

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구
국제사무국

(43) 국제공개일
2023년 6월 8일 (08.06.2023)

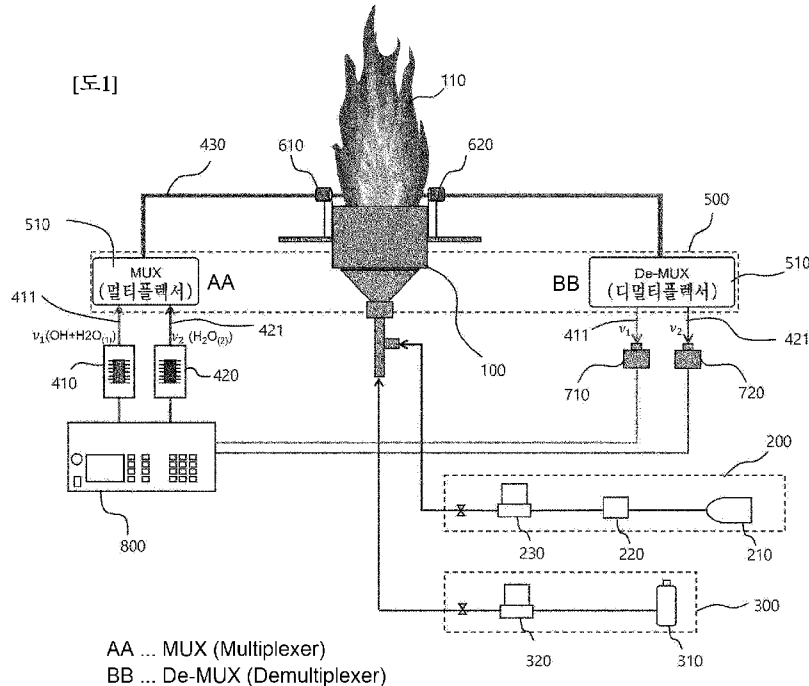


(10) 국제공개번호
WO 2023/101192 A1

- (51) 국제특허분류: *G01N 21/39* (2006.01) *G06F 17/10* (2006.01)
G01N 21/31 (2006.01)
- (21) 국제출원번호: PCT/KR2022/015192
- (22) 국제출원일: 2022년 10월 7일 (07.10.2022)
- (25) 출원언어: 한국어
- (26) 공개언어: 한국어
- (30) 우선권정보: 10-2021-0168941 2021년 11월 30일 (30.11.2021) KR
- (71) 출원인: 한국생산기술연구원 (KOREA INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY) [KR/KR]; 31056 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89, Chungcheongnam-do (KR).
- (72) 발명자: 이창엽 (LEE, Chang Yeop); 07981 서울시 양천구 목동서로 70, 225동 402호, Seoul (KR). 김대해 (KIM, Dae Hae); 16964 경기도 용인시 기흥구 구갈로 71-18, 103동 1404호, Gyeonggi-do (KR). 박대근 (PARK, Dae Geun); 18396 경기도 화성시 동탄원천로 382-37, 114동 503호, Gyeonggi-do (KR). 유미연 (YOO, Mi Yeon); 18032 경기도 평택시 상서재로 80, 505동 1503호, Gyeonggi-do (KR). 소성현 (SO, Sung Hyun); 31056 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89, Chungcheongnam-do (KR).
- (74) 대리인: 오영진 (OH, Young Jin); 16705 경기도 수원시 영통구 덕영대로1556번길 16, B동 1406호, Gyeonggi-do (KR).
- (81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,

(54) Title: METHOD FOR MEASURING CONCENTRATION OF OH RADICAL IN REACTION ZONE USING LASER ABSORPTION SPECTROMETRY

(54) 발명의 명칭: 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법



(57) Abstract: A system for measuring the concentration of OH radicals in a reaction zone using laser absorption spectrometry, according to an embodiment of the present invention, may comprise the steps of: irradiating a first laser and a second laser of mutually different wavelengths; mixing the first laser and the second laser; irradiating the mixed laser toward a reaction zone generated in a reaction system; separating the mixed laser that has passed through the reaction zone into the first laser and the second laser; detecting, in the first laser, a superimposed signal (OH+H₂O) of a light absorption signal for the OH radical and a first light absorption signal for H₂O and detecting, in the second laser, a single light absorption signal for H₂O, which has been absorbed



CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역
내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE,
LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유
럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME,
MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),
OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM,
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

공개:

— 국제조사보고서와 함께 (조약 제21조(3))

by a single component H_2O ; and, on the basis of the single light absorption signal for H_2O , measuring the concentration of OH radicals
by separating only the light absorption signal for H_2O from the superimposed signal.

(57) 요약서: 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템은, 서로 다른
파장의 제1 레이저 및 제2 레이저를 조사하는 단계, 상기 제1 레이저 및 상기 제2 레이저를 혼합하는 단계, 반응시스템에서
발생하는 반응영역으로 혼합 레이저를 조사하는 단계, 상기 반응영역을 투과한 상기 혼합 레이저를 상기 제1 레이저 및 상기
제2 레이저로 분리하는 단계, 상기 제1 레이저에서 OH라디칼 광흡수신호 및 제1 H_2O 광흡수신호의 중첩신호(OH+ H_2O)를 검
출하고, 제2 레이저에서 H_2O 단일성분에 의해 흡수된 단일 H_2O 광흡수신호를 검출하는 단계 및 상기 단일 H_2O 광흡수신호를
기초로, 상기 중첩신호에서 상기 제1 H_2O 광흡수신호만을 분리함으로써 OH라디칼 농도를 측정하는 단계를 포함할 수 있다.

명세서

발명의 명칭: 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법

기술분야

- [1] 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 전세계적으로 지구온난화 억제를 위해 탄소 중립 정책이 시행되고 있다. 현재 탄화수소 연료는 대부분의 연소 시스템의 에너지 생산에 기여하지만 탄소 중립 정책으로 탄화수소기반 연료 사용이 점차 줄어들고 있다. 이를 대체하기 위해서 탄화수소 연료 개질로부터 생산된 수소계열의 (수소, 암모니아 및 합성 연료) 연료 사용이 2050년까지 크게 증가할 것으로 예상된다. 하지만 수소, 암모니아 연료 기반 연소시스템에서도 대기오염물질의 전구물질(질소산화물)이 생성(온실가스와의 trade-off)되기 때문에 새로운 고효율 저공해 수소, 암모니아 연료 기반 연소 시스템 개발이 요구되고 있다.
- [3] OH 라디칼은 연소 시스템의 효율과 대기오염물질 생성에 밀접한 화학종이다. 화염 내 OH 라디칼은 연쇄분지반응(Branching reaction)이나 전파 반응(Propagation reaction)에 주요한 운반자로 연소 효율에 밀접한 영향을 끼치고 또한 화염의 산화제를 공기로 사용할 때 고온 등 여러가지 조건에서 NOX로 변하기 때문에 미세먼지 전구물질 생성에도 연관성을 가진다. 하지만 큰 연소시스템에서 빠른 유동과 열악한 환경으로 인하여 OH 라디칼 농도 측정은 어려운 실정이다. 특히 화염 내 OH 라디칼은 약 2ns 안에 생성과 소멸이 일어나는 특성으로 정량적 농도 측정이 어렵다. 이러한 이유로 연소 환경에서 화염을 직접적으로 진단하기 위한 개발이 활발히 진행되고 있다. 그 중 비접촉식 방식으로 각광을 받고 있는 광학 측정 기술이 화염 거동을 이해하기 위한 방법으로 제안되고 있다.
- [4] 화염 내 OH 라디칼을 측정하는 일반적인 광학 측정 방법은 레이저 유도 형광법(Laser Induced Fluorescence, LIF), 화학발광법 (Chemiluminescence, CL), 그리고 파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법 등으로 분류될 수 있다. 레이저 유도 형광법은 주로 정성적 이미지 분석에 사용되며 가혹한 환경에서 측정하기 어려운 대형 레이저 시스템의 단점을 가지고 있다. 화학발광법은 OH 라디칼 분포의 정성적 특성을 확인하는데 자주 사용되며 정량적 농도 분석에 오류가 존재한다. 마지막으로 본 발명에 적용된 좁은 선폭(narrow line width)의 레이저 광원을 사용하는 파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법은 화학종에 따라서 특정한 파장을 흡수하는 원리를 이용하기 때문에 정량적 농도 측정에 널리 적용되고 있는 방식이다. 또한 화염 및 가스 유동에서 높은 시간 분해능 및

in-situ 측정을 기반으로 가혹한 환경에서도 측정할 수 있는 장점을 가진다.

- [5] 일반적으로 OH 라디칼을 측정하기 위해서 근적외선 파장의 레이저가 사용된다. 하지만 근적외선 영역에서 OH 라디칼 파장은 H_2O 파장이 중첩되는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 화염 내 OH 라디칼 농도를 측정하는 기존 방법은 흡수 분광학적 이론(HITRAN/HITEMP)을 기반으로 H_2O 흡수 신호를 모사(Simulation)하여 OH 라디칼 흡수 신호에 중첩된 H_2O 흡수 신호를 제거하는 방식으로 이루어졌다. 그러나 이러한 방법은 복잡한 모사 방식과 반복 계산(iterative calculations)이 필요하게 되는 문제점이 있었다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [6] 본 발명의 일 실시예는, 광학 방식 기반의 파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)방법 중 직접 흡수 분광법(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)을 이용하여 반응영역 내 OH 라디칼 농도 측정 방법을 제안하고 복잡한 모사 방식과 반복 계산 없이 반응영역 온도, H_2O 농도 및 OH라디칼 농도를 동시에 측정할 수 있는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법을 제공하고자 한다.

과제 해결 수단

- [7] 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템은, 서로 다른 파장의 제1 레이저 및 제2 레이저를 조사하는 단계, 상기 제1 레이저 및 상기 제2 레이저를 혼합하는 단계, 반응시스템에서 발생하는 반응영역으로 혼합 레이저를 조사하는 단계, 상기 반응영역을 투과한 상기 혼합 레이저를 상기 제1 레이저 및 상기 제2 레이저로 분리하는 단계, 상기 제1 레이저에서 OH라디칼 광흡수신호 및 제1 H_2O 광흡수신호의 중첩신호(OH+ H_2O)를 검출하고, 제2 레이저에서 H_2O 단일성분에 의해 흡수된 단일 H_2O 광흡수신호를 검출하는 단계 및 상기 단일 H_2O 광흡수신호를 기초로, 상기 중첩신호에서 상기 제1 H_2O 광흡수신호만을 분리함으로써 OH라디칼 농도를 측정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [8] 상기 측정하는 단계는, 상기 단일 H_2O 광흡수신호를 기초로 반응영역 온도를 측정하는 단계, 상기 반응영역 온도로부터 분석된 상기 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 선강도를 기초로, 상기 단일 H_2O 광흡수신호에 포함된 제2 H_2O 농도를 측정하는 단계, 상기 제2 H_2O 농도를 기초로 상기 제1 H_2O 광흡수신호의 제1 H_2O 흡광도 면적을 측정하는 단계, 상기 중첩신호(OH+ H_2O)의 흡광도 면적에서 상기 제1 H_2O 흡광도 면적을 제거하여 OH라디칼 흡광도를 도출하는 단계 및 상기 반응영역 온도로부터 분석된 OH라디칼 광흡수신호의 선강도를 기초로 상기 OH라디칼 농도를 측정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [9] 상기 반응영역 온도를 측정하는 단계는, 상기 단일 H_2O 광흡수신호가 2개로 존재하고, 2개의 상기 단일 H_2O 광흡수신호 각각은 제2 H_2O 광흡수신호 및 제3 H

$_2\text{O}$ 광흡수신호이며, 하기 수학식 3에 따라 상기 반응영역 온도를 측정할 수 있다.

