

비정상열선법에서 열선의 절연코팅이 선형구간의 초기시점에 미치는 영향

이승현* · 김현진* · 김규한* · 박용준* · 장석필*†

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Effect of Insulation Coating on Start Time of Linear Region for Transient Hot-wire Method

Seung-Hyun Lee*, Hyun Jin Kim*, Kyu Han Kim*, Yong-Jun Park* and Seok Pil Jang*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received September 17, 2013 ; Revised October 2, 2013 ; Accepted October 2, 2013)

Key Words: Transient Hot-Wire Method(비정상열선법), Thermal Conductivity(열전도도), Insulation Coating(절연코팅), Linear Region(선형구간)

초록: 본 논문에서는 절연된 열선을 이용한 비정상열선법에서 열선의 절연코팅이 선형구간의 초기시점에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 이론적인 연구를 수행해 보았다. 이를 위해, 절연된 열선의 온도상승에 관한 해석적 해에서 선형구간의 초기시점에 영향을 미치는 중요한 인자들을 파악해 보았으며, 이러한 인자들의 영향이 무시할 만큼 작아지는 임계시간(critical time)에 대한 연구를 수행해 보았다. 이론적인 연구 결과, 열선의 반경 및 코팅의 두께가 작을수록 절연코팅의 영향이 빠르게 감소하였고, 또한 절연물질의 열전도도가 크고 열확산계수가 작을수록 절연코팅의 영향이 빠르게 감소함을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 절연된 열선을 이용한 비정상열선법에서, 선형구간의 초기시점을 결정하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

Abstract: In this study, the effect of an insulation coating on the start time of a linear region is theoretically investigated when an insulation-coated hot-wire is used for the transient hot-wire method (THWM). For this purpose, important parameters affecting the start time of the linear region are presented from an analytical solution of temperature-rise for an insulation-coated hot-wire. Furthermore, a critical time to ignore the influence of important parameters is studied. The theoretical results indicate that the effect of the insulation coating rapidly disappears with a decrease in the wire radius, coating thickness, thermal diffusivity of insulation material or an increase in the thermal conductivity of the insulation material. The results of this study will be helpful for selecting a proper start time of the linear region for the THWM using insulation-coated hot-wires.

- 기호설명 -

a : 열선의 반경
 c : 절연된 열선의 반경
 e : 온도상승의 상대오차
 k : 열전도도
 q : 단위 길이당 입력 열량
 r : 열선의 반경방향
 S : $\Delta T - \ln t$ 의 기울기
 T : 온도

