

롤투롤 공정의 이해 및 동향

하영우^{1,2}, 김기환¹, 임동찬²

¹ 경상국립대학교 나노신소재융합공학과

² 한국재료연구원 에너지전자재료연구실

초록: 롤투롤 공정은 제조 환경에서 필수적인 위치를 차지하고 있으며, 그 중요성은 수많은 산업에 걸쳐 반향을 일으키고 있다. 이 다목적 기술 플랫폼은 다양한 공정 방법을 포괄하고 광범위한 재료 범주를 수용하여 현대 생산의 초석이 되고 있다. 이 광범위한 영역에서 일반적으로 사용되는 두 가지 코팅 기술인 슬롯 다이와 그래비아 코팅 방식은 완벽한 코팅을 구현하는 정밀도와 효율성으로 각광받고 있다. 또한 건조 공정은 열 건조, 적외선(IR) 건조, 자외선(UV) 건조 방식에 크게 의존하여 재료를 액체 또는 반액체 상태에서 바로 사용할 수 있는 고체 제품으로 신속하게 전환한다. 롤투롤 공정의 중요성은 제조 공정을 간소화하고 비용을 절감하며 제품 품질을 향상시킬 수 있다는 점에 있다. 이 글에서는 이러한 일반적인 롤투롤 공정 방법의 복잡성에 대해 자세히 살펴봄으로써 이러한 중요성의 깊이를 파악하고자 한다. 엄격한 연구와 세심한 데이터 수집을 통해 이러한 기술이 다양한 산업을 형성하고 제조 세계를 발전시키는 데 중추적인 역할을 하는 것을 조명하고자 한다. 롤투롤 공정의 중요성을 이해함으로써 롤투롤 공정의 잠재력을 최대한 활용하고 생산 혁신과 우수성을 위한 기반을 마련할 수 있을 것이다.

키워드: 롤투롤, 슬롯다이 코팅, 그래비아 코팅

Understanding and Trends of Roll-to-Roll Operation

Yeong-Woo Ha^{1,2}, Gi-Hwan Kim¹, and Dong-Chan Lim²

¹ Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

² Department of Energy and Electronic Materials, Korea Institute of Material Science, Changwon 51508, Korea

(Received September 11, 2023; Revised October 16, 2023; Accepted October 19, 2023)

Abstract: Roll-to-roll processing holds an integral position within the manufacturing landscape, and its significance reverberates across numerous industries. This versatile technology platform encompasses a diverse array of process methods and accommodates a wide spectrum of material categories, making it a cornerstone of modern production. Within this expansive domain, two commonly employed coating techniques, namely the slot die and gravure coating methods, have earned their prominence for their precision and efficiency in delivering flawless coatings. Additionally, the realm of drying processes relies heavily on thermal drying, infrared (IR) drying, and ultraviolet (UV) drying methods to expedite the transformation of materials from their liquid or semi-liquid states to solid, ready-to-use products. The undeniable importance of roll-to-roll processing lies in its ability to streamline manufacturing processes, reduce costs, and enhance product quality. This article embarks on a comprehensive journey to fathom the depth of this importance by delving into the intricacies of these common roll-to-roll process methods. Through rigorous research and meticulous data collection, we aim to shed light on the pivotal role these techniques play in shaping various industries and advancing the world of manufacturing. By understanding their significance, we can harness the full potential of roll-to-roll processing and pave the way for innovation and excellence in production.

Keywords: Roll-to-roll, Slot-die coating, Gravure coating

✉ Gi-Hwan Kim; ghkim@gnu.ac.kr

Dong-Chan Lim; dclim@kims.re.kr

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 롤투롤

- 롤투롤(roll-to-roll) 공정은 여러 산업에 걸쳐 다양한 애플리케이션과 제품 범주에 널리 사용되는 중요한 제조 기술 플랫폼이다. 여기에는 종이 인쇄 및 사진 촬영을 위한 할로겐화 은 필름과 같은 전통적인 기술부터 플렉시블 마이크로 일렉트로닉스 [1-4], 얇은 플렉시블 배터리 [5,6], 태양전지 [7-10], 디스플레이 [11-13]를 포함한 새로운 응용 분야까지 다양한 영역이 포함된다. 표준 코팅, 건조 및 라미네이션 단계가 포함된 일반적인 롤투롤 생산 라인은 그림 1에 나와 있다.

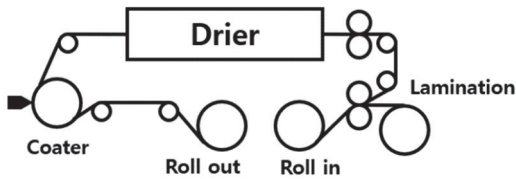


Fig. 1. Schematic representation of a typical roll-to-roll process.

