

# 압출 소프트웨어의 이용

류 승 훈

## 1. 서 론

현대 사회는 고분자의 시대라 할 만큼 일상생활용품부터 항공부품에 이르기까지 광범위하게 이용되고 있다. 이와같이 고분자를 우리 생활에 적용하기 위하여는 용도에 맞게 일정한 형상을 갖는 제품화가 필요하다. 대부분의 고분자는 중합공정을 거쳐 펠렛, 분말 등의 고체상태로 만들어진 후 가공업자들에 의하여 용융된 후 제품화되며, 고분자의 용융은 일반적으로 일축 또는 이축 스크류를 이용하여 이루어진다. 이때 스크류 디자인과 배치, 운전조건 등에 따라 용융효율과 생산성이 많은 영향을 받게 되며, 또한 최종제품의 품질에도 영향을 미치므로 스크류 디자인과 같은 기계적 요소와 운전조건의 최적화가 절대적으로 요구되고 있다. 이는 이형물, 쉬이트, 펄블로잉 등 압출 관련 공정은 물론 사출의 경우에도 용융균일성(melt uniformity)이 최종품질을 결정하는 중요한 변수로서 스크류 디자인에 크게 좌우된다.<sup>1,2</sup> 이와같이 공정조건이나 장비의 디자인이 고분자 공정에 있어 매우 중요함에도 불구하고 아직도 국내에서는 이에 대한 인식이 미흡한 형편이다.

고분자공정, 장비의 설계와 분석에 대한 컴퓨터를 이용한 엔지니어링 방법 (computer aided engineering)은 30여년 전부터 연구되어 왔으나 그 영향이 미미하다가 1978년 C. Austin이 MOLDFLOW™라는 사출성형 소프트웨어를 개발한 이후 1980년대 초 C-MOLD™ 등 주로 사출성형 분야에 대한 컴퓨터모사 소프트웨어의 많은 진전이 이루어졌다. 최근에는 일축압출기와 압출다이에서의 용융흐름에 대한 이해가 많이 진행되었으며, 현재는 thermoforming, blow molding, 이축압출 등의 모사 연구가 여러 연구그룹들에 의하여 진행되고 있다.

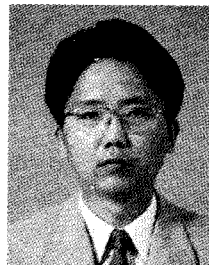
본문에서는 상업적인 압출 소프트웨어, 특히 일축압출 소프트웨어와 이의 응용 예와 사용할 때 문제점에 대하여

살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 압출 소프트웨어

고분자공정, 특히 압출공정의 모델링에 대한 노력은 미국의 DuPont사에 의해 처음으로 시작되어 1950년대 초에 발표되기 시작하였으며, 거의 동시에 DuPont과는 별도로 스위스의 Mallifer는 압출에 있어 매우 중요한 몇가지 모델을 개발하였으며, DuPont사의 McKelvey, Gore 그리고 Squires의 공헌은 이미 잘 알려져 있다. Bernhardts<sup>3</sup> 저서에는 1958년 이전의 공정모델링에 관한 것이 잘 요약되어 있으나, 질량, 모멘텀 그리고 에너지보전의 식과 상변화 매카니즘을 이용하여 단일화된 접근법을 제시한 첫 번째 저서로는 McKelvey의<sup>4</sup> 저서를 꼽을 수 있다. 전적으로 고분자공정의 컴퓨터모델링에 대하여 저술한 책으로는 Klein과 Marshall의 저서가<sup>5</sup> 있었으나 이의 영향은 크지 않은 편이며, 스크류 회전에 따른 호퍼로부터의 고체이동, 용융 그리고 용융이송 등을 포함하는 완전한 압출모델링은 Tadmor와 Klein의<sup>6</sup> 저서가 처음으로



