대한기계학회 주최

제13회 전국학생설계경진대회(2023년)

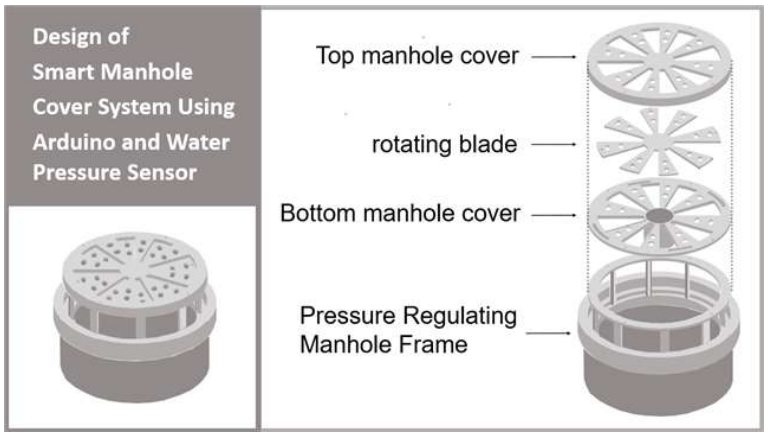
설계 최종 보고서

참가부	대학부 (○)				
참가분야	공모주제 (○) / 자유주제 ( )				
참가팀명	설비플렉스				
설계제목	수재난 대비 목적의 모터구동과 상승작용을 이용한 자가 압력 조절 스마트 맨홀 시스템				
지도교수/교사	(소속) 한밭대학교 (성명) 문주현 (연락처) (이메일)				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	이수민	한밭대학교 설비공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	이수민	한밭대학교 설비공학과 / 3학년	
2	김지겸	한밭대학교 설비공학과 / 3학년	
3	김성규	한밭대학교 설비공학과 / 3학년	
4	이성학	한밭대학교 설비공학과 / 3학년	
5	박찬혁	한밭대학교 설비공학과 / 3학년	
6	곽지호	한밭대학교 설비공학과 / 3학년	

설계 요약문

참가분야	**공모주제 (○) / 자유주제 ( )**
참가팀명	설비플렉스
설계제목	수재난 대비 목적의 모터구동과 상승작용을 이용한 자가 압력 조절 스마트 맨홀 시스템 개발
대표자명	이수민
요약문	1) 설계 배경 및 목적 최근 폭우로 전국의 저지대가 침수되어 큰 피해가 발생했다. 특히, 침수로 인해 길거리마다 필수적으로 존재하는 맨홀이 서울 도심 한복판을 지뢰밭으로 만들었다. **맨홀 뚜껑이 내부 수압을 견디지 못해 이탈하여 차량 또는 보행자에게 피해를 주었고 뚜껑이 이탈한 맨홀로 보행자가 추락하여 사망하는 사고 등이 발생**했다. 우리 팀은 맨홀 뚜껑에 스마트 기술을 활용한 기계적인 방법들을 적용하여 **맨홀 뚜껑의 이탈을 방지하고 그에 따른 인명피해를 없애고자** 스마트 맨홀을 설계하였다. 2) 설계 내용  우리가 설계한 스마트 맨홀은 위 그림과 같이 상부 맨홀 덮개, 회전날개, 하부 맨홀 덮개, 덮개 승강 지지대, 아두이노 회로, 센서, 그리고 모터로 구성된다. 또한, 우리는 스마트 맨홀이 다음과 같이 작동되도록 설계하였다. 침수 발생 시에는 **맨홀에 부착된 압력센서가 설정된 기준 수압을 감지하면 기계적 장치가 회전날개를 개폐**하고 이를 통해 유량을 조절하여 맨홀 내부의 압력을 감소시킨다. 3) 기대효과 **본 스마트 맨홀로 교체하면 맨홀 이탈에 의한 추락사고와 기물파손 방지에 기여할 수 있고 측정된 압력 데이터에 GIS를 적용한다면 맨홀의 고장 여부 확인, 인력 및 자본의 절약 등** 이점이 더욱 커진다.

수재난 대비 목적의 모터구동과 상승작용을 이용한 자가 압력 조절 스마트 맨홀 시스템 개발

이수민* ·곽지호* ·김성규* ·김지겸* ·박찬혁* ·이성학* ·문주현*†
*한밭대학교 설비공학과

Development of a Self-Pressure-Controlled Smart Manhole System Using Motor-Driven and Lifting Mechanisms for Disaster Preparedness Purposes

Su-Min Lee*, Ji-Ho Kwak*, Seong-Kyu Kim*, Ji-Kyum Kim*, Chan-Hyuck Park*, Sung-Hak Lee* and Joo-Hyun Moon*†
* School of Building and Plant Engineering, Hanbat Natational University

(Received May 8, 2023 ; Revised July 10, 2023 ; Accepted September 11, 2023)

Key Words: Manhole Fall Prevention(맨홀 추락 방지), Arduino Coding(아두이노 코딩), Water Pressure Sensor(수압센서), Step Motor(스텝모터), Moment of inertia(관성모멘트), Bernoulli's Theorem (베르누이 정리), Extreme Rain(극한호우)

초록: 최근 극한호우로 배수구 내부 수압 증가에 따라 맨홀 덮개가 이탈하면서 인적, 물적 피해와 맨홀 내부로 추락하는 사고가 발생하고 있으며, 이와 관련된 방지 대책이 요구되고 있다. 본 연구에서는 침수 시 맨홀 이탈을 방지하고 맨홀 내부 압력을 자체적으로 조절할 수 있는 '스마트 맨홀'을 고안 및 디자인했다. 상부 맨홀 덮개, 회전날개, 덮개 승강 지지대, 하부 맨홀 덮개로 구성된 구조이다. 수집한 데이터를 바탕으로 회전날개를 회전시켜 1차 압력조절과 덮개 승강 지지대의 승강 작용을 통해 2차 압력조절을 하여 배수구 내의 용량을 조절한다. 일반 맨홀 덮개 대비 유속, 압력의 감소효과를 전산유동해석을 통해 분석하였다. 도시침수지도와 GIS 시스템을 도입하면 경제성 확보 및 유지, 관리 측면에서도 도움될 것이라 판단된다.

Abstract: The 'Smart Manhole' is engineered to prevent manhole dislodgment during heavy rain by autonomously regulating internal pressure with a rotating wing and cover elevation supporter. Computational fluid dynamics analysis demonstrates its effectiveness in reducing flow velocity and pressure compared to traditional covers. Integration with urban flooding maps and GIS systems enhances cost-effective drainage system maintenance and management. Furthermore, this innovative approach to manhole cover design improves safety during extreme weather.

1. 서 론

최근 이상기후로 인해 발생한 폭우로 하천 범람, 저지대의 침수 등 전국적으로 큰 피해가 발생했다. 흔히 폭우의 종류에는 호우주의보, 호우경보만 알고 있지만, 사실 피해 사례의 80%가 극한 호우 상태일 때 발생한다. 극한호우란 시간 당 누적강수량이 50mm가 넘고 3시간 동안 90mm에 도달한 때를 말한다.[22] 최근 들어 극한 호우의 발생 횟수가 증가함에 따라 이로 인한 피해의 대비가 필요하다. 기상청 자료를 활용해 연도별 극한 호우 기록 횟수를 Fig. 1에 나타내보았다.

본 설계는 폭우로 인한 피해 중 맨홀과 관련된 사고에 집중하였고, 맨홀 덮개가 이탈하여 발생하는

† Corresponding Author, jhmoon9@hanbat.ac.kr
ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

사고의 예방을 주목적으로 설정했다. 맨홀 덮개의 이탈은 극한 호우처럼 비가 짧은 시간에 강하게 내리면 순간적으로 우수관이 감당할 수 있는 용량을 초과하여 우수가 역류하는 과정에서 발생한다.[15] 맨홀 덮개 이탈로 인한 사고는 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 맨홀 덮개가 내부 수압을 견디지 못하고 이탈하여 차량 또는 행인을 가격해 피해를 입히는 경우로 2022년 8월 집중호우로 인해 제주에서 맨홀 덮개가 수압을 이기지 못하고 솟구치면서 버스를 강타해 버스 창문이 파손되고, 도로 아스팔트가 부서지는 사고가 있었다. 두 번째는 맨홀 덮개가 이탈된 후 맨홀 구멍으로 보행자가 추락하는 사고이다. 실제로 2022년 8월 8일 서초구에서 길을 가던 남매가 덮개가 날아간 맨홀 구멍을 확인하지 못하고 추락하여 숨지는 사고가 있었고, 2023년 7월 15일 충북 괴산군에서도 폭우로 배수가 원활하지 않던 맨홀을 관리하던 중 부자(父子)가 추락하는 사고가 있었다. 또한, 7월 16일에도 공주 옥룡동에서도 남성이 맨홀에 빠져 숨지는 사고가 있었다.

집중호우로 인한 맨홀 이탈의 위험성을 알리고자 국립재난안전연구원[2]에서 실시한 실험에 따르면 시간당 50mm의 집중호우가 강남역에 발생했을 경우 40kg가량의 철제 맨홀 덮개가 41초 만에 지상으로부터 27cm가량 튀어 오르는 것으로 나타났다. 이는 맨홀 역류 현상이 순간적으로 빠르게 진행되고 그에 따라 튀어나온 맨홀 덮개가 보행자에게 위협이 된다는 것을 보여준다.

기존 맨홀 덮개의 형태를 변화시키고 아두이노와 수압 센서를 활용하여 본 설계를 고안했다. 1차 압력 조절인 모터를 이용한 맨홀 덮개의 회전과 2차 압력 조절인 맨홀 덮개의 승강을 통해 맨홀 내부의 수압을 감소시켜 맨홀 주변으로부터 발생할 수 있는 피해를 방지하는데 기여하고자 한다.

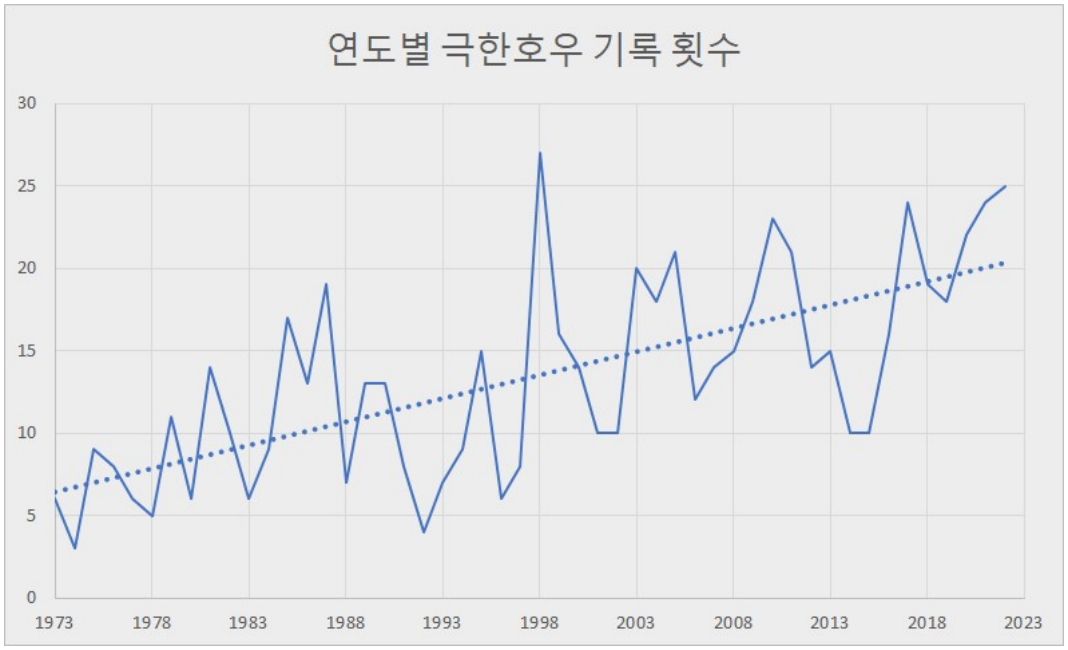
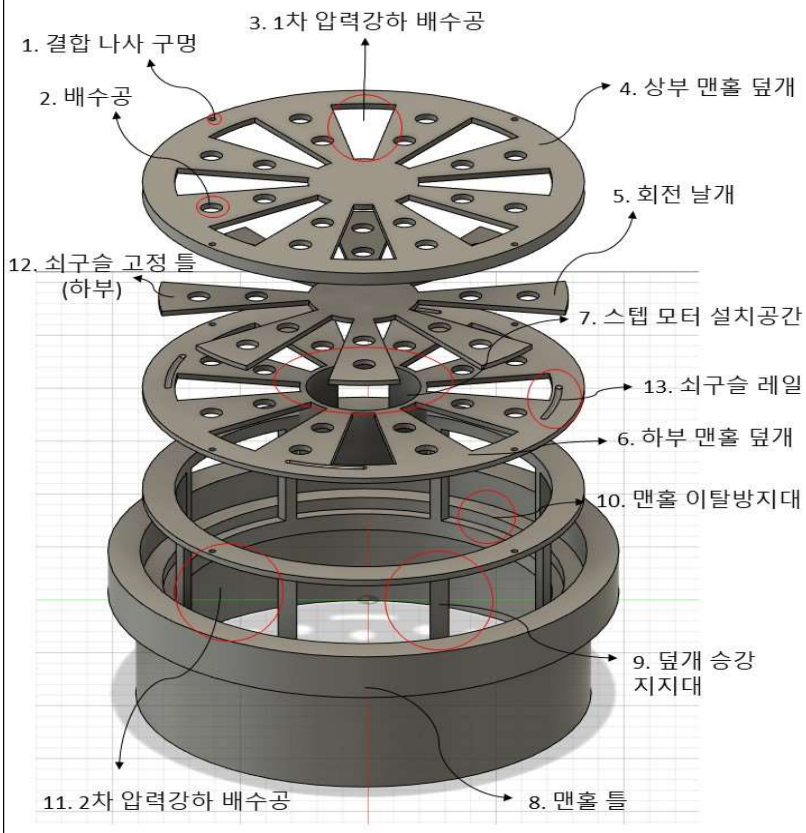


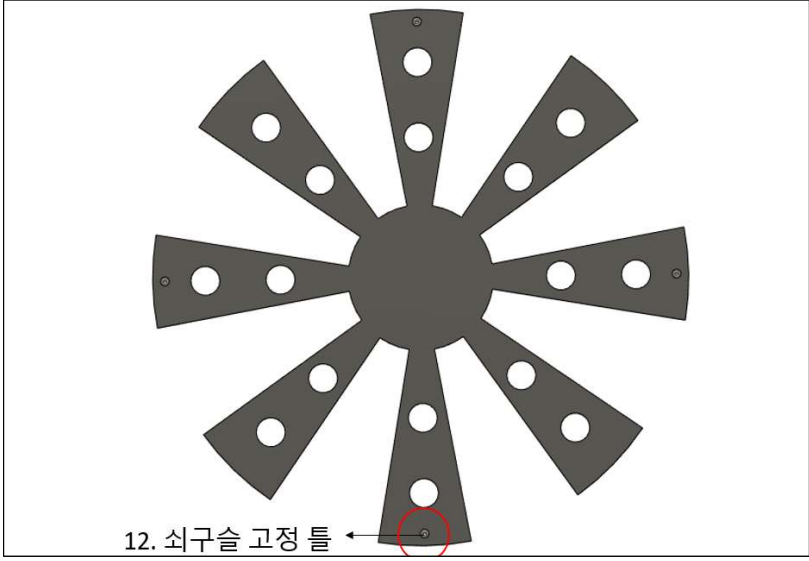
Fig. 1 Number of extreme lakes per year

2. 설계핵심내용

2.1 용어정리

Table 1 Smart manhole product quotation





번호	명칭
1.	결합 나사 구멍
2.	배수공
3.	1차 압력강하 배수공
4.	상부 맨홀 덮개
5.	회전 날개
6.	하부 맨홀 덮개
7.	스텝 모터 설치공간
8.	맨홀 틀
9.	덮개 승강 지지대
10.	맨홀 이탈 방지대
11.	2차 압력강하 배수공
12.	쇠구슬 고정 틀 (날개 하단)
13.	쇠구슬 레일

2.2 시장 분석

2.2.1 하수도 맨홀 규격 선정[1, 21]

Table 2 Table on the material, shape, type, size and weight of sewer manholes

재질	형태	종류	부도 번호	규격(mm)	덮개 수 (개)	무게(kg/조) 이상		
						덮개	틀	계
회주철	원형	하수도	1	Ø648×110	1	82	61	143
구상 흑연 주철 · 탄소강 주강	원형	상하수도용	4	Ø648×110	1	63	50	113
		상하수도용	8	Ø766×150		114	105	219
		상하수도용	12	Ø918×135		135	130	265
		상하수도용	15	Ø648×110 (틀 직각형)		63	50	113
		상하수도 (잠금형)	16	Ø648×110		63	50	113
	원형	상하수도	75	Ø375×85	1	9	9	18
			76	Ø375×150		9	14	23
			77	Ø386×85		9	9	18
			78	Ø386×150		9	14	23
			79	Ø450×90		14	15	29
			80	Ø450×150		14	21	35
			81	Ø253×150		5	10	15
			82	Ø548×60		28	23	51
			83	Ø548×110		28	32	60

Table 3 Table of materials and levels used in manholes

구 분	요구수준
회주철	SPS-KFCA-D4301-5015 GC250
구상 흑연 주철	SPS-KFCA-D4302-5016 GCD500
탄소강 주강	SPS-KFCA-D4101-5004 SC450
손잡이 및 속 덮개	KS D3503의 SS400
고무 패킹	사용자와 주문자의 협의에 따른다.

비고 : 구상흑연주철 품에 한하여 흑연 구상화율은 80 % 이상이어야 한다.

스마트 맨홀 제작 시 맨홀의 규격은 Ø648*110mm로 선정하였다. 선정이유로는 가장 보편화된 규격일 뿐만 아니라 학교 주변 맨홀의 규격을 실측해본 결과 대다수의 맨홀이 Ø648mm로 측정되었기 때문이다. 가장 보편화된 규격으로 선정했기 때문에 기존 맨홀 덮개를 우리가 설계한 스마트 맨홀로 교체 시 추가적인 시공을 최소화하여 경제적인 측면에서 유리함이 있다.

철의 탄소 함유량이 2% 이상인 것을 주철이라 한다. 주철에는 여러 가지 종류가 있다. 맨홀에 주로 사용하는 주철은 회주철과 구상흑연주철이다. 회주철은 용해로에서 선철, 고철 등을 배합, 용해하여 제조한 것이고 구상 흑연 주철은 탄소가 구상 형태로 되어있는 주철이다. 구상 흑연 주철은 내식, 내구성이 우수하고 회주철보다 탄력계수가 크고 피로한도가 1.5~2배 이상이고 강인성이 뛰어나고 강도와 연신율이 우수하다는 장점이 있다. 따라서 우리 스마트 맨홀에는 구상 흑연 주철을 선정하기로 했다.

2.2.2 타 제품 조사

현재 가장 광범위하게 사용되고 있는 맨홀 덮개는 일반 원형 주철 맨홀 덮개와 잠금장치 맨홀 덮개가 있다. 일반 원형 주철 맨홀 덮개는 집중호우로 인한 침수 시 우수관의 역류 현상으로 수압을 견디지 못해 맨홀 덮개의 이탈이 쉽고, 차량 통행으로 인한 이탈도 쉬워 차량 파손 사고가 발생하는 경우가 있다. 이 문제를 방지하기 위해 개발된 것이 잠금장치 맨홀 덮개이다. 하지만 관리하는 과정에서 잠금장치를 여러 번 여닫다 보면 체결 부위가 닳게 되어 내부 수압에 의한 이탈 사고가 발생할 수 있다. 이를 위해 잠금장치의 체결력을 강하게 하면 오히려 덮개가 파손되는 사고가 유발될 수 있다.

Table 4 Manhole related market products

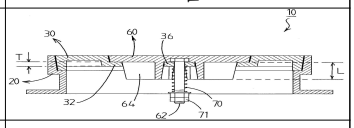
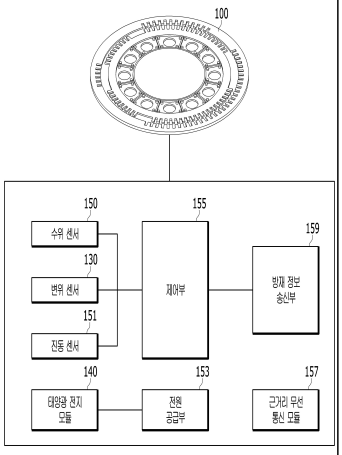
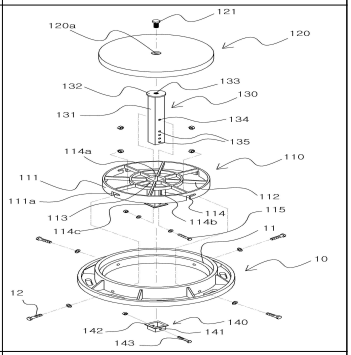
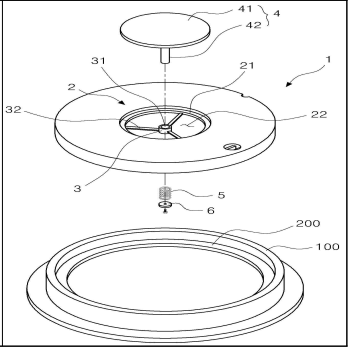
원형 주철 맨홀 덮개	잠금장치 맨홀 덮개	맨홀 추락 방지 시설물

서울시는 2022년 8월 집중호우 이후 맨홀 추락 사고 방지를 위한 시설물을 도입하기로 했다. 서울시의 하수도 맨홀 27만여 개 중 1만 개, 서초구에는 108곳에 시범 도입을 할 예정이다. 하지만 맨홀 추락 방지 시설물의 문제점은 물의 흐름을 방해하여 배수가 원활하게 진행되지 못하게 하고, 근본 대책인 수압을 낮추는 것에 도움이 되지 못한다. 따라서, 맨홀 이탈과 파손으로 인한 사고는 방지할 수 없다. 수압 상승으로 인한 맨홀의 파손을 방지하기 위해 수압 조절 맨홀 덮개가 개발되었다. 하지만 수압 조절 맨홀 덮개는 하수의 역류 시 맨홀 상부의 상승만으로 내부의 물을 밖으로 배출하는데 이때, 주행하는 차량이 돌출된 맨홀 덮개에 의해 파손될 우려가 있다.

