

## 대용량 광학 부품 테스트

고체 자동 시료 주입기가 탑재된 Agilent Cary 7000 범용 측정 분광 광도계(UMS) 사용



### 저자

Travis Burt

Farinaz Haq

Agilent Technologies, Inc.

### 서론

고품질 다층 광학 코팅 소자 생산을 위해서는 박막 소재의 광학 성능을 정확하게 측정할 수 있는 신뢰성 높은 분석법이 필요합니다. 여기에는 전통적으로 2가지의 분리된 측정이 사용되는데 바로 일반적으로 분광기 시료 챔버 내에서 전도되는 정상 입사 투과(T)와 분리된 반사 액세서리 사용이 필요한 정상 반사 근접(R)입니다. 이 접근법으로는 R과 T 측정 간 기기 구성의 변화 과정에서 시료 위치가 재조정되기 때문에 2가지 측정이 시료의 정확히 동일한 패치로부터 측정되도록 하는 것이 어렵습니다. 그러나 Cary 7000 UMS는 시료 위치 재조정 없이 시료 표면의 정확히 동일한 지점에서 다각도의 투과 측정 및 절대 반사 측정을 수행함으로써 이 문제를 극복합니다. 이 분석법을 통해 다양한 %R 및 %T 측정 기법을 도입했을 때 입사각(AOI)에서의 작은 변화로 인해 종종 발생하는 시스템 오류를 줄일 수 있습니다.

## 광학 박막 코팅의 QA/QC

광학 박막 코팅의 효과적인 품질 보증 및 품질 관리(QA/QC)는 코팅 절차의 과정 및 완료 지점에서 이루어지는 정확한 분광 측정에 달려 있습니다. 현재의 QA/QC 테스트는 보통 테스트 목적으로 코팅 과정에 도입되는 대표적인 증거 조각으로 제한됩니다. 증거 조각 테스트는 대용량 다중 시료 테스트에서 분석당 비용이 매우 높기 때문에 다수의 완제품에 대한 포괄적 테스트 형태로 이루어지는 경우가 많습니다.

이 연구에서는 애질런트 교체 자동 시료 주입기가 탑재된 Agilent Cary 7000 UMS 사용 시, 코팅되지 않은 용융실리카 다중 시료의 자동화된 무인 다각도 R/T 분석에서 생산성이 향상되고 분석당 비용이 감소됨을 시연했습니다.

## 실험

### 기기

- Agilent Cary 7000 범용 측정 분광 광도계
- 애질런트 교체 자동 시료 주입기

Cary 7000 UMS는 파장 범위 250~2500nm에서 다각도 광도 분광(MPS) 응용을 수행하기 위해 설계된 고성능 UV-VIS-NIR 분광 광도계의 최신 제품입니다. MPS는 정상 근접에서부터 편향 입사에 이르는 다양한 각도에서 절대 반사 및/또는 시료 투과율을 측정합니다(1). UMS는 시료 표면의 동일 패치에서 다양한 각도의 투과 및 절대 반사 측정을 수행합니다. 시료에 입사되는 직선적 편광 빔은 검출기 어셈블리를 시료 통과 축 중심으로 회전시키고 입사면에 수직으로 반사시킴으로써 투과를 측정하는 데 사용될 수 있습니다. 또한 UMS는 비경면 표면의 확산 반사 측정 및 반투명 물질의 확산 투과 측정을 위한 추가 기능을 제공하여 번각 분광 광도계의 기능을 합니다. 자동 Polarizer의 추가는 S, P, 또는 사용자 정의 편광각의 정확한 측정을 가능케 합니다.

현재 Cary 4000/5000/6000i UV-Vis-NIR 분광 광도계를 사용 중인 사용자는 업그레이드 옵션으로 Cary 7000 UMS의 액세서리 구성품인 Cary UMA(범용 측정 액세서리)를 사용할 수 있습니다.

