

자동 절단과 부하 감응 제어 기술을 적용한 양날 도로절단기 개발

Development of a Double-blades Road Cutter with Automatic Cutting and Load Sensing Control Technology

서명국^{1*} · 강명철¹ · 박종호² · 김영진³

Myoung Kook Seo, Myeong Cheol Kang, Jong Ho Park and Young Jin Kim

Received: 17 Jan. 2024, Accepted: 14 Feb. 2024

Key Words : Road Cutter(도로절단기), Double-Blade(양날), Automatic Driving Cutting(자동 주행 절단), Vision Sensor(비전 센서), Load Sensing Control(부하 감응 제어)

Abstract: With the recent development of intelligence and automation technologies for construction machinery, the demand for safety and efficiency of road-cutting operations has continued to increase. In response to this, a double-blade road cutter has been developed that can automatically cut roads. However, a double-blade road cutter has a load difference between the two blades due to the ground and wear conditions of the cutting blades. The difference in load between the two blades distorts the direction of travel of the cutter. In this study, a vision sensor-based driving guide technology was developed to correct the driving path of road cutters. In addition, we developed a load-sensing technology that detects blade loads in real-time and controls driving speed in the event of overload.

1. 서 론

도로절단기는 도로 유지보수 공사에서 도로 지면을 절단하기 위해 사용되는 장비이다. 고속으로 회전하는 칼날을 이용하여 단단한 지면을 절단하는 작업인 만큼 사고발생 위험도가 높으며, 작업자는 작업 중 발생하는 소음과 분진¹⁾과 같은 열악한 환경에 직접 노출된다.

최근 건설기계의 지능화 및 자동화 기술²⁻⁷⁾이 개발되면서 도로 절단 작업의 안전성과 효율성에 대한 요구가 지속적으로 증가하였다. 이러한 요구에 따라 자동으로 도로 절단작업이 가능한 양날 도로절단기

가 개발되었다(Fig. 1).

양날 도로절단기⁸⁾는 일반적인 외날 도로절단기와 달리 두개의 절단 모듈을 가지고 있기 때문에 절단 작업 시 시멘트, 자갈, 철근 등의 불균일한 지면 상태와 절단용 칼날의 마모 상태 등으로 양쪽 칼날의 부하 차이가 발생하고, 양날의 부하 차이는 절단기의 주행 방향을 틀어지게 한다. 또한 도로절단기의 특성 상 칼날에 과부하가 발생하면 칼날이 끼여 멈추거나, 과도하면 파손되어 2차 사고가 발생할 수 있기 때문에 절단 작업 자동화가 필요하고, 틀어지는 작업 경로를 보정하는 기술이 반드시 필요하다.

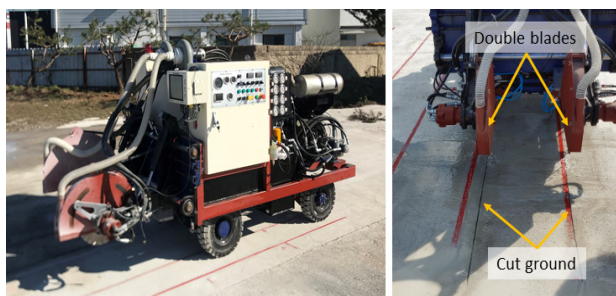


Fig. 1 A double-blades road cutter

* Corresponding author: seomk@koceti.re.kr

1 Korea Constructions Equipment Technology Institute, Gunsan, Jeonbuk State, 54004, Korea

2 JINSAN TECHWIN, Iksan, Jeonbuk State, 54629, Korea

3 Jungdo, Iksan, Jeonbuk State, 54584, Korea

Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 연구에서는 선행연구⁸⁾를 기반으로 지면에 표시한 절단선을 인식하여, 도로절단기의 주행 경로를 보정하는 비전센서 기반의 주행가이드 기술과 칼날의 부하를 실시간 감지하여 과부하 발생 시 주행속도를 제어하는 부하감응 기술을 개발하였다. 양날 도로절단기의 성능 검증을 위해 콘크리트로 포장된 테스트베드에서 직진 주행 시험, 도로 절단 시험, 부하감응 시험을 수행하였다.

