

쌀전분으로부터 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴 혼합젤의 형태학적 구조

백만희 · 신말식
전남대학교 식품영양학과

Microstructure of Recombinated Gels of Amylose and Amylopectin Isolated from Rice Starch

Man-Hee Baek and Mal-Shick Shin

Department of Food and Nutrition, Chonnam National University

Abstract

The changes on microstructure of recombined gels with different ratio of amylose(A) and amylopectin(AP) which were isolated from nonwaxy rice starch were investigated by scanning electron microscope(SEM) and X-ray diffractometer. As the concentration of amylose was above 3%(1.08% of soluble amylose) in the amylose suspension, gel matrix became like a three-dimensional network. The microstructure of amylose gels showed a network including macroporous structure, but the higher the ratio of amylopectin content were, the firmer network were formed. In case of A/AP mixed gels(15%) with different amylose/amylopectin percent ratios ; 0/5, 5/10, 10/5, 15/0%, as the storage time of gels and the percent ratio of amylose content were increased, network was formed harder with thick films. While X-ray diffractograms of waxy rice starch which contained 100% amylopectin showed A type, those of purified amylose and amylopectin showed V type and amorphous patterns, respectively. Amylose(3%) gels added 2~3% amylopectin and A/AP mixed gels(15%) showed peak at $2\theta = 17.0^\circ$ which were shown B type crystallinity similar as retrograded starches. Also as the percent ratio of amylose content in mixed gels was increased, peak intensity was increased.

Key words : amylose, amylopectin, gel, scanning electron microscope

서 론

아밀로오스와 아밀로펙틴으로 구성되어 있는 전분은 충분한 물이 있는 조건에서 호화온도 이상으로 가열하면 용출된 아밀로오스가 냉각되면서 삼차원적 그물망 구조의 겔 매트릭스를 이루고 내부는 물과 팽윤된 아밀로펙틴에 의해 채워지는 겔 구조를 이룬다⁽¹⁾. 겔의 형성은 전분함유식품의 텍스처와 질을 조절하는 중요한 인자의 하나로서 겔의 구조는 전분농도⁽²⁾, 아밀로오스 함량⁽³⁾이나 사슬길이⁽⁴⁾, 아밀로오스와 아밀로펙틴의 비율⁽⁵⁾ 등에 의해 큰 영향을 받는다고 알려져 있다.

아밀로오스의 겔화는 단지 몇 시간 내에 이루어지고 노화경향이 크며 거친 겔과 강한 필름을 생성하는 반면, 아밀로펙틴의 겔화는 적어도 며칠 또는 몇 주 이상의 긴 시간이 필요하며 현탁액에서 매우 안정되

고 부드러운 겔과 약한 필름을 형성한다⁽⁶⁾. Case 등⁽⁷⁾은 아밀로오스 함량이 높을수록 겔이 빨리 형성되고 견고하고 단단한 겔을 형성한다고 하였으며, Ellis와 Ring⁽⁸⁾은 아밀로오스겔은 1.5% 이상 농도에서 농도가 증가함에 따라 rigidity modulus가 증가하고, shear modulus는 아밀로오스 형태에 의존한다고 하였다. 또한 Biliaderis와 Zawistowski⁽⁹⁾는 아밀로오스의 storage modulus는 초기 단계에서 급격히 증가하고 오랫동안 저장했을 때 변화가 거의 없으며, 아밀로오스 함량이 증가하면 storage modulus도 증가하여 4°C에서 저장한 것이 20°C에서 저장한 것보다 더 높은 값을 보였다고 하였다. Ring⁽¹⁰⁾은 어느 전분이든 용출될 수 있는 아밀로오스의 최대량은 1.5% w/w 미만으로 이 농도에서는 아밀로오스가 매우 약한 겔을 형성하는 반면 겔의 견고성은 아밀로오스와 호화된 입자가 같이 영향을 주는데, 같은 강도의 겔을 형성하는 데 필요한 아밀로오스 양은 수화된 전분입자가 없을 때가 있을 때보다 3배 크다고 하였다. Cameron 등⁽¹¹⁾은 저분자량의

