

# 소형선박 기관실의 개구부 유동 및 온도에 대한 화재시뮬레이션: 천장 통풍통 위치 및 측면 개구부 크기 영향

정이규\* · 이치영\*\*,\*\*†

\* 한국해양수산연수원 교수, \*\* 부경대학교 소방공학과 교수, \*\*\* 부경대학교 건축·소방공학부 교수

## Fire Simulation for Vent Flow and Temperature in Engine Room of Small Ship: Effects of Ceiling Duct Location and Side Vent Size

Lee-Gyu Jeong\* · Chi Young Lee\*\*,\*\*†

\* Professor, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Republic of Korea

\*\* Professor, Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

\*\*\* Professor, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

**요 약** : 소형선박 기관실 내 화재 시 개구부 유동 및 온도에 대해 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 화재시뮬레이션을 수행하였다. 열방출률이 10 kW 급인 경유(Diesel) 화재를 대상으로 하였고, 천장 통풍통의 위치, 측면 개구부 유·무 및 크기에 대한 영향을 파악하였다. 측면 개구부의 유·무 및 크기는 연기 거동 뿐 아니라 개구부를 통한 질량 유량 및 온도에 지대한 영향을 미쳤다. 측면 개구부가 미설치되거나 크기가 작은 경우 연기층이 기관실 내 바닥까지 도달하였고, 측면 개구부의 크기가 증가함에 따라 개구부를 통한 질량 유량이 증가하고 온도는 감소하는 경향이 나타났다. 반면, 천장 통풍통의 위치가 연기 거동, 개구부를 통한 질량 유량 및 온도에 미치는 영향은 측면 개구부 크기에 비해 상대적으로 미미한 것으로 관찰되었다. 따라서 소형선박의 기관실 내 화재 시 안전성 향상을 위해서는 천장 통풍통 위치보다 측면 개구부의 크기가 더 중요한 설계 인자인 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 소형선박, 기관실 화재, 천장 통풍통, 측면 개구부, 화재시뮬레이션

**Abstract** : Fire simulations were performed using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software to examine the vent flow and temperature in the engine room of a small ship. A diesel fire with a heat release rate of 10 kW was targeted, and the effects of the ceiling duct location, side vent existence and nonexistence, and side vent size were investigated. The existence or nonexistence of the side vent and its size considerably affected the smoke behavior, mass flow rate through the vent, and temperature. When the side vent was not installed or was small, the smoke layer reached the floor in the engine room. In addition, as the side vent size increased, the mass flow rate through the vent increased with decreasing temperature value. However, the effects of the ceiling duct location on the smoke behavior, mass flow rate through the vent, and temperature seemed to be relatively minor compared to those of the side vent size. Therefore, to improve the fire safety of the engine room in a small ship, the side vent size is considered to be a more important design factor than the ceiling duct location.

**Key Words** : Small ship, Engine-room fire, Ceiling duct, Side vent, Fire simulation

### 1. 서 론

현재 우리나라의 선박 등록 총 척수는 2018년 기준으로 약 7만 4천여 척에 이른다(Korean Maritime Safety Tribunal, 2019).

해양 관련 사고가 해마다 증가하는 추세에 있고, 2019년 통계에 의하면 500 ton 미만의 선박에서 일어나는 사고가 전체 사고의 약 91% 이상을 차지하고 있다(Korean Maritime Safety Tribunal, 2019). 소형선박의 구조 및 설비 기준에 의하면 선박 길이가 12 m 미만인 선박을 소형선박으로 정의하는데 (Structure and Facilities Standards for Small Ship, § 2(1)), 대부분의 소형선박들은 자연 통풍 방식으로 선원실 및 기관실을

\* First Author : pas92@seaman.or.kr, 051-620-5785

† Corresponding Author : cylee@pknu.ac.kr, 051-629-6493

소형선박 기관실의 개구부 유동 및 온도에 대한 화재시물레이션: 천장 통풍통 위치 및 측면 개구부 크기 영향

환기시킨다. 소형선박 기관실의 통풍 상태가 좋지 못할 경우, 기관실 내의 온도 상승으로 인해 엔진(Engine)의 출력이 저하되고 화재의 위험성이 증가된다. 또한, 기관실 화재 시 연기 배출이 어렵기 때문에 화재 진압의 장애 요인으로 작용할 수 있다.

일반적으로 5 ton 미만의 소형선박들은 엔진 운전 시 필요한 공기를 공급하고, 기관실 내부의 원활한 통풍 및 온도 상승을 방지하기 위하여 기관실 천장과 측면에 개구부를 설치하여 자연 통풍을 실시한다. 또한, 천장 개구부에는 기관실 내 열기를 배출하고 우천 시 빗방울 등과 같은 것들의 유입을 막기 위하여 여러 가지 형태(예를 들면, 거위목 형상)의 통풍통을 설치하는데, 천장의 통풍통은 엔진의 배기관과 연결되어 있지 않고, 측면 개구부와 같이 별도로 설치하게 된다. 한편, 천장 통풍통 및 측면 개구부의 크기나 형상의 경우, 소형선박의 구조 및 설비 기준에 이에 대한 특별한 규정이 없어 조선소의 경험이나 선주의 요구에 따라 적당하게 설치되어 왔다. 따라서 소형선박의 화재 안전성을 향상시키고 기관실 내 원활한 자연 통풍을 위해서는 현재 별다른 기준 없이 다양한 크기 및 형태로 제작되고 있는 천장 통풍통 및 측면 개구부를 규격화할 필요가 있고, 이를 위해서는 천장 통풍통의 위치 및 측면 개구부의 크기가 화재 시 연기 거동 및 온도에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되어야 한다.

소형선박에서의 통풍 관련 연구가 일부 수행된 바 있다. 이와 관련된 기존 연구 동향을 살펴보면, Kim et al.(2007)은 소형선박 기관실의 원활한 환기를 위하여 기관 출력에 맞는 개량된 거위목 통풍구를 제안하였고, Park(2008)은 소형선박 기관실의 자연발화 방지를 위한 환기 조건 관련 연구를 수행하여, 급기구 및 배기구의 수와 위치에 따른 유동장 및 온도장을 분석하였으며, 이를 통해 자연발화 방지에 적합한 환기 조건을 제시하였다. 또한 Lee and Seo(2004)는 전산해석을 통하여 대규모의 복잡한 선박 내 공기 유동을 검토하였고, 실제 연기감지 시험과 비교를 수행하여 연기감지기 설치 위치에 대한 권고 사항을 도출하였다. 이러한 선행 연구 결과를 토대로 볼 때, 소형선박 기관실 내 천장 통풍통 및 측면 개구부의 역할이 중요함에도 불구하고 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 소형선박 기관실 화재 시 천장 통풍통 및 측면 개구부 조건이 개구부를 통한 연기 거동 및 온도에 미치는 영향을 검토하였다. 5 ton 미만의 소형선박 기관실을 대상으로 하였고, FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 전산시물레이션(Numerical simulation)을 수행하였다. 천장 통풍통의 위치, 측면 개구부 유·무 및 크기에 따른 연기 거동을 가시화하고, 천장 개구부와 좌·우 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량을 측정하였으며, 특정 위치에서 시간에 따

른 온도 변화를 측정하였다. 이를 통해 천장 통풍통과 측면 개구부 조건이 소형선박 기관실 화재 시 연기 거동 및 온도에 미치는 영향을 비교하고 분석하였다. 본 연구 결과는 소형선박의 기관실 내 화재 시 안전성을 확보하기 위해 원활한 연기 배출 및 온도 상승 방지를 위한 가장 효율적이고 적합한 천장 통풍통 및 측면 개구부 조건을 설정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 전산시물레이션 방법 및 조건

### 2.1 전산시물레이션 방법

본 연구에서 설정한 5 ton 미만 소형선박 기관실의 크기 및 구조에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 개략도는 본 연구에서 수행한 전산시물레이션 조건 중 천장 통풍통이 중앙에 설치되어 있고, 측면 개구부가 중앙에 0.5 m (폭)×0.5m(높이) 크기로 설치되어 있는 경우이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 전산시물레이션을 위한 전체 크기는 2.4 m (폭)×2.0 m(깊이)×2.2 m(높이)로 하였고 이 중 기관실 크기는 2.0 m(폭)×2.0 m(깊이)×1.6 m(높이)이고, 재질은 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)로 설정하였다.

