



## CFD 해석을 통한 후지 사과 CA 저장고 내의 적정 CO<sub>2</sub> 농도 조성 검토

### Evaluating Proper CO<sub>2</sub> Concentrations in CA Storage of Fuji Apple using CFD Analysis

이상익\* · 홍세운\*\* · 최 원\* · 김락우\* · 이인복\*<sup>†</sup>

Lee, Sang-ik · Hong, Se-woon · Choi, Won · Kim, Rack-woo · Lee, In-bok

#### Abstract

CO<sub>2</sub> concentration has a significant effect on quality of cold-stored apples. High indoor CO<sub>2</sub> concentrations above 10,000 ppm cause the browning of apples and result in economic loss for farmers. The purpose of this study is to evaluate CO<sub>2</sub> concentrations and their distribution in a controlled atmosphere (CA) storage and provide better structural designs to improve the CO<sub>2</sub> environment using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The CFD model was developed for a real CA storage for apples and applied to investigate the effect of changing the inlet and outlet locations and the aspect ratio of the floor of the CA storage on the spatial distributions of CO<sub>2</sub> concentration and the browning of the apples. The lowest CO<sub>2</sub> concentrations in existing CA storage with a high aspect ratio of the floor were achieved from the combination of the inlet located at the top of the right side and the outlet located at the bottom of the left side. In modified CA storage with a low aspect ratio, the combination of the inlet and outlet located at top and bottom of left side respectively achieved the lowest CO<sub>2</sub> concentrations. The proposed case enhanced the storage performance by reducing total browned apples by 3.6% in storage duration of 210 days. This study is expected to reduce the browning damages of apples in CA storage, and thus greatly prevent economic losses.

Keywords: Controlled atmosphere storage; fuji apple; computational fluid dynamics; CO<sub>2</sub> concentration; apple browning

#### 1. 서 론

농산물은 수확 후 소비자에게 전달되기까지 저장되는 동안 품질 저하를 최소화하기 위해 세심한 관리가 요구된다. 특히 사과는 수확 시기가 한시적인 반면 저장 중 단기간에 품질이 저하되기 때문에 사과의 가격은 그 저장량에 따라 불안정하며 1년 중 판매시기에 따라서도 가격이 크게 변한다. 2016년 서울시농수산식품공사가 발표한 농수산물 가격연보에 따르면, 2014년 사과의 수확철인 10월에 22,733원이던 10 kg 사과 상자는 차년 5월에 가격이 약 1.5배까지 올라 33,846원에 판매되었다. 따라서 수확시기가 일시적인 사과를 10월에 수확하고 저장하여 공급량이 적을 때에 판매하면 농가 수익을 크게 증대시킬 수 있다.

국내에서 사과 저장을 위해 이용되는 대표적인 방법은 상온저장, 저온저장, 그리고 환경조절 (Controlled atmosphere, CA) 저장이다. 상온저장은 그 저장기간이 최대 90일밖에 되지 않지만 저온저장은 180일, 그리고 CA 저장은 250일까지 연장할 수 있다 (Park, et al., 2003). 국내뿐만 아니라 국외에서도 사과 저장을 위해 이와 같은 저장방식을 사용하고 있으며, 유사한 저장기간을 보고한 바 있다 (Bai et al., 2005). 저장기간을 크게 연장시키는 CA 저장기술은 저장고를 저온으로 유지하는 동시에 산소 (O<sub>2</sub>) 및 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 농도가 조절된 기체를 주입하고 사과에 의해 발생하는 이산화탄소, 에틸렌 등의 기체를 배출하여 저장고 내의 산소 및 이산화탄소 농도를 조절한다. 그러나 CA 저장기간 동안 저장고 내의 이산화탄소 농도가 적절하게 조절되지 못하면 사과에 내부 갈변 현상이 발생해 품질에 치명적인 영향을 줄 수 있고 심할 경우 일반 저온 저장에 비해 오히려 보관성이 떨어질 수 있기 때문에 저장고 내의 이산화탄소 농도를 조절하는 것은 매우 중요하다. 특히 국내에서 유통량이 가장 많은 후지 사과의 경우 갈변 피해가 심각한 것으로 알려져 CA 저장 시 각별한 주의가 필요하다 (Kweon et al., 1998).

후지 사과의 갈변 피해를 방지하기 위해서는 CA 저장고 내의 이산화탄소 농도를 10,000 ppm 이하로 유지해야 한다 (Chung et al. 1999). 또한 저장고 내부의 이산화탄소 농도를

\* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

\*\* Department of Food, Agricultural and Biological Engineering, The Ohio State University, USA

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4586 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iblee@snu.ac.kr

Received: February 7, 2018

Revised: March 26, 2018

Accepted: March 26, 2018

공간적으로 균일하게 유지하여야 한다. 그러나 기존 CA 저장 시설은 질소 (N<sub>2</sub>) 발생기에 의한 질소 주입구와 배기구가 같은 벽면의 중앙에 가깝게 위치하고 있어 질소 주입구와 배기구가 설치되어 있지 않은 다른 쪽 벽면 방향으로의 기체 농도 조절이 어렵다. 또한 기체 농도를 측정하는 센서는 점적으로 설치되어 있어 저장고 내부 전체의 농도를 균일하게 조절하기 힘들다. 이에 전산유체역학 (Computational fluid dynamics, CFD)을 이용하여 저장고의 기체 주입과 배출 등에 따른 내부 환경 변화를 유동학적으로 해석하고, 그 설계를 개선하기 위한 연구들이 Papanikolaou et al. (2005), Delele et al. (2008), Moureh et al. (2009), Ambaw et al. (2013) 등에 의해 활발히 진행되었다. 특히, CA 저장고의 대형화 추세에 따라 저장고 내 기체 농도를 효과적으로 조절하기 위한 공학적인 접근이 시급히 요구되고 있다.

