

자동차 선도장을 위한 롤코팅 공정에서 고분자 도료의 동적 거동 및 불안정성

김진호 · 이인준 · 노승만 · 강충열* · 남준현* · 정현욱† · 박종명**

고려대학교 화공생명공학과, *PPG Industries Korea 선행연구팀, **포항공과대학교 철강대학원
(2011년 5월 4일 접수, 2011년 6월 13일 수정, 2011년 7월 12일 채택)

Dynamics and Instability of a Polymeric Paint in Roll Coating Process for Automotive Pre-coating Application

Jin Ho Kim, In Jun Lee, Seung Man Noh, Choong Yeol Kang*,
Joon Hyun Nam*, Hyun Wook Jung†, and Jong Myung Park**

Department of Chemical and Biological Engineering,
Korea University, Seoul 136–713, Korea

*Advanced Research Team, PPG Industries Korea, Cheonan 330–912, Korea

**Graduate Institute of Ferrous Technology, POSTECH, Pohang 790–784, Korea

(Received May 4, 2011; Revised June 13, 2011; Accepted July 12, 2011)

초록: 자동차 선도장 강판을 위한 핵심 응용기술로서 3-롤코팅 공정을 연구하였다. 본 연구를 위한 3-롤코팅은 저장조로부터 코팅액을 끌어 올리는 pick-up롤, 적절한 코팅 두께로 계량시키기 위한 계량롤, 강판에 직접 코팅시키기 위한 applicator 롤로 구성되어 있다. 전단담화의 유변물성을 갖는 고분자 도료의 코팅 유동 특성과 코팅 운전 영역을 pick-up 롤과 계량롤 사이의 속도비와 간격 등의 공정조건과의 상관관계를 통해 고찰하였다. 안정한 코팅 영역에서, 간격이 크거나 속도비가 작을수록 코팅 두께는 증가하였다. 또한, ribbing과 cascade라는 불안정성은 각각 속도비가 낮고 높을 때 관찰되었다. 특히, 속도비가 낮을때, ribbing의 파장과 심각도가 증가함을 확인하였다.

Abstract: 3-Roll coating process as a key application technology for manufacturing automotive pre-painted metal-sheets has been studied. The 3-Roll coating system for this study consists of pick-up roll for picking up and distributing coating liquid from the reservoir, metering roll to properly meter coating liquid in metering gap regime, and applicator roll for directly transferring liquid into metal-sheet surface. Flow dynamics and operable coating windows of a polymeric paint (primer) with shear-thinning rheological property have been correlated with processing parameters such as speed ratio and metering gap between pick-up and metering rolls. In the uniform coating regime, dry coating thickness increased with increasing metering gap or decreasing speed ratio. Ribbing and cascade instabilities were observed in low speed and high speed ratio conditions, respectively. It is revealed that lower speed ratio makes severity and wavelength of the ribbing increase, aggravating flow instability in coating systems.

Keywords: roll coating, ribbing, cascade, polymeric primer, coating window.

서 론

일반적인 자동차 도장(코팅)공정은 강판의 절단, 가공 및 조립공정을 거쳐 차체를 완성한 후 스프레이 방법으로 전착(electronic-coating)한 후 프라이머(primer), 베이스코트(basecoat), 클리어코트(clearcoat) 등을 연속적으로 코팅함으로써 완성된다. 이러한 자동차 제조를 위한 강판 코팅공정은 그 과정이 복잡하고 다양하여 관련 설비 및 인력이 크게 요구될 뿐 아니라, 비친환경적인 스프레이 코팅으로 인한 환경문제의 대두로 새로운 코팅 방식의 개발 필요성이 증대되고 있다.¹⁻³

이러한 문제점을 해결하기 위하여 롤(roll)코팅에 의한 roll-to-roll 연속 공정을 활용한 선도장 기술이 대안으로 연구되어지고 있다. 단순화된 선도장 공정에서는 롤코팅법을 활용하여 강판에 기능성 코팅액 또는 도료를 코팅한 후, 가공 및 조립과정을 거쳐 차체를 완성하게 된다. 이러한 방법을 통해 기존의 도장공정에서 필수적인 전처리/전착/중도 과정 등의 비친환경적 단계들을 효과적으로 줄일 수 있으며, 전체적인 도장 공정도 단축시켜 환경문제 뿐 아니라 비용, 인력문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 미래지향적 선도장 공정에서 강판 코팅의 균일성을 확보하기 위해서는 핵심 요소기술인 롤코팅 공정에 대한 코팅액의 유변학적 유동 특성 및 불안정성에 대한 이해가 중요하다.⁴⁻⁶

