

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.5.491

ISSN 1226-4881

저공해 버너에서의 운전조건에 따른 미분탄 분배특성에 관한 수치 해석 연구

윤성환* · 박 정**† · 권오봉** · 박호영*** · 서상일***

* 부경대학교 에너지시스템공학과, ** 부경대학교 기계공학과, *** 한전 전력연구원 수화력발전그룹

Numerical Study of Distribution Characteristics of Pulverized Coal According to Operation Condition in PM Burners

Sung Hwan Yoon*, Jeong Park**†, Oh Boong Kwon**, Ho Young Park*** and Sang Il Seo***

* Dept. of Energy System Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

*** Power Generation Laboratory, Korea Electric 'Power' Research Institute

(Received January 4, 2011 ; Revised February 9, 2011 ; Accepted February 11, 2011)

Key Words: CFD(전산 유체 역학), Concentric Coal Nozzle(미분탄 과다노즐), Numerical Analysis(수치해석), PM Burner(저공해 버너), Pulverized Coal(미분탄), Weak Coal Nozzle(미분탄 부족노즐)

초록: 국내에서 널리 사용되는 500 MW급 미분탄 화력발전에서 2개의 PM (pollution minimum) 버너의 최적 운전 범위를 확인하기 위하여 DPM (discrete phase model)을 활용하여 수치계산을 수행하였다. 본 연구는 저가의 아역청탄의 활용 증진을 위하여 다양한 조건에서 탄 종별로 연구를 수행하는데 그 목적이 있다. 탄 종별로 미분탄의 질량 유량, 1차 공기의 질량 유량, 그리고 미분탄의 입자 크기 분포를 달리하여 공기/석탄의 분배비의 영향을 조사하였다. 이러한 매개변수에 관하여 PM 버너에서의 공기/석탄의 분배비의 최적운전조건을 도출하고 이에 대해 논의하고자 한다.

Abstract: We performed numerical simulation using a DPM (discrete phase model) to identify the optimal operation ranges in two representative PM burners widely used in domestic 500-MW pulverized coal-fired power plants. Recently there has been an increased utilization of low-cost coals such as sub-bituminous coal. We investigate the effects of coal blends on the distribution ratio of coal to air by varying the mass flow rates of pulverized coal and primary air and the particle size. We present and discuss optimal conditions for the distribution ratio of coal to air in PM burners.

1. 서론

세계 에너지 소비량의 급격한 증가 및 고유가 시대가 도래함에 따라 보존량이 풍부한 석탄은 가격상승 정도도 크지 않아 향후 석유를 대체할 기축에너지로서의 충분한 자질이 갖추고 있다. 그러나 세계 에너지 시장의 수요공급의 불안정으로 대량공급 체제로의 전환이 어려워며 발전원가 또한 지속적으로 상승하고 있다. 따라서 에너지원의 다각화와 원가 절감을 위해 수분 및 휘발분이 높은 아역청탄(subbituminous coal)의 사용을 확대

하고 여러 탄 종의 혼소가 불가피한 실정이다. 실제 국내 500 MW급 보일러는 아역청탄 전소(destruction)를 기준으로 설계되어 있어 다량의 연소되지 않은 비산재(fly ash) 및 낮은 부하에서의 화염불안정성, 그리고 보일러 내의 슬래그 문제 등⁽¹⁾을 내포하기 때문에 다른 보일러의 연소 벤치마킹이 어렵고 설계 범위를 벗어나는 신규 탄 및 다양한 탄 종을 연소시킬 경우 최적 연소를 위한 운전조건 도출이 힘든 상황이다. 또한 1차 공기 압력, 유량, 미분탄의 유량, 그리고 탄 종 등 다양한 요인에 의해서 연소특성의 변화가 심한데 이러한 조절 변수 조절에 경험 기술만이 사용되고 있는 실정이라 적절한 조절 값을 찾는 데 곤란을 겪고 있다. 특히 아역청탄을 전소하는 발전플랜트

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 경우 질소산화물(NO_x)을 대량으로 발생되기 때문에 안정적이고 경제적으로 감소시켜 배출농도 규제치⁽²⁾를 준수하기 위한 연구가 필요하게 되었다.

NO_x 배출저감을 위해서 탈질설비를 설치할 경우 쉽게 규제치를 준수할 수 있으나 고가의 설치비와 유지비로 인해 발전원가의 상승을 유발한다. 그리하여 최근 과잉 연소공기(OFA, Over Fire Air)^(1,3-6) 혹은 다단 과잉 연소공기(SOFA, Separated Over Fire Air)⁽⁷⁾기법을 이용하여 NO_x 절감을 위한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 이러한 기법 또한 기존의 연소기 후단 이후 OFA, SOFA를 설치해야 하기 때문에 추가비용이 발생하게 된다.

한편 500 MW급 보일러에서 주로 채택하는 PM(pollution minimum) 버너는 코너형 버너의 일종으로 미분탄과 1차 공기를 2개로 분리된 버너 노즐 즉, 미분탄 과다노즐(concentric coal nozzle)과 미분탄 부족노즐(weak coal nozzle)로 분사시켜 휘발분 연소 시 발생하는 질소화합물을 저감하는 형식으로 연료 과다영역에서는 공기량이 적어 휘발분 연소가 지연됨으로 인해 NO_x 발생량이 감소하게 되며 미연 가스량은 증가하게 된다. 반면 공기 과다영역에서는 공기량의 증가로 인해 NO_x 발생량이 증대되지만 연료 과다영역에서의 미연 가스량의 유입으로 NO_x 발생량이 감소하게 된다. 하지만 이러한 PM 버너 또한 아역청탄 및 여러 탄 종의 혼소로 인해 최적운전조건을 제시하지 못하고 있는 실정이다. PM 버너에서 권장하는 공기/석탄의 분배비를 Fig. 1에 나타내었는데 Conc 측이 C₁에 속하는 값으로 대략 1.2에 해당한다. 그리고 Weak 측은 C₂에 해당하고 대략 6~7 근처

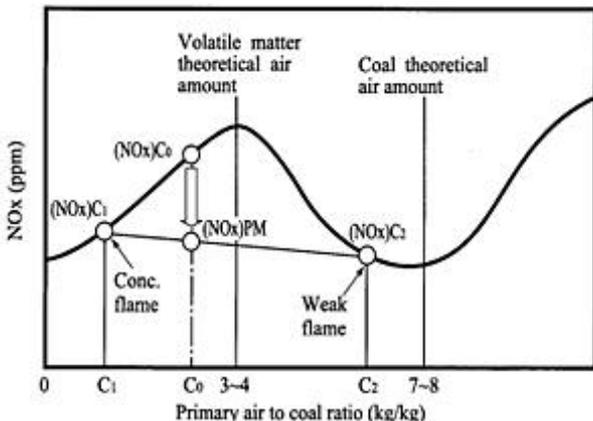


Fig. 1 Distribution ratio of coal to air in PM burner

에 위치한다.

