

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.8.703>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

대형 공장 개구부용 에어커튼의 설계 인자에 따른 차단 성능 변화에 대한 전산해석 연구§

문종민* · 리광훈**
* 서울시립대학교 기계정보공학과

Numerical Study on Variations in the Sealing Performance of Air Curtains in Large-Scale Factory Opening Considering Various Design Factors

Jongmin Moon* and Gwang Hoon Rhee**

* Dept. of Mechanical and Information Engineering, Univ. of Seoul.

(Received February 8, 2015 ; Revised June 4, 2015 ; Accepted June 24, 2015)

Key Words: Air Curtain(에어커튼), CFD(전산유체역학), Large-scale Factory(대형 공장), Opening(개구부), Sealing Efficiency(차단 효율)

초록: 작업의 효율을 높이기 위해서 대형 공장에서 개구부는 주로 개방 되어 있다. 그러나 동절기에 공장에서 난방을 하는 경우 개방되어 있는 개구부는 난방부하를 상승시키는 큰 요인이다. 때문에 공장에서는 개구부 상단에 에어커튼을 설치하여 외부의 침기를 막아 난방부하를 낮춘다. 일반적인 에어커튼의 설계 변수로는 토출 각도와, 속도, 온도 등이 존재하며 이에 대한 연구는 이미 많이 진행되었다. 하지만, 공장이라는 공간적 특수성을 고려하였을 때, 기존에 연구되지 않은 개구부로부터의 이격 거리와 토출구 폭에 대한 부분도 차단 성능에 영향을 미친다. 그 결과 에어커튼은 이격 거리가 가깝고, 토출구 폭은 넓을수록 차단 성능이 좋았다. 이격 거리가 존재하더라도 토출구 폭을 증가시키면 차단 성능이 향상되었으며, 토출구 폭을 증가시킴으로써 약 13.7%의 차단 성능의 향상을 기대할 수 있다.

Abstract: In large-scale factories, there are usually openings in the building to increase the efficiency of workers. However, if the factory is heated during winter, openings significantly increase the heating load. Therefore, there is a need for air curtains to be installed at the top of openings in factories to reduce the heating load due to the cold air entering from outside. The main design variables of these air curtains are the discharge angle, speed, and temperature, etc. While there have already been many studies focusing on these design variables, the distance from the opening and the width of the discharge have not been studied even though they also affect the sealing performance. As a result, when the distance from the opening decreases and the width of the discharge increases, we realize an optimum air curtain performance. However, if the distance from the opening is about 1.5 m, by adjusting the discharge angle and the distance from the opening, the sealing performance of the air curtain is improved by 13.7%.

- 기호설명 -

b : 에어커튼의 젓 노즐의 폭(m)
B : 에어커튼의 설치 폭(m)

E : 차단 효율(%)
g : 중력 가속도(m/s²)
H : 공장의 실내 공간 높이(m)
H_d : 개구부의 높이(m)
P : 압력(Pa)
T : 온도(℃)
v : 속도(m/s)
X_l : 개구부로부터의 거리(m)

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11.-14., 김대중컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, ghrhee@uos.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

W_d : 개구부의 너비(m)

그리스문자

γ : 토출 각도($^\circ$)

ρ : 밀도(Kg/m^3)

하첨자

a : 에어커튼이 작동하고 있는 상태

b : 에어커튼이 작동하지 않는 상태

i : 실내

j : 젯(jet)

o : 실외

1. 서론

공장은 일반적으로 생산이라는 합목적성이 강한 공간이기 때문에 효과적인 생산 및 작업 효과의 증대라는 가장 큰 목적을 지니고 있다. 그렇기 때문에 기존의 공장 내에서의 공기 조화라 함은 생산 제품의 효과적인 생산과 보관에 대한 적절한 온습도의 조절에 가장 큰 목적이 있었다. 그러나 현대에 들어 실내 공간에서의 인간의 건강과 쾌적성에 대한 관심이 높아지면서 공조 공간 내에서의 재실자, 즉 공장 내의 근로자의 근로 환경 개선과 오염물질로부터 보호하는데 그 역할이 이동하고 있다. 일반적으로 공장은 공간 사용에 있어 목적성이 뚜렷하기 때문에 공조 설비의 설계나 배치에도 공간적 특성이 나타나게 된다. 공장 내의 내부 형태는 생산 라인의 구성에 따라 기계와 인원이 배치되어 있으며 공간을 구분하기 위한 파티션과 즉각적인 라인에서의 대응을 위한 자재 및 생산품들이 적재되어 있기 때문에 내부 공간이 매우 복잡하게 구성되어 있다. 이러한 공간적 특성은 공장이 대형화 될수록 뚜렷하게 나타난다. 대형 공장에서 효율적인 환기 성능을 보장하고 발생하는 오염원의 유입 및 유출을 방지하며 이러한 상태에서도 안전하고 쾌적

한 근로 환경을 보장하기 위한 공조 설비를 구성하면서 공조에 투입되는 에너지를 절감할 수 있는 많은 아이디어들이 연구되어 왔다.^(1,2) 그 중 에어커튼은 실내외의 공기 교환을 막아주며 난방 부하를 줄여주는 1차적인 역할을 담당한다.^(1~3) 대형 공장의 경우 자재나 제품의 적하에 대형 차량을 이용하기 때문에 적하를 담당하는 대형 개구부가 상당량 존재하며, 작업의 효율성을 위해 동·하절기에도 항시 개방하는 경우가 잦다. 공조 설비에서 이러한 개구부에서는 냉·난방부하가 매우 크게 작용되기 때문에 개구부의 크기가 작은 경우 비닐막 등을 이용하여 외기의 유출입을 어느 정도 차단할 수 있지만, 개구부의 크기가 4 m × 4 m 정도의 대형 개구부의 경우 냉·난방부하를 줄이기 위해 에어커튼이 주로 사용된다.

