

## 김치냉장고 내의 유동 및 열전달 특성에 관한 수치해석

윤 준 원<sup>†</sup>

군산대학교 기계공학부

### A Numerical Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics in a Kimchi Refrigerator

Jun-Won Yun<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Chonbuk 573-701, Korea

(Received September 17, 2003; revision received October 31, 2003)

**ABSTRACT:** Kimchi refrigerator is a household electric appliance developed with the wholly domestic technology for maturing and keeping kimchi. However, the principle of keeping is not yet revealed obviously. This numerical study has been conducted to investigate the flow and heat transfer characteristics in a kimchi refrigerator. The effects of arrangement variation of a evaporation tube are examined. Also, the heat transfer characteristics through the insulation material are discussed in detail. The flow and temperature field was simulated using the commercial code of CFX-5.3. A natural convection flow is formed through about 5/6 region from the bottom within the keeping space and accordingly, the 90% region of kimchi containers satisfies the temperature requirement with  $0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . The stagnant flow exists in the upper 1/6 region of the keeping space and accordingly, the stratified high temperature distributions appear in the upper region of kimchi containers. The upward shift of the start location of a evaporation tube improves the temperature concentration toward  $0^\circ\text{C}$  but the pitch variation is of no effect. The heat fluxes on the insulation surfaces show two-dimensional distributions with being higher toward the center. Through the variation of insulation thickness, 3.5% saving of insulation material is obtained under the same heat transfer rate.

**Key words:** Kimchi refrigerator(김치냉장고), Natural convection(자연대류), Temperature distribution(온도분포), Evaporation tube arrangement(증발관 배열), Insulation thickness(단열재 두께)

#### 1. 서 론

우리나라의 대표적 발효식품인 김치에는 각종 유기산이 존재하여 주위온도 변화에 따라 증식 또는 억제되어 산도(pH)를 변화시킴으로써 김치

의 맛이 덜 익거나 신맛이 나게 된다. 주거양식의 추세가 단독주택보다는 아파트 등의 다세대 형태로 변함에 따라 동절기 땅 속에 독을 묻어 김치를 장기간 보관하는 재래의 방식은 적용할 수 없게 되었다. 또한 기존의 냉장고는 보관공간 부족, 잔존냄새, 김치전용 적정온도 제어의 한계 등으로 김치를 지속적으로 맛있게 보관하는 것이 어렵다. 김치냉장고는 냉장보관기능만을 가진 냉장고와는 달리 김치를 맛있게 숙성시키고 그 맛

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-63-469-4718; fax: +82-63-469-4727

E-mail address: jwyun@kunsan.ac.kr

을 장기간 유지시킬 수 있는 제품으로 개발된 새로운 가전기기로 100% 국내 독자기술이다.

현재 김치냉장고에 적용하였던 속성 및 장기보관기술은 어느 정도 성공하였으나 최근 들어 보관용량 증대 및 보관기간 연장에 대한 요구가 점점 커지고 있다. 일반적으로 보관용량, 즉 보관고(keeping space)의 체적이 증가하면 보관고 내의 온도편차가 커져 내용물의 보관기간이 감소될 수밖에 없는데, 소비자는 보관용량의 증대와 함께 보관기간의 추가연장을 요구하고 있다. 그러나 지금까지의 연구개발은 김치냉장고 내의 유동 및 열전달 특성에 대한 상세한 규명이 없이 보관고 내의 온도분포만을 제한적으로 측정하는 실험에 의존함으로써 당면한 개발요구에 신속히 대응하는 데 어려움을 겪고 있다. 또한 아직까지 공개된 연구결과가 전무한 실정이다.

김치냉장고 구조는 대부분 크게 나누어 위쪽에는 좌우로 대칭인 형상을 갖는 2개의 보관고가 있고 아래쪽에는 냉매순환용 압축기 등이 놓이는 기계실로 이루어진다. Fig. 1은 김치냉장고의 보관고만을 별도로 분리하여 나타낸 사진이다. 왼쪽은 보관고 바깥에 단열재가 입혀져 있는 모습이고, 오른쪽은 단열재를 제거시킨 후 그 안에 김치용기가 적재되는 흡열판(heat-absorbing plate)의 외관을 보여준다. 흡열판 외벽에는 바닥에서 약 2/5 지점부터 위로 증발관이 감겨 있는데, 증발관 내를 순환하는 냉매가 증발하면서 외부로부터 열을 흡수하여 보관고 내를 냉각하게 된다. 김치냉장고의 작동은 설정된 보관온도를 유지하기 위해 흡열판에 설치된 온도센서의 지시값에 따라 ON/OFF 방식으로 제어된다.

증발관은 보관고를 냉각시키는 근원이므로 증발관의 배열형태는 보관고 내의 온도분포에 가장

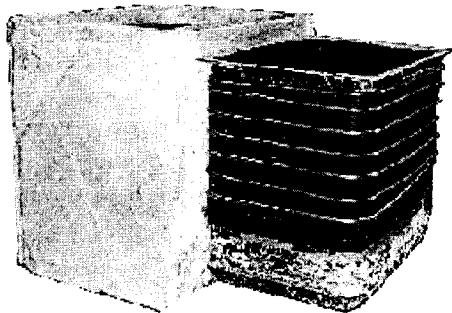


Fig. 1 Photograph of a keeping space.