교체 자동 시료 주입기는 별개의 제어 가능 시료 홀더로, Cary 7000 UMS와 UMA를 위해 특별히 설계되었습니다. 이 홀더는 그림 1a에서 보이는 바와 같이 Cary 7000 UMS 측정 챔버 내에 장착할 수 있습니다. 교체 자동 시료 주입기는 UMS가 제공하는 입사각(AOI) 제어( $\theta$ )에 더해 입사 빔 축( $I$ )에 대한 방사( $z$ ) 및 회전 방향( $\Phi$ )의 2가지 추가 각도를 제공합니다. 다양한 시료 홀더를 통해 여러 개별 시료(최대 직경 32 x 1인치까지), 그림 1b 또는 단일 대형 직경 시료(직경 8인치)를 장착할 수 있습니다.

연구에서는 정상 근접 입사 너머의 각도에서 MPS 데이터를 포함시키는 것이 복잡한 박막에 대한 더 우수한 역공학을 제공함이 드러났습니다(2). 또한 다각도 광도 분광 데이터는 얇은 유전체 막 총 소실 내의 진동 정보를 제공하였습니다(3). MPS 측정을 적용한 Cary 7000 UMS의 측정은 코팅 생산 과정에 역공학 전략을 최적으로 적용하고 이를 검증하는 데 사용되어왔습니다(4).



그림 1a. 교체 자동 시료 주입기가 탑재된 Cary 7000 UMS 측정 챔버의 개요도.



그림 1b. 최대 32 x 1인치 직경의 시료를 장착할 수 있는 다중 시료 홀더.

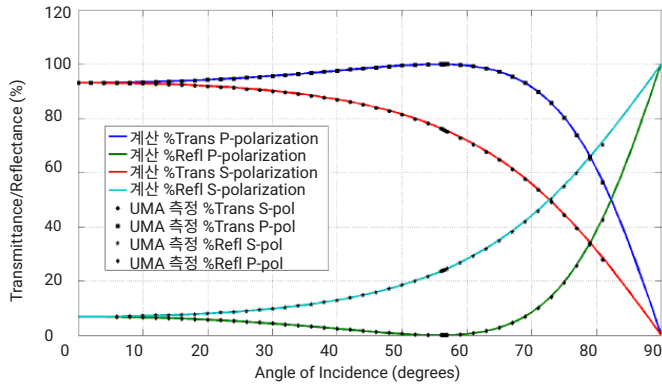


그림 2. 입사각 함수로서의 1mm 두께 실리카 시료 플레이트의 절대 반사 및 투과. 실선은 Fresnel 공식으로 계산하였으며, 기호와 같은 Cary 7000 UMS를 사용해 측정되었습니다. 측정 파장: 500nm, 용융실리카의 물리적 크기가 AOI 범위를 0~82°로 제한함.

## 결과 및 토의

### 단일 시료 분석

Cary UMS를 사용해 1mm 두께 용융실리카 시료의 동일 패치에서 절대 정반사율과 직접 투과 모두에 대한 순차적인 다중 각도를 시료 위치 재조정 없이 측정하였습니다(그림 2). 1mm 두께 용융실리카 플레이트에서 투과와 반사를 간단하게 측정하는 이 방법은 S 및 P 편광 모두 투과 시 0~82° 범위의 입사각에서, 반사 시 6~82°의 범위에서 수행되었습니다. 실리카 시료의 물리적 크기는 입사 빔이 시료 표면에서 벗어나는 현상 없이 입사각의 측정 가능 범위를 <82°로 제한했습니다. 표시된 측정 결과에는 전면 및 내부 후면 반사 및 투과 모두의 기여가 포함되어 있습니다. 개별 지점은 측정된 값을 나타내며, 아래의 실선은 Fresnel 공식으로 예측한 총 반사율과 총 투과율을 나타냅니다.

