

삼단중유연소 버너에서 다단비가 연소현상에 미치는 영향에 대한 수치 연구

이승수*, 김혁주†, 박병식*, 김종진*, 최규성*

Numerical study on the effects of air staging on combustion in the three air stage heavy oil fired combustion system

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

ABSTRACT

Computations were performed to investigate the effects of air staging on combustion in three stage heavy-oil fired combustion burner. The burner was designed for 3 MW. Different amounts of air are introduced into each 3 three stages by means of each dampers. The goal of the study is to understand combustion phenomena according to each air stage mass ratios through CFD. Air flow rates at three inlets are adjusted by dampers 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. In case of cold flows, only longitudinal velocities are considered. On the other hand, flow, temperature and NOx generations are taken into account for reactive flows. Simple parametric study was conducted by setting 1'st air stage mass ratio as a parameter. And an optimal operation condition was found. 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 : Three stage burner, PDF, P-1 radiation model, WSGGM, Thermal NOx, Prompt NOx, Fuel NOx

1. 서 론

현재까지 대단위 산업체 열설비용 연료로서 경유나 중유를 연료로 사용한다. 산업체의 이윤을 높이기 위해서는 상대적으로 저가인 중유 연료의 사용이 매력적이지만 점성이 높아 취급이 용이하지 않고 분무가 용이하지 않아 고압의 공기나 증기를 이용한 이윤체 노즐을 사용한다. 그리고 연료 자체의 질소 성분과 회분등에 의해 질

소산화물, 일산화탄소 그리고 다량의 분진을 발생시킨다. 중유 연료를 연소시켜 저공해 연소가 되도록 하는 것은 버너 설계의 관건이다. 그러나 저공해 연소에 설계점을 집중하면 연소효율이 떨어지는 단점이 있다. 그러므로 저공해 고효율 중유 버너의 설계는 많은 시행착오가 따르게 된다. 두 목적을 달성하기 위해 본 연구에서는 3단 공기공급 방식의 버너를 채택하였다. FGR과 같이 별도의 장치 부착없이 공기 역학적으로 연소현상을 제어할 수 있다는 장점에서 가스 연소에서 이미 많이 활용이 되었다. 연구 대상 버너 시스템에서 각단 별로 유입되는 공기의 양을 측정하기 힘들기 때문에 수치해석을 통해서 각 단에 유입되는 공기의 양에 따른 연소현상을 예측하고자

* 한국에너지기술연구원 열병합보일러연구센터

† ssl@kier.re.kr

한다. 실제 운전에서 각 단의 공기 제어는 각 단에 설치한 미닫이식 댐퍼를 사용해서 조절을 하였다. 현 버너에서 각 단의 댐퍼는 상호간에 영향을 미쳐 한 단의 공기 양을 정확히 맞추기 어려워 수치해석을 통해 연구를 하고자 한다. 다양한 연소 조건에서 유동과 온도장 그리고 공해물질의 발생에 대해서 살펴본다. 유입시퀀스 경우에 NOx 발생량의 변화를 살펴보고 참고적으로 상용 CFD 프로그램을 활용하여 연소현상의 특성과 NOx 발생을 비교하고자 했다.

2. 연소시스템과 계산

2.1 연소시스템

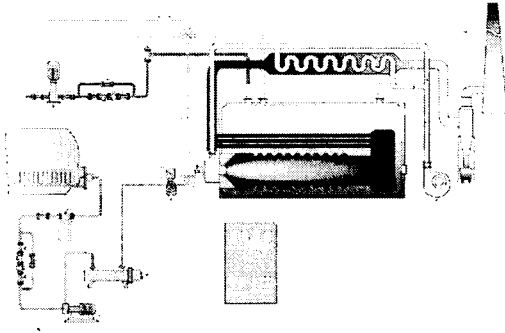


Fig. 1 Schematic diagram of combustion test facility

Fig.1은 본 연구를 위해서 제작한 실험장치의 개략도를 예시한다. 장치는 크게 6개의 부분으로 나눌 수 있다. 우선 시험용 보일러를 들 수 있으며, 버너의 연료 및 공기 공급계통, 분무용증기 공급계통, 보일러의 급수 및 배수계통, 배가스 성분 분석장치, 온도 및 유량 계측장치 등을 들 수 있다. 실험용 보일러로써 노통연관식 증기 보일러를 제작하였으며, 연소실은 연소량이 다소 큰 경우에도 실험이 가능하게 설계하였다.

