

물리발포제 상태도와 용융 수지 요소 추적 시뮬레이션을 통한 고압물리 초미세발포 사출성형 공정 분석 방법론

김진수^{a,*}, 전주형^b, 양성환^b, 황병관^c

Novel Analysis Methodology for High-Pressure Physical Microcellular Foaming Injection Molding based on Phase Diagram of Physical Blowing Agent and Melt Element Tracing Simulation

Jinsu Gim^{a,*}, Joohyeong Jeon^b, Sunghwan Yang^b, Byung Kwan Hwang^c^a Jinju Center, Dongnam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)^b Injection Molding Research Institute, LS Mtron^c Moldex3D Team, ETS-Soft

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 September 2025

Revised 19 September 2025

Accepted 24 September 2025

Keywords:

Microcellular injection molding

Foam injection molding

Physical blowing agent

Phase diagram

Molding simulation

ABSTRACT

Microcellular foaming utilizing highly pressurized physical blowing agent (PBA) is widely employed for the injection molding of lightweight, high-dimensional-quality parts. The cell foaming behavior is important for the quality of foam injection-molded parts, and the physical condition of the PBA provides crucial information on cell growth. In this study, the pressure-temperature (PT) history of melt elements is directly compared with the phase diagram of the PBA to propose a novel method that analyzes the simulation results of microcellular injection molding. The PT history of particle tracers from different final positions exhibited unique profiles, particularly in relation to the thickness and flow length directions. Each PT history can be directly correlated to the phase change of the PBA and is useful for understanding positional differences in cell growth conditions.

1. 서론

1.1 연구 배경

발포 사출성형(foam injection molding, FIM)은 사출성형 제품 내부에 기공(발포셀)을 형성하는 공정으로, 다양한 공정상의 이점을 가진다. 기본적으로 사출품 내부에 형성된 기공으로 인하여 제품 경량화 및 원재료 절약의 효과가 있으며, 성형과정 중 발포셀의 팽창에 의하여 용융수지의 냉각에 의한 수축이 보상되기 때문에 보압과정을 생략할 수 있다. 보압과정의 생략은 사이클 타임 단축

의 추가적인 공정상의 이득을 가져올 수 있다. 또한 발포셀의 팽창으로 인한 수축 보상은 치수정밀도 향상과 더불어 수축에 의한 싱크마크(sink mark) 및 후변형(warpage) 등을 억제할 수 있다. 발포셀로 인한 내부 morphology 변화는 사출품의 연성(ductility)을 증가시키는 효과 또한 기대할 수 있다^[1].

발포사출 공정은 발포제(blowing agent)의 종류에 따라 물리발포(physical foaming)와 화학발포(chemical foaming)로 나눌 수 있다. 물리발포는 주로 질소, 이산화탄소 등의 불연성 기체인 물리발포제(physical blowing agent, PBA)를 용융수지에 용해시켜

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

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

PBA-용융수지 1상 혼합물(PBA-melt 1-phase solution)을 금형 내로 주입함으로써 발포를 일으키는 공정이다. 대표적으로 초임계(supercritical state, SC)상태의 PBA(SC-PBA)를 사출성형기 배럴에 설치된 인젝터로 주입하고, 혼련(mixing)부를 포함하는 스크류를 이용하여 용융수지와 PBA를 혼합하는 MuCell (MIT, and Trexel) 공정이 산업적으로 널리 사용된다^[2,4]. 이 밖에도 SC-PBA의 주입 방법에 따라, 노즐 내부의 다공성 슬리브(sleeve)와 정적 믹서(static mixer)를 사용하는 OptiFoam (Sulzer Chemtech, and IKV)^[5-7], 동적 믹서와 플런저 타입의 추가 사출 모듈을 사용하는 Ergocell (Demag)^[7], 사출 유닛의 수지 공급부(hopper)에 고압 챔버를 설치하여 고상 소재에 PBA를 확산시켜 주입하는 ProFoam (IKV) 및 IQ Foam (Ku-Fizz, Volkswagen)^[8-10], 소재의 펠렛타이징(pelletizing)과정에서 SC-PBA를 압축기에 주입하고 용융수지를 급냉하여 PBA를 포함하는 펠렛(gas-laden pellet)를 활용하는 SIFT (supercritical fluid-laden pellet injection molding foaming technology)^[11,12] 등이 개발되어왔다.

최근 전기자동차와 드론 등의 미래 모빌리티 부품의 경량화 수요에 따라 발포 사출성형과 응용기술이 주목받고 있다. 특히 2004년에 Turng이 제안한 발포 co-injection 공정^[13,14]은 표면층에는 일반 고상층, 내부 코어는 발포층의 하이브리드 구조를 성형할 수 있다. 이는 발포사출품의 표면품질 이슈를 해소하면서도 발포사출의 이점을 가지는 공정으로, 발포사출 공정의 외관부품 적용을 가능하게 한다. 따라서, 발포사출 공정의 적용 부품군과 관련 장비 및 부품 시장의 확대가 예상되고 있다.

물리발포 사출공정에서 발포셀의 생성은 SC-PBA 포함 용융수지의 물리적 조건에 따른 현상이기 때문에 사출기 노즐에서부터 캐비티 충전 과정에서의 온도와 압력의 이력이 중요하다. 발포셀의 핵 생성 및 셀 성장과 관련한 모델이 Moldex3D와 같은 사출성형 시뮬레이션 소프트웨어에 적용되어 발포사출품의 셀 크기(cell size)와 단위부피당 셀 갯수(cell density)에 대한 예측을 수행할 수 있다. 여기서 더 나아가 발포 co-injection 공정과 같은 응용기술을 개발하기 위해서는 SC-PBA 포함 용융수지의 금형 충전과 냉각 과정에서의 압력과 온도 이력에 따른 PBA의 상변화에 대한 이해가 필요하다.

본 연구는 발포사출 시뮬레이션에서 각 용융수지 요소(melt element, ME)의 압력과 온도 이력을 통해 발포셀의 형성 과정을 설명하는 새로운 방법론을 제안한다. 사출성형 시뮬레이션에서의 입자 추적(particle tracing)과 PBA의 상태도(phase diagram)를 통하여 캐비티로 주입되는 용융수지의 발포 상황을 분석하고자 한다. 이를 기반으로 두께방향 및 유동방향 위치에 따른 발포셀의 차이를 설명할 수 있다. 본 방법론은 향후 발포 co-injection 공정

의 최적화 및 multi-PBA를 활용한 복합 발포사출 공정의 설계에 활용 가능할 것으로 예상된다.

2. 방법론

제안하는 방법론은 발포사출 공정의 시뮬레이션 과정에서 입자 추적을 통하여 도출되는 용융수지 요소의 시간에 따른 위치, 압력 및 온도 이력을 PBA의 상태도에 도시함으로써 발포셀의 형성 과정을 설명한다. 상태도는 압력과 온도 조건에 따른 PBA의 상(phase)를 나타내기 때문에, 압력과 온도 이력을 상태도에 표현하면 용융수지에 포함되어 주입되는 PBA의 상태변화를 설명할 수 있다.

2.1 사출성형 공정 중 용융수지의 물리조건 이력

발포셀의 형성을 결정하는 가장 중요한 기준은 PBA의 임계점(critical point)를 정의하는 임계압력(critical pressure, P_c)과 임계온도(critical temperature, T_c)이다. 질소의 경우 $P_c = 34.1$ bar, $T_c = 126$ K (-147°C)이며, 이산화탄소의 경우 $P_c = 73.8$ bar, $T_c = 304$ K (31°C)이다. 임계압력과 임계온도 이상의 조건에서의 PBA의 용융수지에 대한 용해도의 압력 의존성 증가와 밀도 상승으로 인하여 SC-PBA는 용융수지에 다량 용해될 수 있으나, 초임계상태를 유지하지 못하는 조건에서는 용해도가 급격히 감소함에 따라 용융수지에서 PBA의 과포화 상태가 발생하여 용출이 시작되고 발포가 진행된다. 이를테면 사출성형 공정에서 가소화단계의 배압이 100 bar 이상으로 형성된다면, 혼련부(mixing zone) 및 계량부(metering zone) 내에서 질소의 초임계상태가 유지되어 용융수지 내에 SC- N_2 가 다량 용해될 수 있다. 그러나 충전단계에서 SC- N_2 를 포함하는 단상 용융수지 혼합물이 압력이 낮은 유동선단으로 이동하면, 용융수지에 가해지는 압력이 점차 임계압력 미만으로 감소함으로써 발포가 이루어지게 된다. 따라서, 발포과정을 구체적으로 이해하기 위해서는 용융수지 요소가 발포사출 공정 중 겪는 압력과 온도이력을 추적할 필요가 있다.

