

## CFD 시뮬레이션을 이용한 농산물 저온저장고내의 온도분포 균일화 연구

정훈<sup>†</sup> · 권진경 · 윤홍선 · 이원옥 · 김영근 · 이현동  
농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

### Uniformity of Temperature in Cold Storage Using CFD Simulation

Hoon Jeong<sup>†</sup>, Jin-Kyung Kwon, Hong-Sun Yun, Won-Ok Lee,  
Young-Keun Kim and Hyun-Dong Lee

*Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science,  
Rural Development Administration, Suwon 441-100, Korea*

#### Abstract

To maintain the storage quality of agricultural products, temperature uniformity during cold storage, which is affected by fan flow rate and product arrangement, is important. We simulated and validated a CFD (Computational Fluid Dynamics) model that can predict both airflow and temperature distribution in a cold storage environment. Computations were based on a commercial code (FLUENT 6.2) and two turbulence models. The standard k-ε model and the Reynolds stress model (RSM) were chosen to improve the accuracy of CFD prediction. To obtain comparative data, the temperature distribution and velocity vector profiles were measured in a full-scale cold storage facility and in a 1/5 scale model. The agricultural products domain in cold storage was modeled as porous for economical computation. The RSM prediction showed good agreement with experimental data. In addition, temperature distribution was simulated in the cold storage rooms to estimate the uniformity of temperature distribution using the validated model.

**Key words** : Computational fluid dynamics, Simulation, Airflow, Temperature, Uniformity, Cold storage

#### 서 론

농산물 저온저장 기술은 농산물을 수확 이후부터 소비자에게 전달하는 유통체계 중에서 고품질화를 위한 가장 핵심적인 기술이라 할 수 있다. 이를 위해서는 농산물의 품질에 영향을 미치는 가장 중요한 요소인 온도를 정밀하고 균일하게 관리하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 우리나라에 보급된 대부분의 농산물 저온저장고는 저장고내의 온도분포가 균일하지 못하여 저장물의 위치에 따라 품질의 차이가 나타나며, 통기가 불량하여 온도가 높은 곳에서는 농산물의 품질이 저하되고, 온도가 낮은 위치에서는 동결피해를 입는 사례도 있다. 농산물 저온저장고의 온도분포는 냉각용 송풍기의 용량 및 배열, 저장물의 적재방법이나 통기성 등에

따라 차이가 있다. 따라서 온도분포를 균일하게 유지하고 저장고를 효율적으로 운영하기 위해서는 냉각용 송풍기의 적정 용량 및 저장물의 적재방법을 효율적으로 설정할 필요가 있다.

이를 위해서는 저온저장고 내부의 온도분포에 영향을 미치는 다양한 변수에 대한 반복적인 실험이 요구되지만, 최근 컴퓨터 및 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기술의 발달로 컴퓨터 시뮬레이션 기법에 의해 저온저장고내의 공기유동과 온도분포를 경제적으로 해석 가능하게 되었다.

지난 30여 년간 수많은 연구자들이 농식품 냉장시스템에 관한 공기유동 시뮬레이션 연구를 수행하여 왔다. Wang 등은 Phoenix 상용코드와 k-ε 난류모델을 이용하여 저온저장고 내의 유동, 온도 및 습도분포를 예측하였으며, 온도에 대해서 수치해석 모델을 검증하였다(1). Van Gerwen 등은 Phoenix 상용코드를 이용하여 팔레트에 산물을 적재한 상

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail : ghkta@korea.kr,  
Phone : 82-31-290-1908, Fax : 82-31-290-1900

태의 저장고 내부의 기류 및 열전달 현상을 시뮬레이션 하였으며 연기 가시화 실험을 실시하여 수치모델을 검증하였다(2). Hoang 등은 CFX 상용코드를 이용하여 빈 저장고 및 저장물이 있는 상태의 저장고에 대해 기류해석을 하였다(3). 국내에서도 일부 연구자들에 의해 저온저장 관련 수치 해석 연구가 수행되었다. 조병관 등은 유한요소법에 의해 저온저장고 내부의 온도분포를 k-ε 난류모델을 이용하여 수치해석하고 유의성 있는 온도분포 검증결과를 얻었다고 보고하였다(4). CFD ACE+ 패키지에 의해 저온저장고 내부 공기유동 및 온도분포를 3차원적으로 해석한 연구는 양길모에 의해 수행되었으며 표준형 k-ε 난류모델을 적용하여 농산물 무적재 및 적재 상태에 대한 온도분포를 검증하였다(5).

