

사출성형에서 런너 크기의 최적화를 위한 CAE 적용

김준민¹ · 류민영[#]

An Application of CAE in the Optimization of Runner Size in Injection Molding

June-Min Kim, Min-Young Lyu

(Received February 27, 2006)

Abstract

The delivery system such as sprue, runner and gate is a waste of resin in injection molding operation. In this study the reduction of runner size has been investigated using injection molding CAE softwares, Moldflow and Moldex3D, and commercial CFD Softwares, Fluent and Polyflow. To verify the computational results experiment was performed. There were three considerations in deciding optimal runner size in this study: minimum pressure at the gate that makes resin fully filled in the cavity, minimum runner size that compensates shrinkage of resin in the cavity, and frozen layer thickness formed in the runner during injection. Through the computer simulations the optimal runner size that satisfies those three considerations has been decided. Although the computational results among the softwares were slightly different, it was enough to predict the optimal runner size. The previous runner diameter was 8 mm and predicted optimal size was 5 mm. This was verified by injection molding experiment. Thus, the way of CAE application in deciding optimal runner size adapted in this study would be appropriated.

Key Words : Injection Molding, CAE, Delivery System, Runner Size, Shrinkage, Frozen Layer Thickness

1. 서 론

사출성형은 용융된 수지를 고속, 고압으로 성형하고자 하는 모양이 새겨져 있는 캐비티 내에 주입시켜 플라스틱 제품을 성형하는 방법이다. 수지가 캐비티 안으로 주입될 때는 스프루(Sprue), 런너(Runner), 그리고 게이트(Gate)로 구성되어있는 유동전달시스템(Delivery system, 또는 Feed System)을 통하여 캐비티 안으로 전달된다[1~2]. 이러한 유동전달 시스템은 성형품이 완성된 후 버려지게 되거나 원 소재와 함께 섞어서 재생하게 된다. 그러나 재생하게 되면 소재의 물성이 저하되어 성형품에 치명적인 결점을 주게 되는 경우가 생긴

다. 따라서 근본적으로 유동전달 시스템의 크기를 최소화 하는 게 가장 바람직하다고 하겠다.

사출성형에서 유동전달 시스템에 관한 관심은 오래전부터 연구의 대상이 되어왔는데 크게 두 분야로 나뉘어서 생각할 수 있다[3~5]. 첫째는 캐비티에 수지를 균형있게 분배하는 흐름의 균형이고, 둘째는 크기를 최소화 하는 것이다. 흐름의 균형에서는 여러 개의 캐비티가 있는 금형 내에서 각 캐비티에 수지가 동시에 충전되도록 하는 것으로 런너의 배열과 게이트의 위치 및 크기가 주된 관건이다[6~7]. 크기의 최소화에서는 런너의 크기를 최소화 하는 것으로 수지의 유동성과 관련이 있으며 압력의 전달이 잘 되어 수지가 캐비티에

1. 서울산업대학교 산업대학원
교신저자: 서울산업대학교 금형설계학과,
정밀기계기술연구소, E-mail: mylyu@snut.ac.kr

홀러 들어가는데 문제가 없도록 하는 최소의 런너의 크기가 주된 관건이다[8~9]. 런너의 크기 설계에서는 수지가 캐비티에 전달되는 동안 온도강하와 압력저하가 최소가 되도록 하기 위해서 크기가 가능한 한 커야 하며, 원료손실 및 사출 사이클 타임을 고려하면 런너의 크기는 가능한 한 작게 설계 되어야 한다. 런너의 크기가 너무 작으면 수지가 캐비티로 전달되는 동안 온도저하와 압력강하가 크게 발생해 캐비티를 완전 충전 시키지 못하는 현상 즉, 미충전(Short Shot)이 우려되고, 런너의 크기가 너무 크면 재료 손실이 크고 수지를 냉각시키는 시간이 길어져 결국 사이클 타임이 길어지게 된다. 따라서 제품과 성형기의 능력에 따른 최적의 런너 크기가 존재하며 이를 찾아 설계하는 것은 매우 중요하다. 그러나 유동전달 시스템에 관한 대부분의 논문들은 런너와 게이트의 흐름균형에 초점이 맞춰져 있고, 또한 흐름 중의 온도와 관련한 런너와 게이트의 고화에 관한 연구이다[8~9]. 그리고 많은 연구들이 컴퓨터 모사를 위한 수식의 전개와 상용 CAE 시스템을 활용하고 있는데 이의 정확성과 응용방법에는 의문이 있다[3]. 따라서 런너의 최적 크기 결정을 위한 적절한 CAE 시스템의 적용 방법에 대한 연구와 여러 CAE 시스템들을 적절히 활용하는 방법에 대해서 연구가 필요하다.

