

물류시설 적재가연물 FDS 를 통한 화재 확산 모델링에 관한 연구

A Study on the Fire Diffusion Model of Loadable Materials in Rack-Type Warehouse Using FDS

주유빈¹ · 손은수² · 김상일³ · 최두찬^{4*}Yu Bin Joo¹, Eun Su Son², Sang Il Kim³, Doo Chan Choi^{4*}¹Researcher, Future Initiative R&D Center, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea²Center Leader, Future Initiative R&D Center, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea³Vice President, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea⁴Chief Executive Officer, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea

*Corresponding author: Doo Chan Choi, cdc4111@kfubis.com

ABSTRACT

Purpose: In order to secure a specific fire diffusion model, this study compares and analyzes the NIST UL standard application scenario and the performance-oriented design application scenario and examines the difference between the fire diffusion model and the surface fire model. **Method:** Temperature, visibility, and CO sensors were installed for each scenario using FDS, and the two scenarios were compared and analyzed through the changes. **Result:** As a result of analyzing the temperature, visibility, and CO for each scenario, the NIST UL standard application scenario is very similar to the actual fire, and the performance-oriented design application scenario shows a harsh fire situation. **Conclusion:** When designing fire safety for large buildings such as distribution warehouses, it is important to prepare comprehensive fire safety measures in consideration of both actual fire and harsh fire conditions.

Keywords: Rack-Type Warehouse, Fire Dynamics Simulator, Performance Based Design, Fire diffusion model, Surface Fire Model

요약

연구목적: 본 연구는 구체적인 화재 확산 모델을 확보하기 위해 NIST UL 기준 적용 시나리오와 성능위주설계 적용 시나리오를 비교 분석하고 화재 확산 모델과 표면 화재 모델의 차이점을 보고자 한다. **연구방법:** FDS를 활용하여 시나리오 별로 온도·가시도·CO 센서를 설치하고 그 변화를 통해 두 시나리오를 비교 분석하였다. **연구결과:** 시나리오 별로 온도·가시도·CO를 분석한 결과 NIST UL 기준 적용 시나리오의 실화재와 매우 유사하고, 성능위주설계 적용 시나리오는 가혹한 화재 상황을 보여준다. **결론:** 물류창고와 같은 대형 건축물의 화재 안전 설계 시에는 실화재 및 가혹한 화재 상황을 모두 고려하여 종합적인 화재 안전 대책을 마련하는 것이 중요하다.

핵심용어: 물류시설, 화재 시뮬레이션, 성능위주설계, 화재 확산 모델, 표면 화재 모델

Received | 19 August, 2024

Revised | 23 September, 2024

Accepted | 23 September, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

최근 군포 복합물류터미널 화재(2020), 이천시 물류창고 화재(2020), 용인시 양지 물류센터 화재(2020), 쿠팡 덕평 물류센터 화재(2021) 등 물류 시설물에 대한 화재는 계속해서 발생하고 있다. 물류 시설물은 대부분 랙크식 창고로, 대공간에 랙크를 배치하여 물품을 수직으로 배치하는 구조이다. 그리하여 많은 양의 다양한 물품을 적재할 수 있어 우수한 면이 있지만, 화재 발생 시 수직 확산으로 인하여 가연물 화재 확산 전파 속도가 상대적으로 빨라 화재를 진압하기 어려운 면도 있다.

해외 물류시설인 경우 NFPA 13(Sprinkler)에 대한 기준을 따라 가연물 특성에 맞게 분류하며 나아가 스프링클러 K-Factor 적용, ESFR등에 대한 설계를 고려하고 있다. 반면에 국내 물류시설인 경우 랙크식 창고에서 제품을 배치할 때 상대적으로 빠른 배송을 원하는 제품인 경우 랙의 하단부, 느린 배송이 가능한 제품은 랙의 상단부로 배치하고 있다. 아직까지 가연물에 대한 특성을 반영하지 못하고 있어, 국내 랙크식 창고에 대한 위험물성에 대하여 명확히 확인되지 못하고 있다.

