

Ohmic Heating에 의한 가열속도 변화가 옥수수전분의 물성특성에 미치는 영향

이석훈 · 장재권* · 변유량¹

청강문화산업대학 식품과학과, ¹연세대학교 생명공학과

The Effect of Heating Rate by Ohmic Heating on Rheological Property of Corn Starch Suspension

Seok-Hun Lee, Jae-Kweon Jang*, and Yu-Ryang Pyun¹

Department of Food Science, Chungkang College of Cultural Industries

¹Department of Biotechnology, Yonsei University

Granule swelling is essential phenomenon of starch gelatinization in excess water, and characteristic of heated starch dispersion depends largely on size and distribution of swelled starch granule. Although swelling characteristic of starch granules depends on type of starch, heating rate, and moisture content, influence of heating rate on swelling phenomenon of starch granule has not been fully discussed, because constant heating rate of starch dispersion cannot be obtained by conventional heating method. Ohmic heating, electric-resistant heat generation method, applies alternative current to food materials, through which heating rate can be easily controlled precisely and conveniently at wide range of constant heating rates. Starch dispersion heated at low heating rates below 7.5°C/min showed Newtonian fluid behavior, whereas showed pseudoplastic behavior at heating rates above 16.4°C/min. Apparent viscosity of starch dispersion increased linearly with increasing heating rate, and yield stress was dramatically increased at heating rates above 16.4°C/min. Average diameter of corn starch granules during ohmic heating was dramatically increased from 30.97 to 37.88 μm by increasing heating rate from 0.6 to 16.4°C/min (raw corn starch: 13.7 μm). Hardness of starch gel prepared with 15% corn starch dispersion after heating to 90°C at different heating rates decreased gradually with increasing heating rate, then showed nearly constant value from 9.4 to 23.2°C/min. Hardness increased with increase of heating rate higher than 23.2°C/min.

Key words: ohmic heating, corn starch, heating rate, rheology

서 론

전분현탁액의 가열속도는 전분입자의 팽윤에 큰 영향을 미치며 팽윤된 전분입자의 크기와 그 분포는 호화된 전분의 특성을 좌우한다. 그러나 종래의 전도가열방법으로는 일정한 가열속도를 얻기 곤란하므로 가열속도의 영향에 관한 연구는 매우 제한적으로 이루어졌다.

Ellis 등(1)은 밀 전분과 옥수수 전분 현탁액을 pouring method로 급격히 등온가열한 경우, 가열온도가 높을 때 전분입자는 더 높은 팽윤도와 점도를 나타냈으며, 옥수수전분에서 보다 밀 전분에서 그 차이가 더 심하게 났다고 보고한 바 있다. 또한 Holmes 등(2)은 200°C oil bath에 넣어서 85°C까지 비교적 급격

히 가열한 전분 현탁액과 100°C oil bath에 넣어서 천천히 가열했을 경우를 비교해 볼 때, 완만 가열한 전분현탁액은 삼출물(exudate)이 많고 전분입자의 변형이 심한 것으로 관찰되었으며, 급속 가열한 경우에는 일부 삼출물과 변형이 관찰되지만 찢어지거나 분열된 전분입자가 더 많이 관찰된다고 하였다. 이러한 보고들은 전분현탁액이 가열속도에 따라서 전분입자의 팽윤과 점도가 영향을 받는다는 사실을 의미한다.

Ohmic heating이란 전류가 도체를 통과할 때, 도체가 지니고 있는 고유의 저항에 의해 전자의 흐름이 방해받아 열이 발생하는 원리로 저항가열이라고도 하며, 새로운 가열방법으로써 그 적용범위가 점차 확대되어 가고 있다(3-5). Ohmic heating의 가장 큰 장점은 일반적으로 사용되어 왔던 전도가열에서는 얻기 힘든 피가열체의 균일한 급속 가열이 가능하며, 가열속도를 용이하게 조절할 수 있다는 것이다. 종래의 전도가열에서는 가열속도의 정확한 조절이 거의 불가능하지만 ohmic heating을 사용하면 전분현탁액의 가열속도를 변압기를 이용하여 전류의 양을 조절함으로써 원하는 가열속도를 용이하게 얻을 수 있다. 따라서 지금까지 연구가 미진했던 전분입자의 팽윤현상에 미

