

유체에 잠겨있는 가는 열전대의 시간상수 측정

박 상 진* · 송 치 성*

Time Constant of a Fine-Wire Thermocouple
Immersed to Fluids

S.J.Park · C.S.Song

Key words : Thermocouple (열전대), Time-constant (시간상수), Unsteady flow (비정상유동),
Internal heating technique (내부가열법)

Abstract

A new measuring method is suggested to determine the time constant of a thermocouple wire to be applied for the measurement of the true fluid temperatures in varying flow states. Based on the techniques of internal heating which are commonly used to measure mean time constants, we extend the existing method to measure instantaneous time constants continuously. A method of measurement and analysis is presented and verified experimentally.

기호설명

A_s	표면적 [m^2]
c	비열 [J/kgK]
D	직경 [m]
h	대류 열전달계수 [W/m^2K]
I	전류 [A] k 열전도율 [W/mK]
L	길이 [m]
r	단위길이당 전기저항 [Ω/m]
T	온도 [$^{\circ}C$]
t	시간 [sec]

u	유속 [m/s]
V	부피 [m^3]
x	축방향 좌표 [m].

희랍문자

α	열확산계수 [m^2/sec]
θ	무차원온도, [$\theta = (T - T_{\infty}) / (T_R - T_{\infty})$]
ρ	밀도 [kg/m^3]
τ	시간상수 [sec].

* 한국기계연구원 산업설비연구부 (원고접수일 : 96년12월)

하첨자

- e 평형상태
- i 초기조건
- j 열전대의 정선
- R 기준점
- ∞ 주위조건.

1. 서론

열전대는 평균온도의 측정에 주로 사용되어 왔으나 시간에 대하여 변화하는 유체온도를 측정할 경우에는 열전대의 유한한 열용량으로 인하여 고주파 변동성분의 진폭이 감소하는 현상이 나타나게 되므로 근래에 와서는 Laser 등을 이용한 광학적 방법을 많이 사용하고 있다. 그러나 설치의 용이성과 저렴한 비용으로 인하여 온도변화의 특성시간이 비교적 긴 경우에는 열전대로 온도를 측정하고 이를 다시 보정하여 사용하는 방식을 취하는 경우도 빈번하다. 모든 프루브 (probe) 는 유한한 질량을 가지고 있기 때문에 자신의 상태를 바꾸기 위해서는 유한한 시간이 필요한데 열전대의 경우에는 열용량에 의한 효과를 시간상수로 특성화시킬 수 있다. 대부분의 열전대²⁾를 이용한 비정상온도의 측정에서 평균 시간상수만을 취하여 열관성효과를 보상에 주고있다(1),(2),(3). 그러나 열전대 주위를 둘러싸고 있는 유체의 물리적 상태가 변하면 열전대의 시간상수도 따라서 달라지게 된다. 특히, 열전대 주위의 유속이 시간에 따라 변하면 시간상수가 유속의 직접적인 영향을 받으므로 시간상수 역시 시간의 함수가 된다. 따라서 비정상 온도 측정의 경우에는 시간에 따른 시간상수의 변화를 고려하여야 한다.

시간상수를 측정하는 기법은 반응유동이나 난류화염의 온도측정 등의 연소공학분야에서 많이 개발되어 왔다. Lockwood 와 Moneib⁴⁾은 새로운 on-line pulsing 기법을 개발하였는데, 이는 열전대에 단속적으로 교류를 흘려 그 사이사이의 열전대가 냉각 또는 가열되는 과정을 측정하여 일정한 온도까지 도달하는 시간으로부터 시간상수를 얻는 방법이다. 이 방법의 장점은 Ballentyne 과

Moss⁵⁾가 채택하였던 일반적인 저항가열법과는 달리 열전대의 물성과 기하학적 형상을 알 필요가 없다는 것이다. 그러나 주위의 조건이 변하지 않는 상태에서 열전대의 온도가 상승 또는 하강하는 시간을 시간상수로 취하므로 주위의 유동조건이 변하는 경우에는 적용이 힘들고 준정상상태가정의 도입이 가능한 경우라도 연속적인 측정이 불가능하다. 이것은 내부가열법이 가지는 일반적인 한계이기도 하다. 한편, Cambray⁶⁾는 한곳에 시간상수가 서로 다른 두개의 열전대를 삽입하여 시간의 함수로 시간상수를 측정하는 새로운 방법을 고안하였다. 이는 두 열전대의 시간상수의 비가 주위 환경변화에 상관없이 일정하다는 가정에 기초한 것인데, 추가의 열전대 외에 부가적인 장치가 필요없고 유체의 온도측정과 시간상수의 측정을 동시에 수행할 수 있다. 그러나 시간상수의 비가 측정도중 변할 수 있고 한곳에 두개의 열전대를 설치하는 것이 현실적으로 어렵다. 특히, 이방법은 측정된 온도의 시간변화율이 0 근처인 곳에서 매우 불안정해지는 단점을 가지고 있다.

