

# 유류 연소 발전용 보일러에서 공기 공급 계통의 불균일성에 관한 실험적 연구

고영건\* · 김영봉\* · 최상민\*\* · 김영주\*\*

## A Experimental Study on the Uneven Flow Distribution in the Windbox of an Oil-Fired Boiler

Young Gun Go, Youngbong Kim, Sangmin Choi and Young-zoo Kim

### ABSTRACT

In the multi-burner power plant, uneven supplies of combustion air to multi-burner are induced by unbalanced flow distribution in the windbox. These flow patterns tend to make flame unstable, increase the formation of pollutants and lower the overall combustion efficiency. To prevent these disadvantages, flow patterns in the windbox should be investigated and made to be distributed uniformly. In this study, scaled windbox model was used for tests and measured the velocities at the exit of the each burner and compared those with the CFD results.

**Key Words** : Windbox, Oil-Fired Burner, Power Plant, Flow Distribution, CFD

### 1. 서 론

국내 화력 발전설비 중 약 15%의 설비용량 (2001년 기준)을 차지하는 중유화력은 500MW급 표준석탄화력 발전이 급속히 성장하는 과정에서 상대적으로 등한시 된채 1997년 이후 계속적인 설비 감소추세에 있다. 그러나 아직도 전체 발전 용량에서 뛰어난 설비 가용성으로 인해 중요한 위치를 점하고 있음은 물론이고, 안정적인 동력원 확보의 일환으로 실시되고 있는 연료 다변화 정책의 큰 부분을 담당하고 있다. 이로인해 꾸준히 중유화력에 대한 기술수요가 증가하고 있다. 그 중에서 연소조정기술, 버너요소 설계기술, 연료 및 연소공기 배분/측정기술, 저공해기술 등의 설비적인 기술과 연료의 조성 및 특성에 의한 영향에 관한 기술이 다소 취약하여 국내 기술 시장의 대부분을 외국의 발전설비제작업체나 일부의 컨설팅업체에 의존하고 있는 실정이다. 이에 보

다 근본적이고 체계적인 연구를 통해 연소에 관한 제반 기술의 자립도를 키우고 이를 바탕으로 환경 친화적이며, 고 효율의 연소 시스템 구축이 절실한 실정이다[1].

### 2. 중유화력 발전 System 개요

중유화력 발전에서는 다수의 버너가 사용되며 각 버너별로 균일한 연료 및 연소용 공기를 공급해야 안정적인 운전을 할 수 있게 된다. Fig.1은 연료탱크에서부터 버너까지 연료를 공급하는 단계를 나타낸 것이며 연료의 이송성을 높이기 위해 이송라인 중간에 연료를 120°C 정도로 가열을 하여 가압이송 시킨다. 중유를 사용한 국내 일부의 발전소에서는 모든 버너의 연료 공급을 하나의 Control Valve로 총괄적으로 조절을 하고 있어 버너 개별적인 연료 유량 조절을 할 수가 없는 구조이며 단순히 On/Off 개념으로만 연료를 공급 혹은 차단시킬 수 있다.

