

과도탐침법을 이용한 열전도계수 측정장치개발

Development of apparatus for thermal conductivity using transient probe method

홍지향* 정회원 J. H. Hong	김용욱* 정회원 Y. W. Kim	고학균* 정회원 H. K. Koh
---------------------------	--------------------------	--------------------------

I. 서론

열전도 계수는 농산물을 안전하게 저장하기 위한 건조, 냉각, 가열공정의 모델링 계산에 사용되는 기초 물성값인 동시에 주요 설계인자이다. 정확한 물성값만 있으면, 각 공정에서 농산물로 더해지거나 제거되어야 하는 총열량 및 단위시간당 가감되어야 하는 열량을 정확히 결정 할 수 있다.

현재 탐침법을 이용한 열전도계수 측정장치는 고온·고압의 상태에서는 열전도계수를 측정 할 수 없고, 상온에서만 측정 할 수 있게 되어있다. 또한, 탐침 제작의 어려움 때문에 탐침의 직경 크기가 1mm보다 커서 시간 수정법과 탐침 사용에 적합한 탐침 보정계수를 필요로 하는 불편이 있으며, 열전도계수 측정시 시료 내부의 온도를 비교·측정 할 수 있는 센서가 없기 때문에 시료내부의 온도를 정확하게 측정 할 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 시간 수정법이나 탐침의 보정계수 없이도 신속·정확하게 열전도계수를 측정할 수 있게 탐침의 길이 대 직경의 비(L/D)가 100이상, 직경의 크기는 0.5mm로 최소화한 센서를 개발하며, 이 센서를 사용하여 시료내부의 온도를 비교·측정 할 수 있으면서도 상온뿐만 아니라 고온·고압의 상태에서도 열전도계수를 측정할 수 있는 장치를 제작하는 것이다.

2. 연구내용

가. 실험장치

본 연구에서 개발한 실험장치는 크게 외형부, 측정 장치부와 자료 수집 부로 나뉘어진다.

(1) 외형부

그림 1은 윗덮개, 아랫상자, 부착판 그리고 압력용기의 모양과 치수를 나타낸 것이다. 실험시 측정 장치들을 고정하고 보호하기 위한 윗덮개는 500(W)×400(L)×100(H)mm, 아래상자는 500(W)×400(L)×300(H)mm, 부착판은 500(W)×400(L) mm의 크기로 스테인리스로 제작하였다.¹⁾

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

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

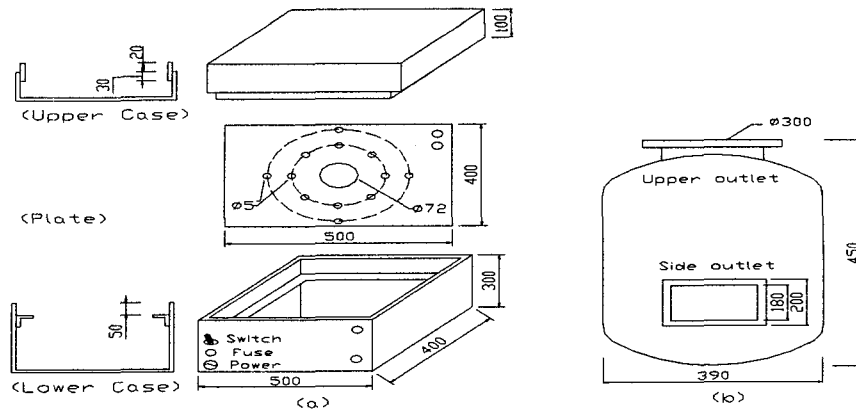


Fig. 1 Shape and dimension of the case (a) and the pressure vessel (b)

부착판에는 샘플홀더를 넣기 위하여 직경 72mm의 구멍을 뚫었으며, 항온조의 고정을 위하여, 직경 5mm의 구멍을 원둘레를 따라 8개 뚫었다. 부착판은 아래상자의 돌출부분 위에 놓았으며, 항온조 고정, 항온조 보호원통 고정, 샘플홀더의 고정을 위해 사용되었다.

압력용기는 390(D)×450(H) mm 크기의 원형으로 제작하였다. 용기의 상단부에는 샘플홀더를 쉽게 삽입할 수 있도록 150mm 크기의 출입구를 만들었으며, 상단측면에는 압력계측구를 만들어 압력계이지와 솔레노이드 밸브를 설치하였다. 압력계이지와 솔레노이드 밸브는 유사시 고압을 제거하거나 용기내의 온도를 조절하여준다. 용기 하단측면에는 200(L)×100(H) mm출구를 만들어 히터의 착탈을 용이하도록 하였다. 압력용기 전체는 단열재로 단열하여 외부로 열이 유입되거나, 유출되는 것을 최소화 하였다.

