

플라스틱 射出機의 設計에 대하여

黃璟鉉* · 金浩然**

On the Design of Plasticating Extruder

Kyung Hyun Whang · Ho Youn Kim***

1. 序 言

플라스틱 射出機(Extruder)의 역할은 플라스틱 덩어리(Pellet)를 녹여 균일한 플라스틱 熔融物을 만들고 다이(die)를 통하여 일정한 율로 사출(pump)하여 원하는 형태의 제품을 만드는 데 있다. 이를 위하여 먼저 固型 플라스틱 덩어리를 前熱(pre-heating)하고 熔融이 일어날 때까지 加熱해야 하는데 이때 溫度 變化(fluctuation)가 없어야 한다. 또한 다이를 통하여 사출하기 위한 수준까지 용융물에 壓力을 가해야 한다. 이러한 작업에서 가장 문제가 되는 것은 스크류의 성능이다. 현재까지 여러가지 종류의 스크류가 개발되어 사용되고 있으나 單軸 스크류 射出機(single screw extruder)가 가장 많이 이용되고 있으며 그 이유는 다양하고 적은 投資로 여러 범위의 熱粘性 材料(thermo plastic)를 사출할 수 있기 때문이다. 2축 스크류는 단축 스크류에 비해 혼합(mixing)효과가 좋고 사출량이 많으며 단단한 PVC같은 재료를 직접 압출할 수 있어 차츰 이용도가 높아지고 있다. 여기에서는 단축 압출기와 2축 압출기에 대한 특성을 비교하고 개발 현황 및 전망을 소개하고자 한다.

2. 現況 및 展望

플라스틱을 射出하는데 필요한 조건은 재료의 온도변화 없이 재료를 균일하게 사출할 수 있어야 하며 局部的인 加熱을 피해야하고 압력 變動 없이 高生産量(output)을 얻을 수 있어야 한다. 이러한 조건들을 만족시키기 위해 여러종류의 사출기가 개발되었다. 단축 스크류의 경우 과거 60년대에서 70년대에는 L/D비(스크류 길이: 直径), 直径, 채널(channel)깊이 이외에는 별로 변하지 않았으며 供給部(feed zone), 壓縮部(compression zone), 計量部(metering zone)가 있는 전형적인 스크류가 개발되었다. 또한 대부분 공급 구간에서 제량 구간까지 간단하고 균일한 flight를 사용하였다. 그러나 최근에는 완전하고 균일한 제품을 얻기 위하여 복잡한 多段 混合 스크류(multi stage screw)가 개발되었다.

예를 들어 통상적인 균일한 flight screw를 따라 링(ring)형태의 댐(dam)을 사용하는 것이다. 재료가 채널을 따라 흘러가는 것을 막고 링의 外經과 배럴(barrel)의 內經 사이의 적은 틈새로만 흘러가도록 함으로써 高剪斷(shear)을 발생시켜 완전한 熔融상태로 만드는 것이다. 댐은 용

* 昌原本所 加工機械室, Member of Process Machinery Lab.