본연구에서는 내부가열법에 기초한 시간상수 측정법을 개발하였다. 기본 개념은 전류로 전열선을 가열하고 그후의 냉각과정을 측정하는 일반적인 저항가열법과 비슷하지만 그후의 시간상수를 얻는 과정은 기존의 방법과는 달리 냉각하는데 걸리는 시간이 아닌 하강하는 열전대온도의 시간변화율로부터 시간상수를 계산하였다. 이 방법은 변화하는 시간상수의 연속적인 측정이 가능하고 주위의 환경변화에 민감하기 때문에 왕복동 기관에서 자주 나타나는 맥동 또는 왕복유동과 같은 비정상유동에서의 시간상수 측정에 강점을 가지고 있다.

2. 기초이론

유체에 잠겨 있는 직경이 매우 작은 가는 열전대는 집중용량법으로 해석할 수 있다. 이때, 열전대의 열균형은 다음과 같이 주어진다.

$$T_{\infty} - T_j = \tau (dT_j/dt) \tag{1}$$

여기서, T_j 는 접합부의 온도이고 T_∞ 는 주위의 유체온도이다. 유체온도를 측정하는 경우 측정된 온도는 접합부의 온도를 의미한다. 이때 열전대의 특성 시간상수 τ 는

$$\tau = \rho V_c / hA_s \quad (2)$$

로 나타낼 수 있는데, ρ, c, A_s, V 는 각각 열전대의 밀도, 비열 및 유효 표면적과 체적이고, h 는 대류 열전달계수이다. 만일 열전대와 유체의 물성이 온도에 관계없이 일정하다면, 시간상수는 h 만의 함수가 된다. 또 열전달계수 h 는 주위 유동조건에 의해 결정되므로 결국 시간상수는 유동조건에 따라 정해지게 된다.

식(1)로부터, T_j 와 T_∞ 를 안다면 시간상수는

$$\tau = (T_\infty - T_j) / (dT_j / dt) \quad (3)$$

로 구할 수 있다. 그러나 측정하고자하는 유체의 온도가 시간에 따라 변하는 경우에는 T_j 만 측정할 수 있을 뿐 T_∞ 는 여전히 알 수 없으므로, 위의 식(3)으로 시간상수를 구할 수 없다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 열전대와 주위의 유체가 정해졌을 때 시간상수가 유동조건만의 함수라는 가정을 인정한다면, 유동의 조건은 같고 유체의 온도가 기지의 값으로 일정하게 유지되고 있는 경우의 시간상수가 유체의 온도가 변화하는 경우와 같은 값을 가지므로 온도가 일정한 경우의 측정을 통하여 온도가 변할 때의 시간상수를 구할 수 있다.

본 연구에서 도입한 기법에서는 주위유체의 온도를 고정시킨 상태에서 열전대에 전류를 흘려 한번 가열한 후 냉각과정동안의 온도를 측정하고 그로부터 시간변화율을 계산하여 식(3)의 관계로부터 시간상수를 구한다. 이렇게 하므로써 시간상수를 시간의 함수로 측정할 수 있고 내부가열법의 가장 큰 단점을 극복할 수 있다. 가열이 끝난 후에 열전대로 공급되는 열이 없으므로 T_j 의 시간변화율은 열전대가 T_∞ 에 도달할 때까지 항상 0보다 작은 값을 가지게 되어 Cambray⁶⁾의 방법에 비하여 보다 안정된 결과를 얻을 수 있다. 이와 같은 장점에 도 불구하고 본 기법은 몇 가지 단점이 있다. 즉 화염이나 반응유동과 같이 유동이 주위의 온도에

의하여 발생 또는 영향을 받는 경우에는 적용하기가 어렵고 한번 가열 후의 냉각시간이 한정되어 있으므로 연속 측정이 가능한 시간이 비교적 짧다. 두번째 단점은 연속된 여러번의 측정을 통하여 보완할 수 있다.

3. 1차원 해석 및 방법의 검증

직경이 수십 μm 정도인 가는 열전대의 경우, 직경이 매우 작기 때문에 가열 및 냉각과정을 길이 방향만을 고려한 비정상 1차원 모델링을 통하여 해석할 수 있다. 본 연구의 해석 모델은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 열전대가 서로 다른 두 금속으로 이루어져있고 용접부의 크기가 일반적으로 선의 직경보다 크므로 열전대의 물성치와 기하학적 형상은 길이방향 좌표의 함수로 주어진다. 용접부는 두 금속이 혼합되지 않고 경계면에서 맞붙어 있는 것으로 가정하였다.

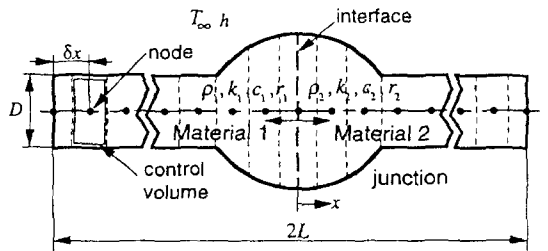


Fig.1 Analysis model for a welded thermocouple

열전대와 외부의 복사에 의한 손실을 무시하면 전류에 의한 열발생과 선을 통해 전도되는 열은 내부에너지의 증가 및 표면에서 대류에 의해 외기로 전달되는 열량과 균형을 이룬다. 따라서 지배방정식은

$$\rho c (\partial T / \partial t) = k (\partial^2 T / \partial x^2) + 4/D h (T_\infty - T) + (4/\pi D^2) I^2 \phi \quad (4a)$$

$$T |_{x=0} = T_i, \quad \partial T / \partial x |_{x=0, L} = 0 \quad (4b)$$

로 주어진다. 여기서, k 는 열선의 열전도계수, D 는 직경, I 는 열전대에 가해주는 전류이고 ϕ 는

단위길이당의 전기저항이다. 식(4)의 해는 열전대의 물성과 열전달계수만 주어지면 수치해석적 방법으로 비교적 손쉽게 구할 수 있다. 본 연구에서는 암시적 유한차분법을 사용하였다. 그리고 열전달계수 h 는 주위유체의 유속과 물성이 주어지면 Collins 와 Williams⁷가 제안한 다음의 상관식으로 계산된다.

