

모형식품의 열전도도에 관한 연구

장규섭 · 전재근* · 윤한교

충남대학교 식품가공학과 · * 서울대학교 식품공학과

Studies on the Thermal Conductivity of Model Foods

Kyu-Seob Chang, Jae-Kun Chun* and Han-Kyo Yoon

Department of Food Science and Technology, Chungnam National University, Daejeon

*Department of Food Technology, Seoul National University, Suwon

Abstract

The model foods similar to Korean typical foods were prepared by combining moisture, protein and starch, and their thermal conductivities were investigated. Thermal conductivity of the model foods had a close relationship with food components such as moisture, protein and starch content. The interaction between the thermal conductivity and food components was not found. Thermal conductivity was proportionally increased as the moisture content increased, and thermal conductivity of starch food was lower than that of protein foods under the same level of moisture content of the model foods. The regression equation between thermal conductivity of the model foods. The regression equation between thermal conductivity of the model foods and moisture, protein and starch content at 20°C was as follows; $k = 0.00421M + 0.03152P + 0.05181$. Correlation coefficient between calculated by above equation and measured values showed highly significant ($r = 0.8418^{**}$).

서 론

전보^(1,2)에서 보고된 바와 같이, 식품의 열전도도 (thermal conductivity), 열확산도 (thermal diffusivity) 및 비열 (specific heat) 등의 열특성은, 식품제조업에서 가열 또는 냉각속도를 결정하는 주요한 인자가 될뿐만 아니라 열처리장치를 설계하는데 기본적인 자료가 된다.

더우기 오늘날 식품공업이 고도로 발달됨에 따라 식품의 열특성을 합리적으로 이용함은 제품의 품질을 높이는 데 중요한 물리적인 성질이 되고 있다.^(3,4)

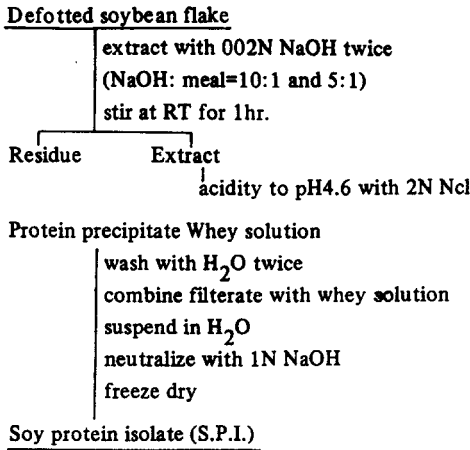
우리나라의 경우, 한국 고유식품의 열특성에 관한 연구를 저자등⁽⁵⁾이 발표한 바 있으나, 식품의 주요성분인 수분, 전분, 단백질의 세가지 성분을 조합하여 조제한 일반적인 전분, 단백질, 수분 등으로만 구성된 한국 식품과 유사한 모형식품에 대한 열전도도 측정에 관한

연구는 수행된 바 없으며, 따라서 본 연구에서는 조제한 모형식품이 각 성분내 따라 열전도도가 어떻게 변화하는가를 실측하고, 이를 근거로 하여 회귀분석식을 도출하였으며, 이 회귀식과 실측치간의 교호작용을 검토하여 몇가지 결과를 얻었기에 열특성 연구의 기초자료로 제시코자 보고하는 바이다.

재료 및 방법

재료

모형식품을 조제하는 재료로서의 전분은 감자를 상법⁽⁶⁾에 따라 처리하여 조제하였고, 단백질은 Fig. 1에서와 같이 처리하여⁽⁶⁾ 얻은 분리대두단백질 (Soy protein isolate)을 사용하였다. 즉 hexane으로 유지를 추출하고난 탈지대두박을 재료로 하여, 이 탈지대두박 1



모형식품 조제용 재료의 일반성분은 Table 1 과 같다.

모형식품의 조제 및 조성

수분, 감자전분 및 분리대두단백의 세가지 성분을 무게를 근거로 하여 조합하되, 수분은 4% 함량 차이로 하고 전분과 분리대두단백을 0:4에서 4:0까지 7개 수준으로 조합하여 Table 2와 같은 35종의 모형식품을 조제하였다.

