

## 강제 통풍식 감귤 예건시설의 유동 해석

권진경 윤홍선 정 훈 이현동 이성현 문종필

### Analysis of Flow Characteristics of Forced Ventilated Pre-drying Facility for Mandarin

J. K. Kwon H. S. Yoon H. Jeong H. D. Lee S. H. Lee J. P. Moon

#### Abstract

Uniform and rapid pre-drying of mandarin is important to improve the storage quality. The aim of this study was to suggest the basic design of forced ventilated pre-drying facility for mandarin by thermal flow analysis using computational fluid dynamics software (FLUENT 6.2). Developed CFD simulation model was verified by comparison with experimental data. Airflows and temperature distributions in the five conceptional designs including existing ordinary temperature storage rooms were analyzed and appropriate basic design was determined. Analysis of the effect of arrangement of windows and exhaust fans on thermal flow in facility was carried out for more detailed design. The results of this investigation showed that the predicted airflow velocity by CFD simulation showed a good agreement with the measured value and optimum design condition for simulated forced ventilated pre-drying facility of mandarin has two exhaust fans and two windows on both sidewalls and cover on loaded mandarin.

**Keywords :** Airflow, CFD (Computational Fluid Dynamics), Forced ventilation, Heat transfer, Pre-drying

#### 1. 서론

감귤이나 배의 저장 시 가장 주의할 점은 부패과의 발생 및 과피의 흑변이며, 저장전 농산물의 표면 함수율이 저장중의 부패율을 결정짓는 가장 큰 요인이다. 이와 같은 저장품질의 저하는 수확 후 적절한 예건과정을 통해 감소시킬 수 있다. 한편 제주도의 조생종 온주밀감은 대부분 재래식 상온저장고에서 2월 중하순까지 저장하며, 저장고 입고 전 대부분 노지의 야적상태에서 자연통풍을 이용하여 상온예조를 실시하고 있어 저장품질의 저하가 발생하고 있으므로 저장 전 단계에서 적절한 설비를 이용하여 신속하고 균일한 예건을 수행할 필요가 있다. 농산물의 건조, 저장시설에서 적재물과 공기사이의 열 및 물질전달은 대부분 대류에 의존하므로 온도 및 습도의 분포는 시설내부의 공기유동 패턴에 가장 큰 영향

을 받게 된다. 시설내부의 기류 및 온도의 최적조건을 결정하는 변수는 농산물의 호흡열, 물성치, 적재공극률 등 농산물 고유의 성질에 의한 것과 공기공급의 방식, 유속, 온도, 적재물의 배열방식과 같이 제어 가능한 것으로 대별되며, 부적절한 조건에서는 공기량의 집중 또는 정체에 의해 호흡 및 증산작용의 불균형이 발생할 수 있다. 시설의 설계 시 이들 변수의 영향을 반복실험을 통해 분석하는 것은 비용, 시간적 측면에서 매우 비효율적이므로 최근 수학적 모델에 기초하여 열유동 관련 지배방정식을 수치적으로 풀으로써 기류 및 열전달을 예측할 수 있는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)이 다양한 분야에서 활용되고 있다.

열유동 수치해석코드와 컴퓨터 성능의 발전에 따라 농업분야에서도 원예시설과 저장·수송 시설 등을 중심으로 CFD를 이용한 열유동 해석 연구가 급증하고 있는 추세이다. 원예시

This work was financially supported by Agricultural R&D Promotion Center(ARPC). The article was submitted for publication on 2010-10-05, reviewed on 2010-10-22 and approved for publication by the editorial board of KSAM on 2010-11-02. The authors are Jin Kyung Kwon, Research Scientist, Hong Sun Yun, Senior Research Scientist, Hoon Jeong, Research Scientist, Hyun Dong Lee, Research Scientist, Sung Hyoun Lee, Senior Research Scientist, and Jong Pil Moon, Research Scientist, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, 441-707, Korea; Fax: +81-31-290-1840; E-mail: <cen55@korea.kr>

설의 경우 Okushima 등(1989)이 CFD가 자연환기 온실의 유동장을 정성적으로 예측할 수 있음을 밝힌 이래 CFD를 이용한 온실 미기상 연구가 다양하게 진행되어 왔다. 저장시설과 관련된 연구로 Wang 등(1988)과 Van Gerwen 등(1990)이 Phoenics 코드를 이용하여 저온저장고 내의 열유동을 예측하였으며, Hoang 등(2000)은 CFX 코드를 이용하여 빈 저장고와 저장물이 있는 상태의 저장고에 대해 기류해석을 실시하여 유속 측정치와 비교하였다. Chourasia 등(2007)은 FLUENT 코드를 이용하여 저온저장고 내의 감자의 냉각특성에 미치는 스택 사이즈와 배열의 영향에 대해 수치해석을 수행하였다. Moureh 등(2002)은 2열의 팔레트를 탑재한 냉동 컨테이너에 대해 FLUENT를 이용한 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 LDV 속도벡터 측정 결과와 비교하였다. 이상과 같이 CFD는 원예시설이나 농산물 저장고, 수송 장치 등의 열유동 해석에 활발히 적용되어 있으며 실측치와의 비교, 검증을 통해 그 유용성이 확인되고 있다.

본 연구의 목적은 감귤 상온저장고에 적용 가능한 강제통풍 예건 시스템에 대해 FLUENT 상용 코드(FLUENT 6.2, ANSYS, USA 2005)를 적용하여 열유동 수치해석을 수행하고, 이를 통해 흡기창, 배기팬의 위치, 개수 등에 대한 적정

설계변수를 결정함으로써 최적의 강제통풍 예건 시스템 설계를 위한 기초적 자료를 제공하는데 있다.

