Polymer(Korea), Vol. 40, No. 5, pp. 751-758 (2016)
http://dx.doi.org/10.7317/pk.2016.40.5.751

ISSN 0379-153X(Print)
ISSN 2234-8077(Online)

사출성형기의 배리어 스크류 디자인이 PP 수지의 가소화 효율에 미치는 영향

박성열 · 조한수 · 이강혁* · 남윤효 · 류민영**,†

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과, *(주)우진플라임, **서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2016년 4월 18일 접수, 2016년 6월 9일 수정, 2016년 6월 10일 채택)

Effect of Barrier Screw Design in Injection Molding Machines on the Plasticization Efficiency of Polypropylene Resin

Seong-Yeol Park, Han-Su Cho, Gang-Hyuck Rhee*, Yun-Hyo Nam, and Min-Young Lyu,†**

Department of Product Design & Manufacturing Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

**WOOJIN PLAIMM CO., LTD., 100, Woojinplaimm-ro, Jangan-myeon, Boeun-gun, Chungbuk-do 22766, Korea*

***Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea*

(Received April 18, 2016; Revised June 9, 2016; Accepted June 10, 2016)

초록: 사출성형의 사이클 타임에서 냉각시간은 가장 긴 시간을 차지하므로 냉각시간을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 이에 따라 짧아진 냉각시간 내에 수지를 가소화시킬 수 있는 스크류 디자인에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 사출성형기용 barrier screw 디자인에 따른 PP 수지의 가소화 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 barrier screw는 barrier flight의 도입부가 열린 타입(open type)과 닫힌 타입(closed type)으로 두 가지이다. 스크류를 계량한 후 정상상태에서 RPM에 따른 토출량, 배압, 토크, 수지온도를 측정하였다. 그리고 스크류를 배럴에서 빼내어 스크류 채널에 분포되어있는 수지의 단면을 관찰하여 PP 수지의 용융현상을 관찰하였다. 그리고 용융 시작점과 용융 완료점을 관찰하여 용융길이의 비교를 통해 스크류 형상에 따른 가소화 능력을 비교하였다.

Abstract: The cooling phase takes the longest time in injection molding process. Subsequently, researchers are focusing on the reduction of cooling time in injection molding process. Appropriate screw design in injection molding machine is required to enhance plasticizing plastics in a short cooling time. In this study, the effects of two barrier screw designs, open and closed barrier flights, on the plasticization efficiency of polypropylene (PP) resin were investigated through melting experiments. Throughput, back pressure, torque, and melt temperature for RPM were measured after screw operation reached a steady state. And the melting behaviors of PP resin were examined by observing the distribution of materials in the screw channels after the screws were removed from the barrel. Plasticizing capability was measured and compared in terms of melting length, the distance between the starting and completion points of melting.

Keywords: barrier screw, screw design, injection molding, melting mechanism, melting length.

서 론

사출성형의 한 사이클은 형폐, 사출, 보압, 냉각, 형개, 그리고 취출로 구성되어 있다. 냉각공정 중 형체장치에서는 사출성형품이 냉각되고 사출장치에서는 수지의 가소화가 이루어 진다.[1,2] 수지의 가소화는 스크류 회전에 의해서 수지 간, 수지와 배럴 내부 면 간, 수지와 스크류 면 간의 마찰과 밴드히터로부터 전달되는 열로 인해 이루어진다.[3,4] 사출성형 사이클 중 냉각단계에서 가장 긴 시간을 차지하기 때문에 생산성을 높이기 위한 냉각시간 단축에 관한 연구가 많이 수행되었다.[5,6] 금형 내에서 냉각이 완료되는 시점에 배럴의 수지는 완전히 용융을 마쳐야 하기 때문에 배럴 내의 스크류에서 가소화 효율을 높이기 위한 연구가 필요하다.

스크류 내 수지의 용융 메커니즘(melting mechanism)은 실험을 통해서 많이 관찰되어 왔다. 1959년에 Maddock은 배럴을 냉각시킨 후 스크류를 배럴에서 빼내는 실험(screw pulling out experiment)을 통해서 채널 내 수지의 단면 관찰하여 용융 현상을 관찰하였다.[7] 1967년 Tadmor는 실험을 통해서 수지 종류와 공정 조건에 따른 용융 메커니즘을 관찰하였다.[8]

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr
©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

배럴 내부와 닿는 면에서 용융 막(melt film)이 형성되고 스크류의 passive flight 부분에서는 솔리드 베드(solid bed)가, active flight 부분에서는 멜트 풀(melt pool)이 형성되었다. Menges는 passive flight에 melt pool이 형성되는 것을 관찰하였다.[9] Dekker와 Lindt는 솔리드 베드가 스크류 채널 중간에 위치하고 멜트 풀은 채널 좌, 우에 형성되며 용융 막의 두께는 스크류 채널 상, 하에 존재하며 용융이 진행되면서 용융 막이 점차 증가하는 것을 관찰하였다.[10,11] 이러한 용융 메커니즘은 스크류의 디자인, 수지 종류, 성형 조건에 따라 차이가 있지만 Maddock과 Tadmor가 관찰한 현상이 지배적이다.