[10] [수학식 3]

$$T_{flame} = \frac{\left[\frac{hc}{k} (E''_{2_H2O(\#2)} - E''_{1_H2O(\#2)}) \right]}{\left[\ln \frac{A_{1_H2O(\#2)}}{A_{2_H2O(\#2)}} + \ln \frac{S_{2_H2O(\#2)}(T_0)}{S_{1_H2O(\#2)}(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{(E''_{2_H2O(\#2)} - E''_{1_H2O(\#2)})}{T_0} \right]}$$

[12] (여기서, T_{flame} 는 반응영역 온도, h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, k 는 볼츠만 상수, $E''_{1_H2O(\#2)}$ 는 제2 H_2O 광흡수신호의 저준위 상태에너지, $E''_{2_H2O(\#2)}$ 는 제3 H_2O 광흡수신호의 저준위 상태에너지, $A_{1_H2O(\#2)}$ 는 제2 H_2O 광흡수신호의 흡광도 면적, $A_{2_H2O(\#2)}$ 는 제3 H_2O 광흡수신호의 흡광도 면적, $S_{1_H2O(\#2)}(T_0)$ 는 기준온도에서 제2 H_2O 광흡수신호의 선강도, $S_{2_H2O(\#2)}(T_0)$ 는 기준온도에서 제3 H_2O 광흡수신호의 선강도, T_0 는 기준온도이다.)

[13] 상기 단일 H_2O 광흡수신호에 포함된 제2 H_2O 농도를 측정하는 단계는, 하기 수학식 4로부터 도출된 하기 수학식 5에 따라 상기 제2 H_2O 농도를 측정할 수 있다.

[14] [수학식 4]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H2O(\#2)} dv = P \cdot \chi_{H2O(\#2)} \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L = A_{H2O(\#2)}$$

[16] [수학식 5]

$$\chi_{H2O(\#2)} = \frac{A_{H2O(\#2)}}{P \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L}$$

[18] (여기서, $\alpha_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 흡광도, P 는 측정환경 내 압력, $\chi_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 농도, $S_{i,j}(T)$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 선강도, L 는 광측정거리, $A_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 흡광도 면적이다.)

[19] 상기 중첩신호($\text{OH}+\text{H}_2\text{O}$)에 포함된 제1 H_2O 농도와, 상기 단일 H_2O 광흡수신호에 포함된 제2 H_2O 농도는 동일하며, 이는 하기 수학식 6으로 표현될 수 있다.

[20] [수학식 6]

$$\chi_{H2O(\#2)} = \chi_{H2O(\#1)}$$

[22] (여기서, $\chi_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 농도, $\chi_{H2O(\#1)}$ 는 중첩신호의 제1 H_2O 농도이다.)

[23] 상기 제1 H_2O 광흡수신호의 제1 H_2O 흡광도 면적을 측정하는 단계는, 상기 수학식 4 및 상기 수학식 6으로부터 도출된 하기 수학식 7에 따라 상기 제1 H_2O

흡광도 면적을 측정할 수 있다.

[24] [수학식 7]

$$[25] \quad A_{H_2O(\#1)} = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H_2O(\#1)} d\nu = P \cdot \chi_{H_2O(\#2)} \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L$$

[26] (여기서, $A_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적, $\alpha_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도, P는 측정환경 내 압력, $\chi_{H_2O(\#2)}$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 농도, $S_{i,j}(T)$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 선강도, L은 광측정거리이다.)

[27] 상기 OH라디칼 흡광도를 도출하는 단계는, 하기 수학식 8에 따라 상기 OH라디칼 흡광도를 도출할 수 있다.

[28] [수학식 8]

$$[29] \quad A_{OH} = A_{OH+H_2O(\#1)} - A_{H_2O(\#1)}$$

$$\Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH} d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH+H_2O(\#1)} d\nu - \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H_2O(\#1)} d\nu$$

[30] (여기서, A_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도 면적, $A_{OH+H_2O(\#1)}$ 는 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도 면적, $A_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적, α_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도, $\alpha_{OH+H_2O(\#1)}$ 는 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도, $\alpha_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도이다.)

[31] 상기 반응영역 온도로부터 분석된 OH라디칼 선강도를 기초로 상기 OH라디칼 농도를 측정하는 단계는, 하기 수학식 9로부터 도출된 하기 수학식 10에 따라 상기 OH라디칼 농도를 측정할 수 있다.

[32] [수학식 9]

$$[33] \quad \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH} d\nu = P \cdot \chi_{OH} \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L = A_{OH}$$

[34] [수학식 10]

$$[35] \quad \chi_{OH} = \frac{A_{OH}}{P \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L}$$

[36] (여기서, α_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도, P는 측정환경 내 압력, χ_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 농도, $S_{i,j}(T)$ 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 선강도, L은 광측정거리, A_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도 면적이다.)

- [37] 제1 레이저는 1450 ~ 1550 nm의 파장 범위를 가지고, 제2 레이저는 1300 nm ~ 1400 nm의 파장 범위를 가질 수 있다.

발명의 효과

- [38] 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법은, 향상된 DAS 방법을 기반으로 근적외선 파장 영역에서 OH 라디칼 흡수 신호에 중첩되는 H₂O 흡수신호를 제거하는 방법을 적용하고, 복잡한 보사 방식과 반복 계산 없이 반응영역 온도, H₂O 농도 및 OH라디칼 농도를 동시에 측정할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [39] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템의 구성도이다.
- [40] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 제1 레이저로 측정한 선강도 그래프이다.
- [41] 도 3은 도 3 그래프의 일부 구간을 확대하여 도시한 그래프이다.
- [42] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 제2 레이저로 측정한 선강도 그래프이다.
- [43] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법의 순서도이다.
- [44] 도 6은 도 5의 OH라디칼 농도를 측정하는 단계를 상세히 나타낸 순서도이다.
- [45] 도 7는 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법 및 R-type 열전대로 측정된 반응영역 온도를 나타낸 그래프이다.
- [46] 도 8 및 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법 및 화학반응시뮬레이션으로 측정된 H₂O 농도 및 OH라디칼 농도를 각각 나타낸 그래프이다.

발명의 실시를 위한 형태

- [47] 이하, 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다. 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 동일 또는 유사한 구성요소에 대해서는 동일한 참조부호를 붙였다.
- [48] 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [49] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템의 구성도이다.

- [50] 먼저, 도 1을 참고로 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)에 대해 설명한다.
- [51] 도 1을 참고하면, 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)은, 반응시스템(100), 공기공급부(200), 가스공급부(300), 제1 레이저조사부(410), 제2 레이저조사부(420), WDM 시스템(500), 제1 콜리메이트 렌즈(610), 제2 콜리메이트 렌즈(620), 제1 광검출부(710), 제2 광검출부(720) 및 제어부(800)를 포함할 수 있다.
- [52] 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)은 반응시스템에 설치되어 반응영역에서 발생하는 반응영역 온도, H₂O 농도, OH라디칼 농도를 측정할 수 있다. 여기서, 반응영역은 화학적 반응 또는 화염과 같이 열과 빛을 발생하는 화학반응뿐만 아니라 다양한 반응이 발생하는 영역을 의미한다. 도면들의 설명에서, 반응시스템(100)은 연소기이고, 반응영역(110)은 연소기에서 발생하는 화염일 수 있다.
- [53] 공기공급부(200)는 공기저장부(210), 공기건조시스템(220), 제1 질량유량제어기(230)를 포함할 수 있다.
- [54] 공기저장부(210)는 압축기에 의해 압축된 공기가 저장될 수 있다. 압축공기는 공기건조시스템(220) 및 제1 질량유량제어기(230)를 통해 반응시스템(100)로 공급되어, 반응영역(110)에서의 산화제로서 역할을 할 수 있다.
- [55] 공기건조시스템(220)은 공기저장부(210)로부터 압축공기를 공급받아, 압축공기 중에 포함되는 먼지, 유분, 수분 등의 오염물질을 요구 정도에 기초한 기준값 내로 제거하여 최적의 압축공기를 공급하는 시스템이다.
- [56] 제1 질량유량제어기(230)는 압축공기의 유량을 측정 및 제어할 수 있다. 제1 질량유량제어기(230)는 압축공기의 유량을 모니터링함에 따라, 압축공기를 기설정된 유량으로 반응시스템(100)에 공급되도록 할 수 있다.
- [57] 가스공급부(300)는 가스저장부(310) 및 제2 질량유량제어기(320)를 포함할 수 있다.
- [58] 가스저장부(310)는 반응시스템(100)에서 반응영역(110)에서의 연료로서 역할을 하는 가스가 저장될 수 있다. 예를 들어, 가스저장부(310)에는 CH₄(메탄)가스가 저장될 수 있다. 가스저장부(310)는 저장된 가스를 제2 질량유량제어기(320)를 통해 반응시스템(100)로 공급할 수 있다.
- [59] 제2 질량유량제어기(320)는 가스의 유량을 측정 및 제어할 수 있다. 제2 질량유량제어기(320)는 가스의 유량을 모니터링함에 따라, 가스를 기설정된 유량으로 반응시스템(100)에 공급되도록 할 수 있다.
- [60] 제1 레이저조사부(410)는 제1 파장을 갖는 제1 레이저(411)를 조사할 수 있다. 예를 들어, 제1 파장은 1450 ~ 1550nm 범위일 수 있다.
- [61] 제2 레이저조사부(420)는 제2 파장을 갖는 제2 레이저(421)를 조사할 수 있다. 예를 들어, 제2 파장은 1300 ~ 1400nm 범위일 수 있다.
- [62] 즉, 제1 레이저조사부(410) 및 제2 레이저조사부(420)를 통해 서로 다른 파장

범위를 갖는 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)를 동시에 조사할 수 있다.

