



시퀀스 사출 성형에서 공정 조건이 은선 결함에 미치는 영향

박형필^{a,b,*}, 이남훈^{a,b}, 한동욱^{a,b}, 김효근^{a,b}, 윤규택^b, 김진수^{c,*}

Impact of Process Conditions on Silver Streak Defects in Sequential Injection Molding

Hyungpil Park^{a,b,*}, Nam Hoon Lee^{a,b}, Dong Wook Han^{a,b}, Huo Geun Kim^{a,b}, Kyutek Yun^b, Jinsu Gim^{c,*}^a Mold Engineering Team, Hyundai Mobis Co., Ltd.^b Lamp Production Engineering Group, Hyundai Mobis Co., Ltd.^c Jinju Center, Dongnam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

ARTICLE INFO

Article history:

Received	26	December	2025
Revised	13	January	2026
Accepted	21	January	2026

Keywords:

Silver streaks
Sequential injection molding
Bubble formation
Valve gate control
Hot runner system

ABSTRACT

Silver streaks, a major surface defect in sequential injection molding, are closely associated with unstable bubble formation within the polymer melt during the filling stage. This study investigates the effects of sequence valve gate operation on silver streak formation using injection molding simulations. Flow rate, pressure, and temperature conditions were quantitatively analyzed in the hot runner manifold and valve gate regions under three different sequence conditions. The results showed that overlapping gate-opening conditions were associated with pressure instability and backflow, whereas a sequential opening-and-closing conditions improved flow stability and reduced residual melt accumulation. Furthermore, pressure-volume-temperature (pVT) diagram analysis indicated that pressure release in the range of 30-150 MPa was accompanied by significant specific volume expansion. These findings demonstrate that silver streaks can be closely related to pressure-induced thermodynamic instability, and suggest the optimization of sequence valve gate control as an effective process design approach for improving surface quality.

1. 서론

사출성형은 열가소성 수지를 고온·고압 조건에서 금형 내부로 주입하여 복잡한 형상의 정밀 플라스틱 제품을 대량 생산할 수 있는 제조 공정이다^[1]. 그러나 공정 조건과 형상 복잡성에 따라 다양한 표면 결함이 발생하며, 이는 제품의 외관 품질을 저하시켜 불량

품을 발생시킨다^[2]. 일반적으로 사출성형품의 주요 표면 결함은 은선(silver streaks), 흐름 자국(flow marks), 광택 불균일(gloss defects)^[3, 4], 기포(bubbles) 등이 있으며, 이러한 결함들은 재료 특성, 금형 구조 및 사출 조건의 복합적 영향으로 발생한다.

이 중 은선 결함은 사출성형 공정에서 빈번하게 발생하는 대표적인 외관 불량이다. 가소화 과정에서 펠릿 간 공극을 통해 기체가

* These authors contributed equally to this work.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8086-6347

E-mail address: php@mobis.com (Hyungpil Park).

* Corresponding author. Tel.: +82-55-924-0134

E-mail address: jgim@kitech.er.kr (Jinsu Gim).

용융수지에 혼입된다. 플라스틱 소재는 잔류 수분 및 저분자 첨가제 등을 함유하고 있다. 용융온도의 고온 환경에서 이러한 수분 및 저분자 화합물이 기화되고, 혼입된 기체가 용융수지 내부에 미세 기포를 형성한다. 형성된 기포는 용융수지가 금형 내부로 유동하는 과정에서 유동 방향을 따라 신장되거나 파열되며, 제품 표면에 은색 줄무늬 형태의 결함으로 나타난다. 특히 사출성형 중 급격한 사출속도 및 압력 변화로 기포가 불안정해질 경우, 은선 결함이 더욱 두드러지게 발생한다.

기포의 생성 및 소멸 거동에 관한 기초 연구로는 Chen 등이 제안한 기포 발생·소멸 시 압력 측정 장비 연구^[5]와 Tobias 등이 수행한 평형 유리 셀 기반 시각화 연구^[6]가 보고된 바 있다. 이러한 연구들은 주로 발포성형 공정^[7]을 중심으로 수행되었다. 은선 결함과 관련된 기존 연구는 재료 건조 조건^[8], Gas Counter Pressure(GCP) 적용 효과 등에 초점을 맞추고 있으며, 일부 연구에서는 가시화 금형^[9], 금형 내 압력 센서^[10] 및 인공지능 기반 예측 기법^[11]을 활용한 불량 분석이 시도되었다. 그러나 사출성형 충전과정 중 기포의 형성부터 은선 결함으로 이어지는 연속적인 메커니즘을 공정 조건과 연계하여 정량적으로 분석한 연구는 여전히 제한적인 상황이다.

본 연구에서는 핫러너 밸브 게이트를 순차적으로 개방하는 시퀀스(sequence) 사출성형 공정에서 발생하는 은선 결함의 형성 메커니즘을 규명하고, 공정 조건이 외관 품질에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 시퀀스 밸브 게이트 작동 방식에 따른 유동, 압력 및 온도 변화를 비교 분석하고, 이러한 공정 변수들이 기포 발생 및 은선 결함 형성에 미치는 영향을 체계적으로 고찰함으로써 은선 결함 억제를 위한 최적 공정 조건을 도출하는 것을 목적으로 한다.

2. 사출성형 공정 중 기포 형성과 파열 메커니즘

사출성형 공정 중 기포는 용융수지 내부에 존재하는 잔류 수분, 저분자 첨가제의 분해가스, 소재에 혼입된 공기 등의 기체 성분이 공정 조건 변화에 의해 과포화 상태로 전이되면서 형성된다. Fig. 1은 이러한 공정 조건 변화에 따른 기포 형성 메커니즘을 나타낸다. 특히 대면적 또는 대형 부품을 성형하는데 주로 사용되는 시퀀스 사출성형 공정^[12]에서, 게이트를 순차적으로 개방할 시에 발생하는 급격한 압력 강하는 용융수지 내부에 존재하는 기체의 비체적을 증가시켜 기포 형성을 유도하는 주요 원인으로 작용한다. 이러한 현상은 열역학적 불안정성에 기인하며, 발포 사출성형과 유사한 거동^[13]을 보이지만 사출성형 공정에서는 의도되지 않은 압력 변동으로 영향으로 외관 품질 저하를 발생시키는 점에서 차이가 있다.

