

## 자동차 부품용 무도장 메탈릭 플라스틱 소재 개발

최민진<sup>\*,†</sup> · 조정민<sup>\*</sup> · 최영호<sup>\*</sup> · 최민호<sup>\*</sup> · 이춘수<sup>\*</sup> · 성한기<sup>\*\*</sup> · 이경실<sup>\*\*\*</sup> · 박기훈<sup>\*\*\*\*</sup> · 황세종<sup>\*\*\*\*</sup>

\*현대자동차 외장PT플라스틱재료개발팀  
 18280 경기도 화성시 남양읍 현대연구소로 150 외장PT플라스틱재료개발팀  
 \*\*현대자동차 플라스틱금형기술부  
 44259 울산광역시 북구 염포로 700 현대자동차 플라스틱금형기술부  
 \*\*\*현대자동차 기아디자인엔지니어링팀  
 18280 경기도 화성시 남양읍 현대연구소로 150 기아디자인엔지니어링팀  
 \*\*\*\*대원케미칼 기술연구소  
 31044 충청남도 천안시 서북구 성거읍 천흥8길 67-34 대원케미칼  
 (2021년 9월 10일 접수, 2021년 10월 13일 수정본 접수, 2021년 10월 18일 채택)

## Development of Paint-free Metallic Plastic Material for Automotive Parts

Min Jin Choi<sup>\*,†</sup>, Jeong-Min Cho<sup>\*</sup>, Young Ho Choi<sup>\*</sup>, Min Ho Choi<sup>\*</sup>, Choon Soo Lee<sup>\*</sup>, Han Ki Sung<sup>\*\*</sup>  
 Kyoung Sil Lee<sup>\*\*\*</sup>, Ki Hun Park<sup>\*\*\*\*</sup> and Se Jong Hwang<sup>\*\*\*\*</sup>

\*Hyundai Motor Group, Exterior & Powertrain System Plastic Materials Development Team,  
 150, Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18280, Korea  
 \*\*Hyundai Motor Group, Plastic Mold Manufacturing Engineering Department Team, 700, Yeompo-ro, Buk-Gu, Ulsan, 44259, Korea  
 \*\*\*Hyundai Motor Group, Kia Design Engineering Team, 150, Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18280, Korea  
 \*\*\*\*Daewon Chemical Company, 67-34, Cheonheung 8-gil, Seonggeo-eup, Sebuk-gu, Cheonan-si Chungcheongnam-do, 31044, Korea  
 (Received 10 September 2021; Received in revised form 13 October 2021; Accepted 18 October 2021)

## 요 약

본 논문에서는 범퍼 스킴드 플레이트 및 아웃사이드미러 하우징 부품에 적용되는 polypropylene (PP)와 acrylonitrile styrene acrylate (ASA) 소재를 활용하여 무도장 메탈릭 소재 구현에 대해 연구하였다. 금속 효과를 극대화하기 위해 알루미늄 입자의 종류, 크기, 함량을 최적화하였고 웰드 라인을 은폐하기 위해 종횡비가 상이한 하이브리드 알루미늄 입자를 사용하였다. 또한 부품 표면에 발생하는 플로우 마크를 개선하기 위해 유동성을 제어하였으며 사출 해석을 수행하였다.

**Abstract** – In this paper, paint-free metallic plastic material, polypropylene (PP) and acrylonitrile styrene acrylate (ASA) materials were investigated on the applications for bumper skid plate and outside mirror housing parts. In order to maximize metallic effect, type, size and content of aluminum pigment were optimized based on flop index. Hybrid aluminum pigments with different aspect ratios were used to conceal weld lines. By controlling the fluidity of the material, the flow mark problem, generated on the surface of the part, was resolved. We also investigated the surface defects of flow and weld lines by using the developed modeling and simulation.

