

난방공간에서 에어커튼의 토출각도 변화에 따른 성능 변화

성 순 경[†]

경원대학교 건축설비공학과

Performance Variation of the Air Curtain for Various Discharge Angles in Heating Space

Sun-Kyung Sung[†]

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

(Received October 19, 2009; revision received November 24, 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. The discharge angle of air curtain is very important as the sealing efficiency is affected by it. This paper presents a performance of single jet air curtain in heating space when the discharge angle of nozzle changes. 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 condition of discharge angle that has the highest sealing efficiency is proposed.

Key words: Single jet air curtain(단일 제트 에어커튼), Discharge angle(토출각도), 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 : 바닥으로 부터의 높이 [m]

μ : 절대점성 계수 [kg/(m·s)]

하첨자

a : 에어커튼이 있는 경우
 b : 에어커튼이 없는 경우
 c : 실외
 w : 실내
 o : 제트노즐의 출구

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m³]

1. 서 론

대형 판매시설이나 공장 등에는 사람이나 장비들의 출입이 빈번한 출입문이 설치되어 있으며 이를 열고 닫는 경우에 겨울철에 연돌현상 등으로 인한 실내외 압력차의 발생으로 많은 양의 차가운

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5883; fax: +82-31-750-5314

E-mail address: sksung@kyungwon.ac.kr

외부 공기가 실내로 들어오게 된다. 이에 따라 외기로 인한 열에너지의 손실이 발생하고 난방부하가 증가한다. 최근 에너지 절약에 대한 관심이 높아짐에 따라 외기의 침입을 차단하는 장치를 필요하게 되어 공기의 유동과 공기의 차단막을 형성하는 에어커튼 장치를 설치하여 이용하고 있다. 에어커튼은 새로운 기술이 아니라 오랫동안 이용되어 왔으며, 냉동 냉장창고, 냉장 보관용 전사용 캐비닛, 공장의 작업장, 산업현장의 출입구 등 여러 곳에서 이용되고 있다. 공장이나 창고와 같이 차량 등이 출입하는 곳의 경우에는 에어커튼 제트의 두께는 작게 하고 기류속도를 크게 하는 방법을 이용하여도 별로 문제는 없으나 보행자들이 출입하는 경우에는 고속의 제트기류를 이용할 경우 불편감을 느낄 수 있으므로 저속의 두꺼운 기류를 이용하기도 한다.

대부분의 에어커튼 공기 순환방식은 실내에서 공기를 흡입하고 개구부로 공기를 토출하는 방식의 비순환형으로 본 논문에서도 비순환형의 하향 토출방식을 기준으로 하였다.

에어커튼의 성능은 개구부의 높이, 제트 슬롯의 폭과 토출풍속, 실내외 온도차 등과 설치공간의 기밀 상태나 환기설비의 급배기의 풍량 차이로 인한 차압 등의 영향을 받으며, 노즐의 토출방향과 각도에 따라서도 영향을 받는다. 또한 외부 바람의 의하여도 커다란 영향을 받는다.⁽¹⁾ 에어커튼의 차단효율에 대한 측정 자료를 보면 냉동창고에 설치된 경우 설치방법에 따라 0.44~0.78로 큰 차이를 나타내고 있다.⁽²⁾ 차단효율 1의 값은 에어커튼이 없는 경우에 침입하는 외기량에 대하여 설치 후 차단되는 외기량의 비를 의미한다. 고정된 노즐과 풍속에 따라 작동하는 에어커튼의 성능은 출입구의 여러 가지 조건을 충족시키며 차단효과를 높이기에는 부족하여 많은 경우에 있어서 높은 풍속을 사용함에 따라 필요 이상의 열손실과 운전 비용의 증대를 가져오기도 한다. 한편 에어커튼에 대한 기본적인 개념과 설계 자료를 정립한 Hayes and Stoecker⁽³⁾가 제안한 설계자료는 바람이 없고 잘 밀폐된 공간에서 일부 각도에 대한 경우에 대한 것이므로 본 논문에서는 난방공간에서 토출각도 변화에 따라 차단효율과 기류상태의 변화에 대한 분석을 통하여 가장 효과적 조건에 대하여 살펴보았다.