랙크식 적재 가연물의 화재 확산에 대한 연구는 국내에서 아직까지 미비한 상황이며, 일반적으로 FDS 수행을 할 때 국내 성능위주설계 적용 상황에서는 표면화재를 가정하여 수행을 하고 있지만, 물류시설인 경우 구체적인 화재 확산 모델이 필요한 상황이다. 이에 대해서 물류시설 가연물에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되어 연구를 진행하고자 한다.

실화재 실험을 통해 물류시설 적재 가연물의 실험적인 수치를 확인이 가능하나 비용과 위험부담이 있어, FDS(Fire Dynamics Simulator)를 활용하여 NIST UL 기준 적용 시나리오와 성능위주설계 적용 시나리오를 비교 분석하고 화재 확산 모델과 표면 화재 모델의 차이점을 보고자 한다.

연구방법

화재 시뮬레이션 규격

화재실의 크기는 Fig. 1과 같이 30.5m×30.5m로 설정하였고, 천장까지의 높이는 8.2m로 설정하였다. 또한, Fig. 2와 같이 모델링은 4단랙을 구성하였고, 배열은 2×8 배열 1개, 1×8 배열 2개로 구성하였다. 랙크 간 통로 폭은 2.4m로 설정하였고, 종이박스의 크기를 1.05m×1.05m×1.05m로 모델링을 하였다.

