

CFD Simulation & Structural Analysis를 활용한

중대재해 감축을 위한 과학적 사고분석 연구사례집

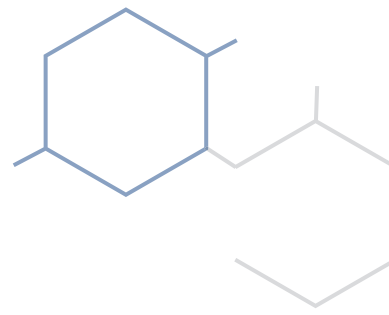
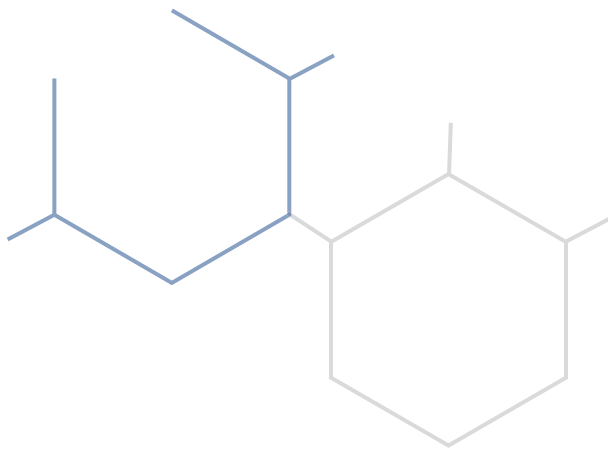
 산업안전보건연구원

CFD Simulation & Structural Analysis를 활용한

중대재해 감축을 위한 과학적 사고분석 연구사례집

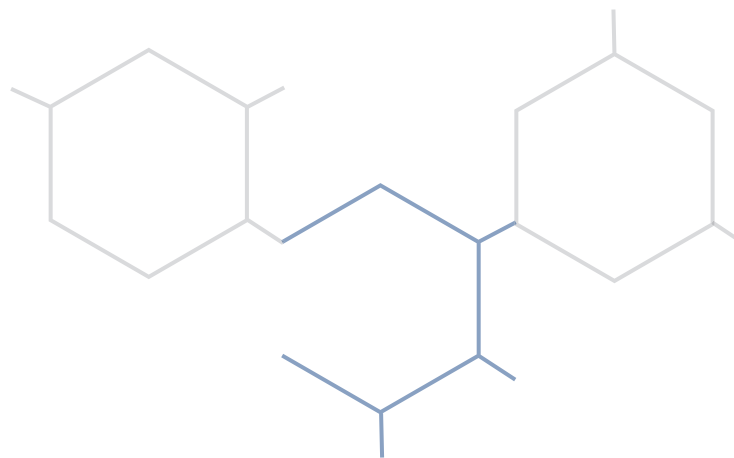
산업재예방
안전보건공단
산업안전보건연구원

산업재예방
안전보건공단
산업안전보건연구원



CFD Simulation & Structural Analysis를 활용한

중대재해 감축을 위한 과학적 사고분석 연구사례집



인사말

“안전하고 건강한 일터, 행복한 대한민국”

2022년 11월, 정부는 2026년까지 사고사망만인율을 획기적으로 감축하여 산업안전 선진국으로 도약하기 위한 ‘중대재해 감축 로드맵’을 발표하였습니다.

중대재해 감축 로드맵의 핵심전략은 위험성평가 중심의 자기규율 예방체계를 확립하는 데 있습니다. 위험성평가란 노·사가 함께 사업장 내의 유해·위험요인을 스스로 파악하여 개선대책을 수립하고 이행하는 제도입니다. 유해·위험요인을 발굴하고 개선하는 데 있어 가장 쉬운 방법으로는 실제로 발생했던 사고를 토대로 원인을 분석하고 개선책을 마련하는 것입니다.

중대재해 감축 로드맵과 함께, 우리 연구원은 안전보건연구를 위한 내비게이션 “안전보건연구 로드맵”을 수립하였습니다. 연구로드맵의 7대 중점 추진전략은 사망재해 감소, 산재취약계층 보호, 직업성질병 모니터링, 미래 안전보건 이슈 선제 대응, 일하는 사람의 웰빙, 화학물질관리, 안전보건수준과 역량 강화 등으로 꾸려져 있습니다.

그 중에서도 사망재해 감소는 가장 중요한 전략으로, 산업안전 정책연구와 안전신기술 개발연구 및 중대재해 사고원인에 대한 분석연구를 이어나가고 있습니다.

이 연구사례집에는 그 동안 산업현장에서 발생한 중대재해에 대해 전산유체역학(CFD)과 구조해석 프로그램 등을 활용하여 사고가 발생한 상황을 연구하고 과학적으로 해석한 7건의 경험을 담았습니다.

각 연구사례들은 작업공정이나 방법, 그리고 취급물질 등에 있어 여러분이 일하고 있는 현장과 유사하거나 혹은 경험한 사례일 수도 있습니다. 해당 연구사례를 반면교사(反面教師)로 삼아 산업현장의 유해·위험요인을 발굴하고 개선하는 데 조금이라도 도움이 될 수 있기를 희망합니다.

감사합니다.

산업안전보건연구원장
김 은 아



Contents

CFD Simulation 이란? 10

CFD

Case1
집수정 내 질식사고에 대한 CFD 위험성평가 14

Case2
폭기조 내 중독사고에 대한 CFD 위험성평가 22

Case3
금속포집박스 내 질식사고에 대한 CFD 위험성평가 30

Case4
저류조 내 폭발사고에 대한 CFD 위험성평가 38

Case5
기계식주차장 내 중독사고에 대한 CFD 위험성평가 46

Case6
3밀 작업장 내 환기관리에 대한 CFD 위험성평가 54

구조해석

Case7
열교환기 파열에 대한 주요 구조부 응력해석 66

Q & A 76

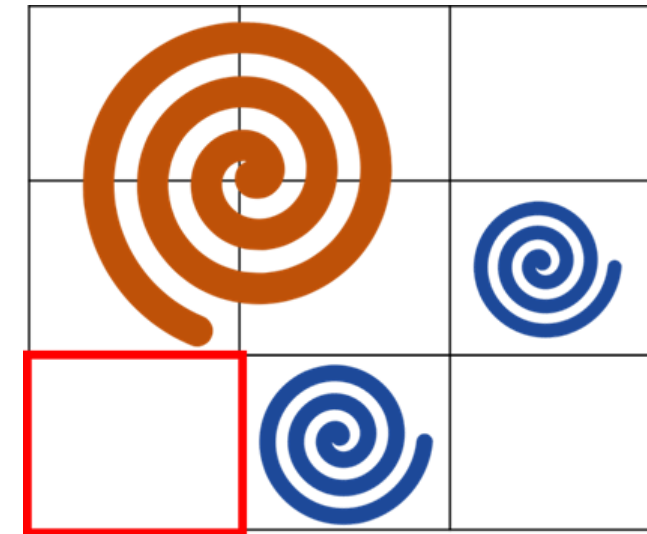
CFD

CFD Simulation 이란?

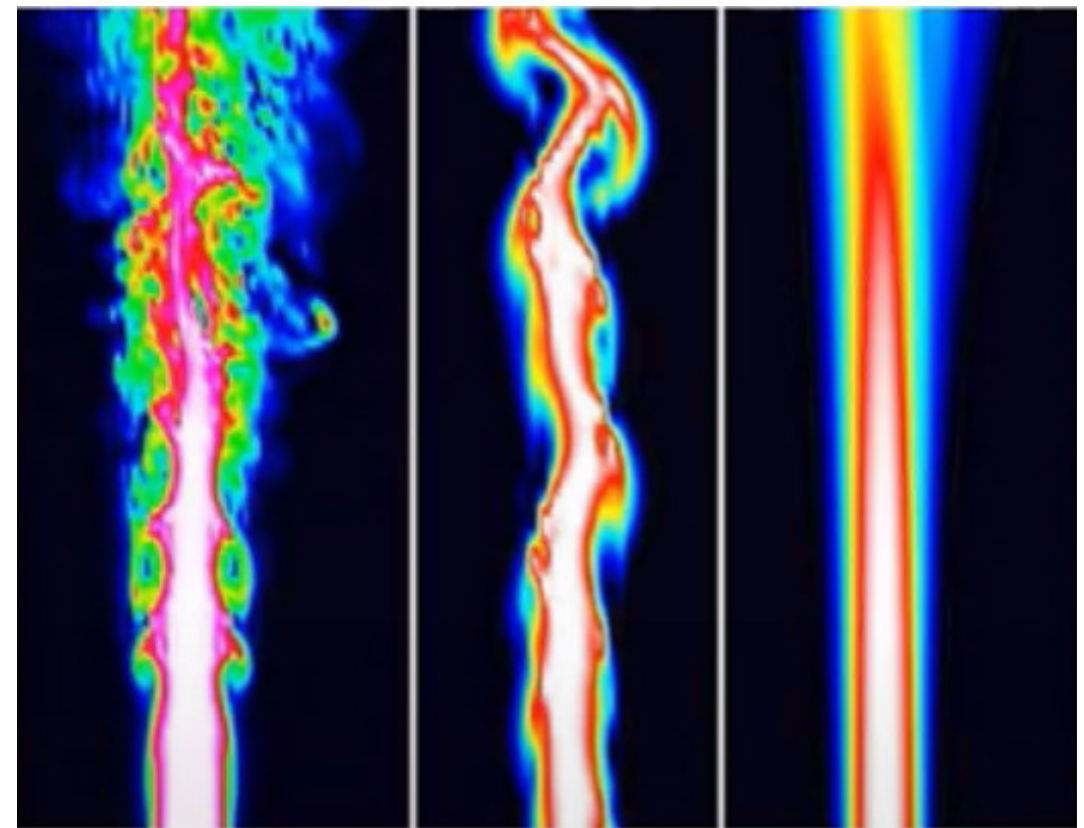
CFD Simulation 이란?

CFD 란?

- CFD는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)이라고 하며, 유체현상을 편미분 방정식으로 표현한 지배방정식들을 차분화하고 이를 컴퓨터를 활용해 계산하는 것을 말한다. 현재 CFD는 항공우주산업, 반도체산업, 선박제조업 등의 산업현장과 국내·외 연구소 등에서 사용하고 있다.
- CFD 해석 과정은 크게 전처리(Pre-process), 계산(Simulation), 후처리 과정(Post-proccess)으로 구분할 수 있다. 전처리 과정에서는 해석 대상을 모델링하고 계산에 적합한 크기의 격자를 구성하는 작업을 수행한다. 다음으로 계산 과정에서는 해석하고자 하는 대상의 조건과 기법을 설정하고 계산을 수행하며 후처리 과정에서는 계산 결과를 분석하고 시각화하는 작업을 수행한다.
- 전처리 과정에서 계산에 적합한 크기의 격자를 선정하는 것은 계산 결과의 정확성과 연관되어 있어 매우 중요하다. 격자란, 해석하고 싶은 계산영역을 세분화하였을 때 각 세분화된 영역을 말하며 [그림1]에서 빨간색 영역이 1개의 격자라고 볼 수 있다. 그리고 격자 크기가 작을수록 작은 크기의 Eddy를 해석할 수 있지만 계산시간이 기하급수적으로 증가한다는 단점이 있다.
- 이러한 계산시간을 감소하기 위해 난류모델링이 적용되며, 난류모델링은 크게 DNS(Direct Numerical Simulation), LES(Large Eddy Simulation), RANS(Raynolds Averaged Navier Stokes)로 구분된다. DNS는 기존 지배방정식을 변형하지 않고 물리적인 현상을 계산할 수 있는 격자를 구성하여 계산하는 것으로 가장 작은 난류 사이즈까지 계산이 가능하지만 계산시간이 많이 소요되어 기초과학분야에서 주로 사용된다. LES는 DNS와 방정식은 유사하지만 작은 크기의 Eddy는 추가 모델링을 통해 해석하고 큰 크기의 Eddy만 지배방정식을 통해 계산하기 때문에 DNS보다 격자가 크고 계산시간이 비교적 적게 소요되며 비교적 정확도도 높은 편이다. 마지막으로 RANS는 비정상상태 방정식을 정상상태 방정식으로 계산하는 것으로 결과값이 시간평균값이기 때문에 정확도는 낮지만 계산시간은 가장 빠르다. [그림2]는 난류모델링 기법에 따른 계산결과를 정리한 것이다. [그림2]를 통해 난류모델링 기법에 따라 계산결과가 확연히 차이가 나는 것을 볼 수 있으며, DNS에서는 가장 작은 Eddy가 확인되지만 RANS에서는 Eddy가 확인되지 않는 것을 볼 수 있다.
- 본 사례집에서는 다양한 CFD 해석코드 중에서 미국 NIST에서 개발한 Fire Dynamics Simulator(FDS) v6.3.2를 사용하여 사고사례에 대해 계산을 수행하였다. FDS는 난류모델링 기법 중 DNS와 LES를 적용할 수 있지만 사고현장을 해석하기에 DNS는 계산시간이 오래 걸리기 때문에 LES를 적용하여 계산을 수행하였다.



[그림1] 격자 및 Eddy 예시



[그림2] 난류모델링 기법에 따른 해석결과

1

Case

집수정 내 질식사고에 대한
CFD 위험성평가

[Case 1] 집수정 내 질식사고에 대한 CFD 위험성평가

사고 개요

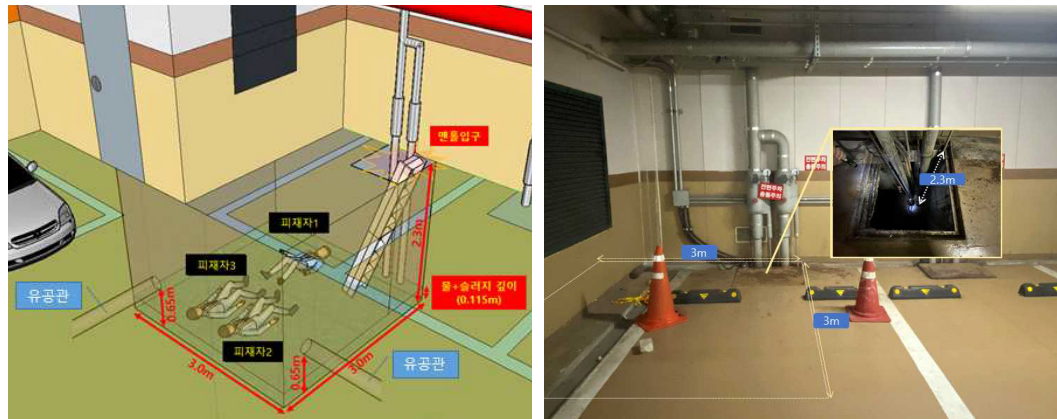
○ 20년 8월 14일(금) 11:10, 서울 영등포구 소재 00오피스텔 지하 2층 토목집수정*에서 수중모터의 이상상태를 확인하던 건물관리자 3명이 사망한 사고이다.

<토목집수정 이란?>

- 지반조건에 따른 지하수의 영향으로 인해 건물 기초바닥에 발생하는 부력(양압력)을 처리하기 위한 영구배수 시스템의 일환
- 건물 기초저면 일부에 설편층으로 배수층을 형성한 후 판형배수재 및 연결관(PVC유공관, 다발관 등)을 통해 지하수를 집수정으로 유도한 후 일정수위가 되면 펌프에서 우수관으로 배출함으로써 건물기초바닥에 작용하는 양압력 해소

사고장소 및 상황

○ 건축물 내부 집수정(Sump Pit)인 토목집수정(3m×3m×2.3m) 내부에서 작업 수행하였고 토목집수정 내부 바닥면의 공기농도는 산소 2.8%, 이산화탄소 7.4%로 확인하였다.



[그림1] 사고장소 및 상황

사고 주요원인 및 대책

- (원인) 질식사해 발생위험이 있는 작업공간에서 안전보건조치 없이 작업 수행
- (대책) 집수정 내부 환기 등 작업 전 '적정공기' 여부를 확인 후 작업

산소결핍증의 영향

- 대기 중 정상적인 산소농도는 약 21%이지만 산소농도가 18%미만으로 떨어지면 '산소결핍증'을 일으키며 [표 1]은 산소 농도별 인체 영향을 정리한 것이다.
- 특히, 산소농도가 매우 낮은 상황에서는 한 번의 호흡만으로도 순간적으로 폐내 산소분압이 떨어지면서 뇌 활동이 정지되어 의식을 잃게 된다.
- 호흡정지 시간이 4분이면 살아날 가능성은 절반으로 줄어들고, 6분 이상이면 생존가능성이 없다. 그리고 빨리 구조하더라도 후유증으로 언어장애, 운동장애, 시야협착, 환각, 건망증, 성격이상 등이 남을 수 있다.

[표1] 산소 농도별 인체 영향

농도(%)	인체 영향
18%	안전한게이나 연속환기 필요
16%	호흡, 맥박의 증가, 두통, 메스꺼움, 토할 것 같음
12%	어지럼증, 토할 것 같음, 근력저하, 체중지지 불능으로 추락
10%	안면창백, 의식불명, 구토
8%	실신혼절, 7~8분 이내에 사망
6%	순간에 혼절, 호흡정지, 경련, 6분 이상이면 사망

그렇다면, 환기조치만 하면 안전한가?【환기에 대한 위험성평가】

- 집수정 내부 환기조치는 어떠한 방법으로 실시해야 적정한가?
- 환기팬의 효율(55%)을 반영한 집수정 내 기류거동 확인
- 급기량(환기 횟수)에 따른 집수정 내 기류분포 확인
- 덕트 설치 위치변화(KOSHA-Guide)에 따른 환기효율 변화 확인

CFD 목적 및 필요성

- 해당 사고는 건축물 내부 집수정 내부가 질식사해 발생위험이 있음에도 산소농도 측정, 환기 등의 적절한 안전보건조치를 수행하지 않아 발생하였다. 특히, 작업 전 집수정 내부가 '적정공기'수준이 되도록 환기하는 것이 중요하지만 이를 수행하지 않은 것이 주요 원인으로 확인된다. 따라서 CFD를 통해 작업 전 집수정 내부가 적정공기수준으로 도달하는데 필요한 환기량과 환기방법에 대해 확인할 필요가 있다.
- 본 분석에서는 KOSHA-Guide H-80-2018의 환기방법과 현장적용성이 높은 환기방법을 적용하여 환기방법에 따른 구조물 내 산소의 기류거동과 집수정 내부가 적정공기수준이 되는데 필요한 환기량*을 확인하고자 한다.

* KOSHA-Guide H-80-2018에서는 구조물 체적의 5배 권고

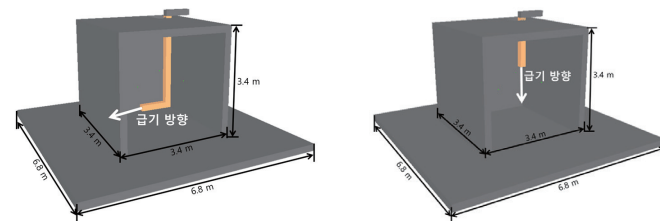
CFD 모델링 및 조건

○ [표 2]는 모델링 및 계산조건을 정리한 것으로 먼저 해석프로그램은 미국 NIST에서 개발한 오픈소스코드인 Fire Dynamics Simulator v6.3.2를 사용하였고 난류해석방법은 LES 기법을 적용하였다. 그리고 구조물 및 개구부의 크기는 사고현장을 반영하였고 계산영역은 구조물 외부 기류의 영향을 고려하기 위해 구조물보다 넓게 선정하였다. 또한 덕트의 크기는 현재 안전보건공단에서 대여하고 있는 환기팬의 덕트를 반영하였다. 그리고 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.1 m로 선정하였고 총 240,448개의 격자가 사용되었다. 계산은 1,000 s동안 수행했으며 환기방법은 급기를 적용하였고 급기량은 안전보건공단에서 제공하고 있는 환기팬 용량의 효율을 55%로 반영하여 0.33 m³/s로 하였다. 다음으로 구조물 내 산소결핍 조건을 조성하기 위해 내부 화학종 조성을 사고조사결과를 반영하여 산소는 0.6%, 이산화탄소는 6.06%, 질소는 93.34%로 구성하였다. 마지막으로 덕트 삽입 형상에 따른 기류분포를 비교하기 위해 KOSHA-Guide에서 권고하는 방법(KOSHA-Guide 조건)과 현장에서 적용하기 쉬운 방법(검토 조건)을 적용하였다. 먼저 KOSHA-Guide 조건은 덕트가 구조물 내 바닥면에서 꺾여 구조물 안쪽으로 급기하는 것을 의미하며, 검토 조건은 다양한 작업조건을 고려하여 덕트가 윗면으로부터 일정길이만 삽입되어 바닥면 방향으로 급기하는 조건을 의미한다. 이 때, 덕트의 삽입 길이는 구조물 높이의 10%, 30%, 50%, 70%, 90%인 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m, 2.1 m, 2.7 m로 하여 덕트 삽입 길이에 따른 환기 효율도 함께 비교하였다.

