

돌출부가 있는 시편의 사출성형 공정에서 2차원 형상 첨가제의 배향에 대한 연구

박근태 · 반수형* · 류민영[†]

서울과학기술대학교 대학원 기계정보공학과, *삼성전자
(2024년 8월 13일 접수, 2024년 10월 23일 수정, 2024년 10월 24일 채택)

Study on the Orientation of Two-dimensional Shaped Additives in Injection Molded Specimen Containing Protrusion Shape

Geun-Tae Park, Soo Hyung Ban*, and Min-Young Lyu[†]

Department of Mechanical Information Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

*Samsung Electronics Co. Ltd., 129 Samsung-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16677, Korea

(Received August 13, 2024; Revised October 23, 2024; Accepted October 24, 2024)

초록: 플라스틱 사출물의 표면에 금속성의 질감을 구현하기 위해 수지에 2차원 형상의 금속 첨가제를 혼합하여 사출하는 성형 방식에 대한 관심이 증가하고 있다. 2차원 형상 첨가제를 혼합한 수지를 이용하여 제품을 사출할 경우 충전 과정에서 분수유동에 의하여 첨가제가 표면에 평행하게 배향된다. 그러나 리브(rib)나 후크(hook)와 같이 제품에 돌출부가 있는 경우 돌출부의 방향이나 두께와 같은 요인으로 인하여 첨가제의 배향이 변화한다. 본 연구에서는 돌출부가 있는 시편의 사출성형 공정에서 발생하는 2차원 형상 첨가제의 배향 변화를 시뮬레이션을 통해 예측하였다. 돌출부를 지닌 첨가제는 시편 표면 방향에 기울어진 상태를 유지하며 플로우 라인(flow-line)과 같은 표면 결함을 형성한다. 흐름 방향으로 설계된 돌출부는 흐름과 직각 방향으로 세워진 돌출부와 비교하여 첨가제가 시편 표면에 기울어진 정도가 컸다. 돌출부의 두께가 두꺼울수록 돌출부를 지닌 후 첨가제의 기울어짐이 커서 표면 결함이 뚜렷하게 나타났다. 첨가제의 배향에 따른 표면 결함은 돌출된 면과 돌출부 반대면에서 모두 관찰되었다. 실험에서 돌출부 반대면의 표면 결함은 시뮬레이션으로 예측한 표면 결함보다 뚜렷하게 나타났다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 종합하여 돌출부에서 2차원 형상 첨가제의 배향 메커니즘(orientation mechanism)을 제시하였다.

Abstract: A flat metal additive is added into the resin to create a metallic feel on the surface of an injection molded product. When injection is made using a resin mixed with two-dimensional flat additives, the additives are oriented parallel to the surface due to the fountain flow in the cavity, giving a metallic texture. However, if the product has protrusions such as ribs or hooks, the flow is not uniform and the orientation of the additive changes, resulting in surface defects. This study predicted the orientation of two-dimensional shaped additives in injection molding specimens with protrusions through simulation and compared them with experiments. The orientation of the two-dimensional additive and surface defects were observed by varying the thickness and direction of the ribs and hooks in the specimen. Surface defects depending on the orientation of the additive were observed on both the protruding side and the opposite side of the protruding surface. In the simulation, surface defects on the protruding side were predicted, but surface defects on the opposite side of the protrusion were not predicted. Through this study, the orientation mechanism of the two-dimensional shaped additive in the specimen containing a protruded shape was presented.

Keywords: injection molding, two-dimensional shaped additives, protrusions, surface defects, orientation mechanism.

서 론

사출성형 공정은 대량의 제품을 균일한 품질로 생산할 수 있다는 장점으로 인해 널리 사용되는 고분자 성형 공정 중 하나이다. 사출성형품은 치수, 강도와 같은 기능적인 측면이

[†]To whom correspondence should be addressed.
mylyu@seoultech.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-7554-2072
©2025 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

중시된다. 그러나 제품 외관에 대한 소비자의 관심이 증가하면서 성형품의 미적인 측면 또한 부각되고 있다. 성형품의 표면에 금속 질감을 부여하여 플라스틱 이상의 외관을 구현하는 것은 이러한 소비자의 요구를 충족하기 위한 노력의 일환이다.^{1,3}

제품 표면에 금속 질감을 부여하기 위해 일반적으로 금속 입자를 혼합한 용액을 도포하거나 전기적 방식으로 입자를 증착하는 도금(plating)이나 코팅(coating) 방식을 사용한다.⁴ 도금이나 코팅 공정은 많은 비용과 시간이 소모되고 용액을 세척하는 과정에서 환경을 오염시킨다. 이에 비해 수지에 금속 입자를 혼합하여 사출 성형하는 방식은 도금이나 코팅 공정을 생략할 수 있어 생산비용이 절감되고 환경오염을 방지할 수 있다. 그러나 금속 입자를 혼합하여 사출하면 금속 질감의 외관을 구현할 수 있지만 성형 중에 다양한 외관 불량을 초래한다.

사출성형에서는 일반 수지로 사출하는 과정에서도 다양한 표면 불량이 발생한다. 수지의 흐름에 따라 발생하는 성형 불량량의 대표적인 사례로 웰드 라인(weld-line)과 플로우 마크(flow-mark) 등이 있다. 웰드 라인은 여러 게이트를 사용하거나 홀(hole), 슬롯(slot)과 같은 형상에 의해 흐름의 이력이 다른 수지가 만나면서 발생한다. 플로우 마크는 수지의 유동성이 떨어져 흐름이 원활하지 않아 발생한다. 이러한 표면 결함을 줄이거나 없애는 연구들이 있는데 rapid heat cycle molding(RHCM), bright surface molding(BSM), 그리고 shear controlled orientation in injection molding(SCORIM) 방법 등이 대표적인 공정이다.^{5,7}

알루미늄 플레이크(aluminum flake)와 같은 2차원 형상 첨가제를 혼합하여 사출성형을 하는 경우는 앞에서 설명한 수지의 흐름에 의해 발생하는 성형불량이 더욱 두드러진다. 용융 수지가 코어층에서 스킨층으로 이동하는 분수 유동에 의해 플레이크는 캐비티 표면과 평행하게 배향되어 금속 질감을 준다.⁸ 그러나 플레이크가 캐비티 표면과 평행하게 배향되지 않으면 표면의 불량현상으로 나타난다. 대표적인 불량이 웰드 라인과 플로우 라인이다. 웰드 라인이나 플로우 라인과 같은 표면 불량은 플레이크가 캐비티 표면에 세워져 배향되기 때문에 발생한다.^{8,9} 캐비티 표면에 세워져 배향된 플레이크는 캐비티 표면과 평행하게 배향된 플레이크와 빛 반사율이 달라 제품 외관의 결함으로 나타난다.^{10,11} 따라서 플레이크의 배향으로 인한 외관 결함을 예측하고 이를 제어하기 위한 연구가 필요하다.

사출성형품에서 플레이크 배향과 이로 인한 외관 불량에 관한 연구는 다음과 같다. Park 등은 웰드 라인과 플로우 라인에서 나타나는 2차원 형상 입자의 배향을 관찰하고 일반화된 배향 메커니즘을 제시하였다.⁸ Kobayashi 등은 슬롯이 있는 시편에서 발생하는 플레이크 배향의 변화와 이로 인한 외관 불량을 관찰하였다.¹² Kim 등은 홀과 슬롯, 리브(rib)가 있는 시편에서 캐비티 내부의 플레이크 배향을 관찰하고 실험과

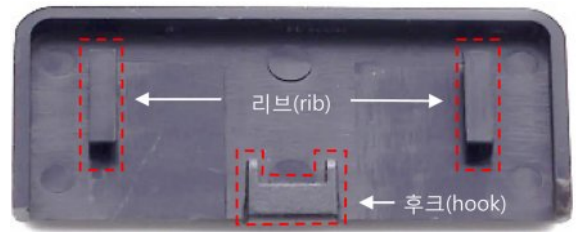


Figure 1. Ribs and hook on injection molded article.

