한국농업기계학회지 제22권 제1호. pp. 59~67. 1997

과도탐침법에 의한 열전도계수 측정장치 개발

Development of Experimental Apparatus For Measuring Thermal Conductivity by Transient Probe Method

배 신 철* 김 명 윤**
정회원
S. C. Bae M. Y. Kim

ABSTRACT

An experimental apparatus was developed for the rapid determination of thermal conductivity by transient probe method.

The theoretical basis for transient probe method has been investigated. The mathematical model for this method is the Carslaw and Jaeger model which is used perfect line source theory.

The small needle probe which is equipped with thermocouple and heating element is constructed. A software that performs data analysis and acquisition is programmed. The influence of the power dissipated per unit length of the probe has been assessed for glycerin. The result showed no significant correlation between thermal conductivity and power input.

Determination made with this experimental apparatus were found to agree well with the recommended thermal conductivity data.

주요용어(Key Words): 과도탐침법(Transient Probe Method), 열전도계수 탐침(Thermal Conductivity Probe), 열 특성(Thermal Property), 열전도계수(Thermal Conductivity)

1. 서 론

물질의 열특성 연구는 급속한 각종 산업의 고도화에 따라 에너지산업, 항공우주산업, 농산물산업, 철강산업 등 산업 전반에 걸쳐 물질의 열특성 파악 및 최적설계, 기술혁신을 위하여 요청되고 있는 주요 기술분야이다. 농산물 산업에서는 각종 농산물의 수송, 가공, 건조장비 등의 농업기계 설계 및 작동 방법의 기초자료로 쓰이며, 특히 농산품 보관시설의 냉난방, 항온장치 등의 열매체로 쓰이는 물, 에틸렌 글리콜 등의 액체에 대한 데이터, 지표면의 열 밸런스 연구를 위한 토양의 열 저장 특성, 저장 농산물의 열 거동상태, 농산품 가공을 위한 열 전도 매개물질인 식용유의 열 특성 등의 연구를 위해서도 열 전도계수의 측정이 요구된다. 현재까지 대부분의 상용화된 열 전도계수 측정은 연구소의 실험실이나 대기업의 품질관리실험실에서 고가장비에 의하여 주로 이루어져 왔다. 그러나 최근에 와서는 현장에서 측정

* 단국대학교 기계공학과
** 단국대학교 대학원

가능한 비교적 값싼 휴대용 또는 간편한 측정 장치가 점차 관련 종사자들에게서 요구되어지고 있다. 본 연구는 이러한 장치를 보다 발전시키고자 하는 것이다.

연속가열법인 라인소스(Line source)법의 일종인 과도탐침법(Transient Probe method)은 바늘모양 탐침(probe)내의 열선에 일정한 라인소스를 공급하여 시간에 따른 온도 상승을 측정하여 열 전도계수를 측정하는 방법으로서, 재료가 건조하거나 습한 것에 관계없이 열전도계수를 측정할 수 있는 장점이 있으므로 토양이나 농가공품 및 액체를 포함하여 다양한 물질의 열 특성 측정에 이용할 수 있다. 이 라인소스법(Line source method)은 1888년 Schleiermacher[1]가 최초로 제안하였으며, 1931년 Stalhane과 Pyk[2,3] 가 독창적으로 개발하여 1934년 세라믹재의 측정에 사용되었다. Jaeger[4]는 완전 도체인 무한 실린더의 반경방향에 대한 열 흐름을 연구하였고, Carslaw 와 Jaeger[5]는 완전 라인소스에 대하여 Laplace 변환을 사용한 가장 보편적인 측정이론 모델을 제시하였다. 1940년 Weishaupt[6], 1949년 Van der Held와 Van Drunen[7]등은 이 방법을 이용하여 액체의 열전도계수를 측정하였다. 특히 Van der Held 등은 이 장치 개발의 기초를 제공하는데 많은 기여를 하였다. 과도열선법이 열선을 직접 측정재료에 넣고 측정하는데 비해 과도탐침법은 실제적이고 현장에 사용하기 편리하도록 열선을 탐침내에 넣어 시료에 삽입이 쉽도록 고안한 것인데, Hooper와 그의 동료들[8,9], De vries와 Peck[10]은 토양 및 기타 재료에 대한 열전도계수의 측정을 위하여 이 방법을 실제적으로 적용하였다.

