



Seoul National University
College of Engineering
Department of Mechanical Engineering
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea

Fall 2022

Materials and Manufacturing Process
Final Report
(Team 5, REPLICAR)

Table of Contents

- 0. Introduction
- 1. Design
- 2. Manufacturing
- 3. Quality
- 4. Cost and Scale-Up

Team Members

- 2018 - 12988 김병주
- 2018 - 12663 이도현
- 2017 - 11556 이주형
- 2020 - 17460 김예준
- 2020 - 17789 김재완
- 2016 - 18528 김진수
- 2018 - 12597 김백승
- 2018 - 17327 윤요한
- 2020 - 13899 송관형

0. Introduction

0.1 Company Introduction

Team ‘REPLICAR’는 총 9인으로 구성되어 있는 회사이며, 배터리로 주행하는 미니카 Chassis 부분과 결합할 수 있는 상판을 디자인하고 제작한다. 이때, Plastic injection molding 기법을 이용해 Quality 높은 제품을 대량 생산한다. 또한 조립 방식으로는 Press-fit의 방식을 선택하여 사용자의 편의성도 극대화한다.



Fig. 1 회사 소개

회사명은 복제품을 뜻하는 ‘Replica’와 차량을 뜻하는 ‘Car’의 합성어로, 점점 다양해지고 있는 실제 차의 차체 디자인을 미니카에 그대로 옮겨 담아 제조, 공정하겠다는 생각을 담아냈다.

0.2 Product Introduction

REPLICAR의 첫 제품은 유선형을 강조한 스포츠카 형상의 차량 상판이다. 실제 스포츠카의 형상을 오마주 하여 디자인을 진행하였기에, chassis와의 결합 시 실제 차량과 매우 유사한 형태를 떨 수 있다. 또, 후면의 리어 왕은 유체역학적인 강점과 함께 경주를 하는 차량을 떠올리게 하여 심미성을 더해준다. 해당 리어윙에는 회사명 REPLICAR을 양각으로 표현하여 회사의 Identity를 나타낼 수 있도록 하였다.

본 제품을 설계하고 제작한 과정, 그리고 결과물에 대한 분석과 피드백을 아래에 제시하겠다.

1. Design

1.1. Final design and detailed drawings of the product and mold

1.1.1 Product Design

본 제품의 제작에는 CNC 가공 및 몰드 결합 등을 고려하여 디자인이 지속적으로 변할 수밖에 없었다. 아래에 초기 단계와 최종 단계의 사진을 포함하여, 변화 과정과 그 이유를 담았다.

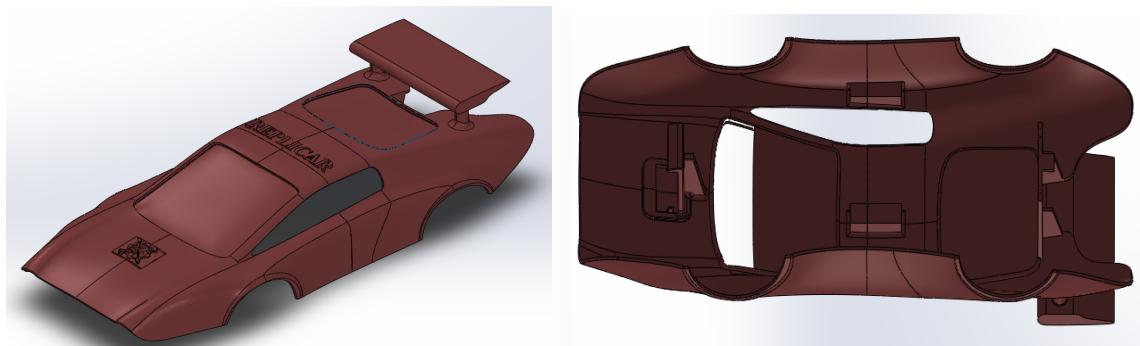


Fig. 2 초기 제품 디자인

초기 제품의 전반적 디자인은 위와 같다. 초기 제품에는, 미적인 요소와 역학적 요소를 모두 고려하여, 유선형의 스포츠카와 유사한 형태를 오마주 하여 디자인하였다. 또한 차의 보닛 부분에 회사의 로고와 차량 윗면에 회사의 이름을 양각으로 새겨 넣었다. 또 각 제품은 차량 전면부, 후면부, 레어 윙, 로고 부분, 총 4개의 부품으로 구성되도록 설계했다.

다만, 제품의 몰드 설계 과정을 고려하였을 때 차량의 전반적 형태의 단순화, 언더컷(undercut) 형상의 제거 등이 이루어졌고, 이에 따라 변한 최종 디자인은 아래와 같다.

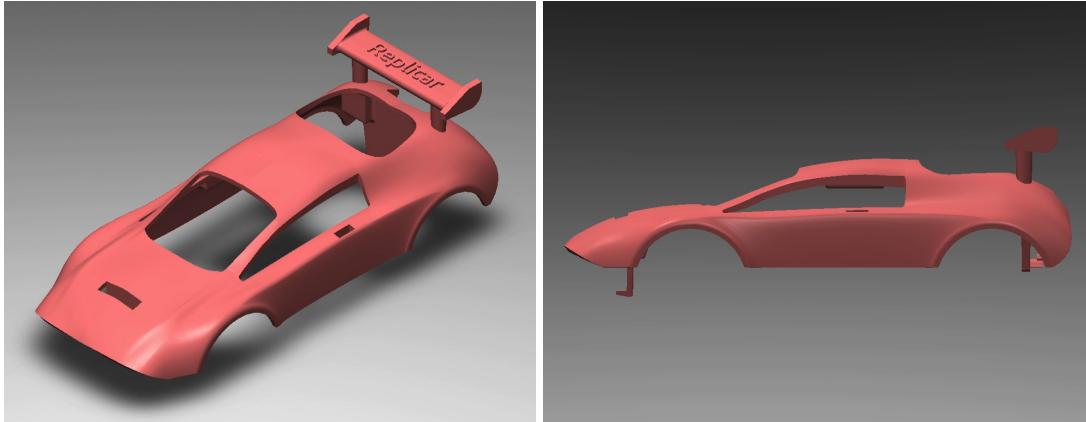


Fig. 3 제품 최종 디자인 - 전체

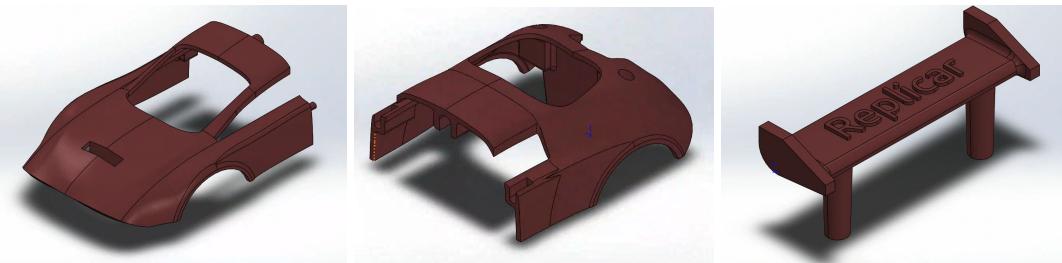


Fig. 4 제품 최종 디자인 - 전면부, 후면부, 리어윙

본 디자인에서 고려한 사항은 아래와 같다.

우선, injection molding 과정에서 undercut이 발생하지 않으면서, 분리와 결합이 편한 결합부 설계를 진행했다. 특히, 전면-후면부 결합과 수면부-리어윙 결합 모두 공차와 수축율을 고려하여 press fit 방식을 사용할 수 있도록 하였다.

둘째로, mold 제작의 적절한 편의와 injection molding 과정의 생산 용이성을 위해 파트의 개수를 4개에서 3개로 변경하였다. 이때, 기존에 있었던 로고가 새겨진 파트를 제작의 편의를 고려하여 제거하기로 결정했다.

셋째로, mold의 크기 제한을 고려한 전반적 형태 변경이 이루어졌다. 제작을 진행하는 injection molding 업체의 기계에 제한이 존재하므로, 그 제한에 알맞는 mold의 최대 크기가 존재하였다. 초기 디자인의 경우 해당 크기를 맞추는 것이 불가능한 길이와 폭을 가지고 있었기에, 적절한 재설계를 통해 크기를 조절하였다.

넷째로, 차량 윗면을 차지하는 창문 부분을 모두 뚫었다. 이를 통해 생산 단가를 절감하는 효과가 생겼고, 미세한 undercut 구조가 생기는 것을 방지하였다.

이러한 과정을 거쳐 완성된 차량의 디자인은 유선형을 강조한 스포츠카 형상을 뛴다. 또, 후면부 rear wing에는 양각으로 회사의 이름을 새겨 넣어 회사의 identity를 표현할 수 있도록 하였다. 구성은 injection molding의 효율을 위해 part를 총 3개로 나누어 설계하였으며, 각 part는 press fit 방식으로 간편히 결합되고 분리될 수 있도록 설계하였다.

1.1.2 Mold Design

1.1.1의 product design을 바탕으로 제작된 mold는 아래와 같다.

