

## 상자포장 청과물의 송풍저항 특성

### Resistance to Air Flow through Packed Fruits and Vegetables in Vented Box

윤홍선*	조영길*	박경규*
정희원	정희원	정희원
H.S.Yun	Y.K.Cho	K.K.Park

#### ABSTRACT

In pressure cooling system, produce were packed in vented box and cooled rapidly by producing a difference in air pressure on opposite faces of stacks of vented box. So, energy requirements and performance of pressure cooling system depended upon the air flow rate and the static pressure drop through packed produce in vented box. The static pressure drop across packed produce in vented box normally depended upon air flow rate, vent area of box and conditions of produce bed (depth, porosity, stacking patterns, size and shape of products) in box. The objectives of this study were to investigate the effect of vent area and air flow rate on airflow resistance of empty box and packed produce in vented box, and to investigate the relationship between the air flow resistance of packed products in vented box and sum of air flow resistance of empty box only and products in bulk only. Mandarins and tomatoes were used in the experiment. The airflow rate were in the range of  $0.02 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ , the opening ratio of vent hole were in the range of 2.5~20% of the side area. The results were summerized as follows.

1. The pressure drops across vented box increased in proportion to superficial air velocity and decreased in proportion to opening ratio of vent hole. A regression equation to calculate airflow resistance of vented box was derived as a function of superficial air velocity and opening ratio of vent hole.

2. The pressure drops across packed produce in vented box increased in proportion to superficial air velocity and decreased in proportion to opening ratio of vent hole.

3. Because of the air velocity increase in the vicinity of vent hole in box, the airflow resistances of packed products in vented box were always higher than sum of air flow resistance of empty box only and products in bulk only.

4. Based on the airflow resistance of empty box and products in bulk, a regression equation to calculate airflow resistance of packed products in vented box was derived.

주요용어(Key Words) : 송풍저항(Air Flow Resistance), 차압통풍 예냉(Pressure Pre-cooling)

---

\* 농촌진흥청 농업기계화연구소  
\*\* 경북대학교 농업기계공학과

1. 서론

청과물을 차압통풍 냉각하는 경우에는 산물을 상자에 담아서 냉각하는 것이 일반적이는데, 이때 포장상자에는 냉기의 원활한 흐름을 위해 적당한 크기와 갯수의 통기공을 뚫어주고, 냉기는 포장상자 통기공과 상자 내부의 산물 퇴적층을 통과하도록 유도된다(그림1 참조). 따라서 냉각공기가 포장상자 통기공과 산물 퇴적층을 원활히 통과하기 위해서는 공기통로에서 발생하는 송풍저항에 상응하는 적절한 정압을 유지하여야만 하며, 이는 냉각성능과 송풍에너지 소비에 크게 영향을 미친다. 한편, 산물 퇴적층에서의 송풍저항은 산물의 형상, 크기, 배열방법, 퇴적높이 및 공극을 등에 영향을 받으며, 포장상자의 송풍저항에는 통기공의 크기, 갯수, 형상 등의 요인이 영향을 미친다. 또 산물을 퇴적한 포장상자에서 발생하는 송풍저항은 산물 퇴적층과 포장상자 통기공에서의 송풍저항이 조합되어 나타나는데, 이때의 송풍저항은 같은 양의 공기가 포장상자 또는 산물 퇴적층만을 통과할 때의 각각의 송풍저항과 밀접한 관계에 있는 것이 확실하며, 이는 Chau(1985)가 상자포장 오렌지의 송풍저항은 산물퇴적 오렌지와 빈상자의 송풍저항을 각각 측정하여 합한것 보다 높게 나타났다고 한 연구결과로 부터 확인할 수 있다. 따라서 상자포장 청과물의 송풍저항을 결정하기 위해서는 산물퇴적 청과물과 포장상자의 송풍저항에 영향을 주는 개개의 요인 뿐만아니라, 산물퇴적층 및 포장상자의 각각의 송풍저항이 상자포장 청과물의 송풍저항에 미치는 복합요인이 동시에 고려되어야 한다. 그러나 이러한 실험에는 엄청나게 많은 노력과 시간이 소요되며, 또한 대부분의 연구에서 산물퇴적층 및 포장상자의 송풍저항을 각각 분리하여 측정하거나 이들과 상자포장 청과물의 송풍저항과의 관계를 구명하지 못하고있어 실제 차압통풍 예냉장치의 설계와 송풍기의 정압결정에 어려움을 초래하고 있다.

