

4륜 독립 조향(4WIS) 시스템을 적용한 라스트마일 배달 목적의 로봇 모빌리티 플랫폼 디자인 제안

하유 진¹⁾ · 어준 혁^{*2)}

홍익대학교 일반대학원 산업디자인전공¹⁾ · 홍익대학교 산업디자인전공²⁾

Design Proposal for a Delivery Robot Mobility Platform for Last-Mile Applications with a Four-Wheel Independent Steering (4WIS) System

Yoojin Ha¹⁾ · Jun Hyuck Eoh^{*2)}

¹⁾Department of Industrial Design, Graduate School of Hongik University, Seoul 04066, Korea

²⁾Department of Industrial Design, Hongik University, Seoul 04066, Korea

(Received 8 December 2025 / Revised 6 February 2026 / Accepted 23 February 2026)

Abstract : The explosive growth of e-commerce, driven by the increasing demand for advanced last-mile services, such as dawn and same-day delivery, necessitates the proliferation of Micro-Fulfillment Centers (MFCs) in South Korea. However, current delivery robots face critical inefficiencies. For instance, their pedestrian legal status imposes speed limits on arterial routes, significantly degrading logistics efficiency. Furthermore, the lack of high-volume loading capacity and flexible maneuverability required for multi-order parcel delivery in high-density urban areas. Hence, this study proposed an innovative autonomous mobility platform integrating a four-wheel independent steering (4WIS) system and platooning technology to resolve these structural issues. The proposal's core novelty lies in its legal status switch strategy (pedestrian when single; vehicle when in platoon), which, using the air resistance reduction effect of platooning, enables energy-efficient high-speed operation. This MFC-optimized design provides a blueprint for efficient, unmanned last-mile delivery systems in complex environments.

Key words : Delivery robot(배달 로봇), Four-wheel independent steering(4WIS, 4륜 독립 조향), Ultra-dense platooning (초밀집 군집 주행), Micro fulfillment center(MFC, 마이크로 풀필먼트 센터), Legal status switch(법적 지위 전환), Last-mile delivery(라스트마일 배송)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 10년간 한국의 택배 물류 시장은 전자상거래(E-commerce)의 폭발적인 성장과 더불어 연평균 15% 이상의 물동량 증가세를 기록하며 비약적으로 확대되고 있다.¹⁾ 특히 농축수산물과 같은 신선식품 상품의 온라인 거래가 급증함에 따라, 기존의 익일 배송을 넘어 새벽 배송 및 당일 배송과 같은 고도화된 라스트마일 서비스에 대한 수요가 높아지고 있으며, 모빌리티 서비스 체계 전환에도 목적 기반 모빌리티(PBV) 중심의 서비스 전환이 진행되고 있다.²⁾ 이러한 빠른 배송 요구에 대응하기 위

하여 도심 내 소규모 자동화 물류센터인 마이크로 풀필먼트 센터(MFC)의 구축이 확산되고 있으며, 이는 최종 소비자와의 근접성을 통해 주문 처리 속도와 효율성을 혁신적으로 개선하는 핵심 인프라로 자리잡고 있다.

그러나, 현재 상용화된 실외 배달 로봇은 이러한 MFC 연계 고효율 물류 시스템을 지원하는데 근본적인 한계를 지닌다. 현행 법규상 배달 로봇은 실외이동형 운행안전인증을 취득하여 보행자 지위로 인정받으나, 이로 인해 최대 운행속도와 운행경로에 제약이 따른다. 이 제약은 MFC와 배송지 주변 지역 간의 핵심 간선 이동 시 물류 O/D (Origin-Destination) 시간을 현저히 증가시켜 물류

*Corresponding author, E-mail: jheoh@hongik.ac.kr

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.

효율을 저하시키는 근본적인 원인이 된다.

또한, 기존 로봇은 배달음식과 같은 단건 배송 위주의 단순 적재 구조와 일반적인 휠 조향 방식을 채택하고 있어, 다건 배송에 필수적인 택배 물류에 적합한 대량 적재 능력과 복잡한 도심 환경에서의 정밀하고 유연한 기동성을 확보하지 못한다. 특히 한국의 고밀도 아파트단지 및 좁고 복잡한 도심 도로망의 특수성은 기존 로봇의 한계를 더욱 부각시킨다.

따라서, 본 연구는 MFC 연계형 라스트마일 배송의 구조적 비효율성을 개선하고, 미래 무인 물류 서비스의 실현 가능성을 구체화하기 위한 새로운 형태의 자율주행 모빌리티 플랫폼 디자인을 제안하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 주요 범위 및 차별성

본 연구는 기존 배달 로봇의 한계를 극복하기 위해 4륜 독립 조향(4WIS, Four-Wheel Independent Steering) 시스템을 기반으로 군집 주행(Platooning) 기술을 결합하는 혁신적인 접근 방식을 취한다.

주요 연구 범위는 다음과 같다.

첫째, 4WIS의 고도화된 유연 기동성을 활용하여 다수의 모달형 로봇이 초밀집 군집 주행 및 동적 결합을 수행할 수 있는 기술적 원리를 제시한다.

둘째, 기존의 배달 로봇의 이동 속도 제한으로 인해 물류 효율에 치명적인 영향을 미치는 문제를 해소하고자, 단일 로봇으로 운행시(보행자 지위)와 다수의 로봇이 군집하여 운행시(차량 지위) 운송 플랫폼의 법적 지위 전환을 위한 운행 시나리오와 이를 위한 디자인 요구사항을 탐구한다. 특히, 초밀집 군집 주행 시 발생하는 공기저항 분산 효과를 이용한 에너지 효율적 고속 운행 방안을 제시한다.

셋째, 물류 자동화의 핵심인 규격화된 패키지(재사용 가능한 패키지 및 종이박스)를 활용한 단순 스테킹 및 하단 컨베이어 토출 방식 등 효율적인 배송물 처리 구조에 대한 설계 원리를 구체화한다.

결론적으로, 본 연구는 4WIS 기반 군집 주행 및 지위 전환 전략을 핵심 동력으로 삼아, 한국의 고밀도 도심 환경에 최적화된 MFC 연계형 지위 전환형 라스트마일 모빌리티 플랫폼의 디자인 방향을 제안함으로써, 기존 배달 로봇이 가진 구조적 한계를 극복하고, 근 미래의 무인 물류 서비스의 청사진을 제시하는데 차별성을 가진다.

2. MFC 연계 라스트마일 배송 로봇의 현황 및 구조적 한계 고찰

2.1 MFC의 정의와 라스트마일 연계의 중요성

마이크로 풀필먼트 센터(Micro Fulfillment Center, MFC)는 전통적인 대형 물류센터(Distribution Center, DC)와 최종 소비자 사이의 격차를 해소하기 위해 도심 내부에 전략적으로 구축된 소규모 자동화 물류 시스템을 의미한다. MFC는 일반적으로 기존 상업용 부동산이나 유휴 공간을 활용하여 도심 인구 밀집 지역에 위치하며, 최종 소비자와의 근접성을 극대화하여 주문 처리 속도를 혁신적으로 단축하는 것을 목표로 한다. MFC는 인공지능(AI) 기반의 재고 관리 및 예측 시스템, 소형 로봇 및 자동화 창고(Automated Storage and Retrieval System, AS/RS)를 접목하여 상품의 보관, 피킹(Picking), 패키징(Packing) 과정을 최소한의 인력을 통해 높은 효율을 달성한다.³⁴⁾

MFC의 핵심 기능은 당일 배송(Same-day delivery) 또는 단시간 배송(Quick commerce)과 같은 고도화된 라스트마일>Last-mile) 서비스 요구에 대응하는 것이다. MFC는 최종 배송 거리를 획기적으로 줄임으로써, 기존 물류 시스템이 필연적으로 갖는 시간적, 비용적 한계를 극복하는 브리지 허브(Bridge hub) 역할을 수행한다. 따라서, MFC는 도심 내 소규모 재고 분산 및 자동화를 통해 라스트마일 배송 속도를 향상시키고, 비용을 절감하는 핵심 인프라이다. 그러나, MFC가 지리적으로 소비자와 근접하더라도, 고밀도 도시에서 폭증하는 물량을 처리하기 위해서는 여전히 MFC와 배송 목적지 주변 지역 간의 O/D (Origin-Destination) 시간 단축이 필수적이며, 이를 위해서는 효율적인 라스트마일 운송을 위한 모빌리티 솔루션이 필수적이다.

2.2 현행 배달 로봇의 운용 현황 및 한계

현재 상용화되고 있는 자율주행 배달 로봇은 ‘지능형 로봇 개발 및 보급 촉진법’에 의거하여 보행자 지위로 운행이 허가된다. 배달 로봇이 보행자 지위로 인정받기 위해서는 ‘실외이동로봇 운행안전인증’을³⁵⁾ 취득하여야 하며, 여기에는 로봇의 최대 질량에 따른 운행 속도가 제한된다.

Table 1 Maximum operating speed limits regulation for robots in S.Korea

Robot weight range (kg)	Max. operating speed limit (km/h)
Over 300~500 and under	5
Over 100~230 and under	10
100 and under	15

자율주행 배달 로봇을 운행하기 위해 ‘실외이동로봇 운행안전인증’을 취득하였다면, 운행 경로 역시 인도와 횡단보도, 그리고 보행자가 통행할 수 있는 이면도로로 한정된다. 많은 물동량을 감당하여야 할 것으로 예측할 수 있는 MFC 연계형 라스트마일 솔루션에 현행 배달 로봇을 단순 적용할 경우, 이러한 제도적 제약으로 인해 운행 속도 제한으로 인한 물동량 처리 능력을 감소시키게 된다. MFC에서 배송 밀집 지역으로 이동하는 핵심 간선 구간을 저속으로 운행해야 하기에, 배송 속도를 늦추게 되고, 이로 인해 배달 로봇이 한 대당 하루에 처리할 수 있는 물동량(처리 건수)이 근본적으로 제한된다.

또, 현재 운용되고 있는 실외로봇들은 음식 배달과 같은 단건 배송에 집중되어 있어, 적재함 내부 구조가 단순하고, 출발지에서 직원이 직접 적재물을 넣고, 목적지에 도착하면 고객이 직접 적재물을 꺼내는 것을 상정하여 디자인되거나 적재물의 단순 토출만 가능한 것을 확인할 수 있었다.⁷⁾ 이는 기존의 배달 로봇이 MFC에서 취급하는 택배와 같이 다건 배송이 기본적으로 요구되는 물류 환경의 라스트마일 배송에는 적합하지 않음을 확인할 수 있었다.

2.3 기존 배달 로봇의 조향 시스템 분석

현재 한국에서 상용화되거나 실증 단계에 있는 실외 자율주행 배달 로봇들은 대부분 보행자 지위에 준하는 운용환경에 맞추어 설계되어 구조적, 성능적 한계를 내포하고 있다. 구동방식의 경우, 비용 효율성과 구조적 단순성을 위해 차동 조향(Differential steering) 방식을 보편적으로 채택하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2 Delivery robots in pilot programs in S.Korea⁸⁻¹²⁾

Model	Number of wheels	Steering method
Dilly X2 ⁹⁾	6	Front & rear independent steering
NEUBIE ¹⁰⁾	4	Differential steering
GAEMI ¹¹⁾	4	Differential steering
Mobin M3 ¹²⁾	4	Differential steering

차동 조향 방식은 좌측 및 우측 바퀴의 속도 또는 토크를 차동 제어함으로써 차체에 회전 모멘트를 발생시킨다. 이 과정에서 바퀴와 지면 사이에 의도적인 측면 슬립(Lateral slip), 즉 미끄러짐이 유도되며 결과적으로 스키드 스티어링(Skid steering) 현상이 나타난다. 이러한 조향 방식은 탱크, 포크레인, 트랙터처럼 무한궤도나 다륜 구조에서 흔히 적용되며, 로봇산업에서도 사용하고 있다.

