

다수의 분할된 긴 열선과 짧은 열선을 갖는 새로운 비정상열선법 센서개발

이 신 표[†] · 이 명 훈^{*}

(2003년 7월 31일 접수, 2004년 4월 7일 심사완료)

Development of a New Sensor with Divided Multiple Long and Short Wires in Transient Hot-wire Technique

Shin Pyo Lee and Myung Hoon Lee

Key Words : Transient Hot-wire Technique(비정상열선법), Thermal Conductivity(열전도율), Hot-wire Cell(열선셀), Nanofluid(나노유체), Base Fluid(표준유체)

Abstract

A fine hot-wire is used both as a heating element and a temperature sensor in transient hot-wire method. The traditional sensor system is unnecessarily big so that it takes large fluid volume to measure the thermal conductivity. To dramatically reduce this fluid volume, a new sensor fabrication and a data processing method are proposed in this article. Contrast to the conventional and most popular two wire sensor, the new sensor system is made up of divided multiple long and short wires. Through validation experiments, it is found that the measured thermal conductivities of the glycerin are exactly same each other between the conventional and proposed new method. Also some technical considerations in arranging the multiple wires are briefly discussed.

1. 서론

비정상열선법은 액체의 열전도율을 측정하는 경우 가장 널리 사용되는 방법이다. 또 다른 액체 열전도율 측정방법인 정상법(steady state method)과 비교하여 액체 내에서 일어나는 자연대류의 영향을 효과적으로 억제할 수 있어서 정밀한 열전도율 측정이 가능하고 측정에 소요되는 시간도 매우 짧은 장점이 있다. 비정상열선법에 대한 센서의 설

계와 데이터의 획득, 신호의 처리방법 및 오차해석 등은 매우 잘 확립되어 있으며⁽¹⁾ 특별한 경우로서 전기적으로 전도성 (electrically conducting)을 갖는 액체의 경우에도 측정결과가 보고되었다.⁽²⁾

Fig. 1에 기존의 비정상열선법에서 사용되는 센서의 형식을 나타내었다. (a)는 가장 기본적인 센서형식으로 한 개의 비교적 긴 열선을 사용하는 방법(single wire method)이며 (b)는 길이가 다른 두 개의 열선을 사용하는 방법(two wire method)이다. 한 개의 열선을 사용하는 경우에는 열선의 양쪽 끝 접합점에서 전도에 의한 열손실이 발생하여 작지만 측정오차가 나타나게 된다. 이와 비교하여 두 개의 열선을 사용하는 방법은 긴 열선과 짧은 열선의 양끝에서 동일하게 발생하는 열손실량을

† 책임저자, 회원, 경기대학교 기계공학과

E-mail : shinpyo@kyonggi.ac.kr

TEL : (031)249-9814 FAX : (031)249-9796

* 경기대학교 대학원 기계공학과

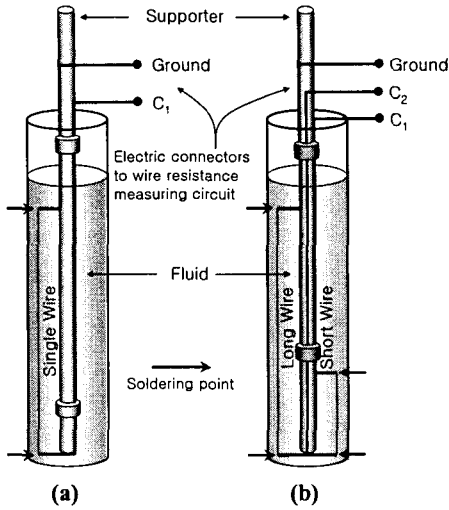


Fig. 1 Schematic diagrams of (a) single and (b) two wire sensor

회로구성과 자료의 처리를 통하여 서로 동일한 양 만큼 상쇄시켜서 전도손실에 의한 오차없이 유체의 열전도율을 더욱 정확하게 측정하기 위하여 제안된 것이다. 두 센서에는 공통적으로 열선센서에 가열전류를 흘리기 위한 연결전선(예를 들면 표시된 C₁, C₂, Ground)들과 열선을 측정대상 유체 속에 수직으로 위치시키기 위한 지지대(supporter)가 있게 된다.

