

## PIV 풍동실험을 통한 공장건물의 자연환기 향상 연구

강종훈\* · 이상준†

### Improvement of Natural Ventilation in a Factory Building Using PIV Technique

Jong-Hoon Kang\* and Snag-Joon Lee†

#### Abstract

Vents at outer walls of a large factory building are very important for natural ventilation. But, if a full-open vent is used, rain comes through the vents. We tried to utilize the natural ventilation effectively using a louver. A 1/120 scale-down building model was placed inside an atmospheric boundary layer simulated in a wind tunnel test section. The effect of louver angle on the ventilation flow inside the factory building was investigated experimentally. Instantaneous velocity fields inside the building model were measured using a 2-frame PIV system with varying the louver angles ( $\theta=20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ ). For the case of  $\theta=60^\circ$ , as the incoming flow into the factory building increases, the inside velocity distribution becomes uniformly.

**Key Words :** Factory building (공장건물), Natural ventilation (자연환기), Atmospheric boundary layer (대기경계층), Louver (루버), PIV (입자유속속도계)

#### 1. 서 론

환기는 공간 내부 공기흐름을 변화시키기 위해 쓰이는 방법으로 크게 자연환기법과 공조시스템을 이용한 강제배기법이 있다. 강제배기법은 효율적인 측면에서 우수한 성능을 보이나 공조시스템 구축에 많은 경비가 들고, 작업환경에 유연성을 확보하기 어렵다. 이에 비해 자연 환기법은 적은 비용으로 우수한 환기효과를 얻을 수 있다. 건물 내부 자연환기의 기본적 원리는 1962년 Emswiler<sup>(1)</sup>에 의해 규명되었으며, Kreichelt 등<sup>(2)</sup>은 자연환기에 대한 이론 및 관련 수식들을 정리하였다. Codiergues<sup>(3)</sup>는 여러 가지 열원(heat source)과 풍속조건들이 공장 내부 자연환기에 미치는 효과를 연구하여 환기효과를 도식적으로 나타내었으며, Lee 등<sup>(4)</sup>은 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장

측정기법을 이용하여 공장 내부 환기유동을 실험적으로 해석하였다.

건물 내부의 환기유동을 다룬 대부분의 기존 연구들은 2 차원 모델을 이용한 유동가시화나 컴퓨터 수치해석에 의존해왔다. 그러나 건물 내부 환기유동은 복잡한 난류유동이기 때문에 기존의 측정기법으로는 정확하게 해석하기가 쉽지 않다. 그리고 실제 건물은 대기경계층(atmospheric boundary layer)<sup>(5,6)</sup> 속에 놓여 있기 때문에 보다 정확하게 실험을 수행하기 위해서 건물 모형이 설치된 풍동 시험부에 해당 지역의 대기경계층을 모사하여야 한다.

건물 내부 환기유동은 건물 주위 대기유동의 풍향과 풍속, 건물 내부 구조물의 배치, 환기구의 위치 및 크기 등에 크게 영향을 받는다. 이와 같은 여러 가지 매개변수를 모두 고려한 완벽한 실내 풍환경 개선모델을 찾기는 어렵다.

일반적으로 공장건물의 외벽의 환기구는 외기를 바로 유입하기 위하여 완전히 개방되어 있어 우천시 빗물이 공장 안으로 들어올 가능성이 있다

† 포항공과대학교 기계공학과 교수

E-mail: sjlee@postech.ac.kr

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

이러한 이유로 본 연구에서는 환기효율을 극대화 하며 빗물의 유입을 최소화 할 수 있는 최적의 루버(louver) 각도를 도출하기 위해 루버가 설치된 건물모형을 제작하여 앞 절에서 사용한 PIV 속도장 측정기법을 이용하여 건물 내로 유입되는 환기 유동의 속도장을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 대기경계층 모사

본 실험은 시험부 크기가  $6.75^L \times 0.72^W \times 0.6^H \text{m}^3$  이고, 유속  $10\text{m/s}$  에서 난류강도가  $0.08\%$  이하인 폐쇄형 저난류 아음속 풍동에서 수행하였다. Fig. 1 에 풍동 시험부의 개략도를 나타내었다. 비교적 짧은 거리에서 대기경계층을 모사하기 위해 시험부 입구에 스파이어(spire) 형태의 와류생성장치(vortex generator)를 장착하고 풍동 바닥면에 인공잔디를 깔았다.

