

에너지·環境 諸般 시스템에 關한 수치해석적 연구 (II)

A Numerical Study on Various Energy and Environmental Systems (II)

장동순¹⁾, 박병수²⁾, 김복순²⁾, 이은주²⁾, 송우영³⁾

D. S. Jang, B. S. Park, B. S. kim, E. J. Lee, W. Y. Song

This paper describes some computational results of various energy and environmental systems using Patankar's SIMPLE method. The specific topics handled in this study are jet bubbling reactor for flue gas desulfurization, cyclone-type afterburner for incineration, 200m tall stack for 500 MW electric power generation, double skin and heat storage systems of building energy saving for the utilization of solar heating, finally turbulent combustion systems with liquid droplet or pulverized coal particle.

A control-volume based finite-difference method with the power-law scheme is employed for discretization. The pressure-velocity coupling is resolved by the use of the revised version of SIMPLE, that is, SIMPLEC. Reynolds stresses are closed using the standard $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ models. Two-phase turbulent combustion of liquid drop or pulverized coal particle is modeled using locally-homogeneous, gas-phase, eddy breakup model. However simple approximate models are incorporated for the modeling of the second phase slip and retardation of ignition without consideration of any detailed particle behavior. Some important results are presented and discussed in a brief note. Especially, in order to make uniform exit flow for the jet bubbling reactor, a well-designed structure of distributor is needed. Further, the aspect ratio in the double skin system appears to be one of important factors to give rise to the visible change of the induced air flow rate. The computational tool employed in this study, in general, appears as a viable method for the design of various engineering system of interest.

1 충남대학교 환경공학과 (305-764, 대전시 유성구 궁동 220, Tel 042-823-8361)

2 충남대학교 환경공학과 대학원 (305-764, 대전시 유성구 궁동 220, Tel 042-821-6677)

3 한국 전력 연구원 (305-380, 대전시 유성구 문지동 103-16, Tel 042-865-5677)

1. 서론

최근 컴퓨터 성능의 현격한 신장과 저렴한 가격에 의한 PC의 보급은 산업 전반에 걸친 열유동 및 화학반응이 결부된 시스템 설계에 있어 전산유체공학적 방법의 역할을 크게 증대시켰다. 본 논문은 컴퓨터 프로그램 개발에 의한 에너지·환경 분야에 관련된 다양한 CFE(Computational Fluid Engineering) 응용 예를提示함으로써 수치해석적 방법이 이 분야의 고도설계에 중요한 도구로 사용될 수 있음을 보이고자 한다. 특히 환경분야의 외국기술에 대한 의존도가 높고 많은 기술료를 외국에 지불하고 있는 국내사정을 감안할 때 전산유체공학기술 보급에 의한 국내 환경기술의 제고는 바람직한 일로 생각된다.

본 연구에서 고려한 첫 번째 시스템은 발전소에서 배출되는 산성가스의 하나인 SO_x 제거장치인 고효율 Jet Bubbling Reactor(JBR)에 관한 것이다. 이 장치에 대한 본 연구의 목적은 그림 1에 나타낸 각 스파저 파이프에 균일한 양의 배기가스가 유입되어 SO_x 의 흡수를 위한 액-기의 혼합이 효율적으로 일어나도록 유동장을 조절하는 것이다. 유동장 조절의 주요 방법으로는 JBR의 중형비, 배기가스의 유입속도, 배플의 형상과 크기 등을 들 수 있다. 그림 2는 싸이클론 형태를 가진 후연소로의 도식도를 나타내는 것으로서 공기유입량 및 선회강도, 싸이클론의 중형비에 따른 접선방향의 속도분포 및 체류시간과 같은 유동특성의 파악이 목적이다. 그림 3과 4는 태양열의 효율적인 이용을 위한 건물의 이중외피와 물을 작동유체로 사용한 열저장 축열조의 도식도를 각각 나타낸다. 이중외피문제는 이중외피의 중형비, 내외벽의 온도 및 유도 유입되는 공기의 온도 등에 따른 유도 공기의 양, Nusselt수가 설계의 변수로 고려된다. 축열저장조 시스템에서는 태양열에 의해 가열된 고온 물의 상부 유입과 열적부하를 감당한 비교적 온도가 낮은 재순환 물의 하부유입에 따른 열유동장의 분석이 목적이다. 구체적으로 상부고온 물의 유입에 대한 관성교란효과와 완전냉각되지 않는 재순환 물의 하부유입에 따른 열적부력에 대한 열저장조내의 성층유지가 관건이다.

