

# PIV 속도장 측정기법을 이용한 공장 실내환기 개선방안 연구

임희창\* · 김형범\*\* · 이상준†

(2001년 3월 5일 접수, 2001년 7월 25일 심사완료)

## Improvement of Natural Ventilation in a Factory Building Using a Velocity Field Measurement Technique

Hee Chang Lim, Hyung Bum Kim and Sang Joon Lee

**Key Words :** Natural Ventilation(자연 환기), Wind Tunnel(풍동), Atmospheric Boundary Layer(대기경계층), PIV(입자화상속도계), Velocity Field(속도장)

### Abstract

Air movement in workplaces, whether resulting from a forced ventilation system or naturally occurring airflow, has a significant impact on occupational health. In a huge shipbuilding factory building, typical harmful factors such as fume or vaporized gas from welding and cutting of steel plates, and dusts from grinding give unpleasant feeling. From field data survey, the yearly dominant wind directions for the shipbuilding factory building tested were northwest, northeast and southeast. Among the three wind directions, the ventilation improvement was the worst for the northeastern wind. This study was focused on location of the opening vents in order to utilize the natural ventilation effectively. Instantaneous velocity fields inside the 1/1000 scale-down factory building model were measured using a 2-frame PIV system. The factory building model was embedded in an atmospheric boundary layer simulated in a wind tunnel. The modified vents improve the internal ventilation flow with increasing the flow speed more than two times, compared with that of present vents.

### 1. 서론

산업체의 작업공정에서 발생하는 대표적인 유해요인으로는 용접 및 용단작업에서 발생하는 폼(fume)과 가스, 연마작업에서 발생하는 분진, 각종 소음, 도장작업시 나타나는 유기 용제의 증기 등이 있다. 이러한 물질들은 인체의 호흡기에 유해하며, 작업자들에게 불쾌감을 주는 것으로 알려져 있다. 또한, 다른 오염물질과 결합되어 독성효과를

높이기도 하고, 실내공기의 혼탁을 증가시켜 가시도를 감소시키기는 요인이 되기도 한다. 이러한 공장내부에서 발생하는 폼이나 미세먼지에 대한 근본적인 대책 중 하나는 환기효율을 증대시키는 것이다. 환기는 넓은 공간 내에서 작업자가 오염물질에 노출되는 것을 줄이는 데 많이 쓰이는 방법으로 크게 희석환기법(general dilution ventilation)과 국소배기법(local exhaust ventilation)으로 나누어진다.

많은 산업체에서 적용하고 있는 환기방식은 유해물질을 오염원에서 완전히 제거하는 것이 아니라 유해물질이 방출될 때 신선한 외부공기로 작업장 내부를 통풍시켜 유해물질의 농도를 희석시킨 후 건물 바깥으로 내보내는 희석환기방식을 주로 사용해오고 있다. 그러나, 이 방법은 오염물질의 발생량이 적고, 작업자와 오염물질 발생원 사이에

\* 회원, 포항공과대학교 대학원 환경공학부

\*\* 회원, 포항공과대학교 환경연구소

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

TEL: (054)279-2169 FAX: (054)279-3199

어느 정도 이상의 거리가 확보되어야 한다. 이에 비해 오염물질 제거 시 적은 유량으로 최대효과를 낼 수 있는 국소배기방식은 건물 전체에 대한 환기보다 냉난방 관점에 있어서 경제적인 면도 있지만 경비가 많이 들고 작업환경에 유연성을 확보하기 어렵다.

우리나라의 경우, 지난 수십 년 동안 눈부시게 발전되어온 공학 기술발전에 비해 산업체의 작업장 환기 문제는 상대적으로 큰 관심을 받지 못하였다. 그 동안 환기를 주제로 한 연구 결과들이 일부 발표되었으나, 대부분 학문적 기초연구에 국한되어 산업현장에서 필요로 하는 총체적인 환기 정보를 얻기에는 부족한 실정이다.

1926년 Emswiler<sup>(1)</sup>는 건물 내부 자연환기의 기본적인 원리를 규명하였으며, Kreichelt 등<sup>(2)</sup>은 자연환기 이론 및 관련 수식들을 정리하였다. 그들은 작업장 환기에 대한 기존의 계산식들은 일반적으로 많은 오류를 가지고 있음을 지적하고, Emswiler<sup>(1)</sup>에 의해 유도된 식이 오차가 없음을 확인하였다.

Codiergues<sup>(3)</sup>는 여러가지 열원과 풍속조건이 공장내부 자연환기에 미치는 효과를 연구하여 환기 효과를 도식적으로 나타내었다.

Skaret<sup>(4)</sup>은 산업공정에서의 환기문제에 대한 이론과 타당성을 연구하였다. 한편 Larsson<sup>(5)</sup>은 작업공간 내부에서 부력에 기인한 순환류를 수치해석적으로 예측한 결과, 등온과정과 적당한 온도의 입구조건을 가지는 2 차원 유동의 경우에는 실험 결과를 잘 예측하였다. 그러나, 실제 현장실험에 근거한 모델이나 부력효과가 없는 유동의 경우에는 잘 일치하지 않았다.

자연환기 방식의 적용 예로 Davis<sup>(6)</sup>는 단일 방향 환기(uni-directional flow ventilation)방식에 대해서 기술하고, 전기 분해나 야금공정에 적용하여 성공적인 결과를 얻었다. Naralizio 등<sup>(7)</sup>은 제강공장 건물의 환기에 대해 벌크 환기율(bulk ventilation rate), 열과 오염원의 분포를 예측하는 방법으로 이론적 계산의 한계에 대해 언급하였다.