본 연구에서는 대형 공장에 존재하는 4 m × 4 m 크기의 대형 개구부에서 산업용 에어커튼의 설계 인자의 변화에 따라 외기 차단 성능을 전산 유체역학을 이용하여 연구하였다. 일반적인 에어커튼의 설계 변수 중 토출 각도와 토출 속도에 대한 영향은 이미 많은 연구를 통해 설명되었지만,^(4~8) 일반적인 빌딩이나 상가에서 사용되는 에어커튼과는 다르게 대형 공장에 존재하는 대형 개구부가 가지는 설계 특성이 존재하며, 그 중 토출구 폭과 이격 거리에 대한 성능 변화를 중심으로 연구를 진행하였다. Fig. 1의 좌측 사진은 실제 개구부보다 토출구 폭이 작게 설치되어 있는 경우이며, 우측 사진은 개구부로부터 어느 정도 이격되어 에어커튼이 설치되어 있는 실제적인 현상을 보여주고 있다. 이처럼 대형 공장 내에서 실제로 설계 변수에 포함되는 이격 거리와 토출구 폭에 대한 영향을 전산유체역학을 이용하여 차단 성능의 변화를 알아보았다.

2. 해석 모델과 해석 방법

2.1 해석 모델

모델이 되는 대형 생산 공장은 길이 약 400 m, 폭 약 150 m의 총 면적이 60,000 m^2 이 넘는 규모의 대형 공간이며, 높이는 약 12 m의 톱날형 지붕을 지녔다. 공장의 형상은 Fig. 2에서 보이는 것처럼 일반적인 빌딩과 다르게 층고가 낮고 평면적이 넓은 구조로 되어 있다. 이러한 형상적 특성으로 인하여 일반적인 빌딩의 풍압 분포와는 다른 양상이 건물 형태로부터 발생한다. 빌딩은



Fig. 1 Air-curtain in a large-scale factory and installed distance at the opening

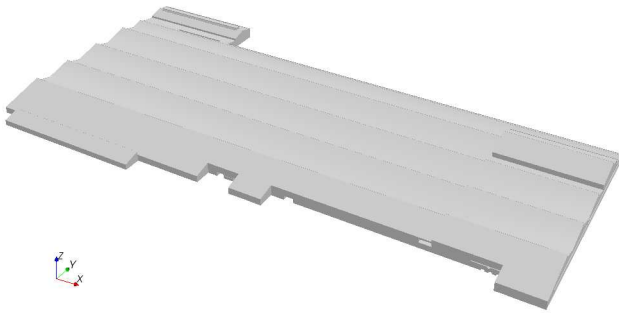


Fig. 2 CAD geometry modeling of large-scale factory

높이에 대한 건물 길이 비가 작기 때문에 전면부에 주풍압이 발생하면 상하에 의한 유동의 박리현상보다 측면부에서의 박리현상이 두드러지게 발생하며 박리로 인한 와류 형성이 건물 후면에서 발생하는 길이가 짧다.⁽⁹⁾ 때문에 와류 후면부에서의 압력구배가 크게 발생하여 벽압력 계수의 변화가 짧은 시간동안 반복되나 공장의 경우 건물 폭이 높이에 비해 훨씬 크기 때문에 와류에 의한 영향을 건물 후면에서 영향을 받는 범위가 작고 주기가 길다. 특히 층고가 길이에 비해 크게 작기 때문에 온도차이로 인한 굴뚝 효과는 거의 나타나지 않으며 이에 따라 중립 압력 높이 (neutral pressure level)은 공장 건물 중앙에서 두드러지게 나타난다.^(6,9,10) 때문에 대형 공장의 경우 밀폐공간이 아니고 개방된 개구부가 외풍을 받는 공장 전면부와 후면부에 전체적으로 존재하기 때문에 공장 내부에서의 압력 변화는 파티션 및 적재된 자재와 생산품들 그리고 생산 라인에 따른 국부적인 변화는 존재하나 넓은 총 면적의 영향으로 평균적인 대기압 상태와 동일하다고 가정하여 해당 연구를 진행하였다.

2.2 해석 방법

본 연구를 전산유체역학에 효과적으로 적용하기 위해서 해석 모델을 단순화하여 Fig. 3처럼 구성하였다. 구역을 크게 내부 공간과 외부 공간으로 구분하였으며, 내부 공간은 공장의 일부분을 구현하였다. 공장의 단위 구역인 기둥과 기둥사이의 거리인 1개의 spanwise를 단위 길이로 적용하였으며, 그 경우 적용된 길이는 20 m이다. 일반적인 공장에서 각 spanwise마다 적재 및 라인이 설치되는 기준이 되기 때문에 이를 단위 구역으로 정의하는 것은 타당하다고 간주하였다. 높이