상자포장 청과물의 송풍저항에 관한 연구로서, Chau(1985)는 상자포장 오렌지의 송풍저항은 산물퇴적 오렌지와 빈상자의 송풍저항을 각

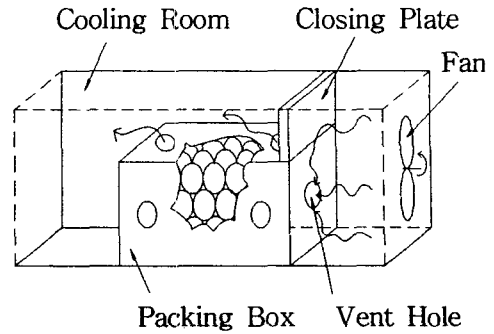


Fig. 1. Configuration of pressure pre-cooling system.

각 측정하여 합한것 보다 클 뿐만 아니라, 그 비율이 풍속에 따라 불규칙하여 상관관계를 찾을 수 없다고 하였는데, 이 결과는 결국 상자포장 청과물의 송풍저항은 일정한 수학적 모형으로 예측할 수 없으며 필요에 따라 실험에 의존하여야 함을 나타내는 것이기도 하다. 그러나 Henderson(1943)은 다공판 위에 퇴적된 곡물의 송풍저항을 다공판의 개공율, 퇴적 곡물의 공극율 및 송풍량을 변수로하는 수학적 모형으로 나타내어 Chau(1985)와 다른 연구결과를 발표하였다. Chau(1985)와 Henderson(1943)의 연구는 비록 그 대상이 다르기는 하지만 송풍저항의 발생요인이 서로 유사하므로 그 결과에 대한 재검정의 필요성이 있는 것으로 판단된다.

통기공이 있는 청과물 포장상자의 송풍저항에 관한 연구로서, Chau(1985)는 포장상자의 송풍저항은 통기공 통과풍속의 제곱에 비례하여 증가하고, 원형 통기공을 설치했을 때가 사각형 통기공을 설치했을 때 보다 송풍저항이 더 크다고 하였으며, 石橋貞人(1982)은 포장상자의 송풍저항은 상자 통과풍량의 제곱에 비례하고 개공율의 제곱에 반비례한다고 하였는데, 이들의 연구결과로 미루어 볼 때 포장상자의 송풍저항은 급확대관 또는 급수축관에서의 압력손실과 유사한 형태로 나타남을 알 수 있다. 그러나 이들이 측정한 송풍저항은 같은 값을 나타내지는 않았는데 이는 통기공의 형상, 갯수 등이 다른데에 원인이 있는 것으로 판단되며 앞으로 이에 관한 연구가 더 수행되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 청과물의 차압통풍 예냉장치 설계의 효율성을 높이고 송풍기 소요정압을 결정하는데 필요한 기초자료를 얻기위하여, 포장상자 통기공의 크기, 송풍량 등이 포장상자와 상자포장 청과물의 송풍저항에 미치는 영향과 산물퇴적층과 포장상자의 각각의 송풍저항이 상자포장 청과물의 송풍저항에 미치는 영향을 비교분석하여 그들간의 상호관계를 구명하는데 목적이 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험장치

실험장치는 송풍저항 측정용 탑, 송풍기, 탑과 송풍기를 연결하기 위한 배관, 송풍량 측정부 및 정압 측정부로 구성되어 있으며, 윤 등(1995)이 사용한 장치에 포장상자를 설치하여 이용하였다.

### 나. 실험방법

#### (1) 포장상자의 송풍저항 측정

크기가 400mm(L)×400mm(W)×300mm(H)인 포장상자의 상,하면의 중앙부에 4각형의 통기공을 1개씩 뚫었는데 이는 본 연구에서는 측정과 분석의 용이함을 위해 통기공의 형상과 갯수는 요인으로 하지않았기 때문이다. 통기공은 179mm×179mm, 127mm×127mm, 90mm×90mm, 63mm×63mm의 4가지 크기로 하였으며, 그 면적이 각각 통기공 설치면의 총단면적의 20%, 10%, 5%, 2.5%에 상당하도록 하였다.

각 실험에 대하여 겉보기 풍속을 0.1m/s~1m/s의 범위에서 변화시켰다.

