



# A study on the deterioration phenomenon of stored rice during the decomposition process of polysaccharide carbohydrates

Yong-Sik Youn<sup>1,2</sup> · Jae-Min An<sup>1</sup> · Wang-Taek Hwang<sup>1</sup> · Hyungmin Roh<sup>3</sup> · Hae-Min Park<sup>2</sup> · Kyeongseok Oh<sup>3</sup>

## 다당류 탄수화물의 분해과정을 통한 보관 벼의 감모현상에 관한 연구

윤용식<sup>1,2</sup> · 안재민<sup>1</sup> · 황왕택<sup>1</sup> · 노형민<sup>3</sup> · 박해민<sup>2</sup> · 오경석<sup>3</sup>

Received: 2 June 2023 / Accepted: 2 July 2023 / Published Online: 11 July 2023  
© The Korean Society for Applied Biological Chemistry 2023

**Abstract** Stored rice grain undergoes physical and chemical deteriorations over time. As temperature and moisture content are important factors affecting to the denaturation of rice, it is important to store rice at a low temperature and hermetic condition. From a microscopic point of view, many studies have already reported how proteins and lipids were denatured within rice grain. Meanwhile, the weight loss of rice is currently observed at actual storage sites and can occur for diverse reasons. In this study, it was assumed that the decomposition process of polysaccharides, known as the main component of rice, plays an important role in its weight loss. In specific, the roles of enzymes were also evaluated. Our interest is in the major polysaccharides within a rice grain such as starch as well as within a rice endosperm cell wall. It is suspected that the weight loss of rice grains during storage seems to associate with the degradation of

amylose and amylopectin. Nevertheless, it should be also speculated the correlating effect of other components such as proteins and lipids.

**Keywords** Amylose · Amylopectin · Enzyme · Rice weight loss · Storage

## 서론

세계인구의 절반은 쌀을 주식으로 사용하고 있다. 쌀 생산량으로는 미국, 중국, 인도 그리고 동남아가 크며, 아프리카와 같은 개발도상국에서도 쌀을 생산하고 있다[1]. 세계인구의 증가는 개별 국가의 식량안보와 중요한 상관관계를 갖고 있다[2]. 보관되는 쌀은, 주로 벼 상태로 보관한다. 이후, 도정 과정을 거쳐 소비자에게 전달된다. Fig. 1에서 추수, 탈곡, 건조과정을 거쳐 저장하는 전반적인 과정을 나타내었다. 햅쌀의 경우는 저장하기도 하지만, 필요시 저장하지 않고 도정하여 소비한다. 저장하는 형태는 왕겨가 붙어 있는 벼를 저장하며, 필요한 시기에 도정 과정을 거쳐 현미 혹은 백미로 생산된다. 도정 과정 중 연미 단계에서 광택 및 세척을 위해 적정량의 물이 사용되며, 또한 저장기간이 늘어남에 따라 미분이 많이 발생할 가능성이 높아진다[3,4]. 이때, 쌀의 미분은 물의 비중보다 높지 않기에 부유 물질로 분리되어 왕겨와 함께 제거될 가능성이 높다. 이는 도정을 통한 손실이 된다. 도정 과정은 보관기간에 따른 벼의 노화 과정과 연관될 수 있다고 하겠다. 실제 현장에서는, 도정 과정보다는 저장소에 보관되는 벼의 중량변화에 더 관심을 가지고 있다. 저장된 벼의 경우, 외적인 변화가 감지되지 않고 또한 특별한 이유가 없었음에도 불구하고 급격한 중량 손실이 나타나

Kyeongseok Oh (✉)  
E-mail: kyeongseok.oh@inhac.ac.kr

<sup>1</sup>Experiment Research Institute, National Agriculture Products Quality Management Service, 141, Yongjeon-ro, Kimcheon-si, Gyeongsangbuk-do, Korea

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Inha Technical College, 100 Inha-ro, Incheon 22212, Republic of Korea

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 경우가 있다. 내부 자료들에서는 쌀의 중량이 줄어드는 현상을 통상적으로 쌀의 감모 현상이라고 부르고 있으며, 가장 큰 요인으로는 수분 함량과 저장 온도를 가장 중요하게 다루고 있다. 한편, 벼의 보관 기간에 따른 물성변화는 주로 밥맛과의 상관 관계에서 다루는 경우가 많다[4-6]. 전분 과립(starch granules) 알갱이의 표면은 셀룰로오스(cellulose)로 알려져 있는데, 밥을 짓는 동안 셀룰로오스 분자 구조가 깨져서 전분 과립들간의 경계선이 없어진다[1]. 계속해서, 쌀의 전분성분이 전분 과립에서 빠져나온다. 이 과정을 비가역적인 호화과정(gelatinization)이라고 한다. 보고된 바에 의하면, 벼의 보관기간은 2년을 기준으로 더 오랜 기간 보관을 할 경우, 밥맛과 영양 등에서 최초 상태보다 많이 부족해지는 것으로 알려져 있다[7]. 특히, 보관시 온도와 수분이 가장 중요한 요인이다[8,9]. 이것은 쌀내부의 효소 작용과도 연관이 깊다[10-12]. 보관조건에서 함수율이 높거나 온도가 상온보다 높은 경우 발아가 시작되기도 한다[8,9]. 따라서, 발아 조건보다 낮은 조건에서 함수율을 유지하는 것이 필요하며, 벼는 건조과정을 거쳐 함수율을 15% 수준에서 밀폐 포장(hermetic package)하여 보관한다[13]. 보관시 감모가 일어나는 원인으로서는 크게, 생물학적인 미생물들에 의한 호흡작용이 중요할 수 있다[14]. 그렇지만, 미생물 호흡에 의한 쌀의 감모는 함수율과 온도 제어가 어려운 보관시설의 낙후와 연관성이 더 높은 것으로 보인다[15].

본 연구에서는 벼의 저장 기간에 일어나는 감모 현상에 초점을 맞추었다. 즉, 도정 과정에서 일어나는 감모 현상에 대해서는 제외하였으며, 포장된 이후 저장 기간 동안 일어나는 감모 현상에 한정하여 살펴보았다(Fig. 1). 먼저, 쌀의 구조에 대해서

소개하였다. 이후, 쌀의 구성 성분 중 가장 큰 비중을 차지하는 전분의 분해과정에 대해서 정리하였다. 쌀의 전분은 아밀로스(amylose)와 아밀로펙틴(amylopectin)으로 되어 있다. 두 성분 모두 포도당(glucose)에서 유래된 고분자이다. 아밀로스는 선형이지만 일부 가지결합을 포함하기도 한다[9]. 한편, 아밀로펙틴은 아밀로스에 비하여 많은 가지결합을 가지고 있다. 또한, 아밀로펙틴의 평균분자량은 아밀로스의 평균분자량 보다는 상대적으로 큰값을 가진다[16]. 보관 기간 동안, 아밀로스와 아밀로펙틴은  $\alpha$ -아밀라제( $\alpha$ -amylase)와  $\alpha$ -glucosidase와 같은 효소의 작용으로 포도당까지 분해되며, 이후 호흡활동을 거쳐 이산화탄소 소비된다. 이 과정이 진행된다면, 저장된 쌀의 주된 중량 손실로 이어진다고 할 수 있다. 한편, 배젖(endosperm)의 세포벽도 일부 분해되는 것으로 보인다. 세포벽의 주된 구성성분에는 펙틴(pectin), 셀룰로오스, 그리고 헤미셀룰로오스(hemicellulose)가 있으며, 효소에 의한 분해가 일부 진행될 경우 포도당과는 다른 종류의 다양한 단당류가 생성된다. 전분의 분해로 인한 쌀의 감모가 주된 감모 원인이라면, 세포벽의 분해과정은 감모에도 일부 영향을 주지만, 쌀의 강도를 약화시켜 도정 과정에서 손실로 이어질 것으로 예상된다.