연료 공급 계통은 서비스 탱크에서 중력에 의해서 스트레이너를 거쳐서 연료유량계를 통해서 펌프에 중유와 경유가 공급되며, 펌프에서 가압된 연료는 중유의 경우에 중유예열기에서 적정한 온도로 가열된 후 버너에 공급된다.

분무용 증기공급 계통은 별도의 보일러에서 공급되는 증기를 사용하거나 자체로 생산되는 증기를 사용할 수 있는 구조로 설계하였으며, 증기를 사용할 수 없는 경우를 고려하여 압축공기를 분무

용으로 사용할 수 있도록 설계하였다.

급수계통은 연수기를 통과한 상수는 수조여 저장되고, 펌프의 구동에 의하여 보일러 내에 공급되는 데 수위제어 센서에 의해서 자동으로 이루어진다. 급수펌프의 후단에는 급수유량계가 설치되어 있으며, 급수온도를 측정할 수 있도록 온도센서를 설치하였다. 보일러 하부에는 배수관을 설치하여 수동밸브를 설치함으로써 드레인을 수동으로 할 수 있다.

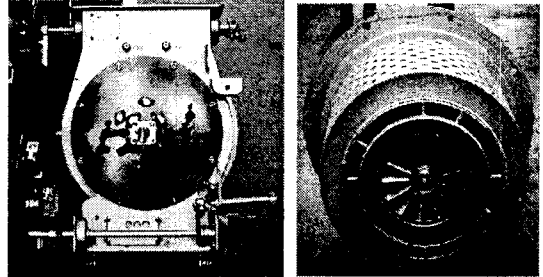


Fig. 2 Views of 3MW test burner

시험용 보일러의 연소성능실험에서 주된 측정 항목은 공기비, 연소가스 온도의 위치별 변화, 배가스 성분(NOx, CO, CO₂, O₂, 분진), 압력손실, 화염의 안정성 및 형상, 연료유량 및 급수유량, 보일러 및 열교환기 위치별 온도 변화 등이다.

Fig.2는 계산에 사용된 3MW급 용량의 경유/중유 연소 버너의 전/후면을 도시한다. 버너의 중심에 노즐건이 위치하고 노즐건을 둘러싼 45도 각도를 기울어진 스윌러와 2단의 공기 공급부로 구성되어있다. 통상 스윌러 부분을 1단이라고 하고 반경 방향으로 2, 3단이라고 하였다. 각 단에 공급되는 공기는 버너 전면에 위치한 댐퍼 조절용 봉을 전/후 방향으로 이동시켜 조절하였다. 한 단의 유량을 조절해도 다른 두 단에 영향을 미치고 냉간 시험을 하지 않아 정확한 유량과 제어가 현재로서는 어렵다.

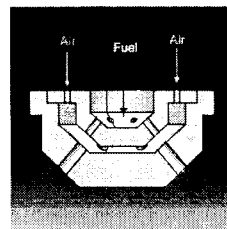


Fig. 3 Schematic diagram of twin-fluid nozzle

본 버너는 연료유량을 240 L/h까지 연소시킬 수 있도록 설계하였으며, 본 수치해석에서는 240 L/h의 연료량에 대해서 계산을 수행하였다. 공기비의

는 배가스 중 산소농도가 6% vol. 이 되도록 하였다. 연료공급 계통에는 부하에 따른 연료 공급량을 조절할 수 있는 주 제어모터에 연동되는 연료 유량 조절밸브, 연료유량계, 연료의 공급, 차단을 담당하는 메인 솔레노이드 밸브로 구성되어 있으며, 연료의 공급압력은 분연펌프에 의해서 결정된다.

이유체 분사노즐의 분무특성은 액체공급관직경, 공기공급관직경, 혼합실의 형상, 액체와 기체의 접촉 후 노즐 내에서의 혼합길이 등에 따라 변화된다. 본 연구에서는 6개의 Orifice를 가진 환형 형태의 관통형 이유체 노즐을 사용하였다.

