

## CFD를 이용한 단축압출기 스크류 및 다이스의 성능시험평가 및 해석에 관한 연구

김재열\*, 정효희<sup>+</sup>

(논문접수일 2008. 11. 24, 심사완료일 2009. 3. 13)

### Performance Evaluation and Analysis of the Screw and Die of the Single Screw Extruder Using the CFD

Jae-yoel Kim\*, Hyo-hee Chung<sup>+</sup>

#### Abstract

The extruder type is classified as screw type and non-screw type in terms of the extrusion method. The screw type extruder, which is the most frequently used, is classified as the single screw extruder and the multi-screw extruder. They are classified as vertical type and horizontal type in terms of structure; and those for compounding and for forming in terms of function. The single screw extruder is a universal extruder, most of which is suitable for the extrusion forming of thermoplastic resin. The multi-screw(two-screw, three-screw and four-screw) extruder can increase the extrusion power using the engagement of the screw flank. The single screw extruder does not have a good mixing ratio of the raw material and stable extrusion power, while it has low construction cost and operation cost. In this study, the single screw extruder, which has many weak points compared with the multi-screw extruder, was studied. There have been many studies on the single screw extruder, and they led to its significant development. The existing study method, however, had complex analysis processes and required much time. In this study, the CFD was applied to the performance test and analysis of the extruder, and the optimal design condition of the extrusion power for the screw and die of the single screw extruder was found by comparing the analysis results with the actual performance measurement of the single screw extruder.

**Key Words** : Single-screw extruder(단축 압출기), Multi-screw extruder(다축 압출기), Compounding(혼합), Molding(성형), Computing fluid analysis(전산유체해석)

\* 조선대학교 메카트로닉스공학과 (jykim@chosun.ac.kr)

주소: 539-710 광주시 동구 서석동 375

+ 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과

## 1. 서론

압출기는 압출원리상 크게 스크류 방식과 비스크류 방식으로 나누어지며, 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 스크류식 압출기는 단축 압출기와 다축 압출기로 크게 나뉜다. 구조상으로는 수직형, 수평형, 기능상으로는 컴파운드용과 성형용으로 구분할 수 있다. 단축 스크류 압출기는 범용압출기로 대부분 열가소성 수지의 압출성형에 적당하고, 다축(2축, 3축, 4축) 스크류 압출기는 스크류 플랭크의 맞물림을 이용해서 압출력을 크게 할 수 있다.

단축 스크류 압출기는 다축 스크류 압출기에 비해 원재료의 혼합률 및 안정된 압출력을 가지지 못하는 반면 낮은 시설비와 운영비를 가지고 있다.

현재까지 단축 스크류 압출기는 비교적 기하학적 형상이 단순하여 다축 스크류에 비해서 많은 연구와 실험적 수치해석이 있었다. Tadmor와 Gogos<sup>(1)</sup>와 Fenner<sup>(2,5)</sup>는 압출기의 여러 부위에서의 폴리머의 유동에 관한 해석을 하였고, Fenner<sup>(5)</sup>, Karwe와 Jaluria<sup>(3,9)</sup>는 역적으로 완전히 발달된 역류가 존재하지 않는 계량화부내의 유동을 해석하였으며, Griffith는 무한대의 길이와 폭을 가진 스크류 압출기에서의 비압축성 유체의 속도 및 온도분포를 해석하였고, Chiruvella는 역압력구배에 의한 계량화부내의 역류를 타원형 폴리법과 포물선형 폴리법으로 해석하여 각각을 비교하였다. Gopalakrishna 등<sup>(6)</sup>은 Extrusion Cooking의 전달현상 해석을 시도하여 온도분포 뿐만 아니라 수분의 확산현상에 대한 시뮬레이션 결과를 보고하였고, Kwon<sup>(7)</sup>등은 급속소관에서 비뉴턴유체의 압력강하를 계산할 수 있는 관계식을 개발하였고, Lin과 Jaluria<sup>(8)</sup>는 비뉴턴유체를 급수축 다이에서 압력에 대한 점성의 종속성을 고려하여 해석하였다. 이러한 연구결과는 스크류의 계량화부와 다이스를 분리하여 각각 해석하거나 다이에서 발생하는 압력강하만이 고려된 계량화부를 해석하였다.

