

# 물류 창고 랙(rack)의 설치에 따른 창고 내부 온도분포 연구

## Analysis of Temperature Distribution around Rack in the Logistical Warehouse

장용준\*<sup>†</sup>, 김영주\*\* , 류지민\*

Yong-Jun Jang\*<sup>†</sup>, Young Ju Kim\*\* , Ji-Min Ryu\*

**Abstract** The investigation of temperature distribution in the logistical warehouse with rack is performed for reduction of energy consumption using CFD method. The size of logistical warehouse is 33m x 66m x 10m and the size of rack is 21m x 6m x 9m. The total 7 racks are installed in the center of logistical warehouse. The two unit coolers are employed to cool down the space of logistical warehouse. The temperature and the velocity of cool air from unit cooler is -1°C and 5m/sec, respectively. The numbers of used computational cell are 1.4millions. MPI method is used for parallel computation. Large Eddy Simulation method (LES) in FDS code is adopted to solve the momentum and energy equations. Buoyancy force term is included in momentum equation. The unsteady flow characteristics is investigated and hot spots are found between racks. The high volume low speed fan is recommended for increase of cooling efficiency in the logistical warehouse

**Keywords :** Logistical warehouse, Unit cooler, LES, MPI

**초 록** 물류 창고 에너지 절감을 위하여 랙(rack)이 설치된 물류 창고 내부의 온도 분포를 CFD 기법을 이용하여 조사하였다. 물류 창고의 전체 규모는 33m x 66m x 10m, 랙 사이즈 21m x 6m x 9m 이며 총 7개의 랙이 창고 중앙에 설치되었다. 창고 내부의 쿨링을 위하여 유닛 쿨러(Unit Cooler)를 사용하여 창고의 온도를 하강시켰다. 유닛 쿨러의 냉기는 -1°C, 유속은 5m/sec 이다. 총 140만개 셀이 사용되었으며, MPI를 이용하여 병렬 계산을 수행하였다. Large Eddy Simulation(LES) 기법을 이용하여 운동량방정식 및 에너지 방정식을 계산하였으며, 부력(buoyancy force) 항이 에너지 방정식에 포함되었다. 창고 내부의 비정상 열유동의 특징을 조사하였으며, 창고 중앙에 랙의 존재로 인하여 핫 스팟(Hot Spot)이 존재하는 것이 발견되었다. 창고 내부의 쿨링의 효율을 증가시키기 위해서는 고평량 저속(High Volume Low Speed : HVLS) 팬 사용이 고려된다.

**주요어 :** 물류 창고, 유닛 쿨러, LES(large eddy simulation), 병렬처리방법

### 1. 서 론

물류시설이 지능화, 자동화되면서 물류시설의 에너지 소비량은 점점 증가하고 있으며 이에 물류시설의 에너지 절감은 기업들에게 매우 중요한 경영관리 요인이 되고 있다. 특히 냉동/냉장 창고의 경우 판매관리비의 약10%, 매출액의 약 9%를 전기사용료로 납부하고 있다. 따라서 물류센터의 주 에너지원인 전기의 사용량을 절감하는 기술을 개발 보급함으로써 물류 기업의 경영 압박을 경감하고 나아가 국가차원의 에너지 절감 시책에 부응할 필요가 있다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 에코시스템 연구실(jangyj@krri.ke.kr)

\* 한국철도기술연구원 에코시스템 연구실

\*\* 한국철도기술연구원 첨단물류시스템연구단

이에 따라 쾌적함을 저해하지 않으면서 에너지 사용량을 절감할 수 있는 에너지 절감형 물류 시설 및 그 체계적인 관리 방안이 절실히 요구되고 있으나, 현재 국내에서는 에너지 절감형 물류 시설에 대한 체계적인 연구가 진행된 바 없어 종합적이고 체계적인 연구가 필요하다.

