

자율주행차량 모바일 LiDAR의 실내외 성능 비교 연구

A Research on Autonomous Mobile LiDAR Performance between Lab and Field Environment

김지윤* · 박범진** · 김지수***

* 주저자 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 박사후연구원

** 교신저자 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원

*** 공저자 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 전임연구원

Ji yoon Kim* · Bum jin Park* · Jisoo Kim*

* Dept. of Highway & Transportation Research, KICT

† Corresponding author : Bum jin Park, park_bumjin@kict.re.kr

Vol. 22 No.4(2023)
August, 2023
pp.194~210

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.4.194>

Received 4 August 2023
Revised 15 August 2023
Accepted 18 August 2023

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요약

자율주행차량에서 핵심적인 역할을 수행하는 LiDAR는 운전자의 눈을 대신하여 주변 환경을 감지하는 데 활용되며, 그 역할이 점차 확대되고 있다. 이에 따라 최근에는 자율주행차량에 장착된 LiDAR의 성능을 시험하는 요구가 높아지고 있다. 많은 LiDAR 성능 시험은 시뮬레이션 및 실내환경에서 수행되고 있어, 실외환경 및 실도로 환경에서의 시험은 미미한 상황이다. 이에 본 연구는 LiDAR 성능을 실내와 실외에서 동일한 조건으로 비교하여, 실내의 시험 간의 관계를 확인하고, 각각의 특징과 역할을 정립하고자 하였다. 실험결과 조광환경(직사광선, 실내) 및 검지물체에 따라 LiDAR 감지성능이 달라지는 것을 확인하였다. 특히, 거리증가와 강우량 증가에 따른 Intensity 감소 영향은 실외에서 보다 크게 나타남에 따라 물체에 대한 LiDAR 감지 성능 시험 시 실내의 실험이 모두 필요함을 제시하였다. 본 연구의 결과는 LiDAR 센서 활용 연구 수행 기관 및 LiDAR 대응 시설물 연구 기관에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : LiDAR, LiDAR 성능, 성능시험, 강우, 직사광선

ABSTRACT

LiDAR plays a key role in autonomous vehicles, where it is used to detect the environment in place of the driver's eyes, and its role is expanding. In recent years, there has been a growing need to test the performance of LiDARs installed in autonomous vehicles. Many LiDAR performance tests have been conducted in simulated and indoor(lab) environments, but the number of tests in outdoor(field) and real-world road environments has been minimal. In this study, we compared LiDAR performance under the same conditions lab and field to determine the relationship between lab and field tests and to establish the characteristics and roles of each test environment. The experimental results showed that LiDAR detection performance varies depending on the lighting environment (direct sunlight, led) and the detected object. In particular, the effect of decreasing intensity due to increasing distance and rainfall is greater outdoors, suggesting that both lab and field experiments are necessary when testing LiDAR detection performance on objects. The results of this study are expected to be useful for organizations conducting research on the use of LiDAR sensors and facilities for LiDAR sensors.

Key words : LiDAR, LiDAR performance, Performance test, Rainfall, Direct sunlight

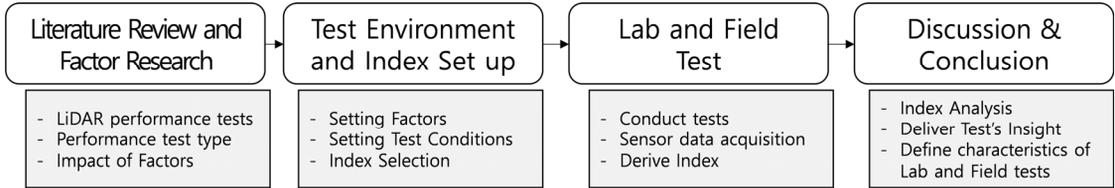
I. 서 론

자율주행차량의 상용화를 위하여 자율주행 핵심기술 발전이 이루어지고 있다. 자율주행 핵심기술 중 하나인 센서기술은 운전 시, 운전자의 눈이 수행하는 역할과 같은 주변 환경을 감지하는데 활용된다.(KICT, 2021) 자율주행차량은 영상, 레이더, 라이다, 초음파 등의 다양한 센서를 활용하며, 자율주행차량에서의 성능과 활용 영역도 지속적으로 발전하고 있다. 특히, 현재의 자율주행기술을 주도하는 센서는 LiDAR(The Light Detection and Ranging, 이하, 라이다)이다(Li and Ibanez-Guzman, 2020). 라이다는 짧은 순간에 주변의 환경을 3차원으로 감지할 수 있기 때문에 자율주행차량과 ADASs(Advanced Driver Assistance Systems)뿐만 아니라 이동 로봇, 항공측량, 대형SOC 구조물 등의 관리에도 다방면으로 사용된다(Park et al., 2023). 실제로 제네시스와 아우디 등의 상용차에는 이미 프랑스 업체인 발레오사의 LiDAR를 장착하여 주변감지에 활용하고 있다(Etnews, 2023). 주변 환경을 감지하는데 장점을 가지는 모바일 LiDAR는 도로 환경 감지하는 기존 역할과 더불어 차량 측위보정과 돌발상황 인지 등으로 자율주행차량에서의 활용 영역도 지속적으로 확대되고 있다(Kim and Park, 2022b). 자율주행차량용 모바일 LiDAR의 역할 확대에 따라 정확한 성능평가에 대한 요구가 있으나, 자율주행용 LiDAR는 2000년대에 비로서 상용화되었기 때문에 기술발전 역사가 짧아, 평가방법, 영향요인, 사용하는 성능지표 등이 정립되지 않았다(Kim et al., 2021).

이러한 요구에 기인하여 최근에는 LiDAR 성능 평가가 활발히 이루어지고 있다. 자율주행차량을 위한 LiDAR 성능평가는 LiDAR 제조사에서 제시하는 성능을 시험하는 것과 LiDAR가 자율주행차량에 장착되어 부여받은 역할을 시험하는 종류로 구분할 수 있으나, 최근 자율주행기술에서 요구하는 LiDAR 성능평가의 관심 사항은 후자에 집중된다. 이에 최근에는 시뮬레이션 성능평가(Goodin et al., 2019), 실내 성능평가(Heinzler et al., 2019; Montalban et al., 2021), 실제도로·실외 성능평가(Kim and Park, 2022b; Kim et al., 2021; Kim et al., 2023b; Tang et al., 2020), 실 도로상을 주행한 자율주행차량의 데이터를 직접 활용하는 다이내믹 성능평가(Park et al., 2023) 등으로 LiDAR 성능시험을 지속적으로 진행한다. 최근 성능시험 문헌들은 다음과 같은 결과를 주장한다. LiDAR는 해상도가 높은 영상을 지속적으로 취득할 수 있으며, 거리정확도는 매우 우수하다. LiDAR가 영상 센서에 비하여, 날씨·기상 환경의 영향에 보다 강건한 것은 사실이나, 눈과 비, 특히 안개 시에 성능이 떨어진다. 또한, 대다수의 문헌에서 시뮬레이션보다는 실제 도로환경에서 더 많은 연구가 수행되어야 하고, 실내에서 보다 실제 도로 위를 주행하면서 얻은 데이터를 취득하여 성능을 평가해보아야 정확한 결과를 확인할 수 있다(Kim et al., 2023b). 하지만, 실제 도로에서 성능평가를 수행한 문헌에서는 실제 도로에서의 데이터 취득은 번거롭고 어려우며, 데이터의 축적과 기상 등의 다양한 환경의 구현과 반복 시험은 시뮬레이션이나 실내 시험이 간편함을 언급하기도 한다. 이는 야외 실험 환경 구성의 어려움도 원인으로, 국내에서는 실외 도로 상에서 눈, 비, 안개 등을 제어하는 시설이 한국건설기술연구원의 기상재현도로실증센터와 K-City 등 소수에 불과하다(KICT, 2021). 결과적으로 최근의 연구동향은 LiDAR의 정확한 성능을 확인하기 위해서 실 도로상의 성능평가를 주장하지만, 현실적인 이유로 실내위주의 성능 평가로 LiDAR의 성능을 판단하는 것으로 보인다.

