

소형 Thermal Conductivity Detector의 입구열전달 거동에 대한 수치해석

김영민* · 김우승[†] · Kuan Chen^{**} · 천원기^{***}
 (2001년 6월 27일 접수, 2001년 12월 26일 심사완료)

Numerical Study on the Thermal Entrance Effect in Miniature Thermal Conductivity Detectors

Young-Min Kim, Woo-Seung Kim, Kuan Chen and Won-Gee Chun

Key Words: Thermal Conductivity Detector(열전도계수측정기), Thermal Entrance Length(열입구길이), Entrance Effect(입구효과), Microchannel Flow(마이크로채널 유동)

Abstract

The microchannel flow in miniature TCDs (thermal conductivity detectors) is investigated numerically. The solutions based on the boundary layer approximation are not very accurate in the region of the duct inlet for low Reynolds numbers. In this study, two-dimensional Navier-Stokes equations are considered to analyze the gas flow in a miniature TCD. Effects of channel size, inlet and boundary conditions on the heat transfer rate are examined. When the gas stream is not preheated, the distances for a miniature TCD to reach the conduction-dominant region for duct flow are found to be approximately two and three times the thermal entry length for duct flow with constant properties, respectively, for constant wall temperature and constant wall heat flux boundary conditions. If the gas temperature at the channel inlet is close to the mean gas temperature in the conduction-dominant region, the entrance region is much shorter compared to other cases considered in this study.

기호설명

c_p : 비열
 D_h : 수력직경
 H : 유로깊이
 M : 분자량
 p : 압력
 q : 열유속
 R : 일반기체상수
 T : 온도
 u, v : x, y 방향의 속도성분
 x : 유동방향 좌표

y : 높이방향 좌표
 X^* : 무차원 열입구길이
 X^+ : 무차원 수력입구길이
 Re : Reynolds 수
 Pr : Prandtl 수

그리스문자

ρ : 밀도
 ϵ/x : Lennard-Jones constant (10.2K)
 σ : Lennard-Jones constant (2.576 Å)
 Ω_k, Ω_μ : collision function
 μ : 점성계수

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 공학대학 기계공학과
 E-Mail : wskim@hanyang.ac.kr
 TEL : (031)400-5248 FAX : (031)418-0153
^{**} Department of Mech. Eng., University of Utah
^{***} 회원, 제주대학교 에너지공학과

상첨자
 * : 무차원량
 하첨자
 b : 유로하부
 t : 유로상부

- i : 유로입구
- ref : 물성치가 일정한 유동
- ut : 일정 온도조건
- uhf : 일정 열유속조건

1. 서론

가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)에 있어서 성분 검출을 위한 detector는 필수적이며 GC 장비를 위한 검출기 중 일반적으로 Katharometer로 알려진 Thermal Conductivity Detector (TCD)는 가장 널리 쓰이는 검출장비이다. 비록 TCD는 Flame Ionization Detector (FID)와 같은 용질 성분 분석장치 만큼 정밀하진 않지만^(1,2) 작동원리의 단순성과 신뢰성 때문에 최근 GC 응용에 각광을 받고 있는 장치이다.^(3,4) 또한 FID등의 Ionization Detector는 질량에 민감한 장치인 반면 TCD는 농도에 민감한 장치이다. 검출기 크기가 감소하면 검출체적의 감소에 의해 질량은 감소하나 농도는 거의 변화가 없으므로 마이크로 장치에 사용될 경우 TCD가 유리한 선택이 될 것이다.

TCD의 기본적 작동원리의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. TCD는 Fig. 1과 같이 대조유로(reference channel)와 검출유로(sensing channel) 내에 열선을 두어 직류 전류를 흘려서 온도차를 형성하고 전 열선은 저항을 측정하는 일반적인 방법인 Wheatstone bridge 회로를 구성하게 된다. 일정 온도차를 유지하고 있는 유로에 순수 캐리어 가스(carrier gas) 만이 흐를 경우 브릿지회로(bridge circuit)는 "zero"로 평형상태를 유지한다. 캐리어

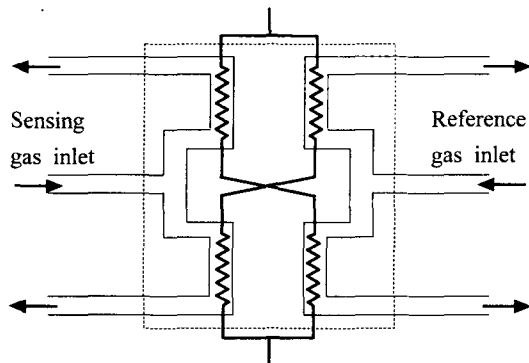


Fig. 1 A schematic diagram of the typical thermal conductivity detector bridge circuit

