

## FDS를 활용한 수소화 훈련장 안전성 평가에 관한 연구

박도영\* · 김준호\*\*†

\* 한국해양수산연수원 교관, \*\* 국립목포해양대학교 해양메카트로닉스학부 교수

## A Study on the Safety Assessment of Water-based Firefighting Training Center using Fire Dynamics Simulation

Doyoeng Park\* · Junho Kim\*\*†

\* Instructor, Korea Institute of Maritime &amp; Fisheries Technology

\*\* Professor, Division of Marine Mechatronics Engineering, Mokpo National Maritime University

**요 약** : STCW 협약 A-VI에 의거, 승선 필수 증서를 발급받기 위해 소화 과정 최저 훈련 이수율 거처에 되는 공간이 수소화 훈련장이다. 선박 화재의 상황과 유사한 장소에서 발생한 화재 진압 훈련을 위한 실습 장소의 특성상, 제진설비의 안전을 보장할 수 있는 운영을 위해 안전성을 수치화하여 평가하고 기준을 수립하는 연구의 필요성이 대두되었다. 화재 안전 평가를 위해 FDS를 기반으로 한 Pyrosim을 활용하여 제연설비 유무에 따른 Case를 설정, vector의 분석을 통한 연기 유동 및 열기에 대한 평가를 수행하였다. 피난 안전 평가는 Pathfinder를 통해 허용 피난시간, 총 피난시간을 수치화된 결과로 해석, 비교하여 안전성을 분석하였다. 각 Case에 대한 안전성을 평가함으로써 제연설비별 기능의 적정성을 수치, 시각적으로 나타내었으며, 현재 운영 상태는 안전성이 양호한 것으로 평가하였다. 집진설비가 정지한 비상상황은 각 피난시간과 111.2초의 여유시간으로 나타내어 수소화 훈련장의 비상상황에 대한 피난시간의 기준으로 활용할 것을 제시하였다.

**핵심용어** : 집진설비, 제연설비, 제연경계벽, 화재역학시뮬레이션, 파이로심, 패스파인더

**Abstract** : According to the section A-VI/3 of the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW), Water-based firefighting training center is mandatory to obtain onboard certificates. This space, being similar to fire situations on ships requires that safety measures be quantified to ensure occupant safety and establish operational standards. For fire safety evaluation, cases were designed based on the presence or absence of smoke control equipment using Pyrosim based on Fire Dynamics Simulation (FDS). Vector analysis was performed to evaluate flow of smoke and heat. Available safe escape time/required safe escape time (ASET/RSET) analysis was conducted to evaluate safety by comparing the interpreted numerical results through Pathfinder. During safety evaluation of the current operational condition, the appropriateness of the function of each smoke control equipment was numerically and visually indicated. The emergency situation with dust collector stopped was expressed by each evacuation time and safety margin of 111.2 seconds, suggesting that be used as a standard of evacuation time.

**Key Words** : Dust collector, Smoke control equipment, Smoke barrier wall, FDS (Fire Dynamics Simulation), Pyrosim, Pathfinder

## 1. 서 론

수소화 훈련장은 선박 화재의 상황과 유사한 장소에서 발생한 화재 진압 훈련을 위한 장소로써 설계되었고 단시간 내 다량의 연기와 열기가 동반하는 화재의 상황 대응 능력 및 숙련도를 높이기 위한 훈련이 진행되고 있다.

안전한 훈련을 진행하기 위한 제연설비 중에는 발생하는 연기를 흡입하고 분진을 분리하여 외부로 토출하는 집진설비가 있다. 훈련장이 위치한 M 지역에서 발생한 정전 및 분진의 고착으로 집진설비가 정지하는 경우가 실습 준비 중 각 1회씩 발생하였다. 화재가 없는 준비 과정에서 발생한 상황이었지만 수업 중 같은 상황이 발생하고 집진설비가 정지하게 되는 비상상황이 발생한다면 연기를 통제할 수 없게 되므로 이에 대한 준비가 필요하였다.

\* First Author : parkdyo922@seaman.or.kr, 061-241-0331

† Corresponding Author : junho.kim@mmu.ac.kr, 061-240-7241



Photo 1. Training by water-based firefighting.

Photo 1은 수소화 훈련장 내에서 수소화 훈련 진행 상황 중 교육생들의 실습 전 교원의 시범 상황을 보여주고 있다.

통제된 상황 속, 이론으로 이해하기 어려운 열기, 압력, 위험성과 관련 내용으로 구성된 실습을 진행·학습하고 있다.

교원과 교육생이 훈련장에서 직접 중형화재를 진압하는 실습 훈련의 특성상, 안전한 운영을 위해 재실자 안전성을 수치화하고 기준을 수립하는 연구의 필요성이 대두되었다.