2. 연구 개발 배경

2.1 도로 절단기의 작업과정

기존 도로절단기는 페인트 및 먹션 등으로 도로 지면에 표시된 절단 기준선을 따라 작업자가 밀고 가면서 절단 작업을 진행한다. 먼저, 작업자는 절단선 시작점 위치에 도로절단기의 칼날을 위치시킨다. 그리고 도로절단기가 정지한 상태에서 칼날을 고속 회전시킨 후 서서히 하강시킨다. 설정된 절단 깊이에 칼날이 도달하면 도로절단기를 밀고 가면서 절단 작업을 진행한다. 작업자는 칼날이 절단선을 따라 가도록 핸들(handle)을 조정하고, 동시에 절단작업에서 발생하는 부하를 핸들로 감지한다. 강한 부하가 감지되면 핸들을 약하게 밀어주고, 부하가 작게 감지되면 강하게 밀어주어 작업에서 발생하는 부하를 일정한 범위 내로 유지하도록 조정한다. 따라서 절단 작업 품질은 작업자의 운전 숙련도가 절대적이다.

2.2 국내외 도로절단기의 개발 현황

도로절단기는 절단 작업 특성상 과도한 소음과 분진, 슬러지 등을 발생시키기 때문에 주로 절단기 연구에서는 소음과 이물질을 방지하기 위한 기술이 개발되었다. Shin⁹⁾에서는 절단 분진을 회수하는 건식 방식의 친환경 도로절단기를 제안하였고, Kim¹⁰⁻¹²⁾에서는 흡입(suction)방식의 비산먼지, 슬러지 회수 장치와 소음 차폐 장치를 장착한 습식 도로절단기를 제안하였다.

한편, 절단기 자동화에 관련한 기술은 일부 상용화 제품에서 적용되고 있다. Husqvarna사에서 판매 중인 제품(FS7000DL)¹³⁾의 경우 조작 편의성 향상을 위해 자동 절단기 깊이 제어 기능과 직선 절단 유지 기능을 제공하고 있다. 직선 절단 유지 기능은 절단 시 발생하는 틀어짐을 별도 장착한 후방 바퀴를 실시간 교정하여 자동 직선 절단 작업을 가능하게 한다.

본 연구에서는 양날 도로절단기 선행연구⁸⁾를 바탕으로 소음과 이물질을 최소화할 수 있는 슬러지 회수 장치와 소음 차폐 장치를 추가로 장착하였다. 또한 도로절단기의 효율성과 안전성을 향상시키기 위해 기존 도로절단기 연구¹⁰⁻¹³⁾에서 제공하지 않는 자동 절단 기술과 과부하 감응 기술을 제안한다.

3. 양날 도로절단기

3.1 도로절단기의 주요 구성

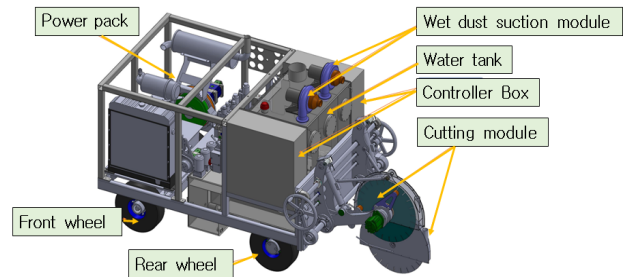


Fig. 2 Major components of a double-blades road cutter

개발한 양날 도로절단기(Fig. 2)는 80마력 디젤엔진(현대산업엔진, D4AK-P)을 활용하여 파워팩을 구성하였다. 엔진에 직결된 기어 펌프는 도로 절단을 위한 유압모터에 작동유를 공급하며, 풀리를 통해 연결된 기어 펌프와 베인 펌프는 각각 주행구동기와 조향 및 회전 칼날 이송용 압 실린더에 작동유를 공급한다.

주행 구동기는 불균형한 도로, 이물질, 경사지 조건을 고려하여 각 바퀴에 독립적으로 적용되었으며, 조향용 유압 실린더에 부착된 와이어 센서(draw wire sensor, SX50)로부터 바퀴의 정렬 정보를 측정한다. 절단 모듈은 절단용 칼날을 회전시키기 위한 유압모터와 칼날을 지지하기 위한 암, 암의 지지 및 이송, 가압을 위한 암 실린더로 구성된다. 유압모터는 양날에 각각 독립적으로 구동한다.

