

플라스틱 랙기어의 사출성형 해석에 관한 연구

김형국*.#

*창원문성대학교 스마트기계자동차공학부

A Study on Injection Molding Analysis of a Plastic Rack Gear

Hyung-Kook Kim*.#

*School of Smart Mechanical & Automotive Engineering, Changwon Moonsung University

(Received 05 May 2020; received in revised form 24 May 2020; accepted 29 May 2020)

ABSTRACT

This study investigates the injection molding of a plastic rack gear and focuses on deflections in the part. The causes of deflections were found and resolved through a trade-off study by injection molding analysis. Based on a warpage analysis, the fiber orientation was found to be a dominant factor in the occurrence of deflections. Changes in the part design and various injection conditions were analyzed for their effects in reducing deflections. Based on the trade-off study, a new part bottom design, injection time, and melt temperature were recommended. A trial injection was done for the new plastic rack gear, and measurements showed that its flatness surpassed that of the original part and met the specified requirement. The short injection time, low melt temperature, and symmetric similar configuration of the part contributed to the reduction in deflections. Therefore, optimized gate design and injection conditions as well as a new part design were validated through injection molding analysis in this study.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Mold-Die Design(금형설계), CAE Analysis(CAE 해석), Plastic Rack Gear(플라스틱 랙기어), Warpage Analysis(변형 해석)

1. 서 론

산업현장에서 쓰이는 랙기어(rack gear)는 회전 운동을 수평운동으로 바꾸는 기어장치이다. 랙기어는 적절한 무게를 지탱하고 강성이 필요하여 대부분 금속재질로 되어있다. 이에 따라 랙기어를 많이 필요로 하는 완제품을 만들면 비례적으로 전체 무게가 증가할 수밖에 없다. 굳이 금속재 랙기어가 필요 없는 상황에선 오히려 플라스틱 랙기어

가 무게, 소음/진동, 비용 및 관리 편의성 측면에서 유리하며 이 경우 나일론 소재를 많이 사용한다^[1].

본 연구는 금속재 랙기어를 플라스틱 소재로 제작하는 방안을 마련하고자 시작하였다. 일반적인 랙기어의 형상은 한편에는 치차(gear)들이 배치되고 그 반대편에는 평면을 형성하는 기다란 바(bar) 모양을 갖춘다. 치차가 형성된 부분의 얇은 두께와 반대편 쪽에 형성된 평면부분에 상대적으로 두꺼운 두께가 혼재되어 있다. 이런 동일한 형상이 반복되어 기다란 모양을 갖춘 제품은 사출성형 시 변형을 유발하여 휘거나 뒤틀릴 가능성이

Corresponding Author : ihihome@daum.net

Tel: +82-55-279-5961, Fax: +82-55-279-5132

매우 크다^[2]. 이는 불균일한 수축에 따른 것으로 만약 변형이 어느 범위 이상이면 플라스틱 랙기어 사용시 진동, 소음을 유발하여 만족도가 떨어질 것이다.

이에 변형을 최소화하기 위해 제안된 몇 가지 제품 형상에 대하여 사출성형 해석을 수행하였다. 사출성형 해석을 통하면 실제 변형 경향을 예측할 수 있으며 생산자의 경험에만 의존하여 발생하는 시행착오를 줄일 수 있다^[3].

이 과정에서 적절한 사출조건을 찾고 제품의 평면도를 개선하기 위한 변형해석(warpage analysis)을 수행하여 변형이 최소화된 형상을 선정하였다. 이렇게 선정된 제품형상과 개선된 성형조건을 반영하여 시사출하고 기존 성형품의 변형량과 비교하여 연구의 유효성을 검증하였다.

2. 제품형상과 특성

제품 제원은 길이×폭×높이가 170×25×14mm, 잇수 27개를 갖는 플라스틱 재질의 랙기어이다. 랙기어의 양쪽 끝단에는 고정용 스크류가 설치될 홀이 각각 있고 치차가 있는 랙기어의 반대편 바닥은 네모난 모양의 테두리를 갖춘 평면 형상이 기본형(baseline)이다. 이 기본형 제품은 사출시 높이방향으로 과도한 휨변형이 발생하여 이를 개선할 목적에서 휨변형을 품질 특성으로 선정하였다.

Fig. 1에서 기본형 제품의 도면을 보여준다.

