

코팅도막의 결함과 방지대책 (2)

原崎 勇次 / 原崎總合 Consultant 소장

이 글은 일본의 기술사·경영사·공학박사로서 종합 컨설턴트회사를 운영하고 있는 原崎勇次씨가 한국포장기술연구소(소장 김영호)가 주최해 연 코팅 관련 세미나에서 발표한 내용을 우리말로 옮겨 분재하고 있다. 워낙 이론의 깊이가 있고 내용이 까다로워 번역상의 오류가 있을 수 있다. 이 분야에 종사하고 있는 여러분의 질정을 바라고, 한편으로 이 글이 도움이 될 것도 기대한다.

목 차

- | | | |
|---|--|--|
| <p>1. 결함의 기본 원리</p> <p>1-1 동력과 표면장력</p> <p>1-2 레올로지(Rheology)</p> <p>1-3 용매의 용해성과 증발</p> <p>1-4 용매(Solvent)</p> <p>2. 코팅 방식에 따른 결함과 방지 대책</p> <p>2-1. 에어 독터 코터
(Air Doctor Coater)</p> <p>2-2. 블레이드 코터(Blade Coater)</p> <p>2-3. 로드 코터(Rod Coater)</p> <p>2-4. 나이프 코터(Knife Coater)</p> <p>2-5. 정회전 롤 코터
(Direct Roll Coater)</p> <p>2-6. 리버스 롤 코터
(Reverse Roll Coater)</p> <p>2-7. 그라비아 코터</p> <p>2-8. 커튼 코터(Curtain Coater)</p> <p>2-9. 압출 코팅</p> <p>2-10. 기타 방식</p> | <p>2-11. 도료의 레벨링(Lavelling)</p> <p>3. 도공 직후 공정에 있어서의 결함과 방지 대책</p> <p>3-1. 유자 껍질(Orange Peel)</p> <p>3-2. 도포 반발(Cissing)과 오우리듬(Cratering)</p> <p>3-3. 발포(Foaming)</p> <p>3-4. 시딩(Seeding)</p> <p>3-5. 색 불균일
(Colour Ununiformity)</p> <p>3-6. 도포의 처짐
(혹은 도포 흐름, Sagging)</p> <p>4. 건조 공정의 결함 방지 대책</p> <p>4-1. 핀홀(Pinhole)</p> <p>4-2. 백화(Blushing)</p> <p>4-3. 광택 소실(Frost Mat)</p> <p>4-4. 링클(Wrinkle)</p> <p>4-5. 경화 불량
(Insufficiency of Cure)</p> | <p>4-6. 용매 기포(Solvent Popping)</p> <p>4-7. 가스 체크(Gas Checking)</p> <p>4-8. 선단부의 과도포(Fat Edge), 프레임잉(Framing)</p> <p>5. 노화(Aging)후에 있어서의 결함과 방지 대책</p> <p>5-1. 도포 불량
(Insufficiency of Adhesion)</p> <p>5-2. 균열(Crack)</p> <p>5-3. 초킹(Chalking)</p> <p>5-4. 블리스터
(부풀어 오름, Blistering)</p> <p>5-5. 변색(Discolouration)</p> <p>5-6. 부식(Corrosion)</p> <p>6. 도막의 결함과 그것들의 상호 연결
(Interconnection)</p> <p>6-1. 레올로지</p> <p>6-2. 표면장력</p> |
|---|--|--|

2. 코팅방식에 따른 결함과 그 방지 대책

2-1 에어 독터 코터 (Air Doctor Coater)

에어 독터 코터에서 야기되는 주된 결함은 줄무늬와 기포이다. 에어 독터의 공기압이 너무 높으면 용액이 분무화되고 블레이드 선단이 더러워져 줄무늬가 생기는 원인이 된다. 또는 노즐의 가장자리가 기계적 손상을 받으면 줄무늬를 만든다.

대책으로는 △노즐 선단을 청소한다. △노즐 가장자리를 연마하거나 교환한다.

또 에어 독터의 노즐 슬릿 앞 내부에 부착된 외래 입자가 줄무늬를 만든다. 대책으로는 △공기 도관을 조립할 때 청소에 주의한다. △녹에 주의한다. △송풍기 또는 에어 독터의 앞을 여과한다.

한편 기포가 발생하는 전형적인 원인은 다음과 같다.

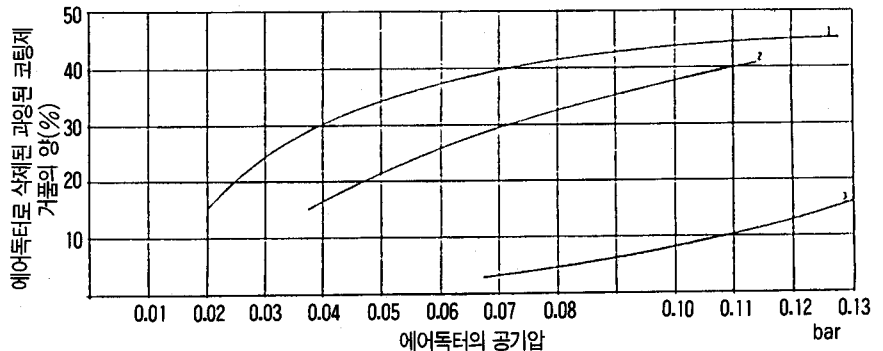
① 애플리케이션 : 애플리케이터 롤이 코팅제 용액 중에 충분히 잠기지 않았을 때 일어나므로 롤의 직경은 적어도 20~25cm이어야 한다.

② 계량과 평탄화 : 에어 독터압이 너무 높을 때, 노즐 폭이 너무 높을 때, 공기 투입각이 작을 때

③ 과잉 도료 회수 : 도료가 자연낙하되었을 때(안내 버클을 이용한다), 가능한 한 파이프나 호스를 꼭 채워 둔다.

④ 재순환 : 펌프질을 할 때 기포가 옮겨 다닌다. 항상 용기 바닥에 도료를 충전한다(필요하다면 조제용 호스를 이용한다).