$$h = k/D[0.24 + 0.56(uD/\nu)^{0.45}] \quad (5)$$

여기서, u 는 유체의 속력이고 ν 는 동점성 계수이다. 이 식은 정상상태 열전달에 적용하기 위하여 제안된 것이지만, 저항가열을 받는 선의 경우에도 만족할 만한 결과를 보이는 것으로 알려져 있다.^{8,9}

우선 이 해석을 통하여 정체공기에서의 구리와 콘스탄탄으로 구성된 T 형 열전대의 온도변화를 구하였다. T 형 열전대는 주로 상온을 포함한 -100~240℃ 정도에서 가장 많이 사용하는 열전대이다. 경계면에서의 물성치는 산술평균한 값으로 주었고, 선의 직경은 25 μ m 이다. Fig.2 는 T_{∞} 가 0 ℃ 로 일정한 경우의 열전대 정선과 인접한 리드선의 온도변화를 나타내고 있다. 열전대에 가해준 전압은 12 V 이고 가열시간은 15 ms 이다.

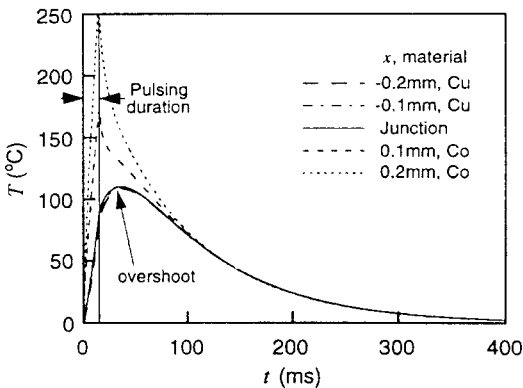


Fig.2 Temperature history at various positions near the thermocouple junction in an isothermal stagnant air - the temperature of -0.2mm Cu ; -0.1mm; and the junction overlap and they are not distinguished in the figure(analysis)

그림에 나타난 바와 같이 금속의 종류에 따라 가열하는 동안과 가열이 끝난 직후의 양상이 확연히 다르다. 콘스탄탄의 경우에는 전류가 흐르는 동안 온도가 급속하게 상승하여 가열이 끝나면 바로 온도가 떨어지기 시작한다. 반면에 구리선은 전류가 흐르는 동안의 온도 상승이 완만하고 가열이 끝난후에도 잠시동안 온도가 계속 상승하며 (overshoot) 위치에 관계없이 온도가 거의 같음을 볼 수 있다. 이는 두 물질의 물성치가 매우 크기 때문인데, 특히 비저항은 콘스탄탄이 구리에 비해 30배 정도 크고 열전도계수는 구리가 약 16배 더 크다. 따라서 전류로 가열하는 동안 콘스탄탄의 온도상승이 구리에 비해 훨씬 더 크고 가열이 끝난 후에도 두 금속간의 온도차로 인하여 콘스탄탄에서 구리쪽으로 열이 전도되어 구리의 온도가 계속 상승하게 된다. 또 구리의 열전도계수가 크므로 구리선의 온도는 길이방향으로 거의 일정하게 유지 된다. 사실 열전대로 측정된 온도는 정선 (두 금속의 경계면) 의 온도이고 정선의 온도변화에도 오버슈트 현상이 나타나므로 정선온도의 변화로부터 시간상수를 계산하는 것은 매우 어려운 일이다. Lockwood 와 Moneib⁴)도 본 연구에서와 같이 전기가열법을 채택하였지만 그들이 시험한 열전대가 S 형 (platinum / platinum - 10% rhodium) 이기 때문에 오버슈트가 뚜렷하게 나타나지 않았다. S 형은 고온가스의 온도측정에 많이 사용되는 열전대로서 두 금속의 물성이 서로 비슷하기 때문에 오버슈트가 잘 발생하지 않는다¹⁰. 또 가열을 본연구에 비하여 매우 오랫동안 한 것도 오버슈트를 줄인 원인으로 생각된다. 그러나 과도하게 긴 가열시간은 오버슈트를 줄일 수 있지만 다른 문제들을 일으키는데 이는 다음 장에서 논의하였다. 한편 T 형 열전대처럼 오버슈트가 뚜렷하게 나타나는 경우에는 일반적인 내부가열법에서와 같이 냉각하는데 걸리는 시간으로부터 시간상수를 얻는 것은 큰 오차를 수반할 수 있다. 저항가열법을 T 형 열전대와 같이 오버슈트가 심하게 발생하는 경우에도 적용할 수 있는가를 알아보기 위하여, Fig. 2 에 나타난 정선온도의 변화율을 계산하고 식(3)의 관계로 시간상수를 구하여 Fig. 3 에 도시하였다. 또 초기온도를 100 ℃로 균일하게 준다