중유화력 발전에서는 다수의 버너를 사용하기 때문에 각 버너별로 균일하게 연소용 공기를 공급하는 것은 아주 중요한 문제이며 각 버너로 연

\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처자, smchoi@kaist.ac.kr

\*\* 한전 전력연구원

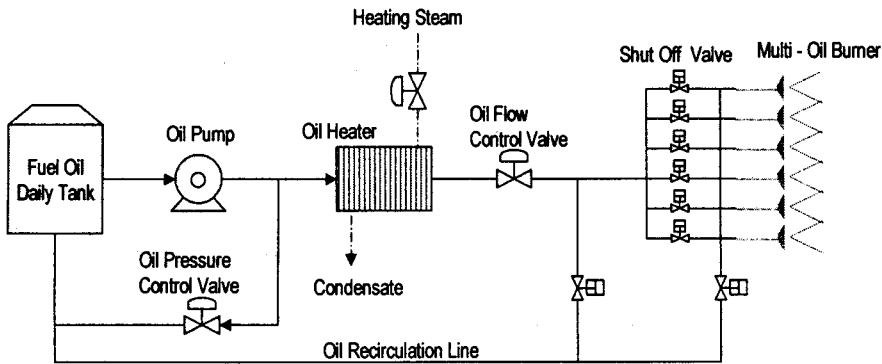
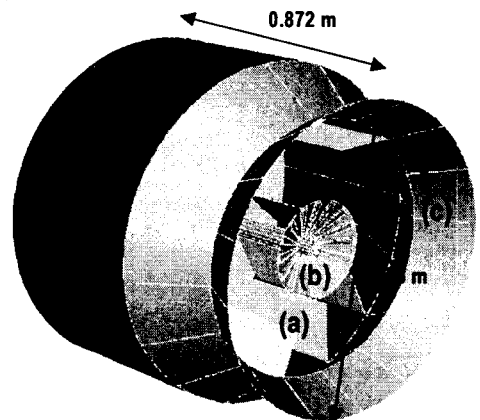


Fig. 1 Schematic diagram of fuel supply system in the oil-fired burner

소용 공기를 공급하는 역할을 하는 것이 Windbox라는 구조물이다. 이는 Fig. 3에서 보듯이 커다란 덕트형태를 띠고 있으면 Air preheater에서 가열된 공기가 유입되어 Windbox를 통해 각 버너로 연소용 공기가 공급된다.

중유 버너는 Fig.2에서 보듯이 연소용 공기 유량을 제어하는 Air register vane, 화염을 안정적으로 유지시키는 Impeller(Flame Stabilizer), 버너의 외관을 구성하는 버너 타일, 그리고 연료유를 무화시키는 Atomizer로 구성된다. 연기에 추가적으로 NOx 생성을 줄이기 위한 연료와 공기의 다단연소 기능이나 가스연료와의 혼소를 요소를 추가하기도 한다. 이런 버너 구성 요소들의 상호 작용에 의해 최종적으로 버너에서의 화염위치, 형태 등이 결정되어 연소효율 및 공해 물질 발생 정도를 결정한다.

중유버너에서는 미립화를 증진시키기 위해 공기나 증기를 중유와 함께 2유체 형태로 공급하게 된다. Fig. 4는 이런 중유버너에서 사용되는 전형



(a) : Air register vane  
(b) : Atomizer & Impeller  
(c) : Burner tile & Burner throat

Fig. 3 Outline of an oil-fired burner

적인 Y-jet atomizer의 개략도를 나타낸 것이다. 버너건의 가운데를 통해 가압된 증기는 버너건 바깥부분을 통해 공급되는 중유와 atomizer tip 부분에서 혼합되어 미립화를 증진시키게 된다.

2.1 해석 대상 개요

본 연구 대상 Windbox의 기본 형태는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 연소로 주위를 공기를 공급하는 덕트로 둘러싼 형태로 되어 있으며 상부(1floor), 하부(2floor) 및 Front 그리고 Rear의 4부분이 격막에 의해 구분된다. 또한 2개의 버너가 하나의 셀을 구성하며 총 12개의 버너셀이 위치하고 있으며 각각의 버너셀은 Windbox 바깥쪽에서 버너셀을 봤을 때 왼쪽 버너셀부터 A,B,C의 이름을 갖게 된다. 그러므로 상부층의 Front면의 왼쪽의 버너셀은 1FA라고 불려진다. 또한 각 버너셀에서 위쪽의 버너는 Upper, 아래쪽의

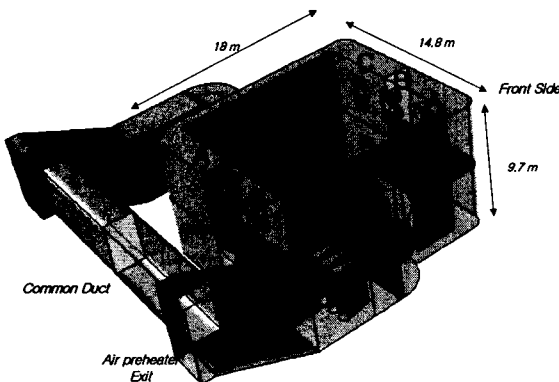


Fig. 2 Outline of a calculated windbox

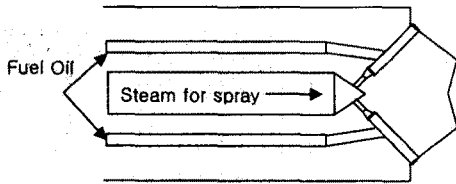


Fig. 4 Steam assisted Y-Jet atomizer

버너는 Lower 버너로 불린다.