본 연구에서는 압출기의 성능시험 및 해석을 전산유체해석(CFD)을 이용하며, 실제 단축 스크류 압출기의 실 측정 성능시험결과와 비교 분석하여 단축 스크류 압출기의 스크류와 다이스의 압출력에 대한 최적설계 조건을 찾을 것이다.

## 2. 압출 스크류 및 다이 설계

본 연구에서 사용된 압출기는 고분자 튜브 전용 단축 스크류 압출기로서 고분자 튜브의 제작에 가장 적합한 스크류의 설계 및 다이스의 설계를 위해 스크류와 다이스를 시제작하

게 되었으며 그에 따른 모델링 작업을 통한 해석 또한 이루어졌다. 그리고 압출기 스크류의 특성상 유체의 특성을 해석할 수 있는 부분은 고분자 재료의 용융상태가 되어있는 계량화부(Metering zone)<sup>(10,11)</sup>이므로 본 연구에서는 고분자 재료가 용융상태인 계량화부와 다이스 부분만을 해석 수행하였다. Fig. 1은 압출기의 단면 형상을 나타내었으며, Fig. 2는 스크류의 치수 변수를 나타내고 있다. Table 1은 시제작 스크류와 다이스의 치수를 나타내었다<sup>(12)</sup>.

$A$ 는 스크류의 피치,  $H$ 는 스크류 날의 높이,  $D$ 는 배럴의

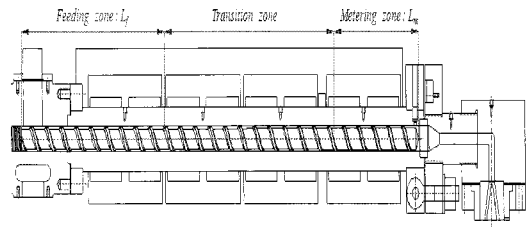


Fig. 1 Sectional view of the single screw extruder

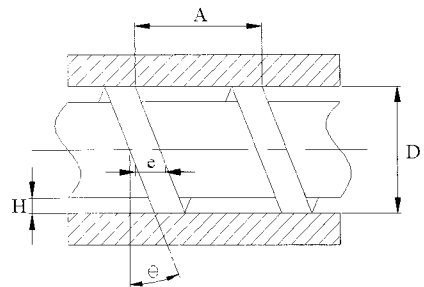


Fig. 2 Screw dimension variables

Table 1 Trial product dimensions

Model geometry	Value
Barrel diameter, $D$	40mm
Metering zone screw length, $L_m$	240mm
Screw channel height, $H$	1.6mm
Flight width, $e$	6mm
Helix angle, $\theta$	30°
Dies output diameter	∅12.5mm
Dies hole diameter	∅18mm
Screw pitch, $A$	42mm

내부 지름,  $e$ 는 스크류 날의 폭, 그리고  $\theta$ 는 스크류 날개의 나선각 이다.

일반적으로 단축 스크류 압출기의 압출에 있어서 압출성능의 기반이 되는 기본적인 요소로 스크류의 압축비( $C/R$ )와 유효길이( $L/D$ )가 중요하다. 압축비(Compression ratio)는 스크류의 공급부(Feed zone)와 계량화부(Metering zone)의 나선 길이의 1피치당 체적비에 따라 나타내며 계산식은 다음 식 (1) 과 같다<sup>(13)</sup>.

$$C/R = \frac{(\frac{1}{4})(D^2 - (D - 2L_f)^2)}{(\frac{1}{4})(D^2 - (D - 2L_m)^2)} \quad (1)$$

- $C/R$  : 압축비
- $L_f$  : 공급부 스크류 길이
- $L_m$  : 계량화부 스크류 길이
- $D$  : 스크류 지름

그리고 해석의 변수의 조건을 주기 위하여 시제작 스크류 모델의 치수 중 피치의 변형을 준 6개의 모델링을 수행하였고, 기준이 된 시제작 스크류의 피치가 42mm이며 변형 피치는 42mm 이하로 5개의 변형 피치를 주었으며 42mm 이상으로는 한 개의 변형 피치를 주었다. Table 2에 피치변형 치수를 나타내었다<sup>(14)</sup>.

