

# 전분 소화율과 구조와의 상관성

## Relationship Between Starch Digestibility and its Structure

정현정<sup>1,\*</sup>, 임승택<sup>2</sup>

Hyun-Jung Chung<sup>1,\*</sup>, Seung-Taik Lim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 식품영양과학부, <sup>2</sup>고려대학교 식품공학과

<sup>1</sup>Division of Food and Nutrition, Chonnam National University

<sup>2</sup>Department of Food Bioscience and Technology, Korea University

### 1. 서론

식물에서 탄수화물의 저장형태인 전분(녹말, starch)은 자연에 가장 풍부하게 존재하는 물질 중 하나이며 쌀, 보리, 밀 등의 곡류와 감자, 고구마 등의 서류에 많이 들어 있는 저장 다당류로서 사람과 동물의 에너지원으로 가장 중요한 영양소이다(1). 전분은 가열하지 않고는 물에 용해되지 않는 천연 고분자로서 포도당이  $\alpha$ -1,4 결합으로 연결된 거의 직쇄상의 구조를 가지는 아밀로오스(amylose)와  $\alpha$ -1,6결합의 가지가 많고 작은 사슬로 이루어진 아밀로펙틴(amylopectin)으로 구성되어 있다(1). 전분의 대부분은 인체 내 소장에서 포도당으로 소화되어 흡수되는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제로는 전분의 구조적 특징이나 가공방법에 따라 전분은 빠르게 소화되어 흡수되기도 하며 일부는 소화되지 않기도 한다. 즉 소화속

도가 전분의 구조나 가공방법에 따라 다양하게 나타난다. 많은 연구에서 당뇨병, 심혈관질환, 암과 같은 질병의 발생과 섭취하는 탄수화물, 특히 전분의 소화율과 상관성이 높다고 보고되고 있다(2-5). 본 보고에서는 전분의 건강 기능적 특성인 소화율과 그들의 천연 상태의 구조나 다양한 가공에 의해 변형된 구조와의 상관성에 대하여 알아보고자 한다.

### 2. 소화속도에 따른 전분의 종류

전분의 소화율과 연관된 영양학적 가치는 전분의 구조나 가공에 따라 변하며 소장에서의 소화흡수 속도와 연관되어 있다. 전분의 소화율은 다양한 특성에 의해 영향을 받는데 출처에 따른 전분의 종류, 아밀로오스와 아밀로펙틴의 비율, 입자의 크기, 결정성, 아밀로오스-지질 복합체, 아밀로

\*Corresponding Author: Hyun-Jung Chung  
Division of Food and Nutrition, Chonnam National University,  
77 Yongdong-ro, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea  
Tel: +82-62-530-1333  
Fax: +82-62-530-1339  
Email: hchung@jnu.ac.kr

표 1. 전분의 영양학적 분류

전분분류	소화 특징	전분구조	식품의 예
빠르게 소화되는 전분 (rapidly digestible starch, RDS; 급소화성전분)	입이나 소장에서 빠르게 소화 (20분 내 소화)	무정형	대부분의 전분질 조리 및 가공식품
천천히 소화되는 전분 (slowly digestible starch, SDS; 지소화성전분)	소장에서 천천히 그러나 완전히 소화 (20~120분 사이 소화)	단단한 무정형/ 불완전한 결정형	천연곡류 및 콩류 전분, 부분적으로 노화된 전분
소화되지 않은 전분 (resistant starch, RS; 저항전분)	소화되지 않고 대장에서 발효 (120분 내 소화되지 않음)	주로 결정형	천연 감자 및 바나나, 노화된 식품, 화학변성전분

펙틴의 분자구조, 아밀로오스의 사슬길이 등이다(6). 전분의 출처에 따른 소화율은 대체적으로 곡류가 높고 그 다음으로는 legume류이며 감자전분과 고아밀로오스 옥수수전분은 가장 낮은 소화율을 나타내는 것으로 알려져 있다(6). Ring 등(7)은 옥수수전분, 밀전분, 완두전분, 감자전분의 소화율을 각각 100%, 95%, 67%, 15%라고 보고하였으며 Socorro 등(8)은 옥수수전분, 쌀전분, 밀전분, 검은콩전분의 소화율을 각각 74.4%, 75.5%, 75.2%, 49.5%라고 보고하였다.

전분은 실제로 소장에서 빠르게 소화되는 형태에서 소화가 되지 않은 형태까지 다양하다. 전분을 영양학적 기준으로 소화속도에 따라 분류하면 소장에서 소화되는 전분과 소화되지 않은 전분으로 나누어지고 소화되는 전분은 빠르게 소화되는 전분과 천천히 소화되는 전분으로 세분화할 수 있다(9). 즉 전분은 소장에서의 소화속도에 따라 빠르게 소화되는 전분(rapidly digestible starch, RDS; 급소화성전분), 천천히 소화되는 전분(slowly digestible starch, SDS; 지소화성전분), 소화가 되지 않은 전분(resistant starch, RS; 저항전분)으로 분류된다(표 1).

RDS는 소장에서 빠르게 소화되기에 인체 내 에너지원으로 빠르게 활용되어지며 조리되거나 가공된 전분질식품의 대부분을 차지한다. SDS는 소화속도가 느리지만 소장에 소화가 모두 이루어지기에 에너지원으로 사용되기도 하며 식후 혈당을 천천히 높이는 장점을 가지고 있어 다양한 혈당 관련 질환을 완화시키는 효과가 있다고 보고되

고 있다(2, 9). SDS를 형성하는 전분 구조는 비교적 단단한 무정형 구조나 불완전한 결정형 구조이다. 그래서 가공하지 않은 천연전분이나 부분적으로 노화된 전분에서 SDS함량이 비교적 높으나 조리나 가공에 의해 대부분이 RDS로 전환되기에 SDS함량을 높이기 위한 많은 시도들이 진행되고 있다(2). RS는 소장에서 소화되지 않고 대장에서 발효되기에 장 건강에 영향을 준다고 보고되고 있다(4). RS는 특징에 따라 4가지로 세분화하여 분류하기도 한다. RS1은 효소에 의해 분해되지 않는 매트릭스에 의해 둘러싸여 있기에 물리적으로 접근이 어려운 전분을 말하며 RS2는 효소에 저항성을 나타내는 천연전분으로 감자전분, 바나나전분, 고아밀로오스전분 등이 있고 RS3는 효소의 저항성을 나타내는 노화된 전분을 말하며 RS4는 화학적 변성전분이 해당되며 주로 가교결합에 의해 형성된다(2-4).