3. 사출성형 해석

3.1 해석절차 및 방법

사출성형 해석에 들어가기 전에 대상 제품(기본형)에 대한 형상을 3차원으로 모델링하여 격자작업(mesh)을 완료하였다. 사출성형에 사용될 수치 데이터를 입력하고 게이트 종류 및 위치 선정, 각종 공정조건 설정 등의 상세연구를 통해 최종적으

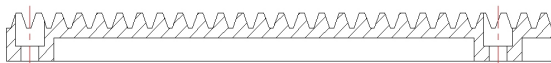


Fig. 1 Product drawing (baseline)

로는 변형이 개선된 형상을 선정하는 것을 목표로 하였다. 이 과정에서 유동해석, 냉각해석, 변형해석을 진행하였는데 본 연구에서는 제품변형이 최대 관심사이기에 변형해석 위주로 분석하였다.

본 해석과 사출성형에 사용된 수지는 KOPLA사에서 제조한 PA6 계열인 KDG1030 이고 유리섬유 강화재가 30.2% 함유되었다.

3.2 해석 조건

금형설계 인자들 중에서 유동 균일화에 가장 크게 영향을 주는 요소로 게이트의 위치와 형식이라는 사실을 반영하여^[4,5] 우선 이들에 대한 상쇄연구(trade-off study)로 시작하였다. 사출 후 수치에 함유된 섬유배향이 제품변형에 가장 큰 요인이라고 판단하여 제품의 형상(바닥면)을 변경한 새로운 제품들에 대하여 해석하고 그 결과를 분석하였다.

본 연구에서는 2종의 게이트 종류와 5종의 게이트 위치, 4종의 바닥면 형상, 5종의 사출조건에 대해 성형해석 하였으며 그 상세조건은 Table 1에서 보여준다. Fig. 2와 3에서는 case #1 ~ #12까지의 주요 특징을 보여주는데, 특히 #8 ~ #12까지는 제품 바닥면에 동일한 스파이크(spike) 구조를 갖는 형상이다.

Table 1 Analysis conditions for injection molding

#	Gate Type	Gate Location	Rack Gear Bottom	Injection Condition		
1	side	1-end	no-rib	T _i =5s T _m =270℃		
2		2-end				
3		2-side				
4	pin-point	2-top(long)				
5		2-top(wide)				
6	side	1-end	9-ribs	T _i =3s T _m =270℃		
7			21-ribs			
8			spike	T _i =7s T _m =270℃		
9					T _i =3s, T _m =240℃	
10						T _i =3s, T _m =300℃
11						
12			T _i =3s, T _m =300℃			

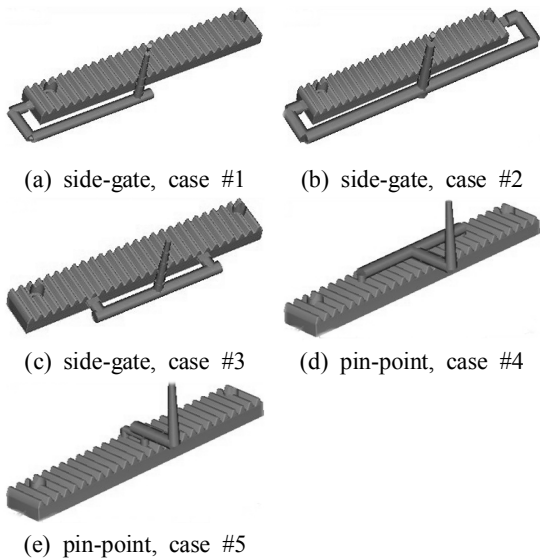


Fig. 2 Gate location trade study

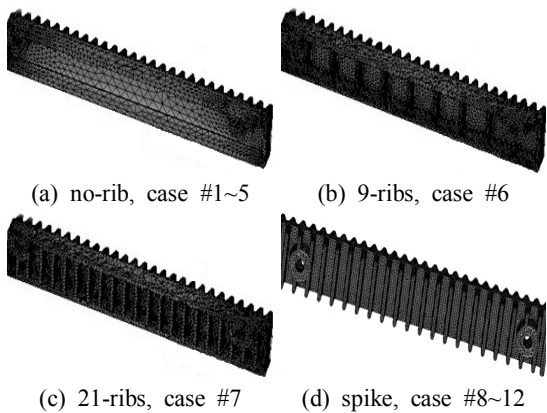


Fig. 3 Bottom configuration change trade study

3.3 해석 결과

3.3.1 변형 원인 분석

기본형 랙기어 제품(case #1)의 바닥면 평면도가 4.5로 매우 큰데 이를 사출성형 해석에서 재현하고 그 원인을 찾아보았다.