큰 영향을 미치는 설계변수이다. 따라서 보관고 내의 온도분포의 균일성을 향상시키기 위해서는 증발관 배열형태에 대한 체계적인 고찰이 필요하다. 한편, 보관고의 각 면은 외부로부터의 열 침투를 가능한 한 차단하여 소비전력을 줄이기 위해 일정한 두께의 단열재가 입혀져 있다.<sup>(1)</sup> 현재 각 면의 단열재 두께는 간단한 1차원 열전도식을 이용하여 설계되므로 효과적인 단열처리에 있어 한계가 있다.

본 연구에서는 상용 열유동 해석코드인 CFX-5.3<sup>(2)</sup>을 사용하여 김치냉장고 내의 유동 및 열전달 특성을 상세히 규명함으로써 김치를 장기간 보관할 수 있는 작동원리를 밝히고자 하였다. 또한 증발관 배열형태의 변경에 따른 김치용기 내의 온도분포를 비교함으로써 온도분포의 균일성을 향상시킬 수 있는 증발관 배열형태의 개선방안을 제시하고자 하였다. 그리고 단열재 표면의 열유속 분포를 파악함으로써 단열재를 통한 열전달 특성을 고찰하였고, 외부로부터의 열전달률은 같게 유지하면서 단열재 양을 절감할 수 있는 단열재 두께에 대한 개선방안을 얻고자 하였다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식과 경계조건

김치냉장고 내의 유동 및 온도장을 수치해석하기 위하여 기계실 및 증발관 내부를 제외한 전

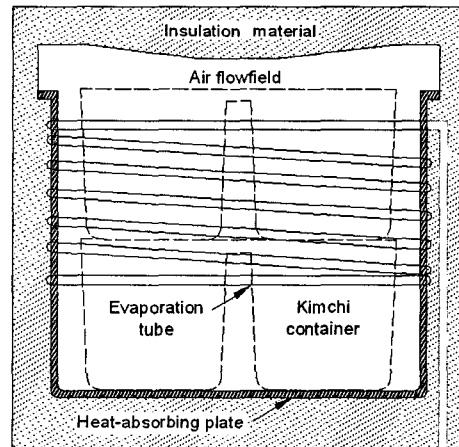


Fig. 2 Two dimensional view of computational domain.

Table 1 Material properties

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg·K)	$k$ (W/m·K)
Air 0°C, 1 atm	1.290	1008.7	0.025
Kimchi container (Salt water)	1155.1	33.85	0.454
Heat-absorbing plate (Aluminum)	2740.0	896.0	205.5
Insulation (Urethane foaming)	38.0	1590.0	0.021

영역을 해석대상으로 하였다. 또한, 보관고 형상은 좌우 대칭이고 같은 작동상태에 있는 것으로 가정하여 반쪽만을 계산영역으로 채택하였다. Fig. 2는 계산영역의 형상을 단면상에 나타낸 것으로 보관고 내의 공기유동장, 보관고 내에 적재되는 김치용기, 흡열판 및 단열재 등의 4부분으로 구성된다. 이때, 흡열판 외벽과 증발관의 접촉 정도는 위치에 따라 임의적으로 변하므로 본 연구에서는 3mm 폭으로 일정하게 접촉시켰다.

보관고 내의 유동은 흡열판 내벽의 수직 방향 온도차에 기인된 자연대류 유동으로 다음과 같은 지배방정식을 해석한다.

#### 연속방정식

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

#### 운동량방정식

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g}(\rho_o - \rho) \quad (2)$$

#### 에너지방정식

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T \quad (3)$$

여기서,  $\vec{u}$ 와  $p$  및  $T$ 는 각각 공기의 속도와 압력 및 온도이며,  $\rho$ 와  $\mu$  및  $c_p$ , 그리고  $k$ 는 각각 공기의 밀도와 점성계수 및 정압비열, 그리고 열전도계수를 나타낸다. 그리고  $\vec{g}$ 는 중력가속도이다. 공기유동의 속도 및 온도차가 크지 않기 때문에 부력항은 Boussinesq 가정을 이용하였고, Rayleigh 수는  $10^8$ 보다 작으므로 층류로 가정하였다.<sup>(3)</sup> 김치용기 경우, 실제 작동에서는 김치가 담겨 있지만 실험조건에 맞추어 염도 2.5%인 소금물로 취급하였으며 유동이 없는 고체로 가정하였다. 김

치용기와 흡열판, 그리고 단열재 등과 같은 고체 내의 온도장을 해석하기 위하여 아래의 열전도방정식을 위의 식들과 중첩하여 해석한다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (4)$$

여기서,  $T$ 는 고체온도이며  $\rho$ 와  $c_p$  및  $k$ 는 각각 고체의 밀도와 정압비열 및 열전도계수를 나타낸다. Table 2는 수치해석에 사용된 각 물질들의 물성치를 나타낸 것이다.<sup>(4)</sup> 김치냉장고의 실제 작동상태는 ON/OFF 제어에 의해 유동 및 온도장은 주기적인 변동을 한다. 또한 최초 작동시에는 과도적인 주기작동을 하며 얼마간의 시간이 경과한 후부터 일정한 주기작동을 한다. 따라서 실제 작동상태에 대한 수치해석은 상당한 계산시간 및 계산용량이 요구되어 현실적으로 어렵다. 본 연구에서는 대표적인 현상을 예측하는 데 초점을 맞추어 일정한 주기작동 상태에서 시간 평균화된 유동 및 열전달 특성을 밝히고자 하였다. 경계조건으로 계산영역의 바깥 표면에서는 실험조건에 맞추어 30°C의 온도를 부여하였고, 증발관 표면에서는 실험에 의해 측정된 온도를 시간 평균하여 적용하였다.