Kim and Kim(2016)은 Fire Dynamics Simulator(FDS)를 사용하여 ISO 9705시험에서 플레시오버가 발생한다는 1MW(MegaWatt) 화재 크기에서의 피난 위험성을 제시하였으나, 본 연구는 실제 훈련장에서 발생하는 화재의 크기를 반영하여 피난 위험성을 제시하였다.

Koo et al.(2019)은 시뮬레이션을 통한 인명안전성평가에 사용되는 커플링 방식별 차이점을 분석한 결과 비교를 통해 개선 방안을 제안하였고 본 연구는 커플링 방식 중 Pyrosim과 Pathfinder를 동시에 물리적으로 중첩하여 시각적으로 확인하는 세미커플링 방식을 활용하였다.

Seo et al.(2020)은 Pathfinder를 사용하여 성능위주설계에 따른 피난지연시간 적용과 방화문 개방도에 따른 피난 안전성 평가의 영향을 파악하여 검토 방안을 제안하였다. 본 연구에서는 안전한 운영을 위해 비상상황에 해당하는 변수를 포함하여 훈련장 내 제연설비에 따른 연기 유동을 해석하여 시각화하고 재실자의 안전성을 수치화하여 평가하였다. 결과값을 통해 각 상황에 따른 제연설비의 필요성과 피난시간의 기준을 제시하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 FDS(Fire Dynamics Simulation)

본 연구에서 활용한 화재 역학 해석 프로그램 FDS는 화재로 인한 연기 및 열전달 현상을 다루며, 다양한 화재 현상 수치와 저속 열적 유동 해석에 최적화된 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하였다(McGrattan et al., 2023).

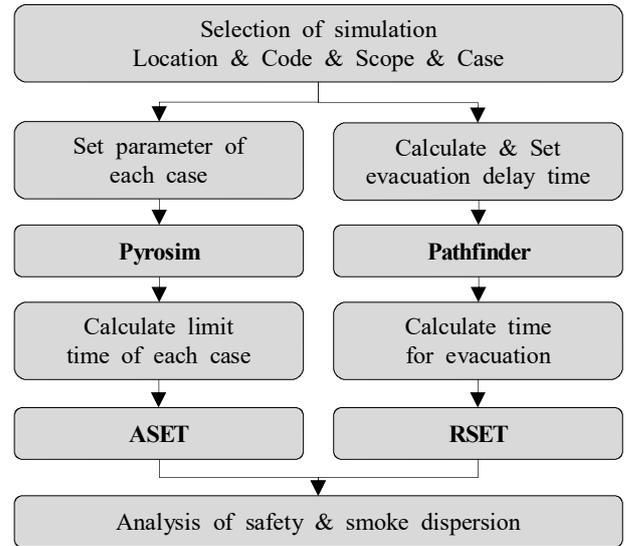


Fig. 1. Flow chart of analysis.

FDS를 사용한 본 연구의 진행 순서는 Fig. 1로 정리했다. 연구의 첫 순서인 장소, 화재 종류, 구획, 반경 및 Case를 설정했다. 두 번째 순서로 Case별 변수를 설정했다. 세 번째 순서로 Pyrosim과 Pathfinder에 기입하여 세미커플링 방식을 사용한 결과를 도출하였다.

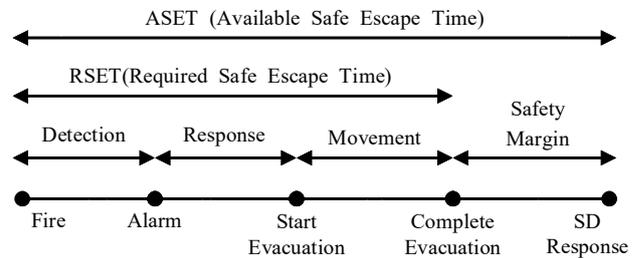


Fig. 2. Classified time for evacuation.

Fig. 2는 피난을 위한 단계별 시간을 나타낸다. 발화부터 통제 불능 상황 위험성을 교원이 감지(Detection)하게 된다. 상황 전달과 도움 경보 발생 후, 행동 요령 지정 및 상황 통제 까지가 지연시간(Response)이다. 계산된 Case의 대피 가능 시간은 지연시간 이후 피난을 위한 지정 집합 장소까지 집합(Movement)하기 까지 소요된 시간이 총 피난시간(RSET, Required Safe Escape Time)이다. SD(Smoke Detector)가 최초 감지하는 여유시간(Safety Margin)까지를 허용 피난시간(ASET, Available Safe Escape Time)이라 한다. 수치, 시각화 된 두 결과값의 비교를 통해 안전성을 분석했다. 여유시간이 길수록 비상 상황 중 변수를 통제할 수 있어 훈련장 재실자를 위한 안전성이 높다고 판단했다(Ahn, 2021).

