

## 초음파처리가 옥수수전분의 이화학특성과 기공 형성에 미치는 영향

최은희 · 이재권\*

경기대학교 자연과학대학 식품생물공학과

### Effects of sonication on physicochemical properties and pore formation of maize starch

Eun-Hee Choi and Jae-Kwon Lee\*

Department of Food Science and Biotechnology, College of Natural Science, Kyonggi University

**Abstract** The physicochemical properties of maize starch sonicated at various amplitudes (100, 200, and 300 W) and times (10, 30, and 50 min) were examined. The amount of enzyme-susceptible starch increased marginally after sonication. Sonication increased the amount of oil absorbed in the starch although the degree of oil absorption decreased with an extension of the sonication time, implied that different types and extent of damages occurred. Scanning electron microscopy revealed that ultrasound sonication did not form pores on the surfaces, but caused damages such as depression and erosion. Pasting viscosity of starch decreased with an increase in the severity of sonication conditions because of the weakened polymer network. X-ray diffraction suggested that the crystalline domains in starch were not susceptible to sonication and were more resistance to degradation. Sonicated starch formed more pin-holes on the surfaces in the initial glucoamylase reaction; subsequently, as the reaction proceeded, porous starch with enlarged pores was formed and finally, disrupted granular fragments were observed.

**Keywords:** ultrasound, physicochemical properties, porous starch, glucoamylase

## 서 론

초음파(ultrasound)는 주파수 20 kHz 이상의 음파로서 주파수에 따라 의료 및 산업용의 비파괴적 진단을 위한 진단초음파와 물질 분산, 세포 파쇄 등을 목적으로 하는 출력초음파(power ultrasound)로 분류된다. 이중 출력초음파는 초음파의 공동효과(cavitation effect)로 인하여 액상에서 높은 에너지의 압력과 전단력(shearing action)을 발생하고 용매분자를 해리하여 라디칼을 생성함으로써, 고분자 화합물은 초음파처리 시 분자사슬이 분해, 해체되고 분자구조가 약화된다(1,2). 이 같은 특성으로 초음파는 추출, 살균, 유화, 탈기 등의 다양한 식품공정에서 이용되고 있으며(1,3,4), 최근에는 전분을 대상으로 초음파에 의한 전분물성의 개선 효과에 관한 연구가 보고되었다(5-9). Wang과 Wang(3)은 쌀 전분의 추출에서 기존의 알칼리 추출법을 대체하여 초음파와 중성 프로테이스(protease)의 병행처리가 효율적이라고 보고하였으며, Tomasik과 Zaranyika(4)는 전분의 화학적 변성방법(chemical modification)을 대체하는 변성방법으로 초음파처리를 제안한바 있다. 또한 전분물성에 미치는 초음파의 영향으로는 전분 분산액의 경우 전분의 분자량 감소와 이에 따른 paste 점도의 감소, 전분 분자구조의 약

화 등이 보고되었으며(5-7), 전분입자의 경우에는 홈(dent), 기공(pore)과 같은 입자표면에서의 손상 발생이 보고되었다(8-9).

다공성 전분(porous starch)은 전분입자에 기공이 생성된 다공구조의 변성전분으로서 식품, 세제, 제약, 화장품 등의 분야에서 흡착제 또는 유용성 성분의 방출조절용 캡슐(controlled-release encapsulation) 소재로 사용된다(10-14). 다공성 전분은 생전분을 호화온도 이하에서 글루코아밀레이스(glucoamylase)로 부분 가수분해하여 제조되며, 전분의 다공성 구조는 글루코아밀레이스에 의한 입자표면에서의 기공과 입자내부의 공간(cavity) 생성으로 형성되는 것으로 알려져 있다(14,15). 이와 같은 다공성 전분의 흡착능력은 일반적으로 전분입자의 다공성과 입자 표면적에 비례하여 증가한다. 최근 전분입자의 다공성 증대를 목적으로 초음파와 글루코아밀레이스를 병행 처리하는 다공성 전분의 제조방법과 최적조건에 관한 연구가 보고되었으나(16,17), 이들 연구에서는 초음파처리가 글루코아밀레이스의 기공생성에 미치는 영향과 이에 따른 다공성 전분의 기공특성에 관한 검토는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 초음파처리 조건에 따른 옥수수전분의 물성변화를 확인하고, 글루코아밀레이스에 의해 생성되는 초음파처리전분의 기공특성을 조사함으로써 초음파처리에 의한 전분입자 내 다공구조의 조절 가능성을 검토하였다.

