



연세대학교
YONSEI UNIVERSITY

Comprehensive investigation of corrugated fiberboard boxes with edge vents for ambient loading of Chinese cabbage: Part I - computational fluid dynamics simulation and experimental validation

Journal information: Computers and Electronics in Agriculture (SCI(E); IF : 7.7)

연세대학교 패키징학과 김민휘(일반대학원 석박사통학과정)

1. 논문 키워드

- Computational fluid dynamics; Package design; Compression strength; Cold-chain strategy; Chinese cabbage

2. 하이라이트와 초록

- 전산 유체 역학(CFD)을 활용한 수출용 배추 골판지 상자의 통기구 설계

3. 실험 재료 및 방법

- CFD 시뮬레이션을 활용한 통기구를 통과하는 저온 기류 관찰, 골판지 상자의 기계적 강도와 실증 실험

4. 실험 결과 및 고찰

- CFD 시뮬레이션과 실증 실험의 비교 분석

4. 결론

- 연구 결론과 향후 계획, 참고문헌



- **Computational fluid dynamics** : 전산 유체 역학은 컴퓨터를 사용하여 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식을 기반으로 액체 및 기체 흐름을 예측하는 과학(시뮬레이션)임
- **Package design** : 농산물은 부피, 판매 단위, 수확후 품질변화, 수출 국가의 검역 시스템 등의 요소들이 종합적으로 고려된 수출용 농산물 골판지 상자의 설계를 제안함
- **Compression strength** : 농산물이 적재된 골판지 상자 적재물이 수출 국가까지 안정적으로 최종 소비될 수 있도록 유통 조건을 견딜 수 있는 골판지 상자의 압축 강도를 제안함
- **Cold-chain strategy** : 농산물 수출을 위한 저온 유통 전략 효과를 높이기 위해 통기구를 설계하고, 전산 유체 역학 시뮬레이션과 실증 실험을 수행함
- **Chinese cabbage** : 수분 함량이 90 % 이상인 배추는 저온 유통 전략을 통한 농산물 수출 안정성을 실험하기에 적합한 작물임

- 통기구 설계가 적용된 골판지 상자는 배추의 중심 온도를 감소시킴
- 통기구 설계가 적용된 골판지 상자의 상자 압축 강도는 통기구 면적이 커질 수록 저하됨
- 통기구 설계가 적용된 골판지 상자의 통기 효율성은 CFD 시뮬레이션과 실증 실험 결과 모두에서 대조군 대비 보완됨