[그림 1] 에어 독터에서 거품 형성의 공기압 의존성



에어 독터의 설정 조건 : 노즐 틈새 = 0.6mm, 노즐과 지지체간 거리 = 3mm, 공기류의 경사각 = 7° 분출 공기류와 백업롤 축을 통과하는 수평선과의 거리 = 15mm, 백업롤의 주속도 30m/min, 지지체 : PVdC코팅용 바렌 크라프트지에서 높은 캘린더 길이의 특수품, 코팅제 : PVdC 분산

1. 코팅 속도 150m/min, 고형분 농도 55%
2. 코팅 속도 150m/min, 고형분 농도 42%
3. 코팅 속도 50m/min, 고형분 농도 55%

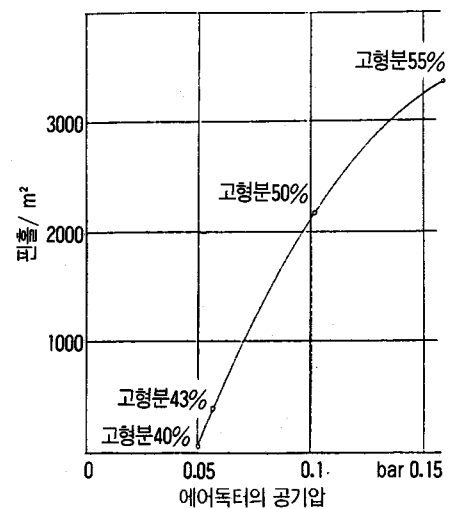
[그림 1]에서는 에어 독터에 의해 회수된 PVdC 에멀전이 과잉된 기포의 체적과 공기 압력과의 관계를 나타낸다. 기포의 양은 공기압뿐만 아니라 도공 속도 및 고형분 농도와 더불어 증가한다.

일정한 PVdC 층의 두께를 얻는데 필요한 공기압은 분산(Dispersion)의 농도와 더불어 감소하므로 회색을 하는 것은 도막의 차단성을 개량한다. 이것은 [그림 2]에서 확인된다.

에어 독터 코터에서는 도공 속도의 증가와 더불어 도공 중량이 늘어 일정한 도막의 두께를 얻는데 필요한 공기압도 그것에 상당하여 도공 속도와 더불어 늘어난다. 그러나 이것은 기포의 형성이 강화되므로 층의 차단성은 나빠진다([표 1] 참조).

아직 축축해 있기는 하나 너무 빨리 경화된 도막은 지지체 표면 중에 있는 결함을 이제는 평탄하게 할 수 없다. 따라서 에어 브러시(Air Brush)에 의해

[그림 2] 다양한 코팅 속도에서 에어독터의 공기압에 의한 코팅량의 의존성



코팅제 : PVdC 에멀전 고형분 농도 = 55%, 지지체 : PVdC 코팅용 특수품에서 바렌 크라프트지의 높은 캘린더 길이 45g/m², 에어 독터 : 노즐 틈새 = 0.6mm, 노즐과 지지체간 거리 3mm, 공기류의 경사각 7°, 분출 공기류와 백업롤의 축을 통과하는 수평선과의 거리 15mm, 백업롤의 주속도 30m/min, 건조 구역 1: 125°C, 2: 150°C, 3: 175°C, 예비건조의 1R 22.8kw/m²

생긴 작은 거품에 가두어진다. 경화 속도는 다음과 같은 요인에 의존한다. 즉 △예비 건조 IR의 속도, △지지체에 의한 물 흡수, △코팅제의 고형분, △코터 헤드(Coater Head)와 건조로 사

이에서 체류하는 시간.

이중 예비 건조 IR 조사(照射)가 끼치는 영향의 한 가지 예를 [표 2]에 나타낸다. 예비 건조의 IR 조사 강도가 증가함에 따라 핀홀이 증가하여 도막

의 차단성은 약화된다. 핀홀에 의한 도막의 약화는 [표 3]과 같이 코팅제를 희석한 경우에도 생긴다.

[표 2]에서 볼 때 제 2층에서도 도공 속도가 100m/min 이하인 경우에만 약화가 일어난다. 이에 대해 도공 속도가 가장 높은 경우에는 IR 조사(照射)를 이용하면 도장 피막의 차단성은 개량된다. 이 결과는 에어 브러시대신 메이머 바를 이용하였을 때에는 발견되지 않는다.

도공 중량과 코팅 회수의 영향에 대해 알아 보면 [표 4]와 같이 코팅 중량

[표 1] 차단성의 코팅 속도 의존성

코팅속도 m/min	에어 덕터			메이머바	
	공기압(bar)	코팅중량(g/m ²)	핀홀(수/m ²)	코팅중량(g/m ²)	핀홀(수/m ²)
50	0.06	11.8 + 7.6	20	9 + 9	30
100	0.10	11 + 9.4	340	10 + 10	20
150	0.13	11.8 + 9.8	810	10 + 10	90

지지체:바렌 크라프트지의 높은 캘린더 45g/m², PVdC코팅용 특수품, 코팅제:PVdC 에멀전, 고형분 55%, 에어 덕터에 의한 코팅, 건조:열풍, 코팅의 최종 온도:95°C

[표 2] PVdC 코팅지의 차단성에 미치는 예비건조 IR 조사의 영향

코팅속도(m/min)			25			50			100			150		
IR조사강도(kw/m ²)			A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1. 에어브러시	1.1 제1층	0	105	120	2.0	105	200	2.4	105	330	4.5	1.5	1,500	7.2
		64.6	116	900	2.2	115	950	2.5	112	550	4.3	110	2,500	8.2
	1.2 제2층	0	105	120	2.1	105	280	4.1	105	530	5.5	105	2,900	6.4
		64.6	118	890	4.6	115	820	6.8	113	200	2.8	110	950	3.8
2. 메이머바	제1층	0	-	-	-	90	55	1.6	90	15	2.5	90	20	1.6
		64.6	-	-	-	100	60	2.0	95	20	2.1	95	20	1.5

A:코팅의 최종 온도(°C), B:핀홀/m², c:수증기 투과성(g/cm², 24hr)

지지체: PVdC 코팅용 특수지에서 바렌 크라프트지의 높은 캘린더 길이 45g/cm², 코팅제:PVdC 에멀전, 코팅 중량:(1)(12+8)g/m², (2)(10+10)g/m², PVdC 에멀전의 고형분 농도 (1):50%, (2):55%, 예비건조에서 IR조사:(1.1) 제2층에 대해 없음, (1.2) 제1층에 대해 없음, (2) 제2층에 대해 없음.

