

버너Windbox의 설계기술에 관하여

한용식* , 김명배

한국기계연구원

ABSTRACT

An experimental study for the improvement of combustion air distribution in the exit of burner windbox is carried out. Since the distribution of combustion air in the burner directly affects the stability and the shape of flame, it should be as uniform as possible. Furthermore multi-burner windbox should be designed to supply the suitable quantity of combustion air for each burner. For these purposes, thin splitting plates are installed in the windbox, which make the flow control and setup the circumferentially uniform pressure field at each windbox exit. The effect of splitters on the velocity distribution of combustion air is investigated by the use of a small sized two-burner windbox model having a dynamical similarity to the prototype. Even though not the best one, a configuration of splitters which seems to give a practically useful result is suggested.

1. 서 언

연소기술의 고도화를 통하여 연소효율을 향상시키고 완전연소를 추구하기 위한 노력의 필요성은 화석연료가 점점 고갈되고 배기가스로 인한 대기오염이 심각해짐에 따라 더욱 강하게 제기되고 있다. 버너는 헤아릴 수 없이 많이 사용되고 있는 연소기로, 연료와 연소용 공기를 적절한 비율로 잘 혼합시켜 최적의 연소상태를 유지하는 것이 목적이기 때문에 버너 개발에는 연료 분사장치와 연소용 공기 공급장치에 대한 연구가 필수적이다. 연소용 공기 공급장치인 air register는 연료 분사기에서 분사된 연료에 연소용 공기를 유효하게 혼합시키고, 화염을 안정화시키기 위하여 공기의 흐름을 규제, 조절하는 기능을 가지며, 일반적으로 덕트, windbox, vane, swirler 등으로 구성되어 있다. 윈드박스로 유입된 연소용 공기는 air register에 설치된 vane과 swirler를 통하여

연소장인 보일러 화로로 분출되는데 버너 연소용 공기의 통로인 윈드박스의 출구에서 속도분포가 고르지 않으면 화염이 찌그러지거나 한쪽으로 치우치게 되어 연소실 벽의 손상, 연소효율 저하, 대기오염 등을 유발시킨다[1]. 버너가 제 성능을 발휘하려 윈드박스 출구에서 속도분포가 균일해 지도록 연소용 공기를 공급하는 방안을 강구하는 것이 필수적인 작업의 하나가 될 수 밖에 없다.

산업용이나 발전용으로 사용되는 윈드박스는 매우 크고 공기를 공급하는 송풍기 또한 대용량이 기 때문에, 현장에서 실제 윈드박스를 이용하여 출구 공기속도 분포를 균일하게 잡아주는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 이 연구에서는 차원해석을 통하여 공학적으로 상사가 유지되도록 축소 제작된 윈드박스 모델을 이용하여 모델시험을 수행하고자 하며, 연소용 공기의 유로가 되는 윈드박스 모델 내부에 분할판을 적절하게 배치하여 압력분포를 변경시키므로써 윈드박스 출구의 공기속도 분포를 균일하게 하는 것을 목표로 한다.

2. 모델의 상사

윈드박스 출구에서의 공기속도 분포를 개선하기 위한 축소모델 시험이 의미를 가지려면 모델과 실물이 기하학적으로는 물론 역학적으로 상사를 유지하여야 한다[2].

송풍기에서 시작하여 윈드박스 출구까지의 연소용 공기의 유동은 온도변화가 작고 압축성 효과가 나타날 만큼 속도가 빠르지 않기 때문에 비압축성, 정상, 등은 유동으로 볼 수 있다[3]. 공간좌표와 속도, 압력을 윈드박스 출구 직경 D 와 여기서의 평균속도 V , 송풍기 출구 (공기유도관 입구) 압력 P_i 로 무차원화 시킨 지배 방정식은 속도 u 와 압력 p 에 대하여

$$u \cdot \nabla u = - C_{pr} \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

로 주어진다. 이 식에서 무차원 수 C_{pr} 와 Re 는 압력계수와 레이놀즈 수로서

$$C_{pr} = \frac{P_i}{\rho V^2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (4)$$

에 의해 정의되며, ρ 와 ν 는 유체의 밀도와 동점성계수(kinematic viscosity)를 뜻한다. 식(1)에서 알 수 있듯이 기하학적으로 상사하게 제작한 모델이 역학적으로 상사가 유지되려면 모델과 실물의 압력계수 및 레이놀즈 수가 서로 같아야 한다. 그러나 윈드박스의 실제 사용조건에서 레이놀즈 수 Re는 10^6 정도의 값을 갖게되어 1/10로 축소된 모델을 사용하더라도 아주 크기 때문에 점성효과를 관성효과에 비하여 상대적으로 무시할 수 있다. 따라서 모델의 레이놀즈 상사는 큰 의미가 없고 압력계수만 같게 잡아주면 된다.