#### (2) 상자포장 산물의 송풍저항 측정

(1)항에서 사용한 포장상자에 굴과 토마토를 퇴적하여 실험하였으며, 여기서 사용한 굴과 토마토의 평균 등체적구 상당직경은 각각 4.89cm와 6.35cm이었다. 산물의 퇴적방법은 6방계 능

면체배열로 하였으며, 공극율은 굴은 0.29, 토마토는 0.44이었다. 통기공의 개공율은 2.5%~20% 까지 4단계로 변화시켰고, 각 실험에 대하여 겉보기 풍속을 0.02m/s~0.5m/s의 범위에서 변화시켰다.

### 다. 송풍저항의 수학적 모형설정

#### (1) 청과물 퇴적층 송풍저항의 모형

윤 등(1995)이 제시한 모형방정식을 이용하였으며 다음과 같다.

$$\text{굴} : \Delta P_t/L = 3.392 \frac{1}{\varepsilon^{1.075} \cdot D_p^{1.38}} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

$$\text{토마토} : \Delta P_t/L = 8.01 \times 10^{-6} \frac{1}{\varepsilon^{6.94} \cdot D_p^{3.8}} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

$\Delta P_t$ : 청과물 퇴적층의 송풍저항(Pa), L: 퇴적 높이(m),  $D_p$ : 퇴적물의 직경(m),  $\varepsilon$ : 공극율,  $\rho$ : 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), V: 겉보기풍속(m/s)

#### (2) 포장상자 송풍저항의 모형

통기공이 있는 포장상자에 공기를 통과시킬 때의 송풍저항은 급확대관(sudden expansion pipe) 및 급수축관(sudden contraction pipe)에서의 압력손실과 유사하다.

급확대관 및 급수축관에서의 압력손실은 풍속의 제곱과 손실계수의 곱에 비례하며, 손실계수는 수축부와 확대부의 단면적비와 밀접한 관계가 있다. 따라서 통기공이 있는 포장상자에서의 압력손실을 나타내기 위해 상자통과 겉보기풍속과 개공율을 변수로하여 다음의 모형방정식을 설정하였다.

$$\Delta P_b = C \frac{\rho V^2}{2} \times O^n$$

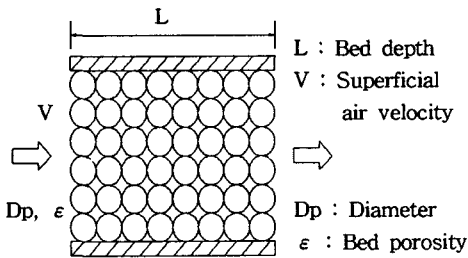
$\Delta P_b$ : 포장상자 송풍저항(Pa)

O: 개공율(소수)

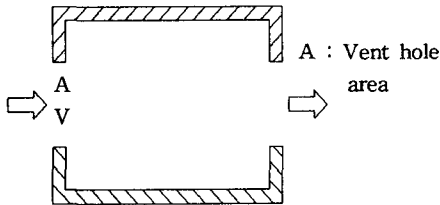
C, n: 상수

(3) 상자포장 산물의 송풍저항 모형

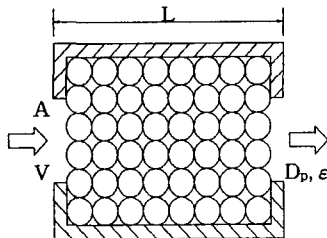
상자포장 산물의 송풍저항은 산물퇴적층 및 포장상자의 각각의 송풍저항이 직렬로 연결된 형태이나, 실제로는 상자포장 청과물의 송풍저항은 포장상자와 산물퇴적층의 각각의 송풍저항을 측정하여 합한 것 보다 매우 크게 나타난다 (Chau,1985). 그 이유는 공기가 산물이 퇴적된 포장상자를 통과할 때 통기구과 가까운 곳에서는 산물 퇴적층을 통과하는 공기의 풍속이 매우 빨라지게 되며, 그 영향으로 산물퇴적층에서의 송풍저항이 커지기 때문으로 예상된다(그림2 참조). 여기서 상자포장 청과물의 송풍저항을 포



a) produce in bulk



b) empty box



c) packed produce

Fig. 2. Mechanism of air flow resistance.