천천히 소화되는 SDS와 건강기능성에 대한 일부 연구가 진행되어 왔다. SDS는 당대사의 안정화, 당뇨조절, 포만감에 대한 기능성을 가지고 있다(2). 혈당지수가 낮은 식품은 당뇨병과 심장질환의 위험성을 낮춘다고 보고하고 있으며 혈당지수가 낮은 식품은 SDS함량이 높고 반대로 혈당지수가 높은 식품은 RDS함량이 높았다(10). 제 2형 당뇨병 환자와 정상인에게 RSD와 SDS가 함유된 식사를 제공하였을 때 SDS가 RDS보다는 혈당, 인슐린의 분비가 줄어들음을 확인하였고 식품 속에 RDS를 SDS로 전환하였을 경우 대사적 질환의 위



표 2. Englyst 방법에 의한 전분의 소화율

전분	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)	참고문헌
<b>천연(native)전분</b>				
옥수수	24.4±0.3	53.0±4.9	22.6±4.9	Zhang 등 (18)
밀	40.1±0.4	50.0±1.4	9.6±1.8	Zhang 등 (18)
쌀	32.4±1.1	43.8±2.5	23.8±3.6	Zhang 등 (18)
감자	8.7±0.2	15.2±1.8	76.0±2.1	Zhang 등 (18)
옥수수	29.7±1.9	65.7±1.3	4.6±1.8	Chung 등 (19)
완두콩(pea)	27.0±2.5	62.9±0.7	10.0±2.4	Chung 등 (19)
렌틸콩(lentil)	20.8±1.8	70.1±2.2	9.1±1.2	Chung 등 (19)
<b>호화(gelatinized)전분</b>				
옥수수	95.3±2.0	0.1±0.2	4.6±1.8	Chung 등 (19)
완두콩(pea)	94.2±1.0	0.6±1.0	5.2±0.8	Chung 등 (19)
렌틸콩(lentil)	93.9±0.6	0.8±0.8	5.3±0.6	Chung 등 (19)

힘성을 줄일 수 있다고 보고하였다(11). SDS가 높은 아침식사는 RDS가 높은 아침식사에 비해 집중력에 도움이 된다고 보고되기도 하였다(12). SDS가 높은 식이는 안정한 혈당반응이나 낮은 인슐린 반응에 의해 포만감을 지속할 수 있는데 SDS함량이 높은 콩 푸레는 RDS가 높은 감자 푸레에 비해 포만감을 지속시킨다고 보고하였다(13).

RS는 인체 내 소화효소에 의해 분해되지 않고 위장관의 하부를 거쳐 대장에 들어가서 장내 세균의 환경에 영향을 주어 생리활성이 우수하다고 알려져 있다(4, 5). 일반적으로 RS는 수용성 식이 섬유와 생리적 기능이 유사하다. RS는 장내 유익한 미생물의 먹이가 되어 발효되면서 *bifidobacteria* 같은 장내 유익세균의 증식을 촉진하여 변의 부피를 증가시킨다(5). RS가 대장에서 발효되면서 생산된 단쇄지방산(short chain fatty acid)은 대장 내 pH를 감소시키고 칼슘, 철, 마그네슘과 같은 무기질의 흡수를 촉진하기도 한다(14). RS에 의해 생성된 단쇄지방산은 세포의 DNA 손상으로 회복시켜 정상적인 세포기능을 하게 하여 대장암 발생을 억제하는 효과가 있다고 보고하였다(15). RS는 인체 내에서 느리게 대사되어지며 소화가능한 전분의 소화흡수를 방해하기에 식후 혈당과 인슐린

반응을 감소시키는 효과를 가진다(15). 호화된 전분은 섭취한 후 소화가 바로 시작되나 RS는 5~7시간 후에 장내에서 대사되기에 포만감을 증가시키고 혈당 및 인슐린 반응을 감소시켜 당뇨병의 발병 위험성을 낮춘다(16). RS는 혈중 콜레스테롤을 감소시켜 간의 중성지방농도를 감소시켰고 지질 대사를 개선시키는 효과가 있어 심혈관 질환의 발병 위험도를 감소시킬 수 있다고 보고하였다(17).

전분질 식품의 전분소화율은 *in vivo*로 측정하는 것이 가장 정확하지만 *in vivo* 소화율은 경제적이 아니고 실험에 참여하는 사람에 따라 차이가 크며 많은 시료에 대한 정확한 실험을 수행하기 쉽지 않다. 그래서 *in vitro* 전분소화율을 통하여 인체 내 혈당변화를 예측하며 다양한 전분질 식품의 전분의 소화율을 측정한다. *In vitro* 전분소화율 측정 방법으로 가장 많이 사용되는 방법은 Englyst 등(9)에 의해 제안된 방법으로 인체 내의 위와 소장의 생리적 조건을 모방하여 제시하였는데 pancreatin, amyloglucosidase, invertase을 37℃에서 반응시키면서 분해되는 포도당의 양을 측정하여 RDS, SDS 그리고 RS함량을 구한다. RDS는 20분 안에 분해되는 전분함량, SDS는 20분과 120분 사이에 가수분해 되는 양, RS는 120분 안에 분해

표 3. 다양한 전분질 식품에서의 전분 소화율[Cummings와 Englyst(20)을 참고]

식품	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)	총전분함량
밀가루	40	39	2	81
흰빵	69	7	1	77
비스킷	37	10	1	48
생감자	2	7	70	79
삶은 감자	71	1	1	73
바나나가루	3	15	56	74
바나나비스킷	19	11	18	48
스파게티	41	33	5	79
삶은 완두콩	12	2	5	19

되지 않는 양을 의미한다. Zhang 등(18)은 Englyst 방법에 의해 다양한 전분의 RDS, SDS, RS함량을 측정하였는데 곡류전분인 쌀, 밀, 옥수수전분이 높은 SDS함량을 보였으며 감자전분은 높은 RS함량을 보였다(표 2). Chung 등(19)은 Englyst방법에 의해 천연전분의 소화율과 실제 가공식품에서의 연관성을 위하여 조리 후의 전분 소화율을 보고하였는데 조리 후에는 SDS함량이 거의 없고 대부분이 RDS로 전환되는 것으로 보고하였다(표 2). Cummings와 Englyst(20)는 다양한 전분질 식품의 RDS, SDS, 그리고 RS함량을 분석하였다. 식품소재가 되는 밀가루, 감자, 바나나가루에서의 세 가지 전분의 함량과 이를 이용한 식품에서의 함량 변화를 분석하였는데 밀가루에서의 높은 SDS함량은 전분질 식품으로 가공할 경우 RDS로 전환하였으며 감자나 바나나가루의 높은 RS함량은 이를 이용한 가공식품에서는 RDS로 전환하였다(표 3).

