Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 796~810
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.796

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

# 수소 연료전지 트랙터의 수소 누출 CFD 해석을 통한 수소 누출 감지기 최적 배치 연구

서혜원 · 유수연 · 정재환 · 이정운[†]

한국가스안전공사 가스안전연구원

# Optimization of Hydrogen Leak Detector Placement in Fuel Cell Tractors Based on Leak Scenarios

HYEWON SEO, SUYEON YU, JAEHWAN JUNG, JUNGWOON LEE[†]

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, Korea

[†]Corresponding author :
ljw@kgs.or.kr

Received 18 November, 2025
Revised 5 December, 2025
Accepted 10 December, 2025

**Abstract >>** This study presents an analytical approach for evaluating hydrogen leakage risks and optimizing the placement of hydrogen leak detectors in a fuel-cell-powered agricultural tractor. Representative leakage scenarios were defined under realistic operating conditions, and the corresponding leakage hole sizes and mass flow rates were determined in accordance with ISO 60079-10-1. CFD simulations using ANSYS Fluent were performed to analyze hydrogen dispersion behavior, and sensor response characteristics were extracted. Based on these results, analytical procedures—including scenario–sensor matrix construction, coverage and detection-time evaluation, spatial detection mapping, and Genetic Algorithm–based optimization—were employed to derive the optimal detector placement. The proposed framework provides a systematic methodology for enhancing the safety of hydrogen-powered tractors and related mobility systems.

**Key words :** Hydrogen fuel cell tractor(수소 연료전지 트랙터), hydrogen leak(수소 누출), CFD(전산유체역학), hydrogen detector(수소누출감지기)

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경 및 필요성

전 세계적으로 농업 분야에서도 탄소중립 실현과 지속가능한 에너지 전환이 중요한 과제로 대두되고 있다. 이에 따라 내연기관 기반 농기계의 대체 기술로 수소 연료전지를 적용한 트랙터 개발이 활발히 추진되고 있다. 수소 연료전지 트랙터는 배출가스가 없고 높은 에너지 효율을 가지지만, 고압 수소 저장 및 공급 과정에서 누출 가능성이 존재한다. 수소는 낮은 점화에너지와 빠른 확산특성으로 인해 누출 시

폭발 및 화재 위험이 크므로, 운용 단계에서의 안전 확보가 필수적이다[8]. 특히 농기계는 외부 충격, 진동 등 복합적인 환경에 노출되기 때문에 수소 누출에 대한 실시간 감지 대응 체계 구축이 중요하다. 따라서 수소 누출 위험성을 정량적으로 평가하고, 이를 기반으로 효율적인 감지기 배치 및 안전설계를 도출하는 연구가 필요하다.

### 1.2 연구 목적 및 범위

본 연구의 목적은 트랙터용 이동형 수소 연료전지 시스템에서 발생할 수 있는 수소 누출 위험을 정량적으로 평가하고, 누출 특성에 기반하여 수소 감지기의 최적 설치 위치를 도출함으로써 시스템의 안전성을 향상시키는 것이다. 연구 흐름도는 Fig. 1과 같다. 이를 위해 실제 운전 조건을 고려하여 수소 공급 배관, 연결부 등 주요 구성요소를 중심으로 대표적인 누출 시나리오를 설정하였다. 각 시나리오에 대한

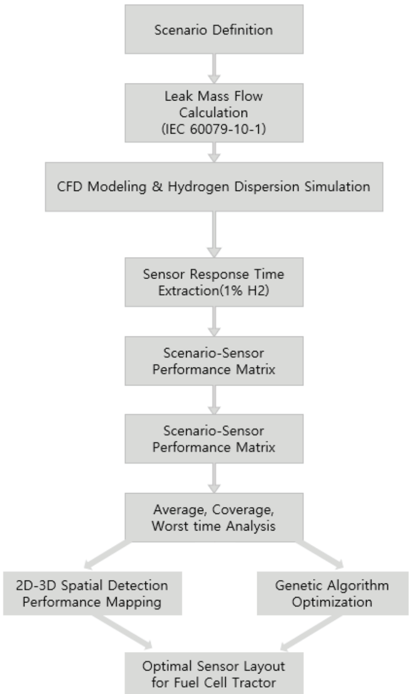



**Fig. 1.** Hydrogen Leakage Analysis & Sensor Optimization flowchart

누출공 크기와 질량유량은 IEC 60079-10-1의 5.4 Release rate of flammable substances를 적용하여 산정하였으며, 이를 기반으로 ANSYS Fluent를 활용한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 해석을 수행하였다. CFD 결과를 통해 농용 트랙터 내부 공간에서의 수소 확산 거동과 시간별 농도 분포를 분석하였으며, 특히 수소 폭발 하한값(Lower Explosive Limit, LEL) 4%에 대한 안전율을 고려한 수소 부피농도 1%에서 수소 누출 감지 기준을 참고하여 1% 도달 시간을 주요 평가 지표로 설정하였다[1]. 분석된 1% 농도 도달 시각 및 공간 분포는 각 위치에서의 조기 누출 인지 가능성을 판단하기 위한 기초 자료로 활용되었다. 이후 시나리오별 수소 확산 특성의 비선형성, 센서 간 상호 보완 관계, 그리고 탐색 공간의 조합 폭이 매우 크다는 점을 고려하여, 전통적 단일 기준 기반의 센서 배치 기법 대신 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 포함한 CFD 기반 데이터 분석, 시나리오–센서 매트릭스 구축, 커버리지·응답시간 기반 성능지표 계산 방법 등을 적용하였다. 이러한 방법들은 전역적 탐색 능력을 확보할 수 있어, 다중 목적 함수하에서 균형 잡힌 최적해를 도출하는 데 유리하기 때문에 커버리지와 조기 탐지성(1% 도달시간 최소화)을 동시에 만족하는 감지기 배치안을 도출하는데 기여하였다.

본 연구는 수소농도 1% 도달 특성에 기반한 감지기 최적 배치라는 체계적 분석 절차를 제시함으로써, 수소 연료전지 트랙터 및 향후 수소 기반 농기계의 안전설계 기술 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 문헌 고찰

수소 누출 및 확산 거동에 관한 연구는 다양한 공간 조건과 시스템을 대상으로 수행되어 왔다.

Choi 등[6]의 연구는 IEC 기준을 적용하여 누출공 크기와 누출 질량유량을 체계적으로 산정하고, 이를 기반으로 밀폐 공간에서의 수소 확산 특성을 분석한 대표적 연구이다. 해당 논문은 누출 초기조건 정의

와 누출량–확산 거동 간의 상관성을 정량적으로 제시함으로써, 본 연구에서 수행한 누출 시나리오 설정 및 해석 조건 선정의 이론적 근거를 제공한다. 특히 누공 크기에 따른 확산 속도 및 농도 분포의 변화 경향은 본 연구의 CFD 기반 시나리오 구성과 감지 성능 평가의 타당성을 뒷받침하는 핵심 참고자료로 활용되었다.

De Stefano 등[3]은 핵시설의 실내 공간을 축소 모델로 구성하여 다양한 유량, 위치, 장애물 유무 조건에서 수소 확산 거동을 실험적으로 분석하였다. 장애물이 존재할 경우 난류 확산이 억제되어 혼합시간이 약 1.5배 증가함을 확인하였으며, CFD 해석을 통해 이를 정량적으로 재현하였다. 이러한 결과는 트랙터 내부의 배관, 엔진룸 구조물 등 장애물 존재 시 수소 확산이 지연될 가능성을 검토하는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

Cui 등[4]은 수소 공급 시스템의 다양한 누출 시나리오를 설정하고 CFD 해석을 통해 센서의 농도 응답시간 데이터를 확보한 뒤, 이를 기반으로 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 적용하여 감지기 배치를 최적화하였다. 각 시나리오별로 수소 농도가 1%에 도달하는 시간을 계산하여 커버리지와 응답속도를 목적함수로 구성하였으며, 결과적으로 센서 수를 최소화하면서도 감지 효율을 향상시키는 최적 배치안을 제시하였다. 이러한 연구는 본 연구가 수행하는 시나리오 기반 감지기 최적화 접근과 직접적으로 맥락을 공유하며, 트랙터 내부 센서 조합 최적화 기법 설계에 핵심적인 이론적 근거를 제공한다.

