

1. 서론

차압예냉시스템에서 정압강하에 영향을 미치는 설계인자로는 청과물 퇴적층, 용기에서의 정압강하 이외에 상자의 적재방법, 상자사이의 간극 등을 고려할 수 있다.

차압예냉용 용기로는 PVC 및 골판지상자 등이 사용될 수 있는데 이 중 PVC상자를 사용할 경우 정압강하가 거의 없지만, 골판지상자를 사용할 경우는 강도 문제상 개공율을 크게 할 수 없으므로 정압강하는 피할 수 없다(大久保, 1991). 개공율에 따른 정압강하는 다공판에 대한 Henderson(1943)식이 제안(Brooker등, 1973)된 이래 골판지상자에 대한 Chau등(1985), 全農施設·資材部(1982) 등에서 여러가지 실험식이 제안되고 있으나 이들의 결과가 일치하지 않고 있다. 한편 용기의 개공율에 관해서 Mitchell등(1972)은 실내냉각(room cooling)의 경우 측면 면적당 2% 이상을, 강제통풍냉각(forced-air cooling)의 경우 빠른 냉각속도를 얻기 위해서는 4% 이상을 추천하고 있으나, 中馬등은 감귤의 냉각실험에서 개공율 3% 이상일 경우 개공율을 높여도 냉각속도는 기대한 만큼 커지지 않았다(全農施設·資材部, 1982)고 하였고, Parson등(1972)은 배의 냉각실험에서 개공율 2% 이상에서는 개공율에 따라 냉각시간이 크게 달라지지 않았으며, 개공율 3.5~5%에서 냉각속도는 거의 같았다고 하였다.

Baird등(1988)은 각 인자의 변화에 따른 에너지 및 경비의 효율성에 관한 모델링과 이를 이용한 시뮬레이션 결과를 이용하여 개공율이 3% 미만이면 냉각에 소요되는 경비가 급격하게 상승하지만 개공율을 5% 이상으로 제작하는 것은 상자의 강도, 라벨링 등을 고려할 때 대단히 어렵다고 하였다. 한편, 골판지상자의 함수율이 1% 증가할 때 압축강도가 10%정도가 감소하게 되는데, 예냉조건이 0~10°C, 90~100%, RH일 경우 예냉에 의해 골판지상자의 함수율이 1~2% 증가하게 되고, 통기공의 위치에 따라 최대 10% 정도의 강도차가 발생하게 된다(全農施設·

資材部, 1982). 또한, 실제 차압예냉실에 상자를 적재할 때 상부에 적재한 상자의 하중을 고려하면 외국에서 추천하고 있는 개공율을 그대로 수용하는 것은 적합치 않을 수도 있어 적정 개공율에 대해서는 향후 많은 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

중앙흡입 차압예냉시스템에서 냉기는 폭방향으로 유동되기 때문에 폭방향의 적재수가 많아지면 정압강하가 커져서 송풍량이 적어질 뿐 아니라 냉각편차의 발생 원인이 되며, 예냉실 바닥면적의 효율적인 이용과도 관계가 있어 차압예냉시스템에서 폭방향의 적재수는 시스템의 효율면상 큰 영향을 미치게 된다(Baird등, 1988). 따라서 Mitchell등(1972)은 대부분의 강제통풍식에서는 적정 정압하에서 양호한 냉각속도를 얻기 위해서는 폭 방향의 적재는 3~4ft(91.44~121.94cm)정도가 적당하다고 하였으며, 大久保(1991)는 Mitchell등(1972)의 결과를 인용하여 폭방향의 적재를 1상자 또는 3상자로 하여도 청과물의 단위중량당의 송풍량은 큰 차이가 없지만 정압강하는 큰 차이가 있어 비교적 통풍이 양호한 품목에서는 폭방향의 적재는 3상자정도가 좋다고 하였다. 그러나 이들 결과중 실제 차압예냉시스템에서 상자의 적재방법에 따라 정압강하를 측정하여 나타낸 예는 찾아볼 수 없었다.

