

쌀전분의 열전도도

윤 정 로

강릉대학교 식품과학과

Effective Thermal Conductivity of Rice Starch

Yoon, Jungro

Department of Food Science, Kangneung National University

Abstract

Effective thermal conductivity of rice starch was measured by the probe method. The thermal conductivity increased from 0.065~0.09 W/mK to 0.13~0.23 W/mK as the moisture content increased from 0 to 28.2%. At constant bulk density, the temperature effect on the thermal conductivity was positive and getting larger as the moisture content increased. In the moisture range 7.2~33.6%, a very weak peak was found at 65°C in DSC thermogram. Positive effect of interaction between temperature and moisture content on the thermal conductivity was thought to be due to the increase of thermal conductivity of water with temperature, not to starch gelatinization phenomenon. A regression equation ($r^2=0.963$), $Ke = -0.111 + 0.000203 T + 0.00173 M.C. + 0.000247 \rho_b + 0.000035 M.C. \cdot T$, was obtained in the range of moisture content (M.C.) of 0~28.2% (w.b.), temperature (T) of 25~70°C and the bulk density (ρ_b) of 650~800 kg/m³

Key words: rice starch, thermal conductivity, DSC

서 론

열전달에 관계되는 성질들은 식품의 열처리 공정의 정량적 분석에 절대적으로 필요함에도 불구하고 이에 대한 자료는 충분치 못한 실정이다. 이들 자료들은 여러 연구자들에 의하여 몇 차례에 걸쳐서 수집 정리 발표되었으나⁽¹⁻³⁾, 열전도의 경우에 전분식품에 관한 자료는 특히 부족한 상태이다. 국내에서는 한국 고유식품의 열특성에 대한 연구가 있었으나^(4,5) 제한된 온도 구간과 수분 함량에 그쳤고, 최⁽⁶⁾는 식품의 주요 구성성분(당, 전분, 단백질, 식용유 등)의 열전도도를 현탁액에 대한 열전도도와 열확산도를 온도와 수분함량의 함수로써 측정하였다. 최근들어 김 등⁽⁷⁾은 배추출기의 열전도도를 수분함량 및 가스함량의 함수로써 측정하였다.

열전도도는 식품의 온도 및 그 구성성분에 따라서 달라지는 까닭에 각기 그 구성성분의 열전도도를 연구하는 것은, 식품자체의 복잡성과 가공시의 여러가지 변화 조건(열처리, 수분의 가감, 다른 식품과의 혼합 등)을 감안할 때 절대적으로 필요하다. 따라서 가공된 식품 개개의 열전도도 측정보다는, 식품의 구성성분들의 열전도도로부터 식품의 열전도도를 정확하게 추정할 수

있는 model의 개발 및 이에 필요한 기초 자료의 마련이 시급히 요청된다.

한편 최근 들어서 국내에서 계속되는 풍작과 쌀 소비의 둔화로 말미암아 쌀을 이용한 가공식품의 개발이 시급히 요청되고 있다. 쌀을 이용한 새로운 가공식품의 개발시에 합리적인 공정 및 기계 선택을 위해서는 열전달에 관계되는 성질들(열전도도, 비열, 열확산도 등)을 알아야 한다. 또한 쌀이 여러가지 다른 형태로 가공되었을 경우, 그 가공식품의 열전도도를 예견하기 위해서는 쌀전분의 수분 함량 및 온도에 따른 열전도도의 측정이 필요하다.

또한 전분식품은 열처리가 수반되는 가공시에 호화로 인하여 물리적 성질에 많은 변화가 따른다. 호화 온도는 전분의 종류 그리고 수분 함량에 따라서도 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다⁽⁸⁾. Drouzas와 Saravacos⁽⁹⁾는 감자전분의 열전도도가 50°C 이상에서 증가현상을 보임을 밝히고, 이것은 전분의 호화에 따른 물리화학적 변화 때문일 것으로 추측하였다.

본 연구의 목적은 i) 온도, 수분함량 및 밀도에 따른 열전도도를 측정함으로써 쌀 가공 식품의 개발에 필요한 기초자료를 마련하고 ii) 각 수분 함량에서의 호화 온도를 측정함으로써 호화로 인한 전분의 물리적 성질의 변화가 열전도에 미치는 영향을 살펴보고 iii) 이 구간에서 쌀전분의 열전도도를 추정할 수 있는 관계식을 구하는데 있다.