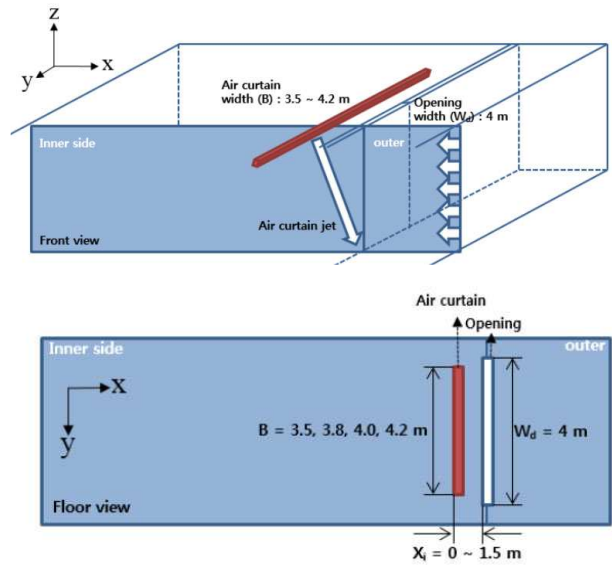


Fig. 3 Schematic front view (top) and floor plan (bottom) for numerical analysis

는 개구부의 높이인 4 m와 외부 벽면에는 원래 공장 높이인 12 m를 적용하였으며, 그 위 공간은 외부공간으로 하여 여유를 두어 해석 격자를 적용하였다. 공장 내부가 매우 넓기 때문에 실내 압력은 대기압 상태와 같았으므로 내부는 대기압 상태로 정의하였다. 입구에서는 해당 공장이 위치한 지역의 동절기 평균 풍속인 2.025 m/s를 정의하여 외부 풍속이 일정하게 불어오는 상황이라고 간주하였으며, 설계 인자의 변화에 따른 차단 성능을 비교할 수 있도록 하였다. Fig. 3에서 보여지고 있는 에어커튼의 설계 인자는 토출구의 폭(B)과 토출 각도(γ), 그리고 에어커튼의 설치 이격 거리(X_i)이며, 각 설계 인자에 대한 케이스는 Table 1에서 정리하였다.

그리고 Fig. 4에서는 해석이 적용된 형상에 경계 조건을 입력한 부분을 설명하고 있다. 이에 대해 몇 가지 가정을 도입했다. 입구 조건에는 외풍에 해당하는 속도 조건과 에어커튼의 토출 노즐 부분에는 일정 유량 조건을 입력하였다. 이는 팬 동력에 의해 에어커튼에서 토출되는 젓은 토출 각도에 관계없이 일정한 유량으로 토출된다고 가정하였기 때문이다. 또한 공장의 층고가 높지 않기 때문에 외부 유동은 고저에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 그리고 해석 공간이 대칭적이고, 유동 방향 및 운동량 방향 역시 대칭적이며 토출되는 유동 패턴도 중심에서 대칭적인

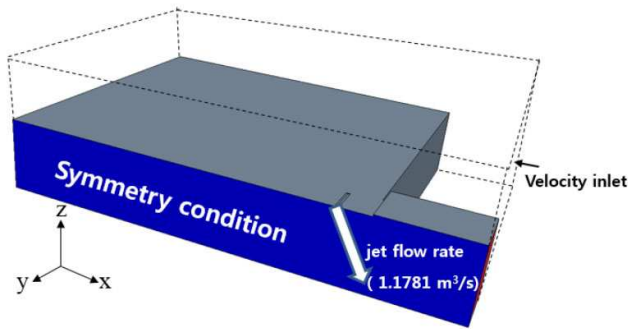


Fig. 4 Boundary conditions for present study

결과가 나올 것을 예상할 수 있기 때문에 해석의 효율성을 위해 중앙에 대칭조건을 부여함으로써 절반의 영역만 해석을 수행하였다. Fig. 4에서 파란 색의 표면이 정중앙 면에 적용한 대칭 조건이며, 회색 면으로 보이는 부분은 공장 내부 영역에 해당하며, 점선으로 표현된 부분은 외부 영역에 해당하는 부분으로 외부에서 바람은 공장 내부와 공장의 외벽과 지붕 상단부에 해당하는 외부 영역으로 공장 지붕을 넘어 진행할 수 있게끔 설정하여 실제 상황과 동일한 상황을 부여하였다. 이에 따른 정확한 형상 변수와 환경 변수에 대해서 Table 2에 정리하였다.

전산유체역학을 이용하여 해당 연구를 진행하기 위해서 사용되는 지배방정식은 다음과 같다.^(11,12)

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \vec{g} + \frac{1}{\rho}\nabla \cdot \vec{\tau} \quad (2)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho\varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

식 (1)은 연속방정식, 식 (2)는 운동량 방정식이며, 식 (3)과 (4)는 난류 모델링 식이다. 사용된 난류 모델로는 k-ε turbulence model for high Reynolds number를 적용했으며, 해당 난류 모델은 일반적인 외부 유동 및 환기 문제에서 다양하게 사용되기에 범용성이 강한 모델이다. 본 연구에서 원활한 해석을 위해서 상용 전산유체역학

Table 1 Independent parameters applied to the air curtain design variables for numerical analysis

개구부로부터의 이격 거리 (X _i)	0	1.5		
토출 각도 (γ)	0	7.5	15	22.5
토출구 폭비 (B/W _d)	0.875	0.950	1.000	1.050

Table 2 Dimensional and environment parameters for numerical analysis

형상 변수		환경 변수	
에어커튼 젓 노즐 폭 (b)	0.15 m	외기풍속	2.025 m/s
개구부높이 (H)	4 m	에어커튼 토출 유량	1.1781 m ³ /s
실내 공간 폭	40 m	실내 압력	1 atm
실내 공간 깊이	20 m	외부 압력	1 atm

프로그램인 CD-Adapco 사의 STAR-CCM+ ver. 8.06을 사용하였다.

