

양문 여닫이형 냉장고 냉동실 결빙 최소화를 위한 토출구형상 최적설계

Optimal Design of Blowing Plates to Minimize the Freezing Phenomena in the Freezer of a Side-by-side Refrigerator

곽수민 · 이영환 · 이연원 · 금종수 · 김남식 · 김상배

S. M. Kwak, Y. H. Lee, Y. W. Lee, J. S. Kum, N. S. Kim and S. B. Kim

Key Words : Freezing Phenomena(결빙현상), Freezer(냉동실), Characteristics of Cold Air Flow(냉기 유동 특성), Standard k-ε Turbulence Model(표준 k-ε 난류모델)

Abstract : As side-by-side refrigerators came into existence, there has been a growing concern about the freezing-up of the vital equipment in a walk-in freezer. Due to a bad performance, customers are experiencing too much frustration. In order to minimize the freezing phenomena, the numerical simulation has been performed on the characteristics of cold air flow in a side-by-side refrigerator. The flow field has been simulated with a standard k-ε turbulent model and a SIMPLE algorithm based on the finite volume method. Through the results of the analysis of the pattern of cold air flow, finally the shape of outlet for cold air flow was modified. The present model was compared with the modified model. The latter was better than the former in minimizing the freezing phenomena.

1. 서 론

결빙이나 착상현상¹⁻²⁾은 공기중에 포함된 수증기가 이슬점보다 낮고 0°C보다 낮은 냉각면과 접촉 경우 냉각면에 서리층이 형성되는 것을 말한다.

냉장고의 냉동실 및 냉장실은 식품의 신선도를 높여준다는 측면과 외부 습공기 유입시 냉기와 치환되어 결빙 및 착상이 발생된다는 측면에서 적절한 냉기분배를 위한 최적의 시스템 설계는 상당히 중요하다고 볼 수 있다. 냉장고 내에서 발생하는 결빙구역은 두 가지로 구분 할 수 있다. 첫째는 저온의 냉기를 발생시키는 증발기에서고 두번째는 냉장고 내 벽면이나 선반 등 구조물표면에 발생하는 것이다. 증발기에서 발생하는 결빙은 별도의 제상장치를 가지는 반면 냉장 및 냉동실내에서 발

생하는 결빙은 별도의 제상장치를 가지지 않으므로 제거가 어렵다. Fig. 1에서는 냉장실 및 냉동실 문을 열고 닫을때 외부 습공기가 유입되어 냉기와 서로 치환되고 일정한 시간이 경과한 후 냉장고내 주요부위의 결빙불량률을 나타낸 도표인데 전체 결빙불량률의 85%가 냉동실이 차지하고있고 그중 선반 부위의 결빙불량률이 가장 높게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 결빙불량률이 높게 나타나는 냉동실의 냉기유동패턴을 분석하여 냉기의 최적 유로를 설계하고 궁극적으로 결빙을 해소시키고자 하는데 그 목적을 두고 있다.

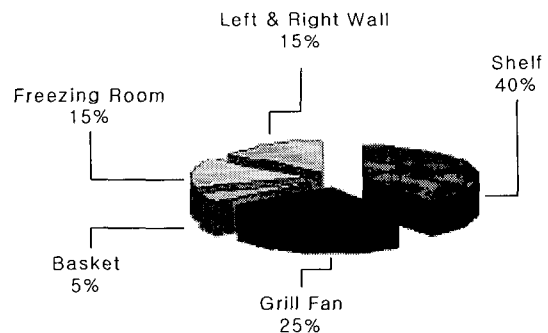


Fig. 1 Frosted weight percentage in a refrigerator

접수일 : 2003년 2월 22일
이연원(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : ywlee@pknu.ac.kr Tel : 051-620-1417
금종수, 김남식 : 부경대학교 기계공학부
곽수민, 이영환 : 부경대학교 대학원
김상배 : LG 전자 냉장고 사업부

2. 수치 해석

2.1 계산모델

본 수치시뮬레이션 모델로 채택한 가정용 냉장고는 좌측은 주로 음식을 냉동 저장하는 냉동실, 우측은 저장을 주목적으로 하는 냉장실을 기본으로 하는 양문여단이형(Side-by-side type) 냉장고로서 Fig. 2에서 냉동실의 기하학적인 형상과 간단한 냉기흐름을 도시하였다. 냉동실 후단에 위치하고 있는 증발기에서는 주위의 열을 흡수하여 저온의 냉기를 발생시키고 그 저온의 냉기는 증발기 상부에 위치한 냉기 순환팬과 팬 전방에 위치한 토출판으로 순환하게 되고 토출판에 있는 각각의 토출구를 통해 일정한 방향을 가지면서 고내로 유입하게 된다. 유입된 냉기는 선반, 제빙그릇, 바스켓 등을 거치면서 하부로 자연대류하면서 내려오고 하부에 위치한 흡입구(return duct)를 통해 고내를 빠져나가면서 연동적으로 순환하게 된다³⁾.