기존 CA 저장고 연구들은 소형화된 일반 사과 저장고의 온도, 습도 등에 대한 실험논문이 대부분이며 대형화 시스템의 최적화 연구를 위해서는 시간적, 금전적으로 많은 비용이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 대형 CA 저장고의 효율적인 설계를 위해서 CFD 수치해석 모델을 도입하여 최적설계를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 CFD를 이용해 기존 CA 저장고의 문제점을 정량적, 정성적으로 분석하고, 농도를 조절한 기체의 주입구 및 배기구의 설치 위치 조건 및 중형비에 따른 저장고 형상 조건에 대한 내부의 공간적 기류 흐름을 해석하였다. 저장고 내부 사과 형상의 구형은 Delele et al. (2008), Ambaw et al. (2013) 등에 의해 연구되었던 다공성 (Porous) 모델링 기법을 이용하였으며 CA 저장고의 CFD 모델은 검증이 완료된 결과 (Tanaka et al., 2012)를 바탕으로 설계하였고, 설계된 모델을 이용하여 CFD 해석을 진행하였다. 이를 통해 얻어진 해석 조건별 기체 농도 분포를 바탕으로 사과의 저장성이 가장 좋은 기체 주입구와 배기구의 개선된 설치방법 및 저장고 형상을 제시하였다. 그리고 사과의 저장 효율과 불량률을 추정해 경제적 손실을 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험 대상

본 연구에서는 대한민국 충청북도 충주거점산지유통센터에 위치한 CA 저장고를 바탕으로, 이와 같은 바닥 면적과 유사한 용적으로 설계된 CA 저장고를 실험대상으로 하였다. 설계된 CA 저장고는 저온 저장을 위한 냉방을 통해 내부온도가 0 °C로 유지되고 있으며 내부 이산화탄소 농도가 10,000 ppm

을 초과했을 경우 질소 발생기가 가동되어 이로부터 질소, 산소, 이산화탄소의 농도가 조절되어 생성되는 기체가 유입되는 주입구가 설치되어 있고, 내부에서 사과에 의해 발생하는 이산화탄소와 에틸렌 등의 기체를 배출시키기 위한 배기구가 설치되어 있다 (Fig. 1). 저장고의 크기는 폭 7 m, 길이 20 m, 높이 5.5 m이다. 상자의 적재는 팔레트 적재방식이며 하나의 팔레트 위에 총 12개의 10 kg 사과상자가 적재되어 있다. 본 연구에서는 하나의 팔레트와 12개의 사과상자를 스택 (Stack)이라 칭하며, 최대 적재 시 내부에 총 312개의 스택, 즉 3,744개의 사과상자가 적재된다. 스택은 서로 0.2 m의 간격으로 적재되어 있으며 벽으로부터 0.2 m 떨어져 있고 중앙에는 이동통로가 있다.

저장되는 과일 품종인 후지 사과는 CA 저장 시 저온저장에 비해 70일 정도 저장기간이 늘어나 오랜 기간 동안 신선한 상태로 출하가 가능하다는 장점이 있으나, 10,000 ppm을 초과하는 이산화탄소 농도에서 다른 과일과 비교하여 상대적으로 갈변에 매우 취약하다는 단점이 알려져 있기 때문에 본 연구의 대상 작물로 선정하였다.

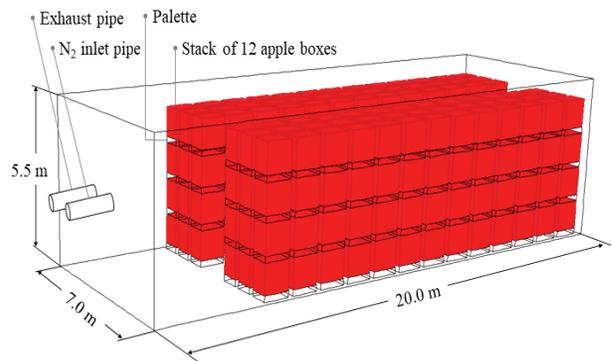


Fig. 1 Schematic view of the CA storage containing stacks and inlet/exhaust pipes

### 2. 이산화탄소 농도 분포 분석을 위한 CFD 모델 설계

#### 가. CFD 모델 설계

본 연구에서는 CA 저장고를 CFD의 전처리 모듈인 DesignModeler (Ver. 18.2, Fluent Co. New Hampshire, USA)을 사용해 3차원 격자망 모델로 설계하고 해석은 ANSYS Fluent (Ver. 18.2, Fluent Co. New Hampshire, USA)를 이용하였다. 팔레트 위에 12개의 사과상자들이 적재되어 있는 스택은 폭 0.7 m, 길이 1 m, 높이 1.2 m이며 팔레트만의 높이는 0.2 m이다. 모델의 격자는 격자 독립성 테스트를 실시하여 연산 시간을 단축하면서도 충분한 격자 품질을 가질 수 있도록 격자크기 0.2 m로 설정하였으며 이에 따른 총 격자수는 약 65만개이

**Table 1** Physical properties of internal gases used in CFD simulations

Gases	Molecular weight	Density (kg · m <sup>-3</sup> )	Conductivity (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Capacity (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Viscosity (kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )
N <sub>2</sub>	28	1,138	0,0242	1,040.67	1.66 × 10 <sup>-5</sup>
O <sub>2</sub>	32	1,299	0,0246	919.31	1.92 × 10 <sup>-5</sup>
CO <sub>2</sub>	44	1,788	0,0145	840.37	1.37 × 10 <sup>-5</sup>
Air	29	1,225	0,0242	1,006.43	1.79 × 10 <sup>-5</sup>
Mixture-template	-	Incompressible ideal gas	0,0250	1,035.98	1.75 × 10 <sup>-5</sup>

**Table 2** Physical and thermal properties of wall materials used in CA storage (PHIKO, 2010)

Section	Material	Density (kg · m <sup>-3</sup> )	Conductivity (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Capacity (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
Floor	Concrete	2,200	1.6	1,000
Roof, Wall	Urethane form	45	0,023	1,400

다. CFD 해석을 위한 난류모델에 있어, Launder et al. (1974)은 Standard k-ε 모델이 기체의 유동해석에 널리 사용될 수 있는 모델이라 제시하였으며, Tanaka et al. (2012)에 의해 수행된 Standard k-ε 모델은 저온 저장고의 CFD 해석에서 다른 난류 모델들과 비교하여 해석의 정확도를 높일 수 있음을 검증한 바 있기에, 본 연구에서도 Standard k-ε 모델을 적용하였다. 해석은 Pressure-based solver를 사용하여 정상상태로 해석하였다. 공기는 Fluent 내에서 혼합기체로 설정하며, 질소, 산소, 이산화탄소, 공기 (Air)의 네 가지 기체로 구성하였다. 혼합 기체의 물성치는 Table 1에 제시하였다. 또한 일반적으로 CA 저장고 바닥은 콘크리트로, 벽과 천장은 저온을 유지하기 위해 우레탄으로 시공하기 때문에 이를 반영하여 경계조건으로 설정하였다. (Table 2).