- [63] WDM(Wavelength Division Multiplexing)시스템은 서로 다른 파장 범위를 갖는 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)를 결합 및 분리하기 위한 것으로, 멀티플렉서(Multiplexer, 510) 및 디멀티플렉서(De-Multiplexer, 520)를 포함할 수 있다.
- [64] 멀티플렉서(Multiplexer, 510)는 제1 레이저조사부(410) 및 제2 레이저조사부(420)에서 발생된 제1 레이저(411) 및 제2 레이저를 하나의 레이저로 혼합함으로써 혼합 레이저(430)가 반응영역(110)에 조사될 수 있도록 한다.
- [65] 디멀티플렉서(De-Multiplexer, 520)는 반응영역(110)을 투과한 혼합 레이저(430)를 파장의 굴절률 차이를 이용하여 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)로 다시 분리할 수 있다.
- [66] 한편, 제1 콜리메이트 렌즈(610)는 멀티플렉서(Multiplexer, 510)를 통과한 혼합 레이저(430)에 대한 콜리메이팅을 수행할 수 있다. 이에 따라, 제1 콜리메이트 렌즈(610)는 혼합 레이저(430)를 반응영역(110) 내 소정의 측정 위치로 조사할 수 있다.
- [67] 제2 콜리메이트 렌즈(620)는 제1 콜리메이트 렌즈(610)에서 조사되어 반응영역(110)을 투과한 혼합 레이저(430)를 집광하여 전술한 디멀티플렉서(De-Multiplexer, 520)로 전달할 수 있다.
- [68] 즉, 멀티플렉서(Multiplexer, 510), 제1 콜리메이트 렌즈(610), 반응영역(110) 및 제2 콜리메이트 렌즈(620)를 순차적으로 통과한 혼합 레이저(430)는 디멀티플렉서(De-Multiplexer, 520)에서 다시 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)로 분리될 수 있다.
- [69] 제1 광검출부(710)는 디멀티플렉서(De-Multiplexer, 520)에서 분리된 제1 레이저(411)를 집광할 수 있다. 예를 들어, 제1 광검출부(710)는 포토 다이오드 일 수 있다.
- [70] 또한, 제1 광검출부(710)는 제1 레이저(411)의 광흡수신호를 검출할 수 있다. 구체적으로, 제1 광검출부(710)는 제1 레이저(411)로부터 OH라디칼 광흡수신호 및 제1 H₂O 광흡수신호가 중첩된 중첩신호(OH+H₂O)를 검출할 수 있다.
- [71] 제2 광검출부(720)는 디멀티플렉서(De-Multiplexer, 520)에서 분리된 제2 레이저(421)를 집광할 수 있다. 예를 들어, 제2 광검출부(720)는 포토 다이오드 일 수 있다.
- [72] 또한, 제2 광검출부(720)는 제2 레이저(421)의 광흡수신호를 검출할 수 있다. 구체적으로, 제2 광검출부(720)는 제2 레이저(421)로부터 H₂O 단일성분에 의해 흡수된 단일 H₂O 광흡수신호를 검출할 수 있다.
- [73] 제어부(800)는 제1 광검출부(710)에서 검출된 제1 레이저(411)의 광흡수신호와, 제2 광검출부(720)에서 검출된 제2 레이저(421)의 광흡수신호를 수신 및 분석하여 반응영역 온도, H₂O 농도 및 OH라디칼 농도를 측정할 수 있다.

- [74] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 제1 레이저로 측정된 선강도 그래프이고, 도 3은 도 3 그래프의 일부 구간을 확대하여 도시한 그래프이며, 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 제2 레이저로 측정된 선강도 그래프이다.
- [75] 도 2 내지 도 4는 1000K ~ 2000K (726.85C-1726.85C)사이 화염 온도 범위의 측정환경에서 측정되었다.
- [76] 도 2 및 도 3을 참고하면, 제1 레이저는 1400 ~ 1600 nm 파장 범위내에서 3.5×10^{-21} 이상 강한 선강도 범위를 효과적으로 측정할 수 있다. 바람직하게는, 제1 레이저가 1450 ~ 1550nm 파장 범위일 경우 OH라디칼 선강도는 높고 H₂O 선강도가 낮게 측정되며 OH라디칼 및 H₂O 신호가 중첩될 수 있다. 이때, 0.01 ~ 0.5% 농도 범위에 해당되는 반응영역 내 OH라디칼 농도를 측정할 수 있다.
- [77] 도 4를 참고하면, 제2 레이저는 1300 ~ 1400 nm 파장 범위내에서 $1.0 \times 10^{-22} \sim 9.0 \times 10^{-22}$ 범위의 선강도 범위에서 화염온도 및 H₂O 농도를 측정할 수 있다. 이때, H₂O 농도 5 % - 20% 사이에 해당되는 화염 환경에서 측정가능 할 수 있다.
- [78] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법의 순서도이다.
- [79] 도 5를 참고로 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법에 대해서 설명한다.
- [80] 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법은, 제1 레이저 및 제2 레이저를 조사하는 단계(S100), 제1 레이저 및 제2 레이저를 혼합하는 단계(S200), 반응영역으로 혼합 레이저를 조사하는 단계(S300), 혼합 레이저를 제1 레이저 및 제2 레이저로 분리하는 단계(S400), 제1 레이저 및 제2 레이저의 광흡수신호를 검출하는 단계(S500), 광흡수신호를 분석하여 OH라디칼 농도를 측정하는 단계(S600)를 포함할 수 있다.
- [81] 먼저, 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)은 서로 다른 파장의 제1 레이저 및 제2 레이저를 조사할 수 있다(S100). 구체적으로, 제1 레이저조사부(410)에서 제1 파장을 갖는 제1 레이저(411)를 조사하고, 제2 레이저조사부(420)에서 제2 파장을 갖는 제2 레이저(421)를 조사할 수 있다. 이때, 서로 다른 파장의 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)는 동시에 조사될 수 있다.
- [82] 이후, 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)은 제1 레이저 및 제2 레이저를 혼합할 수 있다(S200). 구체적으로, 멀티플렉서(Multiplexer, 510)에서 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)를 하나의 레이저로 혼합함으로써 혼합 레이저(430)가 조사될 수 있도록 한다.
- [83] 이후, 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)은 반응시스템에서 발생하는 반응영역으로 혼합 레이저를 조사할 수 있다(S300). 구체적으로, 멀티플렉서(Multiplexer, 510)를 통과한 혼합 레이저(430)는 제1 콜리메이트 렌즈(610)를 통해 반응시스템(100)에서 발생하는 반응영역(110) 내 소정의 측정 위치로 조사될 수 있다.

- [84] 이후, 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)은 반응영역을 투과한 혼합 레이저를 제1 레이저 및 제2 레이저로 분리할 수 있다(S400). 구체적으로, 반응영역(110)을 투과한 혼합 레이저(430)는 디멀티플렉서(De-Multiplexer, 520)에서 파장의 굴절률 차이에 의해 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)로 다시 분리될 수 있다.
- [85] 이후, 제1 레이저에서 OH라디칼 광흡수신호 및 제1 H₂O 광흡수신호의 중첩신호(OH+H₂O)를 검출하고, 제2 레이저로부터 단일 H₂O 광흡수신호를 검출할 수 있다(S500).
- [86] 이후, 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 시스템(1)은 단일 H₂O 광흡수신호를 기초로, 중첩신호에서 제1 H₂O 광흡수신호만을 분리함으로써 OH라디칼 농도를 측정할 수 있다(S600). 구체적으로, 제어부(800)에서 제1 광검출부(710)에서 검출된 제1 레이저(411)의 광흡수신호와, 제2 광검출부(720)에서 검출된 제2 레이저(421)의 광흡수신호를 수신 및 분석하여 반응영역 온도, H₂O 농도 및 OH라디칼 농도를 측정할 수 있다.
- [87] 이때, 제어부(800)는 광학 방식 기반의 파장 가변형 다이오드 레이저 흡수 분광법(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)방법 중 직접 흡수 분광법(Direct Absorption Spectroscopy, DAS) 방법을 기반으로 반응영역 온도, H₂O 농도 및 OH라디칼 농도를 동시에 측정할 수 있다.
- [88]
- [89] TDLAS이론은 Beer-Lambert 법칙에 근거한다. 구체적으로, 특정한 파장(ν)을 가지는 레이저가 반응영역으로 투과될 때, 투과율은 초기 강도와 투과된 강도의 관계를 나타내는 하기의 수학식 1로 표현될 수 있다.
- [90] [수학식 1]
- [91]
- $$\tau(\nu) = \left(\frac{I}{I_0} \right)_{\nu} = \exp(-k_{\nu}L)$$
- [92] (여기서, τ 는 투과율, I 는 입사광의 세기, I_0 는 투사광의 세기, k 는 흡수계수, L 은 광측정거리이다.)
- [93] 이때, 수학식 1의 흡수계수(k)는 수학식 2와 같이 표현될 수 있으며, 흡수 계수(k)와 광측정거리(L)의 곱은 흡광도(α)로 표현될 수 있다.
- [94] [수학식 2]
- [95]
- $$k_{\nu} = \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot P \cdot \chi_i \cdot \phi(\nu - \nu_{0,i,j})$$
- [96] (여기서, k 는 흡수계수, $S_{i,j}(T)$ 는 측정되는 화학종의 선강도, P 는 측정환경 내 압력, χ_i 는 화학종(i)의 농도, ϕ 는 흡수신호의 선형상이다.)
- [97] 이때, 본 발명의 일 실시예에서 측정하고자 하는 화학종의 종류는 H₂O 및 OH라디칼일 수 있다.

[98] DAS 이론은 상기 수학식 2로부터 유도될 수 있으며, DAS 방법을 기반으로 한 OH라디칼 농도를 측정하는 단계에 대해서 후술하도록 한다.

[99]

[100] 도 6은 도 5의 OH라디칼 농도를 측정하는 단계를 상세히 나타낸 순서도이다.

[101] 도 6을 참고하여 DAS 방법을 기반으로 반응영역 온도, H₂O 농도 및 OH라디칼 농도를 측정하는 방법에 대해서 설명한다.

[102] OH라디칼 농도를 측정하는 단계(S600)는, 반응영역 온도를 측정하는 단계(S610), 제2 H₂O 농도를 측정하는 단계(S620), 제1 H₂O 흡광도 면적을 측정하는 단계(S630), 제1 H₂O 흡광도 면적을 제거하여 OH라디칼 흡광도를 도출하는 단계(S640), OH라디칼 농도를 측정하는 단계(S650)를 포함할 수 있다.

[103] 먼저, 제어부(800)는 단일 H₂O 광흡수신호를 기초로 반응영역 온도를 측정할 수 있다(S610). 구체적으로, 단일 H₂O 광흡수신호는 2개로 존재할 수 있으며, 2개의 단일 H₂O 광흡수신호는 각각 제2 H₂O 광흡수신호 및 제3 H₂O 광흡수신호로 명명한다. 제2 H₂O 광흡수신호 및 제3 H₂O 광흡수신호는 제2 레이저(421)의 파장 범위 내에서 서로 겹치지 않게 존재할 수 있다.

[104] 이때, 제2 H₂O 광흡수신호 및 제3 H₂O 광흡수신호로부터 얻은 데이터를 하기 수학식 3에 대입함으로써 반응영역 온도를 측정할 수 있다.