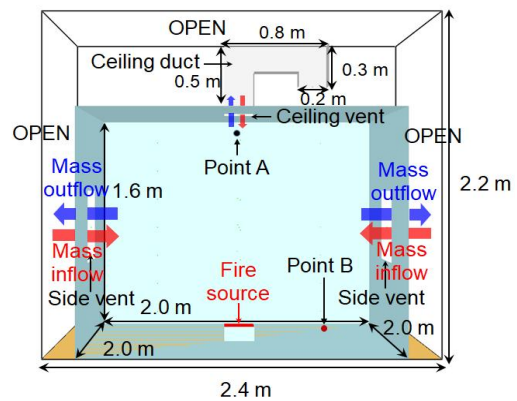


Fig. 1. Schematic diagram for numerical simulation (e.g., with ceiling duct and side vent).

Fig. 2에 천장 개구부의 위치에 대한 개략도 및 실제 전산시물레이션에서 설정한 천장 개구부 및 천장 통풍통의 그림을 나타내었다. 천장 통풍통의 영향을 파악하기 위하여 통풍통의 위치를 변화시켰다. 통풍통이 설치된 경우 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 기관실 상부에 0.2 m(폭)×0.2 m(깊이) 크기의 천장 개구부를 설정하였고 해당 개구부에 통풍통이 연결되도록 하였다. 천장 개구부에 통풍통이 항상 연결되어 있으므로 천장 통풍통의 위치 변경은 천장 개구부의 위치 변경과 동일한 의미이다. 천장 통풍통의 위치는 천장 중심(Fig.

2(b)), 측면(Fig. 2(c)), 모서리(Fig. 2(d))로 변화시켜 전산시물레이션을 수행하였다.

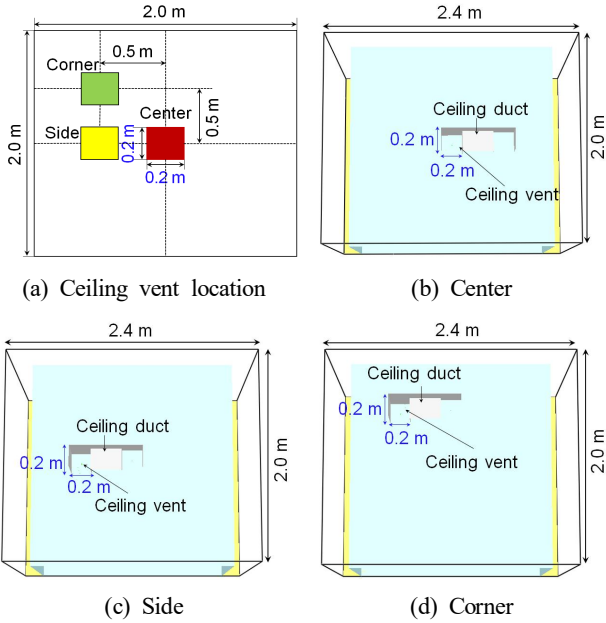


Fig. 2. Schematic diagrams for location of vent with duct in ceiling (i.e., top-view of engine room).

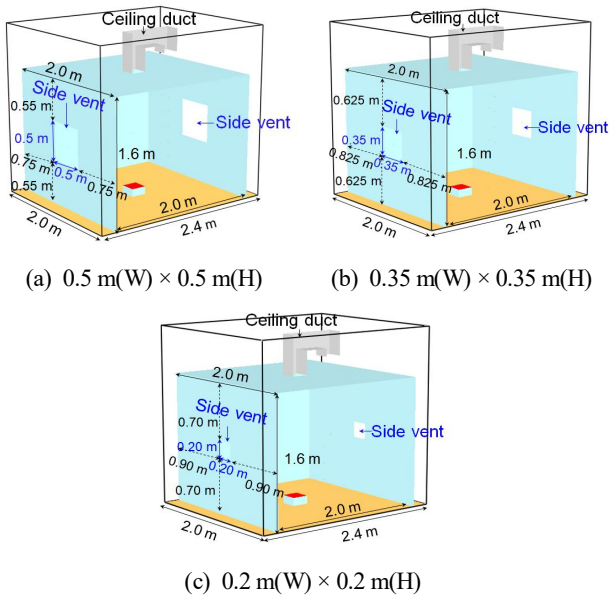


Fig. 3. Schematic diagrams for different side vent sizes.

한편, 측면 개구부 영향을 파악하기 위하여 측면 개구부의 유·무 및 Fig. 3과 같이 크기를 변화시켰다. 측면 개구부가 있는 경우 위치는 측면의 중앙으로 설정하였고, 크기의

경우 0.5 m(폭)×0.5 m(높이), 0.35 m(폭)×0.35 m(높이), 0.2 m(폭)×0.2 m(높이)로 변화시켜 전산시물레이션을 수행하였다.

한편, 화원은 0.2 m(폭)×0.2 m(깊이)×0.1 m(높이) 크기로 기관실 내 바닥 중심에 위치시켰으며, 화원의 열방출률(HRR; Heat Release Rate)은 아래의 식(1)과 같은 t-squared fire model (Karlsson and Quintiere, 1999)을 이용하였다.

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (1)$$

여기서,  $\dot{Q}$ 는 열방출률(kW),  $\alpha$ 는 화재성장계수(kW/s<sup>2</sup>),  $t$ 는 시간(s)을 나타낸다. 본 연구에서는 모든 경우에 대해 열방출률을 10 kW로 동일하게 설정하였다. 이는 천장 통풍통 및 측면 개구부의 조건 변화에 따른 결과 간 상대적인 비교를 통해 천장 통풍통 및 측면 개구부의 영향을 파악하려는 본 연구의 목적 등을 고려하여 설정한 것이다. 한편, 화재성장 속도는 fast growth로 가정하였고, 연료로는 소형선박 엔진의 주 연료인 경유(Diesel)를 적용하였다.

전산시물레이션을 위해 FDS(Ver. 6.6.0)를 이용하였고, 전산시물레이션 시간은 300 s로 설정하였다. FDS는 화재 시 연기 거동 및 열전달 현상 분석을 위해 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발되었다. FDS의 신뢰성 및 정확도에 대해 다양한 조건에서 확인(Verification) (McGrattan et al., 2017a) 및 검증(Validation)(McGrattan et al., 2017b) 작업이 수행된 바 있고, 현재 화재 및 소방 분야의 연구에 널리 활용되고 있다. 전산시물레이션 시 격자의 크기는  $D^*/\delta x$ (Plume resolution index)와 NIST/NRC(Nuclear Regulatory Commission)의 연구 결과를 기반으로 설정(McGrattan et al., 2017b)하였다. Plume resolution index에서  $D^*$ 는 특성화재직경(Characteristic fire diameter)으로 아래의 식(2)와 같이 계산되고  $\delta x$ 는 격자 한 변의 길이를 나타낸다.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_{\infty}$ 는 주변 공기 밀도,  $T_{\infty}$ 는 주변 공기 온도,  $c_p$ 는 주변 공기 비열,  $g$ 는 중력가속도,  $\dot{Q}$ 은 화원의 열방출률을 의미한다. 본 연구에서는 주변 공기 밀도는 1.204 kg/m<sup>3</sup>, 주변 공기 온도는 293 K, 주변 공기 비열은 1.007 kJ/kg·K으로 설정(Cengel and Ghajar, 2015)하여 계산하였다. 한편, NIST/NRC의 연구 결과에서 Plume resolution index의 범위는 5–11이다 (McGrattan et al., 2017b). 따라서 식(2)를 이용하여 도출한 특성화재직경과 NIST/NRC의 Plume resolution index 범위, 그 밖에 컴퓨터의 성능 및 계산 시간 등을 고려하여 격자 크기를

0.02 m(x축) × 0.02 m(y축) × 0.02 m(z축)로 설정하였고, 이 경우 전산시물레이션을 위한 총 격자수는 1,320,000개이다.

