

청과물 퇴적층에서의 공기유동 정압강하

Static Pressure Drop of Airflow in Packed-bed of Fruits and Vegetables

김의웅* 김병삼* 남궁배* 정진웅* 김동철* 금동혁**
 정희원
 O.W.Kim, B.S.Kim, B.Nahm-Gung, J.W.Jeong, D.C.Kim, D.H.Keum

ABSTRACT

The purpose of this paper is to obtain the basic data for design of pressure cooling system. Static pressure drop, as a function of superficial velocity, was measured for different stacking methods and stacking heights of some fruits and vegetables.

At given superficial velocity, sphericity and void fraction had a much greater influence on static pressure drop than average diameter of spherical fruits such as apple, peach, tomato and kiwi fruit. Among cylindrical vegetables such as cucumber, carrot, radish and chinese cabbage, cucumber showed different pattern of static pressure drop because of its bended shape, radish showed less static pressure drop than other vegetables because its large sizes of voids.

When cucumber and spinach were stacked vertically and horizontally to air flow, a much greater static pressure drop was shown in vertical than in horizontal type, therefore static pressure drop was affected not only by void fraction but also by void shape.

Also, in packed-beds of fruits and vegetables, static pressure drop could be estimated very well by Ramsin's equation.

주요 용어(Key Words) : 차압예냉시스템(Pressure Cooling System), 정압강하(Static Pressure Drop)

1. 서론

차압예냉시스템(Pressure cooling system)은 차압팬, 차압실, 차압시트 등을 이용하여 차압에

냉용 용기에 퇴적된 청과물 퇴적층 내부로 유입 되는 유효공기량을 증대시켜 청과물 냉각속도의 증진은 물론 냉각편차를 줄일 수 있도록 한 공기예냉방식의 일종이다. "차압예냉"이라는 용어

* 한국식품개발연구원 산업화연연구부
 ** 성균관대학교 생물기전공학과

는 pressure cooling이 일본에 처음 도입될 때 강제통풍냉각방식(forced-air cooling)과 구별하기 위하여 pressure cooling을 번역하여 사용한 것이 최초로서(石橋 등, 1989) 국내에서도 이 용어가 그대로 도입되어 차압예냉으로 통용되고 있다.

차압예냉시스템은 미국 및 일본 등지에 상당히 많이 보급되어 있지만 이들 시설이 신뢰할만한 자료에 근거해서 설계되었다고 말하기 어렵고, 차압예냉에 관한 연구 보고가 거의 없어 경험적으로 건설하고 있는 현실로서, 건설되어 있는 차압예냉시설이 실제로는 차압냉각의 효과가 거의 없고 강제 통풍냉각방식과 틀리지 않은 예를 많이 볼 수 있다(大久保, 1984).

차압은 청과물을 퇴적한 상자 전후의 정압차, 또는 차압실과 예냉실의 정압차를 의미하는 것으로서 용기에 유입되는 유효공기량에 큰 영향을 미친다. 중앙흡입형 차압예냉실에서 청과물 상자는 흡기구를 중심으로 2열로 길이, 폭 및 높이 방향으로 적재되고, 냉기는 폭방향의 가장 바깥쪽 상자의 통기공을 통하여 상자내의 청과물을 냉각하고, 중앙흡기덕트를 거쳐 차압실에 설치되어 있는 차압팬을 통해 예냉실로 토출되며 이 과정에서 정압강하가 발생하게 된다. 이 때 차압팬의 흡입측인 차압실의 정압은 예냉실의 정압에 비하여 負壓를 갖게 되므로 정압강하가 발생할수록 차압은 더욱 커져 송풍량은 감소하고 냉각속도는 늦어지게 된다. 이러한 정압강하에 영향을 미치는 인자로는 청과물 퇴적층, 용기의 통기공, 상자 적재방법 및 상자간의 간극 등을 들 수 있다.

따라서 차압예냉시스템의 설계 및 운영을 위해서는 이들 영향인자의 측정이 필요하며, 빠른 냉각속도 및 에너지 절약을 위해서는 정압강하를 최소화할 수 있는 방안의 강구가 필요하다고 할 수 있다.