**Key words:** Paint-free metallic plastic material, Aluminum pigment, Skid plate, Outside mirror housing, Weld line, Flow mark

## 1. 서 론

자동차 부품 디자인에 대한 고객들의 요구사항이 다양화되고 있다. 이에 자동차 업체는 부품 사출 후 외관 고급화를 위하여 도장, 도금,

필름 성형 등 다양한 표면처리를 하고 있다. 하지만 후 처리를 하게 되면 추가 비용이 발생할 뿐만 아니라 도막 박리 등의 품질 문제를 야기시킬 수 있다. 이에 자동차 분야뿐만 아니라 전기, 가전 등의 분야에서 표면처리를 대체할 수 있는 솔리드 색상 또는 메탈릭 색상의 원소재 개발이 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 표면처리 대체 원소재를 적용하게 되면 도장공정에서 발생하는 휘발성 유기 화합물 (Volatile Organic Compounds: VOCs)을 저감시킬 수 있는 장점이 있고 도막 박리로 인한 품질 문제를 해결할 수 있다. 또한, 유독성 도료에 의한 수질오염과 필름 부산물에 의한 환경 폐기물 문제도

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
 E-mail: mjchoi@hyundai.com

‡이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

저감할 수 있다.

아울러 기업 입장에서는 생산원가를 낮출 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 최근 자동차 업계도 원가경쟁력을 가지며, 환경적인 표면처리 대체 원소재 개발에 집중하고 있다. 이에 본 연구에서는 자동차 내·외장 부품의 메탈릭 도장을 대체할 수 있는 원소재 개발과 부품화 적용을 진행하였다.

일반적으로 금속 질감을 구현하기 위해서는 알루미늄(aluminum), 펄(pearl), 마이카(mica) 등 다양한 무기물 입자가 사용된다. 그 중 본 연구에서는 반사율이 좋으며 금속 질감과 광택이 우수한 알루미늄 입자를 선택하였다. 알루미늄 입자는 종류, 크기, 함량 등에 따라 부품 외관의 금속 질감 차이가 크게 발생하기 때문에 최적의 알루미늄 입자 조성을 확보하는 것이 매우 중요한 과제이다.

금속 질감은 휘도(Brilliance) 측정을 통해 비교하였으며, 다양한 각도에서 표면을 관찰하였을 때 차이가 클수록 휘도와 볼륨감이 높다고 판정하였다. 평판 시편뿐만 아니라 적용 대상 부품인 스킵드 플레이트(skid plate), 아웃사이드미러 하우징(outside mirror housing)을 활용하여 추가 검증하였다.

## 2. 메탈릭 플라스틱 소재 개발

### 2-1. 베이스 소재

산업계에서 표면처리 대체 원소재 적용 니즈가 증가함에 따라 자동차 제조사, 부품사, 소재사 등에서 무도장 메탈릭 플라스틱 소재에 대한 연구가 진행되고 있으며 베이스 소재도 Polypropylene (PP), Acrylonitrile styrene acrylate (ASA), Polyamide (PA) 등으로 다양화되고 있다[2]. 본 논문에서는 자동차 외장 부품에 주로 사용되는 PP와 ASA 소재를 베이스 소재로 사용하였다. 자동차 부품용 플라스틱 소재 중 PP 소재는 주로 범퍼, 스킵드 플레이트, 사이드 실 몰딩 등에 적용되며, ASA 소재는 아웃사이드미러, 라디에이터그릴 등에 적용된다. 두 소재 모두 대원케미칼에서 컴파운딩 된 소재를 사용하였으며 소재 그레이트명은 각각 JR3512HM, JC0650 이다. 특히 PP 소재는 타 자동차 제조사 대비 상위 수준의 금속 질감 확보를 위해 반투명 베이스 PP를 선정하였다. 일반적으로 반투명 PP는 투광성 및 광택성은 우수하며 기계적 물성 저하 없이 금속 질감 확보에 용이한 장점이 있다.

### 2-2. 알루미늄 입자

본 연구에서는 금속 질감을 구현하기 위해 Eckart社(Germany)에서 생산된 알루미늄 입자를 사용하였다. 알루미늄 입자는 종류, 크기, 함량에 따라 다양한 금속 질감을 구현할 수 있기 때문에 본 연구에서는 입자의 종류, 크기, 함량을 최적화하여 최상의 금속 질감 구현을 목표로 하였다.