본 논문에서는 정해진 성형품의 모양과 주어진 사출성형기에서 최적의 런너 크기를 결정하는데 CAE의 응용방법에 대해서 연구 하였다. CAE 해석에서는 사출성형 전용 CAE 프로그램뿐만 아니라 상용화된 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 적절히 사용 하였다. 그리고 본 연구에서 제시한 방법으로 최적화된 런너의 크기를 실험을 통하여 검증 하였다.

2. CAE 해석 및 실험

2.1 해석 모델 및 CAE 해석 프로그램

Fig. 1은 본 연구에 사용된 성형품의 모델을 나타내고 있다. 이 모델은 사각형의 프레임으로 그림에는 유동전달시스템(Delivery System: 스프루, 런너, 게이트)이 함께 나타나 있으며 네 개의 런너와 네 개의 게이트로 구성되어 있다. 성형품의 평균 두께는 1.3mm이고 가로와 세로는 각각 404.6 mm, 333mm 이다.

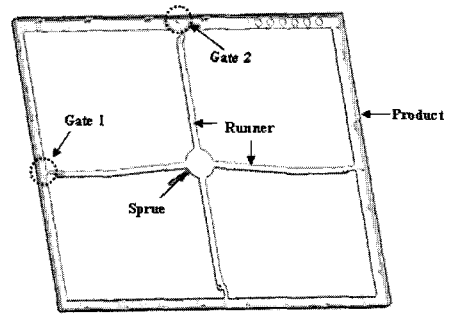


Fig. 1 Injection model with delivery system for study

CAE 해석 프로그램은 해석결과 응용의 신뢰성을 높이기 위하여 두 개의 사출전용 CAE Software인 Moldflow 와 Moldex3D, 그리고 두 개의 상용 CFD Software인 Polyflow 와 Fluent 를 사용하였다.

2.2 CAE 해석 적용 절차

성형품을 사출성형 할 수 있는 최적의 런너 지름을 선정하기 위해서 다음과 같이 크게 3단계의 해석 절차를 구상하였다. 즉 캐비티 내에서 완전 충전을 위한 해석, 성형품의 수축을 고려한 해석, 그리고 런너의 고화층 예측을 위한 해석 등으로 Fig. 2에 해석 절차가 나타나 있다. 사출성형 해석에서 해석결과의 정확성을 판단하기 위해 Moldflow와 Moldex3D를 이용하여 2차원(2D) 및 3차원(3D) 성형해석을 하였고 그의 결과와 실험결과를 비교 하였다. 런너의 크기가 줄어들면 스프루에서 게이트까지 압력 강하가 증가하여 게이트의 압력이 감소한다. 따라서 런너의 크기를 변화 시켜가면서 완전 충전을 이룰 수 있는 게이트부분의 압력을 계산하였다. 이때의 완전 충전을 위한 해석은 제품의 품질을 고려하지 않은 것이기 때문에 양품의 성형이 가능한 런너의 크기를 결정하기 위해 수축률을 고려한 성형 해석을 하였다. 성형해석을 통해 최적의 런너 지름을 결정하기 위해서는 런너의 지름에 따른 고화층의 두께를 고려하여야 하나 완전 충전을 위한 해석과 수축을 고려한 사출성형해석은 2D해석으로써 고화층이 고려되지 않은 상태에서 해석이 진행되었다. 따라서 런너의 고화층을 예측하고 분석 하여 이를 보상하기 위해서 Moldflow, Moldex3D, Fluent, 그리고 Polyflow를 이용하여 3차원 해석을 수행 하였다. 위의 CAE 해석 결과를 종합적으로 분석하여 최적의 런너 크기를 결정하였다.