Corresponding author: Department of Food and Nutrition,
Chonnam National University, Bukgu Yongbongdong 300,
Kwangju 500-757, Korea

아밀로오스는 겔이 형성되지 않은 상태로 침전되고, 고분자량 아밀로오스는 그물망을 형성하는데, 아밀로펙틴의 경우는 고분자량이며 가지 정도가 높기 때문에 아밀로오스의 겔형성 양상에 가까우며, 겔 형성속도는 아밀로펙틴의 짧은 가지사슬과 관련되어 있다고 하였다. Zobel¹²⁾은 아밀로오스겔은 2% 농도에서 몇 분내에 단단한 겔을 형성하며 일단 형성된 아밀로오스겔은 가압멸균온도(110~160°C)에서와 같은 높은 온도에서 가역적인 반면 아밀로펙틴겔은 30% 이상 농도에서 안정되고 부드러운 겔을 형성할 수 있으며, 분자회합 정도나 결정화에 의존하여 호화온도 이상에서 가역적으로 용해될 수 있다고 하였다. 겔을 형성하는 아밀로오스와 아밀로펙틴에 관한 연구는 대부분 아밀로오스와 아밀로펙틴으로만 이루어진 찰전분으로 혼합한 겔에 관한 연구이다.

그러므로 본 연구에서는 아밀로오스를 함유한 전분의 겔 형성기작을 이해하기 위하여 찰전분에서 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴이 겔을 형성할 수 있는 최저농도를 측정하였고, 아밀로오스와 아밀로펙틴을 다른 비율로 혼합하여 제조한 겔 구조 및 저장된 겔의 노화특성도 조사하였다.

재료 및 방법

전분의 분리 및 탈지

시료로 사용한 멧쌀은 동진벼로 전분은 알칼리 침지법¹³⁾으로 분리하였고, 탈지는 85% 메탄올을 사용하여 속스랙추출법¹⁴⁾으로 24시간 추출한 후 실온에서 건조, 마쇄하여 데시케이터에 보관하면서 사용하였다.

아밀로오스와 아밀로펙틴의 분리

찰전분으로부터 아밀로오스와 아밀로펙틴은 Montgomery와 Senti 방법¹⁵⁾으로 분리하였다. 탈지전분 20 g에 1 L 증류수와 10 mL 0.1 M 인산완충용액(pH 6.0)을 혼합하고 계속 저어주면서 98°C까지 가열하였고 98°C로 15분간 유지한 다음 얼음물에서 실온까지 급냉하였다. 이 호화액을 3000 rpm에서 30분간 원심분리하여 상정액을 모으고 침전물에 증류수 800 mL과 10 mL 완충용액을 가하여 계속 저어주면서 98°C에서 15분 유지시켰다. 냉각후 원심분리(3000 rpm, 30분)를 하였고, 위와 같은 방법으로 3회 계속 반복하여 상정액을 버리고 얻은 겔과 같은 물질에 무수 메탄올을 가하고 균질기(Biohomogenizer, M133/1281-0, ESGE, Switzerland)를 이용하여 분산·탈수시켰다. 이것을 감압 여과하여 침전물을 수집하고 아밀로펙틴을 분리한 다음

건조, 마쇄하여 45메쉬 체를 통과시켜 시료로 사용하였으며, 수율은 59%였다.