전산시물레이션을 통해 연기 거동을 가시화하였고, 천장 통풍통이 설치되어 있는 조건에서 천장 개구부와 측면 개구부를 통한 질량 유량을 측정하였다. 또한, Fig. 1에 나타난 바와 같이 소형선박 기관실 내 대표적인 지점인 Point A와 Point B에서 시간에 따른 온도를 측정하였다. Point A는 천장 통풍통이 연결된 상부 개구부의 정중앙에서 0.2 m 아래 위치이고, Point B는 기관실 내 하부의 지점으로 화원과 측면 개구부 사이에 위치해 있다. 즉, 화원 중심에서 우측 방향으로 0.55 m 떨어져 있고, 바닥으로부터 0.2 m 높이의 위치로 설정하였다.

### 2.2 전산시물레이션 조건

Table 1에 본 연구에서 수행한 전산시물레이션 조건을 정리하여 나타내었다. 본 연구에서는 측면 개구부 유·무의 영향, 천장 통풍통의 위치, 측면 개구부의 크기 영향을 검토하였다. Case 1은 천장 통풍통이 천장 모서리에 설치되고 측면 개구부가 미설치된 경우이고, Case 2는 천장 통풍통이 모서리에 설치되고 측면 개구부가 설치된 경우를 나타낸다. 따라서 Case 1과 Case 2 간 비교를 통해 측면 개구부 유·무의 영향을 파악하였다. 한편, Case 2, Case 3, Case 4는 측면 개구부 조건은 동일(위치는 중앙이고 크기는 0.5 m × 0.5 m)하고 천장 통풍통의 위치만 각각 천장 모서리, 측면, 중앙인 경우로, 이를 통해 천장 통풍통의 위치 영향을 파악하였다. Case 4, Case 5, Case 6의 경우 천장 통풍통의 조건은 동일(천장 중앙에 설치)하고 측면 개구부의 크기가 각각 0.5 m × 0.5 m(0.25 m<sup>2</sup>), 0.35 m × 0.35 m(0.1225 m<sup>2</sup>), 0.2 m × 0.2 m(0.04 m<sup>2</sup>)인 경우로 해당 결과 간 비교를 통해 측면 개구부 크기의 영향을 검토하였다. 이때 2개의 측면 개구부와 천장 통풍통이 연결된 상부 개구부의 면적비는 Case 4, Case 5, Case 6의 경우 각각 12.5, 6.125, 2이다.

Table 1. Summary of numerical simulation conditions

Case	Ceiling duct		Side vent	
	Condition	Location	Condition	Size(W×H)
Case 1	With	Corner	Closed	-
Case 2	With	Corner	Opened	0.5 m × 0.5 m
Case 3	With	Side	Opened	0.5 m × 0.5 m
Case 4	With	Center	Opened	0.5 m × 0.5 m
Case 5	With	Center	Opened	0.35 m × 0.35 m
Case 6	With	Center	Opened	0.2 m × 0.2 m

## 3. 전산시물레이션 결과 및 분석

### 3.1 연기 거동 가시화

#### 3.1.1 측면 개구부 유·무의 영향

측면 개구부의 유·무에 따른 기관실 내 연기 거동을 비교하기 위하여 Fig. 4에 Case 1(측면 개구부가 미설치된 경우)과 Case 2(측면 개구부가 설치된 경우)에 대한 시간에 따른 가시화 결과를 비교하여 나타내었다.

2가지 경우 모두 화원에서 발생한 연기가 기관실 내 천장에 도달한 후 상부 벽을 따라 반경 방향으로 이동하였다. 이후 일부 연기는 천장 개구부를 통해 유출되었고, 시간이 지남에 따라 상부로부터 연기층의 하강이 나타났다. 이후 Fig. 4(a)와 같이 측면 개구부가 미설치되어 있는 경우 연기층은 빠르게 하강하여 기관실 내 바닥까지 도달하는 것이 관찰되었다. 반면, Fig. 4(b)와 같이 측면 개구부가 개방되어 있는 경우 연기층이 하강하여 측면 개구부를 통한 연기 유출이 일어났고, 기관실 내 중심부의 연기층 높이는 연기가 유출되는 측면 개구부 근처에서 유지되었다. 즉, 가시화 결과를 통해 측면 개구부가 기관실 내 연기층 높이와 같은 연기 거동에 지대한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

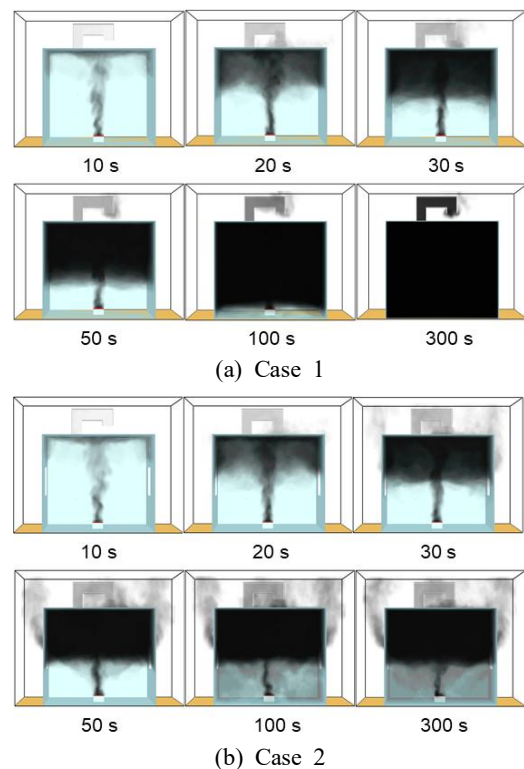


Fig. 4. Visualization for effects of existence and nonexistence for side vent on smoke behavior.

### 3.1.2 천장 통풍통 위치의 영향

천장 통풍통 위치가 연기 거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 Fig. 5에 Case 2(천장 통풍통이 천장 모서리에 있는 경우), Case 3(천장 통풍통이 천장 측면에 있는 경우), Case 4(천장 통풍통이 천장 중앙에 있는 경우)에 대한 시간에 따른 연기 거동 가시화 결과를 비교하여 나타내었다.

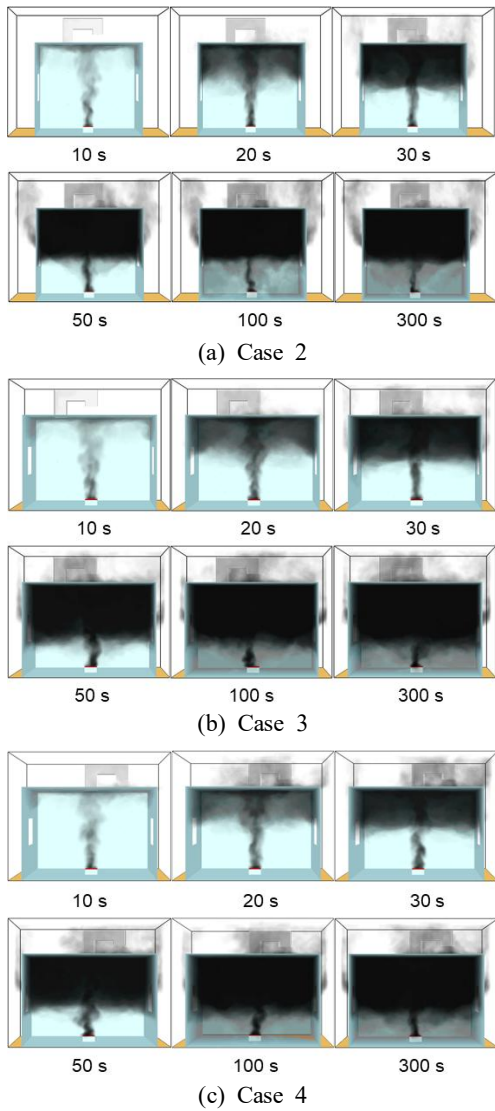


Fig. 5. Visualization for effect of ceiling duct location on smoke behavior.

