

국내 육종 고구마 전분의 이화학 호화 및 소화 특성

백혜림 · 김하람 · 김경미¹ · 김진숙¹ · 한귀정¹ · **문태화***
서울대학교 농생명공학부, ¹농촌진흥청 국립농업과학원 농식품자원부

Characterization of Korean Sweet Potato Starches: Physicochemical, Pasting, and Digestion Properties

Hye Rim Baek, Ha Ram Kim, Kyung Mi Kim, Jin Sook Kim, Gui Jung Han, and **Tae Wha Moon***

Department of Agricultural Biotechnology & **Center for Food and Bioconvergence,**
Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

¹Department of Agro-food Resources, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

Abstract Physicochemical, pasting, and digestion properties of sweet potato starches from 11 Korean cultivars were investigated. Starch granules were variably oval, round, polygonal, spherical, and bell-shaped, and of 10.2-15.3 μm in mean particle diameter. Amylose contents varied from 12.3 to 17.4%. A similar chain length distribution of amylopectin was found in each of the cultivars. The portion of B₃ correlated with the degree of amylose leaching. Thermal properties determined by differential scanning calorimetry showed high values of gelatinization temperatures in Shinyulmi and Jeungmi starches, but a relatively low value in Daeyumi starch. All starches exhibited a Ca-type diffraction pattern. Differing patterns were observed in swelling factors, depending on temperature. The contents of rapidly digestible starch, slowly digestible starch, and resistant starch ranged from 9.6-17.4, 31.4-45.6, and 35.7-62.8%, respectively. In Rapid Visco Analyser profiles, differences were observed in pasting parameters such as pasting temperature, peak viscosity, final viscosity, and breakdown.

Keywords: sweet potato starch, digestibility, slowly digestible starch, resistant starch, pasting properties

서 론

고구마(*Ipomoea batatas* L.)는 매년 전 세계적으로 1억 3천만 톤 이상 생산되며 밀, 쌀, 옥수수, 감자, 보리, 카사바에 이은 주요 식량 작물이다(1). 최근 고구마는 주식에서 건강식으로 그 역할이 급격하게 변하고 있다. 고구마는 분말, 스낵, 젤리, 음료, 전분, 에탄올, 천연 색소 등으로 다양한 분야에서 이용되며(2), 고구마로부터 얻은 전분은 빵, 케이크, 국수, 당과류 등의 원료로 사용된다. 국내 고구마의 육종은 주로 농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물센터에서 이루어져 왔으며, 유색 고구마 품종과 전분 수율이 높은 신품종들이 최근 개발되었다.

현재 우리나라에서는 주황색, 자색을 띠는 유색 고구마가 일반 고구마에 비해 특이한 외관 및 향미로 인기를 얻고 있다. 주황색 고구마의 경우, 베타카로틴 함량과 관련된 영양적 측면은 알려져 있으나(3), 그 전분의 이화학적 특성은 거의 보고되어 있지 않은 실정이다.

영양학적으로 전분은 소화되는 속도에 따라 RDS (rapidly digest-

ible starch), SDS (slowly digestible starch), RS (resistant starch)의 3가지로 분류된다(4). RDS는 당뇨병, 심혈관 질환 및 비만에 영향을 미치는 것으로 알려진 당지수(glycemic index)와 관련되어 있다(5). SDS는 매우 느리지만 완전히 소화되는 전분의 부분으로, 포만감을 오래 지속시켜주기 때문에 체중 조절을 위한 식단에 유용하며, 당뇨병에도 도움이 된다. SDS는 인체에 글루코스를 더 오래 안정적으로 공급해주는 역할을 한다(6). 인체 생리적으로 RS는식이섬유와 마찬가지로 장내 미생물에 의해 발효되어 butyrate를 생성함으로써 대장 환경에 유익한 영향을 미친다. 또한 Sajilata 등(7)에 의하면 RS는 대장암을 예방하고 혈당 및 콜레스테롤 수치를 낮추는 효과를 가지고 있으며, 지방질의 축적을 저해하고 무기질의 흡수를 증가시킨다.

전분은 식물체의 저장 다당류로 부분적으로 결정성을 띠는 입자로 존재하며 아밀로스와 아밀로펙틴의 2종류의 거대분자로 구성되어 있다. 전분의 이화학적, 구조적 특성은 작물 종 및 생육 환경에 따라 다를 수 있는데(8), 이 연구에 사용된 11종의 고구마는 동일한 지역에서 재배되었기 때문에 이들 간 이화학 및 소화 특성의 차이는 이들의 유전적인 차이에 의해 나타나는 것이라고 볼 수 있다. 최근 개발된 국내산 고구마에 대해서는 품종에 따른 전분 또는 분말의 이화학 성질에 대한 상세한 연구가 드물며(9,10) 전분의 소화성과 구조 특성 간의 관계 또한 충분히 구명되어 있지 않다. 따라서 이 연구에서는 국내에서 육종된 11가지 고구마 전분의 이화학, 호화 및 소화 특성을 밝히고 이들 간의 상호 연관성을 분석하여 새로운 식품 소재로서의 사용 가능성을 알아보고자 하였다.

*Corresponding author: Tae Wha Moon, Department of Agricultural Biotechnology & Center for Food and Bioconvergence, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Tel: 82-2-880-4854

Fax: 82-2-873-5095

E-mail: twmoon@snu.ac.kr

Received December 27, 2013; revised January 2, 2014;

accepted January 2, 2014

재료 및 방법

재료

고구마는 농촌진흥청 국립식량과학원에서 육종한 건미, 건풍미, 대유미, 맛나미, 보라미, 신율미, 전미, 증미, 하얀미, 해피미, 헬씨미 등 11개 품종을 전라남도 무안군에서 2011년에 재배한 것을 사용하였다.

전분 분리

고구마를 세척하고 껍질을 벗긴 후 0.2 mm 두께로 잘랐다. 이를 증류수에 담가 분쇄한 후, 100 mesh 체에 통과시켰다. 이렇게 얻은 현탁액에서 상층액을 버리고 전분을 증류수에 침지시키는 과정을 여러 차례 반복한 뒤, 6,000×g 에서 15분간 원심 분리하여 가라앉은 전분 층만을 40°C 오븐에서 24시간 건조한 후 100 mesh 체를 통과시켜 전분 시료를 제조하였다.

고구마 전분의 입자 형태 및 크기 분포

고구마 전분의 입자 형태는 광학현미경(CSB-HP3 light microscope, Samwon Scientific Ind. Co., Ltd., Seoul, Korea)으로 관찰하였다. 전분 입자의 크기는 입도분석기(Accusizer™ 780 particle sizing & counting analyzer, Port Richey, FL, USA)를 이용하여 분석하였다.

아밀로스 함량

고구마 전분의 절대 아밀로스 함량은 amylose/amylopectin assay kit (Megazyme International Ireland Ltd., Bray, Ireland)로 측정하였다.

