

사출성형기의 가소화 스크류에서 PP수지의 이동현상: 스탠다드 스크류와 배리어 스크류의 비교

박성열 · 이강혁* · 남윤호* · 류민영**†

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과

*(주)우진플라임, **서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2015년 11월 28일 접수, 2015년 12월 28일 수정, 2016년 1월 4일 채택)

Transport Behavior of PP in a Plastication Screw of an Injection Molding Machine: Comparison of Standard Screw and Barrier Screw

Seong-Yeol Park, 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, Chungcheongbuk-do 28913, Korea

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

(Received November 28, 2015; Revised December 28, 2015; Accepted January 4, 2016)

초록: 사출성형은 충전, 보압, 냉각 그리고 취출의 단계를 거치는데 수지의 가소화는 냉각단계에서 이루어진다. 냉각시간 이내에 사출장치에서는 스크류 회전에 의한 계량이 완료되어야 하므로 빠른 시간 내에 수지를 녹일 수 있는 가소화의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 사출성형기용 스크류에서 PP 수지의 가소화에 관하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 스크류는 스탠다드 스크류와 배리어 스크류이다. 각각의 스크류에 대하여 RPM에 따른 실험결과를 비교하였다. 계량 후 정상적인 가소화 상태에 도달한 후 토출량, 배압 그리고 토크를 측정하였다. 또한 배럴에서 스크류를 빼내어 스크류 채널에 붙어 있는 수지의 단면을 관찰하여 용융 현상을 파악하였다. 그리고 용융 시작점과 용융 완료점을 관찰하여 용융길이의 비교를 통해 두 종류의 스크류에서 가소화 능력을 분석하였다.

Abstract: Injection molding consists of a series of process, filling, packing, cooling, and then ejection. Resin in the cylinder of injection unit should be rapidly plasticated before a metering region within cooling time. In this study, plastication of PP resin inside a cylinder of an injection molding machine was investigated. The screws used for the experiment were a standard screw and a barrier screw. The length of melted resin (plastication) was compared for RPM. When steady state reached after plastication, the throughput, back pressure, and torque values were measured and compared. After pull out the screw, the cross-section of the resin adhered on the screw channel was investigated. The degree of plastication, and the length of melted resin, which indicates the start and end of resin melted on the screw, were investigated for each screw.

Keywords: injection molding, standard screw, barrier screw, melting behavior, melting length.

서 론

사출성형기는 상하의 금형을 고정시키고 열고 닫는 형체장치와 고체의 고분자 수지를 용융시키고 금형으로 주입하는 사출장치로 구분된다.^{1,2} 사출성형 공정은 충전, 보압, 냉각 그리고 취출 순으로 한 사이클이 진행된다. 냉각단계에서 형체장치에서는 금형 내부 사출성형품의 냉각이 이루어지며 사출

장치에서는 밴드히터의 열과 스크류 회전에 의한 마찰열로 인해 고체의 고분자 수지를 용융시키는 계량 공정이 이루어진다.³ 사출성형 사이클에서 냉각단계는 가장 큰 시간을 차지하기 때문에 생산성을 높이기 위해서 냉각시간 단축이 필요하다.^{4,5} 금형에서 성형품이 냉각되는 시간에 실린더에서는 수지의 가소화가 진행된다. 따라서 하이사이클 성형에서는 가소화에 필요한 시간이 작다. 그리고 수지가 완전히 용융되지 않거나 열화가 발생할 경우에는 성형품의 불량을 초래하고 물성이 저하되므로 스크류 내에서 수지의 가소화는 매우 중요하다.