Hwang 등[7]은 패키지형 수소충전시스템을 대상으로 CFD 기반 안전성 향상 방안을 제시한 연구로, 누출 위치·유량·설비 배치에 따른 수소 확산 특성을 정량적으로 분석하였다. 연구는 구조물에 의한 유동 간섭과 체류 영역이 국부 농도 상승을 유발할 수 있음을 확인하였고, 환기 조건 변화가 위험영역 규모에 직접적인 영향을 미친다는 점을 제시하였다. 이는 수소 기반 설비의 안전 설계에서 누출 시나리오 기반 해석의 필요성을 뚜렷하게 보여주며, 본 연구의 트랙터 누출 모델링 및 감지기 배치 최적화에도 유사한 분석 틀이 적용될 수 있음을 시사한다. 또한 장비 집약형 패키지 시스템에서 CFD의 활용이 위험도 평가의 신뢰도 향상에 기여한다는 점을 명확히 제시한 연구라는 점에서 중요한 참고자료가 된다.

Lee 등[8]은 반밀폐 공간에서의 수소 누출을 대상으로 강제환기 조건이 확산 거동에 미치는 영향을 수치적으로 분석한 연구로, 환기 속도와 유량 변화가 농도 분포 및 최대 농도 형성 시점에 큰 영향을 미침을 규명하였다. 연구는 환기 흐름이 충분할 경우 누적 농도가 효과적으로 저감되고, 반대로 불충분한 환기 조건에서는 체류 영역 발생으로 농도 상승이 지속될 수 있음을 제시하였다. 이는 반밀폐 구조물 내에서 환기 설계가 안전성을 결정하는 핵심 인자임을 보여주며, 특히 구조적 장애물이 존재하는 실내·차량 공간에서 수소 확산이 비대칭적으로 나타난다는 점을 강조한다. 본 연구에서 수행한 트랙터 내부 누출 시나리오 분석과 비교하면, 환기 조건이 감지시간 및 플룸 형성 속도에 미치는 영향이 유사하게 나타나, 향후 농기계의 환기·유동 설계 개선을 위한 중요한 참조 근거가 된다.

## 3. 수소 누출 조건 설정 및 도출

### 3.1 관련 기준 요약 및 분석

IEC 60079-10-1은 인화성 가스 또는 증기를 취급하는 설비의 폭발위험장소를 분류하기 위한 국제표준으로, 누출특성값과 환기조건을 바탕으로 위험 범위를 산정하도록 규정한다[2]. 본 기준에서는 누출원의 등급(연속·1차·2차)과 누출공 면적을 설정한 뒤, 가스의 물성치와 운전압력, 온도 조건을 이용해 누출량을 계산하고 이를 희석등급 및 폭발위험거리로 변환한다. 그러나 실제 운전환경이나 대기조건은 반영되지 않아 보수적 결과를 제시하는 경향이 있으며, 따라서 본 연구에서는 IEC 60079-10-1의 계산절차를 기본 틀로 하되 CFD 해석을 병행하여 보다 현실적인 수소 확산 및 위험 영역을 평가하였다.

## 3.2 누출 조건 설정

### 3.2.1 누출 위치 설정

본 연구의 대상은 트랙터 탑재되는 파워팩이며, 파워팩의 설치 위치는 확정되었으나 내부 부품(스택 위치, 배관·피팅 등)의 세부 배치가 미확정인 상태이다. 이에 따라 누출원의 위치는 본 논문에서 고려한 누출원 및 방향은 총 8곳이며, 세부적으로 누출위치가 명확한 매니폴드 및 레귤레이터 2곳, 누출위치가 불확신한 파워팩의 경우 파워팩 기준 전/후/좌/우/상/하 6곳이다.

### 3.2.2 누출공 크기 산정

IEC 60079-10-1 기준에 따라 트랙터용 연료전지 시스템의 중압 수소 배관을 대상으로 누출공을 산정하였다. 중압 수소 라인의 특성상 누출 개구부는 재질 열화나 부식 등에 의해 확대될 가능성이 있으므로, 이를 고려하여 누출공 면적을 0.25 mm², 1.0 mm², 2.5 mm², 5.0 mm²의 4단계로 설정하였다. 이러한 누출공 크기 산정은 가정을 전제로 한 평가이므로, 실제 누출 위치 및 방향에 따른 불확실성을 보정하기 위해 모든 시나리오에 대해 동일한 4단계의 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

**Table 1.** Categories of Variables in Hydrogen Leakage Analysis

| Item | Type |
|---|---|
| Leak Location | Manifold, Regulator, Power Pack (Front, Rear, Left, Right, Top, Bottom) |
| Leak Direction | Front, Rear, Left, Right, Up, Down |
| Leakage Orifice Area [mm²] | 0.25, 1, 2.5, 5 |

### 3.2.3 질량누출 계산

IEC 60079-10-1 기준하여 산정된 누출공에 따라 질량유량을 계산한다. 먼저 유동의 음속 도달 여부(초킹 판정)을 확인하고, 조건에 따라 아래 식을 적용하였다[2].

$$\text{초킹조건(음속, } \frac{P_0}{P_a} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}\text{):}$$

$$W_g = C_d \cdot A \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{ZRT_0} \cdot \frac{M}{\gamma+1}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

$$\text{비초킹조건(아음속, } \frac{P_0}{P_a} < \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}\text{):}$$

$$W_g = C_d \cdot A \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{ZRT_0} \cdot \frac{M}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{P_0}{P_a}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

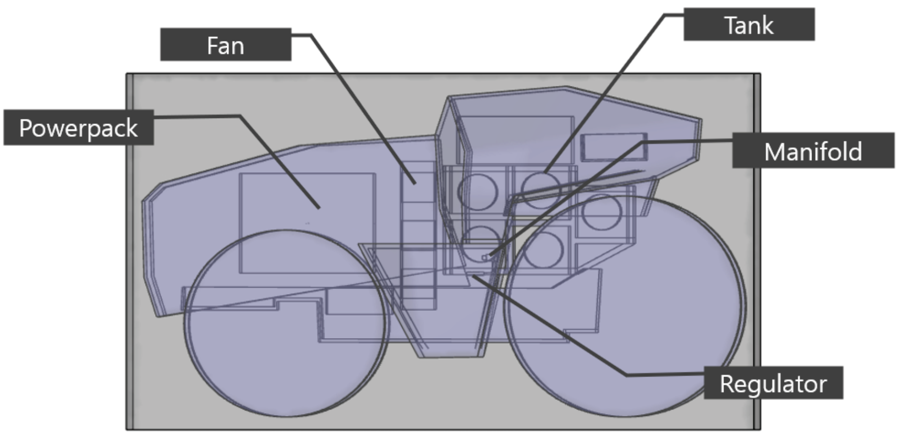



**Fig. 2.** Geometric simplification of the tractor model

Table 2. Coordinate positions of virtual sensors inside the tractor

| Sensor | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x(m) | -0.35 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.8 | 1.15 | 1 | 1 | 1 | 1.5 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 2.4 | 2.5 |
| y(m) | 0 | 0.45 | -0.45 | 0 | 0 | 0 | 0.43 | -0.43 | 0 | -0.43 | -0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| z(m) | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.25 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.4 | 0.65 | 1.4 | 1.4 | 1.73 | 1.6 | 1.3 |

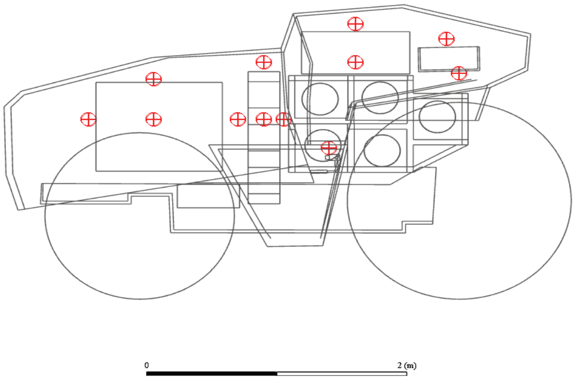



Fig. 3. Placement of virtual sensors inside the tractor

### 3.3 누출 조건 도출

도출한 8개 누출원(메니폴드, 레귤레이터, 파워팩 전·후·좌·우·상·하)에 대해 IEC 60079-10-1을 준용하여 누출공 4단계(0.25, 1.0, 2.5, 5.0 mm²)를 적용, 질량누출을 산정한다. 각 조건별 압력·온도·방출계수(Cd=0.75)를 입력하고 초킹조건/비초킹조건을 판정해 해당 오리피스 식을 사용한다. 산출된 $W_g$는 '누출원×오리피스' 매트릭스로 정리해 시나리오 세트를 구성하고, 이후 CFD 경계조건과 센서 응답평가의 입력 데이터로 활용한다(Table 1).