사출성형 공정에서 용융수지 요소는 금형으로 주입되는 시점에 따라서 상이한 압력과 온도 이력을 가진다. Fig. 1은 금형 주입 시점에 따라 상이한 위치로 이동하여 성형되는 용융수지 요소의 간소화된 압력과 온도 이력에 대한 예상을 나타낸다.

충전 초기에 주입된 용융수지 요소(Fig. 1, ①)는 용융온도와 낮은 사출압력 조건에서 노즐로부터 금형으로 주입되고, 유동선단으로 이동하면서 압력이 대기압까지 감소한 뒤, 최종적으로 게이트로부터의 유동거리 측면에서 게이트 인근 및 제품 두께 측면에서는 유동선단부(flow front)의 분수유동(fountain flow)에 의하여 금형과 바로 접촉하는 표면으로 이동함으로써 대기압

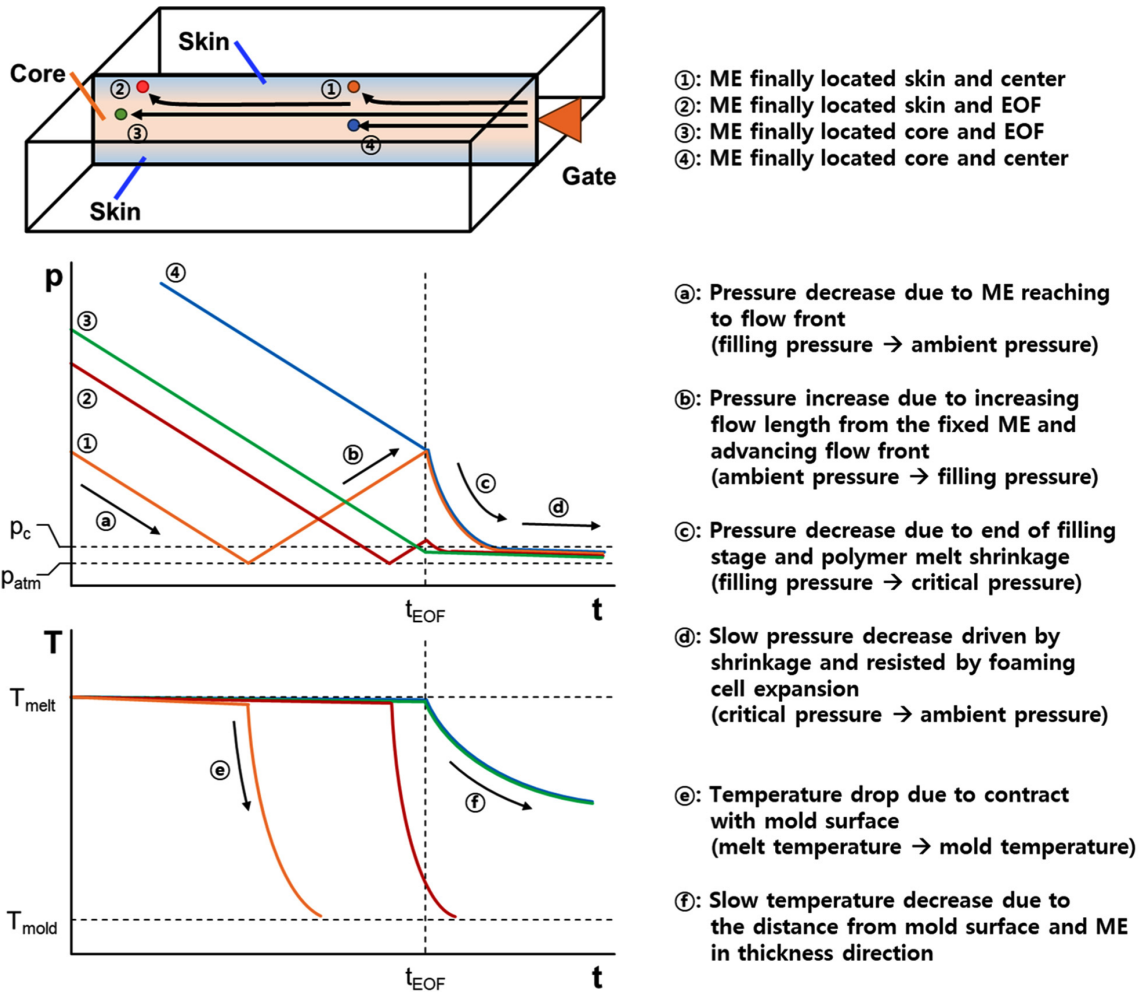


Fig. 1 Expected history of pressure and temperature of melt element injected into the cavity during physical microcellular foaming injection molding.

상황에서 급격한 냉각 상황에 놓인 후, 충전단계가 계속 진행되면서 해당 위치로부터 유동선단까지의 유동거리가 증가하면서 다시 압력이 증가하고 추가적인 냉각이 진행되는 압력 및 온도 이력을 겪을 것이다.

충전 중후반기에 주입된 용융수지 요소는 (Fig. 1, ②, ③) 용융 온도와 비교적 높은 사출압력 조건에서 노즐로부터 금형으로 주입 되고, 위와 유사하게 유동선단으로 이동하면서 압력이 대기압까지 감소한 뒤, 최종적으로 게이트로부터의 유동거리 측면에서 충전말 단부(end of filling, EOF)에 위치하게 되며 제품 두께 측면에서는 제품 표면에 위치함으로써 대기압 상황에서 급냉 상황에 놓일 것이다. 만약 해당 용융수지 요소가 제품 표면이 아니라 코어부에 위치하게 된다면 금형 표면과의 거리가 멀기 때문에 상대적으로 느린 속도로 냉각되게 될 것이다. 다만, 위와 달리 EOF에 위치하게 되는 용융수지 요소는 해당 위치로부터 유동선단이 더 이상 전진하기 않으므로 유동거리 증가로 인한 압력발달이 거의 이루어지지 않을 것이다.

충전 말기에 주입된 용융수지 요소(Fig. 1, ④)는 용융온도와 최대 사출압력 조건에서 노즐로부터 금형으로 주입된다. 이후, 유동선단 방향으로 이동함에 따라서 압력이 감소하나 유동선단에 노출되는 않으므로 대기압까지는 압력이 감소하지는 않으며, 동시에 해당 용융수지 요소가 금형과도 접촉하지 않게 되므로 급격한 냉각 상황에 놓이지 않으므로 온도가 서서히 감소하는 이력에 놓일 것으로 예상할 수 있다.

따라서 캐비티 또는 제품에서의 게이트로부터의 유동방향 및 두께 방향으로의 다양한 위치에 있는 수지요소는 각각 매우 상이한 압력과 온도 이력에 놓일 것이며, 해당 이력의 차이는 각 위치별 발포셀의 특성(크기, 밀도)에 직접적인 영향을 미칠 것이다.

