

냉장 컨테이너 내부의 공기유동 및 열전달 현상에 대한 CFD 시뮬레이션

윤홍선 권진경 정 훈 이현동 김영근 윤남규

CFD Simulation of Airflow and Heat Transfer in the Cold Container

H. S. Yun J. K. Kwon H. Jeong H. D. Lee Y. K. Kim N. K. Yun

Abstract

To prevent deterioration of agricultural products during cold transportation, optimized temperature control is essential. Because the control of temperature and thermal uniformity of transported products are mainly governed by cooling air flow pattern in the transportation equipment, the accurate understanding and removal of appearance of stagnant air zone by poor ventilation is key to design of optimized cooling environment. The objectives of this study were to develop simulation model to predict the airflow and heat transfer phenomena in the cold container and to evaluate the effect of fan blowing velocity on the temperature level and uniformity of products using the CFD approach. Comparison of CFD prediction with PIV measurement showed that RSM turbulent model reveals the more reasonable results than standard $k-\epsilon$ model. The increment of fan blowing velocity improved the temperature uniformity of product and reduced almost linearly the averaged temperature of product.

Keywords : Cold container, CFD (Computational Fluid Dynamics), Airflow, Heat transfer

1. 서론

냉장컨테이너를 사용하는 농산물의 저온수송에 있어서 컨테이너 내부의 온도관리는 농산물의 품질유지를 위해서 가장 중요한 과제이다. 최상의 수송 품질은 컨테이너 내부의 온도를 일정하게 유지하는 것뿐만 아니라 온도 분포를 균일하게 유지해야 얻을 수 있다.

냉장컨테이너 내부의 온도에 영향을 미치는 변수로는 농산물의 호흡열, 열물성값, 적재 공극률 등 농산물 고유의 성질에 의해 결정되는 것과 냉각 매질인 공기의 온도와 속도, 적재물의 배열형태 등과 같이 제어 가능한 변수들로 대별된다.

컨테이너 내부에서 일어나는 열 및 물질 전달은 대부분 대류작용에 의존하므로 공기 및 농산물의 온도 분포는 공기의 유동특성에 가장 큰 영향을 받게 된다. 냉각공기의 유량이 집

중되는 부분에서는 저온장해나 과도한 수분증산이 발생할 수 있는 반면, 유량이 부족하거나 2차선회류 등에 의해 유동이 정체되는 부분에서는 농산물의 품온이 상승되어 변질을 일으킬 수 있다.

따라서 냉장컨테이너에서 일정한 온도와 균일한 온도분포를 유지하기 위해서는 설계변수들이 냉장컨테이너 내부의 공기 및 열의 유동에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 그러나 다양한 설계변수들의 영향을 반복적 실험을 통해 분석하는 것은 비용과 시간적 측면에서 비효율적이다.

이에 따라 본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 기반으로 하여 냉장컨테이너 내부에서의 공기 및 열유동 현상을 예측하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고자 하였다.

CFD 시뮬레이션은 적용되는 지배방정식에 따라 해석 유동

This work was financially supported by Agricultural R&D Promotion Center (ARPC). The article was submitted for publication in October 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2007. The authors are Hong Sun Yun, Senior Research Scientist, Jin Kyung Kwon, Research Scientist, Hoon Jeong, Research Scientist, Hyun Dong Lee, Research Scientist, Young Geon Kim, Research Scientist, and Nam Kyu Yun, Research Scientist, National Institute of Agricultural Engineering. Corresponding author: H. S. Yun, Senior Research Scientist, National Institute of Agricultural Engineering, Suwon, 441-707, Korea; E-mail: <hsyoon@rda.go.kr>.

장내의 대부분의 변수에 대한 예측값을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으나, 예측결과의 유용성은 적용되는 수치해석 모델과 그 해법의 타당성에 크게 의존하므로 정확한 모델링과 수치해법이 요구된다.

농업이나 식품산업 분야에 CFD 해석이 도입된 것은 1970년대 말부터 이나, 본격적인 적용은 컴퓨터 하드웨어의 진보와 상용코드들의 모델링 능력과 신뢰성의 향상이 이루어진 최근에 들어서 가능하게 되었다. 저온저장 및 냉장수송 장치와 관련된 최근의 연구 동향을 살펴보면, Hoang 등(2000)은 CFX 코드를 이용하여 빈 저온저장고와 저장물이 적재된 저온저장고에 대한 기류해석을 수행하고, 저온저장고 내부의 공기 유속 측정치와 비교하여 수치해석 모델의 타당성을 검증하였으며, $k-\epsilon$ 계열의 난류모델은 벽면의 코안다 효과(Coanda effect)의 모사에 한계가 있다고 하였다. Moureh 등(2002)은 냉동컨테이너 내에서의 공기 유동에 대해 FLUNET 코드를 사용한 3차원 수치해석을 수행하고, 축소모형에 대해 레이저 도플러 유속계(Laser Doppler velocimetry, LDV)를 사용하여 속도벡터를 측정하여 수치해석 결과와 비교하였다. 그들은 레이놀즈 응력모델(Reynolds stress model, RSM)이 코안다 효과나 팔레트 사이의 공기 유동을 잘 모사하며 컨테이너 내부의 유동은 강한 역압력 구배의 지배를 받는다고 하였다. Chourasia 등(2007)은 FLUENT 코드를 사용하여 감자 저온저장 시 단위 적재물의 중형비와 체적이 감자의 냉각에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 고찰하였으며, 수치해석 모델의 타당성을 온도 측정치와의 비교하여 검증하였다.