롤코팅 공정은 2개 이상의 롤을 사용하여 순방향(forward) 또는 역

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hwjung@grtrkr.korea.ac.kr

방향(reverse)으로 회전하는 롤들 사이에 코팅액을 적절하게 계량(metering)시키고, 기재(substrate)에 도포시키는 것으로 롤속도 차이가 비교적 용이하여 강판 코팅 산업에 많이 활용되고 있다.⁷⁻⁹ 롤코팅 공정은 마주보는 두 롤의 회전방향이 코팅진행 방향과 동일한 순방향 롤코팅과 한 롤의 회전방향이 코팅진행 방향과 반대인 역방향 롤코팅으로 크게 나뉜다. 순방향 롤코팅은 pick-up롤(PUR) 또는 applicator롤(APR)에 의해 코팅용액을 이송시켜 일부는 기재에 바로 도포시키고 나머지 용액은 용액공급 장치로 환류시키는 공정으로 롤 사이의 유동 특성이 중요하여 이에 대한 이론적, 실험적 연구가 활발히 연구되어져 왔다.¹⁰⁻¹⁴ 순방향 롤코팅에서는 두 롤 사이의 간격을 양(positive)의 값으로 유지하여 코팅시키는 방법과 롤 표면을 우레탄이나 고무 등의 변형 가능한 재질로 하여 nip 압을 가해 두 롤 사이의 간격을 음(negative)으로 유지시켜 박막으로 코팅시키는 방법이 있다.¹⁵⁻¹⁷ 순방향 롤코팅 공정에서 발생하는 대표적인 유동 불안정으로 ribbing이라 불리는 폭방향 두께 불균일성이 존재하며, capillary 수($Ca = \mu V / \sigma$, 여기서, μ 는 코팅액의 점도, V 는 pick-up 롤 속도, σ 는 코팅액의 표면장력)가 크거나 코팅액의 탄성이 증가할수록 불균일성은 더 악화된다. 이러한 ribbing 불안정성은 순방향 롤코팅 공정의 생산성 향상을 위한 고속화 운전 제어를 더욱 어렵게 한다.¹⁸⁻²²

이에 비하여, 역방향 롤코팅 공정은 pick-up롤 또는 applicator롤에 의해 공급되는 코팅 용액이 코팅 진행 방향과 일정한 양의 간격을 유지하며 반대 방향으로 회전하는 계량롤(metering roll, MR)에 의하여 원하는 코팅양 만큼 계량되어 기재에 도포될 수 있어 박막코팅용으로 많이 활용되고 있다. 이 공정에서는 반대 방향으로 회전하는 두 롤 사이의 간격뿐만 아니라 두 롤의 속도비(V_{MR} / V_{PUR})가 코팅액의 두께를 결정짓는 중요한 인자이다.²³⁻²⁶ 역방향 롤코팅에서도 유동 불안정성이 물론 존재하며 속도비에 따라 다른 유형의 불안정성을 보인다. 낮은 속도비에서는 순방향 롤코팅에서와 같은 ribbing 불안정성이 발생하고, 속도비가 높은 영역에서는 흐름 방향으로의 두께 불균일성인 cascade라는 불안정성이 생긴다. 이와 같은 다양한 코팅방식으로 균일한 코팅 제품을 생산하기 위해서는 코팅액의 유변학적 특성을 고려하여 두 롤 사이 영역에서의 코팅액의 유동을 규명하고 코팅 안정영역을 확보하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 자동차 선도장 공정에서 가장 기본이 되는 부식방지 기능을 갖는 프라이머(또는 중도) 코팅액을 사용하여 유변물성을 분석하였고 이를 반영한 3-롤코팅 실험을 수행하였다. 프라이머의 경우, 기본적인 특성상 차체에 박막으로 코팅되어야 하므로 Figure 1과 같이

실제 강판코팅 공정에서 사용되는 물구성을 갖춘 3-롤코팅의 운전 조건을 설정하여 코팅을 진행하였다. 세 롤의 회전방향에 따라 다양한 운전 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 Ca 수가 어느 정도 큰 조건에서도 안정적 유동을 보장하는 역방향 롤코팅의 장점을 고려한 운전방식을 선택하였다. 즉, pick-up롤에 의하여 코팅용액이 이송되고, 반대 방향으로 운전되는 계량롤의 속도를 적절히 조절하여 원하는 코팅 두께로 계량한 후, applicator 롤에 의해 기재 강판에 코팅되도록 하는 방식이다. 확대된 metering gap 영역을 Figure 1에 제시하였다. PUR과 MR은 서로 반대 방향으로 회전하게 되므로 일정한 양의 간격을 유지해야 하며, MR에서 볼 수 있는 코팅액의 contact line 위치는 운전조건 및 유체 물성 등에 따라 다를 수 있는데 cascade라는 불안정성 발생을 설명하는 정성적인 척도가 된다.^{7,9,24} 참고로 본 연구에서 사용된 모든 롤들은 기재 강판의 진행방향과 반대로 회전하게 되는 방식이다. 프라이머의 전단담화(shear-thinning)의 유변학적 특성이 반영되어 ribbing과 cascade 발생 영역을 구분지어 코팅 window를 설정하였으며, 안정한 영역에서 운전 조건에 따른 건조 코팅 두께 변화를 고찰하였다. 또한 규칙적인 폭방향 두께 변화를 나타내는 ribbing 불안정성의 파장(wavelength)과 심각도(severity)를 조사하여 운전 조건에 따른 불안정성을 심층적으로 연구하였다.