위에 보인 기존의 방법에서 센서들은 모두 길이가 긴 형태를 가지며 이와 같이 제작된 센서는 보통 원형 단면을 갖는 용기(예를 들면 매스실린더) 속의 측정대상 유체에 충분히 잠긴 상태로 측정이 이루어진다. 측정에 이와 같은 일반 용기를 사용하는 경우 소요되는 유체의 양은 열선센서 주위의 소량의 유체와 또한 나머지 용기부분을 채우는 다량의 유체로 구성되어 실제 측정에 필요한 양보다 측정대상 시료의 양이 매우 많아지는 단점이 생기게 된다. 측정에 사용되는 유체의 양을 효과적으로 줄여서 열선 센서 주위를 감싸는 소량의 유체만으로 한정하려면 열선셀이라고 부르는 복잡하고 특별한 용기를 제작하여야만 한다.⁽³⁾ 그러나 이 경우에 측정 대상유체를 교체하기 위하여 열선센서를 열선셀로부터 분리하거나 좁은 열선셀의 내부를 완벽히 세척하는 과정 등은 시간이 매우 많이

소요되고 불편한 작업이다. 또한 열선셀 제작시에 복잡한 구조물들 사이로 열선의 지지대와 연결전선을 설치하는 것도 기술적으로 매우 어렵다.

최근에 본 연구자들은 초미세 금속입자를 물, 글리세린 등의 전통적인 열전달 유체에 혼합하여 유체의 열전도율을 상승시키려는 나노유체⁽⁴⁾ 관련 연구를 수행하고 있다. 나노유체의 열전도율을 측정하는 경우에는 위에서 언급한 기존 센서의 여러 가지 문제점 뿐만 아니라 측정대상 시료의 확보가 또한 현실적인 문제로 나타났다. 즉, 초미세 금속입자의 가격이 비싸지 않은 경우에는 많은 양의 유체시료를 확보하는 것이 어렵지 않아 기존의 방법으로도 충분한 측정이 가능하였으나 예를 들어 탄소나노튜브(carbon nanotube) 입자의 경우에는 입자의 가격이 매우 고가여서 많은 양의 유체시료를 확보하는 것이 현실적인 어려움으로 나타나게 되었다. 따라서 소량의 유체를 이용하여 측정을 수행하려면 위에서 소개한 것처럼 특별한 열선셀을 제작하여 사용해야 하는데 다양한 성분과 다양한 조성의 나노유체 시료에 대하여 열전도율을 측정하는 경우 발생하는 여러 가지 어려움으로 기존의 방식과 다른 새로운 측정방법의 필요성을 느끼게 되었다.

따라서 본 논문에서는 기존의 방법과 동일한 측정정밀도를 가지면서 위에서 언급한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 방식의 비정상열선법 즉, 새로운 센서의 구성방식과 자료처리 방법을 제시하고자 한다. 연구의 주요 내용은 기존에 사용되던 하나의 긴 열선센서를 다수의 짧은 열선으로 분할하고 이와 같이 짧아진 열선들을 효과적으로 배열하여 센서의 전체 크기를 줄여서 측정에 소요되는 유체의 양을 줄이고 또한 센서의 분해와 설치과정이 대폭 생략되어 사용하기 편리한 측정방법을 제시하는 것이다.

제시될 방법은 센서를 분할하여 배치하는 새로운 방법이므로 사용자의 의도에 따라 다양한 형식의 센서 설계가 가능할 것으로 예상된다. 최종적으로 열전도율이 잘 알려진 글리세린을 표준유체로 선정하고 제시된 방법을 적용하여 장치를 구성한 후 열전도율을 측정함으로써 방법의 타당성을 검증할 것이다.

2. 새로운 센서 설계와 자료 처리방법

2.1 센서 설계와 자료처리

비정상열선법은 액체 속에 잠겨있는 가느다란 열선센서에 순간적으로 가열전류(heating current)를 흘리고 이 열선의 온도변화를 검출하여 주위유체의 열전도율을 환산하는 방법이다. 만약 열선이 잠겨있는 주위 유체의 열전도율이 높다면 열선에서 발생된 열은 대부분 유체쪽으로 전달되어 열선의 온도상승은 낮을 것이다. 그러나 반대의 경우로서 유체의 열전도율이 낮다면 열선에서 발생된 열은 유체쪽으로 전달되지 못하고 대부분 열선 자체의 온도상승에 사용되어 열선의 온도상승은 크게 나타나게 될 것이다.

