



자동차 선도장용 베이스코트에서 알루미늄 입자 크기와 형태에 따른 물성 연구

이재우 · 이미춘 · 조을룡[†]

한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부
접수일(2014년 5월 13일), 수정일(2014년 5월 20일), 게재확정일(2014년 5월 26일)

A Study on Properties with Particle Size and Type of Aluminum in Pre-painted Basecoat of Automotive

Jae Woo Lee, Mei-Chun Li, and Ur Ryong Cho[†]

School of Energy-Material-Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education, 1600 Chungjeol-ro, Byungcheon-Myeon, Cheonan, Chungnam 330-708, Republic of Korea

(Received May 13, 2014, Revised May 20, 2014, Accepted May 26, 2014)

요약 : 자동차 선도장용으로 알루미늄 페이스트를 사용하여 6가지 베이스코트용 포물레이션이 설계되었다. 알루미늄 페이스트는 pancake 형태의 금속 안료인 #501, #801, #601와 cornflake 형태의 금속 안료인 #750, #770, #790가 사용되었다. 베이스코트의 상대적인 경화 밀도는 #501, #801, #601, #750, #770, #790 순으로 증가하였다. T-bending, 내충격성, 테이핑 부착력은 경화 밀도의 증가에 따라 향상되었다. Cornflake 형태의 안료에 대한 외관(combined factor) 테스트에서 입자가 가장 작은 #790이 다른 두 가지(#750, #770)와 비교하였을 때 가장 좋은 combined factor를 보여 주었다.

ABSTRACT : The formulation of six basecoats was designed using aluminium pastes for the pre-painted system in the automotive. The aluminium pastes contain pancake type metallic pigment, #501, #801, #601 and cornflake type metallic pigment, #750, #770, #790. The relative cure density of the basecoat increased in order of #501, #801, #601, #750, #770, #790. T-bending, impact resistance, and taping adhesion showed increment with increasing cure density. In the appearance(combined factor) test on cornflake type pigment, The basecoat including the smallest particle size pigment, #790 resulted in the best combined factor compared to other two systems(#750, #770).

Keywords : pre-painted system, basecoat, aluminum pastes, cure density

I. 서론

최근에 세계적인 자동차 제조사의 화두로 급부상한 ‘Automotive Modular Process’는 자동차 주요 부품 및 새시 프레임, 기타 부품 등을 모두 모듈화 함으로써 생산 공정을 매우 단축시켜 제조원가를 낮추고, 현재의 복잡한 구조를 갖는 완성차 공장의 시스템을 단순화함으로써 생산성을 향상시킬 수 있는 새로운 방안으로 대두되고 있다.¹⁻⁵ 이러한 요구는 자동차 도장 공정과정에도 module process의 도입을 요청하기에 이르렀는데, 이러한 일련의 현장요구를 통하여 pre-painted system(선도장 시스템)의 개발이 요청되어지고 있다.⁶⁻⁹

Pre-painted system의 완성차 공장 도입은 기존의 도장공정에서 필수 불가결한 전착 및 프라이머, 베이스코트 공정을 그

대로 생략할 수 있기 때문에 그야말로 자동차 산업에서 획기적인 도장시스템이다. 기존의 자동차 도장공정은 전처리-전착공정-프라이머 공정-베이스코트 공정-클리어코트 공정 등 매우 길면서도 복잡한 생산 공정을 사용하고 있으나, 매우 단순하면서도 쉽게 적용할 수 있는 롤코팅 프로세스를 적용함으로써 기존의 방법을 일부 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 전착공정에서의 욕액 및 세정수가 완전 생략되며, 프라이머/베이스코트 도장 공정에서 적용되는 스프레이 프로세스 및 각 색상별 필요한 세정용제가 생략 될 수 있다. 그리고 이러한 과정에서 필수불가결하게 발생하는 폐수와 슬러지와 같은 오염물의 발생이 전혀 없는 청정기술을 적용할 수 있다. 반면에 pre-painted 강판 도료시스템은 스프레이 프로세스가 아닌 롤코팅 프로세스 이므로 대기 중으로 VOCs 및 유해물질들의 비산을 막을 수 있다.¹⁰⁻¹⁵

