

배추줄기의 열전도도에 관한 연구

김주봉 · 이동선* · 최동원** · 변유량**

제일제당(주), 경남대 식품공학과*, 연세대 식품공학과**

Thermal Conductivity of Petiole Tissue of Chinese Cabbage

Ju-Bong Kim, Dong-Sun Lee*, Dong-Won Choi** and Yu-Ryang Pyun**

Jeil Sugar Co., *Department of Food Engineering, Kyungnam University,

**Department of Food Engineering, Yonsei University

Abstract

Changes in thermal conductivity of petiole tissue of Chinese cabbage during steam heating and salting were measured by probe method. The thermal conductivity(k , W/m·K) of the tissue decreased with the increase in gas content and the decrease in moisture content. The correlating equation, $k_c = 0.0192 MC - 0.6284 V_a - 1.3252$, obtained over the range of moisture content(MC) of 92 to 96% and gas content(V_a) of 0 to 0.15 ml/g cabbage at 30°C. The thermal conductivity of salted cabbage was about 0.04 W/m·K higher than that of raw cabbage at the same moisture content.

Key words: Chinese cabbage, thermal conductivity

서 론

김치 발효속도에 가장 큰 영향을 미치는 환경인자는 온도로서 저장수명을 연장시키기 위하여 저온유통 또는 저온살균한다. 현재 수출용 김치는 배추를 저온 창고에 저장하였다가 10~15°C의 작업실에서 김치를 담근 다음 소포장하여 -1°C 내외의 냉장 컨테이너로 일본 등지로 수출되며 현지에서도 저온 유통체계를 통해 유통된다. 국내 시판 김치도 이와 유사한 공정을 거쳐 유통된다. 한편 군 급식 등으로 생산되는 레토르트 파우치 김치는 80°C 내외의 steam blancher에서 열처리 한 다음 파우치에 소포장, 밀봉 후 115°C 내외에서 열순환식 살균기로 살균한다⁽³⁾.

이와 같은 가공, 저온유통 및 살균공정의 최적화를 위하여 가장 중요한 물리적 성질은 김치의 열적 성질이다. 김치의 열적 성질에 관한 연구로는 장과 전⁽¹⁾의 마쇄김치에 대한 열전도도 측정과 변 등⁽²⁾에 의한 김치의 열확산율 측정 등 단편적인 보고밖에 없다.

김치의 열적특성을 알기 위해서는 먼저 김치의 주원료인 배추 자체의 전열특성을 알아야 한다. 배추는 수분 함량이 매우 높고 내부에 공기가 포집되어 있어 염절입 과정 중에 탈수, 탈기되며, 또한 데치기 및 저온살균 중에도 수축, 탈기되므로 열전도도는 연속적으로 변한다.

수분함량이 매우 높은 채소류는 정상상태법에 의하여 열전도도를 측정하면 수분 손실이나 수분 이동으로 인해 오차가 크게 발생한다⁽³⁾. 또한 채소류는 시료의 모양이 일정하지 않거나 불균일하며 크기도 작은 경우가 많으므로 측정시간이 매우 짧고, 작은 시료에서도 측정할 수 있어야 한다. Probe method는 transient method 중에서도 측정시간이 제일 짧고, probe의 크기에 따라 매우 작은 시료에도 적용 가능한 장점이 있다⁽⁴⁾.

본 연구에서는 배추의 부위 중에서 줄기부분을 선택하여 염절입, 열처리 과정에서 수분과 가스함량에 따른 열전도도의 변화를 probe method로 측정하여 보고한다.

재료 및 방법

재료

시장에서 구입한 신선한 절구종 배추를 5°C의 냉장실에 저장하면서 시료로 사용하였다. 한 포기 내에서의 잎간, 한 잎에서의 부위간 유의차 검정 결과에 의하면 겉잎에서부터 16~30번 사이의 잎 사이에 가장 유의차가 적었고, 한 잎내에서는 줄기의 중앙부위가 가장 유의차가 가장 적었다⁽⁵⁾. 따라서 배추 한 포기의 겉에서부터 16~30번의 잎의 줄기 중앙부분만을 취하여 5×7 cm로 절단하여 시료로 사용하였다. 또한 시료 배추를 염절입 때는 시판 정제염 또는 식약급 NaCl을 사용하였다.