버너의 경우는 Fig. 3과 같이 버너 중앙에 Impeller와 연료유를 분사하는 Atomizer가 있으며 버너 내부로 들어오는 연소용 공기의 유량 및 선회도는 Air register vane 개도에 따라 제어가 된다.[2]

### 3. 공기 공급 계통의 불균일성

실제 운전되고 있는 발전용 보일러에서 연소현상에 문제가 발생되면 연료, 버너팁 변형 등 여러 원인들에 대해 차근차근 접근하여 문제점을 해결해야 한다. 본 연구에서는 이런 여러 가지 원인들 중에서 버너로 공급되는 연소용 공기가 얼마나 균일하게 공급되고 있는가를 확인하고 개선방향을 제시하는데 있다.

앞절에서도 언급했듯이 다수의 버너가 사용되는 경우에는 각 버너별로 균일한 연소용 공기가 공급돼야 각버너에서 화염 모양 및 길이, 과잉공기비, 연소효율 및 공해물질 생성을 제어할 수 있게 된다. 이는 단지 각 버너별로 공급되는 공기량뿐만 아니라 버너의 Air register vane별로도 동일하게 공기를 공급해야 버너축을 중심으로 대칭적인 유동형태를 나타내게 되어 화염이 안정적으로 형성되게 된다. 그렇기 때문에 저공해 및 화염 안정성 관점에서 각 버너별로 공급하는 Windbox내에서의 유동분포를 균일하게 하는 것은 중요한 요소로 작용하게 된다.[3,5]

#### 3.1 버너별 공급 공기 유량의 불균일성

각 버너별로 공급되는 공기량이 차이가 발생하게 되면 공기가 부족한 쪽의 버너에서는 산화제 부족으로 인해 CO 등의 불완전 연소 생성물이 증가하게 된다. 이를 방지하기 위해서 연소용 공기 공급을 증가하게 되면 다른 쪽의 버너에서는 과잉 공기 공급으로 인한 온도 강하 및 연소 불안정성 등의 영향을 나타내게 된다.[3, 4, 7]

