

## 현미의 호화 모형 개발

조용진 · 이수정 · 김철진 · 김종태 · 김명환\*  
한국식품개발연구원, \*단국대학교 식품공학과

### Modeling for the Gelatinization of Brown Rice

Yong-Jin Cho, Soo-Jeong Lee, Chul-Jin Kim, Chong-Tai Kim and Mung-Hwan Kim\*

Korea Food Research Institute

\*Department of Food Engineering, Dankook University

#### Abstract

This study was conducted to develop a model for the gelatinization of brown rice. A modified 1st-order reaction model including a time-lagging factor was proposed. The time-lagging factor was introduced as a function of time. In the temperature range of 65 to 80°C, a new model with the time-lagging factor ( $R^2=0.920$ ) predicted well the degree of gelatinization for brown rice. The reaction rate constant had a form of Arrhenius-type equation.

Key words: Gelatinization, Modeling, Time-lagging factor, Reaction rate constant, Brown rice

#### 서 론

곡류의 주요 성분의 하나인 전분은 충분한 물과 열이 가해질 때 전분의 결정성 구조가 붕괴되어 유백색의 콜로이드 용액으로 변하는 호화(gelatinization)가 일어난다. 취반과 같이 수분과 열이 주어지는 곡류의 가공에서, 호화 현상에 대한 충분한 이해는 제품의 품질 관리를 위해 필요할 뿐만 아니라 공정 제어를 위해서도 긴히 요구되고 있어 오래 전부터 관심의 대상이 되어 왔다.

호화 현상의 체계적 해석은 수학적 모형을 이용하여 이루어지고 있으며, 곡류 전분의 호화 현상은 약간의 변형이 소개되고 있지만 기본적으로는 1차 반응 모형으로 해석되고 있다.

Bakshi와 Singh (1980)은 50~120°C의 열수에서 단립종 벼를 파보일(parboiling)할 때, 벼의 수화 및 호화 현상을 각각 확산 모형과 1차 반응 모형으로 해석하였던 바, 수분확산계수와 반응속도상수 모두 절대온도에 대해서 아레니우스 식(Arrhenius-type equation)으로 나타낼 수 있었으며, 85°C 이하에서는 전분과 수분의 반응이 파보일 과정의 제한인자로 나타난 반면에 85°C 이상에서는 수분의 확산이 제한인자로 나타났다

고 하였다.

Cho *et al.* (1980)은 일반계 및 다수계 백미의 수화 및 취반 현상에 관한 연구에서 수화 현상은 10~40°C의 물 속에서, 호화 현상은 90~120°C의 열수 속에서 실험한 결과를 각각 확산 모형과 1차 반응 모형으로 나타내어 속도론의 관점에서 해석하고, 시간과 온도에 따른 각각의 조건별로 호화 반응의 반응속도상수를 제시하였다.

Lund와 Wirakartakusumah (1984)는 Bakshi와 Singh (1980)의 1차 반응 모형이 시간지연효과를 반영하지 못한다고 지적하였을 뿐만 아니라 반응속도상수가 아레니우스 식을 따르지 않는다고 주장하면서, 호화 반응을 1차 반응 모형으로 나타내고자 할 때 주어진 온도에서 시간이 무한대로 경과하더라도 호화가 되지 않는 전분의 양만큼  $\beta$ 를 주는 호화 모형을 제시하였다.

Mok *et al.* (1985)은 60~95°C의 온도 조건하에서 보리 전분의 물은 용액의 호화 현상을 1차 반응 모형으로 해석하면서 85°C 이하에서는 2단계의 1차 반응으로 나타났다고 하여 반응속도상수를 2단계로 구분하여 제시하였다.

이와 같은 호화 모형은 호화 반응에서 나타나는 시간 지연 현상을 제대로 반영하지 못하였거나 반영하였더라도 해당되는 인자를 다루기가 불편한 것으로 지적되고 있다. 뿐만 아니라 일부 모형에서는 반응속도상수를 각각의 조건별로 개별적인 상수를 제시하는 방법을

Corresponding author: Yong-Jin Cho, Senior Research Scientist, Korea Food Research Institute, P.O. Box 2, Pundang, Songnam, 463-050, Korea

사용하고 있어 호화 현상의 예측을 위한 모형으로서의 유용성이 미흡한 것으로 평가되고 있다. 더구나, 곡류 속의 전분은 독립적으로 존재하는 것이 아니라 다른 성분들과 결합되어 복합체로 존재하기 때문에 곡류의 종류에 따라 호화 현상은 다르게 나타날 수 있다.

