

자율주행차량용 광·원격 노면센서 파장선택을 위한 노면상태의 광학적 특성분석

박 찬 봉*

Analysis of Optical Characteristics of Road Surface Conditions to Select Wavelengths for Optical Remote Road Sensor of Autonomous Vehicles

Chan Bong Park*

요 약

최근 자율주행차량의 레벨-5 단계 구현을 위해 도로노면상태를 정확하고 신속하게 파악할 수 있는 광·원격 계측센서 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 도로 노면상태 계측을 위한 광·원격계측 장치의 측정방식 설정 및 최적파장 선택을 위해 460nm, 532nm, 650nm, 980nm 및 1630nm 파장의 광을 송·수신 할 수 있는 광학시스템을 구성하고 건조, 수막 및 결빙 노면상태 샘플에서의 반사도 및 편광도를 계측하였다. 계측된 실험자료의 분석결과로써 노면상태의 구분을 위해 단일파장만의 반사도를 이용하는 경우 보다 VIS/IR 2 개 파장의 반사도의 비 및 편광 대비도를 조합적으로 사용하는 방식이 좀 더 효과적이며 이를 위한 파장쌍으로 532/980nm이 건조, 수막 및 결빙 상태를 가장 잘 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract

Recently, research on the development of optical remote sensors that can measure the road surface conditions accurately and quickly is being actively conducted in order to implement level-5 Autonomous Vehicles. In this study to set the measurement method and the optimal wavelengths for optical road surface remote sensing device, an optical system which can transmitting and receiving light with wavelengths of 460nm, 532nm, 650nm, 980nm and 1630nm was consisted and the reflectance and the polarization at the road surface condition samples of dry, water and ice were measured. As a result of the analysis of the measured experimental data, it was found that the combination of the ratio of reflectance and polarization contrast of the two VIS/IR wavelengths is more effective than using the reflectance of only a single wavelength for the classification of road surface conditions, and that 532/980 nm can distinguish dry, water, and ice conditions well as a pair of wavelengths for this purpose.

Keywords

road sensor, optical remote sensing, polarization contrast, road surface reflectance, autonomous vehicle sensor

* 목원대학교 전기전자공학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7789-264X>

· Received: Aug. 19, 2024, Revised: Sep. 13, 2024, Accepted: Sep. 16, 2024
· Corresponding Author: Chan Bong Park
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering,
Mokwon Univeristy, 88 Doanbuk-ro, Seo-gu, Daejeon, 35349, Korea
Tel.: +82-42-829-7656, Email: cbpark@mokwon.ac.kr

1. 서 론

현재 다수의 국제적 자동차기업은 2028년-2030년 경 레벨 5(완전 자율주행차량)수준의 자율주행 기술 완성을 목표로 하고 있으며 이를 위한 필수적인 기술의 하나로써 도로노면의 급격한 변화에 의한 돌발적 위험요인 발생에 즉각적인 대응이 가능한 자율주행 차량용 노면상태 자동계측기술이 매우 주목을 받고 있다[1]-[3].

도로의 고인 빗물이나 젖은 노면에서 발생하는 수막, 겨울철 적설, 결빙 및 블랙아이스의 발생은 차량의 타이어와 노면 간의 마찰력 변화를 가져와 이에 의한 미끄러짐을 유발한다[4][5]. 이러한 미끄러짐은 차량, 도로 구조물 및 대인과의 충돌에 의한 각종 인적, 물적 교통사고의 주요원인이 되고 있으며 이에 따른 사회적 경제적 손실비용도 지속적으로 확대추세에 있다.

최근까지 보고된 도로 노면상태 계측기술로는 수동형 접촉센서(Passive pavement sensor), 초음파센서(Acoustic sensor), 열센서(Thermal sensor), 수동광학센서(Passive optical sensor) 및 능동 광·원격센서(Active Remote optical sensor)를 사용하는 방식이 있다. 이 중 수동형 접촉센서(온도, 습도, 수분, 용액 깊이, 염분율)는 다수의 센서를 동시에 사용해야 하고 노면상태의 판별 알고리즘이 복잡하여 실시간 측정이 어려운 단점이 있다[6][7]. 초음파 방식은 반사파를 이용하여 습도 혹은 수분의 유무를 측정하는 방식으로 결빙, 눈, 건조 상태 등 다양한 도로 표면 상태를 구분하지 못하는 문제점이 있다[8]. 열센서를 이용하는 방식은 8~14 μm 의 방사열을 감지하는 방식으로 도로표면 주변 환경(공기, 먼지) 및 온도측정거리에 민감하다는 단점이 있다[9].

광학방식 중 수동광학센서 방식은 표면 반사된 광을 카메라 혹은 분광기를 이용하여 해석하는 방법이다. 카메라 방식은 최근 인공지능 데이터처리 기술발전과 더불어 빠르게 발전하는 기술 중 하나이다. 하지만 장치가 비싸고 데이터처리가 복잡하며, 측정오차가 비교적 크다고 보고되고 있다 [10][11]. 분광기를 이용하는 방식은 다양한 표면상태의 측정이 가능하나 기상요건 및 태양광 세기의 변화에 대한 오차가 크고 가 측정 거리가 짧다는

단점이 있다[12][13].

본 연구를 통해 개발하고자 하는 노면상태 계측 기술은 능동형 광·원격계측 방식으로이다. 본 방식은 대상 노면에 직접 단일 파장 혹은 다중 파장의 광을 조사 후 반사된 광의 특성을 분석하는 방식으로 측정거리는 비교적 크고 오차는 다른 방식들에 비하여 가장 적은 것으로 보고되고 있다. 다만 단일 파장으로 결빙, 눈 및 빗물 등의 계측 시 입자형태, 불순물의 함유에 따른 노면반사율을 측정하는 경우 측정오차가 커지는 한계를 가진다[14]. 최근에는 이를 보완하기 위해 다파장 및 편광을 이용한 기술이 보고되고 있다[15]. 본 능동형 광·원격계측 기술을 기반으로 한 상용화 제품으로는 VAISALA사(핀란드)의 DSC111가 대표적이다.