본 연구의 목적은 냉장 컨테이너 내부의 기류 및 열전달 현상을 수치적으로 시뮬레이션 할 수 있는 CFD 모델을 개발하는데 있으며, 모델의 타당성은 컨테이너 축소모형에 대해 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)를 사용하여 측정된 속도벡터와 비교하여 검증하였다.

2. 이론해석

가. 해석대상 유동장

본 연구의 해석 대상인 냉장컨테이너의 내부크기는 7,620(L) × 2,290(W) × 2,250(H) mm이다. 컨테이너 상류의 상부에는 4개의 송풍팬(ϕ 300 mm)이, 하부에는 공기출구(2,290(W) × 100(H) mm)가 위치하고 있으며, 벽체는 두께 70 mm의 우레탄으로 단열되어 있다. 냉장컨테이너 내부의 열유동 현상 및 해석범위에 대한 개략도는 그림 1(a)에 나타내었다. 냉각기에서 만들어진 냉기류는 송풍팬에 의해 컨테이너 내부를 순환하여 공기흡입구로 되돌아오며, 컨테이너 내부의 열생성은

농산물의 호흡열과 외부로부터의 침투열에 의해 결정된다. 그림 1(b)에는 계산영역과 경계조건에 대한 개략도를 나타내었다. 계산영역은 형상의 대칭성을 고려하여 전영역의 1/2로 하였으며, 농산물의 적재는 복숭이를 통기성이 우수한 벌크 빈(bulk bin)에 담아 팔레트 위에 적재한 상태로 가정하였다.

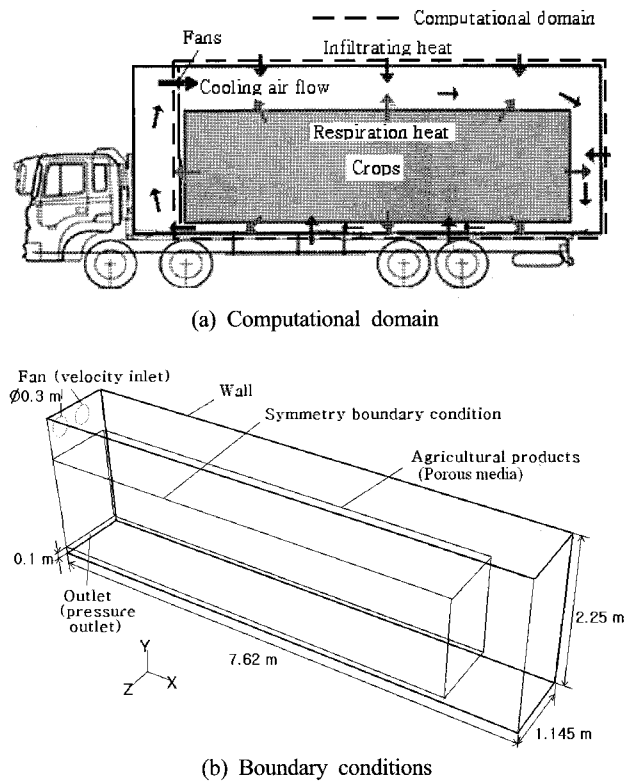


Fig. 1 Schematics of the computational geometry and boundary conditions.

나. 지배방정식

컨테이너 내부의 공기유동은 정상상태, 비압축성의 3차원 난류로 간주되며, 복사열전달은 무시되고 전도 및 혼합대류 형태의 열전달만 고려된다. 유동은 저속·저온이므로 점성소산 및 열부력 효과는 무시하였으며, 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델과 RSM을 채택하였다.

위의 가정에 기초하여 수치해석에 적용된 시간평균 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식을 텐서형식으로 나타내면 아래와 같다.

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

$$\frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{u_j T} \right) + S_h \quad (3)$$