*Corresponding author: Jae-Kweon Jang, Department of Food Science, Chungkang College of Cultural Industries, 37 Haewol-Li, Majang-Myeon, Ichon-Si, Kyunggi-Do 467-744, Korea
Tel: 82-31-639-5905
Fax: 82-31-637-9696
E-mail: jkjang@chungkang.ac.kr

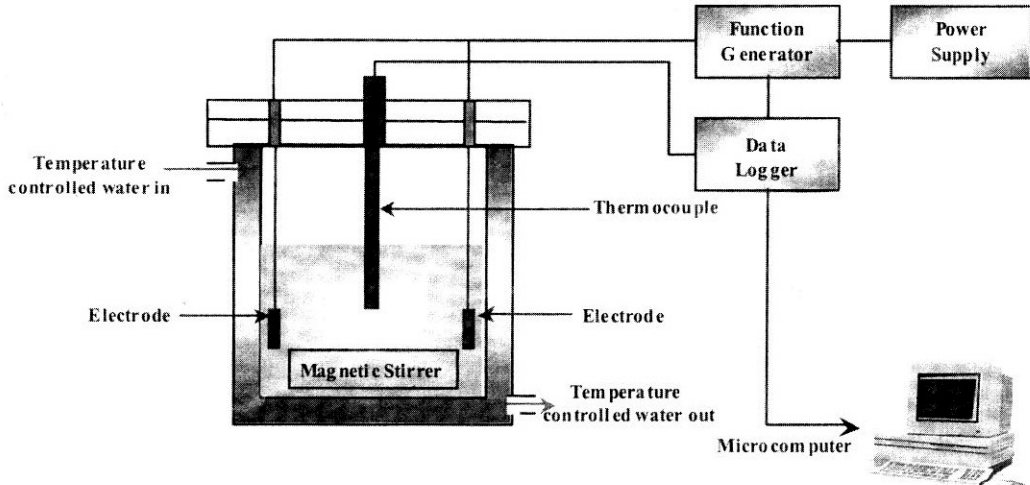


Fig. 1. Schematic diagram of heating device using ohmic heating.

치는 가열속도의 영향에 대하여 ohmic heating을 이용하면 보다 정밀한 연구가 가능하다. 본 연구에서는 이러한 목적으로 ohmic heating 방법을 이용하여 옥수수 전분현탁액의 가열속도를 원하는 속도로 일정하게 조절함으로써 가열속도가 전분현탁액의 물성특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

재료 및 방법

가열방법

전분현탁액의 가열에 사용된 전체적인 ohmic heating system을 Fig. 1에 나타내었다(6). 자체 제작한 ohmic heater에 주파수 변조기(function generator, PM-5191, Philips, Co., The Netherlands)가 부착된 전원공급장치(precision power amplifier, NF electronic instrument)를 연결하여 전압을 변화시킴으로써 가열속도를 0.5-60°C/min으로 조절하였으며, 전압, 전류 및 온도를 컴퓨터에 연결된 data logger를 이용하여 3초 간격으로 측정하였다. 온도 조절은 필요에 따라 ohmic heater에 부착된 water-jacket을 이용하였고 최대 편차가 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 가 되게 조절하였다. Heating jar는 내경이 6.5 cm이고 working volume이 100 mL인 실린더형으로 제작하였으며, 가열 시 수분의 손실을 막기 위해 o-ring과 clamp를 이용하여 closed system으로 구성하였다. 온도측정은 측정의 민감성과 ohmic heating에 따른 측정간섭을 배제하기 위하여, 시간상수(time constant)가 0.1초이고 teflon으로 절연된 0.64 mm (0.025 inch)의 T type-thermocouple(Cole-Parmer Ins. Co., type IT-18, USA)을 사용하였다. Ohmic heating을 위한 전극은 부식을 최소화하기 위하여 titanium을 소재로, 실린더형의 heating jar의 벽면에 맞게 곡면으로 제작하였다. 한편 전분현탁액 자체로는 전기전도도가 매우 낮아 충분한 가열속도를 얻기가 어려우므로, 전자전달매체로서 NaCl 1%를 첨가하였다. 가열이 끝난 전분현탁액은 water-ice bath에서 즉시 냉각한 후 시료로 사용하였으며, 가능한 빠른 시간에 모든 분석을 행하였다.