2.2.3 특허 조사 및 분석

스마트 맨홀과 유사한 제품이 존재하는지 알아보기 위해 특허 조사를 하였다. 특허정보 검색서비스 ‘키프리스(KIPRIS)’ 사이트를 이용하였다. 키워드는 ‘수압 조절 맨홀’과 ‘스마트 맨홀’로 검색하였고 각각 315건과 489건이 등록, 공개되었다. 그중 우리의 스마트 맨홀과 유사한 제품 4가지를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Patent data investigation

명칭	출원번호	그림
수압조절기능을 갖는 맨홀 덮개	1020110003809	
스마트 맨홀 덮개	1020200057503	
맨홀 뚜껑의 이탈제한 및 복원장치	1020110121815	
수압조절기능을 갖는 이중 맨홀 뚜껑	1020100029050	

우리가 설계한 스마트 맨홀과 가장 유사한 제품은 ‘수압 조절 기능을 갖는 맨홀 덮개’라고 생각했다. ‘수압 조절 기능을 갖는 맨홀 덮개’[16]는 하수 역류 기능을 갖는 맨홀 덮개에 추가로 보조 덮개를 설치하여 하수 역류 시 보조 덮개의 승강을 이용해 단위시간 당 많은 양의 하수가 배수될 수 있도록 한다. 설계한 스마트 맨홀과 목적 및 수압 조절의 형태가 가장 유사하지만 수압 센서나 다른 자동화된 센서의 연결 없이 수압에 의해 자연적으로 승강을 하는 점과 1차 압력 조절과 2차 압력 조절 등의 수압의 정도에 따른 구분이 없다는 차이점이 있다.

다음으로는 ‘스마트 맨홀 덮개’[10]가 있다. ‘스마트 맨홀 덮개’는 하수의 수위 증가와 맨홀 덮개가 손상되는 전조 증상이 발견될 시 원격으로 정보를 전송하여 맨홀을 관리하는 제품이다. 센서를 이용하는 점은 유사하다. 하지만 ‘스마트 맨홀 덮개’는 센서를 통해 현 상황의 정보만을 제공하는 점과 맨홀의 자동

적인 현장 대처가 아닌 관리자의 조치가 필요하다는 차이점이 있다.

그 외에 '맨홀뚜껑의 이탈 방지 및 복원 장치'와 '수압 조절 기능을 갖는 이중 맨홀 뚜껑' 등 목적은 유사하지만 형태와 수압 조절 방식에서 차이가 있고 센서의 이용이 없는 제품들이 키프리스(KIPRIS)에 등록되어 있었다.

2.2.4 관련 논문 조사 및 분석

본 설계와 유사한 논문을 조사하고 차별성을 확보하기 위해 DBpia를 활용하였다. 키워드 '맨홀'을 통해 332건이 검색되었다. 그중 본 설계와 유사하다고 생각되는 3건을 Table 6.에 나타내보았다.

Table 6 Thesis survey

제목	저자
승강 구조를 가지는 이탈 방지 맨홀 뚜껑 최적 설계	배상우, 김재열, 양승진, 허진호
중대 시민재해 예방을 위한 맨홀 내부 '압력 저감 맨홀 뚜껑' 개발	김경수, 김건영, 박정용, 강종수, 김용철, 박성민
3D 프린팅과 구조해석을 이용한 맨홀의 부양장치 설계 및 제작	이형욱

'승강 구조를 가지는 이탈 방지 맨홀뚜껑 최적 설계'[9]는 기존의 맨홀 덮개에 수압 조절을 위해 승강 작용을 할 수 있도록 중앙 부분에 맨홀 덮개를 설치하였다. 본 설계와 폭우 시 맨홀 내부의 압력을 감소시킨다는 목적은 유사하다. 하지만 아두이노와 센서의 이용이 없고 승강 작용만을 통해 수압 조절을 하는 방식의 차이점이 있다.

"중대 시민 재해 예방을 위한 맨홀 내부 '압력 저감 맨홀 뚜껑' 개발"[11] 압력 저감 밸브를 이용하여 맨홀의 내부 압력을 감소시켜 맨홀의 이탈을 방지하는 방식이다. 본 설계는 하수도용 맨홀에 사용되지만 위 논문은 지중송전선로 맨홀에 사용되는 점, 맨홀 덮개의 형태 변화가 아닌 압력 저감 밸브를 이용한다는 점에서 차이가 있다.

'3D 프린팅과 구조해석을 이용한 맨홀의 부양 장치 설계 및 제작'[12]은 맨홀 틀에 부양 기능이 가능한 부양 장치와 후크를 설치하여 맨홀 덮개를 상승시키는 방식이다. 본 설계와의 차이점은 아두이노와 센서의 이용이 없는 점, 맨홀 덮개의 형태 변화가 아닌 후크를 이용하는 점 등이 있다.

위 3건 외에 아두이노나 센서를 이용한 논문은 모두 맨홀의 이탈 정보를 담당자와 시민들에게 전달하여 위험을 알리는 방식으로만 사용되고 맨홀의 수압 조절을 위한 개폐에 사용되지 않았다.

2.3 경제성

2.3.1 스마트 맨홀 구성 제품 견적서

본 스마트 맨홀을 제작하기 위해선 459,603원의 금액이 사용된다. 일반적인 Ø648mm 맨홀의 경우 150,000원 정도의 가격이 형성되어 있고, 자가 부상형 맨홀의 경우 300,000원 ~500,000원 사이의 가격이다. 본 설계의 제작 비용이 459,603원이므로 자가 부상형 맨홀과 비슷한 가격을 형성한다.

서울시에는 2022년 10월 기준 277,133개의 맨홀이 설치되어 있다. 서울시의 노후 맨홀 정비 예산은 2019년 15억 원, 2022년 15억 원이었지만 2023년 50억 원으로 크게 증가하였다.[20] 2023년 이전의 예산 계획에서는 단순히 불량 맨홀의 정비만 포함되어있지만, 2023년 예산안에서는 맨홀 정비, 맨홀 추락방지 시설 설치 예산이 추가되었다. 이 중 추락방지 시설 설치 예산이 약 35억원이다. 이는 최근 집중호우로 인한 맨홀 사고의 위험성을 정부에서도 충분히 인지하고 대비책 마련의 필요성을 느끼고 있음을 알 수 있다. 서울시에서 선정한 맨홀 추락방지 시설 설치 비용이 1개소당 1,200,000원이므로 본 설계 4개를 설

치할 수 있는 비용이다. 맨홀에 추락방지 시설을 설치하는 대신 본 설계의 스마트 맨홀로 교체하는 것이 경제적인 측면에서 유리함이 있다. 또한 2023년 서울시의 노후 맨홀 정비 예산 50억원을 전부 사용한다면 약 10,000개의 본 설계의 스마트 맨홀을 설치할 수 있으며 강남 등 홍수 피해에 취약한 지역 위주로 먼저 교체하고 새롭게 시공하는 맨홀에 우리 설계를 적용할 수 있다.

Table 7 Smart manhole product quotation

	수량(EA)	규격(mm)	단가(원)
구상흑연주철 맨홀	1	Ø648*110	300,000
아두이노 우노보드	1	53*73*11	12,900
수압센서	1	19*15*05	55,000
스텝모터	1	56*56*95	60,500
모터 드라이버	1	27*31*19	4,400
점퍼케이블(암-수)	40	200	3,000
쇠구슬	4	3	53
방수테이프	2	38*3,200	9,900
배터리 홀더	1	55*30*20	1,100
9V 건전지	1	48.5*26.5*17.5	3,000
방수 LED 롤	1	125	9,750
총합(원)			459,603

2.3.2 공급 방식

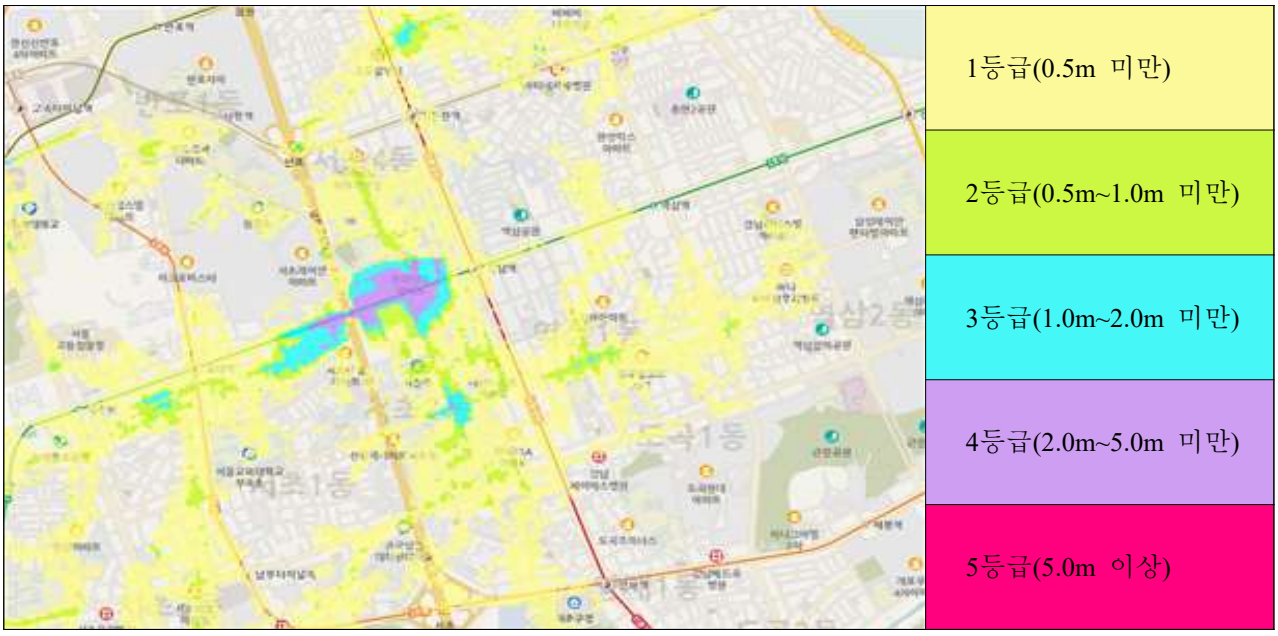


Fig. 2 Urban flood map and legend(Seocho-gu)

Fig. 2는 극한 호우 조건에서 빗물처리시설(배수펌프장, 하수관거 등)의 용량 초과 및 고장 시 피해가 예상되는 가상의 침수 범위를 표시하고 침수 수심을 등급별로 나타낸 지도이다. 경제성을 고려하여 전 지역의 하수 맨홀이 아닌 우선으로 도시침수 지도에서 나타나는 침수 위험 지역과 저지대에 스마트 맨홀을 설치한다면 맨홀 이탈에 대한 사고 피해를 감소시킬 수 있을 것이다.

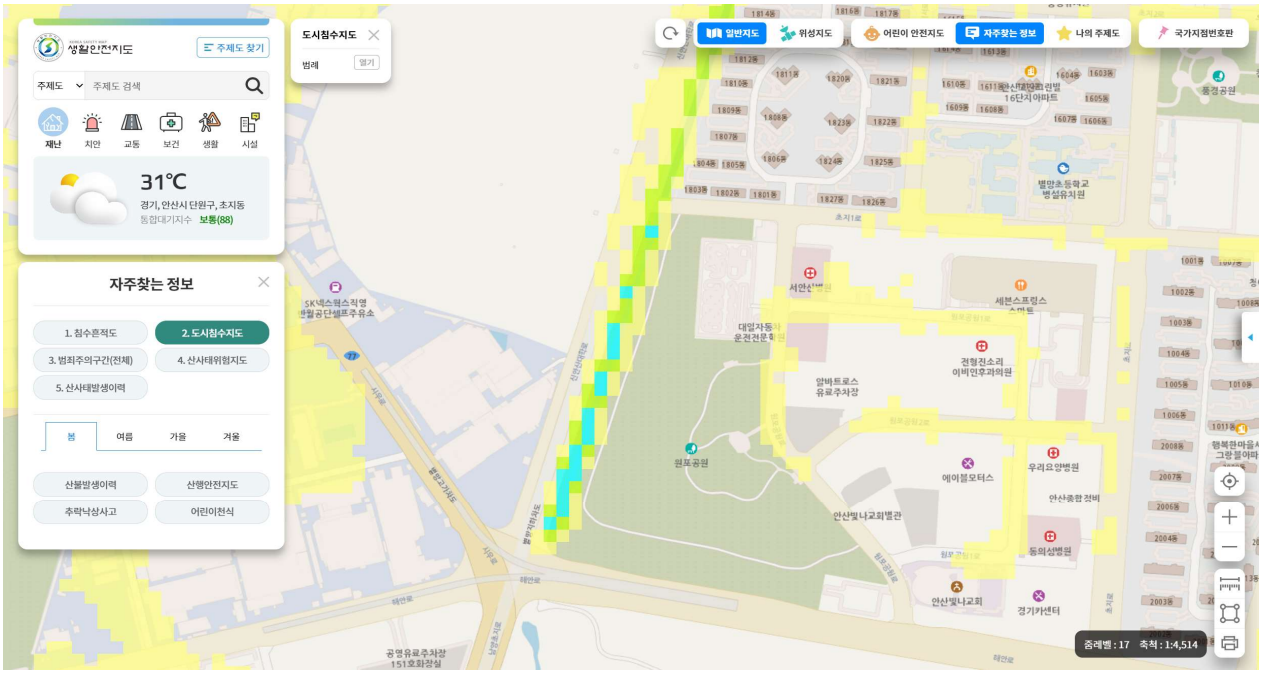


Fig. 3 Urban flood map(Ansan-si)

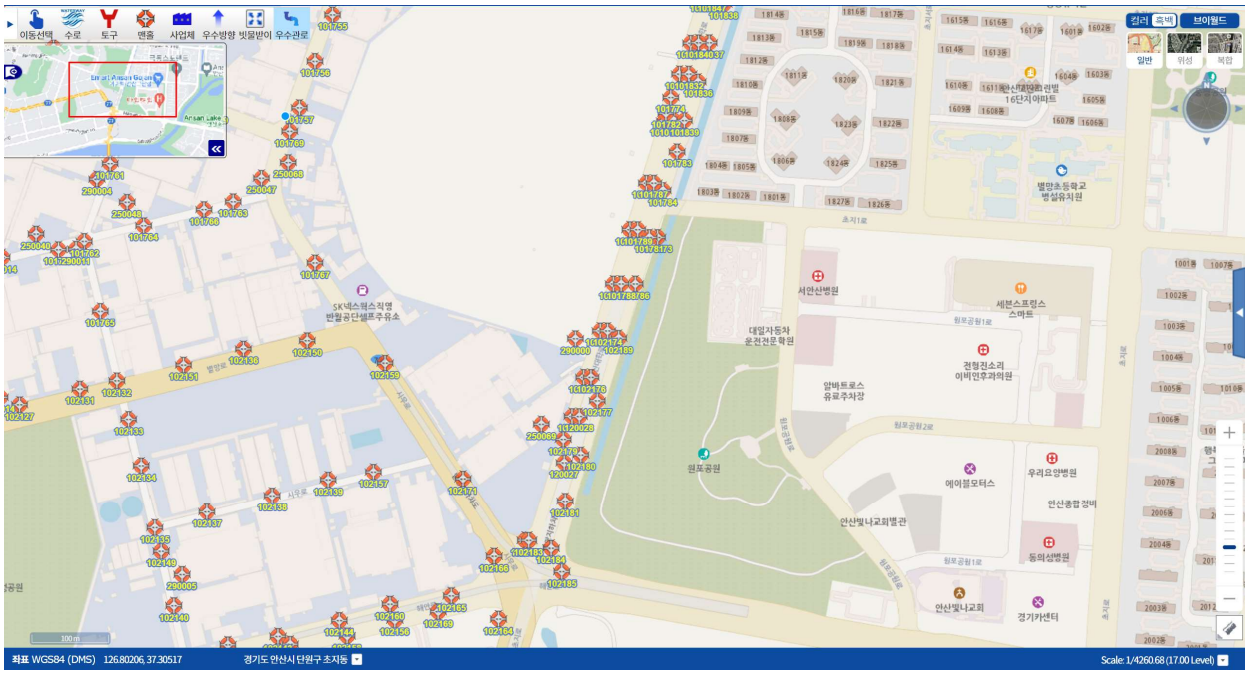


Fig. 4 Urban manhole distribution map(Ansan-si)

Fig. 2를 바탕으로 침수 위험 지역의 맨홀 위치와 개수를 파악하는 것이 중요하다고 생각했다. 예시로 Fig. 3과 Fig. 4는 도시침수 지도와 GIS 시스템을 통해 안산시의 침수 위험 지역과 그 장소의 맨홀 위치를 나타내보았다. 안산시의 경우 원포공원 부근인 신안산대학로가 침수 위험 3단계로 표시되므로 그 장소 우수맨홀에 스마트 맨홀 덮개를 설치하면 침수로 인한 피해를 감소시킬 수 있다. 이처럼 안산시뿐만 아니라 전국에 걸쳐 도시침수 지도를 통해 침수 위험 지역을 예측하고 GIS 시스템을 사용하여 맨홀의 수와 위치를 확인하여 부분적으로 스마트 맨홀을 설치하면 경제성 확보 및 위험 지역의 맨홀 덮개 이탈 사고를 방지할 수 있다.

2.4 맨홀 덮개에 작용하는 수압 관련 수 계산식/ 계산과정 EES결과

2.4.1 수압 관련 수 계산식

시간당 강수량이 30mm가 넘는 집중호우 발생 시 저지대에 위치한 맨홀의 경우 빗물 유입으로 인한 역류 발생 가능성이 증가한다. 국립재난안전연구원[2]에서 시행한 '우수관거 맨홀사고 실증실험'의 결과 시간당 강수량이 30mm일시 1분 22초 만에 맨홀 덮개에서 물이 뿜어져 나오고 1분 25초가 지나면 맨홀 덮개가 이탈된다는 것을 확인할 수 있었다. 시간당 강수량이 30mm가 지속된다는 가정하에 맨홀 덮개에 작용하는 동적 압력을 계산하기 위한 방정식은 식 (1) 식 (2) 그리고 식 (3) 으로 표현할 수 있다.

식 (1)은 유량에 대한 방정식이고, 유량은 단면적과 속도의 곱으로 표현한다.

$$Q = A_1 \times v_1 \tag{1}$$

식 (2)는 연속 방정식이고 연속 방정식은 정상상태의 물의 흐름에 질량 보존의 법칙을 적용하여 얻어지는 방정식이다.

$$A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 \tag{2}$$

식 (3)은 우수관로 내의 물체가 흐름을 막음으로써 압력이 상승한다는 베르누이의 정리에서 동적 압력을 결정하는 방정식이다.

$$P = \frac{\rho \times v_2^2}{2} \tag{3}$$

또한 식 (4)는 시간당 강수량이 30mm라고 가정하였을 때, 유입 유량 Q는 $0.87m^3/s$이다.

$$Q = A_1 \times v_1 = 0.87m^3/s \tag{4}$$

식 (5), 식 (6)을 통해 개방 전 설계한 스마트 맨홀의 배수공에 작용하는 속도와 동적 압력은 다음과 같이 계산되었다.

개방 전

$$v_2 = \frac{A_1 \times v_1}{A_2} = \frac{Q_1}{A_2} = \frac{0.87m^3/s}{\pi \times (0.015m)^2 \times 32} = 38.5m/s \tag{5}$$

$$P = \frac{\rho \times v_2^2}{2} = \frac{999.1kg/m^3 \times (38.5m/s)^2}{2} = 740kPa \tag{6}$$

식 (7), 식 (8)을 통해 1차 압력조절을 한 후의 설계한 스마트 맨홀의 배수공에 작용하는 속도와 동적 압력은 다음과 같이 계산되었다.

1차 압력조절

$$v_2 = \frac{A_1 \times v_1}{A_2} = \frac{Q_1}{A_2} \tag{7}$$

$$= \frac{0.87m^3/s}{\pi \times (0.015m)^2 \times 16 + \frac{25}{360} \times \pi \times (0.255m)^2 - \frac{25}{360} \times \pi \times (0.075m)^2 \times 8} = 7.57m/s$$

$$P = \frac{\rho \times v_2^2}{2} = \frac{999.1kg/m^3 \times (7.57m/s)^2}{2} = 28.6kPa \tag{8}$$

식 (9), 식 (10) 을 통해 2차 압력조절을 한 후의 설계한 스마트 맨홀의 배수공에 작용하는 속도와 동적 압력은 다음과 같이 계산되었다.

2차 압력조절

$$v_2 = \frac{A_1 \times v_1}{A_2} = \frac{Q_1}{A_2} = \frac{0.87m^3/s}{\pi \times (0.325m)^2} = 2.62m/s \quad (9)$$

$$P = \frac{\rho \times v_2^2}{2} = \frac{999.1kg/m^3 \times (2.62m/s)^2}{2} = 3.4kPa \quad (10)$$

Table 8 Calculation results for the speed and pressure of the designed manhole before opening, primary pressure control, and secondary pressure control

	속도(m/s)	동적 압력(kPa)
개방 전	38.5	740
1차 압력조절	7.57	28.6
2차 압력조절	2.62	3.4

2.4.2 계산과정 EES결과

설계한 스마트 맨홀의 압력 변동에 따른 수 계산 결괏값과 비교하기 위해 기존에 배치되어있는 맨홀의 배수공의 크기를 실측하였다. 그리고 실측한 데이터를 바탕으로 유량과 면적의 변화에 따른 기존 맨홀의 압력 변동을 EES를 통해 표현해보았다.