## 2.2 Pyrosim

Pyrosim은 FDS와 긴밀하게 통합하고 보완하여 설계된 소프트웨어이다. 화원을 설정하고 소화설비를 설치하여 발생한 연기의 유동, 열기, 속도, 온도, 이산화탄소 농도, 독성 등 결과를 계산, 해석하는 프로그램이다. 본 연구에서의 프로그램 사용 목적은 화재 시물레이션을 통한 건축물 내 재실자의 안전성 검토에 활용하기 위함이다(Thunderhead engineering, 2023a).

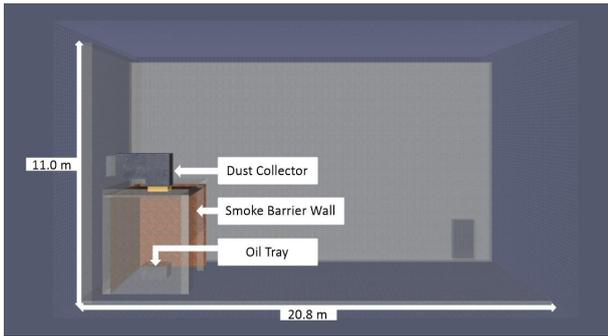


Fig. 3. Pyrosim modeling (Training center).

본 연구의 장소 선정은 M 지역에 소재한 한국해양수산연수원의 수소화 훈련장을 선택했다. Fig. 3과 같이 Pyrosim으로 모델링하는 과정에서 모의시험에 큰 영향을 주지 않는 천장, 벽면, 기둥 등 돌출부를 단순화한 후 모형화하고 Front View로 나타냈다. 훈련장의 반경은 X축 20.8m, Y축 10.4m, Z축 11.0m으로 설정했다(벽면의 두께 포함).

Table 1. Predetermined value of Pyrosim

| Content                      | Value                      |
|------------------------------|----------------------------|
| Location Size (x × y × z)    | 21.5 × 15.4 × 11.5 (m)     |
| Mesh Size (x × y × z)        | 0.25 × 0.25 × 0.15 (m)     |
| Number of Grid (x × y × z)   | 398,696 (86 × 61 × 76)     |
| Location of Fire             | Oil Tray                   |
| Ignition Reaction            | Reac-fuel                  |
| Heat Release Rate per Area   | 179.6835 kW/m <sup>2</sup> |
| Animated Planar Slice factor | Vector                     |

Table 1은 Pyrosim의 설정값을 나타낸다. 해석 반경 설정은 전체 Mesh X축 21.5m, Y축 15.4m, Z축 11.5m 이다. 해당 면적을 Single mesh로 만들고 0.25, 0.25, 0.15m 크기의 격자로 나누었다. X축 86개, Y축 61개, Z축 76개로 구성하여 사용된 총 해석 격자수는 398,696개로 구성했다.

화원은 Fig. 3의 수소화 훈련장 내 유류 트레이의 연료유에서 발생(B급 화재)으로, 발화 반응은 연료유의 화재 반응

설정값인 Reac-fuel로 설정했다.

발화원 단위 면적당 열 방출률은 유류 트레이에 발화를 위해 사용한 연료유의 양과 고위발열량(총 발열량, 증기의 잠열 포함)으로 산정된 179.6835 kW/m<sup>2</sup>로 설정했다.

평면 유동 해석을 위한 요소는 Vector를 사용했다. 훈련장의 설정 범위 내 유체 흐름 속도, 방향과 온도 등을 길이, 방향과 색깔을 이용해 각 위치별로 2차원으로 나타내도록 설정했다(Bae et al., 2017).

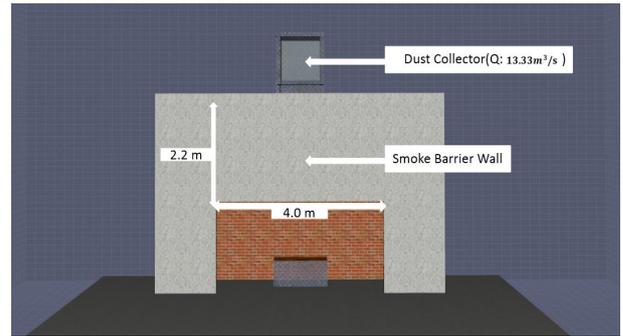


Fig. 4. Parameter (Smoke Barrier wall & DC).

Fig. 4는 제연설비인 집진설비(Dust Collector), 제연경계벽(Smoke Barrier Wall)을 Right view로 나타냈다. 제연경계벽은 높이 2.2m, 폭 4.0m이며 연기의 특성을 고려하여 상부에 설치해 통제 공간에서의 유출을 막는 역할을 하고 있다. 상부의 집진설비(유량 13.33m<sup>3</sup>/s)로 향하는 덕트는 연기, 열기를 흡입하고 필터를 거쳐 외부로 토출하는 역할을 하고 있다.