case #1의 XYZ-총변형량과 Z-방향 변형량을 Fig. 4에서 보여준다. 제품 중앙부분은 아래로 처지고, 양쪽 끝부분은 위로 처진 전형적인 바 구조물의 변형형태를 보여준다. case #1 ~ #5까지 서로

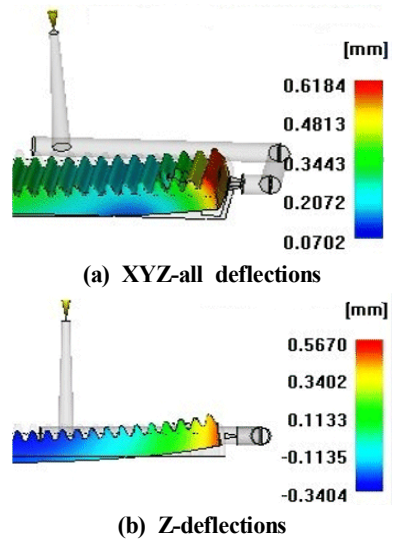


Fig. 4 Deflections of case #1

약간의 차이만 있을 뿐 모두 동일한 양상을 보였다. 이는 제품의 두께 편차가 크고(2t ~ 14t), 길이 방향으로 일직선인 형상, 그리고 제품 상하 비대칭성 때문에 과도한 변형을 유발하는 것으로 생각된다. 수축률 불균일이 제품 변형을 유발하는데 그 요인은 크게 3가지로 구분하여 냉각 편차(differential cooling), 수축률 편차(differential shrinkage) 그리고 섬유 배향(fiber orientation)이다 [6].

Fig. 5에서 이들 3가지 요인들이 총변형량에서 차지한 값들을 비교하였다. 냉각 편차는 $\pm 10^{-5}$ mm 범위에서, 수축률 편차는 ± 0.14 mm 범위에서 변형에 기여했지만 섬유 배향은 -0.41 mm ~ $+0.64$ mm까지 가장 큰 부분을 차지했다. 섬유의 배향이 가장 지배적인 인자로서 따라서 이를 해결하려면 제품 주요부의 형상과 기능을 제한하지 않는 범위 내에서 바닥면의 형상을 수정하는 방안이 바람직한 것으로 판단되었다.

사이드 게이트를 채용한 case #1 ~ #3의 XYZ-총변형량과 Z-방향 변형량을 비교해보니 기본형(case #1)이 게이트 2개를 옆면에 설치한 경우(case #3)보다 변형이 더 적은 것을 보여주었다.

핀포인트 게이트를 채용한 case #4, #5의 XYZ-총변형량과 Z-방향 변형량을 기본형과 비교했더니

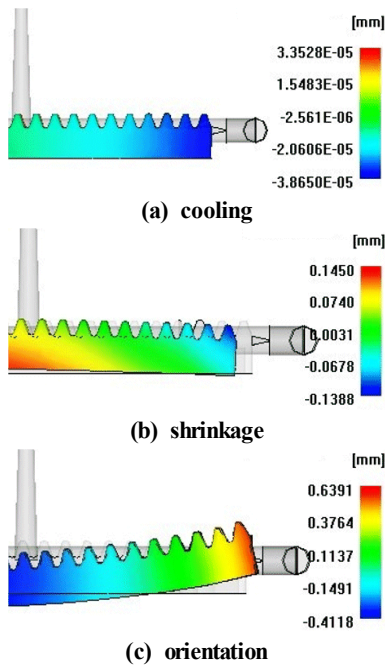
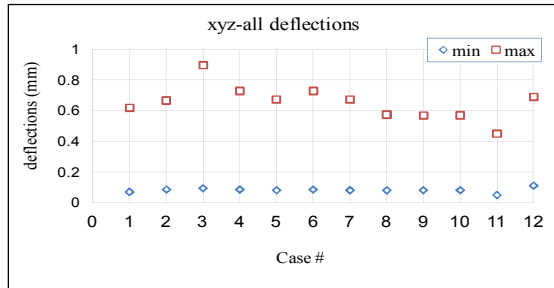


Fig. 5 Deflection effectiveness depending on 3-causes



(a) XYZ-all deflections vs. case #



(b) Z-deflections vs. case #

Fig. 6 Deflections for each case

변형이 약간 더 심한 결과를 보여주었다. 따라서 게이트 위치상 한쪽 끝에서 수지를 주입하는 것이 변형 최소화 측면에서 바람직하다고 판단되었다. Fig. 6에서 각각의 case별로 변형량 예측치를 보여 준다.

