

스마트냉동컨테이너의 적재부 온도 편차 최적화에 관한 연구⁺

(A Study on the Optimization of Temperature Deviation of Loads in Smart Reefer Container)

박 상 원¹⁾, 김 태 훈²⁾, 박 도 명³⁾, 한 동 섭^{4)*}

(SangWon Park, TaeHoon Kim, DoMyung Park, and DongSeop Han)

요 약 냉동컨테이너는 외부 환경에 의해 냉동기가 있는 적재부의 전면과 컨테이너 문이 있는 적재부의 후면부 사이에 온도 편차가 발생한다. 특히, 신선화물 운송에서 이러한 온도 편차는 화물의 신선도에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 온도 편차를 줄이기 위해 T-Floor를 부분적으로 차폐하고, T-Floor 차폐율이 냉동컨테이너 적재부 온도 변화에 미치는 영향을 평가하여 온도 편차를 최소화하는 방법을 제안한다. 실험 대상은 40 feet 스마트 냉동컨테이너로 T-Floor 차폐율은 0%, 50%, 60%, 70%, 80%로 설계 변수를 설정하였다. 실험 결과, 차폐율에 따라 냉동컨테이너 적재부의 온도 편차가 다르게 발생하였으며, 차폐율 60%인 경우 온도 편차가 가장 균일한 것을 확인했다. 이러한 적재부 온도 편차 최소화를 통해 스마트 냉동컨테이너를 이용하여 신선 화물의 운송 시 화물의 부패 및 냉해를 예방할 수 있다.

핵심주제어: 냉동컨테이너, T-Floor, 온도 편차, 차폐율, 신선화물

Abstract In a reefer container, temperature deviation occurs between the front of the loading part with the refrigerator and the rear of the loading part with the container door due to the external environment. In particular, this temperature deviation in the transport of fresh cargo has a great influence on the freshness of the cargo. In this study, we propose a method to minimize the temperature deviation by partially shielding the T-Floor to reduce the temperature deviation and evaluating the effect of the T-Floor shielding rate on the temperature change of the reefer container loading part. The subject of the experiment was a 40 feet smart reefer container, and the T-Floor shielding rates were set to 0%, 50%, 60%, 70%, and 80%. As a result of the experiment, it occurred differently in the temperature deviation of the reefer container loading part according to the shielding rate, and it was confirmed that the temperature deviation was the most uniform when the shielding rate was 60%. By minimizing the temperature deviation of the loading part, it is possible to prevent corruption and cold damage of cargo during transportation of fresh cargo by using the smart reefer container.

Keywords: Reefer Container, T-Floor, Temperature Deviation, Shielding, Freshness Cargo

* Corresponding Author: dshan1@dau.ac.kr

+ 이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20210154, 스마트컨테이너 실용화 기술개발 사업)

Manuscript received December 04, 2023 / revised

December 14, 2023 / accepted December 18, 2023

1) 동아대학교 스마트물류연구센터, 제1저자
2) 동아대학교 스마트물류연구센터, 제2저자
3) 동아대학교 스마트물류연구센터, 제3저자
4) 동아대학교 산업공학과, 교신저자

1. 서론

냉동컨테이너는 냉동기와 적재부로 구성되는데, 냉동기는 화물의 상태를 유지하지 위해 적재부에 냉기 또는 온기를 일정하게 공급하는 장치이며, 적재부는 화물이 적재되는 공간이다.

냉동컨테이너에 적재되는 화물의 부패, 냉해 등의 파손을 예방하기 위해 사용자가 설정한 온도로 냉기 또는 온기를 공급하여 적재부의 온도를 일정하게 유지한다. 하지만 냉동컨테이너에 화물을 올바르게 적재하지 않으면 적재부로 공급되는 공기가 정체되어 적절히 순환되지 않는 현상이 발생한다. 또한, 기온이 높은 지역을 통과할 때는 외부 온도의 영향으로 인해 적재부의 온도차가 크게 발생할 수 있다.

