

CO튜브 삽입에 따른 오염 물질 배출특성에 관한 연구

이재박* · 김종민* · 이승로** · 이창언**

*인하대학교 기계공학과 대학원, **인하대학교 기계공학과
(2010년 7월 20일 접수, 2010년 9월 15일 수정, 2010년 9월 16일 채택)

A Study on Emission Characteristics of Inserting CO Tube

Jaepark Lee*, Jong-Min Kim*, Seungro Lee** and Chang-Eon Lee**

*School of Mechanical Eng. Graduate School Inha Univ., **School of Mechanical Eng. Inha Univ.
(Received 20 July 2010, Revised 15 September 2010, Accepted 16 September 2010)

요 약

본 연구는 콤팩트 연소실내 CO 튜브 삽입에 따른 NO_x 및 CO 배출 특성에 관한 연구로써, CO 튜브 삽입에 따른 연소기와 CO튜브 사이의 거리와, CO튜브와 주열교환기 사이의 거리에 따른 배출 특성을 검토하였다. 본 연구를 위해 상용프로그램인 Fluent와 GRI 2.11 상세 반응 기구를 이용하여 수치해석과 상용 열교환기 실험을 통해 CO튜브 삽입에 관한 CO 및 NO_x 배출특성을 검토하였다. 그 결과 연소기와 주열교환기 사이에 CO 튜브를 삽입하여 CO 튜브가 연소기에 근접하고 CO 튜브와 주열교환기 사이를 넓어짐으로써 NO_x 및 CO 저감에 효과가 있음을 확인할 수 있었으며, 이로 인해 CO 튜브 삽입에 따른 NO_x 및 CO를 동시 저감법을 확인할 수 있었다.

주요어 : 열교환기, CO, NO_x, CO tube

Abstract — This study was the effect of inserting CO tube on NO_x and CO emission characteristics in a compact combustion chamber. In detail, NO_x and CO emission characteristics with changing of distance due to inserting CO tube between a burner and a main heat exchanger were investigated. For this study, the commercial program, FLUENT with GRI 2.11 detail reaction mechanism, was used for the numerical study and a commercial heat exchanger was tested for the experimental study. As results, when the CO tube was inserted between a burner and a main heat exchanger, it was verified that NO_x and CO emissions was decreased simultaneously as CO tube was closed to a burner and the distance between CO tube and a main heat exchanger was increased.

Key words : heat exchanger, CO, NO_x, CO tube

1. 서 론

최근의 NO_x 및 CO등을 포함한 강화된 환경규제와 더불어 높은 화염안정 메커니즘을 갖는 버너의 개발과 연료/공기의 혼합제어기술의 발전으로 이전에는 산업용 연소기기에 많이 적용되었던 예혼합 연소기가

현재는 소형 및 가정용 연소기를 포함한 많은 연소시스템에 크게 확대 적용되고 있다 [1,2]. 예혼합화염에서는 당량비가 희박할수록 배기량이 많아지며 시스템의 열효율은 낮아지게 되는데, 에너지 절약적인 관점에서 시스템의 열효율을 높이기 위해 당량비 1부근까지 높이는 추세이지만 CO 및 NO_x 배출농도를 저감해야 하는 난점이 부각되고 있어 미래형 저공해 버너로서 CO 및 NO_x 배출농도를 낮추는 연구가 진행되고 있다 [3,4]. 그러나 이러한 연구는 혼합비 혹은 선

[†]To whom corresponding should be addressed.
Dept. of Mechanical Eng. Inha Univ.
253 Yonghyeon 4-dong, Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea
Tel : 032-860-7323; E-mail : chelee@inha.ac.kr

회기를 이용한 난류강도의 변화를 이용한 방식으로, 실제 열교환기를 부착한 연소기와 차이를 보이게 된다 [5,6].