## 본 론

### 쌀의 구조

쌀의 종류를 나누는 것에는 유전자 특성인 낱알(grain)의 길이, 색, 두께, 재배 방식 등에 의해 나뉘며, 밥을 지었을 때 나타나

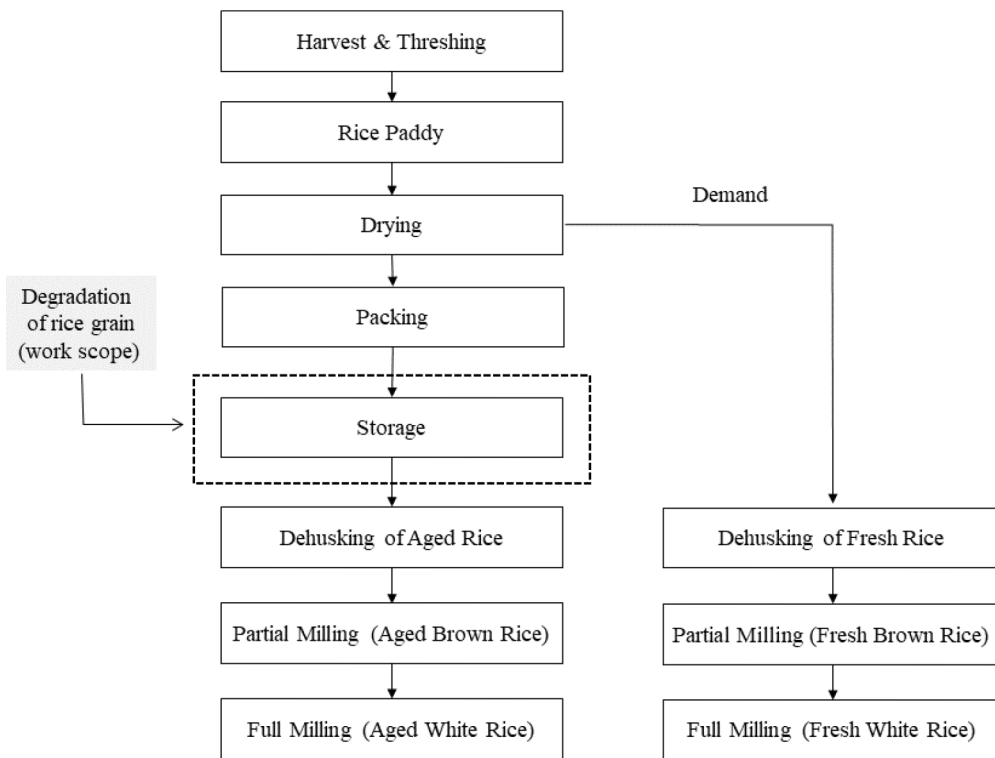


Fig. 1 Flow chart of rice production and storage

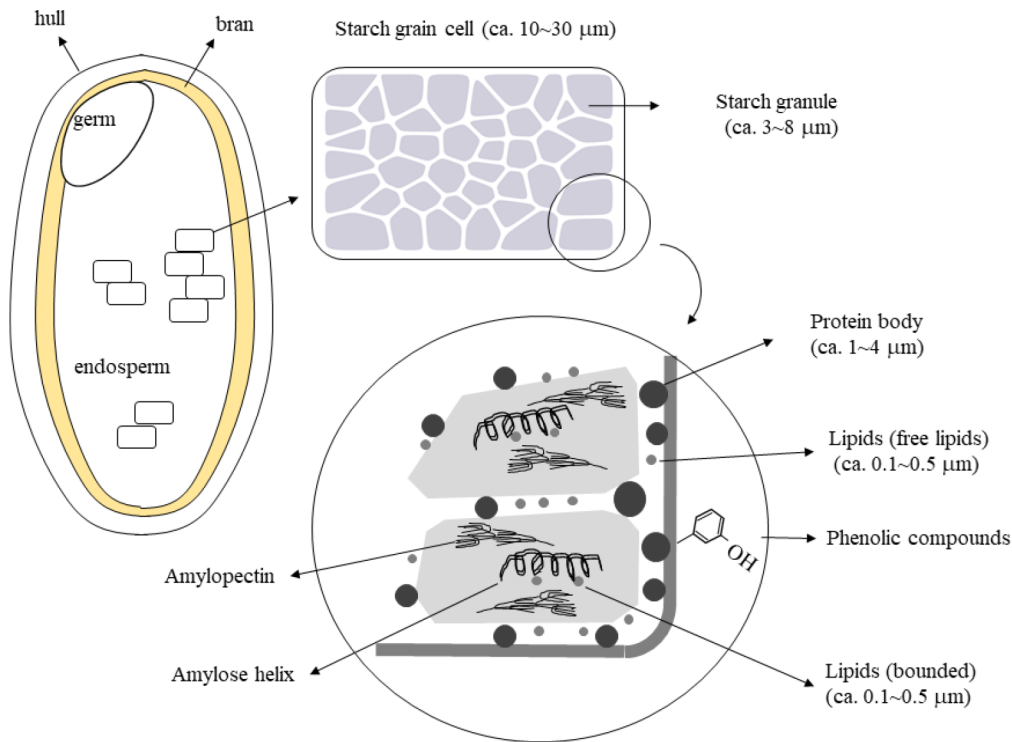


Fig. 2 Schematic structure of rice. Note: redrawn based on references [1,17]