## 2. CFD 수치해석

### 가. 해석대상 예건시스템

감귤 상온저장고에 적용 가능한 강제통풍 예건 시스템을 선정하기 위해 그림 1에 나타난 강제통풍 방식들에 대해 CFD 시뮬레이션을 통한 열유동 해석을 수행하였다. 그림 1 (a), (b)는 제주도의 대부분의 감귤 상온저장고에서 채용하고 있는 환기창, 배기팬의 배치로서 상온저장고의 경우 배기팬은 외풍에 의해 작동되는 무동력 팬을 천정에 부착하고 있다. 본 CFD 시뮬레이션에서는 기존 저장고의 활용 가능성을 검토하는 관점에서 무동력 팬의 위치에 강제 배기조건을 적용하였다. 그림 1 (a)의 Case 1은 양측벽 상부에 흡기창이 설치되고 천정에 강제 배기팬이 4개 설치된 구조이며, 그림 1 (b)의 Case 2는 Case1 조건에 부가하여 양측벽 하부에 흡기창 4개가 추가된 구조이다. 그림 1 (c)의 Case 3은 제주도의 일부 감귤 상온저장고에서 채용하고 있는 방식으로 정면벽의

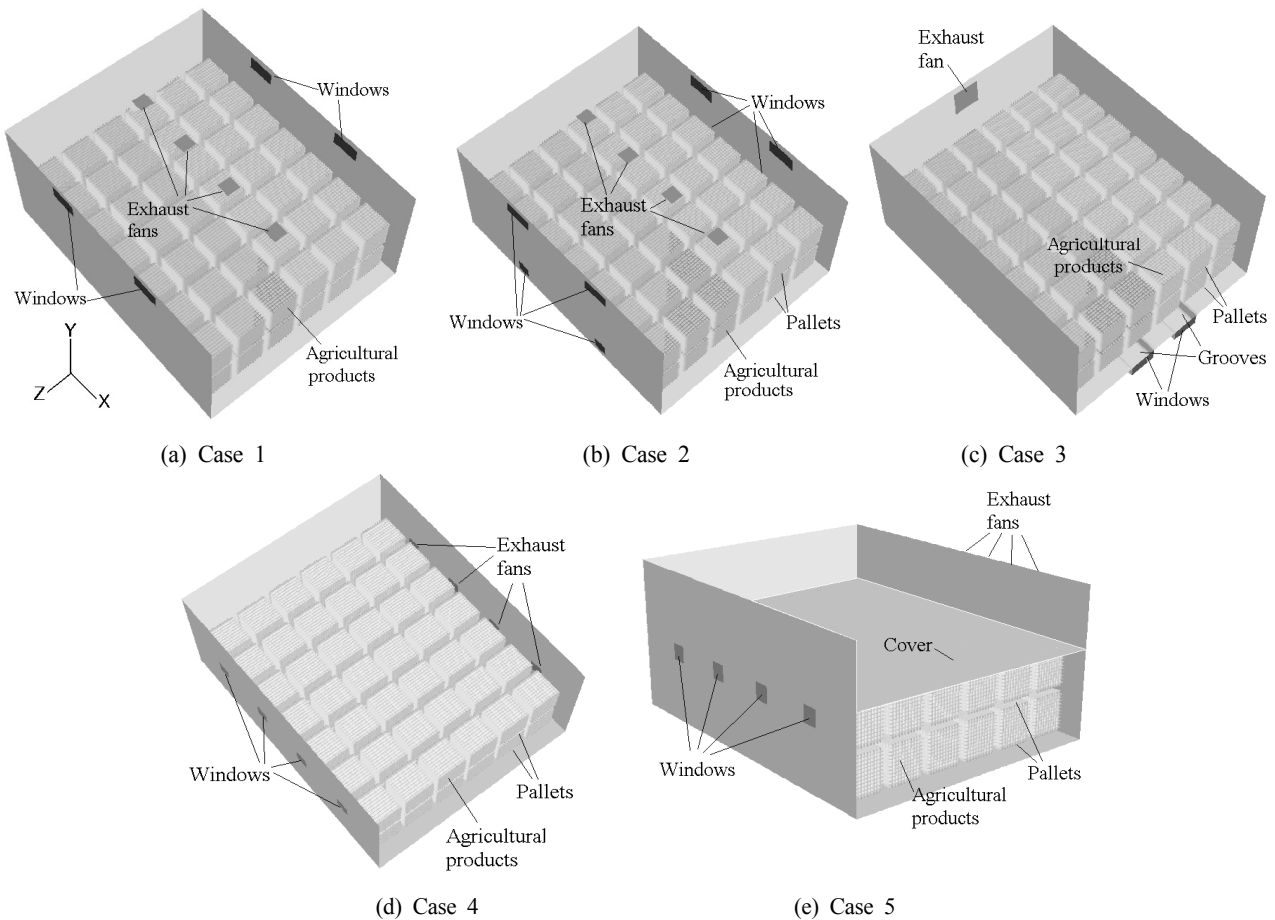


Fig. 1 Schematics of forced ventilated pre-drying facilities for analysis.