## 2.2 계산격자 및 수치기법

본 연구에서는 수치해석을 위해 상용 열유동 해석코드인 CFX-5를 사용하였다. 복잡한 형상을 갖는 계산영역 내에 격자를 원활히 구성하기 위해 사면체 형태의 비정형격자(tetrahedral-type unstructured grid)를 이용하였다. Fig. 3은 계산영역 내부의 표면격자 분포형태를 나타낸 것이다. 증발관 주변 및 공기유동이 접하는 고체 표면 부근에 매우 조밀한 격자를 분포시킨 비균일 격자계를 구성하였고 계산에 사용된 전체 격자의 개수는 약 300만 개이며 Compaq HPC160/320 기종을 사용하여 계

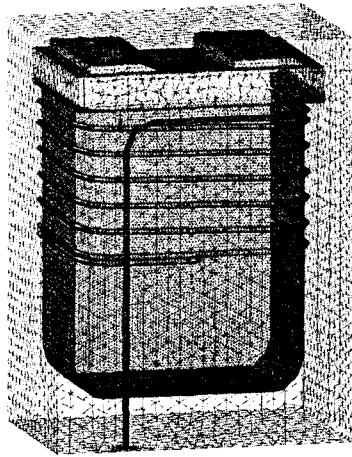


Fig. 3 Surface grid distribution.

산하였는데 1회 계산에 약 300시간이 걸렸다. 수렴판정 기준은 지배방정식의 RMS 잔류량을  $10^{-4}$  이하로, global imbalance를 1% 이내로 하였다.

3. 수치해석결과 및 고찰

3.1 보관고 내의 유속분포 및 온도분포

Fig. 4는 수치해석결과의 검증을 위하여 증발관에 의한 냉각에 따라 보관고 내벽에 형성된 수직 방향 온도분포를 실험결과와 비교한 것으로, 경계조건으로 적용된 증발관 표면온도도 함께 나타내었다. 실험결과의 경우, 수직방향 온도분포는 보

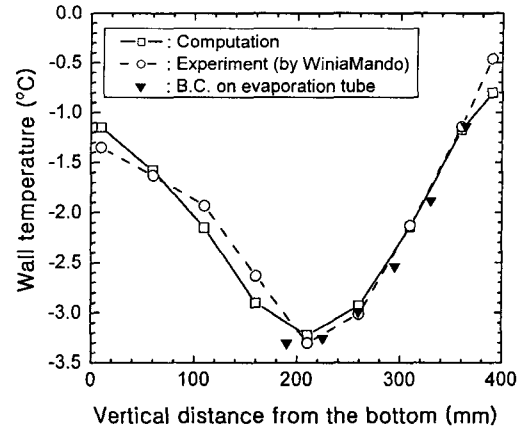
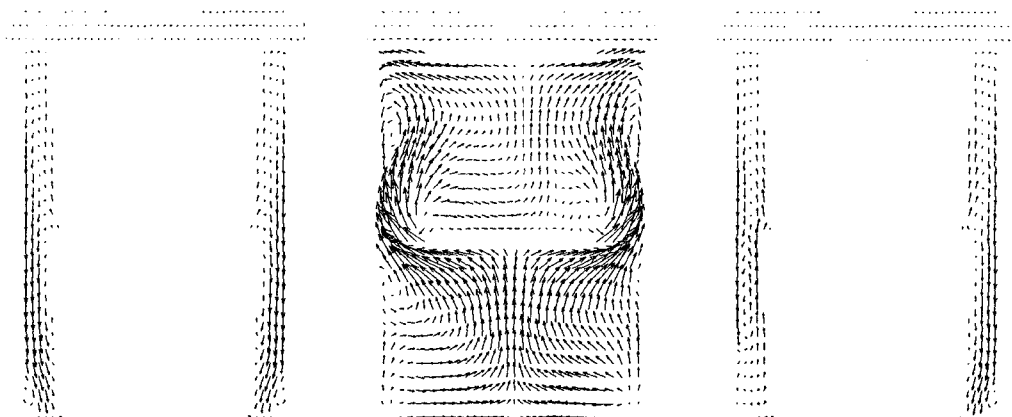


Fig. 4 Vertical temperature distribution on the inner wall of a keeping space.

관고 둘레를 따라 다소의 차이가 있는데 이는 흡열판과 증발관의 접촉 정도가 위치에 따라 다르기 때문이다. 여기서는 흡열판과 증발관의 접촉이 확실한 모서리 위치에서 두 결과를 비교하였다. 증발관이 감겨져 있는 보관고 위쪽에서는 두 결과가 매우 잘 일치하고 있으며, 특히 최저온도 및 그 위치가 잘 일치하고 있다. 보관고 상단과 아래쪽에서 약간의 온도차이는 있지만 전반적인 온도분포 경향은 합리적으로 일치하고 있다.