스크류는 기능에 따라 공급부, 압축부, 계량부로 구분되는데 압축부에서는 수지의 가소화가 일어나므로 압축부의 설계가 중요하다.[12] 효율적인 가소화를 위해서 스크류에서 압축부의 길이를 조절하거나 압축비를 변경할 수 있다. 하지만, 이 방법에는 한계가 있기 때문에 main flight 사이에 barrier flight를 도입한 barrier screw에 관한 연구가 진행되어 왔다.[13,14] Barrier screw는 Maddock과 Tadmor의 용융 메커니즘과 일맥상통한다. Barrier screw는 1959년 Maillefer에 의해서 개발되었다.[15] 수지가 솔리드 베드와 멜트 풀로 구분되어 용융되는 연구 결과를 착안하여 barrier flight에 의해 물리적으로 솔리드 베드와 멜트 풀을 구분시켜 용융 효율은 높이는 구조이다.[12] Barrier screw에서 barrier flight 설계는 수지의 용융 효율과 관련이 깊어 이에 연구가 필요하다. 그리고 현재 사출성형기의 가소화 스크류에서 다양한 barrier screw를 많이 사용하고 있는데 이의 검증이 필요하다.

본 연구에서는 가소화 실험장치를 이용하여 두 가지 형상의 barrier screw로 가소화 실험을 수행하였다. RPM에 따른 토출량, 배압, 토크, 그리고 수지온도를 측정하였다. 그리고 배럴에서 스크류를 빼내어 스크류 채널 내 수지의 용융거동을 관찰하였다. 또한 용융 시작점과 용융 완료점을 관찰하여 용융길이(melting length)를 비교하여 barrier screw의 디자인에 따른 가소화 효율을 검토하였다.

실 험

스크류 모델. Figure 1은 본 연구에서 사용한 두 가지 형상의 barrier screw를 보여주고 있다. Figure 1(a)는 open type이고 Figure 1(b)는 closed type이다. 두 스크류의 직경은 40 mm, 길이는 800 mm, 피치는 40 mm이다. 공급부의 채널 깊이는 7.9 mm, 계량부의 채널 깊이는 3.3 mm로 압축비는 2.39로 동일하다. 압축비는 공급부 채널 깊이를 계량부 채널 깊이로 나눈 값이다. Barrier screw의 open type은 barrier flight가 시작되는 부분에서 채널이 열려있다. 즉 채널 깊이가 있다. 그러나 barrier screw의 closed type은 barrier flight가 시작되는 시점에서 채널이 닫혀있다. 즉 채널이 시작되는 부분에서 채널 깊이가 없다.

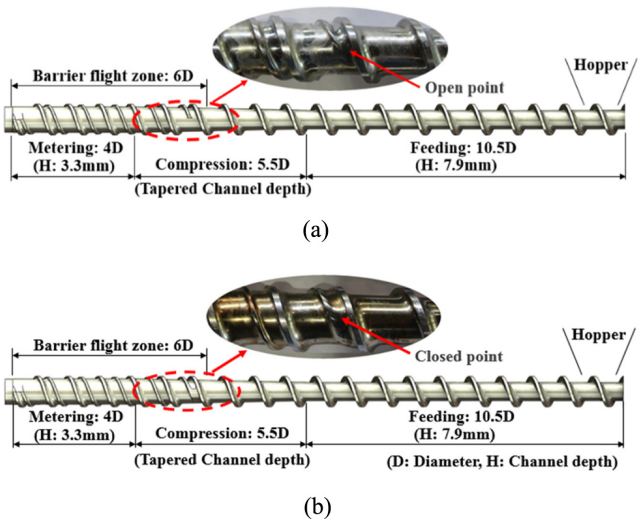

Figure 1. Geometry of barrier screw (a) open type; (b) closed type.

가소화 실험장치. Figure 2는 가소화 실험장치이다. 토출량, 배압, 토크, 그리고 수지온도를 측정할 수 있으며, 배럴에서 스크류를 용이하게 뺄 수 있도록 고안되어 있다.

실험방법. 실험한 수지는 Lotte Chemical의 polypropylene (PP) 단일중합체(Grade: J150)이며, MI는 10 g/10 min(230 ºC)이다. 채널 내 단면의 솔리드 베드와 멜트 풀을 용이하게 구분하기 위하여 파랑색의 마스터 배치 펠렛을 2% 배합하여 가소화 실험을 진행하였다.

Figure 3은 배럴의 온도조절을 위한 밴드 히터의 설정 온도를 보여준다. 두 barrier screw에서 온도 설정은 동일하게 하였다. Screw RPM은 30, 70, 120, 180, 그리고 250이며 실험 순서는 아래와 같다.

i. 스크류와 RPM을 선정한 후 계량한다. 계량이라 함은 hopper에 수지를 채우고 스크류 회전에 의해 재료가 스크류 채널을 타고 녹으면서 앞으로 진행하는 것을 의미한다. 계량 중 스크류가 후퇴하지 않도록 배압(30 MPa)을 설정한다.

ii. 계량 중 발생하는 배압, 토크, 수지온도가 일정해지는 정상상태까지 계량을 지속한다.

iii. 정상상태에서 10초 동안 토출량, 배압, 토크, 그리고 수지온도를 측정한다.

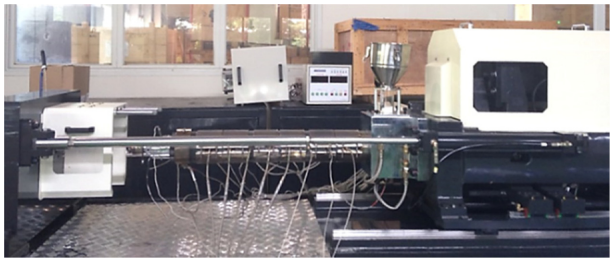

Figure 2. Equipment for plastication experiment.

