

발전용 희박예혼합 가스터빈에서 연소모드변환 시기의 연소특성 해석

정재화*, 서석빈**, 김종진***, 차동진****, 안달홍*****

Numerical Analysis of Combustion Characteristics during Mode Transfer Period in a Lean Premixed Gas Turbine for Power Generation

Jae Hwa Chung*, Seok Bin Seo**, Jong Jin Kim***, Dong Jin Cha****, Dal Hong Ahn*****

Key Words : Gas turbine(가스터빈), Combustor(연소기), CFD(전산유체역학), Fuel nozzle(연료노즐), Lean-Premixed Combustion(희박예혼합연소)

Abstract

Recently, gas turbines for power generation adopt multistage DLN(Dry Low NOx) type combustion, where diffusion combustion is applied at low load and, with increase in load, the combustion mode is changed to lean premixed combustion to reduce NOx emissive concentration. However, during the mode changeover from diffusion to premixed flame, unfavorable phenomena, such as flashback, high amplitude combustion oscillations, or thermal damage of combustor parts could frequently occur. In the present study, to apply for the analysis of such unfavorable phenomena, three-dimensional CFD investigations are carried out to compare the detailed flow characteristics and temperature distribution inside the gas turbine combustor before and after combustion mode changeover. The fuel considered here is pure methane gas. A standard $k-\epsilon$ turbulence model with wall function and a P-N type radiation heat transfer model, have been utilized. To analyze the complex geometric effects of combustor parts on combustion characteristics, fuel nozzles, a swirl vane for fuel-air mixing, and cooling air holes on the combustor liner wall, are included in this simulation.

1. 서론

최근 국내에 도입된 발전용 가스터빈은 NOx 저감을 위하여 DLN(Dry Low NOx) 연소방식을 사용하여 저부하에서는 연소의 안정화를 위하여 확산연소가 일어나도록 하고, 일정부하 이상이 되면 NOx 저감을 위하여 희박예혼합 연소방식으로 연소모드를 변환하는 다단연소방식을 채택하고 있다^{1,2}. 그러나 다단 연소방식에서 연소모드 변환 시에 연소 불안정, 화염의 역화, 연소진동 및 이에 기인한 연소기 부품들의 소손 등이 발생할 가능성이 높아져 DLN 가스터빈의 연소에 대한 국내연구의 필요성이 증대되고 있다.

이러한 가스터빈 연소기 내부에서의 연소불안정이나 복잡한 유동특성을 파악하기 위한 유용한 도구로 최근에는 3차원 전산 해석 방법이 많이 사용되고 있다³⁻⁵. 하지만 기존 가스터빈 연소에 관한 해석들은 정상상태(steady state)에 대한 연구가 주를 이루고 있어서, 연소모드의 변환과 같이 과도상태(transient state)의 현상을 3차원으로 해석한 문헌들은 찾아보기 어렵다. 또한 연소기 형상도 단순화하여 해석하고 있어서 복잡한 냉각홀 등을 입력하여 연소기의 실제 형상을 고려한 연소과정을 파

악하는 데에도 한계가 있다.

본 연구에서는 상용의 건식 저NOx 발전용 가스터빈의 연소기를 대상으로 연소특성을 3차원 비정상상태로 해석하여 연소모드 전환전후의 연소기 내부 유동, 온도분포 및 고온부를 예측하여 연소모드 변환전후에 가스터빈의 연소상태를 비교하여 안정적인 운전에 활용할 수 있도록 하였다. 특히 본 전산해석에서는 연소기 연료노즐들의 형상, 공기와 연료의 혼합을 위한 스윙 베인 형상, 라이너 벽에 있는 냉각공기 구멍들의 세부적인 3차원 형상을 고려하여 이들의 형상 변경이 연소기 내부유동이나 온도 분포에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 하였다.

2. 지배방정식 및 계산격자

2.1 지배방정식 및 수치모델

가스터빈 연소기 내부 연소특성 해석에는 연속방정식, 운동량 보존식, 에너지 보존식을 포함한 3차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법(finite volume method)으로 해석하였다.

