

# 강우와 표면 재질이 라이다 성능에 미치는 영향 분석

박 명 옥<sup>1)</sup> · Lennart Jahn<sup>2)</sup> · 손 준 우<sup>\*1,2)</sup>

대구경북과학기술원 HumanLAB<sup>1)</sup> · (주)소넷 자율주행연구팀<sup>2)</sup>

## The Impact of Rain and Surface Properties on LiDAR Performance

Myoungouk Park<sup>1)</sup> · Lennart Jahn<sup>2)</sup> · Joonwoo Son<sup>\*1,2)</sup>

<sup>1)</sup>HumanLAB, DGIST(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), Daegu 42988, Korea

<sup>2)</sup>Autonomous Driving R&D Team, Somnet.AI, Hyeonpung-eup, Dalseong-gun, Daegu 43017, Korea

(Received 26 December 2024 / Revised 3 January 2025 / Accepted 3 January 2025)

**Abstract** : LiDAR system performance is highly influenced by surface properties and environmental conditions, particularly clear and rainy weather. This study investigates the impact of surface properties and rain on LiDAR performance, focusing on point cloud density and intensity within regions of interest(ROI). Data was collected in a container terminal during container handling operations under varying weather conditions. Surface categories, including asphalt ground and container, were analyzed to evaluate the differences in LiDAR performance metrics. Statistical analyses revealed that clear weather conditions yield more accurate and consistent LiDAR data compared to those under rainy conditions. These results highlight the significant influence of weather on LiDAR detection reliability, and emphasize the need for robust LiDAR systems that can maintain performance across diverse environments. This research can improve LiDAR-based sensing applications, such as autonomous vehicles and industrial automation, particularly in environments under different weather conditions.

**Key words** : LiDAR(라이다), Adverse weather(악천후), LiDAR performance(라이다 성능), Surface properties(표면 재질), Rain(강우조건)

### 1. 서론

자율주행 기술은 현대 자동차 산업에서 안전성, 효율성, 그리고 이동성의 혁신을 주도하는 핵심 요소로 자리 잡고 있다.<sup>1)</sup> 자율주행 시스템은 복합적인 센서 데이터를 통합하여 주변 환경을 인식, 해석, 대응하는데, 특히 LiDAR(Light Detection and Ranging) 센서는 3차원 공간 정보를 고해상도로 제공함으로써 자율주행 기술의 정밀도와 신뢰성을 높이는 중요한 역할을 한다.<sup>2)</sup> LiDAR는 빛의 반사 시간을 측정하여 물체와의 거리를 계산하며, 정밀한 거리 및 위치 정보를 통해 차량 주변의 물체를 정확하게 감지할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 LiDAR는 특정 기상 조건, 특히 우천, 안개, 눈과 같은 악천후 상황에서는 신호의 산란과 흡수로 인해 성능 저하가 발생할 가능성이 높다.<sup>3-5)</sup>

이와 관련하여 다양한 선행 연구들이 악천후 조건에서 LiDAR의 성능 특성을 분석하기 위해 단기적 실험을 진행한 바 있다. 예를 들어, Montalban 등<sup>4)</sup>은 우천 상황에서 LiDAR 신호가 물방울에 의해 산란되어 정확도가 저하된다는 사실을 실험적으로 입증한 바 있다. 또한 Filgueira 등<sup>5)</sup>은 다양한 표면 조건에 대한 LiDAR의 신호 감쇠 현상을 관찰하며 그 한계를 분석하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 제한된 환경 또는 인공 강우 상황에서 짧은 시간 동안 관찰한 데이터를 토대로 결과를 제시하였다. 따라서, 실제 운행 환경에서 LiDAR의 성능 변화를 지속적으로 모니터링하고, 강우에 따른 영향을 체계적으로 분석하는 연구는 여전히 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 실제 운영 환경에서 강우가 LiDAR 성능 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 항만 컨테이

\*Corresponding author, E-mail: [json@dgist.ac.kr](mailto:json@dgist.ac.kr)

<sup>†</sup>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.