### 3. 혈당지수

전 세계적으로 비만 인구는 급속하게 증가하고 있으며 국내에서도 식생활의 서구화로 3명중 1명이 비만을 나타낸다고 보고되고 있다. 비만은 고혈압, 당뇨, 대장암, 심장질환 등 다양한 질병의 원인이 되고 있으며 그 중 당뇨병은 우리나라에서도 발병률이 매년 급증하고 있는 추세로 식생활 습관

의 서구화가 주된 요인으로 인식되고 있다(21). 비만과 당뇨의 예방 및 치료는 식이조절이 필수적이며, 탄수화물의 소화 및 흡수의 조절이 직접적인 영향을 미친다. 당뇨뿐 아니라 저혈당 증상도 위험한 것으로 알려져 있으며 저혈당이란 혈액 내 포도당의 수치가 낮은 상태로서 뇌의 에너지원인 혈당의 저하로 뇌의 기능 수행 능력이 떨어져서 생겨나는 증상이다. 탄수화물 섭취와 관련된 질환들은 탄수화물 섭취의 양적인 측면뿐 아니라 질적인 측면도 함께 고려되고 있다(21, 22).

탄수화물의 질적 섭취를 평가하기 위하여 혈당지수(glycemic index, GI)를 지표로 많이 사용하고 있는데 혈당지수는 1981년 Jenkins 등이 식후에 탄수화물의 흡수 속도를 반영하기 위하여 제안한 것으로 특정 식품의 식후 혈당반응정도를 기준이 되는 식품에 비교하여 수치화한 것을 말한다(23). 혈당지수는 특정식품 속에 포함된 50g의 탄수화물을 섭취한 후 혈당 반응 면적을 표준식품인 흰빵이나 포도당에 들어 있는 50g의 탄수화물을 섭취한 후 혈당 반응 면적을 나누어 계산한다(23). Foster-Powell 등(24)은 750개 식품의 혈당지수 값을 제시하였다. Song 등(21)은 국내외의 연구 결과들로부터 얻은 혈당지수 자료를 이용하여 한 국민 상용식품 653개의 GI값을 계산하고 제시하였다. 혈당지수의 값에 따라 70 이상을 high-GI식품으로 55에서 70을 medium-GI식품으로 55 이하



를 low-GI식품으로 분류한다(24, 25).

High-GI식품을 지속적으로 섭취하면 혈당이 빠르게 상승하여 상대적으로 인슐린 분비가 많아지고 체지방을 증가시킨다. 일부 연구에서는 GI가 높은 식단에 비해 GI가 낮은 식단을 섭취한 군에서 혈당이 개선됨을 확인하였으며 GI가 높고 곡류를 통한식이섬유 섭취량이 적은 식사가 당뇨병의 위험성을 증가시킨다고 보고하였다. 혈당지수는 HDL콜레스테롤과는 음의 상관관계가 있고 심근경색과도 음의 상관관계를 나타내어 low-GI식품의 지속적인 섭취는 심혈관질환 발생 위험도를 감소시킬 가능성이 있다고 보고하였다. 일부 연구에서 혈당지수가 낮은 식단은 대장암의 위험도와 직접적인 관련성이 있다고 보고하였다(25-27).

혈당지수는 식품 내 탄수화물이 소화되어 흡수되는 정도에 따라 달라지기에 전분의 분자 구조, 전분의 물리적 상태, 조리시간과 조리방법, 지방과 단백질의 동시 섭취 등에 의해 영향을 받는다(28). 조리방법이나 조리시간은 식품의 혈당지수에 직접적으로 영향을 미치는데 조리하는 동안 물과 열에 의해 전분 입자가 호화되고 팽윤되면서 효소의 접근성이 용이하기에 혈당지수가 높아진다(28). 가공방법에 의해 혈당지수는 영향을 받는데 전분질 식품의 분쇄나 제분은 입자의 크기를 줄이기 때문에 물에 쉽게 흡수되고 소화효소의 접근을 용이하게 하여 혈당지수가 높아진다. 전분 내 아밀로오스와 아밀로펙틴의 함량에 의해 혈당지수가 변화하는데 아밀로스 비율이 높을수록 혈당지수가 낮아진다(29). 지질이 포함된 전분질 식품은 지질의 영향을 받아 전분이 소장에서 소화되는 속도를 늦추기 때문에 혈당상승을 억제하고 혈당지수를 낮춘다(29). 대부분의 탄수화물식품은 높은 전분의 함량을 보이고 이런 전분의 소화율에 따라 혈당지수에 영향을 미친다.

#### 4. 전분의 입자, 결정, 분자 구조와 소화율 관계

전분의 입자 구조적 특징인 크기나 형태는 생

물의 중에 따라 다양하다. 입자크기와 소화율에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔는데 일반적으로 전분입자의 크기가 작을수록 소화율이 높은 것으로 보고되고 있다. Kaur 등(30)은 감자전분의 입자크기에 따른 소화율을 비교하여 보고하였는데 큰 입자를 많이 가진 감자전분이 작은 입자를 가진 감자전분에 비해 낮은 소화율을 나타낸다고 보고하였으며 Chung 등(31)은 다양한 legume 전분 중에서 입자크기가 가장 큰 bean전분의 소화율이 가장 낮았으며 반대로 입자크기가 가장 작은 chickpea전분의 소화율이 가장 높았다고 보고하였다. Capriles 등(32)은 아마란스전분의 높은 소화율은 작은 입자크기(1~3  $\mu\text{m}$ )에 기인한다고 보고하였다. 이와 같이 작은 입자의 높은 소화율은 높은 표면적으로 인하여 효소와 반응성이 증가하기 때문이다(30-32).

전분 소화율은 입자의 형태에 의해서도 영향을 받는다. 전분의 효소에 의한 가수분해의 첫 번째 단계는 입자 표면으로부터 시작된다. 그런데 옥수수나 수수전분 등의 곡류전분은 입자표면에 작은 구멍(pin holes)들이 존재하기에 효소들이 통과하여 입자의 안쪽에서부터 분해가 일어난다. 그에 비해 감자나 다른 B형 전분들은 입자표면이 매끄럽기에 입자 표면에서부터 가수분해가 진행된다. 그래서 곡류전분이 서류전분에 비해 높은 소화율을 나타낸다(33).