#### 3.2 개별 버너에서 비대칭적인 공기 유입

버너 내부에서의 유동은 버너 중심축을 기준으

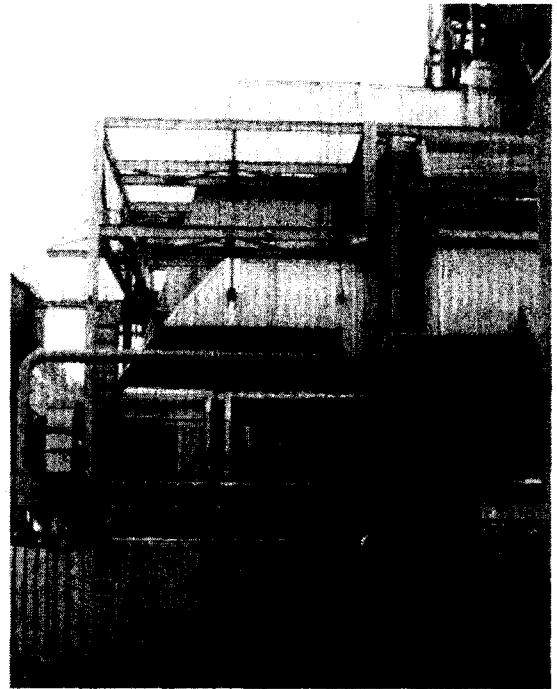


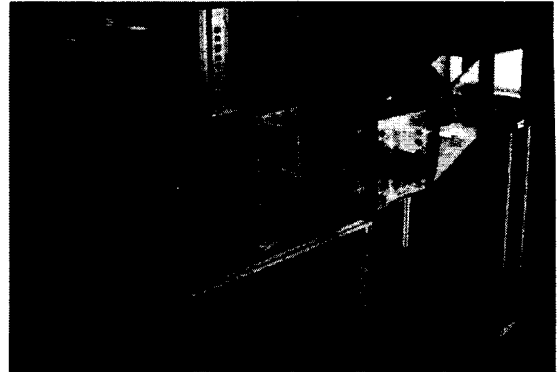
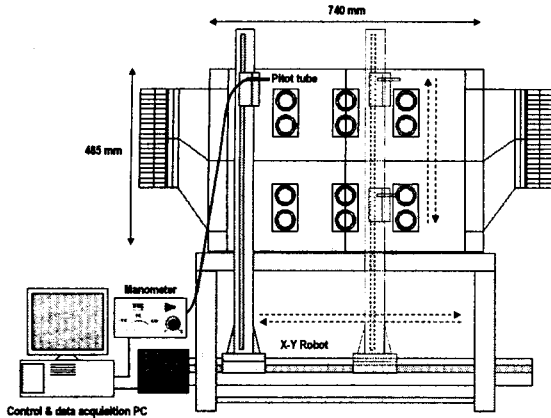
Fig. 5 Arrangement of a combustion air duct

로 대칭적인 형태를 보일때가 화염이 가장 안정적으로 형성되게 된다. 그러나 각 버너로 공급되는 공기 유량이 균일하다고 해도 버너의 Air register vane별로 들어가는 공기량 편차가 크게 되면 버너 내부에서의 유동형태가 버너 축을 중심으로 찌그러지게 되어 화염 안정성에 나쁜 영향을 주게 된다. 그렇기 때문에 버너 주변으로 들어가는 공기분포가 균일하도록 Baffle 등의 추가적인 장치가 필요하다.[3]

실제 운영되는 발전소에서는 공간상의 제약 등의 이유로 인해서 각 설비들의 배치가 조밀하게 되어 연소용 공기를 공급하는 덕트 배치가 Fig.5와 같이 상당히 복잡한 형태로 구성되게 된다. 그러므로 Windbox를 통해 버너로 공급되는 공기유동은 필연적으로 불안정하게 된다.

### 4. Windbox내 유동실험 및 전산해석

실제 발전소의 Windbox에서 실측을 통해 각 버너로 공급되는 공기유량을 파악할 수 있으면 Windbox내 유동분포 및 이로 인한 연소불안정의 원인을 유추할 수 있게 된다. 그러나 실제 운전되고 있는 발전소에서는 유가 상황이나 전력 수요에 따라 운전상황을 수시로 변화시키기 때문에 Windbox내의 유동 분포 및 각 개별 버너로



(a) Schematic diagram of windbox

(b) Photo of real windbox model

Fig. 6 Windbox model test

들어가는 유량을 실측을 통해서 확인하는 것은 매우 어려운 작업이다.

그러므로 실질적으로 다양한 조건에서 Windbox내의 유동형태를 관찰할 수 있는 방법은 Windbox의 모형을 사용하여 유동분포를 확인할 수 있다. 그러나 축소 모형을 사용한 실험에서는 원형과의 상사성을 유지하기 어려우며 1:1 모형 사용은 실험장치가 실험실 규모로 하기에는 너무 큰 크기가 되기 때문에 실험에 제약이 따르게 된다. 이런 실험의 한계성을 보완하기 위하여 본 연구에서는 전산 해석결과와 비교를 하였다.

4.1 실험장치

실험에 사용된 모형은 실제 Windbox에서 1/20 scale로 축소된 모형을 사용하였다. Fig. 6에서 보듯이 장치 구성은 크게 Windbox 모형, 공기를

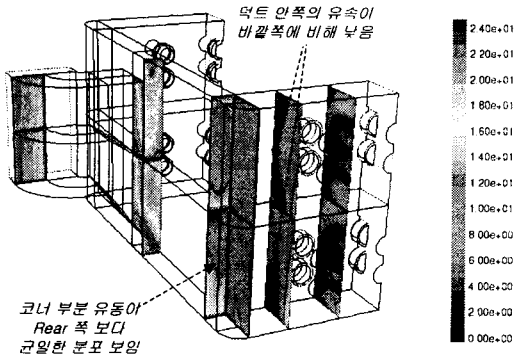
공급하기 위한 송풍기, 압력측정장치, 측정 port의 위치를 이동시키는 X/Y Robot 그리고 Control 및 Data acquisition을 위한 PC로 구성된다.