너 터미널이라는 새로운 운영 환경에서 LiDAR 성능을 평가하고자 한다. 현재 부산항에서 운영 중인 소네트의 차대위치 유도시스템(Chassis Positioning System, CPS)<sup>6)</sup>에 사용된 LiDAR를 대상으로 실험을 실시하였다. CPS는 컨테이너 하역 작업 중 LiDAR 센서를 활용해 컨테이너의 위치를 정밀하게 안내하는 시스템이다. 본 연구에서는 CPS의 실운영 데이터를 활용하여 맑은 날씨와 강우 환경에서 동일한 관심영역(Region of Interest, ROI) 내의 LiDAR 포인트 밀도와 강도를 비교 평가하였다.

데이터 분석 과정에서 표면 특성(지면, 차대, 컨테이너 등)에 따라 데이터를 분류하였으며, 강우가 LiDAR 성능에 미치는 영향을 다각적으로 분석하였다. 연구 결과, 강우 환경에서는 LiDAR 데이터의 포인트 밀도와 신호 강도가 감소하여 컨테이너 위치 지정의 정확도가 저하되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 기존 연구에서 보고된 악천후의 부정적 영향과 일치하며, 강우가 LiDAR 성능에 부정적인 영향을 미친다는 점을 다시 한번 확인할 수 있었다.

이는 다양한 환경에서 LiDAR 기반 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 기술적 개선과 악천후에 대비한 대응 전략 개발의 필요함을 의미한다. 특히 신호 처리 알고리즘의 고도화 및 센서 융합 기술은 강우로 인한 성능 저하를 보완하는 데 유용한 해결책이 될 수 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 LiDAR 센서 사양 및 특성

본 연구에서는 3D 포인트 클라우드 데이터를 수집하기 위하여, Livox HAP LiDAR<sup>7)</sup>를 사용하였다. Livox HAP는 하이브리드 솔리드 스테이트(Hybrid Solid-State) 방식의 LiDAR 센서로, 기존 기계식 LiDAR 대비 높은 안정성과 긴 수명을 제공하며, 실시간으로 고해상도 3차원 데이터를 획득할 수 있는 특징을 가진다. 본 실험에 사용한 LiDAR의 주요 사양은 아래와 같다.

#### 시야각(Field of View, FoV):

Livox HAP는 120°(Horizontal) × 25°(Vertical)의 시야각을 제공한다. 이는 차량 전방 및 측면의 광범위한 영역을 커버할 수 있도록 설계되어 자율주행 시스템이 주변 물체와 장애물을 더욱 효과적으로 인식할 수 있도록 돕는다.

#### 각도 해상도(Angular Resolution):

해당 센서는 0.18°(Horizontal)×0.23°(Vertical)의 높은 각도 해상도를 제공한다. 이는 상대적으로 작은 물체나 복잡한 구조물도 정확하게 감지할 수 있음을 의미한다.

#### 데이터 수집 주기(Frequency):

Livox HAP는 10 Hz의 주기로 데이터를 수집하며, 이는 실시간으로 움직이는 물체나 급작스러운 상황 변화에 빠르게 대응하는 데 충분한 수준이다.

#### 초당 포인트 수(Point Rate):

본 연구에 사용한 LiDAR 센서는 초당 452,000 포인트를 생성할 수 있다. 이는 보다 세밀한 3차원 포인트 클라우드 생성을 가능하게 하며, 이는 복잡한 환경이나 다중 물체 감지에 특히 유리하다.

#### 강도 범위(Intensity Range):

각 포인트의 강도(Intensity)는 0-255 범위로 표현된다. 이 강도 정보는 물체의 반사율과 표면 특성을 분석하는데 활용되며, 악천후 환경에서 반사율 변화를 관찰할 수 있는 중요한 기준 데이터를 제공한다.

#### 레이저 파장(Laser Wavelength):

센서는 905 nm의 레이저 파장을 사용한다. 이 파장은 인체 안전 기준(IEC 60825-1 Class 1)을 만족시키며, 사람의 눈에 안전한 수준을 유지하면서도 안정적인 데이터 수집이 가능하다.

## 2.2 실험 조건

본 연구의 데이터는 항만 컨테이너 터미널에서 수집되었으며, 다양한 시나리오에 대해 자동으로 기록이 이루어졌다. 본 연구에서는 컨테이너가 트럭에 적재 및 하역되는 시나리오에 초점을 맞추어 분석을 진행하였다.

