

제지 공정에서 색상 관리 개선을 위한 고속, 고정밀 컬러 센서

히로코시 쿠미코 (Kumiko Horikoshi)*1
니시다 카즈후미 (Kazufumi Nishida)*1

마키 류우타로 (Ryuutarou Maki)*1

소매업의 확장에 힘입어 아시아의 판지(paperboard)시장은 성장하고 있으며, 이에 따라 종이 색상 관리에 대한 수요가 증가하고 있습니다. 이러한 필요를 충족하기 위해 제지 공정에서 종이 색상의 엄격한 품질 관리를 보장하기 위한 종이 색도(chromaticity)의 온라인 측정이 사용됩니다. Yokogawa는 B/M9000VP 종이 품질 관리 시스템용 LED 컬러 센서의 기능을 향상시켰습니다. 새로운 고감도 분광계는 고감도, 고속 측정이 가능하며, 구성 부품에 대한 방습 코팅으로 내습성(moisture resistance)이 개선되었습니다. LED 컬러 센서의 향상된 기능 및 견고성으로 B/M9000VP는 제지 공정에서 품질 관리를 개선하였습니다.

※ LED 컬러 센서 : 일본 전용 판매

도입

판지(paperboard)시장은 중국 및 기타 아시아 국가에서 계속 성장할 것으로 예상되며, 이에 따라 종이 색상 제어에 대한 수요가 증가하고 있습니다. 예를 들면, 판지는 재활용이 가능하고 지속 가능한 포장재로 식품 산업에서 점점 더 많이 사용되고 있지만, 포장 외관이 매출에 상당히 영향을 미치기 때문에 높은 수준의 색상 품질을 충족해야 합니다.

Yokogawa의 B/M9000VP 종이 품질 관리 시스템에 장착된 LED 컬러 센서는 제지 공정 중 종이 색상과 관련된 품질 특성을 온라인으로 측정할 수 있습니다. LED 컬러 센서는 종이 웹(paper web)의 표면 전체를 가로질러 이동하면서, 여러 측정 지점에서 색상 정보를 얻고, 데이터를 시스템에 전송하며, 색도 추세를 출력합니다. 그 결과로, B/M9000VP는 색의 균일성을 평가합니다. 필요한 경우, 이 시스템은 일관적인 색 품질을 보장하기 위해 색상 관리 부서(coloring control unit)에도 피드백을 제공합니다.

용해된 펄프는 고온에서 건조되기 때문에 제지 공정은 뜨겁고 습한 환경을 겪게 되며, 이는 컬러 센서에 사용되는 일부 광학 부품에 영향을 미칩니다. 이로 인한 표시 변경 및 그 밖의 문제를 극복하기 위해 건조한 공기로 LED 컬러 센서 내부를 퍼징(purging)하거나 가열하는 등 습도 대책이 취해집니다.

그러나 유지 보수 및 검사 중에는 유틸리티가 꺼져 있기 때문에 광학 부품의 내습성을 개선할 필요가 있습니다.

이러한 문제를 해결하고 제지 공정에서 색 관리를 개선하기 위해, 우리는 고감도의 고속 LED 컬러 센서를 새롭게 개발했습니다. 우리는 고감도, 고속 측정 및 출력 색상 프로파일을 수행할 수 있는 고감도 분광계를 사용합니다. 구성 부품에 대한 특수 방습 코팅으로 내습성이 개선되었고, 제지 공정에서 색상 측정에 필요한 기능 및 안정성이 향상되었습니다. 표 1은 컬러 센서 헤드의 주요 사양을 표시하며, 그림 1에서는 제품 사진을 보여줍니다.

표 1 주요 사양

조사 (Irradiation) / 검출 (detection) 조건	45° a: 0° (환형 조사)
측정 및 표시 가능 범위	파장: 400~780 nm 반사율: 0~130%
측정 항목	CIE L*a*b*, Hunter Lab, CIE Yxy 및 CIE XYZ 색 공간 (color space)의 각 치수 값, ISO 백색도 (brightness), CIE 백색도, 형광 증백 효과 (fluorescence whitening effect)
광원	고광도 백색 LED (High-brightness white-LED) UV-LED (형광 증백 효과 측정용)
스펙트럼 측정 주기	6.3 ms