자동차 pre-painted 도료시스템의 베이스코트에서 요구되는

[†] Corresponding Author. E-mail: urcho@koreatech.ac.kr

물성은 도막의 가공성 측면에서 일반적으로 프라이머와 비교하여 유사하거나 낮은 유연성을 보이는 것이 허용되나, 프라이머에 비하여 우수한 기계적 물성과 탁월한 외관 품질수준의 구현이 필수적이다. 또한 프라이머 및 클리어코트와의 접착성능이 반드시 고려되어야만 하는데, 베이스코트는 PCM(pre-coated metal) 방식의 도장시스템에서 요구되는 유연성을 갖는 동시에 자동차용 도료에서 요구되고 있는 탁월한 경도 및 외관품질을 동시에 구현해야 하며, 또한 우수한 내화학적 물성들을 제공해야만 하는 높은 기술적 난이도를 필요로 한다. 이러한 기술적으로 요구되는 물성들을 모두 만족시키는 일반적인 pre-painted 도장시스템용 도료에 적용하는 주수지는 현재까지 존재하지 않으므로 본 과제를 수행하기 위하여 이러한 극대화된 물성을 구현할 수 있는 주수지의 개발이 필수적으로 필요하다. 따라서, 전보¹⁶에서는 자동차 선도장용 베이스코트에서 알루미늄 입자 크기와 배향에 따른 내후성 변화에 대한 연구결과를 게재하였다. 본 연구에서는 pre-painted 도료시스템에 대한 연구를 위하여 먼저 고유연성(high flexible) 폴리에스터 수지를 합성하고, 합성된 고유연성 수지를 이용하여 고휘도 베이스코트 준비하였다. 6 가지 다른 메탈릭 안료(Al paste)가 배합 처방된 도료 시스템을 물성 평가를 위하여 국내 완성차업체에서 사용 중인 0.8T 두께의 GI(galvanized steel) 강판에 도포한 후 베이스코트의 경화조건에 따른 기본물성, 경화저동, 외관 평가, 또한 안료 입자 형태에 따른 모폴로지와 인장강도를 비교하였다.

II. 실험

1. 고유연성(high flexible) 폴리에스터 수지의 합성

높은 경도를 나타내면서도 pre-painted 도장시스템에 적용할 수 있는 도막 가공성능인 유연성을 동시에 가지며, 높은 외관품질을 구현할 수 있고, 우수한 내화학적 물성들을 모두 갖출 수 있는 베이스코트용 폴리에스터 수지를 합성하고자 하였다. 특히 pre-painted 도장 시스템에 적용할 수 있는 도막 가공 유연성을 제공하는 동시에 자동차용 베이스코트로서 요구되는 고경도의 물성을 melamine curing system에서 구현하기 위해서는 기존의 PCM(pre-coated metal) 베이스코트용 폴리에스터 폴리올의 분자구조 설계 방식으로는 한계가 있는 상황으로 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 새로운 분자구조의 설계를 수행하였다. 설계의 가장 중요한 고려 사항으로는 선형구조에서 제공하는 유연성을 부여하면서도 도막 형성 시에 멜라민 가교와 더불어 수지 자체에 존재하는 불포화 결합에 의하여 추가적인 가교를 유도함으로써, 분자량 10,000 이하의 낮은 분자량에도 불구하고, 탁월한 경도를 제공할 수 있도록 설계하였고 그 배합처방을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Formulation for Synthesis of High Flexible Polyester Resin