하부에 2개의 흡기창과 반대편 후면벽까지 연결된 위쪽이 열린 2개의 바닥흡을 가진 구조로, 반대편 후면면에 배기팬이 설치된 구조이다. 그림 1 (d)의 Case 4는 한쪽 측벽 중간높이에 흡기창을, 반대편 벽면의 중간높이에 배기팬을 설치한 구조로 앞의 Case 1과 2의 천정 배기로 인한 저장고 하부의 통기성 저하를 방지하기 위해 제안하였다. 그림 1 (e)의 Case 5는 Case 4와 흡기창, 배기팬구성은 동일하며, 농산물 적재 영역의 상부 공간을 흐르는 공기를 적재영역으로 집중시키기 위해 적재물 상부에 커버를 덮어 공간을 축소하는 조건이다. 모든 Case들에서 저장고 크기는 10000(L)×8000(W)×4500(H) mm로 동일하며, 통기되는 공기유량도 동일하다. 적재 농산물은 감귤로 높이 150 mm의 팔레트 위에 1200(W)×1200(W)×1200(H) mm의 통기성이 우수한 상자 내에 적재되며, 팔레트는 정면, 후면 측벽과 550 mm, 양측벽과 200 mm 떨어져서 높이 2단, 팔레트간 간격 150 mm의 7×6 배열로 총 84개 팔레트가 저장고에 입고된 상태를 가정하였다.

나. 수치적 방법

예건시설 내의 유동은 정상상태, 3차원, 난류 공기유동이며, 공기는 비압축성 유체로 취급하였다. 열전달은 전도 및 혼합대류를 고려하였으며, 열부력 효과는 계산시간을 고려하여 Boussinesq 모델을 적용하였다. 난류모델은 난류해석의 정확성과 수렴성을 고려하여 Realizable  $k-\epsilon$  모델을, 벽면 표면의 유동 모델링에는 표준벽함수를 적용하였다. 물리량의 수송을 나타내는 비압축성, 정상상태, 3차원 보존방정식의 일반형은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(U\Phi)}{\partial X} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial Y} + \frac{\partial(W\Phi)}{\partial Z} = \Gamma \cdot \nabla^2\Phi + S_\Phi \quad (1)$$

위 식에서  $\Phi$ 는 수송되는 물리량들의 농도로서 연속방정식, Navier-Stokes 방정식, 에너지방정식에서 각각 질량, 운동량의 3차원성분, 엔탈피를 의미한다. U, V, W는 속도벡터 성분이며  $\Gamma$ 는 확산계수,  $S_\Phi$ 는 각 보존방정식에서 질량, 운동량, 에너지의 생성항이다. 적재 감귤은 다공매체모델(porous media model)로 모델링 되었으며 Navier-stokes 방정식에 부가되는 다공매체 내의 운동량손실은 Darcy-Forchheimer 방정식에 기초하여 다음과 같이 정의된다.

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

여기서  $\alpha$ 는 투과도,  $C_2$ 는 관성저항계수,  $v_{mag}$ 는 유속이며, 다양한 레이놀즈수와 다공매체에 대한 실험식인 Ergun 방정식(Ergun, 1952)에 기초하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서  $D_p$ 는 감귤의 등체적구상당직경이며,  $\gamma$ 는 감귤의 적재 공극률로 각각의 값은 Yun 등(1995)의 측정 결과를 참고하였다. 위 식 (3)을 통해 계산된 점성저항계수( $1/\alpha$ )와 관성저항계수( $C_2$ )를 적재 감귤의 모델링에 적용하였다. 본 해석에 적용된 공기 및 감귤의 물성치와 경계조건을 아래의 Table 1과 2에 각각 나타내었다. 감귤의 물성치는 ASHRAE 핸드북(1989)을, 흡기되는 공기 온도는 서귀포의 11월 30년 평균기온에 관한 기상청 데이터를 적용하였다. 또한 5가지 case들의 강제 환기되는 공기유량을 동일하게 하기 위해 배기팬은 팬 경계조건 대신 속도 경계조건으로 모델링하였다.

Table 1 Properties of air and mandarin

Properties (Unit)	Values
Air	
Atmospheric pressure (Pa)	101325
Acceleration of gravity (m/s <sup>2</sup> )	9.81
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.225
Specific heat (J/kg°C)	1006
Thermal conductivity (W/m°C)	0.0242
Viscosity (kg/ms)	1.7894×10 <sup>-5</sup>
Mandarin	
Diameter (m)	0.059
Density (kg/m <sup>3</sup> )	580
Specific heat (J/kg°C)	3770
Thermal conductivity (W/m°C)	0.58
Respiration heat (W/m <sup>3</sup> )	20

Table 2 Boundary conditions

Parameters (Unit)		Values
Exhaust air velocity (m/s)		6.0
Intake air temperature (°C)		13.7
Porous media	Inertial resistance factor (m <sup>-1</sup> )	1000
	Viscous resistance factor (m <sup>-2</sup> )	484000
	Heat source (W/m <sup>3</sup> )	13.2
Wall heat flux (W/m <sup>2</sup> )	Porosity (%)	34
	Roof	5.0
	Side wall	3.0
Bottom	3.0	

형상의 대칭성을 고려하여 Case 1, 2, 3은 시설의 X-Y 중심면에 대칭경계조건을 적용하였으며 Case 4와 5는 시설의 Y-Z 중심면에 대칭경계조건을 적용하여 전 영역의 반만 계

산하였다. 감귤 적재영역은 정렬 육면체격자를, 나머지 공간은 비정렬 사면체격자를 적용하였다. 그림 1의 Case 2를 대상으로 격자 의존성을 검토한 결과 격자크기 10 mm에서 감귤 적재영역 내부와 나머지 공간의 평균유속의 격자 의존성이 약해짐을 확인하였으며, 이때의 격자개수는 Case 1, 2가 약 91만개, Case 3, 4, 5는 각각 약 100만개, 약 89만개, 약 50만개로 나타났다. 연속방정식에 나타나는 압력수정식에는 수렴성을 고려하여 SIMPLE 알고리즘을 적용하였고, 압력항의 이산화에는 유동장내에 포함된 다공매체모델을 고려하여 PRESTO! 스킴을, 나머지 항들의 이산화에는 선회유동의 해석에 적합한 QUICK 스킴을 적용하였다. 해의 수렴기준은 반복계산에 따른 유수의 합과 연속된 종속변수들의 상대오차가 에너지의 경우  $10^{-7}$ , 나머지 변수들은  $10^{-4}$  이하가 될 때까지로 하였다. 또한 반복계산의 진행에 따른 출구 평균유속과 입·출구의 질량유량 평형을 통해 해의 안정성과 보존칙의 만족여부도 확인하였다(Yun et al., 2008).