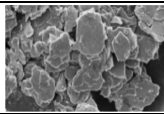
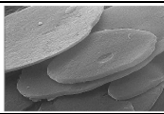
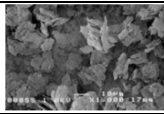
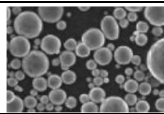
금속 질감 측정 방법으로는 X-Rite社 장비를 활용하여 휘도 값을 측정하였으며, 계산된 Flop index 값을 비교하였다(각도별 측정 오차:  $\pm 0.2$ ). Flop index는 15°, 45°, 110°에서의 밝기 값을 구한 뒤 하기 수식을 활용하여 얻을 수 있었다. Flop index 수치가 클수록 휘도가 좋다고 판단하였다.

$$\text{Flop index} = \frac{2.69(L_{15^\circ} - L_{110^\circ})^{1.11}}{(L_{45^\circ})^{0.85}}$$

### 2-3. 알루미늄 입자 최적화

알루미늄 입자 종류 및 장단점은 Table 1과 같다. 금속 질감은 판

Table 1. Aluminum pigment types and characteristics

Pigment type	Corn flake	Round flake or Silver dollar
Image		
Advantages	Metal texture (luminance) ↑	Metal texture (luminance) ↑ Color power ↑
Disadvantages	Color power ↓, Weld line may occur	Weld line may occur
Pigment type	Powder	Sphere
Image		
Advantages	Price competitiveness ↑	Weld line may occur, Flow mark improvement ↑
Disadvantages	Metal texture (luminance) ↓ Mechanical properties ↓	Metal texture (luminance) ↓ Color power ↓

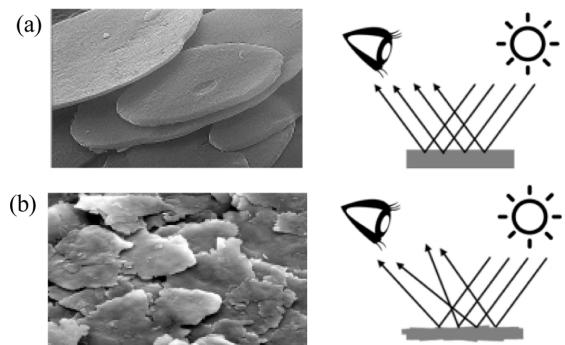


Fig. 1. Comparison of appearance by aluminum pigment type of round flake and corn flake types. (a) Round flake, (b) Corn flake

상형(Corn flake)과 디스크형(Round flake)이 가장 우수하며, 은페력(색구현력)은 디스크형이 판상형보다 우수한 것을 확인할 수 있다.

알루미늄 입자는 Fig. 1과 같이 편평한 원반형상으로 끝단이 둥글게 처리되어 있을 때 빛이 정반사되어 금속 질감이 높다. 반면에 불규칙한 모양을 가질 경우 빛이 난반사되어 금속 질감이 떨어진다[3]. 이러한 특성으로 디스크형이 판상형보다 금속 질감이 우수한 것을 확인할 수 있다.

동일한 크기와 함량의 알루미늄 입자 조건(알루미늄 입자 크기는 16  $\mu\text{m}$ , 알루미늄 입자 함량은 3 wt%로 동일)에서 비교 시, Fig. 2와 같이 디스크형이 다른 입자 종류보다 휘도가 높음을 확인할 수 있었다.

알루미늄 입자 종류뿐만 아니라 알루미늄 입자의 크기도 금속 질감에 영향을 미친다. 알루미늄 입자 크기가 작을수록 금속 질감 및 입자 분산성이 우수한 반면에 알루미늄 입자 크기가 클수록 금속 질감 및 분산성은 저하되어 고급감이 떨어지게 된다. 이에 본 연구에서는 금속 질감이 최적화되는 알루미늄 입자를 실험을 통해 확인하였다. Fig. 3에서와 같이 동일한 종류, 함량의 알루미늄 입자 조건(알루미늄 입자 종류는 디스크형, 알루미늄 입자 함량은 3 wt%로 동일)에서 비교 시, 알루미늄 입자 크기가 16  $\mu\text{m}$ 일 때 금속 질감이 가장

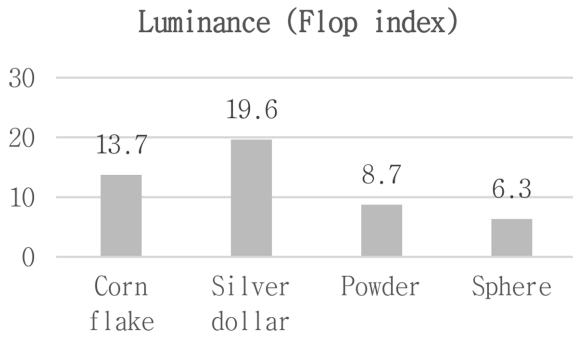


Fig. 2 Flop index according to the type of aluminum pigment.