또한, 청과물이 퇴적된 상자를 적재할 때 상자형상의 불균일, 청과물의 하중에 의한 부분적인 처짐 및 적재시의 부주의 등에 의해 발생하는 상자사이의 간극을 통해 다량의 냉기가 유출되어 전체 송풍량에서 차지하는 유효송풍량이 줄어들게 된다. 이와 관련하여 大久保(1991)는 상자사이의 간극을 통한 냉기의 유입을 고려하여 전체 송풍량을 상자의 통기공을 통해 상자내로 유입되는 유효공기량의 대략 1배정도를 고려해야 한다고 추정하였다.

따라서 본 연구의 목적은 차압예냉시스템의 설계 및 운영에 필요한 인자중 통기공 및 상자의 적재방법이 정압강하에 미치는 영향과, 용기사이의 간극의 영향 등을 살펴보는 데 있다.

2. 연구방법

가. 실험장치

실험장치로 3150×6700×2150mm(W×L×H, 21.1m³, 6.38평)규모의 차압예냉시스템을 제작하여 사용하였다. 차압예냉시스템은 크게 냉각시스템 및 차압발생시스템으로 구성되어 있으며 그림 1과 같다.

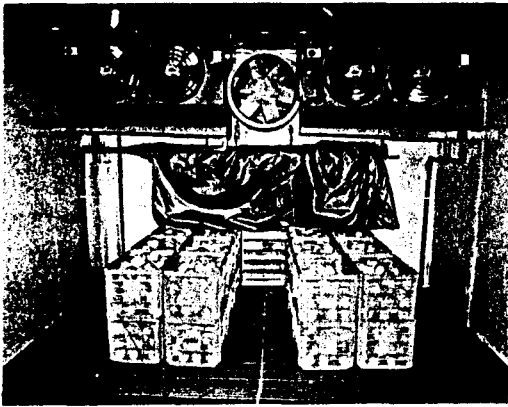


Fig. 1. View of the experimental pressure cooling system.

1) 냉각시스템 : 콘덴싱유니트 및 유니트쿨러로 구성되어 있으며, 압축기는 증발온도 및 고내온도차 10℃, 응축온도 54.4℃에서 냉각능력 15,000kcal/h인 10HP 반밀폐형(Copleland Co, USA)을 콘덴싱유니트형태로 제작하여 사용하였다. 또한 유니트쿨러는 전열면적 33.67m², 팬 및 모터 400φ×2EA×0.2kW×6p인 7,500kcal/h 용 2대(중원냉열)를 사용하였으며, 냉매는 R-22를 사용하였다.

2) 차압발생시스템 : 차압실, 차압팬 및 차압시트로 구성되어 있으며, 차압실의 크기는 3150×500×2150mm(W×L×H)로서 75mm 우레탄 폼 판넬로 제작하고, 1300×460mm(H×W) 크기의 흡기구를 부착하였다. 차압팬은 변속모터가 부착된 축류송풍기((주)삼원풍력, 송풍량 70CMM, 정압 50mmAq)를, 차압시트는 두께 0.3mm 방수코팅된 천막지를 사용하였다.

나. 실험방법

상자의 통기공에서의 결보기풍속별 정압강하는 개공율이 1~5%인 아크릴 수지판을 이용하여 김등(1995)이 사용한 정압강하 측정장치로 측정하였다. 이 때 통기공의 크기는 개공율이 1%가 되도록 직경 42mm으로 하였으며, 각각 1~5개를 뚫어 개공율이 1~5%가 되도록 하였다.

상자의 적재방법별 정압강하는 통기공을 뚫은 15kg용(495×345×255mm, L×W×H) 빈 사과상자를 적재하여 측정하였다. 통기공은 中馬 등의 결과와 국내 골판지상자의 현황등을 고려하여 약 3%정도가 되도록 하였으며, 기존 사과상자에 사과를 담을 때 내자 및 패드 등으로 3등분으로 나누어져 있는 점을 감안하여 그림 2와 같이 직경 28mm의 통기공을 장변 6개, 단변 3개를 뚫어 사용하였다. 이 때 상자사이에는 폴리프로필렌 접착 테이프로 밀봉하여 상자사이의 간극을 통한 영향을 없앴다.

