

Study of a Method for Measuring Hydrogen Gas Concentration Using a Photon-counting Raman Lidar System

In Young Choi^{1†}, Sung Hoon Baik¹, 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 6, 2019; Revised April 22, 2019; Accepted April 29, 2019)

This paper discusses the development of a Raman lidar system for remote detection and measurement of hydrogen gas by using a photon counter. The Raman signal of the hydrogen gas is very weak and has a very low signal-to-noise ratio. The photon counter has the advantage of improving the signal-to-noise ratio, because it has a discriminator to eliminate the background noise from the Raman signal of the hydrogen gas. Therefore, a small and portable Raman lidar system was developed using a low-power pulsed laser and a photon-counter system to measure the hydrogen gas concentration remotely. To verify the capability of measuring hydrogen gas using the developed photon-counting Raman lidar system, experiments were carried out using a gas chamber in which it is possible to adjust the hydrogen gas concentration. As a result, our photon-counting Raman lidar system is seen to measure a minimum concentration of 0.65 vol.% hydrogen gas at a distance of 10 m.

Keywords: Raman lidar system, Hydrogen gas, Remote detection, Measurement algorithm, Raman scattering signal
OCIS codes: (280.3640) Lidar; (290.5860) Scattering, Raman; (280.1350) Backscattering

광 계수 방식의 라만 라이다 시스템을 이용한 원격 수소 가스 농도 계측 방법에 대한 연구

최인영^{1†} · 백성훈¹ · 차정호² · 김진호²

¹한국원자력연구원 양자광학연구부
Ⓣ 34057 대전광역시 유성구 대덕대로989번길 111

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

(2019년 3월 6일 받음, 2019년 4월 22일 수정본 받음, 2019년 4월 29일 게재 확정)

본 논문은 원격으로 수소 가스의 계측이 가능한 광 계수 방식의 소형 라만 라이다 시스템 개발에 관한 것이다. 수소 가스에 의한 라만 신호는 매우 미약한 신호로서, 신호 대 잡음비가 매우 낮다. 광 계수기는 광 판별기를 갖고 있어, 레이저에 의하여 발생한 배경 신호의 전기적 잡음을 제거할 수 있는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 출력이 낮은 레이저와 광 계수기를 이용하여 소형의 라만 라이다 시스템을 개발하였다. 개발된 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템의 원격 수소 가스 검출 능력을 증명하기 위하여 수소 가스 농도를 조절할 수 있는 가스 챔버를 이용하여 수소 가스 농도 측정 실험을 수행하였다. 그 결과 10 m 거리에서 최소 0.65 vol.%의 수소 가스 농도 검출이 가능하였다.

Keywords: 라만 라이다 시스템, 수소 가스, 원격 계측, 측정 알고리즘, 라만 산란 신호
OCIS codes: (280.3640) Lidar; (290.5860) Scattering, Raman; (280.1350) Backscattering

[†]E-mail: iychoi@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 중 하나로서, 에너지의 발생과정에서 오염물질의 배출이 거의 없는 친환경 에너지원으로 각광받고 있다. 특히 친환경 자동차로 최근 많은 연구가 진행중인 연료전지 자동차의 에너지원으로서, 점차 수요가 증가할 것으로 예상된다. 그러나 수소 가스는 낮은 점화 에너지를 갖고 있으며, 폭발성과 화염 전파성이 매우 큰 위험한 물질 중의 하나이다. 따라서 안전한 수소 가스의 산업적 이용을 위해선, 수소 가스의 누출 감지 및 제거하는 기술이 필수적으로 요구된다.

수소 가스 검출을 위한 방법은 크게 촉매 산화법, 반도체 산화 센서, 열전도 센서, 전기 화학 센서 등이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 센서를 이용한 측정 방법의 경우, 넓은 공간을 측정하기 위해선 수많은 센서가 필요한 단점을 갖고 있다. 또한 대부분의 센서를 이용한 수소 검출 방법은 특정 구역의 공기를 샘플링하기 때문에 수소 가스의 누출 지점을 정확히 파악하는데 많은 어려움이 있다.