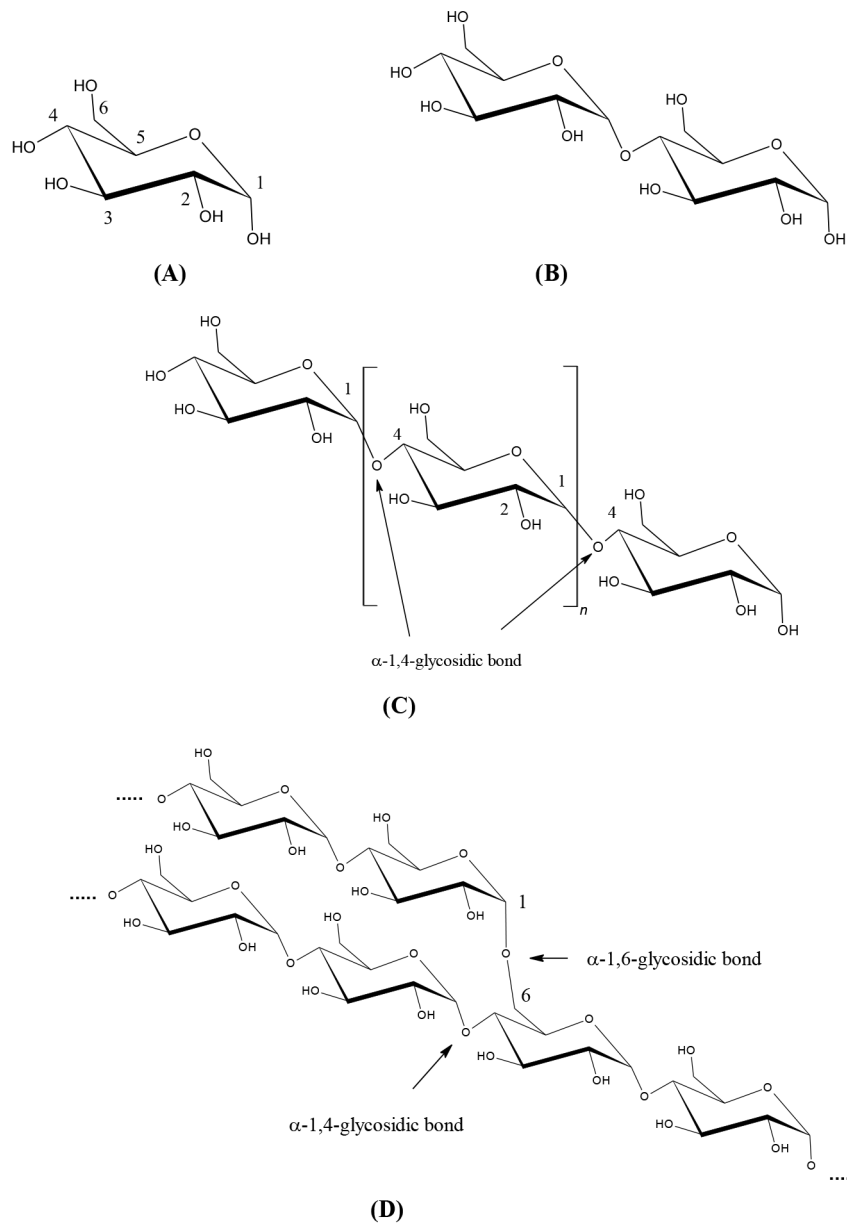
는 점성(stickiness)이나 향기로도 구분한다. 쌀의 품종 중에 Asian rice (*Oriza sativa*)가 우리에게 가장 많이 알려져 있으며, 인디카(indica)와 자포니카(japonica)가 대표적이다. 인디카 품종은 길이가 길고, 자포니카 품종은 길이가 짧고 밥을 지었을 때 인디카 품종에 비해 찰기가 더 있다. Fig. 2에서는 쌀의 구조를 나타내었다. 먼저, 단순화한 쌀의 구조에는 배젖, 배아(germ), 미강(bran), 그리고 세포벽을 나타내었다. 쌀의 미강 부분은 무기질이 상대적으로 풍부하다. 쌀에 포함된 무기물질로는 인, 철, 나트륨, 칼륨, 아연, 마그네슘 등을 들 수 있다. 이외에도, 현미는 백미와 비교하여 niacin, 비타민 B<sub>1</sub>과 B<sub>2</sub>가 상대적으로 많고, 섬유질도 상대적으로 풍부하다고 알려져 있다[4]. 계속해서, 전분 과립이 모여 있는 세포(rice grain cell)를 확대하여 나타내었다. 세포의 크기는 대략 10-30 μm, 그리고 전분 과립의 크기는 대략 3-8 μm로 알려져 있다[1]. Fig. 2에서는 크기에 비례해서 그린 것은 아니며, 설정된 부위를 과장하여 나타내었다. 세포의 오른쪽 하단부위를 확대하여, 전분 과립과 과립 내의 주요 물질인 아밀로스과 아밀로펙틴을 나타내었다. 또한, 세포벽과 전분 과립 사이 혹은 전분 과립들 사이에 분포된 단백질과 지질 입자들을 표시하였다. 지질은 전분 과립 내부에서는 결합된 형태로 존재하며, 전분 과립 외부에서는 유리된 형태로 존재한다. 세포벽 바깥쪽에는 페놀계 물질을 함께 표시되어 있다[17].

Fig. 3에 대표적인 당 성분으로 포도당, 맥아당, 아밀로스, 그리고 아밀로펙틴의 화학적 구조를 나타내었다. 아밀로스과 아밀로펙틴 모두 단당류인 포도당(glucose)를 기본단위로 한 고분자이다. 각각이 포도당 분자는 -O- 결합으로 연결되어 있다. 아밀로스는 포도당 분자가 선형적으로 연결되어 있으며 일부 가지

결합을 갖고 있으며, 전분 과립내에서는 헬릭스(helix) 형태인 것으로 알려져 있다[18]. 아밀로펙틴은 아밀로스와 같은 선형의 고분자 뼈대로부터 가지 결합(branched)이 여러 형태로 이어져 있다[18]. 전분 과립 내에는 아밀로스와 아밀로펙틴이 함께 존재한다. 전분 과립은 전자현미경(scanning electron microscope)으로도 관찰된다[1]. 전분 과립은 전분알갱이 세포(starch grain cell 혹은 endosperm cell)에 다면체구조로 모여있다. 쌀의 전분 구조를 voronoi 패턴구조를 가진 다면체구조로 보고된 사례[19]도 있는데, Fig. 2에서도 이를 참조하여 나타내었다. 전분 과립들 사이에는 단백질과 지질(lipids)이 구형의 알갱이 형태로 흩어져 있는 것이 보고되어 있다. 단백질과 지질의 크기는 각각 1-4 μm와 0.1-0.5 μm 정도로 알려져 있다[1,17]. 단백질은 구조 단백질과 효소가 있는데, 구조단백질은 세포의 형태를 유지시키는 세포벽과 연관성이 있다. 효소들은 전분 과립 사이와 전분 과립과 세포벽 사이에 존재하는 것으로 알려져 있다[1]. 전분 과립은 다면체로 존재하며 표면의 주성분은 셀룰로오스로 알려져 있다. 한편, 이런 전분과 세포들이 모여 있는 공간을 배젖이라고 한다. 세포사이를 분리하는 경계면은 세포벽(cell wall)으로 나뉜다.

**쌀의 보관과 대표적 구조변화**

일반적으로 벼의 장기간 보관은 밀폐보관을 사용한다. 밀폐보관의 장점으로서는 곤충 피해와 같은 생물학적 감모현상을 줄일 수 있고, 쌀의 품질을 유지하는데에도 가장 유리한 방법이다. 밀폐된 툰백에 보관하는 방법들은 저장소에서도 표준으로 정하고 있다. 품질 평가방법에는 포장내부의 기체발생량, 수분량, 1000 쌀 알갱이 질량, 기공도, 경도, 백도, 도정수율, head rice yield, 젤



**Fig. 3** Chemical structures of (A) glucose, (B) maltose, (C) amylose, and (D) amylopectin

라틴화 온도, 아밀로스, 단백질, 지방, 지방산, sensory 특성 등을 들 수 있다[1]. 벼의 보관기간이 길어짐에 따라, 밥맛에도 영향을 주는데, 그 이유들을 Table 1에 간략히 나타내었다. 전분 과립의 구조가 바뀌게 되며, 배젓내 세포벽 주위로 카르보닐기가 생성된다. 또한, 세포벽 주위에 단백질의 변성이 진행되고, 단백질의 변성으로 인해 생기는 결합구조 중 disulfide 결합은 세포벽을 더욱 단단하게 변화시킨다[20]. 만일, 배젓내의 세포벽이 단단해질 경우, 밥을 지을 때 세포벽에 쌓여 있는 전분 중 아밀로스가 용해되어 나오는 양이 줄어들게 되어 밥의 점성이 낮아진다. 반대로 밥알 내부의 응집력(cohesiveness)의 증가로 밥맛을 좋지 못하게 한다고 알려져 있다[22]. 보관기간 동안에는 휘발성 물질이 검출되기도 하는데, 여기에는 2-(E)-octenal을

성숙도를 알려주는 화학물질이며, 쌀의 품종에 따라서는 heptanal, octanal, 2-ethyl hexanol이 성숙도를 알려줄 수 있다고 보고하였다[23]. 이와 같이, 보관 기간 동안 다양한 변성과정이 보고되었기에 단백질의 변성, 지질의 변성, 그리고 아미로스와 아미로펙틴 즉 탄수화물의 변성 등 종합적으로 벼의 성질이 바뀐다고 할 수 있다[1,17]. 밥맛에 대해서는 국가별 문화와 선호도에서 극명하게 나누기도 한다. 예를 들면, 한국과 인도의 사례를 들 수 있다. 한국의 경우, 햅쌀의 선호도가 높은 반면, 인도의 경우에는 1년 정도 보관하였던 쌀의 선호도가 햅쌀에 비해 더 높다. 그 이유로는 한국은 밥맛의 기준이 점성과 연관성이 크다. 한국의 햅쌀 선호도는 일본과 매우 유사하다. 이에 반하여, 인도는 밥에서 나오는 향과 연관성이 높기 때문에 이

