연구보고서

백빛나



요약문

• 연구기간 2021년 02월 ~ 2021년 11월

•핵심단어 밀폐공간, 환기, 환기량,

• 연구과제명 밀폐공간 형상 및 내부 공기 조성에 따른 필요 환기량에 관한 연구

1. 연구배경 및 목표

밀폐공간 내 질식재해는 발생할 경우 2명 중 1명이 사망할 정도로 사망 위험성이 높은 재해유형이다. 현재 산업안전보건기준에 관한 규칙에 따르면 작업장 내 밀폐공간이 있는 경우 사업주는 밀폐공간 작업프로그램을 실시해야 하며, 밀폐공간 작업프로그램의 방법에 대해서는 밀폐공간 작업 프로그램 수립 및 시행에 관한 기술지침에 자세히 명시되어있다. 해당 지침에는 안전한 밀폐 공간 작업 수행을 위해 작업자가 작업 전, 밀폐공간 체적의 5배에 해당하는 환기량을 급기해야한다고 명시되어있다. 하지만 2020년 사고조사를 통해 일부 밀폐공간 형상은 적정공기 상태로 치환하기 위해 작업 전 밀폐공간 체적의 약 9~11배의 환기량이 필요한 것이 확인되었다.

본 연구에서는 밀폐공간 형상에 따라 안전한 작업을 위해 필요한 작업 전 필요 환기량을 시뮬레이션을 이용하여 분석하고자 한다. 특히, 필요 환기량에 영향을 미칠 수 있는 내부 공기 조성, 개구부 위치, 개구부 면적, 구조물 부피를 변수로 하여 검토를 수행하였다. 이를 통해, 각 변수에 따라 질식재해를 예방 하기 위해 필요한 적정 환기량을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

밀폐공간 형상에 따른 필요 환기량을 평가하기 위해 먼저 최근 10년간 발생한 질식 중대재해를 분석하였다. 질식 중대재해 분석을 통해 재해가 주로 발생하는 장소와 화학종을 확인하였고 전문가 자문을 통해 수치계산 조건을 세부적으로 선정하였다.

선정한 수치계산 조건에서 밀폐공간 형상은 크게 육면체와 원기둥 형상이며 내부 공기 조성은 일산화탄소(CO)와 황화수소(H₂S)이다. 그리고 밀폐공간 형상은 가로(지름)와 높이의 길이에 따라 각각 3종류로 구분하였고 각 형상에 대해 개구부 위치 및 면적, 구조물 부피에 따른 필요 환기량을 검토하였다.

수치계산은 NIST에서 개발한 Fire dynamics simulator(FDS)가 사용되었고 격자 민감도 테스트를 통해 격자크기는 0.1 m로 하여 계산을 수행하였다.

3. 연구결과

○ 육면체 형상의 구조물 내 필요 환기량 평가 결과

먼저 내부 공기 조성의 비중에 관계없이 필요 환기량은 거의 유사한 것으로 확인하였다. 그리고 개구부 위치에 따른 필요 환기량은 구조물 형상별로 영향이 차이가 있었고 높이가 긴 Hw 형상이 가장 영향을 많이 받는 것으로 확인하였다. 다음으로 개구부 면적에 따라 필요 환기량은 선형적으로 감소하는 것으로 확인하였고 구조물 부피는 계산의 정확도를 높이기 위해 추가적인 격자 민감도 테스트가 필요하다. 마지막으로 필요 환기 횟수는 개구부 면적이 구조물 천장 단면적의 76.6% 이상인 경우에만 기술지침에서 제안한 환기 횟수를 만족하며 그 외의 조건은 약 8회 이상으로 확인하였다.

○ 원기둥 형상의 구조물 내 필요 환기량 평가 결과

본 연구에서 사용한 수치계산 코드인 FDS는 직교 좌표계를 기반으로 해석 하기 때문에 원기둥 형상의 구조물을 직선으로 세분화하여 모델링하고 수치 계산을 수행하였다. 수치계산 결과를 통해 곡선을 직선으로 세분화함에 따라 생긴 부분으로 인해 유동이 정체되는 구간이 있었다. 이는 실제 원기둥 형상 에서의 환기와 차이가 있다. 또한 육면체 형상과 동일한 조건임에도 필요 환기 횟수가 약 100회가 차이가 났다. 따라서 본 연구에서 사용한 수치계산 코드의 한계로 원기둥 형상에 대한 필요 환기량 평가는 어렵고 추후 원통 좌표계 해석이 가능한 수치계산 코드를 이용하여 추가적인 연구가 필요하다.

4. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구부 대리 백빛나
 - ☎ 052) 7030. 853
 - E-mail bitna93@kosha.or.kr

목 차

Ι.	서 론	··· 1
1.	연구배경 및 목적	3
2.	연구동향	8
3.	연구범위 및 방법	·· 10
	1) 문헌조사 및 전문가 자문	·· 10
	2) 시뮬레이션 수행	·· 10
	3) 시뮬레이션 결과 정리 및 분석	10
Π.	시뮬레이션 조건 및 방법	•11
Ⅱ. 1.	시뮬레이션 조건 및 방법 ······	• 11 ••13
Ⅱ. 1.	시뮬레이션 조건 및 방법 ···································	• 11 •• 13 •• 13
Ⅱ. 1.	시뮬레이션 조건 및 방법 시뮬레이션 조건 선정 1) 질식 중대재해 분석(2011년-2020년) 2) 전문가 자문 및 시뮬레이션 조건 선정	• 11 •• 13 •• 13 •• 15
Ⅱ. 1. 2.	시뮬레이션 조건 및 방법 시뮬레이션 조건 선정 1) 질식 중대재해 분석(2011년-2020년) 2) 전문가 자문 및 시뮬레이션 조건 선정 시뮬레이션 지배방정식	• 11 13 13 15 23
Ⅱ. 1. 2.	시뮬레이션 조건 및 방법 시뮬레이션 조건 선정 1) 질식 중대재해 분석(2011년-2020년) 2) 전문가 자문 및 시뮬레이션 조건 선정 시뮬레이션 지배방정식 1) 질량 보존 방정식(Conservation of mass equation)	• 11 13 13 15 23 23
Ⅱ. 1. 2.	시뮬레이션 조건 및 방법 시뮬레이션 조건 선정 1) 질식 중대재해 분석(2011년-2020년) 2) 전문가 자문 및 시뮬레이션 조건 선정 시뮬레이션 지배방정식 1) 질량 보존 방정식(Conservation of mass equation) 2) 화학종 α의 보존 방정식(Conservation of species equation)	• 11 • 13 • 13 • 15 • 23 • 23 • 24
Ⅱ. 1. 2.	시뮬레이션 조건 및 방법 시뮬레이션 조건 선정 1) 질식 중대재해 분석(2011년-2020년) 2) 전문가 자문 및 시뮬레이션 조건 선정 시뮬레이션 지배방정식 1) 질량 보존 방정식(Conservation of mass equation) 2) 화학종 α의 보존 방정식(Conservation of species equation) 3) 에너지 보존 방정식(Conservation of energy equation)	• 11 • 13 • 13 • 15 • 23 • 23 • 24 • 24
II. 1. 2.	시뮬레이션 조건 및 방법 1) 질식 중대재해 분석(2011년-2020년) 2) 전문가 자문 및 시뮬레이션 조건 선정 시뮬레이션 지배방정식 1) 질량 보존 방정식(Conservation of mass equation) 2) 화학종 α의 보존 방정식(Conservation of species equation) 3) 에너지 보존 방정식(Conservation of energy equation) 4) 모멘템 보존 방정식(Conservation of momentum equation)	• 11 • 13 • 13 • 15 • 23 • 23 • 24 • 24 • 24

목 차

3. 시뮬레이션 계산영역 및 방법	25
Ⅲ. 시뮬레이션 결과	29
1. 육면체 형상의 구조물 내 필요 환기량 계산 결과	31
1) 내부 공기 조성 ···································	·31 ·39
3) 개구부 면석 4) 구조물 부피	· 45 · 54
2. 원기둥 형상의 구조물 내 필요 환기량 계산 결과	57
Ⅳ. 결론 ······	61
참고문헌	65
Abstract	67

표 목차

⟨⊞	-1>	산업안전보건기준에 관한 규칙 별표18의 밀폐공간	5
⟨⊞	-2>	밀폐공간 내 질식재해건수 및 재해자수(2010년~2019년)	6
⟨⊞	-1>	질식재해 발생 장소별 화학종 분석 결과(2011년~2020년)	14
⟨⊞	-2>	시뮬레이션 기본 조건	18
⟨⊞	-3>	공기조성에 관한 시뮬레이션 조건	19
⟨⊞	$ -4\rangle$	개구부 위치에 관한 시뮬레이션 조건	20
⟨⊞	-5>	개구부 면적에 관한 시뮬레이션 조건	21
⟨⊞	-6>	구조물 부피에 관한 시뮬레이션 조건	22
⟨⊞	-7>	구조물 크기별 계산영역 및 총 격자 개수	27
⟨⊞	∭-1>	공기조성에 관한 시뮬레이션 결과	38
⟨⊞	−2>	개구부 위치에 따른 시뮬레이션 결과	44
⟨표	∭-3>	개구부 면적에 따른 시뮬레이션 결과	53
⟨표	∭-4>	구조물 부피에 따른 시뮬레이션 결과	56
⟨⊞	∭-5>	원기둥 형상에 대한 시뮬레이션 결과	58

vii 🦳

그림목차

[그림	ㅣ−1] 밀폐공간 작업절차	7
[그림 [그림	Ⅱ-1] 개구부 위치 개략도(천장 단면도) ······ Ⅱ-2] 덕트 삽입 방법에 따른 급기 방향 및 구조물 형상 ·····	· 17 · 17
[그림	Ⅱ-3] 가로(지름)와 높이가 동일한 기본 조건 계산영역 및 구조물 크기	·26
[그림	Ⅱ-4] 격자 크기에 따른 구조물 내 평균 산소농도 변화(육면체, WH)	·26
[그림	Ⅲ-1] 구조물 형상별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화	· 32
[그림	Ⅲ-2] 내부 공기 조성에 따른 개구부 근처에서의 산소 농도의 유동 변화	
	(육면체, WH)	·34
[그림	Ⅲ-3] 내부 공기 조성별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화	·35
[그림	Ⅲ-4] 구조물 형상에 따른 산소 농도의 유동 변화 (CO)	·37
[그림	Ⅲ-5] 구조물 형상별 개구부 위치 개략도 (천장 단면도)	.39
[그림	Ⅲ-6] 개구부 위치별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화	·40
[그림	Ⅲ-7] 구조물 형상별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화	·42
[그림	Ⅲ-8] 구조물 형상별 개구부 위치에 따른 환기 완료 시간	•43
[그림	Ⅲ-9] 개구부 길이별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화	·45
[그림	Ⅲ-10] 구조물 형상별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화	•46
[그림	Ⅲ-11] 구조물 형상별 CO 농도 변화율	· 48
[그림	Ⅲ-12] 개구부 길이별 CO 농도 변화율	·49
[그림	Ⅲ-13] 개구부 면적에 따른 산소 농도의 유동 변화 (WH)	· 50
[그림	Ⅲ-14] 구조물 형상별 개구부 면적에 따른 환기 완료 시간	· 52
[그림	Ⅲ-15] 개구부 면적에 따른 환기 완료 시간 (WH)	· 52



I. 서 론

1. 연구배경 및 목적

산업안전보건기준에 관한 규칙 제618조 제1항에 따르면 밀폐공간이란 산소결핍, 유해가스로 인한 질식·화재·폭발 등의 위험이 있는 장소로서 별표 18에서 정한 장소로 정의된다. 여기서 별표 18에서 정한 장소는 〈표 I-1〉과 같다.