2. 대상공간과 성능해석 모델

2.1 대상 공간

에어커튼을 설치하기 위한 대상 건물의 공간은 가로, 세로, 높이가 4m×4m×3m이고, 개구부 즉 출입구의 폭이 1.8m, 높이 2.0m인 경우로 하였다. 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.⁽¹⁾ 에어커튼에서 노즐의 토출각도는 출입구의 바깥 방향과 실 안쪽 방향으로 각각 7.5도, 15도인 경우와 수직하향인 5가지 경우로 하였다. 에어커튼으로 들어 온 실내공기는 20℃인 상태로 가열한 후 토출구를 통하여 나가도록 하였으며, 에어커튼 상부에 위치한 흡입구를 통하여 순환되도록 하였다.

대상건물의 실내는 난방 상태를 유지하고 에어커튼에 미치는 기류 영향을 최소화하기 위하여 전 공기 방식의 저속 급기구 2개소를 실 안쪽의 천정면에 설치하고, 환기구 2개소는 좌우측 벽면 아래에 두었으며, 급기구에서 나오는 공기는 35℃인 상태로 유지되도록 하였다. 건물의 외부조건은 0℃인 상태를 기준으로 하고, 바람의 영향은 없도록 하였다.

2.2 성능해석

대상건물에서 개구부의 안과 밖이 온도차가 있

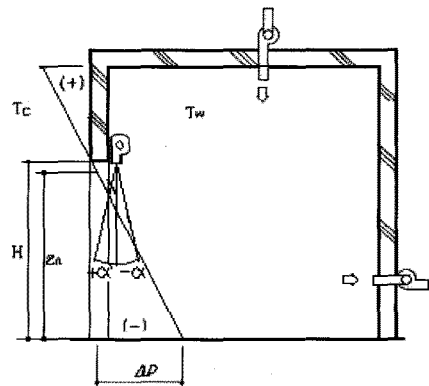


Fig. 1 Vertical elevation of the room and air curtain.

을 때 연돌효과에 의한 개구부에서의 압력차 Δp_{se} 는 식(1)과 같이 발생하며 위에서 아래로 선형적으로 변화한다.

$$\Delta p_{se}(Z) = (\rho_c - \rho_w)g(Z - Z_n) \quad (1)$$

여기서 Z_n [m]은 바닥에서 압력 차이가 없는 중성대까지의 높이이며, 건물 내부에서 누설이 없는 경우에 이 Z_n 은 개구부의 중간 높이에서 일어난다. 난방실의 경우 실내온도가 외기온도보다 높으므로 출입구 아래 부분의 압력은 출입구 위의 부분보다 낮게 된다. 또한 에어커튼이 설치된 위치에 따라 실내에 작용하는 압력은 다르게 되며, 실내 쪽에 설치한 경우에는 공기를 실내에서 흡인하여 토출하면서 기류의 일부는 바닥면에 충돌한 후 실 외부로 나가게 되어 실내에는 부압으로 작용하게 된다. 이에 기류조건에 따라 제트슬롯에서 토출된 주기류가 실 안 쪽으로 굽어지는 현상이 일어난다. 따라서 에어커튼의 차단효율은 실내의 온도차, 토출기류의 속도와 노즐의 토출방향에 영향을 받게 된다. 이 이외에도 바람에 의한 풍압이나 실내에 설치된 환기설비의 급배기 량의 차이 등이 있는 경우에는 이로 인한 압력 변화가 영향을 주게 되지만 본 연구에서는 바람이나 환기에 의한 영향이 없는 경우를 대상으로 하였다. 에어커튼이 작동하는 경우 바닥으로 부터 어느 높이에서의 압력차 Δp_s 는 에어커튼에 의하여 실내에 작용하는 압력이 p_a 이면 식(2)와 같으며, 이때 압력의 차이가 없는 중성대의 높이는 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta p_s(Z) &= p_a + \Delta p_{se}(Z) \\ &= p_a + (\rho_c - \rho_w)g(Z - \frac{H}{2}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z_n = -\frac{p_a}{(\rho_c - \rho_w)g} + \frac{H}{2} \quad (3)$$