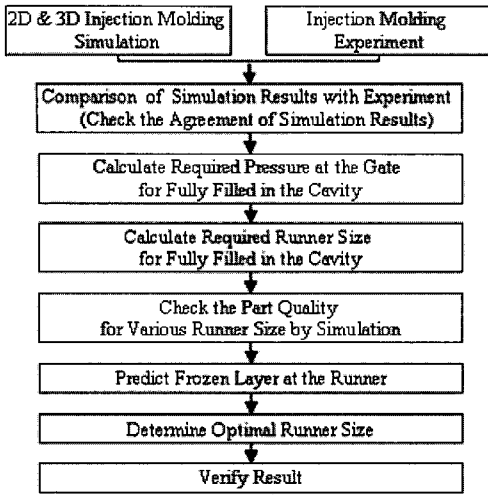


Fig. 2 Flow chart for CAE analysis to decide optimum runner size

2.3 실험 및 재료

실험에 사용된 사출성형기는 사출 실린더의 최대압력이 140bar, 최대 사출률이 438cm³/sec, 스크류의 직경이 70mm, 그리고 형체력이 480ton인 우진 SELEX NE-480을 사용하였다. 금형은 2단 형식이고 유동전달 시스템 형식은 콜드 런너(Cold Runner)에 바나나형 터널 게이트방식을 적용하였다. 금형의 온도조절을 위한 냉각 채널은 직류식 회로방식이고 냉매는 물을 사용하였다. 수지는 제일모직사의 ABS HF-0680U를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 사출성형 해석과 실험의 비교

본 연구에서 대상으로 하는 모델에서 현재 사용하고 있는 런너 크기에 대해서 실험과 CAE 해석을 비교 검토하였다. CAE 해석은 Moldflow와 Moldex3D를 이용하여 2D와 3D로 해석하여 CAE 해석 프로그램 사이의 결과들을 비교하고 또한 이들의 결과와 실험을 비교 검토 하였다.

실험 조건은 Table 1에 나타나있으며 사출스트로크를 조절하여 얻은 성형품의 충전 과정의 실험이 Fig. 3에 나타나있다. Fig. 4에는 Moldflow와 Moldex3D를 이용한 2D 해석의 충전 패턴이 나타나있고 Fig. 5에는 3D 해석 결과가 나타나있다. Fig. 4와 Fig.5에서 보면 성형품에서 수지가 가장

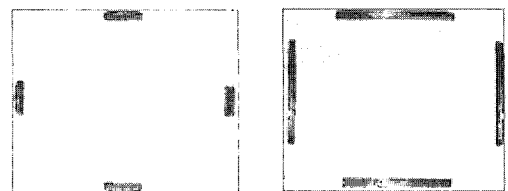
늦게 채워지는 부분은 성형품의 상단 좌우 모서리 안쪽과 하단 좌우 모서리에서 약간 안쪽으로 Moldflow 2D, 3D 그리고 Moldex3D의 2D, 3D 해석 결과가 모두 일치하고 있다. 실험의 결과인 Fig. 3과 비교하면 스트로크 (Stroke) 25mm에서 충전 말단의 모양이 CAE 해석 결과들과 일치함을 알 수 있다.

따라서 이 두 프로그램은 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다. 또한 2D 와 3D 해석 결과에서 보여주듯 제품의 두께가 얇기 때문에 2D 해석으로도 유용한 결과를 낼 수 있다고 판단되어 이후

Table 1 Injection molding condition

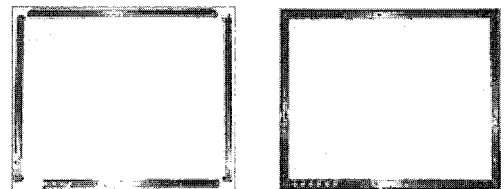
Stage	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Stroke Position (mm) (Start from 54)	45	12	8	5
* Injection Speed (%)	50	80	70	65
Pressure (bar)	50	80	75	60
Injection Temperature (°C)	240			
Mold Temperature (°C)	33			
Holding Pressure (bar)	80			
Holding Time (sec)	2			
Holding Stroke Speed (%)	30			

*: Represents Percentage from Maximum Speed of Machine



(a) Stroke: 5 mm

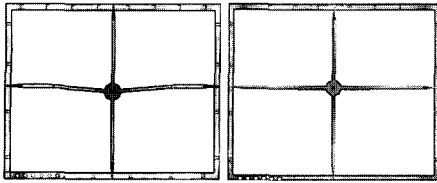
(b) Stroke: 15 mm



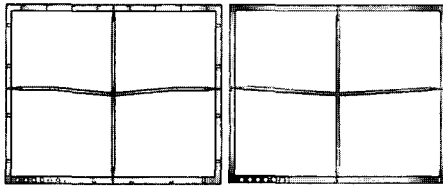
(c) Stroke: 25 mm

(d) Stroke: 35 mm

Fig. 3 A progress of melt front in the cavity



(a) Result from Moldflow (b) Result from Moldex3D
Fig. 4 Two dimensional CAE results of melt front