수소 가스는 강한 라만 산란(Raman scattering) 현상을 나타내며, 이를 이용한 라만 라이다 시스템은 수소 가스를 원격으로 농도 및 분포를 측정할 수 있는 장점을 갖고 있다. 특히 라만 현상을 발생시키는 레이저 빛의 광 경로상의 모든 지점에서의 수소 가스 농도를 원격으로 측정하는 것이 가능하기 때문에 수소 가스의 누출 위치 및 범위를 정확히 측정할 수 있는 장점을 갖고 있다. 수소 가스 검출을 위한 라만 라이다 시스템의 경우, 2004년 523 nm 파장의 레이저를 이용하여 수소 가스 분자 검출의 가능성이 V. E. Privalov에 의하여 이론적으로 제안되었다^{1,2)}. 또한 미국의 Ball, 일본의 Ninomiya 및 한국원자력연구원에서 수소 가스 원격 측정이 가능한 라만 라이다 시스템이 개발되었다³⁻⁷⁾. 가장 최근에 개발된 한국원자력연구원의 수소 가스 원격 측정을 위한 라만 라이다 시스템은 30 mJ의 출력을 갖는 355 nm 파장의 펄스 레이저와 75 mm 직경의 광 수신기를 이용한 라만 라이다 시스템을 개발하여 30 m 거리의 수소 가스를 정량적 측정하였다^{8,9)}.

본 연구는 라만 라이다 시스템의 소형화에 관한 것으로, 3 μJ의 출력을 갖는 반도체 여기 방식의 마이크로 칩 펄스 레이저와(파장 355 nm), 광 계수기를 이용한 소형 라만 라이다 시스템을 설계 및 개발하였다. 또한 개발된 소형 라만 라이다 시스템의 수소 가스 검출 성능을 검증하기 위하여 수소 가스의 폭발 방지 및 농도 유지가 가능한 가스 챔버를 이용한 수소 가스 농도 측정 실험을 수행하였다. 그 결과 개발된 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템을 이용하여 10 m 거리에서 0.65 vol.% 수소 가스 농도 측정이 가능하였다.

II. 라만 라이다 시스템

라만 라이다 시스템을 이용하여 수소 가스를 검출하는 연구는 Privalov, Ball, Ninomiya, 한국원자력연구원 등에 의하여 수행되었다. 표 1은 각 연구자들에 의하여 개발된 수소 가스 검출을 위한 라만 라이다 시스템 사양을 나타낸 것이다. 수소 가스 검출을 위한 라만 라이다 시스템은 수소 가스에 라만 산란 현상을 발생시키는 레이저 전송 시스템의 레이저 출력과 반복률 그리고 라만 산란 신호를 측정하는 광학 수신 장치의 직경에 의하여 성능이 결정되는 특징을 갖고 있다. Privalov의 경우, 100 mJ 출력과 반복률이 50 Hz인 532 nm 파장의 레이저와 직경 400 mm의 광학식 수신장치를 이용하여 측정된 라만 산란 신호를 15회 평균하여 수소 가스 농도를 측정하였으며, 0.6 vol.%의 농도의 수소 가스 측정이 가능함을 제시하였다^{1,2)}. 미국 Ball의 경우, 250 mJ 출력과 반복률이 10 Hz인 355 nm 파장의 레이저와 100 mm 직경의 광학 수신장치를 이용하여 측정된 라만 산란 신호를 50회 평균하여 0.76 vol.% 농도의 수소 가스를 측정하였다^{3,4)}. 일본 Ninomiya의 경우, 6 mJ 출력과 반복률이 100 Hz인 355 nm 파장의 레이저와 직경 170 mm의 광학 수신장치를 이용하여 측정된 라만 산란 신호를 64회 평균하여 0.6 vol.%의 농도의 수소 가스를 측정하였다⁵⁻⁷⁾. 한국원자력연구원에서 개발한 라만 라이다 시스템은 30 mJ의 출력과 반복률이 20 Hz인 355 nm 파장의 레이저와 직경 75 mm의 광학 수신장치를 이용하여 측정된 라만 신호를 100번 평균하여 30 m 거리에서

Table 1. Comparison of the specification of previously invented Raman lidar system¹⁻⁹⁾

