

# 코팅 도막의 결함과 방지 대책(3)

原崎 勇次/일본 原崎總合 Consultant 소장

이 글은 일본의 기술사·경영사·공학박사로써 종합 컨설턴트회사를 운영하고 있는 原崎 勇次씨가 한국포장기술연구소(소장 김영호)가 주최해 연 코팅 관련 세미나에서 발표한 내용을 우리말로 옮겨 분재하고 있다.

## 목차

|  |   |
|--|---|
| <p><b>1. 결함의 기본 원리 (Basic Principle of Defect)</b></p> <p>1-1 동력과 표면장력 (Gravity &amp; Surface Tension)</p> <p>1-2 레올로지 (Rheology)</p> <p>1-3 용매의 용해성과 증발 (Solubility and Evaporation of Solvent)</p> <p>1-4 용매 (Solvent)</p> <p><b>2. 코팅 방식에 따른 결함과 방지 대책</b></p> <p>2-1 에어 닥터 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 (Levelling)</p> <p><b>3. 코팅 직후 공정에 있어서의 결함과 방지 대책</b></p> <p>3-1 유자 껍질 (Orange Peel)</p> <p>3-2 도포 반발 (Cissing) 과 오우라듬 (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><b>4. 건조 공정의 결함 방지 대책</b></p> <p>4-1 핀홀 (Pinhole)</p> <p>4-2 백화 (Blushing)</p> <p>4-3 광택 소실 (Frost Mat)</p> <p>4-4 링글 (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), 프레이밍 (Framing)</p> <p><b>5. 노화(Aging)후에 있어서의 결함과 방지 대책</b></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><b>6. 도막의 결함들과 그것들의 상호 연결 (Interconnection)</b></p> <p>6-1 레올로지</p> <p>6-2 표면장력</p> |
|--|---|

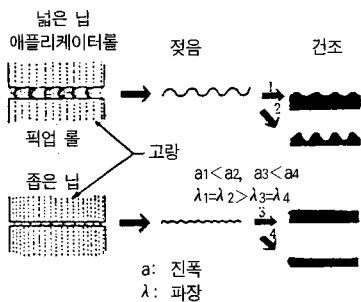
2-6 리버스(Reverse) 롤 코터  
(1) 고랑과 레올로지 인덱스

리버스 롤 코터에서 맨처음 마주치는 도장 피막의 결함은 아마 등그

스름하게 약간 솟아오른 흐름방향으로 비교적 굵은 줄무늬, 즉 고랑 형태의 리브(Rib)일 것이다. 이것은 애플리케이션 롤과 픽업(pick-up) 롤(혹은 미터링 롤)에서 유래하는 고랑이 도장 피막에 나타나는 것이다. 점성 비탄성(비뉴턴이고 비탄성 유체) 코팅제에서, 고랑의 수(또는 고랑의 간격)는 애플리케이션 롤과 픽업 롤(혹은 미터링 롤) 사이의 립(Lip) 간격에 의해 1차적으로 결정된다.

[표 1]에서는 레올로지적으로 다른 코팅제 도장 피막 표면의 외형을 나타낸다. 이것은 Profilometer의 결과인데, 대개 표면 형상은 정현파(正弦波)로 간주할 수 있다.

현상론적으로 말한다면 애플리케이션



[그림 1] 립설정대 표면파상의 모식도

[표 1] 여러가지 코팅제계의 레올로지<sup>a)</sup>

| 코드   | 계         |     | 레올로지특성 |        |       |         | 흐름과 평탄화            |                    | 상대립 간격<br>(l/l <sub>0</sub> ) |
|------|-----------|-----|--------|--------|-------|---------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
|      | 플리머       | 증점제 | 포드캡-4  | B형점도   | ICI점도 | 레올로지 지수 | 도막10μ              | 도막20μ              |                               |
| I    | 라텍스A      | T-1 | 30 초   | 1230cp | 22cp  | 0.02    | 매우 나쁘다             | 매우 나쁘다             | 1.36                          |
| II   | " A       | T-2 | 30     | 317    | 30    | 0.09    | 나쁘다                | 매우 좋다-             | 1.00 <sup>b)</sup>            |
| III  | " A       | T-3 | 31     | 270    | 35    | 0.13    | "                  | " -                | 0.86                          |
| IV   | " B       | -   | 28     | 275    | 84    | 0.31    | 매우 좋다              | " +                | 0.36                          |
| V    | " C       | -   | 27     | 270    | 62    | 0.23    | 좋다                 | "                  | 0.36                          |
| VI   | " D       | -   | 27     | 250    | 58    | 0.23    | "                  | "                  | 0.52                          |
| VII  | " E       | -   | 29     | 255    | 66    | 0.27    | 매우 좋다              | " +                | 0.45                          |
| VIII | 시판용제형 에나멜 |     | 86     | 330    | 310   | 0.94    | (우수) <sup>b)</sup> | (우수) <sup>b)</sup> | 0.10                          |

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

이더 롤에 있어서 고랑의 간격(또는 고랑의 주파수)은 롤 속도와는 거의 무관하고, 픽업 롤(또는 미터링 롤)과 애플리케이션 롤 사이의 립 간격에 크게 의존한다. (그림 1)에서 보는 바와 같이 립 설정이 좁을수록 고랑은 가늘어진다. 이 립의 설정을 일정하게 하였을 때에는 표 5에서 나타내는 코팅제의 레올로지는 고랑의 간격에 영향을 주지 않으나, 마지막 도장 피막 두께에는 영향을 미친다.

전이 특성이 보다 좋은 코팅제계에서는 일정한 도장 피막의 두께를 얻기 위해 픽업 롤과 애플리케이션 롤 사이의 립 설정을 보다 작게 할 필요가 있다. 그렇게 하면 [그림 1]에 나타난 바와 같이, 도료의 고랑 구조는 훨씬 가늘어진다. 따라서 도료의 전이능은 고랑의 생성과 도장 피막 표면의 품질을 1차적으로 결정한다(그림 1의 2와 3을 비교해 보라).

리버스 롤 코팅을 고속으로 할 때 이용되는 전단 속도는 10<sup>4</sup>sec<sup>-1</sup> 또는 그 이상이기 때문에 전이 특성과 고랑 주파수의 관계는 이 전단 속도 영역에서 코팅 점도와 밀접하게 관계되

어 있다.