- 롤투롤 제조 기술의 기원은 19세기 후반, 산업 혁명 말기로 거슬러 올라간다. 인쇄와 사진이라는 두 가지 전통 산업의 출현은 산업혁명 당시 롤투롤 제조의 발전과 혁신과 밀접한 관련이 있다. 1840년대 Richard Hoe가 회전식 인쇄기를 발명한 것이 대량 인쇄의 진화에 큰 영향을 미쳤다. 이 발명은 이전에 발명된 압연지 및 증기 기관과 결합하여 넓은 면적의 종이를 비용 효율적으로 대량으로 인쇄할 수 있게 되어 대량 발행 신문을 출시하고 현대 출판 산업의 토대를 마련할 수 있었다 [14]. 마찬가지로 촬영용 필름의 주 원료인 할로겐화 은 기반 필름의 역사 또한 롤투롤 공정의 출현 및 발전과 유사하며 일부 일치한다. 19세기 중반에는 유리에 감광성 유화액을 코팅하여 일괄 공정으로 인화판을 생산했다. 이로 인해 할로겐화 은 필름은 상대적으로 비싸 일반 소비자들이 쉽게 접할 수 없었다. 1880년대 초, George Eastman과 새로 설립된 회사인 Kodak (나중에 Eastman Kodak으로 개명함)은 사진 필름의 대량 생산을 시작하는 데 도움이 된 롤투롤 공정을 적용하여 유연한 기재에 감광성 물질을 쉽게 코팅할 수 있는 새로운 제조 공정을 개발했다 [15]. 사진 필름의 롤투롤 제조 공정 개발의 첫 번째 단계는 William Walker와 George Eastman의 주요 발명을 바탕으로 사진 유화제를 압연된 종이 기재에 코팅하는 것이었다 [15]. 그 후 Eastman의 초기 협력자 중 한 명인 H. Reichenbach가 제안하고 특허를 받은 투명한 질산 셀

룰로오스 기재로 종이 기재를 대체했으며(그림 2 참조), 이는 H. Goodwin이 이전에 발명한 질산 셀룰로오스 필름 제조 공정에 기반하였다 [16]. 이러한 사진 필름 제조의 선구적인 발전은 사진의 대중화로 이어져 일반 소비자들이 사진을 쉽게 접할 수 있게 되었을 뿐만 아니라 카메라, 필름 처리, 인화 장비 및 관련 소비재에 대한 수요를 창출했다. 실제로 19세기 후반과 20세기 전반의 롤투롤 제조 기술의 초기 개발과 혁신의 대부분은 사진 및 인쇄 산업의 빠른 성장, 특히 빠르게 움직이는 기재에 최대 24개의 얇은 감광층을 정밀하게 도포해야 하는 사진 산업의 까다로운 요구와 고급 마감 방법 및 새로운 기재 기술의 필요성에 의해 촉발되고 주도되었다 [17].

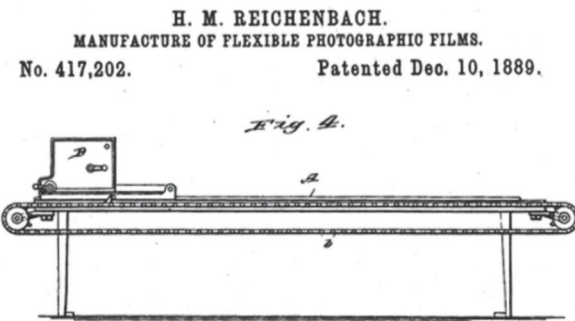


Fig. 2. Reichenbach's patent in 1889 [18].

2. 롤투롤 구동 방식

- 롤투롤 구동은 시장과 제품 범주만큼이나 다양하지만, 근본적인 공통 기능과 운영 원칙은 비슷한 내용을 다지고 있다. 그림 1은 일반적인 코팅, 건조 및 라미네이션 단계가 있는 롤투롤 생산 라인을 나타내지만, 보다 일반적인 롤투롤 작업의 개략적인 레이아웃은 그림 3에 나와 있다.

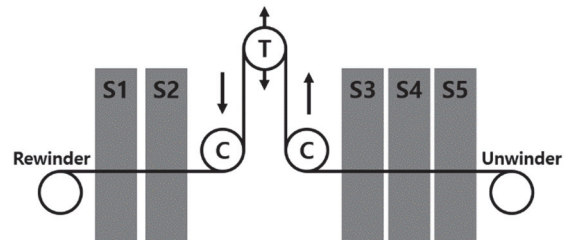


Fig. 3. Schematic representation of the roll-to-roll process [The compartmentalized process sections (S1-S5), from the unwinder feeding the substrate to coating, drying, and curing, are carried out under constant tension (T) by transfer rollers (C) arranged along the path].