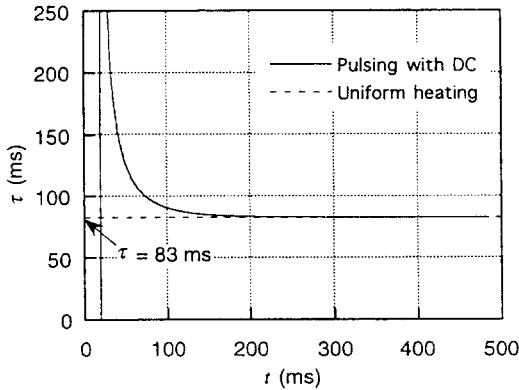


Fig.3 Comparison of the time constant calculated from time derivative of the junction temperature after pulsing with that in case of uniform initial temperature and no pulsing(analysis)

음, 가열하지 않고 바로 냉각하는 경우의 시간상수도 같은 방법으로 구하여 함께 나타내었다. 후자의 값이 이상적인 실제 시간상수에 해당하는 값으로 레이저 가열법 등의 외부가열법으로 측정할 때의 상황과 비슷한 경우이다.

오버슈트가 나타나지 않는다면 열전달계수가 일정한 경우이므로 시간에 관계없이 시간상수가 일정하고 두 경우의 값이 일치하겠지만 그림에서 나타나듯이 전기 가열을 한 경우는 초기 시간상수의 거동이 매우 현실적이지 못하다. 그렇지만 시간이 갈수록 시간상수가 참값에 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 이 그림과 Fig. 2 를 비교해 보면 열전대의 온도분포가 평형상태, 즉, 양 금속간의 온도차가 작아질 때 전류로 가열한 경우의 시간상수가 균일하게 가열한 경우의 값에 근접하기 시작함을 확인할 수 있다. 이는 오버슈트가 나타나더라도 평형에 도달하는데 걸리는 시간 이후에 계산을 수행하면 식(3)으로 시간상수를 구할 수 있음을 의미한다. 평형상태에 도달하는데 걸리는 시간은 열전대의 종류와 열전달계수에 따라 다르다. 대류에 의한 열손실을 무시하면 평형에 도달하는 시간 t_e 는 물성이 다른 두개의 반무한 고체가 맞붙어 있고 초기온도가 각각 다르게 주어진 경우의 해석해¹¹⁾를 이용하면 대략적인 추정이 가능하다. 열전대 정선 근처의 두 물질의 온도차가 초기 온도차의

10 %가 될 때까지 걸리는 시간을 t_e 로 정의하면, t_e 는 대략

$$t_e \sim (2 \times 10^{-9} / \pi) [(k_2 + k_1) / (k_2 \sqrt{\alpha_1} + k_1 \sqrt{\alpha_2})]^2 \quad (6)$$

이다. 위의 식에서 k 와 α 는 각 물질의 열전도도와 열확산계수인데, 이는 t_e 가 주로 두 물질의 열전달물성에 의하여 결정됨을 보여주고 있다. 그러나 실제 경우에는 온도가 높을수록 대류에 의한 손실이 크므로 t_e 가 식(6)으로 예측한 값보다 작아진다. 다시 말해, 열전달계수가 클수록 더 빨리 평형상태에 도달하게 된다. 식(6)을 이용하면 t_e 가 T형 열전대의 경우 70 ms 정도이다. 이 결과를 Fig. 2 와 비교해 보면 식(6)으로 어느 정도 예측이 가능함을 알 수 있다. 한편, S형의 경우는 약 40 ms 이다. 비정상유동 즉, 열전달계수가 시간에 대해 변하는 경우에서 본 기법의 적용 가능성을 살펴보기 위하여, 주위온도가 고정되어 있는 왕복유동에서의 시간상수를 해석을 통하여 구하였다. 왕복유동에서는 유속이 주기적으로 변하기 때문에 시간상수 역시 시간에 대한 주기함수로 나타난다. 그러나 왕복주기가 한번의 가열로 측정할 수 있는 시간보다 길 경우에는 한번의 측정으로 한 주기동안의 시간상수의 변화를 측정하지 못한다. 따라서 각각 다른 위상각에서 수행되는 여러번의 계산을 반복하여 각 결과를 다시 정리해 주어야 한다. Fig. 4 는 10번의 계산을 통해 얻은 유속이 사인함

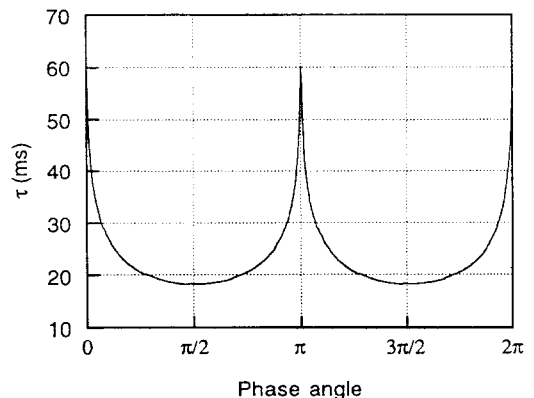


Fig.4 Variation of instantaneous time constant over a period in an oscillating flow of 120 rpm (analysis)

수로 주어지고 왕복주파수가 120 rpm (2 Hz) 인 경우의 한주기 동안의 시간상수이다. 열전달계수는 식(5)로 주었고, 시간상수는 식(3)을 이용하여 구하였다. 유속이 0이 될 때 시간상수가 최대값을 가지고 반대로 유속이 최대일 때 최소값을 가짐을 볼 수 있다.