Corresponding author: Jungro Yoon, Department of Food Science, Kangneung National University, San-1 Jibundong, Kangneung, Kangwon-do 210-702, Korea

실험 재료 및 방법

시료제조 및 수분함량 측정

쌀전분(Sigma Chemical Co., St. Louis, MO., U.S.A.) 분말에 적당량의 증류수를 가하여 원하는 수분함량을 가지도록 조정된 후 (10.9~28.2% w.b.) 상온에서 24시간 동안 평형시켰다. 수분함량 0%의 시료는 vacuum oven을 사용하여 100℃에서 건조함으로써 제조하였다. 수분함량은 AOAC방법⁽¹⁰⁾에 따라 분석하였다.

밀도 측정

시료의 밀도(bulk density)는 내경 5 cm, 높이 11.4 cm인 알미늄으로 제작된 용기에 시료를 채워 중량을 칭량하여 구하였으며, 압착기를 사용하여 충전시의 밀도를 650~800 kg/m³가 되도록 하였다. 수분함량이 조정된 전분 분말의 밀도(particle density)는 helium gas stereopycnometer(Model SPY-2, Quantachrome Corporation, Syosset, New York, U.S.A.)로 측정하였다.

열전도도 측정

Line heat source technique으로 쌀전분의 열전도도를 측정하기 위하여 실험실에서 제작한 probe는 Fig. 1과 같다. Stainless steel tubing은 외경이 1.45 mm 길이가 52.4 mm이었다. 절연된 지름 0.076 mm의 constantan wire가 열원으로써 사용하였다. 또한 온도는 지름 0.076 mm의 Chromel-constantan thermocouple로써 측정하였으며, junction point가 열전도도 probe의 중간에 위치하도록 하였다. Chromel-constantan thermocouple은 온도 1℃ 변화당 가장 큰 전압을 발생하는 까닭에 사용되었다⁽⁹⁾. 사용된 probe의 길이/직경 비율은 25보다 큰 값이 되도록 하였다⁽⁹⁾. 열전도도 측정 시스템은 Fig. 2와 같이 설치되었으며 probe의 온도는 32 bit PC에 의하여 자동으로 수집되었다. Thermocouple로부터 발생된 전압은 증폭기(Omni-Amp IIA, Omega Engineering Inc.)에 의하여 증폭된 후 A/D converter를 통하여 PC에 입력되었다. Reference junction으로는 cold junction compensator (Omega Engineering Inc.)가 사용되었다. 알미늄 실린더에 시료를 채운다음 그 중앙에 열선과 thermocouple을 연결하고 향온 구조에서 실린더의 중심부와 실린더 벽의 온도가 같아질 때까지 방치한 다음, 열선에 power supply를 연결하여 일정량의 전류가 열선에 흐르게 하였다. Probe의 온도는 매초마다 약 2분간 수집되었다. 시료의 열전도도는 다음식 (1)에 의하여 온도와 log t의 회귀분석을 통하여 직선의 상관계수의 제곱 (r²)이 0.99 이상에서 최대가 될 때의 기울기로부터 구하였다⁽⁹⁾.

$$K = \frac{2.303 I^2 R \log (t_2/t_1)}{4\pi (\Delta T)} \quad (1)$$

여기서 K는 열전도도 (w/mK), I는 전류 (A), R은 열원의

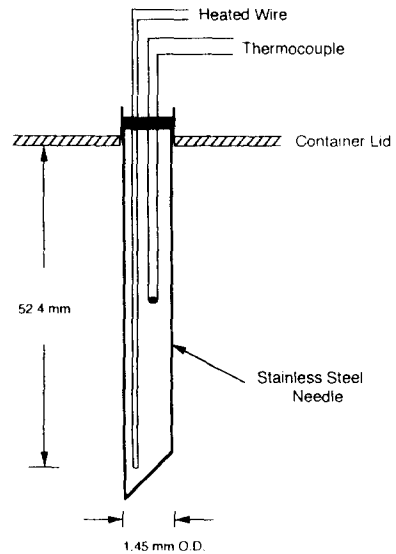


Fig. 1. Cross section of the thermal conductivity probe

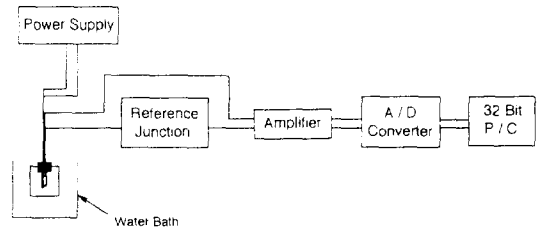


Fig. 2. Experimental setup for thermal conductivity measurement

단위 길이당 저항 (Ω/m), ΔT는 시간 t₁에서 t₂ 사이의 probe에서의 온도 증가분이다⁽⁹⁾.

