

교합형 동방향 이축압출기에서 충전제 분산에 대한 스크루 조합의 영향

강민성 · 강병욱 · 심현석 · 손재명 · 이광희[†] · 박 민*

인하대학교 고분자공학과, *한국과학기술연구원 고분자하이브리드연구센터
(2010년 2월 10일 접수, 2010년 3월 19일 수정, 2010년 5월 1일 채택)

Effect of Screw Configuration on Filler Dispersion in Intermeshing Co-rotating Twin Screw Extruder

Min Sung Kang, Byoung Yook Kang, Hyun Seog Sim,
Jae Myoung Son, Kwang Hee Lee[†], and Min Park*

Department of Polymer Science and Engineering,
Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Polymer Hybrid Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea

(Received February 10, 2010; Revised March 19 2010; Accepted May 1, 2010)

초록: 컴파운드의 물성을 최적화하기 위해서는 충전제 입자들의 분배와 분산이 잘 일어나도록 효율적으로 혼련하는 것이 중요하다. 혼련 효율을 향상시키고자 다양한 종류의 혼련 요소들이 이축압출기에 이용되고 있다. 본 연구에서는 탄산칼슘이 충전된 폴리스티렌을 대상으로 충전제 분산에 대한 이축압출기의 스크루 조합 영향을 알아보았다. 충전제의 분산 상태는 포토다이오드가 장착된 광학현미경으로 조사하였다. 실험 결과는 충전제의 분산 정도가 혼련 요소들의 형태 및 위치에 주로 영향을 받는다는 것을 보여주었다.

Abstract: To optimize the properties of compounds, effective mixing is of importance to achieve adequate distribution and dispersion of filler particles. A variety of mixing elements have been used for twin-screw extruders in order to improve the mixing efficiency. In this study, the effects of 10 screw configurations on the filler dispersion were investigated for the calcium carbonate filled polystyrene processed in a co-rotating twin-screw extruder. The state of filler dispersion was characterized by optical microscopy equipped with a photodiode. The experimental results indicated that the type and position of mixing elements primarily affected the degree of filler dispersion.

Keywords: filler dispersion, screw configuration, twin-screw extruder.

서 론

동방향 이축압출기는 고체 이송, 가소화, 혼련 및 용융체 이송 등의 성능이 우수하여 고분자 컴파운딩 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다.¹ 최근에는 세그먼트 스크루를 채용하여 용도나 혼련성능에 맞게 임의로 이축압출기의 스크루 형상을 변경하는 것이 일반적이다. 분질식 스크루는 고체 이송, 가소화, 용융체 이송, 혼련 등 각기 다른 기능을 가지는 요소들로 구성된다. 이축압출기에 대한 연구에서 중요한 것은 배럴 내에서의 흐름 패턴을 이해하는 것이다. 흐름 패턴은 혼련 시 이루어지는 구성 성분간의 분배와 분산에 대한 가장 기본적인 정보를 제공한다.²⁻⁴ 그러나 이축압출기의 흐름 패턴은 온도, 스크루 속도, feeding 속도, 스크루 조합 및 다이 형상 등에 따라서 매우 복잡한 양상을 띠기 때문에 혼련 수준을 예측하기가 어렵다.

많은 열가소성 수지와 대부분의 엘라스토머는 다양한 입자들과 컴

파운딩하여 상업적으로 사용된다. 컴파운딩된 소재의 기계적, 광학적, 유변학적 특성을 향상시키기 위해서는 충전된 입자들의 분산 정도나 응집을 적절히 제어해야 한다. 충전된 입자들의 분산 상태는 광학현미경, 전자현미경, 광산란을 이용하거나 표면 거칠기 또는 전기전도도 등을 측정하여 조사되어 왔다.⁵⁻⁹ 이중 현미경 관찰은 분산을 평가하기 위한 가장 기본적인 방법으로 회상해석장치 및 시판된 해석 소프트웨어와 접목하여 입자형상, 입자경, 입자경 분포, 평균 입자경, 공간분포와 같은 분산 상태에 대한 정보를 정량적으로 제공한다. 그러나 이러한 정량적인 분산 정보를 얻기 위해서는 많은 노력이 필요하다.

본 연구에서는 탄산칼슘이 충전된 폴리스티렌 시편의 광 투과도를 포토다이오드가 장착된 광학현미경으로 측정하고, 이를 통계적으로 처리함으로써 이축압출기로부터 제조한 컴파운드의 분산 상태를 조사하였다. 또한, 이축압출기의 스크루 조합 및 압출 조건 변화에 따른 컴파운드의 분산 수준을 상호 비교함으로써 대상 시스템의 효율적 혼련을 위한 공정 인자를 도출하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: polylee@inha.ac.kr

실 험

재료. 용융지수가 9.0 g/10 min인 금호석유화학의 폴리스티렌 (GP-125)과 표면처리를 하지 않은 우진 케미칼의 탄산칼슘(SW-100, 평균 입자크기 1.06 μm)을 사용하였다. 폴리스티렌과 탄산칼슘은 80 °C 오븐에서 24시간 건조한 후, 건식 블렌딩하였다. 건식 블렌딩 시, 탄산칼슘의 함량은 3.0 wt%이었다.

