

Optogalvanic 효과를 이용한 펄스형 파장가변 레이저의 파장측정

정의창 · 정도영 · 이종훈 · 노시표 · 이용주 · 차형기 · 이종민

한국원자력연구소 원자분광학연구실

(1993년 4월 8일 받음)

펄스형 파장가변 색소레이저를 사용하여 550~600 nm 사이의 파장영역에서 Ne 원자의 OG(Optogalvanic) 스펙트럼을 구했다. 정확하게 알려진 전이에 해당하는 OG 신호의 파장을 기준 위치로 하여 색소레이저의 파장을 측정하였다. 측정된 파장의 정확도는 ± 0.005 nm이며, 각각의 OG 신호의 위치와 상대적인 세기를 표로 만들어 R-590, R-610 색소레이저 파장측정에 이용할 수 있도록 하였다.

I. 서 론

파장가변 레이저를 사용할 때 레이저 파장을 정확하게 측정하기 위해 단색분광기(monochromator), 파장측정기(wavemeter), HCL(Hollow Cathode Lamp)등을 이용하는 방법들이 있다. 이들 중에서도 특히 HCL을 이용하는 방법은 다른 두 경우에 비해 장치가 월등히 간편하고, 가격이 저렴하며, 장치의 간편함에 비해 정확하기 때문에 많이 사용되고 있다.

HCL은 기체가 방전될 때 발생하는 여러 방전영역 중에서 음극 글로우 방전영역을 확장시키기 위해 평행한 두개의 전극 대신에 속이 빈 원통모양의 전극을 사용하고 있다. 이러한 구조는 높은 전류(수 암페어 정도)를 흘려줄 수 있다는 장점외에, 원통전극의 내부면 방향으로 향하는 높은 전기장이 방전중에 존재하는 양이온을 음극 원통면 방향으로 강하게 가속시킬 수 있기 때문에 음극물질층을 잘 떼어낼 수 있다는 점에서 내화원소(refractory element)들의 자유원자 생성원으로 사용되고 있다.^[1] HCL 속에는 일반적으로 Ar, Ne 등의 불활성 기체가 방전에 필요한 완충기체로 채워져 있고, 음극물질로는 다양한 원소들이 연구목적에 따라 선택적으로 사용된다.

방전 플라즈마를 구성하고 있는 불활성 기체, 혹은 음극에서 떨어져 나온 원자들의 전이와 일치하는 파장의 레이저 빛이 입사되면 평형상태의 원자분포에 변화가 생기고, 이 변화는 방전전류의 증가나 감소로 나타난다. 이 현상을 OGE(Optogalvanic Effect)라고 하며, 전이파장이 정확하게 알려진 각각의 원자전이에 해당하는 OG

스펙트럼을 확인, 비교함으로써 레이저의 절대 파장을 측정할 수 있다.^[2,3,4]

본 연구의 목적은 원자 및 분자분광학에 널리 사용되는 펄스형 파장가변 색소레이저의 절대 파장값을 OG 스펙트럼을 이용해 측정하는 것이다. 펄스레이저가 입사될 때 OG 스펙트럼을 측정하기 위해서는 몇가지 점을 미리 고려하여야 한다. 그 중에서 가장 먼저 고려해야 할 점은 OG 신호의 동역학적인 현상인데, 스펙트럼을 얻기 위해 boxcar 평균기를 사용할 때 시간축상의 어느 점에서 신호를 받아들이는지에 따라 신호의 크기 뿐만 아니라 부호까지 바뀔 수 있으므로 주의해야 한다.^[5] 이 연구에서는 먼저 펄스레이저가 HCL에 입사될 때 OG 신호의 시간에 대한 반응을 분석하고, 완충기체로 흔히 사용되는 Ne 원자의 에너지 준위들 중에서 파장영역이 550~600 nm 사이에 있는 원자전이의 OG 스펙트럼을 확인한 후, 그 위치와 함께 상대적인 크기를 측정하여 표로 만들었다. 이미 정확하게 알려진 Ne 원자의 전이파장을 기준으로 하여 비교해 볼 때, 측정된 레이저 파장의 정확도는 ± 0.005 nm이며, 이는 사용하는 레이저의 선폭 정도에 해당하는 값으로 단색분광기나 파장측정기의 정확도와 비교해도 별 손색이 없다.

