

고분자 성형공정 개요 및 성형원리

류민영 · 김혜연

1. 서론

현재 고분자의 생산량은 한국, 일본은 물론 세계적으로도 철강의 생산량보다 많다. 인류가 지구상에 자리 잡은 후 시대를 분류할 때 그 당시 사용하던 소재로 분류(신석기, 구석기, 청동기, 철기 시대)하는 것을 보면 먼 훗날 지금의 시대를 고분자 시대라 부르지 않을까 하는 상상을 하게 된다. 이처럼 고분자의 쓰임이 증가함에 따라 고분자 제품을 성형하는 방법 또한 중요한 역할을 하고 있다. 고분자 성형에서의 주안점은 경쟁력 있는 가격으로 품질의 만족을 꾀할 수 있도록 하기 위한 소재의 선택과 제품설계, 금형설계 그리고 성형기계의 운전이라고 할 수 있다.^{1,2} 제품의 설계는 성형공정과 소재에 적합하도록 이루어져야 하기 때문에 최적의 제품을 설계하는데 있어서 고분자 성형법을 충분히 이해하는 것이 우선적이라 하겠다. 금형은 고분자 성형에 있어서 요구하는 모양을 형성시키기 위해 쓰이는 기본적인 도구로써 제품의 형상에 직접적인 영향을 주며 이 금형설계의 어려움 때문에 제품설계에 많은 제약을 받기도 한다. 성형기계의 운전조건 역시 성형에 큰 영향을 미친다. 성형기계는 금형이나 다이를 포함하고 있고, 소재를 녹이고 펴내는 역할을 하며 금형을 통하여 제품이 완성되도록 한다. 기계의 운전조건 설정 및 조작은 소재의 특성에 맞게 이루어져야 한다. 이러한 상황들을 종합적으로 검토해 볼 때 고분자 성형공정에서 가장 중요한 핵심은 소재, 금형, 그리고 기계의 운전 즉, 성형조건이라고 말할 수 있다.

고분자 성형방법을 열거하면 사출성형(injection molding), 압축성형(compression molding), 이송성형(transfer molding), 열성형(thermoforming), 블로우성형(blow molding), 필름 블로잉(film blowing), 압출성형(profile extrusion), 카렌더링(calendering), 섬유방사(fiber spinning) 그리고 발포성형(expanding molding) 등 다양하다.³ 이러한 성형공정에서 사용하는 금형의 형태는 다양하다. 두 개의 반쪽 금형이 닫혀서 공간(cavity)을 만들도록 되어있는 금형을 몰드(mold)라 부르고, 금형에 수지가 통과하면서 형상을 만들도록 되어있는 금형을 일반적으로 다이(die)라 부른다. 또한, 금형을 열고 두 개의 반쪽 금형 사이에 수지나 미리 성형된 판재 등을 넣고 반쪽 금형을 닫으면서 특정모양을 성형하는데 쓰이는 금형도 다이라 칭한다. 이

러한 측면에서 보면 몰드를 쓰는 공정은 사출성형, 이송성형, 블로우성형, 그리고 발포성형이다. 재료를 통과시키면서 성형하는 다이를 쓰는 공정은 필름블로잉, 압출성형, 카렌더링, 그리고 섬유방사이다. 카렌더링은 두 롤(roll) 사이에 재료를 통과시키면서 띠 모양의 제품을 성형하기 때문에 두 롤이 금형인 다이의 역할을 한다고 보면 된다. 특별히 섬유방사에 쓰이는 다이를 스피너렛(spinneret)이라 부른다. 두 반쪽 금형 사이에 재료를 넣고 금형을 닫으면서 성형하는 다이를 사용하는 공정은 압축성형과 열성형이다. 사출성형, 필름블로잉, 압출성형, 그리고 방사성형에 쓰이는 성형기계는 성형하는 재료의 가소화가 필요하기 때문에 단축스크류(single screw)가 부착되어 있다. 그 외의 성형기계는 이미 일정 모양으로 만들어진 반제품을 가열하는 장치가 있어 성형이 가능하도록 온도를 높여준다. 성형이 모두 끝난 후에는 제품이 일정한 모양으로 굳어지도록 냉각을 하게 된다. 이러한 냉각 과정에서 용융된 수지는 수축을 하기 때문에 정밀한 성형을 하기 위해서는 이에 대한 대처가 중요하다. 특히, 결정성 수지는 결정화를 이루면서 냉각의 조건에 따라 수축



류민영

1987 한양대학교 기계설계학과(학사)
1989 KAIST 기계공학과(생산공학전공)
1997 The Univ. of Akron,
Polymer Engineering (공학박사)
1989~ LG생산기술연구원 주임연구원
1992
1997~ 삼양사 중앙연구소 수석연구원
2001
2001~ 서울산업대학교 금형설계학과 부교수
현재



김혜연

2007 서울산업대학교 금형설계학과(학사)
2007~ 서울산업대학교 대학원
현재

Introduction to Polymer Shaping Processes and Their Principles

서울산업대학교 공과대학 금형설계학과 (Min-Young Lyu, Department of Die and Mould Engineering, Seoul National University of Technology, 172 Gongreung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea) e-mail: mylyu@snut.ac.kr

서울산업대학교 대학원 (Hae-Yeon Kim, Graduate School of Industry, Seoul National University of Technology, 172 Gongreung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea)

에 크게 편차를 보이기 때문에 세심한 주의가 필요하다.

본 논문에서는 고분자 성형법 중에서 가장 활용빈도가 높은 공정인 일반사출성형, 특수사출성형, 압출성형, 그리고 블로우성형 등을 위주로 원리와 개요를 설명하고 연구동향을 고찰하고자 한다.

2. 일반사출성형(Conventional Injection Molding)

2.1 사출성형의 원리 및 공정의 구성

사출성형기는 고분자 수지를 녹이고 펌핑을 해주는 사출장치(injection unit)와 상하 금형을 고정시키고 열고 닫힘의 기능을 해주는 형체장치(clamp unit)로 구분되어 있다. **그림 1**에는 일반사출성형기가 나타나 있다. 사출장치에는 실린더가 있고 실린더에서 스크류 또는 플런저를 이용하여 파우더(powder), 그레인(granule), 또는 펠릿(pellet) 상태의 고체 고분자를 녹이면서 실린더 앞쪽으로 이송시키고, 이송이 끝나면 앞으로 이송된 고분자 용융물을 스크류나 플런저로 밀어 실린더 끝의 노즐을 통과시켜 금형 안으로 흘러 들어가게 한다. 사출장치에서 고분자를 녹이는 방법은 **그림 2**에 나타나 있는 것처럼 크게 두 가지가 있는데, 첫 번째 방법은 스크류의 회전에 의한 마찰 열과 외부의 가열장치에 의해 고분자를 녹이는 방법으로, 녹은 고분

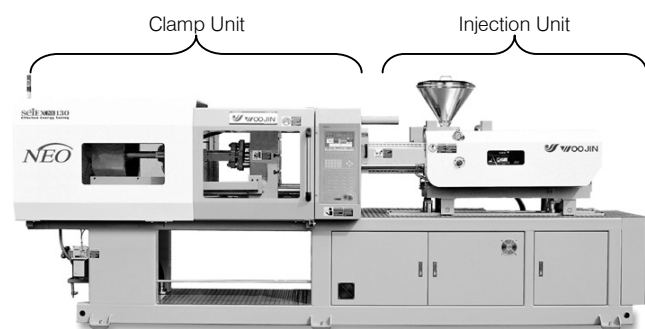


그림 1. Conventional injection molding machine consisted of injection unit and clamp unit.

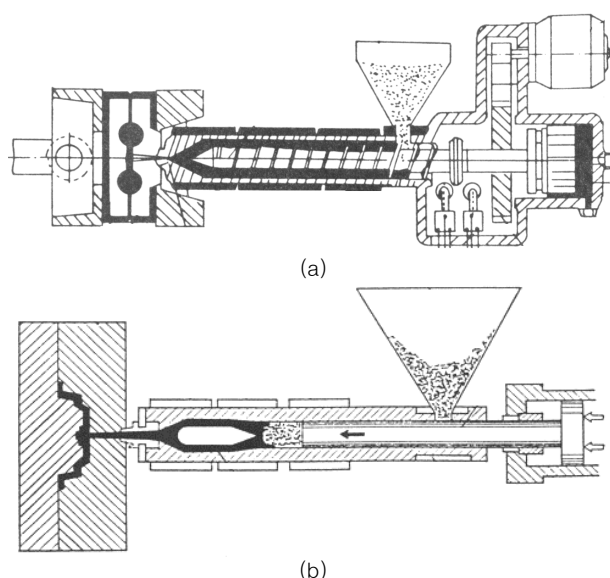


그림 2. Difference of injection units in a conventional injection molding machine: (a) screw; (b) plunger types.

자는 스크류의 채널을 따라 앞으로 이송되고 이송이 끝나면 스크류의 회전이 정지하고 스크류가 플런저 역할을 하여 앞에 모인 용융 고분자를 높은 압력으로 노즐 쪽으로 밀어낸다. 사출장치에서 고분자를 녹이는 두 번째 방법은 순전히 외부의 열을 이용하여 실린더 안에서 고분자를 녹이고 플런저를 이용하여 녹은 고분자를 노즐 쪽으로 밀어내면서 사출을 하는 방법이다. 고분자의 완전 가소화를 위해 실린더 내부의 끝 부분에는 토피도가 있어 고분자 흐름 속도가 커 온도를 상승시킨다. 실린더를 두 개 사용하는 사출장치도 있는데 하나의 실린더에서는 가소화만 시키고 가소화된 수지가 다른 실린더로 이송되면 그곳에서는 플런저를 이용하여 사출을 한다. 이러한 사출장치는 다른 방법에 비해 가소화 능력이 뛰어나다.

형체장치는 상하 두 금형을 매달고 있으며 금형을 열고 닫는 역할을 한다. 그리고 사출 시 캐비티에 높은 압력이 작용될 때 금형이 열리지 않도록 큰 힘으로 두 금형을 밀착시키는 역할을 한다. 금형을 밀착시키는 방법은 유압식과 기계식인 토글식이 있다. 사출성형 시 형체력은 매우 중요한 항목이며 이 형체력으로 사출기를 분류하고 호칭한다. 사출장치의 구동이나 형체장치의 구동에 모터를 이용한 전동식은 유압식에 비해 에너지 소비가 작고 제어가 정밀하다.

사출성형의 사이클은 수지의 가소화, 수지의 금형으로의 충전, 수지가 금형으로 충전되면서 냉각에 의해 수축이 되는데 이를 보상하기 위한 보압, 수지가 금형 내에서 형상이 만들어진 후 꺼내기 온도까지 기다리는 수지의 냉각, 그리고 제품의 취출로 구성되어 있다. 이러한 사이클에서 냉각과정이 차지하는 비중이 대략 80% 정도로 가장 크다. 따라서, 사출성형의 사이클 시간을 단축하기 위해서는 금형의 냉각을 효과적으로 수행하는 것이 매우 중요하다.

