

-대기오염 확산 시뮬레이션 SaaS 개발 및 실증-

A horizontal line composed of 18 dark blue slanted rectangular segments.

넥스트폼

과제명 ① · 시뮬레이션 SaaS 개발 및 실증

수행기관 ① · (주관기관)
주식회사 넥스트폼

· (참여기관)
주식회사 테렌즈
주식회사 에이에스티홀딩스
한국국토정보공사

총괄책임자 ① · 이상돈 수석연구원

수요기관
(실증기관) ① · 경기도 시흥시

수행기간 ① 2024. 5. 10 ~ 2024. 12. 31

총사업비 ① · 1,156,668 천원

사업목적 ① · 공중 보건과 환경에 심각한 영향을 주는 대기 오염 확산 문제를 분석하고 대안을 검토·평가할 수 있는 시뮬레이션 SaaS를 개발·실증하여 국내 SW 경쟁력 강화 및 디지털 트윈 확산 기반 마련

· 공공(LX플랫폼)이 보유한 양질의 3D 공간 데이터와 민간 기업의 시뮬레이션 및 SaaS 구축기술 역량을 결합하여 디지털 행정 혁신 기반 마련 및 글로벌 디지털 경쟁력 확보

사업내용 ① · 공공 플랫폼 기반 서비스

· 대기 오염 확산 시뮬레이션 소프트웨어 클라우드 기반 SaaS 모델 구축

· 수요기관 현장실증 시험 진행

- 본 연구에서는, 기능 확장이 용이한 오픈소스 CFD 해석 프로그램인 OpenFOAM을 사용하여 기존의 기상데이터 그리고 3D 지도데이터 등을 활용하여 오염 물질 누출 영향 범위를 예측 및 오염원을 추적 하는 서비스를 **CFD 전문가가 아닌** 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 구성하고자 하였다.
- 대기오염 물질 확산 시뮬레이션 SW 개발
 - 대상지의 지형, 건축물 등의 지표면 인근 바람저항 요소들의 형상 모델링 자동화
 - 기상 데이터를 활용하여 시뮬레이션 해석 시 실제 기상 정보를 반영
- SaaS 서비스 개발
 - **완전 자동화**
 - 사용자의 별도 개입 없이(대상지는 고정) 실시간 센서데이터와 연동하여 자동으로 오염원 추적 해석 진행
 - 오염원 추적 해석의 경우 바람길 해석 DB를 구축한 후 진행
 - 특정 해석
 - 사용자가 원하는 센서데이터 및 날씨 정보를 입력하여 오염원 추적 해석 가능 (구축된 DB 활용 가능)

- 해석 지형: 시흥시 시화공단 및 정왕동 인근
- 기상 조건
 - 풍속: 측정지점 해발도 10m에서 풍속 1.5m/s
 - 풍향: 정남풍
- 오염물질 해석 시나리오
 - 악취 물질: 부틸아크릴레이트 (VOCs)
 - 최대 악취 배출량: 38.2 ton/month

Table 3. Physical and chemical characteristics for Butylacrylate (U.S. Dept. of Health and Human Services, 1993; U.S. EPA, 2001; 국립환경연구원, 2001)

Chemical Formula	C7-H12-O2
Molecular Weight	128.17
Color/Phase	Colorless liquid
Odor	Sharp, biting characteristic odor
Conversion factors	5.23 mg/cu m = 1 ppm
Minimum Detectable Level	0.55 ppb
CAS #	141-32-2

반월, 시화공단 악취물질의 안산지역 확산 연구

송동웅 · 송창근* · 김철희*
 상지대학교 환경공학과, 서울대학교 지구환경과학부*
 (2003년 5월 7일 접수, 2003년 10월 15일 승인)

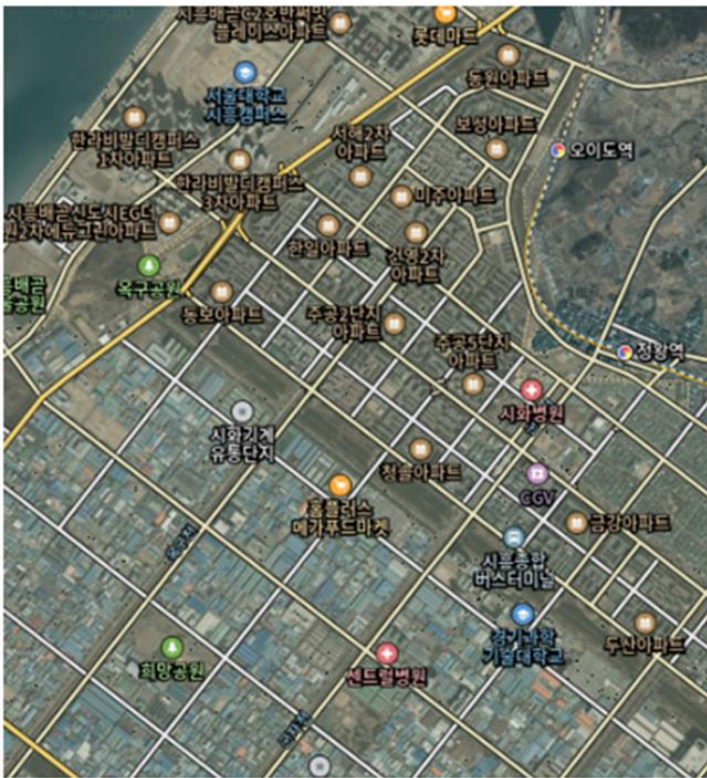
A Study on the Atmospheric Dispersion of Odor Emitted from Banwol/Sihwa Industrial Complex in Ansan Area

Dong-Woong Song · Chang-Keun Song* · Cheol-Hee Kim*
 Department of Environmental Engineering, Sangji University
 School of Earth and Environmental Science, Seoul National University*
 (Manuscript received 7 May 2003; accepted 15 October 2003)

Table 2. Characteristics of VOCs point source on May and August 2002

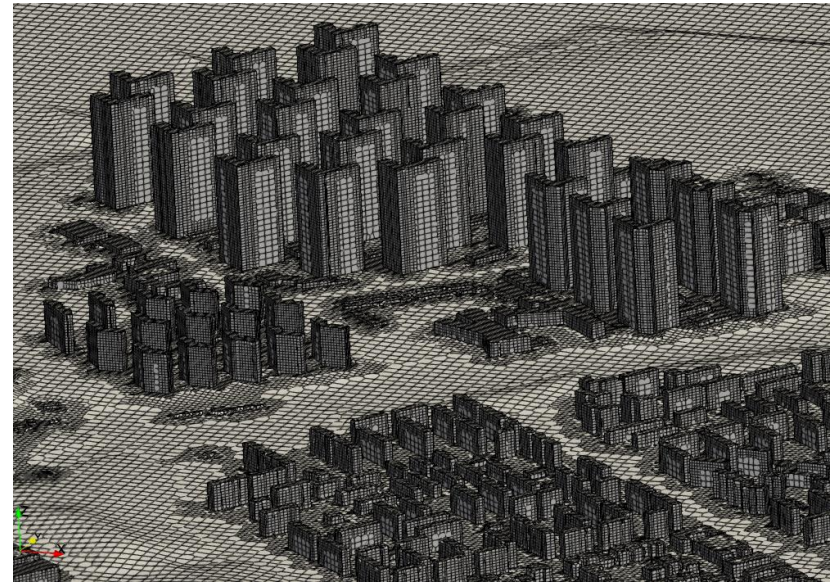
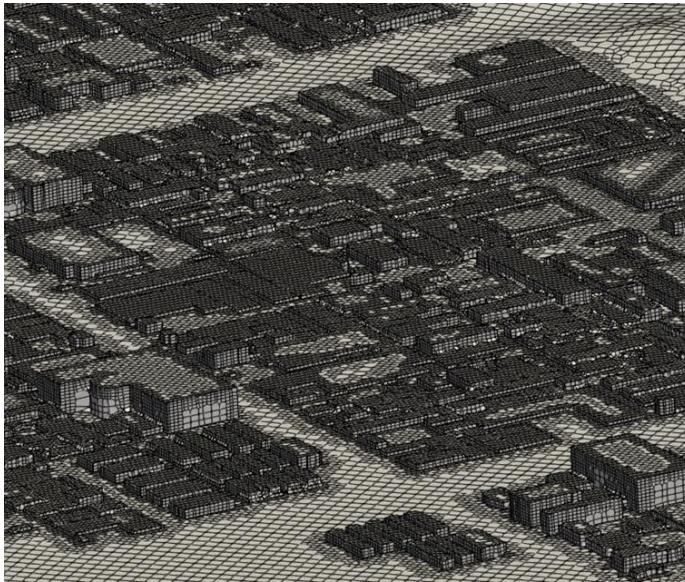
TM-X (km)	TM-Y (km)	Altitude (m)	Stack Height(m)	Stack Diameter(m)	Exit Temp. (°C)	Exit Vel. (m/s)	Emission (May)(t/mon)	Emission (August)(t/mon)
182.044	422.422	16	20	1.5	25	10	2.60	2.44
181.249	422.704	20	29	1.4	170	4	1.46	1.79
180.522	425.599	0	29	1.2	65	6.4	38.2	23.1
182.890	425.122	20	29	1.2	65	6.5	19.6	12.5
181.249	422.704	20	29	1.4	170	4.5	3.50	4.02
181.249	422.704	20	29	1.4	80	4	1.70	2.09
179.232	422.681	17	29	1.2	63	6.2	18.5	14.4
180.627	421.912	3	30	1.3	49	2.9	3.59	3.41
179.754	422.744	17	27	0.7	70	6.5	7.01	6.11
180.853	423.444	21	25	1	201	15.77	4.66	5.10
176.353	424.611	0	20	8	150	20	1.77	1.77

1. 국가정보공간포털을 이용하여 수치지형도 파일 다운로드
2. 지형 및 건물 생성 모듈 실행 -> STL 형식의 표면 격자 자동 생성



- snappyHexMesh

- STL 형상 파일을 이용해 형상 표면에 맞춰 3차원 격자를 재생성하는 OpenFOAM 유틸리티
- 건물, 지형 및 레이어 추가
- 약 1000만개 격자



- **Pasquill class ATM boundary inlet**

- 지표 열복사와 대기 온도차에 의한 대기 안정도 Pasquill class
- 입구 경계조건으로 입구 속도 U와 난류값 k, epsilon이 고려됨
- FLACS Technical Report 를 참고해 새로운 OpenFOAM library를 빌드