**Table 1** Typical changes of rice grains during storage duration

Classification	Contents	Ref.
chemical	polysaccharides <ul style="list-style-type: none"> <li>• decrease of polysaccharides quantities</li> <li>• decrease of qualitatively long chain of polysaccharides</li> <li>• increase of short chain of polysaccharides</li> <li>• generation of carbonyl compounds</li> </ul>	10,16
	protein <ul style="list-style-type: none"> <li>• decrease of prolamines and glutelins</li> <li>• generation of protein disulfide bonds</li> </ul>	3,20
	lipids <ul style="list-style-type: none"> <li>• hydrolysis and oxidation of free lipids</li> <li>• decrease of unsaturated fatty acids</li> </ul>	3,17
	phenolic acid <ul style="list-style-type: none"> <li>• release of phenolic acids</li> <li>• decrease of free phenolic acid</li> </ul>	1,17
quality	<ul style="list-style-type: none"> <li>• increase of hardness</li> </ul>	3,21
cooking properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reduction of adhesiveness</li> <li>• increase of cohesiveness</li> </ul>	22

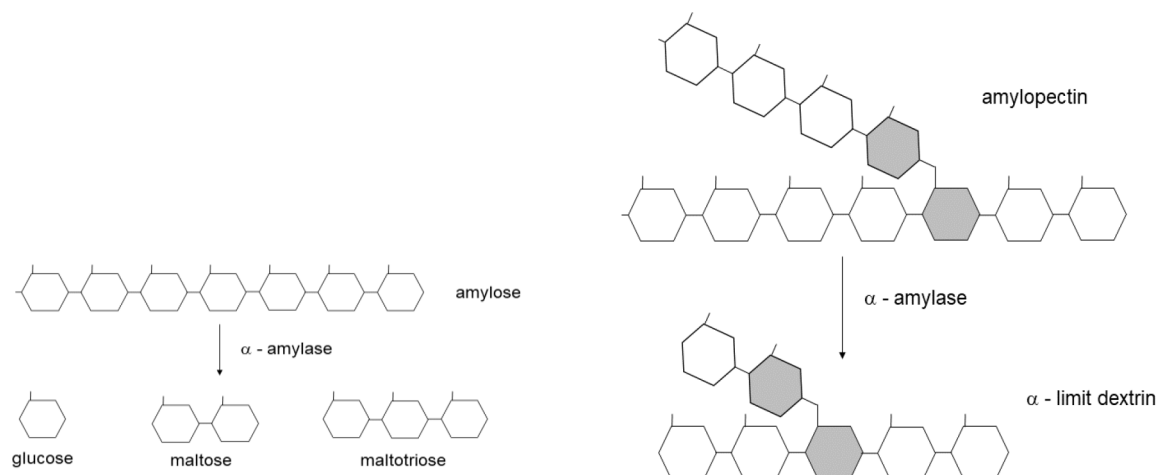
해된다[21]. 따라서, 어느 경우에는 저장된 쌀의 노화를 지연시키는 것이 중요할 것이며, 다른 한편에서는 숙성의 개념으로 빠른 숙성조건으로 보관 기간을 단축하려 할 것이다. 두 경우 모두, 품종이 다른 쌀의 노화 혹은 숙성에 대해서 연구들이 많이 진행되었다. 그렇다 보니, 쌀에 포함된 단백질과 지질에 대한 변성도 많이 알려지게 되었다. 단백질의 경우, 보관시 prolamins, glutelins의 양이 줄어든다. 이 단백질들은, disulfide 가교에 의한 커다란 단백질의 생성에 관여한 것으로 추정된다[3,20]. 오래된 쌀에서는 단백질들 사이에 disulfide 결합을 통한 가교가 진행되면 강도가 높아진다. 이를 억제하기 위한 방법으로, 2-mercaptoethanol로 화학처리한 결과가 보고되었다. 화학처리 결과로 이미 형성되어 있는 protein disulfide 결합을 끊어주어, 밥을 지을 때 쌀알의 수화(hydration)와 팽윤성이 향상되어 호화도가 증가하였다[24]. 단백질 분해효소 (protease)를 보관기간이 긴 벼에 처리 할 경우에도 호화도가 증가함을 보고하였다. 단백질 분해효소로 인해 세포벽 구성물질 중 단백질이 분해되어, 밥을 지을 때 전분이 세포벽 외부로 나오게 되어 밥알의 점성을 회복시킨다고 보고하였다[24]. 이 두 가지 처리는, 세포벽의 강도를 약화시켜 밥의 호화도 회복을 시도하였으며, 오래 보관된 쌀의 호화도 증가를 위해서는 단백질과 전분 과립 사이에 상호작용이 중요하다는 것을 제시해 주고 있다. 한편, 지질은 아밀로스과 결합되어 전분 과립 표면에서 과립 입자의 팽창을 제어하는 역할을 한다. 지질의 변성과정 중에는 배젓에 위치한 lipoxygenase-3 효소에 의한 lipid peroxidation 반응이 알려져 있다[25]. 따라서, lipoxygenase-3 효소작용을 억제하는 것이 필요하다.

**탄수화물의 특성과 분해반응**

쌀 품종에 따라 찹쌀(waxy rice)의 경우 아밀로스의 함량이 매우 적은 반면, 멬쌀(non-waxy rice)은 아밀로스의 함량이 20-30%까지 달한다[26-28]. 아밀로스 함량의 증가는 상대적으로 아밀로펙틴의 함량이 낮아지고, 쌀의 화학적, 물리적 특성도 달라진다. 아밀로스의 함량이 많아짐에 따라, 일반적으로 RDS (rapid digestible starch)의 함량이 함께 증가하고 전분의 결정화도는 줄어든다[26,28]. 또한, 아밀로스의 함량이 많은 경우, 감도에 더 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 보관 중 효소에 의한 아밀로

스의 분해 가능성에 대해 살펴본다면, 아밀로스의 함량과 함께 분자 크기도 영향을 가질 것이다. 아밀라제와 같은 효소는 작은 분자량의 아밀로스와의 반응에 더욱 유리할 수 있다[21]. 아밀로스와 아밀로펙틴을 한 묶음으로 하여, 이 두 성분의 정량 비율에 따른 쌀의 물성을 예측하기도 한다. 이를 위해서는 평균분자량과 분자량 분포를 함께 고려하여 물성을 예측하여야 한다. 작은 분자량의 아밀로스는 용해도가 높다고 알려져 있다. 또한, 아밀로펙틴의 경우에는 평균분자량과 함께, 가지결합이 많고 적음, 그리고 가지결합으로 연결된 글루코사이드(glucoside)의 크기도 특성을 갖는다고 알려져 있다[27,28]. 따라서, 감도 진행도 아밀로스와 아밀로펙틴의 함량 차이에 의해, 종류별로 다르게 진행될 것이 예상된다. 보관 기간동안, 아밀로스와 아밀로펙틴 모두 분자량이 낮아진다고 알려져 있다[10]. 화학적 변화 중에는 아밀로스와 아밀로펙틴을 구성하는 탄수화물 고분자 내부에 reducing sugar content가 약간 증가하는 것으로 측정되었다. 이는 효소( $\alpha$ -glucosidase)에 의한 전분의 분해를 의미한다고 할 수 있다. 또한, 전분에 포함된 당류의 평균 개수를 의미하는 short chain (DP6-12)의 증가가 관찰되었다. 가혹 조건인 온도가 높고 오랜 기간 저장시, 아밀로스 분자의 길이가 줄었고, 아밀로펙틴의 경우에는 작은 사슬구조가 증가되었다[10]. 이렇게, 아밀로스와 아밀로펙틴의 분자량이 줄어드는 것은 효소에 의한 분해가 진행되었음을 유추할 수 있다. 저온보관 옵션은 상온보관과 비교하여 품질유지에 유리하다[9]. 저온보관 사례[29]를 참고한다면, 저온보관시 함수율의 변화는 크지 않는 것으로 보인다. 그러나, 저온보관에서는 쌀의 강도가 상온보관에 비해 잘 유지되었다. 예를 들면, 현미가 부서지는 경우가 4-10.8%에서 1.6-7.2%로 낮아졌으며, 발아속도도 11.6-9.6%에서 0.3-3.3%로 낮아졌다. 이 외에도 시료의 산도(acid value)도 저온 보관을 통해 낮게 유지되었다. Fig. 4에서는 대표적인 효소인  $\alpha$ -아밀라제의 역할에 대해서 개략적으로 나타내었다.