실 험

도료 코팅액. 실험에 사용된 도료는 PPG Industries Korea에서 개발한 강판의 성형가공성과 도막 유연성을 극대화하고, 롤코팅 시 외관을 향상시킬 수 있는 우레탄 경화제를 함유한 프라이머 용액이다(Kang 등의 문헌에서²⁷ 제시된 Table 2의 N-0375-40로 명명된 도료). 용매는 도료의 점도를 조절하고 롤코팅 시 레벨링 및 pick-up 특성 등을 좋게 하기 위한 방향족 및 에스터 계열의 DS-EEP(ethyl 3-ethoxypropanoate, Dow Chemical)와 Solvesso#150(방향족 탄화수소 혼합물, Exxon Mobil)을 사용하였다. 또한 DBTDL(dibutyl tin di-laurate, Akzo Chemicals Inc.) 촉매와 EFKA 4050(EFKA Additives)의 분산제가 첨가되었다. 고분자 성분으로 고형분 함량이 60.06%이고 분자량(M_w)이 12420인 폴리에스터 폴리올(polyester polyol)을 경화제인 hexamethylene diisocyanate(HDI) 형태의 blocked isocyanate(Desmodur BL-3175, Bayer)와 혼합시켜 OH/NCO의 비율을 1:1로 만든 후 사용하였다.

전단 유변물성. 프라이머 용액의 전단점도, 탄성모듈러스(G'), 점성모듈러스(G'')와 같은 유변물성은 AR2000(TA Instruments)의 40 mm parallel plates를 사용하여 상온(25 °C)에서 측정하였다. 도료의 전단점도는 Figure 2(a)에서와 같이 전단속도가 증가함에 따라 점도가 작아지는 전단담화(shear-thinning) 거동을 보였다. 탄성/점성 모듈러스의 경우, Figure 2(b)와 같이 측정 주파수 영역에서 점성이 탄성보다 전체적으로 우세함을 볼 수 있다. 본 연구에서는 고분자 도료의 코팅 유동 특성을 Ca 수와 상관관계를 짓고자 점성 정보를 주로 사용하였다. 코팅액의 기본적인 표면장력은 백금의 ring(RI21)을 사용한 디지털표면 장력계 K9(KRUSS)을 사용하여 35.5 mN/m의 값을 얻었고, 이 정보 역시 코팅실험에서 Ca 수를 예측할 때 활용되었다.

롤코팅 및 건조 조건. 실험에 사용된 롤코팅 공정은 앞서 기술한 바와 같이 3-롤 구동방식의 장비를 활용하였다. 표면 경도가 55인 변

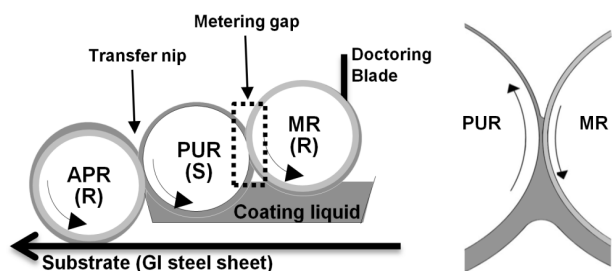


Figure 1. Schematic diagram of 3-roll coating process. GI denotes the galvanized iron and R and S indicate the deformable roll and the steel roll, respectively.

형 가능한 2개의 롤은 MR과 APR로, 스틸롤 1개는 PUR로 사용되었다. 각 롤의 직경과 폭은 모두 15 cm, 35 cm로 동일하였다. 상온 조건하에서 운전조건의 변화에 따른 코팅액의 동특성과 불안정성을 고찰하기 위해, MR과 PUR 사이의 간격(metering gap: 100 μm, 200 μm) 및 MR과 PUR의 속도비($V_{MR}/V_{PUR}=0\sim0.6$)에 변화를 주었다. PUR과 APR 사이는 가능하면 간격이 없도록(5 μm 이하) 매우 작게 하여 PUR에서 계량된 코팅액이 바로 APR로 전이되도록 하였고, PUR과 APR의 속도는 동일하게 유지하였다. 롤코팅을 위해 사용된 강판은 POSCO에서 생산한 0.8 mm 두께의 가로, 세로 각 15 cm 크기를 갖는 아연 도금 강판(GD)이고, 강판에 프라이머 도료를 코팅한 후 바로 자동배출 오븐에서 넣어 300 °C 온도에서 30초간 건조시켰다.