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

스크류는 기능에 따라 공급부, 압축부, 계량부로 구분된다. 공급부에서는 호퍼를 통해 들어온 고체의 수지를 스크류 앞쪽으로 이송하고, 압축부는 채널의 깊이가 점점 낮아지고 고체의 수지를 가소화시키며, 계량부는 용융된 수지를 균질화시키는 역할을 한다.^{6,7} 스크류의 구조 중 압축부에서 용융이 일어나기 때문에 압축부의 설계가 중요하다. 스크류 내에서 수지의 용융에 관한 연구가 오래 전부터 수행되어왔는데 1959년에 Maddock은 스크류 계량 상태가 정상상태에 도달한 후 스크류 회전을 정지시키고 냉각한 후 스크류를 빼내는 실험(screw pulling out experiment)을 수행하였다.⁸ 스크류 채널에 붙어 있는 수지의 단면을 관찰하여 active flight에는 melt 풀(melt pool)이, passive flight에는 솔리드 베드(solid bed)가 존재하는 것을 관찰하였다. 1967년 Tadmor는 Maddock과 동일한 실험 방법을 이용하여 수지와 공정조건을 변화시켜 채널 내 수지 단면을 관찰하여 Maddock과 유사한 실험결과를 보였다.⁹ 그 이후로 많은 연구자들은 screw pulling out 방법을 이용하여 수지의 용융 특성에 관한 연구를 수행해왔다.¹⁰⁻¹² 스크류 내 수지의 용융 메커니즘(melting mechanism)은 스크류 디자인, 수지, 운전 조건에 따라서 차이를 가지지만 solid bed와 melt pool이 분리되는 현상은 동일하게 나타났다. 이러한 실험결과를 통해 solid bed와 melt pool을 구분시켜서 용융 효율을 높여주는 barrier flight를 포함한 barrier screw가 개발되었으며,¹³ barrier screw의 개선과 연구는 꾸준히 진행되고 있다.^{14,15} 그리고 Lyu와 White는 회전과 왕복 운동을 하는 스크류의 채널에서 단면을 관찰하고 용융시작점과 완료점을 파악하여 용융길이(melting length)를 비교하는 실험을 수행하였다.¹⁶ 이러한 연구는 주로 압출기의 스크류에서 이루어졌으며 사출성형기 내에서 수지의 용융 연구는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 사출성형기의 사출장치를 이용하여 main flight로만 구성된 standard screw와 barrier flight를 갖는 스크류(barrier screw)에서 가소화 실험을 수행하였다. RPM에 따른 토출량, 배압, 수지온도 그리고 토크를 측정하였으며 screw pulling out 방법을 이용하여 채널 내 수지의 용융 거동을 관찰하였다. 그리고 용융 시작점과 용융 완료점을 관찰하여 용융 길이를 비교한 후 스크류 디자인에 따른 가소화의 성능을 검토하였다.

실 험

스크류 모델. Figure 1은 실험에 사용한 standard screw와 barrier screw를 보여준다. 두 가지 스크류의 직경은 40 mm, 길이는 800 mm, 피치는 40 mm 그리고 main flight angle은 17.6°로 동일하다. Standard screw의 공급부와 계량부 채널 깊이는 각각 7.0, 2.3 mm이며, 압축비는 3.04이다. 여기서 압축비는 공급부 채널 깊이를 계량부 채널 깊이로 나눈 값이다. Barrier screw의 공급부와 계량부 각각의 채널 깊이는 7.9,

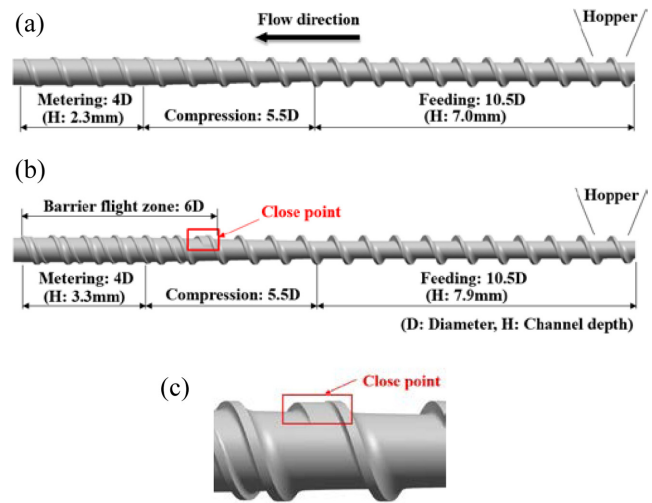


Figure 1. Screw geometry: (a) standard screw; (b) barrier screw; (c) close point in barrier screw.

3.3 mm이며 standard screw에 비해 낮은 압축비 2.39를 가지고 있다. 압축부의 네 번째 채널부터 스크류 선단까지 barrier flight를 포함하는데 그 이유는 용융 효율을 높이기 위하여 설계하였다. Figure 1(c)에 나타난 부분 close point는 barrier screw에서 barrier flight의 도입부이며 barrier flight 좌측 채널은 1 mm이며 우측 채널은 닫혀있다.

가소화 실험 장치. Figure 2는 가소화 실험장치를 보여준다. 본 실험장치는 토출량, 배압, 수지온도 그리고 토크를 측정할 수 있으며, screw pulling out 실험이 용이하도록 사출장치로만 구성되어 있다.

실험방법. 실험에 사용한 수지는 Lotte Chemical의 polypropylene homopolymer(Grade: J150)이며 MI는 10 g/10 min이다. 채널 내 단면을 관찰할 때 solid bed와 melt pool을 구분하기 쉽도록 파랑 색의 마스터배치를 2% 첨가하여 가소화 실험을 진행하였다.

Figure 2는 실린더에 설치한 밴드 히터의 온도 설정을 보여준다. 설정 온도는 PP 수지를 이용한 사출성형의 온도조건과 동일하며 두 가지 스크류의 모든 RPM에서 온도조건은 동일하다. 실험 RPM은 30, 70, 120, 180 그리고 250이며 실험 방법은 아래와 같다.