## 4. CFD 해석을 통한 수소 확산 분석

### 4.1 해석 모델링

본 연구의 해석 모델은 계산 효율성과 수렴 안정성을 확보하기 위해 주요 구조물 중심으로 단순화하여 구성하였다(Fig. 2). 수소 농도 모니터링을 위해 CFD 도메인 내에 총 15개의 가상 센서를 배치하였으며(Fig. 3), 각 센서의 위치는 Table 2에 제시하였다.

### 4.2 해석조건 설정

본 연구의 수치해석은 트랙터 내부에서 발생하는 수소의 비정상적 거동을 모사하기 위해 비정상(unsteady) 및 비압축성(incompressible) 유동을 가정하였다. 중력 효과는 아래의 식을 적용하였다.

$$\vec{g} = (0, 0, -9.81)\, m/s^2$$

위의 식에 설정하여, 수소의 낮은 밀도에 기인한 부력(buoyancy) 영향을 정확히 반영하였다. 해석에 적용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식(Navier – Stokes), 에너지방정식 및 스칼라 수송방정식으로 구성된다. 먼저, 연속방정식(Continuity Equation)은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

유동장의 운동량 보존은 Navier–Stokes 방정식으로 기술된다.

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}\right) = -\nabla \rho + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g}$$

열전달은 에너지방정식(Energy Equation)을 통해 계산하였다.

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot(k\nabla T)$$

수소 농도 변화는 스칼라 수송방정식(Scalar Transport Equation)으로 모사하였다.

$$\frac{\partial Y_{H_2}}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla Y_{H_2}=\nabla\cdot(D_{H_2}\nabla Y_{H_2})$$

난류 특성은 Realizable k–ε 난류모델을 적용하였으며, 난류 운동에너지 k와 소산율 ε은 다음의 수송 방정식으로 산정하였다.

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla k=\nabla\cdot\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\nabla k\right)+P_k-\epsilon$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla k=\nabla\cdot\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\nabla\epsilon\right)+C_1S_\epsilon-C_2\frac{\epsilon^2}{k}$$

수치해석 알고리즘은 압력기반(Pressure-Based) 계산기법을 채택하였으며, 압력–속도 연성은 Coupled Scheme을 적용하여 계산 안정성과 수렴성을 강화하였다. 대류항의 이산화에는 Second-Order Upwind 기법을 사용하였고, 압력항은 Body Force Weighted 방식을 적용하여 중력에 의한 체적력 효과가 정확히 반영되도록 하였다.

## 4.3 모델 검증

본 연구의 CFD 모델은 De Stefano 등[3]의 장애물 존재 폐쇄공간 내 수소 누출 실험을 기준으로 검증하였다. 동 연구에서 수행된 실험 조건(누출공 1 $mm^2$, 압력 2 bar, 온도 298 K, 장애물 포함)을 동일하게 재현하여 CFD 결과를 실험 측정치에 피팅한 후, 오차 분석을 수행하였다. 시간에 따른 상부 농도 분포의 예측값과 실험값을 비교한 결과(Figs. 4-7), 센서 A1, A2, A3, A4에서 전체 농도 변화 범위(0.0～0.2 vol fraction) 대비 MAE (Mean Absolute Error) 및 RMSE

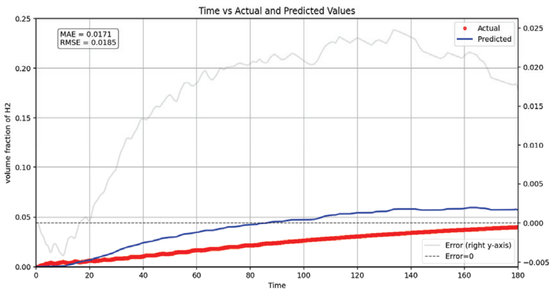



**Fig. 4.** Prediction error over time at the A1 sensor

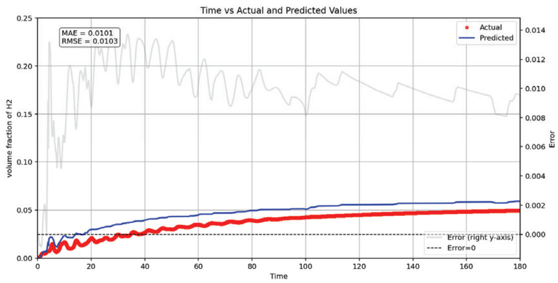



**Fig. 6.** Prediction error over time at the A2 sensor

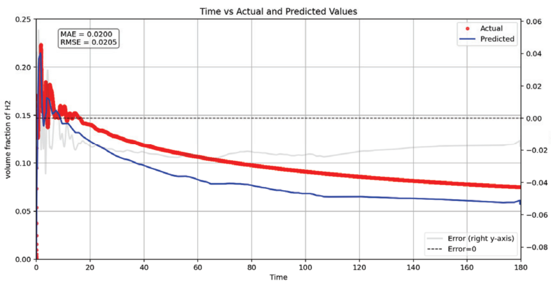



**Fig. 5.** Prediction error over time at the A4 sensor

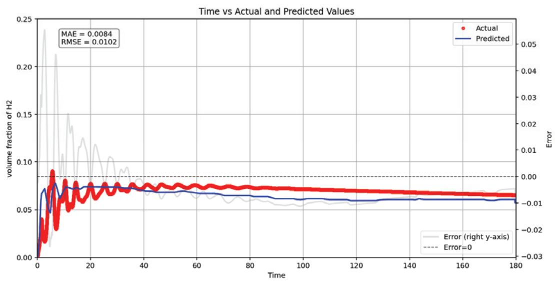



**Fig. 7.** Prediction error over time at the A3 sensor

(Root Mean Squared Error) 약 2% 이내의 오차로 (Table 3), CFD 모델이 실험적 확산 거동을 정량적으로 재현함을 의미한다. 계산식은 아래와 같다.

$$MAE = \frac{\sum |y - \hat{y}|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y - \hat{y})^2}{n}}$$

Table 3. Error Verification between Experimental and CFD Results

| Sensor | MAE | RMSE | MEAN ERROR |
|---|---|---|---|
| A1 | 0.0171 | 0.0185 | 0.0171 |
| A2 | 0.0101 | 0.0103 | 0.0101 |
| A3 | 0.0084 | 0.0103 | -0.0084 |
| A4 | 0.0192 | 0.0205 | -0.0192 |
| Equation for Error Validation | $MAE = \frac{\sum \lvert y-\hat{y} \rvert}{n}$ | $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y-\hat{y})^2}{n}}$ | $MAE = \frac{\sum \lvert y-\hat{y} \rvert}{n}$ |

또한 A1, A2에 대비하여 A3, A4의 MEAN ERROR의 값이 음수로 나타난 것은 k-ε 모델의 난류 확산이 다소 보수적으로 계산되는 경향 때문이며, 그 외 시간 응답 패턴과 농도 저감 곡선의 형태는 실험결과와 정성적으로 일치하였다. 따라서 본 CFD 모델은 장애물이 존재하는 반폐쇄 공간에서의 수소 확산 거동을 충분히 신뢰할 수 있는 수준으로 재현함을 확인하였다.

