

도로시설물의 색깔 및 기상 환경에 따른 LiDAR의 성능변화 연구

A Study of LiDAR's Performance Change by Road Sign's Color and Climate

박 범 진* · 김 지 윤**

* 주저자 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 연구위원

** 교신저자 : 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 박사후연구원

Bum jin Park* · Ji yoon Kim**

* Dept. of Highway & Transportation Research, KICT

** Dept. of Highway & Transportation Research, KICT

† Corresponding author : Ji yoon Kim, jiyoonkim@kict.re.kr

Vol.20 No.6(2021)

December, 2021
pp.228~241

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.6.228>

Received 9 November 2021
Revised 16 November 2021
Accepted 18 November 2021

© 2021. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

본 연구는 자율협력주행차량의 협력 인프라 중 하나인 도로표지판을 대상으로 LiDAR의 검지 성능 변화를 알아보았다. 이를 위해서 색깔과 재질이 다른 도로표지판을 제작하여 실제도로 환경에서 강우량을 통제된 테스트를 수행하였다. 성능지표는 NPC와 Intensity로 선정하였고, 집단 간의 비교는 T-Test를 활용하였다. 연구결과, 모든 재질에서 강수량이 증가할수록 LiDAR의 성능지표가 감소되는 결과가 관측되었다. 재귀반사지는 강수량 증가에 따른 성능지표 감소가 페인트 도색에 비해선 작았지만, 이 역시 40mm이상의 강수량에서는 데이터의 관측이 되지 않을 정도로 성능이 저하되었다. 검은색 페인트는 맑은 날에도 다른 색들에 비하여 성능지표가 낮았으며 특히, 백색의 재귀반사지는 성능지표가 강수량 증가에 가장 민감하게 저하되었다. 이러한 성능검증 결과는 향후 센서의 시인성을 제고하는 도로시설물 제작에 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : 자율주행, LiDAR, 도로표지판, 성능지표, 강우

ABSTRACT

This study verified the performance change of a LiDAR when it detects road signs, which are potential cooperation targets for an autonomous vehicle. In particular, road signs of different colors and materials were produced and tested in controlled rainfall on the real road environment. The NPC and intensity were selected as the performance indicators, and a T-Test was used for comparison. The study results show that the performance of LiDAR for the detection of road signs was reduced with the increase of rainfall. The degradation of performance in retroreflective sheets was lesser than painted road signs, but at the amount of 40 mm/h or more, the detection performance of retroreflective sheets deteriorates to an extent that data cannot be collected. The performance level of black paint was lower than that of other colors on a clear day. In addition, the white sheet was most sensitively degraded with the increase in precipitation. These performance verification results are expected to be utilized in the manufacturing of road facilities that improve the visibility of sensors in the future.

Key words : Autonomous vehicle, LiDAR, Road Sign, Indicator, Rainfall

I. 서 론

정부는 ‘2030미래차 산업 발전전략’에서 2027년 세계 최초로 완전자율주행차량을 상용화하겠다는 국가계획을 발표하였다(Kim, 2020). 더불어, 정부는 완전자율주행차량 지원을 위하여 자율주행 도로, 차량통신, 정밀지도, 교통관제로 자율주행 상용화를 위한 인프라를 구분하고, 상기 4가지의 인프라를 상용화 전까지 완비하고자 한다(국토교통부 네이버 블로그, <https://blog.naver.com/mltmkr>). 이 중 ‘자율주행 도로 인프라’는 자율주행차량을 위한 전용도로 및 차로, 센서를 위한 도로시설물들 등을 의미하며, 국토교통부는 21년 연구개발 사업을 착수하였다(Kim, 2020). 이러한 상용화 노력은 다른 선진국에서도 비슷하게 추진되고 있으며, 자율주행차량이 가져올 경제적 효과가 7조 달러로 예상되는 SA(Strategy analytcis)의 조사결과가 발표되기도 하여 자율주행기술 연구는 세계적으로 많은 관심과 투자가 이뤄지고 있다(Jeon and Kim, 2021).

‘자율주행 도로 인프라’는 자율주행기술의 인지, 판단, 제어 프로세스 중 센서의 인지 성능을 지원하여, 판단의 정확도 향상과 차량의 제어에 기여하는 역할을 수행한다(Chan, 2021). 이러한 연구의 배경에는 급속도로 성장한 센서 중심 자율주행차량이 기술적 한계를 보이는 점이 자리잡고 있다. 레벨 2 자율주행 기술인 테슬라 오토파일럿은 영상센서의 인식 오류로 인한 사고가 끊이지 않고 발생해왔으며, 2018년 3월 레벨 3 자율주행기술을 시범주행하고 있던 Uber의 로보택시는 보행자 발견이 늦어 사망사고를 내기도 하였다. 이에, ‘자율주행 도로 인프라’는 자율주행차량이 안전한 주행을 할 수 있도록 인프라를 통해 자율주행차량의 센서를 지원하는 기술 개발을 목표로 하고 있으며, 기본적 방향은 센서의 물체 인식을 위한 시인성 향상에 있다(KICT, 2021).

자율주행차량에는 영상, Radar, 초음파 등 다양한 센서가 활용되나, 현재의 자율주행기술을 주도하는 센서는 LiDAR(Light Detection and ranging, 이하 LiDAR)로 볼 수 있다(Li and Ibanez-Guzman, 2020). LiDAR는 타 센서의 비하여 가격은 높지만, 정확성이 우수하며, 야간에도 그 성능을 유지하는 것으로 알려져 있다(Tang et al., 2020). LiDAR는 현재의 다수의 자율주행차량에 적용되어, 동적물체의 인지와 현재 차량에 주행 절대위치 파악 등에 활용되고 있으며, 영상검지기를 대신하여 노변이나 신호교차로에 설치하여 보행자등을 인지하는 등의 목적으로 사용이 확대되고 있다(Li and Ibanez-Guzman, 2020).

이러한 자율주행차량의 LiDAR 활용이 증가추세에도 불구하고 LiDAR의 성능검증 결과를 제시한 문헌들은 물체를 인식하는 알고리즘의 정확성을 중심으로 제시되고 있으며(Roh et al., 2020), 특정한 도로시설물(도로표지판 등)을 대상으로 그 성능을 검증한 사례는 많지 않다. 또한, 여러 문헌에서 LiDAR의 성능이 안개나 우천 시 저하된다고 밝히고 있으나(Stock, 2018; Kutila et al., 2016; Goberville et al., 2020; Heinzler et al., 2019), 이는 시뮬레이션 을 통하여 이루어진 결과가 다수이며, 실제 도로환경에서 우천 시의 환경을 재현하며 이루어진 경우는 드물다.