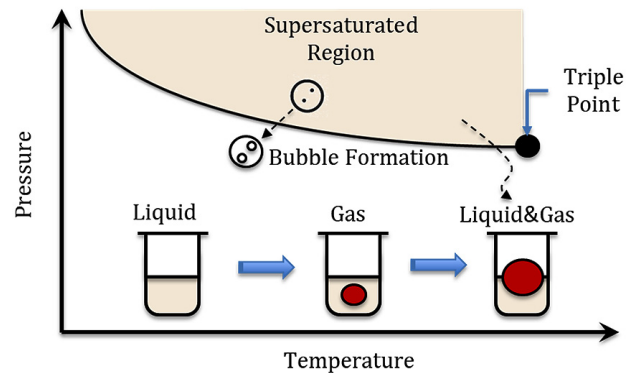


Fig. 1 Bubble formation mechanism in injection molding process

보다 구체적으로는, 시퀀스 밸브 게이트에서 1차 이후의 게이트의 경우, 개방 전 내부 압력은 노즐압력(사출압)에 가깝다. 핫러너 매니폴드의 직경이 매니폴드 내에서의 유동저항을 최소화하기 위해 되도록 두껍게 설계되기 때문이다. 그러나, 게이트 개방 시점에서 용융수지 유동선단이 게이트에 도달하기 때문에 해당 게이트 부분의 캐비티의 국부 압력의 경우 대기압의 상황이다. 따라서 개방 직전에는 매니폴드와 캐비티 간의 압력차이는 게이트 앞뒤의 가까운 물리적 거리임에도 불구하고 노즐압력만큼 발생하게 된다. 그러다 게이트가 개방되게 되면 해당 압력 차이에 의하여 용융수지가 급격히 주입되게 되고, 매니폴드 압력 또는 사출압력이 하강하여 과도한 압력차이가 해소되고 유동 선단 속도가 안정화될 때까지 매니폴드 압력은 급격히 감소하게 된다. 따라서 급격히 감소하는 압력에 의하여 용융수지 내에 용해되어 있는 기체가 용출되어 기포를 형성하게 된다. 해당 압력 강하 과정에서 용출된 기포의 경우 열역학적으로 압력이 오르면 용해도가 상승하여 다시 용융수지에 용해될 수는 있으나, 용해되기까지의 시간이 필요하다. 그러나 짧은 충전과정과 보압과정의 시간이 용출된 기포를 용해시키기에는 시간이 부족할 뿐만 아니라, 이미 금형과 접촉한 용융수지는 고화가 진행되어, 최종적으로 용출된 기포가 표면에 고착화 되게 된다.

특히 기포 형성 이후의 거동은 사출성형 중의 유동 특성에 의해 크게 좌우된다. 용융수지는 금형 충전 시 유동 중심부에서 빠르게 전진하고, 금형 벽면 인근에서는 상대적으로 느리게 흐르므로, 유동 선단에서는 유동 중심부의 유체가 금형 벽면으로 이동하는 분수 유동(fountain flow)을 보인다^[14]. 이로 인해 용융수지 내부에 형성된 기포는 충전 과정 중 금형 표면 방향으로 이동하게 되며, 표면 인근에서 팽창하거나 파열되면서 은선과 같은 외관 결함을 발생시킨다.

Fig. 2는 충전 과정에서 유동 방향으로의 압력 구배와 기포 내부의 압력 차이가 기포의 파열에 미치는 영향을 나타낸다. 기포의 파열은 기포 내부 압력과 외부 압력 간의 차이로 인해 발생한다.

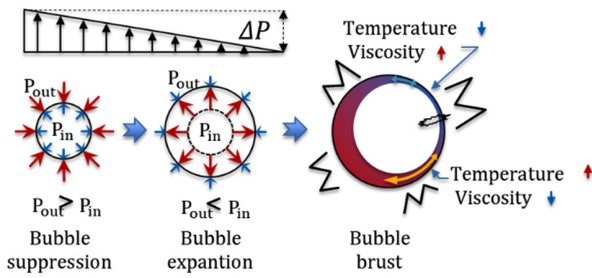


Fig. 2 Bubble burst caused by pressure difference between internal and external pressures

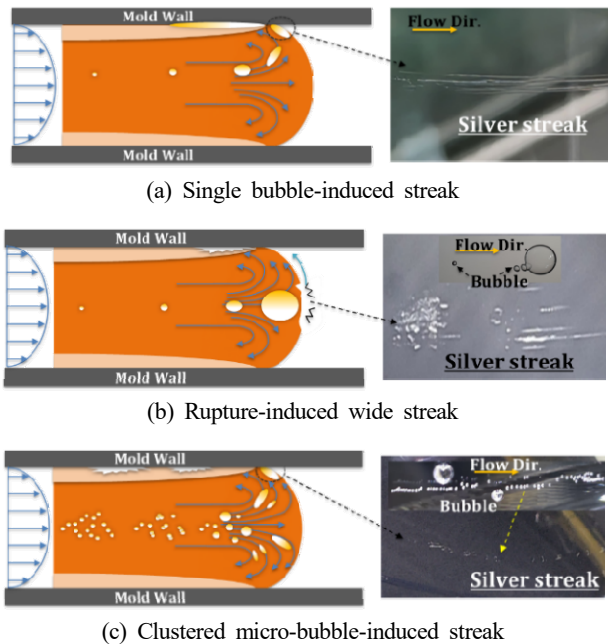


Fig. 3 Types of silver streaks by bubble formation and growth

외부 압력이 급격히 저하될 경우 기포는 급격히 팽창하며, 이 과정에서 기포 벽면에는 인장응력이 작용한다. 기포 벽면에 발생하는 응력이 재료의 기계적 물성 한계를 초과하면 기포는 붕괴 또는 파열에 이르게 되며, 이러한 현상은 주로 충전 과정 중 인장응력이 형성되는 유동 선단 영역에서 관찰된다. 또한 일부 기포는 안정적인 성장 단계에 도달하기 이전에 고전단 영역이나 국부적인 압력 불안정에 의해 즉각적으로 파열되기도 한다.

