

고정밀 온라인 적외선 센서 WG51S2

Kumiko Horikoshi^{*1}
Rena Sakai^{*1}

Tomoya Taguchi^{*1}
Kazufumi Nishida^{*1}

최근 몇 년 동안 패키징에서 전자 장치에 이르기까지 다양한 분야에 걸쳐 활용되는 기능성 소재로서 필름에 대한 수요가 증가하고 있습니다. 박막 필름에 대한 트렌드는 일부 식품 포장과 가깝고 얇은 전자제품의 필요성을 반영합니다. 제조 공정 중 온라인에서 필름 두께를 측정함으로써 필름 두께의 고급 품질 관리가 가능해집니다. 온라인 두께 게이지 WEBFREX NV의 일부인 적외선 센서 WG51S2는 필름 제조 공정에 있어 고정밀 두께 측정을 가능하게 합니다. 앞으로의 박막필름 트렌드에 맞춰 적합한 검출기를 채택함으로써 고도로 민감한 박막 측정을 향상 시키고 적외선 센서의 기능과 안정성이 강화됨에 따라 품질 관리 기능이 개선되었습니다.

소개

프라스틱 필름은 식품 포장부터 전자 부품에 이르기까지 다양한 용도로 널리 사용되어, 식품의 유통기한 및 LCD 패널의 광학 특성과 같은 성능을 개선합니다⁽¹⁾⁽²⁾. 일부 식품 포장과 같은 얇고 가벼운 전자 기기에 대한 수요가 증가함에 따라 필름은 점점 더 얇아지고 있습니다. 전기 자동차에 대한 수요 증가로 인해 이차 전지용 분리막과 같은 용도로 사용되는 고성능 필름에 대한 수요도 증가하고 있습니다. 이러한 배경 하에서 필름 제조의 고급 품질 관리는 선택이 아닌 필수입니다.

2015년 Yokogawa는 온라인 두께 게이지 WEBFREX NV를 개발했으며, 2018년에는 이 시스템에 설치할 적외선 센서 WG51S2⁽³⁾를 상용화했습니다. 이 적외선 센서는 필름 두께와 관련된 품질 특성을 정확하게 측정합니다. 이 센서는 생산 공정 중에 필름의 폭을 가로질러 움직이며 각 지점에서 측정된 두께 값을 시스템으로 전송

합니다.

이러한 방식으로, 필름의 두께 균일성을 평가하는 데 사용되는 두께 프로파일을 얻습니다. 제품의 균일성을 향상시키기 위해 두께 프로파일 데이터를 두께 제어 시스템에 피드백 할 수 있습니다.

이 적외선 센서는 방사선형 두께 센서와 동일한 레벨의 측정 정확도를 달성하고 Yokogawa의 독점 광학 시스템을 사용하여 높은 견고함을 보여줍니다. 본 논문에서는 광범위 측정 파장을 가진 적외선 검출기를 사용하여 박막 두께 측정의 안정성을 향상시키는 적외선 센서에 대해 설명합니다.

적외선 센서 WG51S2의 기본 작동

측정 원리

각 재료는 고유의 흡수 파장이 있습니다. 적외선 센서는 일반적으로 물체를 통과할 때 흡수되는 적외선의 양이 두께에 따라 달라지는 특성을 활용하여 두께를 계산합니다. 고분자 구조인 필름 두께 측정은 분자 진동과 관련된 적외선 흡수와 CH기 및 기타 분자 구조의 회전을 활용합니다.

^{*1} Engineering Department, P&W Solution Division, Yokogawa Products Headquarters

그림 1은 폴리프로필렌 필름의 적외선 흡수 스펙트럼을 보여줍니다. 적외선 센서 WG51S2는 재료의 탁도와 센서 대비 필름 위치의 변화(필름 떨림 현상)를 보상하여 정확하고 안정적인 필름 두께 측정이 가능하도록 하기 위해 기준 파장 R1과 R2의 광 강도에 따라 파장 M의 흡광도를 보정합니다.

