

PIV기법을 이용한 전시용 냉장기기 내부 유동장 측정

박철우[†] · 백인제^{*}

An Experimental Study on Flow Structure inside a Display Cooler Using PIV Techniques

Cheol Woo Park and In Je Baek

Abstract. Flow structure inside a refrigerating compartment of a scale-down display cooler model was investigated experimentally by using PIV (particle image velocimetry) method, a reliable velocity field measurement technique, in the present study. In addition, we also carried out flow visualization regarding flow structure and particle movement inside a display cooler by using a tracer method. As a result, the mean velocity field measurement shows a large scale vortical flow structure inside a refrigerating compartment due to strong entrainment flow, going through a base plate open gaps.

Key Words: Display Cooler(전시용 냉장기기), Flow Visualization(유동가시화), PIV(입자영상유속계)

기호설명

- D : depth of a display cooler [m]
- H : total height of a display cooler [m]
- L : height of cooling compartment [m]
- Ra : Rayleigh number
- Re : Reynolds number
- T_v : streamwise turbulence intensity [%]
- U_o : streamwise mean flow velocity [m/s]
- v : streamwise flow velocity [m/s]
- v_i : inlet flow velocity [m/s]
- W : width of a display cooler [m]

1. 서 론

최근 생활 수준의 향상과 더불어 에너지 소비가 폭발적으로 증가되어지고 있으며 이에 따라 에너지 소비에 대한 제품의 규제도 전세계적으로 매우 강화되어지고 있다.¹⁾ 특히, 가정용으로 일반적으로 많이 사용되어

지고 있는 생활필수품인 냉장고와 같은 경우에 있어서도 에너지 소비전력 저감을 위한 구조 및 성능개선 등에 관한 노력과 연구들이 수행되어져 오고 있다.²⁾

이러한 냉장기기의 기본적 성능은 냉장기기 내부의 음식물을 오랫동안 신선하게 유지하는 문제와 주로 관련이 많다. 특히, 음식의 신선도는 냉장부 내의 공기유동과 온도분포에 직접적으로 의존하게 되는데 냉장장치를 통해 내부로 유입된 냉기의 온도가 균일하고 적절하게 분포될 경우, 냉장기기 내부의 온도변화는 감소되며 음식물의 신선도를 증가시킬 수 있다. 이는 또한 냉장기기의 소비전력을 저감시켜 효율적 에너지 소비를 가져올 수 있게 된다.

그러나 만일 냉장기기 내의 냉기의 흐름이 순조롭지 못하면 냉장기기 내부 유동의 불규칙적 분포와 온도분포로 인해 치명적 문제를 유발하며 에너지 효율의 감소를 초래하게 한다. 특히, 냉장기기 내부에 음식과 음료수 등이 놓여 지게 되면 유동구조가 변화하게 되며 이는 전력 손실을 증가시키게 되는 구조로 변화하게 된다.³⁾

냉장기기와 관련된 연구들은 주로 냉동사이클 및 효율향상 등과 관련된 연구들이 수행되어져 왔으며 특히, 냉장기기 내부 유동 자체에 대한 분석 및 개선은 아직까지 많지 않은 실정이다. 또한 불투명한 실제적 냉장

[†]경북대학교 기계공학부

E-mail: chwoopark@knu.ac.kr

^{*}경북대학교 대학원 기계공학과

기기 내부의 유동은 실제 계측의 어려움과 한계 등으로 인해 주로 수치해석 등을 통하여 많이 이루어져 오고 있다.

Ding 등⁴⁾은 냉장고의 수직 길이의 증가에 따른 냉기 분포의 불균일 정도와의 상관관계를 수치해석을 통하여 제시하였다. Laguerre 등³⁾은 자연대류 유도 방식의 냉장고에 대한 내부 유입유동 및 열전달 분포에 대하여 수치해석을 수행하고 실험값과 비교하였다. 그리고 오 등⁵⁾은 460L급 냉장고 내부 형태를 단순화하여 내부를 순환하는 유동에 대하여 수치해석을 통하여 3차원 유동분석 연구를 수행하였다. 그리고 냉장기기 내부 유동에 대한 실험적 고찰로서는 홍 등⁶⁾과 최 등⁷⁾이 가정용 냉장고의 냉동실 내부 유동을 선반(shelf)이 없는 경우에 대하여 입자영상상속계(PIV)를 이용하여 속도장 측정 연구를 수행하였다.