선행연구에 의하면 해상운송 중 여름철 적도를 이동할 경우 냉동컨테이너의 적재부 평균 온도는 3°C의 온도차가 발생한다.(Moon et al., 2017). 냉동컨테이너로 운송되는 화물 중 육류, 수산물, 과일, 채소와 같은 신선화물은 온도나 습도 등에 민감하여 부패하기 쉽다. 따라서 화물의 손상을 방지하기 위한 적절한 관리가 필요하다(Lee et al., 2022; Choi and Park, 2016).

해운물류 분야에서는 육상운송, 터미널, 선박 등 다양한 환경에서 운송되며, 이로 인해 일시적인 전원 차단과 같은 상황이 발생하게 된다. 이때, 컨테이너 적재부의 온도가 컨테이너 외부에 온도의 영향을 받아 급격히 변동된다. 따라서, 전원 공급이 재개되는 경우 적재부의 온도를 사용자가 설정한 온도로 빠르게 유지하고 온도 편차를 최소화하는 기술이 필요하다(Han 2010; Choi et al., 2014). 컨테이너 적재부의 온도차가 발생하는 원인은 크게 두 가지로 구분할 수 있다.

첫 번째 원인은 냉동컨테이너 문의 구조적인 문제로 인해 완전한 밀폐가 불가능하여 냉동컨테이너 외부의 열이 유입되기 때문이다.

두 번째 원인은 Fig 1과 같이 냉기를 전달하는 T-Floor의 상부가 개방되어 있어 T-Floor를 따라 후방으로 냉기가 충분히 전달되지 않기 때문이다. 컨테이너 적재부에 냉기가 효과적으로 순환할 수 있도록 컨테이너 벽에 약간의 요철을

두어 난류를 발생시키는 방법을 적용하였으나, 컨테이너 전면부와 후면부 도어의 온도차를 줄이는 데는 한계가 있다.



Fig. 1 T-Floor of Reefer Container

본 연구에서는 T-Floor의 선택적인 차폐를 통해 냉동컨테이너 적재부의 온도가 설정온도에 빠르게 도달하고 이를 유지하기 위한 방법을 연구하였다. T-Floor의 차폐율이 냉동컨테이너 적재부 온도 변화에 미치는 영향을 분석하고 가장 적절한 차폐율을 도출하기 위해 T-Floor를 차폐하지 않은 경우(0% shield)와 T-Floor의 모든 짝수 라인을 50%부터 80%까지 10% 단위로 차폐했을 때의 설정온도 도달 시점과 적재부의 온도 편차를 분석하였다.

2. 선행연구

냉동컨테이너의 온도 편차 분석에 대한 선행연구 검토 결과는 다음과 같다.

Lee et al.(2022)은 냉동컨테이너를 사용하여 운송되는 냉장 및 냉동 화물은 다양한 환경 조건 및 해양 요인의 영향으로 인한 냉동컨테이너에 고장이 발생하여 화물의 손상이 발생할 수 있음을 확인하였다.

Getahun et al.(2017)은 냉동컨테이너에 화물이 적재된 환경에서 냉장 운송 중인 온도 데이터를 사용하여 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 모델을 통해 냉동컨테이너 적재부 냉각 영역에 대한 온도 변화를 검증하였다.

Lukasse et al.(2016)은 적재부의 온도 분포를 최적화하기 위해 T-Floor에 덮개를 설계하고 실험을 진행하였다. 결과적으로 구멍이 없는 사

다리꼴 형태의 T-Floor 커버로 화물 공간에서 가장 따뜻한 위치와 가장 차가운 위치간의 온도 차를 약 50% 감소시키며, 전원이 꺼진 후에도 일정시간 온도가 유지됨을 확인하였다.