### 3. 해석대상 및 조건

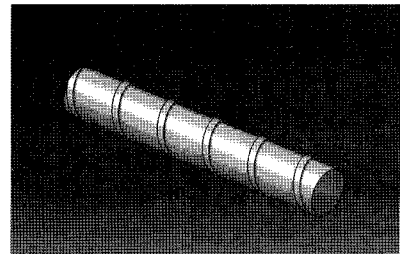
#### 3.1 시뮬레이션 조건

본 연구에서 해석대상인 압출기의 시제작 스크류와 다이스가 고분자 튜브의 생산력 즉 압출력의 안정성을 가지고 있는지를 해석 주목표로 삼았으며 그에 따른 변수로 시제작 스크류의 변형 치수를 준 스크류 모델링들 또한 해석 대상으로 하였다. 해석 프로그램은 CFD프로그램인 CFdesign을

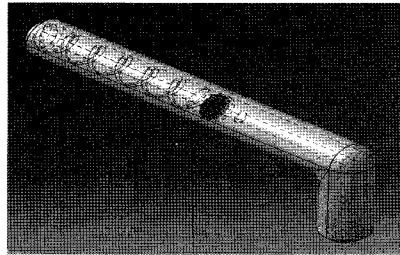
사용하였다. CFdesign을 사용하기 위해 각 모델링들의 간소화를 위해 모델링을 수행하였다.

Fig. 3은 압출기의 계량화부와 다이스의 모델링을 나타내었다<sup>(15,17)</sup>. 그리고 모델링은 Table1의 치수를 사용한 시제작 스크류와 다이스가 기준이 되었고, 그 외의 변형 피치를 Table2의 치수를 적용하여 모델링을 각각 수행하였다.

그리고 해석을 수행하기위해 사용된 고분자 재료는 PEEK로서 PE계열의 압출용 튜브의 생산에 많이 사용되는 고분자 재료이다. PEEK의 용융상태 물성 및 해석 조건을 Table 3에 나타내었다<sup>(16,18)</sup>.



(a) Metering zone modelling of screw



(b) Built-in type modelling of barrel and dice

Fig. 3 Drawing of Simply Design system

Table 2 Pitch transformation model geometry

Model geometry	Model number	Value
Screw pitch, $A$	Ex. screw 1	24mm
	Ex. screw 2	28mm
	Ex. screw 3	32mm
	Ex. screw 4	36mm
	Ex. screw 5	40mm
	Ex. screw 6	44mm

Table 3 Material properties of matter and processing condition

Properties of simulation	Value
Density	1.30g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	10,000Pa s
Thermal conductivity	0.25W/m°C
Specific heat	2160J/kg°C
Temperature melt	360°C
In-put pressure	30Bar
Out-put pressure	1.0135Bar
Screw velocity	60rpm

### 3.2 실 측정 조건

본 연구에서는 시뮬레이션뿐만 아니라 시제작 스크류와 다이스를 사용하여 압출기의 실 측정을 수행하였다. 변형 스크류의 실 측정은 이루어 지지 않았지만 기준이 되는 시제작 스크류와 다이스의 실측이 이루어졌다. 또한 실 측정이 이루어지는 조건과 시뮬레이션이 이루어지는 조건을 동일하게 하였으며 생산되는 고분자 튜브의 직경은  $\varnothing 12.5\text{mm}$ 의 튜브를 생산하였다. 실 측정 방법은 다음과 같이 이루어졌다.