따라서 본 연구는 국내 화력발전에서 사용되어지는 단탄, 혼탄(single coal, blended coal)을 기준으로 PM 버너에서 추가비용 발생없이 조정 가능한 미분탄의 질량 유량, 1차 공기의 질량 유량, 그리고 미분탄의 입자 크기를 달리하여 수치적 연구를 수행함으로써 Fig. 1과 같이 이상적인 공기/석탄의 분배비를 이루는 최적의 운전조건을 제시하고자 한다.

2. 수치해석 모델 및 이론

2.1 지배방정식

PM 버너 내에서는 일반적으로 난류 및 대류/복사 열전달을 수반하고 아울러 석탄 입자의 거동 해석이 요구된다. 이와 같은 유동장을 수치적으로 해석하기 위해서는 관계된 여러 방정식들이 적절히 선택/적용되어야 한다. 본 연구에서는 버너 내의 유동장과 온도분포를 계산하기 위해 질량

Table 1 Governing equations and the numerical models used in the present study

Mass conservation equation
$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x_i)}{\partial x_i} = S_m$ <p>where, $S_m = \text{mass source term}$</p>
Momentum conservation equation
$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$ <p>where,</p> $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$
Standard k-ε model
$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k \cdots \rho \varepsilon$ $\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$ <p>where,</p> $u_i = \rho C_p k^2 / \varepsilon, G_{1\varepsilon} = 1.44, G_{2\varepsilon} = 1.92$ $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$ $G_\mu = 0.99, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$

보존 방정식, 운동량보존 방정식을 사용하였으며, 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 해당 방정식의 자세한 수식은 Table 1에 나타내었다.

석탄 입자들은 주로 가스의 흐름을 따라가고 가스화기내 석탄 입자의 부피비율이 매우 작기 때문에 석탄입자의 부피 비율 및 석탄 입자끼리의 상호작용은 무시할 수 있다. CFD에서는 이렇게 고체입자의 부피비율이 10 % 이내로 매우 작을 경우 DPM(Discrete Phase Model)을 쓰는 것이 가능하며,⁽⁸⁾ 본 연구에서도 이를 활용하여 계산을 수행 하였다. DPM은 오일러-라그랑지안 방식(Euler-Lagrangian approach)을 따르며, 유체 상(phase)은 연소체로 가정되어 시간 평균된 N-S 방정식을 푸는 방법으로 해결하고, 고체상은 계산하고자하는 유동장에서 라그랑지안 방법을 사용하여 해결하게 된다.⁽⁹⁾

수치계산은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하는 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.2를 사용하였으며 대류항의 차분도식(convection scheme)으로는 2차 상류도식(second order upwind scheme)을 사용하였다. 본 연구는 버너 내부의 미연탄과 공기의 분포에 초점을 두고 있으며, 실제 연소반응 과정은 고려하지 않기 때문에, 화학반응에 관련된 방정식들은 포함되지 않았다.

2.2 PM 버너 형상 및 구조

본 논문에 적용된 PM 버너는 500 MW급 보일러에 부착된 코너형 방식으로 미분기에서 공급된 미분탄이 두 개의 버너로 나뉘져 보일러 노에 석탄을 공급하며, 각각의 버너는 희박 연소와 농후 연소가 일어나 다단 연소를 하게 된다. 각 버너 중 농후 상태(fuel rich)에서 연소가 일어나는 쪽을

Conc 버너라 하고 희박 상태(fuel lean)에서 연소가 일어나는 쪽을 Weak 버너라 한다. 현재의 PM 버너는 Fig. 2와 같이 A형과 B형 2가지 종류로 구성되어 있다. 버너의 높이는 각각 A형이 2540.8 mm이고 B형은 2591.2 mm이다. 폭은 오른쪽 벽과 왼쪽 벽의 거리 기준으로 A형이 705.7 mm이고 B형이 483.4 mm이고 Weak쪽은 A형이 344 mm이고 B형이 349.2 mm이고 Conc는 A형이 312.8 mm이고 B형이 335.83 mm이다. 통상적으로 두 타입 모두 Weak쪽으로 소량의 미분탄을 Conc쪽으로 다량의 미분탄을 배분한다. 하지만 공기량에 있어서는 A형은 Weak쪽으로 다량의 공기가 배분되고 B형은 Conc쪽으로 더 많은 공기가 배분된다. 한편, A형은 3, 4 미분기에 B형은 8, 9 미분기에 설치되어 보일러 노의 4모통이를 기준으로 높이에 따라 3개의 버너(Top, Middle, Bottom)에 공급되어 총 24개의 PM버너가 사용된다. 여기서 최상단(Top burner)의 A형의 미분기(4 EA)는 화재와 같은 특정 상황을 고려하여 가동하고 있지 않다. 그리하여 실제 구동되는 PM 버너는 총 20개에 해당한다.

