

저선량 감마선 조사가 옥수수 녹말의 이화학 성질 및 저항전분 생성에 미치는 영향

김성곤* · 김정희 · 권중호¹

단국대학교 식품영양학과, ¹경북대학교 식품공학과

Effects of Low-Dose Gamma Irradiation on Physicochemical Properties and Formation of Resistant Starch of Corn Starch

Sung-Kon Kim*, Jeong-Hee Kim, and Joong-Ho Kwon¹

Department of Food Science and Nutrition, Dankook University

¹Department of Food Science and Technology, Kyungpook National University

Abstract Intrinsic viscosity of starch irradiated with Co-60 (0.25-9.1 kGy) significantly decreased, and swelling power and solubility measured at 80°C linearly increased with increasing irradiated dose. Radiation treatment up to 1 kGy increased amylose content of starch. Water-binding capacity increased rapidly up to 3 kGy. Peak viscosity of irradiated starches by Rapid visco Analyser and Visco/amylo/Graph indicated that the decrease in peak viscosity was dose-dependent. Gamma irradiation showed no effect on endothermic temperatures of irradiated starches, but decreased endothermic enthalpy with increasing dose level. Viscosity of starch autoclaved at 120°C and air-dried significantly decreased with increasing irradiation dose. Resistant starch content slightly decreased upon irradiation.

Key words: corn starch, irradiation, resistant starch, gelatinization

서 론

방사선 조사는 식품 저장성 향상에 효율적으로 이용되는 물리적 처리 방법의 하나로서, 우리나라에서는 녹말의 경우 최대 선량 5 kGy까지 사용이 허가되어 있다(1). 방사선 조사는 녹말 분자의 크기와 구조에 영향을 주어 이화학적 성질 변화를 일으키므로(2) 변성녹말 제조의 유용한 방법으로 인식되고 있다. 옥수수 녹말은 자연계에서 풍부한 녹말의 하나로 식품산업은 물론 제지공업, 방직공업, 기타산업에 녹말 자체 또는 변성녹말 형태로 다양하게 이용되고 있다. 이에 따라 방사선 조사한 옥수수 녹말의 성질에 대하여 다양한 연구가 이루어져 왔다.

방사선 조사가 옥수수 녹말에 미치는 영향 중 가장 뚜렷한 변화는 점도감소(2-7)이다. 점도감소는 후추(8), 곡류(9), 도토리(10)에서도 보고되어 있다. 옥수수 녹말의 점도는 자외선 처리에 의해서도 감소한다(11). 또한 방사선 조사에 의하여 옥수수 녹말의 팽윤력은 조사선량 30 kGy까지 증가하고, 그 이상의 선량에서는 감소하나, 용해도는 조사선량 증가에 따라 계속 증가한다(4,6,12). 고선량 조사(0-110 kGy)에 의하여 옥수수 녹말의 청색값(blue value)의 감소(4,7), 말단 알데하이드 그룹의 수를 나타내는 알칼리값(4,6,7)과 페리시아나이드(ferricyanide) 수(4)의 증가 현상이 일어난다.

Kang 등(13)은 조사선량 10-50 kGy에서 pH변화에 따른 옥수수 녹말의 성질에 대하여, Roushdi 등(6)은 감마선 조사에 의한 옥수수 녹말의 구조변화에 대하여 보고하였다. 이들 결과에 의하면 선량 50 kGy에서 -CH-OH기가 메틸렌기(-CH₂)로 전환 즉 데옥시 당이 생성되며, 20 kGy까지 아밀로오스 함량은 증가, 녹말, 아밀로오스와 아밀로펙틴의 사슬길이는 감소하였다. De Kerf 등(14)도 옥수수 녹말을 X-선 또는 전자빔으로 100 kGy까지 조사했을 때 분자량과 다분산성(polydispersity)은 조사선량의 증가에 따라 감소함을 보고하였다.

지금까지의 연구는 대부분이 10 kGy 이상의 고선량을 대상으로 이루어졌고, 저 선량(10 kGy 이하)에서의 방사선 조사에 의한 옥수수 녹말의 성질에 대한 연구로는 조사선량 0-6 kGy에서의 점도, 팽윤력과 용해도, 알칼리값에 대하여 보고한 An 등(7)의 연구가 있다. 저항녹말은 작은 장자에서 소화되지 않는 녹말의 획분으로 생리적 유용성과 기능성 성질 때문에 널리 주목되고 있다(15). 저항녹말은 여러 형태가 있으나 가장 보편적인 것은 녹말의 노화로 일어나는 것이다. 녹말의 가열-냉각 방법에 의한 저항녹말 생성은 기본적으로 아밀로오스의 노화에 의존한다(16,17). 방사선 조사는 녹말의 아밀로오스 함량을 증가시키는 것으로 보고되어 있다(6). 따라서 이 연구에서는 저선량(0-9.1 kGy)을 조사한 옥수수 녹말의 이화학 성질과 감마선 처리 녹말을 이용한 저항녹말의 생성 가능성을 검討하였다.

재료 및 방법

실험재료와 감마선 조사

옥수수 녹말은 시판제품(삼양제넥스)을 구입하여 사용하였다.

*Corresponding author: Sung-Kon Kim, Department of Food Science and Nutrition, Dankook University, Yongsan-gu, Hannam-ro 147, Seoul 140-714, Korea
Tel: 82-2-709-2426
Fax: 82-2-790-2447
E-mail: k0903@dku.edu

Received February 11, 2006; accepted April 10, 2006

시료는 한국원자력연구소의 Co-60감마선 조사시설(AECL, IR-79, MDS Nordion International Co., Ltd., Ottawa, ON, Canada)을 이용하여 실온에서 1시간당 1kGy의 선량률로 조사하였다. 시료 500g을 폴리에틸렌 용기에 담고 흡수선량 0.25-9.1 kGy로 처리하고 ceric cerous dosimeter를 사용하여 흡수선량을 확인하였다.