나. 경계 조건

저장고 내의 사과를 CFD 상에서 전부 모델링하여 계산하는 것은 시간 측면에서 비효율적이기 때문에, 사과를 평균 크기인 0.07 m의 매끈한 구형으로 가정하고, 사과가 들어있는 상자 내부의 공기 유동을 다공성 (Porous) 직육면체 내의 유동으로 취급하여 해석하였다. Moureh et al. (2009)는 CFD 모델링 시 구형의 물체가 다공성 직육면체 내에 있는 모델과 불투과성 직육면체 내에 있는 모델과의 비교로 그 차이를 해석하고, 다공성 모델링에 대해 그 결과와 실측값을 비교해 상관성을 연구하였으며, Delele et al. (2008)는 다공성 물체 내부에 직경이 0.065-0.075 m 범위인 구의 다양한 적재 방식에 대해 다공성 모델링이 7.25%의 낮은 오차 수준을 보였음을 연구하였다. 이에 따라 모델 계산의 편의성, 경제성, 오차율 등을 고

려하여 본 연구에서 사과상자 모델링을 위해 다공성 모델링 기법을 적용하였다. 유체가 다공성 물체를 통과할 때 일어나는 압력강하는 Darcy-Forchheimer 식 (1)에 의해 계산된다.

$$-\nabla p = \frac{\mu}{\kappa} \mathbf{u} + \beta \rho |\mathbf{u}| \mathbf{u} \tag{1}$$

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{K_1(1-\varepsilon)^2}{d_{eff}^2 \varepsilon^3}, \beta = \frac{K_2(1-\varepsilon)}{d_{eff} \varepsilon^3} \tag{2}$$

여기서, μ는 유체의 점성계수 (kg · m<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>), κ는 다공성 물질의 투과율 (1 · m<sup>2</sup>), u는 유체 속도 (m · s<sup>-1</sup>), ρ는 유체의 밀도(kg · m<sup>-3</sup>), β는 Forchheimer 상수 (1 · m<sup>-1</sup>), K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>는 압력강하 보정계수, ε는 다공성 물질의 공극비, d<sub>eff</sub>는 내부 구체의 유효입경 (m) 이다.

구형 물체에 대한 Darcy-Forchheimer 식의 두 매개변수 κ와 β를 표현하는 가장 일반적인 방법은 Ergun (1952)의 방법으로 식 (2)와 같다 (Delele et al., 2008). 각 매개변수의 보정계수인 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>의 값 계산은 매우 복잡하지만, 내부 입자를 매끈한 구형으로 가정할 경우 경험적으로 각각 180, 1.8의 값을 사용할 수 있다 (McDonald et al., 1979). 사과의 호흡량 값을 Kang et al. (2002) 논문을 참조하여 사과상자 내부의 CO<sub>2</sub> 증가량으로 간주하고, 이를 단위시간 당 발생량(Source Terms)으로 적용하였다. 사과는 상자 안에 구의 형태로 가장 이상적으로 배치되어있다고 가정하며 이때 사과상자의 공극비는 0.26이다 (Gauss, 1831). 유체의 점성계수와 밀도는 각각 0 °C에서 표준 공기의 값인 1.79 × 10<sup>-5</sup> kg · m<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>, 1.225 kg · m<sup>-3</sup>

**Table 3** Specifications of Fuji apple (Kang et al., 2002)

Density (kg · m <sup>-3</sup> )	Conductivity (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Capacity (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	Respiration rate (mgCO <sub>2</sub> · kg <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )
535.19	0.51	3,770	1,609

**Table 4** Parameters for porous media of apple box in Fluent

	Section	Value
Porous Zone	Viscous resistance (1 · m <sup>-2</sup> )	8.74 × 10 <sup>-7</sup>
	Inertial resistance (1 · m <sup>-1</sup> )	1,082.6
	Solid material	Apple
Source Term	CO <sub>2</sub> Variant (kg · m <sup>-3</sup> · s <sup>-1</sup> )	1.94 × 10 <sup>-7</sup>

**Table 5** Boundary conditions of internal devices

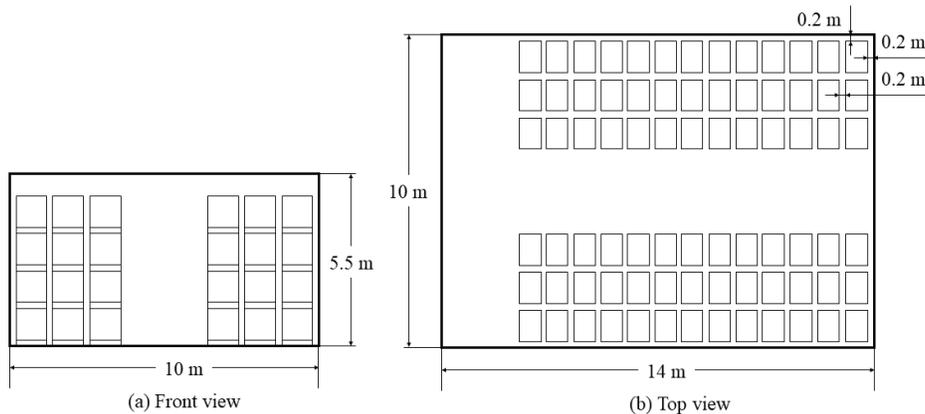
Factor	N <sub>2</sub> Generator	Air valve
Model	WH N-300s	-
Flow rate	992.3 m <sup>3</sup> · hr <sup>-1</sup>	-
Surface area	0.16 m <sup>2</sup>	0.16 m <sup>2</sup>
Type	Velocity-inlet	Pressure-outlet
Velocity	1.723 m · s <sup>-1</sup>	-
Temperature	288.16 K	273.16 K

을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 사과의 물성치와 이를 다공성 물체로 설계한 주요 변수들은 Table 3과 Table 4에 제시하였다. 저장고의 내부 기체 조성을 조절하는 질소 발생기와 배기구의 경계조건 값은 Table 5와 같으며 질소 발생기는 CA 저장고 내부 이산화탄소 농도가 10,000 ppm을 초과했을 경우, 농도가 질소 980,000 ppm, 산소 20,000 ppm, 이산화탄소 300 ppm으로 조절된 기체를 발생시켜 질소 주입구로 주입한다.

다. 해석 조건

본 연구에서는 CA 저장고의 형상과 질소 주입구 및 배기구의 위치에 따른 CA 저장고 내의 이산화탄소 농도 분포를 비교하였다. 또한 이산화탄소 농도 분포로부터 후지사과의 갈변 정도를 평가하였다. 일반적으로 CA 저장고는 넓은 저장 공간을 확보하면서 농도 조절의 효과를 높이기 위해 길이방향으로 종횡비가 높은 형태를 취한다. 그러나 본 연구에서는 종횡비가 낮은 경우도 주입구 및 배기구의 위치에 따라서 효