전이를 위해서는 고(高)전단 속도 점도를 보다 높게, 또 레벨링을 위해서는 저(低)전단 속도 점도를 보다 낮은 조합으로 해야 본질적으로 개량된 도장 피막의 외관을 낳게 된다. 이 점도비, 즉 고전단 점도 η HSV / 저전단 점도 η LSV를 레올로지 인덱스라고 정의하고, 이 점도비는 도장 피막 표면의 외관을 예측하는 데 유용한 툴(Tool)을 제공한다. 이 레올로지 인덱스는 다음과 같이 Newtonian 거동으로부터의 편차 비율을 결정한다.

$$\text{레올로지 인덱스} = \frac{\eta \text{ HSV} > 1 \cdots \cdots \text{팽창}}{\eta \text{ LSV} < 1 \cdots \cdots \text{의(變)소성}} = 1 \cdots \cdots \text{Newtonian}$$

[표 1]에서 알 수 있듯이 레올로지 인덱스는 기기(機器)에 의해, 또는 육안으로 결정된 도장 피막의 외관과 좋은 상관관계가 있다. 레올로지 인덱스의 값이 크면, 전이와 마지막 도장 피막 외관과의 균형이 좋아진다. 도장 피막이 얇거나 두껍더라도 도장 피막 표면의 외관이 아주 좋은 코팅제는 레올로지 인덱스가 0.25 이상이다. 레올로지 인덱스가 증가하면 유동성과 평탄화 특성인 도장 피막 두께의 의존성을 외관상 최소로 한다.

사실 단단한 라텍스 / 증점제계(增粘劑系)의 코팅제계에서는 고전단 점도가 높을수록 고랑은 가늘어진다. 그런데 고전단 점도가 매우 높아 160cp 이상이고, 레올로지 인덱스가 0.5 이상인 팽윤성 카복실화 라텍스계의 코팅제는 전이 특성이 아주 높음에도 불구하고 고랑의 크기는 매우 높고, 또 고랑의 수는 적어진다. 이와 같이 이상한 고랑의 경향은 고

전단 점도가 증가함에 따라 커진다. 이것은 아마도 점성 때문이 아니라 탄성 때문일 것이다. 이 탄성은 높은 전단이 걸렸을 때 라텍스 입자 팽윤 층의 전단 변형으로부터 유도되는 것임에 틀림없어 변형된 층은 에너지를 저장하여 탄성을 발달시킨다.

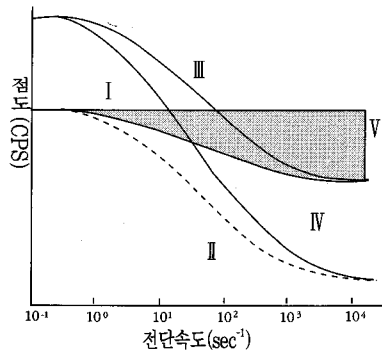
레벨링에 관계되는 고랑의 파장  $\lambda$ 는  $\eta$ 의 간격  $l$ 에 의해 결정되고  $l$ 이 작을수록 작아진다. 한편 주어진 도장 피막 두께에서는  $\eta$ 의 간격  $l$ 이 고전단 점도  $\eta$  HSV에 반비례한다. 따라서 파장  $\lambda$ 는  $\eta$  HSV에 반비례한다. 전체적으로 레벨링은  $\eta$  HSV가 높을수록, 그리고  $\eta$  LSV가 낮을수록 매우 용이해진다. 따라서 레올로지 인덱스  $\eta$  HSV/ $\eta$  LSV는 리버스 룰코팅에서 마지막 도장 피막 표면의 형태를 예측하는 유용한 툴(Tool)이다.

사실 고속 코팅에서는 코팅후 아주 짧은 시간에 고온 건조 부분으로 들어간다. 그 통과 시간은 수 초인 경우도 있다. 레벨링 프로세스는 코팅후 아주 빠른 단계에서만 움직이므로 긴 시간의 레벨링은 의미가 없어 코터 헤드 내에서의 거동이 중요해진다.

Bierman에 의한 점탄성 유체의 유동성에 관한 이론 분석 결과에서는 탄성이 레벨링에 지연 효과를 갖기는 하나 그 중요성은 점성보다도 적음을

나타내고, Glass도 1차 범선응력차(法線應力差)는 항복응력을 발달시킬 수도 있어 탄성 응답이 작을수록(복소응력 모듈러스와 1차범선응력차) 유동성과 레벨링이 좋아짐을 나타내었다. 인장 점도는 고랑의 크기와 수에 나쁜 영향을 주므로 리버스 룰코팅제의 탄성 성분을 배합하는 것은 가능한 피해야 한다.

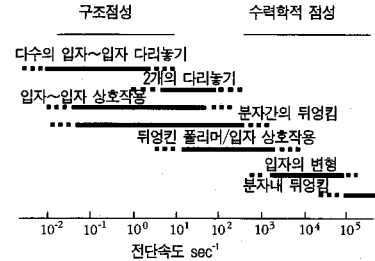
[그림 2]에서는 의(擬)소성의 정도가 다른 코팅제의 레올로지적 특성의 일반 모식도를 나타낸다. 대표적인 4가지의 非Newtonian 유체들 사이에서  $\eta$  LSV가 높고  $\eta$  HSV가 낮은 계(系) I는 레올로지 인덱스가 가장 낮아져 전이 특성이 나쁘고, 또 레벨링도 나쁘다. 한편  $\eta$  LSV가 낮고  $\eta$  HSV가 높은 계 IV는 레올로지 인덱



[그림2] 의소성의 정도가 다른 가정(假定) 라텍스 베이스 코팅제의 일반적인 레올로지적 측면

[표2] 일반화된 레올로지적 패턴의 전이 및 평탄화 특성

| 계   | 레올로지 특성      |              |                       | 코팅 프로세스 |     | 유동성과 평탄화 |        |
|-----|--------------|--------------|-----------------------|---------|-----|----------|--------|
|     | $\eta_{LSV}$ | $\eta_{HSV}$ | 레올로지 인덱스 <sup>c</sup> | 전이      | 평탄화 | 얇은 도막    | 두꺼운 도막 |
| I   | 높다           | 낮다           | 매우 작다                 | 불가능     | 불가능 | 매우 불가능   | 매우 불가능 |
| II  | 낮다           | 낮다           | 중간                    | 불가능     | 양호  | 매우 불가능   | 양호     |
| III | 높다           | 높다           | 중간                    | 양호      | 불가능 | 양호       | 양호     |
| IV  | 낮다           | 높다           | 크다                    | 양호      | 양호  | 매우 양호    | 매우 양호  |
| V   | 낮다           | 매우 높다        | 매우 크다                 | 매우 양호   | 양호  | 매우 양호    | 매우 양호  |



[그림3] 상호작용 스펙트럼(상호작용의 타입대개개의 상호작용의 효과가 시작되는 전단속도)

스가 가장 높아져 이 중에서는 도장 피막 표면의 외관이 가장 좋을 것이다. [표 2]