** 昌原本所 加工機械室長, Head of Process Machinery Lab, Ph. D.

용되지 않은 입자들이 흘러가지 못하도록 하는 역할을 한다. 비슷한 방법으로 링 대신에 다수의 圓型핀(pin)을 사용하기도 한다. 또한 벤팅(venting)의 사용이 증가되었는데 생산량을 증가시킬 수 있기 때문이다. 混合物(compound) 사출기의 경우에는 생산 제품을 다듬질하는 데 벤팅이 사용되고 습기를 제거하는 데 사용되기도 한다. 靜的 混合機(static mixer)가 생산량을 증가시키기 위해 사용된다. 1978년에 發表된 보고서에 의하면 生産量이 10~25%정도 증가된다고 한다. 2多 射出機를 사용하여 氣泡 射出(foamed extrusion), 非類似 高分子 化合物의 混合 등에 이용한다. 스크류의 feed 채널이 전이 구간(transition)에서 점점 좁아지고 알아지는 경향이 있다. 동시에 計量 구간이 전이 구간 출발점에서 시작되기도 한다. 용융되지 않는 고형 덩어리와 용융물질을 구분하여 균일한 용융물을 얻기 위하여 Hartig Div. of Midland-Ross Corp.에서 XLK스크류를 생산하였으며 Scientific Process Research Co.에서는 Recycle 사출기를 개발하였다. 어느 것이나 사출기 배출 구간에서 두개의 동심축이나 同軸(coaxial)을 사용한다. Egan Machinery Co.에서 Dual-channel 스크류를 개발하였고 이는 스크류 断面의 不均衡을 제거하여 스크류와 배럴(barrel)의 摩耗를 줄일 수 있다. 또한 Computer를 이용한 射出壓力, 射出速度, 射出溫度 등을 제어하는 System이 개발, 이용되고 있다. 이러한 Programmable control 방식으로는 Injectrol system, Sycap system, Conject system 등이 이용된다. 2축 사출기의 경우 최근 개발 상황은 기계 구조의 단순화와 성능 향상, 힘든 工程을 필요로 하는 재료에 대한 2축 사출기의 개발, 2多(two stage) 2軸 스크류의 개발 등을 꼽을 수 있다.

3. 單軸 스크류와 2軸 스크류의 비교

2軸 스크류 사출기는 PVC 사출이 많은 유럽 쪽에서는 오래 전부터 사용되어 왔으나 미국에서는 최근 10년동안 파이프와 판재(sheet)의 직접 射出을 하는 경우에 사용되어 왔었다. 그러나 2軸 射出機를 사용하면 원료를 적극적으로 移

送을 할 수 있고 혼합 효과를 높일 수 있으며 원하는 압출량을 얻기 위하여 단축 스크류 사출기보다 회전속도가 낮아도 되는 이점이 많다. 미국에서보다 유럽쪽에서 2축 사출기를 많이 사용하는 이유는 미국쪽에서는 사출온도가 216~221°C이고 유럽쪽에서는 171~177°C로 온도의 제한이 있기 때문이다. 즉 低溫에서 균일한 용융이 필요한 원료를 다이에 移送할 수 있으므로 열에 민감한 재료는 2軸 스크류를 사용한다. 2軸 스크류를 사용하여 粉末混合工程(powder blend process), LDPE의 균일화와 작은 球型으로 만드는 작업(pelletizing), HDPE의 精製와 Pelletizing, Polystyrene의 複合, PVC의 複合, 비닐 아세테이트 공동 중합체의 複合, 아세탈(acetal), 아크릴(acryl), 폴리아미드(polyamide), 폴리카보네이트(polycarbonate), PPO, ABS 등의 彩色, 複合, 용융물의 粘性이 다른 고분자 化合物의 混合, 색깔의 濃縮 등에 사용된다.

3.1 移送 방법 및 混合 방법

單軸 스크류의 경우 Channel에 채워진 원료가 스크류에 붙고 배럴의 内部面에서 미끄러지면 원료가 앞으로 나가지 못하고 空轉을 하게 된다. 배럴을 따라 前進하기 위해서는 원료는 스크류 回轉속도보다 늦게 回轉해야 한다. 배럴의 내부면에 대한 마찰이 원료가 스크류보다 늦게 回轉하도록 하는 유일한 힘이다. 미끄러짐과 점착(sticking)의 정도는 특별한 원료의 마찰계수, 온도와 綱온도 등에 따라 변한다. 그중에서도 綱(스크류와 배럴)의 온도에 따라 마찰 계수의 변화가 크다. 스크류와 배럴의 온도 차이가 있기 때문에 동시에 粘着되지는 않으며 스크류위에서는 자유롭게 미끄러지고 배럴에서는 粘着되어야 한다. 그러므로 단축 스크류에서는 綱의 마찰계수가 중요하다. 또한 채널을 가로 질러 압력 勾配(gradient)가 존재하게 되어 원료의 흐름(flow)을 만든다. 원료의 여러 層(layer)의 속도가 다르므로 混合이 된다. 얇은 채널을 사용하면 循環이 잘 되므로 混合이 잘 되지만 射出量이 적어지고 過多한 剪斷力에 의한 過熱이 되므로 너무 얇게 할 수 없다. 틈(clearance)이 증가하면

