

비접촉식 지표면 화학 오염 탐지용 라만 분광시스템 설계 및 성능확인

고 영 진^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

The Design and Test of the Stand-off Surface Chemical Contaminant Detection System based on Raman Spectroscopy

Young Jin Koh^{*,1)}

¹⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 25 February 2019 / Revised 5 April 2019 / Accepted 26 April 2019)

ABSTRACT

In order to detect toxic chemical spread on field ground, we developed stand-off Raman spectrometer system which employed a deep UV laser. In this paper, the design and specification of various components in the spectrometer system are described. Some results when the detection system was tested on the outdoor roads are shown, which may help researching stand-off chemical detectors based on Raman spectroscopy.

Key Words : Deep UV Laser(단자외선 레이저), Raman Scattering(라만 산란), Stand-off Detection(비접촉식 탐지), Chemical Detection(화학탐지)

1. 서론

최근 화학물질에 대한 접근이 용이해지면서 산업 현장에서의 폭발사고, 화학작용제를 이용한 테러 등의 위험도 함께 증가하여, 군인을 포함한 일반 시민들도 심각한 피해에 노출될 수 있다^[1]. 이러한 피해를 최소화 하기 위해 위험물의 노출을 신속히 탐지하는 장비의 필요성도 높아지고 있으며, 다방면에서 이에 대한 연구 개발이 이루어지고 있다.

위험물을 탐지하는 장비는 탐지 대상물질의 도입 방법에 따라 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있다. 접촉식 방법은 화학물질을 직접적으로 탐지장비 내로 도입한 후 분석하는 방법으로 여기에는 ion mobility spectrometry, colorimetric method, fluorimetric array, mass spectrometry 등의 기술을 기반으로 한 장비들이 있다. 이 방법에 의해서는 장비의 부피가 작고 이동이 용이하다는 것 등 많은 장점들이 있으나, 위험물과 직접 접촉하기 때문에 사용자의 안전상 문제, 장비의 오염 야기, 탐지 거리의 제한 등 단점도 가지고 있다. 비접촉식 방법은 화학물질과의 직접적 접촉없이 물질이 나타내는 광학적 신호에 의해서 분석하는

* Corresponding author, E-mail: yj04@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

방법으로 여기에는 infrared spectroscopy, laser-induced breakdown spectroscopy, Raman spectroscopy 등의 기술을 기반으로 한 장비들이 있다. 비접촉식이기 때문에 상기 접촉식 방법이 갖는 단점을 보완할 수 있다^[2,3].

화생방 작전 하에서 살포된 화학작용제의 탐지를 위해 개발된 현용 화생방정찰차는 지표면에 누출된 화학작용제를 탐지하기 위해 두 개의 실리콘 바퀴로 구성된 연속시료공급장치와 질량분석기 기반의 탐지장비를 이용한다. 이때, 바퀴에 묻혀진 시료는 질량분석기에 직접 접촉하여 시료를 공급함으로써 바퀴 굴림으로 인한 정찰속도 제한, 실리콘 바퀴의 잦은 교체, 분석장비의 오염 등의 문제점이 있다. 따라서 이러한 단점 극복과 화학전 하에서의 진장 오염회피 및 기동성 향상을 위한 비접촉식 지표면 화학 탐지장비의 개발 필요성이 대두되고 있다^[4].

비접촉식 장비의 기반 기술 중, Raman spectroscopy는 화학물질에 광원 조사 후 발생하는 물질 고유의 산란 스펙트럼을 분자지문으로 활용하는 만큼 다양한 화학물질을 분석할 수 있고, 수분에 의한 영향성이 적어 야외환경에 적합하다^[5]. 더불어, 최근 라만 산란을 유도하기 위한 광원으로 태양광 간섭 및 지표면 존재 생물물질에 의한 형광 간섭을 회피할 수 있는 단자외선(deep UV) 레이저를 이용하는 연구가 진행되고 있다^[6-8].

이러한 사유에 의해, 차량 탑재 후 지표면에 누출된 독성 화학물질을 비접촉식으로 신속히 탐지하기 위한 장비로써 248 nm의 단자외선 파장을 유도광원으로 하는 라만 분광시스템을 설계 및 제작하였다. 본 논문에서는 개발된 장비를 기반으로 실제 시스템 구성, 장비의 성능을 확인하기 위해서 수행한 시험 및 결과에 대해 기술하였으며, 최종적으로 개발된 장비의 야외 탐지에 대한 적용 가능성을 확인하였다.