기포의 생성 및 성장 방식에 따라 은선 결함은 Fig. 3과 같이 세 가지 유형으로 분류할 수 있다. Fig. 3(a)는 단일 기포가 금형 표면으로 이동한 후 고화 과정 중 신장 또는 파열되면서 형성되는 “선형 은선”, Fig. 3(b)는 과도하게 성장한 기포가 유동 선단부에서 파열되며 형성되는 “넓은 영역 은선”, 그리고 Fig. 3(c)는 다수의 미세 기포가 군집 형태로 존재하며 반복적으로 형성되는 “점상 은선”이 이에 해당한다. 이러한 기포 거동에 대한 이해는 은선 결함 발생 메커니즘을 이해하고, 공정 조건 설계 및 제어를 위한 중요한 실험적 근거를 제공한다.

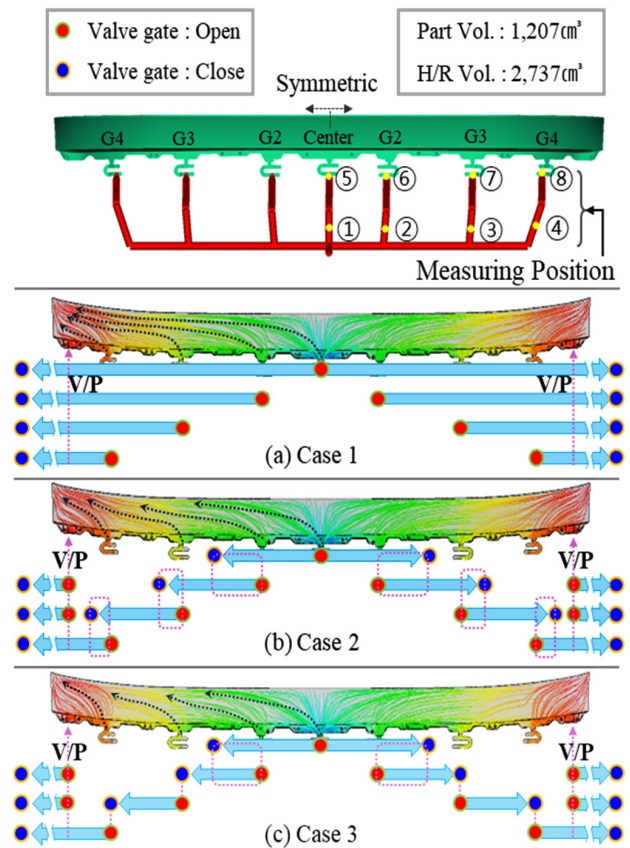


Fig. 4 Valve gate sequence configurations: Case 1, 2, and 3

3. 사출성형 시뮬레이션을 통한 은선 형성 분석

은선 형성 분석에는, 은선과 같은 표면 불량에 품질에 대단히 큰 영향을 미치는 제품 형상을 선정하여 적용하였다. 분석 대상 부품은 자동차 센터 램프 부품이며, 핫러너 매니폴드 및 밸브 게이트 각 구간에서의 성형 거동을 정량적으로 비교 분석하였다.

사출성형 시뮬레이션에는 Autodesk Moldflow 2019를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 재료는 폴리카보네이트(polycarbonate, PC) 수지인 TRIREX 3022L1-I3 (Samyang Corp., Korea)이다. 모든 시퀀스 조건에 대해 동일한 성형 조건을 적용하였다. 용융 수지 온도는 290°C, 금형 온도는 90°C로 설정하였고, 사출속도는 30 mm/s로 고정하였다 (스크류 직경 105 mm). 보압은 50 MPa에서 3초간 유지하였으며, 이후 냉각 시간은 30초로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시퀀스 밸브 게이트 조건은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 세 가지로 구분하였다.

첫 번째 조건(Case 1)은 모든 밸브 게이트를 순차적으로 개방한 후 보압 종료 시점까지 모든 게이트를 개방 상태로 유지한다. 두 번째 조건(Case 2)은 밸브 게이트를 순차적으로 개방하고, 일정 구간에서 게이트 개방 상태가 중첩된 이후 일부 게이트를 순차적

