

Family 금형 제작에서의 유동 밸런스 및 휨특성에 관한 연구

김무연[#]·김기환¹·송동주²·권창오³·이성희⁴·허영무⁴

A Study on flow Balance and Warpage Characteristics in Manufacturing of Plastic Injection Family Mould

M. Y. Kim, K. H. Kim, D. J. Song, C.O. Kwon, S.H. Lee, and Y. M. Heo

Abstract

In the present study, the characteristic of warpage and flow balance for family mould, which is able to mold parts with different shapes in a mold, is considered. To obtain an optimal gate and runner system, plastic injection molding analysis with commercial code is performed. Design and manufacturing of family mould is then carried out on the basis of this computer aided engineering result. Flow balance and warpage comparisons between experiment and numerical analysis give good agreement with each other. However, it was shown that results of warpage measured by CMM was about 20 ~ 55% lower than those of numerical analysis.

Key Words : Family plastic injection molding(패밀리 사출성형), Injection mold(사출금형), Flow balance(유동 밸런스), Warpage(휨), Flow analysis(유동해석), Deflection(변형)

1. 서 론

사출 성형 공정(injection molding process)은 복잡한 형상의 고분자 제품을 정밀하고 경제적으로 생산할 수 있는 가장 효율적인 생산 기술 중의 하나로 인식되어 오고 있어 사출성형품의 수요가 매년 증가하고 있는 추세이다. 일반적으로 사출성형공정은 충전(filling), 보압(packing), 그리고 냉각(cooling)과정으로 이루어져 있다. 충전 과정 중에 응용된 고분자 수지는 금형의 캐비티 내부를 채우게 되고, 충전 완료된 후에 고압을 가함으로써 캐비티 내부의 압력분포를 균일하게 만드는 보압 과정이 있게 되며, 보압과정 후에 수지를 충분히 응고시켜 제품이 완성되는 냉각과정을 거쳐 취출

(ejecting)이 이루어진다.

사출성형공정 중에 발생할 수 있는 결함에는 웰드라인(weld line), 에어트랩(air trap), 수축(shrinkage), 변형(warpage) 등이 있다. 이와 같은 결함들을 최소화하고 최종 성형품의 정밀도 및 기계적 강도 등을 향상시키기 위해서는 주어진 공정조건에 따른 최적의 금형형상을 설계하여야 하며, 성형에 따른 최적의 공정변수를 확보하여야 한다. 이를 위해서는 공정 중에 소재의 유동 및 온도의 압력분포의 정확한 예측이 필요하다. Family 금형이란 일반적으로 서로 다른 형상의 제품을 하나의 금형에서 동시에 사출 성형하는 것을 말하며 서로 다른 형상과 체적, 수지의 유동거리에 의해서 각 캐비티 간의 충전 불균일한 것으로 말미암아 과도한 사출압력이 발생하게 되고 잔류응력의 증가로 인하여 변형과 수축량이 증가하는 등 여러 가지 결함이 발생하게 된다. 각 캐

1. 세원E&I, 2. 영남대학교 기계공학과
3. ㈜동아정밀 기술연구소
4. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀,
E-mail : mykim@kitech.re.kr

비티 간의 유동을 균일하게 하기 위해서 게이트(gate)의 위치, 러너(runner)의 형상을 변화시키는 방법과 overflow 를 설치하는 등의 방법이 이용된다.

본 연구에서는 Family 금형의 제품 생산의 전 과정을 수행하고 그에 있어서 상용 플라스틱 사출 해석 프로그램을 이용하여 각 캐비티 간의 유동을 균일화 할 수 있는 게이트와 러너 시스템을 찾고 이를 바탕으로 금형제작을 한 후 사출품의 결함을 최소화하기 위한 사출 조건을 도출하는데 그 목적이 있다.

2. 모델의 선정 및 CAD 데이터 생성

Family 금형의 유동 balance 최적화와 변형량 최소를 위한 가장 적절한 게이트-러너 시스템 도입과 변형량을 최소화 할 수 있는 사출 조건을 도출하기 위해 본 연구에서는 그 단면의 두께 변화가 심하고 여러 형상의 곡면으로 이루어진 모형항공기용 프로펠러와 모형헬리콥터의 꼬리날개 모델을 선정하였다.

2.1 제품측정

먼저 선정된 모델을 3 차원 측정기(CMM)를 이용하여 정밀 측정을 실시하였으며 여러 지점의 포인트에 대한 좌표 데이터를 얻었다(Fig. 1).