S 및 p 편광 빛에 대한 반사(R) 계수와 투과(T) 계수

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2 \quad R_p = \left| \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right|^2$$

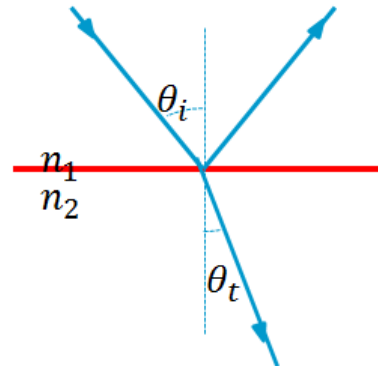
$$T_s = 1 - R_s \quad T_p = 1 - R_p$$

$n_1$  = 입사 매질의 굴절률 지표

$n_2$  = 시료의 굴절률 지표

$\theta_i$  = 입사각

$\theta_t$  = 투과각



여기서  $n_1$ 이 1.00(공기)이고,  $n_2$ 가 용융실리카의 굴절률 지표, Sellmeier 공식으로 계산:

$$n_2(\lambda) = 1 + \sum_i \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i}$$

$\lambda$  = 파장

$B_i$  및  $C_i$  = Sellmeier 계수

Sellmeier 계수는 일반적으로 투명 재료의 광학 데이터 시트와 함께 제공됩니다.

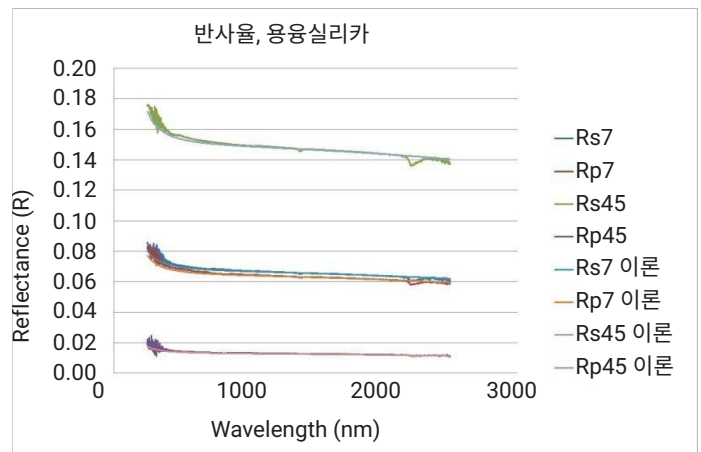


그림 3a. 다중 시료 홀더의 시료 지점 #1에서 용융실리카의 반사율. 이론적 선은 Fresnel 공식으로 계산. 측정된 결과는 고체 자동 시료 주입기가 탑재된 Cary 7000 UMS를 사용해 측정.

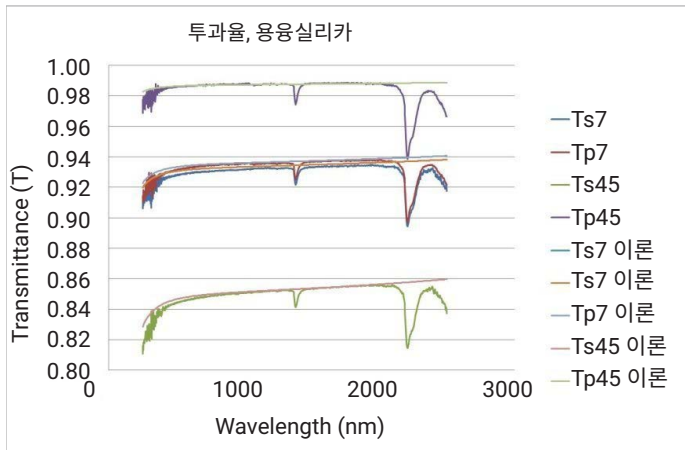


그림 3b. 다중 시료 홀더의 시료 지점 #1에서 용융실리카의 투과율. 이론적 선은 Fresnel 공식으로 계산. 측정된 결과는 고체 자동 시료 주입기가 탑재된 Cary 7000 UMS를 사용해 측정.