길이 방향(axial direction)의 혼합은 잘 되지만 너무 큰 漏泄(leakage)때문에 사출기 효율이 감소된다. 즉 單軸 스크류의 혼합은 背圧(backpressure)과 計量구간(metering section)에서 발생하는 逆流(back flow)에 의해 결정되며 이러한 배압과 역류를 결정하는 요인(factor) 중 하나가 배럴과 스크류 사이의 틈새이며 틈새에 의해 혼합, 射出量, residence time 등이 결정되어 스크류 효율이 결정된다. 스크류 크기에 따라 다르나 틈새를 0.3mm~2mm로 한다. 2축 스크류의 경우 맞대고 있는 점에서 반대편 스크류의 flight에 의해 두개의 flight사이의 채널이 密閉되어 이웃 flight와 배럴사이에 방(chamber)을 각각 형성한다. Flight사이에 원료가 들어오면 強制移送를 하지 않는한 前進도 後進도 하지 않는다. 2축 스크류에서는 마찰계수, 압력, 사출량 등에 관계 없이 배럴을 따라 앞으로 전진한다. 용융물은 스크류에 粘着되지 않는데 맞물리는 곳(Intermeshing point)에서 한 스크류가 다른 스크류를 닦아 내기 때문이다. 2축 스크류에 의한 강제 이송의 장점은 다음과 같다.

○ Residence time 分布 범위가 매우 좁다. 즉 모든 粒子들의 排出(discharge)시간이 거의 같다.

○ 모든 粒子들이 같은 정도의 熱과 일(work)을 받으므로 均一한 제품을 얻는다.

○ 自体 洗滌(self-cleaning)이 우수하다. 재료가 遲滯되는 것을 막고 색깔 변화를 용이하게 한다.

○ 서어지(surge)없이 용융물을 배출할 수 있다. 압력과 점성 계수에 영향을 받지 않기 때문이다.

混合 효과는 同方向 回轉 2축 스크류(co-rotating twin screw)보다 異方向 回轉 2축 스크류(counter-rotating twin screw)가 크다.

3.2 射出量(output) - 背圧

單軸 스크류는 solid convey zone, melting zone, pumping zone으로 나눌 수 있으며 압력 발생은 주로 펌프 구간에서 일어난다. 펌프 구간과 solid convey zone은 원료의 相(phase)가 다르기 때문에 해석을 하는 경우에도 구분을 해서 각각 계산을 한다. 2축 스크류의 경우에도

마찬가지로 구분을 해서 계산을 한다. 단축 스크류의 경우 다이 끝에서 호퍼(hopper)끝까지 背圧을 전달할 수 있는 연속적인 solid bed가 존재하게 되며 사출량이 다이 압력에 의해 좌우된다. 2축 스크류의 경우 이러한 bed가 flight에 의해

Table 1. 스크류 직경에 따른 압출량 비교

rpm	스크류직경	압출량(kg / hr)		
		단축스크류	2축스크류	
10	30	3.88	5.06	
	40	6.93	9.04	
	50	10.75	14.02	
	60	15.48	20.19	
	70	21.09	27.51	
	80	27.61	36.01	
	90	35.70	46.56	
	40	30	15.53	20.25
		40	27.01	36.01
50		43.13	56.25	
60		61.93	80.76	
70		84.38	110.04	
80		110.45	144.04	
90		139.59	182.04	
60		30	23.30	30.38
		40	41.42	54.02
	50	64.70	84.38	
	60	92.89	121.14	
	70	126.70	165.23	
	80	165.64	216.02	
	90	209.38	273.06	