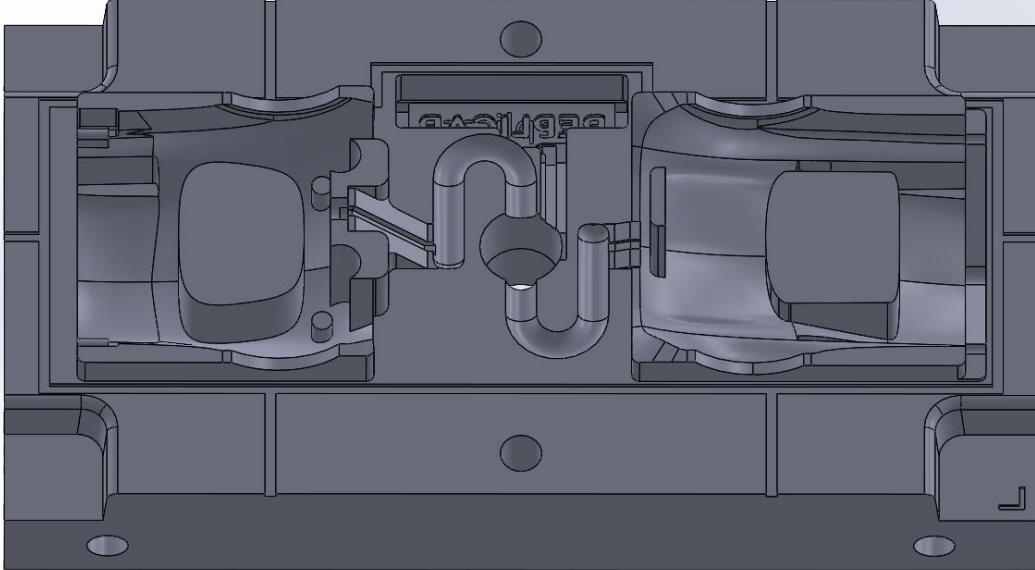


Fig. 5 상코어 몰드 디자인

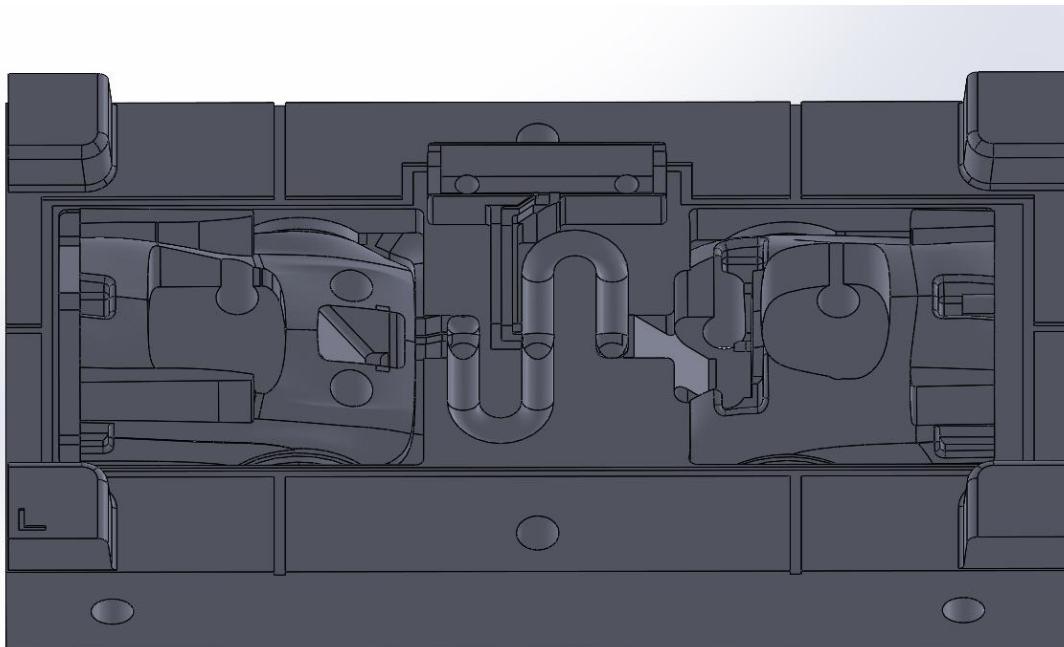


Fig. 6 하코어 몰드 디자인

중앙의 러너를 기준으로 전면부와 후면부를 각각 양 끝에 두고, 리어윙의 경우 러너 앞부분에 배치하였다. 또, 배치 과정을 포함한 몰드의 설계 과정 전반에서 ejection이 제대로 될 수 있도록 다양한 사항을 고려하였다. 우선, 각 파트가 펀이 누르는 힘을 균형 있게 받아 eject가 잘 이루어질 수 있도록 eject pin의 위치와 파트 간의 위치 관계를 적절히 설정하였다. 또, 정상적인 eject를 위해 구배 분석을 통해 역구배를 제거하였고 수직 각을 갖는 부분에는 draft angle을 부여했다.

몰드 설계에는 injection의 시간 균형을 포함한 quality도 고려하였는데, 이는 다음 항목에서 상세히 후술하도록 하겠다.

1.2. Computational simulation of injection molding process

1.2.1 Plastic Flow Simulation

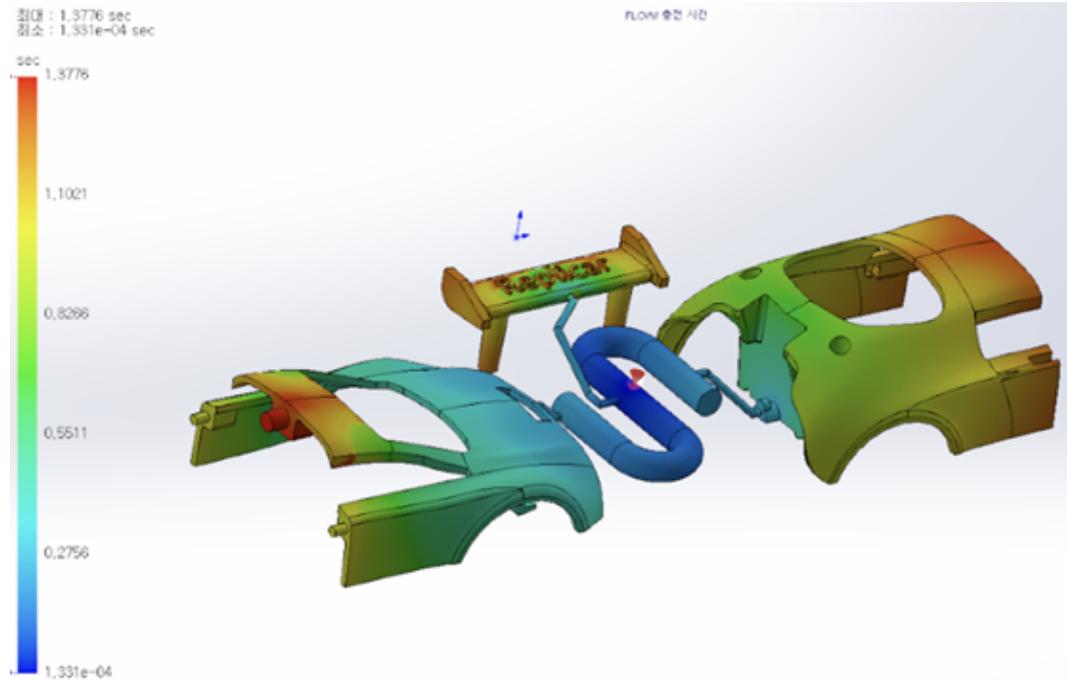


Fig. 7 Entire Plastic Flow Simulation

모든 파트가 injection 도중 압력을 균일하게 받으며 cooling 과정에서 열전달의 불균일함이나 열수축의 영향을 덜 받기 위해서는 각 파트 끝부분에 plastic이 도달하는 시간의 균형이 매우 중요하다. 이를 위해 러너에서 각 파트로 뻗어 나오는 가지의 두께를 적절히 조절해가며, 시간의 균형을 맞추었다. 시뮬레이션 결과, 사출에 걸리는 최대 시간은 1.3776초이며, 이는 매우 짧은 시간으로 생산 cycle과 경제성 측면에서 매우 좋은 수치이다. 차량 상판의 경우 매우 얇게 디자인이 되어 있기에 이러한 시간이 나타난다고 생각해 볼 수 있다. 다만 시뮬레이션 결과 예상 가능한 defect도 확인할 수 있었는데, 이를 다음 항목에 상세히 서술하겠다.

1.2.2 Possible Defects

1.2.2.1 Sink Marks

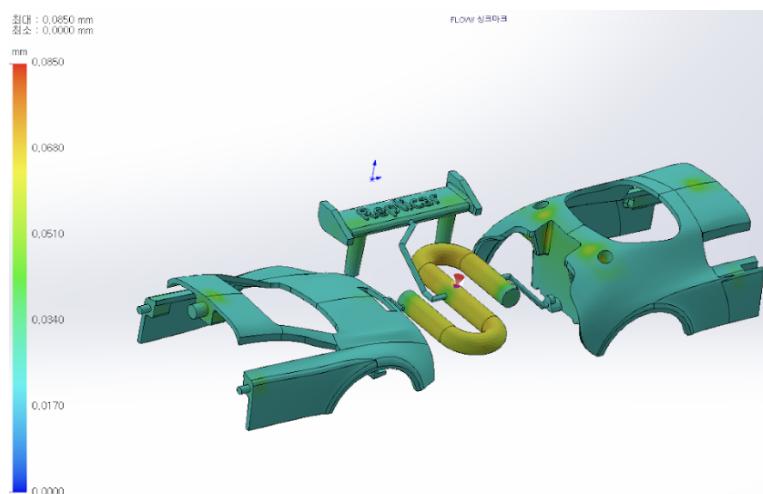


Fig. 8 Sink Mark Simulation

본 제품은 제품 특성상 두께가 얇고 균일하여 sink mark가 거의 생기지 않는다. 다만 이 특성 때문에 두께가 두꺼울 수밖에 없어 두껍게 설계된 부분에서의 sink mark는 불가피하다. 파트 간의 연결부, 상판과 chassis와의 연결부는 형태의 제약 때문에 차량의 두께에 비해서는 훨씬 두꺼울 수밖에 없는데, 위 simulation 결과를 확인해 본다면 해당 부분에 0.03mm~0.07mm의 sink mark가 생길 것으로 예상되는 것을 알 수 있다.

1.2.2.2 Pressure Drop & Short Shot

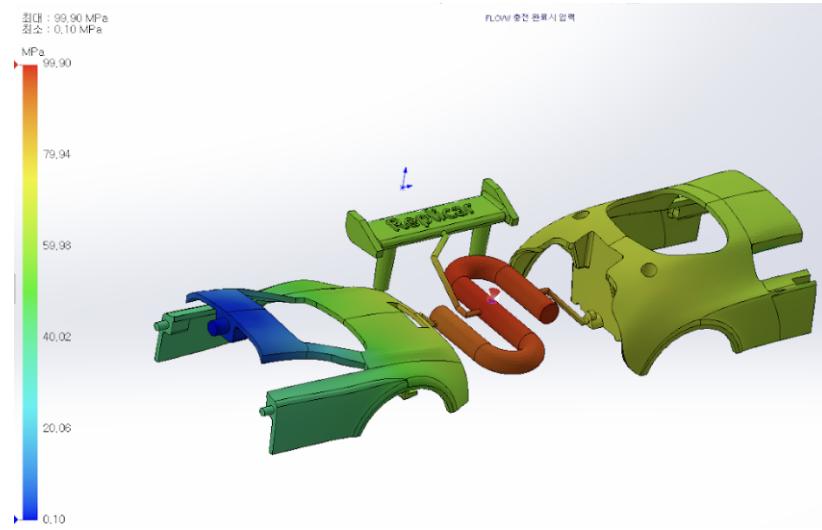


Fig. 9 Pressure Simulation

압력에 대한 simulation을 진행해 보았을 때, 차량 전면부의 중앙 연결부 부분의 압력이 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 해당 부분이 러너와 멀고, 차량의 A pillar 부분이 너무 좁으며, 해당 부분의 두께가 연결부에 의해 두꺼워졌기 때문이라고 생각할 수 있다. 이런 pressure drop이 실제 사출 과정에서도 나타난다면, 이는 short shot의 직접적인 원인이 될 것이다.

1.2.2.3 Air Trap

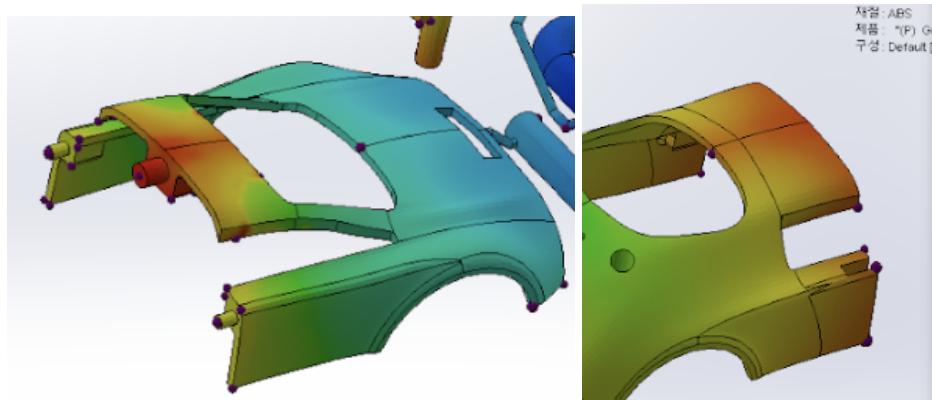


Fig. 10 Air Trap Simulation

Air Trap에 대한 시뮬레이션을 진행해 본 결과, 대부분의 air trap이 파트의 모서리 부분에 형성됨을 확인했다. 이러한 air trap들은 몰드의 gas bent로 제거할 수 있기에, defect라고 볼 수 없다. 몇몇 모서리가 아닌 부분의 air trap은, 1.4에서 후술할 제품의 중요한 특성과는 무관한 것으로 확인 되기에 제품 제작에 air trap이 문제가 되지는 않을 것으로 예상된다.