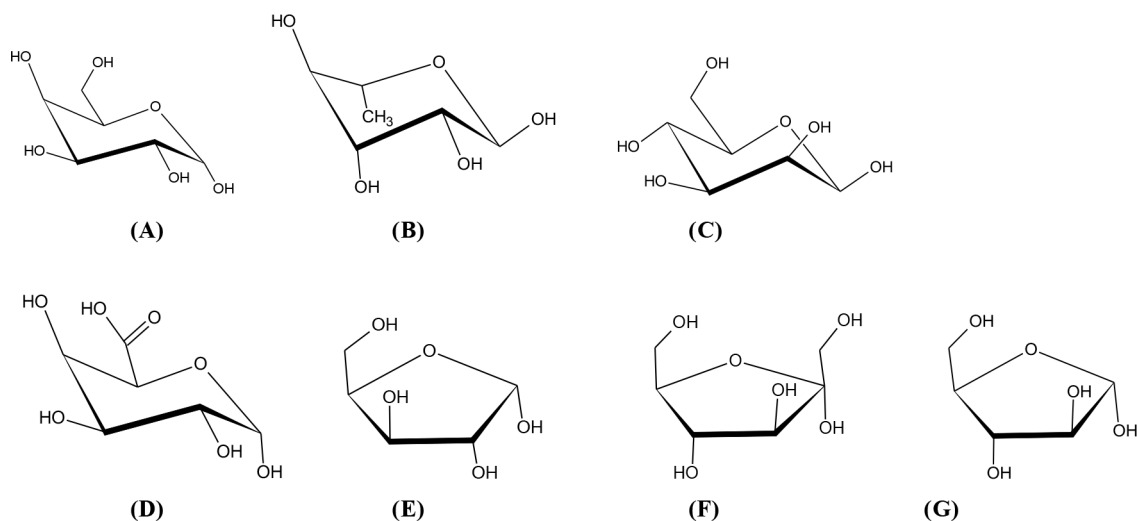
Table 2에는 탄수화물 분해에 관여하는 효소들을 나타내었다. EC number (Enzyme Commission number)는 효소의 촉매반응 즉 효소 기능에 의해 분류한 체계 번호를 나타낸다. 효소의 농도(U/g)는 참고문헌 [30]에서 제시한 값을 가져왔다. 또한, 다양한 당당류들의 결합이 가수분해반응으로 인해 분해될 때, 특정 효소들의 역할을 정리하였다. 두 종류의 아밀라제( $\alpha$ -amylase,  $\beta$ -



**Fig. 4** The roles of  $\alpha$ -amylase to break down amylose and amylopectin. Solid gray hexagons represent glucose molecules linked by  $\alpha$ -1,6-glycosidic bonds, which cannot be split by  $\alpha$ -amylase

**Table 2** Enzymes to decompose polysaccharides within rice grain cell wall

Enzyme	EC number	U/g	Role
$\alpha$ -amylase	3.2.1.1	237.7 $\pm$ 54.2	Endohydrolysis of $\alpha$ -(1,4)-D-glucosidic bonds in polysaccharides
$\beta$ -amylase	3.2.1.2	33.3 $\pm$ 14.9	Hydrolysis of $\alpha$ -(1,4)-D-glucosidic bonds from the non-reducing ends in polysaccharides to generate successive maltose units
$\alpha$ -glucosidase	3.2.1.20.	66.4 $\pm$ 25.8	Hydrolysis of terminal, non-reducing $\alpha$ -(1,4)-D-glucose residues with production of alpha-D-glucose
$\alpha$ -mannosidas	3.2.1.24	159.7 $\pm$ 42.2	Hydrolysis of terminal, non-reducing $\alpha$ -D-mannose residues in $\alpha$ -D-mannosides
$\alpha$ -galactosidase	3.2.1.22	213.6 $\pm$ 41.7	Hydrolysis of terminal, non-reducing $\alpha$ -D-galactose residues in $\alpha$ -D-galactosides, including galactose oligosaccharides, galactomannans and galactolipids
$\beta$ -galactosidase	3.2.1.23	159.5 $\pm$ 43.2	Hydrolysis of terminal non-reducing $\beta$ -D-galactose residues in $\beta$ -D-galactosides
$\beta$ -glucanase	3.2.1.6	161.5 $\pm$ 29.9	Endohydrolysis of (1 $\rightarrow$ 3)- or (1 $\rightarrow$ 4)-bonds in $\beta$ -D-glucans
$\beta$ -xylanase	3.2.1.8	17.3 $\pm$ 7.8	Endohydrolysis of $\beta$ -(1,4)-D-xylosidic bonds in xylans



**Fig. 5** Chemical structures of possible monosaccharides when rice grain cell walls are decomposed by enzymes listed in Table 2; (A)  $\alpha$ -D-galactose, (B)  $\alpha$ -L-rhamnose, (C)  $\alpha$ -D-mannose, (D)  $\alpha$ -D-galacturonic acid (representing uronic acid), (E)  $\alpha$ -D-xylose, (F)  $\alpha$ -D-fluctose, and (G)  $\alpha$ -D-arabinose

amylase)와 글루코시다아제( $\alpha$ -glucosidase)는 주로 전분 분해에 역할을 한다.  $\alpha$ -amylase의 역할은 Fig. 4에서도 나타내었지만, 다당류의 위치에 상관없이  $\alpha$ -(1,4)-glucosidic bonds를 분해하는 역할을 수행한다.  $\beta$ -Amylase는 다당류에서 이당류(maltose)로 분해되는 역할을 한다. 아밀로스과 아밀로펙틴으로부터 단당류인 포도당까지 분해되기 위해서는 glucosidase가 주된 역할을 한다. 만약,  $\alpha$ -limit dextrin과 같이  $\alpha$ -(1,6)-glucosidic bonds가 남아 있을 경우(Fig. 3),  $\alpha$ -(1,6)-glucosidase에 의해 두 포도당 사이에 연결된 (1,6) 결합이 분해된다. 전분 이외에 관심있는 탄수화물에는 세포벽이 있다. 세포벽은 쌀 배젖에 분포한 전분 과립을 안정하게 보호하는 역할을 하며, 주성분으로는 펙틴, 셀룰로오스, 그리고 헤미셀룰로오스로 구성되어 있다. 세포벽은 endo-xylanase에 의해 분해된다고 알려져 있다[31]. Fig. 5에는 Table 2에서 제시된 효소들에 의해 헤미셀룰로오스와 펙틴에서 분해되어 나온 단당류들에 대해서 화학식으로 나타내었다.

### 고찰

쌀은 적당한 수분과 온도가 유지될 때, 발아를 시작하며  $\alpha$ -아밀라제를 생성시킨다. 아쉽게도, 본 논문에서는 저장소에 보관된 벼가 발아를 시작하였다는 근거는 없는 상황이다. 그렇지만, 아밀로스과 아밀로펙틴과 같은 다당류가 보관기간 전후로 평균 분자량이 줄어든다는 연구들에 근거하여,  $\alpha$ -아밀라제를 포함한 여러 효소들이 매우 느리지만 여전히 활동을 할 수 있다고 유추하였다[10,12]. 또한, 아밀라제 등 효소가 이미 쌀알에 고루 분포하고 있다는 것에 대해서는 보고된 자료들이 있다[32]. 만약, 효소활동으로 아밀로스나 아밀로펙틴 분자로부터 분해되어 포도당 분자들이 생성되면, 이후 호흡 활동을 이어나갈 것으로 추정하였다. 아래의 식은 포도당에서 호흡과정을 거쳐 에너지를 얻는 대표 반응식이다. 결국, 호흡을 통해 포도당의 탄소원은 이산화탄소의 형태로 소비될 것이다.