## 4.4 메쉬 독립성 평가 및 메쉬 구성

### 4.4.1 메쉬 독립성 평가

CFD 해석의 수치적 신뢰성을 확보하기 위해 총 세 단계의 격자 모델을 구성하여 메쉬 독립성 평가를 수행하였다. 격자 수는 각각 207만(격자 A), 94만(격자 B), 6.8만(격자 C)으로 설정하였다.

속도 및 압력 분포를 비교한 결과(Figs. 8-9), 격자 C는 계산 안정성이 낮고 시간응답 곡선이 일그러지는 현상이 나타났으며, 격자 A는 해석 정확도는 높

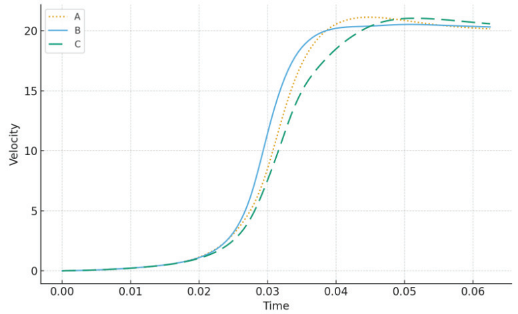



Fig. 8. Mesh-dependent velocity variation at 0.8 m above the leakage hole

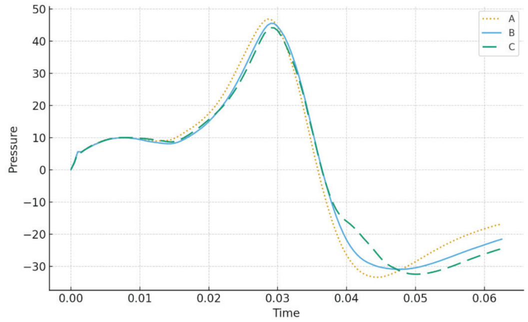



Fig. 9. Mesh-dependent pressure variation at 0.8 m above the leakage hole

았으나 계산비용이 과도하였다. 반면, 94만 개 셀을 사용한 격자 B에서는 속도와 압력 곡선이 모두 안정적으로 수렴하였으며, 격자 A 대비 오차는 3% 이하로 나타났다. 따라서 계산 효율과 정확도를 동시에 고려하여 944,618개의 셀을 사용한 모델을 최적 격자로 선정하였으며, 이 격자를 기반으로 모든 시나리오 해석을 수행하였다.

### 4.4.2 메쉬 구성

본 연구에서 생성한 계산 격자의 품질은 전체 도메인을 기준으로 평균 Skewness가 0.104, 평균 Orthogonal Quality가 0.894로 나타나, 수치해석에 적합한 수준의 기하학적 품질을 확보하였다. 전체 메쉬의 기본 요소 크기(element size)는 0.06 m로 설정하였으며, 수소 누출공 주변의 급격한 농도 변화 및 속도 구배를 정밀하게 해석하기 위해 해당 영역에는 0.0005 m의 세부 요

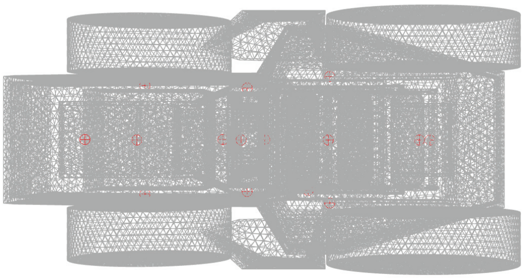


**Fig. 10.** Mesh of the hydrogen leakage flow region in the tractor-2

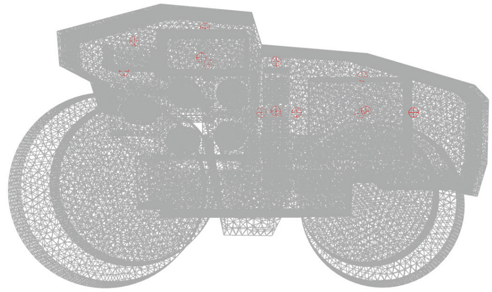


**Fig. 11.** Mesh of the hydrogen leakage flow region in the tractor-1

소 크기를 적용하였다. 이를 통해 누출공 주변에서 발생하는 초기 제트 유동과 플룸 형성 과정을 높은 공간 해상도로 포착할 수 있도록 하였으며, 전체 메쉬의 수렴성과 안정성을 동시에 확보하였다. 완성된 메쉬의 Top view와 Right view는 Figs. 10-11과 같다.

## 4.5 시나리오별 수소누출 해석

본 연구에서는 각 누출 시나리오에 대해 시간 간격(Time step) 0.01~0.05 s 및 단계당 200회의 반복 계산(Iteration)을 적용하여 최대 30 s까지 비정상(transient) 해석을 수행하였다. 트랙터 내부 공간의 수소 확산은 초기 수 밀리초(ms) 구간에서 급격한 농도 변화를 보인 뒤, 시간 경과에 따라 층상 플룸 구조가 점진적으로 발달하는 경향을 나타냈다. 이를 기반으로 모든 시나리오에 동일한 계산 조건을 설정하여 시나리오 간 비교 가능성을 확보하였다. 수소 농도 모니터링은 내부 유동 특성과 설치 가능 공간을 고려하여 선정한 총 4개 센서 위치에서 수행하였다. 각 센서에 대해 수소 부피농도 1% 도달 여부와 그 시각을 추출하여 감지 가능성을 평가하였다.

한편, 누출공 면적이 0.25 mm²인 시나리오에서는 매우 낮은 질량유량으로 인해 누출로 인한 수소의 누적보다 강제환기로 인한 확산이 상대적으로 더 빠르게 진행되는 특징이 관찰되었다. 이에 따라 누출된 수소가 공간 내에 머무르기 전에 희석이 우세하게 일어나며, 플룸 농도가 지속적으로 낮게 유지되었다. 실제 해석 결과에서도 대부분의 경우 60 s가 경과하더라도 수소 부피농도 1% 수준의 플룸이 형성되지 않았으며, 이는 본 연구의 비교 기준(30 s 이내의 1% 도달)과 감지기 성능 평가 목적에 부합하지 않는 것으로 판단되었다. 따라서 0.25 mm² 누출조건은 감지 성능 분석 대상에서 제외하였다. 이와 같은 해석 조건과 기준을 통해 시나리오별 수소 확산 특성을 일관적으로 평가하였으며, 본 결과는 이후 제시되는 센서별 감지시간 및 커버리지 분석의 기초자료로 활용되었다(Table 4).

## 4.6 결과분석

### 4.6.1 시나리오별 수소 확산 특성 분석

- 누출 위치에 따른 확산 분석

상부나 전방부 구성요소에서 누출이 발생한 시나리오에서는 수소의 부력 효과가 우세하게 작용하여 플룸이 빠르게 상향 이동함에 따라 상단부 센서들이 우선적으로 반응하였다. 반면 엔진룸 하부, 측면 배관 등 폐색도가 높은 위치에서 발생한 누출은 구조물에 의한 와류 및 난류 소산 효과로 인해 플룸의 상승 및 확산이 지연되었고, 이로 인해 특정 센서만 제한적으로 반응하거나 감지시간이 크게 지연되는 경향을 보였다. 또한 트랙터 내부 중앙부와 같이 강제환기로 인하여 상대적으로 개방도가 높은 영역에서 누출이 발생한 경우, 확산 플룸이 비교적 균일하게 분포하여 복수의 센서가 동시에 유사한 감지 양상을 나타내는 것으로 확인되었다.

- 누출 방향에 따른 확산 분석

상향 누출 시나리오에서는 수소의 낮은 밀도와 강한 부력 효과가 상호작용하여 누출 직후 급격한 상승 플룸이 형성되었다. 이 경우 상부 영역에 배치된 센서들이 가장 빠르게 반응하였으며, 플룸의 수직 성장 특성으로 인해 감지시간의 편차가 작고 비교적 안정적인 패턴을 보였다. 이러한 경향은 누출 위치와 상관없이 "상향 분출 + 부력 지배 유동"에서 일관적으로 관찰되었다.

