

아밀로오스 함량이 다른 쌀 전분의 분자 및 결정 구조와 이화학적 특성

유수연 · 이은정 · 정현정*
전남대학교 식품영양학과 · 생활과학연구소

Study of Molecular and Crystalline Structure and Physicochemical Properties of Rice Starch with Varying Amylose Content

Su-Yeon You, Eun-Jung Lee, and Hyun-Jung Chung*

Department of Food and Nutrition and Research Institute for Human Ecology, Chonnam National University

Abstract The *in vitro* digestibility and molecular and crystalline structures of rice starches (Seilmi, Dasan1, and Segoami) with differing amylose content were investigated. Segoami had the highest amylose content (30.9%), whereas Dasan1 had the lowest amylose content (21.2%). The molecular weight (M_w) of amylose and amylopectin in Segoami was much lower than that of the other two rice starches. Segoami had the highest proportion (8.7%) of amylopectin short branch chains (DP 6-12) and the lowest proportion of B1 chains (DP 13-24). The relative crystallinity, intensity ratio of 1047-1022 cm^{-1} (1047/1022) and gelatinization enthalpy followed the order: Segoami>Seilmi~Dasan1. Segoami showed substantially low pasting viscosity. Rapidly digestible starch (RDS), slowly digestible starch (SDS), and resistant starch (RS) contents showed the highest value in Seilmi, Dasan1, and Segoami, respectively. The expected glycemic index (eGI) of Segoami was lower than that of the other two rice starches. Overall results suggested that the digestibility of rice starch could be highly influenced by their molecular and crystalline structure.

Keywords: rice starch, molecular structure, crystalline structure, physicochemical property, *in vitro* digestibility

서 론

쌀(*Oryza sativa* L.)은 밀, 옥수수과 더불어 세계 3대 작물로서 주요 곡물자원 중의 하나이다. 우리나라의 쌀 생산은 1980-1990년대 쌀 자급 이후 밥맛 좋은 쌀에 대한 소비자의 요구 증가에 따라 가공용 및 기능성 품종과 같은 다양한 쌀 품종이 개발되고 있다(1). 우리나라 국민의 쌀 소비량은 사회적 여건에 따른 식생활의 변화와 쌀 소비 정책에 의하여 소비량은 많은 변화가 있었다. 1인당 연간 쌀 소비량은 80년대 120 kg, 90년대 중반 110 kg, 2009년 74 kg, 2013년 67 kg으로 급격하게 감소하는 추세를 보이고 있으며 이에 따라 쌀의 소비를 증가시키기 위해 주식뿐만 아니라 쌀 가공 제품 개발 및 다양화를 위한 노력이 이루어지고 있다(1).

국내 쌀 가공 산업은 주로 떡류, 면류, 주류 시장이 주를 이루고 있으며, 최근 즉석밥류 및 죽류 산업으로 점차 확대되고 일부 과자류, 음료, 조미식품류 등으로 개발되고 있으며 쌀 가공 제품 개발이 다양해지는 추세를 보이고 있다(2).

쌀 중량의 60% 이상을 차지하는 전분은 식품 소재의 영양원으로 사용되고 있을 뿐만 아니라 식품에 원하는 물성을 부여하기 위하여 첨가되는 식품첨가제로서도 사용되고 있다. 다른 전분

과 같이 아밀로오스와 아밀로펙틴으로 구성되어 있는 쌀전분은 이화학적, 구조적 특성은 작물 종이나 생육환경에 의해 영향을 받는다(3). 쌀전분의 이화학적 특성은 전분 내의 아밀로오스와 아밀로펙틴 함량비를 포함한 분자 및 결정 구조에 영향을 받는다(4).

전분은 영양적으로 소화되는 속도에 따라 빨리 소화되는 전분(rapidly digestible starch, RDS), 천천히 소화되는 전분(slowly digestible starch, SDS), 소화되지 않는 전분(resistant starch, RS)의 3가지로 분류된다(5). RDS는 당뇨병, 심혈관 질환 및 비만에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 SDS는 소화 속도는 느리지만 완전히 소화되기에 포만감을 오래 지속시켜 주게 되어 체중 조절을 위한 식단에 유용하다고 알려져 있다. RS는식이섬유와 마찬가지로 장내 미생물에 의해 발효되어 대장 환경에 유익한 영향을 미친다고 보고되고 있다(4-6). 현대사회의 급속한 변화, 식생활의 서구화 및 간편화 등으로 인스턴트 식품이나 스낵류 등의 가공식품 소비가 증가하고 있는데 이러한 식품은 설탕과 같은 단순당의 함량이 높고 빨리 소화되기 쉬운 형태인 RDS 함량이 높아 이런 식품을 장기적으로 섭취하게 되면 혈당의 증가가 빈번하게 이루어져 결국 혈당을 일정하게 유지하고자 하는 생체 기능에 무리가 되고 결과적으로 당뇨병을 유발하게 된다(7).

쌀 전분의 소화율은 전분의 입자 크기, 아밀로펙틴의 가지사슬 구조, 결정성 등의 영향을 받는다(4). 지금까지 다양한 쌀 전분의 이화학적 특성에 대한 연구가 진행되어 왔으나(4,8) 국내산 쌀 품종에 대해서 품종에 따른 전분의 분자 및 결정 구조의 특성에 대한 연구가 드물었으며 전분의 소화율과 분자 및 결정 구조 간의 상관성에 대한 충분한 연구가 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 최근에 개발된 아밀로오스 함량이 다른 3종의 쌀에서 추출한 쌀 전분의 이화학적, 분자 및 결정 구조, 소화 특성들을 밝

*Corresponding author: Hyun-Jung Chung, Department of Food and Nutrition, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea
Tel: 82-62-530-1333
Fax: 82-62-530-1339
E-mail: hchung@jnu.ac.kr
Received July 14, 2014; revised August 21, 2014;
accepted September 1, 2014

히고 이들 간의 연관성을 살펴봄으로써 여러 쌀 가공식품들에 대한 소재로의 이용 가능성을 알아보고자 하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험에 사용된 3가지 쌀 품종인 새일미(Seilmi), 다산1호(Dasan1), 새고아미(Segoami)는 농촌실용화재단(Suwon, Korea)에서 구입하였다. 쌀 시료에서 Lim 등(9)의 알칼리 침지법으로 전분을 분리하였다.