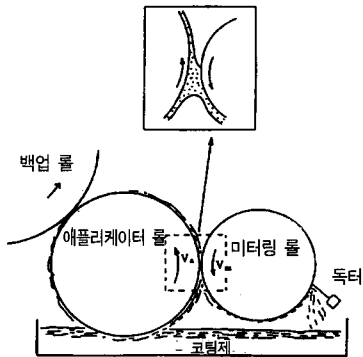
코팅제의 의소성은 최소로 하는 것이 좋다. 즉 낮은 전단 속도에서 낮은 점도를 갖는 Newtonian 유동 영역의 코팅제를 만들어야 하는데, 이것은 최저의 구조 점성을 갖는 배합을 함으로써 달성된다. [그림 3]에서는 상호작용 스펙트럼이라고 불리는 각각의 상호작용이 파괴되기 시작하는 전단 속도 영역을 나타낸다. 낮은 전단 속도에서 높은 전단 속도에 걸치는 모든 전단 속도의 바람직한 레올로지적 양상은 보다 적절한 개개의 상호작용으로 배합할 수 있다. 그 일반적 표현으로는 다음 식과 같이 각각의 상호작용의 합계로 계의 점도를 표시할 수 있다. 즉,

$$\eta = C_1\eta_1 + C_2\eta_2 + C_3\eta_3 + \dots \sum C_i\eta_i \dots (23)$$

$\eta_i, C_i$  : 각각 타입  $i$  상호작용의 크기 및 수

각각의 상호작용에서 전단 속도의 의존성은 ( $\partial\eta/\partial D$ )을 갖는다. 계(系)의 전단 속도 의존성은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\frac{\partial\eta}{\partial D} = \sum C_i \frac{\partial\eta_i}{\partial D} \dots (24)$$



(그림4) 애플리케이터~미터링틀계

모든 전단 속도 영역에 걸쳐 Newtonian 유동에 가까워지려면 전단속도의존성이 가장 적은 상호작용을 이용하는 배합을 함으로써 달성된다.

### (2) 애플리케이터 ~ 미터링 틀계의 난류

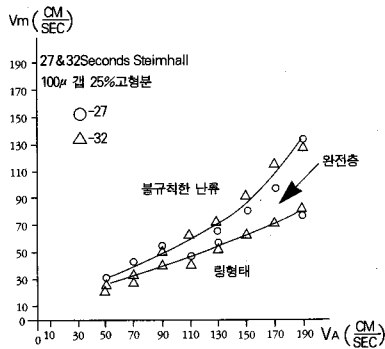
[그림 4]와 같은 애플리케이터 ~ 미터링 틀계(리버스 틀계)에서 안료를 첨가한 코팅제와 안료를 첨가하지 않은 코팅제로 실험한 것에서는, 애플리케이터 롤의 주속  $V_a$ 에 대해 미터링 롤의 주속  $V_m$ 의 영역은 세 개의 구역으로 나눌 수 있다. 즉

구역 1 :  $0 < V_m < V_{m1}$  이 구역에서 접촉선은 님의 한가운데 위에 있다. 메니스커스(meniscus)의 반경은 유한하여 링 형태의 난류가 관찰된다.

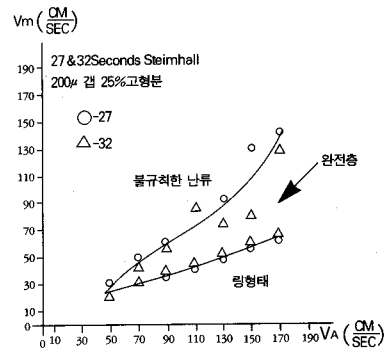
구역 2 :  $V_{m1} < V_m < V_{m2}$  이 구역에서는 사실 메니스커스가 없다. 접촉선은 거의 한가운데 있어 난류가 전혀 없는 층이 관찰된다.

구역 3 :  $V_{m2} < V_m$  이 구역에서는 불규칙한 난류인 '오점(Foul)'이 발견된다. 정상적인 접촉선은 없다.

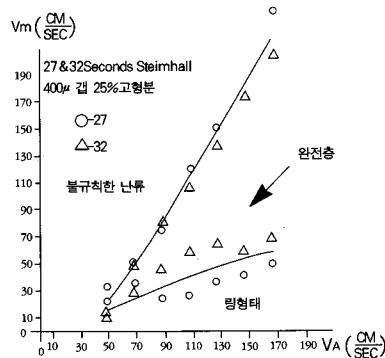
애플리케이터 ~ 미터링 틀계 중에서 파장치는 식(20)과 같은 단순한



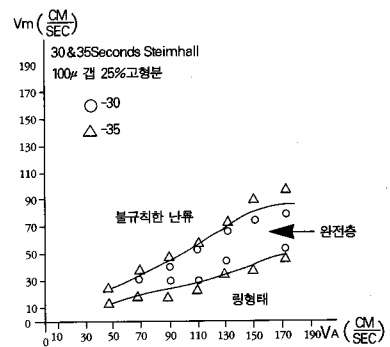
(그림5) 안료를 첨가하지 않은 코팅제에서 원전충의 "속도의 창", 갭 100μ



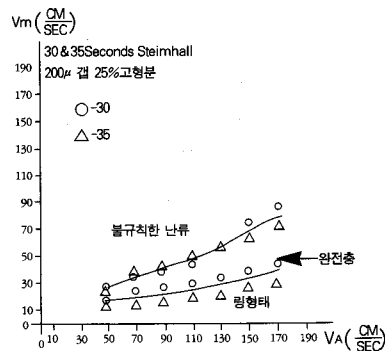
(그림6) 안료를 첨가하지 않은 코팅제에서 원전충의 "속도의 창", 갭 200μ



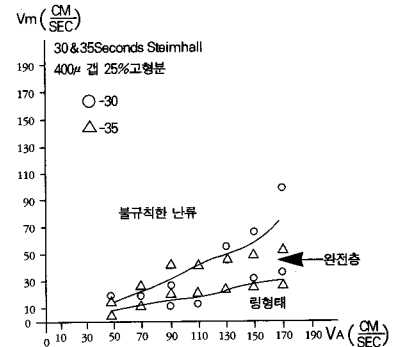
(그림7) 안료를 첨가하지 않은 코팅제에서 원전충의 "속도의 창", 갭 400μ



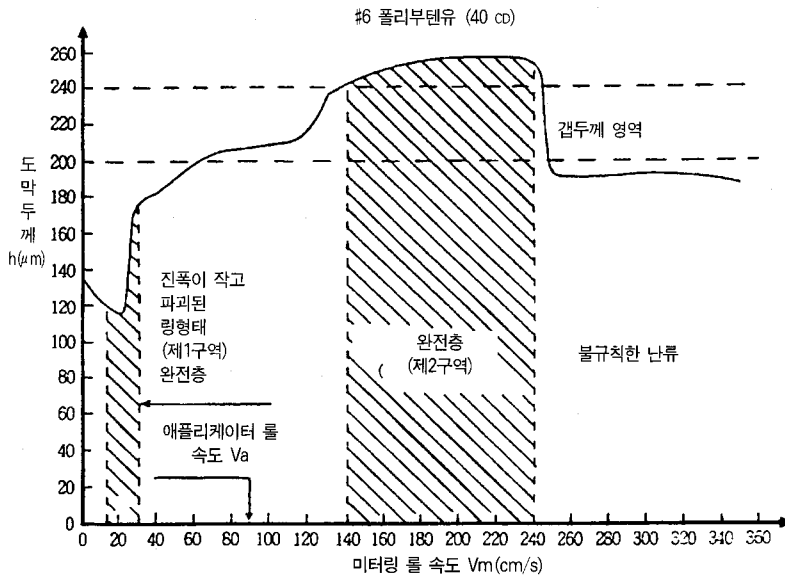
(그림8) 안료를 첨가하지 않은 코팅제에서 원전충의 "속도의 창", 갭 100μ