전분 소화율은 전분의 분자 및 결정구조에 의해 영향을 받는다. 전분의 아밀로오스함량은 전분 종류에 따라 14~31%에 이르며 찰전분은 아밀로오스가 거의 존재하지 않으며 고아밀로오스전분은 70%까지 이른다(1). 전분의 소화율은 아밀로오스 함량이 높을수록 낮아진다고 보고되고 있다(3). 아밀로펙틴은 분지형 구조를 가지고 있기에 분자당 표면적이 크기 때문에 효소의 접근이 용이하다(3). 아밀로오스 함량이 높은 legume전분은 옥수수전분에 비해 낮은 소화율을 나타낸다(7, 8). 같은 legume전분 내에서도 아밀로오스 함량이 높은 bean전분이 다른 lentil, chickpea, pea 전분에 비

해 낮은 소화율을 나타냈다(31).

전분의 소화율은 아밀로펙틴 분자구조에 의해 영향을 받는다. 짧은 사슬(DP 8-12)은 전분 소화율과 양의 상관성을 보였으며 DP 16-26은 반대로 전분소화율과 음의 상관성을 보였다(34). Jane 등(35)의 보고에 의하며 짧은 A 사슬(DP 6-12)은 짧은 이중나선구조를 형성하여 단단한 결정구조를 만들지 못하기에 소화효소에 의해 쉽게 공격을 받는다고 설명하였다. Chung 등(36)은 짧은 A 사슬(DP 6-12)은 RDS와 양의 상관성을 나타내고 SDS나 RS와는 음의 상관성을 나타낸다고 보고하였다. 보고된 문헌들에 근거하여 볼 때 아밀로펙틴의 긴 사슬의 함량이 높을수록 길고 안정한 이중나선구조를 형성하고 이는 전체적으로 단단한 결정구조를 가지기에 효소의 접근이 용이하지 않아 소화율을 낮춘다고 설명할 수 있다.

전분은 결정성 영역과 무정형 영역을 포함하고 있으며 일반적으로 무정형 영역이 소화효소에 의해 쉽게 가수분해되는 것으로 알려져 있다(28). Zhang 등(18)은 무정형 영역이 결정성 영역에 비해 소화효소에 의해 가수분해가 쉽게 되기는 하나 입자 내에서는 배열의 특징이나 결정성 영역과의 강한 결합에 의해 가수분해가 지연될 수 있다고 보고하였다. Chung 등(31)은 legume 전분의 상대적 결정성은 RDS와 음의 상관성을, SDS와는 양의 상관성을 나타낸다고 보고하였다.

전분은 결정의 배열 형태에 따라 A, B, C형으로 나누어지는데 일반적으로 A형 결정을 가진 전분이 B형 결정을 가진 전분에 비해 소화율이 높았다(3). A형과 B형 전분은 이중나선구조의 배열과 수분함량이 다른데 A형 전분이 비교적 짧은 사슬을 많이 함유하고 있기에 효소적 가수분해에 민감하다(3).

### 5. 가공에 따른 전분소화율

전분질 식품을 생산하기 위해서는 다양한 가공 방법들이 사용된다. 이러한 가공방법들은 식품 구

표 4. 다양한 가공방법에 의한 전분 소화율 [Singh 등 (3) 논문 참고]

가공방법	전분소화율 (증가율)	참고문헌
조리 (cooking)	34.0	Roopa와 Premavalli (37)
고압처리 (autoclaving)	39.7	Roopa와 Premavalli (37)
발아 (germination)	15.4	Roopa와 Premavalli (37)
로스팅 (roasting)	37.2	Roopa와 Premavalli (37)
방사선조사 (gamma irradiation)	75.2	Chung과 Liu (38)
탈피 (dehulling)	151	Alonso 등 (39)
압출가공 (extrusion)	306	Alonso 등 (39)
조리 (cooking)	96	Capriles 등 (39)
압출가공 (extrusion)	93	Capriles 등 (32)

조를 변화시키고 결과적으로 전분 소화율을 포함하는 영양적인 특성에 영향을 미친다. 많은 가공 방법들은 열처리가 수반되는데 열처리에 의해 물 분자가 아밀로오스와 아밀로펙틴의 수소결합과 연결되어 팽윤이 일어나게 되고 그로 인하여 전분 내 결정구조가 파괴되어진다. 결과적으로 효소의 접근이 용이하게 되어 소화율이 증가하게 된다 (28). 다양한 가공방법들에 의한 전분 소화율에 대한 연구를 진행하였으며 Singh 등(3)은 연구결과들(32, 37-39)을 표로 정리하였다(표 4). 다양한 가공방법들 중 전분 소화율의 증가정도를 비교하면 Chau와 Cheung (40)은 조리(cooking) > 발아(germination) > 침지(soaking) 순서였으며 Urooj와 Puttaraj (41)는 조리 > 발아 > 발효(fermentation) > 로스팅(roasting) 순서이었고 Negi 등(42)은 발아 > 조리 > 탈피(dehulling) > 침지 순서였다.

조리(cooking)는 전분을 호화시키기에 식품 내에 효소의 접근이 용이하고 소화율을 크게 높인



표 5. 다양한 가공방법에 의한 pulse 전분의 RDS, SDS, RS 변화

가공방법	소재	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)	참고문헌
조리(cooking)	lentil	+32.1	-14.0	-21.3	Bravo (47)
조리(cooking)	lentil	+45.0	-14.0	-14.0	Lintas와 Cappelloin (48)
압출가공(extrusion)	lentil	+40.0	0.0	-40.0	Lintas와 Cappelloin (48)
조리(cooking)	chickpea	+30.2	+4.5	-31.0	Bravo (47)
조리(cooking)	chickpea	+58.0	-47.0	-11.0	Lintas와 Cappelloin (48)
조리(cooking)	chickpea	+44.1	-37.7	-16.7	Macroni 등 (49)
Microwaving	chickpea	+44.0	-37.6	-16.4	Macroni 등 (49)
압출가공(extrusion)	chickpea	+30.0	-9.0	-19.0	Lintas와 Cappelloin (48)
조리(cooking)	white bean	+10.1	+1.0	-16.0	Bravo (47)
조리(cooking)	Common bean	+50.4	-28.4	-22.0	Macroni 등 (49)
Microwaving	Common bean	+53.2	-29.8	-23.4	Macroni 등 (49)

다. Bravo 등(43)은 legume 전분의 소화율은 일반적인 조리보다는 발아한 후 조리할 경우가 소화율이 더 높다고 보고하였으며 침지과정을 거칠 경우 크게 증가한다고 보고하였다. Periago 등(44)은 chickpea를 조리하였을 때 RS함량이 39.9%에서 3.8%로 크게 감소하였다고 보고하였다. 일반적인 조리보다는 압력이 가해진 조리방법이 소화율을 높이는 데 가장 효과적이라고 보고되고 있다. Rehman과 Shah(45)는 pulse의 전분 소화율은 36.8~42.0%이었으며 일반적인 조리에서 70.0~77.3%로 증가했고 가압 조리에서 87.4~91.0%로 소화율이 크게 증가하는 결과를 나타낸다고 보고하였다.