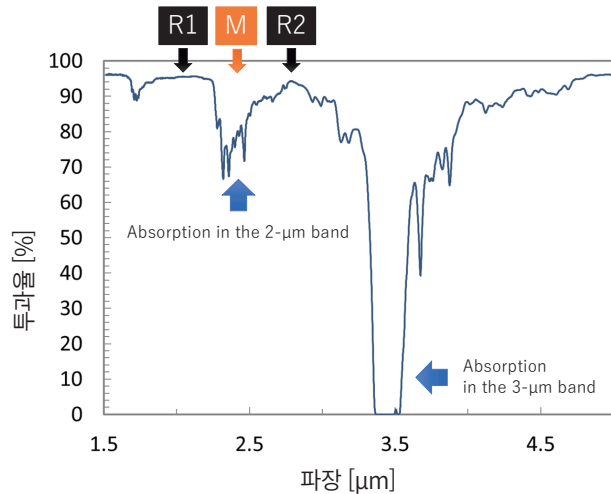


그림1 폴리프로필렌 필름의 적외선 흡수 스펙트럼

적외선 센서 WG51S2의 특징

적외선 센서 WG51S2는 미세 신호를 검출하고 정확도와 신뢰성을 크게 향상시키기 위해 디지털 로크인 증폭기 회로가 장착된 주파수 변조 광원과 이중 적분구를 사용하는 Yokogawa의 독점 광학 시스템과 결합됩니다.

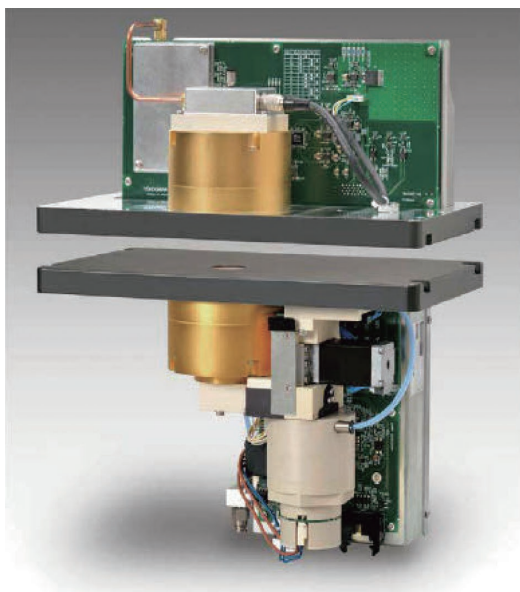


그림2 적외선 두께 센서 WG51S2의 외관

표 1 적외선 두께 센서 WG51S2의 주요 규격

항목	규격
광원	할로겐 램프
광검출기	• InGaAs 검출기 • PbSe 검출기 비고: 측정 두께 범위에 따라 선택
파장 식별 방법	주파수 변조 로크인 증폭기
두께 측정 범위	5 - 2000 μm
평균값 반복성	$\pm 0.2 \mu\text{m}$ 또는 $\pm 0.2\%$ (어느 쪽이든 더 큰 값) 최대 정확도: $\pm 0.1 \mu\text{m}^*1$
측정 광학	확산 광학
박막 간섭 제어 방법	각도 평균화 방법
교란 및 열 제거	로크인 검출
허용 가능 통과선	$\pm 10 \text{ mm}$