깨어지므로 정상적인 작동 조건하에서는 다이 압력에 무관하다. Janssen에 의하면 背圧의 변화에 射出량이 5%이내 범위에서 일정하다고 한다. 2축 스크류의 경우 다이에서의 전체 압력은 射出량과 다이 型狀에 의해 唯一하게 결정된다. Table 1에 단축 스크류와 2축 스크류의 스크류 직경에 따라 射出량의 변화를 제시한다. 이때 원료는 polyethylene이고 작동 온도는 196°C, 점성 계수는 8700poise, 단축의 L/D는 24 : 1, 2축의 경우는 18 : 1, flight높이는 1.25cm, 폭은 1.7cm, 배럴의 마찰 계수는 0.4725, 스크류의 마찰계수는 0.345이다. 背圧은 단축의 경우 293.67kg / cm²이고 2축 스크류는 200.00kg / cm²이다. 單軸, 2軸 모두 스크류 제품에 비해

해서 사출량이 증가하며 單軸보다 2軸의 射出量이 약간 많다. 2軸 스크류의 射出量은 스크류의 型狀에 의해 결정되는데 Schenkel의 공식에서 Chamber 체적에 의해 사출량이 비례하기 때문이다. Table 2에 Pitch에 따른 사출량의 증가를 보인다.

Table 2. 피치에 따른 배압-압출량 관계

rpm	pitch(cm)	압 출 량 (kg / hr)	배 압 (kg/cm ²)
10	2.0	10.00	72.50
	3.0	23.29	94.24
	4.0	36.60	120.34
	5.0	49.49	153.70
40	2.0	40.00	290.36
	3.0	93.16	376.98
	4.0	146.40	585.61
60	5.0	197.96	791.85
	2.0	60.00	435.00
	3.0	139.74	565.44
	4.0	219.60	722.04
	5.0	269.94	922.20

4. 사출기 효율에 영향을 미치는 인자

사출기 效率에 영향을 미치는 인자는 여러가

지 있으나 가장 큰 요인은 속도, L/D (스크류 길이 : 스크류 직경), 온도 등이다. 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

4.1 速度

射出量은 스크류 速度에 거의 비례한다. 최근의 사출기 回轉數는 과거에 비해 50% 증가되었다. 單軸 스크류와 2軸 스크류를 비교하면 같은 사출량을 얻기 위하여 단축 스크류의 회전수가 높아야 한다. 그러므로 국부적인 열 발생이 생기며 큰 전동기를 필요로 한다. 또한 완전히 용융된 제품을 얻기 위하여 L/D의 비를 크게 해야 하며 품질이 저하된다. 특히 온도 발생이 문제가 되는 곳은 計量部를 너무 길고 좁게해서는 안된다. 대신에 混合 구간의 효율을 높이는 것이 바람직하다. 혼합 구간의 效率를 높이는 방법으로 Wave screw의 使用, Fluted 혼합 구간의 使用등이 있다. Wave screw란 일정한 길이의 計量구간 대신에 연속적인 計量Wave를 사용하는 것을 말하는데 채널 깊이를 Wave 지게하여 計量 구간을 길게해 주는 역할을 한다. 이 스크류의 장점은 용융물의 質을 향상시킬 수 있고 高速에서도 온도 생성이 적다. Table 3에 Wave를 준 경우 압출량, 압력, 온도를 보인다. Fluted