NO.	Ingredient	Content (wt%)
1	Neopentyl Glycol	24.0
2	Trimethylol Propand	9.0
3	Adipic acid	18.0
4	Fumaric Acid	12.0
5	Maleic Anhydride	12.0
6	Di-butyl tin oxide	0.03
7	Aromatic Solvent	7.0
8	Xylene	10.0
9	Styrene	5.0
Total		100.03

2. 베이스코트 배합 설계

메탈릭 안료는 Al paste를 사용하였는데 본 실험에서는 wetting behavior와 orientation이 우수하도록 개발된 ECKART사의 STAPA METALLUX 500, 600, 700, 800 시리즈를 선정하여 사용하였다. 선택된 6개의 안료 중 3개는 cornflake type이고 나머지 3개는 pancake type이었다. 메탈릭 안료의 wet properties는 Table 2에 나타내었다. 프라이머와 베이스코트의 부착력 증대를 위하여 프라이머에 적용한 수지를 동일하게 베이스코트 시스템에 적용하였다. Table 3은 안료 시스템에 따른 베이스코트의 배합으로 6가지 적용 가능한 메탈릭 안료를 선정하였으며, 각 도료 시스템은 안료 시스템에 따른 도막 물성 및 오리엔테이션 평가를 위하여 설계되었다. 선도장용 베이스코트의 실험 배합은 Table 3과 같다. 별도의 500 g 용기에 1~3항을 넣고 300 rpm의 속도로 교반하면서 알루미늄 paste를 정량하여 서서히 넣어가며 녹인다. 용제가 흡유된 알루미늄

Table 2. Properties of Metallic Pigment(Aluminium Paste)

Paste	Non volatile content(%)	Particle size distribution(μm)	Type
Al paste #501	65	21	Pan cake
Al paste #601	65	18	
Al paste #801	65	14	
Al paste #750	65	21	Corn flake
Al paste #770	65	16	
Al paste #790	65	10	

Table 3. Formulation for Basecoat by Metallic Pigment System

No	Description	sample -501	sample -601	sample -801	sample -750	sample -770	sample -790
1	HF Polyester	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
2	Aromatic solvent	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
3	Aromatic solvent(Koco #150)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
4	Al paste #501	8.0					
5	Al paste #601		8.0				
6	Al paste #801			8.0			
7	Al paste #750				8.0		
8	Al paste #770					8.0	
9	Al paste #790						8.0
10	Aromatic solvent	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
11	Setalit H-10X	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
12	Dibasic ester	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
13	HF Polyester	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
14	HF Polyester	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
15	MR-603LF	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
16	Aromatic sulfonic acid	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
17	Aromatic solvent	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Total		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Table 4. Evaluation Method of T-Bend Test

Evaluation	Condition of Coated Film
5	No cracked, not picked off
4	Slightly cracked, not picked off
3	Cracked, slightly picked off
2	Cracked, partly picked off
1	Cracked, significantly picked off
0	Cracked, completely picked off

* SPEC. : 2T, more than 4

늪 paste에 젖음성을 부여하기 위하여 왁스류인 setalit H-10X[®]를 첨가한 후 10~13항을 순서대로 투입하고 교반하면서 알루미늄 paste 반제품을 준비하고 30 분간 교반을 실시한다. 이후 유리판에 60 μ m의 applicator를 이용하여 외관을 확인한다. 주 바인더 솔루션을 만들기 위하여 별도의 용기에 14~17항까지 별도의 용기에 순서대로 교반하면서 투입하여 투명하게 될 때까지 교반을 지속한다.⁹

3. 도료의 점도 측정

자동차용 pre-painted 도료는 강판회사에서 롤코팅 공정으로 코팅되기 때문에 최적화된 점도를 가져야 한다. 점도는 일반적으로 수지의 분자량과 밀접하게 연관되어 있으며, 사용된 안료의 형태와 안료의 양, 용제의 종류 및 사용량, 그리고 첨가제의 유무에 의해 정해진다. 따라서, 기본적인 배합을 통해서 만들어진 도료의 점도를 측정하는 과정은 필수적이다. 도료의 점도는 Fordcup#4 (ASTM D-1200-94) 점도계를 사용하여 측정하였다.