이렇듯 실제 도로 위를 주행하는 자율주행차량에 장착된 LiDAR의 채널별로 물체인식 시의 인지성능과 기상악화 상황에서의 인지 성능 저하 등을 객관적인 성능지표를 통하여 수치적으로 제시한 문헌을 찾아보기는 쉽지 않다. 이러한 이유는 차량에 활용하는 LiDAR의 기술개발 역사가 길지 않고(Beraldin et al., 2010), 상용화를 위한 연구개발이 아직 진행 중인 뿐만 아니라 자율주행차량 센서의 인지성능 공개는 자율주행차량의 기술수준으로 판단되는 성향이 있기 때문이다(Jeon and Kim, 2021). 그럼에도 불구하고 향후 LiDAR의 활용확대와 기술의 발전을 고려한다면, 실제 도로와 유사한 환경에서의 반복적 성능검증은 중요하다고 판단된다.

본 논문은 LiDAR의 성능을 실제도로 환경에서 검증하는 것이 목적이다. 이에 본 연구에서는 실제로 시범 운행이 가능한 자율주행차량과 이에 장착된 LiDAR를 활용하였으며, 객관적인 성능검증을 위하여 수치적 표현이 가능한 성능지표를 선정하였다. 성능시험은 강수량을 조절을 통해 우천 환경의 통제가 가능한 실제 도로 환경에서 수행 되었고 맑은 날과 우천 시의 성능지표 변화를 비교하였다.

LiDAR의 성능검증의 대상은 가장 대표적인 도로시설물인 도로표지판으로 선정하였으며, 테스트 시나리

오는 실제 사용되는 표지판의 색깔에 따라 구성하였다. 이러한 연구결과는 LiDAR가 도로표지판을 센싱 할 때의 성능검증뿐만 아니라 LiDAR 센서의 특성을 파악할 수 있으므로 향후, 센서의 시인성을 제고하는 도로 표지판 제작에 활용될 것이 기대된다.

II. 선행연구검토

본 장에서는 일반적으로 알려진 LiDAR의 원리와 LiDAR의 특성을 통하여 LiDAR 성능검증의 타당성과 방향성에 대하여 논의하고자 한다. LiDAR 기술은 GNSS 기술이 상용화된 1990년대 이래로 급격한 발전을 이루었다. 초기 LiDAR는 항공측량 등에서 많이 사용되었다(Guan et al., 2016). 소형화된 Mobile LiDAR는 Airborn or Terrestrial LiDAR와 거의 동일한 기술이지만 짧은 기간 동안 빠른 발전을 이루었다(Lavarone, 2007). LiDAR는 근적외선 대역의 760nm~1900nm 파장(wave Length)의 레이저를 조사하여, 위상차 방식(Phase Shift)과 TOF(Time of Flight, 이하 TOF) 방식으로 물체를 탐지하며, 최근에는 조사 속도가 빠르고 물체와의 거리에 영향이 적은 TOF 방식이 보편적으로 활용 된다(Chen et al., 2021).

자율주행차량은 LiDAR의 결과물을 물체탐지, 분류, 추적, 움직임 예측에 활용하고 있다(Li and Ibanez-Guzman, 2020). 최근의 자율주행차량은 높은 안전성을 보장하기 위해 동적인 물체인 보행자, 신호등, 주변 차량 등의 정보들을 얻는데 LiDAR에 의존하고 있어, LiDAR는 자율주행차량에서 필수적인 센서로 부상하고 있으며(Tang et al., 2020), 현존하는 최고의 자율주행차량으로 평가받는 구글의 웨이모도 LiDAR를 돌발물체 등의 검지에 활용한다(Jeon and Kim, 2021).

LiDAR의 주요 성능은 Eye safety, Accuracy, Field-of-view, Data rate, Scan Frequency and Range로 판단 한다(Chen et al., 2021). 이러한 성능은 LiDAR 구매 시에 제품성능설명서에 표기되지만, 실제로 자율주행차량의 주행 시에도 성능이 제대로 발휘되는지는 장담할 수 없다. 이론적으로는 Frequency and Range와 Field of view 가 높을수록 많은 정보를 스캔할 수 있어 실제도로상의 정보를 취득하는데 용이하다(Lee and Lee, 2010). 많은 자율주행차량에 활용되는 64 channel 이상의 고사양 LiDAR 제품은 이론적으로 주행속도에 따른 검지성능의 영향을 받지 않는다. 또한, LiDAR의 기능 중 물체의 거리측정 성능은 물체와 자율주행차량과의 거리가 가까울수록 검지에 유리하다(KICT, 2021). LiDAR는 레이저 펄스가 물체에 반사되어 돌아오는 것을 활용하기에 물체 반사면의 도색 재질 및 색상에 영향을 받으며, 물체의 색깔이 무채색일 때 보다 백색일 때, 그리고 반사도가 높은 재질일수록 좋은 검지 성능을 보인다(Dannheim et al., 2014).

이러한 LiDAR의 성능들은 실제도로환경을 주행하는 LiDAR 기반의 자율주행차량을 제작할 때 유의해야 하는 것들로 판단된다. 하지만 언급된 LiDAR의 성능은 시뮬레이션, 실험실(Lab Test) 기반 결과 혹은 이론적 추론일 뿐 실제도로상에서 성능을 검증한 사례는 많지 않다. 대부분의 성능검증은 물체인식의 정확성에 집중되어 있으며, 인식하는 물체도 다양한 도로시설물 보다는 현재는 사람과 차량에 집중되어 인식의 정확성을 검증하고 있다. 이러한 원인은 LiDAR 기술의 역사가 길지 않은 이유뿐만 아니라 자율주행 기술이 아직 상용화되지 않은 기술인 관계로 자율주행차량의 성능의 공개가 자율주행차량 제작업체의 기술수준을 공개하는 것으로 간주되기 때문이다(Jeon and Kim, 2021).

이렇듯 LiDAR는 자율주행차량의 최근 급격한 발전을 주도하고 있고, 자율주행차량의 안전한 주행을 위하여 필요한 다양한 정보를 제공하고 있다(Li and Ibanez-Guzman, 2020). 최근에는 자율주행차량의 주행안전성을 높이기 위한 센서 간 융합기술이 개발되고 있으며, LiDAR를 영상센서와 융합하여 활용하는 사례도 증가하고 있다(Lee and Lee, 2010). 특히 영상과 LiDAR와의 융합은 영상을 단독으로 활용할 경우에 비하여 성능

이 우수한 것으로 나타났다(Stock, 2018).