율이 증가될 수 있음을 보이기 위해서, 두 가지 형상을 종횡비에 따라 Case A (종횡비가 높음)와 Case B (종횡비가 낮음)로 설정하여 비교하였다. Case A (7 × 20 × 5.5 m<sup>3</sup>)는 바닥 길이 방향으로 비교적 길고 높은 종횡비를 가지는 기존에 사용되는 형상이다. Case B (10 × 14 × 5.5 m<sup>3</sup>)는 Case A와 같은 바닥면적, 높이, 부피를 유지하며 바닥의 길이를 단축시키고 폭을 늘려 폭 10 m, 길이 14 m로 변형한 형상이다 (Fig. 2). 또한 저장고의 질소 주입구와 배기구의 위치에 따른 내부 공기 분포를 분석하기 위해 Fig. 3과 같이 8가지로 분류하였다. 기존 CA 저장에서 질소 주입구와 배기구는 같은 벽면의 중간 높이에 서로 가깝게 위치하고 있으며 이를 Case 1로 설정하였다. Case 2와 Case 3은 질소 주입구 및 배기구를 기존에 설치된 벽면에서 위, 아래로 이동하여 설치하였으며 Case 4와 Case 5는 각각 다른 벽면에 설치하였고, Case 6, Case 7은 서로 다른 쪽 벽면에서 위, 아래로 각각 이동하여 설치하였다. Case 8은 Case 6의 경우를 길이방향으로 대칭되게 설계한 것으로



**Fig. 2** Front view (a) and top view (b) of Case B

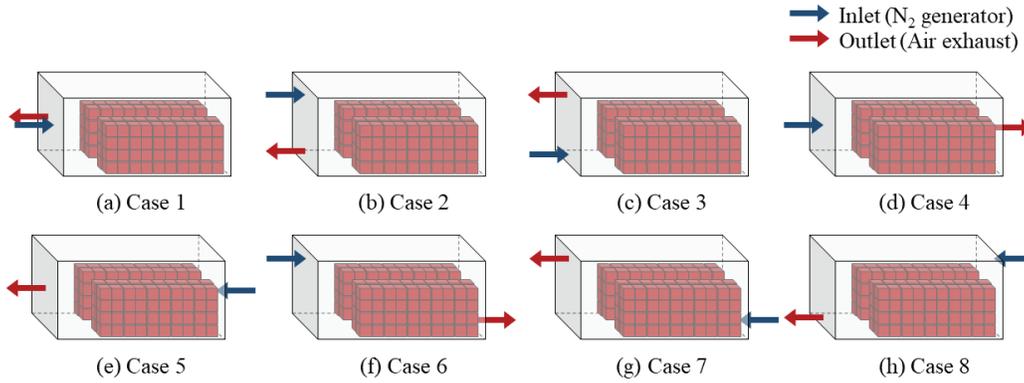


Fig. 3 Case distribution according to position of N<sub>2</sub> generator and air exhaust

배기구가 사과상자와 가까운 벽면에 설치되어 있다. Case A와 Case B 각각에 대해 Case 1부터 Case 8을 적용하여 총 16가지 조건에 대해 CFD 해석을 시행하였다 (Table 6).

### 3. 사과 갈변 피해 분석방법

CA 저장기간 동안 이산화탄소 농도에 따른 후지 사과의 갈변비율은 Table 7과 같이 나타난다 (Hong, 2015). 저장기간 210일에서, 이산화탄소 농도가 10,000 ppm으로 유지될 경우

갈변비율이 15%에 그쳤지만 20,000 ppm으로 유지될 경우 갈변비율이 42%로 급격하게 증가하였다. 따라서 본 연구에서는 이산화탄소 농도 10,000 ppm을 한계농도로 설정하여 내부 농도가 이를 초과했을 경우 질소 발생기를 작동하도록 하였으며 질소 발생기에 의한 농도 조절에도 불구하고 이산화탄소 농도가 10,000 ppm 이하로 유지되지 못하는 스택을 분석하였다. 또한 저장고 내 모든 스택의 이산화탄소 농도 분포를 산출하여 이를 통해 각 스택별 저장기간에 따른 갈변비율을 산정

Table 6 Analysis cases

Case A (7×20×5.5 m <sup>3</sup> )	Case B (10×14×5.5 m <sup>3</sup> )	Position	
		Inlet	Outlet
Case A-1	Case B-1	Middle of left side	Middle of left side
Case A-2	Case B-2	Top of left side	Bottom of left side
Case A-3	Case B-3	Bottom of left side	Top of left side
Case A-4	Case B-4	Middle of left side	Middle of right side
Case A-5	Case B-5	Middle of right side	Middle of left side
Case A-6	Case B-6	Top of left side	Bottom of right side
Case A-7	Case B-7	Bottom of right side	Top of left side
Case A-8	Case B-8	Top of right side	Bottom of left side

Table 7 Apple browning ratio by CA storage duration depending on CO<sub>2</sub> concentration during storage

CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	Apple browning ration by storage duration (%)						
	30 days	60 days	90 days	120 days	150 days	180 days	210 days
Control (300)	–	–	–	–	6	11	16
10,000	–	–	–	5	8	14	15
20,000	–	5	16	21	27	36	42
30,000	–	9	37	48	54	61	75
40,000	23	51	76	92	100		
50,000	31	53	65	88	100		

하였다. 이때 표에 주어지지 않은 농도에서의 갈변비율은 각 저장기간에서 농도에 따른 갈변비율을 통한 추세선 수식으로 산정하였으며 해석 조건별 사과 갈변비율을 종합하여 전체 사과의 갈변비율을 산정하고, CA 저장 사과가 출하되는 늦봄의 사과 도매가격을 적용하여 선정된 최적의 주입구 및 배기구 위치와 형상 조건 적용 시 절감할 수 있는 손실액을 계산하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. CA 저장고 내 이산화탄소 농도 분포

조건별 CFD 해석으로 각 스택에서의 이산화탄소 농도를 산정하여, 이산화탄소 한계농도 10,000 ppm을 초과하는 스택의 개수 및 비율을 Table 8과 같이 산정하였고, 이산화탄소 농도 분포의 평균 및 표준편차를 Table 9와 같이 계산하였다. 또한 CA 저장고 내 스택에서의 이산화탄소 농도 분포를 Fig. 4와 Fig. 5에서 히스토그램으로 나타내었다. 기존 저장고 형상인 Case A에서, 기존의 질소 주입구 및 배기구 위치 형태인 Case A-1은 1개의 스택이 한계농도를 초과하였다. Case A-4에서 96개의 가장 많은 스택 개수가 한계농도를 초과했으며 이는 총 312개의 스택 중 약 31%가 한계농도를 초과한 것이다. 또한 이 경우 최고농도가 11,761 ppm으로 나타났다. Case

A-3에서도 78개의 많은 스택이 한계농도를 초과하였다. 모든 스택이 한계농도 이하로 조절된 해석 조건은 Case A-6과 Case A-8이었으며, 특히 Case A-8의 농도 분포의 평균은 7,236 ppm으로 가장 작았고 1,415 ppm의 표준편차를 나타냈다. Case A-8의 최고농도는 9,983 ppm, 최저농도는 4,456 ppm이었다. Case A-6은 769 ppm의 낮은 표준편차를 나타내 농도 분포의 균일성이 높았으며 평균 농도는 7,765 ppm이었다

저장고 길이를 단축시키고 폭을 늘려 중형비가 감소한 형상인 Case B에서, 가장 많은 스택 개수가 한계농도를 초과한 것은 Case B-7이었으며 그 개수는 236개이었다. 총 312개의 스택 중 약 76%의 높은 비율로 한계농도를 초과했고 최고 13,475 ppm까지 이산화탄소 농도가 도달하였다. 또한 Case B-6에서도 112개의 많은 개수가 한계농도를 초과하였다. 모든 스택이 한계농도 이하로 조절된 것은 Case B-2와 Case B-8이었다. 특히 Case B-2의 농도 분포의 평균은 7,285 ppm으로 Case B 중 가장 작았으며 최고농도는 9,523 ppm, 최저농도는 5,149 ppm이었다. Case B-8은 평균 농도가 7,785 ppm이었으며 표준편차는 657 ppm으로 가장 작아 분포의 균일성이 높았다.

