

# 나노유체의 열전도율 측정을 위한 새로운 비정상열선법 센서설계와 자료처리방법

이신표<sup>†</sup> · 이명훈\* · 김민태\*\* · 오제명\*\*

## Development of a New Sensor and Data Processing Method in Transient Hot-wire Technique for Nanofluid

Shin Pyo Lee, Myung Hoon Lee, Min Tae Kim and Je Myung Oh

**Key Word** : Transient Hot-wire Technique(비정상열선법), Thermal Conductivity(열전도율), Hot-wire Cell(열선셀), Nanofluid(나노유체)

### 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.

비정상열선법은 액체의 열전도율을 측정하는 경우 가장 널리 사용되는 방법이며 이에 대한 센서의 설계와 데이터의 획득, 신호의 처리방법 및 오차해석 등은 매우 잘 확립되어 있으며<sup>(1)</sup> 특별한 경우로서 전기적으로 전도성(electrically conducting)을 갖는 액체의 경우에도 측정결과가 보고되었다.<sup>(2)</sup>

Fig. 1 에 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 회로구성

과 자료의 처리를 통하여 서로 동일한 양만큼 상쇄시켜서 전도손실에 의한 오차 없이 유체의 열전도율을 더욱 정확하게 측정하기 위하여 제안된 것이다.

기존의 방법에서 센서들은 모두 길이가 긴 형태를 가지며 이와 같이 제작된 센서는 보통 원형 단면을 갖는 용기속의 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.<sup>(3)</sup> 그러나 이 경우에 측정 대상유체를 교체하기 위하여 열선센서를 열선셀로부터 분리하거나 좁은 열선셀의 내부를 완벽히 세척하는 과정 등은 매우 시간이 많이 소요되고 불편한 작업이다. 또한 열선셀 제작시에 복잡한 구조물들 사이로 열선의 지지대와 연결전선을 설치하는 것도 기술적으로 매우 어렵다.

최근에 본 연구자들은 초미세 금속입자를

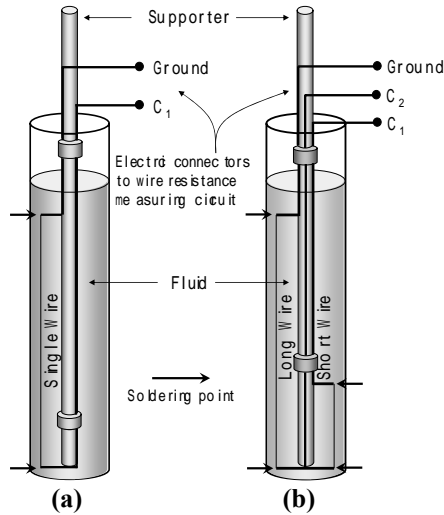
† 책임저자, 회원, 경기대학교 기계공학과

E-mail : shinpyo@kyonggi.ac.kr

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

\* 경기대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한국전력공사 전력연구원



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

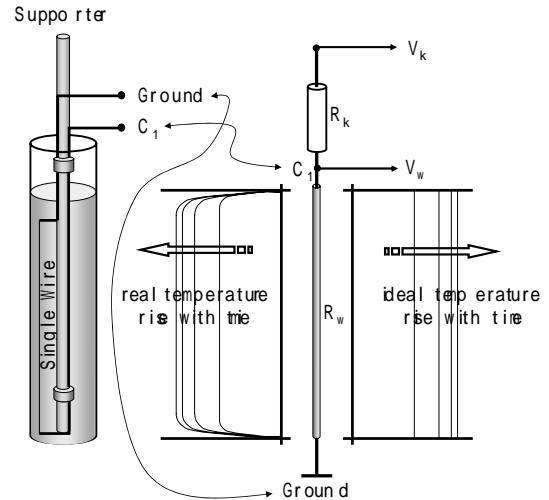
물, 글리세린 등의 전통적인 열전달 유체에 혼합하여 유체의 열전도율을 상승시키려는 나노유체<sup>(4)</sup> 관련 연구를 수행하고 있다. 나노유체의 열전도율을 측정하는 경우에는 위에서 언급한 기존 센서의 여러 가지 문제점뿐만 아니라 측정대상 시료의 확보가 또한 현실적인 문제로 나타났다. 즉, 초미세 금속입자의 가격이 비싸지 않은 경우에는 많은 양의 유체시료를 확보하는 것이 어렵지 않아 기존의 방법으로도 충분한 측정이 가능하였으나 예를 들어 탄소나노튜브(carbon nanotube) 입자의 경우에는 입자의 가격이 매우 고가여서 많은 양의 유체시료를 확보하는 것이 현실적인 어려움으로 나타나게 되었다. 따라서 소량의 유체를 이용하여 측정을 수행하려면 기존의 방식과 다른 새로운 측정방법의 필요성을 느끼게 되었다.