와류생성장치는 높이( $h_v$ )가  $28\text{cm}$  이고 직각 감각형 형태를 갖는다. 본 연구에서는 안정된 대기 경계층을 얻기 위해서 와류생성장치로부터 공장 모형까지  $16h_v$  이상의 적응(adjustment) 거리를 두었다. 대기경계층 유동이 레이놀즈 수( $Re$ )에 거의 영향을 받지 않는 임계 레이놀즈 수는  $10^5$  이다. 본 연구에서는 자유흐름속도  $U_o=8\text{m/s}$  조건에서 실험을 수행하였는데, 이를 기준한 레이놀즈 수는  $Re=1.26 \times 10^5$  이다.

대기경계층의 유동특성을 파악하기 위하여 풍동 입구로부터  $4.5\text{m}$  하류지점에서 풍동 바닥면으로부터 수직방향으로  $3\text{mm}$  간격으로 평균속도와 난류강도를 측정하였다. 속도측정에는 정온형 열선유속계(TSI IFA-100)를 사용하였으며, 열선 프로우브는 DANTEC 사의 I 형 프로우브를 사용하였다. 열선에서 나오는 속도신호는  $800\text{Hz}$  저대역(low-pass) 필터를 거치게 하였으며, 한 지점에서 초당  $2,000$  개의 비율로 샘플링하여  $16,384$  개의 데이터를 얻었다. 유속의 수직분포는 역법칙 형태로 가정하여 측정된 속도값을 기준 풍속과 경계층 두께로 무차원하여 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$\frac{U(y)}{U_o} = \left( \frac{y}{\delta} \right)^n \quad (1)$$

여기서 경계층 풍동 내부에 모사한 대기경계층의 두께는 약  $\delta=24\text{cm}$  이다.

Fig. 2 는 측정된 대기경계층 유동의 평균속도 및 난류강도 분포를 나타낸다. 평균속도 분포를 보면 역법칙 지수(exponent)가  $n=0.14$  로 평활지역