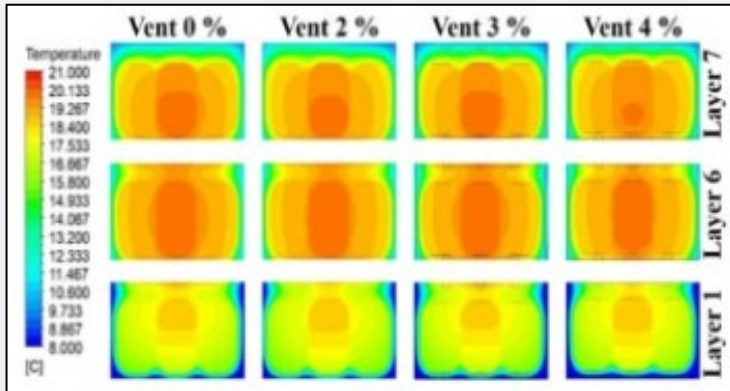


그림 1. 골판지 상자 내 배추의 중심 온도 변화

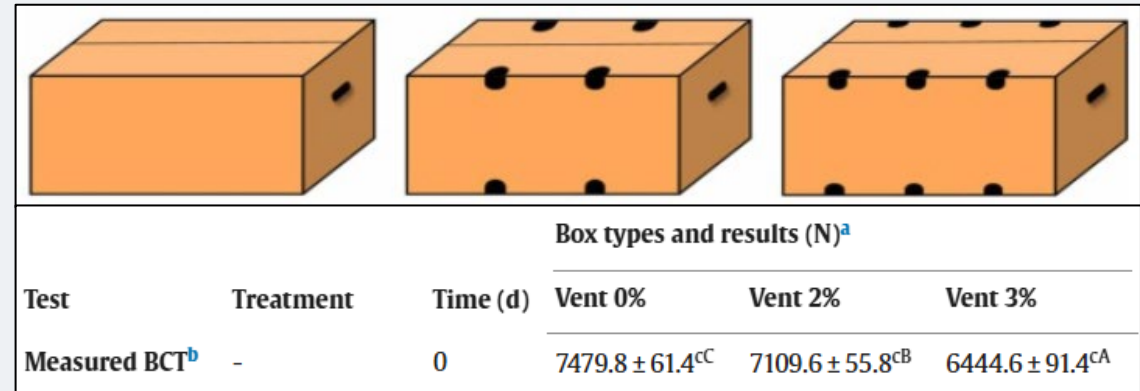


그림 2. 골판지 상자의 통기구 설계 이미지와 상자 압축 강도

- 예냉을 거치지 않고 수확후 농산물을 곧바로 유통하는 ambient (warm) loading*은 여전히 널리 통용되고있음
- 골판지 상자에 적절한 통기구를 설계하는 것은 ambient loading으로 저장 및 유통되는 농산물의 온도를 낮추는 역할을 수행할 수 있음
- 실험에 사용된 농산물은 배추이고, 골판지 상자의 통기구 설계 방식은 edge-vent이며, 국제 해상 컨테이너를 기준으로 실험 조건을 설계함
- 컨테이너 내부의 저온 기류는 아래에서 위로 흐르므로, 통기구 면적은 상자의 바닥 면적 대비 0, 2, 3, 4 %로 설계함
- 각 면적으로 설계된 골판지 상자의 상자 압축 강도는 ASTM과 TAPPI의 실험 방법에 따라 시험함
- 총 7 상자로 적재된 적재물 속 배추의 중심 온도는 CFD 시뮬레이션과 실증 실험을 통해 관찰하여 비교 분석함
- CFD 시뮬레이션과 실증 실험 모두에서 하단의 상자 속 배추의 중심 온도가 먼저 떨어지고, 최상단보다 중심부가 더 늦게 떨어짐
- 그러나 통기구 면적에 따라 배추의 중심 온도를 낮추는 효과성은 실증 실험에서만 관찰되었고, CFD 시뮬레이션에서는 구현되지 않았음
- 골판지 상자의 상자 압축 강도는 통기구 면적이 증가함에 따라 감소되었으며, 통기구 면적이 4 %로 설계된 상자는 0 % 대비 약 20 % 정도의 상자 압축 강도가 감소함

*Ambient (warm) loading: 수확후 농산물을 예냉하지 않고 곧바로 유통하는 것을 뜻하며, 이 때문에 warm loading이라고도 부름

- 국제 해상 컨테이너(reefer)에서는 내부에서 생성된 저온 기류가 바닥의 T-bar를 따라 흐르고, 바닥의 저온 기류가 상승하며 천장을 따라 순환함
- Ambient loading 조건을 기준으로 실험하기 위해, 초기의 배추 중심 온도는 약 21도로 설정함
- CFD 시뮬레이션에서 수직으로 상승하는 저온 기류 온도와 속도는 각각 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 $0.02 - 0.06\text{ L s}^{-1}\text{ kg}^{-1}$ 로 설정함
- 저온 저장고의 온도는 $1.0 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고, 배추의 중심 온도는 열전대로 측정하여 관찰함