이와 같은 과도적인 상황에서 열선과 접한 유체의 온도변화는 Carslaw 와 Jaeger 가 제시한 해석해에 의하여 다음과 같이 표시될 수 있다.⁽⁵⁾ 이 식을 측정실험에 성공적으로 적용하기 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다. 즉, 열선의 직경은 무시할 수 있을 만큼 매우 가늘어야 하며 열선에서 충분히 먼 지점의 반경방향 위치에서 일정한 유체온도조건을 확보하기 위하여 충분한 양의 유체가 사용되어야 한다. 또한 열선의 길이방향으로 열전달을 무시할 수 있도록 열선의 길이는 직경과 비교하여 충분히 길어야 한다.

$$T(t) - T_{ref} = \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4K}{a^2 C} t\right) \tag{1}$$

여기서 $T(t) - T_{ref}$ 는 초기유체온도 T_{ref} 에 대하여 열선과 접한 유체의 시간에 따른 온도상승을 표시하며, q 는 단위길이당 열선의 발열양, k 는 유체의 열전도율, K 는 열확산율, t 는 경과시간, C 는 상수이며 a 는 열선의 반지름이다. 이 식을 정해진 두 시간 t_1 과 t_2 에 대하여 적용하고 정리하면 다음과 같이 열전도율에 대한 표현을 얻을 수 있다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{(\ln t_2 - \ln t_1)}{(T_2 - T_1)} \tag{2}$$

여기서 T_1 은 측정이 시작되는 시점 t_1 의 열선온도

이며 T_2 는 측정이 끝나는 시점 t_2 에서 측정된 열선온도이다. 즉, 시간에 따라 얻어진 열선의 온도 변화 데이터들을 로그시간-온도축 상에서 선형적으로 곡선맞춤(curvefit)하여 기울기를 구하고 측정된 열량을 이용하면 유체의 열전도율을 계산할 수 있다.

그런데 시간에 따른 열선의 온도상승은 직접 측정할 수 없으며 이를 위해 다음의 Fig. 2와 같이 열선의 저항변화를 검출하는 전압분할회로(voltage divider circuit)를 구성한다. 여기서 V_k 는 가열전류를 공급하기 위한 직류전원이며 R_k 는 저항값이 알려진 저항, R_w 는 동작중인 열선의 저항을 나타낸다. R_k 와 R_w 가 직렬로 연결되어 흐르는 전류가 동일하므로 V_k 와 R_k 가 알려지면 오옴의 법칙에 의하여 열선 양단의 전압 V_w 를 측정함으로써 R_w 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_w = \frac{V_w}{V_k - V_w} R_k \tag{3}$$

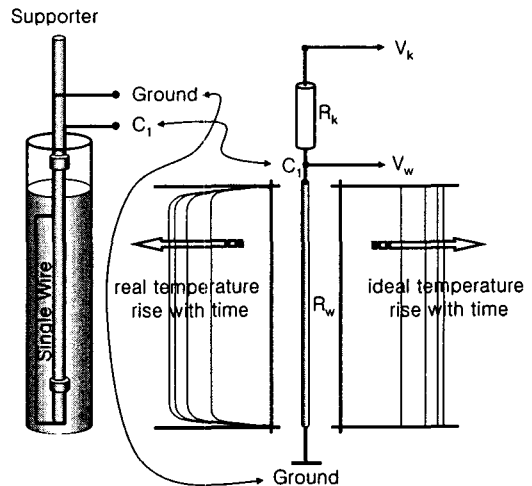


Fig. 2 Real and ideal temperature distribution along the wire and resistance measuring circuit in single wire method