류승훈

1979 연세대학교 화학공학과(학사)  
 1981 서울대학교 화학공학과(석사)  
 1983~ 주석회사 코오롱 기술연구소  
 1985 연구원  
 1985~ Stevens Institute of Technol-  
 ogy(SIT), 화학공학과(박사)  
 1991~ 제일모직, 화성연구소 선임연  
 구원  
 1993 경희대학교, 화학공학과 부교수  
 현재

### Extrusion Software Packages and Its Application

경희대학교 화학공학과(Sung Hun Ryu, Department of Chemical Engineering, Kyung Hee University, Kiheung-Eup, Yongin, Kyunggi-Do 449-701, Korea)

로 제시되었다. 이축압출공정 모델링에 관한 광범위한 개관은 White의 책에 잘 요약되어 있다.<sup>7</sup>

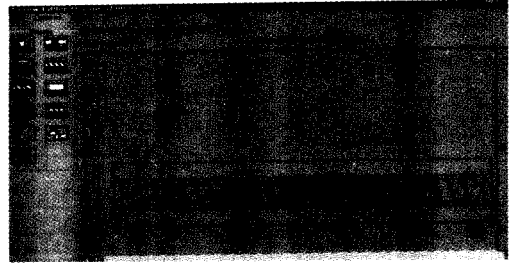
일축압출공정의 모사는 Union Carbide에서의 Maddock의 실험에 기초한 Tadmor의 용융모델 개발로 가능하게 되었다. 압출기는 일반적으로 고체이송부, 용융 또는 압축부, 용융이송부의 3부분으로 나누어진다. 고체 bed는 항상 힘과 토오크 밸런스에 의해 모델링을 하며 용융지역에서 용융은 고체 bed와 가열된 배럴사이의 얇은 필름에서 발생한다. 이때 rear flight에는 용융 pool이 형성된다. 용융채널은 퍼진 형태로 나타나며 유체의 흐름은 2차원으로 가정한다. 이러한 가정과 조건들이 상업적 일축압출 소프트웨어인 EXTRUD,<sup>8</sup> SINGLE SCREW DESIGNER(SSD, 전에는 PASS),<sup>9</sup> REX,<sup>10</sup> CHEMEXTRUD<sup>11</sup> 그리고 EXTRUCAD의<sup>12</sup> 기본적인 개념들이다.

Single Screw Designer<sup>TM</sup>는 미국의 Polymer Processing Institute에서 개발된 프로그램으로 수학적인 모델들은 Tadmor와 Klein<sup>6</sup> 외에 Tadmor와 Gogos,<sup>13</sup> Sebastian과 Rakos<sup>14</sup> 문헌에 기초하고 있다. 프로그램은 크게 스크류 디자인과 물질 데이터베이스 부분으로 나누어진다. **그림 1**은 SSD의 스크류 디자인 화면을 나타내고 있다. 스크류는 일반적인 스크류와 barrier 스크류로 디자인할 수 있으며 필요에 따라 torpedo와 fluted 혼련 부분을 첨가할 수 있다. 또한 vented 유형도 모사가 가능한 특징을 지니고 있다. 고분자 용융의 유변학적 성질은 Power-law, Carreau 그리고 Log polynomial 모델 등을 사용할 수 있다.

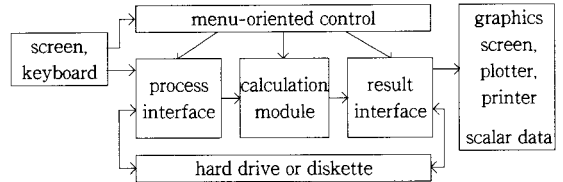
이 프로그램은 압출량과 스크류 속도를 설정한 후 작동시키면 압출기 내에서의 온도, 압력분포 및 고체 bed의 변화, 단위에너지 소비량 등을 얻을 수 있다. 이때 압출기 배출압력이 다이의 압력감소와 동일하지 않으면 다시 압출량과 스크류 속도를 선정하여 프로그램을 작동시키게 된다.