시료

시료는 시약급 옥수수전분(Duksan Pure Chemicals Co., Ltd., Korea)을 구입하여 사용하였다.

전분입자의 크기 및 형태 관찰

전분입자의 크기는 laser diffraction particle size analyzer(Mal-

vern Master Sizer 2600, Malvern Instruments Ltd., Malvern, England, UK)를 이용하여 측정하였으며, 초점거리(focal length)는 옥수수전분의 경우 100 mm로 측정하였다. 전분입자의 형태 및 크기는 역상광학현미경이 장착된 화상분석장치(image analyzer system; Diaphot 300, Nikon, Japan)를 이용하여 요오드용액(0.33% I_2 , 0.67% KI)으로 염색한 후 200배로 관찰하였다.

전분입자의 물성측정

전분현탁액의 물성측정은 rheometer(Carri-Med-CSL100, TA Instruments Ltd., Surrey, England)를 이용하여 20°C에서 shear stress, shear rate와 viscosity를 측정하였다. Steel cone과 plate(6 cm, 2°)를 사용하였으며, shear rate 1-600 s^{-1} 범위에서 ramp duration을 5분으로 하여 측정하였다. 전분겔의 견고성(hardness)은 15%의 옥수수전분현탁액을 ohmic heater를 이용하여 가열속도별로 가열한 후 냉각시키고, 직경 1.5 cm, 높이 2.5 cm의 원통형 틀에 담아 20°C incubator에서 3시간 성형시켰다. 성형된 전분겔은 Texture analyzer(TA-XT2, England)를 이용하여 2회 반복 압착시험하여 측정하였다. Head speed는 0.2 mm/sec로, deformation은 20%로 하였다.

결과 및 고찰

Ohmic heating과 가열속도에 따른 전분입자의 팽윤특성

물을 용매로 하여 전해질로 1%의 NaCl이 첨가된 3%의 옥수수 전분현탁액을 90°C까지 ohmic heating한 경우와 전도가열했을 경우의 가열곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 3.3°C/min의 거의 동일한 가열속도로 가열한 전도가열과 ohmic heating의 가열곡선을 비교하여 보면, 전도가열의 경우 온도가 높아지면서 가열매체와 피가열체와의 온도차가 작아지므로 일정한 가열속도로 가열하기가 곤란하였으며, 특히 가열속도가 빨라질수록 일정한 가열속도를 유지하기가 불가능하였다. 반면에 ohmic heating은 변압기를 통해 전압을 조절하여 가열속도를 조절함으로써 가열곡선이 거의 직선을 이루어 가열속도가 일정하게 유지되었음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 45.5°C/min의 빠른 가열속도에서도 ohmic heating은 거의 일정한 가열속도를 유지할 수 있었다.