*1 Yokogawa 제품 본부 산하 센싱 센터 개발 사업부
P&W사업부



그림1 새로운 LED 컬러 센서

제지 공정 중 컬러 센서의 작동

새로운 온라인 LED 컬러 센서는 뛰어난 신뢰성과 안정성을 제공합니다. 백색 및 UV-LED를 광원으로 사용하고, 광학 시스템을 통해 종이 웹에 빛을 조사합니다. 분광계는 종이 표면에서 반사된 빛을 수신하고 연산부(calculation unit)는 각 파장에서 반사 강도를 계산합니다. 측정된 반사 강도는 백색 판 보정(white tile calibration)에서 미리 결정된 값으로 정규화 및 보정됩니다. 그런 다음 LED 컬러 센서는 종이의 반사율 스펙트럼을 출력합니다. 이 출력 및 사전 지정된 광원 설정으로 LED 컬러 센서는 업계 표준 컬러 시스템, CIE 백감도(whiteness), ISO 백색도(brightness) 등을 계산하여 결과를 출력합니다.

외관상 백감도(apparent whiteness)를 증가시키기 위해 종이 제조 시 형광 증백제(Fluorescent brighteners)를 사용합니다. 새로운 LED 컬러 센서는 고백색도(high-brightness)UV-LED를 켜고 끌 때 종이 웹의 백감도 측정을 통해 그 효과를 판단할 수 있습니다.

제지 라인 주변에는 많은 광원과 외란 발생원(sources of disturbance)이 있습니다. 이러한 외란의 영향을 보정하기 위해 LED 컬러 센서는 각각 6.3 ms씩 세 가지 모드(두 LED 모두 켜짐, 백색 LED만 켜짐, 두 LED 모두 꺼짐)로 작동합니다. '두 LED 모두 켜짐' 모드 동안 측정된 값은 주변 조명에서 나온 것이기 때문에 그 외 모드의 데이터에서 이 값을 뺍니다.

새로운 LED 컬러 센서는 온라인 색상 측정에 필요한 기능도 장착되어 있는데, 예를 들면 측정 윈도우에서 가로질러 흐르는 종이 웹의 표면까지 거리의 변화를 보정하기 위한 경로 라인 보정 기능⁽¹⁾이 있습니다.

측정 원리에 따라 새로운 LED 컬러 센서는 위의 세 가지 모드를 반복하면서 번갈아 빛을 조사합니다. 종이가 고르지 않고 고속으로 측정을 수행할 수 없는 경우, 동일한 지점에서 동시에 측정하기 어려워 측정 값의 신뢰성이 감소합니다. 이러한 이유 때문에 우리는 측정의 민감도를 증진하고, 계산 속도를 높였으며, 측정 값을 안정화시켰습니다.

기능 및 안정성 향상을 위한 기술

고감도 후면 조사(Back-illuminated) CCD 분광계

UV영역에서의 고감도 측정

독립적으로 제어 가능한 두 개의 LED(백색 및 UV)가 광원으로 사용됩니다. 이 센서는 LED를 고속으로 깜박이게 할 수 있습니다. 최소 하나의 LED가 켜져 있을 때, 두 LED가 모두 켜져 있을 때의 측정 값을 빼면 주변 조명의 영향을 제거할 수 있습니다. 그림 2는 UV LED와 백색 LED의 스펙트럼 특성을 보여줍니다. 두 LED의 조합은 UV 영역에서 고감도를 보장합니다.

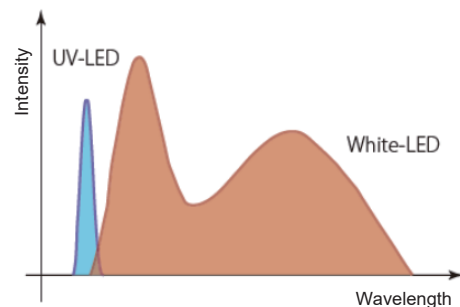


그림2 UV LED 및 백색 LED의 스펙트럼 특성

이 센서는 UV LED와 백색 LED를 독립적으로 제어함으로써 형광 효과의 유무에 관계없이 측정을 수행할 수 있습니다. 세 가지 조사 모드(각각 6.3 ms)는 약 19 ms의 주기로 반복되며(그림 3), 이 기간 동안 데이터가 수집되고 평균화 됩니다. 색 값(chromatic value), 백색도(brightness), 형광 강도(fluorescence intensity), 불투명도(opacity), 백감도(whiteness)와 같은 정보는 스펙트럼 측정 결과를 통해 산출할 수 있습니다.