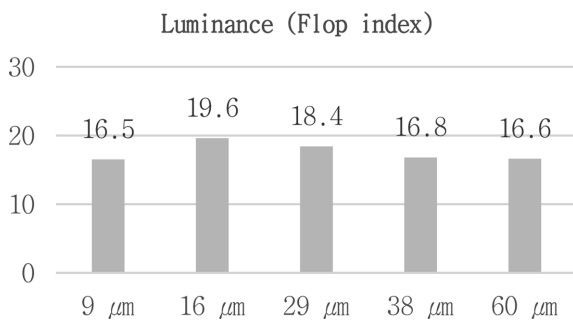


Fig. 3. Flop index according to size of aluminum pigment.

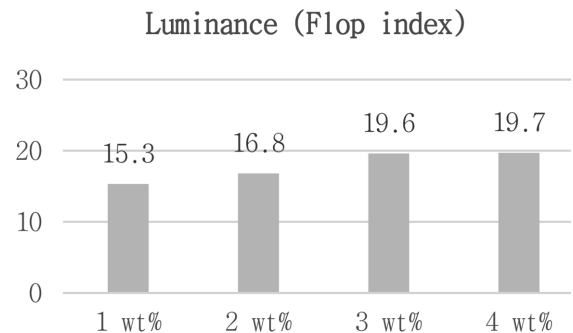


Fig. 4. Flop index according to aluminum pigment content.

우수하다는 것을 알 수 있었다.

또한, 알루미늄 입자 함량이 높아질수록 금속 질감은 향상되지만, 웰드 라인 등의 표면 불량 발생 수 있고 소재 원가가 높아지므로 적절한 함량 선정도 중요하다. Fig. 4에서와 같이 동일한 종류, 크기의 알루미늄 입자 조건(알루미늄 입자 종류는 디스크형, 알루미늄 입자 크기는 16 μm로 동일)에서 비교 시, 3 wt% 정도의 함량에서 금속 질감이 최적화됨을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 결론적으로 디스크형, 크기 15~25 μm, 함량 3 wt%의 알루미늄 입자를 적용하였다.

#### 2-4. 외관 품질 강건화

무도장 메탈릭 플라스틱 소재 적용에 있어서 가장 큰 극복 과제는 외관에 발생하는 웰드 라인과 플로우 마크 해결이다. 웰드 라인은 사출성형 시 수지가 만나는 부분에서 알루미늄 입자가 수지 흐름의 수직 방향의 배향성을 가지면서 발생한다[4].

웰드 라인 은폐를 위해 본 연구에서는 중형비가상이한 두 종류의

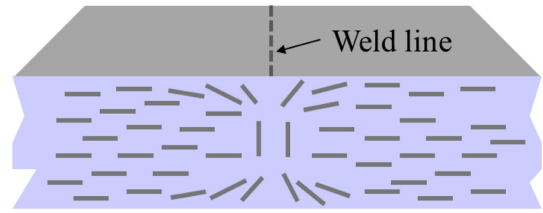


Fig. 5. Schematic illustration of weld line generation according to aluminum pigment orientation.

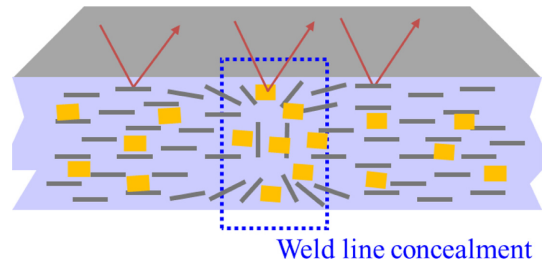


Fig. 6. Schematic illustration of hybrid aluminum pigment (disc+3D disc) orientation.

디스크형 알루미늄 입자를 적용하였다. 웰드 라인 부위에 위치한 중형비가 작은 알루미늄 입자(3D 디스크형)는 디스크형과 달리 수지 흐름에 수직방향 배향이 적어 부품 표면에 입사된 빛을 충분히 반사 시킴으로써 웰드 라인을 은폐시킬 수 있다. 본 논문에서 사용된 3D 디스크형 알루미늄 입자의 크기는 약 16 μm이며, 두께는 2~10 μm로 일반 디스크 형태(두께 약 300 nm) 보다 더 두꺼운 형태이다.

이러한 웰드 라인 은폐 원리는 사출성형 후 외관 비교를 통해 확인하였다.