II. 실험장치

전체 실험장치는 그림 1과 같다. 레이저 빛이 주 분광실험장치로 입사되며, 그 중에서 나뉘어진 일부가 광

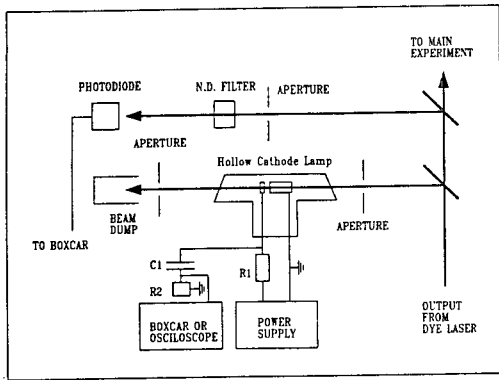


그림 1. 레이저 파장측정 실험장치

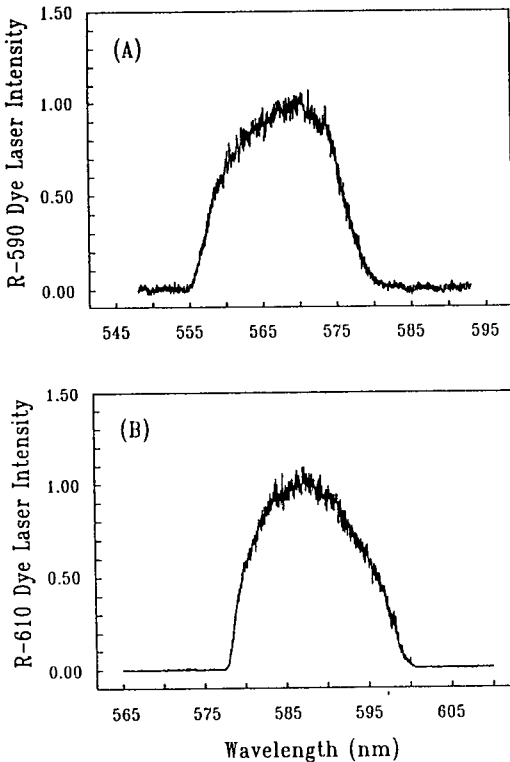


그림 2. (A) 파장의 변화에 대한 R-590 색소레이저의 규격화된 세기.
(B) 파장의 변화에 대한 R-610 색소레이저의 규격화된 세기

다이오드와 HCL 속으로 입사된다. 펄스형 파장가변 레이저로는 Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파로 펌핑되는 색소레이저(Lumonics, Model HD-300)가 사용되었으며,

발진 파장영역에 대한 레이저 빛의 상대적인 세기를 측정하기 위해 광다이오드(Electro-Optics Technology, Model ET 2000)가 사용되었다. R-590, R-610 색소를 이용하여 레이저를 발진시키면 각각 그림 2(A), (B)와 같이 발진 파장에 대한 레이저 빛의 상대적인 세기가 측정된다. 레이저 세기를 측정할 때 boxcar 평균기(SRS, Model SR 280)에 삽입된 적분기(SRS, Model SR 250)의 gate 위치는 레이저 펄스의 중앙이고, 그 넓이는 3 ns이다. OG 신호의 파형을 관측할 때는 boxcar 평균기 대신에 오실로스코프(LeCroy, Model 9450)를 사용하였다.

실험에 사용한 HCL은 HAMAMATSU사 제품인 Pb/Ne(Model L2783-82 Ne-Pb) 및 Hg/Ne(Model L2783-80 Ne-Hg)이다. 여기서 Pb와 Hg는 각각 HCL의 원통형 음극물질이고, Ne은 완충기체를 뜻한다. 음극물질은 서로 다르고 완충기체는 동일한 두개의 HCL에서 같은 조건으로 각각 OG 스펙트럼을 측정함으로써 음극물질과 완충기체의 OG 신호를 구분할 수 있다. EG&G ORTEC사의 고전압 전원(Model 556H)을 이용해 HCL을 방전시켰고, OG 스펙트럼을 측정할 때 방전회로의 구성값은 각각 전류제한저항(R1) 20 kΩ, 교류신호 검출을 위한 축전기의 용량(C1) 0.01 μF, 신호검출저항(R2) 1 MΩ, 방전전류 10 mA 등이었다.