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. CFD계산의 검증

CFD 시뮬레이션 모델의 검증을 위하여 그림 2와 같이 양쪽 측벽에 흡기창 2개, 배기팬 2개가 설치된 6500(L)×4000(W)×3200(H) mm 크기의 저장고를 대상으로 유속 측정 실험을 수행하였다. 감귤을 모사하기 위해 직경 50 mm의 플라스틱 구를 농업용 플라스틱 운반상자에 담아 팔레트 위에 4단으로 쌓은 후 팔레트를 다시 2단, 3x2의 배열로 쌓았다. 내부에 열원이 없는 상온 강제통풍 상태이므로 내부의 지점별 온도차는 거의 나타나지 않아 지점별 유속만 측정하여 CFD 계산치와 비교하였다. 배기팬의 유속은 5.2 m/s, 흡기되는 외기의 온도는 9.5 °C 이었다. 그림 2에 시설 내에 설치한 총 10개의 무지향 미소풍속 센서(HD403TS, Delta OHM, Italy)의 위치를 나타내었다. 대칭조건을 고려하여 총 10개의 센서를 한쪽에만 설치하였으며 플라스틱 상자 내부에 4개, 상자 사이에 2개, 상자 외부에 4개의 센서를 설치하였다.

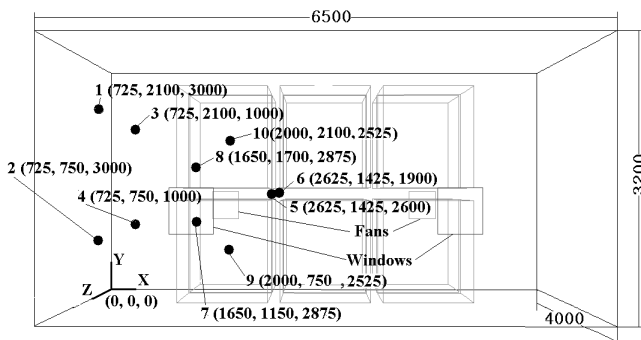


Fig. 2 Positions of velocity sensor

그림 3에는 각 지점별 측정치와 CFD 예측치의 비교 결과를 나타내었다. 플라스틱 상자 외부의 1~6번 센서위치에서 측정치는 대부분 예측치보다 약간 높게 나타났으며 이는 CFD 경계조건으로 사용된 팬 유속 측정치가 실제보다 약간 낮았기 때문으로 판단된다. 상자 내부의 7, 8번 위치에서 측정치는 광범위한 레이놀즈수에 대한 실험식인 Ergun 방정식에 기초한 Porous media 모델링과 실제 적재물의 유동저항과의 차이 및 Porous media 모델링에서 고려하지 않은 플라스틱 상자의 부가적인 유동저항으로 인해 예측치보다 낮게 나타난 것으로 보이며, 상자 내부의 9, 10번 위치에서의 유속은 사용된 풍속센서의 측정범위를 벗어나는 낮은 값으로 유속측정에는 실패하였다. 그러나 그림에서 보듯 측정치와 예측치의 풍속분포 경향은 매우 잘 일치하며, 예측치와 측정치의 오차의 RMS(Root Mean Square)값은 약 0.026 m/s로 나타나 CFD 시뮬레이션을 이용한 신뢰성 있는 강제통풍식 예건시설의 유동 예측이 가능할 것으로 판단되었다.

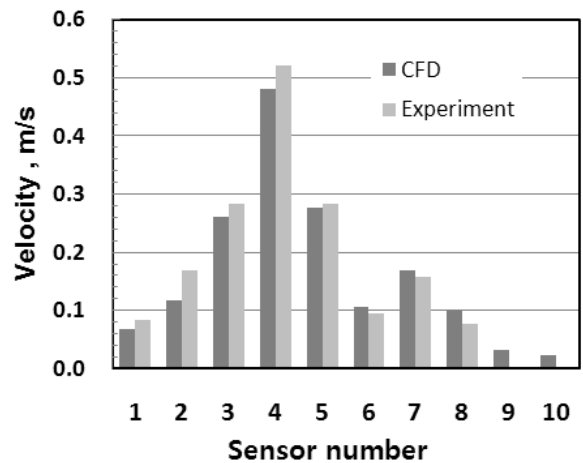


Fig. 3 Comparison between experimental and numerical velocities at sensor positions.