Probe내에 열선이 두겹으로 들어있는 까닭에 R값은 단일 wire 저항값의 두배가 실제 계산에 사용되었다. 본 실험에서 제작된 열전도도 측정 probe를 보정하기 위하여 glycerol (K=0.284 W/mK)을 표준시료로 사용하였다⁽¹¹⁾.

호화온도의 측정

각 수분 함량에서의 쌀전분의 호화 개시 및 종료 온도는 Differential Scanning Calorimeter (STA 785, Stanton Redclift, England)를 이용하여 측정하였다⁽¹²⁾. Aluminium sample pan에 시료를 5~10 mg 넣어 밀봉한 후 10℃/min의 속도로 실온에서 100℃까지 가열하여 endothermic peak를 얻었다.

결과 및 고찰

쌀전분의 물리적 성질과 수분함량

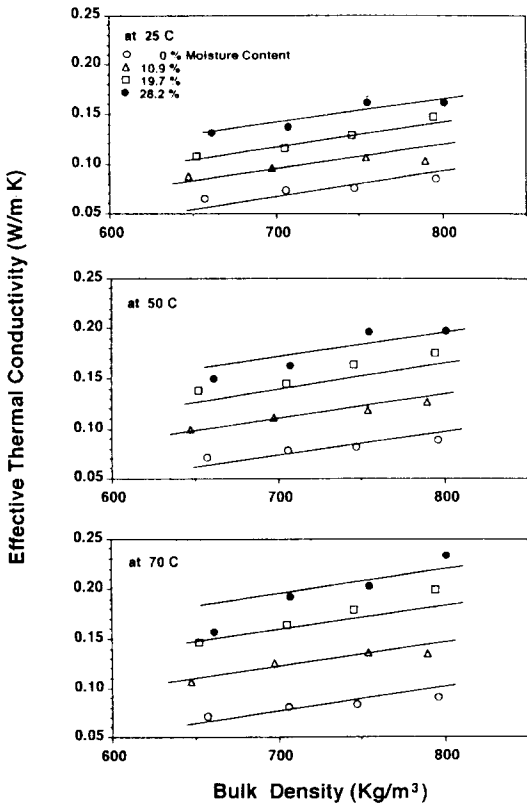


Fig. 3. Effect of bulk density on the thermal conductivity of rice starch

쌀전분 분말을 비롯한 porous한 시료의 경우 전열특성에 큰 영향을 미치는 요인중의 하나는 시료의 충전시의 밀도이다. 상온에서의 공기의 열전도도는 0.0260 W/mK⁽¹¹⁾로써 매우 작기 때문에 시료의 간극율에 따라 열전도도는 크게 좌우된다. 따라서 수분함량에 따른 전분분말의 밀도(ρ_b)와 충전시의 시료의 밀도(ρ_p)를 각각 독립적으로 측정하였으며, 이에 따른 간극율(ϵ)은 다음 (2)식에 의하여 구하였다.

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (2)$$

전분 분말의 밀도는 수분함량이 0에서 10.9%와 15.9%로 증가함에 따라 각각 1520 kg/m³에서 1550 kg/m³, 1560 kg/m³로 증가하였으나, 수분함량이 20.9%와 29.7%로 더욱 증가하였을 때는 각각 1540 kg/m³, 1470 kg/m³로 오히려 감소하였다. 이는 옥수수전분 분말의 밀도 측정시 수분함량 19% (d.b.)까지는 증가하였으나, 그 이후는 감소하였다고 보고한 Maroulis 등⁽¹³⁾의 결과와 일치하고 있다.