사출성형 공정에서의 용융수지가 겪는 압력과 온도조건의 변화를 설명하는데 활용되는 pvT (pressure-specific volume-temperature) 선도 상에서의 압력 및 온도 변화 이력은 발포사출 공정에서의 발포셀 형성을 설명하기에 적절하지 않다. 일반적으로 사출성형 공정의 각 단계는 Fig. 2의 pvT 선도에서 표시된 대로,

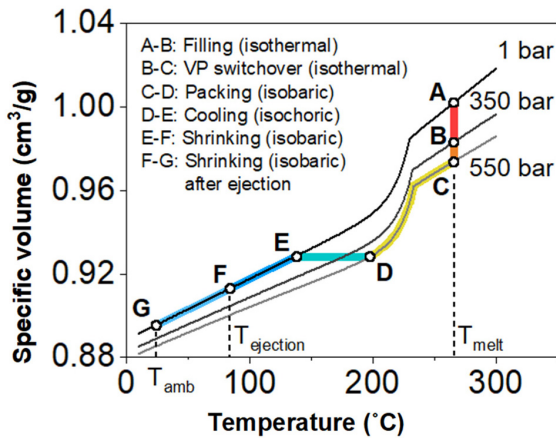


Fig. 2 Typical pressure and temperature history explanation of injection molding on pT diagram. (Note: T_{melt} = melt temperature, $T_{ejection}$ = ejection temperature, T_{amb} = ambient temperature)

충전 및 보압절환(VP switchover) 단계는 등온증압(isothermal pressurizing), 보압단계는 등압냉각(isobaric cooling), 금형 내 냉각단계는 등적냉각(isochoric cooling), 이후 수지의 수축은 등압냉각으로 표현된다. 하지만, 이러한 설명방법은 위에서 서술한 다양한 위치에 최종적으로 놓이게 되는 용융수지 요소 각각의 상이한 압력과 온도 이력을 설명하지 못하는 한계점이 있다. 또한 해당 압력과 온도 이력을 직접적으로 PBA의 상태도에 연관시키기 매우 어렵다. 따라서, 두 한계점을 해소하기 위해서는 다른 방식의 분석 방법이 필요하다.

2.2 용융수지 요소 별 입력 및 온도 이력 도출

발포사출 공정에서 용융수지 요소의 압력과 온도 이력을 도출하기 위하여 사출성형 시뮬레이션에 유체요소의 이동을 모사하는 particle tracing를 활용하였다. Particle tracing에서 모사되는 용융수지 요소는 시뮬레이션에서 용융수지 주입부 단면에서의 위치와 주입 시간에 따라 캐비티 내의 다양한 위치로 이동하는 이동하며 각 요소별로 압력과 온도 변화 이력이 추적된다.

발포사출 시뮬레이션을 위하여 Moldex3D (CoreTech System Co., Ltd., Taiwan)와 초미세발포 사출성형 해석 모듈이 사용되었다. 해석모델에는 $100 \times 40 \times 2$ mm (길이 \times 폭 \times 두께)의 판상 캐비티에 팬(fan) 게이트로 용융수지가 주입되는 간단한 해석 모델이 사용되었다. 사출성형 시뮬레이션에서의 메쉬 크기에 대한 결과의 영향을 억제하기 위하여 두께 방향으로 충분한 수의 메쉬를 생성하였다. 사출성형 시뮬레이션에서 유동의 전단변형이 큰 캐비티 표면부일 수록 메쉬 요소를 고밀도로 배치해야 하므로, 이를 위하여 Boundary Layer Mesh (BLM) 방식을 사용하였다. 전단변형이 주로 발생하는 표면의 Boundary Layer의 mesh는 총 22개 층

Table 1 Characteristic points of nitrogen

Characteristic point	Pressure (bar)	Temperature (°C)
Critical point	34.1	-147
Melting point	1.0	-210
Boiling point	1.0	-196
Triple point	0.125	-210

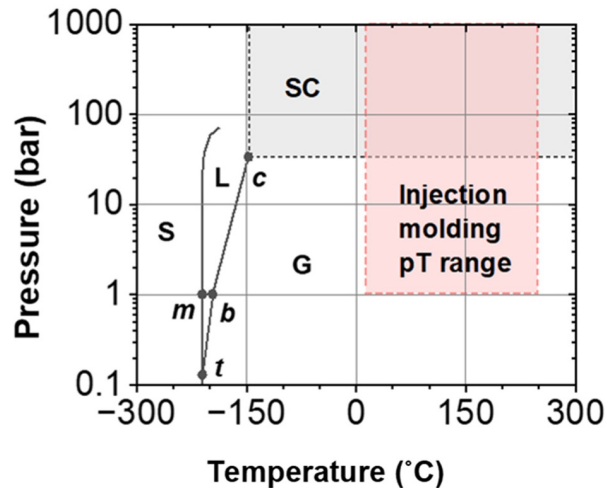


Fig. 3 Phase diagram of nitrogen, N_2 defined by characteristic points and pressure(p) and temperature(T) range of injection molding. (Note: S = Solid state, L = Liquid state, G = Gas state, SC = Supercritical state, m = melting point, b = boiling point, t = triple point, c = critical point, p = pressure, T = temperature)

을 설정하였다. 이는 본 연구에서 사용한 사출성형 시뮬레이션에서 사용 가능한 메쉬층의 최대 개수이다. 이를 반영하여 Full 3D mesh가 약 45만개 생성되어 시뮬레이션에 적용되었다. 소재 물성으로 Lupol HI 4352L (LG Chem Co., Ltd., Korea)의 소재물성 모델이 적용되어 성형 과정중 전단점도와 온도-압력에 따른 비체적 변화가 반영되었다. 주입되는 용융수지 초기 온도는 225°C , 금형 온도는 65°C 로 설정되었으며, 전체 충전 시간은 1.0 s, 냉각시간은 10.0 s를 부여하였다. PBA로 질소가 선택되었으며, 가스화된 용융수지의 PBA 함유량은 0.5%로 설정되었다. 충전과정의 종료는 캐비티 부피의 95% 충전 시 이루어졌다. 발포 셀 성장 모델로는 Han and Yoo 모델을 사용하였다.

용융수지 요소 모사에 스포루 시점의 용융수지 주입면에서 약 0.1 s마다 유체요소가 224개씩 주입되어 총 2,240개의 유체요소의 이력이 시뮬레이션 되었다. 용융수지 요소 각각의 시간에 따른 위치, 압력, 온도 등의 정보는 약 0.015 s마다 기록되었다. 충전과정 시뮬레이션의 시간간격(time step)은 0.001-0.004 s 범위에서 가변적으로 solver에 의하여 조절되었으며, 유동이 거의 일어나지 않는 충전 과정 이후의 경우 0.004-1 s 범위에서 가변적으로

조절되었다.

2.3 물리발포제 상태도

물리발포제의 상태도는 압력 및 온도에 따른 고체, 액체, 기체 상태를 구분하는 각 특성점을 통하여 간단하게 도출할 수 있다. 보다 상세한 상태도는 NIST 등에서 제공하는 물성 데이터를 참고하여 도출할 수 있다. Table 1은 초미세발포 사출공정에 주로 PBA로 사용되는 질소의 특성점의 압력과 온도를 나타낸다. Fig. 3은 Table 1을 참고하여 나타낸 질소의 상태도이다. 추후 용융수지 요소의 압력과 온도 이력을 함께 나타내기 위해서는 압력을 log 스케일에서 노즐압력의 대략적인 크기인 1,000 bar를 온도 범위의 상한으로, 온도 범위의 상한은 대략적인 용융수지 온도를 포함하는 300°C으로 설정하는 것이 바람직하다.

3. 결 과

3.1 용융수지 요소 별 최종 도달 위치

캐비티로 주입된 용융수지 요소는 주입시점에 따라서 다양한 유

동거리 및 두께상의 위치로 이동한다. Fig. 4는 캐비티 충전 시작 후부터 캐비티 완충까지 해석 모델에 주입된 용융수지 요소의 최종 위치와 함께 각각 주입된 시간(release time)을 나타낸다. Figs. 4(a)~(e)는 용융수지의 캐비티 도달부터 사출기로부터의 충전단계 종료까지를 나타내며, Fig. 4(f)는 충전단계 종료 이후 남은 캐비티의 부피가 발포로 인해 충전된 직후를 나타낸다.