본 논문은 LiDAR의 성능을 실내(Lab)와 실외(Field)에서 동일한 조건으로 비교하고자 한다. 실내외에서 동일한 취득 데이터의 차이를 통해 성능의 차이와 실내외 시험 간의 관계를 알아보고, 실내시험과 실외시험의 각각의 특징과 역할을 정립하는 것이 목적이다. LiDAR 성능의 실내외 비교는 실외 평가가 어려울 때, 실내 실험만으로 성능을 예측할 수 있으며, 지금의 ITS(Intelligent Transportation System)에서 수행하는 교통정보 감지기, 레이더 감지기 성능평가와 동일한 형태로 발전되어 인증제도로 정착될 가능성도 있다. 자율주행차량에서 LiDAR의 역할이 증대될수록 이러한 요구는 증대될 것으로 기대된다.

이러한 목적을 달성하기 위해서 본 연구는 <Fig. 1>의 절차대로 진행하였다.



<Fig. 1> Process of research

II. 선행연구검토

1. LiDAR 개요

LiDAR는 최초 항공에서 지면의 온도, 습도, 시정 및 지형정보를 수집하기 위하여 개발되었으며, 항공 LiDAR(Airborn LiDAR)는 위성공간정보기술(Global Navigation Satellite Systems)이 각광받기 시작한 90년대에 상용화되었다(Beraldin and Blais, 2010). 자율주행차량 혹은 교통정보수집용으로 도로에서 사용되는 모바일 LiDAR는 항공LiDAR와 흡사한 기술이며 최근의 자율주행차량 센서기술 발전을 주도하고 있다(Li and Ibanez-Guzman, 2020). LiDAR는 근적외선 대역인 760nm~1900nm 파장의 레이저를 검지 물체에 조사하여 거리를 측정한다. 자율주행차량에서는 주로 905nm 파장과 TOF(Time of Flight)방식을 활용하는 LiDAR가 보편적으로 활용되고 있다. LiDAR는 도로 주변 환경의 3차원 정보를 점군데이터(Point Cloud)형태로 고해상도로 제공하며, 높은 정확도의 거리정보뿐만 아니라 센서가 검지한 반사 강도(intensity)도 제공한다(Chen et al., 2021). 이러한 이유로 자율주행차량에 장착되는 센서로 LiDAR의 활용 영역도 꾸준히 증가하고 있다(Kim et al., 2023a). 최근 자율주행차량은 동적인 물체인 보행자, 신호등, 주변 차량, 자전거, 오토바이 등의 정보들을 수집하는데 LiDAR에 의존하며(Tang et al., 2020), 가장 기술적으로 높게 평가하는 구글의 웨이모 역시 돌발 물체 등의 검지에 활용한다(Jeon and Kim, 2021). 장애물이나 시설물 검지 외에도 정밀지도기반의 자율주행에서 필수적인 측위(localization) 지원 역할을 수행하기도 하는데, 주변의 차선과 표지판 등의 도로시설물을 인식하고, 미리 만들어진 Intensity Map과 시설물의 위치를 맵매칭(Map Matching)하거나, GPS 기반의 절대측위를 보정하는 데에도 활용하는 등 활용영역이 넓어지는 추세이다(Park, 2022).

2. LiDAR 성능평가 및 성능지표 조사

자율주행차량에서 LiDAR가 점차 핵심 역할을 부여받게 되면서, LiDAR의 성능에 대한 이슈가 자연스럽게 대두되었다. 특히, 자율주행차량에 직접 장착된 LiDAR가 업체에서 제시한 초기 성능에 부합되는가와 기상 변화에 따른 성능이 얼마나 잘 유지하는지에 대한 궁금증이 발생되었다. 이러한 이유로 최근에는 LiDAR의 성능시험과 시험방법, 지표 등을 선정하고, 이를 실제 시험하는 연구가 점차 진행되고 있다. 초창기 LiDAR 성능평가는 주로 시뮬레이션이나 실내시험으로 진행되었으나, 현재는 실외나 실제 자율주행차량이 거동한 후 발생된 데이터를 직접 분석하는 다이나믹 시험까지 진행 중에 있다. 이러한 성능시험의 대표적인 사례를 본 논문에서는 유형별로 구분하여 간단히 소개하고자 한다.

Goodin et al.(2019)은 LiDAR의 성능을 시뮬레이션을 통하여 시험하였다. 객관적인 성능을 확인하기 위하여 사용한 성능지표로는 최대인식거리(Max Range), 포인트 클라우드의 개수(Numbers of Point Cloud, 이하 NPC), 물체 검지 거리(Obstacle Detection Range)를 활용하였다. 영향변수는 강수량으로 설정하고, 우천시의 성능저하를 관찰하였다. 우천 시 성능저하의 원인을 레이저의 빔방출 산란되어 되돌아오는 포인트의 개수가 줄어들기 때문임을 주장하였다.

Heinzler et al.(2019)은 기상환경 재현이 가능한 실내 챔버(Climature Chamber)에서 LiDAR의 성능을 시험하였다. 실내라는 공간적 특성상, 검지 물체와 LiDAR의 거리는 최대 20m로 다소 짧다. 하지만, 실외와 비교하여 기상 영향변수 제어가 강수량은 5mm, 시정거리는 10m 단위까지 자유롭게 제어할 수 있는 장점이 있다. 정밀한 시정거리 조절 기능은 실외와 큰 차별성으로 한국의 실외 기상재현 센터인 연천 센터에서는 시정거리 10m 단위의 제어는 불가능하다. 사용한 성능지표로는 NPC와 intensity(반사강도, 이하 Intensity), epw(echo pulse width, threshold를 초과하여 반사된 펄스의 폭)를 활용하였고, 영향변수인 비(강수량)과 안개(시정거리)에 강도에 따라 성능이 저하됨을 밝혔다.

Kim et al.(2021)과 Kim et al.(2023b)은 한국의 연천 기상재현센터의 실제 주행로에서 실외 LiDAR 성능평가를 진행하였다. 시험에서는 기상 영향변수를 안개(시정거리 50m 단위)와 비(강수량 최대 40mm)로 선정하였고, 특히, 물체의 재질을 영향변수로 보고 실제 표지판에 활용되는 재질을 LiDAR 타겟을 제작하여 시험하였다. 실외 시험결과, 안개와 강수에 따라 LiDAR는 성능지표 NPC와 Intensity의 값이 하락하였으며, 특히, LiDAR와 물체의 검지거리에 따라 값의 차이는 발생하지만, 강수량 40mm이상, 시정거리 50m이하에서는 급격한 하락이 발생되며, 하락 정도는 재귀반사시트, 알루미늄, 플라스틱, 나무 재질 순임을 밝혔다.

Tang et al.(2020)은 실제 실외 주차장에서 보행자를 검지하는 LiDAR를 설치하고, 강우 시 실외평가를 실시하였다. 타 성능시험과는 다르게 보행자 인식알고리즘의 보행자 인식여부를 성능지표로 선정하여 시험하였다. 시험결과 강우시 보행자 인식오류가 맑은날에 비하여 33% 증가된다고 언급하였다.

Park et. al.(2023)은 실제 LiDAR가 장착된 자율주행차량이 시험운행하면서 취득한 데이터를 이용한 다이나믹 성능시험을 수행하였다. 다양한 기상 영향변수별 데이터 취득을 위하여 눈이 많은 미국의 알래스카, 강한 햇빛과 온도변화의 영향을 평가하기 위해서 미국 네바다 등에서 데이터를 취득하였다. 사용한 성능지표는 NPC, Intensity, 거리정확도 등과 특히 LiDAR 제조사에서 제시하는 레이저 주파수(Scan Frequency), 수직해상도(Field of view and Angular Resolution) 등도 성능지표로 포함하였다. 그들은 다양한 기상환경 변수는 LiDAR 성능에 심각한(significant) 영향을 준다고 밝혔으며, LiDAR 성능유지를 위하여 시뮬레이션이나 실외 평가 등이 지속적으로 진행되어야 함을 주장하였다.