코팅두께 및 Ribbing 불안정성 측정. 균일한 코팅 운전 조건에서 코팅된 강판의 도막 두께를 측정하기 위하여 접촉식 두께측정 장비인 Minitest 4100(Electrophisik)을 이용하였다. 또한 ribbing 불안정성의 심각도를 살피기 위해서 마이크로 단위의 표면 불균일성 또는 거칠기(roughness) 측정이 가능한 Alpha-step 500(Tencor)을 사용하였다. MR과 PUR 사이의 간격이 200 μm인 경우, 건조 코팅 두께가 실제 현장에서 적용되는 것보다 상당히 크고 ribbing 불안정성 영역도 넓지 않아, 다양한 운전조건에 따른 비교실험을 위해 두 롤의 간격이 100 μm

인 조건에서 ribbing을 심층적으로 고찰하였다. Wet 상태의 코팅영상은 DSLR 카메라(Nikon)를, 건조 상태의 코팅 영상은 Camscope (Somotech)를 이용하여 촬영하였다.

결과 및 토론

코팅 Windows 설정. 3-롤코팅 공정에서의 코팅 안정성을 MR과 PUR 사이의 간격을 일정하게 유지한 상태에서 MR과 PUR, APR의 속도를 변화시켜 가며 분석하였다. Figure 3은 3-롤코팅 실험을 통해 얻어진 코팅 window로 MR-PUR 속도비와 Ca 수를 상관관계로 하여 균일한 유동 영역과 ribbing, cascade 불안정성 영역으로 구별되어 있다. 전단담화 거동을 갖는 코팅액의 점도는 운전조건 변화(즉, 전단속도의 변화)에 따라 다른 값을 갖게 되므로 각 조건에서 Ca 수의 기준치는 두 롤의 최소간격 지점에서의 유효 전단속도를 예측하고(i.e., effective shear rate=(PUR speed+MR speed)/metering gap) 이에 대응되는 전단 점도로부터 산출되었다. 계량의 효과가 미미한 속도비가 낮은 영역에서는 ribbing 현상이 발생하고, 속도비가 점차 증가하면서 ribbing의 영향이 줄어들게 되어 균일한 코팅이 형성될 수 있는 안정한 유동 영역으로 바뀌게 된다. 순방향 코팅의 경우, 롤 속도나 Ca 수가 증가하면 필연적으로 ribbing 불안정성이 발생하는 것에 반해 MR-PUR를 이용한 역방향 코팅에서는 적당한 크기의 Ca 수에서도 유체역학적으로 안정한 영역의 존재가 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 그러나, 속도비를 더욱 크게 증가시키게 되면 ribbing과는 다른 형태의 cascade라는 불안정성이 발생한다. 각 불안정한 조건에서 MR-PUR 사이의 간격에 따른 코팅 windows를 살펴보면 간격이 클수록 ribbing 불안정성 영역은 상당히 감소하게 되어 안정한 영역이 늘어나는 반면, cascade 불안정성은 작은 간격조건에 비해 더 낮은 속도비에서 발생하였다. Ribbing 불안정성은 이론적인 안정성 분석에 의거하여 MR-PUR 사이 metering gap 영역에 있는 자유계면에서의 압력구배 변동과 연관되어 있다.⁷⁻⁹ Cascade 불안정성은 계량롤에서 코팅액의 contact line 위치 변화와 정성적으로 관련되어 있음을 문헌에서 보고하고 있다.^{24,28} 즉, 계량의 효과를 강하게 부여하는 경우, contact line의 위치가 일정치 않게 되어 계량되어 나오는 코팅양이 흐름방향으로 불규칙하게 됨을 의미한다. Figure 4는 PUR 속도가 4 m/min일 때, 롤 표면에서 코팅액의 두께 불균일성인 ribbing

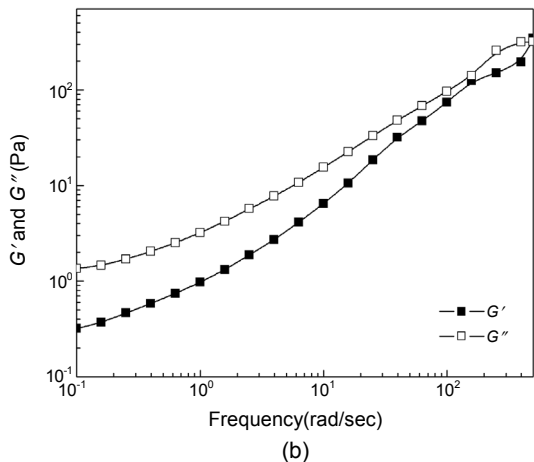
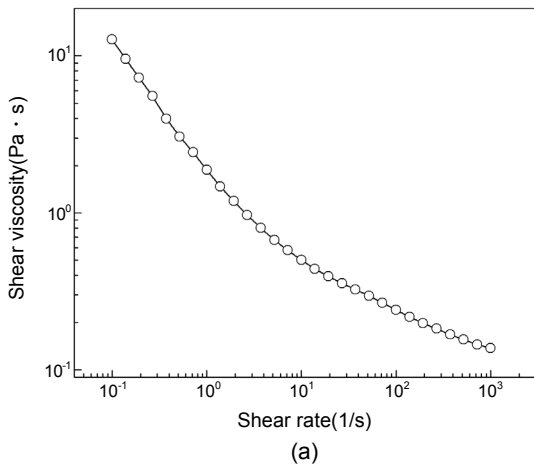