\*Corresponding author: Jae-Kwon Lee, Department of Food Science and Biotechnology, College of Natural Science, Kyonggi University, Suwon, Gyeonggi 16227, Korea  
Tel: +82-31-249-9654  
Fax: +82-31-249-9650  
E-mail: jglee@kyonggi.ac.kr  
Received May 18, 2017;  
accepted May 25, 2017

## 재료 및 방법

### 실험재료

옥수수전분(amylose 27%, w/w)과 글루코아밀레이스(70 units/mg, *Aspergillus niger*)는 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하여 사용하였으며 기타 시약은 일급시약을 사용하였다.

### 초음파처리

옥수수전분의 초음파처리는 침탐(probe)형 초음파분산기(Ultrasonic Processor, VCX 400, Sonics & Materials Inc., Newtown, CT, USA)를 사용하여 행하였다. 옥수수전분 현탁액(10%, w/v) 100 mL를 비이커에 취하고 현탁액 중앙에 probe를 위치한 다음 초음파 세기 100, 200 및 300 W에서 10, 30 및 50분간 각각 초음파 처리하였다. 초음파처리과정의 발열로 인한 전분의 호화를 방지하기 위하여 초음파처리는 30°C 항온수조에서 일정한 속도로 교반하면서 행하였다. 이후 시료는 원심분리하여 40°C 오븐(OF-22GW, Jeio Tech., Daejeon, Korea)에서 24시간 건조한 다음 4°C에서 보관하면서 실험에 사용하였다.

### 유지흡수도

유지흡수도는 Wu 등(16)의 방법을 변형하여 측정하였다. 즉 전분시료 0.5 g을 50 mL 원심분리 튜브에 넣고 여기에 시판 포도씨유(Sajo Industries Co. Ltd., Seoul, Korea) 10 mL를 가하여 균일하게 혼합한 다음 상온에서 1시간 정치하였다. 이후 시료는 원심분리하고 표면의 과도한 유지를 종이타월로 제거한 다음 칭량하여 유지흡수 전의 전분무게 대비 유지흡수 후의 무게증가 백분율로서 유지흡수도를 산출하였다.

### 전분의 이화학특성

전분의 손상도는 Megazyme kit (Megazyme, Wicklow, Ireland)를 사용하여 총 전분함량 대비 손상전분(ESS, enzyme susceptible starch)의 함량을 측정하는 AACC 효소분해법(18)으로서 구하였다. 전분의 결정성은 X-선 회절분석기(Miniflex II, Rigaku Denki Co. Ltd., Tokyo, Japan)를 이용하여 30 kV, 15 mA에서 회절각도(2θ) 5-35°, 스캔속도 3°/min의 조건에서 측정하였다. 전분의 호화 특성은 신속점도분석기(Rapid Visco Analyzer, RVA-3D, Newport Scientific, Australia)를 사용하여 전분현탁액(12%, w/v)을 50°C에서 95°C로 7.5분 동안 가열하고 95°C에서 2분 유지 후 7.5분 동안 50°C까지 냉각하는 신속점도분석기 cycle에서의 점도 변화로서 조사하였다.

### 전분 가수분해도

글루코아밀레이스 반응시간에 따른 초음파처리(300 W, 10분) 및 무처리 옥수수전분의 가수분해도는 Wu 등의 방법(16)을 변형하여 측정하였다. 전분시료 1.0 g을 100 mL의 0.1 M 초산원충용액(sodium acetate buffer, pH 5.0)에 현탁하고 여기에 글루코아밀레이스(5 unit/mg starch)를 가하여 40°C 항온수조에서 1, 3, 5, 10, 15, 20 및 25시간 반응 후 무수 에탄올을 가하여 효소반응을 종결하였다. 효소반응시간 별 가수분해도는 반응용액 상층액 3 mL를 취하여 유리된 포도당을 DNS (3,5-dinitrosalicylic acid) 방법(19)으로 정량하여 아래 식에 따라 구하였다.

$$\text{가수분해도(\%)} = \frac{C \times V}{\text{시료중량(mg)} \times 0.94 \times 1.11} \times 100$$

C: glucose 함량(mg/L), V: 반응용액 부피 (L<sup>-1</sup>)

### 미세구조

전분입자의 미세구조는 시료를 카본테이프에 부착하여 gold 코팅한 후 가속전압 15 kV에서 주사전자현미경(SEM, SNE-3000MB, SEC Co. Ltd., Suwon, Korea)을 사용하여 관측하였다.