박준홍 등[1]은 냉동 물류 창고에서 공조 시스템 설계 관련하여 오산복합물류센터의 냉동 창고 내부에서의 열유동 형태 분석 및 시스템 설계를 수행하였다. 권진경 등[2]은 농산물유통센터 창고 내부에서 양압식 및 음압식 팬&패드 시스템과 냉방기와 덕트로 구성된 국소냉방 시스템이 적용된 APC 작업장에 대해 CFD 시뮬레이션을 이용한 열유동 수치해석을 수행하여 냉방 효과를 분석하였다. Hoang 등[3]은 냉동 창고에서 찬공기의 유동을 RANS의 k-e 모델 및 RNG k-e 모델을 사용하여 예측하였다. Kittas & Bartzanas[4]는 물류창고에서 환기구 형태가 창고 내부의 열유동 형태에 미치는 영향을 실험 및 해석(FLUENT - k-e 모델)를 이용하여 조사하였다.

본 연구에서는 국내 일반적인 물류 냉동 창고 규모를 대상으로 창고 내부에 랙(rack)의 존재에 따른 온도분포를 조사하였다. 창고의 규모는 33m x 66m x 10m 이며 창고의 내부는 유니트 쿨러(Unit Cooler)를 사용하여 창고를 냉동/냉장 시켰다. Large eddy simulation(LES:대와류 모사) 기법을 이용하여 창고 내부의 열유동을 해석 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 물류 창고 모델 및 수치해석을 위한 조건

물류 창고의 모델로는 Fig 1, 2과 같이 오산복합물류센터의 냉동 창고 규모를 고려하여 결정하였다. 창고 전체 규모는 33m x 66m x 10m 이며, 중앙에 총 7개의 랙이 설치되어 있다. 랙의 사이즈는 21m x 6m x 9m 이다. 왼쪽 벽면 상단에는 유니트 쿨러(Unit Cooler) 2개를 설치하여 창고 내부의 냉동/냉방을 제어하도록 하였다. 유니트 쿨러의 크기는 1m x 1m 이며, 23m 간격으로 설치하였다. 유니트 쿨러에서 공급되는 냉기의 온도는  $-1^{\circ}\text{C}$ , 유속은 5m/sec 이다. 유니트 쿨러 반대편 벽에는 환기를 위하여 외부로 배출되는 환기구(1m x 1m) 2개를 설치하였다. 물류 창고 외부의 온도는  $35^{\circ}\text{C}$ 로 유지되는 것으로 가정하였다.

