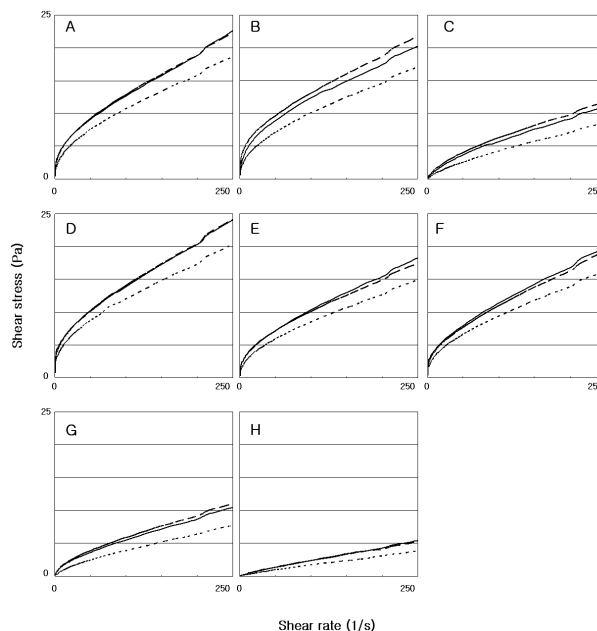
재래가열 방식으로 55°C, 60°C, 65°C로 가열 처리된 감자 전분과 감자변성전분의 현탁액(2%, 3%)의 유동곡선(Fig. 2)을 살펴보면 모든 감자전분 시료는 유동곡선의 형태가 비뉴우톤 유체의 성질을 보였다. 일반적으로 전분, 펙틴, 단백질과 같은 고분자 화합물이 섞인 유체 등에서 비뉴우톤의 특성을 나타내는 것으로 알려져 있으므로 감자전분 현탁액의 유동곡선이 비뉴우톤계인 것은 당연한 것으로 사료된다. 호화 후 10°C에서 전단속도 변화에 따른 전단응력(shear stress)을 측정된 결과, 생 감자전분 현탁액의 결과 값을 기준으로 60°C, 65°C에서 재래가열 처리된 감자전분의 전단응력은 약간 낮게 나타났다. 변성전분 중 저치환 감자변성전분은 전단응력이 생 감자전분의 70% 정도로 나타났는데, 이는 65°C에서 재래가열 처리한 감자전분과 비슷한 결과였다. 고치환된 변성전분은 생전분의 50% 수치밖에 나타나지 않아 재래가열 처리된 감자전분보다 전분의 팽윤과 호화가 억제됨을 알 수 있었고, 이는 가교 변성 전분의 일반적 특징이다(Singh 등 2007).

55°C와 60°C에서 옴가열 처리한 감자전분과 변성전분의 유동곡선은 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2와 동일한 조건에서 유동곡선을 측정하였으며, 이번에도 역시 비뉴우톤계 특성을 나타내었다. 2%, 3% 현탁액으로 실험한 모든 경우에서 옴

가열 처리한 감자전분의 전단응력은 저치환 변성전분뿐만 아니라, 고치환 변성전분의 전단응력보다도 낮게 나타났다. 65°C에서 재래가열 처리한 감자전분의 전단응력이 저치환 감자변성전분과 비슷한 수치를 나타내는데 비해, 옴가열 처리한 감자전분은 55°C에서 처리한 경우가 고치환 감자변성전분과 비슷한 수치를 보였고, 60°C에서 옴가열 처리한 경우는 이 수치보다 더 낮은 전단응력 수치를 보였다. 이런 유동곡선의 변화는 옴가열에 의해 감자전분 입자의 파괴가 촉진되고, 이들이 다시 엉키는 현상이 화학적 변성전분의 가교가 형성되는 반응과 비슷한 효과를 주었기 때문이라 설명할 수 있다(Cha YH 2015).

## 2) 측정 온도 변화에 따른 감자전분과 감자변성전분의 레올로지

옴가열 처리는 감자전분의 내부 구조의 물리적 변화를 촉진하여 유동곡선의 전단응력을 감소시켜 인산 치환 감자변성전분과 유사한 유동곡선을 나타내게 했다. 3% 전분 현탁액 조건에서 4°C, 10°C, 20°C로 유동곡선의 측정 온도를 다르게 하고, 유동곡선의 변화를 측정 후 비교하였다(Fig. 4). 일반적으로 전분의 측정 온도가 낮아지면 전단응력이 높게 나타나는데, 이런 현상은 대부분의 감자전분 현탁액에서 나타났다.