장상자의 송풍저항과 포장상자 통기구 부근에서의 풍속증가의 영향을 보정한 산물퇴적층의 송풍저항을 합한 형태로 나타낼수 있다면 앞으로 산물퇴적 청과물의 송풍저항에 대한 실험자료 만으로도 상자포장 청과물에 대한 송풍저항의 예측이 가능할 것이므로 이를 구명하기 위하여 다음과 같은 수학적 모형을 설정하였다.

$$\Delta P_b = \Delta P_b + \Delta P_i \cdot O^n$$

$\Delta P_i$  : 상자포장 청과물의 송풍저항(Pa)

3. 결과 및 고찰

가. 포장상자의 송풍저항

포장상자의 개공율별 걸보기 풍속에 따른 송풍저항의 변화를 그림3에 나타내었다. 그림에서

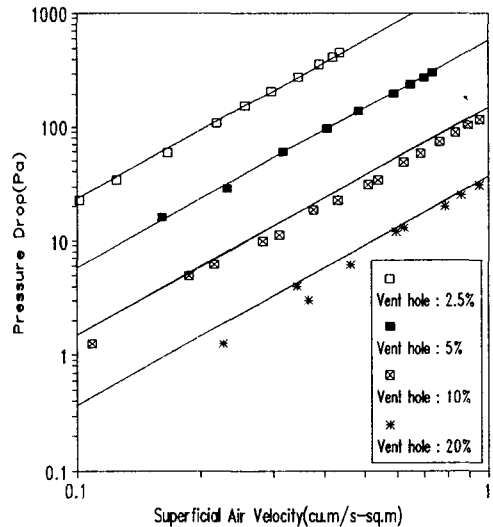


Fig. 3. Airflow resistance of model box at various opening ratio of vent hole.

보는바와 같이 걸보기풍속이 증가하고 개공율이 작아질수록 송풍저항은 증가되었고, 각각의 개공율에 대한 풍속과 송풍저항의 관계를 양대수용지 위에 나타낼 때 직선으로 표시되었으며, 개

공율과 송풍저항 사이에는 지수반비례 관계가 있고, 풍속과 송풍저항 사이에는 지수비례 관계가 있는 것으로 나타났다. 포장상자의 송풍저항을 앞에서 설정한 수학적 모형을 선형화하여 회귀분석에 의해 매개변수를 구한 결과 식1과 같이 나타낼 수 있었으며, Chau(1985) 및 石橋貞人(1982)의 연구결과와 마찬가지로 겉보기풍속의 제곱에 비례하고 개공율의 제곱에 반비례하였다.

또한 이 회귀방정식에 대한 분산분석 결과 1% 수준에서도 유의성이 인정되었다. 그러나 송풍저항 값은 다른 연구에서와 서로 다르게 나타났으며, 이는 통기공의 형상과 갯수가 다른데에 원인이 있는 것으로 판단되었으며, 앞으로 이에 대한 연구가 있어야 할 것으로 생각되었다.

$$\Delta P_b = 2.197 \times \frac{\rho V^2}{2} \times \frac{1}{O^2}, R^2 = 0.998 \dots (1)$$

나. 상자포장 귤과 토마토의 송풍저항

상자포장한 귤과 토마토에 대한 포장상자의 개공율별 겉보기풍속에 따른 송풍저항의 변화를 그림4와 그림5에 나타내었다. 그림에서 보는바

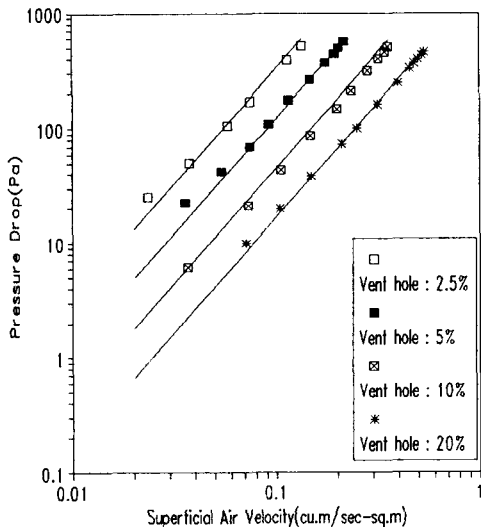


Fig. 4. Airflow resistance of box packaged mandarins at various opening ratio of vent hole(staggered arrangement).