[표2] 모델링 및 계산 조건

해석 프로그램	Fire Dynamics Simulator v6.3.2
난류해석방법	대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)
계산영역	가로 × 세로 × 높이 = 6.8 m × 6.8 m × 5.2 m
구조물 크기	가로 × 세로 × 높이 = 3.0 m × 3.0 m × 3.0 m
개구부 크기	가로 × 세로 = 0.8 m × 0.8 m
덕트 크기	가로 × 세로 = 0.2 m × 0.2 m
격자크기(총 격자개수)	0.1 m(240,448개)
해석 시간	1,000 s
급기량	0.33m³/s(환기팬 효율을 55%로 반영)
구조물 내 화학종 조성	O ₂ (산소) 0.6%
	CO ₂ (이산화탄소) 6.06%
	N ₂ (질소) 93.34%

모델링 및
덕트 삽입 형상

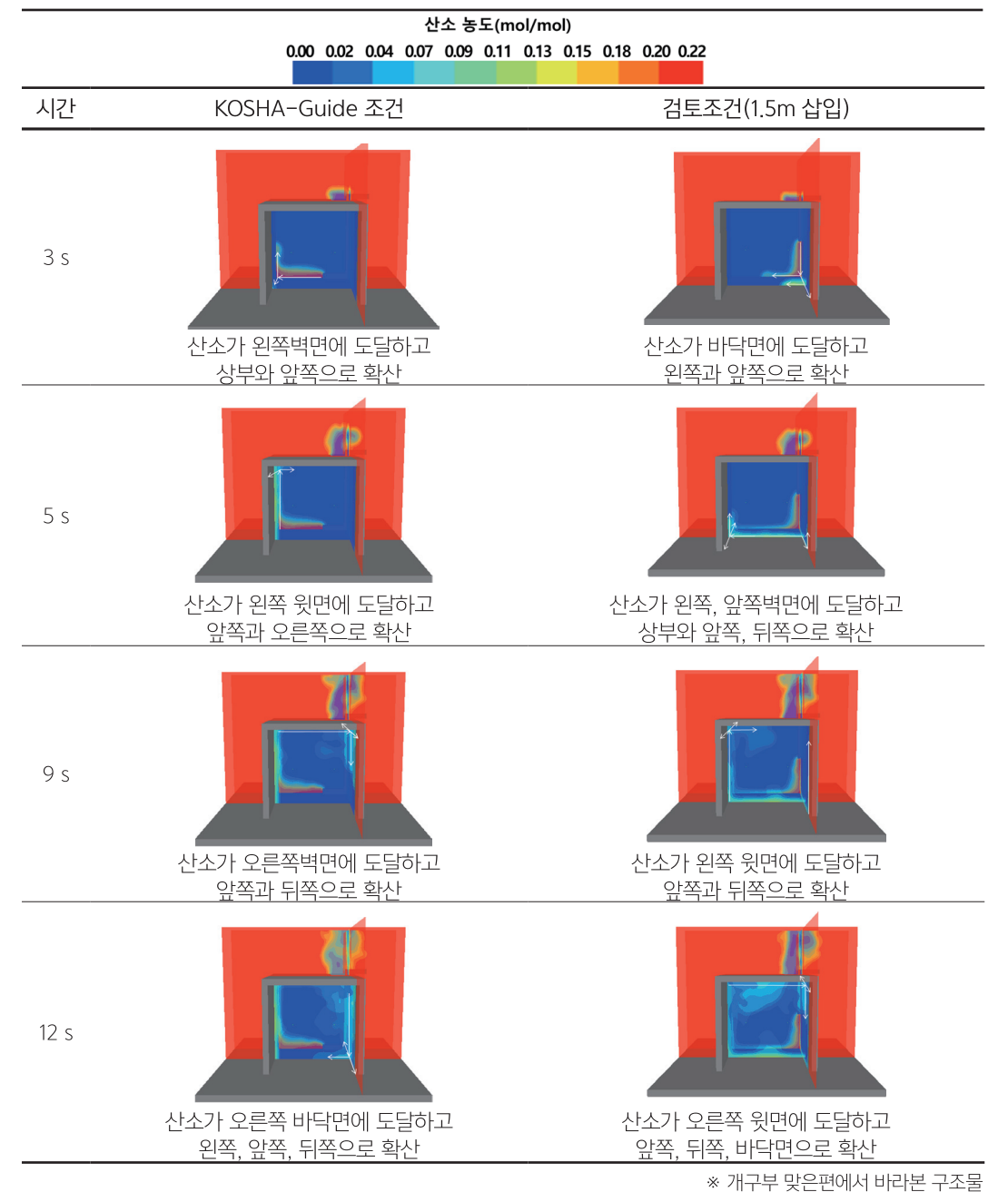


<KOSHA-Guide 조건>

<검토 조건>

CFD 계산결과

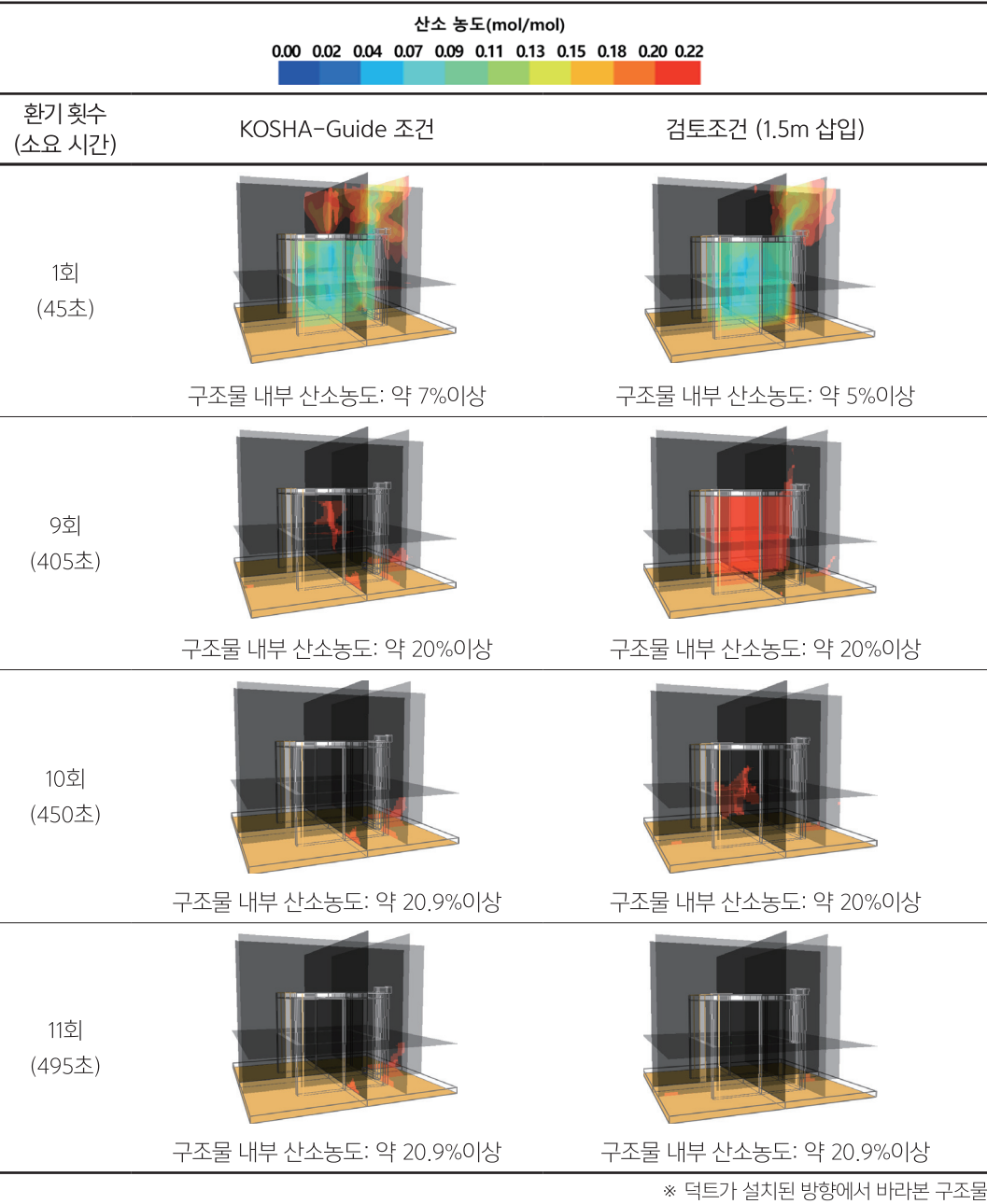
○ [그림2]는 덕트 삽입 형상에 따른 산소의 기류 거동을 정리한 것으로 검토조건은 덕트를 윗면으로부터 1.5 m 삽입한 결과이다. [그림2]를 통해 확산 방향은 구조물 형상에 영향을 받고 급기 방향에 달라지는 것을 확인할 수 있다. 특히, KOSHA-Guide 조건은 급기 이후 산소가 급기방향 쪽의 벽면에 도달하고 상부와 앞쪽으로 확산하기 때문에 검토조건보다 더 빠르게 상부로 산소가 확산되는 것을 볼 수 있다.



※ 개구부 맞은편에서 바라본 구조물

[그림2] 덕트 삽입 형상에 따른 급기 이후 시간대별 구조물 내 산소의 기류거동

○ [그림3]은 덕트 삽입 형상에 따른 환기 횟수별 구조물 내 산소농도 분포를 정리한 것으로 검토조건은 덕트를 윗면으로부터 1.5 m 삽입한 결과이다. [그림3]에서 검은색 영역은 적정공기수준인 산소농도가 20.9%이상인 영역을 의미하는 것으로 구조물 내부가 검은색 영역으로 표시될 때 적정공기수준에 도달한 것으로 볼 수 있다. 따라서 KOSHA-Guide 조건은 10회, 검토조건은 11회에 환기가 완료되어 적정공기수준에 도달하는 것을 확인하였다.



[그림3] 덕트 삽입 형상에 따른 환기 횟수별 구조물 내 산소농도 분포(검은색: 산소농도 20.9%)

○ [표 3]은 덕트 삽입 형상 및 길이에 따른 적정공기수준 도달시간과 도달시간까지의 총 체적유량 및 환기 횟수를 정리한 것이다. [표 3]을 통해 덕트 삽입 길이에 따른 환기 횟수는 서로 유사하며 약 11회인 것으로 확인된다. 그리고 KOSHA-Guide 조건은 약 10회의 환기 횟수가 필요한 것을 알 수 있다. 따라서 덕트 삽입 형상 및 길이에 따른 환기효율은 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

[표3] 덕트 삽입 형상 및 길이에 따른 값

구분	도달시간*	총 체적유량**	환기 횟수***
KOSHA-Guide 조건	434초	260.4m ³	9.64회
검토조건	0.3m 삽입	486초	291.6m ³
	0.9m 삽입	479초	287.4m ³
	1.5m 삽입	490초	294.0m ³
	2.1m 삽입	489초	293.4m ³
	2.7m 삽입	488초	292.8m ³

※ KOSHA GUIDE H-80-2018, 5회 이상의 환기 횟수 권고

* 도달시간: 구조물 내부 산소농도가 20.9%이상에 도달하는 시간

** 총 체적유량(m3) = 도달 시간(s) × 체적유량(0.6m3/s), 구조물 내에 유입된 총 급기량

*** 환기 횟수 = 총 체적유량(m3)/구조물 체적(27m3)

결론

○ CFD 해석을 통해 덕트 삽입 형상 및 길이에 따른 환기효율은 큰 차이가 없지만 KOSHA-Guide 조건이 약 12%정도 빨리 환기가 되는 것을 확인하였다. 그리고 계산에 사용된 개구부 및 덕트의 크기로 구조물 내부 산소농도를 적정공기수준으로 유지하기 위해서는 약 10회 이상의 환기횟수가 필요하며, 이는 기존 KOSHA-Guide H-80-2018에서 권고하고 있는 5회보다 많은 것을 확인하였다. 이러한 해석결과를 바탕으로 2021년도에는 KOSHA-Guide를 개정하여 환기횟수를 10회로 권고하고 있다.

2

Case

폭기조 내 중독사고에 대한
CFD 위험성평가

[Case 2] 폭기조 내 중독사고에 대한 CFD 위험성평가

사고 개요

○ '21년 2월 13일(토) 16:08, 인천 석남동 소재 미생물 처리시설 00케미컬의 1차 폭기조*에서 송기마스크를 벗고 상부로 올라오던 재해자가 사망한 사고이다.

<폭기조 란?>

○ 활성오니법을 이용한 폐수처리 시 이용되는 반응장치이며 활성오니법은 오니와 호기성 미생물들과 혼합하여, 폭기(물속에 공기를 불어넣거나 공중에 물을 살포하여 물과 공기를 충분히 접촉시키는 조작)함으로써 생물학적으로 오니를 정화하는 방법이다.

사고장소 및 상황

○ 폭기조(2.65m×9.2m×2m) 내부에서 송기마스크*를 착용하고 고압수 살포 작업 및 폐수 흡입작업을 실시하였고 폭기조 내 잔류된 슬러지 및 폐수를 5분간 교반 후 황화수소가 최대 58.0ppm로 측정되는 것을 확인하였다.

* 송기마스크용 송풍기를 환기가 미흡한 작업장 내에 비치



[그림1] 사고장소 및 상황

사고 주요원인 및 대책

○ (원인) 유해물질 발생위험이 있는 작업공간에서 안전보건조치 없이 작업 수행

○ (대책) 작업 전·중 내부 환기 등 '적정공기' 여부를 확인

황화수소의 영향

○ [표 1]은 황화수소 농도별 인체 영향을 정리한 것이다. 분노나 오·폐수, 펄프액 등이 있는 장소에서 황화수소는 가만히 놔둘 땐 적게 발생할 수 있지만 밟고 다니거나 휘젓거나, 또는 섞으면 녹아있던 황화수소가 순간 고농도로 발생하여 치명적인 영향을 줄 수 있으며 이를 거품효과라고 부른다.

[표1] 황화수소 농도별 인체 영향

농도(ppm)	건강영향	노출시간
10	8시간 작업시 노출기준	8시간
50~100	가벼운 자극(눈, 기도)	3시간
200~300	상당한 자극	1시간
500~700	의식불명, 사망	30분~1시간
>1,000	의식불명, 사망	수분

그렇다면, 환기조치만 하면 안전한가?【환기에 대한 위험성평가】

○ 폭기조 내부 환기조치는 어떠한 방법으로 실시해야 적정한가?

- 황화수소 발생량에 따른 폭기조 내 기류거동 및 황화수소 농도 확인

- 송기마스크용 송풍기 근처에서의 황화수소 농도 확인

CFD 목적 및 필요성

○ 해당 사고는 폭기조 내부에서 유해물질 발생위험이 있음에도 유해가스 측정, 송기마스크 착용 등의 적절한 안전보건조치를 수행하지 않아 발생하였다. 특히, 작업 전·중에 산소 및 유해가스 농도측정을 실시해야 하지만 이를 수행하지 않은 것이 주요 원인으로 확인된다. 따라서 CFD를 통해 살수작업 및 슬러지 흡입 작업으로 인한 황화수소의 기류거동에 대해 분석하여 해당 작업의 위험성을 확인하고 대책을 마련할 필요가 있다.

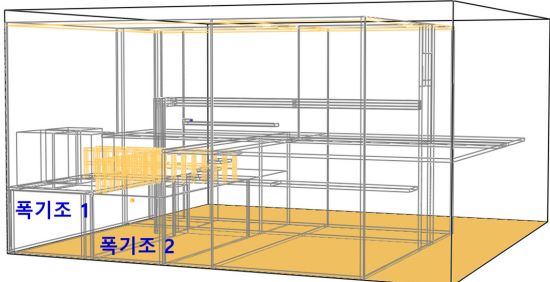
○ 본 분석에서는 사고현장에서 확인된 변수들을 바탕으로 작업 당시의 폭기조 내 황화수소 농도 분포 및 환기가 미흡한 장소에 송기마스크용 송풍기를 비치하는 경우의 위험성에 대해서도 함께 확인하고자 한다.

CFD 모델링 및 조건

○ [표 2]는 모델링 및 계산 조건을 정리한 것으로 먼저 해석프로그램은 미국 NIST에서 개발한 오픈소스코드인 Fire Dynamics Simulator v6.3.2를 사용하였고 난류해석방법은 LES 기법을 적용하였다. 구조물의 크기는 사고현장과 동일하게 반영하였고 계산영역은 외부 공기의 유입을 고려하기 위해 구조물보다 크게 지정하였다. 그리고 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.1 m로

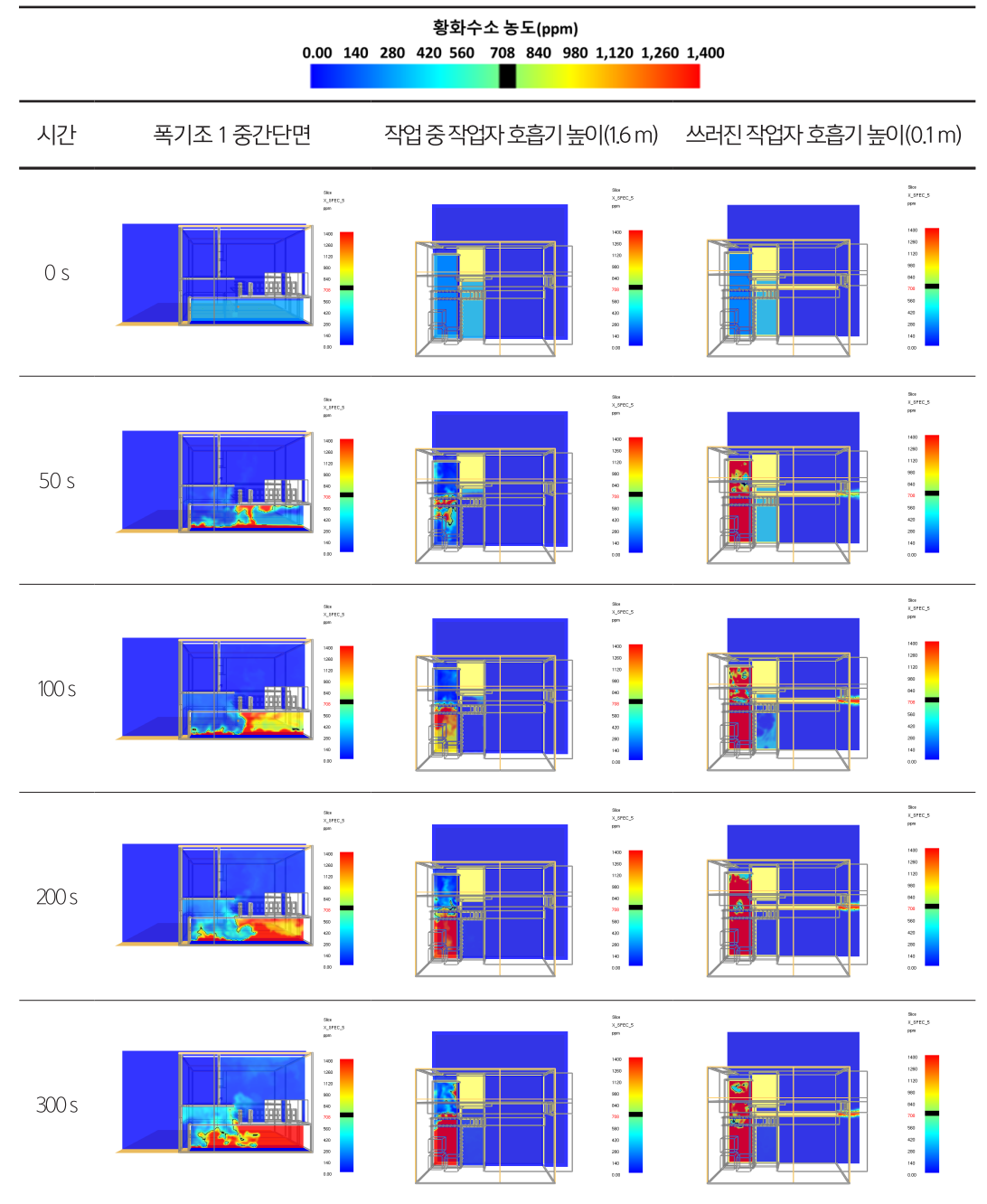
선정하였고 총 1,800,000개의 격자가 사용되었다. 계산은 1,000 s동안 수행했으며 폭기조 내부 초기 황화수소 농도는 기존 작업으로 발생될 것으로 예상되는 300 ppm을 지정하였다. 그리고 작업장소인 폭기조 1에서는 진공펌프 흡입작업과 살수작업으로 인해 황화수소가 35 ppm/s 또는 58 ppm/s가 발생하는 것으로 지정하였다. 여기서 35 ppm은 사고 현장 슬러지에서의 평균 황화수소 발생량, 58 ppm은 최대 황화수소 발생량을 반영하였다. 마지막으로 실제 작업과 동일한 조건을 반영하기 위해 슬러지 흡입 펌프 용량은 49.75 m³/min, 살수작업 용량은 60 L/min으로 실제 작업과 동일하게 지정하였다.