열전도도에 미치는 인자의 선택

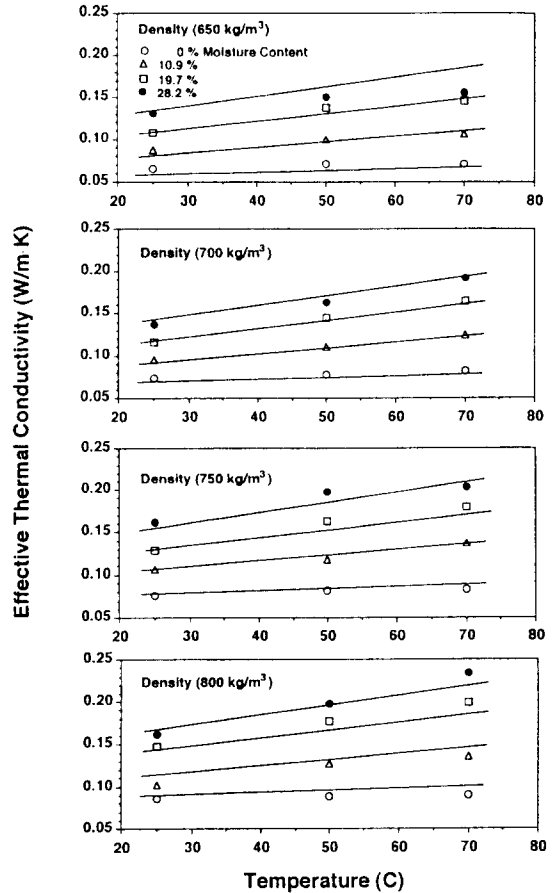


Fig. 4. Effect of temperature on the thermal conductivity of rice starch

열전도도에 영향을 미칠 수 있는 인자로 수분함량, 온도, 충전시의 밀도, 간극율 등을 들 수 있다. 본 연구에서 얻어진 자료를 이들 인자에 대하여 분산 분석을 행하였을 때 4개의 인자가 모두 1% 수준에서 유의성이 있는 것으로 나타났으며 F값이 큰 순서로는 수분함량, 온도, 밀도, 간극율의 순이었다. 또한 단계적으로 다중회귀(setwise multiple regression)를 행하였을 때 4개의 인자를 모두 포함한 경우에 열전도도 data의 변이를 93.8% 설명할 수 있었으며 간극율만을 제외한 경우에 93.7%를, 밀도만을 제외시킨 경우에 92.8% 설명 가능하였다. 또한 밀도와 간극율 간에는 상관계수가 -0.973이라는 높은 상관관계가 얻어졌으므로 이들은 서로 독립적이지 않음이 확인되었다. 따라서 수분함량, 온도, 밀도 그리고 이들 인자간의 교호작용에 의한 열전도도에 대한 효과를 조사하였을 때 수분함량-온도, 수분함량-밀도가 1% 수준에서 유의성이 있는 것으로 나타났으며 이 중 수분함량-밀도는 수분함량과 높은 상관계수(0.992)가 얻어졌다. 따라서 수분함량, 온도, 밀도, 수분함량-온도 만을 포함

시켜 다중회귀를 행한 결과 다음의 식을 얻었다.

$$K_e = -0.111 + 0.000203 T + 0.00173 M.C. + 0.000247 \rho_b + 0.000035 M.C. \cdot T \quad (3)$$

여기서 K_e 는 쌀전분의 열전도도(W/mK), T 는 온도(°C), M.C.는 수분함량(% w.b.), ρ_b 는 충전시의 밀도(kg/m³)를 의미한다. 식 (3)의 회귀직선으로 추정된 결과 추정된 값과 실측값의 오차범위는 ± 0.03 W/mK이었으며 상관 계수의 제곱(r^2)은 0.963이었다(Fig. 3 및 4).

충진시 밀도와 쌀전분의 열전도도

수분함량 0~28.2%, 온도범위 25~70°C 에서 열전도도에 대한 충전시의 밀도의 영향을 도시하였다(Fig. 3). 일정 온도, 일정 수분함량에서 충전밀도가 650 kg/m³에서 800 kg/m³로 증가함에 따라 열전도도는 직선적으로 증가하였다. 이는 밀도가 증가함에 따라 열전도도가 매우 작은 공기가 차지하는 체적분율이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 이 때의 간극율을 (2) 식에 의하여 구하였을 때 0.46~0.59의 범위에 속하였다.

온도 및 수분함량과 쌀전분의 열전도도

일정 온도 및 밀도에서 수분함량이 0에서 28.2%로 증가함에 따라 열전도도는 약 0.065~0.09 W/mK로 약 2~2.5배의 큰 증가를 나타내었다(Fig. 3). 이것은 열전도도가 전분 분말보다 높은 물(0.6076 W/mK)이 혼합되었기에 나타난 예견되었던 결과이다⁽¹¹⁾.