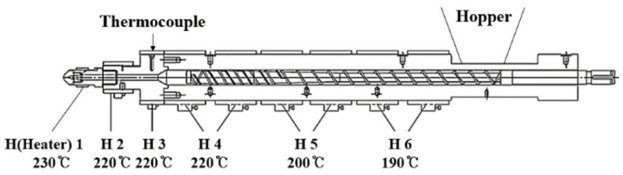

Figure 3. Locations of temperature sensors and barrel temperature settings.

iv. i~iii의 순서로 반복 실험하여 평균과 표준편차를 계산한다. 예비 실험 결과 반복 실험의 오차가 매우 적어 반복 횟수는 세 번으로 하였다.

v. 측정을 완료한 후 스크류 회전을 정지시키고 밴드 히터를 꺼서 배럴을 상온으로 자연 냉각한 후 스크류를 배럴에서 빼낸다. 스크류 채널 내 수지의 단면을 관찰하여 고체가 용융되는 현상을 관찰한다.

vi. 채널 내 단면 관찰을 통해 용융현상을 분석한 후 용융 시작점과 완료점을 파악하여 용융길이를 구한다.

vii. 스크류 또는 RPM을 변경하여 i~v의 순서로 반복하여 실험한다.

여기서, 토출량은 30초 동안 토출된 수지의 무게로 계산하였다.

결과 및 토론

토출량. Figure 4는 두 가지 스크류에서 RPM에 따른 토출량을 보여준다. 스크류 채널에서 토출량은 1차원 흐름으로 가정할 때 식 (1)과 같이 표현된다.[6]

$$Q = \frac{WH}{2}\pi DN\cos\theta - \frac{WH^3}{12\eta}\frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

여기서, W는 스크류 채널의 폭, H는 채널 깊이, D는 스크류 지름, N은 RPM, θ는 스크류 날개 각도, η는 수지의 점도, L은 스크류 채널의 길이, ΔP는 길이 L 사이의 압력 차이이다. 식(1)에서 보듯이 토출량은 RPM에 따라 선형적으로 증가하며 동일 조건에서 스크류 형상이 같을 경우에는 동일한 토출량을 가진다. 실험에서도 토출량은 RPM에 선형적으로 증가하게 나타났다. Barrier screw의 closed type의 토출량이 다소 높게 나타났지만 두 가지 스크류는 barrier flight가 시작되는 형상(open type 또는 closed type)만 상이하기 때문에 토출량은 유사하게 나타났다고 판단된다.

배압. Figure 5는 두 가지 스크류에서 RPM에 따른 배압을 보여준다. 배압은 수지가 토출될 때 스크류가 후퇴하지 못하도록 지지하는 압력으로 스크류 선단의 압력과 동일하다. 스크류에서 압력상승은 스크류 디자인과 스크류 채널에 수지가 채워진 정도에 따라 달라진다. RPM이 증가할수록 토출량이 증가하므로 배압은 증가한다. 두 가지 스크류의 형상과 토출량이 유사하므로 배압도 유사하게 나타났다고 판단된다.

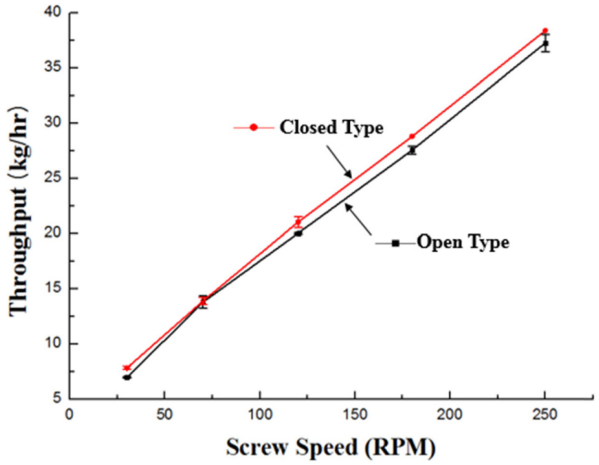

Figure 4. Variation of throughput with screw RPM.

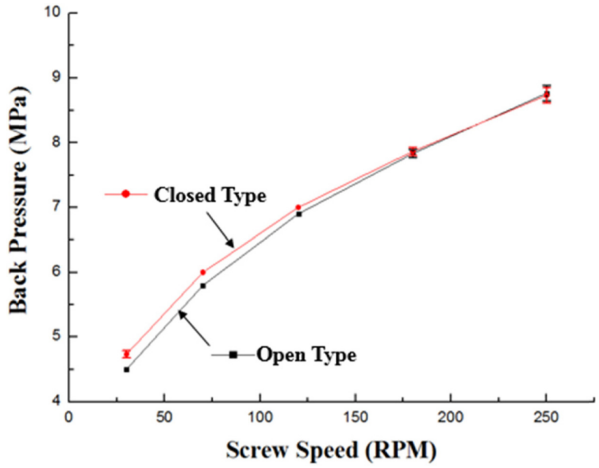

Figure 5. Variation of back pressure with screw RPM.