(2) 측정장치부

측정센서는 탐침내에 히터선과 온도센서가 들어있는 것으로 구성된다. 탐침의 유한길이 때문에 생기는 축류 열전달의 효과를 최소화하기 위해서 길이 대 직경비가 100이상이 되도록 한다는 Hooper 등의 연구결과에 따라서, 탐침은 Popper & Sons사 제품으로 외경 0.5mm, 길이 50mm, 두께 0.1mm (L/D:100)으로 제작하였다. 이렇게 작은 탐침을 사용하면 탐침 보정계수가 필요없으며 탐침 내부에 충전물을 채우지 않아도 된다. 히터선은 온도에 따른 저항의 변동이 거의 없는 Physitemp사 제품인 Neofion-insulated 40-gauge 콘스탄탄선(constantan wire)을 사용하였으며, 저항값은 $255 \Omega/m$ 이다. 콘스탄탄선은 5ohm degree 당 10^{-6} ohm의 대단히 낮은 온도계수를 가지며, m당 9.8ohm으로 저항의 강도가 높아 히터선으로 적합하다.

온도측정을 위한 온도센서로는 가격이 저렴하면서도 사용하기 편리하고 정밀도가 비교적 높은 열전대를 사용하였다. 열전대는 절연된 피복의 표면이 아주 고르게 코팅된 Physitemp사의 제품인 Teflon-insulated 44-gauge type-T thermocouple을 사용하였다. T형 (동-콘스탄탄) 열전대는 $-160 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 사용온도 범위 내에서 선형성이 양호하며, 44gauge의 미세한 열전대는 온도측정에서 시간지연을 최소화 할 수 있다.

온도 측정 센서는 열전도 계수 측정 센서와 같은 크기와 재질의 탐침과 열전대로 구성하였다. 이 센서는 열전도계수 값을 측정하기 전과 측정하는 동안 샘플 내부의 시료 온도가 어떻게 변화하는지를 알아보기 위해 설치하였다.

탐침내부에서 탐침 밖으로 나온 열전대 끝부분에는 Physitemp사의 제품인 PVC-insulated 24-gauge type-T thermocouple을 더미 열전대로 사용하여 접합시켰다. 열전도센서와 온도측정센서를 고정하기 위하여 절연성이 있는 테프론으로 탐침 홀더를 제작하였다. 탐침 홀더의 중심축에 열전도 계수 측정센서를 설치하였으며, 온도센서는 중심축으로부터 0.15mm 떨어진 거리에 설치하였다.

그림 2는 측정 센서의 개략도를 나타낸 것이며, 그림 3은 탐침홀더의 치수와 외형을 나타낸 것이다.

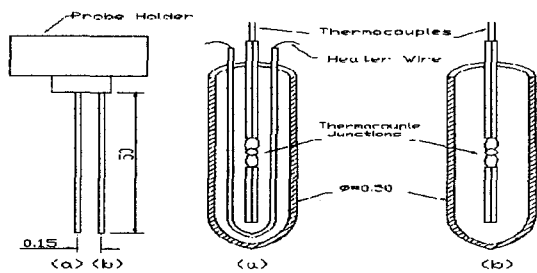


Fig. 2. Schematics and sections of the thermal probe : (a)Thermal conductivity sensor (b)Temperature measurement sensor

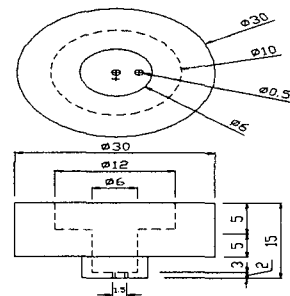


Fig 3. Schematics and dimension of probe holder

샘플홀더는 열전도 계수 측정시 시료를 넣고 빼기가 용이하게 하기 위하여 시료용기, 용기 접합부, 원형판으로 구성하였다.

시료용기와 용기 접합부는 다른 금속보다 열전도 계수가 높은 구리를 사용하여 만들었으며, 항온조와 시료용기가 열적 평형상태에 빨리 도달 할 수 있게 해준다. 원형판은 알루미늄을 사용하여 만들었으며, 시료용기가 실험도중에 열에 의해 움직이지 않도록 부착판에 꼭 맞게 제작하였다.