국내에서도 광(LED, LD)를 이용하여 적설 및 도로 노면상태를 계측하는 능동형 광·원격계측기술 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. (주) 마스는 거치형 복합센서(비접촉 광학, 온습도)를 이용하여 거치형 도로노면상태 계측기를 개발 한 바 있다[16]. 인하대학교에서는 532nm 단파장 레이저를 이용한 스캐닝 라이다를 이용한 노면상태를 분류에 대한 연구를 보고한바 있다[17]. 하지만 차량탑재용 레이저, LD 혹은 LED를 이용하여 노면의 상태를 파악하는 국내 상용화제품은 아직까지 보고되고 있지 않다.

본 연구에서는 차량탑재형 도로노면상태 능동형 광·원격계측센서 개발을 위해 가시광선 영역에서 근 적외선까지의 다수의 파장을 이용하여 도로표면 샘플에서의 파장별 반사도 (Reflectance) 및 편광(Polarization)을 측정할 수 있는 광·원격 송수신 장치를 구성하였다. 계측실험 데이터를 이용하여 도로 노면 상태의 아스팔트 건조(Dry), 수막(Water), 결빙(Ice)상태를 구분하기 위한 데이터처리 방식과 이를 위한 최적 파장선택 연구를 진행하였다. 본 연구의 결과는 가시과 근적외선 영역 다 파장의 반사도의 비 및 편광대비도를 이용한 차량용능동적 광·원격 계측 방식에 대한 최초의 보고라는 점에서 의의를 가진다.

II. 광학장치의 구성 및 실험

2.1 노면에서의 반사 및 편광신호

노면으로 입사된 광의 파장에 따른 반사는 노면을 구성하는 물질의 종류, 조성, 두께, 표면형상 등에 따라 반사, 산란, 굴절, 투과, 흡수 등의 다양한 광학적 특성을 가진다. 이중 광의 반사는 크게 정반사(Specular reflection)와 확산반사(Diffusion reflection)로 구분되며 이는 그림 1과 같다. 그림 1의 (a)의 정반사는 거울반사라고도 하며 아스팔트 표면 위에 채워진 물 혹은 얼음표면에서의 반사이며 이때 입사각(θ_i)과 반사된 출력광의 각도(θ_o)는 같다. 그림 1의 (b)의 확산반사(난반사)는 아스팔트 표면상의 전 방향으로 무작위 산란되는 반사이며 이때 산란광의 강도는 입사광의 각도와 상관없이 없다. 실제 도로에서의 광의 반사는 두 가지 반사형태 모두를 포함한다. 일반적으로 아스팔트 도로의 표면은 매우 불균일하며 이의 경우 정반사 대비 확산반사의 비중이 커질 수 있다. 아스팔트 도로 표면이 물(빛물)로 채워지거나, 혹은 얇은 두께의 얼음막이 형성된 경우 이의 표면은 균일해지며 이때의 반사는 정반사의 비중이 확산반사의 비중보다 커지게 된다[18]. 이러한 두 가지 반사의 강도를 비교하는 방식은 단일파장을 이용한 광 측정방식에서 아스팔트 건조/물 혹은 아스팔트 건조/결빙의 도로표면 상태를 구분하는 데 유효하다. 하지만 매우 다양한 도로표면 상태를 구분하기 위해서는 즉 건조, 물 상태와 결빙 상태를 좀 더 명확히 구분하기 위해서는 전술한 바의 여러 파장의 흡수율의 차이 혹은 편광을 이용하는 방식이 추가되어야 한다.

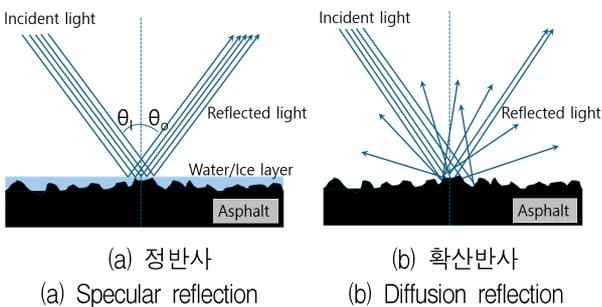


그림 1. 도로노면에서의 반사
Fig. 1. Reflection on the road surface

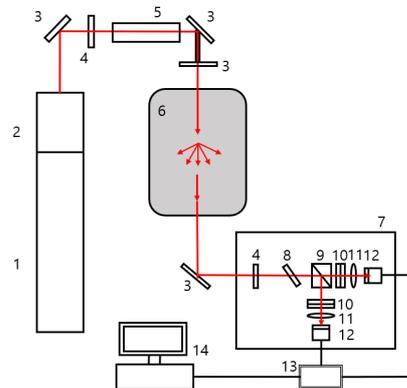
단파장 사용의 문제점을 해결하기 위해 제안된 새로운 방식 중의 하나는 다 파장의 광을 이용하여 송신광의 파장에 따른 반사도(Reflectance)의 변화를 이용하는 방식이며 다른 하나는 편광(Polarization)을

이용한 방식이다. 다파장을 이용한 방식은 파장에 따른 굴절율(Reflective index) 허수부의 변화 즉 파장별 에너지 흡수차에 의한 도로노면 반사도의 변화를 이용하는 방식이다. 편광을 이용하는 방식은 노면을 구성하는 물질내로 투과된 광의 부피산란(Volume scattering)에 의한 편광도 변화의 차이를 이용한 방식이다.

2.2 송·수신 광학 시스템의 구성

노면상태 계측을 위한 다파장 송·수신이 가능한 광학시스템을 구성하였다. 그림 2는 구성된 시스템의 블록다이어그램을 나타내고 있다. 그림 2에서 송신 시스템은 Surellite Nd:YAG 레이저 기반 OPO (Optical Parametric Oscillator) 다파장 레이저 발진기 및 송신광학계로 구성된다. 수신시스템은 시료에서 반사된 광의 파워를 계측하기 위한 분광기, 검출기, 신호처리기 및 데이터 처리기로 구성된다. 표 1은 구성된 송·수신 장치의 레이저, OPO 및 주요 광학 장치의 제원을 나타내고 있다.