Case A와 Case B에 대해 각각 Case 4와 Case 5의 비교에서는 형상에 따라 농도 분포의 균일성이 다름을 확인할 수 있었다. 질소 주입구와 배기구의 거리가 먼 Case A의 경우 Case A-4와 Case A-5의 최저농도와 최고농도의 차이가 크고, 비교적 큰 표준편차가 나타났지만, 질소 주입구와 배기구의 거리

**Table 8** Number of stacks exceeding the CO<sub>2</sub> limit concentration of 10,000 ppm

Case A	Case							
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
Number of stacks	1	13	78	96	23	0	40	0
Ratio (%)	0.32	4.17	25.00	30.77	7.37	-	12.82	-
Case B	Case							
	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
Number of stacks	7	0	4	11	18	112	236	0
Ratio (%)	2.24	-	1.28	3.53	5.77	35.90	75.64	-

**Table 9** Mean and standard deviation of CO<sub>2</sub> concentration distribution

CO <sub>2</sub> concentration distribution	Case							
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
Mean (ppm)	7,960	7,723	9,244	9,102	8,272	7,765	8,937	7,236
Standard deviation (ppm)	934	1,367	972	1,328	1,201	769	947	1,415
CO <sub>2</sub> concentration distribution	Case							
	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
Mean (ppm)	8,628	7,285	8,325	8,990	8,822	9,317	10,880	7,785
Standard deviation (ppm)	967	1,070	849	700	784	1,200	1,081	657

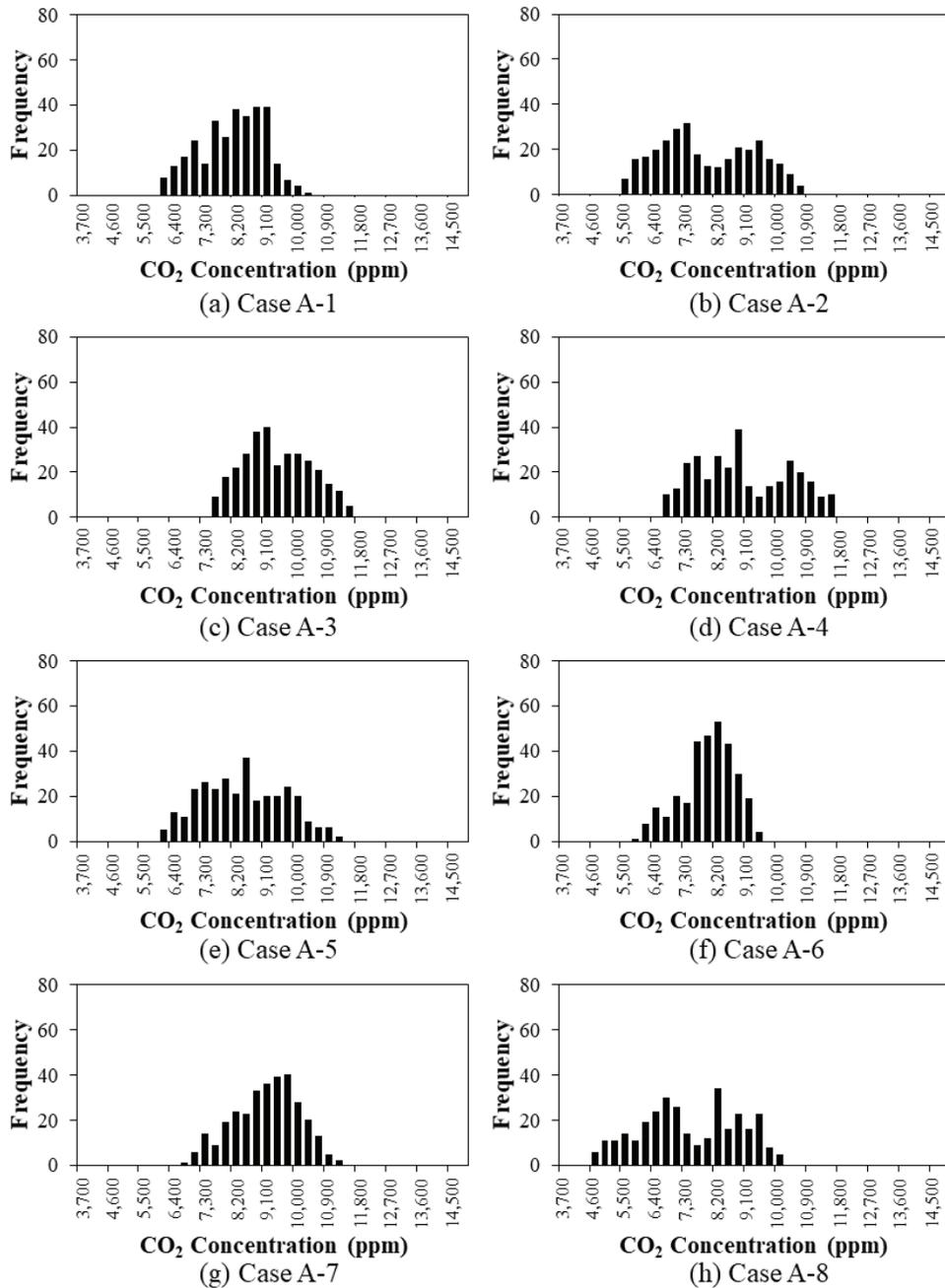


Fig. 4 Distribution of CO<sub>2</sub> concentration in Case A

가 가까운 Case B의 Case B-4와 Case B-5는 최저농도와 최고 농도의 차이가 작고, 비교적 작은 표준편차를 나타냈다. 이는 농도 분포의 균일성을 높이기 위해서는 Case B-4와 Case B-5의 경우와 같이 낮은 중회비로 주입구와 배기구가 설치된 두 벽면 사이의 거리가 가까운 조건이 더 효과적임을 나타냈다.