### 통계분석

모든 자료는 평균과 표준편차를 산출하여 표시하였으며 처리 시료의 유의 차는 분산분석(ANOVA) 후 Duncan의 multiple range test로 검증하였다( $p < 0.05$ ). 통계분석은 SPSS Statistics 21 (IBM, Armonk, NY, USA)을 사용하였다.

## 결과 및 고찰

### 손상전분함량 및 유지흡수도

초음파처리에 따른 옥수수전분의 손상전분함량은 초음파 세기와 처리시간에 비례하여 증가하여, 무처리 전분의 손상전분함량 1.21%는 300 W, 50분의 초음파처리에서 최대측정치 3.78%로 증가하였다(Table 1). 그러나 초음파처리에 따른 각 시료의 손상전분 증가는 예상과 달리 비교적 미미하였는데, 이는 Luo 등(9)의 보고와 같이 전분입자의 결정성 구조 대부분은 초음파처리에 의해 손상되지 않으며 그 결과 글루코아밀레이스의 전분 가수분해가 제한적으로 일어나기 때문으로 판단된다. 글루코아밀레이스의 전분 가수분해 용이성을 나타내는 손상전분함량은 일반적으로 전분의 호화 또는 과도한 분쇄 등의 요인으로 전분입자의 결정성 영역이 소실되었을 때 증가한다(18).

초음파처리 전분의 유지흡수도는 처리시간 10분의 경우 초음파 세기가 높을수록 증가하여 100, 200 및 300 W의 세기에서 176, 193 및 198%로 측정되었다(Table 1). 반면 처리시간 30분과 50분에서는 초음파 세기에 관계없이 전분의 유지흡수도가 상응하는 10분 처리시료보다 낮은 것으로 조사되었다. 유지흡수도, 즉 전분에 흡수되는 유지량은 전분입자의 표면적 또는 다공성의 증가에 비례하여 증가한다. Wu 등(16)은 옥수수전분을 500 W, 50분간 초음파 처리하였을 때 입자표면에 형성된 기공으로 인하여 유지흡수도가 증가하며, Sujka와 Jamroz(20)는 170 W, 30분간 초음파 처리한 감자 전분과 밀 전분의 입자표면에 발생하는 함몰과 균열로 인하여 유지흡수도가 증가하는 것으로 보고하였다. 본 실험의 경우 초음파처리 10분에서는 초음파 세기가 높아짐에 따라 전분의 유지흡수도가 증가한 반면, 전분의 손상도가 상대적으로 높은 30 및 50분의 처리에서는 유지흡수도가 오히려 감소하였는데, 이는 초음파의 처리조건에 따라 전분입자의 손상형태가

**Table 1. Oil absorption and damaged starch content of maize starches sonicated at different levels of amplitude and time**

Sonication conditions		Damaged starch (%)	Oil absorption (%)
Time (min)	Amplitude (W)		
10	100	1.24±0.01 <sup>ab</sup>	176.2±1.3 <sup>c</sup>
	200	1.26±0.06 <sup>ab</sup>	193.3±5.8 <sup>d</sup>
	300	1.75±0.03 <sup>c</sup>	198.1±4.8 <sup>d</sup>
30	100	1.33±0.02 <sup>b</sup>	168.7±3.0 <sup>abc</sup>
	200	1.85±0.07 <sup>d</sup>	162.8±8.5 <sup>ab</sup>
	300	1.89±0.02 <sup>d</sup>	173.9±7.3 <sup>bc</sup>
50	100	1.70±0.03 <sup>c</sup>	171.1±0.2 <sup>abc</sup>
	200	2.50±0.03 <sup>e</sup>	161.8±3.9 <sup>a</sup>
	300	3.78±0.05 <sup>f</sup>	175.9±4.7 <sup>c</sup>
Untreated maize starch		1.21±0.01 <sup>a</sup>	159.85±3.0 <sup>a</sup>

Values followed by the same letter in the same column are not significantly different ( $p < 0.05$ ).