고유점도 측정

녹말의 고유점도는 미국의 옥수수 산업연구 협회(18)의 방법에 따라 측정하였다. 녹말 0.5g에 25°C의 중류수 50mL를 넣고 잘 분산시킨 뒤 25°C의 2N NaOH 용액 50mL를 넣어 100mL로 하였다. 고유점도는 Ubbelodhe 모세관점도계(No. 75)를 이용하여 25°C에서 측정하고 다음 식으로부터 구하였다.

$$\text{고유점도} = \frac{2.303 \log(t/t_0)}{0.5}$$

여기에서 t 는 녹말용액의 흐름시간(초), t_0 는 1N NaOH 용액의 흐름시간(초)이다.

팽윤력과 용해도 측정

팽윤력과 용해도는 Leach 등(19)의 방법에 따라 측정하였다. 녹말 1g(건량기준)을 50mL 원심분리 관에 넣고 중류수 30mL로 분산시키고 항온수조를 사용하여 80°C까지 가열시키고 80°C에서 1시간 유지한 뒤 4,000 rpm에서 30분간 원심분리 하였다.

상징액은 미리 무게를 측정한 비커에 옮겨 105°C에서 5시간 건조시켰다. 원심분리 후 침전 녹말의 무게(B)와 건조후의 무게(A)로부터 팽윤력과 용해도를 계산하였다.

물 결합능력 측정

녹말의 물 결합능력은 Medcalf와 Gilles의 방법(20)으로 측정하였다. 시료 2g에 중류수 40mL를 넣고 1시간 동안 교반하고 4,000 rpm의 속도로 30분간 원심분리 하여 상징액을 제거하고 침전된 녹말의 무게를 측정하여 처음 시료 녹말과의 무게 비로부터 물 결합능력을 계산하였다.

겉보기 아밀로오스 함량 측정

겉보기 아밀로오스 함량은 Williams 등(21)의 방법에 따라 측정하였다. 옥수수 녹말 20mg에 0.5N KOH 10mL를 넣어 완전히 녹인 뒤 100mL로 희석하였다. 이 용액 10mL를 취하여 0.1N HCl 5mL와 0.2% I₂ 용액 0.5mL를 넣고 50mL로 희석하고 10분 뒤에 625nm에서 흡광도를 측정하였다. 겉보기 아밀로오스 함량은 감자 아밀로오스(No. A-0512, Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, USA)와 감자 아밀로펩틴(No. A-8515, Sigma Chemical Co.)을 사용하여 만든 표준곡선으로부터 구하였다.

점도패턴 측정

녹말의 호화에 따른 점도패턴은 신속점도계(RVA, Rapid Visco Analyser-4D, Newport Co., Warriwood, Australia)와 아밀로그램(Brabender OHG, Duisberg, Germany)로 측정하였다. RVA는 ICC 표준방법(22)에 따라 측정하였다. 녹말 3.0g(건량기준)과 중류수 25g을 RVA 용기에 넣고, 50°C에서 1분간 유지 후 95°C까지 1분당 12°C로 가열하고 95°C에서 2.5분간 유지한 뒤 1분당 -12°C로 50°C까지 냉각시키고 50°C에서 2분간 유지하였다. RVA 비스코그램으로부터 최고점도, 최저점도, 최종점도 및 setback(최종점도와 최저점도와의 차이)을 구하였다. 점도 단위는 rapid visco unit(RVU)로 표시하였다. 아밀로그램은 Medcalf와 Gilles(23) 방

법에 따라 측정하였다. 시료 농도는 8%(건량기준), 혼탁액은 500g으로 하고, 30°C에서부터 94.5°C까지 1분당 1.5°C의 속도로 가열하고 94.5°C에서 15분간 유지시킨 뒤 다시 1분당 -1.5°C의 속도로 50°C까지 냉각시켰다. 아밀로그램으로부터 최고점도, 15분 후 점도, 냉각점도와 setback을 구하였다.

Differential Scanning Calorimetry

녹말 10mg(건량기준)과 중류수 30mg을 스테인리스 강철 팬에 담고, 실온에서 1시간 방치한 뒤 Differential Scanning Calorimetry (Model DSC-4, Perkin-Elmer, USA)를 이용하여 1분당 10°C의 속도로 30°C로부터 100°C까지 가열하여 흡열 피크를 얻었다. 대조 팬은 빈 팬을 사용하였다. 이 흡열 피크로부터 호화개시온도(T_o), 호화정점온도(T_p), 호화종료온도(T_c)와 호화엔탈피(ΔH)를 구하였다.

저항녹말 생성

감마선 조사한 옥수수녹말(0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.6, 9.1 kGy)에 물을 녹말 무게의 4배 넣어 분산시키고 끓는 물에서 15분 가열한 뒤 121°C에서 1시간 가열 후 냉장고(4°C)에서 24시간 저장하였다. 이를 다시 가열-냉각하는 과정을 1회 반복한 다음 4배량의 95% 에탄올로 털수하는 과정을 3회 반복한 뒤 9,000 rpm에서 30분간 원심 분리하고 침전물을 40°C에서 3시간 건조시켜 60 메쉬 체에 통과시켰다(15).

시료의 색도는 색차계(JC-801S, Color Techno System Co., Tokyo, Japan)로, 점도패턴은 RVA로 측정하였다. 저항녹말 함량은 AOAC 방법(24)에 따라 측정하였다. 저항녹말 함량은 알파-아밀레이스만 처리한 저항녹말 함량과 비례하므로(15,25) 여기에서는 알파-아밀레이스 처리 저항녹말을 측정하였다. 시료 1g에 인산 완충용액(pH 6.0) 50mL를 넣고 분산시킨 뒤 알파-아밀레이스(No. A-3306, Sigma Chemical Co.) 0.1mL를 넣어 95°C 항온수조에서 15분간 반응시킨 뒤 실온으로 냉각시켰다. 여기에 95% 에탄올 200mL를 넣고 20시간 실온에서 방치한 뒤 여과지(Toyo No. 2)를 사용하여 여과하고 78% 에탄올 20mL 3회, 95% 에탄올 10mL 2회, 아세톤 10mL 2회로 세척하고 불용성 물질을 실온에서 건조시켰다. 저항전분 함량은 시료무게에 대한 불용성 불질의 무게비로부터 구하였다.