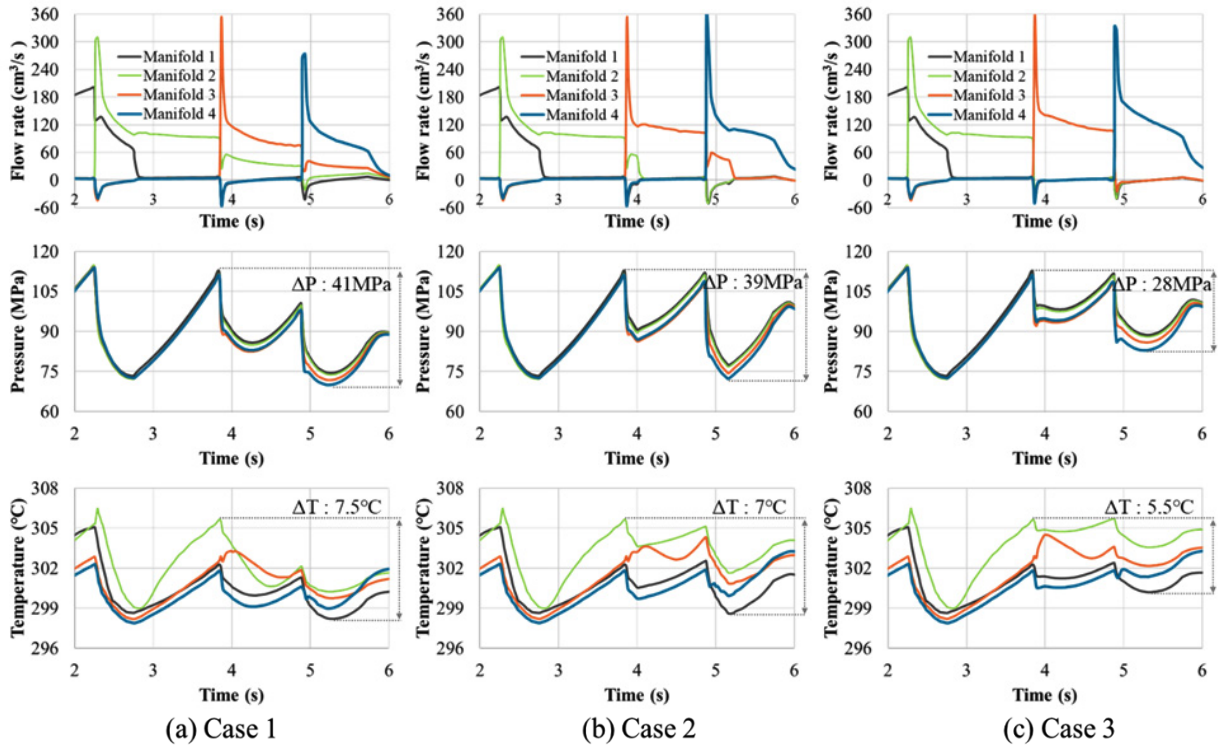


Fig. 5 Variation of flow rate, pressure, and temperature in the manifold regions for cases 1~3

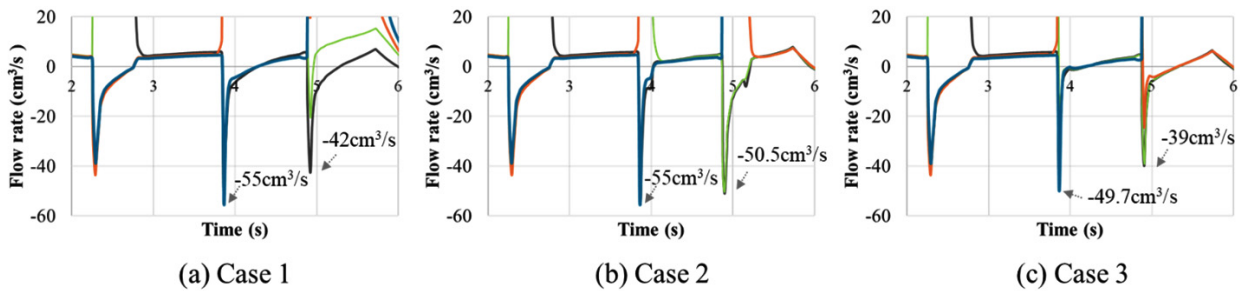


Fig. 6 Detailed view of flow rate range(-60~20 cm³/s) in the manifold regions for cases 1~3

으로 폐쇄한다. 세 번째 조건(Case 3)은 밸브 게이트를 순차적으로 개방함과 동시에, 앞서 개방된 게이트를 단계적으로 폐쇄한다. 모든 조건에서 보압 절환 이후에는 모든 밸브 게이트를 개방 상태로 유지하여 보압 과정 동안 소재의 냉각으로 인한 수축을 보상하도록 설정하였다.

3.1 핫러너 매니폴드 구간의 유동·압력 변화 분석

핫러너 매니폴드는 용융 수지를 각 밸브 게이트로 분기시키는 역할을 수행한다. 매니폴드 내에 위치한 용융수지의 유동은 밸브 게이트 작동 조건에 따라 급격히 변동한다. 이에, Fig. 4에 제시된 매니폴드 1~4번 측정 위치에서의 시뮬레이션 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 조건에서 충전이 시작되는 센터 게이트의 개방 조건은 동일하므로, 충전 초기 구간에서는 유량, 압력 및 온도 변화가 유사하게 나타났다. 이에 따라 본 절에서는 충전 개시 이후 약 2~6

초 구간을 중심으로 결과를 비교 분석하였다.

시뮬레이션 결과, 모든 조건에서 시퀀스 밸브 게이트가 개방되는 시점에 매니폴드 구간에서 급격한 음의 유량이 나타났다. 이는 일시적인 역류 현상을 의미하며, 매니폴드 내부에 높은 압력이 형성된 상태에서 밸브 게이트 개방 순서 차이에 의해 게이트 간 압력 구배가 반대로 형성되고, 그 결과 유동 반전이 유도된 것으로 판단된다. 또한 게이트 개방 직후 매니폴드 내부 압력이 급격히 해소되면서 토출 유량이 순간적으로 증가한 후 빠르게 감소하는 경향을 보였다. 이러한 조건에서 급격한 유량 변화는 고전단 영역을 형성하여 전단 응력이 증가하고, 이로 인해 용융수지 내부에 잔류한 기체가 기포로 전환될 가능성이 증가할 수 있는 것으로 해석된다.