LiDAR 센서는 Fig. 1과 같이 갠트리 크레인(Gantry crane) 본체에 설치되어 있다. 또한, 강우가 LiDAR 성능에 미치는 영향을 비교 분석하기 위하여, 맑은 날과 비가

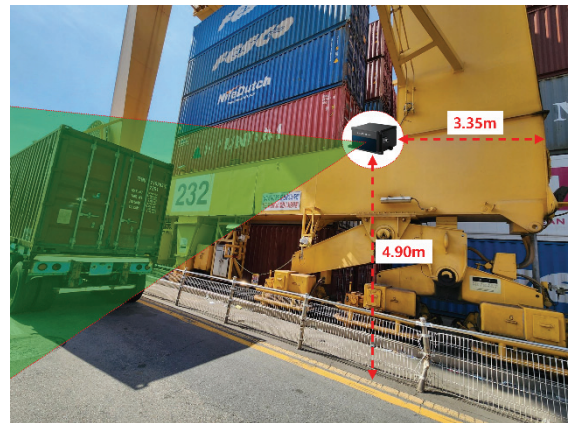


Fig. 1 Overview of the CPS apparatus

Table 1 Rain classification based on precipitation per hour

Classification	Precipitation per hour
Light rain	less than 3 mm/h
Moderate rain	3 to 15 mm/h
Heavy rain	15 to 30 mm/h
Very heavy rain	30 mm or more per hour

오는 날의 데이터를 사용하였다. 평균 습도는 67 %로 LiDAR 센서의 최적 성능을 내기 위한 권장 습도(40 ~ 60 %) 보다는 약간 높았지만, 성능에 큰 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 알려져 있다.

또한, 비가 오는 날의 평균 강우량은 8.9 mm/h를 기록하였다. 우리나라 기상청에서는 시간당 강수량에 따른 비의 세기 분류를 Table 1과 같이 정의하고 있으며, 본 연구에서 강우 실험은 보통 비(Moderate rain) 조건으로 진행되었음을 알 수 있다.

### 2.3 LiDAR 성능 지표

본 연구에서는 강우가 LiDAR 센서에 미치는 영향을 비교 분석하기 위한 정량적 지표로 포인트 수(Number of points)와 포인트 강도(Point intensity)를 사용하였다.

포인트 수(Number of points)는 LiDAR 센서가 특정 시간 동안 수집한 3차원 포인트 클라우드(Point cloud) 내의 점(Point)의 총 개수를 의미한다. 이 지표는 센서가 얼마나 많은 정보를 수집했는지, 그리고 해당 환경에서 신뢰할 수 있는 데이터를 제공했는지를 평가하는 중요한 기준이 된다. 포인트 수가 많을수록 객체의 형상 및 윤곽을 더욱 정확하게 재구성할 수 있으며, 강우가 심할수록 빔 방울로 인한 노이즈 포인트가 증가하거나 신호 감쇠로 인해 실제 물체로부터의 반사 포인트 수가 감소할 수 있다. 이러한, 포인트 수를 통해 LiDAR의 탐지 범위(Range detection)와 커버리지(Coverage)를 평가할 수 있으며, 다양한 거리와 표면 조건에서 포인트 수의 변화를 분석함으로써 LiDAR의 신뢰성을 평가할 수 있다. 선행 연구에 따르면 강우 환경에서 LiDAR의 포인트 수는 일반적으로 감소하는 경향을 보이며, 이는 물체 감지 및 식별 능력 저하로 이어질 수 있음을 의미한다.<sup>3)</sup>

다음으로, 포인트 강도(Point intensity)는 LiDAR 센서가 반환된 레이저 신호의 강도를 수치화한 값으로, 일반적으로 0에서 255 범위 내에서 표현된다. 여기서, Intensity 수치 0은 LiDAR 수신부에 반사되어 돌아온 레이저 펄스가 없다는 것을 의미하고, 255는 발산된 레이저가 전부 반사되었음을 의미한다. 일반적으로 0 ~ 100 사이의 수치는 일반적인 물체 표면에서 반사되어 돌아오는 레이

저 펄스의 강도이며, 100을 넘어가는 수치는 높은 반사도를 가진 물체에서 확인된다. 255는 대체로 재귀반사지에서 확인 되는 수치이다.<sup>8)</sup> 이 값은 레이저가 물체 표면에 반사되어 돌아오는 신호의 에너지 크기를 의미하며, 물체의 재질, 반사율, 거리, 조사각, 그리고 환경적 조건에 따라 달라질 수 있다.