[105] [수학식 3]

$$T_{flame} = \frac{\left[\frac{hc}{k} (E''_{2_H2O(\#2)} - E''_{1_H2O(\#2)}) \right]}{\left[\ln \frac{A_{1_H2O(\#2)}}{A_{2_H2O(\#2)}} + \ln \frac{S_{2_H2O(\#2)}(T_0)}{S_{1_H2O(\#2)}(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{(E''_{2_H2O(\#2)} - E''_{1_H2O(\#2)})}{T_0} \right]}$$

[107] (여기서, T_{flame}는 반응영역 온도, h는 플랑크 상수, c는 빛의 속도, k는 볼츠만 상수, E''_{1_H2O(#2)}는 제2 H₂O 광흡수신호의 저준위 상태에너지, E''_{2_H2O(#2)}는 제3 H₂O 광흡수신호의 저준위 상태에너지, A_{1_H2O(#2)}는 제2 H₂O 광흡수신호의 흡광도 면적, A_{2_H2O(#2)}는 제3 H₂O 광흡수신호의 흡광도 면적, S_{1_H2O(#2)}(T₀)는 기준온도에서 제2 H₂O 광흡수신호의 선강도, S_{2_H2O(#2)}(T₀)는 기준온도에서 제3 H₂O 광흡수신호의 선강도, T₀는 기준온도이다.)

[108] 한편, 단일 H₂O 광흡수신호가 1개만 있을 경우, 상기 수학식 3에 적용이 불가하며, 즉 제2 레이저(421)를 통한 반응영역 온도 측정이 불가하다. 이러한 경우, 열전대 및 파이로미터와 같은 다른 측정센서를 이용하여 반응영역 온도를 측정할 수 있다.

[109] 이후, 제어부(800)는 반응영역 온도로부터 분석된 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 선강도를 기초로 단일 H₂O 광흡수신호에 포함된 제2 H₂O 농도를 측정할 수 있다(S620). 구체적으로, 측정된 반응영역 온도 값을 적용하여 HITRAN Database에서 제2 H₂O 선강도를 분석할 수 있고, 이를 하기 수학식 4 및 5에 적용하여 제2 H₂O 농도($\chi_{H2O(\#2)}$)를 계산할 수 있다.

[110] [수학식 4]

$$[111] \quad \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H_2O(\#2)} dv = P \cdot \chi_{H_2O(\#2)} \cdot \sum_{i,j} S_{ij}(T) \cdot L = A_{H_2O(\#2)}$$

[112] [수학식 5]

$$[113] \quad \chi_{H_2O(\#2)} = \frac{A_{H_2O(\#2)}}{P \cdot \sum_{i,j} S_{ij}(T) \cdot L}$$

[114] (여기서, $\alpha_{H_2O(\#2)}$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 흡광도, P는 측정환경 내 압력, $\chi_{H_2O(\#2)}$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 농도, $S_{ij}(T)$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 선강도, L는 광측정거리, $A_{H_2O(\#2)}$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 흡광도 면적이다.)

[115] 다른 예로, 단일 H₂O 광흡수신호가 복수 개로 존재할 경우, 그 중 하나의 단일 H₂O 광흡수신호로부터 얻은 데이터를 기준으로 계산한다.

[116] 이때, 상기 수학식 4는 흡광도 면적을 구하는 함수로써, 상기 수학식 4로부터 H₂O의 농도를 구하는 함수인 수학식 5가 도출될 수 있다.

[117] 이후, 제어부(800)는 제2 H₂O 농도를 기초로 상기 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적을 측정할 수 있다(S630). 구체적으로, 하기 수학식 6과 같이 중첩신호(OH+H₂O)에 포함된 제1 H₂O 농도($\chi_{H_2O(\#1)}$)와, 상기 단일 H₂O 광흡수신호에 포함된 제2 H₂O 농도($\chi_{H_2O(\#2)}$)는 동일할 수 있다. 이는 제1 레이저(411) 및 제2 레이저(421)가 동일한 시간 및 공간으로 투과되었으므로 이론적으로 성립될 수 있다. 이에 따라, 하기 수학식 7에 기측정된 제2 H₂O 농도($\chi_{H_2O(\#2)}$)를 대입함으로써 제1 H₂O 흡광도 면적($A_{H_2O(\#1)}$)을 측정할 수 있다.

[118]

[119] [수학식 6]

$$[120] \quad \chi_{H_2O(\#2)} = \chi_{H_2O(\#1)}$$

[121] (여기서, $\chi_{H_2O(\#2)}$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 농도, $\chi_{H_2O(\#1)}$ 는 중첩신호의 제1 H₂O 농도이다.)

[122]

[123] [수학식 7]

$$[124] \quad A_{H_2O(\#1)} = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H_2O(\#1)} dv = P \cdot \chi_{H_2O(\#2)} \cdot \sum_{i,j} S_{ij}(T) \cdot L$$

[125] (여기서, $A_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적, $\alpha_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도, P는 측정환경 내 압력, $\chi_{H_2O(\#2)}$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 농도, $S_{ij}(T)$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 선강도, L은 광측정거리이다.)

[126]

[127] 이후, 제어부(800)는 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도 면적에서 제1 H₂O 흡광도 면적을 제거하여 OH라디칼 흡광도를 도출할 수 있다(S640). 구체적으로, 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도 면적은 제1 레이저(411)의 광흡수신호로부터 기측정된 상태이고, 제1 H₂O 흡광도 면적은 S630단계에서 상기 수학식 7에 의해 기측정된 상태이다.

[128] 이에 따라, 하기 수학식 8과 같이 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도 면적($A_{OH+H_2O(\#1)}$)에서 제1 H₂O 흡광도 면적($A_{H_2O(\#1)}$)을 제거함으로써, 단일의 OH라디칼 흡광도(α_{OH})를 도출할 수 있다.

[129]

[130] [수학식 8]

$$[131] \quad A_{OH} = A_{OH+H_2O(\#1)} - A_{H_2O(\#1)}$$

$$\Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH} dv = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH+H_2O(\#1)} dv - \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H_2O(\#1)} dv$$

[132] (여기서, A_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도 면적, $A_{OH+H_2O(\#1)}$ 는 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도 면적, $A_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적, α_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도, $\alpha_{OH+H_2O(\#1)}$ 는 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도, $\alpha_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도이다.)

[133]

[134] 이후, 제어부(800)는 반응영역 온도로부터 분석된 OH라디칼 선강도를 기초로 OH라디칼 농도를 측정할 수 있다(S650). 구체적으로, 측정된 반응영역 온도값을 적용하여 HITRAN Database에서 OH라디칼 선강도를 분석할 수 있고, 이를 하기 수학식 9 및 10에 적용하여 OH라디칼 농도(χ_{OH})를 계산할 수 있다.

[135]

[136] [수학식 9]

$$[137] \quad \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH} dv = P \cdot \chi_{OH} \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L = A_{OH}$$

[138] [수학식 10]

$$[139] \quad \chi_{OH} = \frac{A_{OH}}{P \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L}$$

[140] (여기서, α_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도, P는 측정환경 내 압력, χ_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 농도, $S_{i,j}(T)$ 는 OH라디칼

광흡수신호의 OH라디칼 선강도, L 는 광측정거리, A_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도 면적이다.)

[141]

[142] 이때, 상기 수학식 9는 흡광도 면적을 구하는 함수로써, 상기 수학식 9로부터 OH라디칼의 농도를 구하는 함수인 수학식 10이 도출될 수 있다.

[143] 즉, 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법은, 직접 흡수 분광법(Direct Absorption Spectroscopy, DAS) 방법을 기반으로 근적외선 파장 영역에서 OH 라디칼 흡수 신호에 중첩되는 H_2O 흡수신호를 제거하는 방법을 적용함으로써, 복잡한 모사 방식과 반복 계산 없이 반응영역 온도, H_2O 농도 및 OH라디칼 농도를 동시에 측정할 수 있는 효과가 있다.

[144]

[145] 도 7는 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법 및 R-type 열전대로 측정된 반응영역 온도를 나타낸 그래프이고, 도 8 및 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법 및 화학반응시뮬레이션으로 측정된 H_2O 농도 및 OH라디칼 농도를 각각 나타낸 그래프이다.

[146] 도 7를 참고하면, 본 발명의 DAS 방법을 기반으로 측정된 온도는 R-Type 열전대로 측정된 온도와 비슷한 경향성을 보이고, H_2O 농도 및 OH라디칼 농도는 화학반응 시뮬레이션 Chemkin(GRI 3.0)과 비교했을 때 당량비에 따라서 유사한 경향성이 확보되었다.

[147] 이상에서 본 발명의 일 실시예에 대하여 설명하였으나, 본 발명의 사상은 본 명세서에 제시되는 실시 예에 제한되지 아니하며, 본 발명의 사상을 이해하는 당업자는 동일한 사상의 범위 내에서, 구성요소의 부가, 변경, 삭제, 추가 등에 의해서 다른 실시 예를 용이하게 제안할 수 있을 것이나, 이 또한 본 발명의 사상범위 내에 든다고 할 것이다.

청구범위

- [청구항 1] 서로 다른 파장의 제1 레이저 및 제2 레이저를 조사하는 단계;
 상기 제1 레이저 및 상기 제2 레이저를 혼합하는 단계;
 반응시스템에서 발생하는 반응영역으로 혼합 레이저를 조사하는 단계;
 상기 반응영역을 투과한 상기 혼합 레이저를 상기 제1 레이저 및 상기 제2 레이저로 분리하는 단계;
 상기 제1 레이저에서 OH라디칼 광흡수신호 및 제1 H₂O 광흡수신호의 중첩신호(OH+H₂O)를 검출하고, 제2 레이저에서 H₂O 단일성분에 의해 흡수된 단일 H₂O 광흡수신호를 검출하는 단계; 및
 상기 단일 H₂O 광흡수신호를 기초로, 상기 중첩신호에서 상기 제1 H₂O 광흡수신호만을 분리함으로써 OH라디칼 농도를 측정하는 단계를 포함하는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.
- [청구항 2] 제 1 항에 있어서,
 상기 측정하는 단계는,
 상기 단일 H₂O 광흡수신호를 기초로 반응영역 온도를 측정하는 단계;
 상기 반응영역 온도로부터 분석된 상기 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 선강도를 기초로, 상기 단일 H₂O 광흡수신호에 포함된 제2 H₂O 농도를 측정하는 단계;
 상기 제2 H₂O 농도를 기초로 상기 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적을 측정하는 단계;
 상기 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도 면적에서 상기 제1 H₂O 흡광도 면적을 제거하여 OH라디칼 흡광도를 도출하는 단계; 및
 상기 반응영역 온도로부터 분석된 OH라디칼 광흡수신호의 선강도를 기초로 상기 OH라디칼 농도를 측정하는 단계를 포함하는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.
- [청구항 3] 제 2 항에 있어서,
 상기 반응영역 온도를 측정하는 단계는,
 상기 단일 H₂O 광흡수신호가 2개로 존재하고, 2개의 상기 단일 H₂O 광흡수신호 각각은 제2 H₂O 광흡수신호 및 제3 H₂O 광흡수신호이며,
 하기 수학적식 3에 따라 상기 반응영역 온도를 측정하는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.
- [수학적식 3]

$$T_{flame} = \frac{\left[\frac{hc}{k} (E''_{2_H2O(\#2)} - E''_{1_H2O(\#2)}) \right]}{\left[\ln \frac{A_{1_H2O(\#2)}}{A_{2_H2O(\#2)}} + \ln \frac{S_{2_H2O(\#2)}(T_0)}{S_{1_H2O(\#2)}(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{(E''_{2_H2O(\#2)} - E''_{1_H2O(\#2)})}{T_0} \right]}$$

(여기서, T_{flame} 는 반응영역 온도, h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, k 는 볼츠만 상수, $E''_{1_H2O(\#2)}$ 는 제2 H_2O 광흡수신호의 저준위 상태에너지, $E''_{2_H2O(\#2)}$ 는 제3 H_2O 광흡수신호의 저준위 상태에너지, $A_{1_H2O(\#2)}$ 는 제2 H_2O 광흡수신호의 흡광도 면적, $A_{2_H2O(\#2)}$ 는 제3 H_2O 광흡수신호의 흡광도 면적, $S_{1_H2O(\#2)}(T_0)$ 는 기준온도에서 제2 H_2O 광흡수신호의 선강도, $S_{2_H2O(\#2)}(T_0)$ 는 기준온도에서 제3 H_2O 광흡수신호의 선강도, T_0 는 기준온도이다.)