2.2 사출성형용 금형

사출성형에 쓰이는 금형은 **그림 3**에 나타난 바와 같이 형체장치의 고정판에 부착되는 고정측 금형과 형체장치의 이동판에 부착되는 가동측 금형으로 나뉘어져 있다. 이 두 금형에는 형상이 새겨져 있어 서로 결합하면 제품의 형상을 갖는 공간(캐비티)을 이루고 여기에 용융 고분자가 채워지고, 수지의 온도에 비해 낮은 금형의 온도에 의해 용융

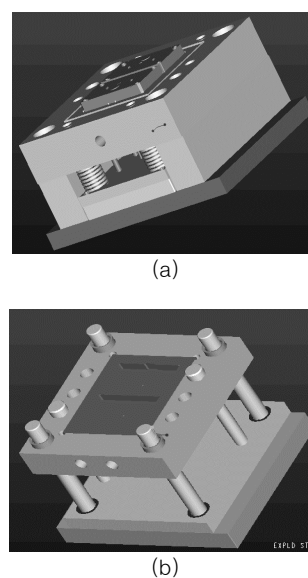
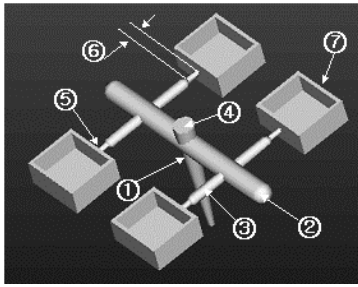


그림 3. Injection mold consisted of moving and stationary mold: (a) moving; (b) stationary molds.



1. Sprue
2. Runner
3. Auxiliary Runner
4. Cold Slug Well
5. Gate
6. Gate Land
7. Product

그림 4. A Injection molded product containing sprue, runner and gate.

수지가 굳으면서 제품을 형성한다. 금형의 온도는 수지의 온도보다는 낮지만 수지의 점도나 제품의 형상에 따라 성형이 잘 이루어지도록 설정하는데 대략 40~90 °C 사이로 설정한다. 금형의 온도는 제품의 품질과 성형 사이클 시간에 큰 영향을 미치기 때문에 적절한 설정은 매우 중요하다. 최근에는 외관 디자인 및 품질의 중요도가 높아짐에 따라 금형의 온도를 120 °C 정도까지 높은 온도로 가열하여 표면의 품질을 향상시키는 방법이 많이 채택되고 있다.

금형은 단순히 고정 및 이동 금형 두 개의 형판으로 이루어져 있는 2단 금형과 세 개의 형판으로 이루어져 있는 3단 금형이 있다. 이러한 금형들은 그 부품의 형상이 유사하여 몰드베이스로 정형화되어 있다. 따라서, 적절한 몰드베이스를 선정하여 여기에 코어나 캐비티의 형상을 가공하거나 삽입하여 금형을 완성한다. 용융 고분자가 금형의 캐비티 내에 들어가는 경로는 사출장치의 노즐에서 금형의 스프루, 런너 그리고 게이트를 통과하여 캐비티로 흘러가는 순서로 이루어져 있다. 캐비티 내에서 수지가 굳으면 성형품을 빼내기 위해서 금형이 열리는 데 성형품은 일반적으로 가동측 금형에 붙어있게 된다. 가동측 금형에 붙어있는 성형품은 이젝터 핀(ejector pin)이나 스트리퍼 플레이트(stripper plate)에 의해 금형으로부터 추출된다. 그림 4에는 금형에서 빠져나온 스프루, 런너, 게이트 그리고 성형품의 연결 상태가 나타나 있다.

2.3 사출성형품의 특성

사출성형공정은 고체 고분자를 용융시킨 후 고압으로 금형에 밀어 넣은 후 냉각시켜 제품을 얻는 공정으로써 공정 중 온도변화가 크고 높은 압력이 적용된다. 그로 인해 온도변화가 크기 때문에 체적의 변화가 수반되어 성형품에 형상오차가 발생하게 된다. 즉, 성형품이 금형의 모양이나 치수 그대로 전사되는 것이 아니라 금형의 치수보다 작은 치수로 성형된다. 이와 같은 현상을 성형수축이라 한다.⁴ 그림 5에는 성형수축이 발생하는 이유를 온도-압력-비체적 곡선을 통해 설명하고 있다. 온도변화 속에서 압력변화가 동시에 작용하기 때문에 단순히 온도변화에 따른 체적변화만 나타나는 것이 아니라 압력에 의한 팽창의 효과도 나타나 성형수축을 어느 정도 보상한다. 정밀사출성형을 위해서는 온도-압력-비체적 곡선에서 제품이 어떠한 경로를 따르게 하면서 성형을 해야 할지가 큰 관건이다.⁵ 그림 6에는 사출성형공정 중에 거치는 경로가 나타나 있다. 성형공정의 조절로도 할 수 있고 특별한 사출성형기를 통하여도 온도, 압력 그리고 비체적의 경로를 조절할 수 있다. 일반적으로 사출성형품에 나타나는 성형수축은 결정성 수지에서는 약 1.5~2% 내외, 비결정성 수지에서는 약 0.5% 내외를 보인다.⁶ 그 이유는 결정성 수지가 그림 5에서와 같이 체적이 크게 팽창하는 용융온도(T_m)가 있기 때문이다. 결정성 수지는 응고되면서 결정화를 이루게 되는데 결정화도(degree of crystallinity)의 정도는 응고되는 속도, 즉 냉각속도와

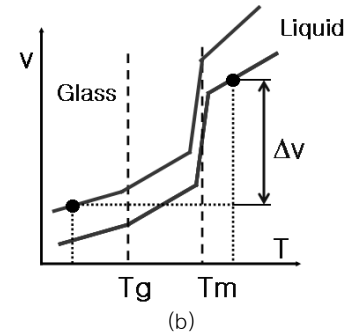
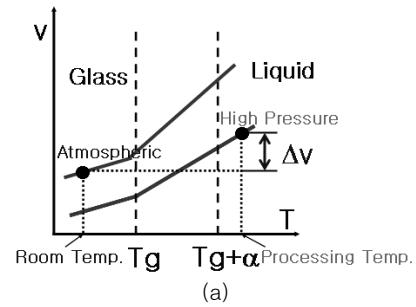


그림 5. Schematic explanation of part shrinkage (Δv) occurred in injection molding process: (a) amorphous polymer; (b) crystalline polymer.

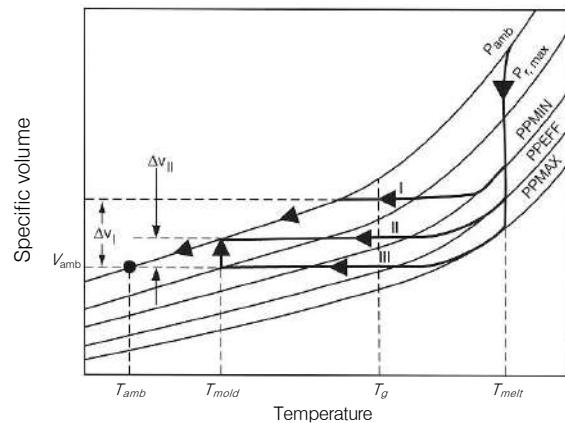


그림 6. Control of solidifying path in the PVT diagram.

관련이 있고, 냉각되는 속도는 금형의 온도에 따라 결정된다. 따라서, 결정성 수지의 경우 금형의 온도조절에 따라 수축량이 변하고 이것은 제품의 정밀도와 깊이 관련이 있어 온도조절이 매우 중요하다.

사출성형품에 나타나는 또 다른 외관특징은 형상의 변형(deflection, warpage)이다. 형상의 변형은 성형품의 치수 및 외관형상의 정밀도와 관련이 있다. 성형 중에 형성된 잔류응력(residual stress)이 성형이 끝난 후 제품에 작용되어 시간이 지난 후에 제품을 변형시키는 것이다. 따라서, 정밀성형을 위해서는 이러한 잔류응력의 제거가 중요하다.⁷ 잔류응력의 형성은 크게 두 가지로 설명되는데 흐름에 의한 잔류응력(flow-induced residual stress)과 열에 의한 잔류응력(thermally induces residual stress)이다. 그림 7에 흐름에 의한 잔류응력의 형성과정과 설명되어 있다. 흐름에 의한 잔류응력은 고분자 용융체가 큰 압력을 받아 작은 틈새의 금형 캐비티에 흘러들어가면서 큰 전단응력을 받고 분자가 배향되어 형성되는 잔류응력이다. 이 잔류응력은 흐름 방향과 흐름직각방향과의 차이가 있어 잔류응력이 이방성을 보인다.

그림 8에는 열에 의한 잔류응력의 형성과정이 설명되어 있는데 높은 온도의 수지가 응고되면서 표면층과 중앙층의 냉각의 차이 때문에 형성되는 잔류응력이다. 용융온도 이상의 온도로 금형 내로 들어온 수지는 낮은 금형온도 때문에 표면부터 응고되기 시작한다. 이 과정에서 초기에는 표면층의 응고에 따라 수축을 하려고 하는데 중앙부는 아직 온도가 높아 큰 체적을 유지하려고 하는 과정에서 표면층은 인장응력을 받고 중앙층은 압축응력을 받는다. 그러나, 시간이 지남에 따라 중앙층의 온도도 낮아지면서 응고되기 시작하는데 표면층은 이미 응고가 끝나 치수가 굳어져 있어 중앙층이 수축하는데 저항을 하게 된다. 이 과정에서 최종적으로 중앙부분은 인장응력을 받고 표면 부분은 압축응력을 받게 된다. 이렇게 형성된 두 가지의 잔류응력이 이완되면서 성형품을 변형시킨다. 잔류응력의 형성을 줄이기 위해서는 성형조건 설정이 매우 중요하다. 일반적으로 수지의 온도와 금형의 온도를 높게 설정하고, 사출속도를 빠르게 하면 잔류응력을 줄일 수 있는데 이러한 성형조건들은 제품의 성형성과 생산성도 관련되어 있어서 모든 요구조건을 만족하는 최적의 조건을 찾는것은 매우 어렵다.

성형품의 품질에 영향을 주는 현상들은 여러 가지가 있는데 주로 표면의 품질과 관련이 있다. 웰드라인(weld line), 흐름자국(flow mark), 게이트 자국(gate mark), 젯팅(jetting), 은줄(silver streak), 그리고 버닝(burning) 등이 표면 품질과 관련된 현상인데, 이러한 현상들은 성형조건, 제품형상, 금형설계, 그리고 소재의 용융물성과 관련이 있다. 미성형(short shot)은 수지가 금형의 캐비티 속을 완전히 채우지 못한 현상인데 역시 성형조건, 제품설계, 그리고 수지의 용융물성과 관련이 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 일반적인 사출성형에서 정밀도에 영향을 주는 여러 조건들이 복합되어 있어 고정밀의 품질을 맞추기는 매우 어렵다. 따라서, 사출성형의 정밀도를 높이기 위해서는 제품의 형상설계, 금형설계, 수지의 선정, 그리고 운전조건이 서로 조

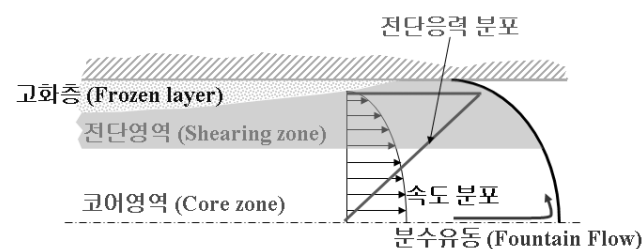


그림 7. Schematic drawing of flow-induced residual stress.

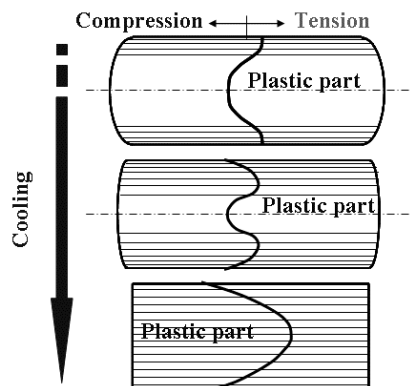


그림 8. Schematic drawing of thermally-induced residual stress.

화가 잘 이루어지는 과정에서 최적조건을 찾아야 한다. 일반사출성형의 한계를 극복하거나 정밀도를 향상시키기 위해서 특수사출성형이 활용된다.

