한국금형공학회지, 제13권 제4호, 2019
J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.13 No.4, 2019 ISSN 2092-9692

사출성형 중 달무리 현상에 의한 불량에 대한 분석

이순영[1] · 박은민[1] · 김도훈[2] · 김용철[2] · 양철승[2] · 진경민[2] · 김선경[†]
서울과학기술대학교 대학원 기계디자인금형공학과[1]
서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과[2,†]

Analysis of defects caused by halo defects during injection molding

Soon-Young Lee[1] · Eun-Min Park[1] · Do-Hun Kim[2] · Yong-Chul Kim[2]
· Chul-Seung Yang[2] · Gyeong-Min Jin[2] · Sun-Kyoung Kim[†]
Department of Product Design and Manufacturing Engineering, Graduate School, SeoulTech[1]
Department of Mechanical System Design Engineering, SeoulTech[2,†]
(Received September 17, 2019 / Revised December 19, 2019 / Accepted December 31, 2019)

Abstract: In this study, we investigated the halo surface defection of various phenomenon occurred during the injection molding process which is caused by the thinning of the product thickness and the importance of the appearance. Surface analysis was performed to observe the difference between the surface where defects appeared and the surface which did not appear. Based on these results, we analyzed the phenomenon of halo surface defects was caused by unstable flow of resin generated in injection molding and velocity change of flow front. Furthermore, we will conduct a clear analysis of halo surface defects through observations through optical microscopy and subsequent observations with atomic force microscope. It has been analyzed that halo in PP is due to the rheological difference between the crystalline and amorphous regions while that in PC/ABS is due to shear separation of PC and ABS.

Key Words: Halo surface defect, Injection mold, Shear rate

1. 서 론

플라스틱제품 사출성형 시 많은 불량현상이 발생한다. 제품의 표면에 나타나는 불량현상은 weld line, 플로우 마크, silver streak[1)]등이 있다. 이중에서 gate 뒷면에 생기는 달무리 현상(halo surface defects)은 핸드폰, 노트북 등의 케이스 외관에 나타나서 불량을 일으킨다.

외관의 품위가 요구되는 제품은 표면의 보호 및 외관의 장식, 표면성질의 기능적 개선을 위하여 도장을 사용하였다. 그러나 달무리 현상이 있는 ABS 제품의 경우 도장 후에도 제품의 표면품질에 영향을 줄 수 있다. 최근에 출시되는 제품은 두께가 얇아지고 외관이 중요시됨에 따라 후처리 공정을 거치지 않는 추세이다. 이와 같은 요구를 충족시키기 위해 사출공정만으로 표면불량현상을 해결할 수 있는 기술이 요구된다.

달무리 현상은 과거 1998년 Brent A. Salamon, 2009년 Giovanna Ianuzzi[2)]에 의해서 연구되었다. 달무리 현상의 원인에 대한 가설은 금형 충진 시 stick-slip유동에 의해 발생되거나 불안정한 snake-like유동이 원인이다. 하지만 원인은 명확하게 파악되지 않았고 문제가 발생되는 경우에는 경험적 지식에 의존해서 현상을 해결하는 상황이다.

본 연구에서는 사출불량현상 중 하나인 달무리 현상에 대한 연구를 진행한다. 달무리 현상은 관로 내의 수지유동성, 금형온도, 사출온도, 사출속도, 수지의 종류 등에 영향을 받아 나타난다. 많은 요소 중에서 사출속도, 수지의 종류가 달무리 현상에 크게 영향을 미친다고 가정하고 상관관계를 파악하기 위하여 본 실험을 진행한다.

1. 서울과학기술대학교 대학원 기계디자인금형공학과
† 교신저자: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
E-mail: sunkkim@seoultech.ac.kr

따라서 본 연구의 실험을 진행하기 위하여 변형 다이렉트 게이트 금형을 설계하고 얇은 두께의 제품을 성형하였다. 달무리 현상의 정도를 비교하기 위하여 광학현미경을 이용하여 제품의 표면을 관측하였다. 단일, 복합수지와 사출속도 비교를 통하여 달무리 현상과의 상관관계를 분석하였다. 연구결과를 통해서 제품 성형 시 발생되는 불량현상을 예방하고 수정하는데 용이 할 것이라 기대한다.