겉보기 아밀로오스 함량(apparent amylose content)

전분의 겉보기 아밀로오스 함량은 Williams 등(10)의 방법에 의해 구하였다. 전분 시료(10 mg)에 0.5 N KOH (1 mL) 용액을 첨가하여 호화시킨 후 0.5 N HCl로 중화하였다. 이 전분 용액 1 mL를 취하고 요오드 시약(0.2% I₂+2% KI) 0.5 mL를 첨가한 후 증류수로 25 mL까지 정용하였고 5분 방치 후 625 nm에서 흡광도를 측정하였다.

아밀로오스의 평균중합도(average degree of polymerization, DP_n)

쌀 전분의 아밀로오스는 Jane와 Chen (11)의 방법을 이용하여 분리하였다. 분리된 아밀로오스의 평균중합도(DP_n) 분석은 총 탄수화물과 환원당 함량으로부터 구하였다. 총 탄수화물 함량은 페놀-황산법(12)으로 환원당 함량은 변형된 Park-Johnson 법(13)으로 구하였다.

HPSEC-MALLS-RI를 이용한 아밀로오스와 아밀로펙틴 분자량 분석

Han과 Lim(14)의 방법을 이용하여 전분을 전 처리하였다. 전 처리한 전분 시료 12 mg을 0.1 N NaOH에서 분산시키고 0.1 N HCl로 중화하였다. 중화된 시료를 microwave bomb (#4872, Parr Instrument Co., Moline, IL, USA)에 넣고 microwave oven (RE-552W, Samsung, Seoul, Korea)에서 30초간 가열하였다. 가열한 시료를 membrane filter (pore size: 5 µm)를 이용하여 여과한 후 0.15 M NaNO₃와 0.02% NaN₃를 이동상으로 SEC column (TSK G5000 PW, 7.5 mm·600 mm; TosoBiosep, Montgomeryville, PA, USA)을 이용하여 분당 0.4 mL의 속도로 흘려 분리한 후 RI detector (Waters 2414)와 multi-angle laser light scattering (MALLS) detector (HELEOS, Wyatt Technology Co., Santa Barbara, CA, USA)로 분석하였다. 분리된 아밀로오스와 아밀로펙틴의 중량평균분자량(M_w)은 ASTRA 5.3 software (Wyatt Technology Co.)을 활용하여 얻어진 chromatogram으로부터 구하였다.

HPAEC-PAD를 이용한 아밀로펙틴의 가지 사슬 길이 분석

아밀로펙틴 분자의 가지 사슬 길이 분포도(branch chain length distribution)는 high performance anion exchange chromatography-pulsed amperometric detection (HPAEC-PAD) (Dionex ICS-5000, Dionex Co., Sunnyvale, CA, USA)을 이용하여 분석하였다. 전분 시료를 90% DMSO에 분산시키고 분산액의 3-5배 부피의 에탄올을 첨가하여 시료를 침전하였으며 침전된 시료는 다시 50 mM sodium acetate buffer (pH 3.5)에 분산시키고 debranching enzyme (isoamylase, EN102, 68,000 U/mg of protein, Hayashibara Biochemical Laboratories, Okayama, Japan)을 5 µL 첨가하여 20시간 이상 37°C에서 반응시켰다. 반응을 마친 시료는 0.45 µm의 nylon

filter를 이용하여 여과하고 HPAEC-PAD에 주입하고 분석하였다. 500 mM sodium acetate와 150 mM NaOH을 이동상으로 Dionex Carbpac PA100 칼럼을 사용하여 분당 1 mL의 속도로 분석하였다.

X-선 회절기를 이용한 결정 구조

쌀전분의 결정 구조는 X-선 회절기(X-ray diffractometer, D/Max-1200, Rigaku Co., Tokyo, Japan)를 이용하여 분석하였다. 기 분석 조건은 target: Cu-Kα, filter: Ni, scanning speed: 5.0°/min, voltage: 40 kV, current: 20 mA로 회절각도는 (2θ) 3-40°였으며 얻어진 X-선 회절곡선으로부터 상대결정성(relative crystallinity)을 계산하였다(15).

푸리에 변환 적외선분광기를 이용한 표면 결정 구조

전분 입자의 표면 결정성 분석을 위하여 푸리에 변환 적외선 분광기(Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR, Digilab USQ, Randolph, MA, USA)을 이용하였다. 얻어진 쌀 전분 시료의 FT-IR spectrum로부터 피크의 해상도를 높이기 위하여 deconvolution과 basel apodization을 사용한 후 1,047 cm⁻¹과 1,022 cm⁻¹의 피크 높이를 측정하였다. 전분의 FT-IR spectrum에서 1,047 cm⁻¹은 결정성을 나타내고 1,022 cm⁻¹을 무정형을 나타낸다고 보고되었다(16). 본 연구에서는 1,047 cm⁻¹/1,022 cm⁻¹의 비율을 전분 입자의 표면 결정 특성으로 분석하였다.

팽윤력

팽윤력(swelling factor)은 80°C에서 blue dextran exclusion법에 따라 측정하였다(17).

열적 특성

쌀 전분의 열적 특성은 시차주사열량계(differential scanning calorimeter, DSC 6100, Seiko Instruments Inc., Chiba, Japan)를 이용하여 분석하였다. 알루미늄 팬(14 µL)에 전분과 증류수의 비율이 1:2가 되도록 넣고 밀봉하여 5°C/min의 속도로 20°C에서 150°C까지 가열하면서 thermogram을 얻어 분석하였다.