2.2 제품모델링

이렇게 얻어진 점의 좌표 값을 Fig. 2 에서와 같이 상용 CAD 프로그램인 CATIA 로 읽어 들인 다음 각 점을 연결하는 곡선을 생성하고 그 곡선을 연결하는 surface 를 만든 후 solid 형태의 최종 모델을 생성하였다(Fig. 3).

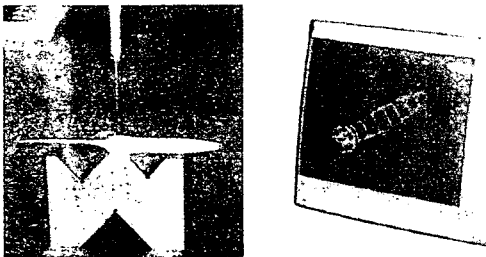


Fig.1 3-D measurement and point cloud data

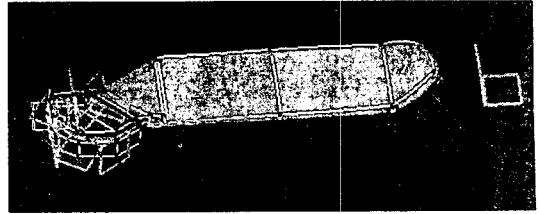
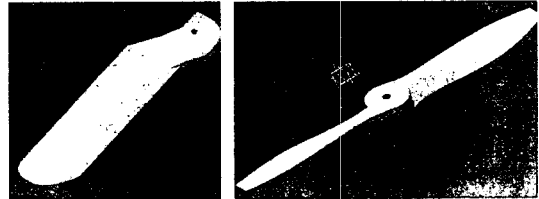
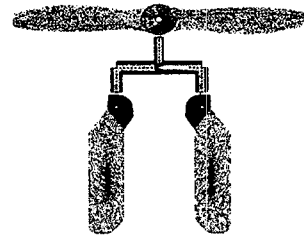


Fig. 2 Result of surface generation from point cloud

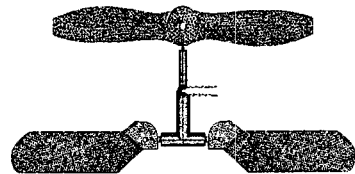


(a) Tale rotor modeling (b) Propeller modeling

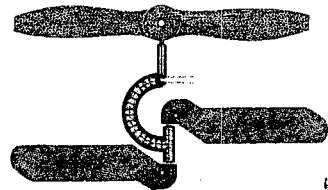
Fig. 3 Result of solid modeling



(a) Type-A runner system



(b) Type-B runner system



(c) Type-C runner system

Fig. 4 Design of runner system

3. 사출성형해석

3.1. 유동해석

유동을 해석하기 위하여 먼저 CATIA 에서 생성된 모델을 중립파일형태인 IGES 파일로 변환하여 저장하고 이를 C-MOLD 로 불러들이고 3 차원 모델에 격자계를 생성하여 Fig. 4(a),(b),(c)와 같은 3 가지 형상의 가진 러너 시스템을 설계하였다. 여기서 모형항공기용 프로펠러를 P1, 모형헬기의 꼬리날개를 P2 라 칭하고 각 러너 시스템에 대한 러너 길이, 러너 직경, 최대 유동길이를 Table 1 에 나타내었다.

본 연구에서는 대표적 결정성 수지로 수축률이 큰 PP(Poly-propylene)를 사용하여 성형실험 및 CAE 성형해석을 수행하였다. PP는 반투명의 기본 색상에 인장강도, 강성이 높으며 성형성, 연신성이 뛰어나 필름 등에 사용된다. Table 2 에 성형에 관계된 파라미터와 실험변수를 제시하였다. 금형상,하형의 온도를 40℃로 고정하고 냉각 시간을 각각 20 초, 30 초, 40 초로 변화시켜가며 각각의 온도에 대하여 해석을 수행하였고, 허용 변형량 범위 내에 들면서 총 사출 시간을 줄일 수 있는 가장 적절한 냉각시간을 찾은 후 이 냉각 시간을 고정하고 금형의 온도를 상형과 하형을 각각 40℃와 80℃사이로 변화 시키면서 해석을 수행하였다.

