

# Alpha UV-Vis 분광광도계의 광도 응답 선형성 검증 및 Stray Light 억제 설계 기반 성능 평가



reddot design award  
winner 2019



## 개요

본 연구에서는 케이랩에서 개발한 Alpha UV-Vis Spectrophotometer의 광학적 성능을 평가하기 위해 흡광도 선형성(Photometric Linearity) 검증을 수행하였다. 본 실험은 특정 시료의 정량 분석이 아닌, 장비의 광도 응답이 농도 변화에 따라 Beer-Lambert 법칙을 얼마나 정확히 재현하는지를 확인하기 위한 것으로, 과망간산칼륨(Potassium Permanganate,  $KMnO_4$ ) 용액을 이용하여 Alpha 장비의 선형성 및 측정 안정성을 검증하였다.

국내 분석장비 산업을 선도하는 케이랩 주식회사, 연구 및 제조까지 전 과정을 한 곳에서 책임지는 국내의 유일한 전문 연구·제조 기업입니다.

**주소**  
(34014) 대전광역시 유성구 테크노 2로 94-23

**홈페이지**  
[www.klab.im](http://www.klab.im)

**전화번호**  
042-932-7586

**문의**  
[info@klab.im](mailto:info@klab.im)

## 서론

분광광도계(UV-Vis Spectrophotometer)는 시료에 특정 파장의 빛을 조사하고, 그 빛이 시료를 통과하거나 흡수되는 정도를 측정하여 물질의 광학적 특성을 정량화하는 장비이다.

흡광도(Absorbance)는 시료의 농도에 비례하며, 이러한 관계는 Beer-Lambert 법칙으로 설명된다. 따라서 측정된 흡광도가 농도 변화에 따라 선형적으로 증가하는 특성은 장비의 광도 응답이 정상적으로 작동하고 있음을 의미한다.

그러나 실제 분석 환경에서는 회절격자의 고차 회절(high-order diffraction), 광학 부품의 표면 반사 및 산란(scattering), 또는 단색화 광학 부품의 물리적 결함(optical imperfection) 등에 의해 미광(Stray Light)이 발생할 수 있다. 이 stray light가 검출기에 함께 도달하면, 특히 고흡광도(High Absorbance) 시료에서 투과광이 실제보다 과대하게 측정되어 흡광도가 낮게 나타나는 오차가 발생한다.

예를 들어, 실제 투과율이 0.1%( $A=3.0$ )인 시료에 stray light가 0.05% 유입될 경우, 측정 투과율은 0.15%( $A=2.82$ )로 약 6%의 오차가 발생한다. 따라서 stray light 억제 성능은 분광광도계의 광도 정확도(Photometric Accuracy)와 선형성(Photometric Linearity)을 결정짓는 핵심 요소라 할 수 있다.



[그림 1]. Alpha UV-Vis Spectrophotometer - 케이랩에서 개발한 190-1100 nm 범위 측정 가능 이중빔(Double-beam) 분광광도계

케이랩의 Alpha UV-Vis Spectrophotometer는 이러한 stray light의 영향을 최소화하기 위해, 광로 전체에 걸친 다층 차단 시스템(Multi-Layer Stray Light Suppression System)을 설계에 반영하였다. 이 시스템은 광원부 - 단색화부 - 검출부로 이어지는 전체 광학 경로에서 stray light의 발생을 근본적으로 억제하도록 구성되어 있으며, 그 주요 단계는 다음과 같다.

### 1) 램프 하우징 산란광 차단

광원이 반사면에 의해 산란되는 현상을 최소화하기 위해, 램프 하우징 내부에 빛 흡수 구조체(black light-trap surface)를 적용하였다. 이를 통해 광원 단계에서 불필요한 반사광이 광학계로 전달되는 것을 근본적으로 차단하였다.

### 2) 회절격자 고차회절광 차단

회절격자(Grating)에서 발생하는 고차 회절광(high-order diffraction)과 산란광을 제거하기 위해 High-Order Cut Filter를 적용하였다. 이 필터는 파장대역별 stray response를 최소화하여

특정 파장 영역의 투과광 정밀도를 향상시킨다.

