대한기계학회 주최

제13회 전국학생설계경진대회(2023년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부 (✓)				
참가분야	공모주제 (✓) / 자유주제 ( )				
참가팀명	3D MAKERS				
설계제목	자전거 전도전복사고 예방을 위한 전자식 ABS				
지도교수/교사	(소속) 한성대학교 기계전자공학부 (성명) 윤주일 (연락처) (이메일)				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	박상환	한성대학교 기계전자공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	박상환	한성대학교 기계전자공학과 / 3학년	
2	박승표	한성대학교 기계전자공학과 / 3학년	
3	민종호	한성대학교 기계전자공학과 / 3학년	
4	염홍철	한성대학교 기계전자공학과 / 3학년	

설계 요약문

참가분야	**공모주제 (✓) / 자유주제 ( )**
참가팀명	3D MAKERS
설계제목	자전거 전도전복사고 예방을 위한 전자식 ABS
대표자명	박상환
요약문	최근에는 환경에 대한 관심이 증가하면서 자전거 산업이 급성장하고 있는 추세이다. 그러나 동시에 자전거 관련 사고 및 범죄가 증가하고 있다. 특히 자전거의 전도전복사고는 연간 증가하는 경향을 보이고 있다. 본 연구는 이러한 전도전복사고의 원인으로서 바퀴가 완전히 잠기어 미끄러짐을 유발하는 lock-up 현상을 지목하고 이를 예방하기 위한 전자식 ABS 장치를 개발하여 자전거 전도전복사고를 줄이고자 한다. 개발한 ABS는 기존의 ABS의 단점을 보완하여 자전거 운행 중 노면을 실시간으로 분석, 그 반응을 다르게 하는 적응형 ABS이다. 사용자의 브레이크 조작 의사를 힘 인식 센서인 로드셀 센서로 파악하고, 이를 기반으로 DC 모터를 제어하여 브레이크 작동을 조절한다. 이때 구동부에서 DC 모터의 회전운동을 직선운동으로 변화하고 제작한 브레이크를 통해 ABS를 작동한다. 더 나아가, 자전거의 주행 노면을 실시간으로 분석하여 노면 상태에 따라 브레이크 시스템의 반응을 조정하는 적응형 ABS 시스템을 포함하고 있다. 기술 구현을 위해 자전거의 앞 뒷바퀴에 부착된 네오디뮴 자석을 활용하여 리드 스위치로 감지한다. 이 과정을 통해 노면 상태에 따른 각속도 차이를 식별하고, 이를 토대로 적절한 ABS 작동 방식을 분석하여 적용한다. 전자식 ABS는 NFC(Near Field Communication) 기술을 활용하여 도난 방지 전자식 잠금 시스템을 갖추었다. 사용자의 카드리더기 인식을 통해 브레이크 잠금 기능을 활성화하여 도난을 방지한다. 본 연구를 통해 노면에 따라 적응형 ABS가 작동하게 되며, 이를 통해 제동 거리를 줄여 전도전복사고를 예방하는 목표가 달성될 것으로 기대된다. 또한 본 제품의 경우 전자식 잠금 시스템을 갖추어 별도의 잠금장치 없이도 효과적인 도난 방지 효과를 제공한다.
설계프로젝트의 입상 이력	

자전거 전도전복사고 예방을 위한 전자식 ABS

박상환* · 박승표* · 민종호* · 염홍철*†
*한성대학교 기계전자공학부·

Electronic ABS for preventing bicycle overturn accident

Sang-hwan Park*, Seung-pyo Park*, Jong-ho Min*, Hong-Chul Youm*

* School of Mechanical and Electronic Engineering, Hansung University

(Received september 11, 2023)

Key Words: Anti-lock Brake System(잠김 방지 브레이크 시스템), Near Field Communication(근거리 무선 통신),Road Friction Coefficient(노면마찰계수), Hall Sensor(홀센서)

초록: 본 연구에서는 자전거 급제동 시 전도전복사고를 예방하고 제동거리 조절 및 도난방지를 목적으로 전자식 ABS(Anti-lock Brake System)을 설계하였다. 전자식 ABS 시스템이란 노면 상태를 실시간으로 모니터링하고, 브레이크의 작동을 노면에 최적화하여 전도전복사고를 막고 제동거리를 최소화함으로써 긴급상황 시 자전거 제어를 원활하게 한다. 그뿐만 아니라, 자전거 도난 방지를 위해 NFC(Near Field Communication) 기술을 활용하여 전자식 잠금 시스템을 포함한다.

Abstract:: In this study, an electronic ABS (Anti-lock Brake System) was designed to prevent overturning accidents during sudden braking of a bicycle, control braking distance, and prevent theft. The electronic ABS system monitors the road surface conditions in real time and optimizes the operation of the brakes to the road surface to prevent rollover accidents and minimize the braking distance to facilitate bicycle control in emergency situations. In addition, it includes an electronic locking system using NFC (Near Field Communication) technology to prevent bicycle theft.

1. 서 론

최근 환경에 대한 세계적인 관심도가 증가하면서 탄소 절감을 위해 우리의 생활 양식이 다양하게 변화하고 있다. 특히 인구가 집중되는 도시에서 자전거를 이동 수단으로 활용하거나 레저 스포츠로써 즐기기도 하면서 자전거 산업이 급성장하고 있다. 실제 서울시 공공자전거 “따릉이” 연도별 대여 건수는 연도가 지날수록 점차 증가하는 추세인데 서울시 발표에 따르면 2020년 따릉이 대여 건수는 작년 대비 24% 증가하였다.(1) 이러한 자전거 산업의 성장세에 비해 관련된 도시 인프라가 부족하여 자전거와 관련된 안전사고가 꾸준히 발생하고 있다. 도로교통공단의 보도자료에 따르면 2017년부터 2021년 사이 5년간 자전거 교통사고 건수는 총 2만 7239건으로 매년 5천 건을 넘으며 자전거 이용자의 안전이 위협받고 있음을 알 수 있다. 자전거 교통사고 치사율은 1.65로 전체 교통사고 치사율(1.61)과 비슷한 수준이지만 운전자가 20세 이하일 때의 치사율은 0.32, 65세 이상일 때는 3.56으로 운전자 연령때에 따라 높아지는 경향을 보였다(2) 통계청의 통계자료 중 ‘사고 유형별 자전거 교통사고 현황’에 따르면 이중 2021년 자전거 단독 전도 전복 사건이 총 77건 발생하였고, 사망자 수는 10명으로 13%의 치사율을 보였

다.[3] 또한 자전거에 대한 수요와 운행이 증가하면서, 자전거에 대한 범죄 사고도 증가하고 있다. 특히 도난 사건의 경우, 경찰청 자료의 '절도 수법' 에 따르면 2021년 자전거 절도 건수는 12,148건이 있었고 그중 검거 건수는 4,358건으로 검거율이 전체의 36%도 채 되지 않는다.[4] 따라서 자전거 전도전복사고의 예방과 자전거 도난사고 방지에 대한 대책 마련이 필요하다.

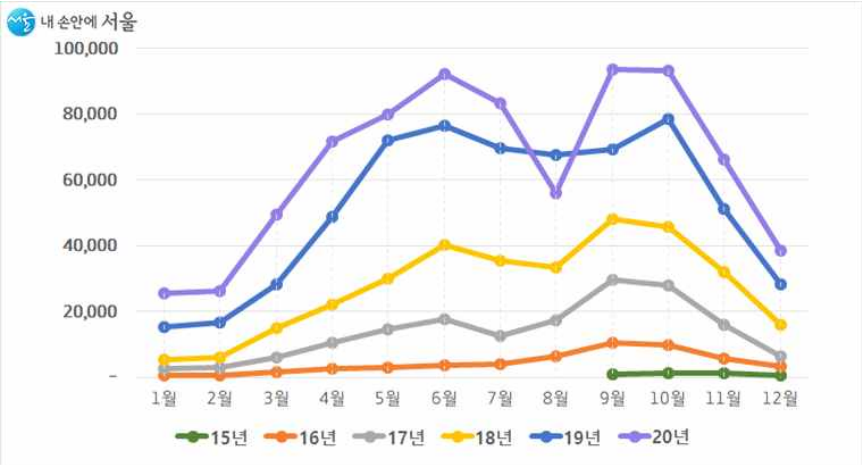


Fig. 1 Public bicycle monthly Number of rentals

본 연구에서는 이러한 전도전복사고의 원인으로서 자전거 브레이크 작동 시 바퀴가 완전히 잠기어 미끄러짐을 유발하는 lock-up 현상을 지목하고 이를 예방하기 위한 전자식 ABS 장치를 개발하였다. 더 나아가, 기존의 ABS의 노면에 따른 작동의 차이를 두지 않는 시스템을 발전시켜 자전거 운행 중 노면을 실시간으로 분석, 그 반응을 다르게 하는 적응형 ABS이다. 브레이크의 조작 의사를 힘 인식 센서인 로드 셀 센서로 측정하고 동시에 분석한 노면의 변화를 기반으로 적절한 ABS 작동을 적용한다. 이로써 노면에 따라 적응형 ABS가 작동하게 되며, 이를 통해 제동거리를 줄여 전도전복사고를 예방하는 목적을 달성한다. 또한 자전거 중앙의 부착부에 위치한 NFC 센서를 통한 전자식 자전거 보안 장치 및 제어 알고리즘을 개발하였다.

2. ABS 구조 설계

2.1 기존 제품 및 특허 분석

2.1.1 기존 제품 분석

작동 조건에서 기존의 ABS 작동 방식은 사용자가 풀브레이킹시에 위급한 상황이라고 판단, ABS를 작동하여 사용자가 풀브레이킹을 못하는 시에는 작동이 저하된다. 제품은 노면의 차이를 두지 않고 ABS 작동을 하는데 실제 노면은 각 노면에 따라 바퀴와 노면의 Slip ratio가 다르므로 각각의 차이를 두고 ABS의 반응을 다르게 하는 게 효과적인 것으로 판단하였다.