압출. 건식 블렌딩한 폴리스티렌과 탄산칼슘을 체적조절 투입기를 이용하여 일괄투입 방식으로 교합형 동방향 이축압출기(Model TEK25, SM Platek, Korea)로 용융 혼련하였다. 혼련 시, 배럴 온도는 공급 영역에서 160 °C, 압축 영역에서 190 °C, 이송 영역에서 210 °C이었

으며, 다이 온도는 205 °C이었으며, 이축압출기와 feeder의 스크루 속도는 각각 100 rpm과 10 rpm이었다. 사용한 이축압출기의 스크루 내경, 스크루 외경, 중심축 거리 및 L/D 비는 각각 16.6 mm, 25 mm, 21.1 mm, 40이었으며, 원형 다이의 직경은 2 mm이었다. 압출기 내의 혼련 상태는 압출 과정 중에 기기를 비상 정지시키고 배럴로부터 스크루를 뽑아 분리시킨 다음에 각 위치 별로 시료를 채취하여 조사하였다.

스크루 구성. 스크루는 호퍼를 통해 배럴 내부로 공급된 재료를 단 순히 운송하는 공급 영역, 공급 영역을 통해 운송된 재료를 용융 압축하여 혼련 과정을 거치는 압축 영역, 압력과 온도를 일정하게 유지하여 다이로 재료를 운송해주는 이송 영역으로 나누어진다. 본 연구에

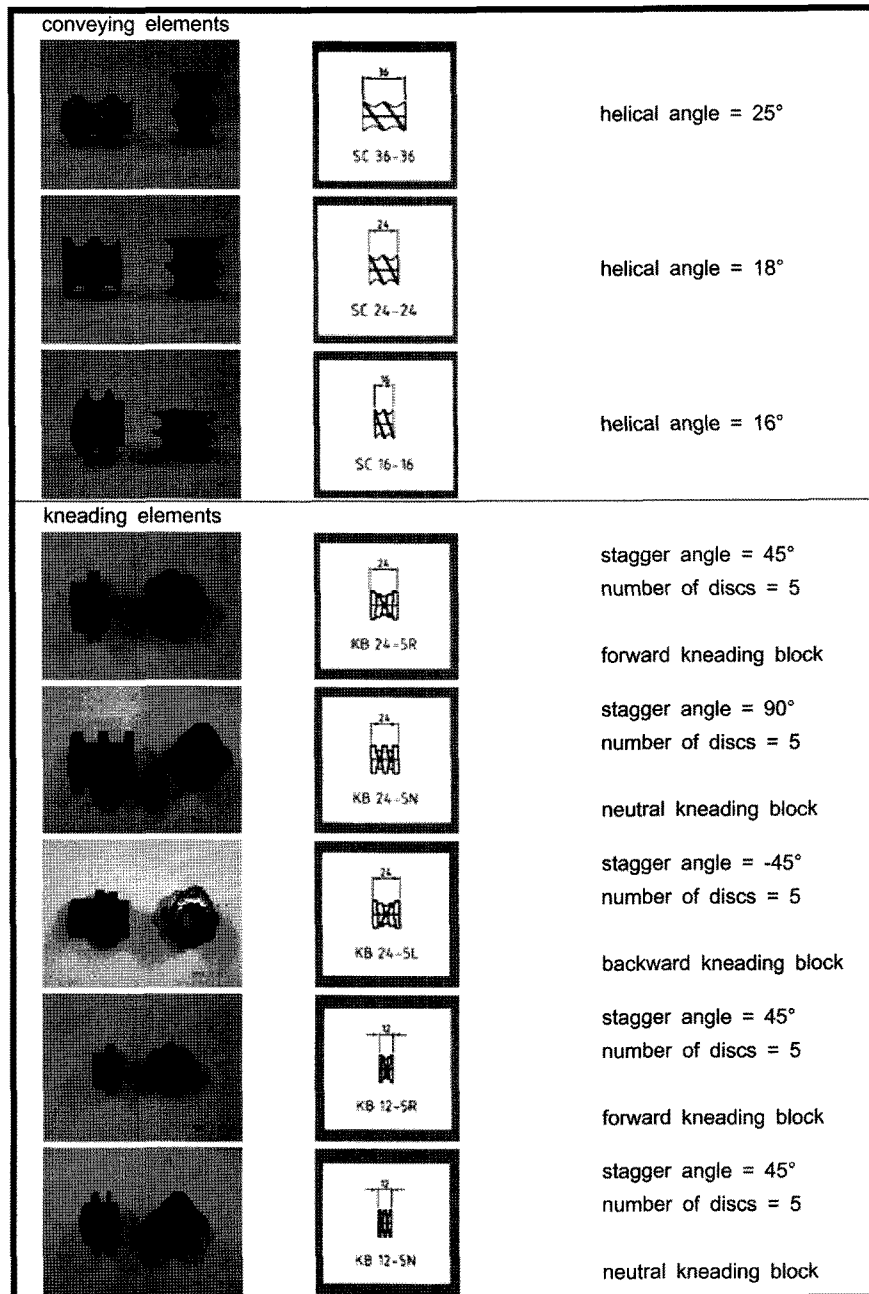


Figure 1. Conveying elements and kneading blocks used in this study.

