

## UV-Vis 분광법을 이용한 항공 연료의 총 나프탈렌 탄화수소 측정

Agilent Cary 3500 UV-Vis를 사용한 광도 정확도 최적화 및 데이터 처리 간소화



### 저자

Yasurika Heenatigala  
Agilent Technologies, Inc.

### 개요

이 연구에서는 항공 연료에 함유된 나프탈렌 탄화수소의 정성 및 정량 분석을 위한 효율적이고 간단한 방법으로서 UV-Vis 분광법을 적용하는 방법을 살펴봅니다. Agilent Cary 3500 UV-Vis 분광 광도계와 Agilent Cary UV Workstation UV-Vis 소프트웨어를 사용하여 3개의 Jet A-1 연료 시료에 있는 나프탈렌의 총 농도를 측정하는 간단한 워크플로가 개발되었습니다. 연료의 품질, 연소 특성, 잠재적 환경 영향을 평가하는 데 있어 이 기술의 잠재력을 확인시켜 주는 우수한 분석법 정밀도 데이터가 제시되었습니다.

## 소개

UV-Vis 분광법은 터빈 연료 시료의 구성 탄화수소 농도를 측정하여 항공 엔진 성능에 대한 간단하고 빠른 정성 분석을 제공하는 데 사용할 수 있습니다.

항공기 엔진 성능을 평가하는 한 가지 방법에는 연료의 연소 특성을 분석하는 것이 포함됩니다. 두 개의 방향족 고리로 구성되고 다환 방향족 탄화수소로 분류되는 탄화수소인 나프탈렌<sup>1</sup>은 일반적으로 등유의 연료 첨가제로 사용됩니다. 제트 연료에는 아세나프텐과 이들 탄화수소의 알킬화 유도체가 소량 존재할 수도 있습니다. 이러한 나프탈렌은 연료 시료의 부피에서 차지하는 비중이 작지만, 엔진 배기가스 중 입자상 물질 수준에는 크게 기여합니다.<sup>2</sup> 또한 불완전 연소로 인해 그을음, 연기, 열 복사가 발생합니다.<sup>3</sup> 이러한 연소 특성은 연료 효율성이 낮고 오염물질 배출 위험이 높음을 나타내므로<sup>4</sup> 항공 연료에 있는 나프탈렌 탄화수소의 총 농도를 계산하는 것이 필수적입니다.

정성적 흡광도 측정과 정량적 계산을 통해 제트 연료 시료에 있는 나프탈렌의 총 농도를 UV-Vis 분광법으로 결정할 수 있습니다. 이 응용 자료에서는 Agilent Cary 3500 UV-Vis 분광 광도계와 Agilent Cary UV Workstation v1.6을 사용하여 3개의 Jet A-1 연료 시료에서 나프탈렌 탄화수소의 총 농도를 측정할 때 어떤 이점이 있는지 보여줍니다.

## 실험

### 시료 전처리

**용매 대조군:** 분광 등급 이소옥탄(2,2,4-트리메틸펜탄, Sigma-Aldrich, 품번 1047182500, CAS 번호 540-84-1). 이소옥탄 3mL를 표준물질 3.5mL, 10mm 광학 경로 길이의 석영 큐벳(Agilent Technologies, 품번 5061-3387)으로 옮겼습니다. 세 가지 용매 대조군을 준비하여 시료에 대한 블랭크로 사용했습니다.

**시료 1-3:** Jet A-1 연료 시료(현지에서 구입) 3개를 0.075mL씩 나누어 깨끗하고 건조한 100mL 용적 플라스크에 옮겨 담았습니다. 각 시료의 질량은 가장 가까운 0.0001g(각각 64.1, 63.4, 65.5mg) 단위로 기록한 다음, 분광 등급 이소옥탄으로 표선까지 희석한 후 마개를 막고 완전히 혼합했습니다. 그런 다음 용액 3mL를 10mm 석영 큐벳으로 옮겨 분석할 준비를 했습니다.