시뮬레이션 결과를 비교하였다.¹¹ Santos 등은 서로 다른 재료와 크기의 금속성 플레이크를 활용하여 사출한 시편 내부의 플레이크 배향을 비교하였다.¹³ 플레이크로 인한 외관 불량을 개선하고자 하는 연구도 다방면에서 진행되었다. Keith 등은 웰드 라인에서 플레이크의 배향으로 나타나는 외관 결함을 SCORIM 공정과 BSM 공정을 활용하여 완화할 수 있음을 확인하였다.⁷ Lim 등은 2차원 형상 첨가제의 배향을 제어하기 위해 구형 형상의 첨가제를 함께 사용하여 연구를 진행하였다.¹⁴

웰드 라인에서 나타나는 플레이크 배향에 대한 연구가 비교적 많이 진행된 것과 달리 플로우 라인에서의 플레이크 배향 메커니즘에 대한 연구는 상대적으로 미진하다. 본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 Figure 1에 나타나는 리브나 후크(hook)와 같이 돌출부로 인해 발생하는 플레이크의 배향 변화를 관찰하고 이로 인한 외관불량을 예측하고자 하였다. 또한 돌출부의 크기와 돌출 방향에 따른 플레이크의 배향을 시뮬레이션과 실험을 통해 관찰하여 돌출부에서 플레이크의 배향 메커니즘(orientation mechanism)을 규명하고자 하였다.

실 험

재료. 본 연구에서 사용된 재료는 ABS 수지이고 2차원 형상의 첨가제는 알루미늄 플레이크다. ABS 수지는 LG Chemical(S. Korea)의 XR-401을 사용하였다. 알루미늄 플레이크(Silverline Co., USA)는 은색을 띠는 원형 판상 형태로 직경이 10 μm , 두께는 1 μm 이며 종횡비(직경/두께)는 10이다. ABS 수지에 첨가된 플레이크의 함량은 0.5 wt%이다.

연구 모델. Figure 2에 시뮬레이션에 사용된 시편의 치수와 형상이 나타나 있다. 평판 시편의 길이는 100 mm, 폭은 50 mm이며 두께는 3 mm이다. 평판 시편의 두께 방향으로 돌출된 형상은 리브와 후크이다. 리브의 길이는 15 mm, 높이는 10 mm이며 두께는 각각 0.6, 0.9, 1.5 mm로 평판의 두께에 대하여 각각 20, 30, 50% 비율로 설계하였다. 후크의 높이는 10 mm이고 두께는 0.7, 1.0, 1.5 mm로 바닥면 두께에 대해 각각 23, 33, 50% 비율이다. 수지의 흐름과 돌출부가 만나는 각도의 영향을 관찰하기 위해 리브와 후크의 방향을 달리하여 평판 위에 배치하였다. 리브는 수지의 흐름과 평행한 방향

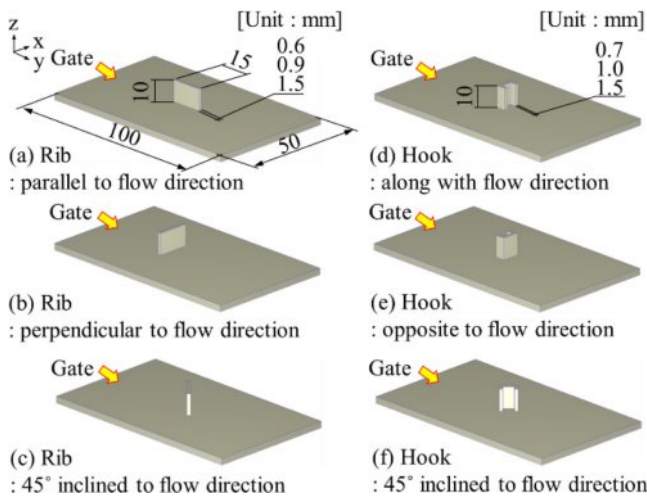


Figure 2. Model specimens used for simulation.

(Figure 2(a)), 흐름과 직각 방향(Figure 2(b)), 그리고 흐름과 45° 방향(Figure 2(c))으로 각각 설계하였다. 후크는 후크의 꺾임 부분을 흐름 방향(Figure 2(d)), 흐름의 반대 방향(Figure 2(e)), 그리고 흐름과 45° 방향(Figure 2(f))으로 각각 설계하였다.

실험. 돌출부를 지나 발생하는 알루미늄 플레이크의 배향을 하나의 금형에서 관찰하기 위해 Figure 3와 같이 두께가 3 mm 인 평판 위에 다양한 돌출부를 설계하였다. 돌출부의 종류와 두께, 그리고 수지의 흐름과 돌출부가 만나는 방향을 달리하여 설계하였다. 리브의 두께는 0.6 mm와 0.9 mm, 후크의 두께는 0.7 mm와 1.0 mm이며 평판의 두께에 대하여 리브는 각각 20, 30%, 후크는 각각 23, 33%의 비율로 설계하였다. 수지의 흐름과 돌출부가 만나는 각도의 영향을 비교하기 위해

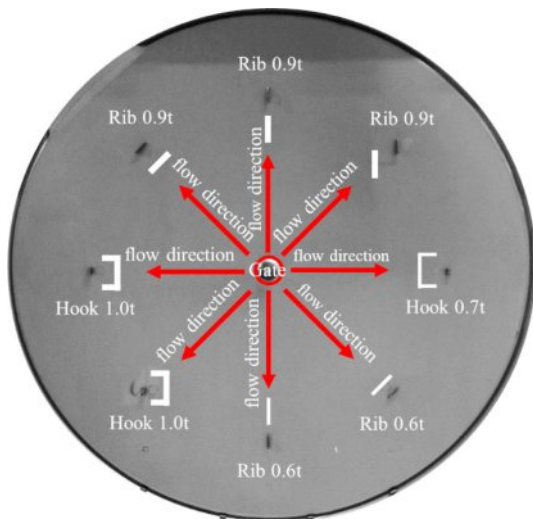


Figure 3. Design of ribs and hooks for experiments.

Table 1. Injection Molding Conditions

Molding condition	Unit	Value
Injection temperature	°C	255
Injection speed	mm/s	70
Mold temperature	°C	150/65
Packing pressure	Mpa	40
Packing time	sec	8.5

흐름과 평행한 방향, 45° 방향, 직각 방향으로 리브를 설계하였다. 후크는 흐름의 반대 방향과 45° 방향으로 배치하였다.

실험에 사용된 사출기는 JSW1300(JSW Co., Japan)이며, Table 1에 사출조건이 나타나 있다. 사출온도는 255 °C이며 금형온도는 가동측을 150 °C, 고정측을 65 °C로 설정하였다. 캐비티를 충전할 때의 사출속도는 70 mm/s이며, 보압은 40 MPa로 8.5초 동안 적용하였다.

결과 및 토론

돌출부 형상에 따른 2차원 첨가제의 배향 예측. 리브에서의 배향: Figure 1의 연구 모델에서 플레이크의 배향을 예측하기 위해 상용 사출성형 시뮬레이션 프로그램인 Moldex3D를 사용하였다. Moldex3D에서 사용한 입자 배향 모델은 Tseng 등이 유체 내부의 입자 배향을 예측하기 위해 개발한 iARD-RPR model이다.¹⁵

Figure 4는 세 가지 리브의 중간 지점 단면에서의 알루미늄 플레이크 배향을 나타내었다. 리브가 수지의 흐름방향과 나란한 경우(Figure 4(a))에서는 수지가 리브를 채우면서 흐름이 리브 높이 방향으로 일어나 알루미늄 플레이크가 리브 높이 방향으로 배향된다.