많은 스택개수가 한계농도를 초과한 Case A-3과 Case A-4, 그리고 Case B-7은 모두 질소 주입구의 위치가 벽면의 아래쪽 혹은 중간에 위치하고, 배기구는 상단 혹은 중간에 위치하고

있다. 반면 모든 스택이 한계농도 이하로 조절된 Case A-6과 Case A-8, 그리고 Case B-2와 Case B-8은 모두 배기구가 벽면의 하단에 위치하고 질소 주입구는 상단에 위치하고 있다. 본 해석에 이용된 기체인 질소(분자량 28) 및 산소(분자량 32)에 비해 이산화탄소의 분자량은 44로 비교적 무거워 시간이 지나면서 바닥에 가라앉기 때문에 하단에 배기구를 설치하여 혼합기체를 배기하는 것이 낮은 이산화탄소 농도를 유지하기에 효율적인 것으로 분석된다. Case A와 Case B에서 공통적

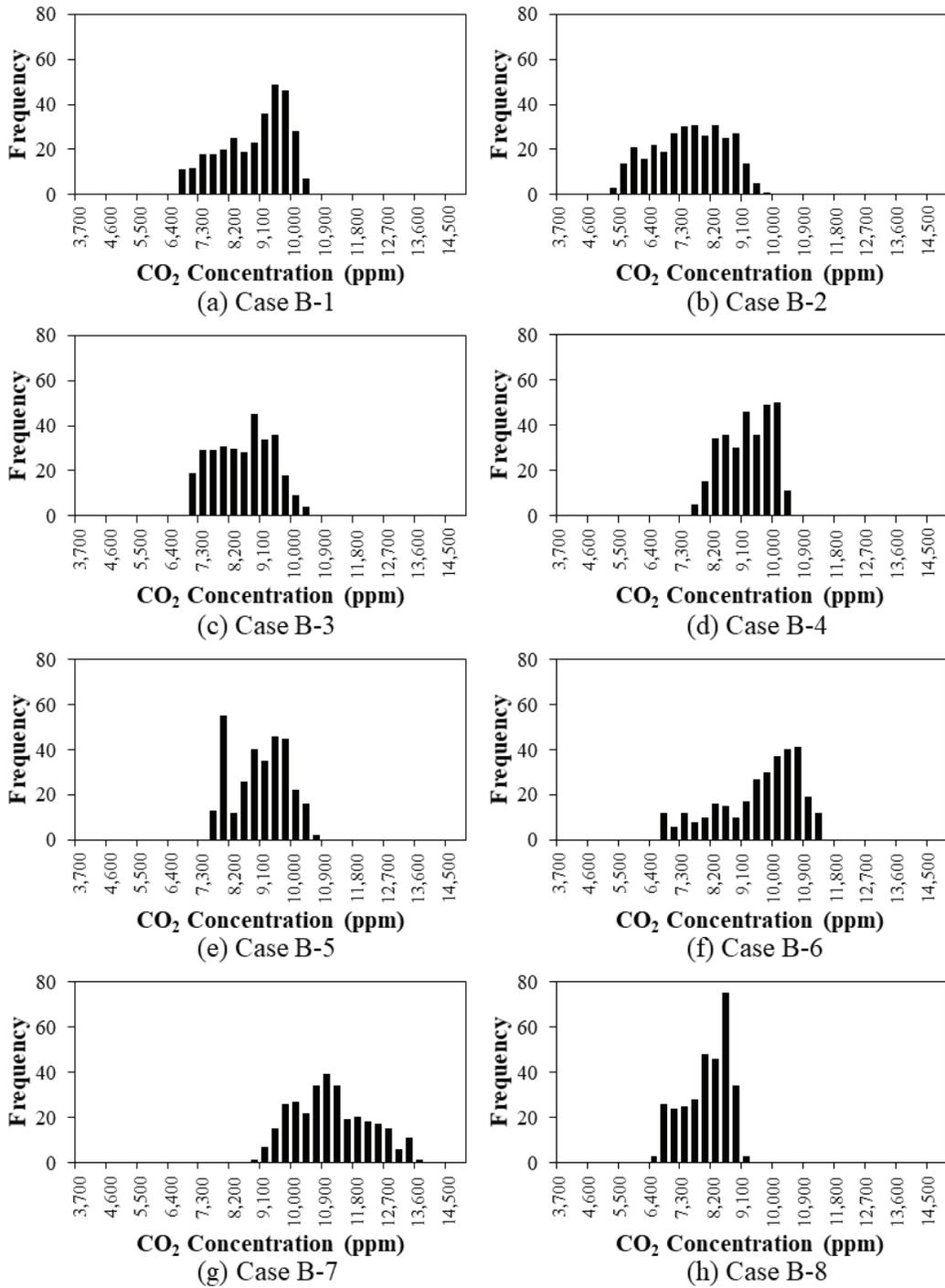
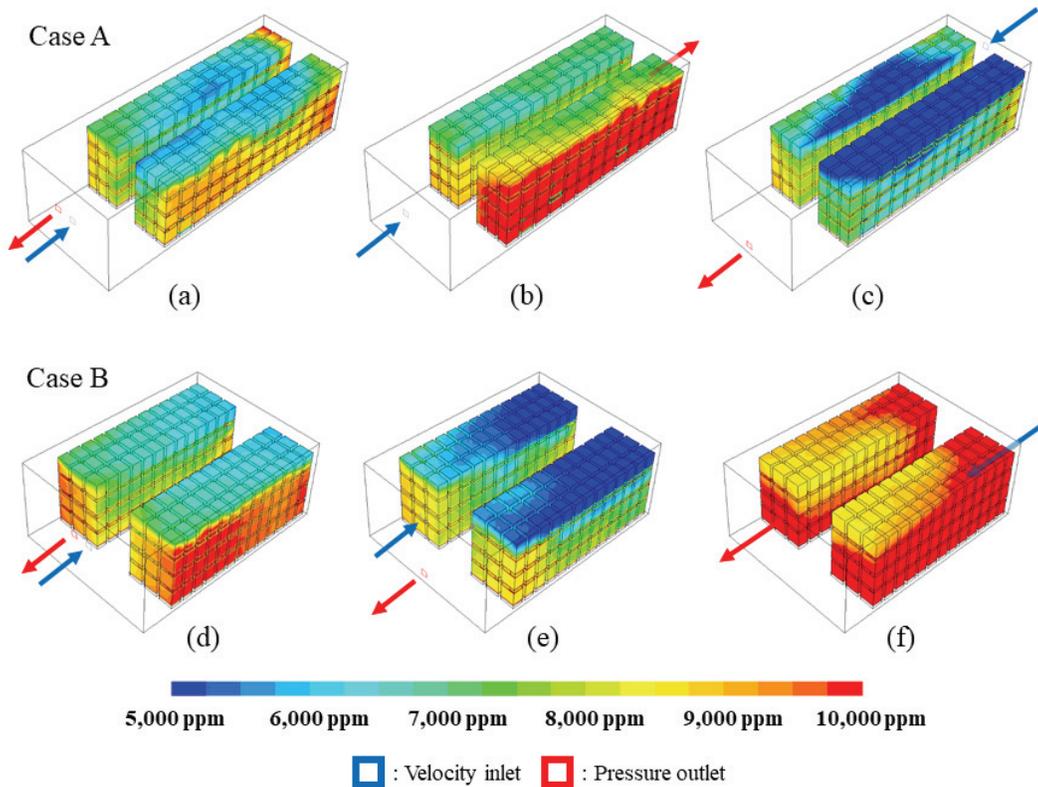