4. 시험편의 제작

시험 전 시험편의 선단으로부터 약 5 mm와 이면에 대해서 폴리에스터 점착테이프를 사용하여 시험 중에 벗겨지지 않도록 주의하여 마스킹을 실시한 후 ASTM D 1654에 규정되어 있는 텅스텐 카바이드 팁을 이용하여 시험편의 중심 부근에 길이 60 mm의 2 개의 홈을 약 50°의 각도로 교차시켜서 X자의 형태로 만든다. 홈은 금속판에 다다른 깊이로 하며 단면의 크기가 항상 일정하도록 한다.

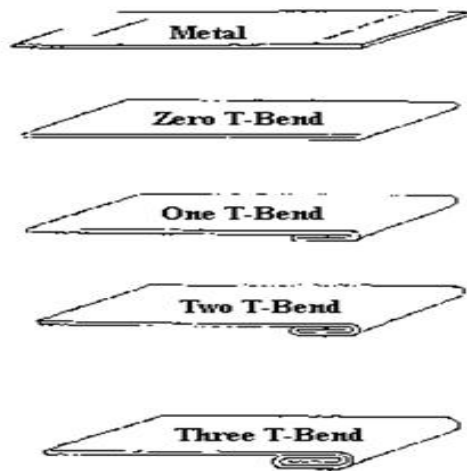


Figure 1. T-Bending test model (0T, 1T, 2T, 3T).

5. T-Bending 시험(굴곡성)

T-Bending 시험은 작성된 시편을 상온에서 180° 절곡하여 절곡된 부위에서 *taping* 하여 도막 박리 및 손상 여부를 점수화하여 평가는 시험 방법이다. Table 4는 T-Bend 시험 판정 방법을 나타내고, Figure 1은 T-Bending 시험 모델을 보여 준다.

6. 경화거동 분석

강체 진자형 물성시험기(Rigid body Pendulum type Hardness Tester, RPT-3000)는 일정한 힘을 주어 강체진자(Rigid body Pendulum)를 진자운동 시키면서 발생하는 사인 파장의 진폭과 주기의 증감을 분석하여 경화거동 및 점탄성적 성질을 분석하는 기기이다.⁷ 자동차용 도료의 경우, 강판 위에 도장한 후 경화가 진행되기 때문에 정확한 경화거동을 분석하기 위해서는 철판의 온도를 상승시키면서 경화거동을 측정하여야 한다. 실험 조건은 배합된 도료를 철판 위에 프라이머는 40 μm, 베이스코트는 30 μm wet 도장한 후 승온 속도 5 °C/min으로 상온에서부터 200 °C까지 승온시킨 후 200 °C를 유지하며 30 분간 경화거동을 분석하였다.

7. 안료의 표면분석

주사전자현미경(JSM-7500F)은 재료의 표면형상, 적층 결합, 계면 등을 직접 관찰함에 따라 이들이 재료의 여러 성질들에 미치는 영향을 정확히 규명하기 위한 장비이다. 본 실험에서는 pre-painted 도료의 입자분포 및 표면형상을 알아보기 위해 활용하였으며, 분석조건은 20 kV의 광원을 조사하여 1,000 배로 촬영하여 각 시편의 표면형상을 비교하였다.



Figure 2. Wave Scan Dual (BYK, Germany).

8. 인장강도 측정

인장강도 측정은 필름의 인장강도와 연신율을 실시간으로 분석하기 위하여 경화된 도막을 이용하여 ASTM D-1822에 따라 시편을 Dumbell 모양으로 제작한 후 Texture Analyzer(TA instruments, TA-XL2i)를 이용하여 분석하였다. Pre-painted 경화도막의 두께는 200 μm, 분석 조건은 0.4 mm/sec 속도로 측정하였다.