통계분석

모든 실험은 최소한 2회 이상 측정하였으며 평균±표준편차로 표시하였다. 실험 결과는 통계 분석용 프로그램 SAS을 이용하여 분산분석 및 던킨의 다중검정법으로 유의수준 5%에서 유의성을 평가하였으며, 상관성은 피어슨 상관분석법으로 검정하였다.

결과 및 고찰

이화학 성질

감마선 처리한 옥수수 녹말의 알칼리 용액에서의 흐름 정도를 판정하는 고유점도는 조사선량이 증가함에 따라 감소하였다(Table 1). 고유점도는 조사선량 2kGy를 경계로 기울기가 다른 두 개의 직선 관계를 보였다. 즉, 고유점도는 조사선량 2kGy까지는 옥수수 녹말 1.912 g/mL에서 1.702 g/mL로 급격히 감소하였고($R^2=0.99$), 조사선량 2-9.1 kGy에서 다시 완만하게 감소하였다($R^2=0.96$). Roushdi 등(6)은 조사선량의 증가에 따라 옥수수 녹말의 상대 점도가 감소하는 이유는 감마선 조사에 의한 녹말의 사슬길이의 감소에 기인한다고 하였다.

팽윤력은 조사선량의 증가에 따라 직선적으로 증가하였다

Table 1. Intrinsic viscosity, swelling power, solubility and apparent amylose content of irradiated corn starches

Irradiation dose (kGy)	Intrinsic viscosity (g/mL)	Swelling power at 80°C	Solubility at 80°C (%)	Apparent amylose content (%)
0	1.91±0.00 ^{a1)}	7.7±0.0 ^b	4.5±0.1 ^j	25.0±0.2 ^e
0.25	1.87±0.00 ^b	7.9±0.1 ^{gh}	4.8±0.1 ⁱ	25.6±0.6 ^{de}
0.5	1.85±0.00 ^c	7.9±0.1 ^{fg}	5.0±0.1 ^{hi}	25.9±0.3 ^d
0.75	1.82±0.01 ^d	8.0±0.1 ^{efgh}	5.2±0.1 ^{gh}	26.2±0.2 ^d
1.0	1.79±0.00 ^e	8.2±0.1 ^{defg}	5.5±0.1 ^g	27.6±0.2 ^c
2.0	1.70±0.01 ^f	8.2±0.1 ^{def}	6.1±0.1 ^f	27.9±0.3 ^{bc}
3.0	1.62±0.01 ^g	8.3±0.2 ^{de}	6.7±0.2 ^e	28.0±0.5 ^{bc}
4.0	1.57±0.01 ^h	8.4±0.1 ^{cd}	7.4±0.2 ^d	28.3±0.1 ^{abc}
5.0	1.51±0.01 ⁱ	8.7±0.1 ^c	8.6±0.2 ^c	28.4±0.0 ^{ab}
7.6	1.41±0.00 ^j	9.5±0.2 ^b	11.1±0.2 ^b	28.5±0.1 ^{ab}
9.1	1.38±0.00 ^k	9.8±0.3 ^a	12.6±0.1 ^a	28.8±0.2 ^a

¹⁾Mean of two determinations± standard deviation. The same letters in the same column are not significantly different at $p < 0.05$.

($R^2=0.97$). Kang과 Byun(4)은 옥수수 전분의 팽윤력(90°C)은 13.0에서 조사선량 10 kGy 처리시 17.5로 크게 증가하였다고 하였다. Roushdi 등(6)도 고 선량(5-20 kGy) 처리시 옥수수 녹말의 팽윤력의 증가 현상은 방사선은 분자간 수소결합을 파괴시켜 보수력(water holding capacity)을 증가시키기 때문으로 추정하였다. 그러나 An 등(7)은 조사선량 0-6 kGy에서 옥수수녹말의 팽윤력은 큰 변화를 없었으나 유의적으로 감소한다고 하였고, Lee 등(12)은 감마선 조사한 옥수수녹말의 팽윤력은 조사선량 10 kGy 이상에서 감소하는 것으로 보고하였다.

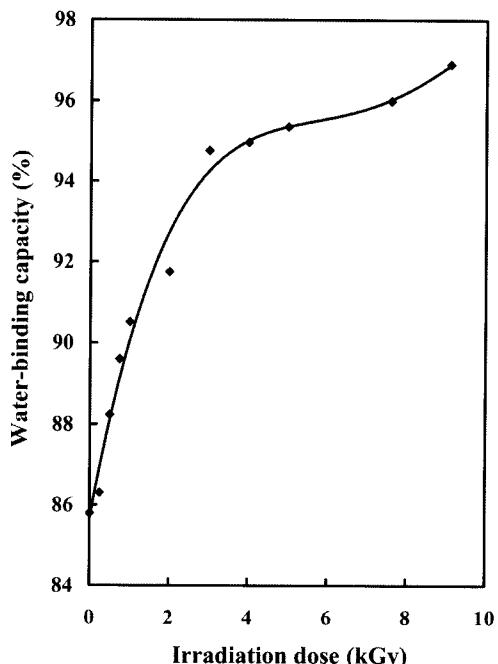
용해도도 팽윤력과 마찬가지로 조사선량과 비례하여 증가하였다($R^2=0.99$). 이러한 결과는 다른 연구(4,6,7,12,26) 결과와도 같은 경향이었다. De Kerf 등(14)도 옥수수와 감자녹말의 용해도는 X-선과 전자 빔 조사선량(0-100 kGy)의 증가에 따라 증가한다고 보고하였다. 용해도가 증가하는 원인으로서 Roushdi 등(6)은 아밀로오스와 아밀로펙틴 구조의 분해 또는 변화에 기인하는 것으로 추정하였다.