리브의 두께가 얇을수록 알루미늄 플레이크가 리브 높이 방향으로 세워진 정도가 크다. 리브 두께가 두꺼울수록 리브 두께의 중앙부는 알루미늄 플레이크가 리브 높이 방향과 직각으로 배향되고 리브 벽면에서는 리브 높이 방향으로 배향되고 있다. 리브의 두께가 두꺼울수록 리브 아래쪽 평면에서 알루미늄 플레이크의 배향이 균일하지 않다. Figure 4(b)는 수지의 흐름방향과 수직으로 세워진 리브에서 알루미늄 플레이크 배향을 보여준다. 리브 면에서 알루미늄 플레이크 배향은 두께에 따른 차이를 보이지 않는다. 리브 두께가 0.6 mm, 0.9 mm인 경우 리브 두께의 중앙부에서 알루미늄 플레이크가 리브 표면과 평행하게 배향된다. 반면 리브 두께가 1.5 mm인 경우 리브 두께의 중앙부에서 알루미늄 플레이크가 수지의 분수유동에 따라 유동 방향, 즉 리브 높이 방향과 직각으로 배향된다. Figure 4(c)는 수지의 흐름과 45° 방향인 리브에서 알루미늄 플레이크의 배향을 보여준다. Figure 4(a)와 달리 알루미늄 플레이크가 흐름 방향으로 세워져 원형으로 보인다.

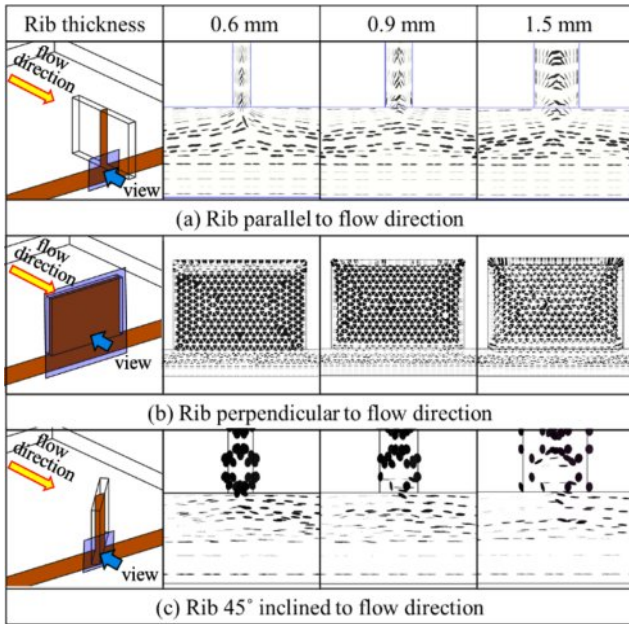


Figure 4. Effect of flow directions and thickness on the orientation of flake at the center of the rib.

리브 두께가 1.5 mm인 경우 리브 중앙부를 기준으로 왼쪽보다 오른쪽에서 알루미늄 플레이크가 흐름 방향으로 세워진 정도가 커서 원형에 가깝게 보인다. 따라서 리브가 수직 흐름 방향과 각도를 이루며 설계된다면 리브 표면에 결함이 나타날 것으로 예측된다.

Figure 5는 알루미늄 플레이크를 포함한 수지가 리브를 지난 후에 나타나는 알루미늄 플레이크의 배향을 정량적으로 보여준다. Moldex3D에서는 알루미늄 플레이크의 배향 벡터 $P(p_x, p_x, p_z)$ 을 식 (1)과 같이 계산한다.

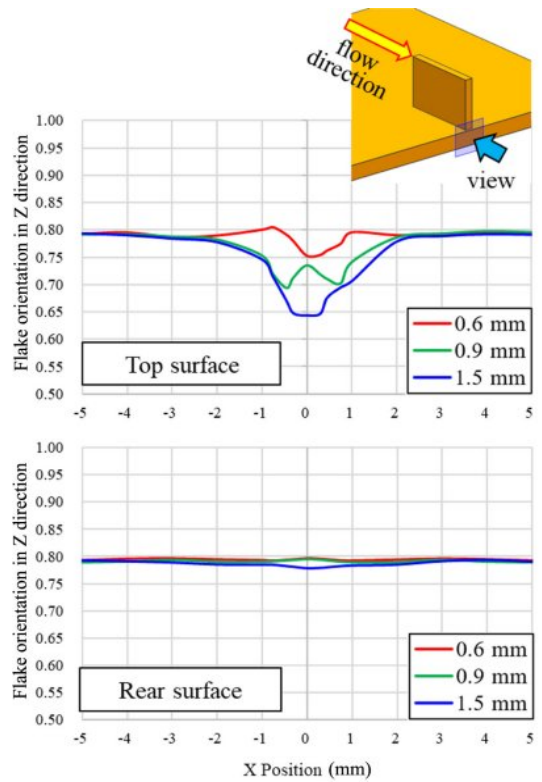
$$p_x = |\sin\theta * \cos\phi| \tag{1a}$$

$$p_y = |\sin\theta * \sin\phi| \tag{1b}$$

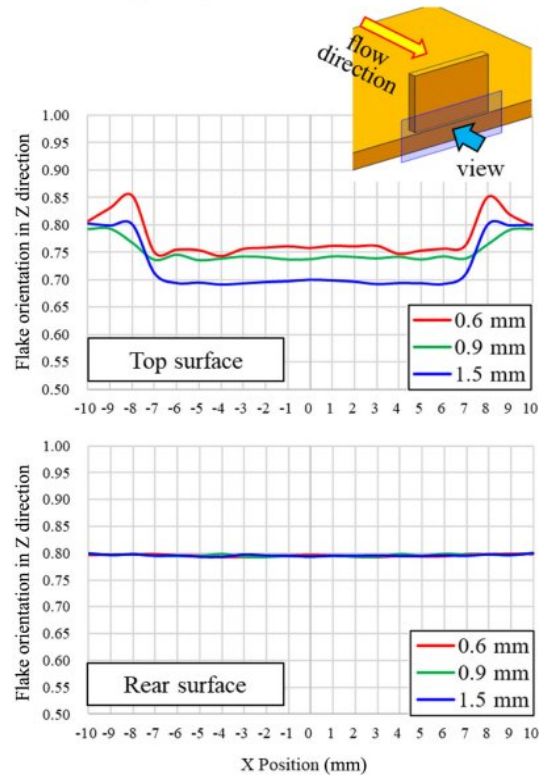
$$p_z = |\cos\theta| \tag{1c}$$

배향 벡터 P 는 알루미늄 플레이크 입자의 넓은 면에서 법선 방향의 단위 벡터를 의미하며 이 중 시편 두께 방향인 z 축으로의 벡터 요소를 p_z 로 정의한다. p_z 의 값이 1에 가까울수록 알루미늄 플레이크가 시편 표면에 평행하게 배향되며 0에 가까울수록 표면에 수직한 배향을 나타낸다.

Figure 5(a)는 수지가 리브 길이 방향으로 흐를 때 리브의 흐름이 끝나는 지점에서 시편 표면의 알루미늄 플레이크 배향이다. 리브가 세워진 면에서 리브 두께 중앙 부분의 배향이 크게 감소하여 알루미늄 플레이크가 흐르는 방향으로 어느 정도 세워져서 표면에 얼룩으로 보일 수 있을 것으로 판단된다. 리브 두께가 두꺼울수록 배향 값이 작아서 표면에 얼룩이 더 심해질 것으로 예측된다. 리브가 세워진 반대면에서의



(a) Rib parallel to flow direction



(b) Rib perpendicular to flow direction

Figure 5. Effect of flow directions and thickness on the orientation of flake at the surface of the rib.

배향은 리브 두께가 가장 두꺼운 1.5 mm를 제외하고는 0.8 근처로 균일한 값을 보여 얼룩이 나타나지 않을 것으로 예측된다.