감모현상은 효소작용에 기인하는 것으로 보인다. 어느 정도의 수분을 함유한 조건에서 효소들이 활동성은 매우 느리지만, 여전히 역할을 할 수 있을 것이라 유추하였다. 이 효소들은 쌀의 품종에 따라 그 형태가 크게 다르지는 않다고 알려져 있다[30]. 다시 전분분해과정으로 돌아와, 아밀로스의 함량에 따라서 감모 수준이 달라질 것으로 예상된다. 탄수화물에서는, 아밀로스의 평균분자량을 보관 전후로 비교하여 분자량이 큰 아밀로스의 함량이 줄고 분자량이 작은 아밀로스의 함량이 많아진다면, 이는 아밀로스의 분해가 진행되고 있음을 유추해 볼 수 있다. 또한, 아밀로스과 아밀로펙틴의 분해반응은 전분 과립의 부피감소를 유도하여 세포내에서 물리적이 빈공간의 형성이 생길 것이다 [33]. 이러한 시나리오의 확인을 위해서는, 물리적인 기공도 측정도 필요할 수 있을 것이다. 물리적 기공의 부피 확대는 쌀의 강도저하로 이어져 도정 과정을 거치며, 감모율이 증가할 것이다. 그러함에도 불구하고, 아밀로스과 아밀로펙틴의 정량적, 정성적인 변성과정을 통해 감모 현상을 설명한다는 것에는 한계가 있다. 왜냐하면, 쌀의 노화과정(ageing) 메커니즘을 제시한 사례를 들 수 있는데, 쌀의 노화를 이끄는 것이 특정 물질들에

의해서 진행되는 것이라기 보다는 여러 물질들의 복합적인 변성에 의해 진행된다고 밝히고 있다[1,17]. 마찬가지로, 감모 현상도 ‘탄수화물에 대한 효소 분해와 호흡활동이 주된 원인이다’라고 결론을 내리기에 주의가 필요하다. 그렇기에, 벼의 보관 중 발생하는 다양한 변성 과정들을 살펴보면 중요한 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 저장 온도와 함수율에 대해서는 지속적인 모니터링이 감모를 줄이는데 도움을 줄 것이다. 한편, 단백질의 분해과정이 감모에 영향을 주는 것이 그동안 과소평가되어 있을 수도 있다. 일례를 들면, 단백질은 접착능력이 있으며, 골격의 유지에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 따라서, 세포벽에 위치한 구조단백질의 분해과정은 일부 세포벽의 파쇄를 유도할 수 있으며, 이는 배젖 전체의 골격 약화로 이어질 수 있다. 따라서, 보관 중 단백질분해 효소에 의한 단백질 분해가 진행될 경우 생성될 수 있는 중간 단계의 화학물질 분석 가능성도 제기된다. 본 논문의 연구 범위는 Fig. 1에서 제시하였듯, 보관 기간 중 예상되는 감모현상에 한정하였다. 보관 전후로 무게 감소는 실제 발생하고 있는 일이며, 외형적으로 큰 변화를 감지하기에는 어려움이 있다. 따라서, 감모현상에 대해서 우리가 예상한 시나리오는 전분 분해가 주된 감모 원인이 될 것으로 예상하였다. Table 3에서는 참고문헌 [10]에서 제시한 아밀로펙틴을 구성하는 가지결합 A 사슬, B<sub>1</sub> 사슬, B<sub>2</sub> 사슬, 그리고 B<sub>3</sub> 사슬에 대한 DP (degree of polymerization) 값을 중량 비율로 나타내었다. 또한, 포도당 분자량(180 g/mol)을 평균 DP 값에 곱하여, 중량비율에서 유사(pseudo) 중량 전환값으로 바꾸어 나타내었다. Table 3의 시료는 Bengal 품종이며, 아밀로스, 아밀로펙틴, 그리고 중간계(intermediate material) 전분의 함량이 각각 대략 15, 75, 그리고 10%인 시료이다. 보고된 자료들에 의하면, 일반적으로 쌀 아밀로펙틴의 평균분자량은 대략 10<sup>8</sup>-10<sup>9</sup> g/mol로 알려져 있다[27]. 여기서, 아밀로펙틴의 분자량을 직접 구할 수는 없지만, 분자량을 구성하는 단편의 DP를 통해서 감모량 계산을 시도할 수 있었다. 만약, Table 3의 자료가 아밀로펙틴을 구성하는 여러 단편 고분자들의 중량비율이라면, 각각의 DP 값들의 합에서 어떤 factor를 곱하면, 전체 분자량이 될 것이다. 예를 들어, 1개월 지난 후의 쌀에 포함된 아밀로펙틴의 분자량은 factor (F)를 사용한다면, 3,579.2F라고 할 수 있을 것이다. 마찬가지로 9개월이 지난 경우에는 3,525.7F라는 분자량으로 표시할 수 있을 것이다. 그렇다면, 아래와 같이 1개월에서 9개월이 지난 경우의 감모량은 다음과 같이 계산할 수 있을 것이다.

$$\frac{3579.2F - 3525.7F}{3579.2F} \times 100(\%) = 1.47\%$$

물론, 이 값은 정확한 계산값은 아니며, 감모량 계산을 위해 편의상 가정하여 유추한 값이라고 할 수 있다. 이와 같은 방법으로, 두 종류 품종의 온도별, 기간별 아밀로펙틴의 무게 감소량을 계산하였으며, 결과를 Table 4에 나타내었다. Cypress 품종의 경우 아밀로스, 아밀로펙틴, 그리고 중간계 전분의 함량이 각각 대략 20, 66, 그리고 14%인 시료이다. 특이한 점으로는, 보관기간 1개월에서 9개월 사이동안 감모량이 온도 21 °C에서 3.44%인 반면, 온도 38 °C에서 2.89%로 오히려 낮은 값을 나타내었다. Bengal 품종의 경우에는, 기간이 길어질수록 감모량이 더 많아짐을 나타내고 있다. 특히, 온도 21 °C에서 1개월과

**Table 3** Amylopectin chain length distribution of Bengal cultivar stored at 21 °C for various months and their conversion values of multiplication by glucose unit molecular weight with average DP values; 9, 18, 31, and 40 for DP6-12, DP13-24, DP25-36, and DP37+, respectively. The data are used from the reference [10]. Here, the average DP values are arbitrarily selected without supporting clues, but they may provide the insight regarding how much percentages are reduced during 9-month storage

Duration (month)	Wt.%				sum
	DP6-12	DP13-24	DP25-36	DP37+	
1	26.0	49.3	13.5	11.2	100
3	26.2	48.9	13.6	11.3	100
5	26.4	49.1	13.4	11.1	100
7	26.8	49.5	13.0	10.7	100
9	27.9	48.6	12.4	11.1	100
Conversion from % to multiplication by 180*(average DP values; 9, 18, 31, 40)					
1	421.2	1,597.3	753.3	806.4	3,579.2
3	424.4	1,584.4	758.9	813.6	3,584.3
5	427.7	1,590.8	747.7	799.2	3,570.4
7	434.2	1,603.8	725.4	770.4	3,540.8
9	452.0	1,574.6	691.9	799.2	3,526.7

**Table 4** Calculated weight loss data based on the reference [10] with hypothesis that the weight loss of amylopectin may represent the weight loss of rice grain during storage

Cultivar	Temperature (°C)	Calculated weigh loss (%) based on hypothesis
Bengal	4	0.19
	21	1.47
	38	2.72
Cypress	4	1.50
	21	3.44
	38	2.89