Figure 2. (a) Shear viscosity; (b) storage (G') and loss (G'') moduli of primer coating liquid.

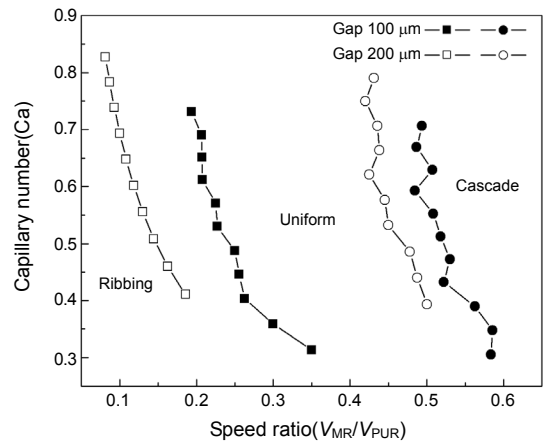


Figure 3. Coating windows of primer coating liquid through 3-roll coating operation.

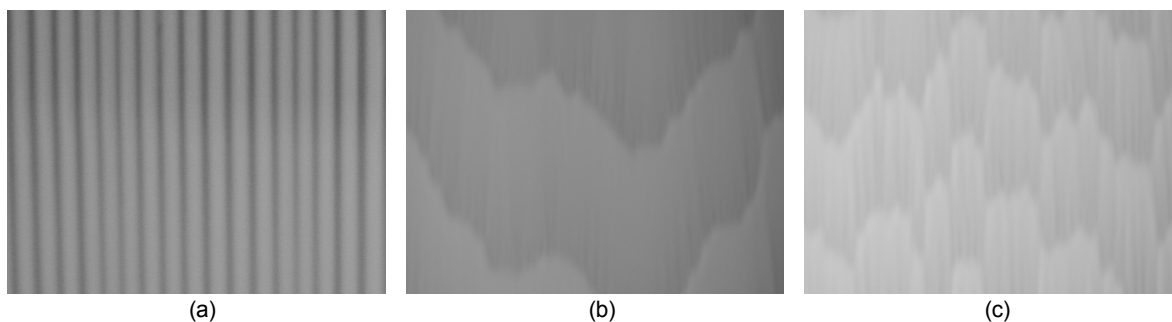


Figure 4. Ribbing and cascade instabilities for different metering roll speeds: (a) $V_{MR}=0.4$ m/min; (b) $V_{MR}=3.1$ m/min; (c) $V_{MR}=3.7$ m/min under constant $V_{PUR}=4$ m/min.

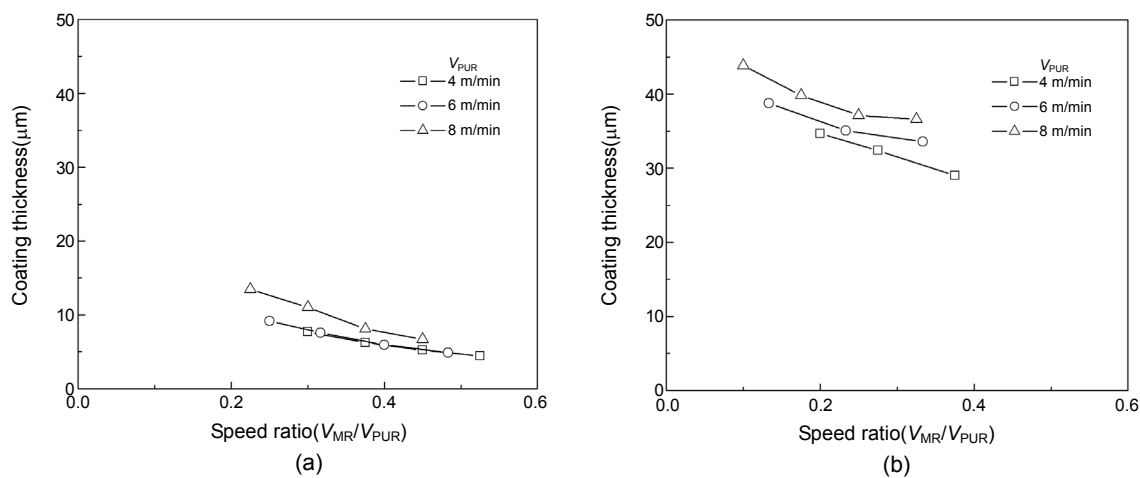


Figure 5. Effect of speed ratio on the coating thickness in uniform coating region: (a) Metering gap 100 μm ; (b) 200 μm between MR and PUR.