Table 1. Properties of fuel

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

연료는 황 5%를 함유한 중유(0.5% LRFO)를 연소시키는데 질소는 약 0.3% 함유하고 있다.

2.2 계산방법

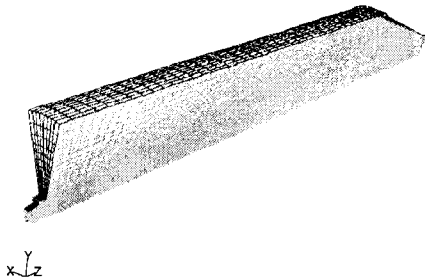


Fig. 4 Computational domain

실험 노의 크기는 직경 1200mm이며 길이는 4500mm이다. 버너의 1차 공기 공급구인 스윌러는 13개의 블레이드가 노즐건을 둘러싼 관벽에 유동방향과 45도의 각을 이루며 부착되어 있다. 노즐이 6개의 홀을 갖는 다공노즐이기 때문에 노

의 중심을 기준으로 전체 영역의 1/6을 계산영역으로 취했다.

노의 축 부분의 삼각뿔 격자를 제외하고 전 영역을 육면체 격자로 구성하였으며 총 격자 수 91142개의 3차원 계산영역을 얻었다.

본 중유 연소는 선회 공기와 고속으로 분사되는 연료 그리고 연소반응에 의한 전형적인 난류 확산 화염이다.

운동량 방정식은 k-ε 방정식을 채택하였고 복사 모델은 P-1 모델을 채택하였으며 연소가스의 복사 물성치를 계산하기 위해 연소가스내 구성 성분들의 각각의 복사 물성치에 각기 다른 가중치를 두어 계산하는

WSGGM(weighted-sum-of gray gases) 접근방법을 복사 열전달의 계산에 적용하였다. 액체 연료의 연소는 연료의 액적의 기화와 끓음 그리고 기화된 연료의 연소가 혼합되어 가스 연료의 연소보다는 복잡하다.

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.

분무형태는 Rosin-Rammler 분포 형태를 취했으며 기본분포 형태로써 참고문헌[1]의 실험결과를 채택했다. 참고문헌[1]에서 Delvan swirl air atomizer, peabody atomizer, Todd CDS atomizer, Sonicore 그리고 Delvan siphon atomizer를 이용한 중유액적 크기의 분포에 대한 연구를 수행했다. 이 중에서 본 이유체 노즐의 평균액적크기인 80μm 와 근사한 형태를 보이는 Delvan swirl air atomizer의 액적분포를 채택했다. 액적 분사 모델에서 연료의 물성치는 상당히 큰 영향을 미친다. 계산 입력값으로서 연료의 증발점과 비점을 입력해야 한다. 이 값들은 분명한 값을 가지지 않기 때문에 경유와 fuel oil의 중간 값 정도로 가정을 하여 400, 500 K로 설정을 하였다. 초기 평균분무 속도는 약 56 m/s로 했다.

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 NOx는 온도에 크게 좌우되는 확장 Zeldovich mechanism에 의해 결정되고 반응물은 Hanson과 Salimian에 의해 얻어진 식을 채택했다. O2와 OH의 분해와 재결합 과정에서 이들과 반응하는 제 3의 입자의 영향을 고려한 부

분평형모델을 적용하였다. Prompt NOx는 De Soete에 얻어진 식을 채용하고 Fuel NOx는 중간 생성물로 HCN에 의해서 형성된다고 가정하였다.

3. 결과

3.1 Cold flow

연소시에 반응에 의해 복잡한 유동 형태를 분석하기 전에 각 단에 다르게 공급되는 공기량에 의해 버너 내부에서 형성되는 유동장을 살펴볼 필요가 있다. 가스 연료 연소와는 달리 상대적으로 큰 질량을 갖고 분사되는 액적과의 공기의 혼합되는 정도를 파악하기 위해서 버너 내부에서 냉간유동 계산을 하였다.