Figure 5(b)는 수지가 리브 길이의 직각 방향으로 흐를 때 리브를 지난 지점에서의 배향 값을 보여준다. 리브가 세워진 면에서 배향값을 보면 알루미늄 플레이트의 배향이 리브의 양쪽 끝 부분에서 크고 리브 영역에서는 작게 나타났다. 따라서 리브를 지나면서 리브 영역과 그 주변의 외관이 다르게 나타날 것으로 판단된다. 리브 두께가 두꺼울수록 배향 값이 작아지고 있다. 리브가 세워진 반대면에서 배향 값은 리브의 두께에 관계없이 모두 균일하게 0.8 근처의 값을 보인다. 따라서 리브가 세워진 반대면에서는 얼룩이 나타나지 않을 것으로 예측된다.

Figure 6는 수지가 리브 길이 방향으로 흐를 때 리브 두께에 따라 예측되는 외관이다. 리브면에서 리브 두께가 0.6 mm인 경우 얼룩이 나타나지 않았다. 리브 두께가 0.8 mm인 경우 리브 길이 방향을 따라 흐릿한 얼룩이 나타난다. 리브 두께가 1.5 mm인 경우 리브 길이 방향으로 선 모양의 얼룩이 더 뚜렷하게 나타난다. 리브 두께가 두꺼울수록 리브에 의한 얼룩이 잘 나타났다.

Figure 7은 리브의 방향에 따라 예측된 외관을 보여준다. 흐름의 직각 방향으로 설계된 리브를 지나고 나서 표면에서 어두운 부분이 나타나지 않았다. Figure 5의 (b)에서 관찰한 배향 값은 두께 1.5 mm의 경우 0.70 수준인데 표면 불량처럼 어둡게 나타나지는 않았다. 리브의 양쪽 가장자리에서 배향의 변화가 급격하지만 외관 예측에서 얼룩으로 나타나지 않았다. 리브가 수지의 흐름과 45°로 만나는 경우 리브가 기

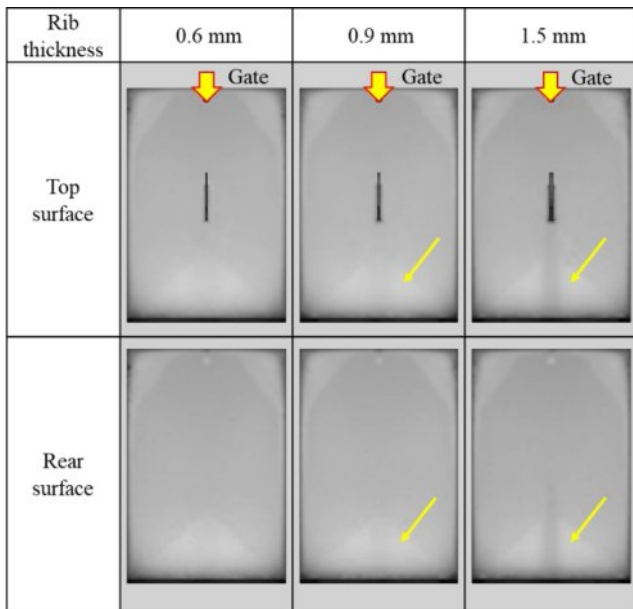


Figure 6. Effect of thickness in rib on surface appearance.

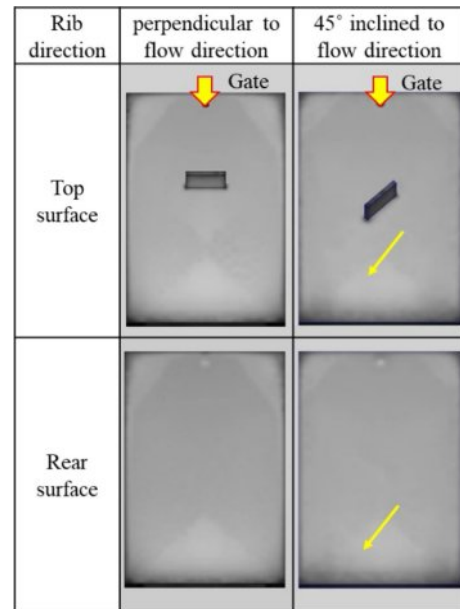


Figure 7. Effect of direction in rib on surface appearance.

울어진 왼쪽 방향에서 희미하게 어두운 선이 나타났다. 리브가 세워진 반대면의 외관은 흐름직각 방향 리브에서는 어두운 영역이 나타나지 않았으며, 흐름 45° 방향 리브에서는 희미하게 어두운 영역이 예측되었다.

후크에서의 배향: Figure 8은 Figure 2(d), (e), (f)에 나타난 후크 설계에서 후크 중간 지점의 단면에서의 알루미늄 플레이트 배향을 보여주고 있다. 후크의 꺾임 부분이 수지의 흐름방향으로 설계된 경우(Figure 8(a))에 수지가 후크의 넓은 면을 지나며 플레이트가 후크의 높이 방향으로 배향된다. 후크의 꺾임 부분에서도 수지가 후크의 높이 방향으로 흐르면서 플레이트가 후크 높이 방향으로 배향된다. 후크의 두께가 얇을수록 알루미늄 플레이트가 후크 높이 방향으로 세워진 정도가 크다. 후크 두께가 1.5 mm인 경우 후크의 안쪽 표면 (Inner surface)에서 알루미늄 플레이트가 수지의 흐름 진행 방향과 후크 높이 방향으로 동시에 배향되어 타원 형상으로 보인다. 이는 후크 꺾임 부분의 바깥면(Outer surface)에서 알루미늄 플레이트가 표면에 평행하게 배향되어 직선 형상을 보이는 것과 대비된다. 후크의 꺾임 부분이 수지의 흐름과 마주하게 설계된 경우(Figure 8(b))에 후크 꺾임 부분의 중앙부에서 알루미늄 플레이트가 후크 높이 방향과 수직하게 배향된다. 알루미늄 플레이트는 수지의 흐름 진행 방향으로 세워져 배향되는데 후크 두께가 두꺼울수록 세워진 정도가 커서 타원 형상으로 보인다. 후크 두께가 1.5 mm인 경우 후크 꺾임 부분의 플레이트가 후크 꺾임 부분의 두께 중앙을 기준으로 대칭적으로 배향되어 흐름 방향으로 설계된 후크에서 보이는 알루미늄 플레이트 배향과 차이를 보인다. 수지의 흐름과 45° 방향으로 배치된 후크의 경우(Figure 8(c)) 알루미

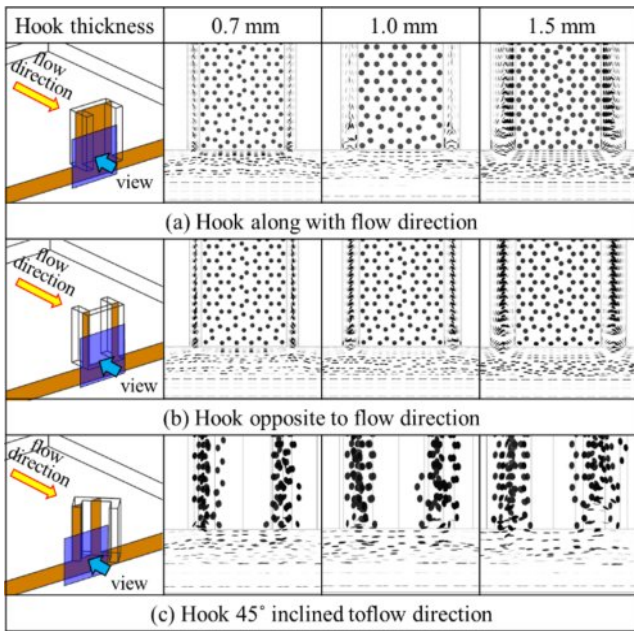
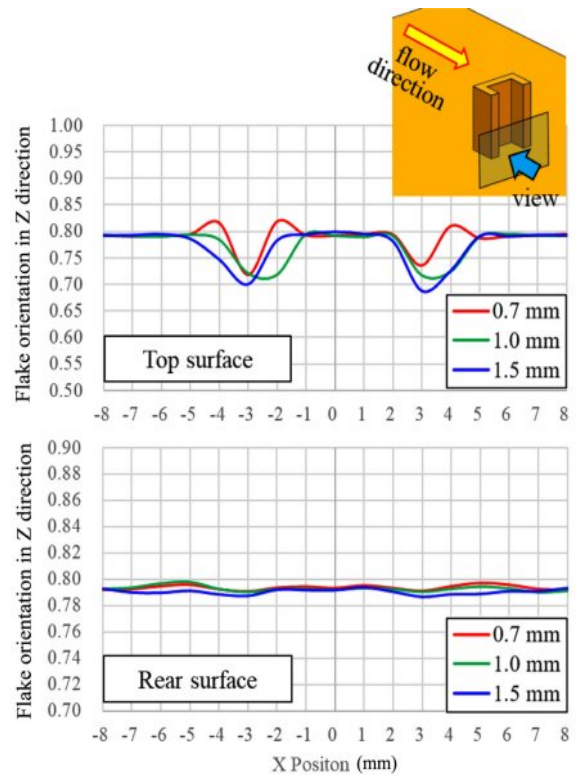