본 연구 그룹에서는 이러한 문제점을 극복하고자 연소기에 열교환기가 장착된 형상에 대한 꾸준한 연구를 수행하고 있으며, 그 예비 단계로 간단한 1차원형상에 대해 예혼합 화염후류에서 열전달이 CO 및 NO_x에 미치는 영향을 검토한 바 있다 [7]. 또한 기존의 1차원 해석 연구 결과 열전달 및 유동 등을 가정 또는 간략화하여 그 경향을 예측하였으나 열교환기 형상 및 재질에 따른 효과를 묘사하기에는 한계가 있었다 [8].

한편, 고효율 저공해 보일러 개발사업의 일환으로 실시된 응축형 열교환기 개발에서는 높은 CO농도를 낮추는 방안이 핵심 문제로 대두되었다. 이에 본 연구 그룹에서는 열교환기의 내부에 CO저감용 열교환기를 추가로 설치(이하 CO튜브)하였으며, 이를 이용해 O₂ 0%기준 30 ppm이하의 CO 배출을 달성할 수 있었다. 본 연구에서는 실제 응축형 열교환기의 내부에 설치된 CO저감용 열교환기 삽입이 CO 및 NO_x의 배출특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 상용프로그램인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 이 수치해석 결과를 바탕으로 상용 열교환기에 적용하여 상용 열교환기의 CO 및 NO_x 동시저감 시스템 방안 제안에 그 목적이 있다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 상용프로그램인 FLUENT 6.3.26을 [9] 사용하여 계산을 수행하였으며, 상세반응기구조 GRI 2.11을 [10] 사용하였다. 계산은 CH₄/air 예혼합 화염을 대상으로 하였으며, 당량비는 실용연소기 운전범위인 0.85로 하였다. 또한 반응물 입구의 온도와 연소기내의 압력은 각각 298 K와 1atm으로 하였다.

본 연구에서는 열교환기 내부의 유동해석을 하기 위하여 standard k-ε 모델을 사용하였다. standard k-ε 모델은 난류 유동이 완전 발달하였다고 가정하여 해석을 진행하는 방식이다. 또한 본 계산에 사용한 각 화학종의 방정식은 여러 화학종이 난류 강도에 의한 파동을 간소화하여 계산을 하며, 여러 화학종은 fine structure 범위 안의 단일 화합물로 가정되는 EDC(Eddy Dissipation concept)모델을 사용하였으며, FLUENT 6.3.26내의 방정식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa v_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_\kappa \end{aligned} \quad (1)$$

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

여기서, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_\kappa = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 를 사용하였다. 아래의 (3)식은 에너지 방정식으로 우 항은 전도, 화학종 확산, 점성 소멸에 의해 전달되는 에너지를 나타낸다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

S_h 는 화학반응열을 포함하고, h 는 sensible enthalpy로 이상기체일 때, 식 (4)와 같이 정의 된다.

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (4)$$

위에서 언급한 바와 같이, 본 연구에서 사용한 화학종 방정식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

여기서, \vec{J}_i 와 R_i 는 농도구배에 의하여 생성되는 화학종 i 의 확산 흐름과 화학 반응에 의한 i 화학종의 생성률을 각각 나타내며, 각각 식 (6)과 (7)을 이용하여 계산한다.

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad (6)$$

$$R_i = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i) \quad (7)$$

여기서, $D_{i,m}$ 은 혼합기에서 i 화학종의 확산계수이고, Sc_t 는 난류 Schmidt number로 0.7을 사용한다.

Fig. 1은 본 연구에서 계산에 사용된 고효율 저공

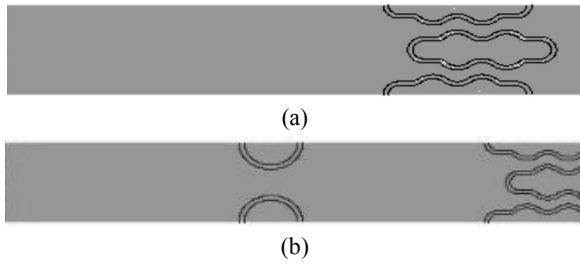


Fig. 1. 상용 열교환기의 형상 (a) 주름관 모양의 열교환기 (6 cm), (b) CO튜브 삽입 열교환기.