Paderborn 대학의 Fachgruppe Kunststofftechnologie (Plastics Technology Group, KTP)에서는 18개의 산업체와 협력하여 REX<sup>TM</sup>라고 하는 압출기 디자인 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 Turbo Pascal 언어를 사용하고 있으며 PC에서 작동한다. REX<sup>TM</sup> 모듈은 크게 공정, 결과 interface 그리고 계산의 3부분으로 나누어져 있다(**그림 2**).

REX<sup>TM</sup>은 일축압출기의 스크류 디자인과 운전조건의 모사가 가능하다. 입력 데이터는 스크류, 배럴, 물질특성, 운전조건의 4종류이며, 모든 입력 데이터는 쉽게 변형이 가능하므로 여러 조건에서의 모사가 가능하게 한다. 특히 새로운 스크류(constant or variable flight depth, shearing or mixing element)와 전체 압출공정(conventional, grooved barrel and vented machines, barrier screw)을 쉽게 모사할 수 있다. REX<sup>TM</sup>은 토출량, 토오크, 속



**그림 1.** Screw design screen of SSD<sup>TM</sup>



**그림 2.** Functional structure of the REX program system.

도, 3개의 균일성 변수와 같은 스칼라 결과와 온도, 압력 분포, 용융거동 등의 결과를 제공하고 있다.

EXTRUCAD<sup>TM</sup>는 캐나다 McMaster 대학의 Vlachopoulos 교수의 연구결과를 바탕으로 Polydynamics 사에 의하여 상용화된 프로그램으로 고체이송부는 Darnell과 Mohr의 해석을 변형하였으며, 용융부는 Tadmor 모델을 그리고 용융이송부는 2-D 유체흐름분석을 하였다. 그밖에 독일 Aachen에 위치한 Institute für Kunststoffverarbeitung(Institute for Plastics Processing, IKV)에서는 MOTEX<sup>TM</sup>라는 소프트웨어를 개발하였다.

앞에서 언급한 일축압출 소프트웨어들을 이용하여 압출 모사를 하는데 있어 다음과 같은 2가지 어려움이 있다:

- 고체입자의 마찰계수, compact 계수 등과 같은 일부 고분자물성은 측정이 매우 힘들다. 실제로 일축압출 소프트웨어들의 가장 취약한 부분으로는 고체이송 부분을 들 수 있다. 고체 bed의 이송은 고체 bed와 배럴, 고체 bed와 스크류의 마찰에 의해 진행된다. 따라서 정확한 이들 마찰계수의 값이 필요하나 압력, 온도, 스크류 속도, 물질의 종류, 입자모양 등 마찰계수에 영향을 미치는 인자와 마찰계수간의 수학적 모델을 확립하기 어렵다. 현재와 같이 힘과 토오크의 밸런스를 이용하여 마찰계수를 구하는 것은 실험주의에 의존하는 것이므로 보다 정확한 모사를 위하여는 이에 대한 자세한 이해가 필요하다.
- 고분자용융의 점탄성 성질이나 서로 다른 지역사이에서 일어나는 전이현상 등을 표현할 수 있는 적절한 방정식을 제시하기 힘들다.

이축압출기는 일축압출기와는 달리 스크류의 위치, flight의 모양, 회전방향 등 다양한 형태의 배열이 가능하며, corotating, counter-rotating, intermeshing, non-