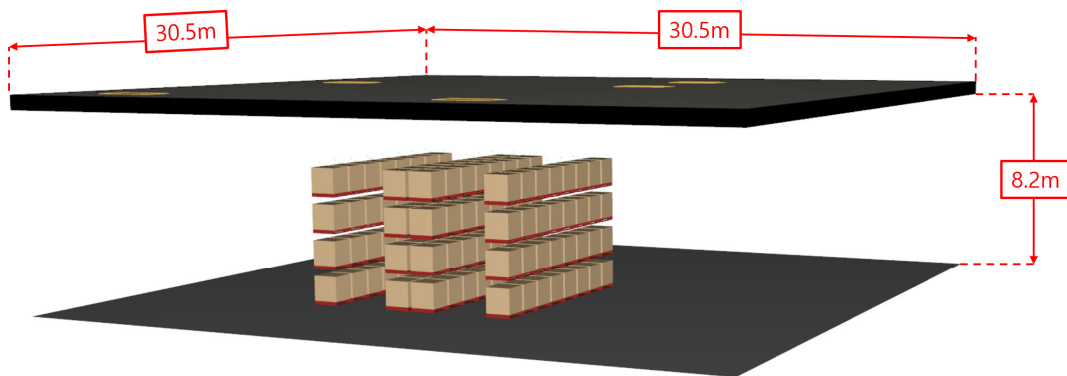


Fig. 1. Thread size

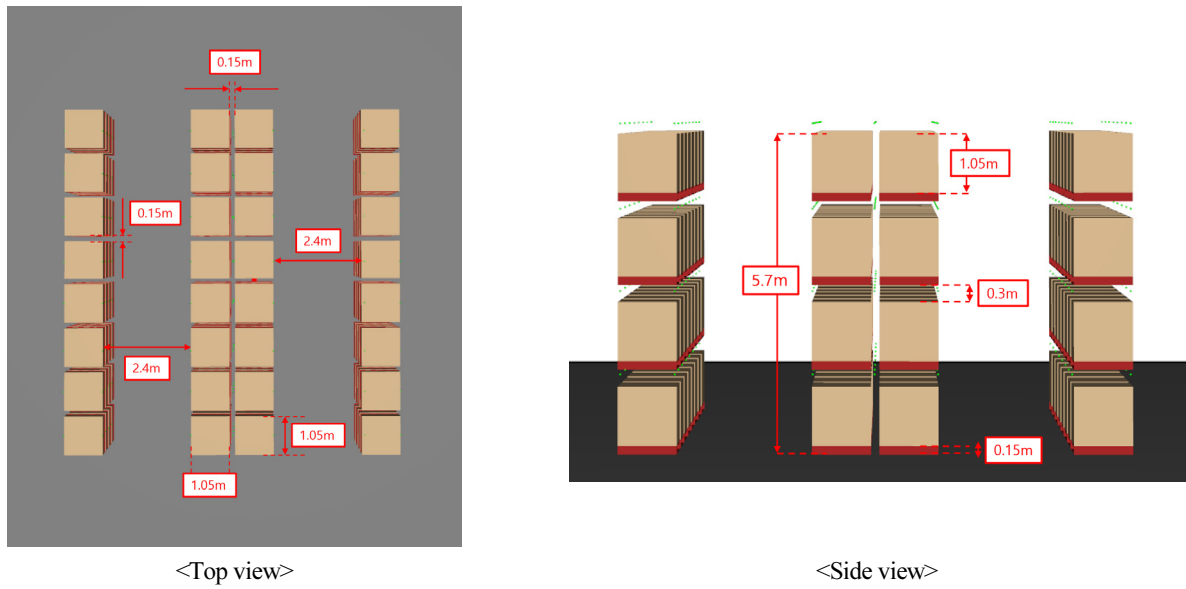


Fig. 2. Measurement length

시나리오 선정

점화원

점화원은 Fig. 3과 같이 랙 1단 가운데 맨 아래에 위치하였고, 0.15m×0.15m×0.15m 크기에 1,000kw로 시뮬레이션 시작 후 60초 뒤에 인접 가연물에 착화하는 방식으로 구현하였다.

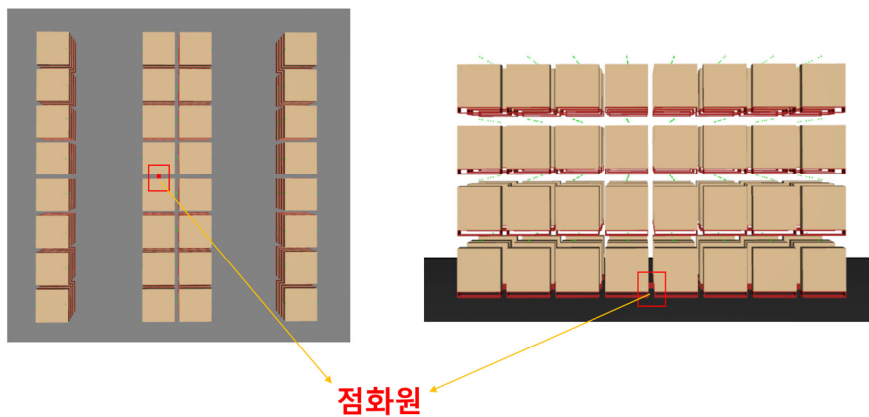


Fig. 3. Ignition source position

센서 설정

아울러 Fig. 4와 같이 박스 좌우측, 높이 별로 온도·가시도·CO 센서를 설치하였으며, 시나리오 별로 온도·가시도·CO 변화를 분석하여 화재 확산 모델과 표면 화재 모델의 차이점을 확인하고자 한다.