2.3 해석 검증

에어커튼의 성능을 파악하는 방법 중 가장 확실한 방법은 외부에서 바람이 불 때 에어커튼을 가동시켜 여러 포인트에서 속력 측정을 하는 방법일 것이나 외풍의 유속이 일정하지 않기 때문에 외풍의 영향을 받아 회절하는 젓의 속력을 측정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 여러 포인트에서 속력을 측정하면서 시간에 따라 속력의 변화를 추적하면서 그에 대한 평균치로 대표하는 방법으로 에어커튼에서 토출된 젓의 속력 분포를 파악하였다. 에어커튼에서 토출되는 공기의 형태는 젓의 형태와 동일하기 때문에 젓의 속력을 측정하는 방식을 택했으며, 측정을 위해 Lutron 사의 Am-4214SD 휴대용 속력 측정 장치를 사용하였고, 10분간 에어커튼이 가동 될 때의 내부 포인

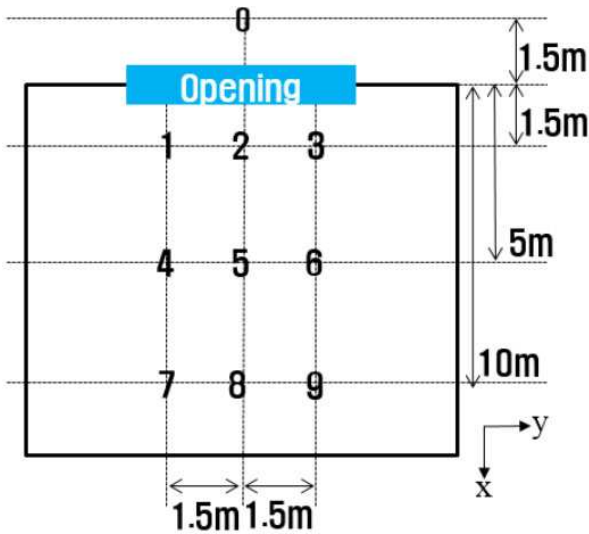


Fig. 5 Measurement points about air curtain jet velocity magnitude

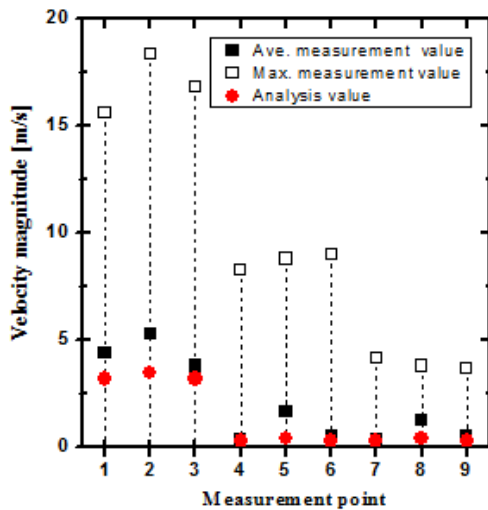


Fig. 6 Comparison on measurement value of the mean and maximum velocity magnitude with analysis at each point

트 9개와 외풍 속력을 측정하는 1대를 외부 포인트에 사용하여 속력 데이터를 로깅하였다. 속력을 측정한 포인트는 Fig. 5에 나타난 것처럼 개구부의 전·후면부로부터 1.5 m 떨어진 곳과 5 m, 10 m 떨어진 곳에서 호흡선 높이인 1.5 m 높이이다. 로깅한 데이터를 외풍이 2 m/s 이상일 때 측정된 속력을 중심으로 최대 속력과 평균 속력을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 외풍의 속력을 2.025 m/s로 지정한 이유는 해당 지역의 평균 풍속이며, 해당 정보는 1990년부터 현재까지의 해당 지역의 기상 데이터를 받아 정리한 결과이다.

Fig. 6에는 에어커튼이 개구부 바로 상단에서

수직 하방 ($X_1 = 0, B/W_d = 1, \gamma = 0^\circ$)인 경우에 외풍이 2 m/s 로 불 때의 시간의 결과를 추출하여 측정된 최대 풍속과 평균 풍속을 나타낸 것으로, 검은색 짝 칸 사각형이 평균 풍속을, 검은색 빈 사각형이 측정된 최대 풍속을 나타낸다. 그리고, 적색 동그라미는 해석한 결과를 보여준다. 전체적으로 해석 값이 측정값보다 근소하게 작으나 에어커튼 젯이 위치한 부분에서 큰 속도가 나오고, 멀어질수록 속도가 작게 나오는 경향이 유사하며, 중앙부가 양 옆보다 더 큰 속도가 측정되는 경향을 따르고 있다. 해석값과 측정값의 차이는 해석을 진행할 때 적용한 이상적인 경계조건을 따르며 정상상태의 값을 나타내는 조건의 차이에서 기인했다고 할 수 있다.