도로 절단 작업 시 발생하는 소음과 이물질을 감소시키기 위해 절단 모듈에는 치마 형태의 소음 차폐 모듈을 부착하였고, 흡입 방식의 비산먼지 회수 모듈을 장착하였다. 비산먼지와 함께 흡입된 물은 물탱크로 회수되며, 칼날 냉각에 다시 재활용된다. Fig. 3에서 도로절단기가 제자리에서 지면을 절단 중이며, 주변으로 이물질 분산¹⁸⁾이 차단되는 것을 확인할 수 있다.

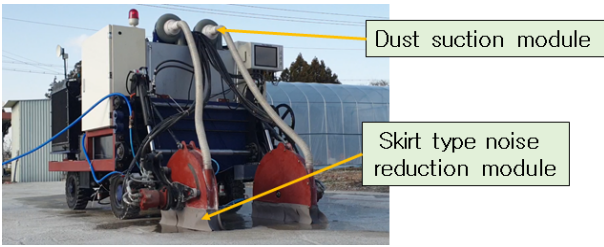


Fig. 3 Dust and noise reduction modules

3.2 비전시스템

양날 도로절단기는 수동 모드(mode)에서는 무선 제어를 활용하여 주행 속도와 조향이 제어되고, 자동 모드에서는 비전 시스템과 연동되어 조향제어가 자동으로 진행된다.

비전시스템은 선행연구⁶⁾처럼 카메라 모듈과 연산처리 모듈로 구성된다. 카메라 모듈은 FHD 1080p 해상도의 USB 카메라 1개(로지텍 스트림캠)를 사용하며, 칼날이 지면에 닿는 지점으로부터 약 30cm 전방을 향하도록 설치된다. 음영지역 등 조명이 부족한 환경에서 절단 표시선을 안정적으로 인식하기 위해 추가로 카메라 모듈에는 12W급 LED 조명 모듈을 설치하였다(Fig. 4). 모니터는 실외 환경에서 가시성 확보를 위해 고휘도(1000 cd/m²)제품으로 교체하였다.

연산처리 모듈은 선행연구⁶⁾처럼 카메라 모듈로부터 측정된 영상을 활용하여 절단 표시선 방향 정보를 계산한다(Fig. 5). 절단 표시선 방향 정보는 영상 하단 중심 지점을 기준으로 영상 상단에서 감지된 절단 표시선 영역 중심 지점의 x축, y축 변위값을 이용하여 계산하였다.

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{dx}{dy}\right) \quad (1)$$

본 연구에서는 직진 방향을 90도로, 90도 이하는 우회전, 90도 이상은 좌회전을 나타내도록 표기하였으며, 절단 표시선 방향 정보(θ)는 도로절삭기의 칼날이 절단 표시선 영역 중심에 위치하도록 유도한다.



Fig. 4 A control box and A light module of vision system.

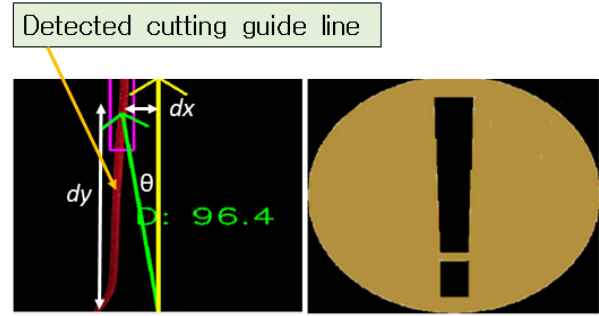


Fig. 5 Direction calculation of cutting line and an warning sign of recognition failure.

본 연구에서는 도로절단기가 절단 작업이 진행되고 있을 때는 5mm/s ~ 20mm/s의 저속으로 주행하고, 칼날이 좁은 틈에 끼이지 않도록 좁은 각도내에서 방향 전환이 진행되어야 하는 점을 고려하여, 일회 방향 전환 범위를 1도 이내로 제한하였다. 또한 유압식 조향 모듈과의 연동을 위해 방향 정보 전송 주기를 0.5초로 설정하였다.

한편, 지면에서 살포된 물이 절단 표시선(주행선)으로 넘어와 절단 표시선이 오염되거나, 지면의 심한 음영 차이로 인하여 절단 표시선이 인식이 실패하는 경우가 발생한다. 본 연구에서는 실시간 분석을 통해 절단 표시선 인식이 실패할 경우, 수동 조향 제어로 전환을 위해 모니터 상에 인식실패 경고 표시(Fig. 5)를 하였다. 인식 실패는 일시적 1회 인식 실패 상황은 제외하였고, 2초 이상(누적 4회 이상) 연속적으로 실패한 경우를 명확한 인식 불가능 상태로 판단하였다.