[표 3] 차단성의 IR조사 강도 의존성(기초도공-에어브러시)

코팅제 라텍스의 고형분(%)	에어브러시의 공기압(bar)	예비건조의 IR조사강도 제1층(kw/m ²)	핀홀/m ²
55	0.15	0	440
		22.8	580
		44.2	840
50	0.085	64.6	1,160
		0	170
		22.8	210
45	0.050	44.2	390
		64.6	470
		0	90
		22.8	40
		44.2	200
		64.6	1,360

지지체:바렌 크라프트지의 높은 캘린더 길이 45g/m², PVdC 코팅용 특수품
 도공제:PVdC 에멀전, 코팅 중량(12+8)g/m²,
 에어 브러시 코팅 속도 150m/min, 제 2층 코팅 건조의 IR 조사(照射) 없음, IR 조사기(照射器)와 지지체와의 거리 3.5cm

[표 4] PVdC 코팅막의 투과성에 미치는 코팅회수의 영향

코팅중량(g/m ²)	No. 1	No. 2	No. 3
제 1 층	20	12	7
제 2 층	-	8	7
제 3 층	-	-	6
수증기 투과성(g/m ² , 24hr)	4.1	2.5	1.9
CO ₂ 투과성(cm ³ /m ² , 24hr, bar) ⁺⁺	3,445	9.4	5.7
지방투과성(핀홀/m ²)	765	25	0

⁺⁺DIN 5338

지지체: PVdC 코팅용 특제품, 바렌 크라프트지의 고켈린더 길이 45g/m²

이 비슷한 경우에는 코팅 회수가 많은 쪽이 도막의 차단성을 확실히 개선한다. 그러나 일반적으로 코팅을 3회 이상 실시한 경우에는 내지성(耐脂性)의 이득이 매우 작다. 코팅 회수가 같은 경우에는 코팅 중량이 증가함에 따라 차단성이 개선된다.

2.2 블레이드 코터

블레이드 코터 및 나이프 코터에서 일어나는 스크래치(Scratch)와 스트리크(Streak)의 원인인 대책을 살펴보면 다음과 같다.

① 블레이드가 손상되거나 또는 너무 오래 사용하였다.

대책: 블레이드를 교환하거나 조정한다.

② 지지체 위에 이물질이 있다.

대책: 애플리케이션터 앞에 먼지 흡인 장치를 단다.

③ 지지체에서 광택이 너무 난다.

대책: 전처리에 거친 안료를 사용한다.

④ 지지체의 흡수성과 코팅제의 보수성(保水性)이 일치하지 않는다.

대책: 적절한 조제(助劑)를 사용하여 보수성을 높인다.

⑤ 코팅제의 점도가 너무 높다.

대책: 얇게 한다. 처방을 개정한다. pH를 조정한다.

⑥ 블레이드 밑을 제대로 세척하지 않는다.

대책: 코팅제 공급장치의 과잉량을 많이 한다. 코팅제의 순환 속도를 높인다.

⑦ 코팅제 중에 이물질이 있다.

대책: 분급(分級)과 여과를 재검토한다.

블레이드 코팅에서 볼 수 있는 짧게 굽힌 자국인 Scratch는 코팅제의 점도 또는 고형분 농도에 거의 비례한다. 따라서 코팅제의 조제(調製)를 엄밀히 조정할 필요가 있다. 또한 지지체 위에 있는 티끌 등의 불순물, 코팅제의 부적절한 여과 및 블레이드 상태도 스크래치의 주요 원인이다. 지지체의 액체 흡수성이 큰 경우에는 비교적 낮은 점도의 코팅제를 필요로 한다. 코팅제에서 액체가 선택적으로 제거되고 점도를 늘리면 블랭드에서 스크래치를 일으키기 때문이다.

팽창(Dilatant) 코팅제 또는 잘 분산되지 않는 코팅제는 블레이드 선단에서 스크래치를 만드는 입자를 형성하기 쉽다. 따라서 스크래치 제어는 코팅제에서 지지체로 흘러가는 액체의 이동을 감소시키는 것으로도 가능하다.

흡수성 지지체에 대한 전(前)코팅은 1.5g/m²의 낮은 코팅량에서 효과가 있다.

긴 줄무늬인 streak의 원인으로서는 다음과 같은 것을 생각할 수 있다.

① 끝이 예리한 줄무늬는 스크린(Screen)으로 제거할 수 없었던 원재료(안료, 고착제 등) 중에 들어 있는 사상 입자 때문이다.

② 폭이 상당히 넓은 줄무늬는 스크린을 통과하고 나서 코팅제 속으로 떨어져 들어간 건조 코팅제 조각 또는 녹과 같은 불순물로 인해 생긴다.

③ 레올로지적 줄무늬로 불리는 폭 넓은 줄무늬는 높은 고형분과 큰 액체의 침투가 중첩되어 블레이드의 선단에서 거의 고체 형태의 코팅제를 형성하기 때문이다.

①의 사상 입자에 대해 말한다면 75 μ 이하(혹은 200메시 이하)인 입자에서는 줄무늬를 뚜렷하게 만들지 않고, 160 μ 이상(혹은 100메시 이상)인 입자에서는 줄무늬를 만든다. ③의 레올로지적 줄무늬는 전색제(Vehicle)의 침투가 너무 커서 코팅제가 높은 전단 속도하에서 팽창 상태가 되기 때문이다. 팽창 상태 하에서도 높은 고형분이 아니면 줄무늬를 만들지 않는다. 그 경우 코팅량이 크면 도료층의 바깥쪽에서부터 흘러드는 전색제의 이동은 감소되므로 줄무늬가 발생하는 경우는 줄어든다.

블레이드의 각도가 45°일 때는 60°일 때보다도 줄무늬가 많아진다. 왜냐하면 입자가 압입되는 블레이드 밑의 췌기가 좁아질수록 블레이드 닙(NIP) 속에 사상 입자가 머무를 기회는 커지기 때문이다. 게다가 코팅 속도가 빨라짐에 따라 줄무늬는 현저하게 증가한다.

다.

또한 지지체와 코팅제와의 접촉각이 증가하더라도 줄무늬가 발생하는 경향은 감소한다.

따라서 코팅제의 보수성을 증가시킴으로써 분사 불균형은 감소하거나 없어진다.

