

액체 연속 코팅 공정의 이슈와 미래

남 재 욱 (성균관대학교 화학공학부 조교수)

1. 서론

국내 전자 제품 산업이 중흥기를 맞이하면서, 다양한 소재 부품들, 예를 들면 접착테이프, 광학필름, 배터리 전극 등의 대량 생산 기술에 대한 폭발적인 관심이 증가하고 있다. 또한, 미래의 전기/전자 제품들, 예를 들면 말리는 배터리, 전자 종이, 접히는 휴대전화 등이 유연 전극 및 기판의 소재 부품들을 요구하면서, 필름 형태의 코팅 제품들의 초고속/초정밀 제작에 관련된 관심은 그 어느 때보다 높은 실정이다. 그러나 아이러니하게도, 폭발적인 소재 부품 제작에 대한 수요에 대비하여, 이러한 공정 기술들에 대한 투자 및 연구 개발은 매우 낮은 실정이다. 더 심각하게는 이러한 공정 기술을 과학과 공학의 영역이라기보다는 공정 조업자들의 소위 “손맛”에 의해 좌우되는 “예술(art)”의 영역으로 보거나, 고가의 해외 장비를 도입하여 (주로 turn-key 방식의 완전도입) 해결하려고 하는 80~90년대 산업의 발전 방식을 그대로 답습하고자 하는 경우가 비일비재한 실정이다.

기본적으로 양산공정 즉, 다시 말해 고속 공정이 가능하기 위해서는 여러 가지 방법들이 있을 수가 있으나, 용액을 기반으로 하는 공정 기법이 현재로써는 가장 합리적인 기법으로 여겨지고 있다. 고온 기반의 증착법과는 달리 저온 공정이 가능하여 고분자 기재 위에 코팅막을 도포할 수 있으며, 제대로 된 공정 디자인과 조업 조건 하에서 초당 미터 이상의 고속 필름 생산이 가능하다. 이에 따라 유연 기판 위의 코팅이 용이하므로, 현재 차세대 소재 부품 제작에서 가장 주목을 많이 받는 기법이다. 많은 소재

연구 논문들에서 실제 산업에 사용 가능하다는 점을 강조하기 위하여 가장 많이 등장 및 사용하는 문구가 “용액으로 가공 가능한 (solution processable)”이다. 그러나 이러한 관심에 반하여 실질적인 용액공정 기반의 연구는 아직 많이 부족한 실정이다.

본 기고문에서는 필자가 지난 2010년 한국화학공학회지 (NICE)에 투고했던 기고문(제28권 제2호 p552 “연속코팅 공정 개요와 미래과제”)에 이어 필자가 직접 연구 및 산학 자문, 그리고 기업체 기술자 대상 교육을 통하여 느낀 상황을 바탕으로, 코팅 공정 원리를 소개하고, 이를 바탕으로 코팅 공정 연구 부분의 현재 상태와 미래에 대한 방향을 제시하고자 한다.

2. 액체 코팅 공정의 개요

본 기고문에서는 용액 기반 공정 중에서 얇은 박막을 고속으로 제조하는 액체 코팅 공정에 대하여 다루고자 한다. 이 코팅 공정을 통하여, 유리의 표면, 전지의 전극, 세라믹 소재의 기판, 감광 드럼 등의 많은 부품에 추가적인 박막을 입힘으로써 필요한 기능성을 확보하고 있다. 예를 들어, 액정표시장치(LCD)나 발광다이오드 표시장치(LED)의 유리 표면 위에는 광학 기능성을 높이기 위해 빛의 반사를 조절하는 막이 필요하며, 이외에도 제품의 내구성을 높이기 위해 긁힘 방지막 또는 청결한 상태의 유지를 도와주는 막 등이 추가되기도 한다. 또한, 최근 터치스크린 등에는 추가로 잔여 지문 등의 흔적을 줄여주어 가시성을 높여주는 지문 방지층이 제품의 가치를 높이는 역할을 한다. 이처럼 코팅은 기본

적인 필름 제품의 특성 확보는 물론, 다른 제품과의 차별성을 부여할 수 있는 매우 강력한 기술이다. 그림 1은 코팅 공정으로 생산되는 제품의 몇 가지 예를 보여주고 있다.