#### 나. Case별 열유동 해석

각 Case들에 대한 CFD 시뮬레이션 결과를 그림 4에 유선 분포로 나타내었다. Case 1의 경우 양측벽 상부의 흡기창에서 유입된 기류는 감귤 적재영역의 상부에서 선회하며, 대부분 천정의 배기팬으로 바로 배출됨을 볼 수 있으며 이로 인해 감귤 적재영역 중, 하부의 통기성이 불량한 것으로 나타났다. Case 2의 경우 양측벽 하부의 흡기창에서 유입되는 기류로 인해 적재영역 하부에도 어느 정도 기류가 생성됨을 볼 수 있으나 여전히 대부분의 기류는 양측벽 상부 흡기창에서 유입되어 천정의 배기팬으로 배출됨을 볼 수 있다. Case 3의 경우 정면벽 하부의 흡기창에서 유입된 기류는 바닥함을 통해 반대쪽 후면벽까지 도달 후 배기팬을 통해 배출되며 일부 유동은 감귤 적재영역의 상부공간을 통해 정면벽 쪽으로 이동

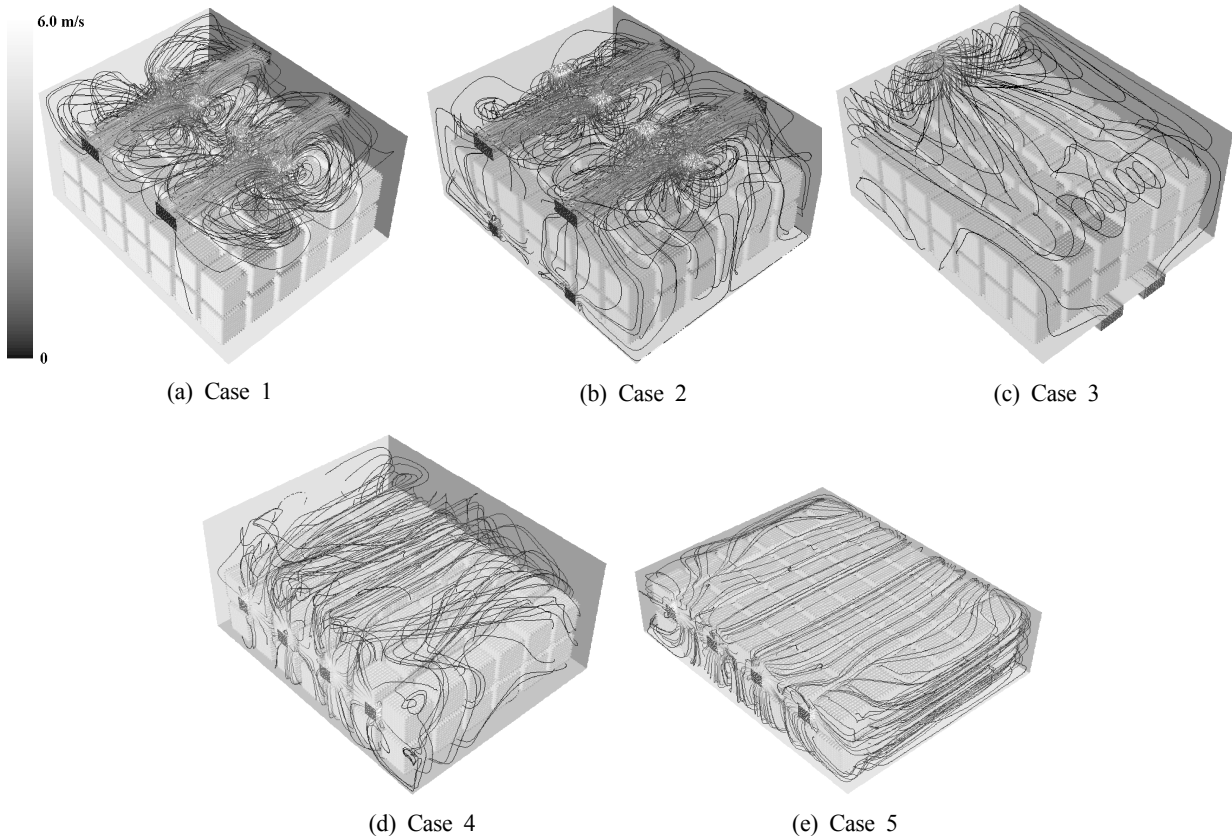


Fig. 4 Streamlines in forced ventilated pre-drying facilities.

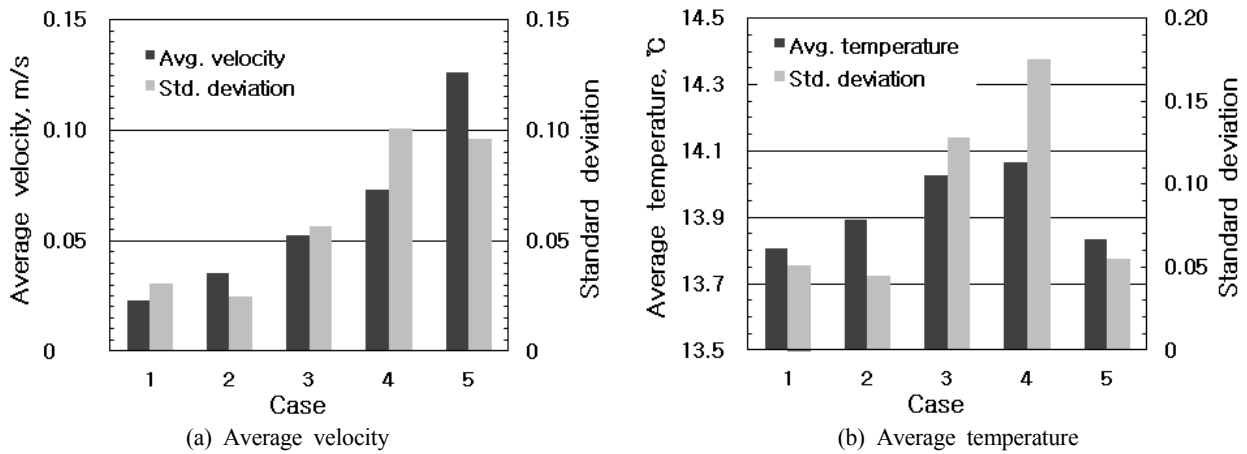


Fig. 5 Average velocity and temperature in loaded mandarin domain.