3.3.2 수축과 변형해석

기본형 바닥면의 사각 테두리 내부가 비어있는데 반해 새로 변경된 3가지의 형상은 9개의 단순 리브를 가진 형상(case #6), 21개의 리브를 가진 형상(case #7) 그리고 테두리 없이 23개의 스파이크를 가진 형상(case #8) 이다.

case #6, 7, 8의 XYZ-총변형량을 #1과 비교해 보니 약간 증가하거나(#6, 7) 또는 감소한 수준(#8)을 보였다. 그런데 Z-방향 변형량을 비교해 보면 case #6, 7, 8이 #1 보다 변형이 줄었다. 즉 제품 중앙부의 아래로 처짐이 12% 감소하거나(#6, 7) 35% 감소하였고(#8), 특히 #8은 양 끝단 위로 처짐도 36% 감소하였다. 이것으로 볼 때 리브 형상은 변형감소에 도움이 되지 않고 스파이크 구조가 효과적인 것으로 보이며 이는 반대편 치차와 유사한 구조로 좀 더 상하 대칭에 가깝기 때문일 것으로 판단된다.

사출조건이 변형을 최소화 할 수 있는지를 검토하기 위해 충전시간을 바꿔보고(case #8 ~ 10), 수지 용융온도도 바꿔보았다(case #11, 12). 먼저 충전시간에 따른 영향을 비교했더니 XYZ-총변형량 측면에선 별 차이가 없었으나 Z-방향 변형량 측면에선 충전시간 3초를 채택한 case #9이 우수하였다. 이는 빠른 충전시간이 변형을 최소화하는데 유리하다는 일반적 경험에서 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에 사용된 수지의 추천 용융온도는 240°C ~ 300°C 이다. 이에 용융온도에 의한 영향을 확실히 보기 위해 240°C (case #11), 300°C (case #12)를 선정하여 해석했다. 그 결과 온도가 높은 경우보다 온도가 낮은 경우에서 XYZ-총변형량 및 Z-방향 변형량이 모두 감소하였다. Z-방향 변형량 측면에서 보면 case #11이 case #8보다 34% 감소하였고 기본형인 case #1 보다는 58% 감소하였다. 이는 수지의 용융온도가 낮을수록 변형을 감소에

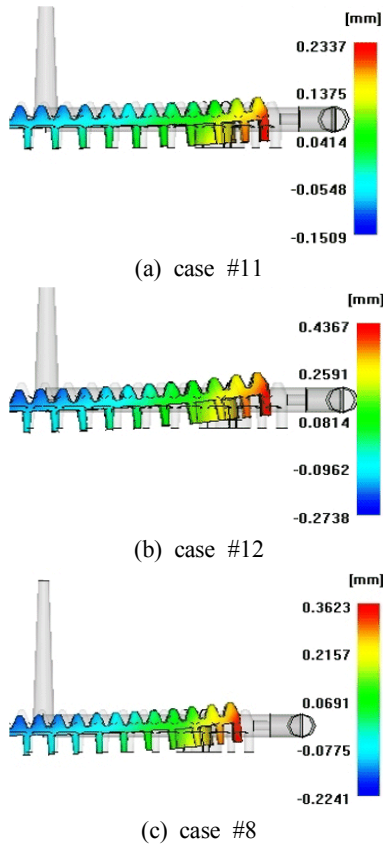


Fig. 7 Z-Deflections depending on injection condition

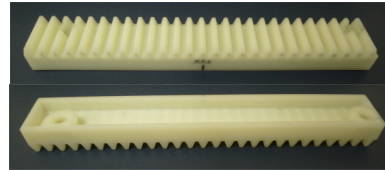
유리함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7에서 용융온도를 변화시킨 경우(case #11, 12)와 기존 용융온도(270°C)를 사용한 경우(case #8)에서의 변형량 예측치를 보여준다.

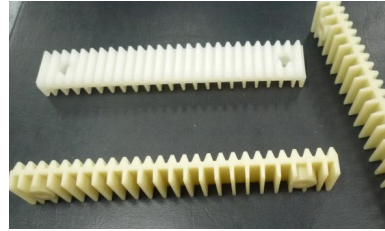
4. 시사출 결과 및 고찰

상쇄연구 결과 case #11이 가장 변형을 최소화할 수 있는 제품형상과 사출조건으로 생각되어 금형을 제작하고 시사출을 하였다. 사출기는 형체력 80ton 짜리로서 최대 사출속도 600mm/s인 고속사출기이며 충전속도는 20-80-100%, 보압은 후반부로 갈수록 점차적으로 감소시키는 다단 보압을 적용하였다.

