

Development of On-axis Raman Lidar System for Remotely Measuring Hydrogen Gas at Long Distance

In Young Choi^{1†}, Sung Hoon Baik¹, Jae Young Lim², Jung Ho Cha², and Jin Ho Kim²

¹*Division of Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute,
111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Korea*

²*Division of R&D Center, Korea Nuclear Technology Co., Ltd., 277, Baeul 1-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34036, Korea*

(Received March 30, 2018; Revised May 6, 2018; Accepted May 8, 2018)

Hydrogen gas is an important and promising energy resource that has no emissions of pollutants during power generation. However, hydrogen gas is very dangerous because it is colorless, odorless, highly flammable, and explosive at low concentration. Conventional techniques for hydrogen gas detection are very difficult for measuring the hydrogen gas distribution at long distances, because they sample the gas to measure its concentration. Raman lidar is one of the techniques for remotely detecting hydrogen gas and measuring the range of the hydrogen gas distribution. A Raman lidar system with an on-axis optical receiver was developed to improve the range of hydrogen gas detection at long distance. To verify the accuracy and improvement in the range of detecting the hydrogen gas, experiments measuring the hydrogen gas concentration are carried out using the developed on-axis Raman lidar system and a gas chamber, to prevent explosion of the hydrogen gas. As a result, our developed on-axis Raman lidar system can measure a minimum hydrogen gas concentration of 0.66 volume percent at a distance of 50 m.

Keywords: Raman lidar system, Hydrogen gas, On-axis optical receiver, Raman scattering signal
OCIS codes: (280.3640) Lidar; (290.5860) Scattering, Raman; (280.1350) Backscattering

원거리 수소 가스 원격 계측을 위한 On-axis 라만 라이다 장치 개발

최인영^{1†} · 백성훈¹ · 임재영² · 차정호² · 김진호²

¹한국원자력연구원 양자광학연구부
Ⓞ 34057 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

²(주)한국원자력기술 기술연구소
Ⓞ 34036 대전광역시 유성구 배울1로 277

(2018년 3월 30일 받음, 2018년 5월 6일 수정본 받음, 2018년 5월 8일 게재 확정)

수소 가스는 신·재생 에너지원으로서, 에너지의 발생과정에서 오염물질의 배출이 없는 친환경적인 에너지원이다. 그러나 수소 가스는 인화 에너지가 낮으며, 무색, 무취의 화염 전파성과 폭발성이 강한 매우 위험한 물질 중 하나이다. 수소 가스의 검출을 위한 다양한 기술이 있으나, 대부분 센서를 이용하여 대기 중의 수소 가스를 수집하여 측정하는 근거리 측정 기술이 대부분이다. 수소 가스 측정 기술 중 하나인 라만 라이다 장치는 수소 가스의 강한 라만 산란 현상을 이용하여 원거리에서 수소 가스 농도 검출 및 분포를 계측할 수 있는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 넓은 영역에서(2~50 m) 누출된 수소 가스의 원거리 측정을 위한 on-axis 형태를 갖는 라만 라이다 장치를 개발하였다. 본 연구를 통하여 개발된 수소 가스 원거리 탐지 거리가 향상된 라만 라이다 장치의 성능을 검증하기 위하여, 수소 가스 폭발을 방지 및 농도 변화가 가능한 가스 챔버를 이용하여 라만 라이다 장치로부터 50 m 거리에 위치한 수소 가스 농도 측정 실험을 수행하였다. 그 결과, 개발된 라만 라이다 장치를 이용하여 50 m 거리에 위치한 0.66 Vol.%의 수소 가스 검출이 가능함을 증명하였다.

Keywords: 라만 라이다 시스템, 수소 가스, On-axis 광학 수신기, 라만 산란 신호
OCIS codes: (280.3640) Lidar; (290.5860) Scattering, Raman; (280.1350) Backscattering

[†]E-mail: iychoi8584@kaeri.re.kr, ORCID: 0000-0002-5504-4698

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

수소 가스는 신·재생 에너지원 중의 하나로서, 에너지 발생과정에서 오염물질의 배출이 없는 친환경 에너지원 중 하나이다. 그러나 수소 가스는 인화 에너지가 낮으며, 무색, 무취, 폭발 및 화염 전파성이 매우 큰 위험한 물질 중 하나이다. 또한, 원자력 발전소에서 중대 사고가 발생할 경우에는 핵연료 피복의 산화 과정에서 다량의 수소 가스가 발생하며, 밀폐되어 있는 격납 건물 내에서 2차 사고가 발생하는 가장 큰 원인 중 하나이기 때문에 수소 가스의 검출 및 제거 기술은 원전의 안전을 위하여 필수적으로 요구된다. 수소 가스의 검출 및 농도 측정 방법은 크게 화학적 촉매, 열전도 방식 등의 방법을 이용하고 있다. 그러나 이러한 센서를 이용한 계측 방법은 측정 지점에 대한 수소 가스의 검출 및 농도 측정이 가능하여 원자력 발전소와 같이 넓은 공간을 측정하기 위해선, 다수의 센서를 위상 배열하여 설치하여야 하는 단점을 갖고 있다.