- **출구조건**

- totalPressure 출구압력 설정

- **지형, 건물**

- No slip 조건 설정

```
dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField uniform (0 0 0);
boundaryField
{
    inlet
    {
        type pasquillAtmBoundaryLayerInletVelocity;
        kappa 0.40;
        Cmu 0.09;
        flowDir (0 0 0);
        zDir (0 0 1);
        Uref 2.41;
        Zref 10.0;
        z0 0.03;
        d 0.0;
        Ls 1.0;
        Zs 0.0;
        value $internalField;
    }
}
```

- **Steady 계산 솔버**

- buoyantSimpleFoam: RANS 또는 LES 난류모델을 사용하고, MRF 기능을 사용할 수 있는 압축성 정상상태 난류유동 해석 프로그램

- **Transient 계산 솔버**

- buoyantPimpleFoam: RANS 또는 LES 난류모델을 사용하고, 동적격자 기능을 사용할 수 있는 압축성 비정상상태 난류유동 해석 프로그램

- **Turbulenc Model**

- Realizable k-Epsilon two layer model

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t S^2 - \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 S \epsilon - C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}}$$

- Mass Source

- scalarCodedSource

- Source term을 code 형태로 입력하여 Source에 대한 변화를 implicit하게 계산

```
39 codeInclude
40 #{}
41 #};
42
43 codeCorrect
44 #{}
45 #};
46 codeAddSupRho //incompressible flow: codeAddSup, compressible flow: codeAddSupRho
47 #{}
48     scalarField& source = eqn.source();
49     const Time& time = mesh().time();
50     const labelList& cellIDs = cells();
51
52     forAll(cellIDs, i)
53     {
54         label cellI = cellIDs[i];
55         source[cellI] -= 3.18533137594124;
56     }
57 #};
58
59 codeConstrain
60 #{}
61 #};
```

```
142     scalar AL = accl * timeStep / rhoL / minThick;
143     scalar RE = AL * 1.4 * pow(Uref, 0.78) * pow(Mu, (2.0/3.0)) * Pv / (82.05 * T0);
144     scalar resultL = RE * timeStep / 60;
145
146     totL += resultL;
147
148     Info << "mass flow rate is " << resultL << endl;
149
150     forAll(cellIDs, i)
151     {
152         label cellI = cellIDs[i];
153         source[cellI] -= resultL/nCells;
154     }
155     sleep(1);
156
157     FILE *outFile = fopen("totL_s.txt", "w");
158     fprintf(outFile, "%f\n", totL);
159     fclose(outFile);
160     FILE *outFile2 = fopen("resultL_s.txt", "w");
161     fprintf(outFile2, "%.15f\n", resultL);
162     fclose(outFile2);
163     FILE *outFile4 = fopen("saveTime_s.txt", "w");
164     fprintf(outFile4, "%f\n", curTime);
165     fclose(outFile4);
166 }
167 else{
168     scalar resultL;
169
170     FILE *inFile2 = fopen("resultL_s.txt", "r");
171     if (inFile2 != nullptr){
172         fscanf(inFile2, "%Lf", &resultL);
173         fclose(inFile2);
174     }
175
176     Info << "mass flow rate is " << resultL << endl;
177
178     forAll(cellIDs, i)
179     {
180         label cellI = cellIDs[i];
181         source[cellI] -= resultL/nCells;
182     }
183 }
```

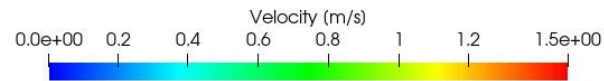
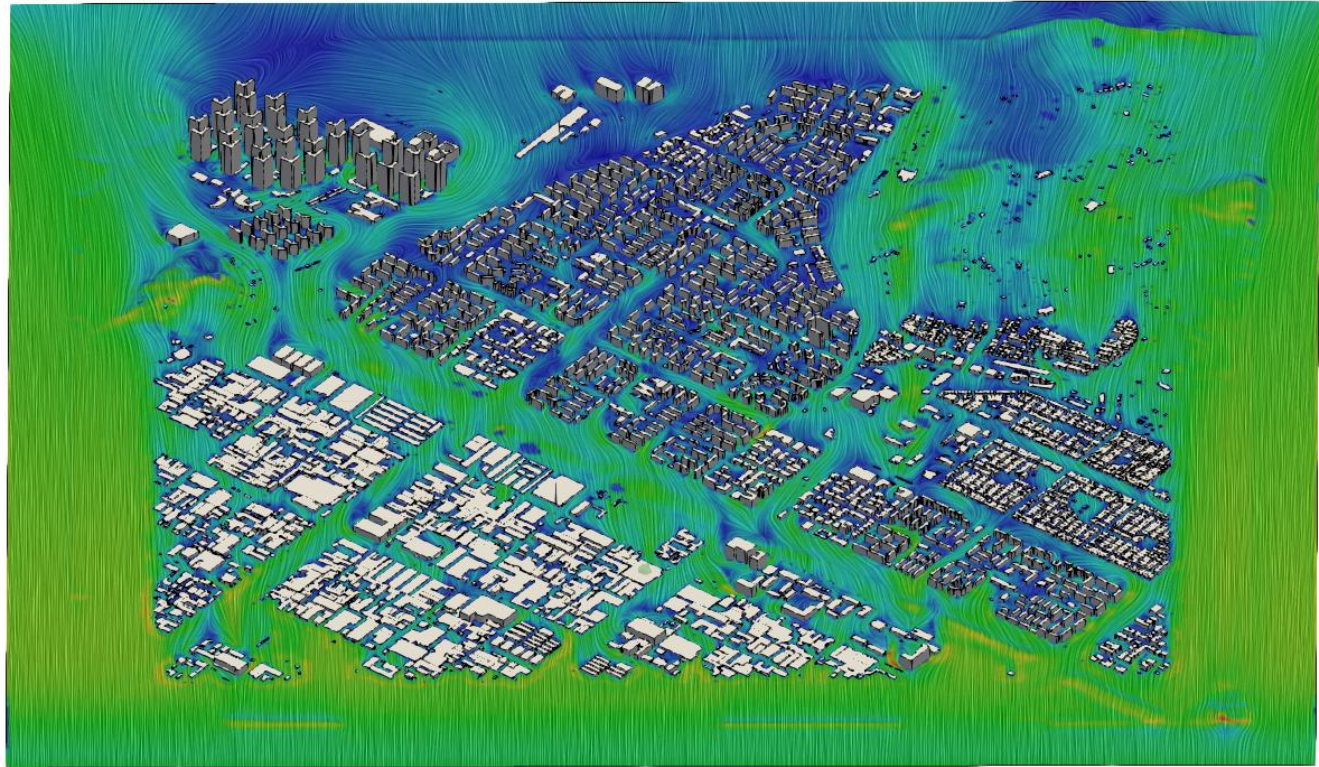
- 약취확산 시뮬레이션 시나리오



● : 약취배출원(B만 약취를 배출한다고 가정)

○ : 약취측정소

- 악취확산 시뮬레이션 바람길 해석 결과



- 악취확산 시뮬레이션 실행 결과 (최소 악취 감지레벨=0.55ppb)



OpenFOAM 사용의 간편화

• OpenFOAM을 이용한 해석 간편화

- 간편화/자동화 → 해석 과정 **정형화**
- 전처리 과정의 정형화
 - **형상 생성**
 - 형상을 간단한 parameter로 정형화
 - 자주 사용하는 형상을 미리 DB화 → DB에 입력되어 있는 형상을 선택하여 사용(축소/확대 등)
 - Fan단독성능해석, 미사일외부공력해석 등
 - **격자 생성**
 - 특화 분야를 위한 해석 격자 생성 기준 마련 → 적정 격자 해상도 테스트 결과 분석을 통해
- 후처리 과정의 정형화
 - **해석 결과 후처리 기준 마련**
 - 특정 위치에서의 속도/압력 값 추출
 - 3D contour 그림 및 동영상 추출
 - **동일 격자를 사용하여 입력 조건만 다른 해석**
 - 동일한 결과 그림을 자동으로 추출하여 비교 분석

전처리

- Shp 파일 → 3D 형상, STL 파일
- STL 파일 + base mesh → 볼륨격자



해석

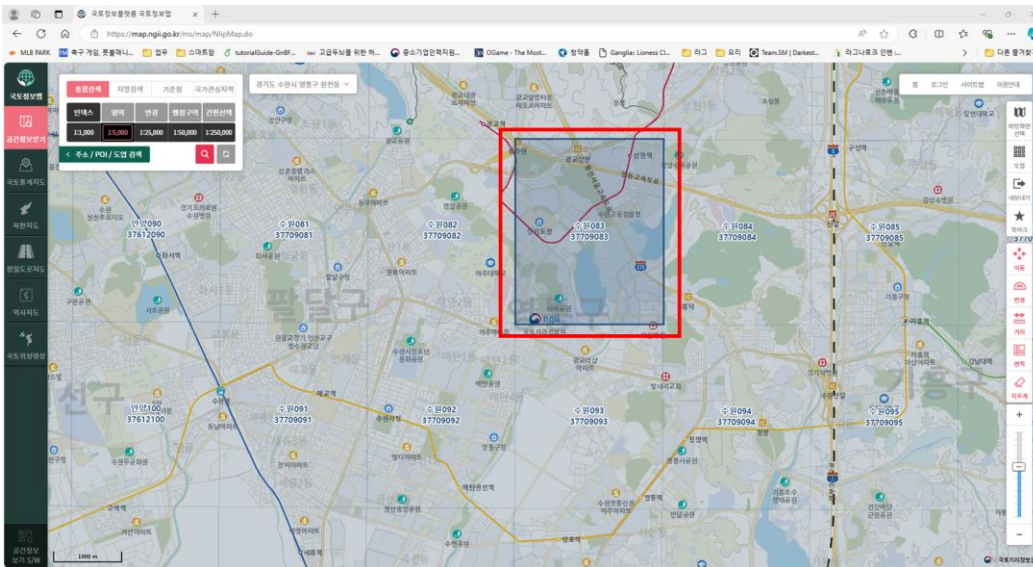
- 특정 해석에 특화된 케이스 셋팅
- 주요 해석 조건 입력 (유입속도, 압력 등)