열전도도의 측정방법

본 연구에서의 모형식품의 열전도도 측정방법은 Vos⁽¹⁾가 개발한 비정상상태 방법을 개량한 것으로 그 원리 및 장치는 전보^(1,2)에서와 같은 방법으로 수행하였다.

Fig. 1. Preparation of soyprotein isolate

kg에 대하여 0.02N-NaOH용액 10l를 가하여 실온에서 1시간 교반한 다음, 1,500rpm으로 10분간 원심분리하여 상등액을 얻었다. 이 액에 2N-HCl을 가하여 pH가 4.6이 되게 조절함으로써 침전되는 단백질을 분리하여 수세한 다음 1N-NaOH로 pH6.7이 되게 중화한 것을 냉동건조시켜 분쇄하여 분말로 하였다. 이들

결과 및 고찰

수분함량을 5개 수준으로, 단백질과 전분 함량비율 7개 수준으로 조제한 모형식품 35 처리구중, PoS₄, P₁S₁, P₁S₃에 대한 초기온도 20℃와 60℃에서 온도상승을 보면 Table 3과 같다. 표에서 나타난 바와 같이 상승속도는 높은 온도에서 보다 낮은 온도에서 더 높은 경향을 나타냈으며, 중심부의 온도와 시간을 반대수지

Table 1. General Composition of soyprotein isolate and potato starch

Ingredient	Moisture	Protein	Fat	Carbohydrate		Ash
				Sugar	Fiber	
Soyprotein isolate	12.1	82.1	0.8	2.4	—	2.6
Potato starch	11.7	1.1	0.3	86.7	—	0.2

Table 2. Formular of model foods

Food formula	Water (%)				
	78	82	86	90	94
P ₀ S ₄	0.0 : 22.0	0.0 : 18.0	0.0 : 14.0	0.0 : 10.0	0.0 : 6.0
P ₁ S ₃	5.5 : 16.5	4.5 : 13.5	3.5 : 10.5	2.5 : 7.5	1.5 : 4.5
P ₁ S ₂	7.3 : 14.7	6.0 : 12.0	4.7 : 9.3	3.3 : 6.7	2.0 : 4.0
P ₁ S ₁	11.0 : 11.0	9.0 : 9.0	7.0 : 7.0	5.0 : 5.0	3.0 : 3.0
P ₂ S ₁	14.7 : 7.3	12.0 : 6.0	9.3 : 4.7	6.7 : 3.3	4.0 : 2.0
P ₃ S ₁	16.5 : 5.5	13.5 : 4.5	10.5 : 3.5	7.5 : 2.5	4.5 : 1.5
P ₄ S ₀	22.0 : 0.0	18.0 : 0.0	14.0 : 0.0	10.0 : 0.0	6.0 : 0.0

P and S denote protein isolate, starch, respectively and subscripts represent the ratio of their composition.

Table 3. The temperature changes at the center of cylindrical cell with model foods ($P_0 S_4$, $P_1 S_1$, and $P_4 S_0$) containing 86% of moisture at the initial temperature of 20°C and 60°C

Heating time (min)	$P_0 S_4$		$P_1 S_1$		$P_4 S_0$	
	20°C	60°C	20°C	60°C	20°C	60°C
10	31.2	71.2	30.5	70.7	31.7	71.3
20	33.2	73.1	33.1	72.6	33.3	72.8
30	34.1	74.1	34.4	73.5	34.5	74.0
40	35.3	75.0	36.0	74.3	35.4	74.9
50	36.1	75.3	37.1	74.9	36.1	75.2
60	36.6	76.0	37.8	75.4	37.2	75.7