반면 수평 누출의 경우, 플룸은 초기에는 분출 방

**Table 4.** Sensor response time by scenario

| Scen | 1st sensor | 1% time [s] | 2nd sensor | 1% time [s] | 3rd sensor | 1% time [s] | 4th sensor | 1% time [s] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10 | 0.01 | 13 | 0.23 | 9 | 0.52 | 7 | 0.6 |
| 2 | 7 | 0.053 | 2 | 0.072 | 6 | 0.094 | 9 | 1.17 |
| 3 | 13 | 0.232 | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 13 | 4.2 | 12 | 7.55 | 15 | 9 | 10 | 9.95 |
| 5 | 10 | 0.001 | 11 | 0.015 | 14 | 0.03 | 7 | 0.1 |
| 6 | 5 | 0.13 | 7 | 0.14 | 9 | 0.22 | 10 | 0.35 |
| 7 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 8 | 0.38 | 13 | 0.6 | 2 | 1.1 | 10 | 1.15 |
| 9 | 10 | 0.011 | 11 | 0.015 | 6 | 0.019 | 13 | 0.02 |
| 10 | 7 | 0.052 | 5 | 0.068 | 6 | 0.085 | 8 | 0.12 |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 7 | 0.051 | 12 | 0.059 | 13 | 0.065 | 2 | 0.078 |
| 17 | 8 | 2.03 | 9 | 2.6 | 5 | 2.66 | 7 | 2.98 |
| 18 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 19 | 10 | 4.75 | - | - | - | - | - | - |
| 20 | 10 | 0.015 | 8 | 2.05 | 3 | 2.65 | 5 | 4.4 |
| 21 | 10 | 0.17 | 6 | 0.47 | 13 | 0.68 | 12 | 0.71 |
| 22 | 7 | 1.75 | 2 | 1.9 | 5 | 2.06 | 8 | 3.4 |
| 23 | 7 | 1.6 | 2 | 3.02 | 5 | 12.1 | 9 | 17.05 |
| 24 | 10 | 0.06 | 8 | 0.28 | 6 | 0.69 | 9 | 0.81 |
| 25 | 5 | 0.28 | 10 | 0.36 | 6 | 0.37 | 12 | 0.57 |
| 26 | 7 | 0.19 | 6 | 0.42 | 9 | 0.53 | 2 | 0.54 |
| 27 | 10 | 0.1 | 7 | 0.45 | 5 | 1.18 | 13 | 2.13 |
| 28 | 8 | 0.02 | 3 | 0.17 | 4 | 0.39 | 11 | 0.48 |
| 30 | 2 | 1.51 | 3 | 1.67 | 1 | 2.65 | - | - |
| 31 | 1 | 0.63 | 2 | 0.77 | 3 | 1.07 | 7 | 1.27 |
| 32 | 1 | 0.09 | 3 | 0.095 | 9 | 0.15 | 2 | 0.24 |
| 34 | 7 | 1.45 | 5 | 2.65 | 8 | 2.7 | 9 | 6.5 |
| 35 | 5 | 2.5 | 8 | 0.27 | 7 | 0.6 | 4 | 1.21 |
| 36 | 5 | 0.005 | 8 | 0.059 | 3 | 0.122 | 2 | 0.288 |
| 38 | 3 | 0.01 | 4 | 2.98 | - | - | - | - |
| 39 | 3 | 0.01 | 9 | 0.94 | 4 | 1.09 | 6 | 1.26 |
| 40 | 3 | 0.0254 | 8 | 0.163 | 10 | 0.241 | 1 | 1.45 |
| 42 | 7 | 0.2 | 2 | 2.8 | - | - | - | - |
| 43 | 7 | 0.14 | 2 | 0.21 | 4 | 1.8 | 1 | 1.05 |
| 44 | 2 | 0.016 | 7 | 0.089 | 12 | 1.02 | 1 | 1.05 |
| 46 | 4 | 0.28 | 7 | 2.5 | 9 | 6.32 | 8 | 8.21 |
| 47 | 9 | 0.17 | 4 | 0.3 | 2 | 0.55 | 8 | 0.68 |
| 48 | 4 | 0.9 | 7 | 0.11 | 8 | 0.14 | 9 | 0.24 |
| 50 | 1 | 1.98 | 4 | 3.81 | 2 | 4.56 | 7 | 5.96 |
| 51 | 1 | 1.65 | 4 | 2.14 | 3 | 2.45 | 2 | 4.98 |
| 52 | 1 | 0.495 | 2 | 0.698 | 4 | 0.74 | 7 | 0.81 |

향을 따라 진행하나 곧 벽면·커버 구조물과 충돌하여 유동이 분리되고 와류가 형성되면서 감지 패턴의 방향성이 크게 흐트러지는 특징을 보였다. 이로 인해 특정 방향에 인접한 센서에서만 조기 감지가 발생하거나, 플룸이 구조물에 의해 국부적으로 체류하여 의도하지 않은 센서에서 먼저 감지되는 사례가 다수 확인되었다. 즉, 수평 누출에서는 구조물 간섭에 의한 비대칭 확산이 주요 영향인자로 작용하였다.

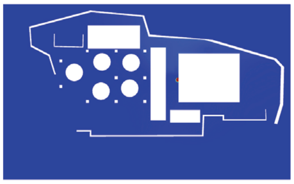
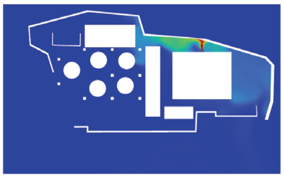
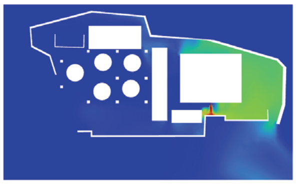
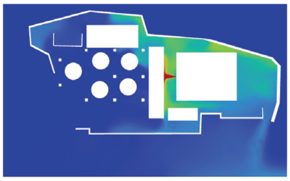
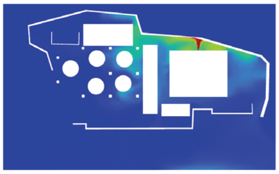
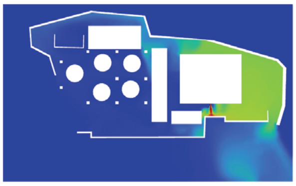
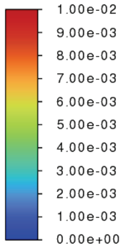
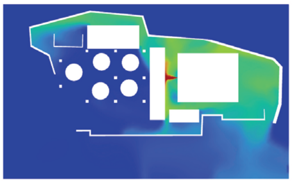
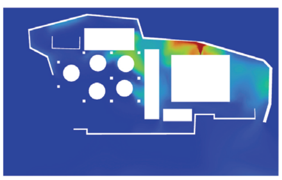
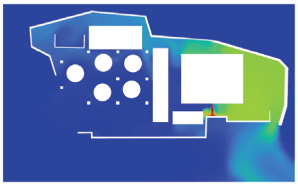
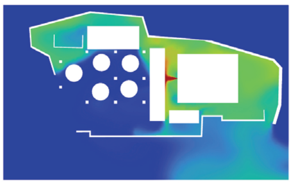
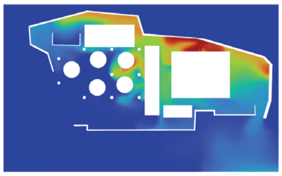
하향누출의 경우에는 부력 방향과 분출 방향이 반대이기 때문에 초기 제트가 비교적 짧은 거리에서 감쇠되며, 이후 주변 공기와 혼합되면서 확산이 지배적인 형태로 전환되었다. 이 경우 플룸이 상부로 도달하기까지 시간이 오래 걸려 대부분의 시나리오에서 감지시간이 상대적으로 지연되었으며, 플룸 농도가 낮게 유지되어 일부 센서에서는 30 s 이내 1% 기준에 도달하지 않는 경우도 나타났다. 이는 하향 누출이 트랙터 외부로 유출되는 경우도 있기 때문이다. 결과적으로 하향 누출은 부력에 의한 재상승과 누출로 인한 빠른 속도가 만나 빠른 확산 과정이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

각 누출 방향에 따른 수소 확산 거동은 Table 5에 일부 제시하였다.