첫번째 호화액에서 얻어진 상정액에 250 mL *n*-butanol을 첨가하고 5시간 저어준 다음 3000 rpm으로 30분간 원심분리하였다. 침전물(amylose-butanol complex)에 끓는 증류수 900 mL와 100 mL *n*-butanol을 첨가하여 용액이 투명해질 때까지 흔들어준 후 이 액을 감압하에 여과하고 여과액을 냉각하였다. 여과액에 *n*-butanol을 150 mL 첨가하고 16시간 저어 다시 여과한 후 같은 과정을 5번 계속 반복 실시하였다. 이 액을 3000 rpm에서 30분간 원심분리하여 상정액을 버리고 침전물에 아세톤을 부어 혼합·여과하여 침전물을 회수하였다. 여기에 다시 99% 에탄올을 넣어 혼합하고 이를 감압여과한 후 침전물을 회수하여 아밀로오스를 분리하였다. 건조한 다음 45메쉬 체를 통과시켜 시료로 사용하였으며, 수율은 7%였다.

요오드친화력 측정

요오드친화력은 Williams 등의 방법¹⁶⁾으로 측정하였다. 아밀로오스 표준곡선은 동진벼 전분에서 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴을 일정비율로 혼합한 다음 동일한 방법으로 작성하였다. 요오드친화력을 680 nm에서의 흡광도로 나타냈을 때 멧쌀전분에서 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴의 요오드친화력은 각각 0.9713, 0.1026이었다.

아밀로오스 일정농도에 아밀로펙틴을 혼합한 겔 제조

아밀로오스 농도를 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0%로 하여 아밀로오스 겔을 형성해 본 결과 찰전분으로부터 분리한 아밀로오스로 겔을 형성할 수 있는 최저농도는 3%(용해된 아밀로오스 농도 : 1.08%)로서, 이는 아밀로오스 용액에 찰전분 입자를 분산시켜 전분겔이 만들어지기 위해서는 적어도 1.06%의 아밀로오스 함량이 필요하다는 Ott와 Hester¹⁷⁾의 보고와 비슷한 값이었다. 3% 아밀로오스에 아밀로펙틴을 각각 0, 2, 3, 4.5, 7% 첨가하여 고형분 중의 아밀로오스 비율이 100%, 60%, 50%, 40%, 30%인 겔을 제조하였다. 시료를 뚜껑이 있는 시험관(φ3cm×6cm)에 넣고 잘 혼합하여 테프론테이프로 수분이 증발되지 않게 막은 다음 교반시키면서 1시간 동안 끓는 수조에서 호화시켰다. 호화시료액을 얼음물에 넣어 급냉하였고, 실온에서 0, 7일 동안 저장하여 겔의 구조를 관찰하기 위한 주사전자현미경 시료와 X-선 회절도를 측정하기 위한 호화, 노화전분 시료를 제조하였다.

아밀로오스와 아밀로펙틴 비율을 달리한 혼합젤 제조

쌀전분으로부터 분리한 아밀로펙틴으로 겔을 형성할 수 있는 최저농도인 15%를 기준으로 아밀로오스와 아밀로펙틴 비율이 0:15, 5:10, 10:5, 15:0이 되도록 혼합한 시료를 뚜껑이 있는 시험관(φ3cm×6cm)에 넣고 잘 혼합하여 테프론테이프로 수분이 증발되지 않게 막은 다음 교반시키면서 1시간 동안 끓는 수조에서 호화시켰다. 호화시료액을 얼음물에 넣어 급냉한 후 실온에서 0, 7일 동안 저장하여 겔의 구조를 관찰하기 위한 주사전자현미경 시료와 X선 회절도를 측정하기 위한 호화, 노화전분 시료를 제조하였다.

주사전자현미경에 의한 아밀로오스와 아밀로펙틴의 분자형태 및 겔 구조관찰

쌀전분으로부터 분리, 건조한 아밀로오스, 아밀로펙틴과 제조한 아밀로오스와 아밀로펙틴 혼합겔을 액체 질소로 1분간 급속냉동시킨 후 12시간 냉동건조(Freeze Dryer II-Sin Engineering Co., Korea) 시킨 시료를 금으로 도금시켜 전도성을 갖게 한 다음 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, JEOL JSM-5400, Japan)을 사용하여 가속전압 15kV, Phototime 85초, 2000배 배율에서 관찰하였다.