압출가공(extrusion)도 전분의 소화율을 크게 증가시킨다. 압출과정에서의 가해진 전단력(shearing force)에 의해 전분을 포함하는 구조가 파괴되어 소화효소의 접근이 용이하게 된다(39). 또한 압출가공에 의해 입자의 크기가 작아지기에 효소가 접근할 수 있는 표면적인 넓어져 소화율이 증가한다. 그러나 일부 전분질 식품에서 압출가공에 의해 소화율이 감소한다는 보고되었는데 이는 압출가공 중 아밀로오스-지질 복합체와 전분-단백질 간의 새로운 상호작용이 형성되어 효소작용이 지연된 것으로 보고하였다(46).

곡류들의 가공방법에 사용되는 탈피(dehulling), 침지, 발아에 의해 소화율이 증가하는데  $\alpha$ -amylase의 활성을 저해하는 피틴산, 탄닌, 폴리페놀 등이 파괴되기 때문이다. 피틴산이나 탄닌이 가공에 의해 파괴되면 곡류 입자 내에 큰 공간이 생성되고 그 사이로 효소의 접근이 용이하기에 소화율이 증가한다(47). Legume에도  $\alpha$ -amylase의 활성을 저해하는 lectin, saponin, 피틴산, 탄닌 등이 많이 함유되어 있고 이러한 성분들에 의해 전분 소화율이 감소하게 되는데 조리, 침지, 발아, 탈피, 압출가공 등에 의해 이러한 저해 물질이 파괴되어 전분 소화율이 크게 증가한다(2, 47).

많은 연구자들에 의해 보고된 pulse의 전분소화율인 RDS, SDS, RS가 가공방법들에 의해 변화한 결과들을 표 5에 정리하였다(47-49). 다양한 가공방법에 의해 RDS는 크게 증가하였으며 SDS는 대부분이 감소하는 경향을 보였고 RS함량은 크게 감소하는 경향을 보였다. 가공에 의해 전분 내 결정 및 분자 구조의 변화나 소화효소의 활성을 저해했던 물질들의 파괴에 의해 RS나 SDS가 RDS로 전환되었기 때문이다(표 5). 결과적으로 다양한 가공법에 의해 전분 소화율이 크게 변화하고 구체적으로 RDS함량이 크게 증가하였다.

대부분의 식품 내 전분은 조리과중 중에 호화되

고 상온이나 저온에서 저장 시 노화현상이 일어난다. 아밀로오스와 같은 직선상의 구조는 빠르게 노화가 일어나며 분자를 가지고 있는 아밀로펙틴은 재결합을 형성하는데 비교적 오랜 시간을 요구한다(1). 노화에 의한 결정성의 향상은 소화율을 감소시킨다. 조리된 쌀을 냉장온도에서 보관하게 되면 전분 소화율이 감소하고 그들의 혈당지수도 감소하였다(50). Brovo(47)는 조리된 pulse을 4°C에서 24시간 저장하였을 때 RS함량이 두 배 이상 증가한다고 보고하였으며 이는 pulse 전분의 아밀로오스와 아밀로펙틴의 부분적인 노화에 기인한다고 설명하였다. Mishra 등(51)은 조리된 감자를 냉장온도에서 저장하였을 때 RDS함량이 95%에서 45%로 감소한다고 보고하였다. 결과적으로 호화된 전분을 포함하는 식품을 냉장온도에 저장하는 동안 새로운 결정구조를 형성하고 이러한 구조는 효소에 의한 소화율을 낮추는 원인이 된다.

## 6. 이화학적 변성에 따른 전분소화율

천연전분도 식품 산업에서 점도를 증가시키거나 품질을 조절하는데 많이 사용되고 있으나 열에 대한 불안전성, 전단력에 대한 낮은 저항성, 노화 경향 때문에 여러 가지 방법으로 변성된 전분이 식품에 널리 사용되고 있다(1). 이러한 변성전분들은 식품 산업에서 제품의 품질에 영향을 미칠 뿐 아니라 전분 소화율에도 영향을 준다(52). Hoover와 Sosulski(53)는 아세틸화전분은 천연전분에 비해 소화율이 10% 정도 감소한다고 보고하였으며 이러한 치환에 의한 소화율감소는 전분의 구성단위인 포도당의 2번 탄소에 아세틸기가 치환되기에  $\alpha$ -amylase의 활성부위에 기질이 결합하는 것을 구조적으로 방해하기 때문이다. Chung 등(52)은 전분의 하이드록시프로필화가 아세틸화보다는 효소적 가수분해를 효과적으로 줄일 수 있다고 보고하였다. 가교전분에 대한 연구는 다소 상반된 결과를 제시하고 있다. 일부 연구에서는 가교전분은 천연전분에 비해 약간의 소화율 감

소는 있으나 큰 차이를 보이지 않는다고 보고하였다(52, 53). 그러나 다른 연구에서는 가교전분은 소화율을 크게 감소하여 높은 RS함량을 보인다고 하였으며 특히 RS4형으로 분류하고 있다(54). 가교전분에서의 소화율의 차이는 소화율을 측정하는 방법이나 가교제의 종류와 사용되는 양의 차이에 기인한 것으로 생각된다. Han과 BeMiller(55)는 옥수수, 타피오카, 감자전분의 옥테닐호박산전분은 천연전분에 비해 SDS와 RS함량이 높고 RDS는 감소한다고 보고하였다. Wolf 등(56)은 텍스트린 화전분이나 산화전분은 천연전분에 비해 RS함량이 증가한다고 보고하였다. Chung 등(52)은 화학적으로 변성된 전분은 호화된 후에도 천연전분에 비해 낮은 소화율을 나타낸다고 보고하였다.