2.1.2 차별성

본 연구에서 개발한 ABS는 기존의 풀브레이킹으로 작동하는 방식이 아닌 사용자가 0.5초 내에 브레이킹을 하면 ABS가 작동되는 시스템을 가진다. 따라서 위급상황에서 효율적인 ABS 가동을 돕는다. 또한 노면의 상황을 실시간으로 분석하고 ABS의 가동을 다르게 하는 시스템을 구축하였다. 조하나 등[5]의 연구에서 노면의 차이에 따라 바퀴와 노면의 Slip ratio가 다르다는 결과를 자세히 알 수 있다. 또한 출원 번호 10-2017-0057480[6]의 자료를 인용하여 다양한 노면에 따른 Slip Ratio가 각기 다름을 알 수 있다. 우리는 이러한 사전 조사를 통해 노면에 따라 각기 다른 Slip Ratio를 가짐을 예측, 실제 실험을 통해 일반 아스팔트 노면과 젖은 노면에서의 아스팔트 두 노면과 바퀴 간의 Slip Ratio가 다름을 알아내었다. 이 실험은 3부에서 자세히 다루겠다. 이러한 실험값에 따라 다른 반응을 지니는 ABS를 제작해 적응형 ABS를 도출하였다.

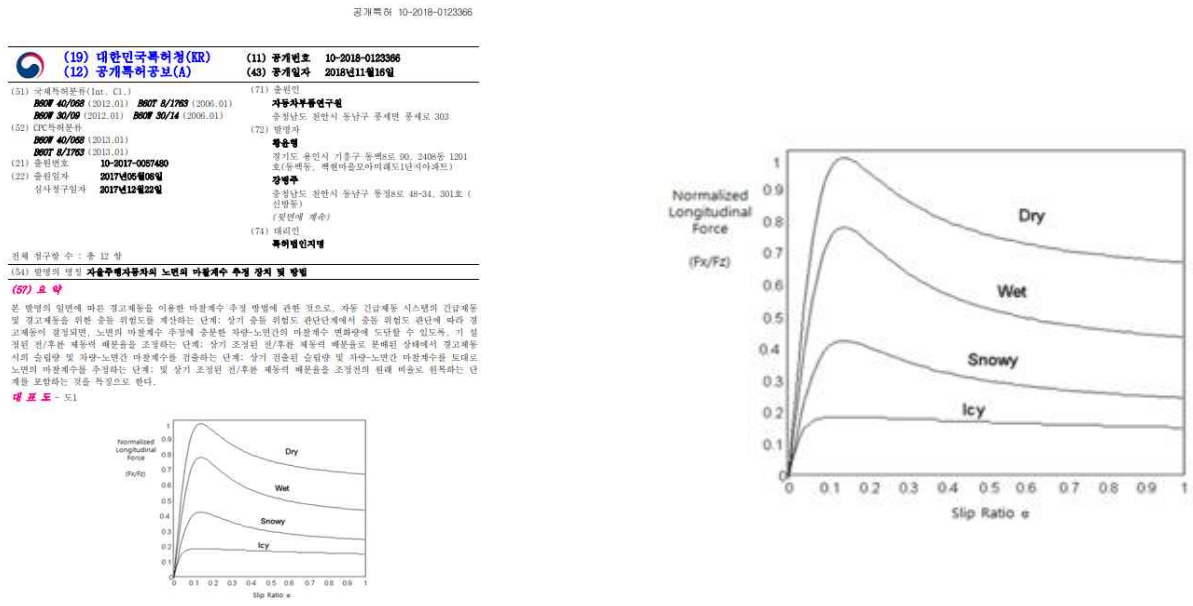


Fig. 2 Patent investigation and analysis

2.1 전체 구조

‘자전거 전도전복사고를 막기 위한 전자식 ABS’ 는 브레이크 레버를 당길 시에 그 작용을 측정, 구동부로 브레이크를 제어하는 장치이다. 아두이노 기반 프로세스로 앞 뒷바퀴의 각속도 차이를 측정하여 노면을 감지하고 실험값으로 취득한 값으로 모터의 회전을 제어한다. 구동부의 동력 전달부에서 회전운동을 직선운동으로 변환, 제어하여 와이어로 동력을 전달한다. 와이어로 브레이크의 작동을 제어하여 노면에 다른 반응을 가지는 ABS 구동을 설계하였다. 이러한 작동원리를 고려하여 설계한 장치를 Fig.3과 Fig 4에 나타내었다.

Fig. 3 A prototype proposed in the research

Fig. 4 Expansion of the operating core

2.2 ABS 브레이크

‘ABS 작동 기계식 브레이크’ 는 디스크의 양쪽에서 브레이크 패드로 제동하는 기계식 브레이크 형식을 따랐다. 브레이크는 본체, 나사 체결 부, 와이어 당김 부 세 부품으로 구성된다. 나사는 동력 전달을 주 목적으로 하기 위해 운송 나사인 사각나사로 선정하였고 반 시계 방향으로 운동하기 위해 왼나사로 설계하였다. 운송 나사로 설계하여 에너지 손실을 최소화하였으며 와이어를 통한 동력을 나사가 감기며 브레이크 패드를 통해 디스트에 전달한다. 디스크에 동력을 전달하여 ABS 및 브레이킹 작동을 제어한다. 본체에는 홀센서 하우징을 함께 고려하여 설계하였다. 앞바퀴에 부착한 네오디뮴 자석을 홀센서로 인식하여 앞바퀴의 회전을 알아낸다. 분석 과정을 통해 앞바퀴의 각속도를 실시간으로 측정한다.

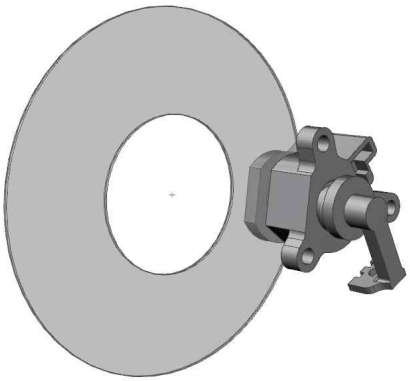


Fig. 5 Mechanical brake

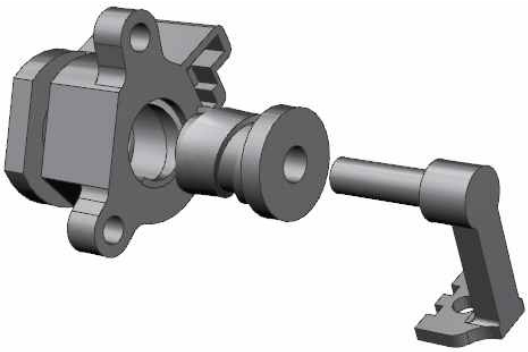


Fig. 6 Mechanical brake enlargement

2.3 구동부

2.3.1 구동부 전체 구조

‘브레이크 구동부’ 는 브레이크 레버에서의 로드 셀 측정값을 바탕으로 자전거 급제동 필요시 브레이크 ABS 기능을 작동시키고 일반적인 브레이킹 상황도 함께 제어하고 브레이크 작동을 이룬다. 또한 NFC(Near Field Communication) 기술을 활용하여 자전거 앞바퀴의 브레이킹 후 잠금을 가지는 장치이다. 장치의 전체 구조는 다음과 같다.

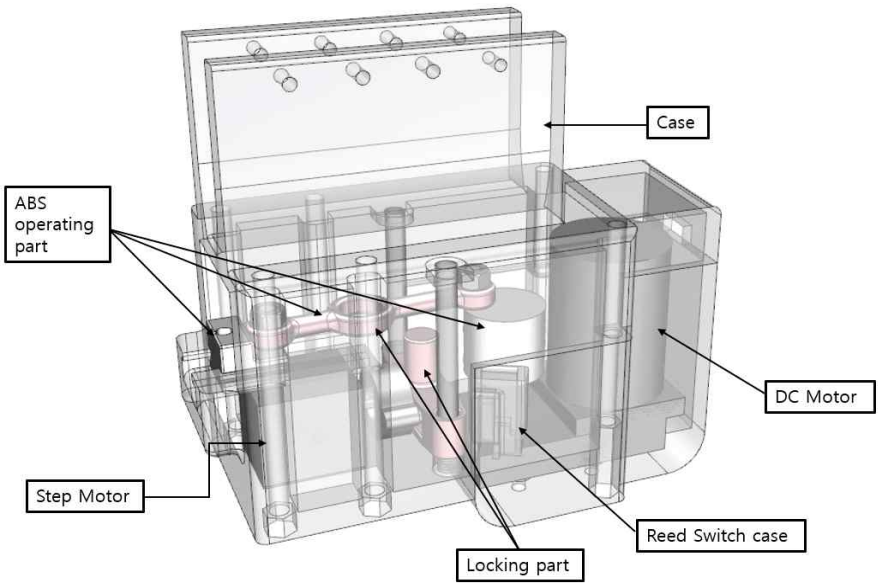
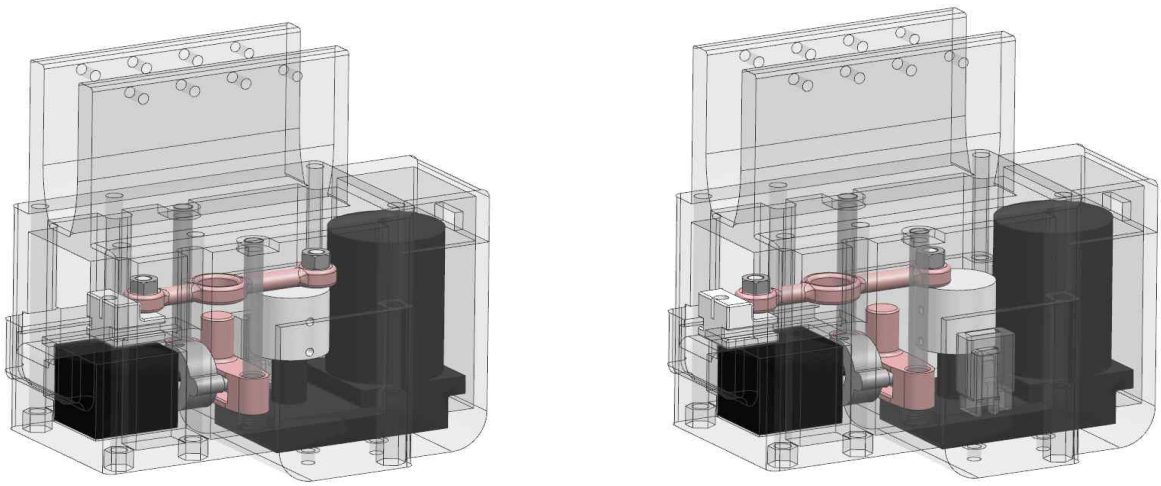


Fig. 7 Brake driving unit

2.3.2 구동부 작동 원리

‘브레이크 구동부’에서 ABS를 작동시키기 위해서 크랭크 기구와 LM 가이드를 참고하여 설계하였다. 모터는 DC 모터를 사용하였다. DC 모터는 기동 Torque가 크고 직선적으로 비례하며, 또한 출력 효율이 양호하다는 장점이 있다. 브레이크를 제어하는 데 있어서 큰 Torque가 필요하므로 DC 모터가 적절하다고 판단, 선정하였다. DC 모터를 이용하여 회전 운동을 크랭크 축을 통해 직선 운동으로 바꾸어 준다. 기계식 브레이크의 와이어를 잡아당기어 기본적인 브레이크의 역할을 하고 자전거 주행 중 급정거 시 전도전복사고를 방지하기 위해서 브레이크 줄을 빠르고 반복적으로 잡아당기도록 설계하였다 잡아당기는 길이는 원판의 지름을 고려하여 최대 35㎜를 당길 수 있도록 설계하였다. 또한 DC 모터에 달린 크랭크 축에 자석을 넣고 홀센서로 인식하여 모터의 각도 오차를 파악, 수정하여 브레이크의 정확도를 더 높이도록 설계하였다.