1) 스크류와 RPM을 선정한 후 계량한다. 계량이라 함은 hopper에 수지를 채우고 스크류 회전에 의해 재료가 스크류

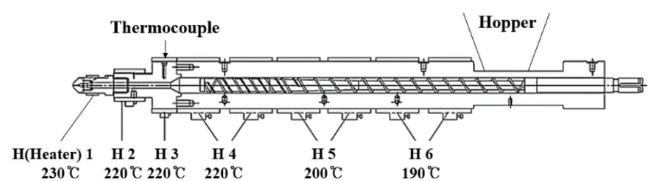


Figure 2. Set up of melting experiment.

채널을 타고 녹으면서 앞으로 진행하는 것을 의미한다. 계량 중 스크류가 후퇴하지 않도록 배압(30 MPa)을 설정한다.

2) 계량 중 발생하는 배압, 수지온도, 토크가 일정해지는 정상상태까지 계량을 지속한다.

3) 정상상태에서 10초 동안 토출량, 배압, 수지온도 그리고 토크를 측정한다.

4) 1~3의 순서로 반복 실험하여 평균과 표준편차를 계산한다. 반복 실험의 오차가 매우 적어 반복 횟수는 세 번으로 하였다.

5) 측정을 완료한 후 스크류 회전을 정지시키고 밴드 히터를 꺼서 배럴을 상온으로 냉각한 후 스크류를 배럴에서 빼낸다. 스크류 채널 내 수지의 단면을 통해 수지가 녹아가면서 solid와 melt의 공존상태를 관찰한다.

6) 채널 내 단면 관찰을 통해 용융 시작점과 완료점을 파악하여 용융길이를 구한다.

7) 스크류 또는 RPM을 변경하여 1~6의 순서로 반복하여 실험한다.

여기서 토출량은 30초 동안 토출된 수지의 무게를 측정하여 환산하였다.

결과 및 토론

토출량. Figure 3은 2가지 스크류에서 RPM에 따른 토출량을 보여준다. 스크류 채널에서 토출량은 간단히 식 (1)과 같이 표현된다.^{6,17}

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

여기서, W 는 스크류 채널의 폭, H 는 채널 깊이, D 는 스크류 지름, N 은 RPM, θ 는 스크류 날개 각도, η 는 수지 점도, L 은 스크류 채널의 길이 ΔP 는 압력 차이이다. 식 (1)에서 보듯 토출량은 RPM에 따라 선형적으로 증가하며 스크류 형상에 따라 다르게 나타난다. Standard screw는 30 RPM을 제외한 모든 RPM에서 barrier screw에 비해 높은 토출량을 보였지만 180, 250 RPM에서는 미용융된 수지가 토출되었다. 하지만, barrier screw는 모든 RPM에서 완전히 용융된 수지가 토출되었다.

배압. Figure 4는 두 가지 스크류에서 RPM에 따른 배압을 보여주고 있다. 배압은 수지가 노즐을 통해 토출될 때 스크류가 후퇴하지 않도록 지지해주는 압력으로 스크류 선단에 작용하는 압력과 동일하다. 스크류에서 압력상승은 스크류 디자인과 스크류 채널에 수지가 채워진 정도에 따라 다르게 나타난다. RPM이 증가할수록 배압이 증가하는데 그 이유는 토출량이 증가하기 때문이다. Standard screw는 barrier screw에 비해 토출량이 크기 때문에 120, 180, 그리고 250 RPM에서 높은 배압이 측정되었다고 판단된다.

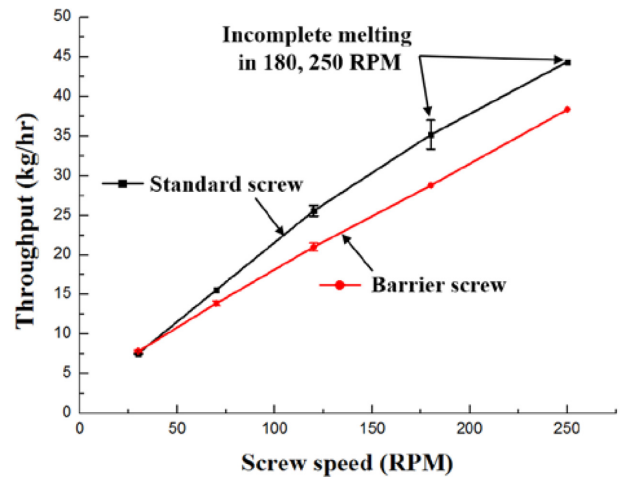


Figure 3. Throughput vs. screw RPM.