본 모델의 수치계산 영역은 냉동실 내부이며 각 부위면의 유동현상을 파악하기 위해서 선반 및 아이스트레이, 제빙그릇 등 내부 구조물들도 포함시켰다.

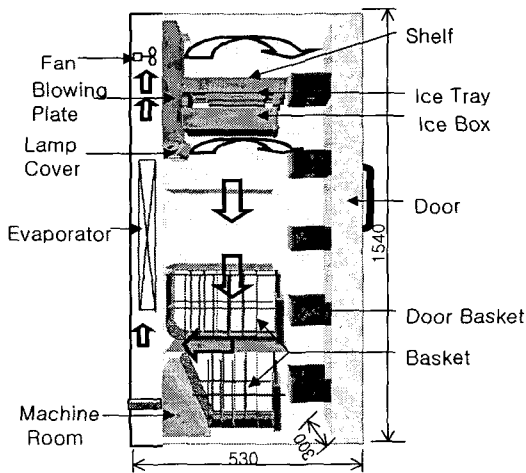


Fig. 2 Overview of a refrigerator and its cold air flow pattern

2.2 지배방정식 및 경계조건

수치계산을 수행하기 위하여 내부유체 유동형태는 3차원 정상상태, 비압축성, 난류유동이고 작동유체의 물성치들은 일정하게 유지된다는 가정을 하였다. 그리고 예측성능이 우수하고 광범위하게 이용되어지고 있는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였고, 비압축성 정상상태 3차원 난류유동의 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식, 난류운동에너지

방정식, 난류운동에너지 소산율방정식으로 구성되어 있고 다음의 식 (1)~(6)과 같다⁴⁻⁶⁾

연속방정식:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

운동방정식:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, $u_i u_j$ 는 시간평균 속도이다. Reynolds 응력($-\rho \overline{u_i' u_j'}$)을 분자점성에 의한 응력과 같은 구배확산형으로 나타내면 식(3)과 같이 된다.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k \delta_{ij}) \quad (3)$$

여기서 난류점성 μ_t 는 난류 운동에너지(k)와 소산율(ϵ)으로부터 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서 C_μ 는 모델상수이며, 식 (4)의 난류 운동에너지(k)와 소산율(ϵ)은 식(5) 및 식(6)에서 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서, G_k 는 Reynolds 응력때문에 발생하는 난류 운동에너지 생성항이며 식(7)과 같이 된다.

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

난류모델 상수들은 식(8)과 같이 정의하였다.

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (8)$$

또한, 수치계산의 경계조건에서 입구조건은 토출구(①~⑦)를 통해 냉동실내로 유입되는 냉기를 초음파 풍속계(KAIJO사)로 10회이상 반복 측정된 속도성분의 평균값을 직교계의 X, Y, Z 성분으로 변환한 정량적인 값을 적용하였고, 질량보존을 만족시키기 위해 이 값을 토대로 출구조건은 흡입구

(⑧)를 통해 빠져나가는 풍속을 측정하여 그 값을 보정하여 출구 경계조건으로 주었다. 냉동실내의 복잡한 형상과 유입 및 유출되는 입, 출구 경계면에서의 계산을 정확히 하기위해 사용 격자의 형태는 엇갈림 격자(staggered grid)로 하였으며 사용 격자수는 약 300만개이다.