1.2.2.4 Weld Line

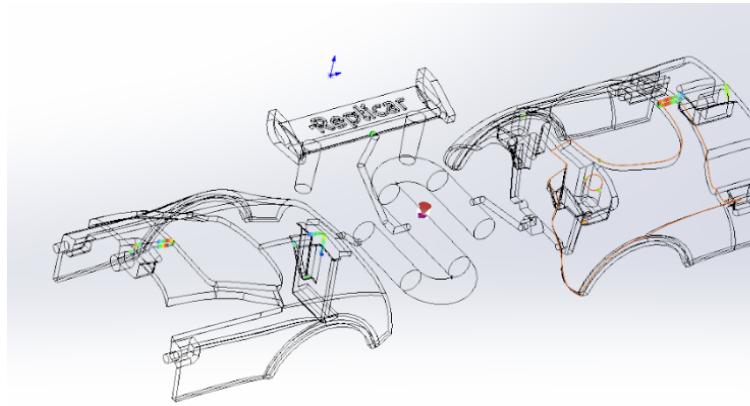


Fig. 11 Weld Line Simulation

Weld line simulation을 진행한 결과, flow의 흐름이 분리되었다가 다시 합쳐지는 구간에 weld line 생김을 확인할 수 있다.

이렇게 표시된 부분 중 러너와 가까운 부분의 경우 조기에 cooling 될 가능성이 없기에, 실제 injection molding 과정에서 welding이 발생하지는 않을 것으로 보인다. 다만, 전면부 파트의 연결부 부분은 weld line이 생길 가능성이 비교적 높음을 예상할 수 있다. 이는 1.2.2.2에서 언급한 pressure drop으로 인한 사출 속도 저하와 조기에 cooling 될 가능성을 종합적으로 생각해 본 결과이다.

1.3. Tool path design for CNC machining

보고서 3에서 설계한 툴패스는 가공시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 해당 툴패스로는 현실적으로 가공이 어렵다는 현직자 분의 조언에 따라 상코어에 대한 툴패스를 다시 설계하였다. 지난 툴패스에서는 각각의 바운더리를 임의로 설정하였기 때문에 바운더리가 설정되지 않은 부분은 가공이 제대로 되지 않을 뿐 아니라 제한된 엔드밀의 종류로 인하여 깊은 형상을 가공할 시 엔드밀이 파손될 위험성이 존재했다. 또한 가공 시간도 매우 오래 걸린다는 문제가 있었다. 이를 개선하기 위해 날장이 긴 엔드밀을 사용하였고, 절삭 속도를 높여서 엔드밀의 안정성과 가공 시간 단축을 확보하였다.

수정된 상코어 툴패스 전략은 다음과 같다.

툴패스	Boundary	가공 유형	공구	가공여유	가공공차
O0001	블록	황삭	F10	0.2	0.1
O0002	블록	황잔삭	F5	0.2	0.1
O0003	쉘로우 바운더리	등고선 가공	B3	0.0	0.01
O0004	쉘로우 바운더리	라스터 가공	F2	0.0	0.01
O0005	쉘로우 바운더리	라스터 가공	F2	0.0	0.01

Table. 1 상코어 툴패스 전략

황삭 이후 황잔삭 과정에서는 레스터 가공을 하여 이전 툴패스에서 가공되지 않은 부분에 대해 집중적으로 가공하는 전략을 취했다. 이후 정삭 과정에서는 기존에 사용하던 선택된 서피스로 바운더리를 설정하지 않고 헬로우 바운더리를 사용하였다. 이를 통해 모든 부분이 가공될 수 있도록 툴패스를 설계하였다. 각 툴패스의 사진은 다음과 같다.