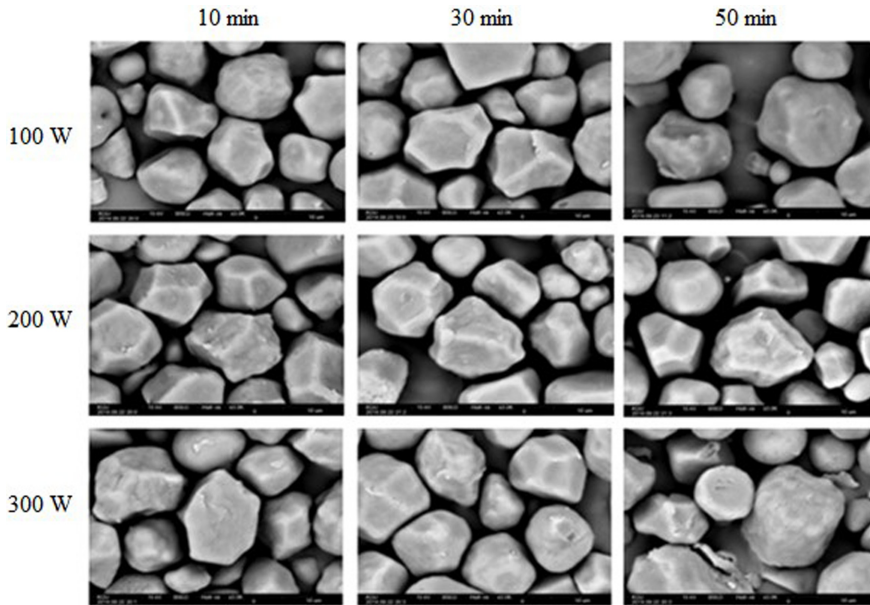


Fig. 1. Scanning electron micrographs of maize starch granules sonicated at different levels of amplitude and time.

상이하기 때문으로 예상된다. Zuo 등(21)은 전분입자에 미치는 초음파의 영향은 전분의 출처 및 농도뿐만 아니라 초음파세기, 시간, 온도 등에 따라 상이하다고 보고한 바 있다. 이에 초음파처리 전분의 외관형상을 주사현미경으로 관측하고 전분입자의 손상 형태를 확인하는 후속실험을 진행하였다.

**초음파처리 전분의 입자외형**

주사현미경으로 관측한 초음파처리 옥수수전분의 외관형상을 Fig. 1에 표시하였다. 초음파처리에 따라 전분입자의 표면은 거칠어지며 처리시간이 길어짐에 따라 표면이 함몰되며(100 W, 30분) 이후 함몰된 표면 주위의 모서리가 둥글게 마모된 거친 표면의 전분입자 형태(100 W, 50분)가 관측되었다. 이 같은 전분입자의 외형변화는 초음파세기 200 W와 300 W의 처리시료에서도 동일한 양상을 보였으나 초음파처리에 의한 입자표면에서의 기공(pore) 생성은 관측되지 않았다. 이상의 관측결과를 통하여 전분입자는 초음파의 처리과정에서 발생하는 강력한 전단력에 의해 표층이 마모, 절삭되며, 처리시간이 길어짐에 따라 전분입자의 표면손상은 단계적으로 심화되는 것으로 판단된다. 이에 따라 선행 유지흡수도 실험에서 측정된 초음파처리 전분의 유지흡수 양상은 초음파처리 조건에 따른 전분입자 표면에서의 상이한 손상형태에 기인한 결과로 추정된다. 즉 초음파처리 10분의 경우 전분입자의 표면 함몰에 따른 표면적 증가로 인해 전분의 유지흡수도가 증가한 반면, 이후 초음파처리 시간이 길어짐에 따라서는 입자표면의 과도한 마모로 인하여 유지흡수도는 오히려 감소하는 것으로 판단된다.

**초음파처리 전분의 소화특성**

신속점도분석기로 측정된 초음파처리 전분의 소화특성을 Fig. 2에 표시하였다. 초음파처리 전분은 처리시간 10분과 30분의 경우 무처리 전분에 비해 다소 낮은 페이스팅(pasting) 점도를 나타내었으나 초음파의 세기에 따른 전분시료 간의 페이스팅, breakdown 및 final 점도는 차이가 없었다(Fig. 2A, 2B). 반면 처리시간 50분에서는 초음파 세기가 높을수록 초음파처리 전분의 페이스팅, breakdown 및 final 점도는 확연하게 감소하여(Fig. 2C), 초