해 보일러에 사용될 열교환기의 형상을 나타낸 것으로, (a)는 주름관 모양의 주열교환기를, (b)는 주름관 모양의 주열교환기에 원형의 CO튜브를 삽입한 것이다. 전체 열교환기의 길이는 32 cm로 고정하였으며, 연소기와 주열교환기의 거리는 6 cm와 8 cm로 변화시켰으며, (a)에서 다량의 CO배출로 인한 CO의 저감을 위해 (b)에서 보여지는 바와 같이 연소기와 주열교환기 사이에 1.2 cm의 열교환기를 설치하였으며 그 위치를 변화시키며 계산을 수행하였다. 본 계산에서는 전열관의 두께 및 형상을 고려하여 2D로 해석을 진행하였다.

3. 실험 방법

본 연구에서는 CO튜브 위치에 따른 CO 및 NO_x의 저감을 실험하기 위하여 상용 열교환기를 대상으로 하였으며 열교환기의 형상은 Fig. 2와 같으며, 열교환기 위치에 따라 배출되는 NO_x 및 CO 배출농도를 측정하였다. 실험가스로는 CH₄를 사용하였고, 공기비는 1.15~1.4사이에서 검토하였으며, 공급유량의 제어는 질량유량계(Bronkhorst)를 사용하여 정밀하게 제어하였다. NO_x 및 CO의 배출농도측정은 연소가스분석기(Lano Lancom III, AMETEK)를 사용하여 측정하였다. 실험은 2nd 열교환기의 NO_x 및 CO 배출농도와 3rd 열교환기의 NO_x 및 CO 배출농도를 측정하였다.

4. 결 과

4-1. 버너와 열교환기 거리에 따른 수치해석 결과

먼저, Fig. 1(a)의 상용 열교환기에서 주름관 모양의 주열교환기의 위치에 따른 CO 및 NO의 배출특성을 검토하기 위하여 연소기로부터 주열교환기사이의 거리를 6 cm와 8 cm일 때로 나누어 검토하였다. Fig.

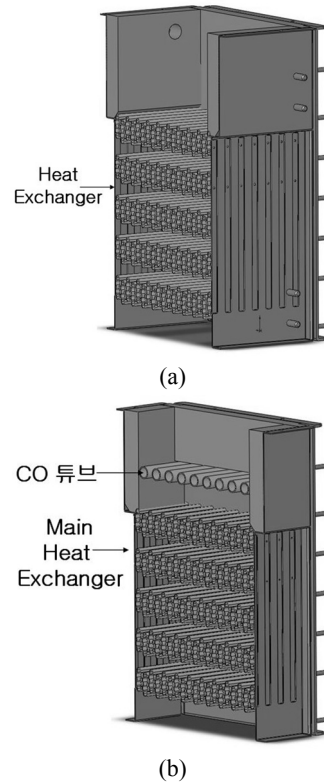


Fig. 2. 실험 열교환기의 형상 (a) 2nd 열교환기 (b) 3rd 열교환기.

3은 주열교환기 위치에 따른 CO 및 NO 배출농도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이, CO의 배출농도는 출구에서 8 cm일 때가 6 cm일 때 보다 약 600 ppm 낮은 약 900 ppm을, NO의 배출농도는 화염면과 거리가 가까운 6 cm일 때 약 350ppm, 8 cm일 때는 약 50 ppm 높은 약 400 ppm을 각각 보여주고 있다. 이는 CO의 경우 연소기와 주열교환기의 거리가 멀수록 CO가 CO₂로 전환하는 반응으로 인하여 배출농도가 낮아지며, 단열상태에서 NO의 경우 연소기와 주열교환기의 거리가 증가할 수 록 NO는 지속적으로 증가하고, 열손실 위치에 따라 NO 농도가 변화하는 차이가 이후 NO의 배출에 차이를 나타내게 된다. 본 연구에서는 과도한 CO 배출을 감소하기위한 목적으로 연소기와 주열교환기 사이의 거리를 8 cm 고정하여 계산을 수행하였다.