그리고 이러한 냉장기기 내부의 냉각되어진 유동은 열전달 및 물질전달이 포함되어 있는 복합적 유체유동으로 유동 패턴이 매우 복잡하게 상관되어져 있다. 또한 이러한 냉각 유동은 그 흐름이 눈에 보이지 않으며 외부에서 밀폐된 공간을 순환하는 유동장 시스템으로 이루어져 있어 해석이 매우 어렵다.⁸⁾

그러나 유체역학적 관점에서 볼 때, 이러한 냉장기기의 내부 유동 특성을 파악하는 것은 매우 중요하며 열전달과의 상관관계의 기초를 제시함으로써 냉장기기의 효율을 향상시킬 수 있는 방법이 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 전시용 냉장기기의 냉장실 내부 유동구조에 대한 체계적 분석을 위해 PIV 속도장측정과 유동가시화 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 모형이 되는 원형(prototype) 냉장기기는 일반 음료 보관 및 판매를 위한 다목적 전시용 냉장기기로서 상부는 단열재가 포함된 온장고이며, 중앙부는 냉장실을 가지고 있고, 최하단부에는 기계실을 가지도록 설계되어 있다. 이러한 전시용 냉장기기는 기존의 일반 냉장고의 형태와는 다소 다르게 설계되어 있으며, 사면 전체가 투명하게 유리로 이루어지고 상부에 온장고 부분이 추가되어져 있다.

따라서 기존 냉장고와 같이 상부나 측면에서 냉기를 공급하기 어려운 실정으로 하부에서 냉기를 공급하는 방식을 채택하기 위해 본 연구를 수행하였다. 즉, 기계

실로부터 냉각되어진 냉기가 최하부 선반의 오른쪽 부분 입구로부터 냉장실 내부로 유입되어 순환되게 되고 다시 선반 왼쪽 부분의 출구를 통해 빠져나가 다시 기계실로 유입되도록 순환하고 있는 형태로 이루어져 있다.

따라서 본 연구에서는 원형 냉장기기의 축소모형을 Fig. 1 과 같이 1/2.5 축소를율 적용하여 내부를 투명하도록 아크릴로 제작하였다. 유동구조 개선의 목적이 되는 기계실 상부의 냉장실(cooling or refrigerating compartment)에 대하여 속도장 측정 실험을 수행하였으며 냉장실 내부에 다시 중앙 분리 선반(shelf)을 설치하여 냉장실 상부(upper)와 하부(lower)로 구분된다. 음료수 모형은 원기둥 형태로 제작하여 중앙 분리 선반 위에 적치하였다. 본 연구에 사용된 전시용 냉장기기 모형에 대한 특성값을 Table 1 에 나타내었다.

냉장실 작동유체(working fluid)로는 순수한 물을 사용하였으며, 냉장기기 축소 모형 내에 물을 채우고 공압식 압축기를 이용하여 기계실 내부의 팬을 회전시켜 공급되도록 하였다. 본 실험에서 기계실의 팬의 회전속도를 330 rpm으로 고정하여 유량이 정상상태를 이루도록 일정하게 유지하였다. 그리고 전시용 냉장기기에 내부 선반에 음료수를 적치하여 음료수 캔 유무에 따른 유동구조 변화를 비교 분석하였다. 특히, 음료수 캔

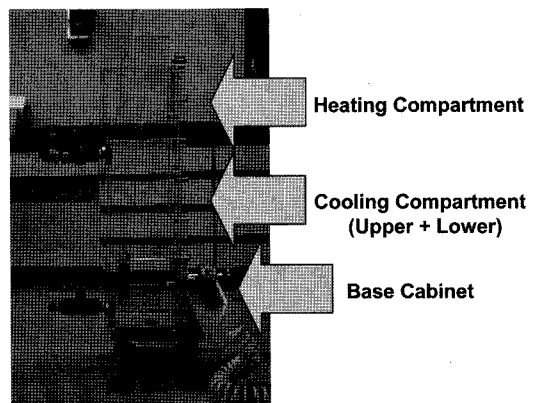


Fig. 1. A scale-downed display cooler model (1:2.5)