많은 문헌에서는 우천, 안개, 눈과 같은 기상상황에서 LiDAR의 성능저하를 언급하고 있으며(Goberville et al, 2020; Heinzler et al., 2019; Vargas Rivero et al., 2020; Goodin et al., 2019), LiDAR의 우천시 성능저하는 다음의 2가지 현상이 있다. 첫째, 우천 시 물체에 반사되어 돌아오는 레이저가 빗방울에 부딪혀서 돌아오는 레이저 포인트의 개수(Numbers of Point Cloud, 이하 NPC)가 절대적으로 줄어드는 문제가 있으며, 둘째, 물체가 아닌 빗방울에 부딪혀서 돌아오는 레이저로 인하여 물체와의 거리정확도가 떨어지는 현상이다. 강수량에 따라 LiDAR의 최대인식거리(Max Range), NPC 그리고 Obstacle Detection Range가 감소함을 시뮬레이션을 통해 제시된 사례도 있다(Kutila et al., 2016). 뿐만 아니라 실제 주차장에서 자율주행차량에 장착된 LiDAR로 보행자를 검지하는 테스트를 수행하여, 우천 시에는 정확성이 심각하게 저하됨을 검증한 사례도 있다(Tang et al., 2020). 강수뿐만 아니라 안개와 눈 등의 상황에서도 우천 시와 비슷한 이유로 성능이 저하되며(Roh and Im, 2020), 자율주행차량 제작 전문가들을 대상으로 한 설문조사에서 자율주행차량이 주행 시 어려움을 핸디캡 구간의 유형과 상황을 질문한 결과 기상과 관련된 상황이 조속히 극복하여야 하는 분야로 응답되었다(Roh and Im, 2020).

문헌고찰의 시사점을 정리하면 다음과 같다. 첫째, LiDAR는 현재 자율주행차량의 발전을 주도하고 있어 다양하게 활용되고 있다. 둘째, LiDAR는 기술개발이 급격히 이루어진 이유로 실제로도 환경에서 LiDAR의 성능을 검증한 사례가 많지 않다. 또한, 성능검증 사례도 물체의 인식의 정확성 위주로 이루어져서 수집된 데이터보다는 데이터를 활용한 인식 알고리즘의 우수성에 집중되어 있다. 셋째, LiDAR는 검지하는 물체의 색깔, 재질과 센싱 시의 우천, 안개 등의 환경에 영향을 받아 성능이 저하되는 특성이 있는 것으로 알려져 있으나, 실제 도로표지판 등의 도로시설물을 대상으로 특성을 확인한 사례는 많지 않다. LiDAR가 현재 자율주행차량에서 물체 구분, 물체 추적, 물체 인식 등의 핵심적인 역할을 담당하는 것으로 미루어보건대 성능지표와 더불어 성능검증의 체계가 필요한 시기로 판단되며, 특히 자율주행차량을 지원하는 도로시설물 개발을 위해서는 도로표지판 등의 도로시설물을 LiDAR의 성능을 검증하는 것은 지속적으로 이루어져야 한다.

Ⅲ. 분석방법론

1. 분석 상황

본 논문은 도로시설물 중 도로 표지판에 활용되는 페인트와 재귀반사지의 색상에 따른 라이다성능을 알아보고, 성능지표가 맑은날과 우천시에 어떻게 달라지는지 확인하였다.

1) 테스트 환경

실제도로환경과 유사한 검증을 위하여 기상환경 재현시설이 있는 한국건설기술연구원 연천SOC실증연구센터의 시험주행로에서 테스트를 수행하였다. 해당 장소는 아스팔트로 포장된 다차로 구간으로 구성되어있으며, 600m 이상의 직선 도로구간이 확보되어 있다. 차로 우측에 50mm/h 이상의 강우상황을 재현하고 통제할 수 있는 기상재현 실증장비가 설치되어 있고, 실제 도로환경 속에서 거리-기상의 변화에 따른 원활한 LiDAR 데이터 취득이 가능하다.

2) 테스트 시나리오

테스트에서 구분한 변수는 <Table 1>과 같이 구성하여 한 시나리오에 5회 반복하여 수행하였다. 예를 들

면 ‘100m, 강우량 0mm(Clear), 백색페인트 도로표지판’이 1개의 시나리오이며, 차량 주행을 통해 각 시나리오가 5번씩 측정되었다.

<Table 1> Test Scenario

Factor	Variable	Test Scenario					
Environmental Factor	Distance (m)	100	80	60	40	20	
	Rainfall (mm/h)	0 (Clear)		10	20	30	40
Target Factor (Color)	Paint	Steel(unpainted)	White	Black	Red	Green	Yellow
	Retroreflective sheet	White	Red		Green	Yellow	

2. 성능지표 정의

본 테스트에서 정량적인 수치로 LiDAR의 성능을 분석하기 위하여 활용한 지표는 NPC(Numbers of Point Cloud)와 Intensity이다. NPC는 LiDAR에서 발산된 뒤 Target Object에 반사가 되어 LiDAR Receiver로 돌아온 레이저 펄스의 수를 의미한다. LiDAR 데이터를 이용한 객체 인지는 군집화가 가능한 일정 규모 이상으로 포인트 클라우드가 취득되는 상황에서 수행된다. 따라서, NPC가 많을수록 포인트 클라우드의 군집화가 유리하며, Target Object의 형상을 정확하게 파악할 수 있다. 본 연구에서는 아래와 같은 측정 당 평균 NPC를 측정 지표로 활용하였다.

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

where,
NPC_{average} : average NPC
P_i : number of Point Clouds in *i*th measurement
n : number of measurement

Intensity는 LiDAR로부터 발산된 레이저펄스의 강도 대비 반사되어 돌아온 강도의 비율이다. LiDAR 장비의 제조업체에 따라 다를 수 있으나, 본 연구에서 활용한 Robosense Rs-LiDAR-32 장비는 0-255 범위로 수치가 제시된다. 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 레이저 펄스의 강도이며, 100을 넘어가는 수치는 높은 반사도를 가진 물체에서 확인된다. 255는 대체로 재귀반사지에서 확인 되는 수치이다. LiDAR Intensity는 조사하는 물체의 조사각, 범위, 표면 재질, 색깔, 거칠기, 습도 등에 따라 상이할 수 있으며, 다양한 변수값으로 인하여 일정한 수치를 나타내지 않기 때문에 절대적 수치보다는 상대적 수치비교가 유효하다. 본 연구에서는 아래와 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 *n*th Point Cloud
k : number of Point Cloud

IV. 성능지표변화 분석 결과

1. 도색에 따른 지표 변화

1) 성능지표 NPC

NPC는 LiDAR의 특성상 거리에 종속되는 수치로, 탐지물체와 장비와의 거리가 멀어질수록 그 수치가 감소하는 특성이 있다. 따라서 5개 거리그룹별로 도색 및 강우상황에 대한 NPC를 집계하여 서로 비교하였다.

먼저 거리에 따른 NPC 수치를 비교하여 보면 거리증가에 따라 NPC가 감소하는 특성은 모든 유형에서 나타나 강우가 없는 상황에서 20m 거리의 물체에선 30개 이상의 NPC가 관측된 반면, 40m에서는 10개 미만, 60m에서는 6개 미만 수준으로 검지량이 감소하였다. 이 중에서 검정색은 다른 색체에 비해 거리의 영향이 커서 40m 구간부터 격차가 나타나 거리가 멀어질수록 다른 색체와의 검지량 차이가 더욱 증가하였다.