여기서 U 는 평균유속, ρ 는 밀도, P 는 압력, ν 는 동점성계수, Pr 은 프란틀수, T 는 온도이다. 운동량 방정식의 $\overline{u_i u_j}$ 항은 레이놀즈응력, 에너지 방정식의 $\overline{u_j T}$ 항은 난류열유속으로서 각각 난류효과를 반영한다. S_h 는 뒤에서 설명하는 porous media 모델링에서 정의되는 손실 운동량을 의미하며, S_h 는 벽면 침투 열유속, 호흡열 등에 의한 에너지 생성량이다. 난류 모델의 적합성을 판정하기 위해 표준 $k-\epsilon$ 모델과 RSM을 적용하였으며, 시간평균 난류운동량(k) 수송방정식과 난류운동량 소산율(ϵ) 수송방정식 및 레이놀즈응력(Reynolds stress) 수송방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial (k U_i)}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\epsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho} C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} U_k \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} = & - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{u_i u_j u_k} + \frac{p}{\rho} (\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_k} \right] - \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) \\ & + \frac{p}{\rho} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (4)와 식 (5)에서 μ_t 는 난류점성계수, σ_k , σ_ϵ 은 k 와 ϵ 에 대한 난류프란틀수, G_k 는 응력에 의한 난류생성항, δ_{ij} 는 Kronecker 델타이다. 표준 $k-\epsilon$ 모델에 사용된 상수 및 프란틀수에 대한 내용과 RSM 난류모델에 적용된 상수 및 모델링 방법에 대한 상세한 내용은 FLUENT ver. 6.2(2005)에 나타나 있다. 식 (6) 우변의 첫 번째 항인 난류확산항, 네 번째의 pressure strain 항, 다섯 번째의 소산항은 기존의 실험 또는 이론식에 기초하여 모델링 되어야 한다. 벽면 근처의 유동 계산에는 표준 벽함수를 적용하였으며, 농산물 적재 영역의 모델링에는 porous media 모델을 적용하였다. porous media 모델링에서 다공성 농산물 영역 내부의 유동저항은 겉보기 유속 (superficial velocity)에 기초하여 계산되며 운동량 방정식에 부가되는 운동량 손실은 다음과 같이 점성 및 관성 저항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho u_{mag} u_i \right) \quad (7)$$

여기서 α 는 투과도, C_2 는 관성손실계수, u_{mag} 는 유속이며, 다양한 레이놀즈수와 다공성 물질들에 통용되는 Ergun 방정식 (Ergun, 1952)에 기초하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\gamma^3}{(1-\gamma)^2}, \quad C_2 = \frac{3.5}{D_p} \frac{(1-\gamma)}{\gamma^3} \quad (8)$$

여기서 D_p 는 산물직경, γ 는 porous media의 공극률이다. Porous media내의 에너지방정식은 다음과 같이 수정되어 적용된다.

$$\nabla \cdot (\overline{u} (\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \left(\sum_i h_i J_i \right) \right] + S_f^h \quad (9)$$

여기서 E_f 는 유체에너지, h_i 는 엔탈피, J_i 는 확산 플럭스, k_{eff} 는 유효열전도계수로 다음과 같이 정의된다.

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1-\gamma) k_s \quad (10)$$

여기서 k_f 는 유체의 열전도계수, k_s 는 고체의 열전도계수이다. S_f^h 는 porous medium의 내부 열원으로 복숭아의 호흡열로부터 다음과 같이 계산된다.

$$S_f^h = (1-\gamma) \dot{q} \quad (11)$$

여기서 \dot{q} 는 복숭아의 호흡에 의한 단위체적당 열발생율이다. 그림 1(b)에는 지배방정식의 해석에 적용된 경계조건을 나타내었다. 송풍팬의 토출풍속은 모델 검증용 계산에서는 1.5 m/s, 실물 컨테이너에 대한 계산에서는 임의의 속도들을 적용하여 계산하였다. 공기온도는 송풍팬 출구에서 측정된 평균 온도인 4.9°C로 하였고 난류강도는 냉동 컨테이너 관련 기존 연구(Moureh 등, 2002)를 참조하여 10%로 하였으며, 출구에는 압력경계조건을 적용하였다. 복숭아의 물성치는 ASHRAE 핸드북을 참조하였으며, 벽면을 통한 침투열유속은 컨테이너 내·외벽의 온도를 측정하여 Fourier법칙으로부터 계산하였다. 물성치 및 경계조건에 대한 자세한 내용은 표 1과 같다. 계산 격자는 비정렬 사면체 격자를 적용하였으며 개수는 격자의존성을 고려하여 약 30만개로 하였다. 복숭아 적재는 12개 팔레트를 2열로 배치하고, 각 팔레트 위에는 1,500 mm 높이의 벌크 빈이 탑재된 것으로 하였으며, 팔레트 1열이 차지하는 공간은 6,600(L) × 1,100(W) × 1,500(H) mm이다. 연속 방정식에 나타나는 압력수정식에는 SIMPLE알고리즘을 적용하였고, 압력항의 이산화에는 PRESTO! 스킴을, 나머지 항들의 이산화에는 QUICK 스킴을 적용하였다. 해의 수렴기준은 반복계산에 따른 유속의 합과 연속된 종속변수들의 상대오차

가 에너지의 경우 10^{-7} , 나머지 변수들은 10^{-4} 이하가 될 때까지 하였다. 또한 반복계산의 진행에 따른 출구 평균유속과 입·출구의 질량유량 평형을 통해 해의 안정성과 보존칙의 만족 여부도 확인하였다.

Table 1 Boundary conditions and physical properties

Properties		Value
Inlet	temperature (°C)	4.9°C
	velocity (m/s)	variable
	turbulent intensity	0.1
	hydraulic diameter (m)	0.3
Peach	effective diameter (m)	0.1
	specific heat (J/kg K)	3,900
	thermal conductivity (W/m K)	0.58
	density (kg/m ³)	608.7
	respiration heat (W/m ³)	9.13
	respiration heat (W/m ³)	9.13
Porous media	heat source (W/m ³)	5.48
	porosity	0.4
Infiltration heat flux (W/m ²)		
	side wall	8.8
	roof	8.8
	floor	8.4
	north wall	9.2
	south wall	0

3. 실험장치 및 방법

시뮬레이션 모델의 검증에 위해 해석대상 컨테이너를 1/5 비율로 축소하여 제작한 모형 내부에서의 기류의 속도 벡터를 PIV를 사용하여 측정하였다. 모형은 레이저 조사와 CCD 카메라를 통한 광학계측에 지장이 없도록 고품질의 투명 아크릴로 제작하였다.