- (1) 조건 : 압출 표준온도 = PEEK 용융온도  $360^{\circ}\text{C}$
- (2) 설비조건
  - 압출기 : 40mm로 통일
  - 헤드의 차이점 : 브레이크 플레이트에 삽입되는 이물 제거를 위한 아미의 차이 있음
  - 제품규격 : 아미조건 무시, 다이스의 내 외경 크기, 내 외경 사이의 간격차이(12.5mm사용)
- (3) 압출조건
  - 압출속도 = 압출Hz = 스크류 회전수 = 압출량  
 압출Hz 1이면 근사치로 스크류 1회전

위의 조건을 바탕으로 1)시제작 스크류를 장착한 압출기에 1kg의 고분자 원재료인 PEEK를 넣고 2) 압출기의 전체 시스템의 히팅 온도를  $360^{\circ}\text{C}$ 로 제어하며 3) 스크류의 속도를 60rpm으로 하고 4) 그 외의 연신기와 권취기를 제어하도록 하여 실험에 기본적인 셋팅을 하였다. 실험에서 압출량을 검출하는 것은 생산속도로 나타낼 수 있으며 방법은 권취기 롤러 위에 위치한 엔코더펄스를 이용하여 디지털 메타로 디스플레이하게 하여 단위는 미터로 나타내며 오차율은  $\pm 1\text{m}$ 이다. 생산속도로 분당 압출량을 나타 낼 수 있다. 분당 압출량은 절경의 평균값 $\times$ 두께의 평균값 $\times 2$ (두겹) $\times 1.3$ (원재료의 비중) $\times 1$ 분당 생산미터 수=분당 압출량으로 계산되어진다. 총 실험시간은 10분간 이루어졌다. Fig. 4는 시제작 스크류와 다이스를 장착한 고분자 튜브용 단축압출기를 나타내었다.

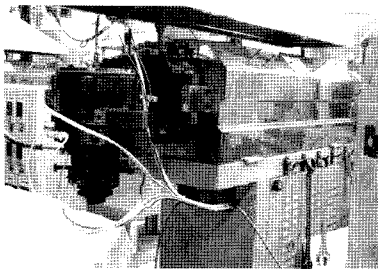


Fig. 4 The polymer single screw extruder thing photograph

## 4. 해석 및 고찰

### 4.1 실 측정 결과

본 연구에서 시제작 스크류와 다이스의 압출력 실측정이 이루어 졌으며 Fig. 5는 실 측정 압출력 값을 그래프로 나타내었다. 그래프의 결과로 초기 1-5분간의 압출량은 안정된 압출력을 나타낸 것으로 볼 수 없다. 실 측정에서의 압출기의 압출력 안정기로 접어드는 시간을 1-5분으로 하였기 때문에 정확한 압출력을 나타내는 시간은 6-10분 사이의 값이다.

### 4.2 시뮬레이션 해석결과

시뮬레이션 해석은 실측과의 동일한 조건을 주어 해석 수행하였으며 Table 1을 기준으로 모델링을 수행한 모델과 변수로서 사용한 Table 2의 기준으로 한 변수 모델링을 그리고 Table 3을 고분자 원재료의 특성과 해석 수행 값으로 하여 시뮬레이션을 시제작 모델링 포함 총 7개의 모델링을 시뮬레이션 수행을 하였다. 여기서 온도는 정상상태, 압력은 정압으로 스크류의 속도는 일정으로 하였다. Fig. 6은 시뮬레이션 과정을 나타내었다. Fig. 7~Fig. 13은 실 측정 데이터와 각 시뮬레이션 모델링들의 결과데이터를 그래프로 나타내었다.