가열속도 변화에 따른 전분입자의 형태변화를 관찰하기 위하여, 3% 옥수수 전분현탁액을 가열속도를 달리하여 ohmic

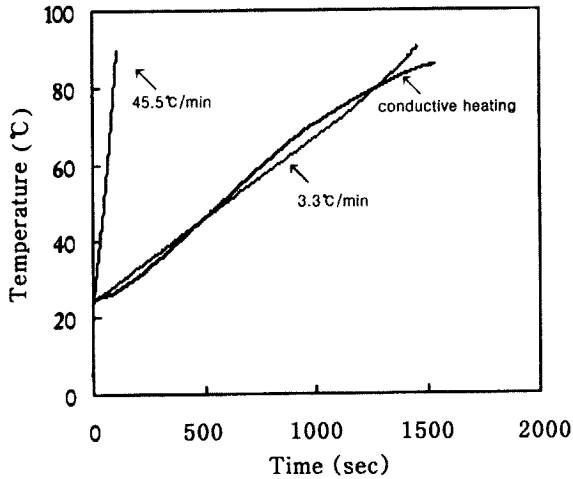


Fig. 2. Heating profiles of 3% corn starch dispersion by conductive and ohmic heating.

heating하고 90°C에 도달한 즉시 급냉시키고 요오드 염색법으로 처리하여 광학 현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 가열속도가 증가함에 따라 전분입자의 크기가 현저히 증가하였으며, 특히 실험 범위 내에서 최대 가열속도로써 매우 급속한 가열속도인 51.3°C/min인 경우 약 1.5분 이내에 전분 현탁액의 온도는 가열 최종온도에 도달하게 되며 입자의 크기가 현저히 증가하여, 전분입자의 팽윤도는 가열속도에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 가열속도에 따라 팽윤된 옥수수 전분 입자의 평균직경의 변화는 가열하지 않은 옥수수전분입자의 평균직경은 13.7 μm이었으며 0.6°C/min의 가열속도로 가열했을 경우 30.97 μm, 16.4°C/min로 가열한 경우는 37.88 μm로 평균직경이 급속히 증가하였으나 16.4°C/min 이상의 가열속도에서는 완만히 증가하여 45.5°C/min일 때는 41.56 μm로 증가하였다.

또한 가열속도가 증가함에 따라 전분입자의 색이 얼어지고 입자 주위에 요오드반응물이 있는 것으로 보아 입자내부로부터 아밀로오스의 용출도 가열속도에 따라 증가하는 것이 관찰되었다. 초기 20°C에서 옥수수전분현탁액의 경우 가열속도가 느린 분당 0.6°C씩 증가하는 가열조건과 28.3°C와 51.3°C씩 증가하는 가열조건으로 최종 가열온도인 90°C에 도달할 때(Fig. 3), 각각의 가열시간은 가열속도가 느린 분당 0.6°C는 117분, 분당 28.3°C는 2.5분, 분당 51.3°C는 1.4분이 소요되었다. 느린 가열속도인 분당 0.6°C가 높은 가열속도인 분당 28.3°C와 분당 51.3°C보다 전분입자가 호화점 이상의 온도를 유지한 시간이 수십 배에서 수백 배 이상이 됨에도 불구하고 높은 가열속도에서 전분입자의 팽윤도가 커지는 현상은 매우 흥미로운 사실이다. 이는 전분입자의 팽윤이 가열온도보다는 가열속도에 더 크게 영향을 받고 있다는 사실을 의미한다고 볼 수 있다.

가열속도가 전분현탁액의 유동거동에 미치는 영향

Rheometer를 이용하여 3% 옥수수전분 현탁액을 가열속도를 달리하여 90°C까지 가열한 후, 20°C로 냉각시킨 옥수수 전분현탁액의 유체거동특성을 측정하였다.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n + \eta_0$$

여기서 τ =shear stress(Pa), K =consistency index(Pa·sⁿ), $\dot{\gamma}$ =shear rate(s⁻¹), n =flow behavior index, η_0 =yield stress(Pa)이다.