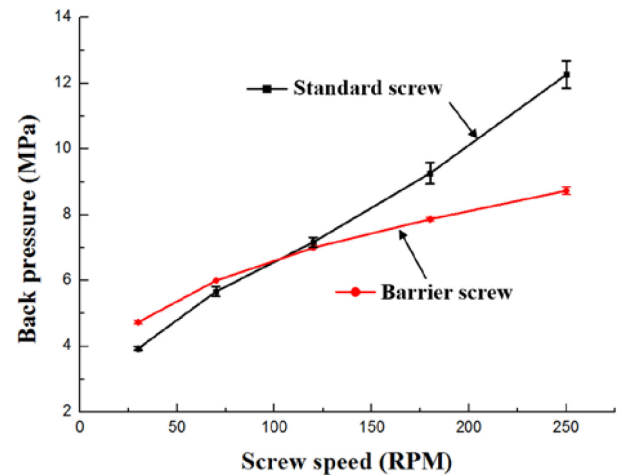


Figure 4. Back pressure vs. screw RPM.

스크류의 회전 토크. Figure 5는 두 가지 스크류에서 RPM에 따른 토크를 보여준다. 토크는 스크류 채널 내에 수지가 채워진 길이가 길수록 수지와 배럴 사이의 마찰이 커지므로 토크가 증가한다. Barrier screw에서 토크가 크게 나타난 것으로 보아 barrier screw에서 standard screw보다 수지가 채워진 영역이 크다고 판단된다. 모든 RPM에서 용융이 잘 이루어진 barrier screw에서는 완전 용융된 수지의 점도가 RPM이 증가할수록 전단박화(shear thinning)에 의해 감소하여 토크 상승률이 작아졌다고 여겨진다.¹⁸

가소화 현상. Figure 6은 용융 시작점과 완료점의 예시를 보여준다. 용융 시작점은 스크류 채널에서 수지가 처음 붙어 있는 채널이며 용융 완료점은 채널 단면 전체에서 용융된 수지가 스크류 채널에서 회전하는 유동이 관찰되는 채널이다.⁸⁻¹²

Figure 7은 스크류 채널의 번호를 보여주고 있는데 공급부의 첫 번째 채널이 1번이며 스크류 축 방향으로 번호가 증가

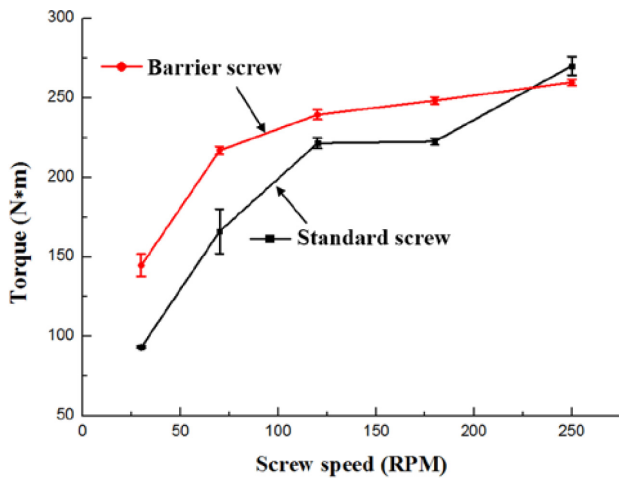


Figure 5. Torque vs. screw RPM.

하여 20번까지의 채널이 있다.

Figure 8은 standard screw에서 30 RPM일때 채널별 단면을 보여준다. 8번째 채널의 단면을 보면 배럴과 접촉하는 면에서 용융 막(melt film)이 형성된 것을 볼 수 있다. 공급부를 지난 후 채널의 깊이가 낮아지기 시작하는 압축부인 11번째 채널에서 solid bed와 melt pool이 구분되어 형성된 것을 볼 수 있다. 흐름이 진행되며 solid bed가 관찰되는데 이러한 용융 현상은 Maddock과 Tadmor의 melting mechanism과 유사한 경향을 나타낸다.^{8,9} 채널을 지나며 melt pool은 점진적으로 증가하여 18번째 채널의 단면 전체에서 회전유동이 관찰되었다. 따라서 용융 시작점은 8번째 채널, 용융 완료점은 18번째

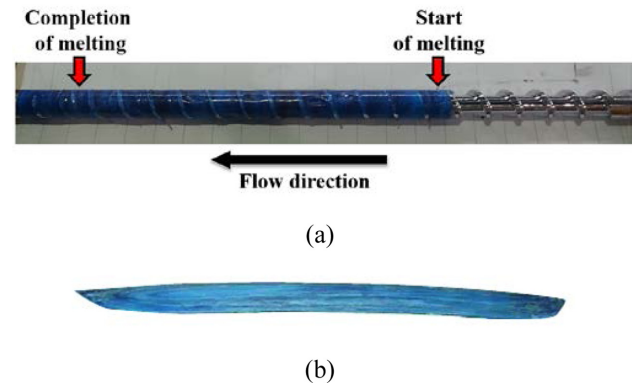


Figure 6. Start and completion locations of melting (a) material distribution in a screw; (b) completed melted material in the cross-section of screw.

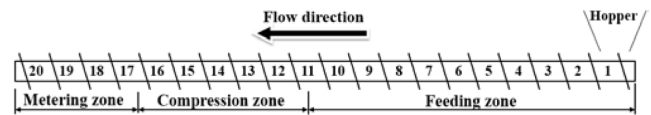


Figure 7. Screw channel number.