	Privalov	Ball	Ninomiya	KAERI
Low hydrogen gas limit (vol.%)	0.6	0.76	0.6	0.66
Laser max output energy (mJ)	100	250	6	30
Wavelength (nm)	532	355	355	355
Repetition rate (Hz)	50	10	100	20
Telescope diameter (mm)	400	100	170	75
Detection distance (m)	2	50	13	30
Remark	Privalov	648 nm FWHM = 5 nm, 15 averaging data used		
	Ball	Hi-pass filter 375, 385, 395 nm, 50 averaging data used		
	Ninomiya	Band-pass filter 416.3 nm, FWHM = 1.8 nm, 64 averaging data used		
	KAERI	Band-pass filter 416 nm ± 0.15 nm, 100 averaging data used		

0.66 vol.%의 농도를 측정하였다^{18,91}. 표 1에 기술된 라만 라이다 장치들은 수 mJ에서 수백 mJ 급의 펄스레이저를 사용하는 장치로서, 크기와 무게에 있어 이동식으로 사용하는 데 제한이 있다.

III. 광 계수 방식 라만 라이다 시스템 개발

라만 라이다 시스템의 수소 가스 원격 측정 성능은 라만 신호를 발생시키는 레이저의 출력, 레이저 반복률과 광학 수신기의 직경 등이 영향을 크게 미친다. 특히 거리가 멀어지면 수신되는 라만 신호가 급격히 감쇄하므로, 레이저 출력은 라만 라이다 시스템에서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 레이저 에너지 출력이 증가하게 되면 레이저 발진기가 커지며, 출력의 안정화를 위하여 별도의 냉각 장치가 필요하게 되어 이동형 시스템을 구축하는데 어려움이 있다.

라만 라이다 시스템을 소형화하기 위해선, 레이저의 에너지 출력을 줄이고 별도의 냉각 장치가 없는 레이저 광원을 사용해야 한다. 그러나 레이저의 에너지 출력이 낮아지게 되면, 라만 신호의 신호 대 잡음비가 낮아지는 현상이 발생하게 되어 수소 가스의 농도 측정 정밀도가 떨어지는 단점이 존재한다.

라만 라이다 시스템을 소형화하기 위하여 μJ 의 출력을 갖는 반도체 여기 방식의 펄스 레이저를 사용하였다. 라만 신호를 발생시키는 레이저 출력 에너지가 매우 낮기 때문에 수소 가스에 의하여 발생한 라만 신호의 신호 대 잡음비가 매우 낮은 한계를 갖고 있어 이를 해결하기 위해 광 계수 방식을 적용하였다. 표 2는 개발된 광 계수기 방식의 소형 라만 라이다 시스템의 사양을 나타낸 것이다. 그림 1은 광 계수기의 원리를 나타낸 그림이다. 광 계수기는 광 판별기(discriminator)에 의하여 일정 세기 이상의 광자 신호의 개수를 세는 장치

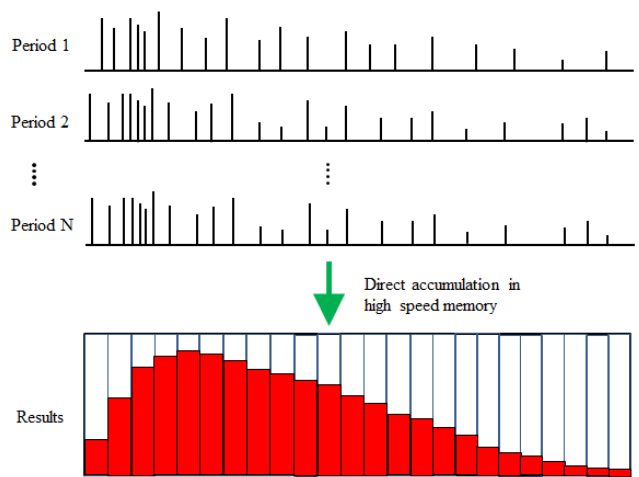


Fig. 1. Principle of the photon counting process.