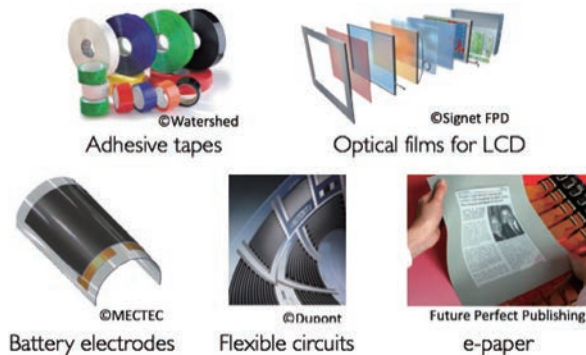


그림 1. 코팅 공정으로 생산되는 다양한 필름 형태의 제품들

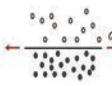
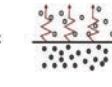

일반적으로, 제품의 경제성을 높이기 위해, 다시 말해 제품 단가를 낮추기 위하여, 위와 같은 필름들은 연속 공정을 통해 제조되어야 한다. 연속 코팅 공정이란 기본적으로 얇은 박막 형태의 기능성 필름을 액체인 상태에서 기재나 다른 필름 위에 추가한 후 건조공정을 통하여 고체화된 최종 제품을 생산하는 형태의 공정을 말한다. 대부분의 연속 코팅 공정의 목표는 얇고 두께가 일정한 제품을 빠른 속도로 생산하는 데 있다. 최근에는 이러한 기법을 확장하여, 두 개 이상의 층을 한 번에 코팅하거나(simultaneous multi-layer coating), 비연속성 형태의 필름을 제조(patch or discrete coating)하는 등 다양한 방식이 시도되고 주목을 받고 있다.

3. 액체 코팅의 기본 원리 및 이슈

액체를 활용하는 공정의 경우, 이송 및 공급의 용이성 때문에 연속 공정과의 연관성이 깊다. 이와 더불어 평탄한 코팅 막이 요구되는 경우, 액체의 사용이 강점을 보인다. 그러나 이러한 상황에서도 액체 코팅 공정은 크게 표 1과 같은 내용의 4대 이슈가 존재하고 있으며, 본 기고문에서는 이를 좀 더 자세하

게 살펴보고자 한다.

표 1. 액체 코팅 공정의 4대 이슈

○ 액체 코팅 공정의 4대 이슈	
1. '가장 손쉽게 평탄한 박막을 얻는 방법'은 "자연 현상"을 이용하는 것임 (기/액 계면에 작용하는 표면장력은 평탄화 기능이 있음)	Exploit surface tension 
2. 평탄화 능력을 극대화하기 위해서는 상대적으로 액체 유동으로 인한 점성력을 줄여야 하며, 이를 위해 과량의 용매를 투입하여 코팅액의 점도를 낮춤.	$N_{Ca} = \frac{\text{Viscous force}}{\text{Capillary force}}$
3. 최종 고체 막 형성을 위해서 추가된 용매를 제거하는 공정(건조 공정)이 필요함.	Remove excessive solvent 
4. 도포 및 건조 과정 중에 용액 내의 첨가물 (나노 및 마이크로 입자들 포함)이 미세 구조를 형성하게 되고, 이 구조에 따라 필름의 성능이 결정됨.	