한편, 본 기법의 정당성을 입증하기 위해서는 주위의 온도가 일정할 때 내부가열법으로 구한 Fig. 4의 시간상수를 이용하면, 유동조건은 같고 주위의 온도가 변하는 경우에서의 정선온도로부터 실제 유체온도변화를 구할 수 있는지를 살펴 보아야 한다. Fig. 5는 임의의 유체온도변화를 주었을 때 해석을 통하여 구한 열전대 정선의 온도변화를 나타내고 있다. 유동조건은 앞서 시간상수를 구할 때와 동일하다. 그림에서 실선은 주어진 임의의 주위유체의 온도이고, 점선은 1차원 해석에서 구한 정선의 온도로 정선의 온도가 유체의 온도를 열전대의 열관성으로 인하여 제대로 따라가지 못하고 있다. 그리고 그림에서 원으로 나타낸 것이 Fig. 4의 시간상수와 식(1)의 관계를 이용하여 정선온도에서 열관성효과를 보상해 준 것이다.

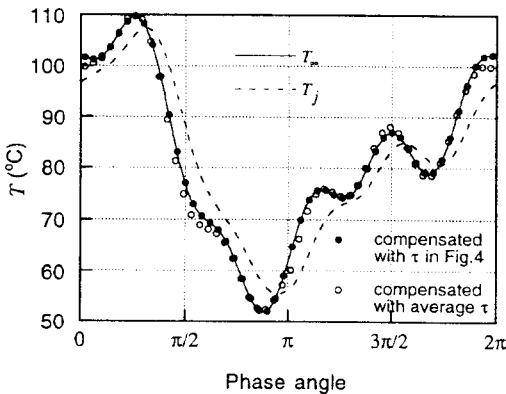


Fig.5 Comparison of the surrounding temperature with the compensated result of junction temperature by using the time constant in Fig.4 under same flow condition as Fig.4 (analysis)

그림에서 보드시피 실제 유체온도와 보상해준 값이 매우 잘 일치하고 있다. 비록 시간상수를 주위유체의 온도를 일정하게 유지시키고 열전대가 불균일하게 가열되는 경우에서 구하였지만, 유체

의 온도가 시간에 따라 변하는 경우에 적용하였을 때에도 만족할 만한 결과를 보이고 있다. 이는 본 연구에서 도입한 가정과 방법들이 합리적이라는 것을 의미한다. 한편, 해석을 통해 얻은 또다른 흥미로운 결과는 유동조건이 동일한 경우, 열전대의 시간상수가 정선의 크기보다는 선 굵기의 영향을 훨씬 많이 받는다는 것이다. 유속이 $u=1$ m/s로 주어졌을 때 열전대의 굵기 및 정선의 크기에 따른 시간상수의 변화를 해석을 통해 구하면 Fig. 6과 같다.

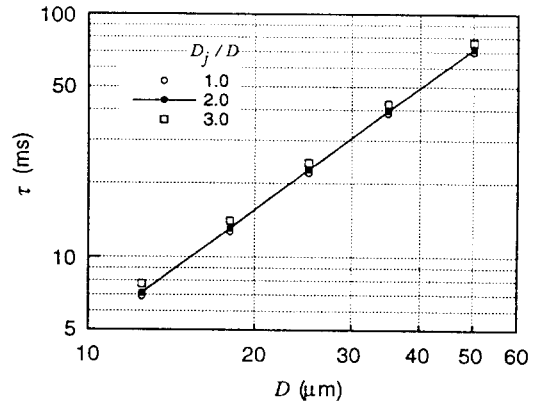


Fig.6 Effect of the wire diameter and the junction size on the time constant of T-type thermocouple in air stream of $u=1$ m/sec (analysis)

선의 직경에 대한 정선 크기의 비가 일정하면 시간상수는 직경 D 의 5/3 승에 비례하는 것으로 나타났다. 이는 열전대를 해석할 때 통상 정선만을 고려하는데, 정선에 연결된 리드선들의 열용량도 함께 고려되어야 한다는 것을 의미한다.