Table 2. Parameters in 4 Cases

| Case | Existance of Smoke Control Equipment |                |
|------|--------------------------------------|----------------|
|      | Smoke Barrier Wall                   | Dust Collector |
| 1    | X                                    | X              |
| 2    | O                                    | X              |
| 3    | X                                    | O              |
| 4    | O                                    | O              |

Table 2는 제연설비 중 집진설비, 제연경계벽 유무를 변수로 설정한 4가지 Case를 나타냈다. 모든 제연설비가 없는 Case 1, 집진설비만 있는 Case 3은 설비별 효용성 및 연기 유동의 차이를 보여주기 위함이다. 모든 제연설비가 있는 정상 운영 상태인 Case 4에서 정전 등 변수로 인해 발생할 가능성이 있는 비상 상황에 해당하는 경우가 집진설비는 정지하고 제연경계벽만 있는 Case 2의 상태이다. 두 Case의 결과값인 안전성의 차이를 중점적으로 수치화 및 시각화하여 비교하였다.

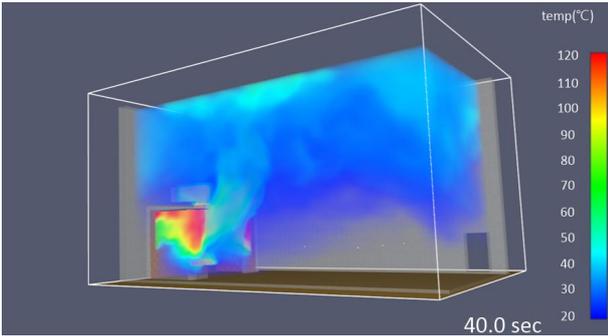


Fig. 5. Smokeview of Pyrosim.

Fig. 5는 SMV(Smokeview)를 활용해 40.0초에 해석된 Case 2의 온도를 3D, Perspective view로 나타냈다. Pyrosim의 사용 목적은 훈련 중 유류 화재로 인한 연기와 열기의 위험성을 평가하고 두 가지 제연설비가 확보하게 되는 안전성, 연기 유동 차이를 시각, 수치화하는 것이다.

### 2.3 Pathfinder

Pathfinder는 탈출 및 인간 이동 시뮬레이터로, 시뮬레이션 실행과 설계를 위한 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 그리고 시각화를 위한 도구로 구성된다. 시각화 도구를 사용해 개인별 반응 시간, 보행 속도, 외형과 성별 등의 특징을 지정하고 탈출 전 대기 구역 및 시간 그리고 출구와 경로 등의 행동을 지정한다. 이동 중 충돌, 경로 이탈, 밀도와 지형에 따른 속도 변화 등 다양한 가정을 통해 계산하는 프로그램이다. 마지막으로 Pyrosim과 연동하여 결과에서 발생한 연기, 열기의 영향 그리고 상기 설정값을 종합적으로 계산된 결과값인 거동을 가시화했다(Thunderhead engineering, 2023b).

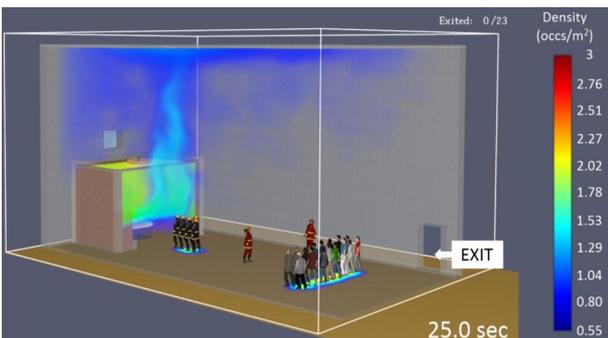


Fig. 6. Pathfinder modeling.

Fig. 6은 Pyrosim 결과를 Pathfinder에 옮겨 모델링한 결과 중 25.0초 상태를 Density, 3D, Perspective view로 나타냈다. 탈출 시간의 설정은 훈련 중 집진설비가 정지한 비상 상황을 나타내는 Case 2를 선택하여 진행했다.

훈련 중, 제연설비가 정지하게 되고 연기가 통제되지 않아, 제연경계벽을 넘어 내부로 퍼져 나오는 것을 감지하고 교원이 대피 명령을 지시, 전달하는 것으로 설정했다.

내부의 인원 지휘방화복을 입은 교원 3명과 지도방화복을 입은 교육생 4명 그리고 대기 중인 교육생 16명이 교원의 지도에 따라 지정된 출구로 대피하는 것으로 설정했다.

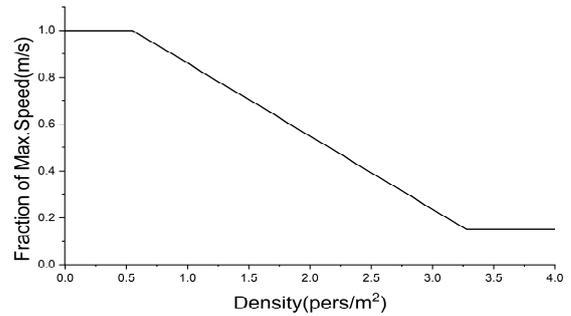


Fig. 7. Speed-density profile of Pathfinder.