2.4.2.1 기존 맨홀의 유량에 따른 압력 변동

Parametric Table

Table 1

1..4	A [m2]	P [kPa]	Q [m3/s]	V [m/s]
Run 1	0.009852	1042	0.45	45.68
Run 2	0.009852	3896	0.87	88.31
Run 3	0.009852	8698	1.3	132
Run 4	0.009852	14526	1.68	170.5

Fig. 5 Table of area, pressure, and velocity due to changes in flow rate

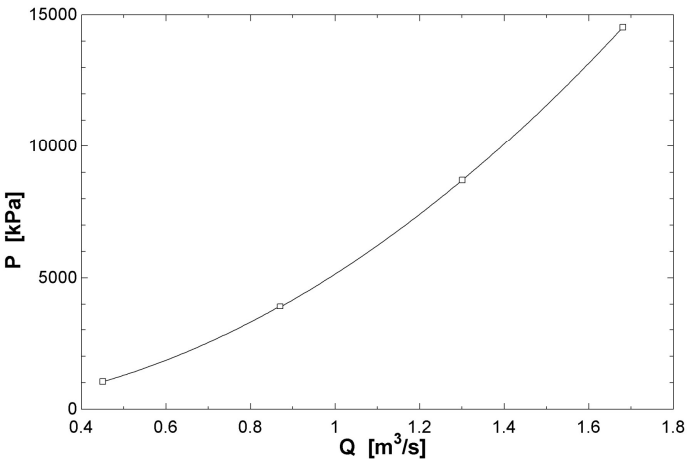


Fig. 6 Flow and pressure change graph

Fig. 5, Fig. 6에서 기존의 맨홀 배수공의 크기가 평균 2.6~2.8cm일 때 강수량에 따른 유입 유량에 변화를 통해 압력을 계산했다. 그 결과 강수량이 증가하면 압력이 상승하는 것을 알 수 있었고 그에 따라 맨홀 덮개의 이탈을 방지하기 어려울 것으로 판단했다.

2.4.2.2 맨홀 구멍의 면적에 의한 압력 변동

Parametric Table

Table 2

	A_1 [m2]	P_1 [kN]	V_1 [m/s]	F_1 [kN]	Q_1 [m3/s]
Run 1	0.04	236.3	21.75	9.453	0.87
Run 2	0.05014	150.4	17.35	7.54	0.87
Run 3	0.06029	104	14.43	6.272	0.87
Run 4	0.07043	76.22	12.35	5.368	0.87
Run 5	0.08058	58.24	10.8	4.692	0.87
Run 6	0.09072	45.94	9.59	4.168	0.87
Run 7	0.1009	37.16	8.625	3.749	0.87
Run 8	0.111	30.68	7.837	3.406	0.87
Run 9	0.1212	25.76	7.181	3.121	0.87
Run 10	0.1313	21.93	6.626	2.88	0.87

Fig. 7 Table of pressure, speed, force, and flow rates according to changes in area

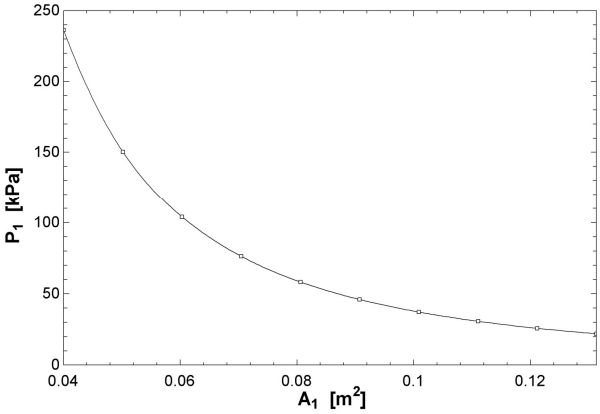


Fig. 8 Area and pressure change graph

Fig. 7, Fig. 8은 기존의 맨홀 배수공의 면적에서 그 면적의 크기가 증가하였을 때의 압력 변화를 측정하였다. 그 결과 맨홀 배수공의 면적이 증가하면 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

수 계산식과 EES를 진행하면서 압력이 변화한다는 사실을 확인할 수 있었다. 하지만 그 압력의 수치가 정확한 결괏값 인지는 수문학 프로그램이나 시뮬레이션을 통해 확인할 필요가 있다. 왜냐하면, 수 계산식과 EES 수식은 배수관의 전체 막힘으로써 우수관거로 하수가 전부 상승한다는 가정이 포함되어 있고 우수관거의 길이를 고려하지 않았기 때문이다.

국립재난안전연구원에서 시행한 맨홀 뚜껑 이탈 실험에서의 재원은 실험을 직접 담당한 김태훈 팀장님께 문의를 통해 우수관거의 길이 10m, 폭 1m로 제작하여 실험하였다는 것을 알 수 있었다. 하지만 본 학부생이 직접 제작하여 실험하기에는 수준이 부족하고 경제적인 부담이 있기에 한계가 있었다. 그래서 CFD 전산 유동 해석 프로그램을 통해 부족한 결과를 보충하고자 한다.

2.5 모터 선정

2.5.1 맨홀을 회전시키기 위한 모터의 최소 토크 결정 계산식과 계산과정

스마트 맨홀에서 5kg의 맨홀 회전날개를 회전시키기 위해서는 충분한 힘을 가진 모터가 필요하다. 따라서, 가장 이상적인 모터를 선정하기 위해 모터의 최소 토크를 계산해보았다.

식 (1)은 물체가 회전 운동할 때 토크를 구하는 방정식이다.

토크(Torque) = 관성모멘트(Moment of Inertia) × 각 가속도(angular acceleration) (1)

식 (2), 식 (3)은 각가속도를 계산하기 위해 필요한 방정식이다.

$$각가속도 = \frac{최종각속도 - 초기각속도}{시간} \quad (2)$$

$$각속도 = \frac{각도변화량}{시간} \quad (3)$$

식 (4)는 초기 각속도를 0으로 가정하고 원판을 중심으로 1초 동안 22.75° 회전할 때 각가속도를 나타내었다.

$$\text{각도}(rad) = 22.75^\circ \times \frac{\pi}{180} = 0.396rad \quad (4)$$

$$\text{최종 각속도} = \frac{\text{각도 변화량}}{\text{시간}} = \frac{0.396rad}{1s} = 0.396rad/s$$

$$\text{각 가속도} = \frac{\text{최종 각속도} - \text{초기 각속도}}{\text{시간}} = \frac{0.396rad/s}{1s} = 0.396rad/s^2$$

관성모멘트는 Fusion 360을 통해 $2.72kg \circ m^2$임을 확인하였고 식 (5)를 통해 토크를 계산해보았다.

$$\text{토크} = \text{관성모멘트} \times \text{각 가속도} = 2.72kg \circ m^2 \times 0.396rad/s^2 = 1.0752kg \circ m^2/s^2 = 1.0752N \circ m \quad (5)$$

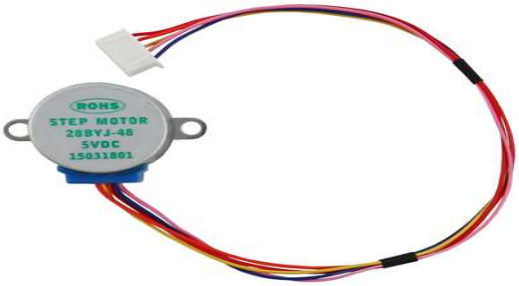
위 계산 결과 모터를 선택할 때 최소 $1.0752N \circ m$ 이상의 토크를 가져야 한다는 것을 알 수 있다.

2.5.2 필요 전압

모터의 전압은 아두이노 보드의 사용되는 전압에 따라 변경된다. 만약 아두이노 보드와 모터의 전압이 일치하지 않으면 모터가 정상적으로 회전하지 않는다. 그러므로 먼저 아두이노 보드의 전압을 결정하고 동일한 전압이 사용되는 모터를 선정해야 한다.

먼저 실험에 사용되는 아두이노 보드는 5V가 사용되므로 그에 따라 5V 스텝모터를 선정했다. 다음으로 시제품에 적용되는 모터는 최소 토크 값 1.0752를 고려하여 선정해야 한다. 선정된 스텝모터 SF2563C31B401은 12V의 전압이 필요하므로 모터 드라이버를 사용하여 아두이노 우노와 전압을 맞춰야 한다.

Table 9 Arduino and step motor specifications

아두이노 우노	모터 드라이버
실험용 스텝모터(5V)	제품용 스텝모터(12V)
	

2.6 설계 시 제약조건

‘스마트 맨홀’을 설계하는 과정에서 발생할 수 있는 제약조건은 다음과 같다.

첫째, 맨홀 덮개의 한쪽 면에만 큰 힘이 작용하면 맨홀의 승강 작용이 원활히 이루어지지 않을 수 있다.

둘째, 하단 맨홀 덮개를 상단 맨홀 덮개 아래에 단단히 고정하는 방식에 문제가 있다.

셋째, 모터가 받는 하중이 커서 모터의 회전이 작동하지 않거나 수명이 짧아질 수 있다.

넷째, 2차 압력 조절 과정에서 맨홀 덮개가 상승한 상태에서 보행자의 발 걸림과 차량 파손 등의 피해가 발생할 수 있다.

다섯째, 점검 및 보수를 위해 맨홀 덮개의 분해와 내부로 출입이 어려울 수 있다.

2.7 설계 시 해결방안

제약조건에 작성한 문제 중 둘째, 셋째, 다섯째는 PPT Schematic과 Fusion 360을 이용해 여러 디자인을 제작하여 최적의 모델을 선정할 예정이다. 제약조건 첫째는 맨홀 덮개 승강 지지대와 맨홀 틀에 레일을 구성하여 한쪽 부분에만 큰 힘이 작용하더라도 일정하게 승강 작용이 가능하게 한다. 제약조건 중 넷째는 상단 맨홀 덮개 부분에 아두이노와 연동이 가능한 방수 LED 를 부착해 맨홀 상승 시 운전자나 보행자의 눈에 잘 띄도록 한다.

2.8 3D 프린팅 설계과정(Autodesk Fusion 360)

우리가 고안한 맨홀의 시제품 제작을 위해 3D 프린터를 활용하기로 하였고 이를 위한 정보를 수집하던 중 학교에서 3D 프린팅 교육 프로그램을 진행한다는 소식을 듣게 되었고 3시간의 교육 이수 후에 Autodesk Fusion 360 프로그램을 이용해 3D로 제품 설계를 한 후 도면을 출력해보았다.

우선 3D 설계는 처음 제안서에 제출한 2D 그림을 바탕으로 3D 설계를 해보았다.

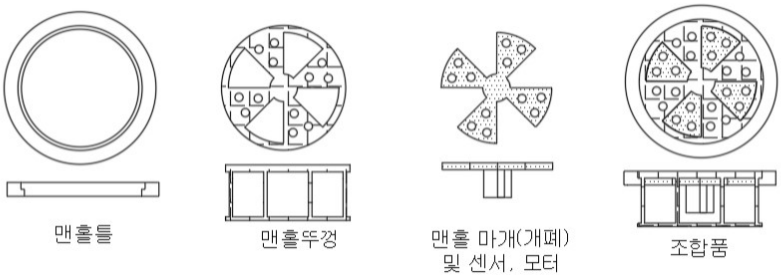


Fig. 9 2D manhole plot on proposal

수재난 대비 목적의 모터구동과 상승작용을 이용한 자가 압력 조절 스마트 맨홀 시스템 개발

3D 설계 과정은 다음과 같다.
우선, 3D 프린터로 제품 출력을 위해 작성한 맨홀 틀 규격은 폭 15mm이다.

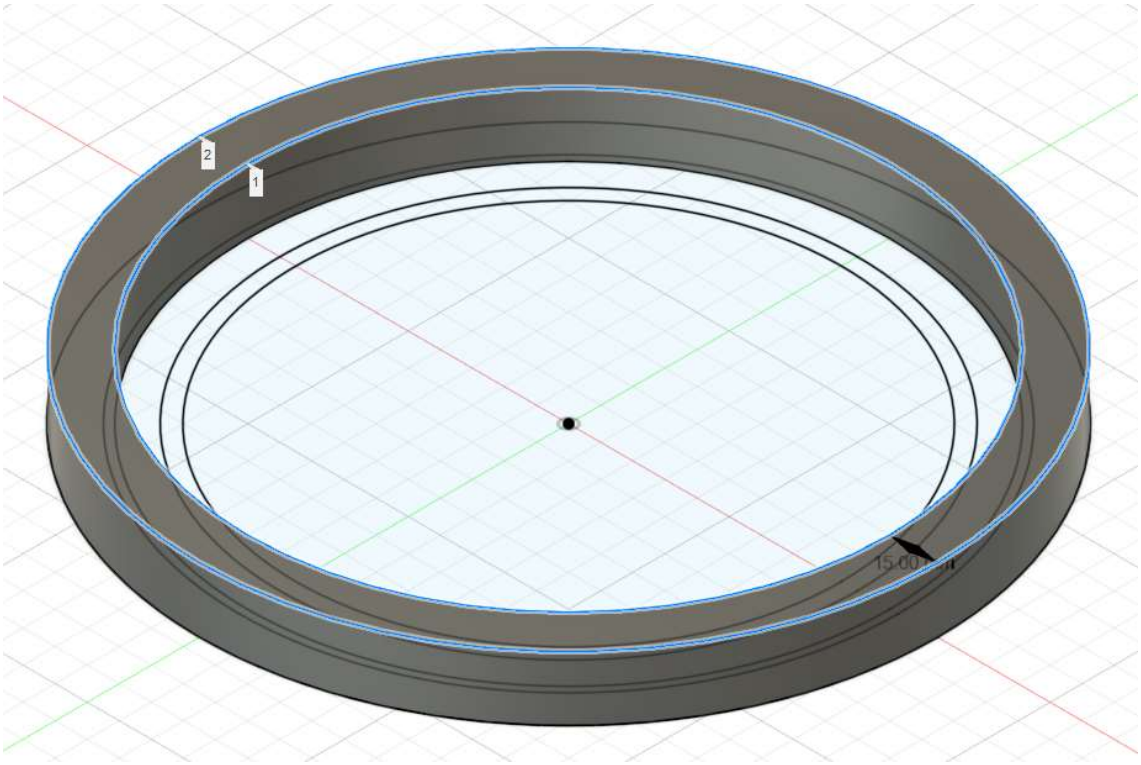


Fig. 10 Manhole frame

맨홀 덮개의 경우 제안서에는 부채꼴의 각도를 40도로 총 4개의 구멍으로 구성했었지만 40도 정도의 구멍은 유아의 발이 빠져 다칠 우려가 있어 부채꼴 각을 20도로 줄이고 총 8개의 구멍으로 다시 설계했다. 작은 구멍도 10mm로 하였고 측면 개구부는 40도로 하였다.

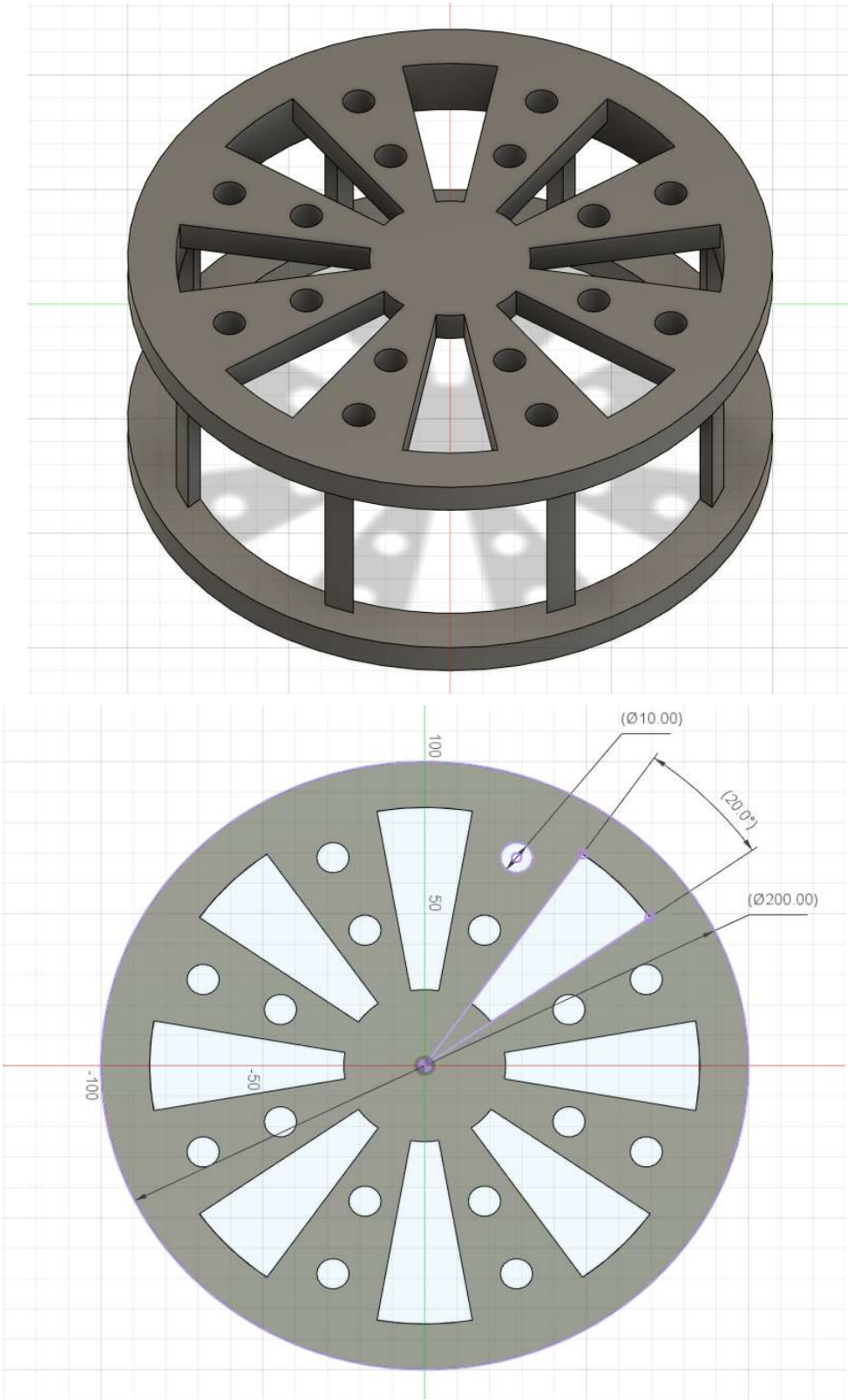


Fig. 11 Manhole cover

하단 맨홀 덮개는 프로펠러 모양으로 제작하여 상단 맨홀 덮개 하부에서 모터에 의해 고정된다. 스텝 모터가 들어가는 공간은 35mm로 하였다.

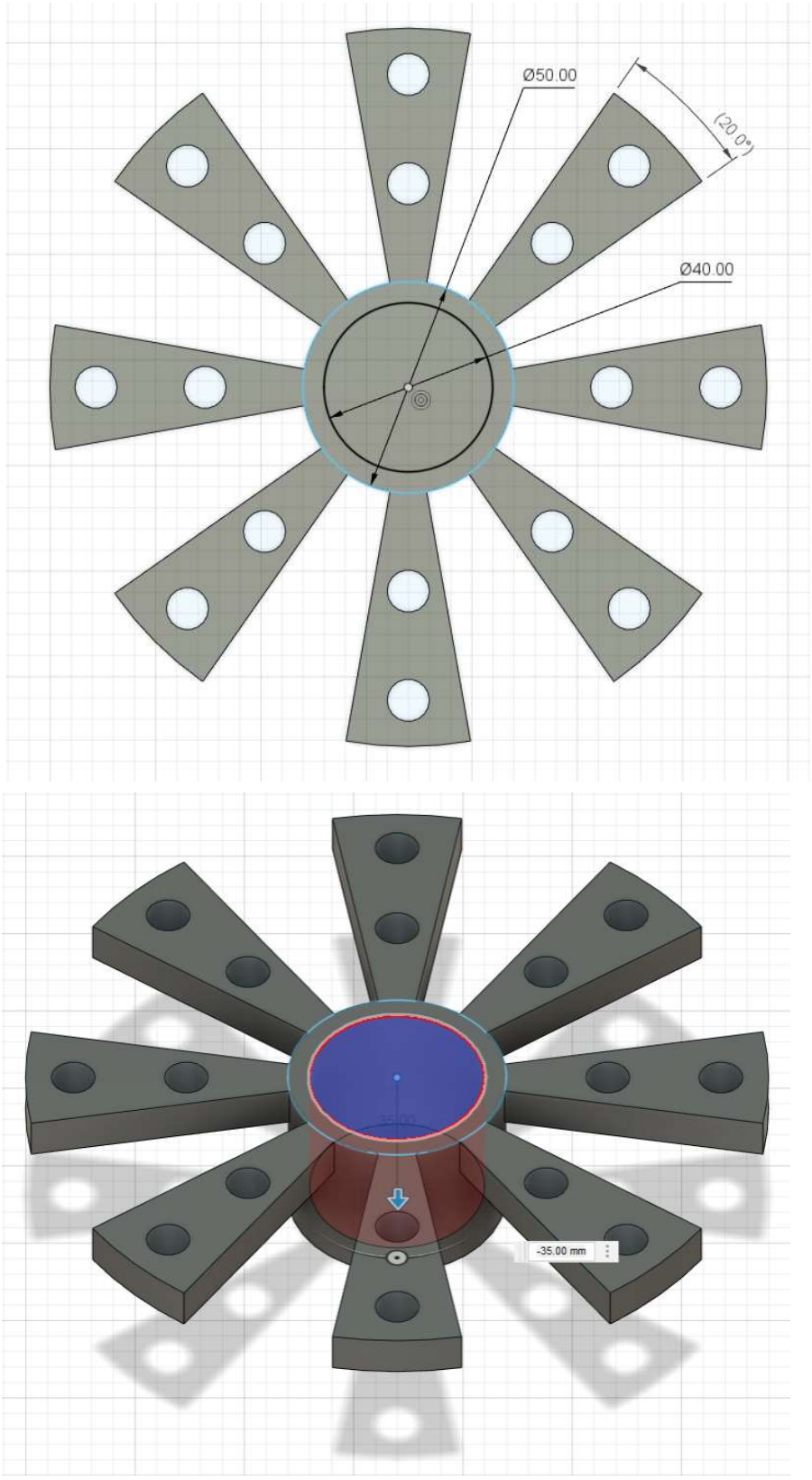


Fig. 12 Propeller with bottom manhole cover

이 모든 부품을 조합했을 때 다음과 같다.