겉보기 아밀로오스 함량은 조사선량의 증가에 따라 증가하였다(Table 1). 겉보기아밀로오스 함량은 초기 25.0%에서 조사선량 1 kGy까지 27.6%로 증가하였고($R^2=0.90$), 조사선량 1.9-1 kGy까지는 완만하게 증가하였다($R^2=0.93$). Roushdi 등(6)은 조사선량 0.5-20 kGy에서는 선량 증가에 따라 옥수수 녹말의 아밀로오스 함량이 증가하나 그 이상에서는 감소하는데 그 이유는 아밀로펙틴의 가지 구조의 파괴 그리고 내부의 1,4-글루코사이드 결합의 일부 파괴로 아밀로펙틴의 함량은 감소하고 반대로 직선상의 아밀로오스 획분이 증가하기 때문이라고 하였다. De Kerf 등(14)도 X-선 또는 전자 빔 조사에 의해 옥수수와 감자녹말의 아밀로펙틴 분자량이 작아지는 현상으로부터 조사에 의하여 아밀로펙틴이 파괴되고 이에 따라 아밀로오스 획분이 증가한다고 하였다.

녹말의 물 결합능력은 조사선량의 증가에 따라 증가하였으나 3 kGy 이상에서의 증가 정도는 완만하였다(Fig. 1). Kang과 Byun(4)도 조사선량 30 kGy까지 조사선량의 증가에 따라 옥수수 녹말의 물 결합능력은 증가하였다고 하였다. 물 결합능력의 증가 현상은 앞에서 설명한 팽윤력 증가에서와 같이 감마선에 의해 녹말 분자간 수소 결합의 파괴에 따른 보수력의 증가 때문으로 생각된다.

점도패턴

감마선 조사선량에 따른 옥수수 녹말의 RVA 점도 변화 Table 2와 같다. 조사선량의 증가에 따라 호화온도는 낮은 온도 쪽으로

**Fig. 1. Water-binding capacity of irradiated corn starches.**

이동하였으며, 최고점도, 최종점도와 setback은 유의하게 감소하였다. 한편, 최고점도와 최저 점도와의 차이, 즉 점도붕괴도(breakdown)는 조사선량에 비례하여 증가하였다. 아밀로그래프의 의한 녹말의 점도 변화는 Table 3과 같다. 아밀로그래프에 의한 결과도 RVA 결과(Table 2)와 같은 경향을 보였다. 다만 점도붕괴도는 아밀로그래프의 경우 조사선량 3 kGy까지 증가하였으나 그 이후 감소하였다. RVA 또는 아밀로그래프의 최고점도와 조사선량과의 관계는 모두 직선관계식을 보였다(Fig. 2). RVA의 경우 대조구와 조사선량 9.1 kGy에서의 점도 차이는 18.3 RVU로서 감소 정도는 7.5%이었으나, 아밀로그래프의 경우 점도 차이는 290 BU로 감소 정도는 46.0%로 조사선량에 따른 녹말의 최고점도 감소 정도는 아밀로그래프에서 더욱 현저하였다. 이러한 차이는 시료의 농도(RVA 10.71%, 아밀로그래프 8.0%), 가열속도(RVA 12°C/min, 아밀로그래프 1.5°C/min), 교반속도(RVA 160 rpm, 아밀로그래프 75 rpm) 등 기기의 작동조건의 차이에 의한 것으로 생각된다. 감마선 조사에 따라 옥수수 녹말의 최고점도 감소는 여러 연

Table 2. RVA viscogram data of irradiated corn starches

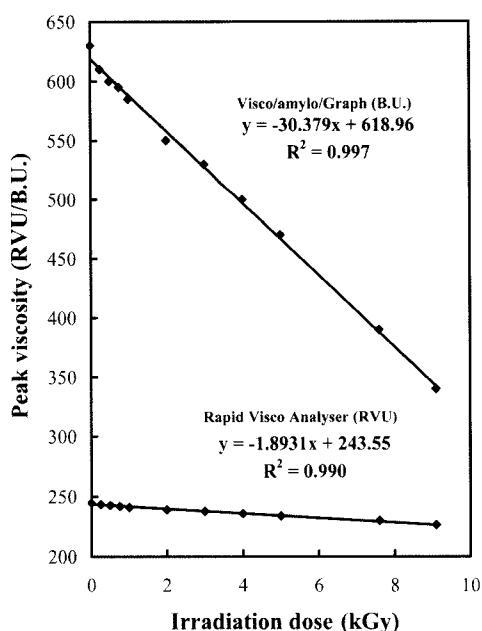
Irradiation dose (kGy)	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)
0	77.1 ± 0.4 ^{a1)}	244.7 ± 0.3 ^a	79.0 ± 0.6 ^k	253.4 ± 0.5 ^a	87.7 ± 0.7 ^a
0.25	77.0 ± 0.4 ^{ab}	243.5 ± 0.3 ^b	84.0 ± 0.8 ^j	241.8 ± 0.8 ^b	82.3 ± 0.2 ^b
0.5	76.9 ± 0.5 ^{ab}	242.8 ± 0.3 ^c	89.8 ± 0.3 ⁱ	232.2 ± 0.2 ^c	79.2 ± 0.3 ^c
0.75	76.7 ± 0.1 ^{ab}	241.8 ± 0.6 ^d	91.6 ± 0.4 ^h	227.9 ± 0.4 ^d	77.7 ± 0.7 ^d
1.0	76.6 ± 0.1 ^{abc}	241.0 ± 0.5 ^e	97.1 ± 0.5 ^g	219.7 ± 0.4 ^e	75.8 ± 0.3 ^e
2.0	76.5 ± 0.4 ^{bc}	239.0 ± 0.5 ^f	103.6 ± 0.4 ^f	201.8 ± 0.6 ^f	66.5 ± 0.6 ^f
3.0	76.1 ± 0.4 ^{bed}	237.5 ± 0.5 ^g	118.9 ± 0.4 ^e	181.4 ± 0.2 ^g	62.7 ± 0.3 ^g
4.0	75.9 ± 0.1 ^{de}	235.8 ± 0.5 ^h	125.6 ± 0.4 ^d	171.1 ± 0.4 ^h	60.9 ± 0.3 ^h
5.0	75.6 ± 0.4 ^{ef}	233.8 ± 0.5 ⁱ	134.1 ± 0.6 ^c	153.2 ± 0.9 ⁱ	53.4 ± 0.7 ⁱ
7.6	75.1 ± 0.1 ^f	229.8 ± 0.1 ^j	155.1 ± 0.6 ^b	117.6 ± 0.4 ^j	42.9 ± 0.6 ^j
9.1	74.4 ± 0.1 ^g	226.4 ± 0.4 ^k	161.6 ± 0.6 ^a	103.0 ± 0.9 ^k	38.3 ± 0.6 ^k