가지 사슬 길이 분포

전분 15 mg을 90% dimethyl sulfoxide (DMSO) 3 mL에 분산시켜 15분간 끓인 다음, 에탄올 15 mL를 첨가하여 전분을 침전시켰다. 이어서 10,000×g로 10분간 원심 분리하는 과정을 2번 반복한 후 sodium acetate 완충용액(50 mM, pH 4.3)과 isoamylase (1,000 U/mL, Megazyme International Ireland Ltd.) 30 µL를 첨가하였다. 이 혼합물을 항온수조(BS-21, Jeio Tech. Co., Ltd., Daejeon, Korea)에서 50 rpm으로 45°C에서 2시간 동안 반응시켜 가지 결함을 제거하였으며, 10분간 끓여 효소 반응을 정지시켰다.

이를 0.45 µm membrane filter를 통과시켜 Carbo-pack PA1 음이온 교환 컬럼(250×4 mm; Dionex, Sunnyvale, CA, USA)과 pulsed amperometric detector(Dionex)가 연결되어 있는 고성능 액체 크로마토그래프로서 분석하였다. 컬럼을 150 mM의 NaOH로 평형시킨 뒤, 150 mM NaOH에 대한 600 mM sodium acetate의 농도를 시간대별로 증가시켜 1 mL/min의 속도로 흘려 보내며 시료를 분석하였다(농도 기울기 조건 0-5분, 0-20%; 6-30분, 20-45%; 31-60분, 46-55%; 61-80분, 56-60%; 81-90분, 61-65%; 91-95분, 66-80%; 96-100분, 81-100%). 1에서 7까지의 중합도(DP, degree of polymerization)는 말도올리고당 혼합물(DP 1-7, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)을 외부 표준물질로 사용하여 구하였다.

아밀로펙틴의 분자량 분포

고구마 전분 내 아밀로펙틴의 분자량은 HPSEC-MALLS-RI (high performance size exclusion chromatography-multiangle laser-light scattering-refractive index detector system)를 이용하여 분석하였다. 전분 25 mg을 90% DMSO (5 mL)에 분산시켜 15분간 끓인 다음, 에탄올 25 mL를 첨가하고 10,000×g로 10분간 원

심 분리하였다. 침전물을 30 mL 에탄올에 다시 분산시킨 후 원심 분리하여(10,000×g, 10분) 세척하는 과정을 3번 반복하였다. 그 후 냉풍을 이용하여 완전히 건조하였다. 그리고 0.02% NaN₃를 함유한 100 mM NaNO₃ 5 mL를 침전물에 가하고 15분간 끓인 후 15분간 autoclave시키고 5.0 µm 필터(Millipore, Millipore Co., Billerica, MA, USA)를 통과시켰다. 아밀로펙틴과 아밀로스를 분리하기 위하여 multi-angle laser-light scattering detector (Dawn DSP, Wyatt Technology, Santa Barbara, CA, USA)와 differential refractive index detector (Opti-Lab, Wyatt Technology)가 연결되어 있는 고성능 크기 배제 크로마토그래프(model PU-2080 Plus, Jasco, Tokyo, Japan), 200 µL injector loop, degasser (NO-OX Vacuum Station, Alltech, Deerfield, IL, USA), Shodex OH-Pak 804 컬럼, 806 컬럼(Showa Denko, Tokyo, Japan)에 주입하였다. 이동상으로는 0.02% NaN₃가 포함된 100 mM NaNO₃ 용액을 사용하였으며, 0.22 µm 필터(Millipore)를 통과시킨 후 0.4 mL/min의 유속으로 흘려 보냈다. 수집된 자료는 ASTRA software (Version 4.09.07., Wyatt Technology)를 이용하여 분석하였다.

X선 회절도 및 상대적 결정화도

X선 회절은 X-ray diffractometer (Model New D8 advance, Bruker, Karlsruhe, Germany)를 사용하여 분석하였다. Target: Cu-Kα, voltage: 40 kV, current: 40 mA의 조건으로 회절각도(2θ) 3-30° 범위에서 측정하였다.

고구마 전분의 열 특성

고구마 전분의 열 특성은 시차주사열량계(Diamond DSC, Perkin-Elmer Inc., Waltham, MA, USA)로 측정하였다. 전분 10 mg과 증류수 40 µL를 알루미늄 팬에 넣어 밀봉하고 12시간 동안 상온에서 안정화시켰다. 30°C에서 130°C까지 5°C/min의 속도로 온도를 증가시켜 가열하였으며 이때 얻은 흡열 곡선으로부터 호화 개시 온도(T_o: onset temperature), 피크온도(T_p: maximum peak temperature), 종결온도(T_c: completion temperature)와 호화 엔탈피(ΔH: crystal melting enthalpy)를 구하였다.

고구마 전분의 팽윤력

전분의 팽윤력은 Tester와 Morrison(11)의 방법을 이용하여 측정하였다. 전분 100 mg을 5 mL의 증류수에 분산시켜 현탁액을 제조하였으며, 이를 각각 50, 60, 70, 80°C의 항온수조에서 30분간 정치하였다. 시료를 얼음에 식힌 후, blue dextran 용액 0.5 mL (5 mg/mL)를 넣고 3,000×g로 15분간 원심 분리한 다음 상층액의 흡광도를 620 nm에서 측정하였다. 팽윤력(SF, swelling factor)은 다음과 같은 식으로 계산하였다:

$$SF = 1 + \frac{7,700}{w} \times \frac{A_S - A_R}{A_S}$$

w: 시료의 무게(g)

A_S: 상층액의 흡광도

A_R: 기준 시료의 흡광도

용출 아밀로스

용출 아밀로스 양(amylose leaching, AML)은 Eerlingen 등(12)의 방법을 변형하여 측정하였다. 0.15% 전분 현탁액을 80°C 항온수조에서 15분간 가열하고 5분간 얼음에서 식힌 후 2,400×g로 15분 동안 원심 분리하여 얻은 상층액을 측정에 사용하였다. 상층액 1.0 mL를 50.0 mL 튜브에 담아 0.1 M NaOH 0.5 mL를 가

하고 3분간 끓인 후 얼음에 식혔다. 0.1 M HCl (0.5 mL)로 중화시킨 뒤, potassium hydrogen tartrate 용액(5.0 g/L) 20 mL와 증류수 27.5 mL를 첨가하였다. 여기에 아이오딘 용액 0.5 mL (200.0 mg I₂+2.0 g KI/100 mL)를 가하여 혼합한 뒤 상온에 20분간 정치하였다. 용액의 흡광도는 680 nm에서 측정하였으며, 순수한 감자 아밀로스를 사용하여 표준 곡선을 작성하였다.