Getahun et al.(2018)은 냉동컨테이너의 T-Floor 바닥과 평면 바닥 두 가지 유형의 컨테이너에서 유체역학 모델을 사용하여 컨테이너 디자인과 운영 조건이 공기 유동 패턴과 분포에 미치는 영향을 연구하였다. 분석 결과 평면 바닥 형태에 비해 T-Floor 형태의 컨테이너가 공기순환 영역의 속도가 높음을 확인하였다.

Lukasse et al.(2019)은 해상 운송 실험을 통해 T-Floor에 덮개를 설치하여 화물 적재부의 온도 차이를 확인하였다. 실험 결과로 냉각된 화물 출하 시 온도가 가장 높은 화물과 가장 낮은 화물의 온도 변화를 약 30% 감소시키는 것으로 확인하였다.

Kan et al.(2021)은 냉동기의 고장이 냉장, 냉동 화물에 미치는 영향을 분석하고 화물의 온도 상승 경향을 파악하기 위해 화물 내부의 온도 모니터링 실험을 진행하였다. 연구 결과 냉동컨테이너 배출구로부터 외부 공기가 진입하여 가까운 화물의 온도가 외부 공기의 더 높은 열 전달로 인해 상대적으로 온도가 빨리 상승한다는 것을 확인하였다.

Suheriyanto and Budiyanoto (2021)는 CFD 시뮬레이션을 이용하여 T-Floor의 냉동 바닥재의 세부 구조 변수와 나무 팔레트의 공기 유동 저항이 에너지 소비에 미치는 영향을 확인하였다. 지금까지 발표된 선행연구에서는 냉동컨테이너의 T-Floor를 차폐했을 경우 적재부의 온도 차이를 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 실제 실험을 통해 T-Floor를 부분적으로 차폐했을 경우의 T-Floor의 차폐율에 대한 온도 편차를 검증하였다.

3. 실험 조건 및 방법

스마트 냉동컨테이너는 기존 냉동컨테이너에 4차 산업혁명 기술(빅데이터, 사물인터넷, 인공지능 등)을 접목하여 화물의 안전 수송을 도모

함은 물론, 언제 어디서나 화물의 상태정보를 관리하고 제어할 수 있는 장치이다(Lee et al., 2023). 40 feet 스마트 냉동컨테이너를 대상으로 초기 온도는 17.5°C, 설정 온도는 5°C로 하여 실험을 진행하였다. 냉동컨테이너 외부의 온도는 17~21°C이며, 온도 측정에는 Fig. 2과 같이 T-Floor에 온도 기록을 위해 온습도 로거 5개(#1~#5), 2m 높이의 온습도 로거 5개(#6~#10)를 각각 3미터 간격으로 설치하였다. T-Floor의 차폐율은 T-Floor가 차단되지 않은 경우(0%)를 기준으로 50, 60, 70 그리고 80%까지 차폐(shielding)하여 총 5개 설계 변수를 설정하였다. 또한, 차폐 시 짝수 열의 T-Floor만을 차단하여 냉동기가 있는 전면부와 컨테이너 문이 있는 후면부에 T-Floor에서 공급되는 공기가 골고루 전달되도록 하였다.



Fig. 2 Thermometer attachment location and freezer set temperature

4. 실험 결과

Table 1은 차폐율에 따라 온도가 일정한 값으로 수렴한 후의 결과를 정리한 것이며, Figs. 3~7은 T-Floor를 덮지 않은 조건(0%)과 50%에서 80%까지 10% 간격으로 5가지 실험 조건에 대하여 1분 간격으로 4시간 동안 10개의 지점에서의 온도를 측정한 결과를 나타낸다. #1~#5의 값을 표시하는 왼쪽 그래프는 T-Floor 아래에서 5개 지점의 온도를 나타내며, #6~#10값을 나타내는 오른쪽 그래프는 바닥에서 2m 높이에