## 기기

용매 대조군과 시료 셀이 준비된 후, Agilent Cary 3500 Multicell UV-Vis(그림 1)를 사용하여 흡광도를 측정했으며, 이때 표 1에 나타난 파라미터를 사용했습니다. 멀티셀 모듈을 이용해 최대 7개의 시료와 참조물질을 동시에 측정할 수 있습니다. 이 실험에서는 세 가지 연료 시료를 함께 측정하고, 흡광도 스펙트럼을 하나의 그래프에 수집했습니다. 그런 다음 시료의 흡광도 측정값을 285nm에서 분광학 이소옥탄(용매 대조군)과 비교했습니다.



그림 1. Agilent Cary 3500 Multicell Peltier UV-Vis 분광 광도계.

표 1. Agilent Cary 3500 Multicell UV-Vis 데이터 수집 파라미터.

파라미터	값
스펙트럼 범위	240-350nm
신호 평균화 시간	0.1초
데이터 간격	1nm
스펙트럼 대역폭	1nm

## 결과 및 토의

### 시료의 정성 및 정량 분석

Cary UV Workstation v1.6에는 사용자가 단일 프로그램 내에서 결과를 생성하고 분석하는 데 도움을 주는 기능적 도구들이 포함되어 있어 분석이 간소화됩니다. 작동 파라미터와 계산 방법은 모두 Scan 애플리케이션 프로그램 내에서 새로운 배치를 사용하여 설정했습니다. 사용자는 선택에 따라 파장 범위 또는 특정 파장에서 흡광도를 수집할 수 있습니다. 본 연구에서는 240-350nm 파장 영역을 스캔하여 흡광 스펙트럼의 모양을 분석할 수 있었습니다.

제트 연료 시료에 존재하는 총 나프탈렌 농도를 평가하기 위해 그림 2에 나타난 대로 세 가지 계산이 "시퀀스 종료 분석" 기능에 입력되었습니다.

분석 1은 나프탈렌(1)과 연료(0.8)의 질량 백분율(질량 %)과 상대 밀도 값을 사용하여 시료의 나프탈렌 부피 백분율(부피 %)을 계산하는 데 사용되었습니다.<sup>5</sup>

분석 2는 285nm에서의 흡광도 값(A), 각 시료의 그램 질량(W), 두 상수 0.10(K) 및 285nm에서의  $C_{10}$ - $C_{13}$  나프탈렌 평균 흡광도 33.7 L/g·cm를 사용하여 제트 연료 시료에 있는 나프탈렌의 질량 백분율(질량 %)을 계산하는 데 사용되었습니다.<sup>3</sup> 사용자가 변수와 단위를 원하는 대로 조정할 수 있는 사용자 정의 파라미터 기능을 사용하여 시퀀스 분석 설정에 가중치를 추가했습니다(그림 2).

분석 3은 "(285)에서의 값" 수식을 사용하여 285nm에서의 흡광도 (Abs)를 찾는 데 사용되었습니다.