따라서, 호화 현상을 체계적으로 이해하기 위해서는 곡류의 종류에 따른 호화 모형의 개발이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 온전한 상태의 현미가 열수 속에서 호화가 일어날 때 시간지연이 반영된 호화도의 변화를 예측할 수 있는 모형을 개발하고자 하였다.

## 호화 모형 설정

전분의 호화 현상을 모형화하기 위해 이용되는 기존의 단순 1차 반응모형은 다음의 식 (1)로 주어진다.

$$\frac{d(1-\alpha)}{dt} = -k(1-\alpha) \quad (1)$$

여기서  $\alpha$ : 호화도 (decimal)  
 $t$ : 시간(min)  
 $k$ : 반응속도상수( $\text{min}^{-1}$ )

그러나, 분쇄되지 않은 온전한 상태의 현미가 열수 속에 투입된 경우, 충분히 많은 양의 수분이 주어지더라도 가수 및 가열에 따른 호화 현상이 일어나는 동안 시간지연 현상이 나타난다고 가정하면 1차 반응 모형은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\frac{d(1-\alpha)}{dt} = -kf(t)(1-\alpha) \quad (2)$$

여기서  $f(t)$ : 시간지연인자(무차원)

식 (2)에서 시간에 대해서 임의의 함수 형태로 표시될 수 있는 시간지연인자  $f(t)$ 를 다음의 식 (3)으로 설정한다면 식 (2)는 적분이 가능하게 된다.

$$f(t) = nt^{n-1} \quad (3)$$

여기서  $n$ : 임의의 상수

$$\alpha = 1 - \exp(-kt^n) \quad (4)$$

위의 식 (4)는 식 (2)가 적분된 형태이다.

## 재료 및 방법

### 실험 재료

본 연구에 사용된 시료는 일반계 현미(Japonica-type brown rice)인 동진(Dongjin)으로서 1997년도산 벼를 농

협에서 구입하여 실험용 제현기(Satake model 101668, Japan)로 제현하여 사용하였다.

### 열수 처리

65~80°C에서 5°C 간격으로 하여 일정 온도를 유지하는 열수 속에 현미를 투입한 후 일정 시간 간격으로 채취하였다.

### 호화도 측정

호화도 측정을 위한 amylose/iodine blue value는 Birch와 Priestley (1973)의 방법을 응용하여 다음과 같이 실시하였다.

열수 처리한 현미를 동결건조하여 분쇄한 분말 0.2 g을 10M-KOH 용액 2 mL로 처리하고 증류수 98 mL를 가한 후 10분간 교반하였다. 이를 원심분리하여 상층액 1 mL를 취하고 0.5M-HCl 0.4 mL로 중화한 후 증류수를 가하여 10 mL가 되도록 하였다. 여기에 iodine 용액 0.1 mL를 가하고 혼합하여 분광광도계로 600 nm에서 흡광도(A)를 측정하였다. 한편, 10M-KOH 용액 5 mL, 증류수 95 mL로 위와 같이 처리하고 0.5M-HCl 1 mL로 중화하여 그 흡광도(B)를 측정하여, 두 흡광도의 비(A/B)를 호화도로 하였다. 이때 생시료의 A/B 값을 호화도 0으로 하고, 완전호화 시료의 A/B 값을 호화도 1로 하며, 두 시료를 1:1로 혼합하였을 때의 A/B 값을 호화도 0.5로 하는 표준 호화도 곡선을 작성하여 호화도를 구하였다.

## 결과 및 고찰

### 반응속도상수

호화 과정에서 나타나는 시간지연 효과를 반영하기 위해 본 연구에서 설정된 변형 1차 반응 모형의 적합성을 분석하기 위하여 시간에 따른 반응속도상수의 변화를 분석하고, 기존의 단순 1차 반응 모형의 경우와 비교하였다.

먼저 식 (4)를 이용하여 현미의 호화 현상을 분석한 결과, 식 (3)의 시간지연함수의  $n$  값은 0.175로 나타났다.