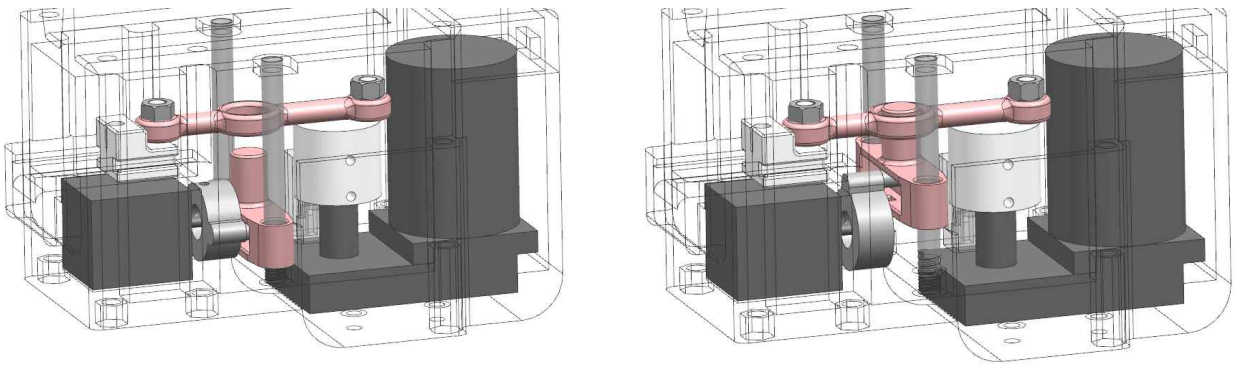


(a) Braking (b) Not braking

Fig. 8 Brake actuation design

2.3.3 구동부 잠금장치 설계 및 원리

‘브레이크 구동부’에서 잠금장치 원리는 다음과 같다. NFC(Near Field Communication) 기술을 이용하여 사용자가 인식기를 센서에 인식, 잠금 여부를 확인한다. 잠금 여부가 확인되면 홀센서로 DC 모터의 크랭크 축을 정확한 잠금이 가능한 위치로 제어한다. DC 모터의 크랭크 축이 회전운동을 하면 구동하단부에 고정되어 있는 상하 슬라이드가 브레이크를 작동시키는 축을 고정한다. 이렇게 브레이크가 잡힌 상태에서 앞바퀴의 움직임을 억제함으로써 자전거를 잠금상태로 만들도록 설계하였다.



(a)_Brake unlocking (b) Brake locking

Fig. 9 Brake lock

2.4 브레이크 레버 및 센서 하우징

2.4.1 브레이크 레버

‘사용자 힘 측정을 위한 로드 셀 부착 브레이크 레버’는 센서가 위치하는 브레이크 손잡이 부와 자전거 연결부로 구성된다. 브레이크 손잡이 안쪽에는 토션 스프링을 포함하여 설계하였다. 토션 스프링은 비틀림 스프링의 일종으로 스프링 한쪽 암을 고정시키고 스프링이 직접 뒤틀리면서 비틀린 탄성력을 제공한다. 스프링의 작동으로 브레이크 레버의 동작을 도와주어 사용 시 손잡이 부에 걸리는 응력을 줄여준다. 작동원리는 다음과 같다. 사용자가 레버를 당기면 레버 안쪽의 로드 셀 센서로 사용자 손의 악력을 측정한다. 0.5초 미만으로 지정한 큰 힘이 측정되면 사용자가 위급한 상황이라고 판단, ABS를 작동을 제어한다. 나머지 상황에서의 작동은 위급하지 않은 상황에서의 작동이라고 판단하고 ABS 미작동 및 적은 힘의 브레이크를 적용한다.

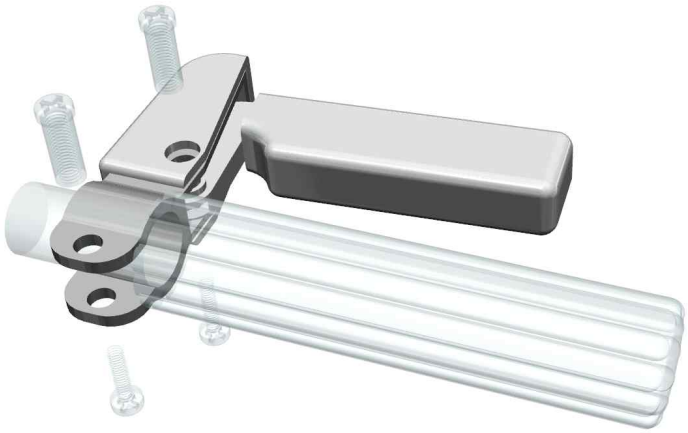


FIg. 10 Brake lever

2.4.2 센서 하우징

센서 제어 장치, NFC 장치를 자전거에 부착할 필요성이 생기어서 센서 하우징을 제작하였다. 앞뒤에 센서선이 빠져나올 부분, 밑에 뒷브레이크 와이어선을 고려하여 제작하였다. 윗부분에 NFC센서를 보관하우징을 제작하여 사용자가 편리하게 자전거 잠금장치를 사용할 수 있게 하였다.

뒷바퀴에 홀센서를 부착할 센서 하우징을 제작하였다. 홀센서가 뒷바퀴에 부착한 네오디뮴 자석을 인식하여 바퀴 회전을 인식한다. 분석작업을 통해 뒷바퀴의 각속도를 실시간으로 측정한다. 앞뒷바퀴의 각속도를 분석하여 그 차이를 알 수 있다. 이러한 차이값을 노면에 따라 종합 및 분석하여 궁극적인 목적인 노면의 변화를 알아낸다. 각속도 측정 및 노면변화 측정은 3부에서 자세히 다루겠다.

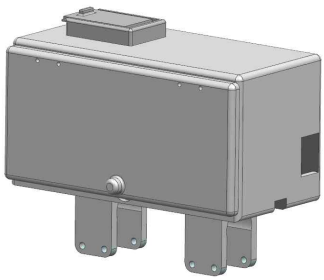


Fig. 11 Arduino sensor-housing

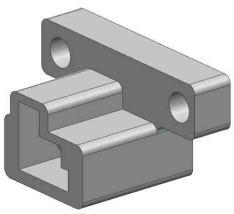


Fig. 12 Hall sensor-housing

3. ABS 작동 메커니즘

3.1 ABS기본 원리

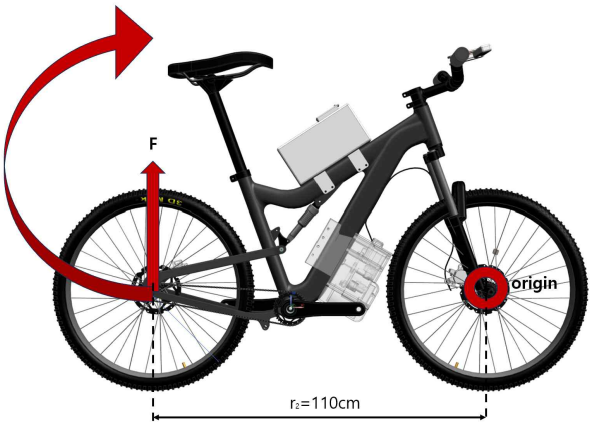


Fig. 13 Bicycle overturn

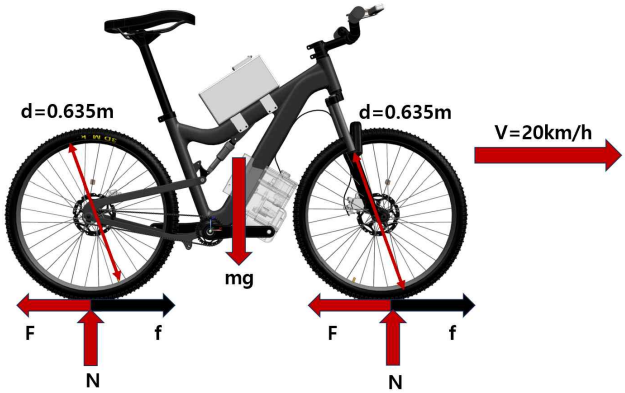


Fig. 14 Bicycle's velocity

자전거의 ABS 장착의 이유로는 자전거 전복사고를 방지하고 더 나아가 자전거의 제동거리를 조절하는 데 있다. 자전거 속도가 20km/h 일 때 자전거의 앞바퀴 브레이크를 순간적으로 잡게 된다면 자전거의 앞바퀴는 정지하게 될 것이다. 노면과 바퀴의 마찰력이 강하여 자전거의 앞바퀴가 고정된다면 자전거는 그림 Fig. 10의 원점을 기준으로 자전거의 뒷바퀴의 F(힘)에 의해서 전복이 된다. 아래의 식은 20km/h의 속도로 달리는 자전거 전복사고 시 자전거의 전복 각도를 파악하기 위한 계산식이다. 그림은 Fig. 13과 Fig. 14를 참고한다.

condition: m=v(velocity)=20km/h, Bike's Weight=17kg, Bicycle's Weight=60kg, r(wheel radius)=0.3175m

$$m = (Bike's\ \ Weight) + (Bicycle's\ \ Weight) = 17kg + 60kg = 77kg$$

$$v\text{=}20\text{km/h}\text{=}20 \times 10^3\text{m/s} \times \frac{1}{3600s} = 5.56m/s$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{5.56m/s}{0.3175m} = 17.51rad/s$$

$$\text{Kinetic Energy}=\frac{1}{2} \times mv^2 = \frac{1}{2} \times 77kg \times (5.56m/s)^2 = 1188.27Nm\text{(two wheels)}$$

이로써 자전거의 운동에너지(KE)는 1188.27Nm임을 알 수 있다.

$$Kinetic\ Energy = \frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{1}{2} mr_2^2\omega^2$$

$$\omega^2 = \frac{2 \times KE}{mr_2^2} = \frac{2 \times 1188.27Nm}{77kg \times (1.1m)^2} = 25.51rad^2/s^2$$

$$\omega = \sqrt{25.51rad^2/s^2} = 5.05rad/s$$

$$\omega = 5.05rad/s \times \frac{180}{\pi} = 289.37^\circ$$

20km/h 속도로 달리던 자전거가 급브레이크 시 자전거는 289.37° 로 전복된다.