2. 이론적 고찰

달무리 현상은 제품 표면에 흐릿하게 나타나는 표면결함이다. 이것은 전형적으로 사출성형과정 중에 발생하며 게이트 주변에서 동심원 모양의 띠를 이룬다. 띠는 게이트 직경의 2~3배 크기를 가지며 사출조건에 따라 단일 줄무늬 혹은 여러 줄무늬가 나타난다. 위의 현상은 달무리(halo), 호랑 무늬(tiger stripes)[3], 줄 무늬(striping), chatter marks, rings라 불린다[4]. 표면결함의 발생원인은 크게 2가지로 논의되었다. 첫 번째는 수지의 불안정한 유동에 의한 것이고 두 번째는 유동선단의 속도변화와 관련된다.

첫 번째로 수지의 불안정한 유동에 의해서 발생된 표면결함은 동심원 모양으로 나타난다. 결함원인은 충진 시 Snake-like flow라 불리는 유동이 발생했기 때문이다. Snake-like flow는 안정되고 균형된 분수유동과 차이를 나타내며 표면불량에 직접적인 영향을 줄 수 있으나 부족하고 모호한 부분이 많이 있다[5].

두 번째는 유동선단의 속도변화와 관련된다. 대부분의 금형에서는 유로 단면적의 변화가 심하고 냉각회로의 위치와 냉매의 순환방식에 따라 금형 온도편차가 존재한다. 이에 따라 재료의 점도가 지역적으로 다르고 고화층의 발달속도는 용융선단 속도를 크게 변화시킨다. 따라서 용융선단의 속도가 증가하면 배향과 전단응력이 커지게 된다. 증가한 전단응력이 제품표면에 작용하거나 수지 분자 내 작용하여 표면결함을 일으킬 수 있다[6].

용융선단의 속도변화에 의해서 발생된 결함은 원형으로 나타난다. 속도변화가 표면결함을 일으키는 원인은 몇 가지로 생각해 볼 수 있다.

첫째 수지가 유동할 때 제품의 표면에 수지가 먼저 얇게 고화된다. 그리고 다음에 흘러오는 높은 속도 (큰 전단력)을 가진 수지가 얇게 고화된 수지 층에 전단력을 가하게 된다. 큰 전단력에 의해서 수지층에 미세한 노치가 생기고 노치들이 육안으로 봤을 때 달무리 현상을 일으킬 수 있다.

실제로 용융수지는 고화층의 내측을 강하게 마찰시키면서 유동한다. 속도구배는 이 부분 즉 고화층과 유동층 경계면(전단층-shear layer)에서 최대가 된다. 그러나 전단층은 금형표면에 가까워 고화가 빨라져 수지의 점도가 매우 높기 때문에 절대속도의 최대치는 중심층 쪽으로 치우치게 된다. 속도구배가 최대인 전단층에서 용융수지는 강하게 전단변형을 하며 첨가된 유리가 일정한 방향성을 가지게 된다.

둘째 복합수지나 혼합수지의 경우에 수지가 전단층에서 발생한 전단력에 의해서 분리된다. 분리된 수지가 제품 표면에서 다른 위치에 나타나고 개별의 층을 이룬다. Hamada and Tsunasawa (1996)에 따르면 PC/ABS사출 시 우선적으로 PC가 금형표면을 덮고 밝은 표면을 나타낸다. 대조적으로 ABS는 어두운 표면을 나타내며 플로우 마크를 나타낸다.

추가적으로 플로우 마크와 달무리 현상과의 차이점은 크게 속도와 모양의 차이에서 나타난다. 첫 번째로 플로우 마크는 낮은 사출속도로 인한 유동성 저하로 수지 흐름자국이 나타나는 반면 달무리 현상은 속도 증가로 인한 전단 속도증가로 표면 자국이 발생한다. 두 번째는 나타나는 모양이 다르다. 플로우 마크는 제품 표면에 흐름 방향으로 물결현상으로 나타나는 반면 달무리 현상은 게이트 중심으로 2~3배 크기의 원형의 띠를 나타낸다.

3. 사출금형 및 성형

3.1. 금형의 설계

본 실험에서 사용된 금형은 콜드러너 금형이며 사출 성형으로 제품을 생산할 때 필요한 요소는 사출성형기와 재료, 그리고 사출 성형 금형이다. 사출 성형기는 제품을 성형하기 위하여 재료를 녹이고, 주입한 사출 성형 공정에서의 전반적인 역할을 수행하며, 재료는 제품의 사용용도, 목적에 따라 사용된다.