송풍기는 인버터를 통해서 유량을 조절할 수 있으며 Windbox의 입구 전단에서 양쪽으로 유동이 분기되어 공급된다. 공급된 공기는 Windbox 내부덕트를 거쳐 최종적으로 Burner의 Air register vane을 통해 빠져 나오게 된다. 빠져나오는 공기의 유량은 피토판과 마노미터를 이용해서 측정을 하며, 피토판은 X/Y PC에 의해 제어되는 Robot에 의해 이동되어 각 버너의 유량을 측정하여 PC에 저장된다.

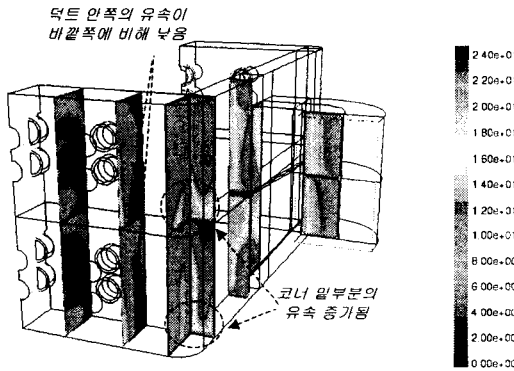
본 실험에서는 작동유체를 원형과 똑같은 공기를 사용하기 때문에 모형과 원형 사이의 레이놀즈 수를 상사하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러나 레이놀즈 수가 충분히 발달된 난류영역에 속하는 경우에는 레이놀즈 수 값에 큰 영향을 받

Table 1 실험조건

항 목	단 위	원형	모 형 실험 조 건				
		설계조건	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
송풍기 회전수	RPM	4/4 Load	607	760	913	1066	1218
총유량	m3/min	30,730	107	135	163	191	219
버너유량	m3/min	1,099	4.46	5.63	6.79	7.95	9.13
온도	℃	293	20	20	20	20	20
점도	kg/m · s	$2.903 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$
밀도	kg/m <sup>3</sup>	0.6527	1.225	1.225	1.225	1.225	1.225
버너 출구 직경	m	0.96	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048
출구 유속	m/s	25.3	50	63	77	90	103
Re(버너출구)		$5.467 \times 10^5$	$1.662 \times 10^5$	$2.095 \times 10^5$	$2.528 \times 10^5$	$2.959 \times 10^5$	$3.398 \times 10^5$



(a) Front Side



(b) Rear Side

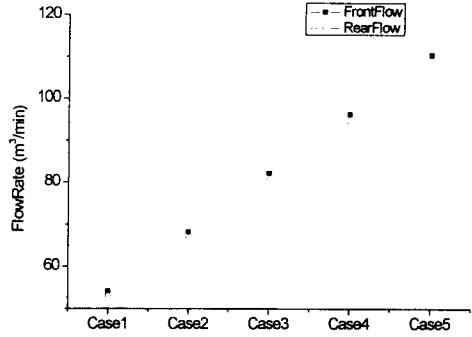
Fig 7. Velocity distribution in the windbox (m/s)

지는 않기 때문에 일정 값이상의 레이놀즈 수를 유지하면 어느정도 원형과 실물 사이의 상사 조건을 만족한다고 가정을 할 수 있다.

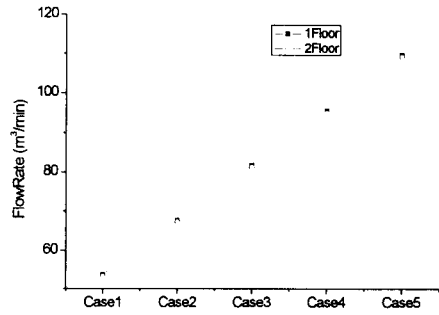
#### 4.2 실험 및 전산해석 조건

실험조건은 작동유체를 상온의 공기를 사용하여 송풍기의 회전수를 조절하여 Windbox로 공급되는 유량을 조절하여 Table 1에서와 같이 107m<sup>3</sup>/min ~ 219m<sup>3</sup>/min 사이의 유량조건에서 다섯가지의 Case에 대해서 실험을 하였다. 모형에서의 레이놀즈 값이 원형과 비슷한 10<sup>5</sup> 단위로 나타나고 있기 때문에 레이놀즈수에 의한 상사성은 어느정도 원형에 가깝게 유지된다고 볼 수 있다.