연소기 내부의 연소과정 해석을 위해서 연소에 참여하는 화학종 i 의 보존식은 다음과 같이 tensor 형태로 표현하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} J_{i,j} + R_i$$

* 한전전력연구원, jhchung@kepri.re.kr

** 한전전력연구원, dolbin@kepri.re.kr

*** 한전전력연구원, jjkim@kepri.re.kr

**** 한밭대학교, djcha@hanbat.ac.kr

***** 한전전력연구원, dhahn@kepri.re.kr

여기서, m_i 는 화학종 i 의 질량분율, $J_{i,j}$ 는 화학종 i 의 확산 flux를 나타내며, R_i 는 화학반응에 의한 화학종 i 의 질량 생성율(또는 소멸율)을 나타낸다. R_i 를 구하기 위해서 Finite rate chemistry 모델^[6,7]을 사용하였다. 가스터빈 연소기에서의 연료는 순수한 메탄으로 가정하여 화학종은 CH_4 , O_2 , CO_2 , CO , H_2O , N_2 의 6종류를 고려하여 2단계의 연소가 일어나는 것으로 해석하였다. 난류계산 모델로는 κ - ϵ 모델이 적용되었고, 전체적인 방정식의 해법으로는 SIMPLE 알고리즘이 사용되었다. 복사에 의한 열전달 해석을 위해서는 P-N 근사법^[8]을 적용하였으며, 평균 흡수계수는 $0.2m^{-1}$ 로 일정하게 가정하였다. 전산해석에는 상용의 FLUENT 6.0 code^[9]를 사용하였다.

2.2 계산격자계

연소기는 라이너, 라이너 벤츄리부분, 각 연료노즐들(1차연료 노즐, 2차연료 노즐, 변환노즐), 연료와 공기의 혼합을 촉진하기 위한 스윙 베인, 라이너 벽에 있는 냉각공기 구멍들을 모두 포함하여 해석하였다. 실제 계산에는 계산시간의 단축을 위하여 연소기의 6분의 1을 전산해석 영역으로 선정하여 주기 경계조건(periodic boundary condition)을 사용하여 계산하였다. Fig. 1은 연소특성 해석에 사용한 연소기 실제 형상을 6분의 1을 표시한 그림으로 우측이 압축기 방향으로 공기가 유입되는 방향이며, 좌측이 터빈 방향으로 연소가스가 연소되어 나가는 쪽이다.

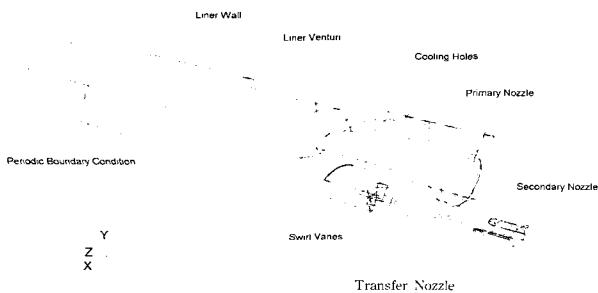


Fig. 1 Schematic of the combustor

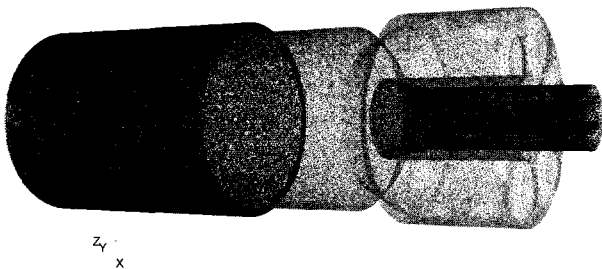


Fig. 2 Unstructured grid system for the combustor

계산영역은 노즐 캡 assembly 상면에서 라이너 끝까지 총

길이는 970mm로 선정하였고, 라이너의 내경은 350mm, 라이너에서 역화방지를 위하여 단면적 축소부위인 venturi 부는 내경 250mm로 설정하여 계산하였다. 계산격자는 GAMBIT code^[10]를 사용하여 생성하였으며, 연소기 6분의 1의 계산영역에 대하여 약 24만 cell의 비구조형 격자(unstructured grid)를 생성하였다. Fig. 2는 연소해석에 사용한 계산격자의 형상을 보여주며, 계산영역을 6개 합친 전체 연소기 형상을 표시하였다.