스크류의 회전 토크. Figure 6은 두 가지 스크류에서 RPM에 따른 토크를 보여준다. 토크는 스크류 채널 내에 수지가 채워지는 길이가 길수록 수지와 배럴 사이의 접촉면이 커지므로 토크가 증가한다. RPM이 증가함에 따라 수지와 배럴 간의 전단응력이 증가하여 용융이 빨리 되고 스크류에 채워지는 깊이가 길기 때문에 토크가 증가했다고 판단된다. 반면에, 높은 RPM에서 토크 상승률이 감소하는 이유는 전단 변형율이 높아짐에 따라 수지의 점도가 감소하기 때문에 토크 상승이 감소하였다.[4]

수지온도. Figure 7은 두 스크류에서 RPM에 따른 수지온도를 보여준다. 모든 RPM에서 closed type의 스크류에서 수지온도가 높게 나타났지만 온도 차이는 1 ℃ 미만으로 매우 작다. 두 가지 스크류 모두 RPM이 증가함에 따라 수지온도는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다. RPM이 증가할수록 토출량이 커지고 높은 온도의 배럴 속에 수지의 체류시간이 짧아지므로 수지온도가 다소 낮아지지만, 180과 250의

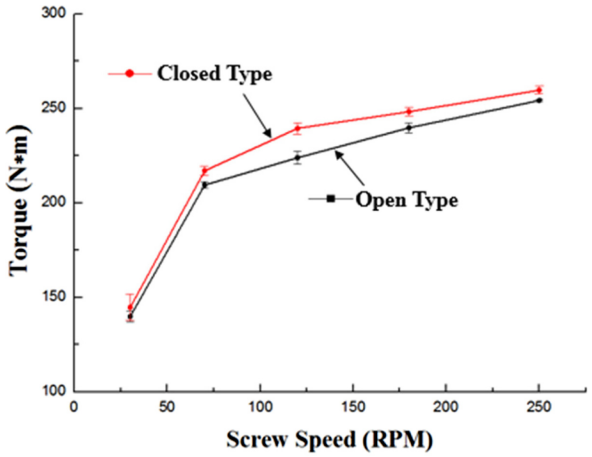

Figure 6. Torque for screw RPM.

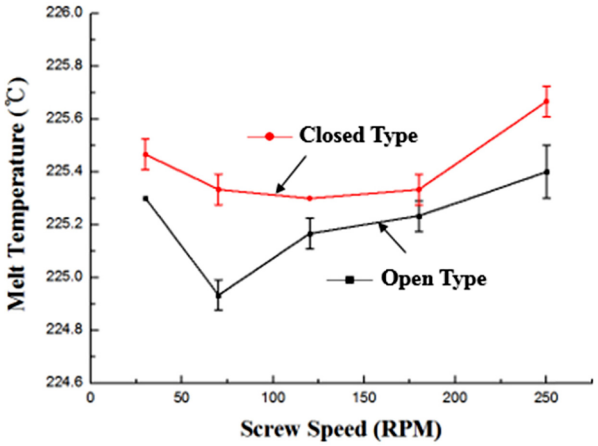

Figure 7. Melt temperature for screw RPM.

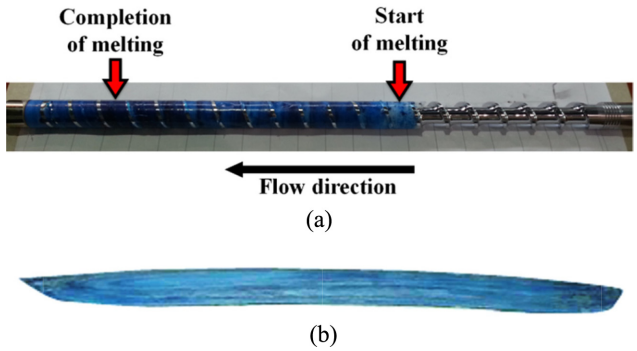

Figure 8. Start and completion locations of melting (a) material distribution in a screw; (b) completed melted material in the cross section of screw.

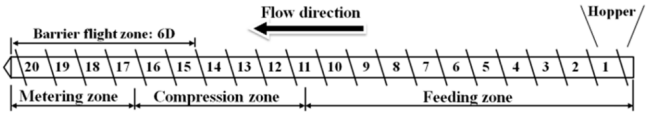

Figure 9. Screw channel number.

높은 RPM에서는 전단발열에 의하여 온도가 증가하였다고 여겨진다.

가소화 현상. Figure 8은 스크류 내에서 수지의 용융 시작점과 완료점의 기준을 보여주고 있다. 수지는 배럴 면에서 용융 막이 형성되므로 용융 시작점은 수지가 처음 붙어있는 채널이다. 용융 완료점은 채널의 단면 전체에서 회전유동이 관찰되는 채널이다.