가열한 전분현탁액의 유동거동을 Herschel-Bulkley model에 적용하여 해석하였으며 각 가열속도에서 구한 유변학(rheology) 값은 Table 1과 같다. 0.6°C/min의 낮은 가열속도에서는 유동거동지수(flow behavior index, n)가 1.10으로 약간의 shear thickening(dilatant) 현상을 보인다고 볼 수 있으나, 7.5°C/min 이하의 낮은 가열속도에서는 flow behavior index가 1에 근접한 Newtonian fluid에 가까운 특성을 보였다. 그러나 가열속도 16.4°C/min 이상에서는 pseudoplastic fluid의 거동을 나타내었으며, 항복응력(yield stress)과 점조도지수(consistency index)의 변

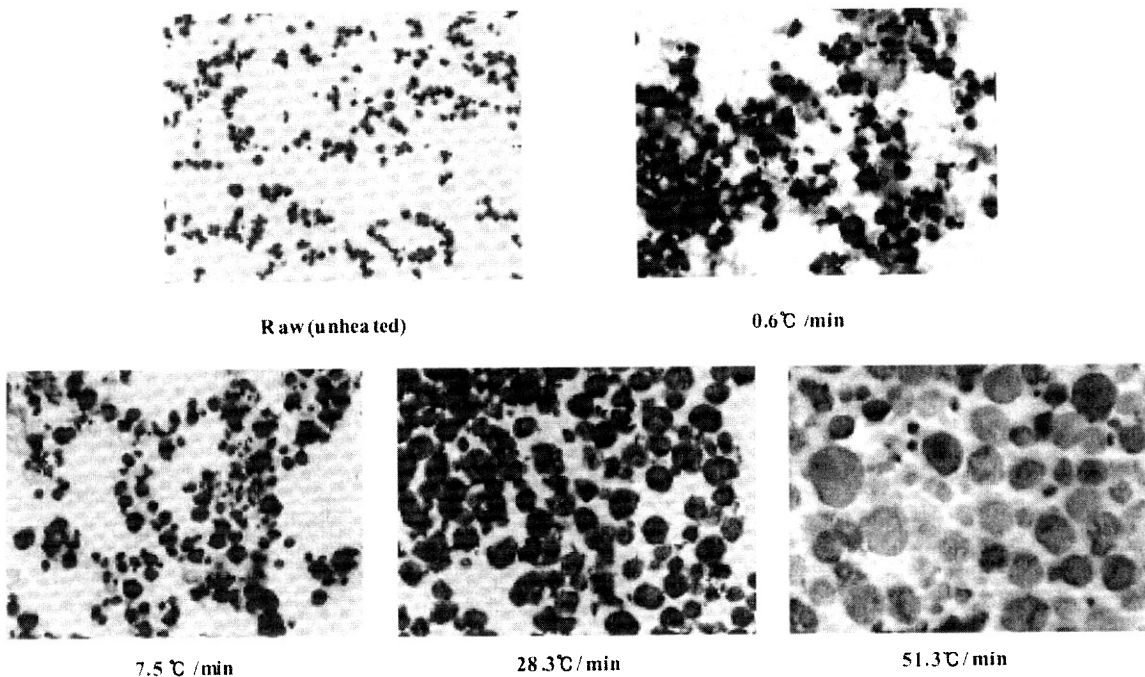


Fig. 3. Microphotographs of corn starch granules heated to 90°C at different heating rates (×200).

Table 1. Effects of heating rates on the rheological parameters of 3% corn starch dispersion heated to 90°C at different heating rates

Heating rate (°C/min)	Yield stress (mPa)	Consistency index (mPa · s)	Flow behavior index (Pa · s ⁿ)
0.6	53.8	1.58	1.10
1.4	38.6	5.34	0.98
3.3	39.6	6.72	0.96
7.5	165.9	10.55	0.92
16.4	571.6	27.60	0.81
21.9	1030.0	61.17	0.71
30.9	1460.0	91.97	0.67
45.5	2338.3	203.47	0.59