기존 LiDAR 성능평가의 유형은 시뮬레이션, 챔버나 실내, 실외, 다이나믹으로 구분되며, 시험에 사용되는 영향변수는 비와 안개 및 직사광선과 같은 날씨 · 기상환경으로, 영향변수를 객관적으로 확인하기 위한 성능지표는 시험에 따라 다양하지만, NPC와 Intensity는 거의 모든 시험에서 활용되는 것으로 분석된다. 기상환경 영향변수는 시험 시, 환경구현과 제어가 비교적 쉽고, 현실에서도 가장 빈번히 발생하는 비의 영향을 주로 관찰하였다. 즉, 강수량에 따라 LiDAR의 성능은 하락됨을 기존 문헌을 통하여 알 수 있다. 본 논문의 목적이 실내와 실외에서 동일한 조건을 구현하여 데이터의 비교를 통하여 실내외 시험의 각각의 특징과 역할을 정립함에 있으므로, 본 논문은 최근 성능평가 문헌에서 주로 사용되는 성능지표 NPC와 Intensity 데이터를 비교하고자 한다. 또한 실내외에서 모두 구현 가능한 강우 영향변수를 고려하여 실내외 시험을 비교하였다. LiDAR의 검지 물체는 Reflection Material(이하 RM)과 알루미늄 패넬을 활용하여 물체 영향변수는 최대한 제거하였다. 실내외 실외의 조건은 다음 장에서 자세히 설명하겠다.

Ⅲ. 성능시험 방법론

1. 동일 환경 조건 설정

LiDAR 감지 성능에 영향을 미치는 영향변수는 LiDAR 센서의 기계적 측면(spec)과 LiDAR 센서가 감지하고 자하는 물체 측면(object), 환경 및 기상측면(climate)으로 구분할 수 있다. 기계적 측면은 채널수, 레이저의 파장과 강도, 해상도, 수직·수평각 등이 있으며, 물체측면으로는 물체와 LiDAR의 거리, 물체의 재질과 색상, 물체의 모양과 배치 등이 있고, 환경 및 기상측면은 햇빛, 온도, 습도, 비, 안개, 눈 등이 영향변수로 작용된다(Kim and Park, 2022a). 이에 본 논문에서는 <Table 1>과 같이 실내외의 환경조건을 구비하였다. 실외 실험은 연천에 위치한 기상재현도로실증센터에서, 실내 실험은 한국건설생활환경시험연구원의 실내 실험실에서 수행하였다. 동일한 LiDAR를 사용하여 실내외 비교 분석을 진행하였으며, 감지 물체 역시 실내외에서 동일한 알루미늄 및 RM 95, 50, 05까지 총 4종의 패널을 활용하였다. 실내외 모두 LiDAR 센서에서 10~30m까지 10m 단위로 거리를 설정하였으며, 비강우 상황과 강우상황을 구현하였다. 다만, 조광환경은 차이가 있어, 야외에서는 직사광선이 패널에 비추지는 환경을, 실내에서는 형광등 조광환경을 구현하였다. RM은 표면을 램버시안 반사가 되도록 열가소성 플라스틱 코팅한 패널로, 어느 각도에서도 동일한 반사율을 보여 레이저펄스를 활용하는 기기의 성능평가 및 검증에 활용되어 타겟으로 선정하였다.

<Table 1> Test Environments

Classification		Field test	Lab test
LiDAR	Sensor Spec	Ultra Puck 32ch (horizontal angular resolution : 0.1°~0.4°(5~20Hz) vertical angular resolution : 0.33°(minimum) vertical fov : 40°(-25°~+15°) points per second : 600,000 pts/s @single return	
	LiDAR mounting height	1.8m from ground (height of vehicle' ceiling)	1.7m from ground
Target Object Attribute	Target Object	Aluminum, RM95, RM50, RM05 (size: 50*50cm) ※ RM (Reflection Material) is designed to provide a consistent measure of reflectivity, e.g. RM-95 means 95% reflectivity.	
	Object Height	1.8m from ground (same as Lidar's height)	1.7m from ground (same as Lidar's height)
	Object angle	90°	
Environment and Climate	Distance	10, 15, 20, 25 and 30 m	
	Lighting	Direct sunlight (field)	LED (lab)
	Rainfall	0(clear), 20, 30 and 40 mm/h	

2. 성능지표 선정

실내외의 성능을 객관적으로 판단하기 위해서는 수치화된 성능지표가 필요하다. 기존의 성능 시험에서 주로 활용하는 NPC와 Intensity를 선정하여 이들의 데이터를 취득한 후 분석하였다. NPC는 LiDAR에서 발산된 뒤, 물체에 반사되어 Receiver로 돌아온 레이저 펄스의 수를 의미한다. LiDAR 데이터를 이용한 객체 인지는

군집화가 가능한 일정 규모 이상으로 포인트 클라우드가 취득되는 상황에서 수행된다. 따라서, NPC가 많을 수록 포인트 클라우드의 군집화가 유리하며, 물체의 형상을 정확하게 파악할 수 있다. 본 연구에서는 수식 (1)과 같은 측정 당 평균 NPC를 측정지표로 활용하였다.

$$NPC_{average} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \dots\dots\dots (1)$$

where,
NPC_{average} : average NPC
P_i : number of *ith* measurement's cloud point
n : number of measurement Point Cloud

Intensity는 LiDAR로부터 발산된 레이저펄스의 강도 대비 반사되어 돌아온 강도의 비율이다. LiDAR 장비의 제조업체에 따라 다를 수 있으나, 본 연구에서 활용한 Ultra Puck 장비는 0-255 범위로 수치가 제시된다. Intensity 수치 0은 LiDAR 수신부에 반사되어 돌아온 레이저 펄스가 없다는 것(threshold 이하)을 의미하고, 255는 매우 강한 강도로 반사되었음을 의미한다. 일반적으로 0~100 사이의 수치는 일반적인 물체 표면에서 반사되어 돌아오는 레이저 펄스의 강도이며, 100을 넘어가는 수치는 높은 반사도를 가진 물체에서 확인된다. 255는 대체로 재귀반사필름에서 확인 되는 수치이다. Intensity는 조사하는 물체의 조사각, 범위, 표면 재질, 색깔, 거칠기, 습도 등에 따라 상이할 수 있으나, 본 연구에서는 RM을 활용하고, 물체의 위치와 각도, 높이를 일정하게 설정하여, 이러한 상이한 결과 발생 확률을 낮췄다. 본 연구에서는 수식 (2)와 같은 점군의 평균 Intensity를 측정지표로 활용하였다.

$$I_{average} = \frac{\sum_{n=1}^k I_n}{k} \dots\dots\dots (2)$$

where,
I_{average} : average Intensity
I_n : Intensity of *nth* Point Cloud
k : number of Point Cloud

3. 성능 시험 시나리오

본 논문은 동일한 조건에서 실내외 시험을 수행한 후, 시험결과를 비교하여 각 시험의 특징을 알아보는 것이 목적이다. 이에 유의미한 비교를 위하여 다음의 <Table 2>와 같은 시나리오를 구성하여 실제 시험을 수행하였다.