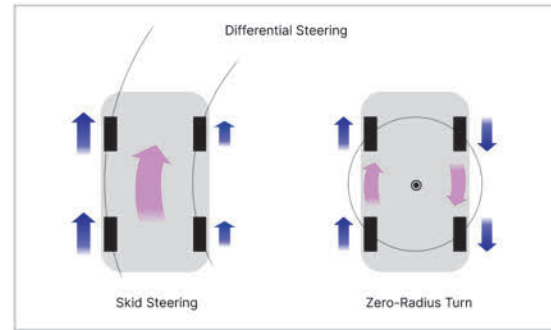


Fig. 1 Diagram of differential steering

이러한 차동 조향 방식은 조향을 위한 별도의 물리적인 장치가 필요 없어 구조가 단순하고 비용이 저렴하며, 제자리 회전(Zero-radius turn)과 같은 유연한 움직임 구현이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 저속 운행 환경(실외 이동로봇 운행안전인증 기준 내)에서는 큰 문제가 되지 않는다. 그러나, 이러한 조향 방식은 고속 주행 환경이나, 정밀한 움직임 제어가 필요한 경우에는 치명적인 단점으로 작용한다. 특히, 스키드 스티어링은 주행속도와 상관 없이 필연적으로 타이어 마모와 에너지 손실을 야기하며, 선회시 발생하는 슬립 각도(Slip angle)로 인해 제적 추종의 정밀도가 떨어져, 고속 주행 시 주행 안정성이 저하된다.¹³⁾ 이러한 한계는 다수의 로봇이 밀착하여 주행하는 군집 주행시 동적 안정성을 확보하는데 근본적인 제약으로 작용할 수 있다. 이를 해결하기 위해서는, 타이어의 진행방향과 회전 반경을 일치시키는 애커먼 조향(Ackermann steering)을 구현하여야 한다.¹⁴⁾

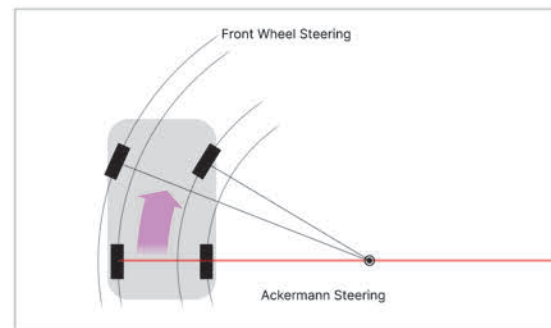


Fig. 2 Diagram of Ackermann steering on traditional vehicle

이는 각 바퀴의 회전 중심점을 일치시킴으로써 구현된다. 이는 자동차와 같은 전통적인 모빌리티에 적용된 개념으로, 조향이 되지 않는 고정된 차축(뒷바퀴) 선 위에 회전 중심점이 위치하게 된다. 이를 통해, 모든 바퀴의 진행방향은 회전방향과 일치하게 된다. 다만, 자동차와 같이 앞바퀴만 조향되는 전통적인 모빌리티는 고정된 차

축(뒷바퀴)로 인해, 회전 중심점이 차체 중심에 위치할 수 없어, 제자리 회전과 같이 유연한 움직임에 제약이 생긴다는 단점이 있다. 이는 보행자와 같은 동선에서 움직여야 하는 배달 로봇에 치명적인 단점으로 작용하게 된다. 이를 해결하기 위해 배달의민족에서 개발한 Dilly X2 배달 로봇은, 바퀴의 개수를 6개로 늘리고, 앞뒤 축을 개별 조향하고, 고정된 차축을 중간에 배치함으로써, 애커먼 조향과 제자리 회전을 모두 충족시킨 것을 확인할 수 있었다.

하지만, Fig. 3과 같이 회전 중심점이 고정된 가운데 차축방향상에서만 위치하게 되기에 특정한 점을 기준으로 반경을 그리며 선회할 수 있는 피봇 턴(Pivot turn)에 제약이 생기게 되며, 주행방향 또한 제한되게 된다는 점을 확인할 수 있었다.

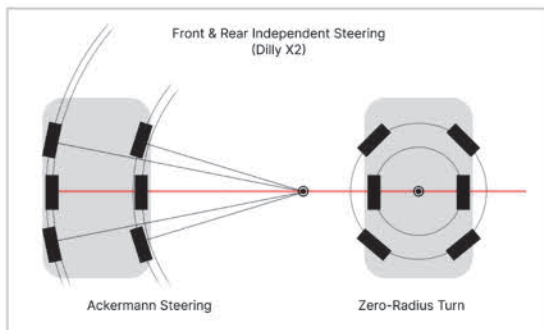


Fig. 3 Diagram of 6-wheel front & rear independent steering system

2.4 한국 도심 환경 및 물류 시스템의 특성

한국의 라스트마일 물류 환경은 외국의 사례와 구별되는 고유한 특수성을 가지고 있으며, 이는 기존의 저속 배달 로봇이 가진 구조적 및 제도적 한계를 더욱 심화시키는 주요 요인이다.

한국은 2023년 통계청 기준 전체 주택 중 아파트가 약 64%를 차지하는 고밀도 아파트 중심의 주거 문화를 형성하고 있다. 이러한 고밀도 주거 환경은 라스트마일 배송시 특정 아파트 단지나 주거 밀집 지역에 물동량이 집중되어 단위 면적당 배송 효율을 높이는 장점을 제공한다. 그리고, 아파트 특성상 세대 현관이 건물 외부에 노출되어 있지 않고, 한국은 타국 대비 낮은 택배 분실률을 보이는 특수성으로 인해, 현재는 세대 현관 앞에 배송물을 내려놓는 것으로 배달이 비대면으로 완료되는 환경을 조성하게 되었다. 그러나, 이는 동시에 단지 내 복잡한 동선, 실내 이동, 엘리베이터 이용 등 로봇의 운용 난이도를 극단적으로 상승시켜, 라스트 50 m 운용을 위한 정밀 제어 능력을 필수적으로 요구한다.

나아가, 한국의 도심 환경은 미국이나 유럽에 비해 인도의 폭이 매우 협소하고, 가로수나 가로등, 노상 시설물 등으로 인해 보행 환경 자체가 복잡한 특성을 가진다. 현행 법규상 보행자 지위로 인도를 주행하여야 하는 기존 로봇은 이러한 좁고 장애물이 많은 환경에서는 보행자의 통행을 방해하거나 안전문제를 야기하는 사회적 마찰을 초래할 수 있다.

2.5 지위 전환형 플랫폼의 제도적 근거 및 규제 비교 분석

앞서 살펴본 한국의 라스트마일 물류 환경에는 기존의 상용화된 혹은 실증사업중인 현행 배달 로봇이 적합하지 않음을 확인할 수 있었다. 제안하는 4WIS 기반 군집주행 플랫폼의 핵심은, 기존 배달 로봇이 직면한 제도적 운행 속도 제한을 극복하는데 있다.

앞서 설명한 것 같이, 현재 국내에서 운용되는 실외 자율주행 로봇은 ‘지능형 로봇 개발 및 보급 촉진법’에 의거하여 ‘실외이동로봇 운행안전인증’을 취득하여 보행자 지위로 운행이 허가된다. 이 보행자 지위는 최대 운행 속도를 로봇의 중량에 따라 5 km/h에서 15 km/h 이하로 제한하며, 운행 경로 또한 보행자와 동일하게 인도, 횡단 보도, 이면도로 등으로 한정함으로써 MFC 연계 물류의 핵심 간선 구간에서의 고속 이동을 근본적으로 차단한다. 이는 로봇당 처리할 수 있는 물동량이 이동시간의 증가로 인해 감소되기에, 전체적인 물류 효율에 악영향을 미치게 된다. 따라서 물류 효율을 획기적으로 개선하기 위해, 본 연구는 여러 대로 군집된 로봇이 차량 지위로 전환될 수 있는 제도적 근거를 모색한다.

실외이동로봇이 기존의 보행자 지위가 지닌 물리적·제도적·지리적 한계를 극복하고 도심 물류의 핵심 간선 구간(도로)에 합법적으로 진입하기 위해서는, ‘자동차관리법’상 ‘저속전기자동차’로의 지위 전환이 필수적이다. 지위 전환형 플랫폼은 단일 로봇 모듈로서의 운용 자유도와 군집 주행시의 고속 이동성을 동시에 확보해야 하며, 이를 위해 저속전기자동차에 적용되는 법적요구사항을 충족시켜야 한다.

저속전기자동차 지위를 획득하기 위한 최우선 요건은 법령에서 정의한 물리적 제원을 충족하는 것이다. 이는 ‘자동차관리법 시행규칙’의 저속전기자동차의 기준(제 57조의2)에 따라, 최고설계속도가 60 km/h 이하여야 하며, 최대 적재량과 승차 정원을 포함한 차량의 총중량이 1,361 kg을 초과하지 않는 전기자동차를 말한다.

저속전기자동차는 ‘자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙, (약칭: 자동차규칙)’의 별표 34, ‘저속전기자동차 특례기준’에 의거하여, 일반 승용차와 달리, 완화된 안전 기준 특례를 적용받아 보행자 보호를 위한

규정(자동차규칙 제102조의 2)의 적용이 제외된다. 이는 보행자 충격 완화를 위한 보닛 구조 설계 등 복잡한 외장 제약에서 자유로워짐을 의미하며, 결과적으로 물류 적재 공간을 극대화할 수 있는 박스형 디자인 채택의 법적 근거가 된다. 다만, 차대 및 차체에 대한 규정(자동차규칙 제19조)은 그대로 유지되기에, 차체의 외형이 예리하게 각이 지거나 돌출되어 위험을 줄 우려가 있어서는 안 되며(다만, 특수자동차로서 기능상 부득이 할 경우에는 그러하지 아니한다), 차체 외곽의 예리한 부위는 곡률반경 2.5 mm 이상을 준수하는 등 최소한의 차체 규정을 만족해야 한다.

또, ‘저속전기자동차 특례기준’에 따라 차량 뒤쪽에 타운전자가 해당 차량이 저속전기자동차임을 즉시 인지할 수 있도록 최고속도 제한(60 km/h)이 명시된 표지를 반드시 부착하도록 규정되어 있다. 해당 표지는 가로 240 mm, 세로 80 mm 이상의 규격을 준수해야 하는 등, 표시방법 규정에 따른 시인성 확보가 필수적이다.

이 외에도 전기차 특유의 저소음으로 인한 사고 위험 방지를 위한 보행자 경고음 발생장치(AVAS) 설치 의무(자동차규칙 제53조의3), 후방영상장치(카메라) 또는 후진경고음 발생장치 설치 의무(자동차규칙 제53조의2), 전비(에너지 효율)측정과 계기 장치의 주행 정보 표시 기준 등 자동차 제작자로서 준수해야 할 일반적인 규정들 또한 만족해야 한다.

하지만 기존의 자동차규칙 법령의 경우, 탑승자가 탑승하는 전통적인 자동차를 기준으로 규정되어 있기에, 사람이 아예 탑승하지 않는 모빌리티나, 여러대의 작은 모빌리티가 군집되어 하나의 거시적인 모빌리티가 구성되는 것과 같은 새로운 형태의 모빌리티의 경우 부득이하게 모든 상세 법령을 만족하기 어려울 수 있음을 예상할 수 있으며, 이러한 문제점에 대한 방안은 연구의 후반부인 3.8절의 마지막 문단에서 후술한다.

결론적으로, 지위 전환형 플랫폼은 단일 모듈 운용 시에는 보행자 지위를 유지하여 안전 및 운용자유도를 확보하고, 군집 운용 시에는 저속전기자동차 규정을 충족시킴으로써 저속전기자동차 지위로 전환되어 고속 운행의 합법성과 제도적 정당성을 확보함으로써 기존 규제 환경과 종래의 배달 로봇의 한계를 혁신적으로 타파한다.

3. 4WIS 기반 모듈형 군집 주행 플랫폼 디자인 원리 및 연구방법

3.1 4WIS 시스템 적용의 필요성 및 기술적 이점

본 연구에서 제안하는 플랫폼은 기존 배달 로봇이 가진 차동 조향(Differential steering)의 한계를 극복하고, 고

속의 밀착 군집 주행 및 복잡한 도심환경에서의 유연한 운용을 실현하기 위해 4륜 독립 조향(4WIS) 시스템을 핵심 구동 기술로 채택한다.