최저온도를 나타내는 위치는 증발관이 감기기 시작하는 부근으로, 증발관에 냉매가 유입되면서 증발량 및 이에 따른 잠열량 흡수가 가장 많기 때문이다. 보관고 위쪽으로 가면서 증발관 내의



(a) Plane near the front wall (b) Mid-plane (c) Plane near the rear wall

Fig. 5 Velocity distributions on three vertical planes in a keeping space.

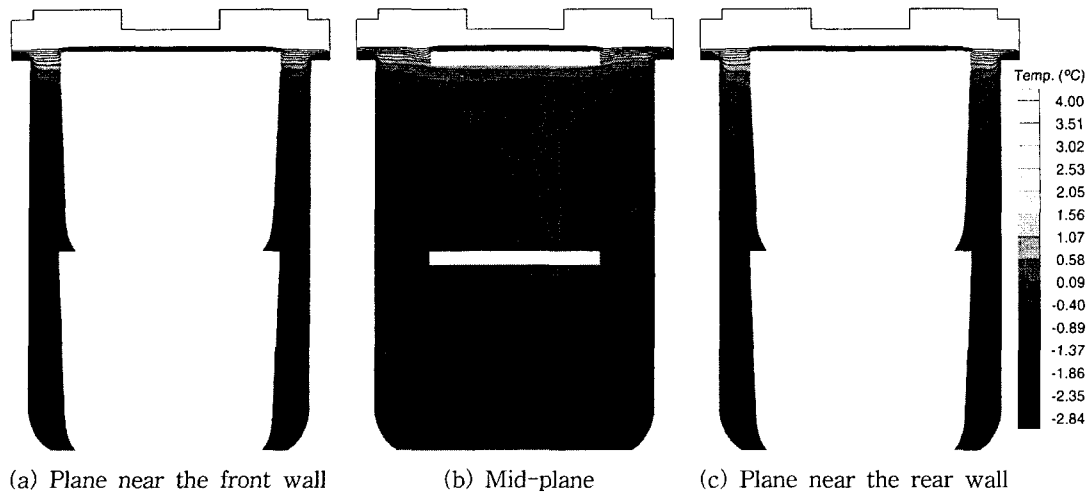


Fig. 6 Temperature distributions on three vertical planes in a keeping space.

냉매의 증발량이 점차 감소하고 흡수되는 잠열이 적어지면서 온도는 거의 선형적으로 증가하고 있다. 보관고 아래쪽으로는 흡열판 내의 열전도에 의해 온도가 증가하는데 이러한 온도분포에 따라 밀도차에 기인된 부력이 공기에 작용하게 된다.

Fig. 5는 보관고 내의 세 수직 단면에서 공기의 유속분포를 나타낸 것이다. 보관고 벽면 부근인 Fig. 5의 (a)와 (c) 경우는 보관고 내벽과 김치용기 사이의 좁은 공간을 통해 대체적으로 하향류가 형성되고 있으며 속도크기도 비슷하다. Fig. 5(c)의 왼쪽 영역의 하향류 세기는 나머지 영역에 비해 약함을 알 수 있는데 이는 보관고 내벽의 수직방향 온도분포의 차이에 의한 것으로 판단된다. 중앙 단면인 Fig. 5(b)의 경우는 안쪽으로 모이는 상향류가 발생하고 있는데, 특히 김치용기에 의해 유로의 대부분이 막히는 중간 높이지점에서는 보관고 내벽과 김치용기 사이의 좁은 공간에서 매우 빠른 유속분포를 나타낸다. 한편, 모든 경우에 있어 미약한 와류가 국소적으로 형성되고 있다. 결과적으로 보관고 내의 유동은 최저 온도를 갖는 보관고 내벽 근처의 가장 차가워진 공기가 보관고의 네 모서리를 따라 바닥까지 하강한 후에 중앙으로 합쳐져 보관고의 약 5/6 높이지점까지 위로 상승하고 다시 모서리를 따라 하강하는 패턴을 나타낸다. 즉, 보관고 전체 영역에 걸쳐 크게 순환하는 자연대류 유동이 형성되고 있다. 한편, 보관고 위쪽의 약 1/6 영역은 유동이 거의 없이 정체된 상태를 보여준다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 세 단면에서 공기의 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a)와 (c) 경우, 공기온도는 최저온도를 갖는 보관고 내벽 근처에서 가장 낮은 온도를 나타내며 하향하는 유동패턴에 따라 안쪽으로 약간씩 높아지고 있다. Fig. 6(b)의 경우, 공기온도는 중간 높이지점에서 형성되는 강한 상향류에 의해 위아래로 분할되어 가장 낮은 온도영역이 형성되며 상향하는 유동패턴에 따라 안쪽으로 서서히 높아진다. 한편, 모든 경우에 있어 유동이 정체되어 있는 보관고 위쪽의 약 1/6 영역은 비교적 높은 온도로 급속히 성층화된 분포를 나타내고 있다. 전반적으로 김치냉장고 보관고 내에는 크게 순환하는 자연대류 유동에 의해 공기는 대부분의 영역에서  $-1^{\circ}\text{C}$  전후의 비교적 균일한 온도분포를 갖게 되며 이로부터 김치를 시어지지 않는 상태로 장기간 보관할 수 있는 성능이 얻어지게 된다.