t : 시간
 t^* : 임계시간
 그리스문자
 α : 열확산계수
 γ : Euler 상수 = 0.5772157
 δ : 절연코팅의 두께

하첨자
 w : 금속열선
 f : 측정유체
 c : 절연코팅

† Corresponding Author, spjang@kau.ac.kr

1. 서 론

비정상열선법 (Transient Hot-Wire Method)은 1931년 Stalhane 과 Pyk⁽¹⁾ 이 분말의 열전도도를 처음으로 측정 한 이후, 임계영역(critical region)을 제외한 다양한 물리적 상태 (physical state)의 열전도도를 측정하는데 널리 사용되고 있는 측정 방식이다.⁽²⁾ 특히 기존의 열전도도 측정 방식인 준정상상태법(Quasi Steady State Method)과 달리 빠른 시간 안에 측정이 완료되기 때문에, 유체의 열전도도 측정 시 자연대류의 영향을 최대한 줄이면서 열전도도를 측정 할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.⁽²⁾ 또한 최근에는 나노유체의 열전도도가 세계적으로 크게 주목 받으면서, 유체의 열전도도 측정에 적합한 비정상열선법이 다시 크게 주목 받고 있다.^(3,4) 비정상열선법에 사용되는 금속 열선은 백금(platinum) 혹은 탄탈(tantalum)과 같이 저항과 온도가 선형의 관계를 가지는 금속을 많이 사용한다. 그러나 이러한 금속 열선은 전기 절연이 되어 있지 않아 전기 전도성 유체의 열전도도를 측정할 경우, 전류 누수(electric leakage) 및 표면에서 발생하는 유체의 극성화 (polarization) 현상으로 인해 심각한 측정오차를 수반하게 된다.⁽⁵⁾ Zhang 등⁽⁶⁾ 에 따르면 부피비 0.003%를 갖는 Au/toluene 나노유체를 절연 코팅된 열선을 사용하여 열전도도를 측정할 경우 기본유체인 toluene 대비 유의미한 열전도도 상승을 확인할 수 없었지만, 절연 코팅이 되어 있지 않은 bare 열선을 이용할 경우 전류 누수현상에 의해 열전도도가 기본유체 대비 8% 정도 상승된 값으로 측정되었다고 보고하였다. 이와 같이 잘못된 열선의 사용은 심각한 측정오차를 수반하기 때문에 전기전도성 유체의 열전도도를 비정상열선법으로 측정할 때는 장비의 전기절연에 많은 노력을 기울여야 한다. 특히 나노유체의 경우 기본유체(base fluid)가 순수물과 같은 비전도성유체라 하더라도 나노입자를 함유함으로써 전기전도성 유체가 되기 때문에,⁽⁷⁾ 나노유체의 열전도도 측정 시 금속 열선의 전기 절연은 필수적이다. 그러나 절연물질로 코팅된 열선을 사용할 경우 코팅 물질의 유한한 두께와 물성치로 인해 비정상열선법의 선형구간(열전도도 계산을 위해 선택된 운용구간) 선정에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향을 파악하기 위해 Nagasaka 와 Nagashima⁽⁵⁾는 절연 코팅된 열선의 온도상승(ΔT)에 대한 해석적 해를 유도하여 이론적인 연구를 수행하였다. 이론적 연구결과, 절연 코팅의 영향은 초기 선형구간에만 영향을 미

치고 일정시간이 지나면 무시할 만큼 작아짐을 보여주었다. 또한 이러한 이론적 결론을 바탕으로 전기전도성 유체인 NaCl 수용액의 열전도도를 실험적으로 정확히 측정함으로써 이론적인 결론이 타당함을 보여주었다. 하지만 Nagasaka 와 Nagashima⁽⁵⁾는 절연코팅의 영향이 사라지는 특정 시간에 대한 공학적인 판단기준을 제시하지는 못하였다. Yu 와 Choi⁽⁸⁾는 Nagasaka 와 Nagashima⁽⁵⁾의 해석적 해를 바탕으로, 반경 38.1 μm 를 갖는 백금선의 절연두께를 0 에서 35 μm 까지 변화시켜가며 절연두께가 측정오차에 미치는 영향을 이론적으로 연구하였다. 이론적 연구결과 물과 Ethylene Glycol의 경우 대략 0.5 초 이후에 대부분의 공학적 적용에 있어 절연 코팅에 대한 영향을 0.8% 오차 이내에서 무시할 수 있다고 하였다. 또한 Yu 와 Choi⁽⁸⁾는 synthetic oil 의 열전도도를 코팅된 열선 및 bare 열선을 이용하여 실험적으로 측정한 결과 이론적 결론과 마찬가지로 0.5 초 이후 값을 이용하면 코팅에 의한 영향 없이 정확히 열전도도를 측정할 수 있음을 보여주었다. 하지만 Yu 와 Choi⁽⁸⁾의 결과는 정해진 열선의 반경과 좁은 범위의 코팅두께만을 고려한 제한적인 범위의 연구결과로서 좀 더 다양한 인자들에 대한 체계적인 연구가 필요한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 절연된 열선을 사용한 비정상열선법에서, 열선의 절연코팅이 선형구간의 초기시점에 미치는 영향을 이론적으로 파악해 보았다. 이를 위해 절연된 열선의 온도상승에 관한 해석적 해를 연구하여 선형구간 초기에 영향을 미치는 중요한 인자들을 파악하였으며, 각 인자들이 미치는 영향을 기존 문헌⁽⁸⁾ 보다 넓은 범위에서 파악해 보았다. 본 연구의 결과는 절연된 열선을 이용한 비정상열선법에서, 선형구간의 초기시점을 결정하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 이론적 연구

비정상열선법에서 열전도도 측정을 위한 기본 방정식은 원통형 좌표계의 열확산방정식 (heat diffusion equation)으로부터 다음과 같이 주어진다.⁽⁹⁾

$$\Delta T_w = \frac{q}{4\pi k_f} \left[\ln t + \ln \frac{4\alpha_f}{a^2 \cdot e^\gamma} + \frac{a^2}{4\alpha_f t} + O\left(\left(\frac{a^2}{4\alpha_f t}\right)^2\right) \right] \quad (1)$$