2. 라만 분광시스템 구성

지표면 비접촉식 화학탐지용 라만 분광시스템의 핵심 구성은 레이저를 조사하여 지표면에 존재하는 화학물질로부터 라만 산란광을 발생시키고 이를 수집하는 탐지기와 전달된 라만 산란광을 공간적으로 분해하여 물질별 고유 정보를 제공하는 라만 스펙트럼을 획득하는 분광기로 되어 있다.

2.1 탐지기

탐지기는 라만 산란광을 유도하는 레이저 광원부, 레이저 빔을 지표면까지 전달하는 송광계, 레이저 빔에 의해 시료에서 발생한 미약한 라만 산란광이 들어오는 수광계, 탐지기를 제어하는 제어보드 및 하우징으로 구성된다. 탐지기의 구성은 Fig. 1과 같다.

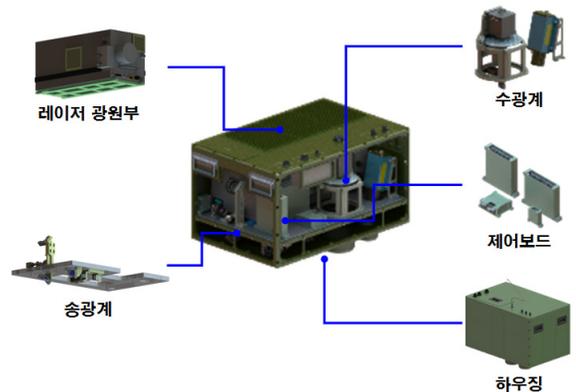


Fig. 1. Sensor module design

2.1.1 레이저 광원부

라만 산란광을 발생시키기 위한 레이저로 248 nm 파장의 KrF 엑시머 레이저(EX-5, Gam Laser, Inc. Florida, USA)를 사용하였다. 라만 산란광의 세기는 레이저의 세기에 비례하여 증가하나, 일정 세기 이상의 레이저가 화학물질에 조사되면 화학물질이 분해되어 라만 스펙트럼이 변화할 수 있다.

Table 1. Specifications of KrF excimer laser

구분	사양
제조사	GAM Laser
파장 (nm)	248
펄스폭 (ns)	10-15
선폭 (pm)	≤ 40
빔크기 (mm ²)	3 × 6
발산각 (mrad)	1 × 2

이에 따라 최적화된 레이저 세기를 찾는 것이 중요하므로 조사 점에서의 레이저 에너지를 가변할 수 있도록 하였다. 레이저 반복률은 수광계의 주경 이동속

도와 레이저 거리측정기의 측정 속도를 모두 고려하여 설정하였다. 적용한 KrF 엑시머 레이저의 기본 사양은 Table 1과 같다.

2.1.2 송광계

송광계는 정해진 형상과 크기를 가진 빔이 측정면에 조사되도록 하며, 측정면에 존재하고 있는 화학물질은 조사된 레이저에 의해 라만 산란광을 발생시킨다. 송광계는 레이저로부터 발진된 빔의 광축이 수광계의 광축과 일치하도록 하였고, 조사 점과 수광계의 물체 점이 일치하도록 하는 조향 반사경, 레이저 빔을 정해진 형상과 크기를 갖도록 하는 송광장치 등으로 구성된다.

2.1.1에서 언급한 바와 같이, 일정한 세기 이상의 레이저 빔은 화학물질을 분해시킬 수 있으므로, 빔의 크기는 Table 1의 사양을 기준으로 적정 수준 조절할 필요성이 있었다. 또한 개발된 장비는 차량에 탑재하여 운용하는 것이 목표이므로 장비의 레이저 빔의 세기가 차량이 움직이면서 지표면까지의 거리에 따라 변화하는 것을 고려하여야 하였다. 따라서 측정면의 변위 구간에서는 레이저 빔의 크기가 일정 범위를 유지하도록 하였다.