수소 가스의 경우, 강한 라만 산란 현상을 갖고 있는 특징을 갖고 있다. 따라서 라만 라이더(Raman lidar)를 이용할 경우, 원거리에서도 수소 가스 분포와 거리 정보 및 농도를 측정할 수 있다. 라만 라이더 장치를 이용한 수소 가스 원격 계측 기술은 러시아^[1,2], 미국^[3] 및 일본^[4-7] 등에서 활발히 연구되고 있으며, 국내의 경우, 본 연구팀에서 직경 50 mm의 소형 off-axis 광학 수신기가 장착된 라만 라이더 장치를 이용하여 20 m 거리에 위치한 수소 가스를 원격으로 검출 및 농도를 측정하였다^[8]. 그러나 이전 연구를 통하여 개발된 직경 50 mm의 off-axis 형태의 라만 라이더 장치는 레이저의 발진 거리에 따른 에너지 감쇠 현상에 의하여 20 m 이상의 거리에서 측정 오차가 심하게 발생하였고, 레이저 송신 광축과 수신 광축의 불일치로 인해 넓은 영역에서 수소 가스의 검출이 어려웠다.

본 연구는 라만 라이더 시스템의 수소 가스 탐지 거리 향상에 관한 것으로, 50 m 거리의 수소 가스를 원격으로 농도 및 분포 측정이 가능한 라만 라이더 장치를 개발하고, 성능 실험을 수행하였다. 새로 개발된 라만 라이더 장치는 기존 라만 라이더 장치의 광학 수신기에 비하여 수신광학계의 직경이 1.5배 크며, 이색성 광분할기를 사용하여 수신 효율을 높였으며, on-axis 형태의 광학 수신기 구조를 사용하였다. 개발된 on-axis 형태의 광학 수신기가 장착된 라만 라이더 장치의 원거리 수소 가스 검출 능력을 검증하기 위하여, 수소 가스 폭발 방지 및 농도 조절이 가능한 가스 챔버를 사용하여 실험을 수행하였다. 수소 가스의 농도 변화에 따른 라만 신호의 변화를 측정하기 위하여 가스 챔버의 수소 가스 농도를 0.66~100 Vol. % 사이에서 변화시키면서, 라만 신호의 변화를 측정하였다. 그 결과, 50 m 거리의 0.66 Vol. %의 수소 가스 농도 검출이 가능하였으며, 측정 오차 평균이 1% 이하의 성능을 획득하였다.

II. On-axis 라만 라이더 장치

2.1. 광학 수신기

그림 1은 이전 연구를 통하여 개발된 off-axis 라만 라이더 장치의 구성도를 나타낸 것이다^[8]. Off-axis 방식의 광학 수신기의 경우, 특정 위치(거리)에서만 레이저 송신 광축과 광학 수신기의 수신 광축이 서로 교차하게 되며, 교차된 지점에서 발생한 라만 현상만 측정이 가능하게 된다. Off-axis 광학 수신기는 수 km의 원거리에서의 사용에는 문제가 없지만, 수 m에서 수십 m의 근거리에서 사용할 경우에는 레이저 송신 광축과 광학 수신기의 수신 광축의 교차영역이 좁아지는 단점이 있다.