그림 5는 직경 12m 높이 200m에 해당하는 500MW급 화력발전소 대형연들의 도식도를 나타낸다. 배기가스의 유량과 내화재의 절연에 따른 온도강하와 압력손실등이 관심이다. 그림 6과 7은 액적 소각처리를 위한 축대칭 액적소각로와 미분석탄의 연소를 위한 접선 주입형태의 슬래깅 연소로의 도식도를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 액적연소와 미분석탄의 연소는 난류반응 가정한 LMF(Locally Homogeneous Flow Model)를 고려하였다.^[1] 액적과 미분석탄의 연소는 난류반응에서 사용되는 eddy breakup 모델^[2]을 사용하였다. 그러나 미분석탄 연료의 농도분포의 보다 사실적인 모사를 위해 공기와 미분석탄간의 'slip'을 고려하였으며 미분석탄 밀도를 공기의 밀도의 일정한 배수만큼 증가시켰다. 한편 액적 붕괴나 입자 휘발에 따른 난류반응 지연효과의 고려를 위해 적절한 경험상수를 난류반응모델에 도입하였다. 이러한 시도는 액적의 붕괴, 미분탄의 휘발, 비산에 따른

공기와 다른相간의 난류간섭, 단일입자의 분무연소와의 차이점^[1] 등에 따른 복잡한 경험식과 그에 따른 현상학적인 모델의 어려움을 피하기위해 시도되었다.

위에서 언급한 제한 에너지·환경 시스템에 대해 본 연구에서는 전산유체역학적인 수치모사를 통해 설계 및 운전조건 설정에 효율적으로 대처할 수 있었다. 특히 컴퓨터 용량과 계산속도가 요구되는 액-고상 난류반응의 복잡한 문제도 간단한 모델을 이용하여 586級の PC를 사용하여 일차적인 설계 및 운전변수 설정이 가능하였다. 이런 점에서 본 논문에서 제시한 수치모사 방법은 산업현장에서도 공히 이용할수 있는 高度 設計의 도구로서 가능성을 보였다고 할 수 있다.

2. 지배 방정식과 수학적 모델

본 연구에서 사용한 기상 지배 방정식은 단위질량당 일반 종속변수 ϕ 에 대해 아래와 같은 표준형으로 나타내어진다^[3].

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (1)$$

식 (1)은 검사 체적에 기초한 유한 차분 방법에 의해 형식적으로 선형인 이산화 방정식을 유도할 수 있으며 이 이산화 방정식의 해는 line-by-line TDMA와 반복 계산에 의해 구할 수 있다. 유동항의 이산화를 위해 power-law scheme 을 사용했으며 운동량 방정식에서 압력과 속도의 연계 문제는 SIMPLE^[3] (Semi-Implicit Method Pressure-Linked Equation)의 개량형의 SIMPLER^[4] 나 SIMPLER^[3]를 각각 사용했다. 한편 Reynolds 전단력의 모델을 위해서는 표준 k - ϵ 모델이나 필요에 따라서 RNG k - ϵ ^[5] 모델을 사용하였다. 난류 반응 모델은 주로 화학반응이 난류 혼합에 의해 빠르다는 가정 하에 'fast chemistry' 모델의 하나인 'eddy breakup'^[2] 모델을 사용하였다.

3. 응용예

본 절에서는 에너지·환경문제에 대한 7가지 적용예를 나타내었다.