PM 버너는 미분기에서 나온 미분탄과 1차 공기의 혼합유체로 두 개의 버너로 들어가기 전에 분배기에서 미분탄의 관성이 공기보다 비교적 큰 점을 감안하여 분배가 이루어진다. 이때에 NOx 저감의 최적화를 위하여 Conc 버너와 Weak 버너

Table 2 Kinds of coal used

	탄종
단탄	NCA
혼탄 #1	Tugnuisky(30%)+Arutmin(70%)
혼탄 #2	Tugnuisky(15%)+APAU(85%)

Table 3 Boundary conditions used in the present numerical calculation

	단탄	혼탄 #1	혼탄 #2	Design point	단위
공기질량유량	5.889	5.889	11.155	9.353	Kg/sec/m
미분탄 질량 유량	5.626	5.626	14.0820	4.683	Kg/sec/m
작동 압력	△ 2255.5	△ 2255.5	△ 2255.5	△ 2255.5	pascal
난류 강도	7	7	7	7	%
PM 버너 입구 직경	0.511	0.511	0.511	0.511	m

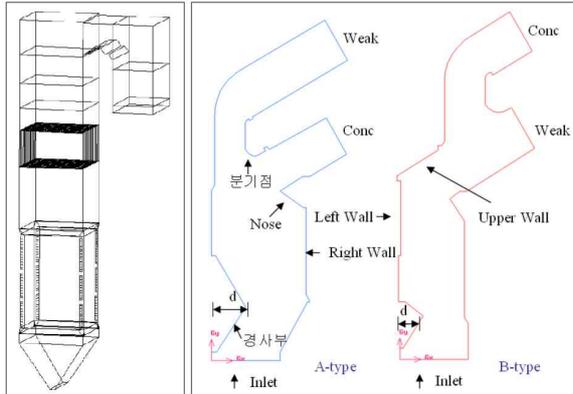


Fig. 2 Schematic of the PM burners; in the right boiler, the left schematic denotes the type A and the right one means the type B

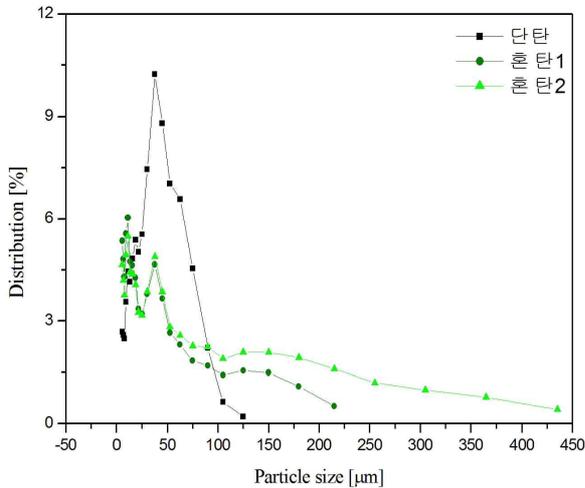


Fig. 3 Particle distributions according to kinds of coal used

의 공기와 질량비를 일정하게 유지하게 되는데 가장 이상적인 질량비는 앞서 언급하였듯이 Conc 측이 1.2, Weak 측이 6~7 근처에 해당한다.

2.3 경계조건 및 수치해석 조건

본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 다양한 입도를 가진 미분탄에 대해 분배기 내에서의 분배 특성을 조사하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 유한요소망은 Fig. 2와 같이 PM버너의 실제크기로, 14524(A형), 12470(B형)개의 격자점과, 14112(A형), 12103(B형)개의 요소로 구성하였다. 아래의 Table 2에는 적용된 미분탄의 종류를 나타내었다. 여기서 단탄은 한국전력에서 제공된 NCA탄의 입도 분포를 사용하였고 혼탄 #1과 #2는 하동 발전 6 호기에서 각각 2010년 4월 7일과 4월 8일에 채취된 미분탄의 입도를 기준으로 계산을 수행하였다.

Fig. 3에는 계산에 사용된 미분탄을 탄종에 따라 입도분석을 시행하여 얻은 결과를 나타내었다. 입도분석은 채취된 미분탄에 레이저를 투과하여 굴절된 각을 이용하여 직경 크기를 구하는 방식을 사용하였다. 그림에서 보듯 단탄인 경우 하나의 특징입자가 특징적으로 도출되는 반면 혼탄 #1,2인 경우는 2종의 미분탄이 혼합됨에 따라 2개의 특징적인 특징입자가 도출되었다. 또한 혼탄 #2인 경우 혼탄 #1인 경우보다 상대적으로 큰 입자의 분포도가 높게 나타났는데 이는 APAU탄이 상대적으로 다른 탄종에 비해 큰 입자 직경을 이루고 있음을 의미한다.

Table 3은 경계조건을 나타내었다. 유량은 2차원화된 값을 나타내었다. 난류 강도는 다양한 값에 대해 계산을 수행하였으나 계산결과에 크게 영향을 미치지 않아 선행 연구에서 도출된 값을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 표에 나타난 설계점(design point)은 현재의 분배기에서 설계 시 권장된 운전조건을 의미한다. 앞서 언급하였듯이 본 연구에서는 분배기의 최적 운전 조건을 제시하는 것이 최우선 목적이므로 설계점에서도 현재 하동 발전에서 사용되는 미분탄을 사용하여 계산을 수행하였다. 이후 논의되겠지만 설계점에서도 실질적으로 사용되는 다양한 입도를 가진 미분탄을 기준으로 설계되지 않아 최적의 운전 조건을 제시하진 못하였다. 그리하여 설계점에서의 미분탄의 최적 입도를 도출하기 위하여 다양한 단일 입도에 대해 계산을 수행하였고 계산 조건은 60 ~ 90 μm에서 5 μm 간격으로 총 7 case에 대해 계산하였다. 이러한 점을 바탕으로 혼탄 #1의 운전 조건을 기준으로 최적 입도를 도출하기 위하여 계산을 수행하였으며 입도 조건은 4.5 ~ 215 μm에서 총 23 case에 대해 계산하였다. 하지만 현장에서 특정 입도를 가진 미분탄을 사용하기에는 탄종 선정 시 기준이 될 수 있으나 실제 운전 환경을 판단하기에는 다소 무리가 있다. 그리하여 단탄과 혼탄 #1에서의 입도 분포를 적용하여 운전 조건의 인자 중 하나인 1차 공기 질량 유량을 조절하여 계산을 수행하였다. 각 조건은 4.5 ~ 16 Kg/sec/m에서 0.5 Kg/sec/m 간격으로 총 24 case에 대해 계산하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 분배기 해석(단탄, 혼탄 #1, 혼탄 #2)

Figs. 4와 5는 각각 A형과 B형의 미분기에 대해

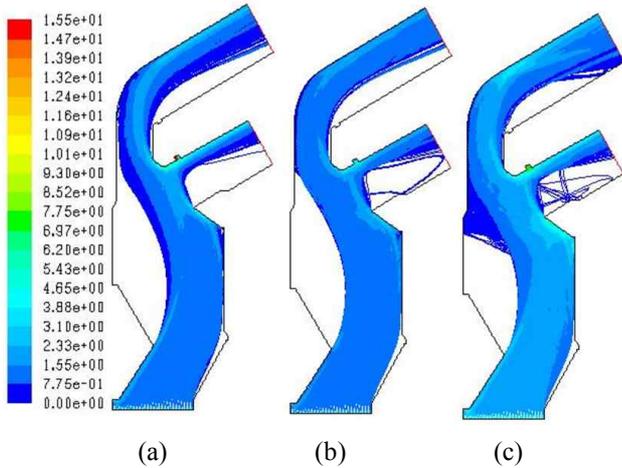


Fig. 4 Concentration distributions of pulverized coal in type-A PM burner; (a) single coal, (b) blended coal #1, and (c) blended coal #2. (Kg/sec/m)