기본적으로 밀도 차이가 급격하게 발생하는 기/액 계면의 경우, 분자 간의 인력 및 척력과 같은 상호 작용의 차이에 의하여 표면 장력(surface tension)이라 불리는 힘이 존재하게 된다. 용어에 사용되는 "장력"에서도 파악할 수 있듯이, 이 힘은 표면을 평탄하게 만드는 효과가 있다. 참고로 이와 유사하게 농도 차이가 발생하는 액/액 계면에서도 해당 현상이 발생하며 이를 계면 장력(interfacial tension)이라 불리나 그 크기가 대략 10분의 1 정도로 작다. 따라서 이러한 표면 장력의 효과로, 액체 코팅은 잘 조정된 환경(특히 젖음 현상이 제어되는 상황)에서 평탄화 효과를 얻을 수 있다. 이렇게 자발적인 자연 현상을 활용하게 되면, 도포 과정 중 잘못된 디자인이나, 최적화되지 않은 조업조건 하에서 발생하는 작은 두께 편차도 쉽게 극복하여 평탄한 막을 비교적 쉽게 확보할 수 있게 된다. 이러한 현상은 액체 코팅의 큰 장점이라 볼 수 있다.

그러나 기본적으로 유동이 발생하는 상황에서는

점성력(viscous force)이 발생하며 이는 표면장력과 경쟁을 하게 된다. 이러한 힘의 비를 유체역학 및 유변학에서, 주로 케필러리 수(Capillary number)로 표현한다. 큰 케필러리 수는 주어진 시스템에서 점성력이 우세함을 간접적으로 확인할 수 있으며, 작은 수는 이와 반대로 표면장력이 우세함을 의미한다. 필름 형성에서 점성력은 여러 가지 효과가 있을 수도 있으나, 평탄화 현상으로 국한하는 경우, 이 힘은 표면장력으로 인한 평탄화 효과를 상쇄하는 작용을 한다. 따라서, 기본적으로 표면장력에 의한 평탄화를 극대화하기 위해서 상대적으로 점성력을 낮추거나, 표면장력의 효과를 높이는 상황이 조성되어야 한다. 그러나 표면장력의 제어의 경우, 계면활성제 및 초임계화를 통하여 낮추기는 쉽지만, 크기를 증가시키기는 매우 어렵다. (온도조절이나 고표면장력 물질의 계면 응축 이외에는 표면장력의 증가시키는 기법은 거의 전혀 없는 것으로 필자는 알고 있다.) 따라서, 상대적으로 점성력을 낮추는 것이 평탄화 관점에서는 쉬운 방법이며, 이를 위해서 과량의 용매(solvent)를 투입하거나, 큐어링(curing) 등의 고분자화 기반의 필름의 경우, 단분자 형태의 단량체(monomer) 등의 활용을 통하여 코팅 용액 자체의 점도를 상대적으로 낮추는 기법이 활용된다. 여기서 참고로 점도가 낮다는 의미는 고분자 용융체(polymer melt)를 사용하는 압출 및 사출과 같은 고분자 가공 공정에 대비하여 낮다는 의미이다. 지나치게 저점도의 용액의 경우(예를 들어 10cP 이하), 얇은 필름 제작에 사용할 시, 젖음 현상으로 인한 파열(dewetting-induced film rupture) 등과 같은 다른 자연현상으로 인하여 불량을 일으킬 수 있으므로, 다른 주의를 필요로 한다.

이러한 상대적 저점도 용액을 슬롯 코터, 바코터, 혹은 그라뷰어 코터와 같은 코팅 장비를 사용하여 적절한 마이크로 규모의 유동을 발생하여, 최종적으로는 큰 종횡비(aspect ratio)를 가지는 필름 형태로 도포 할 수 있으며, 이를 도포 공정(application

process) 혹은 헵의 코팅 공정(coating process)이라고 불린다.

그러나 도포 공정만을 거친 코팅막을 최종 제품과는 거리가 멀다. 평탄화 작업의 편의 및 코팅 유동상의 제어 편의를 위해서 추가되는 과량의 용매 및 단량체 형태의 코팅액은 액체 상태이므로 제작된 필름도 젖은 필름(wet film) 형태이다. 따라서, 과량의 용매를 증발시키거나, 단량체의 고분자화를 통하여 고체화시키는 공정이 들어가게 된다. 이러한 단계를 흔히 건조 공정(drying or curing process)이라고 지칭하며, 도포 공정과 함께 건조 공정은 코팅 공정 중 가장 중요한 부분을 차지하고 있다. 이후에 나오는 코팅막의 평탄도를 높이거나, 물성을 보정하기 위한 압형(calendering)이나 층판화(laminating)와 같은 후처리(postprocessing) 기법들이 존재한다. 도포 공정과 건조 공정에 활용되는 현상에 대한 자세한 내용은 지난 기고문 (NICE지 제28권 제2호 p555~560)에서 확인할 수 있다.