원활한 ABS의 작동을 위해서 설계한 앞 브레이크는 앞바퀴에 작은 힘을 가하여 특정 속도에서 앞바퀴의

완전한 정지를 막아 전복사고를 방지하고 나아가 뒷바퀴의 F_s(최대정지마찰력)과 앞바퀴의 ABS를 이용하여 제동거리를 조절한다.

Rubber	Asphalt (dry)	-	0.5 - 0.8
Rubber	Asphalt (wet)	-	0.25 - 0.75

Fig. 15 Coefficient of Friction Values for Clean Surfaces

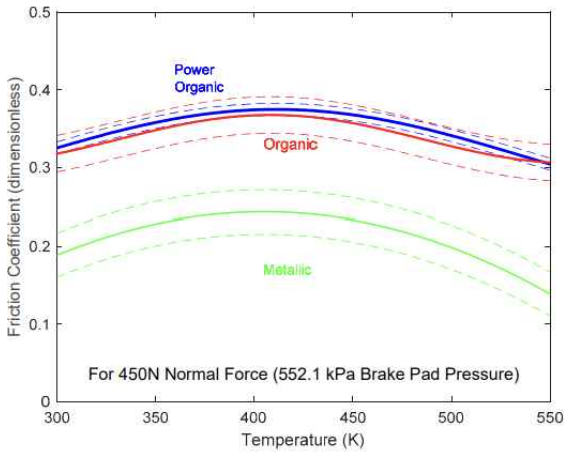


Fig. 16 Friction coefficient depending on temperature

자전거의 제동거리 정지는 노면의 상태의 따라 영향을 받는다. 아래식은 자전거의 노면을 마른 아스팔트($\mu_s = 0.80$)로 설정하였고 자전거의 제동거리를 구하기 위해서 자전거의 운동에너지에서 자전거 앞/뒤 바퀴의 토크 값을 이용하여 구한다. 자전거의 뒷바퀴의 토크 값은 자전거의 뒷바퀴에 작용하는 마찰력을 이용하여 구할 수 있다. 자전거 뒷바퀴는 림 브레이크 방식으로 자전거의 뒷바퀴의 완전 정지를 가능케 한다. 그림은 Fig. 13을 참고한다.

condition: $N = mg/2 = (77kg \times 9.81m/s^2)/2 = 377.685N$(rear wheel), $\mu_s = 0.80$(dry asphalt)

$f = N \times \mu_s = 377.685N \times 0.80 = 302.148N$

$F = f = 302.148N$

$\tau_B = F \times r = 302.148N \times \dfrac{0.635m}{2} = 95.93Nm$

따라서 뒷바퀴가 정지할 때 토크값은 95.93Nm이다.

위 식에서 쓴 마찰계수는 정지마찰계수로 뒷바퀴의 마찰력이 크게 작용한다. 하지만 브레이크의 작동 이후에는 운동 마찰계수로 바뀌어 자전거의 제동거리가 늘어나게 된다. Fig. 14를 참고하여 아스팔트 위에서 자전거 타이어의 운동 마찰계수는 $\mu_k = 0.5$로 위 식을 이용하여 다시 계산하면 뒷바퀴의 토크 값은 59.96Nm가 되어 운동에너지의 감소율이 줄어 자전거의 제동거리는 늘어나게 된다. 또한 속도가 높아질수록 제동거리에 대한 차이는 더 커진다. 이를 위해 자전거 브레이크를 반복적으로 작동시킴으로써 자전거 뒷바퀴의 최대정지마찰력을 힘을 얻을 수 있도록 설계한다.

브레이크 패드는 온도에 따라 마찰계수가 변한다. 일반적으로 대한민국에서 자전거를 장시간 사용하면 자전거의 디스크 브레이크의 온도는 $110^\circ = 383.14K$이다. Fig. 16 그래프를 통해 자전거 패드의 온도 상승을 막기 위해서 ABS 구동부의 rpm을 적절히 조절해야 한다.

3.2 ABS설계 메커니즘

제동거리의 기준을 설정하기 위해 20km/h일 때 자전거의 제동거리가 5m 이내가 될 수 있도록 설계하였다. 20km/h의 속도인 자전거의 제동거리가 5m 이내가 되기 위해서 DC 모터는 4Nm인 모터를 사용하였다.

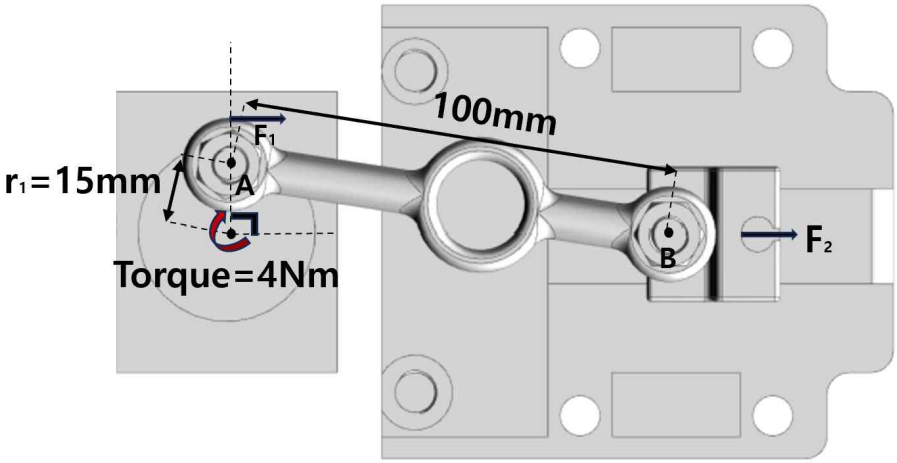


Fig. 17 Slider-Crank

자전거 급제동시의 제동거리를 구하기 위해 앞바퀴에 브레이크의 토크 값을 구해야한다. 그러기 위해서 ABS 구동부에 힘을 계산한다. 그림은 Fig. 17를 참고한다.

condition: τ_D(DC motor Torque)= 4Nm, $r_1 = 0.015m$

$$\tau = F \times r$$

$$F_1 = \frac{\tau_D}{r_1} = \frac{4Nm}{0.015m} = 266.67Nm$$

$$F_1 = F_2 = 266.67Nm$$

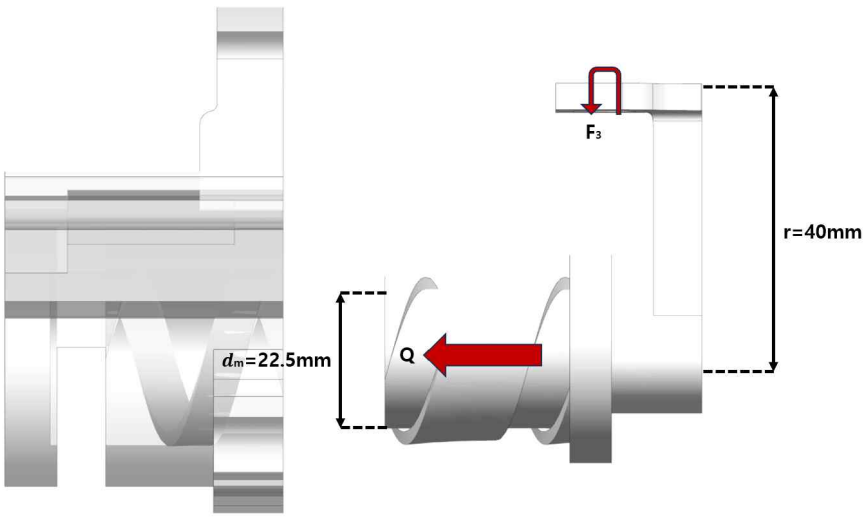


Fig. 18 Screw Thread

기계식 디스크 브레이크는 나사 역학을 적용하여 설계하였다. 브레이크의 Q(디스크에 가해지는 수직력) 값을 구한다. 그림은 Fig. 18을 참고한다.

condition: $d_m = 22.5mm$, $r = 40mm$, $F_3 = 266.67N$, $\mu_s = 0.35(friction\,coefficient\,pla)$, n=1(Number of threads on the screw)

L(lead) is the distance the screw thread moves in the axial direction when the screw rotates one revolution. If the screw turns 90 degrees, the screw moves 5 mm in the axial direction.

so, $\frac{L}{4} = 5mm$

$L = 20mm$

$L = np$

$p = \frac{L}{n} = \frac{20mm}{1} = 20mm$

if screw tightening

$\tan\lambda = \frac{L}{\pi d_m}$ (L;lead, λ:lead angle)

$\lambda = \tan^{-1}(\frac{L}{\pi d_m}) = \tan^{-1}(\frac{0.02m}{\pi \times 0.0225m}) = 15.8^\circ$

$\tan\rho = \mu_s$

$\rho = \tan^{-1}(\mu_s) = \tan^{-1}(0.35) = 19.29^\circ$

$\tau = \frac{d_m}{2} \times Q \times tan(\lambda + \rho) = F_3 \times \Upsilon$

$F_3 = Q \times \frac{d_m}{2 \times r} \times \tan(\lambda + \rho) = Q \times \frac{0.0225}{2 \times 0.04} \times \tan(15.8 + 19.29) = Q \times 0.1976$

$Q = \frac{F_3}{0.1976} = \frac{266.67N}{0.1976} = 1349.54N$

따라서 브레이크의 Q(디스크에 가해지는 수직력)는 1349.54N이다.