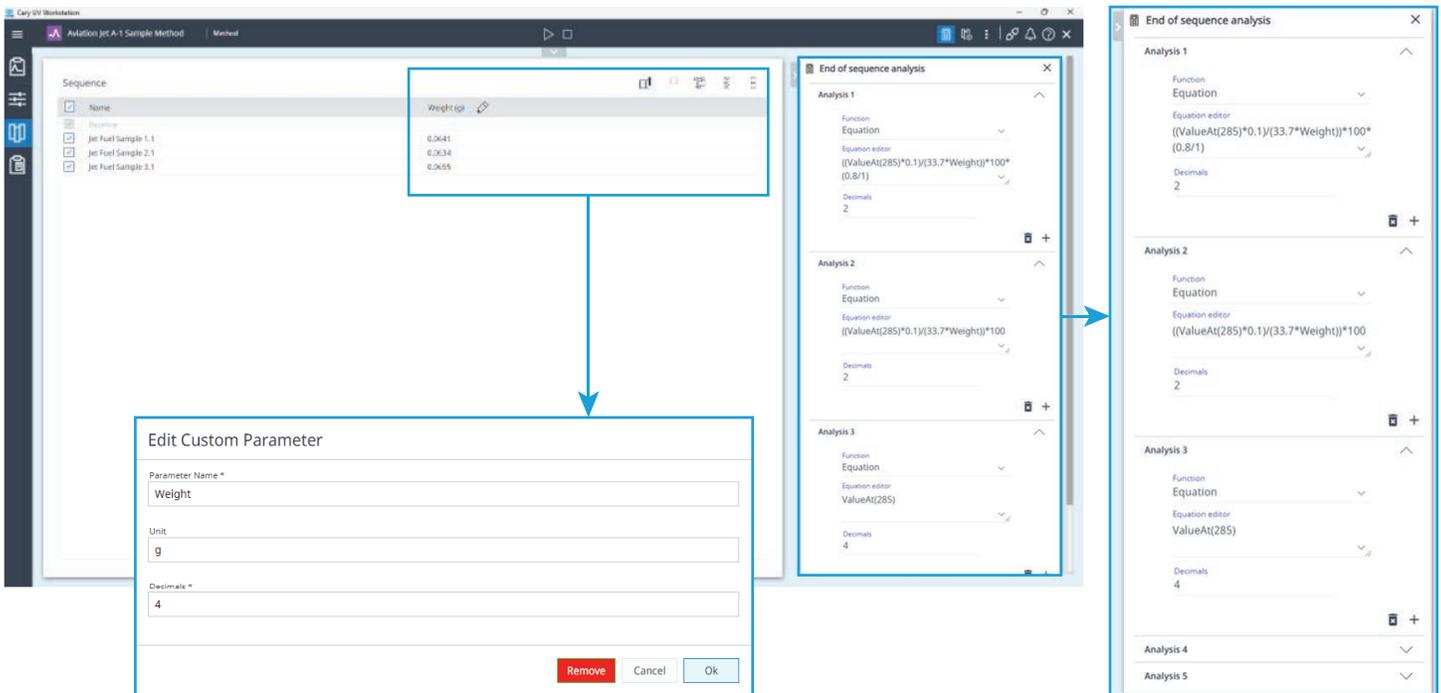


그림 2. Agilent Cary UV Workstation v1.6의 시퀀스 설정 페이지에서 사용자가 테스트 및 계산 방법을 생성할 수 있습니다. 시료 가중치가 사용자 정의 파라미터(하단)로 추가되었고, 세 가지 계산(오른쪽)이 페이지의 시퀀스 종료 분석 섹션에 입력되었습니다.

시료 측정이 완료된 후, Cary UV Workstation v1.6에서 그림 3과 같이 지정된 파장 영역에 대한 확장 가능한 그래프를 생성했습니다. 세 가지 시퀀스 종료 분석 계산의 결과는 모두 읽기 쉬운 표 형태로 반환되었습니다. Abs의 경우 소수점 이하 자릿수는 4자리, 질량과 부피 %의 경우 소수점 이하 자릿수는 2자리로 설정되었습니다. 각 제트 연료 시료에 있는 나프탈렌 탄화수소의 부피 %는 표 2와 같이 가장 가까운 0.01%까지 보고되었습니다.

표 2. 각 제트 연료 시료에 포함된 나프탈렌의 부피 백분율을 소수점 둘째 자리까지 보고했습니다.

	시료 1	시료 2	시료 3
제트 연료 시료에 함유된 나프탈렌 부피 %	1.00	1.08	1.36

오프라인에서 계산을 수행하거나 다른 프로그램으로 데이터를 내보내지 않고도 Cary UV Workstation v1.6에서 제트 연료 시료에 있는 나프탈렌의 부피 %를 결정했습니다. 데이터 수집 파라미터와 데이터 분석법은 모두 향후 실험 설정을 간소화하기 위한 시험법으로 저장되었습니다. 나프탈렌 분석을 위한 시험법을 만들면 분석 설정을 다시 입력할 필요가 없어서 워크플로가 더 빠르고 효율적이 되고, 사용자가 분석법 설정보다는 분석에 집중할 수 있습니다.