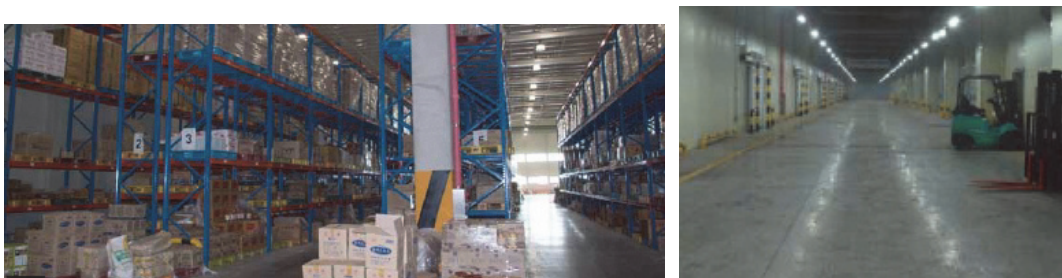


Fig. 1 Oh-San Complex Logistical Warehouse with Rack

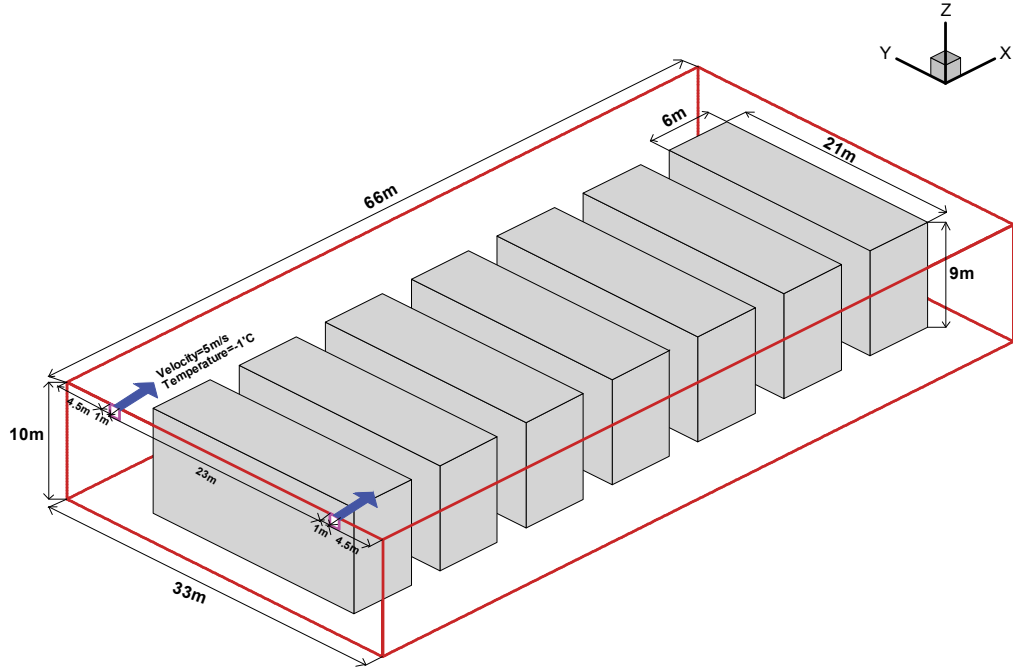


Fig. 2 Schematic diagram for logistical warehouse model

## 2.2 수치해석 기법 및 해석 Code

본 연구에서 수치해석을 위한 Code로 NIST에서 개발한 열유동 해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamics simulator)를 사용하여 연구를 수행하였다. FDS는 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 사용하여 난류를 해석하고 있으며, 본 연구와 같은 저속유동에서 대규모 와류가 발생하는 해석에 강점을 보인다. 수치해석을 위한 격자의 크기는 McGrattan et. Al. [5, 6] 의 제안에 의하여 결정하였다. 격자 크기를 0.25m로 적용 하였을 때, 총 격자 수는 약 140 만개이다. 해석의 효율을 높이기 위해 총 6개의 해석영역으로 나누어 병렬처리 기법으로 해석을 수행하였다. 사용된 OS는 LINUX이며, 사용된 CPU는 Intel 3.0 GHz Dual Core CPU 6개를 사용하였다.

본 연구에서는 난류계산을 위해 다음과 같이 Navier-Stokes eq.을 필터링 하여 해석한다.

$$\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{D\bar{P}}{Dx_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right\} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2)$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 sub-grid scale(SGS) stress이다.

$$\tau_{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} - 2\nu_t \overline{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

여기서  $\nu_t$ 는 모델링이 되어야 하며 FDS에서는 다음과 같은 일반적인 Smagorinsky model을 사용하고 있다.

$$\nu_t = (C_s \overline{\Delta})^2 |\overline{S}| \quad (5)$$

여기서,

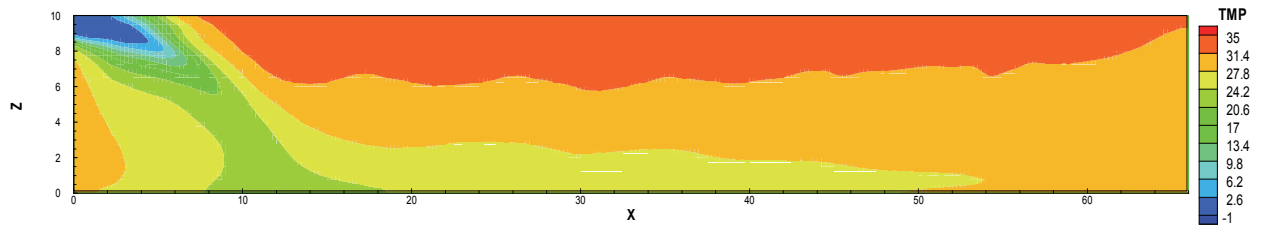
$$|\overline{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (6)$$