상자사이의 간극의 영향은 사과중 찌가루를 그림 2의 사과상자에 담아 차압예냉실에 직렬적

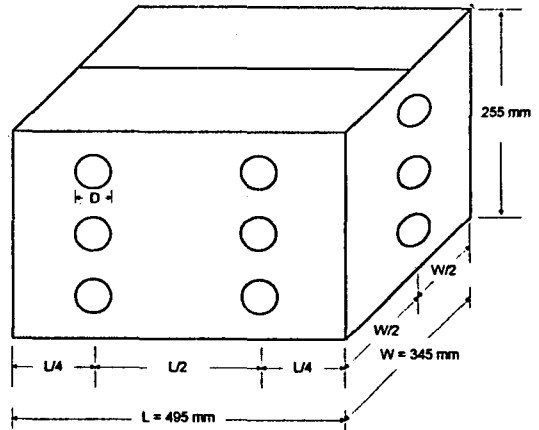


Fig. 2. Schematic diagram of carton box for pressure cooling.

재 2상자, 병렬적재 3상자, 높이적재 2상자를 흡기구를 중심으로 좌,우 2열로 총 24박스를 적재한 다음 차압팬에 부착된 변속모터의 회전수를 조절하면서 상자의 통기공을 통하여 유입되는

냉기속도와 흡기구를 통하여 유입되는 냉기속도를 측정하여 송풍량으로 환산하여 추정하였다. 이 때 측정에 사용한 기기는 김등(1995)이 사용한 기기와 동일하다.

3. 결과 및 고찰

가. 상자의 통기공에서의 정압강하

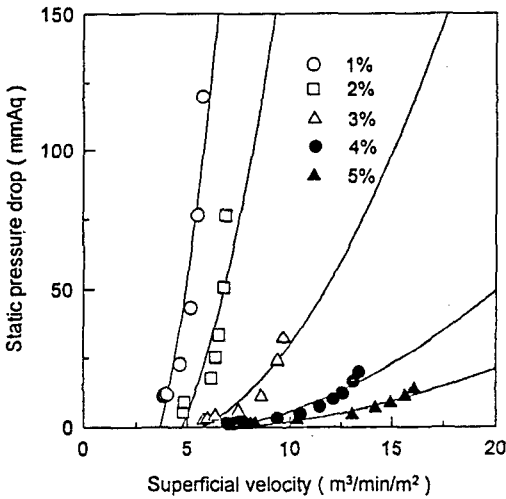


Fig. 3. Static pressure drop as a function of superficial velocity for different air vent hole ratio from 1% to 5%.

그림 3은 개공율 1~5%로 뚫은 아크릴판에서의 결보기속도(V_i , $m^3/min \cdot m^2$)별 정압강하(ΔP , mmAq)를 나타낸 것으로서, 정압강하는 개공율 1~2%에서는 대단히 높게 나타났으나 4~5%에서는 비교적 낮게 나타났다. 결보기속도별 정압강하는 다음과 같이 2차다항식으로 잘 나타낼 수 있었다.

$$\text{(개공율 1\%)} \quad \Delta P = 768.5315 - 263.4576V_i + 43.4128V_i^2 \quad (r^2 = 0.9953)$$

$$\text{(개공율 2\%)} \quad \Delta P = 1059.5263 - 392.4490V_i + 36.1158V_i^2 \quad (r^2 = 0.9559)$$

$$\text{(개공율 3\%)} \quad \Delta P = 157.268 - 47.3143V_i + 3.5612V_i^2 \quad (r^2 = 0.9883)$$

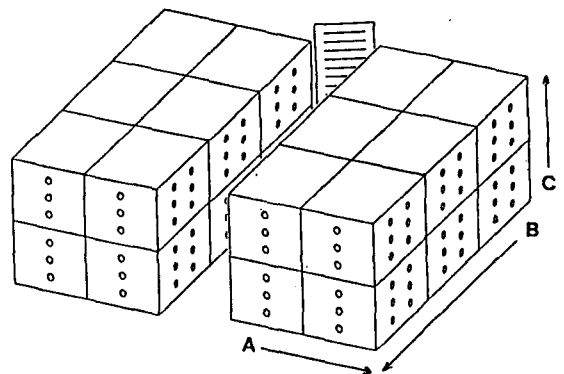
$$\text{(개공율 4\%)} \quad \Delta P = 63.7259 - 14.7407V_i + 0.8606V_i^2 \quad (r^2 = 0.9886)$$

$$\text{(개공율 5\%)} \quad \Delta P = 26.7941 - 5.4449V_i + 0.2868V_i^2 \quad (r^2 = 0.9938)$$