본 연구에서는 CFD를 이용하여 저온저장고 내부의 온도 분포 균일화 설계를 수행하고자 하였다. 이를 위해 FLUENT 6.2 상용코드를 이용하여 저온저장고 내부에 대해 3차원 시뮬레이션을 수행하였으며 공기유속 및 온도분포에 대해 CFD 계산치와 실험 측정치와 비교하여 검증을 실시하였다. 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 저온저장고 냉각용 송풍기의 풍량 및 저장물과 벽체와의 간격 변화에 대해 CFD 시뮬레이션을 수행하고 저온저장고 내부의 온도분포를 평가하였다.

재료 및 방법

CFD 모델의 공기유동 검증

CFD 시뮬레이션 모델의 기류분포 검증을 위해 투명 아크릴 재질로 농가용 16 m<sup>2</sup> 면적 저온저장고의 1/5 축소모형 (1.18×0.54×0.6 m)을 제작하였다. 저온저장고는 저장물이 없는 빈 상태를 대상으로 하였으며 축소모형의 팬 직경은 92 mm이다. 본 연구에서는 입자영상유속계(particle image velocimetry, PIV)를 이용하여 측정된 속도벡터 실측치와 시뮬레이션에 의한 계산치의 비교를 통해 시뮬레이션 모델을 검증하였다. 수치해석 모델의 대상유동은 정상상태, 비압축성의 3차원 난류유동으로 가정하였으며, 지배방정식은 연속, 운동량, 난류에너지 및 난류에너지소산율 수송방정식과 레이놀즈응력 수송방정식이 사용되었다. 난류모델로는 표준 k-ε 난류모델과 레이놀즈 응력 모델(Reynolds stress model, RSM)이 사용되어 비교되었다. 축소모형의 계산 격자는 육면체 정렬 격자를 적용하였으며 격자 개수는 약 49,000개이다. 경계조건으로는 팬토출부 유속을 5 m/sec, 난류강도는 15%로 하였다. Fig. 1 에는 속도벡터 측정에 사용된 PIV 시스템(UltraPIV, TSI, USA)과 실험 장치의 개략도를 나타내었다. PIV에 의한 속도벡터 실측치와 시뮬레이션에 의한 계산치의 비교는 다음의 식(1)에 나타난 상태 오차로 평가하였다.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{CFD}^i - V_{exp}^i|}{\sum_{i=1}^n V_{exp}^i} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, E : 실측치와 시뮬레이션 계산치의 상대적 오차  
 V<sub>CFD</sub><sup>i</sup> : i위치에서의 CFD 시뮬레이션 예측치 속도값(x축 방향)  
 V<sub>exp</sub><sup>i</sup> : i위치에서의 PIV 실측치 속도값(x축 방향)  
 i : 높이 위치(y축 방향)

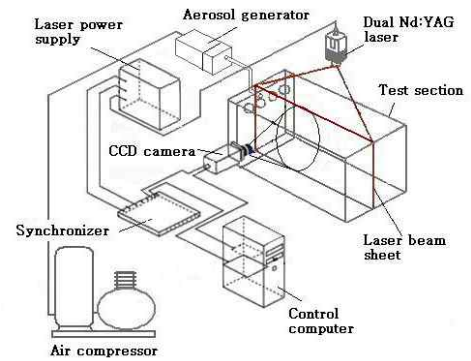


Fig. 1 Experimental setup for PIV measurement

CFD 모델의 온도분포 검증

CFD 시뮬레이션 모델의 온도분포 검증을 위한 데이터를 획득하기 위해 Fig. 2에 나타낸 170 m<sup>2</sup> 면적의 실제 상용 저온저장고(14.4×11.8×8 m)를 대상으로 온도를 측정하였다. 농산물이 없는 상태와 일부 적재된 상태에서 측정되었으며 측정지점은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 무적재 상태에서 35점, 적재된 상태에서 18점을 측정하여 시뮬레이션 예측치와 비교하였다. 온도측정 센서는 Pt100이 사용되었으며, 디지털 온도기록장치(DR230, YOKOGAWA, JAPAN)에 저장되었다. 벽체의 열유속은 플레이트형 열유속 측정 센서(FQA019C, AHLBORN, GERMANY)로 측정되었다. 시뮬레이션에 사용된 CFD모델과 지배방정식은 기류분포