서 5개 지점의 온도를 각각 나타낸다. Figs. 3~7과 같이 T-Floor의 측정 위치에 따른 온도 변화는 기존 컨테이너(0% shield)의 경우 (#1~#3)까지는 공급되는 냉기의 온도가 5°C로 설정 온도와 동일하게 전달되지만 이후(#4~#5)에는 약 7°C에 가깝게 증가하여 냉기가 적절히 전달되지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 짝수 칸의 T-Floor를 50%~80%로 변화시켜가며 차단한 경우(Figs. 3~6 좌측 그래프) 컨테이너 문이 있는 후면부로 냉기가 잘 전달되는 것을 알 수 있다. 컨테이너 문이 있는 #5 위치의 T-Floor 온도의 경우 차폐되지 않는 경우와 비교하여 7°C에서 6.5°C까지 0.5°C 감소되는 것을 확인하였다. Figs. 3~7에서 차폐율에 따른 온도변화 중

2m 높이에서의 온도 변화를 나타내는 #6~#10을 살펴보면, 차폐하지 않은 컨테이너의 경우 냉기가 나오는 전면부의 온도가 먼저 낮아지고 열평형이 이루어져 컨테이너 문이 있는 후면부의 온도가 설정온도에 근접한 6°C 내외인 것을 확인할 수 있다. T-Floor의 차폐율을 50%에서 80%로 변경하면서 바닥에서 2m 높이에서의 온도 분포를 확인한 결과, 차폐율이 50%인 경우는 차폐하지 않은 경우보다 온도 편차가 크게 나타났지만, 차폐율이 60%일 때 온도 분포가 가장 균일하게 나타났다. 또한, 차폐율 70%와 80%에서는 온도 편차가 조금 벌어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, T-Floor의 차폐율이 60%인 경우 적재부의 온도 편차가 가장 최소화

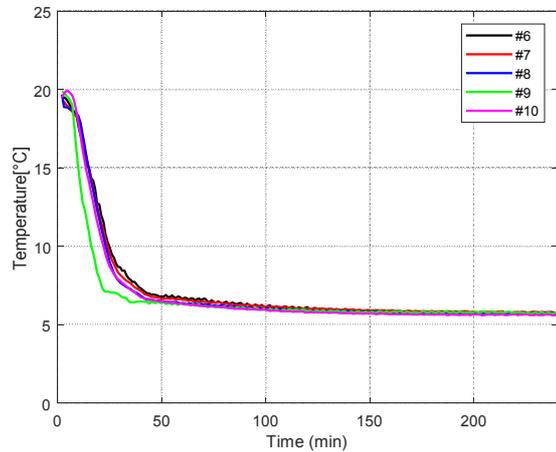
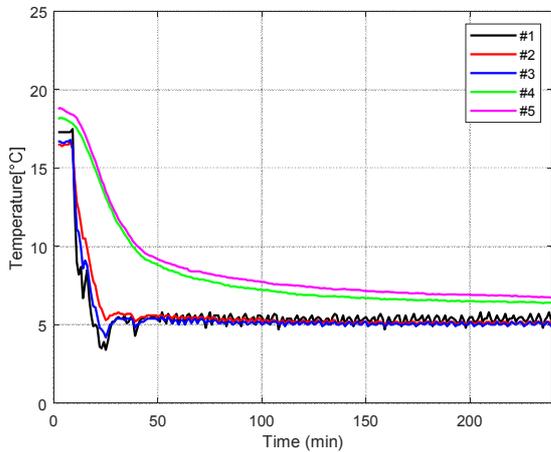