즉, 강도 값이 높을 수록 해당 포인트가 신뢰할 수 있는 데이터임을 의미하며, 강우로 인해 빔방울이 신호를 산란시키거나 흡수하면 강도 값이 감소할 수 있다. 포인트 강도는 객체의 재질이나 표면 상태를 간접적으로 평가하는 데 유용하다. 강우 환경에서 강도 값의 변화를 분석함으로써 데이터 품질 저하를 정량화 할 수 있다. 선행 연구에서는 비가 내릴 때 포인트 강도가 감소하고 노이즈가 증가하는 경향이 있음을 실험적으로 입증한 바 있다.<sup>5)</sup>

상기 내용을 정리하면, LiDAR 성능 지수( $P_{index}$ )는 아래와 같은 수식으로 설명할 수 있다.

$$P_{index} = f(I, N) \tag{1}$$

where  $f$  : performance function  
 $I$  : point Intensity  
 $N$  : number of Points

$$I = \frac{P_t D_r^2 \eta_{atm} \eta_{sys} \rho}{4D^2} \cos \alpha_i \tag{2}^9$$

where  $P_t$  : laser transmission power  
 $D_r$  : receiver aperture  
 $\eta_{atm}$  : atmospheric transmittance  
 $\eta_{sys}$  : system efficiency  
 $\rho$  : target object reflectance  
 $D$  : distance between sensor and object  
 $\alpha_i$  : incidence angle

$$N = N_0 \cdot e^{-\beta D} \tag{3}$$

where  $N_0$  : maximum number of points under ideal conditions  
 $\beta$  : attenuation coefficient(increases with rain intensity)  
 $D$  : measurement distance

### 2.4 분석 방법

본 연구에서는 맑은 날과 강우 조건에서 수집된 총 19개의 LiDAR 데이터 기록을 무작위로 선정하여 분석을 진행하였다. 다양한 표면에서 LiDAR 성능을 평가하기 위해, Fig. 1과 같이 컨테이너 표면에서 1개 영역과 도로

표면에서 3개 영역을 선정하였으며, 도로 표면 영역은 각각 5 m 간격으로 배치되었다. 각 패치는 1 × 1 × 0.6 m 의 관심 영역(Region of Interest, ROI)으로 설정되었고, 각 ROI는 0.5초 동안 총 5개의 프레임 데이터를 수집하였다. 이를 통해 ROI 영역 내에서 포인트 수(Number of points)와 포인트 강도(Point intensity)를 측정하였다.

포인트 수는 취득한 데이터에서 ROI에 포함된 5개의 프레임 데이터를 평균하여 계산하였으며, 이는 해당 영역에서 LiDAR가 감지한 전체 포인트 수를 의미한다. 포인트 강도는 각 프레임에서 ROI 내의 모든 포인트 강도 값을 평균 내어 도출하였다.

다음으로, 표면 유형별로 맑은 날과 강우 조건 간의 성능 차이가 통계적 유의성을 검증하기 위하여, 독립 표본 t-검정을 실시하였다. 이를 통해 각각의 조건에서 포인트 수와 포인트 강도의 평균값에 유의미한 차이가 존재하는지 분석하였다. 또한, 날씨 조건(맑음, 강우)과 표면 유형(컨테이너, 도로)이 LiDAR 성능에 미치는 복합적 영향을 검토하기 위해 이원 분산 분석(Two-way ANOVA)을 수행하였다. 이 분석은 두 요인이 독립적으로, 또는 상호작용을 통해 LiDAR 성능 지표에 미치는 영향을 평가하기 위함이다.

본 연구의 분석 과정은 LiDAR 센서가 다양한 표면 및 날씨 조건에서 어떻게 성능 변화를 보이는지 체계적으로 검증하는 것을 목표로 하였다. 특히 강우가 LiDAR의 탐지 성능에 미치는 정량적 영향을 도출하고, 표면 유형과 날씨 조건 간의 상호작용을 평가함으로써 보다 신뢰성 있는 자율주행 시스템 구현을 위한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

### 3. 결과

본 연구에서는 맑은 날과 강우 조건에서 LiDAR의 성능을 비교 분석하기 위해 포인트 수(Number of points)와 포인트 강도(Point intensity)를 주요 성능 지표로 사용하였다. 각 표면 유형에서 날씨 조건에 따른 성능 지표의 변화는 Table 2와 같이 관찰되었다.