-누출공 크기변화에 따른 확산 분석

누출공 크기 증가에 따라 누출량이 증가할수록 반응 센서 구성과 감지 패턴의 일관성이 뚜렷하게 강화되는 것으로 나타났다. 중·대형 누출공 조건에서는 플룸이 빠르게 형성되면서 상·중부 센서가 우선적으로 반응하였고, 모든 감지된 시나리오에서 일정한 순서 관계를 유지하였다. 특히 센서 6, 센서 3, 센서 7과 같이 유동 중심축 또는 상승 플룸 경로에 위치한 센서들은 누출량이 증가할수록 감지시간 편차

**Table 5.** Hydrogen dispersion and concentration profiles by scenario

| Scenario | Scenario35 | Scenario47 | Scenario51 | Color bar |
|---|---|---|---|---|
| 5[s] |  |  |  | |
| 10[s] |  |  |  |  |
| 15[s] |  |  |  | |
| 30[s] |  |  |  | |

가 감소하며 조기 감지 패턴이 더욱 명확하게 나타났다. 반면 소형 누출공에 해당하는 조건에서 감지된 시나리오들은 플룸 형성이 상대적으로 느리기 때문에 센서간 반응 순서의 변동성이 증가하였다. 이 범위의 누출량에서는 구조물 간섭 및 국부 유동장 형성이 크게 작용하여, 상부 센서가 항상 최초 감지자가 되지 않고, 경우에 따라 측면 또는 중앙 센서가 먼저 반응하는 사례도 관찰되었다. 그럼에도 불구하고 감지된 시나리오 전반에서 공통적으로 플룸 상승 경로와 가까운 센서들이 지속적으로 우세하게 반응하였으며, 이는 누출공 크기와 무관하게 센서 위치의 유동장 중심성과 부력 기반 유동 특성이 감지 패턴을 지배함을 의미한다. 이상의 결과는 누출량이 커질수록 센서 반응 순서가 단순·안정화되고, 누출량이 작을수록 유동장의 민감한 변화에 따른 센서 반응 분산이 증가함을 보여준다.

### 4.6.2 센서별 평균 및 최악 감지성능 비교

시나리오-센서 매트릭스를 구성하여 각 센서별 평균 감지시간, 최악 감지시간, 커버리지를 Table 6과 같이 산정하였으며 그래프로 나타내었다(Fig. 12). 산정은 아래의 식에 따라 도출하였다.

시나리오 개수: $N_{scen} = 42$

선택된 센서 조합: $S = i_1, i_2, i_3$

시나리오 $j$에서 센서 $i$의 1% 도달 시간: $t_{i,j}$

해석시간(30 s) 기준에서 시나리오$j$가 감지성공이면

$$I_j(s) = \begin{cases} 1, \min_{i \in S} t_{i,j} \le T_{\max} \ (T_{\max} = 30s) \\ 0, otherwise \end{cases}$$

시나리오 $j$에서 조합 S의 감지시간은

$$\tau_j(S) = \min_{i \in S} t_{i,j}$$

이때, 커버리지(Coverage)는

$$C(S) = \frac{1}{N_{scen}} \sum_{j=1}^{N_{scen}} I_j(S)$$

최악 감지시간(Worst Detection Time)은

$$W(S) = \max_{j : I_j(S) = 1} \tau_j(S)$$

평균 감지시간(Average Detection Time)은

$$T(S) = \frac{\sum_{j=1}^{N_{scen}} I_j(S) \tau_j(S)}{\sum_{j=1}^{N_{scen}} I_j(S)}$$

**Table 6.** Comparison of sensor detection performance

| sensor | avg time[s] | worst time[s] | coverage% |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.23 | 2.65 | 21.43 |
| 2 | 1.37 | 4.98 | 40.48 |
| 3 | 0.83 | 2.65 | 23.81 |
| 4 | 1.42 | 3.81 | 26.19 |
| 5 | 2.55 | 12.10 | 26.19 |
| 6 | 0.43 | 1.26 | 19.05 |
| 7 | 1.00 | 5.96 | 50.00 |
| 8 | 1.46 | 8.21 | 33.33 |
| 9 | 2.86 | 17.05 | 30.95 |
| 10 | 1.32 | 9.95 | 30.95 |
| 11 | 0.17 | 0.48 | 7.14 |
| 12 | 1.98 | 7.55 | 11.90 |
| 13 | 1.02 | 4.20 | 19.05 |
| 14 | 0.03 | 0.03 | 2.38 |
| 15 | 9.00 | 9.00 | 2.38 |

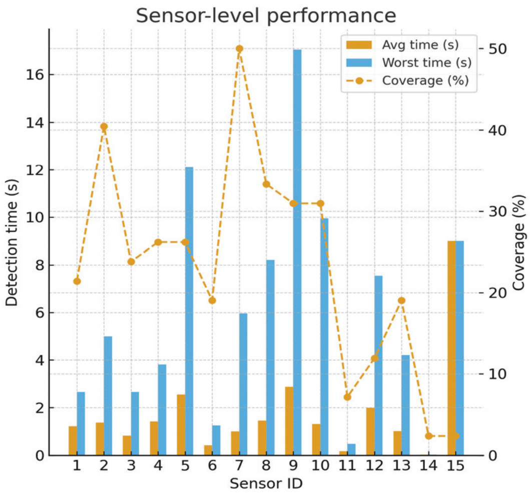



**Fig. 12.** Sensor detection performance comparison graph

평균 감지시간 기준 상위권은 센서 14, 11, 6, 3, 7 순으로 나타났다. 센서 14와 11은 국부적으로 매우 빠른 응답을 보이지만, 전체 시나리오 중 일부에서만 작동하여 커버리지가 낮다는 한계가 있다. 반대로 센서 7과 2, 10, 8 등은 평균 응답은 다소 느리지만 커버리지가 30~50% 수준으로 넓어, 전체 누출 시나리오를 두루 커버하는 역할을 한다. 최악 감지시간 관점에서는 센서 9, 5, 10, 12, 8이 지연 감지가 두드러져 상대적으로 불리한 위치로 평가된다. 특히 센서 15는 평균 9 s, 최악 9 s, 커버리지 2.4%로 거의 일부 시나리오에서만 늦게 반응하는, 효율이 낮은 위치이다. 종합적으로 빠른 평균과 적절한 커버리지를 동시에 고려하면, 센서 6, 3, 7이 트랙터 내부에서 균형 잡힌 감지성능을 제공하는 핵심 위치로 판단된다.

### 4.6.3 검지누락 비율과 취약 시나리오 분석

센서별 커버리지를 기반으로 각 센서가 수소 부피 농도 1%에 도달한 시나리오의 비율을 산정하였으며, 보완지표로서 미검지율(Undetection Rate = 100 – Coverage)을 도입하여 Table 7과 같이 도출 및 그래프화 하였다(Fig. 13). 전체 42개 시나리오 중 약 7.1%는 어떤 센서에서도 1% 농도에 도달하지 않아, 특정 누출 조건에서는 현행 15개 센서 배치만으로는 누출 감지가 어려울 수 있음을 시사한다. 센서별 비교 결과, 센서 7이 미검지율 50%로 가장 낮아 가장 넓은 커버리지를 확보하였으며, 그 뒤로 센서 2(59.5%), 8·9·10(각 69.0%)가 비교적 우수한 감지 성능을 보였다. 반면 센서 14와 15는 미검지율이 각각 97.6%에 달해 대부분의 시나리오에서 감지에 기여하지 못했으며, 센서 11(92.9%), 12(88.1%), 6·13(각 80.9%) 역시 실질적인 커버리지가 매우 제한적인 것으로 나타났다. 이는 해당 센서들이 유동 주류로부터 벗어나 있거나 플룸이 도달하기 어려운 사각 영역에 위치함을 의미한다. 따라서 커버리지가 높은 센서(7, 2, 8, 9, 10)를 축으로 삼고, 반복적으로 미검지가 발생하는 외측·후방 영역을 중심으로 보완 센서 위치를 설계하는 것이 효과적인 감지 성능 향상 전략으로 판단된다.