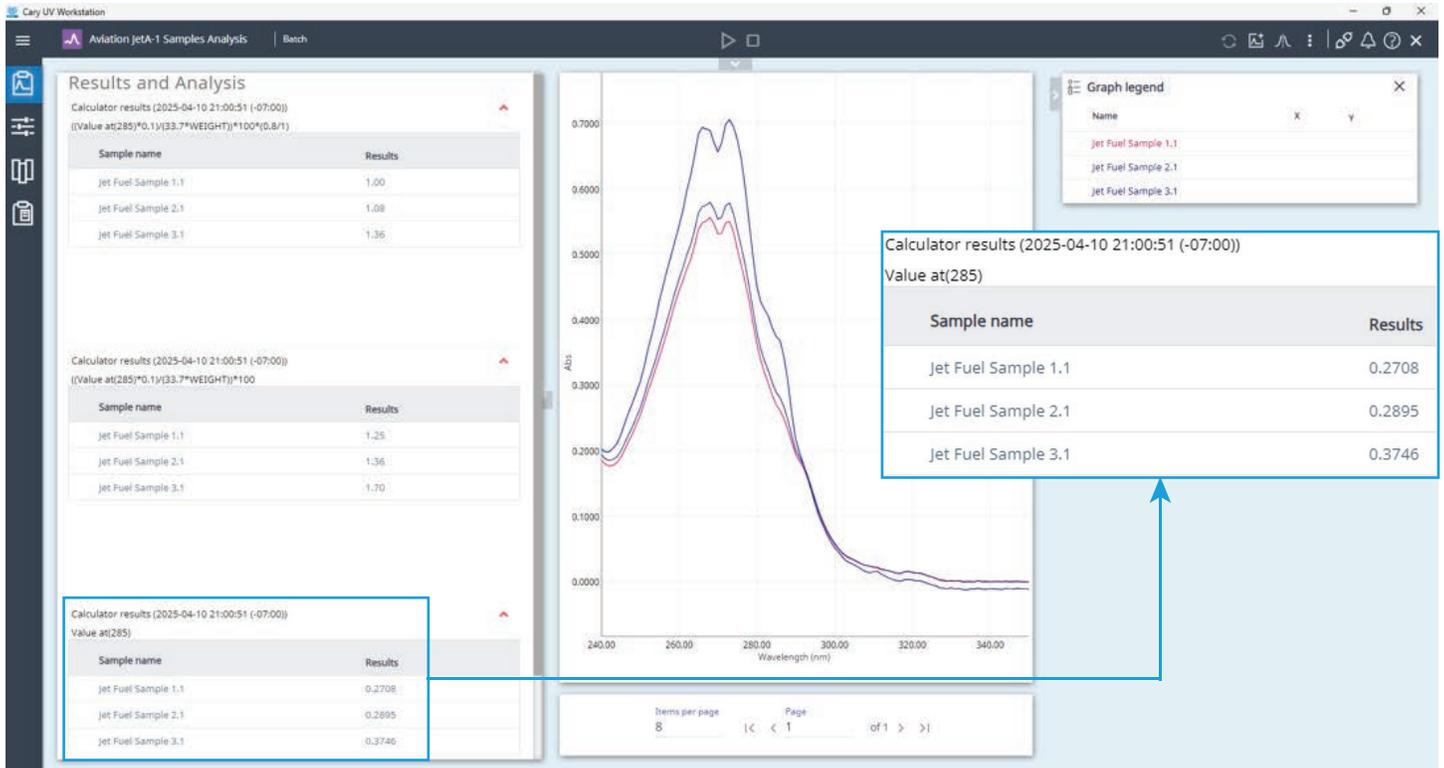


그림 3. Agilent Cary UV Workstation v1.6은 간단한 값 표 형식으로 데이터를 반환하므로 사용자는 측정 시 관련 정량 분석을 수행할 수 있습니다.

## 보고서 생성

Cary UV Workstation v1.6은 정성 및 정량 결과를 하나의 보고서로 통합합니다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 이 연구의 보고서는 값 표를 사용한 데이터 계산, 285nm 영역을 보여주는 축척 그래프, 및 기타 옵션 등의 내용을 포함하도록 맞춤화되었습니다. 보고서 내용에 대한 환경 설정도 시험법의 일부로 저장할 수 있습니다. 그런 다음 3개의 제트 연료 시료에 대한 보고서를 PDF로 생성했습니다.

## 분석법 정밀도

Cary 3500 UV-Vis 분석법의 정밀도는 반복성 및 재현성 테스트를 통해 평가했습니다.

