

사출성형 해석을 통한 Weldline 및 Flow mark 개선사례

The Improvement of Weldline and Flow mark Defection by using Injection Molding Analysis

이영창^{1,✉}
Yeong Chang Lee^{1,✉}

¹ 영진전문대학 (Yeungjin Colloge)

✉ Corresponding author: yclee@yjc.ac.kr, Tel: +82-53-940-5219

Manuscript received: 2013.10.1 / Revised: 2013.10.31 / Accepted: 2013.11.20

The cause of flow mark defect is known as non-uniform temperature of mold surface when the flow front meets the cold cavity. The exact definition and classification of Flow mark is not clear because the mechanism of flow mark is not figured out till now. Any injection molding analysis software can not predict the flow mark phenomena. To solve weldline and flow mark defects, the gate thickness is reduced to increase the melt front velocity and the melt front velocity of the flow mark area is increased from 82.3mm/s to 104.7mm/s. In addition, the bulk temperature of the flow mark area is increased from 178.3 °C to 215.2 °C by adding a cold slug well. The flow mark phenomena can be greatly reduced by increasing the flow front velocity and elevating the bulk temperature.

Key Words: Computer Aided Engineering (CAE, 컴퓨터 응용역학), Injection Molding Analysis (사출성형해석), Flow mark (플로우 마크), Weldline (웰드라인), Melt Front Velocity (MFV, 유동 선단 속도)

기호설명

$\tau : \nabla \vec{v}$ = Viscous heat

ΔH_r = heat of crystallization or heat of reaction

C_i = interaction coefficient

$\dot{\gamma}$ = shear rate tensor

1. 서론

사출성형은 생산비용의 절감, 제품 디자인의 제약성 극복과 대량생산 측면에서 매우 중요한 역할을 수행하고 있다. 또한 플라스틱 성형에 대한 응용기술이 전기, 전자 산업과 자동차 산업에 널리 보급되면서 그 중요성은 매우 강조되고 있다. 특히 자동차의 연료효율 향상 및 기타 원가절감

등의 목적으로 비금속 재료가운데 플라스틱이 차지하는 비율은 고무 성분을 포함하면 약 15%에 육박하고 있으며 앞으로도 꾸준한 증가세를 지속할 것으로 예상되고 있다.

또한, 국내 금형업체는 비효율적인 금형설계에 의하여 금형의 수정에 많은 시간과 비용을 소모하고 있다. 더욱이 소비자의 기호가 다양화 되어 점점 복잡한 기능을 요구하므로 금형의 구조 및 부품수가 크게 증가하여, 실패할 경우 업체의 재정적 부담이 증가하고 있는 실정이다. 설상가상으로 제품의 정밀도를 유지해야 함에도 불구하고 성형 수축량이 큰 플라스틱 재료를 사용하므로 때에 따라서는 금형의 수정이 진행되므로 이를 보정해 줄 수 있는 컴퓨터를 이용한 전산해석이 필요하게 되었다.

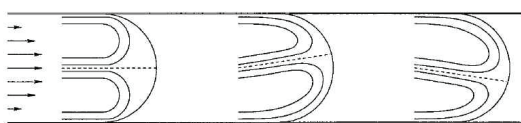


Fig. 1 Unstable flow may cause surface defects⁶

사출성형 해석 소프트웨어는 짧은 시간에 저 비용으로 여러 설계 및 재료와 공정 조건의 조합을 시험할 수 있는 시스템이다. 설계의 오류 및 부적절한 공정 조건의 설정을 실제 금형을 가공하고 시제품을 생산하기 전에 미리 방지할 수 있으므로 공정 변수들이 성형품의 품질, 비용과 성능에 미치는 영향에 관한 정보를 설계 초기 단계에서 제공해 준다.