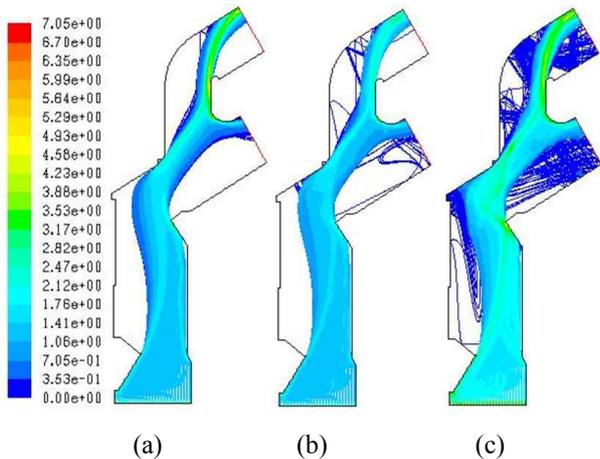


Fig. 5 Concentration distributions of pulverized coal in type-B PM burner; (a) single coal, (b) blended coal #1, and (c) blended coal #2. (Kg/sec/m)

미분탄의 농도 분포를 도시한 그림이고 그림에서 색깔은 농도의 크기를 나타낸다. 그리고 분배 성능을 확인하기 위하여 Fig. 6에 분배기 형상에 따라 탄종 별로 분배 성능(공기/석탄 비)을 나타내었다. 그림에서 보듯 현재의 결과는 NOx 감소를 위한 분배성능이 상당히 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 원인은 분배기의 설계점은 특정 입도를 가진 미분탄을 고려하였고 또한 미분탄 및 공기의 유입량의 설계점과 상이함에 따른 전형적인 운전조건의 차이에 의한 결과임을 알 수 있다. 특히 Table 3에 나타난 설계점의 경우 공기의 유입량이 미분탄 유입량의 약 2배인 점을 감안한다면 현재의 계산에 사용된 운전조건(단탄, 혼탄 #1, 혼탄

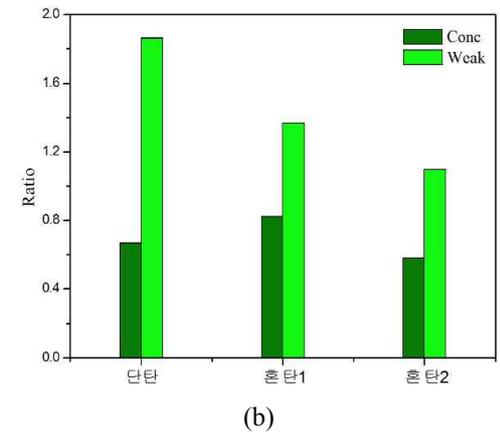
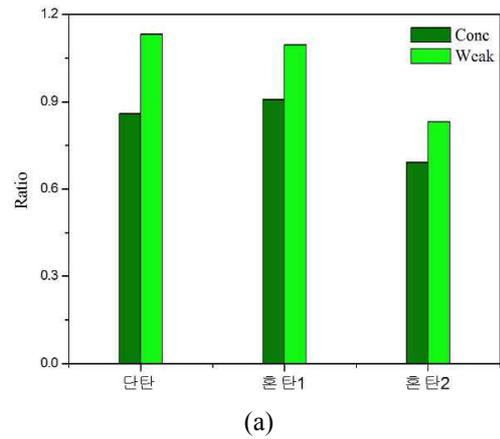


Fig. 6 Comparison between the ratios of mass flow rate of coal and air for conc and weak according to kind of coal; (a) type-A (b) type-B

#2)은 공기의 유입량이 미분탄의 유입량과 상대적으로 거의 동일하게 유입되는 것을 알 수 있다. 또한 분배 효율에 있어서 공기량만을 고려하였을 때 현재의 결과는 분배기 형상에 상관없이 Weak 쪽으로 크게 나타나기 때문에 오히려 분배 성능(공기/석탄 비)을 향상시키는 결과로 보일 수 있으나 미분탄의 유입량을 고려하였을 때에는 A형의 경우 오히려 Weak 측으로 크게 나타남으로 인해 Fig. 6에서도 보듯이 상대적으로 A형 분배기가 분배성능이 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 분배성능의 향상을 위해서는 미분탄 유입량이 일정하다고 가정하였을 때 적정 수준의 1차 공기 유입량이 필요하고 미분탄과 1차 공기의 유입량이 일정하다고 가정하였을 때에는 적절한 입자 크기를 가진 미분탄이 확보되어야 함을 알 수 있다.

Figs. 4와 5는 미분탄의 농도를 나타낸 그림이다. 앞서 언급이 되었듯이 미분탄 유입이 A형의 경우 Weak 측으로 많이 치우치고 B형의 경우

Conc 측으로 많이 치우침을 정성적으로 알 수 있다. 여기서 주목할 점은 분배기 내 미분탄의 유동이 혼탄 #1이 단탄에 비해 상대적으로 벽면에 많이 부딪힘을 알 수 있다. 또한 혼탄 #2는 혼탄 #1에 비해 미분탄이 벽면에 부딪히는 횟수가 더욱 증가한다. 이는 혼탄 #2가 상대적으로 큰 입자를 가진 미분탄의 함유가 높으므로 인해 레이놀즈수(Reynolds number)의 증가로 말미암아 난류강도가 증대된 것으로 볼 수 있다. 또한 레이놀즈수는 항력과 관련이 있고 미분탄 입자를 구형으로 가정 한 현재의 연구에서는 미분탄 입자 크기가 분배 성능에 깊은 관련이 있음을 알 수 있다. 이는 이후 논의토록 하겠다.