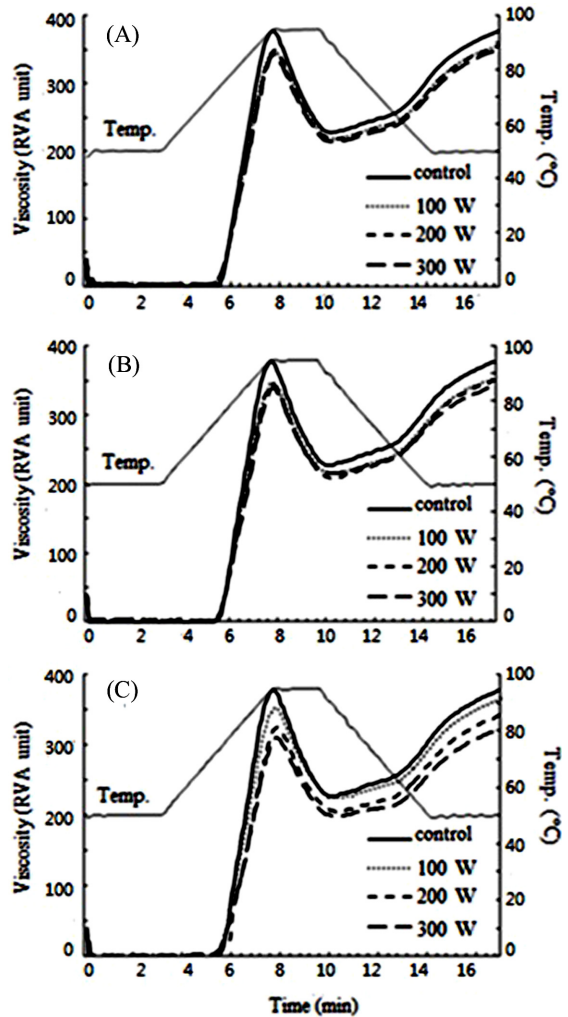
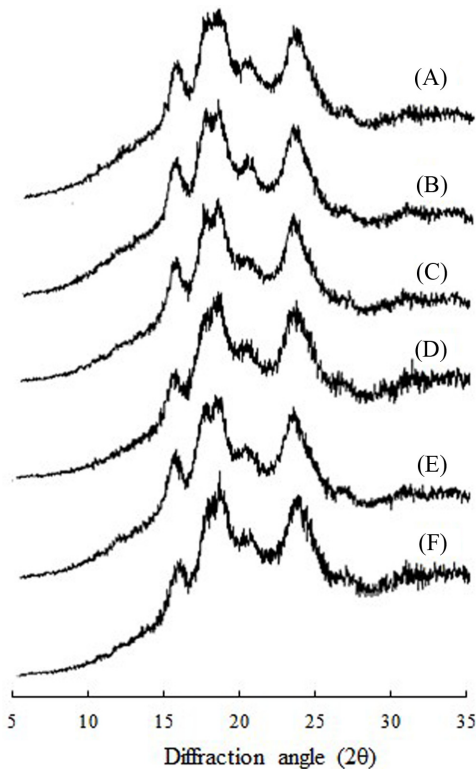


Fig. 2. Rapid visco analyzer profiles of maize starch sonicated at different levels of amplitude and time. (A) Sonication for 10 min, (B) Sonication for 30 min, and (C) Sonication for 50 min.

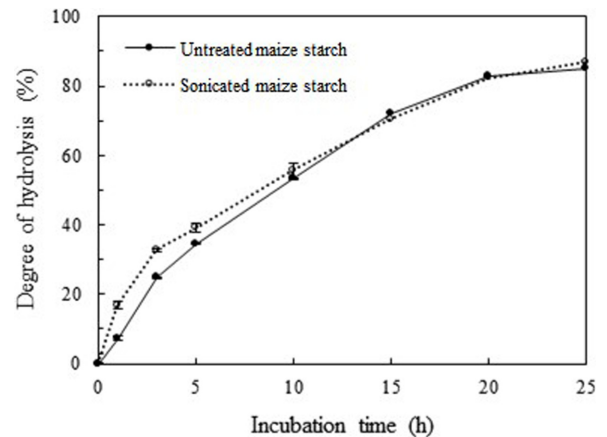


**Fig. 3. X-ray diffraction patterns of sonicated maize starches.** (A) Untreated maize starch, (B) Maize starch sonicated at 100 W for 10 min, (C) 200 W for 10 min, (D) 300 W for 10 min, (E) 300 W for 30 min, (F) 300 W for 50 min.

음파처리 전분의 호화특성은 초음파의 세기 보다는 처리시간에 의존성을 갖는 것으로 확인되었다. 한편 초음파처리 전분이 무처리 전분과 비교하여 낮은 페이스팅 점도를 나타내는 것은 초음파에 의해 전분분자의 glycosidic 결합이 부분 해체되어 전분의 polymer network 약화되었기 때문으로 추정된다(8,9). 즉 초음파처리 전분입자는 95°C에서 교반하는 신속점도분석기의 측정조건에서 호화, 팽윤된 후 약화된 polymer network으로 인해 무처리 전분 보다 쉽게 붕괴되어 낮은 페이스팅 점도를 나타내는 것으로 판단된다.