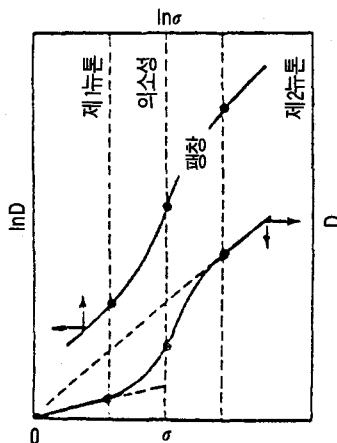
또 원래 코팅제 중에는 줄무늬가 되는 입자가 전혀 없더라도 블레이드와 코팅제와의 전기화학적 영향으로 인해 줄무늬를 만드는 일이 있다. 이 기구(機構)에 대해서는 아직 상세하게 알려진 바 없다.

이상과 같은 사실로 볼 때, 새로운 코팅제는 적어도 150~220 메시, 그리고 재순환 코팅제는 100메시의 스크린을 통과시키고나서 사용해야 할 것이다.

2.3 로드 코터

막대에 와이어(Wire)를 감은, 소위 메이커 바에서 와이어의 곁에 상당하는 줄무늬가 최종 코팅 피막의 표면에 결함으로 남는 일이 있다. 그 대책을 아래에서 열거해 본다.

[그림 3] Ostwald 유동곡선



① 코팅 속도를 올려 제 2뉴턴 영역을 활용한다.

[그림 3]에서 나타내는 바와 같이, 다양한 유동 형식이 각각 독립적으로 존재하는 것이 아니라 전단 속도를 광범위하게 잡으면 일반적으로 Ostwald 형 유동(제 1뉴턴)으로서 행동하는데, 응력이 커지면 유동 곡선은 맨처음 응력축에서凸이 되고 이어서凹이 되어(非Newtonian 유동), 마지막에 가서는 再Newtonian 유동(제 2뉴턴)을 나타낸다. 따라서 줄무늬가 나오는 非뉴턴 영역을 벗어나 제 1뉴턴으로 갖고 가, 즉 저속으로 하거나 도료를 얇게 하면 줄무늬가 없어지는데, 그것보다는 제 2 뉴턴으로 갖고 가, 즉 코팅 속도를 올림으로써 줄무늬를 없애고 동시에 생산성을 올리는 것이 이득이다.

② 로드의 위치를 가능한 한 애플리케이터 롤에 가깝게 한다. 요즘 나오는 기계는 대체로 그러한 구조로 되어 있다.

③ 지지체를 로드의 주위에 덮이지 않게 한다.

④ 로드 부분에서 지지체의 장력을 너무 크지 않게 한다.

⑤ 지지체와의 도장성이 좋은 코팅제 조성으로 한다.

⑥ 점도를 내려 Newtonian 유동에 가깝게 하거나 회복시간이 약간 느린 조성으로 한다.

2.4 나이프 코터

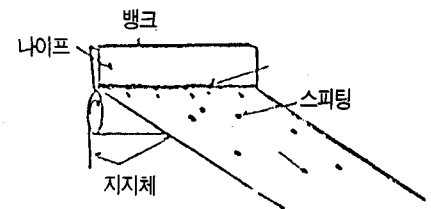
나이프 코팅에서 일어나는 대표적인 문제점으로는 '뒷면 침투 자국'이 있다. 이것을 '칼 자국' 또는 Spitting이라고도 한다. [그림 4]에서 나타내는 바와 같이 코팅 방향을 따라 나이프의 뒷면

으로 도공체가 스며들듯이 올라가 초기에는 올라온 미립자 코팅제가 성장하여 구상(球狀)의 '뿔'(Spitting, blobs: 작은 반점)이라고 불리우는 오점(汚點)을 코팅면에 남기는 결함이다.

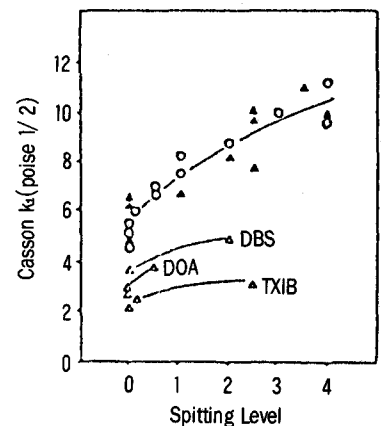
폴리염화비닐의 플라스틱줄에서는 팽창이 인정되지 않는 졸(Sol)에서도 '뒷면 침투 자국'을 일으키므로 점도~전단 속도 곡선상의 팽창이 '뒷면 침투 자국'의 필수 조건은 아니다.

10sec⁻¹에서는 높은 점도일수록 뒷면 침투 자국을 남기기 쉽다. 10²sec⁻¹에서 거의 모든 코팅제는 팽창이 절정으로 되는 전단 속도에서 측정이 불가능할수록 높은 점도이면 코팅이 불가능해진다. 이 전단 속도에서의 점도와 '뒷면 침투 자국'과는 거의 무관하다.

[그림 4] 스피팅 결함의 모식도



[그림 5] $D=1\sim 10\text{sec}^{-1}$ 의 점도에서 계산한 Casson K₁값과 스피팅 거동($U=29\text{m/min}$)과의 관계



[그림 5]에서는 $D=1\sim 10_{\text{sec}^{-1}}$ 의 점도치에서 구한 Casson식의 k_1 값 ($\frac{\ell_{\text{im}}}{D-\infty} \eta \alpha$)^{1/2} 과 뒷면 침투 자국의 상관성을 나타낸다. k_1 값이 낮을수록 뒷면 침투 자국이 적다.

코팅 속도의 영향에 대해서는 속도가 증가함에 따라 뒷면 침투 자국이 생기기 쉬우므로 낮은 점도의 코팅제가 필요하게 된다.