4WIS 시스템은 차량의 네 바퀴 각각에 독립적인 조향 및 구동 모터를 적용하여, 각 바퀴의 조향 각도와 구동 속도를 개별적으로 제어할 수 있는 구조이다. 소형 자율주행 로봇 모빌리티에 4WIS 시스템을 적용한 사례로는 현대자동차그룹의 고객 응대 서비스 로봇인 ‘DAL-e’¹⁵⁾와 배송 로봇인 ‘DAL-e Delivery’¹⁶⁾에서 소형 로봇 모빌리티 전용 4WIS 시스템인 PnD 모듈¹⁷⁾ 적용한 사례를 찾아볼 수 있었고, 현대자동차그룹에서 출원한 특허와¹⁸⁾ 보도자료 미디어¹⁹⁾, 현대모비스에서 한국자동차공학회에 개제된 선행연구자료를^{20,21)} 바탕으로 4WIS 시스템의 움직임을 연구하였다. 이러한 구조적 특성은 기존의 소형 배달 로봇 플랫폼의 기술적 문제를 근본적으로 해결하는 세가지 주요 이점을 제공한다.

첫째, 고속 주행 안정성 및 에너지 효율성의 확보이다. 앞서 2.3 문단에서 고찰했듯이, 일반적으로 많이 사용되고 있는 차동 조향 방식은 선회시 멈추어서 제자리 회전을 하고 다시 진행하는 경우가 아니라면 타이어의 진행 방향과 차체의 회전방향이 일치하지 않기에 필연적으로 바퀴의 슬립을 발생시켜 타이어 마모와 에너지 손실을 야기하며, 고속 주행 중 조향시에는 슬립 각도로 인해 주행 안정성이 현저히 저하된다.

반면, 4WIS는 4개의 바퀴 모두 독립적으로 조향을 할 수 있기에, 슬립 없이(Zero-slip) 구동방향과 궤적 방향을 일치시키는 에커먼 조향(Ackermann steering)을 정밀하게 구현할 수 있다. 또, 일반적인 조향 시스템과 다르게, 고정된 차축이 없기에 에커먼 조향의 기준이 되는 회전 중심점의 자유도가 무한하기에, 이를 이용하여 기존의 모빌리티에서 구현할 수 없는 움직임(피봇 턴)을 정밀하게 구현할 수 있으면서 언제나 구동방향과 궤적을 일치시킬 수 있기에 슬립이 일어나지 않아 에너지 손실이 이상적으로 적다는 점을 알 수 있다.

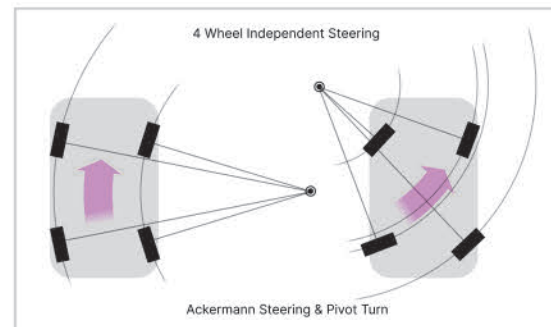


Fig. 4 Diagram of 4WIS Ackermann steering & pivot turn

둘째, 밀착 군집 주행을 위한 정밀 동적 제어 능력이다. 4WIS의 가장 중요한 이점은 로봇 대열이 밀착된 상태에서 선회할 때 발생한다.

기존의 배달 로봇에 사용중인 조향 시스템은 밀착 상태에서 주행중 선회시, 차동 조향 방식의 경우 큰 회전 반경 특성과 떨어지는 정밀도로 인해 대열이 분산되거나 충돌 위험이 크다. (Fig. 5 - Case 1) 애커먼 조향을 구현하는 조향 시스템의 경우에도, 조향되지 않는 고정된 축이 있는 경우, 여러대가 모일 경우 피봇포인트를 일치시킬 수 없기에 밀착한 상태로 하나의 차체처럼 선회시킬 수 없다(Fig. 5 - Case 2,3).

이에 반해, 4WIS는 모든 바퀴의 조향 각도를 제어하여 특정한 점을 기준으로 회전하는 피봇 코너링(Pivot cornering)을 정밀하게 구현할 수 있다. 이를 통해 다수의 배달 로봇이 물리적으로 연결되거나 초밀착 상태로 주행시, 마치 하나의 대형 차량처럼 동기화된 궤적으로 코너를 안정적으로 선회할 수 있어(Fig. 5 - Case 4) 4WIS의 정밀 동적 제어 능력이 지위 전환형 군집 주행을 가능하게 하는 핵심 기술적 기반이 된다.

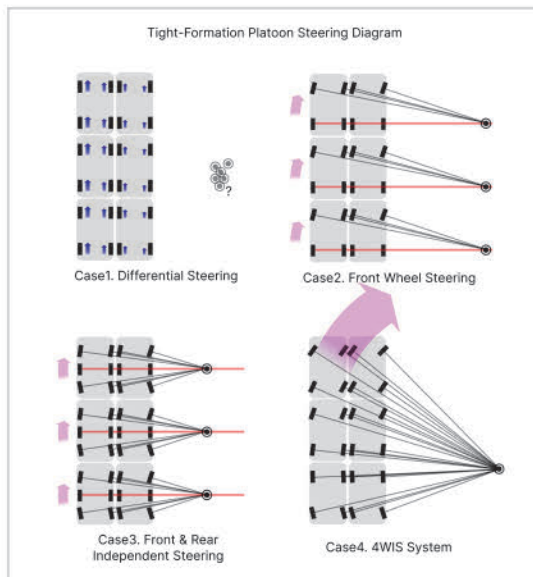


Fig. 5 Analysis of close-formation platoon steering scenarios by steering system

셋째, 협소 공간에서의 최적화된 기동성이다. 한국의 좁은 인도와 복잡한 아파트 단지 환경에서 4WIS는 로봇이 제자리 회전(Zero-radius turn) 하거나 측면 이동(Crab driving), 대각선 이동(Diagonal driving)과 같은 다양하고 자유로운 움직임을 지원한다. 이는 최종 라스트 50 m 배송 단계에서 복잡한 장애물을 회피하고, 엘리베이터 앞이나 현관 앞과 같은 협소한 공간에 정확히 로봇을 위치시켜 배

송을 완료하는 과정에서 운용 효율성을 극대화시킨다.

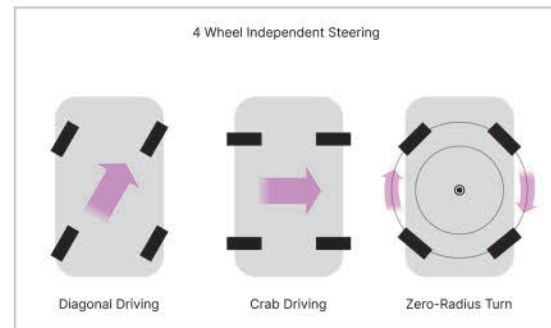


Fig. 6 Diagram of various driving modes in 4WIS

결론적으로, 4WIS 시스템은 단순히 움직임의 유연성을 넘어, 지위 전환을 통한 고속 운용과 밀착 군집 주행시 동적 안정성이라는 본 연구 플랫폼의 핵심 요구사항을 충족시키기 위한 필수적인 기술적 전제 조건이다.

3.2 지위 가변형 운용을 위한 초밀집 군집 주행 전략 및 메커니즘

본 연구에서 제안하는 플랫폼은 기존 배달 로봇의 가장 큰 운용 한계인 제도적 속도 제한을 극복하고, MFC 연계 물류의 O/D 효율을 극대화하기 위해 지위 가변형 운용 전략을 핵심으로 한다. 이 전략은 자율주행 로봇의 보행자 지위와 다수 자율주행 로봇이 결합된 군집된 자율주행 로봇의 차량 지위를 운용 상황에 따라 능동적으로 전환하는 것을 목표로 한다.

지위 가변형 운용을 위한 군집 주행 전략은 4WIS 시스템이 적용된 다수의 자율주행 로봇들이 MFC에서 배송 물품을 적재한 후, 배송 밀집 지역으로 향하는 핵심 간선 구간에서 동적으로 결합하여 하나의 초밀집 대열(Platoon)을 형성하는 것을 기본으로 한다. 이렇게 초밀집 군집된 로봇은 앞서 설명한 4WIS의 정밀 동적 제어 능력을 활용하여 밀착 군집 주행을 수행하며, 이때, 법적으로는 한 대의 저속전기차로 간주되어 도로 주행이 가능한 차량 지위로 전환된다. 이는 단일 로봇으로는 접근 불가능한 도로에서 고속 운행을 가능하게 하여 O/D 이동 시간을 획기적으로 단축시킨다.

지위 전환형 군집 주행 시나리오는 MFC 출고부터 최종 배송까지 크게 네 단계로 구분된다.

1단계 (고속 간선 이동)

MFC에서 출고한 로봇들은 초밀집 군집을 이루어 차량 지위를 확보하고 MFC에서 배송지 주변 지역까지 도로를 이용하여 고속으로 이동한다.

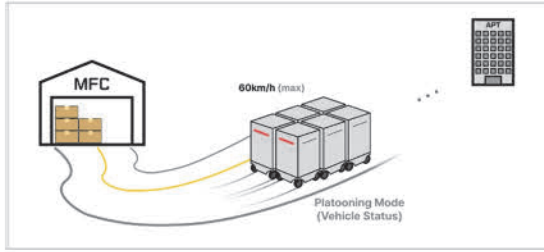


Fig. 7 Illustration of a scenario for leaving the MFC via platooning

2단계 (지위 전환 및 분리)

로봇 대열이 배송 밀집 지역(예: 아파트 단지 입구 등)에 도달하면 개별 배송 업무를 수행하기 위해 군집을 해제하고, 개별 로봇으로 분리되어 이동한다. 이와 동시에 법적 지위는 보행자 지위로 전환되며, 실외이동로봇 운행안전인증에 따른 최대 운행 속도를 준수하도록 자동 제한된다.

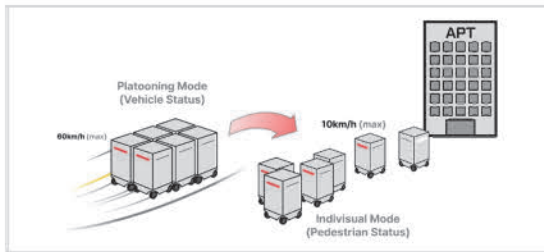


Fig. 8 Illustration of a scenario for platooning deactivation

3단계 (최종 라스트마일 배송)

보행자 지위로 전환된 개별 로봇은 아파트 단지 내부의 좁은 인도와 엘리베이터, 복도와 같은 복잡한 동선을 통과하며 최종 목적지인 현관 앞에 도착하여 배송업무를 수행한다.

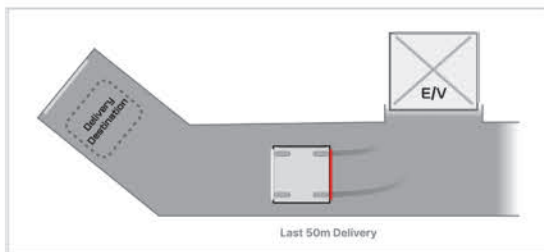


Fig. 9 Illustration of a scenario for last 50m delivery

4단계 (고속 간선 복귀)

배송업무가 완료되면 지정된 집결 지점으로 돌아와 다시 초밀집 군집을 형성하여 차량 지위를 확보하고, MFC까지 도로를 이용하여 고속으로 복귀한다.

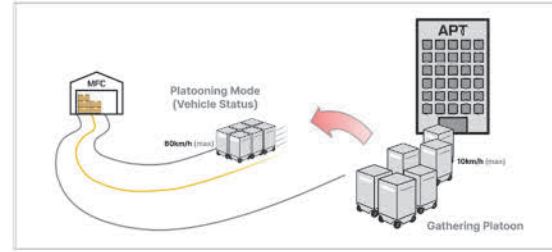


Fig. 10 Illustration of a scenario for returning to the MFC via platooning

이러한 지위 가변형 군집 주행 전략은 물류 라스트마일의 O/D 시간을 획기적으로 줄임으로 인해 기존 배달 로봇이 가진 제도적 운용 한계를 혁신적으로 해소할 수 있으며, 부가적으로 보행자와의 이동 동선 겹침을 최소화함을 통해 보행자의 통행방해와 같은 사회적 마찰을 최소화시킬 수 있다.