본 논문에서는 기존의 방법과 동일한 측정정밀도를 가지면서 위에서 언급한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 센서의 구성방식과 자료처리 방법을 제시하고자 한다. 제시될 방법은 센서를 분할하여 배치하는 새로운 방법이므로 사용자의 의도에 따라 다양한 형식의 센서 설계가 가능할 것으로 예상된다.

2.

2.1

비정상열전법은 액체 속에 잠겨있는 가느다란 열선센서에 가열전류(heating current)를 흘리고 이 열선의 온도변화를 검출하여 주위유체의 열전도율을 환산하는 방법이다. 이와 같은 상황에서 열선의 온도변화는 Carslaw 와 Jaeger 가 제시한 해석해에 의하여 다음과 같이 표시된다.<sup>(5)</sup>



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

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

여기서  $T - T_{ref}$ 는 초기유체온도  $T_{ref}$ 에 대한 열선의 온도상승,  $q$ 는 단위길이당 열선의 발열량,  $k$ 는 유체의 열전도율,  $K$ 는 열확산율,  $t$ 는 경과시간,  $C$ 는 상수이며  $\alpha$ 은 열선의 반지름이다. 이 식을 정해진 두 시간  $t_1$  과  $t_2$  에 대하여 정리하면 다음과 같이 열전도율에 대한 표현을 얻을 수 있다.

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

식 (2)에서 로그시간-온도측 상에 기울기를 구하고 측정된 열량을 이용하면 유체의 열전도율을 계산할 수 있다. 그러나 시간에 따른 열선의 온도상승은 직접 측정할 수 없으며 이를 위해 다음의 Fig. 2 와 같이 열선의 저항변화를 검출하는 전압분할회로(voltage divider circuit)를 구성해야 한다. 여기서  $V_k$ 는 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  $R_k$ 를 알면 오옴의 법칙에 의하여 열선에 흐르는 전압  $V_w$ 를 측정함으로써  $R_w$ 는 다음과 같다.

$$R_w = \frac{V_w}{V_k - V_w} R_k \quad (3)$$

저항  $R_w$ 가 계산되면 다음과 같은 열선의 온도-저항 관계식 (4)에 의하여 열선의 저항을

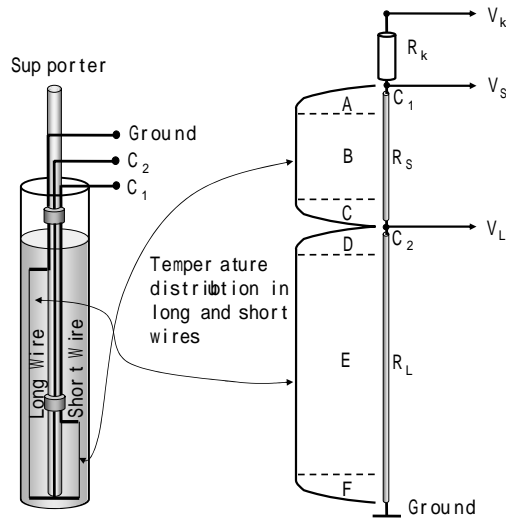


Fig. 3 Wire resistance measuring circuit and temperature distribution in two wire method

온도로 환산할 수 있다. 식 (4)에서  $R_0$  는  $0^\circ\text{C}$  에서 열선의 저항,  $\alpha$  는 열선의 온도저항계수이며 본 연구에서 사용한 백금열선의 경우  $0.0039092/^\circ\text{C}$  가 사용된다.

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

그런데 위의 이론식 (1)은 Fig. 2 에서 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 Carlsaw 와 Jaeger 의 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 두 개의 열선을 사용하는 방법(two wire transient hot-wire method)이다. Fig. 3 에 열선을 포함한 센서구조물과 길고 짧은 각각의 열선에서 예상되는 온도분포를 개략적으로 표시하였다. 각각의 열선에 대한 Hinze<sup>(6)</sup>의 축방향 온도분포해석 결과에 의하면 열선의 중심부 온도와 양쪽 끝단에서의 온도구배는 열선의 길이에 관계없이 동일하다. 즉, A, C, D, F 영역의 온도구배는 동일하고 중심부 B 와 E 영역에서의 온도는 같다. 즉, 측정에 사용되는 순(net) 센서부분을 각 열선들의 중앙부 차이로 생각하면 저항차이는