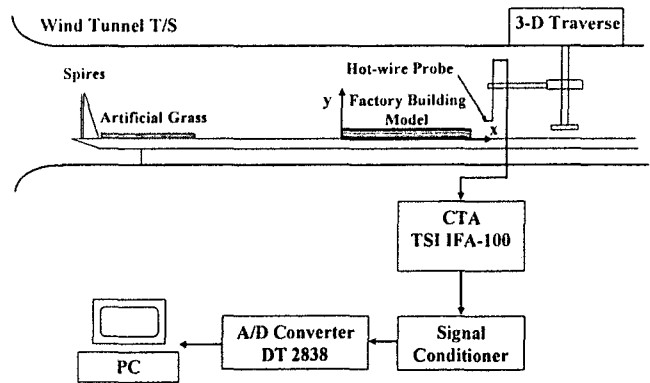


Fig. 1 Schematic diagram of atmospheric boundary layer wind tunnel test

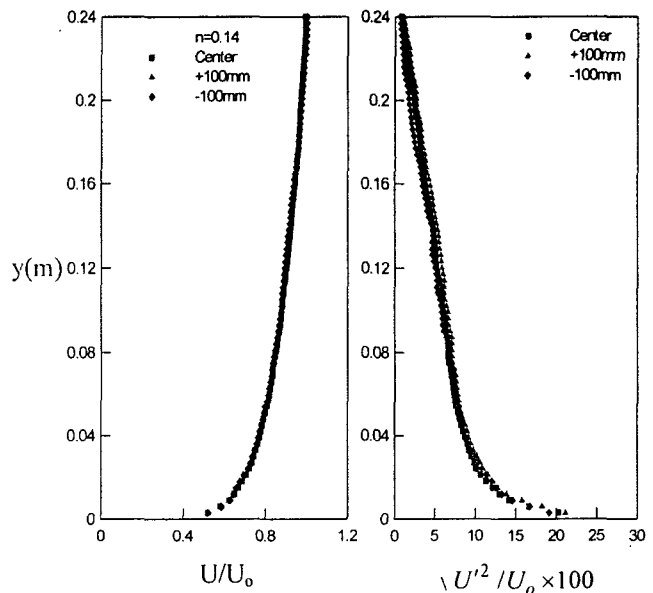


Fig. 2 Mean streamwise velocity and turbulence intensity profiles

(open terrain)의 대기경계층 형태를 잘 모사하고 있으며, 폭방향으로 다른 위치에서( $z=\pm 100\text{mm}$ ) 측정된 풍속분포로부터 모사된 대기경계층의 2 차원성을 확인할 수 있다.

실제 대기경계층의 경우, 지표면 근처에서 난류강도는  $10\sim 30\%$  정도의 값을 가지며 위로 올라갈수록 감소하게 된다. 공장 모형이 놓일 위치에서 측정된 난류강도 분포를 보면 바닥면 부근에서 약  $10\sim 20\%$ 의 난류강도값을 가지며, 고도가 증가할수록 완만하게 감소하는 분포를 보여주고 있다.

### 2.3 PIV 속도장 측정시스템

본 연구에서 다룬 루버가 부착된 공장모형을 찍은 사진을 Fig. 3 에 나타내었다. 공장모형은 레이저광의 투과율이 좋고 가공이 용이한 약  $1\text{mm}$

두께의 투명 아크릴로 제작하였고, 루버 각도조절기를 통하여 루버의 각도를 용이하게 변화시킬 수 있게 하였다.

Fig. 4 는 공장 내부 환기유동의 속도장 측정에 사용되어진 PIV 시스템의 사진이다. CCD 카메라의 해상도는 2048×2048 pixels 이며, 한번에 2 프레임씩 썸으로 유동영상을 취득하였다. 측정하고자 하는 유동단면을 얇은 레이저 평면광(laser sheet)으로 조명하고 추적입자(tracer particles)들에 의해 산란된 빛을 CCD 카메라로 촬영하였다. CCD 카메라와 레이저를 동기시켜 얻은 입자영상들에 대해 상호상관(cross-correlation) 방식의 PIV 알고리즘을 적용하여 속도장을 추출하였다. 미소조사구간의 크기는 64×64 pixels 이며 50% 중첩하였다.

관측창(field of view)의 크기를 약 9cm×9cm 로 정하고 단면을 4 개의 소구간으로 나누어 PIV 속도장 측정실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 토의

본 연구에서는 루버의 각도를 20°~60° 범위에서 20° 간격으로 변화시키면서 각도변화에 따른 건물내부유동의 속도장을 측정하여 Fig. 5~7 에 나타내었다.

루버 각도가  $\theta=20^\circ$  일 경우, 루버 사이의 틈새가 너무 작기 때문에 Fig. 5 에서 보듯이 매우 적은 양의 외기가 루버를 통하여 거의 수직방향으로 건물 내부로 유입되고 있다. 그리고 루버를 통하여 유입된 유량이 적어 외기가 충분히 진행방향으로 나아가지 못하고 건물의 유동방향으로 약 60% 정도의 지점에서 속도가 급격하게 떨어져 건물의 바닥면으로 진행하며 시계방향으로 회전하는 순환유동이 형성되었다.