편의상 첨자[m]과 [p]를 써서 모델과 실물을 나타내기라고하고 공기를 이상기체로 가정할 수 있음을 감안하면, 모델 윈드박스 와 실제 윈드박스는 절대온도 T로 나타낼 때,

$$\frac{T_m}{V_m^2} = \frac{T_p}{V_p^2} \text{-----} (5)$$

의 관계식이 성립되면 압력계수가 같아져서 역학적으로 상사가 이루어진다. 축소 선형비가 Lr인 상사모델의 유량 Q_m 은

$$\begin{aligned} Q_m &= Q_p \cdot \left(\frac{V_m}{V_p}\right) \cdot Lr^2 \\ &= Q_p \cdot \left(\frac{T_m}{T_p}\right)^{1/2} \cdot Lr^2 \text{-----} (6) \end{aligned}$$

가 되므로 윈드박스 모델의 크기, 즉 선형비는 실험장치에 설치된 송풍기의 용량과 실제 윈드박스의 크기에 따라서 결정되는데 1/6 ~ 1/4정도가 된다.

3. 실험방법

Fig. 1은 윈드박스 모델을 시험하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 공기를 공급하는 송풍기와 풍동, 속도를 측정하기 위한 피토포와 미세 차압계, 자료의 취득 및 처리에 필요한 신호증폭기와 AD변환기, 개인용 컴퓨터 및 신호 처리용 카드 그리고 피토포 자동이송장치로 구성된다.

송풍기에서 유입된 연소용 공기는 풍동을 지나면서 출구에서 균일한 속도분포를 가진다. 풍동

출구는 300x300의 크기를 갖는 정사각형 단면이며 이때 사용되는 송풍기는 용량이 5HP, 150mmAq이고, 최고 회전수가 1800rpm인 속도 가변식 직류모터에 의해 구동된다. 공기 덕터는 윈드박스의 크기에 따라 폭이 결정되는데, 한쪽 끝은 풍동의 출구와 다른 끝은 윈드박스과 연결된다.

윈드박스는 공기유도관 위에 고정되어 있어 공기가 수직 상방향으로 유입되지만 윈드박스 내의 공기유동에서는 대류효과가 지배적이기 때문에 높이차에 의한 중력효과나 유입방향으로의 밀도차에 의한 부력효과는 상대적으로 무시할 수 있어서 실제 현장에서 연소용 공기가 위쪽에서 아래방향으로 유입된다 하더라도 여기서의 실험결과를 그대로 적용할 수 있다.

윈드박스 출구에서의 공기속도는 피토투관과 이에 연결된 미세 차압계를 이용하여 직접 속도값을 읽을 수 있으나, 알고자 하는 것이 출구에서의 속도분포이므로 실험의 정확도와 대량의 데이터 처리에 적합하도록 범용 데이터 취득시스템을 사용하여 연속적으로 컴퓨터에 출력되게 하였다.

윈드박스 출구 한 단면에서 속도 측정점의 갯수는 각 반경당 72 균데(5° 마다 한균데씩)로 하였으며, 어떤 각도 θ_i 에서의 속도를 V_i 라 할 때 점($V_i \cdot \cos \theta_i, V_i \cdot \sin \theta_i$) ($i=1,2,3, \dots, 72$)를 차례로 연결시킴으로써 속도분포를 쉽게 가시적으로 파악할 수 있도록 결과를 정리하였다(Fig. 2 참조).