냉기가 청과물 퇴적층을 통과할 때 청과물에 의해 냉기의 유동방향 및 속도성분에 변화가 발생하며 이 과정에서 정압강하가 발생하게 되는데, 이 정압강하는 청과물의 형상, 공극율, 공극

의 형상에 영향을 받게 된다. 이러한 퇴적층에서의 정압강하에 관해서는 비교적 많은 연구 결과가 발표되고 있으나 곡류 및 종자류에 관한 연구 결과가 대부분을 차지(Chau등(1985), ASAE Standards(1994))하고 있는 반면, 국내에서 주로 유통되고 있으면서 예냉이 필요한 청과물에 관한 결과는 거의 찾아볼 수 없는 실정으로 밀감, 양파, 차 등 7개품목에 대해 실험한 石橋등(1982), 감자, 양파등에 대해 실험한 Neale등 (1976), 토마토에 대한 Wang등(1969)의 결과 정도에 불과한 실정이다. 그러나 이들 결과도 주로 구형과일을 중심으로 공극율 및 퇴적방법의 영향을 살펴본 것으로서 실제 퇴적방법이 큰 문제가 되는 과채류 및 엽채류등 장변과 단변의 차가 큰 품목에 대한 영향을 살펴본 결과는 찾아볼 수 없었다.

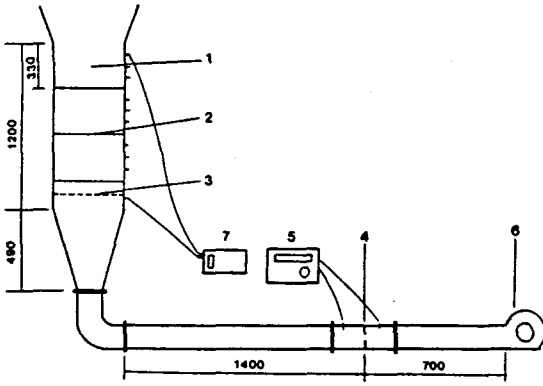
한편, Chau등(1985)은 청과물 퇴적층에서의 공기유동은 비 Darcy흐름으로 정압강하를 나타내는 식으로는 Ramsin, Ergun의 방정식이 있으며, Ramsin식은 Ergun식에 비하여 간단하지만 청과물의 크기 및 공극율을 고려한 일반식을 얻는데는 적당하지 않다고 하였다. 그러나 Ergun식은 청과물의 직경을 고려한 식으로 구형 과일에는 적합할 수 있으나 채소류등에는 적용하기 힘든 단점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 국내에서 주로 유통되고 있는 청과물 12개 품목에 대하여 결보기속도, 퇴적방법 및 퇴적높이에 따른 정압강하 특성을 구명하여, 품목별로 차압예냉시스템의 설계에 활용할 수 있도록 정압강하를 나타내는 수식 중 Ramsin식의 실험상수를 구하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치

청과물 퇴적층에서의 정압강하를 측정하기 위하여 그림 1과 같이 퇴적셀, 오리피스 및 송풍기로 구성되어 있는 정압강하 측정장치를 제작하여 사용하였다.



1. Cell 2. Perforated plate 3. Metal net 4. Orifice
5. Manometer 6. Fan 7. Manometer

Fig 1. Schematic diagram of experimental apparatus for the measurement of static pressure drop.

1) 퇴적셀 : 두께 15mm의 원통형 아크릴수지를 이용하여 사과 3상자(15kg)를 퇴적할 수 있는 용량으로 직경 420mm, 높이 330mm의 3개 셀로 구성하고, 하단부에 금속망을 부착하였다. 또한 위치별 정압을 측정하기 위하여 직경 2mm인 니플을 상부로 부터 100mm간격으로 10개, 동일 높이에 4개씩 총 40개를 설치하여 테프론 압력관으로 정압을 측정할 수 있도록 하였다.