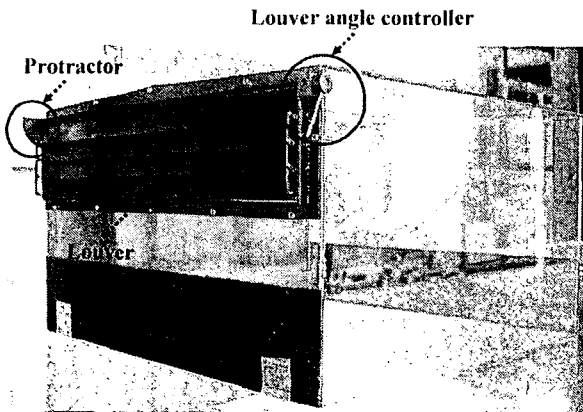
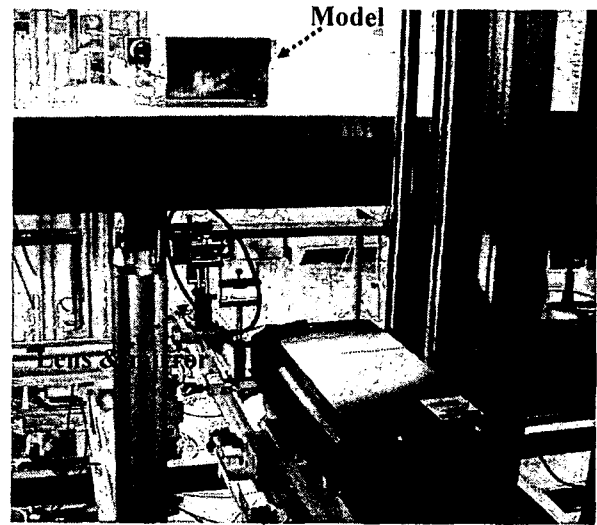


Fig.3 Photograph of experimental model with louver



(a) camera system



Nd:Yag Laser

(b) laser and optic systems

Fig.4 Photograph of experimental set-up

루버 각도가  $\theta=40^\circ$  일 경우, Fig. 6 에서 보듯이  $\theta=60^\circ$  인 경우보다 좁기 때문에 외기가 루버를 통과하면서 가속되어 건물 내부로 유입된다. 그러나 빠른 속도로 유입된 외기의 유량이 적기 때문에 그 운동량(momentum)을 건물 끝까지 가져가지 못하고 건물의 약 70% 정도의 지점에서 유입된 외기의 속도가 떨어져 앞의 경우와 같이 건물의 바닥면으로 유동방향이 꺾여 시계방향으로 회전하는 유동이 나타났다.

반면에 루버 각도가  $\theta=60^\circ$  일 경우, Fig. 7 에서 보듯이 유입되는 외기의 속도가  $\theta=40^\circ$  인 경우보다는 다소 약하지만 전반적으로 유입되는 유량이 많기 때문에 건물의 맞은편 외벽까지 그 운동량을 충분히 가져가는 것으로 나타났다. 그리고 외벽에 부딪힌 외기는 건물의 바닥면으로 진행하면서 시계방향으로 회전하며 건물 내부에서 전체적으로 고른 유동분포를 보여주고 있다. 그리고 순환하는 유동이 바닥면을 따라 가속되는 것도 확인할 수 있다.

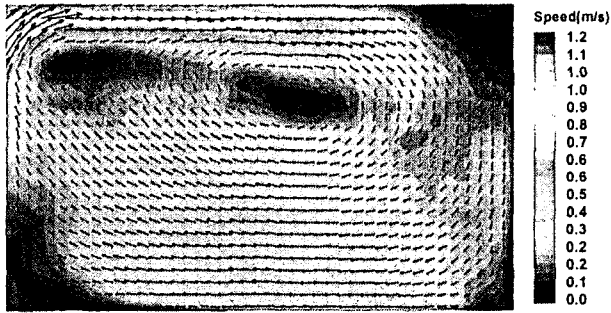


Fig. 5 Velocity field inside the factory model with attached louver at  $\theta=20^\circ$

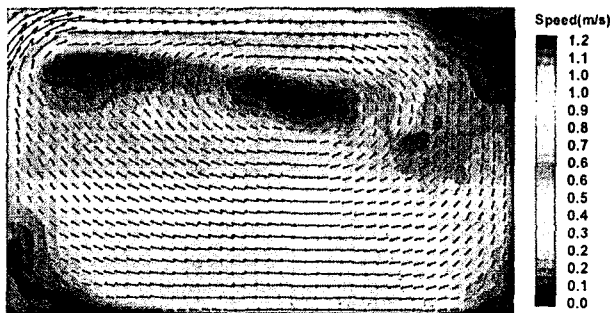


Fig. 6 Velocity field inside the factory model with attached louver at  $\theta=40^\circ$