전산해석은 실제 Windbox 형상에 대해 4/4 Load 기준에 대해서 Fluent 6.0을 이용하여 해석을 하였으며 난류모델은 Standard  $k-\epsilon$ 을 사용하였다. 또한 해석 영역은 Windbox입구에 연결된 곡관 덕트부분부터 버너의 Air register 까지를 해석대상으로 설정하였다. 또한 가운데 버너를



(a) Flow rate of front & rear side



(b) Flow rate of 1st & 2nd floor 중 심  
Fig. 7 Flow rate w.r.t windbox section

으로 완벽한 좌우 대칭형태를 보이고 있기 때문에 Symmetric 경계조건을 사용하여 전체 Windbox 중에 1/2 에 해당하는 영역에 대해서만 해석을 하였다.

### 5. 전산해석 및 실험 결과

#### 5.1 Windbox 내 유동분포(전산해석)

Windbox내 유동분포를 확인하기 위하여 전산 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림은 Front 쪽과 Rear 쪽에서의 단면 속도 분포를 나타낸 것으로 덕트가 격이는 부분들로 인해서 전체적으로 덕트의 안쪽면보다는 바깥쪽에서 빠른 유동 분포를 보이고 있다. 버너가 설치된 덕트로 연결되는 Windbox의 코너 부분에서는 유동이 Rear 쪽의 유동분포가 Front쪽보다는 불안정하며 덕트 아래면 쪽의 유속이 윗면 쪽보다 빠르게 나타나고 있다. 이는 Rear 쪽으로 연결되는 덕트의 길이가 짧아 유동이 균일해 질 수 있는 공간이 Front에 비해 부족하기 때문이다. 또한 입구 급분의 덕트가 아래쪽으로 굽어져 있기 때문에 Windbox내에서도 전체적으로 바닥면에서의

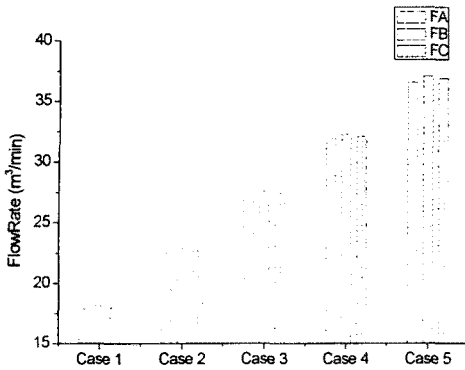


Fig. 8 Flow rate w.r.t burner column

유속이 빠르게 분포하고 있다.

5.2 구역별 유량 편차(모형실험)

Windbox를 통해서 각 버너로 공급되는 공기가 얼마나 균일하게 공급되고 있는 가를 상부층, 하부층, Front 와 Rear 쪽으로 공급되는 유량 편차가 얼마나 크게 나고 있는가를 비교해보면 된다. Fig. 7을 보면 상부층과 하부층 사이의 유량은 거의 비슷한 반면 Front와 Rear 쪽으로 공급되는 공기유량은 Front 쪽으로 공기가 조금 더 공급되는 것을 볼 수 있다. 이는 Rear 쪽의 덕트 구조가 공기가 공급되는 방향으로 180° 각도로 꺾인 구조이기 때문에 Front 쪽보다 압력손실이 더 크기 때문이다. 그러나 그 편차는 2% 이내로 크지 않게 나타나고 있다.

5.3 버너열에 따른 유량 편차(모형실험)

Fig. 8은 Front 쪽의 버너열에 대한 유량 편차를 나타낸 것이다. 모든 Case에 대해서 약 2%이내에서 유량 편차를 보이는 것을 볼 수 있다. 다만 A,C 열에 비해 B열의 버너로 공기 공급량이 많은 것을 볼 수 있다. 이는 Windbox의 코너부분에 의해 생기는 재순환 영역이 A열과 C열로 공급되는 공기의 유동을 방해하기 때문에 B열로 공급되는 유량이 크게 되는 것이다.