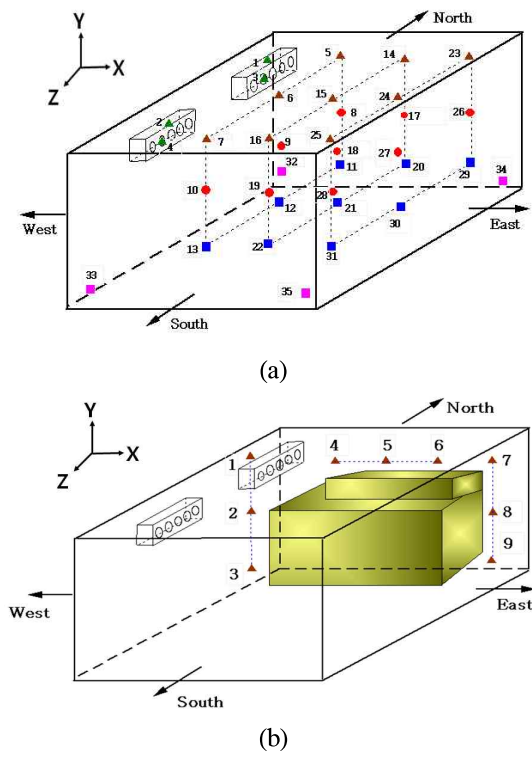


Fig. 2 Positions of temperature measurement, (a) Empty case, (b) Partially loaded case

검증에서와 동일하나 지배방정식에 에너지방정식이 추가되었다. 시뮬레이션의 경계조건은 Table 1에 나타내었다. 실제 저온저장고 내부는 설정온도에 따라 토출팬이 On/Off 되는 비정상상태의 열유동장이지만 CFD 시뮬레이션은 평균 팬토출 유속과 온도를 경계조건으로 하여 정상상태로 계산되었다. 저온저장고의 격자는 농산물이 없을 때 약 138만개, 농산물이 적재된 경우 약 110만개의 육면체 정렬격자로 구성하였으며 유동변수의 구배가 클 것으로 예상되는 지점에는 격자밀도를 증가시켰다.

저장 농산물은 사과(후지)로 하였으며 1.1×1.1 m의 팔레트위에 통기가 양호한 상자에 담겨서 팔레트 3단 적재 형태로 하여 저장고 안쪽부터 100톤이 입고된 상태이다. 저장 농산물은 다공매체모델(porous media model)로 표현하였으며 저장물 영역의 운동량 손실은 Ergun 방정식을 이용하여 모델링하였다. 팬토출 풍속은 바람개비형 풍속센서 (KESTREL 4000, USA)에 의해 측정되었으며, 팬토출 온도는 팬이 On/Off를 반복하는 시스템이므로 팬이 정지된 시점에서 측정된 저온저장고내에 센서가 설치된 지점별 온도의 평균 공기온도로 하였다. 팬 정지시점에 측정된 각 지점별 공기온도는 시뮬레이션에 의한 계산치와 비교되었다. 측정된 온도 실측치와 시뮬레이션에 의한 온도 계산치의 비교는 아래 식(2)의 R. M. S. 값을 이용하였다.

$$R.M.S. = \sqrt{\frac{\sum(d^2)}{n}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, R. M. S. : 실측치와 시뮬레이션 온도값의 Root Mean Square 오차  
 d : 실측치와 예측치의 차이  
 n : 측정 데이터의 수

Table 1. Boundary conditions for simulation validation of temperature

Properties	Empty model	Partially loaded model
Inlet velocity (m/sec)	7.0	7.0
Inlet temperature (°C)	-0.5	0
Turbulent intensity (%)	10	10
East wall heat flux (W/m <sup>2</sup> )	0.1	0.1
West wall heat flux (W/m <sup>2</sup> )	0.7	0.1
South wall heat flux (W/m <sup>2</sup> )	1.4	0.9
North wall heat flux (W/m <sup>2</sup> )	0.8	0.6
Roof heat flux (W/m <sup>2</sup> )	1.4	1.2
Floor heat flux (W/m <sup>2</sup> )	1.1	1.0
Apple heat source (W/m <sup>3</sup> )	-	2.6
Apple porosity (%)	-	0.5