Fig. 8에서 기본형 제품과 변경된 형상의 개선된



(a) baseline product (case #1)



(b) new design product (case #11)

Fig. 8 Baseline product vs. new design product

시제품을 보여준다. 시제품을 육안으로 확인한 결과 플로우 마크(flow mark)나 웰드라인(weld line) 등의 불량은 보이지 않았고 그동안 문제가 되었던 변형도 많이 감소된 것으로 보였다. 두 개 제품의 평면도를 측정한 결과 기존 기본형은 4.5mm, 시제품은 0.3mm로 나타났다.

시제품의 수지 내부에 포함된 유리섬유가 유동 경로를 따라 들어가다가 윗면의 나사와 아래면의 돌기 사이에서 비교적 대칭적인 방향성을 가지도록 분포된 것으로 보인다. 그리고 이런 특성이 기존 기본형에서 문제된 과도한 변형을 개선한 주요인이 되었다고 판단된다.

고분자 주쇄는 유동방향과 일치하는 배향을 갖지만 수지에 포함된 유리섬유는 유동상태에 따라 보다 복잡한 방향의 배향성을 갖는다. 배향은 수축율의 이방성을 야기하고 이로 인해 수축을 편차를 발생시켜 제품의 형태변화를 유도하는 힘이 된다.

변형을 해결하기 위해서는 균일한 살두께, 냉각(속도, 온도분포), 제품의 기하학적 대칭성 유지, 다단 보압 설정, 늦은 사출속도 등의 다양한 방안이 있다^[7]. 문제는 이런 요인들이 변형에 서로 상호작용하여 영향을 주므로 변형을 최소화하기 위해서는 다양한 상쇄연구가 필요하다는 사실이다.

본 연구에서는 유리섬유의 배향이 가장 지배적인 인자로 판명되어 기존 랙기어 제품의 형상을

변경하여 평면도를 대폭 개선하여 제품의 요구도를 만족하였다.

5. 결 론

일반적으로 플라스틱 제품이 비대칭형이고 두께 편차가 크며, 길이 방향으로 일직선인 형상을 가진 경우에 이를 사출하면 휘거나 뒤틀리는 변형을 유발할 가능성이 크다. 불균일한 수축이 제품 변형의 원인인데 이를 해결하는 방안에는 여러 가지 복잡한 요소들이 관여한다.

본 연구에서는 플라스틱 랙기어를 사출할 때 기존 형상 제품에서 발생하는 변형의 원인을 찾고 이를 개선하기 위해 사출성형 해석을 통하여 분석하였다.

변형해석 후 섬유 배향이 가장 지배적인 인자임을 밝히고 제품의 바닥면 형상을 변경하고 사출 조건을 바꾸어 가면서 해석하였다. 이런 해석결과를 바탕으로 제품 바닥면에 23개의 스파이크를 가진 형상에 대해서 충전속도 3초, 수지 용융온도 240℃가 추천되었다. 시사출 결과 평면도 0.3mm로 나타나 기존 4.5mm보다 대폭 개선되었을 뿐만 아니라 요구도 0.4mm를 만족하였다. 즉 빠른 충전시간, 낮은 수지 용융온도, 대칭형에 가까운 제품 형상설계 방안이 변형을 최소화 할 수 있는 요인이라고 판단된다. 이로써 사출성형 해석을 통한 게이트의 설계, 사출조건 선정, 제품 형상변경이 제품 품질향상에 기여하였다고 확인할 수 있었다.

REFERENCES

1. Lim, M. S., "Optimum Design of Plastics", Gijeon Press., pp. 387-388, 2003.
2. Lim, S. H., "Injection Mold Design", Bosunggak Press., pp. 452-455, 2004.
3. Han, S. R., "A Study on the Deformation Optimization of a Plastic Bezel Assembled on the Steering Wheel of an Automobiles", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 105~112, 2017.

4. Kim, J. M. and Lyu, M. Y., "An Application of CAE in the Optimization of Runner Size in Injection Molding", Transactions of Materials Processing, Vol. 15, No. 5, pp. 145-151, 2006.
5. Park, J. C. and Kim, K. M., "Determination of Gate Position Considering Robustness in Injection Mold Design", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp.113~118, 2017.
6. Choi, H. J., Park, C. W., and Choi, S. D., "Analyses on Deformation Patterns Depending on the Injection Process for Rear Lamp Reflectors of automotive," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9 No. 4, pp. 32-37, 2010.
7. Shin, N. H., Oh, H. S and Kang, S, K., "The Optimization of Injection Molding Process by CAE", Daekwang Press, pp. 254, pp.261-263, 2007.