3.3 군집 주행 시 고속 주행을 위한 허브 모터 기반 구동 시스템 제안

본 플랫폼이 목표하는 저속 전기차급(최대 60 km/h 미만) 고속 주행을 기존에 운용되던 배달 로봇에서는 고려되지 않던 구동 시스템의 한계와 고효율성 요구를 수반한다. 본 절에서는 8인치 허브 모터(Hub motor)를 기반으로 하여 고속 운용을 기술적으로 실현할 수 있음을 입증하고자 한다.

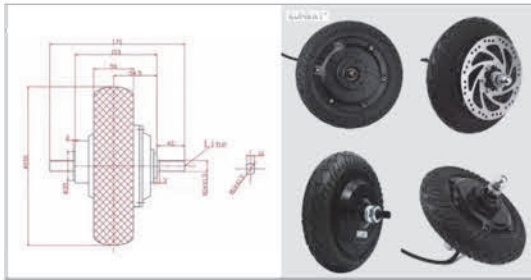
본 플랫폼은 군집 주행을 통한 자동차 지위 변환으로 60 km/h 수준까지의 고속주행이 가능하지만, 군집하지 않은 개별 로봇은 기존의 소형 배달 로봇과 같이 활용됨에 따라 크기에 제한이 있다. 따라서, 8인치 사이즈의 허브 모터를 채택하였다. 일반적으로 전동 킥보드와 같은 PM(Personal Mobility)에 사용되는 8인치 허브 모터의 경우, 사용되는 타이어의 외경은 200 mm 가 보편적이고, 24-48v의 직류 전원을 공급받아 BLDC 모터 컨트롤러를 거쳐 BLDC 모터를 구동하는 방식으로, 평균적으로 최대 분당 회전수는 입력 전원 48 V 기준 1000 rpm 전후임을 확인할 수 있었다.

타이어 외경 200 mm를 가진 8인치 허브 모터 시스템을 이용하여 시속 60 km/h를 달성하기 위해서는 1,592 rpm을 달성할 수 있어야 하나, 일반적인 8인치 허브 모터의 일반적인 최대 RPM은 약 1000 rpm 전후임을 상정하면, 이를 초과하는 수준이다. 이러한 물리적인 한계를 극복하기 위해, 72 v 이상의 고전압 시스템을 적용하는 것을 제안한다. BLDC 모터의 최대 회전 속도는 공급 전압(V)에 정비례하며, 역기전력 상수(K_e)에 반비례한다.

$$\omega_{max} \propto \frac{V}{K_e}$$

Table 3 Technical specifications of commercial 8-inch hub motors for personal mobility²²⁻²⁵⁾

Brand – model	Max voltage & rated power	Max. SPD	Max. RPM	Motor KV
Bafang - D409 ²²⁾	~ 48 v & ~500 w	39.8 km/h	1056 RPM	22 rpm/v
Kuray - MY003 ²³⁾	~48 v & ~500 w	30 km/h	796 RPM	N/A
Hongjun - HJ-008 ²⁴⁾	~48 v & ~400 w	35 km/h	1300 RPM	N/A
Yongkang - 8" 350w ²⁵⁾	~48 v & ~350 w	28 km/h	1000 RPM	N/A

Fig. 11 Sample image of 8" hub motor assembly for e-scooter²³⁾

따라서 기존보다 높은 전압을 사용하는 고전압 시스템의 적용을 통해 허브 모터의 최대 분당 회전수를 목표로 하는 1592 rpm까지 상승시킬 수 있기에, 60 km/h 수준의 고속 운용 목표를 기술적으로 실현할 수 있음을 확인할 수 있다.

고전압 시스템은 운용 효율성 측면에서도 우위를 제공한다. 동일한 출력을 낼 때, 전압이 높으면 전류는 낮아지며($P = V \times I$) 이로 인해 코일 저항에 의한 전력 손실(I^2R)이 최소화된다. 이는 모터가 높은 효율 구간에서 운용되도록 하여 경제성을 확보하는 핵심 근거이다.

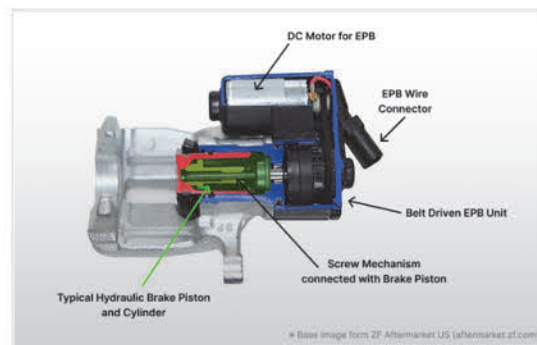
차량 지위로 전환된 군집된 로봇은 ‘저속 전기차’ 수준의 안전 구경을 충족시키기 위해, 구동 시스템에 강력하고 신뢰성 있는 제동 메커니즘을 통합하여야 한다. 이를 위해서 두가지 제동 시스템을 활용한다.

첫번째는 주행 효율성을 높이기 위해 모터의 회생 제동(Regenerative braking)을 활용하여 에너지 회수 및 정밀 토크 제어를 수행한다. 이는 일반적인 제동상황에서 주로 사용되는 제동 시스템이다.

두번째는 고속 운용 시 비상 제동 안정성을 확보하고 법적 요구 사항을 충족시키기 위해 물리적인 브레이크 시스템을 장착하여야 한다. 기존의 허브 모터의 경우 전동스쿠터와 같은 PM에서 사용되기에 하우징에 내장된 드럼브레이크나 허브모터의 측면에 디스크 브레이크를 장착하여 사용할 수 있는 점을 확인할 수 있었다. 이는 케

이블의 당기는 힘을 통해 물리적으로 드럼 혹은 캘리퍼를 작동시키게 된다. 하지만, 사람이 직접 물리적인 레버를 잡아당겨 제동장치를 작동시킬 수 있는 PM과는 다르게 무인 배달 로봇의 경우 기존의 케이블식 브레이크를 연동하기 위해서는 이를 작동시키기 위한 별도의 제어장치가 필요하게 되고, 허브 모터쪽의 제동장치와 연결된 제동용 케이블을 본체의 브레이크 제어장치까지 허브 모터의 개수에 맞추어 연결하여야 하기에 매우 복잡하고 비효율적인 시스템이 될 것이다. 또, 제동용 케이블은 길어지거나 꼬이거나 구부러질 경우 케이블의 걸선과 속선 사이의 마찰력이 늘어나 제동력이 제대로 전달되지 않거나, 제동이 제대로 풀리지 않는 문제가 발생할 수 있는데 이는, 4바퀴가 모두 자유롭게 회전하는 4WIS 특성상 문제를 일으킬 가능성이 있음을 예측할 수 있다.

이를 해결하기 위해, 허브 모터 측면에 전자식 주차 브레이크(EPB) 원리를 적용한 디스크 브레이크 시스템을 독립적인 물리적 제동 장치로 사용한다. 이 제동시스템은, 기존 허브 모터에 장착할 수 있었던 디스크 브레이크 시스템을 그대로 이용하되, 기존에 제동케이블을 통해 작동하던 브레이크 캘리퍼를, 전자식 주차 브레이크(EPB)의 작동 원리를 적용한 전자식 캘리퍼로 대체하여, 브레이크 시스템의 물리적 작동 시작점이 캘리퍼 자체에 내장된 구동 모터가 되도록 한다.

Fig. 12 Image of the structure of a rear caliper with EPB²⁶⁾

이를 통해 이전에 제약사항으로 작용하였던 제동용 케이블을 상대적으로 움직임 자유도가 높은 전선으로 대체할 수 있어, 길이나 꼬임에 상관없이 일관적인 제동 성능을 기대할 수 있고, 외부에 별도의 물리적인 제어장치가 필요 없기에 제어의 복잡함을 최소화시킬 수 있다.

앞서 조사한 내용을 바탕으로 군집 주행 시 60 km/h 수준의 고속 주행 환경에 대응할 수 있는 배달로봇용 4WIS 시스템에 사용될 구동 시스템을 Fig. 13과 같이 모델링을 통하여 시각화하였다.

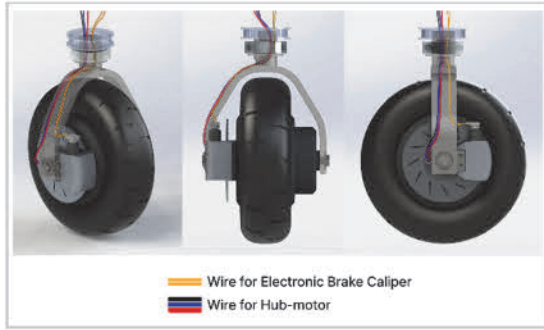


Fig. 13 Designed hub-motor system for proposing delivery robot

이 구동시스템은 축 상부에 위치한 베어링 구조를 통해 하부 프레임 구조물의 네 코너에 회전이 가능하도록 결합되게 되며, 구동시스템의 독립 조향을 구현하기 위해 펄스 제어를 통해 일정한 각도(Step) 단위로 정밀한 회전 제어가 가능하며, 멈춰 있을 때 강한 토크를 유지하고 저속에서 높은 힘을 내는 특성을 가진 스텝모터를 이용하며, 이를 구동시스템의 축 최상단부에 위치한 폴리아머 타이밍벨트로 연결되어 4개의 구동시스템이 독립 조향 구동되는 배달 로봇용 4WIS 시스템을 Fig. 14와 같이 디자인하였다.



Fig. 14 Designed 4WIS system for proposing delivery robot

3.4 동적 결합 구조 기반 공기저항력에 따른 효율 변화 분석

본 연구의 핵심으로 볼 수 있는 배달 로봇의 고속주행 환경의 경우 공기저항이 핵심 저항 요소로 부상하게 된다. 이는 차량이나 물체가 공기 중을 이동할 때 발생하는 저항력인 공력 저항력(F_{air})과 이를 극복하고 차량이 계속 주행할 때 소비되는 동력을 나타내는 공기 저항 동력(P_{air})으로 구분되며, 다음 수식으로 표현할 수 있다.

$$F_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

$$P_{air} = F_{air} \cdot v$$

배달 로봇이 고속주행시 소비되는 주된 전력 소모는 공기 저항 동력(P_{air})이며, 이는 주행속도의 세제곱(v^3)에 비례하므로, 속도가 증가할수록 에너지 비효율이 급격히 증가한다. 따라서 고속 운용의 경제성을 확보하기 위해서는 공기저항을 극복하여야 한다.

하지만 본 연구가 제안할 로봇 디자인은 단일 운행 시 공기저항에 매우 불리한 박스형 디자인을 채택할 것이다. 이는 네모난 박스 형태의 표준화된 패키지를 수납할 때 낭비되는 공간이 적어 공간 효율성이 높기 때문이다. 이는 곧 대당 적재물 탑재 능력(Payload)을 최대한 사용할 수 있기에 1회 운송 시 더 많은 패키지를 운송할 수 있다는 장점을 가지게 된다. 이러한 박스형 디자인은 매우 높은 공기저항계수(C_d)를 가지기에 유선형 디자인에 비해 발생하는 공기저항으로 인해 에너지 효율에 있어 매우 비효율적임을 예상할 수 있다. 하지만 군집 주행에 있어서는 네 면이 서로 평평하게 밀착되는 형태로 배치될 수 있어 군집 주행시 군집 주행 효과(Platooning effect)를 극대화하여 총 에너지 소모량을 효과적으로 절감할 수 있다. 이는 제일 앞열에 위치한 로봇이 박스형 디자인으로 인해 공기저항을 크게 받지만, 그 뒷열에 배치된 로봇들은 서로 60mm 이내로 초밀집 상태를 유지함으로써 공기저항으로부터 영향을 거의 받지 않는 특성을 기대할 수 있기 때문이다. 이러한 효과는 한국자동차공학회의 2023 추계학술대회에 등재된 '군집 주행에서 차간거리와 차속에 따른 선행차량의 후류가 후행차량 항력에 미치는 영향'²⁷⁾ 학술자료에서도 확인할 수 있으며, 선행차량의 형태가 직각에 가까운 형태일수록 후행차량에 직접적인 영향을 미치고, 차간거리에 비례하여 항력계수의 변화 양상이 유사함을 확인할 수 있었다.