3. 특수 사출성형

3.1 가스사출성형(Gas Injection Molding(GIM))

일반적인 사출성형방법이 아닌 방법 중에 가스 사출성형방법(GIM, gas injection molding 또는 gas assisted injection molding)이 있다. 일반적인 사출성형에서 성형품의 두께가 두꺼울 경우, 싱크마크나 기공 등의 성형결함이 생기는데 이러한 결함을 극복하기 위해서 가스 사출성형법이 사용된다.⁸ **그림 9**에 가스사출성형의 공정이 설명되어 있다. 이 방법은 두께가 두꺼운 부분의 중심에 가스를 주입하여 부분적으로 증공부를 만들며 성형하는 방법이다. 따라서, 재료의 절감 및 굽힘 관성 모멘트를 크게 하는 장점이 있다. 가스사출성형에서는 용융수지를 금형의 캐비티 내에 완전히 채우지 않고 일부분만을 사출하고 두께의 중앙부분에 가스를 주입한다. 가스사출 금형의 제작에서 중요한 것이 가스 통로의 배치인데 가스 주입은 노즐을 통하여 주입하는 방법과 런너나 캐비티를 통하여 주입하는 방법으로 분류된다. **그림 10**은 가스주입 위치에 따른 차이를 나타낸 것이다. 이 가스 사출에 의한 제품은 중앙이 증공부이기 때문에 두께가 얇게 성형되어 수지의 양이 적어 수축이 적으며 일반사출에 비해 금형의 치수와 일치하는 성형품을 얻을 수 있다. 그러나, 공기가 용융수지속에 파고 들어가면서 두께가 불균일할 수 있고 내부 표면이 깨끗하지 않게 성형되는 단점을 갖고 있다. **그림 11**에 가스사출에 의한 성형품이 나타나 있다.

3.2 물사출성형(Water Injection Molding(WIM))

가스사출성형방법과 유사한 방법으로 가스 대신 물을 두께의 중심에 주입시키는 성형방법이다.⁹ **그림 12**에 물사출성형 공정이 나타나 있다. 이 방법은 2000년대 초반에 실제 제품에 응용되기 시작했는데 현재는 응용사례가 증가하고 있는 상황이다.

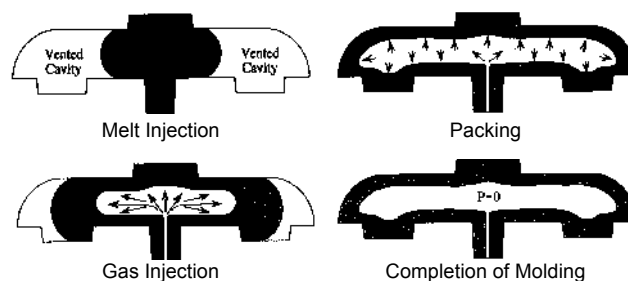


그림 9. Molding procedure in gas injection molding.

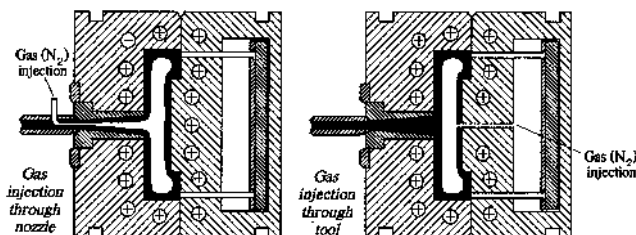


그림 10. Location of gas inlet in gas injection molding.

먼저 고분자 수지를 금형의 캐비티에 주입한다. 그리고, 물을 주입하는 통로를 열어 물을 주입하면 두께의 중앙층은 수지가 아직 굳지 않고 용융 상태에서 물이 중앙부를 통해 용융 수지를 밀면서 흘러 들어간다. 밀려온 수지는 끝의 통로를 통해 빠져나가고 내부에 차있는 물을 빼내면 성형이 완성된다. 물사출성형은 가스사출성형과 유사하지만 가스사출에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 중앙에 주입되는 물질이 물이므로 수지의 냉각이 빨라 가스사출성형에 비해 성형 사이클 시간이 단축된다. 가스사출성형에서는 핑거링(fingering) 현상으로 벽 두께가 불안정하게 형성되는데 물사출성형에서는 벽 두께가 균일하게 형성된다. 또한, 물이 닿는 내부 표면이 보다 깨끗한 장점도 있다.

3.3 사출압축성형(Injection Compression Molding(ICM))

사출압축성형법(injection compression molding(ICM))은 사출성형공정과 압축공정이 복합된 성형공정이다.¹⁰ 그림 13에 공정이 나타나 있다. 먼저 일반 사출성형공정에서와 같은 방법으로 일정량의 고분자 용융체를 금형의 캐비티 내에 충전한다. 이때 금형은 완전히 닫혀 있지 않고 약간 열려있으며 정밀하게 계량된 고분자 용융체는 캐비티 내를 다 채우지 않고 일부분만을 채운다. 그 다음 금형이 완전히 닫히면서 고분자 용융체를 압축하여 캐비티에 완전히 충전시킨다. 사출압축공정은 일반사출공정에 비해 첫 단계의 사출시 사출압을 낮게 사출하기 때문에 성형품의 게이트 부분에 잔류응력이 작게 형성된다. 그리고, 다음의 압축

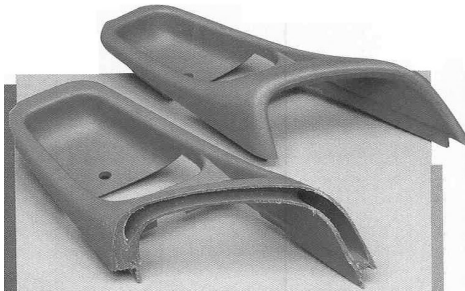


그림 11. Gas injection molded sample.

단계를 통하여 수지가 캐비티에 채워지기 때문에 캐비티 모든 영역에서 균등한 힘을 받게 되며 따라서, 밀도가 균일한 제품을 얻을 수 있고 전체적으로 잔류응력이 작은 성형품을 얻을 수 있다. 투명한 제품의 경우는 복굴절이 낮은 상태로 성형이 가능하여 우수한 광학적 특성이 요구되는 성형품의 성형에 사용된다. CD나 DVD는 사출압축성형법에 의해 성형되며 렌즈처럼 고품질의 광학적 특성이 요구되는 성형품에도 활발히 응용되고 있다.¹¹ 광학적 제품뿐만 아니라 높은 치수품질을 요구하는 기어나 외관 제품에도 이 성형법이 사용되고 있다.

사출압축성형에서 압축운동을 하는 방법은 사출기의 클램핑 운동을 이용하는 방법과 이젝팅 운동을 이용하는 방법이 있는데 이를 이용하여 코어를 움직이게 하거나 전체형판을 움직이게 하면서 압축공정을 수행한다. 그림 14는 사출압축성형법으로 성형된 렌즈의 복굴절 분포를 보여주고 있다.

3.4 반응사출성형(Reaction Injection Molding(RIM))

일반적인 사출성형이나 가스사출성형은 열가소성 수지를 이용하는데 열경화성 수지를 사출하기 위해서는 반응사출성형법(RIM, reaction injection molding)이 사용된다. 열경화성 수지는 수지가 한번 만들어지면 다시 용융되지 않기 때문에 금형 내에서 합성반응을 시키면서 제품을 성형한다.¹² 그림 15에 반응사출성형 공정이 나타나 있다. 반응하여 고분자가 되는 화학 물질들을 따로 공급하며 금형에 들어가기 직전에 믹싱 헤드에서 서로 섞이도록 한 후 플런저를 이용하여 섞인 물질을 밀어 금형에 들어가게 한다. 이렇게 함으로써 점도가 매우 낮은 액체가 금형의 캐비티에 낮은 압력으로 채워지며, 금형 안에서 반응이 완성이 되어 열경화성 수지의 제품을 얻게 된다. 고분자 수지의 고화는 일반사출성형에서는 온도가 낮아짐으로써 이루어지나 반응사출성형에서는 반응이 끝남으로써 이루어진다. 반응사출의 경우 금형의 온도가 일반사출성형에서 보다 높게 하여 반응을 좋게 한다.

3.5 분말사출성형(Powder Injection Molding(PIM))

분말사출성형은 플라스틱 사출 성형 기술의 장점과 분말야금의 장점을 결합시킨 부품 성형 기술이다. 플라스틱 사출 성형 기술의 큰 장점

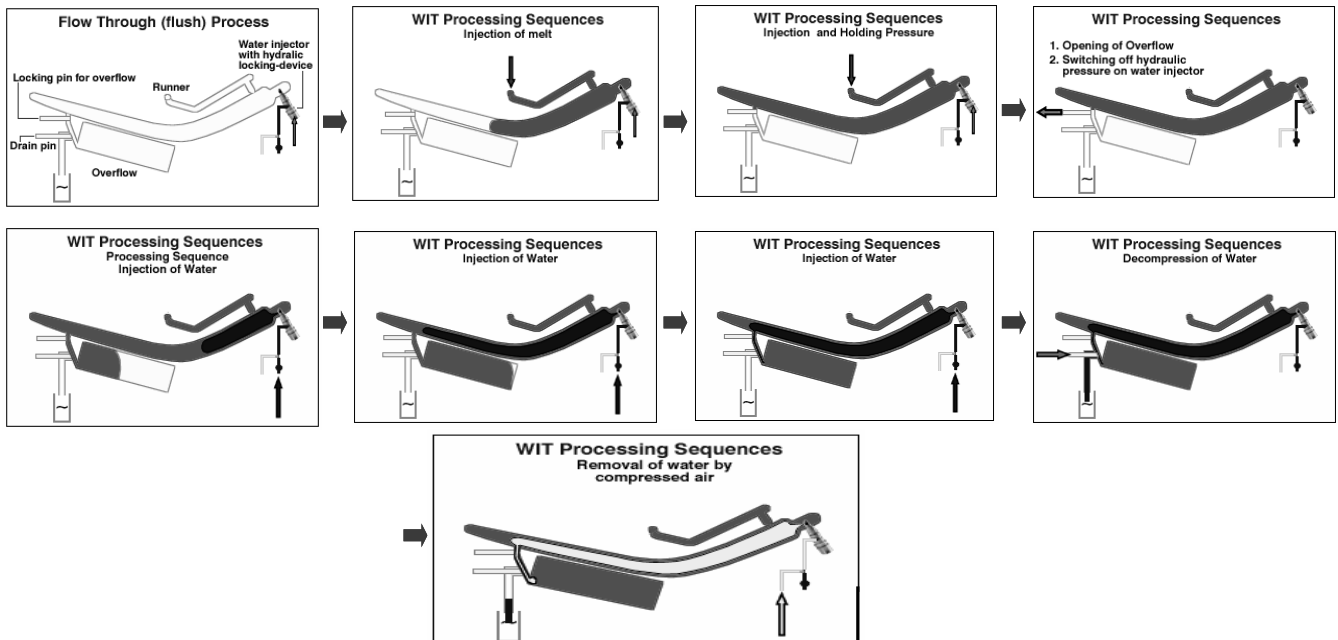


그림 12. Water injection molding process.

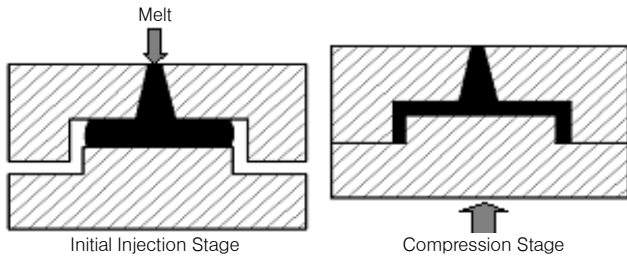


그림 13. Injection compression molding process.