서는 압축 영역에서 니딩 영역과 위치 및 니딩 블록의 서로 다른 배열을 통하여 A에서 J까지의 10 가지 스크루 조합을 만들었다. 사용한 스크루 엘리먼트의 종류는 Figure 1에, 스크루의 배열 형태는 Figure 2와 Table 1로 각각 나타내었다. 조합 A는 혼련 엘리먼트가 없이 나사산 각이 16°, 18°, 25°이고 길이가 각각 16, 24, 36 mm 인 conveying 엘리먼트들로부터 가지고 구성된 'conveying screw configuration'이다. B에서 J까지는 모두 다섯 장의 디스크로 구성되어 있으며, 그 길이가 12 mm 및 24 mm이고, 디스크 간에 stagger 각이 45°, 90°, -45°인 다섯 종류의 forward, neutral, backward 니딩 블록들을 사용하여 니딩 영역과 위치를 달리한 스크루 조합이다.

분산성 평가. 약 200 μm 두께의 필름 형태로 절단된 압출물을 두 개의 슬라이드 글라스 사이에 넣고 280 °C에서 용융 압착시켰다. 용융 압착된 시료의 광 투과도를 포토다이오드가 장착된 Nikon Optiphot2-pol 광학현미경으로 조사하였다. 시료를 X-Y stage 상에서 등간격으로 미세하게 이동시켜 200 단위 셀로부터 투과 광량을 측정하였다 (Figure 3). 각각의 단위 셀로부터 얻어진 데이터를 일정 간격으로 나는 계급으로 계열화하여 투과 광량에 대한 도수분포곡선을 구하였다

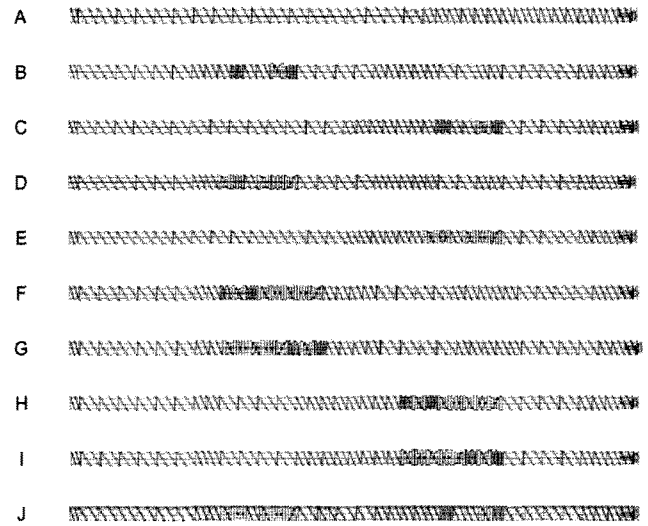


Figure 2. Diagram of screw configurations showing the location of conveying elements and kneading blocks.

Table 1. Screw Configuration Showing Location of Conveying Elements and Kneading Blocks

Screw configuration	Profile of conveying element(s) and kneading block(s) (type of conveying element/number or type of kneading block/number)				
	A	SC 16-16/1	SC 36-36/18	SC 24-24/16	
B	SC 16-16/1	SC 36-36/6	SC 24-24/3	KB 12-5R/2	SC 24-24/2
	KB 24-5R/1	KB 12-5R/1	KB 12-5N/1	SC 36-36/4	SC 24-24/5
C	SC 36-36/2	SC 24-24/2	SC 36-36/4	SC 24-24/4	
	SC 16-16/1	SC 36-36/14	SC 24-24/7	KB 12-5R/2	SC 24-24/2
D	KB 24-5R/1	KB 12-5R/1	KB 12-5N/1	SC 36-36/4	SC 24-24/4
	SC 16-16/1	SC 36-36/6	SC 24-24/2	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1
E	SC 24-24/1	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5L/1	SC 36-36/4
	SC 24-24/5	SC 36-36/2	SC 24-24/2	SC 36-36/4	SC 24-24/4
F	SC 16-16/1	SC 36-36/14	SC 24-24/6	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1
	SC 24-24/1	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5L/1	SC 36-36/4
G	SC 16-16/1	SC 36-36/6	SC 24-24/2	KB 12-5R/2	KB 24-5R/1
	KB 12-5R/1	KB 12-5N/1	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5R/1
H	KB 24-5N/1	KB 24-5L/1	SC 24-24/4	SC 36-36/4	SC 24-24/5
	SC 36-36/4	SC 24-24/3			
I	SC 16-16/1	SC 36-36/6	SC 24-24/2	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1
	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5L/1	KB 12-5R/2	KB 24-5R/1
J	KB 12-5R/1	KB 12-5N/1	SC 24-24/4	SC 36-36/4	SC 24-24/5
	SC 36-36/4	SC 24-24/3			
K	SC 16-16/1	SC 36-36/6	SC 24-24/2	SC 36-36/4	SC 24-24/8
	KB 12-5R/2	KB 24-5R/1	KB 12-5R/1	KB 12-5N/1	KB 24-5R/1
L	KB 24-5N/1	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5L/1	SC 36-36/4
	SC 24-24/4				
M	SC 16-16/1	SC 36-36/6	SC 24-24/2	SC 36-36/4	SC 24-24/8
	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5L/1
N	KB 12-5R/2	KB 24-5R/1	KB 12-5R/1	KB 12-5N/1	SC 36-36/4
	SC 24-24/4				
O	SC 16-16/1	SC 36-36/6	SC 24-24/2	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1
	SC 24-24/1	KB 24-5R/1	KB 24-5N/1	KB 24-5L/1	SC 36-36/4
P	SC 24-24/5	KB 12-5R/2	SC 24-24/2	KB 24-5R/1	KB 12-5R/1
	KB 12-5N/1	SC 36-36/4	SC 24-24/4		