또, 개별 로봇으로 분리 후 보행자지위로 전환되어 운행시에는 저속으로 움직이기에 박스형 디자인에 따른 공기저항의 영향이 크지 않아 무시할 수 있는 수준이다.

군집 주행 여부에 따른 에너지 효율 분석을 위한 디자인 가정 및 공력 모델은 다음과 같은 물리적 가정을 기반으로 한다.

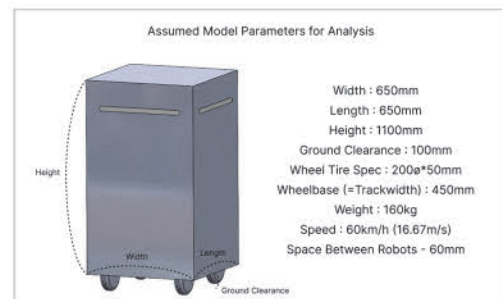


Fig. 15 Diagram of assumed model parameters for analysis

먼저, 단일 로봇이 시속 60 km/h 항속 주행 시 발생하는 구름저항력(F_{roll})과 공기저항력(F_{air})을 계산하고 총구동력(F_{total})에 대한 공기저항의 기여도를 분석한다.

구름저항력(F_{roll})은 타이어와 지면 사이의 마찰로 발생하며, 주로 로봇의 중량에 비례한다.

$$F_{roll} = \frac{1}{2} \cdot \mu_r \cdot m \cdot g$$

구름저항 계수(μ_r)의 경우, 고무/콘크리트간 구름 저항 값정도인 0.015를 사용하였고, 배달 로봇의 질량(m)에 160 kg을, 중력가속도(g)는 9.81 m/s^2 로 하여 계산하였다.

$$F_{roll} = 0.015 \cdot 160 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \approx 23.54 \text{ N}$$

공기저항력(F_{air})은 속도의 제곱(v^2)에 비례하며, 고속 주행 시 지배적인 저항 요소가 된다.

$$F_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

공기 밀도(ρ)의 경우 표준 대기압에서 약 1.225 kg/m^3 이고, 박스형 형상을 가진 로봇의 공기저항계수(C_d)는 2로 가정한다. 전면면적(A)은 본체 0.715 m^2 이며, 로봇 한 대당 타이어로 인한 전면면적은 약 0.005 m^2 으로, 대당 총 전면면적은 0.720 m^2 으로 가정한다. 주행 속도(v)의 경우, 시속 60 km/h는 16.67 m/s 이다.

$$F_{air} = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 2 \cdot 0.720 \cdot (16.67)^2 \approx 245.10 \text{ N}$$

총구동력(F_{total})은 항속 주행시 로봇이 지속적으로 극복해야하는 힘이며, 이는 곧 두 저항력의 합이다.

$$F_{total} = F_{roll} + F_{air}$$

$$F_{total} = 23.54 \text{ N} + 245.10 \text{ N} \approx 268.64 \text{ N}$$

이를 통해, 60 km/h 항속 시, 단일 로봇의 공기저항력(F_{air})은 245.10N이며, 이는 총구동력(F_{total}) 268.64N 중 약 91%를 차지하여 단독 고속 운행이 공기저항력에 의해 비효율적임을 확인할 수 있었다. 이러한 공력 비효율을 극복하기 위해 4WIS 기반의 초밀집 군집 주행 개념을 활용한다.

초밀집 군집 주행 환경을 통한 효율성 개선 원리를 확인하기 위해 다음과 같은 조건을 가정하여, 군집 배열별 공력 효율성의 정량 분석을 진행하였으며, 초밀집 군집 주행시, 밀착된 뒷열의 로봇은 공기저항을 받지 않는다

고 가정하여 계산한다.

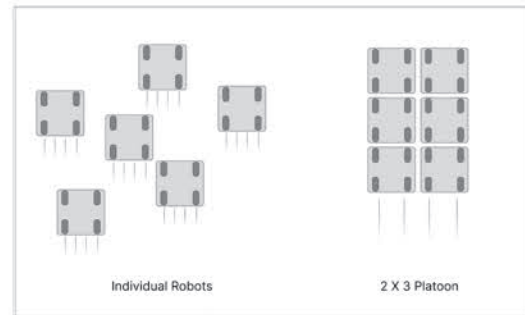


Fig. 16 Diagram of individual robots and platoon operation

3.4.1 군집 주행 미적용

Fig. 16의 좌측과 같이 군집 주행을 적용하지 않은 경우, 전체 소모 구동력은 운행중인 N대 만큼의 구동력의 합으로, 다음과 같이 계산된다.

$$F_{antiplatoon.total} = N \cdot F_{total} = 1611.84 \text{ N}$$

3.4.2 그리드형(2 x N) 배열

Fig. 16의 우측과 같이 2×3 배열로 군집 주행을 할 경우, 공기저항력은 전면의 단면적에 비례하므로, 군집의 총구동력은 선두 2대가 부담하는 공기저항력과 6대 전체의 구름저항력의 합이 되어 다음과 같이 계산된다.

$$F_{platoon.total} = 2 \cdot F_{air} + N \cdot F_{roll} = 631.44 \text{ N}$$

이는 군집 주행을 활용하지 않았을 때의 총 사용량인 대비 총 60.8% 절감된 수치이다. 총 공기저항력은 이론상 1열에 배치된 로봇 수에만 비례하여 2대 폭으로 고정되기에, 2×4 배열이나 2×5 배열과 같이 로봇 군집을 뒤로 늘릴수록 고정된 공기저항을 더 많은 로봇이 나누어 부담하여 대당 에너지 효율성이 증가한다. 다만, 그리드형 배열은 군집의 총 대수가 2의 배수여야 한다는 배치 제약이 발생하여, 이는 MFC의 실시간 물동량 변화 대응에 필수적인 유동적인 군집 형성 및 해체에 걸림돌이 될 수 있다.

3.4.3 다이아몬드형 & 총알형 배열

앞서 살펴본 그리드형 배열의 운용적 제약을 해소하고, 공력 효율을 극대화하기 위해 Fig. 17과 같은 다이아몬드 & 총알형 배열 형태를 제안한다.

이 군집 형태는 전면면적은 앞서 본 그리드형과 거의 동일하지만, 1열의 정중앙에 1대가 배치되는 특성을 통하여 1열의 로봇이 공기를 갈라내는 형태가 되도록 하여, 공기 흐름을 자연스럽게 로봇 대열의 측면으로 흐르도록

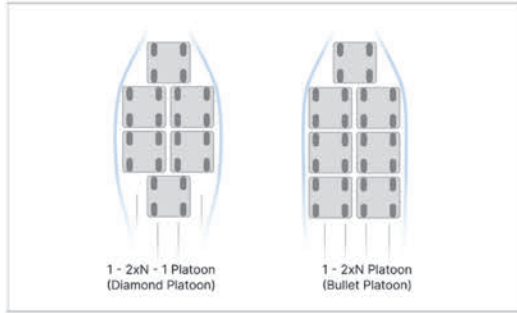


Fig. 17 Diagram of diamond platoon and bullet platoon concept

유도하여 로봇 측면에 발생하는 난류를 최소화시키고, 전면에서 노출되는 로봇들 사이의 틈을 1열의 가운데에 있는 로봇으로 막아주어 이 틈 사이로 공기가 유입되어 발생하는 불필요한 난류와 저항 또한 최소화함으로써 군집 전체의 공기저항계수(C_d 계수)를 낮추게 된다.

이 두 배열은 유동적인 군집 및 해체를 가능하게 하도록 후미에 1대 혹은 2대가 배치될 수 있도록 하여 대수 변화에 대응할 수 있다. 총 대수가 짝수인 경우, 마지막열에 한 대만이 배치되어, 대열 후방에서 발생하는 후방 압력 항력 영역의 크기(A_{wake})를 감소시킴으로써, 전체 대열의 공기저항계수를 추가적으로 낮추게 되는 공력적 이점을 추가로 얻을 수 있다. 군집 전체의 공기저항계수가 기존 2에서 다이아몬드형 배열은 1.5로, 총알형 배열은 1.8으로 개선되었다고 가정하고, 총알형 군집의 경우 한 대가 더 많은 7대로 가정한다. 이때, 군집의 총구동력은 각각 다음과 같다.

$$F_{diamondplatoon.total} = 2 \cdot (F_{air} \cdot \left(\frac{3}{4}\right)) + N \cdot F_{roll} = 508.89N$$

Table 4 Analysis conditions for CFD analysis

Condition	Value
Viscous model	K-epsilon (2 eqn)
Speed (v)	16.67m/s (60 km/h)
Air density (ρ)	1.225 kg/m ³ (constant)
Origin of target object	Object heading to X + axis Upward Y + axis
Boundary area size (from end of the object)	X + 1.5 m (front), X - 3 m (rear) Y + 1 m (upper), 0.01m (ground) Z + Z - 0.7 m
Mesh level	0.3 m
Number of iterations	500
F-total value	Direction Vector (-1 0 0) of Total Pressure [N]
Pathlines-value (color)	Pressure - Dynamic Pressure

$$F_{bulletplatoon.total} = 2 \cdot (F_{air} \cdot \left(\frac{9}{10}\right)) + N \cdot F_{roll} = 605.96N$$

최종적으로, 이러한 배열을 통한 공기의 흐름을 시각적으로 확인하고, 군집에서 발생하는 총 공기저항력을 수치로 도출함을 통하여 앞서 나열한 이론을 검증하기 위해 전산 유체 역학(CFD) 분석을 수행하였다.

분석 조건은 다음과 같다.

분석을 진행할 케이스는 앞서 서술한 4가지 케이스에 대하여 진행한다.

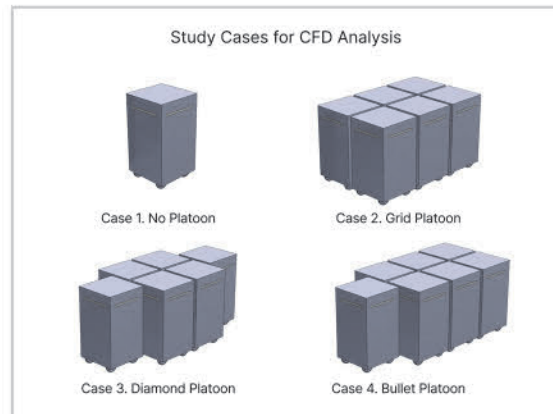


Fig. 18 Study cases for CFD analysis

앞서 진행한 정량적 계산을 통한 분석의 경우 해당 작용하는 구름저항력을 포함하여 군집의 총구동력을 산출하였지만, CFD 분석시에는 계산된 군집 전체의 공기저항력이 도출되기에, 구름저항력을 제외하고 분석을 진행하였다.

다음과 같이 4개의 케이스에 대한 분석 전체에 작용하는 힘(F_{total})과 군집의 중앙 평면에서의 공기흐름을 시각화한 패스라인 이미지를 도출해낼 수 있었다. 공기저항계수의 경우, 앞서 도출된 분석 전체에 작용하는 힘과 로봇의 단면적을 아래 공기저항계수 역산 공식을 이용하여 도출하였다.

$$C_d = \frac{2 \cdot F_{total}}{\rho \cdot A \cdot v^2}$$

이때, 단면적의 경우, 다이아몬드형 배열과 총알형 배열의 경우 60mm 떨어진 틈이 막아지고 휠타이어 두개만 큼의 단면적이 추가로 노출되기에, 두 케이스는 이를 반영한 단면적을 적용하여 공기저항계수를 도출하였다.