본 연구에서는 과도탐침법 기술로서 간편하고 저렴하며 현장에서 사용할 수 있는 실험장치를 구축하기 위하여 먼저 탐침의 제조기술을 자체 개발하고, 탐침에 공급하는 열원크기의 변화에 따른 열전도계수 값의 영향을 조사하고자 한다. 또한 각종 액체의 열전도계수를 온도변화에 따라 측정하여 이미 추천된 자료와 비교함으로서 이 장치의 정밀도를 검증하고, 또한 이 장치를 이용하여 옥수수를 원료로 한 식용유를 측정하여 그 데이터를 제시하고자 한다.

2. 이론 해석

과도 탐침법은 탐침내의 열선에 일정한 열량을 공급하여 시간에 따른 온도 상승 비율을 측정하여 열전도계수를 구하는 방법이다. 무한히 크고 등방성이며 또한 동질성(homogeneous)인 시료내부에 직경이 무한히 적고 길이가 무한대인 선형열원(line source)이 묻혀 있을 때의 수학적 모델인 Fourier 방정식의 해는 Carslaw와 Jaeger[5]에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta T=\frac{Q}{2\pi k}\int_{\beta}^{\infty}\frac{e^{-\beta^2}}{\beta}d\beta=\frac{Q}{2\pi k}I(rn) \quad \cdots\cdots \quad (1)$$

여기서, I : 무한급수

n : $\frac{1}{2\sqrt{at}}$

β : 무차원량 $(\frac{r}{2\sqrt{at}})$

Q : 열선 단위길이당 투입열량 (W/m)

k : 재료의 열전도계수 (W/mK)

식 (1)에서 무한급수를 전개한 후 시간 t_1 과 t_2 사이의 온도 상승 ($\Delta T=T_2-T_1$)을 나타내면 아래와 같다.

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

(2)식에서 ΔT와 $\ln(t)$에 대한 직선관계의 기울기로부터 열전도계수 k를 구할 수 있다.

과도탐침법을 이용하여 열특성을 측정하는 일반적인 방법은 실험장치로 측정한 Fig. 1의 시간-온도곡선에서 선형회귀 방정식을 이용하기 위하여 선형구간만의 데이터를 선택한 후, 열원 공급장치에 의해 공급된 열량 Q를 (2)식에 대입하여 열전도계수를 구하는 것이다. 그러나 실제의 탐침을 이용한 과도탐침법은 공급되는 선형열원(line heat source)은 이론에서 직경이 무한히 작고 길이가 무한대라고 가정하였으나 실제는 일정한 직경과 길이를 가지고 있으며, 또한 시료를 무한히 큰 등방성, 동질성인 물체로 가정함으로서 실제 시료에서는 오차가 발생할 수

있다. 유한한 길이와 직경으로 인하여 발생하는 오차에 대하여 Blackwell[15]은 L/D (L : 길이, D : 직경) 즉 탐침의 길이와 직경의 비가 25에서 30이상이면 직경의 영향을 거의 받지 않는다고 보고하였으며, Hooper와 Lepper[8]는 L/D이 100 이상이면 직경의 영향으로 인한 오차를 무시할 수 있다고 하였다. 한편 Voss[11]는 측정시료의 크기에 대한 오차발생을 시료 표면에서의 반사에 의한 오차인 "Reflection error"로 보고 $(\frac{4at}{b^2})$ > 0.6인 경우에는 오차에 영향을 끼친다고 하였다. 이 조건에서 b는 탐침과 가장 가까운 시료 표면 사이의 거리이다. 이외에 탐침과 시료의 접촉면에서의 접촉저항에 의한 오차도 발생하지만 탐침의 크기를 작게 하면 이러한 요인은 무시할 수 있다.

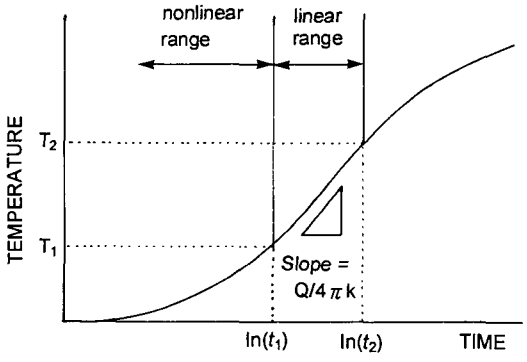


Fig. 1 The temperature rise as a function of ln(t).