3. 해석결과 및 고찰

연소 모드변환 전후의 연소특성을 파악하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 노즐별 연료분사 스케줄(연소기의 6분의 1 계산영역 기준)을 따라서 확산연소모드(Fig. 3의 0초~약 20초사이)에서 예혼합 연소모드(Fig. 3의 약 52초 이후)까지 약 40초 동안의 연소과정을 각 연료노즐들의 연료변화량을 경계조건으로 입력하여 비정상상태로 해석하였다. Fig. 3은 연료 밸브의 움직임을 고려하여 Flowmaster code^[11]로 계산하여 얻은 결과이다. 연소모드 변환전의 확산연소모드와 연소모드 변환후의 직류의 예혼합연소모드에서의 연료량과 공기량을 Table 1에 요약하였다. 전산해석 결과는 연소모드 변환전후의 이 2가지 연소모드 해석결과를 비교하여 분석하였다.

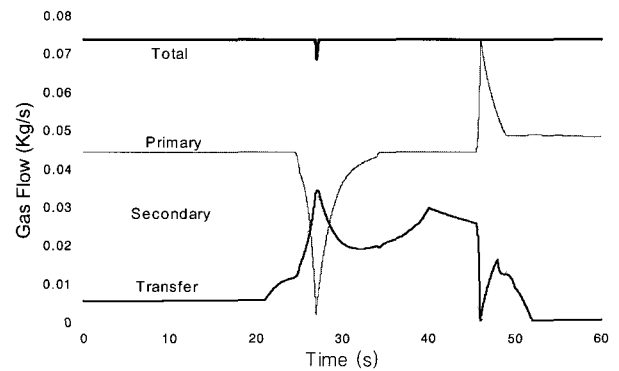


Fig. 3 Variations of natural gas flows through the separate fuel lines

Table 1 Fuel and air flow rates

Combustion Mode	Fuel Flow Rate (Kg/sec)		Air Flow Rate (Kg/sec)
	Primary Nozzle	Secondary Nozzle	
Diffusion Mode	4.9×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.39
Premixed Mode	5.5×10^{-2}	1.8×10^{-2}	2.39

Fig. 4는 확산연소모드에서 연소가 일어나고 있는 상태에서 연소가스의 속도분포를 해석한 결과이다. 1차 연료노즐(primary nozzle) 바로 상부의 1차연소 영역에서 연소가 일어나서 연소가스가 라이너의 벤츄리 부분을 통과하므로 확산연소모드에서 벤츄리 부분의 유속이 매우 고속으로 유지되는 것을 알 수 있다. 1차연소 구역에서 연소된 가스는 벤츄리 부분을 통과하여 라이너의 중심부로 향하고 다시 transfer 노즐 상부의 2차연소 영역에서 연소가 발생하며 고속 영역이 형성된다. 2차연소 영역에서

연소된 연소가스와 함께 라이너를 통과하면서 점차로 연소기 하부로 가면서 전단면에 걸쳐서 균일한 속도분포를 보인다.

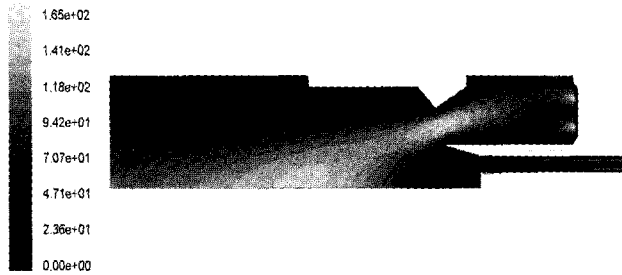


Fig. 4 Velocity contours at diffusion combustion mode (symmetric plane)

Fig. 5는 확산연소모드에서의 온도분포 해석결과이다. 1차 연소 영역과 2차 연소영역에서 모두 연소가 일어나므로 두 영역에서 온도가 높게 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 확산연소 모드에서는 1차연소 영역에서 확산연소가 일어나므로 화염 온도도 국부적으로 고온이며 화염의 최고온도 계산치도 2,270K 정도로 높게 예측되었다. 따라서 확산연소 모드에서 1차 연소 영역에서 국부적으로 형성된 고온부가 thermal NOx의 배출에 영향을 많이 미치는 것을 예측할 수 있다. 실제 현장 가스터빈에서 측정된 결과에서 NOx의 발생이 확산연소모드에서 예혼합 연소모드로 변환한 후에 점차로 감소하는 이유는 이러한 1차연소 영역에서 형성된 국부적인 고온부가 모드 변환후 사라지는데 기인함을 추정할 수 있다. 연료의 양이 1차 및 2차로 나누어져서 연소가 되므로 2차연소 영역에서 연소되는 연료량이 적어지므로 라이너 중심부에 형성되는 2차영역의 고온부위는 상대적으로 크기가 줄어든다.