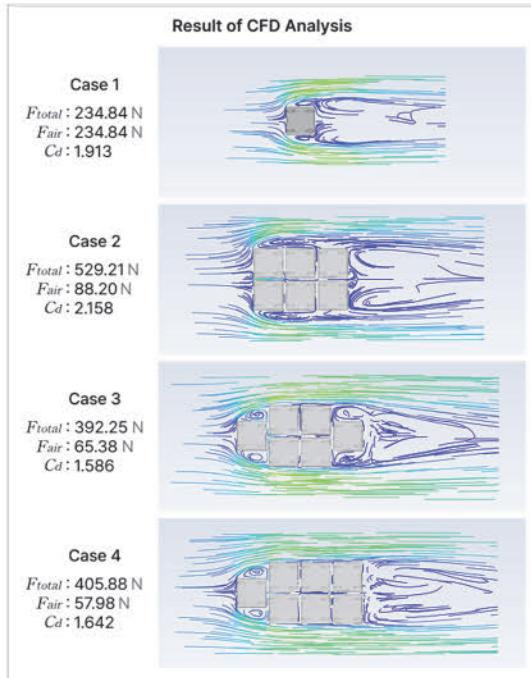


Fig. 19 Result of CFD analysis

분석 전체에 작용하는 힘(F_{total})을 로봇의 대수로 나누어 한 대에 작용하는 공기저항력(F_{air})을 계산하였다.

분석 결과, 앞서 연구한 정량적 분석 및 예측과 일치하는 결과가 도출되었다. 이때 다이아몬드형 배열에 비해 총알형 배열의 공기저항력이 크게 차이가 나지 않는다는 점을 확인할 수 있었는데, 다이아몬드형 배열의 경우 4열에서부터 공기가 말려들어가지만, 총알형 배열의 경우 4열의 끝까지 길게 흐름을 가져감으로 인해 2열 3열을 지나는 난류의 강도가 다이아몬드 배열에 비해 상대적으로 낮게 형성된 것을 난류강도를 표현하는 패스라인 색상과 공기의 흐름인 패스라인 경로를 통해 확인할 수 있었다. 물론, 총알형 배열의 경우, 다이아몬드형 배열에서 기대할 수 있는 후방 압력 항력 감소 이점을 누릴 수 없지만, 대열의 측면부에 흐르는 공기 흐름의 안정화를 통해 이를 상회한 것으로 볼 수 있으며, 군집에 사용된 로봇 대수가 1대 늘어나기에, 로봇 1대당 작용하는 공기저항력은 더 감소됨을 확인할 수 있었다.

이를 바탕으로 박스형 배달 로봇의 고속주행 시 공기저항으로 인한 에너지 비효율 문제는 군집 주행 효과를 통해 해소할 수 있음을 확인하였고, 다이아몬드형 배열과 총알형 배열과 같은 배치 형태의 최적화를 통해 공기저항계수를 효과적으로 낮추어 에너지 효율을 효과적으로 높일 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고, 그리드 배열에서는 차량과 유사한 전장(길이)을 확보하기 위해 최소 2×3 배열을 통해 6대 이상부터 운행이 가능하였지만,

다이아몬드 배열의 경우 4대로 구성된 1-2-1 배열만으로도 동일한 전장을 확보할 수 있다

이를 통해 다이아몬드 배열과 총알형 배열을 적용한 초밀집 군집 주행 개념은 MFC 연계형 라스트마일 배달 로봇 모빌리티 운용환경에 있어 매우 효과적인 솔루션임을 확인할 수 있었다.

3.5 밀착 군집 주행에 적합한 도킹 메커니즘 제안

3.4문단에서 확인할 것과 같이, 군집 주행 효과를 극대화하기 위해서는 긴밀한 간격을 유지하여야 한다. 하지만 간격이 가까워질수록 요구하는 제어 정밀도가 급격히 상승한다. 또한, 실제 운용환경은 이상적인 완벽한 평지가 아니라, 과속방지턱, 포트홀, 경사로 등 다양한 노면 환경에 마주하게 되어, 전체 대열이 구부러지거나 객체의 기울어짐이 발생하고 노면 각도차로 인해 객체의 비틀림현상이 발생하여 객체간 충돌 위험은 더욱 높아진다. 나아가, 군집 주행 시 1열에 위치한 로봇은 공기저항력으로 인해 후미에 배치된 로봇들에 비해 더 많은 전력을 소비하기에 로봇간 에너지 소모 불균형 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 로봇간 서로 물리적으로 연결할 수 있는 도킹 메커니즘 두가지를 제안하고자 한다.

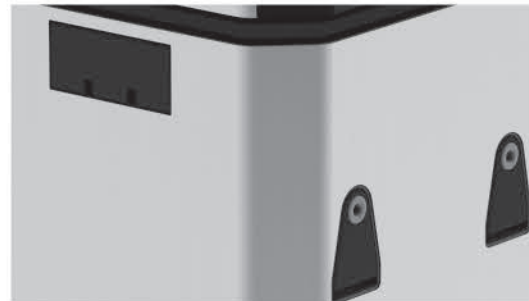


Fig. 20 Two docking mechanism for platoon operating robot

제안하는 첫번째 도킹 메커니즘은 물리적으로 객체간 결속을 통해 일정한 간격을 유지해주고, 연결부의 고탄성 부싱(Bushing)을 통하여 일정 수준의 비틀림을 허용하면서 군집간 구동력 전달시 순간순간 발생하는 구동력 차이로 인한 충격을 흡수해주어 안정적인 주행을 가능케 한다. 이 도킹 메커니즘은 주행방향에 적용되며, 객체간 물리적으로 결속되는 도킹 메커니즘을 통하여 구동력이 균일하게 분산되도록 하는 것이 중요하다. 이는 앞열 로봇이 공기저항력을 많이 받더라도, 도킹 메커니즘을 통해 군집 전체가 하나의 파워트레인처럼 물리적으로 연결되어 작동하기에 구동력이 모든 객체에 공기저항력이 균일하게 분산되고, 구동력 또한 뒷열 로봇에서 앞열로 이

동하므로, 모든 군집 객체가 대열 위치에 상관없이 균일한 전력 소비를 가능하게 한다. 이러한 균형 잡힌 구동력 분산을 위해 앞열과 뒷열을 연결하는 도킹 메커니즘의 연결부는 공기저항력으로 인한 불균형 모멘트(Moment)를 막을 수 있도록 본체의 중심 높이에 위치한다.

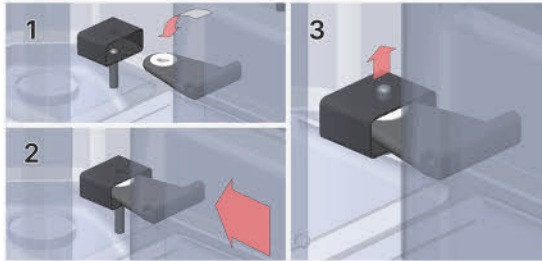


Fig. 21 Proposed longitudinal docking mechanism

종방향의 도킹 과정은 4WIS의 정밀 제어 능력을 활용한다. 먼저 부싱이 장착된 암(Arm)이 로봇의 측면에서 폴딩을 통해 돌출되고(Fig. 21 - 1), 상대 로봇의 장착부(리셉터클)와 나열된다. 이후 4WIS의 크랩 주행 모션이나 대각선 이동 모션을 통해 로봇 전체를 정밀하게 이동하여 암을 상대 로봇 장착부에 삽입한다(Fig. 21 - 2). 부싱이 장착부 구멍에 들어간 후, 상대 로봇의 장착부 상부에서 핀(Pin)이 상승하여 부싱의 구멍을 관통함으로써 도킹이 완료된다(Fig. 21 - 3).

제안하는 두번째 도킹 메커니즘은 군집의 횡방향 연결을 위해 사용된다. 이는 앞선 첫번째 메커니즘과 같이 로봇을 물리적으로 객체 간 결속을 통해 일정한 간격을 유지하는 점은 같으나, 횡방향으로는 공기저항력을 주행방향에 비해 거의 받지 않기에 힘을 전달을 하지 않고 단순히 군집 간의 거리를 유지하기만 하는 역할을 주로 수행하면 된다. 따라서, 이 도킹 메커니즘의 연결부는 본체의 가운데에 있을 필요가 없다. 따라서 복잡한 구조를 배제하고 하나의 넓은 금속 암으로 횡방향 로봇에 장착된 가로 금속봉에 얹혀지듯 걸쳐져서 연결되는 메커니즘을 고안하였다. 이 구조는 장착부의 깊이와 면적을 최소화하여 제한된 부피에 적용하기에 적합하다.

횡방향의 도킹 과정은 앞선 종방향의 도킹과정과 같이 4WIS의 정밀제어능력을 활용한다. 먼저 넓은 금속 암이 로봇의 측면에서 폴딩을 통해 돌출되고(Fig. 22-1), 상대 로봇의 장착부와 나열한 뒤 4WIS의 크랩 주행 모션이나 대각선 주행 모션을 통해 로봇 전체를 정밀하게 이동하여 장착부를 향해 전진한다(Fig. 22 - 2). 넓은 금속 암이 장착부에 위에 걸리듯이 들어가면 곧 이어 로봇 암이 금속 봉에 걸리면서 도킹이 완료된다(Fig. 22 - 3).



Fig. 22 Proposed lateral docking procedure

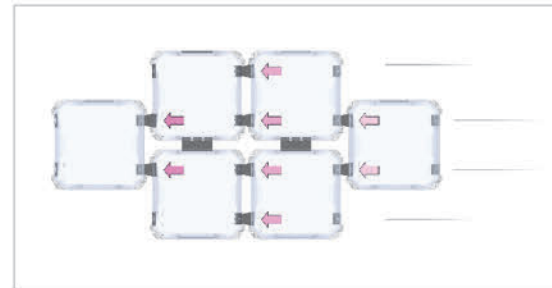


Fig. 23 Review of the docking mechanism through modeling under platooning conditions from top view

이 디자인은 이전에 제안한 다이아몬드형 군집 주행 대열 배치구조의 특성상 발생하는 부분적인 겹침을 고려하여, 앞열의 로봇이 바르게 나열되었을 때와 만만 겹치는 경우 모두를 만족하는 유연한 도킹을 가능하게 한다.

3.6 효율적 배송물 처리 구조 설계 및 전달 방법

본 배송 로봇의 핵심적인 운용 효율은 MFC 연계를 통한 적재물 탑재 자동화와 배송지에서의 자동 하차 및 회수기능에 있다. 이를 위해 먼저 표준 패키지 규격을 제안한다.

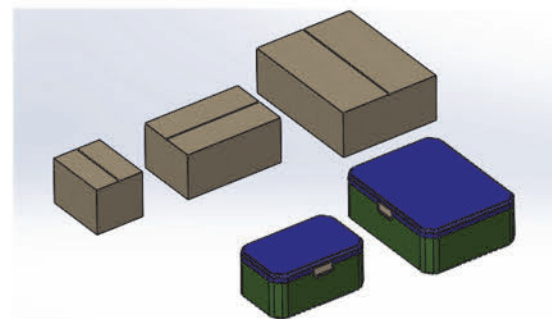


Fig. 24 Modeling of standardized packaging for stacking structure

표준 패키지는 주로 재사용가능한 패키지 두가지와 박스형 패키지 세가지 종류로 분류되며, 높이는 모두 동일한 구조로 구성되어 있다. 이는 배송물의 종류와 크기

에 맞추어 패키지를 선택함으로써, 로봇 한 대가 배송업무 사이클을 1번 수행시 후술할 표준 패키지 스택킹(Stacking) 기법을 통해 가능한 많은 배송 업무를 가능하게 함으로서 운용 효율을 극대화시킬 수 있다.

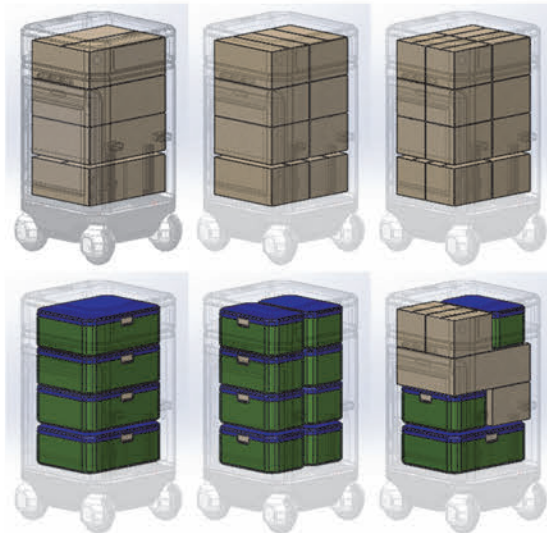


Fig. 25 Package layout view of the proposed robot design

로봇 한 대에는 풀사이즈 패키지 4개, 하프사이즈 패키지 8개 또는 쿼터사이즈 패키지 16개를 수납할 수 있으며, MFC의 자동화 시스템을 통해 효율적인 실시간 적재물 배치 프로그램을 활용하여 1회에 다양한 사이즈의 패키지를 배치하여 배송하는 것이 가능하다.