#### 초음파처리 전분의 결정성

초음파처리 및 무처리 옥수수전분의 X-선 회절특성을 Fig. 3에 표시하였다. 무처리 옥수수전분은 회절각도 17.3°, 18.12°에서 두 개의 주 회절 피크(peak)를 나타내며 회절각도 15.18°, 20.26°, 23.4°에서 피크를 보이는 전형적인 A-형의 X-선 회절양상을 나타내었다(Fig. 3A). 반면 초음파처리 전분의 X-선 회절양상은 무처리 전분과 유사하였으나 피크 형태는 처리조건에 따라 다소 변형되는 것으로 확인되었다. 즉 무처리 전분에서 두 개의 정점을 갖는 회절각도 17°-19° 범위의 피크는 300 W, 10분의 초음파처리에 따라 단일 정점으로 변화하였으며(Fig. 3D), 회절각도 19°-21° 범위의 피크는 초음파 처리시간이 길어짐에 따라 완만하게 확산되었다(Fig. 3B-F). 이는 초음파처리에 따라 전분입자의 결정성 영역이 부분 손상된 것으로 판단되어지며, 500 W, 10분의 초음파처리에 따라 옥수수전분의 무정형 영역뿐만 아니라 결정성 영역이 손상되어 X-선 회절 피크의 형태 변화가 발생한다는 Huang 등(8)의 연구결과와도 유사하였다.



**Fig. 4. Degree of starch hydrolysis by glucoamylase.**

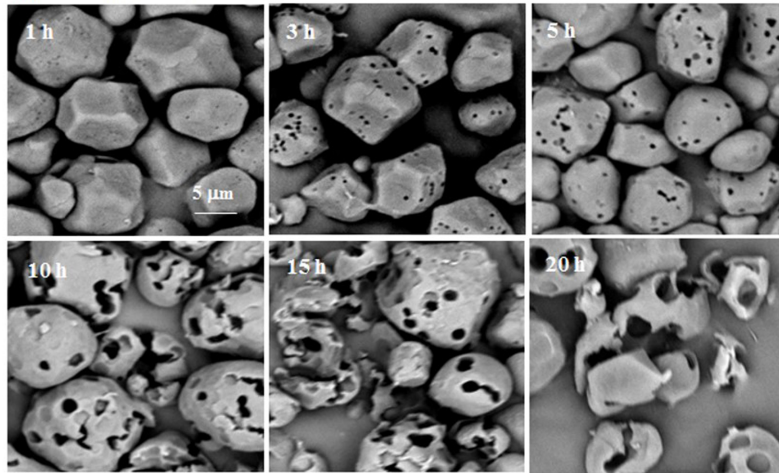
#### 초음파처리 전분의 기공형성 특성

글루코아밀레이스 반응시간에 따른 초음파처리(300 W, 10분) 전분의 가수분해도를 Fig. 4에 표시하였다. 초음파처리 전분의 가수분해도는 효소반응 1, 3 및 5시간에서 16.9, 32.7 및 39.0%로서 상응하는 무처리 전분의 가수분해도 7.3, 24.7 및 34.5% 보다 높았으나, 10시간 이후에서는 무처리 전분의 가수분해도와 차이가 없었다. 초음파처리 전분의 높은 초기 가수분해도는 선행 초음파처리 전분의 외관관측 실험(Fig. 1)에서 확인한 전분입자의 표면손상으로 인한 표면적 증가와 이에 따른 글루코아밀레이스의 흡착효율 상승에 기인한 결과로 추정된다. 일반적으로 전분분해효소의 반응속도는 효소가 흡착되는 전분입자의 표면특성에 따라 결정되며 전분분자의 구조, 중합도 및 amylose 함량 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(22,23).