Fig. 1은 시간지연 효과가 반영된 변형 1차 반응모형에서의 반응속도상수를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 80°C의 후반부를 제외하면 반응시간에 무관하게 반응속도상수가 일정한 값을 가지므로 본 연구에서 설정한 변형 1차 반응 모형 즉, 시간지연인자를 포함하는 1차 반응 모형의 적합성이 양호한 것으로 판단된다. 다만, 80°C의 후반부에서 반응속도상

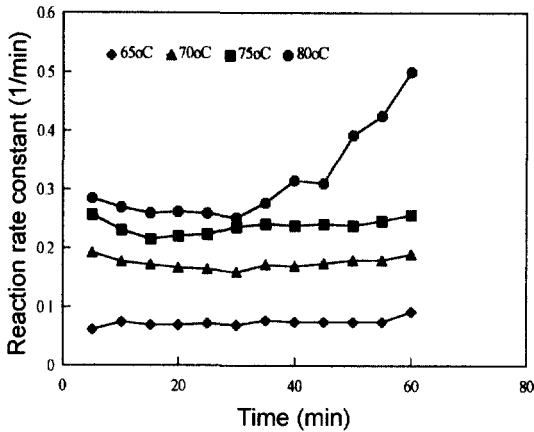


Fig. 1. Reaction rate constants in the modified 1st-order reaction model for the gelatinization of brown rice.

수가 증가하는 현상은 Bakshi와 Singh (1980) 및 Mok *et al.* (1985)의 연구 결과와 비교해 볼 때 실험의 오차 때문인 것으로 판단된다.

반면에, Fig. 2는 기존의 단순 1차 반응 모형에서의 반응속도상수를 나타낸 것으로서, 반응속도상수가 시간에 대해서 일정한 값을 가지는 것으로 가정하여 적분한 식을 이용하여 구한 상수 값임에도 불구하고 시간에 대해서 지수함수적으로 감소하는 경향을 보이므로 Lund와 Wirakartakusumah (1984)가 지적한 바와 같이 호화 모형에서 시간지연 효과가 반영되지 않은 단순 1차 반응 모형은 현미의 호화 모형으로서의 적합성이 미흡한 것으로 판단된다.

Fig. 1과 Fig. 2를 비교해 보면 알 수 있는 바와 같이 변형 1차 반응 모형은 현미의 호화 모형으로 적합한 것으로 판단된다. 이때 반응속도상수는 다음의 식 (5)

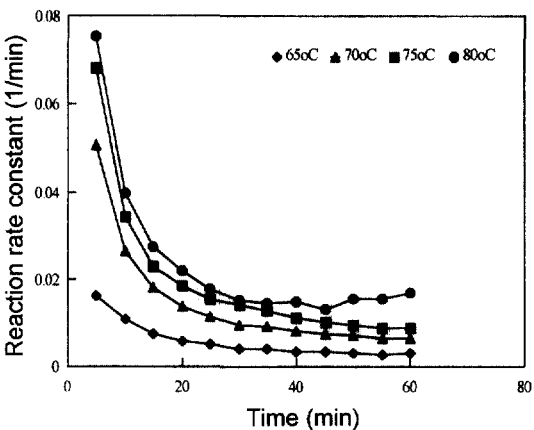


Fig. 2. Reaction rate constants in the simple 1st-order reaction model for the gelatinization of brown rice.

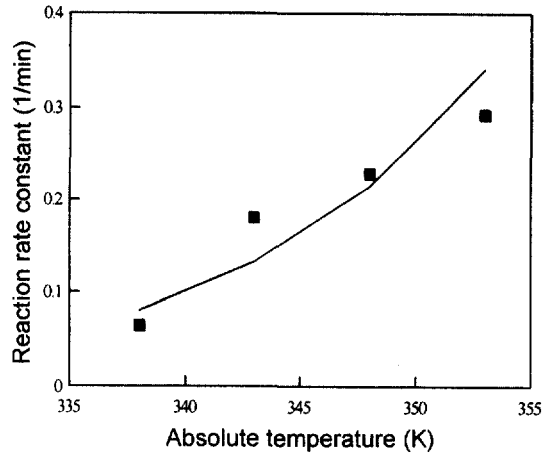


Fig. 3. Measured and predicted values of reaction rate constants of brown rice gelatinization.