강우량별 NPC는 상대적으로 물체와의 거리가 짧은 경우에 보다 큰 수치감소가 있는 것으로 나타났으며, 60m 이상으로 거리가 멀어지면 이미 거리 증가에 따라 NPC가 감소한 이후여서, 강우의 영향은 비교적 적은 모습을 보였다. 이러한 강우량의 증가에 따른 NPC의 감소는 대부분의 거리 구간과 도색유형에서 관찰되었으나, 이 중에서도 검정색은 특히 큰 폭으로 감소하는 모습을 보였다. 반면, 도색을 하지 않은 경우(Steel) 비교적 강우의 영향이 적어 다른 도색유형에 비해 감소량이 적거나, 변화가 없는 모습을 보였다.

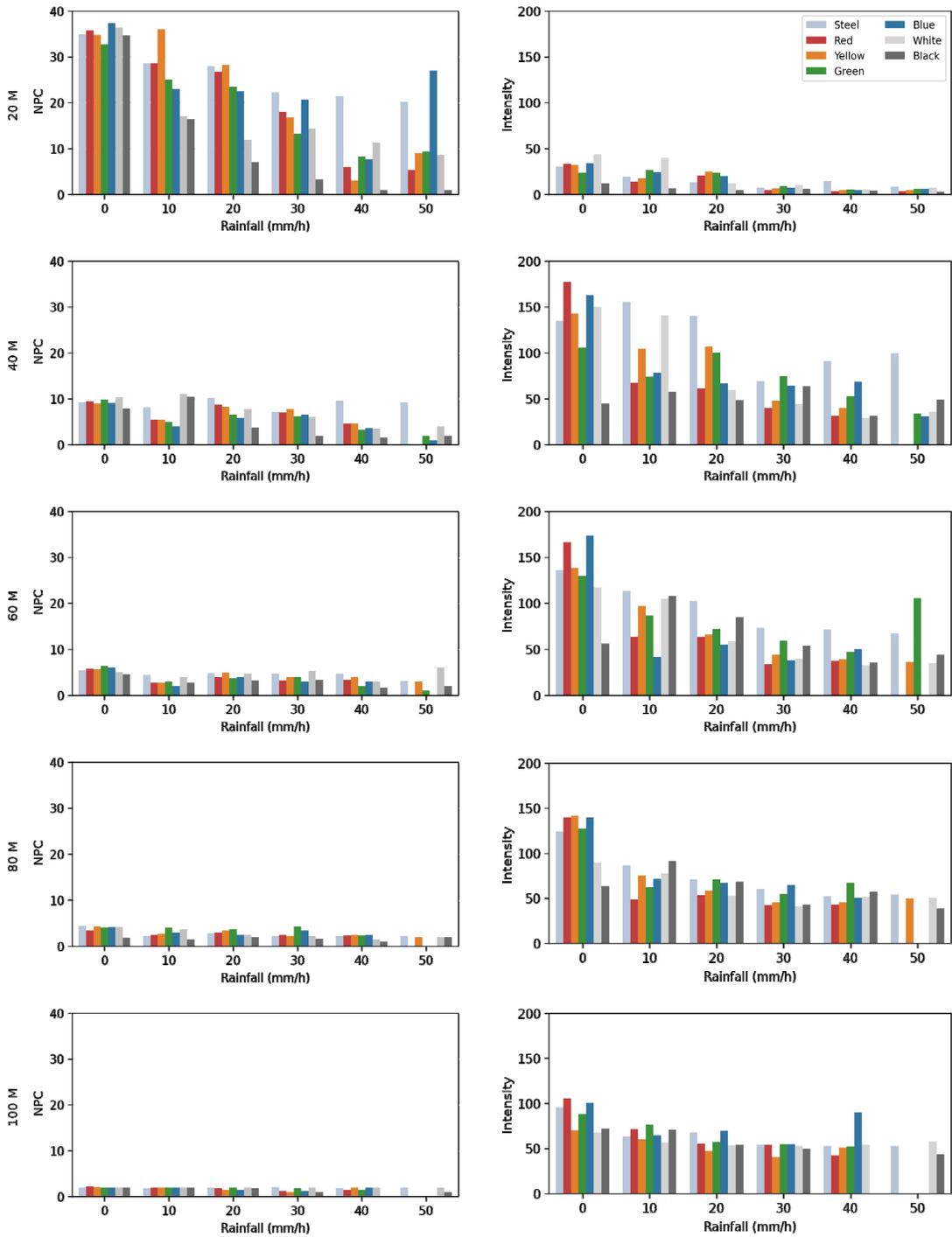
다만, 이러한 강우량 증가에 따른 NPC 변화는 변화의 방향 및 증감폭이 일정하게 유지되지는 않았다. 이는 실험환경의 특성상 빗방울이 항상 일정하게 영향을 주지 않아 나타나는 결과로 해석된다.

2) 성능지표 Intensity

Intensity 수치는 NPC와 비교시 상대적으로 거리에 적게 영향을 받는 지표로, 검정 페인트 도색을 제외하면 40~80m 구간에서는 평균 100 이상을 보여주고, 100m에서도 50 이상의 수치를 보이고 있다. 본 연구에서 활용된 LiDAR 장비의 소프트웨어는 일정거리 이내에서 수집된 데이터의 Intensity 수치를 보정하고 있어 20m 거리에서는 20~40 정도의 Intensity를 보여 오히려 낮은 수치를 보였다. 다른 색과 달리 검정색은 그 특성상 반사도가 낮으며, 이러한 특성이 반영되어 맑은 상황에서도 Intensity의 평균값이 50 전후로 나타나 다른 색깔에 비해 매우 낮은 특성을 보였다.

강우에 의한 영향을 살펴보면, 거리구간 및 도색별로 대체로 점진적인 Intensity 수치 하락이 발생하는 것으로 나타났다. 강우량이 1 step씩(10mm/h) 증가함에 따라 Intensity 감소가 관측되며, 40m~100m 거리의 물체에 대해서는 40~70 수준으로 수렴하는 패턴을 보인 반면, 20m 거리에서는 이보다 낮은 10 이하 수치로 수렴하는 패턴을 보였다. 도색하지 않은 철(Steel)은 다른 도색에 비해 강우에 따른 Intensity 감소가 적은 편이었으며, 이러한 패턴은 40m~60m 구간에서 보다 뚜렷하게 관측되었다.

분석결과는 Intensity 수치 역시 강우량 증가에 따라 점진적 하락을 보이고 있으나, 이러한 감소추세는 일정하게 나타나는 않았으며, NPC에서와 마찬가지로 빗방울이 항상 일정하게 레이저펄스에 영향을 주지는 않아 나타나는 현상으로 해석된다.



<Fig. 1> Average NPC, Intensity of Paints by Distance and Rainfall

결과를 종합하여 보면, Intensity 수치는 80m 이내에서는 비교적 편차가 적어 거리에 의한 영향은 적은 것으로 나타났으며, 검은색은 다른 색에 비해 특히 낮은 특성을 보여 시설물 제작 시 검은색이 아닌 다른 색을 활용하는 것이 Intensity 수치 확보에 도움이 되는 것으로 나타났다.