**Fig. 4.** Flow curves of potato starch solutions (3%) measured at 4°C (—), 10°C (---), and 20°C (····) after gelatinization at 90°C. (A) native potato, (B) low cross-linked, (C) high cross-linked, (D) potato (55°C), conventional heating (CH), (E) potato (60°C), CH, (F) potato (65°C), CH, (G) potato (55°C), ohmic heating (OH), and (H) potato (60°C), OH.

측정 온도별로 봤을 때 20°C에서의 전단응력은 모든 경우 뚜렷하게 낮게 나타났지만, 10°C와 4°C는 큰 차이를 보이지 않았다. 4°C, 10°C, 20°C의 측정온도 차이에 따른 전단응력 수치의 범위를 전단속도 250(1/s)에서 계산했을 때 생 감자전분(Fig. 4-A)은 5 Pa, 저치환 변성전분(Fig. 4-B)은 5.5 Pa, 고치환 변성전분(Fig. 4-C)은 4 Pa로 나타나 가교 치환도가 올라갈수록 측정온도 차이에 따른 전단응력의 범위가 줄어드는 것으로 나타났다. 재래가열 처리한 감자전분(Fig. 4-D-F)은 처리 온도(55°C, 60°C, 65°C)에 따라 전단응력의 범위 차이가 크게 나타나지 않았다. 하지만 60°C에서 옴가열 처리한 감자전분은 1.5 Pa로 급격한 감소를 보였다. 이는 고치환 변성전분의 4 Pa보다 낮은 수치로, 온도 변화가 생겨도 전단응력의 차이가 크지 않다는 것을 말하며, 이는 고치환 변성전분보다 식품에 점도 조정제로 더 유용하게 사용될 수 있음을 의미하는 결과이다.

감자전분의 유동곡선은 비뉴턴유체 거동을 보이며, 그 중 Herschel-Bulkley의 유동곡선 형태를 나타낸다. Herschel-Bulkley의 곡선은 아래의 식으로 표현될 수 있다(Herschel & Bulkley 1926).

$$\text{Shear stress} = \text{yield stress} + (\text{viscosity} \times \text{shear rate}^{\text{rate index}})$$

여기서 먹지수(rate index)는 1보다 작은 범위를 가지며, 먹지수가 1이 되면 뉴우튼계 유체의 형태를 나타낸다.

55°C, 60°C, 65°C에서 재래가열, 55°C, 60°C에서 옴가열 처리한 감자전분과 변성전분 현탁액(2%, 3%)을 4°C, 10°C, 20°C에서 유동곡선을 측정하였다. 그런 후 전단속도 10~250 범위에서 Herschel-Bulkley 식을 구하고, 항복응력(yield stress), 점도(viscosity)와 먹지수를 계산하여 Table 1에 요약하였다. Herschel-Bulkley 식에서 점도가 낮다는 것은 유동곡선이 낮게 그려짐을 의미하며, 먹지수가 증가하는 것은 유동곡선이 점차 직선으로 변하여 뉴턴유체로 변화함을 의미한다. 생 감자전분과 변성전분의 경우, 저치환에서 고치환으로 가교 정도가 증가함에 따라 항복응력과 점도는 감소하고, 먹지수는 증가하였다. 특히 고치환 변성전분인 AC75의 2% 현탁액 경우는 먹지수가 0.9로 유동곡선이 직선의 형태인 뉴턴유체와 가까운 형태로 나타났다. 재래가열 처리한 경우 처리 온도가 증가할수록 항복응력은 줄어드는 것으로 나타났으나, 나머지 점도와 먹지수의 변화에는 뚜렷한 경향이 없었다. 60°C에서 옴가열 처리한 감자전분의 2% 현탁액을 4°C에서 분석한 경우, 점도는 0.0149, 먹지수는 0.9322로 고치환 감자변성전분의 0.0129와 0.9077보다 더 뉴턴유체 특성에 가깝게 나타났다. 유동곡선 결과만을 놓고 보았을 경우, 60°C에서 옴가열

**Table 1. Summary of variable factors in flow curve of potato starch solutions determined by Herschel-Bulkley equation<sup>a</sup>**