(그림9) 안료를 첨가하지 않은 코팅제에서 원전충의 "속도의 창", 갭 200μ



(그림10) 안료를 첨가하지 않은 코팅제에서 원전충의 "속도의 창", 갭 400μ



[그림11] 미터링 롤의 속도를 함수로 한 애플리케이터 롤상의 피막 두께

이 피막의 두께는 롤간의 갭보다 작게도 될 수 있고 크게도 될 수 있다. 거의 완전한 유체층의 2개 구역이 지시되어 있다. 실제 갭 간격의 현실적 계산(概算)은 200~400μ 이다.

다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\lambda \approx 2\pi \sqrt{\frac{3\gamma R_0}{\rho v_0}} \dots\dots\dots(25)$$

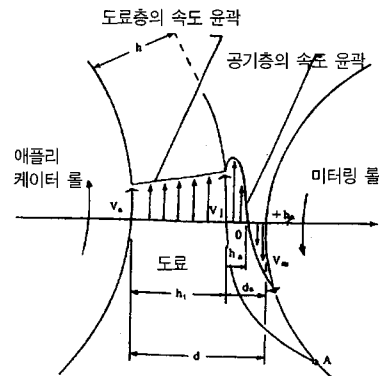
유체의 거의 '완전한 층'이 형성되는  $V_{m1} < V_m < V_{m2}$ 인 '속도의 창'이 존재한다. 그것에 관한 설명은 식 (25)를 고찰하는 데서부터 출발한다. 확실히  $R_0$ 가 제로이든 무한대이든 어느 한쪽이 되면 링 형태의 난류는 사라진다.

난류가 없어지는 정확한 메커니즘은 명백히 말할 수 있으나, 실험 관찰에서 볼 때 Newtonian 유체에서 메니스커스의 반경은 제로를 향하는 경향이 있는 것처럼 보인다. 이것은 미터링 롤의 속도가 점차 감소된 것 만큼 파장이 점차 감소하는 것으로 간주할 수 있다.

이에 대해 상당한 항복응력을 나타내는 안료첨가 코팅제에서는 그와

반대로 메니스커스의 반경이 무한대가 되는 것처럼 보인다.

[그림 5]~[그림 10]은 안료를 첨가한 것과 안료를 첨가하지 않은 코팅제



[그림12] 애플리케이터~미터링 롤의 배치

롤간의 갭을 이상하게 크게 하였다. 공기의 피막은 갭 안에서 아래쪽으로 미터링 롤을 따라 가다가 역류하고 그리고 갭 밖으로 흘러 나간다. 그것은 이 프로세스 안에서 유체를 가속한다.

에 대해 여러가지 크기의 롤을 이용하였을 때 나타나는 실험결과이다.  $V_{m1} < V_m < V_{m2}$ 인 구역은 '완전한 층'이 형성되는 '속도의 창'이다.

[그림 11]에서는 액체로서 폴리부텐유(油)(점도  $\mu = 40cp$ )를 이용하여 미터링 롤 속도  $V_m$ 에 의한 애플리케이터 롤 표면상의 피막 두께 의존성을 나타낸다. 애플리케이터 롤의 속도  $V_a$ 는 54m/min이다. 완전한 층은 두개의 독립된 구역 중에서 관찰되었다.

완전한 층의 제 1 구역은  $V_m=15 \sim 30cm/sec$ (9~18m/min)의 범위에서 피막 두께의 최소에 상당한다. 완전한 층의 제 2 구역은  $V_m=140 \sim 240cm/sec$ (84~144m/min)의 범위에서 피막 두께는 롤의 틈새보다도 크다.

미터링 롤의 속도가 빠를 때 Newtonian 기름은 非Newtonian 코팅제의 거동과 비교하여 약간의 특이성이 나온다. 완전한 층이 관찰되는  $V_m=140 \sim 240cm/sec$ 로 광범한 속도의 영역은 애플리케이터 롤상에서 최대의 피막 두께에 상당한다. 이때에는 [그림 12]에 나타내는 바와 같이 접촉선 A는 갭(Gap)의 중앙 아래에 위치하여 동적 메니스커스의 유효 반경  $R_0$ 는 무한대가 된다. 그렇게 하면 식 (25)에 따라 완전한 층의 존재조건이 만족된다. 접촉선이 갭의 중앙 아래에 있을 때에는 액체층의 표면이 공기층에 의해 미터링 롤의 표면으로부터 격리되어 있다는 점에 주의하는 것이 중요하다. 미터링 롤에 인접하는 공기의 미소체(微小體)는 공기의 쉼기 속으로 깊게 이 끌려 들어가고, 발달하는 압력 구배

는 미터링 롤에서 훨씬 먼 곳에 떨어져 있는 공기의 미소체를 반대 방향, 즉 췌기 밖으로 움직이게 한다. 롤 사이의 갭을 통과하는 공기의 정미(正味, net) 유속은 제로이고, 따라서 속도 윤곽(Profile)은 복잡한 형이다. 롤 속도가 있는 구간에서 공기는 액체층 표면에서 부가적 전단 응력을 생성하여  $V_1 > V_a$ , 즉 애플리케이터 상에서 액체층의 표면 속도는 애플리케이터 롤의 표면 속도보다 더 커진다. 이 경우 애플리케이터 롤 위에 있는 액체의 유속  $Q$ 는 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$Q = \frac{V_a + V_1}{2} h_1 \dots\dots\dots(26)$$

$V_a, V_1$ : 각각 애플리케이터 롤의 표면 속도, 닙 구역 중에서 액체의 표면선 속도 (그림 28)

$h_1$ : 닙 구역 중에서 액체의 두께  
 닙 구역을 충분히 통과한 곳에서는 액체에 대한 공기의 췌기(Wedge)가 표면 마찰에 미치는 영향은 무시할 수 있어,

$$Q_1 = V_a \cdot h \dots\dots\dots(27)$$

따라서 식 (26)을 (27)과 비슷하게 두면 ( $Q=Q_1$ )

$$h = \frac{h_1}{2} \left(1 + \frac{V_1}{V_a}\right) \dots\dots\dots(28)$$

식 (28)로부터 액체의 표면속도  $V_1$ 은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V_1 = V_a (2h/h_1 - 1) \dots\dots\dots(29)$$

만일  $h > h_1$ 이라면

$$|V_1| > |V_a| \dots\dots\dots(30)$$

공기의 속도는 광범위한 압력에 걸쳐 압력과 무관하다.

