이단중유연소 버너의 수치해석적 연구

이승수*†, 김혁주*, 박병식*, 김종진*, 최규성*

Flame simulation on the two stage heavy oil combustion

Sung-Soo Lee, Hyuck-Ju Kim, Byoung-sik Park, Jong-Jin Kim, Gyu-Sung Choi

ABSTRACT

Computations were performed to investigate the flow, temperature and pollutants in two stage heavy-oil combustion burner. The burner geometry and flow conditions were provided by a burner company. The goal of the study is to understand combustion phenomena according to each air inlet's velocity, excessive air ratio and air temperature through CFD. Air flow rates at two inlets are adjusted by a damper inside a burner. Here, injection conditions of liquid fuel are kept constant throughout all simulations. This assumption is made in order to limit the complexity of oil combustion though it may cause some disagreement. The final goal of this research is to design a Low-NOx heavy oil combustion burner through comparison between computational study and experimental ones. Besides experiments, simulation works can give us insights into heavy oil combustion and help us design a Low NOx burner while saving time and cost. The computational study is based on k-e model, P-1 radiation model(WSGGM) and PDF, and is implemented on a commercial code, FLUENT.

Key Words : Two-stage burner, PDF, P-1 radiation model, WSGGM, Thermal NOx, Prompt NOx, Fuel NOx

1. 서 론

환경오염의 문제로 연소설비에 대한 환경 규제가 점점 심화되고 있다. 전체 에너지 소비량의 많은 량을 차지하는 보일러, 가열로 설비에서 꾸준히 중유를 연료로 연소하는 실정이다. 가스연료의 연소와 오염물질 배출에 관한 실험과 해석은 많이 이뤄졌지만 경유나 중유와 같은 액체연료에 대한 해석은 상대적으로 적었다. 현재 많은 산업용 연설비에서는 중유를 연소하는데 NOx나 분진의 발생량은 상대적으로 가스연료의 연소보다는 높다. 현재 환경부에서는 발생 NOx 량에 비례하여 공해부담금을 부과하는 제도를 준비하고 있는 현실에서 저 NOx 버너의 개발은 업체의 비용절감과 환경오염의 감소차원에서 시급하다. 현재 버너개발 업체들은 영세하고 외국의 저 NOx 버너를 단지 개조하고 있을 뿐 저 NOx 버너의 설계에 대한 체계적인 이론은 정립되지 않았다. 버너 설계를 위해 실험적 연구는 필수적이지만 경제적, 시간적인 비용이 많이 들기 때문에 정확할 수는 없다하더라도 근사할 수 있는 전산해석을 통해서 버너설계에 대한 방향을 잡고자 한다. 버너의 기하학을 변형하기 전에 액체연료, 특히 중유연소에 대한 해석을 현재 널리 쓰이는 상용프로그램인 Fluent V.6.0에서 각종 물성치와 경계조건을 변화시키며 중유연소의 현상에 대한 연구를 본 논문에서 하고자 한다.

* 한국에너지기술연구원 보일러연구팀
† ssl@kier.re.kr

2. 지배방정식과 계산방법

2.1 계산대상 및 조건

2.1.1 계산대상 버너

전산해석에 사용된 이단중유 연소 버너는 한국에너지기술연구원의 보일러 연구팀 실험실에 설치된 운전압 10Kg/cm2하에서 증기용량 3톤의 경유/중유 연소 노통연관식 보일러에 설치하여 실험을 할 예정이다. 아래 그림은 개략적인 시스템 구성을 예시한다.