Fig. 3 Temperatures according to time in 0%-shielding (existing model) condition

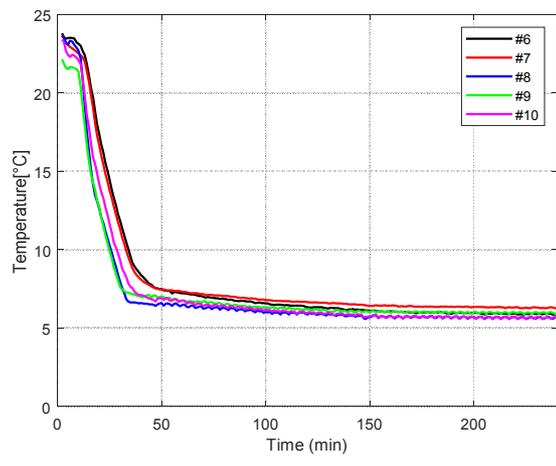
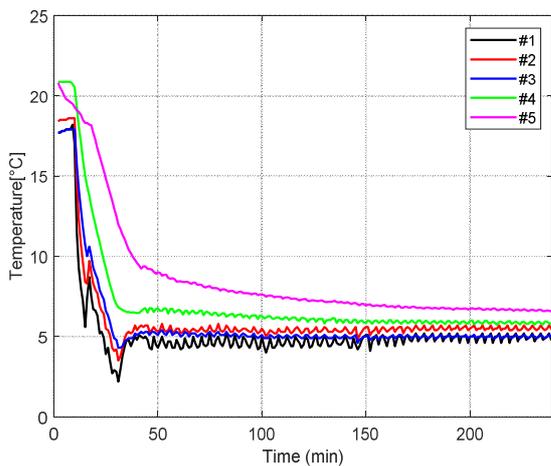


Fig. 4 Temperatures according to time in 50%-shielding (existing model) condition

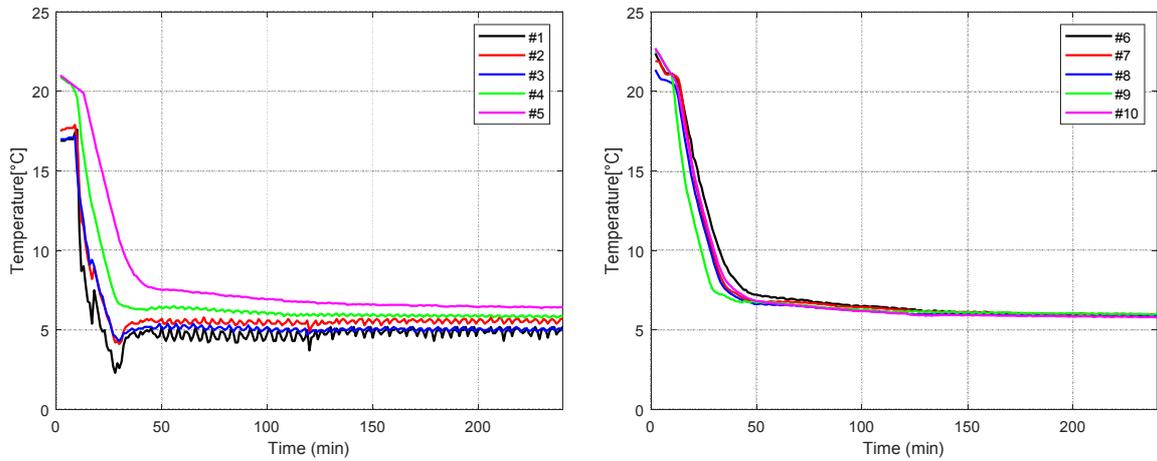


Fig. 5 Temperatures according to time in 60%-shielding (existing model) condition