3. 재료 및 방법

가. 설계기준

본 실험장치를 이용한 열전도계수의 측정대상은 농산물 저장시설에서 냉난방 항온장치의 열매체에 쓰이는 물, 에틸렌글리콜 등과 열전도 매개물질인 식용유와 같은 액체이나, 이 외에도 탐침의 삽입이 가능한 재료인 습기가 있는 토양과 일반 단열재에 대하여도 적용이 가능하다. 사용온도 범위는 탐침제작기술의 제한성으로 인하여 90℃ 미만으로 하였다. 이 장치는 간단하면서도 장치비가 저렴하고 단시간에 현장 측정이 가능한 반면에 정밀도는 정상 상태법에 비해 다소 저하하게 되지만 본 장치의 정밀도 기준은 ±3%로 하였다.

나. 실험장치

본 연구의 실험장치는 퍼스널 컴퓨터, 탐침, 열원 공급장치, 자료 수집장치, 열전도계수 계산 프로그램으로 구성되어 있으며, 개략도는 Fig. 2와 같다.

이 실험장치는 열원 공급장치로부터 탐침에 열원이 공급되면 시료에 삽입되어 있는 탐침내의 온도센서에서 신호가 감지되며, 이 신호는 Cold Junction을 거쳐 Amplifier에서 증폭되어 Linearizer를 거쳐 A/D 컨버터로 입력된다. 퍼스널 컴퓨터 내에 내장된 A/D 컨버터는 들어오는 신호를 디지털로 변환시켜 퍼스널 컴퓨터 내에 저장시키게 되며, 이 자료를 이용하여 열전도계수가 화면에 출력된다. 특히 본 연구에서 중점을 두고 자체 제작한 소형탐침은 길고 가는 튜브 내에 가열히터와 온도센서가 들어있는 것으로 Fig. 3과 같이 나타내었는데, 소형탐침내에 온도센서와 히터선을 삽입하면서 절연을 유지해야 하는 관계로 제조기술이 매우 어렵다. 탐침의 직경과 길이는 Hooper등이 직경의 영향을 거의 무시할 수 있다고 제시한 탐침의 길이와 직경의 비가 100이므로, 직경은 1.3mm, 길이는 130mm가 되도록 제작하였으며, 탐침의 재질은 스테인레스강을 사용하였다.

가열 히터선은 온도에 따라 저항의 변동이 거의 없는 콘스탄탄선(constantan wire)을 사용하였는데, 가열시 탐침 내에서의 절연유지를 위해 Teflon으로 절연된 Omega사의 콘스탄탄선(0.003")을 사용하였다. 온도센서는 가격이 저렴하면서도 사용하기 편리하고 정밀도가 비교적 높은 열전대선(Thermocouple)을 사용하였다. 열 전대선은 T형 (Copper-Constantan : 0.003")으로 절연을 유지하기 위해 Teflon으로 보호된 Omega사의 제품을 사용하였으며 접합점이 탐침의 중간에 오도록 삽입하였다. 본 장치에서 열 전대선을 T형으로 사용한 이유는 사용온도 범위가 −200 ~350℃이며, 이 범위 내에서 선형성이 양호