■ 해당 그림에서는 연성을 띠는 기재가 다양한 공정(변환) 단계를 통과하면서 두 롤러 사이로 이송된다. 코팅되지 않은 기재 또는 사전 코팅된 기재로 구성된 가공되지 않은 기재는 공급 스테이션(연와인더)에서 공급되며, 가공되지 않았거나 부분적으로 가공된 기재는 공급 롤러에서 풀러 롤투를 기계로 공급된다(그림의 점선 프레임). 그런 다음 가공되지 않은 기재는 롤투를 기계를 통해 제어된 속도로 이송되는 동안 코팅, 건조, 경화 등 일련의 연속적인 구획화된 공정(전환) 단계(S1, S2, ...)를 거치게 된다. 기재와 증착층으로 구성된 기재는 와인더에 의해 롤투를 장비를 통해 구동되며, 이송 경로를 따라 배치된 여러 이송 롤러 또는 아이들러(C)에 의해 이송이 촉진된다. 이송되는 기재의 장력은 와인더에 의해 제어되지만 일반적으로 작업 전반에 걸쳐 평탄도, 평탄도 및 결함 없는 이송을 보장하기 위해 롤투를 기계 내에 분산된 하나 이상의 장력 롤러(T)에 의해 조정된다. 그림 1에 표시된 것처럼 라미네이션 또는 인터리빙 단계로 구성된 작업의 경우 단일 롤투를 라인에 둘 이상의 연와인더가 있을 수 있지만, 라인은 항상 단일 와인더로 종단된다. 여기서 유일한 예외는 들어오는 기재가 보호 필름('이형 라이너')으로 보호되는 경우로, 이 경우 기재가 롤투를 장비에서 처리되기 전에 별도의 와인더를 사용하여 벗겨내야 한다. 그림 3의 개략적인 레이아웃에는 5개의 변환 단계가 나와 있지만, 단계 수는 임의적이며 일반적으로 1보다 크다. 롤투를 작업기재에는 다양한 변환 단계가 사용되며, 대부분 이동하는 기재에 일부 기능성 및 보조 재료의 얇은 층을 증착하고 후처리하는 과정을 포함한다. 실제로 일반적인 변환 단계는 (i) 이동 기재 위에 얇은 재료층을 도포하는 필름 형성 단계와 (ii) 도포된 층의 성능을 통합, 수정 및 개선하는 기능을 주로 하는 필름 강화 단계의 두 가지 주요 클래스로 분류할 수 있다. 일반적인 롤투를 필름 형성 단계의 예로는 습식 코팅 [19,20], 진공 증착 [21,22], 인쇄 [23-25], 용매 주조, 압출 주조, 적층 등이 있으며, 일반적인 필름 강화 단계에는 건조 [19,20,26], 방사선 경화 [27-29], 열 경화, 캘린더링, 마이크로 또는 나노 패터닝 [30-32], 열처리, 코로나 방전 처리 [33], 어닐링, 화학 처리, 세척, 인터리빙 등이 있다. 일부 단계에서는 특수한 환경(온도, 습도, 진공, 질소 블랭킷 등)이 필요할 수 있으므로 해당 스테이션을 통과하는 기재를 적절히 밀폐해야 하며, 이는 몇 가지 문제를 야기할 수 있다. 그림 3은 필름 제품의 특수한 요구 사항에 따라 생산 라인에서 변환 단계(모듈)를 추가하거나 제거할 수 있는 롤투를 작업의 모듈식 특성을 강조한다. 기재는 모든 변

환 단계를 통해 일정한 속도로 이송되므로 전체적으로 견고한 작동이 가능하도록 모든 공정 요소를 만족하는 속도(체류 시간에 해당)를 선택하는 것이 중요하다. 이러한 의미에서 공정 단계가 결합되어 있고 최종 라인 속도는 가장 느린 공정 단계에 의해 제약을 받는다고 말할 수 있다. 이러한 과정을 롤투를 작업의 속도 결정 단계라 볼 수 있다. 이것이 가능하지 않은 경우, 즉 하나 이상의 단계가 나머지 단계와 매우 다른 속도로 작동해야 하는 경우, 작업을 둘 이상의 라인으로 분할하여 각각 다른 속도로 작동하거나 기재를 동일한 라인을 통해 다른 속도로 여러 번 실행해야 한다. 물론 이러한 '멀티 패스'(또는 '멀티 라인') 작업은 단일 패스 작업보다 비용이 많이 들기 때문에 가능하면 지양해야 한다. 실제로 회전 속도 선택은 품질 및 운영 고려 사항뿐만 아니라 비용 고려 사항에 따라 결정된다. 라인 속도 외에 멀티 라인 또는 멀티 패스 작동을 필요로 하는 또 다른 요소는 공정 환경이다. 예를 들어, 롤투를 라인에 진공 증착 단계 추가하는 요소가 있다. 일반적으로 빠르게 움직이는 기재를 진공 대기에 가두는 것은 대기압 공정 단계와 결합할 때 특히 어려울 수 있으며, 이 경우 작업을 대기압 라인과 진공 증착 라인으로 분할해야 할 수도 있다.