Fig. 26 Cargo bay floor conveyor system structure of proposed robot design

배달 로봇의 적재함 바닥 구조는 Fig. 26과 같이 설계된다. MFC에서 빠른 적재를 위해, 상부 도어를 열어 로봇암 등을 통해 배송 순서대로 적재물을 위에서 아래로 빠르게 적재한다. 바닥은 4개의 소형 컨베이어 벨트 형태로 이루어져 있어, 전체를 구동하여 풀사이즈 패키지를 토출하거나, 각각을 구동하여 하프사이즈 혹은 쿼터사

이즈 패키지를 선택적으로 토출시킬 수 있다. 적재함 바닥을 통해 1차적으로 토출된 패키지는 열린 도어 내부에 장착된 컨베이어 벨트 위로 올라가게 되며, 도어에 장착된 컨베이어 벨트가 최종적으로 고객의 현관 앞에 내려놓는 방식으로 배송 업무가 완료된다.

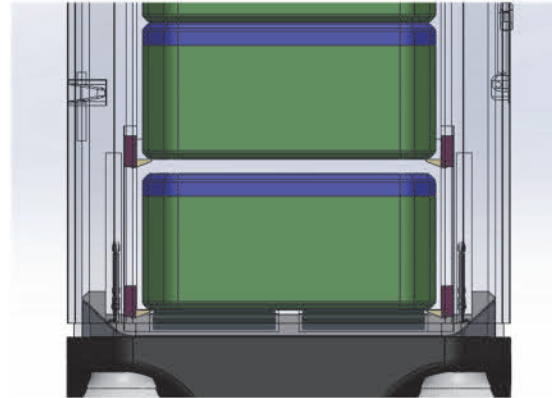


Fig. 27 Package lifting mechanism for proposed robot design

적재된 패키지는 측면에 수직으로 배치된 레일을 따라 위아래로 움직일 수 있는 8개의 래치형(Latch) 구동부를 통해 적재 패키지의 층을 번갈아가며 한층씩 올리고 내릴 수 있다. 이는 하부에서 패키지가 토출될 때, 위의 패키지가 아래로 쏟아지는 것을 방지하고, 후술할 회수 프로세스에서 패키지를 위로 올리는 데도 사용된다.

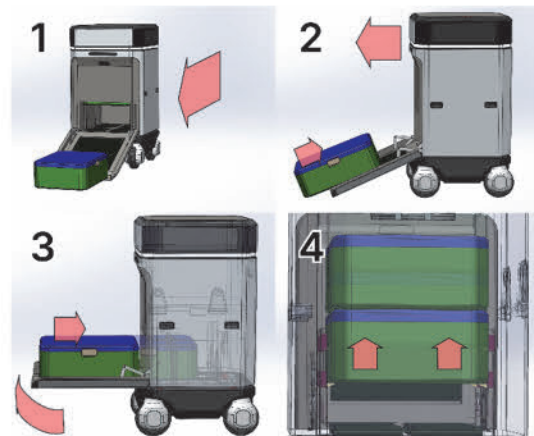


Fig. 28 Package retrieval process of the proposed robot design

사용이 완료된 재사용가능한 패키지의 회수나 반품 교환 건의 경우, 배달 로봇이 모든 배송을 완료하여 적재함이 비었을 때 회수 업무로 전환되어 운용된다. 로봇은 소비자가 내놓은 회수 대상물을 카메라로 확인하며, 반품 태그가 부착된 패키지나 회수 요청된 재사용 가능한 패키지를 인식한다. 회수 시, 적재함 도어를 열어 경면으

로 처리된 도어의 끝단을 바닥에 밀착시킨 채 로봇을 회수 대상 패키지에 밀면서 이동하여, 패키지를 도어에 장착된 컨베이어 벨트에 올린다. 이때 컨베이어 벨트 또한 로봇의 이동 속도에 맞게 구동되기에, 패키지가 컨베이어 벨트 끝단에 닿는 순간부터 패키지는 부드럽게 적재함 안으로 올라가게 된다. 패키지가 일정 이상 들어오면, 도어를 수평으로 위치시키고 적재함 내부 컨베이어 벨트를 통해 안쪽 끝까지 이동시킨다. 패키지가 끝까지 들어오면, 측면에 위치한 레일형 래치가 바닥에서 올라와 패키지를 위로 이동시키고, 패키지를 상위 단계 스테킹한다. 바닥 면적을 전부 채울 수 없는 경우에는 레일형 래치 구조를 통한 리프팅이 불가능하므로, 가급적 풀사이즈 패키지의 회수가 완료된 이후 하프사이즈나 쿼터사이즈의 패키지를 회수하도록 하여, 마지막에 바닥 면적을 전부 채우지 못한 일부 패키지를 바닥면에 둔 채로 회수 업무를 마감하도록 회수 순서를 배정한다.

3.7 주행 특성에 적합한 등화장치 제안

한국로봇산업진흥원의 '실외이동로봇 운행안전인증 가이드북'⁶⁾에 따르면 심사기준 중 '10. 등화장치-가. 로봇은 시각적 알림 제공을 위한 등화장치를 가져야 한다'를 만족시켜야 하며, 이는 야간이나 악천후시 사람이나 차량이 로봇을 식별하지 못하여 발생하는 안전사고를 막기 위함이다. 기존의 배달 로봇은 주행방향을 상정하고 디자인된 방향성 디자인이기에, 접근하는 사람 및 차량에 잘 보일 수 있도록 전면부에 주간주행등(DRL)과 같은 등화류가 집중되어 있고, 후미에는 후미등 역할을 하는 적색 등화가 적용된 모습을 확인할 수 있었다. 하지만, 본 로봇에 적용된 4WIS 시스템 특성상 모든 방향으로 동일한 주행성을 가지기에 별도로 정해진 주행 방향이 없기에 기존의 방향성 등화 디자인을 적용하기에 무리가 있다. 이를 해소하기 위해 각각의 RGB LED 소자를 직렬 데이터 통신을 통해 개별 제어할 수 있는 ws2812 소자와 같

은 Addressable RGB LED (이하 ARGB)로 구성된 등화장치를 제안한다.

ARGB를 이용할 경우, 주행중인 방향에 맞추어 ARGB 소자의 개별 제어를 통해 현재 주행 방향 기준 전면에 흰색으로 점등하여 통해 주간주행등을 표출하고, 후면에는 붉은색을 점등하여 후미등을 표출한다. 추가적으로, 방향 전환 시 해당 방향의 일부 소자를 노랑색으로 점멸하는 등, 이러한 구조는 별도의 추가적인 하드웨어 없이 소프트웨어 제어를 통해 주행방향에 따른 등화의 역할 변화를 구현할 수 있다.

자동차 지위로 군집 주행시에도 이러한 등화류를 갖추는 것은 필수적이며, 이는 앞서 설명한 ARGB를 적용한 등화장치를 통해 구현이 가능하다. 다만, 저속전기와 같은 차량 지위를 부여받기 위해서는 주행 방향 전방을 밝게 비출 수 있는 전조등(Headlamp)이 추가로 설치되어야 한다. 군집 주행 시에는 결합 구조로 인해 앞뒤 좌우가 구분되어 배열에 따른 주행 방향이 정해져 있으므로, 주행 시 앞쪽 방향을 바라보는 로봇의 면에만 전조등을 추가로 구성하면 법적 조건이 충족된다. 이러한 ARGB를 적용한 등화장치 설계는 플랫폼이 개별 주행시 방향에 관계없이 일관적인 등화 표출을 보장하고, 군집 주행시 차량 지위를 확보하는 이중적인 요구사항을 최소한의 하드웨어를 통해 충족시키는 핵심 솔루션이다.

3.8 기타 고려사항

한국로봇산업진흥원의 '실외이동로봇 운행안전인증 가이드북'⁶⁾ 3P의 심사 항목 표⁷⁾ 내용에 따르면, 총 16개의 심사 항목이 있으며, 앞선 연구내용에서 살펴보기 못한 내용 중, 배달 로봇 디자인 시 영향을 미칠 수 있는 심사 항목에 대한 고려가 필요하다. 심사항목 1번의 질량 및 폭 제한의 경우, 질량은 500 kg 이하, 폭은 800 mm 이하로 제한된다. 심사항목 3번의 겉모양의 경우, 날카로운 형상을 제한한다. 심사 항목 5번의 경우 비상정지 스위치 장착 및 요구사항 준수가 요구된다.

저속전기자동차로서 자동차지위로 전환되는 군집 주행 상황에서는, 자동차 관리법과 같이 법적으로 요구되는 자동차번호판과 같은 차량식별번호와 차대의 동일성을 확인할 수 있는 차대번호가 요구될 수 있다. 여러 대의 로봇이 군집하여 하나의 자동차와 같이 운행되는 상황에서는 차대는 여러 대로 나누어져 있지만 실질적으로는 배열을 구성하여 물리적으로 연결되어 비로서 하나의 자동차로서 운용되기에, 법적으로는 한 대의 차량으로 보아야 함이 마땅하지만, 아직 이러한 군집형 모빌리티 플랫폼을 위한 제도는 마련되어 있지 않다. 도로주행을 위해 자동차 번호판이 있어야 하지만, 보행자지위와 자동

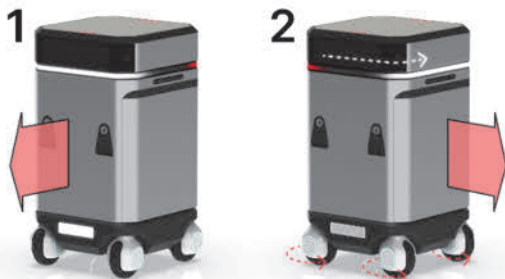


Fig. 29 ARGB based adaptive lighting scenario suitable for omni-directional movement

차지위를 오가는 군집 주행 기반 로봇은 자동차지위로 전환되었을 때만 번호판을 노출하여야 한다는 점 또한 고려하여야 한다. 그리고, ‘저속전기자동차 특례기준’에 따라, 차량 뒤쪽에 타운전자가 해당 차량이 저속전기자동차임을 즉시 인지할 수 있도록 최고속도 제한(60 km/h)이 명시된 표지를 반드시 부착하도록 규정되어 있다는 점을 앞의 2.5절에서 확인할 수 있었다. 하지만, 보행자지위와 자동차지위를 오가는 이러한 군집형 모빌리티 플랫폼의 경우, 기존의 저속전기자동차와 같이 스티커와 같은 방식으로 개별 로봇에 상시 부착하는 것은 최고시속 15 km/h 이내로 제한된 보행자지위로 개별운행시 적합하지 않다는 점 또한 고려하여야 한다.

군집 주행 개념을 통한 지위 전환형 모빌리티 플랫폼과 같이 기존에 없던 새로운 개념의 제품 및 서비스가 도입되는 경우, 기존 법규에 맞추는 것이 사실상 불가능하고, 법규 또한 새로운 개념의 제품 및 서비스에 맞추어 바로 개정되는 것 또한 기대할 수 없다. 이러한 규제로 인한 해결이 어려운 사항은 일시적으로 새로운 개념의 제품 및 서비스를 테스트할 수 있도록 정해진 기간과 제한된 구역 내에 한하여 기존의 규제들을 면제하거나 유예해주는 ‘규제 샌드박스 특례’를 통하여 실증사업을 진행하고, 이를 바탕으로 근 미래에 법규 개정을 진행하는 것으로 가정한다. 이는 이번 연구에서 고려하지 못한 다른 법적 규제 또한 일시적으로 면제 혹은 유예를 받는다고 가정한다.

