

단순화한 챔버에서 유체의 흐름과 온도분포

한현각^{1*}

Fluid Flow and Temperature Distribution in the Simplified Chamber

Hyun-Kak Han^{1*}

요 약 구조가 복잡한 챔버의 온도분포와 유속변화를 연구하였다. 압축성 혹은 비압축성 유체, 층류 혹은 난류의 유속변화를 모델링 할 수 있는 FLUENT 프로그램으로 모사실험을 하였다. 챔버의 구조는 매우 복잡하여 단순화한 구조를 표준 k-ε 모델과 RNG k-ε 난류 모델 모사실험하였다. 평가지역의 온도편차가 적은 것이 중요하다. 본 연구에서 얻은 챔버 내부의 온도분포와 유속변화 자료를 챔버의 제어 알고리즘을 향상하는 제공하였다. 개선된 제어 알고리즘을 이용하여 실제에 적용한 결과 평가지역의 온도편차가 매우 개선되었다.

Abstract The temperature distribution and fluid flow in the chamber was investigated using FLUENT code. It provides comprehensive modeling capabilities for a wide range of incompressible or compressible and laminar or turbulent fluid flow problems. And a broad range of mathematical models for transport phenomena is combined with the ability to model for complex geometries. The geometry of the chamber was very complex, and a simplified model of the chamber was used in the simulation experiment. It was important that the temperature deviation of test site. This datum were provided in the improving the control algorithm. Using this algorithm, the results were with in 0.1℃.

1. 서 론

유체가 흐르고 있는 챔버에서 유체의 흐름에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 연구되어져 왔다. 그들이 연구한 유체는 거의 대부분 비압축성 유체로서 Navier-stoke[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] 식의 해를 구하는 방법에 대한 연구를 계속하여 왔다. 그러나 우리의 일상생활과 밀접한 관련이 있는 물질들은 비압축성 유체보다는 압축성 유체가 많이 있다. 특히 압축성 유체인 공기에 대한 연구는 물체가 초음속으로 비행할 때 유체에 의해서 비행하는 물체의 온도변화와 응력의 영향에 대하여 미항 공우주국과 비행기 제조업체 등에서 많이 연구하고 있다. 연구 대상인 챔버는 정밀한 공정을 통하여 제작된 반도체의 성능을 평가하기 위하여 테스트에 반도체를 이동시키는 테스트 핸들러내의 챔버이다. 반도체를 이동하는 기계장치가 많아 내부가 매우 복잡하다. 온도에 따라 반도체

체의 성능을 평가하므로 평가지역(Test area)에서 반도체의 온도편차가 작아야 한다. 챔버 내부의 압축성유체인 공기의 흐름과, 온도분포 연구가 중요하다. 본 연구에서는 실제 복잡한 구조를 단순화하여 챔버내부의 온도분포와 유체의 흐름을 Fluent Code를 이용한 모사연구하고, 이 자료를 제어 알고리즘을 개발하는 팀에 제공하여 평가지역의 반도체의 온도편차를 작게 하는 것이다.

2. 이론적고찰

2.1 물질수지식

온도분포와 유체흐름을 계산할 때 사용하는 기본 방정식은 나비야스토크(Navier-stokes)식으로 물질수지식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

¹순천향대학교 나노화학공학과

*교신저자 : 한현각(chemhan@sch.ac.kr)

여기에서 S_m 은 외부에서 계로 유입되는 물질 소스, ρ 는 밀도이다
모멘텀수지식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

여기에서 p 는 정압(static pressure), τ_{ij} 는 스트레스 텐서(stress tensor), ρg_i 는 물체에 작용하는 중력(gravitational body force), F_i 는 외부에서 작용하는 힘(external body force)이다.

스트레스 텐서(Stress tensor) τ_{ij} 는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{3}{2} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

여기에서 μ 는 분자 점도(molecular viscosity), 좌측의 두 번째 항은 부피 팽창 항이다.

식(2)을 2차원계의 축 방향과 반지름 방향으로 풀면

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(\tau \rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\tau \rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + F_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(\tau \rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\tau \rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - 2\mu \frac{v}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{\omega^2}{r} + F_r \quad (5)$$

여기에서

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \quad (6)$$

니며 ω 는 소용돌이 속도(swirl velocity)이다.