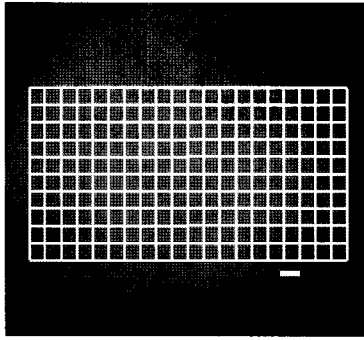


Figure 3. Representation of 20×10 sub-areas for measuring the transmitted light intensity.

다. 본 연구에서는 도수분포곡선을 이용하여 혼련 요소들의 형태와 위치 및 기타 공정 인자들의 변화에 따른 충전제의 분산성을 상대적으로 평가하였다. 투과광의 강도는 시료 두께에 따라서 달라진다. 그러나 본 연구에서 사용한 평가 방법이 투과 광량을 계열화하여 도수 분포곡선을 구하고, 이를 이용하여 분산성을 상대적으로 비교하는 방식이라 시료간의 작은 두께 편차는 분산성 평가에 영향을 주지 않을 것이라 판단하였다.

결과 및 토론

일반적으로 충전제의 단위입자는 서로 강하게 응집하여 일차입자 (aggregate)가 되고, 일차입자는 반데르발스력, 수분에 의한 모세관력, 또는 정전기력 등에 의해 다시 응집하여 집합입자(agglomerate)가 된다. 분산이란 수력학적인 전단력을 이용하여 집합입자를 일차입자로, 경우에 따라서는 단위입자로까지 분리시켜 고분자 중에 균일하게 분배하는 조작이라 할 수 있다. 어느 정도의 분산이 이루어져야 하는가는 대상이 되는 물리적 성질이나 작용 기구에 따라서 차이가 있다. 예를 들어, 광학적 성질은 파장 크기에 대응할 수준의 분산이, 기계적 성질은 응력의 집중과 전달에 필요한 크기 수준의 분산이, 산화방지제와 같은 첨가제는 분자의 확산거리에 상응하는 수준의 분산이 요구된다. 본 연구의 경우에는 광학현미경 상에서 파악될 수준의 관찰 크기를 해석 대상으로 하였다. Figure 4는 스크루 조합 J를 사용하여 압출할 때, 첫 번째 니딩 영역 직전과 첫 번째와 두 번째 니딩 영역 사이 및 두 번째 니딩 영역 직후 위치에서 채취한 시료의 광학현미경 사진이다. 니딩 전에는 탄산칼슘 입자의 분산과 분배가 일어나지 않았으며, 첫 번째 니딩을 통하여서는 어느 정도의 분산은 일어난 반면에 분배는 충분하게 일어나지 않았고, 두 번째 니딩 영역을 지나서는 분산과 분배가 상당히 진행되었음을 알 수 있다.

Figure 5는 Figure 4에 해당하는 시료의 200 단위 셀로부터 측정된 투과 광량을 도수화하여 얻은 광량에 대한 도수분포곡선이다. 각각의 곡선은 투과 강도 축으로 서로 다르게 이동시켜 구별이 용이하게 하였다. 단위 셀의 크기가 충분히 작으면 탄산칼슘의 분포에 국소적인 차이가 나타나서 투과 광량은 평균치를 중심으로 편차가 생긴다. 이러한 투과 광량의 편차는 분산 혼합과 분배 혼합 과정이 진행됨에 따라서 줄어든다. 다시 말해, 지속적인 혼련으로 인하여 분리 스케일(scale of segregation)과 분리 강도(intensity of segregation)가 감소하면