후처리

- Countour, 그래프, 동영상 등
- 정형화된 보고서 양식 → ppt, excel 등

1. 국가정보공간포털을 이용하여 수치지형도 파일 다운로드



이름	수정된 날짜	유형	크기
(B010)수치지도_37608087_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:39	파일 폴더	
(B010)수치지도_37608088_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:39	파일 폴더	
(B010)수치지도_37608097_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:39	파일 폴더	
(B010)수치지도_37608098_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:39	파일 폴더	
(B010)수치지도_37608087_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	Microsoft Edge H...	2KB
(B010)수치지도_37608088_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	Microsoft Edge H...	2KB
(B010)수치지도_37608097_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	Microsoft Edge H...	2KB
(B010)수치지도_37608098_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	Microsoft Edge H...	2KB
building.stl	2024-09-11 오후 2:53	STL 파일	21,891KB
terrain.stl	2024-09-11 오후 2:53	STL 파일	42,670KB
(B010)수치지도_37608087_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	압축(ZIP) 폴더	2,193KB
(B010)수치지도_37608088_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	압축(ZIP) 폴더	2,607KB
(B010)수치지도_37608097_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	압축(ZIP) 폴더	5,547KB
(B010)수치지도_37608098_2024_0000...	2024-09-09 오후 7:38	압축(ZIP) 폴더	4,338KB

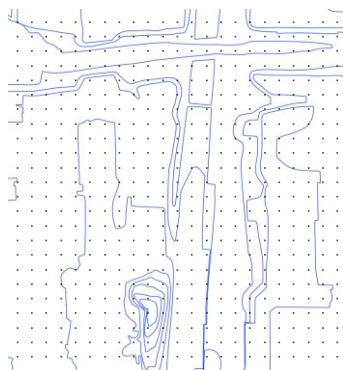
N3A_A0010000.cpg	2024-09-09 오후 7:39	CPG 파일	1KB
N3A_A0010000.dbf	2024-09-09 오후 7:39	OpenOffice.org 1...	476KB
N3A_A0010000.prj	2024-09-09 오후 7:39	PRJ 파일	1KB
N3A_A0010000.shp	2024-09-09 오후 7:39	DWG TrueView S...	438KB
N3A_A0010000.shx	2024-09-09 오후 7:39	DWG TrueView C...	16KB
N3A_A0033320.cpg	2024-09-09 오후 7:39	CPG 파일	1KB
N3A_A0033320.dbf	2024-09-09 오후 7:39	OpenOffice.org 1...	315KB
N3A_A0033320.prj	2024-09-09 오후 7:39	PRJ 파일	1KB
N3A_A0033320.shp	2024-09-09 오후 7:39	DWG TrueView S...	214KB
N3A_A0033320.shx	2024-09-09 오후 7:39	DWG TrueView C...	5KB
N3A_A0053326.cpg	2024-09-09 오후 7:39	CPG 파일	1KB
N3A_A0053326.dbf	2024-09-09 오후 7:39	OpenOffice.org 1...	19KB
N3A_A0053326.prj	2024-09-09 오후 7:39	PRJ 파일	1KB
N3A_A0053326.shp	2024-09-09 오후 7:39	DWG TrueView S...	17KB
N3A_A0053326.shx	2024-09-09 오후 7:39	DWG TrueView C...	1KB
N3A_A0063321.cpg	2024-09-09 오후 7:39	CPG 파일	1KB

- * _B0010000.dat : 건물 정보 데이터
- * _B0010000.shp : 건물 1층 단면 데이터
- * _B0010000.prj : 좌표계 정보

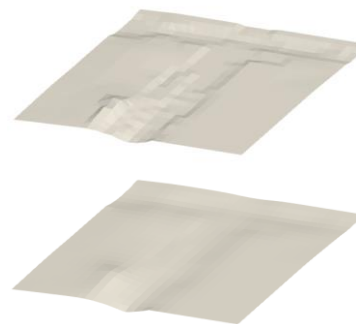
- * _F0010000.dat : 등고선 정보 데이터
- * _F0010000.shp : 등고선 선 데이터
- * _F0010000.prj : 좌표계 정보

• 225개의 파일

- 주요 사용 프로그램(패키지) : ParaView, Python(osgeo, numPy, Scipy)
 - Osgeo 패키지를 이용하여, 해석 영역을 포함하는 수치지형도의 F0010000.shp 파일을 읽어들이
 - 등고선을 이루는 점들의 좌표와 그 높이 정보를 추출
 - 가로, 세로로 일정한 간격을 가지는 grid point를 생성, 선형보간을 통해 grid 점들의 고도를 계산
 - Paraview에서 Grid point끼리 delauny 삼각분할을 통해 지형 표면을 생성
 - Paraview에서 지형 표면을 부드럽게 처리해주는 필터(smooth)를 사용



Qgis로 보는 등고선과, Grid point 예시

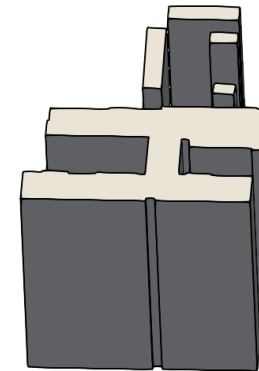


ParaView를 통해 생성/가공한 지표면

- 주요 사용 프로그램(패키지) : Python(osgeo, PythonOCC)
 - Osgeo 패키지를 이용하여, 해석 영역을 포함하는 수치지형도의 B0010000.shp 파일을 읽어들이
 - 건물을 이루는 점들의 좌표와 그 건물의 층수 정보를 추출
 - 건물 평면의 무게중심에서, 이전에 생성한 지형의 고도를 계산하여 층수*3을 더하여 최고 고도 계산 (건물 면적이거나, 층수를 기준으로 생성에서 제외할 수 있음)
 - 해발고도 0m 에서부터 최고 고도까지 돌출(extrusion)기능으로 solid 생성