2.4 성능 비교 방법

에어커튼은 강한 모멘텀을 지닌 젯을 이용하여 외부에서부터 불어오는 외풍의 압력을 극복하고 내부로부터의 침입을 막고, 또한 내부의 공기가 외부로 나가는 것을 막아주는 역할을 한다. 하지만 젯의 모멘텀을 정량적인 가치로 측정하는 것은 불가능하며 수치적인 해석법⁽¹³⁾을 이용해서 계산하고 이에 대한 영향을 평가한다. 또한 직관적으로 에어커튼의 성능을 파악하기 위해서는 차단하는 외기량을 측정하여 이에 대한 차단 성능을 비교하는 방법이 주로 사용된다. 에어커튼에서 차단 성능을 비교할 때 가장 주요한 부분은 차단 효율이다. 차단 효율에 관한 식은 다음과 같다.

$$E = \frac{\dot{Q}_b - \dot{Q}_a}{\dot{Q}_b} \times 100 \quad (5)$$

위 식 (5)에서 하첨자 a는 에어커튼이 작동하고 있을 때 입구를 통해 내부로 유입되는 외부 공기의 유량이며, 하첨자 b는 에어커튼이 작동하지 않을 때 입구를 통해 내부로 유입되는 외부 공기의 유량을 의미한다. 위 식을 통해 에어커튼이 작동하지 않을 때에 비해 에어커튼이 작동할 때 유입되는 유량의 비를 효율로써 표현할 수 있으며, 이는 해석 공간 내에 다른 유량의 발생 및 유출이 없다는 가정이 요구된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토출구 폭에 대한 차단 성능 변화

산업용 에어커튼의 경우 앞서 설명한대로 개구

부 상단부에 주요한 기타 설비들이 먼저 자리 잡을 경우 에어커튼이 개구부로부터 어느 정도 이격하여 설치되는 경우도 있기 때문에 이격 거리는 대형 공장에서 작동하는 에어커튼에 주요한 설계 변수로 존재할 수 있음을 설명하였다. 본 연구에서 적용한 에어커튼의 이격 거리는 실제 공장에서 설정되어 있는 일반적인 이격 거리인 1.5 m로 설정하였다. 1.5 m 이상 이격했을 경우 차단 효과가 극히 떨어지는 현상이 발생했기 때문에 그 이상 거리에서의 데이터는 의미가 없었다.

Fig. 7은 이격 거리가 존재하지 않고 개구부 바로 상단에 설치했을 때의 차단 현상을 비교한 것이다. 토출구 폭비에 대한 영향은 토출구 폭비가 클수록 차단 효과가 좋아지며, 개구부 폭보다 토출구 폭이 더 큰 경우 ($B/W_d > 1$)에도 토출 폭비에 대한 영향이 증가함을 보인다. 토출구 폭은 개구부 양 사이드에서 침입하는 외부 유량의 크기를 파악하는데 중요한 인자이며, Fig. 8에서 보이는 것처럼 토출 폭 비에 따라 개구부 양 사이드에서의 에어커튼에서 토출되는 젓이 외부 유량을 차단하는 효과를 보여준다. 좌측의 그림은 가장 나쁜 결과인 토출 폭비가 0.875인 경우이며, 우측의 그림은 가장 좋은 결과인 토출 폭비가 1.05인 경우이다. 그림의 단면은 개구부 벽면에 인접한 부분의 단면도이며, 적색에 가까울수록

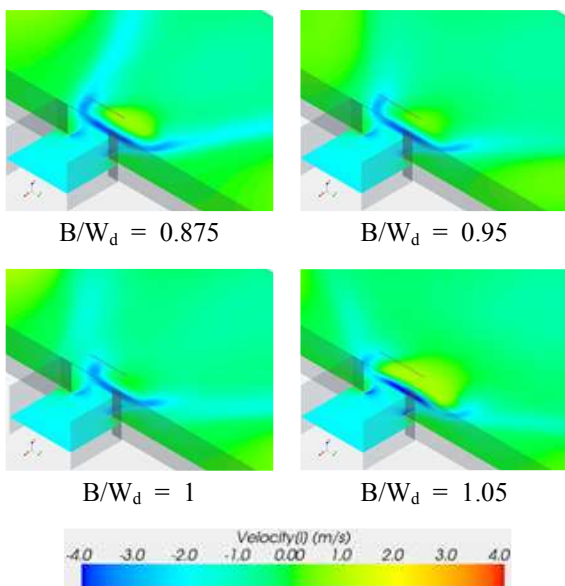


Fig. 7 Velocity fields about $X_1 = 1.5$ m, $\gamma = 15^\circ$ and 1.5 m flood plan for the variance of width ratio of the discharge

에어커튼의 젓의 영향을 받는 내부 공기, 청색에 가까울수록 외부 공기라고 볼 수 있다. 외풍은 우측에서 좌측으로 불며, 에어커튼의 토출 폭비가 작은 경우 침기가 에어커튼의 젓의 모멘텀을 극복하고 젓이 회절되면서 하단으로 외기가 침투하는 양상을 보이고 있다. 토출 폭비가 큰 경우에는 젓의 모멘텀이 유지되면서 외기를 차단하는 양상을 보인다. 즉 에어커튼에서 토출되는 유량이 같은 경우에도 토출구 폭을 증가시킴으로써 개구부 양 사이드로 침입하는 외부 침기를 막아주는 효과를 지니며 이를 통해 차단 효율이 증가함을 보여준다.

3.2 토출 각도와 이격 거리에 대한 차단 성능 변화

노즐부의 베인(vane)의 각도를 조정함으로써 토출 각도를 변경할 수 있다. 그리고, 이미 토출 각도에 대한 연구는 이미 진행되어 있으나,⁽⁶⁾ 이격 거리와 함께 토출 각도가 함께 미치는 영향을 알아보기 위해 각도를 0° , 7.5° , 15° , 그리고 22.5° 의 각도에 대한 영향을 분석하였다. 토출 각도의 경우 각도가 15° 이하일 경우에 차단 효율을 보여주며, 15° 가 넘어 22.5° 로 토출하는 경우에는 차단 효율이 현저하게 감소하는 경향을 보인다. Fig. 9에는 이격 거리가 없는 상태($X_1 = 0$ m)에서, 에어커튼과 개구부 폭의 비가 같을 때($B/W_d = 1$) 토출 각도의 변화에 대해 외기가 차단되는 현상을 1.5 m 높이 평면도에서 보여주고 있다. 보여지는 색깔이 녹색에 가까울수록 속도가 0에 가까우며 청색에 가까울수록 외부 공기의 침입을 의미한다. 토출 각도가 0° 의 경우 개구부 양 사이드 쪽으로 침투되는 유량이 보이며, 토출 각도가 $7.5^\circ \sim 15^\circ$ 사이에서 개구부 양 사이드 쪽으로 굽어 유입되는 유량의 크기가 다른 케이스에 비해 작아지고 있음을 보인다. 그리고 이격 거리에 대해서는 Fig. 10에서 보이는 것처럼 차단 효율이

