특 집

고분자 압출 가공 이론

주 용 락

1. 서 론

고분자 가공에서의 압출 공정은, 호퍼(hopper)를 통하여 펠렛(pellet) 또는 분말상의 고형 수지가 가열된 배럴(barrel)과 그 내부의 회전 스크류(screw)와의 상대 속도차에 의해 연속적으로 이송, 압축, 용융되면서 일정 형태의 다이(die)를 통과한 후 냉각되어 필름(film), 쉬트(sheet), 파이프(pipe), 이형 압출물(profile) 등으로 제조되는 공정으로 구성된다. 압출 공정에 사용되는 기기를 압출기라 하며, 일반적으로 스크류 수에 따라 단축식 및 다축식으로 분류된다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 단축 압출기의 개략도와 압출 공정에서 주로 사용되는 용어를 **그림 1, 2** 및 **표 1**에 나타내었다. 그림에서 보듯이 압출 내의 스크류는 고체 이송을 위한 공급부(feed zone), 용융을 위한 압축부(compression zone or transition zone), 그리고 용융된 melt의 이송을 위한 계량부(metering zone) 3부분으로 나뉘어지며 필요에 따라 혼련부(mixing section)를 두기도 한다. 실제적으로 압출기는 스크류 각 부분과 정확하게 일치하지는 않지만 고체 이송이 이루어지는 고체 이송부(solids conveying section), 용융이 이루어지는 용융부(melting section), 용융된 melt가 이송되는 용융 수지 이송부(melt pumping section)으로 나뉘어질 수 있다.

19세기 중반 고무의 압출을 위하여 짧은 스크류가 쓰여진 압출기가 등장한 이래로 1935년에 처음으로 고분자 가공을 위한 압출기가 독일 Paul Troester에 의해 고안이 되었으며, 1950년대부터 압출 공정에 대한 과학적인 연구가 시작되었다.[1] 1953년에 McKelvey 등에 의해 용융된 melt의 이송이 연구되었으며, 1956년 Darnell과 Mol에 의해 고체상의 수지의 이송 이론이, 1966년 Tadmor에 의해 고체 수지의 용융에 대한 이론이 확립되

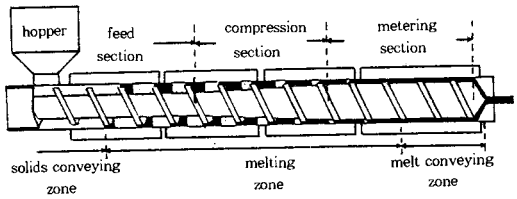


그림 1. 단축 압출기 개략도.

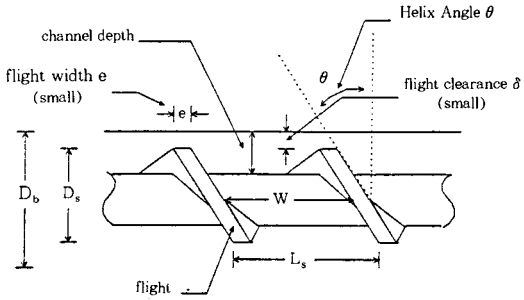
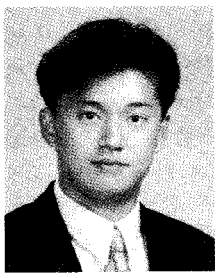


그림 2. 압출 스크류 관련 용어.



주용락
1985~1989 서울대학교 공과대학 화학공학과 (공학사)
1990. 6 美 Stanford대학 화학공학과 (공학석사)
1993. 3 美 Stanford대학 화학공학과 (공학박사)
1993. 8 美 Stanford대학 화학공학과 PostDoc
1993. 9~현재 한화그룹종합연구소 선임연구원

Principles of Polymer Extrusion Process

한화그룹종합연구소(Yong Lak Joo, Hanwha Group R & D Center, 6 Shinsung-dong, Yousung-ku, Taejeon 305-345, Korea)

표 1. 압출기 관련 용어표

용 어	정 의	비 고
D_s	스크류 구경(screw diameter)	
δ	flight clearance	
D_b	바렐 구경(barrel diameter)	$D_b=D_s+2\delta$
θ	스크류 나선각도(helix angle)	
L_s	screw lead 또는 pitch	$L_s=\pi D_s \tan\theta$
e	light 폭	
W	channel 폭(channel width)	$W=L_s\cos\theta-e$ $=\pi D_s \tan\theta\cos\theta$
Square Pitched Screw	pitch와 구경이 같은 스크류	$L_s=D_s$ $\tan\theta=1/\pi=17.65°$
H	홈 깊이(channel depth)	
CR	압축비(compression ratio)	공급부 홈깊이/ 계량부 홈깊이
L	스크류 길이	
L/D	스크류의 유효 길이	스크류 길이/구경

었다. 따라서 1960년대 후반이 되어서야 압출 공정 전반에 대한 이론이 정립되었으며, 그 후 computer의 발전과 더불어 1980년대, 90년대에는 보다 정립된 이론들이 등장하였다. 본고에서는 현재까지의 단축 압출기의 기초 이론을 고체 수지의 이송, 고체 수지의 용융, 용융된 수지의 이송으로 구분하여 소개하고자 한다. 또한 압출 성능을 높이기 위한 각종 스크류 및 혼련부를 고찰하고, 압출 공정에 사용되는 다이의 특성 및 scale-up에 대하여 논하고자 한다.

2. 고체 수지 이송(Solids Conveying) 이론

일반적으로 단축 압출기가 적절하게 가동된다면 압출량은 계량부에서의 용융 수지 이송 능력에 의해 제한되어져야 하나, 스크류의 구조, 가공 조건, 수지 등이 적절하게 맞지 않으면, 고체 수지 이송이 압출 능력의 제한 요인으로 작용하여 압축부 및 계량부에서의 기공 발생, 최종 압출물의 질의 저하, 압출량의 감소, 압출량의 변동 등을 야기할 수 있으므로 고체 수지 이송에 대한 이해가 매우 중요하다.