3) 강우량에 따른 성능지표 변화 검증

강우량 증가에 따른 NPC와 Intensity 감소가 통계적으로 유의한지 t-test를 통해 확인하였다. 테스트는 각 거리구간별, 각 도색별로 강우가 없는 상황(0mm)과 각 강우량 측정결과를 비교하는 방식으로 수행되었다. 거리구간의 경우 20m와 40m 만을 수행하였는데, 60m 이상의 경우 NPC는 비강우 상황에서도 5개 수준으로 감소하여 강우에 따른 감소가 매우 미미하였기 때문에 제외하였다.

먼저, NPC의 결과를 살펴보면(Table 2) 30mm까지는 통계적으로 유의한 NPC 감소를 보이는 도색 유형이 점차 증가하는 공통점을 보였다. 20m 거리 구간에서는 30mm 이상 강우 상황에서 대부분의 도색 유형이 유의한 감소를 보인 반면, 40m 거리 구간에서는 통계적으로 유의하지는 않은 유형이 보다 많은 것으로 분석되었다. 특히 40m 거리의 50mm 강우 환경에서는 초록색 도색만 유의하였으며 이는 다른 도색유형은 극한의 환경으로 인해 통계적 분석이 불가능한 수준으로 NPC 집계량이 감소하여 이러한 결과가 도출되었다.

전반적으로 20m 거리에서 통계적으로 유의한 결과가 많이 관측되었는데 이는 관측거리에 영향을 받는 NPC의 특성상 관측량이 많은 20m 거리에서 강우의 영향이 더욱 크기 때문인 것으로 분석된다.

<Table 2> T-Test results for NPC of Paints by Rainfall

Variable	0mm/h	10mm/h		20mm/h		30mm/h		40mm/h		50mm/h		
		mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	
20m	Black	34.6	16.3	2.37	7.0	6.14 **	3.3	12.43 **	1.0	16.36 **	1.0	-
	Blue	37.4	23.0	-	22.5	4.61 **	20.7	2.34	7.7	6.18 **	27.0	-
	Green	32.6	25.0	-	23.5	1.72	13.3	2.70 **	8.3	4.77 **	9.3	2.61 *
	Red	35.8	28.5	3.55 **	26.8	1.87	18.0	3.46 **	6.0	8.28 **	5.3	7.85 **
	Steel	34.9	28.6	1.45	28.0	1.52	22.3	2.60 **	21.4	2.28 **	20.1	2.62 **
	White	36.4	17.0	2.40	12.0	6.07 **	14.3	4.39 **	11.3	5.50 **	8.7	5.15 **
	Yellow	34.8	36.0	-0.47	28.3	1.46	16.8	3.08 **	3.0	12.93 **	9.0	4.24 **
	40m	Black	7.9	10.5	-1.39	3.8	2.25	2.0	7.39 **	1.5	10.31 **	2.0
Blue		9.1	4.0	-	5.8	2.26 *	6.5	2.34 *	3.7	2.94 *	1.0	-
Green		9.9	5.0	-	6.5	3.22 **	6.3	5.65 **	3.3	5.02 **	2.0	63.00 **
Red		9.5	5.5	2.80 **	8.8	0.64	7.0	2.07 *	4.7	2.44	-	-
Steel		9.3	8.1	0.93	10.1	-0.59	7.1	2.05 *	9.6	-0.30	9.1	0.12
White		10.3	11.0	-0.39	7.8	1.38	6.0	2.72	3.5	2.68	4.0	-
Yellow		9.0	5.5	3.34 **	8.3	0.57	7.8	0.81	4.7	1.98	-	-

** : statistically significant at 95%

* : statistically significant at 90%

도색 유형별로 보면 하얀색 도색은 40m의 모든 강우상황에서 NPC 차이가 유의하지 않았으며, 도색하지 않은 철의 경우 30mm에서만 9.3개에서 7.1개로 2.2개 포인트 감소가 유의하게 나타났다. 반면, 검은색 도색은 20m 거리에서는 20mm부터 40mm 까지 모두 통계적으로 유의한 수치감소를 보였으며, 40m 거리에서는 30mm, 40mm에서 통계적으로 유의한 수치감소를 보였다. 감소폭 역시 다른 색깔이 두자리 수치를 유지하는 것과 달리

10개미만의 NPC가 측정되어 흡수율이 높은 재질 특성이 강우상황에서 더욱 큰 영향을 받는 모습을 보였다.

이는 몸체의 재질 및 도색의 색의 특성에 따라 반사도가 높은 물체가 보다 좋은 센서 시인성을 가지고 있으며, 검은색 도색의 반사도가 낮은 특성이 LiDAR 센서 인식에서도 불리하게 작용함을 보여준다.

Intensity의 검정 결과를 보면(Table 3), NPC와는 달리 대부분의 강우량에서 통계적으로 유의한 수치감소가 확인되었으며, 50mm 구간에서는 일부 도색에서 측정치의 부족으로 통계검정이 불가능한 상황이 도출되었다. 이는 강우상황에서 대기중의 빗방울이 레이저펄스와 부딪혀 에너지의 감쇄, 산란 등으로 이어져 반사강도가 약화되는 것이 측정된 결과로 해석된다. 그래프를 통해서(Fig. 1) 확인되는 것과 같이 대부분의 도색은 10mm의 강우만 발생하여도 반사도에서 큰 감소가 이뤄지나, 하얀색은 감소폭이 비교적 작아서 반사도를 고려한 도색으로 보다 적합한 것으로 나타났다.

특히, 도색하지 않은 철의 경우 강우량이 매우 많은 30mm 상황에서도 도색면에 비해 높은 수치를 유지하여 페인트 도색은 강우 상황에서의 반사도를 낮추어 LiDAR의 인식률을 저해할 수 있는 것으로 분석된다.

<Table 3> T-Test results for Intensity of Paints by Rainfall

Variable	0mm/h	10mm/h		20mm/h		30mm/h		40mm/h		50mm/h		
		mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	
20m	Black	12.6	6.6	17.14 **	5.1	15.65 **	5.8	13.27 **	4.4	10.93 **	3.2	-
	Blue	33.9	24.5	6.33 **	20.1	12.63 **	7.7	30.09 **	5.0	39.31 **	6.2	35.76 **
	Green	23.8	27.0	-1.13	23.7	0.03	8.8	18.87 **	5.7	27.02 **	6.4	27.50 **
	Red	33.5	14.3	20.91 **	20.8	13.43 **	4.8	47.42 **	3.9	50.76 **	3.5	49.34 **
	Steel	30.5	19.3	11.45 **	13.2	22.02 **	7.6	36.80 **	14.9	19.47 **	8.7	29.98 **
	White	43.9	40.0	1.66	12.5	16.77 **	10.4	21.06 **	5.7	70.69 **	7.3	55.62 **
	Yellow	32.1	17.7	13.06 **	24.8	5.77 **	7.0	26.55 **	4.8	35.54 **	4.7	36.65 **
	40m	Black	45.2	57.5	-1.48	48.5	-0.31	63.7	-1.48	31.5	3.59 **	49.2
Blue		162.7	78.2	4.73 **	66.7	16.80 **	64.4	20.25 **	68.8	10.33 **	30.7	-
Green		105.6	74.0	3.06 **	100.3	0.81	74.8	5.13 **	53.0	7.57 **	33.9	23.32 **
Red		177.2	67.5	18.88 **	61.2	20.80 **	40.4	31.25 **	31.6	36.97 **	-	-
Steel		134.9	155.6	-5.10 **	140.0	-1.19	69.2	11.84 **	91.3	7.68 **	100.0	5.31 **
White		150.2	140.9	2.37 **	59.7	17.00 **	44.5	19.41 **	29.1	54.44 **	35.6	17.41 **
Yellow		142.6	104.4	5.63 **	106.8	7.46 **	47.8	22.34 **	40.2	27.57 **	-	-