Table 1. Characteristics of the display cooler

External dimensions (height H×width W×depth D)	: 0.740 m×0.200 m×0.205 m
Number of cavities (heating / cooling / base zone)	: 3
Number of shelf (cooling zone)	: 1

의 개수 및 크기, 그리고 적치 위치의 변화는 냉장실 내부 유동장을 직접적으로 크게 변화시킬 수 있는 변수가 될 수 있을 것이다. 하지만, 본 연구에서는 음료수 캔의 크기를 모두 고려할 수 없는 제한으로 인해 상대적 크기의 설정과 2차원 속도장 측정이 다소 가능하도록 모두 8개의 음료수 캔 모형을 고려하여 적절히 중앙 분리 선반 위에 배치하였다.

그리고 이러한 냉장기기 내부 유동에서는 주로 온도차에 의한 자연대류(natural convection)가 배제되어지고 보통 팬에 의한 강제(forced)대류가 주유동을 이루게 되므로 유동장을 강제대류로 가정하였다. 전시용 냉장기기 내부의 강제대류 유동 내의 지배적인 힘은 부력, 관성력 및 점성력이다. 그러나 이러한 힘들 중 냉각과정에서는 특히 관성력이 다른 힘에 비해 상대적으로 매우 커지게 된다. 이는 입구 유입 유동이 대체적으로 완전발달한 난류제트의 특징을 가지고 전체적으로 밀도차이가 매우 작기 때문이다. 그러나 본 연구의 원형 전시용 냉장기기의 경우 레이리수(Ra)는 10^8 정도로 완전한 난류 열전달을 가정할 수는 없었다.⁹⁾ 특히, 본 연구에서는 작동유체로 물을 사용하였으므로 열전달 특성을 고려할 수 없는 제한점을 포함하고 있다. 따라서 이러한 부분은 수치해석 기법을 이용한 온도장 해석을 통해 보완될 수 있을 것이다.^{3,10)}

또한, 이러한 냉장기기 내부의 유동구조와 열전달 특성을 지배하는 주요 변수는 레이놀즈수(Re)가 될 수 있다. 캐비티(cavity) 형태의 제한된 내부 유동장 내로 제트가 분출되는 유동장의 경우, 공간의 형상비(aspect ratio, W/D)에 따라 진동(oscillation)되는 특성 변화가 존재하고 이는 형상비가 0.6 이하인 범위 내에서 다소 정형화된 형태로 존재한다고 알려져 있다.¹¹⁾ 본 모형의 폭(W)과 깊이(D)에 기초한 형상비는 대략 $W/D=1.0$ 의 값으로 정형화된 진동특성이 나타나는 영역에 포함되고 있지 않음을 간접적으로 확인할 수 있다.

그리고, 본 연구의 실험 모형의 냉장실 하부 입구 토출 유동 속도(v_i)와 냉장실(cooling compartment) 부분의 특성 길이인 냉장실 부분의 높이(L)에 기초를 둔 레이놀즈수는 $Re=1.38-1.87 \times 10^5$ 이다. 이것은 공기를 지닌 전시용 냉장기기의 특성값 보다 약 반치수 정도 낮은 값으로 모형 연구로부터 얻어진 유동과 열전달 특성이 정확히 상사성(similarity)을 만족시키기는 어렵다. 하지만 이러한 레이놀즈수 범위 영역에서는 주로 유동의 점성효과가 벽면 근처에서 크게 존재하여 전체적으로 동일한 난류유동 특성을 가지게 되고, 높이와 폭의 기하학적 형상비 값이 크게 변화될 경우에 레이놀즈수의존성이 커지게 된다고 알려져 있다.¹¹⁾ 따라서, 본 연구의 경우, 상사성이 정확히 일치되지는 않지만, 실제