성형되는 시편의 치수는 Φ80, t =1 mm이며 다이렉트 게이트 방식을 채택하였다. 표면불량 현상을 명확히 표현하기 위해서 기존 유동시스템을 대체하여 길이 300 mm 외경 Φ 9.5 내경 Φ 6.5 의 316 tube를 이용하였다.

본 실험에 사용된 금형은 Fig. 1.과 같이 실험목적에 맞게 제작되었다. 금형의 크기는 300×300×360 (mm) 이다.

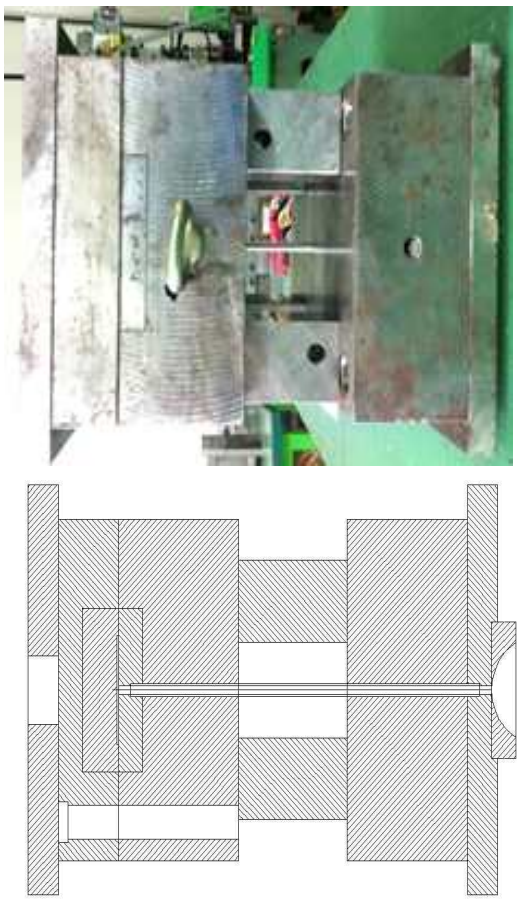

Fig. 1 Photograph and cross-section of the experimental mold

3.2. 사출 성형

3.2.1. 성형 재료

본 실험에 사용된 수지는 PP, PP+GF20%, PC/ABS, ABS이다. 표면불량현상이 주로 관측되는 수지에는 PP, PVC, PC, ABS, PE, PS 등이 있다. PP 이중에서 단일수지로는 자동차산업에 주로 쓰이는 PP와 복합수지로는 유동선단의 파열을 일으켜 표면 불량현상을 나타내기 쉬운 PC/ABS를 사용하였다. 선정된 수지와 첨가제, 혼합수지와의 비교를 위하여 PP+GF20%, ABS 실험 또한 진행하였다.

3.2.2. 사출 성형기 및 조건

실험에는 우진플라임(주)의 1100 kN 사출기를 이용하였다. 토글식 사출기이며 모터는 전동식이다. 사출성형조건은 다음 Table 1과 같고 일정한 사출조건에서 속도 변화를 주어서 실험을 진행하였다.

Table 1 Experimental conditions

Test Condition			
Clamping force	30 kN	Packing	None
Injection pressure	150 MPa	Cooling time	2 mins
Metering distance	40 mm	Mold temperature	Room temperature

3.3. 실험 방법

콜드 러너 금형에서 사출을 하기 위해서는 사출 실린더의 온도를 설정 온도에 맞춰 온도를 일정하게 유지시켜준 후 계량을 한다. 계량이 끝나면 실험 조건에 해당하는 사출 속도를 입력해 준다. 사출 후 캐비티에 수지가 충진 되는 것을 확인한다. 일정한 냉각시간을 기다린 후 제품을 추출하고 관 내부에 있는 수지가 고화되기를 기다린 후 추출한다.