$\vec{V}_m$ 의 방향이 (+) 방향을 의미한다고 하자. 그러면 만일 액체 / 공기 계면상의 전단 응력  $\sigma$  ( $y=ha$ )  $\leq 0$ 이

라면,  $V_1 \geq V_a$  이것으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

$$|V_m| \geq -2 V_1 \dots\dots\dots(31)$$

실험에서는  $V_m = 2 |V_1| \approx 2 |V_a| \approx 180 \text{cm/sec}$  (108m/min)이었다. 이 속도는 코팅 전이 곡선의 특성과 난류의 소실에 갑작스런 변화가 관찰되는  $V_m = 140 \text{cm/sec}$  (84m/min)의 실험 속도와 크게 달라 있지 않았다. 이러한 관찰로부터 그림 12의 곡선에 주목하면 갭의 두께는  $d \approx 240 \text{mm}$ 로 간주할 수 있다.

에어 갭(Air Gap)의 두께  $d_a$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$d_a = - \frac{\mu_a (V_m + 2V_1)}{\mu_1 V_a \left(\frac{h}{d} - 1\right)} \cdot d \dots\dots\dots(32)$$

$\mu_a, \mu_1$ : 각각 공기, 액체의 점도  
 여기서  $V_1$ 은 다음의 식으로 표현된다.

$$V_1 = V_a \left(\frac{2h}{d} - 1\right) \dots\dots\dots(33)$$

식 (32)의 앞에 (-) 부호가 붙어 있는 것은 속도  $V_1$ 과  $V_a$ 가 (-) 값이기 때문이다.

식 (32)와 (33)은 다음과 같은 부등식이 만족될 때에는 제대로 이용할 수 있다.

$$|V_1 - V_a| > |\nabla P| (d - ha) \frac{2}{\mu_1} \dots\dots\dots(34)$$

$\nabla P$ : 압력 구배의 닙에 따르는 스칼라(scalar) 투영

$h=h_1$ 에서 속도  $V_1$ 과  $V_a$ 가 비슷할 때 부등식 (34)는 만족되지 않고 식 (32)은 무의미해진다.

$\mu_a = 0.02 \cdot 10^{-2} \text{poise}$  (0.02cp),  $\mu_1 = 40 \cdot 10^{-2} \text{poise}$  (40cp),  $V_m = 240 \text{cm/sec}$  (144m/min),  $V_a = 90 \text{cm/sec}$  (-54m/min),  $d = 240 \mu$ ,  $h = 250 \mu$  일 때에는 식 (32)에서 공기

췌기의 두께  $d_a \approx 10^{-4} \text{cm} = 1 \mu$ 가 된다.

여기서 갭  $d = 200 \mu$ 로 하였다고 하면 공기 췌기의 두께  $d_a = 0.2 \mu$ 를 낳는다. 대기압에서 공기 분자의 평균 자유 행정은  $0.07 \mu$ 이다. 따라서 공기 췌기의 두께  $0.2 \mu$ 는 공기상(相)을 정확하게 말해서 연속이라고는 생각할 수 없을 지도 모를 한계선 영역에 있다. 운동학적 슬라이드(Slide)도 일어날지 모르나 그것을 계산하기는 곤란하다.

공기층의 두께 때문에, 특히 공기/액체 계면이 공기의 저항력 때문에 불안정해진다면 코팅막이 접촉선의 흐름을 따라 미터링 롤과 접촉하게 될 가능성이 존재한다. 그렇게 되면 존재하는 조작 조건에서 불안정한 새로운 접촉선의 위치가 생길 것이다. 그 결과 코팅막의 불규칙한 난류가 애플리케이터 롤의 표면에 나타나게 된다.

결론적으로 리버스 롤계 非Newtonian 코팅제를 이용한 경우에는 링 형태의 난류가 롤 속도비가 있는 구역에서 관찰되고, 불규칙한 난류는 다른 구역에서 관찰된다. 이 두 구역은 완전히 안정된 유체층을 얻을 수 있는 롤 속도비(속도의 창)에 의해 격리되어 있다. Newtonian 액체를 이용한 경우에는 두 속도의 창이 있어, 제1속도의 창은 매우 낮은 미터링 속도로, 애플리케이터 롤로 전이되는 액체가 최소인 경우에 상당한다. 제2의 안정된 구역은 빠른 미터링 롤 속도로 일어나 액체의 전이가 최대인 경우이다.

빠른 속도의 '창'에 있어서 높은 전이율은 미터링 롤 표면에 동반하는

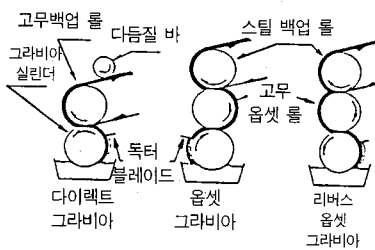
얇은 공기층이다. 미터링 갭 속으로 빨려 들어간 공기는 애플리케이션을 따라 돌아가 프로세스 중에서 애플리케이션 롤 위에 있는 액체막을 가속화한다. 그렇게 하면 액체/공기 계면은 불안정해져 '불규칙한' 타입의 난류를 일으킨다.

(3) 기어 마크 (폭 방향의 코팅 얼룩)

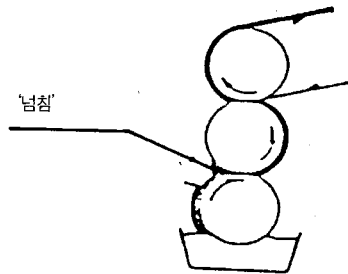
이른바 '횡단(橫段)'이 발생한 것은 코터를 구입한 때부터 발생한 경우는 확실히 코터상의 결함으로 코터 메이커에 책임이 있다. 그 요인으로서는 구동계 모터, 감속기, 그것들을 연결하는 커플링이나 벨트, 롤 베어링, 롤의 진동, 지지체의 장력 변동, 백업 롤과 애플리케이션 롤의 가압 방법; 미터링 롤용 독터와 에지(edge) 가압방법, 측판(side plate)의 형상과 실(seal) 가압 등에 의한 롤의 회전이나 속도가 일정하지 않은 것 등이 있다. 이 중에서 코팅면에 주기적으로 큰 코팅 얼룩이 나오는 요인은 롤을 연마 다듬질할 때 진동 정밀도 및 지지체 장력의 변동이다.