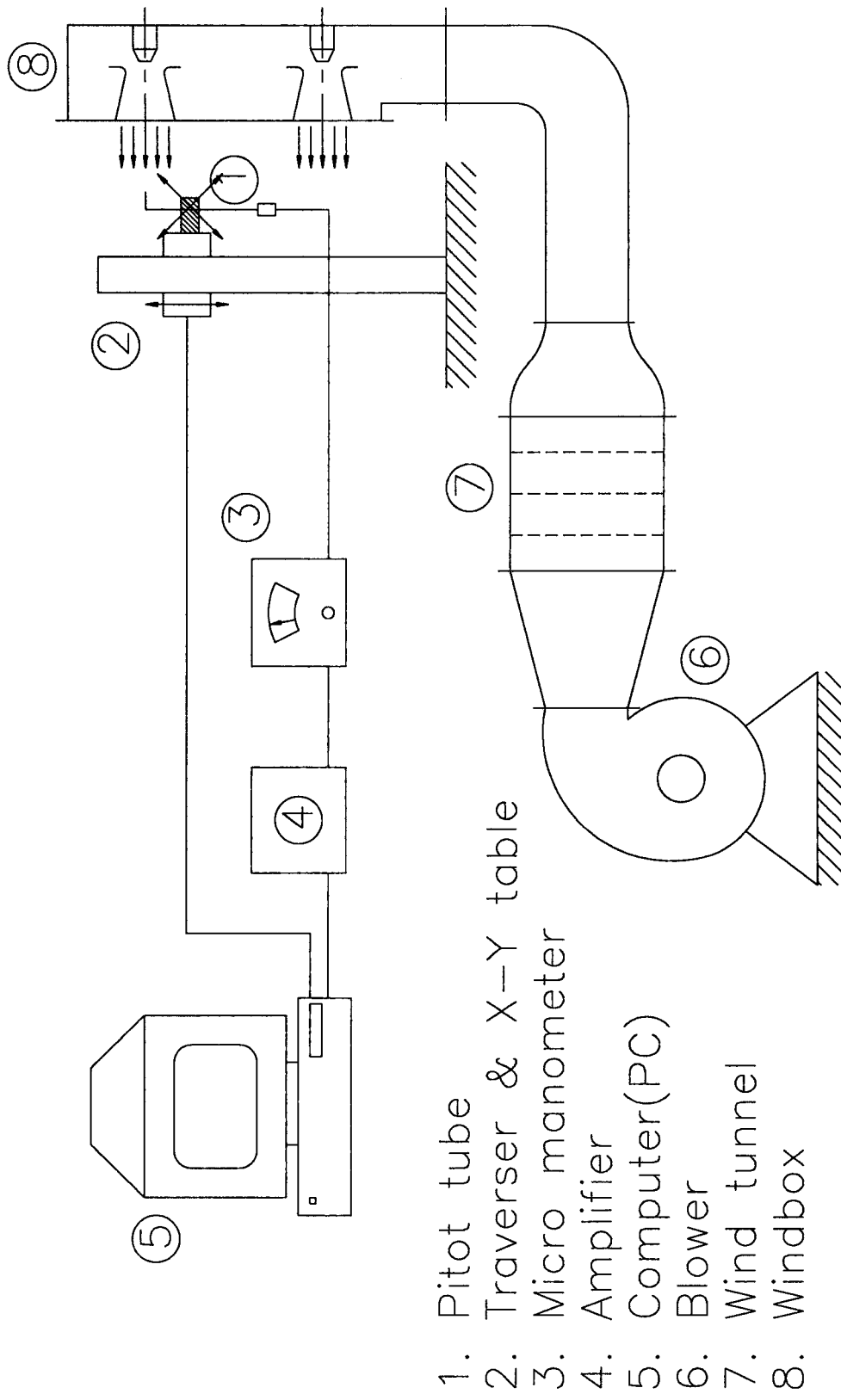
4. 실험결과

지역난방용이나 발전소용으로 사용되는 대형 윈드박스에는 2개, 4개, 6개 등 여러개의 버너가 설치되는 경우가 많다. 윈드박스 하나를 통해서 여러개의 버너에 연소용 공기를 공급할 때 좋은 연소조건이 유지되려면 각 버너에 균등하게 풍량을 분배해야 함은 물론 버너가 설치된 윈드박스의 모든 출구단면에서 공기속도분포가 균일해져야 한다[4].

윈드박스는 현장조건에 따라 설치 공간에 제약을 받기 때문에 어떤 표준형을 만들어 놓을 수 없으며 각 경우마다 크기와 모양을 달리 설계하게 된다. 이렇게 1차 설계된 윈드박스는 현장에 그냥 설치될 수 없고 그 내부에 분할판을 적절히 배치하여 유동장을 바꾸어 줌으로써 출구의 속도 분포를 균일하게 만들어 주어야 한다.

분할판의 배치방법은 버너의 갯수와 윈드박스의 형상에 따라 달라지지만 근본적으로 같은 원리에 따라 실험적으로 결정되기 때문에, 여기서는 2개 버너용 윈드박스에 대한 모델 시험 결과를 보기로 하여 그 방법을 설명하기로 한다 [5,6].