〈표 I-2〉는 2010년부터 2019년까지 밀폐공간에서 발생한 질식재해건수 및 재해자수를 정리한 것이다. 〈표 I-2〉를 통해 밀폐공간에서의 질식재해가 매년 꾸준히 발생되는 것을 알 수 있다(안전보건공단, 2020). 특히 사망자수가 전체 질식재해자의 53.2%에 해당하는 것으로 확인된다. 즉, 밀폐공간 내 질식 재해자가 발생할 경우 2명 중 1명은 사망한다는 것을 의미하며 밀폐공간 내 질식재해가 사망위험성이 높다는 것을 나타낸다. 그리고 중대재해 처벌 등에 관한 법률 시행령 별표 1에서 정의하는 직업성 질병에 공기 중 산소농도가 부족한 장소에서 발생한 산소결핍증을 포함되었다. 따라서 밀폐공간 내 질식 재해를 예방하기 위한 정량적이고 정확한 대안이 선제적으로 필요하다.

현재 산업안전보건기준에 관한 규칙 제619조에 의하면 밀폐공간에서 작업을 수행하는 경우 밀폐공간 작업프로그램을 수립 및 시행해야한다. 밀폐공간 작업프로그램에 관해서는 밀폐공간 작업 프로그램 수립 및 시행에 관한 기술 지침(H-80-2018)에 밀폐공간 프로그램 수립, 추진 절차와 함께 밀폐공간 작업 절차 등 상세히 설명되어 있다(안전보건공단, 2018). 여기서 밀폐공간 작업 절차는 [그림 I-1]과 같고 적정 공기 수준을 유지하기 위한 필요 환기량은 작업 전 밀폐공간 체적 5배, 작업 중 시간 당 교환 횟수 20회 이상으로 명시 되어있다. 이와 같이 밀폐공간 내 안전한 작업을 위한 방법에 관해 상세히 제안되어 있고 또한 이 외에도 밀폐공간 질식 예방 장비 지원 등 질식재해를

3

예방하기 위한 다양한 노력이 수행되고 있다.

하지만 2020년에 수행된 사고조사를 통해, 일부 밀폐공간 형상에서는 밀폐 공간 내 적정공기 상태를 유지하기 위해 작업 전 밀폐공간 체적의 약 9~11배 환기량이 필요한 것으로 확인하였다. 또한 사고현장의 상황을 반영한 CFD 분석 결과에서도 적정공기 농도로 치환하기 위해서는 작업 전 밀폐공간 체적의 약 10배에 해당하는 환기량이 필요함이 확인되었다. 즉, 사고가 발생한 밀폐 공간 형상은 기술지침에서 제안한 작업 전 필요 환기량보다 많은 환기가 필요 하다는 것이며 밀폐공간 형상에 따른 작업 전 필요 환기량에 대한 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 CFD를 이용하여 밀폐공간 작업 전 필요 환기량을 밀폐공간 형상에 따라 검토하고자 한다.

〈표 Ⅰ-1〉 산업안전보건기준에 관한 규칙 별표18의 밀폐공간

밀폐공간 항목

- 1. 다음의 지층에 접하거나 통하는 우물·수직갱·터널·잠함·피트 또는 그밖에 이와 유사한 것의 내부
- 1) 상층에 물이 통과하지 않는 지층이 있는 역암층 중 함수 또는 용수가 없거나 적은 부분
- 2) 제1철 염류 또는 제1망간 염류를 함유하는 지층
- 3) 메탄·에탄 또는 부탄을 함유하는 지층
- 4) 탄산수를 용출하고 있거나 용출할 우려가 있는 지층
- 2. 장기간 사용하지 않은 우물 등의 내부
- 3. 케이블·가스관 도는 지하에 부설되어 있는 매설물을 수용하기 위하여 지하에 부설한 암거·맨홀 또는 피트의 내부
- 4. 빗물·하천의 유수 또는 용수가 있거나 통·암거·맨홀 또는 피트의 내부
- 5. 바닷물이 있거나 있었던 열교환기·관·암거·맨홀·둑 또는 피트의 내부
- 6. 장기간 밀폐된 강재(鋼材)의 보일러·탱크·반응탑이나 그 밖에 그 내벽이 산화하기 쉬운 시설 (그 내벽이 스테인리스강으로 된 것 또는 그 내벽의 산화를 방지하기 위하여 필요한 조치가 되어 있는 것은 제외한다)의 내부
- 7. 석탄·아탄·황화광·강재·원목·건성유(乾性油)·어유(魚油) 또는 그 밖의 공기 중의 산소를 흡수 하는 물질이 들어 있는 탱크 또는 호퍼(hopper) 등의 저장시설이나 선창의 내부
- 8. 천장·바닥 또는 벽이 건성유를 함유하는 페인트로 도장되어 그 페인트가 건조되기 전에 밀폐된 지하실·창고 또는 탱크 등 통풍이 불충분한 시설의 내부
- 9. 곡물 또는 사료의 저장죵 창고 또는 피트의 내부, 과일의 숙성용 창고 또는 피트의 내부, 종자의 발아용 창고 또는 피트의 내부, 버섯류의 재배를 위하여 사용하고 있는 사일로(silo), 그 밖에 곡물 또는 사료종자를 적재한 선창의 내부
- 10. 간장·주류·효모 그 밖에 발효하는 물품이 들어 있거나 들어 있었던 탱크·창고 또는 양조주의 내부
- 11. 분뇨, 오염된 흙, 썩은 물, 폐수, 오수, 그 밖에 부패하거나 분해되기 쉬운 물질이 들어있는 정화조·침전조·집수조·탱크·암거·맨홀·관 또는 피트의 내부
- 12. 드라이아이스를 사용하는 냉장고·냉동고·냉동화물자동차 또는 냉동컨테이너의 내부
- 13. 헬륨·아르곤·질소·프레온·탄산가스 또는 그 밖의 불활성기체가 들어 있거나 있었던 보일러· 탱크 또는 반응탑 등 시설의 내부
- 14. 산소농도가 18퍼센트 미만 또는 23.5퍼센트 이상, 탄산가스농도가 1.5퍼센트 이상, 일산화 탄소농도가 30피피엠 이상 또는 황화수소농도가 10피피엠 이상인 장소의 내부
- 15. 갈탄·목탄·연탄난로를 사용하는 콘크리트 양생장소(養生場所) 및 가설숙소 내부
- 16. 화학물질이 들어있던 반응기 및 탱크의 내부

17. 유해가스가 들어있던 배관이나 집진기의 내부

18. 근로자가 상주(常住)하지 않는 공간으로서 출입이 제한되어 있는 장소의 내부

연도	발생건수	부상자수	사망자수
2010년	12	9	12
2011년	17	15	14
2012년	26	15	20
2013년	28	24	31
2014년	27	25	16
2015년	19	11	14
 2016년	19	19	14
 2017년	14	5	18
2018년	15	12	14
2019년	16	11	13
합계	193	146	166

〈표 I-2〉 밀폐공간 내 질식재해건수 및 재해자수(2010년~2019년)



[그림 I-1] 밀폐공간 작업절차

I. 서론

2. 연구동향

밀폐공간 내 필요 환기량에 관한 연구는 크게 실험과 시뮬레이션을 이용하여 수행되어오고 있다.

먼저 밀폐공간이 정육면체 형상과 직육면체 형상일 때의 환기특성에 대해 실험적으로 연구를 수행하였다. 실험을 통해 밀폐공간 형상에 관계없이 급기 방법이 배기보다 더 효과적으로 환기가 가능함을 확인하였다. 또한 직육면체 형상은 정육면체 형상보다 환기가 완료되는 시간이 지연되고 가로로 긴 형상이 더 많은 환기시간을 요구하는 것을 확인하였다(R.P. Garrison 외, 1989; R.P. Garrison 외, 1989).

그리고 Garrion와 Erig은 실험을 통해 비중이 1보다 큰 CO₂, HC₂₂, SF₆에 대한 환기특성을 확인하였다. 실험조건은 구획실 크기, 환기방법, 환기량, 덕트 삽입 길이, 내부 조성으로 선정하여 연구를 수행하였다. 연구 결과, 급기방법이 배기보다 더 효율적으로 환기되며 내부 화학종 조성의 비중에 따라 구획실 내 O₂ 농도의 변화가 다소 차이가 있음을 확인하였다. 그리고 구획실 형상이 달라질 경우 환기 특성이 달라질 것이라고 확인하였다(R.P. Garrison 외, 1991).

다음으로 Zhao 등은 환기팬 위치 및 천장 개방 여부를 조건으로 하여 실험과 수치계산을 수행하였다. 연구를 통해 환기팬 위치에 따라 구획실 내 유해가스 유동 특성이 달라지는 것을 확인하였다. 또한 실험결과와 수치계산 결과의 비교를 통해 시뮬레이션을 이용할 경우 충분히 밀폐공간 내 환기특성을 확인할 수 있음을 확인한 바 있다(J. Zhao 외, 2007).

