

EPDM 재질 CLIP고무제품의 유동해석을 이용한 최적 설계에 관한 연구

허영민*, 이광오#, 강성수**

A Study on the Optimal Design for CLIP Rubber Product Made of EPDM Using Flow Analysis

Young Min Huh*, Kwang O Lee# and Sung Soo Kang**

ABSTRACT

Many rubber products are used in industrial products such as various hoses, rubber belts and oil seals etc. Especially, more than 200 rubber parts are used in the automobile, but design technology of these is largely dependent on field experiences. These methods brought about too much time and cost in the developing procedures. However, with the help of recent rapid development of non-linear computer analysis, we can develop new sound products at low cost. Therefore in this study, optimizations of design variables such as location and number of gate in order to develop CLIP rubber product made of EPDM were performed by CAE in which Cross-WLF equations are adopted. The validity of proposed variables is evaluated by comparison with real forming results.

Key Words : EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer), MPI(Moldflow Plastic Insight), CAE, Gate location, Viscosity, Cross-WLF(Williams-Landel-Ferry) equation, Filling rate

1. 서론

일상 생활에서 뿐만 아니라 기계 및 자동차 분야에서도 폭넓게 사용되고 있는 고무(Rubber)는 각종 방진제품, 오일 씰 계통 및 커버류 등 그 응용범위가 대단히 넓다. 특히 EPDM 재질의 경우, 고무 제품 성형 시 첨가제(Carbon black)의 양에 따라 다양한 범위의 특성들을 나타내고 있어 자동차 부품 분야에서 범용적으로 사용되고 있다.

이러한 고무부품의 설계는 고무 재질의 유동특성을 정확히 파악하기 어렵기 때문에, 설계 시 시행착오법이나 현장경험에 의존하는 경우가 대부분으로 소요시간 및 비용이 증가하게 된다. 그러나 최근 컴퓨터 시뮬레이션 기술의 비약적인 발전에 힘입어 금속재료뿐만 아니라 고무, 플라스틱 등의 유기재료에 대한 비선형해석을 적용하는 방법들에 대한 연구들¹⁻⁸이 행해지고 있으며, 이를 제품개발

접수일: 2005년 8월 1일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

E-mail royalko@empal.com Tel. (051) 510-1454

** 부산대학교 정밀정형 및 균형가공연구센터

단계에 적용하여 개발비용의 감소와 동시에 품질향상 달성하고 있다.

따라서 본 연구에서는 EPDM 재질의 카본블랙 함유량^{9,10}에 따른 유동특성(점도변화)을 Cross-WLF 방정식으로 구현하여 자동차 브레이크 유압유 배관 간섭방지 홀더용으로 사용되는 CLIP 제품의 사출 성형해석을 상용코드인 MPI(Moldflow Plastics Insight V3.1)을 이용하여 수행하였다. 해석결과를 이용하여 여러 가지 설계변수(게이트의 수 및 게이트의 위치 등)에 따른 수지의 유동거동 및 충전거동 등을 파악함으로써 건전한 제품을 만들어내기 위한 설계조건들을 제시하였고, 제안된 설계조건에 따른 실 제품성형을 통해 연구의 타당성을 입증하였다.

2. EPDM 재료의 거동

2.1 레오메타 시험

본 연구에서 사용된 고무 재료인 Kumho Polychem사의 KEP-570F EPDM소재의 요구 가류시간을 측정하기 위하여 KS M 6518 규격에 따라 레오메타 실험을 실시하였다. 실험은 상판과 하판의 온도를 고무 가공시의 금형온도와 동일한 180℃로 설정하고, 상판을 고정시킨 상태에서 하판을 1°씩 회전을 시키면서 시험편이 받는 토크를 측정하였으며, 토크의 크기를 고무의 가황정도로 판단하였다.

Fig. 1은 레오메타 실험에서 얻어진 가황시간-토크의 관계를 보여주고 있으며, 이로부터 가황이 90%진행될 때까지의 시간 350sec를 적정가류 시간으로 채택하였다.