Nd:YAG레이저의 주 발진파장은 2차 고조파 및 3차 고조파 발진기를 통과 한 후 OPO에 의해 410nm 가시광선(VIS)부터 2400nm 적외선(IR)영역 중에서 선택된 파장의 광을 발진한다. 이후 편광기와 확대경을 통과하여 지름 8~10mm의 빔으로 확대된 후 다시 반사율 90% 이상의 전반사경을 통하여 시료에 입사된다.



1. Nd:YAG Laser 2. OPO 3. Total Mirror 4. Polarizer 5. Beam Expander
6. Sample plate 7. Spectrometer 8. Dichroic Filter 9. Cubic Polarizer
10. Interference Filter 11. Lens 12. Detector 13. Signal Processor
14. Data processor

그림 2. 송·수신 광학시스템의 블록다이어그램
Fig. 2. Block diagram of optical transmitting and receiving system

표 1. 송·수신 광학시스템의 제원

Table 1. Characteristic of optical transmitting and receiving system

Transmitting system
Laser : Surelite III-10 with harmonic generator Output : 220mJ @532nm, 100mJ @355 nm Repetition rate: single or 10Hz OPO : tuning range :460-2500 nm @355 nm pumping Beam expander magnification : 2-5 (variable)
Receiving system
Total mirror : Reflectance > 90% for VIS-IR Spectrometer : 2 channel Dichroic filter : VIS and IR selection Polarizer : Perpendicular/Parallel polarization Wavelengths 420-680nm and 700-1100nm Interference filter: 10nm(Wavelength width) Detector : Thorlab(c) S120C for VIS Thorlab(c) S120C 122C for IR Signal processor ; Thorlab(c) PM400K console Data processor ; Window10 based PC

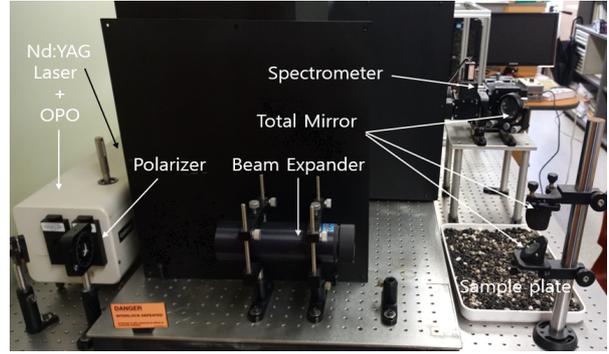


그림 3. 송·수신 광학시스템의 사진
Fig. 3. Picture of transmitting and receiving system

파장가변 OPO 발진기 출력과장 중에서 실험에 사용된 파장은 460nm, 532nm, 650nm, 980nm 및 1630nm이다. 시료에서 반사된 광은 반사경을 통과하여 분광기로 입사되며 분광기내 광학계는 송신과장과 동일한 VIS 및 IR 파장의 반사된 광의 파워 혹은 수직/수평 편광성분 파워를 각각 분리 검출할 수 있도록 구성되었다. 분광기로 입사된 광은 Dichroic 필터에 의해 VIS 혹은 IR 파장광을 선택적으로 투과시키며 이후 반사 신호만을 측정하는 경우에는 협대역 필터 및 렌즈를 거친 후 검출기에 의해 파워가 측정된다. 편광도를 측정하는 경우에는 Dichroic 필터 뒷단에 편광기(Cubic polarizer)를 추가하여 수신광은 수직편광(Perpendicular polarization) 및 수평편광(Parallel polarization) 성분으로 나뉘지게 되고 이후 각 편광성분별로 협대역 필터 및 렌즈를 거쳐 최종적으로 검출기에 의해 파워가 검출된다. 수신광의 검출기로는 Thorlab(c) S120C 및 S122C를 사용하였다. 파장범위는 각각 400~1100nm, 700~1800nm 이며 최대파워는 50mW, 파워분해능은 1nW이다. 검출기의 신호처리기로는 Thorlab(c) PM400K 콘솔 및 Interface 프로그램을 사용하였다. 그림 3은 구성된 송·수신 광학시스템 및 시료의 배치 사진을 나타내고 있다.

도로 노면 아스팔트의 건조(Dry) 상태, 아스팔트 수막(Water) 상태, 아스팔트 결빙(Ice) 상태를 구현하기 위하여 아스팔트 재료인 아스콘, 강모래, 소립모래, 자갈 등을 혼합한 후 이의 표면을 평평하게 다져 유사 아스팔트 건조 시료를 제작하였다. 아스팔트 물 상태는 위의 아스팔트 건조 상태의 표면이 모두 잠기도록 약 1-3mm 높이로 빗물을 채워서 제작하였으며, 아스팔트 결빙상태는 아스팔트 빗물상태를 얼려서 제작하였다. 그림 4는 제작된 아스팔트 건조상태(a), 아스팔트 수막상태(b), 아스팔트 결빙상태(c)의 시료들을 보이고 있다.

