

분무특성에 따른 중유연소 수치해석의 결과와 실험과의 비교

이승수[†] · 김혁주* · 김종진* · 최규성*(한국에너지기술연구원)

Comparison between heavy oil combustion test and numerical analysis of combustion phenomena subject to changes in injection characteristics

S.S. Lee, H.J. Kim, J.J. Kim, K.S. Choi(KIER)

Key Words: NO_x(녹스), Rosin-Rammler(로진램러), Three stage burner(삼단 버너), Twin fluid nozzle(이유체 노즐)

Abstract

Computations were performed to investigate the spray characteristics of the twin fluid nozzle in three stage heavy-oil combustion burner. The burner geometry and flow conditions were provided by a burner company. The goal of the study is to estimate mean droplet size, initial velocity and spread factor of the nozzle through comparison between experiments and numerical analyses. Air stage ratio is 2:4:4 by mass, and O₂ in exhaust gas is about 4 % by volume. Here, the agreement between the experiment and numerical analyses is evaluated by NO_x generation. Spray characteristics will be linearly interpolated between fuel consumption rate 120L/h and 240 L/h.

1. 서론

환경오염의 문제로 연소설비에 대한 환경 규제가 심화되고 있어 전체 에너지 소비량의 많은 양을 차지하는 보일러, 가열로 설비에서 저공해 연소설비의 설계는 중요한 문제가 되고 있다. 현재까지 경유나 중유를 연료로 사용한다. 특히, 대단위 산업체에서 중유를 많이 사용하는데 환경 규제로 인해서 저공해 연소 버너의 개발이 절실하다. 중유의 경우 점성이 높아 취급이 용이하지

않고 분무가 용이하지 않아 고압의 공기나 증기를 이용한 이유체 노즐을 사용한다. 저공해 버너 설계를 위해 실험적 연구는 필수적이지만 경제적, 시간적인 비용이 많이 들기 때문에 정확할 수는 없다하더라도 근사할 수 있는 전산해석이 필요하다. 버너 설계를 위해서 3단으로 나뉜 다단 공기 공급 방식을 채택하여 연료의 혼합, 유동 그리고 보연효과 등을 다단비를 바꿔가며 제어하고자 하였다. 각 단으로 공급되는 공기량은 별도의 풍도실험을 통해서 파악할 수 있다. 여기서 알게되는 공기량은 수치해석의 산화제 입구조건으로 입력이 된다. 한편, 공기량과 다단비뿐만 아니라 분무 조건 또한 연소현상에 중요한 영향을 미친다. 그러나 현재의 방법으로는 분무현상을 정확히 실험적으로 파악하기 어렵고 수치적으로 모사하기도 힘들다. 그리하여 본 연구에서는 기존에 실험으로 수행한 중유 분무의 특징을 기본으로 하여 변화를 주면서 연소현상의 수치해석적 결과를 실험과 비교하였다. 비교를 통해서 본 연구에 사용된 노즐의 분무특성을 역으로 추정하고자 한다.

[†] 한국에너지기술연구원 열병합보일러연구센터
E-mail : ssl@kier.re.kr
TEL : (042)860-3321 FAX : (042)860-3098

* 한국에너지기술연구원 열병합보일러연구센터

2. 실험장치와 계산방법

2.1 실험연소장치

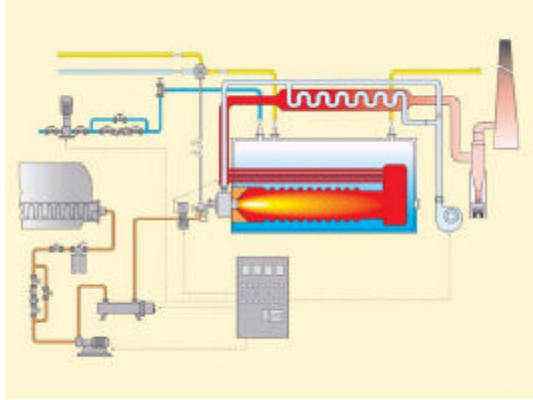


Fig. 1 Schematic diagram of combustion test facility

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 분무용으로 사용할 수 있도록 설계하였다.

급수계통은 연수기를 통과한 상수는 수조에 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.