한편 밀도가 일정할 때 온도의 효과를 보기 위하여 밀도가 유사한 균별로 수분함량에 따라 도시하였다(Fig. 4). 온도가 25°C 에서 70°C 로 증가함에 따른 열전도도에 대한 효과는 수분함량에 따라 달라서, 수분함량이 0인 경우에는 온도의 효과는 거의 보이지 않았으나 수분함량이 증가함에 따라 뚜렷한 증가를 보였다. 이는 쌀 전분의 3가지 구성성분(물, 고형분, 공기) 중 열 전도도가 가장 높은 물의 온도 의존성(25°C, 50°C, 70°C 에서 각각 0.6076 W/mK, 0.6405 W/mK, 0.6594 W/mK)⁽¹¹⁾ 때문에 온도가 상승함에 따라 증가하는 것으로 설명할 수 있다. Drouzas와 Saravacos⁽⁸⁾는 옥수수 전분(수분함량 8.8~20.0%)의 열전도도가 온도가 50°C 에서 70°C 로 증가함에 따라 뚜렷한 증가함을 보였다고 보고하였으며, 그 이유는 상변화에 따른 밀도 및 간극율의 변화에 기인한 것으로 추정하였다. 본 연구에서는 이러한 전분의 호화가 열전도도에 미치는 효과를 조사하기 위하여 DSC를 사용하여 각 수분함량에서 호화정도를 조사하였다.

전분의 Differential Scanning Calorimeter

수분함량이 7.2~33.6%인 쌀 전분의 호화온도를 DSC로 측정하였다(Fig. 5). 가장 뚜렷한 peak를 보인, 수분함량이 33.6%인 경우에도 그 peak는 매우 완만하였으나 onset temperature는 약 65°C로써 현 등⁽¹⁴⁾의 수분과 쌀전분의 비율을 0.75/1로 하였을 때 얻어진 값과

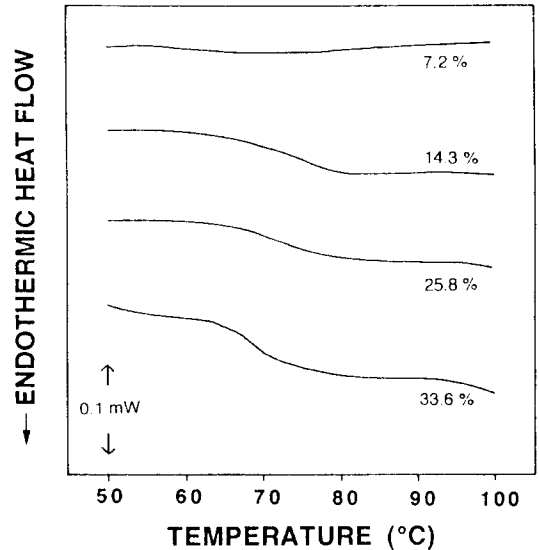


Fig. 5. DSC thermograms of rice starch at moistures 7.2~33.6%

일치하였다. 한편 본 연구에서 얻어진 endothermic peak의 높이는 수분함량이 33.6%인 경우 그들이 얻은 값의 약 1/10에 해당하였다. 이는 전분이 호화되는데 수분이 충분치 못하였음을 간접적으로 시사해 주고 있으며 전분입자의 무정형(혹은 불안정한 결정형)부분이 우선적으로 상전이를 이루었을 것으로 추측된다. 수분함량이 33.6%에서 7.2%로 감소함에 따라 peak는 더욱 완만함을 보였으며 7.2%에서는 전혀 보이지 않았다.

따라서 65°C 이상의 온도에서 쌀전분의 열전도도는, 수분함량 7.2% 이하인 경우 호화에 의한 영향은 전혀 없다 하겠으며, 그 이상의 수분함량(10.9~28.2%)에서도 전분의 물리적 변화에 따른 직접 또는 간극율의 변화를 통한 간접적인 영향은 매우 희박할 것임을 시사해 주고 있다. 이는 호화온도를 포함하는 온도구간(50~70°C)에서 온도증가에 따른 열전도도의 증가폭이 호화온도 보다 훨씬 낮은 온도구간(25~50°C)에서의 증가폭에 비하여 특별히 크지 않았던 본 연구의 결과에 의하여 뒷받침되어지고 있다(Fig. 4). 결론적으로 열전도도에 대한 수분함량-온도의 교호작용은 전분의 호화에 의한 간접적인 영향이라기 보다는 물의 열전도도의 온도의존성에 기인하는 것으로 추측된다.