페이스팅 점도 특성

전분의 페이스팅 점도 특성은 신속점도분석기(Rapid Viscosity analyzer, RVA-4D, Newport Scientific Ltd., Warriwood, Australia)를 이용하여 측정하였다. 7% (w/v) 전분 용액을 50°C에서 1분간 유지한 후 50-95°C까지 6°C/min의 속도로 가열하고 95°C에서 5분간 유지하고 95-50°C까지 6°C/min의 속도로 냉각한 후 50°C에서 2분간 유지하면서 점도를 측정하였다. 호화개시온도(pasting temperature), 최고점도(peak viscosity), 강하점도(breakdown), 치반점도(setback)와 최종점도(final viscosity)를 측정하였다.

In vitro 소화율

In vitro 전분 소화율은 Englyst 등(5)의 방법을 수정하여 분석하였다. 0.45 g의 porcine pancreatic α-amylase (P-7545, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 증류수 4 mL에 분산시키고 원심 분리(1,500×g, 12분)한 후 2.7 mL의 상층액을 분리하고 0.3 mL amyloglucosidase (A-9913, Sigma-Aldrich)와 0.2 mL의 invertase (I-4504, Sigma-Aldrich)를 첨가하여 혼합효소를 만들었다. 전분시료 100 mg에 4 mL의 sodium acetate buffer (pH 5.2)를 혼합한 후 미리 제조한 혼합효소 1 mL와 15개의 유리구슬(4 mm 지름)을 첨가하였고, 일정한 속도에서 교반(170 rpm)하면서 반응하였다. 일정한 시간(0-180분) 동안 반응시킨 시료(0.1 mL)를 취하여 80%

에탄올 용액 속에 혼합한 후 glucose 함량은 glucose oxidase and peroxidase assay kits (GAGO-20, Sigma-Aldrich)를 이용하여 분석하였다. 20분 내에 분해된 전분 함량을 RDS (rapidly digestible starch), 20분과 120분 사이에 분해된 전분 함량을 SDS (slowly digestible starch), 120분 동안 분해되지 않는 전분 함량을 RS (resistant starch)로 분석하였다.

In vitro 혈당지수(expected glycemic index, eGI)는 Granfeldt 등(18)의 방법에 의하여 구하였다. 쌀 전분 시료와 표준물질(white bread)의 소화율 곡선의 면적 비율로 hydrolysis index (HI)을 계산한 후 Granfeldt 등(18)의 계산식($eGI=8.198+0.862 \text{ HI}$)으로부터 eGI값을 구하였다.

통계 분석

모든 실험은 최소 2회 이상을 실시하여 평균과 표준편차로 나타냈고 통계 분석은 SPSS (v. 9.0, SPSS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 Duncan의 다중비교로 95% 신뢰수준에서 실시하였다.

결과 및 고찰

아밀로오스 함량

3가지 쌀 품종 내 전분의 아밀로오스 함량은 Table 1에 나타내었다. 새일미, 다산1호, 새고아미의 아밀로오스 함량은 각각 24.6, 21.2, 30.9%였다. 예상했던 대로 고아밀로오스 타입인 새고아미의 아밀로오스 함량이 가장 높게 나타났으며 다산1호가 가장 낮게 나타났다. 새고아미의 아밀로오스 함량은 기존 고아미의 아밀로오스 함량(26.7-29.4%)에 비해 다소 높았다(19,20). 전분의 아밀로오스 함량은 전분의 호화 및 노화 특성, 점도특성, 소화율 특성, 팽윤력 등에 영향을 미친다고 보고되었다(21).

Table 1. Amylose content in starch and average degree of polymerization (\overline{DP}_n) and molecular weight (\overline{M}_w) of amylose

Rice starch	Amylose content (%)	\overline{DP}_n	\overline{M}_w ($\times 10^7$ g/mol)
Seilmi	24.6 \pm 0.2 ^b	841 \pm 7 ^b	1.53 \pm 0.20 ^a
Dasan1	21.2 \pm 0.2 ^c	998 \pm 8 ^a	1.63 \pm 0.01 ^a
Segoami	30.9 \pm 0.2 ^a	769 \pm 10 ^c	1.12 \pm 0.06 ^b

Values followed by the different superscripts in the same column are significantly different ($p<0.05$).

분자 구조적 특성

쌀 전분에서 분리된 아밀로오스의 평균중합도(\overline{DP}_n)는 Table 1에 나타내었다. 다산1호가 998로 가장 높은 값을 보였으며 새고아미는 769로 낮은 값을 보였다. 이는 쌀 전분 내 아밀로오스의 평균중합도가 Takeda 등(22)이 보고한 1100, Chung 등(4)이 보고한 964와 유사한 결과를 나타내었다.

쌀 전분의 HPSEC-MALLS-RI에 의한 분자량분포 곡선은 Fig. 1A에 나타내었다. 20-30분 사이에 용출되는 큰 피크는 아밀로펙틴에 의한 것이며 30-50분 사이에 용출되는 피크는 아밀로오스에 의한 것이다. 아밀로펙틴에 의한 피크는 다산1호가 가장 먼저 용출되었고 그 다음으로 새일미, 새고아미가 따랐다. 아밀로오스에 의한 피크는 두 개의 피크로 분류가 되었다. 이는 쌀 전분 내 아밀로오스가 분자량의 다소 다른 두 그룹으로 나누어지기 때문으로 사료된다. 30-40분 사이에 용출되는 아밀로오스에 의한 피크는 새고아미가 가장 큰 면적을 차지하였으며 반대로 40-50분 사이에 용출되는 아밀로오스에 의한 피크는 새고아미가 가장 작은 면적을 차지하였다(Fig. 1A). Fig. 1A에 의하여 계산된 아밀로오스와 아밀로펙틴의 중량 평균분자량(\overline{M}_w)은 Table 1과 2에 각각 나타내었다. 먼저 용출되는 아밀로펙틴의 평균분자량은 새고아미