캐비티에 주입된 시점에 따라서 용융수지 요소가 최종적으로 도달하는 위치는 달라진다. 유동채널의 중앙부로 주입된 용융수지는 분수유동에 의하여 유동선단에서 외곽부분으로 밀려나 금형에 가까운 위치로 이동한다. 캐비티가 이미 완충에 가까운 경우, 캐비티로 주입된 용융수지는 유동채널의 중앙부에 잔류하게 된다. 용융수지 요소의 이동을 보여주는 particle tracing 결과는 이를 잘 나타낸다. 캐비티 충전의 초반에 주입된 용융수지 요소일수록 Figs. 4(a)~(c)와 같이 게이트 인근의 제품 표면에 최종적으로 위치하게 되며, 이후에 주입된 용융수지일 수록 Figs. 4(d)~(e)와 같이 충전 말단부 인근의 제품 표면으로 최종적으로 위치한다. 캐비티 충전의 후반에 주입된 용융수지 요소인 경우 Fig. 4(e)와 같이 제품 코어부에 잔류하게 되며, 늦게 주입될수록 Fig. 4(f)와 같이 게이트

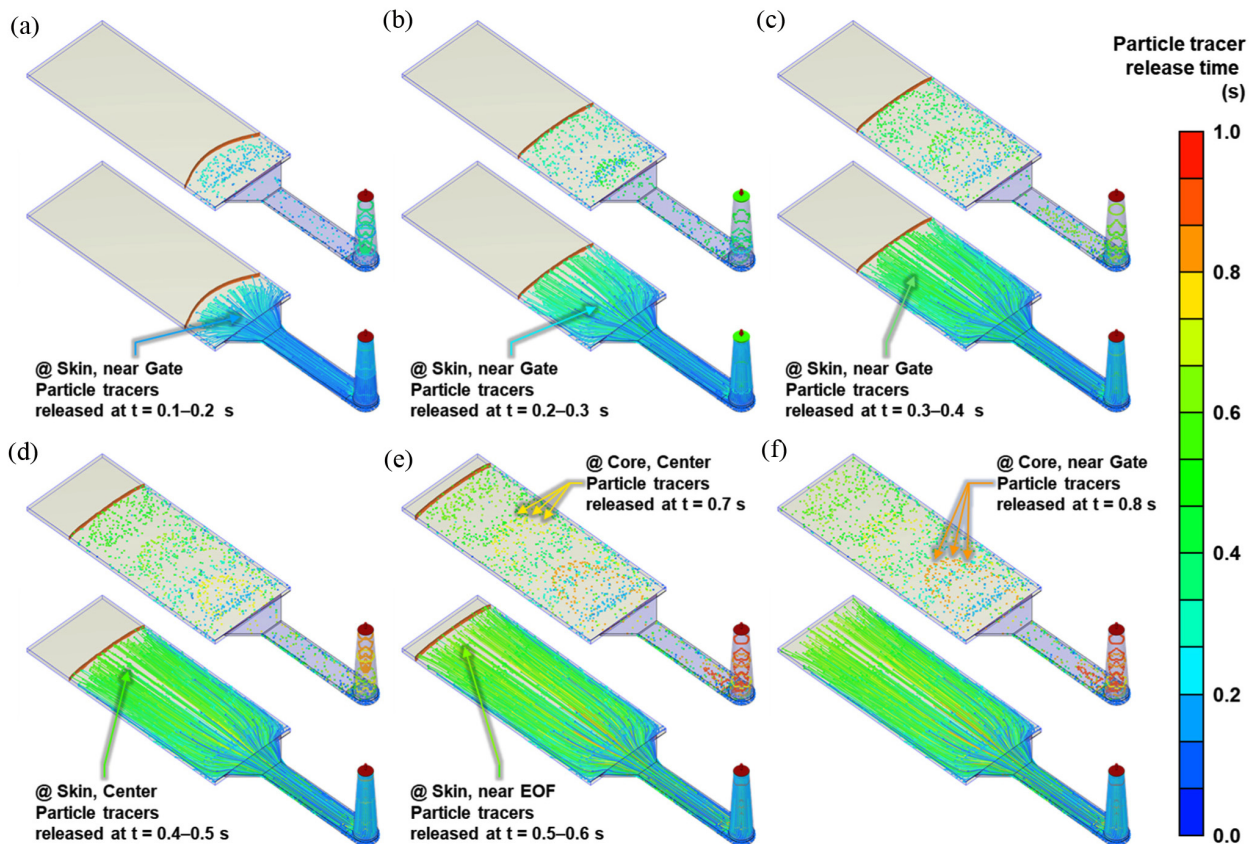


Fig. 4 Positions and traces of melt elements (particle tracers) during cavity filling in microcellular injection molding at beginning of cavity filling, approx. (a) 20%, (b) 40%, middle of cavity filling, approx. (c) 60%, (d) 80%, end of filling stage (EOF), approx. (e) 95%, and (f) complete of cavity filling by foam cell expansion.