실제 사출시에 발생하는 Flow mark는 타이거 스트라이프(Tiger stripes), 아이스 라인(Ice lines) 등으로도 불려지고 있는데 Gate 또는 제품내의 좁은 유로 부분에서 많이 나타난다. 이는 Sprue나 Runner 부분에서 냉각된 수지가 Cavity내에서 다시 냉각되어져 높은 점도로 되고 다시 차가운 금형 벽면에 의해 고체화 된다. 이때 뒤따르는 용융된 수지에 의해 반 고체화된 수지가 밀리면서 흐름 방향에 직각인 줄무늬 모양이 나타나는 것을 말한다.

사출성형 과정 중에 나타나는 유동의 불안정성 때문에 플라스틱 제품의 표면 반사율이 불균일 하게 나타난다. 현재까지 연구된 결과를 보면 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 표면에서의 불량은 유동의 불안정성에 의해 기인한다고 알려져 있다.¹⁻⁶

불안정한 유동의 원인으로서 제안되는 가장 일반적인 메커니즘은 벽면에서의 미끄러짐(Slip)과 정체점에서의 불안정성이다. 유동학 데이터(Rheological data)가 충분하지 못해 유동의 불안정성에 대한 명확한 원인을 파악할 수는 없지만, Chang²의 연구 결과에 따르면, 높은 Recoverable shear strain($S_R = N_1/2\tau_{xy}$)을 갖는 수지의 경우 Flow mark 발생이 적다는 사실이 알려졌다.

본 연구에서는 사출현장에서 발생하는 Flow mark의 해결을 위해 주먹구구식 방법으로 접근하던 기존의 방식을 배제하고 프랑스에서 개발된 사출성형 해석 소프트웨어인 SIMPOE-Mold⁷를 활용하고자 한다. 하지만, Moldflow를 포함하여 현재까지 개발되어 있는 모든 사출성형 해석 소프트웨어에서는 해석 결과로 Flow mark를 직접 보여 주지 않아 Flow mark를 확인 할 수 있는 방법이 없다. 따라서 유동 패턴 및 사출 후 금형 내 온도 분포

파악을 통한 Flow mark의 간접 예측 방법을 이용하여 현업에서 발생하고 있는 문제를 해결하고자 한다.

2. 유동 및 보압 과정에 대한 지배 방정식

유동해석은 수지가 금형에 유입 되었을 때의 과정에 대한 분석이라 할 수 있다. 사출 성형품의 특성은 기본적으로 어떻게 성형되느냐에 따라 다르다. 똑같은 도면, 같은 재료로 된 두 개의 성형품 일지라도 각기 다른 조건 하에서 성형 된다면, 응력 및 수축의 정도가 다른 성형품이 될 수 있다. 따라서, 이것은 두 성형품이 사용 중 서로 다른 물성을 보여 준다는 것을 의미한다. 그러므로, 어떤 상태로 수지가 금형 내로 들어가느냐 하는 것이 성형품의 품질을 결정하는 아주 중요한 요인이 된다. 따라서 충전(유동전진) 과정 중 금형 내의 압력, 온도, 응력을 예측할 수 있다는 것은 충전 과정을 확실히 해석할 수 있다는 것을 의미한다.

충전 공정을 통해 금형 내부로의 수지 충전이 완료되면 용융수지가 활발한 분자활동을 통해 부피가 커지고 커진 만큼의 부피가 냉각되며 수축 현상이 생기게 된다. 이러한 수축 현상으로 인해 원하는 치수의 최종 제품을 얻기가 어렵게 되며, 이러한 수축 현상을 보완하기 위하여 보압 공정이 필요하게 된다. 보압 공정에서는 수지 주입구에 이미 설정된 특정 압력인 보압이 가해지게 되는데, 이 상태에서 수축을 보상하게 된다. 이 경우, 최적의 보압 공정 수행을 위해서 단순한 수지의 추가 유입이 아닌 금형 내부의 압력 분포를 균일화 하기 위한 다단 압력 조절이 요구되는데, 이러한 견지에서 보압 공정의 전산해석은 더욱 중요한 의미를 갖게 된다.