송광계 중 각종 렌즈로 구성된 송광장치는 레이저의 진행 과정 중 초점이 형성되지 않는 갈릴레이형을 사용하여 설계하였다. 총 3장의 렌즈를 사용한 송광장치는 레이저로부터 발진된 빔이 측정면에서 $\phi 3 \text{ mm}$ 안에 레이저의 에너지 중 50 % 이상이 포함되도록 설계하였다. 레이저 빔의 x축과 y축의 발산각과 크기가 다르기 때문에 두 장의 실린더형 렌즈를 사용하였고, 실린더 방향이 수직이 되도록 하였다. 한편, 3장 렌즈의 초점 거리는 각각 70.4 mm, -46.9 mm, -25.4 mm 이었다. 제작된 송광장치의 형상은 Fig. 2와 같다.

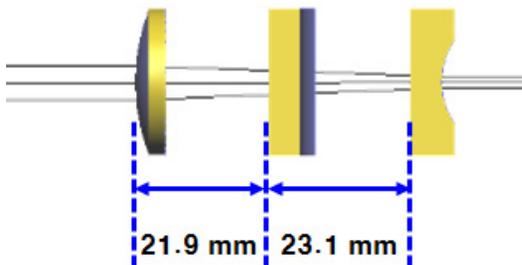


Fig. 2. Beam shaping optics design

2.1.3 수광계

수광계는 레이저 빔과 지표면에 존재하는 화학물질의 상호작용에 의해 생성된 미약한 라만 산란광을 최대한 수집하고, 강한 세기의 탄성 산란광(Rayleigh scattering)을 배제하여 분광계로 전달하는 역할을 한다. 수광계는 라만 산란광을 수광하는 주경조립체, 수광된 라만 산란광을 평행광으로 만들어주는 부경조립체, 라만 산란광에 포함된 탄성 산란광을 제거하는 라만필터, 평행광을 광섬유용치조립체로 집속시켜주는 시준렌즈, 윈도우에서 지표면까지의 변화를 실시간으로 측정하는 거리측정기와 이들을 고정하는 고정브래킷으로 구성된다. 수광계의 주요 구성은 Fig. 3과 같다.

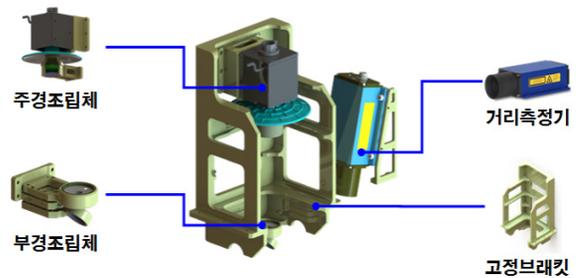


Fig. 3. Telescope design

장비를 차량에 탑재하여 운용할 경우, 지표면과 수광계 하단의 윈도우 간의 거리가 계속 변화하기 때문에 높은 광효율을 얻기 위해 실시간으로 지표면과 윈도우간의 거리를 측정해 주어야 하였다. 또한, 지표면과의 거리변화에 따른 초점거리 보상을 위해 주경의 위치를 움직이도록 하였으며, 주경을 움직이기 위한 구동장치는 각도 변화 및 마모가 없는 보이시 코일이 적용된 Linear Focus Actuator(LFA)를 적용하였다. 이때 LFA는 이동 위치 및 온도 정보를 피드백해주는 기능을 가지고 있으며, 사용한 LFA는 Equipment solutions 사의 LFA-2010 모델이었다.

주경과 부경의 곡률 반경은 수차를 최소화할 수 있도록 설계하였으며, 각각 279.4 mm, 62.2 mm로 제작하였다. 또한, 라만 필터를 통과한 빛을 광섬유용치에 집속하는 시준렌즈의 곡률 반경은 29.1 mm이었다. 설계된 수광계를 LightTools를 이용하여 수광효율을 계산한 결과, 최대 효율은 82.5 %이며, 지표면과의 거리변화에 따른 수광효율은 Fig. 4와 같았으며, 이는 알려져 있는 데이터와 잘 일치 하였다⁹⁾.

라만 산란광에 함께 수광되는 탄성 산란광을 차단하기 위해서 251.1 nm의 cutoff wavelength를 갖는 라만필터를 적용하였다.