2) 오리피스 : 송풍량을 측정하기 위하여 조임 지름비 0.25인 오리피스를 사용하였으며, 오리피스 전,후의 정압차를 측정하기 위하여 오리피스 전 52.5mm, 후 30.95mm에 직경 2mm 니플을 각각 4개씩 설치하였다.

3) 송풍기 : 변속모터가 부착된 터보팬((주)삼원풍력, 규격번호 KS B 6326, 송풍량 55CMM, 정압 420mmAq)을 사용하였다.

4) 기타 사항은 한국공업규격(KS A 0612 『조임기구에 의한 유량 측정 방법』)에준하여 제작하였다.

나. 재료

청과물 퇴적층의 정압강하 측정에 사용한 재료는 사과, 복숭아, 토마토, 키위, 오이, 당근, 무,

시금치, 상추, 샐러리, 브로콜리, 배추 등 총 12개 품목으로 가락동 농수산물시장에서 구입, 공시하였다.

다. 실험방법

1) 정압 및 송풍량

정압강하 측정장치의 퇴적셀에 시료를 퇴적한 다음 송풍기에 부착된 변속모터의 회전수를 조절하면서 오리피스 전,후의 정압 및 퇴적층에서의 정압강하를 측정하였으며, 이 때 퇴적층에서의 정압은 동일 높이의 4점의 평균치를 사용하였다. 퇴적층에서의 정압 측정은 VELOCICALC (8360, TSI Incorporated, 미국)을, 오리피스 전·후에서의 정압은 Digital Manometer (DM-3500, COSMO, 일본)를 각각 이용하였다.

송풍량은 오리피스 전,후에서 차압을 측정한 다음과 같은 방법으로 계산하였다. 먼저 풍속이 빠르지 않으므로 비압축성유체로 고려하여 Bernoulli방정식을 적용하면

$$\frac{1}{2} V_1^2 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{1}{2} V_2^2 + \frac{P_2}{\rho} \dots\dots\dots(1)$$

연속방정식에서

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \dots\dots\dots(2)$$

(1)식과 (2)식을 송풍량 Q에 관하여 풀고 관벽의 마찰, 단면변화에 따른 손실수두를 고려하면 오리피스를 통과한 송풍량은 다음 (3)식으로 표시된다(KS A 0612).

$$Q = KYA_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 $K = A + B \sqrt{\frac{10^6}{ReD}}$

$$Y = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{P_1 - P_2}{kP_1}$$

$$A = 0.5922 + 0.4252 \left[\frac{0.3871}{D^2 \beta^2 + 0.254D} + \beta^4 + 1.25\beta^{16} \right]$$

$$B = 0.00025 + 0.002325(\beta + 1.75\beta^4 + 10\beta^{12} + 0.07874D\beta^{16})$$

$$ReD = \frac{4Q\rho}{\pi D\mu} \dots\dots\dots (4)$$

- 여기서 Q : 송풍량(m³/s)
 ReD : 유관의 직경 D에 기초한 Reynolds수 (무차원)
 k : 비열비 (무차원)
 Y : 기체팽창계수 (무차원)
 β : 압축비 (무차원)
 K : 유량계수 (무차원)
 A₂ : orifice의 단면적(m²)
 ρ : 유체의 밀도 (kg/m³)
 P₁ : orifice 전의 정압(Pa)
 P₂ : orifice 후의 정압(Pa)
 μ : 유체의 절대 점성계수(Pas)

이므로 (4)식을 (3)식에 대입하면 (5)식과 같아진다.

$$Q = YA_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

$$\left(A + 886.2269B \left(\frac{Q\rho}{D\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \dots\dots\dots (5)$$

(5)식의 해를 Newton-Raphson방법으로 구하여 송풍량 Q를 결정하였다.

2) 물리적 특성측정

공시재료의 진밀도는 platform scale로 측정하였으며, 퇴적층의 공극율은 퇴적층의 체적과 시료의 중량에서 측정된 산물밀도 및 진밀도의 관계식으로 부터 계산하였다. 구형율은 Mohsenin (1986)의 방법에 준하여 측정하였다. 공시한 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다.