여기서 a , k , q , T , t , α , γ 는 열선반경(m), 열전도도

(W/mK), 단위길이당 입력열량(W/m), 온도(K), 시간(sec), 열확산계수(m²/s), Euler 상수(0.57721557)이며, 하첨자 f, w 는 각각 측정유체 및 금속열선을 지칭한다. 식 (1)을 자세히 살펴보면 시간에 따라 증가하는 항($f(t) = \ln t$)과 시간에 따라 감소하는 항($f(1/t) = a^2 / (4\alpha_f t) + O\{a^2 / (4\alpha_f t)\}^2$), 그리고 시간에 무관한 나머지 항($f(-) = \ln 4\alpha_f / (a^2 e^\gamma)$)으로 구분할 수 있다. 여기서 만약 일정시간이 지나 $f(1/t)$ 항이 다른 항들에 비해 충분히 작다면 식 (1)을 식 (2)와 같이 간략히 쓸 수 있게 된다.

$$\Delta T_w = \frac{q}{4\pi k_f} \left[\ln t + \ln \frac{4\alpha_f}{a^2 \cdot e^\gamma} \right] \quad (2)$$

식 (2)를 $\ln t$ 에 관해 미분한 후, 열전도도에 관해 정리해주면 식 (3)과 같은 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$k_f = \frac{q}{4\pi} \frac{d\Delta T_w}{d \ln t} = \frac{q}{4\pi} / S \quad (3)$$

여기서 S 는 온도증가(ΔT)와 logscale 시간($\ln t$) 사이의 기울기를 말한다. 식 (3)은 비정상열전법 실험에서 열전도도를 계산하기 위한 기본식으로서, q 는 거의 일정한 값을 가지므로 $\Delta T - \ln t$ 의 기울기 S 만이 열전도도를 결정하는 유일한 변수임을 알 수 있다. 따라서 정확한 열전도도를 계산하기 위해서는 기울기 S 를 정확히 계산해야 하고, 이를 위해서는 ΔT 와 $\ln t$ 가 선형의 관계를 갖는 구간, 즉 선형구간을 정확하게 선정해 주어야 한다. 식 (1)에서 기울기 S 의 오차에 영향을 미치는 인자들은 $f(1/t)$ 항으로서 실험 초기에만 발생하는 것을 알 수 있으며, $f(1/t)$ 항은 열선의 반경(a) 및 측정 유체의 열확산계수(α_f)에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 위에서 살펴본 식은 열선의 유한한 물성치 및 체적을 고려하지 않은 간략화된 식으로서 실제 절연된 열선의 체적과 물성치를 고려하면 식은 더욱 복잡하게 주어진다. 하지만 위에서 언급한 방식과 동일한 절차를 수행하면 선형구간에 영향을 미치는 절연코팅의 중요 인자들을 쉽게 파악할 수 있다. Fig. 1과 같이 주어진 절연된 열선의 온도 상승(ΔT)은 해석적으로 다음과 같이 주어진다.⁽⁵⁾

$$\Delta T_w = \frac{q}{4\pi k_f} \left[\ln \frac{4\alpha_f t}{c^2 e^\gamma} + A + \frac{1}{t} (B \cdot \ln t + C) \right] \quad (4)$$

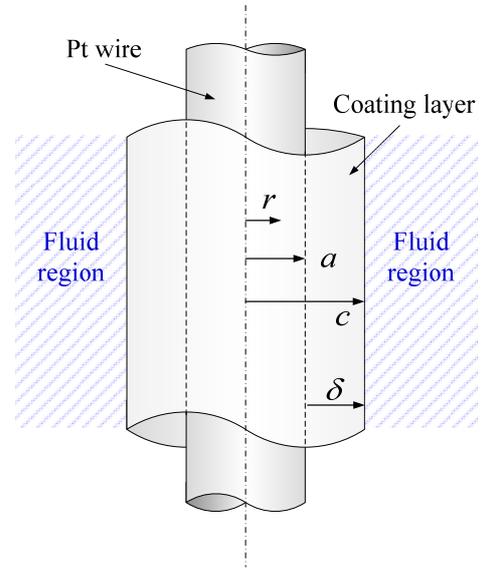


Fig. 1 Schematic diagram of insulation coated hot-wire

여기서,

$$A = \frac{2k_f}{k_c} \ln \frac{c}{a} + \frac{k_f}{2k_w}$$

$$B = \frac{1}{2k_f} \left[a^2 \left(\frac{k_c}{\alpha_c} - \frac{k_w}{\alpha_w} \right) + c^2 \left(\frac{k_f}{\alpha_f} - \frac{k_c}{\alpha_c} \right) \right]$$