저항 R_w 가 계산되면 다음과 같은 열선의 온도-저항 관계식 (4)에 의하여 열선의 저항을 온도로 환산할 수 있다. 따라서 열선의 저항변화를 검출하는 것은 열선의 온도변화를 검출하는 것과 동일하다. 식에서 R_0 는 0°C 에서 열선의 저항, α 는 열선의 물성치로서 온도저항계수이며 본 연구에서 사용한 백금열선의 경우 $0.0039092/^\circ\text{C}$ 가 사용된다. 이상의 방법이 한 개의 열선센서를 사용하는 경우의 비정상열선법이며 가장 단순한 측정방법이다.⁽⁴⁾

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \quad (4)$$

그런데 위의 이론식 (1)은 Fig. 2에서 이상적인 축방향 온도분포를 갖는 즉, 열선전체의 온도가 동일하게 상승하는 경우의 모델이다. 그러나 언급한 바와 같이 실제의 경우에는 열선의 좌측에 표시된 바와 같이 열선과 연결전선이 용접된 접합점에서 전도에 의한 열손실이 나타나므로 Carslaw와 Jaeger의 이론식은 실제로는 열선센서의 중앙부에서만 유효하게 된다. 따라서 열선의 길이가 충분히 길어서 전체적으로 끝단의 전도효과가 무시될 경우에는 한 개만의 열선을 사용하는 경우에도 비교적 정확히 열전도를 측정이 가능하지만 센서의 길이가 유한한 경우에는 유체의 열전도를 높게 평가하게 되어 오차가 발생하게 된다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 고안된 것이 직경은 동일하고 길이가 다른 두개의 열선을 사용하는 방법(two wire transient hot-wire method)이다. 기본 개념은 두개의 열선 양단에서 나타나는 온도구배를 데이터의 적절한 처리과정을 통하여 효과적으로 상쇄시키는 것이다. 다음의 Fig. 3에 열선을 포함한 센서구조물과 길고 짧은 각각의 열선에서 예상되는 온도분포를 개략적으로 표시하였다. 각각의 열선에는 양쪽 끝단에서 온도구배를 갖는 부분과 중앙부의 온도구배가 나타나지 않는 부분이 존재하게 되는데 발열하는 열선에 대한 Hinze⁽⁶⁾의 축방향 온도분포해석 결과에 의하면 열선의 양쪽 끝단에서의 온도구배는 열선의 길이에 관계없이 동일하며 또한 열선들의 중앙부분 온도도 열선의 길이에 관계없이 동일하다. 즉, A, C, D, F 영역의

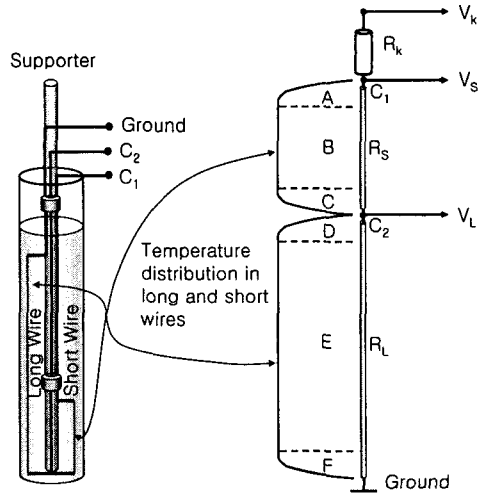


Fig. 3 Wire resistance measuring circuit and temperature distribution in two wire method

온도구배는 동일하고 중심부 B와 E 영역에서의 온도는 같다.

긴 열선과 짧은 열선의 중앙부분에서는 온도구배가 나타나지 않으므로 여기서는 Carslaw와 Jaeger가 제시한 이론식이 정확히 만족된다. 또한 가상적으로 긴 열선과 짧은 열선의 중앙부분 차이를 센서로서 생각한다면 이 경우에도 식 (1)이 정확히 만족될 것이다. 즉, 측정에 사용되는 순(net) 센서부분을 각 열선들의 중앙부 차이로 생각하면 저항차이는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R_E - R_B &= R_D + R_E + R_F - R_A - R_B - R_C \\ &= R_L - R_S \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 긴 열선과 짧은 열선 양쪽 끝단의 온도구배를 갖는 부분의 저항변화가 같다는 결과 ($R_A + R_C = R_D + R_F$)를 이용하여 중앙부 균일한 영역의 저항 R_E 와 R_B 에 동일한 저항을 더하고 빼주었다. 결과는 긴 열선과 짧은 열선의 중앙부분 저항 차이가 긴 열선(R_L)과 짧은 열선(R_S) 전체의 저항차이로 나타나게 됨을 보여준다. 따라서 열선들의 중앙부분 저항차이를 계산하려면 중앙부분인 R_B