[청구항 4]

제 2 항에 있어서,

상기 단일 H_2O 광흡수신호에 포함된 제2 H_2O 농도를 측정하는 단계는, 하기 수학식 4로부터 도출된 하기 수학식 5에 따라 상기 제2 H_2O 농도를 측정하는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.

[수학식 4]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H2O(\#2)} dv = P \cdot \chi_{H2O(\#2)} \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L = A_{H2O(\#2)}$$

[수학식 5]

$$\chi_{H2O(\#2)} = \frac{A_{H2O(\#2)}}{P \cdot \sum_{i,j} S_{i,j}(T) \cdot L}$$

(여기서, $\alpha_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 흡광도, P 는 측정환경 내 압력, $\chi_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 농도, $S_{i,j}(T)$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 선강도, L 는 광측정거리, $A_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 흡광도 면적이다.)

[청구항 5]

제 4 항에 있어서,

상기 중첩신호($OH+H_2O$)에 포함된 제1 H_2O 농도와, 상기 단일 H_2O 광흡수신호에 포함된 제2 H_2O 농도는 동일하며, 이는 하기 수학식 6으로 표현되는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.

[수학식 6]

$$\chi_{H2O(\#2)} = \chi_{H2O(\#1)}$$

(여기서, $\chi_{H2O(\#2)}$ 는 단일 H_2O 광흡수신호의 제2 H_2O 농도, $\chi_{H2O(\#1)}$ 는 중첩신호의 제1 H_2O 농도이다.)

[청구항 6]

제 5 항에 있어서,

상기 제1 H_2O 광흡수신호의 제1 H_2O 흡광도 면적을 측정하는 단계는, 상기 수학식 4 및 상기 수학식 6으로부터 도출된 하기 수학식 7에 따라 상기 제1 H_2O 흡광도 면적을 측정하는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.

[수학식 7]

$$A_{H_2O(\#1)} = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H_2O(\#1)} dv = P \cdot \chi_{H_2O(\#2)} \cdot \sum_{i,j} S_{ij}(T) \cdot L$$

(여기서, $A_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적, $\alpha_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도, P는 측정환경 내 압력, $\chi_{H_2O(\#2)}$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 농도, $S_{ij}(T)$ 는 단일 H₂O 광흡수신호의 제2 H₂O 선강도, L은 광측정거리이다.)

[청구항 7]

제 6 항에 있어서,
상기 OH라디칼 흡광도를 도출하는 단계는,
하기 수학식 8에 따라 상기 OH라디칼 흡광도를 도출하는 레이저
흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.

[수학식 8]

$$A_{OH} = A_{OH+H_2O(\#1)} - A_{H_2O(\#1)}$$

$$\Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH} dv = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH+H_2O(\#1)} dv - \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{H_2O(\#1)} dv$$

(여기서, A_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도 면적, $A_{OH+H_2O(\#1)}$ 는 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도 면적, $A_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도 면적, α_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도, $\alpha_{OH+H_2O(\#1)}$ 는 중첩신호(OH+H₂O)의 흡광도, $\alpha_{H_2O(\#1)}$ 는 제1 H₂O 광흡수신호의 제1 H₂O 흡광도이다.)

[청구항 8]

제 7 항에 있어서,
상기 반응영역 온도로부터 분석된 OH라디칼 선강도를 기초로 상기
OH라디칼 농도를 측정하는 단계는,
하기 수학식 9로부터 도출된 하기 수학식 10에 따라 상기 OH라디칼
농도를 측정하는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼
농도 측정 방법.

[수학식 9]

$$\int_{-\infty}^{\infty} \alpha_{OH} dv = P \cdot \chi_{OH} \cdot \sum_{i,j} S_{ij}(T) \cdot L = A_{OH}$$

[수학식 10]

$$\chi_{OH} = \frac{A_{OH}}{P \cdot \sum_{i,j} S_{ij}(T) \cdot L}$$

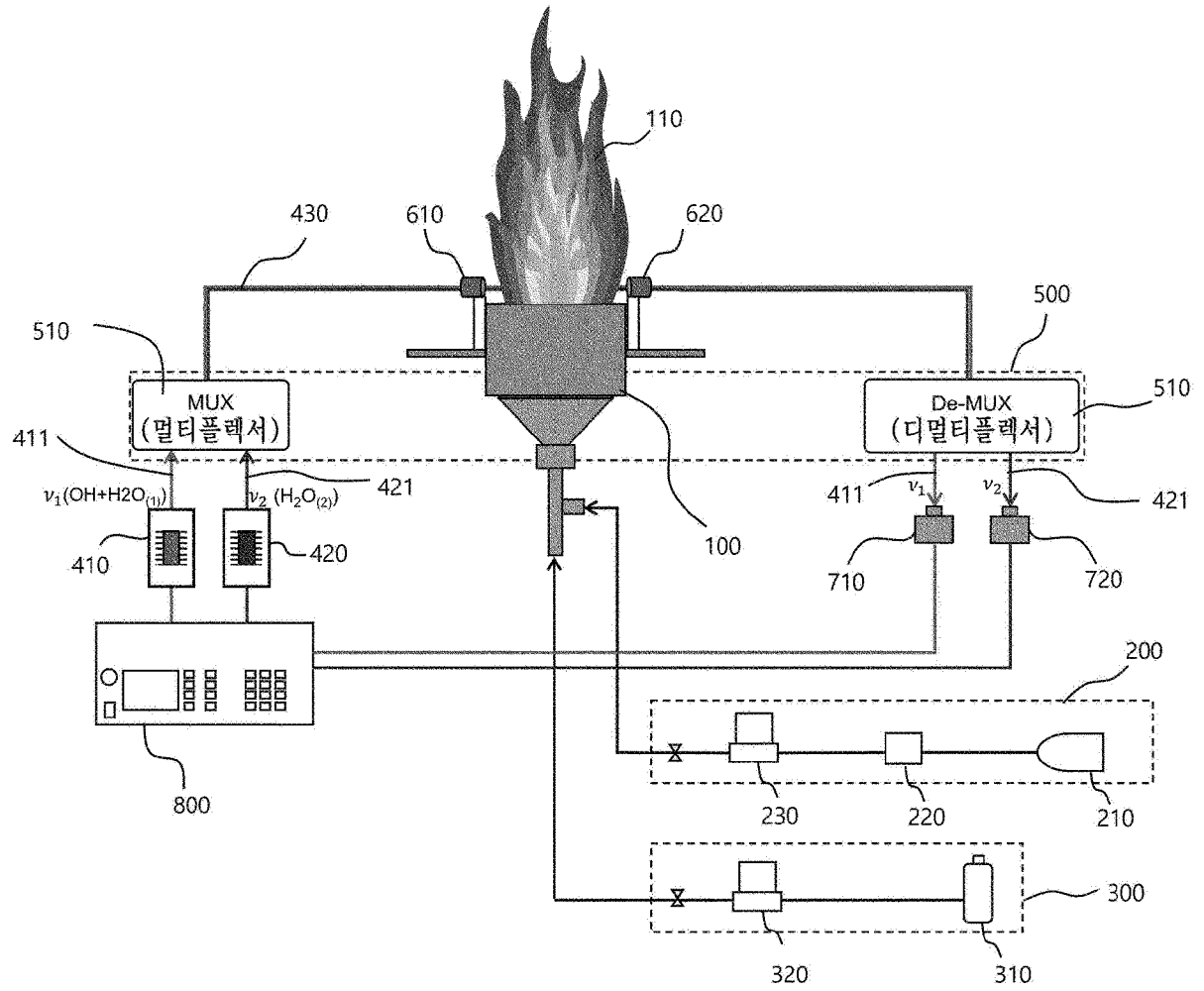
(여기서, α_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도, P 는 측정 환경 내 압력, χ_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 농도, $S_{ij}(T)$ 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 선강도, L 는 광측정거리, A_{OH} 는 OH라디칼 광흡수신호의 OH라디칼 흡광도 면적이다.)

[청구항 9]

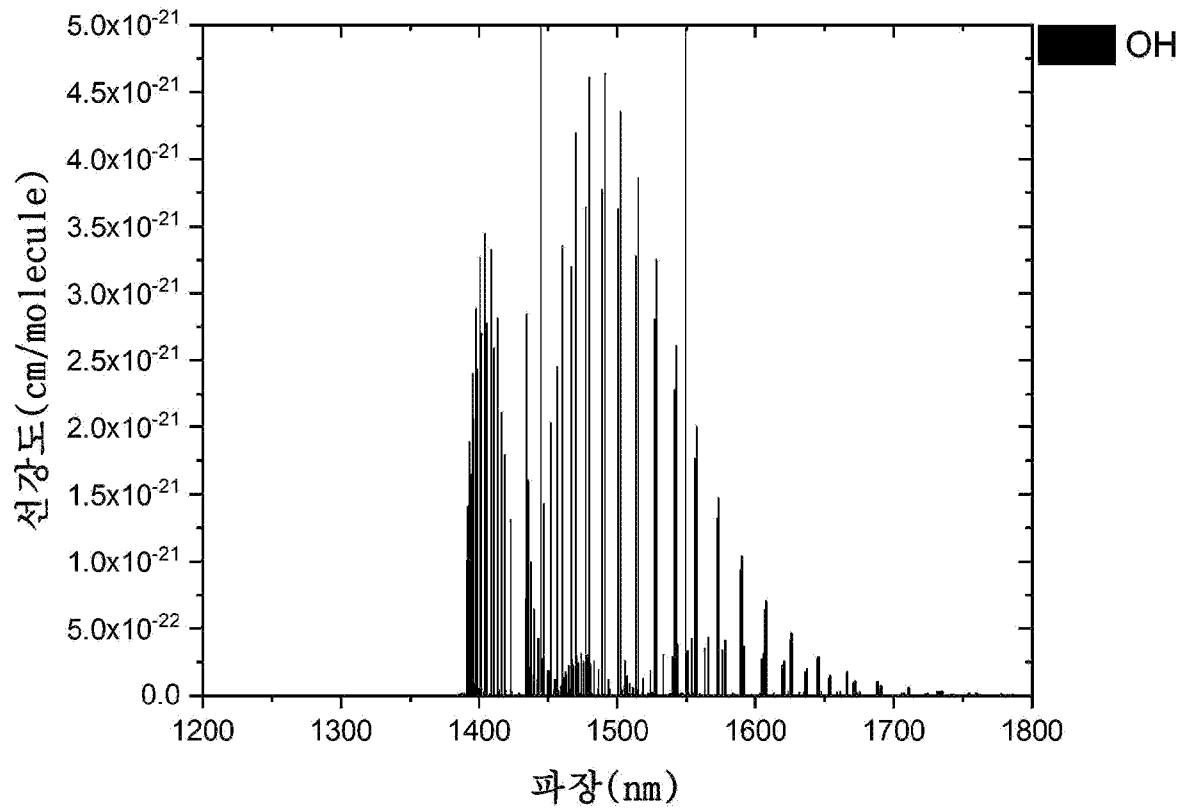
제 1 항에 있어서,

제1 레이저는 1450 ~ 1550 nm의 파장 범위를 가지고, 제2 레이저는 1300 nm ~ 1400 nm의 파장 범위를 가지는 레이저 흡수분광법을 이용한 반응영역 내 OH라디칼 농도 측정 방법.