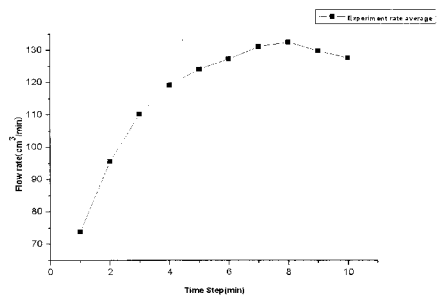


Fig. 5 Experiment extrusion amount data

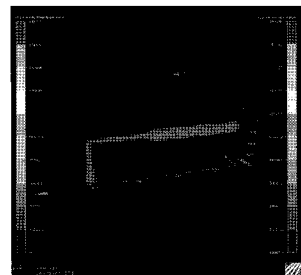


Fig. 6 CFdesign simulation

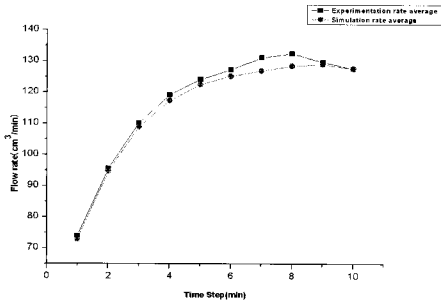


Fig. 7 Temporary manufacture modelling data value and survey experimental value comparison