온도분포 균일화 설계를 위한 시뮬레이션

저온저장고 내부의 온도분포 균일화를 위한 적정 팬용량 및 적재방법을 설정하기 위해 검증된 CFD 시뮬레이션 모델을 이용하여 계산을 수행하였다. 대상 저온저장고는 6×10 열의 2단 적재 팔레트에 농산물(후지사과)이 78톤 적재된 상태이고, 냉각용 송풍기의 팬은 두개이다. Table 2에는 온도분포 균일화 설계를 위한 시뮬레이션에 적용된 설계 변수들을 나타내었다. 저장물과 측면 벽체와의 거리는 150 mm, 300 mm, 500 mm, 팔레트 간 거리는 없는 상태를 대상으로 하였으며, 벽체와의 거리가 500 mm, 팔레트 간 거리는 200 mm인 경우도 추가로 설정하였다. 이 때 저장물량이

Table 2. Simulation parameters for design of temperature uniformity

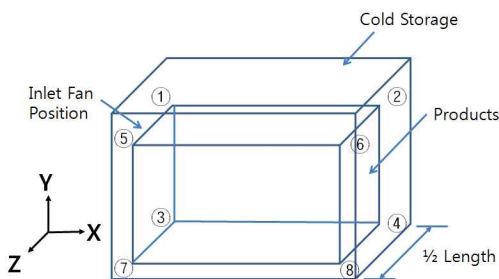
Parameters	Contents
Cold storage size	84 ~ 119 m <sup>2</sup> area
	140 CMM (4.1 m/sec)
Fan Air flow (Velocity of air)	200 CMM (5.8 m/sec)
	300 CMM (8.7 m/sec)
	400 CMM (11.6 m/sec)
	150/0
Distance between products and wall / Distance between pallets(mm)	300/0
	500/0
	500/200

고정되어 있기 때문에 저장물과 벽체와의 거리가 증가할수록 저장고의 바닥면적도 증가하며, 벽체와의 거리가 150 mm 일 때 저장고 바닥면적은 84 m<sup>2</sup>, 벽체와의 거리가 500 mm 이고 팔레트 간 거리가 200 mm 일 때는 최대 119 m<sup>2</sup>의 바닥면적을 가진다. 저온저장고 내부의 냉각용 송풍기의 송풍량 및 팬풍속은 600 mm 직경의 팬 2개를 사용하는 것으로 가정했을 때 팬 2개의 합계 송풍량은 140 CMM(4.1 m/sec 풍속), 200 CMM(5.8m/sec 풍속), 300 CMM(8.7 m/sec 풍속) 및 400 CMM(11.6 m/sec 풍속)을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 3에는 온도분포 균일화 설계를 위한 시뮬레이션에 적용된 경계조건을 나타내었다. 벽체의 열유속 값은 하절기의 외기온도를 기준으로 100 mm 두께의 우레탄 단열재를 적용한 벽체에 대해 계산된 값이다. 저장 농산물은 사과(후지)로 하였으며 1.1×1.1 m 크기의 팔레트위에 통기성이 우수한 상자에 담겨 적재된 것으로 가정하여 다공매체모델(porous media model)로 모델링하였다. Fig. 3에는 저장고 내부의 8개 온도예측 지점을 나타내었다. 8개의 온도예측 지점은 적재 농산물을 냉각기를 중심축으로 하여 좌우 양분된 1/2 육면체의 모서리부분 8지점으로 하였으며, 적재 농산물 모서리지점으로부터 50 mm 떨어진 공간을 예측지점으로 하였다.