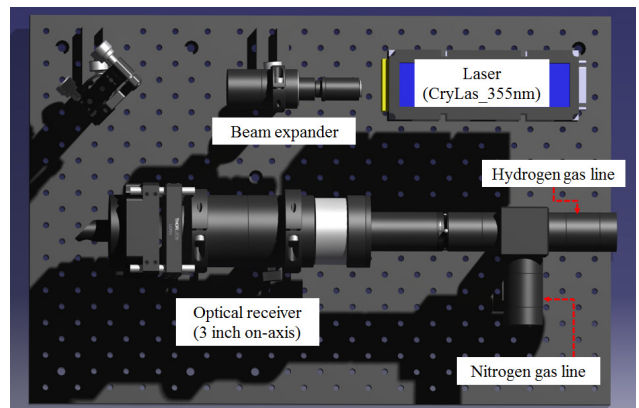


Fig. 2. 3D design lay-out of developed photon counting Raman lidar system.

Table 2. Specifications of developed photon counting Raman lidar system

	Parameter	Specification
Transmitter	Type	Diode pumped laser (CryLas FTSS 355-Q2)
	Repetition rate	10 kHz
	Pulse width	1 ns, Jitter \pm 2 ns
	Energy	3 μJ at 355 nm (third harmonics)
Optical receiver	Telescope diameter	75 mm
	Band pass filter (416 nm)	416 nm \pm 0.15 nm (for hydrogen Raman signal)
	Band pass filter (387 nm)	387 nm \pm 0.15 nm (for hydrogen Raman signal)
	Dichroic beam-splitter	Alluxa, Cut-on Wavelength 409 nm \pm 3.0 nm Transmission band (415 to 850 nm > 95%, T average) Reflection band (325 to 403 nm > 98%, R average)
	Notch filter (355 nm)	355 nm \pm 10 nm
Electronics	Photon counter	FastComtec, MCS6A, Multiscaler, 1 Ch. trigger (Start Ch.), 3 input Ch. (Stop Ch.),
	DAQ	National instrument, NI - USB 6211 (PMT amplifier value control)
	PMT	Hamamatsu R9880-U2 (PMT H ₂ and PMT N ₂ same)
	Pre-amplifier	Hamamatsu C6438-02

로서, 펄스 레이저에 의한 광자의 개수를 누적하면 발생한 신호의 파형을 복원할 수 있다. 따라서 저출력 반도체 레이저가 사용된 라만 라이다 시스템에 광 계수기를 결합하여 레이저 출력 저하에 의하여 낮아진 신호 대 잡음 비를 향상할 수 있도록 설계하였다. 그림 2는 반도체 레이저를 이용한 광 계수 방식의 소형 라만 라이다 시스템을 나타낸 3D 모델을 나타낸 것이다.

IV. 수소 가스 정량적 측정 실험 및 결과

4.1. 실험 방법

수소 가스 원격 측정을 위해 개발된 광 계수 방식 라만 라이다 시스템의 수소 가스 검출 능력을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 수소 가스의 경우, 공기보다 밀도가 낮고, 폭발성이 매우 강하므로 폭발 및 연소를 방지하기 위하여 산소를 차단할 수 있으며 분압 조절을 통하여 수소 가스의 농도를 조절할 수 있는 가스 챔버를 이용하였다. 가스 챔버는 6 m 길이의 원통형으로 제작되었으며, 355 nm 파장에서 99% 이상의 투과도를 갖는 viewport를 설치하였다.

광 계수기는 레이저 펄스에 의하여 발생한 광자 신호의 개수를 누적하여 나타낸다. 따라서 정량적인 수소 가스의 농도를 측정하기 위해선, 동일 개수의 레이저 펄스에 의하여 발생한 수소 가스에 의한 라만 신호 개수를 비교하여야 한다. 개발된 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템의 수소 가스 농도 측정 성능을 비교하기 위하여 10 m 거리에 수소 가스 챔버를 설치하였고, 각각의 수소 가스의 농도에서 30만번의 레이저 펄스를 조사하여 발생한 라만 신호를 20회 반복하여 측정하였다. 또한 개발된 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템의 재현성을 검증하기 위하여 동일한 방법으로 3회 반복 실험을 수행하였다.