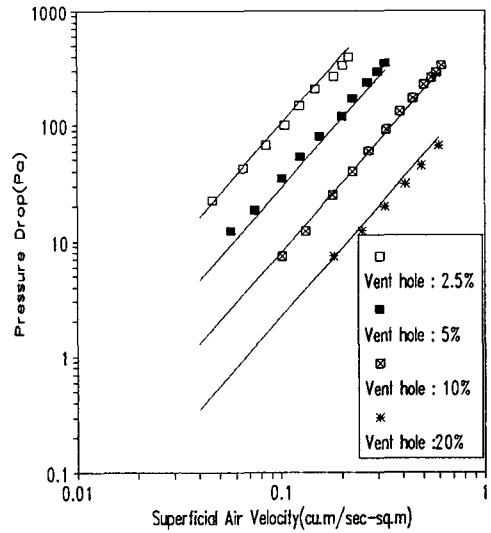


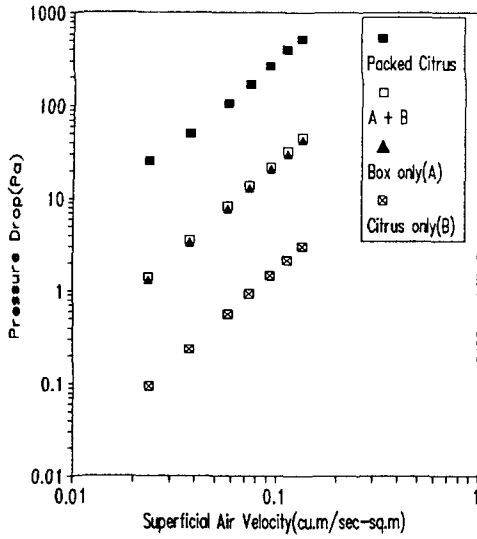
Fig. 5. Airflow resistance of box packaged tomatoes at various opening ratio of vent hole(staggered arrangement).

와 같이 겉보기 풍속이 증가하고 개공율이 감소할수록 송풍저항은 증가하였고, 각각의 개공율에 대한 풍속과 송풍저항의 관계를 양대수 용지위에 나타낼 때 직선으로 표시되었으며, 개공율과 송풍저항 사이에는 지수반비례 관계가 있고, 풍속과 송풍저항 사이에는 지수비례 관계가 있는 것으로 나타났다. 상자포장 귤과 토마토 송풍저항의 회귀방정식을 식2 및 식3과 같이 나타낼 수 있었으며, 송풍저항은 겉보기풍속 및 개공율과 높은 상관 관계를 나타내었다.

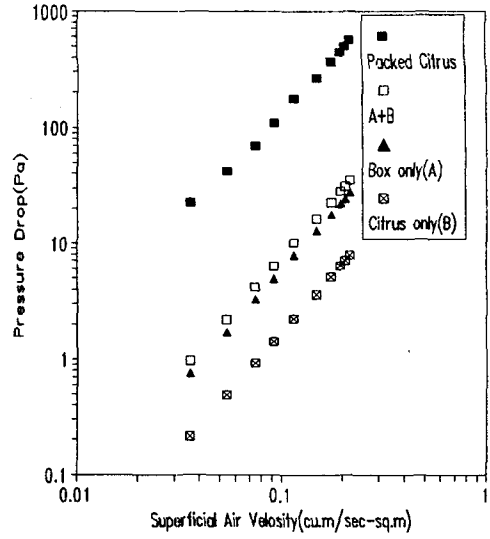
$$\text{귤} : \Delta P_i = 249.47 \times \frac{\rho V^2}{2} \times \frac{1}{O^{1.433}}, R^2 = 0.997 \quad (2)$$

$$\text{토마토} : \Delta P_i = 16.8 \times \frac{\rho V^2}{2} \times \frac{1}{O^{1.847}}, R^2 = 0.935 \quad (3)$$

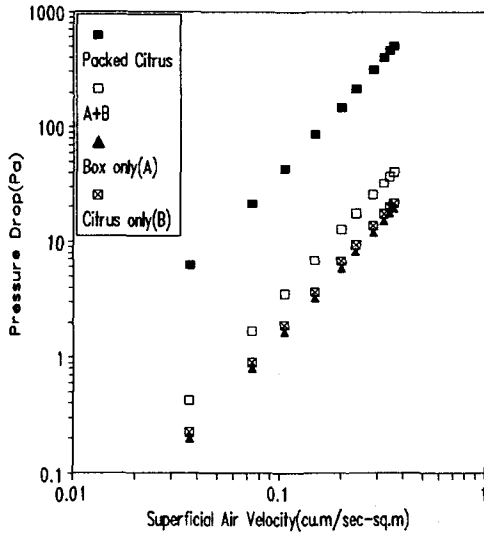
그러나 식2와 식3에서 개공율항의 지수값이 서로 다르게 나타났으며, 이러한 결과로 미루어 볼 때 상자포장 청과물의 송풍저항에는 풍속과 개공율 등의 요인 외에 퇴적산물의 형상, 크기, 공극율 등이 통기공의 요인과 복합되어 영향을