Fig. 7은 본 연구에서 설정한 Pathfinder의 인구 밀집도에 따른 재실자의 대피 시 최대 속도 분율을 나타낸 그래프다.  $m^2$ 당 0명에서 0.55명까지는 속도 분율을 1.0으로 유지되고 약 3.28명까지 상승하면 속도 분율은 0.15까지 내려가면서 밀도 변화에 따른 속도값이 반영됨을 나타냈다.

### 2.4 안전성 평가 기준

Table 3은 소방시설 등의 ‘성능 위주 설계 평가 운영 표준 가이드라인’의 내용 중 재실자의 인명안전 기준을 나타냈다(National Fire Agency, 2023).

호흡 한계선과 동일하게 바닥에서 1.8m의 높이에 연기감지기를 설치해 재실자의 연기 흡입 가능성을 측정했다.

같은 위치에 열, 산소, 이산화탄소, 일산화탄소 농도감지기를 설치하고 재실자가 60°C 이상 열에 노출되어 호흡기에서 발생하는 흡기 화상 가능성 및 독성에 대한 노출 가능성을 측정하였다.

Table 3. Standard of Occupant Life Safety

| Category              | Performance criteria |                      |
|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Respiratory Limit     | 1.8m from the Floor  |                      |
| Effect of Temperature | 60°C or less         |                      |
| Effect of Visibility  | 5m or less           |                      |
| Effects of Toxicity   | Component            | Standard of Toxicity |
|                       | CO                   | 1,400 ppm            |
|                       | CO <sub>2</sub>      | 5% or less           |
|                       | O <sub>2</sub>       | 15% or more          |

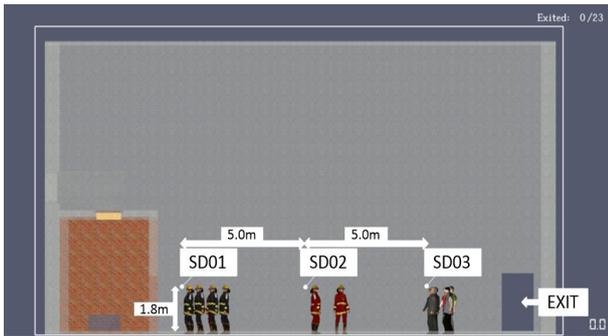


Fig. 8. Position of Detector.

Fig. 8은 측정을 위한 열 및 연기감지기가 함께 설치된 장소마다 표시하여 2D, Front view로 나타냈다. 호흡기계선을 따라 표시된 부분마다 설치되고 위치별 설명은 다음과 같다. SD01은 교원 1명 및 실습 중인 교육생 4명의 위치이다. SD02는 설명 및 상황 총통제 중인 교원 2명의 위치이며, SD03이 16명의 교육생이 대기하게 되는 위치이다. Case마다 Table 3의 기준 중 해당하는 사항에 노출 여부를 분석, 검증하기 위해 프로그램 내에 추가했다(Hwang et al., 2018).

### 3. 연구결과

#### 3.1 Pyrosim Case별 결과

Case별 결과 중, 연기감지기가 감지하는 시점을 수치화시킨 결과값으로 나타내면 Table 4와 같다.

Table 4. Smoke Detector Detection time for each Case

| Case | Detection time of Smoke Detector (Sec) |       |       |
|------|--|-------|-------|
|      | SD01                                   | SD02  | SD03  |
| 1    | 105.0                                  | 85.8  | 105.1 |
| 2    | 151.9                                  | 170.2 | 145.3 |
| 3    | 137.8                                  | 122.3 | 141.4 |
| 4    | 262.1                                  | 275.6 | 263.5 |

Case 1의 제연설비가 모두 없는 상태인 경우, 화재 발생 후 85.8초에 총통제 교원의 위치부터 연기감지기 반응하며 연기에 노출된다. 연기 및 열기를 통제할 수 있는 수단이 없어 화재 발생부터 화원의 위치에서 가벼운 연기가 벽면을 타고 상부로 퍼지기 시작하고 11.0m의 천장에서부터 연기가 내려와서 발생한 와류로 인해 가장 먼저 총통제 교원의 머리 위에 있는 SD02에 닿아 감지하게 되는 것이다.

Case마다 SD02의 감지 시간이 다를 수 있다. Case 별 SD02 감지 시점을 기준으로 하고 열과 연기 유동의 차이에 따른 안전성의 차이를 시각, 수치화하여 나타냈다.