대부분의 압출기에는 수지 투입을 위한 호퍼가 장착되어 있으며, 압출 공정에서의 고체 수지의 이송은 호퍼에서 압출기로의 중력에 의한 고체 이송과 압출기 내부에서의 고체 이송으로 나뉠 수 있다. **그림 3**에는 호퍼 내부에서의 수지 흐름 형태를 나타내었다.[1] 가장 바람직한 경우는 수지의 정체 부분 없이 총체적 흐름(mass flow)의 경우이나, 고체상의 수지가 잘 압축되어지거나, 서로 잘 엉겨 붙는 경우 또는 원료의 bulk density가 매우 작은 경우는 일정 부분의 정체가 발생하거나(funnel flow, 또는 piping) 전혀 고체 원료의 흐름을 차단하는 경우(arching 또는 bridging)가 발생한다. 이러한 경우는 a) hopper taper 각 변경 등 호퍼의 설계를 바꾸거나, b) 진동 패드(vibration pad)를 설치하여 수지의 정체 부분의 흐름을 유도하거나,

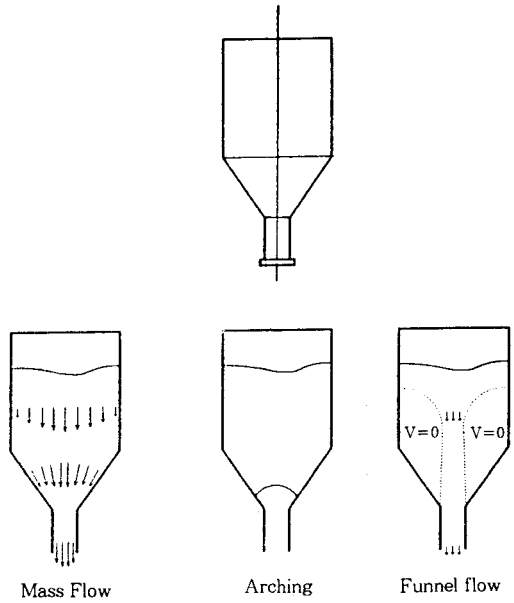


그림 3. 호퍼 내부에서의 수지 흐름 형태.

또는 c) 강제 흐름을 유도하기 위하여 스크류를 장착한 스크류 피더(screw feeder 또는 crammer feeder)를 사용하여 호퍼 내에서 원활한 수지 흐름을 유도한다.

호퍼에 의해 스크류 채널 내로 들어온 고체 원료는 원료와 배럴 내벽 및 스크류 면과의 마찰력 차이에 의해 이송되면서 쏠리드 베드(solid bed)라고 불리는 압축된 고체 덩어리를 형성하게 된다. 고체상의 원료의 이송이 이루어지기 위해서는 고체형 원료와 배럴 내벽과의 마찰력이 스크류면과의 마찰력보다 커야 원료의 이송이 이루어진다. 마찰 특성은 다음과 같이 물체에 작용하는 마찰력(frictional force, F_d)과 접촉면의 수직 방향으로 작용하는 수직력(normal force, F_n)의 비로 표시되는 동적 마찰 계수(coefficient of dynamic friction, f) 로 대표되어질 수 있다.

$$f = F_d / F_n \tag{1}$$

동적 마찰 계수는 마찰 재질의 종류, 표면 상태, 스크류 회전 속도, 온도, 압력 등의 변수이며, 이밖에 수지의 종류, 입자 크기, 첨가제 종류 및 그 양에 따라 마찰 특성이 영향을 받으므로 많은 경우에 있어서 동적 마찰 계수 data를 갖고 있지 못하다. 이와 같은 각종 고체 수지 이송에 관한 data 부족으로 인해 고체 이송은 압출 공정 중 가장 적게 이해되어진 부분이라 할 수 있다.

2.1 고체 이송 이론의 발전 과정

단축 압출기 내에서 고체 이송에 대한 체계적인 연구는 1956년 Darnell과 Mol에 이루어졌다. Darnell과 Mol은 다음과 같은 가정하에 solid bed에 작용하는 힘의 균형

(force balance)을 고려함으로써 고체 이송 과정을 정량화 하고자 하였다.[3]

a. 고체 입자들이 연속상을 이룬다.
b. Solid bed는 스크류 전 채널과 접촉한다.
c. 채널 깊이는 일정하다.
d. Flight clearance는 무시할 수 있다.
e. Solid bed는 막대 흐름(plug flow)으로 움직인다.
f. 마찰계수는 압력과 무관하다.
g. 중력 및 원심력은 무시할 수 있다.
h. Solid bed내의 밀도 변화는 무시할 수 있다.

고체 이송 영역에서 solid bed에 작용하는 힘은 다음과 같이 표시될 수 있으며, **그림 4**에 도식화하였다.

압력 P에 의해 solid bed에 작용하는 힘 :

$$F_2 = W\ H\ P \tag{2}$$

압력 $P+dP$에 의해 solid bed에 작용하는 힘 :

$$F_6 = W\ H(P+dP) \tag{3}$$

후위 flight로부터 solid bed로의 수직력 :

$$F_7 = P\ H\ dZ + F* \tag{4}$$

전위 flight로부터 solid bed로의 수직력 :

$$F_8 = P\ H\ dZ \tag{5}$$

Solid bed와 후위 flight 간의 마찰력 :

$$F_3 = F_7\ f \tag{6}$$

Solid bed와 전위 flight 간의 마찰력 :

$$F_4 = F_8\ f \tag{7}$$

Solid bed와 스크류 root간의 마찰력 :

$$F_5 = P\ W\ dZ\ f \tag{8}$$

Solid bed와 바랠 간의 마찰력 :

$$F_1 = F_5 = P\ W\ dZ\ f \tag{9}$$

f는 solid bed와 바랠 및 스크류 간의 동적 마찰 계수이며, 고체 이송 각(solids conveying angle, ϕ)과 (4)에서 추가 수직력 $F*$이 미지수로 남는다. Darnell과 Mol은 8개의 힘을 축 방향 성분과 접선 방향 성분으로 나누고 축 방향 성분의 합이 0, 접선 방향 성분은 torque 균형(torque balance)에 사용하여, 최종 작용 torque가 0이 되도록 함으로서 $F*$을 제거하여 다음과 같은 고체 이송각과 압력 관계식을 얻었다.[3]

$$\cos\phi = K\sin\phi + [2H/W + 1 + H/(Z\ f)\ \ln(P/P_0)]\ \sin\theta(K + \cot\theta) \tag{10}$$

여기서 $K = (\sin\theta + f\ \cos\theta)/(\cos\theta - f\ \sin\theta)$이며, 고체 이송 영역 내 발생 압력이 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다.