그림 14. Birefringence of lens made by injection compression molding.

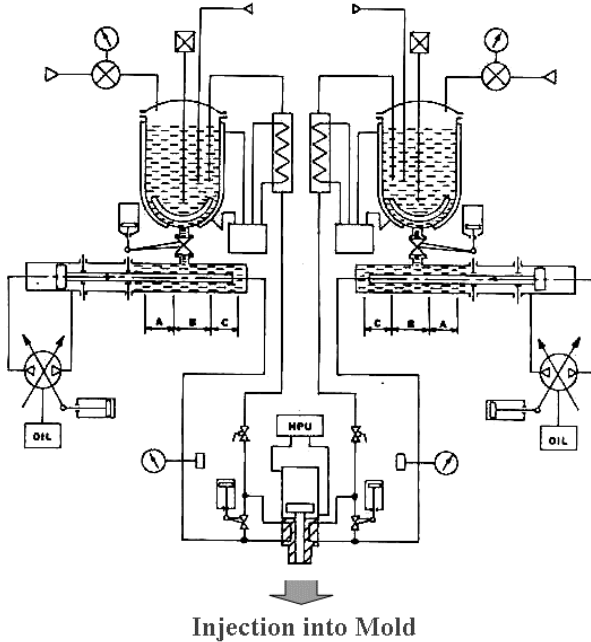


그림 15. Reaction injection molding process.

인 3차원 정밀형상의 대량생산성과 분말야금 기술의 큰 장점인 고용점 재료(주로 1,000 °C 이상)의 성형성을 모두 지닌 특징을 갖고 있다. 분말사출성형 기술은 일반 철합금은 물론 비철합금, 용점이 매우 높은 텅스텐계 및 몰리브덴계의 중합금, 그리고 초경재료와 복합재료 및 세라믹재료까지도 후가공이 거의 없이 3차원의 원하는 형상을 일괄적으로 성형할 수 있는 매우 유용한 부품 제조 기술이다.¹³ 분말사출성형 기술의 상용화로 인하여, 그 동안 형상의 제한때문에 실제 적용이 배제되었던 우수한 기계적 특성의 난가공성 재료의 적용이 매우 용이해져 높은 강도가 요구되는 기계 부품 산업에 응용되고 있다. 또한, 분말사출성형 기술은 기존 분말야금 기술과 비교할 때, 부품 내의 밀도 분포를 매우 균질하게 성형할 수 있고 완성된 제품의 밀도 또한 더 높은 값을 획득할 수 있어 자성재료와 같은 기능성 부품의 경우 성능 면에서

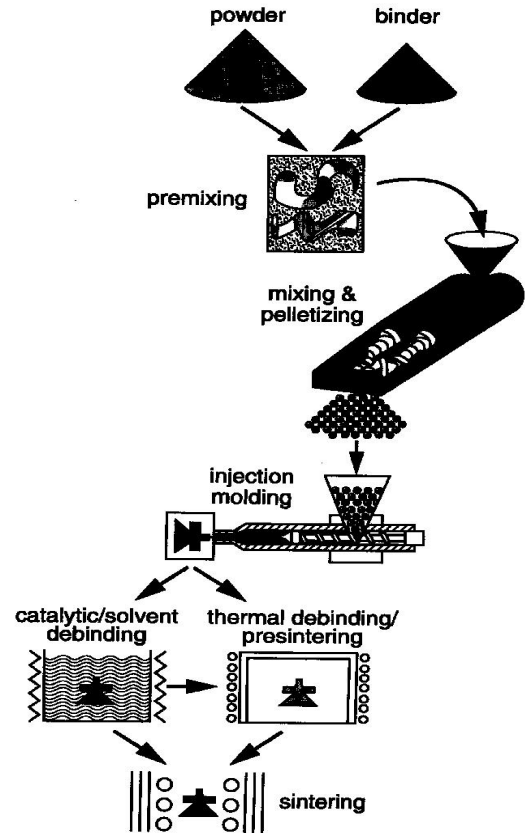


그림 16. Powder injection molding process.

도 매우 우수한 제품을 성형할 수 있는 장점이 있다. 분말사출성형에서 특별히 금속분말을 이용하는 성형을 금속사출성형(MIM, metal injection molding)이라 부른다.

그림 16에는 분말사출성형 공정이 나타나 있다. 분말사출성형 공정은 미세한 산업 재료 분말(금속, 세라믹, 초경 등 고용점 분말)과 유기 결합제를 혼합하여 플라스틱 사출 성형기를 통해 사출 성형체를 성형한 후, 고온에서 처리하여 원하는 정밀부품을 제조하는 공정으로서 혼합물질을 제조하는 공정(feedstock 제조), 사출성형(injection molding), 탈지공정(debiding), 그리고 소결(sintering) 공정 등의 4단계로 나누어 볼 수 있다. 혼합물질을 제조하는 공정 단계에서는 응용부품의 원료분말 및 형상 등을 고려하여 설계 제조된 고분자 결합제(binder)를 혼합하여 사출할 수 있도록 준비하는데, 이 과정에서 고분자 결합제의 선택 및 혼합비 등은 매우 중요하여 분말사출성형의 핵심 기술 중의 하나이다. 분말사출성형에서 사용되는 원료 분말의 크기는 일반적으로 0.1~20 μm 정도의 것을 많이 사용한다. 더불어 원료 분말과 결합제의 혼합비는 최종 제품의 치수 등에 영향을 주는 수축률과 관계가 있으므로 이 또한 사전에 충분한 검토가 있어야 정확한 제품을 얻을 수 있다. 사출성형 단계는 준비된 혼합체를 사출기를 이용하여 금형 내에 충전하여 원하는 형상으로 사출성형체를 성형하는 과정으로, 사출 시 가해진 열은 혼합체 중의 결합제를 용융시켜 혼합체에 유동성을 제공하며 가해진 압력은 혼합체를 금형 내로 충전시킨 후 냉각되어 사출 성형체를 제조하게 된다. 이 과정에서 고려되어야 할 인자로는 사출압력, 사출속도, 온도, 시간 등으로 제품의 형상 및 결합제에 따라 적절한 성형 조건을 이루어야 우수한 사출체를 획득할 수 있다. 탈지 공정 단계는 원하는 형상으로 제조된 사출체에서 최종 제품

에 불필요한 결합제를 용매 또는 열을 이용하여 제거하는 단계로서 제품의 형상을 유지하면서 제거하여야 하므로 적절한 조건이 필요하며 최종적으로 열로 태워버린 후 곧바로 예비 소결 과정까지 이루어져 제품의 형상을 유지시키는 과정이다. 본 과정에 소요되는 시간은 전체 생산성에 영향을 주게 되므로, 결합제 제거 과정시 단시간 내에 사출체에 악영향을 주지 않으면서 제거될 수 있도록 초기 결합제 설계 시부터 결합제의 사용 재료 및 구성비를 결정하는 것이 매우 중요하다. 고온 소결 공정 단계는 결합제가 제거되고 예비 소결된 부품을 적정 온도로 가열 및 유지시켜 분말간의 치밀화(densification)를 통한 수축 과정을 거쳐 부품의 밀도를 높이는 동시에 최종 부품의 형상을 얻는 단계로서 일반적으로 분말사출성형 기술로 생산된 제품의 밀도는 이론 밀도의 95%에서 99% 이상을 획득할 수 있다. 이 단계에서 제품의 특성 및 치수 등이 결정되므로 생산하고자 하는 제품에 따른 소결 조건 즉, 노 내부 온도, 승온 속도, 유지 시간, 그리고 내부 분위기 등을 정확히 결정하는 것이 매우 중요하며, 양산 시 제품의 재현성과 관련이 크기 때문에 이 소결공정 과정이 매우 중요하다.

3.6 기타 특수 사출성형 방법

일반 사출성형에서는 고분자 용융체가 금형의 캐비티까지 들어가게 하는 통로인 스프루와 런너, 게이트가 존재하는데 이는 성형 후 제품에서 분리되어 버려지게 된다. 이러한 소비를 줄이고 또 그 외의 장점을 위해 사출성형에서 스프루와 런너 부분을 성형 사이클 중 냉각을 시키지 않고 용융상태로 유지되도록 하는 런너리스(runnerless) 금형이 있는데 이것은 핫 런너(hot runner)가 대표적이다.¹⁴ 그림 17에 핫 런너 형식의 금형이 나타나 있다. 핫 런너를 이용한 성형은 스프루나 런너에 쓰이는 재료의 소비를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 고속 및 저압성형을 가능하게 하고 성형 사이클 시간을 단축시키는 특징이 있다. 그 이유는 스프루와 런너가 용융되어 있고 또한 냉각시킬 필요가 없기 때문이다. 그러나, 용융수지가 금형 안에서 머무는 시간이 길고 노즐(핫 런너에서 게이트를 포함)에서 정체가 생기면 수지의 탄화 등으로 가스가 발생되거나 변색이 되는 단점도 있다. 따라서, 핫런너에 응용되는 고분자 수지는 열안정성이 좋은 수지로 제한되며 재료에 맞는 노즐 설계가 중요하다. 특히 박육성형(thin-wall molding)에서는 고분자 수지가 흘러가는 통로가 좁고 수지보다 상대적으로 온도가 매우 낮은 금형벽면에 의해 수지가 곧바로 굳어져 흐름이 어려운데 핫 런너 방식으로 고속사출을 하여 성형하고 있다. 이러한 고속사출에서는 캐비티에 있던 공기가 밖으로 잘 빠져나가기야 하기 때문에 공기나 가스 빼기(air venting 또는 gas venting)가 매우 중요하다. 핫 런너에 사용되는 게이트는 그림 18에 나타나있는 것처럼 오픈게이트(open gate)와 밸브게이트(valve gate)가 있다. 오픈게이트는 게이트가 항상 열려 있어 용융수지가 게이트에 도착하면 바로 캐비티로 흘러들어가게 되어있다. 밸브게이트는

게이트의 열림과 닫힘의 시간을 임의로 조절할 수 있다. 따라서, 밸브게이트는 수지가 주입되는 시간을 조절하여 흐름의 균형(balance)을 향상시키는데 응용된다. 그림 19에는 밸브게이트의 응용 예가 나타나 있다. 그림 19에서처럼 세 개의 게이트를 사용하는데 모든 게이트가 동시에 열려 용융수지가 흘러 들어가면 수지가 만나는 웰드라인이 형성되게 된다. 그러나, 게이트의 열림을 조절하면 웰드라인이 없는 성형을 할 수 있다. 즉, 처음에 1번 게이트는 열고 나머지 두 게이트는 닫는다. 그러면 수지는 중앙의 1번 게이트에서 나와 다른 두 개의 게이트 쪽으로 흘러간다. 수지가 다른 두 게이트 위치를 흘러간 직후에 이 두 게이트 즉, 게이트2와 게이트3을 열면 수지가 흘러나와 흐름을 몰아가며 연속적인 충전을 하게 한다. 이때 1번 게이트는 닫는다. 이러한 충전의 경우는 게이트를 여러 개 사용하면서 웰드라인이 없는 성형품을 얻을 수 있다. 또한, 각 게이트에 작용되는 압력이 낮아지므로 성형품에 변형이 작고 잔류응력을 낮게 조절할 수 있는 장점이 있다.

핫런너와 밸브게이트가 활용되면서 새로운 금형과 성형방법이 나타났는데 이것이 스택몰드(stack mold)이다. 그림 20에 스택몰드의 모양이 나타나 있다. 금형이 여러 층으로 구성되어 있고 각 층 사이에서 성형이 이루어진다. 핫 런너가 있고 밸브게이트를 사용하기 때문에 가능한 성형방법이다. 이러한 스택몰드는 여러 수지를 연속적으로 사출(sandwich molding, multi component molding 그리고 over



그림 18. Gate types in the hot runner system.

