

CAPA를 활용한 적용사례 및 개선대책

이영창* · 여동구* · 구본흥*

Case studies using CAPA to eliminate problems

Y.C. Lee, D.K. Yeo, and B.H. Koo

Abstract

With recent trends leaning towards product miniaturization, the advent of new material and speedy delivery times, old style conventional trial-and-error methods have been only serving to weaken corporate competitiveness. Reliant on tiny increments of time-consuming experience, this antiquated approach begets a delayed delivery of product development, cost loss and quality depreciation. To solve such problems, the Dedicated Injection Molding CAPA (Computer Aided Plastics Application) performs a preliminary examination on problems rising from every stage of creation - from appropriate material selection and mold design to mass production - through a computer system. Thus, it determines the optimum design variables and process conditions while diagnosing and solving defective molds.

Key Words : Injection Molding, CAPA, Simulation, Flow Analysis, Cool Analysis, Pack Analysis, Warp Analysis, Fiber Orientation Analysis, Mid Surface Mesh

1. 서론

최근 들어 노트북이나 핸드폰과 같은 이동 전자 제품을 중심으로 경량화 및 콤팩트화가 급속하게 진행됨에 따라, 제품을 구성하는 외관 제품들도 기존의 외관 불량 해결이라는 숙제뿐만 아니라 전체 크기 및 중량감소를 위해 수지의 변경 및 두께의 감소라는 명제를 안게 되었다. 그러나, 기존의 경험에 의존하는 방식으로 이와 같은 문제를 효율적으로 대응하기에는 많은 금형 수정으로 인한 개발 기간의 증가와 더불어 안정된 제품의 품질을 얻기가 어려워져 즉시 시장 출시라는 부분을 만족시키기가 어렵다. 또한 원가 측면의 손실 및 품질저하로 기업 경쟁력의 약화를 초래하

고 있다.

따라서 사출불량 문제를 실제수지를 가지고 사출 성형기에 금형을 설치하여 여러 번 실험을 통하여 해결 하던 종래의 방법을 탈피하여 사출 성형기를 사용하지 않고 컴퓨터 내에서 일정 조건을 입력하여 얻어진 결과로서 문제를 해결하기 위해 사출성형 전용시스템 CAPA(Computer Aided Plastics Application)를 개발 하였다. CAPA는 제품 설계로부터 양산화로 이동하는 시점에서 발생하는 시행착오를 줄여서 제품 개발기간을 단축하기 위한 도구이다. 컴퓨터 화면을 통해서 실제 사출시에 볼 수 없었던 수지의 거동, 냉각과정, 압력거동 등을 볼 수 있으며 이를 기초로 성형품의 예상 문제점을 파악할 수 있다. 즉, 휨, 웰드라인, 수

* (주)브이엠테크

측정의 불량을 예측할 수 있으며 이를 방지하기 위한 여러가지 방법(살두께, 게이트 위치와 종류, 제품형상, 사출조건)을 동원하여 적정 조건을 찾아 주는 종합 Solution 시스템이다.

2. 본 론

2.1 충전해석의 지배방정식

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

운동량 방정식

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \vec{\tau}$$

에너지 방정식

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \vec{\tau} \cdot (\nabla \vec{V})$$

비등온, 비뉴턴 유체, 순수 점성에 대한 Hele-Shaw 모델을 사용할 경우 지배 방정식은 다음과 같이 간략화 된다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right), \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right), \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) \approx 0$$

에너지 방정식

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2$$

2.2 유동 Balance 조절방법

사출성형 제품의 불량은 여러 가지 복합적인 요인에 의해 발생하므로 한가지 요인의 대처만으로 문제를 해결할 수 없는 경우가 많다. 하지만 일반적으로 널리 알려진 사실에 따르면 70% 이상의 성형불량이 유동 Balance에 의해 발생한다고 한다. 따라서 유동 Balance를 조절함으로써 성형시 발생하는 많은 문제점을 사전에 예방할 수 있으리라 생각된다. 유동 Balance를 조절하는 방법을 크게 4가지로 구분하면 다음과 같다.

- 1) Gate 위치/직경 조정
- 2) Gate 개수 조절
- 3) Valve Gate 사용
- 4) 제품의 살 두께 변경

유동 Balance를 위해 가장 많이 사용되는 방법이 Gate 위치 조정이며 다음으로 Gate 추가나 삭제, Valve Gate도입, 살 두께 변경 등의 방법을 사용한다. 본 고에서는 Gate 위치조정과 개수조절, Valve Gate 사용에 의한 유동 Balance 조절방법에 대해 소개하기로 한다.