1972년 Tadmor와 Broyer는 동적 마찰 계수 f를 solid bed와 바랠 및 스크류와의 마찰계수(f_b, f_s)로 분리하여 다음과 같이 보다 현실적인 고체 이송각과 압력 및 마찰 계수와의 상관 관계식을 유도하였다.[5]

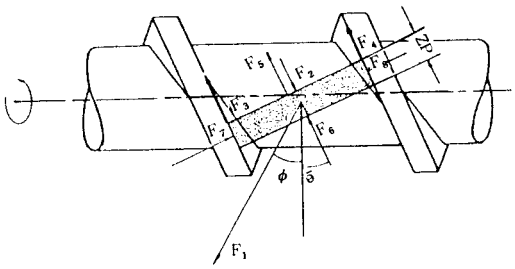


그림 4. 고체 이송 영역에서의 force balance.

$$\cos\phi = K\sin\phi + (2H/W + 1)f_s/f_b\ \sin\theta(K + \cot\theta)\ H/(Zf_b)\sin\theta(K + \cot\theta)\ \ln(P/P_0) \tag{11}$$

여기서 $K = (\sin\theta + f_s\cos\theta)/(\cos\theta - f_s\sin\theta)$이다. 고체 수지 이송량은 이송 각 $\phi=0$ 일 때 0, 이송 각이 크면 클수록 이송량이 증가하여, $\phi=90$ 일 때 최대가 됨을 고려하면 solid bed와 바랠 간의 마찰계수 f_b가 클수록, 스크류와의 마찰계수 f_s가 작을수록 이송량이 늘어남을 알 수 있다. 실제적으로 solid bed와 바랠 간의 마찰계수 f_b 증가를 위해 바랠 재질의 표면을 비교적 거칠게 하거나 바랠에 홈(grooved barrel)을 파기도 한다. 또한 스크류와의 마찰계수 f_s를 줄이기 위해 스크류 표면을 매끈하게 하기도 한다.

Darnell과 Mol 및 Tadmor와 Broyer이론은 a) solid bed는 channel내 압력이 증가해도 압축되지 않으며, b) solid bed에 작용하는 압력이 등방성(isotropic)이며, c) 마찰계수 값이 상수임을 전제로 하고 있다. 이와 같은 전제는 많은 경우에 위의 이론에 따라 계산된 압력이 실험치보다 상당히 크게 나타나는 이유로 지적되고 있으며, 최근의 연구 결과는 solid bed가 압력에 따라 상당히 압축이 되고 작용 압력도 비등방성(anisotropic)이며 마찰계수도 온도, 압력, 및 스크류 회전 속도의 함수임을 나타내고 있다.

Klein 등은 온도, 압력, 속도에 따른 마찰 계수 측정 장치를 고안하여 마찰 계수가 온도, 압력, 속도의 함수임을 보고하였다.[4,5] 최근 Campbell은 식(4)의 solid bed에 작용하는 미지 추가 수직력 $F*$을 F_1의 분력($F_1\cos\phi$)으로 표시하였으며,[7] Dow사의 연구원들은 압력의 비등방성 정도를 나타내는 계수 k를 도입하여, 이를 측정하는 장치를 고안하고 그 값을 압력으로 인하여 solid bed에 작용하는 힘·식(4)와 (5)에 $F_7 = k\ P\ H\ dZ + F*$, $F_8 = k\ P\ H\ dZ$ 같이 반영함으로써 고체 수지 이송 속도 실험 치와 이론 치를 근접시켰다.[8] **표 2**에는 각 고체 이송 이론들의 특징을 비교하였다.

2.2 고체 이송 연구 장치

표 2. 압출기 내에서의 고체 이송에 관한 이론 비교표

고체이송이론	년도	특 징
Darnell & Moll	1956	- solid bed는 plug flow - solid bed와 바랠 및 스크류와의 마찰 계수 동일 - 추가 수직력 F∗는 torque balance에 활용
Tadmor & Broyer	1972	- solid bed와 바랠 및 스크류와의 마찰 계수 분리, 고려
Klein & Riley	1976, 1978	- 마찰 계수 측정 장치 고안 - 마찰 계수는 온도, 압력 및 스크류 회전 속도의 함수
Gogos et al.	1994	- segemented barrel type의 고체 이송 연구 장치 고안 - 스크류내에서 동적 마찰 계수 측정
Campbell & Dontula	1995	- 추가 수직력 $F* = F_1 \cos\phi$
Hyun et al.	1996	- solid bed에 작용 압력이 비등방성 $F7 = k\,P\,H\,dZ + F*$, $F8 = k\,P\,H\,dZ$, $0 \le k \le 1$

고체 이송 연구를 위해서는 고체 수지의 바랠 또는 스크류와의 동적 마찰 계수 측정이 필요하다. 1976년 Klein 등은 마찰 계수 측정 장치를 고안하여 온도, 압력, 속도에 따른 마찰 계수를 측정하였으나, 실제 스크류 내에서의 마찰 현상을 나타내기에는 장치가 간단하였고, 현재에는 주로 실제 단축 압출기의 원료 이송부를 제외한 뒤 부분을 제거하고 실제 스크류 채널 내에서의 torque와 압력을 측정하여 마찰력을 계산하는 segmented barrel & screw system이 주로 쓰인다. **그림 5**에는 1994년 Gogos 등이 고안한 segmented barrel & screw system의 개략도를 나타내었다.[9]

3. 용융(Melting) 이론

고체 수지의 이송 이론은 solid bed와 바랠 간의 마찰열로 인한 얇은 용융 수지 막(melt film)이 형성되기 전인 압출기 입구로부터 3-5D 정도의 길이에서만 적용이 되며 그 후에는 고체 수지의 용융이 고려된 용융 이론이 적용된다.