Figure 9는 스크류의 채널 번호이다. 수지가 공급되는 채널이 1번이며 스크류의 축 방향으로 번호가 증가하여 20번까

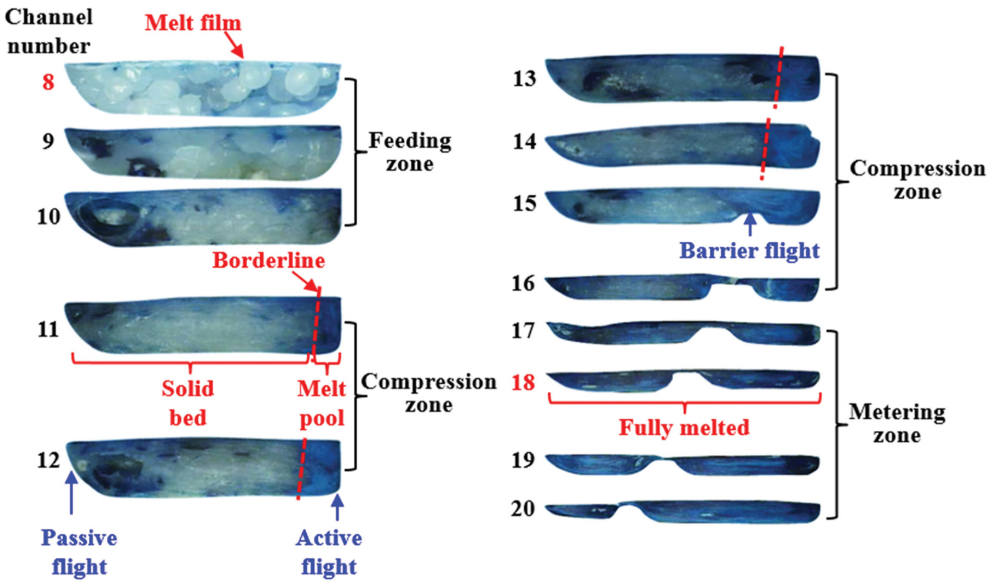

Figure 10. Material distributions in the cross channel sections of open type barrier screw at 30 RPM.

지의 채널이 있다.

Figure 10은 barrier screw의 open type에서 30 RPM일때 채널 별 단면을 보여준다. 8번 째 채널에서 배럴과 접촉하는 면에 용융 막이 형성되어 용융이 시작되었다. 채널의 깊이가 낮아지는 압축부인 11번째 채널에서 솔리드 베드와 멜트 풀이 구분되어 흐른다. 흐름이 진행되며 솔리드 베드는 점진적으로 감소하고 멜트 풀이 증가한다. 15번째 채널에서는 barrier flight에 의해 솔리드 베드와 멜트 풀이 명확히 구분되며 18번 채널의 단면 전체에서 멜트 풀이 형성되며 회전 유동이 관찰되었다. 따라서 용융 시작점은 8번 채널, 용융 완료점은 18번 채널로 용융길이는 11개의 채널이 된다. 이러한 용융 현상은 Maddock과 Tadmor의 용융 메카니즘과 유사한 결과이다.[7,8]

Figure 11은 barrier screw의 open type에서 180 RPM일때 채널 별 단면을 보여준다. 용융 시작점은 30 RPM보다 빠른 6번 채널로 나타났다. 스크류 회전속도가 증가함에 따라 배럴 면에서 전단변형률이 커져서 용융 막이 빨리 형성되었기 때문이다. 반면에 멜트 풀 영역의 상승은 작게 나타났다. 그

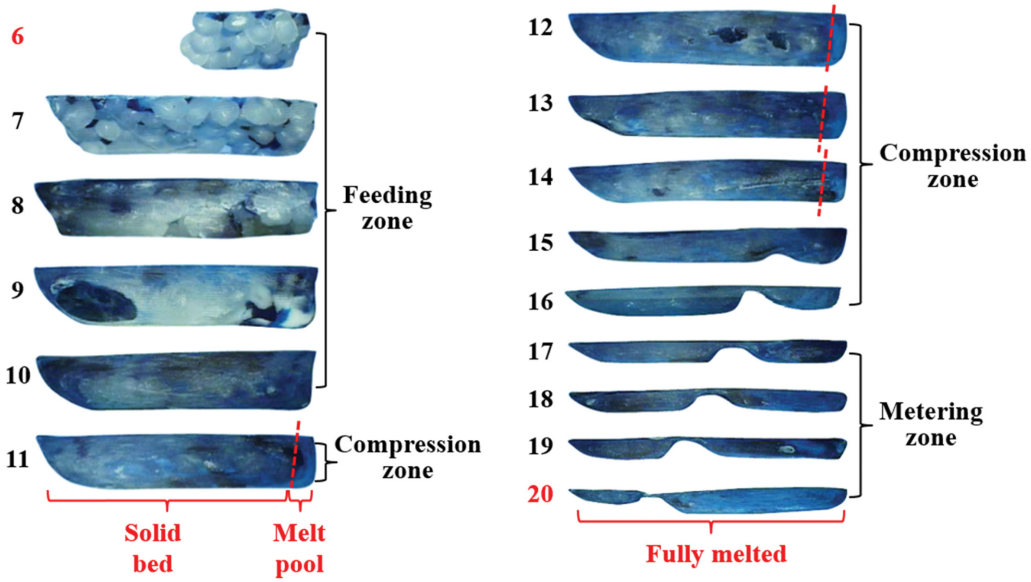

Figure 11. Material distributions in the cross channel sections of open type barrier screw at 180 RPM.