X선 회절도에 의한 측정

전분의 X선 회절도는 수분함량을 비슷하게 조절하여 X-ray diffractometer(D/Max 1200, Rigaku Co., Japan)를 사용하여 다음과 같은 조건으로 회절각(2θ) 40.5°까지 회절시켜 분석하여 피크의 위치와 강도로부터 결정형과 결정도를 비교하였다. X선 회절기의 조건은 target: Cu-Kα, filter: Ni, voltage: 30kV, current: 15mA, full scale range: 2000cps, scanning speed: 8°/min이었다.

결과 및 고찰

아밀로오스와 아밀로펙틴의 특성

쌀전분으로부터 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴을 관찰한 결과는 Fig. 1과 같다. 아밀로오스는 표면이 울퉁불퉁하고 부서지기 쉽고 점성이 없는 덩어리가 뭉쳐있는 반면 아밀로펙틴은 표면이 결모양을 이루고 퍼져 있으며 작은 입자들이 표면에 붙어 있고, 단단한 모양을 보이고 있었다.

쌀전분으로부터 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴의 X선 회절도에 의한 결정형은 Fig. 2와 같다. 아밀로오스는 회절각(2θ) 7.4, 12.7, 20.0°에서 피크를 보였

Fig. 1. Scanning electron microphotographs of amylose (A) and amylopectin (AP) isolated from nonwaxy rice starch

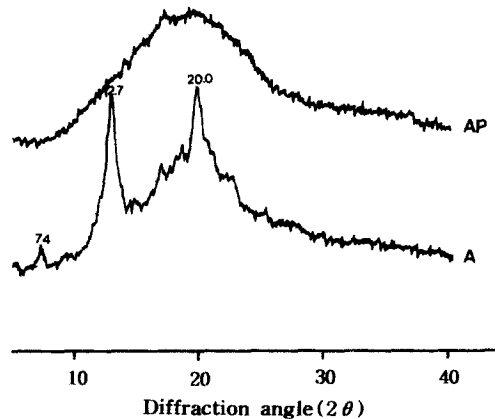


Fig. 2. X-ray diffractograms of amylose (A) and amylopectin (AP) isolated from nonwaxy rice starch

는데 이는 아밀로오스가 알코올과 함께 single helices를 이루었기 때문이며 이 결과는 Zobel⁽¹⁸⁾의 보고와 같은 양상을 보였다. 분리한 아밀로펙틴의 결정형은 아밀로펙틴으로만 구성된 침쌀전분의 A형(2θ = 15.1, 18.0, 23.0°)과는 달리 무정형 구조를 보여 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴의 구조는 전분입자 내에 함유된 구조와는 다를 수 있었다.

주사전자현미경에 의한 아밀로오스와 아밀로펙틴 혼합 겔의 구조

겔을 형성할 수 있는 아밀로오스의 최저농도 3%(용해된 아밀로오스 농도, 1.08%)에 아밀로펙틴을 각각 0, 2, 3, 4.5, 7% 첨가하여 겔을 제조한 후 실온에서 0, 7 일 동안 저장하여 주사전자현미경으로 겔 구조를 관찰한 결과는 Fig. 3과 같다. 아밀로오스로만 형성된 겔은 그물망 크기가 가장 컸고, 아밀로펙틴 함량이 3%까지 증가할수록 겔 그물망 크기는 줄어들었으나 그 이후 7%로 증가하면 다시 겔 그물망 크기가 증가하였다. 아밀로오스 겔의 매트릭스나 물의 함유하는 정도가 크면 제조된 겔이 건조된 후에 큰 구멍이 생길 수 있다. 이는 아밀로오스가 아밀로펙틴에 비해 물에 대한 친화력이 높다고 한 Kalichevsky와 Ring⁽¹⁹⁾의 보고로 설명될 수 있다.