일반적으로 플라스틱 재료는 성형시 약 20%의 성형수축이 발생한다. 물리적으로 결정성 재료와 비결정성 재료는 다른 성질을 가지며, 결정성 재료의 경우 비결정성 재료보다 열적 수축량이 크다고 볼 수 있다. 즉, 결정성 재료는 성형시 Tg(유리전이 온도)보다 낮게 냉각이 될 경우, 분자 구조는 정연하게 배열하려 한다. 반면에 비결정성 재료인 경우는 동일한 조건하에서도 상변화의 발생은 거의 일어나지 않는다. 이러한 사실은 수지의 압력-체적-온도 곡선을 통하여 확인할 수 있다. 이 곡선의 물리적인 의미는 성형시 재료의 성형 수축량을 예측하는데 유용하게 사용된다.

보압을 일정 압력으로 균일하게 가하면 게이트에 근접한 곳은 보압을 크게 받아 수축률이 적고 충전 마지막 부위는 상대적으로 압력을 충분히 받지 못하여 수축률이 큰 수축 불균형이 발생한다. 이러한 불균형은 잔류응력을 증가시켜 변형을 일으키는 중요한 원인이 된다. 따라서 균일한 압력으로 보압을 설정하는 것이 아니라 보압의 크기를 점점 줄여주는 다단 보압 설정을 통하여 캐비티 내압의 위치에 따른 편차를 줄여줄 수 있다.

또한 게이트는 제품의 두꺼운 곳에 위치한다. 일반적으로 수축률은 압력과 고화속도에 의존한다. 따라서 고화속도가 느려 수축률이 큰 곳에 게이트를 위치하여 충분한 압력을 공급함으로써 수축률의 균형을 이룰 수 있다. 그리고 보압 시간은 게이트가 고화시간 이상으로 설정하여야 한다. 보압을 게이트 고화시간 이하로 설정하면 스크루가 가소화를 위하여 후퇴하므로 게이트 앞단에 압축되어 있는 수지가 뒤로 흘러나간다. 따라서 비정상적으로 게이트 주위가 수축률이 커진다.

유동 및 보압 과정에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

1) 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

2) 운동방정식

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

여기서, $\boldsymbol{\tau}$ 는 편차 응력텐서, P 는 압력, \mathbf{g} 는 중력 가속도.

3) 에너지 방정식

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} + \Delta H_r \quad (3)$$

여기서, C_p 는 재료의 비열, \mathbf{k} 는 재료의 열전도도, $\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}$ 는 마찰열, ΔH_r 는 결정화열 혹은 반응열.

4) 역학관계식

용융수지 선단의 위치계산에는 다음과 같은 VOF (Volume of fraction - 부피분율) 방정식이 사용된다.

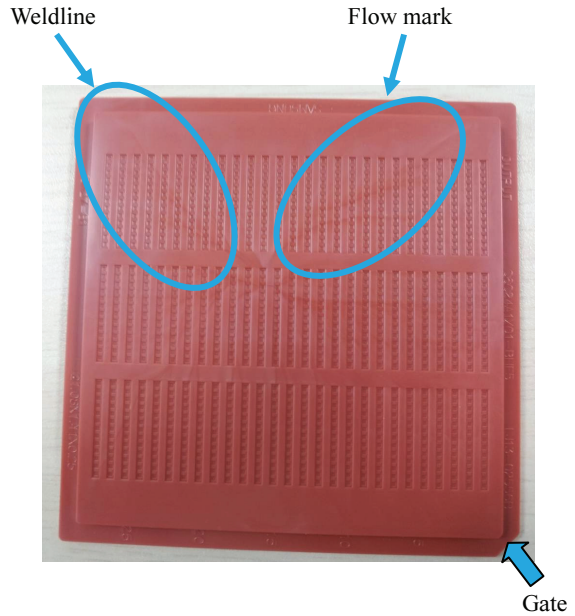


Fig. 2 The model with weldline and flow mark

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}F) = 0 \quad (4)$$

여기서, $F=1$: 검사체적(Control volume)이 완전히 찬 경우; $F=0$: 전혀 차지 않은 경우; $0 < F < 1$: 부분적으로 찬 경우.