**Table 3. Boundary conditions for design of temperature uniformity**

Properties	Boundary conditions	Remarks
Inlet velocity (m/sec)	4.1, 5.8, 8.7, 11.6	
Inlet temperature (°C)	0	
Turbulent intensity (%)	10	
Side wall heat flux (W/m <sup>2</sup> )	7.7	35°C ambient temperature, 100 mm wall depth
Roof heat flux (W/m <sup>2</sup> )	8.36	38°C ambient temperature, 100 mm wall depth
Floor heat flux (W/m <sup>2</sup> )	5.5	25°C ambient temperature, 100 mm wall depth
Apple heat source (W/m <sup>2</sup> )	2.6	Average heat flux of an apple
Apple loading porosity (%)	0.5	



**Fig. 3 Positions for temperature prediction by simulation**

저온저장고의 계산영역은 형상의 대칭성을 고려하여 전 영역의 1/2을 해석 대상으로 하였다. 저온저장고의 격자개수는 약 128~200만개이다. 공기의 난류모델은 위의 기류분포 검증에서 선정된 레이놀즈 응력 모델이 사용되었다.

저온저장고내의 온도분포를 분석하기 위한 공기영역 전체 격자 셀에 대한 온도의 표준편차는 다음의 식(3)을 통해 계산하였다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\sigma$  : 시뮬레이션 모델의 공기영역 총 cell 에 대한 온도의 표준편차

$x$  : 표준편차 산출변수(공기온도)

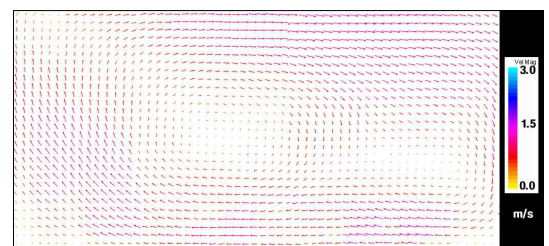
$\bar{x}$  : 산출변수 평균값

$n$  : 공기영역 총 cell 수

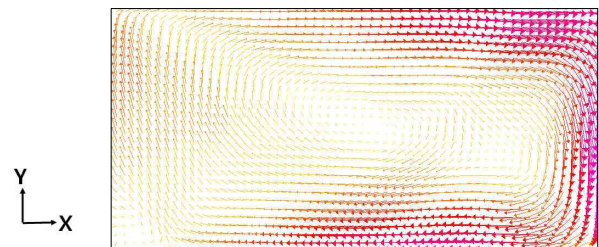
**결과 및 고찰**

**CFD 모델의 공기유동 검증**

Fig. 4는 16 m<sup>2</sup> 면적 저온저장고의 1/5 축소모형(1.18×0.54×0.6 m)에 대해 중앙 대칭 xy단면으로부터 z방향으로 160 mm 떨어진 지점의 xy단면(z=110 mm)에서 PIV 측정치 및 시뮬레이션 예측치의 속도벡터 비교를 보여준다. 중심부의 1차 회전유동과 하류 하부의 2차 유동 영역이 정성적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 5에는 저장고 중앙지점에서 높이방향으로의 x-속도성분 분포를 PIV 측정치와 표준 k-ε모델 및 RSM 모델에 의한 시뮬레이션 예측치에 대해 각각 나타내었다. 측정치와 예측치는 모두 저장고 내부의



(a) PIV measurement



(b) CFD simulation with RSM

**Fig. 4 Comparison between experimental and numerical velocity vector profiles at xy plane(z=110 mm)**



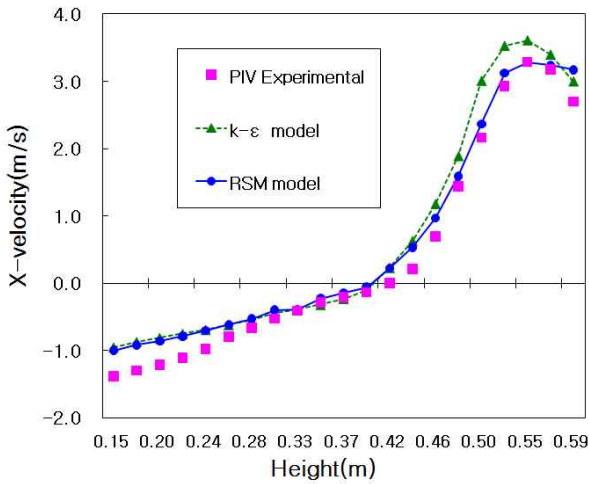


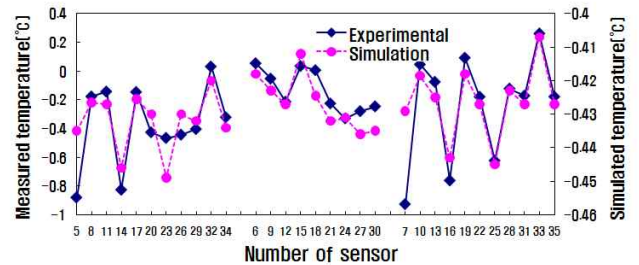
Fig. 5 Comparison between experimental and numerical x-velocity profile on height(x=0.59 m) of symmetric plane