3) 실험상수의 결정

Ramsin식의 실험상수 k,m,n 값의 추정에는

Table 1. Physical properties of experimental materials.

Materials	Diameter (Length) (mm)	Sphericity (-)	Weight (g)	Volume (cm ³)	Density (kg/m ³)	Water content (%)
Apple						
-Red	86.88	0.93	249.07	314.56	791.80	83.7
-Blue	81.10	0.93	206.75	256.98	804.54	75.1
Kiwi fruit	65.48	0.84	98.91	97.49	1014.57	82.9
Peach	77.51	0.94	225.22	234.46	960.59	83.6
Tomato	68.32	0.93	139.93	143.46	975.39	91.6
Carrot	177.60	-	241.16	239.67	1006.22	89.3
Chinese						
cabbage	254.45	-	1893.68	2795.00	677.52	94.7
Cucumber	208.75	-	163.18	167.52	973.62	94.1
Radish	295.83	-	1886.67	1905.00	990.38	94.2
Broccoli	130.90	-	89.38	113.40	788.13	87.3
Celery	70.20	-	-	-	865.06	92.4
Lettuce	213.80	-	6.61	-	682.49	90.5
Spinach	-	-	-	-	513.10	88.8

SAS의 NLIN PROC.를 이용하였으며, 비선형 최소제곱법을 풀기 위해 DUD방법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 청과물 형태에 따른 정압강하

청과물의 형태가 정압강하에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 사과, 토마토, 복숭아, 키위 등 구형의 청과물과, 오이, 당근, 무 등 실린더 형태에 가까운 청과물 퇴적층의 정압강하를 측정하여, 금속망으로 부터 72.35cm에서의 값을 이용하여 비교하였다.

그림 2는 구형 청과물의 겉보기속도별 정압강하를 나타낸 것으로, 사과 및 토마토의 구형율이 0.93, 복숭아가 0.94, 키위가 0.84로서 구형율이 0.93이상인 사과, 복숭아, 토마토는 정압강하가 비슷한 경향을 나타냈지만, 구형율이 0.84(공극율 0.4214)인 키위는 다른 경향을 나타내었다. 구형율이 0.93이상인 청과물의 공극율은 복숭아가 0.5107, 토마토가 0.4707, 사과가 0.4147로서 공극율이 낮은 순서인 사과, 토마토, 복숭아 순서로

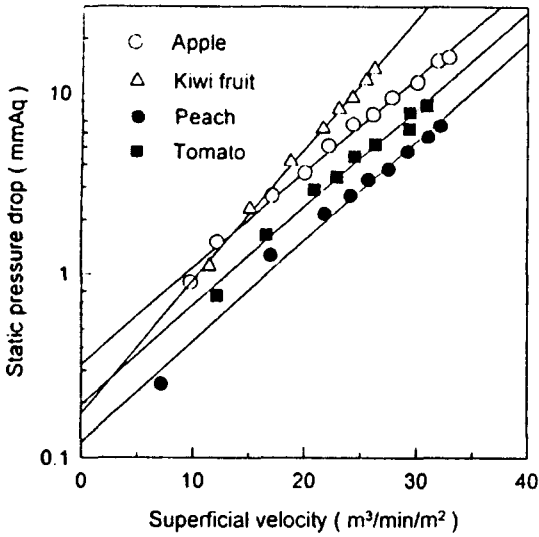


Fig 2. Static pressure drop as a function of superficial velocity for spherical commodity packed beds at 72.35cm of stacking height.