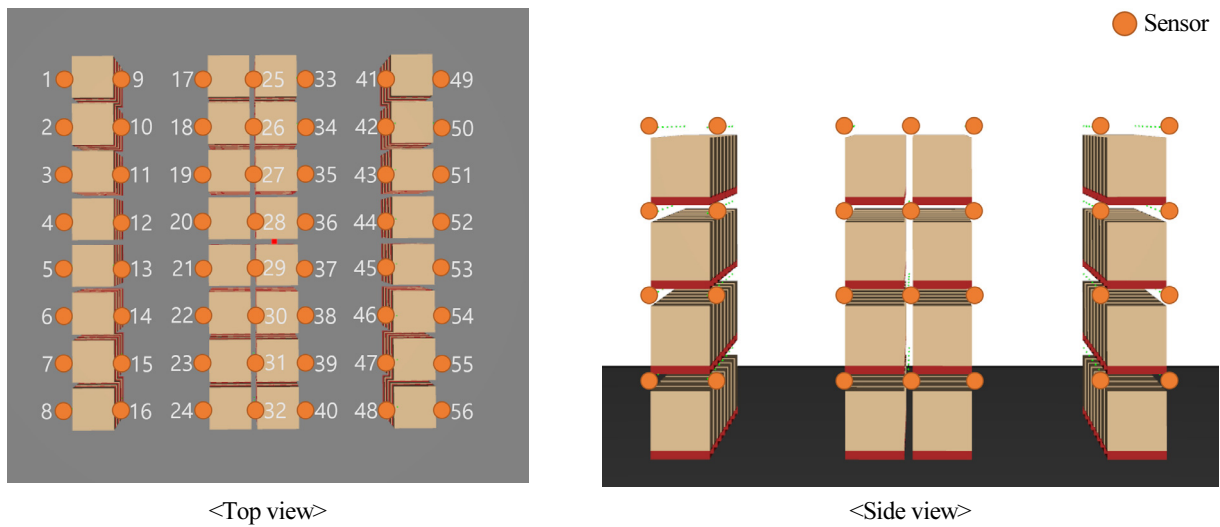


Fig. 4. Sensor settings location

화재 시뮬레이션 확산 모델

NIST UL 기준 적용 시나리오 분석

랙크식 가연물에 대한 화재 시뮬레이션에서 단일 가연물을 CUP(Cartoned Unexpanded Plastic)로 설정하였다. 파렛트 한 개에 적재된 CUP의 HRRPUA(Heat Release Rate Per Unit Area)는 500kw/m^2 로 설정하였고, Extinguishing Coefficient를 $0.5\text{m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$, Bulk Density는 43.7kg/m^3 로 설정하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

연소 생성물은 CO Yield가 0.06이고, Soot Yield가 0.164인 Polystyrene을 선택하여 가연물에 적용하였다.

마지막으로 가연물의 크기를 1.05m인 정육면체 형태의 종이박스가 포장되어 모든 면에 연소가 되는 상황을 고려하였다.

성능위주설계 적용 시나리오 분석

랙크식 가연물에 대한 화재 시뮬레이션에서 단일 가연물을 NIST UL 기준 적용 시나리오와 동일하게 CUP로 설정하였고, 파렛트 한 개에 적재된 CUP의 HRRPUA도 동일하게 500kw/m^2 로 설정하였다. 다른 점은 Extinguishing Coefficient를 $0.0\text{m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$ 로 설정하였고, Bulk Density는 적용하지 않고 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

연소 생성물은 동일하게 CO Yield가 0.06이고, Soot Yield가 0.164인 Polystyrene을 선택하여 가연물에 적용하였다.

마지막으로 가연물의 크기도 1.05m인 정육면체 형태의 종이박스가 포장되어 모든 면에 연소가 되는 상황을 고려하였다.

시나리오 비교

화재 시뮬레이션을 수행하기 위한 2가지 시나리오를 선정하였으며, Table 1과 같이 Extinguishing Coefficient와 Burn away, Bulk Density를 다르게 적용하고, 그 외에는 설정을 같게 하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 총 격자 크기는 $0.15\text{m}\times 0.15\text{m}\times 0.15\text{m}$ 이며, 화재 시뮬레이션 종료 시간을 600초로 설정하였다.

Table 1. Selection of fire simulation scenario

구분	시나리오 1	시나리오 2
Initial Internal Temperature 가연물 CUP HRRPUA Ignite at	20.0°C CUP(Cartoned Unexpanded Plastic) 500.0 kw/m ² 370.0°C	
Extinguishing Coefficient Burn away	0.5 m ² /(kg·s) 적용	0.0 m ² /(kg·s) N/A
Bulk Density 점화원 크기	43.7 kg/m ³ 0.15m × 0.15m × 0.15m	N/A N/A
IGNITOR HRRPUA 연소 생성물 CO Yield Soot Yield	1000.0 kw/m ² Polystyrene 0.06 0.164	
Specify heat of combustion Critical Flame Temperature Autoignition Temperature	4.0E+4 kj/kg 1427.0°C -273.0°C	
격자 크기 격자 수 수행시간	0.15m × 0.15m × 0.15m 2,400,000 600s	

결과

본 연구에서는 NIST UL 기준을 적용한 시나리오 1과 성능위주설계 방식을 적용한 시나리오 2에 대해 온도, 가시거리, CO 농도의 세 가지 주요 지표를 측정하여 비교 분석하였다. Fig. 5와 같이 측정점 224개 중 점화원과 가까운 측정점 5.1.5와 점화원과 가까운 곳에서 가장 높은 측정점인 5.4.5에서의 온도, 가시거리, CO 농도를 시나리오별로 비교 분석하였다.