Table 3. Wave Screw의 성능

Resin	Screw speed, rpm	Output		Stock temperature, °F	Pressure, psi		
		Lb/hr	Lb/hr/rpm		Die	Breaker Plate	
Polystyrene pellets ^b	33	415	12.6	400	910 ± 4	1425	
	51	640	12.5	415	1130 ± 5	1900	
	100	1180	11.8	430 ± 5	1180 ± 5	1800	
	154	1650	10.7	440 ± 5	1185 ± 15	2000	
	180	1914	10.6	445 ± 15	1110 ± 20	2550	
	230	2640	11.5	460	Beyond capacity of downstream equipment		
Low-density polyethylene pellets ^c	50	525	10.5	335	1825	2100	
	101	1080	10.7	350	2050	2450	
	Raised barrel temperature and closed pressure valve						
	172	1542	9.0	480	1425	4050	
Low-density polyethylene pellets ^d	Normal barrel temperature profile						
	40	420	10.5	394 ± 0.6	1590 ± 3	—	
	68	738	10.9	416 ± 1.5	1900 ± 5	2050	
	84	960	11.4	446 ± 2	1990 ± 20	2275	
	101	1080	10.7	454 ± 6	2010 ± 60	3700	
	Shifted to reverse barrel temperature profile						
112	1170	10.4	429 ± 4	2140 ± 60	2600		
Polypropylene (3 MI)	44	410	9.3	438 ± 0.5	920 ± 3	1025	
	76	720	9.4	438 ± 0.5	1110 ± 5	1250	
	129	1140	8.8	459 ± 1	1300 ± 20	2450	
	179	1752	9.8	480 ± 4	1400 ± 150	3300	

Table 4. Fluted mixing Screw의 성능

Resin type	Screw speed, rpm	Output		Stock temperature, °F	Die pressure, psi
		Lb/hr/	Lb/hr/ rpm		
Impact polystyrene	35	354	10.1	416 ± 1.5	1700 ± 1.5
	54	550	10.2	436 ± 2.5	1640 ± 2.5
	96	1068	11.2	462 ± 2	1730 ± 6
	124	1320	10.6	477 ± 2	1685 ± 4
	160	1600	10.0	493	1675
	180	1962	10.9	504	1663
Crystal polystyrene ^b	75	810	10.8	458	1670
	102	1097	10.8	474	1700
	128	1440	11.2	500	1750
	152	1610	10.6	510	1740
	200	1954	9.8	-	1700
	Low-density polyethylene (2MI) ^c	26	240	9.2	335
52		470	9.0	-	1975 ± 2
70		670	9.6	410 ± 1.5	2075 ± 8
83		852	9.7	422 ± 1.5	2200 ± 16
122		1070	8.8	438 ± 4.5	2000 ± 60
Polypropylene (4 MI) ^d		101	744	7.4	471 ± 2.5
	157	1040	6.6	510 ± 2.5	1350 ± 30
	190	1275	6.7	532 ± 2.5	1340 ± 30
	235	1430	6.1	551 ± 2.0	1320 ± 20

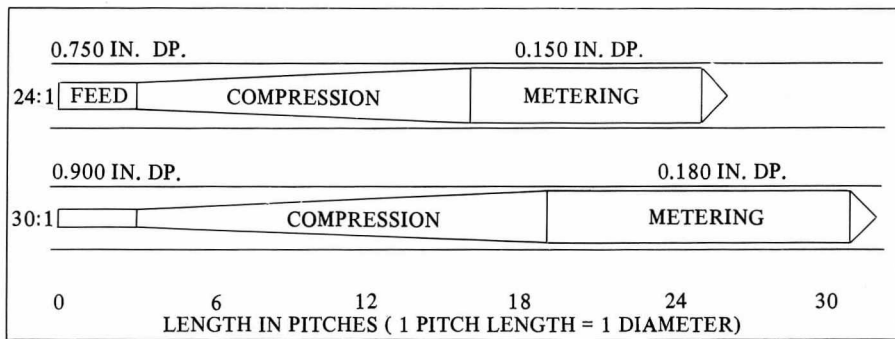


Fig. 1. 24 : 1 스크류와 30 : 1 스크류의 비교

mixing 구간을 사용하면 Table 4에서 보는 바와 같이 加壓능력이 우수하므로 좋은 質의 용융물을 얻을 수 있다. slot의 두께는 15~25mil로 한다.