높은 정압강하를 보였다. 그러나 이 때 평균 직경은 복숭아가 73.20mm, 사과가 75.15mm, 토마토가 63.49mm, 키위가 54.79mm로서, 공극의 형상이 비교적 균일한 구형과일의 경우 평균 직경보다 구형을 및 공극율이 정압강하에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

그림 3은 실린더형태에 가까운 청과물을 길이 방향이 공기의 유동방향과 수직이 되도록 적재하여 겉보기 속도별 정압강하를 나타낸 것으로서 형태가 다소 구부러진 오이(공극율 0.4011)는 타 품목에 비해 비교적 다른 경향을 나타내고 있다. 한편 당근, 무의 공극율이 각각 0.5936, 0.4416으로 나타났으나 정압강하가 공극율 순서와는 무관하게 당근, 무 순서로 나타났는데, 이것은 무의 직경이 295.8mm로서 177.6mm인 당근보다 대단히 커서 공극의 크기가 큰데 원인이 있는 것으로 사료된다.

나. 청과물 퇴적방법 및 높이에 따른 정압강하

청과물을 상자에 퇴적하여 차압에냉실에 적재

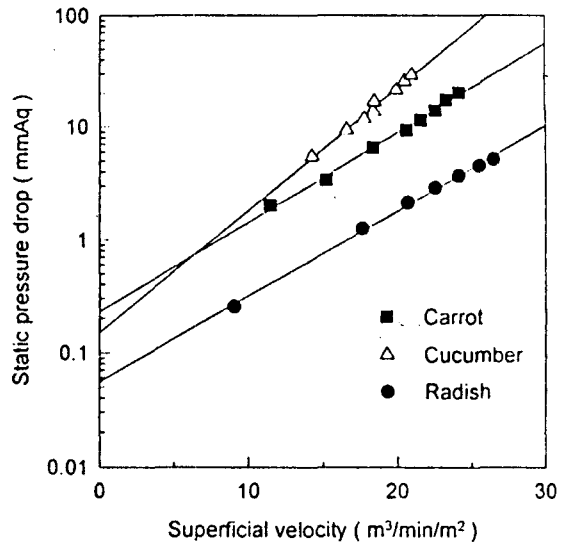


Fig 3. Static pressure drop as a function of superficial velocity for cylindrical commodity packed beds at 72.35cm of stacking height.

할 때 퇴적방법, 냉기의 유동방향에 대한 청과물의 퇴적방향이 정압강하에 미치는 영향을 파악하기 위하여 사과, 오이, 시금치, 상추 등을 퇴적방법을 달리하면서 정압강하 특성을 살펴보았다. 사과를 그림 4와 같이 랜덤(random), 입방격자(square staggered), 능면격자(staggered)의 3가지 방법으로 적재하였을 때의 겉보기속도별 정압강하는 그림 5와 같았다. 이 때 공극율은 각각 0.4147, 0.4318, 0.4148로서 겉보기속도에 따른 정압강하는 공극율의 크기가 비슷한 능면격자형태와 랜덤하게 퇴적한 경우 유사한 경향을 보인 반면, 공극율이 상대적으로 큰 입방격자는 정압강하가 작아, 형상이 비교적 균일한 사과의 경우 공극율이 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

그러나 단경이 32.56mm, 장경이 208.75mm로 장경과 단경의 비가 약 6.4로서 대단히 큰 오이를 길이방향이 공기유동방향과 수직이 되도록 엇갈리게 퇴적하고, 또한 수평방향이 되게 동일한 중량을 같은 용적이 되도록 퇴적하여 정압강하를 측정된 결과 그림 6과 같이 상당히 다른 경향을 나타내었다. 또한, 줄기가 길고 잎이 비교적 많은

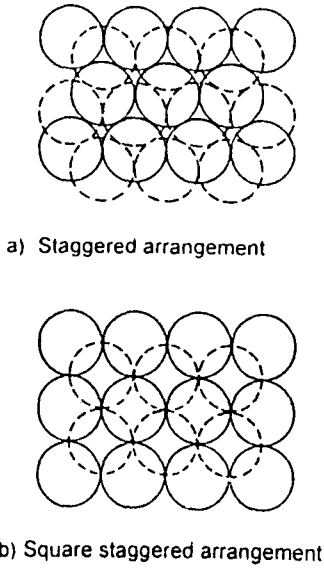


Fig 4. Arrangement patterns of apples.