<Table 2> Test Scenario

NO	climate	object	rainfall	distance	measure	
					field	lab
1	clear	RM95	0mm/h	10, 15, 20, 25 and 30 m	10 sec recorded each (5 frames extracted)	10 sec recorded each (100 frames extracted)
2		RM50				
3		RM05				
4		Aluminum				
5	rain	Aluminum	20mm/h			
6			30mm/h			
7			40mm/h			

IV. 성능시험 결과

본 절에서는 동일한 환경조건에서 수행한 실내외 실험결과의 성능지표에 대한 수치적 비교를 간략히 설명하고자 한다. 실험결과의 함의에 대해서는 5절, 연구결과의 의의에서 다루고 있다. 실험결과는 먼저 Intensity의 맑은 날(clear) 결과와 강우실험 결과를 제시하고, NPC의 맑은 날 결과와 강우실험 결과를 제시한다.

1. 성능지표 Intensity의 실내외 수치 비교

1) 맑은 날 패널별 비교

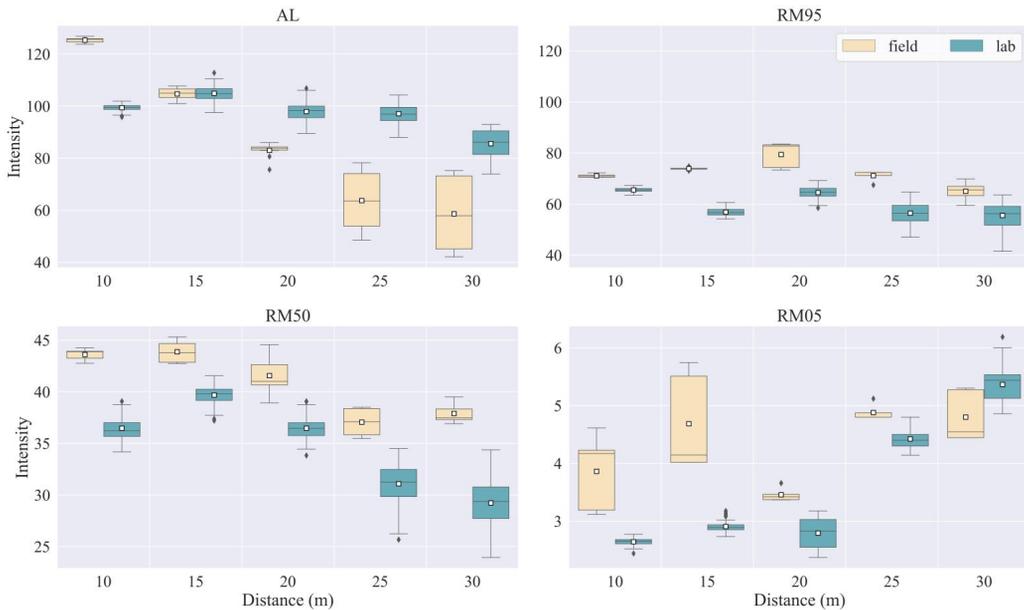
<Table 3>, <Fig. 2>는 패널의 재질별로 평균 Intensity를 측정, 비교한 자료이다. <Fig. 2>에서 각각의 그래프는 x축을 센서와 패널 간의 거리(m 단위)로, y축은 점군의 Intensity를 나타내고 있다. 그래프의 각 박스는 측정환경별로 제시되어 있으며, 실외(해를 마주본 상황, field), 실내환경(lab)으로 구분된다.

실험결과, 일반적인 금속 표면인 알루미늄은 실내가 실외보다 높은 Intensity 수치를 보이는 경우가 많았으며, 램버시안 반사 처리가 된 RM의 경우 실외에서 보다 높은 Intensity 수치를 보였다.

먼저 알루미늄의 경우 실외환경과 실내환경 모두 거리증가에 따른 Intensity감소가 동일하게 관측되었으나 감소폭에선 서로 간의 차이를 보였다. 10m에서는 실외가 실내 대비 약 25% 높은 수치를 보였으나, 거리증가에 따라 실외는 오히려 30m에서는 33% 낮은 수치를 보여 야외환경에서 감소가 나타났다. 반면 RM에서는 상이한 결과가 나타났다. RM95, RM50의 측정결과를 보면, 실내외 환경 모두 거리증가에 따른 Intensity 감소한다. 또한, 실외의 Intensity 측정치가 실내보다 대체로 높은 편으로 알루미늄과는 다른 결과를 보였다. 실내 대비 실외의 Intensity 수치 비율은 RM95의 경우 최대 31.8%, RM50의 경우 최대 37%로 큰 차이를 보였다. 이러한 실내외 Intensity 수치의 차이는 RM05에서도 나타났다. 이러한 편차는 직사광선이 검지 물체를 비추는 경우, 물체 표면의 특성에 따라 실내외와 실외간의 Intensity 측정치가 달라질 수 있음을 보여준다.

<Table 3> Statistics of Intensity by Object

Object	environment	distance									
		10 m		15 m		20 m		25 m		30 m	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
AL	lab	99.4	1.2	104.9	2.7	97.9	3.7	97.1	3.8	85.6	5.3
	field	123.9	2.2	104.7	2	82.7	2.7	65.4	10.2	57.3	11.9
	(field/lab)	24.6%		-0.2%		-15.5%		-32.6%		-33.1%	
RM50	lab	36.5	1.1	39.7	0.9	36.5	1	31.1	1.9	29.2	2.3
	field	46.8	3.4	45.2	1.6	42.3	2.3	40.2	3.5	40	2.4
	(field/lab)	28.2%		13.9%		15.9%		29.3%		37.0%	
RM95	lab	65.5	0.8	56.9	1.6	64.5	2.3	56.4	3.8	55.5	4.6
	field	73.2	2.3	75	1.4	75.7	5.2	68.6	3.4	67.7	4.4
	(field/lab)	11.8%		31.8%		17.4%		21.6%		22.0%	
RM05	lab	2.6	0.1	2.9	0.1	2.8	0.3	4.4	0.2	5.4	0.3
	field	4.5	0.9	3.8	1.1	3.4	0.1	4.6	0.3	5.7	1
	(field/lab)	73.1%		31.0%		21.4%		4.5%		5.6%	



<Fig. 2> Intensity Box Plots by Object (white dots - mean intensity)

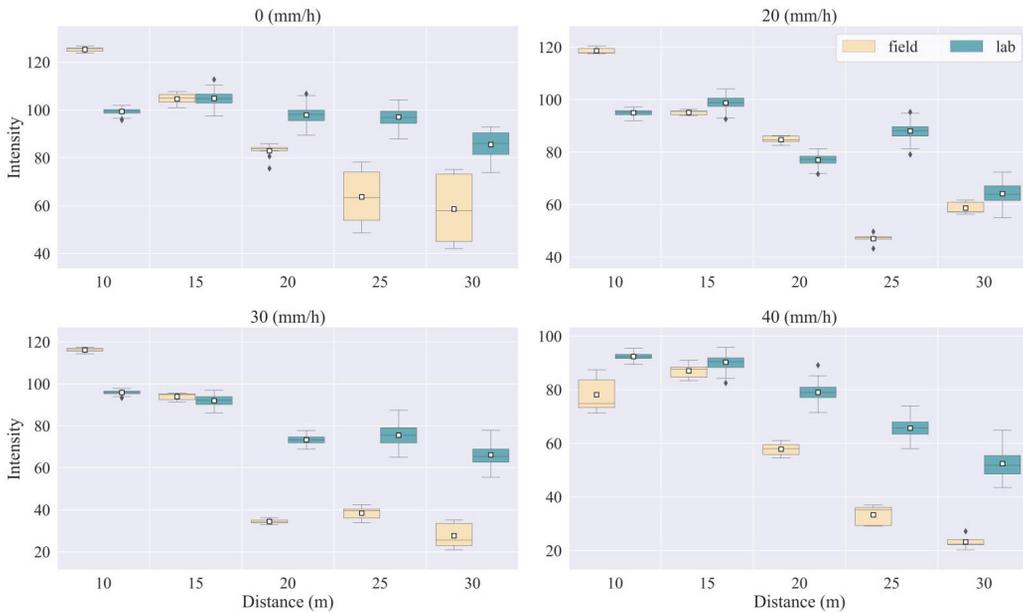
2) 강우량별 비교 (알루미늄)

<Table 4>, <Fig. 3>은 알루미늄 패널을 대상으로 강우량별 평균 Intensity를 측정, 비교한 자료이다. RM 패널에 대해서는 강우량별 측정을 수행하지 않았다. <Fig. 3>에서 각각의 그래프는 4가지 기상조건을(0, 20, 30, 40 mm/h) 의미하며, x축은 거리를(10, 20, 30, 40, 50m), y축은 Intensity를 나타내고 있다. 그래프의 각 박스는 측정환경별로 제시되어 있으며, 해를 마주본 상황(field), 실내환경(lab)으로 구분된다.