3.1 SO_x 흡수를 위한 JBR

황산화물 흡수를 위한 JBR내의 유입속도, 종횡비 등에 대한 일련의 변수연구를 수행하였으며 그림 8은 단순한 배플을 사용한 경우의 대표적인 유동장을 나타낸다. 스파저를 통한 균일한 유량배분을 위한 본 연구에서 고려한 여러 변수연구는 실질적인 효과가 없는 것으로 나타났다. 그러므로 스파저 출구를 통한 균일한 유량분포가 이루어지기 위해서는 잘 설계된 유량분배 장치 구조물이 JBR 입구노즐 근처에 설치되어야 할 것으로 판단하였다.

3.2 사이클론 후연소로

그림9는 사이클론 후연소로 내의 축방향 몇 점의 위치에서 대표적인 접선방향에 대한 직경방향 속도분포를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 접선방향의 속도는 입구나 출구 근처에서는 Rankine vortex 형태를 가지나 사이클론 콘(cone) 근처에서는 solid vortex 형태를 가짐을 알 수 있다. 기타 사이클론 크기, 선회강도 변화에 따른 조사가 수행되었으며 대표적인 체류시간은 0.15초로 나타났다. 이는 후연소로의 대표적인 체류시간인 2초보다 작은 값으로서 오염물질의 농도가 매우 낮을 경우에는 후연소로의 성능이 적절하지 않음을 나타낸다.

3.3 건물에너지 효율 향상을 위한 이중외피

그림10은 이중외피내의 대표적인 유동장과 온도장을 나타낸다. 그림에 나타난 유동장은 열경계층이 매우 작아 벽쪽으로 압축된 양상을 보이고 있으며 속도경계층은 전 영역에 확대되어 밀폐된 관 유동과 유사한 양상을 나타내고 있다. 이러한 양상은 유도유입된 공기의 열용량이 오른쪽 고온벽면에서 공기로 전달되는 열전달을 압도한 것에 기인한 것으로 판단된다. 한편 Prandtl수가 공기의 경우 1에 가까운데 속도장이 밀폐관 유동과 유사하고 속도경계층이 크게 확대되어 나타난 나타나지 않는 이유는 유도공기의 유입구의 방향이 좌측벽이며 주입높이에 영향을 받는 것으로 판단되었다.

3.4 열 저장 축열조

그림 11은 하부에서 축열조내의 온도(40℃)보다 높은 축열조 재순환 물이 유입 또는 경우에 대한 속도장을 나타낸다. 속도의 분포에서 나타났듯이 강력한 열적 부력이 우측 입구 부근의 벽을 따라 형성됨을 알 수 있다. 기타 유입속도, 열저장조의 절연정도 등 변수에 대한 연구가 수행되었으며 연구결과로서 내릴 수 있는 결론중의 하나는 재순환 하부유입 유체의 온도가 열저장조내의 유체의 온도보다 높은 경우 부력 상승 유동 차폐를 위한 baffle의 설치가 요구된다. 또는 상승되는 물이 각각의 온도와 같은 위치에서 열저장조로 유입되는 정교한 분배기가 필요하다.

3.5 200m 고층 연돌

그림 12는 직경 12m, 200m 높이의 고층 연돌에서 온도장을 나타낸다. 온도장의 결과가 연돌의 벽을 따라 평행한 양상을 보여 주고 있는데 이는 200m 고층 연돌의 절연이 충분하여 외부로의 열 손실이 거의 없음을 나타낸다. 연돌방출 기체의 유속과 온도는 연기의 효과적인 확산을 위한 유효고를 결정할 수 있으며 본 연구와 같이 방출되는 가스의 유량이 충분한 경우는 연돌내 유동계산에서 부력항이 고려되지 않는다.