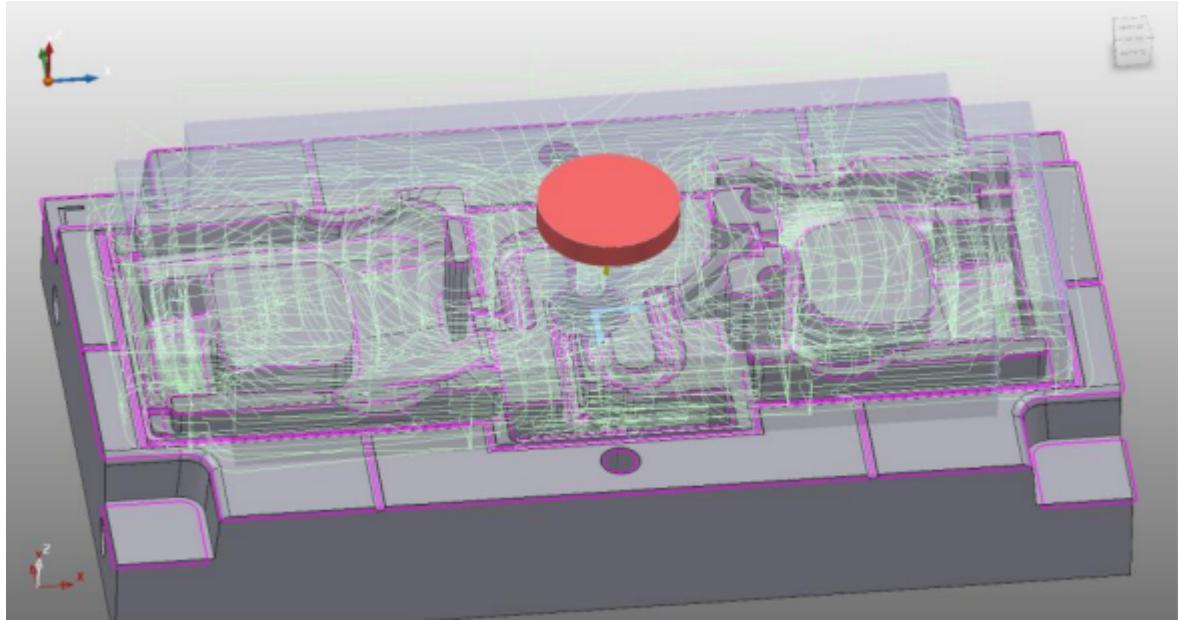


Fig.12 툴패스 O0001 - F10 황삭

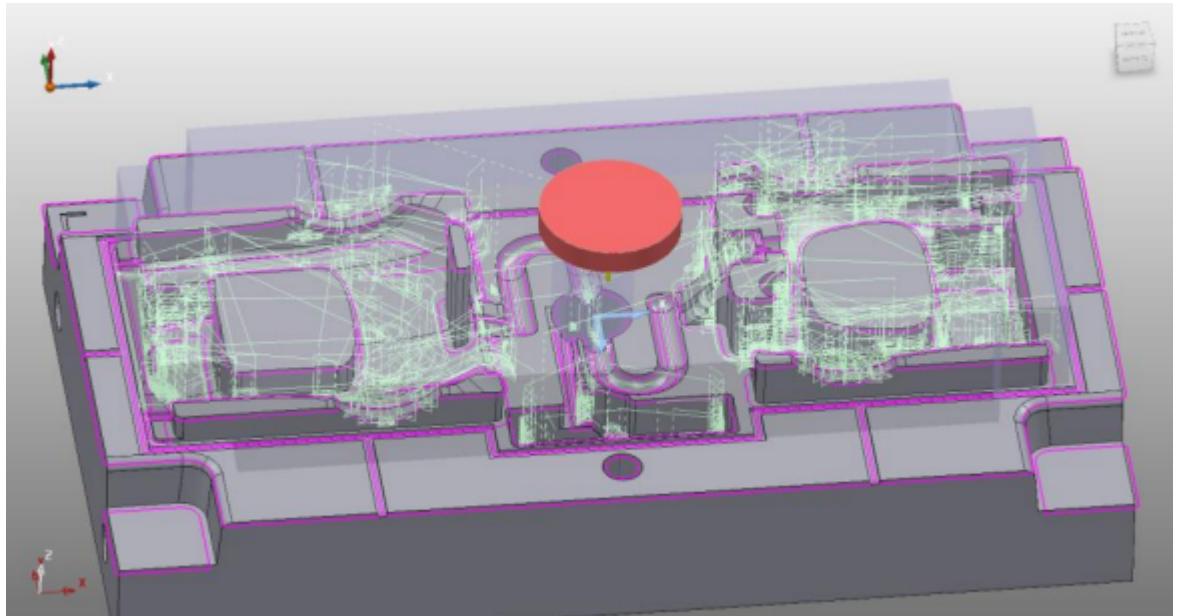


Fig.12 툴패스 O0002 - F5 황잔삭

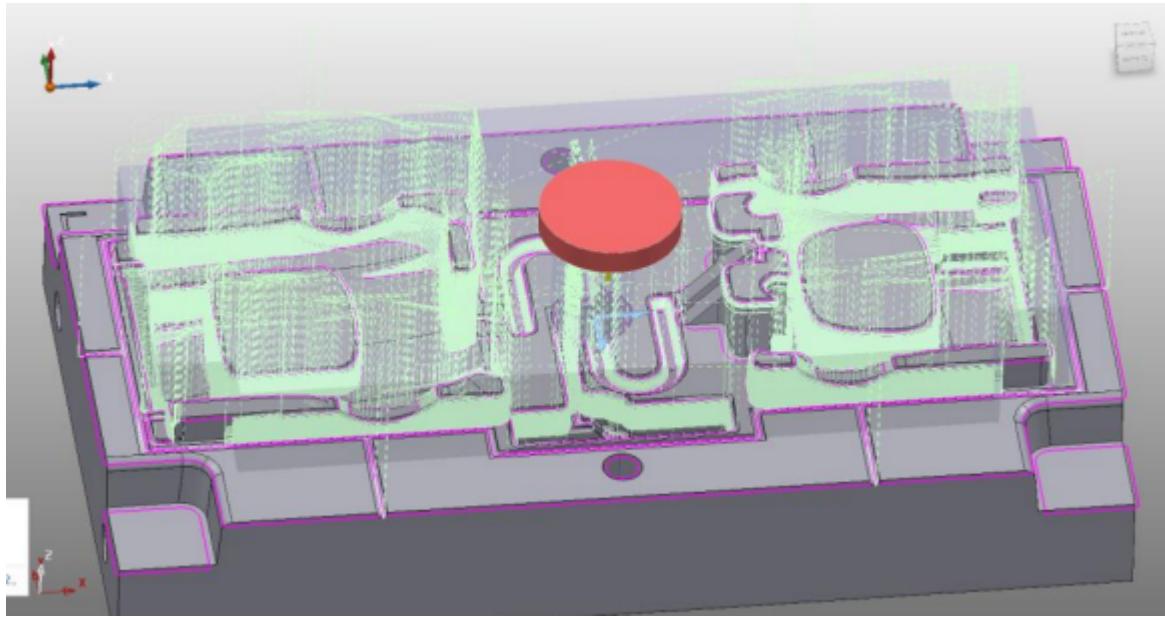


Fig.13 툴패스 O0003 - B3 등고선 가공

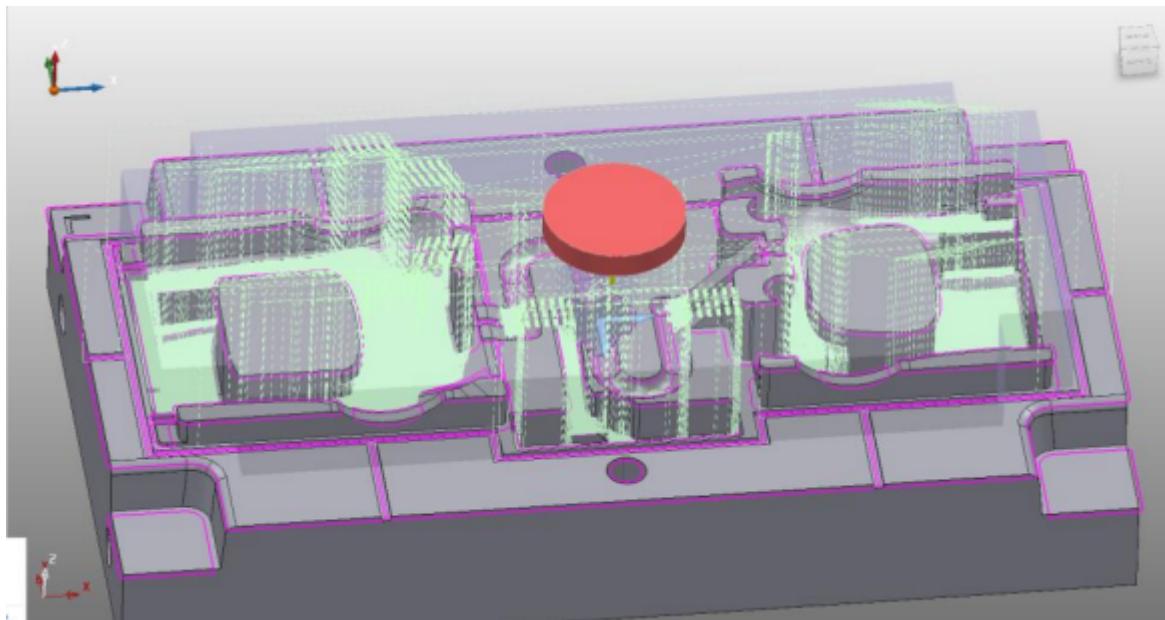


Fig.14 툴패스 O0004 - F2 라스터 가공

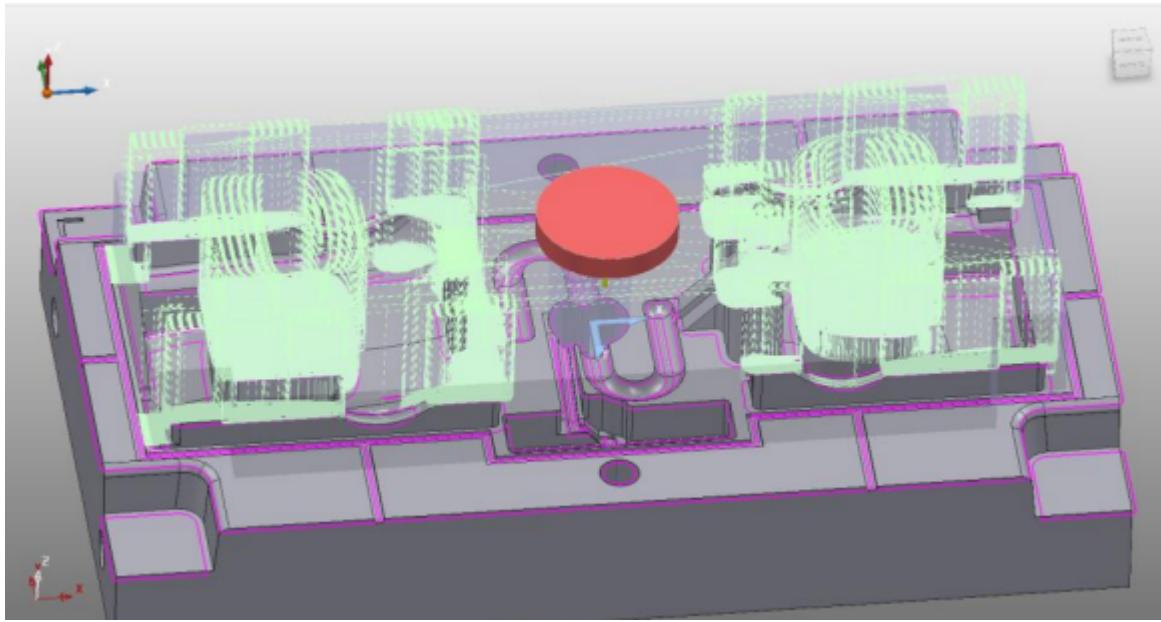


Fig.15 툴 패스 O0005 - F2 라스터 가공2

1.4 Discussion of key features and critical dimensions of design

1.4.1 Key Features

본 제품은 미니카의 상판 부분이며, 정해진 차량 chassis에 결합하여 사용한다. 이러한 용도를 고려해 보았을 때 key features는 다음과 같다고 볼 수 있다.

첫째로 가장 중요한 key feature는 chassis와의 올바른 결합을 들 수 있다.

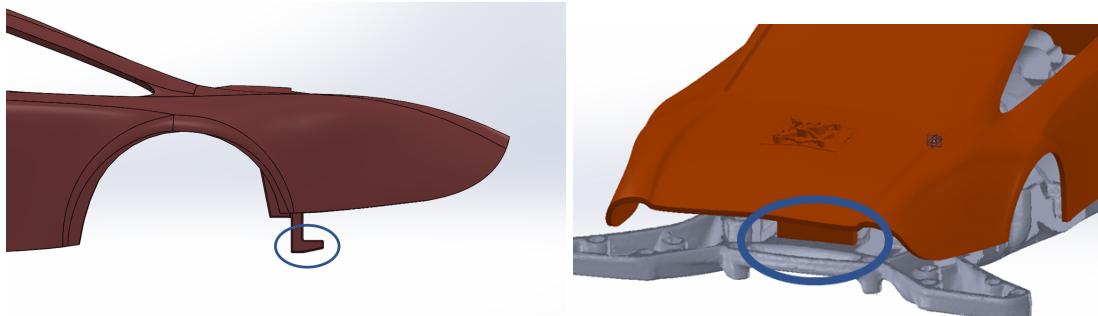


Fig. 16 Chassis와의 결합부 - 전면

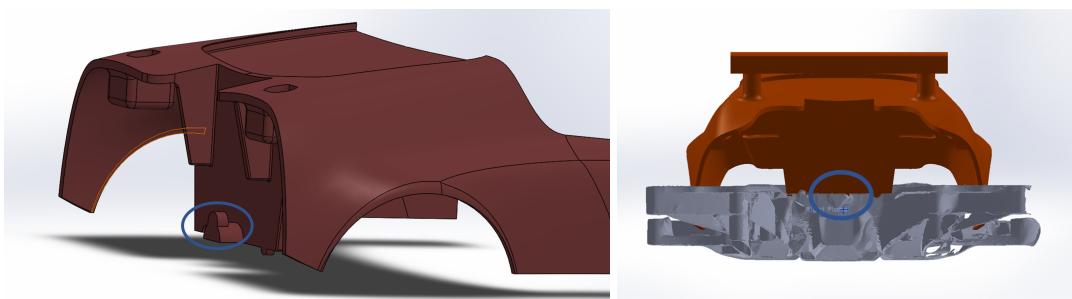


Fig. 17 Chassis와의 결합부 - 후면

위 Figure는 본 제품이 chassis와 어떤 식으로 결합되는지 보여준다. 전면 결합의 경우 ‘L’자로 튀어나온 부분이 chassis에 같은 모양으로 뚫려 있는 구멍에 끼워지는 방식이다. 후면 결합의 경우 반 타원 형태로 생긴 연결부가 잘 포개어진 상태로, 추가적인 부품을 끼운 후 돌려 완벽히 고정하게 된다.

둘째, 제품 파트 간 결합이 제대로 이루어져야 할 것이다. 본 제품의 파트 간 연결부는 크게 두 부분으로, 전면부-후면부 연결부와 후면부-리어윙 연결부가 존재한다. 두 연결부는 모두 press fit 형태로 결합되도록 설계되었다. 설계 중 고려한 정보는 shaft와 hole의 직경, 사출물의 shrinkage, 그리고 press fit이 이루어지기 위한 적절한 공차, 등이 있다.

셋째, 본 제품은 자동차의 역학적 특성을 결정짓는 상판이기에, 역학적 특성이 고려되어야 한다. 우선, 차량의 질량을 변경해가며 주행을 시켰을 때, 주행 결과는 차량의 질량이 작을수록 향상된다는 것을 확인하였다. 이에 제품 설계 과정에서 다양한 곳에 구멍을 만들어 질량을 최소화할 수 있도록 하는 과정을 거쳤다. 또, 차량인 만큼 유체역학적인 분석도 중요한데, 본 제품의 3D drawing 파일을 이용해 주변 공기의 streamline을 확인하는 simulation을 진행한 결과 차량 주변에 vorticity가 크게 발생하지 않는 것을 확인하였다. 리어윙의 부착은 유체역학적으로 생각해 보았을 때 뒷바퀴의 접지력을 늘려 주행의 안정성을 더한다는 특징이 있다.

마지막으로, 본 제품은 자동차의 외관을 결정짓기에, 심미적인 요소가 고려되어야 한다. 이를 위해 가장 아름답다고 여겨지는 스포츠카의 디자인을 오마주 하였으며, 유선형의 디자인을 강조했다. 또한 차량의 chassis 부분이 최대한 가려져 내부가 보이지 않도록 모든 부분을 최대한 덮을 수 있게 설계하였다.

1.4.2 Critical Dimensions

위에서 언급한 본 제품의 key feature가 제대로 이루어지기 위해 꼭 지켜야 하는 중요한 치수들이 존재한다. 특히, 상판-chassis의 결합과 파트 간 결합은 치수에 영향을 받을 수밖에 없는 요소이므로, 이에 영향을 주는 치수들을 중심으로 논하여본다.

1.4.2.1 전면부-chassis 연결부 크기

위에서 언급하였듯이, 전면 결합의 경우 ‘L’자로 튀어나온 부분이 chassis에 같은 모양으로 뚫려 있는 구멍에 끼워지는 방식이다. 특히 이 ‘L’자의 수평 부분이 구멍에 그대로 들어가 고정되어야 하기에, 이 수평 부분 길이가 중요한 치수라고 생각할 수 있다.

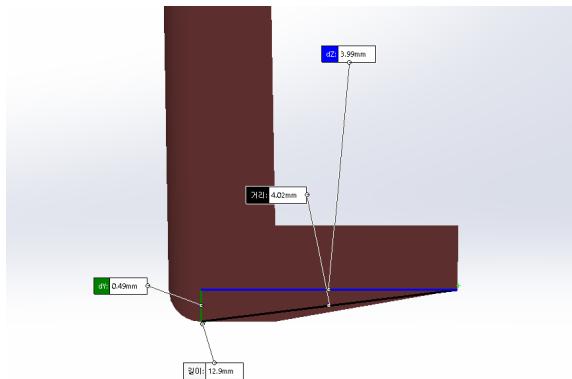


Fig. 18 전면부-chassis 연결부 중 수평 부분 길이 요소

위 figure에서 나타나는 치수를 종합적으로 고려한 설계가 필요하다. 위에서 나타난 부분의 길이가 과하게 길다면 chassis의 구멍에 들어가지 않을 수 있고, 과하게 짧다면 고정이 제대로 되지 않아 차량 앞부분이 주행 중 빠져버릴 위험이 생긴다. 또, 1.4.2.4에서 후술할 치수에 본 치수가 영향을 주는 만큼, 중요한 치수라고 볼 수 있을 것이다.