실험결과는 강우에 의한 Intensity 감소폭에 있어 실내와 실외의 편차가 발생하고 있음을 보여준다. 실내 대비 실외의 Intensity 수치 감소는 거리가 멀어질수록, 강우량이 많아질수록 더욱 커지는 경향성을 보였고, 가장 큰 편차는 30m 거리 및 30mm/h에서 확인되었다.

<Table 4> Statistics of Intensity by Rainfall (Aluminum)

distance	environment	rainfall							
		0mm/h(clear)		20 mm/h		30 mm/h		40 mm/h	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
10 m	lab	99.4	1.2	95.0	1.1	95.9	0.9	92.4	1.2
	field	123.9	2.2	118.6	1.3	116.1	1.2	78.1	7.0
	(field/lab)	24.6%		24.8%		21.1%		-15.5%	
15 m	lab	104.9	2.7	98.7	2.4	92.0	2.4	90.3	2.6
	field	104.7	2.0	95.1	1.0	93.9	1.8	87.0	3.0
	(field/lab)	-0.2%		-3.6%		2.1%		-3.7%	
20 m	lab	97.9	3.7	77.0	2.1	73.3	1.8	79.0	2.8
	field	82.7	2.7	84.7	1.5	34.4	1.3	57.8	2.6
	(field/lab)	-15.5%		10.0%		-53.1%		-26.8%	
25 m	lab	97.1	3.8	88.1	2.9	75.5	4.6	65.7	3.4
	field	65.4	10.2	47.0	2.3	38.4	3.4	33.3	3.8
	(field/lab)	-32.6%		-46.7%		-49.1%		-49.3%	
30 m	lab	85.6	5.3	64.1	3.6	66.1	5.0	52.4	4.7
	field	57.3	11.9	58.7	2.4	27.6	6.4	23.2	2.6
	(field/lab)	-33.1%		-8.4%		-58.2%		-55.7%	



<Fig. 3> Intensity Box Plots by Rainfall (Aluminum Only)

전체적으로 확인되는 패턴은 강우량 증가에 따라 실내외 모두 Intensity가 감소하는 패턴이다. 이는 LiDAR의 작동원리에 따라 레이저펄스가 빗방울에 산란, 흡수되어 발생하는 현상으로 선행연구의 결과와도 일치되는 결과를 보였다. 거리별로 살펴보자면, 10m 거리에서는, 강우량 30mm/h까지는 실외의 Intensity가 보다 높았으나, 40mm/h에서 실내가 보다 높은 Intensity 수치를 보였다. 이러한 강우량 증가에 따른 실외-실내 Intensity 편차의 증가는 대부분의 거리조건에서 확인된다. 20m 거리에서는 30mm/h 강우량에서 실외의 Intensity는 실내보다 53% 낮았으며, 25m와 30m 거리에서도 30mm/h 이상 강우량에서는 실내외 Intensity 편차가 매우 크게 나타났다.

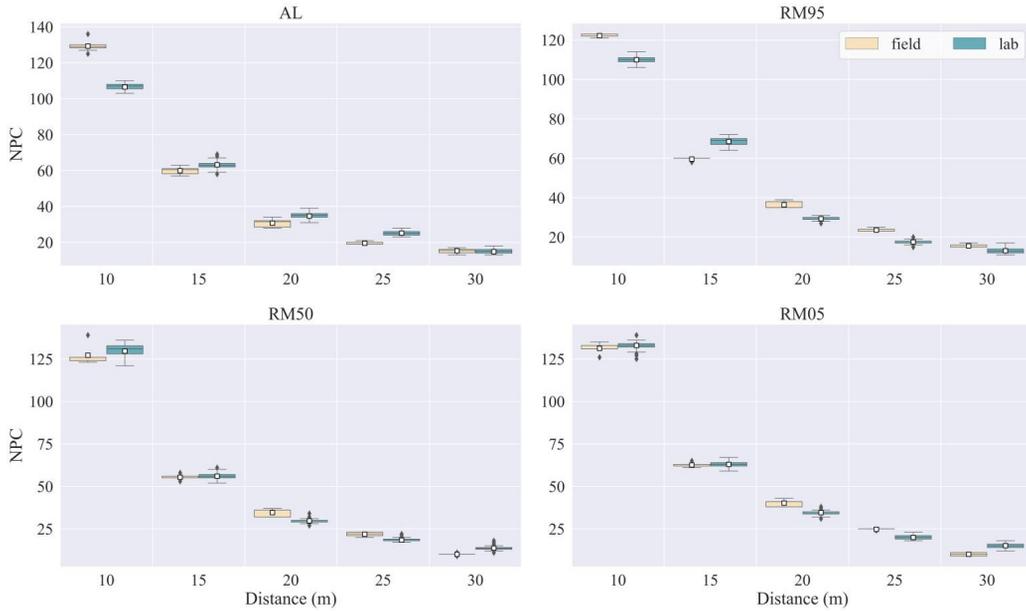
2. NPC 비교

1) 맑은 날 비교 (패널별)

<Table 5>, <Fig. 4>는 패널의 재질별로 평균 NPC를 측정, 비교한 자료이다. 실험결과, 실내외 모두 기준 성능평가와 동일하게 NPC가 검지거리에 크게 영향을 받으며, 실내외의 NPC 차이는 두드러지지 않는 것으로 관측된다. 다만, 반사도가 일정 이상이며(알루미늄 패널 및 RM95), 거리가 10m로 근접한 상황에서는 실외환경의 NPC가 실내환경 대비 12~20% 높은 것으로 측정되었다. 15m 이상의 거리이거나, 반사도가 낮은 RM50, RM05에 대해서는 일정한 패턴의 NPC 측정 편차를 확인하기는 어려웠다. 다만, 거리증가 시 실내외 NPC 편차는 수치적으로 점차 작아지는 패턴이 확인되었다.

<Table 5> Statistics of NPC by Object

Object	environment	distance									
		10 m		15 m		20 m		25 m		30 m	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
AL	lab	106.6	1.5	63.2	2.2	34.7	1.4	25.1	1.3	14.8	1.5
	field	127.4	3.7	58.7	2.5	30.5	2	19.1	0.9	15.5	1.2
	(field/lab)	19.5%		-7.1%		-12.1%		-23.9%		4.7%	
RM50	lab	129.6	4	56	1.8	29.7	1.2	18.4	1.2	13.7	1.5
	field	120.1	8.7	50.8	5.1	35.3	2.3	19.6	2.5	15.2	5.5
	(field/lab)	-7.3%		-9.3%		18.9%		6.5%		10.9%	
RM95	lab	110	1.5	68.5	2	29.3	0.9	17.5	1.2	13.1	1.3
	field	123.6	1.6	58.1	2.3	36.5	1.6	23.2	0.8	13	2.8
	(field/lab)	12.4%		-15.2%		24.6%		32.6%		-0.8%	
RM05	lab	133	2	63	1.8	34.5	1.5	20	1	15.1	1.2
	field	133.2	3.4	62.4	1.4	40.4	1.6	26.5	2.3	12.9	3.2
	(field/lab)	0.2%		-1.0%		17.1%		32.5%		-14.6%	