3. Gate 위치/직경 조정

3.1 Flip 모델에 대한 압력강하

게이트는 런너의 종점이고 캐비티에의 입구이다. 게이트의 위치, 개수, 형상, 치수는 성형품의 외관이나 성형 효율 및 치수 정밀도에 큰 영향을 준다. 따라서 게이트는 성형품의 형상으로 정하는 것이 아니고 캐비티내의 용융수지가 흐르는 방향, 웰드라인의 생성, 게이트 처리 등을 고려해서 정해야 한다. 단면적이 큰 게이트는 충전성은 좋으나 게이트 실(seal)시간이 길고 또 게이트 마무리도 번거롭다. 작은 게이트는 이 반대이다. 게이트의 결정은 사용수지와 성형품, 상품 요구의 3요소 등에 제약을 받는다. 그러나 응력집중을 최소한으로 완화하고 배향에 의한 변형이 적은 형상을 선택하는 것을 기본으로 한다.

Inkjet Printer 모델에 적용되는 Flip은 외관품목이므로 Weldline과 Airtrap이 발생하면 안된다. 따라서 Gate의 개수를 하나로 성형해야 하며 Gate의 위치에 따른 압력 감소를 검토한다. Fig. 1에는 최초의 설계안에 따른 Surface model을 나타내었다. 그림에서 보이듯이 Gate의

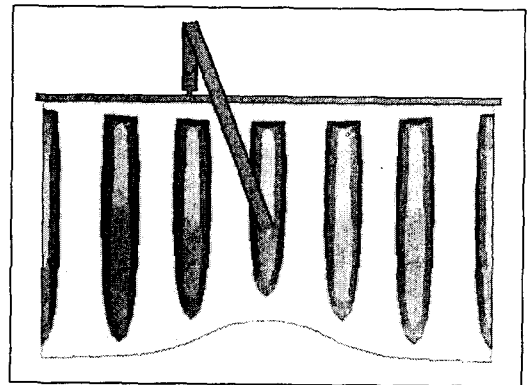


Fig. 1 Original Flip model

위치가 제품의 중앙에서 좌측으로 치우쳐져 있음을 알 수 있다. 성형조건으로서 사용수지는 PC LEXAN 121이고 사출시간은 1.5초, 수지 온도는 310℃이다. 이 모델에 대한 해석 결과를 Fig. 2(a)에 나타내었으며 최대 사출압이 138 MPa인 것을 알 수 있다.

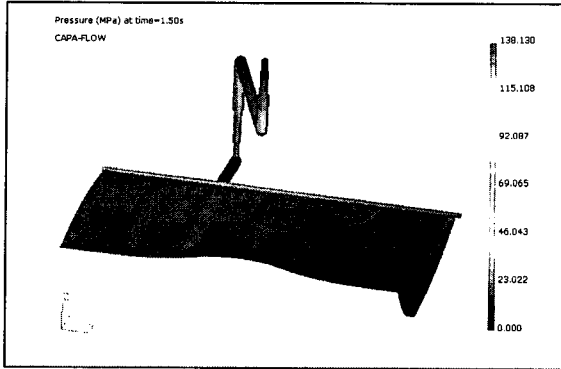


Fig. 2 (a) Pressure distribution of Original Flip model

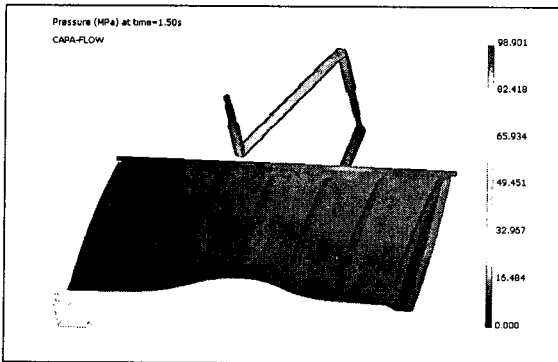


Fig. 2 (b) Pressure distribution of Modified Flip model

일반적으로 러너 쪽의 압력이 높고 캐비티에서 마지막으로 충전되는 부분으로 갈수록 압력이 낮아진다. 충전 중 수지 유동의 근원은 압력 구배(압력차)이며 수지는 압력 구배 방향으로 움직이게 된다. 금형 내 압력의 크기는 수지의 유동 저항성에 의존하며 고점도 수지일수록 고압이 필요하게 된다. 또한, 두께가 얇은 부위나 단면이 작은 러너 및 유동 거리가 긴 경우에는 더 큰 압력 구배가 필요하다.