그림 2는 본 연구를 통하여 개발된 on-axis 라만 라이더 장치 구성도를 나타낸 것이다. On-axis 라만 라이더 장치의 광

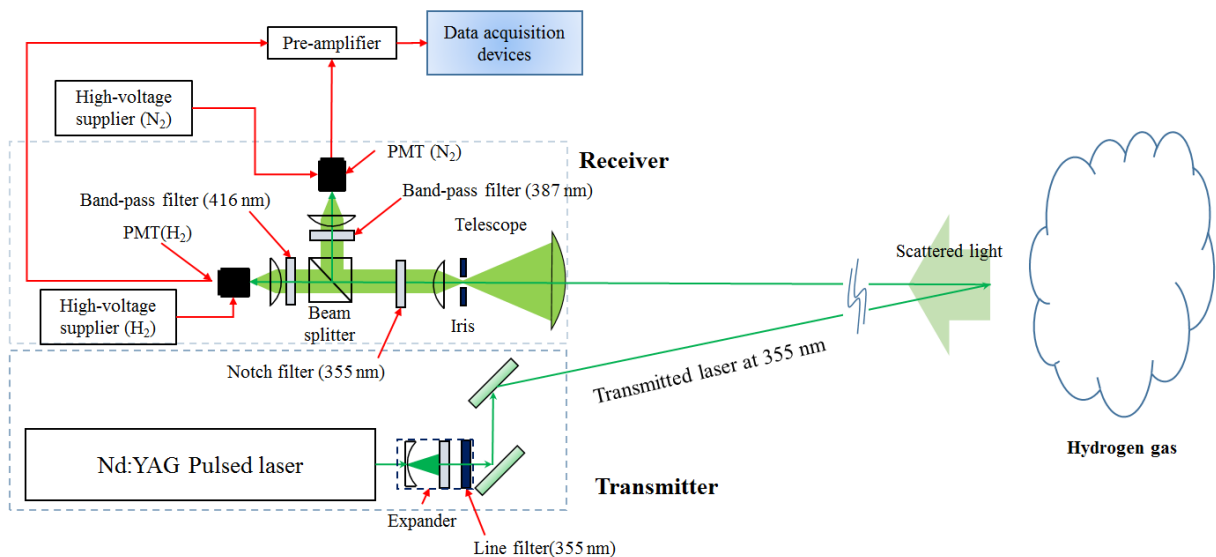


Fig. 1. Schematic diagram of the off-axis Raman lidar system^[8].

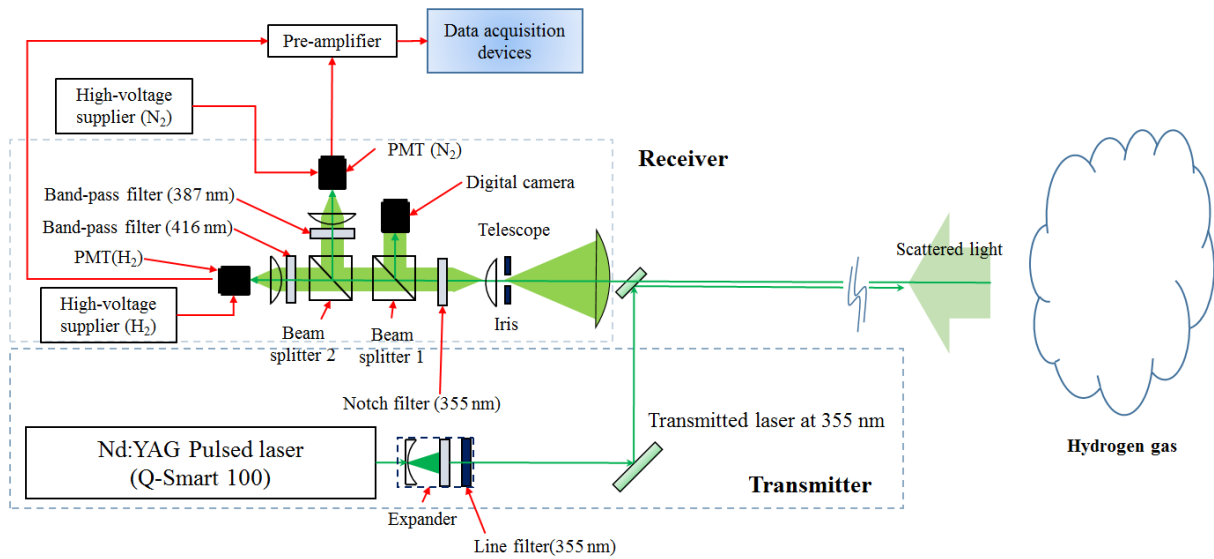


Fig. 2. Schematic diagram of the on-axis Raman lidar system.

학 수신기는 광학 수신기의 앞에 거울을 설치하여 레이저를 전송하는 형태를 갖고 있다. 따라서 광학 수신기의 광축과 레이저 전송 축을 일치할 수 있는 장점을 갖고 있어, 측정 가스에 대한 거리 변화에 관계없이 라만 현상에 대한 측정이 가능한 장점을 갖고 있다. 그러나 on-axis 광학 수신기는 레이저 전송을 위한 거울에 의하여 가려지는 면적이 존재하여, 광학 수신기로부터 가까운 거리에 위치한 신호를 계측할 수 없는 단점을 갖고 있다.