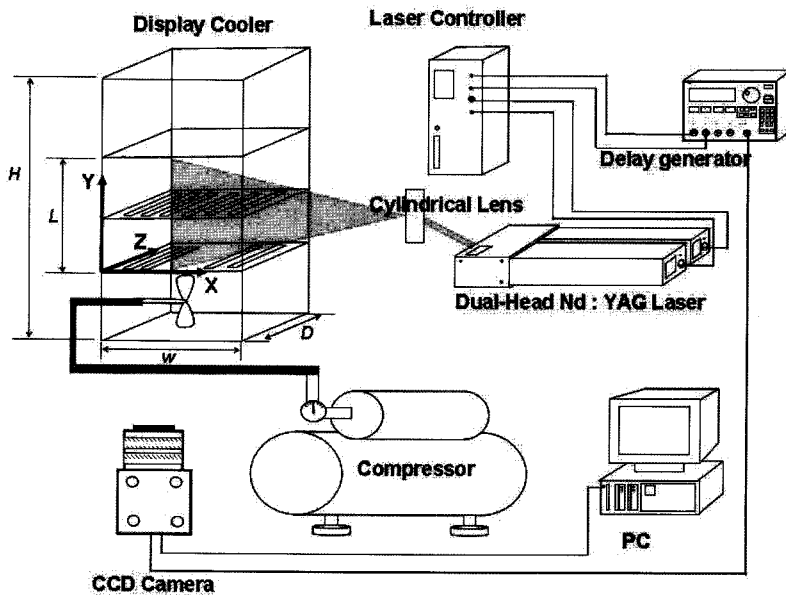


Fig. 2. Experimental set-up and PIV measurement system

전사용 냉장기기 내의 냉각 과정을 이해하고 분석하는데 있어서의 기초 설계 자료로는 활용될 수 있을 것이다.¹²⁾

Fig. 2는 속도장 측정을 위한 PIV 시스템을 나타내고 있는데, 시스템은 고해상도 CCD 카메라(ES4.0-2K×2K), Dual-head Nd:Yag 레이저(Newwave-30mJ), 렌즈시스템, 영상처리보드, 동기화장치 및 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 속도장 측정은 본 연구의 주요 관심 영역인 냉장실(cooling compartment) 내부의 유동영역에 대하여 수행하였다. 냉장실 전체 영역의 크기는 폭 20.0 cm(W)×높이 24.5 cm(L) 이므로 측정장치의 계측 가능 단면적의 한계로 인해 냉장실 내부를 4개의 계측 단면부분으로 설정하여 X-Y 단면에 대하여 속도장을 측정하여 조합하였다. 이때 속도장측정의 관심영역의 크기는 12 cm×12 cm이며, 탐색창 크기는 48×48 pixels² 으로 50% 중첩되었다. 일반적으로 정확한 시간적인 평균 유동구조와 통계적 난류값을 얻기 위해서는 약 450장 이상의 속도장을 취득하여 특성값을 구하여야 하는데, 본 연구에서는 수실험의 제한과 특성으로 인해 일정 수 이상의 평균속도장에서 접근되어지는 형태를 나타내어 100장 이상의 순간 속도장을 평균하여 통계적 난류값을 얻었다.¹³⁾

또한 보다 최적화된 유동구조의 도출을 위해 냉장실의 내부구조를 변경하여 연구를 수행하고, 이에 해당되는 각 경우에 대한 속도장을 측정하였으나, 본 연구에서는 특허와 관련된 제한적 배경에 의해 대표적인 한 경우에 대하여서만 제시하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Flow Visualization

전사용 냉장기기의 냉장실 내부의 유동을 가시화하기 위하여 Fig. 3과 같이 입자주입법(tracer method)을 사용하여 실험을 수행하였으며, 추적입자로는 평균직경이 44 μm인 silver-coated hollow glass spheres 입자를 사용하였다. 먼저 냉장실 중앙선반에 음료수 캔이 없는 경우에는 하부의 기계실로부터 분출되는 토출 제트 유동이 하부 바닥판의 입구로부터 수직(vertical, Y-axis) 방향으로 강력하게 분사된다. 그리고 이 토출 제트는 상대적으로 냉장실 우측 부분에서 큰 운동량을 가지고 토출되므로 냉장실 상부 및 하부에 반시계 방향으로 회전하는 큰 규모의 와류(vortex)를 야기시키고

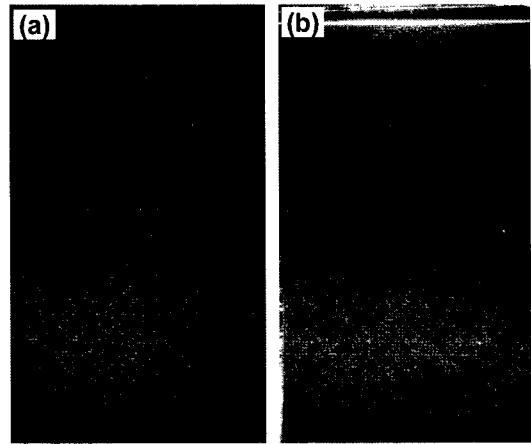


Fig. 3. Visualized flow inside cooling compartment (XY-plane) : (a) without beverage can, (b) with beverage can.