1.4.2.2 후면부-chassis 연결부 크기

후면부-chassis 연결부 크기도 제대로 된 차량 상판과 chassis의 연결을 위해서 중요한 요소가 아닐 수 없다.

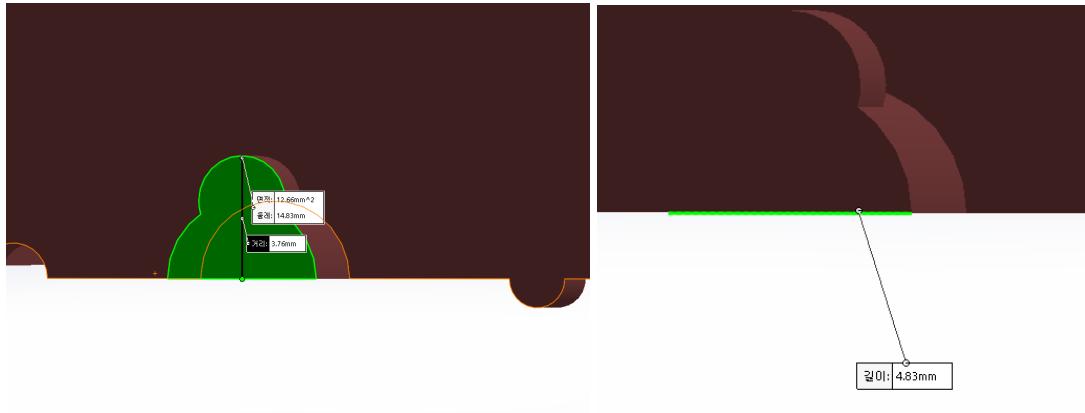


Fig. 19 후면부-chassis 연결부 크기

위 figure는 고려해야 하는 크기를 나타낸 것이다. 후면 결합의 경우 상판과 chassis의 연결부가 잘 포개어진 상태로, 추가적인 부품을 끼운 후 돌려 완벽히 고정하게 된다. 만약 연결부의 크기가 너무 크다면 chassis의 연결부와 포개지지 않거나 추가 부품이 끼워지지 않을 것이고, 너무 작다면 추가 부품을 돌리더라도 완벽하게 고정되지 않을 것이다. 후면부 연결부의 경우 추가적 부품을 돌려 끼운다는 결합 특징 때문에 크기뿐만 아니라 모양도 중요하다는 것을 생각해 볼 수 있다.

1.4.2.3 전면부-후면부 연결부 크기

injection molding이라는 제작 특성상 한 body로 설계하여 사출하는 것보다 파트를 나누어 사출한 후 결합을 하는 방식이 더욱 합리적이다. 따라서 차량 상판을 설계할 때 차량을 대략 반으로 나누어 전면부와 후면부를 각각 만들었다. 이에 두 파트를 결합하는 연결부를 함께 설계하였는데, 이는 아래 Figure와 같다.

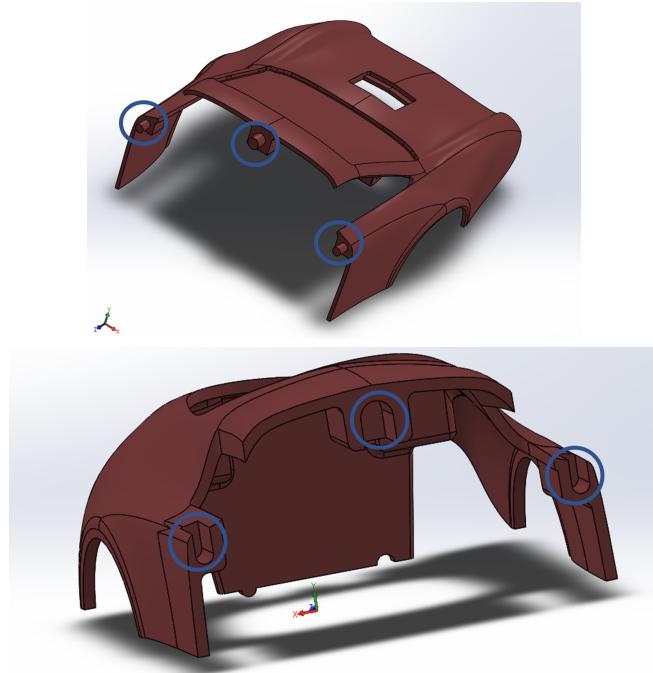


Fig. 20 전면부-후면부 연결부

편리한 결합과 분해를 위해 press fit 형태의 shaft와 hole을 설계하였는데, 제대로 된 press fit을 구현하기 위해서는 이 shaft와 hole의 직경 간 관계와 공차를 고려한 설계가 필수적이다. 또, 제품의 안정적인 결합을 위해 직경뿐만 아니라 길이와 깊이도 고려하여 설계해야 한다.

1.4.2.4 파트 간 결합 완료 시 전면부-chassis 연결부와 후면부-chassis 연결부 길이

1.4.2.1~1.4.2.3에서 고려한 수치가 모두 잘 맞는다고 하더라도, chassis에서의 전면부 연결부와 후면부 연결부 간 길이와 파트 간 결합 완료 시 전면부-chassis 연결부와 후면부-chassis 연결부 간 길이가 완벽하게 일치하지 않는다면, 최종적으로 제품이 chassis와 결합하는 것이 불가능해질 것이다.

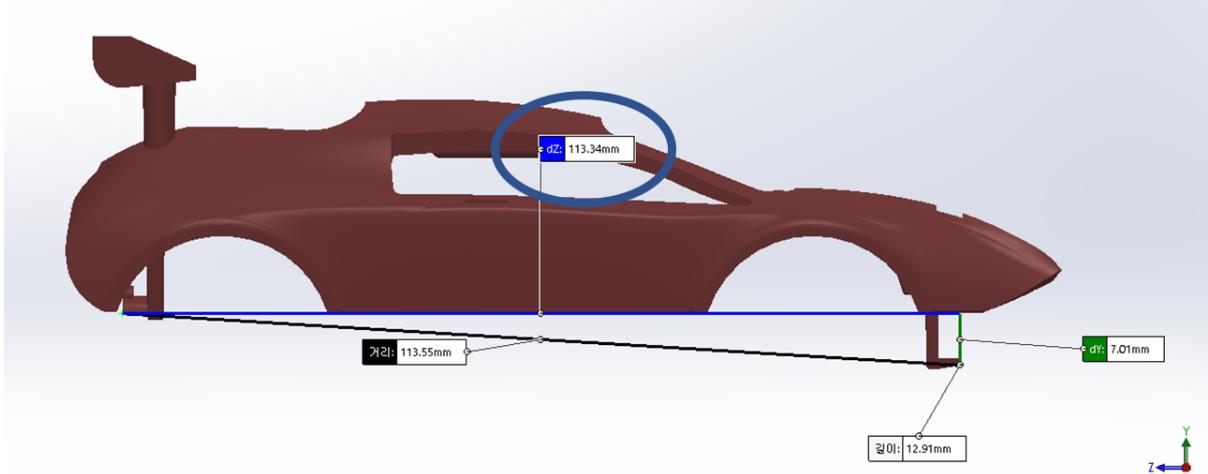


Fig. 21 파트 간 결합 완료 시 전면부-chassis 연결부와 후면부-chassis 연결부 길이

위 Figure의 dZ 부분이 고려해야 하는 길이가 될 것이다. 실제 상황에서의 해당 길이는 두 연결부 길이의 공차와 전면부-후면부 간의 결합 정도가 누적된 공차가 적용될 것이며, 이에 따라 설계 과정에서의 고려에 어려움이 존재했다.

2. Manufacturing

2.1. Photographs of your manufactured components (mold and plastic parts)

2.1.1 Mold Parts

CNC Machining 을 통하여 아래의 몰드 상코어와 하코어를 제작하였다.

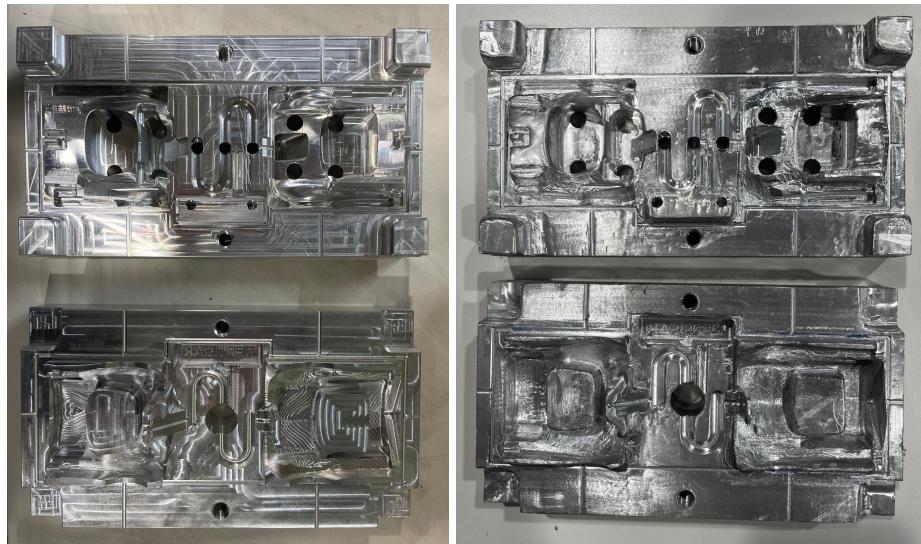


Fig.22 CNC machining으로 만든 몰드(left) & grinding 후 몰드(right)

2.1.2 Plastic Parts

2.1.1의 몰드를 injection molding에 활용하여 아래의 plastic part를 사출할 수 있었다.