3. 코팅헤드 및 코팅기법

3.1 슬롯 다이 코팅

■ 이스트만 코닥사에서 1954년 슬롯 다이 코팅을 개발했다 [34]. 슬롯 다이는 여러 종류의 용액을 수용할 수 있는 분리된 각각의 매니폴드를 구성함으로써 동시에 다층 코팅을 생성할 수 있다. 슬롯 다이 코팅의 레이어 수에 대한 이론적 제한은 없지만 일반적으로 각 매니폴드에 기재에 직접 충돌하는 자체 출구 슬롯이 있는 다이를 구성하는 것을 권장한다. 기하학적 제약으로 인해 3개 이상의 레이어를 가진 슬롯 코팅기는 드물다. 오늘날 사용되는 슬롯 다이 코터에는 여러 가지 개선점들이 있다. 고무 롤에 압착된 슬롯 다이를 근접 다이 코팅 또는 근접 코팅이라고도 하는 강철 롤 근처에 배치된 다이(진공 박스 유무에 관계없이)와 구별하기 위해 접촉 코팅이라고도 부른다. 멀리서 코팅을 기재에 떨어뜨리는 슬롯 다이는 커튼 코팅의 한 형태다. 이를 때때로 압출 코팅이라고 부르기도 하지만 이 용어는 혼동될 수 있다. 슬롯 다이를 장력 기재에 배치하여 장력 기재 오버 슬롯 다이(tensioned web over slot die, TWOSD) 코

팅기로 점점 더 많이 알려진 방식으로 사용할 수 있다. TWOSD 및 접촉 다이 코팅은 매우 얇은(단층 또는 다층) 코팅을 생성할 수 있다. 다이는 한 가지 점도로 균일한 코팅을 생성하도록 설계하거나 다양한 특성에 맞게 최적화할 수 있다. 슬롯 다이 코팅은 적절하게 설계할 경우 비뉴턴 효과(예: 전단 박막 코팅)를 처리하는 보다 강력한 방법 중 하나가 될 수 있다. 범용 파일릿 라인용 다이는 종종 큰 매니폴드와 비교적 좁은 출구 슬롯으로 설계된다. 넓은 적용성을 위한 금형은 코팅 중량 프로파일을 제어하기 위해 금형의 한쪽 립을 편향시키는 능동 제어 요소를 사용하는 경우가 많다. 이렇게 하면 처리할 수 있는 코팅 범위가 최대화되지만 생산에 최적화된 설계가 아닐 수도 있다. 최종 코팅의 특성을 알고 나면 특정 클래스의 코팅을 위해 설계된 매니폴드는 추가 기능을 제공할 수 있다. 예를 들어, 불안정한 코팅에서 겔 형성을 방지하기 위해 벽에서 최소 전단 속도를 생성하는 금형을 전문으로 하는 회사가 있다. 슬롯 다이의 작동성은 다이와 기재 사이의 간격, 다이 페이스와 기재 사이의 각도, 다이와 기재 각도의 변화(예: 교대로 발산 및 수렴하는 채널)에 따라 크게 달라진다 [35].

3.2 그라비아 코팅

- 그라비아 코팅이라는 용어는 닥터 블레이드를 통해 제어된 양의 용액 코팅을 전사하는 인그레이빙 롤과 기재를 전사하고자 하는 롤에 압력을 부여하는 코팅 닙 롤을 사용한 코팅 방법 제품군을 의미한다. 인그레이빙 롤은 수조에 담가서 적셔진다. 닥터 블레이드는 각인 위의 과도한 코팅을 닦아낸다. 따라서 그라비아는 닥터 블레이드 코팅 방식 중 한 가지 방식으로 고려될 수 있다.

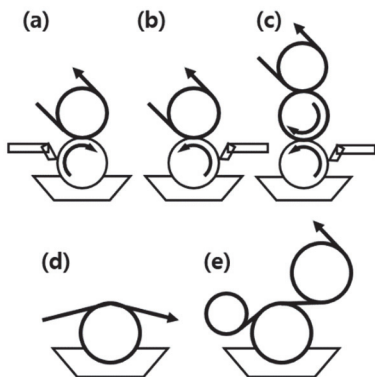


Fig. 4. Common configurations of gravure coatings: (a) direct (and differential), (b) reverse, (c) offset, and (d,e) kiss (tensioned) two implementations of gravure (in kiss coatings, the imprinted roll can be rotated in either direction).