그러나 이러한 필름 형태를 제조해 내는 것이 코팅 공정의 목표는 아니다. 일반적으로 필름의 기능을 부과하거나 가공 시 물성을 조절하기 위한 첨가물 (바인더, 나노 및 마이크로 입자, 계면활성제 등)들이 형성된 코팅 막 내부에서 다양한 미세구조(microstructure)를 형성해야 한다. 이러한 미세구조의 형성의 경우, 다양한 열역학적 현상을 이용하여 상분리 현상을 활용한다든지, 건조 과정의 속도를 조절하여 필름의 유변학적 물성의 변화(예를 들면 점도의 증가)를 통해 열역학적으로 불리한 상황에서도 형성된 미세구조를 유지하거나, 마지막으로 코터 내부의 다양한 유동을 제어하여 입자의 농도 및 방향, 형태를 조절함으로써 (예를 들면 stress-induced particle migration or orientation 등의 물리현상을 활용) 미세구조를 제어할 수 있다.

이와 같은 다양한 상황의 공통점은 크기가 미터 이상인 거시적인 크기의 장비들(코터나 건조장비)을 활용하여, 미시적인 구조(형성된 미세구조의 크기는

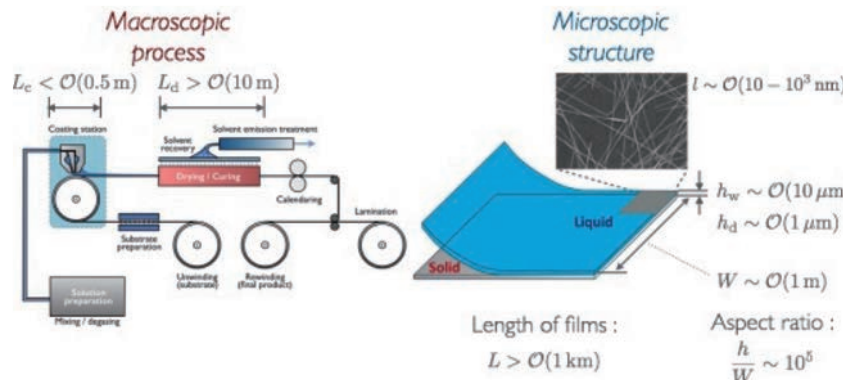


그림 2. 연속 코팅 공정상에서 나타나는 다양한 대표 크기들(characteristic length scales)

수 나노에서 수십 마이크로에 이르는)를 제어해야 한다는 점이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 연속 액체 코팅 공정은 매우 다양한 크기의 현상들을 다루어야 한다. 필름 내부는 나노 및 마이크로 크기의 미세구조로 되어 있으며, 이를 담고 있는 필름(정확히 말해서 젖은필름, wet film)의 경우 100마이크론 내외이다. 그러나 일반적으로 양산형 필름의 폭은 1미터에 달하고, 그 길이는 킬로미터 이상 생산되어야 대량 생산을 통한 가격경쟁력을 확보할 수 있다. 이처럼 매우 큰 거시 현상은 물론 미시 현상까지 한꺼번에 다루어야 하므로, 그 필름 형성 원리를 파악하지 않은 채 설계된 공정법은 늘 잠재적인 문제를 가질 수 있다.