¹⁾Mean of three determinations ± standard deviation. The same letters in the same column are not significantly different at $p < 0.05$.

Table 3. Brabender Visco/amylo/Graph data of irradiated corn starches

Irradiation dose (kGy)	Initial pasting temperature (°C)	Peak temperature (°C)	Peak viscosity (B.U.)	15-min height (B.U.)	Breakdown (B.U.)	Viscosity at 50°C (°C)	Setback (B.U.)
0	78.0 ± 0.0 ^{a1)}	93.5 ± 0.4 ^a	630 ± 7 ^a	480 ± 6 ^a	150 ± 1 ^k	995 ± 3 ^a	515 ± 3 ^a
0.25	78.0 ± 0.4 ^a	93.0 ± 0.1 ^{ab}	610 ± 3 ^{ab}	450 ± 3 ^b	160 ± 0 ^l	930 ± 7 ^b	480 ± 4 ^b
0.5	77.0 ± 0.3 ^b	92.2 ± 0.3 ^b	600 ± 3 ^{bc}	430 ± 4 ^c	170 ± 1 ⁱ	900 ± 7 ^c	470 ± 3 ^c
0.75	76.5 ± 0.0 ^b	91.2 ± 0.1 ^c	595 ± 0 ^{cd}	415 ± 1 ^d	180 ± 1 ^h	880 ± 4 ^d	465 ± 3 ^c
1.0	76.5 ± 0.4 ^b	91.0 ± 0.3 ^c	585 ± 4 ^d	400 ± 7 ^e	185 ± 3 ^g	840 ± 7 ^e	440 ± 0 ^d
2.0	76.0 ± 0.0 ^b	90.5 ± 0.7 ^e	550 ± 8 ^e	320 ± 6 ^f	230 ± 3 ^e	705 ± 4 ^f	385 ± 1 ^e
3.0	75.0 ± 0.3 ^c	89.6 ± 0.4 ^d	530 ± 7 ^f	260 ± 7 ^g	270 ± 0 ^a	620 ± 6 ^g	360 ± 1 ^f
4.0	75.0 ± 0.7 ^c	88.5 ± 0.3 ^e	500 ± 4 ^g	235 ± 1 ^h	265 ± 3 ^b	555 ± 7 ^h	320 ± 6 ^g
5.0	73.5 ± 0.7 ^d	87.8 ± 0.4 ^e	470 ± 7 ^h	210 ± 5 ⁱ	260 ± 1 ^c	490 ± 4 ⁱ	280 ± 1 ^h
7.6	72.5 ± 0.7 ^e	85.8 ± 0.4 ^f	390 ± 3 ⁱ	135 ± 1 ^j	255 ± 1 ^d	285 ± 1 ^j	150 ± 0 ⁱ
9.1	72.0 ± 0.0 ^e	85.5 ± 0.0 ^f	340 ± 7 ^j	110 ± 3 ^k	230 ± 4 ^f	200 ± 7 ^k	90 ± 4 ^j

¹⁾Mean of three determinations ± standard deviation. The same letters in the same column are not significantly different at $p < 0.05$.

**Fig. 2. Relationship between irradiation dose and peak viscosity.**

구에서 보고되어 있다(2-6).

RVA 최고점도와 아밀로그래프 최고점도와의 관계를 보면 Fig.

3과 같은 직선 관계를 보였다. 이 실험조건 즉, 녹말농도가 RVA의 10.71%, 아밀로그래프의 8%에서 점도 1 RVU의 변화는 아밀로그래프의 점도 약 16BU에 해당하였다.

DSC

감마선 처리 옥수수 녹말의 DSC 결과는 Table 4와 같다. 감마선 처리에 의하여 호화개시온도 호화종료온도는 대조구보다 낮아지는 경향이 있으나, 유의적인 차이를 보이지 않았다. 호화정점온도는 조사선량 증가에 따라 감소하였고, 0-1 kGy 사이와 1-9.1 kGy 사이에서는 유의적인 차이를 보이지 않았다. 호화온도범위는 조사선량에 따른 유의적인 차이를 보이지 않았다. 엔탈피는 조사선량의 증가에 따라 감소하는 경향이었다. 대조구가 19.50 J/g 이었으며 조사선량 0.5 kGy와 1 kGy 시료 사이에는 유의적인 차이가 없었으나 이들 값은 대조구와 유의적인 차이가 있었다. 조사선량 3 kGy까지는 엔탈피가 유의적으로 낮아졌으며 그 이상의 선량에서는 조사선량에 따른 차이는 없었다.

정점온도와 개시온도와의 차이와 엔탈피의 비, 즉 흡열피크지수는 흡열곡선의 형태를 설명할 수 있는 숫자로써, 엔탈피가 같은 경우라도 피크가 크고 좁은 경우에는 피크가 낮고 넓은 경우보다 피크 지수 값은 크게 된다(27). 감마선 처리 시료간에 흡열피크지수는 대조구와 유의적인 차이를 보이지 않았다(Table 4). 따라서 감마선 처리는 옥수수 녹말의 흡열 전이에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보인다.

