

외부바람의 영향을 고려한 난방공간에서의 하향토출 에어커튼의 성능

성 순 경[†]

경원대학교 건축설비공학과

Performance of Downward-blowing Air Curtain in Heating Space Considering External Wind Condition

Sun-Kyung Sung[†]

Department of Building equipment System Engineering, Kyungwon University, Sunghnam, 463-829, Korea

(Received May 18, 2009; revision received July 2, 2009)

ABSTRACT : Air curtains are widely used for gates of shopping mall, warehouse, cold stores and refrigerated display cabinets. The purpose of the air curtain is to reduce the infiltration of outdoor air and heat loss from the air conditioning space to ambient air. Design data for the air curtain given by previous researchers do not mention the influence of wind speed. Thus, this paper presents a performance of single jet air curtain in heating space when the wind blows toward the opening space of the building. A numerical simulation is used to study the influence of various parameters on the efficiency of the downward-blowing air curtain device which is installed inside of the wall above the door. The performance of the air curtain is evaluated by sealing efficiency which provides the assessment of the energy savings. A new safety factor is also proposed for determination of air curtain jet velocity under the various wind conditions.

Key words : Air curtain(에어커튼), Air curtain jet velocity(에어커튼 제트속도), Wind speed (풍속), Downward-blowing(하향토출), Sealing efficiency(차단효율)

———— 기 호 설 명 ————

b_o : 에어커튼 제트슬롯의 폭 [m]
 E : 에어커튼의 차단효율 [%]
 h : 엔탈피 [J/kg]
 H : 개구부의 높이 [m]
 p : 압력 [Pa]
 Q : 풍량 [m³]

T : 온도 [K]
 Z : 바닥으로부터 높이 [m]
 그리스 문자
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 μ : 절대점성 계수 [kg/(m · s)]

———— 하첨자 ————

[†] Corresponding author

Tel. : +82-31-750-5883; fax : +82-31-750-5348
 E-mail address : sksung@kyungwon.ac.kr

a : 에어커튼이 있는 경우
 b : 에어커튼이 없는 경우

c : 실외
 w : 실내
 o : 제트노즐의 출구

1. 서 론

겨울철에 공장이나 대형 판매시설 등 사람이나 장비들의 출입이 빈번한 곳에서 출입문을 열고 닫는 경우에 열려 있는 상태로 있는 경우가 많으므로 바람이나 연돌현상 등으로 인한 실내외 압력차의 발생으로 많은 양의 차가운 외부 공기가 실내로 들어오게 됨에 따라 난방부하가 증가하고, 열에너지의 손실이 크게 발생한다. 최근 에너지 절약의 요구가 높아짐에 따라 외기의 침입을 차단하는 장치가 필요하게 되어 공기의 차단막을 형성하는 에어커튼 장치를 설치함으로써 외기의 실내 유입을 차단하는 방법을 이용하고 있다. 에어커튼은 새로운 기술이 아니라 오랫동안 이용되어 왔으며, 냉장창고, 냉장보관용 전시용 캐비닛, 공장의 작업장, 산업현장의 각 곳에서 이용되고 있다.

에어커튼은 사용하는 장소에 따라 설계의 조건이 다르게 된다. 예를 들어 공장이나 창고와 같이 차량 등이 출입하는 곳의 경우에는 에어커튼 제트의 두께는 작게 하고 기류속도를 크게 할 수 있지만 공공건물, 백화점, 그리고 대형 판매장과 같이 보행자들이 출입하는 경우에는 고속의 제트기류를 이용할 수 없으므로 기류 두께를 60~90 센티미터 정도까지 크게 하여 에어커튼의 차단효과를 유지할 수 있게 하기도 한다.

에어커튼의 종류로는 순환형과 비순환형이 있다. 순환형은 공급된 공기를 다시 흡입하여 재순환하는 방식이고, 비순환형은 토출 공기만을 이용하는 방식이다. 그리고 토출기류의 방향에 따라 하향형과 상향형 그리고 수평형이 있다. 일반적으로 많이 이용하는 방식은 비순환형으로 본 논문에서도 이를 기준으로 하였다.