$$C = \frac{a^2}{8} \left[\left(\frac{k_f - k_c}{k_w} \right) \left(\frac{1}{\alpha_w} - \frac{1}{\alpha_c} \right) + \frac{4}{\alpha_c} - \frac{2}{\alpha_w} \right]$$

$$+ \frac{c^2}{2} \left(\frac{1}{\alpha_f} - \frac{1}{\alpha_c} \right) + \frac{a^2}{k_c} \left(\frac{k_c}{\alpha_c} - \frac{k_w}{\alpha_w} \right) \ln \frac{c}{a}$$

$$+ \frac{1}{2k_f} \left[a^2 \left(\frac{k_c}{\alpha_c} - \frac{k_w}{\alpha_w} \right) + c^2 \left(\frac{k_f}{\alpha_f} - \frac{k_c}{\alpha_c} \right) \right] \ln \frac{4\alpha_f}{c^2 e^\gamma}$$

여기서, c 는 절연된 열선의 반경이고 하첨자 c 는 절연 코팅층을 말한다. 식 (4)를 자세히 살펴보면 식 (1)과 동일한 방식으로 시간에 따라 증가하는 항($f(t) = \ln(4\alpha_f t / c^2 e^\gamma)$)과 시간에 따라 감소하는 항($f(1/t) = (1/t)(B \cdot \ln t + C)$), 그리고 시간에 무관한 항($f(-) = A$)으로 나눌 수 있다. 따라서 절연된 열선을 사용한 경우에도 $f(1/t)$ 항들이 무시할 정도로 충분히 작다면 $\ln t$ 에 대한 미분을 통하여 식 (4)를 식 (3)과 같이 S 만의 함수로 열전도도를 표현해 줄 수 있다. Fig. 2는 식 (4)와 Table 1에 주어진 물성치를 바탕으로, 반경 $25\mu\text{m}$ 를 갖는 백금선에 대하여 여러 가지 코팅두께($\delta = 0-100\mu\text{m}$)에 따라 $\ln t - \Delta T$ 그래프를 그려본 것이다. 이 그래프를 살펴보면 절연코팅에 따른 영향이 측정 초기에

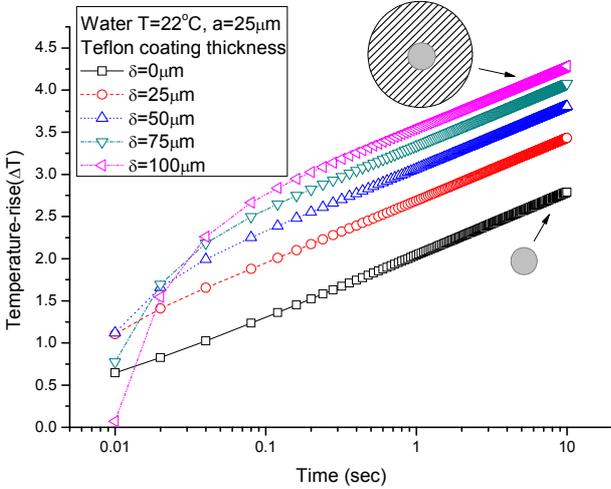


Fig. 2 $\Delta T - \ln t$ plot of Teflon coated Pt wire according to the various coating thickness