[표2] 모델링 및 계산 조건

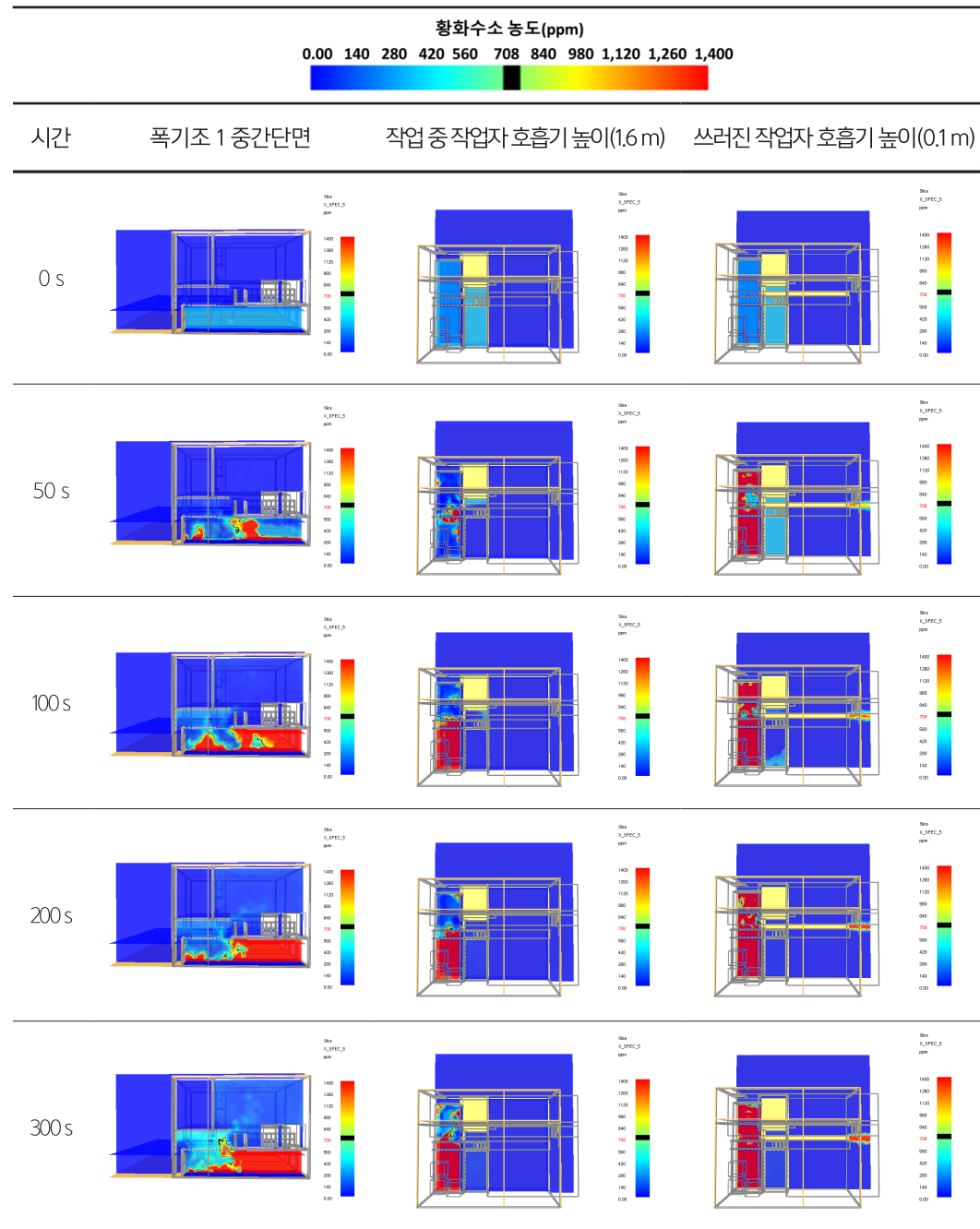
모델링 형상	
	
- 위에서 바라본 구조물 -	- 뒤쪽에서 바라본 구조물 -
CFD 코드	Fire Dynamics Simulator v6.3.2
난류해석방법	대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)
계산영역	가로 × 세로 × 높이 = 15.0 m × 15.0 m × 8.0 m
격자크기(총 격자개수)	0.1 m(1,800,000개)
해석 시간	1,000 s
폭기조 내부 황화수소 초기 농도	300 ppm
폭기조 1 내부 황화수소 발생량	35 ppm/s(사고 현장 슬러지에서의 평균 황화수소 발생량) 58 ppm/s(사고 현장 슬러지에서의 최대 황화수소 발생량)
슬러지 흡입 펌프 용량	49.75 m ³ /min
살수작업 용량	60 L/min

CFD 계산결과

○ [그림2]는 황화수소 발생량이 35 ppm/s 조건일 때, [그림3]은 황화수소 발생량이 58 ppm/s 조건일 때의 작업공간 내 특정 단면에서의 황화수소 농도 분포를 정리한 것이다. 검은색 영역은 황화수소 농도가 700 ppm인 영역을 의미한다. [그림2]와 [그림3]을 통해 폭기조 1 중간단면에서는 1,400 ppm이상인 고농도의 황화수소가 분포하고 작업자 호흡기 높이에서는 700 ppm이상의 황화수소 농도가 분포하는 것을 볼 수 있다. 하지만 폭기조 1 외부에서는 700 ppm이하의 황화수소 농도가 분포하여 위험영역이 형성되지 않음을 알 수 있다.

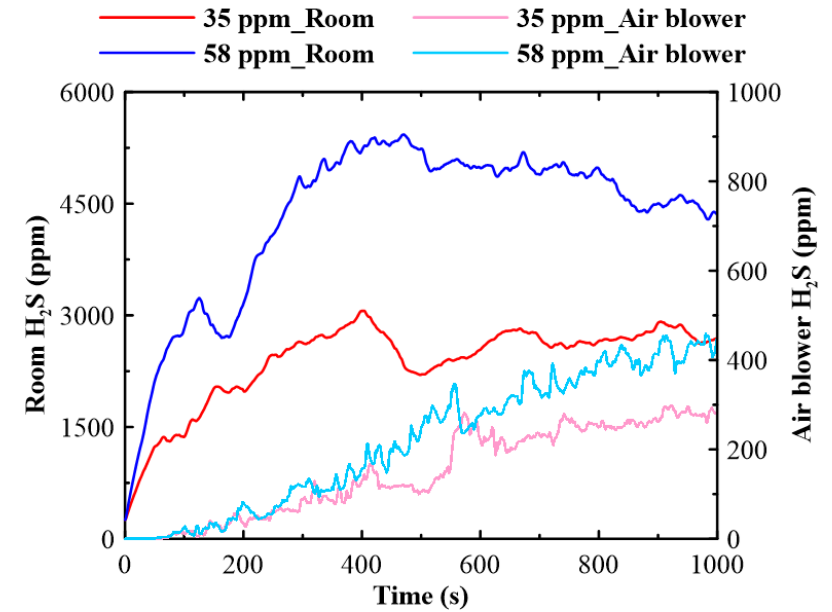


[그림2] 작업 공간 내 황화수소 농도 분포 변화(35 ppm/s 발생조건)



[그림3] 작업 공간 내 황화수소 농도 분포 변화(58 ppm/s 발생조건)

○ [그림4]는 폭기조 1 내부 평균 황화수소 농도와 송기마스크용 송풍기 근처에서의 황화수소 농도를 시간변화에 따라 정리한 것이다. [그림4]를 통해 폭기조 1 내부에서는 황화수소 발생조건에 관계없이 3,000 ppm 이상의 고농도의 황화수소가 분포하는 것을 알 수 있다. 그리고 송풍기 근처에서는 약 300 ppm이상의 황화수소 농도가 분포하는 것을 알 수 있었다.



[그림4] 폭기조 1 내부 평균 황화수소 농도 및 송풍기 근처에서의 황화수소 농도

결론

○ CFD 해석을 통해 황화수소 발생량에 관계없이 사망자의 위치에서 700 ppm이상의 고농도의 황화수소가 분포하여 황화수소 중독으로 인한 쓰러짐 또는 사망 가능성이 있을 것으로 추정할 수 있다. 그리고 송기마스크용 송풍기 근처에서는 다소 낮은 약 300 ppm이상의 황화수소 농도가 분포하였지만 황화수소의 인체영향을 고려할 때, 장시간 작업할 경우 송기마스크로 유입되는 황화수소가 인체에 영향을 미칠 수 있을 것으로 추정할 수 있다. 이러한 분석 결과를 통해 폭기조 내 작업의 위험성을 확인할 수 있었고 추후에는 안전한 작업을 위한 환기방법에 대한 검토가 필요할 것으로 보인다.

3

Case

금속포집박스 내 질식사고에
대한 CFD 위험성평가

[Case 3] 금속포집박스 내 질식사고에 대한 CFD 위험성평가

사고 개요

○ '21년 5월 30일(일) 09:31, 울산 울주군 소재 0000공장 2번 Furnace(로)의 분진 및 질소가스를 포집하는 국소배기장치에서 Pulsing으로 사용하던 질소가 배기덕트를 통해 재해자가 있는 금속포집박스(Metal Case)*로 역류되어 2명이 사망한 사고이다.

<금속포집박스(Metal Case)란?>
○ Furnace(로)에서 배출되는 용탕에 물과 질소 가스를 분사시켜 만들어진 Granule(작은 알갱이)을 포집하는 박스

사고장소 및 상황

○ 금속포집박스(2.33m×4.8m×1.7m) 내부 및 입구에 사망자 2명이 발견되었으며 금속포집박스에 진입한 이유는 불분명하다.



[그림1] 사고장소 및 상황

사고 주요원인 및 대책

- (원인) 질소로 인한 질식의 위험이 있음에도 질소 작업에 대해 사전에 유해·위험요인을 발굴하는 위험성평가를 미 실시함
- (대책) 질소 등의 유해가스를 사용하는 작업에 대해서는 유해·위험요인을 발굴하여 개선대책을 수립할 수 있도록 위험성평가 실시

질소의 영향

○ 대기 중 질소는 약 79%가 있어 인체에는 무해하지만 고농도의 질소가 분포할 경우 산소농도가 18%미만으로 떨어져 산소결핍증이 발생할 수 있다. [표 1]은 산소 농도별 인체 영향을 정리한 것으로 산소농도가 매우 낮은 상황에서는 한 번의 호흡만으로도 순간적으로 폐내 산소분압이 떨어지면서 뇌 활동이 정지되어 의식을 잃게 된다. 그리고 호흡정지 시간이 4분이면 살아날 가능성은 절반으로 줄어듦, 6분 이상이면 생존가능성이 없으며 빨리 구조하더라도 후유증으로 언어장애, 운동장애, 시야협착, 환각, 건망증, 성격이상 등이 남을 수 있다.

[표1] 산소 농도별 인체 영향

농도(%)	인체 영향
18%	안전한계이나 연속환기 필요
16%	호흡, 맥박의 증가, 두통, 메스꺼움, 토할 것 같음
12%	어지럼증, 토할 것 같음, 근력저하, 체중지지 불능으로 추락
10%	안면창백, 의식불명, 구토
8%	실신혼절, 7~8분 이내에 사망
6%	순간에 혼절, 호흡정지, 경련, 6분 이상이면 사망

질소가스의 위험성은 어느 정도인가?【질소가스에 대한 위험성평가】
○ 질소가스로 인한 금속포집박스 내부의 위험성은 어느 정도인가?
- 질소가스 유입으로 인한 금속포집박스 내 평균 산소농도 확인
- 금속포집박스 내 산소농도 변화에 따른 질식재해 발생가능 시점 및 위험성 확인

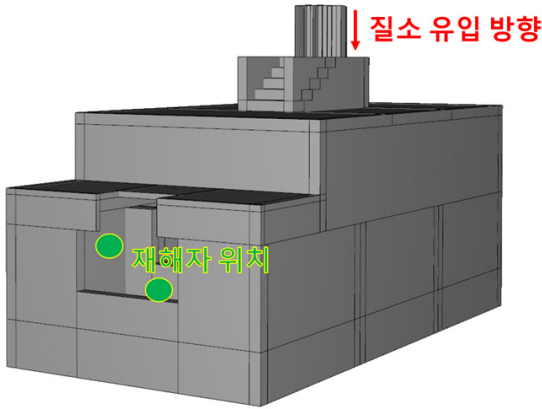
CFD 목적 및 필요성

- 해당 사고는 질식재해 발생위험이 있는 질소가스를 사용하는 작업이지만 작업 전 국소배기장치 미점검, 위험성평가 미실시 등으로 인해 질소가스의 위험성을 확인하지 못해 발생하였다. 따라서 금속포집박스 내부의 질소가스가 유입될 경우의 위험성을 확인하고 대책을 마련할 필요가 있다.
- 본 분석에서는 사고현장에서 확인된 변수들을 바탕으로 질소가스로 인한 금속포집박스 내부에서의 질식재해 위험성을 확인하고자 한다.

CFD 모델링 및 조건

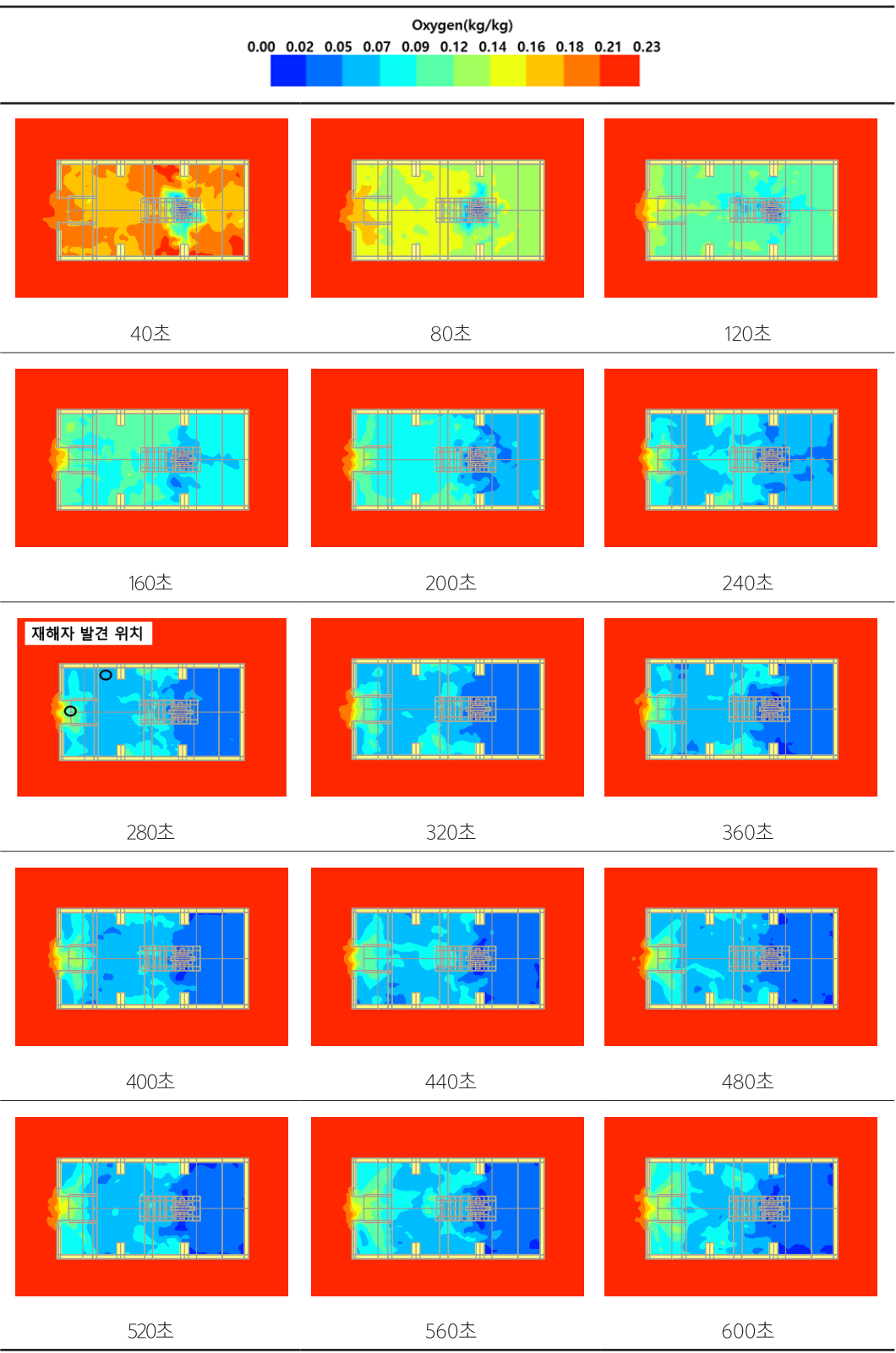
○ [표 2]는 모델링 및 계산 조건을 정리한 것으로 먼저 해석프로그램은 미국 NIST에서 개발한 오픈소스코드인 Fire Dynamics Simulator v6.3.2를 사용하였고 난류해석방법은 LES 기법을 적용하였다. 구조물의 크기는 사고현장과 동일하게 반영하였고 계산영역은 외부 공기의 유입을 고려하기 위해 구조물보다 크게 지정하였다. 그리고 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.05 m로 선정하였고 총 1,260,000개의 격자가 사용되었다. 계산은 1,000 s동안 수행했으며 금속포집박스 내부 초기 화학종 조성은 대기와 동일하게 지정하였다. 그리고 질소 유입 방향과 속도는 실제 현장과 동일하게 반영하였고 속도는 1.0 m/s로 지정하였다.