3.1 용융 이론의 변천 과정

압출기 내에서 고분자 수지의 용융 현상은 1959년 Maddock에 의해 해석되어졌다. 그는 압출 실험 중 압출기를 급냉시키고 스크류를 뽑아 스크류 채널 내 현상을 고찰한 결과, **그림 6**에서와 같이 solid bed와 바랠의 마찰열로 인하여 생성된 melt film이 왼쪽의 멜트 풀(melt pool)로 합류되어, 스크류 진행 방향에 따라 solid bed의 크기는 줄고 melt pool이 점점 늘어남을 보고하였다.[10]

1966년에 Tadmor는 이와 같은 실험을 재현한 후 이를 바탕으로 한 용융 이론을 아래와 같은 가정하에 정립하였다.[4]

a. 온도 및 속도 분포는 정상상태(steady state)

b. 고체 입자들은 solid bed에 압축되어 있다.

c. solid bed와 melt pool의 경계면은 명확하다.

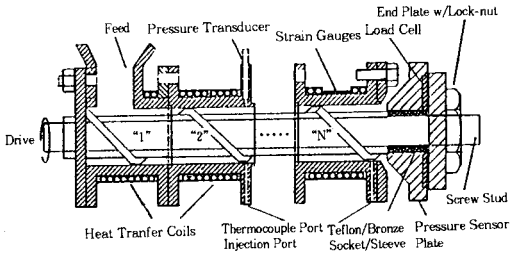


그림 5. 마찰 특성 측정 장치 개략도.

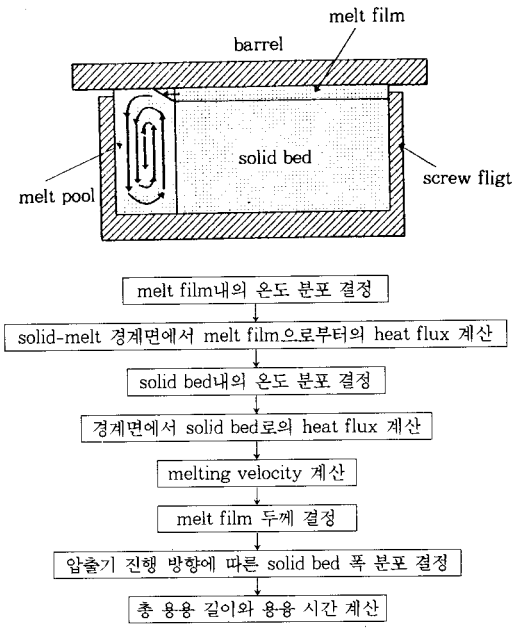


그림 6. 고체 수지의 스크류 channel 내에서의 melting 및 melting 계산 flow chart.

d. 스크류 채널은 직사각형 모양

e. solid bed의 속도는 일정하다.

f. solid bed의 밀도는 일정하다.

g. melt film의 두께가 일정하다.

i. flight clearance는 무시될 수 있다.

j. melt pool 및 melt film에서 용융된 수지는 뉴톤 또는 power-law 유체이다.

위의 가정하에서 용융 속도, 길이, 시간 계산 flow chart를 **그림 6**에 나타내었다. 가장 간단한 뉴톤 유체 model을 사용하여 최종적으로 계산된 용융 속도 ω는

$$\omega = \Phi X^{1/2} \tag{12}$$

로 표시될 수 있으며, 여기서 solid bed의 폭 $X = W[1-\Phi W^{1/2} H_0 Z/(2QH)]^2$로 표시되어 질 수 있고, $\Phi = \{[V_{bx}\rho_m(k_m(T_b - T_m) + \mu V_f^2/2]/[2(C_{ps}(T_m - T_s) + \Delta H_f)]\}^{1/2}$

표 3. 용융 이론 특징 비교표

용융이론	년도	특 징
Tadmor	1966	- solid bed, melt film melt pool 개념 도입 - solid bed의 변형 없음 - 일정한 melt film 두께 - melt film이 solid bed와 배럴 사이에만 형성
Donovan	1971	- melt film의 두께가 일정한 가정을 없앰 - 용융부에서 solid bed의 가열을 고려
Edmonson & Fenner	1975	- solid bed 변형을 도입했으나 불완전함 - melt film이 스크류 root및 flight 사이에도 존재
Shapiro et al.	1976	- melt film이 스크류 root및 flight 사이에도 존재 - melt film의 두께가 일정한 가정을 없앰
Lindt	1981	- solid bed가 스크류 채널 중간에 위치 - melt pool이 좌, 우에 생성 - 상,하의 melt film 두께가 같이 증가
Lee & Han	1990	- elastic modulus factor의 도입으로 solid bed 변형 및 가속 고려
Modified Lee & Han	1996	- 비결정질 고분자 용융 해석을 위해 임계 흐름 온도 개념 도입

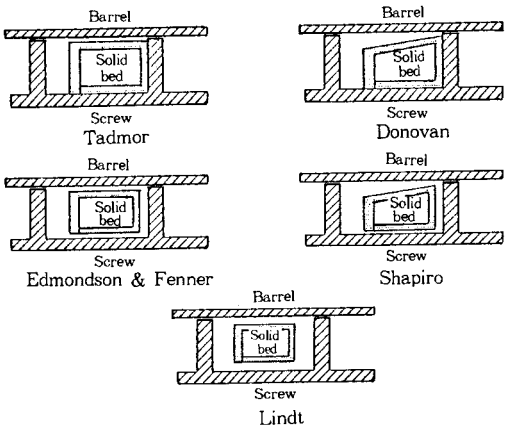


그림 7. Melting model의 비교.