건물 내부 실내 환기유동을 다룬 대부분의 기존 연구들은 단순한 2 차원 모델을 이용한 유동가시화나 컴퓨터 수치해석에 거의 의존해왔다. 그러나, 이들 건물 내부유동은 복잡한 난류유동이기 때문에 기존의 유동해석방법으로는 유동구조의 거시적인 변화를 제대로 해석하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 디지털 화상처리 기술을 이용한 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정 기법을 사용하여 공장 내부유동의 속도장 변화를 측정하여 환기유동을 분석하고자 한다.

건물 내부의 실내환기는 건물 주위 대기유동의

풍향과 풍속, 건물 내부 구조물의 배치, 환기장치의 위치 및 모양 등에 많은 영향을 받는다. 이러한 여러 가지 매개변수들을 모두 고려한 완벽한 환기 시스템을 개발하기란 매우 어렵다. 본 연구에서는 건물내부에 존재하는 오염물질의 농도를 감소시키고 이들을 건물 바깥으로 내보내기 위하여 어떻게 하면 외부의 신선한 공기를 건물내부로 최대한 자연환기시킬 수 있는지를 연구하고자 한다.

이와 같은 연구를 위해서는 먼저 건물주위의 대기유동(atmospheric flow)에 관한 조사가 선행되어야 한다. 다음으로 통풍용 환기구멍의 위치와 크기, 그리고 유동조건 변화에 따른 건물 내부 환기유동의 유속분포에 대한 정확한 유동정보를 구하여야 한다. 본 실험은 환기개선이 요구되고 있는 국내 모 중공업회사의 선각공장을 대상으로 건물내부에서의 자연환기 효과를 극대화시키기 위한 기초연구로 수행되었다. 이를 위해 공장 주위의 실제 풍환경을 풍동 시험부 내에 모사시키고, 선각공장 및 주변 건물들의 축소모델을 풍동시험부에 설치하여 환기조건에 따른 공장 내부 속도장을 측정하고, 환기유동을 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 대기경계층 모사

본 연구에서 사용되어진 풍동은 난류강도가 0.08%이하인 저난류(low-turbulence) 풍동으로 측정부의 크기가 6<sup>m</sup>×0.6<sup>m</sup>×0.72<sup>m</sup>인 폐쇄회로형(closed type) 아음속 풍동을 사용하였다. Fig. 1에 풍동시험부의 개략도를 나타내었다. 비교적 짧은 거리에서 공장주위의 실제 대기경계층을 축소모사하기 위하여 시험부 입구에 스파이어(spire) 형태의 와류생성장치(vortex generator)를 장치하고 풍동 바닥면에 표면저질기로 인공잔디를 설치하였다.

본 연구에서 사용된 와류생성장치는 높이( $h_v$ )가 20cm 이고 직각 삼각형 형태를 갖는다. 이 와류생성장치를 풍동의 시험부 입구에 설치하였다. 일반적으로 풍동 바닥면에서 경계층 형태의 속도구배

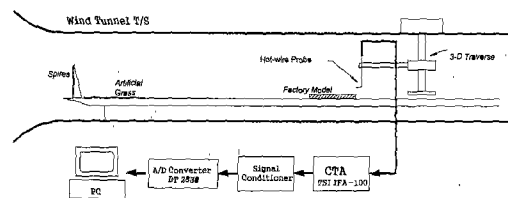


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel test section

를 갖는데 필요한 적응(adjustment) 길이는 약 5h, 또는 9h 정도가 필요하다고 알려져 있으나, 본 연구에서는 안정된 대기경계층을 얻기 위해서 와류 생성장치로부터 공장 모형까지 20h 이상의 거리를 두었다. 시험부 내부의 자유흐름속도는 레이저 광의 세기와 주입된 산란입자의 크기 등을 고려하여  $U_0=6m/s$  로 고정시켰다.

선각공장 모형이 놓이는 풍동 입구로부터 4m 하류지점에 생성되는 대기경계층의 유동특성을 파악하기 위하여 정온형 열선유속계(TSI IFA100)를 사용하였다. 열선 프로브로는 DANTEC 사의 X 형과 I 형 프로브를 사용하였다. 열선에서 나오는 전압신호는 IBM/PC 에 설치되어 있는 12bit A/D 변환기를 이용하여 획득한 후, 통계 처리하여 원하는 속도정보를 얻었다. 속도측정은 선각공장모형이 놓이는 위치에서 수직방향으로  $y=2mm$  에서 200mm 까지 2mm 간격으로 측정하였다. 속도신호는 800Hz 저역(low-pass)필터를 사용하여 한 지점에서 초당 2,000 개의 비율로 샘플링하여 16,384 개의 데이터를 얻었다. 유속의 수직분포는 벽법칙 형태로 가정하여 측정된 속도값을 기준풍속과 특성길이로 무차원하여 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$\frac{U(y)}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^n \quad (1)$$

여기서 경계층 풍동 내부에 생성시킨 대기경계층의 높이는 약  $\delta=20cm$  이고, 풍동 시험부의 자유흐름풍속  $U_0$  는 6m/s 로 설정하였다. 이를 기준으로 한 레이놀즈 수는  $Re=8 \times 10^4$  이다.

Fig. 2 는 측정된 대기경계층의 평균속도 및 난류강도분포를 나타낸다. 여기서 평균속도장 분포를 보면 벽법칙 지수(exponent)가  $n=0.143$  로 교란되지 않은 평활지역(open terrain)에서의 대기경계층 형태를 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 또한 폭 방향으로 다른 위치에서 측정한 유동 결과로부터 묘사된 대기경계층의 2 차원성을 확인할 수 있다.