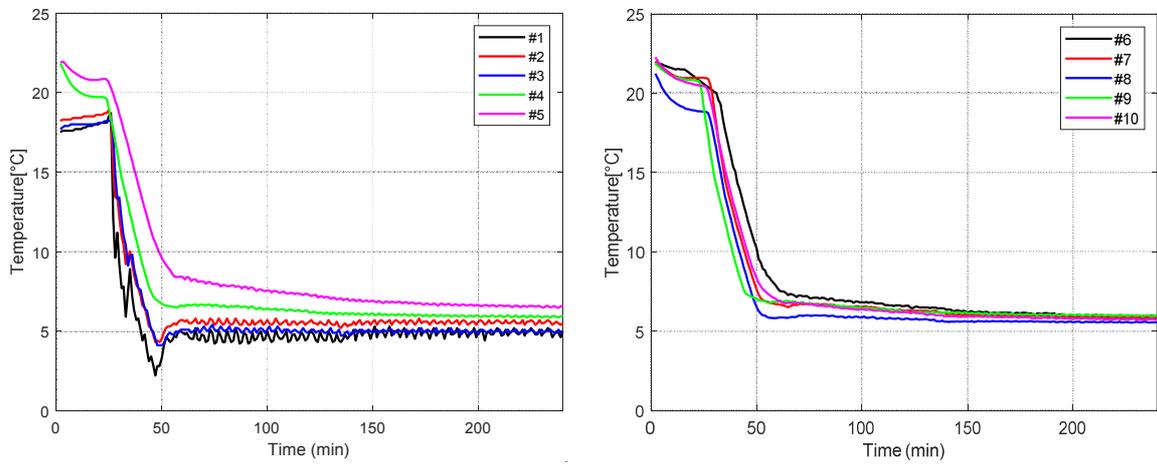


Fig. 6 Temperatures according to time in 70%-shielding (existing model) condition

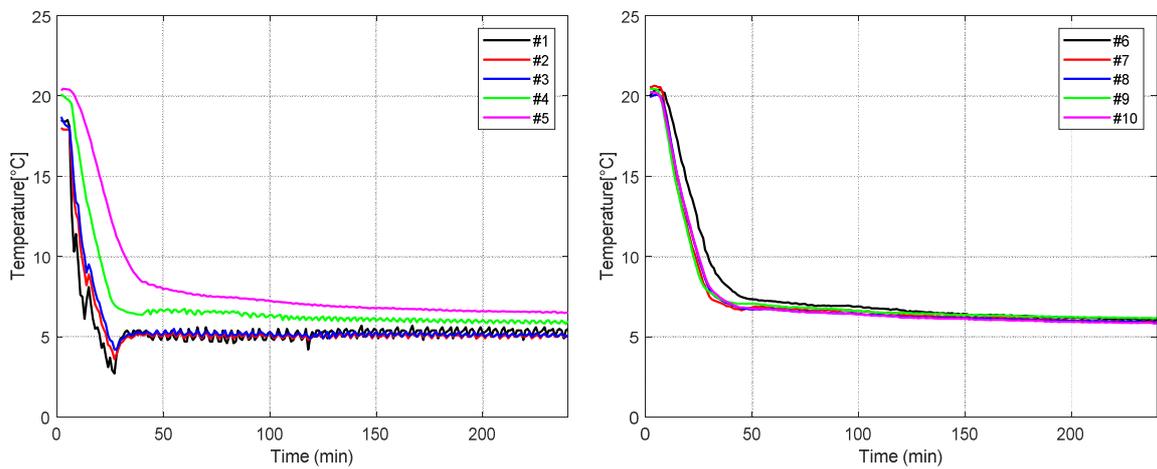


Fig. 7 Temperatures according to time in 80%-shielding (existing model) condition

됨을 확인할 수 있다. 또한 컨테이너에 화물이 적재되어 있을 때 컨테이너 문이 있는 후면부로 냉기를 효율적으로 보낼 수 있어 전면부와 후면부 간의 온도차를 개선할 수 있을 것으로 기대된다. Table 2는 냉동 컨테이너의 T-Floor 차폐율에 따른 설정 온도 도달 시간을 나타낸다. T-Floor가 차단되지 않은 경우(0% shielding)에 비해 차폐율(50%~80% shielding)이 증가할수록 설정 온도에 도달하는 시간이 증가하는 것을 알 수 있다. 차폐율이 50% 일 때 설정 온도 도달 시간이 가장 증가했으며, 차폐율이 60%일 때 가장 적은 설정 온도 도달 시간을 나타내었다.