가스의 열전도 계수와 분석하고자 하는 가스의 열전도 계수가 큰 차이를 보이면 검출에러를 최소화 할 수 있기 때문에 일반적으로 열전도 계수가 큰 헬륨이나 수소를 캐리어 가스로 사용한다. 평형상태를 유지하고 있을 때 분석하고자 하는 가스가 검출유로에 방출되면 검출유로내의 가스 혼합물의 열전도 계수는 캐리어 가스의 열전도 계수보다 낮아진다. 이로 인해 열선의 온도가 상승하고 온도 상승에 의해 열선의 저항이 크게 증가하여 브릿지가 평형을 이루지 못하는 상태가 된다. 이때의 전기신호를 검출하여 가스 성분을 분석하는 것이 TCD의 기본원리이다. 따라서 적어도 두 개의 유로를 두어 대조유로와 검출유로를 형성하여야 하나 검출기의 소형화를 위해 하나의 유로를 두어 교대로 가스를 통과시켜서 성분을 분석하는 장치도 개발되고 있다.

많은 연구자에 의해 상용 TCD의 열전달 현상에 대한 연구가 진행되어왔다.⁵⁻⁷⁾ Daynes⁽⁵⁾는 TCD 열전달 기구 중 전도가 열손실의 가장 큰 요인이지만 고밀도 가스일 경우 특히, 고정도 측정을 하여야 할 경우 대류효과도 변동요인이 될 수 있다고 하였다. 또한 Wisemen⁽⁶⁾은 저속 가스 유동일 경우 TCD 평형에 자연대류효과가 중요한 요인임을 발견하였으며 Sweden과 Eanes⁽⁷⁾는 TCD 유로 직경이 5mm 이하일 경우 수직과 수평위치에 대한 TCD 거동에 아무런 차이가 없음을 보고하였다.

일반적인 GC 장비는 부피가 큰 부속장비로 인해 대형이며 고가이므로 현장에서 바로 사용하기에 많은 어려움이 있다. 따라서 GC 장비의 가격을 낮추고 현장에서 직접 가스성분 분석을 위해 GC 장비가 소형화 되는 추세이며 GC 장비의 구성요소 중 가스성분을 분리하고 검출하는 부분을 반도체 제작 공정을 사용하여 실리콘 웨이퍼 상에 일괄 공정(batch-fabrication)을 통해 제작하고 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 또한 검출체적이 감소하면 검출신호에러 감소 및 감도 증가 등의 장점이 있으므로⁽¹¹⁾ 최근에는 소형 TCD에 대한 연구가 수행되고 있다. Jerman⁽¹²⁾은 Terry 등⁽¹³⁾이 GC 장비를 위해 사진식각술(photolithography technique)을 사용하여 만든 planar TCD에 대한 집중 열용량 모델(lumped thermal model)을 개발하였다. 그러나 Jerman⁽¹²⁾의 연구에서 TCD 가스 유로 깊이는 6 μm로 매우 작아 대류열전달은 무시되었다.

이와 같이 소형 TCD 해석에 있어서 대류열전

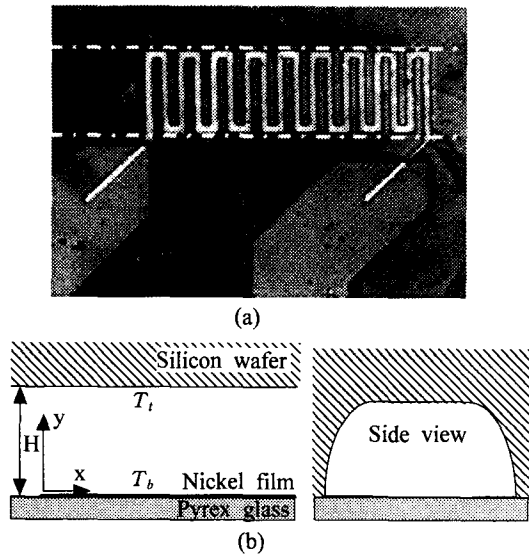


Fig. 2 A miniature TCD⁽¹²⁾: (a) the heating element of the TCD; (b) a schematic diagram of the microchannel flow in the TCD

달은 작은 유로깊이로 인해 무시되거나 실험적 보정으로 고려되어왔다. 비록 대류효과가 중요한 영역은 TCD 작동영역 중 매우 작은 부분을 차지하지만 TCD는 대조유로와 검출유로사이의 미소한 열전달률의 차이를 측정함으로써 가스 성분을 분석하는 장치이므로 고감도와 정밀도를 위해서 이를 고려하여야 한다.