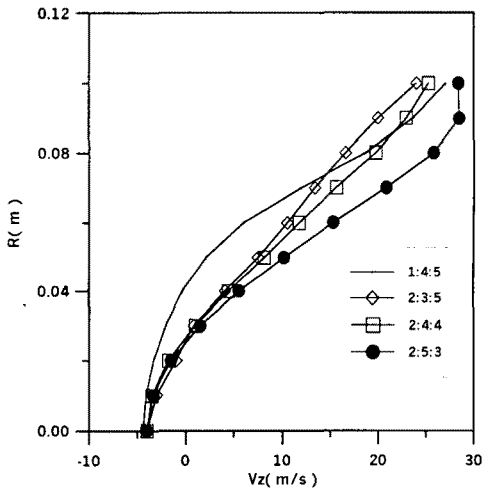


Fig. 5 Longitudinal Velocities along a radius at 78mm from a nozzle tip with different air staging

노즐 팁으로부터 78mm, 123mm 떨어진 부분에서 반경방향에서 길이 방향 속도를 계산하였다. 공기량은 240L/h 연료에 대해서 배가스 중 산소농도가 약 6%가 되는 공기를 유입하고 계산은 단별 공기질량비가 1:4:5, 2:3:5, 2:4:4 그리고 2:5:3의 비로 공급되는 케이스에 대해서 수행하였다.

Fig.5는 축방향으로 78mm 떨어진 위치에서 반경 방향을 따른 축방향 속도를 도시한다. 1단에서 스윙 작용에 의해서 1단의 공기량이 적을 때는 4cm 그리고 두 배일 경우에는 2cm 정도 높이까지는 길이 반대 방향의 속도 분포를 보인다.

위와 같은 노즐 근처에서 음의 길이방향 속도 성분에 의해 형성되는 내부 재순환 영역은 화염의 형성과 보연 효과에 영향을 미쳐 전체적인 화염의 안정성에 미치는 주요한 인자로 작용을 할 것이다. 각단의 공기량비에 따라 유사한 속도 분포를 보여주고 있다.

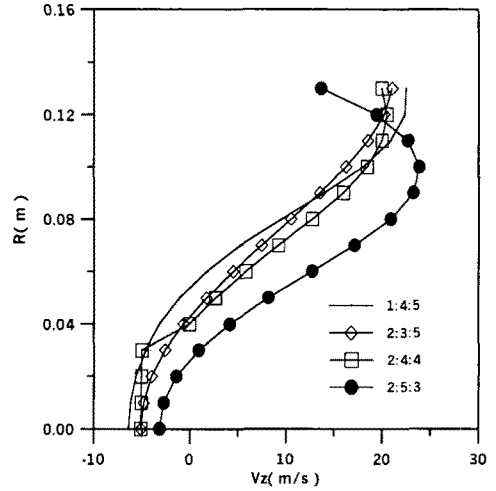


Fig. 6 Longitudinal Velocities along a radius at 123 mm from a nozzle tip with different air staging

Fig.6 은 노즐 팁으로부터 123 mm 떨어진 위치에서의 속도분포를 보이는데 이 위치는 버너의 끝단으로서 노와 연결되는 부분이다. 전체적으로 Fig. 6의 형태를 보이지만 2:5:3의 경우에 버너 벽 근처에서 가장 낮은 속도를 보였다.

3.2 Reactive flow

참고문헌[1]에서 채택한 입경분포를 참고하여 입경의 최소, 최대 그리고 평균크기를 각각 10, 300, 80으로 설정하고 Spread factor는 3으로 액적의 분포를 가정하여 연소 계산을 수행하였다.

3.2.1 속도 분포

Fig.7에서 연소 반응이 일어나는 경우에 노즐 팁에서 123 mm 떨어진 부분에서 길이 방향 속도를 도시한다. 냉간 유동보다 최대 속도변화가 급격하게 보이고 최대 속도 또한 반응에 의해 체적 팽창으로 커졌다. 모든 경우에 최대 속도 부분은 중심으로부터 8cm 위치에서 나타나는데 이부분에서 노즐에서 분출된 연료 기류와 만나 반응을 하는 영역이다.