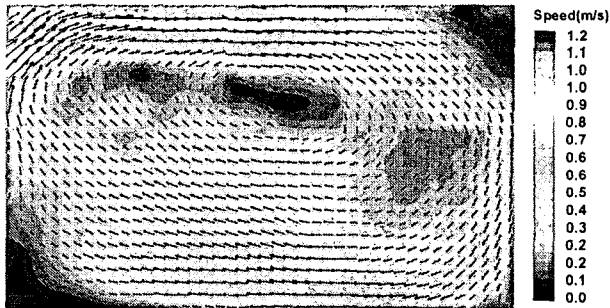


Fig. 7 Velocity field inside the factory model with attached louver at  $\theta=60^\circ$

루버 각도가  $\theta=60^\circ$ 인 경우 상대적으로 빠르고 많은 양의 외기가 루버를 통하여 유입되므로 공장 내부의 환기구를 통과하면서 그 양이 다소 감소하더라도 실내 환기효율에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다. 물론 루버의 각도가 크면 클수록 많은 양의 외기가 실내로 유입되어 환기효율을 향상시킬 수 있겠지만, 이 경우 앞서 언급하였듯이 외부의 빗물이 공장 내부로 들어올 가능성이 크다. 본 연구결과를 통해 루버의 최적 각도는  $60\pm 10^\circ$ 정도가 될 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

루버 각도가  $\theta=20^\circ$ 일 경우, 루버 사이의 틈이 너무 작아 유입되는 외기의 양이 매우 적으며 외기가 거의 수직방향으로 유입되었다. 유입된 외기가 충분히 유동방향으로 나아가지 못하고 진행방향 길이의 약 60% 정도 위치에서 속도가 급격하게 감소하였다.

루버 각도가  $\theta=40^\circ$ 일 경우, 각도가  $\theta=60^\circ$ 인 경우보다 루버 사이 간격이 좁기 때문에 외기가 루버를 통과하면서 가속되어 건물 내부로 유입되었다. 그러나 유입된 유량이 적어 운동량을 건물 끝까지 가져가지 못하고 건물의 길이방향 약 70% 정도 되는 지점에서 외기의 속도가 떨어졌다.

루버 각도가  $\theta=60^\circ$ 인 경우에는 유입되는 외기의 속도가  $\theta=40^\circ$ 인 경우보다 다소 약하지만 유입 유량이 상대적으로 많기 때문에 그 운동량을 건물의 반대편 외벽까지 충분히 가져가 건물 내부에서 고른 속도분포를 보였다.

#### 참고 문헌

- 1) Emswiler, J. E., 1926, "The Neutral Zone in Ventilation," ASHRAE Transactions, Vol. 32, No. 1, pp. 1-16.
- 2) Kreichelt, T. E., Kern, G. R., and Higgins, F. B., 1976, "Natural Ventilation in Hot Process Buildings in the Steel Industry," Iron and Steel Engineer, pp. 39-46.
- 3) Codiergues, R., 1977, "Investigation Method for Natural Ventilation," Promoclim E - Etudes Thermiques et Aerauliques 8E No. 5, pp. 307-318.
- 4) Lee, S. J., Lim, H. C., and Kim, H. B., 2002, "Investigation of Ventilation Flow inside a Large Factory Building Using PIV Velocity Field Measurements," J. of Visualization, Vol. 5, No. 1, pp. 67-75.
- 5) Cermak, J.E., 1981, "Wind Tunnel Design for Physical Modeling of the Atmospheric Boundary Layer," J. Eng. Mech., ASCE, Vol.107, pp.623-642.
- 6) Davenport, A.G. and Isyumov, N., 1968, "The Application of the Boundary-layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading," Proc. IRSWEBS, Toronto, pp.201-230.