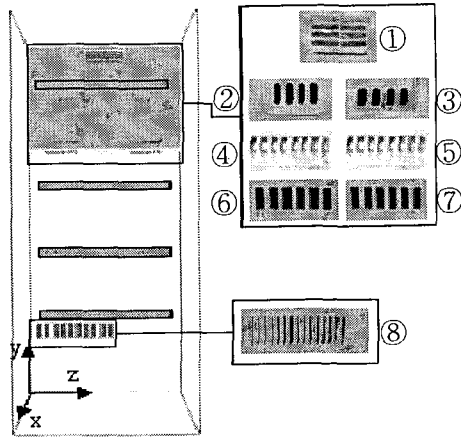
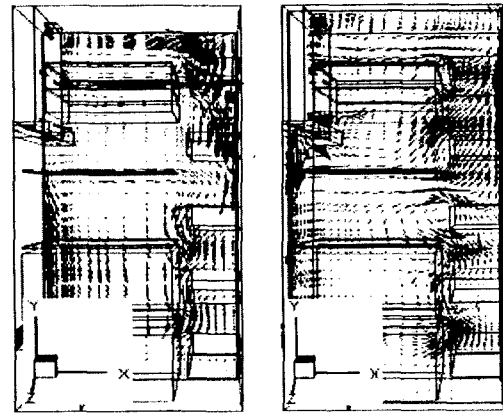


Fig. 3 Inlet and outlet model for numerical simulation

3. 현황 및 개선 아이디어

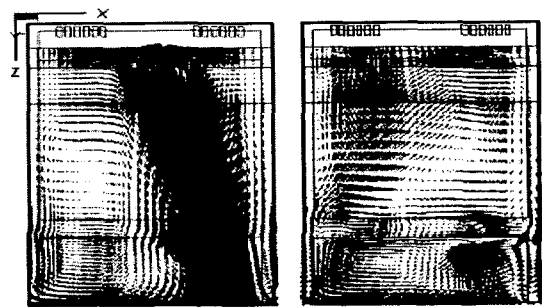
3.1 현 냉장고 유동 패턴

냉동실내의 결빙불량율이 높게 나타나는 선반과 좌, 우 벽면부위의 유동패턴을 파악하기위해 Fig. 4와 5에서 냉기 유동 패턴을 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 우측벽면에서 15mm에 위치한 x-y 단면에 대한 유동패턴이다. ①번 토출냉기의 영향을 받아 벽면 상부오른쪽 도어 바스켓 부위에서 냉기의 분포가 많이 나타나는 것을 볼 수 있다. (b)는 좌측벽면에서 15mm에 위치한 유동패턴인데 상부에 위치한 도어바스켓 부근에서 냉기가 유인되어 고내로 들어오는 것이 관찰된다. Fig. 5는 x-z 단면에 대한 유동패턴이다. (a)는 ①번 냉기 토출구 위치로서 냉기가 우측으로 향하면서 토출되고 있다. (b)는 ①번과 ②, ③번 사이에 위치한 최상부 선반면으로 도어바스켓에서 선반면으로 토출되었던 냉기가 유인되어 들어오는 것이 관찰된다. (c)는 ②, ③번 냉기 토출구 위치의 유동패턴으로 ③번 토출구에서 토출되는 냉기의 기류방향이 우측으로 향하고 있다. (d)는 ⑥, ⑦번 토출구 아래에 위치한 두 번째 선반면의 유동패턴으로 도어바스켓에서 선반면으로 냉기가 유인되어 들어오는 것이 나타난다.

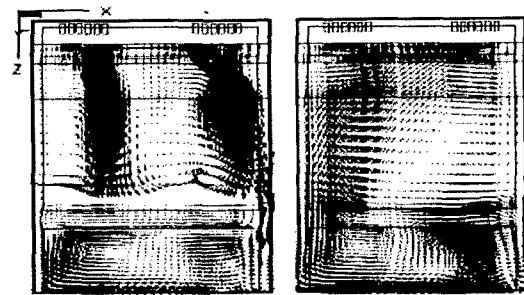


(a) $z=15\text{mm}$ right wall (b) $z=285\text{mm}$ left wall

Fig. 4 Distributions of flow pattern in the freezing room at x-y plane



(a) $y=1400\text{mm}$ (b) $y=1350\text{mm}$ top shelf



(c) $y=1300\text{mm}$ (d) $y=930\text{mm}$ second shelf

Fig. 5 Distributions of flow pattern in the freezing room at x-z plane

이상에서 냉동실 상부에 위치한 냉기 토출판에서 토출되는 냉기의 방향이 우측으로 토출되어 좌측으로 순환되면서 하부로 내려오는 것을 알 수 있다. 이때 냉동실 문을 열었을 때 냉동실 상부 좌측공간으로 외부 습공기 유입이 더욱 촉진되고 유입된 습공기는 벽면 및 선반면 등에 착상 및 결빙을 발생시키는 원인이 된다.