intermeshing, conjugated 그리고 non-conjugated 종류가 있다. 이축압출은 3-D, 비정상 상태공정으로 이를 모사하기는 매우 어려우므로 여러 연구그룹에 의하여 3-D 유체흐름의 간소화 방법이 제시되었다(Case Western Reserve 대학의 Manas-Zloczow, Stevens Institute of Technology의 Gogos, Werner-Pfleiderer의 Kiani, McMaster 대학의 Hrymak 등). 미국 Akron 대학의 White와 독일 Paderborn 대학의 Potente는 보다 간소화한 모델을 이용하여 각기 AKRO-CO-TWIN SCREW™와 MOTEX™ 상업적 이축압출 소프트웨어를 개발하였다. AKRO-CO-TWIN SCREW™는 상업적인 corotating 이축압출기 모사 소프트웨어로서 스크류의 배열, 충전도, 온도, 압력분포 등을 얻을 수 있으며, MOTEX™는 counter-rotating 이축압출기(conical과 cylindrical) 모사 소프트웨어를 시판하고 있다. 그러나 상용 이축압출기 모사 소프트웨어는 아직은 완성도가 떨어져지고 있으며, 일축압출 소프트웨어에 비하여 실제 적용도가 뒤떨어지는 것으로 알려져 있다.

그밖에 압출 소프트웨어와 같이 사용하면 보다 효과적인 소프트웨어로는 고분자 흐름을 분석하기 위한 일반적인 목적의 유체역학용 소프트웨어인 FIDAP™,<sup>15</sup> POLYFLOW™,<sup>16</sup> NEKTON™,<sup>17</sup> POLYCAD™<sup>18</sup> 등이 있다. 이러한 일반적인 목적의 소프트웨어들은 고분자가 완전히 용융된 후인 용융이송부에서 온도, 전단력 등의 분포를 모사하는데 주로 이용되고 있다. 독일의 IKV에서는 일축압출기의 공정을 2차원으로 모사할 수 있는 Bilan™이라는 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램의 주된 특징으로는 용융모델의 완성에 의해 스크류 채널에서의 고체 bed의 모양과 위치에 대한 자세한 정보를 얻을 수 있다는 것이다. 이외에도 압출기 축방향의 온도, 압력 등을 얻을 수 있다.

## 2.2 소프트웨어의 응용

압출기 모사 소프트웨어의 가장 주된 목적은 소프트웨어를 이용하여 최적의 스크류를 디자인하는 것으로 아래의 예를 들어 살펴보자.

Potente 등은 지름 45 mm 배열의 압출기를 이용하여 폴리프로필렌 이형물 압출에 적합한 스크류를 선정하기 위하여 REX™를 이용하여 모사하였다.<sup>19</sup> 이때 압출량은 40 kg/h 그리고 용융온도는 250-260 °C 범위로 규정하였다. 표 1에 있는 바와 같이  $L/D=20$ 이고 고체이송부, 압축부, 용융이송부의 3부분으로 나누어진 4종류의 스크류와 이중 3번과 4번 스크류의 용융이송부에 전단요소(shearing element)를 부착한 2종류를 비교하였다. 요구 압출량을 달성하는데 필요한 스크류 속도와 이때 필요한 power를 그림 3에 나타내었다. 전단요소를 갖는 3번과 4번 스크류가 가장 낮은 specific output을 나타낼 수 있다. 그러므로 동일한 압출량을 위하여는 다른 스

표 1. Survey of the Screws Available for PP

Screw no.	Pitch	Flight depths mm	Zone length <sup>a</sup>		
			E	K	M
1	1D	8.3 to 2.6	3D	6D	10D
2	1D	6.6 to 3.1	6D	8D	5D
3		as no. 5, with shearing element			
4		as no. 6, with shearing element			
5	1D	8.1 to 2.8	7D	4D	8D
6	1D	6.2 to 2.7	3D	6D	10D

<sup>a</sup>. E=feed zone, K=compression zone, M= metering zone.

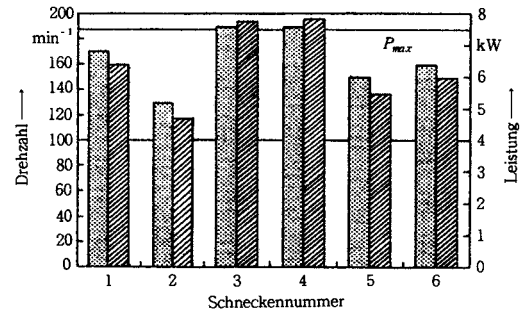


그림 3. Speed and drive power for the screws listed in Table 1 for PP extrusion. Drehzahl= speed, Leistung=drive power, Schneckennummer= screw number.