시계방향 선회유동을 나타내며 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. x-속도성분의 측정치와 예측치의 상대적 오차를 식 (1)에 의해 계산 한 결과, 표준 k-ε모델에 의한 예측치와 PIV 측정치의 상대적 오차는 24.5%로 나타났고, RSM 모델에 의한 예측치와 측정치의 상대적 오차는 16.7%로 나타나 RSM 모델의 예측 정확도가 더 높은 것으로 나타났다. 저장고 모형의 상부영역에서 x-속도성분은 RSM 모델의 예측치가 PIV 실측치와 매우 잘 일치하는 반면, 표준 k-ε모델의 예측치는 상대적으로 높은 값을 나타내는 것으로 나타났다. RSM 난류모델은 난류운동에너지 소산율에 대한 방정식과 함께 레이놀즈 응력텐서의 각항에 대한 수송방정식을 직접 풀게 되므로 선회류나 2차유동의 발생 등에 대해 더 나은 예측 정확성을 가지며 이러한 결과는 Moureh 등(6)의 연구에서 RSM 모델이 k-ε계열 모델에 비해 선회유동을 더 정확히 예측한다는 보고와도 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 온도분포 균일화 설계 시뮬레이션에서는 난류모델로 RSM모델을 채용하여 계산을 수행하였다.

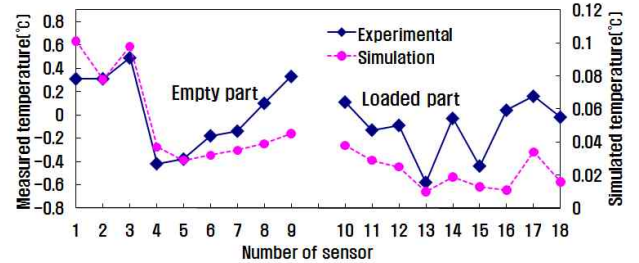
CFD 모델의 온도분포 검증

Fig. 6에는 실제 상용 저온저장고(14.4×11.8×8.0 m)에 대해 농산물 무적재와 적재상태에서 Fig. 2에 나타낸 온도 센서 위치에서 측정된 온도 측정치와 동일 저온저장고에 대해 RSM 난류모델을 적용하여 해석한 온도 예측치를 비교한 결과를 나타내었다. 농산물 무적재 상태에서의 온도 측정치의 평균값 및 표준편차는 -0.26 °C 및 0.30 °C로, 온도 예측치의 평균값 및 표준편차는 -0.43 °C 및 0.01 °C로 나타났으며, 농산물 적재 상태에서의 온도 측정치 평균값 및 표준편차는 -0.03 °C 및 0.29 °C로, 온도 예측치 평균온도 및 표준편차는 0.04 °C 및 0.05 °C로 나타났다. 식(2)에 의한 실측치와 예측치의 R. M. S. 값은 농산물 무적재 상태에서 0.33 °C, 농산물 적재 상태에서는 0.28 °C로 나타났다. 측정

치는 냉각기의 On/Off에 따른 비정상상태의 평균값을 나타내며, 시뮬레이션 예측치는 정상상태를 가정한 계산이므로 평균온도 및 표준편차의 값에서 차이가 있으나 측정치와 예측치의 저장고 내부 각 위치에서의 온도분포 경향은 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다.