2.2 에너지 수지식

에너지 수지식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_j + \frac{Dp}{Dt} + (\tau_{ik})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \quad (7)$$

여기에서 k 는 분자 전도도(molecular conductivity), k_t 는 난류전달에 의한 전도도(conductivity due to turbulent transport= μ/Pr_t), J_j 는 j 종의 확산 플럭스(diffusion flux of species j), S_h 는 반응열(heat of chemical reaction)이다 현열 h 는 다음과 같이 정의된다.

$$h = \sum_j m_j h_j \quad (8)$$

여기에서 m_j 는 j 종의 무게분률(mass fraction of species j)로

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (9)$$

여기에서 T_{ref} 는 298.15K이다.

루이스수(Lewis number)가 1으로 가정하고, 식(8)과 식(9)를 식(7)에 대입하여 정리하면

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_t}{c_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + \tau_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \quad (10)$$

여기에서 H 는 엔탈피로 아래와 같이 정의하였다.

$$H = \sum_j m_j H_j \quad (11)$$

여기에서 m_j 는 j 종의 무게분률 (mass fraction of species j)

$$H_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref}, j) \quad (12)$$

여기에서 $h_j^0(T_{ref}, j)$: 참조온도에서 j 종의 생성엔탈피 (formation enthalpy of species j at the reference temperature)

2.3 난류모델

난류를 나타내는 속도식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u = \overline{u_i} + u_i' \quad (13)$$

여기에서 $\overline{u_i}$ 는 평균치이고 u_i' 는 요동(fluctuation) 값이다.

같은 방법으로 다른 스칼라 값을 표현하면

$$\phi = \overline{\phi_i} + \phi_i' \quad (14)$$

식(12)을 식(1) 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (15)$$

식(15)를 카테시안 텐서(cartesian tensor) 형으로 풀면

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서 $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 을 레이놀즈 스트레스 라하며, 난류 효과를 나타내는 항이다.

식(15)와 식(16)을 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 식이라 한다.

2.3.1 표준 κ - ϵ 모델

식(16)의 레이놀즈 스트레스를 Boussinesq 가정 모델을 사용하면

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (17)$$

회오리 점도(eddy viscosity(μ_t))는 아래 식에서 구할 수 있다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (18)$$

여기에서 k (turbulent kinetic energy)와 ϵ (its rate of dissipation)은 아래 식에서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \\ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \{ G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b \} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (20)$$

여기에서 G_b 는 난류 스트레스에 의한 k 의 생성항으로

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (21)$$

G_b 는 부력에 의한 k 의 생성항으로

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (22)$$

여기에서 Pr_t 는 온도에 대한 난류 플랜트 수이며 β 는 온도 팽창 계수로.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (23)$$

표준 κ - ϵ 모델에 의한 난류 열전달식을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(k + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \\ + \frac{Dp}{Dt} + (\tau_{ik})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \end{aligned} \quad (24)$$

여기에서 h 는 현열 엔탈피, k 는 분자 전도도, τ_{ik} 는 스트레스 텐서를 나타낸다.

2.3.2 The Renormalized Group(RNG) κ - ϵ turbulence 모델

레이놀즈수에 대한 유효점도 차는

$$\frac{d\mu}{dl} = \frac{A\epsilon l^3}{\mu(1)^2} \quad (25)$$

여기에서 A는 상수

식(25)를 eddy 길이 l에 대하여 적분하여, $l=l_d$ 일 때 $\mu = \mu_{mol}$ 로 정리하면(l_d : kolmogorov dissipation scale $= L/Re^{3/4}$)

$$\mu(l) = \mu_{mol} \left[1 + \frac{3A\epsilon}{4\mu_{mol}^3} (l^4 - l_d^4) \right]^{1/3} \quad (1 \geq l_d) \quad (26)$$

레이놀즈수가 큰 영역에서

$$\mu \approx \mu_t = [0.094L]^2 |\nabla \bar{\mu}| \quad (27)$$

여기에서 μ_t : 난류 점도 $= (\mu_{eff} - \mu_{mol})$

이 결과는 프랜틀(Prandtl)의 mixing length 이론과 유사하다.

식(27)에 L 대신에 $k=0.71\epsilon^{2/3}L^{2/3}$ 를 대입하면 식(18)을 얻을 수 있다. 이것으로 보아 RNG 이론은 표준 k- ϵ 모델과 유사함을 알 수 있다.