## 2-7 그라비아 코터

그라비아 코터에서 가장 중대한 도장 피막의 결함은 그라비아 셀의 패턴이 도장 피막에 남는 점이다. 그



(그림13) 그라비아 응용기법



(그림14) 오프셋 그라비아에서의 '넘침'

때문에 (그림 13)과 같이 코터 헤드를 나온 직후 회전하는 다듬질 막대(Smoothing Bar)를 걸친다. 안료를 함유한 코팅제일 경우에는 이것만으로도 그라비아 패턴은 거의 보이지 않게 된다. 그러나 안료를 함유하지 않은 코팅제일 경우에 그라비아 패턴은 없어지기가 상당히 어렵다.

오프셋 그라비아(그림 13)로 코팅을 하면 다이렉트 그라비아보다 그라비아 패턴은 감소한다. 그 이유는 ▲각 롤에 속도 차이를 줌으로써 그라비아 패턴을 문질러서 선명하지 않게 하는 것 ▲도료를 지지체에 옮기기도 전에 도장 피막이 찢어지는 것 때문이다.

각 롤에 속도 차이를 주면 보다 얇은 막을 얻기에도 상황이 좋아 요즘 코터에서는 오프셋 롤 : 그라비아 롤의 미분 표면속도=10:1까지 올릴 수 있어 최종 코팅량을 셀 함유량의 1/10로 할 수 있다. 또 그라비아 속도를 느리게 하면 팬(Pan)에 있는 거품을 줄일 수 있다.

오프셋 그라비아 코터에서 롤 속도비의 예를 든다면 백업 롤 : 오프셋 롤 : 그라비아 롤 = 3:2:1이다.

이 방법의 결점은 그라비아 롤이 마모되어 코팅 피막이 찢어지는 점과, 그라비아 롤을 잘 스크리닝

(screening)하지 않으면 올바른 코팅을 할 수 없다는 점이다.

낮은 점도(500cp 또는 그 이하)의 코팅제에서도 오프셋 그라비아로 평활한 도장 피막을 얻을 수는 있으나 (그림 14)와 같이 'flooding' (넘침) 현상이 나타나면 스트리크(Streak) 문제가 생겨 코팅을 할 수 없게 된다. 이러한 코팅제가 다이렉트 그라비아를 이용해서 만족스러운 도장 피막 표면을 얻을 수 있을지 없을지는 코팅을 해서 그 결과를 보아야 한다. 코팅제의 전체적인 레올로지가 성과를 결정하므로 이 flooding 문제를 점성과 직접 관련지을 수는 없다. 그러나 일반적으로 그라비아 코팅제의 점도가 높을수록 flooding을 나타내지 않아 오프셋 그라비아는 가장 평활한 도장 피막 표면이 바람직할 때 보다 효과적인 코팅 방식이다.

오프셋 그라비아를 이용하더라도 'fish eye', 스트리크, 핀 홀 혹은 표면 거칠기와 같은 도장 피막의 결함을 일으키는 코팅제일 경우에는 리버스 오프셋 그라비아(그림 13)를 이용하는 것이 좋다. 이 경우에는 오프셋 롤의 역(逆) 삭제작용이 평활성을 높인다.

## 2-8 커튼 코터

커튼 코터에서 일어나는 주된 도장 피막의 결함은 '도막 텅'이다. 코팅할 때 커튼 모양으로 흘러내리는 도료의 피막이 끊어지면 지지체에 코팅되지 않는 부분이 생기는데, 그 부분을 '도막 텅'이라고 한다.

원인으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

▲실리콘 등의 혼입으로 인한 코팅제 자체의 커튼 적성(適性) 불량

▲코팅제 안에 이물질 등이 혼입되어 슬릿(slit)을 메꾸어 놓는다.

▲코팅제의 표면을 씌우는 일 등이 발생하기 쉬운 슬릿에 피인이다.

### 2-9 압출 코팅

압출기(Extruder)를 이용하여 압출 코팅하는 방식에서 가장 잘 생기는 결함과 그 원인을 [표 2]에 나타낸다.

가장 주된 원인은 '수지의 혼합 불완전'을 들 수 있고, 이 표에서 열거한 것 이외에도 도장 피막 중의 보이드(Void), 레이스 커튼, 산화 수지, 편향 등의 결함이 원인이다.

수지를 잘 혼합하는 대책은 다음과 같다.

▲스크류에 혼합부가 달린 3단계 스크류와 같은 배리어 타입(Barrier Type)으로 한다.

▲압출 압력을 올린다.

▲스크류를 냉각한다.

▲L/D를 크게 한다.

▲스크류에 있어서 계량부의 홈의 깊이를 알게 한다.

▲특수한 브레이크판(Breaker Plate)을 사용한다.

또 도장 피막 내의 겔(Gel)이나 입자로 인한 구멍, 절단의 대책은 다음과 같다.

▲수지가 축축하거나 그리스와 같은 불순물이 들어가는 것을 피한다.

▲통(Barrel), 스크류, 스크린 팩 및 다이를 깨끗하게 보관한다.

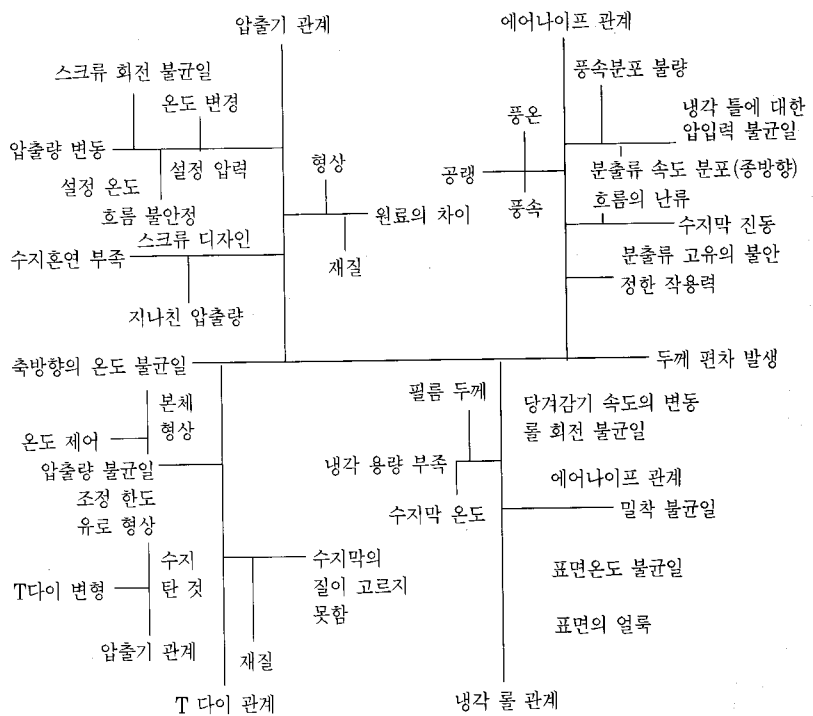
▲수지 온도를 올린다. 특히 수지 밀도가 높을 때 다이의 슬릿 폭을 균일하게 유지하도록 올바르게 조정하여 좁은 영역을 없앤다.

