

급기제트 조건에 따른 냉동용 전시케이스의 성능

성 순 경[†]

경원대학교 건축설비공학과

Performance of Refrigerated Display Cabinets in accordance with the Supply Air Jet Condition

Sun-Kyung Sung[†]

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

(Received September 5, 2010; revision received December 22, 2010)

ABSTRACT: Vertical open display cabinets are widely used in shopping mall, supermarkets, retail stores. Maintaining the temperature of foods in the display cabinet is vitally important to retailers to ensure optimal food quality and safety. The purpose of this study is to reduce the infiltration of air and heat loss from ambient space to display cabinet. The three-dimensional Computational Fluid Dynamics(CFD) simulation is used for the analysis of air flow patterns and temperature distribution in refrigerated display cabinets. Under several operating conditions which vary both the inner and outer jet velocities in the range from 0.3 to 1.1 m/s, simulations were carried out. This paper presents a performance of display cabinets with single jet and double jet. The energy consumption due to thermal entrainment ratio is plotted with varying Re. It was found that the double jet system is better than single jet system in terms of temperature distribution and energy saving.

Key words: Open display cabinet(개방형 전시케이스), Supply air jet(급기제트), Infiltration of air (침입공기)

기 호 설 명

그리스 문자

b_o : 에어커튼 제트슬롯의 폭 [m]
 C_p : 정압비열 [J/kg · K]
 h : 엔탈피 [J/kg]
 H : 개구부의 높이 [m]
 p : 압력 [Pa]
 Q : 풍량 [m³]
 T : 온도 [K]
 Z : 바닥으로부터 높이 [m]

α : 주위공기 혼입비율계수
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 μ : 절대점성 계수 [kg/(m · s)]

하첨자

c : 실외
 r : 환기
 s : 급기
 w : 실내
 o : 제트노즐의 출구

[†] Corresponding author

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

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

1. 서 론

최근에 대형 매장이 급증하면서 육류, 채소 그리고 낙농제품과 같은 가공식품이나 신선식품에 대하여 저온의 보관 상태를 필요로 하는 식품에 대한 전시 판매용 전시케이스의 보급이 늘어나고 있다. 전시케이스는 보관 온도에 따라 냉동용과 냉장용, 진열 개구부 형태에 따라 폐쇄형과 개방형, 개구부 위치에 따라 수평형과 수직형, 냉각 방식에 따라 자연대류식과 강제대류식 등 여러 가지 형태가 있지만 대형 매장의 경우 소비자의 시선을 끌고 쉽게 선택할 수 있도록 개방형 전시케이스를 이용하는 경우가 증가하고 있다.⁽¹⁾ 개방형 전시케이스는 냉각된 공기가 주변 공기와 접촉과 혼합을 일으키기 때문에 에너지 손실이 폐쇄형 전시케이스 보다 훨씬 많게 된다.

개방형 전시케이스의 경우 상부 전면에서 하부로 공기를 유동시켜 공기막을 이용하는 에어커튼 방식이 일반적으로 많이 이용되고 있다. 이는 외부 공기와 혼합을 줄여 에너지 소비를 줄이고, 파리와 같은 해충의 접근을 방지하기 위함이다. 이때 보관 공간에서의 온도가 상승하여 냉동 또는 냉장 식품이 변질되는 경우가 발생하지 않도록 보관 공간 내의 온도 유지 조건을 만족 시켜야 한다. 전시케이스 내의 바람직한 온도범위는 제품에 따라 다르기는 하지만 대체로 -2~5도 정도이다.⁽²⁾ 에어커튼은 조건에 따라 외부 공기와 혼합이 다르게 일어나고 전시케이스 내부의 온도 분포도 다르게 나타나며, 이에 따라 냉동 또는 냉장을 위한 에너지 사용량이 다르게 된다. 전시케이스에서 발생하는 대부분의 에너지 소비는 주변 공기의 혼합에 따른 것으로 볼 수 있으나 열과 질량 전달과정은 조건에 따라 상당히 복잡하게 일어난다. Pedro Dinis Gaspar et al. 연구에 따르면 전시케이스 냉각 부하의 72%는 에어커튼을 통과하는 주변공기의 침입에 의한 것이라고 하였다.⁽³⁾ 그러므로 에어커튼을 이용하는 경우 어떻게 하면 외부공기의 침입을 최소화할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