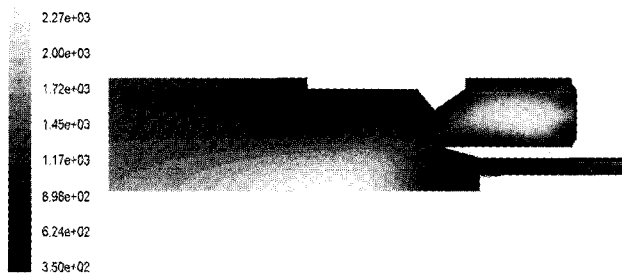


Fig. 5 Temperature contours at diffusion combustion mode (symmetric plane)

Fig. 6은 확산연소시의 각 단면별 온도 분포를 보여준다. Z축은 연소기의 중심축을 따라서 정하였으며, Fig. 1에 표시한 2차 연료노즐(secondary nozzle)이 위치한 좌측 끝 부분을 Z=0으로 정의하였다. Fig. 6(a)는 primary 연료 노즐이 위치한 1차연소 영역에서의 온도분포를 보여준다. 이 부분은 주로 확산연소가 일어나므로 화염의 온도가 높다. 고온부분이 링 형태로 형성되며 라이너 벽에 설치된 냉각홀을 통과하는 낮은 온도의 공기가 불어오는 방향은 화염온도가 상대적으로 낮고, 냉각홀이 없는 부분은 연소온도가 높게 형성되어 원주방향으로 온도 분포가 불균일한 형상을 보이고 있어서 냉각홀의 영향을 알 수 있다. Fig.

6(b)는 벤츄리 부분의 온도분포를 보여주며, 1차연소 영역에서 냉각홀을 통하여 연소기로 도입된 공기와 1차연소된 고온가스가 혼합되어 단면에서 균일한 온도를 유지하고 있다. Fig. 6(c)는 2차연소 영역에서 2차연료 노즐을 통하여 분사된 연료가 연소되어 라이너 중앙에 고온부가 형성되어 있는 것을 보여준다. 이 부분은 스윙 베인을 통과하기 전에 2차연료 노즐을 통해서 분사되어 예혼합된 연료와, 노즐 팁에서 2차연료의 일부(subpilot)가 확산되어 연소되는 부분으로 주로 예혼합 연소가 일어나므로 Fig. 6(a)의 1차연소 영역에 비하여 화염의 온도가 낮게 예측되었다. Fig. 6(d)에서는 연소가 완료되어 온도분포가 전단면에 걸쳐서 균일해지고 있음을 알 수 있다.

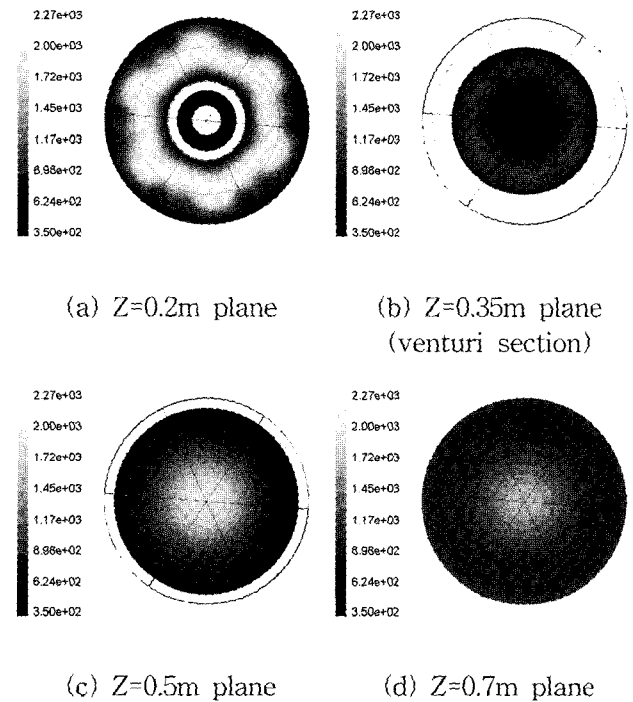


Fig. 6 Temperature contours at diffusion combustion mode (Z-planes)

Fig. 7은 확산연소 모드에서 예혼합 연소모드로 모드 변환이 일어난 직후의 연소가스의 속도분포를 해석한 결과이다. 예혼합 연소의 경우는 1차연소 영역에서는 화염이 존재하지 않으므로 벤츄리 부분을 통과하는 혼합기의 유속은 Fig. 3에 표시된 확산연소 모드에서 벤츄리 부분의 유속에 비하여 감소한 것을 알 수 있다.