이 중 가장 제어하기 어려운 것이 필름 내 미세 구조형성이다. 예를 들면 반사 방지 코팅의 경우, 광학적 효과를 위해서 마이크로 수준의 3차원 피라미드나 2차원 홈(groove) 등을 제작하여야 하는데, 이러한 구조물의 정밀도가 매우 높아야 제대로 된 광학적 성능을 낼 수 있다. 그러나 이를 기계적으로 템플릿(template)을 활용하여 균일하게 찍어내는 것은 실질적으로 거의 불가능하다. 따라서 물리 혹은 화학적인 기법을 활용하여, 앞서 말했던 세 가지 상황, 열역학적 현상, 속도론적인 제어, 혹은 유동을 활용한 기법을 통한 자연 현상(physical or chemical phenomena)을 활용하지 못한다면 대량 생산이 매우 불리하게 된다. 예를 들면, 앞서 언급한 반사 방지 코

팅의 주기적인 미세구조의 경우, 열역학적 현상이나 유체역학적 현상을 통한 자가 조립(self assembly)을 활용할 수 있다면 매우 효율적으로 제작할 수 있다. 따라서 코팅 공정은 기본적으로 이러한 현상에 대한 이해를 바탕으로 공정을 디자인하고 조업조건을 확보하는 것이 가장 중요하다. 이를 통해 볼 때, 비록 개발의 속도는 느릴 수 있으나, 경험 위주의 노하우(know-how)적 접근보다는 현상의 이해를 통한 노와이(know-why)가 합리적인 접근법이며, 장기적으로 볼 때 우리 산업이 추구해야 할 방향이라 볼 수 있다.

이러한 원리 및 자연현상의 이해를 통한 접근법에서 가장 중요한 것이 정량화(quantification)이다. 정량화는 최적화(optimization)의 객관성을 확보해 주며, 장비의 설계 변수(design parameter)의 도출 및 최적 운영 조건(operating conditions)의 선정에도 도움이 된다. 예를 들어 유체역학 및 유변학적 이론을 바탕으로, 코팅 유동 현상의 정량화를 통하여 코팅 윈도우(코팅 유동이 안정화 되는 조업 가능 영역) 선정이 가능하며, 물질 전달 및 열역학적 기법이 건조 현상의 정량화를 통하여, 건조 윈도우(불량 유발 현상이 없는 건조 가능 영역)의 선정이 가능하다. (자세한 예는 NICE지 제28권 제2호 p556~559 참조.) 그러나 이에 비하여 아직도 매우 부족한 것이 코팅 막 내부의 미세구조에 대한 정량화라 할 수 있다. 현재 대부분의 연구가 국부적 정성 정보만 제공해 주는

전자현미경 사진에 의존하여 필름의 성능을 간접적으로 확인하는 것에 그치는 만큼 이러한 구조의 정량화 및 지표 개발은 매우 중요하다 하겠다.

예를 들어 금속 나노와이어를 이용하여 투명전극용 필름을 제조하는 경우, 투명도 (transmittance) 및 면저항(sheet resistance)과 같은 물성의 경우, 제작된 필름의 평탄도뿐만 아니라, 필름 내부의 나노와이어의 개수, 위치 및 길이 분포, 배향과 같은 정보는 물론 궁극적으로는 나노와이어들의 형성되는 퍼콜레이션 네트워크(percolation network) 구조를 분석하여, 투명성 즉 적은 양의 나노와이어만으로도 효율적으로 전기를 통할 수 있는지 확인해야 한다. (그림 3 참조) 또한 이를 실제 제작된 필름의 성능 지표들(투명도 및 면저항)과 연관 관계를 규명하는 연구들이 필요하다. 이와 같은 연구는 실제 저자의 연구실에서 집중적으로 추진하고 있다.