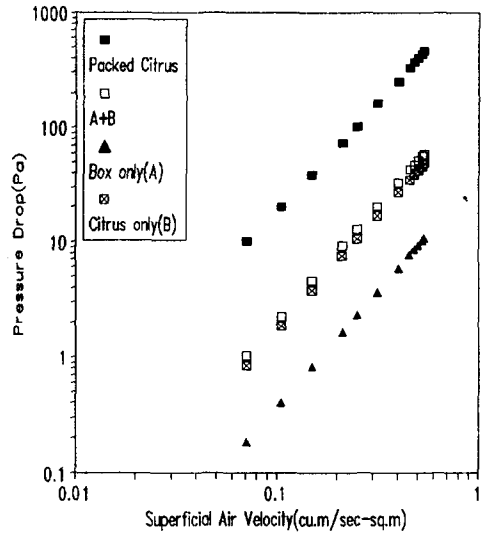
(a) 2.5% opening ratio



(b) 5% opening ratio



(c) 10% opening ratio



(d) 20% opening ratio

Fig. 6. Comparison of airflow resistance between box packaged mandarins, empty box and mandarins in bulk.

미치는 것으로 판단되었다.

각각의 개공율에 대하여 상자포장 청과물의 실측 송풍저항과 포장상자 그리고 산물퇴적층의 각각의 송풍저항을 회귀방정식을 이용하여 계산하여 비교하였으며, 그 결과를 그림6과 그림7에 나타내었다. 그림에서와 같이 상자포장 산물의

송풍저항은 포장상자와 산물퇴적층의 각각의 송풍저항을 측정하여 합한 것 보다 항상 크게 나타났다으며, 이는 Chau(1985)의 연구결과와도 일치하였다. 한편 이러한 결과에 대한 원인은 공기가 산물이 퇴적된 포장상자를 통과할 때 통기공과 가까운 곳에서는 산물 퇴적층을 통과하는 공