Fig. 4는 CO 튜브와 주열교환기 사이의 거리(이하 L₂)를 0.5 cm~3.5 cm까지 변화 하였을 때 계산결과를 나타내고 있다. L₂의 거리가 2 cm일 때 출구에서의 CO 배출농도가 가장 낮게 나타나고 있으며, L₂의 거리가 3 cm일 때와 3.5 cm일 때는 CO 튜브의 위치

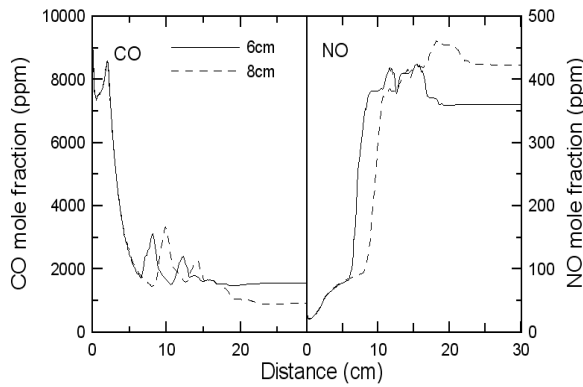


Fig. 3. 연소공간에 따른 CO 및 NO 농도.

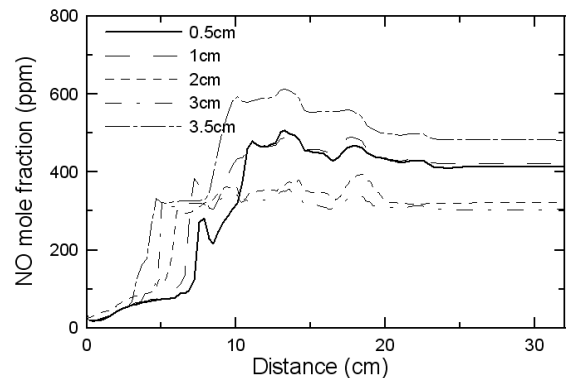


Fig. 5. CO 튜브에 의한 NO 농도.

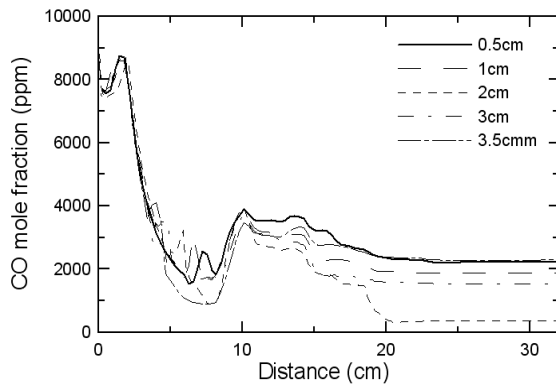


Fig. 4. CO 튜브에 의한 CO 농도.

가 화염에 너무 가까이 위치하여 L_2 의 거리가 증가하여도 CO의 배출농도가 증가하게 된다. 이는 일정온도 이상을 유지하며, 연소가스의 체류시간을 늘려주면 CO_2 로 전환되는 반응으로 CO의 배출농도가 낮아질 수 있으나, 전열관의 위치가 화염에 너무 가까우면 배출농도는 오히려 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 동일한 조건에서의 NO 배출농도를 나타낸 것이다. 이 결과 CO Tube와 주열교환기 사이의 거리가 먼 3 cm일 때 가장 낮은 배출농도를 나타내고 있다. NO의 배출농도는 3 cm일 때까지 감소하다가 3.5 cm일 때는 CO의 배출농도가 증가하는 이유와 같으며, 0.5 cm일 때 보다 높게 나타나고 있다. 이는 L_2 의 거리가 3 cm일 때 CO 튜브의 위치가 화염면에 가까워 단열부분에서 증가한 NO의 양이 0.5 cm일 때 보다 적어 NO의 배출량이 감소하는 것을 알 수 있다. 수치해석의 결과로 CO Tube의 위치가 화염면으로 가까이 갈수록 CO 및 NO의 동시 저감이 가능함을 알 수 있다.