** : statistically significant at 95%

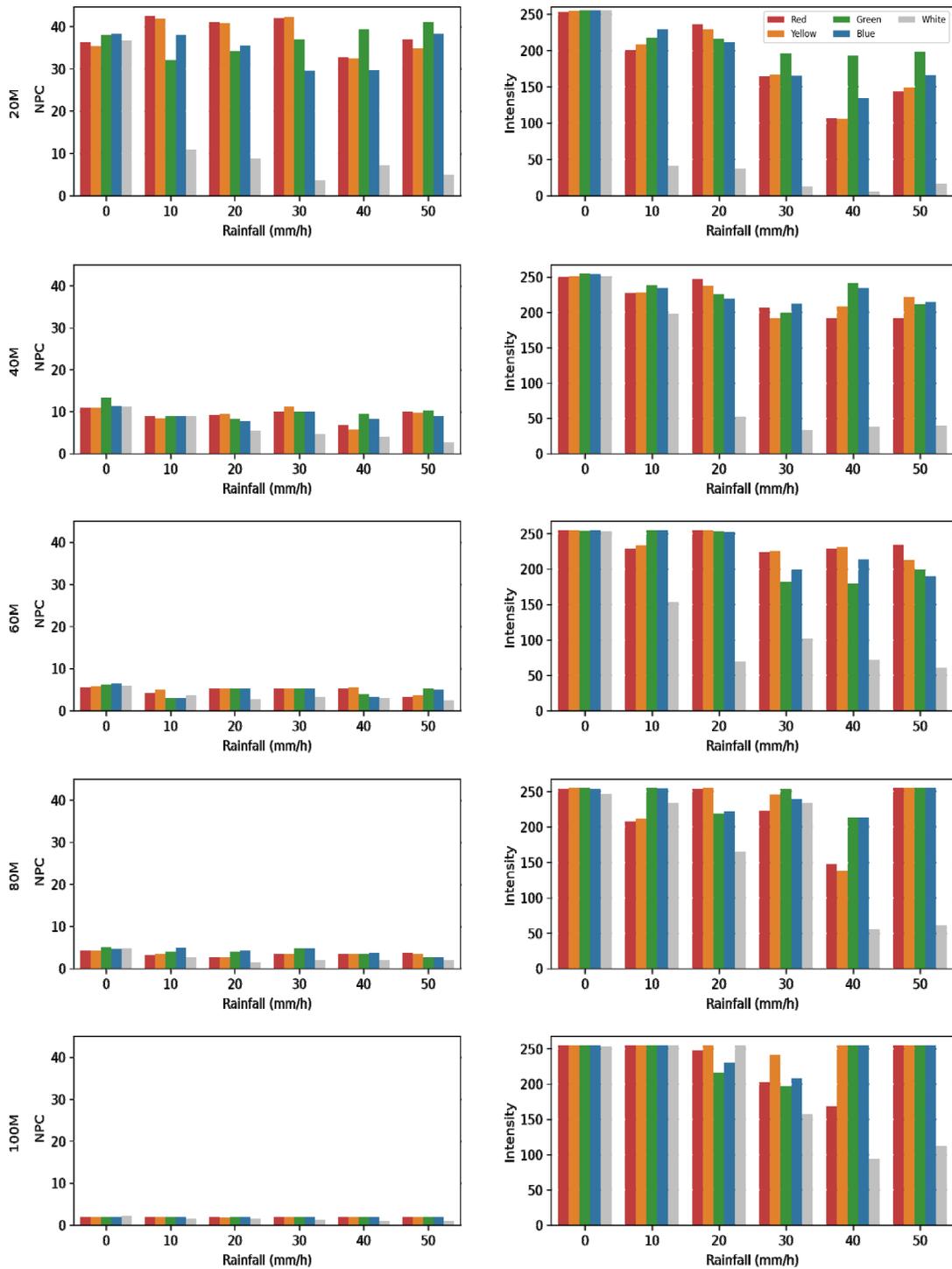
* : statistically significant at 90%

2. 재귀반사지 색상에 따른 지표 변화

1) 성능지표 NPC

NPC의 경우 비강우상황 기준 20m 구간에서는 35개, 40m에서는 10개, 60m 이상에선 5개 수준으로 재귀반사지와 페인트 도색이 큰 차이를 보이지 않았고, 거리증가에 따른 구조적 감소가 가장 크게 나타났다.

하지만 페인트 도색이 강우에 따라서 NPC가 크게 감소한 결과를 보인 것과 달리 재귀반사지에서는 NPC가 감소하지 않거나 감소폭이 미미한 특성을 보였다. 이는 재귀반사지의 반사체(retroreflector)가 매우 높은 반사율을 보여 대부분의 레이저펄스를 LiDAR 수신부에 되돌려보내기 때문에 가능한 현상이다. 다만, 다른 재귀반사지는 강우의 영향이 미미했던 반면, 흰색 재귀반사지는 20m 거리에서 비강우 상황에서 30개 이상 측정되던 NPC가 강우상황에선 10개 이하 수준으로 떨어지는 등 강우에 의한 급격한 하락을 보였다.



<Fig. 2> Average NPC, Intensity of Retroreflective sheets by Distance and Rainfall

2) 성능지표 Intensity

재귀반사지의 Intensity는 맑은날의 경우 최소 250 이상의 매우 높은 Intensity를 보였으며, 거리증가에 따라 서도 영향을 거의 받지 않았다. 이는 페인트 도색이 100m 거리에서는 Intensity가 100이하 수준으로 감소한 것과 비교되는 결과이다. 강우상황에서도 재귀반사지 그룹은 강우량이 적을 경우 수치 감소가 없거나 감소가 있더라도 150 이상의 Intensity를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 반사도가 높은 재질의 특성이 물체와의 거리가 멀어지거나 강우량이 증가하는 상황에서도 반사도를 잘 유지시켜주는 결과로 해석된다.