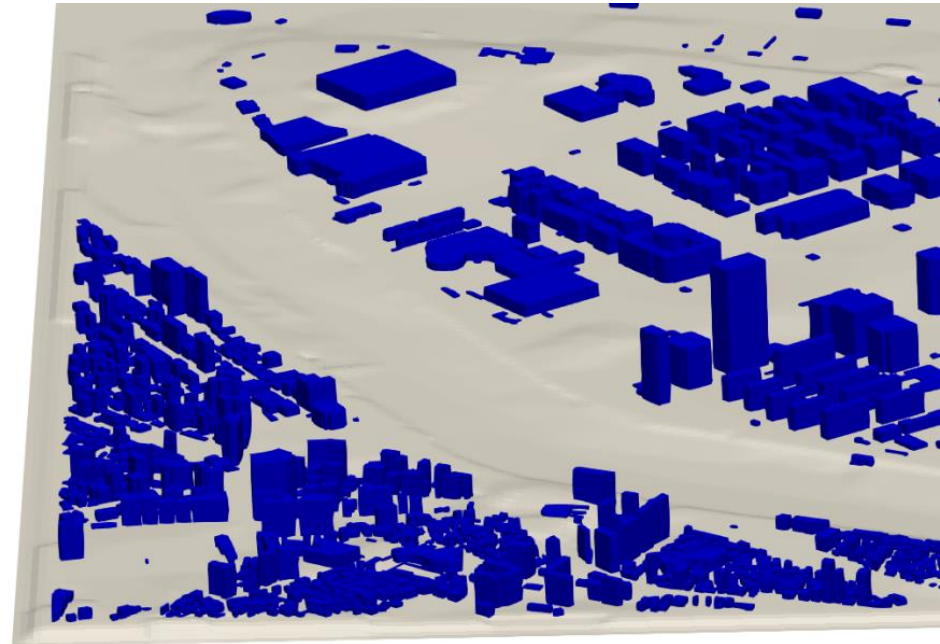


Qgis로 보는 건물 평면과 데이터 예시



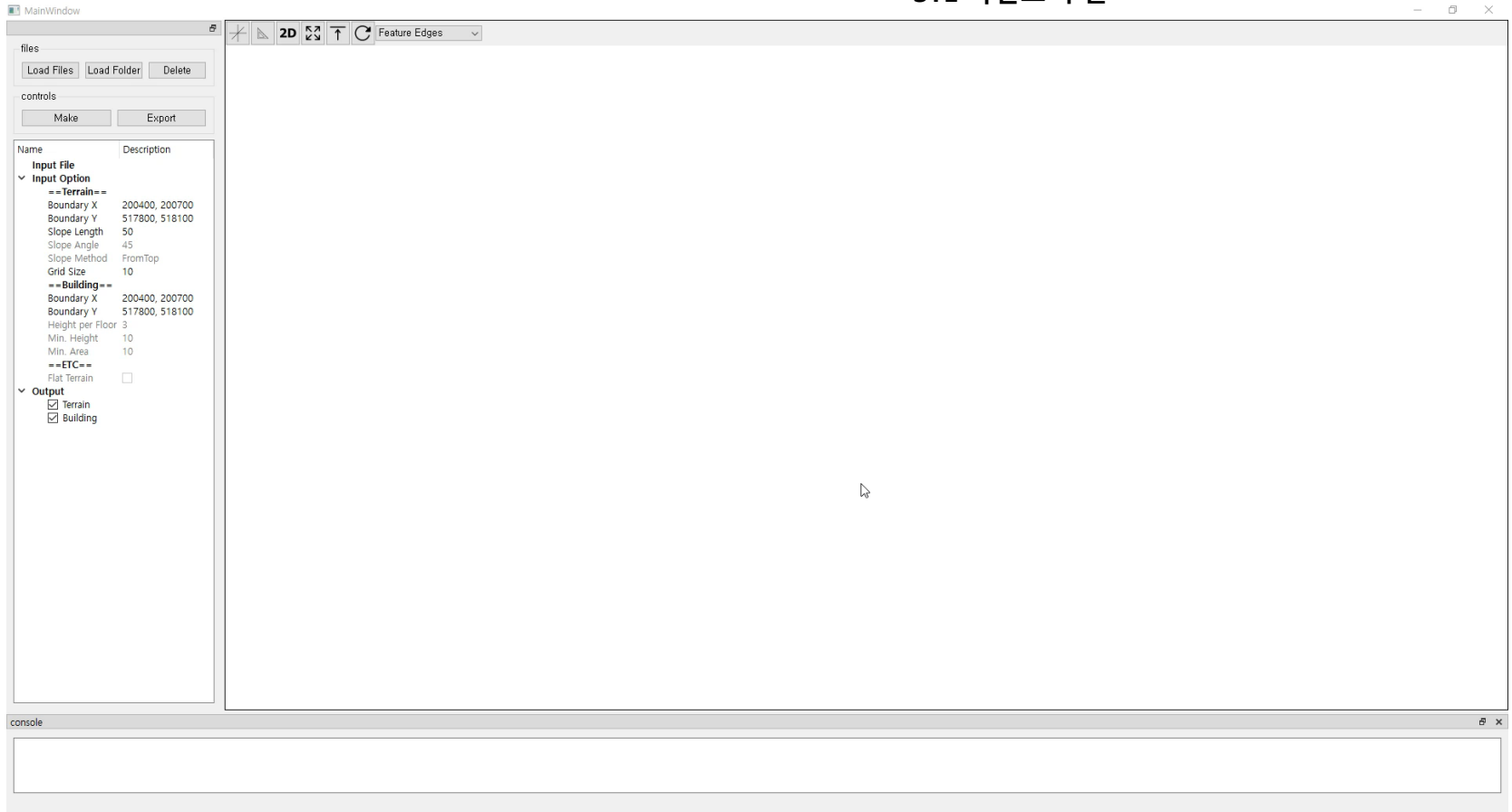
PythonOCC를 통해 생성한 건물 solid

1. 국가정보공간포털을 이용하여 수치지형도 파일 다운로드
2. 지형 및 건물 생성 모듈 실행 -> STL 형식의 표면 격자 자동 생성

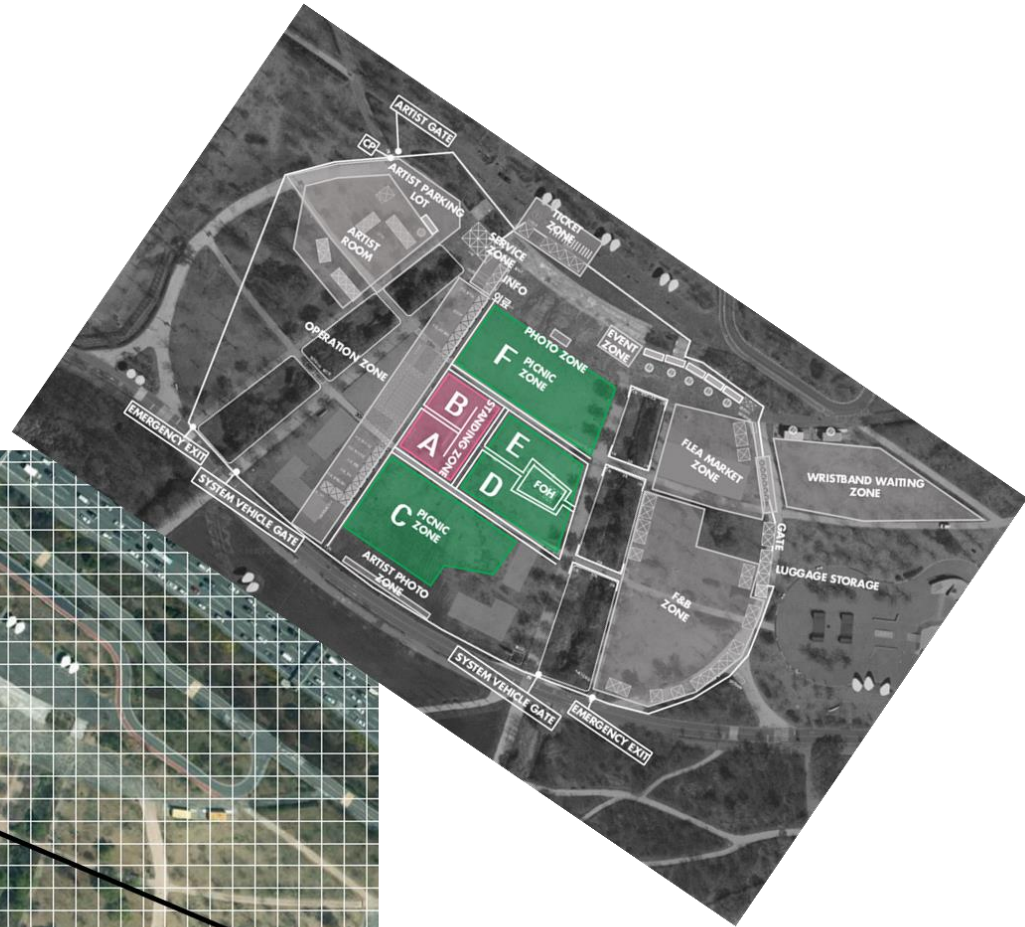


- GUI 형태

- 다운받은 수치지형도를 압축해제, 해당 폴더 선택
- 생성 범위 지정
- 'Make' 버튼 클릭으로 표면 격자 생성
 - ✓ 여의도 근처 지형 및 건물 생성 약 2분
 - ✓ STL 파일로 추출



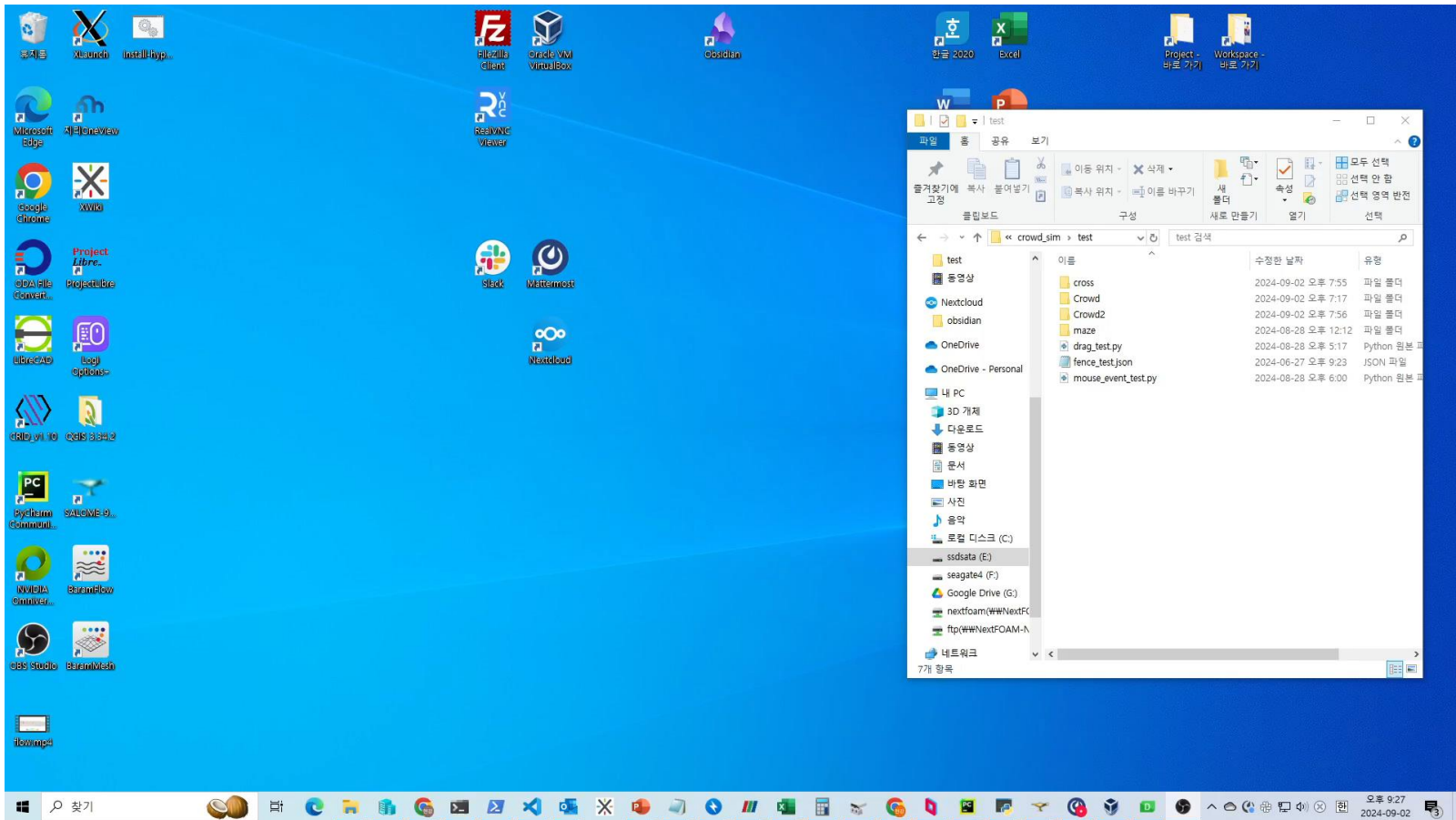
10m Grid



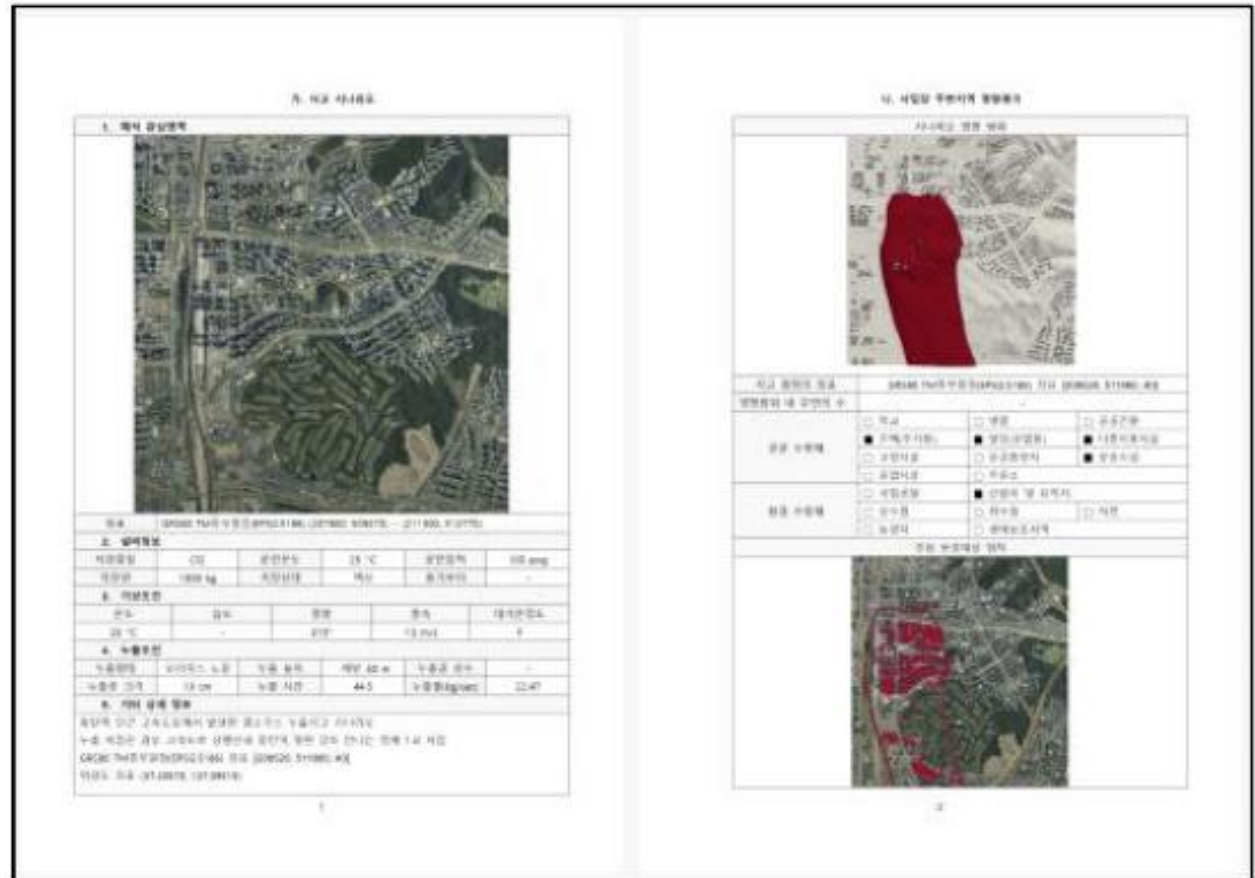
EPSG:4737(GRS80)
동경 126.87766, 북위 37.56618
EPSG:5179(UTM-K)
X=945040, Y=1952050