3.2 개선 모델 선정

냉동실 상부에 위치한 토출판의 토출구에서 나오는 냉기의 풍향을 전체적으로 중앙으로 유도하여 외부습공기 유입량을 최소화시키고 이에 따른 개선 아이디어로 냉기토출판 토출구의 안내깃을 변경하여 토출냉기의 방향을 변경하는 것이다. 그리고 흡입구의 안내깃을 변경하여 토출냉기가 원활히 흡입구(return duct)로 흡입순환 될 수 있도록 하는 것이다.

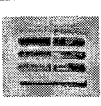





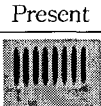
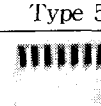
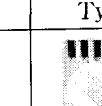
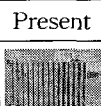
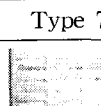
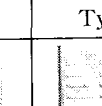
Discharge	Present	Type 1	Type 2	Type 3
Top ①				
Upper ③	Present	Type 4		
				
Middle ④⑤	Present	Type 5	Type 6	
				
Suction ⑧	Present	Type 7	Type 8	
				

Fig. 6 Modification of blowing plates

Fig. 6에서는 토출구와 흡입구의 안내깃의 형상을 변경한 모델을 나타낸 그림이다. ①번 토출구의 안내깃은 기존 중앙에 설치된 것을 Type 1에서는 좌로 12mm, Type 2에서는 우로 12mm, Type 3에서는 좌우 양쪽으로 12mm 변경시켜 기존 우측으로 나오는 기류를 중앙으로 유도하여 외부습공기 유입차단을 도모하였다. 또 ③번 토출구는 토출구 바로 밑에 설치된 안내깃을 토출구 위로 변경하여 구조물의 지속적인 과냉 방지 및 토출기류의 방향을 중앙으로 유도하고자 하였다. ④, ⑤번 토출구는 기존 10mm 안내깃의 폭을 Type 5에서는 20mm, Type 6에서는 30mm로 변경하여 상부에서 내려오는 냉기류의 원활한 순환을 도모하였다. 그리고 흡입구(⑧)은 냉기의 원활한 흡입 순환을 촉진시키기 위해 수직으로 세워진 안내깃을 Type 7과 8에서 수평으로 변경하였다⁷⁾.

이상 변경한 토출구 6가지 Type과 흡입구 2가지 Type을 Table 1에서는 각 변경 Type을 조합하여 모두 5가지 모델로 채택하였고 각 모델에 대한 결빙실험을 시행하였다.

Table 1 Modified models

Classification	Item	Modified model
Discharge	Type 1, 4, 5	Model 1
	Type 2, 4, 6	Model 2
	Type 3, 4, 6	Model 3
Suction	Type 7	Model 4
	Type 8	Model 5

3.3 실험 방법

결빙실험의 기준은 소비자 중심에서 결빙불량률이 나타날 수 있는 최대 조건을 적용하였다. 실험 조건으로 냉장고가 가장 활발하게 운전될 수 있도록 향온습실의 온, 습도(여름기준)를 30℃, 87%의 조건으로 하였다. 그리고 부하시 냉장고내의 온도변화(냉동실:-21℃, 냉장실:3℃ 기준)를 파악하기 위해 C-C열전대, 노점온도계를 활용하였으며 결빙량을 측정하기 위해 정밀저울(1g/150kg, 0.01/2kg, PESA사)을 사용하였다. 실험 방법은 무부하 냉장고를 정격전압으로 운전시켜 고내온도가 안정되고 칫 제상이 완료된 것이 확인되면 도어 개폐를 실시하는데 개폐시간은 10시간 기준으로 냉동실은 총 40회(10초/15분), 냉장실은 120회(10초/5분)로 개폐한다. 그 후 14시간동안 도어를 닫은 상태에서 고내를 안정시킨다. 운전이 완료되면 냉장고를 끄고 향온습실의 온도를 5℃로 고정시킨후 결빙량을 측정한다⁸⁻⁹⁾.