**반복성:** 반복성을 평가하기 위해 일정한 작동 조건에서 각 시료에 대해 20회 연속 측정을 수행했습니다. 표 3에서 볼 수 있듯이, 각 측정값에 대한 표준 편차 값이 낮게 계산된 것은 흡광도 판독값의 일관성을 잘 보여줍니다. 광도 정확도를 얻기 위해서는 이러한 수준의 안정성이 중요합니다.

표 3. 각 제트 연료 시료에 대한 20회 흡광도 측정의 평균과 변동폭입니다.

	시료 1	시료 2	시료 3
285nm에서의 흡광도 평균(Abs)	0.2691	0.2933	0.3748
표준 편차(Abs)	0.0004	0.0004	0.0005

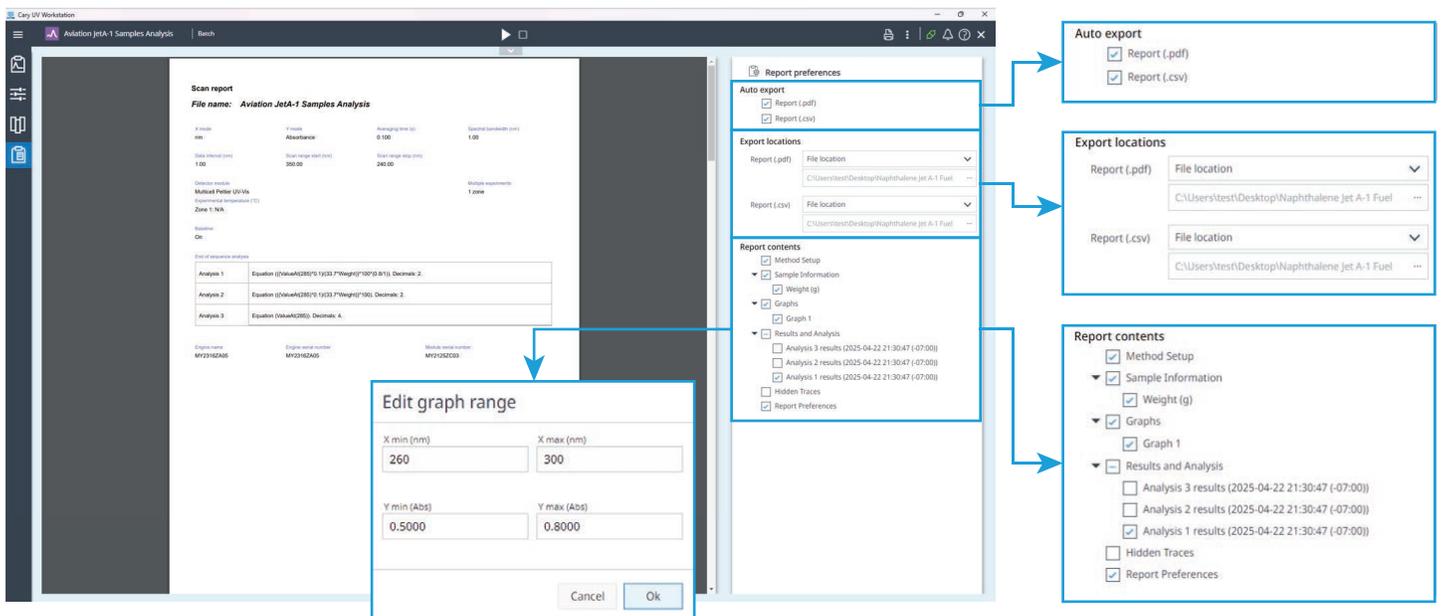


그림 4. Agilent Cary UV Workstation v1.6을 사용하면 시퀀스 수집이 끝난 후 자동으로 PDF 또는 CSV 형식의 보고서를 내보낼 수 있습니다. 사용자는 이러한 보고서에 대한 사용자 지정 내보내기 위치를 정의하고, 기본 설정에 따라 특정 요소를 선택하거나 선택 취소하여 보고서 내용을 사용자 지정하고, 그래프 축척을 조정하여 관심 영역을 강조하여 나타낼 수 있습니다.