- GUI 형태

- 위성 지도 등을 입력
- STL 파일로 추출
- 입력된 파일 위에 마우스 클릭을 통하여 좌표 선택



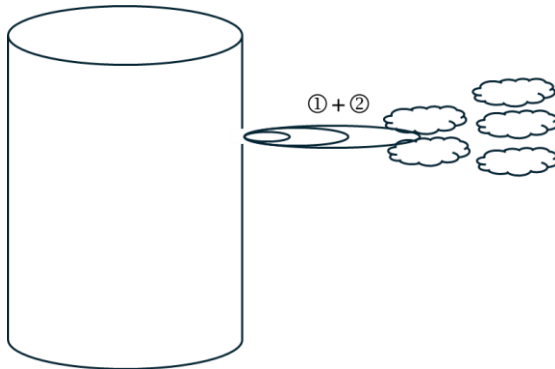
- 사용자가 자주 사용하는 보고서(PPT, excel 등)를 자동으로 작성하는 모듈(python, paraview)
 - 정형화된 보고서 형식이 필요
 - 시뮬레이션 해석 후 결과 후처리 자동으로 진행하여 다양한 후처리 그림/동영상/그래프 생성



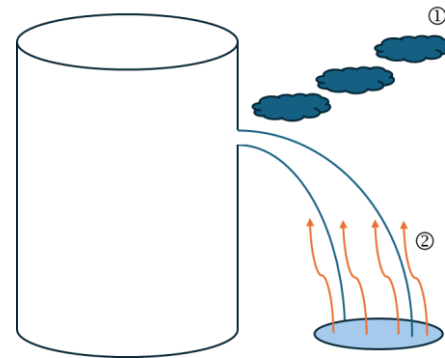
기타 사례

- 해석 지형: 경부고속도로 동탄 터널 인근 (4km X 4km)
- 기상 조건
 - 대기 안정도: Pasquill class D
 - 풍속: 측정지점 해발도 10m에서 풍속 2.41m
 - 풍향: 270° (→, 서풍)
 - 대기 온도: 25°C
- 화학물질 누출 시나리오
 - 누출 지점: 경부고속도로 동탄 터널 인근
 - 누출 방향: 남쪽 방향
 - 누출 물질: 암모니아 (NH₃)
 - 총 누출량: 10.83 ton

- Case1
 - 시나리오: 10분 전량누출, 기상 누출
- Case2
 - 시나리오: 10분 전량누출, 2상(기상+액상) 누출
- Case3
 - 시나리오: 누출률 고정, 기상 누출
- Case4
 - 시나리오: 누출률 고정, 2상(기상+액상) 누출

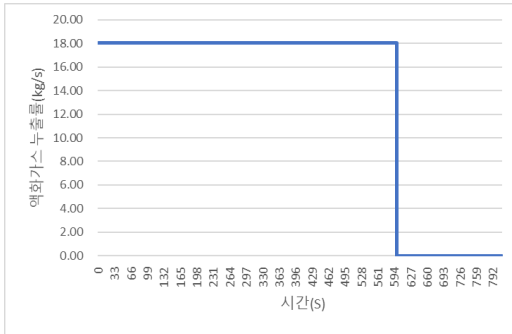


기상 누출



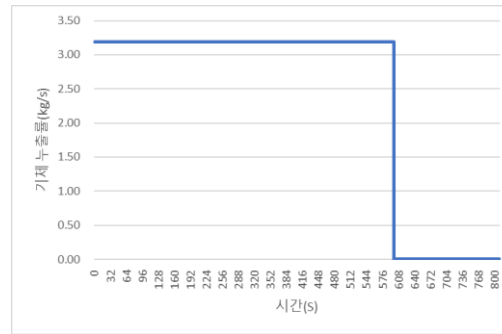
2상(기상+액상) 누출

시간당 누출량



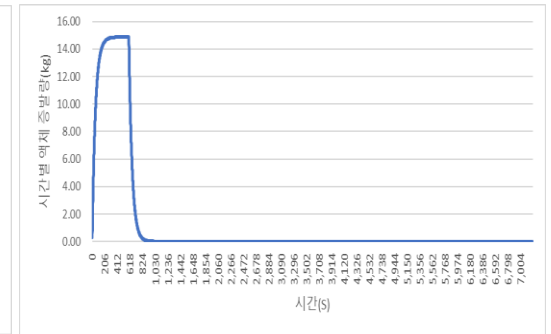
Jet파 누출

Case1

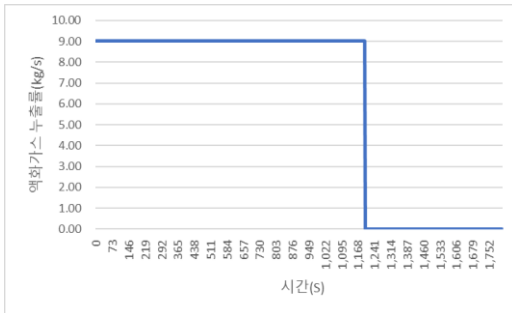


Jet파 누출

Case2

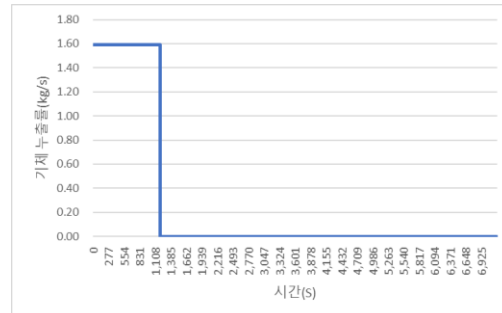


Pool 누출



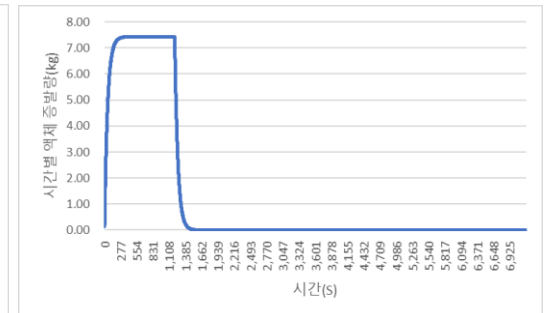
Jet파 누출

Case3



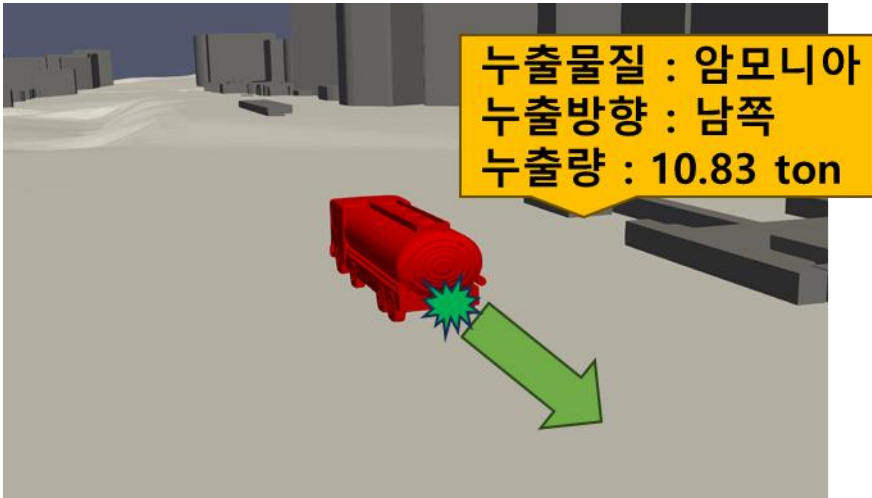
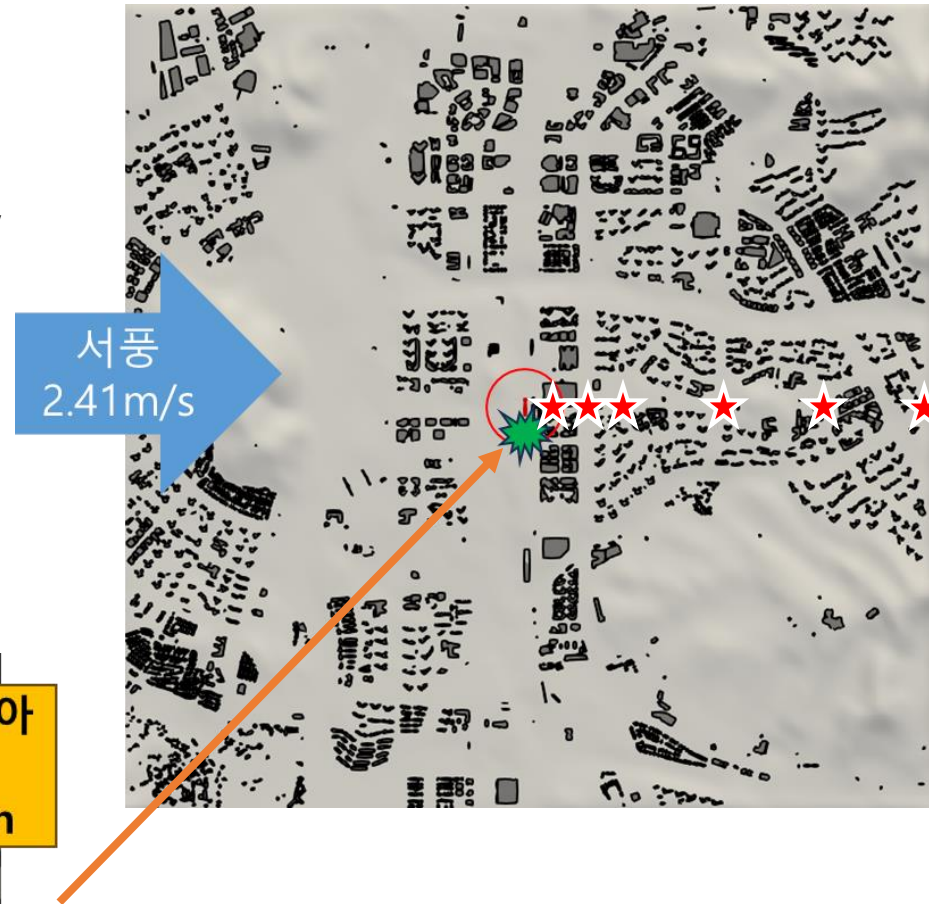
Jet파 누출