<Fig. 4> NPC Box Plots by Object (white dots - mean)

2) 강우량별 비교(알루미늄)

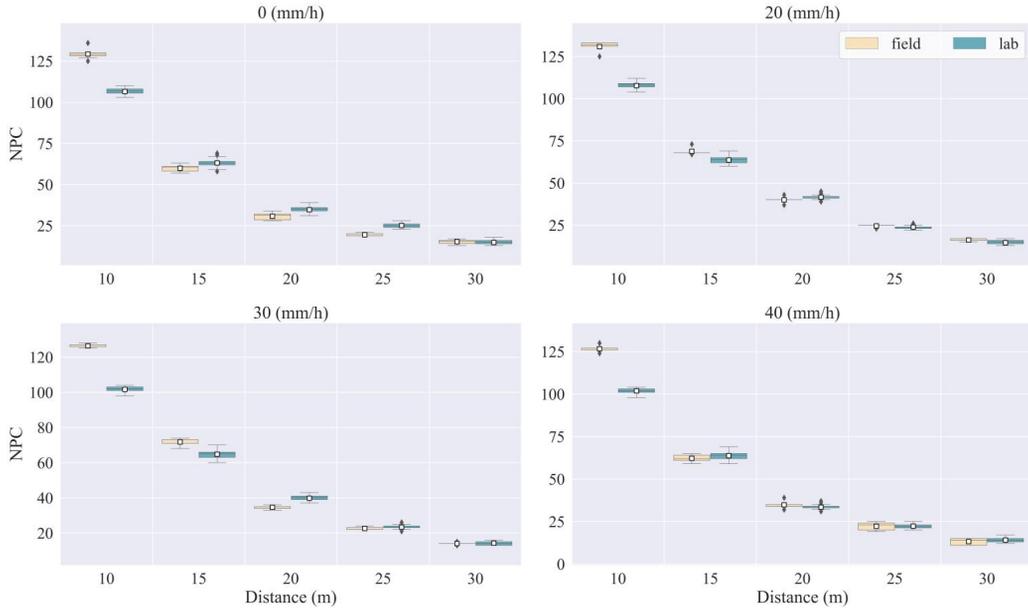
<Table 6>, <Fig. 5>는 알루미늄 패널을 대상으로 강우량별 평균 NPC를 측정, 비교한 자료이다.

실험결과, 10m 거리에서는 실외환경에서 실내환경대비 20~24% 높은 NPC가 관측되었다. 이는 Intensity 측정치에서도 실외가 높았던 결과와 일치하는 결과로 해석된다. 반면, 15m 거리부터는 실내외의 실외 간의 편차가 좁혀지거나 미미한 수준으로 나타났다. 이는 알루미늄이 충분히 높은 반사도를 지녀, 강우에 의한 반사도 저감에도 불구하고 LiDAR 센서에서의 검지는 가능했기에 발생된 결과로 보인다.

<Table 6> Statistics of NPC by Rainfall (Aluminum)

distance	environment	rainfall							
		no rain		20 mm/h		30 mm/h		40 mm/h	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
10 m	lab	106.6	1.5	107.7	1.5	101.7	1.3	101.9	1.3
	field	127.4	3.7	130.8	3.3	126.4	1.1	126.6	2.2
	(field/lab)	19.5%		21.4%		24.3%		24.2%	
15 m	lab	63.2	2.2	63.6	1.9	64.8	2.2	63.8	2.1
	field	58.7	2.5	68.8	2.4	71.8	2.4	62.2	2.4
	(field/lab)	-7.1%		8.2%		10.8%		-2.5%	
20 m	lab	34.7	1.4	41.6	1.4	39.8	1.3	33.4	1.1
	field	30.5	2.0	40.0	2.1	34.6	1.1	34.8	2.6
	(field/lab)	-12.1%		-3.8%		-13.1%		4.2%	
25 m	lab	25.1	1.3	23.9	0.9	23.3	1.0	22.3	1.1
	field	19.1	0.9	24.6	0.9	22.6	0.9	22.2	2.6

distance	environment	rainfall							
		no rain		20 mm/h		30 mm/h		40 mm/h	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
	(field/lab)	-23.9%		2.9%		-3.0%		-0.4%	
30 m	lab	14.8	1.5	14.6	1.2	14.2	1.0	14.1	1.2
	field	15.5	1.2	16.2	0.8	14.0	0.7	13.2	2.0
	(field/lab)	4.7%		11.0%		-1.4%		-6.4%	



<Fig. 5> NPC Box Plots by Object (white dots - mean)

3. 통계적 검정 (t-test)

1) Intensity 검정 결과

<Table 7>은 Intensity 측정치에 대한 t-test 결과이다. 통계적 유의성은 p-value 0.1 이내에서 알루미늄 15m 를 제외한 모든 실험에서 유의한 것으로 나타났다. 즉, 비강우 시 RM에 대해서는 실내대비 실외의 Intensity 수치가 높은 것이 대부분 유의한 편차임을 의미한다. 또한, 알루미늄에 대해서는 10m에서는 실외가 높고, 20m부터는 실내가 보다 높은 것이 통계적으로 유의함을 나타낸다.

알루미늄 패널의 강우실험에 대해서도 대부분 통계적으로 유의한 차이인 것으로 나타났다. 즉, 측정거리가 멀어지는 경우 실외환경의 Intensity가 실내환경에 비해 낮음이 통계적 유의성이 있었다.

<Table 7> t-test results of Intensity

object	rainfall (mm/h)	distance (m)	Mean Intensity		T	p-val
			field	lab		
AL	0	10	125.3	99.4	75.386	0.000 **
AL	0	15	104.7	104.9	-0.261	0.799
AL	0	20	83.0	97.9	-15.023	0.000 **
AL	0	25	63.7	97.1	-8.516	0.000 **
AL	0	30	58.6	85.6	-5.795	0.000 **
RM05	0	10	3.9	2.6	4.068	0.015 *
RM05	0	15	4.7	2.9	4.604	0.010 *
RM05	0	20	3.5	2.8	11.055	0.000 **
RM05	0	25	4.9	4.4	7.084	0.001 **
RM05	0	30	4.8	5.4	-2.802	0.046 *
RM50	0	10	43.6	36.5	24.594	0.000 **
RM50	0	15	43.9	39.7	8.217	0.001 **
RM50	0	20	41.6	36.5	5.306	0.006 **
RM50	0	25	37.1	31.1	9.139	0.000 **
RM50	0	30	37.9	29.2	16.767	0.000 **
RM95	0	10	71.1	65.5	17.065	0.000 **
RM95	0	15	73.9	56.9	51.596	0.000 **
RM95	0	20	79.4	64.5	6.491	0.003 **
RM95	0	25	71.1	56.4	14.466	0.000 **
RM95	0	30	65.0	55.5	5.262	0.004 **
AL	20	10	118.6	95.0	40.554	0.000 **
AL	20	15	95.1	98.7	-7.371	0.000 **
AL	20	20	84.7	77.0	10.936	0.000 **
AL	20	25	47.0	88.1	-37.989	0.000 **
AL	20	30	58.7	64.1	-4.81	0.005 **
AL	30	10	116.1	95.9	36.24	0.000 **
AL	30	15	93.9	92.0	2.29	0.074 .
AL	30	20	34.4	73.3	-65.562	0.000 **
AL	30	25	38.4	75.5	-23.186	0.000 **
AL	30	30	27.6	66.1	-13.329	0.000 **
AL	40	10	78.1	92.4	-4.543	0.010 *
AL	40	15	87.0	90.3	-2.348	0.074 .
AL	40	20	57.8	79.0	-17.464	0.000 **
AL	40	25	33.3	65.7	-18.573	0.000 **
AL	40	30	23.2	52.4	-23.28	0.000 **

note : Shaded cells are positive t values statistically significant at . 90%, * 95%, ** 99% levels.