III. 결과 및 논의

1. 오실로스코프로 관측한 OG 신호의 분석

HCL 내부의 방전전류에 기여하는 이온화 과정은 크게 다음과 같이 세가지로 분류된다.^[1,6]

- (1) Electron impact ionization, $A^* + e \rightarrow A^+ + 2e^-$
- (2) Collisions of the excited atoms, $A^* + A^* \rightarrow A^+ + A + e$
- (3) Penning ionization, $A^* + B \rightarrow A + B^+ + e^-$

여기서 A^* 는 A원자의 들뜬상태(excited state), B는 B원자의 바닥상태(ground state)를 각각 의미한다. 방전 플라즈마속의 원자들은 바닥상태뿐만 아니라 들뜬상태로도 존재하며 평형상태를 이루고 있다. 이들 중의 어느 두 준위의 에너지 차이에 해당하는 레이저 파장이 입사되면 전이에 의해 원자밀도분포에 변화가 생기므로 위의 세 과정과 같은 이온화 과정에 변화가 발생한다. 따라서 HCL 내부의 전극에 방전전류의 변화가 순간적으로 발생한 직후 다시 평형상태로 되돌아가게 되는데, 이 현상이 오실로스코프로 관측할 수 있는 OG 신호의

파형이다. 이 현상은 비율방정식(rate equation)을 이용해 간단하게 정리되어 있으며 그 결과는 다음 식과 같다.^[7,8]

$$\Delta V \propto -(N_1 - N_2) \{ A_2 \exp(-t/T_2) - A_1 \exp(-t/T_1) \} \quad (1)$$

윗 식에서, ΔV 는 OG 신호의 변화, N 은 평형상태의 원자밀도분포, A 는 이온화율, T 는 원자가 주위의 플라즈마와 반응하여 평형상태로 되돌아 가는 특성시간, 아래 첨자 1, 2는 각각 원자전이의 낮은 준위와 높은 준위를 의미한다.

식 (1)에서 일반적으로 낮은 준위의 분포가 크고, 높은 준위에서 이온화율이 크다는 점을 고려하면($N_1 > N_2$, $A_1 < A_2$), T_1 이 T_2 와 거의 같을 때 OG 신호는 초기에 음의 방향으로 변화한 후 지수함수 꼴로 평형상태로 돌아감을 알 수 있다. 반면에 T_1 이 T_2 보다 매우 클 경우의 OG 신호는 초기에 음의 방향으로 감소한 후 어느정도 시간이 지나면 양의 방향으로 증가했다가 평형상태의 크기로 되돌아온다. 그림 3은 방전회로의 구성값이 $R=1\text{ k}\Omega$, $R_2=1\text{ M}\Omega$, $C_1=0.01\text{ }\mu\text{F}$ 일 때 Pb/Ne HCL 속에 있는 Ne 원자의 OG 신호이다. 그림 3(A)는 들뜬상태에서 들뜬상태로 전이가 이루어진 경우(즉, T_1 이 T_2 와 거의 같을 때)에 흔히 볼 수 있는 모양이고, 그림 3(B)는 준안정상태(metastable state)에서 들뜬상태로 전이가 이루어진 경우(T_1 이 T_2 보다 매우 큰 조건)에 볼 수 있는 OG 신호이다. 각각의 전이에 해당하는 레이저 파장은 576.442 nm와 588.190 nm이며, 그림 4에 Ne 원자의 에너지 준위도를 부분적으로 나타내었다. Paschen 표시방법으로 표시한 준위중에서 $1s_5$ 와 $1s_3$ 는 바닥상태로 전이가 금지된 준안정상태이다.^[9,10]

그림 5는 R_1 이 20 k Ω 일 경우 $1s_5 \rightarrow 2p_2$ 전이에 해당하는 OG 신호가 방전전류의 크기에 따라 변하는 모양을 관측한 것이다. 전류가 1, 2.5, 5.8 mA 로 점점 증가함에 따라 평형상태로 되돌아 가는 시간이 빨라짐을 볼 수가 있으며, 이는 방전전류의 증가에 따라 준안정상태의 분포가 증가하므로 주위의 플라즈마와 활발히 반응할 수 있어 결과적으로 식 (1)의 T_1 이 감소하는 현상으로 이해할 수 있다.