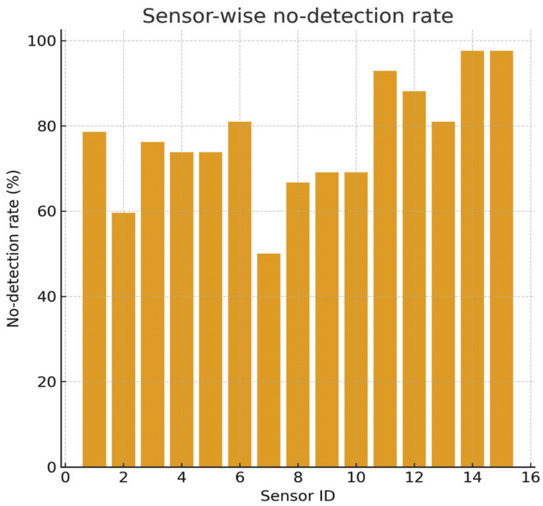



**Fig. 13.** Sensor undetection rate graph

### 4.6.4 트랙터 평면상 감지시간 등고면

등고면 분석은 트랙터 상부 평면에서 각 센서 위치의 평균 감지시간과 커버리지(coverage) 정보를 함께 고려하여, 공간적으로 감지 성능의 분포를 확인하기 위한 목적으로 수행하였다. 분석에서는 먼저 각 센서에서 계산된 평균 감지시간을 0~5초 범위에서 정규화하고, 센서별 커버리지는 0~1 범위로 환산한 뒤 1-coverage로 변환하여 감지 실패 가능성을 나타내도록 하였다. 이후 평균 감지시간과 커버리지에 각각 0.2와 0.8의 가중치를 적용하여 하나의 통합 지표를 구성하였으며, 값이 낮을수록 감지시간이 짧고 감지 가능한 시나리오 비율이 높다는 의미로 설정하였다.

2D 등고선 결과에서 확인된 주요 특징은 트랙터 중앙부의 센서들(6, 7, 9, 10, 11, 13번 주변)에서 통

**Table 7.** Table of Sensor Undetection Rates

| Sensor | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| no detection % | 78.57 | 59.52 | 76.19 | 73.81 | 73.81 | 80.95 | 50.00 | 66.67 | 69.05 | 69.05 | 92.86 | 88.10 | 80.95 | 97.62 | 97.62 |

합지표가 가장 낮게 나타난다는 점이다(Fig. 14). 이 영역은 평균 감지시간이 1초 이하로 비교적 짧고, 커버리지 또한 다른 센서보다 안정적으로 확보되어 있어 전체적으로 감지 성능이 좋은 구역으로 판단된다. 특히 센서 11 주변은 평균 감지시간이 약 0.2초로 매우 빠르게 나타나며, 커버리지 또한 중상 수준을 유지하여 가장 효과적인 감지 위치 중 하나로 확인되었다.

반면 트랙터 전방 우측 외곽에 위치한 센서 15번과 일부 후방 외곽 센서 주변은 평균 감지시간이 길고 커버리지도 낮아 통합지표가 높게 나타났다. 이러한 결과는 해당 영역이 여러 시나리오에서 감지 지연 또는 미감지 가능성이 크다는 것을 의미하며, 구조적인 요소나 유동 조건에 의해 수소가 잘 머무는 구간으로 판단된다.

3D 서피스 그래프에서도 같은 흐름이 나타난다(Fig. 15). 곡면이 아래로 꺼진 저지형 지역은 빠르게 감지되는 센서 주변(6, 7, 11 등)과 일치하며, 봉우리 형태로 높게 솟아 있는 구역은 감지가 늦거나 잘 되지 않는 센서 주변(5, 9, 15 등)에 대응한다. 이러한 공간적 비대칭성은 트랙터 상부 구조와 내부 환기 흐름이 균일하지 않기 때문이며, 중앙부는 주 유동이 형성되어 확산이 빠르게 이루어지는 반면, 전·후방 외곽부는 정체 흐름이 발생하여 수소가 오래 머무는 특성을 보인다.

따라서 감지기 배치를 계획할 때는 중앙부의 고성능 영역을 유지하되, 통합지표가 높게 나타난 전방 우측 및 후방 외곽 지역을 중심으로 센서를 추가하거나 환기구 배치, 공기 흐름 개선 등을 통해 감지 사각지대를 보완할 필요가 있다. 이는 전체적인 감지 신뢰도 향상과 잠재적 위험요소 감소에 도움이 될 것으로 판단된다.

### 4.6.5 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 분석

본 연구에서는 15개의 수소 누출 감지기 중 최적의 3개 조합을 선정하기 위해, 시나리오 기반 감지 성능 자료에 근거한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 적용하였다. 입력 데이터는 각 시나리오에서 1~4등으로 1% 수소 농도에 최초 도달한 센서 번호와 해당 감지시간으로 구성되며, 이를 행은 시나리오, 열은 센서인 시나리오×센서 행렬로 변환하여 사용하였다. GA의 목적함수는 선택된 3개 센서 조합에 대해 감지에 성공한 시나리오 비율을 최우선적으로 최대화하고, 동일 커버리지를 갖는 조합들 사이에서는 최악 감지시간과 평균 감지시간이 더 작은 조합을 선호하도록 아래와 같이 정의하였다.