[표2] 모델링 및 계산 조건

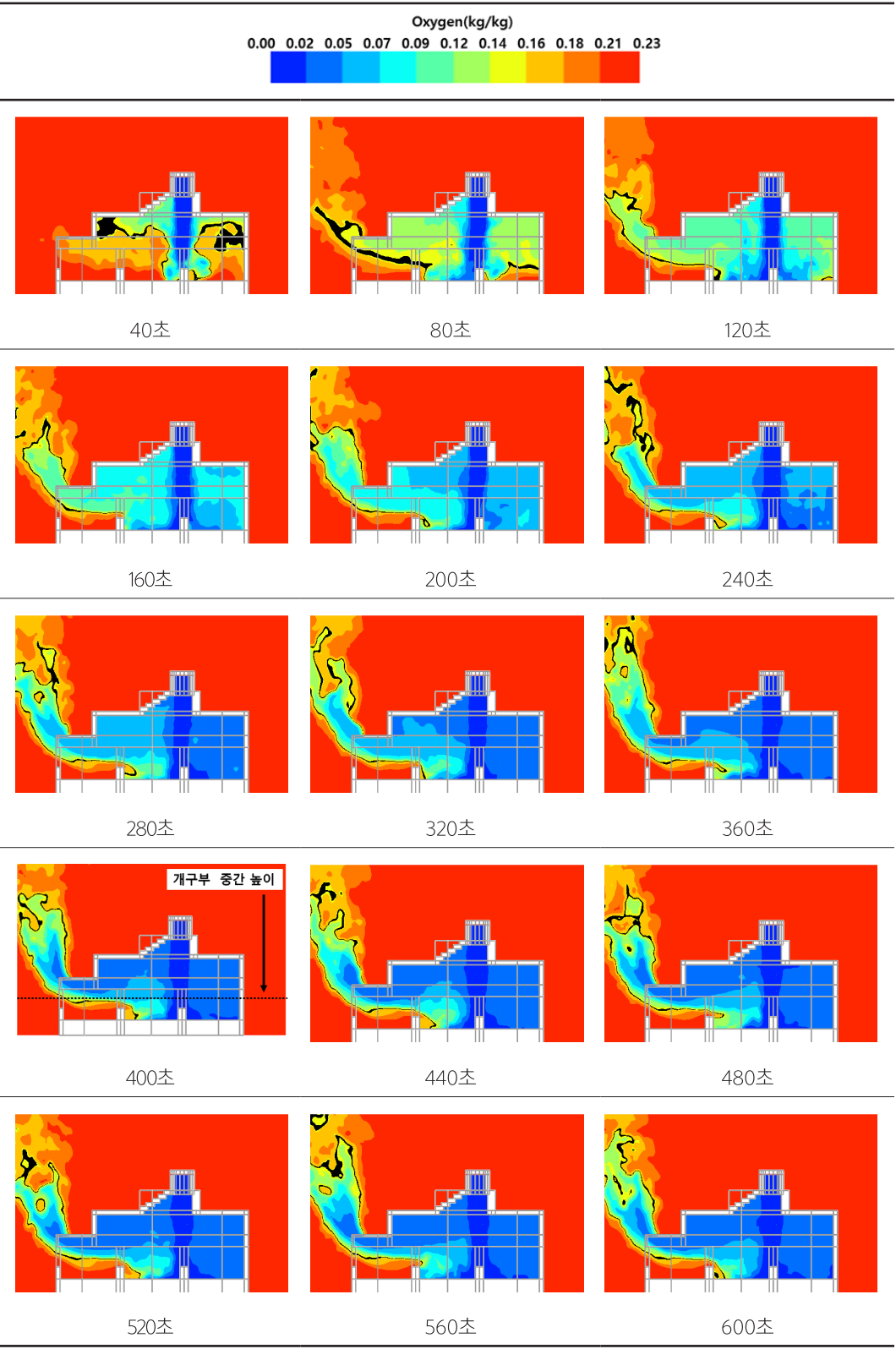
모델링 형상	
	
CFD 코드	Fire Dynamics Simulator v6.3.2
난류해석방법	대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)
계산영역	가로 × 세로 × 높이 = 5.0 m × 7.0 m × 4.5 m
격자크기(총 격자개수)	0.05 m(1,260,000개)
해석 시간	1,000 s
질소 유입 속도	1.0 m/s

CFD 계산결과

○ [그림2]와 [그림3]은 금속포집박스 내부의 산소농도 분포를 정리한 것으로 검은색 영역은 산소농도가 21%인 영역을 의미한다. [그림2]와 [그림3]을 통해 질소가스 유입된 이후 급격히 금속포집박스 내부의 산소농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, [그림2]에서는 280 s이후 재해자 발견 위치에서 약 7%의 산소농도가 분포하여 산소결핍증의 위험이 높은 것을 알 수 있다. 그리고 [그림3]에서는 400 s이후, 개구부 중간 높이 위로 2~15% 산소농도가 외부로 확산되어 금속포집박스 외부에서도 질식재해의 위험성이 있음을 알 수 있다.

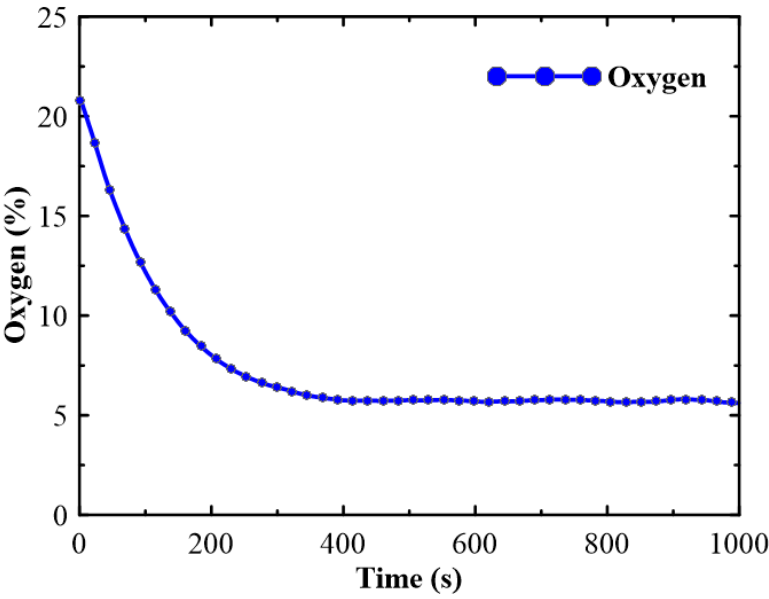


[그림2] 지면으로부터 높이 1.0 m에서의 산소농도 분포(위에서 바라본 단면)



[그림3] 금속포집박스 중간에서의 산소농도 분포(옆에서 바라본 단면)

○ [그림4]는 금속포집박스 내부의 평균 산소농도를 시간변화에 따라 정리한 것이다. [그림4]를 통해 약 5분 이내에 금속포집박스 내 평균 산소농도가 6%로 감소하여 사망위험성이 높은 것을 알 수 있다. 그리고 질소가스 유입 34 s후 평균 산소농도는 18%이하에 도달하여 빠른 속도로 질식재해의 위험성이 증가하는 것을 확인하였다.



[그림4] 금속포집박스 내 평균 산소농도 변화

결론

○ CFD 해석을 통해 밀폐공간에서 질소가스가 유입될 경우 빠른 속도로 밀폐공간 내 평균 산소농도가 감소하여 질식재해의 위험성이 증가하는 것을 확인하였다. 특히, 개구부를 통해서 질소가스가 유출됨에 따라 밀폐공간 외부에서도 질식 위험 영역이 형성됨에 따라 이에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

4

Case

저류조 내 폭발사고에 대한
CFD 위험성평가

[Case 4] 저류조 내 폭발사고에 대한 CFD 위험성평가

사고 개요

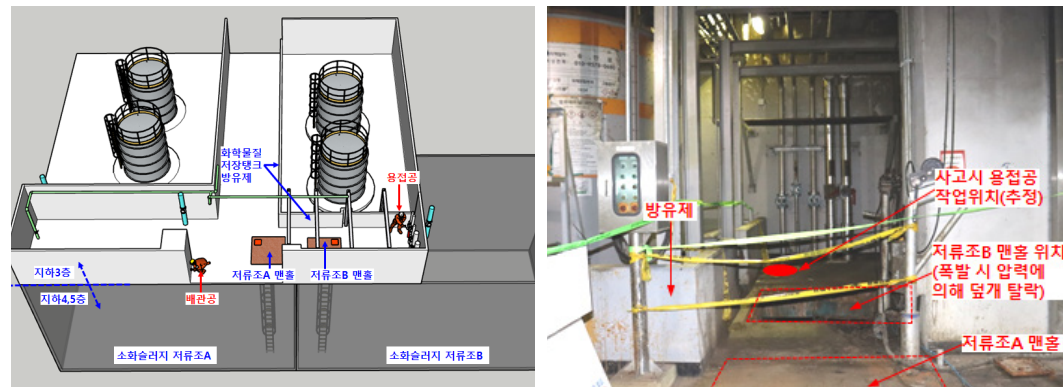
○ '22년 6월 11일(토) 13:45, 경기도 평택시 고덕면 소재 0000센터 유기성폐자원 바이오가스화 시설에서 용접 작업 중 소화슬러지 저류조 내부에서 폭발이 발생하여 1명이 사망한 사고이다.

<저류조 란?>

- 빗물, 하수, 오수따위를 모아두기 위하여 설치한 큰 통을 의미
- 사고가 발생한 곳은 음식물류 폐기물을 통해 바이오가스(메탄가스 함량 60%)를 생성하는 곳으로 폭발 분위기가 형성될 위험이 있음

사고장소 및 상황

○ 저류조 상부에서 배관 용접 작업 중 저류조B에서 발생한 폭발로 인해 저류조B 맨홀이 개방되어 용접공이 저류조B로 추락 후 사망한 사고이다.



[그림1] 사고장소 및 상황

사고 주요원인 및 대책

- (원인) 작업장소가 메탄가스로 인한 폭발 분위기가 형성될 수 있는 폭발위험구역이지만 적절한 안전조치를 수행하지 않고 화기작업인 용접작업을 수행
- (대책) 가연성 가스가 발생하는 곳은 폭발위험구역으로 설정 및 관리해야 하며 폭발위험구역에서 화기작업 시 적절한 안전조치 후 작업 수행

메탄의 특성

○ [표 1]은 메탄의 특성을 정리한 것이다. 메탄은 공기보다 가볍고 흡입으로 인해 인체에 흡수될 수 있다. 저농도의 메탄은 일반적으로 유해하지 않지만 고농도의 메탄을 흡입할 경우 메탄이 질식제 역할을 하기 때문에 구역, 구토, 호흡곤란 등의 증상이 나타날 수 있다. 그리고 가연성이 높고 비교적 낮은 온도에서 발화할 수 있다. 또한 극인화성 가스로 분류되어 화재 및 폭발의 위험성이 높으며 연소하한계와 상한계는 각각 실온에서 공기부피의 5.0 vol%, 15.0 vol%이다. 마지막으로 최소산소농도는 메탄이 발화하는데 필요한 최소한의 산소농도를 의미하며 연소하한계×산소양론계수로 계산된다.

[표1] 메탄의 특성

분자식	CH ₄
분자량	16.0 g/mol
끓는점	-161.7℃
녹는점	-183.0℃
자연발화온도	537.0℃
연소하한계	5.0 vol%
연소상한계	15.0 vol%
최소산소농도	10.0 vol%
연소열	50.0 MJ/kg

메탄가스의 위험성은 어느 정도인가?【메탄가스에 대한 위험성평가】

- 메탄가스로 인한 저류조 내부의 위험성은 어느 정도인가?
 - 저류조 내 환기시설로 인한 메탄가스 농도 분포 확인
 - 메탄가스 발생으로 인한 저류조 내 가연성 분위기 형성 유무 확인

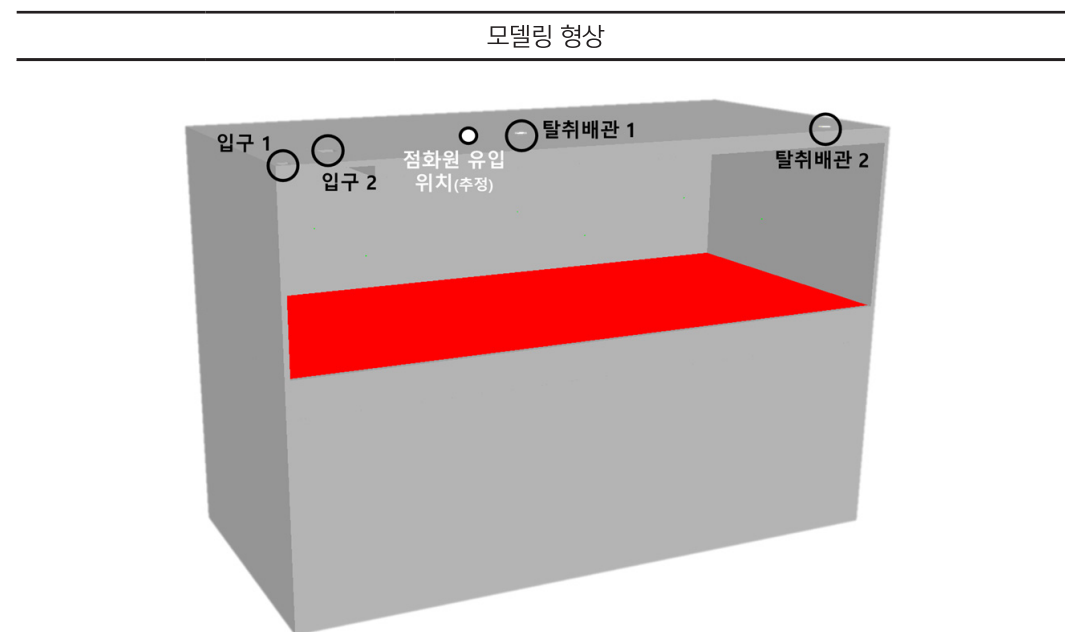
CFD 목적 및 필요성

- 해당 사고는 메탄가스가 발생되어 화재 및 폭발의 발생위험이 있는 장소이지만 화기작업을 실시하여 폭발이 발생한 사고이다. 따라서 메탄가스로 인해 형성되는 저류조 내부의 가연성 분위기를 확인하고 대책을 마련할 필요가 있다.
- 본 분석에서는 사고현장에서 확인된 변수들을 바탕으로 메탄가스로 인한 저류조 내부에서의 화재 및 폭발의 위험성을 확인하고자 한다.

CFD 모델링 및 조건

○ [표 2]는 모델링 및 계산 조건을 정리한 것으로 먼저 해석프로그램은 미국 NIST에서 개발한 오픈소스코드인 Fire Dynamics Simulator v6.3.2를 사용하였고 난류해석방법은 LES 기법을 적용하였다. 구조물의 크기는 사고현장과 동일하게 반영하였고 입구1, 2를 통해 외기가 유입되고 탈취배관1, 2를 통해 메탄이 유출되는 구조이다. 계산영역은 입구 1, 2를 통한 외부 공기의 유입을 고려하기 위해 구조물보다 크게 지정하였다. 그리고 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.1 m로 선정하였고 총 4,800,000개의 격자가 사용되었다. 계산은 1,000 s동안 수행했으며 저류조 내부 초기 화학종 조성은 대기와 동일하게 지정하였다. 그리고 탈취배관 속도는 현장에서 측정한 값인 4.72 m/s로 하였다. 마지막으로 바이오가스 생성조건은 저류조 설계 당시 고려한 생성량의 1.0%, 0.1%, 0.01%로 하여 계산을 수행하였다. 연소하한계×산소양론계수로 계산된다.

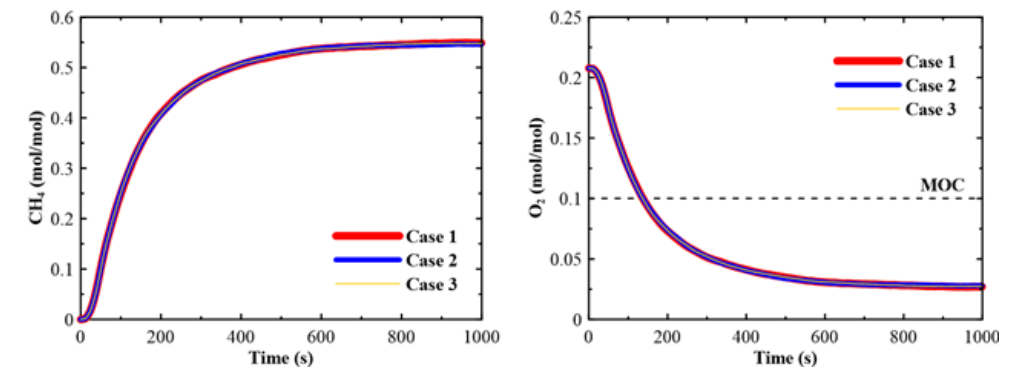
[표2] 모델링 및 계산 조건



CFD 코드	Fire Dynamics Simulator v6.3.2	
난류해석방법	대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)	
계산영역	가로 × 세로 × 높이 = 25 m × 12 m × 16 m	
격자크기(총 격자개수)	0.1 m(4,800,000개)	
해석 시간	1,000 s	
탈취배관 속도	4.72 m/s	
바이오가스 발생량	Case1	0.00062 m3/s (1.00%)
	Case2	0.000062 m3/s (0.10%)
	Case3	0.0000062 m3/s (0.01%)

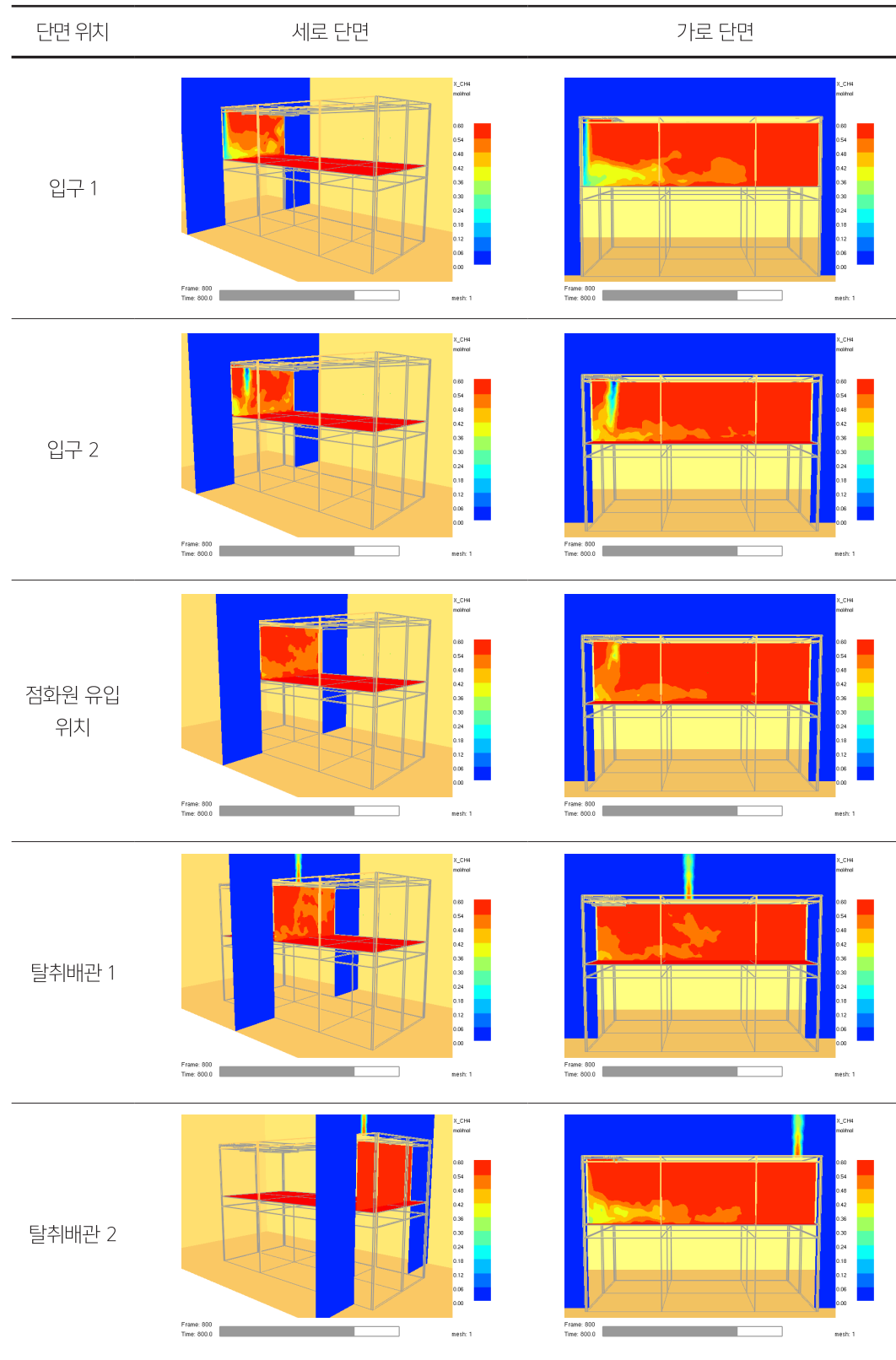
CFD 계산결과

○ [그림2]는 바이오가스 발생량에 따른 저류조 내 평균 메탄 및 산소 농도 변화를 나타낸다. [그림2]를 통해 바이오가스 발생량에 따른 농도 변화가 모두 유사한 것을 볼 수 있다. 그리고 메탄 농도는 꾸준히 증가하고 산소 농도는 감소하면서 약 500 s이후 정상상태에 도달하는 것을 볼 수 있으며 약 200 s이후에는 최소산소농도보다 산소농도가 낮아져 메탄이 발화하기 어려운 조건이 형성됨을 알 수 있다.