다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R_E - R_B \\ &= R_D + R_E + R_F - R_A - R_B - R_C \\ &= R_L - R_S \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)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.

$$\begin{aligned} R_E - R_B = R_L - R_S \\ = \frac{V_L}{i} - \frac{V_S - V_L}{i} = \frac{2V_L - V_S}{i} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)이 적용될 열선센서의 유효길이는 균일한 온도를 갖는 각각의 열선센서의 중앙부분의 길이 차가 되지만 온도구배 효과가 나타나는 양끝단의 영역길이가 이론적으로 동일하므로 이 길이 차이 또한 외견상 나타나는 실제 긴 열선과 짧은 열선의 지지점 사이의 차이가 된다.

$$\begin{aligned} l_E - l_B \\ &= l_D + l_E + l_F - l_A - l_B - l_C \\ &= l_L - l_S \end{aligned} \quad (8)$$

정리하면 길이가 다른 두개의 열선을 사용하는 경우 Carlsaw 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 (7)을 이용하여 계산하고 저항-온도관계식 (4)로 온도로 환산한 후 식 (2)에 나타나는 기울기를 계산하면 열전도를 환산할 수 있다.

## 2.2

다음의 Fig. 4 는 본 연구의 결과로 제시될 새로운 센서의 제작 형식을 보여준다. (a)는 위의 Fig. 3 에서 보인 기존의 열선센서이며 (b)는 판

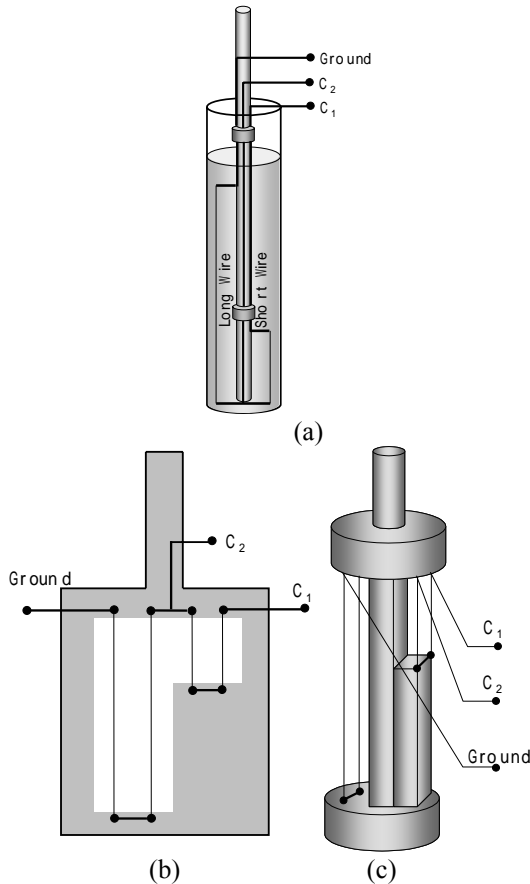


Fig. 4 Schematic diagrams of new sensors with divided multiple long and short wires

형으로 구성된 센서형태로서 (a)의 경우와 비교하여 긴 열선과 짧은 열선을 동일한 길이가 되도록 두 개로 분할하여 구성한 것이다. (c)는 (b)와 동일한 센서구성형식을 갖지만 원주방향으로 센서들을 배치한 것이다.

(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 2.1 절에서 설명하였던 동일한 방법에 의하여 접합점에서의 전도효과는 이 경우에도 완전히 제거된다.

따라서 분할된 긴 열선과 짧은 열선의 끝에서 발생하는 열손실 부분의 저항을 식 (6)에 추가하면 중심부에서의 저항변화는 식 (7)을 통하여 환산할 수 있으며 마찬가지로 이 경우 중심부의 유효길이는 식 (8)로서 계산된다. Fig. 4는 각각의 길고 짧은 열선센서를 두 개로 분할한 예를 보여주고 있으나 사용자의 필요에 따라 그 숫자는 더 늘어날 수도 있으며 이 경우에도 데이터의 처리방법은 위에서 제시한 방법과 정확히 동일하게 된다.