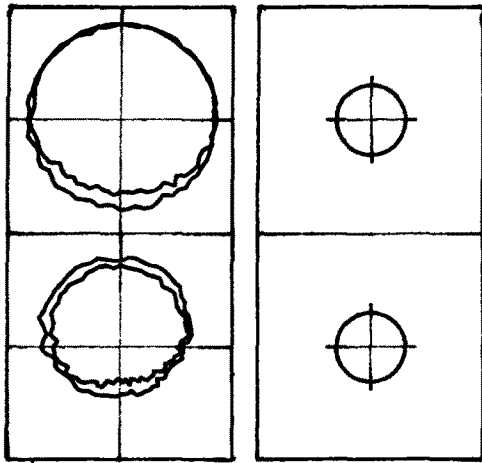
Fig. 2는 1차 설계된 그대로의 윈드박스, 즉 내부에 아무런 분할판도 설치되지 않은 윈드박스 출구에서의 속도분포를 보여주고 있다. 이 속도 분포는 반경 $R_1=15\text{mm}$, $R_2 = 30\text{mm}$ 인 2개의 원상에서 측정한 결과이며, Dev(%)는 평균풍속(mean으로 표시된 값)에 대한 최소, 최대 속도의 편



- 1. Pitot tube
- 2. Traverser & X-Y table
- 3. Micro manometer
- 4. Amplifier
- 5. Computer(PC)
- 6. Blower
- 7. Wind tunnel
- 8. Windbox

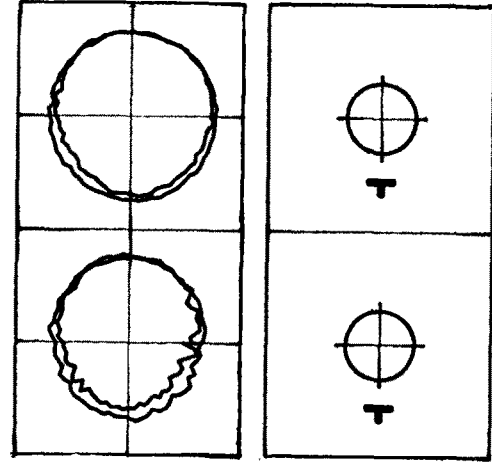
Fig. 1 Schematic diagram of the windbox test system

차를 나타낸다.



UPPER : R1 Mean = 24.71
 Dev.(%) = - 8.7, 4.1
 R2 Mean = 23.42
 Dev.(%) = -21.5, 11.2
 LOWER : R1 Mean = 17.36
 Dev.(%) = -31.4, 26.6
 R2 Mean = 17.37
 Dev.(%) = -51.2, 39.5

Fig. 2 Velocity distribution at the windbox exit without splitters

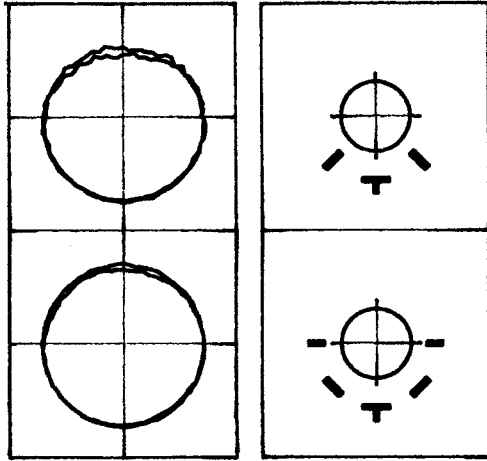


UPPER : R1 Mean = 22.28
 Dev.(%) = - 5.8, 3.2
 R2 Mean = 21.00
 Dev.(%) = -12.8, 8.5
 LOWER : R1 Mean = 20.66
 Dev.(%) = -13.5, 10.6
 R2 Mean = 18.88
 Dev.(%) = -24.6, 24.6