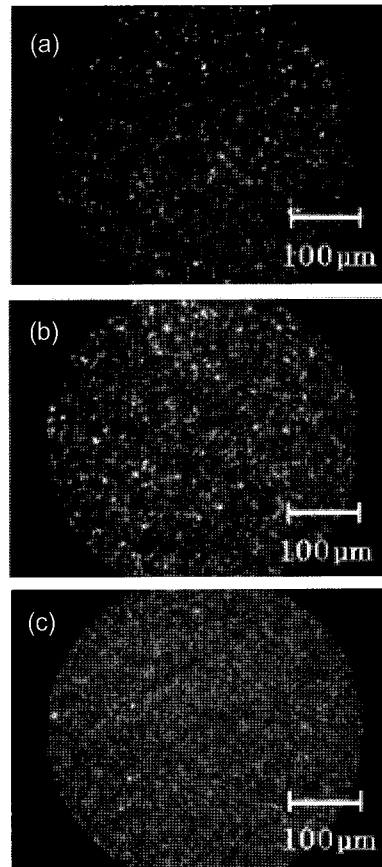


Figure 4. Optical microscopy images showing a broad range of dispersion levels. Samples were taken at backward area of first kneading zone (a); middle area of two kneading zones (b); forward area of second kneading zone (c).

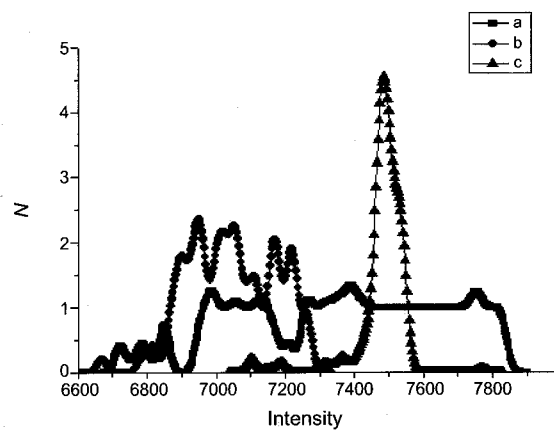


Figure 5. Frequency distribution curves for the corresponding samples in Figure 4. Curves are shifted along the intensity axis for clarity.

단위 셀간 투과 광량의 편차가 작아져 도수분포곡선의 폭이 좁아진다. 이상적인 분산과 분배가 일어날 경우에는 δ 함수 형태의 도수분포 곡선이 기대된다. 따라서, 도수분포곡선 (a)는 시료 내에 탄산칼슘이 덩어리진 집합입자 상태로 단순 분포되어 있다는 것을, 도수분포 곡선의 폭이 (a)에서 (b)로, (b)에서 (c)로 점차 감소하는 것은 니딩 블록에

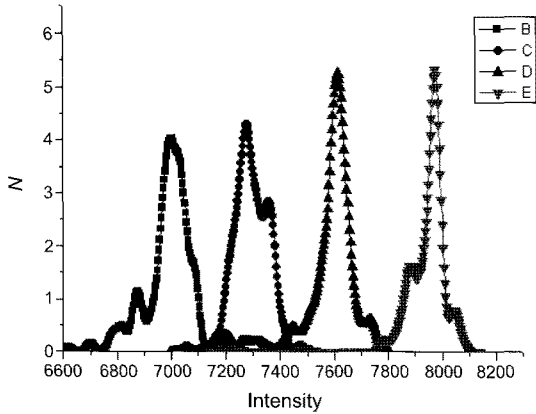


Figure 6. Frequency distribution curves for PS/CaCO₃ compounds prepared with different screw configurations. Screw configuration.

의해 혼련이 실질적으로 진행되었다는 것을 알려준다. 광학현미경 사진 결과와 도수분포곡선의 밀접한 상관관계는 혼련 요소들의 형태와 위치 및 기타 공정 인자들의 변화에 따른 충전제의 상대적인 분산도 차이를 단위 셀로부터 측정된 투과 광량의 도수분포곡선을 이용하여 분석할 수 있다는 것을 시사한다.

본 연구에서는 니딩 영역과 위치 및 니딩 블록의 서로 다른 배열을 통하여 A에서 J까지 10가지 스크루 조합을 만들고 이에 대한 혼련 수준을 도수분포곡선으로 평가하였다. 각각의 스크루 조합에 대한 특징은 다음과 같다. 스크루 조합 A는 니딩 블록 없이 단순 이송 스크루의 피치 변화만을 고려한 조합으로 혼련 수준이 가장 낮다. B, C, D, E는 flight 두께가 서로 다른 니딩 block들을 압축 영역이 시작되는 위치 및 끝 부위에 배치시킨 스크루 조합이다. F, G, H, I는 flight 두께가 다른 니딩 블록들을 하나로 묶어 압축 영역이 시작되는 위치 및 끝 부위에 배치시킨 스크루 조합으로써, F와 H는 얇은 flight를 갖는 니딩 블록들을 호퍼 쪽으로 선 배치한 후에 두꺼운 flight를 갖는 니딩 블록들을 배치한 것이며, 반대로 G와 I는 두꺼운 flight를 갖는 니딩 블록들을 호퍼 쪽으로 선 배치한 후에 얇은 flight를 갖는 니딩 블록들을 배치한 것이다. J는 두꺼운 flight를 갖는 니딩 블록들을 압축 영역이 시작되는 곳에, 얇은 flight를 갖는 니딩 블록들을 압축 영역이 끝나는 부위로 나누어 배치시킨 스크루 조합이다.