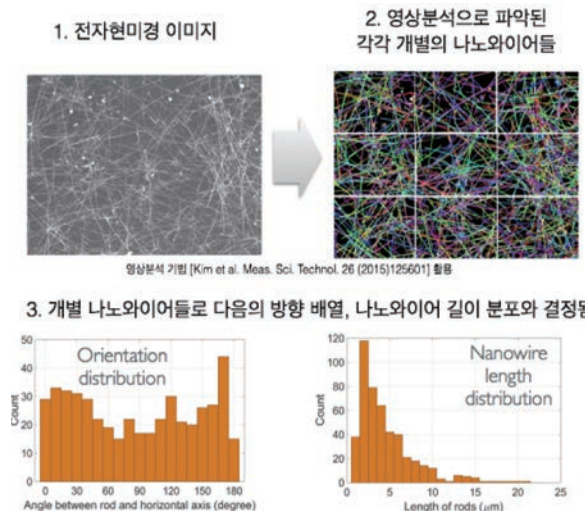


그림 3. 코팅법으로 제조된 나노와이어 필름 내부의 나노와이어 네트워크 구조 분석 예. 굳이 이러한 개별 정보들을 확보하는 이유는 25마이크론 길이 정도의 긴 나노와이어들은 벌크 코팅 용액에서 10마이크론 두께의 필름으로 잘 전달되지 못한다. 따라서, 긴 나노와이어들의 개수를 파악하는 것은 좋은 코팅법(긴 나노와이어들이 전도도 향상에 도움이 되므로)을 판별할 수 있는 척도가 될 수 있다. (아래 그림들은 Dogjae Kim, Jungkyu Choi and Jaewook Nam, Meas. Sci. Technol. 26 (2015) 125601에서 소개된 기법으로 분석된 예임)

4. 불량 현상의 이해를 통한 코팅 공정 디자인

살펴보았듯이 연속 액체 코팅 공정은 매우 얇은 필름을 빠른 속도로 제작하고 더 작은 크기의 필름 내 미세구조를 조절하여 원하는 성능을 구현하는 것이다. 이를 위하여, 거대한 크기(미터 규모)의 공정 장비를 활용하여 물리 및 화학적 현상을 정밀하게 조절하는 것이 필요하다. 따라서 성공적인 코팅 장비를 설계하거나 최적 운영 조건을 찾기 위해서는, 거꾸로 불량을 일으키는 현상을 이해하는 것이 필요하다. 이러한 불량을 유발하는 현상은 매우 다양한 형태로 나타날 수 있다. 따라서 모든 현상을 모두 다루는 것은 사실상 불가능하며, 여기에서는 두 가지 현상에 대하여 소개하고자 한다.

일반적으로 분산 문제(dispersion)는 코팅에서 가장 중요한 문제로 대두되나, 국내 대부분의 코팅 관련 현장에서는 코팅 용액의 조성(formulation)을 통한 해결만을 고려하는 경우가 많다. 이 경우 열역학적 안정 상태(stable state)를 고려한 평형 상태(equilibrium)만이 강조되고 있다. 즉, 다시 말해 용액 자체의 상태만 고려할 뿐 유동 및 건조 상의 고려는 크게 되고 있지 않다. 그러나 최종 필름의 미세구조는 열역학적으로 불안정 된 상태라 할지라도 속도론적으로 제어가 가능할 수 있으므로, 분산의 경우에도 공정의 관점도 같이 고려해야 한다.

앞서 언급된 대로, 표면장력의 영향을 극대화하기 위해 제조된 상대적 저점도 용액의 경우, 첨가물들을 균일하게 섞기 위하여 교반 공정(mixing step)이 필수적으로 활용된다. 이때 많은 경우, 감압 장비를 활용하여, 용존 기체를 빼주는 기법을 활용하기도 한다. 이런 용존 기체량의 조절과 첨가물들의 용액 내부의 혼합 정도 조절은 이후 공정단계에서 매우 중요한 선행 조건이나, 코팅 공정 개발 및 연구 등에 있어서 소홀하게 관리 혹은 디자인되는 경우가 많다. 이러한 부분은 현재 입자계 코팅의 중요성이 강조되면서, 중요 코팅 공정 연구 내용으로 대두 될

것이다.