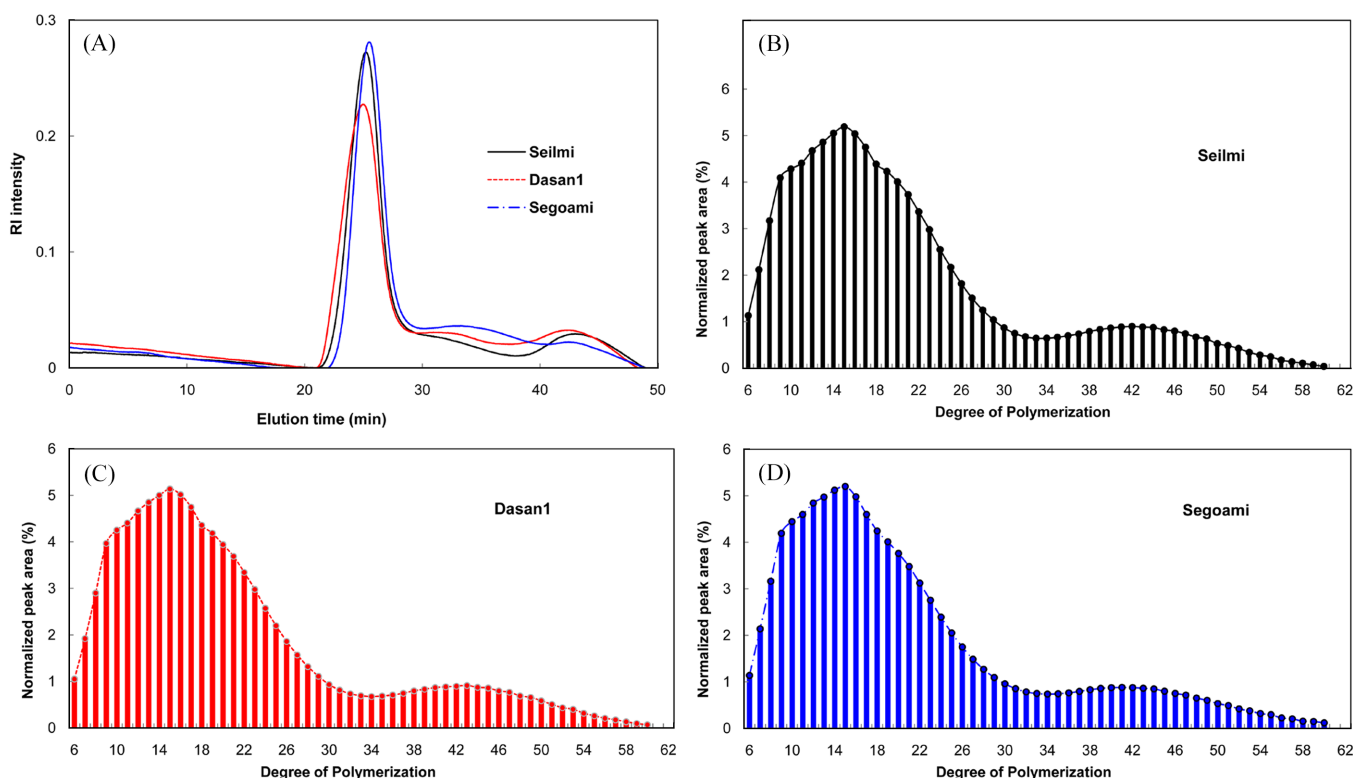


Fig. 1. HPSEC-RI (A) and HPAEC-PAD (B, C and D) chromatographs of rice starches.

Table 2. Molecular weight (\bar{M}_w) and branch chain length distribution of amylopectin

Rice starch	Molecular weight ($\times 10^8$ g/mol)	Average chain length	Distribution (%)			
			DP 6-12	DP 13-24	DP 25-36	DP ≥ 37
Seilmi	1.76 \pm 0.05 ^a	20.9 \pm 0.0 ^a	23.8 \pm 0.1 ^{ab}	50.3 \pm 0.2 ^a	12.8 \pm 0.0 ^b	13.1 \pm 0.2 ^a
Dasan1	1.81 \pm 0.06 ^a	21.4 \pm 0.3 ^a	22.8 \pm 0.6 ^b	49.7 \pm 0.1 ^a	13.3 \pm 0.0 ^a	14.2 \pm 0.6 ^a
Segoami	1.53 \pm 0.10 ^b	21.2 \pm 0.2 ^a	24.3 \pm 0.2 ^a	48.5 \pm 0.2 ^b	13.4 \pm 0.2 ^a	13.8 \pm 0.2 ^a

DP, degree of polymerization

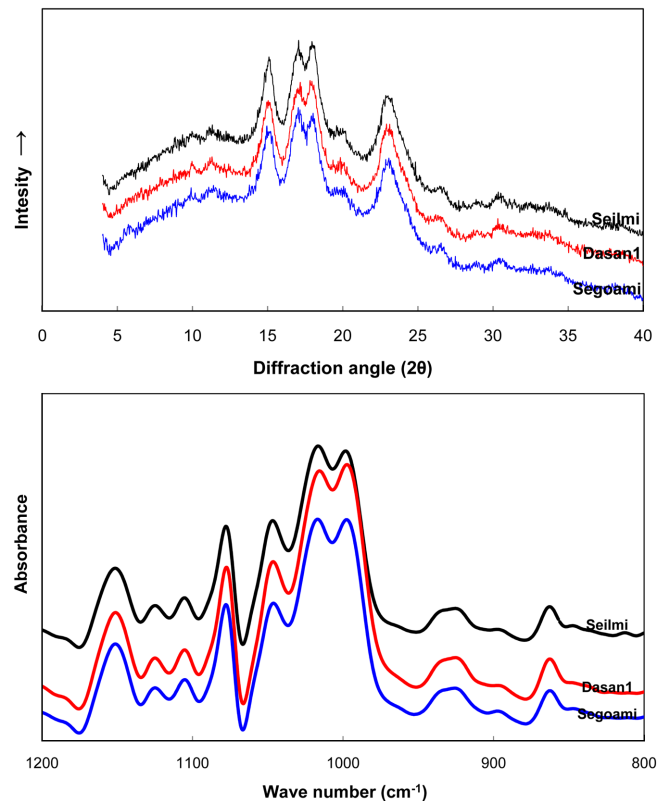
Values followed by the different superscripts in the same column are significantly different ($p < 0.05$).