위 식에서 에어커튼을 실내에 설치하는 경우에는 중성대의 높이가 개구부의 중간높이보다 높은 곳으로 이동되는 것을 알 수 있다.

건물의 개구부를 통하여 출입하는 외기의 양을 알기 위하여 에어커튼이 설치된 검사체적에 에너지 보존법칙과 연속방정식을 이용하여 계산하였다. 에어커튼에 의하여 영향을 받는 건물 내의 작

용압력은 작은 값이므로 실내공기를 비압축성으로 고려하면 개구부를 통하여 들어오는 공기와 나가는 공기의 체적유량은 같으므로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{infiltration} + \dot{Q}_{exfiltration} + \sum \dot{Q}_s + \sum \dot{Q}_r = 0 \quad (4)$$

여기서 $\dot{Q}_{infiltration}$ 는 외부로부터 들어오는 침입외기의 양, $\dot{Q}_{exfiltration}$ 침입외기에 상응하는 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(5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

Hayes and Stoecker⁽³⁾는 에어커튼을 설계하기 위한 토출공기의 속도를 구하기 위하여 아래와 같은 식(6)을 제안하였다. 이 식은 에어커튼 양쪽의 온도차로 인하여 발생하는 연돌효과에 대하여 가로지르는 힘인 에어커튼의 토출공기 운동량의 비를 나타낸 휨계수 D_m 으로 나타내고 있다.

$$D_m = \frac{b_o u_o^2}{gH^2(\frac{T_o}{T_c} - \frac{T_o}{T_w})} = \frac{\rho_o b_o u_o^2}{gH^2(\rho_c - \rho_w)} \quad (6)$$

여기서 u_o 는 에어커튼의 토출속도[m/s], H 는 에어커튼의 공기 출구높이[m], T_o 는 노즐의 출구 온도[K]이다. 에어커튼이 안정된 기능을 발휘하기 위하여 에어커튼의 제트 모멘텀이 최소 휨계수로부터 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 0도 일 때 3.7 m/s, 안 쪽 방향으로 토출되는 경우인 토출각도 -15도

일 때 3.5 m/s, 바깥 방향으로 토출되는 경우인 토출각도 +15도 일 때 4.1 m/s로 계산되었다. 여기에 안전계수를 곱하여 설계 토출풍속을 구해보면 4.9~5.7 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 경우에 대한 값이므로 여러 영향을 받는 경우에는 별도의 안전계수를 고려하여 적용하여야 한다.

2.3 해석 모델

에어커튼의 토출각도 변화에 따른 성능을 해석하기 위한 공간은 Fig. 2와 같은 형상으로 구성하였다. 이때 건물외부와외의 공기유동이 원활하게 이루어질 수 있도록 가로, 세로, 높이가 12m×10m×6m인 외부 공간을 구성하고, 이 공간 안에 대상 건물을 설치하였다. 해석은 3차원 수치해석 방법으로 약 412만 개의 셀과 77만 개의 노드로 이루

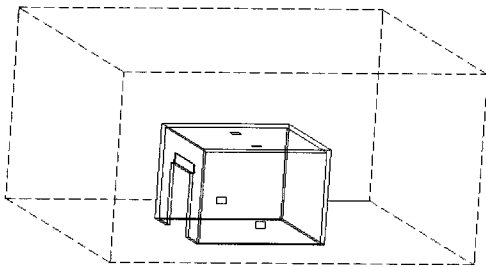


Fig. 2 Geometry of the building with air curtain.