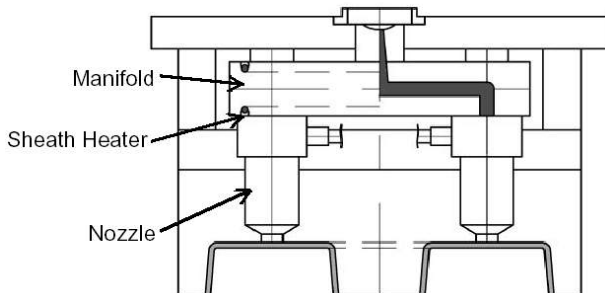


그림 17. Injection mold with the hot runner system.

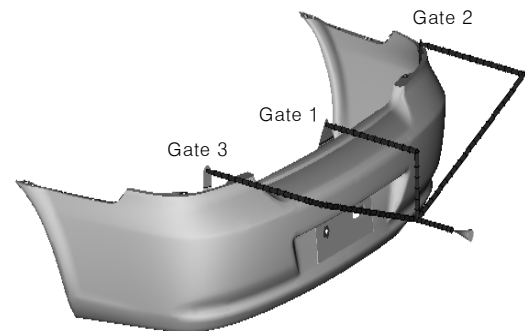


그림 19. Injection molding with valve gate.

molding)을 효과적으로 수행할 수 있는 방법을 제시해 준다. 즉, 두 종류 이상의 소재를 연속적으로 사출하면서 여러 층을 갖는 제품을 성형하거나, 하나의 수지로 사출한 후 다른 수지가 먼저 성형된 제품의 위에 사출하게 하는 방법이다. 이러한 방법은 수지의 주입이 두 곳 이상이고 금형도 단순히 하나의 캐비티로 구성되어 있지 않기 때문에 밸브게이트와 스택몰드를 이용하는 경우가 대부분이다.

일반적으로 사출성형품에 고풍택의 표면이 요구되거나 표면에 결함이 있게 되면 후 가공 즉, 페인팅이나 도금을 통하여 마무리를 하는 경우가 많다. 이렇게 후가공을 하게 되면 공정이 추가되어 생산성이 저하된다. 이러한 경우에는 후가공이 없이 성형이 마무리되도록 즉, 고풍택의 표면을 갖도록 사출성형을 해야 하는데 금형의 온도를 약 120 °C 정도로 높게 올려 성형을 한다. 그러나, 금형의 온도가 높아지면 수지의 냉각시간이 길어지게 되어 전체 성형 사이클 시간이 길어진다. 따라서, 길어지는 성형 사이클 시간을 줄이기 위해 어떠한 방법으로 제품의 표면을 이루는 캐비티 표면을 신속히 가열하고 또한 급격히 냉각하느냐가 매우 중요하다. 가열방법은 스팀으로 가열하고 차가운 물로 냉각하는 RHCM(rapid heat cycle molding) 방법, 토치의 불꽃으로 금형표면

을 직접 가열하는 방법, 고주파 가열법, 적외선 가열법, 전기히터 방법(E-Mold), 그리고 단열법 등이 있다.

다양한 제품의 디자인이 요구되면서 성형품의 형상이 복잡해짐은 물론 고품질의 표면도 요구하고 있다. 고품질의 표면을 위해서 위에서 설명한 금형표면의 온도를 높여서 성형도 하지만 두 가지 재료를 겹쳐서 사출하여 디자인의 수려함과 기능의 향상을 꾀하는 경우도 있다. 이러한 목적으로 성형하는 방법이 오버몰딩(over molding) 또는 겹사출이다. 그 응용의 예로써 하나의 투명한 재료를 사출한 후 그 위에 특별한 색상을 갖는 재료를 사출하여 투명한 소재를 통하여 색상이 있는 재료가 보이도록 하여 눈으로 보이는 느낌을 고급스럽게 하는 경우가 있다. **그림 21**은 1차로 사출한 투명 재료위에 2차로 검은 색의 소재를 사출한 성형품의 복굴절 패턴을 보여주고 있다. 두 재료가 서로 시간 차이를 두고 사출되기 때문에 온도의 불균형으로 잔류응력이 형성되어 후 변형이 문제가 되기도 한다.

4. 압출성형(Extrusion Based Shaping)

압출성형은 동일 단면을 가진 제품 즉 파이프와 봉 및 필름, 시트, 그리고 프레임 등을 연속적으로 성형하는 방법으로 생산성이 높은 성형법이다. 압출성형 공정의 원리는 고체 고분자가 스크류 압출기 내에서 녹으면서 스크류 채널을 따라 앞으로 진행된 후 스크류 끝에 형성된 높은 압력에 의해 압출기 끝의 다이를 통하여 압출되면서 성형되는 것이다.¹⁵ 일정한 단면형상을 갖는 압출된 소재는 물, 공기 또는 물 등의 냉각장치에 의해 냉각 고화되어 원하는 형상 및 치수로 성형된다. 압출기는 배럴 안에 스크류가 한 개만 있는 단축 압출기와 두 개 이상 있는 다축 압출기가 있다. 압출성형기에서는 토출량이 일정한 단축 압출기가 쓰이며 스크류 끝에 기어펌프 등을 부착하여 다이쪽으로 나가는 용융수지의 토출량을 더욱 일정하게 하고 있다. 다축 압출기는 이축 압출기가 많이 쓰이는데 이축 압출기는 고분자 재료의 믹싱과 컴파운딩(mixing and compounding)에 주로 쓰인다.

그림 22는 일반적으로 사용되는 단축 스크류 형상을 나타내는데 이것은 고분자 재료를 호퍼로부터 받아 스크류에 이송시키는 공급부(feed section), 재료를 압축과 함께 가소화시키는 압축부(compression section), 온도를 균일하게 하며 일정량의 용융된 재료가 압출되도록 계량하는 계량부(metering section)로 그의 역할이 구분된다. 공급부, 압축부, 그리고 계량부의 기능은 각각 고체이송, 가소화, 그리고 가소화된 수지의 균일화이다. 스크류 끝과 다이 사이에 스크린 팩(screen pack)과 브레이커 플레이트(breaker plate)를 끼워서 불순물을 걸러내며 소재의 'Turning Memory' 현상을 방지한다. 그 이유는 스크류 채널을 돌면서 진행되는 고분자 용융체는 그의 회전 영향이 남아있어

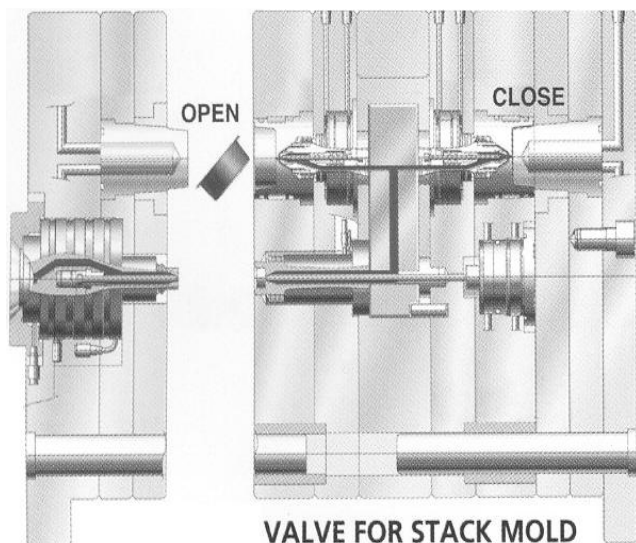


그림 20. Injection molding with stack mold.

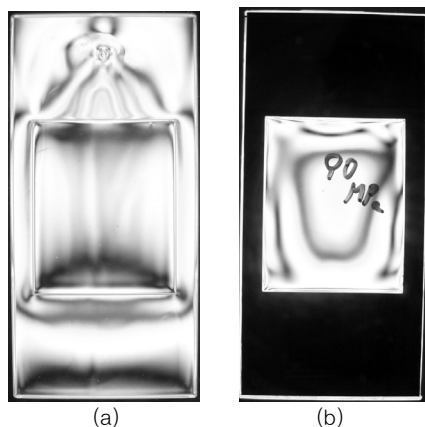


그림 21. Birefringence pattern of over-molded product: (a) injection molding of the first resin; (b) the final product after injection molding of the second resin.

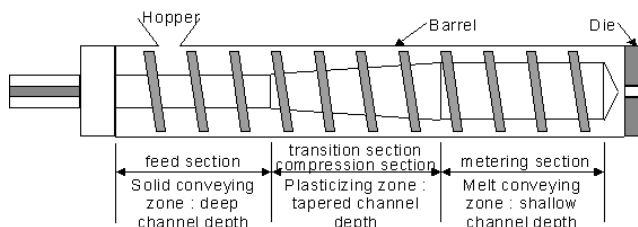


그림 22. Conventional single screw in a screw extruder.

다이까지 그 영향이 갈 수 있으므로 이를 제거하기 위해서이다.

단축 스크류에서 각 구간별 스크류의 형상 및 고분자 용융수지의 거동은 다음과 같다. 고체 고분자를 이용하는 공급부의 스크류 채널은 다른 구간에 비해 깊이가 깊다. 공급되는 고분자 수지의 형태는 그레놀(granule), 펠렛(pellet), 그리고 파우더(powder) 형태인데 이러한 고분자 수지는 스크류가 회전할 때 배럴 내면의 마찰력에 의해 스크류 채널을 따라 돌면서 앞으로 이송하게 된다. 이 구간에서 이송 능력을 증가시키기 위해서 배럴 안쪽면의 마찰이 크게 유리한데, 이를 위해 배럴 안쪽에 요철(groove)을 만들어 배럴을 제작하는 경우도 있다. 고체 고분자를 녹이는 압축부는 스크류 뿌리 지름이 압축부 시작부와 끝 부분이 다른 테이퍼로 되어 있어 스크류 채널 깊이가 앞으로 진행하면서 감소하고 있다. 압축부 시작 점인 공급부의 채널 깊이를 압축부가 끝나는 점인 계량부의 채널깊이로 나눈 값을 압축비라 한다. 고분자 수지는 이러한 형상을 갖는 압축부를 지나면서 강하게 압축이 되고 고분자 사이 그리고 고분자와 배럴 사이의 마찰열과 배럴에 부착된 밴드 히터에 의해 고체 고분자는 녹게 된다. **그림 23**은 고분자 수지가 용융되어가고 있는 현상을 도식적으로 나타내고 있는데 가장 일반적으로 공감되는 모델이 그림의 Tadmor 모델이다. 스크류 채널안의 고체상태의 고분자와 용융체가 공존하는 형상은 재료, 스크류 형상, 그리고 압출기 운전 조건

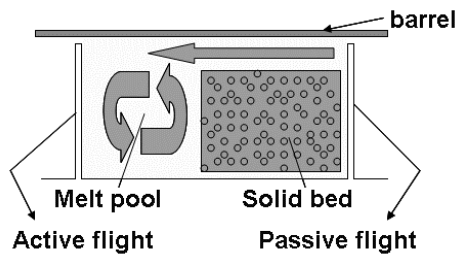


그림 23. Melting mechanism in a screw channel.