포인트 수(Number of points)는 맑은 날과 강우 조건 간에 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 컨테이너 표면에서는 맑은 날 평균 1588.66, 강우 조건 평균 1581.41로 거의 동일한 수준을 유지하였으며, 표준편차에서도 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 도로 표면에서도 비슷한 경향을 보였으며, 세가지 도로 영역 모두 맑은 날과 강우 조건 간의 평균 포인트 수가 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 강우가 LiDAR 포인트 수에 미치는 영향이 미미하다는 것을 의미하며, 물체의 형상과 윤곽을 인식

Table 2 Descriptive statistics on surface properties and weather conditions (\*\*\*)  $p < .001$

Metric	Surface	Clear		Rain	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.
Number of points	Container	1588.66	154.52	1581.41	192.85
	Road1	1295.87	296.86	1185.84	285.93
	Road2	1235.93	177.55	1234.32	177.78
	Road3	399.20	65.87	387.43	54.22
Intensity	Container	22.198	8.272	22.248	8.885
	Road1***	6.589	1.388	1.128	0.656
	Road2***	8.243	0.693	2.505	0.622
	Road3***	8.555	4.553	1.738	1.385

하는 데 있어 강우가 큰 방해 요인이 되지 않음을 시사한다.

반면, 포인트 강도(Intensity)에서는 날씨 조건과 표면 유형에 따라 뚜렷한 차이가 관찰되었다. 컨테이너 표면에서는 맑은 날(22.198)과 강우 조건(22.248) 모두에서 평균 포인트 강도 값이 유사하게 나타났으며, 이는 컨테이너 표면이 강우로 인한 반사 신호의 저감에 상대적으로 덜 민감함을 의미한다. 그러나 도로 표면에서는 맑은 날과 강우 조건 간에 강도 값이 현저하게 차이가 났다. 도로 1에서는 맑은 날 평균 강도 값이 6.589였으나, 강우 조건에서는 1.128로 급격히 감소하였다. 도로 2와 도로 3에서도 유사한 경향이 나타났으며, 각각 8.243에서 2.505, 8.555에서 1.738로 강우 조건에서 평균 강도 값이 크게 저하되었다. 이는 빗방울에 의한 레이저 신호 산란과 흡수, 그리고 도로 표면의 저반사율이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

통계검증 결과, 독립 표본 t-검정을 통해 도로 표면에서 맑은 날과 강우 조건 간의 포인트 강도가 유의미한 차이가 있음을 확인하였다( $p < .001$ ). 반면, 컨테이너 표면에서는 두 조건 간의 차이가 유의미하지 않았다.

또한, 이원 분산 분석(Two-way ANOVA) 결과, 포인트 수(Number of points)는 날씨 조건에 따른 유의미한 차이가 나타나지 않았다( $F(1,72) = 0.012, p = .9122$ ). 이는 맑은 날과 강우 환경에서 LiDAR 센서가 수집하는 포인트 수에 큰 영향이 없음을 의미한다. 또한, 날씨와 표면 유형 간의 상호작용 효과도 통계적으로 유의하지 않았다( $F(1,72) = 0.005, p = .9440$ ). 그러나 표면 유형은 포인트 수에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것이 확인되었으며( $F(1,72) = 76.377, p < .001$ ), 이는 표면의 물리적 특성이 LiDAR의 포인트 수 감지 능력에 중요한 요인임을 보여준다.

포인트 강도(Point intensity)의 경우, 표면 유형이 포인트 강도에 대해 매우 유의미한 주효과를 나타내었으며 ( $F(1,72) = 139.405, p < .001$ ), 이는 표면의 반사율과 물리적 특성이 포인트 강도의 핵심적인 결정 요인임을 의미한다. 또한, 날씨와 표면 유형 간의 교호작용 효과도 통계적으로 유의미하게 나타났다( $F(1,72) = 4.111, p = .0463$ ).