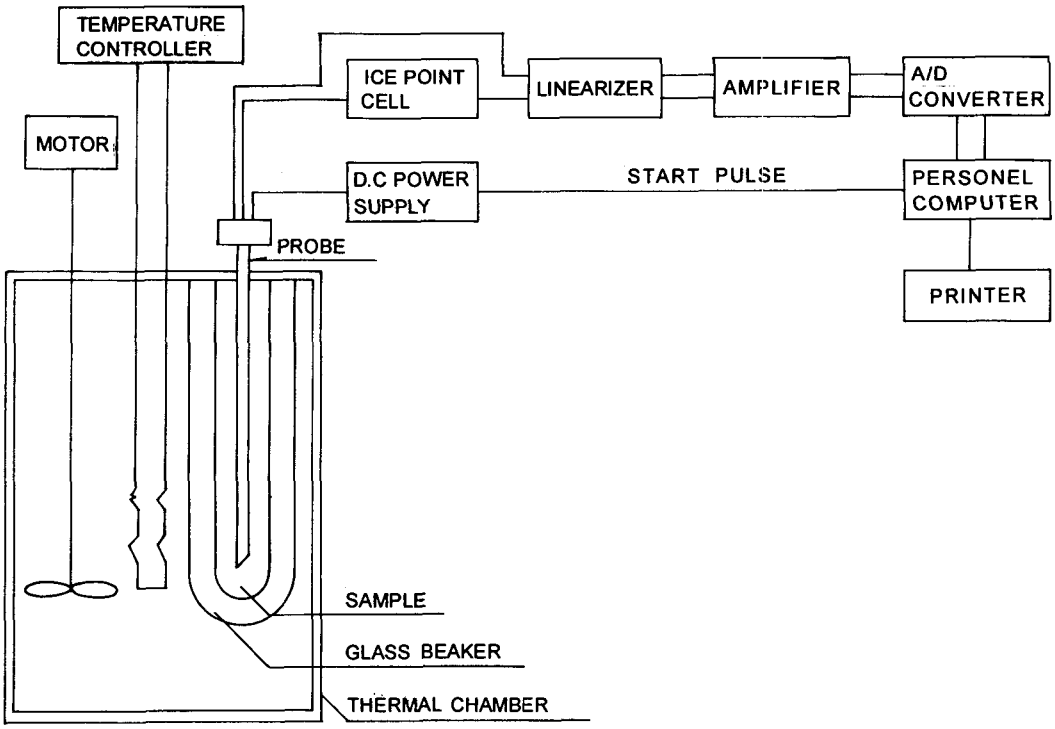


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

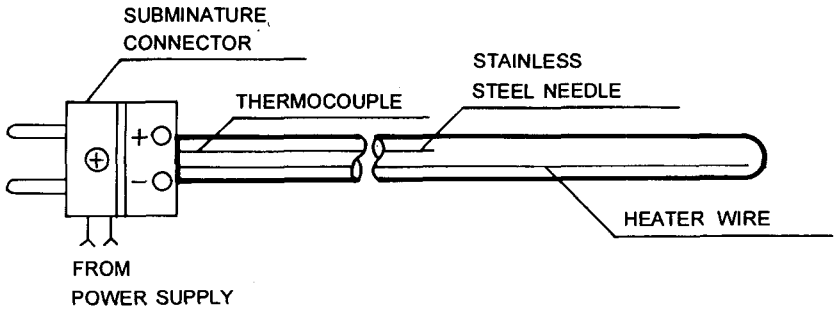


Fig. 3 Cross sectional view of thermal conductivity probe.

하기 때문이다. 열 전대의 scale factor와 offset을 구하기 위해 kaye사의 항온조(Calori block, 모델명: HTR-300A), Ice-Point Cell(모델명: k140−4A)과 GLA elettronica 사에서 열전대 등의 캘리브레이션을 위하여 제작된 다기능 Calibrator(모델명: 6,500 Calibrator)를 사용하여 보정하였다. 탐침내의 히터에 열원을 공급하는 열원 공급장치는 자체 제작한 것으로 입력된 교류를 Bridge diode를 이용하여 정파정류로 바꾸어 주고, 1,000μF 콘덴서로 일정한 전압을 만든 후 7,812 Regulator를 통해서 12 V가 출력 되도록 하였다. 이 전압은 릴레이(Relay)를 구동시키기 위한 전원으로 사용하며, 7,805 Regulator를 거쳐 출

력되는 5 V의 전압은 히터의 전원으로서 사용된다. 릴레이가 가동되었을 때 히터에 흐르는 전류는 가변저항을 조정함으로서 각 탐침과 시료의 특성에 맞도록 조절된다. 릴레이의 on-off는 A/D 컨버터 출력핀을 통한 후 Photo coupler를 사용하여 트랜지스터가 on-off 됨으로서, Relay를 통해 히터의 전류를 제어하도록 되어 있다. 시료의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 가로 400 mm, 폭 400 mm, 높이 300 mm인 항온조(동양과학사 모델 3040)를 사용하였으며, 온도조절장치(한영전자모델 D43)에 의하여 원하는 온도의 조절이 가능하며, 최대온도는 96℃ 범위까지 사용이 가능하다.

본 측정장치의 열전도계수 측정 프로그램인 "NONHDVG" 프로그램은 1)실험시작[M], 2)파일 불러오기[L], 3)파일 저장[S], 4)데이터 파일 목록[D], 5)다시 그리기[R]의 다섯 가지 메뉴로 되어 있다. 이 프로그램은 선형회귀 방정식을 이용한 것으로 $\ln(t)$에 따른 온도상승값 (ΔT)을 읽어서 상관계수 (R_{max}) 값이 0.99 이상인 상태의 구간을 선정하여 이때의 $\ln(t)$값과 ΔT의 값을 구한 후, 앞에서 구한 (2)식을 사용하여 열전도계수 K를 구하도록 되어 있다.