4. 실험

4.1 측정장치

본 연구에서 사용한 회로와 작동순서를 Fig. 7에 개략적으로 나타내었다. 실험에서 사용한 열전대 역시 $25 \mu\text{m}$ T-형 열전대이고, 열전대의 출력은 IBM PC에 장착된 증폭기가 내장된 A/D 변환기로 측정하였다. 가열전류는 전압을 조절할 수

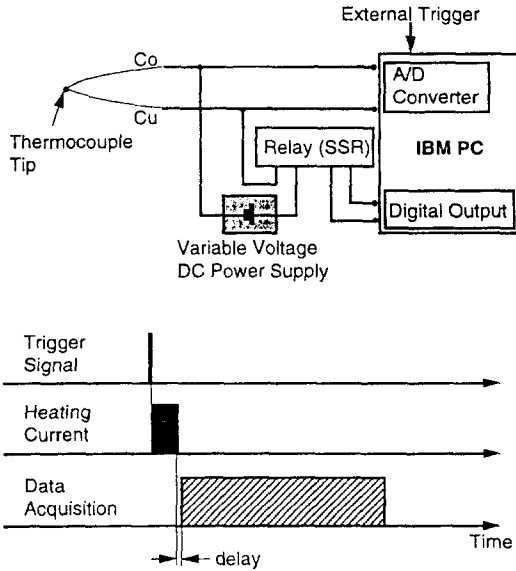


Fig.7 Schematic diagram of the circuit and operating sequence in this work

있는 직류전원으로 공급하고 PC에서 나오는 디지털 신호로 구동되는 SSR (Solid State Relay) 에 의하여 On/Off 조절된다. 가열전류와 데이터 획득은 왕복유동에서의 측정시에는 크랭크축에 부착된 로터리 엔코더에서 나오는 신호로 외부 트리거링된다. 트리거 신호가 들어오면 디지털 신호가 SSR을 접속시켜 정해진 시간동안 열전대에 전류를 흘려주고 난후 A/D 변환기를 통해 온도를 측정한다. 릴레이의 채터링 잡음때문에 전류를 흘려준 다음 수 밀리초 (1-5ms) 의 지연시간을 두고 A/D 변환기로 온도를 측정하였다. Lockwood 와 Moneib⁴⁾와 같이 교류로 가열하는 경우에는 채터링 잡음은 줄어들으나 가열전류와 온도 시그널을 분리하기가 힘들고 장치가 복잡해지는 단점이 있다. A/D 변환기는 가열시 포화상태로 유지되고 측정속도는 1 kHz 이다.

4.2 정체공기에서의 시간상수 측정

순간 시간상수를 측정하기 전에 정체공기 내에서의 열전대의 시간상수를 측정하였다. 열전대에 가해주는 전압과 공급시간이 다른 세가지 경우의 정선온도 변화를 Fig. 8 에 도시하였다. 앞서의 해석에서 예측한 대로 초기에 오버슈트가 나타나고

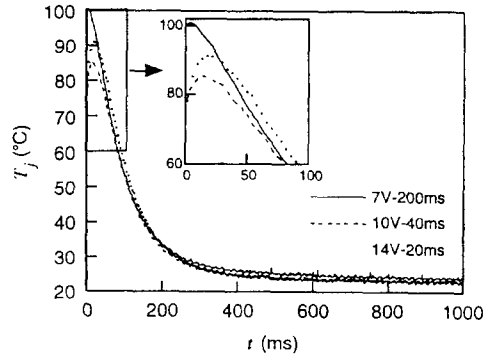


Fig.8 Temperature variations of the thermocouple junction in a stagnant air after pulsing in three cases of voltage and duration of pulsing (experiment)

있는데, 가열시간이 짧을 수록 오버슈트가 크게 나타났다. 이는 가열시간이 길수록, 가열되는 동안 축방향 열확산이 상대적으로 많이 진행되기 때문이다.

그러므로 가열시간을 충분히 길게 하는 것이 오버슈트의 감소 측면에서 유리한 것으로 보이나 기간이 너무 길어지게 되면 정선의 온도가 평형에 도달한 후에도 온도가 진동하는 현상이 자주 나타난다. 이 현상은 Lockwood 와 Moneib⁴⁾의 결과에서도 관찰되고 있다. 또한 오랫동안 가열할 경우 시간상수가 더 크게 측정되는 경향이 있다. 이러한 현상들은 보통 반응속도를 높이기 위하여 가는 열전대를 사용하더라도 정선 부근만 가는 선을 사용하고 나머지 부분은 이보다 굵은 선으로 연결해 주기 때문에, 가는 열전대 선에 연결된 굵은 선에 저장되었다가 방출되는 열에 의한 것으로 판단된다. 해석에서와 같이 오버슈트의 영향이 일정한 시간이 경과하면 소멸하는 지를 확인하기 위하여 Fig. 8 의 정선온도 변화 중 60 ms 이후의 결과를 다음의 식(6)을 이용하여 무차원화한다음 Fig. 9 에 나타내었다.

$$\theta = (T - T_{\infty}) / (T_R - T_{\infty}) \quad (6)$$

여기서 TR은 무차원화를 시작한 점의 온도이다. 초기에 오버슈트가 있음에도 불구하고 Fig. 9 의 구간에서는 열전대의 온도가 세 경우 모두 지수함수적으로 같은 기울기를 가지고 감소하고 있

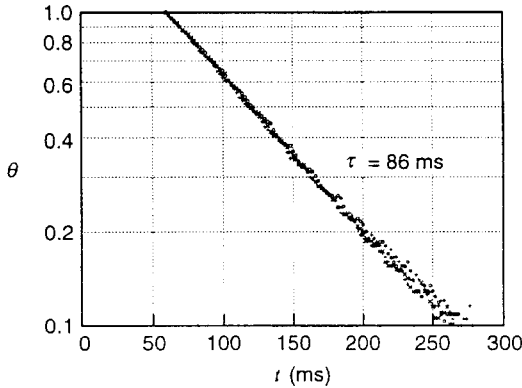


Fig.9 Normalized temperature variation of Fig.8 (experiment)

음을 보여주고 있다.