Measuring temperature (°C)	Potato native	Cross-linked		Conventional heating (°C)			Ohmic heating(°C)			
		Low	High	55	60	65	55	60		
4	Yield stress	0.3238	0.0822	0.0187	0.3781	0.1263	0.0864	0.0747	0.0398	
	Viscosity	0.1432	0.0619	0.0229	0.1209	0.0734	0.0553	0.0266	0.0149	
	Rate index	0.7068	0.7983	0.9077	0.7263	0.7773	0.7993	0.8708	0.9322	
2%	10	Yield stress	0.3196	0.0546	0.1239	0.2676	0.0768	0.0440	0.1476	0.1007
		Viscosity	0.1412	0.0639	0.0224	0.1352	0.0731	0.0569	0.0189	0.0124
		Rate index	0.7002	0.7880	0.9083	0.7041	0.7690	0.7863	0.9171	0.9444
20	Yield stress	0.0997	0.0453	0.0165	0.0526	0.0796	0.0180	0.0889	0.0631	
	Viscosity	0.1386	0.0544	0.0191	0.0390	0.0481	0.0423	0.0324	0.0204	
	Rate index	0.6749	0.7833	0.8915	0.7968	0.7969	0.7958	0.7955	0.8441	
4	Yield stress	3.0830	2.3140	0.0738	3.8260	2.3870	1.7630	0.5550	0.0649	
	Viscosity	0.3746	0.5970	0.2621	0.4022	0.3803	0.3916	0.2020	0.0521	
	Rate index	0.7071	0.6155	0.6792	0.7077	0.6869	0.6722	0.7029	0.8343	
3%	10	Yield stress	2.4780	3.4620	0.1212	3.4160	2.2120	1.7170	0.4310	0.0540
		Viscosity	0.5340	0.4776	0.3456	0.4775	0.3834	0.4535	0.2480	0.0513
		Rate index	0.6481	0.6563	0.6349	0.6768	0.6835	0.6363	0.6729	0.8284
20	Yield stress	1.5040	1.0800	0.0902	2.5640	1.4080	0.9923	0.0683	0.0169	
	Viscosity	0.5114	0.6128	0.1696	0.5005	0.4419	0.4137	0.1591	0.0378	
	Rate index	0.6312	0.5880	0.7069	0.6432	0.6322	0.6300	0.6876	0.8318	

<sup>a</sup> Herschel-Bulkley equation is determined with Shear stress = yield stress + (viscosity × shear rate ^ rate index).

처리한 감자전분은 고치환 감자변성전분보다 감점제로 더 적합한 레올로지 특성을 보였다.

2. 음가열 처리한 옥수수전분의 레올로지 특성

1) 동일 측정온도에서 옥수수전분과 옥수수변성전분의 레올로지

55°C, 60°C, 65°C에서 각각 재래가열과 음가열 처리한 옥수수전분과 시판 중인 고치환 인산가교 옥수수변성전분의 레올로지 특성을 10°C 측정하여 비교하였다. 고치환 인산가교 변성전분은 2%, 3% 현탁액에서 모두 전단응력이 낮게 나타났다(Fig. 5). 재래가열 처리한 옥수수전분은 2% 현탁액에서 생 옥수수의 전단응력 변화와 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 3% 현탁액 조건에서는 생 옥수수전분에 비해 오히려 전단응력이 더 높게 나타나 감자전분과는 다른 양상의 유동곡선을 보였다. 음가열 처리한 옥수수전분 현탁액의 유동곡선은 Fig. 6에 나타났다. 음가열 처리 온도가 55°C, 60°C, 65°C로 증가할수록 전단응력은 감소하고, 유동곡선의 모양은 고치환 옥수수변성전분과 유사한 모양으로 변화했다. 특히 65°C에서 음가열 처리한 옥수수전분의 유동곡선은 고치환 옥수수변성전분과 거의 비슷한 모습을 나타냈다.

2) 측정온도 변화에 따른 옥수수전분과 옥수수변성전분의 레올로지

4°C, 10°C, 20°C의 측정온도에 따른 옥수수전분 시료의 유동곡선 변화는 Fig. 7에 나타났다. 감자전분의 경우처럼 옥수수전분 역시 20°C에서 측정된 유동곡선보다 4°C에서 측정된 유동곡선의 전단응력이 높게 나타났고, 측정 온도가 20°C, 10°C, 4°C로 감소함에 따라 전단응력의 증가는 뚜렷하게 나타났다. 생 옥수수전분(Fig. 7-A)과 옥수수변성전분(Fig. 7-B)의 온도별 유동곡선을 보면 생 옥수수전분이 측정온도 변화에 영향을 받아 모양이 크게 변화하는데 비해, 고치환 옥수수변성전분의 경우는 영향을 거의 받지 않았다. 재래가열 처리한 옥수수전분의 경우(Fig. 7-C-E), 측정 온도가 감소함에 따라 전단응력이 급격하게 증가하였고, 가열 처리 온도가 55°C에서 65°C까지 증가함에 따라 증가폭은 점차 줄어들었다. 음가열 처리한 옥수수 전분도 비슷한 유동곡선 차이를 보였으나, 전단응력의 변화 폭이 좁게 나타났다.