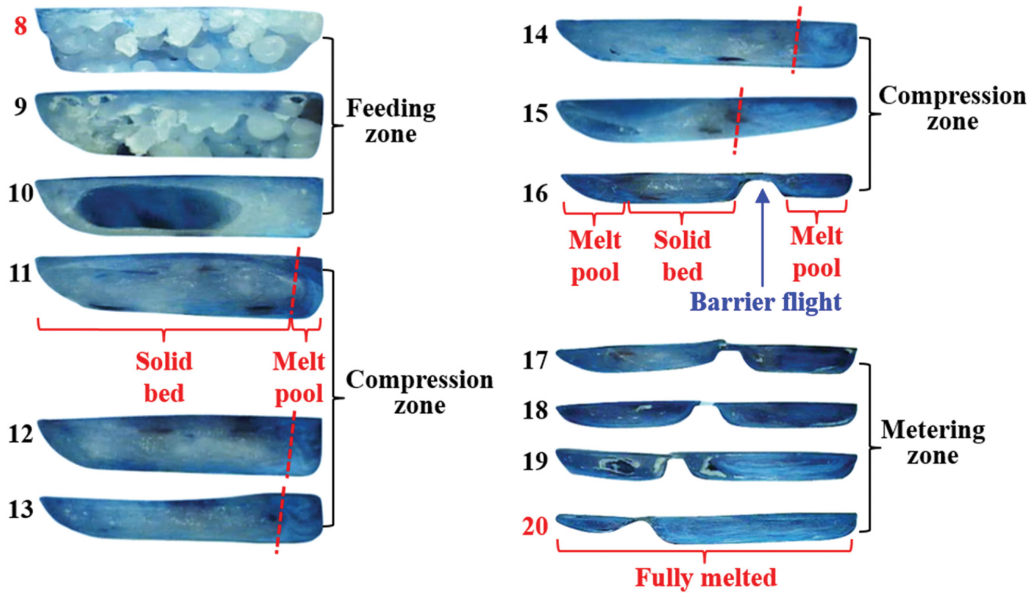

Figure 12. Material distributions in the cross channel sections of closed type barrier screw at 30 RPM.

이유는 높은 RPM에서 토출량이 커서 수지가 빨리 이송하여 배럴의 열을 적게 받기 때문이다. 20번 채널에서 용융이 완료되어 용융길이는 15개의 채널이다.

Figure 12는 barrier screw의 closed type에서 30 RPM일 때 채널 별 단면이다. 16번 채널의 결과를 보면 솔리드 베드 영역에 멜트 풀이 관찰되었다. 그 이유는 closed point(Figure 1(b))를 지날 때 용융된 수지가 솔리드 베드 영역으로 흐르기 때문이다. 이러한 현상은 솔리드 베드와 멜트 풀을 잘 구분시키지 못하여 barrier flight의 역할을 못하고 있다고 판단된다. 용융시작점은 barrier screw의 open type과 동일하게 8번 채널이지만 용융 완료점이 20번 채널로 용융길이는 13개의 채널이 된다. 따라서 barrier screw의 open type과 동일한 RPM에서 2개 채널을 더 흘러가야 용융이 완료된 것을 의미한다.

Figure 13은 barrier screw의 closed type에서 180 RPM일 때 채널 별 단면을 보여준다. 이 결과는 barrier screw의 open type(180 RPM)과 유사한 용융 현상을 보인다. 두 결과에서는 멜트 풀이 미소하게 증가하기 때문에 open과 close의 영향이 크지 않았다.

Figure 14는 30 RPM에서 두 스크류가 barrier flight를 지난 직후의 단면이다. Open type은 barrier flight에 의해 멜트 풀과 솔리드 베드가 명확히 구분되었지만 closed type은 우측

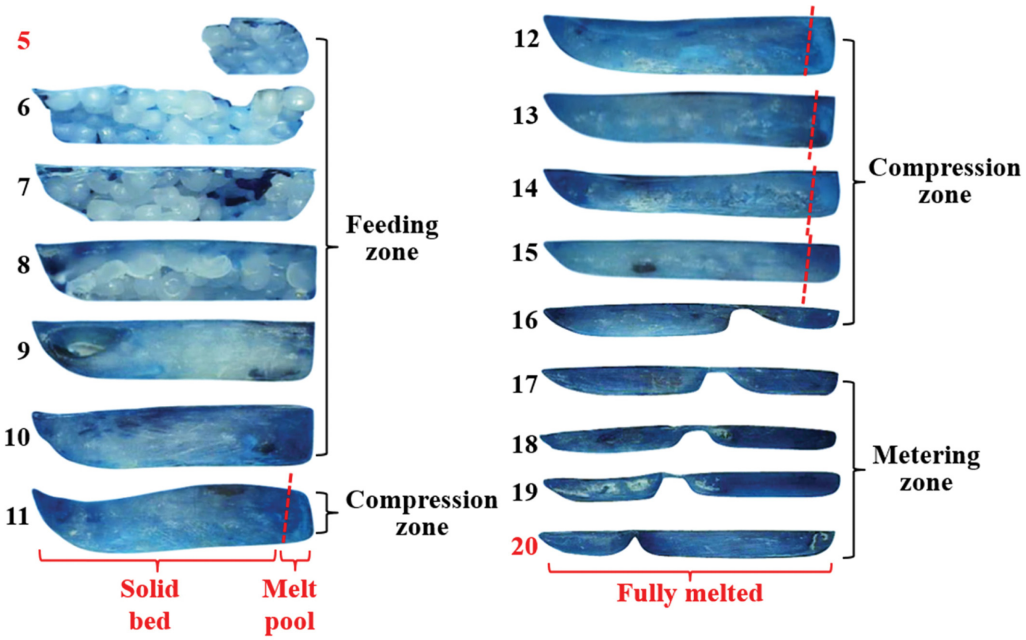

Figure 13. Material distributions in the cross channel sections of closed type barrier screw at 180 RPM.