물리적으로 전분의 구조를 변성하는 대표적인 방법이 HMT(heat-moisture treatment)와 annealing이 있다. 물리적 변성에 의해 전분의 수분흡수력, 입자구조, 결정성, 팽윤력, 용해도, 점도 등이 변화하는데 그와 함께 소화율도 변화하게 된다(19). Annealing에 의해 무정형 영역의 상호작용이 증가하고 결정성의 배열이 안정화되기에 소화율이 감소한다고 보고되었으며 반대로 전분입자 표면에 구멍이 생기거나 균열을 야기하기에 오히려 소화율을 높인다고 보고하기도 하였다(57, 58). HMT에 대한 연구결과도 상반되게 제시되고 있는데 서류전분을 HMT 처리하였을 때 결정구조가 일부 파괴되고 그로 인하여 소화율이 증가한다고 보고하기도 하였고 아밀로오스 사슬의 상호작용에 의하여 무정형 영역의 일부가 결정성으로 전환되고 아밀로오스-지질 결합체를 새로이 형성하기에 소화율을 낮춘다고 보고하기도 하였다(19, 59). Shin 등(60)은 고구마전분을 HMT처리하였을 때 처리온도와 수분함량에 의존하여 SDS함량이 증가한다고 보고하였다. Anderson 등(61)은 HMT 처리한 쌀전분은 천연전분에 비해 천천히 소화된다고 보고하였다. Chung 등(19)은 legume전분을 annealing 처리하였을 때 RDS와 RS함량이 증가하였으며 SDS함량은 감소하였는데 RDS함량의 증가는 전분 표





면의 균열의 증가로 해석하였으며 RS의 증가는 전분 사슬사이의 상호작용의 증가에 의한 결정성의 강도가 다소 커졌기 때문으로 설명하였다. 호화한 후에는 RDS는 감소하였고 RS와 SDS함량은 증가하였다고 보고하였다. Chung 등(19)은 HMT 처리한 legume 전분에서도 annealing과 비슷한 결과를 보였는데 RDS함량의 증가는 전분 결정의 일부가 파괴되었기 때문이었으며 RS함량의 증가는 아밀로오스와 아밀로펙틴 분자 사이의 상호작용에 의한 소화율 감소로 설명하였다. 또한 호화한 후에도 비교적 높은 RS와 SDS함량은 열처리 중에도 HMT에 의해 생성된 아밀로오스-아밀로오스 상호작용이 파괴되지 않았기 때문이라고 설명하였다. Annealing이나 HMT에 의한 전분 소화율의 변화는 전분의 종류, 처리 조건, 사용된 소화율 측정방법에 따라 다양한 결과를 나타냈다. 그러나 효과적인 조건에서 annealing이나 HMT 처리된 전분의 경우 가공된 후에도 천연전분에 비해 높은 RS나 SDS함량을 나타냈기에 산업적으로 응용성이 있다고 보고하였다.

## 7. 전분 이외의 성분에 의한 전분소화율

전분질 식품에서 전분 소화율에 영향을 미치는 다양한 요소들 중 하나가 점도이다. 식품 속에 포함된 수용성 검류들은 인체 내에서 전분의 소화 흡수 속도를 낮추고 혈당도 천천히 변화시킨다고 보고되고 있다. Ellis 등(62)은 돼지의 먹이에 구아검을 첨가하였을 때 혈당의 증가속도가 낮아졌으며 탄수화물의 소화흡수속도가 감소하였다고 보고하였다. 이러한 검 첨가시 소화율 감소는 점도 증가로 인한 소화효소와 기질과의 반응의 기회를 줄였기 때문으로 보고하였다. Koh 등(63)의 보고에서도 쌀반죽에 alginate를 첨가하였을 때 쌀전분과 alginate가 연속상의 네트워크를 형성하여 소화효소가 접근하는데 물리적인 장벽을 형성하기 때문에 소화율이 감소하였다.

전분질 식품에서의 지질도 전분소화율에 영향

을 미친다. 전분 내 아밀로펙틴보다는 아밀로오스가 지질과의 결합을 형성하기 쉬운데 아밀로오스는 나선구조를 이루고 나선구조의 안쪽은 소수성을 가지고 있기에 지질과 결합하여 안정한 형태를 이룬다(1). Crowe 등(64)은 아밀로오스와 지방산을 첨가하였을 때 소화율은 35%까지 감소하였고 RS함량을 증가시킨다고 보고하였다. 전분질 식품에서의 지질의 존재는 이와 같이 소화흡수율을 다소 낮추기에 혈당지수를 낮춘다고 알려져 있다.

전분질 식품 내에 단백질의 존재 역시 전분 소화율에 영향을 미친다. 전분과 단백질의 상호작용의 존재는 전분소화율을 낮추고 혈당반응을 낮춘다고 보고하였다(65). 단백질 존재에 의한 소화율 감소는 전분을 중심으로 단백질이 둘러싸면서 상호작용하는 형태로 존재하며 단백질과의 네트워크를 형성하기에 소장에서의 효소분해를 감소시킨다(65). 유사하게 gluten-free 제품과 일반 밀가루 빵을 비교하였을 때 일반 밀가루 빵의 전분 소화율이 낮은 이유는 단백질에 의한 효과라고 보고하였다(65).

밀, 귀리, 콩 등에 존재하는 다양한 형태의  $\alpha$ -amylase 저해제가 존재한다.  $\alpha$ -amylase 저해제는 단백질형태와 비단백질형태인 폴리페놀화합물로 구성된다. 이러한  $\alpha$ -amylase 저해제는 전분의 소화율을 낮추는 원인이 된다(6, 66). 전분질 식품의 식이섬유가 존재할 때 식이섬유의 수분흡수력에 의해 점도를 높이기 때문에 장내에서 분해된 포도당의 흡수속도를 낮춘다고 보고하였다(67).