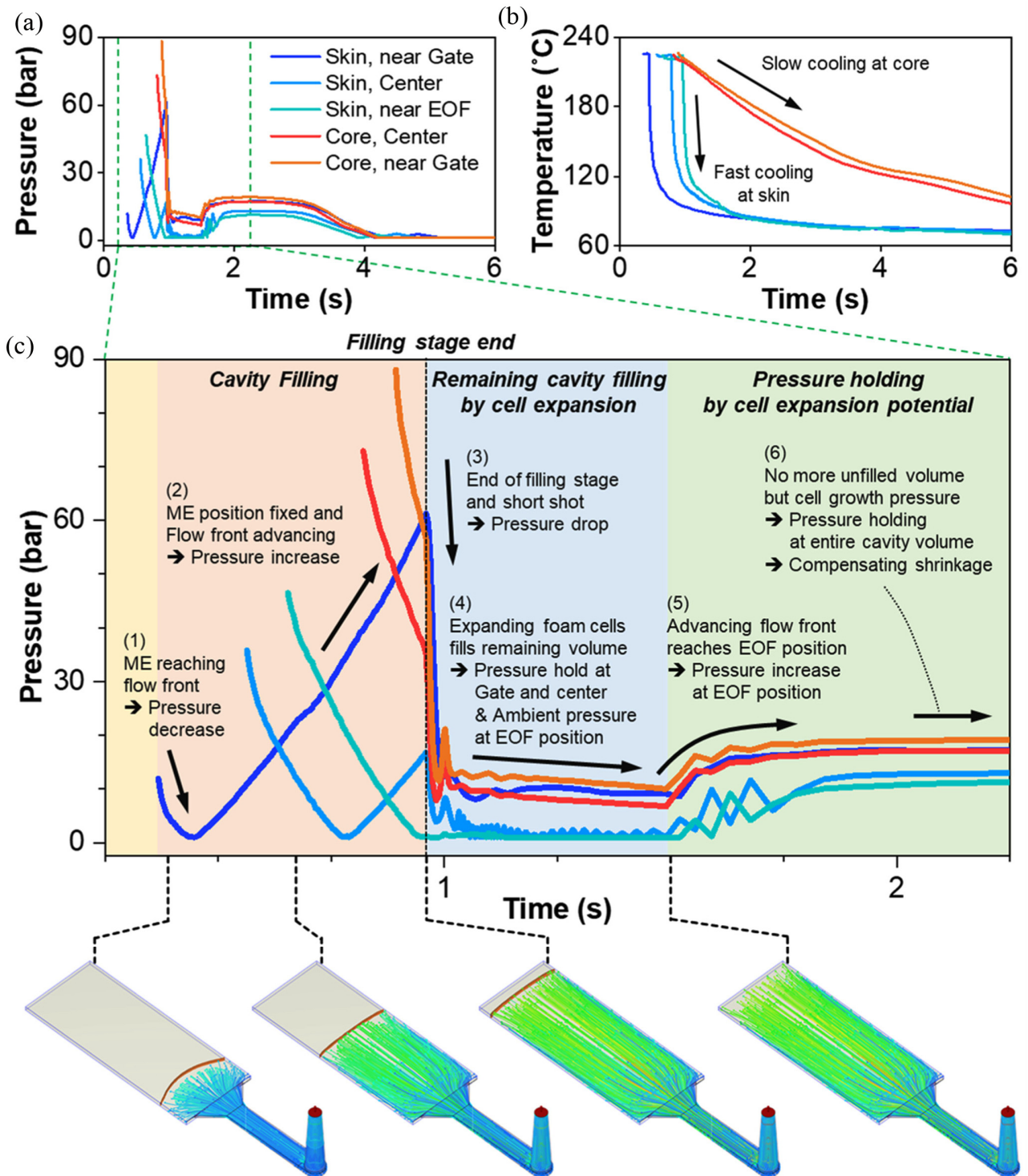


Fig. 5 (a) Pressure and (c) temperature history of melt elements (particle tracers) located at various locations in flow length and thickness direction. (c) Specific pressure history especially for filling and cell expansion with explanations. (Note: This pressure and temperature histories were extracted from the particle tracers only in the cavity, excluding gate and sprue)

인근의 코어부에 최종적으로 위치하게 된다.

3.2 용융수지 요소 위치 별 압력 및 온도 이력

용융수지 요소의 위치에 따른 압력과 온도 이력은 앞서 Fig. 1에

서 예상한 바와 유사하였다. Fig. 5는 용융수지 요소의 최종 도달 위치에 따른 압력과 온도이력의 비교이다.

용융수지 요소가 유동선단까지 이동하여 분수유동에 따라 유동의 중앙부인 코어에서 금형과 접촉하는 스킨으로 이동하는 경우,

용융수지 요소의 압력은 대기압까지 감소했다가 증가하는 이력을 보인다 (c.f., Fig. 5(a)). 앞서 예상한 대로, 용융수지 요소가 충전 단계에서 코어층을 통해 유동선단부로 이동함에 따라 압력이 감소한다. 그 이후 용융수지 요소의 최종 도달 위치가 게이트에 가까울수록, 충전단계에서 해당 용융수지 위치로부터 유동선단까지의 유동거리가 증가하므로 압력이 다시 증가한다. 압력 증가는 충전단계 종료까지 이루어졌다가, 그 직후 급격히 감소한다.

스킨층에 최종적으로 도달하는 용융수지 요소들은 유동선단에서 금형과 접촉하기 때문에 각각의 접촉 시점부터 온도가 급격히 금형 온도 근방으로 감소한다 (c.f., Fig. 5(b)). 일반적으로 금형과 접촉하는 용융수지의 온도는 용융수지와 금형의 열물성과 두 semi-infinite solid의 접촉시의 계면 온도로 근사할 수 있으며^[15], 이는 대개 금형 온도보다 10~15°C 높은 온도이다. Fig. 5(b)에서 해당 용융수지 요소의 온도가 급감하여 1 s 정도 이후 도달하는 온도는 약 77~80°C로 설정된 금형 온도인 65°C보다 10~15°C 높은 온도이다.

최종 도달 위치가 제품 코어부인 용융수지 요소의 경우 유동선단까지 이동하지 못하기 때문에 압력이 대기압까지 감소하지 않는다(c.f., Fig. 5(a)). 특히 게이트 인근의 코어부에 최종적으로 도달하는 용융수지 요소는 가장 나중에 캐비티에 주입되므로, 주입 시점에서 해당 위치로부터 유동선단까지의 유동거리가 가장 멀기 때문에 압력이 타 용융수지 요소보다 높다.

최종적으로 제품 코어부에 위치하게 되는 용융수지 요소는 스킨에 비해 매우 느린 속도로 온도가 감소한다(c.f., Fig. 5(b)). 코어는 금형 표면으로부터의 거리가 멀기 때문에, 열전달 경로가 길어 냉각속도가 느리기 때문이다. 따라서, 두께 방향의 타 위치보다 낮은 점도가 유지되며 발포셀이 성장하는데 더 많은 시간적 여유가 있으므로, 코어부에 위치한 발포셀의 경우 크기가 크거나 서로 병합된 형태를 가질 가능성이 높다.

발포셀의 팽창은 남은 캐비티 부피의 충전하며 완충 이후 캐비티 내압을 유지한다. Fig. 5(c)는 스프루, 게이트, 캐비티를 충전하는 일반적인 충전단계(cavity filling)와, 발포셀의 팽창으로 인한 남은 캐비티 부피의 충전(remaining cavity filling by cell expansion), 그리고 완충 이후 캐비티 내압의 유지 과정(pressure holding by cell expansion potential)에서의 상이한 위치에서의 캐비티 압력의 변화를 나타낸다. 구체적인 설명은 아래와 같다.

- 1) 충전과정에서는 용융수지 요소가 유동선단부로 이동하면서 용융수지와 유동선단까지의 유동거리가 짧아짐으로 인해서 압력이 감소한다.
- 2) 해당 용융수지 요소의 위치가 스킨부로 이동하여 고정된다면, 전진하는 유동선단으로 인하여 유동거리가 증가함에 따라서 압력이 증가한다.

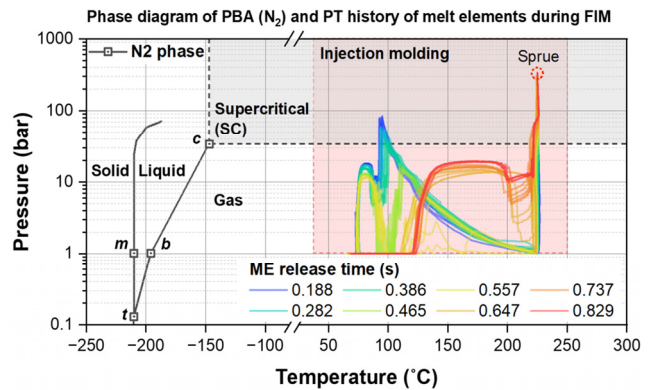


Fig. 6 Pressure and temperature history of melt elements (particle tracers) on phase diagram of N₂ as physical blowing agent (PBA)

3) 발포사출의 경우 캐비티가 완충되기 전에 사출성형기의 충전 단계를 종료하므로, 해당 시점에서 캐비티의 전체 구간에 있어서 캐비티 압력이 일제히 감소한다.

4) 각 용융수지 요소의 압력이 급격히 감소하게 되면, 용융수지에 용해되어있던 PBA의 과포화 상태가 발생하여, PBA가 발포셀 형태로 용출되기 시작한다. 팽창하는 발포셀에 의하여 전반적으로 캐비티를 채우는 용융수지의 부피가 증가함으로 인하여 유동선단이 완충되지 않은 캐비티 부피로 전진한다. 따라서 용융수지가 느린 속도로 미완충 부피 방향으로 흐름에 따라, 게이트에서부터 유동선단부로의 흐름방향으로 압력강화가 형성된다.

5) 발포셀의 팽창에 의하여 전진하던 유동선단이 캐비티 완충지점(EOF)에 도달하게 되면, 더 이상 유동선단이전진하지 못하게 된다. 그러나, 발포셀의 팽창력이 남아 있으므로 해당 잔존 팽창력 (cell expansion potential)은 캐비티 전구간에서의 압력을 상승시키게 된다.

6) 캐비티가 완충되었음에도 불구하고 발포셀이 지속적으로 팽창하고자 함에 따라서 보압과정과 유사하게 일정한 압력이 유지되게 된다. 이때 고분자의 냉각에 따른 수축이 발포셀의 팽창에 의하여 보상된다.