9개월 사이의 감모량이 1.47%를 나타내고 있는데, 이 값은 실제 현장에서 발견되는 감모량과 유사한 값이며 전분 분해가 감모와 연관성이 높음을 간접적으로 나타내 주고 있다. 따라서, 이 논문에서 가정하고 있는 전분 분해가 쌀의 감모에 영향을 주고 있다는 가정에 부합하다고 할 수 있다. 이와 더불어, 전분 분해는 탄수화물 분해이기에, 또다른 탄수화물의 분해까지 확대하여 생각해 볼 수 있을 것이다. 그러나, 수분이 비교적 있을 것으로 예상되는 전분과는 다르게 얇은 두께의 세포벽 구조내부에서 활발한 효소활동을 기대하기에는 어려움이 있다. 이런 이유로, 세포벽의 분해과정은 더디게 진행될 것으로 예상하였다. 그렇다면, 세포벽의 분해과정이 전분의 분해과정에 비해서 상대적으로 적으며, 분해시 생성될 단당류(Table 2)의 소비활동도 포도당의 소비와 비교하여 덜 진행될 것으로 예상하고 있다. 이럴 경우, 세포벽 탄수화물의 분해는 저장시 발생하는 무게 감량보다는 이후 과정인 도정 과정에서 미분 발생이 커지는 역할이 더 중요해 질 수 있다. Fig. 6에서 탄수화물 분해의 주된 장소인 전분 과립과 세포벽의 분해과정이 쌀알의 감모에 주요 요인임을 나타내었다. 특히, 전분의 분해는 실제 무게 감량에 영향을 주고, 세포벽의 분해는 무게 감량 보다는 구조의 약화로 인한 도정 과정에서 수율을 낮출 것이라 예상된다.

**결론**

벼의 보관 전후로 무게가 줄어드는 감모현상은 실제 현장에서 발생하는 문제이다. 외형적인 벼의 관찰로 감모현상의 원인을 파악하기는 어려우며, 물리화학적 분석을 이용하여 원인들을 찾을 수 있을 것이다. 일반적으로, 쌀의 감모에 영향을 미치는 가장 중요한 요인으로 온도와 함수율로 알려져 있다. 감모현상의 대처방법으로 함수율을 약 15중량%로 건조하는 것과 저온에서 보관하는 것이 현장에서 접근하고 있는 방법이다. 또한, 밀폐보관을 통한 산화반응을 제어하고 있다. 그렇지만, 감모현상은 계속해서 일어나고 있다. 거시적인 요인인 함수율과 온도가 조절되어 보관하고 있더라도 감모가 발생하고 있다면, 미시적인 관점에서 살펴볼 필요가 있을 것이다. 미시적인 관점에서, 보관된 벼 내부에 있는 단백질과 지질의 변성은 이미 많은 연구들이 보고되었다. 본 논문에서는, 감모현상에 대해 탄수화물의 분해과정이 중요한 역할을 한다고 해석하였으며, 탄수화물 분해과정들을 효소에 의한 분해로 설명하였다. 관심의 대상이 되는 주요 탄수화물로는 전분의 아밀로스과 아밀로펙틴이 있으며, 그 외에도 세포벽에 포함된 탄수화물이 있다. 이중에서, 전분의 구성분인 아밀로스과 아밀로펙틴의 분해가 감모현상에 더 주요한 역할을 할 것으로 추정된다. 한편, 세포벽 구성물질 중 탄수화물의 분해는 전분의 분해와는 다르게, 적은 범위에서 진행될 것으로 예상된다. 왜냐하면, 수분을 함유하는 능력이 있는 전분과는 다르게, 세포벽은 수분 함유가 상대적으로 적을 것으로 예측되기 때문이다. 이것은 전분과 세포벽에서 진행되는 각각의 효소 반응의 유리함과 불리함으로 연결되며, 각각 포도당과 다른 단당류의 생성으로 인해 호흡과정도 다른 과정을 거칠 것이라 예상된다. 따라서, 주요 감모 현상은 전분의 분해와 호흡으로 인한 무게 감소가 크며, 세포벽 구성물질 중 탄수화물의 분해는 무게 감소보다는 추후 도정 과정에서 미분의 증가로 이어질 것으로 해석하였다. 그러함에도 불구하고, 보관된 벼의 감모현상은 전분의 분해로만 설명하기에는 조심스럽다. 쌀의 노화과정 사례에서도 단백질과 지질의 변성이 큰 영향을 주지만, 추



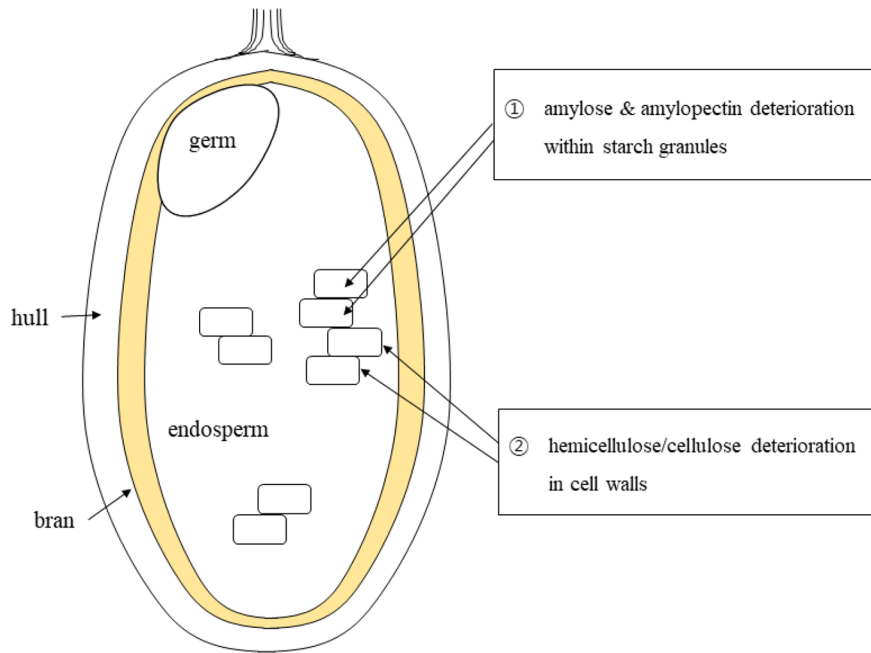


Fig. 6 Two possible scenarios of molecular breakages during rice storage

가적인 다른 성분들의 변성도 노화에 함께 영향을 주고 있다는 의견이 타당성이 있는 것으로 받아들여지고 있다[1,17]. 따라서, 현단계에서는 보관한 벼의 감모현상을 해석하기 위해서는 여러 가지 물질들의 변성과정을 함께 살펴보는 것이 필요하다. 즉, 벼의 감모현상이 나타나는 원인으로 전분분해가 가장 큰 역할을 하고 있다고 보이지만, 단백질과 지질의 변성과정도 그 자체로 감모현상으로 이어지거나, 혹은 벼 내부의 환경변화를 제공하여 전분분해가 더 잘 진행되도록 영향을 주고 있다고 판단된다.

**초 록**

보관된 벼는 시간이 지남에 따라 물리화학적인 변성이 일어난다. 쌀알의 변성에 영향을 주는 중요한 요인으로 온도와 함수율을 들 수 있다. 가급적 저온보관과 밀폐보관이 중요하다. 미시적인 관점에서, 쌀에 함유된 단백질과 지질의 변성은 이미 많은 연구들이 보고되었다. 한편, 실제 보관 현장에서 확인되는 벼의 중량 감소, 즉 감모현상은 현재 진행형이며 다양한 원인으로 발생할 수 있다. 본 논문에서는, 쌀의 주성분인 탄수화물의 분해과정이 감모현상에 중요한 역할을 한다고 가정하였으며, 효소에 의한 탄수화물 분해과정들을 살펴보았다. 관심의 대상이 되는 주요 탄수화물로는 전분과 세포벽에 포함된 탄수화물이 있다. 쌀의 보관 과정 중 중량 감소는 주로 전분의 주성분인 아밀로스과 아밀로펙틴의 분해가 원인일 것으로 보이지만, 단백질과 지질을 포함한 다른 성분들의 변성 또한 종합적으로 영향을 주고 있다고 유추된다.