크류들에 비하여 보다 높은 스크류 속도가 필요하므로 일반적으로 연속공정시 최대 구동력의 80%를 사용한다면 전단요소는 사용할 수 없다.

전단요소가 없는 4개의 스크류들의 압력 분포는 유사함을 그림 3에서 알 수 있다. 그러므로 최적 스크류의 선택은 용융온도와 고체가 완전하게 용융되는 스크류 위치에 기초하여 정성적인 결론을 내릴 수 밖에 없다. 완전용융이 빨리 일어나면 일어날수록 보다 나은 용융균일도를 얻을 수 있는 반면 길게 남은 스크류길이를 여행해야 하기 때문에 높은 용융온도를 나타내게 된다(그림 4). 따라서 1번과 6번 스크류는 사용하지 않으며, 이러한 관점에서 볼 때 전단요소가 있는 3번과 4번 스크류도 적절치 못함을 알 수 있다. 스크류 2는 낮은 용융속도 때문에 가장 나쁜 용융균일도를 나타낼 것으로 판단되므로 5번 스크류가 가장 적절한 것으로 판단된다.

일반적인 압출모사 소프트웨어들은 REX™의 경우와 마찬가지로 스크류내부의 온도분포, 전단력분포 등에 대한 정보를 제공하지 못하고 있다. 따라서 보다 정확한 압출공정 모사, 특히 스크류 디자인을 위하여는 앞에서 언급한 SSD™, EXTRUCAD™ 등과 같은 일축압출모사 소프트웨어와 함께 FIDAP™이나 POLYFLOW™ 등과 같은 일반적인 finite element 패키지를 동시에 사용하는 것이 좋다. Wolff 등은<sup>20</sup> FIDAP™을 이용하여 cross-hole mixing element의 열동질성을 모사하였으며, Fan 등은<sup>21</sup> wave 스크류에서의 압력분포를 그리고

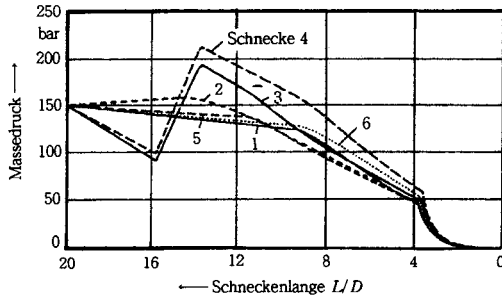


그림 4. Pressure curve in the extruder when using the screws according to Table 1. Schneckennlänge=screw length, Massedruck = melt pressure, Schnecke = screw.

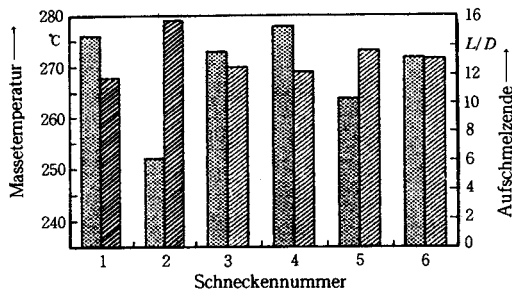


그림 5. Melt temperature and end of melting in PP extrusion with the screws according to Table 1. Schneckennummer=screw number, Massetemperatur=melt temperature, Aufschmelzende=end of melting.

Plumley 등은<sup>22</sup> 일축압출기의 에너지이동(ET) 부분을 모사하였다.