채널로 용융길이는 11개의 채널이 된다.

Figure 9는 standard screw에서 180 RPM일때 채널별 단면을 보여준다. 용융 시작점은 30 RPM일 때에 비해서 2개의 채널 앞인 6번째 채널로 나타났다.

그 이유는 더욱 빠른 스크류 회전 때문에 높은 전단변형률이 발생하여 용융 막을 보다 빨리 형성하였기 때문이다. 압

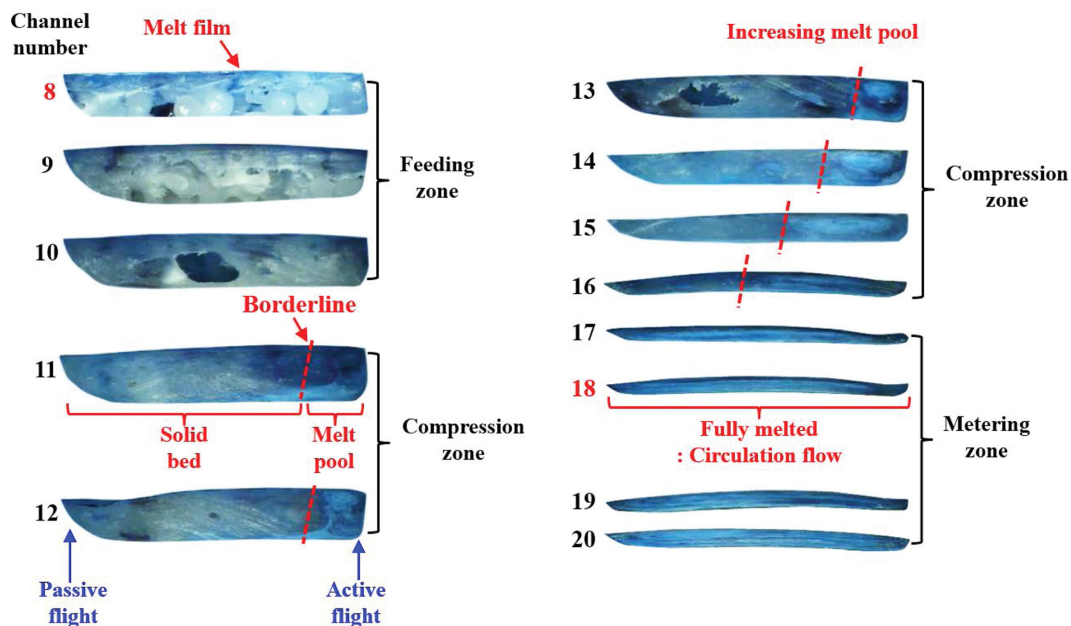


Figure 8. Materials in the cross channel sections of standard screw at 30 RPM.

축부에서 solid bed와 melt pool이 형성되는 것은 30 RPM과 동일한 경향을 보였다. 하지만, 30 RPM에 비해 melt pool의 체적이 상승하는 폭이 적으며 15번 채널부터는 solid bed가 파괴되는 현상이 관찰되었다. 180 RPM에서는 20번 채널까지도 용융이 완료되지 못하였다.

Figure 10은 barrier screw에서 30 RPM일 때 채널 별 단면이다. Barrier flight는 solid bed와 melt pool을 구분시켜 용융 효율을 높이는 역할을 하지만 16번 채널의 현상을 보면 solid

bed 영역에 melt pool이 관찰되었다. 그 이유는 채널 깊이가 1 mm로 매우 낮은 close point(Figure 1(c))를 지날 때 용융된 수지가 solid bed 영역으로 흐르기 때문이다. Solid bed와 melt pool을 완전히 구분시켜주지 못하기 때문에 barrier flight가 있음에도 불구하고 용융길이는 13개의 채널로 standard screw의 30 RPM 결과보다 길게 나타났다고 판단된다.

Figure 11은 barrier screw에서 180 RPM일 때 채널별 단면을 보여준다. 180 RPM에서는 barrier flight영역 이전에 solid