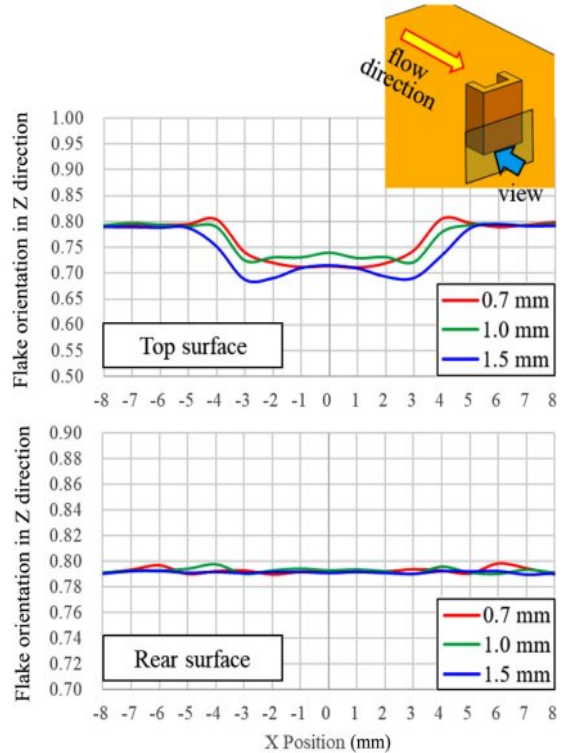
Figure 8. Effect of flow directions and thickness on the orientation of flake at the center of the hook.

늑 플레이크가 수지의 흐름 진행 방향으로 세워진 정도가 커서 플레이크가 원형에 가까운 모습을 보인다. 후크 높이 방향으로 채워지는 수지의 흐름이 불규칙하기 때문에 플레이크도 불규칙하게 배향되는 경향을 나타낸다.

Figure 9는 알루미늄 플레이크를 포함한 수지가 후크를 지난 후에 나타나는 알루미늄 플레이크의 배향을 정량적으로 나타냈다. 후크의 꺾임 부분이 수지의 흐름 진행 방향을 따라 배치된 경우(Figure 9(a)) 후크가 세워진 면에서 후크의 꺾임 부분을 지난 영역의 배향 값이 낮아 표면에 얼룩이 나타날 것으로 예상된다. 후크의 두께가 두꺼울수록 배향값이 낮아져 얼룩이 심해질 것으로 보인다. 후크의 꺾임 부분이 아닌 곳에서는 알루미늄 플레이크의 배향 값은 0.8 근처로 균일한 값을 보여 후크 꺾임 부분과는 달리 얼룩이 나타나지 않을 것으로 예상된다. 후크의 꺾임 부분이 수지의 흐름 진행 방향과 마주보는 경우(Figure 9(b)) 배향 값이 후크의 꺾임 부분 뿐만 아니라 후크의 넓은 면에서도 낮게 나타난다. 후크의 넓은 면을 지난 후 배향 값이 가장 낮은 경우는 후크 두께가 0.7 mm일 때이다. 수지가 후크의 두께를 채우는 과정에서 후크 두께가 얇을수록 알루미늄 플레이크가 흐름 방향으로 크게 세워지기 때문이다(Figure 8(b)). 반면에 후크의 꺾임 이후에는 배향 값이 가장 낮은 경우가 후크 두께가 1.5 mm일 때이다. 수지가 후크 꺾임 부분을 지나서 후크 두께가 두꺼울수록 후크 높이 방향으로 일어나는 수지의 흐름이 커서 알루미늄 플레이크가 주로 세워지기 때문이다. 후크의 반대면에서는 후크의 꺾임 방향과 관계없이 배향이 일



(a) Hook along with flow direction



(b) Hook opposite to flow direction

Figure 9. Effect of flow directions and thickness on the orientation of flake at the surface of the hook.

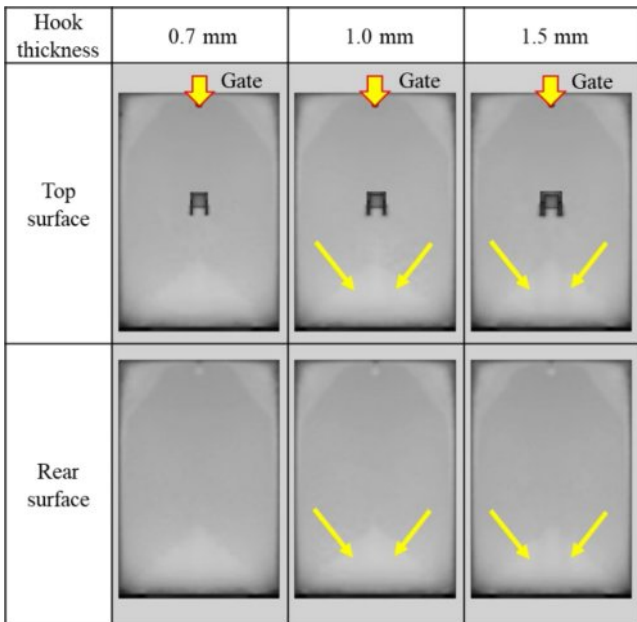


Figure 10. Effect of thickness in hook on surface appearance.

정하다.

Figure 10는 후크의 꺾임 부분이 흐름 방향으로 설치된 경우 수지가 후크를 지날 때 후크의 두께에 따른 시편 외관을 예측하였다. 후크 두께가 0.7 mm인 경우 시편 표면에 얼룩이 나타나지 않았다. 후크 두께가 1.0, 1.5 mm인 경우 후크의 꺾임 부분이 위치한 양쪽 가장자리를 지난 뒤 얼룩이 관찰된다. 얼룩은 후크의 두께가 두꺼울수록 선명하게 나타난다.

Figure 11은 후크의 꺾임 부분의 방향에 따른 외관 예측을 보여준다. 후크의 두께가 1.5 mm로 동일한 후크에 대하여 수지의 흐름과 마주보는 후크와 흐름에 45° 방향으로 세워진 후크를 나타냈다. 후크의 꺾임 부분이 수지의 흐름 진행 방향과 마주보는 후크의 경우 얼룩이 나타나지만 그 정도가 약하다. 후크가 수지의 흐름과 45°로 만나는 경우 수지의 흐름 방향으로 기울어져 있는 후크의 오른쪽 꺾임 부분(수지 흐름이 늦게 채워지는 꺾임 부분) 뒤에서 얼룩이 뚜렷하게 나타난다. 후크를 통과하는 수지의 유동 경로가 상대적으로 짧은 왼쪽 꺾임 부분 뒤에서도 얼룩은 관찰되지만 오른쪽 꺾임 부분보다는 그 정도가 약하다.