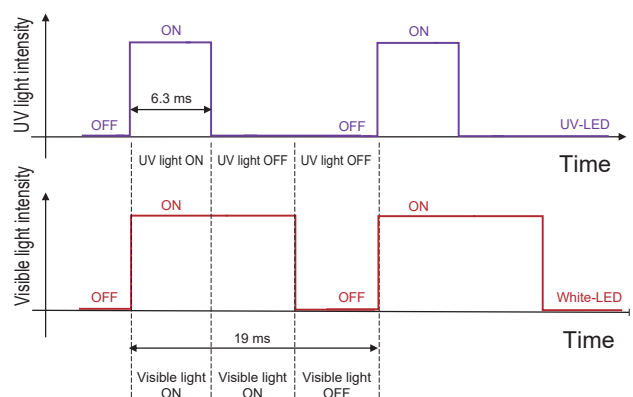


그림3 LED의 점등 및 소등 제어

새로운 LED 컬러 센서는 고감도 후면 조사 CCD 검출기가 장착된 분광계를 사용하여 훨씬 더 안정적인 측정이 가능합니다. 이로 인해 다음과 같은 개선이 이루어졌습니다.

■ 에탈로닝(Etalonning) 특성:

입사 광선의 광파는 검출기의 표면 및 후면에서 서로 간섭하여 감도에 영향을 미칩니다. 이 현상을 에탈로닝(etalonning)이라고 부릅니다. 반사 강도 스펙트럼은 그림 4에서 점선으로 표시된 것과 같이 영향을 받습니다. 이 제품에 사용된 후면 조사(back-illuminated) CCD 검출기는 이러한 효과를 크게 감소시켜 광학 감도 특성을 파장 범위에 걸쳐 거의 편평하게 만들었습니다.

■ 선형성(Linearity) 특성:

측정에 사용되는 범위에서 선형성 특성이 개선되어 LED 컬러 센서에 있는 기존의 선형성 보정 기능이 필요하지 않게 됩니다.

■ 근적외선(near-infrared)에 대한 UV 영역 민감도 증대:

새로운 분광계는 근적외선에 대한 UV 영역에서의 스펙트럼 분석 민감도를 증대시켰고(기존 분광계에 비해 약 40% 개선), 측정 값의 안정성을 향상시켰습니다.

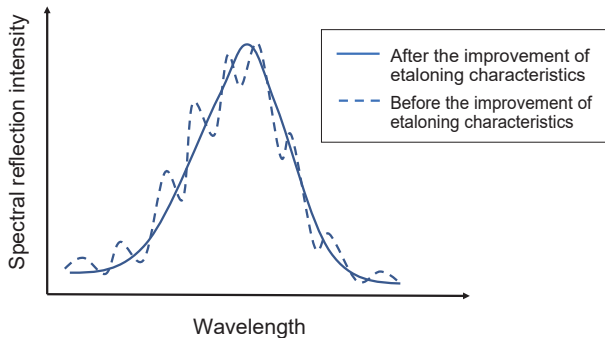


그림4 후면 조사 CCD에 의해 감소된 Etaloning 특성

고속 측정

안정적인 측정을 위해 우리는 컬러 센서의 파장 해상도를 기존 LED 컬러 센서에 요구되는 것보다 높은 5 nm으로 설정했습니다. 이 센서는 또한 데이터를 처리하여 형광 구성 요소의 존재를 확인하고, 미광(stray light) 등과 같은 외란(disturbances)에 대한 데이터를 보정할 수 있어야 합니다. 센서는 또한 기존 주기의 1/5인 200ms 측정 출력 주기의 요구 사항을 충족해야 합니다. 대용량 데이터의 고속 처리를 달성하기 위해 우리는 분광계에 1차 처리 계산 엔진을 장착하고, 컬러 센서의 주 장치에 애플리케이션 엔진을 장착했습니다. 전자는 스펙트럼 데이터를 수집하고 1차 처리를 수행하며, 후자는 후속 처리를 수행합니다. 1차 처리 계산 엔진은 6.3ms 노출 데이터를 얻고 200ms의 측정 주기 동안 평균을 산출할 수 있습니다. 구체적으로 이 엔진은 UV LED 및 백색 LED의 점등 및 소등 제어, 노출 데이터 수집, 공정 제품 거리 측정 및 백색도 보정, 시간 경과에 따른 보정된 스펙트럼 데이터 평균화, 애플리케이션 엔진으로 데이터 출력 등을 담당합니다. 위에서 설명한 바와 같이, 1차 처리 계산 엔진은 평균화 등 범용 분광계에 요구되는 일반적인 처리뿐만 아니라 컬러 센서에 요구되는 애플리케이션별 처리도 수행이 가능해야 했습니다.