크게 발생하며 일정 시점이 지난 후에는 코팅 두께에 상관없이 일정한 기울기 S 를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 코팅 두께가 두꺼울수록 효과가 오래 지속되고, 코팅의 영향이 사라지는 특정 시점이 늦게 나타남을 알 수 있다. 이러한 특정시점을 정량적으로 파악하기 위하여 본 연구에서는, Yu 와 Choi⁽⁸⁾가 제시한 개념에 따라 오차항을 포함한 전체 해와 오차항을 갖지 않은 이상적인 해의 상대적 오차가 1% 정도가 되는 순간을 코팅 효과를 무시할 수 있는 임계시간(critical time)으로 정의해보았다. 이러한 정의에 따라 임계시간을 구하기 위한 식을 정리하면 다음과 같다.

$$e = \frac{|\Delta T_{w,full} - \Delta T_{w,ideal}|}{\Delta T_{w,ideal}} = \frac{\left[\frac{1}{t} (B \ln t^* + C) \right]}{\left[\ln \left(\frac{4\alpha_f t^*}{c^2 e^\gamma} \right) \right]} = 1\% \quad (5)$$

여기서 t^* 는 임계시간을 말한다. 따라서 절연된 열선을 사용한 비정상열선법에서 절연코팅의 영향을 제거해 주기 위해서는 선형구간의 초기시점을 임계시간 이후로 정해야 할 것이다. 식 (5)에서 식 (4)의 A 항을 고려하지 않은 이유는 A 항이 기울기 S 에 영향을 미치는 않는 Y 축의 절편값이기 때문이다. 식 (4)와 식 (5)를 바탕으로 선형구간의 초기시점을 결정하는데 영향을 미치는 중요한 인자들을 모두 정리하면 다음과 같다.

$$e \sim f(a, c, k_w, \alpha_w, k_f, \alpha_f, k_c, \alpha_c) \quad (6)$$

하지만 본 연구에서는 절연 코팅층의 영향만을 파

Table 1 Properties of water and insulation coatings

	k [W/mK]	α [$10^7 m^2/s$]
Water ⁽¹⁰⁾ (Temp.=22°C)	0.606	1.453
Pt wire ⁽⁸⁾	71.6	251
Teflon ⁽⁸⁾	0.25	1.08
Isonel ⁽¹¹⁾	0.2	1.43

악하기 위해 측정유체의 물성치를 물로 고정하고, 열선의 재질을 백금의 물성치로 고정하였다. 따라서 본 연구에서 최종적으로 고려한 중요인자들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$e \sim f(a, c, k_c, \alpha_c) \quad (7)$$

여기서 a 와 c 는 열선이 물리적으로 차지하는 공간의 크기를 말하며, k_c 와 α_c 는 절연물질의 물성치를 말한다.

3. 결과 및 토의

3.1 열선반경 및 코팅두께에 따른 영향

Fig. 3 은 식 (5)의 정의에 따라 다양한 열선 반경 (0 ~ 100 μm) 및 절연두께(0 ~ 50 μm)에 따라 임계시간을 계산한 결과값들이다. Fig. 3 을 살펴보면 금속 열선(wire radius)의 반경이 작을수록 그리고 절연 코팅(coating thickness)의 두께가 얇을수록 임계시간이 짧아짐을 알 수 있다. 다시 말해 열선 및 절연 코팅이 차지하는 물리적인 공간이 작을수록 절연 코팅에 의한 효과가 빨리 사라짐을 알 수 있다. 하지만 Yu 와 Choi⁽⁸⁾의 결론과 같이 임계시간을 일괄적으로 0.5 초로 볼 수 없었으며, 열선 반경 및 절연두께에 따라 임계시점이 달라짐을 확인 할 수 있었다.

3.2 절연 코팅의 물성치에 따른 영향

이번 절에서는 절연물질의 물성치가 열전도도 측정에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 이에 대한 영향을 파악하기 위하여 고정된 열선 반경 및 코팅 두께($a: 25\mu m, c: 100\mu m$)에서 절연물질의 열전도도(0.1 ~ 0.3W/mK)와 열확산계수($1 \sim 5 \times 10^{-7} m^2/s$)를 변화시켜가며 임계시간을 계산해보았다.