또한, PVC상자에서의 정압강하를 살펴보기 위하여 개공면적비가 약 11%에 달하는 아크릴수지로 제작된 다공판을 이용하여 동일한 방법으로 정압강하를 측정된 결과 정압강하가 발생하지 않았다. 따라서 현재 일반적으로 사용되고 있는 PVC상자(520×366×309mm, L×W×H)의 개공율이 전면 약 22.7%, 측면 약 18.1% 정도임을 감안한다면 PVC상자의 통기공에서 정압강하는 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 적재방법의 영향

중앙흡입형에서 편의상 그림 4와 같이 냉기의 흐름방향을 기준으로 냉기의 흐름방향과 동일방향의 적재를 직렬적재(series stacking), 냉기의 흐름방향과 병렬의 관계가 되는 적재를 병렬적재(parallel stacking), 높이축의 적재를 높이적재(height stacking)라고 규정한다면, 중앙흡기다트를 중심으로 한 좌,우 2열에서의 길이 방향의 적재는 병렬적재, 좌,우 2열에서 각각의 폭방향 적재는 직렬적재가 된다. 각 적재방법별 영향은 다음과 같다.



A. Series stacking B. Parallel stacking C. Height stacking

Fig. 4. Schematic diagram of stacking methods of boxes.

1) 직렬적재(series stacking)

차압실의 차압변화에 따른 직렬적재의 영향을 살펴보기 위하여 5상자를 직렬로 적재한 후 차압팬에 부착된 변속모터를 이용하여 차압실 차압을 변화시키면서 각 상자에서의 정압강하를 살펴본 결과 그림 5와 같이 각 상자에서의 정압

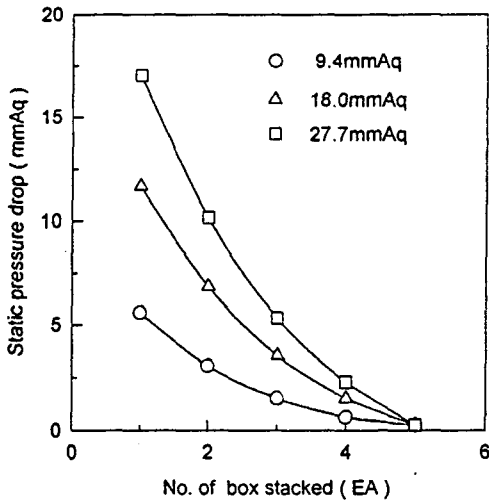


Fig. 5. Static pressure drop in each box in series stacking with 5 boxes for different plenum chamber pressures.

강하는 차압실 차압에 의해 좌우되었으며, 이 때 정압강하는 차압실 차압을 포함한 2차 다항식형태로 나타낼 수 있음을 알 수 있었다. 이는 병렬적재 및 높이적재에서 상자수가 증가함에 따라 정압강하가 1차 선형형태로 나타나는 것과는 다른 경향으로 실제 차압예냉실에 상자를 적재할 때 폭 방향으로 적재하는 상자수가 차압팬의 소요 정압에 미치는 영향이 가장 큼을 알 수 있다. 동일한 방법으로 상자수를 1개에서 5개까지 각각 적재하여 차압실 차압에 따른 정압강하를 살펴본 결과도 마찬가지로 2차 다항식형태로 나타났다.

먼저 1~5상자를 차례로 적재할 때 차압실의 차압(ΔP_{plenum} , mmAq)에 따른 각 상자에서의 정압강하중 중앙흡기덕트에 가장 바깥쪽 상자인 첫번째 상자에서의 정압강하(ΔP_{box1} , mmAq)는 그림 6과 같으며 다음 식으로 나타낼 수 있었다.