그림 4는 샘플홀더의 개략도를 나타내고 있다.

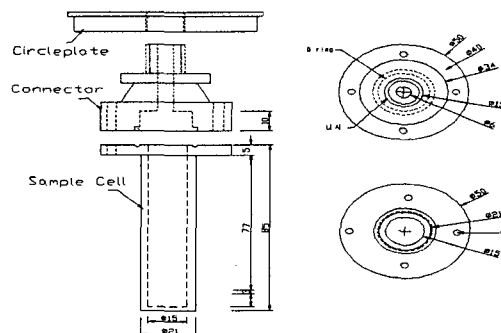


Fig. 4 Schematics and dimension of sample holder

항온조는 시료의 온도를 일정하게 유지하면서, 원하는 측정 온도에서 열전도 계수를 측정하기 위하여 사용하였다. 상온 항온조는 스테인리스 용기, 보호원통, 히터, 교반기, 제어판으로 구성하였다. 고온·고압 항온조는 압력용기, 히터, 제어판으로 구성하였다.

스테인리스 용기는 220(L)×180(D)×1(t)mm인 스테인레스 원통형 제품을 사용하였다. 용기는 외형부의 스테인리스 판에 L자형의 꺾쇠를 이용하여 나사로 고정하였으며, 부착판과 용기가 접촉하는 면은 실리콘으로 밀봉하였다. 보호원통은 250(L)×300(D)×2(t)mm인 원형 모양으로 스테인레스로 제작하였다. 보호원통의 바닥은 막혀 있으며, 용기의 윗부분은 내곳에 50(W)×30(L)×2(t)mm인 사각형의 스테인레스 조각을 붙여 스테인레스 용기가 부착된 부착판에 이 보호원통을 부착하였다. 부착판과 보호원통이 접촉하는 면은 실리콘으로 밀봉하였다. 이 보호원통은 용기를 보호하며 용기의 외부와의 단열을 위하여 만들었으며, 보호원통의 내부는 유리섬유로 가득 채웠다. 히터는 220V, 5kw의 직경 150mm의 원형 모양으로 스테인레스 용기 바닥에서부터 30mm 떨어져 설치하였으며, 온도범위는 100 ℃까지 가능한 것으로 사용하였다. 히터의 작동을 제어하기 위하여 히터에 SSR을 부착하였다. 교반기는 스테인레스 프로펠러 2개를 스테인레스 봉에 실리콘을 이용하여 부착하고 끝 부분은 모터에 연결하였다. 압력용기는 390(D)×450(H)×10(t)mm 크기의 원형으로 가스용기를 사용하여 제작하였다. 용기 내부에는 용량이 5kW로 직경 150mm의 나선형 모양의 히터를 2개 넣어 고온과 고압을 발생하게 하였다. 히터의 작동을 제어하기 위하여 히터에 SSR을 부착하였다. 항온조 내부온도를 측정하기 위하여 스테인리스 용기의 중심에서 50mm, 압력용기의 중심에서 20mm 떨어진 위치에 PVC-insulated-24 gage type-T 열전대 2개를 깊이 80mm 정도로 삽입하여 온도를 측정하였다. 제어판은 히터 및 탐침내의 열선에 공급되는 전원을 제어하기 위하여 사용되었다.

(3) 자료수집장치부

실험에 사용된 탐침 내의 히터선에 일정한 전압을 공급하기 위한 전원 공급장치로 1.2V Nickel-Cadmium Rechargeable Battery 3개를 사용하였다. 히터선으로 전원을 공급하는 1차측에 릴레이를 부착하고 2차측에는 Shunt Resistance 1Ω을 설치하여 히터선에 공급되는 전류값을 측정하였다.

자료 수집장치는 Signal conditioning, Data acquisition, Personal computer와 자료 수집 프로그램으로 구성하였다. Signal conditioning은 National Instruments사의 SC-2345 제품을 사용하였으며, 열전대의 전압입력은 SCC-TC02, 릴레이 제어를 위한 디지털 출력은 SCC-DO01, 전원 공급장치의 전류값은 SCC-FT01의 모듈을 장착하여 측정하였다. 측정된 데이터들은 PCI Interface 방식을 사용하는 Data acquisition장치로 PC에서 처리하였다.