9. 외관(combined factor) 평가

Figure 2는 베이스코트 시스템에 따른 외관 평가를 위한 장비이며 이 장비로 구한 CF 값은 현재 미국의 포드 자동차 외관 기준 스펙에 포함된다. 안료에 따른 베이스코트 시스템에 의한 외관의 영향성을 판단하기 위하여 현재 상용화된 일액형 클리어코트를 정전도장 하였으며, 외관 평가를 위해 Wave Scan Dual (BYK, Germany)을 사용하여 평가를 진행하였다.

1) 측정 항목

Wave Scan Dual의 측정결과 중 CF 값을 영상선명도의 결과로 사용하였다.

2) 영상선명도 결과 토출 방식(외관면품질, CF)

CF 값은 자동으로 측정되어지며, CF 값의 계산식은 식(1)와 같다.

$$CF(\text{combined factor}) = 0.5 \times OP + 0.35 \times SH + 0.15 \times LU \quad (1)$$

여기서, OP는 귤껍질감(orange peel), SH는 맑기감(sharpness), LU는 광택(luster)을 의미한다.

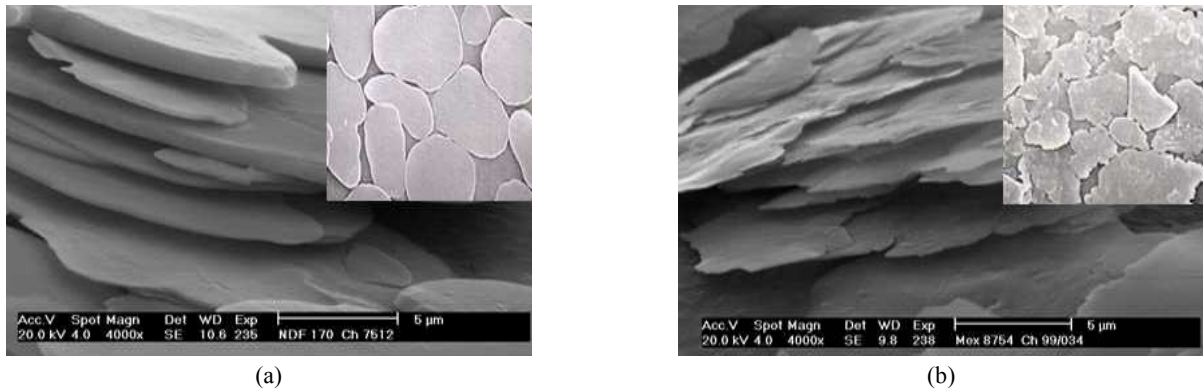


Figure 3. SEM image of pigment; (a) pancake type(#501), (b) cornflake type(#750).

Table 5. Goal Properties and Real Values of HF Polyester Resin

Conditions	Goal Properties	Real Values
Viscosity (G#, 25 °C)	Z - Z2	Z1
Solid (wt%)	74 - 76	75.24
Acid Value (NV)	Max 3	2.5
OH Value(NV)	55 - 75	65
Color (G#)	Max. 2	Below 1
Molecular Weight (M _w)	5,000 ~ 10,000	8,413

III. 결과 및 고찰

1. 고유연성(HF; High Flexible) 폴리에스터 수지의 기본 물성

Table 5에서와 같이 최초 설계 목적에 부합되는 기본적인 물성을 가지는 고유연성 폴리에스터 수지의 개발이 완료되었다. 수지는 저분자량 수준인 10,000 이하의 분자량과 직선적인 분자사슬 구조를 갖고 있지만, 비교적 높은 수산화기 그룹을 갖고 있고, 또한 고분자 내에 불포화기를 포함하고 있어 고온 경화반응을 통한 도막 형성 시에 폴리에스터-멜라민 가교반응과 더불어 가교되어 우수한 기계적/화학적 물성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 불포화기에 의한 가교 시스템의 도입은 차후 추가적인 개선 방향 및 개발 실험에서 유용하게 적용할 수 있는 방향이 될 수 있을 것이라고 판단된다.