수증기 가열 및 염절입

일정한 온도로 유지되는 반 밀폐된 항온 수조에서 발생되는 60~90°C의 수증기에 배추줄기 시료를 0~15

Corresponding author: Yu-Ryang Pyun, Department of Food Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

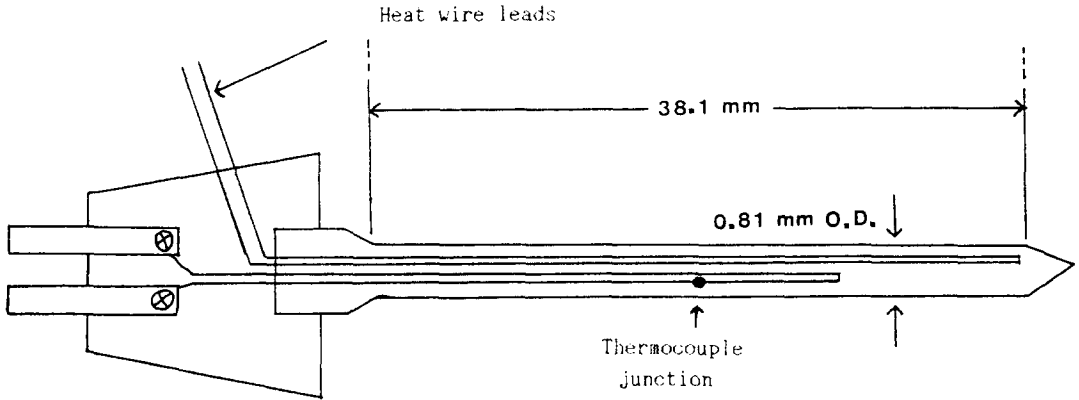


Fig. 1. Cross section of thermal conductivity probe

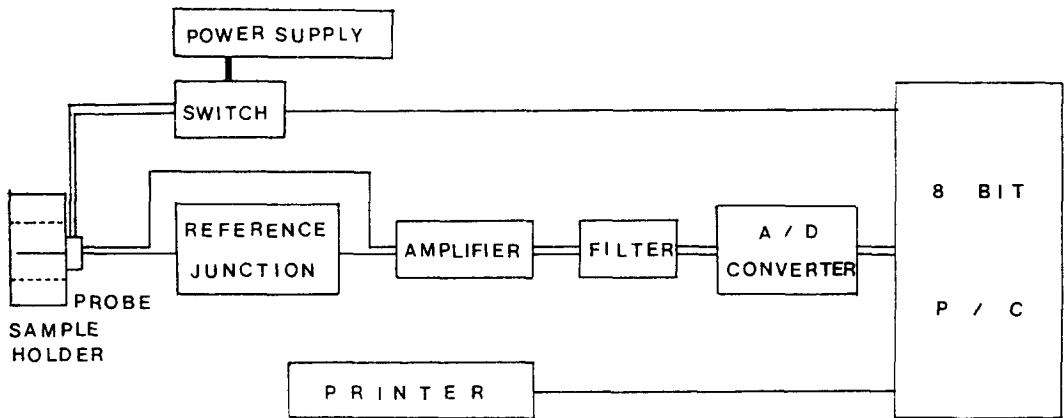


Fig. 2. Probe, thermocouple, heater and control circuit for thermal conductivity measurement

분간 노출시킨 다음 30분간 방냉한 후 측정 시료로 사용하였다.

염결입은 약 25배량의 4°C의 0~10% 염용액에 시료가 완전히 잠기도록 하여 24시간 침지시켰으며, 염결입된 시료는 증류수로 배추표면을 세척하고 길에 묻어있는 물기를 여과지로 흡수 제거한 후 측정시료로 하였다.