**스캔 보고서**  
**파일 이름: 항공 JetA-1 시료 분석**

시료 ID	번호	일자 (년/월/일)	시료명 (내부/외부)
mm	중량도	0.100	1.00

내외부 (mm)	스캔 범위 (nm)	스캔 범위 (nm)
1.00	350.00	240.00

사용자 이름: Multifocal Puller UV-VIS  
 운영 모드: 구제 1.00A

대량 분석

분석 1	수식((285에서 값 * 1.1)(33.7*무게)/(100*부피)) * 1000 * 2
분석 2	수식((285에서 값 * 1.1)(33.7*무게)/(100 * 100)) * 1000 * 2
분석 3	수식((285에서 값 * 2) * 1000 * 4

연구 번호: MY23162405    실험 일자: MY23162405    대량 일자: MY23162405

---

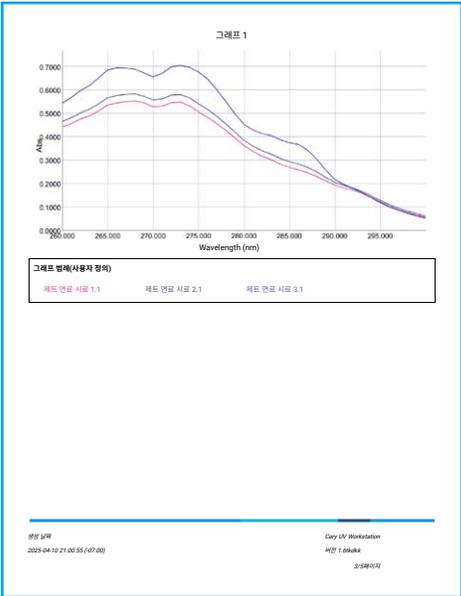
생성 일자: 2025-04-10 21:00:55 (07:00)    Cary UV Workstation    버전 1.6    1/5페이지

**시료 정보**

제트 연료 시료 1.1	무게(g)	0.0641
제트 연료 시료 2.1	무게(g)	0.0634
제트 연료 시료 3.1	무게(g)	0.0655

---

생성 일자: 2025-04-10 21:00:55 (07:00)    Cary UV Workstation    버전 1.6    2/5페이지



**분석 1 결과(2025-04-22 21:30:47 (07:00))**  
 ((285)에서의 값 \* 0.1)(33.7\*무게)/(100 (0.8\*1))

시료 이름	결과
제트 연료 시료 1.1	1.00
제트 연료 시료 2.1	1.00
제트 연료 시료 3.1	1.36

---

생성 일자: 2025-04-10 21:00:55 (07:00)    Cary UV Workstation    버전 1.6    4/5페이지

**보고서 기본 설정**

내보내기 위치  
 보고서(pdf) - C:\Users\test\Desktop\Naphthalene Jet A-1 Fuel  
 보고서(csv) - C:\Users\test\Desktop\Naphthalene Jet A-1 Fuel

보고서 내용

- 분석법 설정
- 시료 정보
  - 무게(g)
- 그래프
  - 그래프 1
- 결과 및 분석
  - 분석 3 결과 (2025-04-22 21:30:47 (07:00))
  - 분석 2 결과 (2025-04-22 21:30:47 (07:00))
  - 분석 1 결과 (2025-04-22 21:30:47 (07:00))
- 숨겨진 트레이스
- 보고서 기본 설정

---

생성 일자: 2025-04-10 21:00:55 (07:00)    Cary UV Workstation    버전 1.6    5/5페이지

그림 5. 3개의 제트 연료 시료에 대한 스캔 보고서가 생성되었습니다.

허용 범위는 일관된 조건에서 20회 실시한 각 제트 연료 시료에서 측정된 나프탈렌의 평균 부피 %를 기준으로 계산되었습니다.<sup>3</sup> 표 4에 나타난 바와 같이 시료 1의 경우 허용값은  $\pm 0.18\%$ , 시료 2의 경우  $\pm 0.19\%$ , 시료 3의 경우  $\pm 0.21\%$ 로 계산되었습니다. 또한 전체 실행에 걸쳐 각 시료에 대한 부피 % 나프탈렌의 변화(표준 편차)를 계산하여 개별 측정값이 평균에서 얼마나 벗어났는지 평가했습니다.