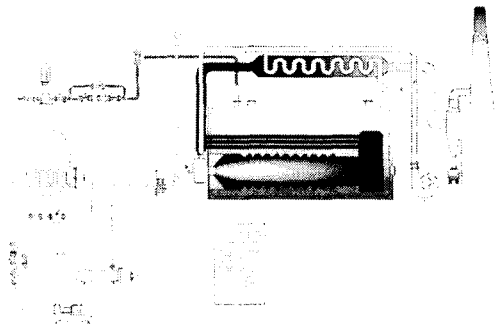


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

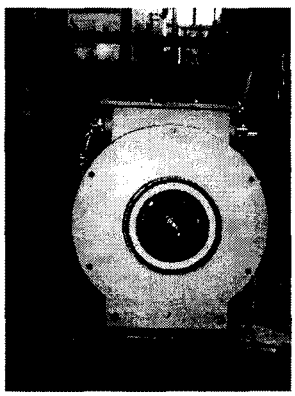


Fig. 2 Front view of two-stage heavy oil burner

실험 노의 크기는 직경 1200mm이며 길이는 5000mm이다. Fig. 2는 이단연소 버너의 정면도를 보여주는데 버너의 외경은 500mm이고 스월러는 노즐건을 둘러싼 관벽에 유동방향과 45도의 각을 이루며 부착되어있다. 스월러의 개수는 16개이고 축대칭이므로 두 스월러의 전반부와 후반부 영역을 취해 전체 영역중 축을 중심으로 22.5도의 영역만을 계산영역으로 취했다. 노의 축 부분의 삼각뿔 격자를 제외하고 전 영역을 육면체 격자로 구성하였으며 총 격자수 27056개의 3차원 계산영역을 얻었다.

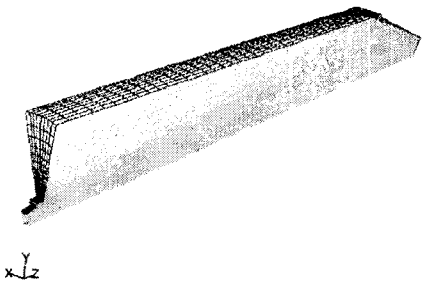


Fig. 3 Computational domain of burner and combustion chamber

2.1.2 연료와 유동조건

분무 연료는 직경 10mm의 노즐면의 중심에서 반경 2.5mm의 위치에서 액적이 중심 축과 50도의 기울기를 갖고 공기 혹은 증기에 의해 속도 100m/s 로 분사된다고 가정했다. 액적의 직경은 9 μm로 가정했으며 [1]에 의하면 위와 같은 직경의 중유 액적은 대체적으로 100m/s의 분사속도를 갖음을 실험에서 보였다. 중유 연료는 초저유황중유(0.5% LRFO)를 사용하였다.

Table 1. Properties of fuel

항목	값
비중	0.9204
동점도(cSt)	14.33
인화점(℃)	75.2
유황분(wt %)	0.43
유동점(℃)	-15.4
잔류탄소분(wt%)	1.87
회분(wt %)	0.011
침전물(wt%)	0.01
수분(wt%)	0.05

본 연료는 탄소 87.1%, 수소 12.1%, 황 0.44%, 질소 2000 ppm 그리고 기타 미량의 침전물로 구성이 되어있으며 저위발열량은 9,940 Kcal/Kg이다. 연소 연료량은 0.052Kg/s로 고정하여 변화없이 유동조건만을 변화시켜 계산을 수행했다. 본 계산은 1차 공기입구(스월러)와 2차 공기입구(스월러를 둘러싼 버너의 테두리)의 공기량비(아래 표에서 다단비는 전체 공기량중 1차 공기입구측으로 유입되는 공기의 량을 기준으로 정의하였다), 과잉공기비 그리고 공기온도를 주요 변수로 하여 계산을 수행했다.

Table 2. Air flow conditions

case	다단비	공기비	공기온도
case1-1	1	1	50
case1-2	"	1.05	"
case1-3	"	1.1	"
case1-4	"	1.2	"
case1-5	"	1.3	"
case1-6	"	1.4	"
case2-1	0.7	1	"
case2-2	"	1.05	"
case2-3	"	1.1	"
case2-4	"	1.2	"
case2-5	"	1.3	"
case2-6	"	1.4	"
case3-1	"	1	100
case3-2	"	1.05	"
case3-3	"	1.1	"
case3-4	"	1.2	"
case3-5	"	1.3	"
case3-6	"	1.4	"
case4-1	"	1	150
case4-2	"	1.05	"
case4-3	"	1.1	"
case4-4	"	1.2	"
case4-5	"	1.3	"
case4-6	"	1.4	"
case5-1	"	1	200
case5-2	"	1.05	"
case5-3	"	1.1	"
case5-4	"	1.2	"
case5-5	"	1.3	"
case5-6	"	1.4	"

공기 입구 두 곳에 velocity inlet 경계조건을 부여하고 벽면에서는 증기압 9Kgf/cm2하에서의 포화온도에 약 50도를 더한 등온벽면 조건을 부여하고 출구 측에는 pressure-outlet 조건을 부여했다.