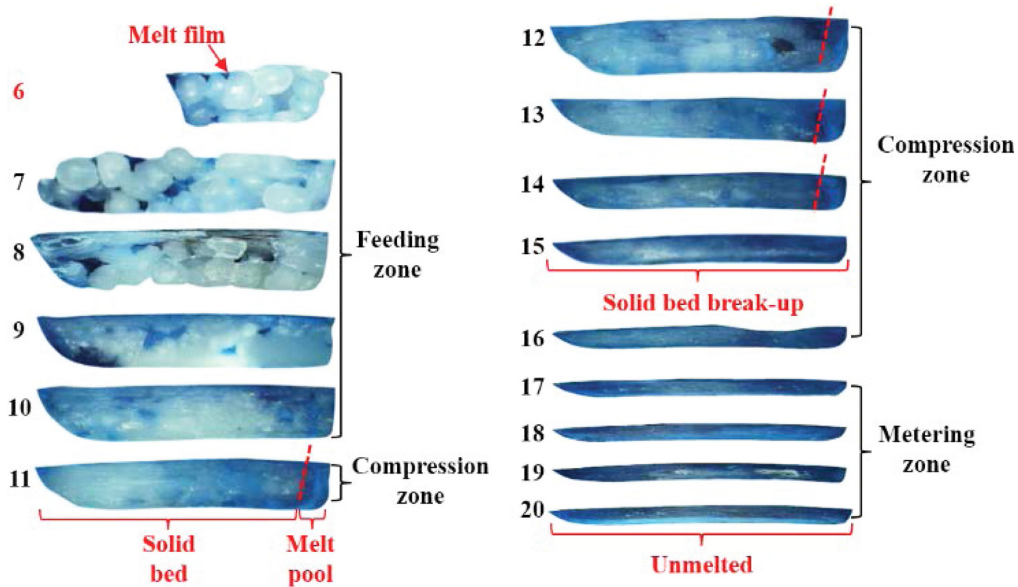


Figure 9. Materials in the cross channel sections of standard screw at 180 RPM.

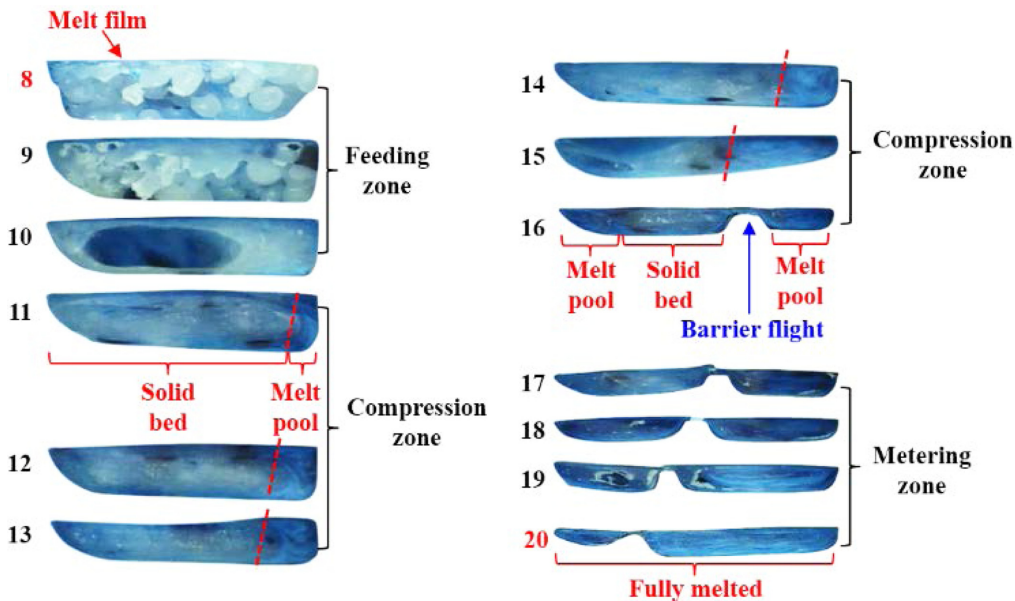


Figure 10. Materials in the cross channel sections of barrier screw at 30 RPM.

bed와 melt pool이 형성되며 melt pool의 체적 증가가 30 RPM에 비해 낮게 나타났다. 15번 채널에서 solid bed가 파괴되는 것이 관찰되었다. 20번 채널에서 수지가 완전히 용융되었는데 그 이유는 채널이 막혀있는 close point에서 수지가 왼쪽으로 흘러가지만 그 후에 barrier flight 만난 후 흐름이 다시 solid bed와 melt pool로 나누어져서 용융 효율이 비교적 높게 나타났기 때문이라고 판단된다.

용융 길이. 스크류의 가소화 능력을 판단하기 위해선 수지의 용융이 빨리 완료되는 것이 중요하기 때문에 용융 시작점과 완료점을 파악하여 용융 길이를 비교하였다. 용융길이가

짧을수록 가소화가 잘 일어남을 의미한다.

Figure 12는 두 가지 스크류의 30, 70, 120, 180 그리고 250 RPM에서 용융 시작점과 완료점을 표시하여 용융길이를 나타낸 그림이다.

Figure 13은 두 가지 스크류에서 RPM에 따른 용융 시작점을 비교한 그림이다. 두 종류 스크류에서 RPM이 증가할수록 용융 시작점이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 RPM이 클수록 전단변형률이 증가하여 melt film이 형성되는 시점이 빨라지기 때문이다.