종합적으로, 강우는 LiDAR 포인트 수에 미치는 영향이 미미하지만, 포인트 강도에는 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 도로와 같은 저반사율 표면에서는 강우로 인해 강도 값이 크게 감소하며, 이는 LiDAR의 데이터 품질과 객체 인식 정확도에 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 반면, 컨테이너 표면에서는 날씨 조건에 따른 포인트 강도의 유의미한 변화가 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 강우 조건에서 LiDAR 성능 저하를 보완하기 위한 센서 보정 및 알고리즘 개선의 필요성을 의미하며, 자율주행 시스템에서의 LiDAR 데이터 처리의 신뢰성 확보를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 4. 토의 및 결론

본 연구에서는 항만 컨테이너 터미널의 실제 운영 환경에서 맑은 날씨와 강우 조건이 LiDAR 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 연구의 주요 성능 지표로 포인트 수와 포인트 강도를 선정하여 각 지표가 날씨 조건과 표면 유형(컨테이너, 도로)에 따라 어떻게 변화하는지를 평가하였다. 연구 결과, 포인트 수는 날씨 조건에 따른 차이가 크지 않았으나, 표면 유형에 따라 유의미한 차이를 보였으며, 포인트 강도는 날씨 조건과 표면 유형, 그리고 두 요인의 상호작용에 의해 유의미한 차이를 나타냈다.

이러한 결과는 기존 선행 연구와 부분적으로 일치하는 경향을 보였다. 먼저, 포인트 수에 대한 결과는 Montalban 등<sup>4)</sup>이 제시한 연구 결과와 유사하다. Montalban 등<sup>4)</sup>은 강우 조건에서 LiDAR의 포인트 수 감소가 크지 않다고 보고한 바 있다. 이는 LiDAR 센서가 상대적으로 빔방울을 포인트로 잘못 감지하거나 신호를 감쇠시키는 영향이 포인트 수의 절대적인 감소로 이어지지 않았음을 의미한다. 그러나 강우로 인한 신호 산란이 포인트의 정확도를 저하시킬 가능성은 여전히 존재한다. 예를 들어, LiDAR 센서가 먼 거리에 있는 객체를 감지할 때, 포인트 수가 부족하면 객체의 형상과 윤곽이 불명확하게 되어 객체 인식 정확도가 저하될 수 있다. 도로 표지판이나 신호등과 같이 크기가 작고 중요한 원거리 객체를 인

식해야 하는 상황에서는 강우로 인한 소량의 포인트 소실도 심각한 문제가 될 수 있다. 또한, 도로 위의 작은 장애물(예, 작은 돌덩어리, 낙하물 등)이나 동물과 같은 작은 객체는 LiDAR 포인트가 충분히 수집되지 않으면 객체로 인식되지 않을 수 있다. 특히 자율주행 시스템에서는 이러한 작은 객체의 누락이 사고로 이어질 수 있으므로 주의가 필요하다. 이와 같이 포인트 수는 원거리나 작은 객체 탐지와 같은 상황에서 객체 인식 정확도에 중요한 역할을 한다.

반면, 포인트 강도에 대한 결과는 기존 연구와 유사한 맥락을 유지하면서도 표면 유형에 따라 상이한 경향을 보였다. Filgueira 등<sup>5)</sup>은 강우가 LiDAR 신호 강도를 저하시키는 주요 요인으로 작용한다고 보고했으며, 본 연구에서도 도로 표면에서 포인트 강도가 강우 조건에서 현저히 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 도로 표면의 낮은 반사율과 강우로 인한 빔방울의 산란 및 흡수가 결합된 결과로 해석된다. 하지만 컨테이너 표면에서는 날씨 조건에 따른 강도 값의 차이가 거의 나타나지 않았으며, 이는 컨테이너 표면의 재질 특성이 빔방울로 인한 신호 감쇠에 덜 민감하기 때문으로 추론된다.

또한, 날씨 조건과 표면 유형 간의 상호작용 효과가 포인트 강도에 유의미하게 작용했다는 점은 선행 연구에서 다루어진 내용보다 한 단계 더 구체화된 분석 결과로 해석될 수 있다. 기존 연구에서는 주로 단일 표면 유형에서의 성능 저하를 다루었지만, 본 연구에서는 서로 다른 표면 유형과 날씨 조건의 결합이 포인트 강도에 미치는 복합적 영향을 체계적으로 분석하였다. 이 결과는 자율주행 시스템에서 강우 조건에 따라 표면 유형별로 상이한 대응 전략이 필요함을 시사한다.