2. 안료의 형태

Flake 입자의 크기와 분포도뿐만 아니라, 안료의 형태 역시 metallic effect에 영향을 끼치기 때문에 flake 선정이 중요하다.

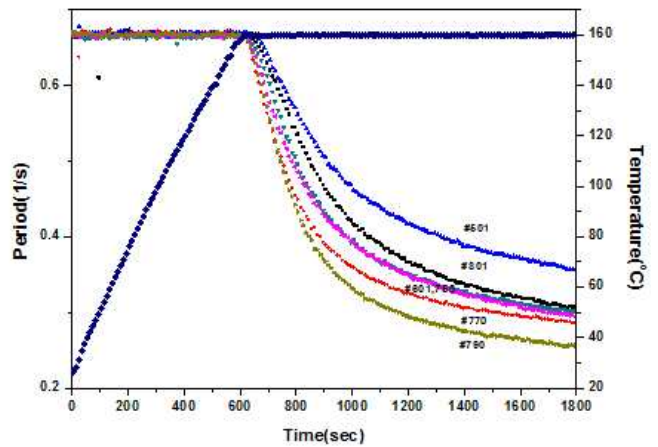


Figure 4. Cure behavior of basecoat with pigment.

제조 공정에 따라 여러 형태의 flake의 생산이 이루어지고 있으며, 형태에 따른 Al paste의 SEM 이미지를 Figure 3에 나타내었다.

Pan cake 타입(#501)의 경우 정교한 제조공정을 통하여 비교적 최근에 개발된 flake로써, particle의 분포가 좁은 범위에서 형성되고 이로 인한 optical property를 향상시킨다. Cornflake 타입(#750)은 불규칙적으로 형성된 혈소판과 같은 모양으로 거의 둥근 형태를 가지고 있다.

3. 베이스코트의 경화와 물성

베이스코트의 경화조건과 이를 통한 기본적인 경화 물성을 Table 6에 나타내었다. Figure 4에서와 같이 경화 밀도가 높을수록 T-bending, 내충격성, 테이프 부착성이 우수한 것으로 나타났다. Figure 4는 안료에 따른 베이스코트 시스템의 경화 거동 시험결과를 보여준다. 각 시스템에 따른 상대적인 경화 밀도를 측정하였으며 상대적인 경화 밀도는 #501, #801, #601, #750, #770, #790 순으로 증가함을 알 수 있다. 경화밀도가 증

Table 6. Cure Conditions and Basic Properties of Basecoat Systems

Conditions	Basecoat Systems						Target
	#501	#601	#801	#750	#770	#790	
PMT (°C)	230						
Specimen Dimension (cm)	30×20						
Material	GI						Line speed : 30mpm Line length : 30m
Time (sec)	30						
Inverter Volume	40						
Viscosity	42	41	39	42	41	41	Fordcup
Solid (%)	56.7	57.3	56.5	56.4	55.8	56.9	105°C×3hrs
Film Thickness (μm)	10 ~ 15						
T-bending	1T	1T	1T	2T	2T	2T	vise
Taping Adhesion	Gt-1	Gt-1	Gt-0	Gt-1	Gt-0	Gt-0	100*100
Impact Resistance	crack	crack	crack	crack	no crack	no crack	1/4", 500g, 20cm

가할수록 베이스코트의 경도는 증가한다.