그림 2는 본 연구에 사용된 2차원 PIV시스템의 구성도이다. 레이저는 펄스 당 최대 에너지가 120 mJ이며 반복율(repetition rate)이 15 Hz인 Dual Nd : YAG 레이저(Y120-15, TSI, USA)이고, 카메라는 초당 30 프레임 촬영할 수 있는 1,024×1,024 pixel 해상도의 10 bit 디지털 CCD 카메라(PIVCAM 10-30, TSI, USA)이다. 카메라와 레이저의 작동은 연결된 동기화기(Laserpulse synchronizer, TSI, USA)로부터 발생하는 신호에 의해 조절된다. 측정된 데이터는 컴퓨터로 전송되어 소프트웨어(Insight3G, TSI, USA)에 의해 벡터장으로 표현된다. 기류 추적을 위한 입자로는 에어로졸 생성기에서 만들어진 올리브 오일 입자를 사용하였다. 본 연구에 사용된 PIV 시스템은 초당 15회의 벡터 데이터를 측정할 수 있으며, 모델검증에 사용된 속도벡터장은 총 120회의

순간 측정치를 평균하여 사용하였다.

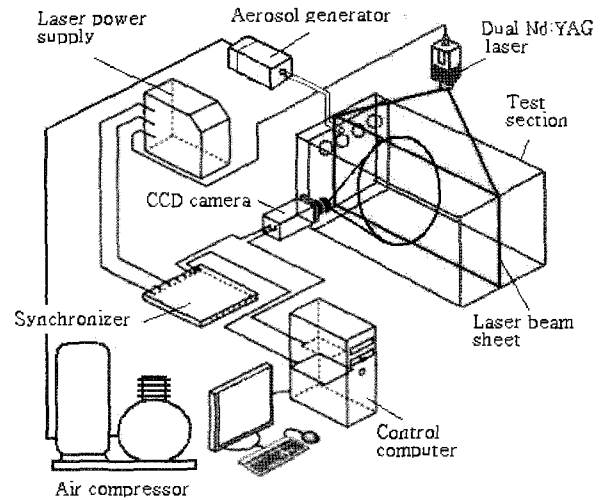


Fig. 2 Experimental setup for PIV measurement.

4. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션 검증

그림 3(a)는 내부가 비어있는 모형 컨테이너의 중앙 대칭단면에서의 속도벡터 측정치를 나타낸 것이다. 상부의 송풍팬 토출구 쪽에서 기류의 최대유속이 관찰되며, 상류의 위쪽에서는 기류가 코안다 효과에 의해 천정면에 접촉하여 흐르다가 하류로 갈수록 내부의 역압력 구배에 의해 천정면에서 박리되어 하부로 향한다. 이에 따라 모형의 상류에는 선회 유동이 만들어지고, 하류에는 아래쪽으로 향하는 저속의 유동이 발생된다.

그림 3(b)와 그림 3(c)에는 CFD시뮬레이션에 의한 해석 결과를 나타내었다. PIV 측정 실험은 내부 열원 및 냉각이 없는 조건에서 수행되었으므로 CFD 해석은 Navier-stokes 방정식만을 대상으로 하였다.

그림 3(b)의 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용한 CFD 해석 결과에서는 실험치에 비해 선회유동의 중심이 더 하류에 위치하며, 하류로 가면서 기류의 천정면으로부터의 박리가 거의 일어나지 않아 하방으로 향하는 유동 역시 실험치에 비해 약하게 나타났다. 기류는 송풍팬의 반대쪽 벽면까지 도달한 후 하방으로 향하므로 모형의 내부는 전체적으로 하나의 큰 선회유동을 형성하였다.

그림 3(c)의 RSM 난류모델을 적용한 해석 결과에서는 상류 선회류의 중심이 실험치에 비해 약간 하류에 위치하나 선회류 크기와 유동형상 등은 실험치와 정성적으로 잘 일치하였다. 하류에서 기류의 천정면 박리가 약하게 나타났고, 중-