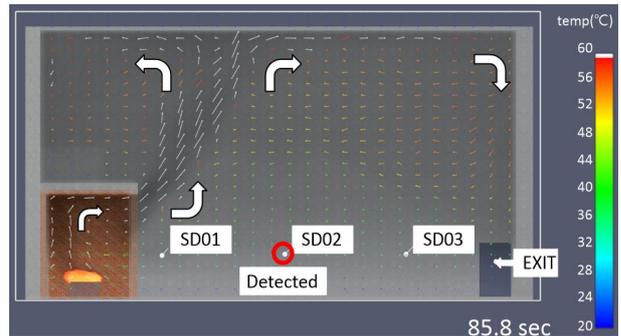


Fig. 9. Detection time of SD02 (85.8s, Case 1).

Fig. 9는 제연설비가 모두 없는 Case 1의 2번 연기감지기 (SD02)가 감지한 85.8초의 상황을 2D, Front view로 나타냈다. Vector를 온도장과 함께 사용하여 공기의 온도, 흐름 방향 및 속도를 나타낸다. Vector를 하얀색으로 강조한 부분은 60°C 및 그 이상의 온도를 표시하고 있다. Vector의 방향을 보면 화재의 연소를 위한 산소 흡입으로 인해 문에서부터 화재의 위치까지 호흡 기계선 부근을 지나 보다 낮은 압력으로 흡입된다. 가벼워진 연기가 벽면을 타고 상승기류를 만들며 천장에 쌓여 구조상 발생한 와류를 Fig. 9의 곡선과 같이 형성시키므로 SD02로 85.8초에 도달하는 것으로 해석됐다.

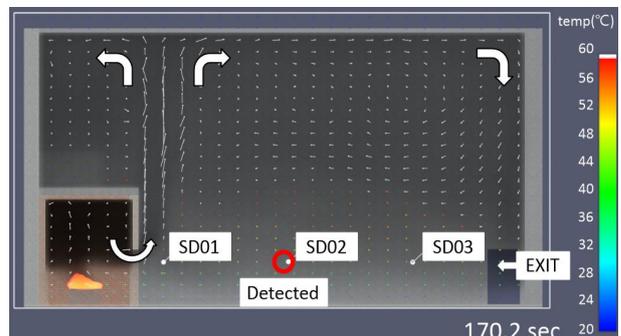


Fig. 10. Detection time of SD02 (170.2s, Case 2).

Fig. 10은 제연경계벽만 있는 Case 2의 2번 연기감지기 (SD02)가 감지한 170.2초 상황을 2D, Front view로 나타냈다. 수소화 훈련장의 운영 중 발생 가능성이 있는 비상 상황인 집진설비가 멈춘 상태로 설정했다. 화재의 산소 흡입 과정까지 Case 1과 같지만 높이 2.2m의 제연경계벽이 연기의 흐름을 막아 시간을 지연시키며, 화원의 위치에 연기의 밀도가 올라가 있는 것을 짙은 검은색으로 관찰했다. 이후, 제연 경계벽이 더 이상 막지 못할 만큼 가득 차면 연기가 넘쳐 수직으로 상승하고 천장에서부터 퍼지고 벽면에서 부딪히는 흐름을 만들어 Case 1보다 느린 속도로 SD02까지 170.2초에 도달하고 감지함을 확인했다.

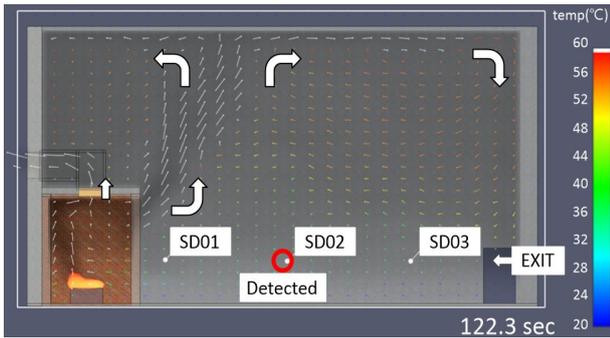


Fig. 11. Detection time of SD02 (122.3s, Case 3).

Fig. 11은 집진설비만 있는 Case 3의 2번 연기감지기(SD02) 감지한 122.3초 상황을 2D, Front view로 나타냈다. 집진설비 특성상 주변의 공기를 흡입하고, 집진 필터를 거쳐 연기를 걸러내고 밖으로 토출한다. 시간을 지연시킬 수는 있으나, 제연경계벽이 없어 연기가 천장으로 분산되므로 제어의 어려움이 발생하여 SD02에 122.3초 만에 도달했다. 집진설비로 흡입류를 제외하면 속도는 느리지만 연기 흐름은 Fig. 9와 유사하게 해석되었다.

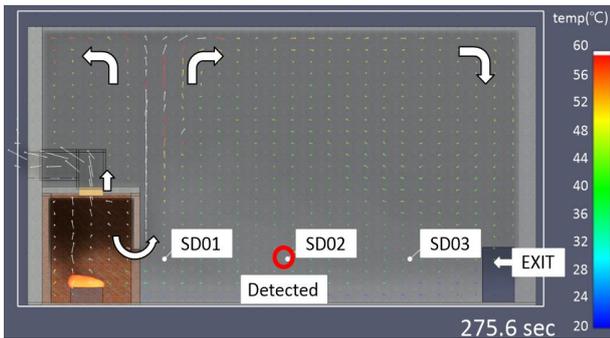


Fig. 12. Detection time of SD02 (275.6s, Case 4).