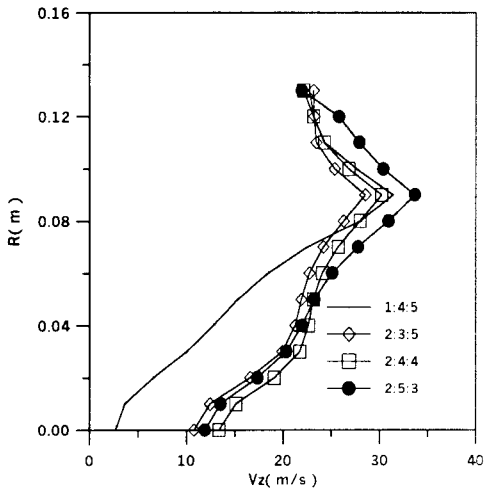


Fig. 7 Longitudinal Velocities along a radius at 123 mm from a nozzle tip with different air staging during combustion

3.2.2. 온도 분포

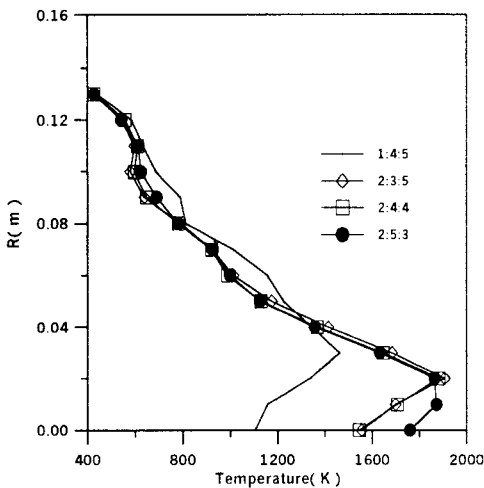


Fig. 8 Temperature along a radius at 123 mm from a nozzle tip with different air staging during combustion

Fig. 8은 123mm에서 온도분포를 도시한다. 중심선에서 4cm 이하에서 고온의 영역이 존재하고 1단의 공기량이 2일수록 높은 온도가 나타났다.

3.2.3 NOx generation

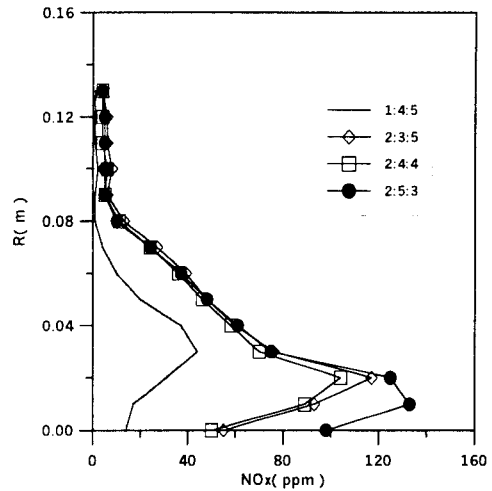


Fig. 9 NOx along a radius at 123 mm from a nozzle tip with different air staging during combustion

같은 위치에서 NOx 발생량을 Fig.9에서 예시한다. NOx 분포는 Fig.8의 온도 분포와 유사한 경향을 보인다. 이는 전체 NOx 발생량 중 thermal NOx가 온도에 비례해서 발생하기 때문이다. 그리고 비교적 높은 함량의 질소 성분을 포함하는 중유연료의 경우 액적의 기화를 통해 기상으로 방출되는 연료의 비율에 비례해서 HCN이 발생한다. 그러므로 1단의 공기량이 많은 경우에 1단 공기의 모멘텀에 의해 휩쓸려 중심에서 연료의 기화가 활발하기 때문에 이 또한 fuel Nox의 발생에 기여를 하고 있다고 사료된다.

3.2.4 NOx generation at exit with air staging ratio

지금까지 임의로 선정된 공기 분배에 따른 버너 내부에서의 유동, 온도 그리고 NOx 발생을 살펴 보았다. 노내의 연소현상은 일차적으로 버너 내부에서의 유동과 연소에 의해 크게 달라지고 이후에 미연 연료와 공기가 노내에서 이차적으로 연소가 되어 노내의 유동과 연소가 달라질 수 있다. 이것이 다단 공기 공급 방식이 NOx 저감을 위해 적용되는 원리이다.

그래서 3단의 공기량비를 2와 6으로 고정하고 1단의 공기량비를 변화시키며 배기가스 출구측에서의 총 발생량을 비교하고자 한다.

공기량은 일정하게 함으로써 2개의 변수에 의해 구속이 되도록 하였다.

가장 바깥쪽의 3단에서 공기량 비를 2와 6으로 하였고 스윌러가 장착된 1단에서 공기량비를 1에서 6으로 증가시키며 계산을 수행하였다.