나 R_E 양단의 전압을 측정하는 것이 아니라 다음과 같이 긴 열선과 짧은 열선 양단의 전압을 측정함으로써 가능하다는 것을 보여준다.

$$R_E - R_B = R_L - R_S$$

$$= \frac{V_L - V_S - V_L}{i} = \frac{2V_L - V_S}{i} \quad (6)$$

식 (6)이 적용될 열선센서의 유효길이는 균일한 온도를 갖는 각각의 열선센서의 중앙부분의 길이 차이가 되지만 온도구배 효과가 나타나는 양끝단의 영역길이가 이론적으로 동일하므로 이 길이 차이 또한 의견상 나타나는 실제 긴 열선과 짧은 열선의 지지점 사이의 차이가 된다.

$$l_E - l_B$$

$$= l_D + l_E + l_F - l_A - l_B - l_C$$

$$= l_L - l_S \quad (7)$$

정리하면 길이가 다른 두개의 열선을 사용하는 경우 Carslaw 와 Jaeger 가 제시한 이론식 (1)을 정확히 만족하는 센서의 구성이 가능하여 지지대를 통한 전도열전달 양 측, 끝단효과(end effect)가 효과적으로 제거되어 single wire model 보다 정확한 열전도를 측정이 가능하게 된다. 자료의 처리과정은 시간에 따른 열선의 저항변화를 식 (6)을 이용하여 계산하고 저항-온도관계식 (4)로 온도로 환산한 후 식 (2)에 나타나는 기울기를 계산하면 열전도율을 환산할 수 있다.

그런데 만약 두 열선의 유효 길이차를 위에서 언급한 한 개의 열선을 사용하는 경우처럼 100mm 로 유지하려 한다면 예를 들어 긴 열선의 경우는 140mm, 그리고 짧은 열선의 경우에는 40mm 가 되어 긴 열선과 짧은 열선을 평행으로 배치한다고 해도 길이는 140mm 로 더 늘어나게 될 것이다.

이 경우 센서의 길이가 늘어나면 더 많은 측정 유체시료가 필요해지는데 이 문제점은 모두 기존 비정상열선법에서 센서 구성방법이 매우 긴 한 개의 열선을 사용하는 점에서 비롯된다. 따라서 센

서의 전체 길이는 일정하게 유지하면서도 센서를 분할하여 사용할 수 있는 새로운 방법이 제시된다면 여러 가지 다양한 형태의 센서모듈 개발과 함께 여러 가지 장점을 기대할 수 있을 것이다.

2.2 새로운 센서설계의 예시

다음의 Fig. 4는 본 연구의 결과로 제시될 새로운 센서의 제작 형식을 보여준다. (a)는 위의 Fig. 3에서 보인 기존의 길고 짧은 두개의 열선을 갖는 센서이며 (b)는 판형으로 구성된 센서형태로서 (a)의 경우와 비교하여 긴 열선과 짧은 열선을 동일한 길이가 되도록 두개로 분할하여 구성한 것이다. (c)는 (b)와 동일한 센서구성형식을 갖지만 원주방향으로 센서들을 배치한 것이다.