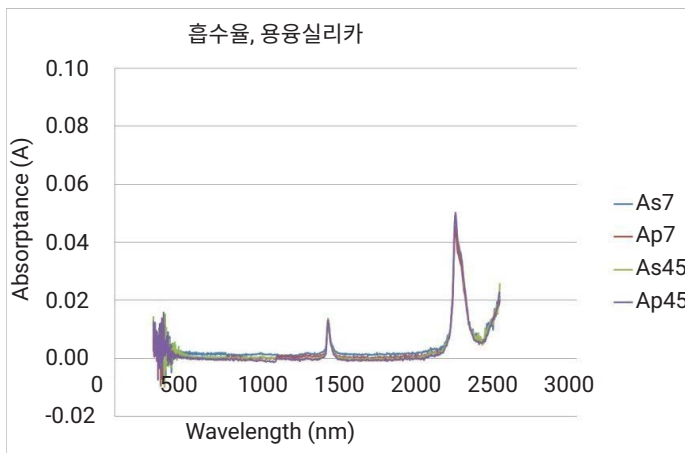


그림 3c. 다중 시료 홀더의 시료 지점 #1에서의 흡수율(A).  $A = 1 - R - T$ 를 사용한 T와 R 데이터에서 계산한 흡수율 데이터. ~1400nm에서의 물 흡수 대역과 별개로, 흡수율 데이터 500~2000nm은 대략 0.00으로 예상.

### 다중 시료 분석

파장 범위 250~2500nm에서 고체 자동 시료 주입기를 사용해 MPS 측정을 단일 용융실리카 조각에서 11개의 코팅되지 않은 용융실리카 개별 조각(38mm x 42.5mm x 1mm)으로 확장하였습니다. 각 시료의 R과 T를  $AOI \pm 7^\circ$  및  $AOI \pm 45^\circ$ , S 및 P 편광 조건에서 측정하였습니다. 양(+)의 수집각과 음(-)의 수집각은 자동으로 데이터 수집 후에 평균화되었으며, 표시된 최종 스펙트럼은 Ts7, Rs7, Tp7, Rp7, Ts45, Rs45, Tp45, Rp45였습니다. 시료당 16개 스펙트럼을 수집하는 데 걸린 시간은 약 40분이었으며, 11개 시료를 수집하는 데 걸린 총 시간은 8시간 미만이었습니다. 데이터는 단일 무인 야간 작업을 통해 사용자 개입 없이 수집되었습니다. 흡수율은

$A = 1 - R - T$ 로 정의되며, 이는 각 각도와 편광에 대해 계산되었습니다.

그림 3a, b, c에 나타난 시료 #1의 전체 스펙트럼 범위 결과는 넓은 범위의 신호 강도, 각도, 편광 상태, 파장에 대해 이론과 근접한 모습을 보여줍니다. 중심 파장 1500nm에 대해 Fresnel 이론과의 차이로 계산된 잔존 오류는 표 1에 나와 있습니다.

이 측정의 정확도에 영향을 미치는 요인으로는 시스템 대칭도에서의 잔존 불확실성, 시료 장착, 기기의 장기적 드리프트 현상 등이 있을 수 있습니다.

- 양(+)의 입사각과 음(-)의 입사각에서 비롯된 스펙트럼 데이터는 평균화되어 측정의 광학적 비대칭성을 보정하는 데 기여했습니다.
- 시료는 정밀 가공된 표면에 대해 전면의 가장자리에 위치시켰습니다. 그 후 시료를 2개 플레이트 사이에 고정해 재현성 있고, 입사각  $\theta_i$ 에 대해 수직이 되도록 위치를 잡았습니다.
- 완전히 자동화된 데이터 수집 과정은 무인 작업으로 진행되어, 측정 챔버를 열 필요가 없었습니다. 초기 베이스라인은 11개 시료 분석 전에 수집되었습니다. 드리프트 보정은 적용되지 않았습니다.

수집된 데이터의 품질 및 이론적 결과와 측정치 간의 근접성은 완전 자동화 무인 데이터 수집 과정에서 시스템이 재현성과 안정성을 가지고 있고, 또한 Cary 7000 UMS의 대칭성이 최적의 상태에 가까움을 보여줍니다.

표 1. 다중 시료 홀더 내 11개 시료 각각의 8가지 수집 조건에 대해 계산된 잔존 오류.