분석장치는 National Instruments사의 그래픽 프로그램인 LabVIEW 5.1을 사용하여 열전대의 온도값과 Shunt Resistance의 전류값을 읽어 들이도록 Themo.vi란 프로그램을 만들었다. Themo.vi는 수집하고자 하는 파일 이름, 측정 시간간격, 수집시작과 종료 등으로 구성하였다. 그림 5는 실험장치의 전체 구성도를 개략적으로 나타낸 것이다.

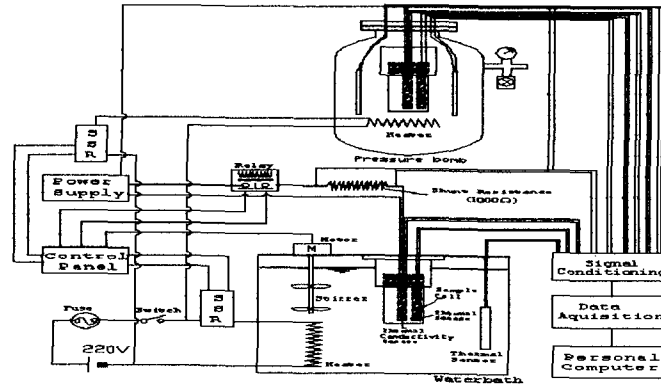


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental apparatus

3. 재료 및 방법

가. 실험재료

측정 시스템의 정확도를 검증하기 위한 시료로 증류수와 글리세린을 사용하였으며, 이러한 재료는 측정하고자 하는 온도에서 비교적 화학적으로 안정되어 있고, 열전도계수 값이 잘 제시되어 있다. 증류수와 글리세린에 대한 열전도계수 기준값은 표 1과 같다.

Table 1 Reference values of thermal conductivity of water and glycerin.

Water			Glycerin (99.5%)		
Temperature(°C)	Reference k (W/m · K)		Temperature(°C)	Reference k (W/m · K)	
	(1)	(2)		(1)	(3)
20	0.597	0.597	20	0.286	0.285
	0.628	0.629			
60	0.651	0.653	40	0.286	0.285
80	0.668	0.667			
100	0.680	0.679	60	0.287	0.287
120	0.685				
140	0.684				

(1) Eckert et al (1972) (2) Ramires et al (1995) (3) Lide et al (1984)

나. 실험방법

시료를 시료용기에 일정량 주입하고 열전도계수 탐침을 시료용기에 넣은 후 용기 접합부와 원형판을 체결한다. 체결된 샘플홀더를 부착판에 움직이지 않도록 단단히 고정한다. 그 후 PC에서 측정온도를 설정한 후 항온조가 측정온도에 도달하여 정상상태를 유지할 때까지 히터를 제어한다. 항온조가 측정온도에 이르면 열전도 계수 탐침 내의 온도가 측정온도와 서로 일치되는 순간을 기준으로 실험을 시작한다.

실험은 200초를 기준으로 1회씩 이루어지도록 하였다. 실험 시작 후 10초 동안은 시료용기 내부와 항온조 내의 온도를 측정하고, 그 후 10초 동안은 열전도 계수 탐침 내의 열선에 전원을 공급하여 시료의 온도 상승을 유발시킨다. 상승되는 온도의 변화는 1/10초 단위로 그 자료를 PC에 저장한다. 이때 공급되는 전압은 Shunt Resistance를 사용하여 전류값으로 환산하여 그 자료를 PC에 저장한다. 온도 상승을 10초 유발 한 후, 180초 동안은 Tempering time을 두어 시료 내부의 온도가 측정온도에서 정상상태의 온도로 평형을 이루도록 하였다. 180초 후에는 처음부터 다시 측정을 시작하였다. 증류수의 경우는 20℃, 40℃, 60℃, 80℃, 100℃, 120℃, 140℃, 글리세린의 경우 20, 40℃, 60℃에서 각 6회씩 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

측정장치의 신뢰성을 입증하기 위한 실험으로 증류수와 글리세린의 온도에 따른 열전도계수 값의 변화를 측정하였다. 그림 6은 탐침 내의 열선에 전원을 공급하였을 때 시간에 따른 증류수의 온도변화 특성을 나타낸 것이며, 그림 7은 탐침 내의 열선에 전원을 공급하였을 때 시간에 따른 글리세린의 온도변화 특성을 나타낸 것이다.