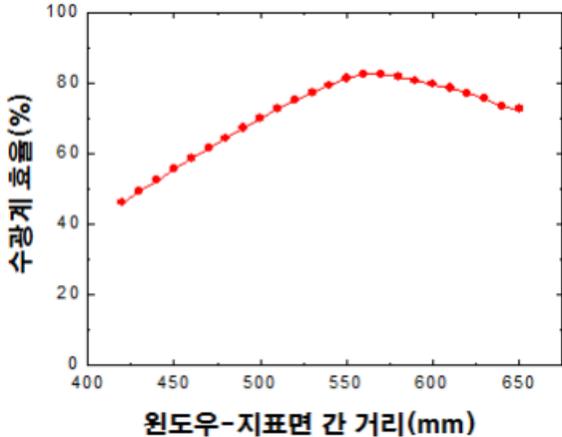


Fig. 4. Result of the telescope efficiency simulation

2.2 분광기

분광기는 수광계에서 수집된 라만 산란광의 특정대역을 파장에 따라 공간적으로 분해하여 검출기에 집속시켜 라만 스펙트럼을 획득하는 역할을 한다. 분광기는 수광계에서 집속된 라만 산란광을 분광장치로 전송해주는 광섬유몽치조립체와 라만 산란광을 파장별로 나눠주는 분광장치 그리고 공간적으로 분해된 광신호를 전기신호로 변환하는 검출기로 구성되었다. 분광계의 구성은 Fig. 5와 같다.

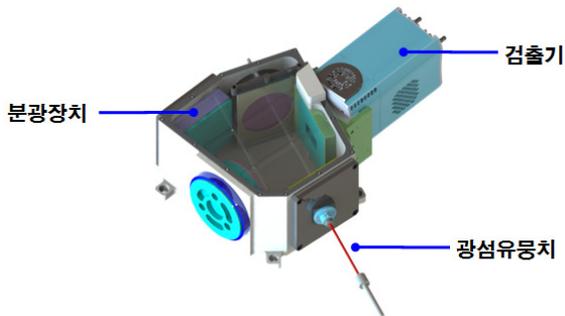


Fig. 5. Spectrograph module design

2.2.1 광섬유몽치조립체

분광계의 입구에는 보통 슬릿이 위치하여 단일코어 광섬유를 사용할 경우 대부분의 빛이 슬릿에 의해 차

단되기 때문에 광배출율이 낮아진다. 광전달 효율을 높이기 위해, 본 연구에서는 circle-to-line 형태의 광섬유 번들을 사용하였다. 입력단은 여러 개의 광섬유를 Fig. 6의 좌측과 같이 원형형태로 배치하여 시준렌즈에 의해 집속된 원형의 빛이 최대한 광섬유로 입력되게 하였다. 또한, 출력단은 Fig. 6의 우측처럼 광섬유를 일렬로 나열하여 슬릿의 역할을 대신할 수 있도록 함으로써 광배출율이 최대화되도록 하였다.

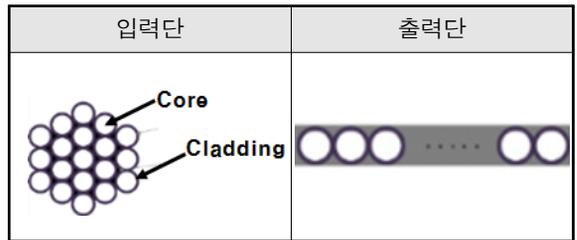


Fig. 6. Fiber bundle design

2.2.2 분광장치

분광장치는 탐지된 화학물질의 라만 스펙트럼을 파장에 따라 공간적으로 분해하며, 빛을 파장별로 분산시키는 회절격자를 기반으로 입구슬릿, 시준경, 집속경, 출구슬릿, 검출기 등으로 구성된다. 화학물질의 특성을 나타내는 라만 스펙트럼의 파수 범위는 350~3800 cm^{-1} , 분해능은 단위 픽셀당 4 cm^{-1} 가 되도록 설계하였다. 차량 탐재를 고려하여 분광장치의 크기를 최소화하기 위해 3600 gr/mm 인 회절격자와 folded Czerny-Turner 형식의 분광기를 적용하여 설계하였다^[10].

2.2.3 검출기

펄스레이저에 의해 라만 산란광은 백 ns 이내에 발생하므로, 검출기는 나노초 급의 고속 게이팅이 가능한 intensified charge-coupled device(ICCD)를 적용하였다. 사용한 ICCD는 Andor사의 DH320T-25F 모델이었다.

3. 성능 확인 시험

2장과 같이 설계 및 최적화를 통해 지표면 비접촉식 화학탐지용 라만 분광시스템 시제품을 최종 제작하였다. 제작된 시제품의 성능은 시스템 성능시험, 기본 스펙트럼 획득 시험 및 야외 스펙트럼 획득 시험을 통하여 입증하였다.