모든 경우에서 가시적으로 관찰되는 연기 거동은 유사하였다. 화재 초기에 화원에서 발생한 연기가 기관실 내 천장에 도달한 후 상부 벽을 따라 반경 방향으로 이동하였고, 일부 연기는 천장 개구부에 연결된 천장 통풍통을 통해 유출되었다. 시간이 지남에 따라 상부로부터 연기층이 하강하였고, 측면 개구부로의 유출이 관찰되었다. 일부 연기는 측면 벽을

따라 하강하여 기관실 내 바닥까지 도달하는 것이 관찰되었으나 기관실 중심부에 존재하는 대부분의 연기층은 연기가 유출되는 측면 개구부 근처에서 유지되는 경향이 관찰되었다. Fig. 5에 나타난 가시화 결과 비교를 통해 천장 통풍통의 위치가 기관실 내 연기층 높이와 같은 가시적인 연기 거동에 미치는 영향이 미미하다는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.1.3 측면 개구부 크기의 영향

Fig. 6에 Case 4(측면 개구부 크기가 0.5 m × 0.5 m인 경우)와 함께 Case 5(측면 개구부 크기가 0.35 m × 0.35 m인 경우)와 Case 6(측면 개구부 크기가 0.2 m × 0.2 m인 경우)에 대해 시간에 따른 연기 거동 가시화 결과를 나타내었다.

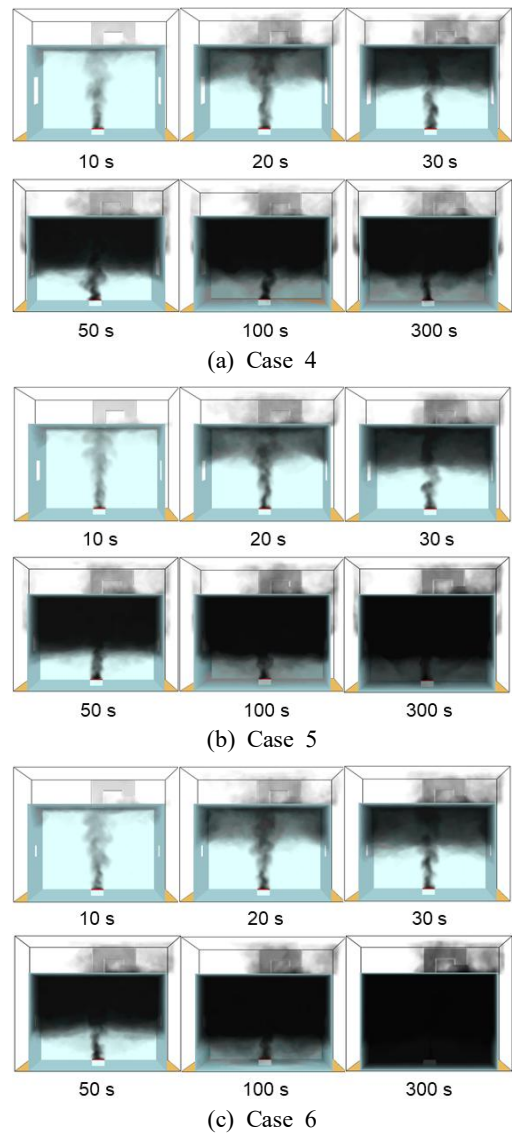


Fig. 6. Visualization for effect of side vent size on smoke behavior.

화재 초기에 모든 경우에서 화원에서 발생한 연기가 기관실 내 천장에 도달한 후 천장 벽면을 따라 반경 방향으로 이동하였다. 이후 일부 연기는 상부 개구부를 통해 유출되었고, 시간이 지남에 따라 상부로부터 연기층의 하강이 관찰되었다. 이후, Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)의 경우와 달리 측면 개구부 크기가 가장 작은 Fig. 6(c)의 경우 대부분의 연기층이 기관실 내 바닥까지 도달하고, 측면 개구부를 통한 연기 유출은 거의 일어나지 않는 것처럼 관찰되었다. 이를 통해 측면 개구부의 크기가 기관실 내 연기 거동에 지대한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 아래와 같이 연기 거동에 대한 추가적인 분석을 수행하였다. 일반적으로 기관실 내 화재 시 연기의 질량 유량 간 관계는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_{s,f} + (\dot{m}_{s,i} - \dot{m}_{s,o})_{cv} + (\dot{m}_{s,i} - \dot{m}_{s,o})_{sv} = dm_{s,er}/dt \quad (3)$$

여기서  $\dot{m}_{s,f}$ 는 화원에 의해 발생하는 연기의 질량 유량,  $\dot{m}_{s,i}$ ,  $\dot{m}_{s,o}$ 는 각각 개구부를 통한 연기의 유입 및 유출 질량 유량, 하점자  $cv$ 와  $sv$ 는 각각 천장 통풍통이 연결된 천장 개구부와 측면 개구부,  $dm_{s,er}/dt$ 는 시간에 따른 기관실 내 연기의 질량 변화율을 나타낸다. 본 연구의 모든 조건에서 개구부를 통한 연기의 유입은 없으므로 식(3)은 아래와 같은 식(4)의 형태로 단순화된다.

$$\dot{m}_{s,f} - \dot{m}_{s,o,cv} - \dot{m}_{s,o,sv} = dm_{s,er}/dt \quad (4)$$

식(4)는 측면 개구부를 통한 연기 유출이 있는 경우를 나타내고, 측면 개구부를 통한 연기 유출이 일어나지 않는 경우(즉, 천장 개구부를 통해서만 연기 유출이 일어나는 경우)에는  $\dot{m}_{s,o,sv} = 0$ 이므로 식(4)가 아래의 식(5)와 같이 표현된다.

$$\dot{m}_{s,f} - \dot{m}_{s,o,cv} = dm_{s,er}/dt \quad (5)$$

또한, 기관실 내 연기층이 모든 위치에서 균일한 두께로 하강한다고 가정할 때, 식(4)와 식(5)로부터 천장에서 형성되는 연기층의 두께( $\delta_s$ )는 아래의 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_s = V_s \Delta t = \frac{dm_{s,er}/dt}{\rho_s A_r} \Delta t \quad (6)$$

여기서  $V_s$ 와  $\Delta t$ 는 각각 천장으로부터 형성되는 연기층의 하강 속도와 연기층 형성에 대한 시간 차이를 나타낸다. 그

리고  $\rho_s$ 와  $A_r$ 은 각각 연기의 밀도 및 기관실의 천장 면적을 나타낸다.

가시화 결과 측면 개구부를 통한 연기 유출이 관찰되는 경우(예를 들면, Cases 2-5), 천장으로부터 형성된 연기층이 측면 개구부의 상부에 도달하기 전까지는 식(5)와 식(6)에 의해, 이후 연기층이 더욱 하강하여 측면 개구부를 통해 연기 유출이 일어나면 식(4)와 식(6)에 의해 연기층의 두께가 결정된다. 가시화 결과, 측면 개구부를 통한 연기 유출이 관찰되는 경우에는 연기층이 기관실 바닥까지 도달하지 않았는데 이는 식(4)에서 측면 개구부를 통한 질량 유량( $\dot{m}_{s,o,sv}$ )이 존재하기 때문으로 판단되고, 정상상태(Steady-state) 조건의 경우, 식(4)에서  $dm_{s,er}/dt = 0$ 이므로, 연기층의 두께는 화원에 의해 발생하는 연기의 질량 유량이 천장 개구부를 통해 유출되는 연기의 질량 유량과 측면 개구부를 통해 유출되는 연기의 질량 유량의 합과 같아지는 위치(즉,  $\dot{m}_{s,f} = \dot{m}_{s,o,cv} + \dot{m}_{s,o,sv}$ )에서 형성되는 것으로 판단된다.

반면, 측면 개구부를 통한 연기 유출 질량 유량이 없는 경우, 식(5)와 식(6)을 이용하여 연기층의 두께를 예측할 수 있다. 본 연구에서 측면 개구부를 통한 연기 유출이 관찰되지 않은 경우(예를 들면, Case 1과 Case 6)의 가시화 결과, 천장에서부터 형성된 연기층이 기관실 내 바닥까지 하강하는 것처럼 나타났다. 이는 식(5)를 토대로 볼 때, 화원에 의해 발생하는 연기의 질량 유량( $\dot{m}_{s,f}$ )이 천장 개구부를 통해 유출되는 연기의 질량 유량( $\dot{m}_{s,o,cv}$ )보다 크기 때문으로 판단된다.