2.2. On-axis 광학 수신기 개발

원자력 발전소의 격납 건물과 같이 수십 m 거리에서 발생한 수소 가스의 원격 계측을 위한 라만 라이더 시스템을 개

발하기 위하여 광학 수신기의 광축과 레이저 전송 축이 일치하는 on-axis 형태의 광학 수신기를 갖는 라만 라이더 시스템을 개발하였다. 표 1은 기존 50 mm 직경의 off-axis 형태의 광학 수신기를 갖는 라만 라이더 장치와 75 mm 직경의 on-axis 형태의 광학 수신기를 갖는 라만 라이더 장치의 주요 부품 사양을 나타낸 것이다. 라만 라이더 장치의 성능은 라만 산란(Raman scattering) 현상을 발생시키기 위한 레이저의 출력 및 광학 수신기의 직경에 의하여 크게 달라진다. 따라서 동일한 출력을 갖는 레이저를 이용하여 먼 거리의 수소 가스를 측정하기 위하여 광학 수신기의 직경을 50 mm에서 75 mm로 변경하였다. 또한, 광축 정렬 및 레이저 모니터링을 위한 디지털 카메라 장치를 설치하였는데, 이를 위하여

Table 1. Specification of the Raman lidar system

	50 mm off-axis Raman lidar system	75 mm on-axis Raman lidar system
Laser Max output energy (mJ)	30	30
Telescope diameter (mm)	50	75
Detection distance (m)	20	50
Beam splitter (Transmit : Reflect coefficient)	General beam splitter (50 : 50)	Dichroic beamsplitter 1 (95 : 95 at 365 nm) Dichroic beamsplitter 2 (95 : 98 at 409 nm)
Remark	Same condition	Pulse laser : Nd : YAG laser (Quantel Brilliant Q - Smart 100, Wavelength: 355 nm, Repetition rate: 20 Hz) PMT (Photo multiplier tube): Hamamatsu (R9880U-210) Band-pass filter 1 (BPF1): 416.06 ± 0.15 nm (for hydrogen gas) Band-pass filter 2 (BPF2): 386.7 ± 0.15 nm (for nitrogen gas) Laser line filter (LF): CWL = 355 ± 2 nm, FWHM = 10 ± 2 nm
	75 mm on-axis Raman lidar system	Dichroic beam splitter 1: Semrock, Cut-off wavelength 365 ± 3.0 nm Transmission band (370 to 525 nm > 95% T average) Reflection band (255 to 360 nm > 95% R average) Dichroic beam splitter 2: Alluxa, Cut-off wavelength 409 ± 3.0 nm Transmission band (415 to 850 nm > 95% T average) Reflection band (325 to 403 nm > 98% R average) Digital camera: Basler acA 640-UC

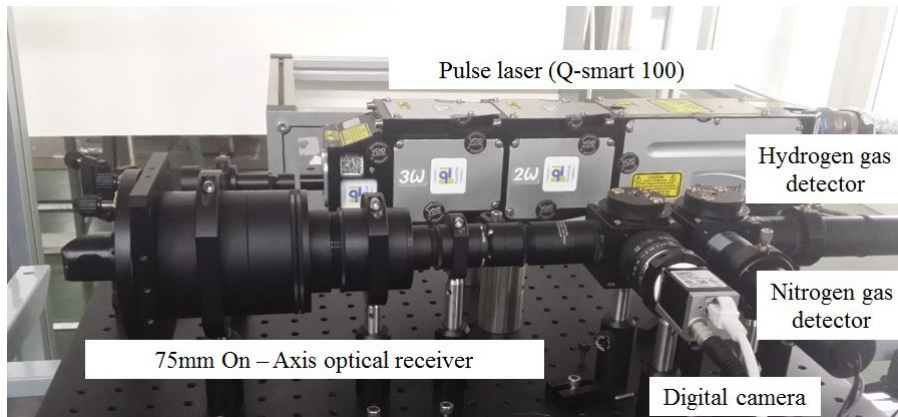


Fig. 3. Photograph of on-axis Raman lidar system for remotely measuring the hydrogen gas at long distance.