Fig. 6은 각 조건에서 유량 범위 20~60 cm³/s에 대한 상세 그래프를 나타낸다. 밸브 게이트가 순차적으로 개방된 후 충전 과정 중 폐쇄되지 않고 개방 상태가 유지되거나 중첩되는 Case 1과

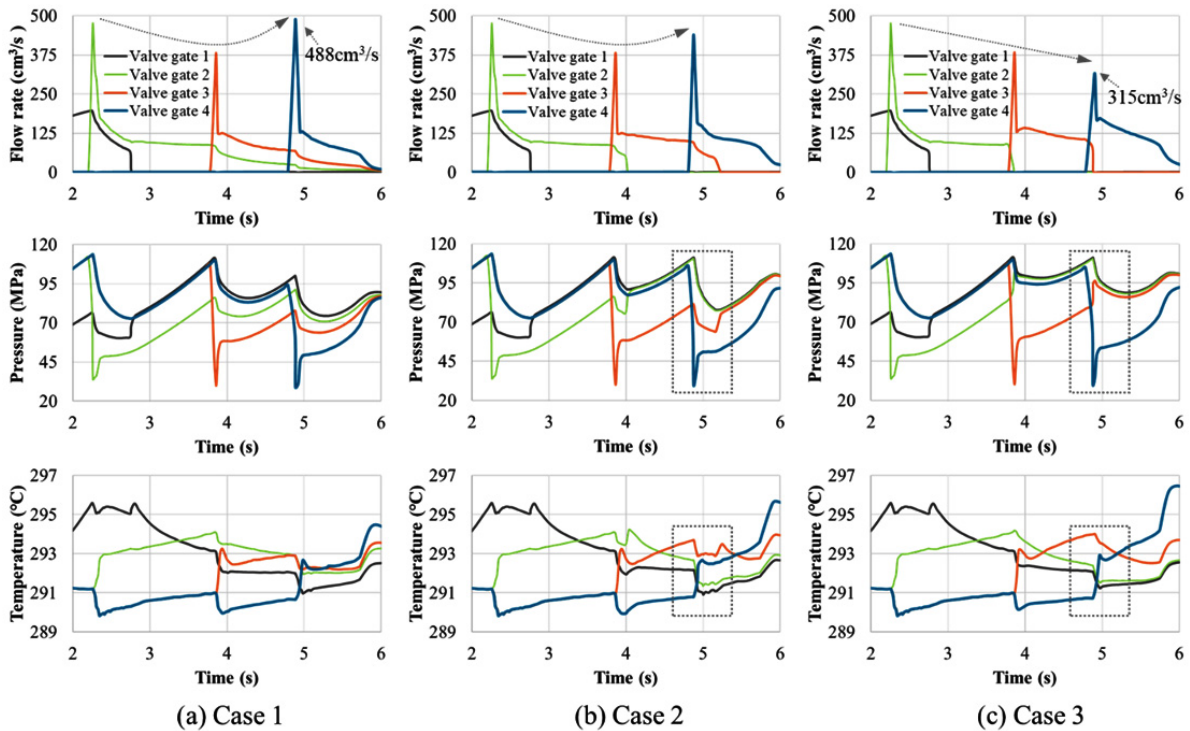


Fig. 7 Variation of flow rate, pressure, and temperature in the valve gate regions for cases 1~3

Case 2에서는 매니폴드 내 음의 유량이 Case 3보다 크게 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 5의 압력 변화에서도 동일하게 관찰되며, Case 1의 압력 편차는 약 41 MPa인 반면 Case 3에서는 약 28 MPa로 약 31.7% 감소하였다. 이러한 결과는 Case 3에서 밸브 게이트의 개방 및 폐쇄 시점을 분산시킴으로써 압력 변화를 완화하고 음의 유량을 줄였기 때문으로 해석된다. 또한 유량과 압력의 변화는 용융수지의 전단율 변화에 따른 점성 발열과 압력에 의한 체적 압축 및 팽창을 유발하여 내부 에너지 변화를 발생시키며, 이는 온도 변화에 영향을 미친다. 특히 Case 3 조건은 이러한 온도 변화를 줄이는 효과를 나타냈다.

3.2 밸브 게이트 구간의 유동·입력 특성

밸브 게이트는 용융수지가 캐비티로 직접 유입되는 최종 구간으로, 충전 과정의 안정성과 제품 외관 품질에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 금형의 핵심 요소이다. Fig. 7은 Fig. 4에 제시된 밸브 게이트 5~8번 측정 위치의 시뮬레이션 결과이다. 매니폴드 구간과 달리, 밸브 게이트 측정 위치에서는 게이트 개방 이후 뚜렷한 역류 현상은 관찰되지 않았다. 그러나 Case 1과 Case 2는 일부 밸브 게이트(G3, G4)에서 상대적으로 낮은 유량이 나타났으며, 게이트 간 유량 피크의 불균형이 비교적 크게 나타났다. 이는 매니폴드 내부 압력 분포 차이와 게이트 개방 시점 차이에 의해 각 게이트로 유입되는 용융 수지의 유동 조건이 상이하게 형성되었기 때문으로 판단된다. 또한 온도 변화는 매니폴드 영역에 비해 상대적으로 작

았으나, 순차적 밸브 게이트 개방 시 폐쇄되지 않은 밸브 게이트에서 압력 변화 영향에 의한 온도 변화 현상이 매니폴드의 온도 변화에서 관찰되었던 현상과 동일하게 발생되었다. 반면, Case 3에서는 모든 밸브 게이트에서 유량 분포가 비교적 균일하게 유지되고, 유량 피크 또한 완만하게 형성되는 경향을 보였다. 특히 밸브 게이트(G4)의 개방 시 유량 피크는 Case 1에서 488 cm³/s로 높게 형성되었으나, Case 3에서는 315 cm³/s로 약 35.5% 감소하였다. 이는 전체 조건 중 Case 3가 유동 안정성이 가장 높은 상태를 형성했을 가능성을 시사한다. 따라서 밸브 게이트 개방 및 폐쇄 시점을 단계적으로 분산시키는 시퀀스 제어가 게이트에서의 유동 안정성 확보에 효과적으로 작용할 수 있음을 의미한다.

3.3 밸브 게이트별 사출량 분배 및 체류비 분석

본 연구에 적용된 핫러너 시스템의 내부 체적은 약 2,737 cm³로, 제품 체적(1,207 cm³)에 비해 약 2.3배에 해당한다. 이러한 구조에서는 각 밸브 게이트별 사출량을 균일하게 유지하는 것이 핫러너 내부에 잔류하는 용융 수지의 체류 시간을 감소시키고, 수지의 열화 및 내부 기포 발생 가능성을 억제하는 데 중요할 수 있다.