■ 그러나 그라비아 실린더에서 기재로 코팅을 옮기는 것은 자체 측정 메커니즘으로 생각할 수 있으며 그라비아를 하이브리드 코팅 방법이라고도 할 수 있다. 그라비아 코팅의 다양한 구성은 1~400 μm 두께의 습식 레이어를 적용할 수 있다. 그라비아 코팅의 코팅 두께는 기재에 따라 달라지며, 종이와 같은 개방형(투과성) 기재는 호일이나 필름과 같은 불투과성 기재보다 훨씬 더 두꺼운 코팅을 수용할 수 있다. 그라비아 코팅은 전단 점도가 1에서 수천 센티푸와즈(cP) 미만인 낮은 코팅을 적용하는 데 사용된다. 그러나 점도가 높은 것으로 인용되는 대부분의 코팅은 전단 박막 코팅이며 전단 점도가 높은 범위는 훨씬 좁다는 점을 기억해야 한다. 그라비아 코팅기에 대한 명명법은 혼란스러울 수 있지만 잘 정립되어 있다. 현재 직접 그라비아 코팅이라고 하는 것은 기재의 속도에 맞는 그라비아 롤을 사용한다. 어떤 사람들은 균일한 패턴이 새겨진 모든 롤을 ‘아날록스 롤’이라고 부르는 반면, ‘그라비아 롤’이라는 용어는 인쇄용 이미지가 새겨진 롤에 사용된다 [23]. 다른 많은 업체에서는 ‘그라비아 롤’로 균일한 레이어를 코팅한다. 차동 그라비아 코팅에서 그라비아 롤은 기재와 같은 방향으로 이동하지만 다른 속도로 구동된다. 오프셋 그라비아는 그라비아 롤과 기재 사이에 고무 롤을 사용하며 모든 롤이 동일한 표면 속도로 회전한다. 이를 ‘간접 그라비아’라고도 부른다. 리버스 그라비아에서는 그라비아 롤이 기재와 직접 접촉하지만 기재와 반대 방향으로 구동된다. 디퍼렌셜 오프셋 그라비아와 같은 조합도 존재한다. 차동 그라비아 및 역방향 그라비아의 경우 롤의 상대 속도는 일반적으로 라인 속도에 대한 지정된 롤의 비율(소수점, 퍼센트 또는 속도 대비 퍼센트로 표시)로 정의되는 그라비아 비율로 표현된다. 이러한 구성은 그림 4에 설명되어 있다. 앞에서 설명한 그라비아 구성은 기재로의 우수한 전송을 위해 부하가 많은 백업 롤(인상 롤이라고도 함)을 사용한다. 이에 요구되는 일반적인 힘을 2,000~20,000 N/m라고 제시한 의견도 있는 반면 [36], 대부분의 그라비아 헤드가 일정한 힘이 아닌 일정한 범위에서 작동한다는 주장도 있다 [37]. 키스 코팅(텐션 기재 또는 비지지 기재 코팅이라고도 함)에서는 백업 롤이 제거된다. 그 결과 코팅 무게가 줄어든다. 키스 그라비아의 그라비아 롤은 정방향(‘직결형’이라고도 불림) 또는 역방향으로 회전할 수 있다. 마이크로 그라비아 코팅은 직경 20~50 mm 그라비아 롤을 사용한 키스 그라비아 코팅이다 [38]. 이러한 작은 직경의 롤이 구부러지는 것을 방지하기 위해 이 기술은 롤을 지나갈 때 기재의 처짐을 최소화하여 실행된다. 이

로 인해 발산 각도가 날카로운 좁은 메니스커스가 발생하여 가로 방향 결함을 제거하고 코팅 용액이 기재에 미치는 영향을 최소화한다고 주장되고 있다. 그라비아 코팅의 마지막 주요 변형인 가압 그라비아는 각인된 롤을 적시는 방법에 따라 정의된다.

- 그림 5에서 볼 수 있듯이 각인된 롤은 개방형 팬에 담거나, 적셔진 분수 롤(용액이 차 있는 용기에 담긴 상태) 또는 분수 다이와의 접촉을 통해 또는 밀폐된 챔버(닥터 박스라고도 함)를 통과하여 기재를 적실 수 있다. 밀폐된 챔버는 상대적으로 큰 매니폴드거나 밀착되도록 가공되거나 셸 충전을 최적화하기 위해 매니폴드 내부에 용액의 흐름을 방해하는 구조물이 있을 수 있다 [20]. 오픈 팬 코팅은 팬 내 공기 혼입과 그라비아 밴드로 이어지는 셸의 불완전한 충전으로 인해 속도가 제한된다. 분수 롤은 그라비아 코팅의 최대 속도를 최대 1,200 FPM까지 확장하여 코팅을 유리하게 하기 위해 널리 사용되었지만 [36], 분수 롤은 대부분 ‘가압 그라비아’로 대체된다. 가압 그라비아에는 두 가지 기본 구성이 있다. 닫힌 챔버에 압력을 가하거나(닥터 블레이드 아래에 여분의 코팅 재료가 누출될 수 있음), 롤 표면을 따라 역류가 흐르도록 챔버를 구성하여 그라비아 롤의 셸 충전을 극대화할 수 있다 [20]. 셸이 채워지면 닥터 블레이드에 의해 각인된 롤 표면에서 여분의 코팅이 제거된다.

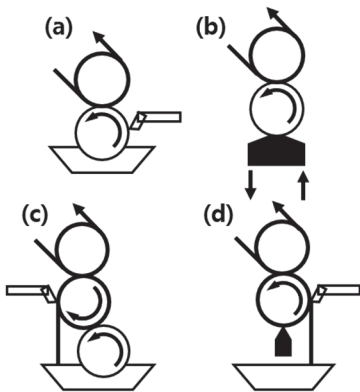


Fig. 5. Wet options for gravure coating: (a) open pan, (b) closed head (or pressurized), (c) fountain roll, and (d) fountain die.