Fig. 7은 보관고 내에 적재된 김치용기 표면의 온도분포를 나타낸 것이다. 김치를 장기간 시어지지 않는 상태로 보관하기 위하여 요구되는 온도조건으로, 김치용기 내의 온도는  $0^{\circ}\text{C}$  기준으로  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  편차 이내의 조건을 만족해야 한다. Fig. 7을 살펴보면, 김치용기 표면의 약 90% 영역이 이 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 따라서 김치용기 내에는 김치용기 표면의 온도범위에 맞추어  $0^{\circ}\text{C}$  전후의 비교적 균일한 온도장이 형성되며 김치를 장기간 보관할 수 있는 성능이 얻어진다. 한편, 김치용기 모서리 부근에 국소적으로

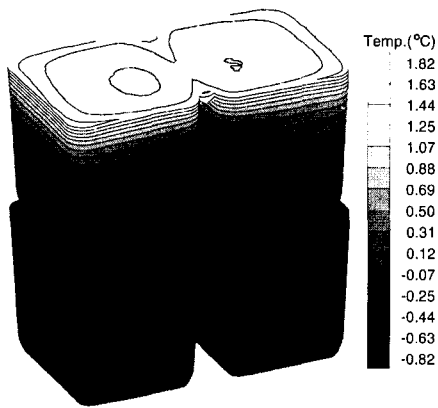


Fig. 7 Temperature distribution on the outer surface of Kimchi containers.

-0.5°C 이하의 온도를 갖는 영역이 존재하는데 이는 가장 차가운 공기유동과 접하기 때문이다. 또한, 위층에 놓인 김치용기의 위쪽 영역은 앞에서 고찰한 공기의 성층화된 온도분포에 따라 약 1.8°C까지 이르는 높은 온도로 급격히 성층화된 온도분포를 나타낸다. 이러한 온도분포로 인하여 현재 위쪽에 놓인 김치가 상대적으로 빨리 시어지는 기술적 한계가 발생하고 있는 것으로 판단된다. 현재와 같은 증발관에 의한 냉각방식에서는 보관고 위쪽에 형성되는 고온영역은 불가피한 현상이며 따라서 김치냉장고 도아부에 별도의 냉각장치를 추가하여 고온영역을 제거시킬 수 있는 기술개발이 요구된다.

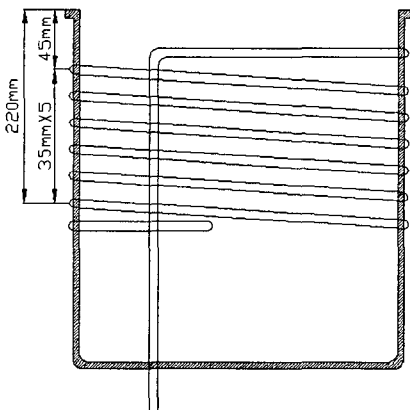


Fig. 8 The present arrangement of a evaporation tube.

Table 2 Alternated design parameters of the evaporation tube arrangement

Case	Starting location (mm)	Pitch
1	185	Equal
2	165	Equal
3	220	Unequal Widening upward
4	220	Unequal Widening downward

3.2 증발관 배열형태 변경

증발관은 김치냉장고의 보관고를 냉각시키는 근원이므로 흡열관 외벽에 감겨져 있는 증발관 배열형태는 보관고 내의 온도분포에 가장 큰 영향을 미치는 설계변수이다. 증발관의 배열형태는 증발관이 감기기 시작하는 위치 및 증발관이 감기는 피치의 2가지 인자로 결정된다. Fig. 8은 현재의 증발관 배열형태를 나타낸 것으로 흡열관 상단에서 220 mm 아래 지점부터 감기기 시작해서 위쪽으로 35 mm 간격의 등 피치로 총 6열로 감겨져 있다.

본 연구에서는 보관고 내의 온도분포 균일성을 향상시킬 수 있는 증발관 배열형태에 대한 개선 방안을 얻기 위하여, Table 2에 나타낸 4가지 경우로 변경시킨 증발관 배열형태를 대상으로 수치해석을 수행하였다. Case 1과 Case 2는 증발관이

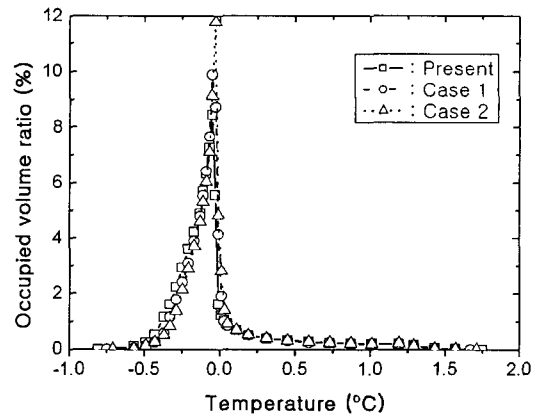


Fig. 9 Comparison of occupied volume ratio classified by temperature according to the alternation of starting location.