3.6 액적 소각로

그림 13은 액적 소각로의 속도장을 나타낸다. 난류 반응장의 계산은 이미 언급한 바와

같이 기상 상태를 가정한 LHF(M(Locally Homogeneous Flow Model)을 사용하였으며 액적 기화 및 붕괴에 따른 난류 반응의 지연 시간을 고려하기 위해 연료 eddy의 반응 특성 시간을 일정 인자로 증가시켰다. 그림에서는 액적붕괴에 따른 난류반응 지연인자를 drop factor를 사용하여 나타내었다. drop factor가 1인 경우에는 완전 기상상태를 의미하며 본 연구에서 행한 변수연구결과에 의하면 drop factor가 0.3인 경우가 문헌에 나타난 액적연소의 온도분포 특성을 잘 나타내고 있다.

3.7 미분탄 슬래깅 연소로

그림 14는 미분탄 슬래깅 연소로 일단계 연소로에서 속도장을 나타낸다. 미분탄 연소는 역시 LHF(M을 사용하였으나 미분탄의 공기와의 slip과 미분탄 휘발화에 따른 반응 지연 효과를 공히 고려하였다. 미분탄의 slip을 고려하기 위해 '미분탄 공기'의 밀도를 공기의 밀도의 5배로 가정하였고 반응 지연 인자는 연료 eddy 붕괴율이 기상 반응에 30%가 되는 것으로 가정했다. 계산한 결과는 실험에 나타난 온도측정값과 그 경향이 비교적 일치하였다.

4. 결론

일련의 수치 해석 연구를 통하여 환경 에너지에 관련된 여러 시스템의 열유동에 대한 유용한 결론을 도출할 수 있으며 특히 강조되는 사항은 다음과 같다. 황산화물 저감을 위한 JBR 수치모사에서는 배기 가스 입구 분포에서의 잘 설계된 배기 가스 확산 장치가 스파저를 통한 균일한 유량 분포에 중요하다. 액적 연소나 미분 석탄의 입구 연소에서 LHF(M에 의한 가정과 'slip'과 '반응 지연 효과'를 고려한 모델로서 복잡한 二相 난류 반응에 대한 일차적인 설계 자료를 도출할 수 있었다. 그러나 경험인자 설정에 대한 타당성과 그 수치에 대한 일반성은 지속적인 검토가 이루어져야 할 사항이다.

감사문

본 연구는 한국에너지 기술연구소 건축설비팀, 지역냉난방팀 그리고 저공해연소팀과 한국기계연구원의 연소환경연구팀의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Faeth, G.M. "Current Status of Droplet and Liquid Combustion", Prog. Energy Combust. Sci Vol3 pp 191-224(1977)
- [2] Spalding, D. B., "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flame", 13th Symposium(Int'l) on Combustion, The Combustion Institute, p.649 (1971)
- [3] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D.C. (1980)
- [4] Jang, D. S., Jelti, R. and Acharya, S., "Comparison of PISO, SIMPLER and SIMPLEC Algorithms for the Treatment of Pressure Velocity Coupling in Steady Flow Problems", Numerical Heat Transfer, Vol.10, pp.209-228 (1986)
- [5] Yakhot, R. and S. A. Orsag, "Renormalization Group Analysis of Turbulence, I. Basic Theory", J. of Scientific Computing, Vol. 1 No. 1 pp.1-51 (1986)