이상에서 살펴본 것과 같이 펄스레이저에 대한 OG 신호의 파형은 각 전이의 종류마다 다르고, 방전전류의 크기에 따라서도 다르다. 그 외에 같은 크기의 방전전류를 유지시킨다 해도 방전회로에 사용하는 전류제한저항의 크기에 따라서도 신호의 파형이 현저히 달라짐을 새로이 관측했는데, 그 원인은 전류제한저항이 방전플라즈마 내부의 전자온도와 전자밀도에 영향을 주기 때

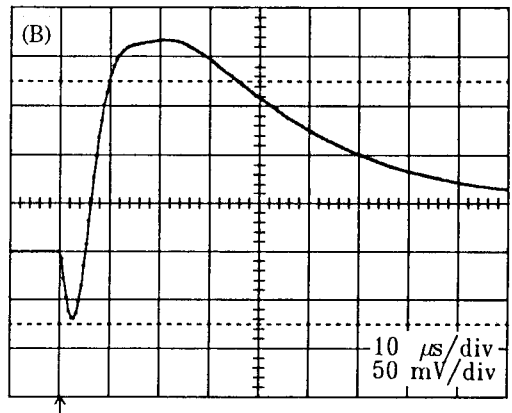
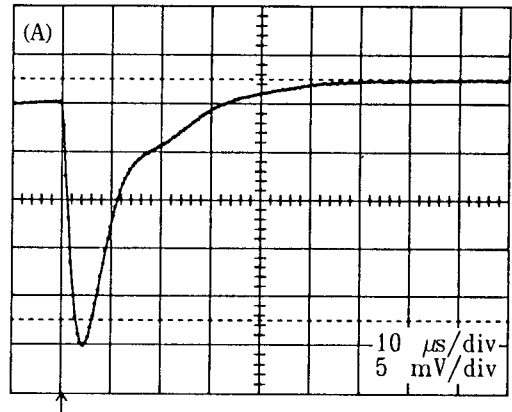


그림 3. 펄스형 색소레이저 빛이 입사될 때 오실로스코프로 측정한 Ne 원자의 전형적인 OG 신호 (Pb/Ne-HCL, 방전전류 10 mA, 전류제한저항 1 k Ω)

- (A) 들뜬상태 사이의 전이에 해당하는 OG 신호 ($2p_9 \sim 4d$ 전이, 576.442 nm)
- (B) 준안정상태에서 시작하는 전이에 해당하는 OG 신호($1s_5 \sim 2p_2$ 전이, 588.190 nm).

문인 것으로 생각하고 있으며, 자세한 분석 중에 있다. 이와 같은 현상들은 OG 스펙트럼의 크기와 부호가 실험조건(방전전류의 크기, 전류제한저항의 크기등)에 따라 크게 다를 수 있다는 것을 뜻한다. 따라서 정확한 파장 위치와 크기를 가진 OG 스펙트럼을 얻기 위해서는 주어진 방전조건에서 OG 신호의 시간에 대한 반응을 미리 확인하는 작업이 boxcar 평균기에 삽입되는 적분기(integrator)의 gate 넓이와 위치를 선택하는데 있어 필수적임을 알 수 있다.

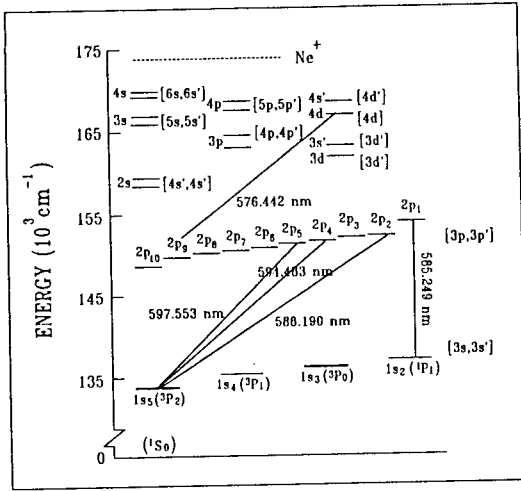


그림 4. Ne 원자의 부분적인 에너지 준위도. 굵은 실선으로 표시한 1s₅, 1s₃는 준안정상상태를 뜻한다.

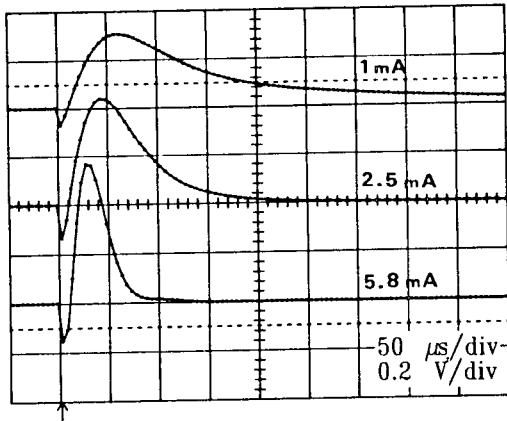


그림 5. 방전전류의 변화에 따른 OG 신호의 변화 (Hg/Ne-HCL, 전류제한저항 20 kΩ, 1s₅~2p₂ 전이, 588.190 nm).