### 3) 광학 블록 간 차폐 구조

각 광학 블록의 경계면에는 광 누설 방지 차폐벽(optical shielding wall)과 흡광 구조체(Stray Light Trap)를 다중으로 배치하였다. 이를 통해 미세 산란광을 흡수·제거하고, baseline 안정성과 장기 측정 안정성을 동시에 확보하였다.



**[그림 2]. Alpha UV-Vis Spectrophotometer의 Stray Light 차단 설계 구조** - 램프 하우징, 회절격자, 광학 블록 등 주요 광로 구간에 차폐 구조와 빛 흡수 구조체를 적용하여, stray light를 0.05% 이하로 억제한다. 이를 통해 고흡광도(High Absorbance) 측정 시에도 신호 왜곡을 방지하고, 높은 신호대잡음비(S/N ratio)를 유지할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 원리에 기반하여 케이랩에서 개발한 Alpha UV-Vis 분광광도계의 광학적 성능을 검증하였다. 기기의 동적 범위(Dynamic Range)와 신호 안정성(Signal Stability)을 확인하기 위한 기초 성능 검증 단계로서 수행되었다.

## 실험 방법

### 사용 장비

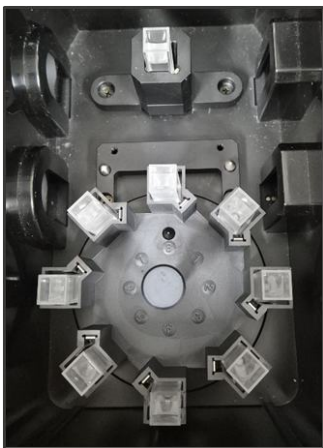
측정에는 케이랩의 Alpha UV-Vis Spectrophotometer를 사용하였다. 본 장비는 8셀 멀티셀 홀더를 기본 장착하고 있어 여러 시료를 연속적으로 측정할 수 있다.

10 mm 일회용 큐벳(Ratiolab, Cat.No. 2811110)을 사용하였으며, Reference Cell에는 증류수를 채워 Auto-zero를 수행한 후 분석을 진행하였다. 모든 시료는 Photometric Mode에서 525 nm 파장에서 측정되었다.

### 시약 및 용액 조제

과망간산칼륨(Potassium Permanganate,  $\text{KMnO}_4$ , CAS No. 7722-64-7, Cat.No. 6607-4405, Daejung) 0.2511 g을 정밀하게 칭량하여 증류수 250 mL에 용해시켜 1,000 mg/L 용액을 조제하였다.

이 용액을 단계적으로 희석하여 265, 250, 125, 62.5, 31.25, 15.63, 7.81, 3.91, 1.95, 0.98, 0.49, 0.24, 0.12, 0.06, 0.03 mg/L의 농도를 갖는 시료 용액을 준비하였다.



[그림 3]. Alpha UV-Vis Spectrophotometer의 8셀 멀티셀 홀더 - Reference Cell에는 증류수를 사용하여 Auto-zero를 수행하였다.

## 결과 및 고찰

### 정량한계

정량한계(Limit of Quantitation, LOQ)는 ICH Q2 (R1) 가이드라인에 따라 블랭크(증류수)를 10회 반복 측정하여 얻은 표준편차( $\sigma$ )와 검량선의 기울기(S)를 이용해 계산하였다.

해당 관계식은 다음과 같다.

$$LOQ = 10 \times \frac{\sigma}{S}$$

본 실험에서  $\sigma = 0.000049$ ,  $S = 0.0151$ 의 값을 적용하였으며, 이를 통해 LOQ는 0.032 mg/L로 산출되었다. 이 결과는 Alpha UV-Vis Spectrophotometer가 0.032 mg/L 이상의 저농도 영역에서도 정량이 가능한 수준의 감도와 신호 안정성을 보유함을 나타낸다.