광분할기(beam splitter)를 추가하였기 때문에 수소 가스에 의한 라만 신호의 감소 현상이 발생하게 된다. 따라서 광분할기 추가에 의한 라만 신호의 감소 현상의 방지 및 라만 신호의 증가를 위하여, 365 nm 이하의 파장만이 반사하고 나머지 파장이 통과할 수 있는 이색성 광분할기(dichroic beam splitter 1, Semrock/365)를 디지털 카메라 앞에 설치하였다. 또한 기존 질소 및 수소 가스에 의한 라만 신호를 동시에 계측하기 위하여 사용된 일반형 광분할기를 409 nm 파장 이하의 빛만을 반사시키고, 나머지 파장을 투과시키는 이색성 광분할기(dichroic beam splitter 2, Alluxa/409)를 설치하여 387 nm의 질소 가스에 의한 라만 신호와 416 nm의 수소 가스에 의한 라만 신호를 세기를 증가시켰다. 그림 3은 50 m 거리에서의 수소 가스 원격 계측을 위한 on-axis 방식의 광학 수신기를 갖는 라만 라이다 장치 모습이다.

2.3. 라만 라이다 장치 측정 알고리즘 개발

그림 4는 on-axis 라만 라이다 장치를 이용한 원거리 수소 가스 원격 측정 알고리즘을 나타낸 것이다. 본 알고리즘은 라만 라이다 장치를 이용하여 수소 가스에 의한 라만 신호를 계측하기 위한 장치 제어 부분과 측정된 라만 신호의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio) 향상을 위한 신호 처리 부분으로 나뉘어 알고리즘을 구성하였다. 라만 라이다 장치의 구성 장치 제어 부분은 라만 라이다 장치의 정렬 상태 및 모니터링을 위한 디지털 카메라 제어 부분과 수소 가스에 의하여 발생한 라만 신호의 증폭 및 기록을 위한 광증배기 공급 전압 제어 부분으로 나뉘어 개발하였다. 라만 라이다 시스템의 신호 처리 알고리즘은 실시간으로 계측된 신호의 신호대 잡음 비 개선을 위한 신호 처리와 측정된 라만 신호의 통계처리 알고리즘으로 구성되어 있다. 라만 라이다 장치의 구성 장치 제어 부분과 신호 처리 부분은 병렬 프로세싱 기법을 이용하여 프로그램 개발 툴인 LabVIEW 프로그램을 이용하여 알고리즘을 구현하였다. 그림 5는 원거리 수소 가스 원격 계측을 위한 on-axis 광학 수신기를 갖는 라만 라이다 장치의 운영 프로그램의 인터페이스를 나타낸 것이다.

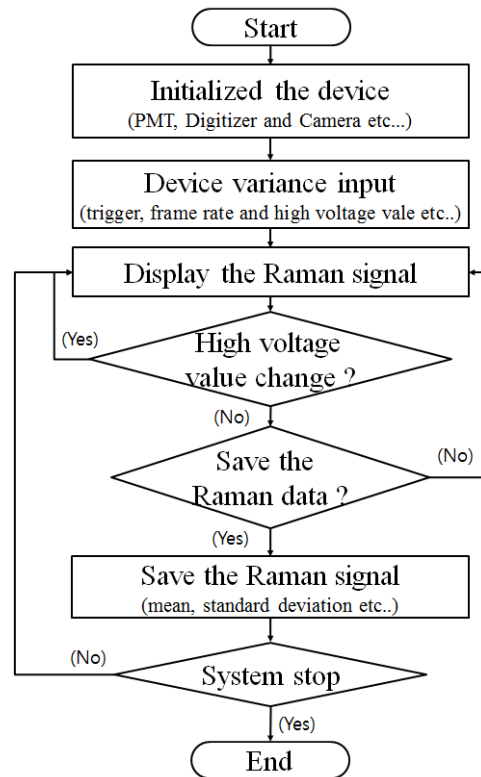


Fig. 4. Measurement algorithm of the Raman lidar system.



Fig. 5. Raman lidar operating program interface.

III. 수소 가스 원격 측정 실험 및 분석

3.1. 실험 방법

On-axis 형태의 광학 수신기가 장착된 라만 라이다 장치를 이용하여 원거리 수소 가스 농도 측정 실험을 수행하였다. 수소 가스는 낮은 발화 에너지를 갖고 있으며, 저농도에 폭발의 위험을 갖는 매우 위험한 물질 중 하나이다. 따라서 라만 라이다 장치의 수소 가스 농도 측정을 위한 실험을 수행하기 위하여 산소의 차단이 가능한 가스 챔버를 이용하였다.