2) NPC 검정 결과

<Table 8>은 NPC 측정치에 대한 t-test 결과이다. 패널별로 보면, 알루미늄은 비강우상황에서, 10m에서는 실외가 NPC 수치가 높았지만, 15m 부터는 실내대비 낮은 수치를 보였다. RM05 및 RM50의 경우, 20m 이상 거리에서 NPC 차이의 통계적 유의성이 있었으며, 20~25m에서는 실외가 크고, 30m에서는 실내가 보다 큰 수

치를 보였다. RM95의 경우 15m를 제외한 모든 측정거리에서 실외환경이 실내에 비해 높은 NPC를 보였다.

강우실험에 대해서는 주로 15m 이내의 근거리에서 통계적으로 유의한 차이가 일관되게 나타났다. 즉, 측정거리가 가까운 경우 실외에서 실내대비 높은 NPC가 측정되지만, 거리가 증가하는 경우, 실내의 NPC가 높거나, 통계적으로 유의한 차이가 없어진다.

<Table 8> t-test results of NPC

object	rainfall (mm/h)	distance (m)	Mean Intensity		T	p-val
			field	lab		
AL	0	10	129.3	106.6	25.023	0.000 **
AL	0	15	59.9	63.2	-4.723	0.001 **
AL	0	20	30.7	34.7	-5.828	0.000 **
AL	0	25	19.5	25.1	-21.467	0.000 **
AL	0	30	15.3	14.8	1.12	0.287
RM05	0	10	131.2	133.0	-1.19	0.297
RM05	0	15	62.6	63.0	-0.535	0.617
RM05	0	20	40.2	34.5	5.748	0.004 **
RM05	0	25	24.8	20.0	21.638	0.000 **
RM05	0	30	10.0	15.1	-11.007	0.000 **
RM50	0	10	127.2	129.6	-0.804	0.465
RM50	0	15	55.4	56.0	-0.745	0.494
RM50	0	20	34.6	29.7	4.512	0.010 *
RM50	0	25	21.8	18.4	5.769	0.003 **
RM50	0	30	10.0	13.7	-10.523	0.000 **
RM95	0	10	122.2	110.0	30.072	0.000 **
RM95	0	15	59.6	68.5	-19.54	0.000 **
RM95	0	20	36.4	29.3	8.072	0.001 **
RM95	0	25	23.6	17.5	14.565	0.000 **
RM95	0	30	15.6	13.1	5.894	0.002 **
AL	20	10	130.8	107.7	15.348	0.000 **
AL	20	15	68.8	63.6	4.762	0.008 **
AL	20	20	40.0	41.6	-1.723	0.158
AL	20	25	24.6	23.9	1.713	0.156
AL	20	30	16.2	14.6	4.027	0.011 *
AL	30	10	126.4	101.7	47.1	0.000 **
AL	30	15	71.8	64.8	6.421	0.002 **
AL	30	20	34.6	39.8	-9.961	0.000 **
AL	30	25	22.6	23.3	-1.689	0.159
AL	30	30	14.0	14.2	-0.708	0.511
AL	40	10	126.6	101.9	25.057	0.000 **
AL	40	15	62.2	63.8	-1.429	0.221
AL	40	20	34.8	33.4	1.18	0.302
AL	40	25	22.2	22.3	-0.081	0.939
AL	40	30	13.2	14.1	-0.953	0.393

note : Shaded cells are positive t values statistically significant at · 90%, * 95%, ** 99% levels.

V. 실험결과의 의의

본 연구는 LiDAR 활용 측정환경(실내외 조광환경 및 강우량, 측정대상)에 따른 측정치의 변화를 확인해 보았다. 실험결과, 검지 물체의 반사도에 따른 Intensity 수치의 변화, 거리증가에 따라 NPC와 Intensity의 감소, 기상 환경 악화에 따른 NPC와 Intensity의 감소는 기존의 연구결과와 일치하였다(Heinzler et al., 2019; Kim et al., 2021; Kim et al., 2023b; Park et. al., 2023).

반면, 기존 연구들과 달리 실내외 실험의 비교를 통해 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 먼저 Intensity의 경우, 1) 맑은 날에는 램버시안 반사 처리가 된 RM의 경우, 실외에서 Intensity 수치가 실내보다 높아진다. 2) 반사도가 높은 일반 표면은(알루미늄) 10m 내외에서는 실외가, 거리가 15m 이상으로 멀어지면 실내에서 보다 높은 Intensity 수치를 보인다. 3) 강우에 의한 알루미늄에 대한 반사도 저감 효과는 실외에서 실내보다 더욱 크게 발생한다. 다음으로 NPC의 경우, 1) 반사도가 50%를 초과하는 재질의 경우(알루미늄, RM95) 10m 거리에서 실외측정 NPC가 실내측정 NPC보다 높게 나타난다. 2) 반사도가 높은 알루미늄에 대한 강우의 실내외 실험환경 차이의 NPC에 대한 영향은 10m 거리에서만 실외가 높게 나타나며, 15~30m 거리 이내에서는 확인되지 않는다.

이러한 Intensity 및 NPC 측정결과 비교를 통해 LiDAR를 활용한 물체검지를 실험하거나 성능을 평가하는 경우 다음과 같은 주의가 필요함을 시사한다. 첫째, LiDAR의 시설물이나 물체별 검지성능을 검사·평가하는 경우 실내 및 실외 검사 모두 필요하다. 알루미늄에 대한 실험결과 측정거리 증가에 따른 Intensity 감소가 실외에서 더욱 크게 나타났다. 알루미늄은 충분히 높은 반사도를 지닌 물체라 NPC의 감소로 이어지지는 않았지만, 보다 낮은 반사도를 가지는 물체는 NPC의 감소도 있었을 것으로 예측된다. 둘째, 일반물체에 대한 강우시 검지성능 영향 역시 실내 및 실외 실험 모두 필요하다. 강우의 Intensity 저감효과는 실내보다 실외에서 보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 앞서와 마찬가지로 알루미늄은 충분히 높은 반사도를 지니, NPC에서는 변화가 미미하였지만, 반사도가 보다 낮은 물체는 30m 거리 이내에서도 실내에서는 관측되고, 실외에서는 관측되지 않는 현상이 발생할 수 있다. 셋째, LiDAR의 성능을 검증하는 경우 RM을 대상으로 실험 해야한다. 실험결과 10m의 근거리 상황이 아닌 경우 RM에 대한 LiDAR 측정결과는 실외와 실내가 유사하였다. 이는 LiDAR의 성능을 검증하기 위해 설계·제작된 RM의 특성대로 결과가 도출된 것을 의미하며, LiDAR를 활용한 반사도 성능검사를 하기전 LiDAR의 성능 검증이 우선되어야 함을 보여준다.

실내 실험은 실외환경과 달리 일정한 환경을 구성하는데 보다 용이하며, 실외보다 측정 및 데이터 생성이 수월한 장점이 있다. 하지만 이러한 결과는 LiDAR를 활용한 성능평가 또는 실험은 실내의 결과가 실외의 실험 결과를 담보하기는 어려우므로, 실내 및 실외환경 모두에서 이루어져야 함을 보여준다.

VI. 결 론

Kim and Park(2022a)은 LiDAR 성능의 영향을 미치는 영향변수를 LiDAR센서 기계적 측면과 LiDAR센서가 검지하고자하는 물체측면, 환경 및 기상측면으로 구분하였다. 기계적 측면은 채널수, 레이저의 파장과 강도, 해상도, 수직·수평각 등이 있으며, 물체측면으로는 물체와 LiDAR의 거리, 물체의 재질과 색상, 물체의 모양과 배치 등이 있고, 환경 및 기상측면은 햇빛, 비, 안개, 눈, 습도 등이 있으며, LiDAR의 활용 빈도와 영역이 커지면 커질수록 이에 따른 성능의 정확한 평가가 중요하게 다뤄질 것임을 주장하였다. 최근의 성능에 대한 연구는 이러한 주장을 뒷받침하는 결과로 해석된다.