플로우 마크 해결을 위해서는 소재 유동성을 향상시켰으며, 사출 시 소재 유동을 컨트롤하여 플로우 마크 발생을 제어할 수 있었다. 또한, 황제 최적화를 통해 베이스 소재와 알루미늄 입자간 상용성을 향상시킴으로써, Table 3과 같이 외관이 개선됨을 확인하였다.

마지막으로, 내스크래치성 강화를 위해 소재 내 Ethylene 성분 함량 최소화를 통해 표면경도를 증가시킴으로써 스크래치 품질문제를

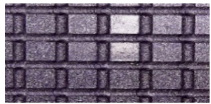
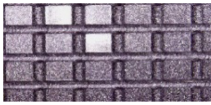

Table 2. Photographs of skin according to aluminum pigment type

Aluminum pigment type	Disc	Hybrid (disc+3D disc)
Image		

Table 3. Photographs of developed products and competitors

Supplier	Daewon chemical	B*
Spiral (mm)		
Appearance evaluation results		
	Good appearance	Flow mark occurrence

**Table 4. Reinforced scratch resistance according to rubber type (ethylene content)**

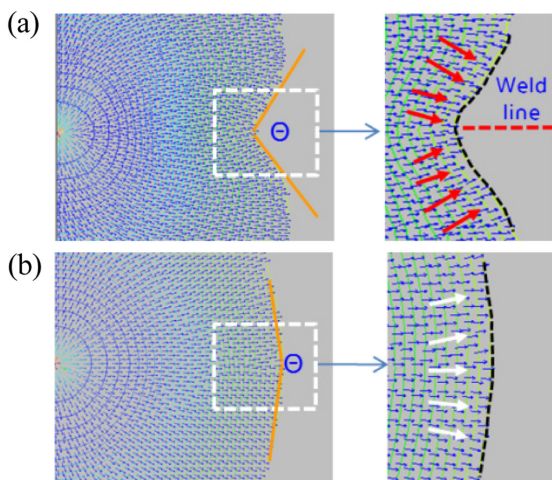
Rubber type	Ethylene content (%)	Rockwell test (R-Scale)	Erichsen test ( $\Delta L$ )	Erichsen test results (x1000)
EPDM	69	68	1.76	
POE	30	65	1.37	
EPR	13	73	0.16	

해결할 수 있었다. 네스크래치성은 에릭슨 시험 (Erichsen test) 을 통해 비교 평가 하였으며, 아래 Table 4와 같다.

### 3. 사출 성형 및 해석

알루미늄 입자 배향에 따른 외관형상을 확인하기 위해 시편 금형 제작 후 성형 해석을 통한 외관 품질 예측이 시행되어왔다[5]. 본 연구에서는 시편상태뿐만 아니라 부품상태에서의 연구를 통해 실제 부품에서 발생할 수 있는 외관 품질을 성형 해석과 비교함으로써 부품 금형 디자인 데이터베이스를 구축하였다.

수지 내에 알루미늄 입자가 포함되어 있는 경우, 사출 시 수지의 흐름을 방해하는 방해물이 있거나, 수지와 수지가 만날 때 웰드 라인 또는 알루미늄 플레이크 라인이 발생하게 된다. 이러한 웰드 라인 연구는 Fig. 7에서의 성형해석 결과에서 볼 수 있듯이 수지와 수지가 만나는 접촉각에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(a)와 같이 수지의 접촉각이  $180^\circ$  이하가 되면 알루미늄 입자 배향 물림이 발생하면서 웰드 라인이 발생하게 된다. 반면에 Fig. 7(b)와 같이 수지의 접촉각이  $180^\circ$  이상을 형성하게 되면 알루미늄 입자 배향이 분산됨으로써 표면이 양호함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 수지 유



**Fig. 7. Mold analysis results on the effect of resin flow pattern contact angle on appearance. (a) Weld line generation according to resin flow pattern contact angle, (b) Weld line prevention according to resin flow pattern contact angle.**