이 그림에서 기울기가 곧 시간상수를 의미하는데, 실험결과로부터 얻은 시간상수는 86 ms 이다. 이는 S-형 열전대에 비하여 약 2-3배 정도 큰 값이다. 구리나 콘스탄탄의 비열이 백금에 비하여 2-3배 크기 때문에 T-형 열전대의 열관성이 더 크고 따라서 시간상수도 크게 측정된다. 한편, Fig. 3 에 나타낸 앞서의 해석에서 구한 정체공기 내에서의 시간상수와 비교해보면 두 값이 비슷함을 알 수 있다. 본 연구에서 도입한 해석 모델과 가정이 실제 상황을 비교적 잘 묘사할 수 있고 비록 간단한 1차원 해석이지만 정량적인 이용도 가능함을 보여주고 있다.

4.3 왕복유동에서의 순간 시간상수 측정

본 연구에서 도입한 방법을 이용하여 원관 내의 왕복유동하는 유체에 잠겨 있는 열전대의 순간 시간상수를 측정하였다. 왕복유동은 원관의 양단에 있는 실린더로 구동된다. 작동유체는 상압의 공기이고, 실린더의 행정체적은 124 cc 이다. 시간상수가 시간에 대하여 주기적으로 변하므로 측정은 한 주기동안만 수행하면 되지만 앞장에서도 언급하였듯이 한번의 가열로 측정할 수 있는 시간이 한정되어 있기 때문에 한주기를 여러 구간으로 나누어 각 구간을 독립된 주기에서 측정하여 이를 다시 한 주기에 정리하는 방식을 취하였다. 본 실험에서는

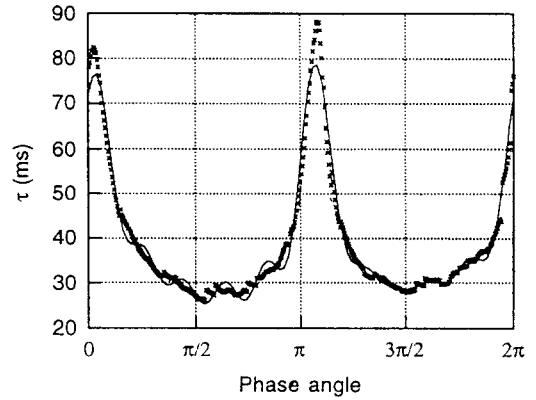


Fig.10 Instantaneous time constant of 25 μ m T-type thermocouple over a period in an oscillating flow of 139rpm (experiment)

한 주기를 10 개의 구간으로 나누어서 실험하였다. 시간상수 측정은 다른 경우와 마찬가지로 주위 온도를 일정하게 유지한 상태에서 행하였다.

Figure 10 은 왕복주파수가 139 rpm (2.32 Hz) 이고 원관의 내경이 24.4 mm 인 경우의 결과이다. 열전대는 원관의 중앙에 위치하고 있고 왕복유동을 발생시키는 구동 피스톤의 속도는 사인 함수와 비슷한 형태이다. 열전대 정선온도의 시간변화율은 각 지점 근처를 값을 이용하여 3차로 곡선 맞춤한 후 이를 미분하여 구하였다. 또 오버슈트의 영향을 없애기 위하여 가열 후 약 35 ms 이후의 데이터만을 취하였고 유체의 온도는 가열 후 충분한 시간 (400ms) 이 흐른 후에 측정한 열전대의 온도를 평균하여 구하였다. 그림에서 마크로 표시한 것은 실험에서 직접 측정한 시간상수이고 실선은 이를 Fourier 급수를 이용하여 10차 조화 성분까지 곡선맞춘 것이다. 시간상수가 유체의 속도가 아닌 속력에 의하여 결정되므로 해석에서와 마찬가지로 한주기동안 시간상수가 두번의 피크를 가지고 전체적인 경향도 Fig. 4 에 나타낸 해석결과와 매우 흡사하다. 그러나 피크가 나타나는 위상각이 정확하게 0 또는 π 가 아닌 그보다 약간 뒤에서 나타나고 또 두 피크의 크기도 조금 차이를 볼 수 있다. 이것은 왕복유동의 경우 왕복주파수가 빨라지게 되면 벽면 근처와 코어 부근의 유속간에 위상차가 나타나기 때문으로¹²⁾ 관 중심부