4.2. 열교환기 위치 변화에 따른 실험 결과

열교환기의 CO 및 NO의 동시저감법 연구를 위한 실험으로 Fig. 2의 열교환기를 사용하여, CO 튜브의 삽입에 따른 CO 및 NO_x 의 배출농도를 측정하였다. CO 튜브의 삽입위치는 수치해석에서 얻은 결과를 바탕으로 결정하였으며, 우선 CO 튜브가 없는 조건에서 CO 및 NO_x 의 배출농도를 확인하여 보았다.

Fig. 6은 당량비를 0.85로 고정하여 L_1 의 변화를 6 ~ 11 cm로 하였을 때 출구에서 CO 및 NO_x 의 농도를 도식화 한 것이다. L_1 이 6 cm일 때 CO는 약 48 ppm, 9 cm에서 약 35 ppm, 11 cm에서 약 30 ppm으로 배출되었으며, L_1 의 거리가 11 cm일 때 약 18 ppm 낮게 배출되었다. 또한 NO는 6 cm에서 약 32 ppm으로 가장 적게 배출되었고, 9 cm에서 약 35 ppm으로 11 cm에서 약 38 ppm으로 배출되었다. 이는 앞장의 수치해석 결과에서 확인한 바와 같이 버너와 열교환기의 위치를 가까이 하면 CO가 산화되는 반응이 줄어 배출농도가 증가하게 되며, NO_x 는 빠른 시간에 생성이 억제되어 출구에서 배출농도가 감소하는 경향과 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 L_1 을 9 cm로 고정한 후 당량비를 0.7~0.85 사이에서 변화시키며 CO 튜브를 삽입하지 않은 조건과 주 전열관으로부터 2 cm 떨어진 곳에 CO 튜브를 삽입하였을 때의 CO 및 NO_x 의 배출농도를 나타낸 것이다. CO 튜브의 삽입 위치는 수치해석의 결과에서 주열교환기의 거리가 약 2~3 cm 정도 간격이 있어야 한다는 것을 확인하여 CO 튜브의 위치를 주 열교환기로부터 2~3 cm 간격을 주어 설치하였다. CO 튜브를 삽입하지 않은 조건을 2nd라 하였으며, CO 튜브를 삽입한 조건을 3rd라 하였다. CO 튜브가 삽입

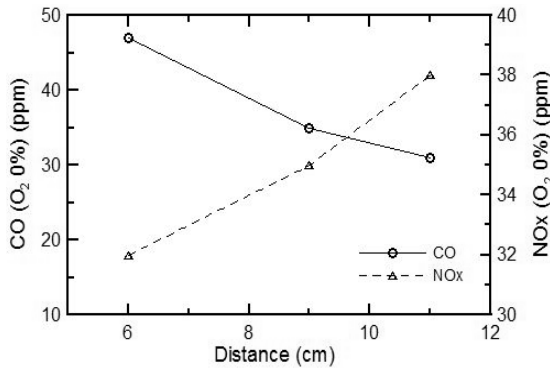


Fig. 6. L1의 변화에 따른 CO, NO 배출 농도.

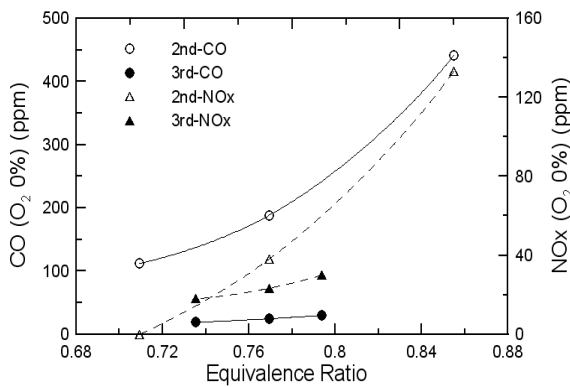


Fig. 7. L2의 변화에 따른 CO, NO 배출농도.