감기기 시작하는 위치변경에 따른 영향을 고찰하기 위하여 현재보다 시작위치를 위로 올린 경우이며 현재와 같이 등 피치로 배열하였다. Case 3과 Case 4는 증발관이 감기는 피치변경에 따른 영향을 고찰하기 위하여 시작위치는 현재와 같게 하고 일정한 비를 갖는 부등피치로 배열한 경우이다. 모든 경우에 있어 증발관의 총 길이는 같으며 마지막 열의 증발관 위치는 보관고 내벽에 결로(dew fall)가 발생하는 기술적 문제로 인해 현재와 같게 유지하였다.

Fig. 9는 증발관이 감기기 시작위치를 변경시킨 Case 1과 Case 2, 그리고 현재 경우에 대해 김치용기 내의 온도별로 점유되는 체적비율을 나타낸 것이다. Fig. 9를 살펴보면, 모든 경우에 있어 체적비율은 약 0°C에서 급격한 피크를 나타내고 좌우로 폭이 매우 좁게 형성되고 있는데 이는 김치용기 내의 온도분포가 0°C 근처로 집중되어 있음을 의미한다. 0°C 이상에서 체적비율은 급격히 감소하지만 Fig. 7에서 고찰한 김치용기 위쪽의 성층화된 온도분포에 따라 약 1.8°C까지 이르는 약간의 영역이 나타난다. 0°C 이하에서는 약 -0.5°C까지 걸쳐 비교적 일정하게 감소하며 -0.5°C 이하의 온도를 갖는 영역은 거의 미미하게 나타난다. 현재의 경우, 김치를 장기간 보관하기 위한 요구조건인  $0 \pm 0.5^\circ\text{C}$  이내의 온도를 갖는 체적비율은 89.6%이며 0.5°C 이상은 9.6%, -0.5°C 이하의 0.8%로, 김치용기 내의 대부분의 영역은 요구되는 온도기준을 만족하고 있다. 그러나 9.6%의 체적비율을 갖는 0.5°C 이상의 고온영역은 앞에서 고찰한 바와 같이 개선이 요구되는 기술적 문제이다.

3의 경우를 비교해 보면, 증발관이 감기기 시작하는 위치를 위로 올릴수록 0°C 온도를 갖는 체적비율의 피크값이 높아지면서 좌우의 폭도 약간씩 좁아지고 있음을 알 수 있다.  $0 \pm 0.1^\circ\text{C}$  내의 온도를 갖는 체적비율을 비교해 보면, 현재의 경우는 34%, Case 1은 42%, Case 2는 46%로 증가한다. 즉, 증발관이 감기기 시작하는 위치를 위로 올릴수록 김치용기 내의 온도분포는 0°C 근처로 더 집중되어 온도분포의 균일성이 향상되는 것을 의미한다. 이것은 증발관이 감기기 시작하는 위치를 위로 올리면 보관고 내벽의 최저온도 위치도 올라가게 되어 보관고 내에 자연대류가 더 활발하게 형성되는 것에 기인된다. 한편, 세 경우

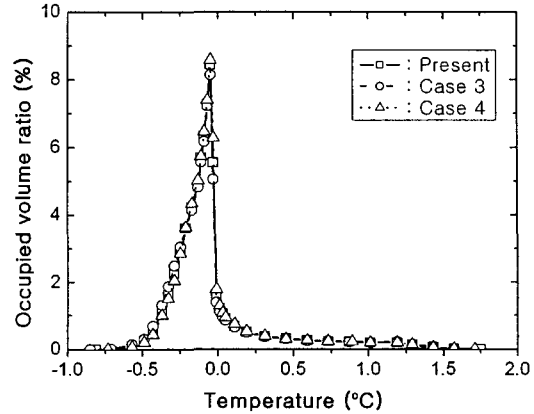


Fig. 10 Comparison of occupied volume ratio classified by temperature according to the alternation of pitch.

모두 0.5°C 이상의 온도를 갖는 체적비율은 거의 같은데, 즉 김치용기 위쪽 영역의 높은 온도로 성층화된 분포는 변화가 없음을 나타낸다. 이것은 마지막 열의 증발관 위치가 동일하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 증발관이 감기는 피치를 변경시킨 Case 3과 Case 4, 그리고 현재 경우에 대해 김치용기 내의 온도별로 점유되는 체적비율을 나타낸 것이다. 3의 경우 모두 온도에 따른 체적비율 분포는 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 즉, 증발관의 시작 및 끝 위치가 동일한 조건에서 피치를 변경하여 그 사이에서 보관고 내벽의 온도분포를 변화시키는 것은 보관고 내의 자연대류 유동패턴에 거의 영향을 미치지 않음을 의미한다. 따라서 증발관 배열의 피치변경은 김치용기 내의 온도분포의 균일성 향상에 효과가 없는 것으로 판단된다.

### 3.3 단열재를 통한 열전달 특성

현재 김치냉장고 보관고 바깥의 각 면에 입혀져 있는 단열재 두께는 간단한 1차원 열전도식을 이용하여 설계된다. 따라서 효과적인 단열처리에 의해 소비전력을 줄이든지, 효율적인 단열재 배치에 의해 단열재 재료비용을 절감하는 측면에서 기술개발이 요구되고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 김치냉장고의 단열재를 통한 열전달 특성을 상세히 고찰하였다.