이렇게 균질하게 교반된 용액을 파이프를 통해서, 펌프 등의 압력 조절장치를 활용하여, 파이프 등으로 이송된다. 파이프 시스템의 특징상 다양한 피팅들(밸브, 급확대부, 급축소부 등)을 통과하게 되면서, 급격한 압력 변화를 겪게 되며, 와류와 같은 유동 변화를 수반할 수 있게 된다. 이러한 와류는 유체의 궤적이 원과 같이 닫힌 형태이므로, 체류시간이 길게 되며, 내부적으로 쓸림률(shear rate)이 존재할 수 밖에 없는 특징을 지니고 있다. 따라서, 앞서 언급된 첨가물이나 입자들의 사로잡히게 되고(체류시간 증가), 이들의 와류 내부에서의 이동을 수반하게 된다. (일반적으로 강한 쓸림힘이 존재하면 입자는 이러한 쓸림힘을 피하고자 움직이게 되는데 이것을 입자 이동현상 혹은 shear-induce particle migration 현상이라 한다.) 결국 응집(flocculation or coagulation) 등의 현상이 유도될 수 있으며, 이를 통하여 상대적으로 크기가 큰 응집체를 형성하게 된다. 비슷한 현상이 제대로 연결되지 않은 피팅을 통해 유입되는 기체 방울이나 심지어 용존 기체들이 압력 및 온도와 같은 열역학적 상태변화를 통해 형성된 기체 방울에도 적용되며, 비슷한 과정을 통해 거대 기체 방울(수십 혹은 수백 마이크로 이상)을 형성할 수 있다. 따라서 이러한 응집체 및 거대 기

체 방울들은 마이크로 사이즈의 코팅 유동을 방해하거나, 코팅 장비 내의 좁은 통로를 막거나, 최종 필름에 전사되어 불량유발 현상(defects)으로 전이될 수 있다.

또한, 현재의 대부분의 코터 내부의 용액 분배 장비(예를 들면 슬롯 코팅 다이 내부의 메니폴드)의 경우, 입자나 첨가물들의 국부 농도(local concentration)의 변화를 고려하지 않고 제작된 경우가 많다. 따라서, 이러한 와류 혹은 입자 이동 현상들로 인하여 제작된 필름 폭 방향으로 입자 및 첨가물들의 농도가 일정하게 유지가 되지 못하여 불량을 유발할 수 있다. 따라서 이러한 사항을 코팅 장비 설계에 포함되어야 한다.

또한, 유체 공급의 경우, 진동을 유발하는 펌프 장비와 파이프 시스템이 직접 연결되어 있으므로, 잘못된 파이프 시스템 설계 혹은 부주의한 관리가 이러한 진동이 증폭되어 문제를 발생시킬 수 있다. 예를 들어, 파이프 등이 공중에 지지가 되지 않고 걸려 있는 경우, 해당 파이프는 고유 진동수를 가지게 되며, 펌프의 맥동이 공진에 의해 증폭되어 고른 유량 공급을 방해할 수 있다. 이외에도 특이한 유변 물성에 의해서도 펌프 시에 진동이 발생할 수 있다. 필자 연구실의 공개적으로 보고되지 않은 사례에 의하면, 뉴턴 유체 및 전단 박하 유동에서 거의 무맥동의

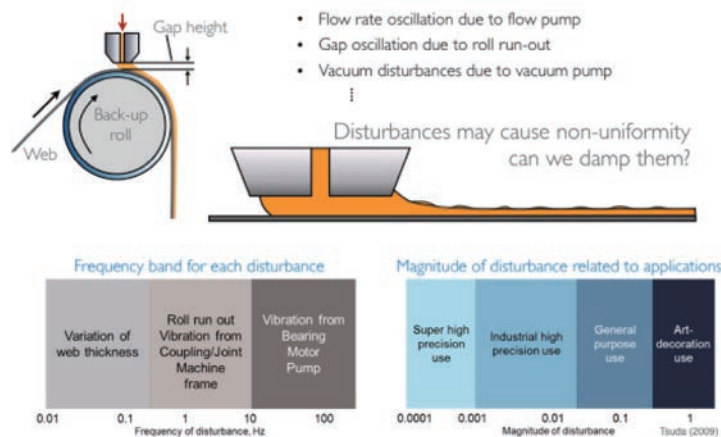


그림 4. 슬롯 코팅 기법에서 유발될 수 있는 다양한 진동의 예 (Semi Lee and Jaewook Nam, AIChE J, 2016 61 1745-1758 및 Tsuda et al, AIChE J, 56 2267-2279에서 자세한 내용을 확인할 수 있음.)