- 닥터 블레이드는 그림 6과 같이 ‘트레일링’ 또는 ‘리버스’ 각도로 장착할 수 있다. 폐쇄형 헤드(및 가압식) 그라비아 챔버는 하나의 트레일링 앵글과 하나의 리버스 앵글 닥터 블레이드를 사용하여 액체를 담게 된다(‘닥터 박스’로 불림).

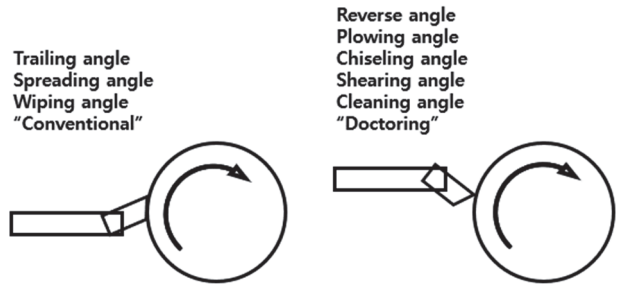


Fig. 6. The configuration of the doctor blade (it can be mounted with a trailing angle that matches the direction of rotation of the roll and a reverse angle that is opposite to the direction of rotation).

4. 건조 및 경화

- 롤투롤 공정에서 건조 및 경화는 액체 코팅을 막힘없이 롤에 감을 수 있는 건조 재료로 전환하는 것과 관련된 하드웨어 및 문제에 대해 설명한다. 코팅 공정에서는 코팅 시 코팅층이 액체 상태여야 한다. 그러나 코팅된 재료를 감아야 하므로 코팅 헤드와 리와인더 사이의 구간에서 액체 코팅을 응고시켜야 한다. 가장 일반적인 방법은 열 건조지만 핫 멜트 코팅은 냉각만 필요하고 전자빔(e-빔) 코팅은 화학 반응을 시작하기 위한 조사만 필요하며 자외선(UV) 경화 코팅은 건조가 필요할 수 있지만 경화만으로 고형화할 수 있는 경우도 있다. 응고 섹션의 일반적인 단위 작업은 다음과 같다.

4.1 열 건조 및 열 전달 메커니즘

- 증발은 항상 대류에 의해 향상되며 습기 또는 용제가 함유된 공기는 코팅 헤드 근처에서 공기 처리 시스템으로 전달되어야 한다. 매우 유동적인 코팅에는 기화되는 용매를 층류 공기로 취급할 수 있지만 대부분의 경우 대류 건조는 난류다. 열 전달은 용매와 어느 정도 독립적이지만 질량 전달 속도는 용매마다 다르기 때문에 대부분의 건조 장비는 에너지 전달 능력(즉 열 전달 계수)에 따라 결정된다. 건조 공기는 일반적으로 전기, 증기, 뜨거운 기름 또는 직접 연소 가스로 가열된다. 건조기에 제공되는 가장 일반적인 사양은 이러한 난방 시스템으로 충족할 수 있는 총 열 부하에 의해 결정된다. 이 사양은 설계 온도까지 가열할 수 있는 최대 공기량을 결정하는 데 유용하지만 얻을 수 있는 건조 속도를 예측하는 데 직접 적용되지는 않는다. 또한 건조기에는 최대 피부 온도, 재료 제약, 열 팽창을 수용할 수 있는 기계

적 공차 능력과 같은 안전 문제에 따라 허용 가능한 온도가 정해진다. 용매를 직접 건조하는 방식은 공기 중 용매의 폭발성 혼합물 생성으로 인해 제한된다. 이를 고려하여 오븐에 공급되는 최대 가용 열을 결정한다.

4.2 적외선 건조

- 적외선 건조는 제지 및 인쇄 산업에서 비교적 일반적이다. 컨버팅 및 첨단 소재 산업에서는 덜 일반적이지만 여전히 많은 경우에 실행 가능한 옵션이다. 앞서 인용한 스테판-볼츠만 법칙은 흑체(이상적으로 흡수/방출-흡수율과 방사율은 키르히호프의 법칙에 의해 같음)에 적용된다. 부수적인 적외선 열 전달에 대한 통찰력을 얻기에 충분하지만, 적외선 건조에는 조금 더 주의가 필요하다. 회색체에 대한 표준 이론이 있지만, 실제 기체는 회색체 이론과 일치하지 않는 복잡한 흡수 스펙트럼을 가지고 있다. 따라서 재료의 IR 흡수를 측정하고, 최대 흡수 파장 영역에서 강하게 방출하는 IR 소스를 선택하고, 파일럿 라인에서 기본 데이터를 생성하는 것이 일반적인 관행으로 이어졌다. 뜨거운 물체의 방출 피크 파장은 주로 방출기의 온도에 따라 달라진다. 따라서 IR 이미터는 일반적으로 근적외선(단파장), 중적외선(중파장), 원적외선(장파장)의 세 가지 온도 범위로 나뉜다. IR 건조의 근본적인 한계는 복사가 외부 질량 전달을 향상시키지 않고 코팅으로의 열 전달을 증가시킨다는 것이다. 따라서 IR 외에 대류 질량 수송이 필요하다. 이는 대류의 모든 복잡성을 IR과 결합한 것이다. 또한 용매를 사용하는 IR에는 상당한 안전 고려 사항이 있다(IR 패널의 온도는 대부분의 용매의 자동 발화점을 초과하게 된다). 순수 IR 가열은 예열 기간에 유용하다. 하이브리드 열풍/IR 건조는 코팅 흡수가 일치할 수 있는 경우 매우 높은 열 및 질량 플럭스를 제공한다.