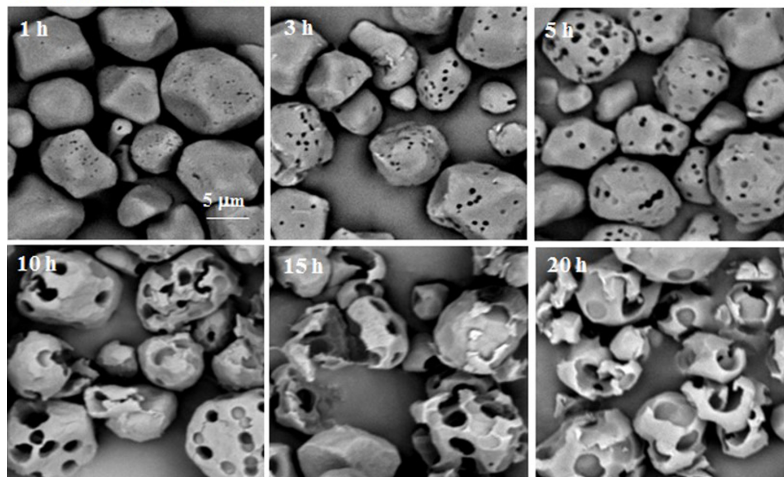
주사현미경으로 관측한 글루코아밀레이스 반응시간 별 초음파처리 및 무처리 옥수수전분의 기공 형상을 Fig. 5에 표시하였다. 효소반응 1시간 경과에 따라 전분시료의 표면에는 미세한 기공(micro pinhole)이 생성되었으나 모든 입자표면에서 균일하게 분포하지는 않는 것으로 확인되었다. 또한 이러한 미세기공의 수는 무처리 전분보다 초음파처리 전분에서 더 많이 관측되었는데, 이는 동일 반응시간에서 측정된 무처리 전분 보다 높은 초음파처리 전분의 가수분해도 실험결과(Fig. 4)와도 일치하였다. 효소반응 5시간에서는 입자표면의 미세기공이 글루코아밀레이스의 가수분해로 인해 그 크기와 깊이가 점차 확장되며, 전분입자는 표면에 기공이 생성된 다공성의 입자형태를 나타내었다. 그러나 효소반응 10시간의 경우 전분입자는 과도한 가수분해로 인한 파손(fracture)이 시작되어, 20시간 반응에서는 전분입자 대부분이 침식된(eroded) 표층 안쪽으로 내부가 비어있는 조각형태로 파열되었다. 이와 같은 반응시간 별 표면기공의 생성과 변화를 통하여 글루코아밀레이스 반응은 입자표면에서 시작된 후 확장된 기공을 통해 내부로 확산, 진행되는 것을 확인하였다. 또한 파손된 전분입자 표면의 일부 기공은 내부로 확장되지 못하고 표층 아래의 전분 층에서 확장이 중지된 형상을 보이는 반면, 입자 내부는 비어있는 형태로 관측됨에 따라 글루코아밀레이스의 가수분해반응은 표층보다 결정성이 낮은 입자 내부에서 용이하게 일어나는 것으로 추정된다. 이상의 결과에 따라 전분입자는 초음파에 의한 표면과 일부 결정성구조의 손상으로 글루코아밀레이스 반응이 초기에 빠르게 진행됨에 따라 더 많은 미세기공이 입자표면에 생성되며, 그 결과 초음파처리 전분의 다공성은 무처리 전분에 비해 증가하는 것으로 판단되었다.



(A) Untreated maize starch



(B) Sonicated maize starch



**Fig. 5. Scanning electron micrographs of maize starch granules hydrolyzed by glucoamylase for various duration (X500).** (A) Untreated maize starch granules, (B) Maize starch granules sonicated at 300 W for 10 min.

**요 약**

초음파에 의한 전분입자 내 다공구조의 조절 가능성을 검토하기 위하여 초음파 처리조건에 따른 옥수수전분의 물성변화와 글루코아밀레이스에 의해 생성되는 표면 기공의 특성을 조사하였다. 손상전분 측정실험과 및 X-선 회절분석을 통하여 전분입자의 결정성 구조는 초음파 처리조건에 따라 제한적으로 손상되는 것이 확인되었다. 신속점도분석기로 측정된 전분의 페이스팅 점도는 초음파처리에 감소하여 초음파에 의해 전분분자의 polymer network이 약화되는 것으로 판단된다. 전분의 유지흡수는 초음파 10분처리의 경우 초음파 세기가 높을수록 증가한 반면, 전분 손상도가 상대적으로 높은 30분과 50분 처리에서는 오히려 감소하는 양상을 나타내었다. 전분입자 표면은 초음파의 전단력으로 인해 마모되어 처리시간이 길어질수록 손상 정도는 증가하였으나 초음파에 의한 기공 생성은 관측되지 않았다. 글루코아밀레이스 반응시간에 따른 전분표면의 기공 특성 관측결과, 반응초기 초음파처리 전분의 표면에는 무처리 전분 보다 더 많은 미세기공이 생성되었으며 효소반응에 따라 그 크기와 깊이가 확장되어 5시간 반응에서 다공성의 전분입자 형태를 나타내었다. 반면 효소반응 10시간 이후에는 과도한 가수분해로 인한 입자의 형태 파손

이 관측되었다. 이상의 결과에 따라 전분입자는 초음파에 의한 표면과 일부 결정성 영역의 손상으로 글루코아밀레이스의 반응이 초기에 빠르게 진행되어 더 많은 미세기공이 입자표면에 생성됨에 따라, 초음파처리 전분의 다공성은 무처리 전분에 비해 증가하는 것으로 판단되었다.