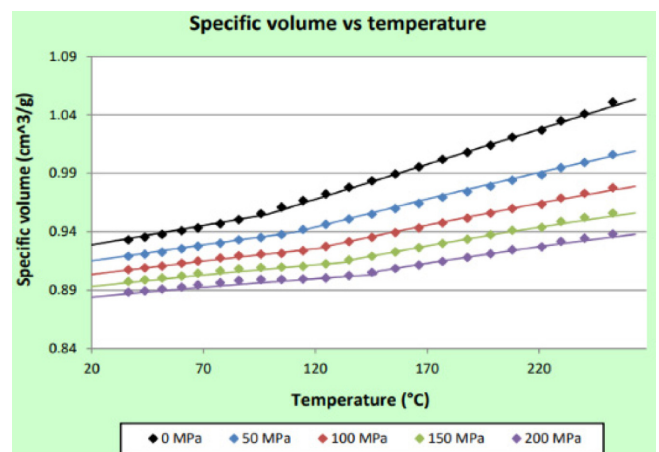
**Table 5. Injection and analysis conditions table**

Item	Content	
Analytical range	Fill + Pack	
Process conditions	Mold temperature	45 °C
	Injection temperature	245 °C
	Filling speed	1~3 s
	Filling/Holding pressure switching conditions	98 % filling time switch
	Holding pressure condition	Apply 80 % filling pressure for 6 s
	Cooling time	20 s

동 형상 조절이 중요하며 수지가 만나는 접촉각은  $180^\circ$  이상일 때 최적 조건임을 확인하였다.

본 연구에서는 아웃사이드미러 하우스징 금형을 활용하여 시제품을 제작한 후, 성형해석을 통해 외관불량 원인분석 및 개선안을 도출하였다. 사출 및 해석 조건표는 하기 Table 5와 같다. 성형 해석은 몰드 플로우(Moldflow) 프로그램인 Autodesk Moldflow 2017.3을 활용하였다. Moldflow 용 해석물성으로 ASA 베이스 소재의 물성치를 활용하였다. 입자가 첨가된 소재의 열유변학적 물성치는 차이가 있지만, 표면 이색은 입자 배향 변화에 의해 발생되기 때문에 베이스 소재의 유동 방향을 해석하여 정성적으로 이색 발생 여부를 판단하였다. 성형해석에 활용된 ASA 베이스 소재의 pvT 선도는 아래 Fig. 8와 같다.

사출을 통해 부품 제작 시, 외관불량은 크게 3 군데로 구분을 할 수 있었다. 위치 별 불량 원인 및 개선 방향을 도출하기 위해 외관 불량 위치 별 성형 해석을 순차적으로 진행하였다. 외관 불량 사례는 Fig. 9와 같다. 또한 각 위치 별 사출 후 문제 현상과 성형해석 비교 결과는 Table 6에 정리하였다.






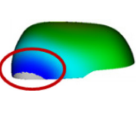
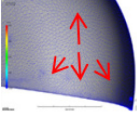

**Fig. 8. ASA (JC0650) pvT.**



**Fig. 9. Paint-free metallic outside mirror housing part.**



**Table 6. Comparison of result of injection and analysis of outside mirror housing**

Content	#1	#2	#3
Problem phenomenon			
Analysis results			

위치 #1에서는 전면 하단부에서 이색이 발생함을 확인할 수 있었으며, 성형 해석 결과 보압 전환 시점에서 미충진 형상과 사출 시 발생하는 문제 형상과 유사함을 확인하였다. 위치 #2에서는 측면 하단부에 이색이 발생함을 확인할 수 있었으며, 충전 과정에서 수지 유동 방향 변경이 복잡하게 바뀔 수 있었으며, 이는 알루미늄 입자 불균일 배향을 유발하고 이에 따른 외관 칼라 변화에 의한 것임을 예측해볼 수 있었다. 마지막으로 위치 #3에서는 게이트 부위의 이색으로, 성형 해석 결과로는 게이트 부위 이색 발생이 나타나지 않았다. 하지만 런너 또는 게이트 설계 변경을 통해 콜드 슬러그 웰(cold slug well) 기능 개선을 함으로써 게이트 부위 이색을 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

이러한 문제 현상을 개선하기 위해서는 배면(뒷면)의 파팅 라인 단차/갭 최소화가 필요하며, 알루미늄 입자 배향의 불균일성을 최소화할 수 있는 유동 패턴이 필요함을 알 수 있었다.

#### 4. 단품 및 부품 평가

무도장 메탈릭 PP를 적용한 스킵드 플레이트와 무도장 메탈릭 ASA를 적용한 아웃사이드미러 하우징 부품을 제작하였고, 자동차의 재료, 부품 신뢰성 평가를 통해 검증하였다. 검증 결과 기존 도장 부품 동등 수준임을 확인할 수 있었다.