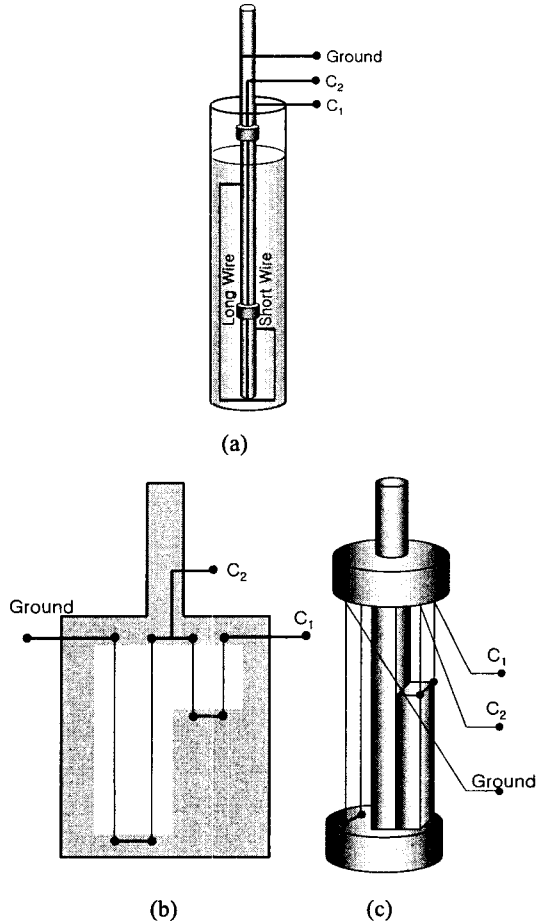


Fig. 4 Schematic diagrams of new sensors with divided multiple long and short wires

(a), (b), (c) 모든 경우에 측정회로 Fig. 3의 저항측정회로에 연결되는 단자의 수와 기능은 동일함을 알 수 있다. (b)와 (c)의 경우에 긴 열선을 분할하였으므로 열선 접합점의 수가 2개에서 4개로 증가하지만 짧은 열선의 경우에도 동일한 개수의 접합점이 생기므로 접합점에서의 열전도 현상이 동일하다면 위의 2.1절에서 설명하였던 동일한 방법에 의하여 접합점에서의 전도효과는 이 경우에도 완전히 제거된다.

따라서 분할된 긴 열선과 짧은 열선의 끝에서 발생하는 열손실 부분의 저항을 식 (5)에 추가하면 중심부에서의 저항변화는 식 (6)을 통하여 환산할 수 있으며 마찬가지로 이 경우 중심부의 유효길이는 식 (7)로서 계산된다. Fig. 4는 각각의 길고 짧은 열선센서를 두 개로 분할 한 예를 보여주고 있으나 사용자의 필요에 따라 그 숫자는 더 늘어날 수도 있으며 이 경우에도 데이터의 처리방법은 위에서 제시한 방법과 정확히 동일하게 된다. 이와 같은 새로운 센서제작 방법을 통하여 사용자는 보다 콤팩트한 형식의 사용하기 편리한 열전도를 측정시스템을 갖게 될 것이다. 그러나 센서의 전체 길이 즉 전체 체적을 줄이기 위하여 센서사이의 열적인 간섭을 무시하고 무조건 열선센서사이의 간격을 줄일 수는 없으며 또한 최소한 분할된 다수의 센서들에서 중앙부에는 양끝단의 전도효과가 나타나지 않는 중심부분이 확보되어야 할 것이다. 이를 위해 다음 절에서 효과적인 열선센서의 설계 즉, 열선의 효과적인 배치를 위한 방법을 검토할 것이다. 여기에는 열선에서 유체로의 반경방향 침투깊이와 열선의 길이방향 온도분포에 대한 논의가 포함될 것이다.

Table 1 Specification of the sensors

Type of sensor	Length	Remarks
Conventional sensor	Long=120mm Short=50mm	Two wire sensor
New sensor	Long=60mm×2 Short=25mm×2	Divided multiple sensor

3. 결과 및 고찰

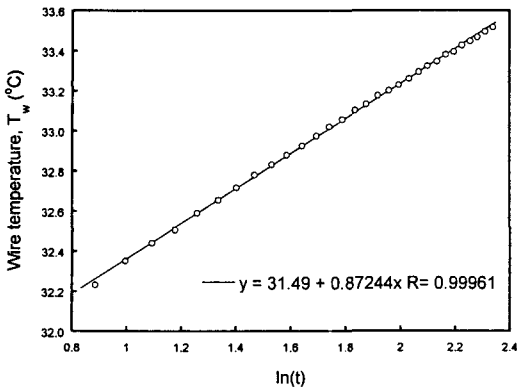
3.1 기존센서와의 측정결과 비교

새로운 방식의 센서를 기존의 길이가 다른 두 개의 열선을 사용하는 방법과 비교하기 위하여 전체 열선의 길이는 동일하게 유지하지만 그 배치를 다르게 한 열선센서를 제작하고 열전도율이 잘 알려진 글리세린의 열전도율을 측정하였다. 측정에는 다음의 Table 1에 정리한 바와 같이 열선의 길이가 120mm, 50mm 로 구성된 기존의 센서와 60mm, 25mm 인 열선을 각각 두개씩 갖는 새로운 열선센서를 사용하였다.