실험에 의한 배향 관찰. 리브에서의 배향: Figure 12은 Figure 3에 설명한 실험 모델로 사출성형한 시편에서 리브의 방향과 두께에 따른 외관을 보여준다. 흐름 방향으로 설계된 리브의 경우 리브를 지난 후 리브 길이 방향을 따라 얼룩이 뚜렷하게 나타난다. 얼룩은 리브 두께가 0.6 mm일 때보다 리브 두께가 0.9 mm일 때 더 선명하다. 리브가 수지 흐름과 직각 방향으로 설계된 경우 리브의 양쪽 가장자리를 따라 얼룩이 흐릿하게 나타난다. 수지 흐름과 45° 방향으로 마주하는

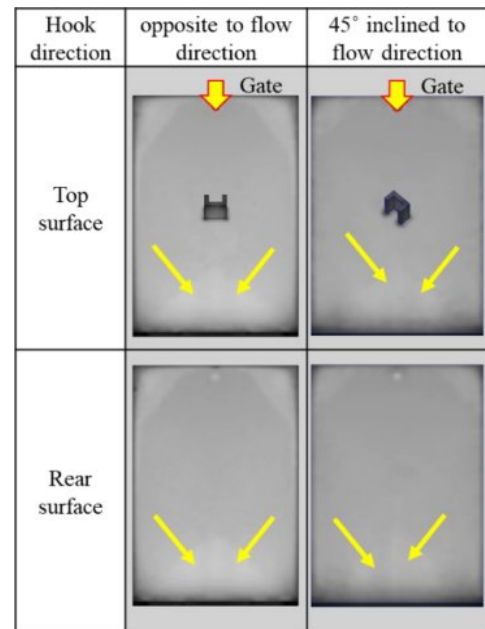


Figure 11. Effect of bending direction in hook on surface appearance.

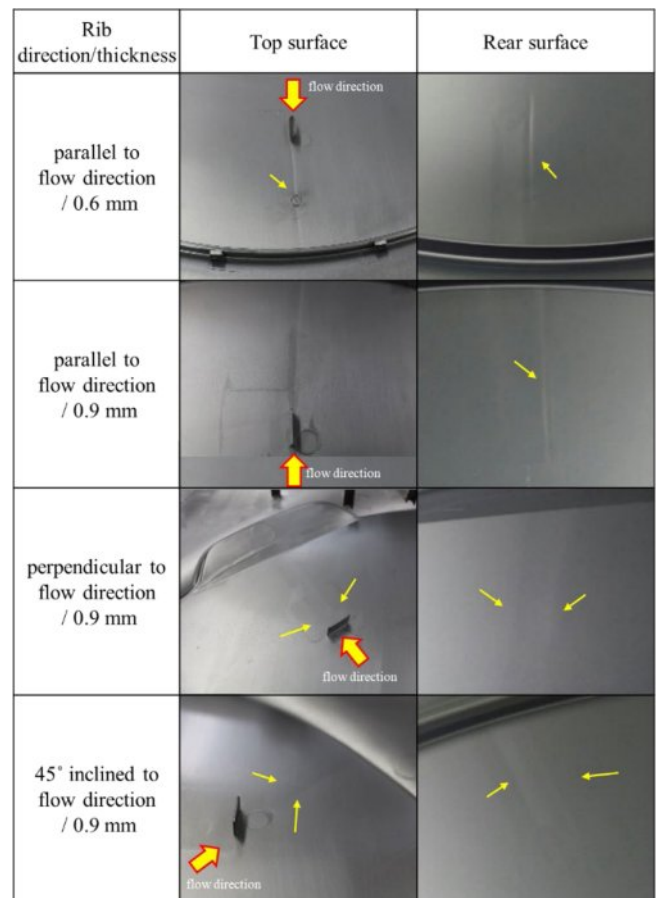


Figure 12. Flowline induced by different direction and thickness of rib.

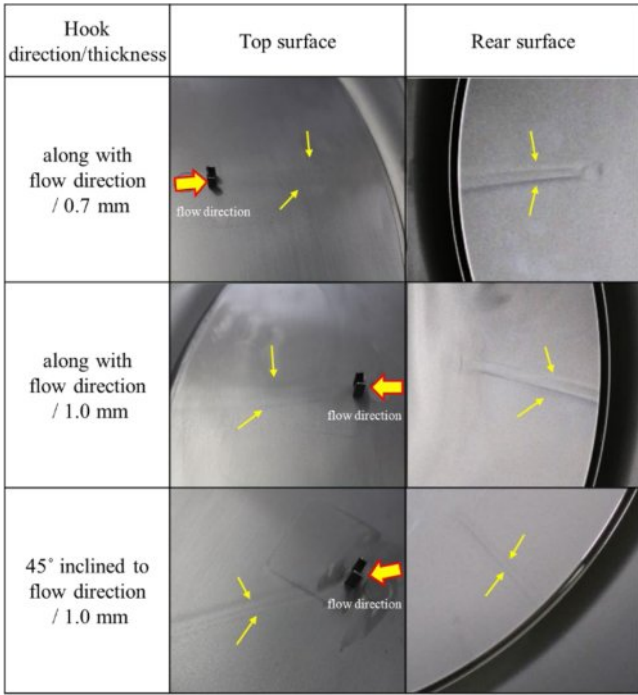


Figure 13. Flowline induced by different direction and thickness of hook.

리브에서의 얼룩은 흐름과 직각 방향인 리브의 얼룩보다 뚜렷하지만 흐름 방향 리브에서 관찰되는 얼룩만큼 선명하지는 않다. 이 경우에 리브 가장자리를 따라 나타나는 얼룩은 흐름 방향으로 기울어진 왼쪽 가장자리가 오른쪽 가장자리에 비해 선명하다. 리브가 세워진 반대면에서도 얼룩이 관찰되는데 수지의 흐름 방향으로 세워진 리브의 반대면에서 나타나는 얼룩은 비교적 선명하지만 수지 흐름과 직각 방향의 리브와 45° 방향인 리브에서의 얼룩은 얼룩의 경계가 불분명하고 밝기 차이도 크지 않다.

후크에서의 배향: Figure 13는 후크 꺾임 부분의 방향과 후크의 두께에 따른 외관을 보여준다. 후크의 꺾임 부분이 흐름 방향으로 설계된 경우 꺾임 부분을 따라 두 갈래의 얼룩이 나타난다. 후크의 두께가 0.7 mm인 경우 얼룩의 폭이 넓고 깊이는 얇게 나타나지만 후크 두께가 1.0 mm일 때는 얼룩의 폭이 좁고 깊이가 깊어 표면 불량이 뚜렷하다. 후크를 지나며 발생하는 얼룩은 후크 면보다 후크 반대면에서 더 뚜렷하게 나타난다. 후크의 두께가 1.0 mm로 동일할 때, 수지 흐름과 45° 방향인 후크 뒤에서 나타나는 얼룩이 흐름 방향의 후크보다 더 흐릿하게 나타났다.

시뮬레이션과 실험의 비교. 리브가 있는 시편의 시뮬레이션 결과인 Figure 6에서 리브의 두께가 두꺼울수록 시편 표면의 얼룩이 선명해질 것으로 예측하였다. 리브가 있는 시편의 실험 결과인 Figure 12에서 리브의 두께가 0.6 mm인 경우보다 0.9 mm인 경우에 얼룩이 더 뚜렷하게 나타나 시뮬레이션

과 실험이 잘 일치하였다. 그러나 시뮬레이션에서는 리브 두께가 0.6 mm인 경우 표면에 얼룩이 생기지 않을 것으로 예측하였으나 실험에서는 흐름 방향을 따라 얼룩이 나타나 시뮬레이션 결과와 차이를 보였다. 리브의 방향에 따른 외관 예측의 경우 시뮬레이션(Figure 7)과 실험(Figure 12) 모두 수지의 흐름 방향으로 세워진 리브에서 나타나는 얼룩이 흐름 직각 방향 리브의 얼룩보다 뚜렷하게 나타났다. 리브가 세워진 반대면에서의 표면은 두께 0.6 mm에서는 얼룩이 예측되지 않았으나 실험에서는 모든 두께에서 관찰되었다.