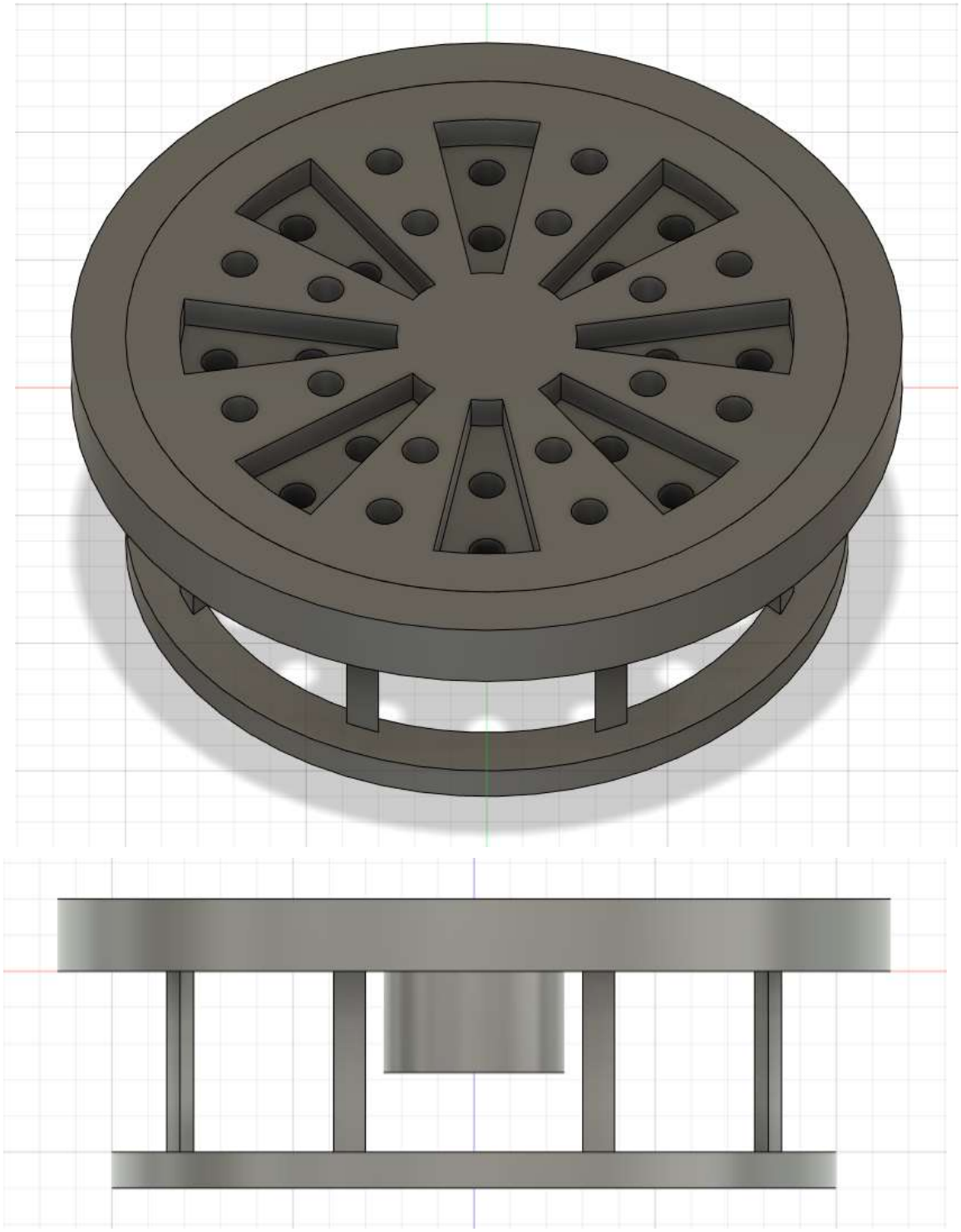
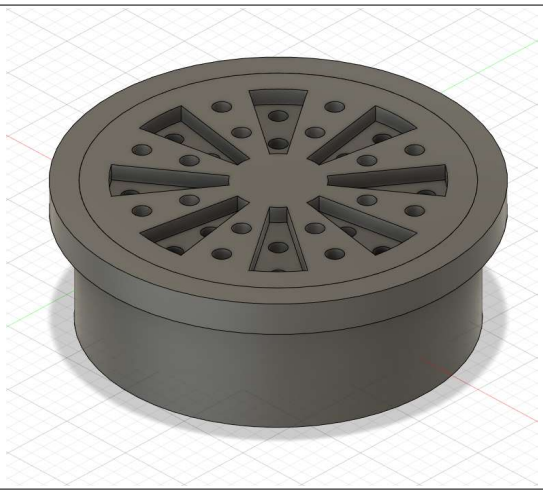
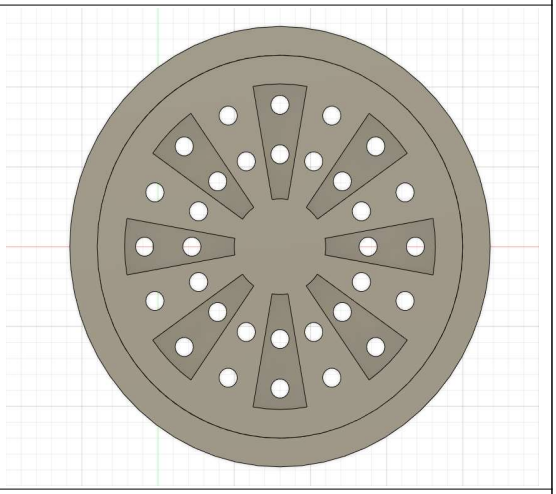
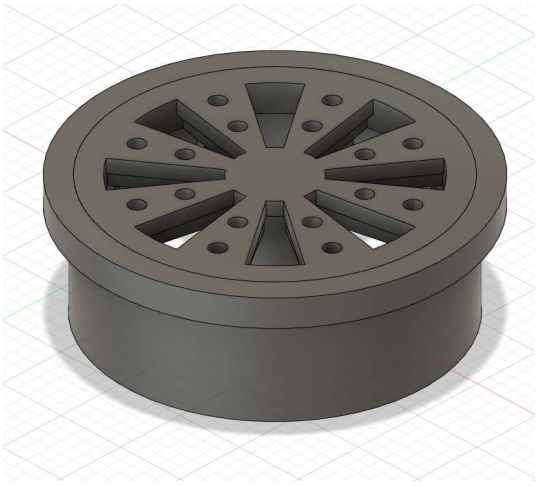
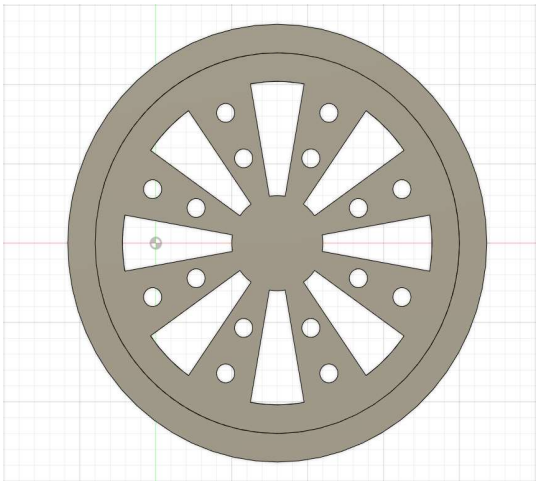
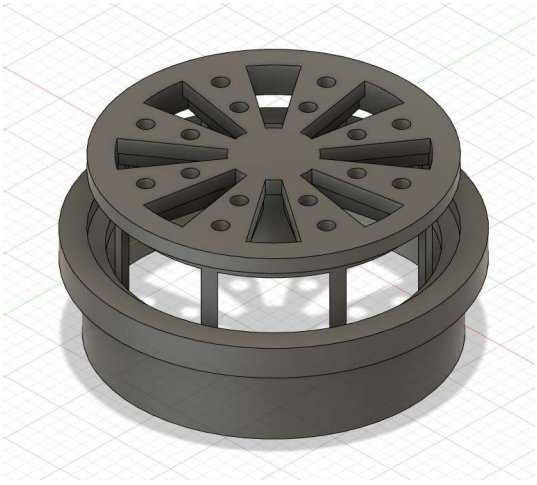
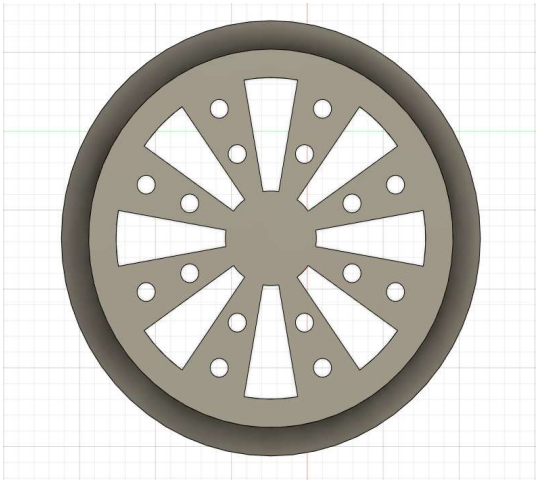


Fig. 13 3D printing model

3D 설계한 모형을 1, 2차 압력조절을 했을 때를 묘사하면 Table 10과 같이 이루어진다.

2.8.1 3D 모델링

Table 10 Three-dimensional and plan view of manhole for pre-opening, primary and secondary pressure regulations

	입체도	평면도(윗면)
개방 전		
1차 압력조절		
2차 압력조절		

2.8.2 기존 모델링을 개선 및 보완한 새로운 모델

우리는 Fusion 360을 통해 디자인한 3D 모델을 3D 프린팅을 이용해 실제 출력해보면서 개선 및 보완이 어떤 부분에서 필요한지 토의해보았다. 중간보고서에서 제시했던 제약들을 위주로 개선하였고 그 외 토의를 통해 필요하다고 판단되는 부분에 대해 개선이 이루어졌다. 중간 보고서에서 제시했던 제약들은 다음과 같다. 첫째, 맨홀 덮개의 한쪽 면에만 큰 힘이 작용하면 맨홀 상승 시 오작동이 발생할 수도 있다. 시제품을 출력하여 확인해보았을 때 맨홀 덮개 상승 시 불균형하게 상승하여 완전히 개방되지 않는 문제점이 있었다.

둘째, 하단 맨홀 덮개를 상단 맨홀 덮개 아래에 단단히 고정하는 기존 방식에 문제가 있다. 초기에는 모터의 뒷면을 상단 맨홀 덮개 아래에 부착하고 모터의 축을 하단 맨홀 덮개 축에 연결하여 구동시키는 방법을 모색하였는데 이 방법은 모터가 받는 하중이 커서 제대로 작동하지 않거나 수명이 짧아질 우려가 있다.

셋째, 맨홀 덮개 상승 시 차량과 보행자가 이동하는 과정에서 피해를 당할 수 있다. 2차 압력 조절로 맨홀 덮개가 상승하면 운전자나 보행자가 이미 차오른 물에 의해 상승한 맨홀 덮개를 육안으로 인지하지 못하고 부딪혀 피해를 입을 수도 있다. 따라서, 이를 위한 방지 대책이 필요하다.

마지막으로 점검 및 보수를 위해 맨홀 내부로 출입 시 어려움이 있다. 상단 맨홀 덮개와 덮개 승강 지지대, 이탈 방지용 지지대가 일체형으로 되어 있어 맨홀 틀과 맨홀 덮개의 분리가 어렵다.

개선된 3D 설계의 각 부분은 다음과 같다.

맨홀 틀의 큰 틀 내부에 안쪽 틀을 추가해 덮개 승강 지지대가 일정 높이 이상 올라가지 못하도록 고정하는 역할을 할 수 있도록 했다. 큰 틀의 폭은 15mm, 안쪽 틀의 폭은 10mm, 틀의 총 높이는 24.25mm 이다.

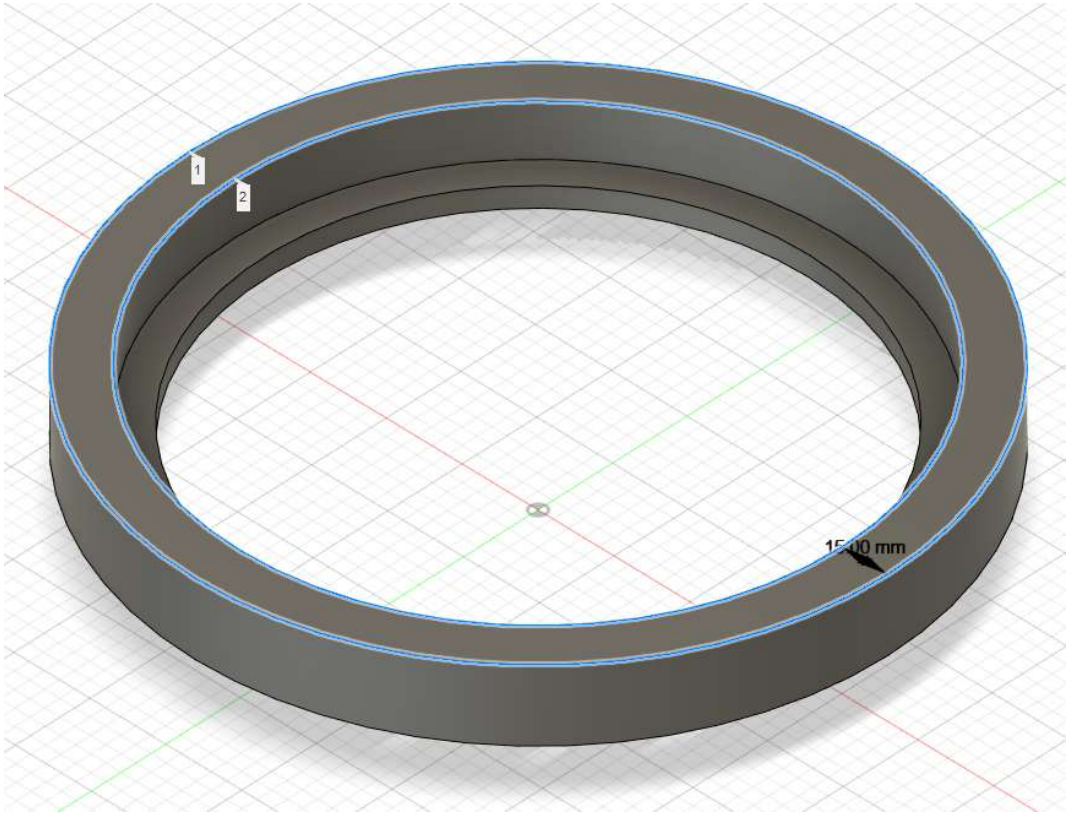


Fig. 14 Outer manhole frame

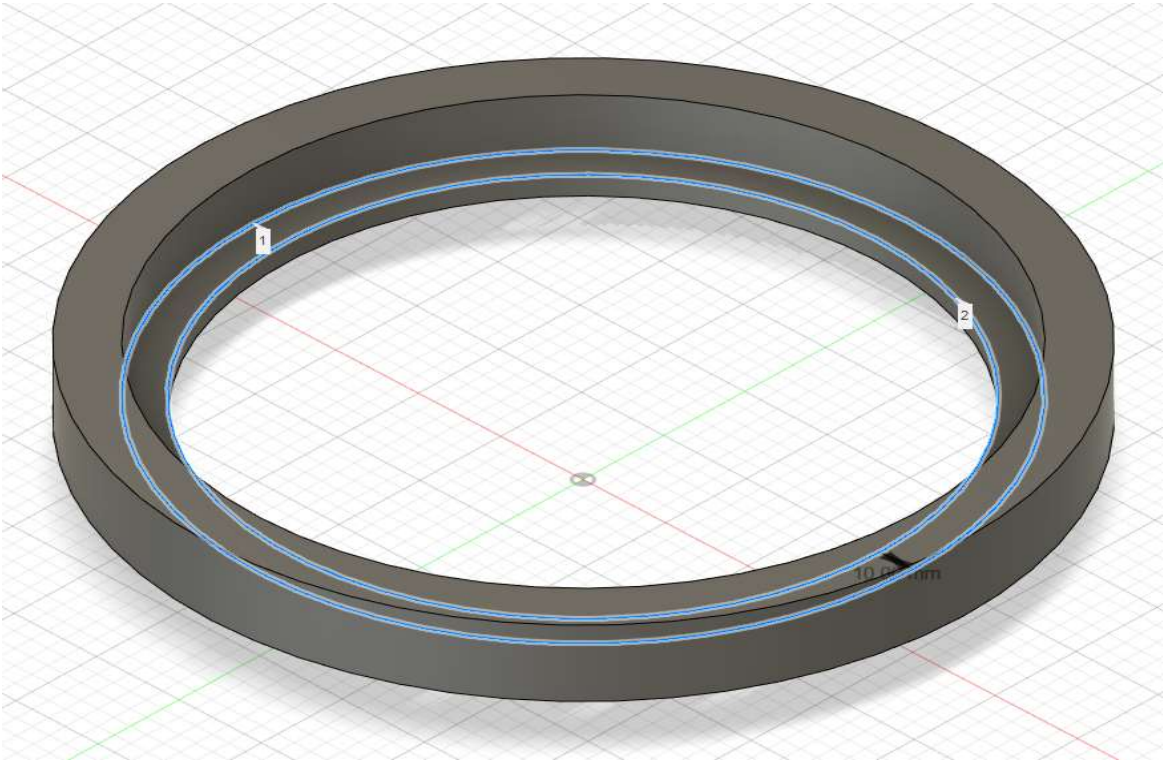


Fig. 15 Inner manhole frame

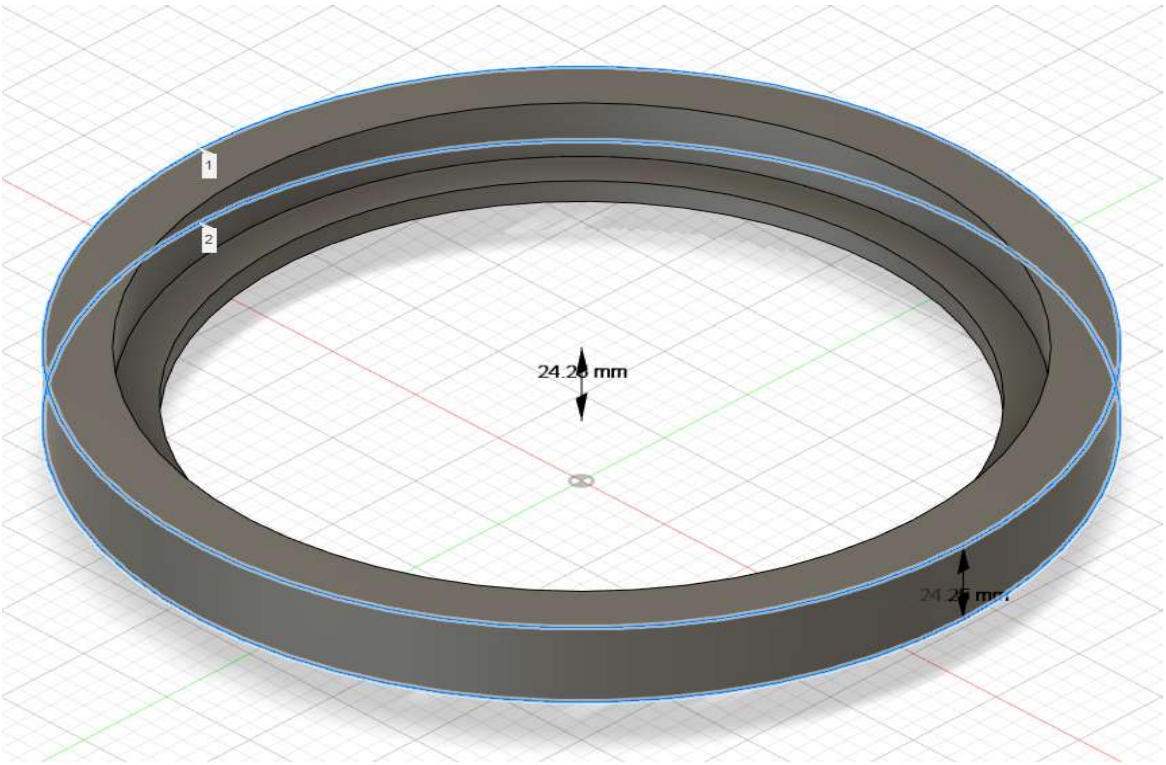


Fig. 16 Manhole frame

기존 맨홀 덮개는 상단 맨홀 덮개와 덮개 승강 지지대, 이탈 방지용 지지대가 일체형으로 되어 있어 맨홀 내부로 출입 시 어려움이 있다. 점검 및 보수 시 맨홀 내부로의 출입은 무조건 필요한 행위임을 인지하고 이를 해결하기 위해 디자인을 개선하였다.

다음 그림과 같이 상단 맨홀 덮개를 덮개 승강 지지대와 이탈 방지용 지지대와 분리하였고 나사 이음으로 결합할 수 있도록 나사 구멍을 뚫었다. 다음 그림의 명칭은 덮개 승강 지지대로 통합하기로 하였다.