5.3 버너셀별 유량 편차(전산해석 및 모형실험)

앞절의 구역별 유량은 각 버너들로 공급되는 유량을 합산한 총 유량이기 때문에 실제 각 버너로 공급되는 유량은 이와는 별도의 경향을 보일 수 있다. 그러므로 Fig. 9에서는 각 버너셀로 공급되는 유량들의 편차를 나타내었다. 각 버너셀로 공급되는 유량은 모든 Case에서 유사한 경향을 보이고 있다. 전체적으로는 앞절에서도 언급했듯이 Front쪽으로 더 많은 공기가 공급되는 것

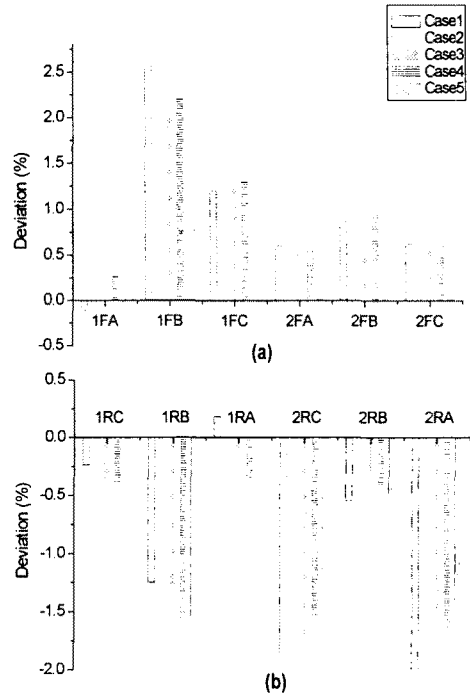


Fig. 9 Flow deviation w.r.t burners (a) Front side, (b) Rear side

을 확인할 수 있다. 또한 Front쪽의 상부층의 버너셀로 조금더 많은 공기가 공급되는 반면에 Rear쪽에서는 하부층으로 더 많이 공급된다.

각버너셀 별로는 Front쪽에서는 상부층과 하부층 모두에서 B열로 공급되는 유량이 더 크나 Rear쪽에서는 상부층에서는 B열이 하부층에서는 A,C 열로 더 많은 공기가 공급되고 있다.

Table 2에는 각 버너 출구에서의 유량 편차를 전산해석을 통해 계산된 결과와 실험결과의 일부에 대해 나타낸 것이다. 기본적으로 전산해석 결과와 실험의 결과는 두경우 똑같이 B열의 버너에 공기가 많이 공급되고 A열과 C열의 버너에는 상대적으로 적게 공급되는 것으로 나타난다. 이외에도 하부층의 Rear쪽의 A, C 버너가 가장 적게 공급이 되는 것도 공통적으로 나타났다.

그러나 전산해석과 실험 결과사이의 가장 큰 차이점은 버너 출구의 유량 편차가 실험결과보다는 전산해석 결과에서 훨씬 크게 예측이 되고 있는 점이다. 전산해석 결과가 실제 현상에 보다 가까운 결과라면 각 버너별로 공급되는 공기량의 차이가 크기 때문에 전체적인 연소효율, 오염물질 생성등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 Windbox 구조적으로 개선할 여지가 많다고 할 수 있다. 그러나 실험의 결과가 더 현실에 가깝다면 각 버너별로 공급되는 유량의 편차가 대부분 2~3%이내이기 때문에 각 버너별로 비교적

Table 2. Air flow rate deviation at the exit of burner

원형 전산해석		Front Burner		
		A	B	C
		편차 %	편차 %	편차 %
Front 상부층	upper	-4.6	12.8	-4.6
	lower	-4.5	17.1	-4.5
Rear 하부층	upper	-8.0	15.0	-8.0
	lower	-16.8	8.4	-16.8
모형실험		Front Burner		
		A	B	C
		편차 %	편차 %	편차 %
Front 상부층	upper	1.24	2.66	1.85
	lower	-1.26	3.00	1.45
Rear 하부층	upper	-1.92	-0.73	-1.88
	lower	-2.31	-0.27	-2.32

균일하게 공급하고 있다고 볼 수 있으며 이는 Windbox내 유동분포가 각 버너별로 비교적 균일하게 공급될 수 있는 구조라고 예측할 수 있다. 그렇기 때문에 전산해석과 실험결과 어떤 결과를 더 신뢰할 수 있는가에 대한 검토가 추가적으로 이루어져야 하겠다.