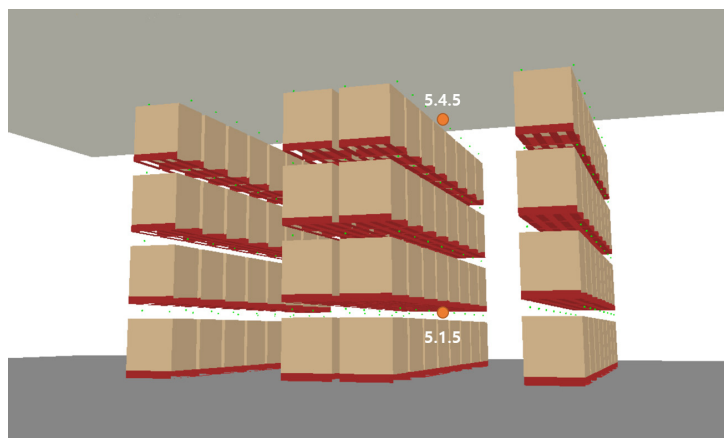


Fig. 5. Sensor 5.1.5, 5.4.5

온도 비교

Fig. 6와 Fig. 7을 비교해보면, 측정점 5.1.5와 5.4.5는 비슷한 양상을 보이고, 시나리오별 양상 차이가 극명히 보인다. 시나리오 1과 시나리오 2의 온도 변화는 초기 단계에서는 유사한 양상을 보였으나, 시간 경과에 따라 시나리오 2의 온도가 더 빠르게 상승하는 경향을 나타냈다. 예를 들어, Table 2와 같이 150초 시점에서 시나리오 1의 온도는 142.2°C에 도달한 반면, 시나리오 2는 312.7°C로 기록되었다. 이후 300초 시점에서는 시나리오 2의 온도가 1,433°C로, 시나리오 1의 795.7°C를 크게 초과하였다. 이러한 결과는 성능위주설계 방식이 보다 가혹한 화재 조건을 모의함으로써 실제 상황에서의 온도 상승에 대한 평가를 강화하고 있음을 시사한다.

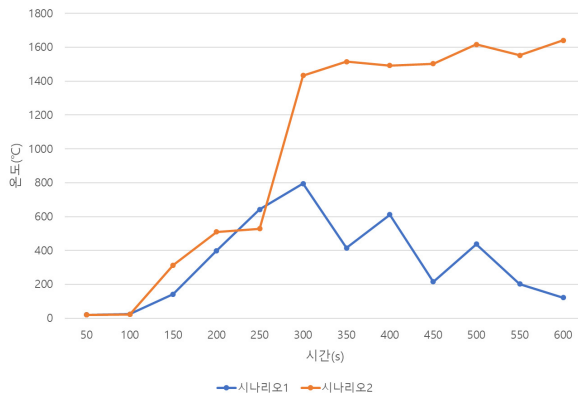


Fig. 6. Temperature comparison at sensor 5.1.5

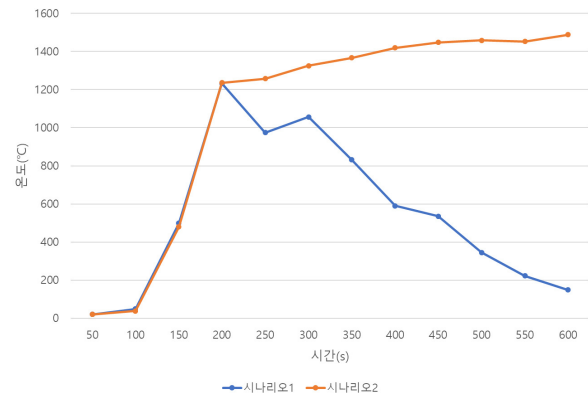


Fig. 7. Temperature comparison at sensor 5.4.5

Table 2. Measurement sensor temperature comparison by scenario

구분	Sensor 5.1.5		Sensor 5.4.5	
	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 1	시나리오 2
50s	20.15°C	20.15°C	20.56°C	20.56°C
100s	24.07°C	23.37°C	49.26°C	38.01°C
150s	142.2°C	312.7°C	498.7°C	479°C
200s	399°C	510.6°C	1,233°C	1,236°C
250s	642.1°C	528.7°C	974.7°C	1,257°C
300s	795.7°C	1,433°C	1,056°C	1,325°C
350s	414.5°C	1,515°C	831.6°C	1,367°C
400s	611.2°C	1,492°C	589.8°C	1,419°C
450s	216.3°C	1,503°C	536°C	1,448°C
500s	438.4°C	1,617°C	345°C	1,459°C
550s	202.9°C	1,553°C	222.3°C	1,452°C
600s	121.6°C	1,641°C	149.2°C	1,488°C