3.2 변형해석

사출 성형품에 있어서 가장 큰 결함 중 하나가 변형과 수축이다. 모든 수지는 고유의 수축률을 가지고 수축이 이루어지며 이를 금형 설계 단계에서 수지의 수축률에 비례하여 제품을 더 크게 설계함으로써 이 문제를 어느 정도 해결할 수 있으며, 수축량은 보압시간과 보압의 크기에 영향을 받는다. 본 연구에서는 보압의 크기를 충전 과정에서 발생하는 최대 사출압의 80%를 적용하였으며 보압 시간은 15 초로 모두 균일하게 설정하였다. 변형의 경우에는 성형품의 구조, 냉각 시스템(cooling system)의 배치와 냉각시간, 냉매(coolant) 온도의 영향을 주로 받는다. 현장접근적인 방법으로 변형이 많이 발생할 것으로 예상되는 부분에 보강재(rib)를 설치하거나 평면형상의 구조를 피하여 굴곡이 지게 제품을 디자인하는 등의 방법으로 변형을 피할 수 있으나 본 연구에서 선정된 모델들은 그 형상을 변화 시킬 수

없는 것이므로 사출 조건을 적절하게 변화시켜 변형을 줄이는 방법을 채택하였으며 허용 변형량을 ± 1 mm로 설정 하였다.

Table 1 Specification of runner system

Type		A	B	C	
P1	runner length (mm)	25	25	25	
	runner diameter (mm)	6	6	6	
	max. flow length (mm)	130.5	130.5	130.5	
P2	runner length	1 차	30	30	70
	runner length	2 차	20	17	8
	runner diameter	1 차	10	10	12
	runner diameter	2 차	8	8	10
	max. flow length		133.6	166.3	192.3

Table 2 Processing parameters & operation conditions

PP		Value	Unite
mold temp.(cavity, core)		40,80	℃
melt temp.		230	℃
Coolant temp.		20	℃
Cooling time		20,30,40	sec
Packing control method	time	15	sec
Packing control method	ratio	80%	MPa

3.3 유동 해석 결과

각 타입의 유동해석에 대한 Melt front advancement 결과가 Fig 5(a), (b), (c)에 나타나 있다. Table 3 은 금형온도 40℃, 냉각시간 40 초일때의 러너시스템에서의 충전완료시간을 나타낸다. 결과에서 보듯이 C 타입의 경우 P1 부분과 P2 부분의 시간 편차가 0.195 초로 가장 작게 나타났으며 특히 P2 부분으로 연결되는 러너시스템이 사출압력 강하가 가장 작은 형태로 설계되었기 때문에 C 타입의 러너 게이트시스템을 채택하여 금형을 제작 하였다.

3.4 변형 해석 결과

선정 모델의 특성상 x 방향이나 y 방향의 변형은 z 방향에 비하여 상대적으로 대단히 작은 값을 가지므로 무시하기로 하고 z 방향의 변형만을 측정 하였다(Fig. 6). 또한 모델 중 모형항공기용 프로펠러의 단면형상이 위쪽 부분은 리브(rib)의 역할을 하기 때문에 항상 +z 방향의 변형이 생길 것으로

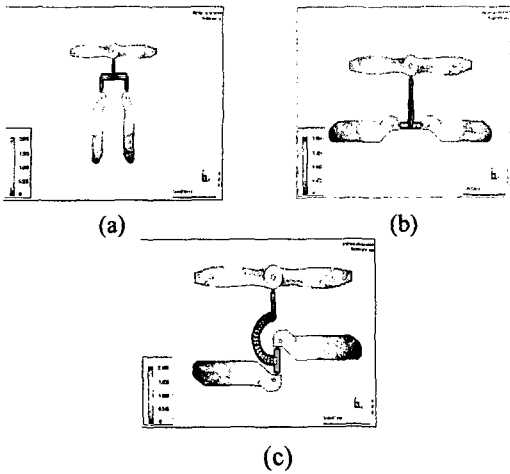


Fig. 5 Comparison of melt front advancement for type-A, B, C

Table 3 Comparison of fill time of each type

Part \ Type	P1	P2	P2-P1
A	1.790	2.015	0.225
B	1.660	1.890	0.230
C	1.985	2.181	0.195

Table 4. Cooling conditions and results of warpage analysis

No.	mold temp.($^{\circ}$ C)		cooling time(s)	displacement (mm)	
	cavity plate	core plate		P1	p2
1	40	40	20	+1.89	+0.01
2	40	40	30	+1.65	+0.00
3	40	40	40	+1.63	+0.00
4	80	40	30	+2.01	-0.01
5	40	80	30	+0.63	+0.01
6	60	40	30	+1.94	-0.01
7	60	80	30	+0.91	+0.01