Fig. 6에서 보듯 분배기 형상만을 고려하였을 때에는 이전 연구⁽¹⁰⁾와 동일하게 A형보다는 B형의 분배기가 분배성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 이는 B형의 상부벽(upper wall)의 경사각이 이상적으로 이루어져 미분탄의 상부벽에 부딪혀 나올 때 Weak 덕트 방향으로의 운동량과 입구에서 유입되는 공기량의 상호작용으로 인해 최적의 분배가 이루어짐을 알 수 있다. 반면 A형의 경우는 공기와 미분탄의 유입량이 모두 Weak 측으로 치우쳐져 Nose부분의 경사각이나 분기점의 위치가 달라져야 함을 알 수 있다.

3.2 분배기 해석(Design point)

앞에서 분배기의 분배 성능을 좌우하는 주요인자로서 미분탄의 입도 분포, 미분탄 및 공기의 질량유량을 언급하였다. 여기서 미분탄 및 공기의 질량유량이 분배기의 분배 성능을 좌우하는 주요인자임을 확인하기 위하여 미분탄 및 공기의 질량유량을 설계점에 설정하고(Table 3) 미분탄의 입도 분포는 단탄과 혼탄 #1의 경우를 적용하여 계산을 수행하였다. Figs. 7과 8은 단탄, 혼탄1에 대한 분배기에서 미분탄 농도 분포의 계산 결과이다. 그리고 Fig. 9에 분배 성능(공기/석탄 비)을 나타내었는데 그림에서 보듯 이전보다 최적조건에 많이 상응했다고 볼 수 있다. 특히 A형의 혼탄 #1-DP는 Conc 측이 1.32, Weak 측이 4.15로 최적 운전 조건에 가장 가깝게 나타났다. 이러한 점을 살펴볼 때 미분탄의 입도 분포를 고려하지 않았을 때 미분탄 및 공기의 질량유량이 분배기의 분배 성능에 향상시키는데 주요한 역할을 함을 알 수 있다. 아울러 현재의 하동 발전의 운전조건의

문제점을 찾을 수 있으며 분배기 내에 보다 더 많은 공기 유입이 필요함을 알 수 있다. 하지만 정량적인 분석은 이후 절에서 논의토록 하겠다. Figs. 7과 8은 미분탄의 농도를 나타낸 그림이다. 이전 절의 경우와 마찬가지로 분배기 내 미분탄의 유동이 혼탄 #1이 단탄에 비해 상대적으로 벽면에 많이 부딪힘을 알 수 있다. 이는 미분탄 및 공기의 질량유량이 분배기에서의 최적 운전 조건으로 구동하더라도 미분탄의 입도 분포가 정량적으로 뒷받침되지 않는다면 분배기의 분배 성능을 감소하는 요인이 됨을 알 수 있다. 이러한 점을

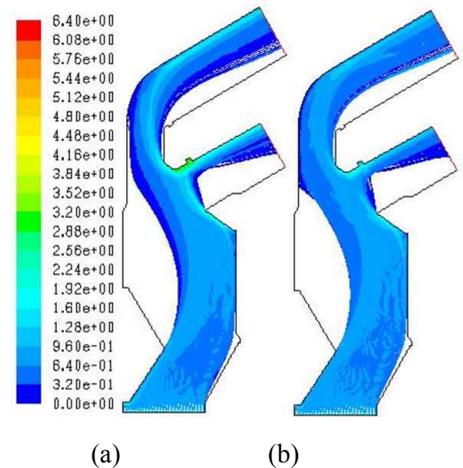


Fig. 7 Concentration distributions of pulverized coal in type-A PM burner at design point; (a) single coal and (b) blended coal #1. (Kg/sec/m)

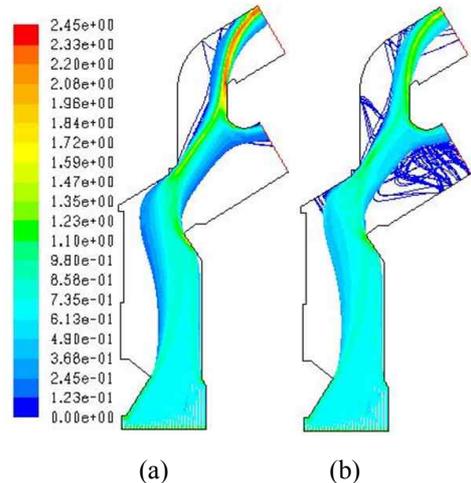


Fig. 8 Concentration distributions of pulverized coal in type-B PM burner at design point; (a) single coal and (b) blended coal #1. (Kg/sec/m)

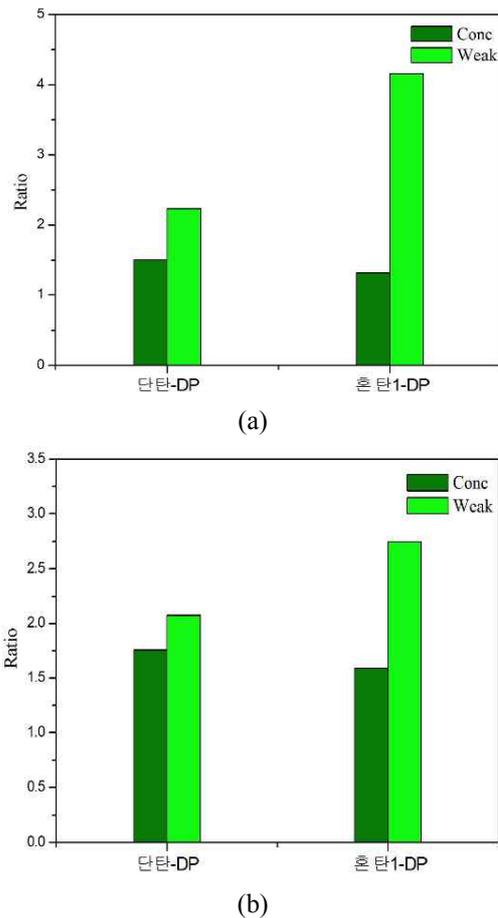


Fig. 9 Comparison between the ratios of mass flow rate of coal and air for conc and weak according to kind of coal, (a) type-A (b) type-B

바탕으로 설계점에서 고려될 수 있는 최상의 미분탄의 입자 크기를 정의하는 것은 탄종에 따른 미분탄 선정 시 매우 유리한 데이터를 확보할 수 있는 데에 동기 부여할 수 있다.