* 20 μm 두께 폴리프로필렌 필름의 경우

이중 적분구

그림 3은 광원측과 검출측 모두에 제공되는 이중 적분구의 개념도를 보여줍니다. 광원측 적분구에서 방출된 빛은 필름을 통과하여 검출 측의 적분구로 들어갑니다. 검출 측의 적분구가 빛을 수신하면, 수신되지 않은 각도의 빛이 검출 측에서 광원 측으로 필름을 다시 통과합니다. 필름을 통과하는 빛은 광원 측에서 포착되어 적분구의 내벽에서 반사되어 다시 필름을 통과합니다. 이러한 방식으로 빛이 필름을 여러 번 통과하면 높은 신호 대 잡음비가 생성됩니다. 또한, 광각의 비방향성 확산광은 박막 간섭 발생 조건을 무효화할 수 있습니다. 또한, 확산광은 센서 움직임과 관련된 온라인 측정에 대한 측정 오류를 크게 줄여줍니다. Yokogawa는 일본에서 이 고유의 이중 적분구 광학 시스템에 대한 특허를 취득했습니다 (특허 번호 6394825).

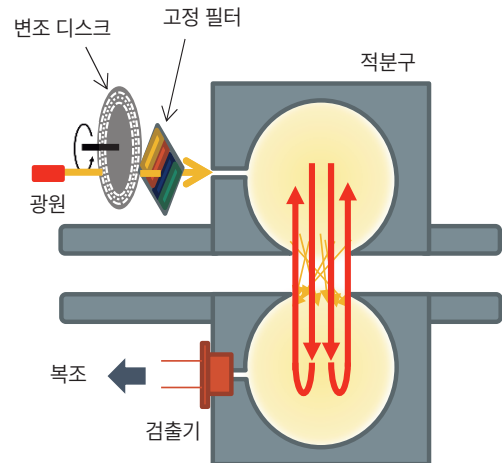


그림3 이중 적분구 구조

이중 적분구가 장착된 이 광학 시스템은 필름의 투과 위치의 영향을 상쇄하여 통과선 변화에 강합니다. 일반적으로 허용 가능한 통과선 변화는 수 밀리미터 이내이지만, 이 시스템은 $\pm 10\text{mm}$ 의 변동을 허용하므로 필름 가장자리의 흐름 변동(진동), 주름 및 비틀림의 영향을 덜 받습니다. 허용 가능 통과선 변화는 경쟁 제품보다 우수하며 적외선 센서 WG51S2의 주목할 만한 특징입니다.

디지털 로크인(Lock-in) 검출

당사의 로크인(Lock-in) 검출 기술은 원하는 주파수 대역의 신호를 추출하고 다른 모든 주파수 구성요소를 효율적으로 제거하여 높은 신호 대 잡음비를 달성하는 미세신호 검출 기술입니다.

그림 4는 주파수 변조 광원의 구조를 보여줍니다.

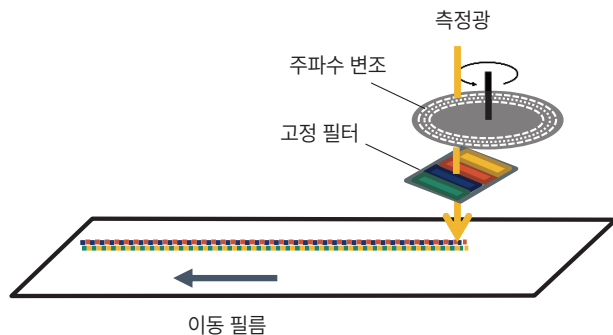


그림4 주파수 변조 광원 구조

샘플에 조사되는 측정광은 세 가지 주파수로 변조되고 세 개의 광학 필터는 원하는 파장을 추출하여 적분구에서 혼합되어 측정 필름에 조사됩니다. 검출기가 수신하는 빛은 전기 신호로 변환됩니다. 그런 다음, 디지털 로크인(Lock-in) 검출 회로는 각 주파수만 추출하고, 추출된 측정 신호는 각 주파수의 강도에 해당하는 DC 신호로 변환됩니다. 출력 DC 신호만 통과하는 저역 통과 필터는 대역 통과 필터에 비해 필터링을 통해 추출된 주파수 대역을 좁힙니다. 이를 통해 고온에서 제작되는 필름 자체의 열복사는 물론, 설치 환경의 미광, 수십 Hz 범위의 $1/f$ 잡음 및 열 잡음을 제거하여 높은 신호 대 잡음비로 두께를 측정할 수 있습니다.