$$\overline{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (7)$$

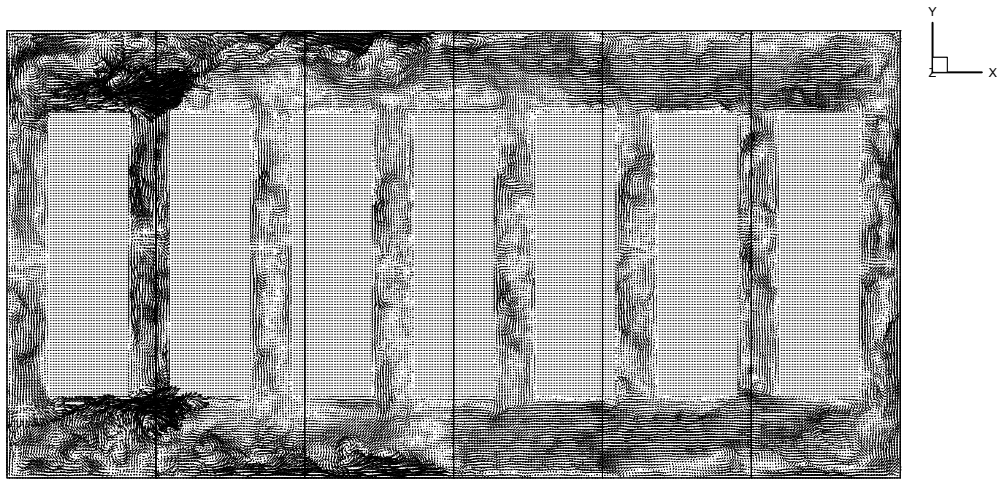
그리고 FDS의 default 조건으로  $C_s=0.2$ 를 사용하였다.

### 2.3 수치해석 결과 및 고찰

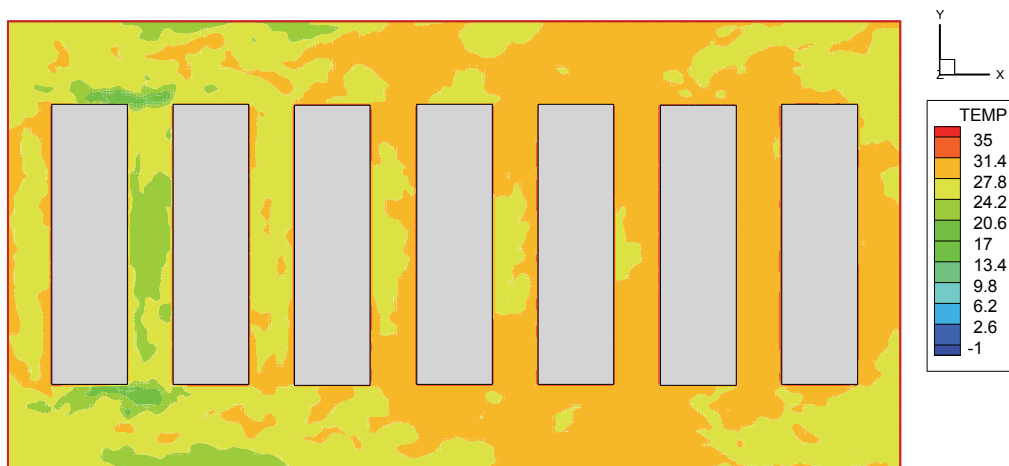
Fig 3은 t=500초에서 유닛 쿨러가 있는 단면에서의 온도 분포도를 보이고 있다. 500초가 지났음에도 불구하고 유닛 쿨러에서 나오는 냉기가 반대편 벽 근처는 물론이고 창고 중앙까지에도 잘 미치지 못하고 있다. Fig 4는 물류 창고 중앙 단면에서의 유동 형태를 나타내고 있다. 유닛 쿨러가 있는 벽면쪽에서는 활발하게 냉기가 창고 내부의 공기와 혼합되고 있지만 반대 벽면으로 갈수록 혼합의 모멘텀이 줄어들어 상대적으로 조용한 유동의 형태를 볼 수 있다. Fig 5는 Fig 4와 동일한 단면에서 온도의 분포를 보이고 있다. 유닛 쿨러 근처에서는 냉기의 분포가 분명하지만 반대 벽면으로 갈수록 온도가 상승하고 특히 랙과 랙 사이에서는 다른 지역보다 고온이 유지되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 랙이 냉기의 유동을 방해하고 있기 때문인 것으로 판단된다. Fig 6는 t=500초에서 26℃를 유지하는 등온도 표면 분포를 보이고 있다. 앞서서도 지적했던 것처럼 창고 중앙의 랙의 존재는 냉기의 활발한 혼합을 방해하는 것으로 판단된다. Fig 7는 유닛 쿨러가 설치된 벽 근처와 창고 중앙의 랙과 랙 사이의 온도 분포를 비교한 것이다. 랙과 랙 사이에 핫 스팟(hot spot)이 존재하여 이곳의 온도가 유닛 쿨러 근처의 온도보다 평균 3℃이상 높은 것으로 조사되었다. 이는 랙과 랙 사이로 냉기의 유동이 활발하지 못하기 때문인 것으로 판단되며, 랙에 저장된 냉동 식품에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 이러한 창고 내부의 핫 스팟 제거 및 냉방의 효율을 높이기 위해서는 창고 천장에 고품량 저속(High Volume Low Speed : HVLS) 팬의 설치가 권장된다.