사출압을 감소시키기 위해 모델을 분석한 결과 제품의 오른쪽에 위치한 연결 부위를 충전시키기 위해 압력이 많이 상승하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 Gate의 위치를 중앙에서 우측으로 이동시켜 해석한 결과를 Fig. 2(b)

결과를 그림 2(b)에 나타내었다. 최대 사출압이 98.9MPa로서 처음 설계안에 비해 28.4%의 개선 효과를 얻을 수 있다.

3.2 Rear Cover 모델에 대한 Weldline 문제 해결

Inkjet Printer 모델에 적용되는 Rear Cover 모델의 경우 외관 품목이므로 Weldline이 중요한 문제가 된다. 웰드 라인은 수지가 캐비티내에서 핀이나 코어 주위를 흐르거나 또는 2개 이상의 유동 선단이 다시 합류할 때 완전히 융합하지 않고 실 모양의 가는 선이 표면에 생기는 현상이다. 성형품 상에 존재하는 웰드라인은 웰드라인의 노치부 형성에 의한 강도상이나 외관상의 가는 선이나 웰드라인부의 색상변화와 같은 외관 품질상의 문제를 야기할 수 있다.

웰드 라인부의 강도는 여러 가지 이유에 의해서 웰드 라인이 없는 부위보다 약하게 된다. 그 이유를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 웰드 라인부위에서 볼 수 있는 노치는 응력 집중부로 작용한다.
- 2) 유동 선단 사이에 존재하는 공기는 유동 선단의 완전한 결합을 방해한다.
- 3) 웰드 라인 부위에서 수지 방향성은 유동 선단의 인장 특성에 의해서 수지의 주 흐름방향에 수직이 된다.

웰드 라인의 위치를 결정하는 가장 큰 요인은 게이트의 위치이다. 컴퓨터를 통한 수지의 충전 패턴을 확인함으로써 웰드 라인의 위치를 확인할 수 있다. 따라서 게이트의 위치를 변경함으로써 웰드라인의 영향이 적은 부위로 옮길 수 있다. 또는 대형, 다점 게이트 사용시에는 밸브 게이트를 사용하여 밸브 노즐의 개폐를 조절하여 웰드 라인의 위치를 옮기거나 제거한다.

Fig. 3(a)에는 최초의 설계안에 따른 유동 패턴을 나타내었다. 유동패턴이 만나는 제품중앙부위에서 Weldline이 발생하는 것을 알 수 있으며 이 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 그림에서 작은 사각형은 Airtrap의 발생 위치를 나타낸다.

제품의 중앙부위에 발생하는 Weldline을 제거하기 위해 Gate의 위치를 상단부로 이동하여 해석한 결과를 그림 4(a)에 나타내었다. 유동 패턴에서 확인할 수 있듯이 Gate 2개를 상측으로 이동함으로써 상측에서 작은 Weldline 발생하지만 중앙 부위의 큰 Weldline은 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다. Gate 위치의 변경에 따른 압력값을 비교해본 결과 기존 모델의 76.7 MPa에 비해 개선 모델의 경우

80.5MPa로서 압력값은 크게 차이나지 않으므로 사용에 문제가 없음을 알 수 있다.

4. Gate 개수 조절

4.1 Mold Frame 모델에 대한 성형성 문제 해결

게이트의 수량은 가능한 다수 게이트를 사용하지 않는 것이 좋다. 제품에 한 개 이상의 게이트 사용은 적당한 유동 및 충전시간, 그리고 유동거리가 짧은 경우와 유동방향변경 등 특별한 목적을 위해서만 사용해야 한다. 이 기술은 특히 유리섬유가 강화된 수지에서 유리섬유의 방향성에 의한 휘는 현상의 최소화를 위해 종종 사용된다. 게이트의 추가는 수지의 유동 선단부를 가산시켜 더 많은 웰드라인을 만든다.

유동 Balance를 유도하는 과정에서 사출압이 지나치게 높거나 미성형 문제가 발생할 가능성이 있는 경우 Gate 추가에 의한 유동 Balance 조절방법을 일반적으로 많이 사용한다. 또한 Weldline이나 과보압이 문제가 되

는 경우는 Gate 제거에 의한 유동 Balance 조절방법을 사용한다. 이 방법은 Scrap으로버려지는 수지의 양도 높거나 미성형 문제가 발생할 가능성이 있는 경우 Gate 추가에 의한 유동 Balance 조절방법을 일반적으로 많이 사용한다. 또한 Weldline이나 과보압이 문제절감할 수 있으며 Gate의 개수감소에 따른 Weldline 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 장점이 있는 반면에 미성형등과 같은 문제점을 야기할 수 있다.