Miles 등⁽²⁰⁾은 아밀로오스의 겔화는 부분적인 결정화 과정으로 간주되어지고 겔의 연결부위는 미세결정영역을 구성한다. 낮은 농도일 때 specific viscosity(η_{sp})는 아밀로오스 농도에 비례해서 증가하다가 아밀로오스 용액의 중합체-중합체 중합이 일어나면서 높은 농도에서는 급격한 증가를 보이게 된다. 아밀로오스 용액의 중합체-중합체 중합은 $C*[\eta] = 1.2$ 에서 일어나 $C*$ 이하 농도에서는 침전되고, 중합체 농도가 $C*$ 이상일 때 뜨거운 용액을 식히면 불투명한 겔이 형성되는데 이는 polymer rich 영역과 polymer deficient 영역의 비가역적인 상분리와 관련되어 연속상의 그물망을 형성한다고 하였다. Leloup 등⁽²¹⁾은 아밀로오스겔의 구조적 변화를 연구한 결과 아밀로오스겔은 폭이 20 ± 10 nm인 필라멘트를 함유하고 있는 거대구멍 구조(메쉬 크기 100~ 1,000 nm)를 나타내는데, 이들 필라멘트는 필라멘트 축에 비스듬히 배열되어 있는 아밀로오스 시슬 부분 ($26 < DP_n < 31 : 56 < DP_w < 73$)의 회합에 의해 형성되며 아밀로오스 분자들은 부분적으로 B형의 결정형 배열을 이루고 있다고 하였다.

Fig. 3에서와 같이 순수한 아밀로오스로 형성된 겔은 그물망 구조가 일정한 모양을 이루지 못하였으나 흐르지 않는 겔을 형성하였는데 여기에 아밀로펙틴을 2% 이하로 첨가하면 오히려 겔 형성이 억제되었고, 7% 이상의 아밀로펙틴을 첨가하면 겔을 setting할 때 이수현상이 일어나 안정한 겔을 이루지 못하였다. 또한 7일 저장한 아밀로오스겔은 그물망 크기가 현저하게 감소하였으나 아밀로펙틴 첨가겔은 뚜렷한 변화를 보이지 않았고 아밀로펙틴을 3~4.5% 첨가했을 때 더 단단한 매트릭스를 갖는 그물망 구조를 이루었다. Kalichevsky 등⁽²²⁾은 아밀로오스겔 (3.2%)의 견고성

Fig. 3. Scanning electron microphotographs of amylose (3%) gels added 0(A), 2(B), 3(C), 4.5(D) and 7%(E) amylopectin, isolated from nonwaxy rice starch, stored for 0 and 7 days at room temperature

(rigidity)에 대한 덱스트란의 첨가효과를 본 결과 덱스트란 농도 3%까지는 아밀로오스의 견고성이 증가하여 아밀로오스만 첨가한 것보다 3배 높은값을 보였으나 덱스트란 농도가 높으면 층분리가 일어나고 겔이 약해진다고 하였다.

아밀로펙틴겔이 형성될 수 있는 최저농도를 측정할 결과 15% 농도 이상에서 아밀로펙틴만으로 겔이 형성될 수 있음을 확인하였다. 이를 기준으로 아밀로오스/아밀로펙틴 함량을 0/15, 5/10, 10/5, 15/0%로 하여 15% 겔을 제조한 후 주사전자현미경에 의해 저장에 따른 겔의 구조를 관찰한 결과는 Fig. 4와 같다. 저장 0일에는 겔 그물망 모양이 불안정하고 아밀로오스 농도가 높을수록 그물망 크기가 큰 겔을 형성하는 반면 저장 7일에는 아밀로오스 농도가 높을수록 더 두껍고

Fig. 4. Scanning electron microphotographs of gels (15%) with different amylose(A)/amylopectin(AP) percent ratios; 0:15(A), 5:10(B), 10:5(C), 15:0(D), isolated from nonwaxy rice starch, stored for 0 and 7 days at room temperature

안정된 그물망 구조를 이루었다.