3.1 시스템 성능시험

라만 분광시스템은 Table 2의 요구 성능에 따라 제작되었으며, 시스템 성능시험을 통하여 각각의 충족 여부를 확인하였다. 송광계를 지나 외부에 위치한 스펙트로미터에 전달된 값을 측정할 엑시머 레이저의 중심파장은 248.68 nm(n=3)로 확인되었다. 에너지 미터로 측정한 레이저의 반복률은 20 Hz 이상, 최대 80 Hz까지 가능함을 확인하였다. Polytetrafluoroethylene (PTFE)를 측정할 라만 스펙트럼을 통해 계산한 분광계의 최대 라만분광범위는 3386.03 cm⁻¹이었다. 또한, 최대 라만분광범위 측정 결과를 바탕으로, 각 픽셀별 파수 차이로 계산한 분해능은 3.31±0.61 cm⁻¹/pixel이었다. 시스템 성능시험 결과, 제작된 라만 분광시스템이 Table 2의 요구 성능을 잘 만족하는 것을 확인하였다.

Table 2. System requirements

항 목	요 구 성 능
레이저파장	< 250 nm
레이저 반복률	> 10 Hz
최대 라만분광범위	> 2500 cm ⁻¹
분해능 ^[11]	< 10 cm ⁻¹ /pixel

3.2 기본 스펙트럼 획득 시험

순도 97 % 이상의 methyl salicylate(MES), dimethyl methylphosphonate(DMMP), cyclohexane을 사용하였다. MES는 화학작용제 중 수포작용제 distilled mustard (HD)의 모의작용제, DMMP는 신경작용제 sarin(GB)의 모의작용제로 널리 사용된다^[12]. Cyclohexane은 상용 라만 분광시스템의 내부 표준물질로 사용되고 있는 물질이다. 한편, 표면 코팅재료 등으로 사용되는 PTFE는 한양공업에서 구매하여 사용하였다.

세부 실험을 위해 내화학성의 폴리카보네이트 소재의 실험용 챔버를 제작하였고, 실험실 내에서 후드와 연결하여 안전성을 확보한 후 실험을 수행하였다. 챔버 상단에 설치한 라만 분광시스템으로부터 약 60 cm 하단에 마이크로피펫을 이용하여 1 µL의 시료 화학물질을 점적하였다. 이후 분광시스템에서 4 mJ 이상의 레이저 에너지를 조사하면서 화학물질의 라만 스펙트럼을 획득하였다.

Fig. 7은 4종 목표 화학물질들로부터 획득한 라만

스펙트럼으로서, 10회 레이저 펄스 조사 후 얻어진 평균값으로 나타내었다. 4종 화학물질에서 모두 물질 특이적이고 서로 구분되는 라만 스펙트럼을 관찰하였다. 이때, 모든 스펙트럼에서 나타나는 약 1550 및 2330 cm⁻¹의 피크는 공기 중 산소와 질소분자에 의한 라만 산란 피크들이다^[9].

MES의 경우, 방향족 고리 구조에 의해서 814 및 1251 cm⁻¹의 피크가 관찰되었고, 1620 및 1675 cm⁻¹에서는 (C=O) 그룹에 관한 피크를 확인하였다^[13,14]. DMMP의 경우, 분자구조 중심에 존재하는 (P-C) 그룹에 의해서 715 cm⁻¹ 피크, (P=O) 그룹에 의해서 1248 cm⁻¹ 피크를 확인하였다. 또한 2856, 2930 cm⁻¹에서 관찰되는 강한 세기의 피크는 (C-H) 결합에 의한 피크이었다^[15]. Cyclohexane의 경우, 고리 구조에 존재하는 (C-C), (C-H) 그룹에 의해서 805, 1036, 1269 및 1447 cm⁻¹의 피크들이 확인되었다. 또한 DMMP와 마찬가지로, (C-H) 그룹에 의해서 2847 및 2925 cm⁻¹의 피크들을 확인하였다^[15]. PTFE의 경우, 731 및 1219 cm⁻¹에서 (C-F) 그룹에 의한 피크들과 1304 및 1378 cm⁻¹에서 (C-C) 그룹에 의한 피크들을 확인하였다^[16,17].