그림에서 온도변화 곡선은 비선형구간, 선형구간, 비선형구간의 세 부분으로 나누어 볼 수 있다. 첫째 비선형구간은 이론해석과는 달리 탐침이 유한차원을 가지므로 탐침의 열용량 또는 탐침 자체의 예열효과와 관련되어 나타난 구간이라 생각 할 수 있다. 두번째 선형구간은 탐침으로 열입력이 시료의 반경 반향으로만 진행되어진 구간으로 간주 할 수 있다. 세번째 비선형구간은 대류 흐름의 영향 또는 열전도 탐침의 유한 길이에 의해 야기된 축류 열흐름 효과로 생각 할 수 있다.

열전도계수를 구하기 위하여 그래프에서 선형구간을 선택하였으며, 이 구간의 시작점과 끝점을 결정하기 위하여 선형회귀분석을 하였다. 이 분석에서 증류수의 경우 실험시작 2초에서 시작점이 선형구간에 잘 일치한 것으로 나타났으며, 글리세린의 경우는 실험시작 1.5초에서 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그래서 증류수의 경우 실험 시작 후 2초를 선형구간의 시작점으로 하고, 글리세린의 경우는 실험 시작 후 1.5초를 시작점으로 하여 상관계수(r^2)값이 최대값을 갖는 점을 끝점으로 선택하였다. 증류수의 각 온도에 따른 선형구간의 끝점은 대부분 4~5초 구간에 있었으며 상관계수(r^2) 값은 0.99이상이었으며, 글리세린의 경우는

대부분 3.8~4.5초 구간에 있었으며 상관계수(r^2) 값은 0.99이상이었다. 이 구간에서 온도- $\ln(t)$ 곡선의 기울기 값을 구하여 식 (7)에 대입하여 열전도계수 값을 구하였다. 식 (7)에서 $Q(W)$ 값은 열선에 투여된 전류값을 저항값에 곱하여 구하였다.

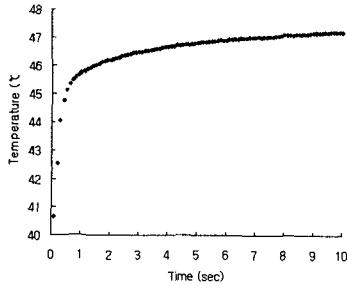


Fig. 5 Temperature rise as a function of time for water

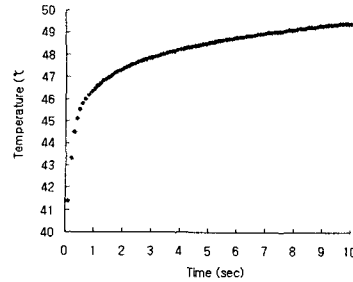


Fig. 6 Temperature rise as a function of time for glycerin

표 2는 측정값과 기준값과의 오차를 나타낸 것이다. 증류수의 열전도계수 값은 온도가 20°C에서 140°C까지 0.614(W/m·K)에서 0.679(W/m·K)까지 변화하였으며, 측정된 값은 Eckert et al (1972)의 기준값과 비교해서 최대 2.8%에서 최소 0.1%까지 매우 근사한 일치를 보였다. 즉, 시간수정법이나 탐침 보정계수 없이도 기준값과 측정값 사이의 오차는 최대 2.8%미만이였다. 측정된 값을 Ramires et al (1995) 기준값과 비교하면 최대 2.8%에서 최소 0.0%까지 근사한 일치를 보였다. 즉, 시간수정법이나 탐침 보정계수 없이도 기준값과 측정값 사이의 오차는 최대 2.8%미만이였다.

Table 2 Measured and reference values of thermal conductivity of water.

Temperature (°C)	Measured (W/m·K)	Reference ⁽¹⁾ (W/m·K)	Reference ⁽²⁾ (W/m·K)	Difference ⁽¹⁾ (%)	Difference ⁽²⁾ (%)
20	0.614	0.597	0.597	2.8	2.8
40	0.635	0.628	0.629	1.1	1.0
60	0.649	0.651	0.653	0.3	0.6
80	0.667	0.668	0.667	0.1	0.0
100	0.671	0.680	0.679	1.3	1.2
120	0.677	0.685		1.1	
140	0.679	0.684		0.7	

표 3은 측정값과 기준값과의 오차를 나타낸 것이다. 글리세린의 열전도계수 값은 온도가 20°C에서 60°C까지 0.301(W/m·K)에서 0.302(W/m·K)까지 변화하였으며, 측정된 값은 Eckert et al (1972)의 기준값과 비교해서 최대 5.6%에서 최소 5.2%까지 일치를 보였다. 즉,

시간수정법이나 탐침 보정계수 없이도 기준값과 측정값 사이의 오차는 최대 5.6%미만이였다. 측정된 값을 Lide et al (1984)의 기준값과 비교해서 최대 6.0%에서 최소 5.2%까지 일치를 보였다. 즉, 시간수정법이나 탐침 보정계수 없이도 기준값과 측정값 사이의 오차는 최대 6.0%미만이였다.