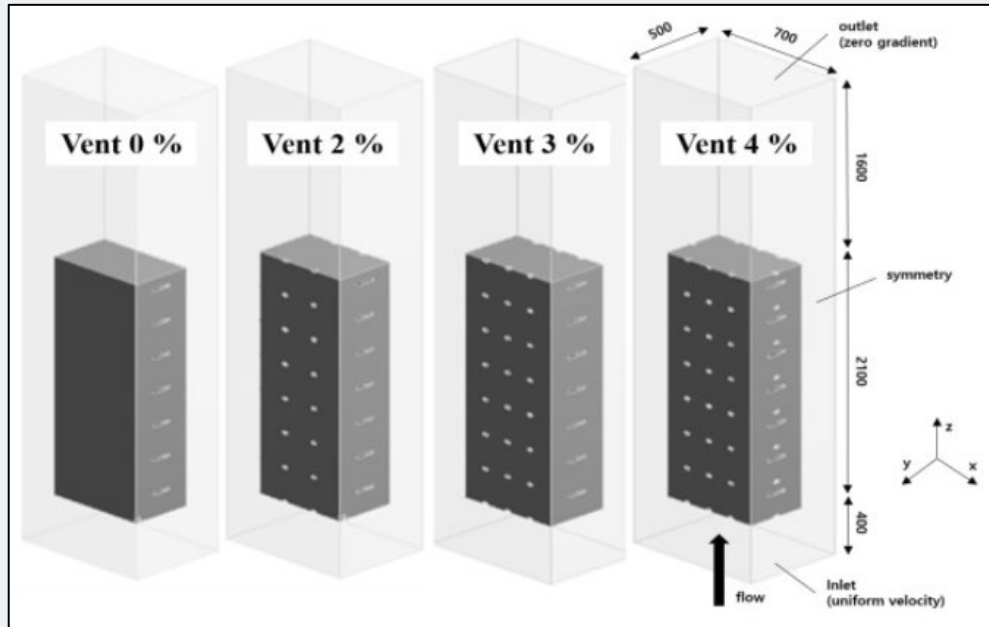


그림 3. CFD 시뮬레이션을 위한 기하학 형상 및 경계 조건

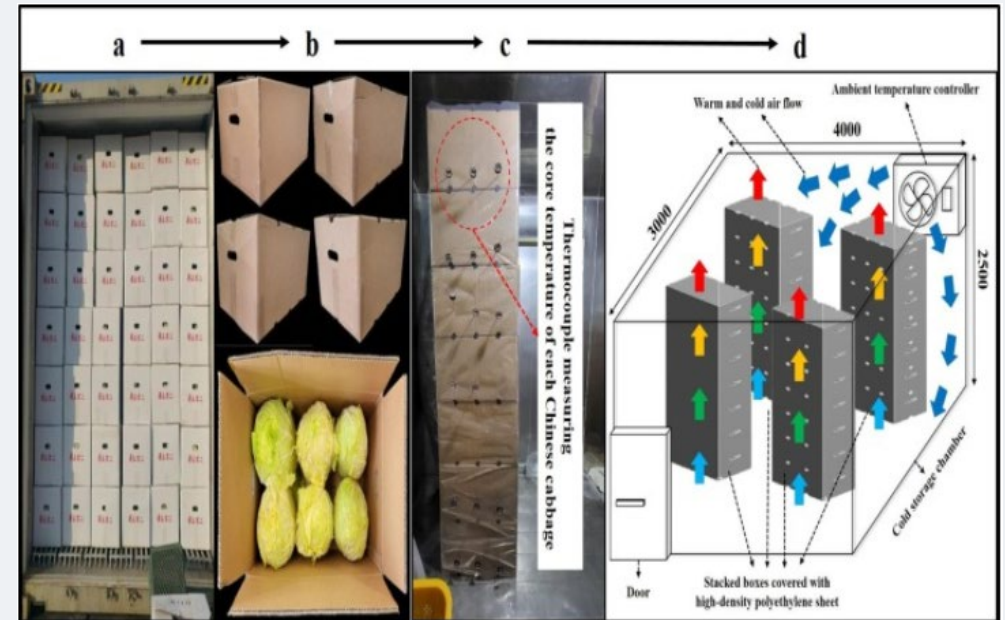


그림 4. 실증 실험 조건 (단위: mm): (a) 실제 수출되는 배추 상자; (b) 실험에 사용된 상자와 배추 이미지; (c) 저장고에 저장된 적재물 이미지; (d) 실험 도식화

- 골판지 상자 샘플의 바깥 치수는 500 mm x 300 mm x 300 mm, 이중 양면 골판지(AB골)의 원지 구성은 SK180/K200/SK180/K200/SK180임.
- ASTM D4332에 따라 샘플 전처리를 하고, ASTM D642와 TAPPI T 804 시험규격에 따라 실험함
- 골판지 상자 압축 강도 시험은 3000 kgf 로드 셀을 장착한 시험 장비로 골판지 상자 샘플을 $12.7 \pm 2.5 \text{ mm min}^{-1}$ 속도로 압축하여 측정함
- 각 샘플을 10회 반복하여 얻은 측정값은 통계 분석을 통해 유의성 검사를 실시함