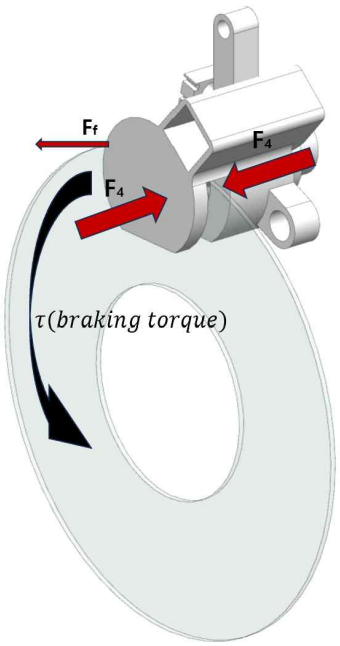


Fig.19 Disc brake

앞에 식에서 Q값을 이용하여 브레이크를 통해 자전거 앞바퀴에를 정지시키는 토크 값을 구하고 앞/뒤바퀴의 토크값을 이용하여 제동거리를 분석한다. 그림은 Fig. 14과 Fig. 19을 참고한다.

condition: $\mu_p = 0.39$(friction coefficient brake pad)

$$F_4 = Q \times \mu_p = 1349.54N \times 0.39 = 526.32N$$
$$F_f = 2F_4 = 2 \times 526.32N = 1052.64N$$
$$\tau_f = F_f \times \frac{(r_o + r_i)}{2} = 1052.64N \times \frac{(0.09 + 0.07)}{2} = 84.21Nm$$

84.84Nm is braking torque

$$\tau = KE/\theta$$
$$\theta = KE/(\tau_f + \tau_B) = 1188.27Nm/(84.21Nm + 95.93Nm) = 6.6rad$$
$$\theta = \omega \times t$$
$$t = \theta/\omega = \frac{6.6rad}{17.51rad/s} = 0.38s$$

Since we need to find the distance until the speed stops, v=0m/s, v_0=5.56m/s and s_0=0

$$v = v_0 + at$$
$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{0m/s - 5.56m/s}{0.38s} = -14.75m/s^2$$
$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$
$$s = 0 + 5.56m/s \times 0.38s + \frac{1}{2} \times (-14.63m/s^2) \times (0.38s)^2$$
$$= 1.1m$$

따라서 자전거의 앞/뒤 브레이크를 반복적으로 당기게 될 경우 마른 아스팔트 제동거리는 최대 1.1m까

지 줄어들을 수 있다. 하지만 운동마찰계수로 위 식으로 제동거리를 구하게 되면 제동거리가 1.3m이다. 노면에 따라 ABS 구동부 rpm 조절하여 제동거리가 가장 짧은 ABS를 설계한다.

3.3 노면에 따른 자전거 앞/뒤 바퀴 각속도 차이 측정

자전거 탑승 중 노면 변화를 실시간으로 측정하기 위한 실험을 하였다. 노면은 각각의 차이에 따라 마찰력이 달라지는 데, 마찰력 차이에 의한 자전거의 앞바퀴와 뒷바퀴의 속도 및 에너지 차이를 이용할 것이다. 실험 내용은 건조한 아스팔트와 젖은 아스팔트 위에서 자전거를 탑승하여 앞바퀴와 뒷바퀴의 각속도 차이를 확인한다.

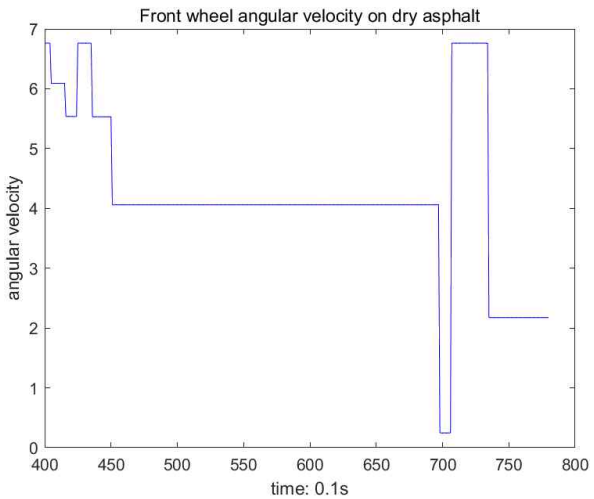


Fig. 20 front wheel ω on dry asphalt

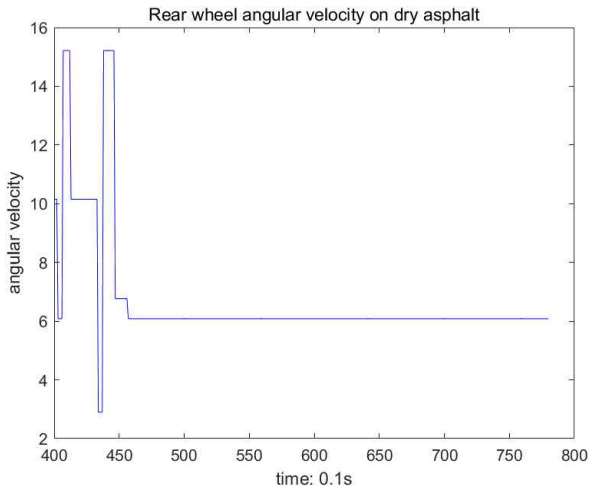


Fig. 21 rear wheel ω on dry asphalt

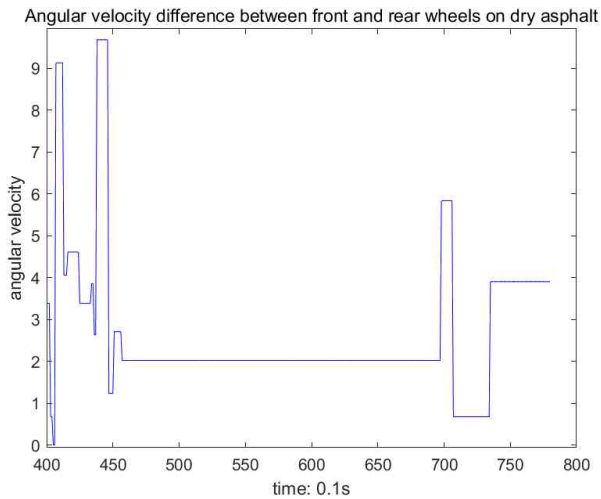


Fig. 22 ω different between front and rear wheels on dry asphalt

Fig. 20~22는 건조 아스팔트에서 자전거를 구동할 때 생기는 앞바퀴 각속도와 뒷바퀴의 각속도를 측정하고 그 차이를 보여주는 그래프이다. 자전거가 가속할때는 앞 뒷바퀴의 각속도 차이가 높은 반면 자전거의 속도가 일정해지는 구간에서는 차이가 일정한 것을 볼 수 있다. 속도가 일정해지는 구간에서의 바퀴 사이의 차이 평균값은 약 2.65 rad/s이다. 여러 번의 실험을 진행하였고 모두 흡사한 결과 값을 도출하였다. 바퀴의 속도차는 $v = r\omega = 0.3175m \times 2.65rad/s = 0.84m/s$이다 에너지로 환산하면 $KE = \frac{1}{2} \times 87kg \times (0.84m/s)^2 = 26Nm$이다.

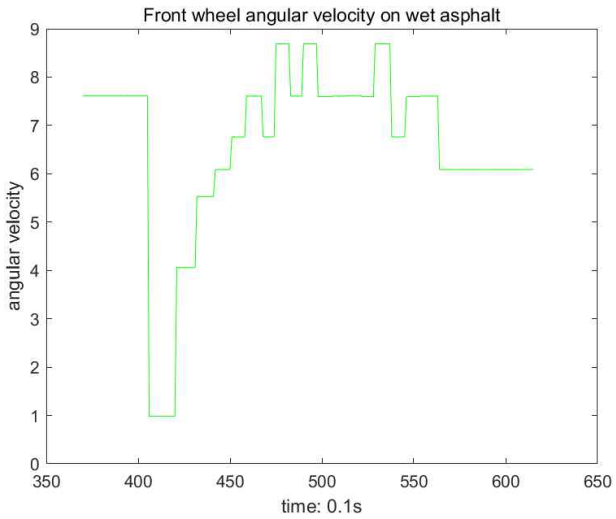


Fig. 23 front wheel ω on wet asphalt

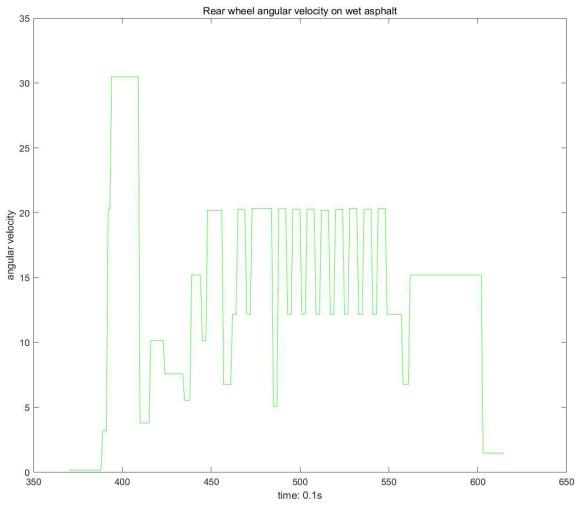


Fig. 24 rear wheel ω on wet asphalt

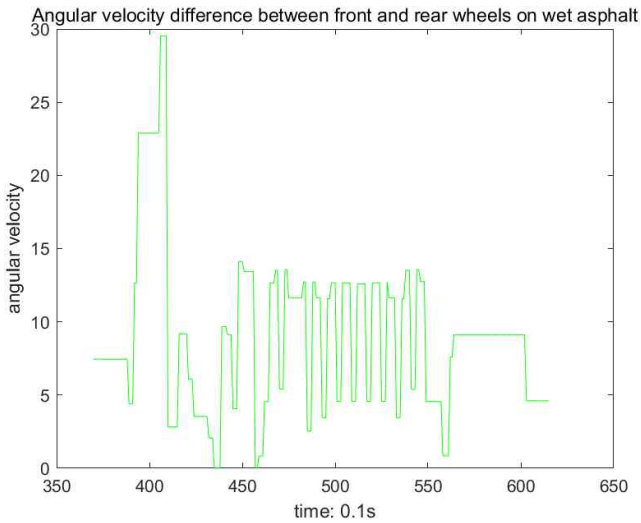


Fig. 25 ω different between front and rear wheels on dry asphalt

젖은 아스팔트에서 자전거를 구동할 때 생기는 앞바퀴 각속도와 뒷바퀴의 각속도를 측정하고 그 차이를 보여주는 그래프이다. 자전거가 가속할 때는 앞 뒷바퀴의 각속도 차이가 높은 반면 속고가 일정해지는 구간에서는 차이의 변화가 일정한 것을 볼 수 있다. 여러 번의 실험을 진행하였고 흡사한 결과 값을 도출하였다. 일정한 차이가 보여주는 구간에서 높은 차이가 보여주는 곳의 각속도는 약 12rad/s이고 낮은 차이가 보여주는 곳에서는 4.5 rad/s가 나왔다. 차이의 변화가 일정해지는 구간에서의 바퀴 사이의 차이 평균값은 약 8.93rad/s이다.