로서, 용융에 사용된 에너지(heat supply)와 고체를 용융 시키는데 필요한 에너지(heat sink)의 비로 해석될 수 있다. 용융에 사용된 에너지는 배럴로부터 공급되는 열[$k_m(T_b-T_m)$]과 내부 마찰열 [$\mu V_j^2/2$]의 합으로 나타낼수 있으며, 고체의 비열 C_{ps},융점 T_m, 융해열 ΔH_f이 클수록 용융이 저하됨을 알 수 있다.

Tadmor의 용융 이론 이후로 Tadmor의 가정을 제거하여 보다 실제적인 용융 이론으로 근접하려는 시도가 그 후로 꾸준히 이루어졌다. 대표적인 용융 이론을 **표 3**과 **그림 7**에 나타내었다.[11-15] 특히 공급부 및 압축부의 길이가 짧은 스크류를 사용할 경우 solid bed의 압축 및 가속이 이루어지므로 기존의 Tadmor 이론을 비롯한 solid bed의 변형을 고려하지 않은 model의 적용의 한계가 있으며, Lee-Han model의 경우 다음과 같이 solid bed에 작용하는 stress와 strain의 선형 비례 관계를 가정함으로써 solid bed의 변형을 고려하였다.[16]

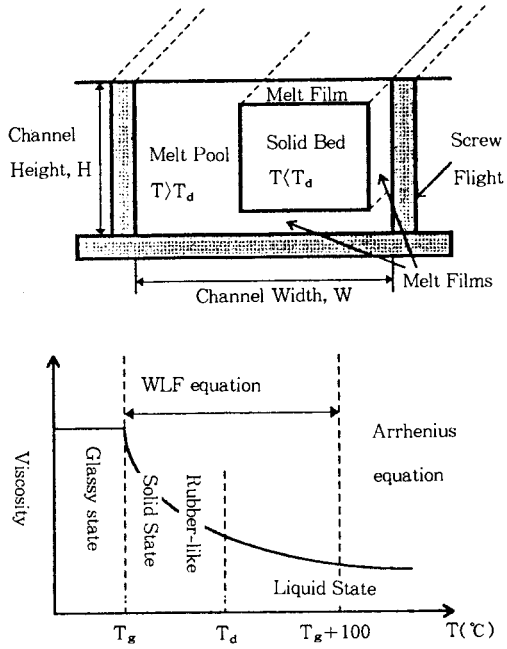


그림 8. 비결정고분자의 melting 해석을 위한 임계 흐름 온도 개념.

$$\Sigma F_i/W_sH_s = f_m\ E_\varepsilon \qquad (1)$$

여기서 W_s와 H_s는 solid bed의 폭과 깊이이고, ΣF_i와 ε은 각각 solid bed에 작용하는 힘의 합과 수지의 평균 strain이다. Modulus factor, f_m은 solid bed의 변형 정도를 나타낸다.

이러한 Lee-Han model은 최근 임계 흐름 온도(critical flow temperature, T_{cf})의 개념을 도입하여 polystyrene 또는 polycarbonate와 같은 비결정질 고분자의 압출기 내에서의 용융을 보다 정확하게 해석할 수 있도록 보완하였다. **그림 8**에는 임계 흐름 온도의 개념을 도식화 하였다.[17,18]

3.2 Melting 향상 Screws

효과적인 압출을 위해서는 사용 수지가 압출기 내에서 용융이 완료되어야 하고, 그 온도 및 가공 조건도 수지의 열적, 기계적 열화(degradation)를 가져오지 않아야 하며, 발생 압력도 용융 수지를 다이를 통해 밀어낼 수 있도록 충분해야 한다. 따라서, 적합한 스크류 설계는 압출 성능, 압출물의 질을 결정하는 기본 요소로 판단된다. **표 1**에서 본 바와 같이 압축비(compression ratio), 공급부, 압축부, 계량부의 홈 깊이 및 길이, 스크류 피치(screw pitch) 등이 사용 수지에 적합하도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 이밖에 압출 성능을 증진시키기 위

표 4. 압출 능력 향상을 위한 각종 스크류 비교표

	스크류 종류	특 징
기본 스크류 개조	공급부에 추가 flight	- 압력 편차 및 스크류 휨 감소 - 고체 수지 이송량 감소
	pitch 증가 스크류	- power 소비 감소 유도 - 스크류 각 부분에 최적의 나선각도사용
	pitch 감소 스크류	- 적은 압축비, L/D와 병행 - 용융수지에 적은 shear(rubber 압출) - 비교적 큰 flight clearance
	계량부 없는 스크류 (zero-meter screw)	- 적은 온도 상승및 압력 발생 유도 - 사출용 스크류로 적합
	압축부 스크류 (zero-feed, zero meter screw)	- 수치의 서서한 압축 발생 유도 - 기포발생, 압력및 온도 편차 감소, 압출물 질 상승 (Nylon 수지) 유도
	급압축 스크류(rapid compression screw)	- 압축부의 길이가 1D 이하
decompression screw	기본 스크류+(이완부+deep channel)	- 마찰열 및 압력 발생 감소가 목적
two stage screw	기본스크류+기본스크류	- 압출기 중반에서 부산물, 수분등 제거 - vent부의 압력이 0, vent전 용융완료

multi flighted screws 종류	공급부에서 barrier로의 전환	arrier 에서계량부로의 전환	기본압출기 (4:1) 대비 용융길이	스크류 제작 용이성	특 징
double flighted	연속적	연속적	0.73	아주 쉬움	용융효율의 향상/이송속도 감소/power 소비증가
Maillefer	연속적	연속적	0.87	쉬움	연속적인 solid channel폭의 감소/melt channel 폭의 증가
Barr	연속적	불연속적	0.73	보통	solid channel 폭은 일정, 깊이는 연속적 감소
Dray & Lawrence	불연속적	불연속적	0.73	보통	sdolid fchannel 폭 일정, 주 flight 나선각 바뀜
Kim	연속적	불연속적	0.80	어려움	주/barrier flight의 나선각이 연속적으로 바뀜
double flighted Millefer	연속적	연속적	0.60	쉬움	double flght screw + Maillefer screw