Kalichevsky와 Ring⁽¹⁹⁾은 젤을 이루는 두 고분자 사이에 3가지 가능성을 제시하였는데, 두분자 모두 연속상으로, 두분자 모두 비연속상으로 젤을 이루는 경우와 전분젤처럼 아밀로오스와 아밀로펙틴이 서로 열역학적 상호작용으로 초래된 상반성 때문에 한쪽은 연속상, 다른쪽은 비연속상으로 젤을 이루는 경우로 나누었다. 젤의 조성은 두가지 고분자의 비율에 의해 결정되고 상전환점으로 작용하는 특정비율에서 연속상과 비연속상이 바뀐다고 하였다. 또한 Leloup 등⁽²³⁾은 감자전분에서 분리한 아밀로오스와 찹옥수수 전분을 아밀로펙틴으로 사용하여 비율을 달리해서 젤을 제조한 후 물성학적 특성을 조사한 결과 아밀로오스와 아밀로펙틴 비율이 0.25이하이면 5일 내에는 젤이 형성되지 않으나 아밀로오스와 아밀로펙틴 비율(r)이 0.43(아밀로오스 30%, 아밀로펙틴 70%)일 때 가열하는 동안

젤 그물망이 형성된다고 하였다. 또한 아밀로오스와 아밀로펙틴 혼합젤은 $r \leq 0.43$ 일 때는 연속상의 아밀로펙틴 매트릭스를 갖으나 $r > 0.43$ 일 때는 연속상의 아밀로오스 매트릭스를 갖으며 아밀로펙틴 분자는 그물망 안에 갇혀 있다고 하여 젤 견고성은 아밀로오스 겔화에 의하며 아밀로펙틴은 견고성에는 영향을 주지 않고 filler로서 작용한다고 하였다.

그러나 본 실험에서와 같이 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴 비율을 달리하여 제조된 겔형성 기작은 다른 양상을 보였는데, 이는 Fig. 2에서와 같이 생전분으로부터 분리된 아밀로오스와 아밀로펙틴의 결정형이 생전분과 다르기 때문이며, 특히 찹쌀전분은 A형의 결정형을 보이는⁽¹⁴⁾ 반면 생전분으로부터 분리된 아밀로펙틴은 무정형을 보였다. 이로부터 분리된 아밀로오스와 아밀로펙틴은 겔 형성기작에서 아밀로오스 매트릭스로 이루어진 겔 구조의 내부에 물과 팽윤된 아밀로펙틴이 채워지는 생전분의 양상과는 달리 아밀로오스와 아밀로펙틴이 함께 겔 매트릭스를 이루는데 참여함으로써 두꺼운 겔 매트릭스를 이루는 것으로 생각되었다.

X선 회절도에 의한 특성

아밀로오스겔의 결정형성정도를 조사하기 위해 초기 아밀로오스 농도 3%에 아밀로펙틴 첨가량을 달리하여 제조한 혼합젤을 7일 저장한 후 X선 회절도를 측정 한 결과는 Fig. 5와 같다. 아밀로펙틴 첨가율이 2%, 3%인 겔은 저장에 따라 $2\theta = 17.0^\circ$ 에서 피크가 커졌으

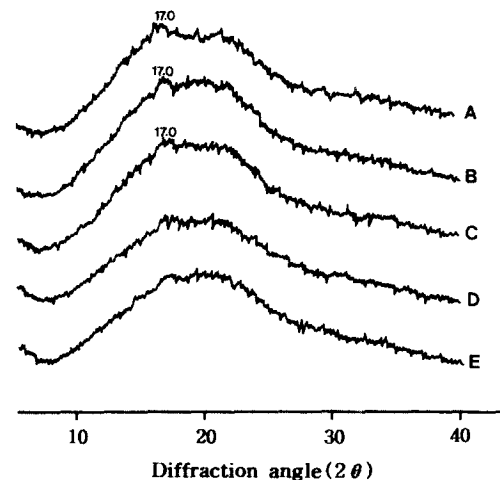


Fig. 5. Changes in X-ray diffraction patterns of amylose (3%) gels added 0(A), 2(B), 3(C), 4.5(D) and 7%(E) amylopectin, isolated from nonwaxy rice starch, stored for 7 days at room temperature