[그림2] 저류조 내 평균 메탄 및 산소 농도 변화

○ [그림3]은 정상상태인 800 s일 때 특정 단면에서의 메탄 농도 분포를 Case2에 대해서만 정리한 것이다. [그림3]에서 볼 수 있듯이 외부 공기가 입구 1, 2를 통해 유입되고 탈취배관 1, 2를 통해 유출된다. 그리고 입구 1, 2 주위를 제외하면 대부분의 영역에서 메탄 농도가 약 50%이상에 도달하기 때문에 산소 농도가 낮아 저류조 내부에서는 폭발분위기가 형성되지 않는 것으로 확인된다. 하지만 입구 1, 2와 탈취배관 1, 2를 주위에서는 외부 공기와 접촉하여 가연성 분위기가 형성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 배관 용접 작업 중 생성된 누출공을 통해 메탄가스가 누출되고 누출된 메탄가스와 외부 공기, 점화원이 접촉하여 연소된 것으로 추정할 수 있다.



[그림3] 800 s일 때 특정 단면에서의 메탄 농도 분포 - Case 2 (0.1%)

결론

○CFD 해석을 통해 바이오가스가 생성되는 밀폐공간에서는 산소농도가 낮아 가연성 분위기가 형성되지 않지만 외부 공기와 접촉할 경우, 화재 및 폭발의 위험이 있음을 확인할 수 있다. 따라서 가연성가스가 생성되는 장소 근처에서는 화재 및 폭발위험이 있기 때문에 작업 전 이에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

5

Case

기계식주차장 내 중독사고에
대한 CFD 위험성평가

[Case 5] 기계식주차장 내 중독사고에 대한 CFD 위험성평가

사고 개요

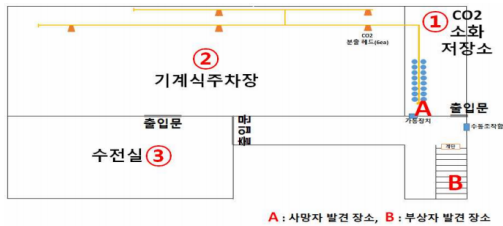
○ `20년 8월 20일(목) 17:22, 대전 서구 월평동 소재 00빌딩 기계식주차장 내 이산화탄소 소화설비가 작동되고 이를 확인하러 내려간 2명 중 1명이 사망한 사고이다.

<‘기계식주차장’이란?>

- 기계장치에 의하여 자동차를 주차할 장소로 이동시키는 설비를 설치한 주차장을 의미
- 기계식주차장은 수직순환식, 수평순환식, 다층순환식 등의 종류가 있으며 기계식주차장이 연면적 800m²이상인 경우 물분부등소화설비를 설치해야한다.

사고장소 및 상황

○ 지하에서 새는 소리가 들리자 이산화탄소 소화설비가 설치되어있는 지하2층으로 내려간 2명 중 1명이 이산화탄소 소화설비 가동장치 앞에서 사망한 것으로 발견되었다.



[그림1] 사고장소 및 상황

사고 주요원인 및 대책

- (원인) 이산화탄소 방출위험이 있는 밀폐공간인 기계식주차장 내부에 출입 시 안전조치가 미흡
- (대책) 산소결핍 또는 유해물질이 있는 장소 출입에 대한 안전조치 수행

이산화탄소의 영향

○ [표 1]은 이산화탄소 농도별 인체 영향을 정리한 것이다. 이산화탄소는 무색, 무미, 무취의 기체로 대기 중에도 0.04% 정도 포함되어 있지만 이산화탄소의 농도가 증가하면 호흡에 필요한 산소의 양이 부족하게 되어 호흡수의 증가, 두통, 구역질 등의 증상을 일으킬 수 있다. 그리고 이산화탄소의 NIOSH IDLH* 수치는 4.0%로 이는 이산화탄소의 농도가 4.0%인 경우 생명과 건강에 즉각적인 위험을 초래한다는 것이다.

* IDLH(Immediately Dangerous to Life Health): NIOSH에서 제시하고 있는 독성농도로 인체의 건강에 즉시 위험을 초래할 수 있는 농도를 의미

[표1] 이산화탄소 농도별 인체 영향

농도(%)	증상발현까지 폭로시간(분)	증상
2~3	5~10	호흡심도의 증가, 호흡수의 증가
3~4	10~30	두통, 메스꺼움(구역질), 지각 저하
4~6	5~10	상기증상, 과호흡에 의한 불쾌감
6~8	10~60	의식수준저하, 의식상실로 진전
8~10	1~10	
10 이상	수분 이내	의식상실, 그 후 단시간에 생명의 위험이 있음
30	8~12호흡	

이산화탄소 소화설비의 위험성은 어느 정도인가?【이산화탄소 소화설비에 대한 위험성평가】

- 이산화탄소 소화설비 작동으로 인한 위험성은 어느 정도인가?
- 이산화탄소 소화설비 작동 후 구조물 내 이산화탄소 기류거동 확인
- 이산화탄소 가스로 인한 구조물 내 위험영역 확인

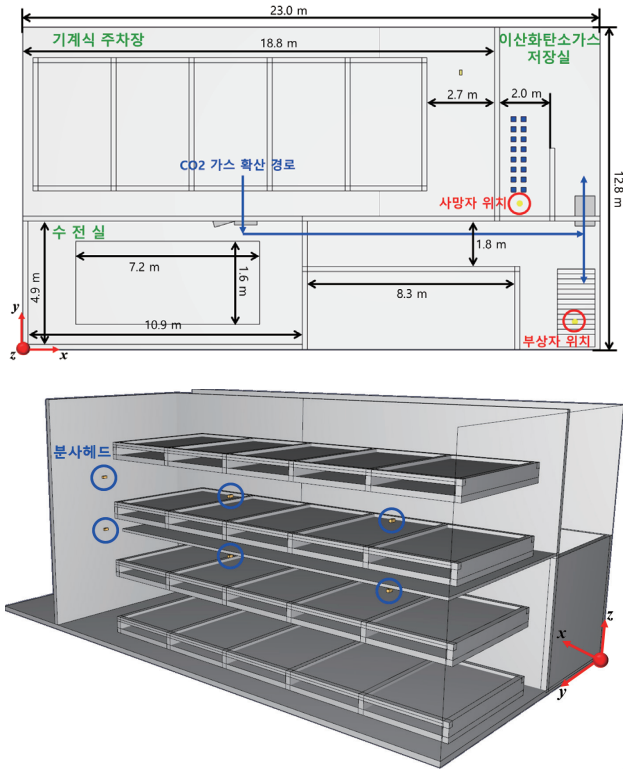
CFD 목적 및 필요성

- 해당 사고는 소화설비 작동으로 인해 이산화탄소가 전량 방출되어 기계식 주차장 내부가 밀폐공간이 되었지만 적절한 안전조치를 수행하지 않고 출입하여 발생하였다. 재해예방을 위해 이산화탄소 소화설비의 작동으로 인해 발생하는 위험성에 대한 검토가 필요하다.
- 따라서 본 분석에서는 CFD를 통해 실제 사고사례를 바탕으로 이산화탄소 소화설비 작동으로 인한 이산화탄소의 기류거동과 위험영역에 대해 분석하고자 한다.

CFD 모델링 및 조건

○ [표 2]는 모델링 및 계산 조건을 정리한 것으로 먼저 해석프로그램은 미국 NIST에서 개발한 오픈소스코드인 Fire Dynamics Simulator v6.3.2를 사용하였고 난류해석방법은 LES 기법을 적용하였다. 구조물의 크기는 사고현장과 동일하게 반영하였다. 그리고 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.1 m로 선정하였고 총 2,944,000개의 격자가 사용되었다. 계산은 2,700 s동안 수행했으며 기계식 주차장 내부 초기 화학종 농도는 대기와 동일하게 하였다. 그리고 사고현장에서 확인된 이산화탄소 가스가 모두 방사되었다는 것을 근거로 하여 총 720 kg의 이산화탄소가 초당 2 kg으로 방출되는 것으로 조건을 지정하였다.

[표2] 모델링 및 계산 조건

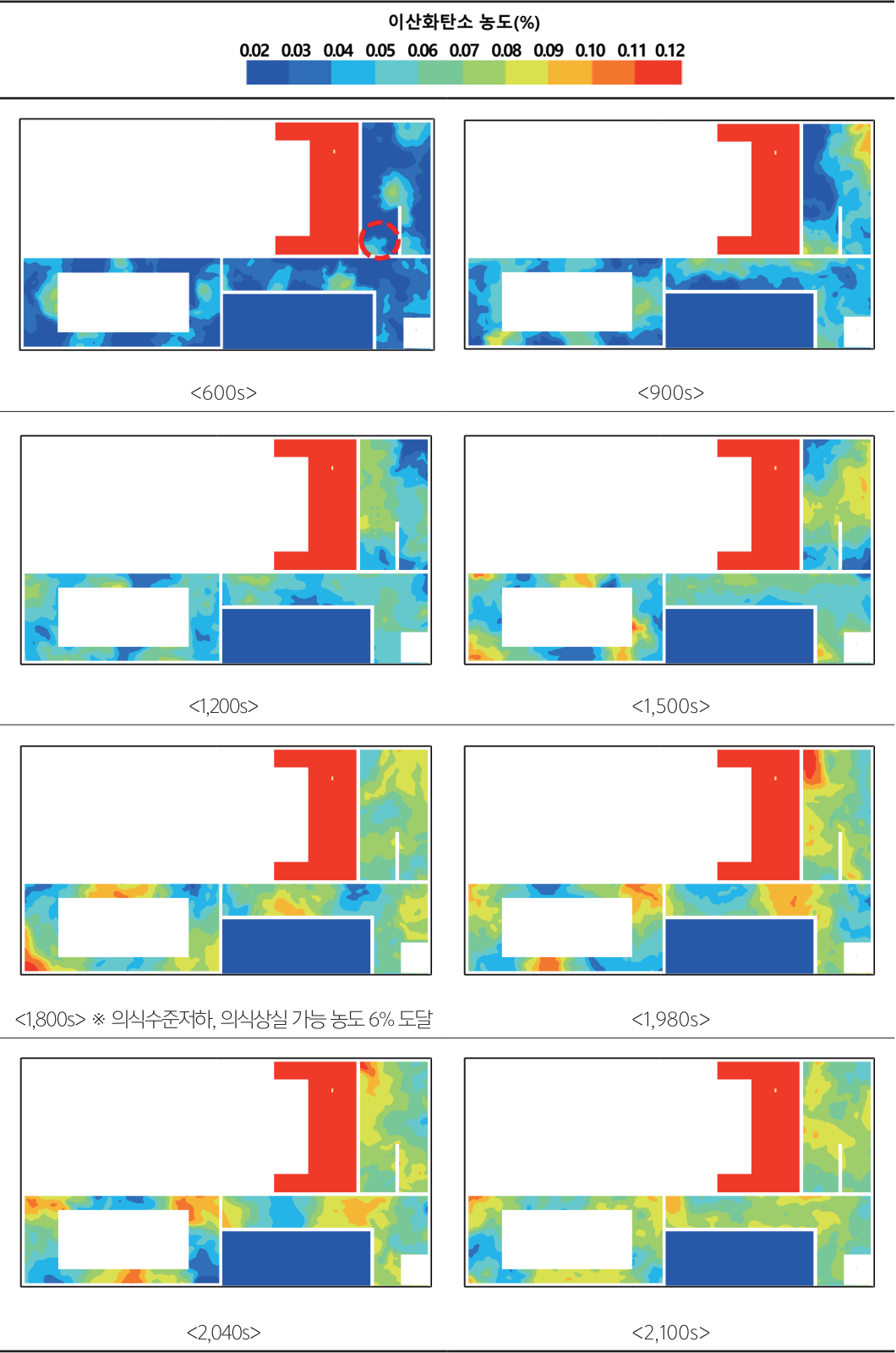
모델링 형상	
	
CFD 코드	Fire Dynamics Simulator v6.3.2
난류해석방법	대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)
계산영역	가로 × 세로 × 높이 = 5.0 m × 7.0 m × 4.5 m
격자크기(총 격자개수)	0.05 m(1,260,000개)
해석 시간	1,000 s
질소 유입 속도	1.0 m/s

CFD 계산결과

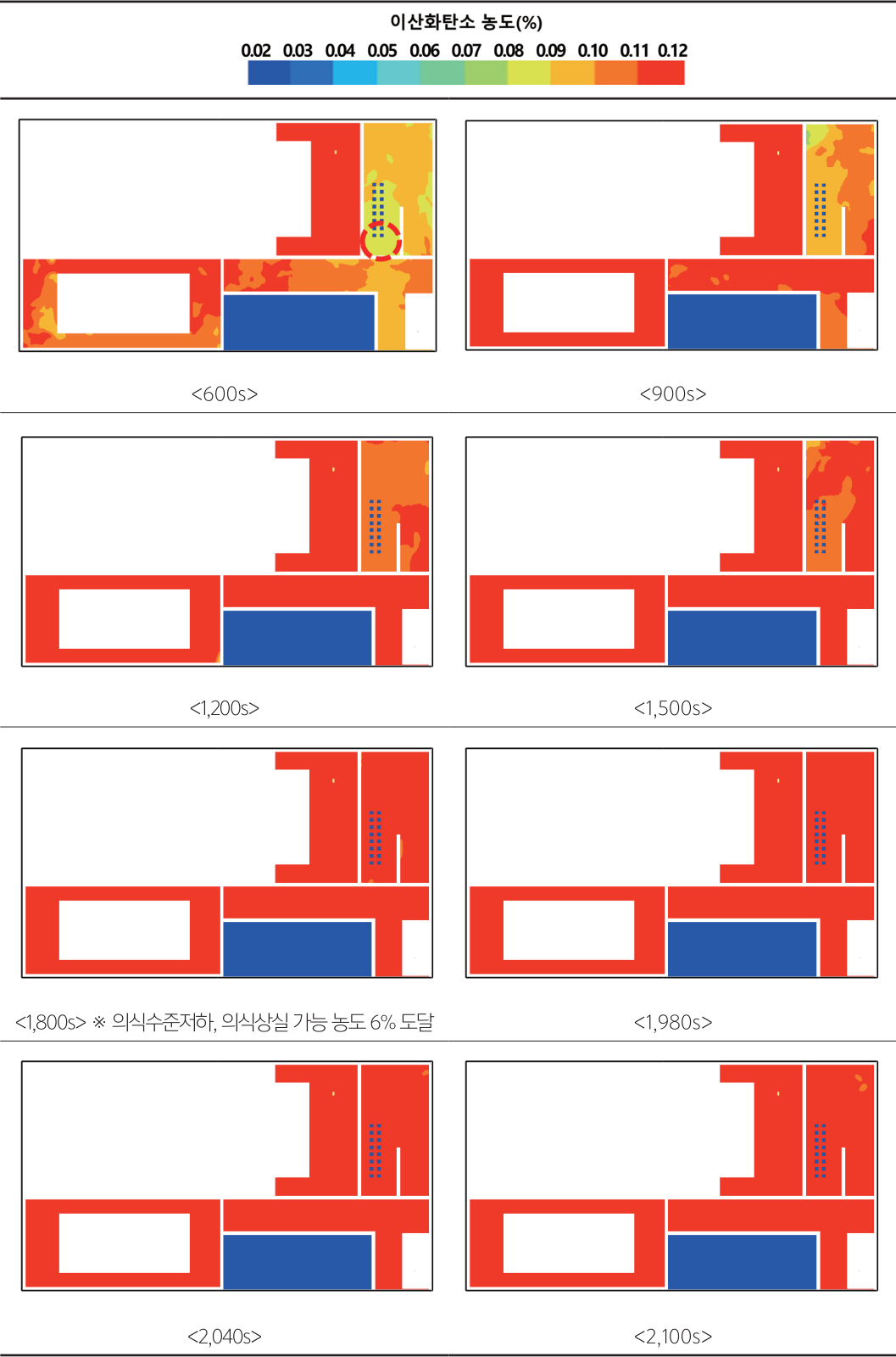
- [그림2]는 사망자가 서 있을 때 호흡기 높이(1.6 m)에서의 이산화탄소 농도분포 변화를 정리한 것이다. [그림2]를 통해 사망자가 발견된 위치에서 바닥으로부터 높이 1.6 m의 이산화탄소 농도는 누출시점부터 약 1,800 s후부터 의식수준저하 또는 의식상실의 가능성이 있는 농도인 6% 이상에 도달하는 것을 확인할 수 있다.
- [그림3]은 사망자가 쓰러졌을 때 호흡기 높이(0.1 m)에서의 이산화탄소 농도분포 변화를 정리한 것이다. [그림3]을 통해 사망자가 발견된 위치에서 바닥으로부터 높이 0.1 m의 이산화탄소 농도는 누출시점부터 약 1,200 s후부터 사람이 사망할 수 있는 농도인 10% 이상에 도달하는 것을 알 수 있다.

결론

- CFD 해석을 통해 이산화탄소 소화설비가 작동된 이후 이산화탄소가 저장실에 도달한 사망자가 이산화탄소 흡입으로 쓰러지고 사망한 것으로 추정할 수 있다. 특히, 이산화탄소 소화설비는 단 시간 내에 방사되기 때문에 방사 이후 빠른 속도로 기계식 주차장 내부가 이산화탄소 중독 위험영역이 되는 것을 알 수 있다. 이러한 분석 결과를 통해 이산화탄소 소화설비가 설치된 밀폐공간의 위험성을 확인할 수 있었고 추후에는 안전한 작업을 위한 작업절차 및 조치에 대한 검토가 필요할 것으로 보인다. 이산화탄소 가스가 모두 방사되었다는 것을 근거로 하여 총 720 kg의 이산화탄소가 초당 2kg으로 방출되는 것으로 조건을 지정하였다.



[그림2] 사망자가 서 있을 때 호흡기 높이에서의 시간대별 이산화탄소 농도 분포



[그림3] 사망자가 쓰러졌을 때 호흡기 높이에서의 시간대별 이산화탄소 농도 분포

6

Case

3밀 작업장 내 환기관리에
대한 CFD 위험성평가

[Case 6] 3밀 작업장 내 환기관리에 대한 CFD 위험성평가

3밀 작업장이란

○ 3밀 작업장은 밀집, 밀폐, 밀접한 작업환경인 작업장을 의미한다. 3밀 작업장의 경우 감염병 전파에 특히 취약하기 때문에 환기상태에 따른 위험수준과 적절한 환기방법으로 개선할 필요가 있다.

작업환경 관리방법

○ 사무실 공기관리 지침(고용노동부고시 제2020-45호)에 따르면 공기정화시설을 갖춘 사무실에서 근로자 1인당 필요한 최소 외기량은 0.57 m³/min 이상이며, 환기횟수는 시간당 4회 이상으로 권고하고 있다. 그리고 [표 1]은 해당 지침에 명시된 오염물질 관리기준을 정리한 것으로 미세먼지, 초미세먼지, 이산화탄소 등 일부는 외기에 포함된 물질이 있어 외기로 인한 오염물질 유입도 관리할 필요가 있다. 특히, 이산화탄소는 작업자의 날숨에 포함되어 3밀 작업장에서 지속적으로 증가할 수 있어 주의를 요구한다.

○ 실제로 어린이집의 공기질을 측정한 결과 이산화탄소 평균 농도가 1042.7 ppm으로 확인된 바 있으며 이산화탄소가 1,000 ppm을 넘을 경우, 집중력이 떨어지고 졸음이 발생할 수 있다.

