

**열탐침을 이용한 액상 농산물의
열전도계수 측정**
**Measurement of Thermal Conductivity of Agricultural
Materials
in Liquid Phase Using a Probe Method**

백 승 규*	홍 지 향*	고 학 균*
정회원	정회원	정회원
S. K. Bak	J. H. Hong	H. K. Koh

1. 서 론

농업의 경우에도 농산물의 품질을 유지하거나 부가가치를 높이기 위해 가열 또는 냉동 등의 열 가공이 많은 분야에서 사용되고 있다. 그러므로 농산물의 열적특성의 구명은 열 가공 공정설계 및 기계설계 시 대단히 중요한 요인이 된다.

열전도계수는 열처리 과정의 각 공정에 농산물로부터 더해지거나 제거되어야 하는 총 열량을 파악하거나, 단위시간·단위면적 당 가감해야할 열량을 결정하는데 매우 중요한 인자가 된다. 그러나, 우리나라의 경우 농산물에 대한 열특성 값, 특히 열전도계수에 대한 정확한 자료가 없어서 우리 농산물에 대한 열가공 연구를 수행하는데 많은 제약이 뒤따르고 있다.

또한, 열 가공은 주로 고온, 고압의 상태에서 가공이 이루어짐으로 고온, 고압에서 이루어지는 열 가공 공정 과정에서 정확한 열량을 얻기 위해서 고온 고압 하에서의 열전도계수의 정확한 데이터를 요구하고 있다.

농산물 가운데 사과는 주스 및 잼의 원료로 많이 이용되고 있다. 한천은 해조를 끓인 액체를 냉각시켜 묵처럼 굳힌 것으로, 일찍부터 위장병 환자나 다이어트를 하는 사람들의 음식으로 이용되어 왔다. 또한 설탕의 경우 당을 이용한 식품의 가공에 쉽게 구입할 수 있으며 가장 많이 사용되어지는 조미료이다. 이들의 열전도계수 값은 이들을 이용한 열처리 공정시 중요한 자료이다.

본 연구의 목적은 고온 고압 하에서 열전도계수와 열확산계수를 시간 수정법이나 탐침의 보정계수 없이도 정확하게 측정할 수 있는 탐침을 이용하여 사과즙과 한천의 열전도계수를 측정하며 설탕의 함량에 따른 증류수의 열전도계수 변화를 파악하여 설탕의 양과 열전도계수의 상관관계를 구명하는데 있다.

† 본 연구는 농림기술관리센터와 (주)쌍용산업기계의 연구과제 연구비 지원에 의해 수행되었음.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부.

2. 이론해석

열침침법은 탐침 내의 열선에 일정한 열량을 공급하여 시간에 따른 온도 상승 비율을 측정하여 열전도계수를 구하는 방법이다.

이 방법은 무한히 크고 등방성이며 동질성인 시료내부에 직경이 매우 작고 길이가 무한대인 선형 열원이 묻혀 있을 때 온도의 변화량은 다음과 같은 Fourier 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

- 여기서 r : 원통 중심에서 반경방향으로의 거리 (m)
- t : 시간
- α : 열확산계수 (m²/sec)
- T: 온도(℃)

이 방정식을 무한 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi k} \ln \frac{(t_2 - t_0)}{(t_1 - t_0)} \dots \dots \dots (2)$$

또한 열전도계수를 좌변으로 정리하면 다음과 같다.

$$k = \frac{Q \ln[(t_2 - t_0)/(t_1 - t_0)]}{4\pi(T_2 - T_1)} \dots \dots \dots (3)$$

탐침법을 이용하여 열특성을 측정하는 방법은 시간에 log를 취하여 시간과 온도의 관계를 그래프로 나타낸 다음 선형회귀방정식을 이용하기 위하여 선형구간의 데이터를 선택한 후, 열원 공급장치에 투입된 열량을 계산하여 ΔT 와 ln(t)에 대한 직선관계의 기울기를 계산하여 열전도계수를 구할 수 있다.

3. 공시재료

증류수에 설탕을 넣어 설탕 함량에 따른 다양한 설탕물 시료를 만들었다. 증류수 60g에 설탕 100g을 넣었을 때 결정이 생겼으므로 500g의 증류수를 기준으로 150g, 300g, 450g, 600g, 750g의 설탕을 각각 넣어 설탕의 함량에 따른 증류수의 열전도계수와의 상관관계를 구명하였다.

사과즙에 사용된 사과는 2000년 11월 경북 영주에서 출하한 부사이다. 실험에 사용된 한천은 식품공업, 의학, 미생물 배양, 화장품 등에 사용되는 홍조류에 함유되어 있는 복합다당류이다.