그리고 Quan 등은 원통형 밀폐공간에 대한 새로운 환기방법을 제안하고 실험과 수치계산을 이용하여 검토한 바 있다. Quan 등이 제안한 환기방법은 밀폐공간 내 환기유동을 소용돌이로 형성하도록 하는 것이다. 연구결과를 통해 환기유동이 소용돌이인 경우가 매우 효과적으로 내부 유해가스를 제거할 수 있음을 확인하였다. 하지만 아직까지 해당 방법을 적용하기에는 현실적인 어려움이 있음을 함께 시사한 바 있다(M. Quan 외, 2021).

김태형 등은 환기방법에 대해 시뮬레이션을 이용하여 검토한 바 있다. 검토한 환기방법은 입구 측, 내부 공간, 작업자 근처 환기방법으로 각각 급기와 배기 방법을 적용하였다. 연구 결과를 통해 작업자 근처 급기 방법이 가장 효과적 으로 작업자 근처의 유해가스 농도를 감소시키는 것을 확인하였다(김태형 외, 2015).

하지만 작업자 근처 급기 방법은 폐수 등이 가득찬 작업 현장에서는 적용 하기가 어렵다는 한계가 있다. 그래서 시뮬레이션을 이용하여 작업자 근처 급기 방법과 내부 급기 방법에 대해 검토한 바 있으며 이때 내부 급기 방법에서 덕트 삽입 길이를 변수로 지정하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 덕트 삽입 길이에 관계없이 내부 급기 방법도 충분히 작업자 근처 급기 방법과 유사한 수준으로 구획실 내 O₂ 농도가 20.9%에 도달하는 것을 확인하였다(백빛나, 2021).

현재까지 위와 같이 밀폐공간 내 환기에 관한 많은 실험과 수치계산 연구가 수행되었지만 밀폐공간 형상변화에 따른 필요 환기량의 변화를 평가하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 내부 조성, 개구부 면적 등에 따른 필요 환기량의 변화에 대해 CFD를 활용하여 중점적으로 확인하고자 한다.

3. 연구범위 및 방법

본 연구의 범위는 최근 10년 동안 발생한 질식재해 분석을 통해 재해가 가장 많이 발생하는 밀폐공간 형상 및 유해물질을 시뮬레이션의 조건으로 선정하고 밀폐공간 형상, 내부 화학종 조성 등에 따른 필요 환기량을 시뮬레이션을 통해 정량적으로 검토 및 제안하는 것이다. 자세한 연구방법은 아래와 같다.

1) 문헌조사 및 전문가 자문

최근 10년 동안 작성된 질식재해에 대한 중대재해 의견서를 분석하여 재해가 다발하는 장소유형 및 유해물질을 확인하였다. 그리고 재해분석 결과에 관한 전문가 자문을 통해 시뮬레이션 조건을 선정하였다.

2) 시뮬레이션 수행

문헌조사와 전문가 자문을 통해 선정된 시뮬레이션 조건에 대해 수치계산을 수행하였다. 그리고 수치계산 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 가장 기본적인 조건에 대해 격자 민감도 테스트를 수행하였다. 다음으로 격자 민감도 테스트를 통해 선정된 격자크기를 적용하여 밀폐공간의 형상, 내부 공기 조성 등 시뮬 레이션 조건에 대해 계산을 수행하였다.

3) 시뮬레이션 결과 정리 및 분석

시뮬레이션 결과를 정리하여 밀폐공간의 형상, 내부 공기 조성 등 변수에 따른 필요 환기량을 분석하였다. 그리고 각 변수에 따른 환기 특성에 대해서도 함께 분석을 수행하였다.

Ⅱ. 시뮬레이션 조건 및 방법

• • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • •

Ⅱ. 시뮬레이션 조건 및 방법

1. 시뮬레이션 조건 선정

1) 질식 중대재해 분석(2011년-2020년)

시뮬레이션 조건을 선정하기 위해 최근 10년 동안 발생한 질식 중대재해를 분석하여 〈표 Ⅱ-1〉과 같이 재해가 많이 발생하는 장소와 화학종을 확인하였다. 여기서 재해 발생 장소는 기존 연구에서 구분한 질식 재해 발생 장소를 참고 하였다(김태형 외, 2015).

〈표 II-1〉을 통해 질식재해 발생 장소는 '부패 쉬운 물질용 정화조/침전조 /집수조/탱크/암거/맨홀/판/피트', '갈탄/목탄/연탄을 이용한 콘크리트 양생 장소 및 가설숙소 내부', '유해가스가 들어있던 배관/집진기 내부' 순으로 재해가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 여기서 부패 쉬운 물질용 정화조 등은 육면체 형상이고 유해가스가 들어있던 배관/집진기 내부는 원기둥 형상으로 주로 확인되었다. 그리고 갈탄 등을 이용한 콘크리트 양생장소는 특정 형상의 구조 물로 확인하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 '부패 쉬운 물질용 정화조/침 전조/집수조/탱크/암거/맨홀/판/피트'와 '유해가스가 들어있던 배관/집진기 내부'에 대해 연구를 수행하였다.

다음으로 화학종의 경우 특정 화학종을 알 수 없는 산소결핍을 제외하면 '일산화탄소', '황화수소', '질소', '아르곤' 순으로 재해가 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

	합계	4	-	2	m	10	2	പ	2	25	-	11	17	∞	14	-	4	2	112
	기타									-		-		~	7		2	~	0
	아르곤			~								2			9				σ
	湿수	-										8							10
^화 학중	산소결핍	2	~	, -		10		с	, -	വ			Ļ	9	2				37
	황화수소				2		1		1	18				1			1		10
	일산화탄소	-			<i>~</i>		~	2					16		с	~	, -	, -	77
	세액 관정 정수	지하매설물 수용 위한 암거/맨홀/피트	유수/용수용 통/암거/맨홀/피트	해수용 열교환기/관/암거/맨홀/피트	장기간 밀폐된 내부 산화가 쉬운 보일러/탱크/반응탑	산소를 흡수하는 물질용 탱크/호퍼/선창 내부	도장 후 건조되기 전에 밀폐된 지하실/창고/탱크	곡물/사료/과일/종자/버섯류 사일로 및 선창 내부	간장/주류/효모 저장 탱크/창고	부패 쉬운 물질용 정화조/침전조/집수조/탱크/암거/맨홀/판/피트	드라이아이스 사용 냉장고/냉동고/냉동화물차/냉동컨테이너	헬륨/아르곤/질소/프레온/탄산가스/불활성기체용 보일러/탱크/반응탑	갈탄/목탄/연탄을 이용한 콘크리트 양생장소 및 가설숙소 내부	화학물질용 반응기 및 탱크 내부	유해가스가 들어있던 배관/집진기 내부	일산화탄소/이산화탄소 중독 및 질식	유해가스 중독	70	호난계

〈표 Ⅱ-1〉 질식재해 발생 장소별 화학종 분석 결과(2011년~2020년)

2) 전문가 자문 및 시뮬레이션 조건 선정

재해 분석 결과에 대해 전문가 자문을 수행하여 시뮬레이션 변수를 내부 공기 조성, 개구부 위치, 개구부 면적, 구조물 부피로 선정하였고 자세한 조건은 〈표 II-2〉~〈표 II-6〉에 정리하였다. 먼저〈표 II-2〉는 시뮬레이션 기본 조건을 정리한 것으로 구조물 형상은 크게 육면체와 원기둥이며 가로(지름) 길이와 높이에 따라 각각 3가지 형상으로 구분하였다. 여기서, 구형 형상의 밀폐공간 에서의 질식재해는 발생 비중이 육면체와 원기둥 형상보다 적고 전문가 자문을 통해 검토에서 제외하였다. 그리고 구조물 부피에 따라 필요 환기량이 영향을 받기 때문에 각 형상별 부피를 모두 64 m³으로 동일하게 지정하였다. 다음으로 구조물 형상에 관계없이 개구부 길이는 1.0 m, 개구부 위치는 ①번으로 하였다. 여기서 개구부는 모두 정사각형 형상이며 위치는 [그림 II-1]에서 확인할 수 있다. 마지막으로 공기조성의 기본 조건은 재해가 가장 많이 발생한 일산화탄소 (CO) 100%로 하였다. 본 연구에서는 〈표 II-2〉를 기준으로 다양한 변수에 대해 비교 분석을 수행하였다.

〈표 Ⅱ-3〉은 공기조성에 관한 시뮬레이션 조건을 정리한 것이다. 전문가 자문을 통해, 유해가스의 농도가 높지 않은 경우의 유효비중은 공기와 유사하기 때문에 물질의 비중에 관계없이 환기효율이 유사하다는 것을 확인하였다. 즉, 유해가스의 종류에 관계없이 환기특성이 유사할 것이라는 의미이다. 따라서 본 연구에서는 가장 많이 발생하고 비중의 차이가 있는 일산화탄소(CO)와 황화수소(H₂S)에 대해서만 검토를 수행하였다. 여기서 CO의 비중은 0.6, H₂S의 비중은 1.2다.

⟨표 II-4⟩는 개구부 위치에 관한 시뮬레이션 조건으로 육면체는 6개, 원기둥은 2개의 위치에 대해 계산을 수행하였다. 먼저 육면체의 경우 기본 조건인 구석
(①), 중앙(②), 세로 길이 측면의 중앙(③), 가로 길이 측면 중앙(⑤)과 함께 중앙과 가로 및 세로 길이 측면의 중앙의 중간 위치(④, ⑥)에 개구부를 지정 하였다. 여기서 구조물 형상이 가로 = 높이(WH)인 경우에는 가로와 세로 길이가 동일한 정사각형 형상이기 때문에 ③번 위치와 ⑤번 위치, ④번 위치와 ⑥번

위치가 각각 동일하다. 따라서 구조물 형상이 WH인 경우에는 개구부의 위치를 ①, ②, ③, ④번 위치에 대해서만 계산을 수행하였다. 그리고 원기둥의 경우 기본 조건인 중앙(①)과 측면(②)에 개구부를 위치하였다. 본 연구에서는 개구부 위치에 대한 계산 결과를 통해 동일한 개구부 면적이지만 위치에 따라 필요 환기량과 환기 특성이 어떻게 달라지는지를 비교 분석하였다.