[표 1]. 블랭크(증류수) 반복 측정 결과

연번	Blank
1	0.0000
2	0.0000
3	0.0000
4	0.0001
5	0.0000
6	0.0001
7	0.0000
8	0.0000
9	0.0001
10	0.0001
표준 편차( $\sigma$ )	0.000049
검량선 기울기(S)	0.0151
LOQ (mg/L)	0.032

## 흡광도 선형성

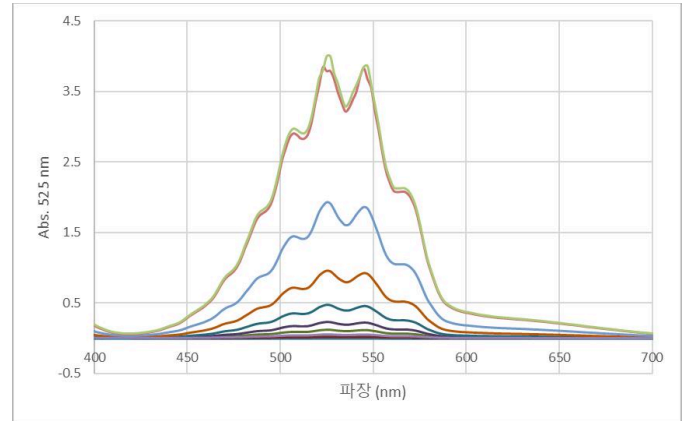
Alpha UV-Vis Spectrophotometer를 이용하여 0.03-265 mg/L 범위의 과망간산칼륨

용액을 측정 한 결과는 [표 2]에 나타내었다. 525 nm에서 측정된 흡광도와 농도 간의 관계는 우수한 직선성을 보였으며, 회귀식은  $A = 0.0151C + 0.0027$ , 결정계수( $R^2$ )은 0.9999로 계산되었다.

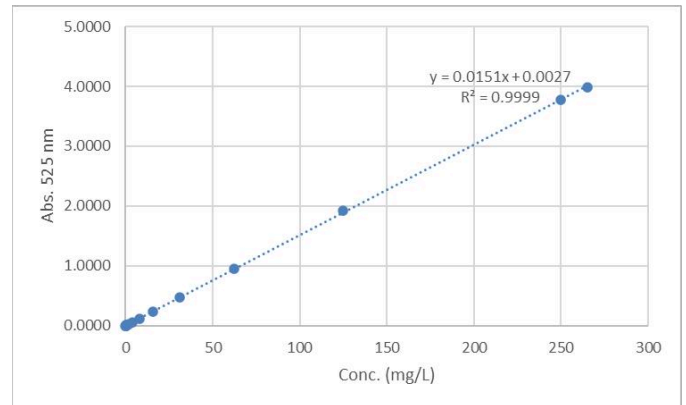
측정된 최대 흡광도는 3.9866 Abs로, 표준 10 mm 셀 사용 시 265 mg/L까지의 고농도 시료에서의 비선형 왜곡 없이 안정적인 광도 응답을 유지하였다

[표 2]. 과망간산칼륨 용액의 농도(0.03-265 mg/L) 측정 결과

Conc. (mg/L)	Abs. (525 nm)
265.00	3.9866
250.00	3.7710
125.00	1.9217
62.50	0.9570
31.25	0.4769
15.63	0.2375
7.81	0.1178
3.91	0.0583
1.95	0.0286
0.98	0.0140
0.49	0.0075
0.24	0.0035
0.12	0.0016
0.06	0.0007
0.03	0.0003



[그림 4]. 10 mm 표준 셀을 사용하여 측정 한 과망간산칼륨( $KMnO_4$ ) 용액의 흡광 스펙트럼 (400-700 nm).



[그림 5]. 525 nm에서 측정된 흡광도와 농도(mg/L) 간의 검량선

## 결론

본 연구에서는 Alpha UV-Vis Spectrophotometer의 광도 응답 특성을 검증하기 위해 과망간산칼륨( $\text{KMnO}_4$ ) 용액을 이용한 흡광도 선형성 평가를 수행하였다.

Alpha 장비는 0.03-265 mg/L 범위에서 결정계수( $R^2$ ) 0.9999의 우수한 직선성을 보였으며, 3.9866 Abs까지의 고흡광도 영역에서도 비선형 왜곡 없이 안정적인 신호를 유지하였다. 또한 블랭크 측정 기반 정량한계(LOQ)는 0.032 mg/L로 산출되어, 저농도 시료에서도 높은 감도와 정량 재현성을 확보함을 확인하였다.

이러한 결과는 Alpha UV-Vis Spectrophotometer가 광학적 정밀도와 신호 안정성이 요구되는 정량 분석에 적합한 성능을 보유하고 있음을 입증한다.

### 참고문헌(자료출처)

ICH Q2, Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology, November 2005