(半对数紙)에 도시(圖示)하여 보면 Fig. 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 이들 전부는 직선으로 나타났고, 이때의 기울기는 $\frac{I^2 Z}{4 \pi k}$ 이기 때문에 열전도도는 식 $k = \frac{I^2 Z \ln(t_2/t_1)}{4 \pi (T_2 - T_1)}$ 에 직접 대입하여 산출할 수 있다. 모형식품의 산출된 열전도도는 Table 4와 같다. 측정조기 온도별로 보면 20°C에서보다 60°C에서 더 높았으며, 또한 모형식품의 수분함량이 증가함에 따라 증가하는 경향이었다. 열전도도와 구성분인 수분함량, 단백질 및 전분함량과의 관계를 구명하기 위하여 컴퓨터에 의한 분산분석(分散分析)을 실시한 결과는 Table 5와 같다. 즉 20°C 및 60°C에서의 열전도도는 모든 수분함량의 수준에서 단백질과 전분의 조성을 달리 하였을때, 각처리 평균치간에 고도의 유의차를 나타내었다. 또한 모형식품의 열전도도와 세 구성성분간의 상호작용을 검정하였는 바, 각각 고도의 유의차가 인정되어, 이들 함량에

따라 열전도도가 일정하게 변화하였다. 한편 수분함량과 단백질 및 전분함량과의 교호작용(交互作用)은 인정되지 않았는데, 이것은 각 수준의 수분함량에서 단백질 및 전분함량의 차이가 열전도도에 미치는 영향이 동일하고, 한편 단백질 및 전분함량의 각 수준에서 수분함량의 차이가 열전도도에 미치는 영향도 역시 같다는 것을 뜻한다. 따라서 수분함량과 단백질 및 전분함량이 열전도도에 미치는 영향은 각각 독립적임을 보여주고 있다.

열전도도와 단백질 및 전분함량과의 관계

모형식품과 유사한 성분조성을 가진 어떤 식품의 열전도도를 직접 산출할 수 있는 식을 정립하기 위하여, 회귀분석(回歸分析)을 실시하였다. 측정온도 20°C에서 열전도도와 단백질 및 전분함량의 관계를 보면, 20°C에서 모형식품의 수분함량이 일정할때 단백질 및

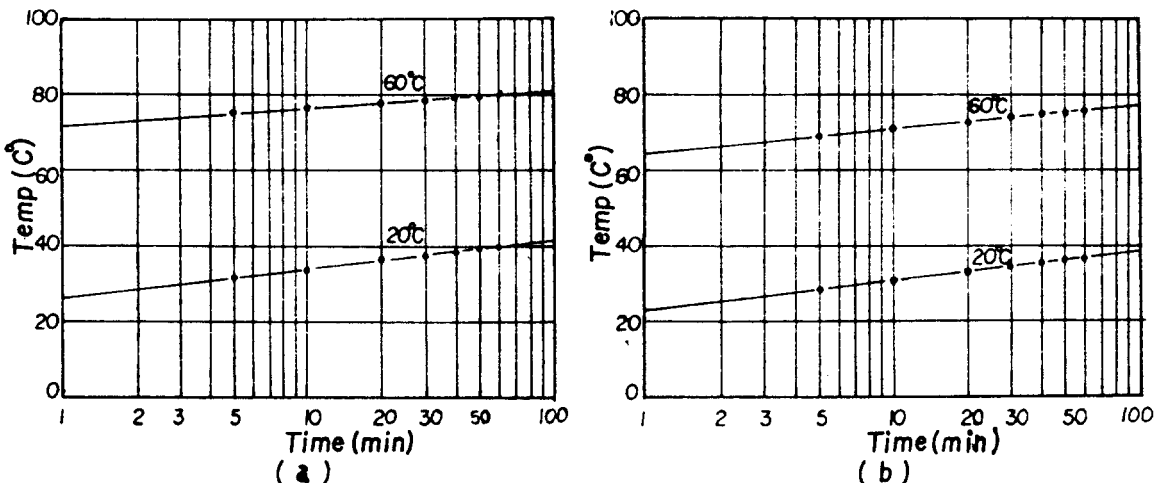


Fig. 2. Time-temperature relationship of thermal conductivity test $P_0 S_4$ (a) and $P_4 S_0$ (b) containing 80% of moisture.