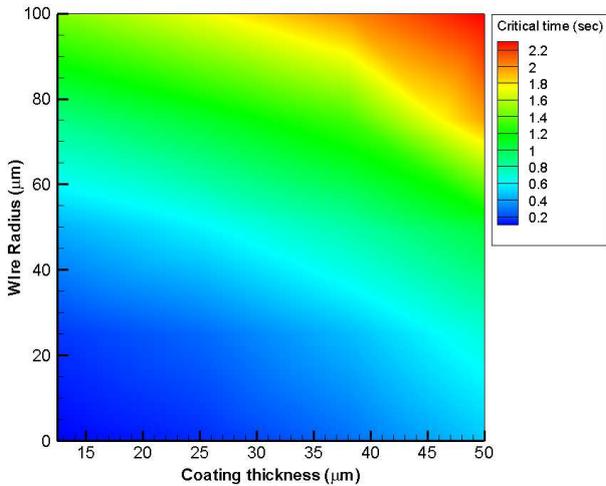


Fig. 3 Critical time for coating effects regarding wire radius and coating thickness

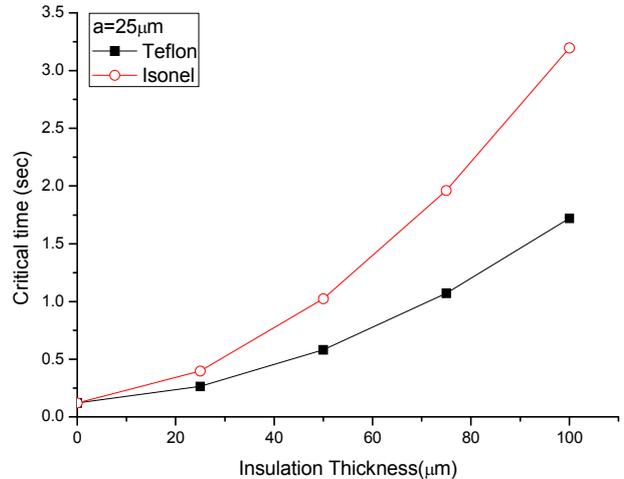


Fig. 5 Critical time for coating effects regarding coating materials

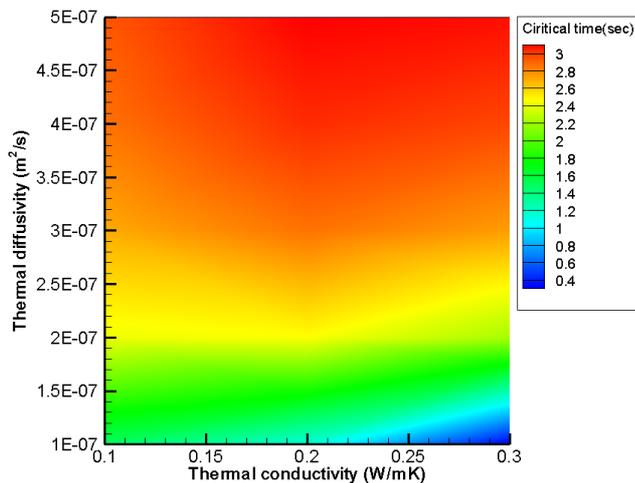


Fig. 4 Critical time for coating effects regarding properties of coating layer

Fig. 4 는 앞에서 언급한 절연물질의 물성치 범위에서 임계시간의 변화를 살펴본 그래프로서, 절연물질의 열전도도가 클수록 그리고 열확산계수가 작을수록 임계시간이 작아짐을 알 수 있다. 물리적으로 열전도도가 크고 열확산계수가 작다는 것은 열확산계수의 분모항인 열용량(밀도 x 비열)이 분자항의 열전도도 대비 훨씬 커야 한다는 의미가 된다. 이러한 내용을 바탕으로 실제 실험에서 자주 사용되는 절연 물질인 Teflon 과 Isonel 에 대하여, 다양한 절연코팅의 두께에 따른 임계시간을 계산해보았다. Fig. 5 는 정해진 열선 반경($a=25\mu\text{m}$)에서 다양한 코팅두께($0 \sim 100\mu\text{m}$)에 따라 임계시간을 계산해 본 것으로서, 계산 결과 모든 코팅두께에 대해서 Teflon 이 Isonel 보다 먼저 코팅에 의한