2. Ne 원자의 OG 스펙트럼

Pb/Ne HCL에서 Ne 원자의 OG 스펙트럼을 측정하기 위해 R1=20 kΩ, C1=0.01 μF, R2=1 MΩ인 방전회로를 구성하였다. 방전전류는 10 mA로 고정시켰다. 앞에서 설명한 것과 같이 OG 신호의 시간에 대한 반응을 관측한 결과를 고려해서 OG 스펙트럼을 그릴 때 boxcar 평균기의 적분기 조건을 다음과 같이 정했다.

- (1) R-590 색소레이저의 경우
 - Gate 지연시간 : 6 μs

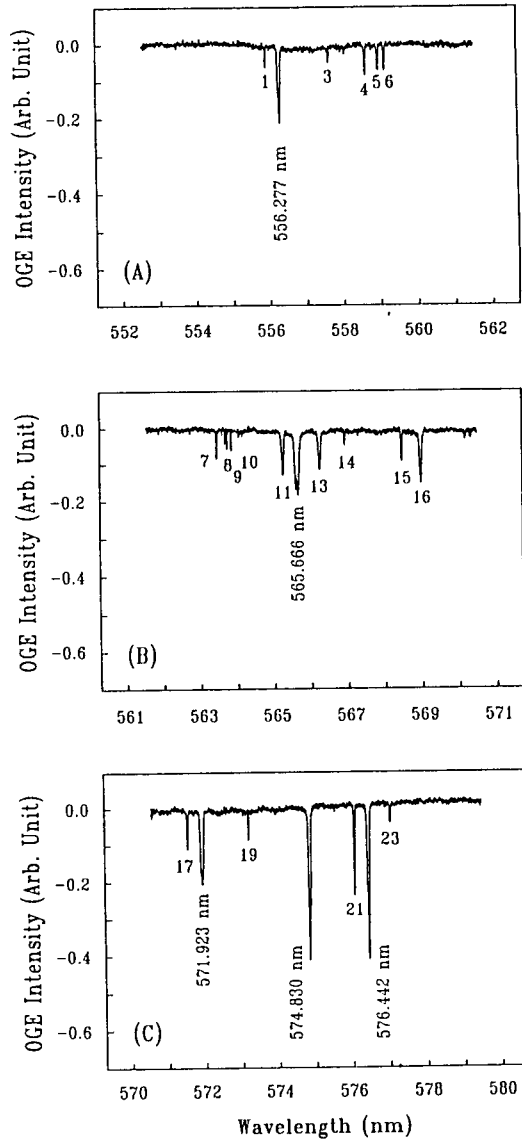


그림 6. Ne 원자의 OG 스펙트럼 (gate width: 0.3 μs, gate delay : 6 μs, 스펙트럼에 표시한 일련번호는 표 1에 표시한 번호와 같다).

- (A) 파장범위 : 553~562 nm
- (B) 파장범위 : 562~571 nm
- (C) 파장범위 : 571~580 nm

- Gate 넓이 : 0.3 μs
- 색소레이저 파장변화 속도 : 0.0150 nm/sec
- 레이저 pulse 반복율 : 10 pps
- Boxcar pre-averaging : 3 samples

(2) R-610 색소레이저의 경우

- Gate delay : ① 20 μ s, ② 6 μ s
- Gate 넓이 : 0.3 μ s
- 색소레이저 파장변화 속도 : 1. 0.0225 nm/sec
2. 0.0150 nm/sec
- 레이저 pulse 반복율 : 10 pps
- Boxcar pre-averaging : 3 samples