2.2 지배방정식과 계산방법

본 중유 연소는 선회 공기와 고속으로 분사되는 연료 그리고 연소반응에 의한 부피 팽창으로 인한 전형적인 난류 확산 화염이다. 운동량 방정식은 k-e 방정식을 사용했고 복사 모델은 P-1 모델을 채택하였으며 연소가스의 복사 물성치를 계산하기 위해 연소가스내 구성 성분들의 각각의 복사물성치에 각기 다른 가중치를 두어 계산하는 WSGGM(weighted-sum-of gray gases) 접근방법을 복사 열전달의 계산에 적용하였다. 액체연료의 연소는 연료의 액적의 기화와 끓음 그리고 기화된 연료의 연소가 혼합되어 가스 연료의 연소보다는 복잡하다. 특히 연료입자의 열역학적 물성치를 정의함에 있어서 증발온도와 binary diffusivity를 어떻게 정의하느냐에 따라 확연히 다른 결과를 얻게 된다. 본 해석에서 연료가 기화되기 직전까지 DPM(Discrete phase model)을 적용하여 이상의 유동으로 해석하고 연료가 기화조건을 만족하여 기체가 되면 기상의 연료와 공기의 연소에 대해서 Mixture fraction with PDF 방법을 적용하였다.

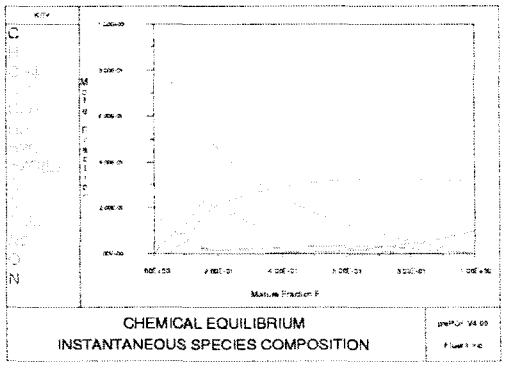


Fig. 4 Instantaneous species composition vs. mixture fraction

이 방법은 복잡한 연소모델링을 위해서 확률밀도함수 접근방법이라고 알려진 통계적인 접근방식을 채택한 연소모델이다. 복잡한 화학반응을 모델링 가정 없이 다룰 수 있기 때문에 PDF 방법은 난류, 반응 유동에 가장 알맞다고 알려져 있다. Fig.4는 초저유황중유에 대해서 공기와의 연소에 대하여 계산한 혼합분율에 따른 순간 입자조성을 예시한다. 동적 반응률이 난류 혼합률보다 상당히 크기 때문에 순간적인 유체의 열, 화학적 상태(즉, 조성, 밀도, 온도 등등)를 화학 평형을 고려함으로써 혼합분율과 전엔탈피의 순간값을 이용해서 계산할 수 있다. 연료의 PDF는 Fluent와 함께 제공되는 solver인 prepdf에서 연

료의 구성물질들의 질량 조성과 발열량과 산화제의 조성을 입력, 계산하여 표 형식으로 얻어져 Fluent에서 계산을 할 때마다 참조하면서 연소계산에 이용한다.

본 연구의 주요 관심 대상인 NOx의 발생량의 계산은 유동과 온도장의 계산이 끝난 후 후처리 과정으로서 행하여진다. Thermal NOx, prompt NOx와 더불어 질소성분이 NOx 발생을 고려하는데 무시하지 못할 만큼 함유된 중유이기 때문에 Fuel NOx까지 고려하여 NOx 발생을 계산하였다. Thermal NOx의 계산에서 O2와 OH의 분해와 재결합 과정에서 이들과 반응하는 제 3의 입자의 영향을 고려한 부분평형모델을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

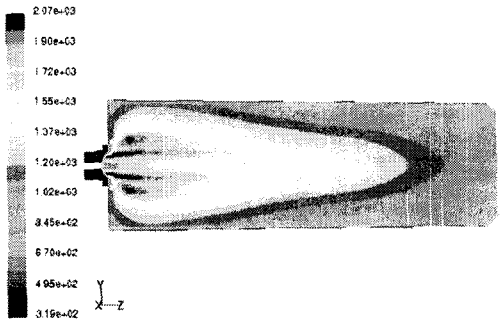
저 NOx 버너의 설계는 공기역학적으로 고온부를 줄이고 재순환 영역과 같은 환원영역을 생성하여 NOx의 발생량을 줄이는 것이다. 그러므로 부가적인 장치의 필요 없는 다단 연소방식이 선호되는데 본 수치적 연구는 이런 목적에 주안점을 두었다.