하나 하부 적재영역과 후면벽쪽 적재영역에 비해 상부 적재영역과 정면벽쪽 적재영역의 기류가 약하게 나타나 적재영역 내에 통기성의 불균형이 발생함을 알 수 있다. Case 4는 양측 벽에 흡기창과 배기팬이 설치된 경우로 앞의 Case들에 비해 감귤 적재영역 내부로 침투하는 기류가 상대적으로 많이 나타났으나 흡기창에서 유입된 기류는 유동저항이 작은 유로를 따라 흐르므로 감귤 적재영역이나 시설 하부를 통과하는 유동에 비해 적재영역 상부공간을 따라 흐르는 유동이 상대적

으로 많이 나타났다. 감귤 적재영역 내부를 통과하는 유량을 증가시키기 위해 Case 4의 조건에 감귤 적재영역 상부에 커버를 설치하여 일종의 차압식 통풍조건을 만든 Case 5에서는 다른 Case들에 비해 유선이 상당히 균일하게 감귤 적재영역에 침투하고 있음을 볼 수 있으며, 이로 인해 감귤적재 영역 내부의 통기성도 다른 Case들에 비해 우수한 것으로 나타났다.

그림 5에는 각 Case 별 시뮬레이션 결과를 감귤 적재영역 내부의 평균유속과 평균온도 및 유속과 온도분포의 표준편차

로 나타내었다. 그림 5 (a)의 감귤 적재영역 내부의 평균유속의 경우, Case 1~5의 순서로 높게 나타났으며 Case 1이 적재영역 중, 하부의 통기성 불량으로 인해 가장 낮았고, Case 5는 Case 1의 약 5배로 가장 높게 나타났다. 적재영역 내부의 속도분포 표준편차는 Case 2가 Case 1에 비해 적재영역 하부의 통기성 개선으로 더 낮게 나타났으며, Case 5가 Case 4에 비해 기류의 집중으로 인해 더 낮게 나타났다. 감귤 적재영역은 유동저항이 매우 높으므로 적재영역 내에서도 내부로 들어갈수록 속도구배가 발생하며, 이러한 경향은 적재영역 주위의 기류가 빠를수록 크게 나타나 속도분포의 표준편차는 대체적으로 Case 1~5의 순서로 증가하는 경향을 보였다. 그림 5 (b)의 적재영역 내부의 평균온도는 다공매체모델의 특성으로 인해 적재된 감귤의 품온이 아닌 감귤 사이의 공극기류의 평균온도로 나타났으며, 이는 조밀하게 적재된 농산물의 경우 농산물과 주위 기류 사이의 온도차는 매우 작다는 Chourasia 등(2005)의 연구결과에 근거한 것이다. 감귤은 일정한 호흡열을 방출하는 열원으로 모델링 하였으므로 적재영역 내부의 유속이 증가함에 따라 대류열전달이 촉진되어 Case 1~4의 적재영역 내부의 평균온도 및 온도분포의 표준편차는 평균유속 및 그의 표준편차와 동일한 경향을 나타내었다. Case 5는 Case 4에 비해 낮은 평균온도와 표준편차를 보이며 이는 Case 5의 경우 적재영역 내부의 유속이 크므로 유속 증가에 의한 대류열전달의 촉진보다 흡기창에서 유입되는 13.7 °C의 외기의 영향이 더 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

그림 6에는 감귤 적재영역을 제외한 공간의 평균유속과 평균온도 및 유속과 온도분포의 공간상의 표준편차를 나타내었다. Case 1은 측벽 상부의 흡기창에서 유입되어 적재영역 상부에서 유동 후 바로 배기되는 상대적 고속기류로 인하여 상, 하부 흡기창에서 유량이 분배되어 유입되는 Case 2에 비해 평균유속과 표준편차가 높게 나타났으며, Case 3의 경우, 정

면벽 하부 흡기창에서 유입된 기류가 대부분 감귤 적재영역 하부의 바닥흡을 통해 후면벽까지 고속으로 도달 후, 후면벽의 배기팬으로 배기되므로 평균유속과 표준편차가 높게 나타났다. Case 4의 경우 적재물 내부로 침투하는 유량이 상대적으로 많으며 흡기창이 4개로 분산되어 있어 Case 2와 비슷한 평균유속을 보였다. Case 5는 상부커버에 의한 공간분리로 유로축소 효과가 발생하여 공간상의 평균유속은 다른 Case들에 비해 높게 나타났으며 비교적 균일한 유동으로 표준편차도 다른 Case들에 비해 특별히 높게 나타나지는 않았다. 그림 6 (b)의 평균온도 및 표준편차는 그림 5 (b)와 달리 그림 6 (a)의 평균속도 및 표준편차와 명확한 비례관계가 나타나지 않았으나 그림 5 (b)와 유사한 경향을 보인다. Case 1에 비해 Case 2는 하부의 유동이 존재하므로 벽면 및 적재영역과의 열전달이 증가한 것으로 보이며, Case 3은 하부의 고속 유동으로 인한 바닥 및 적재영역과의 열전달이 증가한 것으로 보인다. Case 5는 Case 4에 비해 공간축소로 인한 열전달 면적 감소와 기류유속의 증가 효과로 인해 더 낮은 온도를 보이는 것으로 판단된다.