다. 실험재료 및 방법

본 실험에서는 장치의 정확도를 검증하기 위하여 글리세린, 물, 에틸알콜, 에틸렌 글리콜을 사용하였는데, 이들 재료에 대한 열전도계수의 추천값은 Table 1과 같다. 그리고 옥수수를 원료로 한 식용유인 옥수수유의 열전도계수를 측정하였는데, 사용된 재료는 국내에서 시판중인 D사, J사, S사의 제품을 사용하였다.

Table 1 Thermal conductivity of the materials

(단위: W/mK)

T (℃) / material	32	37	42	47
Glycerin[12]	0.288	0.289	0.290	0.291
Water[13]	0.619	0.628	0.634	0.641
Ethyl Alcohol[12]	0.165	0.163	0.162	0.160
Ethylene Glycol[14]	0.253	0.255	0.256	0.257

먼저, 실험을 시작하기 전에 시료를 유리시험관에 넣은 다음 열원 공급장치와 데이터 수집장치에 연결된 탐침을 시료에 삽입한다. 시료가 넣어진 시험관을 항온조의 중앙 지지대에 고정시켜 놓고 자동온도조절기로 실험하고자 하는 온도를 세팅한 후 항온조를 가동한다. 이와 동시에 ICE POINT CELL을 가동시켜 Cold Junction을 정확하게 0℃로 유지시킨다. 항온조의 온도가 측정하고자 하는 온도와 평형을 유지하고, ICE POINT CELL이 0℃가 유지된 후 Linearizer와 Amplifier를 가동하고 또한 열원 공급장치와 P.C의 열전도계수 측정 프로그램인 "NONHDVG"를 작동시키면 측정메뉴가 화면에 나타난다. 다섯 가지의 주 메뉴에서 [실험 시작]을 선택하여 시료이름을 입력시키고 나서 Shift Key를 치면 탐침내에 열원 공급장치의 열원이 전달되며, 이때에 시료에 삽입되어진 탐침내의 온도센서를 통해 온도가 감지되어 Linearizer와 Amplifier를 거친 후 A/D 컨버터로 보내져 P.C에서 열전도계수 해석 프로그램을 통하여 열전도계수가 계산된다.

이 때의 시간과 온도에 대한 데이터는 [파일 저장]메뉴를 선택하여 저장 파일이름을 선택한 후 저장한다. 저장 파일을 다시 불러서 시간-온도 화면

을 그리려고 할 경우, 먼저 [파일 불러오기]를 선택하여 파일을 불러온 후 [다시 그리기]를 선택하면 P.C화면에 시간-온도 화면이 나타난다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 과도탐침법을 이용하여 값이 저렴하고 구성하기 편리하면서도 정확도가 높은 실험장치의 구축에 주안점을 주었다. 이번 실험에서는 먼저 공급열원의 크기가 열전도계수 값에 미치는 영향을 분석하기 위하여 탐침에 공급된 열량(Q)의 크기를 구하여야 하는데, 이것은 탐침내의 열선에 공급된 전압의 크기, 열선의 길이와 저항을 이용하여 구한다. 시료는 글리세린을 사용하였으며, 시료의 온도가 30℃인 경우 일정한 시간 간격을 두고 2.4, 2.6, 2.8, 3.0 Watt/m를 탐침에 공급하였다. 이 결과를 열량과 열전도계수의 영향을 알 수 있도록 Fig. 4에 나타냈다. 각각의 $\ln(t)$와 ΔT를 이용하여 계산된 열전도계수 값은 추천된 값 0.288 *W/m K*에 비해 1.0, 1.7, 1.4, 1.8%의 오차가 발생하였다. 그리고 이 실험장치의 정밀성을 입증하기 위하여 글리세린, 물, 에틸알콜, 에틸렌글리콜을 측정하여 추천된 값과 비교하였다. 또한 이 장치를 이용하여 시판중인 옥수수유의 열전도계수를 측정하였다.

상기 그림에서 보는 바와 같이 글리세린에서 저열원의 증가에 따른 열전도계수 값은 그다지 큰 영향을 미치지 않고 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 열원을 점차 증가할 경우 히터선의 과열로 인한 히터선의 소손이나 히터선과 탐침사이의 절연파괴가 우려된다. 따라서 탐침에 공급하는 열원은 시료의 특성, 시료의 크기, 가열선의 열저항, 가열선의 길이, 탐침내의 가열선과 절연재가 견딜 수 있는 온도를 검토한 후 열원의 크기를 선택하여야 한다.