실제버너에서 연소를 시키는 경우 연소의 상태를 결정하는 주요인자는 공기량, 다단비(공기분배율), 공기온도로 구분할 수 있다.

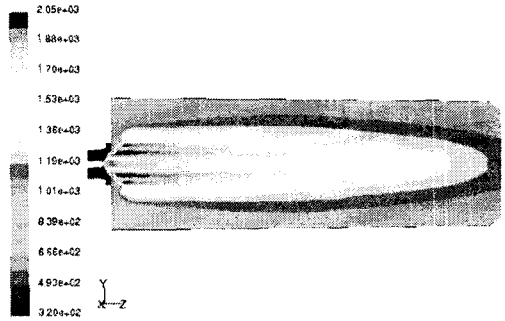
3.1 공기배분에 따른 연소

낮은 NOx를 배출시키는 버너를 개발하기 위해 적용되는 기술중의 하나는 다단연소방식이다. 가스연료처럼 연료의 취급이 쉬운 경우에는 공기뿐만 아니라 가스연료도 다단으로 공급하여 연소하는 방법이 적용되지만 액체연료 특히 중유와 같이 밀도가 높고 점도가 높은 연료의 경우에 연료의 취급이 용이하지 않아 연료는 중심부의 노즐에서 분사하고 공기만을 다단으로 공급하여 다단연소를 시킨다. 대신에 노즐에 각기 다른 크기의 구멍을 두고 배치형태를 달리하여 단일화염이 아닌 다수의 가지화염을 만드는 방법도 채택이 되고 있다.

본 수치해석에 사용된 버너는 스월러를 통과하는 1차 공기입구와 바깥쪽에서 공급되는 2차공기입구로 구성이 된다. 1차공기입구에서만 공기를 공급할 때와 1,2차에 같은 공기량을 분배하여 공급할 경우 유동과 온도의 변화 오염배출의 정도를 파악하는 것이 중요하다. Fig. 5는 과잉공기비 1.4에서 50 ℃의 공기를 1차입구로만 공급할 경우(case 1-6)와 1차 입구에서 70% 2차 입구에서 30%의 공기를 공급하는 경우(case 2-6)의 온도장의 비교를 도시한다. 모든 경우에서 연료분사조건은 동일하다고 가정을 하였다.



(a) One stage air supply(Case 1-6)

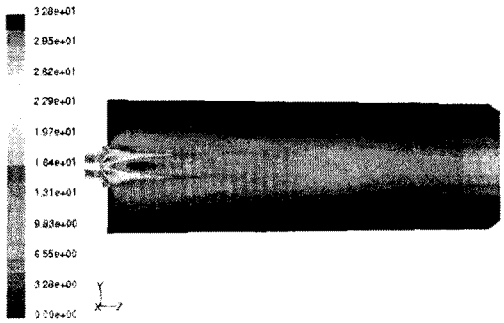


(b) Two stage air supply(Case 2-6)

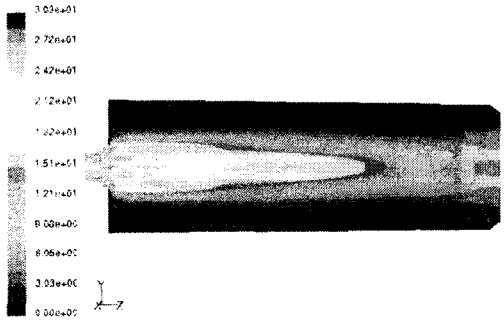
Fig. 5 Comparison of temperature fields in one stage and two stage air supply combustions

일단 연소에서는 모든 공기가 스월러를 관통하여 강한 스월작용과 함께 버너 직후에서 공기와 연료의 반응이 강하게 일어나 고온부가 넓게 형성이 되지만 길이는 짧다. 그러나 이단연소의 경우에 공기를 분배하여 공급하기 때문에 스월러를 통한 스월작용은 약하고 버너 직후에서의 반응은 활발하지 못하여 고온부의 폭은 상대적으로 좁지만 연료과농 연소부에서 형성된 미연분은 이차공기와 재연소되어 화염의 후단부까지 길게 연소되는 현상을 보여준다. 일단연소에서 최대온도는 2070K이고 이단연소에서는 2050K이다.