상자포장 청과물의 송풍저항 특성

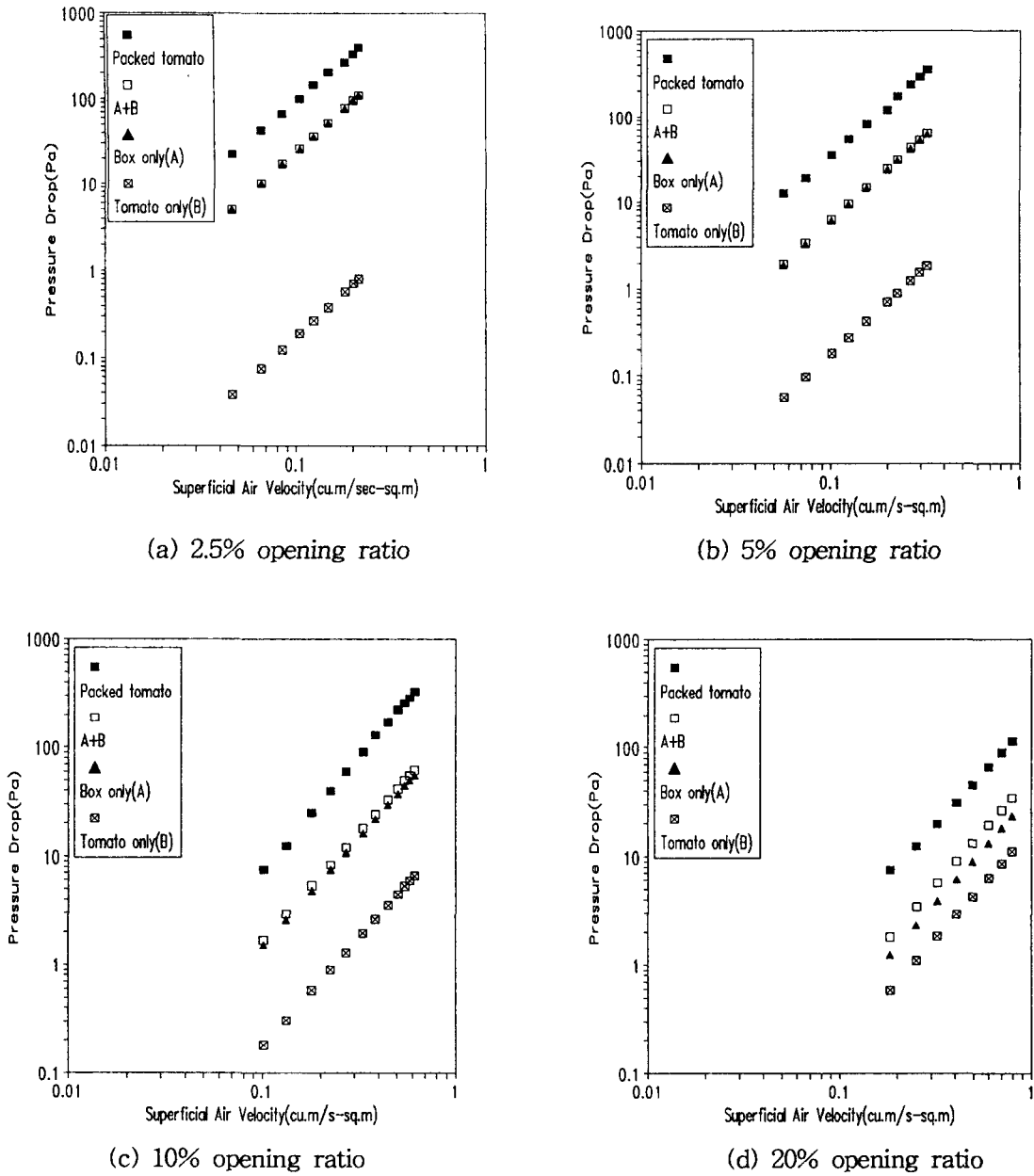


Fig. 7. Comparison of airflow resistance between box packaged tomatoes, empty box and tomatoes in bulk.

기의 풍속이 매우 빨라지게 되며, 그 영향으로 포장상자 내의 산물 퇴적층에서의 송풍저항이 포장하지 않은 산물 퇴적층에서의 송풍저항 보다 커지기 때문으로 판단되었다. 따라서 상자포장 청과물의 송풍저항을 예측하기 위한 수학적 모형방식에 있어서는 포장상자 및 산물퇴적층

에서의 각각의 요인들의 영향이 고려되고 또 포장상자 통기공 부근의 산물퇴적층 내에서의 풍속증가의 영향이 고려되어야 할것으로 판단되었다.

상자포장 산물의 송풍저항과 포장상자 및 산물퇴적층의 각각의 송풍저항 사이의 관계를 앞

에서 설정한 모형방정식을 선형화하여 회귀분석에 의해 매개변수를 구하였으며, 상자포장 굴과 토마토의 송풍저항을 각각 식4와 식5로 표시할 수 있었다.

식4와 식5의 상관계수는 각각  $R^2=0.991$ 과  $R^2=0.963$  이었다.

상자포장 굴 :

$$\Delta P_t = \Delta P_b + \Delta P_i \times O^{-1.42}$$

$$= \frac{\rho V^2}{2} \frac{1}{O^2} \left( 2.197 + 3.392 \frac{1}{\epsilon^{1.075} \cdot D_p^{1.38}} \cdot O^{0.58} \cdot L \right) \dots\dots\dots (4)$$

상자포장 토마토 :

$$\Delta P_t = \Delta P_b + \Delta P_i \times O^{-1.6}$$

$$= \frac{\rho V^2}{2} \frac{1}{O^2} \left( 2.197 + 8.01 \times 10^{-6} \frac{1}{\epsilon^{6.94} \cdot D_p^{3.8}} \cdot O^{0.4} \cdot L \right) \dots\dots\dots (5)$$

따라서 상자포장 청과물의 송풍저항을 산물퇴적 청과물 및 포장상자의 각각의 송풍저항과의 관계로 표시하는 것이 가능하였으며, 이것은 Chau(1985)의 연구결과와는 상이한 것으로서, 그 이유는 기존의 연구에서는 상자포장 청과물의 송풍저항에 있어서 포장상자 통기공의 영향으로 인한 산물퇴적층에서의 풍속 증가의 영향을 고려하지 않고, 단순히 각각 측정된 산물퇴적층 및 포장상자의 송풍저항의 합으로 상자포장 산물의 송풍저항을 나타내고자 한 것에 오류가 있었기 때문으로 판단되었다. 또 이상의 연구 결과에서 볼 때 상자포장 청과물의 송풍저항은 포장상자 통기공의 영향으로 인한 산물퇴적층에서의 풍속 증가의 영향만 보정할 수 있다면 산물퇴적 청과물에 대한 실험자료만으로 예측이 가능할 것으로 판단되며, 이를 위해서는 산물을 퇴적한 포장상자 내에서의 공기유동을 예측할 수 있는 시뮬레이션 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되었다.