고구마 전분의 호화 특성

호화 특성은 Rapid Visco Analyser (RVA-4, Newport Scientific Pty, Ltd., Warriewood, Australia)를 이용하여 다음과 같이 측정하였다. 알루미늄 용기에 전분 2 g과 증류수 25 mL를 넣은 다음 플라스틱 회전축을 이용하여 50°C에서 1분간 교반시켜 시료액을 제조하였다. 12°C/min의 속도로 95°C까지 가열하고 이 상태에서 2.5 분간 유지한 후, 다시 12°C/min의 속도로 50°C로 냉각시키고 2분간 유지하면서 호화 개시온도(pasting temperature), 최종점도(final viscosity), 강하점도(breakdown) 및 치반점도(setback)를 측정하였다.

고구마 전분의 소화율

전분의 소화율은 Englyst 등(4)의 방법을 변형하여 측정하였다. Pancreatin (P7545, activity 8xUSP/g, Sigma-Aldrich) 2 g을 증류수 24 mL에 넣고 10분간 교반하였다. 이를 1,500×g로 10분간 원심 분리시킨 후 상층액 20 mL를 취해 증류수 3.6 mL, amyloglucosidase (AMG 300L, activity 300 AGU/mL, Novozymes, Bagsvaerd, Denmark) 0.4 mL와 혼합하여 효소 용액을 제조하였다. 효소 용액은 10분 동안 37°C에서 보관하여 평형에 이르게 한 다음 사용하였다.

각각의 전분 시료를 유리 구슬과 함께 2 mL-microtube에 30 mg씩 넣은 후, sodium acetate 완충 용액(pH 5.2)을 0.75 mL씩 첨가하여 37°C shaking incubator (VS-8480SFN, Vision Scientific Co., Ltd., Daejeon, Korea)에 10분간 보관하였다. 효소 용액을 0.75 mL씩 각 시료에 넣고 37°C shaking incubator에서 240 rpm으로 교반시키며 시료 별로 각 10분과 240분간 반응시킨 후 10분 동안 끓여 효소 반응을 정지시켰다. 이를 5,000×g로 5분간 원심 분리한 다음 상층액을 취하여 전분으로부터 가수분해된 글루코스 양을 GOD-POD kit (BCS Co., Anyang, Korea)을 이용하여 측정하였다.

전분이 가수분해된 정도에 따라 RDS, SDS, RS 분율을 구하였다. 10분간 효소 반응시켜 생성된 글루코스의 양으로 RDS를 계산하였으며, SDS의 분율은 10분과 240분 사이의 반응에서 가수분해된 글루코스의 양으로 계산하였다. 240분 이후에도 가수분해되지 않은 양을 RS로 하였다.

통계 분석

X-선 회절 측정을 제외한 모든 자료의 결과는 3회 반복 측정된 값의 평균으로 나타내었다. SPSS 12.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 사용하여 분산 분석을 실시하였으며, Duncan의 다중 비교로 0.05 유의수준에서 시료 간의 차이를 결정하였다. 또한 Pearson 상관계수를 구하여 각 측정 항목 간의 상관관계를 분석하였다.

결과 및 고찰

고구마 전분 입자의 형태적 특성

광학 현미경을 이용하여 고구마 전분 입자의 외양을 관찰한 결과, 모든 고구마 품종의 전분 입자는 대부분 둥글거나 타원형이

Table 1. Granule size of sweet potato starches determined by particle size distribution

Samples	Size range (µm)	Mean diameter (µm)	Mode (µm)	Average size (µm)
Gunmi	6.3-33.7	20.0	15.0	15.1 ^{bi)}
Gunpungmi	3.7-31.9	17.8	11.4	12.7 ^{cd}
Daeyumi	3.7-31.9	17.8	10.3	10.3 ^c
Matnami	3.7-31.9	17.8	10.3	10.5 ^c
Borami	4.1-31.9	18.9	10.3	10.2 ^c
Shinyulmi	6.3-35.5	20.9	10.8	13.1 ^{cd}
Jeonmi	6.3-33.7	20.0	11.4	13.1 ^c
Jeungmi	8.3-37.5	22.9	12.1	15.3 ^a
Hayanmi	5.4-35.5	20.5	12.1	13.4 ^{cd}
Happymi	4.6-31.9	18.2	12.1	12.3 ^d
Healthymi	5.1-24.4	14.7	11.4	10.8 ^c

^{b)}Values within a column not sharing a superscript are significantly different (p<0.05, Duncan's multiple range test).

였으며, 일부는 다면체, 종 모양이었다. 같은 품종의 전분 내에서도 입자의 모양이 다양하게 혼합되어 나타났다. 전분 분리 과정으로부터 생긴 것으로 보이는 손상 전분이 극히 일부 관찰되었으나, 대부분의 입자는 표면에 구멍이 보이지 않는 형태를 띠었다(데이터 미제시).

전분 입자의 크기 및 분포는 전분 입자의 특성을 결정하는 요소 중의 하나로(13), 호화 및 노화 특성, 페이스트 특성, 효소 접근성, 결정성, 팽윤 특성 등에 영향을 미친다. 고구마 전분의 입자 크기는 3.7-37.5 µm의 분포를 보였는데(Table 1), 이는 기존에 보고된(10) 시판 국내산 고구마 전분의 입자 크기(14.23-21.08 µm)에 비해서 더 넓은 범위였다. 하얀미 전분이 5.4-35.5 µm의 크기로 가장 분포의 폭이 넓었으며, 헬씨미 전분이 5.1-22.4 µm의 가장 좁은 분포를 보였다. 고구마 전분의 평균 입도 크기는 10.2-15.3 µm 수준으로, 그 중에서도 증미 전분이 가장 큰 평균 입도를 나타내었으며, 보라미, 대유미, 맛나미, 헬씨미 전분의 평균 입도가 가장 작았다.

아밀로스 함량 및 X선 회절

전분의 아밀로스 함량은 전분의 호화 및 노화 특성, 팽윤력, 효소 가수분해 등에 영향을 미친다(14,15). 이 연구에서 사용된 고구마 전분의 절대 아밀로스 함량은 맛나미가 12.3%로 가장 적었으며, 전미가 17.4%로 가장 많았다(Table 2). 이는 기존 연구에서 보고된 값(22.8%)보다 적은 값이었다(16).