3. Flow mark 해결을 위한 문제점 분석

Fig. 2와 같은 모델에 대한 문제 해결을 위해 분석한 결과 다음 두가지의 성형 불량이 복합적으로 발생했다고 판단하였다.

- a) 제품의 살 두께에 비해 외곽 테두리 부근이 더 두꺼움으로써 외곽쪽의 유동속도가 빨라 좌측 상단에 Weldline이 발생하였다.
- b) 우측 상단에는 유동속도 저하 및 유동 선단 온도 강하에 따라 Flow mark가 발생하였다.

결론적으로 이 제품은 좌측 상단에 유동선단의 만남에 의한 Weldline과 우측 상단에 유동 선단속도(Melt Front Velocity, MFV)의 저하에 의한 Flow mark가 발생하는 복합적인 불량 현상을 보여주고 있다.

이 문제를 해결하기 위해 Flow mark의 발생원인을 파악하였으며 정리하면 다음과 같다.

- 1) 사출조건의 문제
 - a) 수지 및 금형온도가 낮은 경우: 점도가 높

- 은 상태로 충전시 충전중에 온도가 저하하여 발생
- b) 사출속도가 낮은 경우: 점도가 높은 상태로 충전시 충전중에 온도가 저하하여 발생
- 2) 금형의 문제
- a) 금형의 냉각수 설치가 잘못된 경우: 냉각수 홈의 위치가 Gate 또는 Gate 근처의 얇은 부분에 설치된 경우 수지 온도 저하에 의해 발생.
 - b) Cold slug well의 크기가 적거나 없는 경우: Sprue 끝이나 주 Runner에서 Sub-runner로 분기한 곳에 Cold slug well이 없거나 작은 경우 수지 온도가 낮은 재료가 충전되기 때문에 발생.
 - c) Gate가 작거나 위치선정이 잘못된 경우: Cavity내 점도상승에 의해 충전 속도가 늦어지기 때문에 발생.
- 3) 사출성형기의 문제(Nozzle이 너무 작은 경우): 노즐부의 수지 온도가 저하되어 사출초기에 사출되거나 수지의 점도가 높아져 압력 저하에 의해 발생.
- 4) 수지의 문제(수지의 유동성이 너무 나쁜 경우): 수지의 점도가 높아져 압력 저하에 의해 발생.

여러 가지 원인 중에 이 경우는 1) b)인 사출속도가 낮아서 점도가 높은 상태로 충전시 충전중에 온도가 저하하여 발생하는 것으로 파악 되었으며 두번째 원인으로는 2) b)인 Cold slug well의 크기가 적거나 없는 경우여서 Sprue 끝이나 주 Runner에서 Sub-runner로 분기한 곳에 Cold slug well이 없거나 작은 경우 수지 온도가 낮은 재료가 충전되기 때문에 발생한다고 파악 되었다.

4. 사출성형 해석 결과

4.1 Weldline 및 Flow mark 해결을 위한 사출 속도 조절

해석을 위한 Mesh 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 제품의 사이즈는 250x250mm이고 본체의 두께에 비해 바깥쪽 테두리 부분이 0.5mm 더 두꺼운 형상을 하고 있다. 3차원 고체 요소 개수는 150만개를 사용하였으며 두께 방향으로 최소 5개 층을 구성하였다. 사용 수지는 PC/ABS C2950을 사용하였으며 사출 조건은 금형온도 80℃에 사출온도 280℃, 사출시간은 3초로 설정하였다.