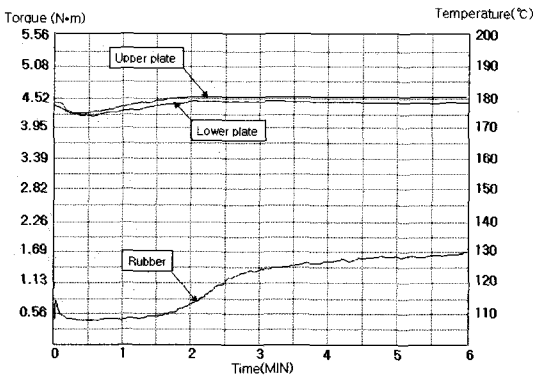


Fig. 1 Torque-time curves from Rheometer tests

2.2 Cross-WLF 점도 모델

점도(Viscosity)는 변형에 대한 재료내부의 저항을 나타내는 유동특성으로, 고무와 같은 재질의 유동특성을 묘사하는 데 아주 중요한 인자이며, 수학적으로 전단응력(τ)과 전단속도($\dot{\gamma}$)의 비로써 나타낸다.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{1}$$

식(1)의 관계가 선형 즉, 점도가 전단속도에 독립이면 뉴우튼 유동이고, 그렇지 않은 경우에는 비뉴우튼 유동이다. 특히 고무와 같은 재질은 비뉴우튼 유동 특성을 나타내며, 일반적으로 Cross-WLF¹¹⁻¹²의 모델이 적용된다.

$$\eta = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0(T)\dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \tag{2}$$

여기서, η 는 점도, T 는 온도, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도, τ^* 는 뉴우튼 특성에서 비뉴우튼 특성으로 천이될 때의 전단응력이며, n 은 전단속도 민감도이다. η_0 는 전단속도가 "0"에 가까워질 때의 점도 즉, $\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta = \eta_0$ 이며, 식(3)으로 계산될 수 있다.

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[- \frac{A_1(T - T_g)}{A_2 + (T - T_g)} \right] \tag{3}$$

여기서, T_g 는 유리전이온도(Glass Transition Temperature)이고, A_1, A_2, D_1 은 상수이다. 본 연구에서 사용된 상수값들을 Table 1에 정리했다.

Table 1 Values for the Cross-WLF Model Constants

Constant	Unit	Value
n	-	0.3482
τ^*	Pa	17900
D_1	Pa*s	$1.12 \cdot 10^8$
A_1	-	8.0973
A_2	K	51.6
T_g	K	263.15

3. 유동 해석

3.1 1 게이트 시스템

먼저, 게이트의 최적 위치를 선정하기 위하여 해석을 수행하였으며, Fig. 2는 최적의 게이트 위치에서의 선호도를 1.0으로 했을 때의 각 위치에서의 선호도를 보여주고 있다. 각 위치에서의 선호도를 3등급으로 나누어 0, □, X로 구분하여 나타내었고, 이것과 제품두께 등을 고려하여 1게이트 일 때의 게이트의 위치를 선정하였다.

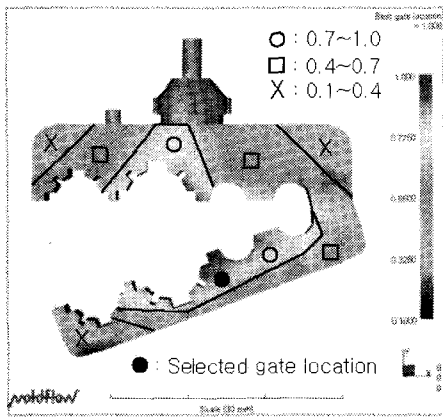


Fig. 2 Simulation for selecting best gate location

선정된 게이트위치에 유동주입시스템(스프루, 런너 및 게이트)을 Fig. 3과 같이 구축하였다.

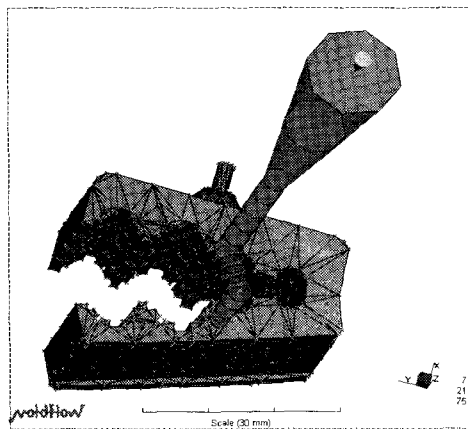


Fig. 3 Delivery system for 1 gate structure

실제 성형에 사용된 사출기의 경우, 3회의 펌핑(pumping)을 완료 한 후, 압력이 점차적으로 감소하기 때문에 Fig. 4와 같이 시간에 따라 사출 위치에서의 압력이 변화하도록 설계하였다. 사출기의 최대압력(16.6Mpa)에 도달하는 데에는 약 2.78[s]가 소요된다는 것도 알 수 있다.