또한, 이 방법은 필름에서 동일 지점 동시 측정을 가능하게 하므로, 이러한 측정은 기준점 변동의 영향을 덜 받습니다. 널리 사용되는 광학 필터 전환 방법을 사용하면 측정광이 한 번에 하나의 파장만 측정할 수 있다는 점에 유의하십시오. 따라서, 측정광과 기준광에 의한 측정 타이밍이 다르며, 통과선 변동, 미광으로 인한 신호 강도 변화 및 필름 클라우딩으로 인한 기준점 변동의 영향을 제거할 수 없어 안정적인 측정이 어렵습니다.

반면, 디지털 로크인(Lock-in) 방식을 사용하여, 단일 검출기는 각각 다른 주파수에서 절단 및 변조된 측정광과 두 개의 기준광의 강도 측정을 동시에 수행하고 디지털 로크인 검출은 각 주파수에 대한 측정 신호를 구별합니다. 이는 투과 흡수 측정을 위한 측정광뿐만 아

니라 기준점 보정을 위한 기준광의 동시 측정을 가능하게 하므로 외부 교란의 영향을 안정적으로 제거하는 측정을 가능하게 합니다. 이 주파수 초핑 및 로크인 기술을 사용하여 단일 검출기로 세 개의 측정광을 동시에 측정할 수 있는 능력은 이 방법의 또 다른 장점입니다. 각 측정 파장에 대한 검출기를 준비할 때, 검출기 간의 감도 변화로 인해 측정 오류가 발생할 수 있습니다. 하지만, 검출기가 하나뿐인 경우, 검출기 감도가 변동되더라도 모든 파장의 신호에 대한 신호 크기가 변하여, 흡광도를 보정하기 위해 기준광을 사용할 수 있습니다. 이를 통해 검출기 감도 오류를 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 보정 노력을 줄이고 고장 위험을 줄이며 비용을 절감할 수 있습니다.

문제점 및 기술적 솔루션

문제점

적외선 센서 WG51S2는 이미 환경 변화에 강한 안정적인 측정이 가능했지만, 박막에 대한 측정은 후막에 비해 안정성이 떨어졌습니다. 이는 설치된 검출기의 측정 파장 범위가 $3\mu\text{m}$ 이하로 제한되었기 때문입니다. 특히, $3\mu\text{m}$ 이상의 범위에는 필름 내 CH기의 신축 진동에 해당하는 높은 흡수율을 가진 파장이 포함되어 있습니다. 예를 들어, 그림 1의 폴리프로필렌 필름의 흡수 스펙트럼은 $3.4\mu\text{m}$ 파장에서의 흡수가 $2.3\mu\text{m}$ 파장에서의 흡수보다 두 배 이상 높다는 것을 보여줍니다. $3\mu\text{m}$ 이상의 이 영역에서 투과율 측정을 수행하면 박막에서도 흡수로 인한 큰 신호 변화가 발생함으로써 높은 신호 대 잡음비로 측정할 수 있습니다.

측정 파장 범위

필름 재료는 특정 파장에서 적외선을 흡수합니다. 따라서, 필름 두께를 측정할 때 적절한 파장을 선택하는 것이 중요합니다.

$750\text{nm} - 2500\text{nm}$ 의 범위를 근적외선 영역이라고 하며, 많은 필름 재료가 이 범위에서 고유의 흡수 대역을 가지고 있습니다. 이 대역의 투과율 변화는 상대적으로 작아 $100\mu\text{m}$ 이상의 비교적 두꺼운 필름을 안정적으로 측정하기에 적합합니다.