Table 1 Specification of the sensors

센서 종류	센서 길이	비고
기존 센서	Long=120mm Short=50mm	Two wire sensor
새로운 센서	Long=60mm(2개) Short=25mm(2개)	Divided multiple sensor

그러나 센서의 전체 체적을 줄이기 위하여 센서 사이의 열적인 간섭을 무시하고 무조건 열선센서 사이의 간격을 줄일 수는 없으며 또한 최소한 분할된 다수의 센서들에서 중앙부에는 양끝단의 전도효과가 나타나지 않는 중심부분이 확보되어야 할 것이다. 이를 위해 열선에서 유체로의 반경방향 침투깊이와 열선의 축방향 온도분포에 대한 논의가 필요하다.

### 3.

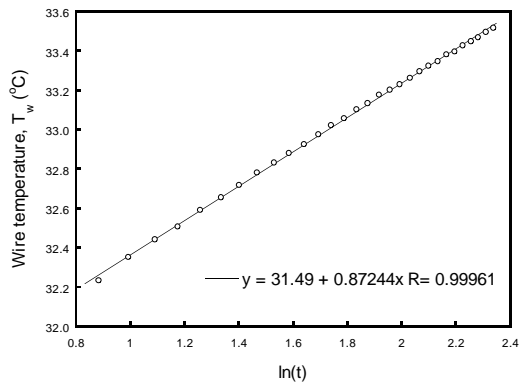
#### 3.1

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 위의 Table 1에 정리한 바와 같이 열선의 길이가 120mm, 50mm로 구성된 기존의 센서와 60mm, 25mm인 열선을 각각 두 개씩 갖는 새로운 열선센서를 사용하였다.

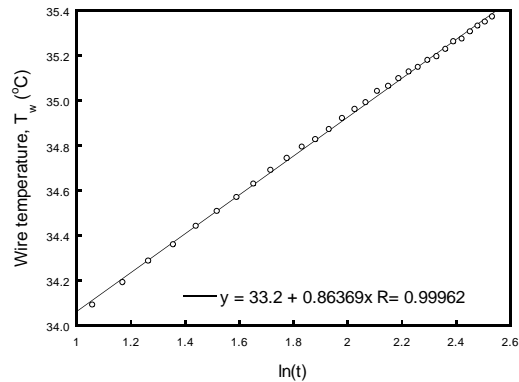
다음의 Fig. 5는 글리세린 표준유체의 열전도율을 계산하기 위하여 식 (2)에 사용되는 시간에 따른 열선의 온도변화를 얻기 위한 데이터와 곡선맞춤된 결과를 표시하고 있다. (a)는 기존센서를 이용하여 획득한 곡선이며 (b)는 Fig. 4의 (c)와 같이 기동형 구조를 갖는 새로운 센서를 이용하여 획득한 자료이다. 로그축으로 나타낸 시간데이터와 열선의 온도상승데이터가 두 경우 모두 만족스러운 선형적 관계를 보여주고 있다.

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/mK를 가지며 본 실험결과와 정확히 일치함을 알 수 있다. 본 연구에서 제안된 새로운 센서의 경우에도 기존의 방법과 차이 없이 열전도율을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 약 50mL 정도의 유체가 측정에 사용되었다. 기존의 연구(4)에서 약 400mL를 사용하였던 경우와 비교하면 소요유체의



(a) Conventional two wire sensor



(b) New sensor

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

Table 2 Experimental Results

센서종류	발생열량 (W)	기울기 °C/ln(s)	열전도율 (W/mK)
기존센서	0.21950	0.87244	0.28601
새로운 센서	0.21731	0.86369	0.28603

양이 대폭 감소했음을 알 수 있다. 보다 효과적으로 센서를 배치한 정밀한 센서를 제작한다면 소요유체의 양을 더욱 줄일 수 있을 것이다.

3.2

본 연구에서 제시된 방법을 통하여 기존의 센서보다 컴팩트한 형식의 열선센서가 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 새로운 측정 센서의 구성을 위해서는 첫째, 분할된 긴 열선과 짧은 열선에서는 중앙부분에 균일한 온도 영역을 갖는 부분이 확보되어야 하며 둘째, 다수로 배열된 열선들 사이에서는 측정시간 동안 서로간의 열적인 간섭이 없도록 최소한의 간격이 떨어져 있어야만 한다.

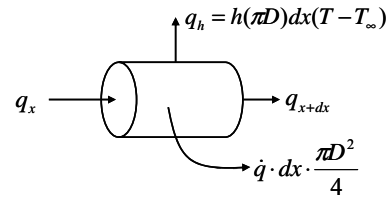


Fig. 6 Control volume for the analysis of temperature distribution along the wire

열선의 미소체적에 대하여 내부열발생과 표면에서의 열전달항을 표시하면 Fig. 6 과 같으며 미소요소에 대하여 에너지보존법칙을 적용하면 식 (9)로 정리된다.

$$\dot{q} = -k \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{4h}{D}(T - T_\infty) \quad (9)$$

여기서 L 은 열선의 길이, D 는 직경, q-dot 은 열선 내부의 발열량, h 는 대류열전달계수, k 는 열선의 열전도율, T 는 열선의 온도, T\_infinity 는 외부유체의 온도를 나타낸다.