본 실험에서 사용한 탐침은 최대 90℃까지 측정할 수 있도록 제작되어 있으므로 사용한 열원의 크기는 2.4 W/m를 사용하였다.

Fig. 5는 글리세린의 열전도계수를 32℃에서 47℃ 범위에서 과도탐침법으로 측정한 것을 그래프로 나타낸 것인데, 측정한 값은 추천된 값에 비해 0.1 ~2.7%의 오차가 발생하였다. 그림에서 알 수 있듯이 글리세린의 경우는 온도가 증가함에 따라 열전도계수도 증가하는 경향을 나타내었으며 오차 또한 3% 미만의 좋은 정밀도를 나타냈다. Fig. 6은 물의 열전도계수값을 나타낸 것으로 추천된 값에 비해

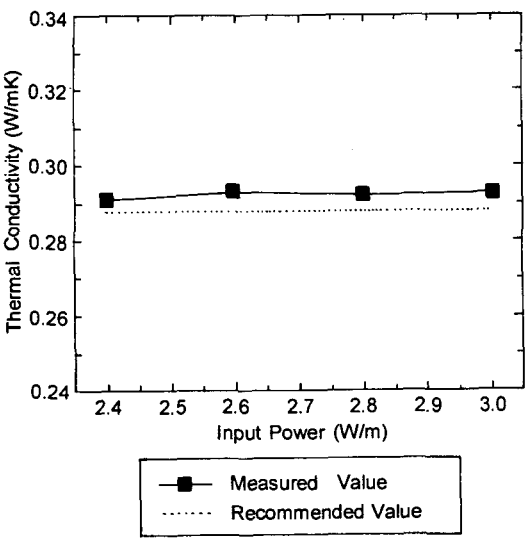


Fig. 4 Variation of measured thermal conductivity for glycerin with power input.

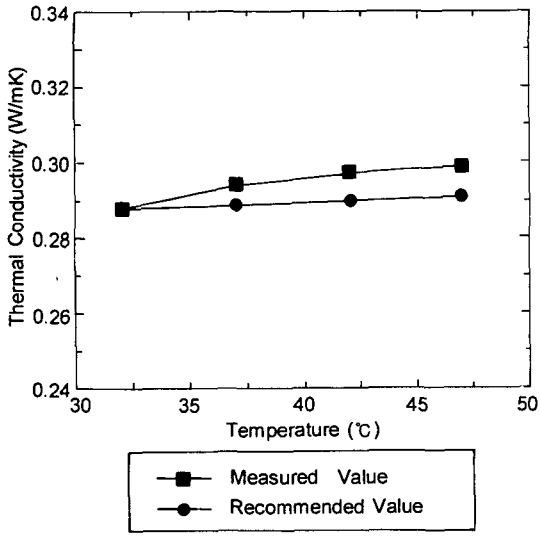


Fig. 5 Thermal conductivity measured by transient probe method for glycerin.

1.5~2.3%의 오차가 나타났으며, 글리세린과 마찬가지로 온도증가에 따라 열전도계수도 점차 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 에틸알콜의 열전도계수 값을 온도에 따라 측정한 것을 나타낸 것으로 측정한 값은 추천된 값에 비해 1.2%~2.5%의 오차가 발생하였다. 에틸알콜은 물과 글리세린과는 달리 온도상승에 따라 열전도계수는 점차 감소한다. Fig. 8은 에틸렌글리콜의 열전도계수 값으로 1.2~2.4%의 오

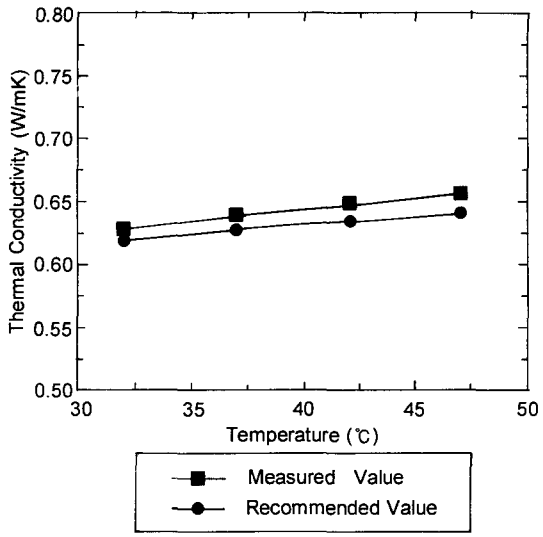


Fig. 6 Thermal conductivity measured by transient probe method for water.