LCD에 사용되는 Mold Frame의 경우 제품의 두께가 매우 얇아 미성형(Short Shot) 문제가 많이 발생한다. 미성형이란 불완전 충전, 즉 사출 압력부족, 게이트 단면적의 과소, 재료의 용융 정도 과소 등의 원인에 의해서 성형 재료가 금형 캐비티 내에 완전히 충전되지 않는 현상을 의미하며 각각의 원인에 대한 대응방법이 다르다. 이를 간략히 정리하면 다음과 같다.

1) 금형구조상의 원인과 대책

a) 스프루, 런너, 게이트가 너무 작을 때 압력강하가 크게 되고 유동성이 나빠지므로 크게한다. 스프루 입구 PC, PPO계 수지에 대해서는 최저 ϕ 필요하다. 런너의

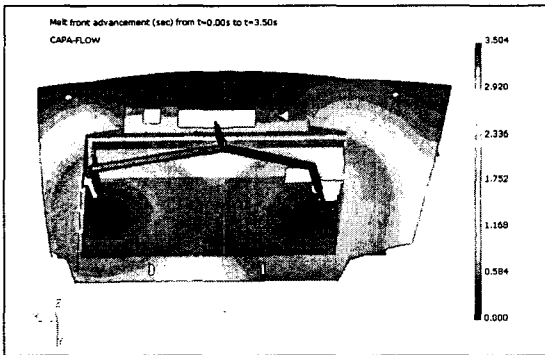


Fig. 3(a) Flow Pattern of Original Rear Cover model

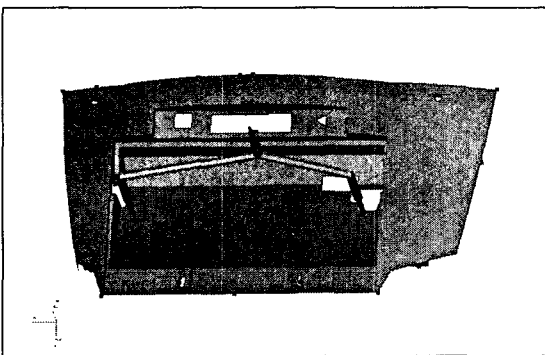


Fig. 3(b) Weldline plot of Original Rear Cover model

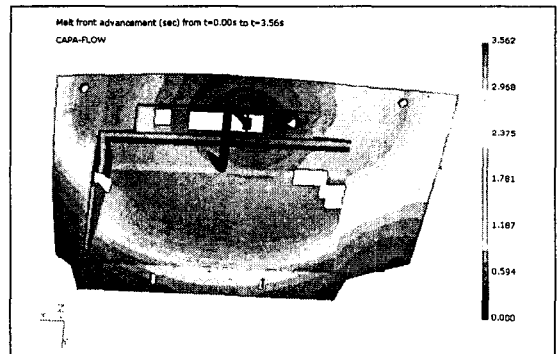


Fig. 4 (a) Flow Pattern of Modified Rear Cover model

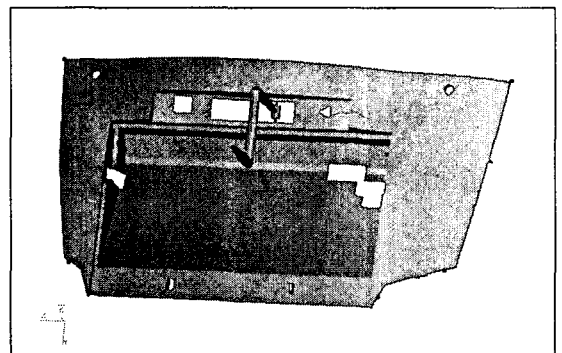


Fig. 4 (b) Weldline plot of Modified Rear Cover model

형상은 원형이나 사다리꼴형을이용하고 필요이상으로 런너는 길게 하지 않는다.

b) 제품의 두께가 얇은 경우

박육성형용(1.5mm 이하) Grade를 사용하거나 수지의 유동성을 좋게 한다.

2) 사출조건상의 원인과 대책

a) 사출압, 수지온도가 낮은 경우

점도가 크게되고 유동성이 저하하므로 실린더 온도, 금형온도를 높이고 사출압을 올리면 좋다.

b) 사출량 부족의 경우

실린더내의 사출계량을 충분히 하여 공급량을 많이 한다.

c) 사출속도가 느린 경우

수지의 금형내 유입중에 냉각할 수 있는 시간이 많아 유동성을 잃게되므로 사출속도를 높여 냉각 이전에 충전을 완료할 수 있도록 하여야 한다.

d) 금형온도가 낮거나 국부적인 냉각이 일어난 경우

냉각수의 온도를 높이고 유량을 감소하여 금형의 온도를 올린다. 또한 부분적 냉각회로를 수정할 필요가 있다.