(a) Empty model



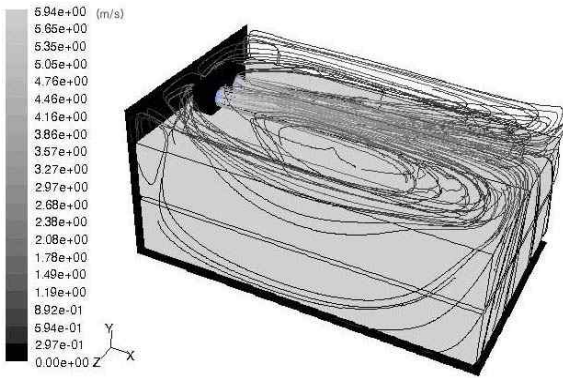
(b) Loaded model

Fig. 6 Comparison between experimental and numerical temperature distribution

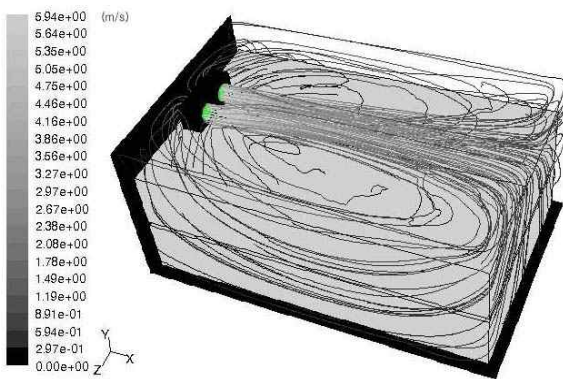
이상의 속도벡터 및 온도의 분포를 이용한 검증과정을 통해, 본 CFD 시뮬레이션 모델을 온도분포 균일화 설계 시뮬레이션에 적용할 경우 저온저장고 내부의 공기유동 및 열전달 현상을 비교적 정확하게 예측 가능할 것으로 판단된다.

온도분포 균일화 설계를 위한 시뮬레이션

온도분포 균일화 설계를 위한 적정 팬용량 및 적재방법을 설정하기 위해 다양한 변수값에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7 (a)에는 저온저장고에 대하여 팬풍속이 8.7 m/sec(300 CMM 풍량)이고, 적재 농산물과 벽체와의 간격이 150 mm일 때의 유선(Streamline) 분포를 나타내었다. 저장물과 벽체와의 간격이 좁기 때문에 팬에서 토출된 기류는 저장물과 벽체 사이의 공간으로 충분히 유입되지 못하며 하류방향으로 생성된 역압력 구배에 의해 저장물 상부영역에서 대부분 선회함을 볼 수 있다. Fig. 7 (b)는 벽체와의 간격이 300 mm 일 때의 유선 분포로, 저장물과 벽체사이의 공간으로 기류가 상대적으로 많이 유입됨을 볼 수 있으며 이로 인한 대류열전달의 향상으로 150 mm 간격의 경우에 비해 저장고 내부의 열적체 영역이 감소한 것으로 분석되었다.



(a) 150 mm distance between products and wall

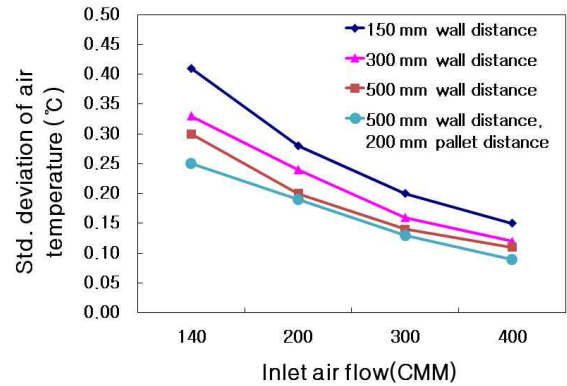


(b) 300 mm distance between products and wall

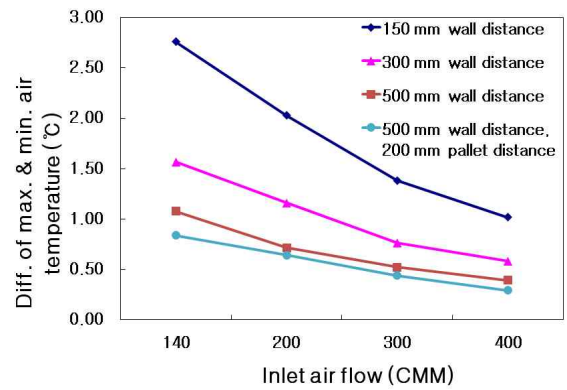
Fig. 7 Streamline in cold storage (5.8 m/sec fan air velocity)

Fig. 8 (a)에는 팬송풍 온도가 0°C일 때 6×10열 2단 팔레트에 농산물이 적재된 상태에서 팬풍량별, 적재방법별로 예측된 저장고 내부의 공기온도 표준편차를 나타내었다. 표준편차는 저장물과 벽체의 간격 및 팬풍량이 증가할수록 감소하였으며 동일 벽체간격 조건에서는 팔레트 사이에 공간이 있는 경우가 낮게 나타나 저장고 내부 공기온도의 균일도가 향상되는 것으로 나타났다.