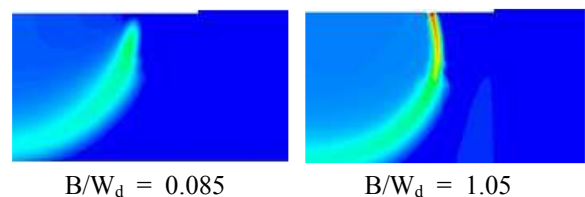


Fig. 8 The cross-section on infiltration status about $X_1 = 1.5$ m, $\gamma = 15^\circ$ at opening end-side

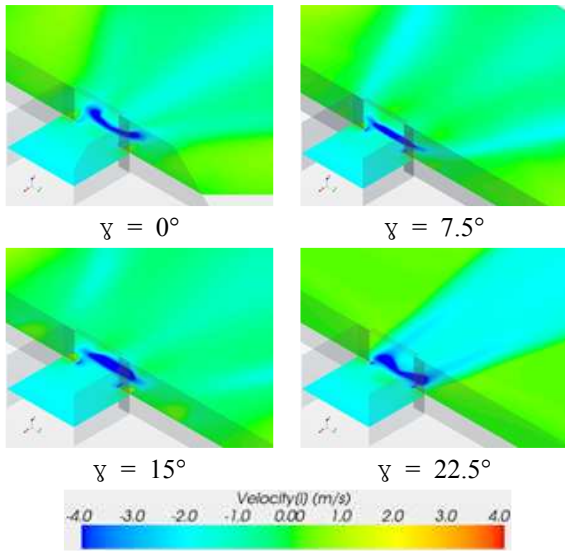


Fig. 9 Velocity fields about $X_l = 0$ m, $B/W_d = 1$ and 1.5 m flood plan for the variance of discharge angle

이격 거리가 없는 상태($X_l = 0$ m)에 비해 이격 되었을 때($X_l = 1.5$ m)의 경우 더 저하됨을 알 수 있다. 개구부 바로 상단에 에어커튼이 위치한 경우에는 외부 공기는 에어커튼의 젯의 모멘텀을 극복해야 침입이 가능하지만, 이격 거리 만큼 떨어져 있는 경우에는 에어커튼의 젯의 모멘텀을 극복하지 않고도 실내에서 에어커튼의 젯 좌우로 돌아서 유입될 수 있기 때문에 차단 효율이 저하되는 현상을 보였다.

또한 Fig. 11에서 이격 거리와 토출 각도간의 상관관계에 대해 젯의 회전을 통해 그 영향을 파악할 수 있다. 토출구 폭비가 같은 경우 이격 거리가 없을 때 토출 각도의 영향을 크게 받지 않고 에어커튼의 젯이 외부 침기를 차단하는 모습을 보인다. 그러나 이격 거리가 존재하는 경우 각도가 작으면 ($\gamma = 0^\circ$) 젯 하단으로 외부 침기가 침투하며 오히려 젯이 침기를 실내로 유도하는 현상을 보인다. 이 경우 토출 각도가 15° 에 가까울수록 차단 성능이 약간 향상되는 현상을 보이는데, 같은 토출 유량이어도 에어커튼의 젯 모멘텀이 작용하는 면적을 증가시킴으로써 에어커튼을 우회하여 침입하는 외부 공기에 대한 차단 효과를 증대시킬 수 있음을 의미한다. 지금까지의 결과를 정리해보면 에어커튼의 토출구 폭이 작은 경우 에어커튼의 젯의 모멘텀을 피해 내부로 유입되는 유량이 분명하게 나타남을 알 수 있었으며 침기량이 토출 폭비가 작은 0.875인 경우

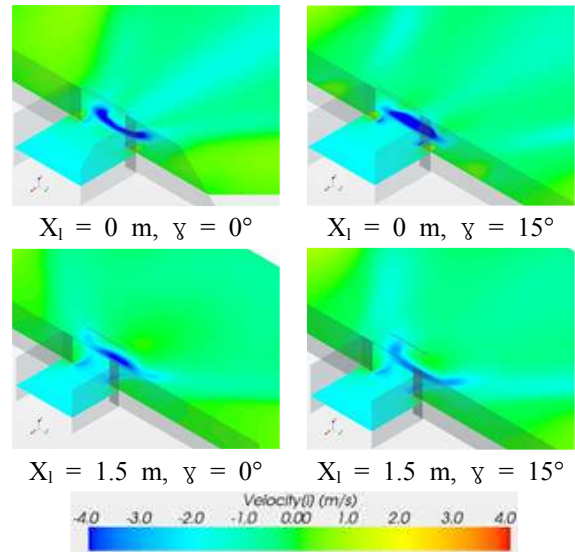


Fig. 10 Velocity fields about $B/W_d = 1$ and 1.5 m flood plan for the variance of distance from the opening