3) 사출기계상의 원인과 대책

a) 성형기의 용량부족의 경우

가열시간의 연장 및 스크류회전수의 증가 및 배압의 증가로 해결할 수 있다. 또 배압의 증가에 따라 용융수지의 밀도가 커지고 용량이 증가하게 된다. 광택의 향상이나 은줄의 감소에도 도움이 된다.

b) 공급능력이 부족할 경우

능력이 큰 기계로 변경해야 한다. 일반적으로 성형기의 가스화능력은 카달로그 값의 80%정도로 생각하면 된다. 또 보통 사용할 경우 카달로그 값의 30~60%의 범위에서 사용하면 체류에 의해 탄화가 발생할 수 있다.

Mold Frame의 경우 제품의 두께가 3.1mm에서 0.47mm로서 두께의 변화가 매우 심한 편이고 다른 제품에 비

해 성형성이 까다로우므로 Gate의 개수를 증가시켜 가며 성형상의 문제점을 해결하였다. 그림 5는 Gate가 7개인 경우에 대한 해석결과이다. 0.9초까지의 유동패턴을 Fig. 5(a)에 나타내었는데 상단부와 하단부 좌측의 모서리가 가장 늦게 충전되는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)에는 사출압력을 나타내었는데 사출압은 141.68 MPa로서 매우 높은 사출압력이 필요하다.

서로 다른 부위의 압력 차이(압력 구배)는 충전 공정 동안에 수지의 흐름을 유발하는 요인이 된다. 용융 수지는 항상 압력이 높은 부위에서 낮은 부위로 흐르게 되며, 따라서 충전 공정 동안 수지의 주입구에서 최대압이 발생하고 유동 선단에서 최저의 압력이 발생한다. 압력 또는 압력 구배의 크기는 용융 수지의 유동 저항에 따라 달라지는데, 점도가 높은 수지는 금형 내부를 채우는 데 더 높은 압력이 필요하게 된다. 또, 살 두께가 얇은 부위나 직경이 작은 러너, 그리고 유동 길이가 긴 부분을 채우기 위해서도 큰 압력 구배를 가해 주어야 한다.

만족할 만한 성형품의 품질을 얻기 위해서는 균일한 압력 구배를 유지하는 것이 바람직하다. 유동 정체(flow hesitation), 과보압(over-packing), 아보압(under-packing)등이 발생하는 경우에 불균일한 압력 구배를 관찰할 수 있다. 그러므로 충전 공정 동안에 큰 압력 변화(조밀한 등압선)는 피하는 것이 좋다. 또한 성형시 사출압이 너무 높을 경우 플래시나 제품 성형 후 잔류응력에 의한 휨등을 유발할 수 있으므로 이를 해결하기 위해 Gate의 개수를 10개와 12개로 증가시켜 가며 해석을 수행하였다. Fig. 6(a)는 Gate가 10개인 경우의 사출압력이고 Gate가 12개인 경우의 사출압력을 Fig. 6(b)에 나타내었다. Gate의 개수 증가에 따라 사출압이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. Gate가 12개인 경우 최대 사출압이 93.2 MPa로서 7개인 경우에 비해 34%의 개선 효과가 있다.