X-선 회절도를 이용하여 전분 입자의 결정 형태와 결정화도를 비교하였다. 11종의 고구마 전분은 모두 2θ=17.2°, 18.1°, 23.1°에서 피크를 보이는 C형의 회절 양상을 나타내었다(Fig. 1). Hizukuri(17)는 C형의 전분을 A형, B형, A형과 B형의 중간형과의 유사성에 근거하여 각각 C_a, C_b, C_c형으로 분류하였다. A형은 주로 2θ=15.0°, 17.0°, 17.9°, 23°에서 피크를 나타내므로(18) 이 연구에 사용된 모든 고구마 전분은 C_a형으로 분류되었다. 모든 시료의 X-선 회절 양상은 유사하였으나, 상대적 결정화도는 최대 값을 나타낸 맛나미가 56.0%로, 최소 값을 나타낸 헬씨미(48.3%)와는 뚜렷한 차이를 나타내었다(Table 2). Abdel-Aal 등(19)은 전분의 상대적 결정화도는 아밀로펙틴의 함량의 영향을 받는다고 보고하였으나, 이 연구에서는 품종간 아밀로스 함량이 크게 차이 나지 않았기 때문에 이로부터 상대적 결정화도와 아밀로스 및 아밀로펙틴 함량 간의 상관관계를 확인할 수는 없었다.

Table 2. Amylose contents and relative crystallinity of sweet potato starches

Samples	Amylose content (%)	Relative crystallinity (%)
Gunmi	16.7 ^{a1)}	51.2
Gunpungmi	14.9 ^b	54.4
Daeyumi	14.6 ^b	53.0
Mannami	12.3 ^c	56.0
Borami	12.6 ^c	50.9
Shinyulmi	15.8 ^{ab}	50.5
Jeonmi	17.4 ^a	52.3
Jeungmi	14.8 ^b	52.3
Hayanmi	16.2 ^{ab}	49.7
Happymi	15.1 ^b	48.3
Healthymi	14.6 ^b	49.0

¹⁾Values within a column not sharing a superscript are significantly different ($p < 0.05$, Duncan's multiple range test).

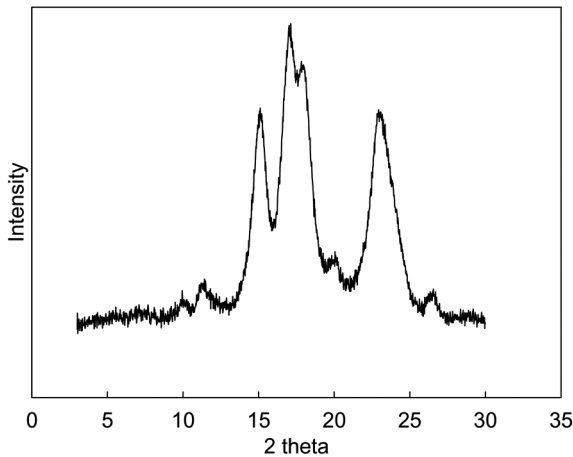


Fig. 1. X-ray diffractogram of sweet potato (Gunmi) starch. It represents X-ray diffractograms of all sweet potato starches used in this study.

아밀로펙틴의 가지 사슬 길이 분포와 아밀로스 용출

전분은 호화 온도 이상으로 가열할 때 팽윤하는데, 이때 수용성 물질이 입자 바깥으로 용출된다. 전분의 팽윤은 아밀로펙틴의 특성에 의해 나타나는 것으로 보고되어 있다(20). 고구마 전분에서 분석된 아밀로펙틴 가지 사슬의 중합도와 그에 따른 피크 면적의 상대적인 비율을 Table 3에 나타내었다. 일반적으로 가지 사슬은 그 길이에 따라 A, B₁, B₂, B₃ 등 4가지 부분으로 분류한다(18). 신율미의 A사슬 함량은 기존에 보고된 바와 같이 다른 고구마 품종에 비해 높았으며(9), 이는 신율미의 호화 점도 특성에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

AML은 1.4%에서 8.3% 사이로 나타났으며, 증미가 가장 많은 AML을 보였고 보라미와 헬씨미의 AML이 가장 적었다(Table 3). 이 연구에서 B₃ 사슬의 함량과 AML이 상관관계를 보였다($r = 0.725$, $p < 0.01$). 건미와 하얀미는 B₃ 사슬 함량이 많았는데(4.1%), 이들의 AML 또한 각각 6.5%와 6.2%로 높은 값을 나타내었다. 이는 아밀로펙틴은 긴 사슬 분율이 높을수록 용출되지 않으므로, 아밀로스가 상대적으로 더 잘 용출되었기 때문인 것으로 보인다.

Table 3. Branched chain length distributions and amylose leaching of sweet potato starches

Samples	Branched chain length distribution (%)				AML ²⁾ (%)
	DP 6-12 ¹⁾	DP 13-24	DP 25-36	DP ≥37	
Gunmi	39.3 ^{de3)}	36.9 ^d	10.1 ^a	4.1 ^a	6.5 ^b
Gunpungmi	41.8 ^b	37.8 ^c	10.0 ^{ab}	3.5 ^b	6.0 ^{bc}
Daeyumi	41.5 ^b	37.8 ^c	9.2 ^d	3.5 ^b	6.2 ^{bc}
Matnami	41.5 ^b	39.1 ^b	9.4 ^{cd}	2.9 ^{cd}	3.7 ^d
Borami	40.1 ^{cd}	40.0 ^a	9.6 ^{bc}	3.0 ^c	1.4 ^e
Shinyulmi	44.7 ^a	35.9 ^e	7.0 ^f	2.9 ^{cd}	4.5 ^{cd}
Jeonmi	40.55 ^c	39.0 ^b	9.9 ^{ab}	3.6 ^b	4.9 ^{bcd}
Jeungmi	39.9 ^{cd}	40.4 ^a	10.1 ^a	3.8 ^b	8.2 ^a
Hayanmi	38.8 ^e	39.0 ^b	10.1 ^a	4.1 ^a	6.2 ^{bc}
Happymi	40.4 ^c	40.1 ^a	9.1 ^d	2.3 ^e	3.7 ^d
Healthymi	40.3 ^c	40.2 ^a	8.5 ^e	2.7 ^d	1.4 ^e

¹⁾DP=Degree of polymerization; DP 6-12=A, DP 13-24=B₁, DP 25-36=B₂, DP ≥37=B₃ chains

²⁾Amounts of amylose leaching

³⁾Values within a column not sharing a superscript are significantly different ($p < 0.05$, Duncan's multiple range test).

Table 4. Molecular characteristics of sweet potato starches

Samples	M _n (×10 ⁷ g/mol)	M _w (×10 ⁷ g/mol)	R _g (nm) ¹⁾	Polydispersity (M _w /M _n)
Gunmi	6.6 ^{cde2)}	9.4 ^{cd}	206.7 ^{bc}	1.4 ^{de}
Gunpungmi	5.5 ^e	8.0 ^d	192.8 ^{cd}	1.5 ^{cde}
Daeyumi	5.7 ^e	7.2 ^d	169.5 ^d	1.2 ^e
Matnami	7.8 ^{bcd}	12.6 ^{ab}	236.2 ^b	1.6 ^{bcd}
Borami	6.3 ^{de}	13.3 ^{ab}	291.6 ^a	2.1 ^a
Shinyulmi	8.1 ^{abc}	10.8 ^{bc}	214.3 ^{bc}	1.3 ^{de}
Jeonmi	9.6 ^a	13.1 ^{ab}	221.1 ^{bc}	1.4 ^{de}
Jeungmi	8.1 ^{abc}	14.6 ^a	223.4 ^{bc}	1.8 ^b
Hayanmi	5.6 ^e	9.9 ^{cd}	213.3 ^{bc}	1.8 ^{bc}
Happymi	7.3 ^{bcd}	10.7 ^{bc}	205.0 ^{bc}	1.5 ^{cde}
Healthymi	8.6 ^{ab}	13.9 ^a	233.3 ^b	1.6 ^{bcd}

¹⁾Values M_n, M_w, and R_g denote number average molar mass, weight average molar mass, and radius of gyration, respectively.