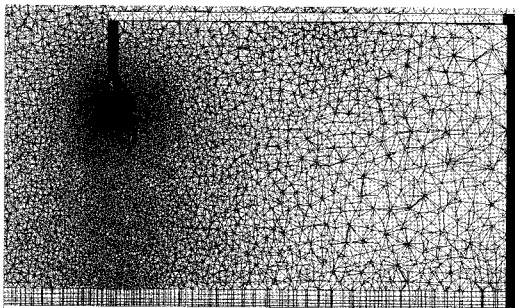


Fig. 3 Shape of the mesh around the Air curtain area.

어진 비정렬 격자를 이용하였고, 정상상태로 계산하였으며, SIMPLE 방법과 k- ϵ 난류모델을 사용하였다. 이때 에어커튼이 설치된 개구부 주변과 급기구, 환기구 그리고 난방을 위한 급기구, 환기구 주변은 정밀한 해석을 위하여 Fig. 3과 같이 조밀한 격자로 구성하였다. 또한 토출각도의 변화를 고려하기 위하여 각 토출각도에 대한 해석 모델을 적용하였다.

에어커튼의 유동과 성능에 대한 현상을 해석하기 위한 지배방정식은 식(7)~식(9)과 같은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_M \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_j \rho h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} k \frac{\partial T}{\partial x_j} + S_E \quad (9)$$

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 토출각도와 토출공기의 회절

난방을 하는 건물의 실내 쪽에 에어커튼을 설치하게 되면 에어커튼은 실내 공기를 유인하여 흡인하고 토출구를 통하여 아래 방향으로 토출하게 된다. 이때 토출된 공기는 노즐의 방향에 따라 유동방향이 다르게 되지만, 대부분 토출공기의 유동경로는 개구부 인근의 바닥면을 향하고 바닥면에 충돌하면서 실내와 실외 쪽으로 분류하게 된다. 이 때 실외 쪽으로 나가게 된 공기로 인하여 실내의 압력이 내려가는 현상이 일어난다. 또한 난방실에서는 실내외 온도차로 인한 연돌현상으로 개구부의 하부는 대기압력보다 낮게 되어 토출공기의 기류를 실내 쪽으로 회절시키게 된다. 이는 Hayes⁽³⁾가 연구한 결과와 Luis⁽⁴⁾ 등이 연구한 결과를 보면 실내에 에어커튼을 설치한 경우 토출기류가 실내 쪽으로 회절하는 현상을 잘 나타내고 있다. 이는 바람의 영향이 없고 잘 밀폐된 실에 대한 제한적인 경우이다. Fig. 3은 에어

커튼 슬롯에서 하향 수직 방향으로 토출속도 10 m/s일 때 건물의 개구부의 중앙에서 횡 단면에 대한 속도 벡터를 보여주고 있으며 개구부에서 실내 쪽으로 회절되는 현상을 볼 수 있다.

이때 에어커튼의 토출속도와 노즐의 각도에 따라 Fig. 5에서 Fig. 7과 같이 토출 기류축의 회절되는 양상이 달라지는 것을 볼 수 있다. 이 선도들은 회절되는 기류 중심축의 변화를 개구부 위의 에어커튼 토출 노즐에서 부터의 높이 Z_c 와 에어커튼의 토출 노즐의 중심으로부터 편심된 거리 x_s 를 제트슬롯의 폭 b_o 로 나눈 무차원 값으로 나타낸 선도이다.

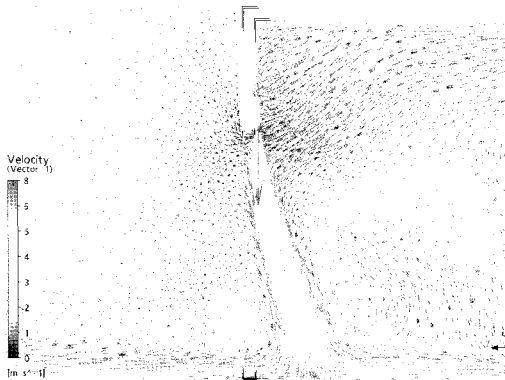


Fig. 4 Deflection of air curtain at doorway for the jet velocity of 10 m/s.