에어커튼의 성능을 결정하는 중요 요소로는 개구부 즉 출입구의 높이, 에어커튼 슬롯의 폭과 토출 풍속, 실내외 온도차 등이며, 설치공간의 기밀 상태, 환기설비에서 급기와 배기의 풍량의 차이로 인한 차압의 발생, 바람에 의하여 형성되는 풍압에 따라 차단효과는 큰 영향을 받는다. 에어커튼

의 차단효율에 대한 측정 자료를 보면 냉동창고에 설치된 경우 설치방법에 따라 0.44~0.78로 큰 차이를 나타내고 있다.⁽¹⁾ 차단효율 1의 값은 에어커튼이 없는 경우에 침입하는 외기량에 대하여 설치 후 차단되는 외기량의 비를 의미한다. 정해진 풍량과 고정된 노즐의 각도에 따라 작동하는 에어커튼의 성능은 시간에 따라 변화하는 출입구의 여러 가지 조건을 만족시키기에는 부족하므로 과도한 용량을 선정하게 되어 열손실과 운전에너지의 증대를 가져 오게 되므로 가변풍량형 에어커튼⁽²⁾의 필요성이 대두되기도 한다. 한편 에어커튼에 대한 기본적인 개념과 설계자료를 정립한 Hayes와 Stoecker⁽³⁾가 제안한 설계자료는 바람이 없고 잘 밀폐된 공간에 대한 제한적인 조건일 경우에 대한 것이므로 본 논문에서는 바람의 영향을 받는 경우에 에어커튼의 규격을 어떻게 결정하여야 하는가에 대하여 살펴보았다.

2. 대상과 성능해석 모델

2.1 대상 건물

에어커튼이 설치된 대상 건물의 가로, 세로, 높이는 4m×4m×3m이고, 개구부는 폭 1.8m, 높이 2.0m인 경우를 선정하였다. 에어커튼은 Fig. 1과 같이 개구부 안쪽 바로 위에 설치하였고, 에어커튼의 길이는 개구부 폭과 같은 1.8m를 선정하였으며, 슬롯의 폭은 일반적으로 많이 생산되고 있는 싱글형의 30mm로 하였다. 에어커튼은 실내 공기를 흡입하고 가열 후 20℃의 상태로 개구부 위에서 수직 하향으로 토출되도록 하였다.

실내에는 난방을 위한 전공기 방식의 저속 급기구 2개소와 환기구 2개소를 두었으며, 급기구의 공급공기 온도는 35℃로 하였다.

바람에 의한 영향을 고려하기 위하여 건물 외부에서 불어오는 바람은 온도 0℃, 고도 10m에서의 기준풍속을 기준으로 하고, 지면으로부터 높이에 따라 변화하는 풍속 U [m/s]는 식(1)을 적용하였다.

$$U = U_{\infty} (Z/Z_{\infty})^n \quad (1)$$

여기에서 U_{∞} 는 고도 10m에서의 기준풍속[m/s], Z 는 지면으로부터의 높이[m], Z_{∞} 는 지면으

로 부터의 기준 높이 10[m]이고, 지수 n 은 저층형 시가지를 기준으로 1/3을 선정하였다.⁽⁴⁾

2.2 성능해석

건물에서 개구부의 안과 밖의 온도차가 있을 때에 연돌효과에 의한 출입구 부분에서의 압력차 Δp_{sc} 는 식(2)와 같이 발생하며 Fig. 1에서와 같이 위에서 아래로 직선적으로 변화한다.

$$\Delta p_{sc}(Z) = (\rho_c - \rho_w)g(Z - Z_n) \quad (2)$$

난방실의 경우 실내온도가 외기온도보다 높으므로 출입구 아래 부분의 압력은 출입구 위의 부분보다 낮게 되어 체트슬롯에서의 기류가 실 안 쪽으로 굽어지게 된다. 건물 내부에서 누설이 없는 경우에는 압력차이가 없는 중성대 높이 Z_n 은 개구부의 중간 높이에서 일어난다. 또한 에어커튼을 설치한 경우에는 공기를 흡인하여 토출하게 되어 압력의 변화를 일으키고, 외부에서 불어오는 바람에 의한 풍압이나 실내 환기설비의 급배기 량의 차이 등으로 인한 압력의 변화가 영향을 주게 된다. 이때 바닥으로부터 어느 높이에서의 압력차 Δp_s 는 식(3)과 같다. 이때 압력의 차이가 없는 중성대의 높이는 식(4)와 같으며, 바람에 의한 풍압은 식(5)와 같다.