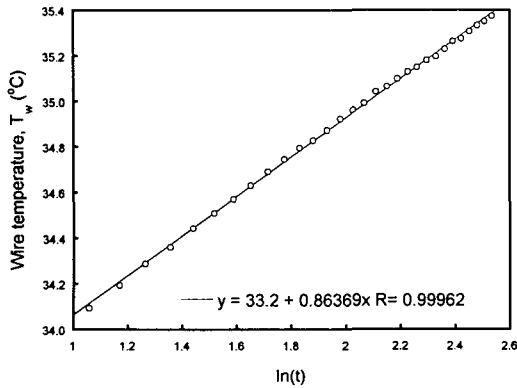
다음의 Fig. 5는 글리세린 표준유체의 열전도율을 계산하기 위하여 식 (2)에 사용되는 시간에 따른 열선의 온도변화를 얻기 위한 데이터와 곡선맞춤된 결과를 표시하고 있다. (a)는 기존센서를 이용하여 획득한 곡선이며 (b)는 Fig. 4의 (c)와 같이 기동형 구조를 갖는 새로운 센서를 이용하여 획득한 자료이다. Fig. 5에서 R 은 곡선맞춤의 정도를 표시하는 regression coefficient 로서 1에 가까울수록 측정된 데이터가 이론식 (1)에 적합함을 나타낸다. 로그축으로 표시한 시간데이터와 열선의 온도상승 데이터에서 R 이 거의 1임을 알 수 있으며 따라서 본 연구에서 제시한 이론식과 측정방법이 열전도율 측정을 위하여 성공적으로 사용된 것으로 판단된다.

Table 2에 식 (2)에 사용되는 단위길이당 발생열량과 획득된 기울기 그리고 최종 환산된 글리세린의 열전도율을 나타내었다. 참고문헌 (7)을 보면 상온에서 글리세린의 열전도율은 약 0.286W/mK 를 가지며 본 실험결과와 정확히 일치함을 알 수 있다. 본 연구에서 제안된 새로운 센서의 경우에도 기존의 방법과 차이 없이 열전도율을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

측정된 열전도율에 대한 불확도 해석을 실시한 결과, Table 2에 제시한 열전도율은 약 1.7%의 불확도를 갖는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안된 새로운 측정방법은 향후 유체의 열전도율을 성공적으로 측정할 수 있는 유용한 방법이 될 것으로 기대된다. 본 연구에서는 약 50mL 정도



(a) Conventional two wire sensor



(b) New sensor

Fig. 5 Temperature rise of the sensors with time in log scale

Table 2 Experimental Results

Type of sensor	Heat generation (W)	Slope °C/ln(s)	Thermal conductivity (W/mK)
Conventional sensor	0.21950	0.87244	0.28601
New sensor	0.21731	0.86369	0.28603

의 유체가 측정에 사용하였다. 기존의 연구(4)에서 약 400mL 를 사용하였던 경우와 비교하면 소요유체의 양이 대폭 감소했음을 알 수 있다. 보다 효과적으로 센서를 배치한 정밀한 센서를 제작한다면 소요유체의 양을 더욱 줄일 수 있을 것이다.

3.2 열선센서의 효과적인 배치

본 연구에서 제시된 방법을 통하여 기존의 센서보다 콤팩트한 형식의 열선센서가 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 새로운 측정센서의 구성을 위해서는 첫째, 분할된 긴 열선과 짧은 열선에서는 중앙부분에 균일한 온도영역을 갖는 부분이 확보되어야 하며 둘째, 다수로 배열된 열선들 사이에서는 측정시간동안 서로간의 열적인 간섭이 없도록 최소한의 간격이 서로 떨어져 있어야만 한다.