▲도장 피막에 플래핑(Flapping)

(표2) 압출 코팅 피막의 결함과 그 원인

| 도막결함           | 레올로지 특성  |
|----------------|--|
| 투명도 부족         | 압출 온도가 너무 낮음, 부적당한 냉각, 냉각 물 표면의 거친 다짐질, 부적당한 폴리에틸렌 수지  |
| 코팅 두께의 분산이 크다. | 다이 출구의 온도 불균일, 다이 출구의 흐름 불균일(물결침), 용융물의 횡방향으로 냉각 불균일   |
| 유자결질 모양        | 압출 온도가 너무 낮거나 또는 너무 높다. 혼합 부족, 스크류의 설계가 틀림   |
| 겔 또는 덩어리 입자    | 혼합 부족, 스크류 또는 배럴 벽에서 산화 폴리머 박리, 수지를 교환한 후 이전 수지의 추출이 완전하지 못함, 수지 메이커에서 정제 부족으로 인해 더러워진 수지. 재생 수지와 혼합, 운전 개시 또는 마지막 조작상의 실수, 수지의 지연 |
| 줄 모양           | 부적당한 혼합, 다이 안에 수지 또는 불순물이 사용될 수 있음, 팽창중의 불순물, 팽창중의 균한 흐름   |
| 당겨감기 물의 수축     | 다이 또는 냉각의 결함으로 인해 생긴 두께의 변동, 냉각 불충분 또는 냉각 불균일, 헤브의 장력 제어 부족, 당겨감기 물은 적당히 되어 있어야 한다. 수지중에 윤활제 과잉 당겨감기 장치 결함                         |
| 윤활 부족          | 코팅 온도 너무 높음, 당겨감기 전에 도공물의 냉각 부족, 냉각 물을 너무 연마함, 자니치게 처리됨  |
| 블로킹            | 수지중에 Anti Blocking제 부족   |

(그림15) 두께 편차의 특성 요인도





이 없게 한다.

▲다이의 길이 방향의 온도를 균일하게 유지한다.

▲스크류를 약 27℃ 로 냉각해 둔다.

▲작은 입자나 먼지가 없도록 좋은 수지를 이용한다.

▲수지의 타입을 바꿀 때에는 새로운 수지는 적어도 30분, 바람직하게는 1시간 전에 수지를 압출기와 다이에서 밀어낸다.

이외에도 '서징 (Surging)' 이라는 결함이 있다. 이것은 수지가 다이에 서 균일하게 나오지 않고 피막의 두께가 장소에 따라 달라지고 게다가 이동하는 점이다. 하얗게 보인다. 그 원인은 ▲수지 온도의 변화, ▲수지의 공급 부족이지만 호퍼나 스크류의 과열로 인한 수지의 부착, 수지의 혼합 부족, 스크류가 너무 짧은 점, 스크류의 회전 변속 벨트가 미끄러짐, 배럴 히터가 일부 절단, 다이가 미끄러져 이물질이 끼어 들어가는 것 등으로 인해 일어난다.

그 대책으로는,

①원료 수지로 용융 강도(溶融強度)가 강한 것을 사용한다.

②조작 조건으로서

▲스크류의 회전 속도와 당겨감는 속도를 올린다. ▲압출기의 배럴 내압을 올린다. ▲스크린 팩의 수를 늘린다. ▲냉각 롤의 작동을 체크한다. ▲다이 폭을 따라 수지의 온도를 균일하게 한다.

선단부가 두꺼워지는 edge bead 를 작게 하는 방법을 든다면 다음과 같다.

①네킹(Necking)이 작고 에지 비드가 작은 원료 수지를 선정한다.

②에지 비드가 작은 다이를 이용한다.

③조작으로서는

▲다이와 님 롤과의 거리를 작게 한다. ▲수지 온도를 내린다. ▲다이의 슬릿 폭을 작게 한다. ▲당겨감는 속도를 크게 한다. ▲공압출법의 경우, 지지체쪽의 층은 모두 도장 피막층의 두께에 대해 가능한 한 낮은 %로 한다.

도장 피막의 두께가 고르지 못한 것을 두께 편차(Thickness Deviation)라고 하는데, 그 특성 요인도를 [그림 15]에서 나타낸다. 그림에서 에어 나이프(Air Knife) 관계라고 하는 것은 압출된 필름에 오존가스를 에어 나이프 형태의 노즐로 불어 넣어 접착 강도를 증가시키기 위한 것이다. 주요 원인은, 다음과 같다.

▲압출기 가열 실린더 내부에서 주로 시동 초기에 볼 수 있는 가소화 과정에서의 불안정성에 의거하는 압력 변동

▲에어 나이프로부터의 공기 분사로 인한 수지막의 진동, 기타 공랭의 영향이나 냉각 롤과의 접촉도

▲T 다이 립(lip) 출구에서 이미 불균일한 압축량을 일으키고 있는 것 그 대책은 다음과 같다.

▲T 다이의 내부 유로 형상, 조정 장치의 개선

▲에어 나이프로부터의 공기 분사로 인한 수지막의 진동, 냉각작용의 경감 장치

▲냉각 롤에 대한 접착을 높이기 위한 가열 방법 등으로, 13% 이상의 두께 편차를 6% 이하로 할 수 있다.

2-10 기타 방식

(1) 분말 코팅

용해되지 않은 분말 폴리머 피막의 두께를 결정하는 자기제한기구는 대전층에 의한 반발 때문이 아니라 부착되는 동안에 방전이 분말층 안에서 일어나기 때문이다. 이 방전은 다임과 같이 두 가지의 중요한 프로세스를 일으킨다.

즉 ▲건(gun) 유입에서부터 건 노즐까지의 흐름과 반대 방향으로 쌓이온이 흐르므로 ▲물리적 교반이 분말층 안에서 일어나 입자는 분말층에서 추출되는 역이온화(back ionisation)로, 이것은 때때로 심하게 일어나 크레이터(Crater)를 형성한다.

대책으로는 ▲건 전류를 내린다. ▲트리보 전으로 한다.

(2) 전착 코팅

전착에서 일어나는 주된 도장 피막의 결함은 도장 피막의 손상이다. 그 원인은 높은 전류 밀도 때문에 가스가 발산하여 분출하기 때문이다.

대책으로는 전류 밀도를 내린다.

(3) 진공 도금

진공 전착에서 도장 피막의 광택과 밀착이 저하되는 것은 다음과 같은 점에 원인이 있다.

▲진공도가 저하되면 증발 원자는 잔류 가스와의 충돌로 인해 냉각되어 공간에서 증발 원자의 집합체가 생겨 피착체에 부착된다.

▲증발원의 온도가 저하됨에 따라 진공도가 높더라도 증발 원자의 운동 에너지는 작고 공간에서 증발 원자가 냉각되어 조잡한 증발면이 된다.