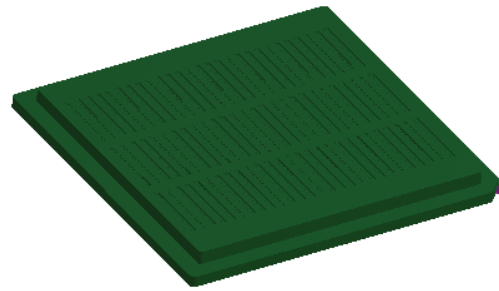


Fig. 3 Solid mesh model

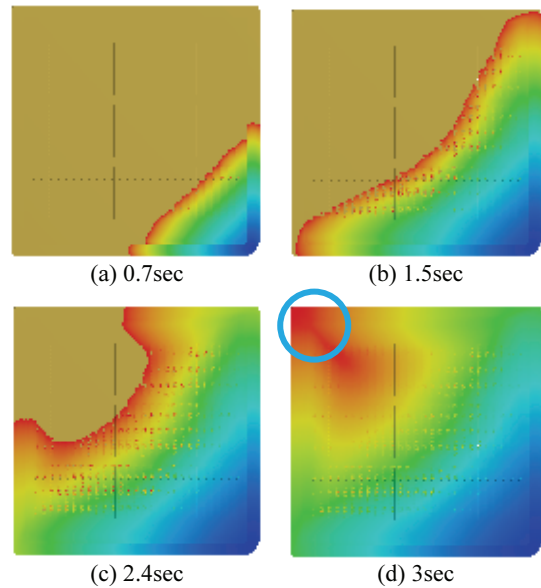


Fig. 4 Flow pattern result based on time difference with original injection conditions

기존 모델의 경우 게이트 두께를 0.5mm로 유지하였으며 사출속도를 높이기 위해 개선 모델의 경우 게이트 두께를 0.3mm로 줄여 사출성형 해석을 수행하였다.

외곽 테두리가 제품 내부에 비해 0.5mm 더 두꺼우므로 충전 속도가 느린 경우 두꺼운 부분이 제품 내부 보다 먼저 충전되어 나가게 되므로 왼쪽 상단에서 Weldline이 발생할 가능성이 높다. 이 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(b)에서 나타난 바와 같이 1.5초에서의 유동패턴을 보면 바깥쪽 테두리 부근에서의 속도에 비해 중심부에서의 유동 정체가 확연히 드러남을 알 수 있으며 이 결과를 통해 Flow mark가 발생할 수 있는 가능성을 예측할 수 있다. Fig. 4(c)의 경우 2.4초에서의 유동패

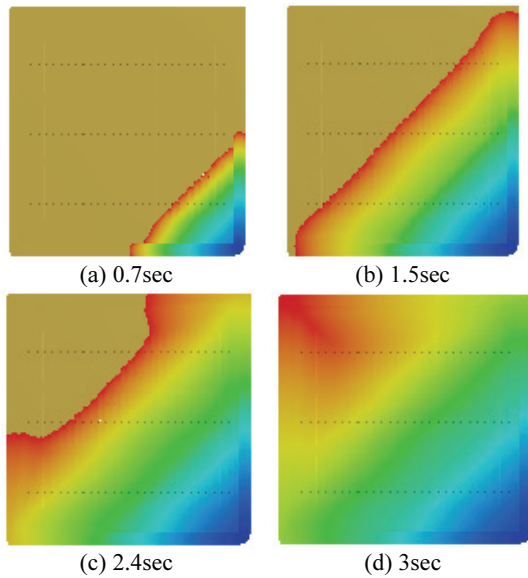


Fig. 5 Flow pattern result based on time difference with modified injection conditions

턴이며 테두리 부근의 속도와 중심부에서의 속도차가 극명하게 나타남으로써 Fig. 4(d)에 표시한 바와 같이 왼쪽 상단에 Weldline이 발생하는 것을 알 수 있다.

이 현상을 개선하기 위해 게이트 두께를 0.3mm로 줄인 수정된 모델에 대한 해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

게이트 두께가 줄어들 경우 유동 속도는 더 빨라지게 되며, 유동 속도가 빠를 경우 제품 두께에 의한 제품내 유동 속도 편차가 적게 나타나게 된다. Fig. 5(b)에서 나타난 바와 같이 1.5초에서의 유동패턴을 보면 바깥쪽 테두리와 중심부에서의 유동이 큰 정체 없이 진전하고 있음을 보여 주고 있으며 이 결과를 통해 Flow mark가 발생할 수 있는 가능성을 상당히 낮출 수 있다.