식(3)~식(6)의 경우, 일부 가정이 전제되고 있으나 기관실 내 연기의 거시적인 거동에 대한 일반적인 경향을 설명하는데 타당하고 의미가 있다고 판단된다. 하지만, 실제 연기 거동에 대한 정량적인 분석을 위해서는 추가적인 정보가 요구된다. 또한, 과도 조건(Transient condition)에서 실제 세부적인 연기 거동을 이론적인 접근(Theoretical approach)을 통해 정확하게 예측 및 검토하기 위해서는 이와 관련된 실험데이터 확보가 필요하다. 따라서 본 조건에서 연기의 실제 세부 거동에 대해 정확하고 정량적인 분석을 위해서는 본 연구와 같은 전산시뮬레이션 뿐 아니라 추후 이론적인 연구 및 실험적 연구가 함께 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 3.2 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량

### 3.2.1 측면 개구부 유·무의 영향

Fig. 7에 측면 개구부 유·무에 따라 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량 측정 결과를 시간에 따라 나타내었다. Case 1은 측면 개구부가 미설치되어 있고, Case 2는 측면 개구부가 0.5 m × 0.5 m 크기로 설치되어 있는 경우이다. Case 1과 Case 2 모두 천장 통풍통은 모서리에 설치되어 있다.

2가지 경우 모두에서 일정 시간 이후 정상상태에 도달하여 비교적 일정한 질량 유량 값으로 유지되는 것을 알 수 있었고, 다른 경우(즉, Cases 3-6)의 시간에 따른 유출 및 유입 질량 유량 곡선에서도 이와 유사한 경향(즉, 일정한 시간 이후 정상상태에 도달하는 경향)이 관찰되었다. 따라서 본 연구에서는 정상상태에 도달하였다고 판단되는 시간 이후에서의 특정 시간 구간(즉, 250 s-300 s)에서의 측정 데이터를 이용하여 평균값과 표준편차를 도출하였고, 이를 이용하여 측면 개구부 유·무(Table 2), 천장 통풍통의 위치(Table 3), 측면 개구부 크기(Table 4)의 영향에 대해 분석하였다.

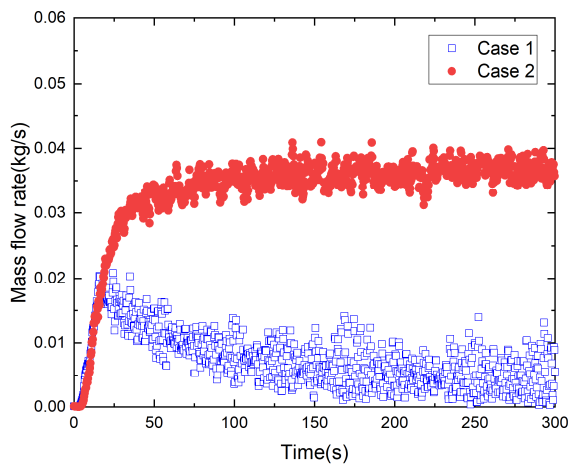


Fig. 7. Temporal variation of mass flow rates for outflow through ceiling vent according to existence and nonexistence for side vent.

Table 2에 측면 개구부의 유·무에 따른 천장 개구부 및 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량의 평균값과 함께 괄호 안에는 측정 데이터의 표준편차를 나타내었다.

Table 2. Effects of existence and nonexistence for side vent on mass flow rates for outflow and inflow through ceiling and side vents

Case	Ceiling vent(kg/s)		Side vent(kg/s)			
	Outflow	Inflow	Left		Right	
			Outflow	Inflow	Outflow	Inflow
Case 1	0.0050 (±0.0030)	0.0030 (±0.0020)	-	-	-	-
Case 2	0.037 (±0.0011)	0.000 (±0.000)	0.043 (±0.0021)	0.061 (±0.0021)	0.042 (±0.0021)	0.061 (±0.0019)

천장 개구부를 통한 유출 질량 유량의 경우, 측면 개구부가 설치된 경우(Case 2, 0.037 kg/s)가 미설치된 경우(Case 1,

0.0050 kg/s)에 비해 약 640 % 많은 것으로 나타났고, 측면 개구부를 통한 유출 질량 유량을 함께 고려할 경우 0.122 kg/s로 측면 개구부가 설치된 경우(Case 2)가 미설치된 경우(Case 1)에 비해 총 유출 질량 유량이 약 2340 %나 많았다. 한편, 천장 개구부를 통한 유입 질량 유량의 경우, 측면 개구부가 미설치된 경우(Case 1)에서 약 0.0030 kg/s로 측정되었으나 측면 개구부가 설치된 경우(Case 2)에서는 측정되지 않았다.

### 3.2.2 천장 통풍통 위치의 영향

Table 3에 천장 통풍통 위치가 개구부 유동의 유출 및 유입 질량 유량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Cases 2-4를 비교하여 나타내었다. 3가지 경우 모두 0.5 m × 0.5 m 크기로 측면 개구부가 설치된 조건이고, Case 2, Case 3, Case 4는 각각 천장 통풍통의 위치가 천장의 모서리, 측면, 중앙인 경우이다.

Table 3. Effect of ceiling duct location on mass flow rates for outflow and inflow through ceiling and side vents

Case	Ceiling vent(kg/s)		Side vent(kg/s)			
	Outflow	Inflow	Left		Right	
			Outflow	Inflow	Outflow	Inflow
Case 2	0.037 (±0.0011)	0.000 (±0.000)	0.043 (±0.0021)	0.061 (±0.0021)	0.042 (±0.0021)	0.061 (±0.0019)
Case 3	0.037 (±0.0013)	0.000 (±0.000)	0.043 (±0.0016)	0.060 (±0.0017)	0.042 (±0.0017)	0.062 (±0.0017)
Case 4	0.039 (±0.0024)	0.000 (±0.000)	0.042 (±0.0021)	0.061 (±0.0021)	0.041 (±0.0020)	0.061 (±0.0018)

천장 통풍통이 중앙에 있는 경우(Case 4)가 측면(Case 3)이나 모서리(Case 2)에 있는 경우에 비해 천장 개구부를 통해 유출되는 질량 유량이 약간 많은 것처럼 측정되었으나 측정 데이터의 표준편차를 고려하였을 때 천장 통풍통 위치의 영향은 미미하다고 판단된다. 또한, 천장 개구부를 통한 유입 질량 유량은 측정되지 않았으며, 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량 또한 천장 통풍통 위치에 따라 크게 차이 나지 않는 것으로 나타났다. 한편, 3가지 경우 모두에서 측면 개구부를 통한 유입 질량 유량이 유출 질량 유량에 비해 많은데 이는 천장 개구부를 통한 유출 질량 때문으로 판단된다. 즉, Table 3에 나타낸 바와 같이 양쪽 측면 개구부를 통한 유입 질량의 합은 모든 경우에서 약 0.122 kg/s이고 유출 질량 유량의 합은 Case 2와 Case 3의 경우 약 0.085 kg/s, Case 4의 경우 약 0.083 kg/s로 측정되었는데 각 경우에서 측면 개구부를 통한 유입 질량 유량과 유출 질량 유량 간 차이는 천장 개구부를 통한 유출 질량(Case 2와 Case 3의 경우 약 0.037 kg/s, Case 4의 경우 약 0.039 kg/s)과 같은 것을 확인할

수 있다. 따라서 측면 개구부를 통한 유입 질량 유량이 유출 질량 유량보다 많은 이유는 천장 개구부를 통한 유입 질량 유량은 없고, 유출 질량 유량만 존재하기 때문이다.

### 3.2.3 측면 개구부 크기의 영향

Table 4에 측면 개구부 크기가 개구부 유동의 유출 및 유입 질량 유량에 미치는 영향에 대해 측정 데이터의 평균값과 표준편차를 정리하여 나타내었다. 측면 개구부의 크기의 경우 Case 4는 0.5 m×0.5 m, Case 5는 0.35 m×0.35 m, Case 6은 0.2 m×0.2 m로 각각의 면적은 0.25 m<sup>2</sup>, 0.1225 m<sup>2</sup>, 0.04 m<sup>2</sup>이다. 3가지 경우에서 천장 통풍통은 천장 중앙에 존재하는 조건이다.