Table 4. DSC data of irradiated corn starches

Irradiation dose (kGy)	Endothermic temperatures (°C) ¹⁾				$\Delta H^2)$ (J/g)	Peak height index ³⁾
	T_o	T_p	T_c	$T_c - T_o$		
0	68.9 ± 0.1 ^{a4)}	73.0 ± 0.2 ^a	82.8 ± 0.3 ^a	13.8 ± 0.1 ^a	19.5 ± 0.1 ^a	4.77 ± 0.03 ^a
0.5	68.9 ± 0.3 ^a	73.0 ± 0.1 ^a	82.7 ± 0.2 ^a	13.8 ± 0.5 ^a	18.8 ± 0.2 ^b	4.65 ± 0.41 ^a
1.0	68.8 ± 0.3 ^a	72.8 ± 0.2 ^{ab}	82.6 ± 0.2 ^a	13.8 ± 0.24 ^a	18.6 ± 0.1 ^b	4.68 ± 0.06 ^a
3.0	68.6 ± 0.3 ^a	72.5 ± 0.3 ^b	82.5 ± 0.4 ^a	13.7 ± 0.34 ^a	18.3 ± 0.1 ^c	4.71 ± 0.08 ^a
5.0	68.5 ± 0.3 ^a	72.5 ± 0.3 ^b	82.4 ± 0.3 ^a	13.8 ± 0.6 ^a	18.2 ± 0.1 ^{cd}	4.59 ± 0.40 ^a
7.6	68.5 ± 0.3 ^a	72.5 ± 0.3 ^b	82.3 ± 0.3 ^a	13.8 ± 0.1 ^a	18.0 ± 0.1 ^{cd}	4.58 ± 0.67 ^a
9.1	68.4 ± 0.3 ^a	72.4 ± 0.1 ^b	82.3 ± 0.4 ^a	13.8 ± 0.2 ^a	18.0 ± 0.3 ^d	4.51 ± 0.34 ^a

¹⁾ T_o = onset temperature; T_p = peak temperature; T_c = completion temperature; $T_c - T_o$ = endothermic melting range.

²⁾Enthalpy.

³⁾Ratio of ΔH to $T_p - T_o$.

⁴⁾Mean of three determinations ± standard deviation. The same letters in the same column are not significantly different at $p < 0.05$.

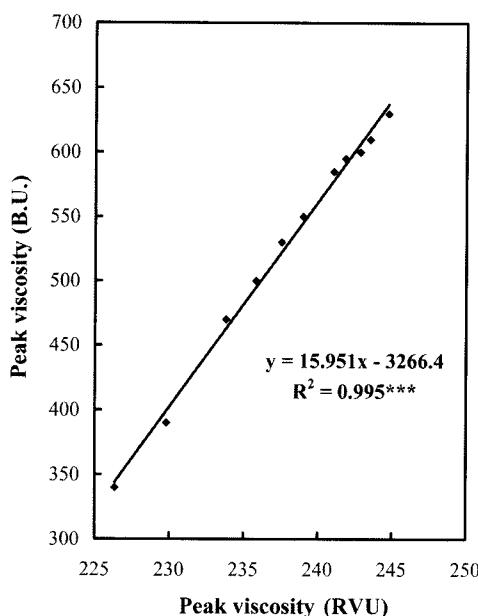


Fig. 3. Relationship between RVA and Visco/amylo/Graph peak viscosities.

엔탈피와 아밀로그래프 최고점도와의 관계를 보면 Fig. 4와 같다. 최고점도는 엔탈피 증가에 따라 증가하였으나 엔탈피 18.4 J/g 을 경계로 기울기가 다른 두 개의 직선식을 보였다. 이에 비하여 RVA 최고점도는 엔탈피와 직선적인 관계($R^2=0.83$)를 보였다. 또한 엔탈피는 물 결합능력($R^2=-0.95$), 아밀로오스 함량($R^2=-0.94$)과 팽윤력($R^2=-0.74$)과 부 상관을 보였다.

저항전분

가열-냉각 방법에 의한 저항녹말 생성은 기본적으로 아밀로오스 노화에 의존한다(16,17). 앞에서 설명한 것과 같이 감마선 조사한 옥수수 녹말의 아밀로오스 함량은 증가(Table 1)하므로 조사 녹말은 처리하지 않은 녹말보다 저항녹말 생성에 유리하다고 볼 수 있다. 이 가능성을 검토하기 위하여 감마선 조사한 녹말을 호화-냉각 방법으로 처리하고 저항녹말의 함량과 호화성질을 조사하였다.

시료를 121°C에서 1시간 가열했을 때 조사선량 7.6과 9.1 kGy 시료는 완전히 액화되었고, 냉장온도(4°C)에서 약한 젤을 형성하였다. 가열-냉각한 시료의 색도를 보면 조사선량의 증가에 따라 L값은 감소하고 a와 b값은 증가하였다(Table 5). 대조구인 녹말과

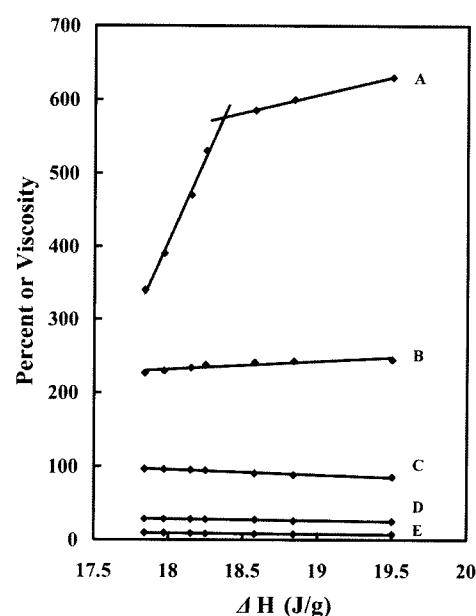


Fig. 4. Relationship between ΔH and properties of irradiated corn starches. A: visco/amylo/graph peak viscosity, B: RVA peak viscosity ($R^2=0.83$), C: water-binding capacity ($R^2=-0.95$), D: amylose content ($R^2=-0.94$), E: swelling power ($R^2=-0.74$).