Fig. 12는 제연설비가 모두 있는 Case 4의 2번 연기감지기(SD02)가 감지한 275.6초 상황을 2D, Front view로 나타냈다. 현재의 운영 상황과 동일하며, 화재 진압 시 연기를 통제하며 훈련을 시행하고 있다. 연기의 SD02 도달까지 시간이 275.6초임에도 앞의 세가지 Case 보다 열기의 영향이 적음을 60°C에서 vector가 강조표시되지 않은 SD부근의 상태를 통해 관찰된다. 연기가 통제가 되고 있음을 화원부에 올라가 있는 연기의 밀도, 훈련장의 천장을 향해 수직으로 느리게 올라가는 vector와 집진설비를 향해 빠르게 흡입되는 vector를 통해 나타냈다. 천장부에 약간의 연기가 누설됨을 볼 수 있으나, SD02에 낮은 연기 밀도와 열기로 보아 연기로 인한 호흡 장애 및 60°C 이상의 열기로 인한 호흡기 화상에 대한 가능성은 낮고 현재의 안전성은 양호한 것으로 확인되었다.

### 3.2 Pathfinder Case별 결과

안전성이 확인된 Case 4를 제외하고 분석이 필요한 세가지 Case의 감지, 지연, 각 피난시간 및 여유시간을 나타내기 위해 Pathfinder를 이용한 설정값 및 결과값은 Table 5과 같다.

Table 5. Evacuation time for each Case

| Sort of evacuation time   | Time (Sec) |        |        |
|---------------------------|------------|--------|--------|
|                           | Case 1     | Case 2 | Case 3 |
| Detection & Response time | 19.5       | 25.0   | 23.4   |
| Evac. time                | 36.5       | 34.0   | 34.1   |
| RSET                      | 56.0       | 59.0   | 57.5   |
| Safety Margin             | 29.8       | 111.2  | 64.8   |
| ASET                      | 85.8       | 170.2  | 122.3  |

피난을 위해 구분된 시간의 기초 값을 정하고 결과를 도출했다. 본 연구는 실습을 위한 발화부터 집진설비의 정지 등으로 인해 연기 통제 불능하여 연기가 제연경계벽을 넘어 보이고 교원이 감지하는 시점까지를 감지 시간이라 한다. 상황 전달 및 도움 요청을 위한 정보 발생 후, 행동 요령을 정하여 상황을 통제하는 시점까지를 지연시간이라 한다.

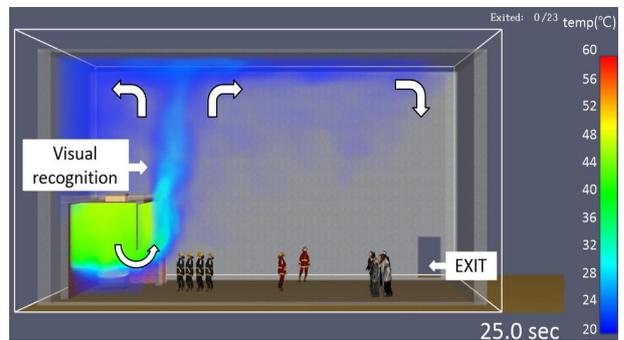


Fig. 13. Before start evacuation (25.0s, Case 2).

Fig. 13은 Case 2의 피난 전, 지연시간의 마지막 장면인 25.0초 시점을 3D, Front view로 나타냈다. 감지 및 지연시간은 연기 확산 시각적 인지 후 통제 소요시간까지 고려한 25.0초로 지정됐다. 지연시간 이후 교원의 지시에 따라 피난 행동을 개시하고 피난을 위한 지정 집합 장소까지 이동하여 마지막 인원까지 모이는 시간은 34.0초가 소요되었다. 둘을 합한 총 피난시간은 59.0초로 해석되었고 Case 별 연기감지기의 작동 시점을 허용 피난시간으로 나타내고 총 피난시간과의 차이값을 여유시간으로 나타내었다. 여유시간의 끝을 정하는 데에는 위험성이 있는 순간을 정하는 경우가 많은데, 본 장소는 안전교육 기관이므로 더 높은 기준인 채실자의 위치에 설치된 2번 연기감지기가 감지하는 시점까지를 허용 피난시간으로 하였다.

각 Case에 따른 여유시간의 차이값을 통해 제연설비별 효용성을 수치적으로 나타내어 수소화 훈련장의 집진설비, 제연경계벽 설치의 필요성을 제시하였다.

Case 1의 해석 결과, 제연설비가 없는 경우 29.8초의 여유시간으로 재실자의 안전을 보장하기 어려울 수 있다.