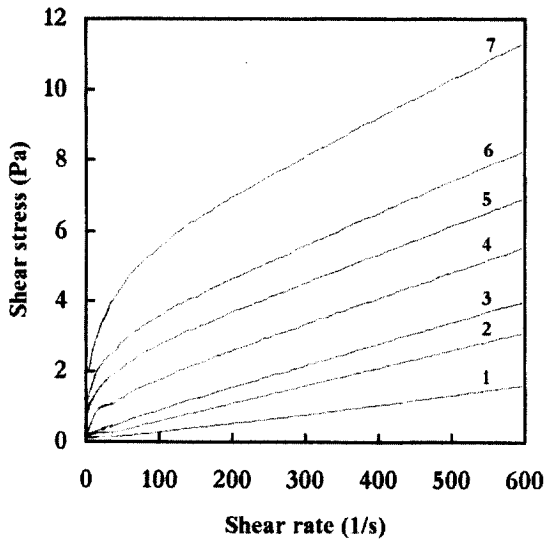


Fig. 4. Flow curves of 3% corn starch dispersions heated to 90°C at different heating rates.
Heating rate (°C/min) 1:1.4, 2:3.3, 3:7.5, 4:16.4, 5:21.9, 6:30.9, 7:45.5.

화가 가열속도에 따라 급격히 증가하였다. Fig. 4로부터 shear rate 100 s⁻¹에서의 겔보기 점도는 가열속도 증가에 따라 선형적으로 증가하여, 가열속도 1.4°C/min의 경우 3 cp에서 45.45°C/min일 때는 55 cp로 크게 증가하였으며, shear rate 100 s⁻¹에서 겔보기점도와 가열속도와는 다음의 상관관계를 이루었다(Fig. 5).

$$\mu = 1.170X + 0.9875 \quad (R^2 = 0.9956)$$

여기서 μ 는 겔보기 점도, X는 heating rate(°C/min)이다.

호화과정 중 점도의 증가는 용출된 다당류에 주로 영향을 받으며 팽윤된 전분입자는 큰 영향을 주지는 않는 것으로 알려져 있으나(7), 다당류의 용출과 전분입자의 팽윤은 동시에 일어나며 밀접한 상관관계가 있으므로 전분입자의 크기로 전분 현탁액의 점도예측이 가능하며 이에 대한 연구가 보고된 바 있으며(8,9), 호화과정 중 옥수수전분 입자의 크기와 분포가 전분 현탁액의 유동거동지수(flow behavior index) 및 점조도지수(consistency index)에 크게 영향을 주며 일정한 상관관계를 이룬다고 하였다. 또한 본 실험결과에서 알 수 있듯이 가열속도는 팽윤된 입자의 크기와 현탁액의 점도에 직접적으로 영향을 주고 있으므로 가열속도를 조절함으로써 전분현탁액의 점도조절이 가능할 것으로 생각된다.

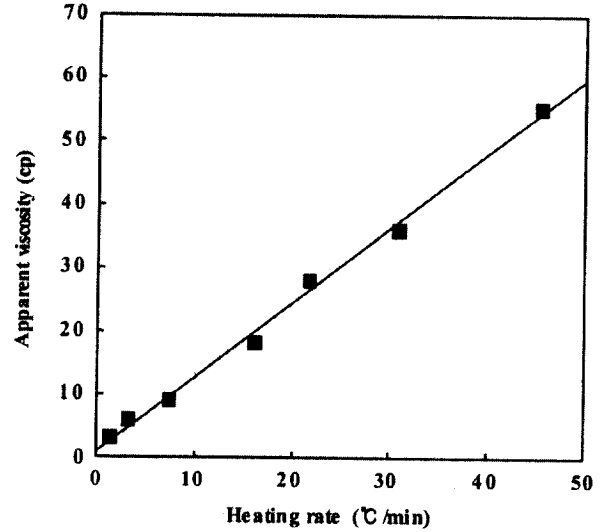


Fig. 5. Effect of heating rates on apparent viscosity of 3% corn starch dispersions heated to 90°C at different heating rates.