가 다른 두 품종에 비해 유의적으로 낮은 값을 보였다(Table 2). 뒤에 용출되는 아밀로오스의 평균분자량 역시 새고아미가 다른 두 품종의 아밀로오스에 비해 낮은 분자량을 나타냈다. 아밀로오스 함량을 높여 개발된 특수미의 한 형태인 새고아미는 다른 두 쌀 품종보다 아밀로오스 함량은 높을지라도 중량 평균분자량은 아밀로펙틴과 아밀로오스 모두 일반 쌀 품종에 비해 낮은 것으로 나타났다. Park 등(8)은 전분 분자량은 DSC에 의한 열적 특성과 RVA에 의한 호화 특성 지표들과 높은 상관성을 나타낸다고 보고하였으며 Tsakama 등(23)은 분자량은 소화율 지표인 RS와 높은 상관성을 나타낸다고 보고하였다. 결과적으로 3가지 쌀 품종의 분자량 차이는 그들의 이화학적 특성 및 소화 특성에 영향을 줄 것으로 생각된다.

쌀 전분의 아밀로펙틴 분자 가지사슬 길이 분포도는 HPAEC-PAD을 이용하여 분석하고 크로마토그램을 Fig. 1의 B, C, D에 나타내었다. 모든 쌀 전분의 크로마토그램에서 중합도(DP)에 따라 두 개의 그룹(DP 6-33, DP 34-60)으로 나눌 수 있었다. 3가지 품종에서 공통으로 첫 번째 피크에서 특정 DP를 가진 사슬의 양(DP 18-23)의 차이에 의해 shoulder를 나타내는데 새일미와 다산 1호는 새고아미에 비해 shoulder가 더 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 새고아미가 두 품종의 일반 쌀에 비해 다소 다른 아밀로펙틴 가지사슬 구조를 가진다는 것을 확인할 수 있었다. Hanashiro 등(24)에 따라 아밀로펙틴의 가지사슬 길이에 따라 A (DP 6-12), B1 (DP 13-24), B2 (DP 25-36), B3+ (DP ≥ 37) 사슬로 나눌 수 있다고 보고하였는데 그 보고에 근거하여 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 새고아미의 A사슬 함량은 다른 두 품종에 비해 다소 높았으며 B1사슬은 가장 낮은 함량을 보였다. 새일미의 B2사슬 함량은 다른 두 품종보다 낮았으며 긴 사슬인 B3+함량은 세 품종 간에 유의적인 차이가 없었다. 결과적으로 3가지 쌀 품종 내 아밀로펙틴의 가지사슬 구조가 다름을 확인할 수 있었다.

결정 구조적 특성

X선 회절도를 이용하여 쌀 전분의 결정 형태와 상대적 결정성을 구하고 비교하였다. 3가지 쌀 전분은 회절각이 17-18°에서 분리되지 않은 두 개의 피크와 15, 20°에서의 각각의 피크를 보이는 A형의 회절 양상을 보였다(Fig. 2A). 3가지 시료의 회절 양상은 비슷하였으나 상대적 결정성은 차이를 보였다(Table 3). 상대적 결정성은 새고아미에서 32.4%로 가장 높았고 다산1호(33.1%)와 새일미(33.7%)는 비슷한 결과를 보였다. 일반적으로 아밀로펙틴의 가지사슬 부분이 결정성에 기인하는 것으로 알려져 있으며 반대로 아밀로오스는 아밀로펙틴의 결정 구조를 약화시키는 것으로 보고되고 있다(25). 결과적으로 새고아미는 아밀로오스 함량이 높기에 상대적 결정성이 낮은 것으로 사료된다. 또한 아밀로펙틴의 짧은 사슬인 DP 10-13의 함량이 높을수록 낮은 결정성을 나타낸다고 보고되었다(25). 새고아미는 아밀로펙틴의 짧은 사

**Fig. 2.** XRD diffractograms (A) and FT-IR spectra (B) of rice starches.

슬인 DP 6-12가 비교적 높은 함량을 나타냈기 때문에 낮은 상대적 결정성의 또 하나의 원인이 된 것으로 생각된다.

결정 구조적 특징 분석을 위하여 deconvolution된 FT-IR spectrum을 이용하였으며 쌀 전분의 FT-IR spectrum은 Fig. 2B에 나타내었다. 쌀 전분들 간의 FT-IR spectrum은 큰 차이를 보이지는 않았다. FT-IR spectrum에서 1047 cm^{-1} 은 전분 입자의 표면 근처의 결정성 영역과 1022 cm^{-1} 은 무정형 영역의 변화에 민감한 것으로 알려져 있으며 두 피크의 비율(1047/1022)은 전분 내의 무정형 영역에 대한 결정성 영역의 양을 나타내는 지표로 사용된다(16). 새고아미 전분의 1047/1022는 0.622로 다른 두 품종에 비해 유의적으로 낮은 결과를 나타내었다(Table 3). 이는 X-ray에 의한 상대적 결정성과 비슷한 경향성을 보였다.

결과적으로 결정 구조적 특징은 새고아미는 다른 두 쌀 품종 내 전분에 비해 높은 아밀로오스 함량과 아밀로펙틴의 짧은 사슬(A chain)이 많기에 X-ray에 의한 상대적 결정성과 FT-IR에 의한 표면 결정성의 양이 낮은 것으로 생각된다.