#### 5. 결 론

최근 자동차 외장부품은 도장, 도금, 필름 삭제 등 친환경 공법의 개발 필요가 증가함에 따라 무도장 메탈릭 플라스틱 소재 개발이 필수불가결하게 되었다. 이에 본 연구에서는 자동차 외장부품에 주로 사용되는 PP, ASA 소재를 베이스로 하여 금속 질감 구현이 가능한 무도장 메탈릭 플라스틱 소재를 개발하였다. 메탈릭 질감 구현에 가장 영향을 미치는 항목 중 하나가 최적의 알루미늄 입자 처방이라는 결론을 얻었다. 본문에 외관 평가를 통해 언급하였듯이, 1) 알루미늄 입자 디스크 타입, 2) 크기 15~25  $\mu\text{m}$ , 3) 함량 3 wt% 에서 금속 질감이 최적화 됨을 확인할 수 있었다.

또한 외관 품질 강건화를 위해 사출성형 해석으로 알루미늄 입자 배향을 관찰하였으며, 성형해석 결과로 나타난 외관과 실제 사출 성

형품의 외관을 비교하였다. 이를 통해 미충진 형상과 사출 시 발생하는 이색 문제 형상과의 유사함을 확인할 수 있었으며, 충전 과정에서 알루미늄 입자 배향을 변화시키는 수지 유동 패턴을 확인할 수 있었다. 이를 개선하기 위해 충전 전/후 부품 내 유동 속도 변화 최소화 유도가 필요하며, 충전 유동 및 수지상태 변화 최소화가 필요함을 확인할 수 있었다. 또한, 게이트 형상도 콜드 슬러그 웰 기능을 강화한 형상이 외관 불량 개선에 효과적임을 확인할 수 있었다.

#### References

1. Santos, O., Pontes, A. J. and Martins, C. I., "Morphological Aspects of Injection-molded Polypropylene with Metallic Pigments," *ANTEC*, **3**, 1944(2013).
2. Govindaraj, K., Balaji, K., Vimalathithan, M., Samir, G. and Rajesh, L., "Mold in Color Diamond White ASA Material for Automotive Exterior Application," *SAE Technical Paper*, **28**, 2562 (2019).
3. Park, J. M., Jeong, S. J. and Park, S. J., "Numerical Prediction of Flake Orientation and Surface Color in Injection Molding of Flake-pigmented Thermoplastics," *Polymer Composites*, **32**(8), 1297-1303(2011).
4. Kobayashi, Y., Teramoto, G. and Kanai, T., "The Unique Flow of Polypropylene at the Weld Line Behind an Obstacle in Injection Molding," *Polymer Engineering and Science*, **51**(3), 526-531 (2011).
5. Kim, S. L., Choi, T. G., Cho, H. S., Lyu, M., Lim, J. and Lee, S., "Orientation of Two Dimensional Fillers and Surface Appearance in an Injection Molded Article," *Polymer (Korea)*, **40**(6), 871-879 (2016).

#### Authors

**Min Jin Choi:** Senior research engineer, Hyundai Motor Group, Hwaseong 18280, Korea; mjchoi@hyundai.com

**Jeong-Min Cho:** Senior research engineer, Hyundai Motor Group, Hwaseong 18280, Korea; jm.cho@hyundai.com

**Young Ho Choi:** Senior research engineer, Hyundai Motor Group, Hwaseong 18280, Korea; ychoi7@hyundai.com

**Min Ho Choi:** Part leader, Hyundai Motor Group, Hwaseong 18280, Korea; matetwo@hyundai.com

**Choon Soo Lee:** Team leader, Hyundai Motor Group, Hwaseong 18280, Korea; cslee@hyundai.com

**Han Ki Sung:** Senior Manager, Hyundai Motor Group, Ulsan, 44259, Korea; shksnr@hyundai.com

**Kyoung Sil Lee:** Senior research engineer, Hyundai Motor Group, Hwaseong 18280, Korea; 2411908@hyundai.com

**Ki Hun Park:** Associate Research Engineer, Daewon Chemical, Cheonan-si 31044, Korea; pkh353@woongsol.com

**Se Jong Hwang:** Senior Research Engineer, Daewon Chemical, Cheonan-si 31044, Korea; hsj@woongsol.com