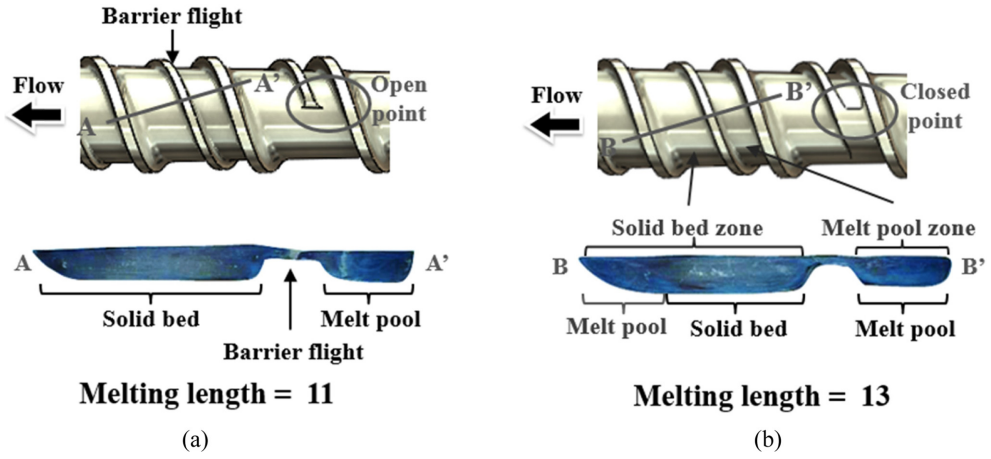

Figure 14. Material distributions in the cross channel sections at 30 RPM (a) open type barrier screw; (b) closed type barrier screw.

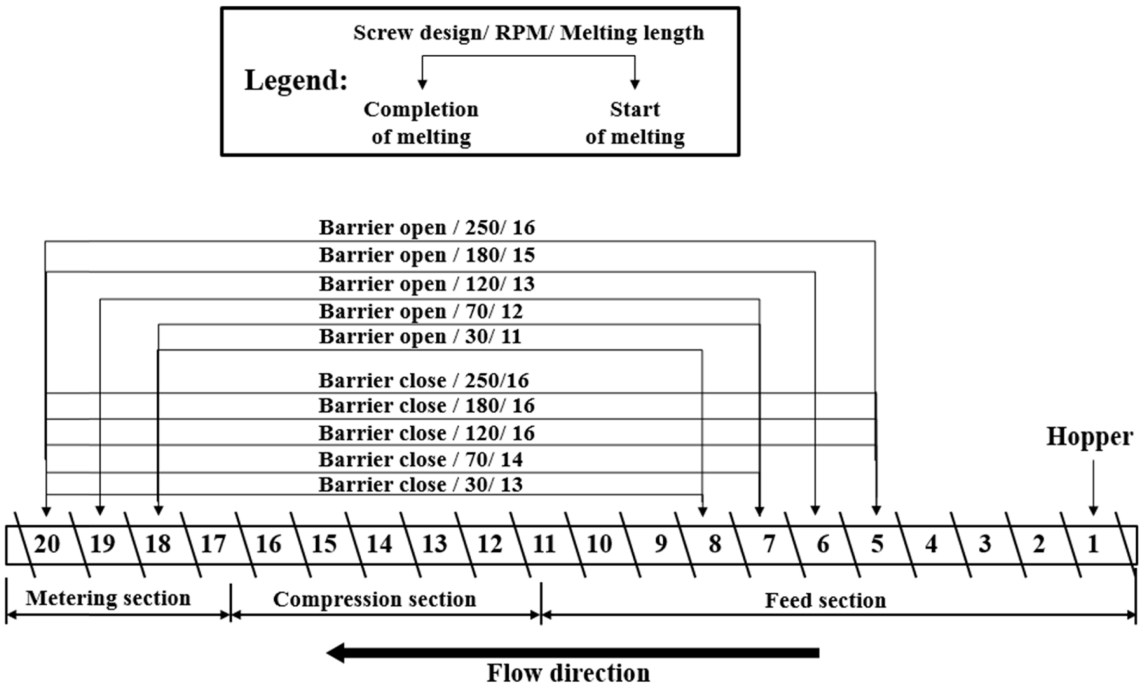

Figure 15. Locations of start of melting and completion of melting in barrier screw.

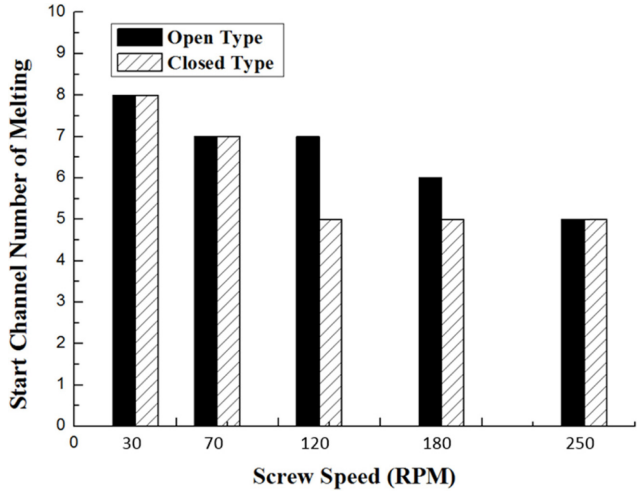

Figure 16. Starting channel number of melting in barrier screw according to screw RPM.