생 옥수수전분, 재래가열 처리 옥수수전분, 음가열 처리 옥수수전분, 옥수수변성전분을 2%, 3% 현탁액을 만들어 유동곡선을 그린 후, 항복응력, 점도, 멱지수를 구하여 Table 2에 요약하였다. 3% 현탁액의 경우, 생 옥수수전분과 변성옥수수전분의 멱지수의 감소가 나타났고, 재래가열과 음가열 처리한 옥수수전분은 모든 경우에서 가열 처리온도가 증가

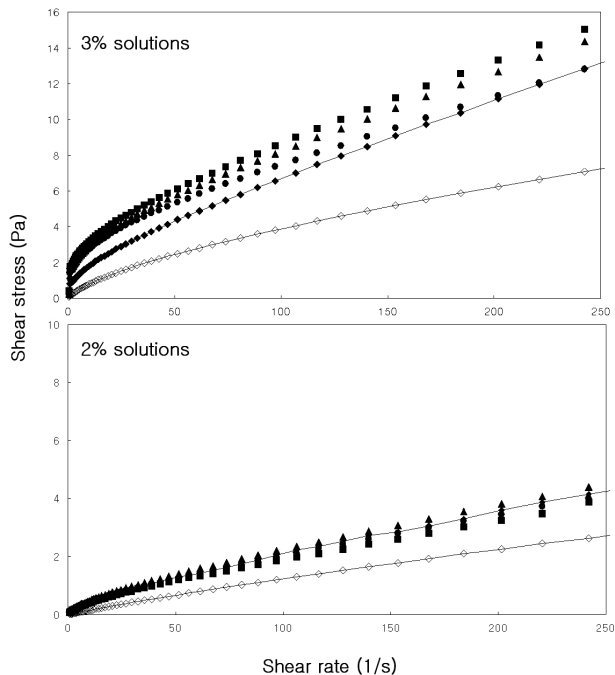


Fig. 5. Flow curves of conventional heated corn starch solutions measured at 10°C after gelatinization at 95°C. ◆: native corn starch, ■: heated at 55°C, ▲: at 60°C, ●: at 65°C, ◇: high cross-linked corn starch.

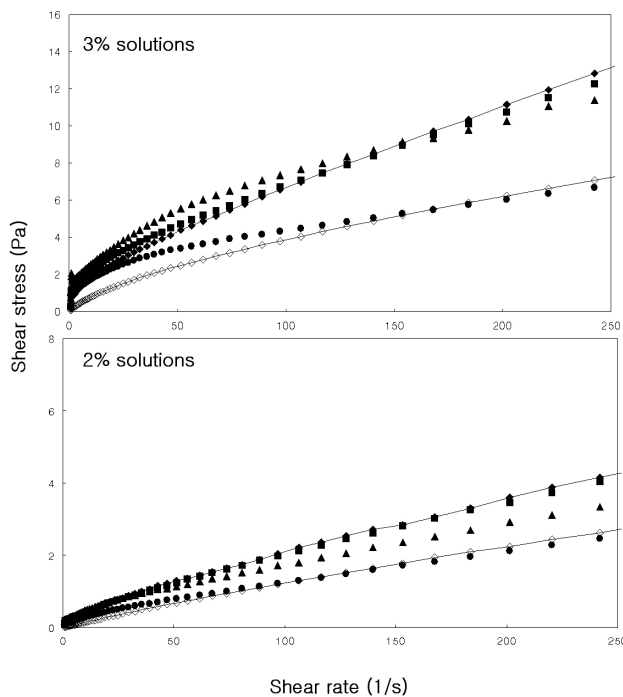
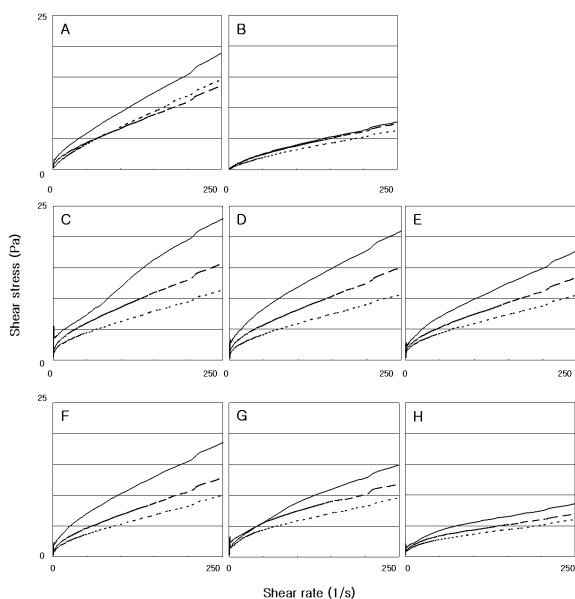