있다. 이러한 주유동(streamwise)방향 유동은 냉장실 천장부 벽면에 도달한 후, 다시 바닥판의 좌측부분을 향해 아래방향으로 하강하게 되는데 이때 큰 재순환 유동 내에는 또다시 국부적으로 작은 크기의 와류와 난류유동이 발생하고 있음을 볼 수 있다.

그러나, 음료수가 중앙선반 위에 놓여져 있는 경우에는 하부 바닥면을 통해 냉장실 내부로 분출된 유동이 상부에 정렬된 음료수 캔 사이를 통과해서 일부가 냉장실 천정부로 토출되기는 하지만 전체적으로 중앙부를 가로막게 되는 음료수 구조물에 의해 억압되고 있는 유동형태를 보여주고 있다. 이러한 유동장 조건 변화에 따라 냉장실 상부에서는 큰 규모의 와류 구조가 없어지게 되고, 하부에서만 중앙선반 아래 부분에 강하게 부딪히며 정체되어 다시 하강되는 유동이 발생되어 반시계 방향으로 회전하는 와류구조를 보이고 있다.

3.2 PIV Measurements

Fig. 4는 냉장실 내부의 상부와 하부의 순간 속도장을 음료수 캔이 적치되어 있는 경우와 없는 경우에 대하여 나타낸 결과이다. 먼저 냉장기기 내부에 음료수 캔이 없는 경우, 전체적으로 유입유동이 오른쪽 하부의 유동 출구에서 오른쪽 벽면을 타고 강하게 분사되고, 유입구에서 벽면과 약간의 간격을 유지하며 하부에서 상부로 상승한다. 이때 유입구 쪽에서 유입유동의 전단력으로 인해 많은 작은 와류들이 형성되고 있다. 유입 유동은 중앙 선반 방향으로 고속으로 상부로 향하며 상

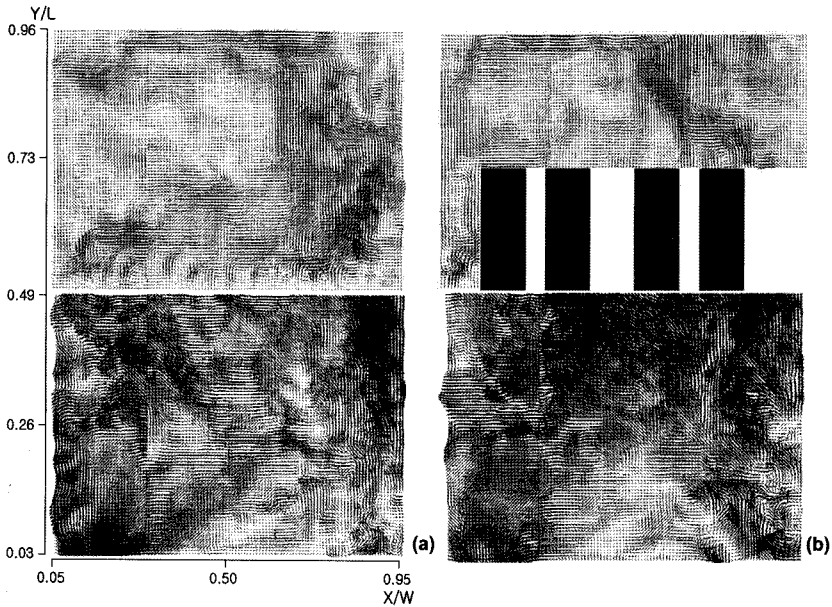


Fig. 4. Instantaneous velocity vector fields (XY-plane) : (a) without beverage can, (b) with beverage can.