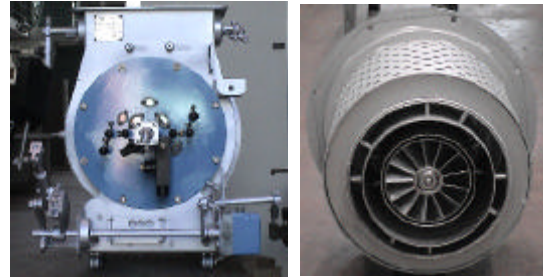


Fig. 2 Views of 3MW test burner

시험용 보일러의 연소성능실험에서 주된 측정 항목은 공기비, 연소가스 온도의 위치별 변화, 배가스 성분(NO_x , CO , CO_2 , O_2 , 분진), 압력손실, 화염의 안정성 및 형상, 연료유량 및 급수유량, 보일러 및 열교환기 위치별 온도 변화 등이다.

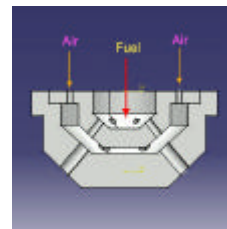


Fig. 3 Schematic diagram of twin-fluid nozzle

본 버너는 연료유량을 240 L/h까지 연소시킬 있도록 설계하였으며, 본 연구에서 120 L/h와 240 L/h의 연료량에 대해서 실험과 수치해석을 수행하였다. 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 8개의 Orifice를 가진 환형 형태의 관통형 이유체 노즐을 사용하였다.

연료로써 황 5% 함유한 중유(0.5% LRFO)를 연소시켰다.

2.2 계산방법

실험 노의 크기는 직경 1200mm이며 길이는 4500mm

이다. 버너의 1차 공기 공급구인 스월러는 13개의 블레이드가 노즐진을 둘러싼 관벽에 유동방향과 45도의 각을 이루며 부착되어있다. 노즐이 8개의 홀을 갖는 다공노즐이기 때문에 노의 중심을 기준으로 전체 영역의 1/8을 계산영역으로 취했다..

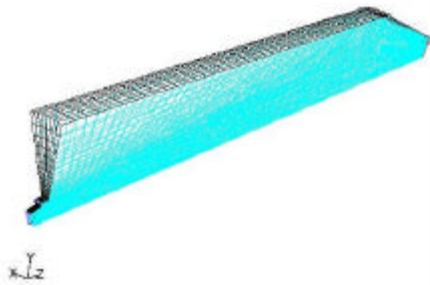


Fig. 4 Computational domain

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

본 중유 연소는 선회공기와 고속으로 분사되는 연료 그리고 연소반응에 의한 전형적인 난류 확산 화염이다. 운동량 방정식은 k-e 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 이류체 노즐의 평균액적크기인 80 μm 와 근사한 형태를 보이는

Delvan swirl air atomizer의 액적분포를 채택했다. 초기 평균분무 속도는 약 203 m/s에서 280m/s사이의 값으로 변화를 주었다. 실제 실험에서 액적의 속도는 액적의 크기에 따라 다르지만 현재의 수치해석에서는 초기 분사속도는 균일하다고 가정하였다.

본 연구의 주요 관심 대상인 NOx의 발생량의 계산은 유동과 온도장의 계산이 끝난 후 후처리과정으로서 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

3.1 평균입경크기의 변화

참고문헌[1]에서 채택한 입경분포에 의하면 입경의 최소, 최대 그리고 평균크기는 각각 10, 400, 80이다. 그리고 Spread factor는 2이다. 연료량 120L/h 에 대해서 평균입경 크기를 변화시켰을 때 의 노 중심축선상의 온도분포를 Fig. 5에서 예시한다.