평균 속도차이는$v = r\omega = 0.3175m \times 8.93rad/s = 2.84m/s$이다.

평균 에너지 손실은$KE = \frac{1}{2} \times 87kg \times (2.84m/s)^2 = 349Nm$이다.

건조한 아스팔트에서는 속도 차이는 0.84m/s, 에너지 차이는 26Nm이고 젖은 아스팔트에서는 속도 차이는 2.84m/s, 에너지 차이는 349Nm이다. 실험을 통해 건조한 아스팔트와 젖은 아스팔트의 두 노면에서 앞바퀴와 뒷바퀴의 속도 및 에너지 차이를 알 수 있었다. 실험에서의 결과값을 적용시켜 실시간으로 노면의 변화를 측정하고 저장하는 시스템을 구축하였다.

3.4 ABS실험

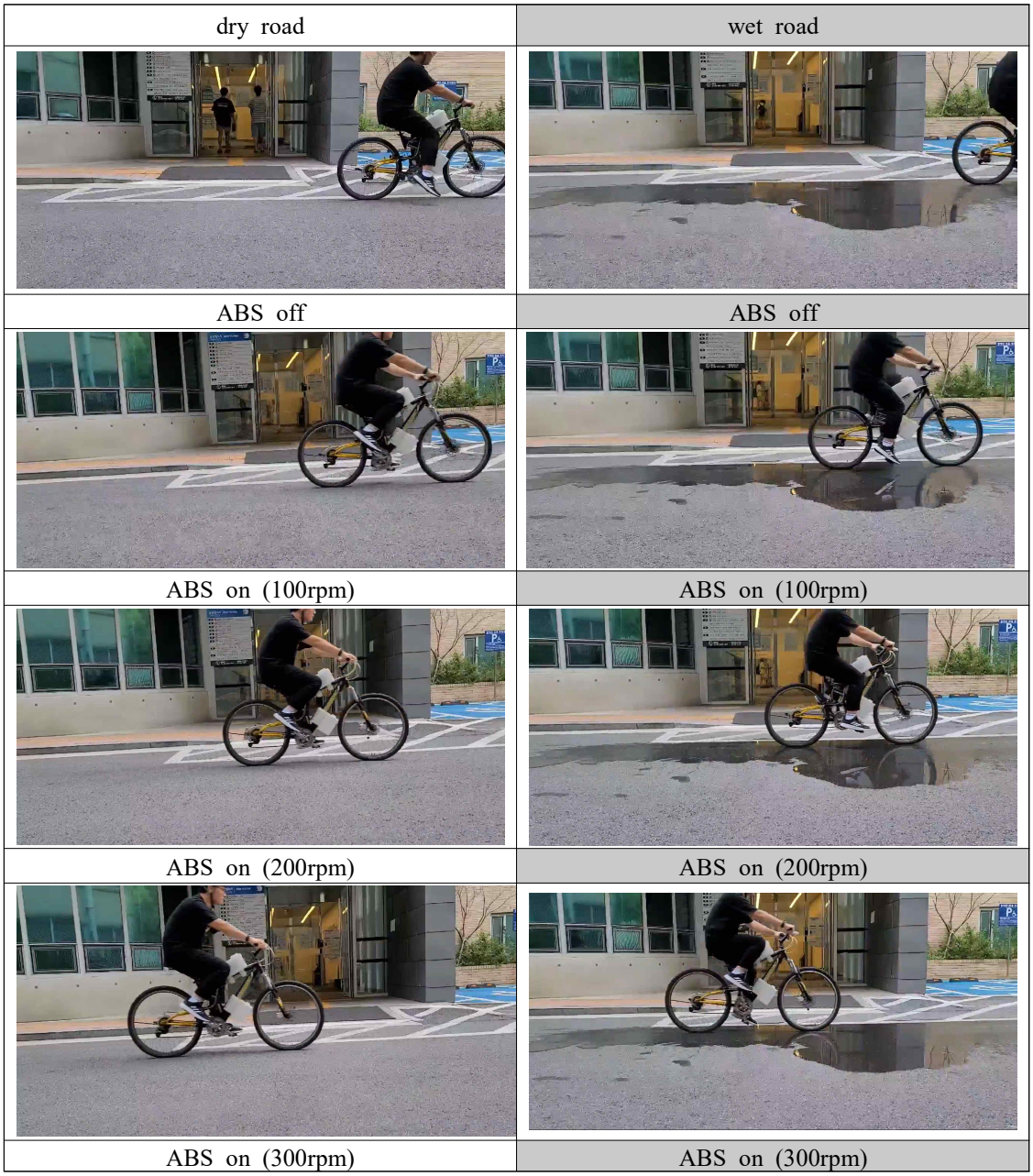


Fig. 26 ABS Test

Fig. 26에서 ABS 구동부의 DC 모터 rpm에 따른 제동거리를 측정하였다.

dry road surface	1.33m	1.24m	1.17m	1.16m
	ABS off	ABS on(100rpm)	ABS on(200rpm)	ABS on(300rpm)
wet road surface	1.72m	1.52m	1.36m	1.18m
	ABS off	ABS on(100rpm)	ABS on(200rpm)	ABS on(300rpm)

※Average starting speed on dry road: 20.3km/h, average starting speed on wet road: 19.8 km/h

Table. 1 ABS test results

마른 노면에서 실험 결과 ABS를 사용하지 않았을 때의 정지거리 1.33m에 비해 ABS를 사용할 경우 빠르

게 가동할수록 점차 정지거리가 줄어드는 결과를 보였으나, 모터 rpm 300으로 가동한 결과 정지 과정에서 약하게나마 잭나이프 현상이 발생하였다. 젖은 노면에서의 실험 결과 마른 노면에서의 제동거리보다는 길지만 젖은 노면 역시 ABS를 가동함에 따라 제동거리가 감소하는 결과를 보였다. 마른 노면에서의 결과와는 달리 젖은 노면에서는 모터 rpm 300에서도 잭나이프 현상이 발생하지 않고 안정적으로 제동거리가 감소하였다. 이에 따라 ABS 최적 모터 rpm은 마른 노면 기준 200 rpm, 젖은 노면에서는 300 rpm으로 결정하였다.

4. 잠금 장치 메커니즘

4.1 NFC

NFC(Near Field Communication)는 근거리 무선 통신으로 가까운 거리에서 13.56MHz의 주파수로 두 전자기기 통신하는 기술이다. 교통 카드나 스마트폰 등 필수품에 내장되어 있다. 사람들은 보편적으로 NFC 기능이 내장되어 있는 기기를 갖고 있고, 사용 방법이 간단하기에 NFC를 사용하기로 하여, NFC를 자전거의 잠금장치의 사용 여부에 사용하였다. NFC를 아두이노로 사용하기 위하여 RFID-RC552 기기를 사용하였다.

4.2 작동 메커니즘

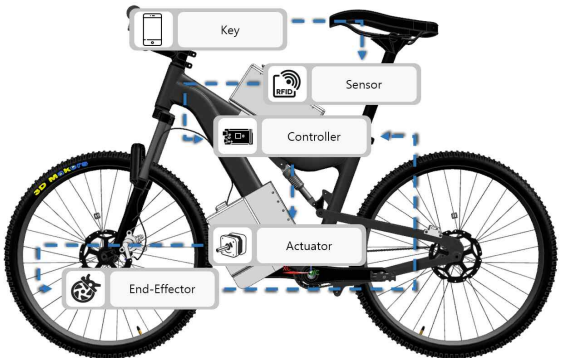


Fig. 27 Bike locking process using NFC

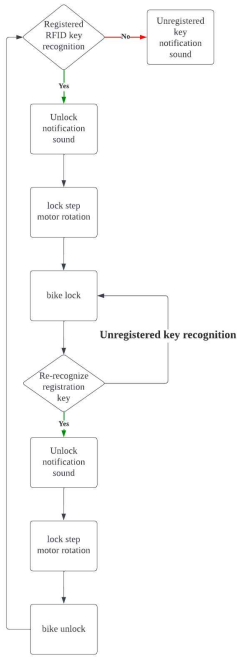


Fig. 28 Bike lock program algorithm diagra

RFID-RC552 리더기에 RFID 태그가 근접하면 RFID 리더기가 RFID 태그의 고유 아이디 데이터를 읽는다. 읽힌 데이터와 원하는 데이터가 일치하면 Controller에서 피에조 버저와 Actuator의 lock 스탭 모터에 신호를 전송한다. 이후 버저에서 아이디가 일치하는 것을 알림음으로 표시한다. 사용자에게 키 인식 결과를 인식시킨 후, ABS 구동부의 잠금장치에 신호를 주어 DC 모터와 스텝 모터를 움직이게 한다. ABS 구동부에 홀센서가 크랭크축에 있는 영점 조절 자석을 인식한 후 DC 모터를 180도 회전을 시켜 브레이크를 최대 강도로 작동시킨다. 그 후 lock 스텝 모터를 90도 회전하여 크랭크축을 고정하여 장치와 자전거를 잠근다. 그리고 다시 리더기에 등록된 고유 아이디의 태그를 접촉하면 버저에서 아이디 인식 결

과를 알리고 ABS 구동부에 신호를 주어서 스텝 모터를 반대 방향으로 90도 회전하여 크랭크축을 고정하고 있던 것을 푼다. 그리고 크랭크축이 180도 회전하여 원점으로 돌아가 잠금을 해제한다. 만약 RFID 리더기에 RFID 태그의 고유 아이디와 같지 않을 때는 버저에서 아이디 불일치 결과를 특정 소리로 알리고 ABS 구동부는 아무 작동을 하지 않는다.