부 냉장실로 일부 유입되고 일부는 중앙선반 바닥면을 따라 좌측으로 나아가고 있다.

이렇게 상부로 강하게 진입되는 우측 주유동(수직)은 냉장실 중앙선반 상부의 우측면에서 강하게 유입되며 전체적으로 우측 벽면을 따라 냉장실 상부 천정면을 따라 반시계 방향으로 재순환 되어지고 있다. 또한 슬릿 형태의 구멍을 가진 중앙선반의 영향으로 냉장실의 하부에서 확산되며 중앙선반 아래를 지나며 상승되던 유동이 중앙에 설치된 중앙선반의 각 슬릿들을 일부 통과하여 수직 방향으로 분출되는 제트 유동의 형태로 냉장실의 상부 부분으로 수직방향으로 유입되어지고 있음을 관찰할 수 있다.

그러나 이러한 제트유동은 냉장실의 우측 부분에서 다소 강하게 수직 유입되고 좌측 부분에서는 하강하는 주유동의 영향으로 다소 약해지게 된다. 특히, 상부 좌측 하단 영역에서 소규모의 반시계 방향의 와류가 발생하며 슬릿으로 유입되는 유동형태가 존재하고 있음을 확인할 수는 있지만, 다소 약한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 비정상(unsteady) 상태의 3차원 유동장을 제한된 2차원의 측정단면에 대하여 순간 속도장 분포를 측정함으로써 나타난 제한점으로 판단되며 3차원 유동특성이 다소 강하게 존재하고 있음을 유추해 볼 수 있는 근거가 된다.

냉장기기 내부에 음료수 캔이 적치된 경우에는 냉장실 하부 유입구를 통하여 강하게 토출되는 유동이 중앙선반 위에 적치된 음료수 캔의 영향으로 상부 유입유동을 강하게 억압하여 상부로 유입되지 못하고 하부에서 강하게 정체되어지고 있음을 볼 수 있다. 특히 중앙선반 하부를 따라 흐르는 유동이 슬릿을 통하여 분출되지 못함에 따라 전체적으로 정체되면서 강하게 좌측으로 향하고 있다. 반면에 냉장실 상부에서는 음료수 캔이 하부 유동을 억제하고 단면적이 줄어들게 되어 우측의 좁은 공간을 통하여 냉장실 상부로 유입되는 유동의 속도만 증가되어 존재하고 있으나 와도의 약화로 인해 큰 규모의 와류를 상부에 형성하지 못하고 있음을 보여주고 있다.

이러한 주유동방향(streamwise) 속도성분의 상대적인 크기는 Fig. 5에서 처럼 음료수 캔 적치 유무에 따른 주유동방향 속도성분의 등고선(contour) 분포에서도 잘 확인되고 있다. 중앙선반의 영향으로 냉장실 하부의 속도가 전체적으로 좌측을 향하고 있으며 특히, 중앙선반에 음료수 캔이 적치되어 있을 경우 유동 억제의 영향으로 좌향 유동의 경향이 더욱 강해짐을 알 수 있다.