²⁾Values within a column not sharing a superscript are significantly different ($p < 0.05$, Duncan's multiple range test).

아밀로펙틴의 분자량 분포

고구마 전분의 아밀로펙틴의 중량 평균 분자량(M_w)은 시료 간에 유의적인 차이를 보였다(Table 4). 가장 높은 M_w값을 보인 증미는 큰 회전 반경(radius of gyration, R_g)을 나타내었으며(223.4 nm), 가장 큰 R_g값을 보인 보라미 또한 상대적으로 높은 M_w를 가졌다(13.3×10⁷ g/mol). 이러한 M_w와 R_g 간의 관계는 비둘기콩 및 보리 전분에 대한 기존의 연구에서 보고된 바 있다(21,22). R_g 값이 용액 내에서 분자가 차지하는 부피를 나타낸다는 점에서, 아밀로펙틴의 가지 사슬 길이와 분자 양상은 용액에서의 R_g에 영향을 미친다(23). R_g와 아밀로스 용출 간에는 음의 상관관계가 관찰되었는데($r = -0.510$, $p < 0.01$), 이는 Patindol 등(24)에 따르면 아밀로펙틴의 R_g가 작을수록 아밀로스 또는 아밀로펙틴 분자들이 상호작용할 수 있는 가능성이 작아지기 때문이다.

다분산성은 아밀로펙틴 분자의 분포 특성을 나타내는 지표로,

Table 5. Gelatinization parameters of sweet potato starches

Samples	T _o ¹⁾ (°C)	T _p ¹⁾ (°C)	T _c ¹⁾ (°C)	T _c -T _o ²⁾ (°C)	ΔH (J/g)
Gunmi	64.8 ^{cd3)}	70.2 ^f	73.9 ^g	9.1 ^f	17.7 ^c
Gunpungmi	66.9 ^{bc}	71.8 ^{de}	76.8 ^e	9.9 ^f	13.9 ^e
Daeyumi	63.8 ^e	71.7 ^e	80.3 ^{bc}	16.4 ^a	12.1 ^f
Matnami	67.4 ^b	73.0 ^{bc}	78.6 ^d	11.2 ^e	15.2 ^d
Borami	66.4 ^c	72.7 ^{cd}	76.5 ^e	10.1 ^f	22.7 ^a
Shinyulmi	70.6 ^a	75.0 ^a	80.0 ^b	9.4 ^f	9.3 ^g
Jeonmi	64.7 ^d	72.6 ^{cd}	79.4 ^{cd}	14.7 ^b	16.4 ^d
Jeungmi	67.2 ^b	73.6 ^b	82.0 ^a	14.7 ^b	15.9 ^d
Hayanmi	62.0 ^g	69.8 ^f	75.5 ^f	13.5 ^c	16.2 ^d
Happymi	62.8 ^f	70.4 ^f	75.3 ^f	12.5 ^{cd}	17.9 ^c
Healthymi	64.6 ^d	72.0 ^{de}	76.9 ^e	12.3 ^d	19.9 ^b

¹⁾T_o, T_p, and T_c indicate the onset, peak, and conclusion temperatures of gelatinization, respectively.

²⁾T_c-T_o denotes the temperature range of gelatinization. ΔH indicates the gelatinization enthalpy.

³⁾Values within a column not sharing a superscript are significantly different (*p*<0.05, Duncan's multiple range test).

Table 6. Swelling factors of sweet potato starches at various temperatures

Samples	50°C	60°C	70°C	80°C
Gunmi	2.3 ^{de1)}	4.2 ^{bcd}	13.2 ^a	15.0 ^{ab}
Gunpungmi	1.8 ^e	3.7 ^{cde}	6.3 ^f	13.0 ^{cde}
Daeyumi	4.0 ^{ab}	5.0 ^b	8.7 ^d	15.7 ^a
Matnami	2.3 ^{de}	2.7 ^e	8.5 ^d	16.3 ^a
Borami	3.7 ^{bc}	4.5 ^{bc}	8.7 ^d	12.7 ^{cde}
Shinyulmi	3.1 ^{cd}	3.3 ^{de}	11.6 ^b	13.4 ^{cd}
Jeonmi	4.6 ^a	6.3 ^a	10.8 ^b	13.7 ^{bc}
Jeungmi	2.4 ^{de}	3.4 ^{cde}	9.7 ^c	12.4 ^{cde}
Hayanmi	2.5 ^{de}	3.3 ^{de}	9.2 ^{cd}	11.8 ^{de}
Happymi	2.7 ^{de}	3.9 ^{cd}	7.2 ^e	11.4 ^e
Healthymi	2.6 ^{de}	3.6 ^{cde}	12.7 ^a	15.8 ^a

¹⁾Values within a column not sharing a superscript are significantly different (*p*<0.05, Duncan's multiple range test).

높은 값을 가질수록 아밀로펙틴의 분포 양상이 불균일함을 의미한다(24). 고구마 전분의 다분산성 값(M_w/M_n)은 평균 약 1.6이었

Table 7. Relative amounts of RDS, SDS, and RS in sweet potato starches

Samples	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)
Gunmi	10.6 ^{bc1)}	40.6 ^c	48.8 ^d
Gunpungmi	9.6 ^c	43.1 ^b	47.3 ^{de}
Daeyumi	17.4 ^a	40.2 ^c	42.4 ^f
Matnami	10.6 ^{bc}	36.6 ^d	52.8 ^c
Borami	12.3 ^b	40.0 ^c	47.8 ^d
Shinyulmi	9.6 ^c	45.6 ^a	45.4 ^e
Jeonmi	10.0 ^c	41.0 ^c	49.1 ^d
Jeungmi	6.3 ^d	30.9 ^e	62.8 ^a
Hayanmi	12.2 ^b	39.8 ^c	48.0 ^d
Happymi	18.6 ^a	45.6 ^a	35.7 ^g
Healthymi	12.5 ^b	31.4 ^e	56.1 ^b

¹⁾RDS, Rapidly digestible starch; SDS, Slowly digestible starch; RS, Resistant starch

²⁾Values within a column not sharing a superscript are significantly different (*p*<0.05, Duncan's multiple range test).