그림 6은 개발된 on-axis 광학 수신기를 갖는 라만 라이다 장치를 이용하여 원거리 수소 가스 원격 측정 실험 모습을 나타낸 것이다. 분압 조절을 통하여 수소 가스의 농도 조절이 가능한 가스 챔버를 개발된 라만 라이다 장치로부터 50 m 거리에 위치할 수 있도록 배치하였으며, 가스 챔버의 분압 조절을 통하여 0.66~100 Vol. % 사이에서 수소 가스 농도를

변화시키며 수소 가스에 의한 라만 신호의 세기를 측정하였다. 개발된 라만 라이다 장치를 이용하여 0.66~100 Vol. %의 수소 가스 농도에서 9 단계로 나눠 수소 가스 농도 측정을 수행하였다. 수소 가스에 의한 라만 신호는 매우 미약한 신호로서, 신호 대 잡음비가 낮다. 따라서 각 단계에서 수소 가스에 의한 라만 신호 100개를 평균으로 총 30번의 반복 측정을 통하여 개발된 라만 라이다 장치의 측정 오차 및 정밀도를 도출할 수 있도록 하였다⁸⁾. 또한 전체 실험을 2회 반복하여 라만 라이다 장치의 수소 가스 농도 측정 반복성을 확인할 수 있도록 하였다. 수소 가스에 의한 라만 신호를 계측하기 위하여 사용된 광증배기의 신호 증폭을 위하여 고전압 공급 장치의 입력 전압을 560 V로 설정하였다. 100번 획득한 data를 평균하여 1회 측정값을 도출하게 되므로 수소 가스 농도와 분포 위치의 측정 시간은 5초가 된다.

3.2. 실험 결과 및 분석

그림 7(a) 와 7(b)는 on-axis 라만 라이다 장치를 이용하여 50 m 거리에 위치한 수소 가스를 원격 측정한 결과를 나타낸 그래프이다. 측정 결과의 X 축은 실제 수소 가스의 농도 값을 나타내며, Y 축은 on-axis 라만 라이다 장치를 이용하여 측정한 수소 가스 농도 값을 나타낸 것이다. 두 그래프에 나타난 것과 같이, 라만 라이다 장치를 이용하여 측정한 수소 가스 농도 측정값과 선형 추세선과의 유사도를 나타낸 결정계수(R^2) 0.9991과 0.9987을 나타내는 것을 알 수 있다. 표 2(a)와 2(b)는 on-axis 라만 라이다 장치를 이용하여 측정한 수소 가스 농도 결과 값을 정량적으로 분석한 것이다. 표에서 보는 것과 on-axis 라만 라이다 장치를 이용하여 50 m 거리에 위치한 0.66 Vol. %의 수소 가스 농도 측정이 가능함을 알 수 있다.

표 3은 on-axis 형태의 광학 수신기가 적용된 라만 라이다 장치를 이용하여 50 m 거리에 위치한 수소 가스 농도 반복 측정 결과를 비교한 것이다. 두 번의 반복 실험 결과, 측정 오차 평균은 0.8500에서 0.9918 사이의 값이므로 1% 미만의

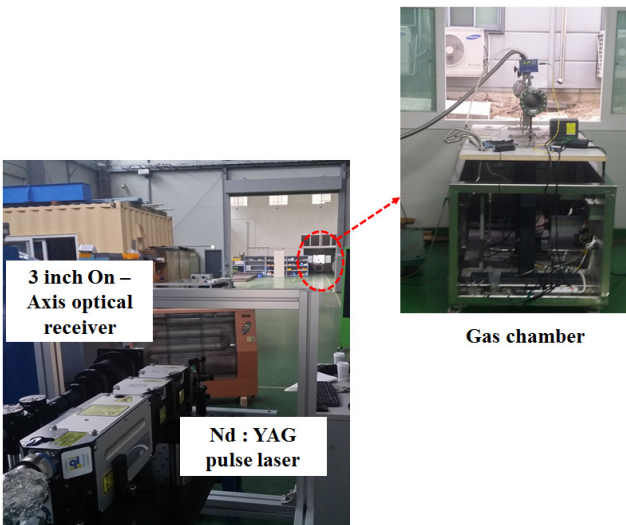


Fig. 6. Photograph of 75 m on-axis Raman lidar system for remotely measurement of the hydrogen gas in distance of 50 m.