실제 대기경계층 내부 유동의 난류강도는 보통 지표면 근처에서 10~30% 정도의 값을 가지며 위로 갈수록 감소하는 분포를 가진다. 본 연구에서는 상응하는 난류강도 분포를 묘사하기 위해 와류 생성장치 외에 시험부 바닥에 인조잔디를 표면거칠기로 설치하였다. 난류강도분포(Fig. 2(b))를 보면 바닥면에서 약 10~20% 정도의 난류강도를 가지며, 높이가 높아질수록 완만하게 감소하는 분포를 보여주고 있다.

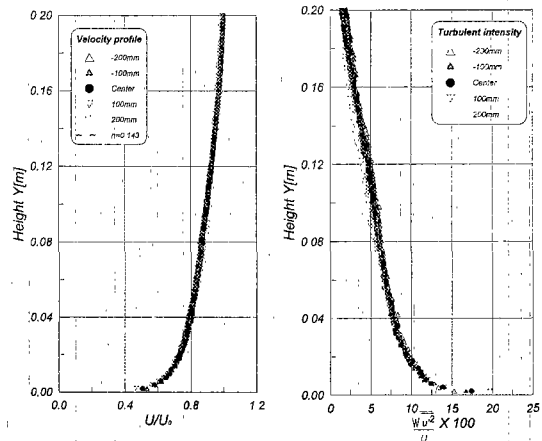


Fig. 2 Mean streamwise velocity and turbulence intensity profiles measured at the location

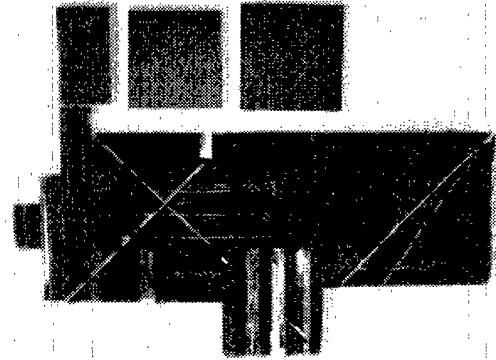


Fig. 3 Top view of models of the shipbuilding factory building and near-by 3 buildings

### 2.2. 공장모형

본 연구에서 다룬 선각공장 모형에 대한 평면 사진을 Fig. 3 에 나타내었다. 공장모형은 레이저광의 투과율이 좋고 개구부 가공이 용이한 약 1mm의 두께를 갖는 아크릴로 제작하였고, 실제 건물과 최대한 유사하게 재현하였다.

공장 모형은 기존의 공장모델과 환기구의 위치와 크기를 개선한 2 가지 모델을 제작하였다. 모형의 축소율은 실제 선각공장에서의 대표길이와 대기경계층의 유체역학적 특성길이와의 비 값을 축소된 모델에서도 동일하게 적용하였다. 공장모형은 평균높이 약 30m 의 공장을 1/1000 scale 로 축소시켜서 약 30cm×62.5cm 크기의 단면적을 갖도록 제작하였다.

2.3 풍환경

선각공장 주변의 풍환경 특성을 파악하기 위하여 공장 주변에서 측정한 풍향과 풍속자료를 기초로 월별 풍향 풍속자료를 분석하였다. 연간 평균 풍속은 약 10m/s 이었으며, 최대풍속은 9 월에 26m/s 이었다. 풍향과 관련하여 전체적으로 북동풍과 북서풍, 그리고 남동풍이 지배적인 것으로 나타났다. 계절별로 살펴보면 겨울철에는 북서풍과 북동풍이 크게 나타났으며, 여름과 가을철에는 북동풍과 남동풍이 지배적으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 풍향, 풍속 자료를 근거로 실험조건을 설정하였다. 즉, 북동풍과 북서풍, 그리고 남동풍의 3 가지 지배적인 풍향에 대하여 공장내부 환기유동의 속도장 변화를 측정하였다.

2.4 2-프레임 PIV 속도장 측정장치

본 연구와 같이 복잡한 기하학적 형상을 갖는 물체주위의 유동은 열선유속계와 같은 기존의 점(point)측정 방법으로는 해석에 많은 어려움이 따른다. 최근 들어, 컴퓨터, 전자, 광학기술, 화상처리기법 등의 발달로 인하여 기존 측정기법들의 단점을 보완한 정량적인 유동가시화 기법들이 활발히 개발되고 있다. 이러한 화상처리를 이용한 유동가시화 기법은 LDV 나 열선유속계가 갖는 장점뿐만 아니라 비정상 유동의 공간적 분포를 정량적으로 계측할 수 있다. 예를 들어 환기유동과 같이 넓은 공간에서의 순간속도장 정보를 필요로 하는 경우에 매우 효과적이다. 이러한 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법은 컴퓨터 및 화상처리 기술의 급격한 발전에 힘입어 유동현상의 규명에 있어서 강력한 계측방법이 되어가고 있다.

PIV 속도장 측정기법의 기본원리는 주어진 측정시간( $\Delta t$ )동안 움직인 유동입자(particle)들의 변위정보를 CCD(charge coupled device) 카메라와 같은 영상입력장치를 이용하여 2 차원 화상데이터로 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측하는 것이다.

Fig. 4 는 속도장 측정에 사용되어진 PIV 시스템의 개략도를 나타낸 것으로 Nd:YAG 레이저, 고속 CCD 카메라, 동기장치, PC 등으로 구성되어 있다. Nd:YAG 펄스형 레이저는 펄스지속시간(pulse duration)이 7ns 이고 강도가 25mJ 이상인 PIV 전용의 2-head 시스템이다. 고속 CCD 카메라는 해상도 512x512 pixel 로 초당 최고 1000 프레임의 영상을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Nd:YAG 레이저와 고속 CCD 카메라를 동기시켜 프레임 노출시간 중 원하는 시간에 레이저가 트리거(trigger)되도록 하여 유동의 입자영상을 얻었다.