으며, 보라미는 특히 높은 값을 나타내었다. 한편 전분의 소화 특성과 관련하여, M_w와 RS함량은 기존 문헌(25)에 보고된 바와 같이 양의 상관관계를 보였다(*r*=0.566, *p*<0.01). 증미가 가장 높은 M_w와 RS 함량을 나타내었으며, 대유미의 M_w와 RS함량이 가장 낮았다(Table 4, 8).

고구마 전분의 열 특성

고구마 전분의 호화와 관련된 열 특성을 시차주사열량계로 분석한 결과를 Table 5에 나타내었다. 신율미와 증미가 높은 T_o, T_p, T_c를 보였으며, 이는 기존에 보고된 값과 유사하였다(9). 반면, 하안미는 가장 낮은 값을 나타내었다. 호화 엔탈피(ΔH)의 경우 보라미(22.7 J/g)와 헬씨미(19.9 J/g)가 높은 값을 보였다. 한편 기존의 연구들에서는 호화온도가 아밀로스 함량의 영향을 받는다고 하였으나(26-28) 이 연구에 사용된 11종의 고구마 전분의 아밀로스 함량과 호화온도 사이에는 유의적인 상관관계가 관찰되지 않았다. 일반적으로 호화 온도는 아밀로스 함량 이외에도 입자의 크기, 형태, 전분 분획의 분포 등에 의해 영향을 받는다(29). 따라서 이 연구에서는 고구마 전분 입자의 아밀로스 함량뿐만 아니라 가지 사슬 길이, 분자량, 전분 분획의 분포 등 다양한 특성이 복합적으로 호화 온도에 영향을 끼친 것으로 보인다. 그리고

Table 8. Pasting properties of sweet potato starches from different cultivars

Samples	Peak viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Final viscosity (cP)	Setback viscosity (cP)	Pasting time (min)	Pasting temperature (°C)
Gunmi	2541 ^a	435 ^{bcd}	3098 ^{ab}	992 ^{abcd}	4.5 ^{bcd}	74.8 ^{ab}
Gunpungmi	2576 ^a	579 ^{ab}	3130 ^a	1133 ^{abc}	4.5 ^{cd}	75.1 ^{ab}
Daeyumi	2361 ^{abc}	406 ^{bcd}	2893 ^{ab}	938 ^{cd}	4.9 ^{ab}	74.8 ^{ab}
Matnami	2202 ^c	334 ^d	2939 ^{ab}	1071 ^{abcd}	4.9 ^{abc}	76.0 ^{ab}
Borami	2294 ^{bc}	316 ^d	3073 ^{ab}	1099 ^{abcd}	5.0 ^a	74.8 ^{ab}
Shinyulmi	2543 ^a	543 ^{ab}	3222 ^a	1221 ^a	4.5 ^{cd}	75.1 ^{ab}
Jeonmi	2426 ^{ab}	545 ^{abc}	2863 ^{ab}	962 ^{bcd}	4.6 ^{abcd}	75.4 ^{ab}
Jeungmi	2291 ^{bc}	422 ^{bcd}	2909 ^{ab}	1041 ^{abcd}	4.6 ^{bcd}	76.7 ^a
Hayanmi	2288 ^{bc}	362 ^{cd}	3129 ^a	1203 ^{ab}	4.7 ^{abcd}	75.1 ^{ab}
Happymi	2469 ^{ab}	645 ^a	2704 ^b	880 ^d	4.3 ^d	74.3 ^b
Healthymi	2398 ^{abc}	561 ^{ab}	2847 ^{ab}	1009 ^{abcd}	4.5 ^{cd}	76.2 ^{ab}

¹⁾Values within a column not sharing a superscript are significantly different (*p*<0.05, Duncan's multiple range test).

Table 9. Correlation coefficients between physicochemical, digestion, and pasting properties of sweet potato starches

Parameter ¹⁾	AM	PS	DP≥37	Mn	Mw	Rg	Poly	RDS	SDS	RS	SDSRS	To	Tc	Tp	ΔH	AL	peakV	finalV	BD	SB	Pasting temp	Pasting time
AM	1																					
PS	0.565** ²⁾	1																				
DP≥37	0.423*	0.525**	1																			
Mn	0.184	0.126	-0.290	1																		
Mw	-0.232	0.013	-0.262	0.725**	1																	
Rg	-0.433*	-0.260	-0.278	0.289	0.754**	1																
Poly	-0.464**	-0.102	0.008	-0.116	0.584**	0.763**	1															
RDS	-0.102	-0.517**	-0.376*	-0.294	-0.362*	-0.227	-0.183	1														
SDS	0.263	0.009	-0.108	-0.264	-0.531**	-0.264	-0.375*	0.313	1													
RS	-0.130	0.264	0.272	0.342	0.566**	0.307	0.360*	-0.744**	-0.867**	1												
SDSRS	0.102	0.517**	0.376*	0.294	0.362*	0.227	0.183	-1.000**	-0.313	0.744**	1											
To	-0.240	0.110	-0.182	0.235	0.218	0.226	0.015	-0.617**	0.019	0.310	0.617**	1										
Tc	-0.107	0.112	0.008	0.357*	0.250	-0.105	-0.096	-0.346*	-0.288	0.384*	0.346*	0.493**	1									
Tp	-0.270	0.008	-0.256	0.376*	0.356*	0.244	0.050	-0.497**	-0.145	0.363*	0.497**	0.857**	0.727**	1								
ΔH	-0.231	-0.205	-0.153	0.033	0.426*	0.620**	0.595**	0.136	-0.339	0.169	-0.136	-0.411*	-0.526**	-0.354*	1							
AL	0.362*	0.667**	0.725**	-0.199	-0.275	-0.510**	-0.161	-0.270	0.004	0.138	0.270	-0.021	0.273	-0.112	-0.487**	1						
PeakV	0.372*	0.271	0.043	-0.129	-0.399*	-0.341	-0.361*	0.001	0.405*	-0.286	-0.001	0.107	-0.228	0.026	-0.212	0.133	1					
FinalV	0.099	0.129	0.336	-0.321	-0.229	0.032	0.087	-0.270	0.144	0.038	0.270	0.308	-0.083	0.142	-0.220	0.196	0.410*	1				
BD	0.276	0.169	-0.332	0.167	-0.139	-0.329	-0.365*	0.103	0.257	-0.236	-0.103	-0.022	-0.086	0.056	-0.124	-0.108	0.685**	-0.251	1			
SB	0.004	0.062	0.182	-0.216	-0.055	0.122	0.195	-0.330	0.023	0.154	0.330	0.347*	0.037	0.245	-0.226	0.067	0.182	0.899**	-0.233	1		
Pasting temp	-0.012	0.104	-0.013	0.315	0.390*	0.183	0.106	-0.377*	-0.548**	0.583**	0.377*	0.215	0.365*	0.297	-0.018	0.048	-0.200	0.139	-0.112	0.328	1	
Pasting time	-0.323	-0.407*	0.126	-0.113	0.112	0.283	0.276	0.072	-0.090	0.027	-0.072	-0.007	0.168	-0.017	0.118	-0.098	-0.684**	0.043	-0.859**	0.035	-0.082	1

¹⁾Parameters, AM=amylose content; PS=particle size; Poly=polydispersity; AL=amylose leaching; peakV=peak viscosity in RVA; finalV=final viscosity in RVA; BD=breakdown; SB=setback

²⁾Significance level: * and ** are $p<0.05$ and $p<0.01$, respectively.