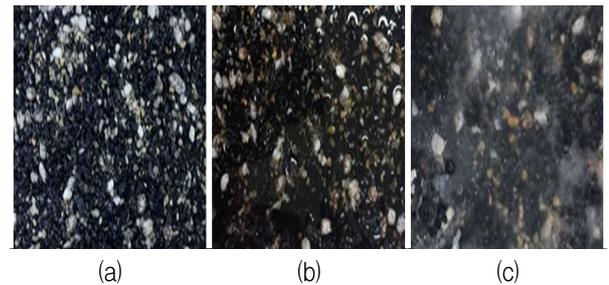


그림 4. 제작된 아스팔트 시료
(a) 건조상태, (b) 수막상태, (c) 결빙상태
Fig. 4. Manufactured asphalt samples
(a) dry condition, (b) water condition, (c) ice condition

III. 광학적 특성 계측

3.1 반사도의 측정

파장에 따른 노면시료별 반사율 변화를 측정하기 위해 3가지 노면 시료에 대하여 OPO 출력과장을 460nm(blue), 532nm(green), 650nm(red), 980nm(IR1)

및 1630nm(IR2) 로 가변시키면서 각각의 파장에 대한 정반사 신호의 파워를 측정하였다. 각각의 파장에서 입사각 θ 를 27° 38°, 46°, 51°도로 변화시키면서 검출기에서의 출력을 측정하였다. 한 개의 고정된 각도에 대하여 바닥시료의 위치를 바꿔가면서 약 15회~20회를 측정하여 이의 평균값을 구하였다. 그림 5에서 그림 9까지는 각각의 파장에 대한 3가지 노면상태인 건조, 수막, 결빙에서의 입사각 변화(Incident angle)에 대해 정반사된 광의 파워(Reflected signal power)의 평균값(도형)과 이의 측정오차범위(실선)를 나타내고 있다. 그림 5에서 그림 9까지의 결과에서 일반적으로 입사각 27°에서 적은 값을 보였으며 입사각도 증가에 따라 파워는 증가하여 46°각도(532nm는 38°)에서 최대값을 보인 후 다시 51°에서 감소하는 경향을 나타내었다. 기존의 연구보고에서 정반사의 강도는 입사각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내지만 본 실험에서의 감소하는 것을 나타낸 것은 시료에서 반사 후 증가된 광의 단면적을 수신 광학계 및 검출기의 검출단면적이 모두 포함하지 못한 손실로 보여진다.

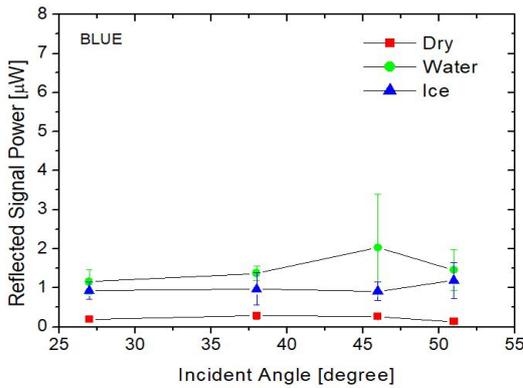


그림 5. 460 nm 파장에서 입사각도에 따른 건조, 수막, 결빙 노면상태에서의 정반사의 파워 변화
 Fig. 5. Specular signal power via incident angles of 460 nm in the road condition of dry, water and ice

그림 5에서 그림 9까지의 파장별 정반사파워의 측정 결과로부터 파장별 송신레이저 파워 및 송수신 광학계의 투광율, 검출기의 파장별 감도를 보정하여 시료별 반사도(Reflectance)를 구하고 이의 평균값을 구하였다. 반사도 계산을 위한 관련식은 다음의 식 (1)과 같다[19].

$$Reflectance(\lambda) = \frac{P_D(\lambda) T_r(\lambda) G_D(\lambda)}{P_T(\lambda) T_T(\lambda)} \times 100 \quad (1)$$

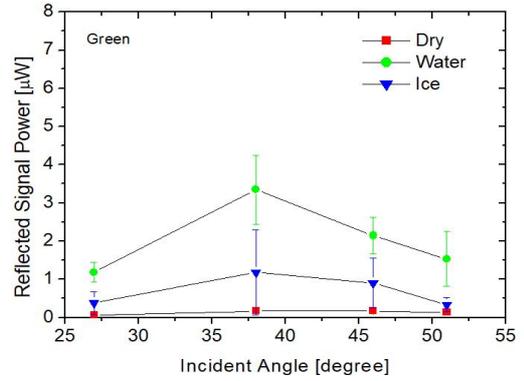


그림 6. 532 nm 파장에서 입사각도에 따른 건조, 수막, 결빙 노면상태에서의 정반사의 파워 변화
 Fig. 6. Specular signal power via incident angles of 532 nm in the road condition of dry, water and ice

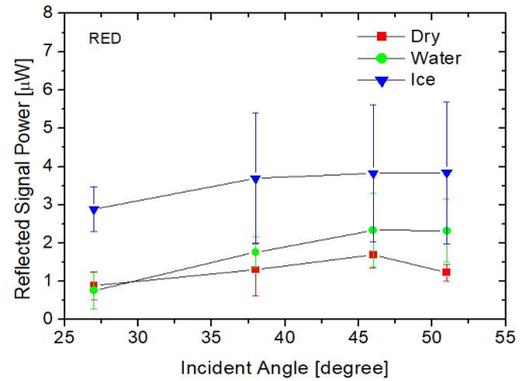


그림 7. 650 nm 파장에서 입사각도에 따른 건조, 수막, 결빙노면상태에서의 정반사의 파워 변화
 Fig. 7. Specular signal power via incident angles of 650 nm in the road condition of dry, water and ice

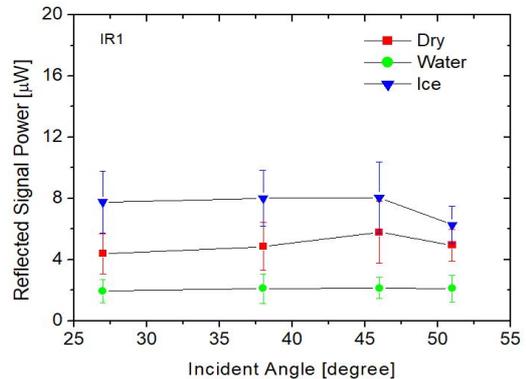


그림 8. 980 nm 파장에서 입사각도에 따른 건조, 수막, 결빙노면상태에서의 정반사의 파워 변화
 Fig. 8. Specular signal power via incident angles of 980 nm in the road condition of dry, water and ice