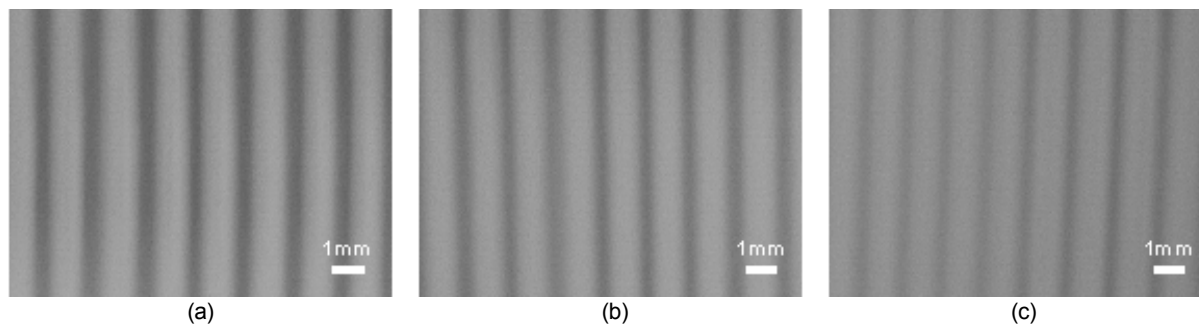


Figure 6. Various ribbing patterns onto APR surface with respect to the speed ratio (wet condition): (a) $V_{MR}=0.4$ m/min; (b) $V_{MR}=0.6$ m/min; (c) $V_{MR}=0.8$ m/min under constant $V_{PUR}=4$ m/min.

과 cascade를 촬영한 것으로, MR의 속도가 증가함에 따라(즉, 속도비의 증가) ribbing (Figure 4(a))이 cascade (Figure 4(b)–(c))로 변하는 것을 볼 수 있으며, MR 속도가 더욱커지면 cascade의 불안정성이 심각해짐을 알 수 있다.

균일한 코팅영역에서 건조 두께 변화. Figure 5는 균일한 코팅영역에서 MR과 PUR 사이의 간격을 100, 200 μm 로 하였을 때, 속도비에 따른 건조 코팅 두께를 측정한 결과이다. 두 롤 사이의 간격이 증가함에 따라 MR과 PUR 사이의 metering gap 영역을 통과하는 코팅액의 유량이 증대되어 건조 코팅 두께가 커졌음을 알 수 있다. 또한 속도비가 커짐에 따라 계량 효과가 커지게 되어 코팅두께는 작아진다. 즉,

두 롤 사이의 간격과 롤 속도비 등을 조절함으로써 원하는 코팅두께의 제품을 연속적으로 안정하게 생산할 수 있는 방법론을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

Ribbing 불안정성 분석. Figures 6, 7은 PUR 속도가 4 m/min로 일정한 상태에서 MR 속도를 변화시키며 촬영한 것으로 APR 표면에서의 wet 상태와 강판표면에서 건조상태의 ribbing 파장유형을 각각 보여주고 있다. 두 그림에서 확인할 수 있듯이 MR의 속도가 증가하면 점점 안정한 영역으로 접근하게 되고 ribbing의 파장이 줄어들음을 알 수 있다. Figure 7의 ribbing이 발생하는 운전 조건에서 건조 코팅 두께의 불균일성 정도를 분석하기 위해 Alpha-step 장비를 활용하여 표면의

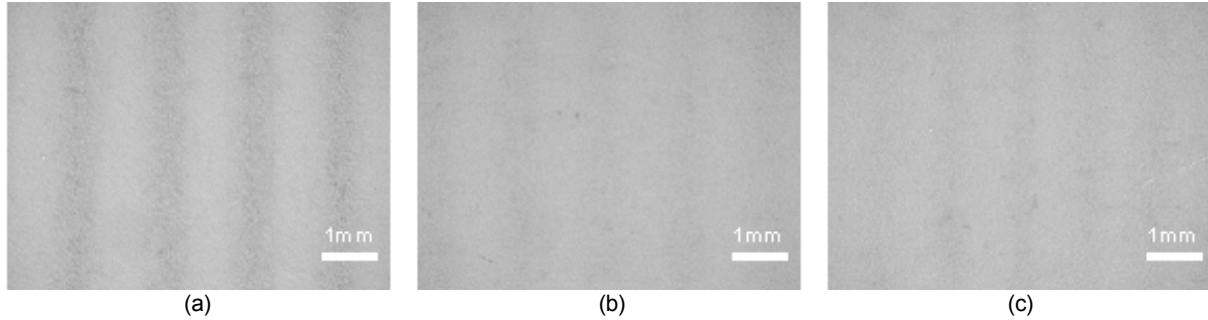


Figure 7. Various ribbing patterns onto substrate (steel) surface with respect to the speed ratio (dry condition): (a) $V_{MR}=0.4$ m/min; (b) $V_{MR}=0.6$ m/min; (c) $V_{MR}=0.8$ m/min under constant $V_{PUR}=4$ m/min.