최근에 Huang과 Bau⁽¹⁴⁾는 TCD 성능에 미치는 강제 대류 효과를 연구하여 실험과 비교하였으며 열선의 시작부분과 끝부분에서 대류에 의한 영향이 크므로 열선을 길게 하면 대류에 의한 니켈 열선의 전력소비율을 줄일 수 있다고 하였다. Chen과 Wu⁽¹⁵⁾는 유로깊이가 마이크로 범위에 있는 소형 TCD의 열전달 특성에 대한 연구를 통해 대류효과가 중요한 열입구길이에 대한 해석해와 수치해석을 수행하였다. 이들의 연구에서 물성치의 변화에 따른 열전달률의 변화는 입구영역에서는 밀도와 비열 및 열전도 계수의 제곱근에 비해 하나 전도가 지배적인 영역에서는 열전도 계수만의 함수임을 나타내었다. 따라서 소형 TCD의 열입구길이의 정확한 추정은 TCD 측정 신뢰도와 밀접한 관련이 있다.

현재까지 TCD를 포함한 다양한 센서에 대한 수치해석 및 모델링에 대한 연구가 여러 연구자에 의해 수행되었으나 소형 TCD 입구 영역에서

의 열 및 유동해석에 대한 연구는 Chen과 Wu의 연구⁽¹⁵⁾를 제외하면 거의 없는 실정이다. 또한 이들은 소형 TCD의 작은 유로 깊이로 인해 유로에 수직인 방향의 속도 및 압력구배를 무시할 수 있다고 가정하여 경계층 근사식을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그러나 소형 TCD의 유로 깊이가 매우 작으므로 이때의 Reynolds 수는 일반적으로 400이하가 된다. 이와 같은 저 Reynolds 수 유동일 경우 Kakac 등⁽¹⁶⁾은 유로 입구 영역에서의 반경방향의 운동량 확산 및 압력구배가 중요하다고 하였으며 이때의 수력입구 길이는 Re 수의 함수로 표시된다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 반경 반향의 운동량 확산 및 압력구배를 고려하여 유로깊이가 마이크로 범위에 있는 소형 TCD의 Re 수의 변화 및 입구조건에 따른 입구영역에서의 열·유동해석을 수행하여 소형 TCD 열입구 길이 추정에 대한 연구를 수행하고자 한다.

2. 수치해석 방법 및 경계조건

2.1 경계조건 및 지배방정식

Chen과 Wu⁽¹⁵⁾에 의해 제작된 소형 TCD의 실리콘 덮개를 제거한 니켈 열선의 사진을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 니켈 열선의 폭은 50 μm 이며 실리콘웨이퍼 상에 식각된 유동채널을 포함한 TCD의 개략도를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 실리콘웨이퍼의 열전도계수가 매우 크므로 유로 윗부분의 온도는 일정하게 유지된다고 가정할 수 있다. TCD는 가스 성분 분석 전에 열선을 가열한 후 캐리어 가스를 흘려 열선의 온도가 정상상태가 될 때까지 예열과정을 거치므로 TCD 유로하부는 일정 온도조건을 사용할 수 있다. 또한 Jerman⁽¹²⁾은 열선이 유로 중앙에 위치하는 non-planar TCD의 경우 열선의 중앙 평면은 열전달에 대해 대칭면을 이루어 단열면으로 생각할 수 있고 니켈 열선은 매우 얇으므로 열선의 경계조건은 일정 열유속 조건으로 가정할 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서 Fig. 2(b)의 $y=0$ 인 면의 경계조건은 일정 온도조건 및 일정 열유속 조건을 주어 해석을 수행하였다. 본 연구에서 고려된 소형 TCD의 Knudsen 수는 0.003~0.03의 범위이므로 운동량방정식과 에너지방정식의 풀이 시 velocity-slip 경계조건과 temperature-jump 경계조건을 사용하지 않았다.^(15,17,18)

실리콘웨이퍼에 식각된 유로는 깊이보다 폭이 넓으므로 이차원 유동으로 가정할 수 있으며 Rayleigh 수나 Grashof 수는 특성길이의 3승에 비례하므로 소형 TCD의 경우 매우 작아 자연대류 효과는 무시하였다. TCD 유로의 상, 하부 온도차는 일반적으로 20~200°C 정도이므로 지배방정식에 사용되는 물성치는 온도의 함수로 가정하였다. TCD의 Mach 수는 상당히 작으므로 에너지 방정식의 풀이에서 압축일에 관한 항을 무시하였으며 소형 TCD는 특별한 고압이나 저온 상태에서 작동하지 않으므로 캐리어 가스는 이상기체 상태 방정식을 따른다고 가정하였다.

이상의 가정에 의한 지배방정식은 다음의 식 (1)~(5)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{\Phi}{\rho c_p} \quad (4)$$

$$p = \rho RT \quad (5)$$

여기서,

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y},$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

$$\Phi = 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \text{ 이다.}$$

상술한 바와 같이 캐리어 가스로는 열전도 계수가 큰 것이 가스 성분 분석에 유리한데 헬륨의

경우 단원자 분자이며 이상기체 상태 방정식을 잘 만족하므로 캐리어 가스는 헬륨으로 선택하여 해석을 수행하였다. 헬륨 가스의 점성계수와 열전도계수는 각각 다음과 같은 식 (6)과 식 (7)로 계산된다.⁽¹⁹⁾

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_\mu} \quad [\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2] \quad (6)$$

$$k = 8.322 \times 10^{-2} \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega_k} \quad [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}] \quad (7)$$

여기서, collision function Ω_μ 와 Ω_k 는 Table 1에 나타낸 것과 같이 Lennard-Jones constant ϵ/x 와 가스온도 T 로부터 구할 수 있다.