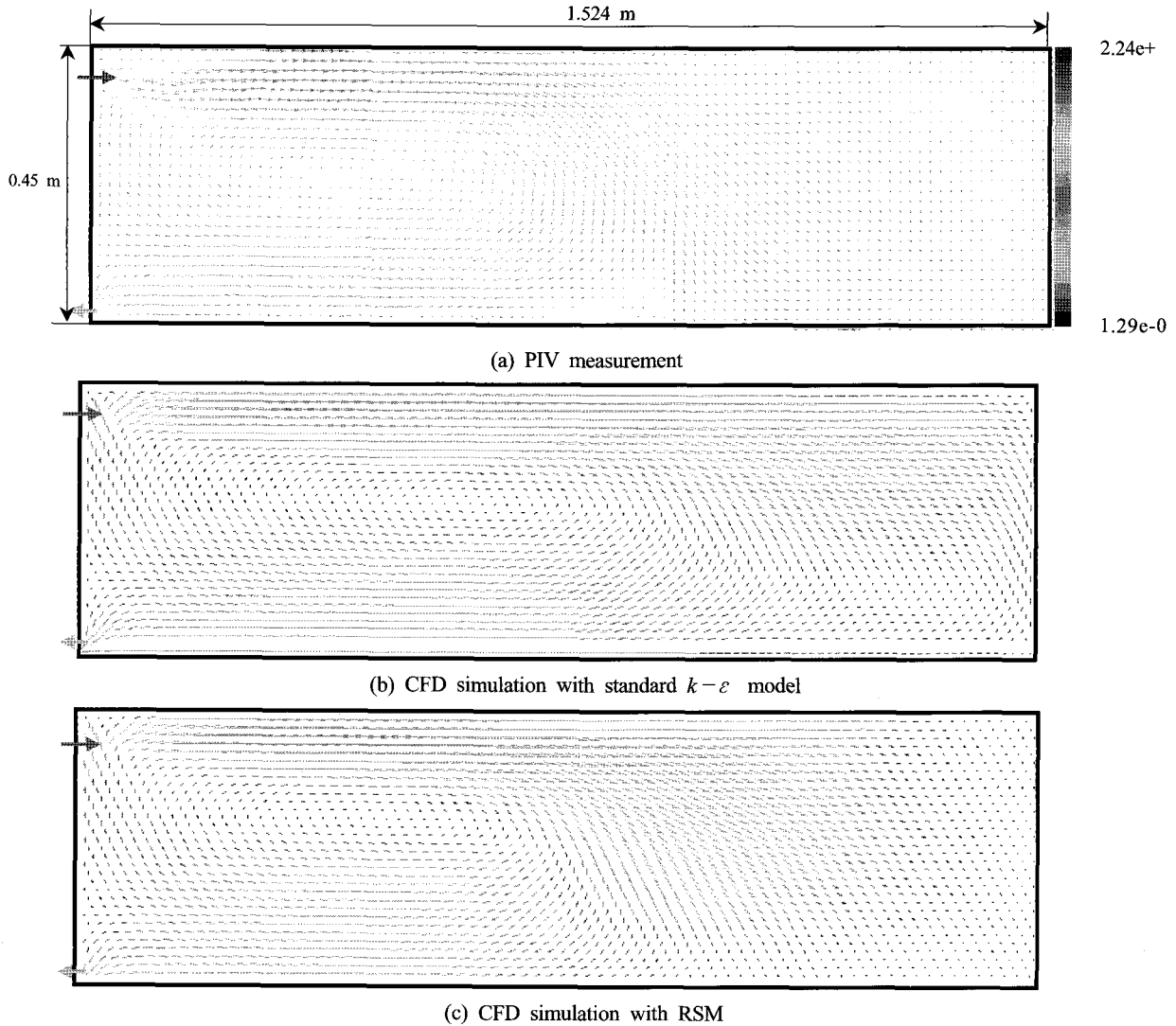


Fig. 3 Comparisons between experimental and numerical velocity vector profiles at symmetric x-y plane of container model.

하류 영역에서 하방으로 향하는 유동 역시 실험치와 유사하게 나타났다. 유동장은 상류의 선회유동과 하류의 저속영역으로 구분되어 나타나며 이러한 경향은 실험치와 정성적으로 잘 일치하였다.

이는 표준 $k-\epsilon$ 모델에서는 난류를 평균속도구배에 기초한 등방성의 스칼라 양으로 풀게 되므로 과도한 확산성을 가지게 되어 벽면전단응력을 과대 예측함으로써 벽면박리가 지연되었기 때문으로 판단된다. 이에 반해 RSM 난류모델은 난류 운동에너지 소산율에 대한 방정식과 함께 레이놀즈 응력텐서의 각항에 대한 수송방정식을 직접 풀게 되므로 선회류나 2차유동의 발생 등의 해석에 유리하며, 그 결과 본 해석에서도 RSM 난류모델에 의한 예상치가 실험 결과를 더 잘 묘사한 것으로 판단된다. 보다 정량적인 검증을 위해 그림 4에 중심대칭면에서 컨테이너의 상/중류와 중/하류의 경계인 상류에서 0.5 m 위치와 1.0 m 위치에서의 x 방향 속도성분을 컨테이너

높이방향에 대해 나타내었다. x = 0.5 m 위치는 그림 3의 PIV 측정 결과에서 상류 선회류의 중심위치에 근접하며 x = 1.0 m는 상류 선회류와 하류 저속영역의 경계위치에 근접한다.