3.3 도로절단기의 부하 감응 제어

칼날의 부하는 절단용 유압모터의 압력을 측정하여 상태를 모니터링하였다. 센서로 부터 받은 초기 측정값은 절단기의 주행 및 절단 과정에서 발생하는 진동 등으로 인하여 심한 잡음이 포함되어 있다. 심한 잡음은 정밀한 제어를 어렵게 하기 때문에 본 연구에서는 측정 부하값에 지수가중이동평균필터(exponential moving average filter)를 적용하여 잡음을 저감하였다. 가중치(β)는 잡음의 편차를 고려해 0.9를 사용하였다.

$$\bar{v}_t = \beta * v_{t-1} + (1 - \beta) * v_t \quad (2)$$

개발한 양날 도로절단기는 무부하 상태(지면 위에서 고속 회전)에서는 측정값이 20bar ~ 35bar로 나타났으며, 절단이 진행 될 경우에는 절단 깊이와 절단 속도에 따라 30bar ~ 60bar 로 측정되었다.

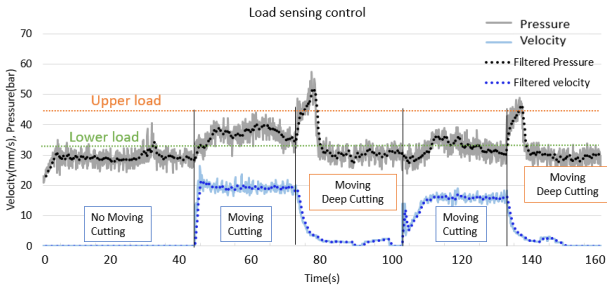


Fig. 6 Load-sensing technology

부하 감응 제어는 칼날 구동 압력이 과부하 상태로 인지되면 도로 절단기 이동 속도를 줄이는 방식으로 부하를 감소시킨다. 부하 감응 제어 적용 시점을 결정하기 위해 본 연구에서는 시험적으로 상단과 하단 부하 시점을 구성하였다. 부하가 상단 기준을 넘어서면 감속 제어가 구동되며, 하단 기준 이하로 감소될 경우 감속 제어가 해제되도록 하였다(Fig. 6).

4. 성능 시험

4.1 테스트베드 구축

본 연구에서는 개발된 도로절단기의 성능 실험을 위해 시험 장소에 가로 폭 20m, 세로 폭 10m 크기의 콘크리트로 포장된 테스트베드를 구축하였다. 절단 깊이가 200mm까지 시험 절단할 수 있도록, 최대 포장 두께는 250mm로 하였다. Fig. 7에서는 구축된 테스트베드를 보여주고 있으며, 절단 표시선 인식 시험을 위해 지면에는 약 2cm~3cm 두께의 적색의 페인트 선을 표시하였다.



Fig. 7 Test-bed

4.2 주행 및 절단 성능

선행연구⁶⁾에서는 도로절단기가 지면에 표시된 절단 표시선을 인식하고, 표시선을 따라 정확하게 이동

하는 성능을 검증하였다. 본 연구의 주행 및 절단 시험에서는 지면에 표시된 약 10m 길이의 절단선을 따라 이동하고 정확히 표시선을 자르는 성능을 분석하였다.

시험을 위해 우선 선정된 절단 표시선 끝에 절단기를 이동시키고, 카메라에 절단 표시선이 인식되도록 자리와 방향을 조정하였다. 정지된 상태에서 절단 표시선이 인식되면 칼날을 구동시킨 후, 지면 아래로 하강시켜 절단을 시작하고, 이후 평균 5 mm/s 속도로 이동하면서 절단 작업을 진행하였다. 양날 도로절단기는 실시간으로 제공받은 절단 표시선 방향을 기준으로 주행방향을 조정한다.

성능 비교를 위해 비전시스템과 연동 없이 주행 및 절단 시험을 진행한 경우, 1m 이동 거리에 기준 경로에서 최대 10cm 이상 거리가 멀어지는 불안정한 결과를 보였다.