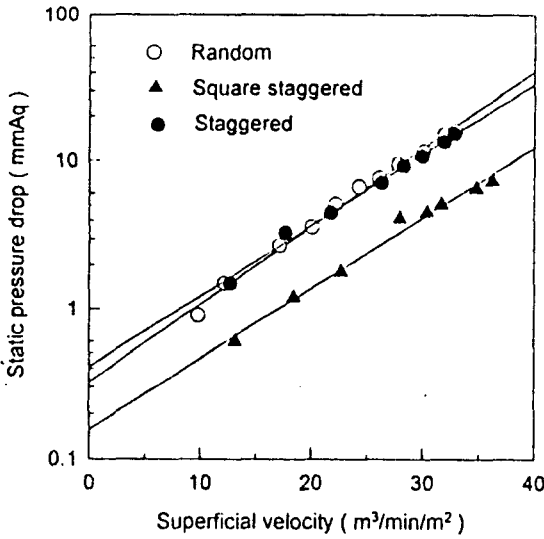


Fig 5. Static pressure drop as a function of superficial velocity for different stacking methods of Tsugaru apple packed bed at 72.35cm of stacking height.

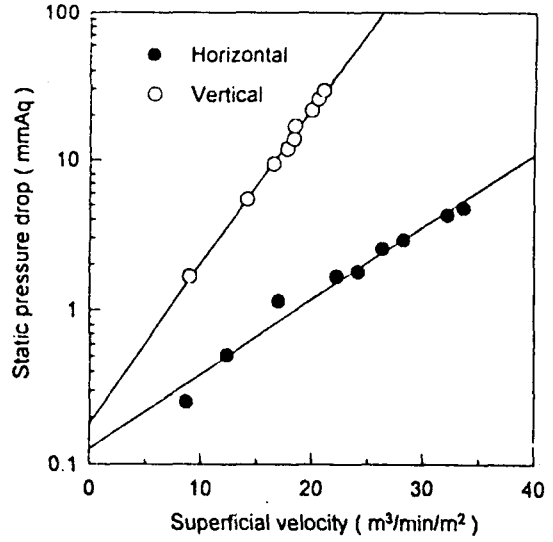


Fig 6. Static pressure drop as a function of superficial velocity for different stacking methods of cucumber packed bed at 72.35 cm of stacking height.

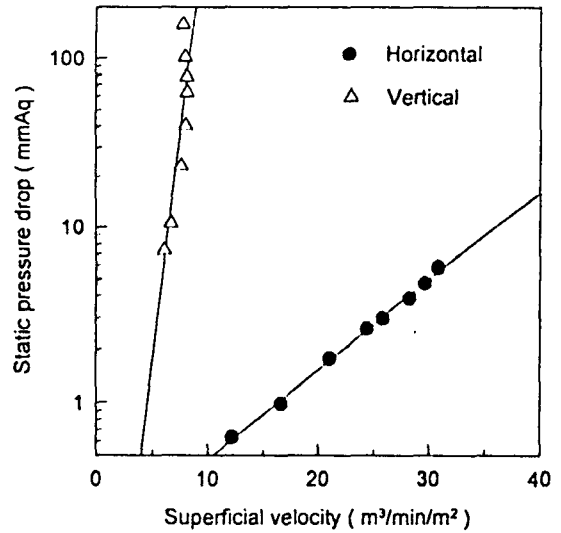


Fig 7. Static pressure drop as a function of superficial velocity for different stacking methods of spinach packed bed at 22.75 cm of stacking height.

시금치를 대상으로 오이와 동일한 방법으로 퇴적하여 정압강하를 측정된 결과 그림 7과 같이 역시 대단히 다른 양상을 나타내었다. 그림 6, 7

의 결과에서 길이방향을 공기의 유동방향과 동

일한 방향으로 퇴적하였을 때는 공극이 긴 통로 형태가 되어 정압강하가 적어진 반면, 수직방향으로 퇴적할 경우 정압강하가 크게 발생하여 공극의 형태가 정압강하에 대단히 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

한편, 공기의 유동방향과 동일한 방향으로 잎상추를 퇴적밀도 84.2kg/m³와 112.4 kg/m³로 달리하여 퇴적하여 정압강하를 측정한 결과 그림 8과 같이 퇴적밀도에 따라서도 상당한 영향을 보이는 것을 알 수 있었으나, 이는 공극율과 무관하지 않은 결과로 사료된다.