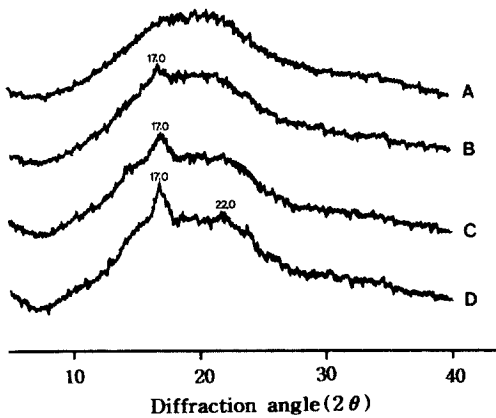


Fig. 6. Changes in X-ray diffraction patterns of gels (15%) with different amylose(A)/amylopectin(AP) percent ratios; 0:15(A), 5:10(B), 10:5(C), 15:0(D), isolated from nonwaxy rice starch, stored for 7 days at room temperature

나 아밀로오스로만 제조한 겔과 아밀로펙틴 함량이 4.5%, 7%인 겔은 노화로 인한 결정생성이 거의 일어나지 않아 아밀로펙틴이 X-선 회절도에 의한 결정형성에 관여하는 것을 확인할 수 있었는데, 본 실험에서 사용한 총고형분의 양은 5~10%로 희석된 용액의 경우 노화는 더디게 일어나는 것을 알 수 있었다. French와 Murphy⁽²⁴⁾도 노화된 고아밀로오스와 찰전분 모두 단일나선형구조가 아닌 이중나선형구조를 갖는다고 제안하여 아밀로오스와 아밀로펙틴의 분지된 사슬에 이중나선형구조를 갖을 수 있음을 나타내었다.

반면, 아밀로오스와 아밀로펙틴함량을 0/15, 5/10, 10/5, 15/0%로 하여 15% 혼합겔을 제조하여 7일 저장한 후 X-선 회절도를 측정한 결과는 Fig. 6과 같다. 아밀로오스 함량이 증가할수록 $2\theta = 17.0^\circ$ 에서 피크가 커졌으며, $2\theta = 18.5, 22.0, 24.0^\circ$ 에서도 피크가 나타났다.

요 약

찰전분으로부터 분리한 아밀로오스와 아밀로펙틴이 겔을 형성할 수 있는 최저농도로 아밀로오스와 아밀로펙틴 혼합겔을 제조하여 주사전자현미경과 X-선 회절기를 이용하여 겔 구조를 관찰하였다. 겔을 형성할 수 있는 최저농도인 용해성 아밀로오스 1.08% 농도에 아밀로펙틴을 1.5%~7% 첨가하면 겔 그물망구조가 잘 형성되었고, 아밀로펙틴을 2%와 3% 첨가한 겔은 저장에 따라 $2\theta = 17.0^\circ$ 에서 피크가 커졌다. 15% 아밀로오스/아밀로펙틴 혼합겔을 저장했을 때 아밀로오스 함량이 높을수록 단단하고 안정된 그물망구조를 이루었

으며 생전분에서의 겔형성 양상과는 달리 아밀로오스와 아밀로펙틴이 함께 겔메트릭스를 이루는데 참여하는 것으로 생각되었고, 아밀로오스 함량이 증가할수록 $2\theta = 17.0^\circ$ 에서 피크의 크기와 결정강도는 커졌다.