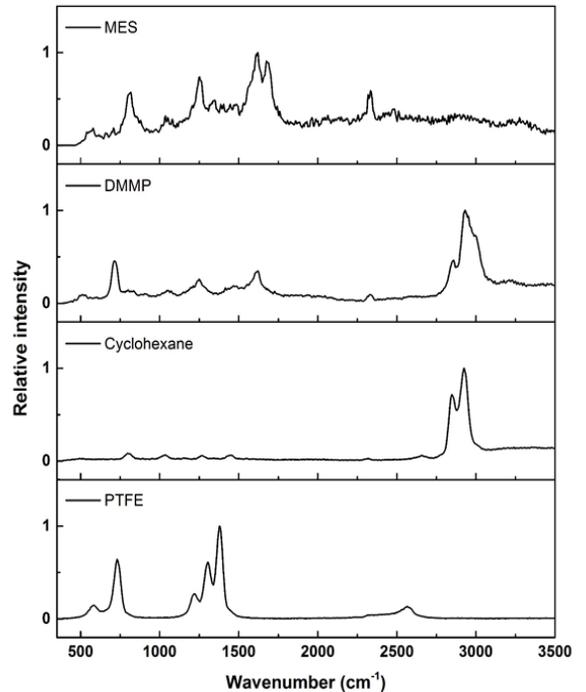


Fig. 7. Result of the indoor test

3.3 야외 스펙트럼 획득 시험

제작된 라만 분광시스템을 지표면과 약 60 cm 거리를 갖도록 균용차량 하부에 장착한 후 차량을 운행하면서 도로 위에 인위적으로 살포한 화학물질의 라만 스펙트럼을 획득하였다^[18]. 세부적으로 Fig. 8과 같이 지표면에 모의작용제인 MES를 살포하고, 20 m 마다 1 m 폭의 참조물질인 PTFE를 위치하도록 지표 환경을 구축하였다. 차량이 MES가 분사된 도로 위를 약 40 km/h의 속도로 주행하면서 라만 분광시스템이 지표면으로 레이저를 조사하여 라만 스펙트럼을 획득하였다^[17].

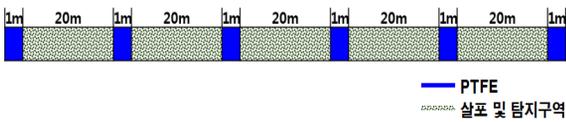


Fig. 8. Field test setup

Fig. 9는 야외 시험을 통해 획득한 레이저 펄스 1 회 조사 시의 라만 스펙트럼 결과이다. 기동 간에 획득한 지표면 위 MES의 라만 스펙트럼 분석을 통하여 실시간 MES의 탐지가 가능함을 확인하였고, 얻어진 라만 스펙트럼은 참조물질인 PTFE와 지표면인 background의 스펙트럼과도 뚜렷한 차이가 있음을 확인하였다.