$$\Delta p_s(Z) = p_a + p_c - p_{ws} - \Delta p_{sc}(Z) = (\rho_c - \rho_w)gZ + (p_a + p_r - p_{ws}) \quad (3)$$

$$Z_n = -\frac{p_a + p_r - p_{ws}}{(\rho_c - \rho_w)g} \quad (4)$$

$$\Delta p_{ws} = \frac{1}{2} C_p \rho_c U^2 \quad (5)$$

여기서 p_a 는 에어커튼에 의한 압력, p_r 는 급배기 장치로 인한 압력, p_{ws} 는 바람에 의한 풍압, C_p 는 건물의 형상과 방향에 따른 계수이며 -1에서 1의 값을 가진다. 본 연구에서는 정면으로부터 불어오는 경우에 대한 경우로 제한하였다.

건물의 개구부를 통하여 출입하는 외기의 양을 알기 위하여 에어커튼이 설치된 검사체적에 에너

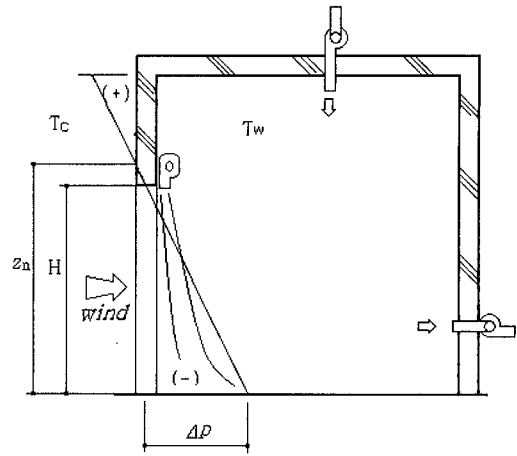


Fig. 1 Vertical elevation of the room and air curtain.

지 보존법칙과 연속방정식을 이용하여 계산하였다. 에어커튼과 풍압에 의하여 영향을 받는 건물 내의 작용압력은 작은 값이므로 실내공기를 비압축성으로 고려하면 개구부를 통하여 들어오는 공기와 나가는 공기의 체적유량은 같으므로 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{inmfilt} + \dot{Q}_{exfilt} + \sum \dot{Q}_s + \sum \dot{Q}_r = 0 \quad (6)$$

여기서 $\dot{Q}_{inmfilt}$ 는 외부로부터 들어오는 침입외기의 양, \dot{Q}_{exfilt} 침입외기에 해당하는 외부로 빠져나가는 실내공기의 양, $\sum \dot{Q}_s$ 는 실내 난방을 위하여 공급되는 공기의 양 그리고 $\sum \dot{Q}_r$ 은 실내에서 되돌아 나가는 환기의 양을 나타낸다.

에어커튼의 차단효율은 에어커튼이 없을 때 침입하는 외기량에 대하여 에어커튼을 설치한 후에 차단되는 외기량에 대한 비로서 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{\dot{Q}_b - \dot{Q}_a}{\dot{Q}_b} \quad (7)$$

Hayes와 Stoecker⁽³⁾는 에어커튼을 설계하기 위한 토출공기의 속도를 구하기 위하여 아래와 같은 식(8)을 제안하였다. 이 식은 에어커튼 양쪽의 온도차로 인하여 발생하는 연돌효과에 대하여 가

로지르는 힘인 에어커튼의 토출공기 운동량의 비를 나타낸 힘계수 D_m 으로 나타내고 있다.

$$D_m = \frac{b_o u_o^2}{gH^2 \left(\frac{T_o}{T_c} - \frac{T_o}{T_w} \right)} = \frac{\rho_o b_o u_o^2}{gH^2 (\rho_c - \rho_w)} \quad (8)$$

여기서 u_o 는 에어커튼의 토출속도[m/s], H 는 에어커튼의 공기 출구높이[m], T_o 는 제트출구 온도[K]이다. 에어커튼이 안정된 기능을 발휘하기 위하여 에어커튼의 제트 모멘텀이 최소 힘계수로부터 구해진 최소 모멘텀보다 커야한다. 만약 이 모멘텀보다 작으면 중간에서 휘어짐으로 인하여 에어커튼의 차단 기능을 상실하게 된다.