4.2 L/D

현재까지 표준 L/D는 單軸의 경우 24 : 1 이고 2軸의 경우 18 : 1 이지만 高速스크류 사출기의 開發에 따라 L/D가 커지고 있다. L/D의 비가 증가하면 計量 구간의 채널 깊이가 증가하고 사출량이 증가 하게 된다. 채널 깊이를 증가시키면 이를 補償하기 위하여 스크류 길이를 증가 시켜야 한다. Fig. 1에 24 : 1 單軸 스크류와 30 : 1 單軸 스크류를 비교한다. L/D가 30 : 1로 증가하면 주로 計量 구간이 증가하고 壓

縮 구간도 증가하게 된다. 2段 單軸 스크류의 L/D를 증가 시키는 경우 사출량을 調節하고 質을 向上 시키기 위하여 첫번째 段(stage)의 길이를 증가 시켜야 한다. 첫번째 段의 壓縮구간의 길이는 供給(feed)구간에서 計量구간으로 원활하게 轉移되기 위해서 길이를 조금만 늘려야 한다. Decompression 구간의 길이는 거의 변화시키지 아니하여도 되며 vent 구간도 특별한 devolatilizing 스크류 경우 이외에는 고정시킨다. Devolatilizing 스크류는 vent 구간을 증가시키기 때문에 첫번째단의 計量구간의 길이가 짧아지며 사출량이 줄어든다. 30 : 1 스크류의 95% 정도는 vent되어 있거나 2段 스크류이다. 2단 스크류의 경우 첫번째 段의 길이는 16 : 1에서 22 : 1까지이다. 2번째 압축 구간과 計量 구간의 길

Table 5. 24 : 1 스크류와 30 : 1 스크류의 사출량 비교

Extruder Size, in.	Screw L/D	Product	Output, lb/yr
3½	24:1	ABS Sheet	400-550
3½	30:1	ABS Sheet	600-750
4½	24:1	Impact Polystyrene (PS) Sheet	1000-1200
4½	30:1	Impact PS Sheet	1200-1400
4½	24:1	ABS Sheet	600-800
4½	30:1	ABS Sheet	750-1000
6	24:1	Impact PS Sheet	1800-2000
6	30:1	Impact PS Sheet	2100-2400
6	24:1	ABS Sheet	1200-1500
6	30:1	ABS Sheet	1700-1800
8	24:1	PS Compounding	3000-3500
8	30:1	PS Compounding	4500-5000

Table 6. 24 : 1 스크류와 30 : 1 스크류의 소요동력

Extruder Diameter	Motor Horsepower for	
	24:1 L/D	30:1 L/D
3½	75 ^a	75-100 ^b
4½	150 ^a	150 ^b
6	300 ^a	300 ^b
8	400-500 ^a	500-600 ^b

이는 24 : 1 의 경우와 비슷하게 한다. Table 5에 L/D가 24 : 1 의 경우와 30 : 1 인 경우의 사출량을 비교 하고 Table 6에 이에 수반되는 소요 動力을 비교한다. 같은 直徑의 스크류인 경우 사출량은 20~30% 증가하지만 소요 動力은 15 % 이하의 차이가 난다.

参 考 文 獻

- 1) Mckelvey, Polymer Processing, 1962
- 2) Jansen, Twin Screw Extruder, 1978
- 3) Kruder, SPE Journal, October 1972, vol. 28
- 4) Siemer, Plastics Technology
- 5) Maillefer, Modern Plastics, 40, 132 (1963)
- 6) Klein, Modern Plastics, July 1979
- 7) Plastics world, July 1978
- 8) 金浩然, 황경현, "Twin Screw Extruder의 특성에 관한 연구", 한국기계연구소 보고서 BSI 19-146. C. 1981. 5월