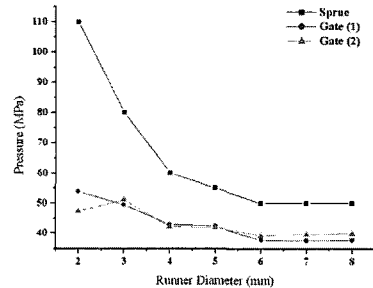
(a) Result from Moldflow (b) Result from Moldex3D
Fig. 5 Three dimensional CAE results of melt front

의 사출성형 해석은 런너의 고화층 예측을 제외하고는 모두 2D로 해석하였다.

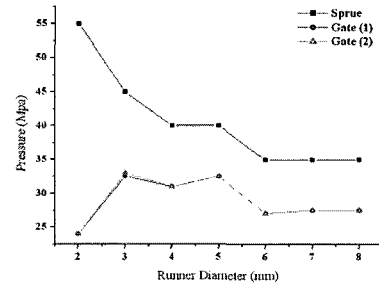
3.2 완전 충전에 필요한 최소의 런너 크기

본 연구에서는 사용되는 성형기계의 한도와 정해진 금형의 크기 내에서 런너의 크기를 결정하였다. 이를 위해 먼저 런너의 크기를 변화시켜 가면서 캐비티 내의 완전 충전을 이룰 수 있는 게이트의 압력을 계산 하였다. 그리고 완전충전을 이루는 게이트의 압력을 유지시키기 위해서 실제로 적용 가능한 스프루 선단의 압력에 따라 런너의 크기를 계산 하였다. 이러한 과정에서 적용 가능한 최대의 스프루 압력에서 완전 충전이 가능한 게이트의 압력을 유지시켜줄 수 있는 런너의 크기를 결정 할 수 있다. Fig. 6에는 런너의 지름을 2mm에서 8mm까지 변화 시 Moldflow와 Moldex3D로 계산된 완전충전을 시킬 수 있는 스프루 선단의 압력과 두 게이트에서의 압력이 나타나 있다. Moldflow의 결과인 Fig. 6(a)의 경우, 런너의 크기가 작을 때 스프루 선단의 압력과 게이트에서의 압력이 높게 나타났다. 그리고 런너의 크기가 커질수록 압력이 감소하다 런너의 지름이 6mm 이상에서는 압력의 변화가 없이 런너의 지름에 무관하게 일정한 압력을 나타내고 있다. 이는 어느 정도의 런너 크기만 유지되면 스프루 선단의 압력을 게이트에 전달하는 데는 문제가 되지 않음을

시사하고 있다. Moldex3D의 결과는 Fig. 6(b)에 나타나 있는데 지름 2mm의 런너에서의 결과를 제외하고는 Moldflow 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 두 CAE 해석결과에서 예측한 압력 값 차이는 존재하고 있다. 스프루 선단의 압력이 80MPa을 넘지 않는 범위 (사출기의 제한) 내에 두 해석 프로그램에서 동시에 만족하고 있는 최소의 런너 크기는 지름 3mm까지로 나타났다.



(a) Result from Moldflow



(b) Result from Moldex3D

Fig. 6 Required pressures at the sprue and gate for fully filled in the cavity according to the runner size

3.3 런너의 크기에 따른 성형품의 품질 예측

3.2 절에서 캐비티에 완전충전 하기위한 즉, 성형 가능한 최소의 런너 크기를 결정하였다. 그러나 이 런너의 크기가 성형 시에 나타나는 성형수축을 제어하는데 충분한 크기인지 검토할 필요가 있다. 따라서 런너의 지름이 3mm 이상인 경우에 두 사출성형 CAE 프로그램을 이용하여 성형 수축을 비교 검토하며 양품의 성형이 가능한 런너의 크기를 계산하였다.