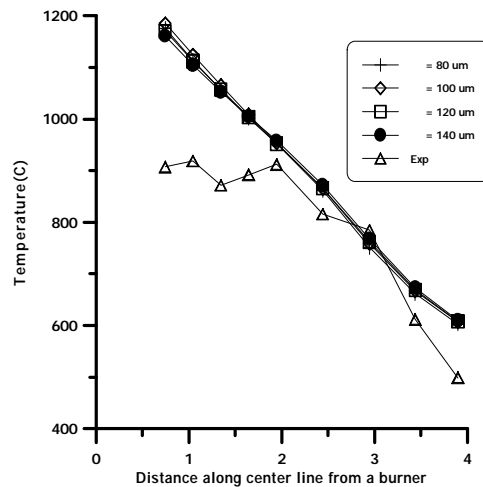


Fig.5 Temperature distribution along central axis with mean droplet size

실험과 수치해석결과를 비교했을 때 버너로부

터 2m 거리까지 온도 편차는 크게 나타난다. 중심축선상의 온도분포는 입경크기에 따른 큰 차이를 보이지 않지만 분사방향에서 고온부분의 차이를 알 수 있다. 입경이 작을수록 노즐선단에서 고온부분의 영역이 크고 입경이 클수록 노즐 선단에서 고온 영역은 작다. 그리고 입경이 클수록 분사방향쪽으로 길게 고온부분이 형성된다.

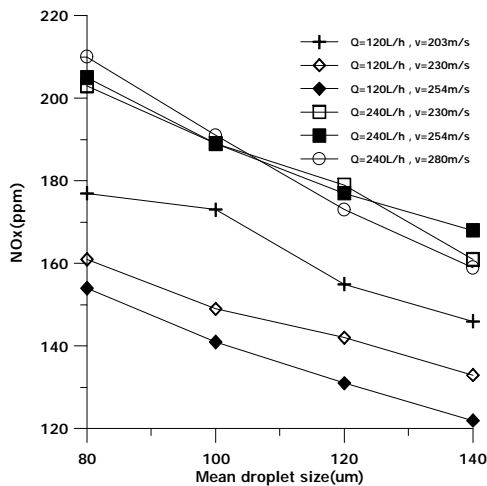


Fig.6 NOx generation with mean droplet size

입경의 크기가 커질수록 NOx 발생량은 줄어드는 경향을 보인다. NOx 발생기구 중 열적 NOx가 고온부에 의해 영향을 받기 때문에, 분무 입경의 평균 크기가 작을수록 고온부가 많이 형성되어 NOx 발생량은 컸다.

3.2 초기 분사속도의 변화

Delvan swirl air atomizer의 분무실험에서 액적의 속도를 크기 25, 75, 125의 세 액적에 대해서 측정하였는데 이 때 속도는 220, 150 그리고 110m/s 이었다. 그러나 현재의 상용프로그램에서 액적의 크기에 상관없이 균일한 초기속도를 부여해야 한다. 그리하여 액적의 속도를 203, 230, 254, 280 m/s로 변화시키며 연소현상의 변화를 살펴보았다. 중심축선상에서 온도분포는 Fig.5와 유사한 형태를 보이며 속도에 따라 분사방향을 따라 온도분포의 변화가 일어났다. NOx 발생의 경우, 평균입경 크기의 변화와는 다른 경향을 보인다. 연료량이 120L/h 일 경우 분사속도가 커질수록 공기의 유동을 벗어나는 액적의 양이 많아져 고온부의 크기도 작아져 NOx 발생량은 작아졌

다. 그러나 연료량이 240L/h 일 경우 같은 당량비의 공기를 공급해줄 때 상대적인 공기의 속도가 커서 액적의 속도변화에 따른 큰 변화를 보여 주지는 않았다고 사료된다.

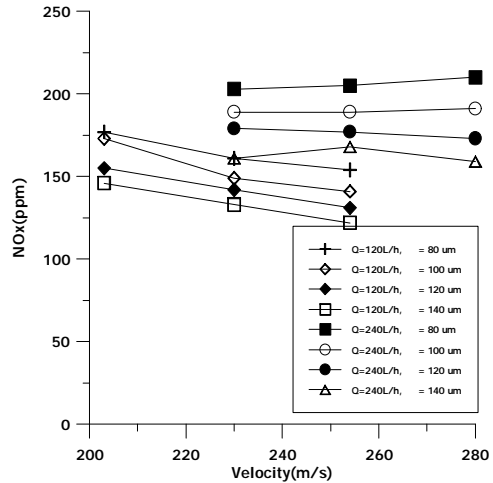


Fig.7 NOx generation with droplet velocity

3.3 Spread factor 의 변화

Spread factor(이하 SF)는 평균입경과 최소, 최대 입경을 기준으로 다양한 크기의 액적을 분포시키는 변수인데 참고문헌[1]에서 참고한 액적분포의 SF는 대략 2였다. SF가 작을수록 액적의 크기는 평균입경 크기에서 작은 입경쪽으로 치우치고 커질수록 최대입경으로 치우친다. 분무특성에서 평균입경의 크기 변화보다는 영향력이 적기 때문에 SF를 2와 4인 두 경우에 대해서 계산을 수행하였고 Fig.8은 NOx의 발생량을 예시한다.