요 약

쌀전분의 열전도도를 probe method로 측정하였다. 수분함량이 0에서 28.2%로 증가함에 따라 열전도는 약 0.065~0.09 W/mK에서 0.13~0.23 W/mK로 약 2~2.5배의 큰 증가를 보였다. 밀도가 일정할 때 온도가 25°C 에서 70°C 로 증가함에 따른 열전도는 수분함량이 증가할수록

뚜렷하게 증가하였다. DSC의 측정결과 수분함량 7.2% 이하인 경우는 endothermic peak가 전혀 보이지 않았으며, 그 이상의 수분함량(7.2~33.6%)에서도 매우 완만한 peak를 보여 주었다. 따라서 열전도도에 대한 수분함량-온도의 교호작용은 전분의 호화에 의한 간접적인 영향이라기 보다는 물의 열전도도의 온도 의존성에 기인하는 것으로 추측된다.

쌀전분의 열전도도(K_e)는 수분함량(M.C., 0~28.2%), 충전밀도(ρ_b , 650~800 kg/m³) 및 온도(T, 25~70°C)와 $K_e = -0.111 + 0.000203 T + 0.00173 M.C. + 0.000247 \rho_b + 0.000035 M.C. \cdot T$ 의 관계식을 얻어졌다.

감사의 말

이 연구는 1991년도 교육부 지원 한국 학술진흥재단의 신진교수 학술연구조성비에 의하여 수행된 것으로 깊이 감사드립니다. 또한 연구를 수행함에 있어서 조력하여 주신 서울대학교 권미라 박사님, 아주대학교 김공환, 유승현 교수님께 감사드립니다.

문 헌

- ASHRAE: *ASHRAE Handbook 1985 Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc Atlanta, GA(1985)
- Choi, Y. and Okos, M.R.: Thermal properties of liquid foods-review. Paper presented at the 1983 Winter meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, IL(1983)
- Sweat, V.E.: Thermal properties of foods. In *Engineering Properties of Foods*, Rao, M.A. and Rizvi, S.S.H. (Eds.). Marcel Dekker, Inc., New York, NY, p49(1986)
- 전재근, 목철균, 장규섭: 고추장의 열특성 측정에 관한 연구. 한국식품과학회지, 11, 157(1979)
- 장규섭, 전재근: 식품의 열특성에 관한 연구. 한국식품과학회지, 14, 112(1982)
- 최용희: 온도와 조성이 식품성분의 열전도도와 열확산도에 미치는 영향. 한국식품과학회지 18, 357(1986)
- 김주봉, 이동선, 최동원, 변유량: 배추줄기의 열전도도에 관한 연구. 한국식품과학회지, 23, 325(1991)
- Chungcharoen, A.: Gelatinization characteristics of rice flour and isolated starch in the absence and presence of solutes. *M.S. Thesis*, University of Wisconsin-Madison, WI(1983)
- Drouzas, A.E. and Saravacos, G.D.: Effective thermal conductivity of granular starch materials. *J. Food Sci.* 53, 1795(1988)
- A.O.A.C.: *Official Methods of Analysis*, 13th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington D. C., MD, p.211(1980).
- Chapman, A.J.: *Heat Transfer*, 4th ed. Macmillan Publishing Company, New York, p.548, 556(1984).
- Lund, D.B.: Influence of time, temperature, moisture, ingredients and processing conditions on starch gelatinization. In *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, T.E. Furia (Ed.), CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, p249(1984)
- Maroulis, Z.B., Drouzas, A.E. and Saravacos, G.D.: Modeling of thermal conductivity of granular starch. *J. Food Eng.*, 11, 255(1990)
- 현창기, 박관화, 김영배, 윤인화: 쌀전분의 Differential Scanning Calorimetry, 한국식품과학회지, 20, 331(1988)
- Wallapapan, K. Sweat, V.E., Diehl, K.C. and Engler, C.R.: Thermal properties of porous foods. In *Physical and Chemical Properties of Foods*, M.R. Okos (ed.). ASAE, St. Joseph, MI, p78(1986)

(1993년 3월 18일 접수)