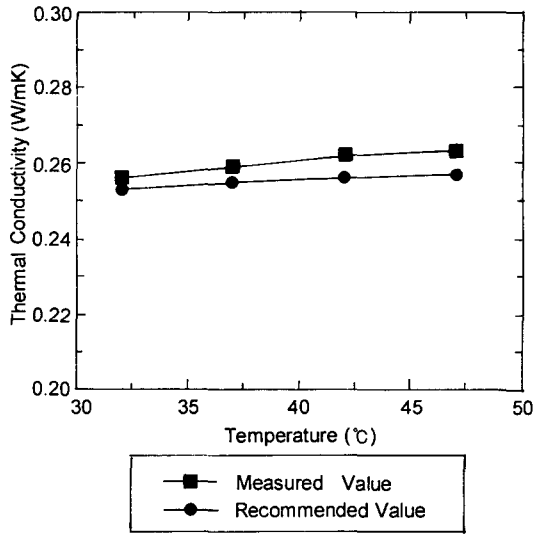


Fig. 8 Thermal conductivity measured by transient probe method for ethylene glycol.

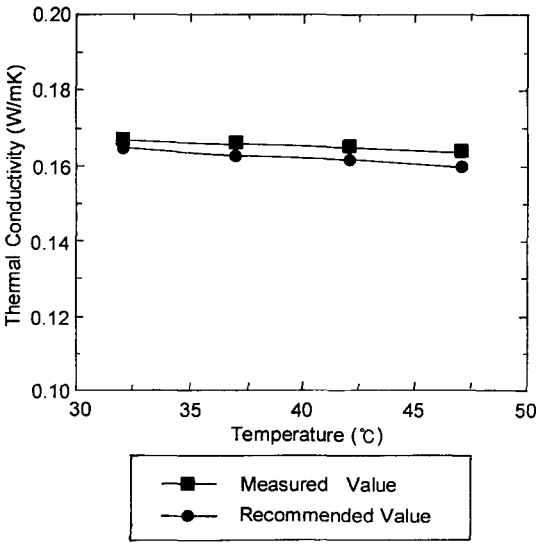


Fig. 7 Thermal conductivity measured by transient probe method for ethyl alcohol.

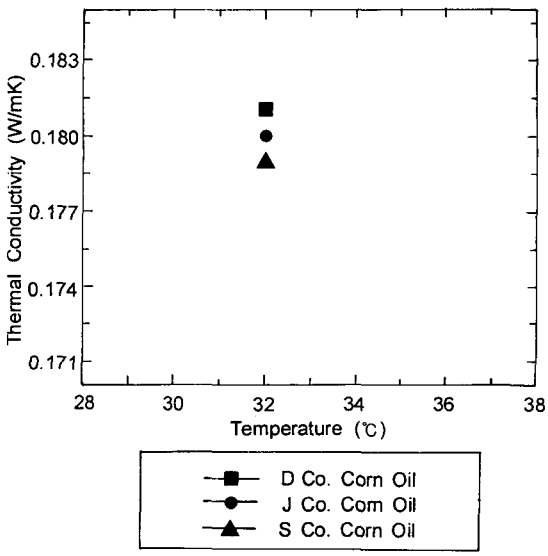


Fig. 9 Thermal conductivity measured by transient probe method for corn oil.

차가 발생하였다. 이러한 결과는 각각의 시료의 특성, 시료와 탐침의 접촉저항, 측정온도의 상승, 탐침과 실험장치의 정밀도 등에 따라 다소간의 오차가 발생함을 의미한다. 그러나 본 장치의 오차는 3% 미만으로, 정밀도가 요구되는 정상 상태법에 비해 정밀도가 다소 저하하지만 과도탐침법의 특성인 저렴하고 편리성이 있으며 또한 현장성이 좋은 장점을 갖춘 장치로서는 적절한 정밀도를 갖추었다는 것이 입증되었다. 또한 이 장치로 식용유인 옥수수유에 대하여도 측정하였는데, Fig. 9는 각 사 제품에 대하여 측정한 결과를 나타낸 것이다. 각 회사별로 다소간의 차이는 있으나 큰 편차는 없음을 보여준다. 실험장치 및 수치해석에 의한 오차를 보다 감소시키기 위해서는 정밀한 설계 제작과 정확한 수치해석 기법의 적용이 요구된다. 실험장치의 정밀한 설계 제작을 위해서는 탐침 제조기술에 보다 주의를 기울여야 하며, 특히 가열선과 온도센서를 탐침내에 삽입시 손상이 없도록 하여야 한다. 향후 온도 측정영역이 보다 넓은 탐침의 제조 기술 개발에 대한 연구가 필요하며, 또한 보다 저렴하고 휴대용이 가능한 열전도계수 측정장치 개발이 요구된다.