### 3. 맺는 말

상업적인 압출 소프트웨어와 일반적인 유체역학 소프트웨어들을 이용하면 압출기를 디자인하거나 분석하는데 있어 실험적인 방법에 비하여 시간과 비용이 적게 소요되는 장점을 지니고 있으며, 이러한 장점때문에 점차 이러한 소프트웨어의 사용이 증가하고 있다. 그러나 상업적 소프트웨어들은 여러가지 가정들을 바탕으로 하고 있어 때에 따라서는 엉뚱한 결과를 제시할 수 있으므로 압출 소프트웨어를 무조건 맹신하는 것은 금물이며, 이를 정확하게 사용하기 위해서는 사용자가 모사결과를 이해하고 판단할 수 있는 경험과 지식을 갖는 것이 필수적이다. 그럼에도 불구하고 압출 소프트웨어들은 압출기설계와 압출시 발생하는 문제점을 해결하는데 유용하게 사용되고 있다. 압출 소프트웨어들은 다음과 같은 질문들에 대하여 유용한 답을 제공할 수 있다.

- 기존에 사용하고 있는 압출기의 scale-up(예 : 100 mm → 150 mm 일축압출기)

- 사용하고 있는 압출기에서 발생한 문제점(예 : 압축인

자를 증가시키기 위하여 feed zone을 깊게 하는 것이 유리한지 또는 배럴의 온도구배를 바꾸는 것이 유리한가?)

일반적으로 주어진 압출조건에서 스크류와 다이의 상호작용을 고려하지 않으면 최적의 스크류설계는 불가능하므로 FIDAP, POLYFLOW 등과 같은 유체분석 소프트웨어를 이용하여 다이에 대한 모사가 필요하다. 또한 소프트웨어를 이용하여 얻은 결과를 이용하여 실험을 실시하여 필요할 경우 변형을 가함으로써 보다 최적의 압출기설계를 얻을 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. J. Bozzelli and B. Larin, *Modern Plastics International*, June, 86 (1991).
2. P. Mapleston, *Modern Plastics International*, August, 68 (1996).
3. E. C. Bernhardt, "Processing of Thermoplastic Materials", Reinhold, New York, 1959.
4. J. M. McKelvey, "Polymer Processing", Wiley, New York, 1962.
5. I. Klein and D. I. Marshall, "Computer Programs for Plastics Engineers", Reinhold, New York, 1968.
6. Z. Tadmor and I. Klein, "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Wiley-Interscience, New York, 1970.
7. J. L. White, "Twin Screw Extrusion", Hanser Publishers, New York, 1990.
8. EXTRUD, SPR, Somerset, NJ, U.S.A.
9. SSD, Single Screw Designer (formerly PASS), P.P.I., Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ, U.S.A.
10. REX, Fachgruppe Kunststofftechnologie, University of Paderborn, Paderborn, Germany.
11. CHEMEXTRUD, CEMEF, ole des Mines, Sophia Antipolis, Valbonne, France.
12. EXTRUCAD, Polydynamics, Ontario, Canada.
13. Z. Tadmor and C.G. Gogos, "Principles of Polymer Processing", Wiley, New York, 1979.
14. D.H. Sebastian and R. Rakos, "Extrusion Process Analysis with PASS", in "Applications of CAE in Extrusion and Other Continuous Processes", E. C. Bernhardt and K. E. O'Brien, Eds., Hanser, New York, 1992.
15. FIDAP, F.D.I. Evanston, IL, U.S.A. (Now owned by FLUENT INC.).
16. POLYFLOW, Louvain-La-Neuve, Belgium. (now owned by FLUENT, INC.).
17. NEKTON, Creare.x, Hanover, NH, U.S.A. (now owned by FLUENT, INC.).
18. POLYCAD, Hamilton, Ontario, Canada. (now owned by Polydynamics, Inc.).
19. H. Potente, W. Hanhart, B. Klarholz, and V. Schöppner, *Kunststoffe German Plastics*, **82**, 939 (1992).
20. T. Wolff and W. Michaeli, SPE ANTEC '98, 237 (1998).
21. P. Fan, J. Vlachopoulos, N. Smith, and H. Sheth, SPE ANTEC '98, 97 (1998).
22. T. A. Plumley, M. A. Spalding, J. Dooley, and K.S. Hyun, SPE ANTEC '94, 332 (1994).