우리는 스펙트럼 분석에서 입증된 모든 실적을 갖춘 일본의 한 분광계 제조업체와 협력하여, 고성능 엔진을 개발했습니다. 그림 5는 1차 처리 계산 엔진과 애플리케이션 엔진에서 다루는 계산 흐름을 보여줍니다. 1차 처리 계산 엔진은 고속 처리 기능을 통해 평균화 전에 경로 라인 보정을 수행하는 반면, 애플리케이션 엔진은 주변 조명 및 UV 조명에 대해 다른 보정을 수행합니다.

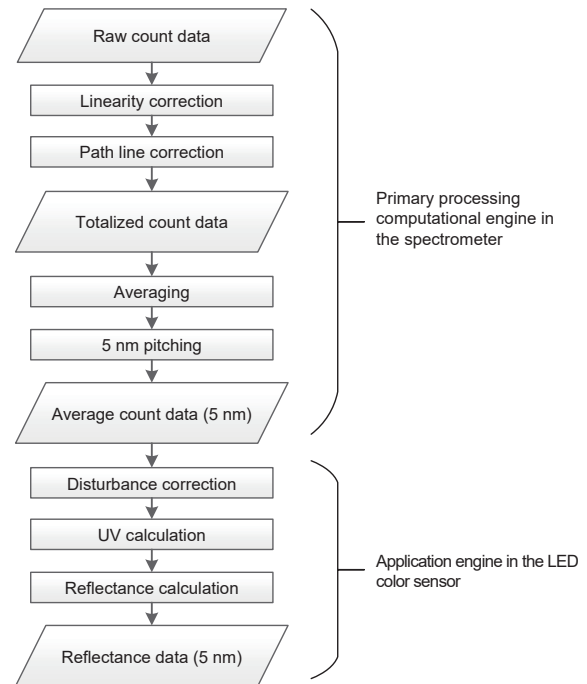


그림5 1차 처리 계산 엔진 및 애플리케이션 엔진에 의해 이루어지는 계산 흐름

LED 전환 및 데이터 평균화

백감도(whiteness) 및 형광 증백 효과(fluorescence whitening effects)를 측정하기 위해, 새로운 LED 컬러 센서는 UV LED 및 백색 LED를 사용하며, 두 가지 모두 독립적으로 제어를 할 수 있습니다.

조명 한 사이클(19 ms)은 3개의 슬롯(각각 6.3ms)으로 구성됩니다. UV LED는 한 슬롯에서 켜지고, 백색 LED는 두 슬롯에서 켜집니다. 이 체계를 가지고, 별도로 형광 증백 효과를 반영하거나 반영하지 않고 스펙트럼 데이터의 총합을 낼 수 있으며, 그 평균을 애플리케이션 엔진으로 출력할 수 있습니다. 또한 출력 데이터가 압축되기 때문에, 고속 인터페이스를 사용할 필요가 없고 전환 간격이 짧아져 동일한 지점에서 동시 측정이 이루어집니다.

종이의 반사율이 일정하더라도 종이에서 반사되는 빛의 양은 측정 거리에 비례하여 달라집니다. 또한 온라인 측정에 있어서 광원으로 부터 공정 제품까지의 거리를 일정하게 유지하는 것은 어렵습니다. 그래서 새로운 센서는 이 거리를 측정하고 이에 따라 스펙트럼 광도를 보정합니다.