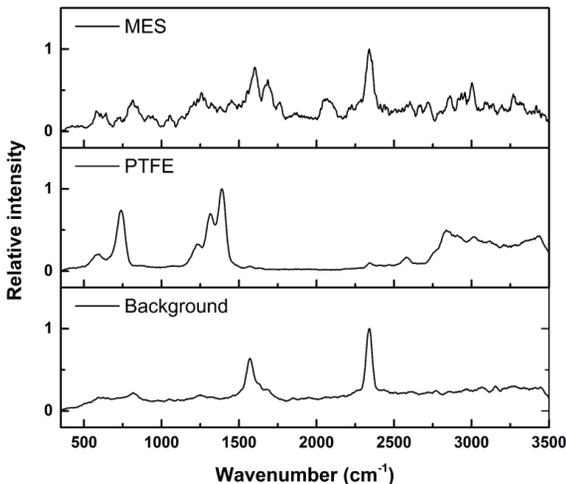


Fig. 9. Result of the field test

Fig. 10은 MES 및 PTFE의 기본 스펙트럼 획득 시험 시 실험실 환경에서 얻어진 라만 스펙트럼과 야외

스펙트럼 획득 시험 시 지표면에서 기동 간 얻어진 라만 스펙트럼을 비교하여 보여주고 있다. 실험실 환경에서 획득한 스펙트럼보다 지표면 환경에서 획득한 경우 신호대 잡음비가 낮은 점과 PTFE의 스펙트럼에서 약 2700~3500 cm^{-1} 근처에 넓게 분포된 피크는 야외에 존재하는 다양한 환경적 영향에 의한 것으로 보인다. MES 라만 스펙트럼의 경우, 734~890, 1177~1302, 1533~1739 cm^{-1} 영역에서 상호 일치되는 피크가 관찰되었고, PTFE의 경우는 523~816, 1148~1463 cm^{-1} 영역에서 공통적인 피크가 관찰되었다. 이러한 결과로부터 상이한 획득 환경에서도 얻어진 라만 스펙트럼 간의 일치성이 매우 큰 것을 확인하였다.

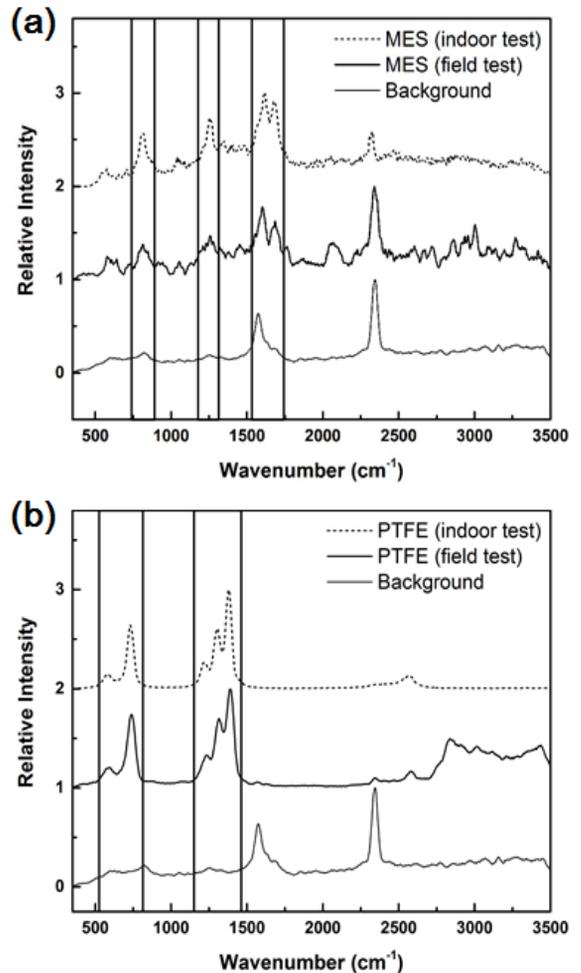


Fig. 10. Comparison of Raman spectrum according to test conditions (a) MES, (b) PTFE

4. 결론

본 연구에서는 차량에 탑재되어 장비 운용자의 안전을 확보하면서 실시간으로 지표면에 오염된 화학작용제 등 독성 화학물질을 탐지할 수 있는 장비인 라만 분광시스템을 제안하였다. 248 nm 단자외선 레이저를 적용한 라만 분광시스템을 설계 및 제작하였고, 시스템 성능시험 및 기본 스펙트럼 획득 시험을 통하여 제작된 라만 분광시스템의 성능을 확인하였다. 그리고 야외 스펙트럼 획득 시험과 결과분석으로부터 지표면 비접촉식 화학 오염 탐지에 대한 제작된 라만 분광시스템의 적용 가능성을 확인하였다.

향후 독성 화학물질의 농도별, 용량별 변화에 따른 스펙트럼 분석을 통한 정량분석 연구를 추가적으로 실시하여 연구의 폭을 넓힐 계획이다. 또한 하드웨어 개선 및 화학물질 데이터베이스 확장, 탐지알고리즘 개발 등 지표면 화학물질 탐지 가능성을 높이는 관련 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소와 미국 ECBC와의 국제 공동 연구의 일환으로 수행된 연구결과를 기술한 것이다.