Fig. 8 (b)에는 Fig. 3에 나타낸 8지점에서 예측된 온도 중 최고온도와 최저온도의 차를 나타내었다. 저장물과 벽체와의 간격이 300 mm 이상이 되면서 최고, 최저 온도의 차 즉 온도 불균일성의 하락이 둔화되는 것으로 나타났으며, 팬풍량은 300 CMM 이상이 되면서 최고, 최저 온도의 차의 하락이 둔화되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 해석대상 저장고의 경우 8개의 온도예측 지점 중 최고, 최저 온도의 차를 1°C 이내로 유지하기 위해서는 저장물과 벽체와의 간격은 300 mm 이상, 냉각용 송풍기의 송풍량은 300 CMM이 되어야 하는 것으로 판단되었다.



(a) Standard deviation in cold storage



(b) Difference of maximum and minimum temperature

Fig. 8 Comparisons of air temperature uniformity for fan air flow rate

## 요약

농산물 저온저장고 내부의 온도분포 균일화를 수치해석적으로 분석하기 위해 3차원 CFD 시뮬레이션을 수행하였다. CFD 시뮬레이션 모델은 속도벡터 및 온도분포 측정치와 비교를 통해 검증하였으며, 온도분포 균일화 향상을 위한 적정 팬용량 및 적재방법을 설정하기 위해 몇 가지 팬풍속 및 저장물과 벽체간의 거리 등에 대해 기류패턴과 온도분포를 분석하였다. CFD 시뮬레이션의 검증에서 속도벡터 분포는 PIV시스템에 의한 측정치와 비교했을 때 표준 k-ε 모델 예측치와 측정치의 상대적 오차는 24.5%로 나타났고, RSM 모델 예측치와 측정치의 상대적 오차는 16.7%로 나타나 RSM 난류모델의 예측 정밀도가 더 높은 것으로 나타났다. 온도분포 검증 결과 실측치와 측정치의 R. M. S. 값은 농산물 무적재 상태에서 0.33 °C, 농산물 적재 상태에서는 0.28 °C로 나타났으며 예측값과 측정값의 온도분포 경향은 잘 일치하는 것으로 나타났다. 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 6×10열 2단 팔레트에 농산물이 적재되고 냉각용 송풍팬이 2개인 저온저장고에 대해 송풍팬의 풍량 및 저장

물과 벽체와의 간격 변화의 영향을 분석한 결과, 저장물과 벽체와의 거리는 300 mm 이상, 송풍량은 300 CMM 이상에서 저장고 내의 공기 온도차는 1℃ 이내로 유지되며 팔레트 사이에 간격을 둔 경우 온도분포의 균일성이 향상되는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. Wang, H. and Touber, S. (1990) Distributed dynamics modelling of a refrigerated room. *Int. J. Refrigeration* 13, 214-222
2. Van Gerwen, R.J.M. and Van Oort, H. (1990) Optimization of cold store using fluid dynamics models. *Proceed. IIF/IIR Commissions B2, C2, D1, D2/3*, vol. 4, Dresden, Germany, 473-480
3. Hoang, M. L., Verboven, P., De Baermaeker, J. and Nicolai, B. M. (2000) Analysis of air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. *Int. J. Refrigeration*, 127-140
4. Yang, G. M. (2002) Development of dome-type cold storage and control system using neuro-fuzzy and three dimensional CFD simulation. Ph. D. Dissertation, Seoul National University
5. Cho, B. K., Song, D. B. and Koh, H. K., (1997) Prediction of temperature distribution in cold storage rooms using K- $\epsilon$  turbulence model. *Food Eng. Progress*, 1, 247-254
6. Moureh, J. and Flick, D. (2004) Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *Int. J. Refrigeration* 27, 464-474

---

(접수 2009년 9월 18일, 채택 2010년 1월 8일)