#### 4. 결론

차압통풍 예냉장치 설계의 효율성을 높이고 송풍기 소요정압 결정에 필요한 기초자료를 얻기 위하여, 포장상자 통기공의 크기, 송풍량 등을 변화시키면서 포장상자와 상자포장 산물의 송풍저항을 측정하고 이들 요인이 송풍저항에 미치는 영향을 분석하였으며, 또 산물퇴적층과 포장상자의 각각의 송풍저항이 상자포장 산물의 송풍저항에 미치는 영향을 비교분석하여 그들간의 상호관계를 구명하였던바 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 포장상자 송풍저항의 회귀방정식을 걸보기 풍속과 개공율을 변수로하여 작성하였으며, 송풍저항은 풍속의 제곱에 비례하고 개공율의 제곱에 반비례하였다.

2) 상자포장 굴과 토마토에 대한 포장상자의 개공율별 걸보기 풍속에 따른 송풍저항을 양대수용지 위에 나타낼 때 직선으로 표시되었으며, 개공율과 송풍저항 사이에는 지수반비례 관계가 있고, 풍속과 송풍저항 사이에는 지수비례 관계가 있는 것으로 나타났다. 또 상자포장 청과물의 송풍저항에는 풍속과 개공율 등의 요인 외에 퇴적산물의 형상, 크기, 공극률 등이 통기공의 요인과 복합되어 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3) 상자포장 굴과 토마토의 송풍저항은 포장상자와 산물퇴적층의 각각의 송풍저항을 측정하여 합한 것 보다 항상 크게 나타났으며, 그 이유는 공기가 산물이 퇴적된 포장상자를 통과할 때 통기공 부근에서는 산물 퇴적층을 통과하는 공기의 풍속이 매우 빨라지게 되며, 그 영향으로 산물퇴적층에서의 송풍저항이 커지기 때문으로 판단되었다.

4) 상자포장 굴과 토마토의 송풍저항은 포장상자 통기공의 영향으로 인한 산물퇴적층에서의 풍속 증가의 영향을 보정하여 주므로써 산물퇴적층과 포장상자의 각각의 송풍저항과의 관계로 표시하는 것이 가능하였다. 따라서 산물을 퇴적한 포장상자 내에서의 공기유동을 예측할 수 있



는 시뮬레이션 기법에 대한 연구가 이루어진다면 산물퇴적 청과물에 대한 실험자료 만으로도 상자포장 청과물의 송풍저항을 예측하는 것이 가능할 것으로 판단되었다.

### 참 고 문 헌

1. 김만수, 김성래. 1986. 곡물의 함수율 변화에 따른 송풍저항에 관한 연구. 한국농업기계학회지. 11(2) : 55-65.
2. 윤홍선. 1994. 차압통풍식 예냉청과물의 송풍저항 및 냉각특성. 경북대 박사학위 논문
3. 윤홍선. 1995. 산물퇴적 청과물의 송풍저항 특성. 한국농업기계학회지. 20권 4호 게재중.
4. 石橋真人, 田中俊一郎, 中野和弘 等. 1982. 差壓通風冷却方式の開発(第1報). 冷凍. 57(662) : 1191-1197.
5. ASAE Yearbook. 1982. 29th edition. ASAE. St. Joseph, M149085.
6. Bakker-Arkema, F.W, W.G. Patterson, and W.G. Bickert, 1969. Static Pressure-Airflow Relationships in Packed Beds of Granular Biological Materials Such as Cherry Pits. Trans. ASAE. 12(1) : 134-136.
7. Chau, K.V., J.J., Gaffney, C.D., Baird, Church. I, G. A. 1985. Resistance to Air Flow of Oranges in Bulk and in Cartons. Trans. ASAE. 28(6) : 2083-2088.
8. Henderson, S.M. 1943. Resistance of shelled corn and bin walls to air flow. Agr. Eng. 25 : 367-369, 374.
9. Matthies, H.J. and H. Petersen. 1974. New Data for Calculating the Resistance to Air flow of Stored Granular Materials. Trans. ASAE. 17(6) : 1144-1149.
10. Neale, M.A. and H.J.M. Messer, 1976. Resistance of Root and Bulb Vegetables to Airflow. J. Agric. Eng. Res. 21 : 221-231.
11. Patterson, F.W., Bakker-Arkema, and W.G. Bickert. 1971. Static Pressure-Air Flow Relationships in Packed Beds of Granular Biological Materials such as Grain. Trans. ASAE. 14(1) : 172-174, 178.