⟨표 II-5⟩는 개구부 면적에 관한 시뮬레이션 조건을 정리한 것이다. 개구부의 면적은 개구부의 길이를 기본 개구부 길이 조건의 1.5배와 2.0배로 하였다.
그 결과 개구부 길이가 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m인 조건에 대해 계산을 수행하여 동일한 구조물 부피, 개구부 위치이지만 개구부 면적에 따른 필요 환기량을 확인하였다.

⟨표 Ⅱ-6⟩은 구조물 부피에 관한 시뮬레이션 조건을 정리한 것이다. 시뮬 레이션 기본 조건의 구조물 부피는 64 m³이며 이 외에 구조물 부피를 27 m³,
216 m³으로 각각 감소 및 증가하여 계산을 수행하였다. 이러한 계산을 통해 동일한 개구부 면적과 위치이지만 구조물 부피가 증가함으로써 달라지는 필요 환기량을 검토하였다.

다음으로 환기량은 안전보건공단에서 사업장에 제공하고 있는 환기팬의 용량인 36 m³/min을 이용하였으며 이 때, 환기 효율을 55%로 감안하여 시뮬레이션을 수행하였다.

마지막으로 환기방법은 실제 현장에서 작업자들이 사용하기 쉬운 개구부에서 수직방향으로 급기하는 방법(내부 급기 방법)을 적용하여 계산을 수행하였다. 여기서 개구부로부터의 덕트 삽입 길이는 구조물 높이의 50%로 하였으며 기존 연구를 통해 덕트 삽입 길이에 따른 환기시간은 큰 차이가 없음이 확인 되었다(백빛나, 2021).

Ⅱ. 시뮬레이션 조건 및 방법



[그림 Ⅱ-1] 개구부 위치 개략도(천장 단면도)



[그림 Ⅱ-2] 덕트 삽입 방법에 따른 급기 방향 및 구조물 형상

	부 내부 공기 조성 (100%)		일산화탄소 (CO)			일산화탄소 (CO)	
	개구 ^년 위츠		$\overline{\bigcirc}$			$\overline{\bigcirc}$	
	개구부 길이		1.0 m			1.0 m	
〈표 Ⅱ-2〉 시뮬레이션 기본 조건	구조물 크기 (가로×세로×높이=부피 / 3.14×반지름 ² ×높이=부피)	4 m × 4 m × 4 m = 64 m ³	2 m × 4 m × 8 m = 64 m ³	8 m × 4 m × 2 m = 64 m ³	$4.3 \text{ m} \times 4.4 \text{ m} = 63.9 \text{ m}^3$	$3.5 \text{ m} \times 6.7 \text{ m} = 64.4 \text{ m}^3$	$5.4 \text{ m} \times 2.8 \text{ m} = 64.1 \text{ m}^3$
	조물 형상	가로 = 높이 (WH)	가로 〈 높이 (H _W)	가로 〉높이 (W)	지름 = 높이 (RH)	지름 〈 높이 (H _R)	지름 〉높이 (R)
	цĻ		유면체			원기동	

Ķ Π-2) 시뮬레이션 기보

개구부 길이			{ { {	E 0.					{ { {	E D.		
개구부 위치			()					()		
내부 공기 조성 (100%)	일산화탄소(CO)	황화수소(H ₂ S)	일산화탄소(CO)	황화수소(H ₂ S)	일산화탄소(CO)	황화수소(H ₂ S)	일산화탄소(CO)	황화수소(H ₂ S)	일산화탄소(CO)	황화수소(H ₂ S)	일산화탄소(CO)	황화수소(H ₂ S)
구조물 크기 (가로×세로×높이=부피 / 3.14×반지름 ² ×높이=부피)	1	4 III × 4 III × 4 III - 04 III	2	Z X 4 X 0 - 04 Z	0 5 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7 5 7	0		4.0 III × 4.4 III = 00.0 III	опе 1 61 - 51 - 53 2 6 - 61 - 53 2 6 - 53 2 7 - 55 2 7 -	0.0 III × 0.7 III - 04.4 III	E 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	0.4 111 × 7.0 111 - 04.1 111
조물 형상	기로 = 높이	(H/N)	가로 〈 높이	(MM)	가로 〉 높이	(\/\)	지름 = 높이	(RH)	지름 〈 높이	(H _R)	지름 〉높이	(R)
Γ Γ΄			년 년 0	파 디 신						년 어		

〈표 II-3〉 공기조성에 관한 시뮬레이션 조건

19

Ⅱ. 시뮬레이션 조건 및 방법

		(표 표 4) '테니커 귀시에 다다 시골네이다			
Η̈́.	조물 형상	구조물 크기 (가로×세로×높이=부피 / 3.14×반지름 ² ×높이=부피)	개구부 위치	개구부 길이	내부 공기 조성 (100%)
	기로 = 높이 (HW)	4 m × 4 m × 4 m = 64 m ³	(1), (2), (3(5), (4)(6)		
유면체	가로 〈 높이 (H _W)	2 m × 4 m × 8 m = 64 m ³	(1), (2), (3), (4), (5), (6), (4),	1.0 m	일산화탄소 (CO)
	가로 〉높이 (W)	8 m × 4 m × 2 m = 64 m ³	(1), (2), (3), (4), (5), (6), (4),		
	지름 = 높이 (RH)	4.3 m × 4.4 m = 63.9 m ³	Ĵ, Ĵ		
원기둥	지름 〈 높이 (H _R)	3.5 m × 6.7 m = 64.4 m ³	Ĵ, Ĵ	1.0 m	일산화탄소 (CO)
	지름 〉 높이 (R)	$5.4 \text{ m} \times 2.8 \text{ m} = 64.1 \text{ m}^3$	<u>(</u>), (

(표 II-4) 개구부 위치에 관한 시뮬레이션 조건

Г Г	조물 형상	구조물 크기 (가로×세로×높이=부피 / 3.14×반지름 ² ×높이=부피)	개구부 길이	개구부 위치	내부 공기 조성 (100%)
	- - 1		1.0 m		
	/년 = 높이	$4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 64 \text{ m}^3$	1.5 m		
			2.0 m		
			1.0 m		
육면체	/년 〈 높이	$2 m \times 4 m \times 8 m = 64 m^3$	1.5 m	\bigcirc	일산화탄소(CO)
			2.0 m		
			1.0 m		
	/년 / 표이	$8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 64 \text{ m}^3$	1.5 m		
			2.0 m		
			1.0 m		
	시듬 = 높이 (RH)	$4.3 \text{ m} \times 4.4 \text{ m} = 63.9 \text{ m}^3$	1.5 m		
			2.0 m		
			1.0 m		
원기둥	시듬 < 퓨이 (H _n)	$3.5 \text{ m} \times 6.7 \text{ m} = 64.4 \text{ m}^3$	1.5 m	\bigcirc	일산화탄소(CO)
			2.0 m		
	L L L L L L L		1.0 m		
	시듬 / 픞이 (R)	$5.4 \text{ m} \times 2.8 \text{ m} = 64.1 \text{ m}^3$	1.5 m		
			2.0 m		

〈표 Ⅱ-5〉개구부 면적에 관한 시뮬레이션 조건

21

Ⅱ. 시뮬레이션 조건 및 방법

	물 형상	구조물 크기 (가로×세로×높이=부피 / 3.14×반지름 ² ×높이=부피)	구조물 부피	개구부 길이	개구부 위치	내부 공기 조성 (100%)
	- - - -	3 m × 3 m × 3 m	27 m ³			
_	/H/V)	4 m × 4 m × 4 m	64 m ³			
_		6 m × 6 m × 6 m	216 m ³			
_		1 m × 3 m × 9 m	27 m ³			
육면체	가로 〈 높이	2 m × 4 m × 8 m	64 m ³	1.0 m	$\overline{\mathbf{r}}$	일산화탄소 (CO)
_		4 m × 6 m × 9 m	216 m ³			
_		9 m × 3 m × 1 m	27 m ³			
_	가로 〉 높이	8 m × 4 m × 2 m	64 m ³			
_		9 m × 6 m × 4 m	216 m ³			
	-	3.3 m × 3.2 m	27.4 m ³			
_	지름 = 높이 (RH)	4.3 m × 4.4 m	63.9 m ³			
_		6.5 m × 6.5 m	215.6 m ³			
_		2.6 m × 5.2 m	27.6 m ³			
원기둥	시름 〈 높이 (H _c)	3.5 m × 6.7 m	64.4 m ³	1.0 m	\bigcirc	일산화탄소 (CO)
_		5.2 m × 10.2 m	$216.5 m^{3}$			
_	-	4.0 m × 2.2 m	27.6 m ³			
_	시듬 > 높이 (R)	5.4 m × 2.8 m	64.1 m ³			
_		8.2 m × 4.1 m	$216.4 m^{3}$			

(표 II-6) 구조물 부피에 관한 시뮬레이션 조건

2. 시뮬레이션 지배방정식

본 연구에서는 다양한 변수에 따른 밀폐공간 내 필요 환기량을 검토하기 위해 시뮬레이션을 사용하였다. 사용된 시뮬레이션 코드는 미국 NIST에서 개발한 오픈 소스 코드인 Fire dynamics simulator v6.3.2(FDS v6.3.2)이다 (K. McGrattan 외, 2015; K. McGrattan 외, 2015). FDS는 전 세계적으로 화재뿐만 아니라 유동장 해석까지 다양한 분야의 해석에 사용되고 있으며 최근까지도 많은 연구진에 의해 예측성능이 검증되고 있다.

FDS에 사용되고 있는 지배방정식은 낮은 마하수 근사법(Low mach number approximation)이 적용되고 있어 마하수가 0.3 미만인 영역에 대해서만 해석이 가능하다는 한계가 있다. 본 연구에서는 음속 영역의 유동을 해석하지 않기 때문에 충분히 FDS를 적용할 수 있다. 그리고 난류해석기법은 대와동모사기법(Large eddy simulation, LES)을 적용하였기 때문에 공간에 대해 Fitering된 지배방정식이 계산에 사용되었다. 공간에 대해 Filtering된 지배방정식은 아래와 같으며 지배방정식의 물리량 위 Bar()는 시간 평균된 물리량, Tilda()는 질량 가중 평균된 물리량을 의미한다.