가시거리 비교

가시거리 측정 결과도 마찬가지로 Fig. 8과 Fig. 9을 비교해보면, 측정점 5.1.5와 5.4.5에서는 비슷한 양상을 보인다. 시나리오 2에서 가시거리가 시나리오 1에 비해 더욱 급격히 감소하는 양상이 관찰되었다. Table 3와 같이 150초 시점에서 시나리오 1의 가시거리는 0.59m로 감소한 반면, 시나리오 2에서는 0.91m로 더욱 크게 감소하였다. 특히, 600초 시점에서 시나리오 2의 가시거리는 0.15m로 유지된 반면, 시나리오 1에서는 6.86m로 비교적 높은 가시거리를 기록하였다. 이는 성능위주 설계 방식이 연기과 가시성 저하를 고려한 평가에서 더욱 엄격한 기준을 적용하고 있음을 보여준다.

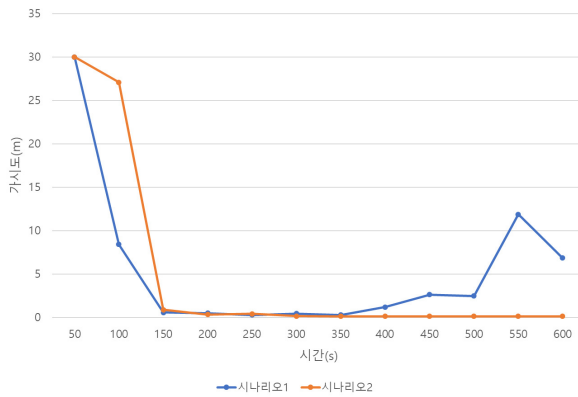


Fig. 8. Comparison of visibility on sensor 5.1.5

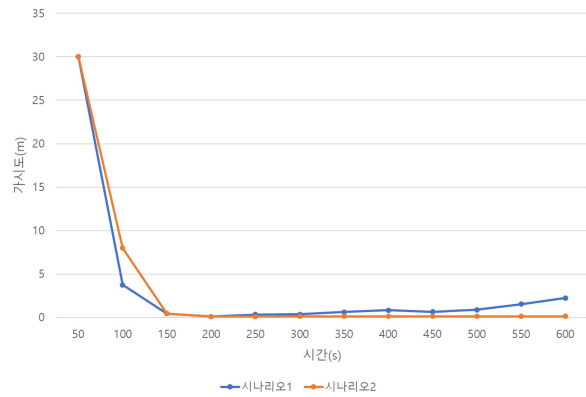


Fig. 9. Comparison of visibility on sensor 5.4.5

Table 3. Comparison of measurement sensor visibility by scenario

구분	Sensor 5.1.5		Sensor 5.4.5	
	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 1	시나리오 2
50s	30 m	30 m	30 m	30 m
100s	8.43 m	27.09 m	3.75 m	7.98 m
150s	0.59 m	0.91 m	0.44 m	0.44 m
200s	0.52 m	0.36 m	0.12 m	0.12 m
250s	0.3 m	0.42 m	0.33 m	0.12 m
300s	0.45 m	0.18 m	0.37 m	0.13 m
350s	0.31 m	0.14 m	0.64 m	0.13 m
400s	1.21 m	0.14 m	0.83 m	0.13 m
450s	2.65 m	0.14 m	0.66 m	0.13 m
500s	2.5 m	0.15 m	0.88 m	0.13 m
550s	11.88 m	0.14 m	1.53 m	0.13 m
600s	6.86 m	0.15 m	2.23 m	0.13 m

CO 농도 비교

CO 농도 분석 결과, Fig. 10과 Fig. 11과 같이 시나리오 2에서의 CO 농도가 시나리오 1에 비해 전반적으로 더 높은 농도를 기록하였다. 특히, Table 4와 같이 300초 시점에서 시나리오 1의 CO 농도는 925.1 mol/mol인 반면, 시나리오 2에서는 3,546 mol/mol로 크게 증가하였다. 이후 CO의 농도는 높은 상태로 지속되는 성상을 보인다. 이러한 결과는 성능위주설계 방식이 연소 생성물의 축적을 더욱 엄격히 평가하고 있음을 나타내며, 실무에서의 최악의 화재 조건을 가정한 설계 필요성을 강조한다.