[표 1] 오염물질 관리기준

오염물질	관리기준(8시간 시간가중평균농도 기준)
미세먼지(PM10)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
초미세먼지(PM2.5)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
이산화탄소(CO ₂)	1,000 ppm
일산화탄소(CO)	10 ppm
이산화질소(NO ₂)	0.1 ppm
포름알데히드(HCHO)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
총 휘발성 유기화합물(TVOC)	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
라돈(radon)*	148 Bq/m ³
총 부유 세균	800 CFU/m ³
곰팡이	500 CFU/m ³

* 라돈은 지상층을 포함한 지하에 위치한 사무실에만 적용한다.

환기만 하면 공기질이 개선되는가?【환기방법에 대한 위험성평가】

- 3밀 작업장 내 이산화탄소의 위험성은 어느 정도인가?
- 환기방법에 따른 3밀 작업장 내 기류거동 확인
- 환기방법에 따른 3밀 작업장 내 이산화탄소 농도 변화 확인

CFD 목적 및 필요성

○ 환기가 취약한 3밀 작업장은 근로자의 건강장해를 유발할 수 있어 작업환경 개선이 필요하다. 따라서 3밀 작업장으로 대표되는 콜센터 등 3곳의 작업장에 대해 모델링을 수행하고 오염물질로 대표되는 이산화탄소 농도를 기준으로 하여 쾌적한 작업장을 조성할 수 있는 환기방법에 대해 검토하고자 한다.

CFD 모델링 및 조건

○ [표 2]는 근로자별 호흡에 따른 화학종 농도 및 유량 등의 조건을 정리한 것으로 모든 계산수행에 동일하게 적용하였다. 그리고 호흡 방향은 얼굴에서 45°아래로 하였고 근로자의 체온은 모두 36.5℃로 고려하였다.

○ [표 3], [표 4], [표 5]는 Case 별 모델링 및 계산 조건을 정리한 것으로 먼저 해석프로그램은 미국 NIST에서 개발한 오픈소스코드인 Fire Dynamics Simulator v6.3.2를 사용하였고 난류해석방법은 LES 기법을 적용하였다. 구조물의 크기는 실제 작업장을 반영하였고 계산영역은 외기의 영향을 반영하기 위해 구조물보다 크게 하였다.

○ 먼저 [표 3]은 Case 1의 모델링 및 계산 조건으로 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.2 m로 선정하였고 총 2,812,500개의 격자가 사용되었다. 계산은 9,000 s동안 수행했으며 계산영역 내 초기 화학종 농도는 대기와 동일하게 하였다. 그리고 계산 시나리오는 2시간(7,200 s)동안 밀폐된 공간에서 65명의 근로자가 호흡하여 이산화탄소가 작업장 내에 축적되고 2시간 이후 작업장에 위치한 앞, 뒤의 창문을 개방하였을 때 환기 효과를 확인하고자 하였다.

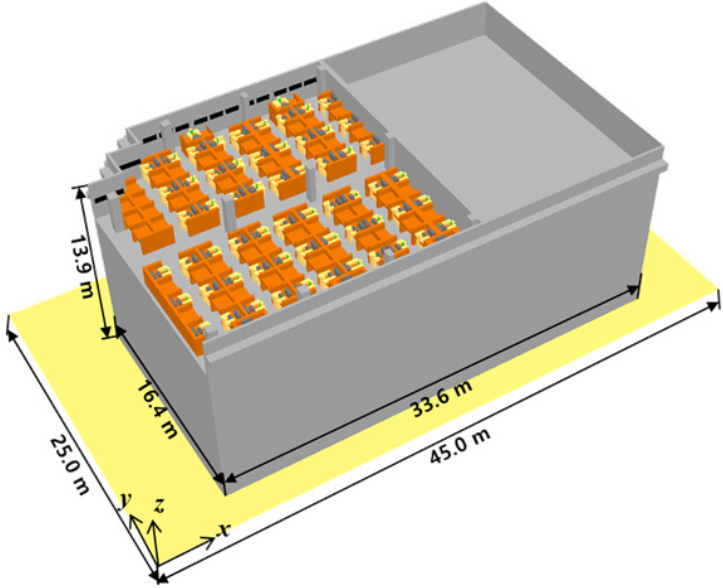
○ [표 4]는 Case 2의 모델링 및 계산 조건으로 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.2 m로 선정하였고 총 650,000개의 격자가 사용되었다. 계산은 1,800 s동안 수행했으며 계산영역 내 초기 화학종 농도는 실제 작업장에서 측정한 결과를 바탕으로 각 구역별로 다르게 지정하였다. 그리고 계산 시나리오는 환기방법을 창문 개방 및 공기청정기 가동을 기본으로 하여 출입문 개방 유무 및 에어컨 가동 유무에 따른 공기질 개선효과를 비교하고자 하였다.

○ [표 5]는 Case 3의 모델링 및 계산 조건으로 격자의 크기는 계산영역에 적합한 0.1 m로 선정하였고 총 2,880,000개의 격자가 사용되었다. 계산은 1,800 s동안 수행했으며 계산영역 내 초기 화학종 농도는 실제 작업장에서 측정한 결과를 바탕으로 각 구역별로 다르게 지정하였다. 그리고 계산 시나리오는 창문 및 출입문 개방 유무에 따른 공기질 개선효과를 비교하고자 하였다.

[표2] 근로자별 호흡 조건

구분	화학종(mol/mol)*			최대체적유량* (m³/s)	체적유량 주기*(s)
	O ₂ (산소)	CO ₂ (이산화탄소)	N ₂ (질소)		
들숨	0.21	0.00	0.79	0.0003	6.0
날숨	0.16	0.04	0.79	0.0003	6.0

[표3] Case 1의 모델링 및 계산 조건

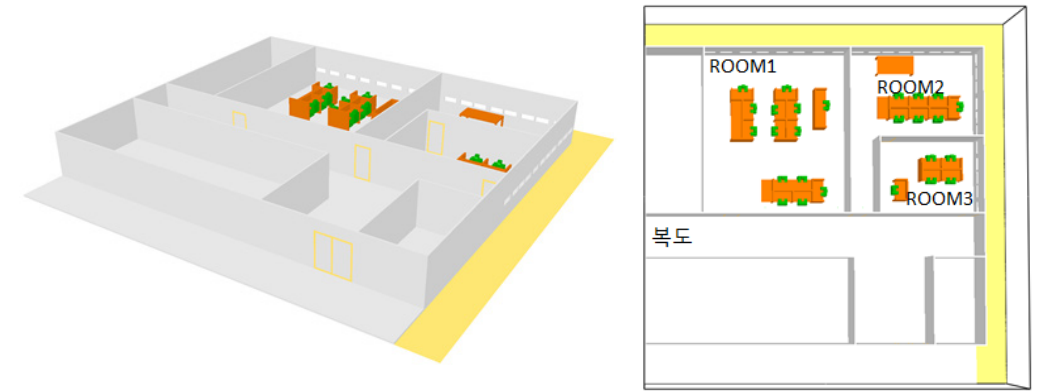
모델링 형상	
	
CFD 코드	Fire Dynamics Simulator v6.3.2
난류해석방법	대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)
계산영역	가로 × 세로 × 높이 = 45.0 m × 25.0 m × 20.0 m
격자크기(총 격자개수)	0.2 m(2,812,500개)
해석 시간	9,000 s
초기 화학종 농도 및 온도	산소: 21.0%, 이산화탄소: 0.0%, 질소: 79.0%, 온도: 20℃
질소 유입 속도	○ 2시간까지 밀폐된 공간 내에서 65명의 근로자 호흡 ○ 2시간이후 구조물 앞, 뒤 창문 개방

[표4] Case 2의 모델링 및 계산 조건

모델링 형상

CFD 코드		Fire Dynamics Simulator v6.3.2
난류해석방법		대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)
계산영역		가로 × 세로 × 높이 = 52.0 m × 20.0 m × 5.0 m
격자크기(총 격자개수)		0.2 m(650,000개)
해석 시간		1,800 s
초기 화학종 농도 및 온도	ROOM	산소: 23.17%, 이산화탄소: 0.1930%, 질소: 76.63%, 온도: 25.6℃
	복도	산소: 23.19%, 이산화탄소: 0.0869%, 질소: 76.73%, 온도: 22.1℃
	외기	산소: 21.0%, 이산화탄소: 0.0%, 질소: 79.0%, 온도: 3.4℃
시나리오	시나리오1	창문 개방, 공기청정기 가동, 출입문 미개방, 에어컨 미가동
	시나리오2	창문 개방, 공기청정기 가동, 출입문 개방, 에어컨 미가동
	시나리오3	창문 개방, 공기청정기 가동, 출입문 개방, 에어컨 가동

[표5] Case 3의 모델링 및 계산 조건

모델링 형상		
		
CFD 코드	Fire Dynamics Simulator v6.3.2	
난류해석방법	대와동모사기법(Large Eddy Simulation, LES)	
계산영역	가로 × 세로 × 높이 = 24.0 m × 24.0 m × 5.0 m	
격자크기(총 격자개수)	0.1 m(2,880,000개)	
해석 시간	1,800 s	
초기 화학종 농도 및 온도	ROOM1	산소: 23.17%, 이산화탄소: 0.2363%, 질소: 76.59%, 온도: 26.9℃
	ROOM2	산소: 23.17%, 이산화탄소: 0.2135%, 질소: 76.61%, 온도: 26.9℃
	ROOM3	산소: 23.17%, 이산화탄소: 0.1982%, 질소: 76.62%, 온도: 26.9℃
	복도	산소: 23.18%, 이산화탄소: 0.0915%, 질소: 76.72%, 온도: 26.9℃
	외기	산소: 21.0%, 이산화탄소: 0.0%, 질소: 79.0%, 온도: 10.1℃
시나리오	시나리오1	창문 및 출입문 미개방
	시나리오2	창문 개방, 출입문 미개방
	시나리오3	창문 및 출입문 개방

Case 1 계산결과

- [그림1]은 앓은 상태의 근로자 호흡기 높이에서의 이산화탄소 농도 분포 변화를 정리한 것이다. [그림1]을 통해 7,200 s까지 약 6,6600 ppm의 이산화탄소 농도가 작업장 내에 분포하고 이후 창문이 개방됨에 따라 빠르게 이산화탄소 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 다만, 9,000 s일 때 일부 영역에서는 1,800 ppm의 이산화탄소 농도가 확인되었다.
- [그림2]는 작업장 내 평균 이산화탄소 농도 변화를 정리한 것으로 [그림1]과 마찬가지로 7,200 s까지 이산화탄소 농도가 꾸준히 증가하지만 창문 개방 이후 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고

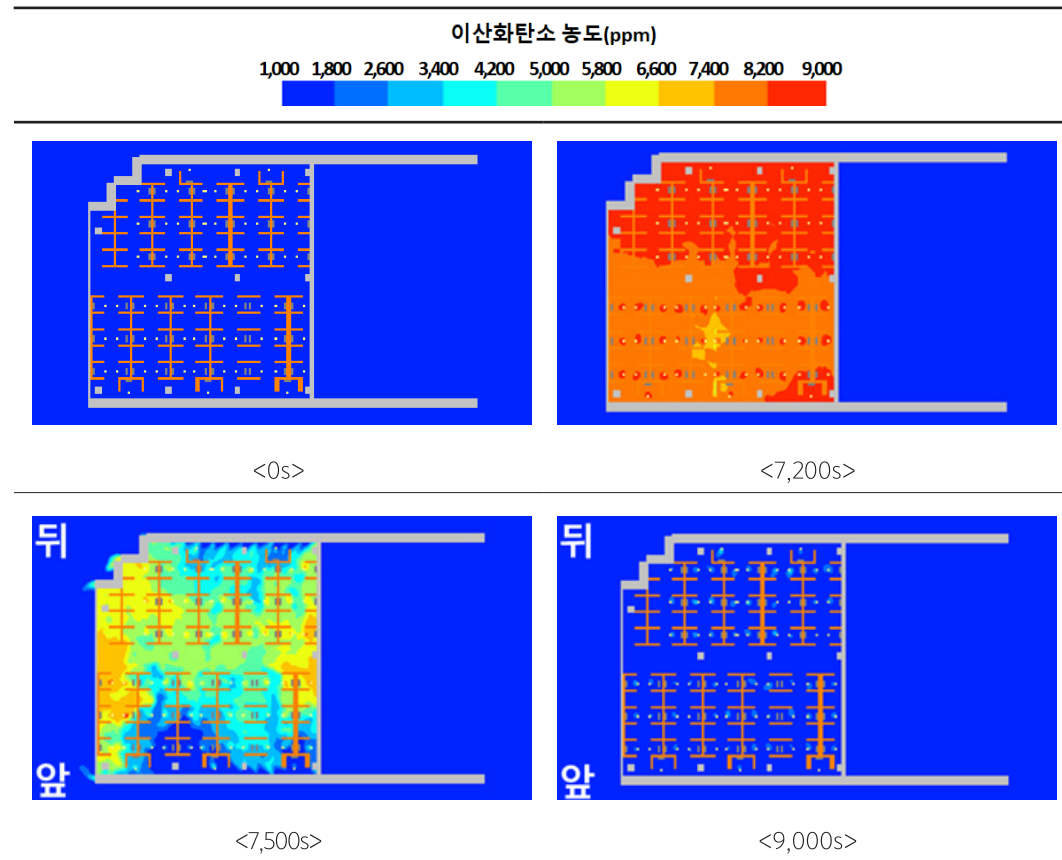
9,000 s에는 작업장 내부에 평균적으로 이산화탄소 농도가 약 1,500 ppm으로 분포하는 것을 볼 수 있다. [그림1]과 [그림2]의 결과를 바탕으로 해당 작업장에 대해서는 추가적인 환기개선 방안이 필요한 것으로 확인하였다.

Case 2 계산결과

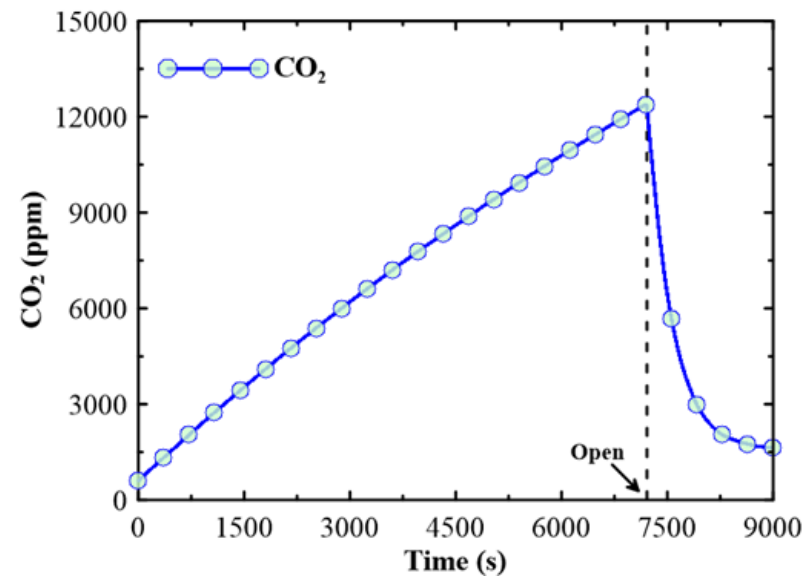
- [그림3]은 1,800 s일 때, 환기방법에 따른 앓은 상태의 근로자 호흡기 높이에서의 이산화탄소 농도 분포 변화를 정리한 것이다. [그림3]을 통해 에어컨을 가동하지 앓은 시나리오1, 2는 이산화탄소 농도가 1,000 ppm을 초과하는 영역이 있음을 알 수 있다. 하지만 에어컨을 가동한 시나리오3은 사무실 일부 영역에서 이산화탄소 농도가 1,000 ppm이하로 분포하여 공기질이 다소 개선되는 것을 확인하였다.
- [그림4]는 작업장 내 평균 이산화탄소 농도 변화를 정리한 것으로 에어컨을 가동하지 앓은 시나리오1, 2는 이산화탄소 농도가 증가하는 추세임을 알 수 있다. 하지만 에어컨을 가동한 시나리오3은 작업장 내 평균 이산화탄소 농도가 1,000 ppm 이하로 유지되는 것을 볼 수 있다. 따라서 해당 작업장에서는 출입문을 개방하고 에어컨을 작동하였을 때 가장 효과적으로 환기 및 공기질 개선이 가능함을 확인하였다.

Case 3 계산결과

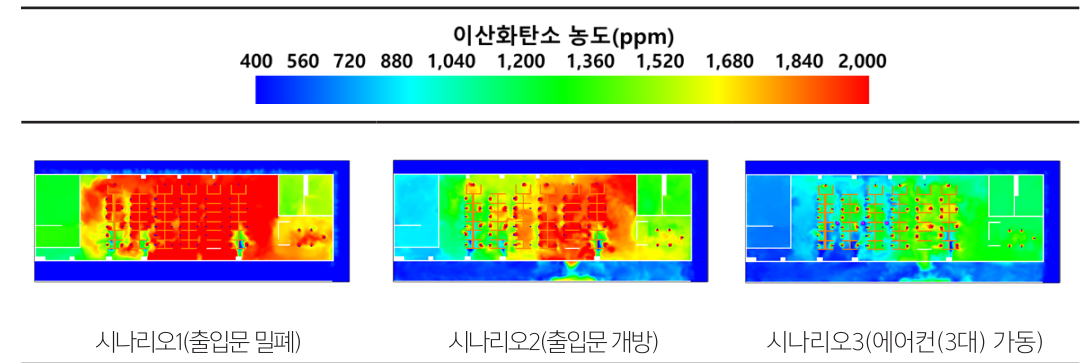
- [그림5]는 1,800 s일 때, 환기방법에 따른 앓은 상태의 근로자 호흡기 높이에서의 이산화탄소 농도 분포 변화를 정리한 것이다. [그림5]를 통해 창문 및 출입문을 밀폐할 경우, 이산화탄소 농도가 약 1,700 ppm이상 분포하지만 창문 또는 출입문을 개방하면 이산화탄소 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 창문보다 출입문 개방이 환기에 더 효과적인 것을 알 수 있다.
- [그림6]은 작업장 내 공간별 환기방법에 따른 평균 이산화탄소 농도 변화를 정리한 것으로 창문 및 출입문을 밀폐할 경우 이산화탄소 농도가 지속적으로 증가하는 추세이지만 창문 또는 출입문을 개방할 경우 이산화탄소 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 [그림5]와 동일하게 출입문 개방이 가장 급격하게 이산화탄소 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 출입문을 개방한 경우에만, 모든 공간에서 평균 이산화탄소 농도가 1,000 ppm이하로 유지되는 것을 볼 수 있다. 따라서 해당 작업장은 창문보다 출입문을 개방할 경우 더 효과적으로 환기 및 공기질 개선이 가능함을 확인하였다.