그림 5. 골판지 상자 압축 강도 시험 도식화

- CFD 시뮬레이션과 실증 실험 모두에서 가장 하단인 1단의 상자 속 배추의 중심 온도가 가장 먼저 떨어지고, 이후 순서대로 2~6단의 상자 속 배추의 중심 온도가 떨어짐
- 그러나 가장 상단인 7단의 상자 속 배추의 중심 온도는 중심부인 2~6단보다 더 빠르게 떨어지는데, 이는 상자 상단의 표면적 노출이 더 크기 때문에 열을 더 먼저 손실한 것으로 보임

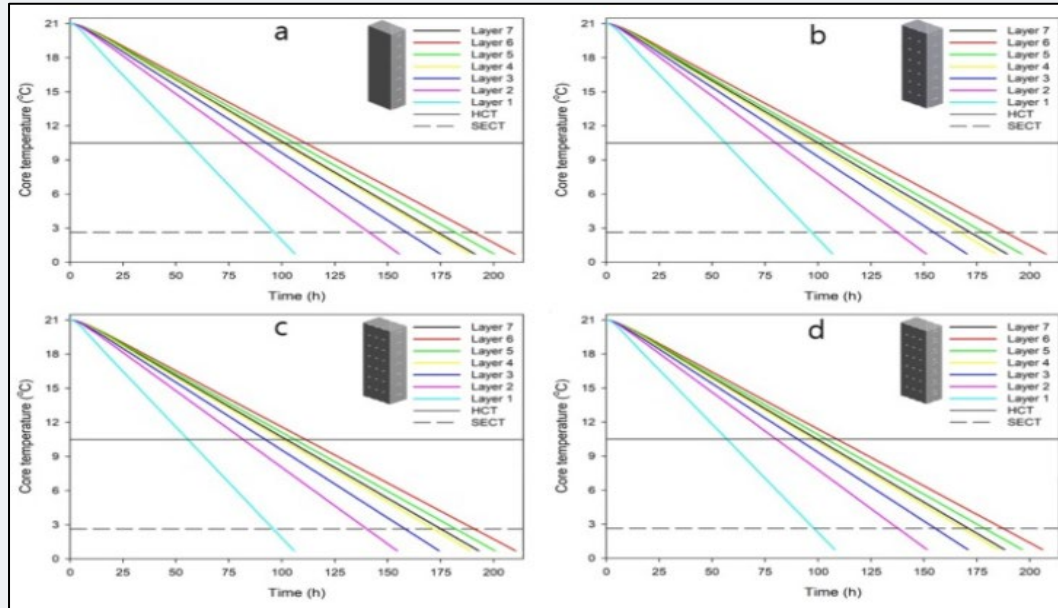


그림 9. CFD 시뮬레이션의 저온 기류와 실험 4시간과 16시간의 온도 이미지

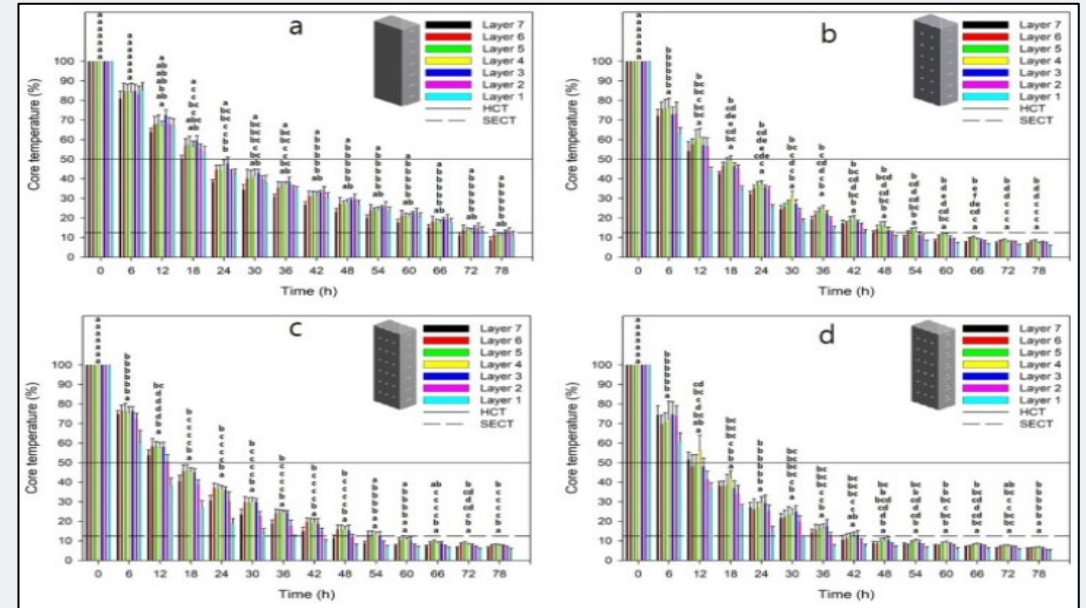


그림 10. CFD 시뮬레이션의 저온 기류와 실험 4시간과 16시간의 온도 이미지

- 가장 상단인 7단의 상자 속 배추의 중심 온도는 중심부인 2~6단보다 더 빠르게 떨어진 이유로 상자 상단의 표면적 노출이 더 크기 때문에 열을 더 먼저 손실한 것을 추측함
- 이는 CFD 시뮬레이션의 저온 기류 이미지에서 확인됨
- 최상단 상자의 상단면에 저온 기류가 빠져나오는 과정에서 중심부의 2~6단 상자들보다 더 많은 난류에 노출됨