뒷면 침투 자국과 Casson k_1 값의 관계를 [그림 6] (a)~(c)에서 나타낸다. 코팅 속도가 변하더라도 k_1 값은 뒷면 침투 자국에 거의 대응한다. 각 코팅 속도에서 뒷면 침투 자국을 만들지 않게 되는 k_1 값을 구하여 이것을 $k_1 \text{ crit}$ 라고 하고, $1 / (k_1 \text{ crit})^2$ 과 도공속도 U 와의 관계를 [그림 7]에 나타내었는데, 거의 원점을 통과하는 직선을 얻는다. 즉

$$(k_1 \text{ crit})^2 \cdot U = \text{const.} \dots \dots \dots (8)$$

또 Casson식 $\sigma^{1/2} = k_0 + k_1 D^{1/2}$ 에서 k_1^2 은 항복치를 뺀 점도에 해당하여 이것을 η_{red} 라고 하면

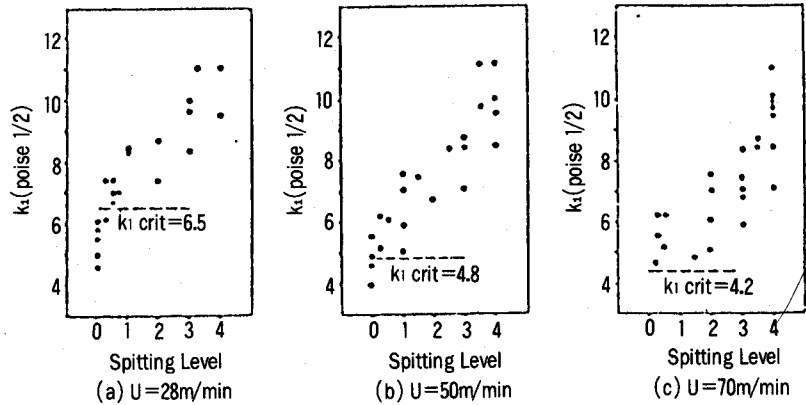
$$\eta_{\text{red}} \cdot U = \text{const.} \dots \dots \dots (9)$$

로 표현되어 코팅 속도를 증가시킬 때에는 반비례적으로 코팅제의 점도를 내릴 필요가 있음을 의미하고 있다.

[그림 8]은 팽창 전후의 전단장(場)에서 일어나는 입자 유동 상태의 모델 그림으로, 팽창 유동 영역에서는 층류이었던 입자가 미세한 난류로 옮겨가는 것을 나타내었다. 이러한 난류가 코팅 나이프 에지(Knife edge)에서 일어나면 이상한 유속도 분포를 일으켜 뒷면 침투 자국을 남기게 된다.

결론적으로 뒷면 침투 자국을 남기

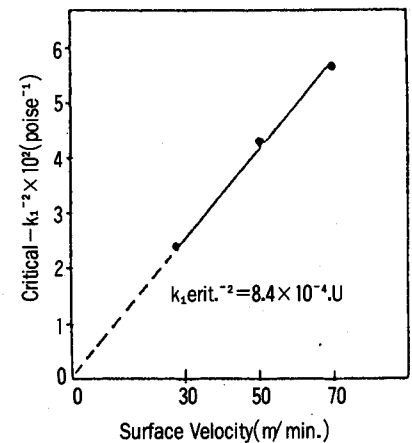
[그림 6] 스퍼팅 거동의 표면속도 의존성



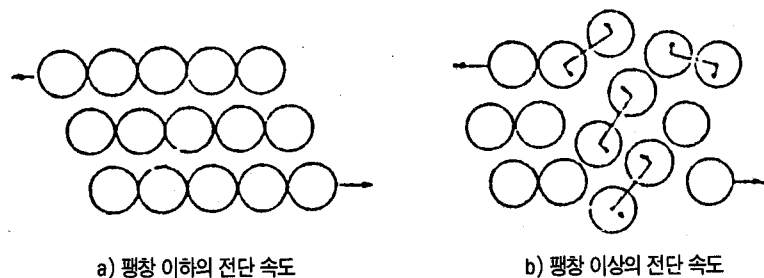
지 않으려면 대체로 낮은 점도의 코팅제를 첨가한 배합제를 사용하는 것이 바람직하고 또 고형분의 분율을 약간 감소하는 것도 효과적이다. 상용성(相溶性)이 비교적 작은 가소제를 배합한 경우에는 낮은 점도에서도 뒷면 침투 자국을 남기기 쉽다. 고속으로 코팅을 할 경우 뒷면 침투 자국을 남기지 않으려면 코팅 속도에 거의 반비례하게 코팅제의 점도를 내릴 필요가 있다.

코팅 속도, 나이프 클리어런스로부터 계산한, 즉 나이프 아래에서 10^3sec^{-1} 의 정도인 전단 속도에서의 점도보다는 오히려 $10_{\text{sec}^{-1}}$ 의 점도치, $1\sim 10_{\text{sec}^{-1}}$ 의 점도치와 Casson 식에서 k_1 값의 상관성이 높다.

[그림 7] $k_1 \text{ crit}^2$ 의 표면속도 의존성



[그림 8] 전단 영역중의 입자 모델



2.5 정회전 롤 코터(다이렉트 롤 코터)

같은 방향으로 등속 회전하는 롤 코터에서 일어나는 코팅 피막의 결함은 점각(点刻)상, 또는 파형(波形)의 반점 모양이다. [그림 9]에서 나타내는 바와 같이 롤의 넘으로부터 지지체가 이탈되는 점에서 공동(Cavitation)을 일으키고, 그 때문에 코팅막이 깨지는 일이 있다. 그런 경우에 지지체면과 롤면에 코팅의 점각 또는 파형 모양의 반점이 생긴다.

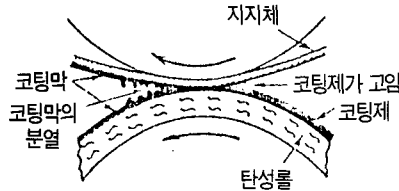
반점의 정도는 코팅제의 레올로지, 점도, 속도, 코팅량 및 롤 경도에 의존하여 속도와 코팅량이 커질수록 악화된다.

탄성이 다른 두 개의 롤에 의해서 형성된 넘을 통과할 때 일어나는 작용은 탄성이 클수록 압력으로 인해 변형된다. 그러나 롤이 너무 무르면 반점 모양과 코팅량이 증가하는 경향은 적어진다. 따라서 롤의 경도는 주의하여 잘 선택할 필요가 있다.