2.2 수치해석

2.2.1 수치해석 방법

지배방정식은 유한차분법으로 차분하여 가상과도해석(pseudo-transient analysis) 방법을 사용하여 압력 및 속도 수정을 하였다. 운동량 방정식 및 에너지 방정식의 대류항은 상류도식(upwind scheme)과 2계 중앙차분도식(second-order central difference scheme)을 혼합하여 차분하였으며 이 두 가지 도식의 조절을 위한 가중 값을 부여할 수 있도록 변수를 도입하였다.

수치해석에 사용된 격자계는 압력, 온도 및 물성치는 제어체적의 중앙에 위치시키고 속도성분은 제어체적 면에 위치시키는 엇갈린 격자계(staggered grid)이며 x 방향으로 80개 y 방향으로

Table 1 Collision functions for prediction of transport properties of carrier gas

$T/(\epsilon/x)$	$\Omega_\mu = \Omega_k$
10	0.8242
20	0.7432
30	0.7005
40	0.6718
50	0.6504

Table 2 Grid dependence test of the non-dimensional surface heat fluxes at different x locations

x location	q_b^* at						
	15 μm	30 μm	45 μm	60 μm	75 μm	90 μm	105 μm
80×20	2.41597	1.46093	1.18934	1.08133	1.03331	1.01115	1.00063
160×40	2.41548	1.46014	1.18919	1.08128	1.03324	1.01114	1.00057

Table 3 Channel depth and initial conditions

Case	H (μm)	T_i (K)	u_i (m/s)	constant temperature T_b (K)	constant heat flux q_b (kW/m^2)
a	50	300	2.333	500	600
b	50	300	4.667	500	600
c	50	400	2.333	500	600
d	6	300	6.667	500	5000
e	6	300	6.667	320	500

는 20개의 격자를 사용하였다. x 방향으로 160개 y 방향으로 40개의 격자를 사용한 조밀 격자계에 대한 표면 열유속 값은 Table 2에서 보듯이 x 방향으로 80개 y 방향으로 20개의 격자를 사용한 결과와 소수점 3자리까지 일치하였으므로 이후의 해석에서는 80×20 의 격자계를 사용하였다.

2.2.2 수치해석 범위

소형 TCD의 입구열전달 거동을 살펴보기 위해 유로 깊이와 유로 상, 하부 온도 및 유입 속도를 변화시키며 수치해석을 수행하였다. 유로 상단의 온도는 300K이며 하부의 온도는 일정 온도조건일 경우 300K로 고정된 주변 온도보다 20~200℃ 높게 하였으며 일정 열유속 조건일 경우 일정 온도 조건에서의 하부 온도와 동일한 값을 나타내도록 하부 열유속 값을 선정하였다. 입구에서의 유속은 2.333~6.667m/s로 하였으며 유입온도는 예열되지 않은 가스흐름의 경우 (Case a, b, d, e) 주변온도인 300K와 같으며 유로 상, 하부 온도의 평균값으로 예열된 가스흐름의 경우(Case c)는 400K로 하였다. 이러한 작동조건은 소형 TCD에서 일반적이다.⁽¹²⁾ 한편 수치해석을 수행한 각 경우에 대한 조건을 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 일정 온도 조건일 경우의 표면 열유속

Fig. 3은 무차원화된 거리 X^* 에 대한 각 경우의 표면 열유속의 변화를 나타낸 것이다. 무차원 거리 X^* 와 표면 열유속은 식 (8) 및 (9)와 같이 무차원화하였다. 표면 열유속은 전도가 지배적인 영역에서의 열유속으로 무차원화 된 것이다.

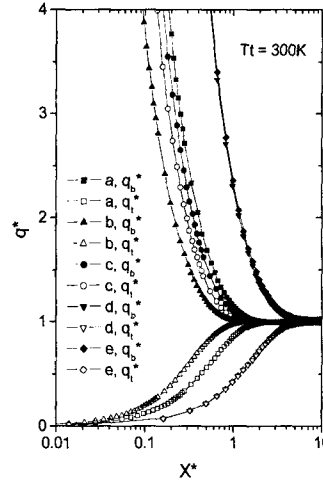


Fig. 3 Variation of heat fluxes as a function of normalized x coordinate (uniform temperature conditions on both upper and lower walls)

$$X^* = x / (D_h \text{RePr}) \tag{8}$$

$$q^* = q / [k(T_b - T_i) / H] \tag{9}$$

여기서, Re 수 계산에 사용되는 물성치는 입구에서의 값을 사용하였으며 \bar{k} 는 T_b 와 T_i 의 평균 온도에서 계산되었다.