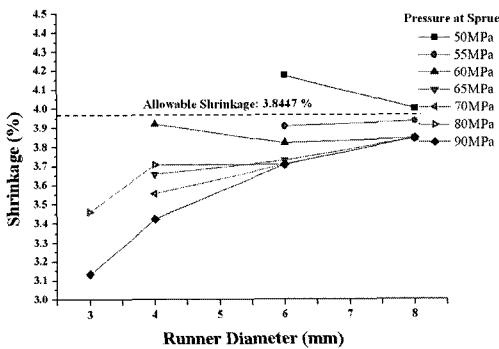
Fig. 7(a)에는 Moldflow로 해석한 각 스프루 선단의 압력에서 런너의 크기에 따른 성형품의 수축률이 나타나있다. 스프루의 압력이 50MPa에서

120MPa로 변할 때 각 런너의 크기에 따라 나타나는 게이트의 압력(두 게이트 압력이 유사하며 'Gate 2'의 압력을 의미함)과 제품에 나타나는 최대 수축률을 보여주고 있다. 성형품이 양품에 해당되는 수축률의 결정은 지름 8mm의 런너를 사용하는 실제 현장에서 양품으로 성형되는 성형조건에서 나타나는 수축률 즉, 3.8447%로 하였다. 스프루 선단의 압력이 크면 수축이 적게 일어났다. 이는 스프루 선단의 압력이 크면 캐비티에 높은 압력이 전달되어 수지의 온도가 떨어지면서 발생하는 성형수축을 보상해주기 때문이다. 런너의 크기가 커지면 역시 캐비티에 압력이 잘 전달되어 수지의 성형수축이 줄어들 수 있으나 오히려 성형수축이 크게 나타났다. 이러한 현상은 런너의 크기가 크면 런너에서도 수축이 크게 일어나기 때문에 보압 시 런너 부분의 수축량을 채우는데 많은 양의 수지가 쓰여졌기 때문인 것으로 판단된다. 현장에서 적용 가능한 스프루 선단의 압력이 80MPa이하 이므로 런너의 지름이 4mm까지는 양품의 제품을 성형하는데 가능하다고 판단된다.

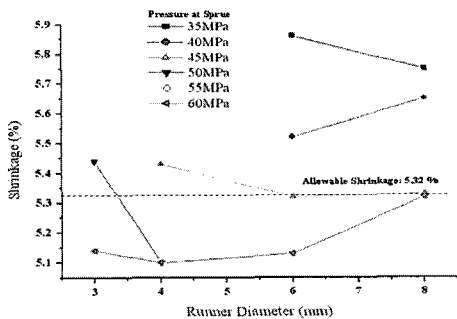
Moldex3D의 해석 결과가 Fig. 7(b)에 나타나있다. Moldex3D의 결과에서는 런너의 지름이 8 mm일 때 수축률이 5.33%이므로 이 수축량 이하로 되는 런너의 지름이 양품의 성형이 가능한 런너의 크기로 판단할 수 있다. Moldflow와 Moldex3D 두 해석프로그램에서 각각 다른 성형수축률을 예측하고 있기 때문에 두 프로그램에서 예측되는 적절한 런너를 결정하고 이 두 결과들 중에서 런너의 크기가 큰 쪽을 선택하였다. Moldex3D해석으로 나타난 각 스프루 선단의 압력에서 런너의 크기에 따른 수축률을 보면 대체로 런너의 크기가 클 때 수축률이 크나 그의 경향성에는 일관성이 없이 나타났다. 스프루 선단의 압력이 80MPa로 제한되는 상황에서 양품으로 성형 가능한 런너의 크기는 지름이 4mm까지는 가능하다고 보여진다. 두 CAE 해석프로그램의 결과를 종합하면 런너의 지름이 4mm이상이면 양품의 성형품을 얻는데 가능한 크기라 할 수 있다.

3.4 런너의 고화층 예측 및 최적 런너 크기의 결정

본 연구에서는 고화층 분석을 하기 위해서 사출 성형전용 CAE 프로그램인 Moldflow, Moldex3D와 CFD 전용 프로그램인 Fluent와 Polyflow을 이용하여 분석 하였다. 고화층의 예측은 3차원 해석으로 수행 하였고 수지는 비 뉴턴 점성체로 온도에 따라서는 Arrhenius 법칙을 따른다고 가정 하였다. 고화층을 판단하는 고화층 경계온도는 Moldex3D에서 제시하는 ABS 수지의 유동정지온도를 적용하였다 [10]. Table 2는 Moldflow의 해석 결과로 런너 지름에 따른 고화층과 유동층의 두께정보를 보여주고 있다.