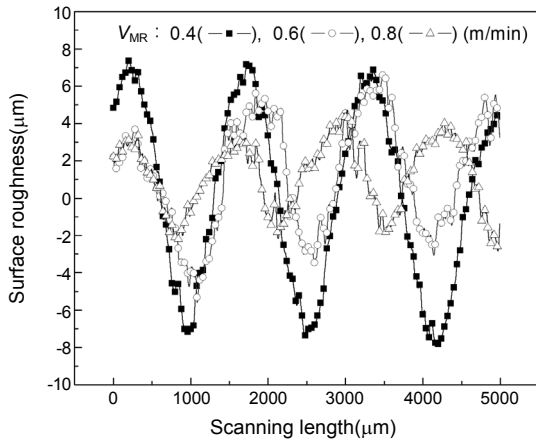


Figure 8. Comparison of coated surface roughness under different speed ratio conditions: (—■—) $V_{MR}=0.4$ m/min; (—○—) $V_{MR}=0.6$ m/min; (—△—) $V_{MR}=0.8$ m/min under constant $V_{PUR}=4$ m/min.

불균일성 또는 거칠기를 직접 측정하였다(Figure 8). 그림에서와 같이 MR 속도가 증가함에 따라(즉, 속도비가 커짐에 따라) ribbing의 파장이 감소하며 코팅 두께 변화의 심각도(그림에서 최대치와 최소치의 차이로 정의됨)도 작아졌다. 즉, MR 속도가 커짐에 따라 계량 효과가 커져서 코팅 두께가 줄어 들었고, 안정한 영역으로 유도되기 때문이다. Figure 9는 표면의 불균일한 정보를 바탕으로 PUR과 MR의 다양한 속도 변화에 따라 ribbing의 파장과 심각도를 비교한 결과이다. PUR 속도가 증가함에 따라 파장이 감소하였고, 심각도 또한 줄어들게 되는데, 이는 Figure 3에서 도시한 코팅 안정성 분포에서 보듯이 동일한 속도비에서 Ca 수가 커짐에 따라 ribbing이 안정한 영역과 가까운 곳에서 발생되기 때문이다.

이상과 같이 스프레이 코팅 방식으로 강판에 코팅하는 기존 방식에서 벗어나 롤코팅에 의한 연속 공정으로 원하는 두께의 도료를 균일하게 코팅할 수 있는 기본적인 방법론을 수립할 수 있었으며, 코팅 공정에서 수반되는 유동 불안정성을 효율적으로 제어하기 위한 공정 조건을 제시할 수 있었다. 이를 바탕으로 변형 가능한 물의 재질 특성과 복잡 다양한 점탄성 유변물성을 갖는 고분자 도료들에 대한 후속 연구를 통해 관련분야의 코팅기술을 더욱 발전시켜 나갈 수 있으리라 기대된다.

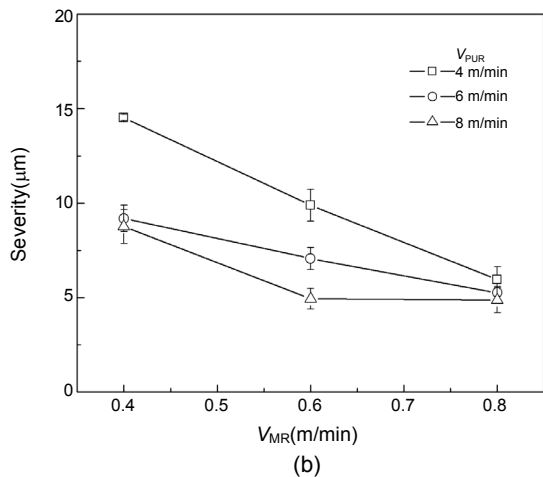
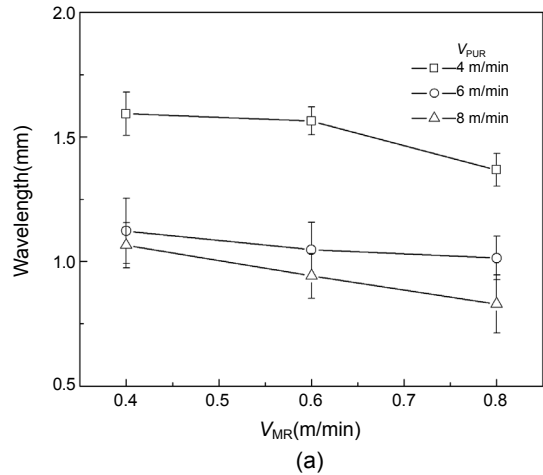


Figure 9. Effect of pick-up roll speed on (a) wavelength; (b) severity of ribbing instability.