위의 식을 이용하여 대상 건물의 개구부에 대하여 바람이 없는 경우 에어커튼의 최소 토출풍속을 구하면 노즐의 토출각도 0도일 때 3.7 m/s로 계산되었다. 여기에 안전계수를 곱하여 설계 토출풍속을 구해보면 5.2~7.4 m/s가 된다. 이때 안전계수는 이론적으로 구한 값에 제작에 필요한 설계풍속을 구하기 위하여 안전성을 고려한 값으로 일반적으로 1.4~2정도이다. 앞에서 구한 에어커튼의 최소 토출풍속은 실내가 잘 밀폐되고 바람이나 다른 요인에 의한 영향이 없는 난방실에 대한 값이므로 바람의 영향을 받는 경우에는 별도의 안전계수를 고려하여 설계 토출풍속을 구해야 한다.

2.3 해석 모델

에어커튼의 성능을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 형상으로 구성하였다. 이때 바람에 의한 영향을 고려하기 위하여 가로, 세로, 높이가 12 m×10 m×6 m인 외부 공간을 구성하고, 외부 공간 안에 대상건물을 설치하였으며, 바람은 Fig. 2의 왼쪽에서 건물을 향하여 수직으로 불어오도록 하고, 오른쪽으로 유동하도록 하였다. 해석은 3차원 수치해석 방법으로 약 220만 개의 셀로 이루어진 비정렬 격자를 이용하였고, 정상상태로 계산하였으며, SIMPLE방법과 k- ϵ 난류모델을 사용하였다. 이때 에어커튼이 설치된 개구부 주변과 급기구, 환기구 주변은 정밀한 해석을 위하여 조밀한 격자로 구성하였다. 이때 건물로 인한 공기의 유동 형태가 가능한 영향을 적게 받을 수 있도록 건물

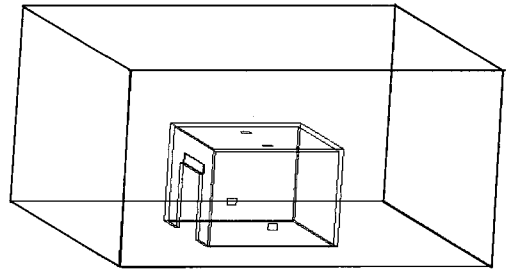


Fig. 2 Geometry of the building with air curtain.

주변의 공간을 최대한 확보하도록 하였다.

에어커튼의 유동과 성능에 대한 현상을 해석하기 위한 지배방정식은 식(9)~(11)과 같은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_M \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_j \rho h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} k \frac{\partial T}{\partial x_j} + S_E \quad (11)$$

위 식에서 u_i 는 속도성분, p 는 압력, T 는 온도, S_M 은 운동량 생성항, S_E 는 에너지 생성항이다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 에어커튼 토출공기의 회절

건물 실내 쪽에 에어커튼을 설치하게 되면 에어커튼은 실내 공기를 유인하여 흡인하고 토출구를 통하여 토출된 공기가 개구부 근처 바닥면에 충돌하게 되면서 일부의 공기는 실외 쪽으로 나가게 되어 실내의 압력이 내려가는 현상이 일어난다. 또한 난방실에서는 실내외 온도차로 인한 연돌현상으로 개구부의 하부는 대기압력보다 낮게 되어 토출공기의 기류를 실내 쪽으로 회절시키게 된다. 이는 Hayes와 Stoecker⁽³⁾가 연구한 결과와 Luis P.C et al.⁽⁵⁾이 연구한 결과를 보면 실내에 에어커튼을 설치한 경우 토출기류가 실내 쪽으로 회절하는 현상을 잘 나타내고 있다. 하지

만 이는 바람의 영향이 없고 잘 밀폐된 실에 대한 제한적인 경우이다. 건물 외부에서 바람이 불어오는 경우에는 건물의 개구부를 통하여 실내의 압력을 변화시키게 된다. 바람의 풍속은 시간에 따라 빈번하게 변화하며 요동치는 양상을 가지고 있다. 따라서 실내공간에 대하여 작용하는 풍압은 시간에 따라 계속 변화하게 되고, 에어커튼의 기류는 바람으로 인하여 흔들리게 되어 외기의 침입 현상이 증가하게 된다. Fig. 3은 에어커튼 슬롯의 토출속도 6m/s, 기준풍속 10m/s일 때 건물 개구부 부근의 중심 횡 단면에서의 속도 벡터를 보여주며 개구부에서 실내 쪽으로 심하게 회절되는 현상을 볼 수 있다.