예상하고 상,하형의 냉각 온도를 달리 해서 그 변형의 정도를 최소화 시켜보았다. 그 결과 P1 부분의 경우에 변형이 집중하여 발생하였고 P2 부분의 경우 변형량이 미세하였다. 이는 P1의 경우 그 단면의 두께변화가 극심한데 반하여 P2는 상대적으로 균일한 두께를 가지기 때문인 것으로 나타났다. 금형의 온도를 40° C로 고정하고 냉각 시간을 변화 시켜본 결과, 냉각 시간이 20 초 일 때는 +1.89 mm, 30 초에서는 +1.65 mm로 그 차이가

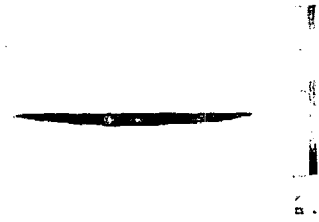


Fig. 6 Z-direction displacement at mold temp. (both 40° C)

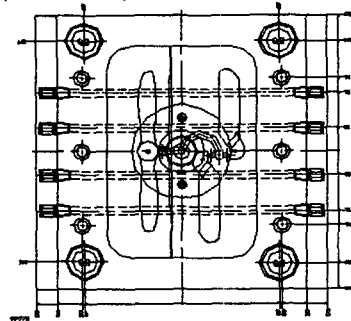


Fig. 7 Mold design of cavity plate

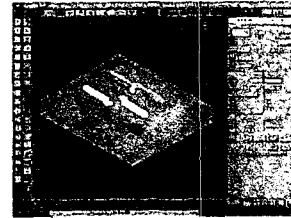


Fig. 8 CAM process of parting plane and core plate

약 0.23 mm이었으나 40 초에서는 +1.63 mm로 냉각 시간 30 초일 때의 경우와 비교하여 0.02 mm 정도의 차이밖에 보이지 않았다. 이 정도의 차이는 금형의 온도를 변화시킴으로써 해결할 수 있을 것으로 판단하여 최적의 사출 시간을 30 초로 설정하였다. 다음으로 냉각 시간을 30 초로 고정하고 상형과 하형의 온도를 변화 시켜가면서 해석을 수행한 결과 상/하형 각각 40° C와 80° C의 온도를 가질때 +0.63 mm로 가장 양호한 값을 가지며, 60° C와 80° C일때 +0.91 mm로 앞서 정한 허용 변형량 범위 안에 드는 것으로 나타났다. 반면 금형의 온도가 상형 80° C와 하형 40° C에서는 +2.01 mm로 오히려 변형량이 증가하는 결과를 보였다. 이것은 금형의 온도가 높은 쪽은 냉각이 천천히 되면서 많은 수축량을 동반하기 때문이다. Table 4는 금형 온도와 냉각시간에 따른 변형량을 나타내고 있다.

4. 금형 설계 및 제작

4. 금형 설계 및 제작

유동 해석에서 얻어진 결과를 토대로 CAD 프로그램인 Autocad 를 사용하여 2 차원으로 금형을 설계(Fig. 7)하고 이를 바탕으로 금형을 제작 하였다. 금형의 구조는 가장 일반적인 형태의 2 단 금형 구조를 채택하였고 그 크기는 가로× 세로× 높이 = 300× 350× 270(mm)이다. 게이트의 구조는 사이드 게이트 (side gate)를 적용하였다. 다음으로 CAM (Computer aided manufacturing)작업을 원활히 하기 위해서 3 차원 모델링 상에 분할면(Parting plane)과 하측 형판을 생성하고 CAM 작업(Fig. 8) 후 금형을 가공하였다(Fig. 9).



Fig. 9 Manufactured plastic injection mold

5. 해석과 실험 결과의 비교

5.1 충전 과정 비교

Fig. 10 은 성형품 총 체적을 100%로 환산했을 때 매 25%마다 충전된 양을 사출성형해석과 실제 사출품을 비교하였다. 그림에서 보듯이 CAE 사출성형해석을 통한 유동해석과 실제의 SHORT SHOT 을 내었을 경우 비슷한 유동경향을 띠을 알 수 있다.

5.2 변형량 비교

3 차원 정밀 측정기(CMM)를 통하여 사출성형된 성형품과 C-MOLD 해석 결과를 비교 하여 보았다. 결과에서 보듯이 항상 해석의 결과가 실제 측정값보다 최소 약 20%에서 55%의 높은 변형량을 보임을 알 수 있다. 이러한 원인으로서는 첫째로 사출성형해석 전용 software 가 가지고 있는 고유의 약 1.2 정도의 안전율과 둘째로 에러항의 증가와 마지막으로 측정시의 오차로 들 수 있다. 측정 시에 오차가 생기는 원인은 성형품의 중심부를 클램프로 고정하고 프로펠러의 양 끝단을 자유로이 놓아둔 상태에서 측정 프로브가 약 1N 의

힘으로 성형품을 누르면서 측정하기 때문이다. 이에 반하여 변형이 일어나는 방향은 항상 일치함을 알 수 있었다.