Fig. 5는 기준풍속 5 m/s일 때 제트슬롯의 토출각도에 따라 회절되는 영향을 나타낸 것으로 토출각도가 출입구의 바깥쪽으로 향한 경우에는 주기류의 방향이 토출각도보다 출입구 바깥을 향하고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 토출각도가 출입구 안쪽을 향한 경우에는 토출구 근처에서는 큰 모멘텀에 의하여 토출각도 방향으로 진행하다 아래로 갈수록 부압에 의한 영향이 작용하여 -7.5도인 경우 Z_c/b_o 가 50인 지점에서 x_c/b_o 가 -7.6 지점까지 바깥 방향으로 굽어 진 후 실내 쪽으로 회절하는 것을 볼 수 있으며, -15도인 경우에는 바깥 방향으로 좀 더 적게 굽어지는 현상을 볼 수 있다. 이와 같이 제트의 토출 각도 방향으로 기류가 계속 진행하지 못하는 것은 기류의 속도가 낮아 제트 모멘텀이 부족하여 개구부 상단에서 바깥쪽으로 작용하는 압력에 의하여 바깥쪽으로 밀려나간 후에 하단부에서는 실내 부압에 의하여 실내 쪽으로 회절되는 것으로 보인다. 수직인 경우에는 오히려 실내 쪽으로 크게 회절되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 토출풍속 7.5 m/s일 때의 경우로서 토출각도가 출입구의 바깥쪽으로 향한 경우에도 제트 모멘텀에 의하여 토출각도 방향으로 진행한 후 개구부 중간 높이 아래에서부터 에어커튼과 연돌효과에 의한 부압의 영향이 작용하기 시작하여 주기류의 하단이 실내 쪽으로 향하고 있는 것

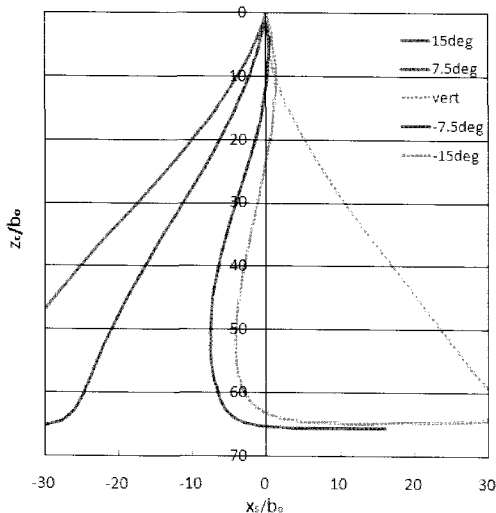


Fig. 5 Trajectory of the air flow for various discharge angles(jet velocity 5 m/s).

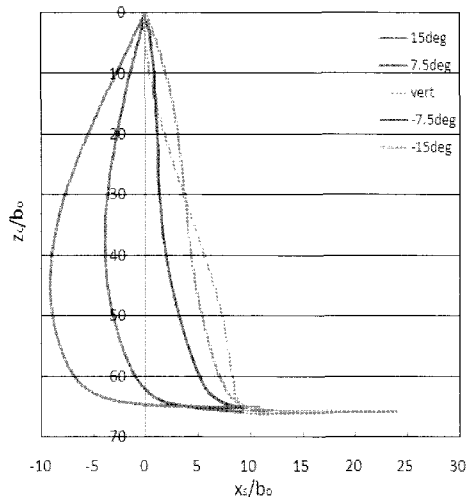


Fig. 6 Trajectory of the air flow for various discharge angles(jet velocity 7.5 m/s).