영향이 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Table 1 에서 보이는 바와 같이 Teflon 이 Isonel 보다 열전도도가 큰 반면, 열확산계수는 작기 때문으로서 Fig. 4 와 동일한 결론임을 알 수 있다. 따라서 동일한 크기의 열선 및 코팅두께에 있어서는 Isonel 보다 Teflon 을 절연물질로서 선택할 경우, 실험초기에 절연코팅에 의한 영향을 줄일 수 있을 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 절연된 열선을 이용한 비정상열선법에서 열선의 절연코팅이 선형구간의 초기시점에 미치는 영향을 이론적으로 연구해 보았다. 이를 위해 우선 절연된 열선의 온도상승에 관한 해석적 해에서 선형구간의 초기시점에 영향을 미치는 중요 인자들을 파악해 보았으며, 중요인자에는 열선의 반경크기(a) 및 절연된 열선반경크기(c), 절연물질의 열전도도(k_c), 열확산계수(a_c) 가 있음을 알 수 있었다. 또한 중요인자들의 영향이 무시할 만큼 작아지는 임계시간(critical time)을 정량적으로 정의하여, 각 인자별 경향성을 파악해 보았다. 이론적인 연구 결과, 열선의 반경 및 코팅의 두께가 작을수록 절연코팅의 영향이 빠르게 감소함을 알 수 있었다. 즉 절연된 열선이 물리적으로 차지하는 공간이 작을수록 절연코팅의 영향이 빠르게 사라짐을 알 수 있었다. 또한 열전도도가 크고 열확산계수가 작을수록 절연물질의 영향이 빠르게 사라짐을 확인하였는데, 이는 열전도도 대비 열용량(밀도 x 비열)이 클수록 절연코팅의 영향이 빨리

사라진다는 것을 의미한다. 마지막으로 임계시간은 열선 반경 및 절연두께, 절연물질의 물성치에 따라 크게 변하기 때문에 기존 문헌⁽⁸⁾에서와 같이 임계시간을 일괄적인 0.5 초로 설정할 수 없음을 확인하였다. 또한 본 연구에서 제시한 임계시간 이후에 선형구간의 초기시점을 선정한다면, 절연된 열선을 사용한 비정상열선법에서 절연코팅이 열전도도 측정오차에 미치는 영향을 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 본 연구에서는 열선의 절연코팅이 미치는 영향을 살펴보기 위해 선형구간의 초기시점에 대해서만 살펴보았으나, 실험에서는 실험 후반부의 자연대류에 대한 영향도 살펴보아야 할 것이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. (계약번호 UD120030ID)

참고문헌

- (1) Stalhane, B. and Pyk, S., 1931, "The New Method for Determining the Coefficients of Thermal Conductivity," *Technisk Tidskrift*, Vol. 61, p.389.
- (2) Wakeham, W. A., Nagashima, A., and Sengers, J. V., 1991, *Measurement of the Transport Properties of Fluids*, Blackwell Science, London, Chap. 7.
- (3) Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *Journal of Heat Transfer; Trans. of the ASME*, Vol. 121, No. 2, pp. 280-289.
- (4) Paul, G., Chopkar, M., Manna, I., Das, P. K., 2010, "Techniques for Measuring the Thermal Conductivity of Nanofluids: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No.7, pp.1913~1924.
- (5) Nagasaka, Y., Nagashima, A., 1981, "Absolute Measurement of the Thermal Conductivity of Electrically Conducting Liquids by the Transient Hot-Wire Method," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 14, No. 12, pp. 1435~1440.
- (6) Zhang, X., Gu, H., and Fujii, M., 2006, "Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids Containing Spherical and Cylindrical Nanoparticles," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100 No.4, pp. 044325.
- (7) Wong, K.-F. V., Kurma, T., 2008, "Transport Properties of Alumina Nanofluids," *Nanotechnology*, Vol. 19, No. 34, pp. 345702.
- (8) Yu, W. and Choi, S. U. S., 2006, "Influence of Insulation on Thermal Conductivity Measurement by Transient Hot-Wire Method," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 77, No. 7, pp. 076102.
- (9) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London.
- (10) Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., 2007, *Introduction to Heat Transfer*, 5th ed., John Wiley & Sons, New York.
- (11) Rusconi, R., Williams, W. C., Buongiorno, J., Piazza, R., and Hu, L.-W., 2007, "Numerical Analysis of Convective Instabilities in a Transient Short-Hot-Wire Setup for Measurement of Liquid Thermal Conductivity," *International Journal of Thermophysics*, Vol. 28, No. 4, pp. 1131~1146.