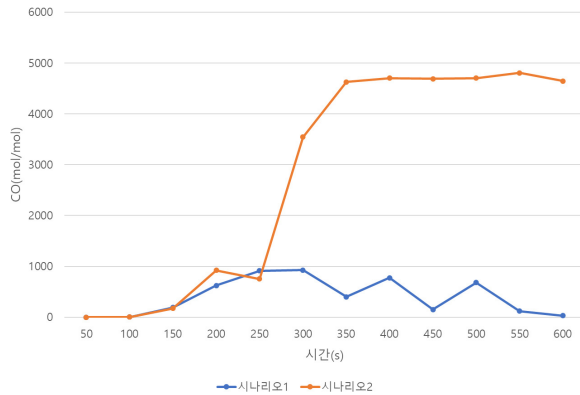


Fig. 10. Comparison of CO on sensor 5.1.5

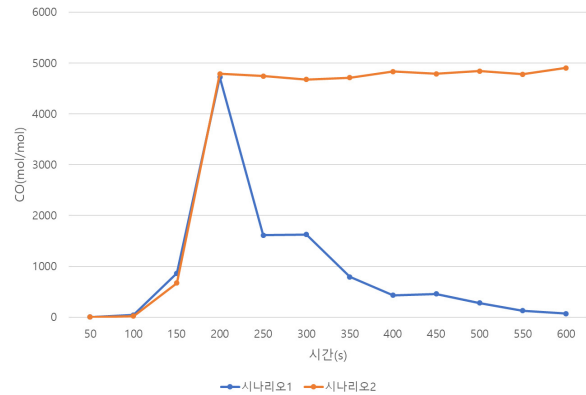


Fig. 11. Comparison of CO on sensor 5.4.5

Table 4. Comparison of measurement sensor CO by scenario

구분	Sensor 5.1.5		Sensor 5.4.5	
	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 1	시나리오 2
50s	0.62 mol/mol	0.62 mol/mol	2.23 mol/mol	2.23 mol/mol
100s	4.41 mol/mol	4.11 mol/mol	42.61 mol/mol	19.51 mol/mol
150s	192.6 mol/mol	171.5 mol/mol	862.2 mol/mol	672.2 mol/mol
200s	623.1 mol/mol	923.8 mol/mol	4,723 mol/mol	4,788 mol/mol
250s	913.9 mol/mol	751.6 mol/mol	1,613 mol/mol	4,744 mol/mol
300s	925.1 mol/mol	3,546 mol/mol	1,628 mol/mol	4,677 mol/mol
350s	399.9 mol/mol	4,627 mol/mol	791.8 mol/mol	4,714 mol/mol
400s	775.7 mol/mol	4,703 mol/mol	432.6 mol/mol	4,835 mol/mol
450s	151.5 mol/mol	4,693 mol/mol	459.3 mol/mol	4,789 mol/mol
500s	682.7 mol/mol	4,705 mol/mol	280.5 mol/mol	4,844 mol/mol
550s	121.1 mol/mol	4,808 mol/mol	126.5 mol/mol	4,780 mol/mol
600s	29.5 mol/mol	4,648 mol/mol	72.47 mol/mol	4,904 mol/mol

결론

본 연구는 물류창고 화재에 대한 두 가지 시뮬레이션 시나리오를 비교하여 분석하였다. 시나리오 1은 NIST UL 기준을 기반으로 하여 실제 화재 상황을 재현하는 것을 목표로 하였으며, 시나리오 2는 성능위주설계 방식을 적용하여 최악의 상황을 가정한 화재 시나리오를 구성하였다. 이 두 시나리오의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 도출했다.