식(26)에서 레이놀즈수가 큰 영역에서 μ_{eff} 를 계산하면

$$\mu_{eff} = \mu_{mol} \left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\mu_{mol}}} \frac{k}{\sqrt{\epsilon}} \right]^2 \quad \text{된다} \quad (28)$$

RNG 이론으로부터 유도된 모멘트식은 다음과 같다

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (29)$$

k와 ϵ 은 아래 수식에서 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t S^2 - \rho \epsilon \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \end{aligned} \quad (31)$$

여기에서 $\alpha_k, \alpha_\epsilon$ 은 k와 ϵ 에 대한 역유효플랜트수이다

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (32)$$

레이놀즈수가 클 때에는 $\alpha_k = \alpha_\epsilon \approx 1.393$

S는 modulus of mean rate-of-strain tensor $S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 이고

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{이다} \quad (34)$$

여기에서 $\eta \equiv Sk/\epsilon$ 으로 정의되며 $\eta_0 \approx 4.38, \beta = 0.012, C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68$ 을 사용하였다.

식(34)를 식(31)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t S^2 - C_{2\epsilon}^* \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{된다} \end{aligned} \quad (35)$$

여기에서 $C_{2\epsilon}^* \equiv C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$ 이다. (36)

RNG 모델에서 부력효과는 다음 식으로 계산한다.

$$G_b = \beta g_i \alpha \mu_t \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (37)$$

$$G_b = -g_i \frac{\alpha \mu_t}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

압축성 유체에 대한 RNG 모델의 수정은 Sarkar가 하였다. 그 식은 다음과 같다

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \\ + \mu_t S^2 - \rho \epsilon (1 + 2M_t^2) \end{aligned} \quad (38)$$

여기에서 M_t 는 난류마하수이다

RNG 모델에서 에너지식은 다음과 같으며

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \mu_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ + \frac{Dp}{Dt} + (\tau_{ik})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \end{aligned} \quad (39)$$

여기에서 a는 온도에서 역난류플랜트수이다.

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_{mol} - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_{mol} + 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (40)$$

여기에서 $\alpha_{mol} = 1/Pr = k/\mu c_p$ 이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

온도제어장치 시스템의 블록도는 Fig. 1과 같다. 챔버 부분, 온도측정부분, 제어시스템부분으로 나눌 수 있으며, 제어시스템은 VME162-212를 사용하였고, VME Embedded 486 PC의 MS-Windows 환경에서 소프트웨어 개발을 위해 parallel port는 IP-Digital 24로 하고, RTD 센서 입력보드는 IP-RTD로 사용하였고, 또한 14bit A/D converter와 SSR을 사용하여 계의 온도를 제어하였다. 온도측정장치로는 표준연구소에서 보정한 RTD 센서를 사용하였다. 챔버의 구조는 Fig. 2와 같다. 챔버의 크기는 1,200mm x 1400 mm 이며, 300mm x 1,000 mm의 빈공간은 외부와 연결되는 부분이다. 히터와 송풍기를 챔버 우측 상단에 설치하여 챔버 내부에 더워진 공기를 공급한다. 작은 삼각형으로 표시한 지점이 반도체의 성능을 평가하는 테스트와 접촉하는 부분으로, 이 지점의 온도제어가 중요하다. 챔버 내부는 매우 복잡하여 모사실험에서는 단순화하여 실험하였다.

3.2 실험방법

온도 측정실험은 최초 상온에서 실험장치에 전원을 가하여 설정된 온도(50℃, 80℃, 110℃까지 가열하여 챔버 내부의 온도가 일정하게 유지하는지를 반복 실험하였다.

모사실험은 실제 챔버 내부의 복잡한 기계장치를 제거한 단순화한 모듈을 실제 치수대로 CAD로 그려 Fluent Code를 이용하여 실험하였으며, 모사 실험에는 다음의 자료를 이용하여 실험하였다.

표 1. 모사 실험에 사용한 자료

Air	Density	1.225 kg/m ³
	Cp	1006.43 j/kg-K
	Thermal conductivity	0.0242 w/m-K
	Viscosity	1.7894x10 ⁻⁰⁵ kg/m-s
Heater	Heat Transfer Coefficients	$h=0.01+7v$
	Heat Flux	2500 w/m ²
	Initial Temp.	220℃(493K)
FAN	rpm	2750

(단, v=air flow rate)

4. 결과 및 고찰

Fig. 3.은 복잡한 내부구조를 제거하지 않은 상태에서 PID제어기를 이용하여 제어온도를 125℃로 하였을 때 반도체가 측정되는 지점의 온도분포를 나타낸 것으로 약 8℃ 정도의 온도 편차가 있으며, 가운데 부분의 온도가 가장자리 부분보다 높음을 알 수 있었다. HIGH는 상부 평가지점이며, LOW는 하부 평가 지점이다. 1은 좌측 첫 번째 시료이고, 16은 16번째 시료이다. 복잡한 구조물이 있음으로 해서 유체의 흐름이 매우 복잡하나, 뜨거운 유체가 챔버의 중앙으로 흐른 것을 알 수 있다. 그러므로 복잡한 기계장치를 변경하기는 어려우므로 온도제어기의 알고리즘을 새로 설계할 필요가 있음을 알 수 있다.