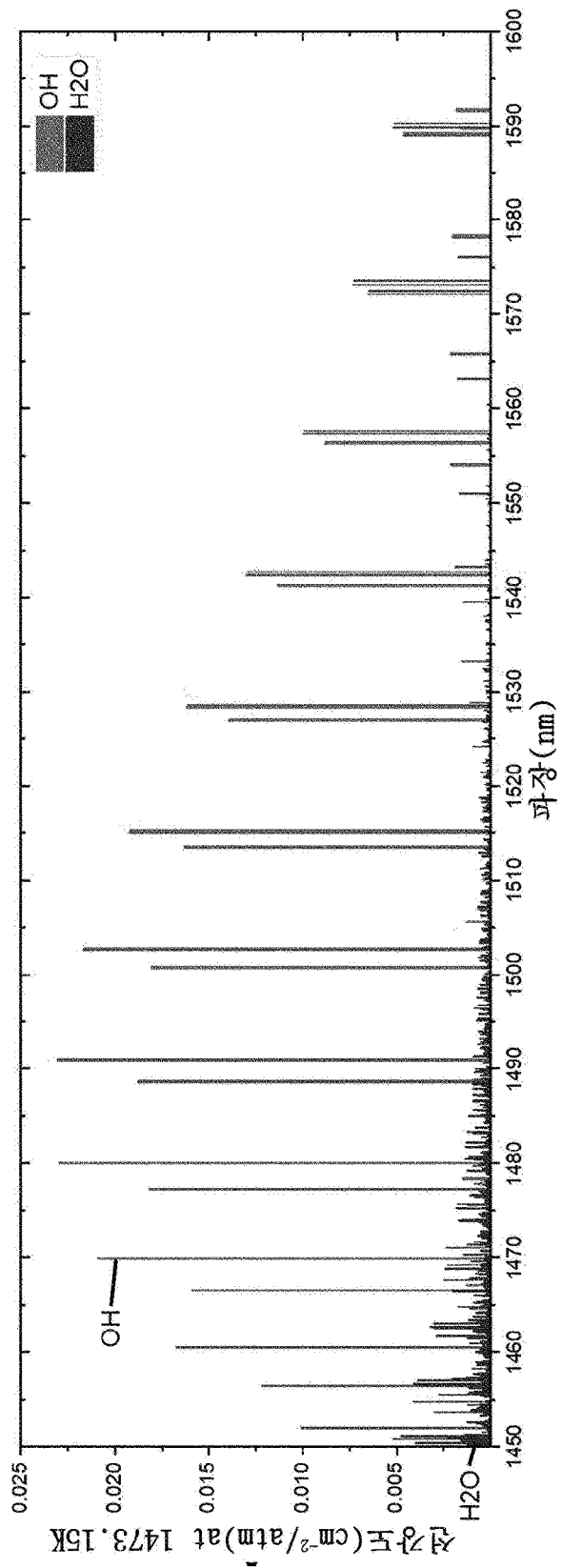
[도1]



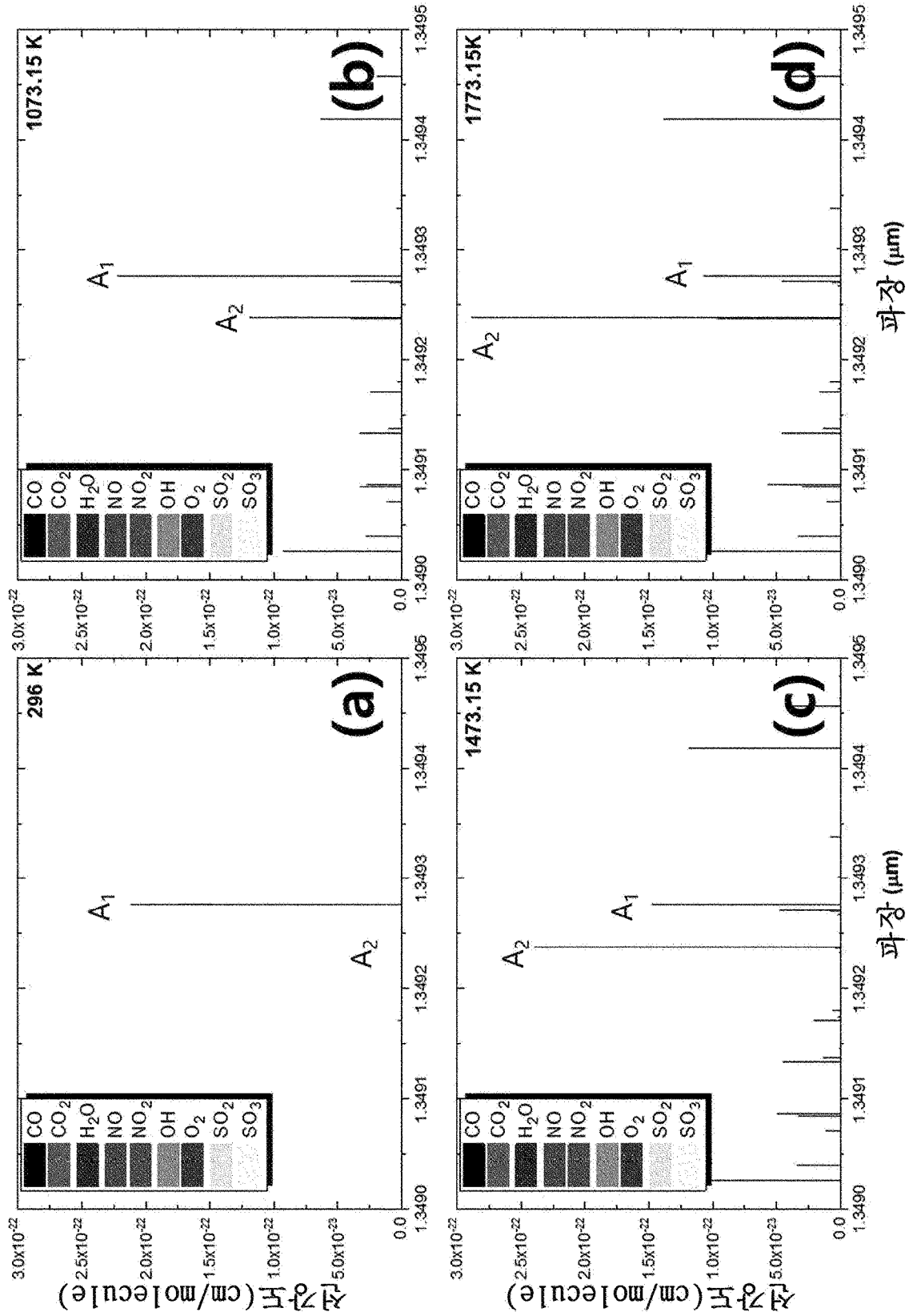
[도2]



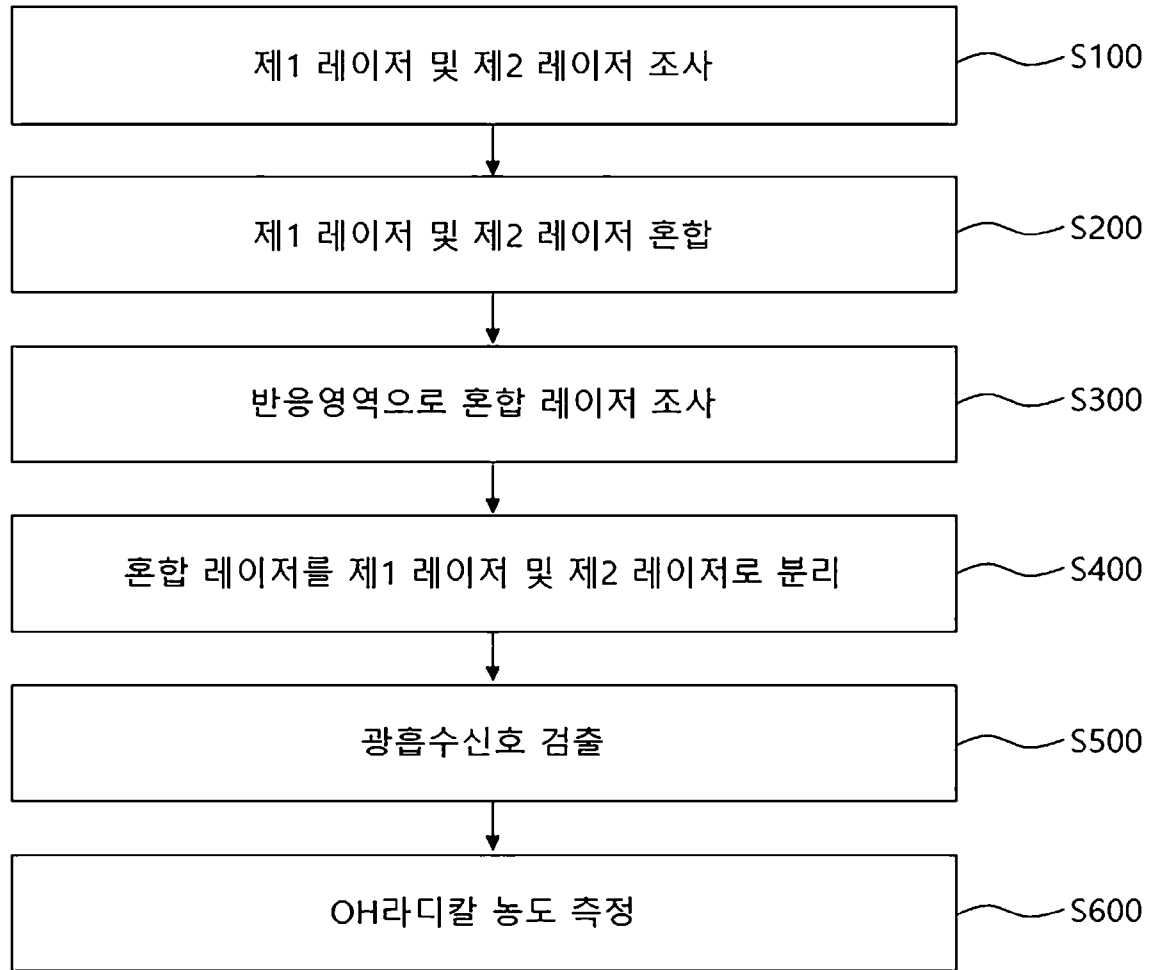
[도3]