M. Havet et al.⁽⁶⁾이 에어커튼에 대한 실험 연구결과를 통하여 외부유동에 의한 영향을 확인한 결과 제트기류가 바닥부분에 충돌하는 아래 부분에서는 외부에서 불어오는 공기가 하향 제트기류와 만나면서 빠르게 재순환하며 바깥 방향으로 흘러나가는 유동형태를 보여주고 있어 Fig. 3의 해석결과와 일치하는 현상을 나타내고 있다.

바람에 대한 영향을 고려한 결과 Fig. 4와 같이 에어커튼의 기류축이 바람의 속도에 따라 회절되는 양상이 달라지는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 제트속도 10 m/s일 때 바람속도에 따라 회절되는 기류 중심축의 변화를 개구부 위에서부터의 높이 Z_c 와 설치된 에어커튼의 토출노즐의 중심으로부터 편심된 거리 x_s 를 제트슬롯의 폭 b_o 로 나눈 무차원 값으로 나타낸 선도이다. 기준 풍속이 5m/s, 10m/s, 15m/s로 높아질 때 바람이 없는 경우에 비하여 약 20%, 50%, 90% 정도 더

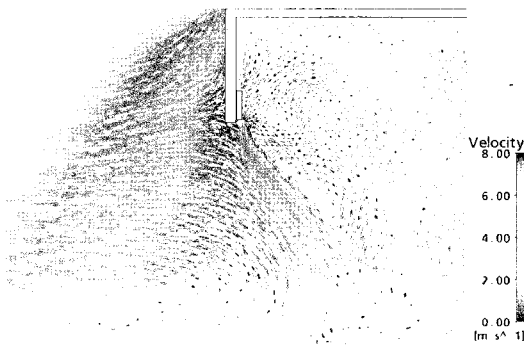


Fig. 3 Velocity vector for the jet velocity of 6 m/s at the vertical section(wind speed 10 m/s).

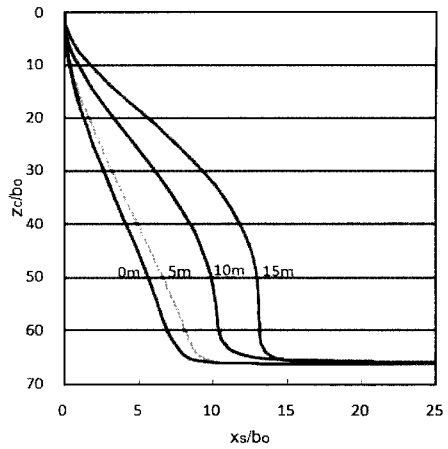


Fig. 4 Trajectory of the air flow in various wind speeds(jet velocity 10 m/s).

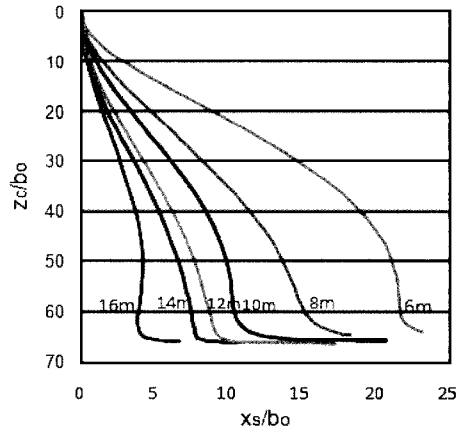


Fig. 5 Trajectory of the air flow in various jet velocities(wind speed 10 m/s).