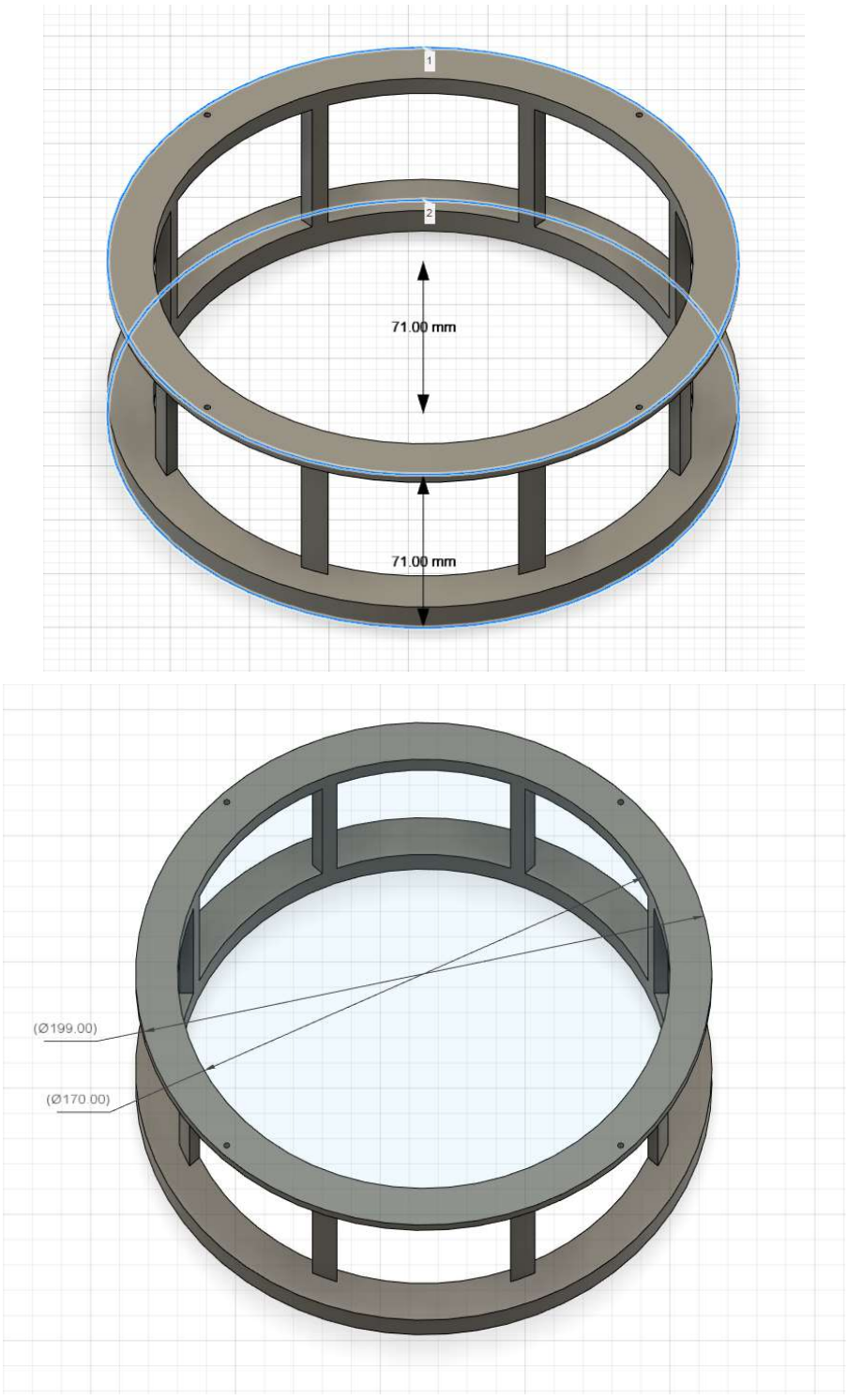


Fig. 17 Manhole prevention support

기존 하단 맨홀 덮개는 회전날개와 스텝모터가 들어가는 공간을 일체형으로 구성하였고 상단 맨홀 덮개 하부가 모터에 의해 고정되는 방식이다. 회전날개와 스텝모터 공간이 일체형으로 되어 있어, 보수 및 점검에 취약할 뿐 아니라 모터 축이 받는 하중이 커서 내구성이 좋지 않다고 판단되어 회전날개와 스텝모터가 들어가는 공간을 분리하였다.

마찬가지로 나사 이음으로 고정할 수 있도록 겉 부분에 나사 구멍을 뚫었고 구슬이 움직이는 경로를 홈으로 파서 모터 축이 받는 하중을 쇠구슬로 분산시킬 수 있도록 하였다. 쇠구슬에 대한 설명은 회전날개 부분에서 자세하게 다루도록 하겠다.

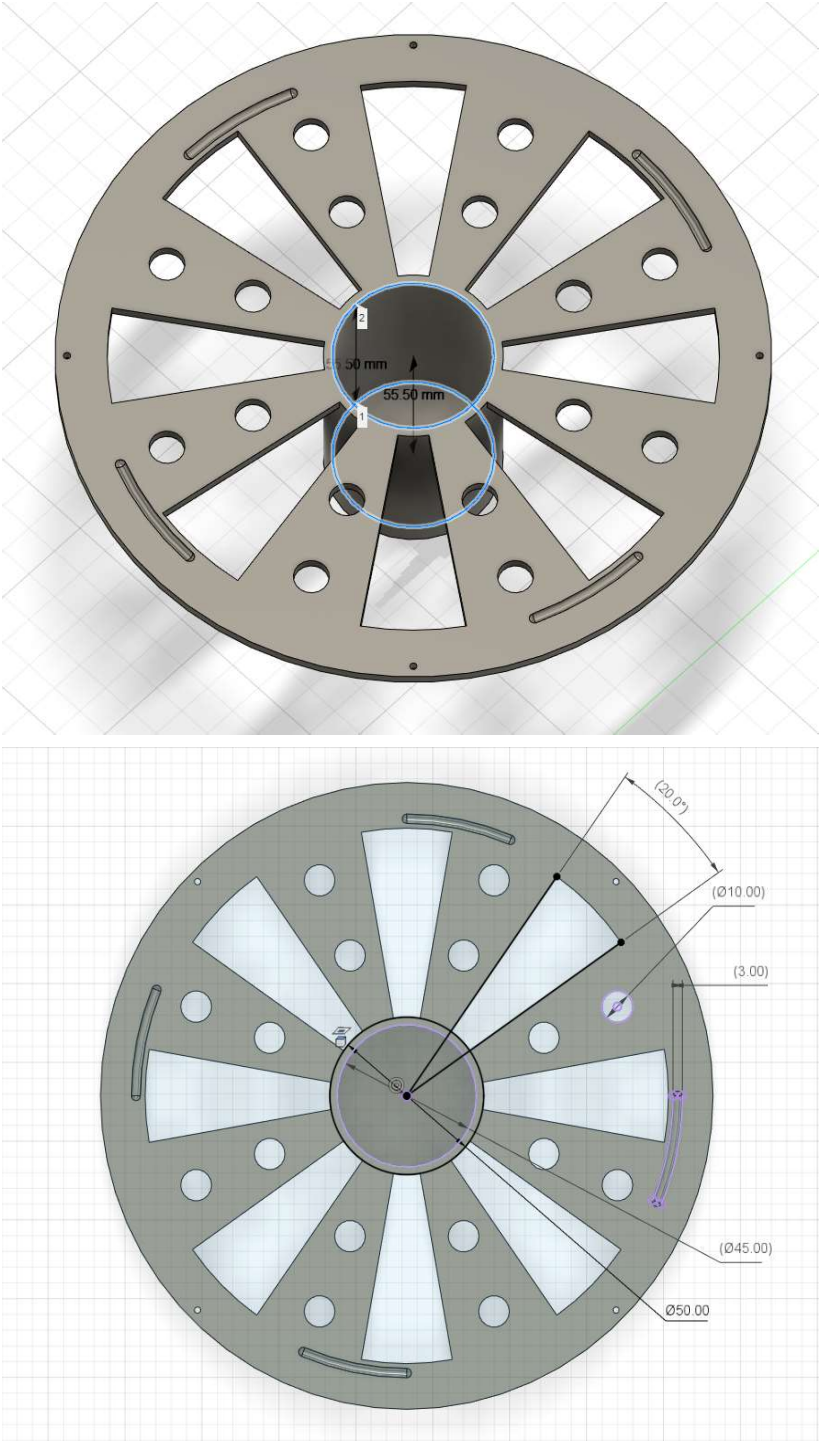
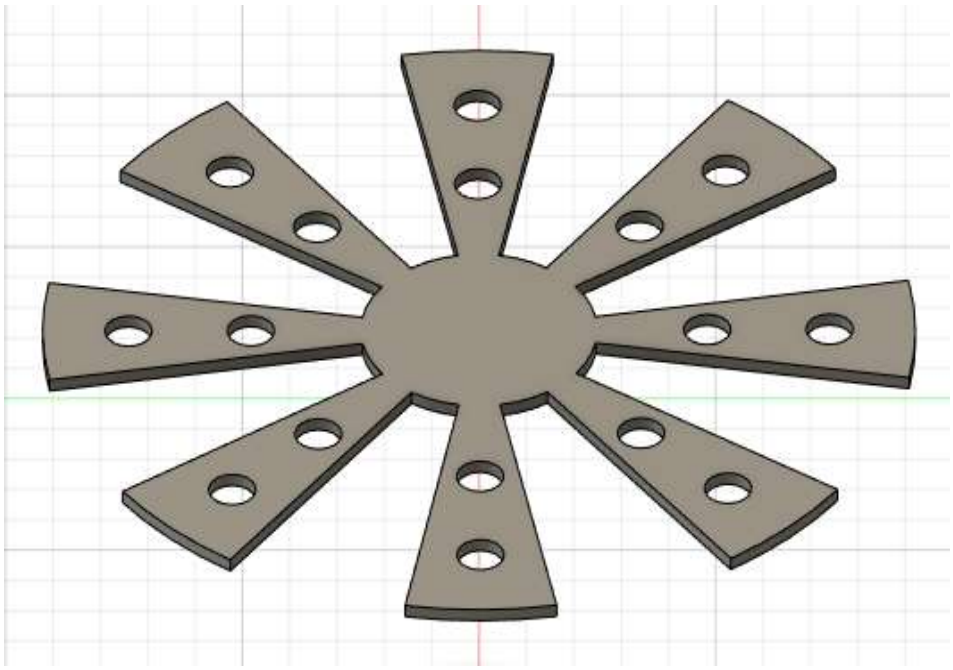
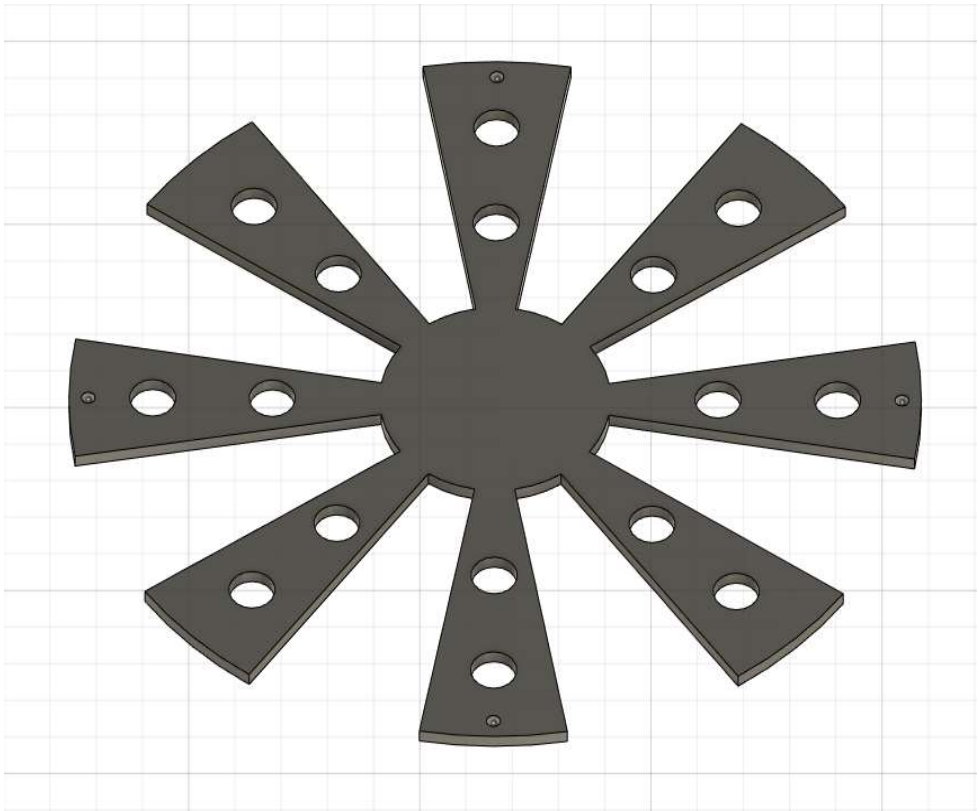


Fig. 18 Lower manhole cover

회전날개는 다음과 같다. 회전날개의 뒷면에는 3mm 쇠구슬이 들어갈 수 있는 홈을 파고 쇠구슬을 장착하고 뒷면 중앙에 모터 축을 고정시켜 하부 맨홀 덮개의 모터 공간에 설치한다. 이를 통해 회전날개의 하중이 모두 모터 축에 전해지지 않고 장착된 구슬이 하중을 나누어 받게 되어 모터 축의 부하를 줄일 수 있다.





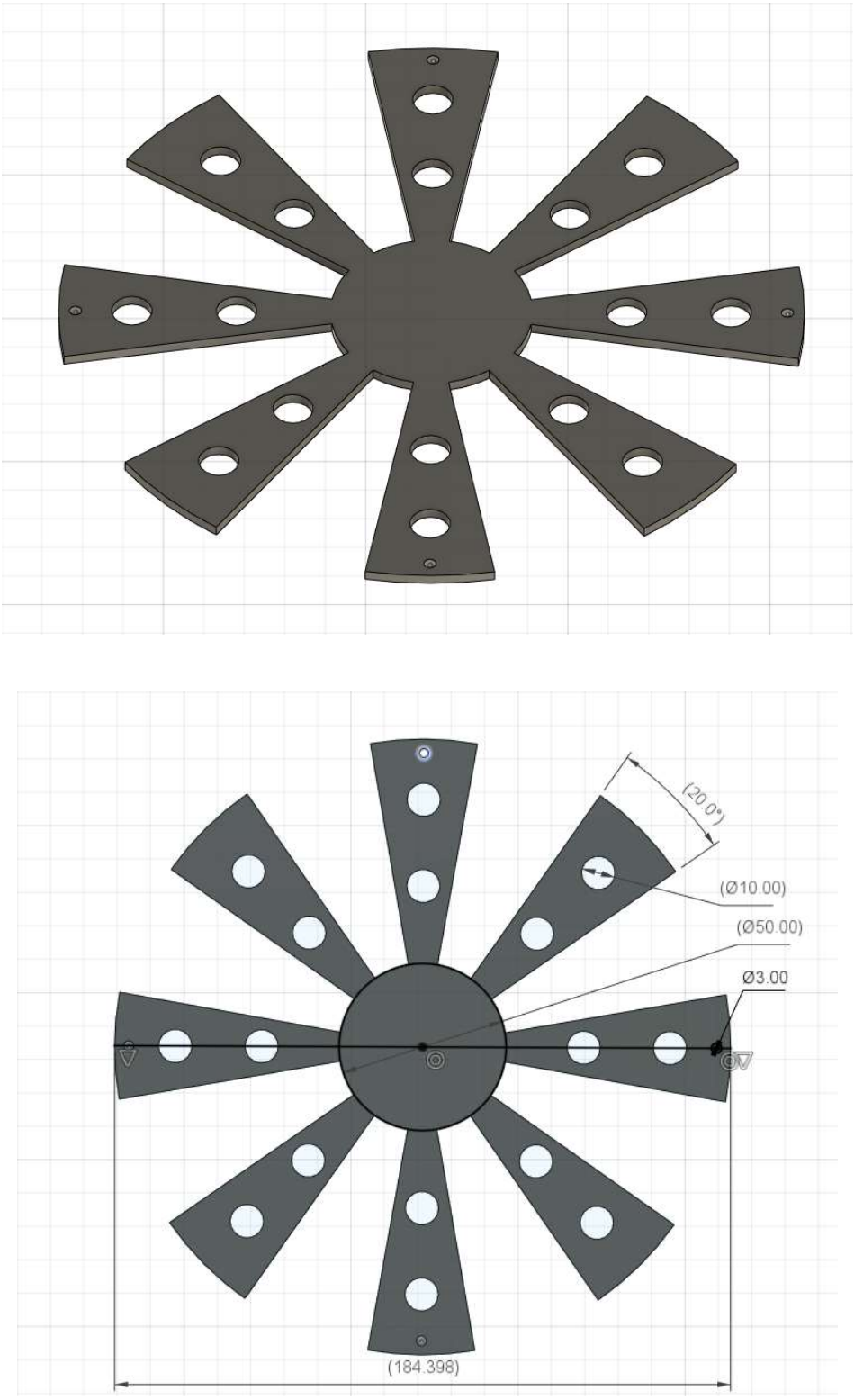


Fig. 19 Manhole propeller

마지막으로 덮개 승강 지지대와 분리된 상단 맨홀 덮개이다. 전체 높이는 7mm, 내부 높이는 4mm 이다. 가장자리에는 나사구멍을 뚫어 나사 이음이 가능하도록 하였다.

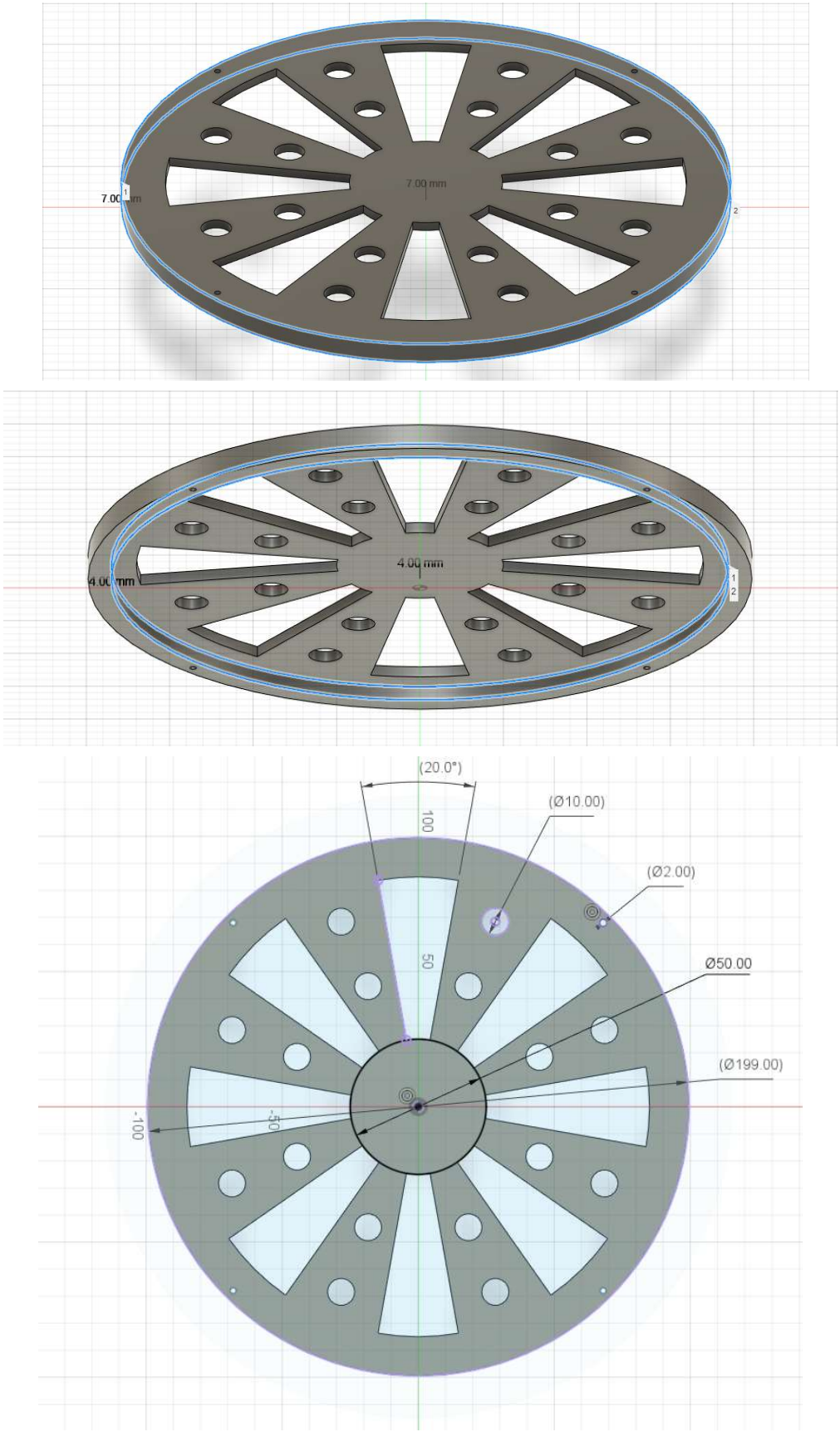


Fig. 20 Upper manhole cover

수재난 대비 목적의 모터구동과 상승작용을 이용한 자가 압력 조절 스마트 맨홀 시스템 개발

모든 부품을 조합했을 때 다음과 같다.