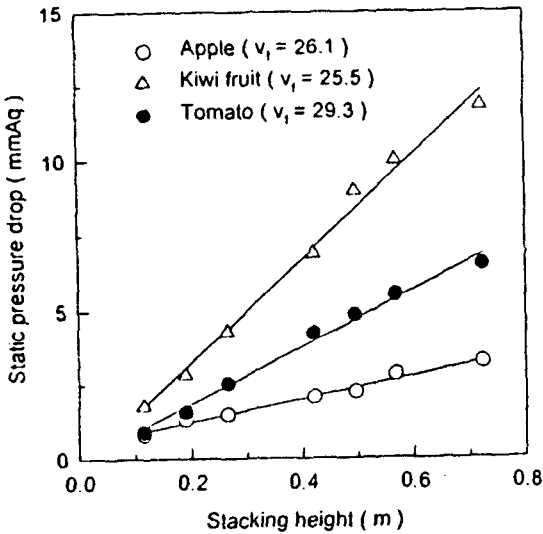


Fig 8. Static pressure drop as a function of superficial velocity for different stacking densities of lettuce packed bed at 21.0cm of stacking height.

그림 9는 퇴적높이의 영향을 살펴보기 위하여 거의 비슷한 겉보기속도하에서 사과, 키위, 토마토의 퇴적 높이에 따른 정압강하를 나타낸 것으로서 퇴적 높이의 증가에 따라 정압강하가 거의 직선적으로 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

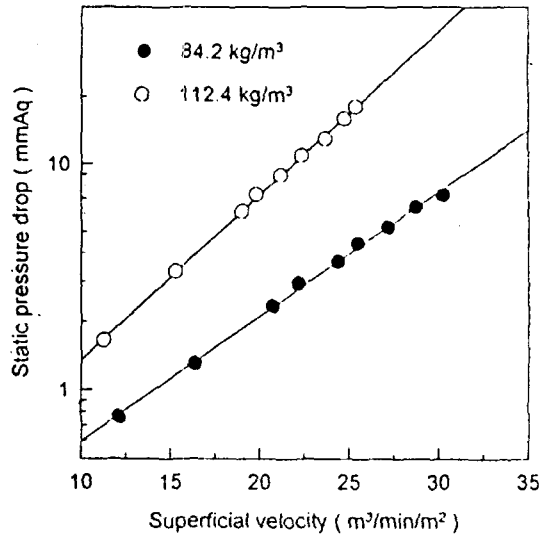


Fig 9. Comparison of static pressure drop in packed beds of various fruits at similar superficial velocity (V_s , m³/min/m²)

다. 실험상수의 결정

공시한 12개 품목에 대하여 청과물 퇴적층에서의 최대겉보기속도 40m³/min/m², 최대퇴적높이 72.35cm의 조건하에서 겉보기속도 및 높이에 따른 정압강하 측정치를 Ramsin식인 (6)식에 적용시켜 실험상수를 구한 결과는 표 2와 같다.

$$\Delta P = K V^n h^m \dots\dots\dots(6)$$

- 여기서 ΔP : 정압강하(mmAq)
- V : 겉보기 속도 (m³/min/m²)
- h : 퇴적층의 높이(m)
- K, m, n : 상수(-)

이 때 퇴적높이에 대한 상수 n의 값은 형상이 균일하지 않은 브로콜리 및 잎이 많은 셀러리의 경우 높은 값을 나타내었으나, 그이외의 청과물에서는 거의 1에 가까운 값을 나타내고 있어 퇴적층의 높이에 따른 정압강하는 거의 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 그러나 겉보기속도의 지수항인 m과, 상수 k값은 품목에 따라 다른 값

Table 2. Estimated values for constants in static pressure drop equation.