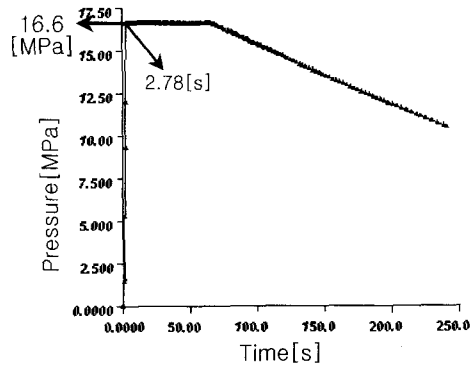


Fig. 4 Pressure variation with time of 1 gate system

1 게이트일 때의 충전 상태를 Fig. 5에 나타내었으며, 그림에서 알 수 있듯이 게이트 위치에서 이동해 가야할 거리가 먼 B지역과 게이트로부터의 거리는 가까우나 제품의 두께가 얇은 S지역을 통과해야 하기 때문에 A지역에서 미충진이 발생하는 것을 알 수 있다.

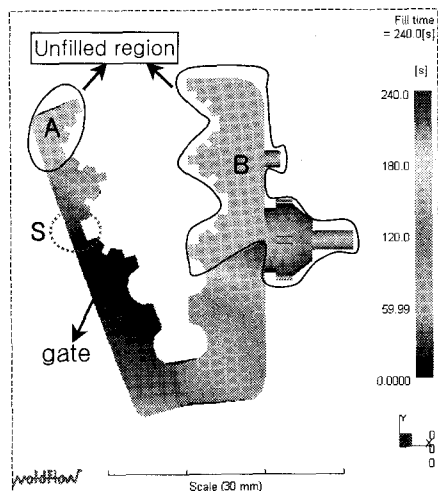


Fig. 5 Flow pattern of the 1 gate system

마찬가지로, 유동이 끝나는 시점에서의 평균 속도분포에서도 두께가 얇은 P지역으로의 유동속도 보다는 두께가 두꺼운 Q지역으로의 유동속도가 더 빠르다(Fig. 6). 따라서 Q지역으로의 유량이 많아지기 때문에 상대적으로 P지역으로의 유량이 적어진다. 또한 이러한 사실은 Fig. 7의 각 위치에서의 충전시간을 통해서도 알 수 있다. 충전이 시작되고 어느 정도의 시간이 흐르면, X지역으로의 유동은 더 이상 일어나지 않고, Y지역으로의 유동만이 일어남을 알 수 있다.

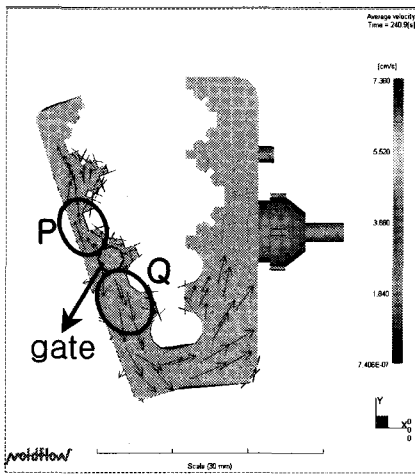


Fig. 6 Average velocity at the end of flow of 1 gate system

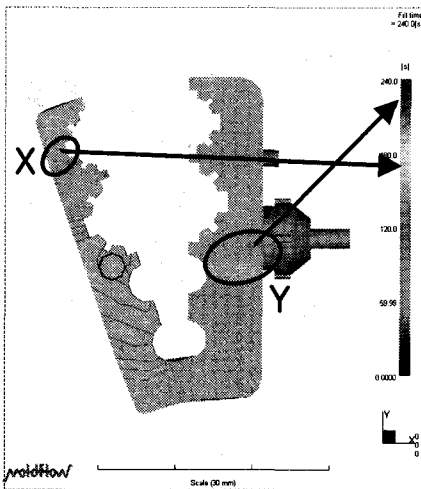


Fig. 7 Fill time at every location

따라서 X지역으로의 유동을 촉진시키고, 체적이 큰 Y지역으로 많은 유량을 제공을 하기 위해서는 Y지역에 새로운 게이트가 추가되어야 한다는 것을 알 수 있다.