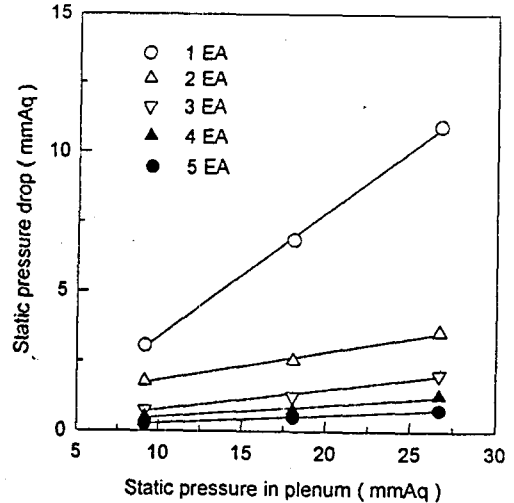


Fig. 6. Relationship between plenum pressure and static pressure drop in the first box for stacked in series for different number of boxes.

$$(1EA) \Delta P_{box1} = -1.1197 + 0.4492\Delta P_{plenum} \quad (r^2 = 0.9993)$$

$$(2EA) \Delta P_{box1} = 0.8051 + 0.1014\Delta P_{plenum} \quad (r^2 = 0.9918)$$

$$(3EA) \Delta P_{box1} = 0.0553 + 0.0724\Delta P_{plenum} \quad (r^2 = 0.9839)$$

$$(4EA) \Delta P_{box1} = 0.0676 + 0.0434\Delta P_{plenum} \quad (r^2 = 0.9611)$$

$$(5EA) \Delta P_{box1} = -0.0122 + 0.0290\Delta P_{plenum} \quad (r^2 = 0.9999)$$

그림 5 및 위의 식에서도 알 수 있듯이 5상자를 적재하였을 때 차압실의 차압변화에도 불구하고 첫번째 상자에서의 정압강하차는 거의 없었으나 적재된 상자수가 적어질수록 정압강하차는 크게 나타났다.

한편, 중앙흡기덕트에 가장 가까운 쪽의 상자에서의 정압강하(ΔP_{box1} , mmAq)와 차압실의 차압과의 관계는 다음식으로 나타낼 수 있었다.

$$(1EA) \Delta P_{plenum} - \Delta P_{box1} = 1.6022 + 0.5118 \Delta P_{plenum} \quad (r^2 = 0.9970)$$

$$(2EA) \Delta P_{plenum} - \Delta P_{box1} = -0.8737 + 0.5617 \Delta P_{plenum} \quad (r^2 = 0.9926)$$

$$(3EA) \Delta P_{plenum} - \Delta P_{box1} = -0.1290 + 0.4563$$

$$\Delta P_{plenum} (r^2 = 0.9417)$$

$$(4EA) \Delta P_{plenum} - \Delta P_{boxl} = -0.0798 + 0.4164$$

$$\Delta P_{plenum} (r^2 = 0.9834)$$

$$(5EA) \Delta P_{plenum} - \Delta P_{boxl} = 0.2845 + 0.3610$$

$$\Delta P_{plenum} (r^2 = 0.9908)$$

2) 높이적재(height stacking)

차압실을 중심으로 2열로 1상자씩을 적재한 다음 높이방향으로 4상자를 적재한후 차압실 차압을 변화시키면서 각 상자에서의 정압강하를 측정된 결과, 그림 7과 같이 각 상자에서의 정압강하는 상위 2번째 상자에서 다소 높게 나타났으나 각 상자간의 정압강하차는 그다지 크지 않았다. 또한 1~4상자를 서로 다른 차압실 차압하에서 적재한 다음 상자에서의 평균 정압강하 ($\Delta P_{box\ average}$, mmAq)와 중앙흡기덕트에서의 차압 (ΔP_{duct} , mmAq)의 관계는 다음과 같은 식으로 잘 나타낼 수 있었다.