음료수 캔이 없는 경우에는 중앙선반 하부에서 상부를 향하는 주유동방향 속도는 우측 분출구에서 매우 강

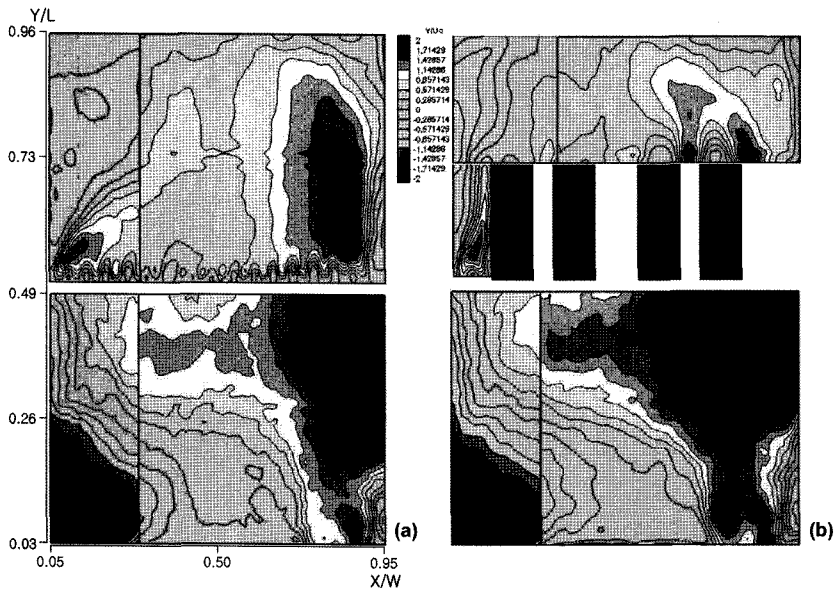


Fig. 5. Contour plots of streamwise(Y-axis) mean velocity component (XY-plane) : (a) without beverage can, (b) with beverage can.

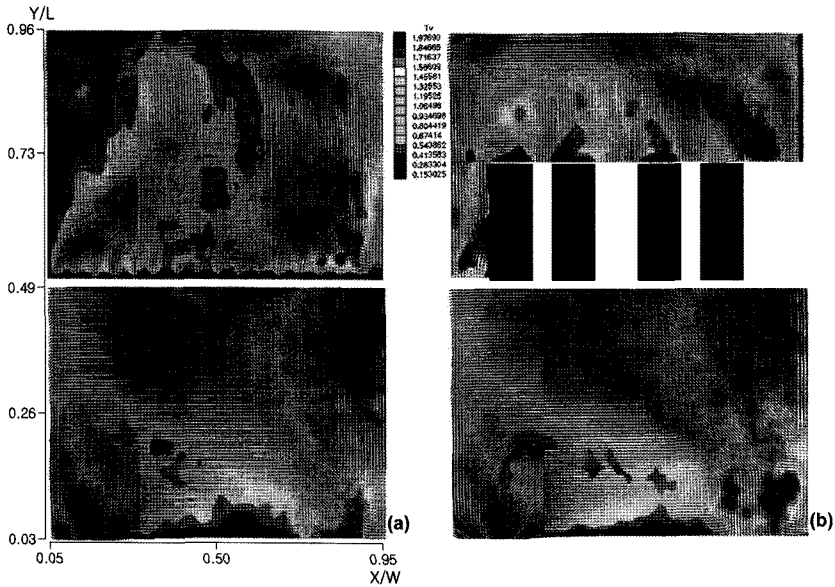


Fig. 6. Spatial distributions of mean velocity and streamwise turbulence intensity (XY-plane) : (a) without beverage can, (b) with beverage can.

하게 유입되고 좌측으로 가면서 각 슬롯을 통해 또한 빠르게 수직 제트 유동 형태로 냉장실 상부로 유입되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 냉장실 하부 좌측의 출구 측에서는 유동이 전체적으로 좁게 제한된 공간을 통해 기계실로 유입되게 되어 전체적인 유속이 감소되어

지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6 은 냉각부 중앙선반에 음료수 캔이 있을 때와 없을 때의 평균속도장과 주유동(수직)방향 속도성분의 난류강도(T_v) 분포를 나타낸다. 음료수 캔이 없는 경우, 하부에서 토출되는 유동이 중앙선반을 관통하고 있

며 우측의 강한 유입유동은 우측벽면을 따라 상부로 가속된다. 이후 큰 와류를 형성하며 냉장실 좌측 하부로 벽면을 따라 하강되어진다. 주유동방향 난류강도는 유동이 유입되는 출구지역에서 대체적으로 큰 값을 나타낸다.

그리고, 음료수 캔이 적치된 경우, 주유동방향 평균 속도는 우측 벽면과 음료수 캔 사이의 좁은 공간을 통해 미세하게 속도가 증가한다. 따라서 난류강도가 냉장실 우측 벽면부에서 상당히 증가하게 된다. 그러나 냉장실 상부의 중앙지역에서 발생하는 와류 구조가 사라지게 되고 중앙의 음료수 캔의 영향으로 대체적으로 유동이 억압하게 되어 전체적으로 움직임이 적게 나타난다. 이는 오히려 중앙부에 정체된 유동과 일정한 온도 분포를 야기할 수 있어서 운전상황에 따라서는 열전도의 균일성 측면에서는 다소 유리할 수도 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 향후 생산 계획중인 전시용 냉장기기의 내부 유동 구조 및 속도장 분포를 파악하기 위하여 축소모형에 대한 PIV 계측을 통하여 분석함으로써 보다 효율적인 냉기 유동분포를 이룰 수 있도록 체계적인 연구를 수행하였다. 특히, 냉장기기 내부 유동 특성 비교를 위하여 냉장실 중앙부에 선반을 설치하고 음료수 캔의 적치 유무에 따른 유동장 변화를 정량적으로 규명하였다.