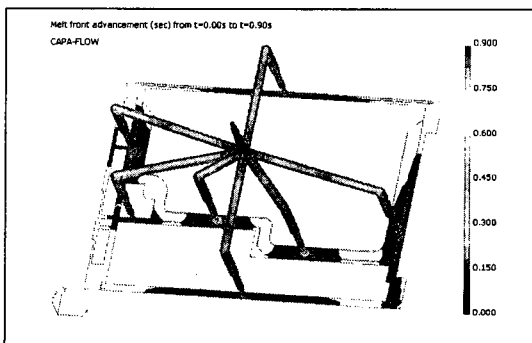


Fig. 5 (a) Flow Pattern of Mold Frame with Gate 7

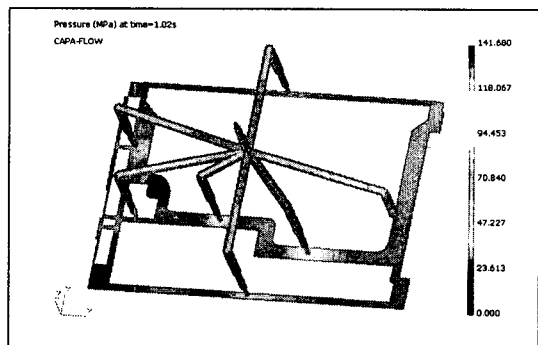


Fig. 5 (b) Pressure distribution of Mold Frame with Gate 7

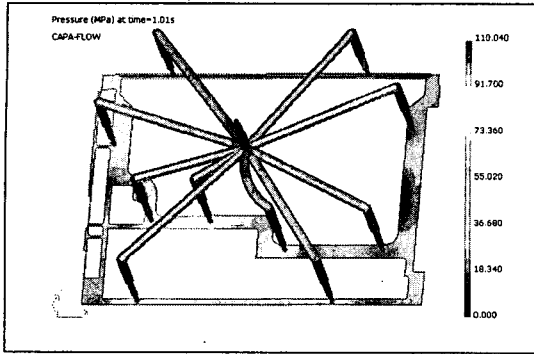


Fig. 6 (a) Pressure distribution of Mold Frame with Gate 10

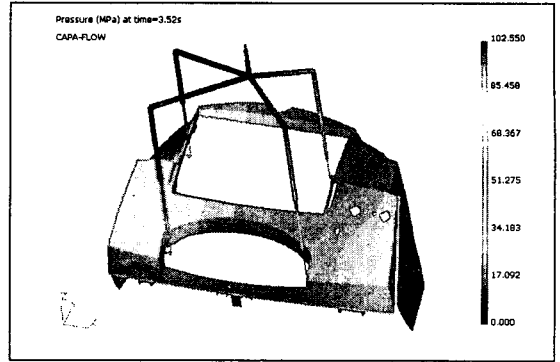


Fig. 7 (a) Pressure distribution of Top Cover with Gate 4

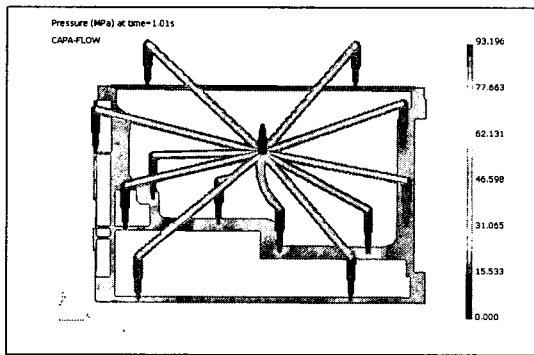


Fig. 6 (b) Pressure distribution of Mold Frame with Gate 12

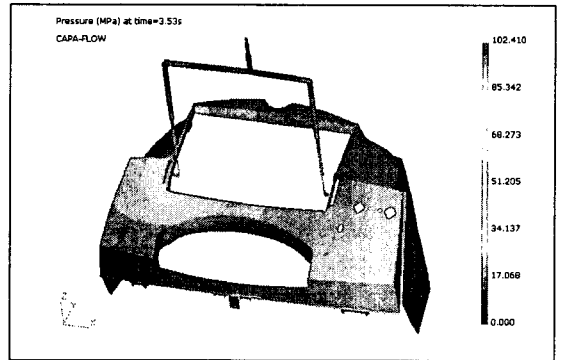


Fig. 7 (b) Pressure distribution of Top Cover with Gate 2

4.2 프린터 Top Cover모델에 대한 Gate 개수 감소

Top Cover 모델의 경우 최초 설계안은 Table 1과 같으며 Gate 가 4개인 경우에 대한 압력분포를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 압력 및 유동 패턴을 분석한 결과 4개의 Gate를 2개로 감소시켜도 성형상에 문제가 없을 것 같아 Gate를 2개로 줄이고 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 7(b)에 나타나 있으며 최대 사출압은 102.55MPa에서 102.41MPa로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 하지만 유동패턴을 분석한 결과 왼쪽부분이 오른쪽부분에 비해, 빨리 차는 것을 알 수 있다. 제품 왼쪽과 오른쪽 Gate에서의 압력을 비교한 결과 Fig. 8(a)와 같이 15 MPa정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 왼쪽 Gate(N610)의 압력이 오른쪽 Gate(N1855)에 비해 높게 나타나는데 이는 제품 좌측의 경우 충전이 완료되었는데 오른쪽 게이트는 충전이 계속 이루어지고 있어 생기는 현상이다. 이런 경우 좌측은 과포압(Overpacking)이 걸리고 우측은 아포압(Underpacking)이 걸려 휨의 원인이 된다. 이를 방지하기 위해 오른쪽 Gate의 직경을 2mm에