비교하면 조사선량의 증가에 따라 특히 L값의 감소 폭이 커지고, a보다는 b값의 증가 폭이 커졌다. 이에 따라 ΔE 는 조사선량에 따라 유의적으로 증가하였다. ΔE 값이 0.0-0.5, 0.5-1.5 및 1.5-3.0 이면 각각 흔적(trace), 약간(slight) 및 뚜렷한(noticeable) 정도의 육안적 차이에 해당한다. 따라서 조사선량 0.5 kGy인 시료는 대조구와 색도에 차이가 없었으나 1 kGy에서는 색도에 약간 차이를 보였으며 3 kGy 이상에서는 색도에 뚜렷한 차이를 보였다.

가열-냉각한 시료의 RVA 점도페더 분석 결과는 Table 6과 같다. RVA의 모든 지표는 처리선량이 증가할수록 급격히 감소 하였는데 특히 조사선량 0.5-3kGy 범위에서 현저하였다. 이러한 결과는 감마선 처리로 녹말 구조 변화에 의한 점도 저하와 함께 121°C에서의 가열에 의한 녹말분자의 붕괴에 기인하는 것으로 생각된다.

가열-냉각한 시료의 저항녹말 함량을 보면 Table 7과 같다. 대조구의 저항녹말 함량은 34.9%로 Kim 등(25)이 보고한 34.6%와 비슷하였다. 조사선량 0.5 kGy에서 34.9%로 대조구와 유의적인 차이를 보이지 않았으나 1 kGy 처리 시료의 저항녹말 함량은

Table 5. Hunter's color value of autoclaved and cooled irradiated corn starches

Irradiation dose (kGy)	L ¹⁾	a	b	ΔE
0	97.1±0.13 ^{a2)}	0.69±0.26 ^d	1.39±0.18 ^g	0.00±0.00 ^f
0.5	96.9±0.37 ^a	0.83±0.23 ^d	1.65±0.19 ^f	0.49±0.33 ^e
1.0	96.5±0.12 ^b	0.93±0.15 ^{cd}	2.14±0.10 ^e	1.05±0.05 ^d
3.0	94.0±0.01 ^c	1.29±0.23 ^c	4.93±0.09 ^d	4.75±0.14 ^c
5.0	91.2±0.12 ^d	1.83±0.26 ^b	7.56±0.14 ^c	8.61±0.18 ^b
7.6	88.9±0.21 ^e	2.38±0.24 ^a	8.99±0.12 ^a	11.33±0.35 ^a
9.1	88.5±0.05 ^f	2.38±0.16 ^a	8.73±0.10 ^b	11.49±0.23 ^a

¹⁾L: Lightness, a: redness, b: yellowness.²⁾Mean of four determinations± standard deviation. The same letters in the same column are not significantly different at $p < 0.05$.**Table 6. RVA viscoogram data of autoclaved and cooled irradiated corn starches**

Irradiation dose (kGy)	Peak (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Peak time (min)
0	152.9±0.8 ^{a1)}	112.6±0.1 ^a	40.3±0.9 ^a	187.1±0.1 ^a	74.5±0.0 ^a	4.20±0.00 ^b
0.5	114.6±0.9 ^b	91.6±0.6 ^b	23.0±0.2 ^b	143.7±0.4 ^b	52.1±0.3 ^b	4.13±0.14 ^b
1	75.9±0.8 ^c	59.1±0.1 ^c	16.8±0.9 ^c	93.4±0.6 ^c	34.3±0.8 ^c	3.50±0.24 ^c
3	29.8±0.2 ^d	20.4±0.0 ^d	9.3±0.2 ^d	37.5±0.2 ^d	17.0±0.2 ^d	3.00±0.10 ^d
5	15.3±0.2 ^e	10.4±0.0 ^e	4.9±0.2 ^e	19.6±0.1 ^e	9.2±0.2 ^e	3.37±0.05 ^d
7.6	11.8±0.8 ^f	9.7±0.5 ^f	2.2±0.3 ^f	18.0±0.4 ^f	8.4±0.1 ^f	3.64±0.23 ^c
9.1	9.6±0.6 ^g	8.4±0.2 ^f	1.2±0.4 ^f	13.9±0.1 ^g	5.5±0.2 ^g	4.77±0.23 ^a

¹⁾Mean of three determinations± standard deviation. The same letters in the same column are not significantly different at $p < 0.05$.**Table 7. Enzyme-resistant starch content of autoclaved and cooled irradiated corn starches**

Irradiation dose (kGy)	A-RS(%) ¹⁾
0	34.9±0.4 ^{a2)}
0.5	34.9±0.2 ^a
1.0	33.0±0.6 ^b
3.0	32.3±0.3 ^b
5.0	32.9±0.3 ^b
7.6	32.2±0.6 ^b
9.1	32.3±0.6 ^b

¹⁾Resistant starch after hydrolysis of the starch with α -amylase using AOAC method.²⁾Mean of three determinations± standard deviation. The same letters in the same column are not significantly different at $p < 0.05$.

33.0%로 대조구보다 유의적으로 낮은 값을 보였다. 한편 1 kGy 이상에서는 조사선량에 따른 유의성은 없었다. 이상의 결과는 감마선의 저선량 조사는 저항녹말 생성에 효과가 없음을 가리킨다. Erilingen 등(28)은 저항녹말은 결정성 B-type 구조의 사슬길이가 24 글루코오스 단위인 아밀로오스 나선구조의 덩어리짐(aggregation)에 의해 생성된다고 하였다. 감마선 조사에 의해 녹말의 아밀로오스 함량 증가(Table 1)에도 불구하고 조사선량 1 kGy 이상인 시료의 저항녹말 함량이 대조구보다 낮은 결과(Table 7)를 보면 감마선조사 시료의 저항녹말 생성은 단순히 아밀로오스 함량만으로 설명할 수 없음을 가리킨다. Roushdi 등(6)은 감마선 선량 50 kGy에서 옥수수 전분의 -CH-OH기가 메틸렌기(-CH₂)로 전환됨을 보고하였다. 따라서 감마선 조사에 의해 아밀로오스 함량이 증가함과 동시에 일부 메틸렌기가 생성되는 경우 아밀로오스 나선구조 형성에 입체적 장해가 일어나 저항녹말 생성이 억제되는 것으로 추측된다.