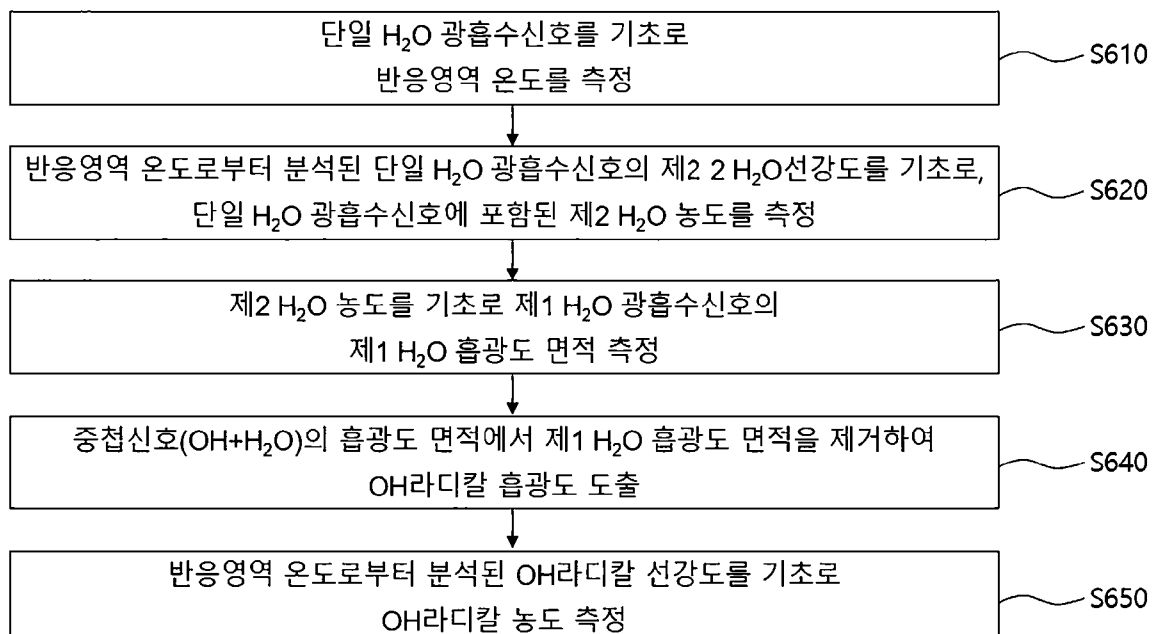
[도4]



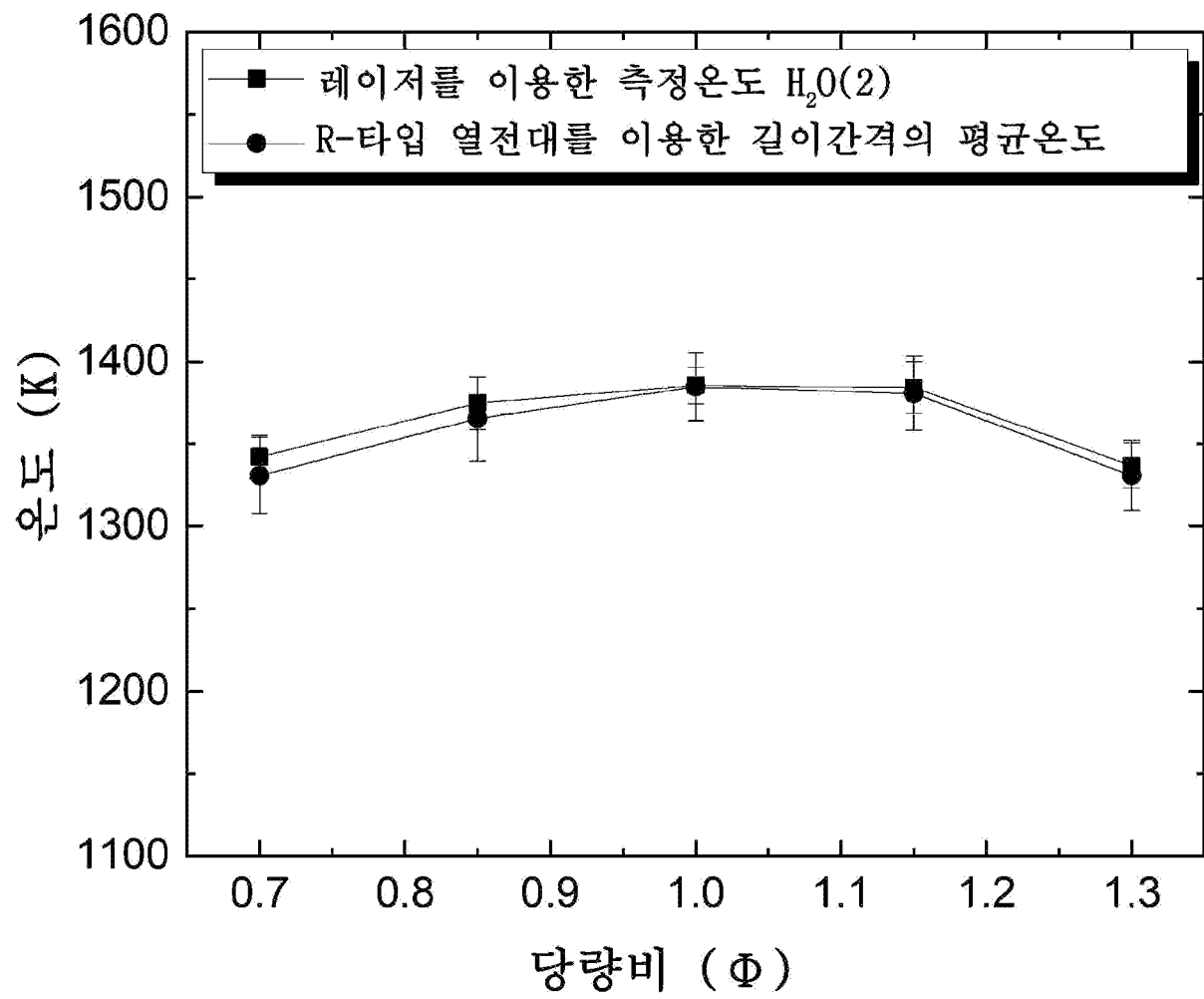
[도5]



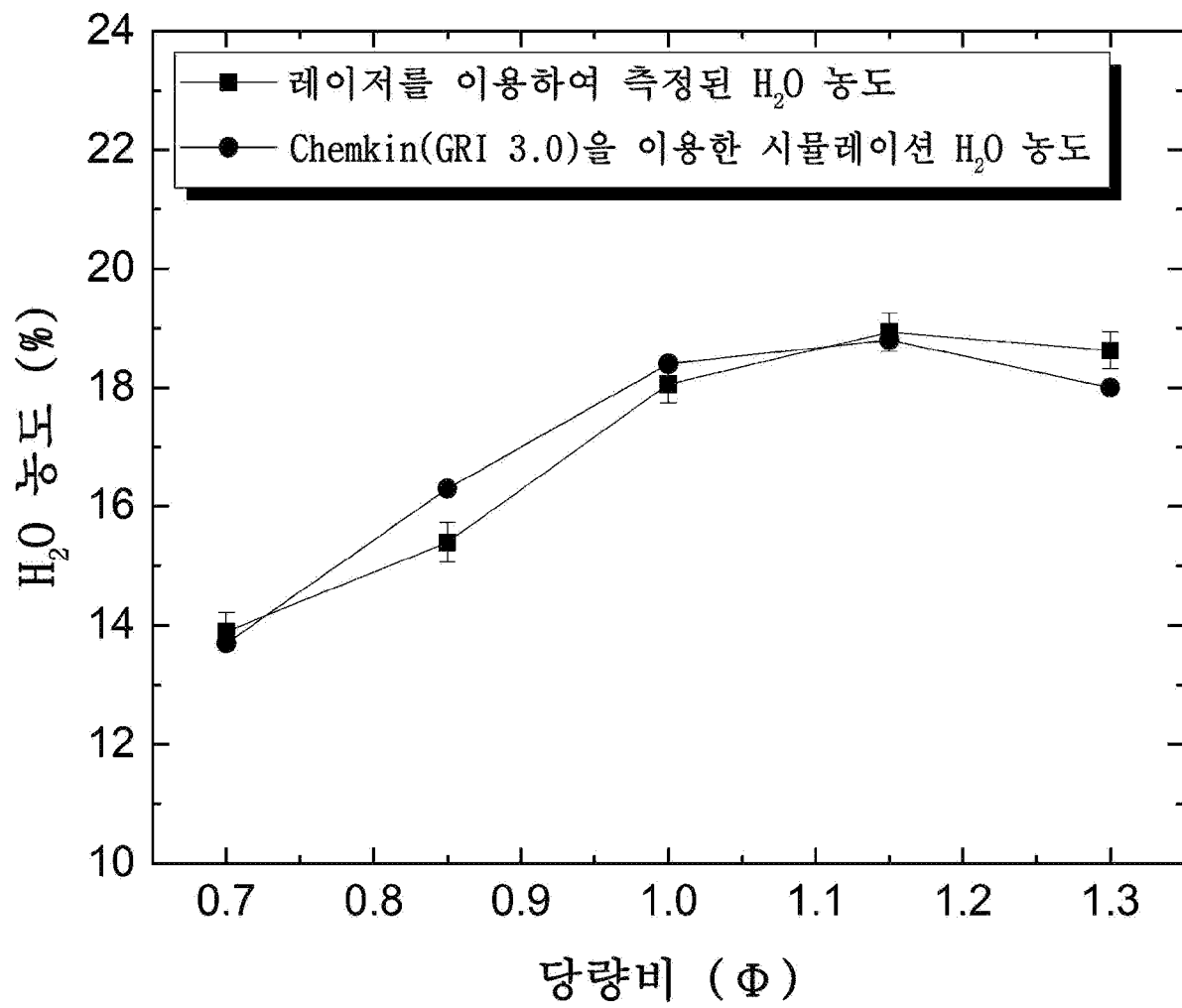
[도6]