Figure 14는 두 종류 스크류에서 RPM에 따른 용융 길이를

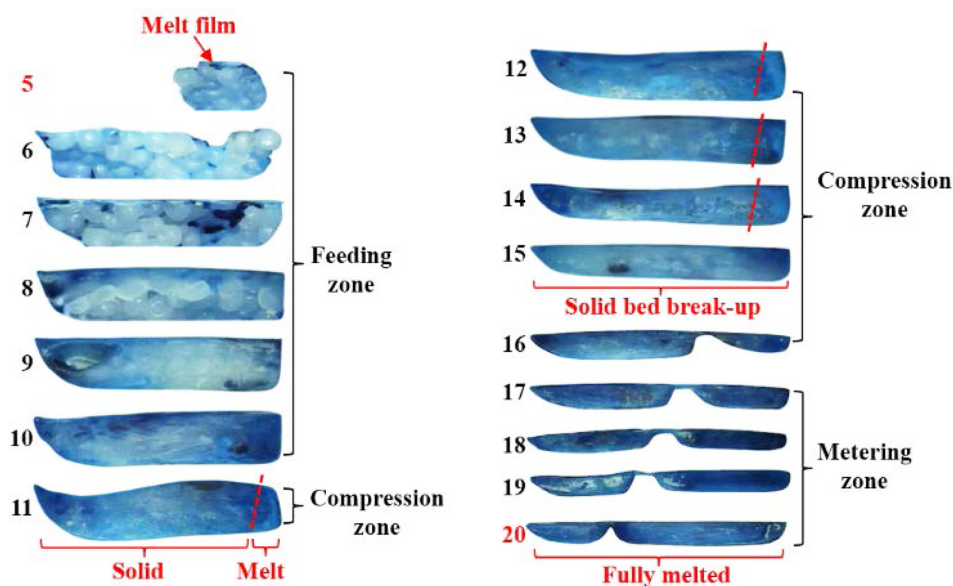


Figure 11. Materials in the cross channel sections of standard screw at 180 RPM.

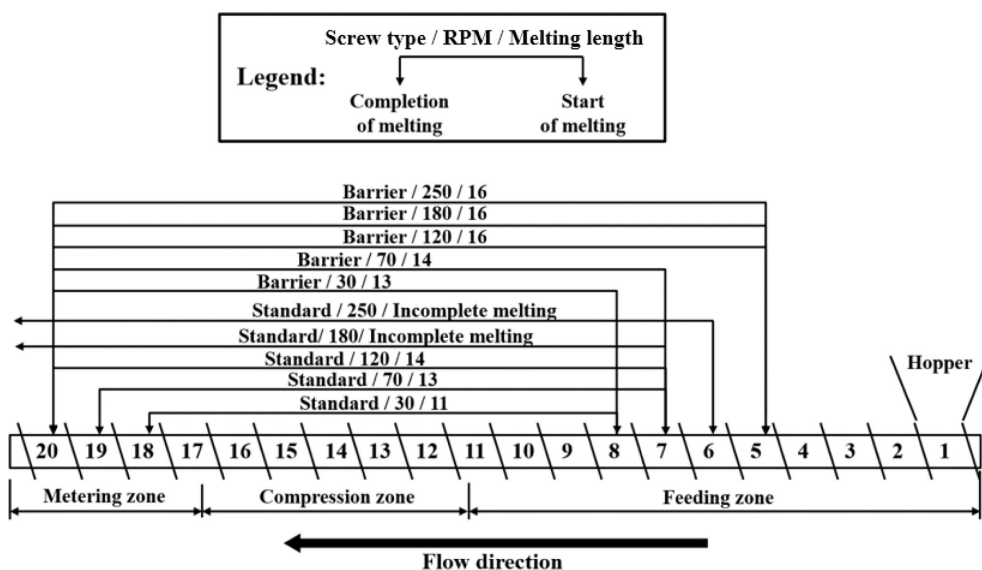


Figure 12. Result of melting experiment for standard and barrier screw.

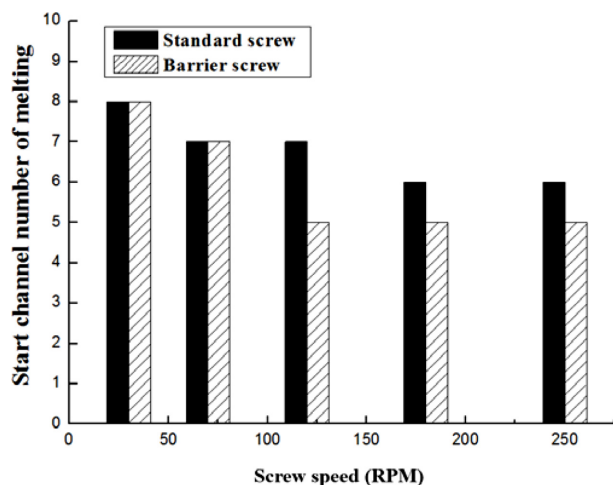


Figure 13. Starting channel number of melting in a screw according to screw RPM.