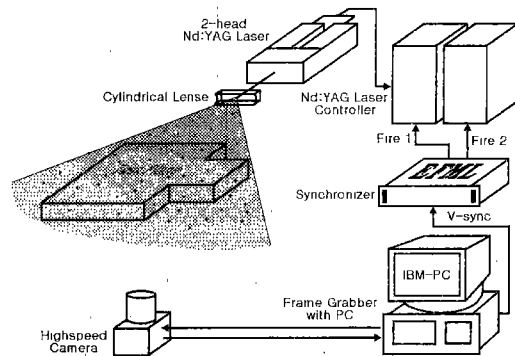


Fig. 4 PIV system for measuring velocity field of ventilation flow in a factory building

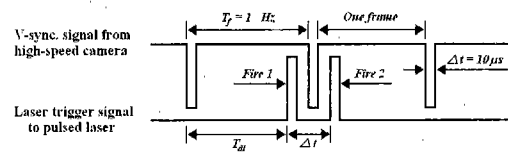


Fig. 5 Circuit signal for synchronization between the high-speed camera and pulsed laser

특하여 유동의 입자영상을 얻었다.

Fig. 5 는 속도장 측정에 사용된 동기회로의 신호 계통도로 첫 번째 레이저 펄스 이후 일정 시간 간격( $\Delta t$ ) 후에 두 번째 프레임 노출시간 기간 동안에 두 번째 레이저 펄스가 튀게 된다. 본 연구에서는 두 입자영상 사이의 시간간격( $\Delta t$ )을 170  $\mu$ s로 하여 레이저와 동기된 고속 CCD 카메라로부터 초당 40 장의 입자영상을 획득하였다. 속도벡터 추출은 2-프레임 상호상관 PIV 기법을 사용하였는데, 속도장 측정기법에 대한 자세한 내용은 참고문헌<sup>(6,9)</sup>에 자세히 나와 있다.

속도장 측정에 사용된 산란입자는 평균직경이 약 2  $\mu$ m이고, 레이저광의 산란성과 유동 추종성이 우수하고 인체에 무해한 올리브 오일 입자를 사용하였다. 압축공기와 라스킨(Raskin) 노즐을 이용한 입자발생장치(atomizer)를 풍동의 수축부에 설치하고 압축공기의 압력을 조절하여 산란입자의 밀도를 최적상태로 유지하였다.

일반적으로 PIV 속도장 측정에서 측정구간은 레이저광의 세기와 산란입자의 크기에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 관측창(field of view)의 크기를 약 60x60 cm<sup>2</sup>로 하였다. 따라서 1/1000 스케일로 축소한 선각공장 모델의 수평단면 전체를 60x60 cm<sup>2</sup> 크기를 갖는 31 개의 소구간으로 나누어 3 가지 지배적인 풍향(북동, 북서, 남동풍)에 대해서 속도장 측정실험을 수행하였다. 건물모형 바닥

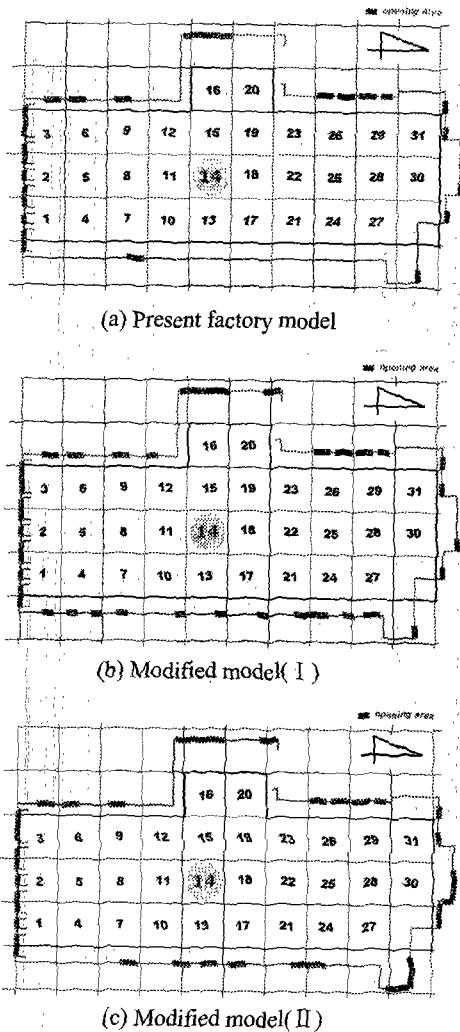


Fig. 6 Velocity field measurement sections with opening area locations

면으로부터 약 6.5 mm 높이에서 측정하였는데, 실제공장에서는 약 6.5m 높이에 해당한다. Fig. 6 은 속도장 측정단면을 보여주고 있다. 또한 건물벽면에 표시한 짙은 사각장은 기존과 개선안에 의한 통풍구 위치를 나타내고 있다. Fig. 7 은 본 연구에 사용된 실험장치를 찍은 사진이다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 환기방안 비교

Fig. 6 과 Table 1 은 본 연구에서 다룬 선각공장의 기존 환기방식과 개선방안을 서로 비교하여 나타낸 것이다.