그리하여 앞서 2.3절에서 언급하였듯이 설계점에서 미분탄 입자 크기를 변화해 가며 분배기의 분배성능을 계산하였다. 입자 직경을 60 ~ 90 μm 으로 바뀌가며 총 7 case에서 계산을 수행하였고 결과는 Table 4에 나타내었다. 그림에서 보듯 Conc와 Weak 덕트에 따른 미분탄 및 공기의 질량 유량이 통상적으로 알려진 대로 미분탄의 양이 분배기 형상과 관계없이 Conc 덕트로 높게 나타나고 공기의 양은 A형의 경우 Weak 측으로 B형의 경우 Conc 측으로 높게 나타났다. 또한 분배기 A형의 경우 Conc, Weak 덕트에서의 분배 성능을 살펴보면 공기/석탄 비가 가장 이상적인 조건이

Table 4 Mass flow rates of coal and air, and their ratios according to particle size of coal at the design point

Diameter (μm)	Duct	A-type		
		Coal	Air	Ratio
60	Conc	2.663	2.764	1.038
	Weak	2.020	6.589	3.262
65	Conc	2.939	2.770	0.943
	Weak	1.745	6.583	3.772
70	Conc	3.206	2.630	0.820
	Weak	1.377	6.722	4.882
75	Conc	3.581	2.441	0.682
	Weak	1.102	6.911	6.272
80	Conc	3.765	2.375	0.631
	Weak	0.918	6.978	7.599
85	Conc	3.765	2.376	0.631
	Weak	0.918	6.977	7.598
90	Conc	3.673	2.390	0.651
	Weak	1.010	6.963	6.894
Diameter (μm)	Duct	B-type		
		Coal	Air	Ratio
60	Conc	4.683	5.142	1.098
	Weak	0	4.211	∞
65	Conc	4.683	5.711	1.220
	Weak	0	3.641	∞
70	Conc	4.683	5.933	1.267
	Weak	0	3.419	∞
75	Conc	4.683	6.157	1.315
	Weak	0	3.195	∞
80	Conc	4.683	6.218	1.328
	Weak	0	3.135	∞
85	Conc	4.683	6.196	1.323
	Weak	0	3.157	∞
90	Conc	4.683	5.906	1.261
	Weak	0	3.448	∞

미분탄입자 직경 75 μm 일 때에 Conc 측이 0.682, Weak 측이 6.272로 도출되었다. 이는 이전의 계산 결과보다 분배 성능이 월등히 향상되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 이전 태안 발전의 연구결과⁽¹⁰⁾에서도 보듯이 미분탄 입자 직경을 74 μm 로

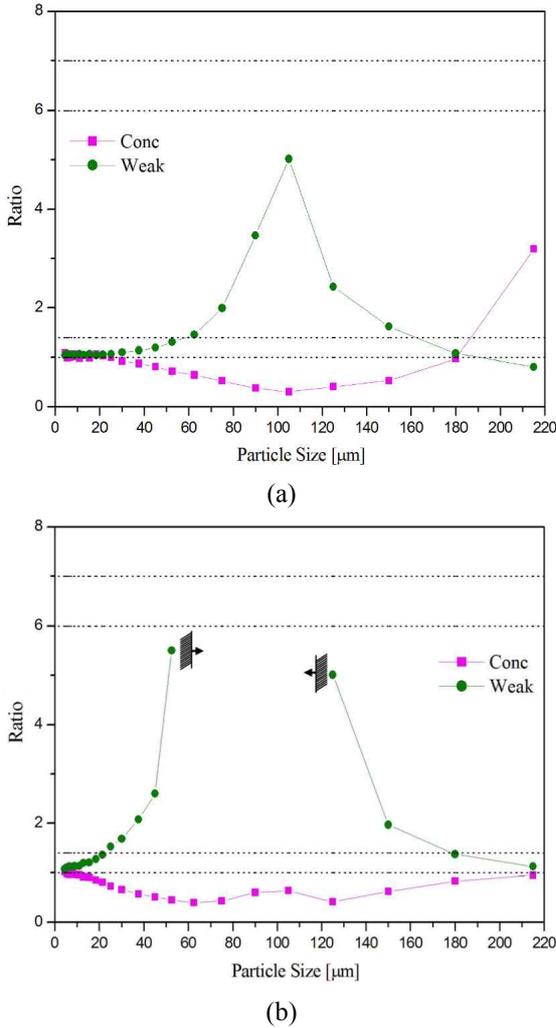


Fig. 10 Variations of ratios of the mass flow rates of coal and air with particle size in Conc and Weak for the blended coal #1; (a) type-A and (b) type-B

고정하고 계산을 수행하였다는 점을 비춰 볼 때 계산 결과는 이상적으로 도출되나 이러한 계산방법은 현장에서 적용하기에는 거리가 있음을 알 수 있다. 이는 보일러 내에 취입되는 다양한 입자 분포를 가진 미분탄과 상이하고 또한 Table 4에서도 알 수 있듯이 분배기 B형의 경우 Weak 측에서는 미분탄 유입이 전혀 발생되지 않는 점으로 볼 때 공기의 유입 량 역시 미분탄 직경이 변화함에 따라 미분탄 입자와의 상호작용에 의해 각각의 덕트로의 유입량이 달라짐을 알 수 있다. 이것은 공기와 미분탄 입자간의 상호작용이 있음을 내포하고 있다. 이러한 점을 고찰하여 볼 때 분배기의 설계점도 마찬가지로 실제 사용되어지는 다양한 입자 분포를 가진 미분탄을 적용하여 계산되어야 함을 알

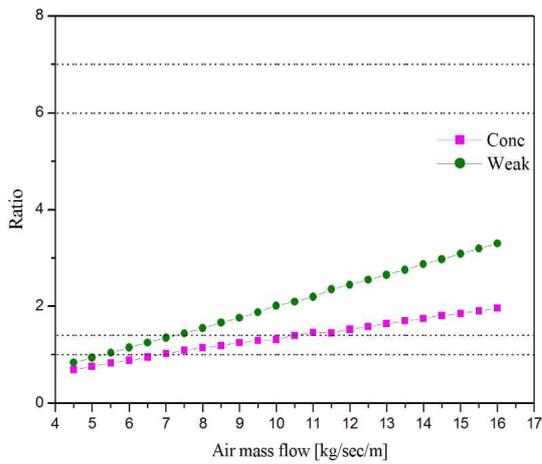
수 있다. 하지만 앞서도 언급하였지만 현재의 계산 결과는 탄 중에 따른 미분탄 선정 시 입도 분포 측면을 고려할 때 선정 기준이 될 수 있다.