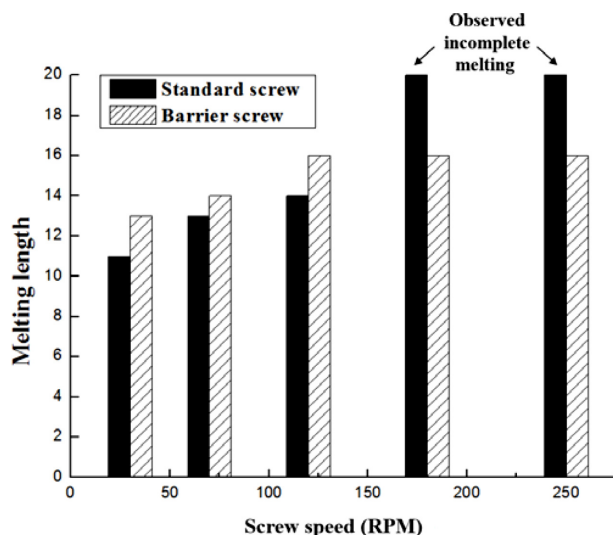


Figure 14. Melting length in a screw according to screw RPM.

보여준다. 낮은 RPM(30, 70, 120)에서는 standard screw에서 용융길이가 짧게 나타났다. 그러나 빠른 RPM(180, 250)에서 standard screw는 용융이 완료되지 못하고 미 용융된 수지가 토출되었다. 따라서 저속에서는 압축비가 높은 standard screw가 가소화에 유리하며, 고속에서는 barrier screw가 가소화에 유리하다고 판단된다.

결 론

사출성형기용 standard screw와 barrier screw에서 PP수지의 가소화 실험을 수행하여 토출량, 배압, 토크, 채널 내 용융특성 관찰 및 용융길이를 통해 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) Standard screw와 barrier screw에서 공히 RPM이 증가

할수록 토출량, 배압 그리고 토크가 증가하였다.

(2) 토출량은 standard screw에서 높게 나타났지만 높은 RPM(180, 250)에서 미용융된 수지가 토출되었다. RPM이 높을수록 전단변형률이 커지기 때문에 용융시작점은 빨라지지만 수지가 밴드히터의 열을 받는 체류시간이 짧아지기 때문에 용융이 어렵다.

(3) 높은 압축비를 가진 standard screw는 저속 RPM(30~120)일 때는 용융길이가 barrier screw에 비해 짧게 나타났지만 고속 RPM(180, 250)에서는 solid bed가 파괴되면서 용융효율이 떨어졌다.

(4) Barrier screw는 저속 RPM일 때 barrier flight가 solid bed와 melt pool을 구분시키는 역할을 못할 뿐만 아니라 압축비가 작아서 용융길이가 standard screw에 비해 길게 나타났다. 그러나 높은 RPM에서는 close point를 지난 후에 barrier flight를 다시 만나며 수지가 완전히 용융되었다. 따라서 high cycle을 위한 스크류는 고속 RPM에서 용융길이가 짧게 나타난 barrier screw가 효과적이라고 판단된다.

감사의 글: 본 논문은 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10051680, 3D 프린팅용 친환경 고강도 고분자 소재 개발).

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, B. Jiang, and L. Shen, *Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process*, InTech, 2011.
4. M. Khan, S. K. Afaq, N. U. Khan, and S. Ahmad, *Int. Scholarly Res. Not.*, **2014**, 1 (2014).
5. M. Vishnuvarthanan, R. Panda, and S. Ilangoan, *Middle-East J. Sci. Res.*, **13**, 944 (2013).
6. C. Rauwendaal, *Polymer extrusion*, Carl Hanser, Munich, 2014.
7. D. H. Morton-Jones, *Polymer Processing*, Chapman and Hall, London, 1989.
8. B. H. Maddock, *SPE J.*, **15**, 383 (1959).
9. Z. Tadmor, I. Duvdevani, and I. Klein, *Polym. Eng. Sci.*, **7**, 198 (1967).
10. G. Menges and P. Klenk, *Kunststoffe*, **57**, 598 (1967).
11. J. Dekker, *Kunststoffe*, **66**, 130 (1976).
12. J. T. Lindt, *Polym. Eng. Sci.*, **16**, 284, (1976).
13. C. E. Maillefer, U.S. Patent 3,358,327 (1967).
14. M. Eshima, U.S. Patent 5,141,326 (1992).
15. A. L. Kelly, E. C. Brown, and P. D. Coates, *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 1706 (2006).
16. M.-Y. Lyu and J. L. White, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 1366 (1998).
17. Z. Tadmor and I. Klein, *Engineering principles of plasticating extrusion*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1970.
18. C. Abeykoon, M. McAfee, S. Thompson, K. Li, A. L. Kelly, and E. C. Brown, *Int. Polym. Proc.*, **22**, 315 (2009).