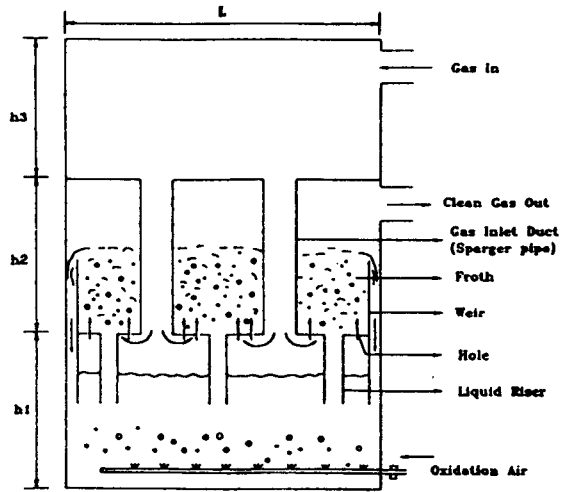


Fig. 1 Schematic of Jet Bubbling Reactor

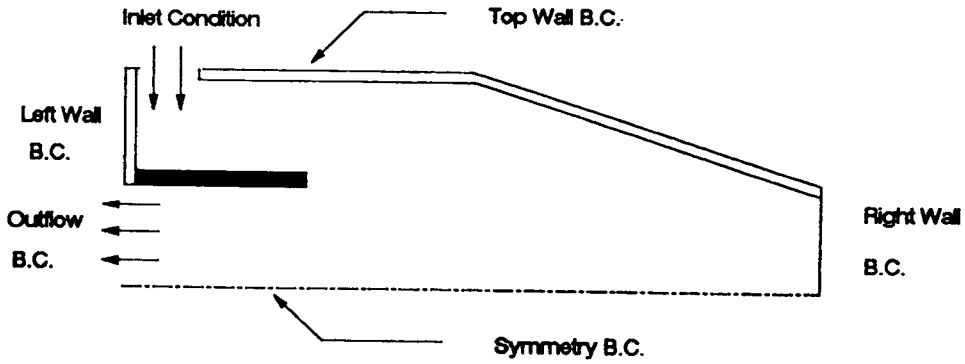


Fig. 2 Schematic Diagram of Cyclone

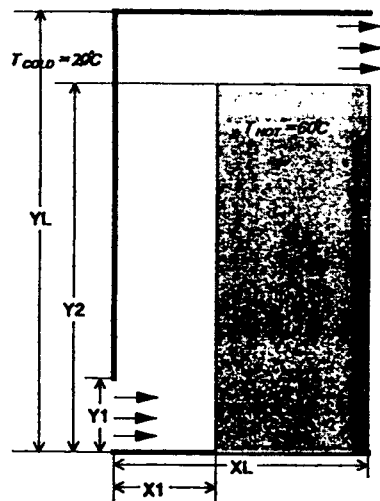


Fig. 3 Schematic of Double Skin System of Building

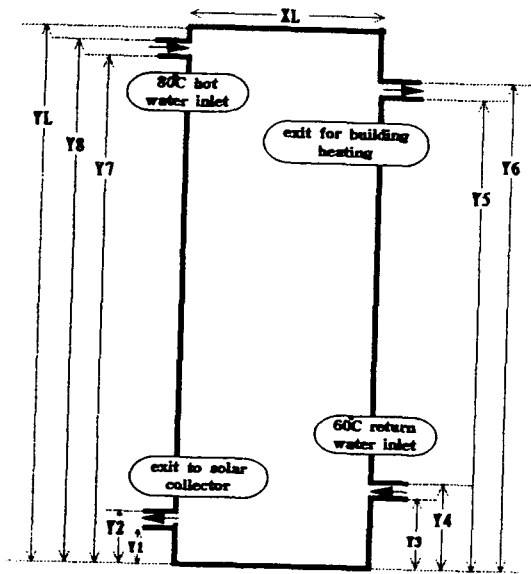
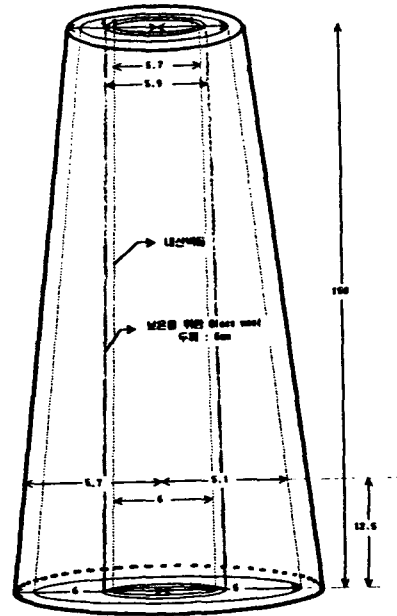