3.2 3 게이트 시스템

1 게이트 구조에서의 유동해석결과와 최적게이트 위치 선정 시뮬레이션 결과(Fig. 8)를 통해 3 게이트 시스템을 만들었다. 게이트 3을 추가함으로써 게이트 1에서 C방향으로의 과도한 유량을 막고, 동시에 많은 유량을 필요로 하는 A부로의 유동을 유도하고자 한 것이며, 게이트 2는 A부로의 유동과 D지역의 완전 충진을 위해 추가한 것이다.

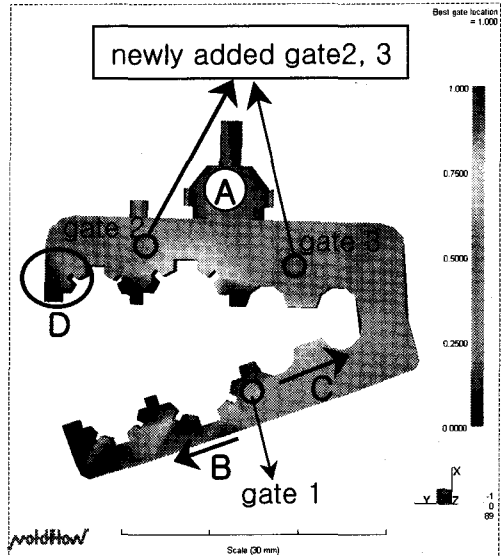


Fig. 8 Locations of newly added 2 gate system

1 게이트 시스템과 마찬가지로 3게이트 시스템에서도 3번의 펌핑 후 시간에 따라 사출 위치에서의 압력이 변화하도록 설계되었다.

유동의 끝 부분에서의 평균속도(Fig. 9)를 보면, 미충진이 일어난 M지역(Fig. 10)을 제외하고는 거의 일정한 속도분포를 가지고 있다. 따라서 Fig. 10의 미충진 부분을 완전히 채우기 위해서는 게이트 1(Fig. 8 참조)에서 제품 두께가 얇은 부분을 넘어선 부분에 새로운 게이트가 존재해야 함을 알 수 있다.

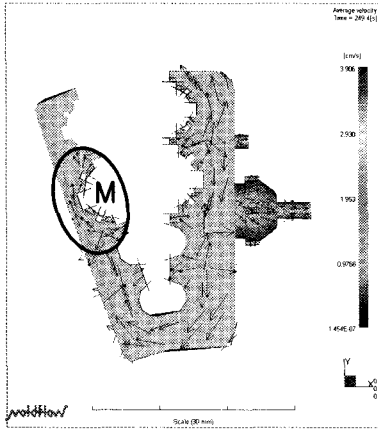


Fig. 9 Average velocity at the end of flow of 3 gate system

정도 하락하고, 제품의 최저압력은 2.834MPa이 됨을 알 수 있고, 평균 유동속도 또한 균일한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

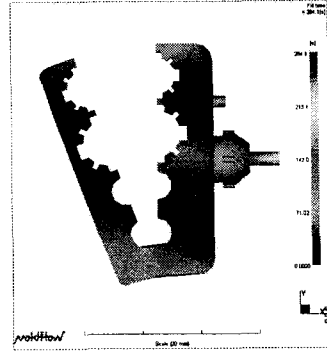


Fig. 11 Full filling of the 4 gate system

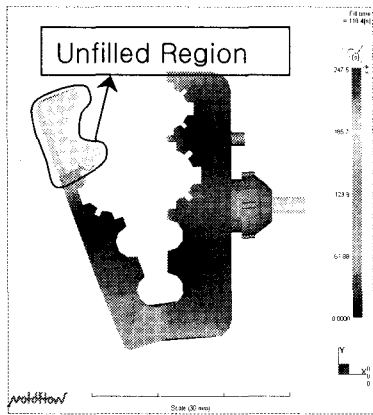


Fig. 10 Flow pattern of the 3 gate system

3.3 4 게이트 시스템

앞의 1 게이트와 3 게이트 시스템의 유동해석 결과를 바탕으로 미충진 부 근처에 새로운 게이트를 하나 추가하였다. 성형압의 일정유지의 저하를 방지하기 위해 3번의 펌핑을 실시하였으며, 그 후 시간에 따라 사출이 이루어지는 위치에서의 압력이 변화하도록 구성되었다.