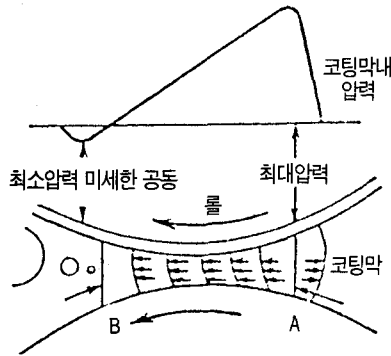
[그림 10]에서 롤의 넘에 코팅제가 들어가면 압력이 급상승하여 압력이 최대가 되는 곳에서 전단이 없는 최초의 영역이 나타난다. 그리고 코팅제 내의 압력은 점차 감소되어 넘의 출구를 지나면 압력은 대기압과 비슷해져 다시 전단 없는 면 B가 나타난다. B를 지나면 코팅 피막은 아래 위로 끌려간다. B에 도달할 때까지 코팅제는 층류형으로 흘러가나 B를 지나면 부압(負壓)이 된다.

압력이 최소인 곳에서 코팅제가 장력을 받으면 저속일 때는 힘을 완화하면서 넘의 중심을 향해 자유 표면이 아치 형태의 잘룩한 모양으로 되는데, 고속이 되면 응력을 완화하는 데 필요한

[그림 9] 코팅막의 분열에 대한 넘의 작용



[그림 10] 롤간 넘의 압력과 속도 분포

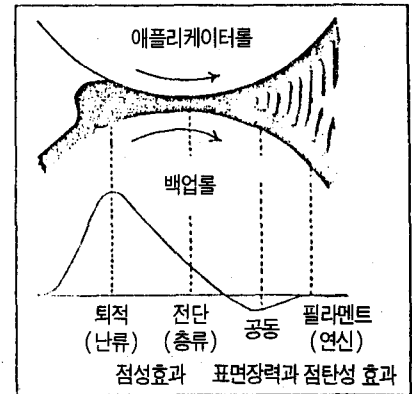


자유 표면이 이동할 정도로 충분한 시간적 여유가 없으므로 피막의 내부에 작은 공동이 발생하고 이것이 급격히 성장하여 필라멘트 형태로 늘어났다가 마침내는 잘라진다.

Gaskell은 [그림 11]에서 나타내는 바와 같이, 다음의 4가지 특징이 있는 영역으로 나누었다.

- ① 전단 속도가 크게 흔들리고 있어 난류가 있는 퇴적 영역(Bank Region)
- ② 층류이고, 전단 속도가 변화하는 수력학적 전단 속도 영역(Shear Region)
- ③ 전단 속도가 매우 낮아 공동 중심에서부터 방사상 유동이 있는 공동 영역(Cavitation Region)
- ④ 전단이 국부적으로 존재하여도 공의 흐름에 수직 유동을 갖는 필라멘트화 영역(Filamentation Region)

[그림 11] 회전롤러간 넘중 4곳의 특유한 영역과 압력분포의 모식도



Newtonian 유체가 넘을 통과할 때의 압력 분포를 계산하면 입구 영역에 존재하는 압력의 극대는 넘을 통과하는 코팅제를 흘려보내기 위한 펌프로써 작용하고, 출구 영역의 압력이 극소(부압)로 되는 것은 필라멘트의 전구체인 공동을 만들고 그것으로부터 리브(Rib)를 형성한다. 따라서 입구 영역에서는 전이 특성을 결정하고, 출구 영역에서는 리브 모양을 형성한다. 리브의 크기와 수는 최종 표면의 외관에 큰 영향을 끼친다.

Meyer에 의하면 필라멘트가 분열하는 데에는 두 가지의 기구(機構)가 있다. 즉 점성 비탄성 유체에 대한 점성 분열과 점탄성 유체에 대한 점탄성 분열이다. 리브 크기의 안전성에 의존하여 필라멘트가 안정될수록 리브의 크기는 커진다. Glass에 의하면 점탄성 유체 중의 필라멘트화는 인장 점도에 의해 제어되어 탄성의 본성은 늘어난 필라멘트를 안정시킨다.

브러시 및 롤 코팅에서는 폴리에틸렌옥사이드, 폴리아크릴아미드, 히드록시에틸셀룰로스와 같은 고(高)분자량

의 증점제(增粘劑)를 배분한 코팅제가 높은 전단 속도에서 상당한 인장 점도를 나타내고, 이것은 마침내 리브가 있는 코팅 모양을 만든다. 코팅제의 탄성적 성질은 리브의 크기에 나쁜 영향을 준다.

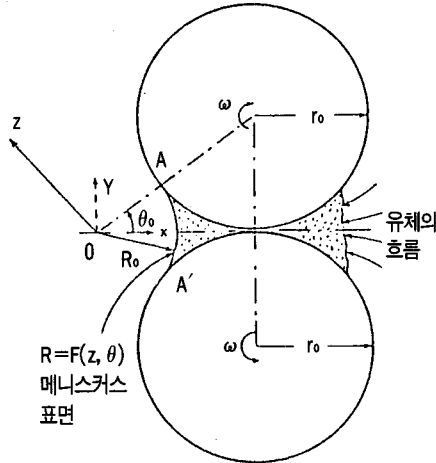
일반적으로 리브의 수와 리브의 발생 조건은 다음과 같은 3가지의 파라미터로 고찰된다. 즉 물의 반경 r , 넓의 간격 l , 그리고 모관 수 $\eta U/r$ 이다. 여기서 U 는 평균 물 주속(周速)이다. Mill에 의하면 정회전 물에 의한 Newtonian 유체의 리브가 발생하는 임계조건은 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{\eta U}{r} \left(\frac{r}{l}\right)^{3/4} = 10.3 \dots\dots (10)$$

실제의 관점에서 본다면 이 관계는 리브 없이 경제적인 속도로 코팅할 수는 없다는 것을 의미한다. γ 과 l 이 일정한 경우 리브의 수는 η/r 의 값이 2.4 까지 증가함에 따라 늘어나고 그리고 나서 $\eta U/r$ 과는 무관해져 계(系)의 기하학적 파라미터, 즉 물의 반경과 넓의 간격에만 의존한다. 전형적인 고속 도공 $\eta U/r > 2.4$ 에서 리브의 수는 넓 간격에 의존하여 리브의 수는 넓의 간격이 감소함에 따라 지수함수적으로 증가한다.