일단, 이단 연소의 속도장의 분포를 Fig. 6에서 살펴볼 수 있다. 일단 연소의 경우 빠른 공기의 속도와 그에 따른 활발한 연료와의 반응에 의한 부피팽창에 기인해 버너 직후에서 빠른 속도 영역이 나타나지만 그 길이는 짧고 그 사이에 작은 내부순환 영역이 형성이 되었다. 반면에 이단연소의 경우 속도의 크기는 상대적으로 균일하고 길게 분포되고 내부순환영역은 형성이 되지는 않았다.



(a) One stage air supply(Case 1-6)



(b) Two stage air supply(Case 2-6)

Fig. 6 Comparison of velocity fields in one stage and two stage air supply combustions

전체 NOx 발생중 가장 큰 부분을 차지하는 thermal NOx는 최대온도가 클수록 커지는데 이단 연소가 일단연소보다는 최대 온도가 낮아 연소실 출구에서 계산한 평균 NOx 발생도 줄어들었다. 과잉공기비를 1에서 1.4까지 변화시키며 두 연소시 NOx의 발생량을 살펴보면 전체적으로 이단연소시에 NOx는 낮지만 1과 1.05에서는 높게 나타났다. 과잉공기비가 낮은 경우에 즉 공기의 속도가 어느 한도 이하일 경우에 이단 연소의 의미가 없어져 이런 결과가 나타났다고 사료된다. 과잉공기비가 커질수록 연료와 혼합되는 공기량이 늘어 연소가스의 전체적인 온도를 낮추고 더 큰 공기의 운동량이 화염을 제트류와 같이 길게 밀어내어 고온부의 폭을 줄여 NOx 발생을 감소하는 형태를 보여준다.

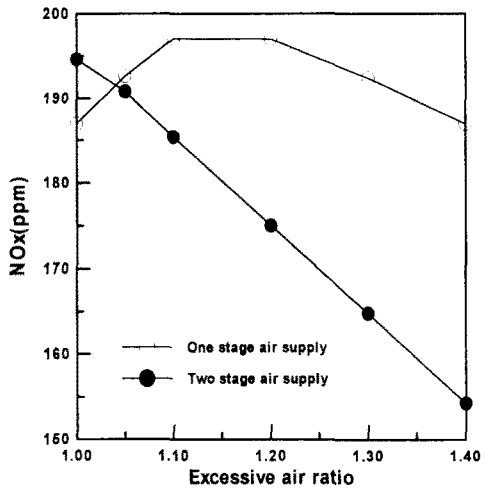


Fig. 7 Changes in NOx generation of one and two stage combustions with excessive air ratio.

3.2 공기온도변화 따른 NOx 발생

버너를 설치한 보일러에서 열효율을 극대화하기 위하여 배가스의 열을 흡수하는 공기예열기를 설치하여 가열된 공기를 버너에 공급한다.

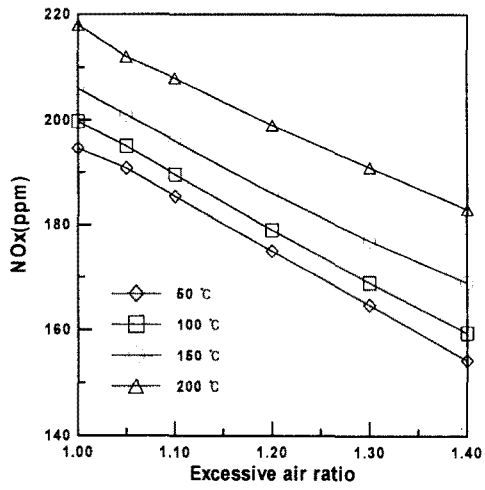


Fig. 8 Changes in NOx generation of combustions with air at different temperature with excessive air ratio.

Fig. 8은 이단연소(0.7)시에 과잉공기비를 변화시키면서 다른 온도의 공기를 연소시킬 경우의

NOx 발생을 도시한다. 공기 온도가 높을수록 NOx 발생량은 증가하는데 증가폭은 온도가 높아질수록 커지고 있다. 높은 온도의 공기는 더 큰 에너지를 갖고 있어 액체연료 연소시에 액적의 기화를 원활히 하여 연소반응이 활발하지만 공기자체가 갖는 에너지에 의해 고온부의 형성에 기여하기 때문에 NOx의 발생량이 커졌다. 보일러의 효율을 향상시키기 위한 공기의 예열과 NOx의 발생은 서로 상충하고 있기 때문에 향후 NOx 발생량에 대한 공해부담금과 효율상승에 의한 비용절감을 고려하여 열설비 사용자가 운전을 조절할 필요가 있다고 사료된다.