Fig. 3의 q_i^* 에서 볼 수 있듯이 Case a, b, d, e의 경우 열경계층은 X^* 가 약 0.01에서 Fig. 2(b)의 유로상부까지 발달되어 열선으로부터 받은 열이 상부의 실리콘 웨이퍼로 방출되기 시작함을 알 수 있다. 상부의 열유속 q_i^* 는 하부의 열유속 q_b^* 와 같아질 때까지 점점 증가하여 q_i^* 와 q_b^* 가 1의 값이 되는 X^* 즉, 열입구길이는 Case a의 경우 $X_{ut}^* = 1.9$ 이며 Case b의 경우 $X_{ut}^* = 1$, Case d, e의 경우 약 5.3의 값을 나타낸다. 유입온도가 유로 상, 하부 온도의 평균값인 Case c의 경우는 q_i^* 와 q_b^* 가 거의 동일한 값을 보이며 $X_{ut}^* = 1.5$ 에서 전도가 지배적인 영역에 도달함을 알 수 있다.

한편 본 연구 결과의 타당성을 검토하기 위해 상용 열유체 해석프로그램인 STAR-CD로 해석을 수행하여 Fig. 3과 정확히 일치하는 결과를 얻었다.

본 연구와 동일한 경우에 대해 Chen과 Wu⁽¹⁵⁾는 소형 TCD의 작은 유로 깊이로 인해 가스흐름에

Table 4 Entrance length subjected to uniform temperature conditions

Case	Re	X_{ref}^+	X_{ref}^{*}	X_{ut}^*
a	0.953	0.66	0.95	1.9
b	1.91	0.35	0.5	1
c	0.585	1.06	1.51	1.5
d	0.327	1.87	2.67	5.3
e	0.327	1.87	2.67	5.3

수직 방향(y)의 속도 및 압력구배를 무시할 수 있다고 가정하여 경계층 근사식을 사용한 수치해석을 수행하였다. 이들은 Case a, b, d, e의 경우 열입구거리는 모두 0.2이며 Case c의 경우 0.05로 작아진다고 하였다. 그러나 Kakac 등⁽¹⁶⁾은 $Re \leq 400$ 인 저 Reynolds 수 유동일 경우 채널 입구영역에서의 y 방향의 운동량 확산 및 압력구배에 대한 영향이 매우 중요하므로 경계층 근사식을 사용한 수치해는 덕트 유동 입구 영역에서 정확한 해를 제공하지 못한다고 하였다.

일반적으로 소형 TCD의 작동영역에서의 Re 수는 400이하이므로 y 방향의 운동량 확산 및 압력구배를 고려한 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 보다 정확한 입구열전달 거동을 추정할 수 있다. 또한 저 Reynolds 수 유동에서는 수력입구길이 Re 수의 함수로 표시되며 Chen⁽²⁰⁾은 물성치가 일정한 관내 유동에서의 무차원화한 수력입구길이를 Re 수의 함수로 제시하였다.

소형 TCD의 각 Case에 대해 물성치가 일정한 유동일 경우 식 (10)으로 정의된 무차원 수력입구길이(X_{ref}^+)를 계산하여 Table 4에 나타내었다.

$$X_{ref}^+ = x / (D_h Re) \tag{10}$$

여기서 수력입구길이(x)는 균일 유동장이 유입될 경우 완전 전개된 속도장의 최고속도의 99%가 되는데 소요되는 거리이다.

Table 4에서 X_{ref}^* 는 물성치가 일정한 소형 TCD의 열입구길이를 나타내며 X_{ut}^* 는 본 연구에서 계산된 일정 온도조건일 경우의 열입구길이이다. Table 4에서 보듯이 Case a, b, d, e의 경우 즉, 유입가스가 주변온도인 300K로 유입되는 예열되지 않은 가스흐름의 경우 열입구길이(X_{ut}^*)는 X_{ref}^* 의 2배임을 알 수 있다. 반면에 유로 상, 하부 온도의 평균값으로 예열된 가스가 유입되는 Case c의 경우 $X_{ut}^* = 1.5$ 로서 X_{ref}^* 와 같음을 알

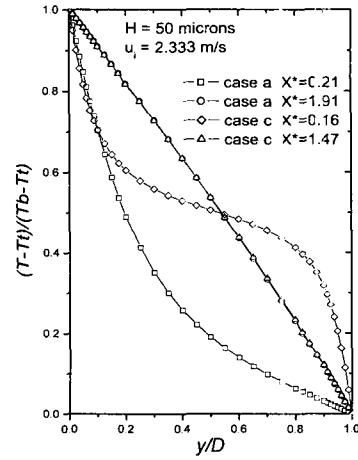


Fig. 4 Normalized gas temperature profiles as functions of normalized y coordinate at different x locations (uniform temperature conditions on both upper and lower wall)