염결입 및 수증기 가열한 시료의 공기함량은 Mitchell 등⁽⁶⁾의 상방 치환법으로 측정하였다.

열전도도 측정

Line heat source technique으로 배추의 열전도도를 측정하기 위하여 실험실에서 제작한 probe는 Fig. 1과 같다. 이 probe는 21 gauge 주사바늘을 사용하여 제작하였으며, thermocouple connector(Omega Eng. Co.) 끝부분에 주사바늘을 접착시켰다. Heater wire는 온도에 따라 저항의 변동이 거의 없는 지름 0.076 mm의 constant wire를 에나멜로 절연시켜 사용하였으며, 바늘 끝까지 통과하도록 삽입하였다. 또한 thermocouple wire는

지름 0.076 mm의 copper-constantan으로 plastic tubing 된 상태로 사용하였으며 junction point가 바늘의 중간에 오게 하였다. 열전도도 측정시스템의 개략적인 회로도도 Fig. 2와 같으며, probe heater의 작동개시, 온도변화 data의 수집 및 분석, 열전도도 계산 등을 위하여 probe에 8 bit PC를 연결하였다. Probe heater는 PC와 heater 사이를 photocoupler를 이용해 전기적으로 분리한 후, silicon control rectifier에 의해 작동되게 하였다. 또한 thermocouple로부터 나오는 전기신호는 증폭기(Omega Eng. Co.)로 증폭시킨 후 저역 filter를 거쳐 A/D converter에서 digital 신호로 바뀌 PC에 입력되게 하였다. 이때 사용한 reference junction은 Omega Eng. Co. 제품을 이용하였다.

배추의 열전도도를 측정하기 위해서 먼저 측정시료를 sample holder에서 온도 평형시킨 후 초기온도를 입력한 다음 heater를 작동시키고 80~100 ms 간격으로 출력 data를 읽었으며 이때 입력전압은 1 volt로 하였다.

시료의 열전도도는 다음 식 (1)에 의하여 T와 ln t의

Table 1. Thermal conductivity (W/m·K) of raw Chinese cabbage during steam heating at various temperature

Heating time (min)	Temperature (°C)			
	60	70	80	90
0	0.4754	0.4754	0.4754	0.4754
1	0.4354	0.4693	0.4491	0.5497
2				0.5395
3	0.4540	0.5043	0.4693	0.5225
5	0.5128	0.5203	0.5400	0.5114
7	0.4565	0.5044	0.5409	
10	0.5121	0.5220	0.5245	
15	0.5034	0.5158		

관계를 도시하고 직선의 상관계수(R)가 0.9999 이상에서 최대가 되는 직선의 기울기로부터 구하였다.

$$T_2 - T_1 = \frac{q'}{2\pi k} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (1)$$

여기서 q'는 line heat source 의 발열량이며, k는 열전도도, T₁, T₂는 각각 시간 t₁, t₂에서 열원에 인접한 점에서의 온도이다⁽⁴⁾.

본 실험에서 제작한 열전도도 측정장치를 보정하기 위하여 문헌상에 정확한 열전도도 값이 보고된 glycerine (0.2873 W/m·K), 증류수(0.62 W/m·K), 0.2% agar gel (0.6199 W/m·K)의 표준시료를 사용하였다.

결과 및 고찰

배추의 열전도도와 공기함량

배추를 비롯한 채소류의 전열특성에 큰 영향을 미치는 성분은 수분과 조직내 가스함량이며, 열처리 공정중 그 함량이 변하므로 이들 함량에 따른 배추 열전도도를 측정하였다. 배추 열전도도를 측정하기에 앞서 예비실험으로 열전도도 probe의 설치방향에 따른 차이를 검토하였다. Probe 중앙이 도관을 피해 유세포 부위에 위치하도록 설치하였으며 이때 각각 도관과 같은 방향 및 직각인 방향으로 설치하여 열전도도를 비교한 결과 표준편차가 ±0.008 W/m·K로 거의 차이가 없으며 시료간 오차범위(±0.015 W/m·K)를 넘지 않았다. 그러나 배추의 유세포 조직이 아닌 도관 부분에서는 측정값의 편차가 심해 본 실험에서는 유세포 조직에서만 열전도도를 구하였다. 또한 배추간 오차의 영향을 없애기 위해 각 처리구별로 1포기의 배추에서 시료를 채취하였다.