1) 질량 보존 방정식(Conservation of mass equation)

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho} \widetilde{u_i}) = 0$$

변수 ρ, u는 각각 밀도와 속도벡터를 의미한다. 그리고 좌변의 첫 번째 항은 시간에 대한 밀도 변화, 두 번째 항은 제어체적 내 질량 유출입을 각각 나타낸 것이다.

2) 화학종 α 의 보존 방정식(Conservation of species equation)

$$\frac{\partial \left(\overline{\rho} \, \widetilde{Y}_{\alpha} \right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\overline{\rho} \widetilde{u_{i}} \, \widetilde{Y}_{\alpha} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\overline{\rho u_{i}} \, Y_{\alpha} - \overline{\rho} \widetilde{u_{i}} \, \widetilde{Y}_{\alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\overline{\rho} \, \overline{D_{\alpha}} \, \frac{\partial \, \widetilde{Y}_{\alpha}}{\partial x_{i}} \right) + \frac{\overline{m_{a}}''}{\overline{m_{a}}''}$$

 $Y_{\alpha}, D_{\alpha}, \dot{m}_{\alpha}^{'''}$ 는 각각 화학종 α 의 질량분율, 확산계수, 생성항을 의미한다.

3) 에너지 보존 방정식(Conservation of energy equation)

$$\frac{\partial \left(\overline{\rho}\widetilde{h_s}\right)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho}\widetilde{u_i}\widetilde{h_s}\right) = -\frac{D\overline{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \frac{\partial \dot{q}r''}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k\frac{\partial \widetilde{T}}{\partial x_i}\right) + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho}D_{\alpha}\widetilde{h_{s,\alpha}}\frac{\partial \widetilde{Y}_{\alpha}}{\partial x_i}\right) + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho}D_{\alpha}\widetilde{h_{s,\alpha}}\frac{\partial \widetilde{Y}_{\alpha}}\right) + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho}D_{\alpha}\widetilde{h_{s,\alpha}}\frac{\partial \widetilde{Y}_{\alpha}}{\partial x_i}\right) + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho}D_{\alpha}\widetilde{h_{s,\alpha}}\frac{\partial \widetilde{Y}_{\alpha}}\partial x_i\right) +$$

h_s, p, q^{'''}, q_r^{''}, T, k는 각각 엔탈피, 압력, 단위체적당 열발생률, 복사열유 속, 온도, 열전도도를 의미한다.

4) 모멘텀 보존 방정식(Conservation of momentum equation)

$$\frac{\partial (\widetilde{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\widetilde{\rho u_j u_i}) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} + \overline{\rho g_i}$$

τ_{ij}, *τ^{sgs}_{ij}*, *g_i*는 각각 점성응력텐서, 아격자 응력 텐서, *i*방향으로의 중력가속 도를 의미한다.

5) 상태방정식(Equation of state)

$$\rho = \left(\overline{p} \, \overline{W}\right) / (RT)$$

W, R는 각각 혼합기체의 분자량과 기체상수를 의미한다.
3. 시뮬레이션 계산영역 및 방법

재해 분석과 전문가 자문을 통해 선정한 시뮬레이션 조건을 계산하기 위해 [그림 II-3]과 같이 모델링을 수행하였다. [그림 II-3]은 가로(지름)와 높이가 동일한 기본 조건인 육면체와 원기둥 형상의 구조물을 모델링한 결과이다. 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 코드인 FDS는 직교 좌표계이기 때문에 원형 구조물을 모델링하기 위해선 [그림 II-3]의 (b)와 같이 곡선을 격자크기만큼 끊어서 표현해야한다. 이 때, 원기둥 내부의 부피와 바닥 면적, 지름은 조건과 동일하게 유지하여 모델링을 수행하였다.

다음으로 시뮬레이션에서는 적합한 격자 크기를 사용하여야만 정확도가 높은 결과가 계산되기 때문에 격자 크기에 대한 검토가 반드시 수행되어야 한다. 본 연구에서는 [그림 II-3]의 (a)의 계산영역과 구조물에 대해 격자 민감도 테스트를 수행하였고 사용된 격자 크기는 5 cm, 10 cm, 20 cm이다. [그림 II-4]는 격자 민감도 테스트 결과를 정리한 것으로 격자 크기에 따른 구조물 내부 평균 산소농도 변화를 도시한 것이다. [그림 II-4]를 통해 격자 크기에 관계없이 시간 변화에 따른 구조물 내부 평균 산소농도가 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 본 연구에서는 격자 크기를 10 cm로 선정하여 계산을 효율적으로 수행하였다.

〈표 Ⅱ-7〉은 구조물 크기별 계산영역과 사용된 총 격자 개수를 정리한 것이다.
계산영역은 각 구조물 길이에 2배로 하였으며 구조물은 계산영역의 중앙에 위치하도록 모델링하였다. 그리고 계산영역은 격자 크기를 10 cm로 하여 균일 격자계로 구성하였고 사용된 격자 개수는 최소 216,000개에서 최대 2,206,464개
이다. 물리적 계산시간은 97시간에서 최대 243시간이 소요되었다.



[그림 Ⅱ-3] 가로(지름)와 높이가 동일한 기본 조건 계산영역 및 구조물 크기



[그림 Ⅱ-4] 격자 크기에 따른 구조물 내 평균 산소농도 변화(육면체, WH)

		וני פדר		
	구조물 형상	· (가로×세로×높이=부피 / 3.14×반지름 ² ×높이=부피)	계산영역 (가로×세로×높이)	총 격자 개수
	-	3 m × 3 m × 3 m	6 m × 6 m × 6 m	216,0007
	가로 = 높이 (M/H)	4 m × 4 m × 4 m	8 m × 8 m × 8 m	512,0007H
		6 m × 6 m × 6 m	12 m × 12 m × 12 m	1,728,0007H
OĦ		1 m × 3 m × 9 m	2 m × 6 m × 18 m	216,0007H
- 묘기	가로 〈 높이	2 m × 4 m × 8 m	4 m × 8 m × 16 m	512,0007H
꾀		4 m × 6 m × 9 m	8 m × 12 m × 18 m	1,728,0007H
		9 m × 3 m × 1 m	18 m × 6 m × 2 m	216,0007H
	가로 > 높이	8 m × 4 m × 2 m	16 m × 8 m × 4 m	512,0007H
		9 m × 6 m × 4 m	18 m × 12 m × 8 m	1,728,0007
	- - 	3.3 m × 3.2 m	6.6 m × 6.6 m × 6.4 m	278,78471
	지름 = 높이 (RH)	4.3 m × 4.4 m	8.6 m × 8.6 m × 8.8 m	650,8487H
		6.5 m × 6.5 m	13.0 m × 13.0 m × 13.0 m	2,197,0007H
야.		2.6 m × 5.2 m	5.2 m × 5.2 m × 10.4 m	281,2167
7	지름 〈 높이 (H _o)	3.5 m × 6.7 m	7.0 m × 7.0 m × 13.4 m	656,6007H
ШЮ		5.2 m × 10.2 m	10.4 m × 10.4 m × 20.4 m	2,206,4647
		4.0 m × 2.2 m	8.0 m × 8.0 m × 4.4 m	281,6007H
	시듬 > 높이 (R)	5.4 m × 2.8 m	10.8 m × 10.8 m × 5.6 m	653,1847H
		8.2 m × 4.1 m	16.4 m × 16.4 m × 8.2 m	2,205,4727

⟨표 Ⅱ-7⟩ 구조물 크기별 계산영역 및 총 격자 개수

27

Ⅱ. 국가 간 산재통계 비교의 한계(문제점)

Ⅲ. 시뮬레이션 결과

• • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • • •</t

Ⅲ. 시뮬레이션 결과

1. 육면체 형상의 구조물 내 필요 환기량 계산 결과

1) 내부 공기 조성

[그림 III-1]은 동일한 구조물 형상일 때, 내부 공기 조성에 따른 평균 화학 종 농도 변화를 비교한 것이다. [그림 III-1]을 통해 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화는 내부 공기 조성에 따라 다소 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 먼저 WH의 경우 CO, H₂S에 관계없이 O₂와 N₂가 각각 유사하게 증가하고 CO와 H₂S가 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 H_w와 W의 경우, CO 조건이 H₂S 조건보다 더 빠르게 O₂, N₂가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 내부 공기 조성에 따른 차이는 W 형상이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통 해 동일한 체적, 개구부 크기, 환기량일 때 W 형상의 구조물은 다른 구조물 형상보다 비교적 초기 내부 공기 조성에 영향을 많이 받는다는 것으로 확인할 수 있다. 그리고 구조물 형상에 관계없이 비중이 1보다 큰 H₂S가 CO에 비해 농도 변화가 완만한 것을 볼 수 있는데 이러한 이유는 [그림 III-2]를 통해 확 인할 수 있다.



[그림 Ⅲ-1] 구조물 형상별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화

[그림 III-2]는 WH 형상일 때, 특정 시간에서의 O₂ 농도 분포에 대한 CO, H₂S 조건의 2D 결과를 정리한 것이다. 그림에서 표시된 화살표는 유동의 방향을 나타내는 것으로 화살표의 길이가 길수록 속도가 빠른 것을 의미한다. [그림 III-2]를 보면 내부 공기 조성의 비중이 1보다 작은 CO인 경우에는 빠른 속도로 개구부에서 상당히 높은 지점까지 CO가 유출되는 것을 알 수 있다. 하지만 내부 공기 조성이 H₂S인 경우에는 CO와 다르게 개구부 부근에서 느린 속도로 유출이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 개구부가 천장에 위치한 경우, 공기보다 비중이 무거운 가스는 개구부를 통한 유출이 비교적 어렵기 때문에 일정수준의 O₂ 농도에 도달하는데 비교적 시간이 많이 소요되는 것으로 확인할 수 있다.

다음으로 [그림 III-2]에서 CO와 H₂S의 유출 거동을 통해 비중이 1보다 작은 기체는 개구부 상부로 위험영역이 형성되고, 비중이 1보다 큰 기체는 구조물 천장 단면적을 따라 위험영역이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 개구부가 천장에 위치한 경우 환기작업 시, 내부 유해가스의 비중에 따라 위험영역이 달라지기 때문에 각 조건에 따른 안전작업방법을 강구해야한다.