전시케이스에 대한 국내 연구 동향을 살펴보면 신유환 외 4인⁽⁴⁾이 연구한 “전시케이스 현장 데이터 측정 및 분석” 등 냉동시스템의 성능에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며, 전시케이스 내의 토출기류 상태에 따른 성능 변화에 대한 연구는 없는 실정이다. 외국의 경우에는 Foster,⁽⁵⁾ Navaz,⁽⁶⁾ Yu⁽⁷⁾ 등의 연구자들이 전시케이스의 공급 기류에 따른

성능변화에 관하여 연구를 하였으며, I. Gray 등이 슈퍼마켓의 전시케이스에 대한 기류개선 연구를 하였다.⁽²⁾

본 논문에서는 시중의 대형마트에서 많이 사용하는 강제 대류식 수직 개방형 전시케이스로서 냉동 보관용을 대상으로 하였다. 강제 대류식 수직 개방형 전시케이스의 냉각 구조는 하부에 냉각용 코일과 팬이 설치되어 있고 코일을 거친 냉각 공기는 배면의 공기 통로를 따라 내벽면과 상부 토출구를 통하여 전시케이스로 공급되고 하부 바깥쪽에 설치된 환기 그릴을 통하여 다시 냉각코일쪽으로 순환한다. 이때 외부 공기와 혼합된 공기의 일부는 전시케이스 바깥으로 빠져 나간다. 덕트를 통하여 공급된 냉각공기는 슬롯이나 벌집무늬를 가진 그릴을 통하여 전시케이스 진열대 쪽으로 공급되며, 전시케이스 내부공기와 외부공기를 차단하는 에어커튼의 역할을 한다. 이 에어커튼의 차단 성능에 영향을 주는 주요 요소로는 토출구 슬롯의 폭과 토출풍속, 토출구의 각도, 전시케이스의 개방구 높이, 토출온도와 주변 공기온도, 환기구 위치 등이다. 일반적인 에어커튼의 차단효율에 대한 측정 자료를 보면 냉동창고에 설치된 경우 설치방법에 따라 -0.44~0.78로 큰 차이를 나타내고 있다.⁽⁸⁾ 차단효율 1의 값은 에어커튼이 없는 경우에 침입하는 외기량에 대하여 설치 후 차단되는 외기량의 비를 의미한다. 정해진 풍량과 고정된 슬롯의 각도에 따라 작동하는 에어커튼의 차단성능은 여러 가지 조건을 고려하지 않을 경우 과도한 용량을 선정하게 되어 열취등으로 인한 운전에너지의 증대를 가져 오는 경우가 많이 있다. Hayes와 Stoecker⁽⁹⁾는 밀폐된 공간에 대한 주변 공기의 유동이 없는 상태에서 에어커튼에 대한 기본적인 개념과 설계 자료를 정립하여 제시하였다.

본 논문에서는 냉각공기 토출구의 에어커튼 효과를 이용할 때 토출구의 제트 조건과 배열수에 따라 다르게 나타나는 성능변화를 비교하고, 고내의 온도분포 상태가 적합한 조건인지를 비교해 봄으로써 에너지 절약 성능이 우수한 조건을 찾고자 하였다.

2. 대상 장치와 성능해석 모델

2.1 대상 장치

대상 전시케이스의 삼단의 선반을 가지고 있으며,

외형 치수는 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 가로, 세로, 높이는 1.93×1.05×1.95 m이고, 개구부의 폭이 1.8 m, 높이가 1.3 m인 경우를 선정하였다.