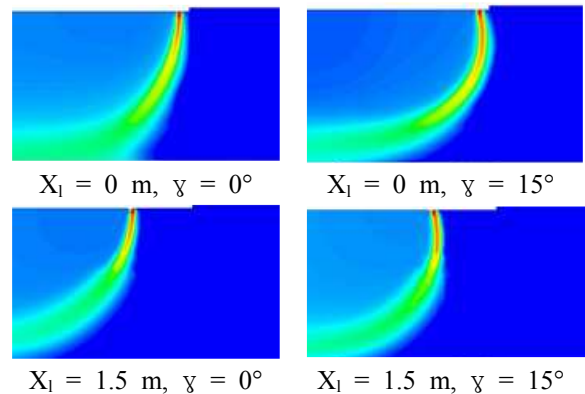


Fig. 11 The cross-section on infiltration status about $B/W_d = 1$ at the door center line

약 $17.94 \text{ m}^3/\text{s}$ 이나, 토출 폭비가 1.05인 경우에는 $15.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 토출 폭비의 변화로 약 15.56 % 침기량을 줄일 수 있다. 에어커튼 설계 변수에 따른 차단 효율에 대한 정량적인 평가를 Fig. 12, 13, 14에서 나타내었다. Fig. 12에서는 이격 거리가 없는 상태, 즉 개구부 바로 상단에 에어커튼이 설치된 경우에 대한 차단 효율을 토출 각도별로 나타낸 그림이다. 각 기호에 대해서는 그래프에 설명되어 있다. 차단 효율은 토출구 폭비에 비례하며, 개구부 문폭보다 토출구 폭비가 더 큰 경우에도 차단 효율이 증가함을 보였다.

토출 각도가 15° 를 넘는 경우에는 차단 효율이 급격히 감소하는데 이는 토출구 폭비에 상관없이 차단 효과가 저하됨을 보인다. 이는 Fig. 13에서도 같은 현상을 보인다. Fig. 13에서는 이격 거리

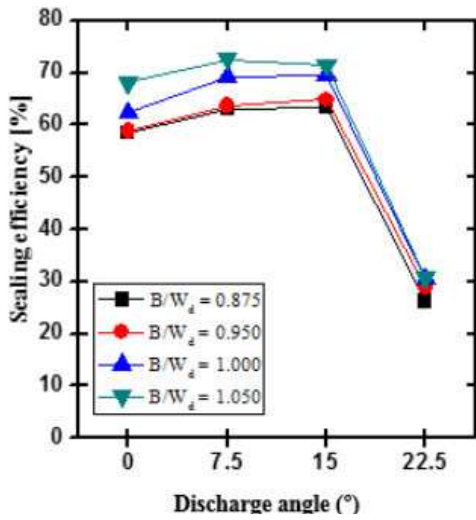


Fig. 12 Sealing efficiency for various discharge angle about $X_1 = 0$ m

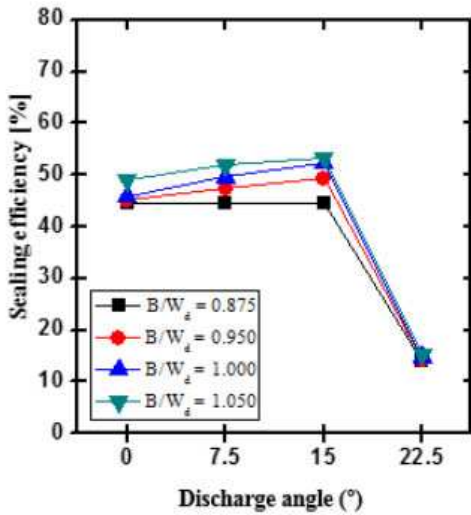


Fig. 13 Sealing efficiency for various discharge angle about $X_1 = 1.5$ m

가 1.5 m 존재하는 경우에 대한 차단 효율을 보이는데, 이격 거리가 없는 경우보다 차단 효율이 떨어짐을 보인다. 토출구 폭비가 작은 경우 ($B/W_d = 0.875$)를 제외하고는 토출 각도를 $7.5^\circ \sim 15^\circ$ 로 증가시켰을 때 차단 효율이 증가함을 보이며, 이를 통하여 공장에서 이격 거리를 두어 에어커튼을 설치하더라도 토출 각도를 통해 차단 효율을 증가시킬 수 있음을 의미한다. 즉 일반적인 에어커튼의 설치 상황인 에어커튼 토출구 폭비 $B/W_d = 1$, 토출 각도 $\gamma = 0^\circ$ 인 상황에서의 차단 효율은 45.9%이나 토출구 폭비를 $B/W_d = 1.05$ 로 증가시키고 토출 각도를 $\gamma = 15^\circ$ 로 함으로써 차단 효율을 53.2%로 기존대비 13.7%의 차단 효율 향상을 기대할 수 있음을 의미한다. 이