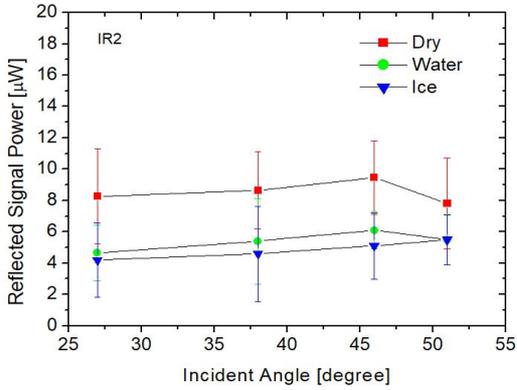


그림 9. 1630 nm 파장에서의 입사각도에 따른 건조, 수막, 결빙 노면상태에서의 정반사의 파워 변화
 Fig. 9. Specular signal power via incident angles of 1630 nm in the road condition of dry, water and ice

식 (1)에서 $P_T(\lambda)$ 는 파장별 송신레이저의 파워이며 $P_D(\lambda)$ 는 검출기에서 검출된 수신신호의 파워이다. $T_T(\lambda)$ 와 $T_r(\lambda)$ 는 각각 송신 및 수신 광학계의 투과율보정상수이다. $G_D(\lambda)$ 는 검출기의 파장에 따른 감도의 보정계수이다. 송신광과 수신검출기의 거리가 20cm 내외로 짧고 실내에서 실험되었으므로 위의 반사도의 계산에서 거리에 따른 대기 감쇄계수는 고려하지 않았다.

그림 10은 식(1)에 의해 계산된 건조, 수막 및 결빙 샘플에서의 정반사에 의한 파장별 반사도의 평균값과 오차를 나타내고 있다. 그림에서 계측된 수막에서의 반사율은 약 0.4~7.2의 값을 가지며 460nm, 532nm에서 결빙이나 건조 상태에 비해 약 4~6.5 정도 높은 값을 보인 후 파장의 증가에 따라 감소하여 980nm에서 약 0.4의 최소값을 보인 후 1630nm 까지 다시 완만히 증가하는 변화를 보였다.

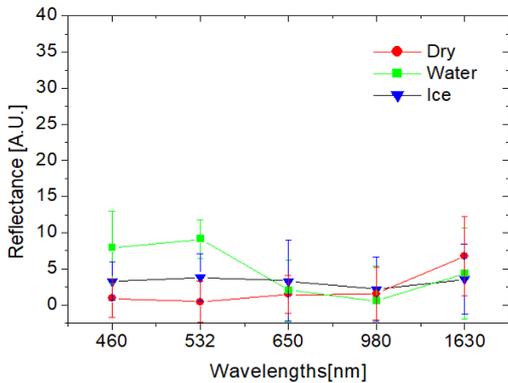


그림 10. 파장에 따른 건조, 수막, 결빙 노면상태에서의 반사도
 Fig. 10. Reflectance dependent on wavelengths in the road condition of dry, water and ice

결빙의 경우는 전 파장에서 1~3%의 값을 가지며 650nm, 980nm에서 약간 감소하였다가 1630nm 파장에서 약간 증가하는 변화를 보였으나 전체적인 변화의 편차는 크지 않았다. 건조상태는 0.5~1.2의 값을 가지며 460nm에서 최소값을 보인 후 1630nm까지 계속하여 증가하는 변화를 보였다. 980nm에서는 수막상태보다 높은 값을 1630nm에서는 다른 상태보다 제일 높은 반사도를 나타내었다.

3.2 편광대비도의 측정

노면 상태를 구분하기 위한 다른 방법의 하나로써 460nm, 532nm, 650nm, 980nm 파장에 대한 정반사와 확산반사에서의 편광도를 측정하였다. 1630nm의 경우는 파장에 적합한 편광기의 부재로 본 실험에서는 제외되었다. 정반사의 경우에는 수직편광 광에 대하여 동일한 입사각 및 반사각 46°에서의 검출기에서의 수직 수평편광 신호의 크기를 측정하였고 확산반사의 경우에는 입사각 46° 반사각 0°에서의 수직 수평 편광 신호의 크기를 측정하였다. 본 계측실험도 각각의 파장별로 한 시료에 대하여 약 20여회 진행되었다. 각각의 실험에서 얻어진 수직 수평 편광신호를 이용하여 편광대비도(PC, Polarization Contrast)를 계산하였다. 이의 계산식은 다음과 같다[20].

$$PC(\lambda) = \frac{P_{\perp}(\lambda) - P_{\parallel}(\lambda)}{P_{\perp}(\lambda) + P_{\parallel}(\lambda)} \quad (2)$$

식 (2)에서 P_{\perp} 는 수신신호 중 수직편광성분 신호의 세기를 P_{\parallel} 는 수신신호 중 수평편광성분 신호의 파워를 나타낸다. 그림 11은 건조, 수막 및 결빙 샘플에서의 정반사와 확산반사의 파장별 편광대비도를 나타내고 있다. 건조의 경우 정반사 및 확산반사의 경우 모두에서 편광대비도가 +의 값을 나타냈으며 확산반사의 경우 그 크기가 0.07~0.164의 값으로 정반사의 0.006~0.03에 비하여 매우 크게 증가하였다. 수막의 경우에는 정반사와 확산반사의 경우에서 모든 파장에서 모두 -의 값을 나타내었고 정반사는 약 -0.004~-0.035의 값을 확산반사의 경우 -0.012~-0.04로 서로 비슷한 값을 나타내었다. 결빙의 경우에는 정반사에서 모두 -의 값으로써 -0.007~-0.014의 값을 확산반사에서는 -0.025~+0.026의 값을 나타내었다.