Table 3. Relative crystallinity, intensity ratio of 1047 cm⁻¹ to 1022 cm⁻¹ (1047/1022), and swelling factor(80 °C) of rice starches

Rice starch	Relative crystallinity (%)	1047/1022	Swelling factor
Seilmi	33.7±0.1 ^a	0.660±0.001 ^a	14.8±0.1 ^a
Dasan1	33.1±0.1 ^a	0.659±0.000 ^a	13.9±0.0 ^b
Segoami	32.4±0.3 ^b	0.622±0.008 ^b	11.4±0.3 ^c

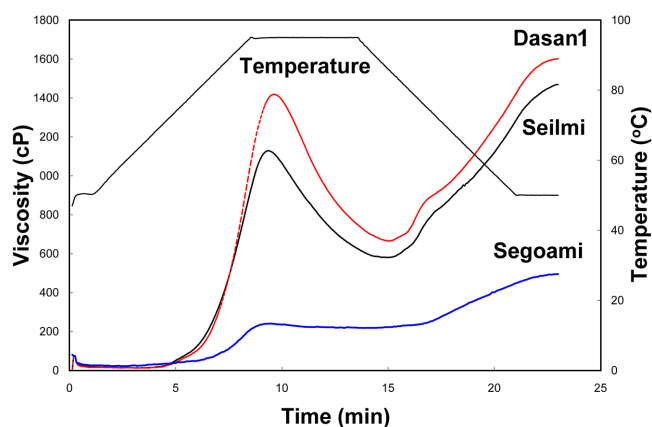
Values followed by the different superscripts in the same column are significantly different ($p<0.05$).

팽윤력

80°C에서 측정된 쌀 전분의 팽윤력(swelling factor)을 Table 3에 나타내었다. 새일미가 14.8로 가장 높았으며 새고아미가 11.4로 가장 낮은 값을 나타내었다. 팽윤력은 아밀로펙틴과 주로 연관이 되어 있으며 아밀로오스는 팽윤을 억제한다고 보고되고 있다(17). 결과적으로 새고아미의 높은 아밀로오스 함량은 팽윤력을 가장 낮게 하는 원인이 된 것으로 생각된다.

열적 특성

쌀 전분의 호화와 연관된 열적 특성을 DSC로 분석한 결과를 Table 4에 나타내었다. 새고아미의 호화 개시온도(onset temperature, T_o), 최고온도(peak temperature, T_p), 종결온도(conclusion temperature, T_c)가 다른 두 쌀 전분에 비해 유의적으로 낮은 결과를 보였으며 다산1호의 T_p 가 가장 높았다. DSC에 의한 호화 온도는 아밀로펙틴의 분자 구조에 의해 영향을 받는 것으로 보고되고 있다(26). 중합도(DP)가 10이하인 아밀로펙틴의 가지사슬은 전분 결정성 내 이중나선 구조의 안정성을 감소시키기에 호화 온도를 낮추는 것으로 알려져 있으며 아밀로펙틴의 A 사슬(DP 6-12)의 함량과 호화 온도는 음의 상관성을 가지는 것으로 보고되고 있다(26). 본 연구에서 새고아미는 아밀로펙틴의 DP 6-12 함량이 가장 높았기에 이중나선 구조의 안정성이 감소하여 호화 온도가 낮았을 것으로 생각되며 아밀로펙틴의 분자량도 다른 두 전분에 비해 가장 낮았기에 결정 구조의 강도가 낮을 것으로 사료된다. 다산1호는 새일미에 비해 아밀로펙틴의 분자 구조가 유의적으로 차이를 보이지는 않지만 평균사슬 길이와 분자량이 다소 높으며 짧은 사슬 길이(DP 6-12)의 함량도 다소 낮고 긴 사슬 길이(DP≥37)의 함량도 높기에 가장 높은 T_p 를 가진 것으로 생각된다. 호화 온도 범위(T_c-T_o)는 새고아미가 다른 두 전분에 비해 높은 값을

**Fig. 3. RVA viscomograms of rice starches.**

나타냈는데 호화 온도 범위는 전분 결정의 불균일성을 나타내는 지표로 아밀로오스 함량이 높은 새고아미에서 불균일성이 높은 결정 구조를 형성하였기 때문으로 생각된다.

쌀 전분의 호화 엔탈피(ΔH)는 13.8-14.7 J/g의 범위에 있으며 새고아미가 다른 두 전분에 비해 낮은 값을 나타내었다. 호화 엔탈피는 전분의 결정성 내에 존재하는 이중나선 구조가 붕괴되는 데 필요한 에너지로 결정성의 양과 관련이 있다. 아밀로펙틴이 높은 전분이 많은 결정성을 가지는 것(25)으로 알려져 있기에 새고아미의 높은 아밀로오스 함량은 직접적으로 낮은 호화 엔탈피의 원인이 된 것으로 생각된다.

페이스팅 점도 특성

쌀 전분의 페이스팅 점도 특성은 RVA를 이용하여 분석하였고 viscomogram은 Fig. 3에 viscomogram으로 부터 분석한 페이스트점도 지표들은 Table 5에 나타내었다. 새고아미는 다른 두 품종에 비해 현저히 낮은 페이스트점도 특성을 보였으며(Fig. 3) 최고 점도(peak viscosity)는 247 cP로 다른 두 전분에 비해 가장 낮게 나타났다. 앞서 언급하였듯이 전분의 팽윤은 아밀로펙틴에 의한 것이며 아밀로오스는 팽윤을 억제한다. 따라서 높은 아밀로오스 함량을 가지는 새고아미는 팽윤이 다른 두 전분에 비해 팽윤이 억제되기에 낮은 최고 점도를 나타내었다. 다산1호는 최고 점도가 1415 cP로 새일미(1129 cP)보다 높게 나타났다. 이는 다산1호의

Table 4. Thermal properties of rice starches

Rice starch	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	T_c-T_o (°C)	ΔH (J/g)
Seilmi	59.5±0.0 ^a	65.1±0.0 ^b	73.3±0.1 ^a	13.8±0.1 ^b	14.7±0.1 ^a
Dasan1	59.5±0.7 ^a	66.0±0.0 ^a	73.0±0.1 ^a	13.5±0.3 ^b	14.4±0.1 ^a
Segoami	54.1±0.1 ^b	61.5±0.1 ^c	68.7±0.4 ^b	14.6±0.3 ^a	13.8±0.2 ^b

T_o , onset temperature; T_p , peak temperature; T_c , conclusion temperature; ΔH , gelatinization enthalpy. Values followed by the different superscripts in the same column are significantly different ($p<0.05$).