Case4



Pool 누출

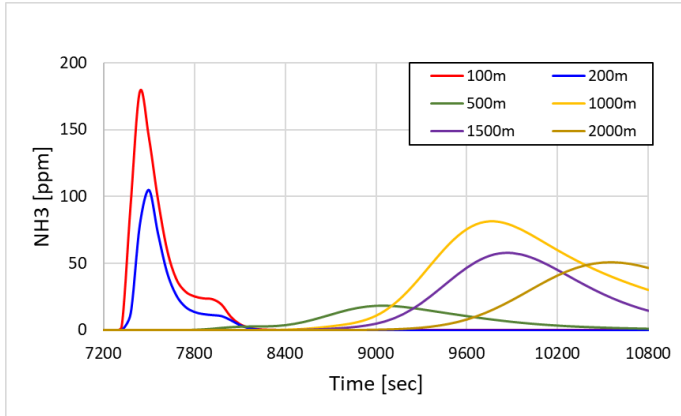
- 암모니아 농도 검출
 - 총 6 곳에서 농도 검출
 - 누출 지점 기준 동쪽으로 100m, 200m, 500m, 1000m, 1500m, 2000m
 - ERPG-1(25ppm), ERPG-2(150ppm), ERPG-3(1500ppm)



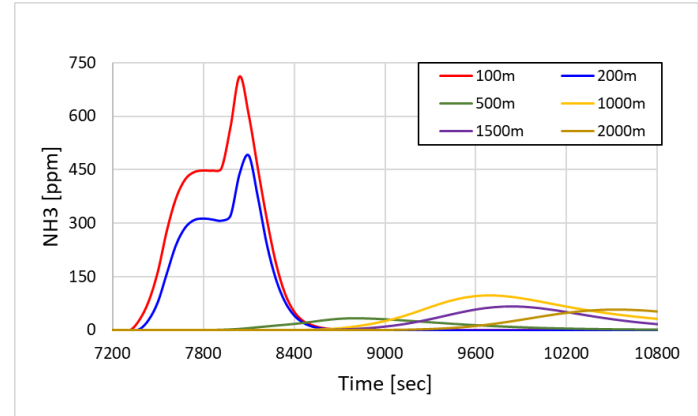
Time-ppm Graph



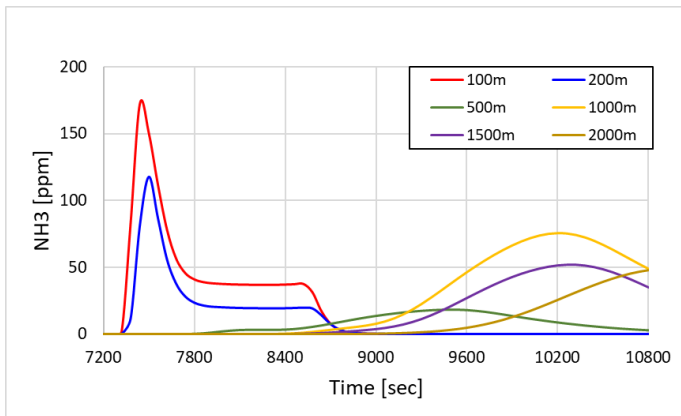
<ul style="list-style-type: none"> Case1 - 10분 전량누출, 기상 누출 	<ul style="list-style-type: none"> Case2 - 10분 전량누출, 2상(기상+액상) 누출
<ul style="list-style-type: none"> Case3 - 누출률 고정, 기상 누출 	<ul style="list-style-type: none"> Case4 - 누출률 고정, 2상(기상+액상) 누출



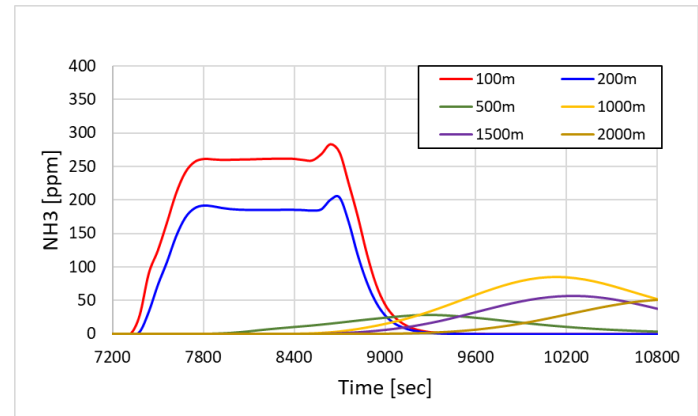
Case1



Case2

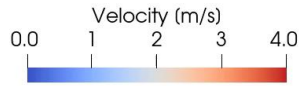


Case3

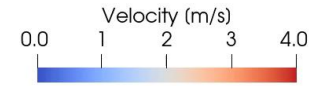
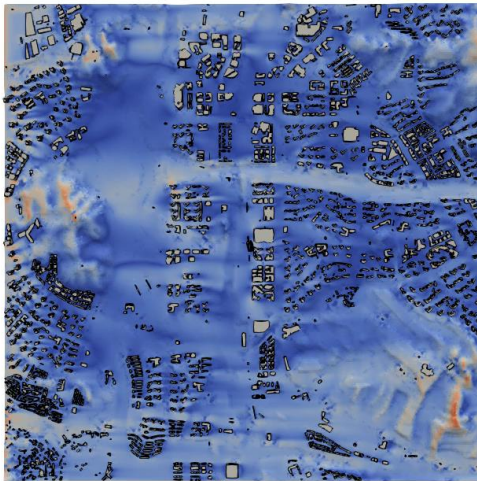


Case4

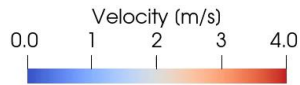
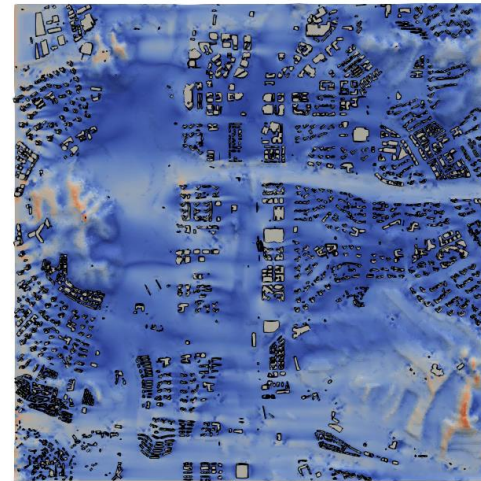
Top view(ERPG1)



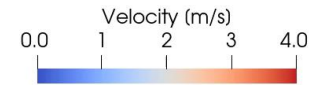
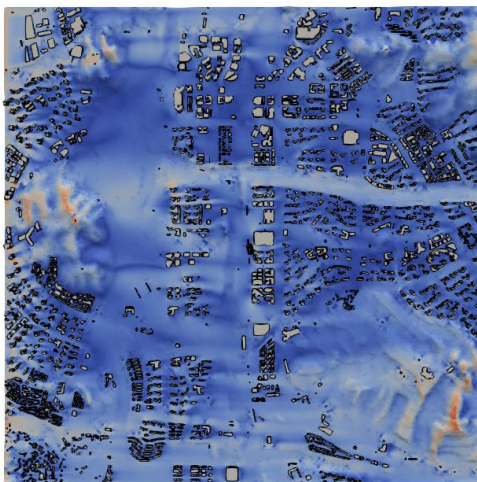
Time: 7200



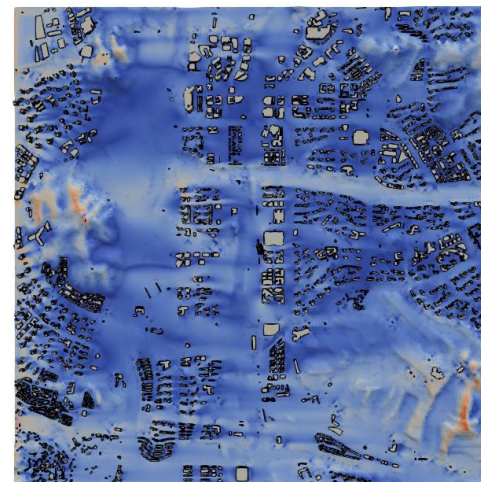
Time: 7200



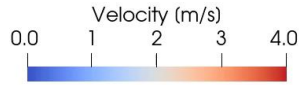
Time: 7200



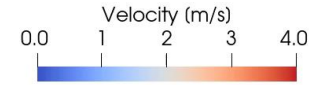
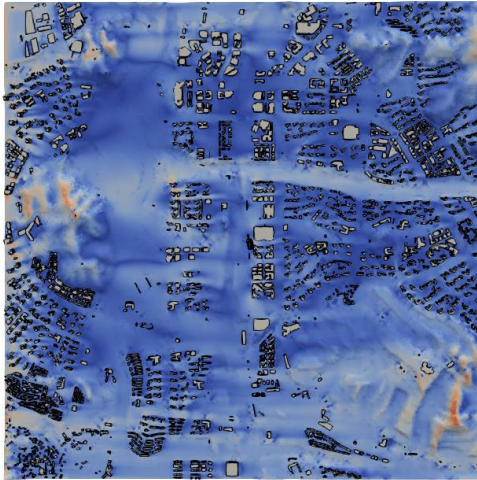
Time: 7200