기존 공장의 경우, 동편벽면과 북편벽면은 사부

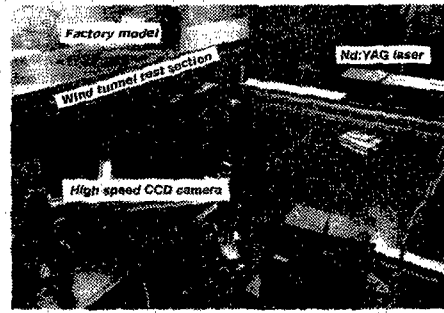


Fig. 7 Photograph of experimental setup and velocity field measurement

Table 1 Comparison between the previous opening condition and the suggested model of the factory

현 재	개선안(I)	개선안(II)
동편 : 1 개	동편 : 10 개	동편 : 6 개
서편 : 8 개	서편 : 10 개	서편 : 9 개
북편 : 5 개	북편 : 5 개	북편 : 6 개
총 14 개 vents	총 25 개 vents	총 21 개 vents

실 및 식당 등의 부속건물이 공장에 붙어있기 때문에 대부분 막혀있다. 따라서 주유동 방향인 북동쪽과 남동쪽에서 불어오는 바람을 제대로 활용할 수 없어 자연환기 관점에서 볼 때 바람직하지 못한 환기형태라 할 수 있다.

이를 보완하여 본 연구에서 개선안(I)과 개선안(II)가 제안되었다. 여기서 기둥을 제외하고 열려있는 건물의 남쪽벽면은 변함이 없다. 개선안(I)은 동편에 10 개, 서편에 10 개의 환기구를 일정간격으로 설치하고 여유가 있는 벽면 상부 공간에 갤러리를 추가하거나 기존 갤러리를 확대하도록 하였다. 그러나, 개선안(I)의 경우 공장에 붙어있는 부속건물을 일정간격으로 철거해야 하며, 연구결과 건물 중앙의 일부구간에서 여전히 환기 개선효과가 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

따라서, 문제가 되고 있는 선각공장 중앙부위에서의 정체유동을 개선하기 위하여 본 연구에서는 동편 벽면의 중앙에 집중적으로 환기구를 배치하여 동서방향의 자연환기를 극대화하고, 연중 불어오는 북동풍을 최대한으로 활용할 수 있는 개선안(II)를 제안하였다. 이 경우 동편 중앙부위에만 6 개의 환기구를 집중 배치함으로써 동편 중앙에 위치한 부속건물 일부만 철거하도록 하였다. 따라서, 개선안(I)에 비해 환기구 개수를 줄이면서 부속건물 철거도 최소화할 수 있는 장점이 있다.

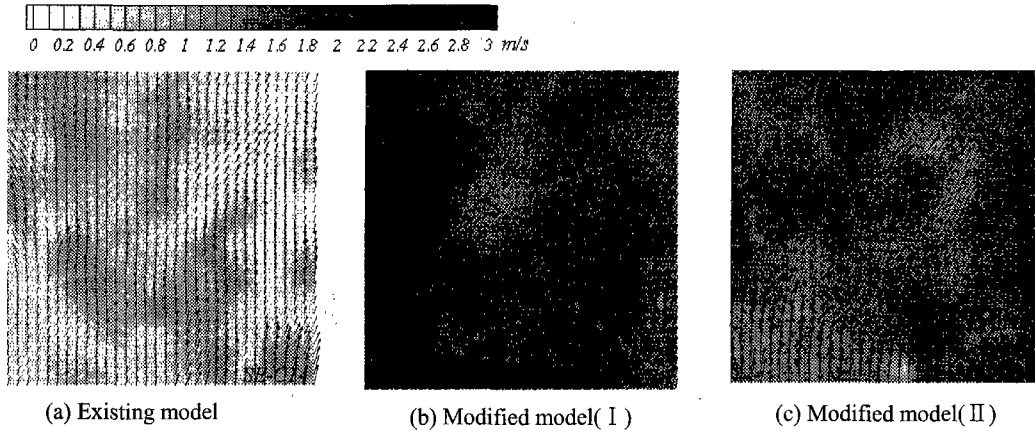


Fig. 8 Velocity fields at section 14 for South-East wind

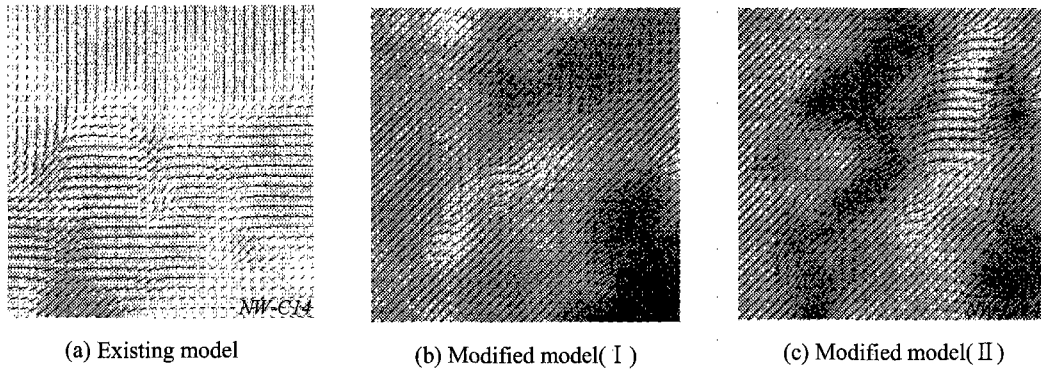


Fig. 9 Velocity field at section 14 for North-West wind

3.2 풍향에 따른 환기유동 비교

공장내부에서 미세먼지 발생빈도가 가장 높은 14 번 측정단면에 대해 기존환기방식과 개선안에 대한 공장 내부 환기유동을 3 가지 풍향에 대해 측정하였다. 본 연구에서 다룬 3 가지 풍향은 남동풍(South-East wind), 북서풍(North-West wind) 그리고 북동풍(North-East wind)이다. 기존의 환기유동에 대한 문제점을 파악하고, 개선안에 따른 환기 개선효과를 확인하기 위하여 선각공장의 현재상태와 제안한 개선안을 구분하여 결과를 정리하였다.