요약

저선량의 감마선 조사(0-9.1 kGy)에 의하여 옥수수녹말의 고유 점도는 감소, 겉보기 아밀로오스 함량, 물 결합능력, 팽윤력과 용해도는 증가하였다. RVA 또는 아밀로그래프 점도는 조사선량이 증가함에 따라 감소하였으나 DSC에 의한 흡열 전이에는 큰 영향이 없었다. 감마선 조사한 옥수수 전분을 이용한 저항전분 생성은 효과가 없었다.

문헌

- KFDA. Food Codex. Korea Food and Drug Administration. Seoul, Korea (2005)
- Wu D, Shu Q, Xia Y. Effect of gamma irradiation on starch viscosity and physicochemical properties of different rice. Radiat. Phys. Chem. 65: 79-86 (2002)
- Yi SD, Oh MJ, Yang JS. Utilization of Brabender visco-amylograph to detect irradiated starches. J. Food Sci. Nutr. 5: 20-24 (2000)
- Kang IJ, Byun MW. Development of modified starch by gamma irradiation. Korean J. Food Sci. Technol. 28: 514-520 (1996)
- Kang IJ, Byun MW, Yook HS, Bae CK, Lee HS, Kwon JH, Chung CK. Production of modified starches by gamma irradiation. Radiat. Phys. Chem. 54: 425-430 (1999)
- Roushdi M, Harras A, El-Meligi A, Bassim M. Effect of high doses of gamma rays on corn grains. Starch/Stärke 35: 15-18 (1983)
- An KA, Jo D, Kim HK, Kim SK, Kwon JH. Effect of gamma irradiation on viscosity and physicochemical properties of starches. Korean J. Food Sci. Technol. 36: 547-552 (2004)
- Hayashi T, Todoriki S, Kohyama K. Irradiation effect on pepper starch viscosity. J. Food Sci. 59: 118-120 (1994)
- Yi SD, Oh MJ, Yang JS. Detection for irradiated cereals by maximum viscosity in amylograph. Food Sci. Biotechnol. 9: 73-76 (2000)
- Kwon JH, Kim SJ, Lee J, Lee SJ, Kim SK, Kim JS, Byun MW.

- Physicochemical and organoleptic properties of starch isolated from gamma-irradiated acorn. *Korean J. Food Sci. Technol.* 34: 1007-1012 (2002)
11. Fiedorowicz M, Tomasik P, You SG, Lim ST. Molecular distribution and pasting properties of UV-irradiated corn starches. *Starch/Stärke* 51: 126-131 (1999)
12. Lee YS, Oh SH, Lee JW, Kim JH, Kim DS, Byun MW. Effects of gamma irradiation on physicochemical and textural properties of starches. *Food Sci. Biotechnol.* 12: 508-512 (2003)
13. Kang IJ, Chung CK, Sohn JI. Effect of pH and gamma irradiation on the physicochemical properties of corn starch. *J. Food Sci. Nutr.* 4: 175-179 (1999)
14. De kerf M, Mondelaers W, Lahorte P, Vervaet C, Remon JP. Characterisation and disintegration properties of irradiated starch. *Int. J. Pharm.* 221: 69-76 (2001)
15. Kim SK, Kwak JE. Estimation of resistant starch content of high-amylase corn starch. *Food Sci. Biotechnol.* 13: 71-74 (2004)
16. Gruchala L, Romeranz Y. Enzyme-resistant starch: Studies using differential scanning calorimetry. *Cereal Chem.* 70: 163-170 (1993)
17. Eerlingen RC, Cronbez M, Delcour JA. Enzyme-resistant starch. I. Quantitative and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation. *Cereal Chem.* 70: 339-344 (1993)
18. Corn Refiners Association. Standard Analytical Methods. Method B-61. Washington DC, USA (1982)
19. Leach HW, McCowen LD, Schoch TJ. Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility patterns of various starches. *Cereal Chem.* 36: 534-544 (1959)
20. Medcalf DG, Gilles KA. Wheat starches. I. Comparison of physicochemical properties. *Cereal Chem.* 42: 558-568 (1965)
21. Williams PC, Kuzina FD, Hlynka I. A rapid colometric procedure for estimating the amylose content of starches and flours. *Cereal Chem.* 47: 411-420 (1970)
22. International Association for Cereal Science and Technology (ICC). Rapid pasting method using the Rapid Visco Analyser, ICC-Standard Draft, Vienna, Switzerland (1994)
23. Medcalf DG, Gilles KA. Effect of a lyotropic ion series on the pasting characteristics of wheat and corn starches. *Starch/Stärke* 18: 101-105(1966)
24. AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC Intl. 15th ed. Total dietary fiber in foods, enzymatic-gravimetric method, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, pp. 1105-1106 (1990)
25. Kim SK, Kwak JE, Kim WK. A simple method for estimation of enzyme-resistant starch content. *Starch/Stärke* 55: 366-368 (2003)
26. Hebeish A, Al-Nagar AM, El-Sisi F, Abdel-Hafiz S, El-Salmwi K. Improving the sizeability of starch using gamma irradiation. *Polym. Degrad. Stab.* 36: 249-252 (1992)
27. Kruger BR, Knut CA, Inglett GE, Wallser CE. A differential scanning calorimetry study on the effect of annealing on gelatinization of corn starch. *J. Food Sci.* 52: 715-718 (1987)
28. Eerlingen RC, Deceuninck M, Delcour JA. Enzyme-resistant starch. II. Influence of amylose chain length on resistant starch formation. *Cereal Chem.* 70: 345-350 (1993)