▲탈(脫)가스 부족

피착체 표면에凹凸이 있으면 증착된 후 난반사되어 새하얗게 되고, 극단적인 경우에는 회색으로 되어 광

택을 아주 잃는다.

(4) 스핀 코팅

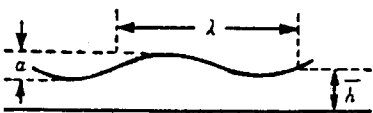
전자 레지스트(Regist)의 스핀 코팅 중에서 종종 관찰되는 두 가지 문제점은 유자점질과 도장 피막의 헤이즈(Haze)인데, 전자(前者)는 낮은 비등점의 용제가 빨리 건조하기 때문이다. 후자는 사용한 용제의 흡습성 때문이다.

2-11 도료의 레벨링

코터 헤드를 나온 후 도료 레벨링의 시간 의존성은 도장 표면의凹凸를 sin 곡선으로 간주하면(그림 16) 다음과 같이 Orchard식으로 표현된다.

$$\ln \frac{a}{a_0} = -\frac{16\pi^4 h^3 \gamma}{3\lambda^4} \int_0^t \frac{dt}{\eta(t)} \dots\dots\dots (35)$$

$a_0, a$ : 각각 시간  $t=0, t$ 에서 sin 곡선 마크의 진폭 : sin 곡선 마크의 파장,  $h$  : 평균 도장 길이,  $\gamma$  : 도료의 표면장력 (일정하다고 가정),  $\eta$  : 도료의 점도



(그림 16) 평탄화 이전의 습윤도막면  
(Ca : 凹凸의 높이, h : 평균 습윤도막 두께, λ : 파장)

건조부에서는 일반적으로 가열하는 중에 온도가 달라지므로 점도는 시간과 무관하지 않다. 따라서 식(35)의 적분항을 계(系)의 동력학에 따라 각 건조 구획에 대해 계산하여야 한다.

흥미가 있는 것은 식(35)에서 우변

의 시간에 의존하는 점도를 취급할 때에는  $h^3 \int_0^t \frac{dt}{\eta(t)}$ 의 항이다. 이 항을  $h^3 F(t)$ 로 생략한다. 여기서  $F(t)$ 는 시간 적분한 점도의 항이다. 이 항을 사용하면 일반 함수 또는 작도에서 다른 도장 피막의 두께로 실시한 측정을 그룹화할 수 있다.

도료의 최대 전단 응력  $\delta \max$ 는 Orchard의 같은 이론에서 다음의 식으로 표현된다.

$$\sigma_{\max} = 8\pi^3 \frac{\gamma a h}{\lambda^3} \dots\dots\dots (36)$$

상당한 항복응력을 갖는 도료에서는 응력이 이 항복응력  $\delta \max$ 에 가까워졌을 때 레벨링은 정지하고 그 이상의 레벨링은 실시되지 않는다.

습윤된 도장 피막이 레벨링 과정에서 전단 속도가 낮은 영역에 걸쳐 의소성 유동을 나타내어 지수법칙  $=KD^n$  ( $K, n$  : 정수)이 성립된다고 하면 레벨링 속도는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{da}{dt} = -\frac{n}{2n+1} \left( \frac{\gamma a^{1/n}}{K} \right)^{\frac{2n}{n}} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{3n}{n}} h^{2n+1/n} \dots\dots\dots (37)$$

여기서 중요한 파라미터는 지수  $n$ 과  $D=1\text{sec}^{-1}$ 에서의 점도, 혹은  $K$ 이다. 식(37)에서  $n$ 이 감소하면 레벨링 속도가 줄어들게 된다.

알키드(Alkyd) 수지 용액으로부터

터 도장 피막을 형성하면, 습윤 도장 피막의 점도는 처음 시간과 더불어 다음 식과 같이 지수 함수적으로 증가한다.

$$\eta(t) = \eta(0) \exp(rt) \dots\dots\dots (38)$$

$\eta(t), \eta(0)$  : 각각  $t$  시간후 맨처음 점도,  $r$  : 용제 파라미터로, 사용한 용제와 습윤 도장 피막 표면상의 풍속과 더불어 변화한다. 휘발유(White spirit) 용액계에서는 다양한 풍속에 있어서의 평균치  $\bar{r} = 0.0025\text{sec}^{-1}$ 이다.

$D=1\text{sec}^{-1}$ 에서의 점도가 식(38)에 따른다고 하면 식(37)의  $K = \eta(0) \exp(0.0025t)$ 이고, 용제의 증발을 고려한 경우에도 식(37)로써 도료의 레벨링을 예측할 수 있다.

결국 Newtonian 습윤 도장 피막은 레벨링되나 지수법칙에 따르는 非 Newtonian 습윤 도장 피막은 파라미터  $K, n$ 에 의해 결정되는 정도로 레벨링되어 만일  $n < 1$ 이라면 완전히 레벨링되는 일은 결코 없다. 항복치가 커지면 레벨링은 방해받지 않아 항복치가 작더라도 습윤 도장 피막의 표면장력이 작아 표면장력에 의한 습윤 도장 피막의 최대 전단 응력이 항복치에 가까울 경우 레벨링은 저지된다. <계속>

서편제 판소리

판소리란 한 사람의 '소리꾼'으로 북반주에 맞추어 긴이야기를 소리(囀)와 대화체의 아나리(白), 극적표현을 위한 동작인 발림(舞)을 통해서 표현한 극음악의 하나다. 또한 고수와 청중들이 '알싸구', '졸다' 등의 외침을 통해서 명중의 흥을 유발시키는 추임새가 들어가는 것이 판소리의 특징이다. 판소리는 이같이 문학, 음악, 연극이 삼위일체가 된 종합예술의 성격을 갖고 있는데 그중에서 소리의 장단을 포함한 음악적 성격이 판소리의 특징을 돋보이게 하며 '고수 2명칭'이란 말이 있듯이 북반주의 역할이 가장 중요하다. 판이란 말은 놀이판, 씨름판같이 무대를 가리키는 말이라고 할 수 있다. 판을 찢는다는 용례에 따르면 소리를 장단에 맞게 '판'을 찢서 부르는 소리라고 할 수 있다. 판소리에겐 여러 바다(流派 또는 制)가 있다. 지역적인 것으로 동편제와 서편제, 중고제를 일컫기도 한다. 동편제는 호령제라고도 하며 전라도의 구례, 곡성, 운봉, 순창지역의 宋興祿의 창제(唱制)를 표준으로 하여 우람하게 내지르는 호방한 성음을 주로 쓴다. 영화화돼 유명한 서편제는 보성, 장흥, 광주, 나주, 해남 등을 중심으로 林裕全의 창제를 표준으로 하여 오열하는 듯 설움조의 소리를 주로 하여 부르는 것을 말한다. 중고제는 충청도, 경기도 지방의 소리제를 가리킨다.