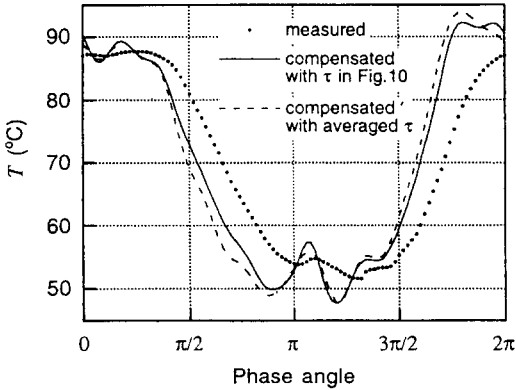


Fig.11 Measured temperature of an oscillating flow and the result of calibration by using the time constant in Fig.10(experiment)

의 위상이 늦어지므로 피크가 나타나는 위상이 조금씩 지연되는 것이다. 또 실험에 사용된 실린더가 크랭크 방식이므로 피스톤의 움직임이 정확한 사인 함수를 이루지 못하게 되고 따라서 시간상수가 좌우대칭에서 약간 어긋나게 된다. 시간상수를 측정할 때와 꼭 같은 유동조건에서 유체의 온도가 주기적으로 변화할 때의 열전대의 온도를 측정하고 이를 다시 앞서 측정한 시간상수를 이용하여 보정하였다. Figure 11에서 원점으로 표시한 것이 측정된 온도이고 실선으로 나타낸 것이 식(1)의 관계로부터 보정한 유체의 온도이다.

5. 결 론

비정상유동에 잠겨있는 열전대의 순간 시간상수를 측정하는 방법을 개발하고 이를 이용하여 정체공기와 왕복유동에서 열전대의 시간상수를 측정하였다. 또 일반적인 내부가열법에 의한 열전대의 열적거동을 알아볼 수 있는 비교적 간단한 해석방법을 제시하였다. 기본적인 원리는 열전대를 인위적으로 가열한 후 냉각시키는 일반적인 저항가열법과 같지만 시간상수를 계산하는 방법은 기존의 방법과는 달리 열전대로 측정된 온도의 시간 변화율로부터 직접 계산하는 방식을 취하였다. 열전대를 전류로 가열하는 경우에 나타나는 오버슈트현상을 해석을 통하여 규명하였고 가열후 열

전대가 평형에 도달한 이후에 시간상수를 측정하면 이를 해결할 수 있음을 보였다. 한편, 본 연구에서 제시한 방법은 순간 시간상수를 연속적으로 측정할 수 있지만 유체의 유속이 온도장과 서로 분리될 수 있는 경우에만 적용할 수 있다는 한계를 가지고 있다. 따라서 화염온도나 반응유동의 온도를 측정하는 경우에는 적합하지 않다. 본 기법은 맥동유동이나 왕복유동과 같이 주기적 비정상유동에 강점을 가지고 있다. 해석에서 얻은 흥미로운 결과는 열전대의 시간상수가 정선의 크기보다는 선의 굵기에 훨씬 민감하다는 것이다. 따라서 열전대의 반응속도를 높이기 위해서는 가는 열전대 선을 선택하는 것이 중요하다. 또 열전대를 모델링할 때 정선의 열관성 뿐 아니라 리드선의 열관성도 고려해야 한다.

참고문헌

- (1) Katsuki, M., Mizutani, Y., and Matsumoto, Y., 1987, "An Improved Thermocouple Technique for Measurement of Fluctuating Temperatures in Flames," *Combustion and Flame*, Vol.67, pp.27 - 36.
- (2) Talby, R., Anslmet, F. and Fulachier, L., 1990, "Temperature Fluctuation Measurements with Fine Thermocouples," *Experiments in Fluids*, Vol.9, pp.115 - 118.
- (3) Tanaka, M., Yamashita, I. and Chisaka, F., 1990, "Flow and Heat Transfer Characteristics of the Stirling Engine Regenerator in an Oscillating Flow," *JSME Int'l Journal, Series II*, Vol.33, No.2, pp.283 - 289.
- (4) Lockwood, F. C. and Moneib, H. A., 1981, "A New On - Line Pulsing Technique for Response Measurements of Thermocouple Wires," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.26, pp.177 - 181.
- (5) Ballantyne, A. and Moss, J. B., 1977, "Fine Wire Thermocouple Measurements of Fluctuating Temperature," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.17, pp.63 - 72.
- (6) Cambray, P., 1986, "Measuring Thermocouple Time Constants: A New Method," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.45, pp.221 - 224.

- (7) Collis, D. C. and Williams, N. J., 1959, "Two - Dimensional Convection From Heated Wires at low reynolds Numbers," J. Fluid Mech., Vol.6, pp.357 - 384.
- (8) Bradbury, L. J. S. and Castro, I. P., 1971, "A Pulsed - Wire Technique for Velocity Measurements in highly Turbulent Flows," J. Fluid Mech., Vol.49, pp.657 - 691.
- (9) Mathioulakis, E., Grignon, M., and Poloniecki, J. G., 1994, "A Pulsed - Wire Technique for Velocity and Temperature measurements in Natural Convection flows," Experiments in Fluids, Vol.18, pp.82 - 86.
- (10) K., 1987, Handbook of Thermodynamic tables and Charts, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C., Chap.1.
- (11) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959, Conduction of Heat in Solids 2nd Ed., Oxford University Press, London, Chap.2.
- (12) Simon, T. W. and Seume, J. R., 1988, A Survey of Oscillating flow in Stirling Engine Heat Exchangers, NASA CR - 182108.