Table 1 Material Properties

사용수지	STAREX HR1360
Gate 개수	4개
금형온도	60℃
사출온도	215℃
사출시간	3.5초

서 2.3mm로 증가시켜 해석을 수행한 후 Gate에서의 압력을 나타낸 결과가 Fig. 8(b)에 나타나 있다. Graph를 비교해보면 기존의 결과에 비해 두 Gate의 압력차가 거의 없음을 알 수 있다. 또한 Gate에서의 최고 압력도 10 MPa이상 감소함으로써 충전 Balance가 잘 이루어진 것을 알 수 있다. 제품 전체의 압력 분포도 Fig. 9에 나타나 있듯이 11MPa정도 감소한 것을 확인할 수 있다. Gate의 개수 감소에 따라 전면부에 발생하던 Weldline이 제거됨으로써 제품의 품질도 획기적으로 향상되었다.

5. Valve Gate 사용

5.1 세탁기 Top Cover에 대한 Valve Gate 적용

여러 가지 목적으로 Valve Gate를 사용하지만 단순히 Gate 위치 조정이나 Gate 개수 조정만으로는 설계사양을 충족시키기가 힘들 경우에도 많이 사용한다.

Fig. 10에 나타나 있는 세탁기 Top Cover는 Cavity내 압력분포를 80(MPa) 이하로 해야 하며 제품 전면에 발생하는 Weldline을 후방으로 이동시켜야 하는 제품이다.

Fig. 10의 빨간 동그라미 영역에 Weldline이 생기지 않게 하기 위해 Valve Gate를 사용해야만 한다. 전면에 있는 Gate를 먼저 열고 사출을 시작한 후 3초 뒤에 후면 Gate를 Open하여 웰드라인을 후방으로 이동시켰다.

Fig. 11(a)는 후면의 Gate가 Open 직전의 충전패턴을 나타내고 있다. 충전상태가 제품의 후면부로 완전히 돌아선 패턴을 보이고 있기 때문에 웰드라인의 위치는 사