Babchin 일행은 리브가 링 모양으로 되는 원인은 액체/공기 계면에 있어서의 표면장력과 원심력과의 길항작용임을 발견하였다. 링은 물 사이의 갭(gap) 속에서 동적 액체 메니스커스(Meniscus)의 표면에서 생기는데, 여기에는 매우 큰 원심력이 있기 때문이다. 이 문제는 단 하나의 자유 파라미터인 메니스커스의 반경으로 환원할 수 있어 난류의 파장을 계산할 수 있다. 그

[그림 12] 동일 방향으로 회전하는 2개의 물체



유체는 물의 표면상에서 박막을 형성한다. 이 코팅막의 형성과 불안정성은 메니스커스의 형상에 의존한다. R_0 는 난류되지 않는 메니스커스의 반경이다. 난류된 메니스커스의 표면이 변화될 수 있는 반경은 $R=F(z, \theta)$ 로 표현된다.

곡률(曲率) 반경은 액체의 레올로지 특성과 운동학적 조건에 의존한다.

기초 미분식

[그림 12]와 같이 두개의 정회전 물체에 있어서 액체/고체 계면에서의 압력차 ΔP 로서의 표면장력과 원심력 사이의 차이, 소위 계면 압력 점프(Jump)를 반영하는 곳의 Young-Laplace식에서 출발한다. 즉

$$\text{압력차 } \Delta P = r \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{\rho \omega^2 R^2}{2} \dots\dots (11)$$

표면장력
원심력

(γ : 코팅제의 표면장력, ρ : 코팅제의 밀도, R_1, R_2 : 각각 코팅제 표면에 있는 점의 곡률 주반경, R : 어떤 표면점에서 회전의 순간 반경, ω : 같은 표면점에서 순간 각속도)

모든 코팅제 점에 대한 회전의 영구 각속도 벡터의 문제를 고려한다.

만일 반경 $R=R_0$ 가 모든 표면점에 대해 동일하다면 원통 표면은 조금도 흐트러지지 않고 R_0 는 곡률의 유일한 반경으로, 식(11)은 다음과 같이 바뀌 쓸 수 있다.

$$\Delta P_0 = \frac{\gamma}{R_0} - \frac{\rho \omega^2 R_0^2}{2} \dots\dots (12)$$

만일 이 표면이 약하게 흐트러지면, 차이 $R-R_0=f$ 는 $f/R_0 < 1$ 이 되는 조건 하에서는 작은 난류이다[그림 13]. 또 만일 ω =일정하고 난류가 정상적인 상태이면 ΔP 는 모든 표면점에서 동일해야 할 것이다. 이것은 식(11)의 길항작용을 하는 표면장력과 원심력 항과의 사이에 압력의 내부 보상이 있다고 하는 경우에만 성립한다. 그렇게 하면 ΔP 는 흐트러진 계면과 흐트러지지 않는 계면에서 같은 값을 가져야 할 것이다. 식(11)과 (12)가 비슷하다고 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$r \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) - \frac{\rho \omega^2 R^2}{2} = \frac{\gamma}{R_0} - \frac{\rho \omega^2 R_0^2}{2} \dots\dots (13)$$

이리하여 회전하는 원통형 액체 표면이 작은 난류에 대한 미분식은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} + \frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \left(\frac{1}{R_0^2} + \frac{\rho \omega R_0}{r} \right) \cdot f = 0 \dots\dots (14)$$

회전하는 한 개의 물 위에 있는 도장 피막의 난류: 링 형태의 난류는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\text{작은 난류 } f = \epsilon \cos KZ \dots\dots (15)$$

(ϵ :작은 진폭, K :난류의 파형 수)
 식(14)에 식(15)를 대입하면 파형 수 K 를 얻을 수 있다.

$$\text{파형 수 } K = \frac{1}{R_0} \sqrt{1 + \frac{\rho \omega^2 R_0^3}{r}} \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{난류의 파장 } \lambda = \frac{2\pi}{K} \frac{2\pi R_0}{\sqrt{1 + \frac{\rho \omega^2 R_0^3}{r}}} \dots\dots\dots (17)$$

같은 방향으로 회전하는 원통:[그림 12], [그림 13]에서 물 표면 위에 형성되는 얇은 코팅 피막과 난류는 메니스커스의 형상에 의존한다. 흐트러진 메니스커스 표면이 변화될 수 있는 반경은,

$$R = F(Z, \theta) = R_0 + f(Z, \theta)$$

로 표시된다. 여기서 R_0 는 흐트러지지 않은 메니스커스의 반경이다.

반경 R_0 를 갖는 메니스커스의 자유 표면은 회전하는 물의 표면과 점차적으로 접촉하여야 한다. 이러한 요구를 마찬가지로 흐트러진 메니스커스의 경우로 확장하면 작은 난류는 점차적인 접촉선을 따라 제로에 가까워진다.(이 점차적인 접촉선은 물리적 액체층 아래에 있는 원통형 물 표면 위에 놓인다)

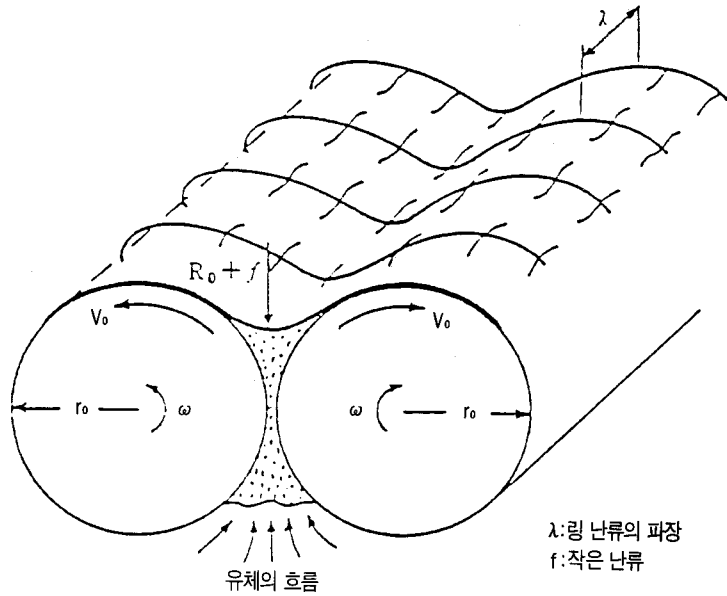
이 마지막 요구에 대해서는 다음과 같은 한계 조건을 준다.

$$f(\theta_0, Z) = 0 \dots\dots\dots (18)$$

(θ_0 :부채꼴 메니스커스각([그림 12] 참조))

Z 축에 따르는 파형으로서 수학적식을 풀어 식(18)의 한계 조건을 이용하면, 파형 수 K 와 파장 λ 는 다음 식과 같이 주어진다.