Hinze(6)의 열선 축방향 온도분포 해석결과를 이용하면 열선의 끝에서 온도구배가 나타나는 영역은 대략적으로 열선직경의 약 300배 정도임을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 백금선의 직경이 25μm 이므로 이 영역은 7.5mm 정도로 예상되며 따라서 새로 제작된 센서에서 짧은 열선의 길이가 25mm 이므로 양 끝단을 제외한 중앙부분의 영역은 약 10mm 로서 충분히 확보됨을 알 수 있다.

식 (1)을 사용하면 시간에 따라 열선과 접한 유체내부로의 반경방향 온도분포를 예상할 수 있다. 보통 비정상열선법에서는 신호의 측정이 15초이내에서 완료된다. 그러나 충분한 시간으로 약 30초를 설정하고 유체로의 온도침투깊이를 예상해보면 열선직경의 약 100배, 즉 2.5mm 임을 알 수 있다. 따라서 측정기간동안 두 열선이 열적인 간섭을 받지 않으려면 최소한 5mm 이상 떨어져 있어야 한다. 본 연구에서 사용한 센서의 경우에는 열선들 사이의 간격이 약 12mm 정도로서 충분한 간격을 가졌다. 본 절에서 논의한 열선축방향 온도분포와 유체내부 반경방향 온도분포의 계산과정과 결과는 참고문헌 (8)에 상세히 기술되어 있다.

4. 결론

기존의 비정상열선법에서는 측정대상 유체시료가 불필요하게 많이 사용되었으며 또한 이를 해결하기 위하여 열선이 설치된 특별한 용기인 열선셀을 사용하는 경우에도 제작과 교체 등이 기술적으로 매우 어려운 단점이 있었다.

이와 같은 단점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존의 방식과 다른 새로운 열선센서와 자로처

리방법을 제시하고 표준유체로 선정된 글리세린에 대한 측정 비교실험을 통하여 성공적으로 열전도율 측정이 가능함을 증명하였다. 본 연구의 대표적인 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 새로운 열선센서는 분할된 길고 짧은 다수의 열선을 갖도록 제작된다.

(2) 제시된 센서와 자료처리방법은 열선 양단에 서 발생하는 전도 열손실에 의한 측정오차를 효과적으로 제거할 수 있으며 따라서 기존의 방법과 측정정밀도는 동일하다.

(3) 글리세린에 대한 비교 측정결과 환산된 열전도율은 기존의 방법과 동일함을 확인하였다.

(4) 본 연구의 결과를 통하여 사용자는 보다 다양한 형식의 열선센서 제작이 가능하다.

후 기

본 연구는 2004년도 경기대학교 교수연수사업에 의하여 지원된 것으로 관계자에게 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Roder, H. M., 1981, "A Transient Hot-Wire Thermal Conductivity Apparatus for Fluids," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 86, No. 5, pp. 457~493.
- (2) Nagasaka, Y. and Nagashima, A., 1981, "Absolute Measurement of the Thermal Conductivity of Electrically Conducting Liquids by the Transient Hot-Wire Method," *J. Phys. E: Sci. Instrument*, Vol. 14, pp. 1435~1440.
- (3) Kestin, J. and Wakeham, W. A., 1978, "A Contribution to the Theory of the Transient Hot-Wire Technique for Thermal Conductivity Measurement," *Physica*, Vol. 92A, pp. 102~116.
- (4) Lee, S., Choi, U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME Tran. J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280~289.
- (5) Carslaw, H. S. and Jeager, J. C., 1959, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Ed., Oxford University Press, New York, pp. 510~511.
- (6) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, pp. 97~99.
- (7) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1996, *Introduction to Heat Transfer*, 3rd Ed., John Wiley & Sons, pp. 753~754.
- (8) Lee, M. H. and Lee, S. P., 2003, "Analysis of Temperature Distribution of a Heating Wire Both in Axial and in Radial Direction for the Optimal Sensor Design in Transient Hot-Wire Method," *Institute of Industrial Technology Journal*, Vol. 25, pp. 87~98.