References

- [1] National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism (START), Global Terrorism Database [Data File], 2017. <http://www.start.umd.edu/gtd>
- [2] K. L. Gares, K. T. Hufziger, S. V. Bykov and S. A. Asher, "Review of Explosive Detection Methodologies and the Emergence of Standoff Deep UV Resonance Raman," *J. Raman Spectrosc.*, Vol. 47, pp. 124-141, Jan. 2016.
- [3] J. J. Brady, S. D. Roberson, M. E. Farrell, E. L. Holthoff, D. N. Stratis-Cullum and P. M. Pellegrino, "Laser-induced Breakdown Spectroscopy: A Review of Applied Explosive Detection," *ARMY RESEARCH LAB ADELPHI MD SENSORS AND ELECTRONIC DEVICES DIRECTORATE*, Sep. 2013.
- [4] S. K. Choi, Y. S. Jeong, J. H. Lee and Y. C. Ha, "Deep UV Raman Spectroscopic Study for the Standoff Detection of Chemical Warfare Agents from the Agent-Contaminated Ground Surface," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 18, pp. 612-620, Oct. 2015.
- [5] F. Yan and T. Vo-Dinh, "Surface-enhanced Raman Scattering Detection of Chemical and Biological Agents Using a Portable Raman Integrated Tunable Sensor," *Sens. Actuators B*. Vol. 121, pp. 61-66, Jan. 2007.
- [6] A. J. Sedlacek, M. D. Ray, N. S. Higdon and D. A. Richter, "Short-range Noncontact Detection of Surface Contamination Using Raman Lidar," in *Proc. of SPIE*, Vol. 4577, pp. 95-104, Feb. 2002.
- [7] W. F. Hug, R. Bhartia, A. Tsapin, A. Lane, P. Conrad, K. Sijapati and R.D. Reid, "Water and Surface Contamination Monitoring Using Deep UV Laser," in *Proc. of SPIE*, Vol. 6378, pp. 63780S-1-63780S-13, July. 2006.
- [8] M. D. Ray and A. J. Sedlacek, "Mini-Raman Lidar System for Stand-off, *In Situ* Interrogation of Surface Contaminants," in *Proc. of SPIE*, Vol. 3707, pp. 138-147, Nov. 2013.
- [9] Y. C. Ha, J. H. Lee, Y. J. Koh, S. K. Lee and Y. K. Kim, "Raman Spectrometer for Detection of Chemicals on Road," *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 28, pp. 16-121, June. 2017.
- [10] Y. C. Ha, J. H. Lee, Y. J. Koh, S. K. Lee and Y. K. Kim, "Development of an Ultraviolet Raman Spectrometer for Standoff Detection of Chemicals," *Current Optics and Photonics*, Vol. 1, pp. 247-251, June. 2017.
- [11] S. T. Christesen, J. P. Jones, J. M. Lochner and A. M. Hyre, "Ultraviolet Raman Spectral and Cross-Sections of the G-series Nerve Agents," *Applied Spectroscopy*, Vol. 62, pp. 1078-1083, Nov. 2008.
- [12] S. L. Bartelt-Hunt, D. R. U. Knappe and M. A. Barlaz, "A Review of Chemical Warfare Agent Simulants for the Study of Environmental Behavior," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, Vol. 38, pp. 112-136, Jan. 2008

- [13] Y. J. Koh, J. H. Lee, Y. S. Jeong and J. O. Lee, "Measurement of Raman Scattering Signals for Toxic Chemicals Using Deep UV Laser", The 118 th General Meeting of the Korean Chemical Society, PHYS.P-371, Oct. 2016.
- [14] R. D. Massaro, Y. Dai and E. B. Barojas, "Energetics and Vibrational Analysis of Methyl Salicylate Isomers," J. Phys. Chem. A. Vol. 113, pp. 10385-10390, Aug. 2009.
- [15] Y. H. Lee and S. Farquharson, "Rapid Chemical Agent Identification by Surface-enhanced Raman Spectroscopy," in Proc. of SPIE, Vol. 4378, pp. 21-26, Feb. 2001.
- [16] A. J. Sedlacek, M. D. Ray and M. Wu, "Application of UV Raman Scattering to Non-traditional Stand-off Chemical Detection," Trends Appl. Spectrosc, Vol. 5, pp. 19-38, 2004.
- [17] C. K. Manka, S. Nikitin, R. Lunsford, P. Kunapareddy and J. Grun, "Wavelength-dependent Amplitude of Teflon Raman Lines," J. Raman Spectrosc., Vol. 42, pp. 685-690, Apr. 2011.
- [18] J. O. Lee and Y. J. Koh, "Deep UV Raman Spectra of Chemical Agent Simulant by using 248 nm Laser In Open Fields," The 121 th General Meeting of the Korean Chemical Society, ORGN.P-417, Apr. 2018.