5. 결 론

과도탐침법을 이용하여 열전도계수 측정장치를 구축하여 여러 시료를 실험한 결과를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 적절한 열원의 크기를 검토하기 위하여 탐침의 단위길이당 공급된 열원의 영향을 평가해 본 결과, 저열원의 증가에 따른 열전도계수 값은 그다지 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 열원의 크기가 증가할 경우 히터선의 소손이나 탐침내의 절연파괴가 우려되므로, 탐침재료의 여러 특성과 시료의 규격을 고려한 후 열원의 크기를 적절히 선택하여야 한다.

2. 직경과 길이의 비가 100인 소형탐침, 열원 공급장치, 열전도계수 해석 프로그램을 자체 개발한 결과, 과도탐침법을 이용하여 열전도계수를 단시간 내에 저렴하고 편리하게 측정할 수 있다는 것을 제시하였다.

3. 글리세린 등의 액체에 대한 열전도계수를 측정한 결과 3% 미만의 오차가 발생되어, 이 장치의 정밀도가 입증되었으며, 또한 옥수수유의 열전도계수에 대한 데이터를 제시하였다.

4. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 열전도계수 측정장치는 실제 측정에 적용 가능한 것으로 평가되었다. 그러나 보다 폭 넓게 본 측정장치를 현장에서 사용하기 위해서는 온도측정 영역을 넓히면서 양산이 가능한 탐침 제조기술의 개선과 실험장치의의 휴대화등 실험장치의 지속적인 개발이 요구된다.

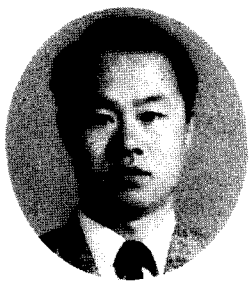
참 고 문 헌

1. Schleiermacher, A. L. E. F. 1888. Wied. Ann. Phys. 34:623.
2. Stalhane, B. and Pyk, S. 1931. New method for measuring the thermal conductivity coefficient. Tekn. Tidskr. 61(28):389~393.
3. Stalhane, B. and Pyk, S. 1934. Determination of the thermal conductivity of ceramic bodies at high temperatures. Tekn. Tidskr. 64(48):445~448.
4. Jaeger, J. C. 1940. Roy, J. Soc. N. S. W. 74 : 342.
5. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. 1959. Conduction of heat in solids 2ed. Clarendon Press:Oxford.
6. WEISHAUPT, J. 1940. Forscharb. Ingwes. 11:20~35.
7. van der Held, E. F. and van Drunen, F. G. 1949. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. Physica. 15(10):865~881.
8. Hooper, F. C. and Lepper, F. R. 1950. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. Heating, Piping and Air Conditioning. ASHVE J. Sect. 22(8):129~134.
9. Hooper, F. C. and Chang, S. C. 1952. Development of the thermal conductivity probe. Heating, Piping and Air Conditioning. ASHVE J. Sect. 24 (10):125~129.

10. De Vries, D. A. and Peck, A. J. 1958. On the cylinderical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils. Aust. Jour. Physics. 11(2):255～271.
11. Vos, B. H. 1955. Measurements of thermal conductivity by non-steady-state method. Appl. Sci. Res. Section A.5:425～438.
12. Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho. C. Y., Klemens, P. G. 1970. Thermophysical Properties of Matter : The TPRC Data Series. IFI/Plenum Publishing Corporation.
13. Anthony F. Mills. 1988. Heat Transfer. Irwin.
14. Holman, J. P. 1987. Heat Transfer. Sixth Edition. McGraw-Hill.
15. Blackwell, J. H. and Misener, A. D. 1951. Approximate solution of a transient heat flow problem. Proc. Phys. Soc. A64:1132～1133.

축

학위취득



성　　명 : 박　규　식
생 년 월 일 : 1962년　5월　14일
취 득 학 위 명 : 농 학 박 사
학위 수 여 대 학 : 경북대학교 대학원
학위취득년월일 : 1997년　2월　25일
학　위　논　문 : 시설환기 장치와 온실 고온제어 시스템 개발