반면 Fig. 8, 9는 비전시스템과 연동하여 진행된 주행 및 절단 시험 결과를 보여준다. 절단 표시선 중심에서 시작된 절단 작업은 10m 진행되었으며, 0.2m 간격으로 측정된 절단 표시선 중심과 실제 절단 틈과의 평균 거리 오차는 14.5mm, 최고 25mm 오차를 보였다(Table 1). 이러한 결과로부터 비전시스템의 주행 경로 연동으로 절단 작업이 안정적으로 진행되는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 8 Driving test of the road cutter



Fig. 9 Driving test result of the road cutter

Table 1 Cutting test result

Position(m)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6
Gap(mm)	19	17	16	14	13	13	12	10	9
Position(m)	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4
Gap(mm)	10	9	10	9	9	11	13	14	16
Position(m)	3.6	3.8	4	4.2	4.4	4.6	4.8	5	5.2
Gap(mm)	16	19	22	15	15	16	14	14	12
Position(m)	5.4	5.6	5.8	6	6.2	6.4	6.6	6.8	7
Gap(mm)	11	11	10	9	10	9	10	12	13
Position(m)	7.2	7.4	7.6	7.8	8	8.2	8.4	8.6	8.8
Gap(mm)	15	17	20	23	25	16	11	7	8
Position(m)	9	9.2	9.4	9.6	9.8	10			
Gap(mm)	11	14	16	17	20	24			

4.3 부하 감응 성능 시험

부하 감응 시험에서는 과부하로 판단될 시 이동 속도를 제어하여 칼날의 부하를 안정화시키는 성능을 분석하였다.

본 시험에서는 절단 깊이를 다르게 하여 칼날의 부하를 도출하였다(Fig. 10). 시험 과정은 주행 및 절단 시험 방식과 동일하며, 최고 속도를 20mm/s 로 전진하면서 20~30초 간격으로 절단 깊이를 5cm와 10cm를 교대로 변경하면서 절단 작업을 진행하였다.



Fig. 10 Load-sensing test of the road cutter

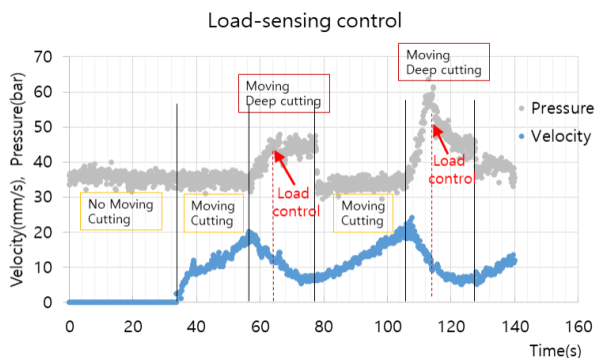


Fig. 11 Load-sensing test result of the road cutter

부하 감응 기능의 성능 비교를 위해 부하 감응 기능을 각각 비활성화, 활성화하여 시험을 진행하였다. 부하 감응 기능을 비활성화하여 시험을 진행한 경우, 절단 깊이가 증가할 때 부하가 증가하면서 이동 속도가 점차 감소하였다. 하지만 일부 구간에서 칼날이 끼여 멈추는 현상이 발생하였고, 일시적으로 칼날이 지면을 타고 올라오는 문제도 발생하였다. 이는 이동 속도에 비해 절단 속도가 느려서 발생하는 것이다.

반면에 동일한 조건에서 부하 감응 기능을 활성화한 경우, 칼날이 멈추거나, 지면을 올라타는 문제가 발생하지 않았다. Fig. 11은 부하 감응 시험 진행시 측정된 칼날 부하와 속도 값을 보여준다. 정지한 상태에서 절단기가 지면 아래로 하강하면 부하가 증가하기 시작하며, 하강이 멈추면 부하가 감소한다. 이후 절단기가 이동이 시작되면 부하는 증가하게 되며, 절단기가 전진 이동하면서 부하는 일정하게 나타난다. 전진 이동하는 중 칼날이 더 깊이 하강하면 부하가 급격하게 증가한다. 하지만 기준 부하를 넘어서면 부하 감응 제어가 작동하여 절단기의 이동 속도가 조정되고, 칼날의 부하는 증가가 멈추거나 감소하게 된다.