전시케이스는 Fig. 1과 같이 하부에 냉각용 코일과 송풍기가 설치되어 있고, 뒤 벽면의 풍도를 따라 올라간 냉각 공기가 상부 안쪽 면에 설치되어 있는 슬롯형 급기구를 통하여 공급되도록 하였고, 내부 벽면에는 선반의 상부 지점에 편칭형 그릴을 설치하여 전시케이스 내부로 냉각된 공기를 공급한다. 이때 냉각 공기의 토출온도는 268 K이다. 상부 급기구의 폭은 개구부 폭과 같은 1.8 m를 선정하였으며, 슬롯의 두께는 50 mm, 35 mm이다. 편칭형 그릴은 폭 12 mm, 길이 1.6 m이고 선반 사이 4개소에 있다. 슬롯의 토출구는 35 mm인 경우에는 두 줄형, 50 mm일 때는 한 줄형과 두 줄 형인 경우를 비교하였다. 두 줄 형인 경우 상부 바깥쪽에 설치된 급기구는 하부의 환기구를 통하여 흡입된 공기 상태 그대로 토출시키는 것으로 하였다.

상부와 후면 급기구를 나온 냉각공기는 전시케이스 내를 거쳐 하부 전면 쪽 턱 부분에 설치되어 있는 환기 그릴로 들어가며, 환기 그릴은 150 mm의 폭을 가지고 있다.

전시케이스는 실내에 설치되어 있고 냉각부하가 많이 발생하는 여름철 기간을 기준으로 주변 온도 25℃, 상대습도 50%인 경우를 기준으로 하였다.

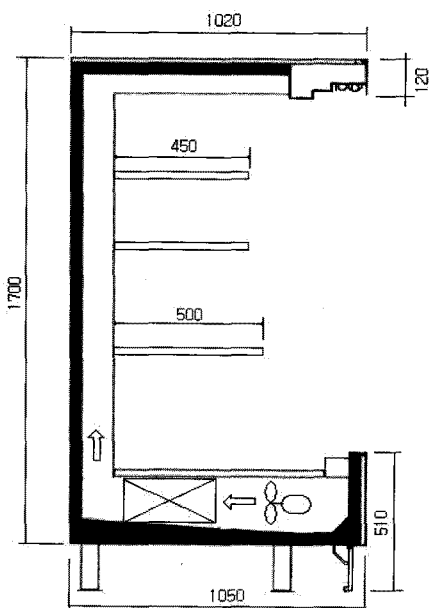


Fig. 1 Vertical section of display cabinet.

2.2 성능해석

전시케이스 내와 주위 공기와의 온도차가 있을 때 Hayes와 Stoecker가 연구한 결과에 따르면 연돌효과에 의하여 개구부에서의 압력차 Δp_{se} 는 식 (1)과 같이 발생하며 위에서 아래로 선형적으로 변화한다.⁽⁹⁾

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

케이스 내부에서 별도의 공급 공기가 없는 경우에는 압력차이가 없는 중성대 높이는 개구부의 중간 높이에서 일어난다.

전시케이스에서 이용된 전면의 에어커튼의 성능에 대하여 Hayes와 Stoecker는 에어커튼을 설계하기 위한 토출공기의 속도를 구하기 위하여 아래와 같은 식(2)를 제안하였다. 이 식은 에어커튼 양쪽의 온도차로 인하여 발생하는 연돌효과에 대하여 가로 지르는 힘인 에어커튼의 토출공기 운동량의 비를 나타낸 휩계수 D_m 으로 나타내었다.

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

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 휩계수로부터 구해진 최소 모멘텀보다 커야한다. 만약 이 모멘텀보다 작으면 중간에서 휘어짐으로 인하여 에어커튼의 차단 기능을 상실하게 된다.

공급되는 토출공기는 주변공기와 혼입 현상을 일으키므로 혼입상태의 특성을 아래와 같은 식(3)으로 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 만약 혼합공기의 온도가 공급온도와 같다면 혼입 공기가 없는 경우를 나타내므로 혼입 비율이 0인 경우를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{T_r - T_o}{T_w - T_o} \tag{3}$$

이때 혼입에 의한 단위길이 당 현열에너지 손실량은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \dot{m} C_p \Delta T \tag{4}$$

여기서 ΔT 는 환기공기와 슬롯을 통한 공급 공기의 온도 차이이다.