Table 5. Pasting properties of rice starches

Rice starch	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Setback (cP)	Final viscosity (cP)
Seilmi	77.3±0.1 ^c	1129±1 ^b	538±15 ^b	874±20 ^b	1465±6 ^b
Dasan1	77.8±0.1 ^b	1415±6 ^a	739±22 ^a	929±10 ^a	1606±6 ^a
Segoami	84.3±0.0 ^a	247±8 ^c	23±0 ^c	285±11 ^c	508±18 ^c

Values followed by the different superscripts in the same column are significantly different ($p<0.05$).

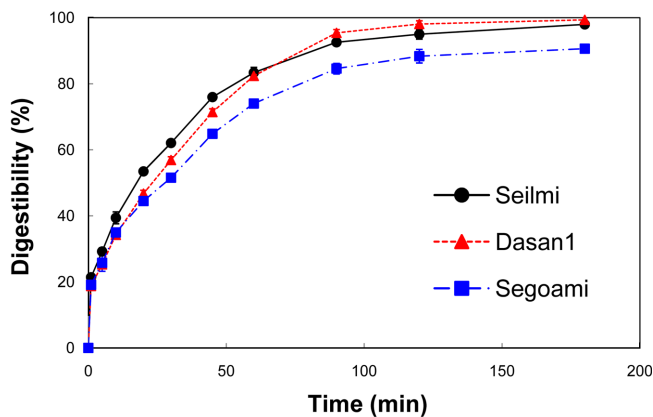


Fig. 4. *In vitro* digestion curves of rice starches.

Table 6. The amount of starch nutritional fractions (RDS, SDS and RS) and expected glycemic index (eGI) of rice starches

Rice starch	Starch nutritional fractions			eGI
	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)	
Seilmi	53.4±0.4 ^a	41.3±0.6 ^c	5.3±0.2 ^b	84.3±0.0 ^a
Dasan1	47.1±0.1 ^b	50.8±0.4 ^a	2.1±0.3 ^c	84.6±0.1 ^a
Segoami	44.5±0.3 ^c	43.9±0.8 ^b	11.6±1.1 ^a	77.4±0.4 ^b

RDS, rapidly digestible starch; SDS, slowly digestible starch; RS, resistant starch; eGI, expected glycemic index
Values followed by the different superscripts in the same column are significantly different ($P<0.05$).

아밀로오스 함량이 새일미에 비해 낮기에 팽윤이 더 잘 일어났기 때문이다.

페이스팅 온도(pasting temperature)는 77.3-84.3°C의 범위를 나타냈으며 새고아미가 다른 두 전분에 비해 가장 높은 값을 보였다. 페이스팅 온도는 팽윤이 시작하는 온도로 아밀로오스 함량이 높을수록 팽윤을 억제하기에 페이스팅 온도가 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 새고아미의 높은 아밀로오스 함량은 높은 호화 개시온도의 원인이 된 것으로 사료된다. 다산1호가 새일미에 비해 아밀로오스 함량이 낮으나 페이스팅 온도가 다소 높은 것은 새일미에 비해 아밀로오스의 평균중합도와 분자량이 높았으며 아밀로펙틴의 분자량과 평균 가지사슬 길이가 컸기 때문으로 사료된다. 강하점도(breakdown), 치반점도(setback) 그리고 최종점도(final viscosity)도 다산1호>새일미>새고아미의 순서로 나타났다. 위의 순서는 쌀 전분의 아밀로오스 함량이나 아밀로펙틴의 분자 구조에 의해 영향을 받은 것으로 생각된다.

In vitro 소화율

쌀 전분의 *in vitro* 소화곡선은 Fig. 4에 나타냈으며 그로부터 계산된 RDS, SDS 그리고 RS 함량은 Table 6에 정리하였다. 새고아미는 3시간의 동안 다른 두 쌀 전분에 비해 가장 낮은 소화율을 나타냈으며 소화 초기에는 새일미가 다산1호에 비해 높은 소화율을 보였으나 60분 이후에는 오히려 다산1호가 새일미에 비해 높은 소화율을 나타냈다.

소화곡선에 의한 RDS 함량은 새일미>다산1호>새고아미 순이었으며 SDS는 다산1호가 가장 높은 함량을 RS는 새고아미가 11.6%로 가장 높았으며 다산1호가 2.1%로 가장 낮았다. 전분의 소화율은 아밀로오스 함량, 결정성의 특징, 아밀로오스와 아밀로펙틴의 분자 구조적 특징에 영향을 받는다(4). 새고아미는 아밀

로오스 함량이 높아 RS 함량이 높고 RDS 함량이 낮은 것으로 사료된다. 고아미 품종은 아밀로오스 함량을 높여 소화되지 않은 탄수화물 함량이 높기에 혈당 감소에 도움이 된다는 기존 보고와 일치하는 결과를 보였다. 다산1호가 새일미에 비해 낮은 RDS와 높은 SDS 함량을 보이는 이유는 아밀로오스 함량은 낮은 지라도 아밀로오스의 평균중합도가 높으며 유의적인 차이는 없을 지라도 비교적 높은 아밀로오스와 아밀로펙틴의 분자량, 아밀로펙틴의 평균사슬 길이 때문으로 생각된다. 다산1호의 낮은 RS 함량은 아밀로오스 함량, 상대적 결정성, 호화 엔탈피가 낮기 때문으로 사료된다.

전분의 소화율곡선과 표준물질(식빵)에 근거하여 계산된 *in vitro* eGI (expected glycemic index, eGI)는 77.4-84.6을 나타내었다. 예상했던 대로 혈당 감소에 도움이 된다고 보고되어지는 고아미로오스 품종인 새고아미가 가장 낮은 결과를 보여주었으며 새일미와 다산은 비슷한 결과 값을 나타내었다.