**Fig. 3** Temperature distribution in the surface of unit cooling in the logistical warehouse



**Fig. 4** Velocity vector distribution in the mid-surface of logistical warehouse with rack



**Fig. 5** Temperature distribution in the mid-surface of logistical warehouse with rack

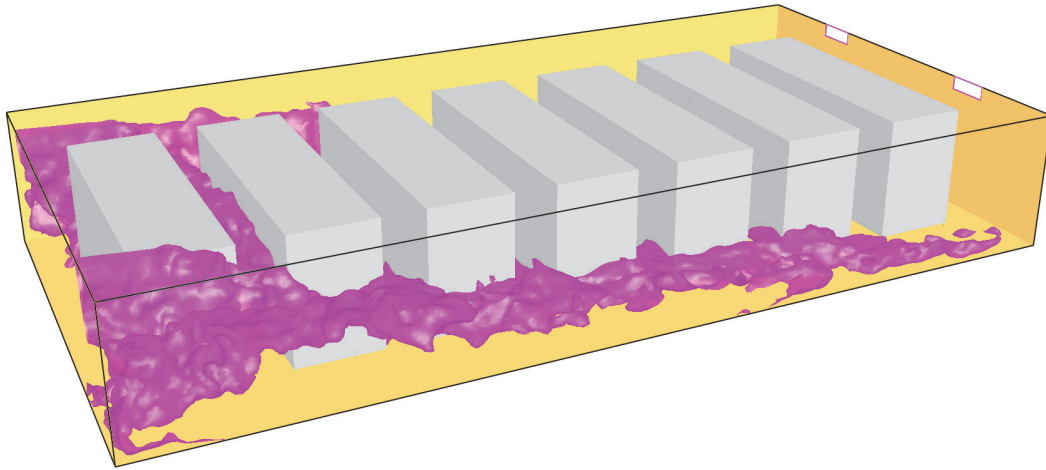


Fig. 6 Iso-surface of temperature(26°C) in the logistical warehouse with rack

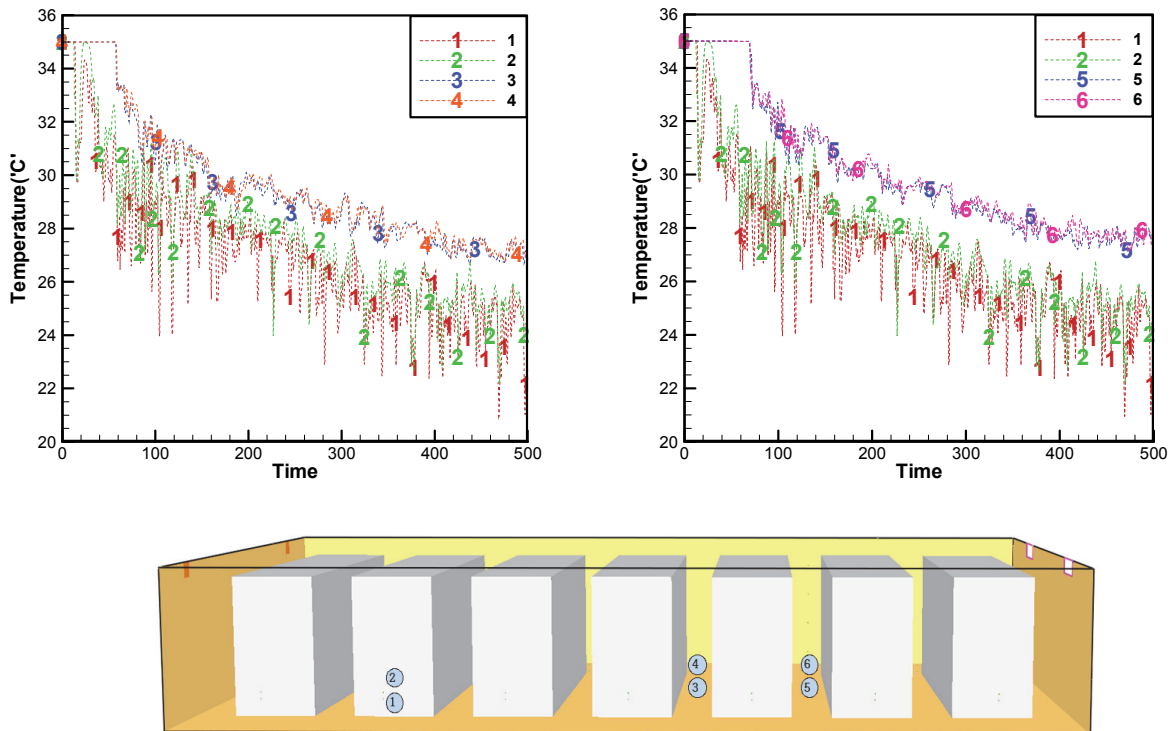


Fig. 7 Temperature distribution with increasing time in the logistical warehouse with rack

### 3. 결론

국내 일반적인 물류 냉동 창고 규모를 대상으로 창고 내부에 랙(rack)의 존재에 따른 온도 분포를 조사하였다. 창고의 규모는 33m x 66m x 10m 이며 창고의 내부는 유닛 쿨러(Unit Cooler)를 사용하여 창고를 냉동/냉장 시켰다. Large eddy simulation(LES:대와류 모사) 기법을 이용하여 창고 내부의 열유동을 해석 하였다. 유닛 쿨러 근처에서는 활발한 냉기와 의 혼

함으로 인하여 저온을 유지하는 반면 랙과 랙 사이에서는 냉기의 혼합이 활발하지 못하여 핫스팟이 존재하며 상대적으로 고온이 유지되는 것으로 조사되었다. 창고 내부 냉방의 효율을 증대 시키기 위해서는 창고 상단부에 고폭량 저속(High Volume Low Speed : HVLS) 팬의 설치가 권장된다.

### 참고문헌

- [1] 박준홍, 박석호, 진형재, 김대인, 조종선(2013) 냉동 물류 창고에서의 공조시스템 최적설계, 대한설비공학회 2013 하계학술대회발표논문집, pp. 657~661.
- [2] 권진경, 이성현, 문종필, 이수장, 김경원(2010) 농산물산지유통센터 작업장의 냉방 설계를 위한 CFD 시뮬레이션 적용, *Journal of Bio-Environment Control*, 19(4) pp. 195-202.
- [3] Hong, M. L., Verboven, P., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B.M.(2000) Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics, *International Journal of Refrigeration* 23, pp. 127-140.
- [4] Kittas, C., Bartzanas, T., (2007) Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations, *Building and Environment* 42, pp. 3774-3784.
- [5] Mcgrattan, K. B., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J. (2007) Fire Dynamics Simulator Version 5 User's Guide, NIST Special Publication 1019-5, pp.31,
- [6] Mcgrattan, K. B., Baum, H.R., Rehm, R.G.(1998) Large eddy simulation of smoke movement, *Fire Safety Journal* 30 (2), pp. 161-178.