4.2. 수소 가스 측정 실험 결과

개발된 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템은 기존의 라만 라이다 시스템에 비하여 레이저 펄스 에너지가 매우 작다. 따라서 기존의 라만 라이다 시스템과 고속 디지털처리를 이용하여 수소 가스에 의한 라만 신호를 획득할 경우, 매우 낮은 신호 대 잡음비를 나타낸다. 그러나 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템은 광 계수기에 장착된 광 판별기를 이용하여 사용자가 입력한 임계 값(threshold value) 이상의 신호 개수를 세는 방식으로 외부 잡음에 의한 영향을 제거할 수 있다. 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템을 이용하여 수소 가스 농도에 따른 라만 신호의 광자 개수를 구하기 위하여 광 계수기의 임계 값으로 0.075 V를 입력하고 임계 값 이상의 광 신호에 대한 광자 개수를 셀 수 있도록 설정하였다.

그림 3은 길이 6 m의 가스 챔버의 중앙 위치를 10 m에 놓고, 수소 가스의 농도가 100 vol.%일 때, 광 계수기의 광 판별기의 임계 값으로 0.075 V를 입력하여 획득한 결과를 나타낸 그래프이다. 그림 3에서 보듯, 가스 챔버의 레이저 전송

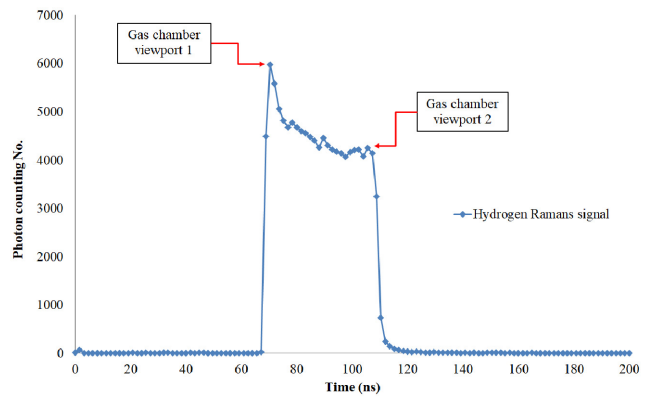


Fig. 3. Photon counting results at 100 vol.% of hydrogen gas concentration.

을 위한 viewport의 앞 단(gas chamber viewport 1)에서 광자 계수 값이 훨씬 많이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 viewport에선, 수소 가스가 존재하지 않으며, 레이저에 의하여 산란된 Mie 신호가 협대역 필터에서 완전히 제거되지 못하고 일부가 투과되어 들어오기 때문에 나타나는 현상이다. 그러나 viewport의 뒷 단(gas chamber viewport 2)의 경우, 앞 단과 같이 viewport에서 레이저에 의하여 산란된 Mie신호가 협대역 필터에 의하여 완전히 제거되지 못하고 일부가 투과되어 들어오게 되나, 그 위치가 앞 단의 위치에 비하여 거의 1.86배 이상 멀고, 광 계수기의 광 판별기의 임계 전압 값 설정에 의하여 제거되어 앞 단과 같이 눈에 띄는 신호가 발생하지 않는다.

광 계수 방식의 라만 라이다 시스템에 사용된 펄스 레이저는 펄스 폭이 약 1 nm의 폭을 갖기 때문에 가스 챔버 앞 단 viewport의 1 ns 이후부터 뒤 단 viewport의 1 ns 이전 데이터까지가 가스 챔버 내부의 순수 수소 가스에 의하여 발생한 라만 신호에 의한 광자 개수가 누적된 것이라고 할 수 있다. 따라서 광 계수기를 이용한 라만 라이다 시스템을 이용하여 수소 가스의 농도를 측정하기 위하여, 챔버의 viewport에 의한 영향이 없는 챔버 중간에서 획득한 광자 계수 값을 이용하여 분석하였다. 그림 4, 5, 6은 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템을 이용하여 3번의 반복 실험을 통하여 획득한 결과를 정리한 것이고, 표 3, 4, 5는 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템을 이용하여 획득한 결과를 바탕으로 측정 오차 및 표준 편차를 분석한 것이다. 표 6은 3회 반복 실험을 통하여 획득한 결정 계수, 측정 오차 평균과 측정 표준 편차 평균을 따로 정리한 것이다. 표에서 볼 수 있듯, 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템을 이용하여 10 m 거리에 위치한 0.65 vol.%의 수소 가스를 원격으로 계측할 수 있음을 알 수 있다. 또한 선형 추세선과의 유사도를 나타내는 결정 계수의 값이 0.9995 이상이었으며, 측정 오차 평균이 0.69%, 표준 편차의 평균 역시 0.75%로 매우 낮은 것을 알 수 있다. 실험 결과, 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템은 기존의 고풍출력 펄스 레이저를 이용한 라만 라이다 시스템과 수소 가스 원격 측정