다만, 하얀색 필름은 비강우 상황에서는 문제가 없으나 강우 상황에서는 매우 급격한 Intensity 감소를 보이고 있으며, 20~40m 거리에서는 50 정도까지 수치가 떨어졌다. 이러한 감소는 먼저 제시된 NPC의 감소와도 연관되는데, 강우상황에 따라 흰색 재귀반사지 반사도가 매우 낮아져 Intensity와 NPC의 동시적 감소가 관측되는 것으로 보인다.

3) 강우상황에서의 지표변화에 대한 통계적 검정

재귀반사지의 NPC의 강우상황에 따른 감소를 검정한 결과, 대부분의 색깔에서 강우에 따른 NPC 감소는 통계적으로 유의하지 않거나, 유의한 차이더라도 수치적으로는 큰 편차를 보이지 않는 결과가 도출되었다. 반면, 하얀색 필름의 경우 20m와 40m 및 모든 강우구간에서 통계적으로 유의한 NPC 감소결과를 보였으며, 감소폭 역시 다른 재귀반사지에 비해 매우 큰 수치가 나타났다.

Intensity에 대한 통계적 검정은 대부분의 필름이 강우에 따라 통계적으로 유의한 Intensity 감소가 나타나 는 것으로 확인되었다. 다만, 흰색 재귀반사지를 제외하고는 높은 강우 상황에서도 100 이상의 높은 Intensity 수치를 보이고 있어 재귀반사지가 페인트 도색에 비해 강우상황에서 보다 적은 영향을 받는 것으로 확인되었다.

이러한 결과는 Intensity와 NPC는 서로 밀접한 관련이 있으며, LiDAR의 측정원리에 따라 물체의 반사도가 낮은 경우 전체적인 반사강도도 약해짐과 동시에 검출되는 NPC 역시 자연스럽게 감소되는 점을 보여준다. 또한, 표지판에 부착되는 재귀반사지 중 흰색을 활용하는 부위는 강우량에 따른 Intensity 수치 하락을 야기 하고, 자율주행자동차에 있어 검지 난이도 상승으로 이어질 수 있다는 점을 시사한다.

<Table 4> T-Test results for NPC of Retroreflective sheets by Rainfall

Variable	0mm	10mm		20mm		30mm		40mm		50mm		
		mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	
20m	Blue	38.3	38.0	-	35.5	1.05	29.5	1.02	29.8	2.62 **	38.3	0.00
	Green	38.0	32.0	-	34.3	1.86	37.0	0.34	39.3	-0.35	41.0	-2.32 *
	Red	36.4	42.5	-2.15 *	41.0	-1.50	42.0	-2.00 *	32.8	0.78	37.0	-0.15
	White	36.8	11.0	8.48 **	8.8	4.90 **	3.7	14.80 **	7.3	10.81 **	5.0	7.44 *
	Yellow	35.4	41.8	-2.03 *	40.8	-1.47	42.3	-2.16 *	32.5	0.46	34.8	0.15
40m	Blue	11.4	9.0	-	7.8	1.72	10.0	0.64	8.3	2.34 *	9.0	1.44
	Green	13.4	9.0	-	8.3	2.35 *	10.0	1.94 *	9.5	2.67 **	10.3	1.58
	Red	11.0	9.0	4.38 **	9.3	2.65 **	10.0	0.98	6.8	3.54 **	10.0	1.19
	White	11.2	9.0	0.80	5.5	6.46 **	4.7	17.69 **	4.0	5.82 **	2.7	23.12 **
	Yellow	10.9	8.3	3.45 **	9.5	1.26	11.3	-0.33	5.8	2.46 **	9.8	0.71

** : statistically significant at 95%

* : statistically significant at 90%

<Table 5> T-Test results for Intensity of Retroreflective sheets by Rainfall

Variable	0mm	10mm		20mm		30mm		40mm		50mm		
		mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	mean	t value	
20m	Blue	254.9	228.8	2.87 **	211.1	6.13 **	164.8	9.82 **	134.1	13.00 **	165.8	10.28 **
	Green	255.0	217.2	3.24 **	216.3	5.55 **	195.7	7.99 **	193.1	8.96 **	198.6	7.49 **
	Red	252.5	200.9	6.81 **	236.3	3.56 **	164.5	11.05 **	106.6	16.34 **	143.1	12.35 **
	White	254.8	41.3	30.86 **	37.5	18.01 **	12.7	71.77 **	5.7	480.52 **	17.0	76.16 **
	Yellow	254.2	208.6	6.41 **	229.3	4.75 **	166.6	10.65 **	105.9	16.57 **	149.3	11.17 **
40m	Blue	254.2	235.2	1.89 *	219.6	3.00 **	212.6	3.84 **	234.8	1.72 *	215.1	3.01 **
	Green	254.9	238.7	1.85 *	226.1	3.13 **	199.7	3.97 **	241.7	1.63	212.0	3.51 **
	Red	249.9	227.3	1.88 *	247.4	0.46	207.0	2.98 **	192.1	3.23 **	191.3	4.99 **
	White	251.2	198.3	5.23 **	52.3	27.12 **	33.2	63.17 **	38.5	66.31 **	39.6	23.08 **
	Yellow	251.2	228.2	1.80 *	237.6	1.51	191.9	4.16 **	208.7	2.55 **	221.5	2.90 **

** : statistically significant at 95%

* : statistically significant at 90%

V. 결 론

본 논문의 목적은 LiDAR의 성능을 실제로 환경에서 검증하는 것이다. 성능검증의 대상은 실제로 사용되는 도로표지판이며, 성능검증의 활용한 지표는 LiDAR가 제공하는 기본 Law Data인 NPC(Numbers of Point Cloud) 와 Intensity이다. 실험은 도로 트랙이 구비되어 있는 한국건설기술연구원의 연천 실증센터에서 강우량을 통제하며 테스트를 수행되었다. 반복적인 테스트를 통하여 도로시설물에 활용되는 페인트 도색과 재귀반사지의 색깔에 따라서 LiDAR 센서의 검지성능 지표가 변화하는 것을 관측 하였으며, 강우 상황에 따른 검지성능 감소를 측정하고 통계적으로 규명하였다.