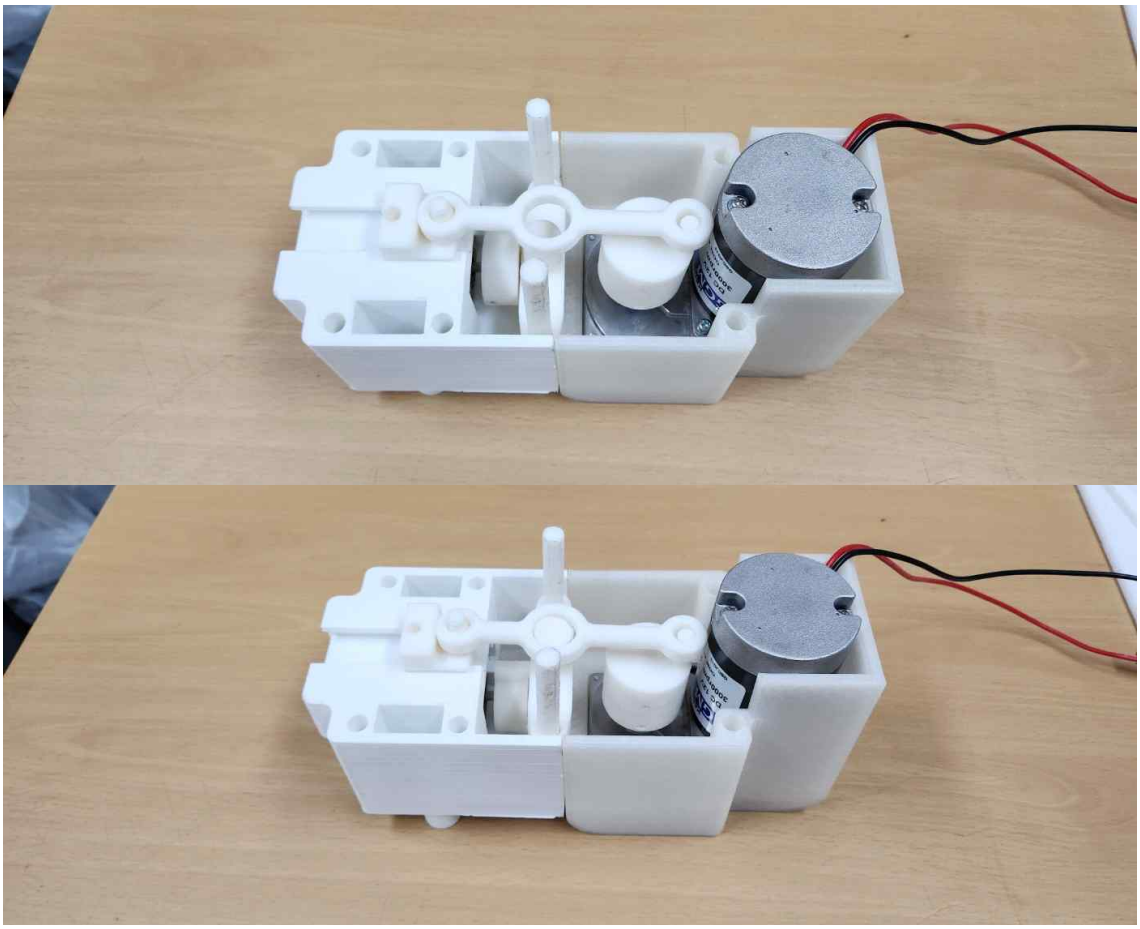


Fig. 29 Appearance of the device when the bike is locked

5. 소프트웨어 구성 및 작동 메커니즘

5.1 로드셀 센서 소프트웨어 구성 및 작동 메커니즘

Whether to hold the handlebars or not	Release the handlebars.	Grab the handlebars.
A picture of holding the handlebars		
Load cell result value	21:17:34.564 -> HX711 reading: 178 21:17:35.563 -> HX711 reading: 170 21:17:36.560 -> HX711 reading: 160 21:17:37.575 -> HX711 reading: 139 21:17:38.571 -> HX711 reading: 204 21:17:39.576 -> HX711 reading: 189 21:17:40.570 -> HX711 reading: 232 21:17:41.569 -> HX711 reading: 164 21:17:42.570 -> HX711 reading: 212 21:17:43.586 -> HX711 reading: 102 21:17:44.550 -> HX711 reading: 119 21:17:45.588 -> HX711 reading: 103 21:17:46.561 -> HX711 reading: 121 21:17:47.586 -> HX711 reading: 107 21:17:48.580 -> HX711 reading: 111	21:14:52.848 -> HX711 reading: 2522 21:14:53.845 -> HX711 reading: 58649 21:14:54.848 -> HX711 reading: 50346 21:14:55.847 -> HX711 reading: 46785 21:14:56.861 -> HX711 reading: 47813 21:14:57.862 -> HX711 reading: 38804 21:14:58.860 -> HX711 reading: 43308 21:14:59.853 -> HX711 reading: 49182 21:15:00.900 -> HX711 reading: 48587 21:15:01.872 -> HX711 reading: 42687 21:15:02.860 -> HX711 reading: 38868 21:15:03.871 -> HX711 reading: 36958 21:15:04.900 -> HX711 reading: 38854 21:15:05.900 -> HX711 reading: 35538 21:15:06.896 -> HX711 reading: 40518

Fig. 30 **Load cell results depending on whether the handle is held or not**

사용자가 브레이크를 사용할 때의 브레이크 레버 강도를 정량적으로 나타내기 위해서 압력을 측정하는 로드셀 센서를 사용하였다. 해당 센서를 통해 사용자가 원하는 브레이크 강도를 수치로 나타내고, ABS 작동을 위한 방아쇠 역할을 적절히 수행하기 위해서는 로드셀 켈리브레이션을 통해 영점을 맞추는 과정이 필요하기 때문에, 로드셀을 브레이크 레버 내부에 설치하고 켈리브레이션 과정을 거쳐 켈리브레이션 수치를 -554,000을 적용하여 영점 조절을 완료하였다.

로드셀 영점 조절 후, 브레이크 작동과 ABS 시작을 위한 레버 압력 수치값을 얻기 위해 레버 압력 측정 실험을 진행하였다. 실험자가 로드셀이 설치된 브레이크 레버를 당기며 기록되는 최소, 최대 값을 기록하여 브레이크 압력 오차 수치, ABS 방아쇠 수치 그리고 브레이크 작동 기준 수치를 확정지을 수 있었다.

5.2 ABS 소프트웨어 메커니즘

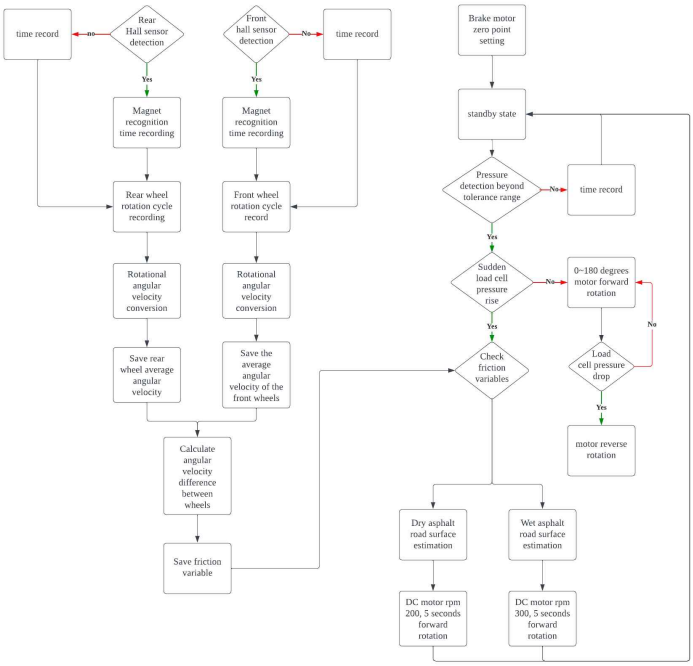


Fig. 31 program algorithm diagram

ABS 시스템 및 장금장치를 만들기 위한 소프트웨어를 단계별로 구성하였다. 1단계는 노면의 변화 체크이다. 2단계는 사용자의 브레이크 잡는 압력에 따른 브레이크 조정 및 ABS 사용 유무이다. 1단계는 앞, 뒷바퀴에 설치한 홀센서와 자석을 이용하여 바퀴 회전 주기를 측정하고 이를 회전 각속도를 변환하여 저장하는데, 이 데이터의 경우 바퀴의 빠른 회전속도와 노면의 진동으로 인하여 노이즈가 생긴다. 노이즈로 인한 영향을 최소화 하기위하여, 해당 데이터들을 평균화하여 데이터의 오차를 최대한 배제하여 저장하였다. 이 앞뒤 바퀴 각각의 속도 데이터 차를 계산하여 마찰 변수 데이터로 치환하여 저장한다. 다음은 2단계이다. 사용자가 브레이크 손잡이를 잡을 때 생긴 힘을 로드셀 센서를 이용하여 측정한다. 사용자 의도하지 않은 작동을 막기 위하여 오차 범위 넘지 않은 압력값은 무시한다. 정지에 대한 측정값의 오차범위 이상에 압력이 감지하면 브레이크가 작동하게 된다. 사용자가 급정지 하지 않을 경우 모터 영점의 0도에서 최대 강도의 180도까지, 총 180도의 가동범위를 10으로 나눠 단계당 18도를 회전하여 일반적인 자전거 브레이크 기능을 10단계로 수행한다. 주행 중 돌발 상황으로 급정지를 하게 될 경우, 로드셀 압력을 모터가 대기 상태에서 최대 강도까지 0.5초 이내로 도달할 경우 급정지 상황이라고 인식한다. 1단계에서 앞, 뒤 바퀴 각속도 차이를 통해 추정한 마찰 변수를 통해 현재 노면 상황을 각각 마른 아스팔트, 젖은 아스팔트로 판단하여 이에 맞는 ABS 작동 빈도로 브레이크 모터를 회전시킨 후, 다시 대기 상태로 전환한다.