Fig. 11에서 완전 충전이 이루어졌음을 확인할 수 있고, 완전 충전까지는 총 284sec가 소요되었고, 이는 레오메타 실험에서의 적정 가류시간(약 300sec)과도 좋은 일치를 보이고 있다.

완전충진이 이루어졌을 때의 압력분포(Fig. 12)와 평균속도(Fig. 13)를 살펴보면 최대압력(사출위치에서의 압력)은 16.6MPa에서 8.752로 대략 50%

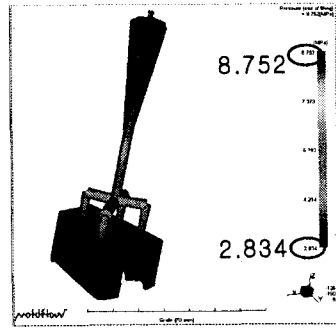


Fig. 12 Pressure distribution at the end of filling of the 4 gate system

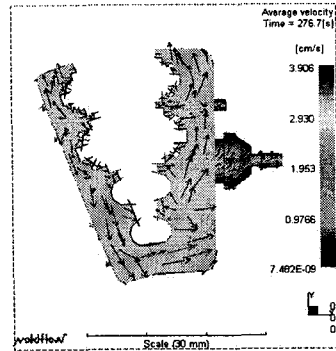


Fig. 13 Average velocity at the end of flow of the 4 gate system

4. 실 제품 성형

수행된 해석과 동일한 조건으로 1 게이트, 3 게이트, 4 게이트 시스템에 대해 실 사출성형시험을 수행하였다. 실 작업시의 시간에 따른 사출성형 압력저하를 기록하여 실제 시물레이션에도 적용되도록 하였다. Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16에서 각각 1 게이트, 3 게이트, 4 게이트 일 때의 실제 성형품을 보여준다. 1게이트에 대한 실 성형실험결과(Fig. 14), “가”부분에서는 게이트로부터의 유동길이 길어짐에 따라 유동선단의 압력강하로 인해 미충진이 발생한 것으로 판단할 수 있으며, “나”부위는 얇은 제품두께로 인해 마찰열이 급격히 증가하게 되고, 유동되지 못하고 오랫동안 머물러 있어야 하기 때문에 소재가 급격히 가루되면서 고화되어 유동선단이 전진하지 못한 것으로 판단되며, 이는 Fig. 5의 해석결과와도 좋은 일치를 보이고 있었다.

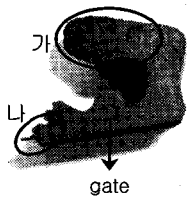


Fig. 14 Test product for 1 gate. Unfilling was occurred

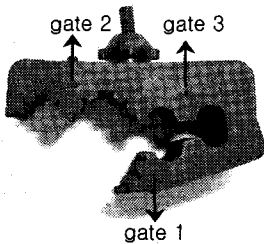


Fig. 15 Test product for 3 gates. Unfilling was occurred near the gate 1

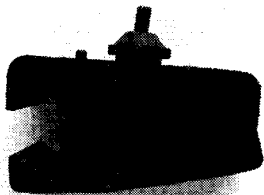


Fig. 16 Sound product of the 4 gate system

3 게이트 시스템의 경우, 게이트 2와 게이트 3의 추가로 인해 Fig. 14의 “가”지역은 완전충진은 가능했으나, 여전히 “나”지역(Fig. 13)에서는 완전충진이 이루어지지 않았으며, 역시 해석결과(Fig. 10)와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4 게이트 시스템의 경우(Fig. 16), Fig. 14의 “가”지역의 충진을 위해 추가적인 게이트를 “가”지역에 추가함으로써 완전한 충진을 이룰 수 있었다. 또한 실 성형에서는 캐비티(Cavity)내부에 존재하고 있던 공기가 통기되지 못하고 갇혀(Air trap) 성형불량을 야기시킬 수도 있기 때문에 성형해석을 통해 공기 갇힘이 발생하는 부분(Fig. 17)에 0.025mm~0.038mm의 통기구멍을 만들어 원활한 성형이 되도록 하였다.