후크가 있는 시편의 시뮬레이션 결과인 Figure 9에서 후크의 두께가 두꺼울수록 표면에 얼룩이 선명하게 나타날 것으로 예측하였다. 실험 결과인 Figure 12에서 후크의 두께가 1.0 mm인 경우 나타나는 얼룩이 후크 두께가 0.7 mm인 경우보다 뚜렷하여 시뮬레이션이 실험 결과를 잘 예측하였다. 또한 수지 흐름과 45° 방향으로 세워진 후크에서 나타난 얼룩이 수지 흐름 방향으로 세워진 후크에 비해 선명하게 나타날 것으로 예측한 시뮬레이션 결과가 실험과 잘 일치하였다. 그러나 시뮬레이션을 통해 예측한 후크 반대면의 외관은 얼룩이 나타나지 않거나 흐릿하게 형성될 것으로 보았으나 실험을 통해 나타난 표면은 얼룩이 매우 뚜렷하게 관찰되어 시뮬레이션과 실험이 차이를 보였다.

2차원 형상 첨가제의 배향 메커니즘. Figure 14은 리브가 세워진 시편에서 알루미늄 플레이트가 배향되는 메커니즘을 모식도로 나타냈다. 리브의 두께가 얇고 수지의 흐름 방향으로 세워진 경우(Figure 14(a))에 수지가 리브를 채우는 과정에서 알루미늄 플레이트가 세워진 리브 벽면과 거의 평행하게 배향된다. 리브 두께가 얇은 경우 리브 높이 방향으로 일어나는 수지의 흐름이 약해 리브를 지난 후에 알루미늄 플레이트가 세워진 정도가 작다. 리브의 두께가 두꺼우면서 수지의 흐름 방향으로 세워진 경우(Figure 14(b))에는 분수유동에 의해 리브 두께의 중앙 부분에서 알루미늄 플레이트가 리브 높이 방향과 수직하게 배향된다. 리브 두께가 두꺼운 경우에는 리브 높이 방향으로 수지의 흐름이 강하게 일어나 리브를 지난 후에 알루미늄 플레이트가 세워진 정도가 크다. 리브 높이 방향으로 일어나는 수지의 흐름으로 인해 리브가 세워진 반대면에서도 알루미늄 플레이트가 평판 표면에 세워져 배향된다. 리브가 세워진 면에 비해 리브의 반대쪽 면에서는 알루미늄 플레이트가 세워진 정도가 작다.

리브의 두께가 얇고 수지의 흐름과 직각 방향으로 세워진 경우(Figure 14(c)) 리브의 길이 방향과 높이 방향에서 플레이트가 벽면에 세워져 배향된다. 리브를 지난 후에 플레이트는 리브의 양쪽 가장자리에서 리브 높이 방향으로 세워져 배향된다. 리브 두께가 두꺼우면서 수지의 흐름과 직각 방향으로 세워진 경우(Figure 14(d)) 리브 길이 방향과 높이 방향 표면의 중앙에서 플레이트가 벽면과 평행하게 배향된다. 리브 두께가 얇은 경우에 비해 리브를 지난 후에는 리브 양쪽 가장자

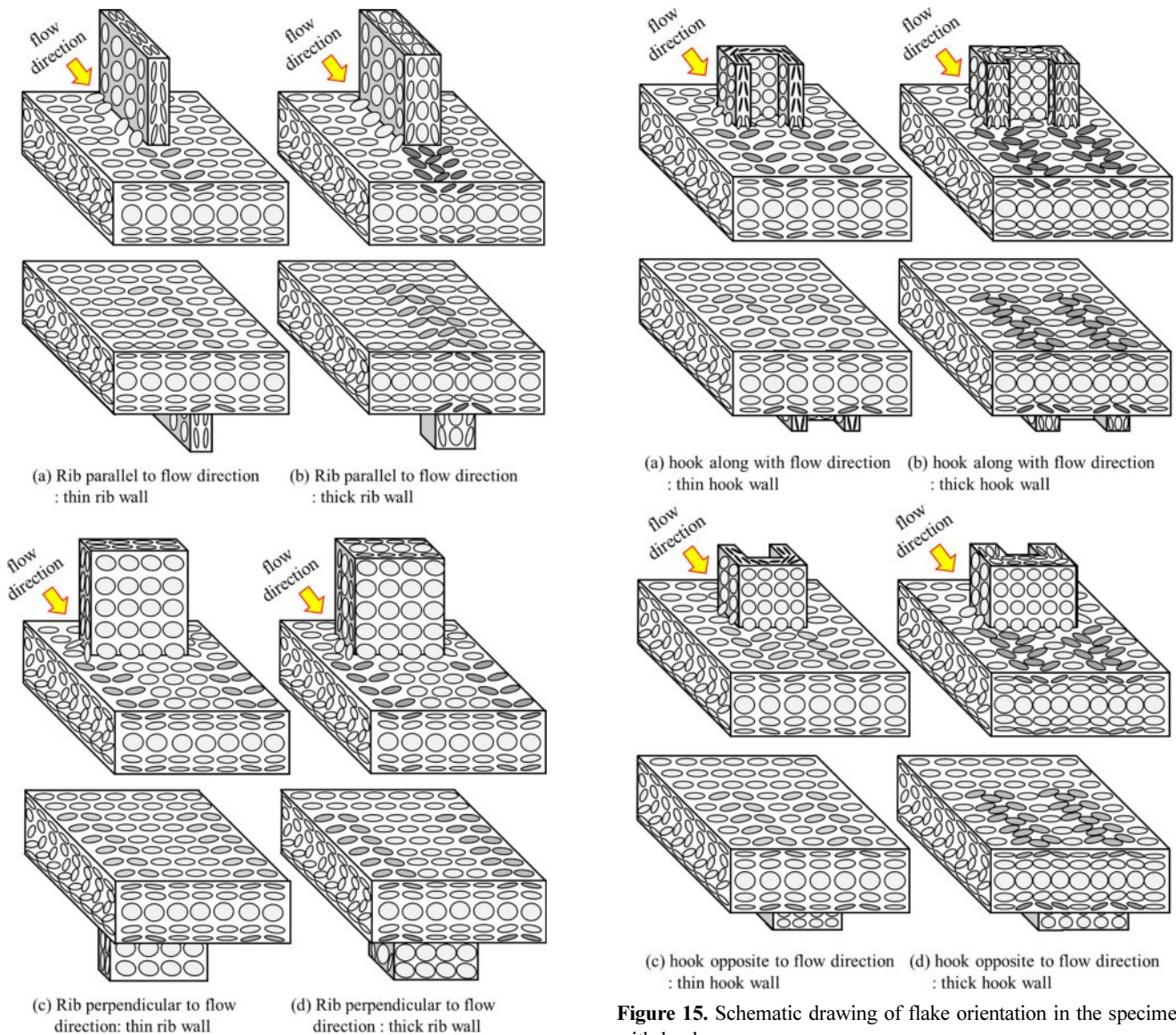


Figure 14. Schematic drawing of flake orientation in the specimen with rib.

리의 플레이크가 평판 표면에 세워진 정도가 크다. 리브가 세워진 반대쪽 면에서도 리브 높이 방향으로 일어나는 수지의 흐름으로 인해 플레이크가 평판 표면에 세워져 배향된다. 흐름 방향으로 세워진 리브에 비해 흐름 직각 방향으로 세워진 리브 뒤에서는 알루미늄 플레이크가 세워진 정도가 작다.

Figure 15는 후크가 세워진 시편에서 알루미늄 플레이크가 배향되는 메커니즘을 모식도로 보여준다. 후크의 두께가 얇고 꺾임 부분이 흐름 방향을 따라 설계된 경우(Figure 15(a))에 후크의 넓은 면을 채우는 과정에서 플레이크가 후크 표면과 평행하게 배향된다. 후크의 꺾임 부분을 지난 후에는 알루미늄 플레이크가 후크 높이 방향으로 세워진다. 후크 높이 방향으로 일어나는 수지 흐름의 영향을 받아 후크가 세워진 반

Figure 15. Schematic drawing of flake orientation in the specimen with hook.