$2500\text{nm} - 8000\text{nm}$ 의 범위를 중간 적외선 영역이라고 하며, 유기물과 많은 폴리머가 이 영역에서 강한 적외선 흡수를 나타냅니다. 이 중간 적외선 파장 대역은 종종 투과율이 크게 변하는 흡수를 특징으로 하며, 두께 변화가 적으면 투과율이 크게 변하기 때문에 박막의 두께를 고감도로 측정할 수 있습니다.

검출기 선택

당사의 이전 적외선 센서는 인듐, 갈륨, 비소(InGaAs) 광다이오드를 검출기로 사용했습니다. 이 검출기는 측정 감도가 높고 응답 속도가 빠르기 때문에 적외선 센서로 적용하기에 적합했습니다. 하지만, 최대 파장이 $2.5\mu\text{m}$ 인 스펙트럼 감도 특성은 근적외선 영역으로 제한되었습니다. 박막의 고감도 측정을 달성하기 위해, 검출 파장 범위를 확장해야 했습니다.

비화 인듐(InAs) 또는 안티몬화 인듐(InSb) 광전지 검출기, 셀레화 납(PbSe) 또는 황화 납(PbS) 광전도체, 서모파일 검출기를 포함한 중간 적외선 측정을 위한 다양한 유형의 검출기가 있으며, 각각 고유의 특성을 가지고 있습니다. 측정 성능을 개선하기 위해, 특히 스펙트럼 감도 특성, 응답 속도, 크기 및 주위 온도와 같은 요소를 고려하

여 의도한 용도에 적합한 검출기를 선택하는 것이 중요합니다.

이 용도를 위해, 광범위 적외선 파장에 걸쳐 고감도 측정이 가능한 PbSe 검출기를 채택했습니다. PbSe 검출기는 1.0 - 5.5 μm 의 근 적외선 또는 중간 적외선 영역에서 감도를 갖습니다. 측정 파장 범위의 상한을 2.5 - 5.5 μm 로 확장하여 이 영역에서 강한 흡수력을 나타내는 재료로 만든 고감도 박막으로 측정할 수 있게 되었습니다.

이 영역에서 흡수되는 새로운 필름 재료를 측정할 수 있게 되어 측정할 수 있는 재료 유형이 넓어졌습니다. 또한, 응답 속도는 수 마이크로 초(μs) 정도로 빠르며, 이는 이 두께 센서의 특징인 주파수 식별 및 로크인(Lock-in) 검출 기술에 매우 적합합니다. 검출기 소자는 또한 6mm $\times$ 6mm의 큰 크기로 이중 적분구에서 확산된 빛을 효율적으로 수신할 수 있습니다. 이러한 이유로, PbSe 검출기는 이 두께 센서의 측정 기술에 적합하며 기존 두께 센서에 비해 향상된 기능을 나타냅니다.

PbSe 검출기

PbSe 검출기는 적외선 강도를 빠르고 고감도로 측정하기 위한 광전 장치입니다. 이 검출기가 적외선에 노출되면, 입사광 강도에 따라 전기 전도도가 변합니다. 이는 검출 회로의 검출 소자 전체에 걸쳐 바이어스 전압을 인가함으로써 측정광 강도 신호를 획득할 수 있도록 합니다.

검출기 온도 제어

적외선을 측정하기 위해 검출기를 사용할 때, 감도와 성능을 개선하기 위해 온도를 낮게 유지해야 합니다. 검출기 암전류는 온도가 상승함에 따라 증가하여 표적 신호를 정확하게 검출할 때 잡음원이 됩니다. 검출기는 저온에서 암전류가 낮기 때문에 신호 대 잡음비가 개선됩니다.

또한, 온도가 상승함에 따라 열 에너지가 증가하여 고온 환경에서 검출기에 열 잡음이 발생합니다. 열 잡음은 검출 신호에 잡음을 유발하기 때문에, 소자 온도를 낮추면 잡음이 억제되고 측정 정확도가 향상됩니다.