Fig. 6. Flow curves of ohmic heated corn starch solutions measured at 10°C after gelatinization at 95°C. ◆: native corn starch, ■: heated at 55°C, ▲: at 60°C, ●: at 65°C, ◇: high cross-linked corn starch.



**Fig. 7. Flow curves of corn starch solutions (3%) measured at 4°C (—), 10°C (---), and 20°C (····) after gelatinization at 95°C.** (A) native corn, (B) high cross-linked, (C) corn (55°C), conventional heating (CH), (D) corn (60°C), CH, (E) corn (65°C), CH, (F) corn (55°C), ohmic heating (OH), (G) corn (60°C), OH, and (H) corn (65°C), OH.

할수록 떡지수는 감소하였다.

### 결론 및 요약

옴가열은 전분 내부의 물리적 구조를 변화시켜 전분 구조를 더 단단하게 만든다. 이런 전분의 구조 변화는 물리·화학적 특성과 물성적 특성에도 큰 변화를 일으킨다. 본 연구에서는 다양한 온도에서 재래가열과 옴가열 처리한 감자전분과 옥수수전분의 레올로지 특성을 시판 중 인산 가교 변성전분의 레올로지 특성과 비교하였다. 재래가열과 옴가열 처리한 감자전분과 저치환, 고치환 가교 감자변성전분을 2%, 3% 현탁액을 만들어 호화시킨 후 일정한 온도에서 유동곡선을 측정하였다. 감자전분의 경우, 치환 감자변성전분의 치환 정도가 증가함에 따라 전단응력이 낮아졌다. 재래 가열 처리한 감자전분의 경우 가열 처리온도가 증가함에 따라 전단응력의 감소가 나타났다. 옴가열 처리한 감자전분의 전단응력은 매우 낮게 나타났는데, 60°C에서 옴가열한 감자전분의 경우는 시판 중인 고치환 감자변성전분보다도 전단응력이 더 낮게 나타났다. 유동곡선의 측정온도를 4°C, 10°C, 20°C로 변화하여 유동특성을 측정한 결과, 측정온도가 감소함에 따라 전단응력은 높아졌다. 가교 치환된 변성전분의 경우, 가교 정도가 증가함에 따라 측정온도 변화에 따른 전단응력의 변화 폭이

**Table 2. Summary of variable factors in flow curve of corn starch solutions determined by Herschel-Bulkey equation<sup>a</sup>**