회절되는 것으로 나타났다. J. J. Costa et al.⁽⁷⁾이 연구한 결과에 따르면 바람이 없는 조건에서 높이가 2m, b_o 가 45mm이고 제트슬롯의 속도가 10 m/s인 경우 x_s/b_o 가 5.8을 나타내고 있다. Fig. 4에서는 제트노즐의 속도가 10 m/s일 때 7.8로 회절현상이 더 크게 나타나고 있으나 이는 제트슬롯의 폭이 1/3 작은 것을 고려하면 유사한 결과가 나온 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 기준풍속 10 m/s일 때 제트슬롯에서의 토출 공기속도 변화에 따라 회절되는 영향을 나타낸 것으로 16 m/s와 비교하여 14 m/s, 12 m/s, 10 m/s, 8 m/s, 6 m/s일 때의 회절되는 값이 약 2

배, 2.5배, 2.75배, 4배, 5.5배 정도 되는 것으로 나타났다. 이는 제트 모멘텀이 속도 제곱에 비례하므로 토출속도가 낮아지면 회절현상이 심해짐을 볼 수 있다. 이때 토출속도 6m/s일 때와 같이 기류의 중심축이 실 안으로 깊이 들어오게 되면 Fig. 6과 같이 개구부의 양쪽 측면으로 외기의 침입현상이 크게 일어남을 알 수 있다. Fig. 7은 에어커튼의 토출속도가 10 m/s인 경우 바람이 없을 때 침입하는 외기량 Q_{a1} 에 대하여 바람의 속도가 증가할 때 침입하는 외기량 Q_{a2} 의 비를 나타내며, 5m/s일 때 1.5배, 10m/s일 때 1.7배, 15m/s일 때 2.6배 정도로 크게 증가함을 알 수 있다.

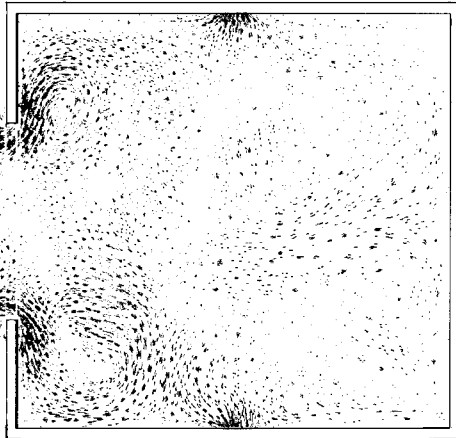


Fig. 6 Velocity vector for the jet velocity of 6 m/s at the horizontal section above floor 0.6m(wind speed 10 m/s).

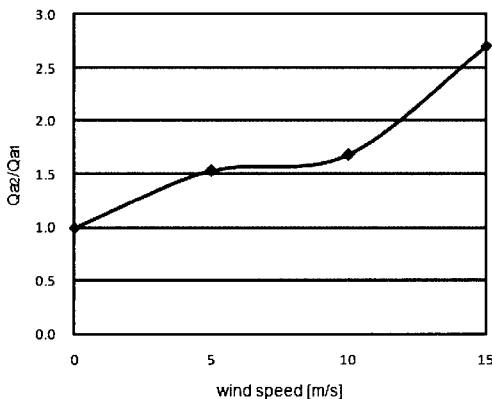


Fig. 7 Infiltration ratios of the room for the various wind speeds(air jet velocity 10 m/s).

3.2 에어커튼의 차단효율

Fig. 8은 기준풍속 5m/s, 10m/s일 때 에어커튼 제트슬롯의 토출속도별 차단효율 E 를 나타낸 것으로 기준풍속 10 m/s일 때 토출속도 6 m/s에서는 48%로 아주 낮은 성능이 나타나고, 10m/s일 때 70%로 가장 높게 나타났으며 더 높은 토출속도에서는 점차 낮아지는 것으로 나타났다.

그리고 기준풍속 5m/s일 때 토출속도 6m/s에서는 77%, 8m/s에서는 87%로 가장 높게 나타나고 그 이후는 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 토출속도가 너무 높아지면 회절현상은 줄어들으나 기류가 바닥에 충돌한 후 실외로 빠져나가는 양이 증가하면서 침입 외기량이 점차 증가하여 차단효율이 낮아지는 것으로 보인다. 여기에서 바람의 속도가 높아지면 차단효율을 높이기 위하여 토출속도를 더 높여야 하는 것으로 나타났다.