Table 4. Thermal conductivity of model foods

Food	Moisture (%)	(kcal/mh °C)	
		Measuring temperature (°C)	
		20	60
P ₀ S ₄	78	0.3930	0.4145
	82	0.4140	0.4429
	86	0.4190	0.4445
	90	0.4287	0.4833
	94	0.4443	0.5087
P ₁ S ₃	78	0.3945	0.4182
	82	0.4079	0.4373
	86	0.4164	0.4568
	90	0.4344	0.4818
	94	0.4517	0.5105
P ₁ S ₂	78	0.3951	0.4272
	82	0.4028	0.4296
	86	0.4196	0.4454
	90	0.4405	0.4862
	94	0.4622	0.4987
P ₁ S ₁	78	0.4038	0.4343
	82	0.4033	0.4364
	86	0.4295	0.4643
	90	0.4396	0.5063
	94	0.4672	0.5164
P ₂ S ₁	78	0.3905	0.4235
	82	0.4082	0.4351
	86	0.4286	0.4617
	90	0.4476	0.4874
	94	0.4718	0.5128
P ₃ S ₁	78	0.4041	0.4255
	82	0.4155	0.4365
	86	0.4537	0.4754
	90	0.4625	0.4938
	94	0.4843	0.5181
P ₄ S ₀	78	0.4202	0.4567
	82	0.4241	0.4632
	86	0.4532	0.4709
	90	0.4607	0.4981
	94	0.4877	0.5279
Mean		0.4309	0.4665

Table 5. Analysis of variance for thermal conductivity of model foods

Source of variation	df	Mean square of thermal conductivity	
		20°C	60°C
Treatment	34	0.00221**	0.00347**
Moisture	4	0.01510**	0.02630**
Protein, Starch	6	0.00188**	0.00135**
Interaction	24	0.00014	0.00019
Error	70	0.00048	0.00039

** : Significant at the 0.01 level of probability

전분함량과 회귀계수는 Table 6 과 같았으며, 이로부터 단백질과 전분함량을 알때 열전도도를 예측할 수 있는 관계식을 얻을 수 있다. 지금 그 예로 78% 수분함량에서 임의의 단백질 및 전분함량과 열전도도와와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = 0.3870 + 0.02319p \dots\dots\dots (1)$$

또는

$$k = 0.3927 - 0.0146p + 0.0377p^2 \dots\dots\dots (2)$$

한편 86%에서는 2 차곡선적인 증가경향도 나타내었다. 그런데 그밖의 수분함량에서는 Table 6에서와 같이 단백질 및 전분함량과 열전도도 사이에는 일정한 관계식을 유도할 수 없었다. 즉 단백질과 전분함량에 따르는 열전도도의 관계는 수분함량 78%에서는 단백질과 전분함량이 증가함에 따라 열전도도도 직선적인 증가현상을 보였으며, 그밖의 수분함량에서는 2 차곡선적이거나 열전도도 변화경향에 뚜렷한 관계를 보여주지 않았다.

열전도도와 수분함량과의 관계

각 모형식품에서 수분함량을 달리하였을때 열전도도와의 관계를 보면 Table 7 과 같다. 20°C에서 전분함량 및 단백질의 각 수준에서, 수분함량이 증가함에 따라 고도로 유의한 직선적인 증가현상을 보였다. 즉 P₁S₁, P₁S₂, 모형식품은 직선적이면서도 2 차곡선적인 경향을 나타냈는데, 한 예로 P₁S₂에서의 열전도도와 수분함량과의 관계식을 보면 다음과 같다.

$$k = 0.16 + 0.003M \dots\dots\dots (3)$$

$$k = -0.4977 + 0.0185M - 0.0009M^2 \dots\dots\dots (4)$$

Sharma⁽¹³⁾의 보고에 의하면 곡물에서 열전도도와 수

Table 6. Regression coefficient of thermal conductivity on protein content of model foods at 20°C