3.2.1 남동풍에 의한 영향

Fig. 8 은 남동풍에 대한 선각공장 내부 중앙부위의 14 번 단면에서 측정한 환기유동의 속도장 결과를 비교한 그림이다. 그림에서 화살표는 속도 벡터로 유동의 방향과 크기를 나타내고, 배경에 있는 윤곽선(contour)은 그 유속의 빠르기를 명암으로 나타내었는데, 짙을수록 유속이 빠름을 나타낸다.

Fig. 8(a)는 남동풍에 대한 기존 환기유동의 결과를 나타낸 것이다. 일부 구간에서 느린 유동이 보이며 전체적으로 유동흐름이 정체되고 있다. Fig. 8(b)와(c)의 제안된 개선안(I)과 (II)의 경우, 남동풍이 동쪽과 남쪽의 환기구를 통해 공장내부로 바람이 기존방식에 비해 최소 2 배 이상 빠른 속도로 움직이고 있음을 보여주고 있다. 이것은 남쪽과 동쪽에 위치한 開口(opening vents) 및 갤러리들이 공장 내부 환기유동에 효과적으로 작용하고 있음을 보여주고 있고, 서쪽과 북쪽에 개구를 늘임으로써 남동쪽에서 들어온 유동이 서쪽 및 북쪽으로 원활하게 유출되어 공장 전체에 걸쳐 고르게 환기가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 개선안 (II)에 비해 開口의 개수가 4 개 많은 개선안 (I)의 경우, 14 번 단면에서 유속이 보다 빠른 것으로 나타났다.

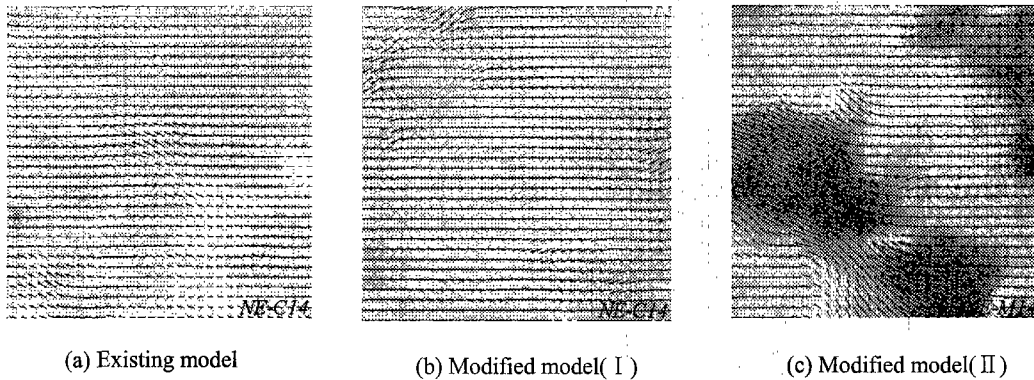


Fig. 10 Velocity field at section 14 for North-East wind.

### 3.2.2 북서풍에 의한 영향

Fig. 9는 북서풍에 대한 선각공장 내부 환기유동의 속도장 변화를 보여주고 있다. 북서풍의 경우, 서쪽 벽면중앙에 위치한 큰 開口 이외에 開口 추가 설치로 인하여 기존 환기유동에 비해 공장의 중앙부분의 환기유동이 크게 개선됨을 볼 수 있다. 여기서, 개선안(I)과 개선안(II)에서 서쪽 벽면의 환기구의 형상 및 개수가 비슷하기 때문에 선각공장 중앙부분에서 비슷한 유동형태를 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 9(a)에서 보면 현재상태의 환기유동은 공장 중앙의 14번 위치단면에서 전반적으로 유속이 느리고 흐름이 정체상태에 가깝다. 그러나, Fig. 9(b), (c)의 개선안(I), (II)의 경우, 기존환기 방식에 비해 상대적으로 빠른 유속분포를 보여주고 있다. 이는 서쪽벽면에 위치한 開口로 들어온 유동이, 동쪽에 추가된 환기구를 통해 빠른 속도로 빠져나가 전체적으로 환기유동이 개선된 것으로 판단되어진다.

### 3.2.3 북동풍에 의한 영향

Fig. 10은 북동풍에 대한 공장 내부 중앙위치단면에서의 환기유동의 속도장 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서 크게 관심을 가지고 다룬 것 중 하나는 어떻게 하면 계절에 상관없이 계속적으로 불어오는 북동풍을 제대로 활용할 수 있을까 이었다. 특히, 현재 상태의 공장 환기방식은 북동풍을 전혀 활용하지 못하고 있는 실정이다. Fig. 10(a)를 보면, 14번 단면에서 북동풍에 대해 선각공장 내부 유동이 전체적으로 느리며 국부적으로 거의 정체되어 있음을 알 수 있다. 이것은 선각공장 북쪽에 붙어있는 공장건물들에 의해 북쪽이 거의 막혀 있고 동쪽 방향으로 한 두 개 밖에 없는 환기구가

주된 요인으로 판단되어진다. 개선안(I)의 경우에는 환기구 11개를 추가로 설치하고 갤러리를 확대했지만 Fig. 10(b)에 나타난 것처럼 북동풍에 대해 유동흐름이 크게 개선되고 있지 않음을 알 수 있다.

개선안(II)에서는 북동풍이 빠른 속도로 유입되어 원활하게 공장내부를 빠져 나가도록 동서방향의 유동 흐름에 주안점을 두어 서쪽 벽면 중앙에 위치한 큰 開口와 마주 보고 있는 동쪽 벽면 중앙 부위에 환기구를 집중 배치하였다.