하여 기본 스크류(공급부, 압축부, 계량부로 구성된 square pitched screw)를 개량하거나, 스크류 홈 내 flight를 추가하는 시도가 계속적으로 이루어졌다. **그림 9**와 **표 4**에는 그러한 압출 능력 향상을 위한 각종 스크류를 나타내었다.[1]

고체 수지의 용융이 상당히 진행되어 solid bed의 channel내에서 차지하는 비율이 작아지면 많은 경우에는 이 solid bed가 본래의 위치를 지키지 못하고 불연속적으로 melt pool속에 위치하는 현상이 발생하여(solid bed break-up) 더 이상 기존의 용융 이론에 따르지 못하고 단지 melt pool로부터의 열 전달에 용융을 의존하게 된

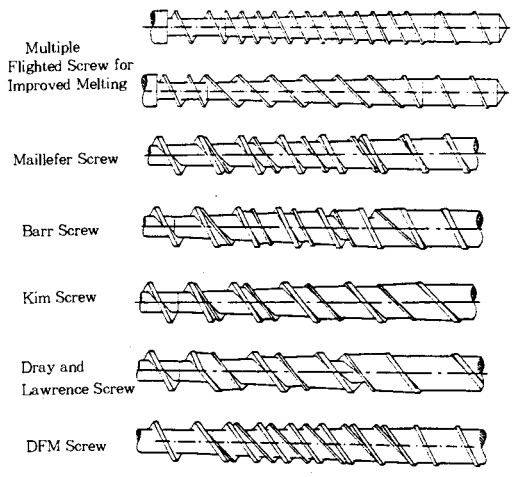


그림 9. 압출 특성 향상을 위한 각종 스크류.

다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 용융된 수지는 melt channel에 그리고 solid bed는 solid channel에 분리되도록 스크류 압축부의 melt pool과 solid bed 사이에 barrier flight를 설치하여 solid bed의 보다 효율적인 용융을 유도하는 배리어 스크류(barrier screw)가 고안되었다. Barrier flight의 위치 및 나선 각, solid channel 깊이의 변화에 따라 **그림 9**에서 보는바와 같이 여러 종류의 배리어 스크류(Maillefer, Barr, Kim screw 등)가 있다. 모든 배리어 스크류에 있어서 한 수지의 용융 특성에 따르는 적합한 배리어 스크류 설계는 용융의 현저한 상승, 압출 공정의 안정성, 높은 압력 발생을 가져올 수 있으나, 수지의 용융 특성이 바뀌거나, 용융 특성이 다른 수지를 사용할 경우에는 barrier flight가 melt와 solid를 분리해 주지 못하고 오히려 melt의 온도 상승, 지나친 압력 발생, 압출량의 변동 등을 초래, 기본 스크류보다도 압출 성능이 오히려 저하되는 경우가 발생하게 되는 것과, 현재까지 배리어 스크류의 만족스러운 수치 모사가 이루어지지 않고 있는 점이 배리어 스크류 사용시 유념해야 할 부분이라 하겠다. 최근에는 기존의 barrier flight중 압축부 초반의 barrier flight를 오히려 제거하여 이러한 문제를 해결하기도 한다.[19]

4. Melt Pumping 이론

공급부 및 압축부를 거친 용융된 수지는 홈 깊이가 일정한 계량부를 거쳐 일정 압으로 다이를 통과하게 된다.

4.1 계량부에서 용융체의 흐름

계량부에서 용융체의 흐름은 **그림 10**에 나타낸 바와 같이 a) 스크류 회전에 의한 추진류(drag flow, Q_d), b) 다이 존재로 인한 압력차에 의한 배압류(pressure-

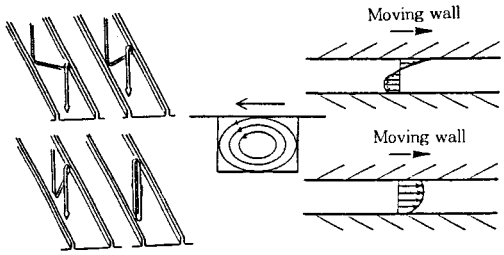


그림 10. Melt pumping section에서의 melt 흐름.

driven flow, Q_p), c) flight와 배럴 사이의 clearance에서 발생하는 누설류(leakage flow, Q_l), d) 채널을 구성하는 양 flight 존재로 발생하는 스크류 홈 내 회전류인 횡류(transverse flow, Q_t)로 구성될 수 있으나, 이중 횡류는 용융체의 혼합 및 열 전달에 기여하나 유출량에는 직접적인 관계가 없다.

따라서 계량부에서 스크류 홈의 횡단면을 통과하는 유량 Q는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$Q=Q_d-Q_p-Q_l=AN-B\ \Delta P/\mu \qquad (13)$$

여기서 N은 스크류 rpm이며, 같은 스크류 rpm에서는 점도 μ가 크거나 압력차 ΔP가 적은 경우에 유량이 큼을 알 수 있다.

그림 10에 배압류와 추진류의 비(throttle ratio)에 따른 계량부에서의 용융체의 흐름을 나타내었다. 계량부에서 용융체의 흐름은 수치 해석의 발달로 인해 현재 3차원 흐름 해석이 가능하여 속도 및 압력 분포는 물론 power 소비, 체류 시간 분포 등을 정확하게 얻을 수 있다.[20]

4.2 Mixing Elements

많은 경우에 있어서 두 고분자의 혼합, 염료를 비롯한 여러 첨가제의 분산, gel과 같은 미용융체의 제거 등을 필요로 한다. 계량부에서의 흐름에서 보듯이 기본 스크류를 사용하여 혼련을 얻고자 할 경우에는 이러한 목적 달성에는 한계가 있다. 이러한 경우에 혼련을 증진하기 위한 혼련부를 두기도 한다.