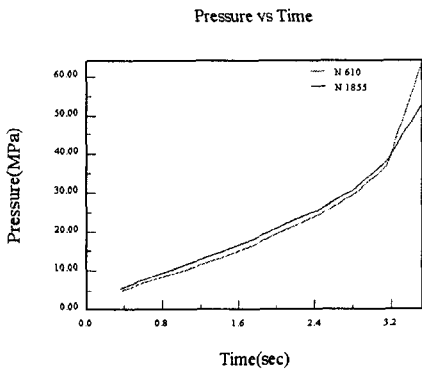


Fig. 8 (a) Pressure profile of Gate with equal diamete

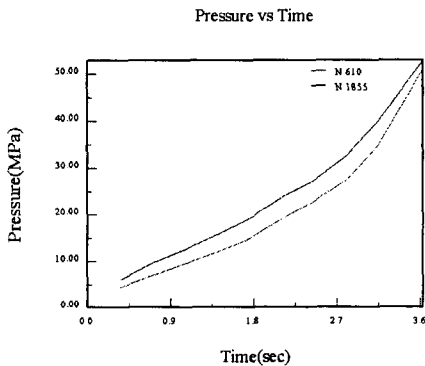


Fig. 8 (b) Pressure profile of Gate with unequal diameter

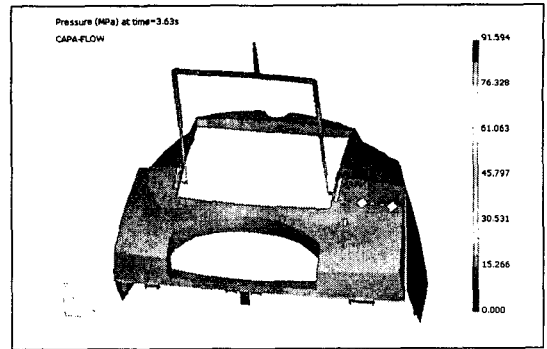


Fig. 9 Pressure distribution of Top Cover with modified gate diameter

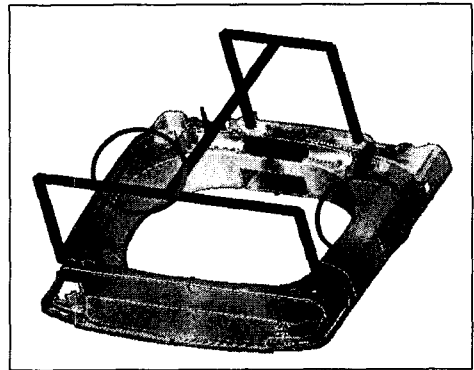


Fig. 10 Flow Pattern of Washing machine Top Cover

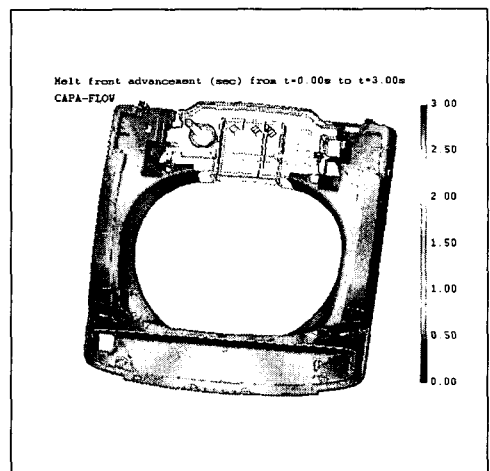


Fig. 11 (a) Flow Pattern of Washing machine before the valve gate open

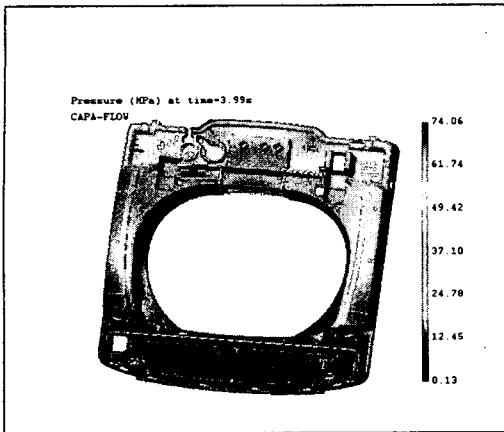


Fig. 11 (b) Pressure distribution of Washing machine Top Cover

사용자의 눈에 띄지않는 후면부 위치에 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 11(b)를 확인해 보면 최대 사출압이 74.06MPa로서 설계 요구사양인 80MPa를 넘지 않은 것을 알 수 있다.

6. 결론

유동 Balance를 조절함으로써 사출성형시 발생하는 문제점을 사전에 예방하기 위해 3가지 접근 방법에 대해 실제 해석 사례를 비교해 가며 설명하였다. 간단히 요약하면 다음과 같다.

(1) Gate 위치/직경 조정

Flip Model에 대한 Gate 위치변경으로 최대 사출압을 28.4% 개선하였으며 Rear Cover Model의 경우 Gate 위치 변경으로 제품 전면부에 발생하는 Weldline을 제거하여 품질을 개선하였다.

(2) Gate 개수 조절

LCD에 사용되는 Mold Frame에 대한 유동해석을 수행한 결과 Gate가 7개인 경우 제품 성형을 위해 141.68MPa의 높은 사출압력이 필요하였다. 과도한 사출

압은 제품의 변형이나 뒤틀림, 플래쉬등의 문제를 유발할 수 있으므로 Gate의 개수를 12개로 증가시켜 최대사출압을 93.2MPa로 낮출 수 있었다. 또한 프린터 Top Cover의 경우 4개의 Gate를 2개로 줄였음에도 불구하고 좌우측 Gate의 유동 Balance 조절을 통해 11MPa의 사출압을 낮출 수 있었다.

(3) Valve Gate 사용

세탁기 Top Cover에 대한 Valve Gate 사용을 통해 전면부의 Weldline을 제거하고 최대 사출압이 설계 요구사양을 넘지 않도록 유도하였다.

이외에도 제품의 살두께 변경에 의한 Balance 조절방법등 여러 가지가 있으나 지면 관계상 생략하였다.

참고 문헌

- (1) Chiang, H, H, Hieber, C. A. and Wang, K. K., 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, Part I. Formulation", Polym. Eng. Sci., Vol 31, pp. 116~124.
- (2) Chiang, H, H, Himasekhar, K., Santhanam, N. and Wang, K. K., 1993, "Integrated Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Injection Molding for Shrinkage and Warpage", J. Eng. Master. Tech., Vol. 115, pp. 37~47.
- (3) Middleman, S., Fundamentals of Polymer Processing, McGraw-Hill, Inc,(1977)
- (4) White, J. L., "Fluid Mechanical Analysis of Injection Mold Filling", Polym. Eng. Sci., Vol 15, pp. 44 ~ 50.
- (5) Hieber, C. A., and Shen, S. F., 1980, "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process", J. Non-Newtonian Fluid Mech Vol. 7, pp. 1~32.