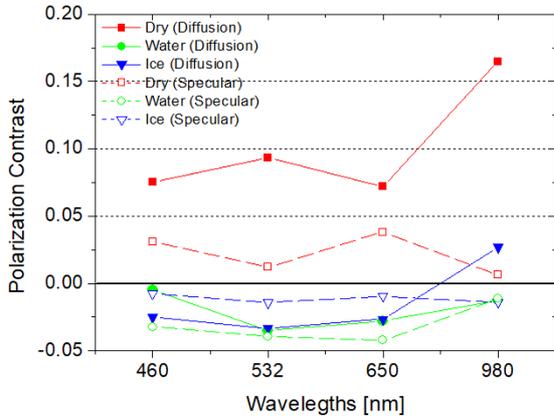


그림 11. 파장에 따른 건조, 수막, 결빙 노면상태에서의 정반사와 확산반사의 편광대비도
 Fig. 11. Polarization contrast of specular and diffusion reflection in the road condition of dry, water and ice dependent on wavelengths

IV. 측정결과 분석 및 파장선택

4.1 반사도를 이용한 분류

그림 10의 파장별 반사도 측정결과에서 보여주는 결과로써 단일파장을 사용할 경우 건조, 수막 및 결빙의 반사도의 차이(대비)는 460nm, 532nm에서 비교적 크며 650nm이상의 긴 파장에서는 매우 적은 차이를 나타내었다. 따라서 460nm, 532nm 단일 파장을 이용한 노면상태의 구분은 가능하여 보인다. 하지만 460nm, 532nm의 경우에도 아스팔트 조성물질의 색상변화, 수막의 두께, 결빙의 얼음두께 및 결빙상태의 변화의 다양성 및 반사도 측정오차의 크기를 고려한다면 단일파장만을 이용하여 위의 세 가지 시료를 구분하는 것은 불분명한 것으로 보인다. 좀 더 명확한 구분을 위하여 파장에 따른 도로표면의 시료별 에너지 흡수율 변화 정보를 가지는 짧은 파장과 긴 파장의 반사도의 비인 CR(Color Ratio)값을 계산하였다. 즉 CR값은 한 파장에서의 시료별 반사도의 절대적인 차이보다는 파장변화에 따른 시료별 반사도의 변화의 기울기가 더 중요한 정보가 된다. CR(Color Ratio) 값의 계산식은 (3)과 같다. 이의 결과는 표 2와 같다.

$$CR = \frac{Reflectance(\lambda_{short})}{Reflectance(\lambda_{long})} \quad (3)$$

표 2에서 #1그룹은 460nm 파장대비 긴 파장의 CR값을 #2는 532 nm 대비, #3은 650nm 대비, #4는 980nm 대비 긴 파장의 CR값을 각각 나타내고 있다. $\Delta\lambda$ 는 긴 파장과 짧은 파장의 파장차이 이다. 표에서 CR값이 1보다 큰 경우는 짧은 파장의 반사도가 긴 파장의 반사도 보다 큰 경우를 나타내며 이는 파장 증가에 따른 반사도의 감소를 나타낸다. 반대로 CR값이 1보다 작은 경우는 짧은 파장의 반사도가 긴 파장의 반사도 보다 적은 경우를 나타내며 이는 파장 증가에 따른 반사도의 증가를 나타낸다.

이의 결과에서 수막의 경우 460/980nm 및 532/980nm 파장쌍에서 13.7~15.7의 큰 CR값을 나타내었다. 이는 파장에 따라 반사도가 급격히 변화하는 것을 의미한다. 건조의 경우에는 460/532nm 파장을 제외한 모든 파장에서 1이하의 값을 나타내어 건조의 경우에는 파장증가에 따라 반사도가 증가 하는 것으로 나타났다. 결빙의 경우에는 전 파장에서 CR값이 0.6~1.74의 값으로 파장에 의한 기울기의 증감 경향이나 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 이를 결과들을 고려하면 460/980nm 및 532/980nm 두 파장을 사용하는 경우 매우 큰 CR값의 크기를 이용하여 수막의 상태를 구분하고 1하의 값인 0.456~0.589의 값을 이용하여 파장증가에 따른 반사율 기울기의 증가를 이용하여 건조상태를 구분하는 것이 가능할 것으로 보인다. 이 두 개의 파장쌍 사용에서 결빙의 CR값은 건조와 수막의 중간에서의 값인 1.48~1.74의 값을 나타내었다.

표 2. 건조, 수막, 결빙 노면상태에서 짧고/긴 두 파장의 반사도의 비

Table 2. Color ratio of reflectance(CR) between short and long wavelengths in the road condition of dry, water and ice

	Wavelength(S) / Wavelength(L), $\Delta\lambda$		CR		
			Dry	Water	Ice
#1	460/532	$\Delta 72$	1.291	0.873	0.851
	460/650	$\Delta 190$	0.633	3.916	0.980
	460/980	$\Delta 520$	0.589	13.784	1.484
	460/1630	$\Delta 1170$	0.138	1.824	0.914
#2	532/650	$\Delta 118$	0.490	4.482	1.151
	532/980	$\Delta 448$	0.456	15.775	1.743
	532/1630	$\Delta 1098$	0.106	2.088	1.074
#3	650/980	$\Delta 330$	0.931	3.519	1.515
	650/1630	$\Delta 980$	0.218	0.465	0.933
#4	980/1630	$\Delta 650$	0.234	0.132	0.616