Table 1은 시퀀스 조건에 따른 각 밸브 게이트의 사출량(injection volume, IV)과 체류비(residual melt fraction, RMF)를 분석한 결과이다. 사출성형 시뮬레이션 결과, Case 1에서는 밸브 게이트 간 사출량 편차가 가장 크게 나타났으며, 특히 G4 게이트의 사출량은 99 cm³로 가장 낮은 값을 보였다. 이 조건에서 체류비는 3.5

Table 1 Comparison of injection volume (IV) and residual melt fraction (RMF) for each condition

Design volume (cm ³)		Center	G2	G3	G4
Case 1	IV(cm ³)	259.7	244.6	139.8	99.05
	RMF	1.66	1.52	2.89	3.50
Case 2	IV(cm ³)	259.7	201.8	146.9	127.7
	RMF	1.66	1.85	2.75	2.72
Case 3	IV(cm ³)	259.7	182.9	140.2	146.3
	RMF	1.66	2.04	2.88	2.37

로, 핫러너 내부에 용융 수지가 상대적으로 장시간 잔류할 가능성이 높은 조건으로 판단된다. Case 2에서는 G4 게이트의 사출량이 다소 증가하는 경향을 보였으나, 게이트 간 사출량 불균일성은 여전히 존재하는 것으로 나타났다. 반면, Case 3에서는 G4 게이트의 사출량이 146 cm³로 증가하였으며, 체류비는 2.37로 감소하였다. 또한 전체 밸브 게이트의 사출량 분포가 비교적 균일하게 유지되어, 핫러너 내부 잔류 용융 수지가 감소할 가능성이 있는 조건으로 평가되었다.

이러한 시뮬레이션 결과는 밸브 게이트의 개방 및 폐쇄 타이밍을 적절히 제어하는 시퀀스 전략이 게이트별 사출량 균일성 확보와 체류비 감소에 기여할 수 있으며, 결과적으로 수지 열화 및 기포 발생 가능성을 억제하는 데 유의미한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

4. 기포 발생 메커니즘의 열역학적 시뮬레이션

고분자 수지는 압축성을 가지므로 압력이 증가하면 비체적이 감소하고, 압력이 급격히 감소할 경우 비체적이 증가한다. 핫러너 내부에 잔류한 용융수지에 고온·고압 조건에서 기체가 용해되어 있는 경우, 압력의 급격한 하강은 용해된 기체를 과포화 상태로 전이시켜 기포 형성을 유도할 가능성이 있다. 이러한 온도와 압력 조건의 변동은 압력-체적-온도(pvT) 거동은 modified two-domain Tait 방정식을 통해 정량적으로 해석할 수 있다. 이는 고분자 재료의 비체적을 온도 및 압력 함수 관계로 나타내며, 아래의 식(1)과 같이 표현한다^[14, 15].

$$v(T, p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] \quad (1)$$

여기서, $v(T, p)$ 는 온도와 압력에 따른 비체적을 나타내며, v_0 는 대기압 상태에서 비체적, T 는 온도, p 는 압력, C 는 기체상수, 그리고 B 는 압력 민감도함수를 나타낸다.

시퀀스 밸브 게이트 작동 시 매니폴드에서 발생하는 압력 변화가 수지의 비체적 변화에 미치는 영향을 분석하기 위해, Tait 방정

Table 2 Parameters of the modified two-domain Tait equation

Parameter	Unit	Value
Melt density	g/cm ³	1.032
Solid density	g/cm ³	1.1804
b5	K	416.98
b6	K/Pa	4.346E-07
b1m	m ³ /kg	0.0008725
b2m	m ³ /kg-K	5.986E-07
b3m	Pa	165928000
b4m	1/K	0.004295
b1s	m ³ /kg	0.0008725
b2s	m ³ /kg-K	2.135E-07
b3s	Pa	264289000
b4s	1/K	0.002398
b7	m ³ /kg	0
b8	1/K	0
b9	1/Pa	0

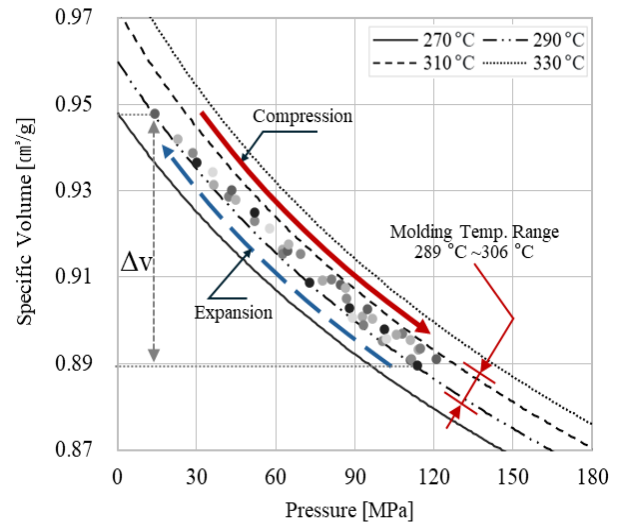


Fig. 8 pvT diagram of resin specific volume at different isothermal conditions with pressure-temperature overlays from manifold positions

식을 온도별 압력 변화에 따른 비체적 변화 관계로 변환하여 적용하였다. Table 2에는 시뮬레이션에 사용된 소재의 pvT 모델의 각 계수를 나타낸다. Fig. 8은 매니폴드의 각 위치별로 측정된 압력-온도 조합을 곡선 상에 중첩하여 수지의 체적 변화에 대해서 270, 290, 310, 330°C의 등온 조건에 대한 pvT 그래프를 도시하였다.