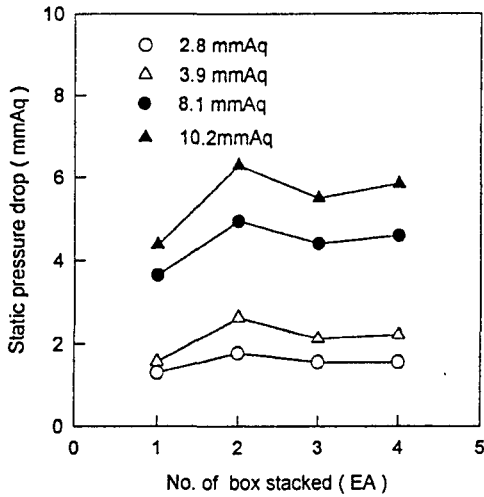


Fig. 7. Static pressure drop in each box in height stacking with 4 boxes for different plenum chamber pressures.

$$\Delta P_{duct} = -0.0895 + 0.81675 \Delta P_{box\ average} \\ (r^2 = 0.9999)$$

3) 병렬적재(parallel stacking)

차압실을 중심으로 좌,우 2열로 1~5상자를

차례로 적재하여 차압실의 차압을 조절하면서 각 상자에서의 정압강하, 중앙흡기덕트 및 차압실의 차압 변화를 측정된 결과 각 경우에서 각

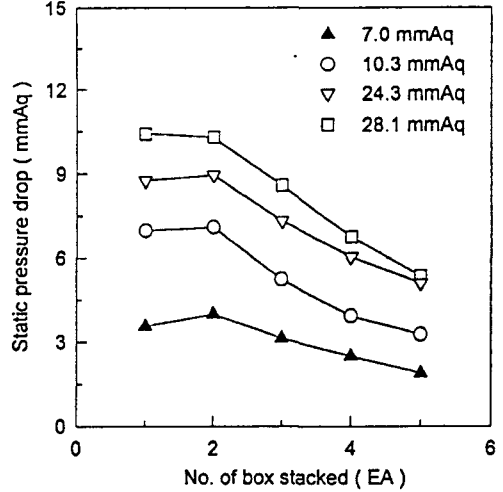


Fig. 8. Static pressure drop in each box in parallel stacking with 5 boxes for different plenum chamber pressures.

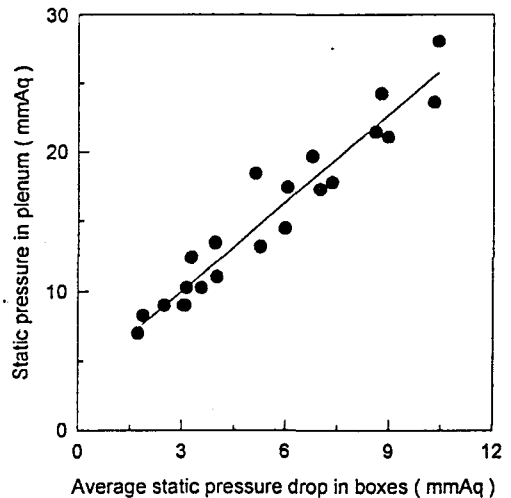


Fig. 9. Relationship between average static pressure drop in boxes and static pressure of plenum chamber in parallel stacking.

각의 상자내에서 압력강하 차이는 거의 없었으나, 그림 8과 같이 상자수가 증가함에 따라 각 상자내의 평균정압강하는 거의 1차 선형형태로

감소하였다. 상자수의 증가에 따른 중앙흡기덕트 및 차압실의 차압변화를 살펴보기 위하여 먼저 서로 다른 차압실의 차압하에서 1~5상자를 적재하고 각 상자에서의 평균정압강하와 이 때의 차압실 차압의 변화를 살펴본 결과 그림 9와 같았으며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있었다.

$$\Delta P_{plenum} = 3.6712 + 2.1214 \Delta P_{box\ average}$$

$$(r^2 = 0.9270)$$

동일한 방법으로 각 상자에서의 평균 압력강하와 중앙흡기덕트에서의 정압강하, 덕트 및 차압실 차압과의 관계도 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있었다.