결과가 대등한 수준임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기존 라만 라이다 시스템에 비하여 레이저 펄스 에너지가 훨씬 낮아 신호 대 잡음비가 떨어지지만, 광 계수기의 광 판별기 임계 값을 설정하여 수소 가스에 의한 라만 신호와 광학 잡음 신호를 분리하여 신호 대 잡음비가 향상되었기 때문에 발생한 결과로 판단된다.

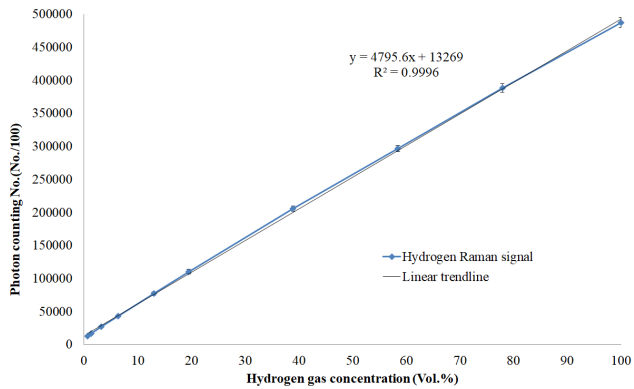


Fig. 4. Results of the first experiment according to the variation of the hydrogen gas concentration.

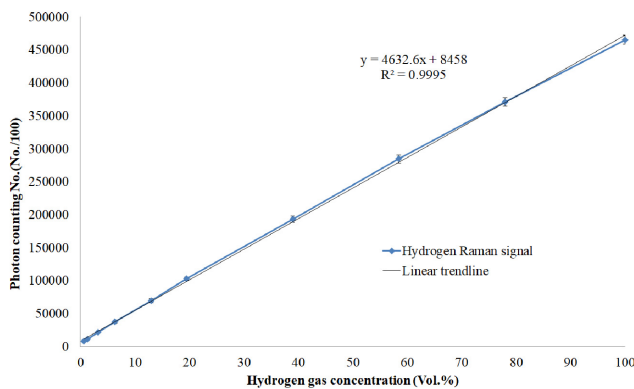


Fig. 5. Results of the second experiment according to the variation of the hydrogen gas concentration.

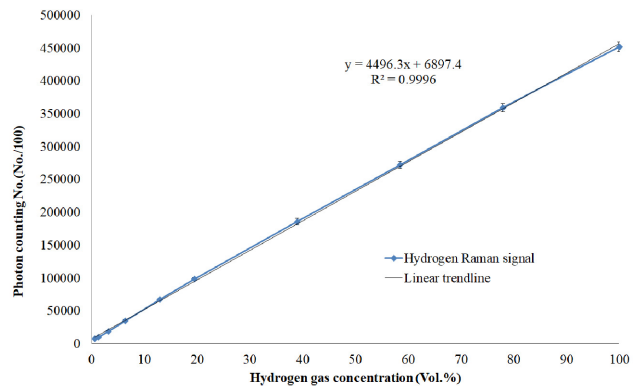


Fig. 6. Results of the third experiment according to the variation of the hydrogen gas concentration.