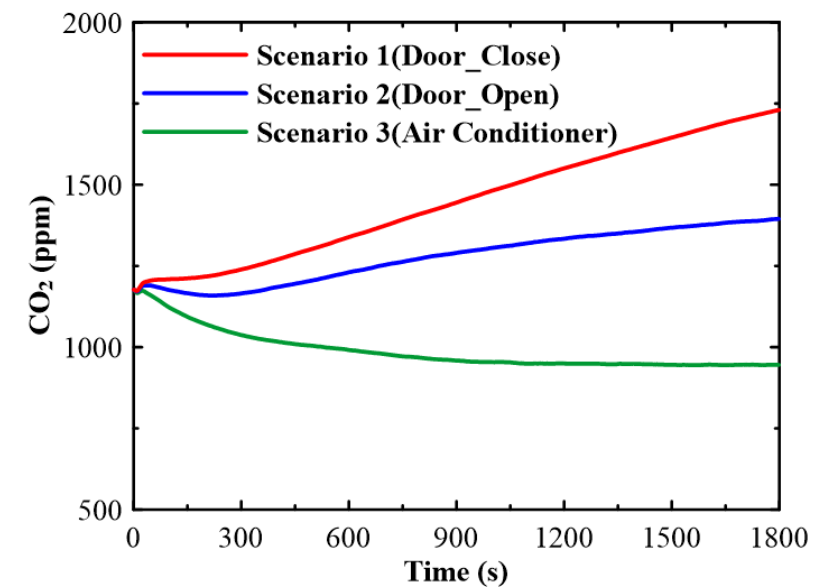
[그림1] 앉은 상태의 근로자 호흡기 높이에서의 이산화탄소 농도



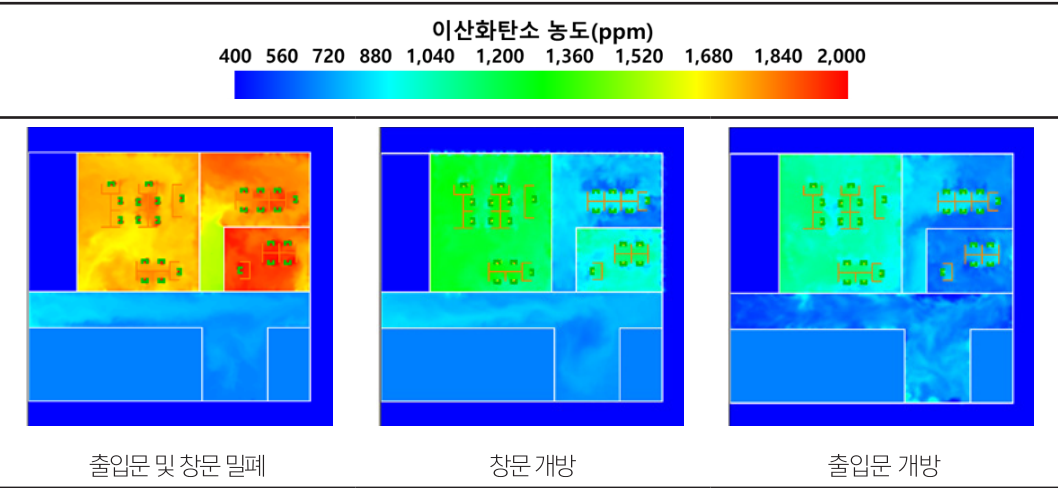
[그림2] 작업장 내 평균 이산화탄소 농도 변화



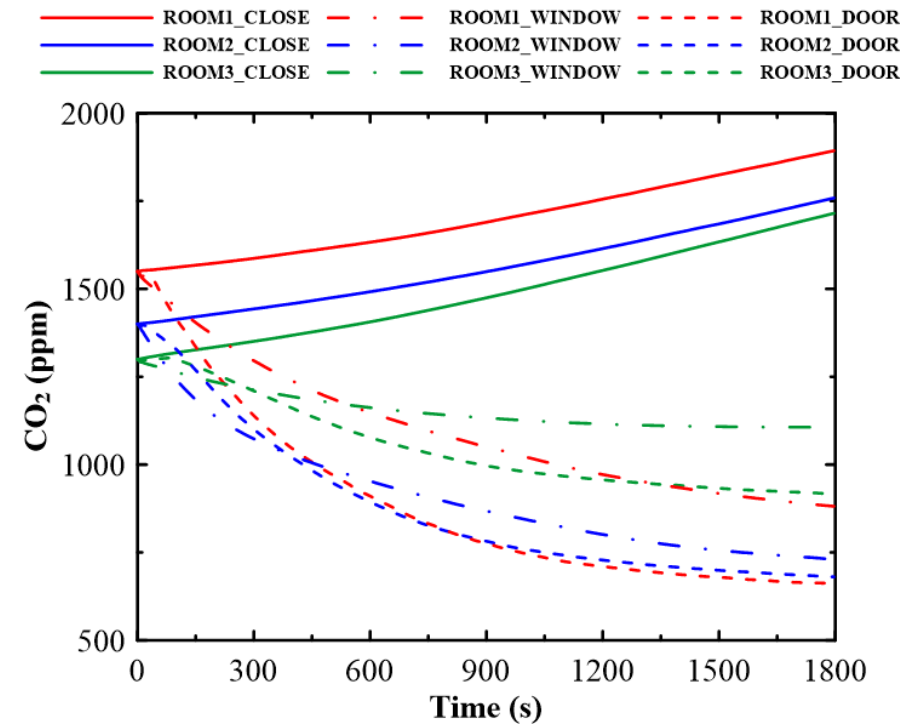
[그림3] 앉은 상태의 근로자 호흡기 높이에서의 이산화탄소 농도(@1,800 s)



[그림4] 환기방법에 따른 작업장 내 평균 이산화탄소 농도 변화



[그림5] 얇은 상태의 근로자 호흡기 높이에서의 이산화탄소 농도(@1,800 s)



[그림6] 작업장 내 공간별 환기방법에 따른 평균 이산화탄소 농도 변화

결론

○ CFD 해석을 통해 3밀 작업장 내 환기방법 및 공기질 수준을 평가가 가능함을 확인하였다. 또한 작업장 구조 및 특성에 따라 효과적인 환기방법이 다르기 때문에 작업장에 적합한 환기방법을 확인하는 것이 필요하다. 따라서 추후에는 작업장 특성에 따른 환기방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

7

Case

열교환기 파열에 대한
주요 구조부 응력해석

[Case 7] 열교환기 파열에 대한 주요 구조부 응력해석

사고 개요

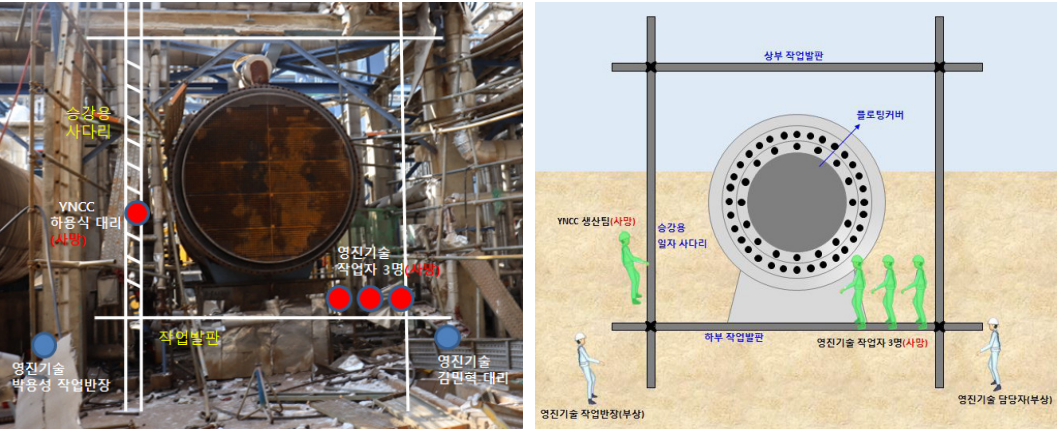
○ `22년 2월경, 전남 소재 ○○공장 급냉공정의 열교환기에 대하여 IA*(약 17.1kgf/cm2)를 이용해 기밀시험을 하던 중 열교환기의 Floating Head Cover가 파열되면서 작업자 4명이 사망하고 4명이 부상당한 사고이다.

* Instrument Air : 계기용 공기

사고장소 및 상황

○ 교환기의 Tube 세척 및 내부 상태를 확인하고 Floating Head Cover를 체결한 후 IA(약 17.1kgf/cm2)를 공급하여 비눗방울 테스트로 접합면 기밀을 확인하던 중 Floating Head Cover를 잡고 있던 Backing Device가 파단 되었다.

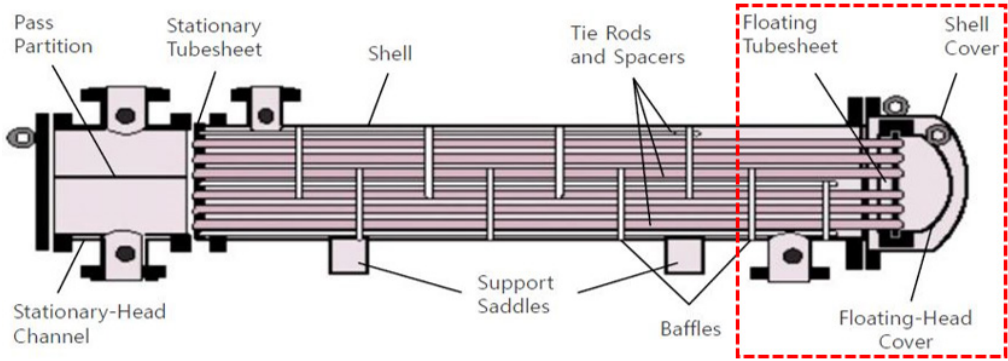
- ○○공장은 22년 10월에 약 35일간 공장을 정지한 후 정기보수(4년주기)가 예정되어 있었으며 사전에 열교환기 내부 상태를 확인하기 위해 세척작업을 진행하였음



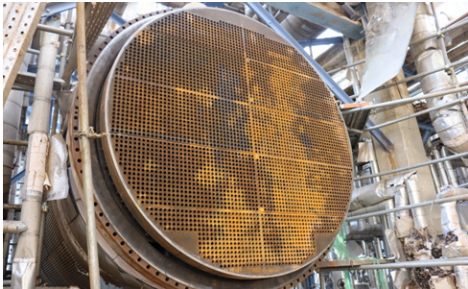
[그림1] 사고장소 및 상황

재해발생 설비

- (용도) 순환 Q.O를 냉각시키고 폐열을 이용하여 D.S를 발생시키는 설비
- (제조사) ○○공업(1987년 제작품)
- (형식) Shell&Tube Floating Head 형식 열교환기
- Floating Head Type 열교환기 : Tube Sheet의 한쪽을 Shell에 플랜지로 고정시키고 다른 쪽은 Shell에 아무런 구속도 받지 않는 구조로 열팽창에 대응할 수 있도록 Shell과 Tube의 온도차가 큰 경우 사용



[그림2] Floating Head 형식 열교환기



사고 열교환기 Floating Head Cover측



파열 분리된 Floating Head Cover

사고 열교환기 모습

[그림3] 사고 열교환기

[표1] 설계 및 운전조건

형 식 (Shell / Tube)	설계온도 (° C)	설계압력 (kgf/cm ²)	운전온도 (° C)	운전압력 (kgf/cm ²)	운전중 사용물질
Floating Head	185 / 220	9.7 / 15.5	170 / 205(in),175(out)	7.7 / 9	물 / Q.O

사고 주요원인 및 대책

- (원인) Backing Device 기계적 안전성 관련 문제점
 - (가공의 적정성) 강도에 영향을 줄 수 있는 중요부(Shear Thick, 노치부와 볼트 홀 간의 두께)가 설계값 보다 작게 제작 되었다.
 - (볼트 조임력) Backing Device와 Floating Head Cover 연결볼트의 조임작업 시 취약한 Backing Device 노치부 손상을 야기할 수 있는 과도한 조임력이 작용했을 우려가 있다.
 - (균열로 인한 강도약화) 노치부 주변 표면부식 등에 의한 다수의 균열이 존재

- (대책) Backing Device 등 취약부품의 기계적 안전성 확보
 - (검수관리) 신규 설비 및 기존 설비의 부품교체 등과 관련한 발주품 검수관리 절차를 검토하고 규격, 재질, 용접부 상태 등의 중요 검수항목에 대한 관리조치 강화토록 조치가 필요하다.
 - (설비점검·수명관리 기준) Backing Device와 같은 장기 사용부품이나 취약부품이 설비점검이나 수명관리 대상에서 누락되지 않도록 내부 설비점검 기준과 수명관리 기준을 검토 및 강화하고 주기적 점검 및 수명관리가 필요하다.
 - (비파괴검사) 강도가 약한 노치가 있거나 과거에 손상 경험에 있는 취약부품의 경우 정비·점검 등으로 분해한 경우에 취약부의 손상 여부를 확인하기 위해 비파괴검사 강화토록 조치가 필요하다.

응력집중과 노치

- 일반적으로 어떤 물체를 인장하거나 압축할 경우 단면에 응력이 골고루 분포하여 평균응력이 작용한다고 본다. 그러나 응력집중은 집중하중이 작용하는 하중점에서 나타나며, 집중하중이 일어나는 하중점에서는 평균응력보다 훨씬 큰 응력이 발생하게 된다. 이러한 집중하중은 기하학적 불연속부에서 발생하는데, 균열이나 천공, 그리고 형상이 급격하게 변하는 각진 형상에서 발생한다. 응력집중을 완화 하는 방법은 집중하중이 예상되는 곳을 찾아 하중을 분산하도록 설계를 변경하는 것으로 각진 모서리 부분은 모따기(chamfer or round)를 하거나 치수가 점진적으로 변하도록 테이퍼링을 해준다. 또한 균열이 발생하면 즉시 교체하거나 보수를 해줘야 하며, 임시적으로 균열선단에 타공하여 균열의 전진을 막아야 하며, 균열이 열리지 않도록 스테이플러를 찍듯이 Bracket을 설치하거나 접착제를 이용하여 균열발생을 억제해야 한다.
- 노치(Notch)란 V자나 U자형으로 움푹 패인 곳을 나타내는 용어로 부품이 인장응력, 압축응력, 굽힘응력, 전단응력을 받을 때 노치효과(응력집중)가 발생하며 이는 고장발생의 원인이 된다. 이러한 응력집중을 해결하기 위해서 노치부에 round를 부여하여 깨짐 등을 개선할 수 있으며 기본적으로 round 값은 제품 살 두께의 50~60%를 부여함으로써 응력집중을 완화 할 수 있다.

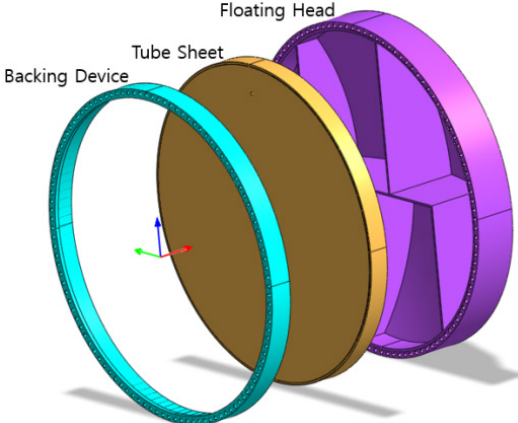
구조해석의 목적 및 필요성

- 해당 사고는 ○○공장에서 열교환기 운전 정지 후 2차 기밀시험(Instrument air)을 하던 중 발생한 파열*에 대해 열교환기 주요 구조부에 대한 응력분포를 해석을 진행 하고자 한다.
 - * 기밀시험을 위해 열교환기 튜브 측에 고압 공기(약17.1kgf/cm²)¹⁾을 투입하던 중 Floating head cover가 이탈되어 사고가 발생
- 본 분석에서는 Backing Device가 Tube sheet와 맞물리는 내측 노치(Notch)부분의 응력 집중여부와 볼트 체결 위치와 노치 부분의 유효면적이 작게 형성되어 이 부분이 구조적인 취약에 미치는 영향을 확인하고자 한다.

구조해석 조건

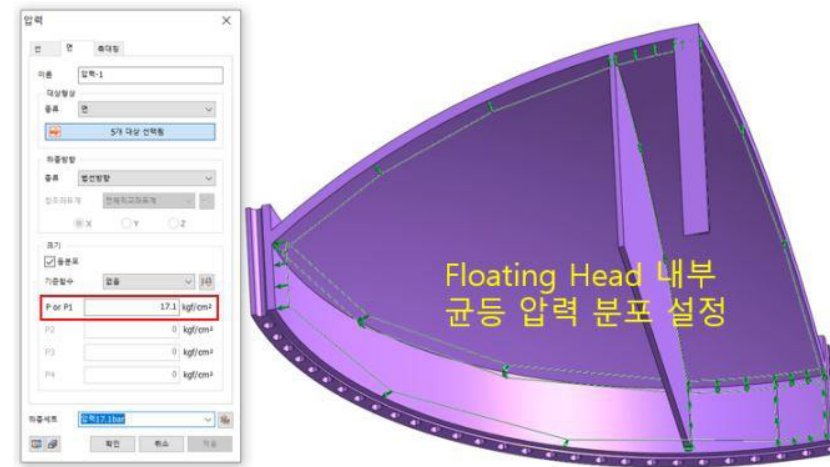
- 사용 프로그램: Midas NFX 2020

[표2] 모델링 및 해석 조건

열교환기 주요 구조부 모델링 형상					
					
품 명	재질	탄성계수(N/mm ²)	프아송비	항복강도(N/mm ²)	인장강도(N/mm ²)
Floating Head	A515GR70 ²⁾	200000	0.2	265	480
Backing Device	A105 ³⁾	200000	0.3	348.6	501
Tube Sheet	A105	200000	0.3	348.6	501

1) 해당사고 사고 동향보고 내 작업자에 의해 촬영된 압력계이지 값.
2) 속소재정보은행(www.metalsbank.com) 내 Data 활용하였으며, 인장강도는 범위(480~620) 내 하한값을 적용함.
3) 계장화압입시험법에 따른 Backing Device의 시편 물성시험 결과 Data 중 최소 평균값임.

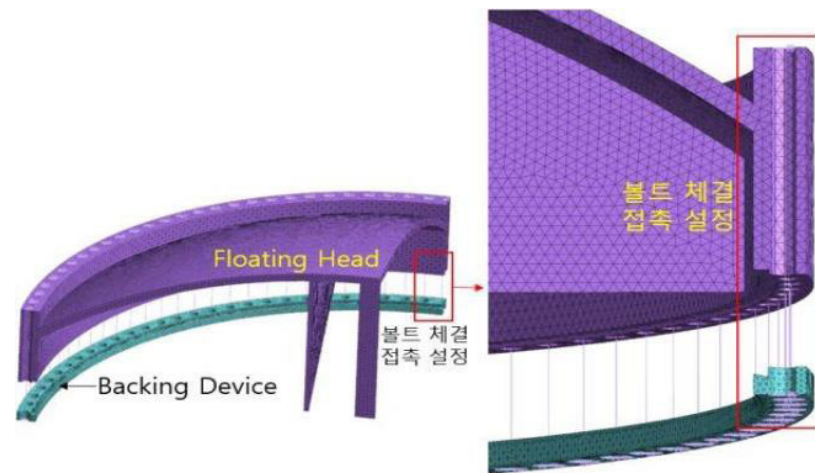
○ 압력: 기밀시험 중 파열이 발생한 17.1kgf/cm² 적용⁴⁾ 하였다.



[그림4] 내압 분포 생성

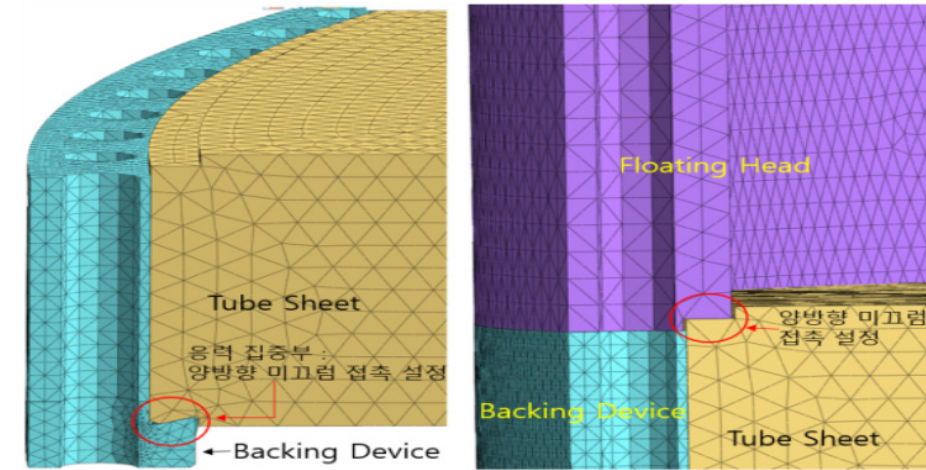
○ 접촉조건

- Backing Device와 Floating Head는 Stud bolt로 체결됨에 따라 두 구조물 간 접촉을 볼트체결로 설정 하였다.