Fig.23 사출된 Plastic Part - 전면부

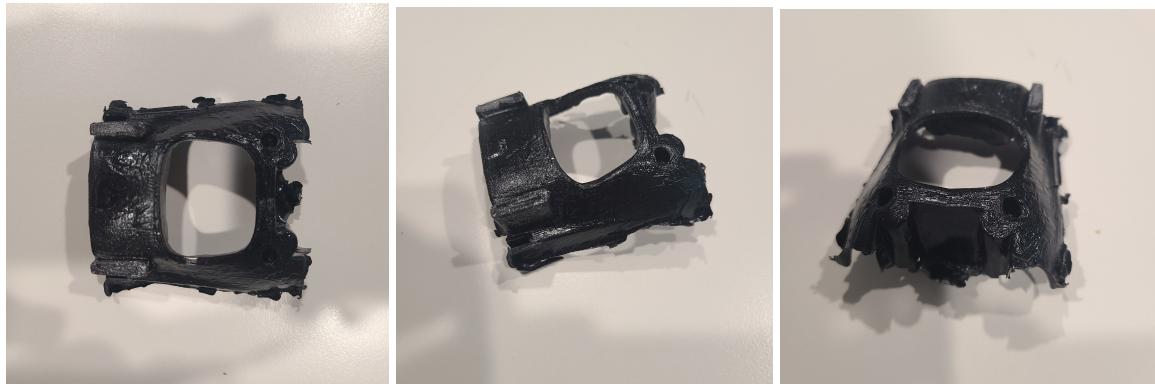


Fig.24 사출된 Plastic Part - 후면부



Fig.25 사출된 Plastic Part - 리어 윙(왼쪽), 결합 후 모습(오른쪽)

2.2. Discussions of actual CNC machining and injection-molding processes (manufacturing challenges or defects you faced with and how you improve the processes)

2.2.1 Discussions on CNC machining

2.2.1.1 CNC machining을 위한 틀패스 설계

본 제품은 차량 상판이기에 매우 얇으며, 그 얕은 면이 하단을 제외한 모든 부분을 감싸는 형상을 띤다. 이를 구현하기 위해 몰드에는 매우 얇고 깊은 형상들이 많이 존재할 수밖에 없었다. 이러한 형상은 CNC machining 틀패스 설계에 어려움을 주는데, 이는 공구의 한계 때문이다. 얕고 긴 공구들은 부리지기 매우 쉽기 때문에 얕기/길이 비율이 너무 작은 공구는 존재하지 않을뿐더러 존재한다 하더라도 파손에 의한 비용이 매우 많이 들 수 있다. 또, 매우 깊은 형상을 깎는 것에 사소한 설계 실수나, 예측하지 못한 원인으로 인해 엔드밀 홀더가 몰드의 깎이지 않은 부분과 충돌할 가능성도 매우 높다.

이러한 문제를 해소하기 위해 여러 번의 틀패스 및 몰드 수정을 진행하였고, 공구의 한계로 인해 가공의 정밀성을 포기하거나, 가공 quality나 마감에서도 타협을 보며 진행할 수밖에 없었다.

2.2.1.2 상하 코어 합형

CNC machining이 끝난 몰드를 합쳤을 때 마찰력이 커서 합형에 실패했다. 마찰력 증가의 원인을 크게 2가지로 정리하면 다음과 같다. 첫번째 문제는 창문과 결합부의 몰드에서 깊은 형상이 요구되어 마찰면이 증가했다는 것이다. 다음은 구배각이 부족하여 마찰을 효과적으로 없애지 못했다는 점이다.

이 때문에 합형하기 위해서 후가공(grinding)이 많이 필요했다. CNC machining의 정삭 과정에서 이미 허용 공차를 0.01로 설정하여 가공했기 때문에, 추가로 가공한 grinding에 의해 liquid tight가 아닌 부분에서 ABS 누출이 발생했고, 이는 후에 설명할 것이다.

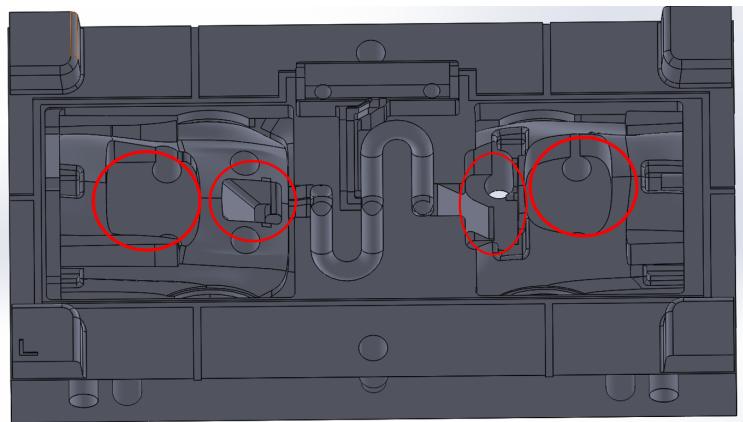


Fig. 26 몰드에서 마찰면을 늘린 요소

2.2.2 Discussions on injection molding process

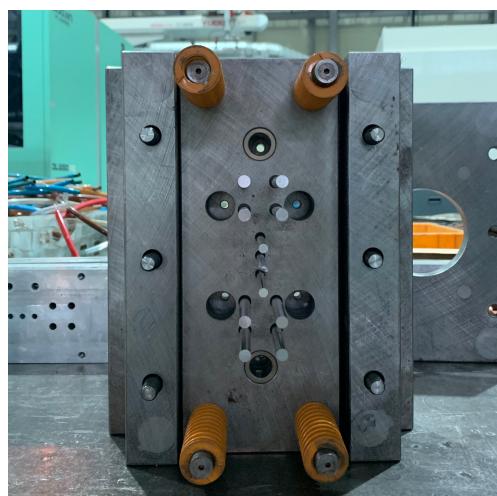


Fig. 27 Mold Base with Ejector pin

2.2.2.1 몰드 상하 코어의 공차

금형 센터에서 Injection molding process를 직접 참관하며, 2가지 manufacturing 상의 심각한 문제가 있음을 관찰하였다. 첫 번째, 몰드 베이스와 본 조에서 가공한 상하코어의 공차가 0.1mm 이상으로 매우 크게 측정되었다. 이에 따라, Injection molding을 진행하지 못하였고 상하코어 외각을 0.2mm 이상 절삭하기 위해 Fig. 28과 같이 추가적인 가공을 진행하였다. Grinding tool에 의해 heat diffusion이 일어남에 따라 알루미늄 코어의 열팽창의 정도가 공차와 그 크기가 비슷했다. 또한, 측정 도구(버니어 캘리퍼스)의 정밀성을 고려하여 몰드의 크기가 몰드 베이스의 크기 보다 특정 공차 이상 작은지 판단하여야 한다. 따라서, 추후 사출 과정에서는 열팽창, 측정의 정밀도 등을 유의하여 진행해야 할 것이다.

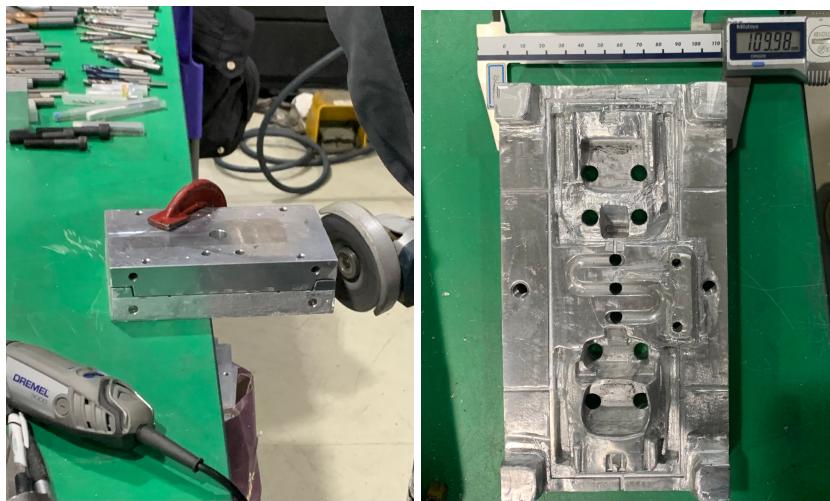


Fig. 28 Additional grinding process

2.2.2.2 Ejection 불가

사출이 성공적으로 이루어지기 위해서는 Ejection 과정에 특히 신경 써야 한다. Injection 과 Part cooling의 단계는 상대적으로 온도, 압력 등 다양한 독립 변수를 조정하며 성공 확률을 높일 수 있지만, 형상에 구배가 거의 없는 mold의 경우 플라스틱이 사출 이후 수축하여 ejection 과정에서 손상을 입기 때문이다. 5조의 injection molding 진행 결과, 사출품이 몰드의 상코어에서 제대로 분리되지 않는 문제가 발생하여, 원활한 생산 cycle이 진행되지 못하였고, 이로 인해 대량 생산이 불가능하였다.

그 원인으로는 우선 너무 깊고 얇은 몰드의 형상을 들 수 있다. 이렇게 얇고 깊은 구간은 ejecting 방향과 평행한, 벽면 형상을 띠게 되는데, ejecting 방향과 평행한 면이기에 해당 면에서 발생하는 마찰력과 저항력은 ejecting이 진행되는 방향과 평행하고 방향은 반대가 되어 ejecting 과정을 방해할 것이다. 또, 그 두께가 얇기 때문에 eject pin도 들어가지 못하여 마찰력을 이겨낼 힘이 충분하지 않을 가능성이 매우 높다. 또, eject pin이 다른 부분에서 눌러주기 때문에 eject 과정에서 사출물의 약간의 힘이 발생할 수 있는데, 이는 깊고 얕은 부분의 벽면과 마찰력을 더욱 늘리게 될 것이다.

또, draft angle이 충분하지 않았기 때문이다. 이 문제는 몰드 전반에 걸쳐 나타났을 것이며, 위에서 언급한 얕고 깊은 형상에도 치명적으로 작용했을 것이다. 실제로 금형 센터에서는 본 조의 injection molding 직전에 Fig. 29와 같이 손으로 가공함을 확인할 수 있었다.

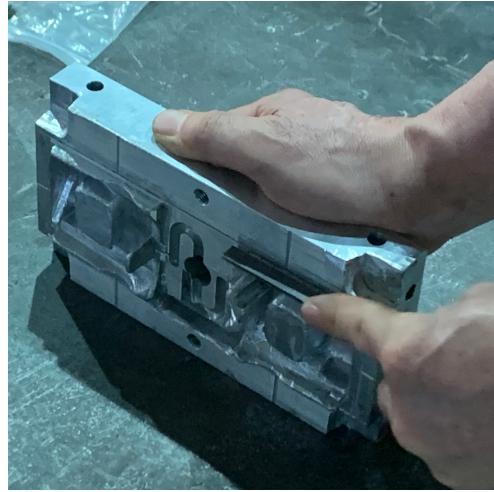


Fig. 29 Hand-grinding process for making draft angle

2.3. Comparison between the simulation and the actual injection molding process

Mold flow simulation을 통해 제품의 충전 시간을 확인할 수 있었고, 싱크 마크, 에어 트랩, 압력 저하, 등의 결함을 예상할 수 있다. 이와 실제 injection 결과를 비교해 본 결과는 아래와 같다.

2.3.1 시간

앞서 설명한 대로 몰드를 이용한 대량 생산이 불가능했던 탓에 충전 시간과 cycle 시간을 확인하는 것은 불가능했다. 그리하여 plastic flow simulation을 통해 나온 충전 시간을 이용하여 일반적인 상황을 가정하여 injection 가공 진행 시간에 대해 고찰해 보고자 한다.

본 시뮬레이션 진행 결과 제품의 충전 시간은 1.5초 이내였다. 보통의 plastic injection molding을 진행할 때 사출이 진행되는 시간을 5초 이내로 잡는다는 점과, 본 제품의 두께가 매우 얇다는 점을 생각해 보았을 때 이 시간대는 합리적인 것으로 생각할 수 있다. 다만, 실제 생산을 위한 시간을 고려할 때는 충전 시간만이 아니라 pack & hold time과 cooling time도 고려를 해야한다. 이 두 과정의 시간은 일반적으로 충전 시간의 약 5배정도로 잡는 것으로 확인된다. 또한 mold 합형과 ejection 시간을 고려한다면 한 cycle의 총 소요 시간은 약 15초 정도일 것으로 예상된다.