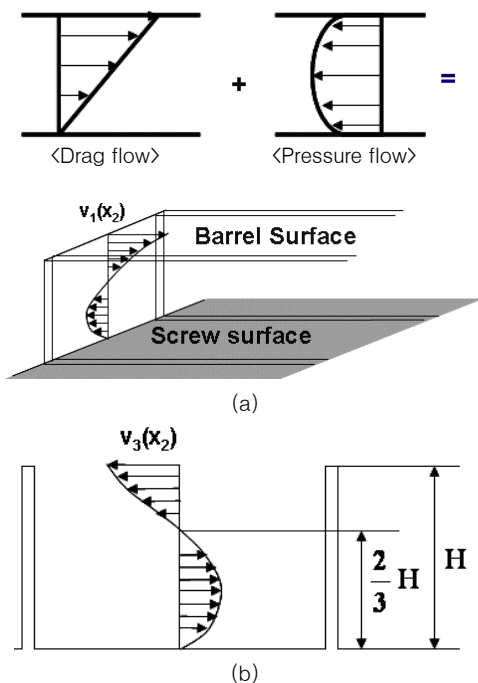


그림 24. Flow in a screw channel: (a) down channel direction; (b) cross channel direction.

에 따라 다르게 나타날 수 있다. 압축부를 지나면서 가소화된 고분자 용융체는 계량부에 다다르게 되는데 계량부의 스크류 채널 깊이는 전체 스크류 영역에서 가장 얇다. 이 계량부에서 고분자 용융체는 균일화가 이루어지고 높은 압력이 형성된다. 고분자 용융체는 계량부를 지나 스크류 끝으로 이송되고 이때 형성된 높은 압력에 의해 다이를 통하여 다이 밖으로 빠져나간다. **그림 24**는 스크류 채널 내에서 일어나는 드래그 흐름(drag flow), 압력 흐름(pressure flow) 그리고 이 두 흐름들이 복합되어 스크류 채널을 따라 흘러가는 속도분포를 나타내고 있다. 또한, 스크류 채널 단면 내에서의 회전 흐름도 나타내고 있다. 사용하는 고분자의 녹는 양상에 따라 이에 맞는 스크류의 설계 및 선택이 중요하며 스크류 직경(D), 스크류의 압축비(공급부 스크류 채널의 깊이/계량부 스크류 채널의 깊이) 및 길이와 스크류 외경의 비(L/D)가 스크류의 디자인에서 중요한 요소이다.

일반적으로 프로파일 압출 시 사용되는 다이는 고분자 재료가 다이를 빠져 나올 때 보이는 다이 스웰(die swell 또는 extrudate swell)을 고려하여 **그림 25**의 점선과 같은 모양으로 설계하여 실선과 같은 형상의 제품을 얻는다. 고분자 소재가 다이를 빠져 나오며 팽창(die swell, 또는 extrudate swell)을 하는 현상은 다이 벽에 작용하는 수직응력, 재료의 탄성 복원력, 메모리 효과, 고분자 용융물의 엔트로피 탄성(entropic elasticity of polymer melt) 등으로 설명되는데 이는 점탄성 소재(viscoelastic material)가 갖는 탄성 특성(elastic property) 때문이다. 다이 스웰의 정도는 소재가 갖고 있는 탄성 특성의 크기에 의해 결정되는데 같은 소재라 하더라도 성형조건에 따라 탄성의 영향은 다르게 표출된다. 성형 중에 나타나는 점탄성의 정도를 무차원수(dimensionless number)로 나타내는데 이는 와이젠버그 수(weissenberg number)와 데보라 수(deborah number)인데 이들 값이 크면 성형 중에 소재의 탄성의 성질이 크게 작용함을 의미한다. 주어진 성형공정에서 전단 변형률(shear rate) 또는 전단 응력(shear stress)이 클수록, 온도가 낮을수록 그리고 다이에서 소재의 이동 경로가 작을수록 즉, 다이의 길이가 작을수록 또는 잔류시간이 작을수록 스웰이 증가되기 때문에 성형조건을 고려한 다이 형상의 설계가 중요하다. 일반적으로 압출에 쓰이는 고분자의 그레이트(grade)는 사출성형에 쓰이는 그레이트에 비해 분자량이 높다. 또한, 분지화된 구조의 그레이트가 쓰이는 경우가 많다. 사출성형에서는 낮은 점도가 중요하지만 압출성형에서는 용융강도(melt strength)가 중요하기 때문이다. 일반적으로 분자량이 클수록, 분지화된 분자구조의 수치가 그리고 분지량분포가 큰 수치가 용융강도가 크다. 고무재료는 탄성의 성질이 매우 크기 때문에 다이 스웰이 커서 정확한 형상의 압출을 어렵게 하고 있다. 압출성형의 연구는 주로 최적 제품의 프로파일을 예측하기 위한 연구가 주를 이루고 이를 위해 수치 해석적인 연구도 많이 있다.

압출공정에 의한 필름이나 판재의 성형과정은 스크류 압출기에 의해 가소화된 고분자 수지를 다이로 압출하고, 여러 개의 압출 롤(role) 상에서 냉각하고 양 귀를 트림(trim)하여 일정한 치수로 제작된다. 다이

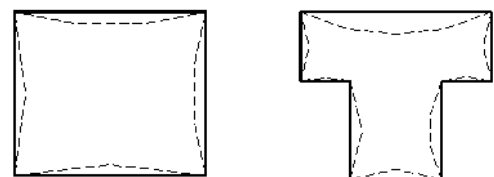


그림 25. Die(dot line) and swelled(solid line) profiles of extrudate.

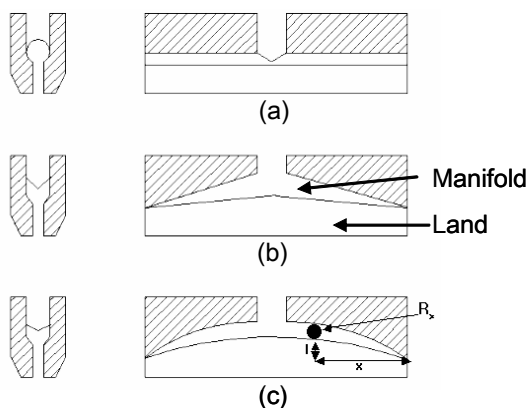


그림 26. Die design for extrusion: (a) T die; (b) fishtail die; (c) coathanger die.

에서 빠져나온 용융고분자가 두 개의 물 사이를 지나갈 때 두 물의 입구 부에 용융 고분자가 쌓이게 되는데 이것을 멜트뱅크(melt bank)라 한다. 멜트뱅크가 안정된 형상을 유지해야 양품의 압출물을 얻을 수 있다. 그림 26에 압출용 다이의 종류가 나타나 있다. 스크류 압출기로부터 다이부의 중앙으로 들어오는 용융고분자를 폭이 넓은 다이 끝으로 균형 있게 흘러 보내는 것이 매우 중요하다. 그림에서는 T형, fishtail형, coat hanger형 다이를 보여주고 있는데 중앙으로 유입된 고분자 용융체는 다이내의 매니폴드(manifold)를 따라 다이의 횡 방향 즉, 압출의 직각 방향으로 흘러가면서 매니폴드를 넘어서 랜드(land)를 통하여 다이의 종 방향, 즉 압출방향으로 흘러간다. 이렇게 랜드를 따라 흘러나온 고분자 용융체는 다이 출구를 지나 압출된다. 판재의 폭 방향의 품질은 다이내에서 횡방향 흐름 균형과 관련이 되어있어 다이 내부의 형상에 크게 좌우된다. 그리고, 판재의 길이방향의 품질은 운전조건에 많이 관련이 되어있다. 따라서, 판재압출용 다이는 치수 정밀도보다는 다이 내에서의 고분자 용융물의 균형있는 흐름이 설계의 주안점이 된다. 다이의 출구부(die lip)는 간격(두께)을 조절할 수 있게 되어 있어 하나의 다이로 여러 두께의 판재를 압출 할 수 있도록 설계되어 있다.

5. 블로우성형(Blow Molding)

블로우성형은 중공 플라스틱 제품을 만드는 공정인데 크게 세 가지 방법이 있다.¹⁶ 즉, 압출 블로우(extrusion blow, 또는 direct blow), 사출 블로우(injection blow) 그리고 사출 연신 블로우성형(injection stretch blow molding) 등이다. 압출 블로우성형은 그림 27에 보는 것처럼 압출기를 이용하여 고분자를 녹이고 압출기 끝에 중공 파이프 모양과 같이 속이 빈 모양을 형성할 수 있는 다이를 부착하여 패리슨(parison)을 만든다. 보통 수직으로 내려오는 패리슨을 열려있는 블로우 금형 안으로 들어가게 한 다음 금형을 닫고 패리슨을 자른 다음 옆으로 금형을 이송한 후 패리슨 안에 공기를 불어 넣는다. 이때 또다른 금형은 패리슨이 내려오는 곳으로 가서 다음 성형을 하게 된다. 패리슨이 팽창하면서 금형벽면에 접촉되면서 중공 제품이 형성되고, 낮은 금형의 온도에 의해 성형품이 냉각되면 금형을 열고 성형품을 빼낸다. 패리슨을 만드는 압출공정에서 패리슨이 중력에 의해 처짐 현상이 발생하여 두께가 변하는 것을 보상하거나, 또는 패리슨의 길이 방향으로 두께를 조절할 때는 압출 다이에 있는 맨드릴(mandrel 또는 parison variator)의 위

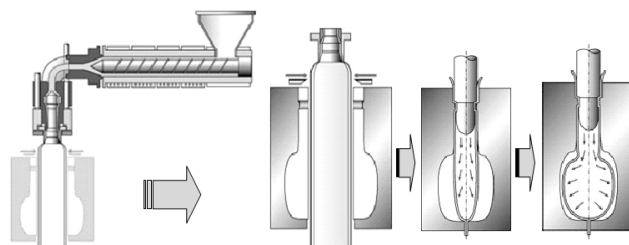


그림 27. Direct (extrusion) blow molding process.

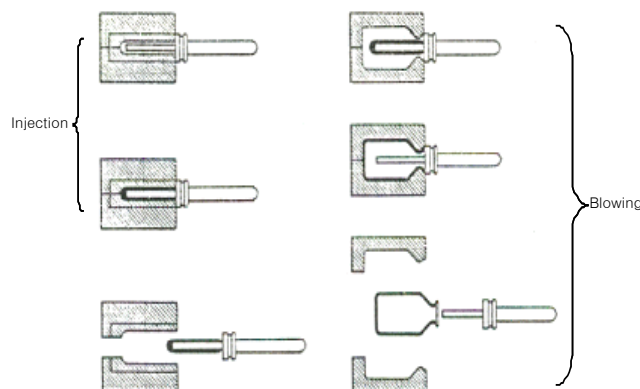


그림 28. Injection blow molding process.

치를 압출 중에 변화시키며 조절한다. 이 공정에 쓰이는 고분자는 주로 PP, PE, PC 등이 쓰이는데 용융 상태의 고분자 패리슨이 형상을 유지하지 못하고 처지는 현상(sagging)이 없도록 용융상태의 물성이 조절된 그레이드(grade)가 적절하다.¹⁷ 이는 용융강도(melt strength)가 큰 소재가 알맞다. 앞의 2.3절의 압출성형에서 설명한 압출 그레이드의 요구조건과 유사하다. 압출 블로우에서 금형 안에서 성형된 병을 어느 정도까지 냉각하는지가 제품의 강도에 영향을 미친다. 결정성 고분자인 경우 낮은 금형온도의 금형 속에서 냉각을 끝내면 결정화도가 낮아 물성이 낮고 금형 안에서 냉각 시간은 짧게 하고 대기 중에서 2차로 서냉하면 결정화도가 높아져 강도의 향상을 기대할 수 있다. 그러나, 이러한 경우 총 냉각 시간이 길어지고 대기 중에서 냉각 시 제품의 치수변화가 일어날 가능성이 있다.