Moisture content of model food(%)			(kcal/mh °C)			Goodness of fit to regression
		a	b	c		
78	Ln.	0.3870	0.0231		Ln.**	
	Qd.	0.3927	-0.0146	0.0377	NS	
82	Ln.	0.4033	0.0135		NS	
	Qd.	0.4096	-0.0253	0.0241		
86	Ln.	0.4137	0.0354			
	Qd.	0.4179	-0.0081	0.0274	Qd.*	
90	Ln.	0.4266	0.0354		NS	
	Qd.	0.4274	0.0286	0.0072		
94	Ln.	0.4407	0.0501		NS	
	Qd.	0.4396	0.0597	-0.0072		

* : Significant at the 0.05 level of probability.

a.b.c are constants for the equation $y = a + bx + cx^2$, where x is protein fraction. (wt/wt)

Table 7. Regression coefficient of thermal conductivity on moisture content of model foods at model foods at 20°C

Model food			(kcal/mh °C)			Goodness of fit to regression
		a	b	c		
P ₀ S ₄	Ln.	0.1600	0.0030		Ln.**	
	Qd.	-0.4977	0.0185	-0.0009		
P ₁ S ₃	Ln.	0.1190	0.0035		Ln.**	
	Qd.	-	-	-		
P ₁ S ₂	Ln.	00.0800	0.0040		Ln.**	
	Qd.	1.3953	-0.0267	0.0002		
P ₁ S ₁	Ln.	0.0410	0.0045		Ln.**	
	Qd.	1.3565	-0.0262	0.0002		
P ₂ S ₁	Ln.	0.0000	0.0050		Ln.**	
	Qd.	-	-	-		
P ₃ S ₁	Ln.	0.0120	0.0050		Ln.**	
	Qd.	-0.6457	0.0201	-0.0001		
P ₄ S ₀	Ln.	0.0610	0.0045		Ln.**	
	Qb.	0.3764	-0.0262	0.0002		

a. b. c are constants for the equation $y = a + bx + cx^2$, Where x is moisture content (%).

분함량과의 관계를 회귀식으로 나타내어 실측치와 비교 하였을때, 95%의 높은 신뢰도가 나타났다고 보고하였다. 본 실험에서도 각식이 각각 고도의 유의성이 인정 되었으므로 식품이 이와 유사한 범위에 있을 때는 이들의 공식에 의해, 열전도도를 직접 측정하지 않고도 계산에 의해 산출할 수 있는 것이다.

열전도도와 수분함량, 단백질 및 전분함량과의 관계
 수분함량과 단백질 및 전분함량과의 동시적 변화에 따르는 열전도도 변화를 구명하고자 수분함량 78%에서

다중회귀식(多重回歸式)을 구하였는 바,

$$k = 0.00421M + 0.03152P + 0.05181 \dots\dots (5)$$

이었다. 여기서 M은 수분함량, P는 단백질 함량을 %로 나타낸 것이다.

이들 다중회귀식에 대한 부합도(附合度)를 검정하고 저 회귀분산분석을 실시한 결과는 Table 8에서와 같다. 초기온도 20°C에서 모형식품의 열전도도 다중회귀식은 모두 높은 유의성이 인정되었는데, 이러한 사실은 측정치와 다중회귀식에 의한 계산치가 잘 일치함을 뜻하고 있으며 Fig. 3에서 명확히 알 수 있다. 그림에서 나타