S600

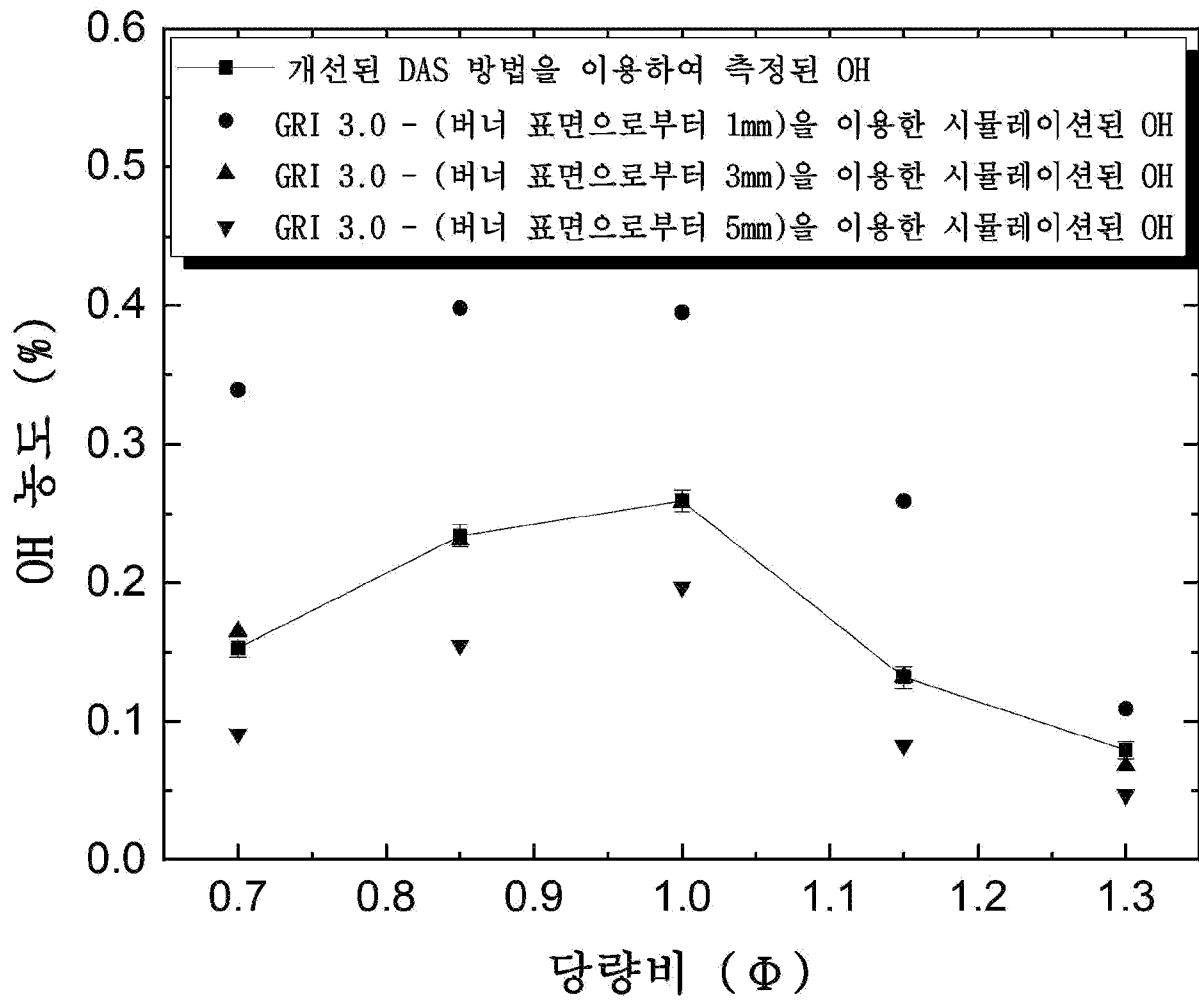
[도7]



[도8]



[도9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/KR2022/015192

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01N 21/39(2006.01)i; G01N 21/31(2006.01)i; G06F 17/10(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01N 21/39(2006.01); G01N 21/31(2006.01); G01N 21/3504(2014.01); G01N 21/59(2006.01) Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Korean utility models and applications for utility models: IPC as above Japanese utility models and applications for utility models: IPC as above Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) eKOMPASS (KIPO internal) & keywords: 레이저 흡수 분광법(laser absorption spectroscopy), 농도(concentration), OH라디칼(OH radical), 중첩(superposition), 멀티플렉서(multiplexer), 온도(temperature), 흡광도(absorbance)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KR 10-2056794 B1 (KOREA INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY) 18 December 2019 (2019-12-18) See paragraph [0035], claim 1 and figure 2.	1-9
A	KR 10-1767177 B1 (KOREA INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY) 24 August 2017 (2017-08-24) See paragraphs [0014], [0042], [0047] and [0070] and figures 2 and 5.	1-9
A	KR 10-2013-0110318 A (ICE TECHNOLOGY CO., LTD.) 10 October 2013 (2013-10-10) See paragraphs [0014]-[0064].	1-9
A	KR 10-2056767 B1 (KOREA INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY) 18 December 2019 (2019-12-18) See paragraphs [0020]-[0028] and figure 2.	1-9
A	KR 10-2020-0125427 A (HORIBA STEC, CO., LTD.) 04 November 2020 (2020-11-04) See claim 1 and figures 1-5.	1-9
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 07 March 2023		Date of mailing of the international search report 07 March 2023
Name and mailing address of the ISA/KR Korean Intellectual Property Office Government Complex-Daejeon Building 4, 189 Cheongsaro, Seo-gu, Daejeon 35208 Facsimile No. +82-42-481-8578		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/KR2022/015192

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
KR	10-2056794	B1	18 December 2019	CN	109425590	A	05 March 2019
				CN	109425590	B	11 June 2021
				KR	10-2019-0023856	A	08 March 2019
				KR	10-2019-0048836	A	09 May 2019
				KR	10-2019-0048856	A	09 May 2019
				KR	10-2029875	B1	08 October 2019
				KR	10-2056920	B1	22 January 2020
				WO	2019-045138	A1	07 March 2019
KR	10-1767177	B1	24 August 2017	None			
KR	10-2013-0110318	A	10 October 2013	None			
KR	10-2056767	B1	18 December 2019	KR	10-2019-0048779	A	09 May 2019
KR	10-2020-0125427	A	04 November 2020	CN	111855596	A	30 October 2020
				JP	2020-180912	A	05 November 2020
				TW	202043736	A	01 December 2020
				US	11493443	B2	08 November 2022
				US	2020-0340918	A1	29 October 2020

A. 발명이 속하는 기술분류(국제특허분류(IPC)) G01N 21/39(2006.01)i; G01N 21/31(2006.01)i; G06F 17/10(2006.01)i		
B. 조사된 분야 조사된 최소문헌(국제특허분류를 기재) G01N 21/39(2006.01); G01N 21/31(2006.01); G01N 21/3504(2014.01); G01N 21/59(2006.01) 조사된 기술분야에 속하는 최소문헌 이외의 문헌 한국등록실용신안공보 및 한국공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC 일본등록실용신안공보 및 일본공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC 국제조사에 이용된 전산 데이터베이스(데이터베이스의 명칭 및 검색어(해당하는 경우)) eKOMPASS(특허청 내부 검색시스템) & 키워드: 레이저 흡수 분광법(laser absorption spectroscopy), 농도(concentration), OH 라디칼(OH radical), 중첩(superposition), 멀티플렉서(multiplexer), 온도(temperature), 흡광도(absorbance)		
C. 관련 문헌		
카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
A	KR 10-2056794 B1 (한국생산기술연구원) 2019.12.18 단락 [0035], 청구항 1 및 도면 2	1-9
A	KR 10-1767177 B1 (한국생산기술연구원) 2017.08.24 단락 [0014], [0042], [0047], [0070] 및 도면 2, 5	1-9
A	KR 10-2013-0110318 A (주식회사 아이스기술) 2013.10.10 단락 [0014]-[0064]	1-9
A	KR 10-2056767 B1 (한국생산기술연구원) 2019.12.18 단락 [0020]-[0028] 및 도면 2	1-9
A	KR 10-2020-0125427 A (가부시키가이샤 호리바 에스텍) 2020.11.04 청구항 1 및 도면 1-5	1-9
☐ 추가 문헌이 C(계속)에 기재되어 있습니다. ☒ 대응특허에 관한 별지를 참조하십시오.		
* 인용된 문헌의 특별 카테고리: “A” 특별히 관련이 없는 것으로 보이는 일반적인 기술수준을 정의한 문헌 “D” 본 국제출원에서 출원인이 인용한 문헌 “E” 국제출원일보다 빠른 출원일 또는 우선일을 가지나 국제출원일 이후에 공개된 선출원 또는 특허 문헌 “L” 우선권 주장에 의문을 제기하는 문헌 또는 다른 인용문헌의 공개일 또는 다른 특별한 이유(이유를 명시)를 밝히기 위하여 인용된 문헌 “O” 구두 개시, 사용, 전시 또는 기타 수단을 언급하고 있는 문헌 “P” 우선일 이후에 공개되었으나 국제출원일 이전에 공개된 문헌 “T” 국제출원일 또는 우선일 후에 공개된 문헌으로, 출원과 상충하지 않으며 발명의 기초가 되는 원리나 이론을 이해하기 위해 인용된 문헌 “X” 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌 하나만으로 청구된 발명의 신규성 또는 진보성이 없는 것으로 본다. “Y” 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌이 하나 이상의 다른 문헌과 조합하는 경우로 그 조합이 당업자에게 자명한 경우 청구된 발명은 진보성이 없는 것으로 본다. “&” 동일한 대응특허문헌에 속하는 문헌		
국제조사의 실제 완료일 2023년03월07일(07.03.2023)		국제조사보고서 발송일 2023년03월07일(07.03.2023)
ISA/KR의 명칭 및 우편주소 대한민국 특허청 (35208) 대전광역시 서구 청사로 189, 4동 (둔산동, 정부대전청사) 팩스 번호 +82-42-481-8578		심사관 박태욱 전화번호 +82-42-481-3405

국제조사보고서에서 인용된 특허문헌	공개일	대응특허문헌	공개일
KR 10-2056794 B1	2019/12/18	CN 109425590 A	2019/03/05
		CN 109425590 B	2021/06/11
		KR 10-2019-0023856 A	2019/03/08
		KR 10-2019-0048836 A	2019/05/09
		KR 10-2019-0048856 A	2019/05/09
		KR 10-2029875 B1	2019/10/08
		KR 10-2056920 B1	2020/01/22
		WO 2019-045138 A1	2019/03/07
KR 10-1767177 B1	2017/08/24	없음	
KR 10-2013-0110318 A	2013/10/10	없음	
KR 10-2056767 B1	2019/12/18	KR 10-2019-0048779 A	2019/05/09
KR 10-2020-0125427 A	2020/11/04	CN 111855596 A	2020/10/30
		JP 2020-180912 A	2020/11/05
		TW 202043736 A	2020/12/01
		US 11493443 B2	2022/11/08
		US 2020-0340918 A1	2020/10/29