이 결과는 Fig. 6에 나타나 있는 ISO surface result를 통해 보다 구체적으로 확인할 수 있다. Fig. 5(c)의 경우 2.4초에서의 유동패턴이며 테두리 부근의 속도와 중심부에서의 속도차가 기존 모델에 비해 상당히 개선되었음을 알 수 있으며 Fig. 5(d)에 표시한 바와 같이 왼쪽 상단에 Weldline이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

Filling pattern은 Melt front가 순간적으로 진전할 때의 형상이다. 이는 제품의 품질에 중요하게 작용한다. MFV는 용융 전단부 진전 속도를 나타내며

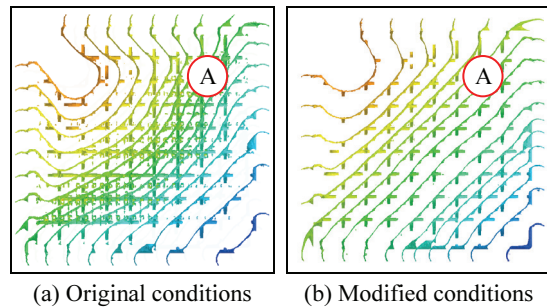


Fig. 6 ISO surface result of flow front velocity

MFA(Melt Front Area)는 용융 전단부 단면으로 정의되며 용융 전단부 길이와 두께의 곱으로 나타낸다. MFV와 MFA는 반비례 관계 이다.

Flow mark를 예측하기 위해 Fig. 6(a)에 기존 조건에 대한 유동 진전을 ISO surface로 나타 내었다. 등 곡면의 단면을 동일한 수로 나뉜본 형상이다. 간격이 넓은 경우 속도가 빠른 것을 의미하고 간격이 좁을 경우 속도가 정체되는 것을 나타낸다. 결과에서 보듯이 기존 조건으로 사출성형을 했을 경우 MFA가 최대로 되는 대각선 부근에서 MFV가 최소로 되어 간격이 좁아지는 것을 볼 수 있으며 이 결과를 바탕으로 사출속도가 낮아 점도가 높은 상태로 충전중에 온도가 저하하여 우측 상단인 A영역에서 Flow mark가 발생하는 것을 예측할 수 있다.

이를 해결하기 위해 게이트 두께를 줄여 사출 속도를 높인 경우에 대한 결과가 Fig. 6(b)에 나타나 있다. 결과에서 확인 가능 하듯이 기존 조건 결과에 비해 MFA가 최대가 되는 대각선 지점에서 간격이 일정하게 유지되고 있어 Flow mark가 발생하는 A영역에서 MFV가 급격히 저하 되지 않고 있음을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 Flow mark 현상이 상당히 개선 될 수 있음을 예측할 수 있다.

Flow mark가 발생하는 A영역에 대한 유동 선단 속도와 Bulk temperature는 4.2절에서 상세히 다루기로 한다.

4.2 Cold slug well 추가에 의한 Flow mark 개선

Cold slug well은 콜드 런너 금형의 특징으로서 런너가 방향을 변경하는 곳에 변경 되기 전 런너가 연장되어 있는 모습으로 설치된다. 금형에 닿은 용융 수지는 바로 고화 되므로 런너가 방향을 변경하는 곳에서는 고화층에 의한 유로의 유효직

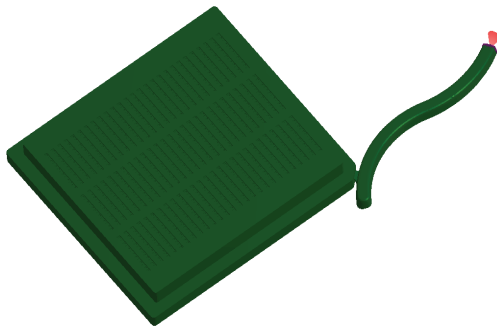


Fig. 7 The modified model with cold slug well

경이 작아 진다. 작아진 유로는 압력 강하를 발생시키는 원인이 될 뿐만 아니라 속도도 저하 시키므로 바람직하지 못하다. 따라서 Cold slug well을 설치하면 Cold slug well 부위의 고화층이 단열층으로 작용하면서 런너의 유로 직경을 걱정하게 보장하여 준다.