Fig. 10(c)를 보면 개선안(II)의 경우, 공장내부중앙 부위에서 유속이 상당히 증가하고 있다. 이것은 북동풍을 고려한 開口와 갤러리의 개선이 효과적으로 유속을 증가시켰다고 판단된다. 이것으로부터 開口의 총면적 증가보다도 開口의 위치에 따라서 환기유동의 유속분포가 크게 변할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 開口수를 적게 설치하고도 효과적인 환기효과를 거둘 수 있었다는 것은 의미하는 바가 크다고 할 수 있다.

### 3.3 전체단면에서의 환기유동 비교

각각의 유동조건에 대하여 31개 단면에서 측정된 환기유동의 순간속도장 결과들을 조합하여 공장 내부 전체 단면에서 유속의 크기 변화를 윤곽선 형태로 표현하였다. 서로 다른 순간에 측정된 각 측정단면에서의 순간속도장 결과들을 조합하다 보니 일부구간에서 연결이 완만하지 못하기는 하지만, 환기조건에 따른 전체적인 환기유동의 변화를 잘 보여주고 있다. 공장 전체단면에서 구한 속도벡터의 총 개수는  $1024 \times 31 = 31,744$ 개로 이들을 열선풍속계나 LDV로 측정한다는 것은 매우 어렵다. 그리고, PIV 속도장 측정기법을 이용하여 건물 내부 자연환기의 속도장 변화를 해석한 것은 전례

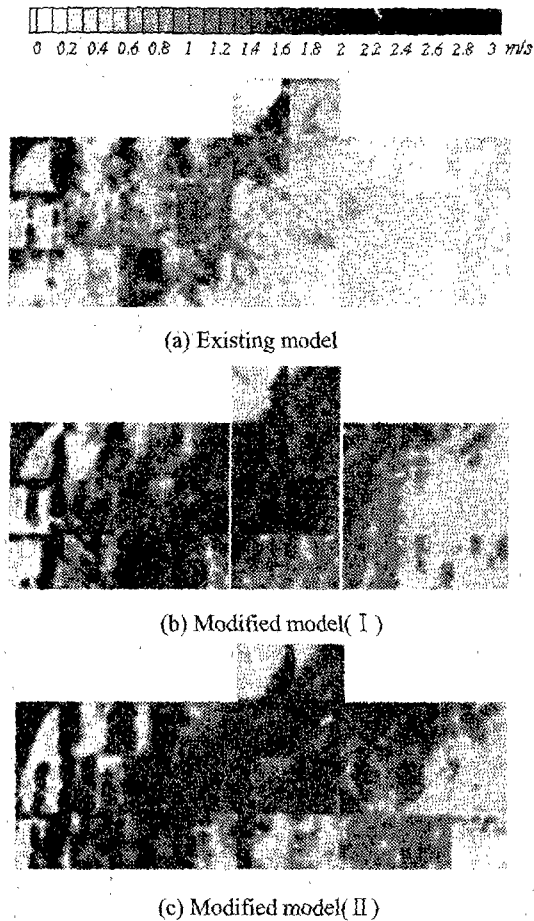


Fig. 11 Velocity fields within the building model for South-East wind

가 없는 것으로 알고 있다.

Fig. 11 은 기존방식과 개선안(I),(II)에 의한 환기방식에 대하여 남동풍이 불어올 경우 공장 내부에서 환기유동의 변화를 보여주고 있다. 기존 환기방식의 경우, 남동쪽으로부터 바람이 들어옴에 따라 남쪽의 開口 부근에서 유동이 상대적으로 빠르게 움직이고 있다. 그러나, 북쪽과 동쪽 벽면부근에서는 일부 開口 부근을 제외하고는 유동이 매우 느림을 볼 수 있다. 이것은 동쪽과 북쪽의 벽면이 거의 막혀있어 내부 환기유동이 거의 움직이지 않고 있기 때문이다. 반면에 특 튀어나온 서편 중앙 開口 주위에서는 선각공장에 인접한 건물에 기인한 골바람의 영향으로 공기유동이 빠르게 공장 내부로 들어오고 있다. 그러나, 앞에서 지적한 것처럼 미세먼지가 다량 발생하는 공장 중앙부분에서는 환기유동이 매우 느림을 볼 수 있다.

Fig. 11(b)는 개선안(I)에 따른 공장내부 환기유동의 속도분포를 나타낸 것이다. 남동쪽에서 불어

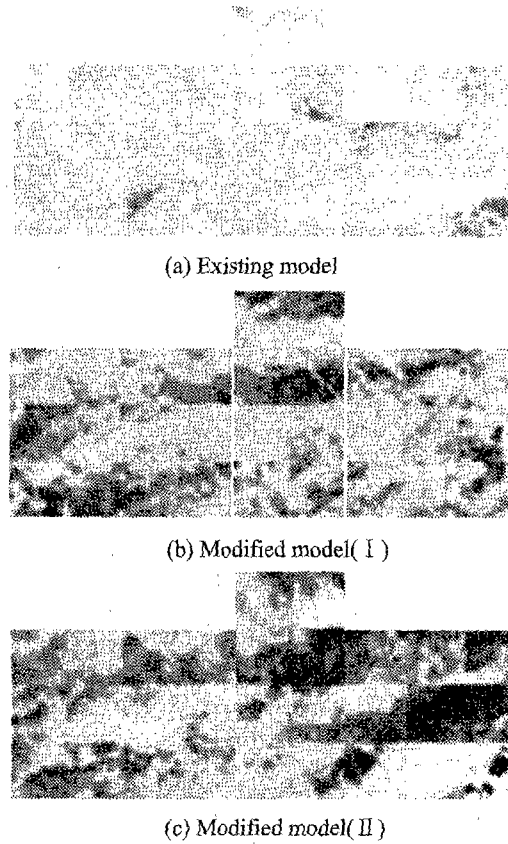


Fig. 12 Velocity fields within the building model for North-East wind

오는 대기유동이 선각공장으로 접근해 오에 따라 남쪽의 開口 주위 영역에서는 유동이 상당히 활발하고 동쪽벽면에 일정간격으로 위치한 開口들을 통한 유동이 공장의 내부에 상당히 빠른 환기유동을 가져오고 있다.