[그림 13] 동일 방향으로 회전하는 2개의 물체와 생성하는 난류의 파라미터



$$\text{파형 수 } K = \sqrt{\frac{\rho V_0^2}{3rR_0} + \frac{1}{R_0^2}} \left[\frac{\pi}{2R_0 \arcsin \frac{1}{1+R_0/r_0}} \right]^2 \dots\dots\dots (19)$$

$$\text{파장 } \lambda \approx 2\pi \sqrt{\frac{3rR_0}{\rho V_0}} \dots\dots\dots (20) \quad \text{다.}$$

(V_0 : 물의 표면선 속도)

$$\mu V_0 / r > 1 \quad (\mu: \text{동적 점도})$$

흐트러진 메니스커스의 반경 R 은 물의 틈새 d 뿐만 아니라 물 주속도 V_0 에 의존한다. $R_0 < r_0$ 이기 때문에 액체의 부근에 있는 입자는 물의 표면상보다도 메니스커스 영역 안에서 원심력이 훨씬 강한 장(場) 내에 있다. 따라서 난류가 메니스커스 영역 안에서 일어나 난류는 원심력의 영향을 크게 받는다.

일반적으로 물 위의 코팅층 양 선단에서는 리브가 큰데, 이것은 에지(edge)효과이다.

Newtonian 액체에서 전형적인 공업용 코팅에서의 동적 조건은 다음과 같

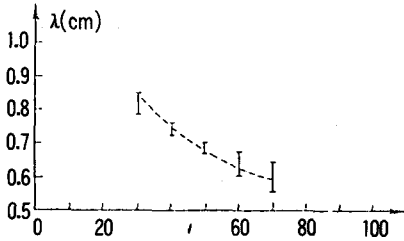
동적 메니스커스 안에 있는 안료 첨가 가공제의 레올로지적 특성을 알아보자.

물 표면선 속도가 약 60m/min일 때, 메니스커스의 실측 반경이 0.2와 1cm의 사이에 있었다고 하자. 그러면 메니스커스 영역 안에서의 변형 속도는 거의 $D \approx V_0/R_0 \approx 100 \sim 500 \text{sec}^{-1}$ 이다. 레올로지적 곡선의 이 부분은 Bingham의 다음 식에 거의 같아진다.

$$\sigma = \eta D + \sigma_0 \dots\dots\dots (21)$$

(σ :전단응력, η :소성 점도, σ_0 :항복

[그림 14] 2개 물계의 표면속도를 함수로 한 점도량 난류의 파장



실험점을 통해 끌어들이는 곡선은 식(20)과 식(22)에서 계산하였다. 단, $h=0.2\text{mm}$, $\eta=220\text{cp}$, $\sigma=650\text{dyn/cm}^2$, $\tau=50\text{dyn/cm}$, $\rho=1\text{g/cm}^3$

응력)

사용한 가공제를 Hercules의 콘플레이트(Coneplate)형 점도계로 측정하였다. $\eta \approx 2\text{poise}$, $\sigma_0 \approx 650\text{dyn/cm}^2$ 이었다. 그러면 전단 응력의 점성 부분은 $\sigma \approx \eta D \approx 200 \sim 1000\text{dyn/cm}^2$ 이고, 항복 응력 σ_0 와 같은 단위의 크기를 갖는다. 따라서 이 코팅제는 점소성적 레올로지 물체로서 거의 행동한다.

원심 압력은 $p \approx \rho V_0^2 / 2 \approx 5,000\text{dyn/cm}^2$ 으로 개산(概算)할 수 있고, 이것은 메니스커스 영역 안에서는 응력 텐서(tensor)에 미치는 원심 효과가 응력

텐서의 레올로지적 성분보다 더 중요함을 의미한다. 이것은 표면장력과 원심력과 사이에서 일어나는 경쟁의 정당성을 증명하는 것으로 원심력이 난류의 주된 요인이다.

다음에서 나타내는 이론값과 실험값을 비교해 보자.

非Newtonian 액체에서는 항복 응력 σ_0 를 고려하여야 한다.

동적 메니스커스의 평균 반경 R_0 는 다음의 식으로 표시된다.

$$R_0 \approx 2(\eta V_0 / r)^{2/3} \cdot (\eta V_0 / \sigma_0)^{1/2} \cdot \sqrt{h}$$

.....(22)

파라미터 $\eta V_0 / r$ 은 이 프로세스의 모관수이고, η / σ_0 는 완화 시간이고, $\eta V_0 / \sigma_0$ 는 완화 프로세스에 관한 특유의 길이를 나타내고, 계수 2는 실험 계수이다.

식(22)는 실험적으로 관측할 수 있었다면 같은 단위를 갖는 크기의 반경 $R \approx 0.2 \sim 1\text{cm}$ 를 얻을 수 있다. 식(22)를(20)에 대입하면 [그림 14]와 같이 실험 데이터와 일치한다.

두개의 정회전 물계에서는 모든 타입의 유체에서 항상 링 타입의 난류를 일으킨다.

[표 5] 여러가지 코팅제계의 레올로지

코드	계		레올로지 특성				흐름과 평단환		상대 넓 간격 (l/l_0^*)
	플리머	중점제	포드캡=4	B형점도	ICI점도	레올로지 지수	도막 10μ	도막 20μ	
I	라텍스 A	T-1	30초	1230 cp	22 cp	0.02	매우 나쁘다	너무 나쁘다	1.36
II	라텍스 A	T-2	30	317	30	0.09	나쁘다	매우 좋다	1.00 _{a)}
III	라텍스 A	T-3	31	270	35	0.13	나쁘다	매우 좋다 -	0.86
IV	라텍스 B	-	28	275	84	0.31	매우 좋다	매우 좋다 +	0.36
V	라텍스 C	-	27	270	62	0.23	좋다	매우 좋다	0.48
VI	라텍스 D	-	27	250	58	0.23	좋다	매우 좋다	0.52
VII	라텍스 E	-	29	255	66	0.27	매우 좋다	매우 좋다 +	0.45
VIII	시판용제형 에나멜	-	86	330	310	0.94	(우수)	(우수)	0.10

a) 픽업롤 / 애플리케이션롤 / 패넬 롤 = 30.5/128/91.5m/분 b) 생산 우수 c) 식(2)에서 계산 (제2장 참조) d) 표준