특히 도로와 같은 저반사율 표면에서는 강우로 인해 LiDAR 신호가 현저히 약화되기 때문에, 이를 보완하기 위한 신호 처리 알고리즘과 다중 센서 융합 기술이 필수적일 것이다. 반면, 컨테이너와 같은 고반사율 표면에서는 상대적으로 강우의 영향을 덜 받기 때문에 기존 LiDAR 데이터 처리 방식만으로도 일정 수준의 신뢰성을 유지할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 결과는 실제 자율주행 환경에서 환경별로 차별화된 LiDAR 센서 운영 및 데이터 처리 전략을 마련해야 한다는 기술적 요구를 뒷받침한다.<sup>10)</sup> 본 연구의 결과는 표면 재질 및 다양한 환경 조건에서의 LiDAR 성능 변화를 심층적으로 분석함으로써 복잡한 운영 환경에서의 시스템 안정성을 강화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

결론적으로, 본 연구는 항만 컨테이너 터미널이라는 실질적 운영 환경에서 LiDAR 센서의 성능 변화를 실증

적으로 검증함으로써 강우가 LiDAR 포인트 수와 포인트 강도에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 포인트 수의 경우 강우의 영향이 크지 않았지만, 포인트 강도에서는 표면 유형에 따라 뚜렷한 차이가 나타났으며, 날씨 조건과 표면 유형의 상호작용 효과 또한 유의미하게 작용했다. 이러한 결과는 강우 조건에서 LiDAR 기반 자율주행 시스템의 신뢰성을 유지하기 위해 신호 보정 알고리즘과 센서 최적화 기술이 필요함을 의미하며, 특히 도로 표면에서의 성능 저하를 보완하기 위한 기술적 접근이 요구된다.

향후 연구에서는 다양한 표면 재질과 기상 조건을 고려한 확장된 실험을 통해 LiDAR 성능 저하 요인을 보다 면밀히 분석할 필요가 있다. 또한, 강우 외에도 안개, 눈과 같은 다른 기상 요인들이 LiDAR 성능에 미치는 영향을 종합적으로 평가함으로써 보다 실질적이고 포괄적인 자율주행 시스템 개선 방안을 마련해야 할 것이다. 본 연구 결과는 LiDAR 기반 자율주행 시스템의 신뢰성 향상과 실질적 운영 효율성 제고를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원의 자율주행기술개발혁신사업(과제명: 지정구역기반 Point-to-Point 이동 Lv.4 승합차급 자율주행 차량플랫폼 기술개발, 과제번호: 20014361) 및 과학기술정보통신부 대구경북과학기술원 기관고유사업(24-IT-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

## References

- 1) M. Park and J. Son, "Reference Test Scenarios for Assessing the Safety of Take-over in a Conditionally Autonomous Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.27, No.4, pp.309-317, 2019.
- 2) Y. Li and J. Ibanez-Guzman, "LiDAR for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive LiDAR and Perception Systems," IEEE Signal Processing Magazine, Vol.37, No.4, pp.50-61, 2020.
- 3) Y. Zhang, A. Carballo, H. Yang and K. Takeda, "Perception and Sensing for Autonomous Vehicles Under Adverse Weather Conditions: A Survey," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.196, pp.146-177, 2023.
- 4) K. Montalban, C. Reymann, D. Atchuthan, P. Dupouy, N. Riviere and S. Lacroix, "A Quantitative Analysis of Point Clouds from Automotive LiDARs Exposed to Artificial Rain and Fog," Atmosphere, Vol.12, No.6, Paper No.738, 2021.
- 5) A. Filgueira, H. González-Jorge, S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño and P. Arias, "Quantifying the Influence of Rain in LiDAR Performance," Measurement, Vol.95, pp.143-148, 2017.
- 6) SONNET.AI, Retrieved from <https://www.sonnet.ai>, Accessed on 2024-12-10.
- 7) Livox Technology Company Limited, Retrieved from <https://www.livoxtech.com/hap/spec>, Accessed on 2024-12-10.
- 8) B. Park and J. Kim, "A Study of LiDAR's Performance Change by Road Sign's Color and Climate," Journal of Korea Institute of Intelligent Transportation Systems, Vol.20, No.6, pp.228-241, 2021.
- 9) A. G. Kashani, M. J. Olsen, C. E. Parrish and N. Wilson, "A Review of LiDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration," Sensors, Vol.15, No.11, pp.28099-28128, 2015.
- 10) H. S. Cho, Y. Park, M. Park and J. Son, "Study on Designing Scenarios to Evaluate Adverse Condition Positioning for Highly Reliable Autonomous Driving," Transactions of KSAE, Vol.31, No.12, pp.1021-1037, 2023.