4. MFC 연계형 라스트마일 배달 로봇 모빌리티 플랫폼 디자인 제안 및 결론

4.1 배달 로봇 플랫폼 디자인 및 주요 사양 제시

제안하는 MFC 연계형 라스트마일 배달 로봇 모빌리티 플랫폼 디자인의 경우, 배송물 탑재 효율을 위해 기존에 제안한 것과 같이 박스형 디자인을 유지하되, 모서리 부분을 모따기 후 모깎기를 한 형상을 바탕으로 날카로운 형상을 제거하여 보행자 안전을 챙기면서도 앞서 제안한 표준 패키지 적재가 가능한 내부 공간을 확보하여 박스형 디자인의 공간적 이점을 그대로 가져갔다. 추가적으로, 순수 박스형 디자인에 비해 모서리가 다듬어진 형상은 경면을 따라 더 자연스럽게 공기가 측면을 타고 흐르도록 유도될 수 있도록 하여 군집 주행을 통한 고속 주행시 발생하는 공기저항력의 감소효과를 기대할 수 있다.

WIS 모듈에는 커버가 장착되어서 내부의 부속품이 보이지 않게 마감을 하였고, 커버의 측면에 면발광 스타일의 LED 조명을 배치하여 주행방향의 측면 시인성을 높여준다.



Fig. 30 Proposed delivery robot design for last mile delivery

Table 5 Specifications of the proposed delivery robot

Specification	Value
W * D * H	650 * 650 * 1200 (mm)
Wheelbase	490 mm
Ground clearance	100 mm
Max. weight (incl. package weight)	160 kg
Max. package load	80 kg
Max. speed (Independent mode)	9.8 km/h
Max. speed (Platooning mode)	60 km/h
Operation method	Autonomous operation
Sensors	Camera based AI Vision, Ultrasonic sensor (backup)
Usage	MFC-Based Last-Mile Logistics

토출구가 위치한 본체의 측면과 그 반대면에는 초밀집 군집 주행시 로봇간 횡방향 연결을 위한 압과 장착부가 위치하고 있고, 본체의 전면과 후면에는 로봇간 종방향 연결을 위한 압과 리셉터클이 위치한다.



Fig. 31 Top of the proposed delivery robot design

본체의 상부에는 ‘실외이동로봇 운행안전 인증규정’에 따른 비상정지 스위치를 위치하였다. 본체 상부 내부

에는 상판 잠금 장치가 위치하여 있으며, 상판에는 별도의 손잡이가 없다. 이는 MFC에서 운반물 적재 시, 로봇을 통한 자동화 공정을 통해 탑재되기에, 로봇암이 진공 석션 컵(Suction-cup)을 통한 상판 탈착을 진행하는 것을 가정하여 디자인하였다. 또, 본체의 상부 네 모서리면 내부에는 운용 시 주변을 빠짐없이 커버할 수 있는 카메라가 배치되어 있어, 이 영상데이터를 바탕으로 인공지능 기반 자율주행을 지원하며, 또 좁은 실내나 조도가 어두운 환경, 거울로 인해 반사가 되는 엘리베이터 내부 환경과 같이 제약적인 상황에서의 자율주행 성능을 유지하기 위해, 음파를 이용해 거리를 탐지하는 초음파 센서를 보조 센서로 활용한다.



Fig. 32 Display usage examples in standalone driving and platooning

로봇의 전면 및 후면에는 디스플레이가 배치되어 보행자지위로 독립 운행시 보행자 및 사용자에게 정보전달을 수행한다. 군집을 형성하여 저속전기자동차로서 자동차지위로 전환되었을 때는, 전산상 여러 대의 차대번호에 대한 하나의 일회성 식별번호를 부여하고, 제일 앞열과 뒷열의 로봇의 전후면에 배치된 디스플레이를 통해 표출한다. 이 일회성 식별번호는 자동차의 번호판과 같이 활용된다. 그리고, ‘저속전기자동차 특례기준’에 따라 후행 차량의 운전자가 군집주행중인 로봇 대열이 저속전기자동차로써 운행되고 있음을 인지할 수 있도록 최고속도 제한(60 km/h) 표식을 군집의 배열 상황에 따라 뒤에서 두번째 열의 디스플레이의 양 측면(다이아몬드형 배열) 혹은 제일 뒷열의 두 디스플레이 중 일회성 식별번호가 표출되는 디스플레이가 아닌 다른 디스플레이(충알형 배열)를 통하여 표출한다.

로봇의 내부구조는 Fig. 33와 같으며, 배터리 팩과 컨트롤러와 같은 구동에 필수적인 장치이자 무거운 장치들을 본체의 최하부에 위치함으로써 무게중심을 낮추어 안정적인 주행이 가능하도록 하였다. 또, 4개의 WIS 모듈을 안정적으로 잡아주면서도, 노면의 불규칙함으로 인해 바퀴가 뜨거나 차체가 흔들리는 것을 막기 위해 탄성이 있는 카본봉을 프레임 상부에 위치하여 비틀어질 수



Fig. 33 Internal parts of the proposed delivery robot design

있게 하고, 추가적인 강성 확보와 비틀림으로 인한 바운스 현상을 줄이기 위해 하부로 연결되는 프레임에 쇼크 업소버(Shock-absorber)를 연결하였다. 또, 하부의 구동부와 상부 본체를 스프링과 같은 완충장치를 통해 연결하여 프레임에서 걸러지지 못한 진동을 완충하여 진동이나 충격으로 인한 배송물 손상을 방지하여 준다. 회수 대상 패키지를 바닥면에서부터 밀면서 도어부로 올리기에, 도어의 걸면 끝단에는 마찰이 극도로 적고 내구성이 튼튼한 검은색 PTFE 소재의 파츠를 적용하여 회수업무시 바닥의 손상과 소음을 방지하고, 장기간 사용으로 인한 마모 시 교체를 통해 유지관리가 가능하다. 또, 도어가 열렸을 때, 패키지의 입 출입상황과 패키지에 부착된 운송장정보를 확인할 수 있도록 본체의 도어 내부면 상부에 카메라가 1개 장착되어 있다.

4.2 기대 효과 및 실현 가능성 고찰

제안하는 4WIS기반 지위변환형 배달 로봇 모빌리티는 기존의 MFC와 배송지주변 지역 간의 핵심 간선 이동시 물류 O/D 시간을 현저히 저하시켜 대당 운행 효율을 상승시켜 줄 것으로 예상되며, 이는 일상화되고 있는 새벽배송 서비스에 적용한다면 새벽시간대의 원활한 교통 흐름과의 시너지로 인해 대당 운행 효율은 더욱 상승시켜 줄 것으로 예상된다. 또, 기존의 배달 로봇은 배달음식과 같은 단건 배송 위주의 단순한 적재구조라는 한계로 인해 택배물류와 같은 비대면 대량 운송에는 적합하지 않았다면, 제안하는 로봇은 규격화된 패키지와 스테킹 구조와 선택적 토출구조를 통해 1회 운행시 다건 배송을 완수하고, 재사용패키지 수거나 반품수거와 같은 회수 업무에도 사용될 수 있기에, 택배물류에 특화된 배달 로봇 모빌리티로서 택배물류업계 또한 제안하는 이 로봇

디자인을 통해 자율주행 기반 배달 로봇 모빌리티를 통한 실증사업 및 상용화가 가능하게 될 것으로 전망된다.

물론, 제안하는 4WIS기반 배달 로봇 모빌리티를 통해 실증사업 및 상용화가 실현되기 위해서는 3.8에서 설명한 것과 같이, 기존에 없었던 새로운 개념의 제품 및 서비스에 해당되기에, 실증사업 및 상용화 초반단계에는 ‘규제 샌드박스 트랙’을 통하여 실증사업을 진행함으로써 실증사업 및 상용화가 시작될 것으로 보이며, 이를 통해 실제 환경에서 운용 시 발생할 수 있는 문제점이나 취약점들을 연구하고 개선하는 작업 또한 필수적이나, 이를 통해 추후 실제 운용 환경에 더욱 적합하고 효율적인 물류 서비스를 통해 더 만족스러운 물류 서비스를 근 미래에 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- 1) O. O. Kwon, S. H. Hwang, J. H. Choi, J. J. Cho, C. W. Jung and S. H. Kim, “MFC System Automation Technology and Logistics Efficiency,” Gyeongbuk Institute of IT Convergence Industry Technology, Gyeongsan, Korea, 2023.
- 2) K. Xiang and S. Koo, “A Study on the Trend of Purpose-built Mobility in the Mobility as a Service System - Focusing on the Usage Distribution -,” Transactions of KSAE, Vol.31, No.6, pp.431-438, 2023.
- 3) Automated Storage and Retrieval Systems from A to Z, AutoStore System, <https://www.autostoresystem.com/kr/insights/automated-storage-and-retrieval-systems-from-a-z>, 2024.
- 4) D. K. Lee, Y. J. Song, J. Y. Lee, K. B. Lee and J. G. Shin, “Validation of Storage Operation Rule and Capacity: Basic Simulation for Automated Storage and Retrieval System Operation,” Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp.47-48, 2008.
- 5) Korea Institute for Robot Industry Advancement, <https://www.kiria.org/portal/cert/portalCertEstiSafe.do>, 2023.
- 6) Korea Institute for Robot Industry Advancement, https://www.kiria.org/cmm/fms/FileDown.do?atchFileId=FILE_000000000007292&fileSn=2, 2023.
- 7) H. Kim, KBS News, <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=8346114>, 2025.
- 8) Korea Institute for Robot Industry Advancement, <https://www.kiria.org/portal/cert/portalCertEstiStats.do>, 2025.
- 9) Baemin, <https://robot.baemin.com>, 2025.
- 10) Neubility, <https://www.neubility.co.kr>, 2025.
- 11) Robotis, <https://www.robotis.com>, 2025.
- 12) Mobinn, <https://www.mobinn.co.kr>, 2025.
- 13) D. S. Jeon, Study about Skid Steer of Independent 4-Wheel Drive Vehicle, M.S. Thesis, Kookmin University, Seoul, Korea, 2009.
- 14) J. Vogel, “Tech Explained: Ackermann Steering Geometry,” Racecar Engineering, <https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-ackermann-steering-geometry/>, 2021.
- 15) Robotics LAB, Hyundai Motor Group, <https://robotics.hyundai.com/unveiled-robots/service/dal-e.do>, 2022.
- 16) Hyundai Motor Group, <https://www.hyundaimotorgroup.com/ko/tv/CONT000000000145294>, 2024.
- 17) Robotics LAB, Hyundai Motor Group, <https://robotics.hyundai.com/projects/research/view.do?seq=15>, 2022.
- 18) Hyundai Motor Company and Kia Corporation, “Method and System for Controlling In-situ Rotation Mode of Four-wheel Independent Steering Type Vehicle,” U.S. Patent Application Publication 2022-0126914 A1, 2022.
- 19) Hyundai Motor Group, <https://www.hyundaimotorgroup.com/ko/tv/CONT000000000107302>, 2023.
- 20) T. Y. Kim, H. K. Lee, K. H. Kim and S. H. Hwang, “Path-Following Strategies for 4-Wheel Independent Steering EVs Using PPO Reinforcement Learning and Turning Radius Gain,” Transactions of KSAE, Vol.31, No.8, pp.575-584, 2023.
- 21) S. J. Park, J. W. Jung and J. Y. Kim, “A Study on Wheel Independent Steering in Future Mobility,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.196-201, 2022.
- 22) Grin Technologies, <https://ebikes.ca/8-scooter-motor.html>, 2019.
- 23) Alibaba, <https://www.alibaba.com/product-detail/8Inch-24V36V48V-350W500W-Disc-Brake-Rear-1600302121939.html>, 2025.
- 24) SCFocus, <https://scfocus.en.made-in-china.com/product/FOMJXemvLTVh/China-8-Inch-200mm-Diameter-Electric-Wheel-Motor-with-Solid-Tire.html>, 2025.
- 25) Alibaba, https://www.alibaba.com/product-detail/8-Inch-Electric-Scooter-Motor-Brushless_62492719590.html, 2025.
- 26) ZF Aftermarket, <https://aftermarket.zf.com/us/aftermarket-portal/for-workshops/useful-tips/brakes/trw-pre-filled-brake-calipers/>, 2025.
- 27) H. K. Han, J. H. Park, S. K. Choi and J. W. Lee, “Effect of Trailing Flow of Preceding Vehicle According to Distance and Speed in Platooning on Drag of Following Vehicle,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1655-1656, 2023.