4. 실험장치

그림 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 서울대 농생대 농산가공 시스템 연구실에서 제작한 본 실험 장치는 데이터수집 및 제어회로를 총괄하는 PC, 고온·고압을 유지하며 시료의 열전도계수와 열확산계수를 측정할 수 있는 압력용기와 상온 대기압에서 열전도계수와 열확산계수를 측정할 수 있는 온도조절용 수조, 그리고 열선, 히터의 전원, 솔레노이드 밸브를 제어하는 제어회로로 구성되어 있다.

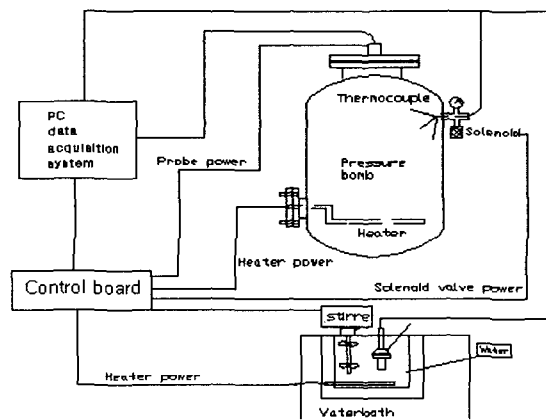


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

5. 실험방법

본 실험은 500g의 증류수를 기준으로 150g, 300g, 450g, 600g, 750g의 설탕을 각각 넣어 설탕의 함량에 따른 열전도계수의 상관관계를 구명하고 나아가 사과의 열전도계수를 측정하였다. 또한 한천의 함량을 20%, 40%, 60%로 조절하여 이들의 열전도계수를 측정하였다.

먼저 시료를 샘플홀더에 일정량을 주입한 후 열전도계수 및 열확산계수 측정용 탐침이 시료에 적당히 잠기도록 한 상태로 센서 뭉치를 조합하여 온도조절 탱크 또는 압력용기 내에 삽입하고 덮개를 덮는다.

온도조절 수조와 압력용기 내에 온도 센서를 세 점에 설치하여 평균값으로 온도조절 수조와 압력용기내의 온도를 파악한다. 각각의 점에서의 온도를 PC에 연결된 SC-2345에서 아날로그 값을 받아들이면 Labview에 의해 디지털 값으로 변환하여 각 세 점에서의 평균한 값을 계산하여 측정하고자 하는 온도와 비교 연산하여 측정하고자 하는 온도를 유지하도록 하

였다. 측정하고자 하는 온도가 상온에서 고온까지(20℃~140℃) 이므로 측정하고자 하는 온도에 도달하기 위하여 온도조절 수조의 경우 1.5Kw의 열선 한 개를 사용하였고, 압력용기의 경우 1.5Kw의 열선을 두 개 사용하였다. 그로 인해 측정하고자 하는 온도에 도달하여 열선의 전원을 제거하게 되면 열선에 잔열이 지속적으로 존재해 측정하고자 하는 온도를 필요 이상으로 넘어서는 현상이 발생하게 된다. 그러므로 측정하고자 하는 온도와 장치내의 세 점의 평균온도와의 차이를 비교하여 특정온도에 이르면 열선에 공급되는 전원을 제어하여 측정온도에 천천히 접근하도록 하여 열선의 잔열에 의해 측정온도를 넘어서는 현상을 방지하였다. 이 방법은 PWM(Pulse Width Modulation)인 Duty Cycle Method를 사용하였다.

열선에 공급되는 전원은 Duty circle을 임의의 초로 두면 측정하고자 하는 온도에 비하여 압력조절용 수조 및 압력용기내의 평균온도의 차이가 5℃이하일 때, 2.5℃이하일 때, 0.5℃이하일 때, 0.2℃이하일 때로 각각 나누어 열선에 공급되는 전원의 공급시간을 제어하도록 하였다.

측정하고자 하는 온도의 지정은 Labview에 의해 지정하였으며 측정온도에 이르면 탐침내의 열전달 유닛과 열확산 유닛 내부에 삽입된 센서에서 읽어들이 값이 상호 같을 때 온도의 안정상태로 간주한다. 측정온도에 도달했을 때 온도의 오차는±0.05℃이내 이다.

측정하고자 하는 온도에서 온도의 안정이 이루어지면 실험을 시작할 수 있다.

만약의 경우 압력용기 내의 온도가 측정하고자 하는 온도보다 과도하게 높아지면 고압을 제어하기 위하여 설치된 솔레노이드 밸브의 개폐시간을 제어하여 온도를 조절한다.

온도가 측정하고자 하는 온도 이내의 안정상태, 즉 용기내의 온도 오차 범위가 ±0.05℃에 도달하면 시험을 시작하였다.