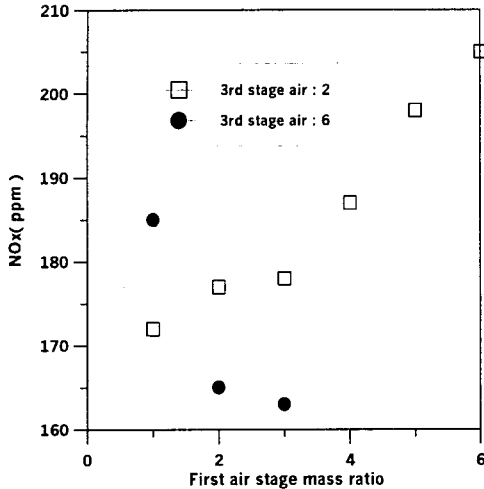


Fig. 10 NOx at exit with varying air staging ratio

3단의 공기량 비율을 6으로 고정하고 1단 공기량 비율을 독립변수로 하여 3단의 공기 분배비를 다양하게 조절하였다. 이 경우에 NOx는 1단 공기 비율이 1일 때 최저 발생량 172 ppm 이었다. 그리고 6일 때 최대 발생량 205 ppm이었다. 전체적으로 1단 공기비가 증가할수록 NOx도 증가하는 추세를 보였다. 이는 스윌러가 위치한 1단에 공기가 많이 흐를수록 더 큰 스윌작용이 일어나 버너 전단부에서 반응이 빨리 진행되어 고온이 형성되었다.

그러나 3단의 공기량비를 6으로 하고 1단의 공기비를 1,2,3으로 변화시켰다. 3단에 많은 공기가 유입되어 1단 공기량을 많이 변화시킬 수 없었다. 이 경우에 1단의 공기가 증가할수록 NOx 발생량은 줄어들고 있음을 보여주고 있다. 3단에 공급되는 다량의 공기가 버너 후류측에서 반응을 하여 고온영역이 줄어들어 NOx가 저감은 되지만 1단의 공기량이 증가할수록 NOx가 줄어드는 점은 대조적이다.

위 계산에서 NOx 발생을 기준으로 하였을 때 저공해 연소점은 3단의 공기비가 3:1:6 일 경우에 일어났다.

4. 결론

삼단 중유연소버너에서 각 단의 공기비가 연소에 미치는 영향을 알아보기 위해서 계산을 수행하였

다. 기존 버너에서 각 단으로 유입되는 공기의 양을 측정하기 어렵다. 다단비를 임의로 선정하여 냉간유동과 반응유동시에 유동과 온도 그리고 NOx 발생을 계산하였다. 냉간 유동시에 버너내부의 유동은 각 단의 속도에 비례하여 유사하게 속도분포가 나타났다. 그러나 연소를 고려했을 때 속도의 변화가 크고 절대값도 컸다. 특히 공기와 분무기류가 만나는 영역과 기화된 연료가 반응하여 속도 분포는 냉간유동과는 확연히 달라졌다. 1단의 스윌작용에 분무기류가 휩쓸려 기화되고 연소되기 때문에 노 중심에서 높게 형성이 되었다. NOx는 온도분포와 유사하게 형성이 되었다. 이는 고온에 의한 thermal NOx뿐만 아니라 연료기화에 의한 Fuel NOx 발생량이 커지기 때문이다. 설계된 버너에서 각 공기입구단의 단면적이 고정된 상태에서 공기량비를 변화시키며 저공해 연소가 되는 최적의 운전 조건을 찾았다. 파라메트릭 연구를 용이하게 하기 위해서 단별 공기량비를 변수로 하였다. 그러나 공기량비 보다는 버너 내부에서 형성되는 속도분포를 기준으로 최적의 운전조건을 찾아야 궁극적인 목적인 저공해 버너를 설계할 수 있을 것으로 사료된다.

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.

[8] 이승수의 4인, "이단중유연소버너의 수치해석적 연구", 추계 연소학회 심포지움, 2002.

[9] 이승수의 3인, "분무특성에 따른 중유연소 수치해석의 결과와 실험과의 비교 ", 대한기계학회 논문집, 2003.