수 있다. 즉, Fig. 3에 나타낸 여러 입구조건에서의 열입구거리에 대한 영향은 Case a, b, d, e의 경우 유입온도와 유로 하부 온도차에 의한 물성치 변화로 인해 X_{ref}^* 의 2배의 값을 나타내며 Case c의 경우는 유입온도가 유로 상, 하부 온도의 평균값이므로 물성치 변화에 의한 영향이 약화되어 물성치가 일정한 경우인 X_{ref}^* 의 값과 같아짐을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 저 Reynolds 수 유동인 소형 TCD의 열입구길이의 정확한 추정을 위해서는 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 하며 Re 수를 변화시키며 경계층 근사해와 비교한 결과 본 연구에서는 $Re = 40$ 이하인 경우에 차이가 나타남을 확인하였다.

두 가지 이상의 서로 비슷한 열전도계수를 갖는 가스의 성분분석을 수행할 경우 측정된 열전도계수만으로는 투입된 가스의 구별이 어렵게 된다. Chen과 Wu⁽¹⁵⁾는 전도가 지배적인 영역에서의 열전달은 가스 열전달계수만의 함수이지만 입구영역에서의 열전달은 열전도계수, 밀도 및 정압비열의 제공근에 비례한다고 하였다. 그러므로 본 연구의 해석방법으로 입구영역을 정확히 추정하게 되면 보다 정확한 가스의 성분 분석을 수행할 수 있다.

3.2 유입온도에 대한 가스 온도분포의 영향

입구 영역과 완전 발달된 영역의 x 위치에서 무차원화 된 거리 y에 대한 Case a와 c의 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 입구영역에서의 온도분포를 보면 Case a의 경우($X^*=0.21$) 가열 표면 즉, 유로 하부에서의 급격한 온도구배가 유로 상부로 갈수록 완만해지며 Case c의 경우($X^*=0.16$) 유로 상, 하부에서 모두 급격하며 유로 중심부에서 완만한 구배를 나타낸다. Case a의 $X^*=1.91$ 인 위치와 Case c의 $X^*=1.47$ 의 위치에서는 열적으로 완전 발달되었기 때문에 선형적 온도분포를 나타내어 유입온도에 관계없이 동일한 함을 알 수 있다. 이때의 온도분포는 대각선과 약간의 차이를 보이는데 이는 상하부 온도차에 의한 물성치 변화에 기인한다.

유입온도가 상, 하부 온도의 평균값으로 예열되었을 경우인 Case c의 온도분포는 중심부에 대해 대칭임을 알 수 있으며 이는 유입온도가 400K로서 y/D가 0~0.5인 구간과 0.5~1인 구간의 유로벽면과 가스와의 온도차가 100K로 동일하기 때문이다. 이와 같은 대칭적 온도분포로 인해 Fig. 3에서 Case c의 상, 하부 표면 열유속이 거의 동일한 값을 보이게 된 것이다.

Case a의 입구 영역에서의 무차원 거리 x, y에

Table 5 Thermal entry length subjected to uniform heat flux on the channel floor

Case	X_{ref}^*	X_{uhf}^*
a	0.95	3
b	0.5	1.5
c	1.51	1.5
d	2.67	8
e	2.67	8

대한 온도장을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 경계층 근사식을 사용한 해석의 경우 입구 영역에서 온도구배가 매우 급격하며 유로 상부 근처에서 갑자기 완만해 짐을 알 수 있다. 이와 같이 경계층 근사식을 사용한 수치해석은 입구영역에서 물리적으로 타당하지 않은 온도구배를 나타내며 이로 인해 열입구길이가 작게 추정되는 것으로 판단된다.

3.3 일정 열유속 조건일 경우의 표면 온도

Fig. 6에 유로하부가 일정 열유속 조건일 경우의 무차원화된 거리 X^* 에 대한 유로하부의 표면 온도 변화를 나타내었다. 하부 열유속은 전도가

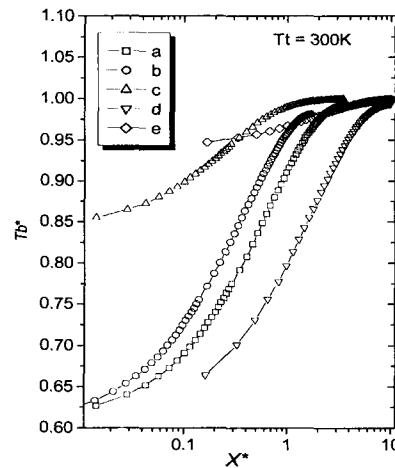


Fig. 6 Variation of channel floor temperature as a function of normalized x coordinate (uniform heat flux on the channel floor)