실험은 240초를 기준으로 1회씩 이루어진다. 실험 시작 후 20초 동안은 온도의 분포를 파악한 후 10초 동안 열전도계수측정 탐침 내 열선으로 4.5V를 투입하여 열을 발생시켜 시료에 온도의 상승을 일으킨다.

온도의 상승은 탐침 내부에 삽입된 Thomocouple에서 측정된다. 측정 후 210초 동안 Tempering Time을 두었으며 각 시료는 각각 6회 반복 측정하였다.

6. 결과 및 고찰

6-1 설탕물의 열전도계수

설탕의 함량은 물 150g을 기준으로 설탕을 각각 150g, 300g, 450g, 600g, 750g을 넣어 5가지 시료를 만들어 설탕함량에 따른 열전도계수의 변화를 관찰하였다.

각 시료에서 온도 변화에 따른 열전도 계수의 변화는 그림2-6에 나타나 있다. 그림4에서 나타난 것과 같이 설탕의 함량이 150g일 경우 40℃와 60℃에서 열전도계수가 가장 높게 나타났으며 그림3에서 나타난 바와 같이 설탕함량이 300g일 경우 60℃와 80℃에서 열전도계수가 높게 나타났다.

그림 6에서처럼 설탕의 함량이 많아 점성이 높아지면 열전도 계수는 온도의 증가에 상관

없이 열전도계수의 변화는 거의 없었다

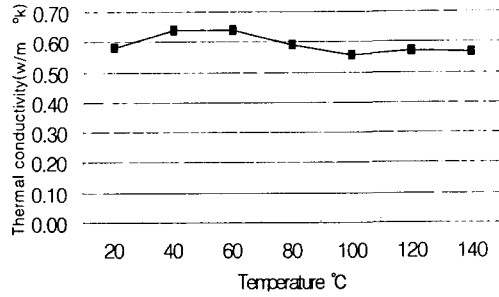


Fig. 2. Thermal conductivities measured by probe method for mixture of 150(sugar)/500(water)

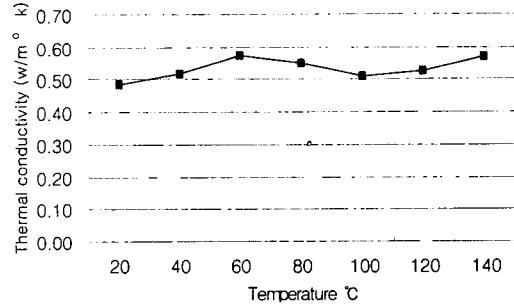


Fig. 3. Thermal conductivities measured by probe method for mixture of 300(sugar)/500(water)

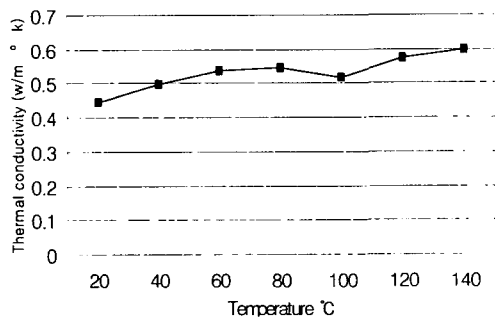


Fig. 4. Thermal conductivities measured by probe method for mixture 450(sugar)/500(water)

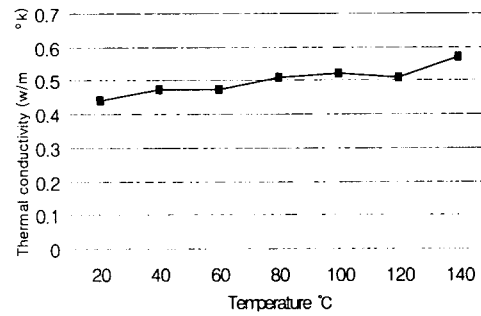


Fig. 5. Thermal conductivities measured by probe method for mixture 600(sugar)/500(water)

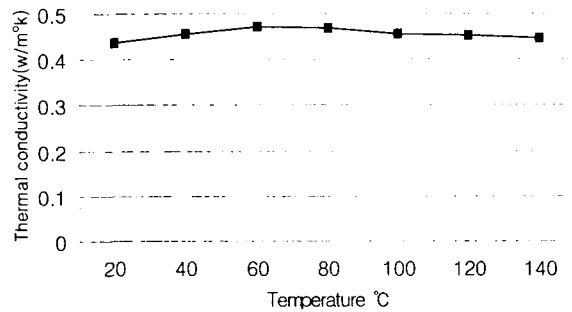


Fig. 6. Thermal conductivities measured by probe method for mixture of 750(sugar)/500(water)