된 조건에서 CO의 배출농도는 당량비가 증가할수록 급격하게 증가하여 0.85에서는 출구에서 CO의 배출 농도가 약 450 ppm 정도 되었으나 CO 튜브 삽입 후 출구에서 CO의 배출농도는 당량비 0.8부근에서 약 50 ppm 정도인 것을 확인할 수 있었다. NO_x의 배출 농도는 CO 튜브가 없는 경우 CO와 같이 당량비가 증가하면 배출농도 또한 급격히 상승하여 0.85일 때 출구에서 NO_x의 배출농도는 약 139 ppm 정도이나, CO 튜브 삽입시 NO_x의 배출농도는 당량비 0.8부근에서 약 30 ppm 정도 배출되는 것을 알 수 있다. 실험에 사용한 열교환기는 현재 상용화 계획중인 열교환기로 실제 열교환기의 운전범위인 당량비 0.7~0.8 범위에서 실험을 진행하였다.

5. 결 론

본 연구는 컴팩트 연소실내 CO 튜브 삽입에 따른 CO 및 NO_x 배출 특성에 관한 연구로써, CO 튜브 삽입에 따른 연소기와 CO 튜브 사이의 거리와, CO 튜브

와 주열교환기 사이의 거리에 따른 배출 특성을 수치 해석과 상용 열교환기 실험을 이용하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 화염하류에서 NO에 대한 저감효과를 얻기 위해서는 최대한 화염면에 가까이 열교환기를 고정한 후 열손실에 의한 NO의 생성을 동결시키는 방법이 필요하나, 화염에 너무 가까이 위치할 경우 불완전 연소로 인하여 배출농도가 증가할 수 있다.
- (2) CO에 대한 저감효과를 얻기 위해서는 CO에서 CO₂로 전환되는 체류시간 및 적정 온도를 길게 유지하는 것이 필요하다.
- (3) NO 및 CO의 배출농도를 동시에 저감하기 위해서는 1번째 열교환기는 NO 저감을 위하여 화염면에 최대한 가까이 설치하는 것이 유리하며, L₂ 거리를 충분히 유지하여 CO에서 CO₂로 전환하는 체류시간을 보장함으로써, CO의 배출농도를 저감할 수 있음을 알 수 있다.
- (4) Turbulence Species Transport Model인 EDC 모델을 사용하면 난류의 파동을 가정하여 해석을 진행하므로 정확한 예측에는 한계가 있지만, 형상에 따른 경향 해석은 가능함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 인하대학교의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lefebvre, A. H., The role of fuel preparation in low emission combustion, J. Eng. Gas Turbine Power, 1995, 117, 617-654.
2. Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M. and Scott, M. J., Premixed turbulent instability and NO formation in a lean-burn swirl burner, Combust. Flame, 1998, 115, 515-538.
3. Kim, J. H. Lee, H. Y., Hwang, C. H. and Lee, C. E., NO_x and CO emission characteristics of premixed oxidizer-staging combustor using a cyclone flow, Journal of Korean Society of Combustion, 2008, 13, 2, 7-13.
4. Ahn, J., Kim, J. J. and Kang, S. B., Heat transfer characteristics of 0.5 t/h class non-furnace boiler. Proceedings of the KSME 2007 Fall Annual Meeting, 2007, 130-135.

5. Semerjian, H. and Vranos, A., NO_x formation in premixed turbulent flames, Proc. Combust. Inst., 1977, 16, 169-179.
6. Elkotb, M., Salem, H., Shehata, H. and Abou-Arab, T. W., Factors affecting NO_x formation in turbulent premixed confined flame, Fuel, 1990, 69, 65-71.
7. Kim J. M., Kim T. H., Kum S. M., Kim S. W., Jang K. H., Lee C. E., Effect of heat loss on CO and NO_x emission characteristics in the postflame region of premixed flames, Journal of Korean Society of Combustion, 2008, 13, 4, 1-7.
8. Lee S. R., Kim J. M., Kum S. M., and Lee C. E., Suggestion on the simultaneous reduction method of CO and NO_x in premixed flames for a compact heat exchanger, Energy and fuels, 2010, 24, 821-827.
9. ANSYS.Inc "FLUENT User Guide" ver 6.3.26.
10. GRI Mech. Ver. 2.11, web address: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.