4.3 UV 경화

- UV 경화는 가교 코팅을 위한 일반적인 선택지 중 하나다. 개념적으로 UV 경화는 간단하다. 깔끔한 코팅을 자외선에 노출시켜 광개시제를 여기시킨 후 가교 반응을 시작한다. 산소는 자외선 경화의 억제제이며 대부분의 자외선 경화는 질소가 제거된 기체 환경에서 이루어진다. 그러나 많은 경우 광개시제가 산소를 소비하고 추가 산소가 코팅으로 확산되기 전에 반응이 수행될 수 있을 정도로 충분히 강한 UV 광원에 코팅을 노출시켜 공기 중에서 경화할 수 있다. UV 경화에는 광개시제가 빛

을 흡수하여 반응을 시작하는 자유 라디칼을 생성해야 한다. 실제로 UV 경화는 상자 내 산소 수준 모니터링, 총 UV 선량 조절, 빛의 초점 조절 등 복잡한 제어가 필요하다. UV 경화를 위해 코팅을 배합해야 하며 광개시제가 종종 불안정할 때가 있다.

5. 결론

- 롤투롤 공정은 종이 소모품, 인쇄, 할로겐화 은 촬영용 필름, 포장 필름과 같이 상품화되고 기성화된 제품 범주부터 디스플레이, 태양광, 마이크로 일렉트로닉스, 미세 유체 등 새롭게 부상하는 여러 응용 분야에 이르기까지 경제의 여러 부문에서 널리 사용되고 있다. 모든 경우에 균일하거나 패턴화된 2D 구조의 유연한 필름형 제품은 움직이는 기판 위에 다양한 기능성 및 보조 레이어를 적용하면서 두 개 이상의 회전 롤러 사이에 웹을 일정한 라인 속도로 이송하여 가공된다. 해당 배치 또는 시트 투 시트 공정에 비해 롤투롤 접근 방식의 주요한 장점들은 낮은 제조 비용, 간소화된 물류, 대량 생산 작업에 대한 쉬운 적응성에서 나온다. 일반적으로 저비용 제조를 위해서는 R2R 생산 라인을 통과하는 패스 횟수를 최소화하고 제품 사양을 충족하면서 가능한 한 가장 빠른 라인 속도와 가장 넓은 웹으로 작동해야 한다. R2R 생산 라인을 더욱 효과적으로 설계하려면 자본 및 운영 비용뿐만 아니라 현행 규정에서 요구하는 건강, 안전 및 환경 요인을 고려해야 하며, 다양한 목적에 맞는 동일한 제품을 반복 사용할 수 있게 해야 하고, 장비에 쉽게 적용할 수 있도록 해야 한다. 이 논문을 통해 롤투롤 공정의 몇 가지 주요 요소들과 이에도 도입된 일반적인 공정과정에 대해 설명하고자 한다.

ORCID

Gi-Hwan Kim
Dong-Chan Lim

<https://orcid.org/0000-0001-7115-2552>
<https://orcid.org/0000-0002-4269-6339>

REFERENCES

- [1] T. Hassinen, T. Ruotsalainen, P. Laakso, R. Penttilä, and H.G.O. Sandberg, *Thin Solid Films*, **571**, 212 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.10.086>
- [2] F. Pastorelli, T. M. Schmidt, M. Hösel, R. R. Søndergaard, M. Jørgensen, and F. C. Krebs, *Adv. Eng. Mater.*, **18**, 51 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1002/adem.201500348>