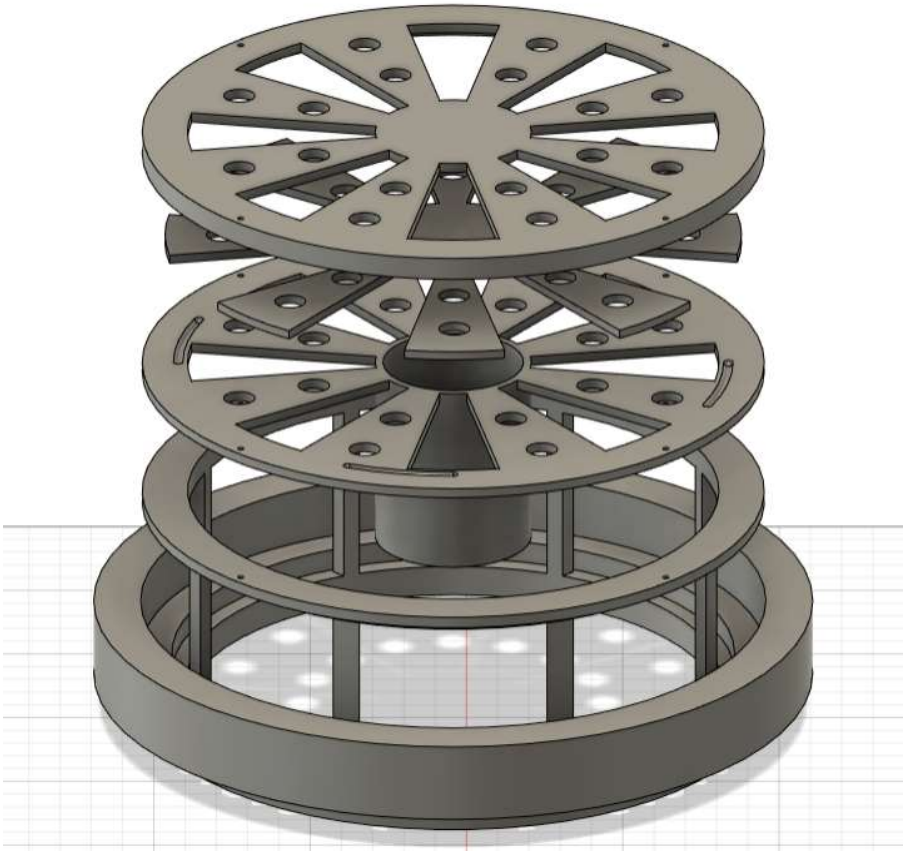


Fig. 21 Manhole structure diagram

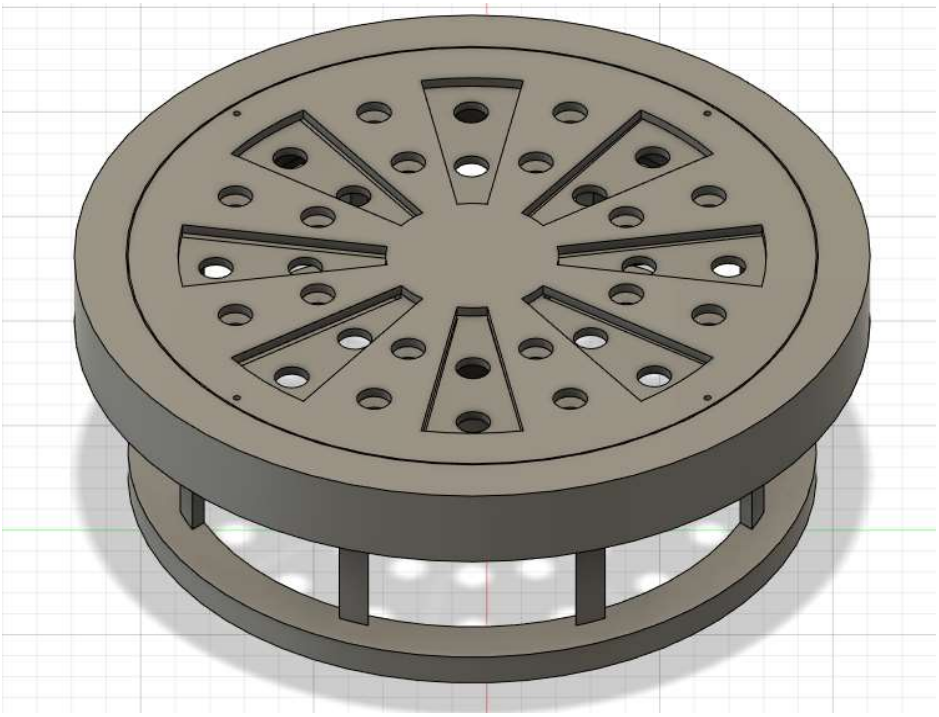


Fig. 22 Complete manhole

2.9 CFD 전산 유동 해석(CFD)

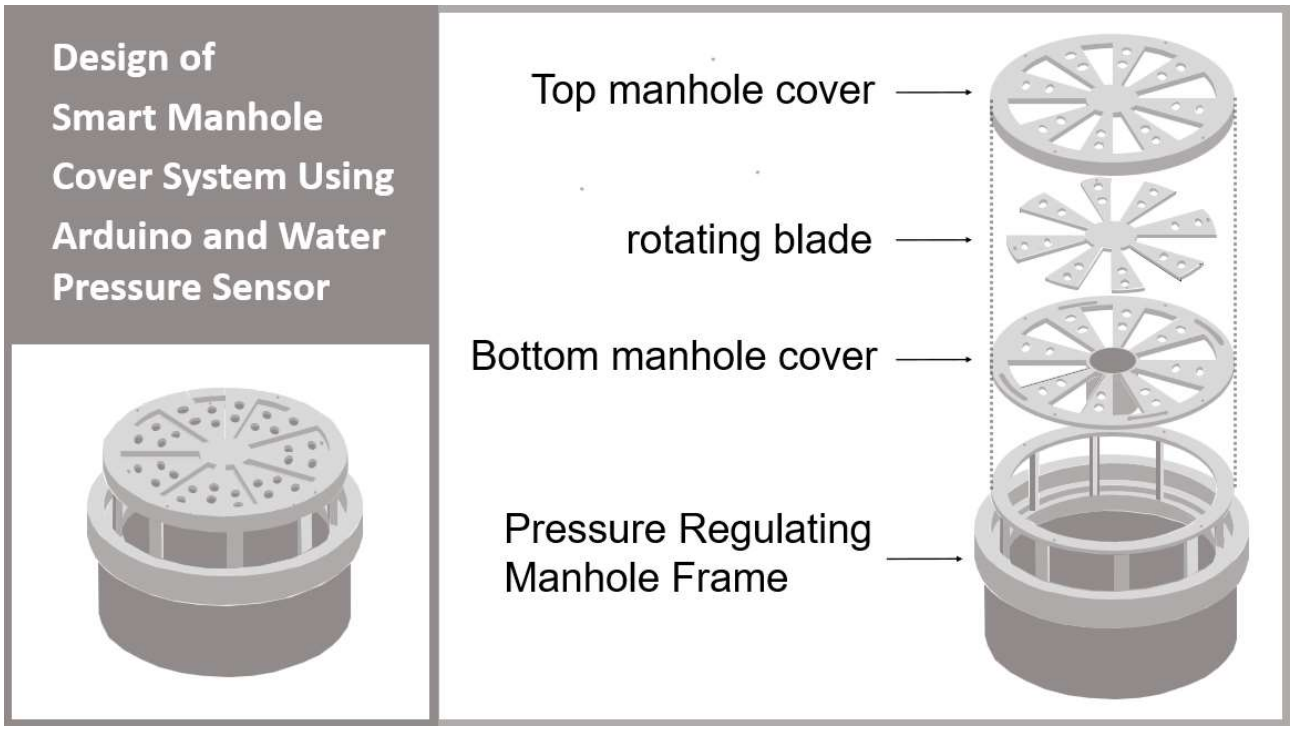


Fig. 23 Schematic

Fig. 23으로 고안된 스마트 맨홀은 상부 맨홀 덮개, 회전날개, 하부 맨홀 덮개, 덮개 승강 지지대 총 4가지로 구성된다.

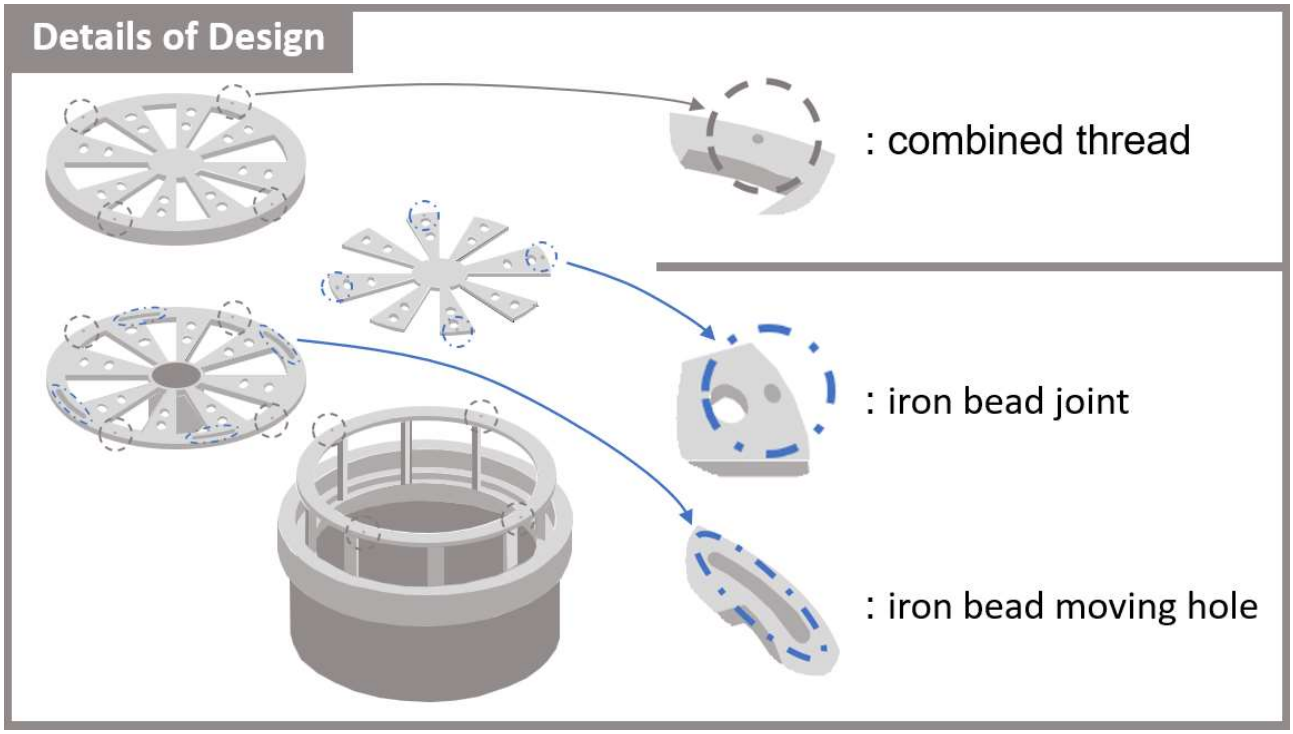


Fig. 24 Schematic detail

세부 구성으로는 위 그림 Fig. 24와 같이 결합 나사 구멍, 쇠구슬 고정 틀, 쇠구슬 레일로 구성되어 있다.

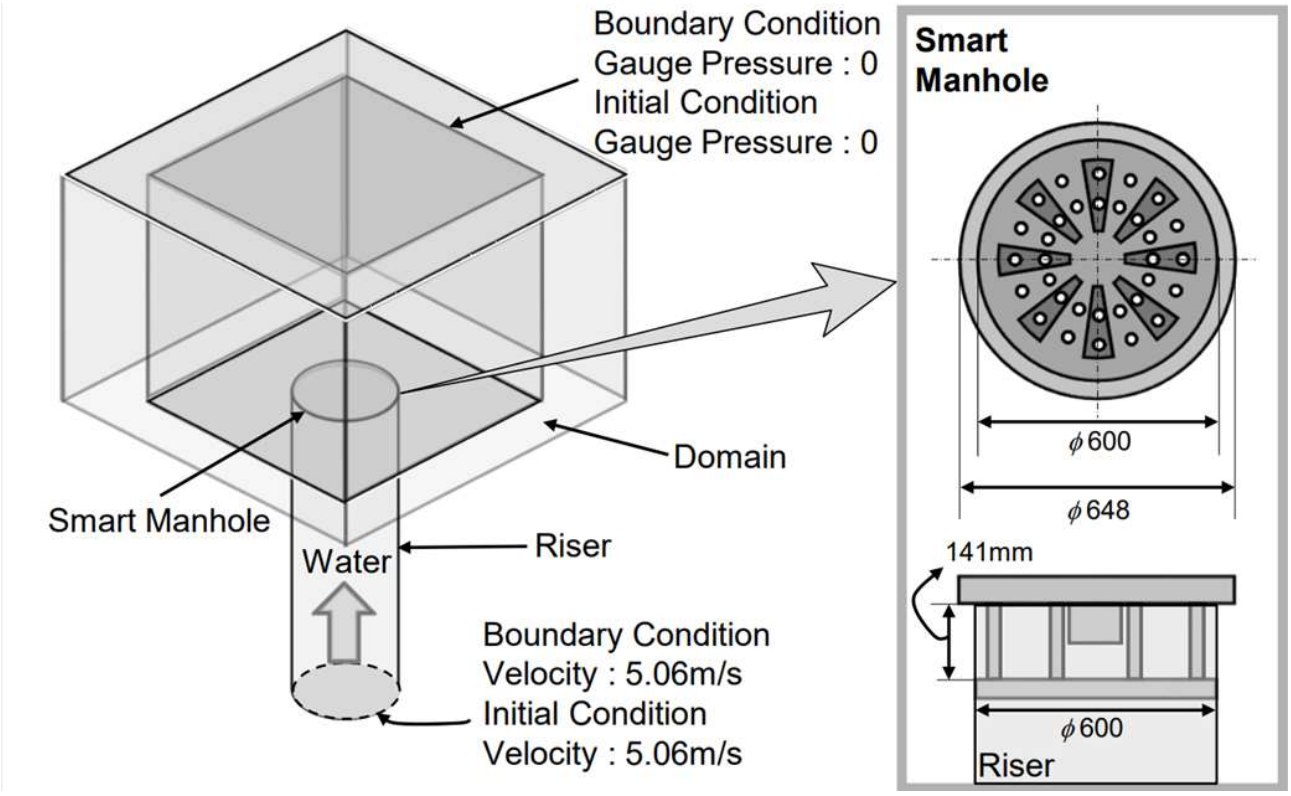


Fig. 25 Details during the CFD analysis process

전산 유동 해석(CFD) 모델의 설명 및 해석을 위한 초기조건과 경계조건, 속도, 규격을 직접 PPT로 그림을 그려보았고 Fig. 25에 나타냈다.

2.9.1 전산 유동 해석을 하기 위한 작성된 모형 설명 및 경계조건, 초기조건 설정

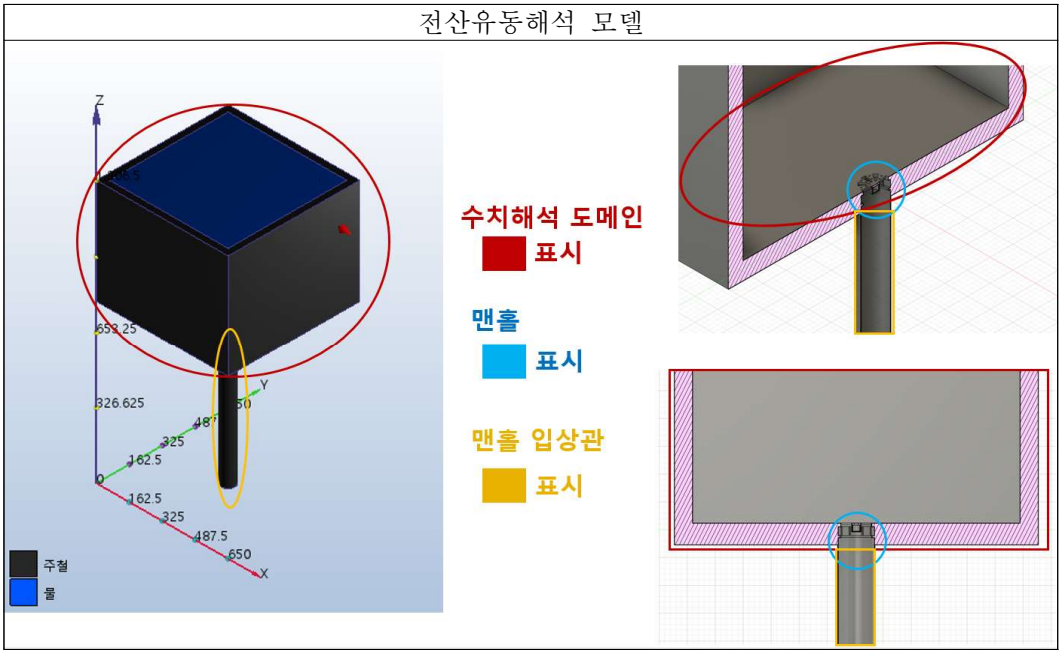


Fig. 26 Computerized flow analysis model description, boundary conditions, and initial conditions

전산 유동 해석을 수행하기 위해 수치해석을 진행할 공간 도메인을 3D로 작성하고, 맨홀 입상관은 자료조사를 통한 서초구 평균 맨홀 깊이인 2.5~3m인 것을 근거로 맨홀 입상관 2.5m로 작성하였다.

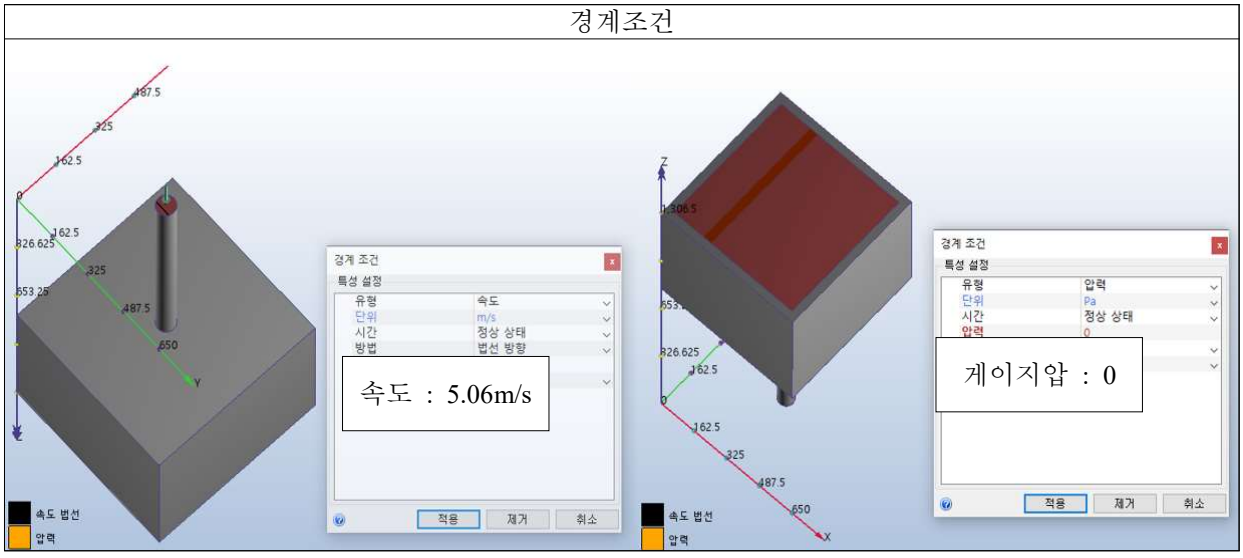


Fig. 27 Setting the boundary conditions for the upper and lower surfaces of the fluid

유체의 상단 면, 하단 면의 경계조건을 설정하였다. 유체 하단 면(맨홀 입상관 입구)의 경계조건은 속도 유형으로 속도 크기는 국립재난안전연구원 맨홀 뚜껑 이탈 실험에서 사용된 최대유량 $1.68m^3/s$에 근거하여 본 제품 맨홀 직경 648mm로 계산한 5.06m/s로 설정하였다.

유체 상단 면(도메인 윗면)의 경계조건은 압력 유형으로 대기압의 게이지 압력이기에 0으로 설정하였다.

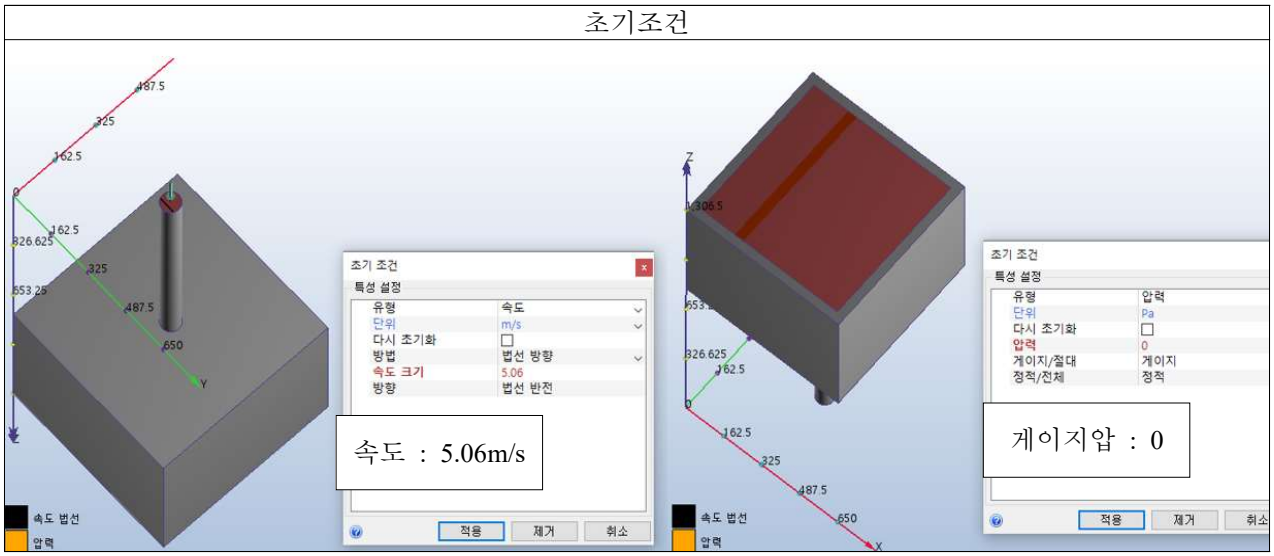


Fig. 28 Setting the initial conditions for the upper and lower surfaces of the fluid

유체의 상단 면, 하단 면의 초기조건을 설정하였다. 유체 하단 면(맨홀 입상관 입구)의 경계조건은 속도 유형으로 속도 크기는 국립재난안전연구원 실험에서 사용된 최대유량 $1.68m^3/s$에 근거하여 본 제품 맨홀 직경 650mm로 계산한 5.06m/s로 설정하였다.

유체 상단 면(도메인 윗면)의 경계조건은 압력 유형으로 대기압의 게이지 압력이기에 0으로 설정하였다.

2.9.2 CFD 컨투어 보는법

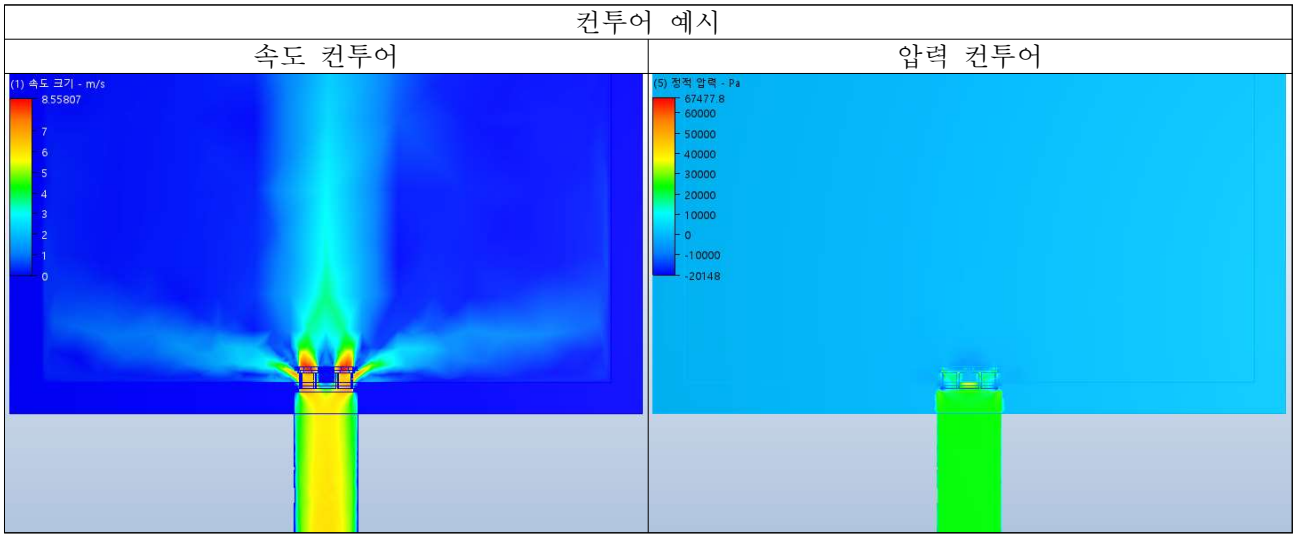


Fig. 29 Speed, pressure contour example

좌측에 스펙트럼 형태의 표를 확인 후 색깔별 속도 혹은 압력의 수치를 인식 후 그림을 보고 구역별 데이터값을 관측할 수 있다. Fig. 29의 맨홀 그림의 구멍 속도는 적색이기에 약 8.56m/s임을 알 수 있다. 압력은 맨홀이 녹색을 띠는 것을 관찰 후 약 25kPa임을 알 수 있다.