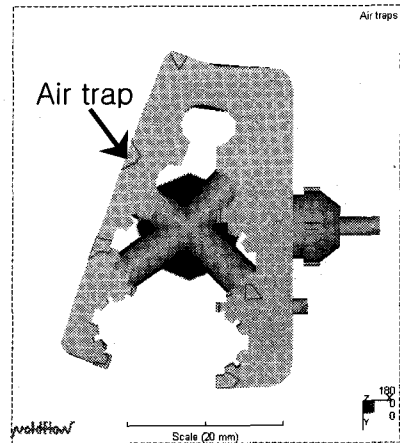


Fig. 17 Air traps of the 4 gate system

5. 결론

본 연구에서는 MPI 상용코드를 이용하여 EPDM 고무재질의 CLIP제품에 대한 유동해석을 수행하였으며, 해석의 타당성을 검증하기 위한 실 성형시험의 결과와의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 게이트 위치 선정 시물레이션을 통해 최적의 게이트 위치를 선정했고, 1개, 3개 및 4개의 게이트 수에 대한 성형해석을 수행하였다. 게이트의 수가 1개 및 3개일 경우에는 급격한 압력강하로 인해 미충진이 발생함을 알 수 있었다.
- 2) 재료의 미충진은 유동선단에서의 압력강하, 공

기 간헐 사출위치에서의 압력등이 중요한 인자가 됨을 알 수 있었다.

- 3) 해석결과와 실 성형시험결과가 잘 일치하였으나 미충진시의 경우, 약간의 형상차이를 보이는 것은 EPDM 고무재질의 점도를 지배하는 Cross-WLF방정식의 인자들의 영향인 것으로 생각된다.
- 4) 완전 충전뿐만 아니라 높은 품질의 제품을 생산하기 위해서는 적절한 위치에 에어벤트(Air vent)를 설치할 뿐만 아니라 사출 위치에서의 압력도 일정하게 유지할 수 있도록 하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Harry, D. H. and Parrot, R. G., "Numerical simulation of Injection Mold Filling," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 10, No.4, pp. 209-214, 1970.
2. Gao, F., Patterson, W.I. and Kamal, M.R., "Cavity Pressure Dynamics and Self-Tuning Control For Filling and Packing Phases of Thermoplastics Injection Molding," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, No. 9 pp. 1272-1285, 1996.
3. Swan, P. L., Garcia-Rejon, A., Cielo, P. and Kamal, M. R., "Optical On-Line Measurement of the Thickness Distribution of Blow Molding Parisons," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, No. 7, pp. 985-992, 1996.
4. Sherbelis, G., Morikawa, J. and Kurihara, T., "Thermal diffusivity of thermosetting materials by temperature-wave analysis Source," *Thermochemica acta*. Vol. 299, No. 2, pp. 95-100, 1997.
5. Lee, Y. B. and Kwon, T. H., "Modeling and numerical simulation of residual stresses and birefringence in injection molded center-gated disks," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, Issues. 1-3, 25, pp. 214-218, 2001.
6. Hieber, C. A. and Shen, S. F., "A finite - element / finite- difference simulation of the injection-molding filling process," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 7, Issue. 1 pp.1-32, 1980.
7. Zu, Y. S. and Lin, S. T., "Optimizing the mechanical properties of injection molded W-4.9%Ni-2.1%Fe in debinding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 71, Issue. 2, pp. 337-342, 1997.
8. Ballman, R. L., shusman, T. and Toor, H. L., "Injection Molding Flow of a Molten Polymer into a Cold Cavity," *Industrial and Engineering chemistry*, Vol, 51, pp. 847-850, 1959.
9. Ghosh, P. and Chakrabarti, A., "Effect of Incorporation of Conducting Carbon Black as Filler on melt rheology and relaxation behaviour of ethylene-propylene-diene monomer(EPDM)," *European Polymer Journal*, Vol. 36, pp.607-617, 2000.
10. Ginic-Markovic, M., Dutta, N. T., Dimopoulos, M., Roy Choudhury, N. and Matisons, J.G., "Viscoelastic behaviour of filled and unfilled, EPDM elastomer," *Thermochemica acta*, Vol. 357, pp.211-216, 2000.
11. Sopade, P. A., Halley, P., Bhandari, B., D'Arcy, B., Doebler, C. and Caffin, N., "Application of the Williams-Landel-Ferry model to the viscosity temperature relationship of Australian honeys," *Journal of Food Engineering*, In Press, Uncorrected Proof, Available online 14 May 2002.
12. Ferry, J. D., "Viscoelastic properties of polymer," *John Wiley&Sons. Inc.*, pp. 280-290, 1980.