압출기 내에서의 혼련은 크게 a) 혼련을 원하는 입자의 크기 감소 없이 분포를 고르게 하는 distributive mixing과 b) 임계 shear stress 이상에서 혼련 입자의 크기를 감소시키는 dispersive mixing으로 나뉠 수 있다. **그림 11**과 **12**에는 distributive mixing과 dispersive mixing 증진을 위한 mixing element의 예를 나타내었다.[1]

Dispersive mixing element는 두 종류 이상의 고분자를 혼련시킬 때 사용되며, distributive mixing element는 안료, 무기 첨가제 등 혼련체 덩어리의 분산 또는 미용융체의 제거 등을 위해 주로 쓰인다. 적절한 혼련부의 사용으로 혼련의 목적을 달성하기도 하지만 보다 나은 혼련 및 그 조절을 위해서는 혼련의 효과를 높일 수 있는 이축 압출기를 주로 사용한다.

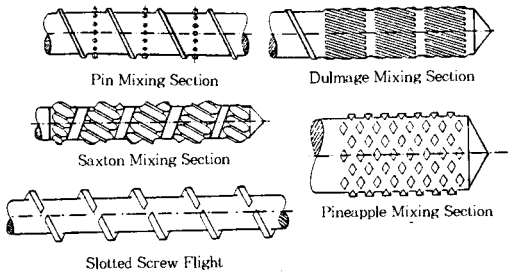


그림 11. Distributive mixing element의 예.

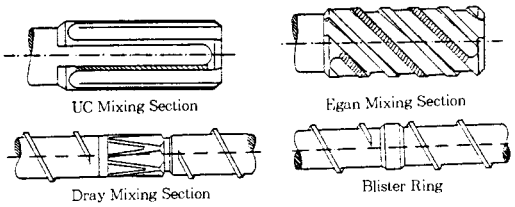


그림 12. Dispersive mixing element의 예.

4.3 스크류 다이 특성 곡선(Screw & Die Characteristic Curves)

압출기의 조업점(operating point)은 **그림 13**에서 보듯이 스크류 특성(screw characteristics)과 다이 특성(die characteristics)의 조합에 의해 결정된다.

압출기에서 스크류 rpm의 변화에 따른 압출량 Q와 압출시 발생 압력 P와의 관계를 스크류 특성 곡선이라 하고 다이에서 다이의 열린 정도에 따른 압출량 Q와 압출시 압력 강하 P와의 관계를 다이 특성 곡선이라 하며, 스크류 특성과 다이 특성의 교차점이 압출기의 조업점이 된다.

스크류 특성은 공급부, 압축부, 용융부의 이론을 활용하면 구할 수 있고, 다이 특성 곡선은 구형 또는 사각형과 같이 간단한 경우는 간단한 수식으로, 필름, 쉬트, 이형 압출 다이인 경우는 여러 수치 해석 방법(control volume method (CVM), finite difference method (FDM), finite element method (FEM) 등)을 활용하여 얻을 수 있다.[21] 이와 같이 스크류 및 다이 특성 곡선을 그릴 수 있으면 조업점 뿐만 아니라 운전 조건의 선정이 스크류 및 다이 설계를 위한 자료로서 활용할 수 있다.

5. 스케일 업(Scaling-Up)

최근의 압출 공정은 압출량 증대를 위하여 스크류

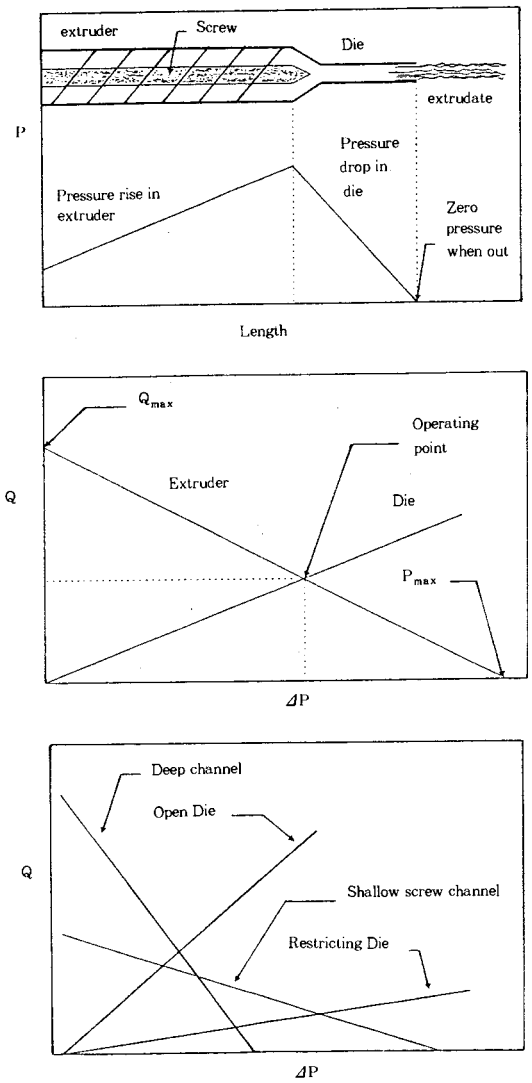


그림 13. 스크류 및 다이 특성 곡선.