레이놀드수와 혼입공기비의 곱은 혼입공기로 인한 열에너지 손실계수 E^* 를 나타내며 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이를 이용하여 에너지 손실량을 나타내면 식(6)과 같다.

$$E^* = \alpha Re \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E &= (\mu Re) C_P \alpha (T_w - T_o) \\ &= E^* \mu C_P (T_w - T_o) \end{aligned} \quad (6)$$

전시케이스에서의 에너지 소비량은 슬롯을 통하여 공급되는 공기와 환기공기와의 상태를 에너지 보존 법칙과 연속방정식을 이용하여 식(7)과 같이 계산하였다.

$$\dot{E} = \rho \dot{Q} (h_r - h_s) \quad (7)$$

2.3 해석 모델

전시케이스의 성능을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 형상으로 구성하였다. 이때 전시케이스는 실내 공간 내에 설치되므로 전시케이스 전면부에 슬롯에서 나온 공기유동 상태에 영향을 주지 않도록 가로, 세로, 높이가 3×2×2.6 m인 외부 공간을 구성하였으며, 전면과 측면은 개방공간으로 설정하여 해석하였다. 수치해석은 3차원인 약 424만 개의 셀로 이루어진 비정렬 격자를 이용하였고, 정상상태로 계산하였으며, SIMPLE 방법과 k- ϵ 난류모델을 사용하였다. 이때 전시케이스가 설치된 개구부 주

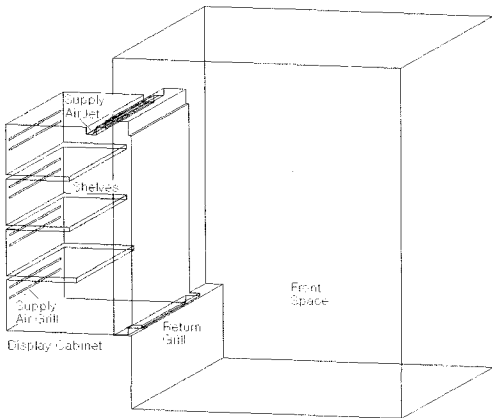


Fig. 2 Geometry of the display cabinet.

변과 급기구, 환기구 주변은 정밀한 해석을 위하여 조밀한 격자로 구성하였다.

전시케이스의 유동과 성능에 대한 현상을 해석하기 위한 지배방정식은 식(8)~식(10)과 같은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + S_M \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_j \rho h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} k \frac{\partial T}{\partial x_j} + S_E \quad (10)$$

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 토출공기의 회절현상과 온도분포

전시케이스 내의 온도는 주위 공기온도보다 낮으므로 내외 온도차로 인한 연돌현상으로 개구부에서 위와 아래는 압력의 차이가 발생하게 된다. 이때 아래 부분은 대기압력보다 높게 되고, 위 부분은 대기압력보다 낮게 되어 슬롯에서의 토출 공기는 위 부분에서는 전시케이스 내부 방향으로 굽어지게 되고 하부에서는 바깥쪽으로 굽어지게 된다.

해석 결과 Fig. 3과 같이 전시케이스 내에 선반이 있는 경우 상부 슬롯에서 토출된 기류는 상부에서 안쪽으로 굽어지는 현상을 볼 수 있으며, 하부로 가면서 선반으로 구획된 공간에 의하여 더 이상 안쪽으로 굽어지지 못하고 하부로 갈수록 압력차에 의하여 기류의 방향이 바깥쪽으로 굽어지는 현상을 볼 수 있다. 중간에 설치된 선반이 뚫려 있는 형식의 경우에는 기류가 선반 사이로 흐름에 따라 Fig. 4처럼 안쪽으로 심하게 굽어지는 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에서는 슬롯의 규격과 속도 변화 및 슬롯의 열수가 하나인 경우와 두 개인 경우에 따라 토출기류의 굽어지는 정도를 슬롯 폭 b_o 에 대한 값으로 무차원화하여 나타낸 선도로서 Z_c 는 개구부 위에서부터의 높이이고, x_s 는 토출구의 중심으로부터 편심된 거리를 나타낸다. 이때 x_s/b_o 가 0인 지점은 상부