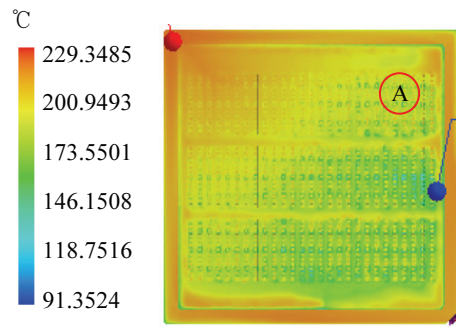
사출 속도를 빠르게 함으로써 Flow mark의 발생 가능성을 많이 감소시켰지만 추가적으로 Cold slug well을 설치함으로써 문제를 완전히 해결하고자 한다. Fig. 7에는 Cold slug well을 설치한 모델을 보여 준다.

Cold slug well이 없는 기존 경우와 Cold slug well을 추가한 경우에 대한 사출이 끝난 시점에서의 Bulk temperature를 Fig. 8에 나타내었다.

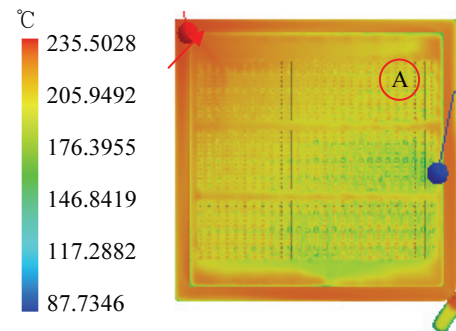
Bulk temperature는 유동이 흘러가는 동안에 측정하는 온도라는 의미에서 중요한 물리적 의미를 가진다. 유동속도를 고려한 평균온도 분포이며, 즉 유동속도가 0이라면 Bulk temperature는 평균온도와 같다. Bulk temperature는 충전과정 중에 Overheating이 발생하는지에 대한 정보를 제공한다.

Bulk temperature는 유동 분포 상태를 점검하는 대안중 하나이다. 유동 분포 상태가 고르게 나타나는 영역에서는 Bulk temperature가 높게 나타나며 유동이 정체되는 부위에서 Bulk temperature가 급격히 감소하는 것을 보여준다.

Cold slug well이 없을 경우 Fig. 8(a)의 Flow mark가 발생하는 A영역에서 Bulk temperature가 178.3℃로 나타나고 있으며 Cold slug well이 있는 경우 동일 위치에서 Bulk temperature가 Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 215.2℃를 나타내고 있다. 따라서 Cold slug well을 설치함으로써 Flow mark가 발생하는 A지점의 Bulk temperature를 36.9℃ 상승시킴으로써 문제를 해결할 수 있었다고 판단된다.



(a) Bulk temperature without cold slug well



(b) Bulk temperature with cold slug well

Fig. 8 Bulk temperature result at filling end

Table 1 Flow front velocity and bulk temperature at flow mark area, A

	Melt front velocity (mm/s)	Bulk temperature (°C)
Original conditions	82.3	178.3
Modified conditions with cold slug well	104.7	215.2

기존 사출 조건으로 Cold slug well이 없을 경우 Flow mark가 발생하는 A지점에서의 유동 선단 속도는 Table 1에 나타난 바와 같이 82.3mm/s 이지만 변경된 사출 조건으로 Cold slug well을 추가 하였을 경우 104.7mm/s로 유동 속도는 27.2% 빨라졌다. 또한 Bulk temperature도 기존 조건의 178.3℃에서 Cold slug well이 있는 경우 215.2℃로 20.7% 개선되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

Flow mark는 현업에서 자주 발생하고 있는 문제지만 Moldflow를 포함하여 현재까지 개발되어

있는 모든 사출성형 해석 소프트웨어에서는 해석 결과로 Flow mark를 직접 보여 주지 않아 속도 패턴과 금형의 온도 분포 파악을 통해 간접적으로 확인해야 한다. 따라서 현재까지 사출성형 해석으로 Flow mark 문제를 해결한 사례는 거의 보고되어지고 있지 않다.