Fig. 11(c)는 환기 개선안(II)에 따른 공장내부 환기유동의 속도분포를 보여주고 있다. 개선안(I)과 비슷하게 남쪽의 開口 주위 영역에서는 유동이 크게 개선되고, 동쪽중앙에 물려있는 開口들을 통한 유동이 중앙부위에서 환기유동의 유속을 크게 증가시켜 환기개선효과가 큼을 볼 수 있다. 이것으로부터 남동풍에 대해서 중앙부분에서의 환기는 동쪽과 남쪽의 開口가 상당히 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 공장의 북쪽영역에서도 상대적으로 빠른 유동이 형성되어 환기개선효과가 크게 나타나고 있다. 그러나 공장내부 동북쪽 코너부분에서 환기유동이 유속이 느린 것으로 나타났다. 이것은 개선안(II)에서는 동쪽 벽면 중앙부



위에 開口를 집중적으로 배치함으로써 남동풍에 대한 환기효과가 약하기 때문이다. 그러나, 이 위치는 소재 반입위치로 환기개선이 요구되지 않는 구간이다.

Fig. 12는 북동풍에 기인한 공장모델 내부에서의 유동장 변화를 보여주고 있다. 기존 환기방식의 경우 선각공장 북동쪽 벽면에는 開口가 많지 않아서 북동쪽으로부터 접근해 오던 대기유동은 선각공장 내부로 거의 들어오지 못하고, 공장 내부는 전체적으로 거의 정체상태에 가깝다. 따라서 연중 불어오는 북동풍을 전혀 활용하지 못하여 자연환기 관점에서 비효율적임을 알 수 있다. 개선안(I)에 따른 속도장 측정결과를 보면 기존의 환기방식에 비해 환기유동을 크게 개선시키고 있음을 알 수 있다. 그러나 환기개선이 크게 요구되는 중앙부분에서는 환기유동이 상대적으로 느낌을 확인할 수 있다.

개선안(II)의 경우, 북동풍에 대하여 공장 내부 환기유동의 유속이 크게 증가되고 있다. 특히, 중앙부위에서도 상당히 빠른 유속을 가지며, 공장 북쪽에서도 유속이 2 배 이상 크게 증가하였다. 이상의 연구결과로부터 건물 동편 중앙에 환기구를 집중 배치하여 공장을 가로지르는 동서방향의 공기유동을 원활하게 하는 개선안(II)의 경우, 공장 내부의 거의 전 영역에서 환기유동의 유속이 빨라짐을 알 수 있다. 따라서 개선안(II)를 따라 開口를 개선하게 되면 공장 중앙부분을 포함한 실내 환기유동이 크게 개선될 것으로 기대되어진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 환기용 開口 위치변화에 따른 공장 내부 환기유동의 속도장 변화를 PIV 기법으로 측정하여 환기개선 효과를 해석하였다. 연구내용을 종합하면 다음과 같다.

(1) 대기경계층 내에 놓인 건물 내부의 환기문제는 PIV 속도장 측정을 통해 해석한 것은 전례가 없으며, 현장적용이 가능한 매우 유용한 결과를 얻었다.

(2) 공장 실내 환기유동은 건물주위 대기유동의 풍향 및 풍속과 같은 풍환경의 영향을 크게 받으며

인접 건물에 의한 상호간섭도 고려하여야 한다  
(3) 본 연구에서 다룬 공장의 경우, 남쪽 開口와 서쪽 開口를 제외하고는 거의 막혀져 있어 외부의 대기유동, 특히 연중 불어오는 북동풍을 제대로 활용할 수 없어 자연환기 효과가 매우 낮았다.

(4) 개선안(I),(II)의 경우, 기존 공장건물에 대한 유속분포에 비해 품 및 분진이 많이 발생하는 중앙부위에서 최소 2 배 이상의 유속증가를 보였다.

(5) 개선안(II)의 경우, 공장에 붙어있는 부속건물의 철거를 최소화하고 비교적 적은 開口의 추가로 공장 내부 전체에 걸쳐 자연환기를 원활히하여 환기개선에 효과적이었다.

#### 후 기

본 연구는 현대중공업의 과제 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Emswiler, J.E., 1926, "The Neutral Zone in Ventilation," *ASHRAE Transactions*, Vol.32(1), pp. 1~16.
- (2) Kreichel, 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 Aerologiques Tome 8E* No. 5, pp. 307~318.
- (4) Skaret, E., 1978, "Ventilasjon av Industrielokalen - Teori or Praksis," *Saertrykk fra Norsk. VVS* No. 6.
- (5) Larsson, M., 1978, "Predictions of Buoyancy Influenced Flow in Ventilated Industrial Halls," *BK # Ser. Therm. F*, pp. 271~281.
- (6) Davis, J.A., 1975, "Unidirectional Flow Ventilation System," 104<sup>th</sup> *AIME Annual Meeting*, New York.
- (7) Natalizio, A. and Twigger-Molecey C., 1980, "Ventilation of Mill Buildings - New Directions," *Iron and Steel Engineer*, pp. 51~56.
- (8) 이상준, 1999, "PIV(Particle Image Velocimetry) Velocity Field Measurement," *PIV'99 Lecture Note*, pp. 181~206.
- (9) 이상현, 이상준, 1999, "Study on Flow Structure of Turbulent Boundary Layer over Semi-circular Riblets," *KSME J.*, Vol. 23(7), pp. 937~944.