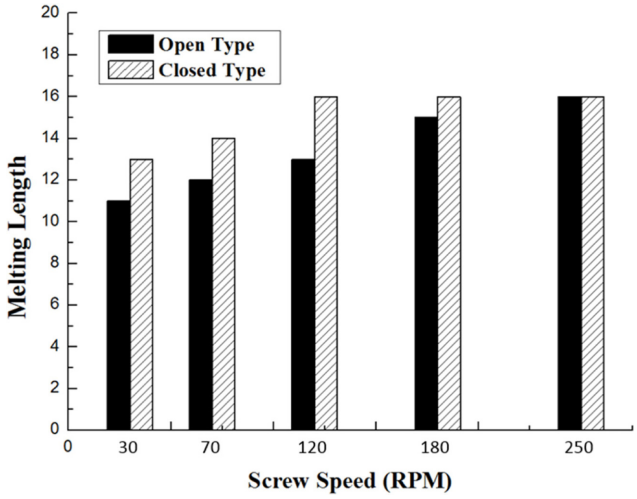

Figure 17. Melting length in barrier screw according to screw RPM.

채널의 막힌 현상에 의해 솔리드 베드 영역에 멜트 풀이 관찰되었다. 따라서 PP 수지 용융 특성에 적합한 스크류 디자인은 open type의 barrier screw 스크류로 여겨진다.

용융길이. 두 스크류의 가소화 능력을 정량적으로 비교하기 위해서 용융길이를 관찰하였다. 용융길이는 용융 시작점과 완료점 사이의 채널 개수로 정했다. 용융길이가 짧을수록 가소화가 잘 일어남을 의미한다.

Figure 15는 두 스크류의 30, 70, 120, 180, 그리고 250 RPM에서 용융 시작점과 완료점을 표시하여 용융길이를 나타낸 그림이다. 그림의 오른쪽 화살표는 용융 시작점이며 왼쪽 화살표는 용융 완료점을 나타낸다.

Figure 16은 두 가지 타입 barrier screw에서 RPM에 따른 용융 시작점을 보여준다. RPM이 증가할수록 용융 시작점이 빨라지는데 그 이유는 RPM에 비례하여 전단변형률이 증가하므로 전단발열에 의해 용융 막이 빨리 형성되기 때문이다.

Figure 17은 두 가지 타입 barrier screw에서 RPM에 따른

용융길이를 보여준다. 30, 70, 120, 그리고 180 RPM에서는 barrier screw의 open type에서 용융길이가 짧게 나타났으며 250 RPM에서는 동일하게 나타났다. 낮은 RPM에서는 open type의 barrier flight가 수지의 용융에 유리하나 고속으로 운전할수록 멜트 풀 영역의 상승 폭이 적어져 barrier flight 형상 차이는 미미하다고 판단된다.

결 론

본 연구에서는 사출성형기용 barrier screw에서 open type과 closed type에서 PP 수지의 가소화 실험을 수행하여 토출량, 배압, 토크, 수지온도, 채널 내 용융 특성 및 용융길이를 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 두 스크류에서 barrier flight의 도입부(open type, closed type)를 제외한 형상은 동일하므로 토출량, 배압, 토크, 그리고 수지온도가 유사하게 나타났다.

(2) RPM이 높을수록 전단변형률이 커지기 때문에 용융시작점은 빨라지지만 수지가 높은 온도의 배럴 속에서 체류하는 시간이 짧아지기 때문에 용융이 늦어진다.

(3) Barrier flight의 open type은 closed type에 비하여 barrier flight에 의한 솔리드 베드와 멜트 풀이 효과적으로 구분하게 되어 가소화 효율이 높아져서 용융길이가 짧게 나타났다.

(4) 수지의 용융 특성과 RPM에 따라 용융길이가 다르므로 이를 고려한 barrier flight의 설계가 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 메디칼몰드 R&DB 구축사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

참 고 문 헌

1. T. A. Osswald, L. S. Turng, and P. J. Gramann, Editors, *Injection Molding Handbook*, Carl Hanser, Munich, 2008.
2. H. Y. Kim and M.-Y. Lyu, *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
3. L. Xie, L. Shen, and B. Jiang, *Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process*, InTech, 2011.
4. C. Rauwendaal, *Polymer Extrusion*, Carl Hanser, Munich, 2014.
5. M. Khan, S. K. Afaq, N. U. Khan, and S. Ahmad, *Int. Scholarly Res. Not.*, **2014**, 1 (2014).
6. M. Vishnuvarthanan, R. Panda, and S. Ilangovan, *Middle-East J. Sci. Res.*, **13**, 944 (2013).
7. B. H. Maddock, *SPE J.*, **15**, 383 (1959).
8. Z. Tadmor, I. Duvdevani, and I. Klein, *Polym. Eng. Sci.*, **7**, 198 (1967).
9. G. Menges and P. Klenk, *Kunststoffe*, **57**, 598 (1967).
10. J. Dekker, *Kunststoffe*, **66**, 130 (1976).
11. J. T. Lindt, *Polym. Eng. Sci.*, **16**, 284 (1976).
12. D. H. Morton-Jones, *Polymer Processing,* Chapman and Hall, London, 1989.
13. A. L. Kelly, E. C. Brown, and P. D. Coates, *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 1706 (2006).
14. C. D. Han, K. Y. Lee, and N. C. Wheeler, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 831 (1991).
15. C. E. Maillefer, U.S. Patent 3,358,327 (1967).