Measuring temperature (°C)	Corn native	Yield stress	Cross-linked	Conventional heating (°C)			Ohmic heating (°C)			
			High	55	60	65	55	60	65	
4°C	Yield stress	0.2801	0.0228	0.2288	0.3275	0.2529	0.2092	0.3522	0.1796	
	Viscosity	0.0437	0.0278	0.0384	0.0476	0.0468	0.0387	0.0449	0.0334	
	Rate index	0.8616	0.8495	0.8577	0.8399	0.8233	0.8795	0.7970	0.7940	
2%	10°C	Yield stress	0.1390	0.0002	0.1597	0.1769	0.2101	0.1396	0.2729	0.1402
		Viscosity	0.0467	0.0211	0.0360	0.0509	0.0389	0.0460	0.0360	0.0260
		Rate index	0.8104	0.8783	0.8437	0.8002	0.8350	0.8096	0.8131	0.8170
20°C	Yield stress	0.0641	0.0254	0.1444	0.1098	0.0983	0.0673	0.2186	0.0920	
	Viscosity	0.0420	0.0183	0.0311	0.0450	0.0603	0.0346	0.0279	0.0213	
	Rate index	0.8003	0.8781	0.8435	0.7954	0.7731	0.8244	0.8292	0.8235	
4°C	Yield stress	1.0670	0.0186	3.0880	1.9590	1.7710	1.4980	1.4090	0.4238	
	Viscosity	0.1392	0.1809	0.1296	0.4754	0.3711	0.3801	0.2956	0.9954	
	Rate index	0.8208	0.6727	0.9226	0.6638	0.6738	0.6837	0.6927	0.3909	
3%	10°C	Yield stress	0.8698	0.0432	2.1100	1.8780	1.7970	1.3700	0.0939	0.5091
		Viscosity	0.1089	0.1825	0.2056	0.2088	0.2000	0.1630	0.7854	0.4303
		Rate index	0.8190	0.6665	0.7534	0.7452	0.7279	0.7638	0.4858	0.4819
20°C	Yield stress	0.5551	0.1215	1.6810	1.1820	1.4890	1.0330	0.7743	0.7805	
	Viscosity	0.1275	0.1418	0.1382	0.2018	0.1683	0.1440	0.4484	0.2030	
	Rate index	0.7433	0.6890	0.7690	0.6927	0.7179	0.7395	0.5319	0.5787	

<sup>a</sup> Herschel-Bulkley equation is determined with Shear stress = yield stress + (viscosity × shear rate ^ rate index).

줄어들었다. 유동곡선을 통해 보았을 때, 옴가열 처리한 감자 전분은 측정온도 저하에 영향을 덜 받는 것으로 나타나, 감점제로 화학적으로 가교 치환된 변성전분을 대신하여 사용할 수 있을 것으로 보였다. 이런 변화는 화학적 가교가 변성전분의 내부 구조를 더 단단하게 하는 것처럼 옴가열 처리도 전분 내부구조를 단단하게 변화시키기 때문이라 생각된다. 옥수수 전분의 유동특성을 측정한 결과, 역시 감자전분때와 비슷하게 나타났다. 이상의 결과를 통해 보았을 때 앞으로 보다 깊은 연구가 이루어진다면 옴가열을 이용하여 화학적 변성전분을 대신할 수 있는 물리적 변성전분의 개발 방법이 제시될 수 있으리라 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2019년도 승의여자대학교 교내 연구비 지원에 의해 연구된 것으로 이에 감사드립니다.

### References

- Cha YH. 2011. Effect of ohmic heating on characteristics of heating denaturation of soybean protein. *Korean J Food Nutr* 24:740-745
- Cha YH. 2012. Effect of ohmic heating at subgelatinization temperatures on thermal-property of potato starch. *Korean J Food Nutr* 25:1068-1074
- Cha YH. 2014. Effect of ohmic heating on thermal and water holding property of starches. *Korean J Food Nutr* 27:112-119
- Cha YH. 2015. Effect of ohmic heating on external and internal structure of starches. *Korean J Food Nutr* 28:126-133
- Cha YH. 2017. Effect of ohmic heating on pasting property of starches. *Korean J Food Nutr* 30:689-695
- Chio JB, Cho WI, Jung JY, Chung MS. 2015. Sterilization of gochujang sauce with continuous ohmic heating. *Korean J Food Sci Technol* 47:474-479
- Craig SAS, Maningat CC, Seib PA, Hosney RC. 1989. Starch paste clarity. *Cereal Chem* 66:173-182
- De Alwis AAP, Fryer PJ. 1992. Operability of the ohmic heating process: Electrical conductivity effects. *J Food Eng* 15:21-48
- Herschel WH, Bulkley R. 1926. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid Zeitschrift* 39:291-300
- Kim JS, Pyun YR. 1995. Extraction of soybean milk using ohmic heating. *Korea Soybean Dig* 12:33-38
- Muhrbeck P, Svensson E, Eliasson AC. 1991. Effect of the degree of phosphorylation on the crystallinity of native potato starch. *Starch* 43:466-468
- Rastogi NK, Eshtiaghi MN, Knorr D. 1999. Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots. *J Food Sci* 64:1020-1023
- Singh J, Kaur L, McCarthy OJ. 2007. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications: A review. *Food Hydrocoll* 21:1-22
- Zareifard MR, Ramaswamy HS, Trigui M, Marcotte M. 2003. Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Sci Emerging Technol* 4:45-55

---

Received 24 May, 2019  
 Revised 25 June, 2019  
 Accepted 11 July, 2019