(a) Result from Moldflow



(b) Result from Moldex3D

Fig. 7 Part shrinkage for the runner size

Table 2 Thicknesses of frozen layer and core in the Runner-predicted by Moldflow

Runner Diameter (mm)	Frozen Layer Thickness (mm)	Percentage of Frozen Layer from Runner Size (%)	Core Layer Diameter (mm)	Percentage of Core Layer from Runner Size (%)
3	0.07	4.6	2.86	96.4
4	0.09	4.5	3.82	96.5
6	0.135	4.5	5.73	96.5
8	0.185	4.6	7.63	95.4

런너 지름이 4mm와 8mm일 때 온도 분포의 경향은 매우 유사하나 수지의 유동 정지온도를 143.9°C(Moldex3D에서 제시하고 있는 유동 정지온도)라고 가정할 때 고화층의 두께는 각각 0.09mm와 0.185mm로 런너의 지름이 클수록 고화층도 크게 나타났다. 이것은 런너의 크기가 작을수록 같은 유량에서 전단변형률 (Shear Rate)가 커져 벽면에서의 온도가 상승하기 때문이다. 런너의 지름이 커질수록 고화층의 두께가 커지나 유동층과 고화층의 비율은 런너의 지름에 관계없이 일정하게 예측되었다. Fig. 8은 Moldex3D의 해석 결과를 보여주고 있다. 런너의 지름이 4mm와 8mm일 때 각각 0.06mm와 0.14mm의 고화층이 형성되고 있음을 알 수 있다.

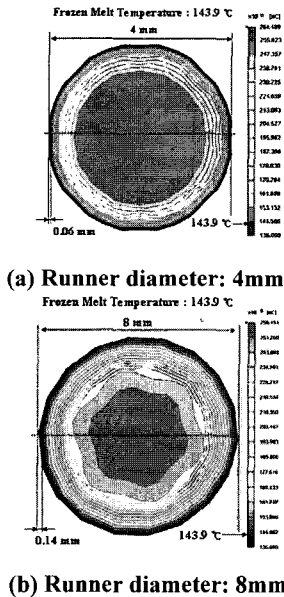
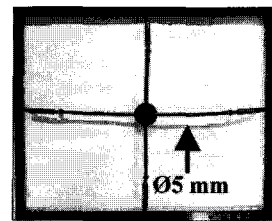


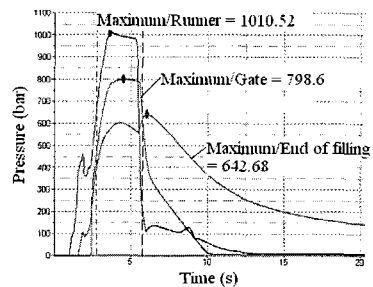
Fig.8 Temperature distribution at the cross-section of runner-result by Moldex3D

Fluent를 이용한 해석에서는 런너의 지름이 4mm와 8mm때 각각 0.11mm, 0.26mm의 고화층을 예측하였고 Polyflow를 이용한 해석에서는 런너의 지름이 4mm와 8mm때 각각 0.3mm, 0.6mm의 고화층을 예측하였다. Polyflow해석 시 사출성형의 유량보다 5배 적은 값을 적용하였다. 사출 성형은 단위시간당 유량이 매우 큰 공정으로 Polyflow를 이용하여 그 유량으로 해석하기에는 어려워 실제보다 적은 유량값을 사용하였다. 따라서 실제의 큰 유량에서는 전단에 의한 온도상승에 의해 5배 적