위 결과를 이용하여 기준풍속 5m/s, 10m/s일 때 에어커튼의 설계를 위한 제트슬롯의 토출속도로 각각 8 m/s, 10m/s를 선정하면 Hayes와 Stoecker⁽³⁾가 제안한 값의 각각 2.2, 2.7배가 되므로 안전계수는 바람이 없는 경우보다 더 높은 값을 선정하여야 함을 알 수 있다. 에어커튼의 차단성능은 바람의 풍속이 일정하지 않아 에어커튼의 막이 계속적으로 흔들리며 부분적으로 깨지므로 이 결과보다 더 낮아질 수 있고, 외기의 침입량이 늘어날 수 있으므로 앞에서 구해진 값 보다 좀 더 높은 값을 고려하여야 할 것으로 보인다. A. M. Foster. et al.⁽⁸⁾의 연구결과에 따르면 실내온도

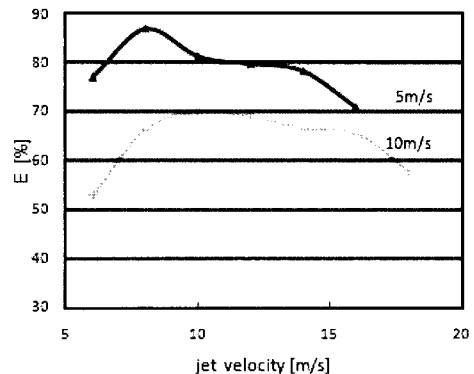


Fig. 8 Sealing efficiencies of the air curtain for various air jet velocities(wind speeds : 5 m/s, 10 m/s).

변화에 따라 차단성능에 미치는 영향은 난방 시 실내온도 20~26℃ 정도에서는 작으므로 이 영역에서의 실내온도변화에 따른 차단효율 변화는 무시할 수 있다.

4. 결 론

에어커튼의 규격을 결정할 때 제트스플릿의 토출 속도 선정은 매우 중요하며, 특히 바람의 영향을 고려해야 하는 경우가 있다. 여기서 외부 바람에 의한 영향을 고려한 에어커튼의 성능 변화에 대한 연구로 부터 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 바람의 영향이 없는 경우에 비하여 기준풍속이 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s일 때 에어커튼의 토출공기가 실 안 쪽으로 약 20%, 50%, 90% 정도 더 회절되는 것으로 나타났다.

(2) 에어커튼의 토출속도가 10 m/s일 때 풍속 변화에 따른 침입외기량의 변화는 바람이 없는 경우에 대비하여 5 m/s일 때 1.5배, 10 m/s일 때 1.7배, 15 m/s일 때 2.6배 정도로 크게 증가함을 알 수 있다.

(3) 기준풍속이 5 m/s, 10 m/s일 때 에어커튼의 토출풍속은 8 m/s, 10 m/s일 때 가장 높은 차단효율을 보여주고, 토출속도를 선정하기 위한 안전계수는 각각 2.2, 2.7이 구해졌으나 안전성을 고려하여 이보다 더 높은 값을 선정하는 것이 바람직하다.

후 기

이 연구는 2009년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

참고 문헌

1. Downing, C. C. and Meffert, W. A., 1993, Effectiveness of cold-storage door infiltration protective devices, Trans. Am. Soc. Heating, Refrigerating and Air Cond. Eng. Vol. 99, p. 356.
2. Kai Sire'n, 2003, Technical dimensioning of a vertically upwards-blowing air curtain-part II, Energy and Buildings, Vol. 35, pp. 697-705.
3. Hayes, F. C. and Stoecker, W. F., 1969, Design data for air curtains, ASHRAE Transactions, Vol. 75, pp. 168-179.
4. ASHRAE., 1985, ASHRAE Hand Book, Fundamentals, ASHRAE, pp. 14.1-14.5.
5. Luis P. C., Neto, M. C., Gameiro Silva and Jose J. Costa., 2006, On the use of infrared thermography in studies with air curtain devices, Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 1194-1199.
6. Havet, M., Rouaud, O., and Sollicec, C., 2003, Experimental investigations of an air curtain device subjected to external perturbations, Heat and Fluid Flow, Vol. 24, pp. 928-930.
7. Costa, J. J., Oliveira, L. A., and Silva, M. C. G., 2006, Energy saving by aerodynamic sealing with a downward-blowing plane air curtain-A numerical approach, Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 1182-1193.
8. Foster, A. M., Swain, M. J., Barret, R., and Agaro, P. D', 2007, Three-dimensional effects of an air curtain used to restrict cold room infiltration, Applied Mathematical Modelling, Vol. 31, pp. 1109-1123.