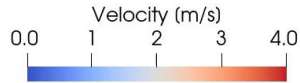
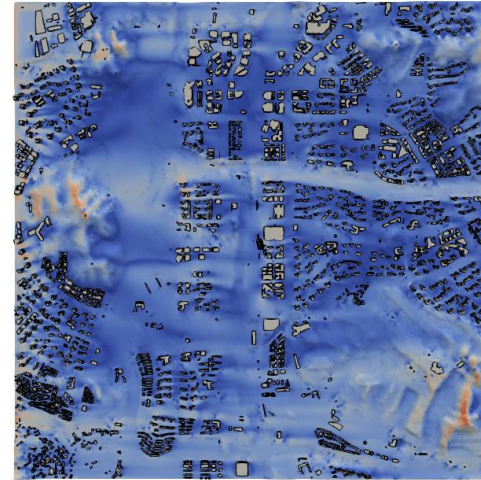
Top view(ERPG2)



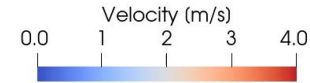
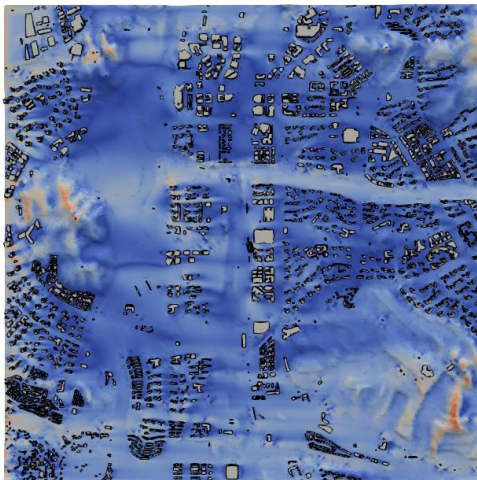
Time: 7200



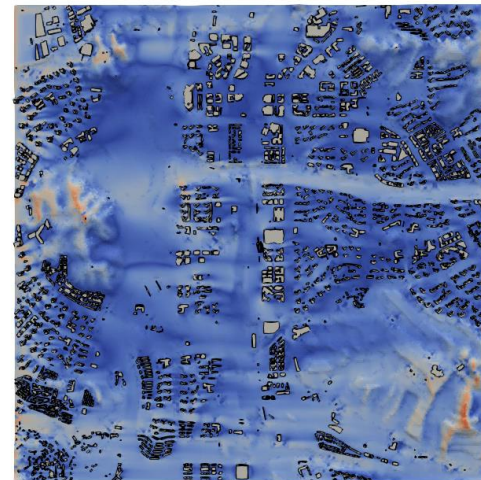
Time: 7200



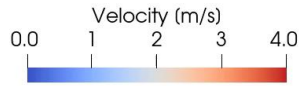
Time: 7200



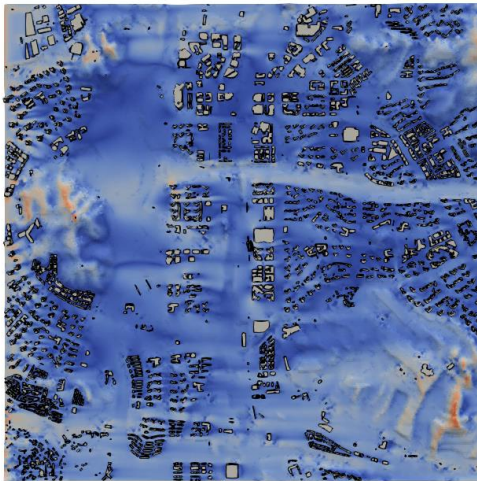
Time: 7200



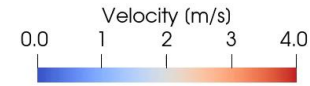
Top view(ERPG3)



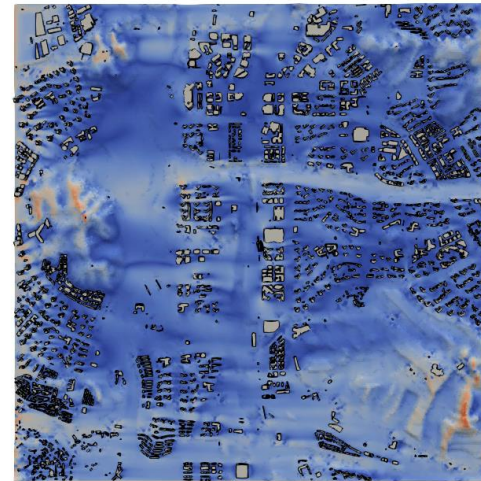
Time: 7200



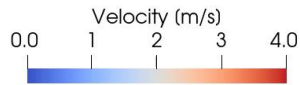
Case1



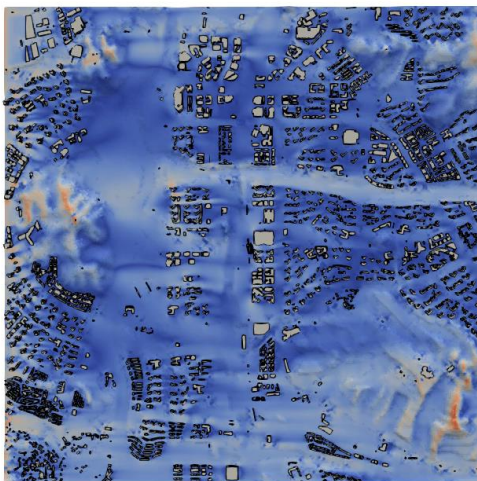
Time: 7200



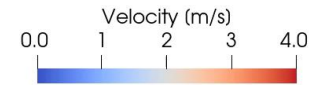
Case2



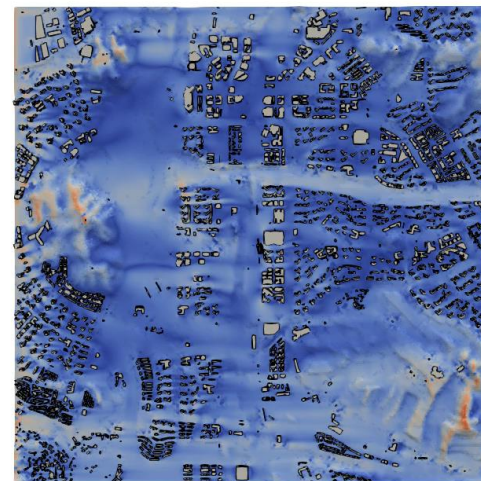
Time: 7200



Case3



Time: 7200

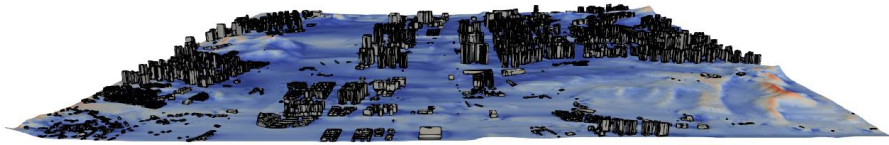


Case4

Side view(ERPG1)



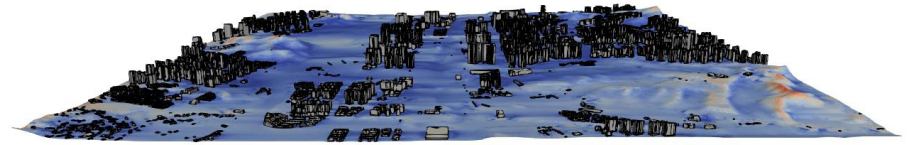
Time: 7200



Case1



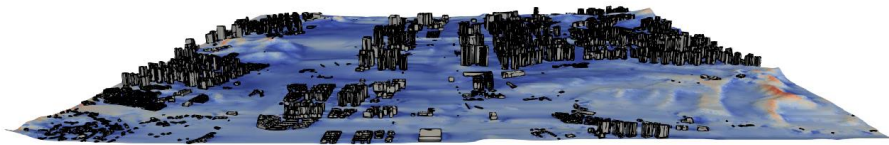
Time: 7200



Case2



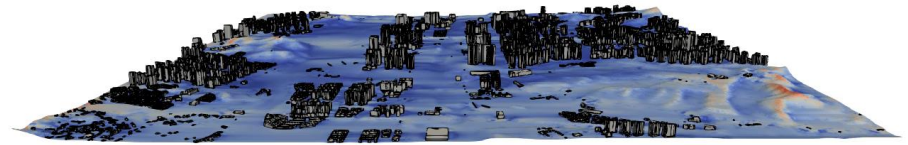
Time: 7200



Case3



Time: 7200

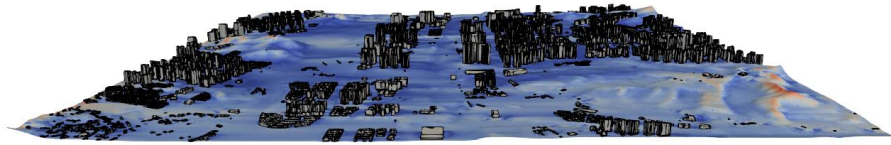


Case4

Side view(ERPG2)