이러한 이유로, 적외선 검출기의 성능을 개선하고 신뢰성을 보장하기 위해 낮은 검출기 온도를 유지하는 것이 중요합니다. 개발된 적외선 센서의 검출기는 검출기 온도를 0.1° C 이하의 정확도로 일정한 0° C로 유지하기 위해 펌터 냉각을 사용합니다.

측정 두께 범위의 안정화

그림 5는 폭 2000mm, 두께 약 25 μm 의 폴리에틸렌 필름에 대한 견본 측정 결과를 보여줍니다. 이 프로파일은 WEBFLEX NV 시스템에 설치된 적외선 센서로 측정했으며 원시 데이터는 평균화하지 않고 10회 중첩되게(overlay)했습니다. 세로축은 구획당 0.2 μm 의 척도로 표시됩니다.

프로파일은 InGaAs 검출기가 장착된 센서를 사용하여 얻은 측정 결과에 비해 더 안정적이고 덜 가변적이었습니다.

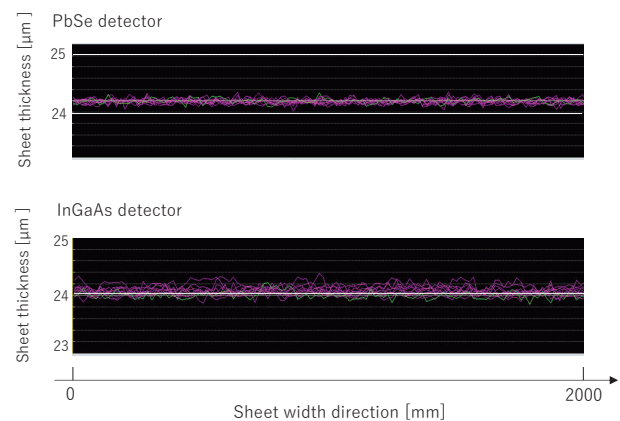


그림5 폴리에틸렌 박판에 대한 측정 결과
(샘플 테스트)

결론

박막화 추세에 대응하여 박막을 안정적이고 정확하게 측정할 수 있는 새로운 검출기를 적외선 센서 WG51S2에 통합했습니다. 이러한 통합으로 인해 두께 측정 범위가 확장되었습니다. 또한, 측정할 수 있는 재료의 종류도 증가했습니다. 그 결과, 제약 조건을 극복하여 동시 측정 및 높은 안정성과 같은 기존 기능을 활용함과 동시에 광범위한 용도로 센서를 사용할 수 있게 되었습니다.

향후, 개발된 센서를 국제 표준을 준수하는 WEBFLEX NV용 QC1F16 프레임에 설치할 계획입니다. 또한, 이 프레임에 도입된 디지털화 기술을 통해 적외선 센서의 상태를 실시간으로 모니터링하여 유지보수를 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대됩니다.

또한 동시에 측정할 수 있는 파장의 수를 늘려 적용 범위를 더욱 확장하는 방안도 고려하고 있습니다.

참고문헌

- (1) Shoujiang Chen, Haiou Wang, et al., "Prediction of plastic film thickness based on gas permeability and validation with 'Kyoho' grapes for optimal modified atmosphere packaging," Packing Technology and Science, Vol. 31, No. 2, 2018, pp. 491-497
- (2) Dominik V. Horváth, Ruiyuan Tian, et al., "Quantifying the Effect of Separator Thickness on Rate Performance in Lithium-Ion Batteries," Journal of The Electrochemical Society, Vol. 169, No. 3, 2022, 169 030503
- (3) Y. Ichizawa, K. Setsuda, et al., "WG51S2 Infrared Sensor," Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 62, No. 1, 2019, pp. 27-32

* WEBFREX is a registered trademark of Yokogawa Electric Corporation. *

All other company names, organization names, product names, service names and logos that appear in this paper are either trademarks or registered trademarks of Yokogawa Electric Corporation or their respective holders