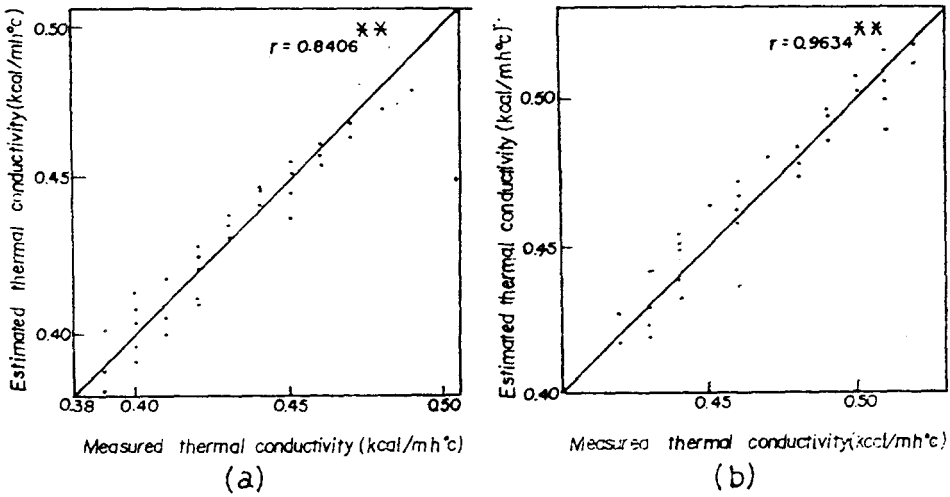


Fig. 3. Relationship between the measured and estimated thermal conductivity at 20°C (a) and 60°C (b)

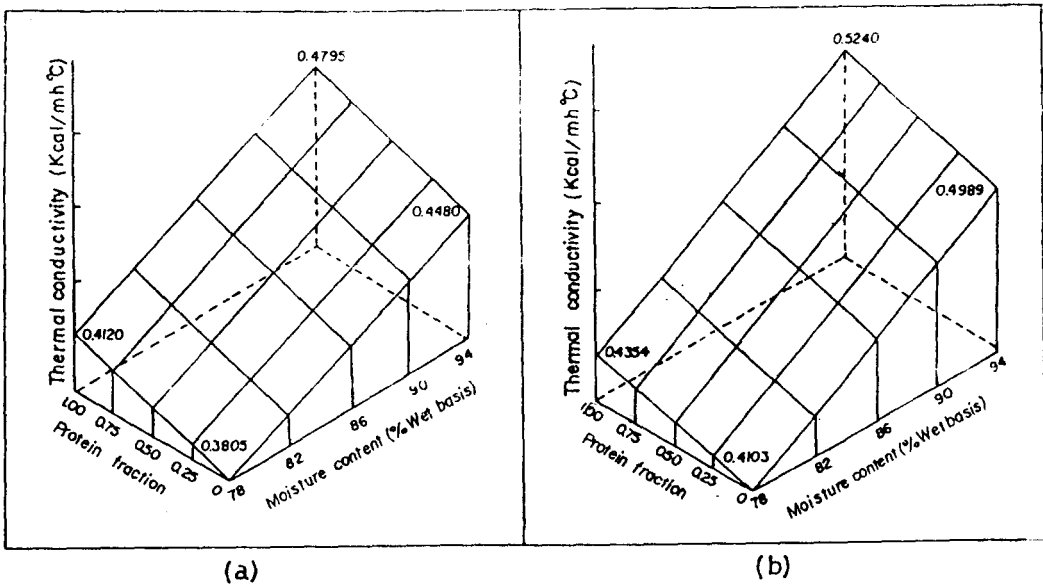


Fig. 4. Response surface for the estimated thermal conductivity of model food at 20°C (a) and 60°C (b)

난 바와 같이 20℃에서의 상관계수 $r=0.8406^{**}$ 이고, 60℃에서는 $r=0.9634^{**}$ 로서 각각 높은 값을 나타내었으며, 상관정도로 미루어 볼때, 측정치와 계산치간의 부합율은 20℃에서보다 60℃에서 더 높음을 알 수 있다. Fig. 4는 열전도도와 수분함량, 단백질 및 전분함량과의 관계를 종합적으로 검토하기 위하여 다중회귀식에 의해 산출한 열전도도 계수를 대응표면(對應表面)으로 나타내어 그 경향을 본것이다. 그림에서 보는 바와 같이 20℃에서 수분함량 78%, 단백질분률 1, 즉 P_0S_0 의 열전도도는 0.4120Kcal/mh℃인데, 94%에서는 0.4795Kcal/mh℃로서, 수분함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여 주었고, 94%에서 단백질분률이 0 인것, 즉 P_0S_0 에서는 0.4480Kcal/mh℃로서, 수분함량이 78%일때의 0.3085Kcal/mh℃보다 더 높은 값을 나타내 주었다. 따라서 결론적으로, 같은 수분함량에서는 단백질분률이 높은 것이, 같은 단백질분률에서는 수분함량이 높은 것이 열전도도가 높는데, 3축도시(三軸圖示)로 나타낸 Fig. 4에서 이러한 특성을 보여주고 있다.