전체적으로 냉장실 내부유동은 하부 바닥면의 우측 출구에서 나오는 토출 유동에 의해 반시계 방향으로 회전하는 큰 규모의 와류가 발생하게 되며 이러한 와류의 중앙부의 냉각 효과는 상대적으로 낮게 나타난다. 특히, 음료수가 중앙선반 위에 적치될 경우, 냉장실 상부의 와류가 없어지게 되며 전체적인 유동구조가 크게 변화되어진다. 따라서 냉장실 내부 유동을 일정한 온도 분포로 유지하기 위해서는 하부 바닥판의 제트 유동 유입구의 영향이 클 수 있음을 알 수 있다.

후 기

This work is financially supported by the Ministry of Education and Human Resources Development (MOE), the Ministry of Commerce, Industry and

Energy (MOCIE) and the Ministry of Labor (MOLAB) through the fostering project of Industrial-Academic Cooperation Centered University.

참고문헌

- 1) P. K. Bansal and R. Kruger, "Testing standards for household refrigerators I: preliminary comparisons," *Int. J. Refrig.*, vol. 18, no. 1, pp.4-20, 1995.
- 2) R. Radermacher and K. Kim, "Domestic refrigerators: recent developments," *Int. J. Refrig.*, vol. 19, no. 1, pp.61-69, 1996.
- 3) O. Laguerre, S. B. Amara, J. Moureh and D. Flic, "Numerical simulation on air flow and heat transfer in domestic refrigerators," *J. Food Eng.*, vol. 81, no. 1, pp.144-156, 2007.
- 4) G. L. Ding, H. T. Qiao and Z. H. Lu, "Ways to improve thermal uniformity inside a refrigerator," *App. Therm. Eng.*, vol. 24, no. 13, pp.1827-1840, 2004.
- 5) M. J. Oh, J. H. Lee and M. D. Oh, "3-dimensional calculation on cold air flow characteristics in a refrigerator," *SAREK J.*, vol. 7, no. 3, pp.382-395, 1995.
- 6) S. H. Hong, M. S. Seo, Y. C. Im, J. W. Choi and Y. H. Lee, "PIV measurement in a domestic refrigerator using an image intensifier CCD camera," *Proc. KSME, Fall Conf.*, pp.773-778, 1999.
- 7) J. Choi, S. H. Cho, Y. S. Nam and I. S. Lee, "PIV analysis of the flow inside a home refrigerator and the design of a higher efficiency cooling duct," *Proc. KSME, Fall Conf.*, pp.405-409, 2001.
- 8) V. T. Lacerda, C. Melo, J. R. Barbosa and P. O. O. Duarte, "Measurements of the air flow field in the freezer compartment of a top-mount no-frost refrigerator: the effect of temperature," *Int. J. Refrig.*, vol. 28, pp.774-783, 2005.
- 9) F. P. Incropera and D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (John Wiley & Sons Inc., New York, 1990), pp.529-585.
- 10) C. W. Park, I. J. Baek and J. H. Yoon, "An experimental study on the flow structure inside a display cooler using PIV techniques," *Key Engineering Materials*, vol. 326-328, pp. 167-170, 2006.
- 11) N. J. Lawson and M. R. Davidson, "An investigation of a low Strouhal number oscillatory jet submerged in

- a thin rectangular cavity”, Proc. 10th ISALTFM, Paper # 11-2, 2000.
- 12) F. M. White, *Fluid Mechanics* (McGraw-Hill Inc., New York, 1986), pp.245-286.
- 13) C. W. Park and S. J. Lee, “Effects of free-end corner shape on flow structure around a finite cylinder,” *J. Fluids and Structures*, vol. 19, no. 2, pp.141-158, 2004.