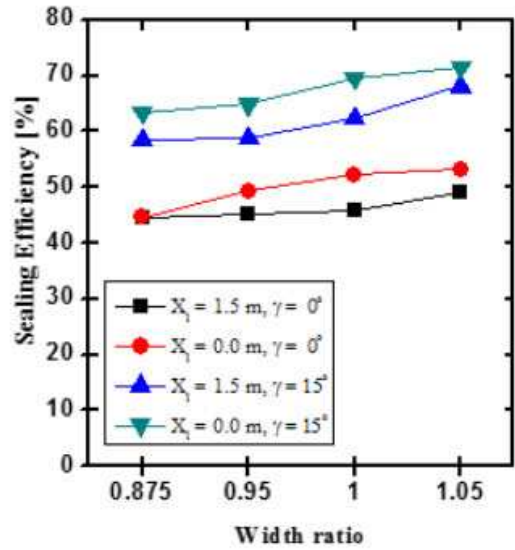


Fig. 14 Sealing efficiency for the variance of width ratio from opening

는 Fig. 14에서 에어커튼의 토출구 폭비가 증가함에 따라 차단 효율도 증가함을 대표적인 케이스에 대해 보여주고 있으며, 이격 거리가 없이 개구부에서 에어커튼이 가까울수록 차단 효율이 높음을 보인다. 그리고, 토출 각도에 따라서도 기존 연구에서 밝혀진 대로 토출 각도가 약 $7.5^\circ \sim 15^\circ$ 방향으로 토출하는 하는 것이 차단 효율을 증가시키는 요인으로 작용되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

대형 공장에서 사용되는 산업용 에어커튼의 경우 일반적인 상가나 빌딩 입구에서 설치되는 에어커튼과는 다른 설계 변수인 이격 거리와 토출구 폭을 지니고 있으며, 이에 대해 기존에 연구된 토출 각도와와의 상관관계를 통해 차단 효율이 변화하는 현상과 그 원인에 대해 연구하였으며, 그로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 에어커튼은 일반적으로 개구부나 문에서 가까운 곳에 설치해야 차단 성능이 보장되며, 본 연구에서도 평균적인 차단 효율이 개구부 상단에 에어커튼이 설치된 경우 1.5 m 이격해서 설치한 경우보다 평균 25.8%의 차단 효율의 증가를 보인다.

(2) 개구부 폭에 대한 에어커튼의 토출구 폭비를 증가함으로써 에어커튼의 차단 효과를 향상시킬 수 있다. 특히 토출구 폭이 개구부 폭보다 5% 더 긴 경우에 이격 거리에 따라 약 1.7 ~ 2.8% 정도의 차단 효율의 향상을 기대할 수 있다.

(3) 에어커튼의 토출 각도에 대해서는 기존의 연구 결과와 동일한 결과를 얻었다. 토출 각도가 0°일 때에 비해 7.5° ~ 15°의 각도를 주어 토출했을 때의 차단 효율이 이격 거리에 따라 4.6 ~ 7.7% 정도 향상되었다.

(4) 에어커튼은 개구부 상단부에 위치하는 것이 가장 효과적이나 부득이하게 개구부로부터 에어커튼의 이격 거리가 1.5 m 존재할 때 토출 각도를 15°, 토출구 폭비를 1.05로 에어커튼이 토출되는 경우 토출각도가 없고 ($\gamma = 0^\circ$), 토출구 폭비가 1인 일반적인 상황보다 차단 효율을 13.7% 향상시킬 수 있다.

후 기

이 논문은 2014년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Jeong, S. Y., 1993, "Ventilation System for Large Factories," *Journal of the SAREK.*, Vol. 22, No. 2, pp. 135~144.
- (2) Cha, S. J., 1989, "Heating and Ventilating for Improving Large Factory's Indoor Condition," *Journal of the SAREK.*, Vol. 18, No. 3, pp. 206~219.
- (3) Choi, D.-W., Eum, H.-S., Yoon, J.-I., Choi, K.-H., Agung, B. and Yoo, J.-K., 2013, "Research on the Effective Energy Conservation in the Cold Storage Imbedded with Air Curtain System," *Proceedings of the Korean Solar Energy Society spring annual conference*, Vol. 33, No. 1, pp. 171~175.
- (4) Joe, M.-J., Song, S.-Y. and Lim, J.-H., 2012, "A Study on the Air-tightness Criteria and Performance Improvement Methods of Domestic Curtain-wall Systems," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 28, No. 3, pp. 251~260.
- (5) Costa, J. J., Oliveira, L. A. and Silva, M. C. G., 2006, "Energy Savings by Aerodynamic Sealing with a Downward-blowing Plane Air Curtain—A Numerical Approach," *Energy and Buildings*, Vol. 38, pp. 1182~1193.
- (6) Sung, S.-K., 2010, "Performance Variation of the Air Curtain for Various Discharge Angles in Feating Space," *Journal of the SAREK.*, Vol. 22, No. 3, pp. 57~63.
- (7) Foster, A. M., Swain, M. J., Barrett, R., D'Agaro, P. and James, S. J., 2006, "Effectiveness and Optimum Jet Velocity for a Plane Jet Air Curtain Used to Restrict Cold Room Infiltration," *International journal of refrigeration*, Vol. 29, pp. 692~699.
- (8) Foster, A. M., Swain, M. J., Barrett, R. and D'Agaro, P. 2007, "Three-dimensional Effects of an Air Curtain Used to Restrict Cold Room Infiltration," *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 31, pp. 1109~1123.
- (9) ASHRAE, 1992, "Cooling and Heating Load Calculation Manual," 2nd ed., *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Inc.*, Atlanta, GA.
- (10) Janssen, W. J., Pearman, A. N. and Hill, T. J., 1979, "Calculating Infiltration: An Examination of Handbook Model," *ASHRAE Transactions*, Vol. 86, Pt. 2.
- (11) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill, New York.
- (12) Myong, H. K. and Kasagi, N., 1990, "A New Approach to the Improvement of the k- ϵ turbulence Model for Wall-bounded Shear Flows," *International Journal of JSME (B)*, Vol. 33, No. 1, pp. 63~72.
- (13) Siren, K., 2003, "Technical Dimensioning of a Vertically Upwards Blowing Air Curtain - Part I," *Energy and Building*, Vol. 35, pp. 681~695.