실험에 사용된 금형에는 이젝팅 시스템이 없기 때문에 자동추출이 불가능하다. 그리고 가동측이 후퇴하면서 캐비티와 제품도 같이 후퇴하면 제품에 백화현상이 생긴다. 이를 해결하기 위해서 캐비티에 매 사이클마다 이형제를 뿌리고 노즐 쪽에서 이젝팅을 실시해야 한다. 실험이 끝났으면 다음 조건을 설정하고 위와 같은 사이클을 반복한다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1. 시편 제작 결과

속도 별 실험을 진행하여 시편을 제작한 결과 PP와 PC/ABS만 달무리 현상을 관측할 수 있었다. 자세한 관측 결과는 다음 Table 2와 같다. 총 5개의 시편을 제작해서 속도 별(mm/s)로 달무리가 관찰된 시편의 개수를 정리하였다.

Table 2 Results of halo surface defects along with injection rate (mm/s)

Injection rate	100	200	300	400
PP	4/5	4/5	4/5	4/5
PP+GF20%	0/5	0/5	0/5	0/5
PC/ABS	0/5	1/5	4/5	5/5
ABS	0/5	0/5	0/5	0/5

PP의 경우에는 모든 속도에서 달무리 현상을 관찰할 수 있었으며 PC/ABS의 경우에는 300, 400에서 주되게 관찰되었다. PP+GF20%의 경우에는 예상했

던 결과와 달리 달무리가 관찰되지 않았다. 전체적인 시편의 모습은 Fig. 2와 같다.

4.2. 수지 별 달무리 결과

4.2.1. PP

PP의 경우 달무리 관측 결과 사출 속도에 의해서 달무리 위치 변화가 나타나는 걸 알 수 있었다. 속도가 증가할수록 게이트 먼 쪽에 위치하는 것을 보였으며 속도가 감소할수록 게이트 가까운 쪽에 위치하였다.

이러한 이유는 러너에서 내부와 벽면의 전단 속도 차이에 의해서 결정화도 차이가 발생하고 이것의 영향으로 제품 표면에서 달무리 현상이 발생하는 것으로 생각할 수 있었다.

Fig. 2 Image of specimen (Clockwise - PP, PP+GF20%, PC/ABS, ABS)

4.2.2. PC/ABS

PC/ABS의 경우에도 PP와 마찬가지로 사출 속도에 의해 달무리 위치 변화가 나타나는 걸 알 수 있었다. 속도가 증가할수록 게이트 가까운 쪽에 위치하는 것을 보였으며 속도가 감소할수록 게이트 먼 쪽에 위치하였다.

이러한 이유는 벽면 근처에서 수지가 높은 사출 속도 내에서 전단력을 받아 PC/ABS의 상 분리가 발생하며 유동이 진행된다. ABS는 가운데로 PC는 벽면에 위치하게 된다. 분리된 수지가 제품 표면에 각각 개별적으로 위치하여 달무리 현상으로 나타난다.

4.3. 달무리 현상 분석

달무리가 나타나는 표면과 일반적인 제품 표면의 차이를 광학현미경(Nikon Optiphot 200) 으로 관찰하였고 조도를 측정하였다. 표면거칠기에서는 별다른 차이를 관찰하지 못하였고 100배 광학현미경 관찰에서는 제품과 달무리의 형상 차이만을 확인할 수 있었다. 광학현미경으로 관측한 달무리의 모습은 Fig. 3에 보인 바와 같다. 그림 왼쪽부분에 일정한 줄무늬가 모여 있는 모습이 달무리의 확대 모습이다.

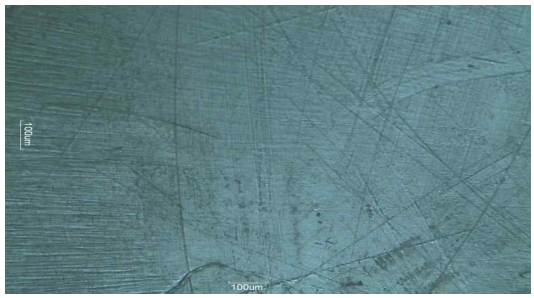

Fig. 3 Halo surface defects measured by optical microscope

PC/ABS나 PP에서 나타난 달무리 현상을 설명하기 위해서는 육안으로 관찰한 범위에서 더 나아가 AFM(원자현미경)을 이용하여 결함을 관찰하기로 하였다. AFM의 스캐닝 모드만을 사용하였기 때문에 표층 만을 대상으로 하였다. Fig. 4에 볼 수 있듯이 Halo 근처에 솟아오른 구간을 확인할 수 있다.