Table 1 Temperature change in shielding rate when temperature setting is reached

Temp. [°C]	shielding[%]				
	0	50	60	70	80
#1	5.2	5.0	5.0	4.9	5.6
#2	5.1	5.2	5.7	5.5	5.1
#3	5.0	5.0	5.2	4.9	5.2
#4	6.5	5.9	5.8	6.1	5.8
#5	7.0	6.6	6.5	6.7	6.6
#6	5.6	6.0	5.9	6.0	6.2
#7	6.0	6.3	6.0	5.9	6.1
#8	5.9	5.6	5.9	5.6	6.0
#9	6.0	6.0	6.0	6.0	6.2
#10	6.2	5.7	5.8	5.8	6.0

Table 2 Time to reach set temperature

Shielding[%]	Time[min]
0	25
50	32
60	25
70	28
80	31

5. 결론

본 논문에서는 냉동컨테이너 적재부의 전면부와 후면부 사이의 온도 편차를 최소화하기 위한 방안을 제안하였다. 온도 편차 최소화를 위해

냉기를 컨테이너 문이 있는 후면부로 전달할 수 있도록 T-Floor의 차폐율에 따른 영향을 실험하였다. T-Floor를 차단하지 않은 경우와 50%에서 80%까지 10% 간격으로 차폐율에 따른 온도 변화를 측정하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 학술적 측면

1) 냉동컨테이너는 냉기를 전달하는 T-Floor가 개방되어 있어 냉기가 문이 있는 후면부까지 전달되지 못하는 것을 확인하였다. 본 논문의 실험을 통해 설정 온도 5°C일 때 컨테이너 적재부의 평균 온도는 6°C로 설정 온도와 유사하게 나타났으나 T-Floor에서 측정된 온도는 전면부가 5°C, 후면부는 7°C로 약 2°C의 편차를 보였다. 그리고 T-Floor의 간격이 0% 차단했을 때 온도 편차가 1.5°C로 가장 낮았으며 기존 컨테이너 대비 25% 감소하는 것을 확인하였다.

2) 냉동컨테이너 적재부 2m 높이에서의 온도 분포를 분석한 결과 차폐율 50%에서는 온도 편차가 차폐율이 0% 일 때 보다 오히려 크게 나타났으며, 차폐율이 60% 일 때는 0.2°C로 0.2°C 편차를 갖는 기존 컨테이너 보다 온도 편차가 33% 수준으로 낮고 가장 균일한 것을 확인했다. 차폐율이 70%와 80% 일 때는 온도 편차가 증가하였다.

3) 컨테이너 바닥과 2m 높이에서 차폐율에 따른 온도 편차를 비교한 결과 T-Floor를 60% 차폐하는 것이 적재부 온도 편차를 최소화할 수 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 산업적 효과 측면

컨테이너로 신선화물을 운송하는 경우 냉기가 공급되는 전면부 냉해를 입으며, 컨테이너 문이 있는 후면부는 부패되어 현재 신선화물은 항공을 통한 운송이 빈번하게 이루어지고 있으나, 이는 운송 물량의 제한과 가격 경쟁력의 저하로 이어진다.

1) 본 연구는 냉동컨테이너의 적재부 온도를 균일하게 유지할 수 있도록 하여 농수산물 등과 같은 신선화물의 손실을 최소화할 수 있으며, 이는 신선화물을 컨테이너로 운송 가능하도록 하여 많은 물량을 낮은 가격에 공급할 수 있다.

2) 또한, 냉동기의 효율성을 향상시켜 냉동컨테이너의 소비전력 감소 등의 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 연구로는 화물이 적재된 냉동 컨테이너의 실제 해운물류 환경에서의 운송 실험을 통해 적재부 온도 변화와 화물의 파손 여부에 대한 추가 연구를 진행할 예정이다.