#### 다. 흡기창 배기팬의 배치 설계

위의 각 Case별 CFD 시뮬레이션을 통해 Case 5가 다른 Case들에 비해 통기성이 우수한 구조로 판단되었으며 보다 상세한 설계를 위해 Case 5를 기본으로 흡기창과 배기팬의 개수 및 배치조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7에는 흡기창x배기팬의 개수를 (a) 2x2, (b) 4x2, (c) 3x3, (d) 4x3의 네 조건으로 한 해석 대상을 나타내었다. 시설 면적은 9200x7950 mm이며 팔레트는 3단, 7x6의 배열로 적재되었고 감귤 적재영역의 상부에는 커버가 덮혀 있다. 흡기창과 배기팬은 감귤 적재영역의 중간높이 측벽에 등간격으로 설치되며 팔레트와 벽체 및 팔레트간 간격은 각각 300 mm와 150 mm로 하였다. 각 조건에서 환기유량은 농산물 적재량 기준

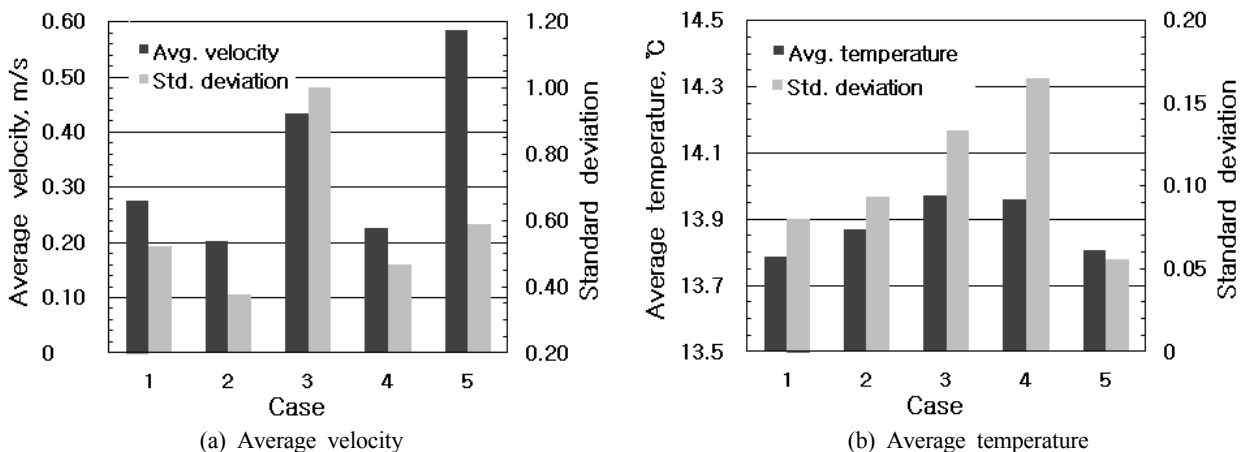


Fig. 6 Average velocity and temperature in space except mandarin domain.

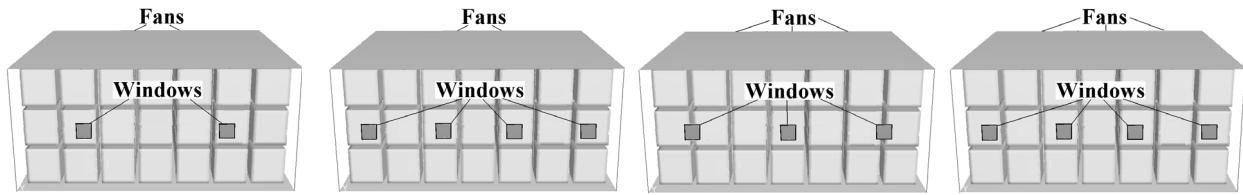


Fig. 7 Schematics of arrangement of windows and fans.

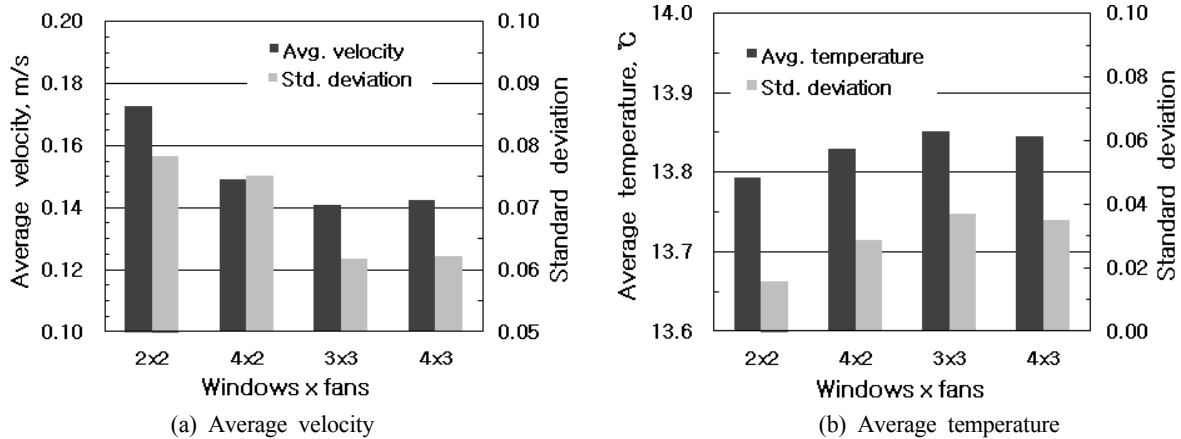


Fig. 8 Average velocity and temperature in loaded mandarin domain.