R-590 색소레이저(파장범위 : 553~580 nm)를 이용한 OG 스펙트럼을 그림 6(A), (B) 및 (C)에 나타내었다. 색소레이저의 파장변화 속도를 0.0150 nm/sec, gate 넓이를 0.3 μ s, gate 지연시간을 6 μ s로 각각 정했을 때 가장 좋은 스펙트럼이 얻어졌다. R-590 색소레이저의 파장범위에 속한 Ne 원자의 전이는 모두 들뜬상태 사이의 전이로서 그림 3(A)와 같은 OG 신호에 해당한다. 표 1에 측정된 전이파장의 위치와 상대적인 세기를 나타내었다. 표에서 윗문자 (a)는 미국 NBS(National Bureau of Standards)에서 작성된 표에 명시된 Ne 원자의 전이파장이고, 윗문자 (b)는 본 실험에서 측정된 것으로서 NBS표의 두 파장값을 기준으로 정한 후, 그 사이를 일정한 간격으로 나누어 측정된 파장을 뜻한다.^[11] 측정된 여러 파장중에서 *기호가 붙은 파장은 실험에 사용한 두 종류의 HCL (Pb/Ne, Hg/Ne)에서 공통적으로 측정된 파장이지만 현재까지 알려진 Ne 원자의 전이에는 포함되어 있지 않으며, HCL을 제작할 때 포함된 불순물의 OG 신호일 가능성이 있다. 그외의 다른 파장들은 Ne 원자의 전이에 관계된 두 에너지 준위가 확인된 값들이다.^[5] 윗문자 (c)로 표시한 세기는 방전중에 방출되는 빛의 상대적인 세기(Relative Emission Intensity)로서 NBS표에 명시된 값이고, 윗문자 (d)로 표시한 값은 이 실험에서 측정된 OG 신호의 상대적으로 규격화된 세기로서 가장 큰 OG 신호를 기준으로 비교한 후, 그림 2(A)에서 측정된 색소레이저의 세기로 나눈 값이다.

그림 7, 그림 8(A), (B) 및 (C)는 R-610 색소레이저(파장범위 : 579~602 nm)를 이용해 측정된 OG 스펙트럼이다. 그림 7은 위 파장범위에 속한 준안정준위에서 시작하는 전이에 해당하는 OG 스펙트럼이며, gate 지연시간을 20 μ s로 주었을 때 준안정준위의 OG 신호는 들뜬준위 사이의 전이에 의한 신호에 비해 100배 이상 크기 때문에 파장측정의 기준위치로 선택하기에 적합하다. 그림 7과 그림 8의 세로축은 보정하지 않고 직접 비교할 수 있는 크기로 나타낸 것이다. 그림 8(A), (B) 및 (C)는 그림 7의 실험조건과 동일하지만, gate 지연시간을 6 μ s로 정했을 때의 OG 스펙트럼이며 정확한

표 1. Ne의 optogalvanic spectra (파장범위 : 553~580 nm).

	^(a) λ (nm)	^(b) λ (nm)	^(c) Rel. int.	^(d) Nor. rel.int.
1		555.905		0.217
2	556.277	556.277	5	0.685
3		557.619*		0.123
4		558.613		0.176
5		558.957		0.137
6		559.136*		0.147
7		563.455*		0.148
8		563.683*		0.078
9		563.746*		0.100
10		563.858*		0.104
11		565.254		0.207
12	565.666	565.666	10	0.304
13		566.252		0.179
14		566.928*		0.078
15		568.467		0.144
16		568.977		0.232
17		571.537		0.183
18	571.923	571.923	5	0.320
19		573.193*		0.157
20	574.830	574.831	121	0.752
21		576.057		0.536
22	576.442	576.442	80	1.000
23		577.033		0.135

^(a)ref.^[11]

^(b)in this work.

^(c)Relative emission intensity(ref.^[11])

^(d)Normalized relative OG intensity(in this work)

*표시가 붙은 파장은 Ne 원자의 전이인지 확실하지 않다.

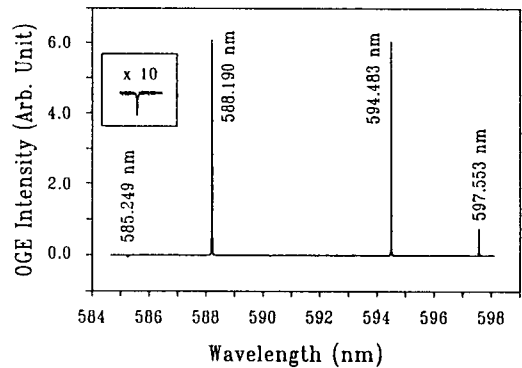


그림 7. Ne 원자의 OG 스펙트럼 (파장범위 : 585~598 nm, gate width: 0.3 μ s, gate delay: 20 μ s, $1s_2 \sim 2p_1$; 585.249 nm, $1s_5 \sim 2p_2$; 588.190 nm, $1s_5 \sim 2p_4$; 594.483 nm, $1s_5 \sim 2p_5$; 597.553 nm).