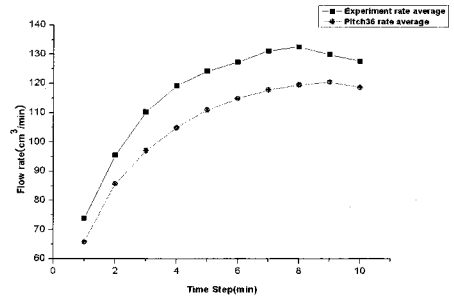


Fig. 11 Pitch36 modelling data value and survey experimental value comparison

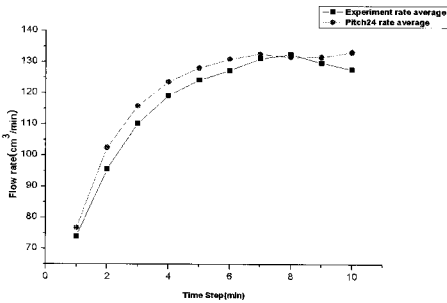


Fig. 8 Pitch24 modelling data value and survey experimental value comparison

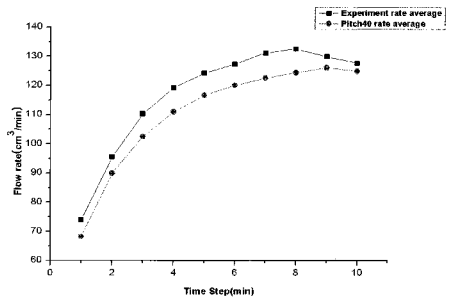


Fig. 12 Pitch40 modelling data value and survey experimental value comparison

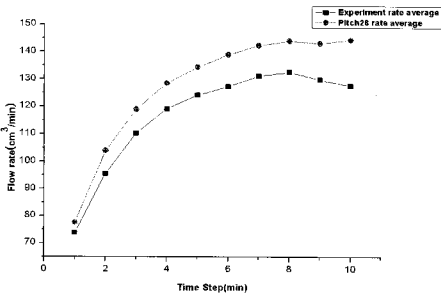


Fig. 9 Pitch28 modelling data value and survey experimental value comparison

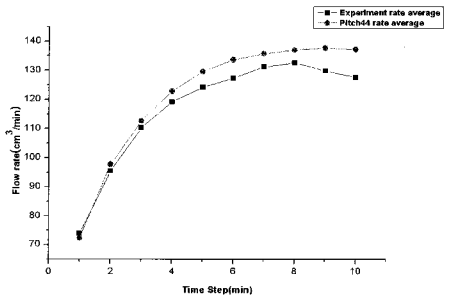


Fig. 13 Pitch44 modelling data value and survey experimental value comparison

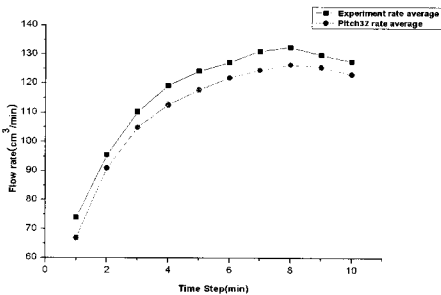


Fig. 10 Pitch32 modelling data value and survey experimental value comparison

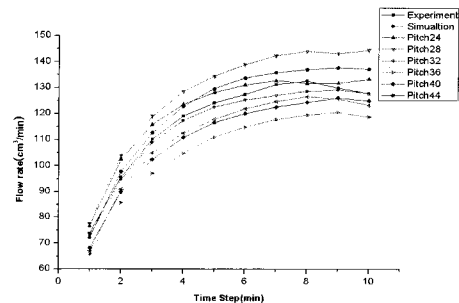


Fig. 14 Whole modelling data value and survey experimental value comparison

## 5. 결론

Fig. 14는 실 측정 실험 데이터와 시뮬레이션 전체의 데이터를 나타내었다.

실 측정 데이터와 전체 시뮬레이션 데이터의 해석 결과를 오차율 분석 실시하였고, 오차율 분석은 1-10분인 전체 오차율과 6-10분 동안의 압출력 안정상태의 오차율을 분석하였다. Table 4는 시뮬레이션 오차율을 분석하였다.

일반적으로 시뮬레이션의 해석결과 데이터가  $\pm 5\%$  미만이면 안정적인 해석이 이루어졌다고 볼때 오차율 분석결과 시제작 스크류와 다이스의 모델링의 경우 전체실험 시간 1-10분 동안 오차율이 1.522%와 압출량이 안정권인 6-10분 동안의 오차율이 1.743%로 시제작 스크류와 다이스는 적합한 설계를 이루었다고 볼 수 있으며 나머지 변수로 스크류의 피치를 변형한 스크류들의 경우 총 6개중 1-10분 오차율 중  $\pm 5\%$  미만은 2개의 스크류가 나왔으며, 6-10분 사이는 4개의 스크류가 나왔다.

따라서 본 연구에서 나타난 결과로 시제작 스크류와 다이스의 설계상 문제점을 보완 수정하기 위해 본 연구에서의 해석 수행을 이루어졌고, 연구 결과 고분자튜브의 생산력에서 안정된 압출력의 성능을 보인 시제작 스크류와 다이스는 해석 수행에서는 문제점이 없는 결과로 나타났으나 변수로 피치 값의 변화를 준 스크류들의 경우를 보면 시제작 스크류 뿐만 아니라 변형 스크류들의 경우도 안정된 압출력을 나타내었다.

안정된 압출력을 나타내며 시제작 스크류의 압출력 오차율과도  $\pm 5\%$  미만으로 2-4개의 모델링이 나타났다. 그것은 시뮬레이션의 변수에서 오직 스크류 피치만을 변수로 하였기에 향후 스크류 및 다이스에서 스크류의 변수 및 압력, 열 등 여러 변수들을 설정하여 고분자튜브 생산에 적합한 스크류와 다이스를 제작 시험 수행을 해야 할 것이다.

본 연구에서 단축압출기 시스템에서 생산되는 고분자 튜브의 안정된 압출력을 측정하기 위하여 단축압출기에 사용되는 단축 스크류와 다이스를 시제작하여 전산유체해석 프로그램인 CFdesign을 이용 시제작 단축 스크류와 다이스를 모델링하여 해석 수행하였고, 변수로 단축 스크류의 피치변형을 준 스크류 또한 해석 수행하였다. 또한 시제작 스크류와 다이스를 사용하여 압출력 실 측정 실험을 하였고 전체 시뮬레이션 해석 데이터와 실 측정 실험 데이터를 비교 분석 오차율을 측정하여 다음과 같은 결과를 나타내었다.

- (1) 튜브의 원형을 유지하면서 압출된 고분자는 총 실험시간 10분 중 5분이후로 나타났으며 그 외의 시간에 압출된 것은 형태를 유지하기 힘들었음
- (2) 총 실험시간 10분 동안의 압출량과 시뮬레이션과의 비교 오차율이  $\pm 5\%$  미만으로 나타났다.
- (3) 시제작 스크류의 모델링 중 치수변형을 준 모델링 또한 6개의 모델링 중 4개의 모델링이 오차율  $\pm 5\%$  미만으로 나타났다.