## 8. 결론

전분질 식품의 전분소화율을 다양한 요소들에 의해 영향을 받는데 전분의 결정 및 분자구조와 높은 상관성을 가진다. 쌀, 밀, 감자, 옥수수전분 등의 전분의 종류에 따라 또는 같은 종이라 하더라도 품종에 따라 전분의 결정 및 분자구조가 다르며 그로 인해 소화율의 차이를 나타낸다. 또한 다양한 형태의 식품 가공방법은 전분의 결정 및

분자 구조의 변화를 야기하기에 소화율의 증가나 감소의 원인이 된다. 전분질 식품 내 전분 외에 다른 성분과 전분과의 상호작용이 존재하고 이러한 상호작용이 전분 소화율을 변화시키기도 한다. 결과적으로 전분의 소화흡수속도와 관련한 질환을 예방하고 건강한 삶을 살기 위해서는 새로운 형태의 전분질 식품이나 신가공기술을 활용하여 전분의 소화율을 낮출 필요가 있으며 이러한 제품의 개발을 위해서는 전분의 결정 및 분자구조와 전분 소화율과의 상관성에 대한 체계적인 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. Thomas DJ, Atwell WA. Starches. St. Paul, MN: Eagan Press (1997)
2. Lehmann U, Robin F. Slowly digestible starch- its structure and health implications: a review. Trends Food Sci. Technol. 18: 346-355 (2007)
3. Singh J, Dartois A, Kaur L. Starch digestibility in food matrix. Trends Food Sci. Technol. 21: 168-180 (2010)
4. Sajilata MG, Singhal RS, Kulkarni PR. Resistant starch- a review. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 5: 1-17 (2006)
5. Chang MJ. Starch in human health. Food Ind. Nutr. 9: 10-18 (2004)
6. Hoover R, Zhou Y. *In vitro* and *in vivo* hydrolysis of legume starches by  $\alpha$ -amylase and resistant starch formation in legumes-  $\alpha$  review. Carbohydr. Polym. 54: 401-417 (2003)
7. Ring SG, Gee JM, Whittam M, Orford P, Johnson IT. Resistant starch: Its chemical form in food stuffs and effects on digestibility *in vitro*. Food Chem. 28: 97-109 (1988)
8. Socorro M, Levy-Benshimol A, Tovar J. *In vitro* digestibility of cereals and legumes(*Phaseolus vulgaris*) starches by bovine pancreas and human pancreatic  $\alpha$ -amylase. Starch 41: 69-71 (1989)
9. Englyst HN, Kingman SM, Cummings JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. Eur. J. Clin. Nutr. 46: S33-S50 (1992)
10. Englyst KN, Vinoy S, Englyst HN, Lang V. Glycaemic index of cereal products explained by their content of rapidly and slowly available glucose. Brit. J. Nutr. 89: 329-339 (2003)
11. Ells LJ, Seal CJ, Kettlitz B, Bal W, Mathers, JC. Postprandial glycaemic, lipaemic and haemostatic responses to ingestion of rapidly and slowly digested starches in healthy young women. Brit. J. Nutr. 94: 948-955 (2005)
12. Benton D, Nabb S. Carbohydrate, memory, and mood. Nutr. Rev. 11: S61-S67 (2003)
13. Leathwood P, Pollet P. Effects of slow release carbohydrates in the form of bean flakes on the evolution of hunger and satiety in man. Appetite 10: 1-11 (1988)
14. Morais MB, Feste A, Miller RG, Lifichitz CH. Effect of resistant starch and digestible starch on intestinal absorption of calcium, iron and zinc in infant pigs. Paediatr. Res. 39: 872-876 (1996)
15. Asp NG, Bjorck I. Resistant Starch. Trends Food. Sci. Technol. 3: 111-114 (1992)
16. Raben A, Tagliabue A, Christensen NJ, Madsn J, Holst JJ, Astrup A. Resistant starch: the effect on postprandial glycemia, hormonal response and satiety. Am. J. Clin. Nutr. 60: 544-551 (1994)
17. Ranhotra GS, Gelroth JA, Leinen SD. Hypolipidemic effect of resistant starch in hamsters is not dose dependent. Nutr. Res. 17: 317-323 (1997)
18. Zhang G, Ao Z, Hamaker BR. Slow digestion property of native cereal starches. Biomacromolecules 7: 3252-3258 (2006)
19. Chung HJ, Liu Q, Hoover R. The impact of annealing and heat-moisture treatments on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. Carbohydr. Polym. 75: 436-447 (2009)
20. Cummings JH, Englyst HN. Gastrointestinal effects of food carbohydrate. Am. J. Clin. Nutr. 61: 938S-945S (1995)
21. Song S, Choi H, Lee S, Park J, Bim B, Paik H, Song Y. Establishing a table of glycemic index values for common Korean foods and an evaluation of the dietary glycemic index among the Korean adult population. Korean J. Nutr. 45: 80-93 (2012)
22. Jenkins DJA, Wolever TMS, Collier GR, Ocana A, Rao AV, Buckley G, Lan Y, Mayer A, Thompson LU. Metabolic effects of a low-glycemic-index diet. Am. J. Clin. Nutr. 46: 968-975 (1987)
23. Jenkins DJA, Wolever TMS, Taylor RH, Barker H, Fielden H, Baldwin JM, Bowling AC, Newman HC, Jenkins AL, Goff DV. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. Am. J. Clin. Nutr. 34: 362-366 (1981)
24. Foster-Powell K, Holt SHA, Brand-Miller JC. International table of glycemic index and glycemic load values: 2002. Am. J. Clin. Nutr. 76: 5-56 (2002)
25. Miller JB. Importance of glycemic index in diabetes. Am. J. Clin. Nutr. 59: S747-S752 (1994)
26. Roberts SB. High-glycemic index foods, hunger, and obesity: is there a connection? Nutr. Reviews 58: 163-169 (2000)
27. Wolever TMS, Mehling C. High-carbohydrate-low-glycaemic index dietary advice improves glucose disposition index in subjects with impaired glucose tolerance. Brit. J. Nutr. 87: 477-487 (2002)
28. Chung HJ, Lim HS, Lim ST. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. J. Cereal Sci. 43: 353-359 (2006)
29. Lim JH, Kim BK, Park KJ. The present condition for glycemic index standardization. Bulletin Food Technol. 22: 78-88 (2009)