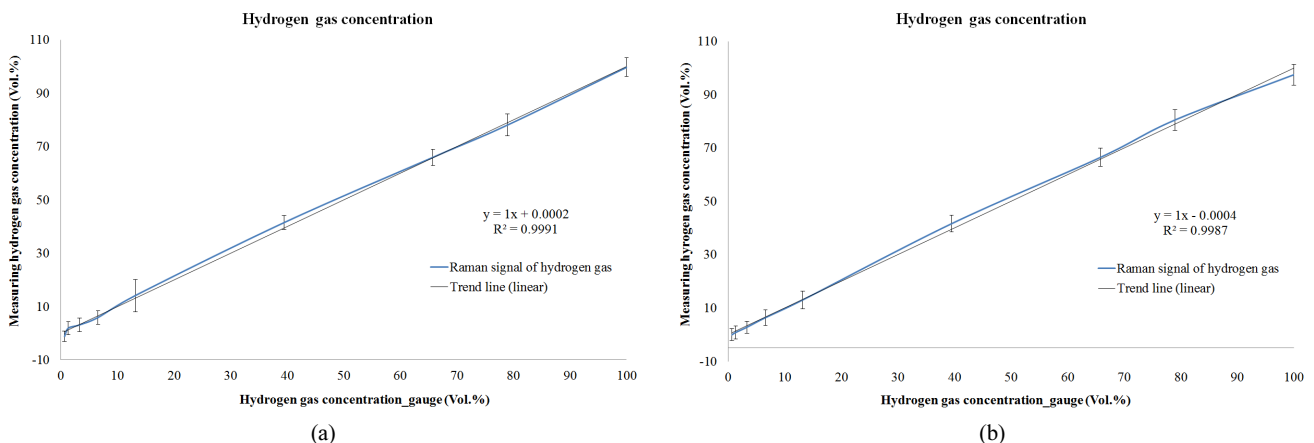


Fig. 7. Results of the hydrogen gas concentration measuring experiment by using the on-axis Raman lidar system in distance of 50 m. (a) First experiment results, (b) Second experiment results.

매우 좋은 정확도를 갖고 있음을 알 수 있으며, 표준 편차는 3.0611~3.1889로서 반복성이 매우 우수한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 이전 연구를 통하여 개발된 off-axis 광학 수신기를 갖는 라만 라이다 장치를 이용하여 20 m 거리에서 0.66 Vol. %의 수소 가스 농도 검출한 결과와 거의 대등한 결과로서^[8], 본 연구를 통하여 개발된 라만 라이다 장치의 수소 가스 검출 거리가 2.5배 향상된 것을 알 수 있다.

기존 off-axis 형태의 광학 수신기를 갖는 라만 라이다 장치와 새롭게 개발된 on-axis 형태의 광학 수신기를 갖는 라만 라이다 장치는 동일한 레이저를 사용하였다. 또한 광증배기의 증폭량을 조절하기 위하여 기존 off-axis 형태의 광학 수

신기를 갖는 라만 라이다 장치는 20 m 거리에서 수소 가스의 농도를 측정하기 위하여 590 V의 전압을 인가하였으나, 새롭게 개발된 on-axis 라만 라이다 장치는 광증배기에 560 V의 전압을 인가하여 광증배기에 의한 라만 신호의 증폭 효율을 감소시켜 실험을 수행하였다. 따라서 동일한 농도의 수소 가스에 의하여 발생한 라만 신호의 세기는 레이저의 거리에 따른 감쇠 현상에 의하여 50 m 거리에서 발생한 신호가 20 m 거리에서 발생한 신호에 비하여 6.25배 작게 된다. 또한 새롭게 개발된 라만 라이다 장치를 이용하여 50 m 거리의 수소 가스에 의하여 발생한 라만 신호를 계측하기 위하여 광증배기의 증폭 효율을 높이기 위하여 입력하는 전압이 오히려 낮

Table 2. Analysis results of the hydrogen gas concentration measuring experiment by using the on-axis Raman lidar system in distance of 50 m

(a) First experiment results

Hydrogen gas concentration (Vol. %)	Raman signal (V/100)	Measured value of hydrogen gas concentration (Vol. %)	Error rate (%)	Standard deviation (%)
0.66	-55.0549	-1.1792	-1.8370	1.9142
1.32	-55.7070	1.9283	0.6125	2.3982
3.29	-57.1410	3.1325	-0.1570	2.5827
6.58	-59.7987	5.9385	-0.6405	2.5035
13.16	-64.6910	14.1489	0.9910	6.0287
39.47	-85.7631	41.5104	2.0367	2.6522
65.79	-104.0985	65.9731	0.1837	3.0461
78.95	-114.4221	78.0665	-0.8809	4.0671
100.00	-126.9578	99.6892	-0.3108	3.5074
Average	-	-	0.8500	3.1889