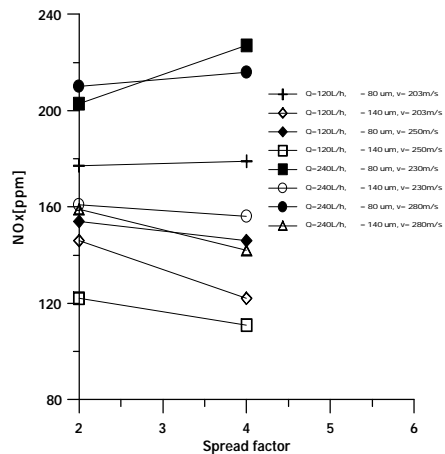


Fig. 8 NOx generation with SF

SF에 따르는 뚜렷한 경향을 파악하기는 힘들다. SF는 평균입경과 분사속도와 함께 전체적으로 고려해야 할 변수라고 생각된다.

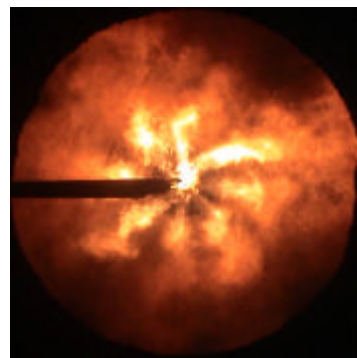
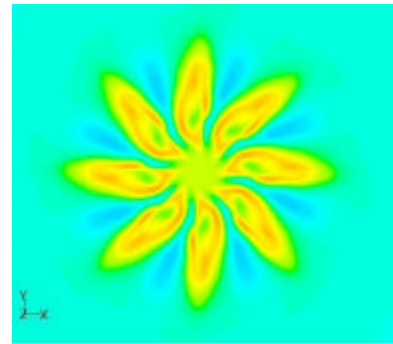
3.4 분무특성의 추정과 실험과의 비교

참고문헌의 분무특성은 기준으로 하여 분무특성을 변화시키며 수행한 수치해석의 결과에서 NOx 발생과 관련해서 근사한 값을 예측했다. 현재까지 전체 노대의 온도를 측정하지 않고 노의 중심선을 따라 온도를 측정하였다. 수치해석 결과와 실험상의 결과에서 온도차는 버너와 가장 가까운 측정지점에서 약 200°C의 온도차를 보이고 출구 측으로 갈수록 그 차는 줄어드는 경향을 보인다. 본 온도차는 수치해석에서 가정된 완전한 연료의 산화와 그리고 실제 연소실험에서 발생할 수 있는 측정의 부정확성에 기인한다고 사료된다. 실험에서 120L/h, 240L/h 연료를 연소시 배가스중 산소량 4%인 연소상태에서 NOx의 발생량은 각각 170, 215 ppm 이었다. 실험과 같은 NOx 발생량을 갖는 수치해석의 결과를 얻을 수 있는 각 유량별 노즐의 분무특성은 다음 표와 같다.

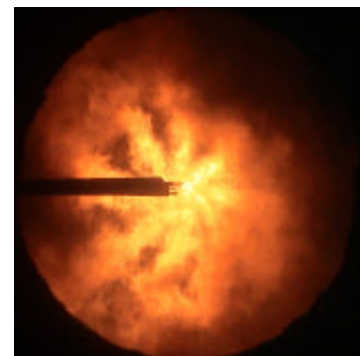
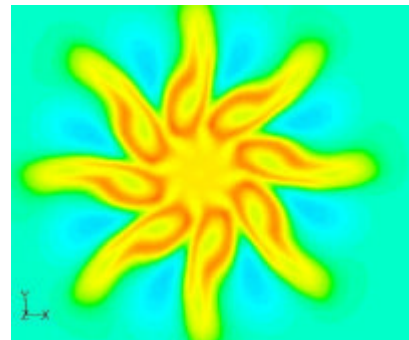
Table 1 Injection characteristics at 120 L/h and 240 L/h

항목	120L/h	240L/h
평균입경(μm)	80	80
최소입경(μm)	10	10
최대입경(μm)	400	400
SF	2	2
분사속도(m/s)	203	280

이 경우에 노의 출구측 관측창에서 바라본 화염의 모습과 버너로부터 0.3m 이격된 거리에서의 수치해석에서 얻은 온도분포를 Fig. 9에서 비교할 수 있다.