그림 28에 사출 블로우 공정이 나타나 있다. 사출 블로우성형은 프리폼(preform, 또는 parison이라 부르기도 하는데 parison은 주로 압출 블로잉에 쓰이는 튜브모양의 형상을 말한다)이라 불리는 중공 성형품을 사출성형에 의해 성형하고 금형이 열린 후 금형의 코어에 끼워져 있는 프리폼을 취출하지 않고 그대로 블로우 금형 속으로 이송하고 코어 금형 속에서 공기가 나와 블로우 작업을 한다. 이러한 사출 블로우는 하나의 기계에서 사출과 블로잉이 연속적으로 한 번에 이루어지기 때문에 1 단계 블로우성형(one stage blow molding)이라 부르기도 한다. 그림 29에는 사출 연신 블로우 공정이 나타나 있다.^{18,19} 사출 연신 블로우성형은 먼저 사출성형에 의해 프리폼을 성형한다. 성형된 프리폼을 다른 장소에 있는 블로우 기계에 공급하여 블로우성형 작업을 한다. 따라서, 이 사출 연신 블로우성형을 2 단계 블로우성형(two stage blow molding)이라 일컫는다. 병에 담겨질 내용물의 종류에 따라 병 주입구를 결정화 처리를 한다. 주스나 곡류 음료는 약 90 °C 정도로 살균하여 주입되기 때문에 병 주입구의 고온에서 기계적 강도가 중요하며 이를 위해 병 주입구를 결정화시킨다. PET 소재에서 결정화도의 증가에 따

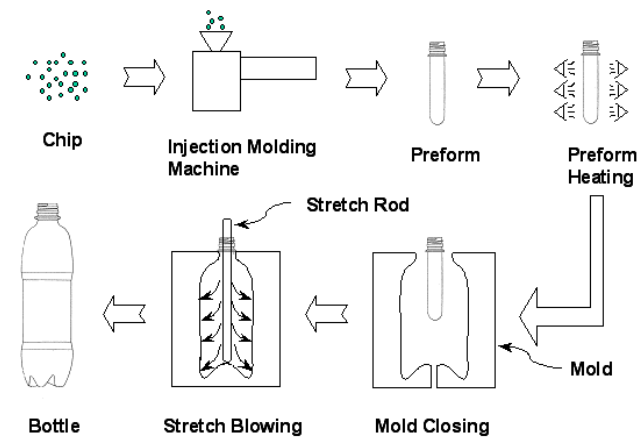


그림 29. Injection stretch blow molding process.

라 그의 기계적 성질이 크게 향상되기 때문이다. 그 후 프리폼의 몸통을 가열하여 블로우 금형 안으로 이송시킨 후 금형을 닫고 블로우 준비를 한다. 금형 안에서 블로우 바로 직전에 스트레칭 로드를 사용하여 프리폼을 축 방향으로 스트레칭시키면서 블로잉하여 중공 성형품을 만든다. 이 방법은 비교적 길이가 긴 중공품을 성형할 때 프리폼이 축 방향으로 확실히 연신되게 하는 효과가 있다. 일반적으로 튜브모양의 프리폼 내에 고압의 공기가 주입되면 길이 방향보다 원주방향(Hoop 방향)으로 연신이 더 크게 일어나기 때문에 스트레칭 로드를 이용하여 축 방향으로 연신시킨다. 사출 블로우성형이나 사출 스트레치 블로우성형은 프리폼이 사출성형에 의해 제작되기 때문에 프리폼의 두께 분포를 정밀하게 설계하여 성형할 수 있는 장점이 있다. 블로우 금형은 중공품의 외곽 모양을 형성하는데 중공품의 최종두께분포는 정해진 외곽 즉 주어진 블로우 금형 모양과 블로우 전 프리폼의 두께 분포에 의존된다. 블로잉된 병은 소재의 스트레치에 의해 높은 기계적 물성을 갖는데 블로우 성형에서는 두 방향 즉, 축방향과 원주방향으로 연신이 일어나 물성의 증가가 있다. 그러나, 이러한 물성의 증가도 소재의 기본 연신비(natural draw ratio) 이상으로 연신이 되어야 가능하며 그 이하의 연신에서는 강도의 증가 없이 두께만 얇아져 구조적 강도가 저하된다. 이렇게 기본 연신비까지 연신시키기 위해서는 최종 병의 형상에 따른 프리폼의 두께분포 설계가 매우 중요하다. 병의 두께분포는 공정상의 변수, 즉 프리폼 가열 온도나 블로잉 압력, 그리고 스트레칭 로드와 스트레칭 조건에 의해서도 좌우된다.

대부분의 PET병은 사출 스트레치 블로잉 법으로 제작되는데 병의 투명도는 성형조건과 밀접하게 관련되어 있다. 원래 PET는 결정성 플라스틱이기 때문에 불투명하다. 그래서, 사출성형에 의해 프리폼을 성형할 때 금형의 온도를 낮게 하여 급랭시켜 결정화도를 아주 낮게, 즉 약 5% 이하로 하여 투명한 프리폼을 얻는다. 그 후 스트레치 블로잉에 의해 병을 성형하는데 소재에 가해지는 변형에 의해 PET는 결정을 이룬다(strain-induced crystalline). 성형된 PET병의 몸통은 실제로 약 50% 정도의 결정을 갖고 있음에도 불구하고 변형에 의한 결정은 그 크기가 빛의 파장보다 작기 때문에 투명하다. 그러나, 성형 중 프리폼의 가열 온도가 너무 높으면 열에 의한 결정이 진행되어 결정크기가 커져 투명도가 저하된다. 그림 30에는 탄산음료용 사출 연신 블로우성형용 금형이 나타나 있다. 탄산음료용 PET병의 바닥면은 잘 세워질 수 있도록 꽃잎모양(petaloid)으로 디자인되어 있는데 내용물의 온도가 증가되어 병의 압력이 증가하면 이 부분에서 응력집중이 심하여 크랙이 생기는 문제



그림 30. Mold for injection stretch molding for carbonated soft drink.

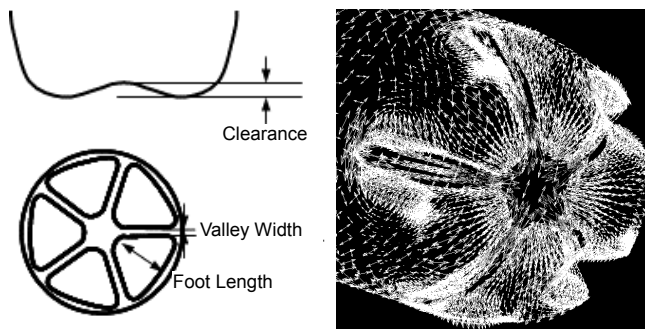


그림 31. Design variables of petaloid bottom and maximum principal stress on the bottom.

가 있다. 여기에서 크랙의 원인이 되고 있는 크레이징(crazing)을 없애기 위해 최대 주응력(maximum principle stress)이 최소가 되도록 적절한 형상의 꽃잎모양으로 디자인하고 있다. 그림 31에는 꽃잎모양의 설계변수와 바닥 면에 집중되고 있는 최대주응력을 보여주고 있다.

2000년대 초반부터 맥주병용 PET병이 미국을 중심으로 선을 보였으며 이제는 국내에서도 맥주병 뿐만 아니라 우유병에도 활발히 사용되고 있다. 맥주병용 PET병에서 가장 중요하게 요구되는 것은 가스 차단성(gas barrier property)이다. 이를 위해서 성형된 PET병에 플라즈마 코팅(plasma coating)을 하거나 다층벽으로 병을 만든다. 다층벽의 병은 먼저 프리폼을 다층 벽으로 사출성형(coinjection molding)한 후 병으로 블로잉하는 방법이다. 다층 벽으로 할 때 중앙 층의 재료는 가스 차단성이 높아야 하는데 이를 위해 나일론 나노 복합 고분자를 사용하기도 한다. 프리폼의 사출성형 시 게이트는 병의 바닥을 형성하는 위치에 있다. 이 게이트 부위는 잔류 응력이 많이 집중되어 있어 취할 뿐만 아니라 게이트 자국도 있고 투명도도 좋지 않다. 따라서, 게이트 자국이 없는 프리폼을 성형하기 위해 사출성형 대신 압축성형을 도입하는 경우도 있는데 향후 더 많이 채택될 전망이다.

6. 기타 고분자 성형공정

6.1 압축성형(Compression Molding)

압축성형은 각종 플라스틱 성형법 중 가장 역사가 오래된 열경화성 수지 성형의 대표적인 성형법이다. 그림 32와 같이 분말상태의 성형재료를 적절한 온도로 조절되는 캐비티 안에 넣고 가열, 가압하여 성형한다. 성형재료가 캐비티 안에서 가열되면 유연해 지고 금형의 코어가 캐비티 안의 성형재료를 가압하여 캐비티 안을 채우게 된다. 그리고, 화학반응에 의해 경화되어 제품을 형성하게 된다.^{16,20}

열가소성 수지도 압축성형에 응용된다. 사출성형품은 항상 게이트를

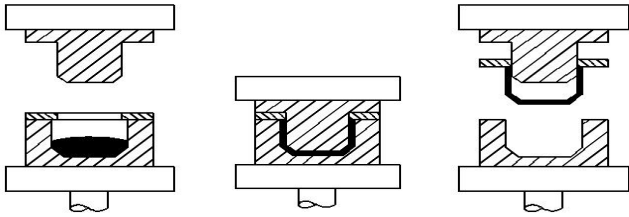


그림 32. Compression molding process.

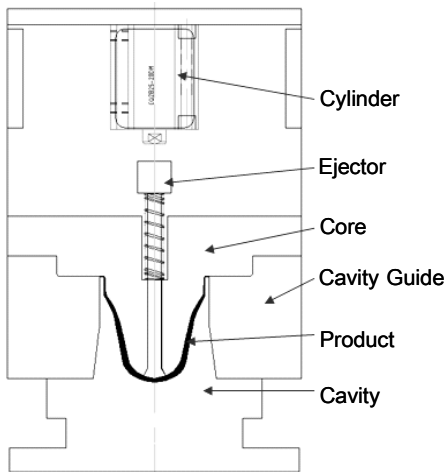


그림 33. Compression molding of preform for blow molding.

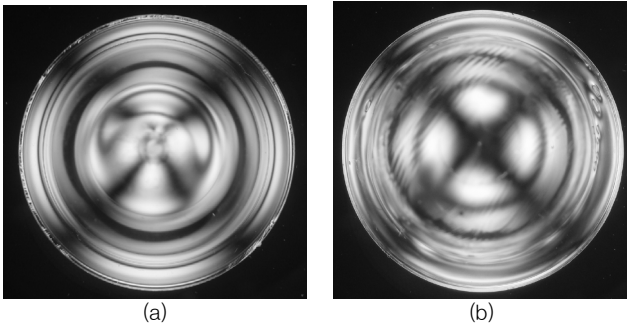


그림 34. Comparison of the birefringence pattern of injection molded and compression molded performs: (a) injection molded perform; (b) compression molded perform.

통하여 수지가 유입되어 성형이 이루어지는데 게이트 부분은 잔류응력이 크게 존재하여 취약할 뿐만 아니라 게이트 마크와 같이 표면도 좋지 않고 변색의 자국이 보이기도 한다. 이러한 결점이 없도록 성형을 하기 위해 압축성형을 하기도 한다. 그림 33은 블로우 성형에 쓰이는 프리폼을 압축성형으로 성형하는 과정을 나타내고 있다. 일정량의 고분자 용융체를 캐비티에 넣고 펀치 또는 플런저로 눌러 프리폼을 성형하고 있다. 그림 34는 사출성형과 압축성형으로 제작한 프리폼 바닥부분의 복굴절 패턴을 보여주고 있다. 압축성형으로 성형된 프리폼 바닥이 잔류응력이 작고 매우 깨끗한 상태를 확인할 수 있다.