결론

연속적인 강판코팅을 위한 자동차 선도장 3-롤코팅 공정을 통해 고분자 코팅액(프라이머)의 코팅 유동특성을 파악하였고, ribbing과 cascade 불안정성으로부터 자유로운 안정한 영역을 구축하였다. 안정한 영역에서 코팅두께는 PUR과 MR 사이의 간격 및 속도비로 제어할 수 있음을

확인하였다. 또한 규칙적인 변화를 보여주는 ribbing 불안정성을 고찰하기 위해 여러 운전 조건 변화에 따른 파장과 표면두께 변화를 고찰함으로써 상관관계를 도출하였다. 이러한 롤코팅 공정은 본 연구에서 적용한 프라이머 외에 베이스코트, 클리어코트 도료 용액 등의 연속 코팅을 위해 유용하게 활용될 수 있으며, 자동차용 선도장 강판제조에 핵심기술이 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글: 본 연구는 지식경제부의 청정제조기반 산업원천기술개발사업(과제번호: 10035163)과 한국에너지 기술평가원(KETEP, 과제번호: 20114010203070)의 지원으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. U. Poth, *Automotive Coatings Formulation*, Vincentz, Hannover, 2008.
2. A. E. Matthews and G. M. Davies, *Proc. IMechE Part B: J. Eng. Manuf.*, **211**, 319 (1997).
3. S. J. Weinstein and K. J. Ruschak, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **36**, 29 (2004).
4. H. D. Hwang, J. I. Moon, Y. J. Lee, H. J. Kim, J. H. Hyun, S. M. Noh, C. Y. Kang, J. W. Lee, J. H. Nam, and J. M. Park, *J. Adhesion Interface*, **10**, 155 (2009).
5. H. J. Streitberger and K. F. Dössel, Editors, *Automotive Paints and Coatings*, 2nd Ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
6. F. V. Lopez and M. Rosen, *Latin Am. Appl. Res.*, **32**, 247 (2002).
7. E. B. Guttoff and E. D. Cohen, *Modern Coating and Drying Technology*, Wiley-VCH, New York, 1992.
8. S. F. Kistler and P. M. Schweizer, *Liquid Film Coating*, Chapman & Hall, New York, 1997.
9. E. B. Guttoff and E. D. Cohen, *Coating and Drying Defects*, Wiley-Interscience, New York, 1995.
10. J. R. A. Pearson, *J. Fluid Mech.*, **7**, 481 (1960).
11. S. F. Kistler and L. E. Scriven, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **4**, 207 (1984).
12. P. H. Gaskell, N. Napur, and M. D. Savage, *Phys. Fluids*, **13**, 1243 (2001).
13. H. Benkreira, *Chem. Eng. Sci.*, **57**, 3025 (2002).
14. G. A. Zevallos, M. S. Carvalho, and M. Pasquali, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **130**, 96 (2005).
15. D. J. Coyle, *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 2673 (1988).
16. O. Coahu and A. Magnin, *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 1339 (1997).
17. M. S. Carvalho and L. E. Scriven, *J. Fluid Mech.*, **339**, 143 (1997).
18. J. Greener, T. Sullivan, B. Tuner, and S. Middleman, *Chem. Eng. Commun.*, **5**, 73 (1980).
19. M. D. Savage, *AIChE J.*, **30**, 999 (1984).
20. T. Hasegawa and K. Sorimachi, *AIChE J.*, **39**, 935 (1993).
21. Y. H. Chong, P. H. Gaskell, and N. Napur, *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 4138 (2007).
22. J. H. Lee, S. K. Han, J. S. Lee, H. W. Jung, and J. C. Hyun, *Korea-Aust. Rheol. J.*, **22**, 75 (2010).
23. H. Benkreira, M. F. Edwards, and W. L. Wilkinson, *Chem. Eng. Sci.*, **36**, 429 (1981).
24. D. J. Coyle, C. W. Macosko, and L. E. Scriven, *AIChE J.*, **36**, 161 (1990).
25. Y. Hao and S. Haber, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **30**, 635 (1999).
26. H. Benkreira, *AIChE J.*, **48**, 221 (2002).
27. C. Y. Kang, J. Y. Lee, S. M. Noh, J. H. Nam, J. M. Park, H. W. Jung, and S. S. Yu, *J. Adhesion Interface*, **12**, 34 (2011).
28. S. K. Han, D. M. Shin, H. Y. Park, H. W. Jung, and J. C. Hyun, *Eur. Phys. J. Special Topics*, **166**, 107 (2009).