사출성형 시뮬레이션 결과, 매니폴드 내부 온도는 약 289-306°C 범위로 분포하였으며, 압력은 30-150 MPa 범위에서 변화하는 것으로 나타났다. 이 구간에서 계산된 최대 비체적 변화량은 약 0.06 cm³/g (6%) 이상으로, 이는 압력 하강 시 용융수지가 급격히 팽창하고 내부 기체가 기포화될 가능성이 높은 열역학적 조건에

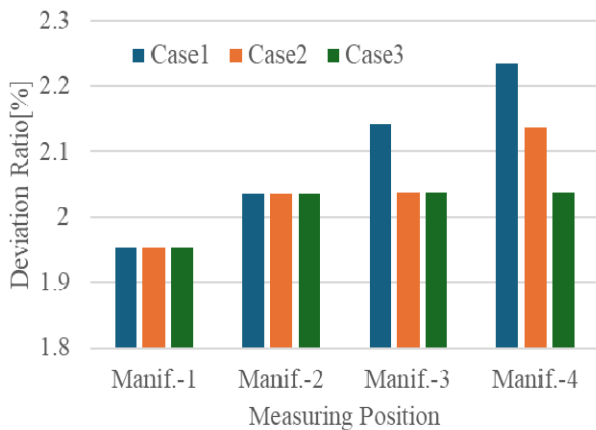


Fig. 9 Specific volume change by sequence conditions at manifold locations

해당한다.

매니폴드 구간은 고온·고압 조건으로 인해 용융수지 내 기체 용해도가 상대적으로 높은 상태를 유지할 수 있으나, 밸브 게이트 개방 시 압력이 급격히 감소하면서 기체 용해도는 빠르게 저하될 수 있다. 이로 인해 용해 상태에 있던 기체가 단시간 내 기포로 전환될 가능성이 있다. 또한 이러한 100 MPa (1,000 bar) 수준의 압력 하강은 작은 기체 용출량이라도, 그 부피를 약 1,000배 팽창시키므로써 기포를 형성하는데 기여한다. 시뮬레이션 결과에 기반할 때 이러한 기포 거동이 충전 과정 중 유동을 따라 성형품 표면 방향으로 이동하여 은선 결합 형성과 연관될 수 있음을 시사한다. 또한 시퀀스 조건별 비체적 변화율 분석 결과, 게이트 개방이 중첩되는 조건에서는 일부 매니폴드 위치에서 국부적인 체적 불균일성이 크게 나타난 반면, 단계적 개방·폐쇄 조건에서는 전 위치에서 상대적으로 낮은 편차율이 유지되었다. 이는 압력 변동이 완전한 시퀀스 조건에서 열역학적으로 보다 안정적인 유동 상태가 형성될 가능성이 있음을 의미하며, 시퀀스 개방 타이밍이 기포 억제에 효과적으로 작용했음을 의미한다.

Fig. 9는 시퀀스 조건에 따른 Fig. 4의 매니폴드 1~4 측정 위치에 대한 비체적 변화율(deviation ratio) 그래프를 나타내고 있다. Case 1은 매니폴드 3 및 매니폴드 4 위치에서 각각 2.15%와 2.25%의 높은 비체적 변화 편차율을 나타냈으며, 이는 압력 손실과 온도 저하가 동시에 발생하여 국소적인 체적 불균일이 심화된 결과로 보인다. 반면 Case 3은 전 위치에서 낮은 편차율을 유지하였다. 이는 열역학적으로 가장 안정적인 유동 조건임을 의미하며, 시퀀스 개방 타이밍이 기포 억제에 효과적으로 작용했음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 시퀀스 사출성형 공정에서 발생하는 은선 결합의

형성 메커니즘을 고찰하기 위해, 밸브 게이트 작동 조건에 따른 유동, 압력 및 온도 거동을 사출성형 시뮬레이션과 열역학적 관점에서 종합적으로 분석하였다. 특히 시퀀스 밸브 게이트 개폐에 의해 발생하는 압력 변동이 기포 발생과 은선 결합 형성에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지를 정량적으로 검토하였다.

사출성형 시뮬레이션 결과, 밸브 게이트 개방이 중첩되는 조건에서는 매니폴드 내부의 압력의 변동으로 인해 유동의 역류 및 급격한 유량 변동이 나타났으며, 이러한 현상은 국부적인 압력 급강하와 게이트 별 사출량 편차를 유발할 수 있는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 이러한 유동 특성이 고전단 조건과 결합될 경우 용융수지 내부 기체의 기포화 가능성을 증가시킬 수 있으며, 시뮬레이션 결과에 기반할 때 이러한 기포 거동이 은선 결합 형성과 연관되어 나타날 수 있음을 보여준다. 반면, 밸브 게이트를 단계적으로 개방·폐쇄하는 시퀀스 제어 조건에서는 유량 및 압력 변화가 비교적 완만하게 유지되었으며, 밸브 게이트별 사출량 분포와 핫러너 내부 잔류 용융 수지의 체류비가 감소하는 경향을 보였다. 이는 시퀀스 제어를 통해 유동 및 압력 거동의 안정성을 확보할 수 있을 가능성을 의미한다. 또한 소재의 압력-체적-온도(pvT) 모델을 이용한 분석결과, 30-150 MPa 범위의 압력 하강은 최대 약 0.06 cm³/g (6%) 이상의 비체적 팽창을 형성하였으며, 이는 기체 과포화 및 기포 생성에 유리한 열역학적 조건을 형성할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 비체적 변화율 분석을 통해, 압력 변동이 상대적으로 완만한 시퀀스 조건에서 체적 불균일성이 가장 낮게 유지되는 경향을 정량적으로 확인하였다.

본 연구의 시뮬레이션 결과에 따르면, 시퀀스 사출성형 공정에서 은선 결합은 재료 특성보다는 밸브 게이트 작동에 따른 압력 변동 및 이에 수반되는 열역학적 불안정성과 연관되어 나타나는 경향을 보인다. 본 연구에서 제시한 단계적 시퀀스 밸브 게이트 제어 전략은 은선과 같은 기포 발생 가능성에 영향을 미치는 공정 조건을 완화하는 방향으로 작용할 수 있으며, 외관 품질 향상을 위한 공정 조건 설계에 유용한 근거를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.