본 연구는 동일한 센서(velodyne UltraPuck)를 활용하여 실내와 실외환경에서 수집된 데이터가 서로 다른 수치를 나타내는지 비교해보았다. 측정환경은 거리 및 기상조건은 동일하나 조광환경이 주요한 차별요인으로 실내에서는 형광등을 활용한 일반조광환경이, 실외에서는 해를 마주보고 있는 환경으로 설정하였다. 측정 대상은 반사율이 인증된 Reflection Material(이하 RM) 3종(95, 50, 05)과 알루미늄 패널을 활용하였다. 측정결과 RM에 대한 Intensity 수치는 실외에서 보다 높았지만, NPC는 서로 간의 큰 편차가 없었다. 단, 알루미늄을 대상으로 한 실험에서는 거리증가에 따른 Intensity 수치 감소가 실외에서 더욱 크게 나타났으며, 10m 거리에 선 실외에서 보다 높은 NPC 수치가 관측되었다. 이는 높은 반사도를 가진 RM95에서도 관측되었으며, 강한 태양광이 내리쬐는 환경에서는 근접한 거리에서의 LiDAR 처리 프로세스에서 보다 많은 점군이 인식되는 것으로 보여진다. 알루미늄만을 대상으로 한 강우실험에서도, 실외에서 실내 보다 큰 Intensity 감소가 확인되었다. 반사도가 비교적 높은 알루미늄은 30m 거리이내에서는 NPC가 실내보다 낮아지지는 않았지만, 반사도가 보다 낮은 물체라면 NPC 수치 역시 낮게 나타날 수 있다.

이러한 결과는 LiDAR의 검지능력 실험이나, 물체의 LiDAR 대응 검지성·반사도 실험을 수행하는 경우 실내외 환경 모두에서 검증이 필요함을 보여준다. 측정결과, 센서와 물체의 거리증가, 강우환경, 검지물체 표면의 특성, 조광환경에 따라 실내외의 Intensity 및 NPC 상이한 경우가 있기 때문이다. 특히, 강우의 영향은 실외에서 보다 크게 나타나, 악기상환경에 대한 실험은 외부에서도 필요한 것으로 보여진다. 또한, 검지거리를 30m 보다 멀리 하는 경우에도 실내에서는 공간의 제한이 있어 실외에서의 측정실험이 필수적이다.

본 연구는 LiDAR를 활용한 실험에서 실내외 환경의 차이가 실험결과에 미치는 차이를 확인하였다. 이러한 결과는 LiDAR 센서를 활용한 연구를 수행하는 기관 및 물체 및 시설물의 LiDAR 대응성능을 연구하는 기관에서 유용하게 활용될 것으로 기대된다. 그럼에도 다음과 같은 한계점이 있다. 본 연구에서는 오로지 velodyne UltraPuck 1종만을 검사하여, 타 센서에서도 이러한 차이가 발생하는지 실험을 통해 규명하지는 못했다. 또한, 실내외 실외에서 강우구현 장치의 미세한 차이로 인해 빗방울의 입자 크기, 속도 등은 완벽한 통제를 하지 못하였다. 특히, 차량 센서 성능에 지대한 영향을 미치는 안개의 경우도 환경 차이로 실험을 수행하지 못한 한계가 있다. 후속 연구에서는 이러한 환경차이를 보다 통제하고, 다양한 센서를 활용하여 실험결과를 제시하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21AMDP-C161924-01, 주관연구기관 과제명: 클라우드 소싱 기반의 디지털 도로교통 인프라 융합플랫폼 기술 개발 / 공동연구기관 과제명: 도로·교통 인프라 성능평가 방법론 개발 및 자율차 기반의 개발 인프라 검증)

REFERENCES

- Beraldin, J. and Blais, F.(2010), *Laser scanning technology: In Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, pp.1-42.
- Chen, C., Fragonara, L. Z. and Tsourdos, A.(2021), "RoIFusion: 3D Object Detection From LiDAR and Vision", *IEEE Access*, vol. 9, pp.51710-51721.

- ETnews, <https://www.etnews.com/20210122000133>, 2023.06.22
- Goodin, C., Carruth, D., Doude, M. and Hudson, C.(2019), “Predicting the Influence of Rain on LiDAR in ADAS”, *Electronics*, vol. 8, no. 1, p.89. doi: 10.3390/electronics8010089
- Heinzler, R., Schindler, P., Seekircher, J., Ritter W. and Stork, W.(2019), “Weather Influence and Classification with Automotive Lidar Sensors”, *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Paris, France, vol. 2019, pp.1527-1534. doi: 10.1109/IVS.2019.8814205
- Jeon, H. and Kim, J.(2021), “Analysis on Handicaps of Automated Vehicle and Their Causes using IPA and FGI”, *Journal of Korea Institute Intelligent Transportation System*, vol. 20, no. 3, pp.34-46.
- Kim, J. and Park, B.(2022), “A Research of Factors Affecting LiDAR’s Detection on Road Signs: Focus on Shape and Height of Road Sign”, *Journal of Korea Institute Intelligent Transportation System*, vol. 21, no. 4, pp.34-46.
- Kim, J. and Park, B.(2022), “A Study of LiDAR’s Detection Performance Degradation in Fog and Rain Climate”, *Journal of Korea Institute Intelligent Transportation System*, vol. 21, no. 2, pp.101-115.
- Kim, J., Kim, J. and Park, B.(2023), “A Research on Improving the Shape of Korean Road Signs to Enhance LiDAR Detection Performance”, *Journal of Korea Institute Intelligent Transportation System*, vol. 22, no. 3, pp.160-174.
- Kim, J., Park, B. and Kim, J.(2023), “Empirical Analysis of Autonomous Vehicle’s LiDAR Detection Performance Degradation for Actual Road Driving in Rain and Fog”, *Sensors*, vol. 23, no. 6, p.2972. doi: 10.3390/s23062972
- Kim, J., Park, B., Roh, C. and Kim, Y.(2021), “Performance of Mobile LiDAR in the Real Road Driving Conditions”, *Sensors*, vol. 21, no. 22, p.7461. doi: 10.3390/s2201010
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT)(2021), *Improved Road Infrastructures to Strengthen Driving Safety of Automated Driving Car Final Report*.
- Li, H., Bamminger, N., Magosi, Z. F., Feichtinger, C., Zhao, Y., Mihalj, T., Orucevic, F. and Eichberger, A.(2023), “The Effect of Rainfall and Illumination on Automotive Sensors Detection Performance”, *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p.7260, doi:10.3390/su15097260.
- Li, Y. and Ibanez-Guzman, J.(2020), “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.
- Montalban, K., Reymann, C., Atchuthan, D., Dupouy, P., Riviere, N. and Lacroix, S.(2021), “A Quantitative Analysis of Point Clouds from Automotive Lidars Exposed to Artificial Rain and Fog”, *Atmosphere*, vol. 12, no. 6, p.738, doi.org/10.3390/atmos12060738.
- Park, B.(2022), “Method of improvements for autonomous vehicle road-traffic facilities using LiDAR”, *The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems(KITS) International Conference Special Session B-5*.
- Park, J., Cho, J., Lee, S., Bak, S. and Kim, Y.(2023), “An Automotive LiDAR Performance Test Method in Dynamic Driving Condition”, *Sensors*, vol. 23, no. 6, p.3892. doi: 10.3390/s23083892
- Tang, L., Shi, Y., He, Q., Sadek, A. W. and Qiao, C.(2020), “Performance Test of Autonomous Vehicle LiDAR Sensors Under Different Weather Conditions”, *Transportation Research Record*, vol. 2674, no. 1, pp.319-329.