Table 3. Analysis results of the first experiment according to the variation of the hydrogen gas concentration

Hydrogen gas concentration (vol.%)	Photon counting No.	Measuring hydrogen gas concentration (vol.%)	Error rate	Standard deviation (%)
0.65	128.85	-0.08	-0.73	0.27
1.30	166.25	0.70	-0.60	0.21
3.25	270.65	2.88	-0.37	0.38
6.36	427.05	6.14	-0.23	0.30
12.99	769.55	13.28	0.29	0.57
19.48	1102.35	20.22	0.74	0.70
38.96	2057.20	40.13	1.17	0.80
58.44	2965.80	59.08	0.64	1.01
77.92	3881.70	78.18	0.25	1.37
100.00	4872.20	98.83	-1.17	1.58
Average	-	-	0.62	0.72

Table 4. Analysis results of the second experiment according to the variation of the hydrogen gas concentration

Hydrogen gas concentration (vol.%)	Photon counting No.	Measuring hydrogen gas concentration (vol.%)	Error rate	Standard deviation (%)
0.65	82.60	-0.04	-0.69	0.18
1.30	114.85	0.65	-0.65	0.19
3.25	214.10	2.80	-0.45	0.28
6.36	372.70	6.22	-0.14	0.40
12.99	692.85	13.13	0.14	0.65
19.48	1026.25	20.33	0.85	0.64
38.96	1931.05	39.86	0.90	0.97
58.44	2844.60	59.58	1.14	1.30
77.92	3708.95	78.24	0.31	1.33
100.00	4652.05	98.59	-1.41	1.52
Average	-	-	0.67	0.75

Table 5. Analysis results of the third experiment according to the variation of the hydrogen gas concentration

Hydrogen gas concentration (vol.%)	Photon counting No.	Measuring hydrogen gas concentration (vol.%)	Error rate	Standard deviation (%)
0.65	71.20	-0.07	-0.72	0.17
1.30	101.95	0.62	-0.68	0.22
3.25	189.90	2.59	-0.66	0.28
6.36	347.20	6.12	-0.25	0.46
12.99	673.85	13.44	0.45	0.31
19.48	980.95	20.32	0.84	0.51
38.96	1856.55	39.95	0.99	1.19
58.44	2721.65	59.35	0.91	1.22
77.92	3590.70	78.83	0.91	1.36
100.00	4514.60	99.54	-0.46	1.69
Average	-	-	0.69	0.74

Table 6. Results of the average error rate and standard deviation according to the experiment No.

Experiment No.	1	2	3
Coefficient of determination (R^2)	0.9996	0.9995	0.9996
Average error rate	0.62	0.67	0.69
Standard deviation (%)	0.72	0.75	0.74

V. 결 론

본 연구에서는 수소 가스 원격 측정을 위한 라만 라이다 시스템의 소형화 연구로서, 기존 개발된 수소 가스 원격 계측용 라만 라이다 시스템에 비하여 아주 작은 3 μ J의 출력과 10 kHz의 반복률을 갖는 소형 레이저를 이용한 레이저 전송 시스템과 광 계수 장치를 이용하여 수소 가스에 의한 라만 산란 신호 검출장치를 개발하였다. 또한 개발된 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템을 이용하여 원격으로 수소 가스 검출 및 정량적 농도 측정을 위한 실험을 수행한 결과 10 m 거리에서 0.65 vol.% 농도의 수소 가스 원격 탐지가 가능함을 증명하였다. 본 연구를 통하여 개발된 광 계수 방식의 라만 라이다 시스템은 기존의 라만 라이다 시스템에 비하여 소형의 레이저와 광학 수신 장치를 이용하여 수소 가스의 원격 계측 능력이 대등함을 실험적으로 증명하였다. 추후 50 m 이상의 거리에서 수소 가스 탐지를 위한 장치의 개선 연구와, 질소 가스에 의한 라만 신호를 이용하여 자체 교정을 할 수 있는 방법에 대한 후속 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**, 636-640 (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. Róvert and B. Nick, "Wide area and distributed hydrogen sensors," *International Conference on Hydrogen Safety* (2009).
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. International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim* (Australia, Aug. 2011), pp. 846-847.
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).
9. I. Y. Choi, S. H. Baik, J. Y. Lim, J. H. Cha, and J. H. Kim, "Development of on-axis Raman lidar system for remotely measuring hydrogen gas at long distance," *Korean J. Opt. Photon.* **29**, 119-1251 (2018).