Fig. 11은 현재의 경우, 단열재 바깥 표면에서

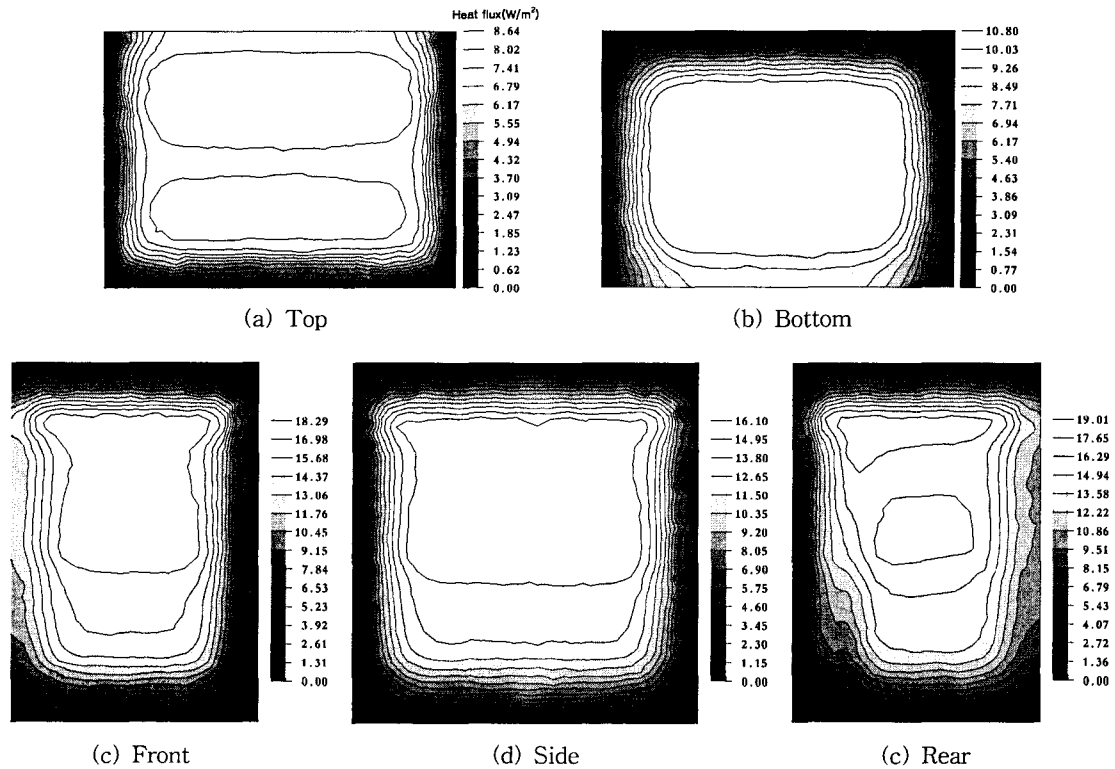


Fig. 11 Heat flux distributions on the insulation surfaces of the present case.

의 열유속분포를 각 방향에 따라 나타낸 것이며, Table 3에는 각 방향의 단열재 두께 및 평균 열유속 크기를 제시하였다. Fig. 11을 살펴보면, 모든 경우에 있어 면의 중앙으로 갈수록 열유속이 증가하는 유사한 형태의 2차원 분포를 보여준다. 흡열판과 접하는 아랫면, 앞면, 뒷면 및 옆면은 흡열판의 위치에 대응하는 영역에서 열유속이 큰 값을 나타내고 있다. 특히, 증발판과 접하는 앞면, 뒷면 및 옆면은 증발판이 감겨 있는 위치에 대응하는 영역에서 가장 큰 값의 열유속이 분포되어 있다. 따라서 효과적인 단열처리를 위해서는 현재 각 방향으로 일정한 값을 갖고 있는 단열재 두께를 이러한 열유속 분포에 맞추어 불균일하게 조정하는 것이 필요하다. Table 3에 주어진 단열재 바깥 표면에서 각 방향의 평균 열유속 크기를 비교해 보면, 앞면, 뒷면, 그리고 옆면이 윗면과 아랫면에 비해 약 1.5배 정도 큰 값을 가지고 있다. 이것은 앞면, 뒷면, 그리고 옆면의 경우 증발판과 직접 접하므로 단열재 양단의 온도차가 크기 때문이다. 윗면의 경우는 보관고 위쪽

Table 3 Insulation thickness and mean heat flux in each directions of the present case

Location	Insulation thickness (mm)	Mean heat flux (W/m <sup>2</sup> )
Top	35.0	6.83
Bottom	63.0	7.70
Side	34.8	10.80
Front	37.3	11.88
Rear	37.3	11.67

에 형성된 고온 영역으로 인해 단열재 양단의 온도차가 작게 주어지며, 아랫면의 경우는 단열재 두께가 상대적으로 두껍기 때문이다. 따라서 열유속이 적은 윗면과 아랫면의 단열재 두께는 현재보다 줄이고 앞면, 뒷면, 그리고 옆면의 단열재 두께를 늘리는 방향으로 두께를 조정한다면 현재와 같은 단열성능을 유지하면서 단열재 양을 절감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 현재의 단열재 두께를 변경하여,



Table 4 Mean heat flux in each directions according to the variation of insulation thickness