을 볼 수 있다. 토출각도가 실내를 향한 -7.5 도인 경우 주기류의 방향이 Z_c/b_o 가 10인 지점까지는 토출각도 방향으로 진행한 후 약간 바깥으로 회절하면서 하향한 후 Z_c/b_o 가 약 40인 지점에서부터 기류의 모멘텀 저하로 실내부압에 의한 영향을 받아 실내로 회절되는 것을 볼 수 있다. 토출각도가 -15 도인 경우에는 Z_c/b_o 가 50인 지점에서부터 회절된다. 토출방향이 수직인 경우에는 Z_c/b_o 가 10인 지점에서부터 실내 쪽으로 회절되는 것을 볼 수 있으나 토출속도 5m/s인 경우보다 수직 방향으로 진행되는 것은 토출기류속도가 갖는 모멘텀이 5m/s인 경우보다 크기 때문으로 보여 진다.

Fig. 7은 토출풍속 10m/s 일 때의 경우로 토출각도가 출입구의 바깥 쪽으로 향한 경우인 15도인 경우에도 x_s/b_o 가 -6.2 로 7.5m/s인 경우의 9.2보다 개구부 안쪽 방향으로 이동된 것을 볼 수 있다. 이는 토출속도가 높아짐에 따라 모멘텀이 커서 토출각도 방향으로 더 먼 곳 까지 진행한 후 주변 압력의 영향으로 실내를 향하고 있음을 볼 수 있다. 토출각도가 실내를 향한 -7.5 도와 -15 도인 경우에는 주기류의 방향이 토출각도 방향으로 직선적으로 유지된 후 바닥면 근처에서 실내 쪽으로 향하는 것을 알 수 있다.

Costa⁽⁵⁾ 등이 연구한 결과에 따르면 바람이 없는 조건에서 높이가 2m, b_o 가 45mm, 제트슬롯의 속도가 10m/s인 경우 x_s/b_o 가 5.8을 나타내고 있다. Fig. 7에서는 제트노즐의 속도가 10m/s일 때 7.8로 회절현상이 더 크게 나타나고 있으나 이는 제트슬롯의 폭이 1/3정도 작은 것을 고려하면 유사한 경향이 나온 것을 알 수 있다.

3.2 토출각도와 차단효율

Fig. 8은 토출풍속 5m/s, 7.5m/s, 10m/s일 때 에어커튼의 토출각도 변화에 따른 차단효율 $E(\%)$ 를 나타낸 것으로 토출풍속 5m/s이고 토출각도가 -7.5 도 일 때 82.3%의 가장 높은 차단 성능을 나타내고 있으며, 토출풍속 5m/s이고 토출각도가 15도일 때 31.2%의 가장 낮은 차단 성능을 보여 주고 있다. 이는 Hayes and Stoecker⁽³⁾의 연구결과에서 노즐의 토출방향이 난방공간을 향하는 것이 바닥과의 접촉점을 적게 파손하여 차단효과에 좋은 영향을 주는 것과 일치함을 알 수 있다. Foster et al⁽⁶⁻⁷⁾의 연구결과에 따르면 실내온도 20~26℃정

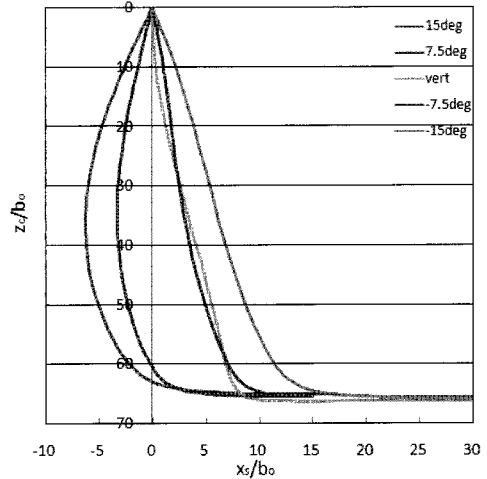


Fig. 7 Trajectory of the air flow for various discharge angles(jet velocity 10 m/s).