본 연구는 Weldline과 Flow mark가 복합적으로 발생한 문제를 해결하기 위해 먼저 게이트의 직경을 줄여 사출속도를 빠르게 가져감으로써 Flow mark가 발생하는 지점에서의 유동 선단 속도가 82.3mm/s에서 104.7mm/s로 27.2% 빨라졌다. 다음으로, Cold slug well을 설치하면 Cold slug well 부위의 고화층이 단열층으로 작용하면서 Runner의 유효 직경을 적절하게 보장하여주기 때문에 Bulk temperature를 기존 조건의 178.3℃에서 215.2℃로 20.7% 개선하여 Flow mark의 발생 가능성을 상당히 감소시켰다. 결론적으로 Cold slug well을 추가하여 금형을 수정하였을 뿐만 아니라 변경된 사출 조건으로 생산하여 문제점을 완전히 개선하였다.

참고문헌

- Bulters, M. and Schepens, A., "The Origin of the Surface Defect 'Slip-Stick' on Injection Molded Products," Proc. of the 16th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, pp. 144-145, 2000.
- Chang, M. C. O., "On the Study of Surface Defects in the Injection Molding of Rubber-modified Thermoplastics," ANTEC '94, pp. 360-367, 1994.
- Hobbs, S. Y., "The Development of Flow Instabilities during the Injection Molding of Multi-component Resins," Polym. Eng. Sci., Vol. 36, No. 11, pp. 1489-1494, 1996.
- Hamada, H. and Tsunasawa, H., "Correlation between flow mark and internal structure of thin PC/ABS blend injection moldings," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 60, No. 3, pp. 353-362, 1996.
- Monasse, B., Vincent, M., Haudin, J. M., Gazonnet, J. P., Durand, V., and et al., "Flow marks in Injection Molding of Polypropylene : Influence of Processing Conditions and Formation in Fountain Flow," Proc. of the 15th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, s'Hertogenbosch, 1999.
- Grillet, A. M., Bogaerds, A. C. B., Peters, G. W. M., Baaijens, F. P. T., and Bulters, M., "Numerical analysis of flow mark surface defects in injection molding flow," Journal of Rheology (1978-present), Vol. 46, No. 3, pp. 651-669, 2002.
- SIMPOE SAS, "SIMPOE Theoretical Manual," 2012.
- Alves, M. A., Pinho, F. T., and Oliveira, P. J., "Study of steady pipe and channel flows of a single-mode Phan-Thien-Tanner fluid," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 101, No. 1-3, pp. 55-76, 2001.
- Grillet, A. M., Bogaerds, A. C. B., Peters, G. W. M., and Baaijens, F. P. T., "Stability Analysis of Constitutive Equations for Polymer Melts in Viscometric Flows," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 103, No. 2-3, pp. 221-250, 2002.
- Kamal, M. R., Chu, E., Lafleur, P. G., and Ryan, M. E., "Computer Simulation of Injection Mold Filling for Viscoelastic Melts with Fountain Flow," Polymer Engineering & Science, Vol. 26, No. 3, pp. 190-196, 1986.
- King, R. C., Apelian, M. R., Armstrong, R. C., and Brown, R. A., "Numerically Stable Finite Element Techniques for Viscoelastic Flow Calculations in Smooth and Singular Geometries," J. NonNewtonian Fluid Mech. Vol. 29, pp. 147-216, 1989.
- Sato, T., and Richardson, S. M., "Numerical simulation of the fountain flow problem for viscoelastic fluids," Polymer Engineering & Science, Vol. 35, No. 10, pp. 805-812, 1995.
- Park, K., Sohn, D. -H., and Seo, Y. S., "Investigation of Weldline Strength with Various Heating Conditions," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 27, No. 1, pp. 105-112, 2010.
- Kwon, O. K., Yun, J. H., and Park, K., "Improvement of Moldability for Ultra Thin-Wall Molding with Micro-Patterns," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., Vol. 31, No. 5, pp. 556-561, 2007.