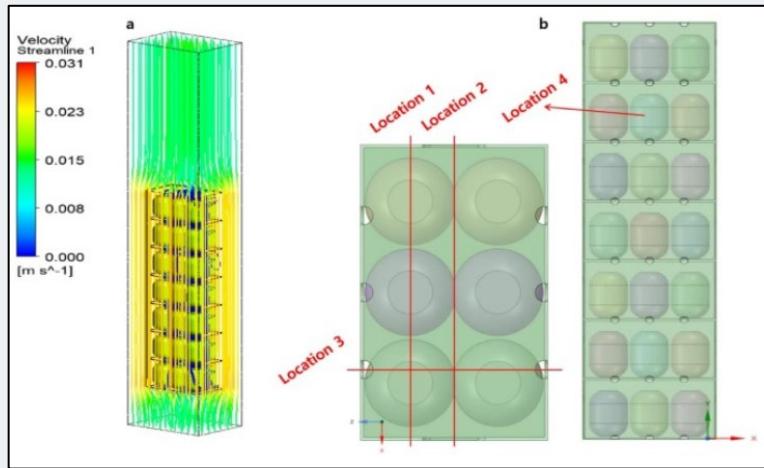


그림 6. CFD 시뮬레이션의 저온 기류 이미지와 관찰 지점

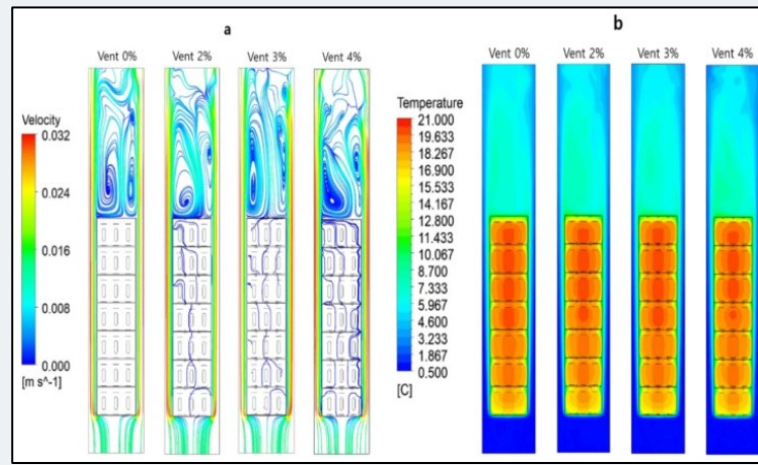


그림 7. 실험 16시간의 CFD 시뮬레이션의 저온 기류와 온도 변화 이미지

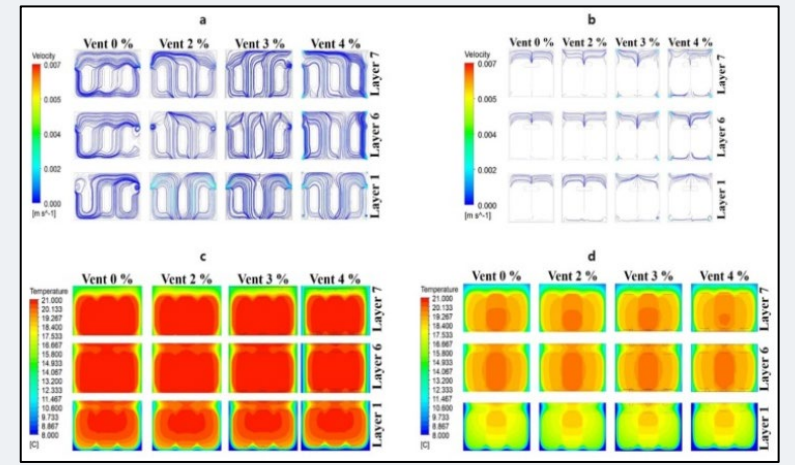


그림 8. CFD 시뮬레이션의 저온 기류와 실험 4시간과 16시간의 온도 이미지

- 실증 실험에서는 통기구 면적이 증가함에 따라 배추의 중심 온도를 낮추는 효과성이 증가함이 관찰됨
- 대조군인 0 % 통기구의 상자보다 2, 3 % 통기구의 상자가 더 나은 효과성을 보였지만, 2와 3 % 통기구 간의 차이는 유의적이지 않았음
- 그러나 ambient loading 방식으로 컨테이너에 적재될 경우, 저온 기류가 (대류와 같이) 너무 약하기 때문에 CFD 시뮬레이션에서 통기구 면적에 따른 효과성 분석이 불분명하게 나타남
- 골판지 상자의 압축 강도는 통기구 면적이 증가함에 따라 유의적으로 감소하였음