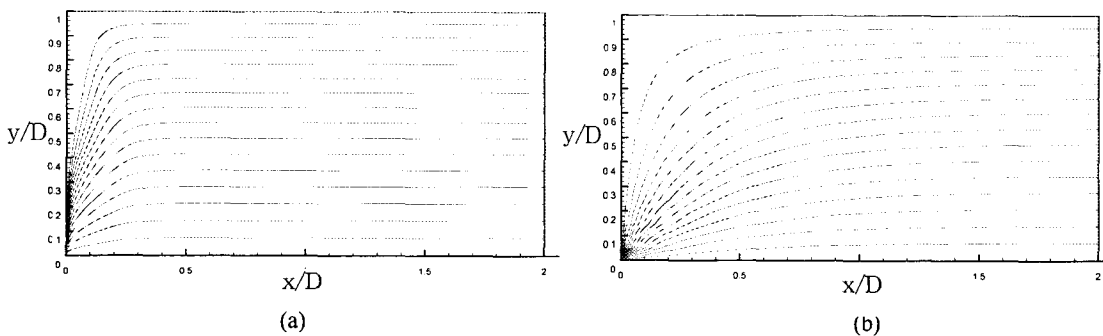


Fig. 5 Temperature contour using (a) boundary layer approximation and (b) Navier-Stokes equations

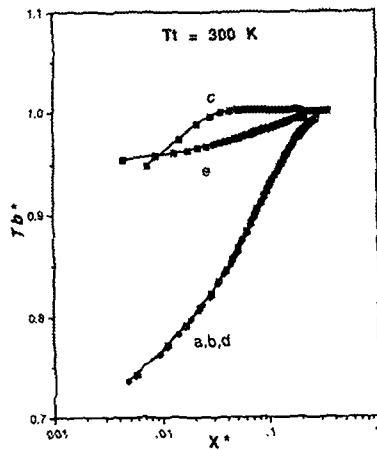


Fig. 7 Variation of channel floor temperature as a function of normalized x coordinate (uniform heat flux on the channel floor)⁽¹⁵⁾

지배적인 영역에서의 유로하부 표면 온도가 일정 온도조건에서의 하부 온도와 같도록 선택되었다. Fig. 6에서 무차원거리 X^* 는 식 (8)로 계산되었으며 표면온도 T_b^* 는 전도가 지배적인 영역에서 가능한 최대 온도 즉, 가스팽창일과 점성소산을 무시하였을 경우의 열선의 온도 T_b 로 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$T_b^* = T_b / (T_t + q_b H / \bar{k}) \quad (11)$$

여기서, \bar{k} 는 T_t 와 T_b 의 평균값에서 계산되나 일정 열유속 조건일 경우 T_b 의 값이 미지수이므로 반복적으로 계산되었다.

유로 입구에서의 얇은 열경계층은 낮은 열전달 저항을 의미하므로 입구 영역에서의 T_b^* 는 작은 값을 나타내며 열경계층이 성장함에 따라 열저항이 증가하여 T_b^* 는 서서히 증가하게 되고 전도가 지배적인 영역에 도달하면 거의 1의 값을 나타낸다. Case e는 하부 열유속이 작아 무차원 표면온도가 비교적 큰 값에서 1로 접근하기 때문에 다른 경우의 T_b^* 곡선과 다른 거동을 보임을 알 수 있다.

경계층 근사식을 이용하여 해석을 수행한 Chen과 Wu⁽¹⁵⁾의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Chen과 Wu⁽¹⁵⁾는 일정 열유속 조건에서 Case a, b, d, e의 경우 열입구길이는 0.2이며 Case c의 경우 0.05로 작아진다고 추정하였으나 이것은 저 Reynolds 수 유동에서 경계층 근사식을 사용한 해석 결과이므

로 Re 수에 관계없이 상당히 작은 값을 나타낸다. 그러나 Table 5에 나타낸 바와 같이 본 연구의 경우 열입구길이(X_{ref}^*)는 $Re^{<2}$ 에 따라 다르며 Case a, b, d, e의 경우 X_{ref}^* 의 약 3배로서 일정 온도 조건일 경우의 열입구길이보다 길어짐을 확인하였으나 Case c는 일정 온도조건일 경우의 결과와 같이 X_{ref}^* 와 같은 값을 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 소형 TCD에서 Re 수의 변화 및 입구조건에 따른 입구영역에서의 열·유동해석을 Navier-Stokes 방정식을 풀어 수행하였다. 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 상용 열유체 해석 프로그램인 STAR-CD로 결과를 비교하여 본 연구 결과와 일치함을 확인하였다.

일반적으로 소형 TCD의 작동영역에서 Re 수는 400 이하의 저 Reynolds 수 유동이므로 채널 입구영역에서의 y 방향의 운동량 확산 및 압력구배에 대한 영향이 매우 중요하다. 따라서 경계층 근사식을 사용할 경우 정확한 열입구길이를 추정할 수 없다. Re 수를 변화시키며 경계층 근사해와 비교한 결과 본 연구의 경우 Re 수 40 이하에서 경계층 근사식과 Navier-Stokes 방정식을 사용한 수치해가 차이를 보임을 확인하였다.