Materials	k	m	n	F value
Apple				
-Random	54.26	2.95	0.99	**
-Staggered	63.82	3.34	1.06	**
Kiwi fruit	424.15	3.74	1.00	**
Peach	8.19	0.41	0.99	**
Tomato	96.89	3.01	1.04	**
Carrot	250.50	3.65	0.96	**
Chinese cabbage	1144.77	4.38	0.87	**
Cucumber(Vertical)	25.59	2.42	0.86	**
Radish	74.66	3.63	1.03	**
Broccoli	68.05	2.30	1.25	**
Celery	82.85	2.94	1.33	**
Lettuce(Bulk density)				
-84.2kg/m ³	281.99	2.83	-	**
-112.4kg/m ³	2249.21	3.61	-	**
Spinach				
(Horizontal)	359.23	4.41	0.93	**

**Significant at .01 level

을 나타내어 청과물의 형상, 퇴적층에서의 공극율, 공극의 형태, 공극의 크기 등을 복합적으로 나타내고 있는 것으로 사료된다. 또한 F검정 결과 99% 신뢰구간에서 유의적으로 나타났다.

4. 결론 및 요약

본 연구는 차압예냉시스템의 설계 및 운전에 필요한 청과물 퇴적층에서의 정압강하 특성을 살펴보기 위하여 12개품목의 청과물을 대상으로 겉보기속도별 정압강하를 측정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 사과, 복숭아, 키위, 토마토 등 공극의 형태가 비교적 균일한 구형과일의 퇴적층에서의 정압강하는 평균 직경의 차이에 의한 영향보다는 구형율 및 공극율에 의한 영향이 더 컸으며, 오이, 무, 당근 등 실린더형태에 가까운 청과물에서는 형태가 다소 구부러진 오이가 비교적 다른 정압강하 형태를 나타내었고, 공극률이 적은 반면 공극의 크기가 큰 무에서의 정압강하가 당근에 비해 낮게 나타나 공극의 크기가 정압강하

에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

나. 오이 및 시금치의 길이방향을 공기의 유동 방향과 수직,수평방향이 되도록 퇴적하여 정압강하를 측정된 결과, 공기유동방향과 수평으로 퇴적할 때의 정압강하가 수직방향으로 퇴적한 경우보다 훨씬 적어 장경과 단경의 비가 큰 청과물 퇴적층에서의 정압강하는 퇴적방법에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

다. 청과물 퇴적층에서의 정압강하는 퇴적층 높이에 따라 거의 선형적으로 비례하였으며, Ramsin식으로 잘 나타낼 수 있었다.

참고 문헌

1. 한국공업표준협회. 1992. 조임기구에 의한 유량측정방법, KS A 0612-1992 : 1-172.
2. 大久保増太郎. 1984. 青果物の豫冷の現状と問題點, 冷凍 59(677) : 195 - 203.
3. 石橋貞人, 田中俊一郎, 中野和弘, 藤崎義勝. 1982. 差壓通風冷却方式の開發, 冷凍 57(662) : 1191 - 1197.
4. 石橋貞人, 志賀 徹, 田中俊一郎. 1989. 豫冷の冷却方式とその特徴, 冷凍 64(736) : 127 - 137.
5. American Society of Agricultural Engineers. 1994. ASAE STANDARDS. P452.
6. Chau,K.V., J.J.Gaffney, G.A.Baird and G.A. Church,II. 1985. Resistance to air flow of oranges in bulk and in cartons. Transactions of the ASAE 28(6) : 2083 - 2088.
7. Mohsenin N.N. 1986. Physical properties of plant and animal materials, p86, Golden and Breach Sci. Pub.,New York.
8. Neale,M.A. and H.J.M. Messer. 1976. Resistance of root and bulb vegetables to airflow, J.Agric. Eng. Res., 21 : 221 -231.
9. WangJ.K. and K. Tunpun. 1969. Forced-air precooling of tomatoes in cartons, Transactions of the ASAE 12(5) : 804-806.