#### 4. 결론

다수의 버너를 사용하는 발전용 보일러에서는 각 버너별로 공급되는 공기유량의 차이가 발생하여 이로 인해 개별버너 주변에서의 유동이 불안정하게 된다. 이는 버너에서의 연소 불안정성을 초래하면 전체적인 연소효율 저감과 공해물질 증가를 초래하여 된다. 본 연구에서는 실제 운전되고 있는 발전용 보일러의 Windbox를 통해 각 버너로 공급되는 공기유량을 축소모형 실험과 전산해석 방법을 사용하여 예측하였다.

전체적인 유동의 경향은 Windbox의 Rear쪽보다는 Front쪽으로 공기의 공급이 많으며 주로 Windbox의 대칭축에 위치한 B열로 공기의 공급이 많이 되고 있는 경향을 보여주고 있다. 또한 이런 경향은 Windbox 내의 유량변화와는 상관없이 동일한 경향을 보여주고 있다.

실험과 전산해석의 결과는 각 버너별로 공급되는 유량의 편차의 경향은 비슷하나 그 정도가 전산해석의 경우가 최대 17%, 모형실험에서는 3%로 크게 차이를 보이고 있다. 이는 전산해석은 적용한 원형 Grid의 적절성, 해석 모델의 정확성 등의 영향을 받기 때문에 이런 해석 조건에 대한

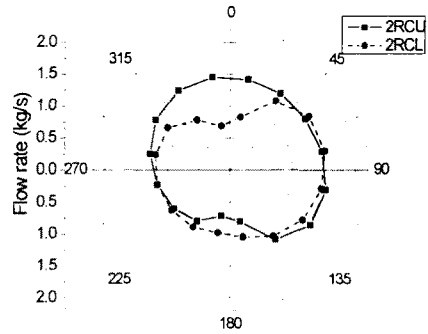


Fig. 10 Flow rate and deviation at the air register vane

검토가 필요하며, 축소모형실험의 경우는 모형의 상사성이 원형에 얼마나 근접한가에 관한 검토를 레이플즈 수 이외의 인자에 대해서도 추가적으로 해야할 것이다.

또한 하나의 버너에는 Air register이 여러개가 달려 있는데 Windbox 내의 유동분포에 따라 Fig. 10 과 같이 버너로 들어오는 공기유량이 버너축을 중심으로 비대칭형태로 들어오게 되며 이런 비대칭 정도가 축소모형에서는 어느정도 이루어지고 있는가에 관한 추가적인 검토도 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 전력기반기술 개발 연구 사업으로 선정한 『중유화력 분진배출저감에 관한 연구』의 일부로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

- [1] "중유화력 분진배출저감에 관한 연구(1차년도 중간보고서), 산업자원부, 1984
- [2] "평택화력 1-4호기 기본운전지침서 (I)", 한국전력공사 평택화력발전처, 2003, 1998, pp. 1~27
- [3] Charles E. Baukal Jr. & Robert E. Schwartz, "The John Zink Combustion Handbook", CRC Press, 2001, pp. 547-586
- [4] Maria da Graca Caarvalho, Woodrow A Fiveland, F. C. Lockwood & Christos Papadopoulos, "Combustion Technologies For a Clean Environment", Gordon and Breach Publishers, 1991, pp.11~130, 203~258

- [5] J.G. Singer, "Combustion Fossil Power", Combustion Engineering INC, 1991
- [6] Charles E. Baukal Jr., Vladimir Y. Gershtein & Xianming Li, "Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion", CRC Press, 2000
- [7] "보일러 및 가열로의 열설계(3차) 산학 합동 공개강좌 자료", KAIST, 1996