(b) Second experiment results

Hydrogen gas concentration (Vol. %)	Raman signal (V/100)	Measured value of hydrogen gas concentration (Vol. %)	Error rate (%)	Standard deviation (%)
0.66	-55.0549	-0.0300	-0.6879	2.2489
1.32	-55.7070	0.8546	-0.4612	2.4761
3.29	-57.1410	2.7998	-0.4896	2.2449
6.58	-59.7987	6.4050	-0.1740	2.9384
13.16	-64.6910	13.0413	-0.1166	3.2808
39.47	-85.7631	41.6252	2.1516	3.1597
65.79	-104.0985	66.4968	0.7074	3.4111
78.95	-114.4221	80.5007	1.5533	3.9225
100.00	-126.9578	97.5052	-2.4948	3.8673
Average	-	-	0.9818	3.0611

Table 3. Results of the hydrogen gas measuring experiments

	First experiment	Second experiment
Coefficient of determination (R^2)	0.9991	0.9987
Average error rate (%)	0.8500	0.9918
Average standard deviation (%)	3.1889	3.0611

기 때문에 라만 신호의 세기가 훨씬 작게 측정된다. 그러나 새롭게 개발된 장치의 경우, 2배의 거리에서 이전에 개발된 라만 라이더 장치에 비하여 수소 가스 농도 계측 결과 거의 대등한 결과를 나타냈었다. 이와 같은 결과는 광학 수신기의 직경이 50 mm에서 75 mm로 1.5배 증가{광학 수신기의 수신 면적 증가: 1.9배 증가(on-axis 광학 수신기의 레이저 전송을 위한 거울에 의한 면적 제외)}와, 이색성 광분할기를 이용하여 라만 신호의 세기가 4배 증가 및 on-axis 형태의 광수신기를 사용하여 송신 광축과 수신 광축의 일치도가 향상에 의한 라만 신호 발생 면적의 증가로 인한 결과로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 원거리 수소 가스 원격 계측이 가능한 라만 라이더 장치의 수소 가스 탐지 거리 향상에 관한 것으로서, 개발된 on-axis 형태의 광학 수신기가 장착된 라만 라이더 장치를 이용하여 50 m 거리에 위치한 수소 가스 원격 측정 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

기존에 개발된 50 mm 직경을 갖는 off-axis 형태의 광학 수신기를 갖는 라만 라이더 장치에 비하여 새롭게 개발된 직경 75 mm 직경을 갖는 on-axis 형태의 광학 수신기를 갖는 라만 라이더 장치는, 동일한 레이저 출력으로 수소 가스 원격 탐지 거리가 2.5배 향상된 결과를 얻었다. 50 m 거리에서 수소 가스를 측정된 결과 선형성 99.9%, 정확도 1% 이하, 표준 편차 3%의 결과를 얻었다. 추가적인 연구를 통하여 개발된 on-axis 라만 라이더 시스템을 이용하여 수소 가스 이외의 다른 가스에 대한 원거리 농도 측정 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2016 1520101250).

References

1. R. N. Verem'ev, V. E. Privalov, and V. G. Shemanin, "Optimization of a semiconductor lidar for detecting atmospheric molecular iodine and hydrogen," *Tech. Phys.* **45**, 115-118 (2000).
2. E. I. Voronina, V. E. Privalov, and V. G. Shemanin, "Proving hydrogen molecules with a laboratory Raman lidar," *Tech. Phys. Lett.* **30**, 178-179 (2004).
3. A. J. Ball, "Investigation of gaseous hydrogen leak detection using Raman scattering and laser induced breakdown spectroscopy," M. S. *Thesis*, University of Florida (2005).
4. Z. R overt and B. Nick, "Wide area and distributed hydrogen sensors," in *Proc. International Conference on Hydrogen Safety* (France, Sep. 2009), pp. 16-18.
5. H. Nynomiya, S. Yeashima, and K. Ickawa, "Raman lidar system for hydrogen gas detection," *Opt. Eng.* **49**, 0943110-09430115 (2007).
6. Y. Noguchi, T. Shiina, K. Noguchi, T. Fukuchi, H. Ninomiya, I. Asahi, S. Sugimoto, and Y. Shimamoto, "Detection of low concentration hydrogen gas by compact Raman lidar," in *Proc. IQEC/CLEO Pacific Rim* (Australia, Aug. 2001), paper C530.
7. I. Asahi, S. Sugimoto, H. Ninomiya, T. Fukuchi, and T. Shiina, "Remote sensing of hydrogen gas concentration distribution by Raman lidar," *Proc. SPIE* **8526**, 852601-852608 (2012).
8. I. Y. Choi, S. H. Baik, N. G. Park, H. Y. Kang, J. H. Kim, and N. J. Lee, "Development of a Raman lidar system for remote monitoring of hydrogen gas," *Korean J. Opt. Photon.* **28**, 166-171 (2017).