**감사의 글**

본 연구는 2014년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

**References**

1. Mason TJ. Power ultrasound in food processing-the way forward. pp. 105-126. In: Ultrasound in Food Processing. Povey MJW, Mason TJ (eds). Thomson Science, London, UK (1998)
2. Czechowska-Biskup R, Rokita B, Lotfy S, Ulanski P, Rosiak JM. Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound. Carbohydr. Polym. 60: 175-184 (2005)
3. Wang LF, Wang YJ. Rice starch isolation by neutral protease and high intensity ultrasound. J. Cereal Sci. 39: 291-296 (2004)
4. Tomasiak P, Zaranyika MF. Nonconventional methods of modifica-

- tion of starch. *Adv. Carbohydr. Chem. Bi.* 51: 243-320 (1995)
5. Isono Y, Kumagai T, Watanabe T. Ultrasonic degradation of waxy rice starch. *Biosci. Biotech. Biochem.* 58: 1799-1802 (1994)
  6. Seguchi M, Higasa T, Mori T. Study of wheat starch structure by sonication treatment. *Cereal Chem.* 71: 636-639 (1994)
  7. Gallant D, Degrois M. Microscopic effects of ultrasound on the structure of potato starch. *Starch* 24: 116-123 (1972)
  8. Huang Q, Li L, Fu X. Ultrasound effects on the structure and chemical reactivity of cornstarch granules. *Starch* 59: 371-378 (2007)
  9. Luo Z, Fu X, He X, Luo F, Gao Q, Yu S. Effect of ultrasonic treatment on the physicochemical properties of maize starches differing in amylose content. *Starch* 60: 646-653 (2008)
  10. Yao WR, Yao HY. Adsorbent characteristics of porous starch. *Starch* 54: 260-263 (2002)
  11. Zeller BL, Saleeb FZ, Ludescher RD. Trends in development of porous carbohydrate food ingredients for use in flavor encapsulation. *Trends Food Sci. Tech.* 9: 389-394 (1999)
  12. Nagata K, Okamoto H, Danjo K. Naproxen particle design using porous starch. *Drug Dev. Ind. Pharm.* 27: 287-296 (2001)
  13. Madene A, Jacquot M, Scher J, Desobry S. Flavor encapsulation and controlled release-a review. *Int. J. Food Sci. Tech.* 41: 1-21 (2006)
  14. Zhao J, Madson MA, Whistler RL. Cavities in porous corn starch provide a large storage space. *Cereal Chem.* 73: 379-380 (1996)
  15. Huber KC, BeMiller JN. Channels of maize and sorghum starch granules. *Carbohydr. Polym.* 41: 269-276 (2000)
  16. Wu Y, Du X, Ge H, Lu Z. Preparation of microporous starch by glucoamylase and ultrasound. *Starch* 63: 217-225 (2011)
  17. Qian J, Chen X, Ying X, LV B. Optimisation of porous starch preparation by ultrasonic pretreatment followed by enzymatic hydrolysis. *Int. J. Food Sci. Tech.* 46: 179-185 (2011)
  18. AACC. Approved Method of the AACC. Method 76-13. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, USA (2000)
  19. Miller GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal. Chem.* 31: 426-428 (1959)
  20. Sujka M, Jamroz J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging and functional behaviour. *Food Hydrocolloid.* 31: 413-419 (2013)
  21. Zuo JY, Knoerzer K, Mawson R, Kentish S, Ashokkumar M. The pasting properties of sonicated waxy rice suspensions. *Ultrason. Sonochem.* 16: 462-468 (2009)
  22. Bertoft E, Manelius R. A method for the study of the enzyme hydrolysis of starch granules. *Carbohydr. Res.* 227: 269-283 (1992)
  23. Kimura A, Robyt JF. Reaction of enzymes with starch granules: kinetics and products of the reaction with glucoamylase. *Carbohydr. Res.* 277: 87-107 (1995)