표 5. Scale-up 관련 변수들의 상관 관계

	small extruder	large extruder		
		일반적인 scale-up factor	열전달에 중점을 둔 scale-up	혼련에 중점을 둔 scale-up
배럴 구경	D_1	D_2	D_2	D_2
채널 폭	W_1	$W_2=W_1(D_2/D_1)$	$W_2=W_1(D_2/D_1)$	$W_2=W_1(D_2/D_1)$
채널 홈 깊이	H_1	$H_2=H_1(D_2/D_1)^{0.5}$	$H_2=H_1(D_2/D_1)^{0.5}$	$H_2=H_1(D_2/D_1)$
스크류 rpm	N_1	$N_2=N_1(D_1/D_2)^{0.5}$	$N_2=N_1(D_1/D_2)$	$N_2=N_1(D_1/D_2)^0$
압출량	Q_1	$Q_2=Q_1(D_2/D_1)^2$	$Q_2=Q_1(D_2/D_1)^{1.5}$	$Q_2=Q_1(D_2/D_1)^3$
shear rate	γ_1	$\gamma_2=\gamma_1(D_1/D_2)^0$	$\gamma_2=\gamma_1(D_1/D_2)^{0.5}$	$\gamma_2=\gamma_1(D_1/D_2)^0$
각속도	V_{b1}	$V_{b2}=V_{b1}(D_2/D_1)^{0.5}$	$V_{b2}=V_{b1}(D_2/D_1)^0$	$V_{b2}=V_{b1}(D_2/D_1)$
체류시간	t_1	$t_2=t_1(D_2/D_1)^{0.5}$	$t_2=t_1(D_2/D_1)$	$t_2=t_1(D_2/D_1)^0$
용융 속도	M_{p1}	$M_{p2}=M_{p1}(D_2/D_1)^{1.75}$	$M_{p2}=M_{p1}(D_2/D_1)^{1.5}$	$M_{p2}=M_{p1}(D_2/D_1)^2$
고체 이송 속도	M_{s1}	$M_{s2}=M_{s1}(D_2/D_1)^2$	$M_{s2}=M_{s1}(D_2/D_1)^{1.5}$	$M_{s2}=M_{s1}(D_2/D_1)^3$
스크류 power	Z_1	$Z_2=Z_1(D_2/D_1)^{2.5}$	$Z_2=Z_1(D_2/D_1)^{2.5}$	$Z_2=Z_1(D_2/D_1)^3$
에너지 소비	E_1	$E_2=E_1(D_2/D_1)^{0.5}$	$E_2=E_1(D_2/D_1)^0$	$E_2=E_1(D_2/D_1)^0$

rpm의 고속화, 압출기 크기의 대형화 추세에 있다. 압출 성형의 고속화시 발생 마찰열의 제어, 압출기 내 체류 시간 감소로 인한 용융 및 혼련의 감소 등의 보완이 필요하며, 소형 압출기에서 얻은 정보로 압출 공정을 대형화 할 경우에는 모든 변수들이 직선적인 비례 관계에 있지 않으므로 여러 변수를 어디에 중점을 두고 스케일 업하느냐는 매우 중요하다.

표 5에는 스케일 업에 관련된 변수들의 상관 관계를 일반적인 경우, 열 전달을 기준으로 한 경우, 혼련에 중점을 둔 경우로 나누어 표시하였다.[1] **표 5**에서 보듯이 기준을 어디에 하느냐에 따라 스케일 업시 여러 변수의 스케일 업 지수가 매우 다르기 때문에 스케일 업시 신중을 기해야 한다.

6. 결 론

지금까지 단축 압출기의 기초 이론을 고체 수지 이송, 고체 수지의 용융, 용융된 수지의 이송으로 구분하여 소개하였다. 또한 압출 성능을 높이기 위한 각종 스크류 및 혼련부를 고찰하였고, 압출 공정 조업점 및 스크류, 다이 설계에 사용될 수 있는 스크류, 다이의 특성 및 스케일 업에 대하여 알아보았다.

압출 공정은 이론 정립이 되어 있음에도 불구하고 최근까지도 꾸준히 연구, 보완되고 있다. 새로운 수지의 출현, 기존 수지의 계속적인 개량으로 인하여 앞으로도 이러한 추세가 계속되리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. C. Rauwendaal, "Polymer Extrusion", Hanser Pblishers, 1986.
2. J. F. Carley, et al., "Industrial Engineering Chemistry", vol 45, 970-992 (1953).
3. W. H. Darnell and E. A. J. Mol, *SPE Journal*, 12, 20 (1956).
4. Z. Tadmor and I. Klein, "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Krieger Publishing Co., 1970.
5. Z. Tadmor and E. Broyer, *Polymer Engineering and Science*, 12, 378-386 (1972).
6. D. W. Riley and I. Klein, *SPE ANTEC Proceedings*, 525-528 (1978).
7. G. A. Campbell and N. Dontula, *International Polymer Processing*, 10, 30 (1995).
8. K. S. Hyun, M. A. Spalding, and C. E. Hinton, *SPE ANTEC Proceedings* (1996).
9. G. G. Gogos, M. Zafar, D. Sebastian, D. B. Todd, K. S. Hyun, and M. A. Spalding, *SPE ANTEC Proceedings*, 288-292 (1994).
10. B. H. Maddock, *SPE ANTEC Proceedings*, 383 (1959).

11. R. C. Donovan, *Polymer Engineering and Science*, 11, 247-257 (1971).
12. I. R. Edmonson and R. T Fenner, *Polymer*, 16, 49 (1975).
13. J. Shapiro, A. L. Halmos, and J. R. A. Pearson, *Polymer*, 17, 905-918 (1976).
14. J. T. Lindt, *Polymer Engineering and Science*, 16, 284-291 (1976).
15. J. T. Lindt, *Polymer Engineering and Science*, 21, 1162-1166 (1981).
16. K. Y. Lee and C. D. Han, *Polymer Engineering and Science*, 30, 665-675 (1990).
17. C. D. Han, K. Y. Lee, and N. C. Wheeler, *Polymer Engineering and Science*, (1996, in press).
18. Y. L. Joo, Y. D. Lee, T. H. Kwack, and T. I. Min, *SPE ANTEC Proceedings*, 64-69 (1996).
19. K. S. Hyun, M. A. Spalding, and J. R. Powers, *PPS Proceedings*, 109-110 (1995).
20. J. W. Joo and T. H. Kwon, *Polymer Engineering and Science*, 33, 959-970 (1993).
21. K. T. O'Brien, "Computer Modeling for Extrusion and Other Continuous Polymer Processes", Hanser Pblishers, 1992.