2.9.3 개방전

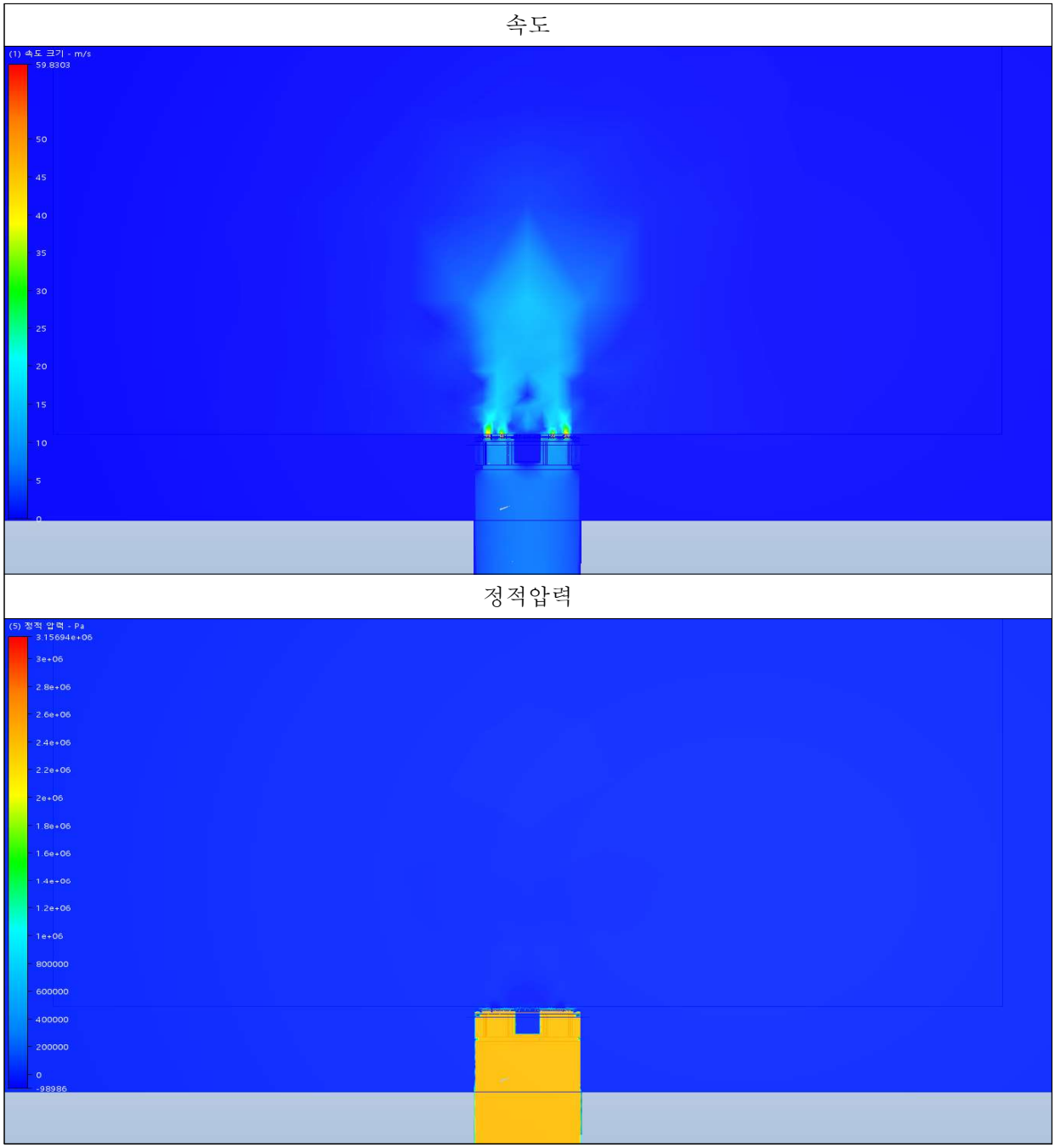


Fig. 30 Manhole opening speed, static pressure contour

맨홀 개방 전 상태이다. 이 상태는 기존 맨홀이 바닥 면에 고정되어있는 상태와 유사하다.

속도 컨투어를 보면 배수공의 속도가 압도적으로 높은 것을 볼 수 있다. 그 속도는 약 59m/s로 나타난다.

그 외에 유체가 맨홀 덮개 이탈 후 속도는 약 30m/s로 나타난다. 정적 압력 컨투어를 보면 맨홀 내부와 외부의 압력이 이분화된 것을 볼 수 있다. (파란색-주황색) 맨홀 외부 정적 압력은 0kPa, 내부 정적 압력은 약 2,400kPa로 나타난다. 따라서 내부-외부 압력 차는 2,400kPa이다.

2.9.4 1차 압력조절

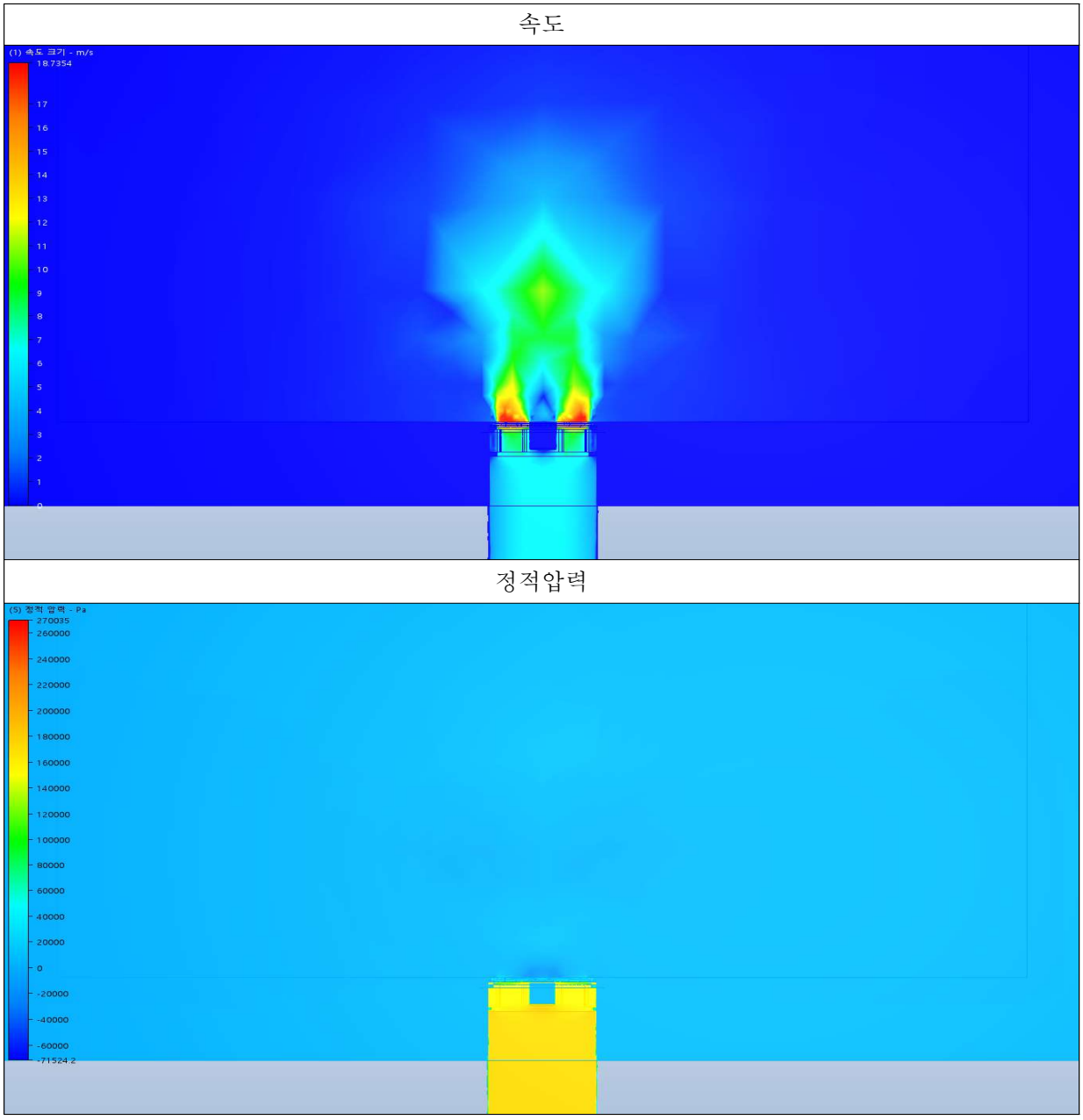


Fig. 31 Speed and static pressure contour after primary pressure regulation of manhole

맨홀 1차 압력 조절 상태이다. 이 상태는 기존 맨홀보다 배수공의 단면적이 늘어나고 바닥 면에 고정되어있는 상태와 유사하다. 속도 컨투어를 보면 개방 전보다 최고속도가 70%로 감소하고 속도분포가 넓게 퍼진 것을 볼 수 있다. 최고속도는 약 18.7m/s로 나타나고 유체가 맨홀 덮개 이탈 후 속도는 약 9m/s로 나타난다. 정적 압력 컨투어를 보면 맨홀 내부와 외부의 압력이 이분화된 것을 볼 수 있다. (하늘색-연두색) 하지만 맨홀 외부 정적 압력은 0kPa, 맨홀 내부 정적 압력은 약 160kPa로 나타나기에 이전 개방 전 데이터 2,400kPa에 비해 93% 낮아져 외부 내부 압력 차 또한 93%가 낮아졌다.

2.9.5 2차 압력조절

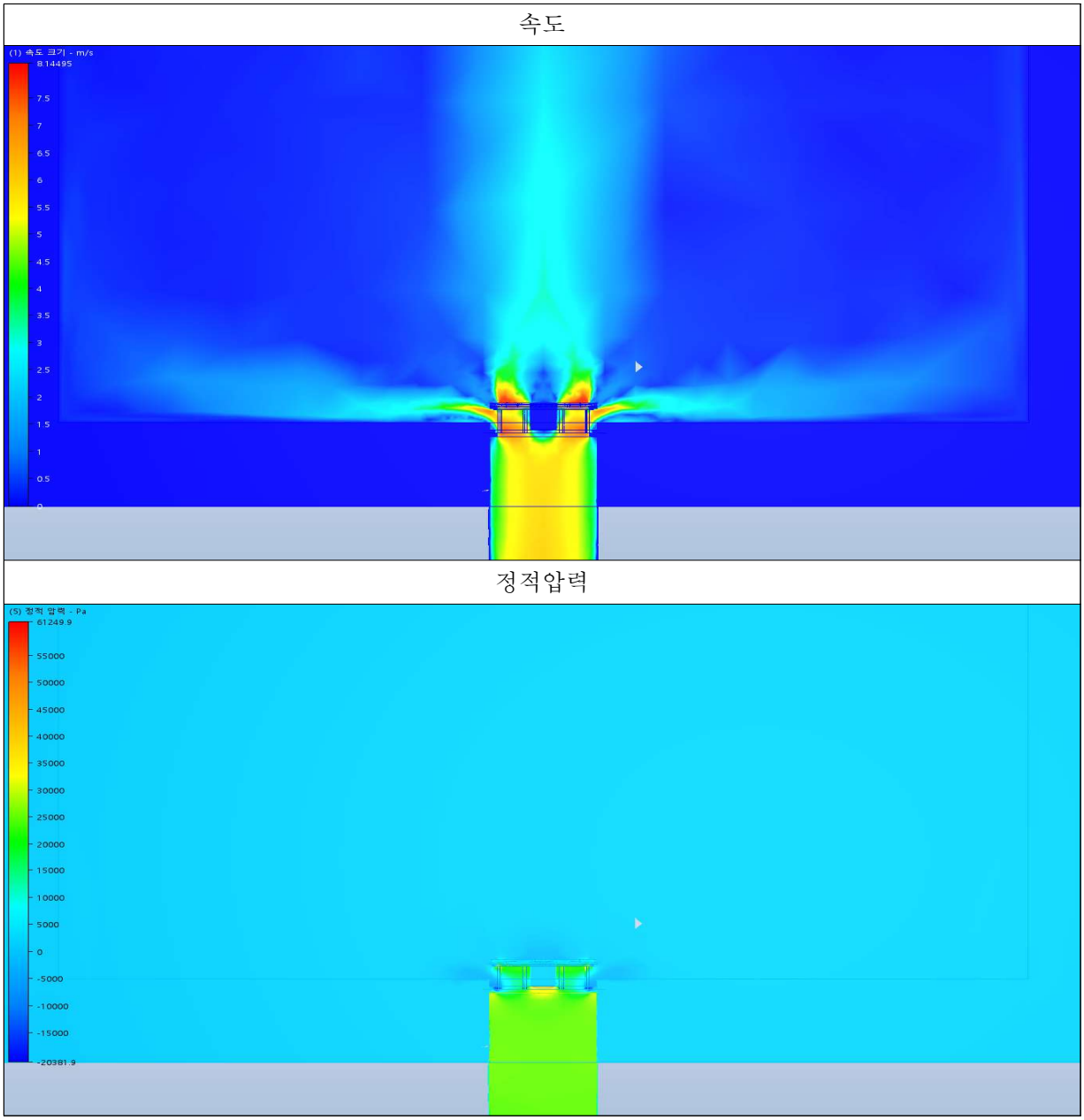


Fig. 32 Speed and static pressure contour after secondary pressure regulation of manhole

맨홀 2차 압력 조절 상태이다. 이 상태는 기존 맨홀보다 배수공의 단면적이 늘어날 뿐 아니라 맨홀 덮개가 상승하여 2차 압력강하 배수공이 생성되고 바닥 면에 고정되어있는 상태와 유사하다. 속도 컨투어를 보면 1차 압력 조절보다 최고속도가 57%로 감소하고 속도분포가 넓게 퍼진 것을 볼 수 있다. 최고속도는 약 8.14m/s로 나타나고 유체의 맨홀 덮개 이탈 후 속도는 약 4m/s로 나타난다. 정적 압력 컨투어를 보면 이전보다 압력이 맨홀 외부로 돌출된 것을 볼 수 있다. (하늘색-연두색) 맨홀 외부 정적 압력은 0kPa, 맨홀 내부 정적 압력은 약 25kPa로 나타나기에 이전 1차 압력 조절 데이터 160kPa에 비해 84% 낮아져 외부 내부 압력 차 또한 84%가 낮아졌다.

2.9.6 CFD 전산 유동 해석을 통한 결론

개방 전과 2차 압력 조절의 데이터를 비교해보았다. 결과는 속도 86%, 압력 99%로 감소하였다. 따라서 우리 팀이 구상한 제품은 기존 맨홀과 비교해 속도와 압력의 대폭 감소를 기대할 수 있다.

2.10 수압 기준 선정 및 센서 코딩

2.10.1 센서가 인식하는 수압 기준

Table 11 Static pressure, dynamic pressure, hydrostatic pressure, and total pressure according to hourly precipitation

압력종류 (Pa) / 시간당 강수량 (mm)	정압	동압	정수압	전압
20	180,000	919.4	24,525	205,444.4
30	600,000	3,437.4	24,525	627,962.4
40	1,400,000	7,675.4	24,525	1,432,200.4
50	2,200,000	12,817	24,525	2,237,342

$P+\frac{1}{2}\rho V^2+\rho gh = Constant$ 베르누이 방정식을 이용해 전압을 계산하였다.

강수량에 따른 정압은 P 압력조절이 일어나지 않았을 때의 모델로 CFD에서 값을 추출하였고 값은 Table 11에 나온 것과 같다. 물의 밀도는 $1{,}000kg/m^3$이다.

동압은 $\frac{1}{2}\rho v^2$ 로

20mm의 경우 유량Q은 $0.45m^3/s$, 면적A은 맨홀 지름 650mm를 적용해 계산하면 $\frac{\pi\times(0.65m)^2}{4}=0.33m^2$이다. 따라서, 유속 V은 $\frac{Q}{A}=\frac{0.45m^3/s}{0.33m^2}=1.36m/s$ 이다.

$\frac{1}{2}\rho v^2=\frac{1}{2}\times 1{,}000kg/m^3\times(1.36m/s)^2=924.8Pa$

30mm의 경우 유량Q은 $0.87m^3/s$, 면적A은 맨홀 지름 650mm를 적용해 계산하면 $\frac{\pi\times(0.65m)^2}{4}=0.33m^2$이다. 따라서, 유속 V은 $\frac{Q}{A}=\frac{0.87m^3/s}{0.33m^2}=2.62m/s$ 이다.

$\frac{1}{2}\rho v^2=\frac{1}{2}\times 1{,}000kg/m^3\times(2.62m/s)^2=3{,}432.2Pa$

40mm의 경우 유량Q은 $1.30m^3/s$, 면적A은 맨홀 지름 650mm를 적용해 계산하면

$\frac{\pi \times (0.65m)^2}{4} = 0.33m^2$이다. 따라서, 유속 V은 $\frac{Q}{A} = \frac{1.30m^3/s}{0.33m^2} = 3.92m/s$ 이다.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{1}{2} \times 1{,}000kg/m^3 \times (3.92m/s)^2 = 7{,}683.2Pa$$

50mm의 경우 유량Q은 $1.68m^3/s$, 면적A은 맨홀 지름 650mm를 적용해 계산하면

$\frac{\pi \times (0.65m)^2}{4} = 0.33m^2$이다. 따라서, 유속 V은 $\frac{Q}{A} = \frac{1.68m^3/s}{0.33m^2} = 5.06m/s$ 이다.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{1}{2} \times 1{,}000kg/m^3 \times (5.06m/s)^2 = 12{,}801.8Pa$$

정수압은 ρgh로 h는 서초구 평균 맨홀 깊이로 2.5m이다.

20mm의 경우 $\rho gh = 1{,}000kg/m^3 \times 9.81m/s^2 \times 2.5m = 24{,}525Pa$

30mm의 경우 $\rho gh = 1{,}000kg/m^3 \times 9.81m/s^2 \times 2.5m = 24{,}525Pa$

40mm의 경우 $\rho gh = 1{,}000kg/m^3 \times 9.81m/s^2 \times 2.5m = 24{,}525Pa$

50mm의 경우 $\rho gh = 1{,}000kg/m^3 \times 9.81m/s^2 \times 2.5m = 24{,}525Pa$

따라서, 전압은

20mm의 경우 $180{,}000Pa + 924.8Pa + 24{,}525Pa = 205{,}449.8Pa$

30mm의 경우 $600{,}000Pa + 3{,}432.2Pa + 24{,}525Pa = 627{,}957.2Pa$

40mm의 경우 $1{,}400{,}000Pa + 7{,}683.2Pa + 24{,}525Pa = 1{,}432{,}208.2Pa$

50mm의 경우 $2{,}200{,}000Pa + 12{,}801.8Pa + 24{,}525Pa = 22{,}373{,}326.8Pa$

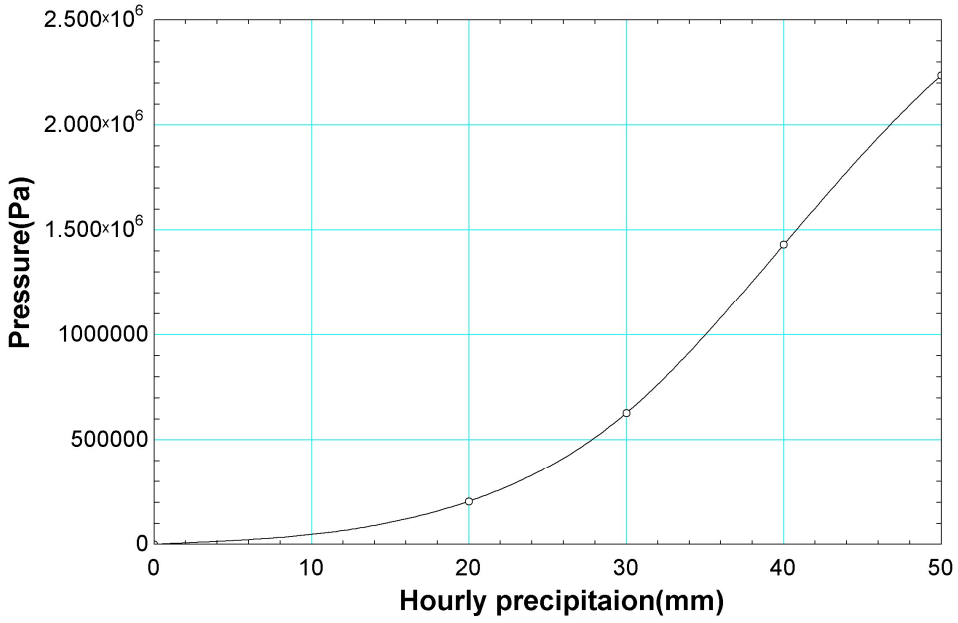


Fig. 33 Hydraulic pressure graph according to hourly precipitation

스마트 맨홀의 1차 압력 조절을 하기 위해서는 수압 기준이 필요하다고 생각되어 시간당 강수량에 따른 압력을 Table 11에 나타내보았다. 우리는 국립재난안전연구원에서 진행한 맨홀 이탈 실험을 참고하여 스마트 맨홀에 활용할 수압 기준을 시간당 20mm일 때인 약 202,650Pa으로 결정하였다. 202,650Pa으로 수압 기준을 결정한 이유는 위 실험에서 시간당 20mm일 때부터 맨홀 이탈의 징후가 발견되었기 때문이다. 본 설계는 맨홀의 이탈과 파손을 방지하는 것이 주목적이기 때문에 맨홀 이탈의 징후가 발견되기 전 수압 조절이 이루어져야 한다고 판단하였다.