Fig. 4 Schematic of Thermal Storage Tank

용적 : 5000
 Pool Flow Rate : 4300ton/day
 Flow Gas량 : 2140ton/hr



(Unit : m)

Fig. 5 Schematic Diagram of 200m tall Stack

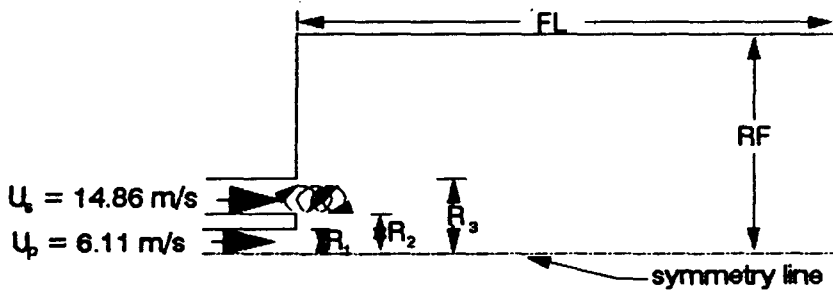


Fig. 6 Schematic of Waste Oil Incinerator

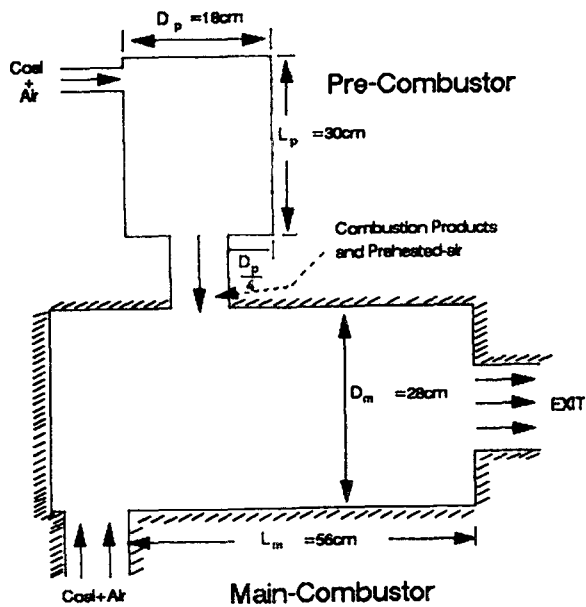


Fig. 7 Schematic System of Cylone Combustor with Pulverized Coal