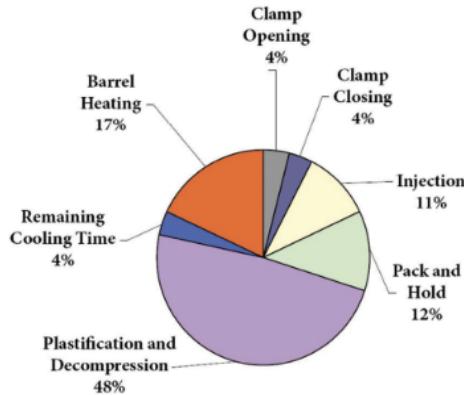


Fig. 30 Cycle for Injection Molding

2.3.2 Short shot

Simulation 결과, 파트 전면부의 연결부 부분(러너와 면 쪽)에서 short shot이 일어날 것임을 예상할 수 있었다. 실제로 사출을 진행한 결과 예상과 같게 일부 사출물에서 short shot이 일어남을 확인 할 수 있었다. 또, simulation 결과 pressure drop이 일어나지 않은 후면부의 러너와 면 쪽 부분에도 short shot이 일어났는데, 이는 simulation 결과와는 상이하다. 단, 해당 부분은 simulation 결과 short shot이 일어날 것이라고 예상되었던 부분과 러너와의 위치 관계와 파트의 형상이 매우 유사하다. 이를 통해 실제

상황이었다면 충분히 pressure drop^o 일어났을 것임을 예측해 볼 수도 있었을 것을 생각할 수 있다. 이를 통해 simulation 결과를 어떤 식으로 해석하고 확장해 나갈지 고찰해 볼 수 있다.

2.3.3 Sink mark

Sink mark simulation 결과 두께가 비교적 두꺼운 부분에서 sink mark가 나타남을 확인할 수 있었는데, 이는 이론상으로도 자명한 결과이다. 이에 실제 사출물에서도 두께가 비교적 두껍게 설계되었던 연결부 부분, 등에서 sink mark가 확인되었다.

2.4. Discussion of possible design and manufacturing opportunities for improvements

첫 번째, 몰드의 깊은 형상을 제거한다. Chassis와 결합하는 front, back 결합 부분을 만들기 위해서 생기는 깊은 형상은 없앨 수 없다. 하지만, 앞, 뒤, 옆 창문 몰드에서 깊은 형상은 없앨 수 있다. 디자인한 몰드에서 창문 부분을 보면 parting line이 차면을 따라가다가 창문 아래 깊이 내려가는 것을 볼 수 있다. 하지만, parting line을 최대한 차면과 가깝게 디자인할 수 있었고, 이를 사용했다면 마찰을 받는 옆 면적이 많이 줄어서 마찰력이 크게 감소했을 것이다.

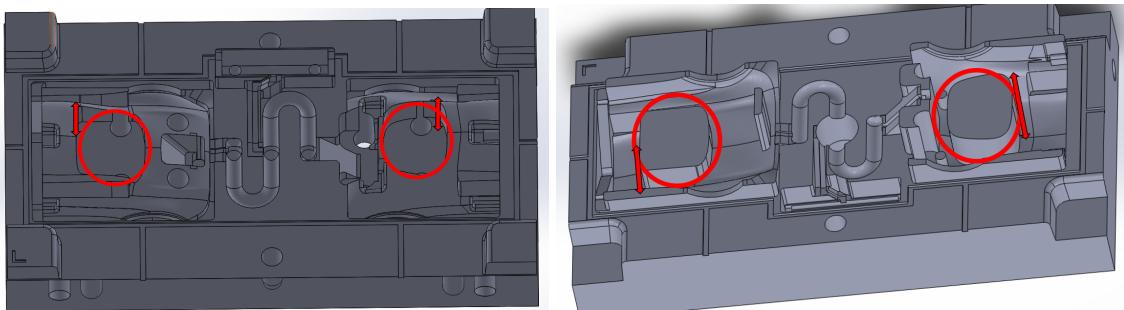


Fig. 31 상, 하코어 창문 parting line

두 번째, 기존 hole shaft 결합 방식의 결합 방향을 바꾸어 가공의 정확도를 높인다. 현재 결합 방식은 Front body, Back body 의 앞 뒤 결합을 위해 좁고 깊은 형상을 가공해야 한다. 외주를 맡긴 뒤에도 해당 결합 부분이 정확히 들어맞지 않았고, 추가 가공 (그라인딩)을 진행하였지만 최종적으로 해당 부근에서 합성이 완전히 이루어지지 않아 flash 현상이 일부 발생하였다. 이에 따라 아래의 그림과 같은 결합 방식으로의 수정이 요구된다. 왼쪽이 현재 결합 방식을 도식화한 그림인데, 빨간색 화살표 위치를 가공하기 위해 작은 공구가 필요하다. 오른쪽은 개선된 결합 방식을 보여준다. 가공해야 할 면적은 늘어나지만, 절삭 공구의 파손을 줄일 수 있으며, flash 등의 결함을 막을 수 있다.

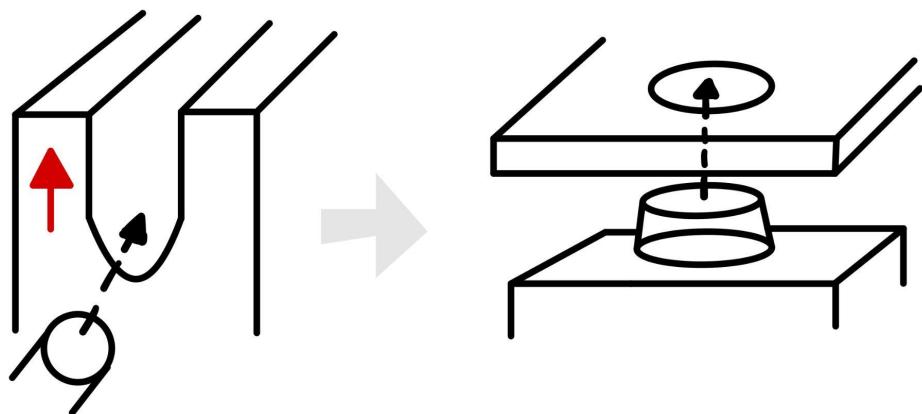


Fig. 32 결합 방식의 개선

세 번째, 디자인의 수정을 통해서도 몰드의 깊고 얕은 형상을 줄일 수 있다. 지금의 차체 디자인은 실제 차량을 최대한 묘사하기 위해 차량의 문에 해당하는 옆면에 일정한 높이를 주어 샤프트를 감싸는 형태를

갖고 있다. 이러한 디자인이 심미적으로는 좋으나 design for manufacturing 측면에서는 몰드에 얇고 깊은 형상을 만들어 현실적으로 가공을 어렵다. 따라서 DFM을 위해 옆면의 높이를 줄이는 형상이 사출에 유리할 것으로 예상된다. 실제로 사출에 성공한 팀들의 사출품을 분석한 결과, 사출품이 아랫부분의 샤프를 감싸는 형태보다는 위로만 덮는 형태의 디자인이 많은 것을 확인하였다. 이렇듯 근본적인 디자인의 수정을 통해 사출의 용이성을 높일 수 있을 것이다. 또한 디자인의 표면이나 형상이 간단할수록 사출에 용이할 것이다.

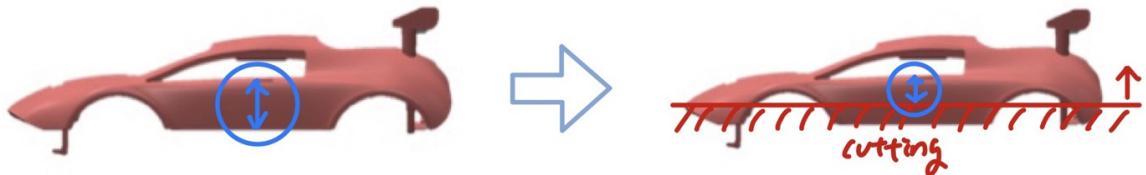


Fig. 33 DFM을 위한 디자인 수정

3. Quality

3.1. Evaluation of the machined mold parts (e.g. dimensions, surface quality, etc.) Find defects from the injection-molded plastic parts and possible causes. Briefly discuss how you could improve the design

3.1.1 Flash

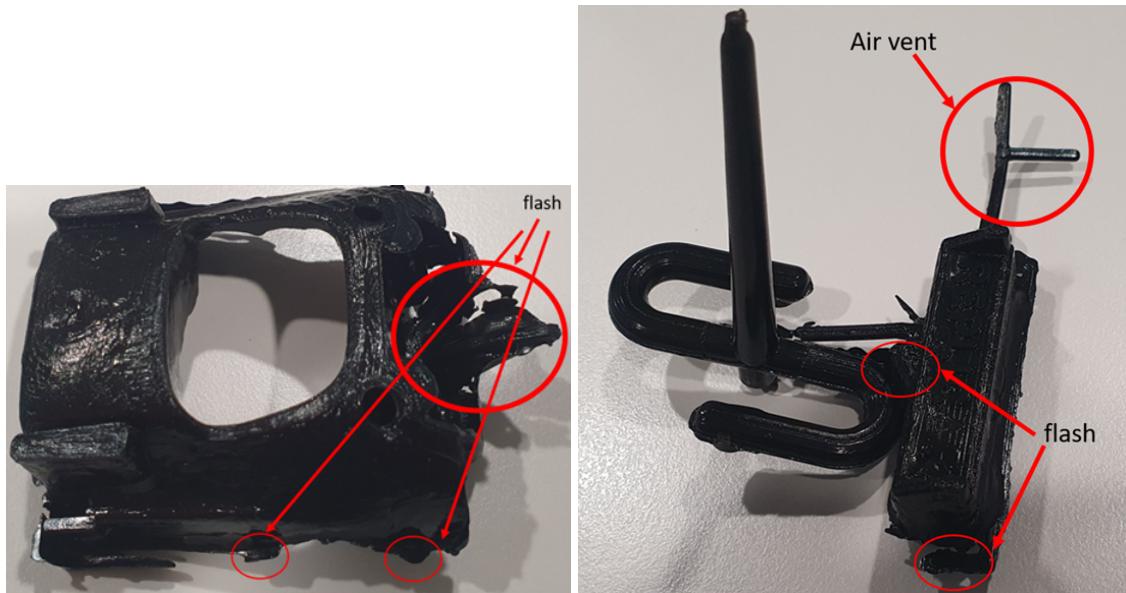


Fig. 34 Back body와 Rear wing에서 생긴 flash

back body와 rear wing 쪽으로 주입되는 runner에서 flash가 발생했다. rear wing 내부에서도 flash가 발생한 것을 볼 수 있다. Rear wing은 좁고 깊은 형상을 갖기 때문에 mold끼리의 마찰이 심했었고, grinding을 많이 하다 보니 runner 쪽의 mold가 의도치 않게 많이 grinding되어 고압의 ABS가 누출되었다.

또한, Air vent에서 ABS flash가 생긴 것을 볼 수 있다. Air vent를 설계할 때 연결된 고리 구조를 만들기 위해서 rear wing 윗부분에도 air vent가 지나가게 했다. 이 때, air vent가 rear wing 파트와 충분한 거리가 확보되지 않아서 grinding 할 때 air vent와 rear wing이 연결되는 부분이 생겨 air vent가 일부 사출된다.