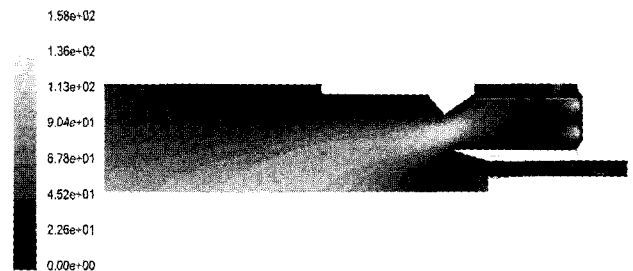


Fig. 7 Velocity contours at premixed combustion mode (symmetric plane)

Fig 8은 확산연소 모드에서 모드 변환이 된 직후의 예혼합 연소 모드에서의 온도분포를 보여준다. 고온부는 라이너의 중심부에 형성된다. 화염온도는 확산연소 모드에 비하여 감소하여 최고 온도가 약 1,700K 정도로 예측되어 모드 변환전인 Fig. 5의 확산연소 모드 온도분포 결과와 비교하면 최고 온도가 상당히 감소된 것을 볼 수 있다. 따라서 확산연소 모드에서 예혼합 연소 모드로 변환시에 최고온도의 감소에 의하여 thermal NOx의 배출이 감소되는 것을 본 해석결과로부터 예측할 수 있다.

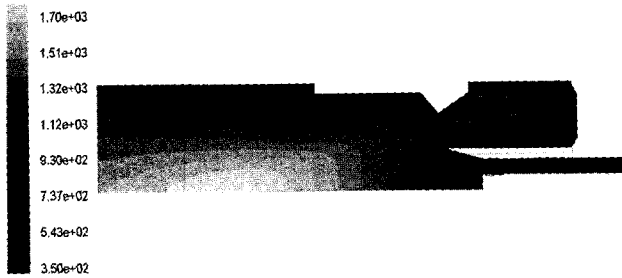


Fig. 8 Temperature contours at premixed combustion mode (symmetric plane)

Fig. 9는 예혼합연소에서 각 단면별로 온도분포를 해석한 결과를 보여준다. 벤츄리 부분인 Fig. 9(a)에서 낮은 온도에서 혼합기가 2차 영역으로 유입되고, Fig. 9(b)에서와 같이 연소가 시작됨에 따라서 라이너 중심부의 온도가 상승하기 시작하고, Fig. 9(c)에서는 라이너 중심부에서 최고 연소온도에 도달한 것을 보여준다. Fig. 9(c)에서 최고 연소 온도에 도달한 부분에서 라이너 중심부와 라이너 벽의 온도 차이가 크게 나타나고 중심부에서의 온도구배도 비교적 크다. 그러나 연소가 거의 완료되는 라이너 끝 부분인 Fig. 9(d)에서는 전체 단면에 걸쳐서 점차로 온도 분포가 균일해지며, 확산연소인 앞의 Fig. 6(d)와 유사한 경향을 보인다.