3.3 NOx 저감을 위한 미분탄 입도 선정

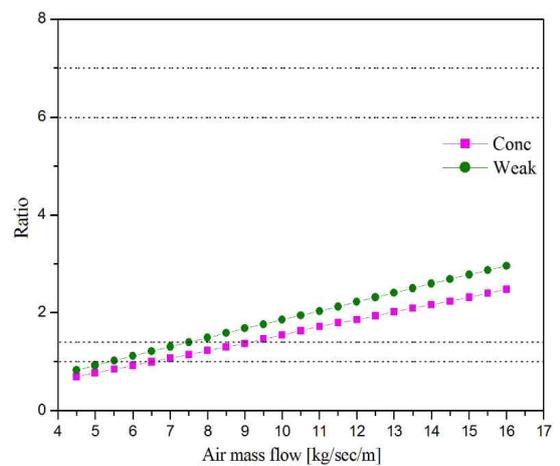
앞 절에서 설계점에서의 분배기 내 배분 성능 분석 및 미분탄의 최적 입도를 도출하였다. 이번 절에서는 현재 하동 발전소에서의 운전 조건을 기준으로 미분탄의 최적 입도를 도출하고자 한다. 운전 조건은 Table 3에서 나타낸 혼탄 #1의 조건으로 하동 발전에서 2010년 4월 8일 13시에 구동된 운전조건에 해당한다. 미분탄의 입도 조건은 4.5 ~ 215 μm로 총 25 case에 해당한다. Fig. 10은 계산된 결과를 그림으로 나타내었다. 그림에서 보듯 설계점에서의 계산 결과와 마찬가지로 분배기 A형의 경우는 미분탄의 유입이 직경에 상관없이 2개의 덕트 내로 분포되어 있는 반면 B형의 경우는 62.5, 75.0, 90, 105 μm의 경우 Weak 측으로 미분탄이 유입되지 않는 것을 알 수 있다. 앞선 설계점에서의 계산 결과를 고려한다면 B형의 분배기가 A형의 분배기보다 미분탄 입도에 상대적으로 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이는 A형의 분배기 보다는 B형의 분배기가 기하학적으로 복잡한 형상을 띄고 있어 미분탄 유동이 상대적으로 분배기 형상에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 이러한 점으로 볼 때 미분탄 입도 선정 시 우선적으로 B형의 분배기의 배분 성능에 초점을 맞추는 것이 합당한 판단이라 볼 수 있다. 그리하여 B형의 분배기를 우선적으로 고려해 보면 Conc 측은 상대적으로 일정한 반면 Weak 측은 미분탄 입도에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 특히 Weak에서 62.5 ~ 105 μm에서는 미분탄 유입이 없기 때문에 분배 성능을 정의 할 수 없다. 그럼에도 불구하고 A형의 분배기를 고려하였을 때 미분탄의 직경이 105 μm일 때 상대적으로 최적의 분배 성능이 나타났다. 또한 B형인 경우에도 실제 미분탄은 직경에 따라 분포를 가지고 1차 공기와 상호작용을 고려하였을 때 하동 발전의 2010년 4월 8일 13시에 구동된 운전조건에서는 105 μm의 입도가 많이 분포된 미분탄을 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.4 NOx 저감을 위한 1차 공기 유입량 선정

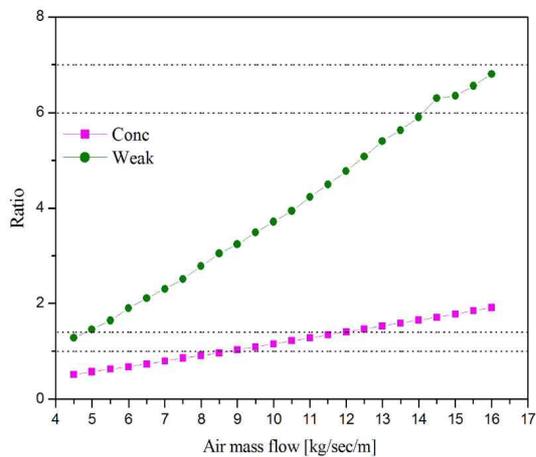
분배기의 분배 성능을 향상시키기 위한 방안



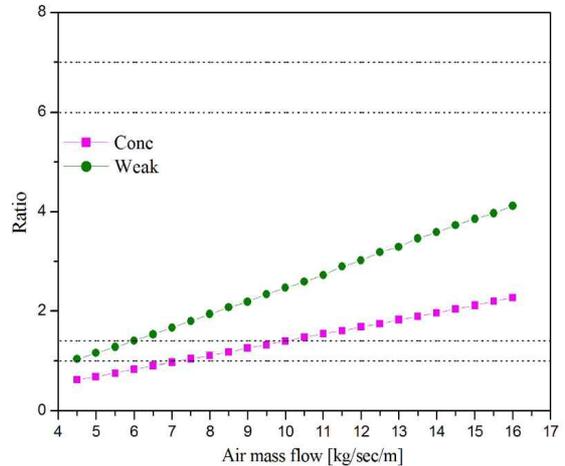
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 11 Variations of ratios of the mass flow rates of coal and air with air mass flow rate in Conc and Weak for the single coal; (a) type-A and (b) type-B

Fig. 12 Variations of ratios of the mass flow rates of coal and air with air mass flow rate in Conc and Weak for the blended coal #1; (a) type-A and (b) type-B

중 1차 공기 유입량의 조정은 가장 현장에 적용하기에 용이한 방법이다. 이는 앞서 언급된 다량의 특정 입도를 가진 미분탄을 번거롭게 대체할 필요도 없고 분배기의 교체, 보수도 요구되지 않고 단지 현재의 제반 시설에 1차 공기 유입량만 조정하면 된다. 계산 조건은 미분탄의 입도 분포는 단탄과 혼탄 #1의 2개의 탄 중에 대해 적용하였고 운전 조건은 앞선 절과 마찬가지로 하동 발전에서 2010년 4월 8일 13시에 구동된 운전조건을 사용하였다. 공기 유입량은 4.5 ~ 16(kg/sec/m)로 총 24 case에 대해 조사하였다.