6.2 트랜스퍼성형(Transfer Molding)

트랜스퍼성형은 사출성형법과 유사하며 사용되는 재료는 주로 성형 기계에서 가소화시키기 어려운 열경화성 수지 등을 성형한다.^{16,21} 사출성형과 다른 점은 재료를 다른 곳에서 가소화시킨 상태로 가져온 후 금형 속으로 압입하는 것이다. 그림 35는 그 원리를 나타내고 있다. 예열시

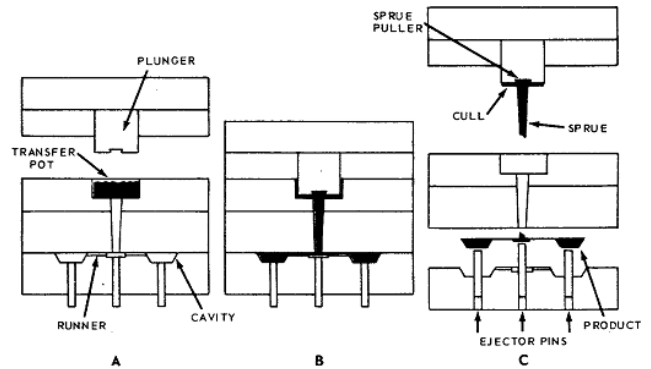


그림 35. Transfer molding process.

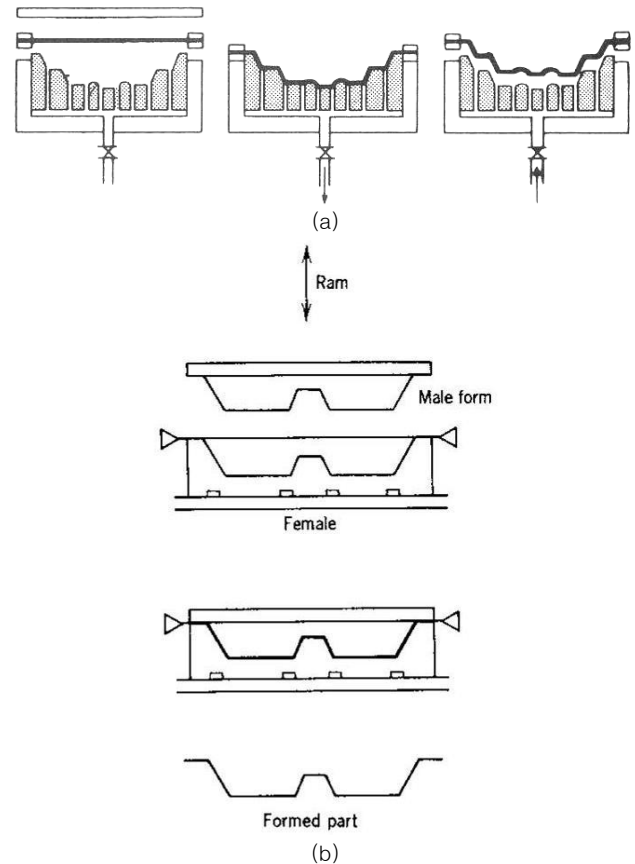


그림 36. Thermoforming process: (a) vacuum; (b) ram forming.

킨 열경화성 수지를 포트라고 부르는 재료실에 투입한다. 포트에 투입된 재료를 식지 않도록 가열하고 플런저로 가압하여 스프루, 런너 그리고 게이트를 통해 금형의 캐비티에 들어가게 하며 금형 내에서 일정시간 동안 가열 경화시키는 방법이다. 트랜스퍼 성형은 고무성형에 많이 활용되고 있고 열경화성 수지의 활용이 확대되면서 반도체 금형 등에 응용되고 있다.

6.3 열성형(Thermoforming)

열성형법(thermoforming)이란 플라스틱 판재를 가열하여 연화시키고 여기에 외력을 가해 성형하는 방법이다.^{16,22} 외력의 형태에 따라 진공성형법(vacuum forming)과 램이나 플런저를 이용한 성형법으로 나뉜다. 그림 36에 그 공정이 나타나 있다. 진공성형의 원리는 열가소성 판재를 가열한 다음 금형 쪽으로 이송하거나, 판재를 금형 위에 고정하고

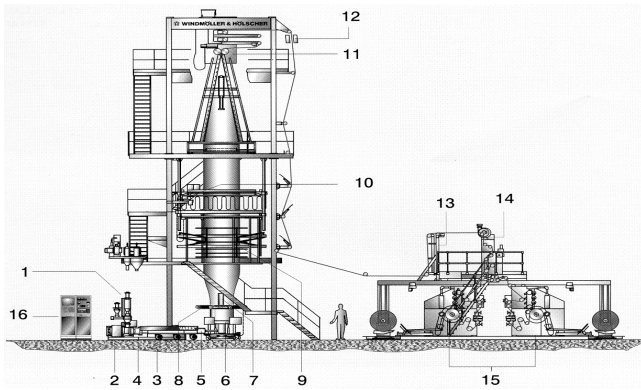


그림 37. Film blowing process.

히터로 가열해 연화시킨 후 진공으로 금형에 흡착시켜 성형하는 것이다. 진공성형의 압력은 1기압 이하이므로 금형은 금속, 석고, 목재, 열경화성 수지 등을 사용할 수 있지만 대량생산의 경우에는 금속을 사용한다. 플런저를 이용한 방법은 연화된 판재를 플런저 또는 펀치로 눌러 판재가 금형의 캐비티에 압착되게 하여 성형하는 방법이다.

열성형 제품의 용도로는 성형능률이 좋고 값싼 얇은 제품을 얻을 수 있어서 종이를 대체하는 각종 1회용 용기, 포장용기, 자동차 센터 필러와 냉장고의 내장 부품, 가면 등의 완구, 입체간판 등이 있다.

6.4 필름 블로잉(Film Blowing)

필름 블로잉 공정은 고분자를 압출장치에서 녹이며 앞으로 압출한 후 압출기 끝에서 블로잉하고 식혀서 옆 부분이 막힌 두 겹으로 된 필름을 제조하는 공정이다.^{16,23} 이러한 필름 블로잉 즉, 필름 제조공정은 압출기 끝에 설치된 링 다이를 사용해 용융된 튜브를 압출하고 그 속에 공기를 불어넣어 원하는 치수로 부풀게 한다. 그리고 공기 중에서 냉각시키며 접어서 연속적으로 옆 부분이 막힌 두 겹의 필름을 만든다. 그림 37에 그 공정이 나타나 있다. 이 공정에서 중요한 사항은 필름이 윗쪽으로 불어지면서 수지가 식는 선(frozen line)의 위치조절과 성형과정 중에 필름이 터지지 않게 하는 것이다. 이 공정에 사용되는 수지는 용융강도가 큰 그레이드를 사용하여 성형성을 좋게 한다.

7. 맺음말

지금까지 고분자가공에서 핵심적으로 사용되는 여러 가지 방법과 성형원리, 그리고 특성에 대해서 알아보았다. 성형재료, 성형기계 그리고 금형이 잘 조화되어야만 완전한 성형이 이루어지기 때문에 이 과정은 매우 복잡하다. 따라서, 성형기술은 재료, 성형기계의 조작, 그리고 제품 및 금형설계기술의 복합기술이라고 말할 수 있다.

성형이 주로 용융상태에서 이루어지기 때문에 재료 측면에서는 유변학적 성질이 중요하다. 유변학적 성질 중 점도가 흐름성질을 크게 좌우하고 있으며 대부분의 고분자 용융체는 점탄성의 특성을 갖고 있어 다 이 압출 등의 공정에서는 점탄성의 특성을 충분히 고려해야만 올바른 성형을 할 수 있다. 따라서, 재료적 측면에서는 유변학적인 측면의 이해가 성형을 이해하는데 중요한 요소라 하겠다. 성형기계의 조작이나 설정은 온도, 압력, 시간, 그리고 속도의 함수로 구성되어 있다. 이의 조절은 성형하는 재료의 특성에 맞게 조절되어야 함은 물론 금형 및 제품의 형상에 따라라도 최적화되어야 한다. 또한, 성형 사이클 시간이 기계의 조작에 크게 의존되기 때문에 성형기계의 성형조건 설정은 매우

중요한 항목이며 재료의 내부 상태 등은 성형 중에 결정되기 때문에 성형기계의 세심한 조작이 요구된다. 금형은 제품의 형상을 포함하고 있기 때문에 올바른 형상이 나오기 위해서는 금형의 형상이 중요하며 금형의 구성 역시 중요하다. 똑같은 형상의 제품을 성형하는 금형이라 하더라도 금형의 구성과 결합상태, 구동방법은 설계자에 따라 다르게 설계된다. 금형설계 측면에서는 소재의 유변학적 특성과 성형기계의 특성에 맞는 금형이 설계되어야 성형불량이 줄고 내구성이 있는 금형이 된다 하겠다. 결론적으로 소재, 성형기계, 그리고 금형기술의 조화가 최적화된 정밀제품을 성형할 수 있다.

참고문헌

1. I. Rubin, in *Injection Molding*, John Wiley & Sons, NY (1972).
2. R. A. Malloy, in *Plastic Part Design for Injection Molding*, Hanser, NY (1994).
3. J.-F. Agssant, P. Avenas, J.-PH. Sergent, and P. J. Carreau, in *Polymer Processing*, Hanser, Munich (1991).
4. K. M. B. Jansen, D. J. van Dijk, and E. V. Burgers, *Intern. Polym. Process.*, **13**, 99 (1998).
5. J. Greener and R. Wimberger-Friedl, in *Precision Injection Molding*, Hanser, Munich (2006).
6. J. P. Braumont, R. Nagel, and R. Sherman, in *Successful Injection Molding*, Hanser, Munich (2002).
7. A. I. Isayev, *Polym. Eng. Sci.*, **23**, 271 (1983).
8. H. Potente and M. Hansen, *Intern. Polym. Process.*, **8**, 345 (1993).
9. S.-J. Liu and Y.-S. Chen, *Polym. Eng. Sci.*, **43**, 1806 (2003).
10. H.-S. Lee and A. I. Isayev, *Inter. J. Prec. Eng. Manufact.*, **8**, 66 (2007).
11. R. Y. Chang, W. Y. Chang, Y. H. Yang, W. L. Yang, and D. C. Hsu, *Society of Plastics Engineers*, **1**, 741 (2001).
12. D. J. Prepelka and J. L. Wharton, *J. Cell. Plast.*, **11**, 87 (1975).
13. M. F. Aksit and D. Lee, *Inter. J. Powder Metallurgy*, **31**, 351 (1995).
14. P. Unger, in *Hot Runner Technology*, Hanser, Munich (2006).
15. C. Rauwendaal, in *Polymer Extrusion*, Hanser, NY (1990).
16. D. H. Morton-Jones, in *Polymer Processing*, Chapman and Hall, NY (1989).
17. M.-Y. Lyu, J. S. Lee, and Y. Pae, *J. Appl. Polym. Sci.*, **80**, 1814 (2001).
18. M.-Y. Lyu and Y. Kim, *Intern. Polym. Process.*, **17**, 279 (2002).
19. M.-Y. Lyu and Y. Pae, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 1145 (2003).
20. D.-K. Kim, H.-Y. Choi, and N. Kim, *J. Mater. Process. Tech.*, **49**, 333 (1995).
21. Y. M. Ismail and G. S. Springer, *J. Compos. Mater.*, **31**, 954 (1997).
22. M. Mogilevsky, A. Siegmans, and S. Kenig, *Polym. Eng. Sci.*, **39**, 322 (1998).
23. S. Kim, Y. Fang, P. G. Lafleur, and P. J. Carreau, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 283 (2004).