4. 안료 타입별 인장시험

알루미늄 입자의 종류에 따른 베이스코트의 인장강도를 평가하였다. Cornflake 타입의 알루미늄 입자는 매우 얇은 박막의 형태로 비정형의 모양을 하고 있지만 도장되어 인장되었을 시에 두께가 두꺼운 pancake 타입의 알루미늄 형태보다 보다 강한 인장력을 나타내었다. 이것은 cornflake 타입이 베이스코트에 적용될 경우에 차체 도장 후 스탬핑 과정에서 상대적으로 도막의 손상 없이 양호한 품질을 제공할 수 있다는 것을 의미하는 것으로 사료된다. 두꺼운 pancake 타입의 경우 가공 중 쉽게 도막이 박리되고 깨어지는 현상을 보이며 이는 Figure 5와 같이 낮은 strain 값을 나타낸다.

5. 외관(combined factor) 평가

외관평가는 인장시험에서 우수한 결과를 보인 cornflake type만 적용하였는데 Figure 6에서 보는 바와 같이, 입자 크기가 작은 #790을 사용한 베이스코트 시스템이 다른 시스템과 비교하여 우수한 CF 값을 나타냄을 알 수 있다. 참고용 베이스코트는 수평 CF(combined factor) 값이 69.8로 측정되며, #750

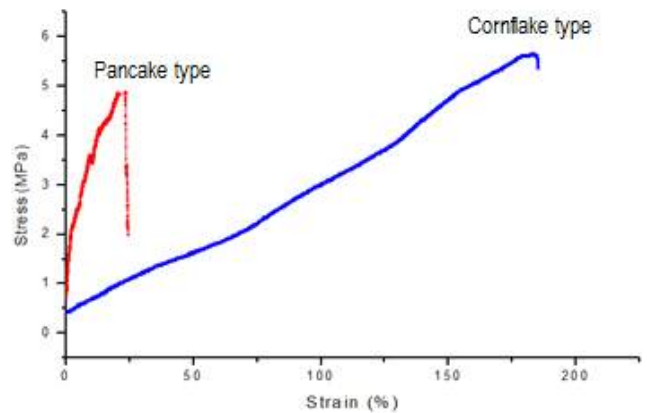


Figure 5. Tensile strength and elongation of basecoat system with pigment type; pancake(#501) vs. cornflake(#750).

을 사용하여 도장된 시편의 경우 57.8로 최대 18%정도 낮은 것으로 측정되었다. 그러나 입자 크기가 작은 #790의 경우 기존의 참고용 도료와 7% 정도 외관의 차이가 발생함을 알 수 있다. Pre-painted 도장 조건은 매우 빠르게 도장되고 도장 후 성형이 가능한 장점이 있으며, 보다 다양한 알루미늄 입자를 사용하여 기존의 도료와 유사한 입자감과 외관을 확보하는 것이 중요하다고 할 수 있다. Figure 6에서 보는 바와 같이 작은 입자 크기를 가질수록 우수한 오리엔테이션 결과에서

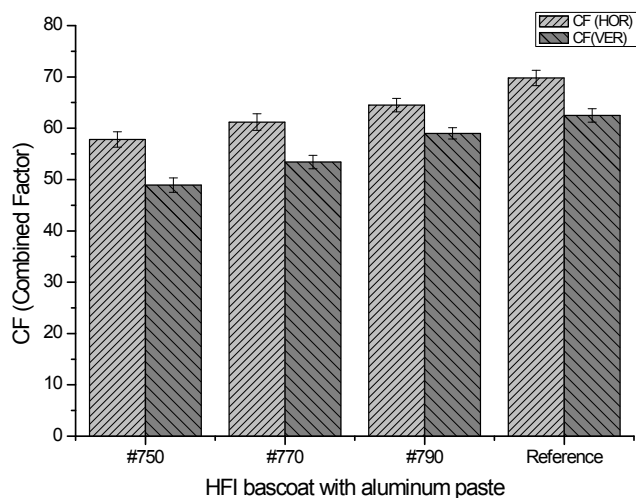


Figure 6. Appearance of basecoat systems.