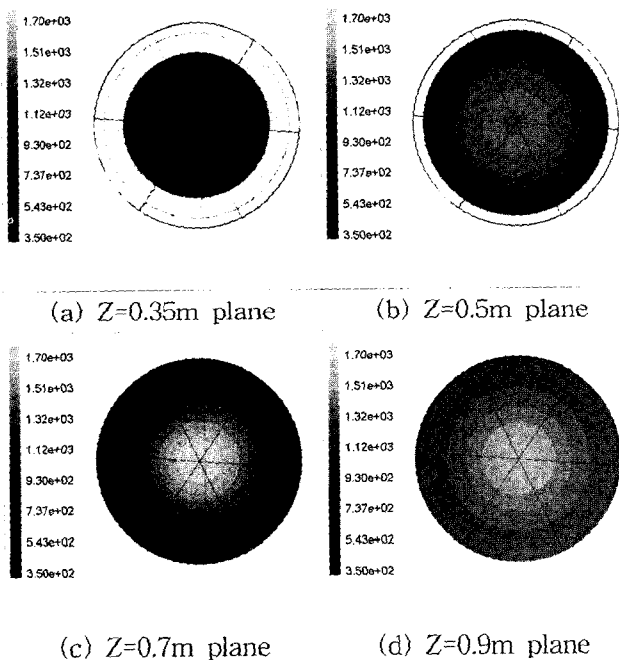


Fig. 9 Temperature contours at premixed combustion mode (Z-planes)

4. 결론

실제 발전소에서 운전되고 있는 DLN 가스터빈 연소기를 대상으로 복잡한 3차원 현상을 고려하여 연소모드 변환전후의 연소과정을 전산해석하였다. 전산해석 결과로부터 연소모드 변환전후의 확산연소와 예혼합 연소의 연소특성을 비교하여 연료 및 공기의 혼합에 의한 연소기 내부의 3차원적인 속도분포와 온도 분포를 세부적으로 파악할 수 있었다.

유동해석결과로부터 연소에 영향을 미치는 스월 강도는 예혼합 연소에서 역화방지를 위해서 사용하는 라이너 벤츄리를 통과 하면서 대부분 감소하여 라이너 벤츄리 후반부에서는 스월 유동이 매우 약해지는 것을 확인하였다. 확산연소 모드에서는 1차연소 영역에 화염 최고온도가 존재하는 것이 예측되었으며 이 부분에서 NOx의 배출농도가 예혼합연소 모드에 비하여 높은 이유를 설명할 수 있었다. 확산연소 모드에서 예혼합연소 모드로 변환시에 최고 연소온도가 상당히 감소하여 예혼합연소로 연소모드 변환에 의하여 thermal NOx가 감소되는 것을 본 해석결과로부터 예측할 수 있었다. 또한, 온도분포의 해석결과에서 고온부를 예측할 수 있어서, 연소기 부품의 열 소손 원인분석이나 냉각수의 변경 등에 의한 연소 성능의 변화 및 운전조건 변경시에 가스터빈의 연소상태를 파악하는데 활용할 수 있다.

본 연구 해석방법은 국내발전용으로 운전되고 있는 건식 저 NOx 가스터빈의 운전중에 종종 발생하는 화염의 역화, 연소불안정, 연소진동, 고온부품의 열 소손 등의 원인 분석에 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] STAG 107F Operation & Maintenance Manual(1-2), Utility application Block 2, Korea Electric Power Corporation ILDO Combined Cycle Power Plant, (1991).
- [2] MS7001F Gas Turbine-Generator Operation Training, Korea electric Power Corp. Ildo Combined-Cycle Project, (1991).
- [3] 정재화, 서석빈, 안달홍, 김종진, "멀티노즐을 사용하는 발전용 회박예혼합 가스터빈 연소기의 연소특성 해석", 제1회 한국유체공학학술대회 논문집, (2000), pp. 827-830.
- [4] D. S. Crocker, D. Nickolaus and C. E. Smith, "CFD modeling of a gas turbine combustor from compressor exit to turbine inlet", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121(1999), pp. 89-95.
- [5] T. Wang, "Modeling of combustion dynamics in gas turbine engines", Doctoral thesis, Pennsylvania State University(1997).
- [6] Magnussen, B.F., and Hjertager, B.H., "On Mathematical Models of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th Symp. (Int'l) on Combustion, Cambridge, MA, Aug. 15-20, (1976).
- [7] A. Brink, C. Mueller, P. Kilpinen, and M. Hupa, Possibilities and limitations of the eddy break-up model", Combustion and flame 123(2000), pp. 275-279.
- [8] R. Siegel, and J. R. Howell, "Thermal radiation heat transfer", Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, (1992).
- [9] FLUENT5 User's Guide, Volume 1~4, Fluent Inc., August (1998).
- [10] GAMBIT User's Guide, Fluent Inc., May 1998.
- [11] FLOWMASTER2, New user training course, FLOWMASTER UK LIMITED, June, 1997.