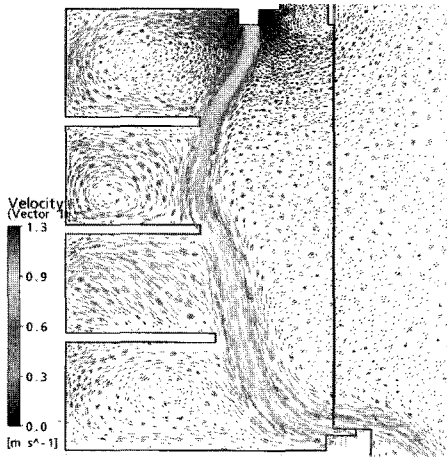


Fig. 3 Velocity vectors for the close type shelves at the vertical section(jet velocity 0.9 m/s).

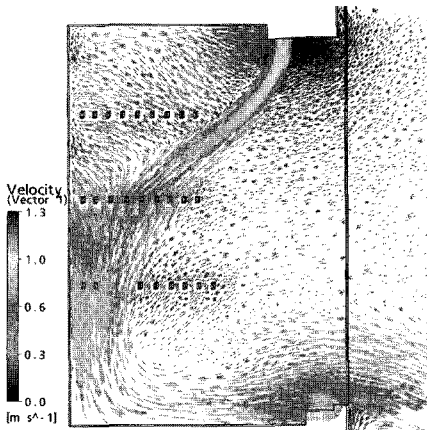


Fig. 4 Velocity vectors for the open type shelves at the vertical section(jet velocity 0.9 m/s).

토출구 지점에서의 전시케이스의 전면 개구부 부분을 나타낸다. 선도에서와 같이 가장 안쪽까지 심하게 좁어지는 경우는 1열의 슬롯 폭이 좁은 35 mm 인 경우로서 토출 속도가 낮을 때이며, 좁어지는 현상이 작게 나타나는 것은 2열의 슬롯 폭이 50 mm 인 경우인 것을 볼 수 있다. 이는 Hayes and Stoecker⁽⁹⁾가 연구한 결과와 잘 일치한다.

선반이 뚫려 있는 경우와 같이 토출 기류가 안쪽으로 심하게 좁아지면 주변공기가 전시케이스 내의 보관 장소까지 유입되어 케이스 내의 온도가 올라가므로 원하는 온도로 유지할 수 없게 되어 전시

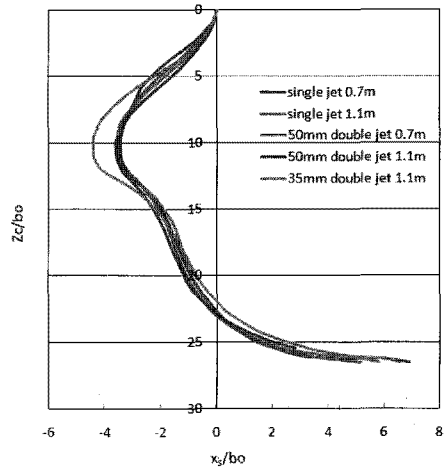


Fig. 5 Trajectory of the air flow in various jet velocities.

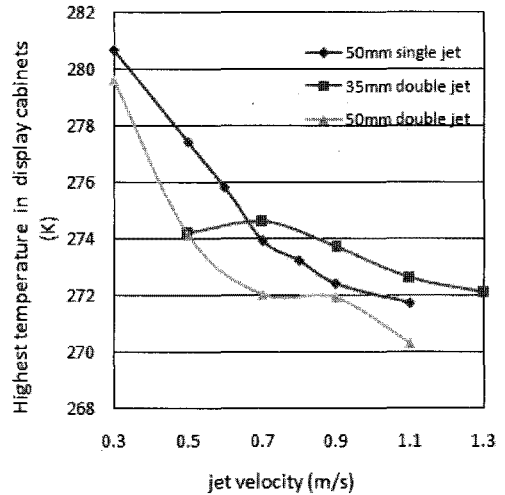


Fig. 6 Highest temperature in display cabinets in various jet velocities.