식 (9)의 해를 구하면 열선의 축방향 온도 분포를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\theta = \frac{D\dot{q}}{4h} \left( \frac{1 - e^{-HL}}{e^{-HL} - e^{HL}} e^{Hx} + \frac{e^{HL} - 1}{e^{-HL} - e^{HL}} e^{-Hx} + 1 \right) \quad (10)$$

여기서  $\theta = T - T_\infty$ ,  $H^2 = \frac{4h}{Dk}$  이며 식 (10)을

이용하여 열선의 길이가 15mm 와 5mm 일 때의 축방향 온도분포를 계산하면 Fig. 7(a)와 같이 나타난다.

위에서 얻어진 결과를 이용하면 열선의 끝에서 온도구배가 나타나는 영역은 대략적으로 열선직경의 약 300 배 정도임을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 백금선의 직경은 25μm 이므로 이 영역은 7.5mm 정도로 예상되며 따라서 새로 제작된 센서에서 짧은 열선의 길이가 25mm 이므로 양끝단을 제외한 중앙부분은 약 10mm 로서 충분히 확보됨을 알 수 있다.

식 (1)을 사용하면 시간에 따라 열선과 접한 유체내부로의 반경방향 온도분포를 예상할 수 있다. 축방향 온도분포해석의 경우와 마찬가지로 유체온도변화를 Fig. 7 (b)와 같이 표시할 수 있다.

보통 비정상열선법에서는 신호의 측정이 15 초이내에서 완료된다. 그러나 충분한 시간으로 약 30 초를 설정하고 유체로의 온도침투깊이를 예상해보면 열선직경의 약 100 배, 즉 2.5mm 임을 알 수 있다. 따라서 측정시간 동안 두 열선이 열적인 간섭을 받지 않으려면 최소한 5mm 이상 떨어져 있어야 한다. 본 연구에서

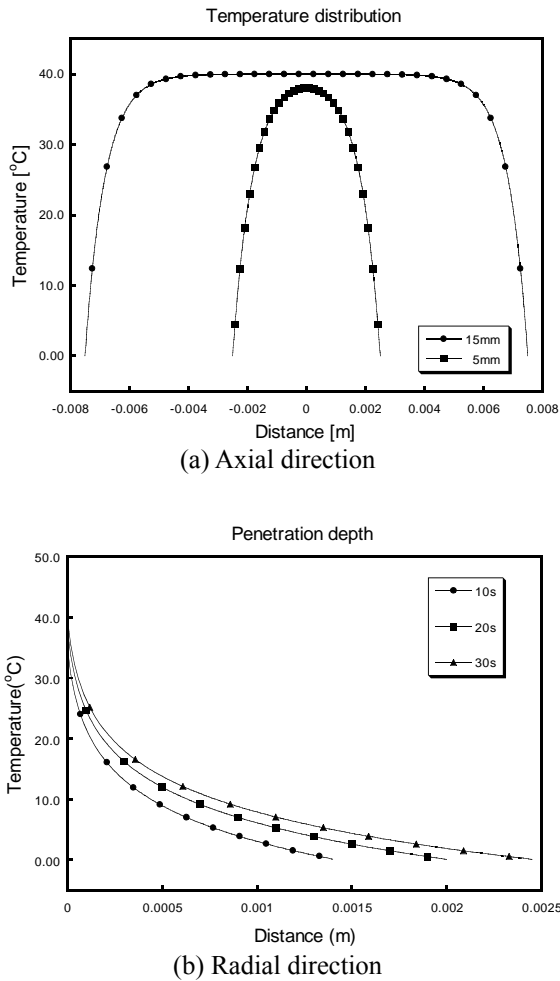


Fig. 7 Temperature distribution of a heating wire both in axial and radial direction

사용한 센서의 경우에는 열선들 사이의 간격이 약 12mm 정도로서 충분한 간격을 갖도록 열선들을 배치하였다.

4.

기존의 비정상열선법에서는 측정대상 유체 시료가 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 자료처리방법을 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 양단에서 발생하는 전도 열손실에 의한 측정오차를 효과적으로 제거할 수 있으며 따라서 기존의 법과 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.

- (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.