색상 프로파일의 출력

분광계의 고속 1차 처리 계산 엔진은 센서가 고감도 고속 측정을 통해 얻은 신호를 안정적으로 출력하고, 프로파일 디스플레이 호스트 시스템과 통신을 동기화할 수 있도록 보장합니다. 색상의 백색도(brightness), 형광 강도, 불투명도(opacity) 및 백감도(whiteness)의 변화를 더 쉽게 이해할 수 있습니다. 추가 측정 정보는 코팅 프로파일의 면밀한 모니터링 등 제지 공정에서의 색상 관리를 개선할 수 있습니다. 이 기능을 통해 B/M9000VP 시스템에 컬러 프로파일 기능을 추가할 수 있습니다.

환경 저항성을 개선하기 위한 특수 방습 코팅

앞에서 언급한 바와 같이, 제지 공정의 환경은 고온 다습하여 광학 부품의 물리적 특성과 판독 값에 영향을 줄 수 있습니다.

새로운 LED 컬러 센서는 적분구(integrating sphere)를 사용하여 두 개의 LED 조명을 균일하게 혼합합니다. 적분구는 일반적으로 황산 바륨(barium sulfate) 분말을 polyvinyl alcohol(PVA)로 응고시켜 만듭니다. PVA는 흡습성(hygroscopic)이 있기 때문에, 적분구 표면의 산란 효율은 주변 습도에 따라 크게 달라집니다. 그림 6은 반사율 스펙트럼에 대한 방습 코팅의 효과를 보여줍니다. 방습 코팅을 하지 않은 기존의 적분구에서는 400~500nm의 짧은 파장 범위에서 반사율이 변화하고 판독 값이 안정화되는 데 시간이 걸립니다.

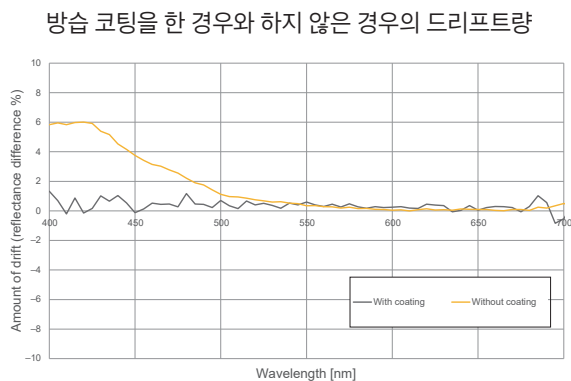


그림6 습도에 의한 반사율 스펙트럼의 변화
(방습 코팅을 한 경우와 하지 않은 경우 간 비교)

새로운 LED 컬러 센서에서는 적분구의 표면이 발수성(water repellency)이 높은 특수 방습 소재로 코팅되어 있습니다. 이렇게 해서 습기에 의해 발생하는 반사를 변화가 방지됩니다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 짧은 파장 범위에서도 반사를 변화가 1% 미만으로 억제되었습니다.

이 코팅제는 방진(dustproof) 효과도 있어서, 실외 사용에도 견딜 수 있는 것으로 확인되었습니다. 적분구의 효율성은 장기간에 걸쳐 안정적으로 유지될 것으로 예상됩니다. 이로써 제지 공정의 습한 환경에서도 안정적인 측정이 가능하도록 보장될 것입니다.

결론

고감도 분광계를 사용하여 고감도, 고속 측정이 실현되었으며, 구성 부품에 대한 특수 코팅을 통해 내습성이 개선되었습니다. 이러한 혁신을 통해 LED 컬러 센서의 기능, 안정성 및 유지 보수성이 향상되었고, 제지 공정에 있어서 색상 관리가 개선되었습니다.

새로운 LED 컬러 센서는 반사율 데이터를 안정적으로 출력할 수 있으며, 이는 또한 제지 공정에서 컬러 코팅 관리에도 사용할 수 있습니다. 우리는 제지 공정에서 제조 동향 데이터를 사용하여 전체 공정의 운영 효율성을 개선하는 잘 조정된 최적화 솔루션을 지속적으로 개발할 것입니다.

참고문헌

- (1) Atsushi Tsujii, Minoru Terajima, et al., "A High-precision Color Sensor for the B/M9000VP System," Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 56, No. 1, 2013, pp. 35-38

* B/M9000VP is a registered trademark of Yokogawa Electric Corporation.
* All other company names, organization names, product names, and logos that appear in this paper are either registered trademarks or trademarks of their respective holders.