호화 온도의 지표(T_0 , T_p , T_c)는 SDS+RS 함량과 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다(각각 $r=0.617$, $p<0.01$; $r=0.497$, $p<0.01$; $r=0.346$, $p<0.05$).

팽윤력

전분을 구성하는 분자는 수소 결합에 의해 미셀 형태로 결정성 다발을 이루어 존재하므로(30) 입자 내 미셀 망의 강도와 특성은 전분의 팽윤력을 결정하는 주요한 요소이다. 전분의 팽윤력은 전분을 함유하는 식품의 호화, 유변학적 특성 등에 영향을 미치며(31), 고도로 팽윤된 입자는 전분 페이스트의 강도를 감소시키는 것으로 알려져 있다(32).

예상한 바와 같이, 모든 고구마 전분의 팽윤력은 온도가 상승함에 따라 커졌으며, 시료에 따라 60-70°C 또는 70-80°C 범위에서 큰 폭으로 증가하였다(Table 6). 80°C에서 측정된 전분의 팽윤력은 하얀미가 가장 낮았으며, 헬씨미가 가장 높았다. 이와 같은 온도 및 시료에 따른 팽윤력의 차이는 아밀로스-아밀로펙틴 비율, 가지사슬 길이와 분자량 분포, 분지 정도와 그 길이, 결합 형태 등의 차이에 의한 것으로 알려져 있다(33).

고구마 전분의 소화율

고구마 전분의 *in vitro* 소화율을 Table 7에 나타내었다. 모든 고구마 전분은 SDS보다 적은 RDS 함량을 가졌다. SDS의 함량은 30.9-53.0%의 분포를 보였으며 신울미, 해피미, 건풍미, 전미, 건미, 대유미, 보라미, 하얀미, 맛나미, 헬씨미, 증미 순으로 높게 나타났다. SDS 함량은 아밀로펙틴의 분자량과 음의 상관관계를 나타내었으며($r=-0.531$, $p<0.01$), 이와 비슷한 결과가 콩과 식물의 전분을 이용한 연구에서 보고된 바 있다(22). 증미가 가장 낮은 SDS 함량을 보였음에도 불구하고, RS 함량이 가장 많았다(62.8%).

천연 전분의 소화율은 유래 작물의 전분 입자 크기, 아밀로스/아밀로펙틴 비율, 지방질-아밀로스 복합체의 존재 여부 등 다양한 요인들의 상호작용에 의해서 영향을 받는다(34-37). 이 연구에서는 입자의 평균 크기와 SDS+RS 함량이 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타나($r=0.517$, $p<0.01$), 전분 입자의 크기가 전분의 소화율에 영향을 미치는 중요한 요인임을 확인하였으며, 또 전분의 저소화성 획득의 함량을 결정짓는 중요한 요인임을 알 수 있었다.

고구마 전분의 호화 특성

Rapid Visco Analyser를 이용하여 전분의 호화 개시온도, 최고, 최저, 최종점도 및 강하점도, 치반점도 등을 측정된 결과를 Table 8에 나타내었다. 이전 연구의 다른 고구마 전분에 비하여(25) 이 연구에서 사용된 모든 고구마 전분의 호화 시간은 대체적으로 짧았으며, 특히 해피미는 가장 짧은 호화 시간을 나타내었다. 전분의 호화 특성은 전분 입자의 팽윤, 결정성, 아밀로펙틴의 가지사슬 분포 등에 의해 영향을 받는다(12). 호화 시간은 전분 입자의 크기($r=0.407$, $p<0.05$), 최고점도($r=-0.684$, $p<0.01$), 강하점도($r=-0.859$, $p<0.01$)와 음의 상관관계를 나타내었으며, 입자의 크기가 큰 전분이 작은 입자 전분보다 더 빨리 호화 과정을 거치는 것으로 사료되었다. 노화 특성을 나타내는 치반점도는 신울미가 1221 cP의 가장 높은 값을, 해피미는 880 cP로 가장 낮은 값을 나타내었다.

한편 Jacobs 등(38)은 팽윤된 입자들 간에 형성된 단단한 배열과 방출된 아밀로스가 전분 페이스트의 점성에 영향을 준다고 하였다. 전분의 강하점도 차이는 호화 중 팽윤된 입자의 열 및 전

단에 대한 저항성과 관련되어 있으며, 11품종 고구마 전분 중에서는 해피미가 645 cP로 가장 높은 값을 보인 반면 보라미는 316 cP로 가장 낮은 값을 나타내었다. 고구마 전분의 최고점도와 강하점도는 양의 상관관계를 보였는데($r=0.685$, $p<0.01$), 이는 최고점도가 높은 전분은 강하점도가 높으며 약한 젤을 형성함을 의미하였다.

앞으로 이 연구에서 규명된 품종 별 고구마 전분의 이화학, 호화 및 소화 특성을 바탕으로 하여 다양한 유형의 식품에서의 가공적성을 평가하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