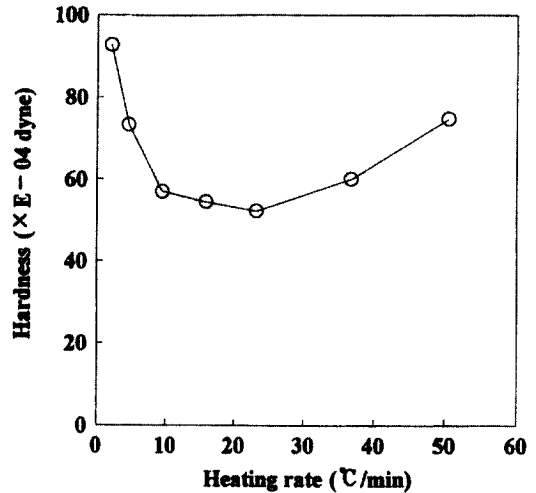


Fig. 6. Effect of heating rates on hardness of 15% corn starch gel heated to 90°C at different heating rates.

가열속도가 전분겔의 견고성에 미치는 영향

15%의 옥수수전분현탁액을 가열속도를 달리하여 90°C까지 가열한 후, 즉시 냉각시키고 직경 1.5 cm, 높이 2.5 cm의 원통형 틀에 담아 실온에서 3시간 성형시켜 전분겔 시료를 조제하고, 견고성(hardness)을 측정하였다. 가열속도에 따른 전분겔의 견고성은 Fig. 6에 나타난 것과 같이 아래로 오목한 곡선을 나타내었다. 즉, 완만 가열하여 제조한 전분겔의 견고성은 높은 값을 나타내었으며 가열속도가 증가함에 따라 차츰 감소하다가 가열속도 9.4-23.2°C/min의 범위에서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 그러나 이후에는 가열속도가 증가함에 따라 전분겔의 견고성이 다시 증가하는 경향을 보였다. 전분현탁액을 일정한 온도 이상으로 가열하면 용출된 아밀로오스의 가교 결합으로 3차원적 망상구조를 이루는 전분겔이 형성되며 이러한 전분의 겔화는 아밀로오스의 결정화에 의한 상전환이라고 알려져 있다(10). Ring(11)에 의하면 전분겔은 용출된 아밀로오스가 매트릭스를 형성하고 팽윤된 전분입자가 박혀있는 복합체로 이들 매트릭스 겔의 견고성은 팽윤된 입자의 변형률, 부피, 형태

등이 영향을 준다고 하였으며, Lii 등(12)은 rheometer를 이용하여 1, 3 및 5°C/min의 비교적 낮은 속도로 전분현탁액을 45°C에서 95°C까지 가열하면서 storage modulus(G')의 변화를 살펴본 결과, 가장 빠른 속도인 5°C/min로 가열할 때가 G'가 가장 낮은 온도에서 상승하기 시작하였고 최대 G'가 일찍 나타났다고 보고하였다. 이러한 이유는 느린 가열속도로 가열한 경우에는 아밀로오스와 팽윤된 전분입자들 간의 상호작용을 증진시킬 수 있는 충분한 시간이 주어지기 때문이라고 설명하였으며, 전분 호화액을 장시간 가열하면 입자의 팽윤뿐만 아니라 매트릭스를 형성하는 아밀로오스와 입자의 운동성에 좋은 영향을 주므로 겔의 강도가 증가한다고 하였다.

전분현탁액을 가열속도별로 가열하게 되면 장시간 가열에 따른 견고성의 증가와 빠른 가열속도에 따른 입자의 팽윤이 서로 상보적으로 작용하면서 전분겔의 견고성에 영향을 줄 것이라는 것을 예상할 수 있다. 가열속도가 느린 2°C/min의 경우에는 충분한 가열시간으로 인하여 견고성이 증가했을 것으로 보이며, 가열속도 증가로 인하여 가열시간이 부족해지면서 견고성이 감소하다가 전분입자의 불완전한 호화로 인한 결정성의 존재와 더불어 가열속도 증가로 인한 아밀로오스 용출량의 증가와 입자크기의 증가에 기인하여 견고성이 다시 증가하는 것으로 생각된다.