References

- A. Kan, T. Wang, D. Zhu. and D. Cao. (2021). The characteristics of cargo temperature rising in reefer container under refrigeration-failure condition. *International Journal of Refrigeration*, 123, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.12.007>
- Choi. D. H. and Park. D. H. (2023). Analysis of factors affecting air freight rates using text mining: focusing on the L.A. and Frankfurt routes, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 28(3), 69-87. <http://dx.doi.org/10.9723/jksis.2023.28.3.069>
- G. S. Han. (2010). A Study Situation Analysis and Improvement Strategies for Logistics System of Perishable Foods in Korea, *Korean journal of food marketing economics*, vol.27, no.2, pp. 67-104.
- Getahun, S., Ambaw, A., Delele, M. Chris J. M. and Umezuruike L. O. (2018). Experimental and Numerical Investigation of Airflow Inside Refrigerated Shipping Containers. *Food Bioprocess Technol* 11, 1164 - 1176 <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2086-5>
- J. W. Choi., J. H. Lee., H. J. Lee., K. J. Son. and Y. P. Hong. (2014). Effect of Precooling and Functional Film Packaging on Postharvest Quality of Oriental Melon, *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, vol.2014, no.5, pp. 98-98.
- Lukasse, L. and Staal, M. G. (2016). Optimizing air flow distribution in maritime refrigerated containers. (Report / Wageningen UR Food & Biobased Research; No. 1621). Wageningen UR Food & Biobased Research.
- Lukasse, L. J. S. Staal, M. G. and Wissink, E. B. (2019). An airflow enhancing floor cover to improve temperature uniformity in maritime refrigerated containers. Paper presented at The 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montreal, Canada. <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.0054>
- Lee. S. H., Park. S. H., Lee. S. J., Lee. H. W., Yu. S. Y. and Lee. K. G. (2022). A Comparative Study on the Methodology of Failure Detection of Reefer Containers Using PCA and Feature Importance, *Korea Convergence Society*, 13(3), 23-31. <https://doi.org/10.15207/JKCS.2022.13.03.023>
- Lee. T. M., Kim. Y. S. and Kim. D. W. (2023). A Study on the BLE Signal Variation in the Smart Container Environment, *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, 21(11), 133-141. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.11.133>
- S. Getahun., A. Ambaw., M. Delele., Chris J. Meyer. and U. L. Opara. (2017). Analysis of airflow and heat transfer inside fruit packed refrigerated shipping container: Part I - Model development and validation, *Journal of Food Engineering*, pp 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.010>
- S. Senguttuvan, J. S. Youn, J. H. Park, J. K. Lee. and S. M. Kim, (2020). Enhanced airflow in a refrigerated container by improving the refrigeration unit design, *International Journal of Refrigeration*, Volume 120, pp 460-473.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.08.019>

Y. S. Moon., S. J. Park., J. W. Jung., H. R. Choi. and J. J. Kim. (2017). Temperature Control Algorithm for Reefer Container, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering 21(12): 2380-2386. <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.12.2380>



박 상 원 (SangWon Park)

- 정회원
- 동아대학교 전기공학과 공학사
- 동아대학교 전기공학과 공학 석사
- (현재) 스마트물류연구센터 연구원

• 관심분야: 전력시스템, 신재생에너지, 해운물류



김 태 훈 (TaeHoon Kim)

- 부산대학교 컴퓨터공학과 공학 석사
- (현재) 스마트물류연구센터 선임연구원
- 관심분야: IoT, 해운물류, 컨테이너 트래킹



박 도 명 (DoMyung Park)

- 동아대학교 경영정보학과 경영학 박사
- (현재) 스마트물류연구센터 사무국장(책임연구원)
- 관심분야: 경영정보시스템, 스마트컨테이너, 인공지능(진단, 예측, 생성 알고리즘)



한 동 섭 (DongSeop Han)

- 동아대학교 기계공학과 공학 박사
- (현재) 동아대학교 산업공학과 전담교수
- 관심분야: 구조해석 및 설계