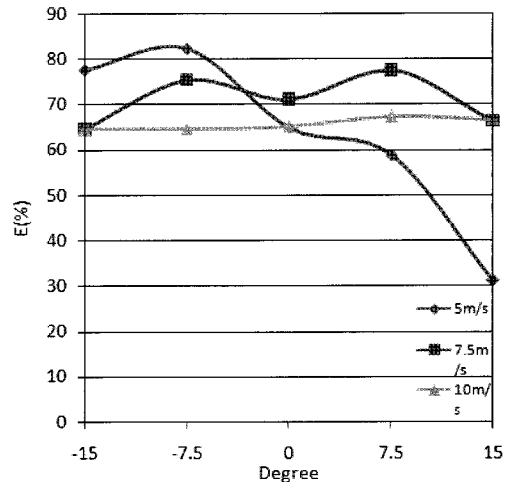


Fig. 8 Sealing efficiencies of the air curtain for various air jet velocities.

도에서는 온도변화에 따른 차단성능의 영향이 작으므로 실내온도 차이에 대한 차단효율 변화는 무시할 수 있다.

토출풍속이 5m/s인 경우 토출각도가 실내 방향에서 수직하향, 출입구 방향으로 7.5도, 15도와 같이 바깥을 향할수록 차단효율이 점차 크게 낮아지는 것을 알 수 있다.

토출풍속이 7.5m/s인 경우에는 토출각도가 -7.5 도에서 7.5도까지 70% 이상의 대체로 높은 차단효율을 나타내고 있지만 그 이상의 각도에서는 차

단효율이 크게 낮아지는 것을 알 수 있다.

토출풍속이 10 m/s인 경우에는 토출각도 변화가 변하여도 차단효율이 65% 전후에서 비슷하게 나타내고 있으므로 토출속도를 높이면 차단효율이 비슷하게 나타나지만 효율이 낮아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

에어커튼을 설치할 때 제트노즐의 토출방향과 토출속도 선정이 매우 중요하고, 설치효과인 차단효율에 크게 영향이 미치는 것을 알 수 있으며 본 연구를 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 에어커튼의 토출각도와 속도 변화에 따라 노즐에서 나오는 주기류의 회절 방향이 크게 다르게 나타나며, 특히 토출속도가 낮은 5 m/s의 경우 토출각도가 바깥 방향을 향한 7.5도, 15도 일 때 모멘텀이 낮아 완전히 출입구 바깥으로 향하여 차단효율이 크게 낮아짐을 알 수 있다.

(2) 에어커튼의 차단효율이 가장 좋은 토출속도와 각도는 5 m/s, -7.5도인 경우로 82.3%이며, 토출각도가 -7.5도인 경우에는 토출속도 변화에 관계없이 대체로 높은 차단효율을 나타낸다.

(3) 에어커튼을 설치하는 경우 토출속도를 높게 하면 토출각도에 관계없이 차단효율이 비슷하나 그 효율은 낮아짐을 알 수 있다.

참고문헌

1. Sung, S. K., 2009, Performance of downward-blowing air curtain in heating space consid-

ering external wind condition.
 2. Downing, C. C. and Meffert, W. A., 1993, Effectiveness of cold-storage door infiltration protective devices, *Trans. Am. Soc. Htg. Refrig. Air Cond. Eng.*, Vol. 99, p. 356.
 3. Hayes, F. C. and Stoecker, W. F., 1969, Design data for air curtains, *ASHRAE Transactons*, Vol. 75, pp. 168-179.
 4. 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.
 5. 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.
 6. Foster, A. M., Swain, M. J., Barrett, R., D'Agaro, P., 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.
 7. Foster, A. M., Swain, M. J., Barret, R. and D'Agaro, P., 2007, Three-dimensional effects of an air curtain used to restrict cold room infiltration, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 31, pp. 1109-1123.