Figure 6은 스크루 조합 B, C, D, E를 사용하여 혼련시킨 시료들의 도수분포곡선을 보여준다. Figure 5에서와 같이 각각의 곡선은 투과 강도 축으로 서로 다르게 이동시켜 구별이 용이하게 하였다. 조합 B와 C 또는 조합 D와 E의 도수분포곡선을 상호 비교해 보면 분산도는 니딩 블록의 배치 위치에는 별반 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 반면에 조합 B와 D 및 조합 C와 E의 도수분포곡선을 별도로 비교해 보면, 니딩 디스크의 flight 두께에 따라서 분산 정도가 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. 이축압출기의 기본적인 혼련 메커니즘을 고려하면, 집합 입자의 분산은 스크루 tip과 배럴 사이의 좁은 공간인 tip clearance에서 높은 전단력이 걸리면서 수력학적 전단력이 입자의 응집력보다 상회하게 됨으로써 일어난다. 그러므로, 분산 정도를 지배하는 가장 중요한 요소는 tip clearance에서 유체 흐름이다. 니딩 디스크 폭이 증가하면 비례적으로 tip clearance를 통과하는 유체 흐름

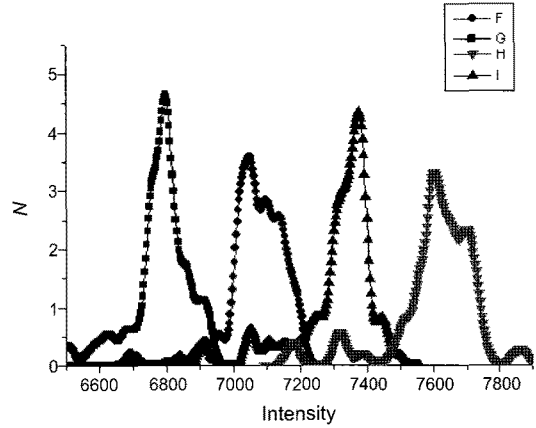


Figure 7. Frequency distribution curves for PS/CaCO₃ compounds prepared with different screw configurations. Screw configuration.

량이 많아지고, 그 결과로 분산이 효과적으로 일어난 것이다.

Figure 7은 스크루 조합 F, G, H, I를 사용하여 혼련시킨 시료들의 도수분포곡선을 보여준다. F보다는 G에서, H보다는 I에서 좀 더 개선된 혼련 상태가 나타났다. 즉, 두꺼운 flight를 갖는 니딩 블록들을 호퍼 쪽으로 선 배치한 후에 얇은 flight를 갖는 니딩 블록들을 배치할 경우가 그 반대의 경우보다 혼련 효과가 우수하였다. 니딩 디스크 폭이 좁으나, 넓으나 하는 차이는 혼련 수준을 결정하는 두 가지 요소인 분산 과정과 분배과정 중 어느 것에 주로 영향을 미치는 가와 깊은 관련이 있다. 앞서 설명한 바와 같이 니딩 디스크 폭이 넓으면 tip clearance에서 유체 흐름양이 많아져 분산성이 증가한다. 반면에 니딩 디스크 폭이 좁아지면 유체의 흐름 패턴이 복잡화되면서 교반 능력이 증가하여 분배 기능이 향상된다. 결론적으로 니딩 디스크 폭은 좁아지면 분배에, 넓어지면 분산에 이점이 있다고 말할 수 있다. 따라서, 두꺼운 flight를 갖는 니딩 블록들을 호퍼 쪽으로 선 배치한 경우가 혼련 정도가 좀 더 우수하다는 실험 결과는 혼련 시 분배보다는 분산을 먼저 도모하는 것이 혼련 효율을 높이는 데 유리하다고 사실을 알려준다. 한 가지 중요한 것은 G와 I 조합이 D나 E 조합보다 혼련 수준이 낮다는 점이다. G와 I 조합은 D와 E 조합과 형태는 다르지만 혼련에 도움을 줄 것으로 기대되는 얇은 flight를 가지는 니딩 블록들을 추가한 것인데 오히려 혼련 효율이 나빠졌다는 것은 예상하지 못했던 결과였다. 니딩 영역에는 어느 정도의 정체 흐름(stagnant flow)이 발생된다. 이러한 정체 흐름은 수지와 배럴 사이의 열전달을 억제시켜 국부적인 발열을 유도할 수 있다. 발열에 의한 온도 상승은 수지의 점도를 떨어뜨리고, 이는 결과적으로 전단력을 감소시켜 분산에 악영향을 미치게 된다. 필요 이상의 니딩 블록의 도입은 과도한 정체 흐름을 야기하여 균일한 혼련에 부정적인 역할을 할 수도 있기 때문에 컴파운딩 시스템에 따라서 니딩 블록의 수와 형태 및 배치 위치를 적절히 조정해야 할 것으로 판단된다.