Fig. 4, 5는 FLUENT code의 표준 k-ε 모델을 이용하여 복잡한 챔버내의 구조물을 제거한 단순화한 챔버의 시동 후 1분, 10분 일 때의 온도분포 모사실험 결과로서 제어온도는 80℃이다. 시동 전 챔버의 온도는 상온이며, 최초 시동 후 1분에서는 아직 히터가 가온 되지 않아서 챔버 내부의 온도가 아직 적정온도에 도달하지 못하였으나, 시동 후 10분이 되면 Fig. 5와 같이 측정지점의 온도가 제어온도에 도달함을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 3과 비교하면 측정지점의 온도 편차가 크므로 모사 연구에서도 챔버내의 구조 변화에 대한 연구가 필요하였지만, 구조가 복잡한 챔버 내부의 온도와 유체흐름에 대한 연구를 위한 기초 연구로서 본 연구를 수행하였다. Fig. 5는 정상상태에서 계 내부의 유체의 흐름을 나타낸 것으로 유체가 주로 벽면을 따라 흐르는 것을 보여주고 있으며 이로 인해 챔버내의 온도분포가 좋음을 알 수 있다.

시스템의 제어 알고리즘을 개발하는 팀에 단순화한 챔버의 온도분포와 유체흐름 정보를 제공하여 개선된 제어 알고리즘이 개발되었다. 실제계에서 실험을 한 결과; Fig. 3. 결과와는 다르게 측정지점의 온도편차는 0.1℃ 이하의 결과를 얻었다.

5. 결론

복잡한 구조의 챔버를 단순화하여 온도분포와 공기유속을 모사 실험하였다.

1. 실제계에 가까운 온도분포를 얻었다.
2. 모사연구 결과를 이용하여 제어 알고리즘을 개선한 결과 평가지점의 온도편차가 매우 향상되었다.

6. 인용 부호

- E : total energy per unit mass. (J/Kg)
- F_i : external body force.(Kg m/s²)
- h : sensible heat. (J)
- J_j : diffusion flux of species j. (Kg/m² s)
- k : conductivity.
- P : static pressure. (Kg/m²)
- P_n : turbulent Prandtle number for enthalpy.
- r : radial coordinate.
- S_h : source term.
- S_m : mass added from any user-defined source. (Kg)
- t : time. (s)
- u : axial velocity. (m/s)
- u' : instantaneous velocity component.
- $\overline{u'_i u'_j}$: Reynolds stress.
- \overline{u} : mean velocity component.
- v : radial velocity. (m/s)
- x : axial coodinate.
- ϵ : rate of dissipation.
- κ : turbulent kinetic energy. (J)
- μ : molecular viscosity.
- μ_t : eddy or turbulent viscosity.
- ρ : density. (Kg/m³)
- ρg_i : gravitational force. (Kg m/s²)
- τ_{ij} : stress tensor defined by (4).
- τ_{ik} : deviatoric stress tensor.