3.3 PBA 상태도 상의 압력 및 온도 이력

시간에 따른 용융수지 요소의 압력과 온도 변화 이력(c.f., Fig. 5)은 캐비티 충전 상황(c.f., Fig. 4)과 매칭하여 발포공정 상황을 이해하기에는 용이하나, 용융수지 요소의 압력과 온도를 함께 매칭하여 PBA의 상태와 비교하기에는 어렵다는 한계를 가진다. 따라서, PBA의 상태도에 각 용융수지 요소의 압력과 온도 이력을 나타내어 분석할 필요가 있다.

Fig. 6은 질소의 상태도와 용융수지 요소의 압력과 온도 이력을 나타낸다. 용융수지 요소가 스프루로 주입된 시점을 기준으로, 각

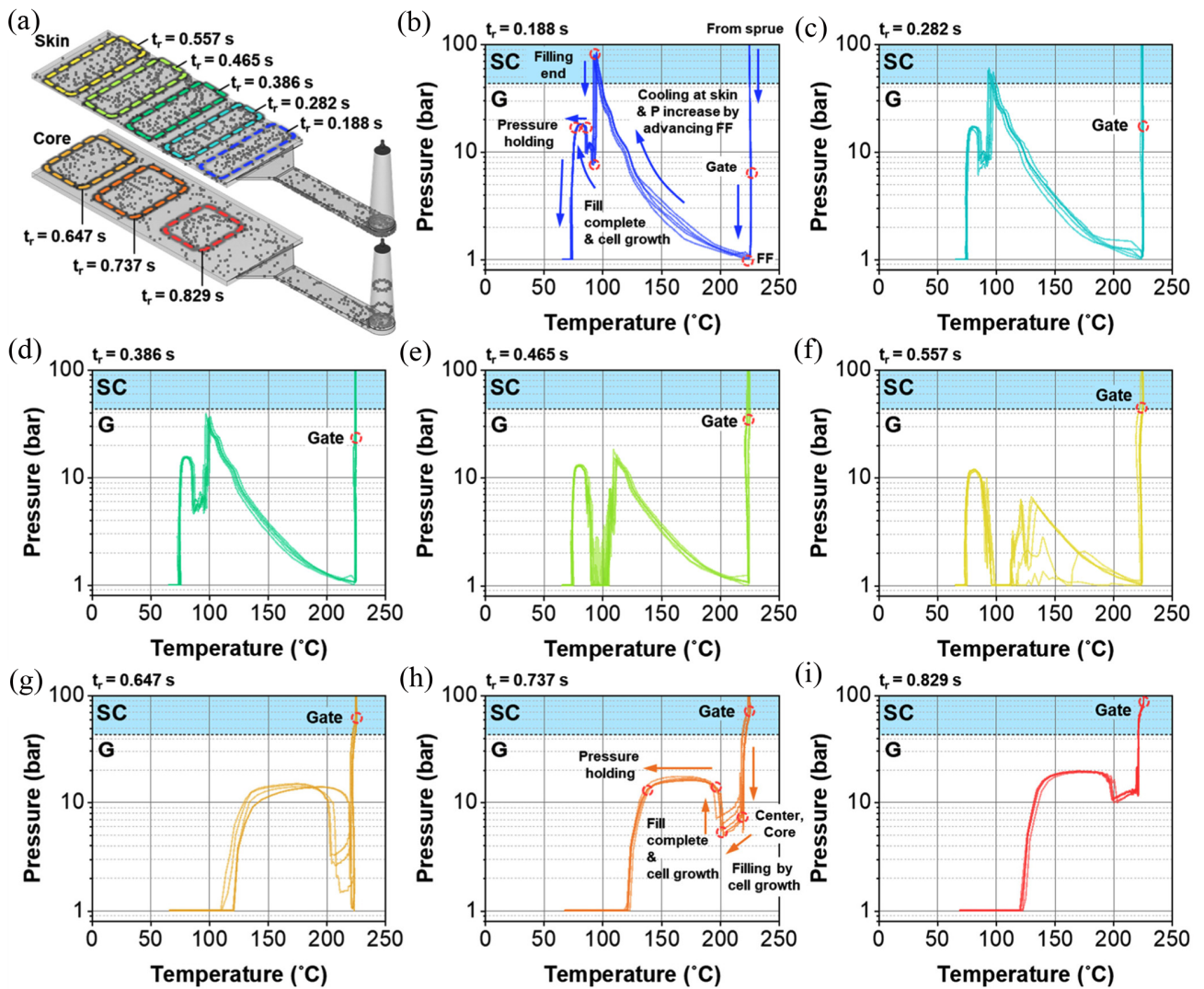


Fig. 7 (a) Final locations of melt elements injected at different release time, t_r . Pressure and temperature history of melt elements injected at (b) $t_r=0.188$ s, (c) $t_r=0.282$ s, (d) $t_r=0.386$ s, (e) $t_r=0.465$ s, (f) $t_r=0.557$ s, (g) $t_r=0.647$ s, (h) $t_r=0.737$ s, and (i) $t_r=0.829$ s. Note: SC = Supercritical state, G = gas state.

시점당 5개 용융수지 요소의 압력과 온도 이력을 추출하였다. 또한, 최종적으로 캐비티 내에 위치하지 않는 용융수지 요소는 제외하였다.

발포사출 시 용융수지에 포함된 PBA는 유동에 따른 용융수지의 위치에 따라 초임계 상태와 기체 상태 사이에서의 거시적 상변화를 1번 또는 3번 겪는 것으로 보인다. Fig. 6(a)에서와 같이 용융수지 요소의 이력은 앞서 Fig. 4에서 예상한 사출성형 공정에 해당하는 온도와 압력 범위 내에서 변동하였다. 질소의 임계압력이 약 34 bar이고, 임계온도가 약 -150° C로 낮기 때문에, 사출성형 공정 범위에서는 PBA가 겪을 수 있는 상태 변화는 초임계와 기체 상태 뿐이다. 거시적 상변화를 3번 겪는 경우, 초임계-가스-초임계 순서로 진행된다. 해당 거시적 상변화는 스프루로 주입되는 용융수지 요소의 주입 시간(release time)에 따라서 달라지는 온도와 압력

이력에 의하여 차이를 보인다. 이를 구체적으로 나타내면 Fig. 7과 같다.

Fig. 7은 각 용융수지 요소별 온도 및 압력 추이를 질소의 상태도에 도시한 결과이다. 각 용융수지 요소의 유동 방향과 두께 방향으로의 위치는 Fig. 7(a)에 표현되어 있다. 충전단계의 초반~중반($t_r=0.1\sim 0.6$ s)에 주입된 용융수지 요소의 경우 스킨부에 주로 위치하며, 분수유동에 의하여 늦게 주입될수록 게이트에서 먼 위치에 위치한다. 충전단계의 중반~후반($t_r=0.6\sim 0.9$ s)에 주입된 용융수지 요소의 경우 코어부에 주로 위치하며, 스킨부에 위치하는 용융수지 요소와는 반대로 늦게 주입될수록 게이트에 가까이 위치한다.

충전단계의 초중반에 주입된 용융수지의 온도와 압력 이력을 나타내는 Figs. 7(b)~(f)는 프로파일의 형상이 유사하며, 이는 해당

용융수지 요소가 유동선단으로 이동하여 스킨부에 고정되기 때문이다. 먼저 게이트에서 주입된 용융수지는 온도가 유지된 채로 압력이 감소하는데, 이는 용융수지 요소가 유동선단(flow front, FF)으로 이동하기 때문이다. 이후 온도가 감소하면서 압력이 상승하는데, 이는 해당 용융수지 요소가 스킨부로 이동하여 금형과 가까워져 냉각이 이루어지는 동시에, 해당 위치에 용융수지 요소의 위치가 고정되는 반면 유동선단이 전진함에 따라서 압력이 상승하기 때문이다. 이후 충전단계가 종료됨에 따라 사출압이 해제되어 압력이 급감한다. 동시에 발포가 진행됨에 따라서 발포셀의 팽창력에 의한 10 bar 정도의 압력이 유지되고 남은 캐비티 부피가 발포셀의 팽창에 의해 완충된다. 캐비티의 완충과 함께 압력이 다시 상승하고 발포셀의 팽창력에 의하여 일정 압력(약 20 bar)이 유지된다. 마지막으로 냉각으로 인해 용융수지가 고화됨으로써 소재가 수축하는 동시에 고화되어 증가하는 용융수지의 기계적 강성 또는 신장 점도가 발포셀의 팽창력보다 매우 커짐에 따라서 압력이 감소하게 된다.