Fig. 5 Distribution of CO<sub>2</sub> concentration in Case B

으로 Case 8의 경우 모든 스택이 한계농도 이하로 유지되었는데 이는 배기구가 하단에 위치하고 있어 무거운 이산화탄소를 더 효과적으로 배기하고, 질소 주입구가 사과상자가 적재되는 공간과 가까운 벽면의 상단에 설치되어 사과에서 발생하는 이산화탄소를 효과적으로 배기구까지 도달시킨 것으로

분석된다.

Fig. 6에서 Case A에서의 기존 사용방식인 Case A-1, 이산화탄소 농도가 많은 스택이 한계농도 이하로 조절되지 못한 Case A-4, 그리고 모든 스택이 한계농도 이하로 조절된 Case A-8를 분포도로 나타냈다. 그리고 Case B-1, 대부분의 스택이



**Fig. 6** Contour of simulated CO<sub>2</sub> concentrations in isometric view (a) Case A-1 (b) Case A-4 (c) Case A-8 (d) Case B-1 (e) Case B-2 (f) Case B-7

한계농도 이하로 조절되지 못한 Case B-7, 그리고 모든 스택이 한계농도 이하로 조절된 Case B-2를 분포도로 나타내었다. 분포도로 나타낸 모든 해석 조건별 결과에서 바닥에 적재된 사과상자들의 이산화탄소 농도가 위쪽에 적재된 사과상자들보다 높게 나타났다. 이는 이산화탄소의 비교적 무거운 분자량에 기인한 것으로 분석되며 이를 효과적으로 배기하기 위해서 배기구를 벽면의 하단에 설치하는 것이 바람직함을 확인할 수 있다. 또한 주입구나 배기구가 설치되지 않은 벽면 가까이에 적재된 사과상자는 다른 사과상자에 비해 높은 이산화탄소 농도 분포를 나타냈으며 중앙 통로에 가까이에 적재된 사과상자에서는 낮은 이산화탄소 농도가 분포되어 있었다. Case A-8과 Case B-2에서 5,000 ppm부터 7,000 ppm에 해당하는 비교적 낮은 이산화탄소 농도의 파란색과 연두색이 많이 분포하고 있었고, Case A-4와 Case B-7에서는 8,000 ppm부터 10,000 ppm 이상의 비교적 높은 이산화탄소 농도를 나타내는 빨간색과 노란색이 많이 분포하고 있었다.

## 2. 사과 갈변비율 및 갈변에 의한 피해 해석 결과

최적의 질소 주입구 및 배기구의 위치와 형상을 찾기 위하여, 해석 조건별 각 사과상자에서의 이산화탄소 농도에 따른

갈변비율을 개별적으로 산정하고 이를 종합해 전체 갈변비율을 산정하여 비교하였다. 저장기간에 따라 산정된 사과 갈변비율은 Table 10에 제시하였다.

Case A의 경우, CFD 해석 결과 평균 농도 7,236 ppm으로 낮은 이산화탄소 농도 분포를 주로 보인 Case A-8에서 모든 저장기간에 대해 가장 낮은 갈변비율이 산정되었다. 비교적 높은 이산화탄소 농도 분포를 주로 보였던 Case A-3과 Case A-4는 저장기간 210일에서 각각 15.95%, 15.88%의 갈변비율이 산정되었으며, Case A-8과 비교했을 때 1.85%의 차이를 나타냈다. 기존에 사용되는 설치방식인 Case A-1의 갈변비율은 저장기간 210일에서 14.53%로 가장 낮은 갈변비율과 0.43%의 차이를 나타냈다.

Case B의 경우, 평균 농도 7,285 ppm으로 낮은 이산화탄소 농도 분포를 주로 보였던 Case B-2에서 모든 저장기간에 대해 가장 낮은 갈변비율이 산정되었다. 저장기간 210일에서는 14.01%의 갈변비율이 산정되었으며 Case A와 Case B 모두에 걸쳐 가장 낮은 갈변비율이었다. 이는 Case A-1과 비교했을 때, 0.52% 감소한 결과이다. 평균 농도 10,880 ppm으로 매우 높은 이산화탄소 농도 분포를 보였던 Case B-7에서는 저장기간 210일에서 18.39%의 높은 갈변비율이 산정되었다.

**Table 10** Apple browning ratio according to simulations cases and storage duration

Storage duration		Apple browning ratio (%)				
		90 days	120 days	150 days	180 days	210 days
Case A	Case A-1	0.00	3.58	7.52	12.35	14.53
	Case A-2	0.02	3.44	7.42	12.21	14.46
	Case A-3	0.24	4.68	8.53	13.85	15.95
	Case A-4	0.41	4.59	8.46	13.75	15.88
	Case A-5	0.06	3.86	7.78	12.74	14.91
	Case A-6	0.00	3.41	7.37	12.12	14.31
	Case A-7	0.07	4.40	8.27	13.46	15.57
	Case A-8	0.00	3.08	7.11	11.78	14.10
Case B	Case B-1	0.01	4.13	8.02	13.10	15.22
	Case B-2	0.00	3.08	7.09	11.73	14.01
	Case B-3	0.00	3.87	7.77	12.73	14.86
	Case B-4	0.00	4.43	8.28	13.49	15.58
	Case B-5	0.02	4.29	8.15	13.29	15.39
	Case B-6	0.28	4.77	8.62	13.99	16.11
	Case B-7	1.71	6.31	10.13	16.22	18.39
	Case B-8	0.00	3.42	7.37	12.13	14.31