**Keywords** 벼의 감모 · 보관 · 아밀로스 · 아밀로펙틴 · 효소

**References**

1. Zhou Z, Wang X, Si X, Blanchard C, Strappe P (2015) The ageing mechanism of stored rice: A concept model from the past to the present. *J Stored Prod Res* 64: 80–87. doi: 10.1016/j.jspr.2015.09.004
2. Mohidem NA, Hashim N, Shamsudin R, Che Man H (2022) Rice for food security: revisiting its production, diversity, rice milling process and nutrient content. *Agriculture* 12: 741. doi: 10.3390/agriculture12060741
3. Zhou Z, Robards K, Helliwell S, Blanchard C (2002) Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes. *J Cereal Sci* 35: 65–78 doi: 10.1006/jcsc.2001.0418
4. Choe JS, Ahn HH, Nam HJ (2002) Comparison of nutritional compositions in Korean rices. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 31(5): 885–892. doi: 10.3746/jkfn.2002.31.5.885
5. Kwak J, Lee JS, Yoon MR, Kim IH, Lee JH, Kim MJ, Lee CK, Kim BK, Kim WH (2015) Changes of seed germination rate and lipid components in different brown rices during ageing. *Korean J Food Nutr* 28(5): 933–940. doi: 10.9799/ksfn.2015.28.5.933
6. Park CE, Kim YS, Park KJ, Kim BK (2012) Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. *J Stored Prod Res* 48: 25–29. doi: 10.1016/j.jspr.2011.08.005
7. Hu H, Li S, Pan D, Wang K, Qui M, Qui Z, Liu X, Zhang J (2022) The variation of rice quality and relevant starch structure during long-term storage. *Agriculture* 12: 1211. doi: 10.3390/agriculture12081211
8. Kim OW, Kim DC (2004) Safe storage period of paddy under different temperature and moisture content conditions. *Korean J Food Preserv* 11(2): 257–262
9. Katta YM, Kamara MM, Abd El-Aty MS, Elgamel WH, Soleiman M, Mousa KM, Ueno T (2019) Effect of storage temperature on storage efficacy, germination and physical characters of some paddy rice cultivars during different storage periods. *J Fac Agr Kyushu Univ* 64(1), 61–69. doi: 10.5109/2232279
10. Patindol J, Wang YJ, Jane JL (2005) Structure-functionality changes in starch following rough rice storage. *Starch* 57: 197–207. doi: 10.1002/star.200400367

11. Ochiai A, Sugai H, Harada K, Tanaka S, Ishiyama Y, Ito K, Tanaka T, Uchiomi T, Taniguchi M, Mitsui T (2014) Crystal structure of  $\alpha$ -amylase from *Oryza sativa*: molecular insight into enzyme activity and thermostability. *Biosci Biotechnol Biochem* 78(6): 989–997. doi: 10.1080/09168451.2014.917261
12. Awazuhara M, Nakagawa A, Yamaguchi J, Fujiwara T, Hayashi H, Hatae K, Chino M, Shimada A (2000) Distribution and characterization of enzymes causing starch degradation in rice (*Oryza sativa* Cv. Koshihikari). *J Agric Food Chem* 48: 245–252. doi: 10.1021/jf990408j
13. Kim B (2014) Quality evaluation of short-grain brown rice during storage as affected by the combined action of initial moisture content, storage temperature, and packaging of the kernels. *Food Eng Prog* 18(2): 160–165. doi: 10.13050/foodengprog.2014.18.2.160
14. Dillahunt AL, Siebenmorgen TJ, Buescher RW, Smith DE, Mauromoustakos A (2000) Effect of moisture content and temperature on respiration rate of rice. *Cereal Chem* 77(5): 541–543. doi: 10.1094/CCHEM.2000.77.5.541
15. Kumar D, Kalita P (2017) Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods* 6: 8. doi:10.3390/foods6010008
16. Bertoft E (2017) Understanding starch structure: recent progress. *Agronomy* 7: 56. doi: 10.3390/agronomy7030056
17. Tong C, Gao H, Luo S, Liu L, Bao J (2019) Impact of postharvest operations on rice grain quality: A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 18: 616–640. doi: 10.1111/1541-4337.12439
18. Wani AA, Singh P, Shah MA, Schweiggert-Weisz U, Gul K, Wani IA (2012) Rice starch diversity: Effects on structural, morphological, thermal, and physicochemical properties. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 11: 417–436. doi: 10.1111/j.1541-4337.2012.00193.x
19. Matsushima R, Maekawa M, Sakamoto W (2015) Geometrical formation of compound starch grains in rice implements voronoi diagram. *Plant Cell Physiol* 56(11): 2150–2157. doi: 10.1093/pcp/pcv123
20. Chrastil J, Zarins ZM (1992) Influence of storage on peptide subunit composition of rice oryzenin. *J Agric Food Chem* 40: 927–930. doi: 10.1021/jf00018a001
21. Saikrishna A, Dutta S, Subramanian V, Moses JA, Anandharamakrishnan C (2018) Ageing of rice: A review. *J Cereal Sci* 18: 161–170. doi: 10.1016/j.jcs.2018.04.009
22. Li H, Fitzgerald MA, Prakash S, Nicholson TM, Gilber RG (2017) The molecular structural features controlling stickiness in cooked rice, a major palatability determination. *Sci Rep* 7: 43713. doi: 10.1038/srep43713
23. Griglione A, Liberto E, Cordero C, Bressanello D, Cagliero C, Rubiolo P, Bicchi C, Sgorbini B (2015) High-quality Italian rice cultivars: chemical indices of ageing and aroma quality. *Food Chem* 172: 305–313. doi: 10.1016/j.foodchem.2014.09.082
24. Kim SR, Ahn SY (1995) Effect of protease and disulfide bond reducing agent treatment on the texture of cooked rice. *Agric Chem Biotech* 38(6): 563–569
25. Hildebrand DF (1989) Lipoxygenases. *J Plant Physiol* 76: 249–153. doi: 10.1111/j.1399-3054.1989.tb05641.x
26. You SY, Lee EJ, Chung HJ (2014) Study of molecular and crystalline structure and physicochemical properties of rice starch with varying amylose content. *Korean J Food Sci Technol* 46(6): 682–688. doi: 10.9721/KJFST.2014.46.6.682
27. Park IM, Ibáñez AM, Shoemaker CF (2007) Rice starch molecular size and its relationship with amylose content. *Starch* 59: 69–77. doi: 10.1002/star.200600568
28. Luo X, Cheng B, Zhang W, Shu Z, Wang P, Zeng X (2021) Structural and functional characteristics of Japonica rice starches with different amylose contents. *CYTA J Food* 19(1): 532–540. doi: 10.1080/19476337.2021.1927194
29. Ning XF, Li H, Kang TH, Han CS (2012) Storage characteristics of low temperature grain warehouse using ambient cold air in winter. *J Biosystems Eng* 37(3): 184–191. doi: 10.5307/JBE.2012.37.3.184
30. Lijima K, Suzuki K, Hori K, Eban K, Kimura K, Tsujii Y, Takano K (2019) Endosperm enzyme activity is responsible for texture and eating quality of cooked rice grains in Japanese cultivars. *Biosci Biotechnol Biochem* 83(3): 502–510. doi: 10.1080/09168451.2018.1547624
31. Shibuya N, Misaki A, Iwasaki T (1983) The structure of arbinoxylan and arabinoglucuronoxylan isolated from rice endosperm cell wall. *Agric Biol Chem* 47(10): 2223–2230. doi: 10.1080/00021369.1983.10865940
32. Tsuyukubo M, Ookura T, Kasai M (2013) Distribution of starch-degrading enzymes in rice grains of different cultivars and elution behavior during cooking. *Food Sci Technol Res* 19(2): 303–311. doi: 10.3136/fstr.19.303
33. Mir SA, Bosco SJD, Sunooj KV (2013) Evaluation of physical properties of rice cultivars grown in the temperature region of India. *Int Food Res J* 20(4): 1521–1527