$$\Delta P_{duct} = 0.4417 + 1.9180 \Delta P_{box\ average} (r^2 = 0.9559)$$

$$\Delta P_{plenum} = 3.7826 + 0.9648 \Delta P_{duct} (r^2 = 0.9461)$$

다. 상자간 간극의 영향

차압실 차압을 10mmAq, 20mmAq로 유지시킨 후 각 상자의 통기공을 통하여 유입되는 냉기의 속도와 차압실 흡기구를 통하여 유입되는 냉기의 속도를 측정된 결과 표 1과 같았다. 차압실 차압이 10mmAq일 때 통기공을 통하여 상자내로 유입되는 총 송풍량은 425.35m³/h인 반면

Table 1. Effect of the clearance between boxes on air flow rate for a different plenum pressures

Items	Plenum pressure	
	10mmAq	20mmAq
Average air velocity in air vent holes(m/s)	2.67	3.22
Average air flow rate per box (ℓ/min/box)	590.76	714.41
Total air flow rates through air vent holes Q ₁ (m ³ /h)	425.35	514.38
Total air flow rates through suction wicket Q ₂ (m ³ /h)	964.62	1361.02
Ratio Q ₂ /Q ₁	2.27	2.65

흡기구로 유입되는 총 송풍량은 964.62m³/h로서 약 2.27배에 달하였고, 20mmAq의 경우 통기공을 통하여 유입되는 총 송풍량은 514.38m³/h인 반면 흡기구로 유입되는 총 송풍량은 1361.02m³/h로서 약 2.65배에 달하였다. 이는 차압실차압이 동일할 경우 중앙흡기덕트에 가까운 상자에서의 정압차가 바깥쪽 상자에서의 정압차보다는 크다는 점을 감안할 때 大久保(1982)가 추정한 약 2배와 비슷한 경향을 나타낼 것으로 예상된다.

4. 결론 및 요약

차압에냉시스템에서 상자의 통기공 및 상자의 적재방법이 정압강하에 미치는 영향과, 상자사이의 간극의 영향을 살펴보았으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 골판지상자의 경우 개공율 1~5% 범위에서 정압강하는 결보기속도에 따라 2차다항식으로 잘 나타낼 수 있었으며, 개공율이 10% 이상인 경우는 정압강하를 무시할 수 있었다.

나. 차압에냉실에 상자를 직렬, 병렬 및 높이로 각각 적재하여 정압강하를 측정된 결과, 상자수에 따라 직렬적재의 경우는 정압강하가 2차다항식으로 나타난 반면 높이 및 병렬적재는 1차 선형형태로 나타나 상자수의 증가에 따른 정압강하폭이 직렬적재시 가장 큼을 알 수 있었다.

다. 상자간 간극을 통한 공기의 유입은 차압실의 차압이 10mmAq 및 20mmAq일 때 상자의 통기공을 통하여 유입되는 공기의 유입량의 약 1.27배 및 1.65배로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김의웅, 김병삼, 남궁배, 정진웅, 김동철, 금동혁. 1995. 청과물 퇴적층에서의 공기유동 정압강하. 한국농업기계학회지 투고중
2. 大久保増太朗. 1991. 野菜の鮮度保持, P90, 養賢堂. 東京.
3. 大久保増太朗. 1984. 青果物の豫冷の現状と

- 問題點, 冷凍 59(677) : 195-203.
4. 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発, 冷凍 57(662) : 1191-1197.
 5. 全農施設の資材部. 1982. 青果物豫冷施設のてびき, P65, 東京.
 6. Baird,C.D.,J.J. Gaffney,and M.T.Talbot. 1988. Design criteria for efficient and cost effective forced air cooling systems for fruits and vegetables. ASHRAE transactions, 94(1) : 1434-1454.
 7. Brooker,D.B., F.W.Bakker-Arkema, and C.W. Hall. 1973. Drying cereal grains. P88, AVI Pub. Co.,Inc.
 8. 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.
 9. Mitchell,F.G., R.Guillou and R.A.Parsons. 1972. Commercial cooling of fruits and vegetables. Manual 43, Division of Agricultural Sciences of University of California : 1-44.
 10. Parson,R.A., F.G.Mitchell, and G.Mayer. 1972. Forced-air cooling of palletized fresh fruit. Transactions of ASAE, 15(4) : 729-731.