비상상황과 같은 경우인 Case 2의 해석 결과, 기준을 높였음에도 여유시간이 111.2초로 산정되었고 Case 1과 비교하여 81.4초로 제연경계벽의 효용성을 나타낼 수 있다.

Case 3의 해석 결과, Case 1보다 35.0초의 여유시간이 더 있음을 집진설비의 효용성으로 나타낼 수는 있으나, 집진설비만으로는 연기의 흐름을 통제하기 어려움을 알 수 있다.

여유시간은 재실자의 탈출 중, 발생 변수에 대한 조치 및 추가적 상황 통제 등을 위한 시간이므로 Case 2에서 59.0초의 총 피난시간, 111.2초의 여유시간 그리고 170.2초의 허용 피난시간을 비상시의 피난 기준으로 활용할 필요가 있다.

#### 4. 결론

수소화 훈련장에서 실습 중 발생 가능성이 있는 비상상황을 가정하여 프로그램을 사용한 해석을 진행하였다. 본 연구에서는 Pyrosim과 Pathfinder의 세미커플링(Semi-coupling) 방식을 통해 제연설비의 안전성, 열 및 연기 유동을 분석하고 시각, 수치화하였다. 2번 연기감지기에 감지 시간을 측정하여 허용 피난시간을 수치화하였다. 결과값을 SMV로 나타내어 시각화하고 수치화된 재실자 안전성 평가의 해석 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수소화 훈련장 현재 운영 상태(Case 4)의 허용피난시간은 275.6초로 해석되었고 SMV를 통해 시각적으로 실습 진행을 위한 충분한 안전성이 있음을 수치적으로 확인하였다.

2. 비상 상황(정전, Trip 등)으로 인한 집진설비 정지 발생(Case 2)한 경우 전원 대피에 소요된 총 피난시간은 59.0초, 여유시간은 111.2초로 산정되어 변수가 없는 상황에서 안전성이 있음을 확인하였다. 둘의 합인 170.2초의 허용 피난시간을 집진설비가 정지한 비상상황에 대한 피난시간의 기준으로 활용할 것을 제시하였다.

3. 각 연기감지기 2번의 감지 시점인 Case 2의 170.2초와 Case 4의 275.6초를 비교한 결과, 집진설비가 있는 Case 4의 연기 유동이 느려지고 연기의 밀도가 낮아짐을 Vector를 이용하여 나타내었고 허용 피난시간의 차이값을 105.4초로 나타내어 집진설비의 시각, 수치화된 안전성을 확인하였다.

본 연구 결과는 수소화 훈련장의 제연설비에 대한 수치적 안전성을 나타내어 기능의 적정성과 비상상황의 피난시간

기준에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 해석 결과를 활용하여 설계 개선 등에 적용 가능할 것으로 기대된다.

#### References

- [1] Ahn, Y. J.(2021), A Study on Architectural Planning Improvements for Fire Evacuation Considering Pediatric Patients in General Hospital, Master Thesis, Keimyung University, Daegu, Republic of Korea.
- [2] Bae, K. Y., H. T. Chung, and H. B. Kim(2017), Numerical Study on the Fire Suppression Mechanism, JILASSKR, Vol. 22, No. 4, pp. 175-184.
- [3] Hwang, K. I., I. S. Cho, G. H. Yun, and B. Kim(2018), A Comparison of the Trainees' Evacuation Characteristics according to the Indoor Smoke-fullfill during the Safety Training on Ship, Journal of Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 4, pp. 422-429.
- [4] Kim, W. O. and D. H. Kim(2016), A Study on Ship Evacuation Safety Consequent on the Size and Sort of Fire, JFMSE, Vol. 28, No. 5, pp. 1358-1364.
- [5] Koo, H. M., R. S. Oh, S. H. An, C. H. Hwang, and J. H. Choi(2019), A Study on Comparison of Life Safety Assessment Results according to Three Coupling Methods of Fire and Evacuation Simulation, Fire Sci, Eng, Vol. 33, No. 1, pp. 121-129.
- [6] McGrattan, K., S. Hostikka, J. Floyd, M. Vanella, R. McDermott, and E. Mueller(2023), Fire Dynamics Simulator User's Guide, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition.
- [7] National Fire Agency(2023), Standard Guidelines for Performance-Based Design Evaluation and Operation, Standard of Occupant Life Safety.
- [8] Seo, D. G., M. S. Kim, S. H. Gu, and Y. J. Song(2020), A Study on the Safety of Evacuation according to Evacuation Delay Time and Fire Door Openness: Based on Residence Type, Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 156-165.
- [9] Thunderhead Engineering(2023a), Pathfinder User's Manual, 2023-2 Version.
- [10] Thunderhead Engineering(2023b), Pyrosim User's Manual, 2023-2 Version.

Received : 2024. 03. 15.

Revised : 2024. 04. 22. (1st)

: 2024. 05. 07. (2nd)

Accepted : 2024. 06. 27.