여러 온도에서 수증기로 가열하면서 시간에 따른 배추의 열전도도의 변화를 측정하여 Table 1에 나타내었다. 가열시간이 길수록 열전도도는 증가하여 초기 0.43~0.47에서 0.51~0.54 W/m·K로 증가하였으며, 이 증가 속도는 가열온도가 높을수록 높았다. 이와 같이 가열하면 열전도도가 증가하는 것은 가열하므로써 배추내 공기가 구

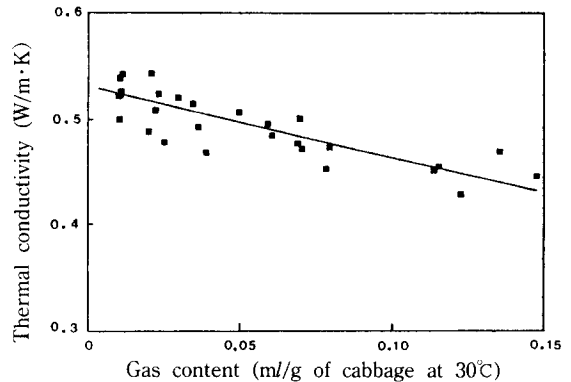


Fig. 3. Relationship between thermal conductivity (k_c) and gas content (V_a) of petiole tissue of chinese cabbage

출되었기 때문인 것으로 생각된다.

열전도도 측정과 동시에 가스함량을 측정하여 배추줄기의 열전도도와 가스 함유량과의 관계를 Fig.3에 도시하였다. 배추줄기의 열전도도(k_c)와 조직내 가스 함유량(V_a)과의 사이에는 상관계수 0.85로 식 (2)와 같은 직선관계가 성립하였다.

$$k_c = -0.6284 V_a + 0.5295 \quad (2)$$

생배추 시료의 수분함량은 96.5%였으며 공기함량은 30°C에서 0.082~0.132 ml/g of cabbage였다. 수증기 가열시 수분증발에 의하여 중량이 감소되나 전보⁽⁷⁾에서 보고한 것과 같이 중량감소는 적기 때문에 무시하고 수분함량은 일정한 것으로 가정하였다. Fig. 3의 결과를 살펴보면 시료간의 차이는 있으나 식 (2)의 직선 관계식으로부터의 추정값과 실측값과의 오차범위는 약 ±0.02 W/m·K이며, 상대오차는 5% 이하로서 비교적 잘 일치됨을 알 수 있었다. 가스 함유량을 0으로 외삽했을 때 열전도도는 0.529 W/m·K로 이 값은 장과 전⁽¹⁾이 보고한 마쇄김치의 열전도도 0.52 W/m·K와 거의 일치되는 값이었다.

Duncan 등⁽⁸⁾은 담배 잎의 열전도도가 담배 잎의 비중에 대하여 거의 직선적인 관계를 보인다고 했으며 Bennett 등⁽⁹⁾도 사과와 배의 열전도도가 비중과의 직선관계가 보인다고 하였다. 본 실험에서 사용한 배추의 경우 조직내 가스 함량(V_a)과 비중(ρ) 사이에는

$$V_a = -1.01 \rho + 1.02 \quad (3)$$

의 관계식⁽⁷⁾이 성립하므로 비중과 열전도도와의 관계로 환산하면

$$k_c = 0.6409 \rho - 0.1248 \quad (4)$$

의 관계식이 성립한다.