케이스 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 중간 선반은 막혀 있는 형식으로 되어 있는 것이 전시케이스 내의 온도조건을 유지하기에 훨씬 유리한 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 급기제트의 종류와 토출속도 조건에 따라 전시케이스 공간 안의 최고온도를 나타내는 선도로서 전시케이스 내의 각 지점에서 272 K이하의 동결온도를 100% 만족시키는 경우는 50 mm 싱글제트의 토출속도 1.1 m/s인 경우와 50 mm 더블제트 0.9 m/s 및 1.1 m/s인 경우로 나타났다.

3.2 전시케이스의 에너지 소비특성

Fig. 7은 레이놀즈수가 변화할 때 싱글제트와 더블제트에 대한 주변공기의 혼입비율 특성을 나타내는 α 값과 에너지 소비량을 나타낸 것이다.

싱글제트인 경우의 값이 더블 제트의 경우보다 α 값이 더 크게 나타나 주위공기와의 혼입현상이 크게 일어나 에너지 소비량이 더 크게 될 것을 예상할 수 있으며, 더블제트이고 슬롯의 폭이 50 mm인 경우가 가장 작게 나타남을 볼 수 있다. 이때 레이놀

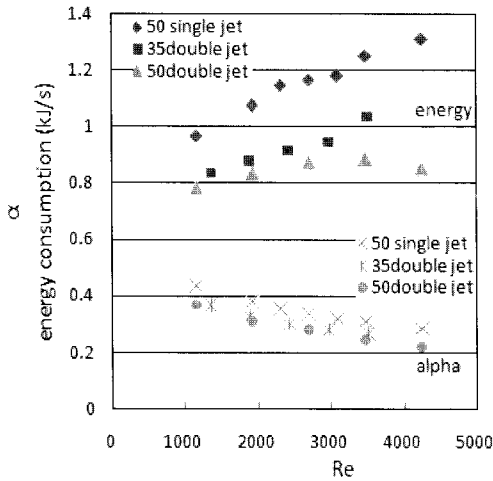


Fig. 7 Entrainment factor and Energy consumption rate vs. Re.

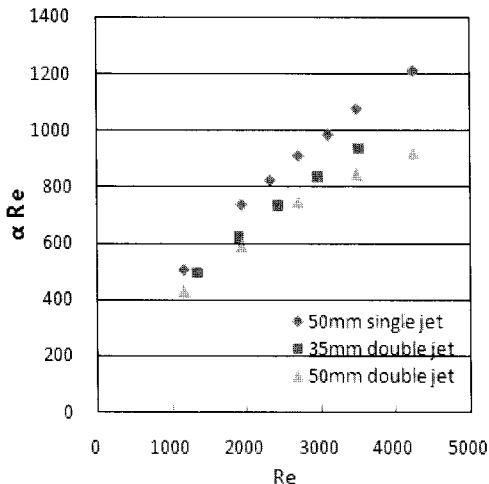


Fig. 8 Thermal entrainment energy loss factor vs. Re.

즈수가 3500정도로 커지면 α 값이 0.2정도까지 낮아짐을 볼 수 있다. 더블제트인 경우 슬롯의 폭에 따른 영향을 비교해 보면 폭이 넓은 50 mm인 경우 혼입비율이 작으므로 성능에서 유리함을 알 수 있다.

에너지 소비량은 슬롯의 조건에 관계없이 레이놀즈수가 커짐에 따라 증가하는 경향을 나타내며, 싱글제트인 경우가 에너지 소비량이 가장 크게 나타남을 볼 수 있고 더블제트인 경우가 상대적으로 유리함을 알 수 있다. 50 mm 더블형인 경우 에너지 소비량이 가장 적게 나타났으며, 이때 레이놀즈수가 증가함에 따라 점차 증가하다 3500정도에서 가장 크게 나타난 후 감소하는 현상이 나타났다. 앞에서 검토한 온도분포조건을 만족하는 세 가지 경우 중 에너지 소비량이 가장 적은 경우는 50 mm 더블제트의 토출속도 1.1 m/s인 경우로 나타났다.