와 같이 아레니우스 식으로 나타낼 수 있었다. 한편, Fig. 3은 현미의 호화 모형에서 반응속도상수의 실측값과 예측값을 나타낸 것이다.

$$k = 3.69 \times 10^{13} \exp(-11400/T) \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.876)$$

여기서 T: 절대온도(K)

호화도의 실측값과 예측값의 비교

Fig. 4는 식 (4)에 의한 현미의 호화도 예측값을 실측값과 비교하기 위하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 80°C의 경우를 제외하면 변형 1차 반응 모형에 의한 현미의 호화도 예측값은 실측값과 잘 일

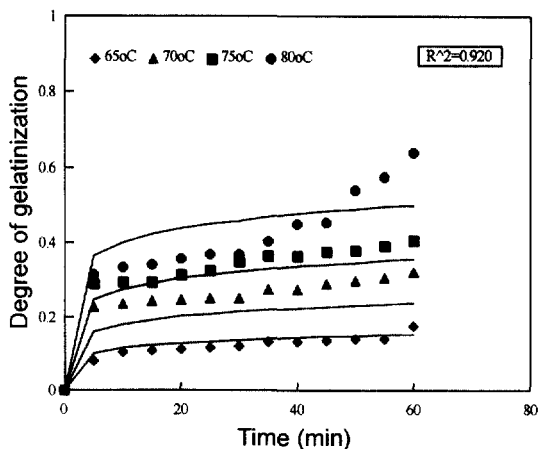


Fig. 4. Measured and predicted values of the degree of gelatinization for brown rice.

치하는 것을 알 수 있다. 이때 65~80°C의 범위에서 모형의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.920으로 나타났다. 다만, 80°C의 경우는 앞에서 고찰한 바와 같이 예측값과 실측값의 차이가 다소 크게 나타난 것은 실험오차에 기인한 것으로 판단된다.

결론적으로, 시간지연인자를 포함하고 있는 변형 1차 반응 모형은 호화 단계를 인위적으로 구분하지 않으면서 현미의 호화 개시 이후의 호화도 예측을 위해 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 요 약

본 연구는 온전한 상태의 현미가 열수 속에서 호화가 일어날 때 시간지연이 반영된 호화도의 변화를 예측할 수 있는 모형을 개발하고자 수행되었다. 현미의 호화 현상에 대해서 기존의 1차 반응 모형에 시간지연인자를 도입하여 변형 1차 반응 모형을 설정한 후, 설정된 모형을 이용하여 온도에 따른 호화도를 분석한 결과, 다음과 같은 현미의 호화도 모형을 제시할 수 있었다.

$$\alpha = 1 - \exp(-kt^n)$$

$$\text{여기서 } k = 3.69 \times 10^{13} \exp(-11400/T) \\ n = 0.175$$

이때 모형의 결정계수는 0.920으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 현미의 호화 모형은 현미의 가공 공정에서 공정 제어용 모형으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 문 헌

- Bakshi, A.S. and R.P. Singh. 1980. Kinetics of water diffusion and starch gelatinization during rice parboiling. *J. of Food Science* **45**: 1387-1392
- Birch, G.G. and R.J. Priestley. 1973. Degree of gelatinization of cooked rice. *Stärke* **25**: 98-100
- Cho, E., Y. Pyun, S. Kim and J. Yu. 1980. Kinetic studies on hydration and cooking of rice. *Korean J. Food Sci. Technol.* **12**(4): 285-291
- Lund, D.B. and M. Wirakartakusumah. 1984. A model for starch gelatinization phenomena. In *Engineering and Food (vol. 1): Engineering Sciences in the Food Industry*, B.M. McKenna (ed.), Elsevier Applied Science Publisher, London, p.425-432
- Metcalfe, S.L. and D.B. Lund. 1985. Factors affecting water uptake in milled rice. *J. of Food Science* **50**: 1676-1679, 1684
- Mok, C., S. Lee, Y. Nam and B. Min. 1985. Kinetic study on the gelatinization of barley starch. *Korean J. Food Sci. Technol.* **17**(6): 409-414.