요 약

국내에서 육종한 11가지 고구마의 전분 특성을 규명하여 새로운 식품 소재의 개발을 위한 기초자료로 이용하고자 전분의 이화학, 호화 및 소화 특성을 조사하였다. 아밀로스 함량은 12.5-17.4%의 범위를 보였으며, 아밀로펙틴 가지 사슬 분포는 시료 간에 유사하였다. 증미 전분의 아밀로펙틴 분자량이 가장 컸으며 대유미 전분은 가장 낮은 값을 보였다. 모든 고구마 전분의 X선 회절 양상은 C형 중에서도 A형에 가까운 C₂형을 나타내었다. 시차주사열량계로 측정된 열 특성에서 11품종 고구마 전분 중 신울미와 증미의 호화 온도가 높았고, 해피미는 낮았다. Rapid Visco Analyser로 페이스트 특성을 살펴보았을 때, 호화시간은 전분 입자의 크기, 최고점도, 강하점도와 음의 상관관계를 나타내었으며, 해피미가 가장 낮은 호화 온도와 치반점도를 보였고 강하점도와 최고점도 및 최종점도가 높았다. 소화 특성에서 증미의 RS 함량이 가장 많았으며, 신울미와 해피미는 SDS 함량이 많았다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ008575)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Bovell-Benjamin AC. Sweet potato: A review of its past, present, and future role in human nutrition. *Adv. Food Nutr. Res.* 52: 1-59 (2007)
2. Wanjekeche EW, Keya EL. Utilization of fresh cassava and sweet potato pulps in baking. *Ecol. Food Nutr.* 33: 237-248 (1995)
3. Teow CC, Truong VD, McFeeters RF, Thompson RL, Pecota KV, Yencho GC. Antioxidant activities, phenolic and β -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours. *Food Chem.* 103: 829-838 (2007)
4. Englyst HN, Kingman SM, Cummings JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clin. Nutr.* 46: S33-S50 (1992)
5. Ludwig DS. Dietary glycemic index and obesity. *J. Nutr.* 130: 280S-283S (2000)
6. Lehmann U, Robin F. Slowly digestible starch-its structure and health implications: a review. *Trends Food Sci. Tech.* 18: 346-355 (2007)
7. Sajilata M, Singhal RS, Kulkarni PR. Resistant starch-a review. *Compr. Rev. Food Sci. F.* 5: 1-17 (2006)
8. Noda T, Tsuda S, Mori M, Takigawa S, Matsuura-Endo C, Saito K, Arachichige Mangalika WH, Hanaoka A, Suzuki Y, Yamauchi H. The effect of harvest dates on the starch properties of various potato cultivars. *Food Chem.* 86: 119-125 (2004)
9. Park JY, Ahn YS, Shin DH, Lim ST. Physicochemical properties of Korean sweet potato starches. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 28: 1-8 (1999)
10. Baek MH, Cha DS, Park HJ, Lim ST. Physicochemical properties

- of commercial sweet potato starches. Korean J. Food Sci. Technol. 32: 755-762 (2000)
11. Tester RF, Morrison WR. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. Cereal Chem. 67: 551-557 (1990)
 12. Eerlingen RC, Jacobs H, Block K, Delcour JA. Effects of hydrothermal treatments on the rheological properties of potato starch. Carbohydr. Res. 297: 347-356 (1997)
 13. Rasper V. Investigations on starches from major starch crops grown in Ghana: III. Particle size and particle size distribution. J. Sci. Food Agr. 22: 572-580 (1971)
 14. Gérard C, Barron C, Colonna P, Planchot V. Amylose determination in genetically modified starches. Carbohydr. Polym. 44: 19-27 (2001)
 15. Lindeboom N, Chang PR, Tyler RT. Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. Starch-Stärke 56: 89-99 (2004)
 16. McPherson AE, Jane J. Comparison of waxy potato with other root and tuber starches. Carbohydr. Polym. 40: 57-70 (1999)
 17. Hizukuri S. Effect of environment temperature of plants on the physicochemical properties of their starches. J. Japan Soc. Starch Sci. 17: 73-88 (1969)
 18. 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)
 19. Abdel-Aal ESM, Hucl P, Chibbar RN, Han HL, Demeke T. Physicochemical and structural characteristics of flours and starches from waxy and nonwaxy wheats. Cereal Chem. 79: 458-464 (2002)
 20. Gomand SV, Lamberts L, Visser RGF, Delcour JA. Physicochemical properties of potato and cassava starches and their mutants in relation to their structural properties. Food Hydrocolloid. 24: 424-433 (2010)
 21. Sandhu KS, Lim ST. Digestibility of legume starches as influenced by their physical and structural properties. Carbohydr. Polym. 71: 245-252 (2008)
 22. You SG, Izydorczyk MS. Molecular characteristics of barley starches with variable amylose content. Carbohydr. Polym. 49: 33-42 (2002)
 23. Yoo SH, Jane JL. Molecular weights and gyration radii of amylopectins determined by high-performance size-exclusion chromatography equipped with multi-angle laser-light scattering and refractive index detectors. Carbohydr. Polym. 49: 307-314 (2002)
 24. Patindol JA, Gonzalez BC, Wang YJ, McClung AM. Starch fine structure and physicochemical properties of specialty rice for canning. J. Cereal Sci. 45: 209-218 (2007)
 25. Tsakama M, Mwangwela AM, Manani TA, Mahungu NM. Physicochemical and pasting properties of starch extracted from eleven sweetpotato varieties. Afr. J. Food Sci. Technol. 1: 90-98 (2010)
 26. Demeke T, Hucl P, Abdel-Aal ESM, Bâga M, Chibbar RN. Biochemical characterization of the wheat waxy a protein and its effect on starch properties. Cereal Chem. 76: 694-698 (1999)
 27. Stevenson DG, Doorenbos RK, Jane JL, Inglett GE. Structures and functional properties of starch from seeds of three soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) varieties. Starch-Stärke 58: 509-519 (2006)
 28. Jane J, Chen YY, Lee LF, McPherson AE, Wong KS, Radosavljevic M, Kasemsuwan T. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. Cereal Chem. 76: 629-637 (1999)
 29. Kaur M, Sandhu KS, Lim ST. Microstructure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starches from different Indian lentil (*Lens culinaris*) cultivars. Carbohydr. Polym. 79: 349-355 (2010)
 30. Oladebeye AO, Oshodi AA, Oladebeye AA. Physicochemical properties of starches of sweet potato (*Ipomea batata*) and red cocoyam (*Colocasia esculenta*) cormels. Pak. J. Nutr. 8: 313-315 (2009)
 31. Srichuwong S, Sunarti TC, Mishima T, Isono N, Hisamatsu M. Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure to swelling and pasting properties. Carbohydr. Polym. 62: 25-34 (2005)
 32. Eliasson AC. Viscoelastic behaviour during the gelatinization of starch I: Comparison of wheat, maize, potato and waxy-barley starches. J. Texture Stud. 17: 253-265 (1986)
 33. Moorthy SN. Tuber Crop Starches. Central Tuber Crops Research Institute, Kerala, India. pp. 1-52. (2001)
 34. Jenkins DJA, Jenkins AL, Wolever TMS, Josse RG, Wong GS. The glycaemic response to carbohydrate foods. Lancet 324: 388-391 (1984)
 35. Snow P, O'Dea K. Factors affecting the rate of hydrolysis of starch in food. Am. J. Clin. Nutr. 34: 2721-2727 (1981)
 36. Goddard MS, Young G, Marcus R. The effect of amylose content on insulin and glucose responses to ingested rice. Am. J. Clin. Nutr. 39: 388-392 (1984)
 37. Guraya HS, Kadan RS, Champagne ET. Effect of rice starch-lipid complexes on *in vitro* digestibility, complexing index, and viscosity. Cereal Chem. 74: 561-565 (1997)
 38. Jacobs H, Eerlingen RC, Clauwaert W, Delcour JA. Influence of annealing on the pasting properties of starches from varying botanical sources. Cereal Chem. 72: 480-487 (1995)