그림 4(a)의 x = 0.5 m 위치에서의 속도분포는 상류 선회류의 발생을 보여주며 선회류의 중심 높이는 RSM 예측치, 표준 $k-\epsilon$ 모델 예측치, PIV 실험치의 순서로 나타났다. 실험치와의 평균오차는 표준 $k-\epsilon$ 모델의 경우 0.043 m/s, RSM의 경우 0.087 m/s로 표준 $k-\epsilon$ 모델이 더 적합하게 보이나, 표준 $k-\epsilon$ 모델은 그림 3에서 확인한 바와 같이 선회류의 중심 위치 예측에 오차가 컸었다. 표준 $k-\epsilon$ 모델의 부적합성은 그림 4(b)의 x=1.0 m에서의 속도분포 비교에서도 잘 나타난다. 실험치와의 평균오차는 표준 $k-\epsilon$ 모델의 경우 0.24 m/s, RSM의 경우 0.12 m/s로 나타났다. 또한 실험치에서는 상류방향으로의 역유동이 나타나지 않으며, RSM 난류 모델에 의한 예측치는 하방의 극히 일부분에서 역유동을 보

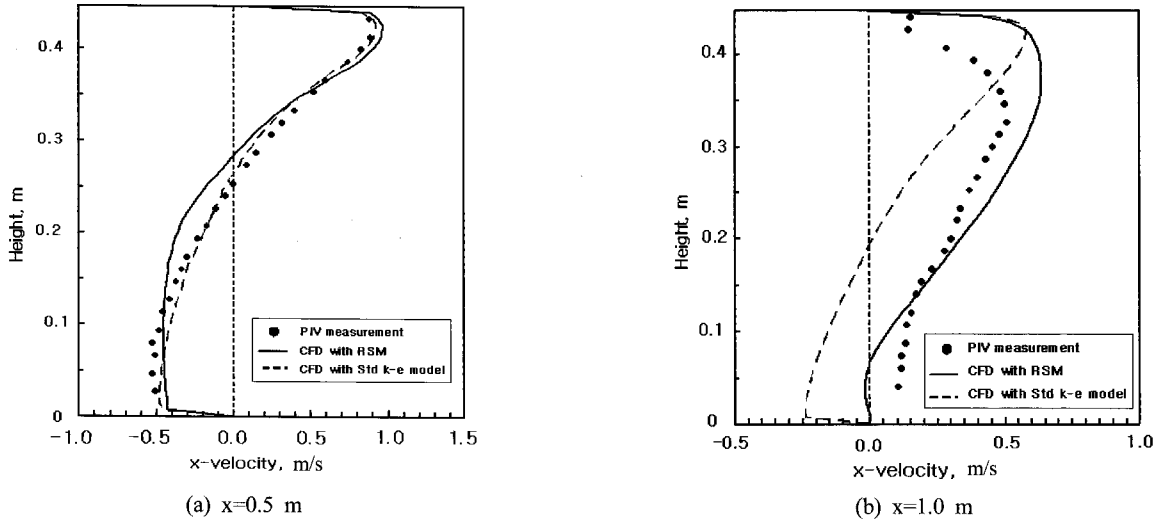


Fig. 4 Comparisons between experimental and numerical velocity vector profiles at symmetric x-y plane of container model.

이는데 반해, 표준 $k-\epsilon$ 모델은 뚜렷한 역유동의 발생을 보여 준다. 이는 RSM 난류모델은 상류 선회유동의 크기를 약간 과대평가하는데 그치지만 표준 $k-\epsilon$ 모델은 모델링 특성상 컨테이너 내부 유동장을 하나의 큰 선회 유동장으로 예측하기 때문이다. 이상의 결과에 의하면 컨테이너 내부의 순환유동 예측에는 표준 $k-\epsilon$ 모델에 비해 RSM 난류모델이 더 적합한 것으로 판단되며 이는 Moureh 등(2002)의 연구결과와도 부합한다. 따라서 본 연구에 적용되는 난류모델은 계산 시간 및 요구 메모리의 증가에도 불구하고 RSM을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

나. 냉장 컨테이너의 기류 분포 예측

그림 5는 실제 냉장 컨테이너에 대해 RSM 난류모델을 적용하여 내부 유동장의 속도벡터를 예측한 결과이다. 송풍팬의 토출 풍속은 6.0 m/s이며 나머지 경계조건 및 물성치는 표 1에 나타낸 바와 같다.

그림 5(a)는 송풍팬 중심 높이에 해당하는 $y = 2.02$ m에서의 x-z 평면상의 속도벡터 분포이다. 측벽면 쪽 송풍팬에서 토출된 기류의 유동은 코안다 효과와 송풍팬 출구에서의 부압효과에 의해 중앙의 송풍팬으로부터 토출된 기류와 거의 혼합되지 못한 채 측벽 근처에서 작은 선회류를 생성하며 적재물 내부와 적재물과 측벽사이의 공간을 따라 하류로 향한다. 이로 인해 하류로 향하는 유동은 거의 중앙의 송풍팬에서 토출된 기류로만 구성된다.

그림 5(b)는 컨테이너의 x-y 대칭면에서의 속도벡터 분포를 나타낸 것이다. 송풍팬에서 토출된 기류는 코안다 효과에 의해 천정면에 부착되나 이는 약 1.5 m 하류에서 다시 박리되어 송풍팬의 하부에 작은 선회류를 만든다. 적재물 상부를

흐르는 유동은 벽면과의 마찰과 적재물 내부로 침투하는 유량에 의해 유속이 급격히 느려지며, 송풍팬의 반대쪽 벽에 도달된 유동은 적재물과 벽면사이에서 약한 선회유동을 만들며 하부로 향한다.