스킨부에 위치하는 용융수지의 게이트로부터의 거리가 가까울수록 용융수지 요소가 겪는 최대 압력이 증가하며, 이는 PBA의 재 용해를 일으킬 수 있다. 게이트로부터 상대적으로 가까운 용융수지 요소일수록 용융수지 요소가 겪는 압력의 상승량이 증가하며, 특히 게이트 근방의 용융수지($t_r = 0.188, 0.282$ s, Figs. 7(b),(c))의 경우 압력이 증가함에 따라 PBA의 조건이 가스 상태에서 초임계 상태 구간으로 변화하게 된다. 따라서, 게이트 주변에 위치하는 용융수지일수록 유동선단 전진으로 인한 압력 발달이 증가하여 PBA의 용해도를 증가시키며, 특히 압력이 PBA의 임계압력보다 증가할 경우 이미 발포셀의 형태로 용출된 PBA를 다시 소재로 재 용해될 가능성이 높아진다.

게이트에 가까이 위치할수록 발포셀의 형상비(aspect ratio)가 1에 가까울 가능성이 높다. PBA가 초임계 상태에서 기체 상태로 다시 용출되는 시점은 사출기의 충전단계가 끝나고 남은 부피가 발포셀의 팽창에 의하여 충전되는 시점이다. 따라서, 해당 시점에서는 유동이 빠르게 발생하지 않기 때문에 발포셀에 큰 전단력이 작용하지 않는다. 그러므로 발포셀은 모든 방향으로 팽창할 수 있기 때문에 발포셀은 구 형상에 가까울 것으로 예상할 수 있다. 하지만 게이트에서 멀어질수록 발포셀의 형상비가 커질 가능성이 높다. 이는 PBA가 초임계 상태로 용융수지에 용해되어있다가 압력이 해제됨으로 인하여 용출되어 발포셀을 형성 및 발포셀이 팽창하는 시점이 용융수지 요소가 유동선단부로 이동하고 충전이 사출압으로 진행되는 단계이므로 유동이 빠르게 생성되어 발포셀에 전단이 강하게 작용하는 시점이기 때문이다.

코어부에 위치하는 용융수지 요소의 온도와 압력 이력은 Figs. 7(g)~(i)와 같이 스킨부와 확연히 차이를 보인다. 이는 용융수지

요소가 유동선단부에 노출되지 않기 때문에 압력이 대기압까지 감소하지 않고, 따라서 금형에 가까이 위치하지 않기 때문에 냉각이 빠르게 진행되지 않기 때문이다. 따라서 발포셀의 팽창에 의한 캐비티의 남은 부피의 충전이 이루어지는 시점에 코어부의 용융수지 요소의 온도는 상대적으로 높다. 이후 스킨부와 동일하게 캐비티의 완충 이후 압력이 상승하고, 발포셀의 팽창력으로 인하여 압력이 일정 수준으로 유지된 상태로 냉각이 진행되게 된다.

4. 고찰

제안하는 발포사출 공정의 시뮬레이션 결과 분석 방법론은 발포셀의 생성과 팽창에 핵심적인 역할을 하는 PBA의 상태를 PBA가 용해되어있는 용융수지 요소의 압력과 온도 조건에 따라 상세하게 분석이 가능하다는 장점이 있다. 스킨부에 위치하는 용융수지(c.f., Figs. 7(b)~(f))와 코어부에 위치하는 용융수지(c.f., Figs. 7(g)~(i))는 용융수지 유동과 열전달 조건에 따라 상이한 압력 및 온도 이력을 보인다. 또한, 최종적으로 게이트에 가까이 위치하는 용융수지(c.f., Figs. 7(b),(c))와 먼 위치에 위치하는 용융수지(c.f., Figs. 7(e),(f))는 압력 및 온도 이력의 개형은 유사하나 최대 압력 등에 차이를 보인다. 이러한 용융수지의 위치에 따른 압력과 온도 이력의 차이는 결과적으로 제품에서의 위치별 발포 상태의 차이를 보일 것이다.

최종 위치가 게이트 근방에 위치하는 용융수지일수록 더욱 복잡한 발포과정을 거친다 (c.f., Fig. 7(b)). (1) 먼저 용융수지 선단부로 용융수지가 이동함에 따라 압력이 감소함으로써 PBA의 용해도가 낮아지며, 상태가 초임계에서 가스 상태로 변화함으로써 용출이 이루어져 발포가 일어난다. 이후 용융수지의 위치가 고정된 후 (2) 유동거리 증가로 인하여 압력이 상승하여 PBA의 용해도가 다시 증가하며, 이의 상태가 가스에서 초임계 상태로 변함으로써 PBA는 용융수지 내로 재 용해될 가능성이 높아진다. (3) 사출성형기의 노즐 압력에 의한 충전단계가 종료됨에 따라서 압력이 급감함으로써 다시 PBA의 용해도가 감소하며, 이의 상태가 초임계에서 가스 상태로 변함으로써 발포가 다시 이루어진다. 마지막으로, 남은 캐비티 부피가 발포셀의 팽창력에 의한 용융수지의 흐름으로 충전되는 과정이 이어진다. 따라서 게이트 인근에 위치한 용융수지의 발포는 PBA의 재 용해 후 용출되는 시점에 이루어질 수 있으며, 이에 해당하는 경우에는 발포 시점에서의 용융수지 유동이 빠르지 않기 때문에 발포셀의 형상이 구형에 가까울 것이라 분석할 수 있다.

사출성형기의 충전단계가 종료됨으로써 발포가 전반적으로 이루어진다 하더라도 캐비티 내부의 압력은 일정하게 유지되지 않는다. 노즐 압력에 의한 충전단계가 종료되더라도 발포사출 공정의

설정에 따라 캐비티의 일부는 미충전 상태로 남아있게 되며, 해당 부피가 발포셀의 팽창으로 인해 충전되게 된다. 따라서, 발포셀의 팽창에 의하여 용융수지의 흐름이 느린 속도로 발생하게 된다 (c.f., Figs. 4(e), (f)). 이때 발포셀의 팽창이 캐비티 전 구간에서 전반적으로 이루어진다 하더라도 용융수지가 비록 느린 속도이지만 흐르고 있기 때문에, 용융수지의 흐름 방향으로 압력 구배가 발생하게 된다(c.f., Fig. 5의 1.0~1.5 s 구간). 또한, 발포셀의 팽창이 남은 부피의 충전을 위한 유동을 일으키고 있으므로, 발포셀의 팽창력이 캐비티 내압 상승 및 유지에 모두 작용하지 않는다. 그러나, 발포셀의 팽창에 의한 유동이 캐비티를 완충시키게 되면, 발포셀의 팽창력이 모두 캐비티 내압의 상승과 유지에 작용하게 된다 (c.f., Fig. 5의 1.5 s 이후 구간 및 Figs. 7(b)~(i)). 따라서, 발포에 의하여 용융수지의 수축이 보상되는 시점은 엄밀히 말하자면 사출성형기의 충전단계 직후가 아니라, 발포셀의 팽창에 의하여 남은 캐비티 부피가 완충된 이후이다.