Fig. 8은 혼입공기로 인한 현열에너지 손실계수인 E^* 와 레이놀즈수와 관계를 나타낸 선도로 레이놀즈수가 증가하면서 거의 선형적으로 E^* 의 값이 증가함을 볼 수 있다. 이는 주위 공기의 혼입비율 값인 α 는 레이놀즈수 증가에 따라 완만하게 감소하지만 레이놀즈수의 증가 비율은 상대적으로 크기 때문이다.

4. 결론

전시케이스의 성능은 상부에 설치된 급기제트의 토출속도와 열수 및 폭에 따라 변화하므로 사용 에너지를 줄이기 위한 조건의 선정은 매우 중요하다. 급기제트의 조건에 따른 성능 변화에 대한 연구로부터 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 급기제트에서의 토출속도와 열수에 따라 토출공기의 회절현상은 크게 다르고, 더블제트이고 슬롯의 폭이 50 mm인 경우 회절 현상이 가장 작게 나타나고 토출속도가 빠를수록 회절량은 줄어든다.

(2) 판상의 막혀 있는 형식의 중간 선반을 사용하는 것이 회절현상이 줄어들므로 전시케이스 내의 온도조건을 유지하기에 훨씬 유리하다.

(3) 싱글제트인 경우보다 더블제트인 경우가 주위공기의 혼입 상태를 나타내는 α 값이 작게 나타나므로 에너지 절약 면에서 유리하고, 더블 제트인 경우 슬롯의 폭이 35 mm 경우보다 50 mm인 경우가 사용 에너지 절약 면에서 유리하다. 또한 레이놀즈수가 3500이상인 경우에서 주위공기의 혼입 비율이 낮아지고, 에너지 소비량이 줄어들었다.

(4) 50 mm 더블제트로서 토출속도 0.9 m/s이상 인 경우에서 전시케이스 내의 온도조건을 만족시키며 에너지 소비량이 적은 것으로 나타났다.

후 기

이 연구는 2011년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

참고문헌

1. Kwon, J. T. and Kwon, Y. C., 2003, Development trend of showcase equipment, Magazine of the SAREK. Vol. 32, No. 7, pp. 34-36.
2. Gray, I., Luscombe, P., Sarathy, C. S. P., Sheahan, P., and Srinivasan, K., 2008, Improvement of air distribution in refrigerated vertical open front remote supermarket display cases, International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp. 902-910.
3. Pedro Dinis Gaspar, Carrilho Goncalves, L. C. and Pitarma, R. A., 2008, Three-dimensional CFD modelling and analysis of the thermal entrainment in open refrigerated display cabinets, Proceedings of 2008 ASME Summer Heat Transfer Conference HT2008, pp. 1-11.
4. Shin, Y.-H., Oh, W.-K., Park, K.-H., Kim, Y., and Shin, Y. 2005, Measurement and analysis of showcase field data, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, pp. 436-443.
5. Foster, A. M., Madge, M. and Evans, J. A., 2005, The use of CFD to improve the performance of a chilled multi-deck retail display cabinet, International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 698-705.
6. Navaz, H. K., Henderson, B. S., Faramarzi, R., Pormovahed, A., and Taugwalder, F., 2005, Jet entrainment rate in air curtain of open refrigerated display cases, International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 267-275.
7. Yu, K.-Z., Ding, G.-L. and Chen, T.-J., 2007, Simulation of air curtains for vertical display cases with a two-fluid model, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, pp. 2583-2591.
8. 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.
9. Hayes, F. C. and Stoecker, W. F., 1969, Design data for air curtains, ASHRAE Transactions, Vol. 75, pp. 168-179.
10. Field, B. S. and Loth, E., 2006, Entrainment of refrigerated air curtains down a wall, Experimental and fluid science, Vol. 30, pp. 175-184.