후 기

본 연구는 현대모비스의 대형센터렌즈 품질 개선 과제 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구개발 유연생산기술연구개발사업(KITECH EH260011)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Menges, G., Michaeli, W., 2001, How to Make Injection

- Molds(Third Edition), Hanser, Newyork, <https://doi.org/10.3139/9783446401808.fm>.
- [2] Gim, J., Turng, L.-S., 2022, A Review of Current Advancements in High Surface Quality Injection Molding: Measurement, Influencing Factors, Prediction, and Control, *Polymer Testing*, 115 107718, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107718>.
- [3] Gim, J., Han, E., Rhee, B., Friesenbichler, W., Gruber, D. P., 2020, Causes of the Gloss Transition Defect on High-Gloss Injection-Molded Surfaces, *Polymers*, 12:9 2100, <https://doi.org/10.3390/polym12092100>.
- [4] Gim, J., Rhee, B., 2020, Generation Mechanism of Gloss Defect for High-Glossy Injection-Molded Surface, *Korea-Aust. Rheol. J.*, 32:3 183-194, <https://doi.org/10.1007/s13367-020-0018-1>.
- [5] Chen, S. C., Su, H., Hsu, T. J., Feng, C. T., Shen, E. N., Chang, C. W., 2022, Surface Improvements on Silver Streak Marks of Injection Molded Moisture Plastics Using Gas Counter Pressure and Plasticizing Optimization, *Materials Science Forum*, 1064 39-45, <https://doi.org/10.4028/p-6541c1>.
- [6] Schaible, T., Bonten, C., 2024, A Novel In-Line Measurement and Analysis Method of Bubble Growth-Dependent Strain and Deformation Rates during Foaming, *Polymers*, 16:2 277, <https://doi.org/10.3390/polym16020277>.
- [7] Deng, R., Jiang, T., Zhang, C., Zeng, X., Liu, B., Yang, J., Li, S., Gu, J., Gong, W., He, L., 2021, In-Situ Visualization of the Cell Formation Process of Foamed Polypropylene under Different Foaming Environments, *Polymers*, 13:9 1468, <https://doi.org/10.3390/polym13091468>.
- [8] Chen, S.-C., Su, H., Mathew, J. J., Gunawan, H., Huang, C.-W., Feng, C.-T., 2022, An Investigation to Reduce the Effect of Moisture on Injection-Molded Parts through Optimization of Plasticization Parameters, *Appl. Sci.*, 12:3 1410, <https://doi.org/10.3390/app12031410>.
- [9] Yokoi, H., Han, X., Takahashi, T., Kim, W. K., 2006, Effects of Molding Conditions on Transcription Molding of Microscale Prism Patterns Using Ultra-High-Speed Injection Molding, *Polym. Eng. Sci.*, 46:9 1140-1146, <https://doi.org/10.1002/pen.20519>.
- [10] Lee, J. W. S., Lee, R. E., Wang, J., Jung, P. U., Park, C. B., 2017, Study of the Foaming Mechanisms Associated with Gas Counter Pressure and Mold Opening Using the Pressure Profiles, *Chem. Eng. Sci.*, 167 105-119, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.04.005>.
- [11] Gim, J., Yang, H., Turng, L.-S., 2023, Transfer Learning of Machine Learning Models for Multi-Objective Process Optimization of a Transferred Mold to Ensure Efficient and Robust Injection Molding of High Surface Quality Parts, *J. Manuf. Process.*, 87 11-24, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.055>.
- [12] Kim, B., Gim, J., Turng, L.-S., Rhee, B., 2024, Optimization of Sequence Valve Gating (SVG) Injection Molding Based on Melt Front Detection (MFD), *J. Manuf. Process.*, 127 289-303, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.07.095>.
- [13] Tsvintzelis, I., Sanxaridou, G., Pavlidou, E., Panayiotou, C., 2015, Foaming of Polymers with Supercritical Fluids: A Thermodynamic Investigation, *J. Supercrit. Fluids*, 110 240-250, <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.11.025>.
- [14] Kennedy, P., Zhengm R., 2013, *Flow Analysis of Injection Molds*(2nd Edition), Hanser, Newyork.
- [15] Mark, J. E., 2009, *Polymer Data Handbook: Second Edition*, Oxford University Press, England, <https://doi.org/10.1093/oso/9780195181012.001.0001>.

	<p>Hyungpil Park Senior Manager, Hyundai Mobis. His research interests include injection molding, fluid-assisted injection molding, powder injection molding (PIM), blow molding, die/mold manufacturing technology, rapid tooling (RT), injection molding CAE, process monitoring and artificial intelligence (AI). E-mail: php@mobis.com</p>
	<p>Nam Hoon Lee Senior Manager, Hyundai Mobis. His research interests include injection molding, die/mold manufacturing technology. E-mail: 1622647@mobis.com</p>
	<p>Dong Wook Han Senior Manager, Hyundai Mobis. His research interests include injection molding, die/mold manufacturing technology. E-mail: 1626849@mobis.com</p>



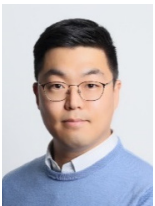
Huo Geun Kim

Senior Manager, Hyundai Mobis.
His research interests include injection molding, die/mold manufacturing technology.
E-mail: hyogeun.kim@mobis.com



Kyutek Yun

Senior Manager, Hyundai Mobis.
His research interests include intelligent manufacturing and automation system.
E-mail: yun9293@gmail.com



Jinsu Gim

Senior Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH).
His research interests include development of microcellular injection molding systems, autonomous manufacturing technology using in-process sensors and artificial intelligence (AI), rheokinetics, polymer/composite processing including molding, forming, joining/welding, and mold technology.
E-mail: jgim@kitech.re.kr