그림 5(c)는 적재물의 x-y 중심단면에서의 속도벡터 분포를 나타낸 것이다. 기류패턴을 명확히 나타내기 위해 벡터 스

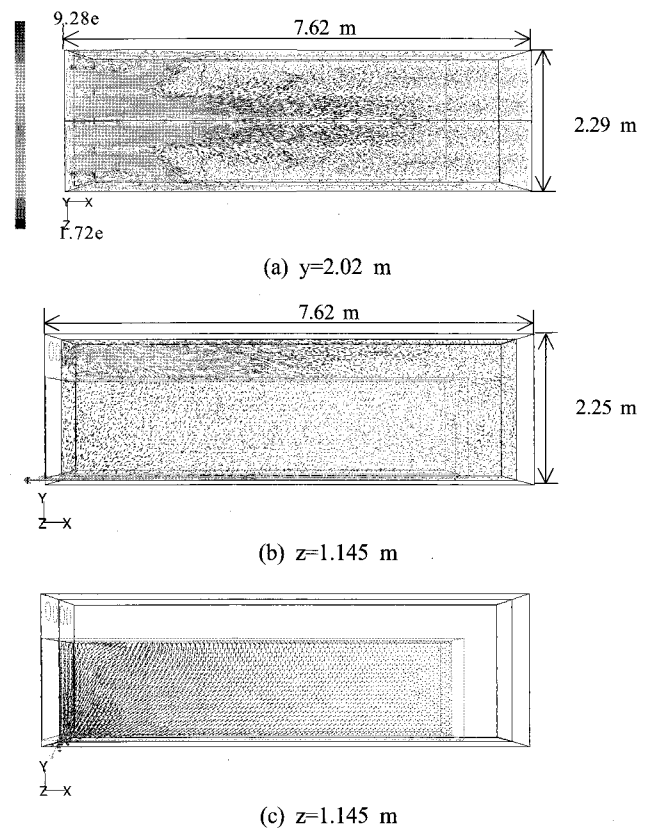


Fig. 5 Velocity vector distributions in the container with $V_{fan}=6.0$ m/s and bulk loading.

케일을 그림 5 (a)와 (b)보다 5배로 크게하여 나타내었다. 적재물 내부의 상류 측에서는 기류의 출구방향으로 비교적 강한 유동이 관찰되나, 하류로 갈수록 강한 역압력구배에 의해 유속이 감소되며, 이로 인하여 적재물 내부영역에 불균일한 온도분포가 발생될 것으로 예상되었다.

다. 냉장 컨테이너의 온도 분포 예측

그림 6은 실제 냉장 컨테이너에 대해 내부의 열전달 현상을 예측한 결과로, 송풍팬 토출 유속을 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 m/s로 증가시킬 때 컨테이너 내부의 x-y 대칭단면에서의 온도분포를 변화를 보여준다. 여기서의 온도는 복숭아의 품온이 아닌 복숭아 사이의 공극을 지나는 기류의 온도를 나타낸 것이며, 이는 조밀하게 적재된 농산물의 경우 농산물과 주위의 유체 사이의 온도차는 매우 작다는 Chourasia 등(2005)의 연구 결과에 근거한 것이다.

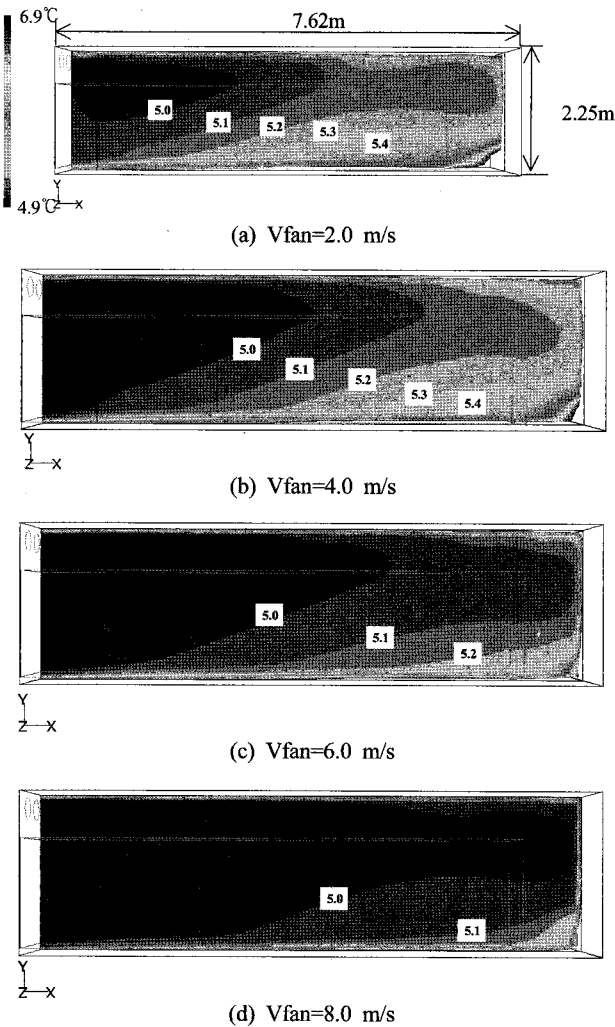


Fig. 6 Temperature contours at symmetric plane in the container with bulk loading.