요 약

전분의 가열, 호화과정에서 ohmic heater를 이용하여 가열속도를 변화시키면서 가열속도가 전분현탁액의 팽윤특성 및 물성에 미치는 영향을 고찰하였다. 3% 옥수수 전분현탁액을 가열속도를 변화시키면서 90°C까지 가열한 후 냉각시키고 현미경 관찰과 입도분포를 측정할 결과 생옥수수 전분입자의 평균 직경은 13.7 µm이었으며 0.6°C/min의 가열속도로 가열했을 경우 30.97 µm, 16.4°C/min로 가열한 경우는 37.88 µm로 평균직경이 급속히 증가하였으나 16.4°C/min 이상의 가열속도에서는 완만히 증가하여 45.5°C/min일 때는 41.56 µm로 증가하였다. 즉, 가열속도는 전분입자의 팽윤에 영향을 주며, 가열속도의 증가는 전분입자의 팽윤을 촉진하는 것으로 나타났다. 7.5°C/min 이하의 낮은 속도로 가열한 3% 옥수수 전분현탁액은 Newtonian fluid에 가까운 유동곡선 특성을 보였다. 그러나 가열속도 16.4°C/

min 이상에서는 전분현탁액이 pseudoplastic fluid의 거동을 나타내었으며, yield stress가 현저히 증가되었다. 또한 겔보기 점도는 가열속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 15%의 옥수수전분현탁액을 각각 다른 가열속도로 90°C까지 가열한 후, 전분겔을 조제하여 가열속도에 따른 전분겔의 견고성(hardness)을 측정할 결과, 완만 가열하여 제조한 전분겔의 견고성은 높은 값을 나타내었으며, 가열속도가 증가함에 따라 차츰 감소하다가 가열속도 9.4-23.2°C/min의 범위에서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 그러나 이후에는 가열속도가 증가함에 따라 전분겔의 견고성이 다시 증가하였다.

문 헌

1. Ellis HS, Ring SG, Whittam MA. A comparison of the viscous behaviour of wheat and maize starch pastes. *J. Cereal Sci.* 10: 33-44 (1989)
2. Holmes ZA, Soeldner A. Effect of heating rate and freezing and reheating of corn and wheat starch-water dispersions. *J. Am. Diet. Assoc.* 78: 352-355 (1981)
3. De Alwis AAP, Fryer PJ. The use of direct resistance heating in the food industry. *J. Food Engin.* 11: 3-27 (1990)
4. Schreier PJR, Reid DJ, Fryer PJ. Enhanced diffusion during the electrical heating of foods. *Intl. J. Food Sci. Technol.* 22: 249-260 (1993)
5. Kim JS, Pyun YR. Extraction of soybean milk using ohmic heating. *Korea Soybean Dig.* 12: 33-38 (1995)
6. Lee SH, Jang JK. The effect of heating rate by ohmic heating on rheological property of starch suspension. *J. Korean Soc. Ind. Food Technol.* 6: 61-70 (2002)
7. Miller BS, Derby RI, Trimbo HB. A pictorial explanation for the increase in viscosity of a heated wheat starch-water suspension. *Cereal Chem.* 50: 271-280 (1973)
8. Rao MA, Okechukwu PE, Da Silva PMS, Oliveira JC. Rheological behavior of heated starch dispersions in excess water: role of starch granule. *Carbohydr. Polymer.* 33: 273-283 (1997)
9. Okechukwu PE, Rao MA. Kinetics of cowpea starch gelatinization based on granule swelling. *Starch* 48: 43-47 (1996)
10. Miles MJ, Morris MJ, Ring SG. Gelation of amylose. *Carbohydr. Res.* 135: 257-69 (1983)
11. Ring SG. Studies on starch gelation. *Starch* 37: 80-83 (1985)
12. Lii CY, Shao YY, Tseng KH. Gelation mechanism and rheological properties of rice starch. *Cereal Chem.* 72: 393-400 (1995)

(2005년 4월 21일 접수; 2005년 5월 16일 채택)