Fig. 3 Velocity distribution at the windbox exit with T-shaped splitters

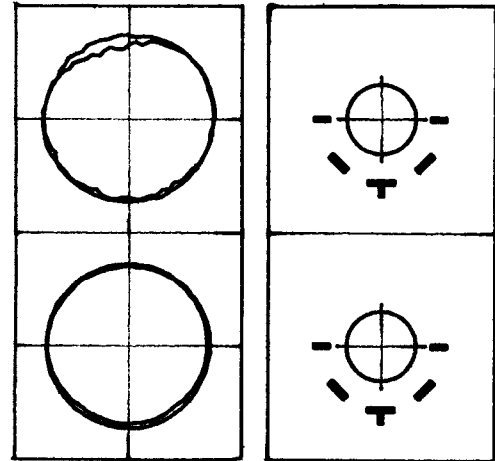
그림에서 알 수 있듯이 위·아래 출구의 풍량차가 크며, 각 출구에서의 속도분포도 상부로 많이 치우쳐 있다. 이것은 유입된 공기가 출구로 빠져 나갈 수 있는 충분한 시간 동안 머무르지 못하고 위로 바로 지나가기 때문이다. 이것을 개선하고자 Fig. 3과 같이 상하 출구 직전에 T형 분할판을 설치하였다. 분할판은 모서리에서 유동박리가 생겨나도록 하므로써 하류쪽 압력분포를 균일하게 하고 공기를 좀 더 오래 붙들어 놓는 역할을 하는데 T형과 1자형이 주로 사용된다. 상하 출구의 풍량차는 T자형 분할판을 설치해 줌으로써 상당히 줄어 들었으며 각 출구에서의 속도변동 역시 많이 개선되었으나 속도의 변동이 다소 심하고, 아래 출구에서 좌우 속도분포가 상하 속도분포에 비해 작은 값을 가지고 있어서 아직 사용하기에 미흡하다. Fig. 4는 1자형 분할판을 반경방향 및 원주 방향으로 추가 배치하므로써 속도분포를 개선한 것이다. 이 경우 분할판이 없는 최초의

결과(Fig. 2)와 비교하면 상당한 진전이 이루어졌다고 볼 수 있으나 윗쪽버너의 속도분포에 편차가 크고 속도분포가 아랫쪽으로 약간 치우쳐 있음을 볼 수 있다.



UPPER : R1 Mean = 20.64
 Dev.(%) = - 14.3, 7.1
 R2 Mean = 20.36
 Dev.(%) = -22.1, 12.1
 LOWER : R1 Mean = 21.39
 Dev.(%) = -2.8, 2.8
 R2 Mean = 20.83
 Dev.(%) = -7.2, 4.7

Fig. 4 Velocity distribution at the windbox exit T-shaped splitters and 1-shaped splitters



UPPER : R1 Mean = 22.03
 Dev.(%) = - 7.3, 4.1
 R2 Mean = 21.83
 Dev.(%) = -16.0, 5.7
 LOWER : R1 Mean = 21.71
 Dev.(%) = -1.2, 1.2
 R2 Mean = 20.91
 Dev.(%) = -2.9, 2.7

Fig. 5 Suggested configuration of splitters and the improved velocity distribution

Fig. 5는 분할판을 2개 추가하고 이미 설치된 분할판들의 크기와 배치를 약간 조정하였을 때의 속도분포를 보여준다. 상하 출구로 풍량도 거의 균등하게 분배되고 있으며 각 출구에서 속도변화도 작으므로 실제 윈드박스에 적용이 가능하다.

5. 결 언

버너 연소상태에 큰 영향을 미치는 윈드박스 출구에서의 공기속도 분포는 이상에서 살펴본 바와 같이 그 내부에 분할판을 적절히 배치함으로써 개선할 수 있다. 여기서 한가지 기억해야 할 사

항은 출구에서의 속도분포를 개선하는 방법이 무수히 많이 존재할 수 있다는 것인데, 설치된 분할판의 수가 늘어남에 따라 압력손실도 증가하기 때문에 송풍기와 모터의 용량도 커져야 한다. 따라서 실제로 적용이 가능한 분할판의 배치상태는 요구되는 속도 분포의 균일도를 유지하면서도 압력손실은 최소화 시킬 수 있도록 고려하여 결정해야 한다. 이 연구에서 간략하게 설명한 버너 윈드박스 출구에서의 속도분포 개선 방안은 최근 수년간 수행된 10여 건의 연구에서 축적된 실험적인 접근방법에서 얻어진 것이다.

윈드박스 초기설계 단계에서 속도분포의 균일화 방안이 미리 고려되도록 하기 위해서는 더 많은 실험 결과의 축적과 더불어 유동에 대한 수치계산 연구의 수행도 절실히 요구된다.

[참고문헌]

1. 오군섭 외, "선박용 스팀제트버너의 개발 연구(I)," 한국기계연구소 연구보고서, 1987.
2. R. H. Sabersky, A. J. Acosta and E. G. Hauptmann, "Fluid Flow," Macmillan Co., 1971.
3. F. M. White, "Viscous Fluid Flow," McGraw-Hill Inc., 1974.
4. 辻正一, "燃焼機器工学," 日刊工業新聞社(日本), 1971.
5. 오군섭 외, "선박용 스팀제트버너의 개발 연구(I)," 한국기계연구소 연구보고서, 1987.
6. 한용식 외, "유공150톤 보일러용 윈드박스 설계," 한국해사기술연구소 연구보고서, 1991.
7. 한용식 외, "신호제지 140톤 보일러용 윈드박스 설계," 한국기계연구원 연구보고서, 1994.