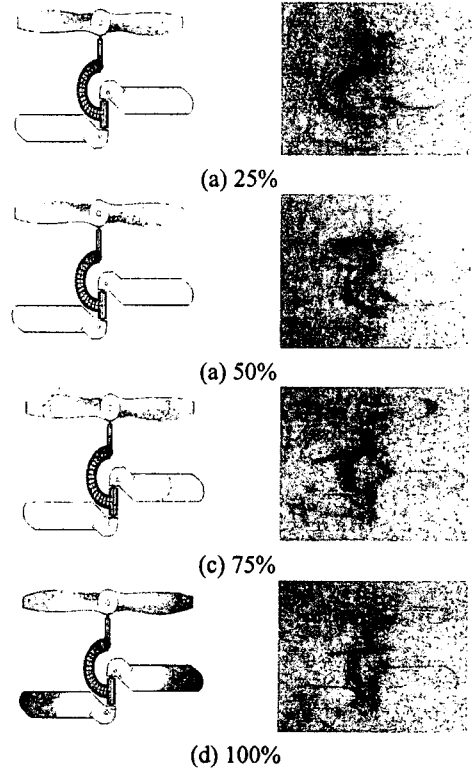


Fig. 10 Comparison of filling patters between numerical result and experiment

Table 5 Comparison of warpage between CAE analysis and 3D measurement

No.	CAE (mm)		CMM(mm)	
	P1	P2	P1	P2
1	+1.89	+0.01	+1.31	+0.007
2	+1.65	+0.00	+1.06	+0.005
3	+1.63	+0.00	+1.04	+0.005
4	+2.01	-0.01	+1.86	-0.005
5	+0.63	+0.01	+0.60	+0.005
6	+1.94	-0.01	+1.32	-0.004
7	+0.91	+0.01	+0.76	+0.004

6. 결 론

본 연구에서는 Family 금형에서의 유동밸런스 최적화와 변형량 최소화를 위한 연구를 위해 모

형항공기용 프로펠러와 모형 헬리콥터의 꼬리날개 모델을 선정하였다. 플라스틱 사출 성형의 전 과정을 수행함에 있어서 삼차원 정밀측정기의 CAD 데이터를 이용하여 역설계 작업을 수행하였다. 또한 상용 플라스틱 사출 성형 CAE 시스템으로 Family 급형의 유동 밸런스 최적화와 변형량 최소화를 위한 가장 적절한 게이트-러너 시스템을 도입하였으며, 변형량을 최소화 할 수 있는 사출 조건을 도출하였다. 이러한 결과를 사출 금형 설계 및 제작, 시사출에 반영하였고 실험적인 방법과 CAE 를 연계하여 수행하여 그 타당성을 입증해 보였다. 제시된 모델에 대한 최적의 사출 조건들은 다음과 같다.

- (1) 금형 온도: 상형 -40℃, 하형 -80℃
- (2) 냉각 시간: 30 초
- (3) 변형량(z-direction): +0.63 mm

마지막으로 향후 다수개의 서로 다른 형상을 갖는 플라스틱 제품 사출성형을 위한 Family 급형의 제작에 있어서 본 연구에서와 같은 접근 방법이 효과적으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Hieber, C. A. and Shen, S. F., 1980, A Finite Element/Finite Difference Simulation of The Injection-molding Filling Process, Journal. of Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 7, pp. 1~32.
- [2] Wang, K. K., etc., 1983, Computer Aided Design and Fabrication of Molds and Computer Control of Injection Molding, Process Report No. 10, Cornell Univ.
- [3] Chiang, H. H., 1989, Simulation and Verification of Filling and Post Filling Stages of the Injection Molding Process, Ph. D. Thesis. Cornell Univ.
- [4] 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, and Sci., Vol. 31, pp. 116~124.
- [5] Chiang, H. H., Hieber, C. A. and Wang, K. K., 1991, A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, Part II : Experimental Verification, Polym, Eng, and Sci.,

Vol. 31, pp. 125~139.

- [6] C-MOLD User's Manual, 1992, AC Technology, USA
- [7] MoldFlow User's Manual, 1992, MoldFlow Pty Ltd. Aus