컨테이너 내부에서의 최대 온도는 기류의 하류쪽 하부의 모서리 부근에서 송풍 팬 풍속 별로 각각 22.5, 19.7, 17.0, 13.3°C로 나타났으나, 그림에는 4.9~6.9°C 범위의 온도분포만 나타내었다.

송풍팬의 토출 풍속이 2.0 m/s인 경우에 기류의 상류 및 적재물의 상단에 5.0°C 이하의 영역이 나타났으나, 하류쪽 하단부의 온도는 6.5°C 이상으로 상승하여 적재물의 온도 불균일을 야기하였다. 송풍팬의 토출 풍속이 증가할수록 적재물 내부의 저온영역은 하류쪽 하부로 확대되며, 풍속이 8.0 m/s의 경우에는 하류쪽 하단부의 일부영역을 제외한 전체 적재물의 영역이 4.9~5.1°C의 대체로 균일한 온도분포를 나타내었다.

그림 7은 그림 6의 컨테이너 내부 적재 농산물의 질량가중 평균 온도값을 토출 팬 풍속별로 나타낸 것이다. 송풍팬의 토출 풍속이 증가함에 따라 적재물 영역의 평균온도는 거의 선형적으로 감소하였으나, 풍속이 클수록 풍속 증가에 따른 온도감소의 기울기는 작아졌다.

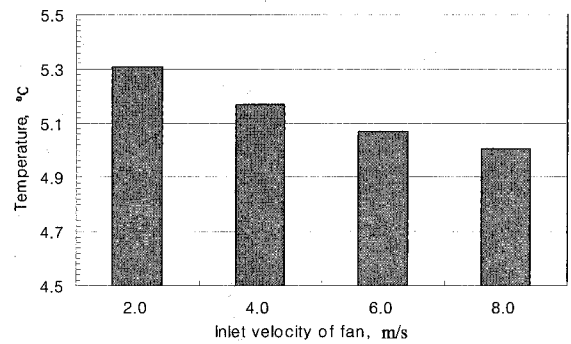


Fig. 7 Average temperatures of bulk load in the container with various fan velocity.

5. 요약 및 결론

냉장 컨테이너를 사용하는 농산물의 저온수송에 있어서 컨테이너 내부의 온도관리는 농산물의 품질유지를 위해서 가장 중요한 과제이다. 최상의 수송품질은 컨테이너 내부의 온도를 일정하게 유지하는 것뿐만 아니라 온도분포 또한 균일하게 유지함으로써 얻어질 수 있다.

냉장 컨테이너에서 일정한 온도와 균일한 온도분포를 유지하기 위해서는 설계변수들이 냉장컨테이너 내부의 공기유동 및 열전달에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 그러나 다양한 설계변수들의 영향을 반복적 실험을 통해 분석하는 것은 비용과 시간적 측면에서 비효율적이다.

따라서 본 연구에서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)를 기반으로 하여 냉장컨테이너 내부의 공

기유동 및 열전달 현상을 예측하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

참고문헌

- (1) CFD 시뮬레이션과 PIV를 이용한 속도벡터 측정치를 비교한 결과, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델은 컨테이너 내부의 순환유동을 예측하는데 적합하지 않았으며, RSM이 상대적으로 우수한 예측치를 나타내었다.
- (2) 컨테이너 내부의 농산물 적재 영역은 효율적인 계산을 위해 porous media로 모델링 되었으며, 벌크상태로 적재된 상태에 대해 송풍팬의 토출 풍속에 따fms 내부 온도장의 변화를 계산한 결과, 풍속의 증가에 따라 적재물 내부의 온도 균일도는 향상되며 적재물의 평균온도 역시 거의 선형적으로 감소하였다. 송풍팬 토출 풍속이 8.0 m/s의 경우 적재물 영역의 내부는 거의 균일한 온도분포로 팬 토출 온도와 동일한 온도까지 냉각되는 것으로 나타났다.

냉장컨테이너의 냉각성능 향상을 위해서는 풍속의 증가뿐 아니라, 팔레트의 배열이나 덕트를 설치하여 컨테이너 내부의 열적체를 해소하는 방안 등이 강구될 수 있다. 이러한 다양한 설계변수를 도입한 냉장컨테이너의 최적화 설계에 대한 결과는 금후 보고될 예정이다.

1. Chourasia, M. K. and T. K. Goswami. 2007. Simulation of effect of stack dimensions and stacking arrangement on cool down characteristics of potato in a cold store by computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* 96(4):503-515.
2. Chourasia, M. K., P. Maji, A. Baskey and T. K. Goswami. 2005. Estimation of moisture loss from cooling data of potatoes. *J Food Process Eng.* 28:397-416.
3. Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progresses* 48:89-94
4. FLUENT 6.2. 2005. User's Guide FLUENT Inc. New Hampshire, USA
5. Hoang, M. L., P. Verboven, J. De Baermaecker and B. M. Nicolai. 2000. Analysis of air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. *International Journal of Refrigeration* 23:127-140.
6. Moureh, J., N. Menia and D. Flick. 2002. Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *Computer and Electronics in Agriculture* 34:25-42.