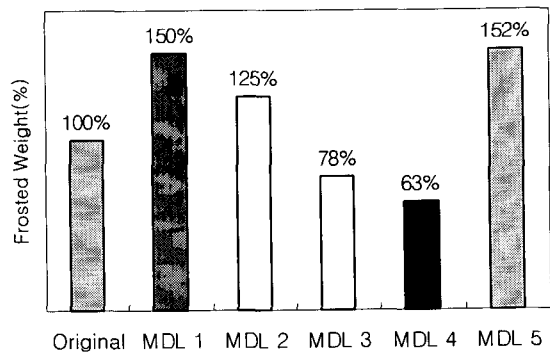


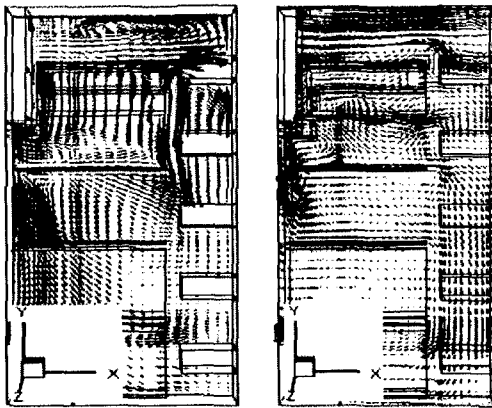
Fig. 7 Test results for various models

Fig. 7은 결빙실험을 통한 현 냉장고 냉동실내에서 발생하는 전체 결빙량과 변경모델별로 나타낸 결빙량 증감표이다. 기존보다 개선된 모델은 3, 4로써 각 22%, 37% 개선 되었다. 따라서 (토출구 변경모델 3) + (흡입구 변경모델 4)를 복합하여 최종 개선 모델을 선정하였다.

4. 검증계산 및 실험

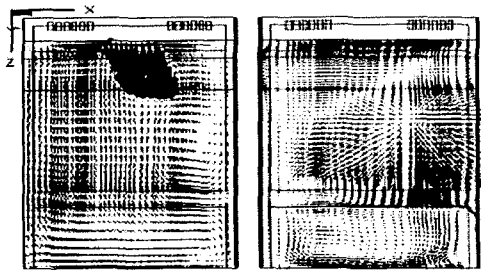
4.1 수치시물레이션

Fig. 8과 9는 개선모델(토출변경3 + 흡입변경4)에 대한 냉기유동 패턴이다. x-y 단면 Fig. 8의 (a)에서 ①번 토출구 지점에서의 유동은 토출판에서 도어바스켓쪽으로 냉기가 일정하게 흘러나가는 것이 관찰된다. (b)는 좌측벽면 부근의 유동패턴인데 기존 도어바스켓에서 토출판으로 유인되는 냉기는 나타나지 않는 것이 관찰된다.

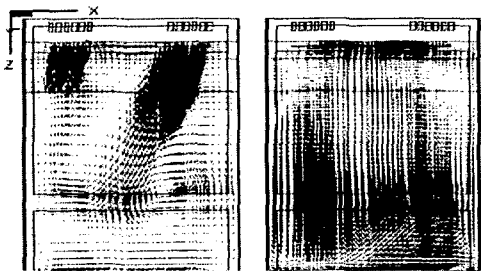


(a) z=15mm right wall (b) z=285mm left wall

Fig. 8 Distributions of flow pattern in the freezing room at x-y plane



(a) y=1400mm (b) y=1350mm top shelf



(c) y=1300mm (d) y=930mm second shelf

Fig. 9 Distributions of flow pattern in the freezing room at x-z plane

Fig. 9는 x-z단면에 대한 유동현상이다. (a)에서는 ①번 토출구에서 토출되는 냉기가 우측으로 향하고 있는 것이 관찰되지만 토출되는 냉기가 도어바스켓쪽으로 향하고 있지는 않다. (b)는 최상부 선반부위의 유동패턴인데 선반 우측 중앙부근에 냉기가 퍼져나가는 것이 관찰된다. 이것은 ①번 토출구에서 토출되었던 냉기가 선반면으로 향하는 것을 알 수 있다. (c)에서는 ②, ③번에서 토출구에서 토출되는 유동패턴으로 ③번 토출구에서 토출되는 냉기가 선반중앙면으로 나가는 것이 관찰된다. (d)는 두 번째 선반면에서 나타나는 유동패턴인데 선반면 전체로 냉기가 흘러나가는 것이 관찰된다. 이상과 같이 ①번 토출구의 냉기가 최상부 선반면으로 향하면서 선반에서의 유동을 촉진시키며 외부의 습공기 유인을 차단시켰고 ③번 토출구의 냉기를 중앙으로 유도하여 두 번째 선반면으로 유인되는 냉기를 최소화시켰다.