Cary 3500 Multicell UV-Vis는 시료 1의 경우  $\pm 1.42 \times 10^{-3}\%$ , 시료 2의 경우  $\pm 1.61 \times 10^{-3}\%$ , 시료 3의 경우  $\pm 1.96 \times 10^{-3}\%$ 의 계산된 변동 값에서 알 수 있듯이 일관되고 반복 가능한 측정을 제공했습니다. 표 4에서 볼 수 있듯이 각 시료의 부피 % 나프탈렌의 관찰된 변화는 허용 가능한 반복성 범위 내에 있었으며, 이는 기기가 정밀한 측정을 수행할 수 있음을 확인시켜 주는 결과입니다.

표 4. 3개의 제트 연료 시료 측정에 대한 반복성 테스트 결과, n = 20.

	시료 1	시료 2	시료 3
평균(나프탈렌의 부피 %)	1.00	1.10	1.36
반복성 기준(%)	$\pm 0.18$	$\pm 0.19$	$\pm 0.21$
표준 편차(나프탈렌 부피 %)	$1.42 \times 10^{-3}$	$1.61 \times 10^{-3}$	$1.96 \times 10^{-3}$

**재현성:** 기기 간 흡광도 측정의 정밀도와 일관성을 확립하기 위해 동일한 세 가지 테스트 시료를 사용하여 두 번째 Agilent Cary 3500에서 20회 연속 측정을 수행했습니다. 별도의 독립적인 시료 분석에서 표준 편차가 작게 나타나 분석법과 기기의 재현성이 뛰어나다는 사실이 입증되었습니다(표 5).

표 5. 두 번째 작업자가 20회에 걸쳐 각 제트 연료 시료에 대해 수행한 흡광도 측정의 평균과 변동폭입니다.

	시료 1	시료 2	시료 3
285nm에서의 흡광도 평균(Abs)	0.2715	0.2916	0.3755
표준 편차(Abs)	0.0002	0.0003	0.0002

재현성에 대한 허용 범위는 작업자 간 측정값의 변동을 기반으로 계산되었습니다.<sup>3</sup> 나프탈렌의 평균 부피 %를 두 번째 Cary 3500 Multicell UV-Vis를 사용하여 계산했으며, 시료에 대한 허용값은 시료 1의 경우  $\pm 0.24\%$ , 시료 2의 경우  $\pm 0.26\%$ , 시료 3의 경우  $\pm 0.29\%$ 로 계산되었습니다(표 6). 여러 작업자가 얻은 결과의 차이를 비교함으로써 기기 간 측정 정밀도를 확립할 수 있었습니다.

표 6. 두 번째 작업자 n = 20으로 3개의 제트 연료 시료에 대해 수행한 측정의 재현성 테스트 결과입니다.

	시료 1	시료 2	시료 3
평균(나프탈렌의 부피 %)	1.01	1.09	1.36
재현성 기준(%)	$\pm 0.24$	$\pm 0.26$	$\pm 0.29$
표준 편차(나프탈렌 부피 %)	$7.73 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-3}$	$8.10 \times 10^{-4}$

측정에 대한 변동(표준 편차) 값은 시료 1의 경우  $\pm 7.73 \times 10^{-4}\%$ , 시료 2의 경우  $\pm 1.18 \times 10^{-3}\%$ , 시료 3의 경우  $\pm 8.10 \times 10^{-4}\%$ 로 나타나 허용되는 재현성 범위 내에 충분히 들어왔습니다.

표 7의 요약에서 볼 수 있듯이, 두 기기 간의 흡광도 값과 시료의 계산된 나프탈렌 부피 %는 상당히 유사하여 분석법의 일관성을 보여주었습니다. 또한, 기기 간 표준 편차의 차이는 작업자 간 변동의 정도가 낮음을 나타냅니다. 계산된 표준 편차는 여러 번의 실행에 걸쳐 기기가 반복 가능하고 재현 가능하며 신뢰할 수 있는 흡광도 측정을 제공할 수 있음을 보여주었습니다.

표 7. 두 가지 기기를 사용하여 동일한 3개의 제트 연료 시료에 대해 측정된 나프탈렌 흡광도 변화와 부피 %를 비교한 내용입니다.