Table 4. Effect of side vent size on mass flow rates for outflow and inflow through ceiling and side vents

Case	Ceiling vent(kg/s)		Side vent(kg/s)			
	Outflow	Inflow	Left		Right	
			Outflow	Inflow	Outflow	Inflow
Case 4	0.039 (±0.0024)	0.000 (±0.000)	0.042 (±0.0021)	0.061 (±0.0021)	0.041 (±0.0020)	0.061 (±0.0018)
Case 5	0.042 (±0.0023)	0.000 (±0.000)	0.017 (±0.0012)	0.038 (±0.0016)	0.017 (±0.0012)	0.038 (±0.0017)
Case 6	0.044 (±0.0021)	0.000 (±0.000)	0.000 (±0.000)	0.022 (±0.0031)	0.000 (±0.000)	0.022 (±0.0030)

한편, Fig. 8에는 Table 4의 결과를 측면 개구부 면적에 따라 그래프로 나타내었다. 측면 개구부를 통한 유입 및 유출 질량 유량의 경우 좌측 및 우측 개구부를 통한 질량 유량의 합으로 나타내었다.

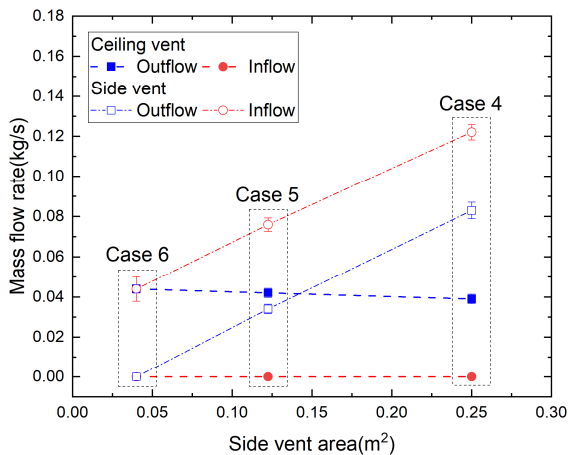


Fig. 8. Mass flow rates for outflow and inflow through ceiling and side vents with side vent size.

측면 개구부 크기가 증가함에 따라 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량은 약간 감소하는 경향이 관찰되었고, Case 6인 경우(0.044 kg/s)가 Case 4인 경우(0.039 kg/s)보다 약 13% 많은 것으로 나타났다. 한편, 천장 개구부를 통한 유입 질량 유량은 3가지 경우 모두에서 측정되지 않았다. 반면, 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 측면 개구부를 통한 유출 질량 유량이 증가하는 경향이 나타났다. Case 4인 경우(0.083 kg/s)가 Case 5인 경우(0.034 kg/s)보다 약 144% 많은 것으로 나타났으며, Case 6인 조건은 측정되지 않았다. 한편, 유입 질량 유량의 경우도 유출 질량 유량의 경우와 마찬가지로 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 증가하였다. Case 4인 경우(0.122 kg/s)와 Case 5인 경우(0.076 kg/s)가 Case 6인 경우(0.044 kg/s)보다 각각 약 177%와 73% 많은 것으로 나타났다. 또한, 유입 질량 유량이 유출 질량 유량보다 많았는데 이는 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량 때문이다. 한편, 비교적 측면 개구부 크기가 작은 경우(Case 5와 Case 6)에서는 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량이 측면 개구부를 통한 유출 질량 유량보다 많았으나 측면 개구부가 큰 경우인 Case 4에서는 측면 개구부를 통한 질량 유량이 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량보다 많았다. 또한, 개구부 크기가 가장 작은 Case 6 조건에서는 측면 개구부가 있음에도 불구하고 측면 개구부를 통해 연기 유출은 일어나지 않고, 외부 공기의 유입만 일어나는 것으로 나타났다.

Table 4와 Fig. 8을 토대로 볼 때, 측면 개구부의 크기는 천장 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량에는 영향이 미미한 반면, 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량에 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

한편, 본 연구에서 측정된 질량 유량에 대해 기존 상관식을 이용하여 검토를 수행하였다. 본 연구에서 이용한 Zukoski 플룸(Plume)의 질량 유량( $\dot{m}_p$ )과 이상플룸(Ideal plume)의 플룸 속도( $U$ ) 및 온도( $T_p$ )에 대한 기존 상관식(Karllsson and Quintiere, 1999)을 식(7)~식(9)에 각각 나타내었다.

$$\dot{m}_p = 0.21 \left( \frac{\rho_\infty^2 g}{c_p T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (7)$$

$$U = 1.94 \left( \frac{g}{c_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{-1/3} \quad (8)$$

$$\Delta T = T_p - T_\infty = 5.0 \left( \frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}^{2/3} z^{-5/3} \quad (9)$$

여기서,  $z$ 는 화원으로부터의 수직 높이를 의미하고, 나머지 기호 및 물성치는 식(2)에서 설명한 내용과 동일하다.



또한, 천장 개구부를 통해 유출되는 질량 유량은 식(10)과 같이 계산 가능하다고 가정할 수 있고, 이때 밀도는 식(11)의 밀도( $\rho$ )와 온도( $T$ ) 간 관계식(Karlsson and Quintiere, 1999)을 이용하여 계산할 수 있다. 그리고 측면 개구부를 통한 유출 질량 유량( $\dot{m}_{o,sv}$ )은 식(12)와 같이 구할 수 있다고 생각할 수 있다.

$$\dot{m}_{o,cv} = C_d \rho A_{cv} U \quad (10)$$

$$\rho = 353/T \quad (11)$$

$$\dot{m}_{o,sv} = \dot{m}_p - \dot{m}_{o,cv} \quad (12)$$

여기서  $C_d$ 와  $A_{cv}$ 는 각각 유량계수(Flow coefficient)와 천장 통풍통이 연결된 천장 개구부의 면적을 의미한다. 일반적으로 유량계수의 경우 0.6–0.7 범위(Karlsson and Quintiere, 1999)이고, 본 계산에서는 0.6으로 가정하였다.

식(7)–식(12)를 이용하여 계산한 결과, 천장 통풍통이 연결된 천장 개구부 입구에서의 플룸 질량 유량, 플룸 속도 및 온도는 0.324 kg/s, 1.104 m/s, 52.22°C로 나타났다. 또한, 천장 통풍통이 연결된 천장 개구부 및 측면 개구부를 통한 유출 질량 유량의 경우, 각각 0.029 kg/s와 0.295 kg/s로 나타났다. 또한, 본 조건에서 각 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량 간에 식(13)과 같은 관계가 성립한다.

$$\dot{m}_{o,cv} + \dot{m}_{o,sv} = \dot{m}_{i,cv} + \dot{m}_{i,sv} \quad (13)$$

따라서, 천장 개구부를 통한 유입 질량 유량이 없는 경우, 상관식에 의해 계산된 측면 개구부를 통한 유입 질량 유량은 0.324 kg/s이다.

Cases 4–6의 개구부를 통한 질량 유량에 대해 기존 상관식에 의한 결과와 본 전산시뮬레이션에 의한 결과를 비교하여 보면, 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량은 본 전산시뮬레이션 결과가 기존 상관식의 경우보다 작고, 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량은 큰 것으로 나타났다. 예를 들면, 측면 개구부가 가장 큰 Case 4에 대한 전산시뮬레이션 결과, 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량은 각각 0.083 kg/s, 0.122 kg/s로 기존 상관식에 의한 0.295 kg/s, 0.324 kg/s보다 작은 것으로 나타났고, 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량의 경우 본 전산시뮬레이션 결과는 0.039 kg/s로 기존 상관식으로부터 계산된 0.029 kg/s보다 큰 것으로 확인되었다. 즉, Zukoski 플룸과 이상플룸 상관식의 경우가 본 전산시뮬레이션 결과보다 전체 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량을 더 크게 예측하였다. 이러한 경향이 나타난 이유 중

하나의 Zukoski 플룸과 이상플룸 상관식의 경우 개방된 조건에서 도출된 상관식으로 화재 플룸(Fire plume)으로의 유입 유동이 원활하게 일어날 수 있는 조건인 반면, 본 전산시뮬레이션 조건은 구획실의 개구부를 통해서만 유입 및 유출 유동이 일어날 수 있는 조건(즉, 유입 및 유출 유동이 제한되는 조건)이기 때문으로 판단된다. 한편, Fig. 8에서 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량은 증가하고, 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량은 감소하는 경향이 관찰되었는데, 앞서 언급한 바와 같이 Zukoski 플룸과 이상플룸 상관식을 이용하여 도출한 결과의 경우 본 연구에서 측면 개구부가 가장 큰 Case 4보다 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량은 크고, 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량은 작은 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 Zukoski 플룸과 이상플룸 상관식의 경우 개방된 조건으로 이는 측면 개구부가 매우 큰 조건으로 생각할 수 있다. 따라서 본 전산시뮬레이션 결과와 기존 상관식인 Zukoski 플룸과 이상플룸 상관식에 의한 결과를 종합적으로 고려할 때, 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 측면 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량은 증가하고, 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량은 감소하는 전체적인 경향은 타당한 것으로 판단된다.