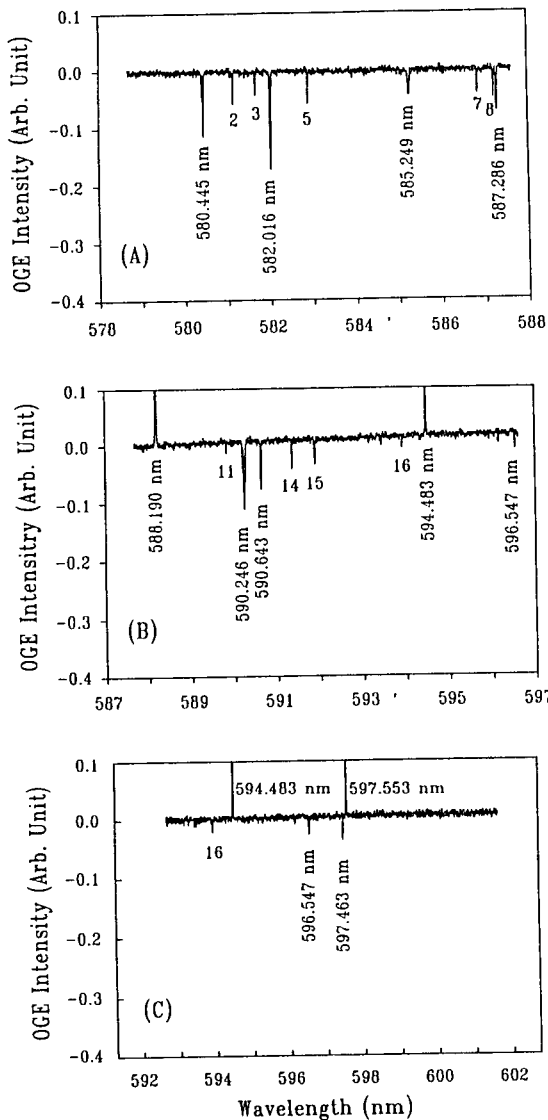


그림 8. Ne 원자의 OG 스펙트럼 (gate width: 0.3 μ s, gate delay : 6 μ s, 스펙트럼에 표시한 일련번호는 표 2에 표시한 번호와 같다.)

- (A) 파장범위 : 579~588 nm
- (B) 파장범위 : 588~597 nm
- (C) 파장범위 : 593~602 nm

위치와 상대적인 세기를 표 2에 정리했다. 파장과 세기를 측정하는 방법은 표 1에서 설명한 것과 같고, 표 2에서 OG 신호의 규격화된 세기를 영문자 m으로 표시한 파장은 그림 4의 준안정준위(1s₅)에서 시작하는 전이이므로, 그 크기를 상대적으로 비교하기가 어렵다. 표 2에 정리된

표 2. Ne의 optogalvanic spectra (파장범위 : 579~602 nm)

	^(a) λ (nm)	^(b) λ (nm)	^(c) Rel. int.	^(d) Nor. rel.int.
1	580.445	580.445	12	0.834
2		581.139		0.382
3		581.663		0.262
4	582.016	582.016	40	1.000
5		582.889		0.307
6	585.249	585.249	500	0.211
7		586.843		0.199
8		587.214		0.228
9	587.286	587.286	100	0.333
10	588.190	588.190	100	m
11		589.829		0.240
12	590.246	590.246	60	0.698
13	590.643	590.640	60	0.536
14		591.361		0.383
15		591.903		0.391
16		593.932		0.277
17	594.483	594.483	100	m
18	596.547	596.548	100	0.396
19	597.463	597.463	100	0.643
20	597.553	597.553	120	m

^(a)ref.^[11]

^(b)in this work.

^(c)Relative emission intensity(ref.^[11])

^(d)Normalized relative OG intensity(in this work)

m은 준안정준위에서 시작하는 전이를 뜻한다.

모든 파장값은 두 에너지 준위가 알려져 있는 Ne 원자의 전이에 해당하는 값들이다.