		기기 1	기기 2
285nm에서 Abs	시료 1	$0.2691 \pm 0.0004$ Abs	$0.2715 \pm 0.0002$ Abs
	시료 2	$0.2933 \pm 0.0004$ Abs	$0.2916 \pm 0.0003$ Abs
	시료 3	$0.3748 \pm 0.0005$ Abs	$0.3755 \pm 0.0002$ Abs
나프탈렌, 부피 %	시료 1	$1.00 \pm 1.42 \times 10^{-3}\%$	$1.01 \pm 7.73 \times 10^{-4}\%$
	시료 2	$1.10 \pm 1.61 \times 10^{-3}\%$	$1.09 \pm 1.18 \times 10^{-3}\%$
	시료 3	$1.36 \pm 1.96 \times 10^{-3}\%$	$1.36 \pm 8.10 \times 10^{-4}\%$

## 결론

Agilent Cary 3500 Multicell UV-Vis 분광기와 Agilent Cary UV Workstation v1.6 소프트웨어를 사용하면 제트 터빈 연료에 존재하는 나프탈렌 탄화수소의 총 농도를 효율적이고 간단하게 분석할 수 있습니다. 정확하고 반복 가능한 흡광도 측정을 통해 Cary 3500의 신뢰성이 입증되었습니다.

저장된 분석법을 검색하고 소프트웨어에서 자동화된 순차적 계산을 사용하면 데이터 수집 및 분석이 간소화되고 수동 입력, 오프라인 계산 또는 외부 소프트웨어가 필요 없어집니다. 또한, 소프트웨어 내의 통합 보고 기능을 통해 결과를 효율적으로 통합하고 정보를 쉽게 검토할 수 있습니다.

Cary UV Workstation v1.6이 탑재된 Cary 3500 Multicell UV-Vis는 연료 품질을 평가하기 위한 빠르고 안정적인 견고하고 사용하기 쉬운 방법을 제공합니다.

## 참고 자료

1. Mckee, R. H.; Adenuga, M. D.; Carrillo, J.-C. Characterization of the Toxicological Hazards of Hydrocarbon Solvents. *Critical Reviews in Toxicology* **2015**, *45*(4), 273–365. doi:10.3109/10408444.2015.1016216
2. Batterman, S.; Chin, J.-Y.; Jia, C.; Godwin, C.; Parker, E.; Robins, T.; Max, P.; Lewis, T. Sources, Concentrations and Risks of Naphthalene in Indoor and Outdoor Air. *Indoor Air* **2012**, *22*(4), 266–278. doi:10.1111/j.1600-0668.2011.00760.x
3. ASTM International. ASTM D1840-24 (2024) Standard Test Method for Naphthalene Hydrocarbons in Aviation Turbine Fuels by Ultraviolet Spectrophotometry. ASTM Volume 05.01: Petroleum Products, Liquid Fuels, and Lubricants (I): C1234–D4176. doi:10.1520/D1840-24
4. Yeh, C.-K.; Tzu, F.-M.; Chen, P.-Y.; Shen, H.-C.; Yuan, C.-S.; Lin, C.; Pu, H.-P.; Ngo, H.-H.; Bui, X.-T. Emission Characteristics of Naphthalene from Ship Exhausts Under Global Sulfur Cap. *Science of The Total Environment* **2023**, *902*. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.166172
5. BP Australia. (2024). Jet A-1 Safety Data Sheet. 7. [https://airbpmsds.bp.com/ussds/amersdsf.nsf/AllFiles\\_AIR\\_BP\\_FUELS/B53D844EC4BB273780258ACF00588ADF/\\$File/3075780.pdf](https://airbpmsds.bp.com/ussds/amersdsf.nsf/AllFiles_AIR_BP_FUELS/B53D844EC4BB273780258ACF00588ADF/$File/3075780.pdf)에서 발췌

[www.agilent.com](http://www.agilent.com)

DE-005997

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2025  
2025년 4월 30일 한국에서 인쇄  
5994-8266KO

한국에질런트테크놀로지스(주)  
대한민국 서울특별시 서초구 강남대로 369,  
DF타워 9층, 06621  
전화: 82-80-004-5090(고객지원센터)  
팩스: 82-2-3452-2451  
이메일: [korea-inquiry\\_lsca@agilent.com](mailto:korea-inquiry_lsca@agilent.com)