절단기의 칼날 깊이를 초기 깊이로 복귀시키고 등속으로 이동시킨 후, 다시 칼날 깊이를 깊게 하는 과정을 반복하여 수행한 결과, 부하 상태에 따라 이동 속도제어가 정상적으로 진행되어 절단 작업이 안정적으로 진행되는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 설정한 경로를 따라 자동으로 도로 절단 가능한 양날 도로절단기를 개발하였다. 선행연구를 기반으로 비전시스템은 안정적으로 절단 표시선을 인식하고 정보 제공을 위해 조명 및 디스플레이 구성 모듈이 보완되었다. 그리고 칼날에 가해지는 부하를 실시간 측정하여, 과부하 발생 시 칼날이 멈추거나 2차사고 발생을 방지하기 위한 이동속도제어 기반의 부하감응 기술이 적용되었다. 구축한 테스트베드에서 양날 도로절단기의 주행 및 절단 시험, 부하 감응 시험을 수행하여 개발한 기술의 성능을 검증하였다.

현재 양날의 부하는 절단 조건(속도, 깊이 등)과 지면 상태에 따라 유동적으로 나타나고 있어, 부하 감응 제어 시점을 고정적으로 설정하기 어려운 문제

가 남아있다. 향후 연구에서는 다양한 조건에서 부하 시험을 진행하여 적응적으로 과부하 시점을 정의하고 정의한 과부하 시점에 따라 자동으로 부하 감응 제어가 구동되도록 성능을 향상하고자 한다.

후 기

본 연구는 국토교통기술촉진연구사업 지원에 의해 수행됨(과제번호: RS-2021-KA161383)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음

References

- 1) M. G. Lee, K. Z. Cho, K. W. Lee, and M. G. Lee, "Cutting characteristics of road cutter." Proceedings of the 2008 Korean Society for Precision Engineering Conference, Korea, pp.469-470, 2008.
- 2) M. C. Park, W. Y. Jung, S. G. Yand, H. S. Hong, S. H. Hong, H. J. Lee, C. M. Kim, J. Y. Moon, M. S. Kang, Y. J. Kim, G. S. You and D. M. Kim, "Development of Autonomous Excavator Control System", Proceedings of KSAE Spring Conference, pp. 940-949, 2020.
- 3) M. S. Lee, Y. I. Shin, S. J. Choi, H. B. Kang and K. Y. Cho, "Development of a Machine Control Technology and Productivity Evaluation for Excavator", Journal of Drive and Control, Vol.17, No.1, pp.37-43, 2020.
- 4) J. H. Won, J. T. Jeon, Y. K. Hong, C. J. Yang, K. C. Kim, K. D. Kwon and G. H. Kim, "Study on Traveling Characteristics of Straight Automatic Steering Devices for Drivable Agricultural Machinery", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4, pp.74-83, 2022.
- 5) J. C. Kim, Y. J. Kim, M. G. Kim and H. M. Lee, "Collision Avoidance Sensor System for Mobile Crane", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4, pp.62-69, 2022.
- 6) H. S. Kim, S. Y. Gong, J. Y. Rhee, J. G. Lim and W. S. Kim, "Technological Trends of Intelligent Agricultural Machinery", Journal of Drive and Control, Vol.20, No.4, pp.80-91, 2023.
- 7) M. K. Seo, H. Y. Lee, D. W. Jang and B. H. Chang, "Development of a Monitoring Module for a Steel Bridge-repainting Robot Using a Vision Sensor", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.1, pp.1-7, 2022.
- 8) M. K. Seo, J. W. Kown, H. H. Jeong, J. H. Ju and Y. J. Kim, "Development of Cutting Route Recognition Technology of a Double-Blade Road Cutter Using a Vision Sensor", Journal of Drive and Control, Vol.20, No.1, pp.8-15, 2023.
- 9) W. S. Shin, "A Cutting Device of The Concrete Floor", KR101547836B1, 2015.
- 10) K. T. Kim, "Eco-friendliness Evaluation of a Low-Noise and Dust-Recovery Type Pavement Cutter", Ecology and Resilient Infrastructure Vol.8, No. 4, pp.194-203, 2021.
- 11) K. T. Kim, "Development of Low Noise and Dust Recovery Type Pavement Cutter", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 22, No. 12 pp. 576-581, 2021.
- 12) K. H. Kim, Y. H. Jun, K. T. Kim, "A Study on the Field Cutting Performance Analysis of Eco-friendly Road Cutter", Korea Institute of Construction Engineering and Management, Vol.21, No.4, pp.12-20, 2020.
- 13) Husqvana, FS 7000 DL, <https://www.husqvamaconstruction.com/int/floor-saws/fs7000dl/>.