표 1 및 표 2에서 볼 수 있듯이 NBS표에 명시된 적당한 간격의 두 파장을 기준으로 그 사이에 있는 OG 신호의 파장을 측정된 결과, ± 0.005 nm의 정확도를 가지고 있음이 확인되었고, 이는 측정에 사용된 색소레이저의 선폭정도에 해당하는 값이다.

한편, 정확하게 알려진 두 파장을 이용할 수 없는 경우에는 알려진 한 파장을 시작점으로 하고 에탈론을 통과한 일정한 간격의 간섭무늬를 눈금으로 이용하여 원하는 위치의 파장을 측정할 수 있다. 이 방법의 장점은 에탈론의 두 거울 간격을 조정함에 따라 간섭무늬의 간격을 원하는 대로 조정할 수 있기 때문에 원자의 초 미세 구조등과 같이 높은 분해능을 요구하는 파장의 측정에도 이용할 수 있다는 것이다.

IV. 결 론

HCL의 optogalvanic 효과를 이용하는 파장측정 방법은 원소의 종류를 적절히 선택함에 따라 거의 모든 영역의 파장을 측정할 수 있다는 점과 실험장치의 간편함에 비해 높은 정밀도를 가지고 있다는 점에서 유리하다.

본 연구에서는 파장가변 색소레이저의 파장을 정확하게 알기 위하여 Ne 원자의 optogalvanic 스펙트럼을 측정했다. 파장범위 550~600 nm 사이에서 43개 정도의 optogalvanic 신호를 관측하였고, 각각의 파장위치와 상대적인 세기를 표로 만들었다. 정확하게 알려진 두개의 파장값을 기준위치로 정한 경우, 그 사이의 파장을 ± 0.005 nm의 정확도로 측정할 수 있었다. 펄스형 색소레이저를 사용할 경우, OG 신호의 파형이 식 (1)과 같은 간단한 식으로 설명되었으며, 신호의 시간에 대한 반응이 방전조건(방전전류, 전류제한저항의 크기 등)에 따라 변화하므로, 스펙트럼을 측정하기 이전에 신호의 파형을 먼저 분석하는 것이 필수적임이 확인되었다.

참 고 문 헌

[1] Beniamino Barbieri, Nicolo Beverini, Rev. Mo-

dern Phys. **62**, 603 (1990).
 [2] Norman J. Dovichi, David S. Moore, Richard A. Keller, Appl. Optics, **21**, 1468 (1982).
 [3] Richard A. Keller, Rolf Engleman Jr. and Byron A. Palmer, Appl. Optics, **19**, 836 (1980).
 [4] Craig J. Sansonetti and K. H. Weber, J. Opt. Soc. Am. **B1**, 361 (1984).
 [5] B. R. Reddy, P. Venkateswarlu, Optics Commun., **85**, 491 (1991).
 [6] B. R. Reddy, P. Venkateswarlu and M. C. George, Optics Commun., **73**, 117 (1989).
 [7] G. Erez, S. Lavi, and E. Miron, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-15**, 1328 (1979).
 [8] A. Ben-Amar, G. Erez, and R. Shuker, J. Appl. Phys., **54**, 3688 (1983).
 [9] E. F. Zalewski, R. A. Keller, and R. Engleman Jr., J. Appl. Phys., **70**, 1015 (1979).
 [10] D. K. Doughty and J. E. Lawler, Phys. Rev. **A28**, 773 (1983).
 [11] Atomic Transition Probabilities (Hydrogen through Neon), NSRDS-NBS 4 Vol. 1 (U. S. Govern. Printing Office, Washington, D. C., 1966). Wavelengths and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions, NSRDS-NBS 68 (U. S. Govern. Printing Office, Washington, D. C., 1980).

Wavelength Measurement of Pulsed Tunable Laser Using Optogalvanic Effect

E. C. Jung, D. Y. Jeong, J. H. Yi, S. P. Rho,
 Y. J. Rhee, H. K. Cha, and J. M. Lee

*Atomic Spectroscopy Dept., Korea Atomic Energy Research
 Institute, Taejon 305-606, Korea*

(Received: April 8, 1993)

Optogalvanic spectrum of Ne has been obtained in the visible wavelength region 550~600 nm by using pulsed tunable dye laser. The recorded laser wavelengths are calibrated on the basis of the accurately-known Ne atomic transition lines. The accuracy of the measured wavelength is ± 0.005 nm. We tabulated the wavelengths and the relative intensities of the OG signals which are useful to calibrate the dye laser using R-590, R-610 dyes.