### 3.3 Point A와 Point B에서의 온도 변화

#### 3.3.1 측면 개구부 유·무의 영향

측면 개구부의 유·무에 따른 Point A와 Point B에서의 온도 변화 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 개구부를 통한 유출 및 유입 질량 유량과 동일한 방법으로 250 s–300 s 구간에서의 측정 데이터를 이용하여 평균값과 표준편차를 도출하여 나타내었다.

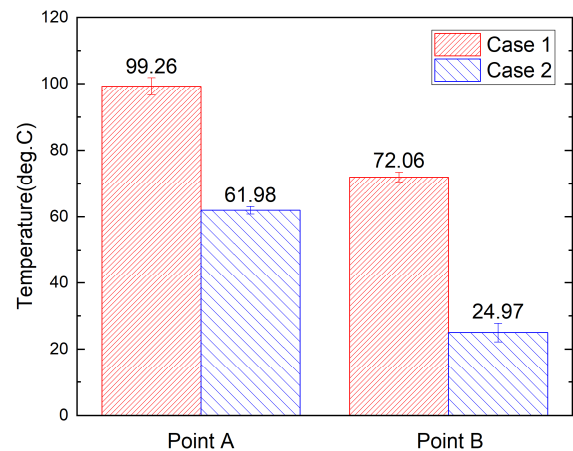


Fig. 9. Effects of existence and nonexistence for side vent on temperatures at Points A and B.

모든 조건에서 Point A에서의 온도가 Point B에서의 온도에 비해 높은 것을 알 수 있는데 Fig. 1에 나타난 바와 같이 Point A는 기관실 내 고온의 연기가 유출되는 경로에 있기 때문으로 판단된다. 한편, 측면 개구부가 설치된 경우(Case 2)가 미설치된 경우(Case 1)에 비해 전체적으로 온도가 낮은 것으로 관찰되었다. 측면 개구부가 설치된 경우(Case 2)가 미설치된 경우(Case 1)에 비해 Point A에서는 약 37.28°C, Point B에서는 약 47.09°C 낮은 것으로 측정되었다. 한편, 측면 개구부가 폐쇄된 경우(Case 1)가 개방된 경우(Case 2)에 비해 Point B에서의 온도가 높은 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4에 나타난 가시화 결과에서 확인할 수 있듯이 측면 개구부가 개방된 경우(Case 2), Fig. 4(b)와 같이 연기층이 측면 개구부 부근까지만 하강하는 반면, 측면 개구부가 미설치된 경우(Case 1), Fig. 4(a)와 같이 연기층이 기관실 바닥까지 하강하기 때문으로 판단된다. 이와 같이 Point A에 비해 Point B에서의 온도가 낮고 측면 개구부가 개방된 경우(Case 2)가 폐쇄된 경우(Case 1)에 비해 온도가 낮은 이유는 Table 2에 나타난 바와 같이 개방된 개구부들을 통해 외부로부터 비교적 온도가 낮은 신선한 공기가 많이 유입되고 기관실 내 고온의 연기가 많이 유출되기 때문으로 판단된다.

### 3.3.2 천장 통풍통 위치의 영향

천장 통풍통 위치가 Point A와 Point B에서의 온도에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타내었다.

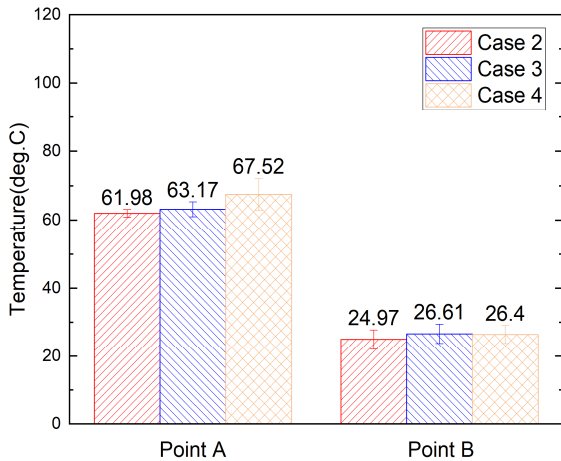


Fig. 10. Effects of ceiling duct location on temperatures at Points A and B.

Fig. 9와 동일하게 모든 조건에서 Point A에서의 온도가 Point B에서의 온도에 비해 높은 것으로 나타났다. 한편, 천장 통풍통이 중앙에 있는 경우(Case 4)가 모서리나 측면에 있는 경우(Case 2, Case 3)에 비해 Point A에서의 온도가 다소

높게 측정되었다. 이는 천장 통풍통이 모서리나 측면에 있는 경우(Case 2, Case 3), 화원으로부터의 천장 개구부까지의 이동 거리가 천장 통풍통이 중앙에 있는 경우(Case 4, 즉, 화원 바로 위에 있는 경우)보다 길어져서 열손실이 증가하고 비교적 낮은 온도의 공기가 유입되는 측면 개구부와와의 거리가 상대적으로 가까워지기 때문으로 판단된다. 하지만 천장 통풍통 설치 위치에 따른 Point A에서의 온도 차이는 본 전산시물레이션 조건에서 최대 5.54°C로 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, Point B에서의 온도의 경우도 천장 통풍통 위치에 따라 약간의 차이는 나타났으나 약 24.97°C-26.61°C 범위로 측정 데이터의 표준편차를 고려할 때 유사한 값이 나타남을 알 수 있었다. Fig. 10을 토대로 볼 때, 천장 통풍통의 위치가 Point A와 Point B에서의 온도에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

### 3.3.3 측면 개구부 크기의 영향

천장 통풍통이 천장 중앙에 위치한 조건에서 측면 개구부의 크기에 따른 Point A와 Point B에서의 온도 측정 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

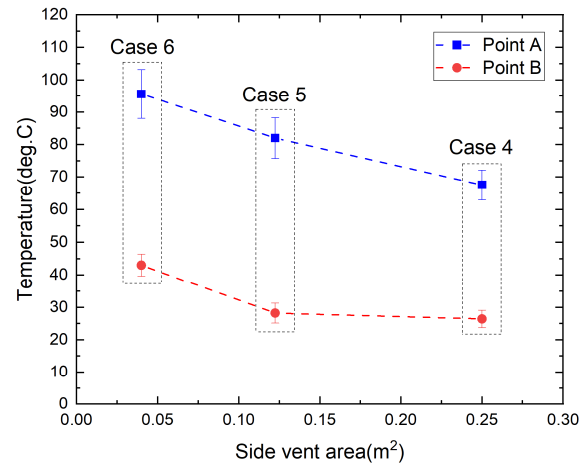


Fig. 11. Effects of side vent size on temperatures at Points A and B.

예상한 바와 같이 Point A에서의 온도가 Point B에서의 온도에 비해 높은 것으로 관찰되었다. 한편, 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 Point A와 Point B에서의 온도가 감소하는 것으로 나타났다. 특히, Fig. 6에 나타난 가시화 결과를 토대로 볼 때, 측면 개구부 크기가 감소함에 따라 연기층이 기관실 바닥까지 하강하는 현상이 나타났고 이로 인해 Point B에서의 온도에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. Case 4 경우가 Case 6인 경우보다 Point A에서는 약 28.06°C, Point B에서는 약 16.61°C 낮은 것으로 나타났고, Case 5인 경우, Case 6

인 경우보다 Point A에서는 약 13.60℃, Point B에서는 약 14.82℃ 낮은 것으로 측정되었다. 이는 Table 4에서 나타낸 바와 같이 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 외부로부터 신선한 공기가 원활하게 유입되고, 기관실 내 고온의 연기가 적절하게 유출될 수 있기 때문으로 판단된다.