문 헌

- Miles, M.J., Morris, V.J., Orford, P.D. and Ring, S.G. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydr. Res.* 135: 271-281 (1985)
- Lii, C.Y., Shao, Y.Y. and Tseng, K.H. Gelation mechanism and rheological properties of rice starch. *Cereal Chem.* 72: 393-400 (1995)
- Sandhya Rani, M.R. and Bhattacharya, K.R. Microscopy of rice starch granules during cooking. *Starch* 46: 334-337 (1995)
- Gidley, M.J. and Bulpin, P.V. Aggregation of amylose in aqueous systems. The effect of chain length on phase behavior and aggregation kinetics. *Macromolecules* 22: 341-346 (1989)
- Lee, Y.E. and Osman, E.M. Correlation of morphological changes of rice starch granules with rheological properties during heating in excess water. *J. Korean Agric. Chem. Soc.* 34: 379-385 (1991)
- Jane, J.L. Recent advances in understanding of the structure of starch granules. pp. 51-59. In: *Granular and Molecular Structure of Starch. The 3rd CAFST International Symposium* (1997)
- Case, S.E., Capitani, T., Whaley, J.K., Shi, Y.C., Trzasko, P., Jeffcoat, R. and Goldfarb, H.B. Physical properties and gelation behavior of a low-amylopectin maize starch and other high-amylose maize starches. *J. Cereal Sci.* 27: 301-314 (1998)
- Ellis, H.S. and Ring, S.G. A study of some factors influencing amylose gelation. *Carbohydr. Polym.* 5: 201-213 (1985)
- Biliaderis, C.G. and Zawistowski, J. Viscoelastic behavior of aging starch gels; Effects of concentration, temperature and starch hydrolysates on network properties. *Cereal Chem.* 67: 240-246 (1990)
- Ring, S.G. Some studies on starch gelation. *Starch* 37: 80-83 (1985)
- Cameron, R.E., Matin Durrani, C. and Donald, A.M. Gelation of amylopectin without long range order. *Starch* 46: 285-287 (1994)
- Zobel, H.F. Molecules to granules; A comprehensive starch review. *Starch* 40: 44-50 (1988)
- Lee, S.H., Han, O., Lee, H.Y., Kim, S.S. and Chung, D.H. Physicochemical properties of rice starch by amylose content. *J. Food Sci. Technol.* 21: 766-771 (1989)
- Kim, S.K. and Shin, M.S. Physicochemical properties of defatted nonwaxy and waxy rice starches. *J. Food Sci. Technol.* 24: 347-352 (1992)
- Montgomery, E.M. and Senti, F.R. Separation of amylose from amylopectin of starch by extraction-sedimen-

- tation procedure. *J. Polymer Sci.* 28: 1-9 (1958)
16. Williams, O.C., Kuzina, F.D. and Hlynka, I. A. rapid colorimetric procedure for estimating the amylose content of starches and flours. *Cereal Chem.* 47: 411-421 (1970)
 17. Ott, M. and Hester, E.E. Gel formation as related to concentrations of amylose and degree of starch swelling. *Cereal Chem.* 42: 476-484 (1965)
 18. Zobel, H.F. Starch crystal transformation and their industrial importance. *Starch* 40: 1-7 (1985)
 19. Kalichevsky, M.T. and Ring, S.G. Incompatibility of amylose and amylopectin in aqueous solution. *Carbohydr. Res.* 162: 323-328 (1987)
 20. Miles, M.J., Morris, V.J. and Ring, S.G. Gelation of amylose. *Carbohydr. Res.* 135: 257-269 (1985)
 21. Leloup, V.M., Colonna, P., Ring, S.G., Roberts, K. and Wells, B. Microstructure of amylose gels. *Carbohydr. Polymers* 18: 189-197 (1992)
 22. Kalichevsky, M.T., Orford, P.D. and Ring, S.G. The incompatibility of concentrated aqueous solutions of dextran and amylose and its effect on amylose gelation. *Carbohydr. Polymers.* 6: 145-154 (1986)
 23. Leloup, V.M., Colonna, P. and Buleon, A. Influence of amylose-amylopectin ratio on gel properties. *J. Cereal Sci.* 13: 1-13 (1991)
 24. French, A.D. and Murphy, V.G. Computer modeling in the study of starch. *Cereal Foods World* 22: 61-70 (1977)
-

(1999년 6월 25일 접수)