- [3] J. Willmann, D. Stocker, and E. Dörsam, *Org. Electron.*, **15**, 1631 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.04.022>
- [4] J. Yeo, G. Kim, S. Hong, M. S. Kim, D. Kim, J. Lee, H. B. Lee, J. Kwon, Y. D. Suh, H. W. Kang, H. J. Sung, J. H. Choi, W. H. Hong, J. M. Ko, S. H. Lee, S. H. Choa, and S. H. Ko, *J. Power Sources*, **246**, 562 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.012>
- [5] L. Hu, H. Wu, F. La Mantia, Y. Yang, and Y. Cui, *ACS Nano*, **4**, 5843 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1021/nn1018158>
- [6] H. Nishide and K. Oyaizu, *Science*, **319**, 737 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1126/science.1151831>
- [7] Y. Galagan, Roll-to-Roll Manufacturing (2018), p. 325.
- [8] X. Hu, L. Chen, Y. Zhang, Q. Hu, J. Yang, and Y. Chen, *Chem. Mater.*, **26**, 6293 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1021/cm5033942>
- [9] K. Hwang, Y. S. Jung, Y. J. Heo, F. H. Scholes, S. E. Watkins, J. Subbiah, D. J. Jones, D. Y. Kim, and D. Vak, *Adv. Mater.*, **27**, 1241 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201404598>
- [10] R. Søndergaard, M. Hösel, D. Angmo, T. T. Larsen-Olsen, and F. C. Krebs, *Mater. Today*, **15**, 36 (2012).
doi: [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(12\)70019-6](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(12)70019-6)
- [11] G. P. Crawford, *Flexible Flat Panel Displays* (John Wiley & Sons, New York, 2005).
doi: <https://doi.org/10.1002/0470870508>
- [12] E. Montbach and D. Davis, Roll-to-Roll Manufacturing (2018), p. 285.
- [13] Y. H. Yeh, C. C. Cheng, B.C.M. Lai, C. M. Leu, and Y. L. Tseng, *J. Soc. Inf. Disp.*, **21**, 34 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1002/jsid.140>
- [14] P. B. Meggs, *A History of Graphic Design, 3rd edn* (John Wiley & Sons, New York, 1998).
- [15] P. Rawlings, *J. Am. Stud.*, **32**, 307 (1998).
doi: <https://doi.org/10.1017/s0021875898615930>
- [16] H. Goodwin, U.S. Patent 600,608 (1898).
- [17] C. A. Fleischer, C. L. Bauer, D. J. Massa, and J. F. Taylor, *MRS Bull.*, **21**, 14 (1996).
doi: <https://doi.org/10.1557/s0883769400035855>
- [18] H. M. Reichenbach, U.S. Patent 417,202 (1891).
- [19] W. Göring, *Mater. Corros.*, **44**, 118 (1993).
doi: <https://doi.org/10.1002/maco.19930440312>
- [20] E. J. Lightfoot and E. D. Cohen, Roll-to-Roll Manufacturing (2018), p. 19.
- [21] C. A. Bishop, Roll-to-Roll Manufacturing (2018), p. 111.
- [22] T. Kobayashi, M. Bando, N. Kimura, K. Shimizu, K. Kadono, N. Umezu, K. Miyahara, S. Hayazaki, S. Nagai, Y. Mizuguchi, Y. Murakami, and D. Hobara, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 023112 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4776707>
- [23] B. Roth, R. R. Søndergaard and F. C. Krebs, Handbook of Flexible Organic Electronics (2015), p. 177.
- [24] M. Hösel, R. R. Søndergaard, D. Angmo, and F. C. Krebs, *Adv. Eng. Mater.*, **15**, 995 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1002/adem.201300011>
- [25] E. Sutanto and A. Alleyne, *Mechatronics*, **31**, 243 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.08.002>
- [26] S. S. Es-haghi and M. Cakmak, Roll-to-Roll Manufacturing (2018), p. 65.
- [27] C. Decker, *Polym. Int.*, **45**, 133 (1998).
doi: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0126\(199802\)45:2<133::Aid-pi969>3.0.Co;2-f](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0126(199802)45:2<133::Aid-pi969>3.0.Co;2-f)
- [28] J. G. Drobny, *Radiation Technology for Polymers*, 2nd edn (CRC Press, Boca Raton, 2010).
- [29] J. P. Fouassier and J. F. Rabek, *Radiation Curing in Polymer Science and Technology* (Elsevier Applied Science, New York, 1993) p. 11.
- [30] S. H. Ahn and L. J. Guo, *ACS Nano*, **3**, 2304 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1021/nn9003633>
- [31] Y. Deng, P. Yi, L. Peng, X. Lai, and Z. Lin, *J. Micromech. Microeng.*, **25**, 065004 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/25/6/065004>
- [32] H. Lim, K. B. Choi, G. Kim, S. Lee, H. Park, J. Ryu, S. Jung, and J. Lee, *Microelectron. Eng.*, **123**, 18 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.03.037>
- [33] J. S. Chang, P. A. Lawless, and T. Yamamoto, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **19**, 1152 (1991).
doi: <https://doi.org/10.1109/27.125038>
- [34] E. B. Albert, EASTMAN KODAK CO, U.S. Patent 2,681,294 (1954).
- [35] G. O. William, DU PONT, U.S. Patent 4,445,458 (1984).
- [36] G. L. Booth, *Coating Equipment and Processes* (Lockwood Pub. Co, New York, 1970).
- [37] H. L. Weiss, *Coating and Laminating Machines : A Guide to the Design, Selection, and Usage of Coating and Laminating Machines* (Converting Technology Company, Milwaukee, Wisconsin, 1977).
- [38] T. Iwasaki, YASUI SEIKI KK, US, 1990.