스크루 조합 B에서 H까지의 혼련 효과를 해당하는 시료의 광량에 대한 도수분포곡선으로 분석한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 니딩 디스크의 폭에 따라서 분산과 분배 기능에 뚜렷한 차이가 있다. 효과적인 분산을 위해서는 스크루 tip부를 통과하는 유량을 증대시켜야 한다. 또한, 스크루 영역 중 상대적으로 온도가 낮아서 수지 점도가 높

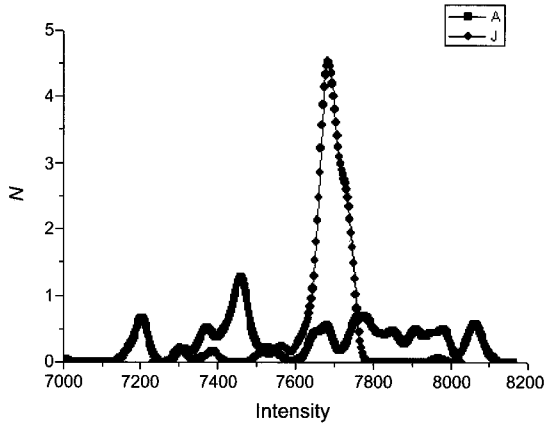


Figure 8. Frequency distribution curves for PS/CaCO₃ compounds prepared with different screw configurations. Screw configuration.

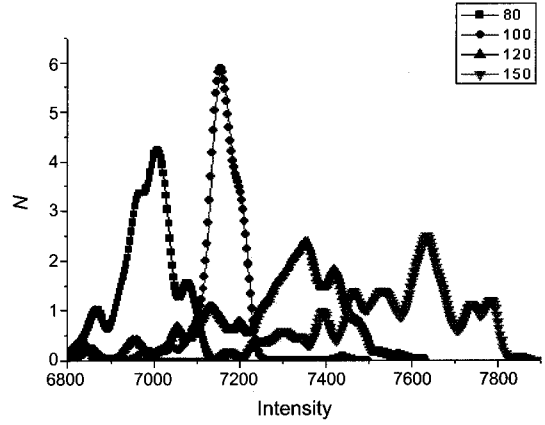


Figure 10. Effect of screw speed on particle dispersion in PS/CaCO₃ compounds.

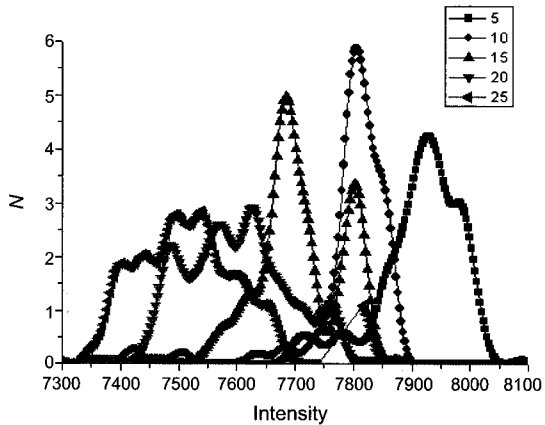


Figure 9. Effect of feed rate on particle dispersion in PS/CaCO₃ compounds.

고, 이로 인하여 큰 전단력이 유도되는 압축 영역 시작 부에 분산을 위한 니딩 블록을 배치하여야 한다. 한편 균일한 혼련을 위한 분배 과정도 필요한데, 이는 분배를 위한 니딩 블록을 다이 가까이 배치함으로써 그 효율을 높일 수 있다. 일반적으로 다이 쪽은 스크루 전 영역에서 상대적으로 고온으로 유지된다. 적절한 니딩 블록을 다이 가까이 배치할 경우에는 낮은 수지 점도에 의해 흐름 교란이 비교적 용이하게 유도되며, 그 결과 분배 효율의 향상을 기대할 수 있다. 이상의 내용을 종합하여 스크루 조합 J를 만들고, 이의 혼련 효율을 조사하였다. Figure 8은 스크루 조합 A와 J를 사용하여 혼련시킨 시료들의 도수분포곡선이다. 이송 스크루로만 구성된 A는 매우 낮은 혼련 상태를 보여준다. 반면에 J는 기대한 바와 같이 10가지 스크루 조합 중에서 가장 우수한 혼련 상태를 나타내는 좁은 폭의 도수분포곡선을 보여준다.