Table 3. Measured and reference values of thermal conductivity of glycerin.

Temperature (°C)	Measured (W/m · K)	Reference ⁽¹⁾ (W/m · K)	Reference ⁽²⁾ (W/m · K)	Difference ⁽¹⁾ (%)	Difference ⁽²⁾ (%)
20	0.302	0.286	0.285	5.6	6.0
40	0.301	0.286	0.285	5.2	5.6
60	0.302	0.287	0.287	5.2	5.2

5. 요약 및 결론

본 연구는 열전도계수를 측정하는 비정상적인 방법의 하나인 과도 열탐침법을 이용하여 시료내부의 온도를 측정할 수 있으며, 열전도 계수를 상온 및 고온·고압 하에서 측정할 수 있는 측정 장치를 개발하였다. 시간 수정법이나 탐침의 보정계수 없이도 신속·정확하게 열전도계수 및 시료내부 온도를 측정할 수 있는 센서를 개발하고, 원하는 온도에서 열전도 계수를 측정할 수 있게 상온 및 고온·고압 온도조절 장치를 개발하였다. 그리고 개발된 장치의 신뢰성을 검증하기 위하여 증류수와 글리세린의 열전도 계수를 구하여 문헌에 나온 기준값과 비교하여 그 신뢰성을 검증하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시간 수정법이나 탐침의 보정계수 없이도 정확하게 열전도계수를 측정할 수 있게 탐침의 길이 대 직경의 비(L/D)가 100이상 되도록 길이 50.0mm, 직경 0.50mm의 열전도계수 측정센서 및 시료온도 측정센서를 제작하였다.
2. 설정온도 범위가 20°C~100°C이며, 오차범위는 ±0.05°C인 상온온도조절 장치와 온도 범위가 100°C~140°C, 압력 범위는 최고 4Psi, 오차 범위는 ±0.05°C인 고온·고압 온도조절 장치를 제작하였다.
3. 측정센서와 온도 조절 장치를 이용한 측정장치는 크게 외형부(윗덮개, 아래상자, 부착판, 압력용기)와 측정 장치부(측정센서, 샘플홀더, 항온조, 제어판) 및 자료수집 장치부(전압 측정장치, 자료수집 및 분석기)로 구성하였다.
4. 열전도계수 측정장치의 신뢰성은 증류수의 경우 Eckert et al (1972)의 기준값과 비교하였을 때 최대 2.8% 오차, Ramires et al (1995)의 기준값과 비교하였을 때 최대 2.8%였다.

5. 열전도계수 측정장치의 신뢰성은 글리세린의 경우 Eckert et al (1972)의 기준값과 비교하였을 때 최대 5.6% 오차, Lide et al (1984)의 기준값과 비교하였을 때 최대 6.0%였다. 따라서, 측정장치는 6%이내의 정확성을 가진 측정장치이다.

6. 참고문헌

1. 배신철 외. 1997. 과도탐침법에 의한 열전도계수 측정장치 개발. 한국농업기계학회지 22(1) : 59-67
2. Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger. 1959. Conduction of Heat in Solids. 2nd ed. London and New York:Oxford University Press. pp.302, 340-341
3. D'Eustachio, D. D. and R. E. Schreiner. 1952. A study of a transient heat method for measuring thermal conductivity. Transactions of the ASHVE 58:331-342
4. Eckert, E. R. G. and R. M. Drake. 1972. Analysis of heat and mass transfer. McGraw-Hill, New York, NY.
5. 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
6. Lide, E. F. and David, R. C. 1984. CRC Handbook of chemistry and physics Sixtyfourth Edition. CRC.
7. Ramires., M. L. V., C. A. Nitro de Castro., Y. Nagasaka., A. Nagashima., M. J. Assael., and W. A. Wakeham. 1995. Standard reference data for the thermal conductivity of water. Journal of Physical and Chemical Reference Data 24(3):1377-1381.
8. Van der Held, E. F. M., and F. G. Van Drunen. 1949. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. Physica 15(10):865-881