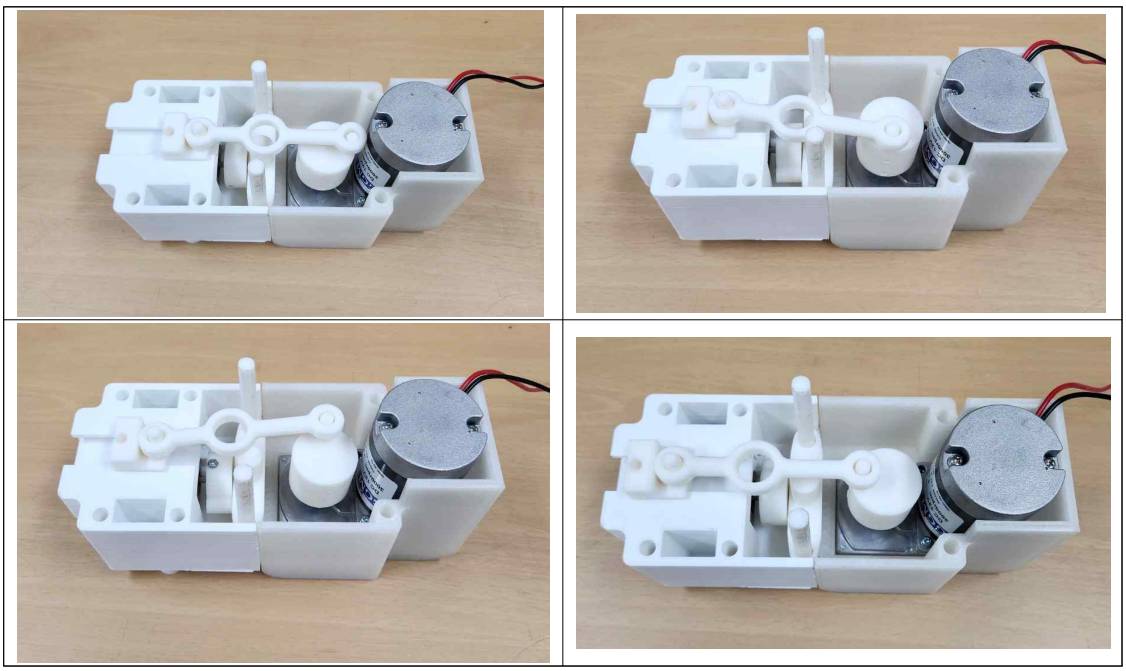


Fig. 32 Brake operation (reading direction: clockwise)

5. 결과 및 토의

5.1 결과

Fig. 33 Completed prototype

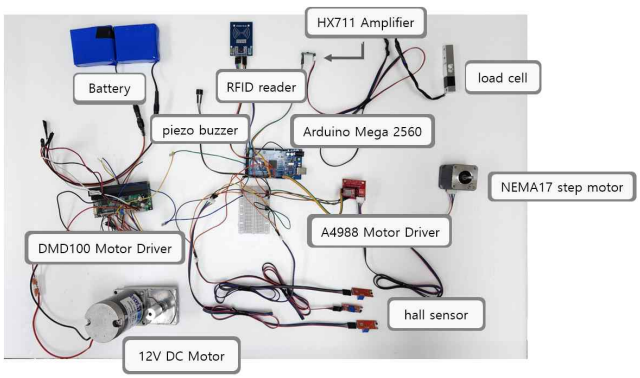


Fig. 34 Detail view of Sensor motor configuration

Fig. 33은 전자식 ABS설계를 바탕으로 제작한 프로토타입이다. 제품의 구성으로는 나사역학을 이용한 브레이크, 크랭크 기구를 참고하여 제작한 ABS 구동부, 로드셀 센서로 압력을 구하는 브레이크 레버, 앞/뒤 바퀴의 각속도를 특정하는 홀센서 하우징, 아두이노 및 배터리 하우징이 있다.

Fig. 34은 DC모터, 스텝모터, 아두이노 보드, 드라이버 모듈, 로드셀 센서, 홀센서, 피조 부저, 배터리 등 전체 하드웨어의 구성이다. 아래는 Fig. 33과 Fig. 34인 전자식 ABS작동 및 도난방지 기능의 순서를 간략히 설명하였다.

ABS 작동 순서

1. 인식한 바퀴간의 각속도 차이를 통해 노면의 상태를 측정한다.
2. 자전거 브레이크 레버의 로드셀 센서가 브레이크를 당기는 압력과 최대압력까지의 시간을 측정하여 0.5초이내에 측정되면 급제동으로 인식, ABS가 작동한다.
3. 노면변화 상태 측정 알고리즘을 통해 DC 모터의 rpm을 결정하고 ABS가 작동한다.

잠금장치 작동 순서

1. 사용자의 등록 키를 RFID 리더기에 인식한다.
2. 홀센서와 DC 모터를 이용하여 자전거 앞바퀴를 브레이크로 잡는다.
3. 잠금장치가 스텝모터에 의해 잠긴다.

Dry road surface	1.33m	1.17m
	ABS off	ABS on(200rpm)
Wet road surface	1.72m	1.18m
	ABS off	ABS on(300rpm)

※Average starting speed on dry road: 20.3 km/h, average starting speed on wet road: 19.8 km/h

Table. 2 ABS results

Table. 2는 실험을 통해 노면의 상태에 따른 ABS작동 rpm과 제동거리를 나타낸 표이다. 해당실험에서는 약 20km/h의 평균 속도로 마른 아스팔트와 젖은 아스팔트에서의 실험값을 도출하였다. 전도전복사고를 고려하여 마른 아스팔트에서는 모터 작동 200rpm, 젖은 노면에서는 모터 작동 300rpm으로 선정하였다. 이로써 전자식 ABS를 통해 제동거리가 현저히 감소함을 확인하였고, 더 나아가 전도전복사고를 해결하였다.

5.2 활용 방안 및 기대효과

본 제품은 기존 ABS가 노면 상태 차이를 두지 않는 한계점을 극복한 제품으로 그 활용도가 더 높다. 이는 더욱 효과적인 제동거리 감소와 전도전복사고를 예방하는 긍정적인 효과를 이끌어 낼 수 있다. 또한 브레이크와 브레이크 레버까지 설계 및 제작하여 기존 자전거에도 장착이 가능하다는 이점이 있다. 이는 높은 사고 위험성을 보이는 자전거의 전도전복사고를 예방하는데 크게 기여할 것이다. 또한 NFC 장치를 이용한 잠금장치 장착하여 자전거 도난 사고 방지에도 긍정적인 효과를 가진다.

5. 결 론

본 제품은 자전거 전도전복사고의 방지를 위한 전자식 ABS이다. 기존 제품의 차이점으로 노면의 상태 변화를 인식, 그에 따른 ABS 작동방식을 구현화 하였다. 이를 구현하기 위해 노면의 차이를 인식하는 실험 진행 및 분석하여 마른 아스팔트와 젖은 아스팔트를 구별하였다. 또한 노면의 차이에 따라 ABS의 rpm을 다르게 하는 실험을 진행 및 분석하여 효과적인 제동거리 감소와 전도전복사고를 예방하는 DC 모터 rpm을 결정하였다. 이를 통해 제품의 목적인 자전거 전도전복사고와 제동거리를 효과적으로 줄이는 시스템을 구축하였다. 또한 자전거 도난 사고를 방지하기 위하여 NFC 잠금장치를 제작하였다. 사용자가 알맞은 ID카드를 리더기에 접촉하면 잠금장치가 활성화된다. 이로써 효과적인 도난 방지기능을 가질 수 있다. 자전거 사용 증가는 다양한 안전 문제로 이루어졌다. 도난 사고, 전복 사고뿐만 아니라 도로에의 자전거와 자동차 충돌사고, 사람과 자전거의 충돌사고 등 다양한 문제를 야기한다. 하지만 본 제품을 통해서 다양한 사고를 예방 및 방지할 수 있다. 앞으로 안전에 대한 문제에 관심이 높아지면서 다양한 방법으로 자전거 안전에 대한 대책이 마련될 것이며 본 제품 또한 다양한 안전사고를 예방할 수 있을 것을 기대한다.

6. 후 기

지난 6개월간 팀원들과 함께 설계대회를 진행하면서 팀의 일원으로 많은 성장을 이룬 값진 시간이었습니다. 쉽지 않은 여정이었지만 많은 시행착오와 과정을 통해 한발씩 나아가는 것을 느껴 보람찬 시간이었습니다. 마지막까지 긴 여정을 함께 해준 팀원들에게 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

7. 참고문헌

(1) 자전거정책과, 코로나가 바꾼 서울교통생활...시민 4명 중 1명 '따릉이' 회원, 서울특별시(내 손안에 서울) (2021.01)

(2) 박지현, 도로교통공단, [보도자료] , 2022.06.15. , 자전거 교통사고, 6월에 가장 많이 발생

(3) 행정안전부,「자전거이용현황」, 2021, 사고유형별 자전거 교통사고 현황

(4) 경찰청,「경찰청범죄통계」, 2021, 절도수법

(5) Hana Cho·Jiin Park·Yongho Yoo·Gukpung Lee1·Kwangki Jeon, 2016,"A Study of Road Friction Coefficient Estimation by Changing Tire Types and Road Conditions"

(6) 특허출원번호 No. 10-2017-0057480, 출원인: 자동차부품연구원, 발명자: 황윤형, 강병주, 자율주행자동차의 노면의 마찰계수 추정 장치 및 방법, 출원 일자: 2017.05.08

(7)Ioan Feier, Joseph Way and Rob Redfield, 2020, "Bicycle Disc Brake Thermal Performance: Combining Dynamometer Tests, Bicycle Experiments, and Modeling^{+}", Department of Mechanical Engineering, U.S. Air Force Academy, Air Force Academy, CO 80840, USA

(8)Coefficient of Friction Values for Clean Surfaces, 2023. 9. 11검색, https://web.archive.org/web/20070929005725/http://www.school-for-champions.com/science/frictioncoeff.htm