## 후기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

## 참고 문헌

- (1) Tadmor, Z. and Gogos, C., 1979, *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, New York.
- (2) Fenner, R. T., 1979, *Principles of Polymer Processing*, Chemical Publishing, New York.
- (3) Karwe M. V. and Jaluria, Y., 1990, "Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Single Screw Extruder for Non-Newtonian Fluids," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 17, pp. 167~90.
- (4) Chiruvella, R. V., Jaluria, Y., Essehir, M., and Sernas, V., 1996, "Extrusion of Non-Newtonian fluids in a Single Screw Extruder with Pressure

**Table 4 Whole modelling data and survey experiment data measuring efficiency comparison**

	1-10min error	6-10min error
Simulation model	1.522%	1.743%
Pitch 24 model	3.067%	1.764%
Pitch 28 model	8.004%	9.009%
Pitch 32 model	5.308%	4.276%
Pitch 36 model	11.129%	9.677%
Pitch 40 model	6.089%	4.968%
Pitch 44 model	3.312%	4.786%

- Back Flow,” *Polymer Engineering & Science*, Vol. 36, pp. 358-67.
- (5) Fenner, R. T., 1977, “Developments in the analysis of steady screw extrusion of polymers,” *Polymer*, Vol. 18, pp. 617-635.
- (6) Gopalakrishna, S., Karwe, M. V., and Jaluria, Y., 1989, *Numiform 89*, Aa Balkema, Rotterdam, pp. 265
- (7) Kwon, T. H., Shen, S. F., and Wang, K. K., 1989, “Pressure Drop of Polymeric Melts in a Conical Converging Flow: Experiments and Prediction,” *Polymer Engineering & Science*, Vol. 26, pp. 214-24.
- (8) Lin, P. and Jaluria, Y., 1996, “Numerical Approach to Model Heat Transfer in Polymer Melts Flowing in Constricted Channels,” *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 30, pp. 103-123.
- (9) Raman, Chiruvella, V., Jaluria, Y., and Abib, A. H., 1995, “Numerical Simulation of Fluid and Heat Transfer in a Single Screw Extruder with Different Dies,” *Polymer Engineering & Science*, Vol. 35, pp. 261-73.
- (10) Yoon, J. B., 2000, “Simulation of Heat and Fluid Flow in the Single Screw Extruder with Coupling of the Metering Section and Die,” A thesis for a master’s degree, Hanyang Univ., Republic of Korea.
- (11) Kwon, T. H., 1991, “Finite Element Analysis of Nonisothermal Flows in Single-Screw Extruders,” *The Korean Journal of Rheology*, Vol. 3, No. 1, pp. 56-67.
- (12) Kwag, D. S., Kim, W. S., and Lyu, M. Y., 2001, “Three-Dimensional Heat and Fluid Flow Simulations for Non-Newtonian Fluid in a Single Screw Extruder,” *KSME*, Vol. 1, pp. 337-342.
- (13) Kim, C. K. and Cho, S. H., 2002, “Numerical Study on the Behavior Characteristics of a Screw in Injection Molding Machine,” *KSMTE*, Vol. 11, No. 5, pp. 30-37.
- (14) Yang, S. H., Ha, M. Y., and Park, I. R., 2004, “The Basic on the Technique of Fluid Flow Analysis Using the Immersed Boundary Method,” *KSME*, Vol. 2, pp. 619-627.
- (15) Toon, J. Y., Hwang, Y. K., Park, J. S., Ko, T. J., and Park, J. W., 2002, “An Integrated CAD System for Design of Extruder Screw,” *KSPE*, Vol. 19, No. 8.
- (16) Blue Ridge Numerics, Inc., 1992-2006, *CFdesign - technical reference*, Blue Ridge Numerics, Inc., UK.
- (17) Lee, S. S., Hwang, Y. J., and Kim, H. J., 2004, *CATIA 5 ver. 5.11*, Sciencebook, Republic of Korea, pp. 99-178.
- (18) Victrex, Inc., *Properties of Matter Guide Book*, Victrex, Inc.