Figs. 11과 12는 각각 단탄, 혼탄 #1에서의 계산 결과를 그림으로 나타내었다. 앞선 절에서의 단일

입자의 계산과는 달리 모든 케이스에서 Weak와 Conc의 덕트내로 미분탄과 공기가 잘 유입되는 것을 알 수 있다. 실제 운전 조건에서의 공기 유입량이 5.889 kg/sec/m임을 감안한다면 분배 성능을 위해서는 공기 유입 정도가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 우선 단탄의 A형의 분배기 경우를 살펴보면 Conc 측은 최적 운전 조건을 취할 수 있으나 Weak 측은 최적 운전 조건에 해당하려면 Conc 덕트에서 오히려 최적 운전 조건의 분배 성능 비를 넘어서는 경우가 발생한다. 반면 B형의 분배기는 Conc와 Weak 덕트에서 상호 간의 최적 운전 조건에 부합할 만한 공기 유입량을 선정할 수 있다. 그리하여 B형의 분배기에서 최적 공기유

입량을 도출하면 대략 14 ~ 15.5 kg/sec/m로 A형의 분배기에서도 B형에서의 분배 성능을 고려한다면 이해할 만한 수준의 운전 조건이라 볼 수 있다. 이때에 배분 성능비가 A형의 Weak 측이 2.97 ~ 3.2이고 Conc 측이 1.75 ~ 1.91에 해당한다. B형의 경우 Weak 측이 5.91 ~ 6.56이고 Conc 측이 1.65 ~ 1.85에 해당한다.

다음으로 Fig. 12의 혼탄 #1의 경우를 살펴보면 우선 A형의 분배기 경우 단탄의 A형의 분배기와 마찬가지로 정성적으로 이상적인 조건을 도출하기 힘들다. B형의 분배기 또한 마찬가지로 두 덕트 모두 만족하는 조건을 찾기 힘들다. 그럼에도 불구하고 최선의 운전 조건을 제시한다면 공기 유입량이 대략 10 ~ 14 kg/sec/m로 분배 성능비가 A형의 Weak 측이 1.86 ~ 2.6이고 Conc 측이 1.4 ~ 2.16에 해당하고 B형의 경우 Weak 측이 2.47 ~ 3.59이고 Conc 측이 1.4 ~ 1.97에 해당한다. 현재의 결과를 고찰해보면 분배 성능 향상을 위해 탄 종 별로는 단탄의 사용이 이상적이고 분배기 형상의 경우는 B형의 분배기가 상대적으로 분배 향상에 기여함을 알 수 있다.

4. 결 론

PM 버너에서 실제 운전조건 및 설계 운전조건에서 탄종에 따라 유동특성을 해석하였다. 동일한 운전조건이라도 사용 탄 종의 입도분포에 따라 PM 버너 Conc/Weak 노즐에서의 공기량/석탄량이 서로 다르게 나타났으며 이는 각 노즐에서의 공기/석탄 비율이 서로 다르게 분포함을 보여주었다. 본 연구에서는 하동 발전의 2010년 4월 8일 13시 운전 조건으로 미분탄의 입도를 4.5 ~ 215 μm 로 총 25 case의 단일 입도에 대해 분배 성능 계산을 수행하여 입도 105 μm 에서 A형의 경우 Conc 측이 0.308, Weak 측이 5.018로 도출되었고, B형의 경우 Conc 측이 0.643, Weak 측은 미분탄의 유입이 없는 것으로 나타났다. 또한 최적 1차 공기량 선정을 위해 2010년 4월 8일 13시 운전조건에 사용된 미분탄 유입량(5.626 kg/sec/m)을 기준으로 단탄과 혼탄 #1의 경우에 대해 계산을 수행하였다. 현재의 결과로 볼 때 단탄을 사용한다고 가정하였을 때에는 최적 공기 유입량은 대략 14 ~ 15.5 kg/sec/m에 해당하였고 혼탄1을 사용한다고 하였을 때에는 최적 공기 유입량은 대략 10 ~ 14

kg/sec/m에 해당하였다.

후 기

본 연구는 한전 전력연구원의 “저열량탄 혼소 기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Fan, J., Qian, L., Ma, Y., Sun, P. and Cen, K., 2001, "Computational Modeling of Pulverized Coal Combustion Processes in Tangentially Fired Furnaces," *Chem. Eng. J.*, Vol. 81, pp. 261~269.
- (2) European Commission, 2001, Directive 2001/80/EC on the Limitation of Emissions of Certain Pollutants into the Air from Large Combustion Plants.
- (3) Choi, C. R. and Kim, C. N., 2009, "Numerical Investigation on the Flow, Combustion and NO_x Emission Characteristics in a 500MW_e Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler," *Fuel*, Vol. 88, pp. 1720~1731.
- (4) Kokkinos, A., Wasyluk, D., Brower, M. and Barna, J. J., 2000, "Reducing NO_x emissions in Tangentially-Fired Boilers - A New Approach," *ASME, International Joint Power Generation Conference*.
- (5) Díez, L., Cortés, C. and Pallarés, J., 2007, "Numerical Investigation of NO_x emissions from a Tangentially-Fired Utility Boiler Under Convective and Overfire Air Operation," *Fuel*, doi:10.1016/j.fuel.2007.07.02.
- (6) Hill, S. C. and Douglas Smoot, L., 2000, "Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion Systems," *Progress Energ. Combust. Sci.*, Vol. 26, pp. 417~458.
- (7) Kang, K. T., Song, J. H., Yoon, M. J., Lee, B. H., Kim, S. M., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., 2009, "A Numerical Study on the Effects of SOFA on NO_x Emission Reduction in 500MW Class Sub-Bituminous Coal-Fired Boiler," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 4, pp. 399~408.
- (8) Chae, T. Y., Yu, T. U., Bang, B. R., Yang, Y., 2009, "A Numerical Study on Characteristics of

- Oxy-Pulverized Coal Combustion in a Corner-firing Boiler of 125MW_{th} Scale," *38th KOSCO Symposium*, pp. 65~70.
- (9) Fluent 6.2 User's and Tutorial Guide, "Multiple Char Reaction"
- (10) Ru, J. B., 2008, "Analysis of Modeling on Oxy-PC in Boiler Furnace" *A Study on Development of Techniques at Korea Electric Power Corporation.*