요 약

국내에서 육종된 아밀로오스 함량이 다른 3가지 쌀 품종의 전분 특성을 살펴봄으로써 새로운 식품 소재의 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 전분의 분자 및 결정 구조적 특성과 소화 특성을 조사하였다. 새고아미 전분은 다산1호나 새일미에 비해 아밀로오스 함량, 아밀로펙틴의 짧은 사슬(DP 6-12) 함량, 페이스팅 온도, RS 함량이 유의적으로 높았으며 반대로 아밀로오스의 중합도, 아밀로오스와 아밀로펙틴의 분자량, 아밀로펙틴의 B1사슬(DP 13-24), 상대적 결정성, 입자표면 결정성(1047/1022), 팽윤력, 호화 온도(T_o , T_p , T_c), 호화 엔탈피, 페이스팅 점도(최고점도, 최종점도, 강하점도, 치반점도), RDS 함량, eGI값이 유의적으로 낮았다. 다산1호는 새일미에 비해 낮은 RDS 함량과 높은 SDS 함량을 보였다. 두 쌀 전분의 소화율의 차이는 분자 구조적 특성(아밀로오스 함량, 아밀로오스 중합도, 분자량, 아밀로펙틴 분자의 가지사슬 길이 분포)과 결정 구조적 특성(상대적 결정성, 1047/1022, 호화 온도와 엔탈피)의 차이에 근거하였다. 결과적으로 3가지 국내산 쌀 품종들의 전분 분자 및 결정 구조적 특성과 소화를 결과는 다양한 유형의 쌀을 이용한 가공제품 개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 공동연구사업(과제번호-PJ009779)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Lee NY. Starch and quality characteristics of Korean rice cultivar with waxy and non-waxy type. Korean J. Crop Sci. 58: 226-231 (2013)
- Kum JS. Nutrition of rice and rice processing food. Food Preserv. Process. 9: 38-54 (2010)
- Noda T, Tsuda S, Mori M, Takigawa S, Matsuura-Endo C, Saito K, Mangalika WHA, Hanaoka A, Suzuki Y, Yamauchi H. The effect harvest dates on the starch properties of various potato cultivars. Food Chem. 68: 119-125 (2004)
- Chung HJ, Liu Q, Lee L, Wei D. Relationship between the structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of rice starches with different amylose contents. Food Hydrocolloid 25: 968-975 (2011).
- Englyst HN, Kingman SM, Cummings JH. Classification and

- measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46: S33-S50 (1992)
6. Sajilata M, Singhal RS, Kulkarni RP. Resistant starch-a review. *Compr. Rev. Food Sci.* 5: 1-17 (2006)
 7. Nakamura J, Hamada Y, Sakakibara F, Hara T, Wakao T, Mori K, Nakashima E, Naruse K, Kamijo M, Koh N, Hotta N. Physiological and morphometric analyses of neuropathy in sucrose-fed OLETF rats. *Diabetes Res. Clin. Pr.* 51: 9-20 (2001)
 8. Park IM, Ibanez AM, Zhong F, Shoemaker CF. Gelatinization and pasting properties of waxy and non-waxy rice starches. *Starch* 59: 388-396 (2007)
 9. Lim ST, Lee JH, Shin DH, Lim HS. Comparison of protein extraction solutions for rice starch isolation and effects of residual protein content on starch pasting properties. *Starch* 51: 120-125 (1999)
 10. Williams PC, Kuzina FD, Hlynka I. A rapid colorimetric procedure for estimating the amylose content of starches and flours. *Cereal Chem.* 47: 411-420 (1970)
 11. Jane JL, Chen JF. Effect of amylose molecular size and amylopectin branch chain length on paste properties of starch. *Cereal Chem.* 69: 60-65 (1992)
 12. Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28: 350 - 356 (1956)
 13. Hizukuri S. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. *Carbohydr. Res.* 147: 342-347 (1986)
 14. Han JA, Lim ST. Structural changes of corn starches by heating and stirring in DMSO measured by SEC-MALLS-RI system. *Carbohydr. Polym.* 55: 265-272 (2004)
 15. Nara S, Komiya TT. Studies on the relationship between water-saturated state and crystallinity by the diffraction method for moistened potato starch. *Starch* 35: 407-410 (1983)
 16. Van Soest JGG, Tournois H, de Wit D, Vliegenthart JFG. Short-range structure in partially crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. *Carbohydr. Res.* 279: 201-214 (1995)
 17. Tester RF, Morrison WR. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chem.* 67: 551-557 (1990)
 18. Granfeldt Y, Bjorck I, Drews A, Tovar J. An *in vitro* procedure based on chewing to predict metabolic responses to starch in cereal and legume products. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46: 649-660 (1992)
 19. Choi SY, Shin M. Properties of rice flours prepared from domestic high amylose rices. *Korean J. Food Sci. Technol.* 41: 16-20 (2009)
 20. Kim JS, Kim SB, Kim TY. Noodle making characteristics of goami rice composite flours. *Korean J. Community Living Sci.* 17: 61-68 (2006)
 21. Lindeboom N, Chang PR, Tyler RT. Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granules starches: a review. *Starch* 56: 89-99 (2004)
 22. Takeda Y, Hizukuri S, Juliano B. Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydr. Res.* 168: 79-88 (1987)
 23. Tsakama M, Mwangwela AM, Manani TA, Mahungu NM. Physicochemical and pasting properties of starch extracted from eleven sweet potato varieties. *Afr. J. Food Sci. Technol.* 1: 90-98 (2010)
 24. Hanashiro I, Abe J, Hizukuri S. A periodic distribution of the chain length of amylopectin as revealed by high-performance anion-exchange chromatography. *Carbohydr. Res.* 283: 151-159 (1996)
 25. Cheetham NWH, Tao L. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X-ray powder diffraction study. *Carbohydr. Polym.* 36: 277-284 (1998)
 26. Gidley MJ, Bulpin PV. Crystallization of malto-oligosaccharides as models of the crystalline forms of starch: minimum chain-length requirement for the formation of double helices. *Carbohydr. Polym.* 13: 291-300 (1987)
 27. Noda T, Nishiba Y, Sato T, Suda I. Properties of starches from several low-amylose rice cultivars. *Cereal Chem.* 80: 193-197 (2003)