(육면체, WH)

O₂ (mol/mol) 0.0 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.13 0.15 0.17 0.19 0.21

[그림 Ⅲ-3]은 동일한 초기 내부 조성일 때 구조물 형상에 따른 평균 화학종 농도 변화를 도시한 것이다.

먼저 내부 공기 조성이 CO인 경우, HW와 W형상의 평균 화학종 농도 변화는 서로 유사한 수준이며, WH 형상은 다른 형상보다 완만하게 CO가 감소하고 O2와 N2가 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 내부 공기 조성이 H2S인 경우의 초기에 평균 화학종 농도는 WH와 W 형상이 서로 유사하게 변화하며 HW 형상이 가장 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 약 400초 이후 W 형상이 HW와 유사한 수준으로 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 동일한 초기 내부 공기 조성, 구조물 체적, 개구부 크기, 환기량이라도 구조물 형상에 따라 평균 화학종 농도의 변화는 차이가 있고 내부 공기 조성에 관계없이 WH 형상이 가장 완만하게 CO, H2S 농도가 감소하는 것을 확인하였다.



[그림 Ⅲ-3] 내부 공기 조성별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화

[그림 III-4]는 내부 공기 조성이 CO인 조건일 때, 특정시간에서의 구조물 형상별 O₂ 농도의 유동을 정리한 것이다. 여기서 색상이 파란색에 가까울수록 O₂ 농도는 낮고 CO 농도가 높은 영역을 의미한다. [그림 III-4]를 통해 W(2초), WH(3초), Hw(4초) 순으로 유입된 O₂ 농도가 바닥면에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이후 Hw 형상은 5초, WH와 W는 6초에 구조물 옆면에 O₂ 농도가 도달하고 이후 옆면을 따라 위로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 위로 상승하는 O₂ 농도는 W 형상은 12초, WH 형상은 17초, Hw 형상은 29초에 천장에 도달하는 것을 볼 수 있다. 하지만 Hw 형상은 12초부터 구조물 옆면을 따라 O₂ 농도가 확산되어 29초에는 구조물 내 전체적으로 O₂ 농도가 확산된 것을 확인할 수 있다. 즉, 구조물 형상의 영향으로 Hw 형상이 다른 구조물 형상 보다 초기에 구조물 내부 CO 농도가 빠르게 감소한 것으로 볼 수 있다. 따라서 구조물 형상에 따른 구조물 내 유동의 변화로 인해 환기효율이 달라지고 Hw 형상이 비교적 빠르게 구조물 전체적으로 O₂ 농도가 확산하는 것을 알 수 있다.



O₂ (mol/mol) 0.0 0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.13 0.15 0.17 0.19 0.21

구조물 형상과 내부 공기 조성에 따른 정확한 환기 완료 시간과 필요 환기 횟수를 확인하기 위해 〈표 Ⅲ-1〉과 같이 시뮬레이션 결과를 정리하였다. 〈표 Ⅲ-1〉에서 환기 완료 시간은 구조물 내부 평균 O₂ 농도가 20.9%에 도달한 시점을 의미하며 필요 환기 횟수는 구조물 체적 대비 환기 완료 시간과 환기량을 곱하여 계산하였다. 〈표 Ⅲ-1〉을 통해 환기 완료 시간은 내부 공기 조성에 관계없이 ₩, H_W, ₩H 순으로 빠른 것을 확인할 수 있다. 또한 구조물 형상에 관계없이 내부 공기 조성이 CO인 조건이 H₂S 조건보다 빠르게 치환이 완료 되는 것으로 확인된다. 마지막으로 구조물 형상과 내부 공기 조성에 관계없이 필요 환기 횟수는 약 9회 ~ 10회로 확인된다.

이러한 결과들을 종합하여 구조물 형상과 내부 공기 조성에 따라 치환 완료 시간은 다소 차이가 있지만 해당 밀폐공간 형상 조건에서의 필요 환기 횟수는 모두 KOSHA GUIDE에서 제안한 구조물 체적의 5배보다 많은 약 9 ~ 10배로 확인된다.

구조물 형상	내부 공기 조성 (100%)	환기 완료 시간 (s)	필요 환기 횟수 (회)
가로 = 높이 (WH)	일산화탄소(CO)	1,089	10.2
	황화수소(H ₂ S)	1,096	10.3
가로 〈 높이 (H _W)	일산화탄소(CO)	1,034	9.7
	황화수소(H ₂ S)	1,055	9.9
가로 〉높이 (W)	일산화탄소(CO)	959	9.0
	황화수소(H ₂ S)	996	9.3

〈표 Ⅲ-1〉 공기조성에 관한 시뮬레이션 결과

2) 개구부 위치

[그림 Ⅲ-5]는 각 구조물 형상일 때 개구부 위치를 정리한 것이다. 여기서 WH 형상의 경우 가로와 세로의 길이가 동일하게 때문에 3번과 5번 위치, 4번과 6번의 위치가 각각 동일한 조건이다. 따라서 H_w와 W 형상의 5, 6번 위치에서의 결과를 WH 형상의 3, 4번의 위치와 각각 비교하였다.



[그림 Ⅲ-5] 구조물 형상별 개구부 위치 개략도 (천장 단면도)

[그림 III-6]은 동일한 개구부 위치에서의 구조물 형상별 평균 화학종 농도 결과를 정리한 것이다. [그림 III-6]을 통해 1번 위치의 경우 구조물 형상별 농도 변화의 차이가 크지 않지만 2, 3, 4, 5, 6번 위치의 경우 구조물 형상에 따른 농도 변화의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 또한 2, 3, 4, 5, 6번 위치에서 모두 H_W 형상이 가장 빠르게 CO 농도가 감소하고 O₂, N₂ 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 동일한 개구부 크기라도 구조물 형상과 개구부 위 치에 따른 환기효율은 달라짐을 알 수 있다.





[그림 Ⅲ-6] 개구부 위치별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화

[그림 Ⅲ-7]은 동일한 구조물 형상일 때 개구부 위치에 따른 평균 화학종 농도 변화 결과를 정리하였다. [그림 Ⅲ-7]에서 동일한 구조물 형상이라도 개구부 위치에 따라 평균 화학종 농도 변화의 차이가 있음을 볼 수 있다. 특히 Hw 형상이 가장 차이가 크다. 따라서 비교적 Hw 형상은 다른 형상보다 개구부 위치에 대한 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

각 구조물 형상별로 개구부 위치의 영향을 확인하였을 때, 먼저 WH 형상의 경우 개구부 위치에 따른 평균 화학종 농도 변화의 차이는 크지 않지만 1번이 가장 기울기가 완만하고 4번이 가장 기울기가 급격한 것을 확인할 수 있다. 따라서 정육면체 형상의 구조물이면서 천장에 개구부가 위치한 경우, 개구부를 4번에 위치하는 것이 비교적 효율적인 것을 알 수 있다.

다음으로 H_w 형상의 경우 2, 3, 4, 5, 6번 위치의 결과는 서로 유사하고 1번 위치보다 상당히 급격하게 CO 농도가 감소하고 O₂, N₂ 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 높이가 긴 형상의 구조물이면서 천장에 개구부가 위치하였을 때는 1번 위치를 제외한 곳에 개구부를 지정할 경우, 효율적으로 환기가 수행됨을 확인하였다.

마지막으로 W 형상의 경우 WH 형상과 동일하게 개구부 위치에 따른 평균 화학종 농도 변화의 차이가 크지 않다. 하지만 WH 형상의 경우 4번 위치에서 가장 빠르게 평균 화학종 농도가 변화하였지만 W 형상은 5번, 6번 위치에서 가장 완만하게 CO 농도가 감소하고 O₂, N₂ 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 가로로 긴 형상의 구조물인 경우 개구부 위치에 따른 환기 효율이 큰 차이가 없지만 5, 6번을 제외한 곳에 개구부를 위치시키는 것이 비교적 효율적인 것을 확인할 수 있다.



[그림 Ⅲ-7] 구조물 형상별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화

구조물 형상과 개구부 위치에 따른 정확한 필요 환기 횟수를 확인하기 위해 〈표 Ⅲ-2〉와 같이 시뮬레이션 결과를 정리하였다. 그리고 개구부 위치에 따른 환기 완료 시간을 비교하기 위해 [그림 Ⅲ-8]과 같이 개구부 위치에 따른 환기 완료 시간을 피팅하였다.

먼저 [그림 Ⅲ-8]을 통해 H_w 형상이 개구부 위치에 따라 환기 완료 시간의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 WH, H_w 형상은 1번 위치에서 가장 많은 환기 시간이 필요하지만 W 형상은 6번 위치일 때 가장 많은 환기 시간을 요구하는 것을 알 수 있다.

[그림 Ⅲ-8]과 〈표 Ⅲ-2〉를 통해 각 구조물 형상별 효율적인 개구부 위치는 WH 형상은 4번, H_W 형상은 5번, W 형상은 1번인 것을 확인할 수 있다. 특히, H_W 형상은 2, 3, 4, 5, 6번 위치일 경우 1번 위치보다 필요 환기 횟수가 약 2회가 감소할 정도로 효율적인 것을 알 수 있다. 그리고 다른 구조물 형상과 개구부 위치의 경우 필요 환기 횟수가 모두 약 9~10회로 검토한 조건은 기술 지침에서 제안하고 있는 구조물 체적의 5배보다 많은 것으로 확인된다.



[그림 Ⅲ-8] 구조물 형상별 개구부 위치에 따른 환기 완료 시간

구조물 형상	개구부 위치	환기 완료 시간 (s)	필요 환기 횟수 (회)	
가로 = 높이 (WH)	1	1,089	10.2	
	2	1,042	9.8	
	3	1,044	9.8	
	4	979	9.2	
	1	1,034	9.7	
	2	842	7.9	
가로 < 높이	3	830	7.8	
(H _W)	4	829	7.8	
	5	816	7.7	
	6	832	7.8	
가로 〉높이 (W)	1	959	9.0	
	2	1,011	9.5	
	3	962	9.0	
	4	1,011	9.5	
	5	1,063	10.0	
	6	1,085	10.2	

〈표 Ⅲ-2〉 개구부 위치에 따른 시뮬레이션 결과

3) 개구부 면적

개구부 면적에 따른 구조물 형상별 평균 화학종 농도 변화는 [그림 Ⅲ-9]와 같다. [그림 Ⅲ-9]에서 WH 형상이 개구부 면적에 관계없이 가장 완만하게 화학종 농도가 변화하고 H_W, W 형상은 서로 유사하게 변화하는 것을 볼 수 있다.