또한, 기존 상관식인 식(9)를 이용하여 Point A에서의 온도를 예측한 결과 56.15℃로 나타났고, 이는 측면 개구부의 크기가 가장 큰 Case 4의 온도보다 낮은 것으로 나타났다. 이러한 경향이 나타난 이유 중 하나는 식(9)가 화재 플룸으로 비교적 저온의 공기 유입이 원활하게 이루어질 수 있는 개방된 조건에서 개발된 상관식이고, 본 전산시뮬레이션 조건의 경우 고온의 유출 및 저온의 유입 유동이 구획실 내 개구부를 통해서만 일어날 수 있는 조건(즉, 유출 및 유입 유동이 제한되는 조건)이기 때문으로 판단된다. Fig. 11에 나타낸 결과와 기존 상관식인 식(9)에 의한 온도 예측 결과를 종합적으로 고려할 때 식(9)의 경우 측면 개구부가 매우 큰 조건으로 생각할 수 있으므로, 측면 개구부의 크기가 증가함에 따라 Point A의 온도가 감소하는 전체적인 경향은 타당한 것으로 생각된다.

한편, FRP로 제작된 소형어선의 무인기관실에는 자동소화장치가 설치되고, 이러한 자동소화장치는 90℃ 이상 110℃ 이하의 온도에서 작동(Fishing Vessel Equipment Standards, § 83(1)) 되도록 하고 있는데, 기존에 설치된 장치는 일반적으로 93℃ 이상이 될 때 열센서 감지에 의해 소화약제가 방출된다. 따라서 본 연구의 온도 측정 결과(Figs. 9-11)를 토대로 볼 때, 열방출률이 작은 조건(예를 들면, 화재 초기 조건)에서는 화재 초기 진압이 불가능하여 소형선박의 화재 안전성에 문제가 생길 수 있다. 따라서 소형선박 기관실 내 화재 시 초기에 빠르게 화재를 감지할 수 있는 추가 장치 설치 등의 대안이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 천장 통풍통의 위치 및 측면 개구부의 크기가 소형선박 기관실 내 화재 시 연기 거동, 개구부 유동 및 온도에 미치는 영향을 검토하였다. 하지만 소형선박 기관실 내 화재 시 연기 거동, 개구부 유동 및 온도는 천장 통풍통의 위치 및 측면 개구부 크기 이외에도 다양한 인자들(예를 들면, 천장 개구부 크기 및 모양, 천장 통풍통 형상, 측면 개구부 위치 및 모양, 열방출률 등)에 의해 영향을 받을 수 있고 추후 이러한 다양한 인자들의 영향에 대해 전산시뮬레이션 뿐 아니라 실험적인 연구가 세부적으로 이루어질 필요가 있다고 생각된다. 한편, 본 연구에서는 비교적 작은 열방출률 조건을 설정하여 전산시뮬레이션을 수행하였다. 소형선박 화재 시 열방출률의 경우 상황(또는 원인)에 따라 다양한 열방출률 조건이 형성될 것으로 판단된다. 따라서 향후 소형선박 기관실 내 화재에 대한 다양한 화재시나리오 검토

를 통해 상황에 따라 적절한 열방출률 조건을 설정하여 연구가 이루어질 필요가 있다고 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 FDS를 이용하여 소형선박 기관실 내 화재 시 천장 통풍통 위치, 측면 개구부 유·무 및 크기가 연기 거동, 개구부 유동 및 온도에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과를 아래에 정리하였다.

(1) 연기 거동 가시화 결과, 측면 개구부가 미설치되었거나 크기가 작은 경우 연기층은 기관실 내 바닥까지 하강하는 경향을 보인 반면, 측면 개구부가 비교적 큰 경우에는 측면 개구부 근처에서 연기층이 유지되는 경향이 관찰되었다.

(2) 측면 개구부 유·무에 따른 영향의 경우, 측면 개구부가 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 천장 및 측면 개구부를 통한 유출 질량 유량이 약 2340% 많은 것으로 나타났다.

(3) 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 측면 개구부를 통한 유출 질량 유량은 증가하였는데, 측면 개구부 면적이 0.25 m<sup>2</sup>인 경우가 0.1225 m<sup>2</sup>인 경우에 비해 유출 질량 유량이 약 144% 많았고, 측면 개구부 크기가 가장 작은 0.04 m<sup>2</sup>인 경우에는 유출 질량 유량이 측정되지 않았다. 반면, 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 천장 개구부를 통한 유출 질량 유량은 감소하였는데, 측면 개구부 면적이 가장 작은 경우가 가장 큰 경우에 비해 약 13% 많은 것으로 나타났다.

(4) 천장 통풍통이 연결된 천장 개구부의 아래(Point A)와 기관실 내 하부 위치(Point B)에서의 온도의 경우, 측면 개구부가 설치된 경우가 미설치된 경우에 비해 각각 약 37.28℃와 47.09℃ 낮게 측정되었다. 측면 개구부 크기가 증가함에 따라 온도는 감소하였고, 측면 개구부가 가장 큰 경우와 작은 경우 간 차이는 Point A에서 약 28.06℃, Point B에서는 약 16.61℃로 나타났다.

(5) 본 화재시뮬레이션 결과, 기관실 내 측면 개구부가 연기 거동, 개구부를 통한 질량 유량 및 온도에 지대한 영향을 미치는 반면, 천장 통풍통의 위치 영향은 미미한 것으로 나타났다. 따라서 소형선박의 기관실 내 화재 시 기관실의 안전성 확보를 위해서는 천장 통풍통의 위치보다 측면 개구부의 크기가 더 중요한 설계 인자인 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 논문은 2019년도 (사)해양환경안전학회 추계학술발표회(2019년 11월 28일-29일, 한국해양수산연수원 교육관)에서 발표한 선행 내용(Jeong et al., 2019)을 보완 및 발전시켜 작성하였습니다.

## References

- [1] Cengel, Y. A. and A. J. Ghajar(2015), Heat and Mass Transfer, McGraw Hill Education, p. 924.
- [2] Fishing Vessel Equipment Standards, § 83(1).
- [3] Jeong, L. G., S. A. Baek, and C. Y. Lee(2019), A Preliminary Study on Ceiling Duct Effect During Fire of Engine Room in Small Ship Using Fire Dynamics Simulator, Proceedings of 2019 Autumn Annual Conference of the Korean Society of Marine Environment & Safety, p. 13.
- [4] Karlsson, B. and J. Quintiere(1999), Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, pp. 38-91.
- [5] Kim, Y. H., K. T. Lee, D. S. Kang, and S. B. Lee(2007), Standard for Ventilation Rate of Engine Room of Small-sized Ship, Proceedings of 2007 Annual Meeting of Korea Fluid Machinery Association, pp. 167-173.
- [6] Korean Maritime Safety Tribunal(2019), Statistics of Marine Accidents, pp. 3-6.
- [7] Lee, H. and H. K. Seo(2004), Ventilation Analysis for an Engine Room of a Ship, Journal of the Society Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 5, pp. 63-69.
- [8] McGrattan, K., S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, M. Vanella, C. Weinschenk, and K. Overholt(2017a), Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification, NIST Special Publication 1018-2 Sixth Edition.
- [9] McGrattan, K., S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, M. Vanella, C. Weinschenk and K. Overholt(2017b), Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation, NIST Special Publication 1018-3 Sixth Edition.
- [10] Park, C. S.(2008), A Study on the Ventilation Condition for the Prevention of Spontaneous Combustion of Small Ship Engine Room, Journal of Korea Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 11-19.
- [11] Structure and Facilities Standards for Small Ship, § 2(1).

---

Received : 2020. 07. 08.

Revised : 2020. 08. 07. (1st)

: 2020. 08. 24. (2nd)

Accepted : 2020. 08. 28.