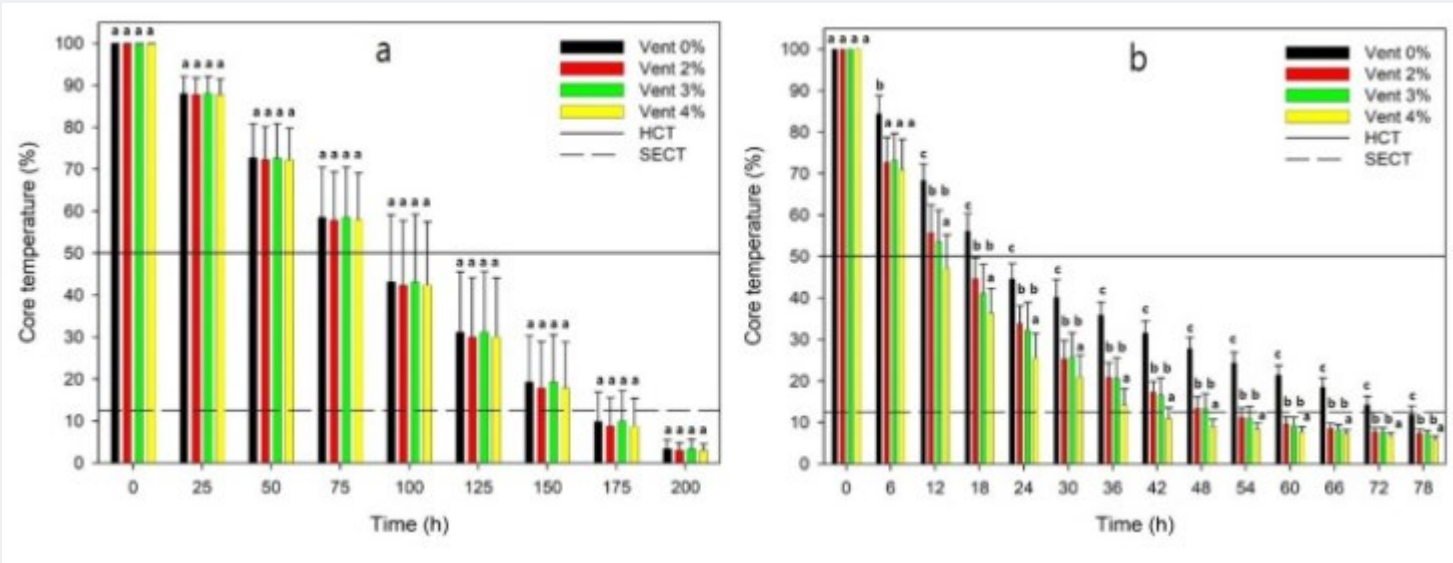


그림 9. 골판지 상자의 통기구 설계 면적에 따른 배추의 중심 온도 감소 효과성: (a) CFD 시뮬레이션; (b) 실증 실험

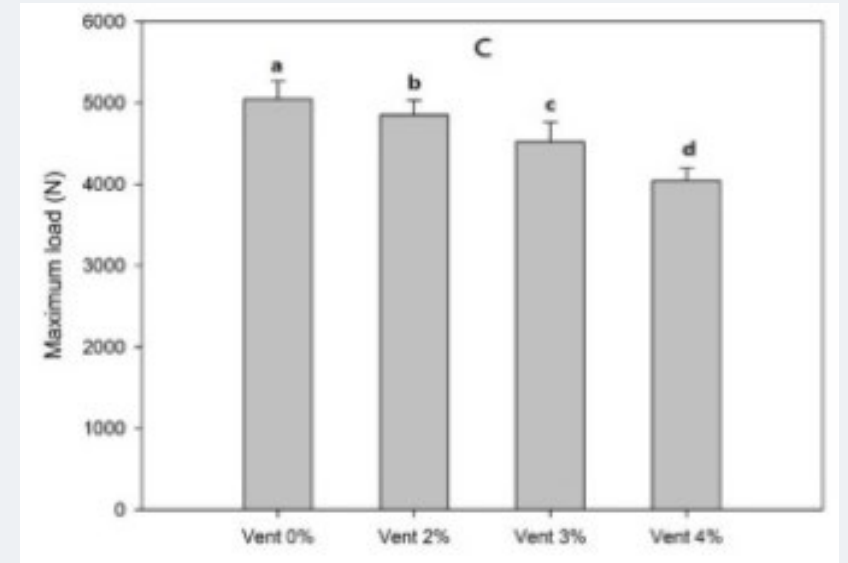


그림 10. 통기구 설계 면적에 따른 골판지 상자 압축 강도 변화

- 본 연구에서는 실증 실험을 통해 통기구 면적 4 %의 골판지 상자가 최고의 냉각 효율을 보임
- CFD 시뮬레이션을 통해서도 1단에 적재된 골판지 상자의 냉각 효율이 가장 빠르고, 적재된 순서대로 그 다음으로 빠른 냉각 효율을 보임
- 그러나 최상단인 7단에 적재된 골판지 상자의 냉각 효율은 중심부인 2~6단보다 빨랐는데, 이는 7단의 상자 상단 표면이 난류에 더 많이 노출되었기 때문임
- 기존의 수출용 배추는 밀폐된 골판지 상자에 유통되었기 때문에 품질이 쉽게 손상되었고, 때로는 골판지 상자의 강도를 저하시키기도 함
- 이러한 ambient loading 방식의 유통은 배추 뿐만 아니라, 국제적으로 남아프리카와 같은 국가에서 대량의 오렌지, 레몬, 포도 등의 작물에도 적용됨
- 이때 리퍼 컨테이너 내부의 저온 기류는 대류와 같이 아래서 위로 상승하며 순환하므로, edge-vent 통기구가 설계된 골판지 상자를 사용함이 적합함
- 향후 Part II 연구에서는 실험에서 사용된 설계의 골판지 상자가 실제 조건과 유사한 환경 조건과 기간에 노출되었을 때의 기계적 강도 변화와 그에 따른 배추의 품질 변화를 관찰할 것임

- Kim, M., Boonsiriwit, A., Lee, M., Kang, H. M., & Lee, Y. S. (2023). Comprehensive investigation of corrugated fiberboard boxes with edge vents for ambient loading of Chinese cabbage: Part II–Quality changes in cellulose paper-and LLDPE film-wrapped Chinese cabbage stored in ventilated corrugated fiberboard boxes. *Postharvest Biology and Technology*, 200, 112338.
- Kim, M., Kim, J. T., Kim, M. S., Boonsiriwit, A., Lee, M., Lee, E., ... & Lee, Y. S. (2023). Comprehensive investigation of corrugated fiberboard boxes with edge vents for ambient loading of chinese cabbage: Part I-Computational fluid dynamics simulation and experimental validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 215, 108376.

- 늘 연구 지도에 힘 써주시는 이윤석 교수님께 감사합니다.
- 연구실에서 동고동락하며 지낸 이명호, Athip Boonsiriwit 동료들에게도 감사합니다.
- 논문 검토에 조언을 주신 강원대 강호민 교수님과 미시간주립대 이의학 교수님께도 감사합니다.
- 끝으로 CFD 시뮬레이션 연구에 큰 도움을 주신 김지태 박사님과 김민석 박사님께도 감사합니다.

감사합니다!