0.015 m<sup>3</sup>/min·kg으로 모두 동일하며, 참고문헌 Postharvest Technology of Horticultural Crop(2002)의 느린 속도의 차압식 예냉 농산물의 필요유량을 기준으로 하였다. 벽면 열유속은 상온통풍을 고려하여 없는 것으로 가정하였으며 나머지 계산조건은 앞의 Case별 시뮬레이션과 동일하다.

흡기창 및 배기팬의 배치조건에 따른 시뮬레이션 결과를 그림 8에 각 조건별 감귤 적재영역 내부의 평균유속과 평균 온도 및 유속과 온도분포의 표준편차로 나타내었다. 각 조건별 적재물 내부의 평균유속과 평균온도는 서로 반비례하는 것으로 나타났으며 이는 Case 5와 같은 차압식 강제통풍의 경우 적재영역 내부온도는 적재 농산물과의 열전달보다 적재영역을 통과하는 유속에 직접적인 영향을 받음을 의미한다. 시설내의 유동장의 분석 결과 (c) 3x3과 (d) 4x3은 각각 흡기창과 배기팬 2개씩이 팔레트 사이의 공간을 향하고 있어 기류가 감귤 적재영역으로 침투하지 못하고 많은 유량이 적재물 사이의 공간을 흐르게 되며 이로 인해 적재영역 내부의 온도가 상대적으로 높게 나타났다. 또한 (b) 4x2 조건의 경우도 흡기창이 4개로 분산되어 (a) 2x2에 비해 유입기류의 유속이 약하며, 적재물과 벽체 및 적재물 사이의 공간을 흐르는 유량이 증가하여 (a)에 비해 적재영역 내부의 유속이 낮게 나타났다. (a) 2x2는 정면에서 봤을 때 좌, 우의 흡기창과 배기팬이 좌, 우 적재영역의 중심 근처에 위치하며, 적재물 사이의 공간을 향하고 있지 않아 시설 내부의 유속분포가 균일하게 나타났으며 적재영역 내부의 유속 역시 가장 높게 나타났다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 노지에서 자연통풍으로 상온예조 되고 상온저장을 주로 하고 있는 조생종 온주밀감의 저장품질 향상을 위해 기존의 감귤 상온저장고를 활용하여 배기팬에 의해 작동되는 강제통풍 예건시설의 기본 설계안을 제시하고자 하였다. 강제통풍 예건 시설의 설계를 위해 본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 기반으로 하여 제주도의 일반적인 상온저장고 형태를 포함한 5가지 Case의 흡기창 및 배기팬 배치 조건에 대해 열유동 해석 시뮬레이션을 수행하여 시설 내부의 기류 및 온도 분포를 해석하였다. 이를 토대로 적합한 기본 형태를 결정하였으며 상세 설계를 위해 흡기창 및 배기팬의 개수와 배치에 대한 추가적인 열유동 해석을 수행하여 흡기창 및 배기팬의 배열을 결정하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강제통풍 예건시설의 열유동 해석을 위한 CFD 시뮬레이션 모델을 개발하였으며 유속 측정치와 CFD 예측치를 비교한 결과 매우 잘 일치하는 결과를 얻었다.
- (2) 5가지 형태의 서로 다른 흡기창 및 배기팬 배치조건에 대해 CFD 열유동 해석을 수행한 결과 양 측벽에 흡기창과 배기팬을 각각 설치하고 감귤 적재영역의 상부에 커버를 덮어 공간을 축소한 형태에서 적재영역 내부의 기류유속이 가장 빠르고 온도가 가장 낮아 강제통풍 성능이 우수한 것으로 나타났다.

(3) 결정된 기본 강제통풍 형태에 기초하여 상세설계를 수행한 결과, 흡기창과 배기팬이 양측벽에 각각 2개씩 설치된 조건이 가장 통풍성능이 우수한 것으로 나타났으며 이때 좌, 우의 흡기창과 배기팬은 좌, 우 적재영역의 중심 근처에 위치하며, 흡기창과 배기팬이 내부의 적재물 사이의 공간과 일치하지 않는 조건이 통기성이 우수한 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Handbook. 1989. Atlanta, American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers Inc.
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. 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.
4. Ergun, S.. 1952. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progresses* 48:89-94.
5. FLUENT 6.2. 2005. User's Guide, FLUENT Inc., New Hampshire, USA.
6. 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. *Int. J. Ref.* 23:127-140.
7. Kader, A. A.. 2002. Postharvest technology of horticultural crop. 3rd edition. University of California, Division of Agricultural and Natural Resource. USA
8. 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.
9. Okushima, L., S. Sase and M. Nara. 1989. A Support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. *Acta Horticulturae.* 248:129-136.
10. Van Gerwen. R. J. M. and H. Van Oort. 1990. Optimization of cold store using fluid dynamics models. *Proceedings of IIF/IIR Commissions B2, C2, D1, D2/3.* 4:473-480.
11. Wang, H. and S. Touber. 1988. Distributed dynamics modelling of a refrigerated room. *International Journal of Refrigeration* 13:214-222.
12. Yun, H. S., Y. K. Cho, P. K. Park and K. K. Park. 1995. Resistance to air flow through fruits and vegetables in bulk. *J. of Biosystems Eng.* 20(4):333-342. (In Korean)
13. Yun, H. S., J. K. Kwon, H. Jeong, H. D. Lee, Y. K. Kim. 2008. Design of heat and fluid flow in cold container using CFD simulation. *J. of Biosystems Eng.* 33(6):396-403. (In Korean)