6-2 사과즙의 열전도계수

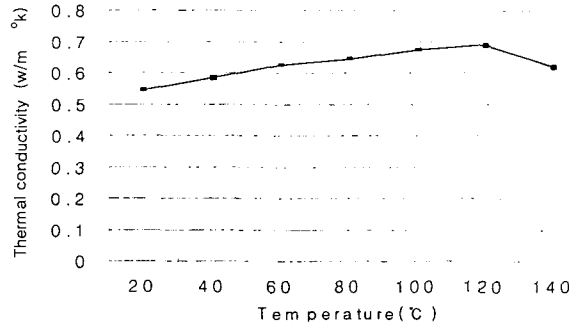


Fig. 9. Thermal conductivities measured by probe method for apples juice

그림 9는 사과를 갈아서 원액을 만들어 열전도계수를 측정한 값으로 온도변화에 따라 열전도계수가 변함을 볼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 측정온도가 높아질수록 사과즙의 열전도계수도 증가함을 볼 수 있다. 또한 140°C 이상에서는 열전도계수가 급격히 낮아짐을 볼 수 있다.

6-3. 한천의 열전도계수

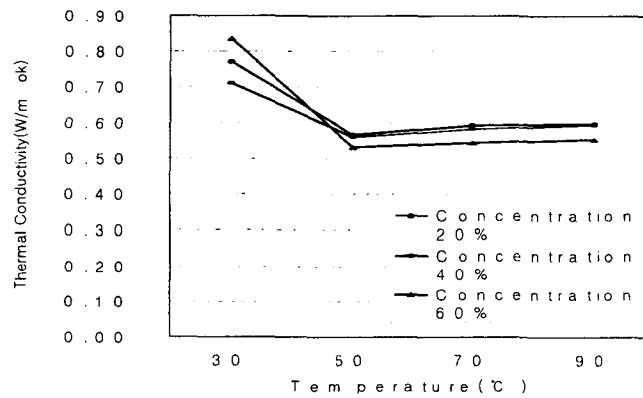


Fig. 10 Thermal conductivity of agar concentrations

그림 10에서 본 바와 같이 농도가 40%일 때까지는 농도가 높아질수록 온도에 따른 열전도계수도 커진다. 하지만 농도가 60%로 되면 오히려 열전도계수가 온도에 따라 작아짐을 볼 수 있다. 열전도계수는 0.836~0.530(W/m⁰K) 범위 내에 존재한다.

7. 요약 및 결과

- 1) 직경과 길이의 비가 100인 가는 미세한 탐침을 이용하여 열특성을 측정할 수 있는 정확도 높은 센서를 이용하였다.
- 2) 압력용기를 제작하여 140℃에서 열특성을 측정할 수 있었으며, 압력용기의 온도 오차는 0.05℃ 이하였다.
- 3) 설탕물의 경우 설탕의 함량이 많을수록 열전도계수가 증가하며 설탕의 함량이 많을수록 열전도계수는 거의 일정한 값을 갖는다.
- 4) 사과즙의 경우 온도가 높을수록 열전도계수는 증가하였으며 열전도계수는 0.546~0.62(W/m^oK) 범위에 존재한다.
- 5) 한천의 경우 열전도계수는 0.836~0.530(W/m^oK) 범위에 존재하였다.

8. 참고문헌

1. 배신철 1997. 과도탐침법에 의한 열전도계수 측정장치 개발. 한국농업기계학회지 22(1):59-67
2. Asher, G. B., E. D. Sloan and M. S. Graboski. 1986. A computer controlled transient needle-probe thermal conductivity instrument for liquids. *International of Thermophysics* 7(2):285-294
3. Bange-Khandan, M. S. and M. R. Okos. 1981. Effect of cooking on the thermal conductivity of whole and ground lean beef. *Journal of Food Sci.* , 46:1302-1305
4. Baghe-Khandan, M. S., Y. Choi and M. R. Okos. 1981. Improved line heat source thermal conductivity of whole and ground lean beef. *Journal of food Sci.* , 46: 1302-1305.
5. Banaszkiwicz, M. 1997. A new method for the determination of thermal conductivity and thermal diffusivity from linear heat source measurements. *American institute of Physics.* 68(11):4184-4190
6. Bhavaraju, N. C. and J. W. Valvano. 1999. Thermophysical properties of swine myocardium. *international Journal of Thermophusecs.* 20:665-675.
7. Casada, M. E. and L. R. Walton. 1989. New Model for Determining Thermal Diffusivity with the Thermal Probe. *Transaction of the ASAE* 32(13):973-976.
8. Choi, Yonghee. and M. R. Okos. 1983. The thermal properties of tomato juice concentrates. *Transactions of the ASAE* 26:305-311.
9. Eckdrft, E. R. G. and R. M. Drake. 1972. *Analysis of Heat Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York
10. Hooper, F. C. and F. R. Lepper. 1950. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. *Transactions of the ASHVE* 56:309-322.