Table 11을 ees를 활용하여 그래프로 시각화한 것이 위에 그림 Fig. 33이다. 시간당 강수량이 증가하는 것에 비례하여 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 시간당 강수량과 압력은 비례관계임을 알 수 있다.

2.10.2 수압 측정 시스템 순서도와 아두이노 센싱 코드

아두이노를 이용하여 수압 측정을 하기 위한 순서도를 Fig. 34에 나타내보았다. 먼저 수압 센서를 통해 수압측정을 10회 반복하고 반복된 데이터를 수집하여 최댓값을 도출한다. 다음으로 최댓값이 설정한 임계값을 초과하고 stepcase 변수가 2인 경우 스텝모터를 정 회전시키고 stepcase를 1로 변환한다. 이후 측정된 최댓값이 설정한 상압 임계값 미만이고 stepcase가 1인 경우 스텝모터를 역회전시키고 stepcase 변수를 2로 변환한다. 만약 수압측정 과정에서 최댓값이 상압 임계값 미만이면 스텝모터는 작동하지 않는다.

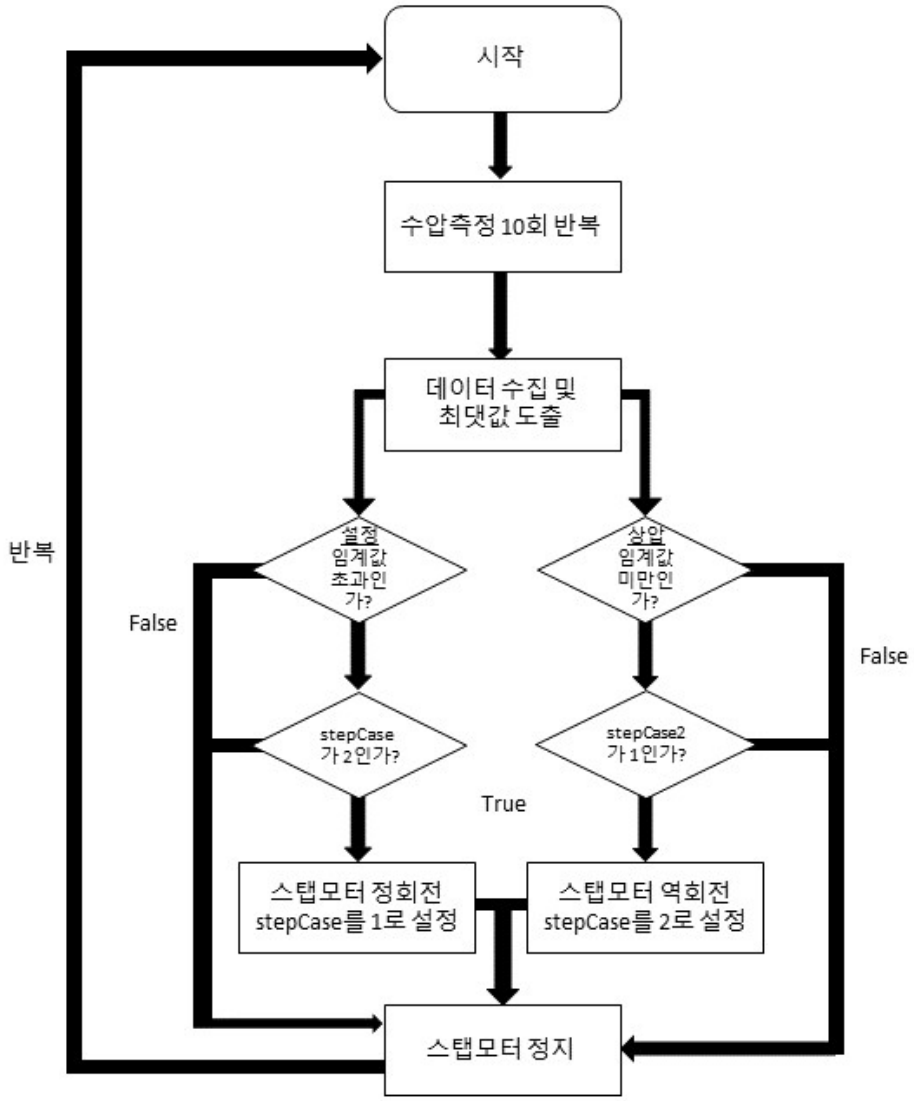


Fig. 34 Arduino operation flow char

Fig. 35는 아두이노를 이용하여 데이터를 수집하고 모터를 작동시키기 위한 최종 센싱코드를 나타낸 것이다.

```
void loop() {                                   //루프함수를 통한 코드 반복 시작

  float a[10];                                  // 10초 동안 반복되서 측정된 데이터를 저장하기위한 배열 a 생성
                                                //지역변수 하나 만들어서 10초 측정 후 11초 부터 다시 측정하는 식으로
  float maxPressure;                            //최대압력 변수 생성

  while (1) {                                   //무한반복을 위한 조건문 true 설정
    static int i = 0;                           //반복문 내 지역변수 i 생성
    float pressure = readPressure();            // 압력 값을 읽어옴
    a[i] = pressure;                            // a배열의 i방에 측정된 압력 저장
    Serial.print("Pressure: ");                 /*
    Serial.print(pressure);
    Serial.println(" mbar");                    측정된 압력을 시리얼 모니터에 출력하기 위한 코드
    index = pressure;                           */
    i++;                                        //코드가 반복될때마다 i에 1을 더하기


    if (i == 10) {                              //10회 반복을 위한 조건문
      int stepCase = 2;                         // stepCase 변수 생성 및 2 저장
      int stepCase2 ;                           // stepCase2 변수 생성
      i = 0;                                    // 지역변수 i 초기화
      Serial.print("==================== ");
      for (uint8_t k = 0; k < 10; k++) {        //k가 10이 될때까지 반복할때마다 k에 1을 더하면서 반복
        if (maxPressure < a[k]) {               /*최대압력측정값을 구하기위한 조건문
          maxPressure = a[k];
        }
        Serial.print(a[k]);
        Serial.print(" ");
      }                                         */

      Serial.print("maxPressure:");             /*최대값을 시리얼 모니터에 출력하기 위한 코드
      Serial.print(maxPressure);
      Serial.print("==================== ");    */
      //delay(1000);  // 1초에 한 번씩 압력 값을 읽기 위해 대기
      if (maxPressure > 800 & stepCase == 2) {  // 임계값은 800 mbar로 설정, 필요에 따라 조정 가능
        rotateStepper();                        //모터 정회전 매서드
        stepCase = 1;
        stepCase2 = stepCase;          // 압력이 임계값을 초과하면 스텝 모터 회전
        maxPressure = 0;                        //최대측정압력 초기화
      } else if(maxPressure<743& stepCase2 == 1){//상온임계값은 743mbar로 설정, 필요에 따라 조정 가능
        RerotateStepper();                      // 모터 역회전 함수
        stepCase2 = 2;                          //stepCase2 변수에 2 저장
      }else{
        stopStepper();                          // 모터 정지 함수
      }

    }
  }
}
```

Fig. 35 Arduino Sensing Code

Fig. 36은 수집된 데이터와 모터 작동 여부를 시리얼 모니터에 출력한 화면이다.

Fig. 36 Serial monitor displaying water pressure measurement data

3. 결과 및 토의

3.1 결과 및 작동 원리

Fig. 37 The usual form of a manhole

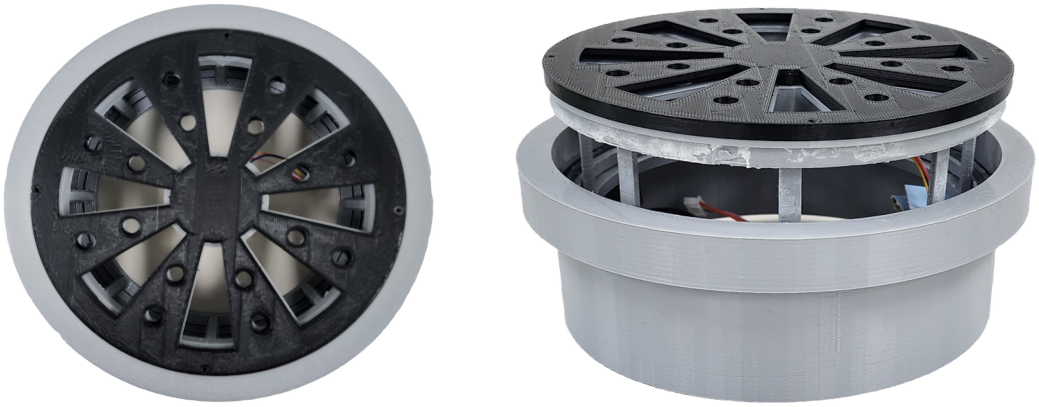


Fig. 38 Manhole shape after pressure regulation

3.1.1 결과

스마트 맨홀은 Fusion 360을 이용해 3D 모델링을 통한 시제품을 제작하여 핵심 구동 전반을 점검했다. 또한, 3D 모델링을 확장시켜 실제 맨홀에 적용해 재질 및 물성치들에 대한 정보를 얻어 토크 선정과 경제성 평가를 했다. 전산 유동 해석을 통해 내부 수압의 감소 효과를 도시화하고 수압 센서가 모터를 구동하기 위한 압력 기준을 수 계산을 통해 정립했다. 아두이노를 활용하여 수압 측정과 동시에 모터를 구동하는 시스템을 구상 및 적용하였고 구성품 전부 하부 맨홀 덮개의 모터 공간에 배치하여 방수 테이프로 마감해 고장을 방지했다. 이러한 연구를 통해 경제적으로 맨홀 이탈을 방지하여 인적, 물적 피해를 줄일 수 있다고 판단된다.

3.1.2 작동 원리

1. 하수관의 용량이 초과되면 입상관을 통해 맨홀 밖으로 역류하게 된다.
2. 역류하는 과정에서 수압 센서를 통해 맨홀 내부의 수압 데이터를 10회 수집한다.
3. 데이터의 최댓값이 설정된 수압 기준을 초과할 시 회전 날개를 정 회전한다.
4. 데이터를 연속적으로 측정하여 수압 기준 초과 시 상태 유지하고 미만이 되면 역회전한다.
5. 1차 압력 조절 이후 높은 수압이 유지되면 자연스럽게 맨홀 덮개가 상승해 2차 압력 조절을 한다.

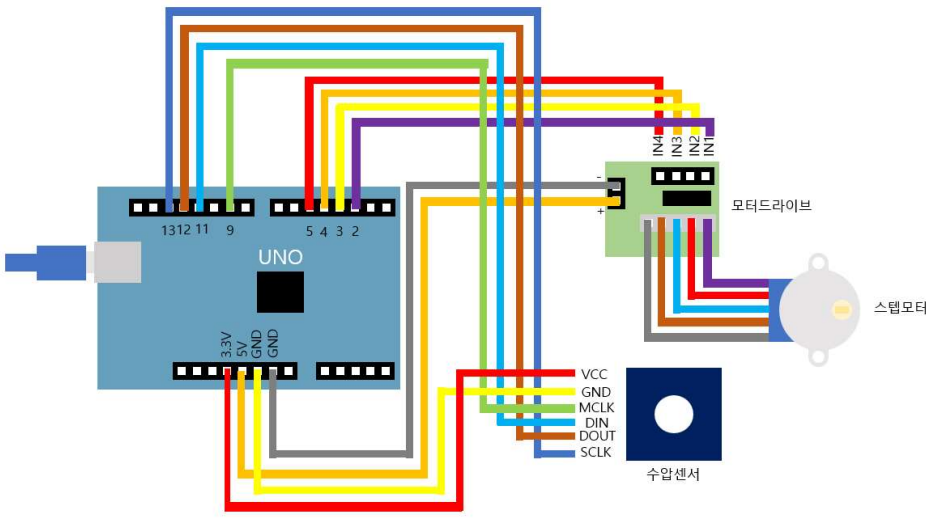


Fig. 39 Arduino Uno wiring diagram for motor and sensors connection

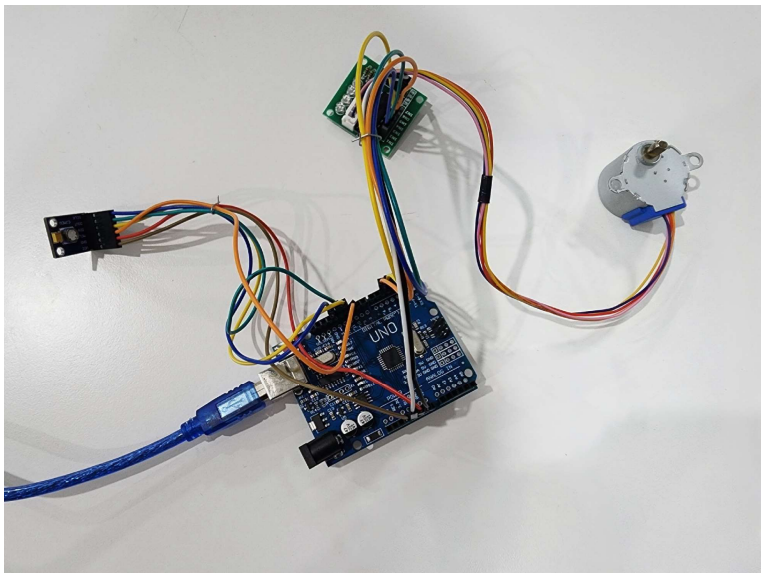


Fig. 40 Connection circuit diagram of motor operation

3.2 장단점

1) 승강 작용에 의한 차량파손 및 발 걸림을 고려하여 1차 압력 조절 장치(모터구동에 의한 압력조절)를 구상했지만 이 장치로 버티는 압력이 초과하면 덮개 승강 지지대가 자연스럽게 상승하기 때문에 본 제품은 고압력에서 승강 작용에 의존된다. 그러나 그 정도에 고압력이라면 차량이나 사람이 이동할 수 없을 정도의 침수상태로 예상되어 승강 작용에 의한 차량파손 및 발 걸림 사건은 빈번하지 않을 것이다.

2) 본 제품은 모터 구동, 전기회로, 복잡한 구조로 인한 가공비와 인건비로 인해 기존 제품들에 비해 초기비용은 클 수밖에 없다. 그러나 맨홀 이탈로 인한 인명피해로 일어나는 비용을 생각했을 때 장기적인 비용은 본 제품이 경제적이다. 또한 모든 맨홀을 본 제품으로 교환하는 것이 아닌 저지대와 침수위험 지역에만 교환하여 불필요한 비용을 줄일 수 있다.

3.3 기대효과 및 활용 방안

‘스마트 맨홀’은 극한 호우 시 과도한 수압으로 맨홀의 흔들림, 역류로 인한 분수, 맨홀의 이탈을 방지해야 하는 곳에 활용할 수 있다. 또한 맨홀의 이탈과 파손이 상대적으로 자주 발생하는 입상관의 길이가 짧은 저지대와 침수 위험 지역에 배치하여 활용할 수 있다. 기대효과는 다음과 같다.

1. 맨홀의 이탈과 파손의 위험을 감소시킬 수 있다.
2. 인명 피해와 차량 파손 등의 피해를 방지할 수 있다.
3. 수압 센서를 통해 데이터를 수집하여 활용할 수 있다.
4. GIS 시스템과 도시침수 지도를 연계하면 시장 경쟁력을 확보할 수 있다.

4. 결 론

현재 사용되는 대부분의 맨홀은 압력 조절 장치나 이탈 방지 장치가 존재하지 않는 것이 대부분이다. 이러한 장치의 부재는 맨홀 이탈에 의한 추락사고로 이어진다. 따라서 맨홀 이탈을 방지하기 위해 **유체 통과 면적을 증가하는 방법**과 **맨홀 덮개가 상승하는 방법**을 병합하여 맨홀 내부압력을 조절하는 시스템을 구축하였다. 이번 연구에서 아두이노 코딩과 모터를 활용하여 맨홀 덮개 내부의 회전날개가 기준압력의 변화에 따라 회전하여 유동 통과 면적을 증가시켜 내부압력을 조절하고, 조절 후에도 압력을 견디지 못하면 내부 수압에 의해 자연스럽게 맨홀 덮개가 상승하여 고압력에서도 맨홀 이탈을 방지할 수 있도록 한다. 수 계산과 전산 유동 해석을 통해 맨홀 내부의 압력이 실제로 감소했음을 확인할 수 있었다. 이번 실험을 진행하며 다음과 같은 결론을 도출했다.

첫째, 최근 이상기후로 인한 대한민국의 침수사례가 증가하는 상황에서 맨홀 이탈을 직접적으로 방지하는 장치가 부족하며, 이에 따라 동반되는 맨홀 이탈로 인한 인명사고가 증가하고 있다. 본 스마트 맨홀의 이용을 통해 **맨홀 이탈에 의한 추락사고 감소와 기물파손 방지에 기여**할 수 있다.

둘째, 본 설계는 능동적으로 맨홀 내부의 압력을 조절한다. 더 나아가 GIS 시스템을 적용한다면 인접한 맨홀 사이에 압력을 센서가 실시간으로 측정하고, 비정상적인 압력 차이가 있다면 각 구간의 위치를 파악하여 **맨홀 관리를 효과적**으로 할 수 있으며 **유지, 관리 등의 체계가 견고해져 인력과 비용적인 측면에서 우위를 점할 수 있다.**

후 기

스마트 맨홀을 설계하면서 많은 도움을 주신 분들과 기관 덕분에 본 보고서를 완성할 수 있었습니다. 이 논문을 작성하는데 도움을 주신 지도교수 문주현 교수님께 진심으로 감사드립니다. 연구자료를 공유해주시고 갑작스러운 질문에도 친절하게 응해주신 김태훈 연구원님께 감사드립니다. 아두이노 코딩에 도움을 주신 모비다임 이동철과장님 감사의 인사 드립니다. 관련 이론에 대해 도움을 주신 차동진 교수님께 감사드립니다. 연구비를 지원해주시고 피드백해주신 공학교육혁신센터와 학생연구모임 ‘하랑’의 교수님들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 한마음기업연구원, 2016, “주철맨홀뚜껑 규격서 조달청다수공급자계약MAS용”, 한마음기업연구원, https://konews.tistory.com/1635

(2) 김태훈, 2014, “집중호우에 따른 맨홀뚜껑 이탈 위험성은?”, 국립재난안전연구원, 울산광역시, pp. 2~4
(3) 변문우, 2022, 남매를 사지로 이끈 맨홀...멀쩡한 맨홀 왜 열렸나?, 시사저널, http://www.sisajournal.com/news/articleView.html?idxno=244268
(4) 윤보람& 김준태, 2022, “서울맨홀 62만개...폭우 때는 잠금장치도 소용없는 지뢰밭”, 연합뉴스, https://www.yna.co.kr/view/AKR20220810154100004
(5) 박창환, 2022, “서울시, 맨홀사고 예방 위해 추락방지시설 하반기에 도입”, 안전신문, https://www.safetynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=214591
(6) 박동현& 기남금속, 2012, “수압조절기능을 갖는 맨홀덮개”, 대한민국특허청, 대전광역시, pp. 1~10
(7) 김준형& 광주광역시환경시설공단, 2013, “맨홀뚜껑의 이탈제한 및 복원장치”, 대한민국특허청, 대전광역시, pp. 1~8
(8) 이상각& ㈜한국주조, 2010, “수압조절기능을 갖는 이중맨홀뚜껑”, 대한민국특허청, 대전광역시, pp. 1~7
(9) S. W. Bae, J. Y. Kim, S. J. Yang& J. H. Her, 2022, “Optimum Design Of Escape-Preventing Manhole Lid With Elevating Structure”, Proceedings of the KSMPE Conference 2022, pp. 477~478
(10) 정인주& ㈜이도, 2021, “스마트 맨홀 덮개”. 대한민국특허청, 대전광역시, pp. 1~16
(11) Kyeong-soo Kim, Gun-young Kim, Jung-yong Park, Jong-soo Kang, Yong-chul Kim& Sung-min Par, 2022, “Development of 'Manhole Cover to Reduce Pressure in Manhole' for the Prevention of Serious Citizen Accident”, 대한전기학회 학술대회 논문집 2022, pp. 2,171~2,172
(12) Hyoungwook, 2018, “Design and Prototyping of Lifting Devices for Manhole Cover using Structural Analysis and 3D Printing”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 19(10), pp. 648~654
(13) Yunus. A. Cengel& Mcgrawhill, 2021, “Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications”, 4th edition, Mc Graw Hill, pp. 203~ 232
(14) 이용화& 박효석, 2019, “SI단위계에 의한 건축 급배수 위생설비”, 12판, 세신사, 서울특별시, pp. 438~460
(15) 강민경, 2022, “영화 '기생충'처럼 역류하는 변기·맨홀...이유는?”, YTN, https://www.ytn.co.kr/_ln/0103_202208092226590644
(16) 최고나, 2023, “아버지 구하려 맨홀에 뛰어든 아들… 괴산서 父子 숨져”, 대전일보, http://www.daejonilbo.com/news/articleView.html?idxno=2074755
(17) 김흥수, 2023, “맨홀에 빠져 숨진 채 발견된 남성…세종·충남서 5명 사망”, SBS, https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1007269712
(18) 환경부 수자원관리과& 한강홍수통제소 수자원정보센터, 2023, 도시침수지도, 생활안전정보, https://www.safemap.go.kr/main/smap.do?flag=2
(19) Water Logics, 2022, Water Logics 환경관리시스템, GIS Application, http://www.gisapplication.kr/OL_WaterLogics_sewer
(20) 박영호, 2019~2023, “노후 불량 하수맨홀 정비”, 서울특별시 물재생관리과, 서울특별시, pp.1~3
(21) CTC기술지도원, 2021, “맨홀뚜껑 다수공급자계약 규격서”, CTC기술지도원 네이버블로그, https://blog.naver.com/tpals5368/222313208570
(22) 이경원, 2023, “[사실은]한반도 ‘극한 호우’, 50년 동안 ○배 늘었다”, SBS, https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1007275147&plink=ORI&cooper=NAVER
(23) 권민지, 2022, “맨홀 뚜껑 솟구쳐 버스 강타...침수 피해도 잇따라”, SBS, https://naver.me/GhNR9t5s