로 작동하는 펌프도 약간의 항복력이 추가된 점소성(viscoplastic) 유체 사용시 진동을 유발할 수 있음이 확인된 바 있다.

이러한 진동의 원인은 이러한 물성 및 파이프 시스템뿐만 아니라 매우 다양하다. 예를 들어, 기재를 지지하는 백업 롤(back-up roll)의 표면이 원형과 벗어나면서 회전하는 경우, 코팅 장비와 기재 사이의 거리가 시간에 따라 일정하게 유지되지 못하여 코팅 유동에 진동이 전달될 수 있고, 기재의 전송장비에도 진동이 발생할 수 있으며, 감압장치에서도 진동이 유발되는 등 다양한 원인이 있을 수 있다. 예를 들면 슬롯 코팅 기법의 경우, 그림 4와 같이 다양한 진동들이 존재할 수 있으며, 이러한 진동이 코팅 유동에 전달되면, 생산되는 필름의 두께 편차를 유발할 수 있다. 이외에도 건조 공정 중에서도 매우 다양한 문제가 발생할 수 있으나, 지면 제약 상 여기서는 언급하지 않고 다음 기회에 다루도록 하겠다.

4. 맺음말

앞서 살펴본 바와 같이, 코팅 기술은 물리 및 화학적 현상에 대한 이해를 기반으로 분석되어야 하고, 이러한 분석 결과들은 정량 지표로 변환되어 공정 최적화 및 설계로 활용되어야 한다. 이를 위해서, 궁극적으로는 현상에 대한 심도 있는 이해가 필요하며 이러한 현상을 정량화할 수 있어야 한다. 이를 위해서 다양한 학제간의 융합 연구가 필요하다. 이러한 연구가 기반이 되어야 비로소 코팅 공정 개발의 원천 기술을 확보할 수 있으며, 새로운 필름 형태 제품의 개발을 선도할 수 있다.

또한, 코팅 공정 기술의 개발은 기존의 회사 중심

의 노하우(know-how) 기반으로 한, 즉 경험 및 아이디어에 의존한 연구로는 한계가 있다. 예를 들어 인화지(photographic film) 제조에 쓰였던 코팅 공정 기법이 광학 필름(optical film)의 제조에 쓰일 수 있지만, 두 제품의 물성의 차이에 의하여, 장비 일부를 새로 디자인해야 하며, 공정 조건도 달라진다. 물성과 공정의 특성에 대한 체계적이고 과학적인 이해 없이는, 인화지 제조에 쓰이던 제조 노하우는 재사용될 수 없으며, 정상적인 (그리고 경제성 있는) 필름의 생산을 위해서는 무수한 시행착오(trial and error)를 반복할 수밖에 없다. 따라서 코팅 연구에 있어서, 노와이(know-why) 방식의 연구 패러다임이 절실히 요구된다. 이러한 패러다임의 변화와 꾸준한 산학협력 만이 우리나라의 코팅 기술의 경쟁력을 확보할 수 있다. 이를 위하여, 이윤 확보 위주의 단기 간 응용 기술 투자보다는 코팅 공정 내 현상의 기저 원리를 규명할 수 있도록, 장기적으로 지속할 수 있는 연구(fundamental study)를 위해 국가와 기업의 지원이 필요하다 하겠다..

•• 남 재 욱 ••



2000 서울대학교 응용화학부 학사
2004 서울대학교 응용화학부 석사
2009 미국 University of Minnesota 박사
2009~2012 미국 Rice University Postdoc
2012~현재 성균관대학교 화학공학부 교수