[그림5] 볼트 접촉부 설정

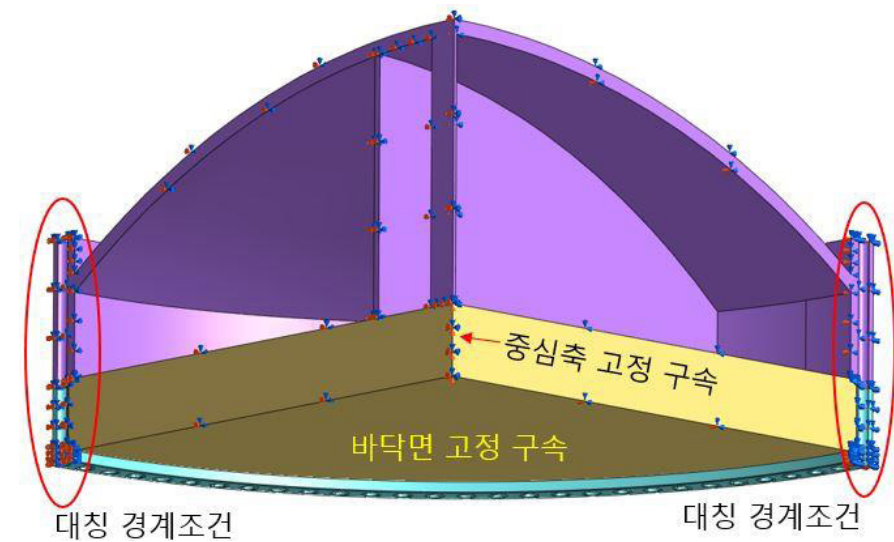
- 응력 집중이 예상되는 Backing Device 노치부와 Tube Sheet 노치부 접촉면은 일체거동 접촉 설정 시 과도 응력집중이 표기됨에 따라 양방향 미끄럼 접촉을 설정 하였다.



[그림6] 양방향 미끄러짐 접촉 설정

○ 경계조건

- 열교환기 내 Tube Sheet는 끝 단면에 의해 고정되어 있기 때문에 바닥면을 고정 구속 설정하였고,
- 해석시간을 줄이기 위해 전체 모델의 1/4을 나누어 양 측면 대칭 경계조건 설정 및 내부 압력 적용 시 Tube Sheet 회전을 막기 위해 중심축 고정을 설정하였다.



[그림7] 경계조건 설정

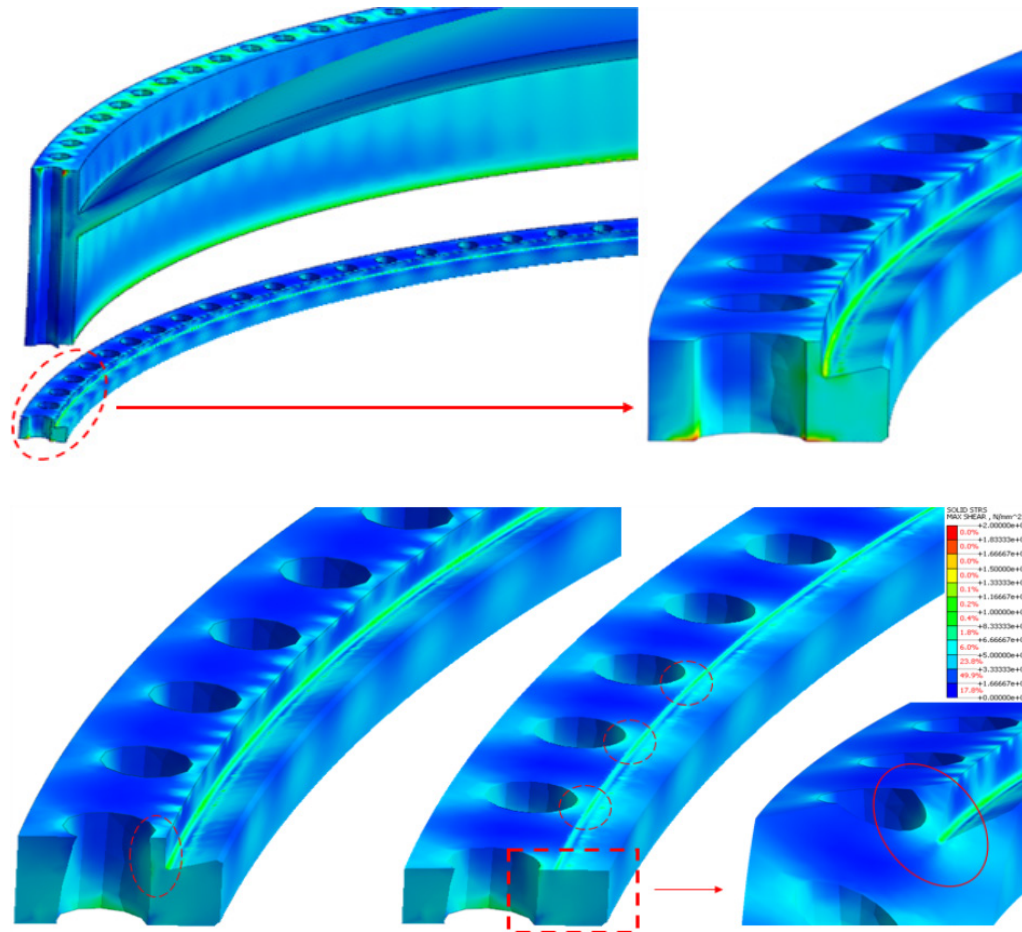
4) 해당사고 동향보고에 명시된 열교환기 파열 압력 적용(중앙사고조사단 요청)

유한요소해석 결과

○ 제공받은 설계 도면으로 주요 구조부 모델링을 하였으며, A 105 재질의 항복강도와 인장강도는 제공된 계장화압입시험 평가 보고서 내용을 참고하여 응력(Von Mises 응력, 최대전단응력, 최대주응력, 피로손상도)을 해석하였다.

○ 열교환기 주요 구조부의 유한요소해석 결과 실물의 파손과 유사하게 노치부의 응력집중이 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

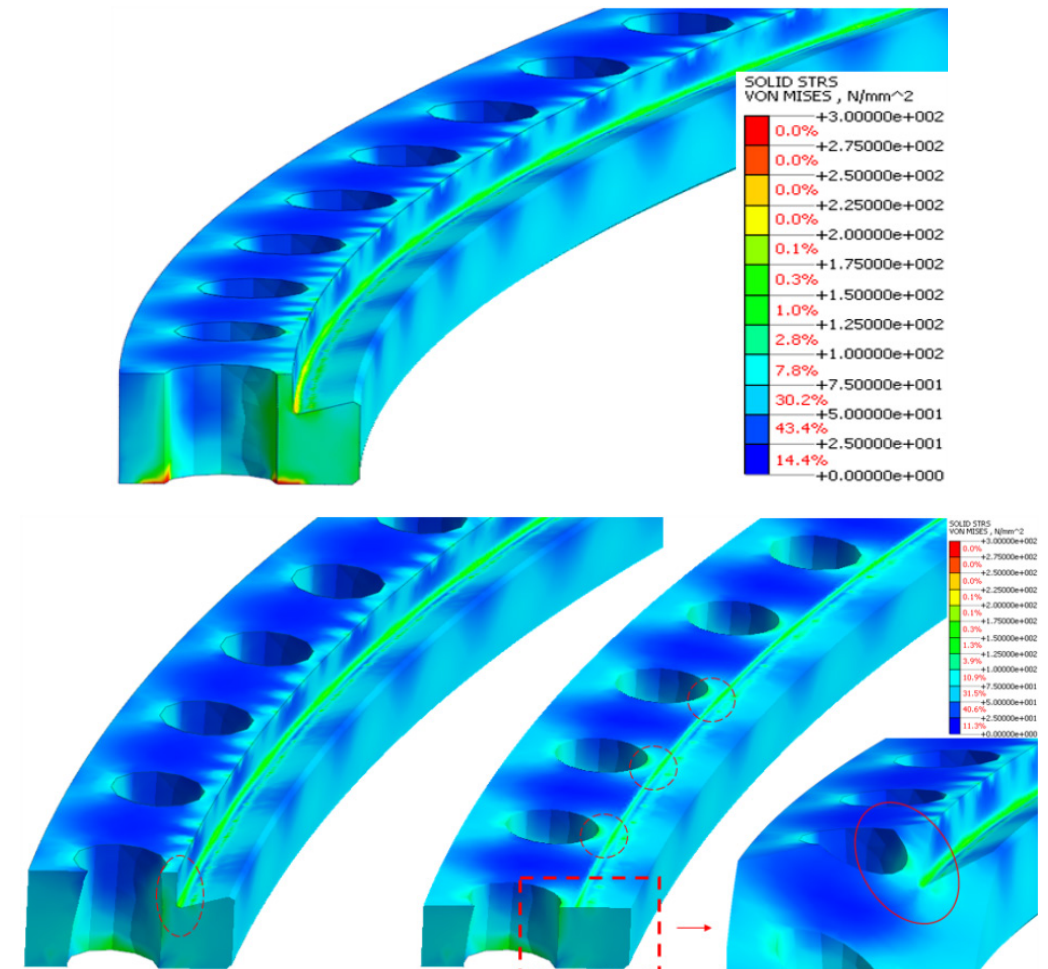
○ 최대전단응력



[그림8] 최대 전단응력 분포

- 최대 전단응력(Tresca) 파손은 일반적으로 연성재료에서 항복과 일치하는 경향이 있으며, 단순 인장시험에서 최대전단응력이 항복응력의 1/2에 도달하면 파손이 발생하는 것으로 판단할 수 있다.
- 해석결과 노치부 내측 R1.5 부분에서 144.2N/mm²의 값을 확인 할 수 있다.

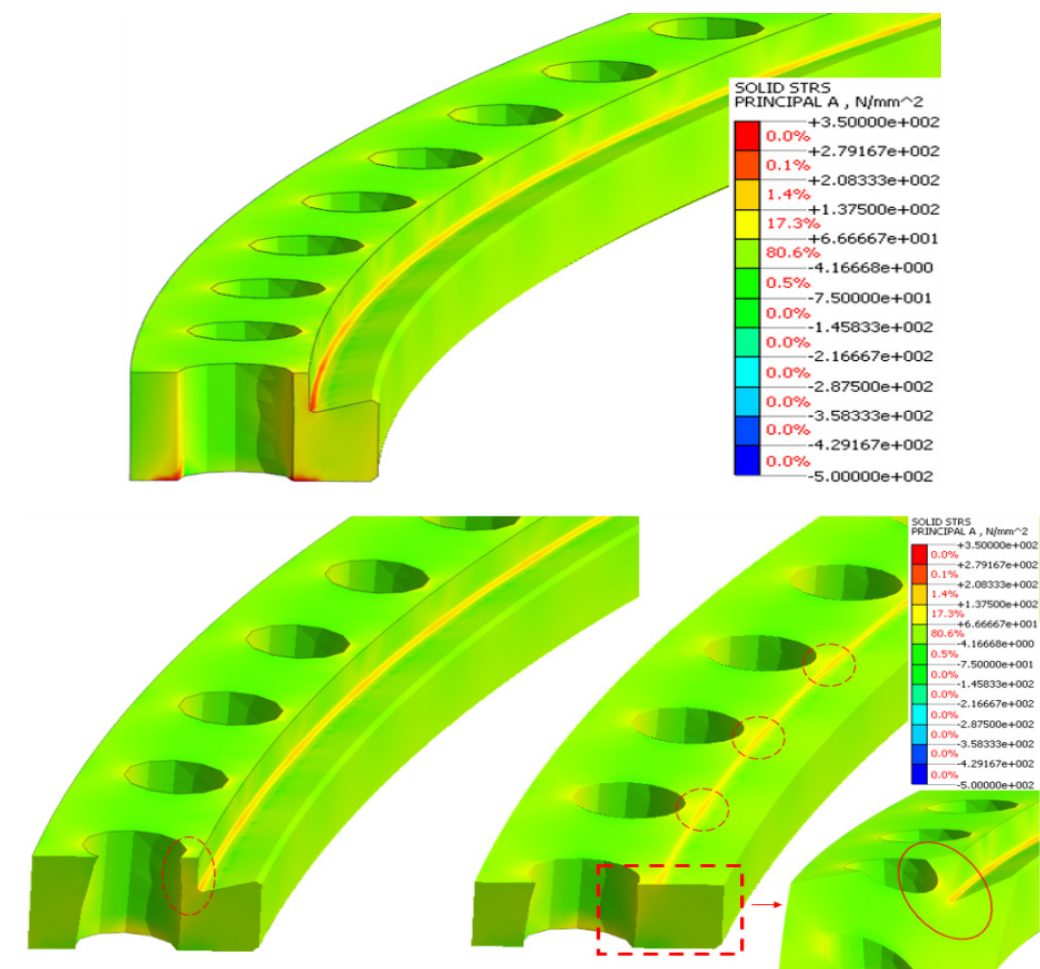
○ Von Mises 응력



[그림9] Von Mises응력 분포

- 최대 비틀림 에너지(Von Mises) 파손은 조합응력상태의 뒤틀림 에너지가 단순 인장시험의 뒤틀림 에너지와 같아지면 항복이 발생하는 것으로 판단하며, 일반적으로 연성재료에 적용한다.
- 해석결과 R1.5가 반영된 노치부에서 응력이 집중됨을 알 수 있으며, 185.7N/mm²의 값을 확인 할 수 있다.
- Backing Device - Floating Head Cover를 연결하는 볼트 체결부와 Backing Device-Tube Sheet가 맞닿는 노치부 간의 면적이 반대편 볼트 홀 측에 비해 상대적으로 작아 노치부와 볼트 홀 간에 응력이 집중되는 것을 확인 할 수 있다.

○ 최대 주응력



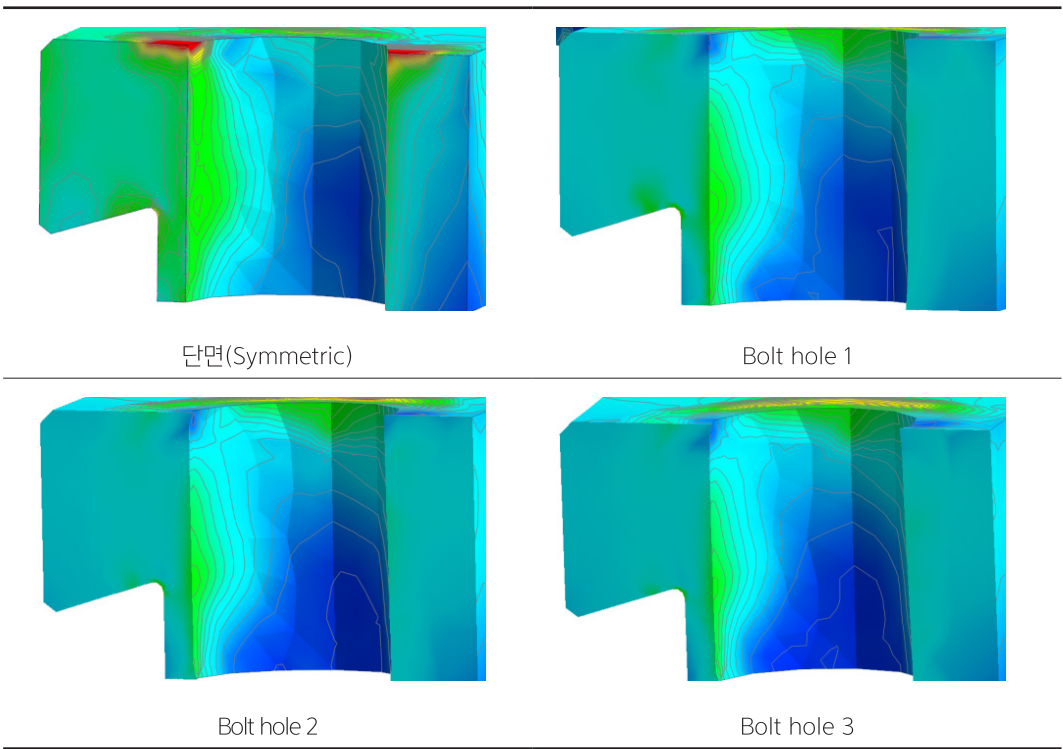
[그림10] 최대 주응력 분포

- 최대 주응력이 극한강도를 초과하는 순간 파손이 일어나는 것으로 판단하며 일반적으로 취성재료에 적용하며,
- 해석결과 볼트 체결 홀과 가장 가까운 노치부 내측 R1.5 부분에서 312.1N/mm²의 값을 확인 할 수 있다.

○ 임의의 Bolt hole 3곳의 응력 분포

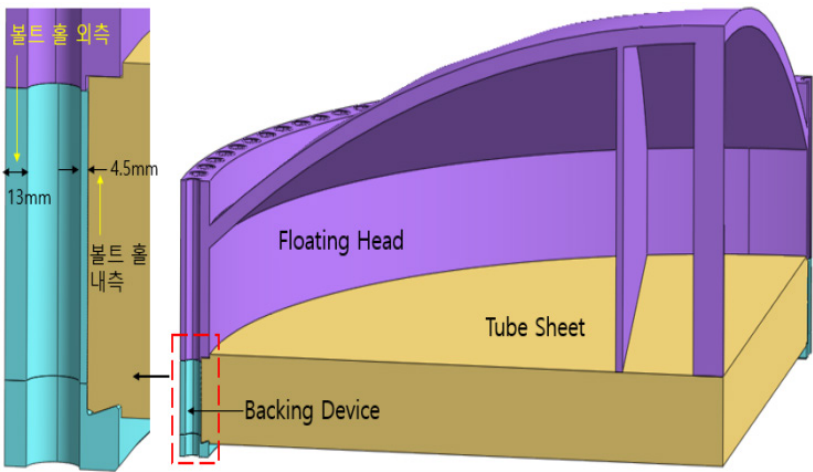
[표3] Bolt hole 응력분포

	최대전단응력	Von mises	최대주응력
Bolt hole 1	137.4MPa	239.4MPa	276.1MPa
Bolt hole 2	111.7MPa	196.4MPa	223.7MPa
Bolt hole 3	108.1MPa	190.3MPa	217.5MPa



[그림11] Bolt hole 응력분포

○ 검토결과



[그림12] Backing Device bolt hole

- (취약부) 실물의 파손과 유사하게 노치부에 응력집중이 일어나는 것을 알 수 있으며 특히 노치부와 볼트 홀 간에 취약한 것을 확인 할 수 있다.
- (안전율) R1.5가 반영된 노치부에서 Von Mises 응력값은 185.7N/mm²으로 판단된 Backing Device의 설계도면 상의 재질인 ASTM A105의 인장강도 485N/mm²을 기준으로 2.61의 안전율을 가진다.

Q & A

CFD Simulation 및 Structural Analysis에 대한 궁금증 해결

CFD 결과와 실제 현상과 동일한가요?

○ CFD는 계산영역을 세분화하고 다양한 모델링기법과 가정을 통해 수행되기 때문에 현실과 차이가 있을 수 있습니다. 하지만 지속적으로 정확도에 대한 검증과 새로운 기법 도입 등을 통해 현실과 유사하게 결과를 도출하고자 노력하고 있습니다.

CFD 해석에 한계가 있나요?

○ CFD의 한계는 해석코드마다 차이가 있어 사용 시 주의가 필요합니다. 본 사례집에서 사용하고 있는 FDS는 직교좌표계로만 해석이 가능하기 때문에 구형 또는 원기둥 해석이 어렵습니다. 또한 폭발 등의 현상을 해석할 수 없습니다.

슈퍼컴퓨터 또는 워크스테이션으로만 해석할 수 있나요?

○ 아닙니다. 노트북을 이용하면 간단한 해석도 가능합니다. 물론 슈퍼컴퓨터나 워크스테이션보다 계산시간은 많이 소요될 수 있습니다. 하지만 복잡한 구조 또는 조건이 있을 경우에는 사양이 좋은 컴퓨터가 필요할 수 있습니다.

어떤 결과를 얻을 수 있나요?

○ 사례집에서 사용한 FDS는 시간변화에 따른 농도 등의 물리량 변화를 엑셀파일로 얻을 수 있습니다. 그리고 계산영역의 특정 단면에서의 물리량 분포 변화(2D)와 계산영역 내 특정 물리량의 영역(3D)을 애니메이션으로 정리할 수 있습니다. 결과물은 사용하는 해석코드마다 차이가 있습니다.

액체상태의 유체도 계산할 수 있나요?

○ 사례집에서 사용한 FDS는 오직 가스상태의 유체에 대해서만 해석이 가능합니다. 물론 다른 해석코드를 활용할 경우 해석할 수 있습니다.

발 간 번 호 2023-산업안전보건연구원-225
발 행 처 산업안전보건연구원
발 행 인 김은아 연구원장
편집위원장 문형수 실장
편 집 위 원 김정덕 부장
변정환 연구위원
강성윤 과장
백빛나 대리
문 의 052-703-0846
주 소 울산 중구 종가로 400 산업안전보건연구원
편집디자인 엔프레임 주식회사