(a) 120 L/h



(b) 240 L/h

Fig.9 Comparison between flames and temperature fields at Q= 120 and 240 L/h

8개의 노즐 홀을 갖기 때문에 실험상에서 8개의 가지 화염이 형성이 되고 수치해석 결과의 온도분포에서도 고온부분이 8개로 나뉘짐을 알 수 있다. 일차 공기 공급부의 스웰작용에 의해 화염이 시계방향으로 치우치는 형상을 실제 실험에서 확인할 수 있고 수치해석에서도 치우침을 알 수 있다. 증기와 연료가 함께 분사되는 이유체 노즐의 특성상 각 노즐 홀에 균일한 양이 분사되지 않아 수치해석과 같은 대칭적인 화염을 얻을 수는 없었다.

4. 결 론

기존의 실험에서 얻어진 분무특성에 근거하여 특성을 변화시키며 수치해석과 실험과의 NO_x 발생량 비교를 통해서 본 연구에 사용되는 노즐의 분무 특성을 알고자 했다. 평균 입경, 분무속도 그리고 Sf 계수에 변화를 주며 노내 온도분포와 NO_x 발생량을 비교했다.

참고문헌[1]의 분무특성에서 평균입경을 변화시켰을 때 수치해석을 수행한 결과 참고문헌상의 평균입경인 80 μ m 에서 120L/h, 그리고 240 L/h의 연소시에 근사한 NO_x가 발생하였다. 그리고 균일한 액적의 분사속도를 가정할 때 120L/h에서는 약 203 m/s, 그리고 240 L/h에서는 약 280 m/s의 속도를 부여하였을 때 좀 더 근사한 값을 얻었다. 화염의 형상 또한 수치해석의 온도 분포와 비교하였을 때 유사한 형상을 보여주었다. 그러나 SF 값은 연료량에 따라 다른 경향의 NO_x 발생하여 독립적으로 고려하기보다는 분사량, 평균입경 크기 그리고 속도 등과 함께 고려해야 한다. 120L/h와 240L/h 사이의 연료량에 대해서는 속도를 선형적으로 보간하여 본 연구에서 추정된 분무특성의 적합성을 향후 확인하고 폭 넓은 턴다운비를 갖으며 저공해 연소가 가능한 버너 설계에 활용하고자 한다.

후 기

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

참고문헌

- [1] G.C. England, D.W. Pershing, M.P. Heap and J.E. Cichanowicz, 1982, "Effects of fuel properties and atomization parameters on NO_x control for Heavy liquid fuel fired package boiler", Final report to EPA.
- [2] Ladislav Bebar, Vit Kermes, Petr Stehlik, Josef Canek, Jaroslav Oral, 2002, "Low Nox burners prediction of emissions concentration based on design, measurements and modelling", WASTE MANAGEMENT, pp. 443-451.
- [3] Javier M Ballester, Cesar Dopazo, Norberto Fuyeo, 1997, "Investigation of low-NO_x strategies for natural gas combustion", Fuel Vol. 76 No. 5, pp. 435-446.
- [4] P.J Coelho and N. Peters, 2001, "Numerical simulation of a mild combustion burner", COMBUSTION AND FLAME, pp. 503-518.
- [5] Masayuki Taniguchi, Kenji Yamamoto, Hironobu Kobayashi and Kenji Kiyama, 2002, "A reduced reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich conditions", FUEL 81, pp. 363-371.
- [6] Philip J. Stopford, 2002, "Recent applications of CFD modelling in the power generation and combustion industries", Applied Mathematical Modelling, pp. 351-374.
- [7] M. Xu, J.L.T. Azevedo and M.G. Carvalho, 2000, "Modelling of the combustion process and NO_x emission in a utility boiler", Fuel 79, pp. 1611-1619.