4.2 편광대비도(PC)를 이용한 분류

그림 11에서 볼 수 있듯이 각각의 노면상태에서 파장에 따른 정반사와 확산반사의 편광 대비도는 확산반사의 경우에서 그 파장대비가 크므로 확산반사를 이용하는 것이 상대적으로 도로 상태구분에 유리함을 알 수 있다. 표 3은 건조, 수막, 그리고 결빙상태에서의 파장별 확산반사의 편광대비도 값을 나타내고 있다. 건조의 경우 모두 +의 값으로써 0.07~0.164의 가장 높은 값의 분포를 나타내었고, 수막의 경우는 전 파장에서 -의 값을 나타내어 -0.04~-0.012의 값을 나타내었다. 따라서 모든 파장에서 편광대비도의 +, -을 이용하여 건조상태와 수막의 상태를 잘 구분할 수 있음을 알 수 있다. 결빙의 경우에는 -0.025~+0.0265의 값을 나타내었고 이는 수막의 경우와 비슷하다. 다만 980nm에서 짧은 파장에 비하여 +의 값으로 반전된 것은 IR 파장에서의 수막과 결빙의 상태를 구분하는 가능성을 보여주고 있다. 참고적으로 그림 12는 가로축을 반사도로 세로축을 편광대비도로 놓고 파장별 도로노면상태 건조, 수막, 및 결빙에서의 값을 표시한 것이다. 건조상태는 모든 파장에서 낮은 반사율과 높은 편광대비도를 보였으며 결빙은 다른 노면상태 대비 중간정도의 반사율과 편광도를 나타내었다. 수막의 경우에는 모든 파장에서 낮은 편광대비도를 나타내었으며 반사도는 파장에 따라 매우 큰 편차를 나타내었다. 위의 결과들을 고려할 때 2파장을 사용하는 경우에는 460/980nm 혹은 532/980nm를 사용하는 것이 건조, 수막, 결빙을 구분하는 가장 최적의 조합으로 보인다.

표 3. 건조, 수막, 결빙 노면상태에서 파장별 편광대비도
Table 3. Polarization contrast in the road condition of dry, water and ice

Wavelength	PC		
	Dry	Water	Ice
460 nm	0.075	-0.004	-0.025
532 nm	0.093	-0.035	-0.033
650 nm	0.072	-0.028	-0.026
980 nm*	0.164	-0.012	0.0265

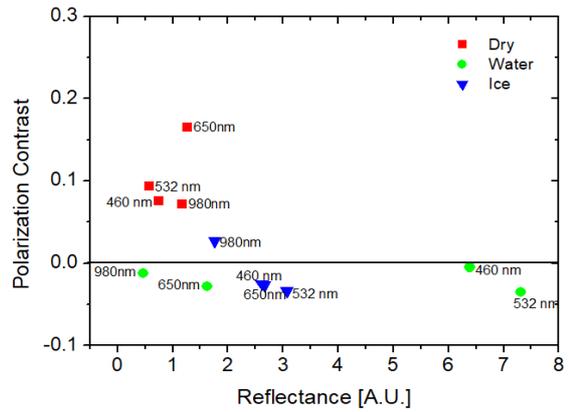


그림 12. 건조, 수막, 결빙 노면상태에서 파장별 반사도 대비 편광대비도

Fig. 12. Polarization contrast via reflectance at each wavelengths in the road condition of dry, water and ice

V. 결 론

본 연구에서는 도로 노면상태 계측을 위한 광·원격계측 장치의 최적파장 선택 및 측정방법 설정을 위해 460nm, 532nm, 650nm, 980nm 및 1630nm 파장의 광을 송·수신 할 수 있는 광학장치를 구성하고 건조, 수막 및 결빙 노면상태 샘플에서의 반사도 및 편광대비도를 측정하였다. 측정된 결과로써 건조, 수막 및 결빙 노면상태의 구분을 위해 단일파장만의 반사도를 이용하는 경우보다 VIS, IR영역의 2개의 파장인 460/980nm 혹은 532/980nm에서의 반사도의 비(CR)를 사용하는 것이 13.7-15.7의 높은 값은 수막상태와 1이하의 값인 0.456-0.598의 값은 건조상태를 좀 더 명확히 구분할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 편광대비도의 측정결과로써 확산반사에 대한 980nm의 편광대비도를 이용하는 경우 단일 파장을 사용하더라도 결빙의 +값과 수막의 -값을 이용하여 두 상태를 잘 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

이를 종합할 때 2파장 반사도의 비(CR) 와 편광대비도(PC) 두 정보를 동시에 조합하여 사용하는 경우에서 가장 효율적인 도로노면 상태의 판단이 가능할 것으로 보이며 이를 위한 파장쌍으로는 532/980nm 가 가장 적합한 것으로 분석되었다. 즉 차량하부 탑재용 도로노면 계측장치로써, 본 연구에서 제시한 2파장 CR, PC 조합방법으로 532/980nm 를 사용하면 노면상태의 판별 알고리즘에서 먼저

두 파장의 수신신호의 CR값을 이용하여 큰 양의 CR값을 보이는 수막상태와 1보다 적은 CR값을 보이는 건조상태를 먼저 구분하고, 다음단계로 PC값을 계산하여 -값을 보이는 수막과 +값을 보이는 결빙상태를 구분하여 최종적으로 건조, 수막, 결빙상태 판별이 가능할 것으로 보인다. 본 방식은 VIS/IR 파장쌍의 능동형 광을 이용한 방식으로 매우 짧은 시간에 측정이 가능하므로 도로 표면상태의 실시간 측정이 가능하다. 또한 비교적 높은 출력의 레이저 광을 이용하여 신호잡음비(SNR)을 높임으로써 측정의 정확성을 높일 수 있다.