30. Kaur L, Singh J, McCarthy OJ, Singh H. Physicochemical, rheological and structural properties of fractionated potato starches. *J. Food Eng.* 82: 383-394 (2007)
31. Chung HJ, Liu Q, Donner E, Hoover R, Warkentin TD, Vandenberg B. Composition, molecular structure, properties and *in vitro* digestibility of starches from newly released Canadian pulse cultivars. *Cereal Chem.* 85: 471-479 (2008)
32. Capriles VD, Coelho KD, Guerra-Matias AC, Areas JAG. Effects of processing methods on amaranth starch digestibility and predicted glycemic index. *J. Food Sci.* 73: H160-H164 (2008)
33. Benmoussa M, Suhendra B, Aboubacar A, Hamaker BR. Distinctive sorghum starch granule morphologies appear to improve raw starch digestibility. *Starch* 58: 92-99 (2006)
34. Srichuwong S, Sunarti TC, Mishima T, Isono N, Hisamatsu M. Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. *Carbohydr. Polym.* 60: 529-538 (2005)
35. Jane JL, Wong KS, McPherson AE. Branch structure difference in starches of A- and B-type X-ray patterns revealed by their naegeli dextrans. *Carbohydr. Res.* 300: 219-227 (1997)
36. 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)
37. Roopa S, Premavalli KS. Effect of processing on starch fractions in different varieties of finger millet. *Food Chem.* 106: 875-882 (2008)
38. Chung HJ, Liu Q. Effect of gamma irradiation on molecular structure and physicochemical properties of corn starch. *J. Food Sci.* 74: C353-C361 (2009)
39. Alonso R, Aguirre A, Marzo F. Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and *in vitro* digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. *Food Chem.* 68: 159-165 (2000)
40. Chau CF, Cheung PCK. Effect of various processing methods on antinutrients and *in vitro* digestibility of protein and starch of two Chinese indigenous legume seeds. *J. Agr. Food Chem.* 45: 4773-4776 (1997).
41. Urooj A, Puttaraj S. Effect of processing on starch digestibility in some legumes—an *in vitro* study. *Nahrung/Food* 38: 38-46 (1994)
42. Negi A, Boora P, Khetarpaul N. Starch and protein digestibility of newly released moth bean cultivars: Effect of soaking, dehulling, germination and pressure cooking. *Nahrung/Food* 45: 251-254 (2001)
43. Bravo L, Siddhuraju P, Saura-Calixto F. Effect of various processing methods on the *in vitro* starch digestibility and resistant starch content of Indian pulses. *J. Agr. Food Chem.* 46: 4667-4674 (1998)
44. Periago MJ, Ros G, Casas JL. Non-starch polysaccharides and *in vitro* digestibility of raw and cooked chick peas. *J. Food Sci.* 62: 93-96 (1997)
45. Rehman Z, Shah WH. Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes. *Food Chem.* 91: 327-331 (2005)
46. Guha M, Ali SZ, Bhattacharya S. Twin-screw extrusion of rice flour without die: effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. *J. Food Eng.* 32: 251-267 (1997)
47. Bravo L. Effect of processing on the non-starch polysaccharides and *in vitro* starch digestibility of legumes. *Food Sci. Technol. Int.* 5: 415-423 (1999)
48. Lintas C, Cappelloni M. Effect of processing on legume resistant starch. *Eur. J. Clin. Nutr.* 16: S103-S104 (1992)
49. Marconi E, Ruggeri S, Cappelloni M, Leonardi D, Carnovale E. Physicochemical, nutritional, microstructural characteristics of chick-peas (*Cicer arietinum* L.) and common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) following microwave cooking. *J. Agr. Food Chem.* 48: 5986-5994 (2000)
50. Hu P, Zhao H, Duan Z, Linlin Z, Wu D. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *J. Cereal Sci.* 40: 231-237 (2004)
51. Mishra S, Monro J, Hedderley D. Effect of processing on slowly digestible starch and resistant starch in potato. *Starch* 60: 500-507 (2008)
52. Chung HJ, Shin DH, Lim ST. *In vitro* starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches. *Food Res. Int.* 41: 579-585 (2008)
53. Hoover R, Sosulski FW. Studies on the functional characteristics and digestibility of starches from *Phaseolus vulgaris* biotypes. *Starch* 37: 181-191 (1985)
54. Woo KS, Seib PA. Cross-linked resistant starch: Preparation and properties. *Cereal Chem.* 79: 819-825 (2002)
55. Han JA, BeMiller JN. Preparation and physical characteristics of slowly digesting modified food starches. *Carbohydr. Polym.* 67: 366-374 (2007)
56. Wolf BW, Bauer LL, Fahey GC. Effects of chemical modification on *in vitro* rate and extent of food starch digestion: An attempt to discover a slowly digest starch. *J. Agr. Food Chem.* 47: 4178-4183 (1999)
57. Hoover R, Vasanthan T. The effect of annealing of the physicochemical properties of wheat, oat, potato and lentil starches. *J. Food Biochem.* 17: 303-325 (1994)
58. Jacobs H, Eerlingen RC, Spaepen H, Grobet PJ, Delcour JA. Impact of annealing on the susceptibility of wheat, potato and pea starches to hydrolysis with pancreatin. *Carbohydr. Res.* 305: 193-207 (1998)
59. Hoover R, Manuel H. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of legume starches. *Food Res. Int.* 29: 731-750 (1996)
60. Shin SI, Kim HJ, Ha HJ, Lee HS, Moon TW. Effect of hydrothermal treatment on formation and structural characteristics of slowly digestible non-pasted granular sweet potato starch. *Starch* 57: 421-

- 430 (2005)
61. Anderson AK, Guraya HS, James C, Salvaggio L. Digestibility and pasting properties of rice starch heat-moisture treated at the melting temperature ( $T_m$ ). *Starch* 54: 401-409 (2002)
62. Ellis PR, Roberts FG, Low AG, Morgan LM. The effect of high-molecular-weight guar gum on net apparent glucose absorption and net apparent insulin and gastric inhibitory polypeptide production in the growing pig: relationship to rheological changes in jejunal digesta. *Brit. J. Nutr.* 74: 539-556 (1995)
63. Koh LW, Kasapis S, Lim KM, Foo CW. Structural enhancement leading to retardation of *in vitro* digestion of rice dough in the presence of alginate. *Food Hydrocolloids* 23: 1458-1464 (2009)
64. Crowe TC, Seligman SA, Copeland L. Inhibition of enzymic digestion of amylose by free fatty acids *in vitro* contributes to resistant starch formation. *J. Nutr.* 130: 2006-2008 (2000)
65. Jenkins DJA, Thorne MJ, Wolever TMS, Jenkins AL, Rao AV, Thompson LU. The effect of starch-protein interaction in wheat on the glycemic response and rate of *in vitro* digestion. *Am. J. Clin. Nutr.* 45: 946-951 (1987)
66. Dreher ML, Dreher CJ, Berry JW. Starch digestibility of foods: a nutritional perspective. *Crit. Reviews Food Sci. Nutr.* 20: 47-71 (1984)
67. Jenkins DJA, Wolever TMS, Taylor RH, Ghafari H, Jenkins AL, Barker H. Rate of digestion and postprandial glycaemia of foods in normal and diabetic subjects. *Brit. Medical J.* 281: 14-17 (1980).