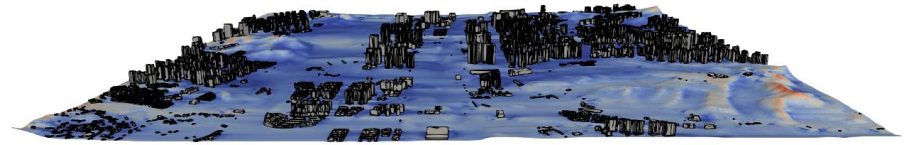
Time: 7200



Case1



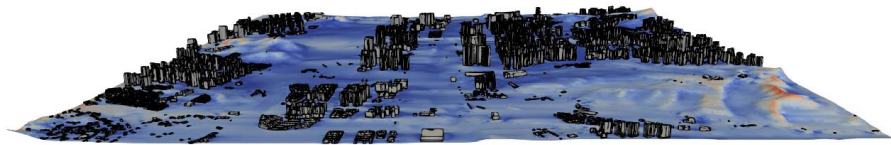
Time: 7200



Case2



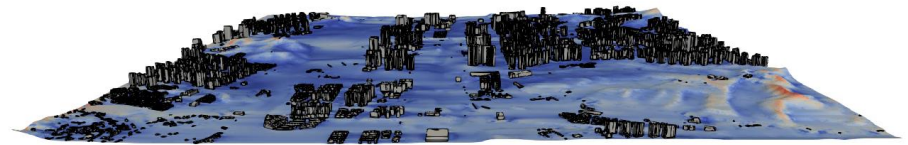
Time: 7200



Case3

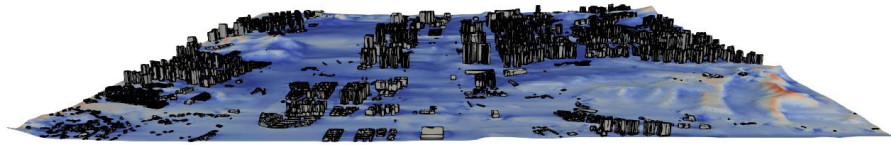
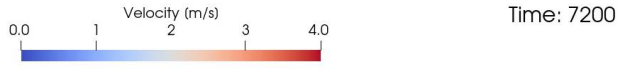


Time: 7200

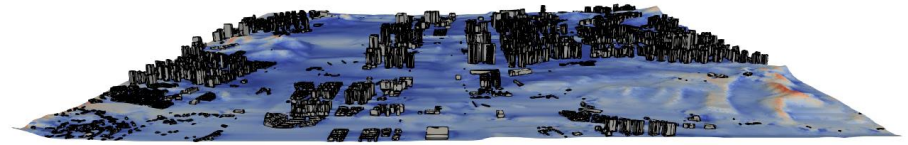


Case4

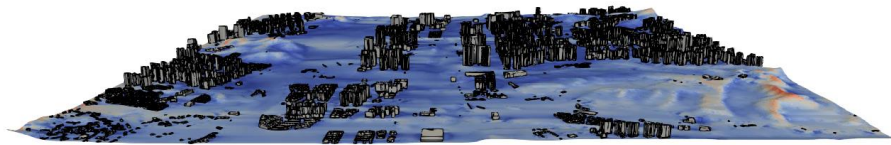
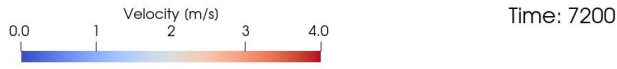
Side view(ERPG3)



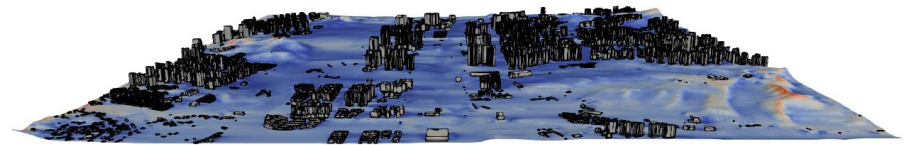
Case1



Case2

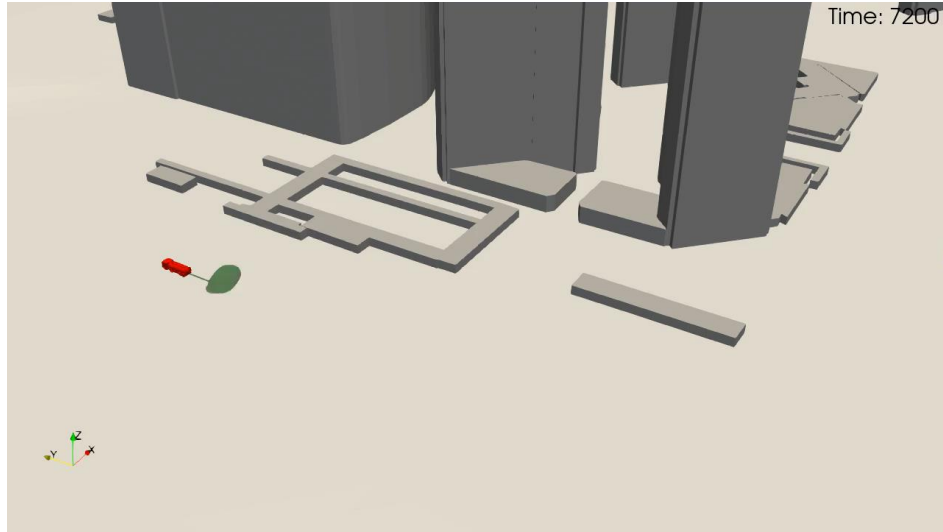


Case3

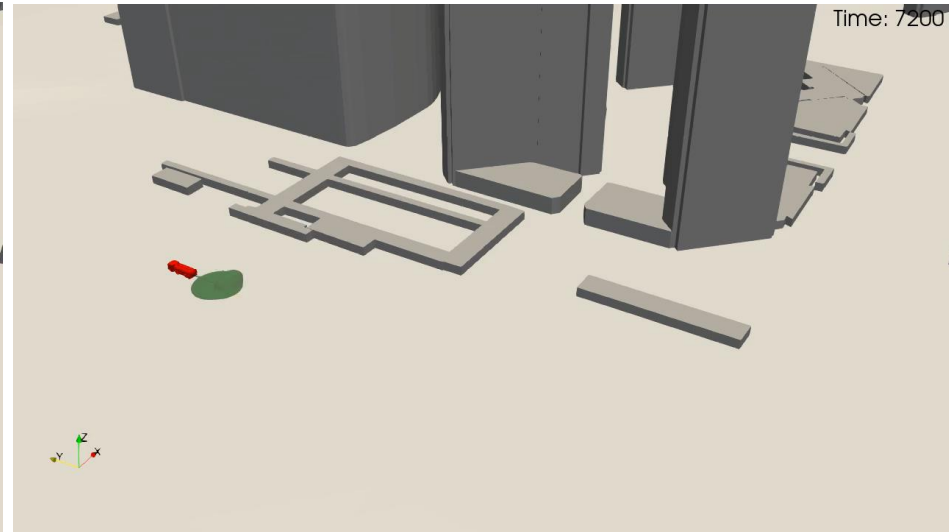


Case4

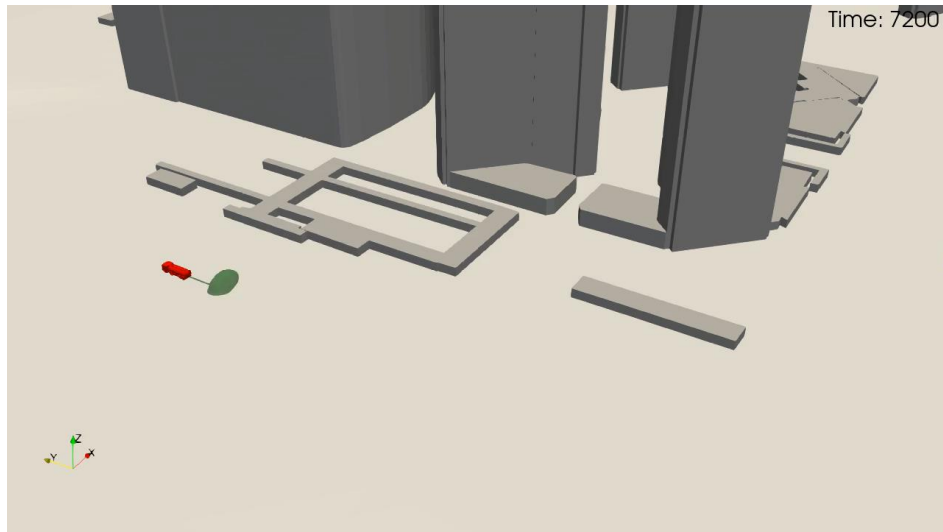
Close-up view(ERPG1)



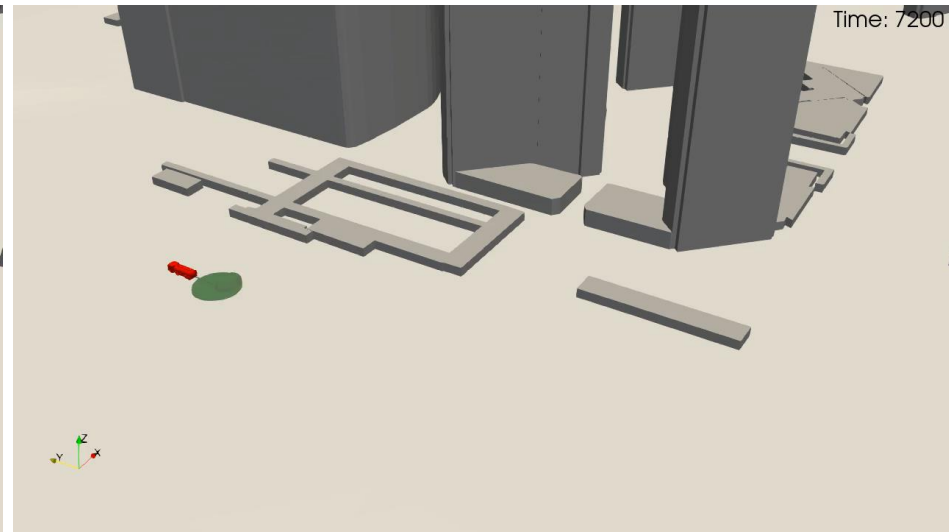
Case1



Case2



Case3



Case4

- OpenFOAM Guide - <https://www.openfoam.com/documentation/overview>
- FLACS Guide - <https://www.gexcon.com/support/flacs-cfd/technical-manuals/>
- 도시협곡에서의 바람유동과 오염물질 이송에 관한 수치적 연구 - 서울대학교 대학원, 건설환경공학부, 공학박사 학위 논문, Nguyen Thanh Chuyen
- 누출원 모델링에 관한 기술지침 - KOSHA GUIDE, P-92-2023, 한국산업안전보건공단
- 3-D dispersion model for simulation of accidental toxic gas releases in a metropolitan area - Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 69, March 2021, 104337, Mimi Min, Junyong Park, Chankyu Kang, Seungho Jung
a



감사합니다.