첫째, NIST UL 기준을 적용한 시나리오 1은 실화재와 매우 유사한 결과를 나타내었으며, 이는 실화재의 특성을 잘 반영하고 있다. 이 시나리오에서 나타난 화재 확산 속도와 온도 상승 패턴은 실제 물류창고 화재 사건에서 보고된 것과 유사한 양상을 보였기에 NIST UL 기준은 물류창고와 같은 대형 건축물의 화재 안전성을 평가하는 데 있어 유효한 기준임을 확인할 수 있다.

둘째, 성능위주설계 방식을 적용한 시나리오 2는 보다 가혹한 화재 조건을 시뮬레이션하여 최악의 경우를 고려한 설계 접근법의 중요성을 강조했다. 이 시나리오에서 나타난 화재 확산의 속도와 강도는 시나리오 1에 비해 훨씬 높은 수준이었으며, 이는 최악의 조건을 가정한 성능위주설계가 보다 높은 안전 여유를 확보하는 데 기여할 수 있음을 시사한다.

결론적으로, 본 연구에서 시뮬레이션한 두 가지 시나리오는 각각의 목적에 따라 다른 결과를 나타냈으며, 이는 각 기준이 설정된 설계 목표에 따라 화재 안전성을 다르게 평가할 수 있음을 보여준다. NIST UL 기준은 실제 화재 상황에 대한 적절한 평가를 제공하는 반면, 성능위주설계는 최악의 상황을 대비하여 더욱 엄격한 기준을 적용할 필요성을 시사한다. 따라서, 물류창고와 같은 대형 건축물의 화재 안전 설계 시에는 두 가지 접근 방식을 모두 고려하여 종합적인 화재 안전 대책을 마련하는 것이 중요하다.

Acknowledgement

본 연구는 국토부/국토교통과학기술진흥원 물류시설 화재 안전성 및 위험도 관리 기술 개발 연구사업(RS-2022-00156237)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Cho, G.-H., Yeo, I.-H. (2016). "A study on the Fire Characteristics of Palletized Unit-Load Commodities on Racks." *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 23-30.
- [2] Korean Fire Protection Association (2008). *Korea Fire Safety Standards (KFS) 1013 Standard of Sprinkler System*. Seoul, Republic of Korea.
- [3] Korean Fire Protection Association (2020). *Korea Fire Safety Standards (KFS) 630 Standard on Fire Protection for Logistics Warehouse*. Seoul, Republic of Korea.
- [4] Kim, M.S., Lee, S.B., Min, S.H. (2023). "A study on the adaptability of oxygen reduction system to fire in cold storage through fire simulation analysis." *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 19, No. 1, pp. 117-127.
- [5] Kim, W.-C. (2017). *An Experimental Study on Vertical Fire Spread Behavior of Rack-Type Warehouse*. Doctor Thesis, KyongGi University.
- [6] Kim, W.-H., Lee, Y.-J. (2016). "A field survey of rack-type warehouse for commodity classification system in

Korea.” *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 98-105.

- [7] Kim, W.-H., Seo, D.-H., Ham, E.-G. (2019). “A improvement plan for fire fighting activity of rack- type warehouse based on case study and field interview.” *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 1, pp. 67-75.
- [8] Ko, M.-H. (2022). *A Study on the Method of Loading Combustibles in Rack-Type Warehouse*. Master Thesis, KyongGi University.
- [9] Lee, J.I. (2019). “A study on the risk of fire of magnetic contactor at the control panel of refrigeration warehouse.” *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-322.
- [10] Lee, S.-B., Kim, M.-S., Min, S.-H. (2023). “A study on the comparison of aspirating smoke detector and general smoke detector detection time according to the fire speed and location of logistics warehouse through FDS.” *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 19, No. 3, pp. 608-623.
- [11] Lee, Y.-J., Park, H.-J. (2012). “A study on Introduction to performance based design of sprinkler installation on risk level for individual occupancy in Korea.” *Science and Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 1-10.
- [12] National Fire Protection Association (2019). *NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. Boston, United States of America.
- [13] National Fire Protection Association. (2019). *NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code*. Boston, United States of America.
- [14] Park, M.-U. (2022). *A Study on the Application of Horizontal Barriers to improve Fire Safety in Rack-Type Warehouse*. Master Thesis, GaChon University.