재료 공급 속도가 혼련에 주는 영향을 검토하기 위해서 feeder의 스크루 속도를 5, 10, 15, 20, 25 rpm으로 변화시켰다. 각각의 feeder 스크루 속도에 해당하는 재료의 정량적인 투입량은 겉보기 체적으로 30, 75, 124, 165, 210 cm³/min이었고, 중량으로는 1.14, 2.82, 4.68, 6.18, 7.80 kg/hr이었다. Figure 9는 스크루 조합 J를 사용할 경우에 재료 공급 속도에 따른 혼련 수준의 차이를 보여준다. 투입량이 1.14

kg/hr에서 2.82 kg/hr로 증가할 경우에는 혼련 정도가 일부 향상되었다. 그러나 투입량이 4.68 kg/hr 이상이 되는 경우에는 혼련 상태가 급격히 나빠진다. 배럴 내 모든 공간이 수지로 채워지는 단축압출기와는 달리 이축압출기는 부분 충전 영역을 갖는 기기이다. 부분 충전 영역에서는 수지의 일부분이 앞으로 나아가지 않고 정체하면서 축방향 혼련(axial mixing)을 한다.^{10,11} 이러한 정체 흐름은 후차적으로 공급되는 수지와 지속적으로 혼련되며, 그 일부분은 또 다른 정체 흐름을 형성한다. 그러나 배럴의 충전도(degree of fill)가 증가하면 수지가 단순히 앞으로 밀려나감으로써 정체 흐름양이 줄어들고, 스크루 내 체류시간이 감소한다. 재료 공급 속도의 증가에 따른 체류시간의 감소는 혼련이 일어날 수 있는 기회의 감소로 이어져 결과적으로 균일한 혼련이 이루어지기가 힘들게 된 것이다.

Figure 10은 스크루 조합 J에서 feeder 스크루 속도를 10 rpm으로 고정하고 이축 압출기 스크루 속도를 80, 100, 120, 150 rpm으로 변화시켰을 때의 혼련 효율의 차이를 보여준다. 스크루 속도와 관련하여 혼련 수준에 영향을 미치는 인자로는 충전도, 체류시간, 전단력 등이 있다.¹² 느린 스크루 속도에서는 높은 충전도와 낮은 전단력에 의해, 빠른 스크루 속도에서는 체류 시간 감소에 의해 주로적으로 혼련 효율이 떨어진다. 스크루 속도가 빨라지면 전단속도가 커져 일반적으로는 전단력이 증가한다. 그러나 일정 이상의 스크루 속도에서는 점도 소산(viscous dissipation)에 의한 국부적인 발열로 온도가 상승하면 수지의 점도가 크게 감소하여 역으로 응집 입자에 가해지는 전단력이 줄어들 수도 있다. 따라서, 혼련 수준에 대한 스크루 속도의 영향을 평가하기 위해서는 여러 가지 인자들을 복합적으로 고려해야 한다. 본 시스템의 경우에는 100 rpm의 스크루 속도에서 가장 우수한 혼련 수준이 나타났다.

결론

탄산칼슘이 충전된 폴리스티렌을 대상으로 이축압출기의 스크루 조합 및 공정 조건이 충전제의 분산 상태에 미치는 영향을 포토다이오드가 장착된 광학현미경으로 조사하였다. 광학현미경 상의 단위 셀로부터 측정된 투과 광량에 대한 도수분포곡선을 구함으로써 혼련 요소들의 형태와 위치 및 기타 공정 인자들의 변화에 따른 충전제의 상대적인

분산도 수준을 손쉽게 평가할 수 있었다. 다양한 스크루 조합에 대한 혼련 효과를 비교한 결과, 분산과 분배 기능이 니딩 디스크의 폭에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 재료 공급 속도나 스크루 속도와 같은 공정 인자들은 충전도, 전단속도, 체류시간 등에 복합적으로 영향을 주어 혼련 수준의 차이를 초래하였다.

감사의 글: 본 연구는 인하대학교 교내연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 컴파운딩 실험은 SM Platek사에서 기증해 주신 이축압출기 (Model TEK25)를 사용하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. Rauwendaal, *Mixing in Polymer Processing*, Dekker, New York, 1991.
2. S. Bawiskar and J. L. White, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 727 (1998).
3. J. Flecke, H. Potente, and K. Kretschmer, *J. Reinf. Plast. Comp.*, **21**, 507 (2002).
4. Y. C. Ahn, *Polymer(Korea)*, **29**, 549 (2005).
5. J. Schroder, *Prog. Org. Coat.*, **15**, 337 (1988).
6. Y. Suetsugu, T. Kikutani, T. Kyu, and J. L. White, *Colloid Polym. Sci.*, **268**, 118 (1990).
7. A. Brisson, G. L'Esperance, and M. Caron, *J. Coat. Technol.*, **63**, 111 (1991).
8. G. S. Choudhury and A. Gautam, *J. Food Sci.*, **64**, 479 (1999).
9. A. Gautam and G. S. Choudhury, *J. Food Process. Pres.*, **23**, 355 (1999).
10. S. M. Lee, J. C. Park, S. M. Lee, Y. J. Ahn, and J. W. Lee, *Korea-Australia Rheology J.*, **17**, 87 (2005).
11. P. Ainsworth, S. Ibanoglu, and G. D. Hayes, *J. Food Eng.*, **32**, 101 (1997).
12. S. Y. Lee and K. L. McCarthy, *J. Food Process. Eng.*, **19**, 153 (1996).