은 유량에서 계산된 온도 보다 더 높은 온도분포가 될 것이라 예측된다. 여기서는 단순히 런너 단면에서의 온도분포를 예측하기 위함이므로 참고값으로 사용하기에는 큰 무리가 없다고 판단된다. 결국 여러 프로그램의 해석 결과를 종합해 볼 때 런너에서 고화층의 두께는 여유치를 감안하여 볼 때 0.5mm정도로 형성된다고 보면 큰 무리는 없을 것으로 판단된다. 위와 같이 런너의 고화층을 예측해본 결과 상당 두께의 고화층이 형성됨을 알 수 있었고 이는 Moldflow와 Moldex3D를 이용하여 계산된 캐비티내의 완전충전을 위한 런너의 크기, 그리고 양품의 성형품을 위한 런너의 크기보다 런너의 지름이 1mm정도 더 커야 함을 나타내고 있다. 따라서 런너에서의 고화층을 고려한다면 런너의 지름이 5mm가 적절하리라 판단된다. Fig. 9에는 런너의 지름이 8mm인 것을 5mm로 수정하여 얻은 성형품의 결과를 보여주고 있다. Fig. 9(a)는 사출성형 된 제품이고, Fig. 9(b)는 사출성형 시 측정된 금형내의 압력곡선이다. 성형 조건은 런너 지름 5mm에 맞게 조절 되었고 성형품은 런너 지름 8mm에서 사출한 것과 같은 품질의 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Injection molded part



(b) Measured pressure profiles at various locations in the cavity

Fig.9 Experimental result for the 5 mm of runner diameter

4. 결 론

본 연구는 사출성형공정에서 재료의 소비가 일어나는 부분의 절감을 위해 런너의 크기를 최소화 하기 위한 사례 연구로써 여러 종류의 상용 프로그램과 실험을 통하여 접근 하였다.

사출성형 전용 프로그램인 Moldflow와 Moldex3D 를 이용하여 정해진 공정조건에서 금형의 캐비티에 완전충전을 위한 런너의 지름은 최소 3mm로 나타났다. 그러나 성형수축과 같이 성형품의 불량 을 해소하기 위한 조건을 고려하면 즉, 성형품의 품질을 고려하면 런너의 지름은 4mm로 예측 되었다.

사출성형 중 수지가 런너의 벽에서 고화되는 층을 고려하기 위해 사출성형 전용 프로그램과 상용 CFD 프로그램을 통하여 이를 예측하고 분석 하였다. 고화층은 상용 프로그램에 따라 다양한 고화층을 예측하고 있어 정확한 고화층의 두께를 결정하기는 어려웠으나 모든 프로그램의 결과를 종합해 볼 때 런너의 지름은 더 커져야 함이 확인 되었고 따라서 런너의 지름이 5mm가 되면 양 품의 성형품을 성형하는데 적절하다고 판단되었다. 이는 실험으로도 검증이 되었으며 결과적으로 런너의 지름이 8mm인 것을 5mm로 줄이는 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 제시하고 사용한 CAE 적용 방법은 런너의 크기를 줄이는 방법으로 타당하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Irvin I. Rubin, 1972, Injection Molding, Theory and Practice, John Wiley & Sons, USA, pp. 3~11.
- [2] D. G. Baird, D. I. Collias, 1998, Polymer Processing, John Wiley & Sons, USA, pp. 277~282.
- [3] Yuan Zhongshuang, Li Dequn, Chen Xing, Ye Xiangao, Gao Xianke, Xiao Jingrong, 1993, Iterated CAD/CAE/CAM system for injection moulding, J. Computing & Control Engineering Journal, vol.4, pp. 277~279.
- [4] R. K. Irani, B. H. Kim, J. R. Dixon, 1995, Towards automated design of the feed system of injection molds by intergrating CAE, iterative redesign and features, Transactions of the ASME., Journal of Engineering for industry, vol.117, pp. 72~77.
- [5] Zhou Zhen-Yong, Gu Zheng-Chao, Shi Jiao-Ying, 2000, Research on intergrated design techniques for injection mold runner system, Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, Vol.12(1), pp. 6~10.
- [6] C. S. Li, Y. K. Shen, 1995, Optimum design of runner system balancing in injection molding, (UK) International Communications in Heat and Mass Transfer, vol.22, pp. 179~188 .
- [7] K. Alam, M. R. Kamal, 2004, Runner balancing by a direct genetic optimization shrinkage, Polymer Engineering and Science, vol.44, pp. 1949~1959.
- [8] S. M. Richardson, 1986, Injection moulding of thermoplastics: freezing of variable-viscosity fluids. I. Developing flows with very high heat generation, (West Germany) Rheologica Acta, vol.25(2), pp. 180~190.
- [9] S. M. Richardson, 1985, Injection moulding of thermoplastics II. Freezing-off in Cavities, Rheol. Acta (West Germany) Rheologica Acta, vol.24(5), pp. 509~518.
- [10] Moldex3D, Version 7.1, ETS-soft, 2005.