하지만 수십 미터 전방의 도로 상태에 대한 측정에서는 송신파장과 동일한 가시광선 영역에서의 배경광(도로주변 및 차량브레이크, 방향지시등)의 간섭이 매우 심할 것으로 예상되고, 대기변수의 영향 및 운전자의 광에 대한 eye-safety 조건도 만족되어야 하므로 송신레이저의 파장은 eye-safety 파장으로서 이의 출력은 낮추고 검출기의 감도는 높여야 하는 문제점이 생긴다. 따라서 IR 2파장을 사용하는 전방계측용 시스템에 관한 연구는 계속 진행해야 할 과제이다. 또한 매우 다양하게 변화하는 실제도로상에서의 필드테스트도 더불어 진행되어야 중요한 과제이다. 본 연구는 차량용 도로노면상태 센서 개발을 위한 기초연구이지만 이의 결과는 자율주행차량용 뿐만 아니라 거치형 도로노면상태 계측시스템의 개발에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] K. Mattas, G. Albano, R. Donà, M. C. Galassi, R. Suarez-Bertoa, S. Vass, and B. Ciuffo, "Driver models for the definition of safety requirements of automated vehicles in international regulations. Application to motorway driving conditions", *Journal of Accident Analysis & Prevention*, Vol. 174, No. 106743, pp. 16-32, Jun. 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4025980>.
- [2] M. A. Khan, H. E. Sayed, S. Malik, T. J. Khan, N. Alkaabi, and H. Ignatious, "Level-5 Autonomous Driving—Are We There Yet A Review of Research Literature", *Journal of ACM Computing Surveys*, Vol. 55, No. 2, pp. 1-38, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1145/3485767>.
- [3] M. Yamada, T. Oshima, K. Ueda, I. Horiba, and S. Yamamoto, "A study of the road surface condition detection technique for deployment on a vehicle", *Journal of JSAE Review*, Vol. 24, No. 2, pp. 183-188, Apr. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(03\)00006-7](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(03)00006-7).
- [4] X. Huang, Y. Jiang, B. Zheng, and R. Zhao, "Theory and methodology on safety braking of autonomous vehicles based on the friction characteristic of road surface", *Science Bulletin*, Vol. 65, No. 30, pp. 3328-3340, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1360/TB-2020-0029>.
- [5] S. Kim, Y. Jang, S. Kim, D. Min, H. Na, and J. Choi, "A Study on the Effects of Factors of Traffic Accidents Caused by Frozen Urban Road Surfaces in the Winter", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 79-87, Mar. 2015. <https://doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.2.079>.
- [6] X. Zhi, H. Cho, B. Wang, C. H. Ahn, H. S. Moon, and J. S. Go, "Development of a Capacitive Ice Sensor to Measure Ice Growth in Real Time", *Journal of Sensors*, Vol. 15, No. 3, pp. 6688-6698, Mar. 2015. <https://doi.org/10.3390/s150306688>.
- [7] A. Ikiades, "Direct ice detection based on fiber optic sensor architecture", *Journal of Applied Physics Letter*. Vol. 91, No. 104104, Sep. 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2772183>.
- [8] P. Mioduszewski and W. Sorociak, "Acoustic evaluation of road surfaces using different Close Proximity testing devices", *Journal of Applied Acoustics*, Vol. 204, No. 109255, Mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109255>.
- [9] P. Jonsson and M. Riehm, "Infrared Thermometry in Winter Road Maintenance", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 29, No. 6, pp. 846-856, Jun. 2012. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00071.1>.

- [10] H. A. Moati, J. Morris, Y. Zeng, M. W. Corie, and V. Y. Garas, "Near field ice detection using infrared based optical imaging technology", *Journal of Optics & Laser Technology*, Vol. 99, No. 1, pp. 402-410, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.029>.
- [11] V. Tümen, O. Yildirim, and B. Ergen, "Recognition of Road Type and Quality for Advanced Driver Assistance Systems with Deep Learning", *Elektron. Elektrotehnika*, Vol. 24, No. 6, pp. 67-74, Aug. 2018. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.24.6.22293>.
- [12] J. Casselgren, S. Rosendahl, M. Sjö Dahl, and P. Jonsson, "Road condition analysis using NIR illumination and compensating for surrounding light", *Journal of Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 77, pp. 175-182, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.08.002>.
- [13] L. Colace, F. Santoni, and G. Assanto, "A near-infrared optoelectronic approach to detection of road conditions", *Journal of Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, No. 5, pp. 633-636, May 2013. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.01.003>.
- [14] T. Ogura, I. Kageyama, K. Nasukawa, Y. Miyashita, H. Kitagawa, and Y. Imada, "Study on road surface sensing system for snow and ice road", *Journal of JSAE Review*, Vol. 23, No. 3, pp. 333-339, Jul. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(02\)00200-X](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(02)00200-X).
- [15] J. Casselgren and M. Sjö Dahl, "Polarization resolved classification of winter road condition in the near-infrared region", *Journal of Applied Optics*, Vol. 51, No. 15, pp. 3036-3045, May 2012. <https://doi.org/10.1364/AO.51.003036>.
- [16] J. H. Park, "Development of multipurpose optical black ice sensor system to prevent traffic accidents in winter", *Journal of the Korean Asphalt Institute*, Vol. 31, pp. 289-295, Dec. 2021. <https://doi.org/10.22702/jkai.2021.11.2.26>.
- [17] J. I. Shin, H. S. Park, and T. J. Kim, "Characteristics of Laser Backscattering Intensity to Detect Frozen and Wet Surfaces on Roads", *Journal of Sensors*, Vol. 2019, pp. 1-9, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8973248>.
- [18] J. Casselgren, M. Sjö Dahl, and J. LeBlanc, "Angular spectral response from covered asphalt", *Journal of Applied Optics*, Vol. 46, No. 20, pp. 4277-4288, Aug. 2007. <https://doi.org/10.1364/AO.46.004277>.
- [19] Q. Ding, W. Chen, B. King, Y. Liu, and G. Liu, "Combination of overlap-driven adjustment and Phong model for LiDAR intensity correction", *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 75, pp. 40-47, Jan. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.09.015>.
- [20] A. Piccardi and L. Colace, "Optical Detection of Dangerous Road Conditions", *Journal of Sensors*, Vol. 19, No. 6, pp. 1360-1372, Mar. 2019. <https://doi.org/10.3390/s19061360>.

저자소개

박 찬 봉 (Chan Bong Park)



1999년 3월 : 경희대학교
전자공학과(공학박사)
2001년 9월 ~ 2006년 9월 :
일본국립환경연구원 연구원
2010년 2월 ~ 2011년 2월 :
목원대학교 국제환경관측센터
연구원

2011년 2월 ~ 현재 : 목원대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 광계측, 레이저레이더, 광신호해석