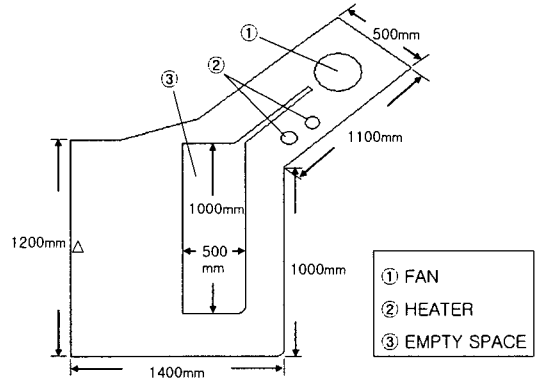


그림 2. 단순화한 챔버의 구조도

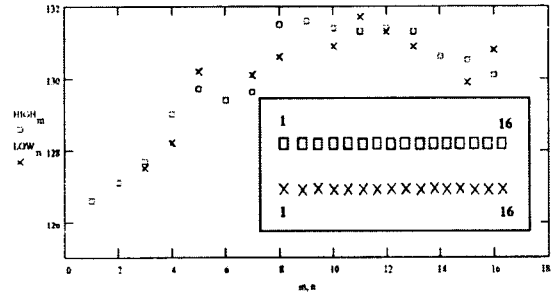


그림 3. 실험지역의 온도분포

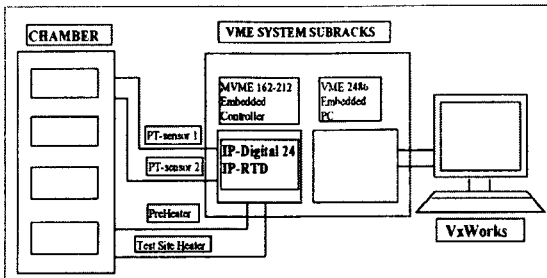


그림 1. 온도제어계의 블록다이어그램

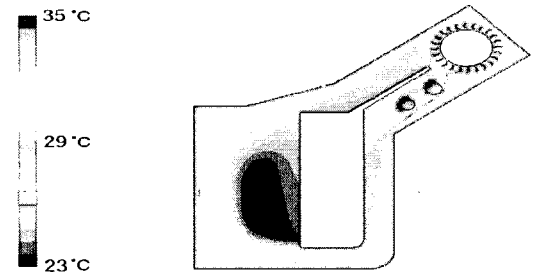


그림 4. 시동 1분 후 온도분포

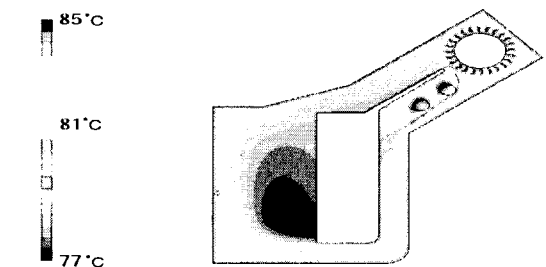


그림 5. 시동 10분 후 온도분포

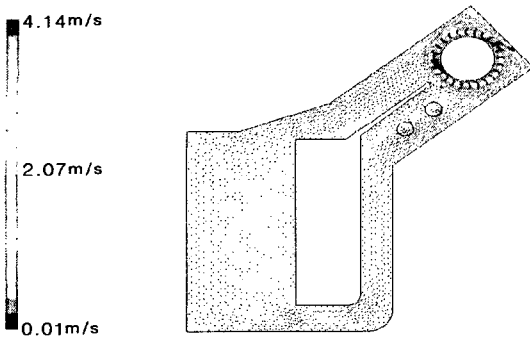


그림 6. 시동 10분 후 유체 흐름

참고문헌

[1] Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N.: "Transport Phenomena", John Wiley & sons (1960).
 [2] Arpaci, V.S. and Larsen, P.L.: "Convection Heat Transfer", Prentice-Hall Inc. (1984).
 [3] Eckert, E. R. G. and Drake, JR. Robert M.: "Analysis of Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill Inc. (1972).
 [4] Fahien, Ray W. : "Fundamentals of Transport Phenomena", McGraw-Hill Inc. (1983).
 [5] Necati Özişik, M. : "Heat Transfer", McGraw-Hill Inc. (1985).
 [6] Hinze, J. O. : "Turbulence", McGraw-Hill Inc. (1975).

[7] Bayazitoglu, Yildiz and Necati Özişik, M. : "Elements of Heat Transfer", McGraw-Hill Inc. (1988).
 [8] McCabe, Warren L., Smith, Julian C., Harriott, Peter : "Unit Operations of Chemical Engineering", McGraw-Hill Inc. (1993).
 [9] "FLUENT USER MANUAL", FLUENT INC. (1996).
 [10] Adomanitis, R.A., Lin, Y.H. and Chang, H.Y., "A Computational Framework for Boundary-value Problem based simulations", ISR TR 98-41, (1999).
 [11] Chang, H.Y., and Adomanitis, R.A., "Analysis of heat transfer in achemical vapor deposition reactor: An eigenfunction expansion solution approach", ISR TR 97-84 (1997)

한 현 각(Hyun-Kak Han)

[정회원]



- 1981년 2월 : 고려대학교 화학공학 (공학사)
- 1986년 8월 : 고려대학교 화학공학 (공학석사)
- 1990년 8월 : 고려대학교 화학학과(공학박사)
- 2003년 3월~현재 : 고려대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

분체공학, 공정제어, 원적위선, 신뢰성공