그림에서와 같이 60℃에서의 열전도도를 20℃와 비교하여 볼때 변화율이 약간 높음을 알 수 있다. Bilanski⁽¹⁴⁾ 등은 유체중자의 열전도도를 측정하였는데, 여기에서도 온도와 비례하였고, 수분함량과는 직선적으로 증가하는 1차함수 관계가 있다고 하였다. 또한 수분함량과 공극률(空隙率)에 의한 영향을 검토하고자, 시료를 유체와의 분말에 대한 열전도도를 측정하였는데, 분말은 0.1273Kcal/mh℃로서 유체보다 약 50%정도 낮았다. 이것은 입자사이의 공극에 존재하는 공기에 기인한 것으로 본다고 설명하였다.

요 약

일반적인 전분, 단백질, 수분 등으로 구성된 한국식

Table 8. Analysis of multiple regression between components and thermal conductivity of model foods at 20°C and 60°C

Source of variation	df	Mean square of thermal conductivity	
		20°C	60°C
Regression	2	0.0116**	0.1642**
Moisture	1	0.0198**	0.3089**
Protein, Starch	1	0.0034**	0.0195**
Deviation	32	0.0005	0.0008

품과 유사하도록 수분, 단백질, 전분의 세가지 성분을 조합하여 만든 모형식품의 열전도도를 측정하였으며, 이들 조성파 열전도도와와의 관계를 구명하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

즉, 모형식품의 열전도도와 구성성분의 관계를 분석한 결과, 수분함량, 단백질 및 전분함량과 밀접한 관계를 보였으며, 이들 성분간의 교호작용은 유의성이 인정되지 않았다. 열전도도는 수분함량에 비례하였고, 동일 수분함량에서는 전분질식품이 단백질 식품보다 낮았다. 모형식품에서 열전도도와 수분함량, 단백질 및 전분함량과의 관계식은 다음 식으로 나타낼 수 있었다.

$$k_{20} = 0.00421M + 0.03152P + 0.05181$$

윗 식에 의한 계산치와 측정치간의 상관계수는 0.8416**로 고도의 상관관계를 나타냈다.

기 호

I = Current, Ampere

k = Thermal Conductivity, Kcal/m.h.°C

T = Temperature at arbitraty time, °C

t = Time, min

Z = Reistance per Unit length of heating wire, ohms/m

문 헌

1. 全在根, 陸澈均, 張奎燮: 한국식품과학회지, 11, 157 (1979)
2. 張奎燮, 全在根: 한국식품과학회지, 14, 112 (1982)
3. Jean, A.C.: *Dechema Monographien*, 63, 21 (1969)
4. Treagus, M.T. and Elson, C.R.: *Sci. Tech. Surveys, Leatherhead Food R.A.* 106, 29 (1961)
5. Nikuni, D.: *Starch Handbook*, Asakura Book Co. (1961)
6. 邊時明, 金哲鎮: 한국식품과학회지, 9, 123 (1977)
7. Vos, B.H.: *Appl. Sci. Res.*, A5, 425 (1955)
8. Bennet, C.A. and Franklin, N.L.: *Statistical Analysis in Chem. and Chem. Ind.*, John Wiley (1954)
9. Cooley, W.W. and Lohnes, P.R.: *Multi-variate Procedure for the Behavial Sci.*, John Wiley (1962)

10. Thomas, M.L. and Hills, F.J.: *Res. Bull. Agr. Ext., Univ. California* (1972)
 11. George, W.S. and William, G.C.: *Statistical Method, Oxford Pub.* (1967)
 12. Ezekiel, M.: *Methods of Correlation Analysis*, John Wiley (1953)
 13. Sharma, D.K.: *Trans. ASAE*, 16, 114 (1973)
 14. Bilanski, W.L.: *Trans, ASAE*, 19, 788 (1976)
-
- (1985년 9월 25일 접수)