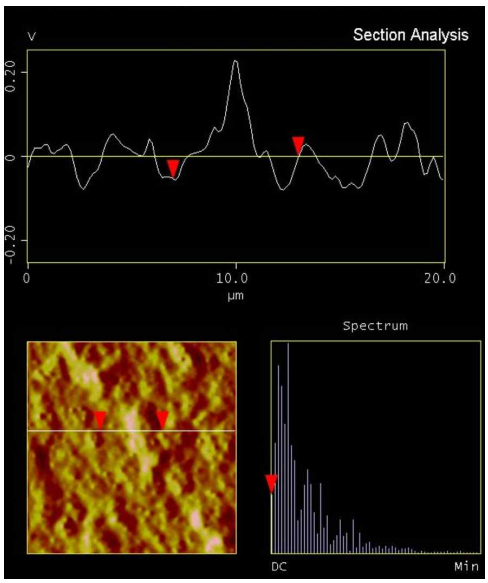

Fig. 4 Halo surface defects inspected by AFM (atomic force microscopy)

5. 결 론

이 연구에서는 표면에 나타나는 달무리 현상에 대하여 분석하였다. 불량 관리 수준의 고도화에 따라 기대되는 표면의 수준도 높아지고 있고 이에 따라 과거에 크게 문제되지 않던 불량에 대한 관리 요구가 높아졌고, 이를 해소하는 것이 필요하게 되었다. 이 연구에서는 게이트 근처에서 외관면에서 나타날 수 있는 달무리에 대하여 연구하였다. 달 무리는 보통 게이트 근처에 1차적으로 나타나며 주기적으로 관찰될 수 있음을 확인하였다. 또한 AFM 관찰 결과 달무리가 나타나는 곳에서 솟아오른 미세구조를 확인할 수 있었다. PP의 경우에는 결정화에 따른 유변학적 성질 변화로 달무리가 발생하고 PC/ABS의 경우에는 PC와 ABS의 상분리에 의해 달무리가 발생하는 것으로 분석하였다.

후 기

이 성과는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NRF-2014 R1A2A1A1105445).

참고문헌

1) Anne M. Grillet, Arjen C. B. Bogaerds, and Gerrit W. M. Peters, and Frank P. T. Baaijens, “Numerical analysis of flow mark surface defects in injection molding flow”, J. Rheol., 46, p. 651, 2002.
2) Brent A. Salamon, Kurt A. Koppi, and Jack Little Dow Plastics, “Halo surface defects on injection molded parts”, Antec p. 98, 1998.
3) Hirano, K., Suetsugu, Y., and Kanai, T., “Morphological analysis of the tiger stripe on injection moulding of polypropylene design”, J. Appl. Polym. Sci., 104, p. 192, 2007.
4) Hobbs, S.Y, “Development of flow instabilities during the injection moulding of multicomponent resins”, Polym. Eng. Sci., 36, p. 1489, 1996.
5) Tredoux, L., Satoh, I. and Kurosaki, Y., “Investigation of wave-like flow marks in injection moulding : flow visualization and microgeometry”, Polym. Eng. Sci., 39, p. 2233, 1999.
6) Yokoi, H., Deguchi, Y., Sakamoto, L., and Murata, Y., Antec 94, pp. 829-832, 1994.

저자 소개

이 순 영(Soon-Young LEE) [정회원]

- 2019년 8월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(공학학사)

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 유동해석

박 은 민(Eun-Min Park) [정회원]

- 2019년 8월: 서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과(공학석사)
- 2019년 9월~ 현재: C2ESKOREA(주)

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 유동해석

김 도 훈(Do-Hoon Kim)

- 2013년 2월 : 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(공학사)

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 유동해석

김 용 철(Yong-Cheol Kim)

- 2013년 2월 : 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(공학사)

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 유동해석

양 철 승(Chul-Seoung Yang)

- 2013년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(공학사)

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 유동해석

진 경 민(Kyung-Min Jin)

- 2013년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(공학사)

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 유동해석

김 선 경(Sun Kyoung Kim) [정회원]

- 2000년 2월: 서울대학교 기계항공공학부(공학박사)
- 2000년 11월~2004년 1월: 노스웨스턴대학교, 연구원
- 2004년 2월~현재: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, 교수

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, 복합재료, 고분자재료