[그림 Ⅲ-10]은 구조물 형상이 동일할 때 개구부 면적에 따른 구조물 내 평균 화학종 농도 변화를 정리한 것이다. [그림 Ⅲ-10]에서 구조물 형상에 관계없이 개구부 길이가 2.0 m인 경우가 다른 개구부 길이와 평균 화학종 농도 변화의 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 특히 구조물 형상 중 H_w 형상이 가장 개구부 길이에 따른 평균 화학종 농도 변화의 차이가 크다.



[그림 Ⅲ-9] 개구부 길이별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화



[그림 Ⅲ-10] 구조물 형상별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화

본 연구에서는 구조물 형상과 개구부 면적에 따른 CO 농도의 변화율을 비교하기 위해 [그림 Ⅲ-11], [그림 Ⅲ-12]와 같이 시간에 따른 CO 농도의 변화율을 정리하였다. 여기서 CO 농도의 변화율(Var)은 아래의 수식을 통해 계산하였으며 시간 간격은 1초로 하였다.

$$Var = \frac{Y_{CO, t_i} - Y_{CO, t_{i-1}}}{Y_{CO, t_{i-1}}}$$

[그림 Ⅲ-11]은 구조물 형상별 개구부 면적에 따른 CO 농도 변화율을 정리한 것이다. 그래프를 통해 개구부 면적이 커질수록 변화율도 커지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 WH와 W 형상의 경우 개구부 면적에 따른 변화율 크기의 차이는 크지 않지만 H_W 형상은 개구부 길이에 따른 변화율이 상당히 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 H_W 형상이 가장 개구부 면적에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

[그림 Ⅲ-12]는 동일한 개구부 길이별 CO 농도 변화율을 나타낸 것이다. 개구부 길이에 관계없이 구조물 형상에 따라 일정한 추세가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 먼저 WH, W 형상은 초기 시점부터 일정한 변화율을 유지하고 변화율의 크기는 WH가 가장 작고 W 형상이 큰 것을 확인할 수 있다.

H_w 형상은 초기에는 변화율이 가장 크지만 점차 감소하다가 일정한 변화 율을 유지하는 경향이 확인된다. 일정한 변화율 구간에서의 변화율 크기는 개구부 길이 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 조건에서는 W 형상보다 낮고 개구부 길이 2.0 m 조건에서는 W 형상과 유사한 수준인 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 개구부 길이가 커짐에 따라 변화율의 진폭도 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유에 대해서는 [그림 Ⅲ-13]을 통해 설명하도록 하겠다.



[그림 Ⅲ-11] 구조물 형상별 CO 농도 변화율

Ⅲ. 시뮬레이션 결과



[그림 Ⅲ-12] 개구부 길이별 CO 농도 변화율

[그림 III-13]은 WH 형상에서 개구부 길이가 0.5 m, 2.0 m일 때의 O₂ 농도의 유동 변화를 나타낸 것이다. 개구부 부근에서의 유동을 보았을 때 개구부 길이가 0.5 m인 조건에서는 개구부를 통해 CO가 유출되는 유동만 확인된다. 하지만 개구부 길이가 2.0 m 조건에서는 개구부를 통해 O₂ 농도와 CO 농도의 유출입이 반복적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 개구부 면적이 커질수록 유입된 O₂ 농도가 다시 유출되고, 유출된 CO 농도가 다시 유입되기 때문에 변화량의 진폭이 커지는 것으로 확인할 수 있다.

49



[그림 Ⅲ-13] 개구부 면적에 따른 산소 농도의 유동 변화 (WH)

구조물 형상과 개구부 면적에 따른 환기 완료 시간을 [그림 Ⅲ-14]와 같이 정리하였다. [그림 Ⅲ-14]에서 개구부 길이가 2.0 m인 경우 다른 개구부 길이에 비해 급격하게 환기 완료 시간이 감소하는 것을 볼 수 있고 특히 Hw 형상이 가장 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 개구부 면적에 따른 환기 완료 시간의 변화 추세를 확인하기 위해 WH 형상에서 개구부 길이가 2.5 m, 3.0 m, 3.5 m, 4.0 m인 조건을 추가적으로 계산하였고 [그림 Ⅲ-15]에 결과를 정리하였다. 이 때, 개구부 길이가 4.0 m인 조건은 구조물 천장 단면적과 면적이 동일한 조건이다.

[그림 Ⅲ-15]는 개구부 면적에 따른 환기 완료 시간과 함께 선형 추세선을 피팅한 것이다. 여기서 선형 추세선의 R-Square 값은 0.971653이며 이를 통해 개구부 면적과 환기 완료 시간은 선형적인 관계임을 확인할 수 있다. 계산 시간의 한계로 다른 구조물 형상에 대한 검토는 수행하지 않았다. 하지만 기울기의 차이는 있겠지만 Hw, W 형상도 개구부 면적과 환기 완료 시간은 서로 선형관계를 가질 것으로 예측된다.

〈표 Ⅲ-3〉은 구조물 형상과 개구부 면적에 따른 정확한 필요 환기 횟수를 정리한 것이다. 구조물 형상에 관계없이 개구부 길이가 2.0 m일 때 환기 완료 시간이 급격히 감소한다. 특히 WH 형상에서 개구부 길이가 3.5 m, 4.0 m일 때는 KOSHA GUIDE에서 제안한 환기 횟수를 만족하는 것을 볼 수 있다. 여기서 개구부 길이가 3.5 m일 때 개구부의 면적은 구조물 천장 단면적의 약 76.6% 이다. 이러한 연구결과를 통해 필요 환기 횟수는 개구부 면적에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.



[그림 Ⅲ-14] 구조물 형상별 개구부 면적에 따른 환기 완료 시간



[그림 Ⅲ-15] 개구부 면적에 따른 환기 완료 시간 (WH)

구조물 형상	개구부 길이 (m)	환기 완료 시간 (s)	필요 환기 횟수 (회)	
가로 = 높이	0.5	1,083	10.2	
	1.0	1,089	10.2	
	1.5	1,092	10.2	
	2.0	1,033	9.7	
(WH)	2.5	859	8.1	
	3.0	651	6.1	
	3.5	396	3.7	
	4.0	183	1.7	
가로 〈 높이 (H _W)	0.5	1,043	9.8	
	1.0	1,034	9.7	
	1.5	1,002	9.4	
	2.0	900	8.4	
가로 〉높이 (W)	0.5	961	9.0	
	1.0	959	9.0	
	1.5	957	9.0	
	2.0	941	8.8	

〈표 Ⅲ-3〉 개구부 면적에 따른 시뮬레이션 결과

4) 구조물 부피

[그림 Ⅲ-16]은 구조물 형상에 따른 구조물 부피별 평균 화학종 농도 변화를 정리한 것이다. 여기서 구조물 부피별 환기 완료 시점의 차이가 있어 가로축의 스케일이 차이가 있다. [그림 Ⅲ-16]에서 구조물 부피에 관계없이 구조물 형상에 따라 평균 화학종 농도 변화는 차이가 있다. 특히 구조물 부피가 27 m³인 조건이 가장 차이가 크다.

〈표 Ⅲ-4〉는 구조물 부피와 형상에 따른 환기 완료 시점과 필요 환기 횟수를 정리한 것이다. 〈표 Ⅲ-4〉에서 구조물 형상에 따라 구조물 부피가 27 m³,
216 m³으로 동일할 때의 필요 환기 횟수는 서로 유사하지만 비교적 매우 높은 것을 볼 수 있다.

구조물 부피가 216 m³인 조건은 64 m³ 조건과 동일한 환기량을 적용하였기 때문에 필요 환기 횟수가 충분히 높을 수 있다. 하지만 기존 실험 연구 결과를 고려하였을 때 구조물 부피가 27 m³인 조건은 필요 환기 횟수가 낮아야 하지만 64 m³ 조건보다 높게 확인된다. 이러한 결과의 이유는 격자크기의 문제로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 WH 형상에서 부피가 27 m³ 조건에 대해 격자크기를 0.05 m로 적용하여 수치계산을 수행하였다.

[그림 Ⅲ-17]은 WH 형상에서 구조물 부피가 27 m³일 때 격자크기에 따른 평균 화학종 농도 변화를 나타낸 것이다. [그림 Ⅱ-4]와 다르게 격자크기에 따라 구조물 내 평균 화학종 농도 변화의 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 기존 계산에 사용한 0.1 m의 격자크기는 구조물 부피가 27 m³조건에 대해 서는 적합하지 않은 것으로 확인된다. 추후 27 m³조건에 적합한 격자크기를 선정하여 구조물 부피에 따른 필요 환기 횟수를 다시 검토할 필요가 있다.



[그림 Ⅲ-16] 구조물 부피별 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화

구조물 형상	구조물 부피(m ³)	환기 완료 시간 (s)	필요 환기 횟수 (회)	
가로 = 높이 (WH)	27	5,196	115.5	
	64	1,089	10.2	
	216	33,052	91.8	
가로 〈 높이 (H _W)	27	5,196	115.5	
	64	1,034	9.7	
	216	32,768	91.0	
가로 〉높이 (W)	27	7,368	163.7	
	64	959	9.0	
	216	34,167	94.9	

〈표 Ⅲ-4〉 구조물 부피에 따른 시뮬레이션 결과



[그림 Ⅲ-17] 격자크기에 따른 구조물 내부 평균 화학종 농도 변화 (WH, 27 m³)

2. 원기둥 형상의 구조물 내 필요 환기량 계산 결과

⟨표 Ⅲ-5⟩는 수치계산을 통해 계산된 원기둥 형상의 구조물의 내부 조성,
 개구부 위치, 개구부 면적, 구조물 부피에 따른 환기 완료 시점과 필요 환기
 횟수를 정리한 것이다.

먼저 내부 조성의 비중이 1보다 작은 CO일 때 H₂S보다 빠르게 환기가 완료된다. 그리고 개구부가 구석에 위치할 경우 중앙보다 더 빠르게 환기가 완료된다. 다음으로 개구부 면적이 증가할수록 환기 완료 시점은 빨라지고 구조물 부피의 경우 환기 완료 시점은 서로 차이가 크지만 환기 완료 시점은 비교적 큰 차이가 없다.