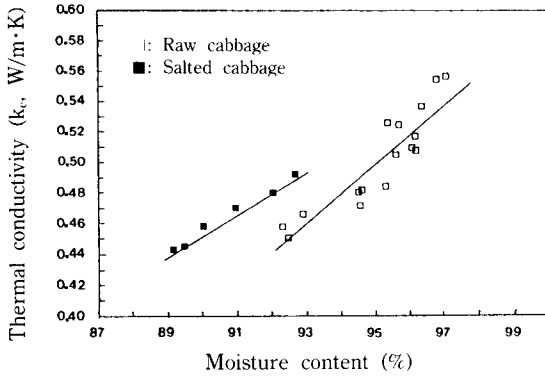


Fig. 4. Effect of moisture content on the thermal conductivity of Chinese cabbage

배추의 열전도도와 수분함량

배추의 열전도도에 크게 영향을 미치는 또다른 인자는 수분함량이다. 배추중의 수분함량은 대부분 93% 이상이며, 염절임, steam 수증기 가열과 같은 전처리 과정에서 수분함량이 변하므로 배추의 전열특성에 미치는 영향은 대단히 크다. 배추줄기의 수분함량의 영향을 검토하기 위하여 배추를 40°C에서 진공 건조시켜 수분을 조정한 후 열전도도를 측정하였다. Fig. 4에 배추줄기 시료의 수분함량과 열전도도와의 관계를 나타내었으며 진공건조 후에도 가스가 검출된 시료에서는 Fig. 3에 의해 가스의 영향을 보정하였다. Fig. 4에서 배추의 열전도도(k_c)는 수분함량(MC) 92~98% 범위에서 다음의 상관관계가 성립하였다.

$$k_c = 0.0192 MC - 1.3252 \quad (5)$$

이 때 상관계수는 0.86이었으며, 식 (5)의 회귀직선으로 추정된 값과 실측값의 오차범위는 공기함량과의 관계식에서와 마찬가지로 ± 0.02 W/m·K였으며 상대오차는 5% 미만이었다. Sweat⁽¹⁰⁾는 문헌상에 보고된 여러 가지 채소 및 과일들의 열전도도와 수분함량(60~96%)과의 관계를 조사한 결과 직선관계를 얻었으며, 실제 식품에 적용했을 때 약 15%의 오차가 있다고 보고하였다. 그러나 비중이 물보다 작은 시료인 경우에는 그 오차범위가 커 조직내 가스함량이 열전도도에 큰 영향을 미친다고 지적하였다.

이상의 생배추 줄기의 열전도도에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 조직내 가스량과 수분함량에 의한 영향을 묶어서 표현하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있고 이 때 상관식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (6)은 공기함량 0.082~0.132 ml(30°C)/g of cabbage 및 수분함량 92~98%의 시료로부터 얻은 열전도도 측정값의 상관회귀식이며 상관계수는 0.85이다.

$$k_c = 0.0192 MC - 0.6284 V_a - 1.3252 \quad (6)$$

염절임 배추의 열전도도

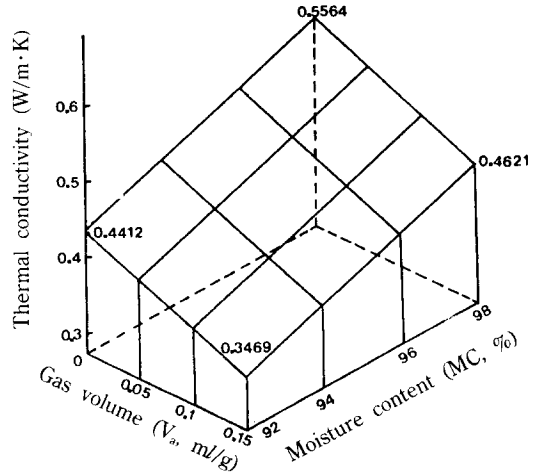


Fig. 5. Response surface for the thermal conductivity of Chinese cabbage as a function of gas volume and moisture content

한편 염절임 배추에서는 열전도도에 영향을 미치는 성분으로 수분 및 조직내 가스 함량외에 염절임 중 확산되어 들어온 소금도 중요한 인자가 된다.