대면에서도 알루미늄 플레이크가 세워져 배향된다. 후크가 세워진 면에 비해 후크의 반대쪽 면에서 플레이크가 세워진 정도가 작다. 후크 두께가 두꺼우면서 꺾임 부분이 흐름 방향으로 설계된 경우(Figure 15(b))에는 후크를 채우는 과정에서 플레이크가 후크 벽면에 세워진 정도가 덜하다. 후크 두께가 두꺼울수록 후크 높이 방향으로 수지의 흐름이 강하게 일어났기 때문에 후크를 지난 후에도 플레이크가 후크 높이 방향으로 세워진 정도가 크다.

후크 두께가 얇고 꺾임 부분이 수지의 흐름과 마주보는 후크의 경우(Figure 15(c)) 후크의 꺾임 부분이 흐름 방향을 따라 설계된 경우에 비해 알루미늄 플레이크가 후크 높이 방향으로 세워진 정도가 작다. 이는 후크 꺾임 부분에서 후크 높이 방향으로 세워진 플레이크가 후크의 폭에 해당되는 넓은 면을

지나며 배향이 변화하였기 때문에 보인다. 후크가 세워진 반대면에서는 플레이크가 세워진 정도가 작아 평판 표면과 거의 평행하게 배향되어 표면 결합이 뚜렷하지 않다. 수지의 흐름과 마주보는 방향으로 설계되었더라도 후크 두께가 두꺼운 경우(Figure 15(d))에는 후크 높이 방향으로 일어나는 수지의 흐름이 강해 플레이크가 세워진 정도가 크다. 후크가 세워진 반대면에서도 후크 두께가 얇은 경우에 비해 플레이크가 세워진 정도가 커서 표면 결합이 뚜렷하다.

결 론

본 연구에서는 알루미늄 플레이크를 함유한 수지를 이용한 사출성형에서 시뮬레이션과 실험을 통해 리브나 후크와 같은 돌출부가 있는 시편에서 나타나는 표면 결합을 관찰하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 알루미늄 플레이크 배향 및 외관을 예측하고 실제 사출성형으로 제작된 시편의 표면을 관찰하여 결과를 비교하였다. 그리고 리브와 후크에서 알루미늄 플레이크의 배향 메커니즘을 규명하고자 하였다.

리브나 후크의 두께가 두꺼울수록 돌출부(리브와 후크)를 지난 뒷부분에서 얼룩이 선명하게 나타났다. 돌출부를 통과하는 단계에서는 돌출부의 두께가 얇을수록 돌출부 높이 방향으로 알루미늄 플레이크의 배향 정도가 작다. 그러나 돌출부의 두께가 두꺼울수록 돌출부 높이 방향으로 배향이 크게 일어났다. 따라서 돌출부의 두께가 두꺼울수록 알루미늄 플레이크 배향에 의한 얼룩이 선명하였다.

흐름방향으로 돌출부가 세워진 경우 돌출부 높이 방향으로 일어나는 수지의 흐름이 균일하고 알루미늄 플레이크의 배향이 커서 돌출부를 지난 후 얼룩이 선명하다. 그러나 흐름 방향과 돌출부가 세워진 방향이 일치하지 않는 경우는 돌출부 높이 방향으로 배향이 균일하지 않아 배향에 의한 얼룩이 덜하였다.

실험에서 알루미늄 플레이크는 돌출부 면은 물론이고 돌출부가 세워진 반대면에서도 플레이크의 배향이 균일하지 않아 표면 얼룩을 보였다. 시뮬레이션에서 돌출부가 세워진 면에서의 표면 불량 예측은 실제 실험과 유사하게 나타났다. 그러나 돌출부가 세워진 반대면에서 알루미늄 플레이크가 세워지는 정도가 낮게 예측하였다. 시뮬레이션에서는 돌출부 반대면에서 나타나는 표면 불량을 과소하게 예측하는 것으로 나타났다.

최종적으로 본 연구에서는 리브와 후크 형상을 갖는 돌출부에서 시뮬레이션과 실험을 통해 관찰한 2차원 형상 첨가제인 알루미늄 플레이크의 배향 메커니즘을 제시하였다. 본 연구의 결과는 알루미늄 플레이크와 같은 2차원 형상 첨가제를 활용한 사출성형에서 표면 불량을 예측하고 이를 제어하기 위한 돌출부 형상 설계에 도움이 될 것으로 기대한다.

감사의 글: 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Crutchley, E. B. *Innovation Trends in Plastics Decoration and Surface Treatment*; Smithers Rapra: Akron, 2014.
- Topp, K.; Haase, H.; Degen, C.; Illing, G.; Mahltig, B. Coatings with Metallic Effect Pigments for Antimicrobial and Conductive Coating of Textiles with Electromagnetic Shielding Properties. *J. Coat. Technol. Res.* **2014**, 11, 943-957.
- Pell, B. D.; Sulic, E.; Rowe, W. S. T.; Ghorbani, K.; John, S. Experimental Study of the Effect of Modern Automotive Paints on Vehicular Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* **2010**, 59, 434-442.
- Schulz, U. *Coating on plastics. In Handbook of Plastic Optics*; Wiley-VCH: Weinheim, 2010.
- Park, K.; Sohn, D.-H.; Cho, K.-H. Eliminating Weldlines of An Injection-molded Part with the Aid of High-frequency Induction Heating. *J. Mech. Sci. Tech.* **2010**, 24, 149-152.
- Allan, P. S.; Bevis, M. J.; UK Patent 2,170,140 B, 1986.
- Rawson, K. W.; Allan, P. S.; Bevis, M. J. Controlled Orientation of Reflective Pigment and Optical Property Characterization of Injection-molded Polypropylene. *Polym. Eng. Sci.* **1999**, 39, 177-189.
- Park, S. H.; Lyu, M.-Y. Observation of Two-dimensional Shaped Aluminum Flake Orientation During Injection Molding and Its Orientation Mechanism. *Macromol. Res.* **2019**, 27, 481-489.
- Park, J. M.; Jeong, S. J.; Park, S. J. Flake Orientation in Injection Molding of Pigmented Thermoplastics. *J. Manuf. Sci. Eng.* **2012**, 134, 014501.
- CoreTech System Co. Color intensity, in *Moldex3D Help 2024*.
- Kim, S. L.; Choi, T. G.; Cho, H. S.; Lyu, M. Y. Orientation of Two-dimensional Fillers and Surface Appearance in An Injection Molded Article. *Polym. Korea* **2016**, 40, 871-879.
- Kobayashi, Y.; Teramoto, G.; Kanai, T. The Unique Flow of Polypropylene at the Weld Line Behind an Obstacle in Injection Molding. *Polym. Eng. Sci.* **2011**, 51, 526-531.
- Santos, I. O.; Pontes, A. J.; Martins, C. I. Morphological Aspects of Injection-molded Polypropylene with Metallic Pigments. *Proceedings of 71st Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2013*, Cincinnati, USA, April 22-24, 2013.
- Lim, J. S.; Yeol, Kwon, K. Y.; Hur, K. B.; Cho, C. H.; Lee, G. C.; Cheon, S. U.; Cho, S. H. Noble Aluminum-pigmented Metallic Polymers II: Effects of Inorganic Filler on Weld-and Flow-line Visibility. *Polym. Test.* **2022**, 106, 107422.
- Foss, P. H.; Tseng, H. C.; Snawerdt, J.; Chang, Y. J.; Yang, W. H.; Hsu, C. H. Prediction of Fiber Orientation Distribution in Injection Molded Parts Using Moldex3D Simulation. *Polym. Compos.* **2014**, 35, 671-680.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.