4. 결 론

저NOx 중유버너를 설계를 위한 실험적 연구의 보조연구로 수치적 연구를 수행했다. 수치연구가 정확한 결과를 보장하지는 못하지만 실험에 소요되는 시간과 비용을 덜 들이면서 연소현상에 대한 통찰력을 쌓을 수 있고 향후 실험과 비교하여 가능한 상관관계를 파악하여 버너개발에 도움을 줄 수 있는 중요한 도구이다. 본 연구에서는 연소현상만으로도 충분히 복잡하기 때문에 분무액적의 크기는 균일하고 일정한 속도로 분사된다고 가정을 하여 연소공기의 분배와 온도 그리고 과잉공기비를 변화시켜가며 온도장과 유동장 그리고 NOx 발생을 살펴보았다. NOx 발생량은 thermal, prompt 그리고 fuel NOx 모두를 고려하였다. 이단연소시에 연소가 국부적으로 집중되기보다는 일차공기와의 연료과농연소에 의해 생성된 연소가스가 이차공기와 함께 재연소되어 같은 공기비의 일단연소보다는 낮은 온도장이 형성되었고 낮은온도에 의한 thermal NOx의 저감으로 전체 NOx 발생량이 줄어들었다. 그리고 과잉공기비가 커질수록 연소가스의 량이 증가해 전체 온도가 낮아져 NOx 발생량이 과잉공기비에 반비례하는 경향임을 모사결과에서도 보여주었다. 공기예열기를 통해 가열된 연소공기의 온도가 높을수록 연소가스의 온도를 높여 NOx 발생이 증가하고 같은 폭으로 온도를 증가시킬 경우 NOx의 발생량은 점진적으로 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. 중유연소를 현상학적으로 현실성 있게 모사할 수 있도록 특정 버너에 대해서 연구를 하였다. 본 연구에서는 계산시간을 줄이기 위해서 액적이 버너의 중심축과 일정한 각을 이루며 균일하게 분사된다는 가정 하에 전체 연소실 영역의 일부만을 취하여 계산을 수행하였지만 다양한 분사노즐에 대해서 전체 영역을 취해서 계산을 수행해야 할 필요가 있다. 시행착오를 통해 얻어진 계산과정에 대한 입력값들의 정확성을 향후 실험과 비교하여 적합성을 판단하고 보완하여 가능한 정확한 연소현상을 모사하여 다양한 형태의 버너에 적용하여 최적의 저 NOx 버너를 개발하고자 한다.

후 기

본 연구는 산자부 지원 하에 수행중인 중유보일러용 기류분무식 저NOx 연소시스템의 개발 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] G.C. england, D.W. Pershing, M.P. Heap and J.E. Cichanowicz, "Effects of fuel properties and atomization parameters on NOx control for Heavy liquid fuel fired package boiler", 1982, Final report to EPA.

[2] Ladislav Bebar, Vit Kermes, Petr Stehlik, Josef Canek, Jaroslav Oral, "Low Nox burners-prediction of emissions concentration based on design, measurements and modelling", WASTE MANAGEMENT, 2002, pp. 443-451.

[3] Javier M Ballester, Cesar Dopazo, Norberto Fuyeo, "Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion", Fuel Vol. 76 No. 5, 1997, pp. 435-446.

[4] P.J Coelho and N. Peters, "Numerical simulation of a mild combustion burner", COMBUSTION AND FLAME, 2001, pp. 503-518.

[5] Masayuki Taniguchi, Kenji Yamamoto, Hironobu Kobayashi and Kenji Kiyama, " A reduced reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich conditions", FUEL 81, 2002, pp. 363-371.

[6] Philip J. Stopford, "Recent applications of CFD modelling in the power generation and combustion industries", Applied Mathematical Modelling, 2002, pp. 351-374.

[7] M. Xu, J.L.T. Azevedo and M.G. Carvalho, "Modelling of the combustion process and NOx emission in a utility boiler", Fuel 79, 2000, pp. 1611-1619.