Case A와 Case B 모두에서, 벽면 하단에 배기구가 설치되어 낮은 이산화탄소 농도 분포를 보였던 해석 조건에서 비교적 낮은 갈변비율이 산정되었으며 그렇지 않은 조건에서 비교적 높은 갈변비율이 산정되었다. 또한 질소 주입구의 설치 위치 역시 갈변비율에 영향을 준 것으로 분석된다. 주입구가 벽면의 상단에 설치될 때 주로 낮은 갈변비율을 나타냈으며, Case A에서는 사과상자와 가까운 벽면에 설치될수록 낮은 갈변비율이 산정되었다. 종횡비가 높은 형상이며 질소 주입구가 벽면의 상단에, 배기구가 하단에 설치되었던 Case B-2는 저장기간 210에서 14.01%의 가장 낮은 갈변비율을 나타내는 최적 조건으로 선정되었다. 또한 CA 저장고의 형상을 바꾸지 않는다면, Case A-8 역시 14.10%의 낮은 갈변비율로 갈변 피해 감소를 가져올 수 있다고 분석되었다. 최적 조건으로 선정된 Case B-2는 기존 저장 방식인 Case A-1의 경우보다 사과 갈변비율을 0.52% 감소시켜 갈변에 의한 피해를 개선하였다. 이를 정량적으로 계산하면 약 20개 사과상자의 갈변 피해를 방지하는 효과이며 비용으로 환산하면 연간 약 700,000원의 손실액을 보상하는 효과가 있는 것으로 분석된다. 또한 주입구가 하단에 있고 배기구가 상단에 설치된, 가장 극단적인 설치 조건인 Case B-7의 경우 최적 조건인 Case B-2와 비교하여 연간 약 560만원의 손실이 발생하는 것으로 분석되어 적합한 주입구 및 배기구의 위치를 선정하는 것이 반드시 필요하다고 사료된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 CA 저장고 내 고농도의 이산화탄소 및 농도의 불균일로 인한 후지 사과의 갈변 피해를 감소시키는 방안으로 질소 주입구와 배기구의 위치 조정 및 저장고의 형상 변화를 제시하였다. CFD를 이용해 조건에 따른 내부 이산화탄소 농도의 분포를 얻었고 그 값을 통해 각 조건별 CA 저장 사과의 갈변비율을 산정하였다. 이에 따라 질소 주입구가 벽면의 상단에 설치되고 배기구가 같은 벽면의 하단에 설치되며 저장고 바닥의 종횡비가 낮은 형상의 Case B-2를 최적 조건으로 선정하였다. 선정된 최적 조건은 0.52%의 갈변비율 개선 효과와 연간 약 700,000원의 경제적 손실을 방지할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 대형화 저장시설에서 사과 등의 호흡에 의해 발생하는 이산화탄소의 경우, 다른 기체보다 무겁기 때문에 배기구는 하단에 위치해야 그 효율성을 증대시킬 수 있음을 분석하였다.

본 연구를 통한 CA 저장고의 적합한 질소 주입구 및 배기구의 위치와 형상 개선방안 모색으로 국내 CA 저장고의 경쟁력을 높이고 CA 저장의 활성화를 가져올 것으로 기대한다. 또한 후지 사과 저장고뿐만 아니라 다른 과실의 저장고 대형화에 따른 내부 환경 조절을 위해 기체 조절기의 설치 위치와 저장고의 형상에 대한 연구가 저장고의 저장성과 경제성을 높일 수 있음을 제안한다.

## REFERENCES

- Ambaw, A., M. A. Delele, T. Defraeye, Q. T. Ho, L. U. Opara, B. M. Nicolai, and P. Verboven, 2013. The use of CFD to characterize and design post-harvest storage facilities: Past, present and future. *Computers and Electronics in Agriculture* 93: 184-194. doi:10.1016/j.compag.2012.05.009.
- Bai, J., E. A. Baldwin, K. L. Goodner, J. P. Mattheis, and J. K. Brecht, 2005. Response of four apple cultivars to 1-methylcyclopropene treatment and controlled atmosphere storage. *HortScience* 40(5): 1534-1538.
- Chung, H. S., S. K. Chung, and J. U. Choi, 1999. Low oxygen CA storage of 'fuji' apples. Korean Society of Food Science and Technology. *Korean Journal of Food Science and Technology* 31(5): 1275-1282 (in Korean).
- Delele, M. A., E. Tijssens, Y. T. Atalay, Q. T. Ho, H. Ramon, B. M. Nicolai, and P. Verboven, 2008. Combined discrete element and CFD modelling of airflow through random stacking of horticultural products in vented boxes. *Journal of Food Engineering* 89(1): 33-41. doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.03.026.
- Ergun, S., 1952. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress* 48: 89-94.
- Gauss, C. F., 1831. Besprechung des Buchs von LA Seeber: Untersuchungen über die Eigenschaften der positiven ternären quadratischen Formen usw. *Göttingische Gelehrte Anzeigen* 2: 188-196.
- Hong, Y. P., 2015. How to suppress internal browning during low temperature storage of Fuji apple. Gunsan, Jeonbuk: Gunsan Agricultural Technology Center (in Korean).
- Kang, J. S., H. S. Jeong, and J. U. Choi, 2002. Effects of storage gas concentrations on the transpiration rate of fuji apple during CA storage, The Korean Society of Food Preservation. *Korean Journal of Food Preservation* 9(3): 261-266 (in Korean).
- Kweon, H. J., H. Y. Kim, O. H. Ryu, and Y. M. Park, 1998. Effects of CA storage procedures and storage factors on the quality and the incidence of physiological disorders of 'fuji' apples. Korean Society For Horticultural Science. *Horticultural Environment & Biotechnology* 39(1): 35-39.
- Lauder, B. E., and D. B. Spalding, 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3: 269-289. doi:10.1016/B978-0-08-030937-8.50016-7.
- McDonald, I. F., M. S. El-Sayed, K. Mow, and F. A. L. Dullien, 1979. Flow through porous media-Ergun equation revisited. *Industrial Engineering Chemistry and Fundamentals* 18(3): 199-208. doi:10.1021/i160071a001.
- Moureh, J., M. Tapsoba, and D. Flick, 2009. Airflow in a slot-ventilated enclosure partially filled with porous boxes: Part I-measurements and simulations in the clear region. *Computers & Fluids* 38(2): 194-205. doi:10.1016/j.compfluid.2008.02.006.
- Papanikolaou, E. A., and A. G. Venetsanos, 2005. CFD modelling for helium releases in a private garage without forced ventilation. *Proceedings of the First ICHS*: 8-10.
- Park, Y. M., and S. G. Lee, 2003. Ethylene removal program for quality maintenance of cold-stored 'Fuji' apples. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* 21(3): 203-208 (in Korean).
- PHIKO, 2010. About Heat Conductivity, Thermal Transmittance, Thermal Resistance. Seoul, Korea: Passive House Institute Korea (in Korean).
- Tanaka, F., Y. Konishi, Y. Kuroki, D. Hamanaka, and T. Uchino, 2012. The use of CFD to improve the performance of a partially loaded cold store. *Journal of Food Process Engineering* 35(6): 874-880. doi:10.1111/j.1745-4530.2011.00636.x.