연구결과, 페인트 도색은 재귀반사지 대비 전반적인 Intensity가 낮게 측정되었으나 이러한 수치 차이가 비강우 상황에서 NPC 감소까지 이어지지는 않았다. 반면, 강우상황에서는 재귀반사지는 Intensity의 감소에도 불구하고 NPC 수치가 유지되거나 감소폭이 적었지만 페인트 도색에서는 반사도의 큰 하락과 함께 NPC 역시 통계적으로 유의한 감소가 관찰되었다. 즉, 강우가 없는 상황에서는 페인트 도색과 재귀반사지의 검지성능에 있어 큰 차이가 없지만 강우상황에서는 재귀반사지를 사용하는 것이 LiDAR 센서의 시인성 제고에 보다 적합함이 관찰된다. 단, 흰색 재귀반사지는 강우상황에서 매우 큰 성능지표 감소가 관측되어 소재 활용에 있어 주의가 요구된다. 흰색 재귀반사지의 이러한 특성은 본 연구에서는 실험과 관측에 의해서 확인되었으나 그 원인은 규명되지 않아 후속 연구가 필요하다. 특히 재귀반사지도 내부적 구조에 따라 다양한 등급이 분류되나 본 연구에서는 특정한 재질 하나만을 활용하여 이러한 결과가 관측되었을 가능성이 있어 추후에는 다양한 필름 소재를 활용한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

자율주행 상용화를 위한 기술 중 ‘자율주행 도로 인프라’는 통신, 플랫폼 등의 타 인프라와는 다르게 기존의 도로와 도로시설물 체계에서 벗어나지 않아야 하는 제약요소를 가지고 있다. 이는 완전자율주행 시대가 도래 하더라도 운전자의 구성이 일반운전자에서 자율주행차량으로 점진적 변화할 것이 예상됨에 따라 도로 시설물 역시 일반 운전자와 자율주행차량이 혼재된 상황에서도 주어진 기능적 역할을 수행할 수 있도록 요구되는 조건이다.

대부분의 자율주행을 연구하는 선진국에서는 이러한 혼재상황을 고려하여 자율주행 기술 상용화에 있어 단계별 접근방법 등을 제시하고 있다. 특히, 도로시설물인 도로표지판, 안전표지판, 노면표시, 신호등, 차선

등은 긴 시간동안 정해진 목적을 가지고 설치되어 운영되므로 모양을 교체하거나 설치위치를 변경할 시에는 운전자에게 불편을 초래할 수 있고, 나아가 교통사고의 원인으로 작용할 수 있어 새로운 기술이나 소재는 보다 신중한 적용이 필요하다. 이러한 측면에서 도로시설물의 소재 및 색상변경을 통해 센서의 시인성을 향상하는 것은 최소한의 변형과 개선을 통해 자율주행을 지원하는 방법으로서 중요성이 있으며, 본 연구는 센서 시인성을 개선하고자 하는 경우 주의해야 하는 요인과 상황을 규명한 것에 의의가 있다.

자율주행센서의 역할은 수집(collect), 인식(perception), 분류(classification), 추적(tracking) 과 같은 일련의 과정을 거치는데, 본 연구는 수집 데이터의 품질이 질적·양적으로 우수할수록 이후 단계가 보다 원활하게 기능할 수 있다는 가정하에 진행되었다. 하지만, 자율주행센서의 인지성능은 데이터 수집 외에도 인식 및 분류 분야의 소프트웨어 성능에 영향을 받음에도 수집 데이터의 품질이 직접적으로 인지성능에 미치는 영향을 본 연구에서 제시하지 않는 한계점이 있다. 최근에는 AI 기반의 방법론을 기반으로한 알고리즘을 통해 미흡한 데이터의 수집상태가 극복될 가능성 역시 충분한만큼 추후 수집 데이터의 품질이 실제 인지성능에 미치는 영향도 연구되어야 할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21AMDP-C161924-01, 클라우드 소싱기반의 디지털 도로교통 인프라 융합플랫폼 기술 개발)

REFERENCES

- Beraldin J. A., François B. and Uwe L.(2010), “Laser Scanning technology,” In G. Vosselman and H. Mass, eds. *Airborn and terrestrial laser scanning*, Caithness, Whittles Publishing, pp.1-42.
- Chan E.(2021), *LiDAR vs. Camera0The Best Sensor Suite*, Mirae Asset Global Investments (Hong Kong), <https://www.am.miraeasset.com.hk/insight/lidar-vs-camera-only-what-is-the-best-sensor-suite-combination-for-full-autonomous-driving/>
- Chen C., Fragonara L. Z. and Tsourdos A.(2021), “RoIFusion: 3D Object Detection From LiDAR and Vision,” *IEEE Access*, vol. 9, pp.51710-51721.
- Dannheim C., Icking C., Mäder M. and Sallis P.(2014), “Weather Detection in Vehicles by means of Camera and LiDAR systems,” *6th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, doi: 10.1109/CICSyN.2014.47
- Goberville N., El-Yabroudi M., Omwanas M., Rojas J., Meyer R., Asher Z. and Abdel-Qader I.(2020), “Analysis of LiDAR and Camera Data in Real-World Weather Conditions for Autonomous Vehicle Operations,” *SAE Technical Paper*, doi: 10.4271/2020-01-0093
- Goodin C., Carruth D., Doude M. and Hudson C.(2019), “Predicting the Influence of Rain on LiDAR in ADAS,” *Electronics*, vol. 8, no. 1, 89. doi: 10.3390/electronics8010089
- Guan H., Li J., Cao S. and Yu Y.(2016), “Use of mobile LiDAR in Road information inventory: A review,” *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. 7, no. 3, pp.219-242.
- Heinzler R., Schindler P., Seekircher J., Ritter W. and Stork W.(2019), “Weather Influence and

- Classification with Automotive Lidar Sensors,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV)*, Paris, France, June 9–12.
- Jeon H. M. and Kim J. S.(2021), “Analysis on Handicaps of Automated Vehicle and Their Causes using IPA and FGI,” *Journal of Korea Institute of Intelligent Transport System*, vol. 20, no. 3, pp.34–46.
- Kim W. K.(2020), “Main Contents and Future Plans of the Automated Driving Technology Development Innovation Project,” *Monthly KOTI Magazine on Transportation*, vol. 272, pp.27–35.
- Korea Institute Construction and Technology(2021), *Improved Road Infrastructures to Strengthen Driving Safety of Automated Driving Car 2th Report*.
- Kutilla M., Pyykönen P., Ritter W., Sawade O. and Schäufele B.(2016), “Automotive LIDAR Sensor Development Scenarios for Harsh Weather Conditions,” *Proc., 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, Brazil, IEEE, New York, pp.265–270.
- Lavarone A.(2007), “Feature: Terrestrial LiDAR goes mobile,” *Professional Surveyor Magazine*.
- Lee I. S. and Lee J. O.(2010), “Performance evaluation of Terrestrial Laser Scanner over Calibration Baseline,” *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 28, no. 3, pp.329–336.
- 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.
- Roh C. G. and Im I.(2020), “A review on handicap sections and situations to improve driving safety of automated vehicles,” *Sustainability*, vol. 12, no. 14, 5509. doi: 10.3390/su12145509
- Roh C. G., Kim J. and Im I.(2020), “Analysis of Impact of Rain Conditions on ADAS,” *Sensors*, vol. 20, 6720, doi: 10.3390/s20236720
- Stock K.(2018. 09. 17), Self-Driving Cars Can Handle Neither Rain nor Sleet nor Snow, *Bloomberg Businessweek*.
- 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.
- Vargas Rivero J. R., Gerbich T., Teiluf V., Buschardt B. and Chen J.(2020), “Weather Classification Using an Automotive LIDAR Sensor Based on Detections on Asphalt and Atmosphere,” *Sensors*, vol. 20, 4306. doi: 10.3390/s20154306.