Location	Mean heat flux (W/m <sup>2</sup> )
Top	6.84 (0.2%)
Bottom	9.91 (28.7%)
Side	10.84 (0.4%)
Front	11.08 (-6.7%)
Rear	10.73 (-8.1%)

단열재를 통한 외부로부터의 열전달률은 현재와 같게 유지하면서 단열재 양을 절감할 수 있는 하나의 방안을 검토하였다. 단열재 두께 변경은 Table 3에서 고찰한 각 방향의 평균 열유속 크기를 토대로 아래쪽 단열재 두께는 13mm 줄이고, 앞쪽과 뒤쪽의 단열재 두께는 3mm 늘렸다. 이에 따라 단열재 체적은 현재에 비해 3.5% 감소된다. 위쪽의 경우는 열유속이 가장 적지만 도아구조 문제로 인해 단열재 두께를 변경하지 않았다.

Table 4는 단열재 두께 변경에 따른 각 방향의 단열재 바깥 표면에서의 평균 열유속 크기를 나타낸 것으로, Table 3에 주어진 현재 경우를 기준으로 한 변화량을 백분율로 함께 제시하였다. 단열재 두께의 변화가 없는 윗면과 옆면에서는 평균 열유속의 변화가 거의 없다. 단열재 두께를 늘린 앞면과 뒷면에서는 평균 열유속이 각각 6.7% 및 8.1% 감소하였고, 단열재 두께를 줄인 아랫면에서는 28.7% 증가하였다. 이러한 평균 열유속 변화에 따라 윗면을 제외한 나머지 면에서 평균 열유속은 거의 비슷한 크기를 보이고 있다. 단열재를 통한 열전달률을 구해 보면 11.27 W로 현재 경우의 11.30 W와 거의 차이가 없었다. 따라서 단열재를 통한 외부로부터의 열전달률은 거의 같으면서 현재에 비해 단열재 양을 3.5% 줄임으로써 단열재 비용을 절감할 수 있는 개선방안을 얻었다. 또한, 앞에서 고찰한 단열재 각 표면에서의 열유속 분포를 토대로 한 단열재 두께의 추가적인 변경이 이루어진다면 단열재 양을 더욱 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 김치냉장고의 보관원리를 규명

하고 증발관 배열형태 변경에 따른 김치용기 내의 온도분포를 비교하며 보관고 각 면의 단열재를 통한 열전달 특성을 밝히기 위하여, 수치해석적 방법을 이용하여 김치냉장고 내의 유동 및 열전달특성을 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 김치냉장고 보관고 내에는 보관고 바닥으로부터 전체의 약 5/6 영역에 걸쳐 크게 순환하는 자연대류 유동이 발생되며 이 영역 내에는 약 -1°C 전후의 비교적 균일한 공기온도장이 형성된다. 이에 따라 김치용기 내의 약 90% 영역이 온도 설정기준인 0±0.5°C 내에 들어감으로써 김치를 장기간 시어지지 않는 상태로 보관할 수 있는 성능이 얻어진다.

(2) 보관고 위쪽의 약 1/6 영역은 유동이 거의 없이 정체되어 있으며 높은 온도로 급속히 성층화된 분포를 나타낸다. 이것이 현재 위쪽에 놓인 김치가 상대적으로 빨리 시어지는 기술적 한계의 원인으로 판단된다.

(3) 증발관이 감기기 시작하는 위치를 변경시킨 Case 1과 Case 2의 경우에, 0±0.1°C 내의 온도를 갖는 체적비율은 현재의 34%에 비해 각각 42% 및 46%로 증가한다. 즉, 증발관의 시작위치를 위로 올릴수록 김치용기 내의 온도는 0°C 근처로 더 집중되어 보다 균일한 온도분포가 얻어진다. 한편, 증발관이 감기는 피치를 변경시킨 Case 3과 Case 4의 경우에, 김치용기 내의 온도 분포는 현재에 비해 거의 변하지 않는다.

(4) 단열재 바깥 표면에서의 열유속 분포는 모든 방향에서 면의 중앙으로 갈수록 큰 값을 갖는 2차원 분포를 나타낸다. 증발관과 직접 접하는 앞면, 뒷면, 그리고 옆면에서의 평균 열유속은 윗면과 아랫면에 비해 약 1.5배 큰 값을 가지며 윗면에서는 보관고 위쪽에 형성된 고온 영역으로 인해 가장 적은 값을 갖는다.

(5) 보관고 앞쪽과 뒤쪽의 단열재 두께를 현재보다 3mm 늘리고 아래쪽을 13mm 줄인 단열재 두께 변경을 통해 외부로부터의 열전달률은 현재와 같게 유지하면서 단열재 양을 3.5% 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학기술정보연구원의 2002년도

초고속응용기술지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Kang, S. H., Koo, B. K., Hwang, H. Z., Seok, H. T., Ahn, H. S. and Song, S. Y., 2003, Optimized insulation thickness of the refrigerated warehouse with different envelope structures and insulation materials by L.C.C. analysis, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 372-381.
2. AEA Technology Inc., 2000, CFX-5.3 Release Notes.
3. Rogers, G. F. C. and Mayhew, Y. R., 1980, *Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer*, Longman.
4. Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. L. and Sammakia, B., 1988, *Buoyancy-Induced Flows and Transport*, Hemisphere, New York.