$$F(S) = \alpha C(S) - \gamma \tilde{T}(S)$$

$\tilde{T}(S)$: 0~1 사이로 정규화

$\alpha \gg \gamma$: Coverage 최우선 반영

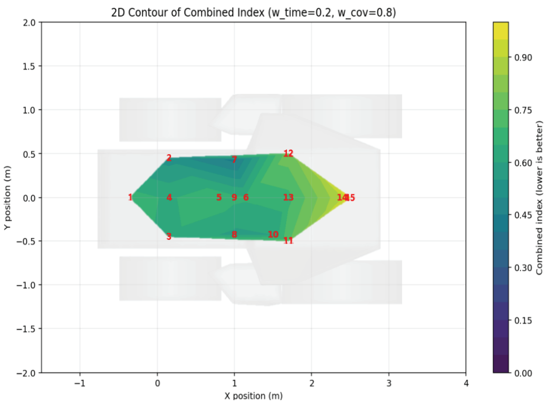



**Fig. 14.** 2D Contour of hydrogen sensor detection performance

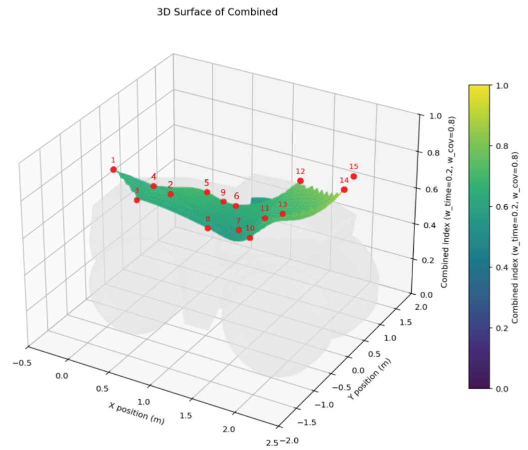



**Fig. 15.** 3D Surface of hydrogen sensor detection performance

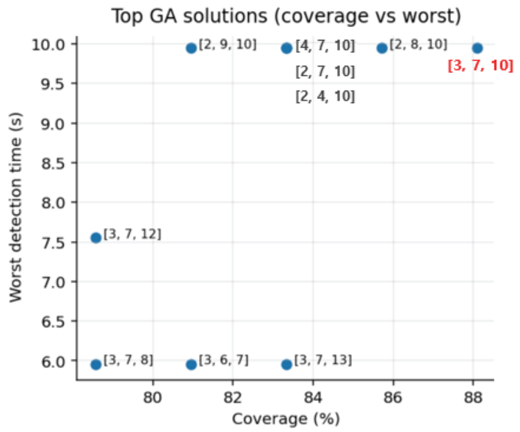



**Fig. 16.** Graph of sensor combinations and detection performance based on GA

구체적으로, 인구수 90, 세대수 800, 토너먼트 선택 크기 3, 단일 교차 및 0.03의 돌연변이 확률을 갖는 전형적인 GA 구조를 사용하였으며, 세대별로 상위 15개 개체를 보존하는 엘리트 전략을 도입하였다. 계산 결과, Table 8과 같이 커버리지 기준 최적 조합은 센서 3·7·10으로 도출되었으며(Fig. 16), 이 조합의 커버리지는 약 88.1%로 대부분의 시나리오에서 최소 한 개 이상의 센서가 1% 농도에 도달하는 것으로 나타났다. 해당 조합의 최악 감지시간은 9.95 s, 평균 감지시간은 1.10 s로 평가되었다. 이는 좌측 전단(센서 3), 우측 중간부(센서 7), 좌측 후단(센서 10)를 동시에 감시함으로써 다양한 누출 위치와 유동 조건에 대해 높은 감지율을 확보하는 대신, 일부 시나리오에서의 감지 지연이 발생함을 의미한다. 세대별 수렴 곡선을 보면 초기 수십 세대 내에 커버리지가 80% 이상으로 급격히 상승한 후 서서히 88% 수준에 수렴하는 경향을 보였으며, 이는 탐색 공간 내에서 높은 커버리지를 제공하는 조합이 제한적으로 존재함을 시사한다. 향후에는 커버리지와 감지시간 지표(최악값 및 평균값)를 동시에 고려하는 다목적 GA 또는 가중합 기반 목적함수를 도입함으로써, 감지율과 응답속도 간의 트레이드오프를 보다 체계적으로 평가하는 최적 설계가 가능할 것으로 판단된다.

**Table 8.** Detection Performance of Sensor Configurations Optimized by GA

| Sensors | Coverage% | Worst[s] | Avg[s] |
|---|---|---|---|
| [3, 7, 10] | 88.10 | 9.95 | 1.10 |
| [2, 8, 10] | 85.71 | 9.95 | 1.44 |
| [3, 7, 13] | 83.33 | 5.96 | 0.96 |
| [4, 7, 10] | 83.33 | 9.95 | 1.12 |
| [2, 7, 10] | 83.33 | 9.95 | 1.21 |
| [2, 4, 10] | 83.33 | 9.95 | 1.21 |
| [3, 6, 7] | 80.95 | 5.96 | 0.87 |
| [2, 9, 10] | 80.95 | 9.95 | 1.63 |
| [3, 7, 8] | 78.57 | 5.96 | 0.83 |
| [3, 7, 12] | 78.57 | 7.55 | 1.12 |

## 5. 결론 및 시사점

본 연구에서 도출된 트랙터 내 수소 누출 해석 결과는, 트랙터 구조와 환기 흐름의 영향으로 수소의 농도 분포가 비대칭적이며 국부 집중 양상을 나타냄을 보여준다. 시나리오별 CFD 해석 및 감지시간 데이터를 종합하면, 누출 초기에는 연료전지 및 배관이 위치한 트랙터 전방부 좌측 영역에서 국부적으로 수소가 빠르게 축적되며, 그 부근의 센서(6~8번)가 가장 먼저 1% 농도에 도달하였다. 이는 누출원이 좌측에 편향되어 있고, 내부 팬에 의한 주 유동이 전방에서 후방으로 흐르며 좌우 대칭성이 깨진 결과로 해석된다. 반면 트랙터 후방부와 상부(센서 14~15 부근)는 유속이 상대적으로 낮고 체적이 크기 때문에 수소의 희석이 지연되어, 농도가 완만하게 상승하고 감지시간이 최대 9초에 이르는 등 지연 검출이 발생하였다. 전체적으로는 환기팬 작동 시 수소가 1~2초 내에 균일 농도 상태로 전파되어 폭발 하한 농도(4%)에 도달하지는 않았으나, 구조 내부의 사각 영역에서는 잔류 수소가 형성될 가능성이 존재한다. 이러한 확산 특성은 트랙터 내 격벽, 환기구 배치, 케이블 덕트 등의 형상적 요인에 의해 크게 좌우되며, 설계 시 유동 저항 최소화 및 농도 구배 완화가 중요한 안전 확보 인자로 판단된다.

1) 누출 위치·방향·누출공 크기에 따라 수소 확산 패턴이 크게 달라졌으며, 트랙터 내부 구조와

환기 흐름이 비대칭적 확산을 유도함을 확인하였다.

2) 센서별 감지성능은 위치 의존성이 강하며, 일부 센서는 빠른 반응에도 커버리지가 낮고, 중앙부 센서들은 다양한 시나리오에서 안정적 감지 특성을 보였다.

3) 미검지율 분석 결과 외곽·후방 영역의 감지 취약성이 두드러졌으며, 특정 센서는 구조적 사각지대로 인해 감지 기여도가 매우 낮은 것으로 나타났다.

4) 통합지표 기반 공간 분석에서 중앙부는 우수한 감지성능을 보였으나, 전방 우측 및 후방 외곽은 정체·체류로 인해 감지 성능이 저하되는 구역으로 확인되었다.

5) GA 분석을 통해 센서 3·7·10 조합이 최고 커버리지를 확보하는 최적 해로 도출되었으며, 향후 다목적 최적화 적용 시 감지율·속도 균형을 더욱 개선할 수 있다.

수소 누출 시나리오 기반의 확산 특성 분석과 센서 감지성능 평가를 체계적으로 수행함으로써, 트랙터 내부에서의 수소 안전성 확보를 위한 기초적인 해석 체계를 제시하였다. CFD 기반 결과는 누출 위치·방향·누출량 변화가 감지 성능에 중대한 영향을 미침을 확인시켜 주었으며, 센서 커버리지 및 최적 조합 분석은 감지기 배치 설계의 합리적 기준을 제공하였다. 다만 구조 단순화와 제한된 시나리오에 따른 해석 범위의 제약이 존재하며, 향후에는 실험적 검증과 다양한 운전 조건을 고려한 확장 연구가 필요하다. 본 연구의 결과는 수소 기반 농기계의 안전 설계 및 센서 배치 최적화 연구의 기반 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 친환경동력원적용농기계기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(322047-4).

## References

1. Korea Gas Safety Corporation, “KGS Code AH374: Safety Requirements for Hydrogen Facilities”, KGS, Korea, 2021, pp. 1-50, Retrieved from http://cyber.kgs.or.kr/kgscode.Index.do.
2. International Electrotechnical Commission, “IEC 60079-10-1: Explosive Atmospheres: Part 10-1: Classification of Areas - Explosive Gas Atmospheres”, IEC, Geneva, Switzerland, 2015, pp. 1-120.
3. M. De Stefano, X. Rocourt, I. Sochet, and N. Daudey, “Hydrogen dispersion in a closed environment”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 17, 2019, pp. 9031-9040, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.099.
4. Y. Cui, R. He, and S. Liu, “Hydrogen leakage simulation and optimization of sensor layout for hydrogen supply systems in fuel cell truck”, Energy Technology, Vol. 13, No. 11, 2025, pp. 2500412, doi: https://doi.org/10.1002/ente.202500412.
5. E. Kim, J. Park, J. H. Cho, and I. Moon, “Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 3, 2013, pp. 1737-1743, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.079.
6. J. Choi, L. Li, C. W. Park, S. H. Lee, and D. Kim, “Dispersion characteristics of hydrogen gas by the effect of leakage hole size in enclosure space,” Journal of the Korea Academia-Indu-strial Cooperation Society, Vol. 17, No. 5, 2016, pp. 26-35, doi: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.26.
7. S. I. Hwang, S. K. Kang, and Y. Huh, “A study on the safety improvement by CFD analysis for packaged type hydrogen refueling system”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 243-250, doi: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.243.
8. S. Lee, S. Oh, J. Moon, and B. Ma, “Numerical study of forced ventilation effects on hydrogen leaks in semi-closed space”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 64-74, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.64.