하지만 〈표 III-1〉~〈표 III-4〉의 육면체 형상에 대한 수치계산 결과와 비교하였을 때 원기둥 형상은 필요 환기 횟수가 상당히 많다. 기본 조건만 비교해도 약 100회정도로 환기 횟수가 차이가 있다. 이러한 이유는 수치계산에 사용한 해석코드의 한계로 볼 수 있다. FDS는 직교좌표계를 기반으로 하기 때문에 곡선에 대한 해석은 한계가 있다. 또한 본 연구에서는 원기둥을 해석 하기 위해 [그림 II-3]의 (b)와 같이 격자크기로 곡선을 직선으로 세분화하여 모델링을 하였기 때문에 실제 원기둥 형상에 대한 환기와 차이가 있다.

[그림 III-18]은 RH 형상과 내부 조성이 H₂S일 때 992 s에서의 O₂ 농도 분포 결과로 구조물 중간 높이를 위에서 바라본 단면이다. 여기서 (b)는 (a)의 왼쪽 아래 부분을 확대한 것으로 곡선을 직선으로 모델링한 부분에 H₂S가 정체되어 있음을 알 수 있다. 따라서 해석에 사용한 코드의 한계로 원기둥 형상에 대한 필요 환기 횟수를 검토하기에는 어려움이 있다. 추후 원통 좌표계로 해석할 수 있는 해석코드를 이용하여 추가적인 연구가 필요하다.

구조물 형상	내부 조성 (100%)	개구부 위치	개구부 길이 (m)	구조물 부피 (m ³)	환기 완료 시간 (s)	필요 환기 횟수 (회)
지름 = 높이 (RH)	СО	1	1.0	64	12,488	117.3
				27	5911	129.6
				216	35,092	97.7
			0.5	64	13,857	130.2
			1.5	64	11,368	106.8
			2.0	64	9,988	93.8
		2	1.0	64	11,785	110.7
_	H_2S	1	1.0	64	28,186	264.8
				64	12,539	116.8
			1.0	27	5,587	121.5
				216	34,492	95.6
지름 < 높이	CO	Û	0.5	64	13,612	126.8
(H _R)			1.5	64	11,066	103.1
			2.0	64	10,161	94.6
		2	1.0	64	12,051	112.3
	H_2S	1	1.0	64	28,835	268.6
지름 〉 높이 (R)	СО	Ð	1.0	64	13,810	129.3
				27	6,410	139.2
				216	35,745	99.1
			0.5	64	14,556	136.2
			1.5	64	12,250	114.7
			2.0	64	10,851	101.6
		2	1.0	64	12,238	114.6
	H_2S	1	1.0	64	27,154	254.2

〈표 Ⅲ-5〉 원기둥 형상에 대한 시뮬레이션 결과

Ⅲ. 시뮬레이션 결과




Ⅳ. 결론

본 연구에서는 밀폐공간 작업 전 필요 환기량에 대해 수치계산을 이용하여 평가하였다. 평가 조건은 크게 육면체와 원기둥 형상과 내부 공기 조성, 개구부 위치, 개구부 면적, 구조물 부피이다.

먼저 육면체 형상에 대한 계산 결과에서 내부 공기 조성은 CO와 H₂S에 대해 검토되었으며 내부 조성에 따른 필요 환기 횟수는 큰 차이가 없었다. 다만, 검토한 구조물 형상의 경우 필요 환기 횟수가 기술지침에서 제안한 5회보다 많은 것을 확인하였다.

개구부 위치에 따른 필요 환기량은 구조물 형상에 따라 영향이 다르며 H_w 형상이 가장 영향을 크게 받는 것으로 확인되었다. 그리고 WH 형상은 4번, H_w 형상은 5번, W 형상은 3번 위치에서 각각 환기가 가장 빠르게 완료되었다. 또한 검토한 조건에서의 필요 환기 횟수는 모두 5회보다 많은 것을 확인하였다.

다음으로 개구부 면적의 경우 높은 유의수준으로 환기 완료 시점과 선형관계를 가지는 것으로 확인하였다. 해당 결과는 WH 형상에 대해서만 검토하였지만 Hw 형상과 W 형상도 유사할 것이라고 예측된다. 그리고 필요 환기 횟수는 개구부 면적이 구조물 천장 단면적의 약 76.6%이상인 경우 기술지침에서 제안한 환기 횟수를 만족하는 것으로 확인하였다.

마지막으로 구조물 부피에 대한 검토는 27 m³, 64 m³, 216 m³에 대해 수행하였다. 이에 앞서 수치계산 결과의 신뢰도를 확보하기 위해 구조물 부피가 64 m³인 조건에 대해 격자 민감도 테스트를 수행하였고 이를 통해 격자크기를 0.1 m로 선정하여 연구를 수행하였다. 하지만 해당 격자크기는 구조물 부피가 27 m³인 조건을 해석하기에는 부적합한 것으로 확인되었다. 따라서 구조물 부피에 대한 필요 환기량을 검토하기 위해 적합한 격자선정이 추가적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서 사용한 수치해석 코드는 직교 좌표계로 해석하기 때문에 원기둥

형상을 해석하기 위해 곡선을 직선으로 세분화하여 모델링을 하였다. 이러한 이유로 인해 수치계산 결과와 실제 원기둥 형상의 환기거동은 차이가 있다. 특히, 실제 원기둥 형상은 곡선이기 때문에 벽면에 유해가스가 정체되지 않지만 수치계산 결과에서는 곡선을 직선으로 모델링한 부분에 유해가스가 정체되어 있는 것으로 확인된다. 또한 육면체 형상과 동일한 내부 조성, 구조물 부피 이지만 원기둥 형상은 더 많은 환기가 필요함을 확인하였다. 따라서 해석에 사용된 코드의 한계로 원기둥 형상에 대한 필요 환기량을 평가하기에는 어려움이 있다. 추후 원통 좌표계 해석이 가능한 코드를 이용하여 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- 김태형, 하현철, 박승욱 등. 질식재해 발생 특성별 예방 매뉴얼 개발. 안전보 건공단. 2015.
- 백빛나. CFD를 이용한 덕트 삽입 길이에 따른 밀폐공간 내 필요 환기량 평가 연구. 2021 한국안전학회 춘계학술대회. 2021.(p.100)
- 안전보건공단. 밀폐공간 작업 프로그램 수립 및 시행에 관한 기술지침. 안전 보건공단. 2018.
- 안전보건공단. 밀폐공간 질식재해예방 안전작업 가이드. 고용노동부. 안전보 건공단. 2020.
- J. Zhao, H. B. Manbeck, D. J. Murphy. Computational fluid dynamics simulation and validation of H2S removal from fan-ventilated confined-space storages. Transactions of the ASABE. 2007;50(6):2231-2246.
- K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott et al. Fire dynamics simulator user's guide. NIST. 2015.
- K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott et al. Fire dynamics simulator technical reference guide. NIST. 2015.
- M. Quan, Y. Wang, Y. Zhou et al. Effect of swirl ventilation on contaminant removal in a cylindrical confined space. Building and Environment. 2021;205:108277.
- R. P. Garrison, R. Nabar, M. Erig. Ventilation to eliminate oxygen

밀폐공간 형상 및 내부 공기 조성에 따른 필요 환기량에 관한 연구

deficiency in a confined space part I: a cubical model. Applied Industrial Hygiene. 1989;4(1):1-11.

- R. P. Garrison, M. Erig. Ventilation to eliminate oxygen deficiency in a confined space partII: noncubical models. Applied Industrial Hygiene. 1989;4(10):260-268.
- R. P. Garrison, M. Erig. Ventilation to eliminate oxygen deficiency in a confined space partIII: heavier-than-air characteristics. Applied Occupational and Environmental Hygiene. 1991;6(2):131-140.

Abstract

A Study on the Amount of Ventilation Required According to the Shape of Confined Space and Species in a Confined Space

Objectives : Currently, KOSHA GUIDE suggests that the required amount of ventilation before working in a confined space is 5 times the volume of the enclosed space. However, through a investigation for fatal accidents, it was confirmed that the required ventilation amount for some enclosed space was more than 9 times the volume of the enclosed space. Therefore, it is necessary to review the amount of ventilation required before working in an enclosed space according to the shape of the enclosed space. This study aims to evaluate the required ventilation amount according to the shape of the enclosed space and the species in the enclosed space using CFD.

Method : First, in order to determine the CFD variables, fatal asphyxiation accidents that occurred over the past 10 years were analyzed. And Based on the analysis results, detailed variables were selected through expert meetings. The selected variables are the shape of compartment, location of opening, area of opening, volume of the compartment and the species in the confined space are CO and H2S.

밀폐공간 형상 및 내부 공기 조성에 따른 필요 환기량에 관한 연구

To increase the reliability of the numerical results, the grid size was selected through the grid sensitivity test. Based on the grid sensitivity test, the grid size adopted a 0.1 m and numerical calculations were performed.

Results : For the hexahedron shape, there is no significant difference in the amount of ventilation required depending on the species in the confined space. And a shape with a long height is most affected by the opening position. Next, the amount of ventilation required decreases linearly according to the area of the opening, and additional research is needed on the volume of the compartment. The numerical results for the cylindrical shape are difficult to evaluate the required ventilation amount due to the limitations of the numerical code. Among the conditions calculated, only the case where the opening area was 76.6% of the cross-sectional area of the ceiling of the compartment satisfies the ventilation amount suggested in the KOSHA GUIDE. In addition, it was confirmed that ventilation more than 8 times the volume of the compartment was required for other conditions.

Key words : Ventilation, Confined space, Computational fluid dynamics, Asphyxiation accidents

연구진

연 구 기 관 : **산업안전보건연구원** 연구책임자 : 백빛나 (대리, 산업안전연구부)

연구기간

2021. 02. 24. ~ 2021. 11. 30.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

밀폐공간 형상 및 내부 공기 조성에 따른 필요 환기량에 관한 연구 (2021-산업안전보건연구원-775)

발 행 일 : 2021년 11월 30일발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아연구책임자 : 산업안전연구부 대리 백빛나발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원주 소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400전 화 : 052-703-0853택 스 : 052-703-0334Homepage : http://oshri.kosha.or.krI S B N : 979-11-92138-48-0