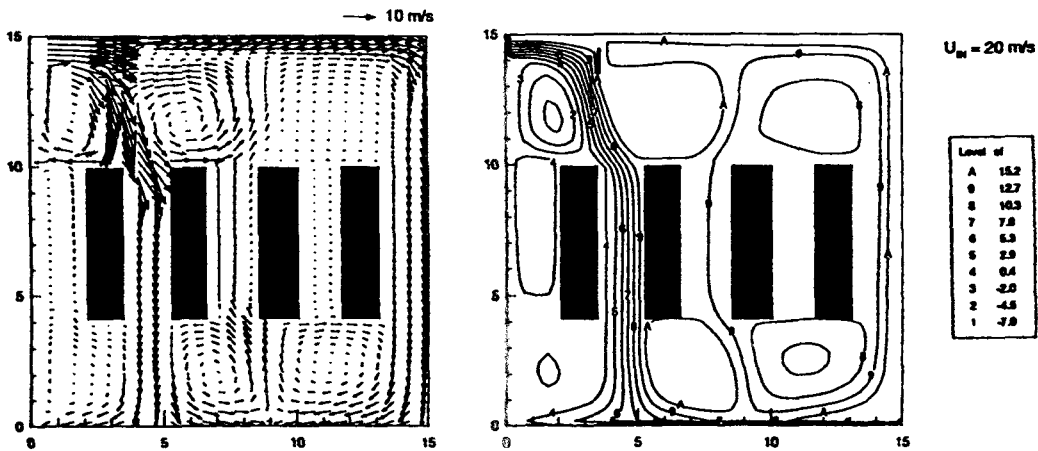


Fig. 8 Velocity Vector and Streamline Contour of JBR with Baffle

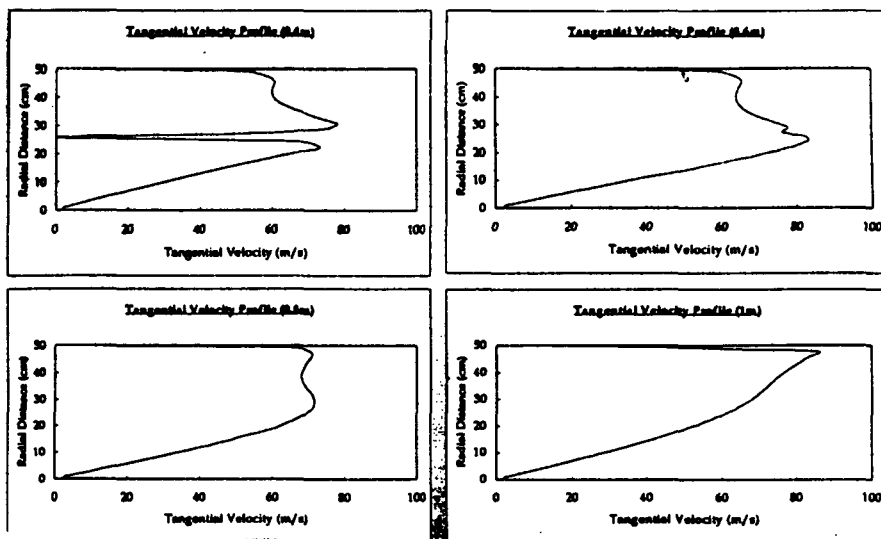


Fig. 9 Radial Tangential Velocity Profile at Four Axial Location

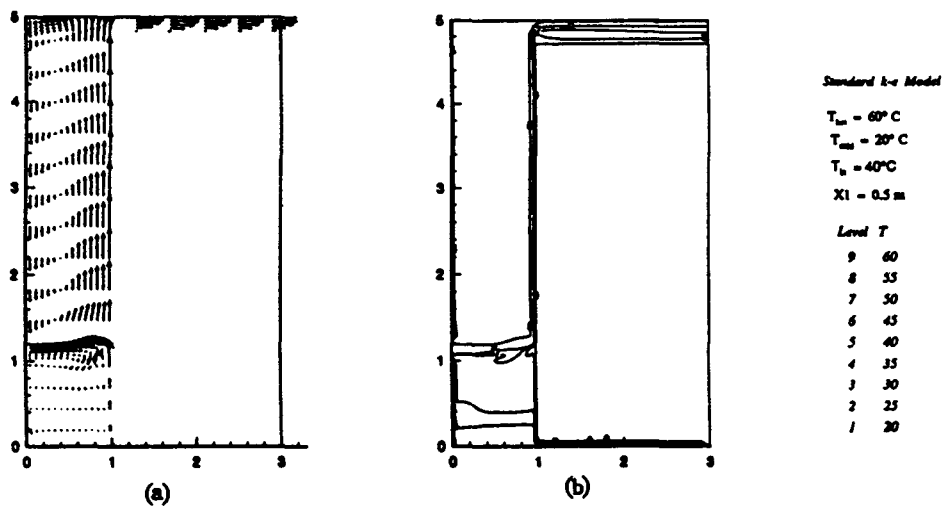


Fig. 10 Velocity Vector and Streamline Contour of Double Skin