유로 상, 하부가 일정 온도조건일 때 유입온도가 주변온도와 동일한 예열되지 않은 가스흐름의 경우 유입온도와 유로 하부 온도차에 의한 물성치 변화로 인해 열입구길이 X_{in}^* 는 X_{ref}^* 의 2배의 값을 나타내며 유입온도가 유로 상, 하부 온도의 평균값으로 예열된 가스흐름의 경우 물성치 변화에 의한 영향이 상쇄되어 열입구길이 X_{in}^* 가 짧아져 물성치가 일정한 경우인 X_{ref}^* 의 값과 같아짐을 확인하였다.

일정 열유속 조건에서 예열되지 않은 가스흐름일 경우의 열입구길이 X_{in}^* 는 X_{ref}^* 의 약 3배로서 일정 온도조건일 열입구길이보다 길어지며, 가스를 유로 상, 하부 온도의 평균값으로 예열하면 X_{in}^* 는 X_{ref}^* 와 같은 값을 나타내었다.

참고문헌

- (1) Scott, R. P. W., 1998, *Introduction to Analytical Gas Chromatography 2nd edn.*, Marcel Dekker, New York, NY.
- (2) Fowles, I. A., 1996, *Gas Chromatography, 2nd edn.*, Wiley, Chichester, West Sussex, England.
- (3) Noebels, H. J., Wall, R. F., Brenner, N. (Eds.), 1961, *Gas Chromatography: Second International Symposium on Gas Chromatography*, Academic Press, New York, NY.
- (4) Lawson, A. E. Jr., Miller, J. M. 1966, *J. of Chromatography Science*, Vol.4.
- (5) Daynes, H. A., 1933, *Gas analysis by measurement of thermal conductivity*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, Great Britain.
- (6) Wiseman, W. A., 1959, "Katharometer Behavior," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, Vol. 72.
- (7) Snowden, F. C. and Eanes, R. D., 1959, "Thermal Conductivity Detectors for Process Control," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, Vol. 72, pp. 764~778.
- (8) Reston, R. R. and Kolesar, E. S., 1994, "Silicon-Micromachined Gas Chromatography System used to Separate and Detect Ammonia and Nitrogen Dioxide-Part I: Design, Fabrication and Integration of the Gas Chromatography System," *IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 3, pp. 134~146.
- (9) Kolesar, E. S. and Reston, R. R. 1994, "Silicon-Micromachined Gas Chromatography System used to Separate and Detect Ammonia and Nitrogen Dioxide-Part II: Evaluation, Analysis and Theoretical Modeling of the Gas Chromatography System," *IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 3, pp. 147~154.
- (10) Kolesar, E. S. 1998, "Review and Summary of a Silicon Micromachined Gas Chromatography System," *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Tech., Part B*, Vol. 21, No. 4, pp. 324~328.
- (11) Mcnair, H. M. and Miller, J. M., 1998, *Basic Gas Chromatography*, John Wiley and Sons, New York.
- (12) Jerman, J. H., 1981, "A Miniature Thin-Film Thermal Conductivity Detector for an Integrated Gas Chromatograph," PhD thesis, Stanford Univ., Stanford, CA.
- (13) Terry, S. C., Jerman, J. H. and Angell, J. B., 1979, "A Gas Chromatographic Air Analyser Fabricated on a Silicon Wafer," *IEEE Trans. Electron Devices ED-26*, Vol. 12, pp. 1880~1886.
- (14) Huang, Y., Bau, H. H., 1997, "The Effects of Forced Convection on the Power Dissipation of Constant-Temperature Thermal Conductivity Sensors," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 119, pp. 30~37.
- (15) Chen, K. and Wu, Y. E., 2000, "Thermal Analysis and Simulation of the Microchannel Flow in Miniature Thermal Conductivity Detectors," *Sensors and Actuators A Physical*, Vol. 79, pp. 211~218.
- (16) Kakac, S., Shah, R. K. and Aung, W., 1987, *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, John Wiley & Sons.
- (17) Duncan, A. B. and Peterson, G. P., 1994, "Review of Microscale Heat Transfer," *Appl. Mech. Rev.*, Vol.47, No.9, ASME, pp. 397~428.
- (18) Arkilic, E. B., Breuer, K. S. and Schmidt, M. A., 1994, "Gaseous Flow in Microchannels," *Application of Microfabrication to Fluid Mechanics*, FED-Vol. 197, ASME, pp. 57~66.
- (19) Hirschfelder, J. O., Bird, R. B. and Spotz, E. L., 1949, *Chem. Revs.*, Vol. 44.
- (20) Chen, R. Y., 1973, "Flow in the Entrance Region at Low Reynolds Numbers," *J. Fluids Eng.*, Vol. 95, pp. 153~158.