5. 결론

발포사출성형 공정에서 물리발포제(physical blowing agent, PBA)의 상태는 발포셀의 형성과 성장을 일으키므로, 발포공정을 분석하고 설계하는데 있어서 핵심이다. 발포사출 공정에서 용융수지의 압력과 온도 조건이 변동하고 이는 PBA의 상태에 따른 용융수지에 대한 용해도의 차이를 발생시킴으로써 발포셀이 형성되기 때문에, 용융수지 조건에 따른 PBA의 상태 분석이 중요하다. 그러나, 일반적인 사출성형 공정을 설명하기 위한 pvT(pressure-volume-temperature) 선도상의 온도 및 압력 이력은 PBA의 상태를 직접적으로 알기 힘들며, 용융수지의 위치에 따른 온도 및 압력 이력과 이에 따른 PBA 상태 차이를 분석하기가 어렵다는 한계를 보인다. 이러한 한계를 극복하고자 본 연구에서는 고압물리 발포사출 공정의 분석을 위한 방법을 제시한다.

제안한 방법론은 사출성형 시뮬레이션에서의 입자 추적을 활용하여 용융수지 요소의 압력과 온도 이력을 추출한다. 해당 압력과 온도 이력을 물리발포제의 상태도와 함께 도시함으로써, 각 용융수지에 용해되어 있는 물리발포제의 상태변화를 추적하여 분석할 수 있다.

제안 방법론은 유동전달부에서의 유동, 게이트로부터 유동선단부로 용융수지의 이동, 용융수지부터 유동선단까지의 유동거리 증가에 의한 용융수지 요소가 받는 압력 증감을 구체적으로 나타낸다. 이와 동시에 용융수지 요소가 유동의 중심부(코어)에서 급형과 가까운 표면(스킨)으로 이동함에 따른 냉각 속도의 차이에 따른 온도 감소 또한 압력 이력과 함께 나타낸다. 따라서, 용융수지 요소의 위치에 따른 압력과 온도 이력을 상세하게 나타내어 각 위치에

따른 PBA의 상태 변화를 확인할 수 있게 한다.

특히 제안 방법론을 통하여, 게이트 인근의 스킨부에서 PBA의 용출(발포) 이후 재 용해 및 발포가 일어남을 예상할 수 있다. 또한 용융수지의 수축을 상쇄하는 압력 유지 단계는 사출기의 충전단계 종료 직후가 아니라, 충전단계 종료 이후 발포셀의 팽창으로 용융수지의 후속 유동이 인한 미충진 캐비티 부피가 모두 채워진 이후임을 확인할 수 있다.

본 제안 방법론은 발포사출 공정에서 제품의 위치에 따른 발포 품질의 차이를 이해하는데 기여할 수 있다. 또한 상이한 multi-PBA를 사용하는 경우 각 PBA의 발포 선후관계나 시점, 발포 여부를 판단하는데 추가적으로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

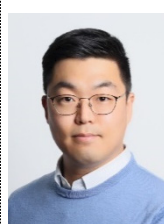
본 연구는 한국생산기술연구원 뿌리기술제조혁신연구개발 뿌리 고도화기술개발사업 (KITECH EH250004)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Sun, X., Karbas, H., Peng, J., Turng, L.-S., 2015, A Novel Method of Producing Lightweight Microcellular Injection Molded Parts With Improved Ductility and Toughness, *Polymer*, 56 102-110, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.09.066>.
- [2] Wang, J., Wang, G., Zhao, J., Zhang, A., Dong, G., Wang, X., Zhao, G., Park, C. B., 2021, Research on Cellular Morphology and Mechanical Properties of Microcellular Injection-molded BCPP and Its Blends, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 116 2223-2241, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07389-5>.
- [3] Jiang, J., Li, Z., Yang, H., Wang, X., Li, Q., Turng, L.-S., 2021, Microcellular Injection Molding of Polymers: A Review of Process Know-How, Emerging Technologies, and Future Directions, *Curr. Opin. Chem. Eng.*, 33 100694, <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100694>.
- [4] Gim, J., Turng, L.-S., 2022, A Review of Current Advancements in High Surface Quality Injection Molding: Measurement, Influencing Factors, Prediction, and Control, *Polym. Test.*, 115 107718, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107718>.
- [5] Ding, Y., Hassan, M. H., Bakker, O., Hinduja, S., Bártolo, P., 2021, A Review on Microcellular Injection Moulding, *Materials*, 14:15 4209, <https://doi.org/10.3390/ma14154209>.
- [6] Xu, J., 2022, *Polymeric Foams*, CRC Press, Boca Raton,

<https://doi.org/10.1201/9781003166160-4>.

- [7] Llewelyn, G., Rees, A., Griffiths, C. A., Scholz, S. G., 2020, Advances in Microcellular Injection Moulding, *J. Cell. Plast.*, 56:6 646-674, <https://doi.org/10.1177/0021955X20912207>.
- [8] Simon, S.A., Hain, J., Osswald, T. A., 2023, Modeling and Simulation of an Alternative Microcellular Injection Molding Process Ku-Fizz™, *AIP Conf. Proc.*, 2884:1 220001, <https://doi.org/10.1063/5.0178484>.
- [9] Simon, S. A., Hain, J., Osswald, T., 2021, Effect of Gas Pressure on the Microstructure of Parts Foamed With the Novel Microcellular Injection Molding Technology Ku-Fizz™, *SPE Polymers*, 2:4 311-324, <https://doi.org/10.1002/pls2.10044>.
- [10] Simon, S. A., Hain, J., Sracic, M. W., Tewani, H. R., Prabhakar, P., Osswald, T. A., 2022, Mechanical Response of Fiber-Filled Automotive Body Panels Manufactured with the Ku-Fizz™ Microcellular Injection Molding Process, *Polymers*, 14:22 4916, <https://doi.org/10.3390/polym14224916>.
- [11] Sun, X., Kharbas, H., Turng, L.-S., 2015, Fabrication of Highly Expanded Thermoplastic Polyurethane Foams Using Microcellular Injection Molding and Gas-laden Pellets, *Polym. Eng. Sci.*, 55:11 2643-2652, <https://doi.org/10.1002/pen.24157>.
- [12] Sun, X., Turng, L.-S., 2014, Novel Injection Molding Foaming Approaches using Gas-laden Pellets with N₂, CO₂, and N₂ + CO₂ as the Blowing Agents, *Polym. Eng. Sci.*, 54:4 899-913, <https://doi.org/10.1002/pen.23630>.
- [13] Turng, L.-S., Kharbas, H., 2004, Development of a Hybrid Solid-microcellular Co-injection Molding Process, *Int. Polym. Proc.*, 19:1 77-86, <https://doi.org/10.3139/217.1806>.
- [14] Shen, C., Kramschuster, A., Ermer, D., Turng, L.-S., 2006, Study of Shrinkage and Warpage in Microcellular Co-injection Molding, *Int. Polym. Proc.*, 21:4 393-401, <https://doi.org/10.3139/217.0122>.
- [15] Hopmann, C., Lammert, N., Zhang, Y., 2017, Variothermal Foam Injection Molding - Dimensional Stability with High Surface Quality, *Cell. Polym.*, 36:3 151-166, <https://doi.org/10.1177/026248931703600303>.



Jinsu Gim

Senior Researcher, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests are 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



Joohyeong Jeon

Senior Researcher, Injection Molding Research Institute, LS Mtron. His research interests are Microcellular Injection Molding, Plasticizing System, Advanced Injection Molding, Rheological Properties of Foamed Materials, Process Signal Monitoring, and AI-based Analysis.
E-mail: joohyeong.jeon@lsmtron.com



Sunghwan Yang

Chief of Injection Molding Research Institute, LS Mtron. His research interests are Development of Injection Molding Systems, Advanced Injection Molding Systems, Plasticizing Systems.
E-mail: wolf@lsmtron.com



Byung Kwan Hwang

Leader of Moldex3D Team, ETS-SOFT. His research interest is Injection Molding Process, Machine Integration, Material Properties and Digital Twin.
E-mail: bkhwang@ets-soft.com