4.2 실험 결과

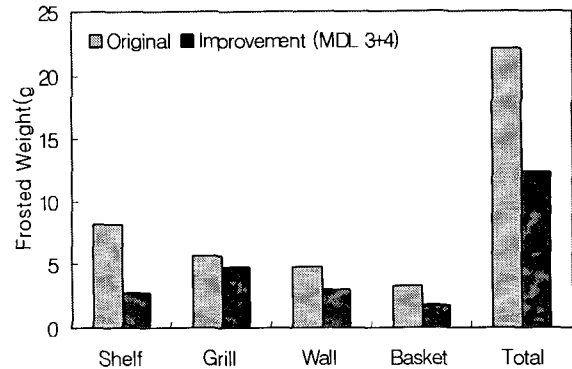


Fig. 10 Results of frost weights

개선 모델(토출구3 + 흡입구4)과 기존모델의 결빙량 실험에 대한 정량적인 값을 Fig. 10과 같이 나타내었다. 각 부위별 결빙량중에서 선반의 결빙량이 기존보다 약 67% 감소되었고 각 부위별 결빙량을 합한 전체 결빙량도 약 44%가 감소되었다.

5. 결 론

냉동실에서 발생하는 결빙, 착상을 최소화하기 위해 본 연구에서는 냉동실 냉기 토출판에서 토출되는 냉기의 유동을 수치해석하고 토출구 형상의 최적설계를 하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 냉동실 냉기 토출판의 토출구는 전체적으로 토출되는 냉기가 우측천정, 벽면쪽으로 향하면서

좌측벽면으로 순환되는 형태를 보이고 있다. 이 경우 대기압상태의 외부 습공기와 치환이 이루어질 때 냉동실 좌측공간으로의 습공기유입이 촉진되어 결빙이 증가한다.

- ①, ③번 토출구의 안내깃을 변경하여 토출냉기의 기류를 중앙으로 유도하여 외부습공기 유입을 최소화 시켰다.
2. ④, ⑤번 토출구의 안내깃을 확장하여 외부습공기 차단을 도모하고 상부에서 내려오는 냉기의 흐름을 촉진시켰다.
3. 고내에 정체되는 냉기는 외부습공기 유입시 결빙 발생의 주요 원인이 된다. 따라서 토출되는 냉기는 일정한 목적을 수행한 후 바로 흡입 순환 될 수 있도록 설계되어야 한다.

참고 문헌

- 1 이관수, 이태희, 1999, “착상이란?”, 공기조화 냉동공학 논문집 제 24 권 제 2 호, pp. 99~107.
- 2 이관수, 지성, 이태희, 1997, “서리층 성장 예측을 위한 수치적 모델”, 공기조화 냉동공학 논문집 제 9 권 제 2 호, pp. 249~258.
- 3 오민정, 이재현, 오명도, 1995, “냉장고 내부의 냉기 유동특성에 관한 3차원 해석(Ⅰ)”, 공기조화 냉동공학 논문집 제 7 권 제 3 호, pp. 382~395.
- 4 이영환 외 6인, 2001, “냉동실 결빙 메카니즘 정량화 및 착상량 최소화에 관한 연구(제 1보: 기초실험 및 온도, 풍속측정에 의한 결빙 메카니즘 추론)”, 한국동력기계공학회 2001 춘계 학술대회논문집, pp. 64~70.
- 5 김상현 외 5인, 2001, “냉동실 결빙 메카니즘 정량화 및 착상량 최소화에 관한 연구”, 한국동력 기계공학회 2001 추계 학술대회논문집, pp. 132~140.
- 6 한병운 외 4인, 2002, “냉장고 기계실 내부 열유동 특성 해석(Ⅱ)”, 한국박용기관학회 2002 춘계 학술대회 논문집, pp. 173~179.
- 7 엄운섭, 부정숙, 윤인철, 2000, “냉장고의 냉동실 내 냉기 덕트 내부의 유동해석”, 한국박용기관학회지 제 24권 제 4 호, 2000, pp. 117~122.
- 8 稻葉英男, 今井誠土, 1995, “昇華蒸發現象を利用した除霜に關する基礎研究 (第1報, 強制對流にさられた水平上層の昇華蒸發學動)”, 日本機械學會論文集(B編), 第 61 卷 第 585 号, pp. 230~237.
- 9 稻葉英男, 今井誠土, 1997, “衝突噴流下に水平露層放射熱エネルギーを照射した場合の昇華蒸發促進効果”, 日本機械學會論文集(B編), 第 63 卷 第 607 号, pp. 205~212.