잔차	시료 번호											평균치	StDev.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Ts7	0.01	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.05	-0.07	0.02	0.019
Rs7	-0.06	-0.05	-0.06	-0.06	-0.05	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05	-0.07	-0.05	0.06	0.005
Tp7	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.05	-0.06	-0.08	-0.10	0.04	0.030
Rp7	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.004
Ts45	-0.04	-0.06	-0.07	-0.07	-0.05	-0.07	-0.08	-0.08	-0.09	-0.10	-0.12	0.08	0.024
Rs45	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.17	-0.17	-0.17	0.16	0.004
Tp45	-0.04	-0.05	-0.06	-0.05	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	-0.09	-0.11	-0.14	0.07	0.031
Rp45	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.002
평균치	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09		
StDev.	0.049	0.048	0.048	0.050	0.048	0.047	0.044	0.048	0.047	0.049	0.056		

## 결론

고체 자동 시료 주입기가 탑재된 Agilent Cary 7000 UMS는 코팅되지 않은 용융실리카 다중 시료의 광학적 특성에 대한 무인 자동 측정 작업을 수행할 수 있었으며, 측정된 값은 이론적 결과와 근접하였습니다. 단일 무인 작업으로 진행된 11개 시료에 대한 총 수집 시간은 8시간 미만이었으며, 이는 비-MPS 방법을 사용했을 경우 수일이 걸렸던 것에 비하면 우수한 결과입니다. 7000 UMS로 인해 향상된 생산성은 산업용 광학 장치의 QA/QC 분석당 비용을 크게 감소시켜줍니다.

또한 고체 자동 시료 주입기는 광범위한 반사 및/또는 확산 시료의 표면 동일 지점에서의 절대 반사와 투과에 대해 모두 일반 MPS 측정을 가능케 하는 다양한 기능을 제공합니다. 넓은 범위의 AOI 에서 스펙트럼 데이터를 측정하는 것은 정밀 광학 장치에 적용되는 재료와 코팅 성능의 특성을 더 우수하게 규명할 수 있도록 합니다. 이 데이터는 또한 코팅 파라미터의 역공학에서 발생하는 불확실성을 줄여, 광학 코팅 설계의 검증에 도움 수 있습니다.

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

이 정보는 사전 고지 없이 변경될 수 있습니다.

© Agilent Technologies, Inc. 2020  
2020년 3월 13일, 한국에서 발행  
5991-4071KO  
DE.6946064815

한국에질런트테크놀로지스(주)  
대한민국 서울특별시 서초구 강남대로 369,  
A+ 에셋타워 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)

## 참고 문헌

1. Death, D.L.; Francis, R.J.; Bricker, C.; Burt, T.; Colley, C. *The UMA: A new tool for Multi-angle Photometric Spectroscopy*. Proceedings of the Optical Interference Coatings (OIC) OSA Topical Meeting, Canada, **2013**.
2. Tikho0nnavov, A.V.; Amotchkina, T.V.; Trubetskov, M.K.; Francis, R.J.; Janicki, V.; Sancho-Parramon, J.; Zorc, H.; Pervak, V. Optical characterization and reverse engineering based on multiangle spectroscopy. *Appl. Opt.* **2012**, *51*, 245-254.
3. Amotchkina, T.V.; Trubetskov, M.K.; Tikhonravov, A.V.; Janicki, V. J.; Sancho-Parramon; Razskazovskaya, O; Pervak, V. Oscillations in the spectral behavior of total losses (1 - T - R) in the dielectric films. *Opt. Exp.* **2012**, *20*, 16129-16144.
4. Amotchkina, T.V.; Trubetskov, M.K.; Tikhonravov, A.V. Schlichting, S., Ehlers, H., Ristau, D., Death, D., Francis, J.J. and Pervak, V. Quality control of oblique incidence optical coatings based on normal incidence measurement data. *Opt. Exp.* **2013**, *21*, 21508-21522 (2013).

## 추가 정보

이 연구에 대한 보다 자세한 정보는 다음에서 처음 출판되었습니다. *Opt. Exp.* **2013**, *21*, 18, 21508-21522.