예상되었던 결과와 동일하며, 입자의 크기가 크면 높은 휘도를 나타내어 반짝거림을 느낄 수 있으나 CF 값은 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

IV. 결론

중량 분자량이 8,413인 고유연성 폴리에스터 수지를 합성하여 메탈릭 안료로서 pancake 타입 알루미늄 페이스트 3종 (#501, #801, #601)과 comflake 타입 알루미늄 페이스트 3종 (#750, #770, #790)을 사용하여 베이스코트를 배합 처방하였다. 상대적인 경화 밀도는 #501, #801, #601, #750, #770, #790 순으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 경화 밀도가 높을수록 T-bending, 내충격성, 테이핑 부착성이 우수한 것으로 나타났다. 인장시험에서 comflake 타입의 알루미늄 입자는 pancake 타입의 알루미늄 형태보다 보다 강한 인장력을 나타내었다. Comflake 타입 만 적용한 외관평가에서는 입자 크기가 작은 #790을 사용한 베이스코트 시스템이 다른 시스템과 비교하여 우수한 CF 값을 나타냄을 알 수 있었다.

References

1. S. M. Noh, J. W. Lee, J. H. Nam, J. M. Park, and H. W. Jung, "Analysis of scratch characteristics of automotive clearcoats containing silane modified blocked isocyanates via carwash and nano-scratch tests", *Prog. Org. Coat.*, **74**, 192 (2012).
2. S. M. Noh, J. W. Lee, J. H. Nam, K. H. Byun, J. M. Park, and H. W. Jung, "Dual-curing behavior and scratch characteristics of hydroxyl functionalized urethane methacrylate oligomer for automotive clearcoats", *Prog. Org. Coat.*, **74**, 257 (2012).
3. J. I. Moon, Y. H. Lee, and H. J. Kim, "Synthesis and characterization of flexible polyester coatings for automotive pre-coated metal", *Prog. Org. Coat.*, **73**, 123 (2012).
4. I. J. Lee, and S. Park, "Rheology and roll coating dynamics of metallic basecoats for automotive pre-coated metal sheet", *Prog. Org. Coat.*, **76**, 917 (2013).
5. J. H. Kim, I. J. Lee, S. M. Noh, C. Y. Kang, J. H. Nam, H. W. Jung, and J. M. Park, "Dynamics and instability of a polymeric paint in roll coating process for automotive pre-coating application.", *Polymer(Korea)*, **35**, 574 (2011).
6. R. A. Priemon, "Annual Book of ASTM Standards", American Society for Testing and Materials 19, (1983).
7. T. Tanaka, "The measurement for physical properties of coated materials by rigid-body pendulum", A&D Co., Ltd., (1982).
8. J. P. Stropp, U. Wolff, S. Kernaghan, H. Löffler, M. Osterhold, and H. Thomas, "UV curing systems for automotive refinish applications", *Prog. Org. Coat.*, **55**, 201 (2006).
9. U. Poth, "Automotive coating formulation", *Vicentz Network*, (2008).
10. B. W. Johnson, "Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings", *Prog. Org. Coat.*, **27**, 95 (1996).
11. L. G. J. van der Ven, "Durability prediction of p-urethane clearcoats", *Prog. Org. Coat.*, **48**, 214 (2003).
12. Antia Augustiniak, "Early detection of aluminum corrosion via turn-on fluorescence in smart coatings", *Prog. Org. Coat.*, **71**, 406 (2011).
13. A. Kiehl, "Encapsulated aluminum pigments", *Prog. Org. Coat.*, **37**, 179 (1999).
14. E. Kirchner, "Film shrinkage and flake orientation", *Prog. Org. Coat.*, **65**, 333 (2009).
15. A. Arthur, "Traction, coating materials and surface coatings", CRC Press (2007).
16. J. W. Lee and U. R. Cho, "A study on weatherability with particle size and orientation of aluminum in pre-painted basecoat for automotive", *Elast. Compos.*, **48**, 167 (2013).