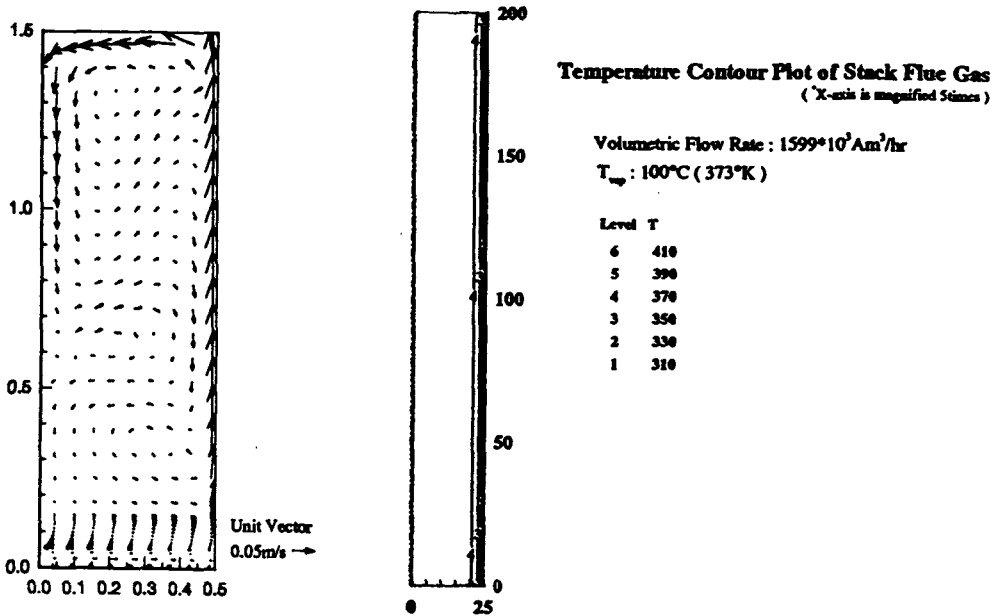


Fig. 11 Velocity Vector plot with Fig. 12 Isothermal Contour for 200m tall Stack Bottom Waste Inlet only

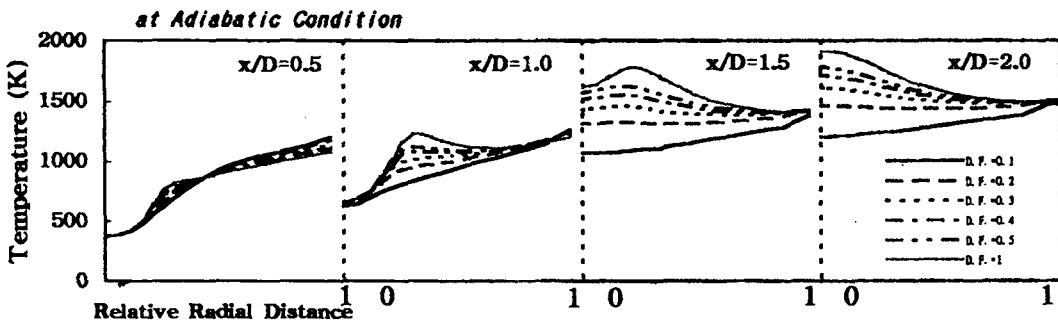


Fig. 13 Radial Temperature Profile at Four Axial Location

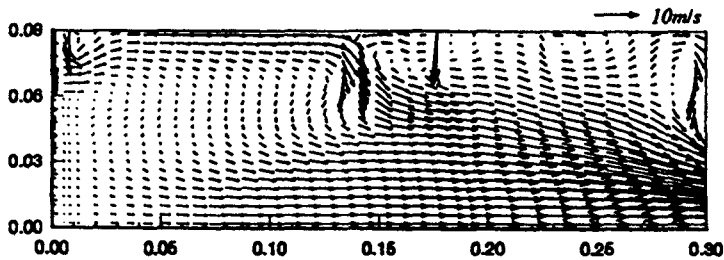


Fig. 14 Velocity Vector Plots of Cyclone Precombustor with Staged Air Injection