소금은 결정상태인 경우 열전도도가 0.247 W/m·K로 매우 작으나 농도가 낮은 염용액의 경우 오히려 물보다 높은 값을 가지며 10% 이상에서는 물과 비슷한 열전도도 값을 나타낸다. 배추 열전도도에 대한 염절임의 영향을 관찰하기 위하여 0~10% 염용액에 24시간 침지한 시료의 열전도도를 측정하였다. 염절임시 약 30% 정도 탈수되며⁽⁸⁾, 확산되어 들어온 소금량에 따라 수분함량이 달라지므로 염절임 시료의 열전도도를 그 때의 수분함량과의 관계로 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보면 같은 동일 수분함량에서 염절임 시료의 열전도도가 생배추보다 높게 나타났는데 이는 염의 영향으로 저농도 염용액의 경우 오히려 물보다 열전도도가 높기 때문인 것으로 생각된다. 염절임한 배추의 열전도도는 수분함량 92~98% 범위에서 상관계수 0.99로 다음의 상관관계를 보였다.

$$k_c = 0.0138 MC - 0.7839 \quad (7)$$

요 약

배추줄기 부분의 열전도도를 probe method로 측정하였다. 여러 온도에서 수증기로 가열하면서 시간에 따른 배추의 열전도도를 측정된 결과 초기 0.43~0.47 W/m·K에서 가열됨으로 배추내 공기가 구축되어 0.51~0.54 W/m·K으로 증가되었다. 또한 수분함량 92~98% 범위에서 열전도도는 수분함량의 증가에 따라 직선적으로 증가되었으며, 배추줄기의 열전도도(k_c)는 수분함량(MC, 92~98%) 및 가스함량(V_a , 0.082~0.132 ml(30°C)/g of cabbage)과 $k_c = 0.0192 MC - 0.6539 V_a - 1.3252$ 의

상관식이 성립하였다. 한편 열절임 배추의 열전도도는 동일 수분의 생배추보다 약 0.04 W/m·K 높은 값을 보였다.

감사의 말

본 연구는 1989년도 과학재단 학위논문 연구비 지원에 의하여 이루어진 것의 일부이며 이에 감사드린다.

문헌

1. 장규섭, 전재근 : 한국 고유식품의 열특성. 한국식품과학회지, 14, 112(1982)
2. 변유량, 신승규, 김주봉, 조은경 : Retort pouch 김치의 전열 특성과 살균 조건에 관한 연구. 한국식품과학회지, 15, 414(1983)
3. Nesvadba, P.: Methods for the measurement of thermal conductivity of frozen foodstuffs. *Mod. Refrig.*, 55, 254(1952)
4. Nix, G.H., Lowery, G.E., Vachon, R.I. and Tranger, G.E.: Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source techniques. *Prog. Astronautics*, 20, 865(1967)
5. 유명식 : 가공 중 배추조직의 텍스처 변화와 리올로지 모델. 연세대학교 박사학위논문(1990)
6. Mitchell, R.S., Lynch, L.J. and Casmir, D.J.: Blanching of green peas. *Food Technol.*, 23, 812(1969)
7. 김주봉, 유명식, 조형용, 최동원, 변유량 : 열절임 및 blanching시 배추의 물리적 특성의 변화. 한국식품과학회지, 22, 445(1990)
8. Duncan, G.A., Bunn, J.M. and Henson, W.H.: Thermal conductivity of Burley tobacco during the cure. *ASAE*, 9, 36(1966)
9. Bennett, A.M., Chase, W.G. Jr. and Cubbedge, R.H.: Heat transfer properties and characteristics of apple-chian area Red Delicious apples. *ASHRAE Trans.*, 79, 133(1969)
10. Sweat, V.E.: Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. *J. Food Sci.*, 39, 1080(1974)
11. Lozano, J.E., Urbicain, M.J. and Rostein, E.: Thermal conductivity of apples as a function of moisture content. *J. Food Sci.*, 44, 198(1979)

(1991년 3월 11일 접수)