3.1.2 Front body short shot

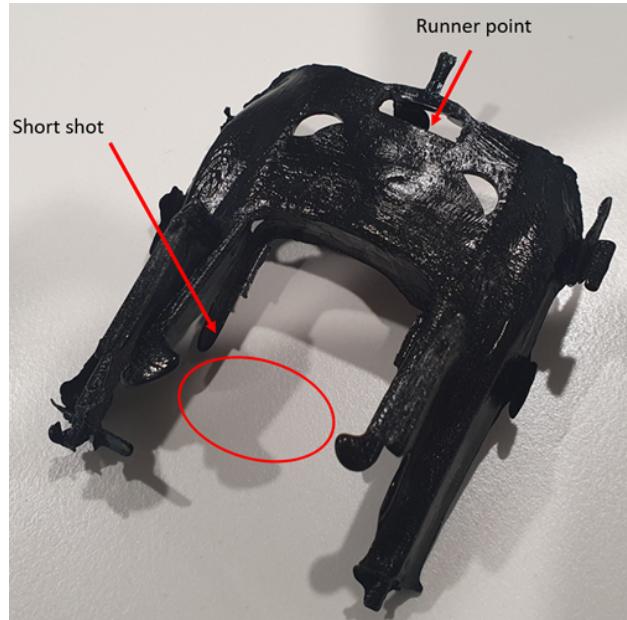


Fig. 35 Front body short shot

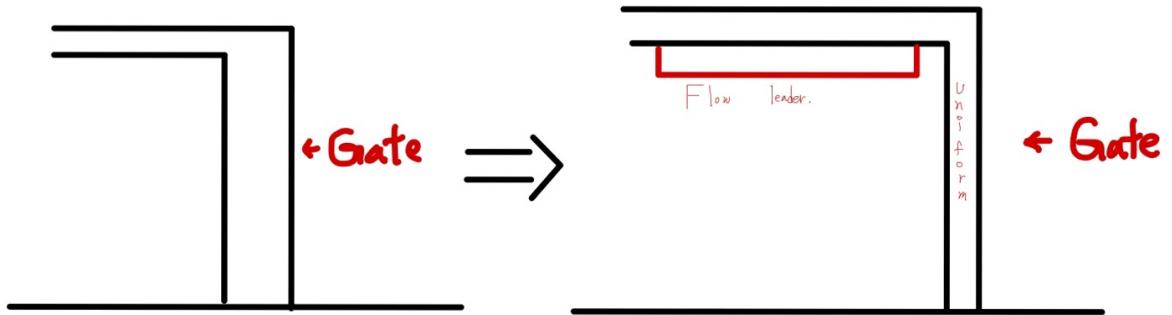


Fig. 36 Flow leader

Front body에서 주입구 반대편에 ABS가 끝까지 채워지지 않은 부분, 즉 short shot이 발생했다. 이 short shot은 위에서 simulation을 통하여 예측된 것과 같다. 해당 부분에서의 급격한 압력 저하가 injection speed를 떨어트려 short shot을 야기했을 것이다. 이 부분을 해결하기 위해서 Flower leader를 사용하여 문제점을 해결할 수 있었다. 뒷부분이 얇기 때문에, 이를 해결하기 위해 전체적으로 얇은 두께를 이용해 uniform한 thickness를 유지하였고, Flow leader를 육안상 보이는 곳에 배치하지 않고 아랫면에 두어 안보이게끔 설치하였다.

또, 3.1.1에서 보았듯 mold의 합형이 제대로 이루어지지 않아 flash가 나타났는데, 이에 의한 압력 손실이 이후 부분의 short shot의 원인이 되었을 가능성도 존재할 것이다.

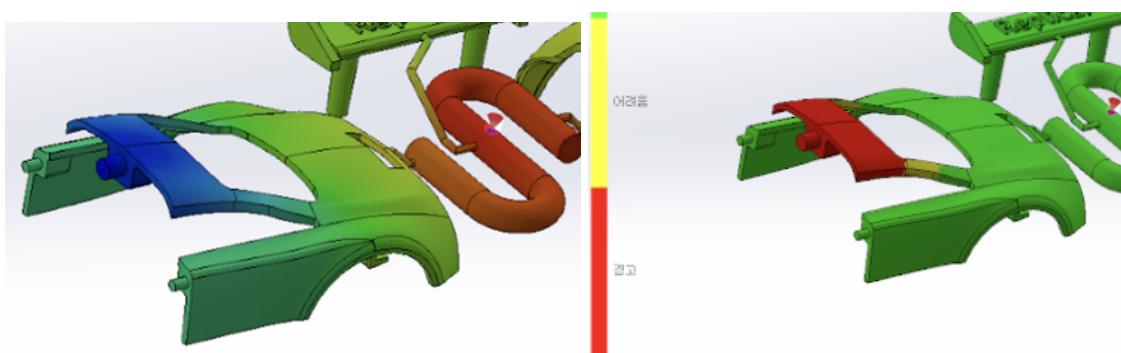


Fig. 37 해당 파트에서의 압력 저하와 사출 난이도 경고가 나타난 모습

이를 해결하기 위해 적절한 gate position 선정이 필요한데, ABS를 여러 point로 주입시킨다면 위와 같은 현상을 방지할 수 있다. 또한 창문 부분을 막아 플라스틱이 균일하게 전달되도록 하는 방법도 있을 것이다.

3.1.3 Back body short shot

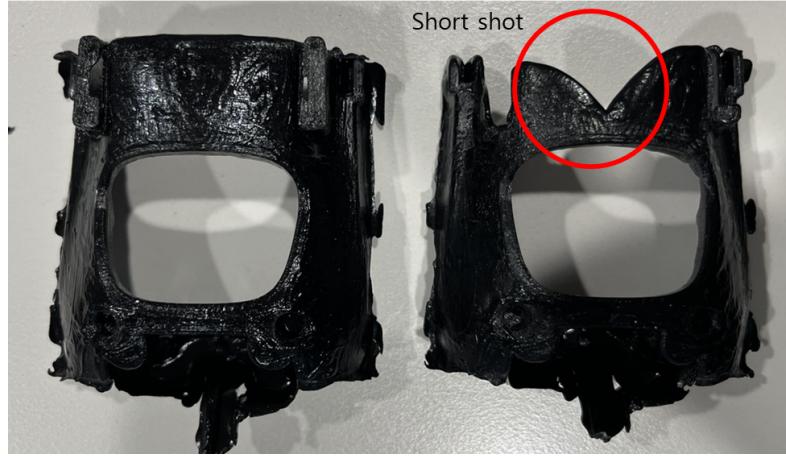


Fig.38 Back body short shot

차체 뒷부분에서도 short shot이 발생하였다. 왼쪽 사진은 끝부분까지 사출이 된 파트이며, 오른쪽은 short shot이 발견된 파트의 사진이다. 비교를 통해 short shot 영역이 크게 형성되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 차체 뒷부분도 앞부분과 마찬가지로 injection 압력을 높이거나 gate의 위치를 바꿔야 한다.

3.1.4 Ejector mark

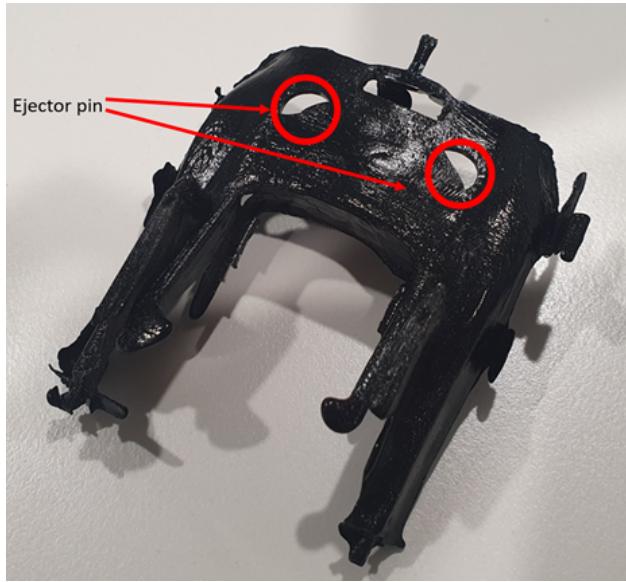


Fig. 39 Front body에 생긴 밀핀 자국

Front body에서 ejector pin의 높이가 높게 설정되어 채워지지 못한 부분을 볼 수 있다. 이는 차체가 매우 얇기 때문에 ejector pin 높이를 적절히 설정하기 어렵기 때문이다. ejector pin의 높이를 더 작게 여유를 두고 차체의 안쪽 면에 ABS가 여유 있게 채워지도록 해야 한다.

3.1.5 Sink mark

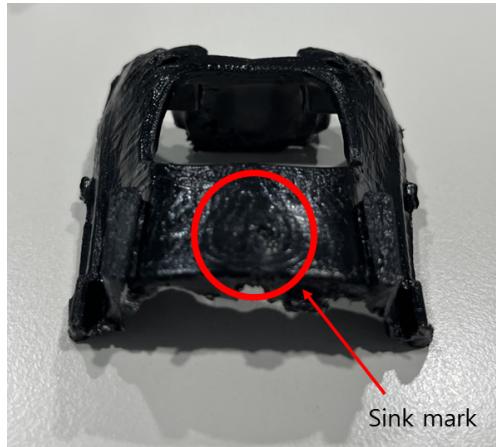


Fig. 40 Back body sink mark

Back body의 천장 쪽에 있는 차체 결합부에서 sink mark가 발견되었다. 이는 결합부 쪽의 두께가 두꺼워 injection 후 cooling 과정을 거칠 때 이 부분에서 두께 감소가 주변보다 더 크게 일어났기 때문이다. Sink mark를 해결하기 위해 결합부의 두께를 줄여야 한다.

3.1.6 Poor Surface Finish



Fig. 41 Surface of mold(left) & Surface of plastic part(right)

왼쪽 Figure을 통해 볼 수 있듯, mold의 surface finish가 좋지 않다. 이는 손으로 작업한 grinding의 한계 때문이다. 해당 mold를 이용하여 injection molding을 진행한 결과 오른쪽 사진과 같이 사출품의 surface finish도 매우 좋지 않은 것을 확인하였다. 이는 injection molding의 특성상 사출품이 mold의 표면 거칠기를 그대로 따라가기 때문이다. hand grinding을 적게 해야 좋은 표면 거칠기를 유지할 수 있는데 그러기 위해서는 처음부터 합형이 잘 될 수 있도록 mold 설계를 하는 것이 중요하다.

3.2. Evaluation of the plastic parts (e.g. dimensions, surface quality, etc.) (a) Histogram plots and (b) Statistical analyses for comparing the critical dimensions of your part design specifications to the measured dimensions of a hundred (entire parts) plastic products you manufactured. Explain where the deviations of the critical dimensions of plastic parts originate from.

2.2.2.1에서 서술한 문제로 인해, injection molding을 통한 대량 생산에 실패하였다. injection molding을 통해 대량 생산한 제품의 dimension deviation에 대해 알아보기 위해, 다른 제품을 예시로 하여 통계적

분석을 진행해 보았다. 이때 사용한 critical dimension은 1.4에서 언급한 것과 동일하거나 유사한 수치이다. 총 20개의 사출물을 사용하여 통계 분석을 진행하였다.

3.2.1 전면부-chassis 연결부 크기



Fig.42 전면부-chassis 연결부 측정 부위(left) & 도면 상 실제 길이(right)

1.4.2.1에서 언급한 차체의 front body가 chassis와 결합되는 ‘L’자 연결부의 길이를 측정하여 통계 분석을 수행하였다. 위 figure에 나와있듯이 도면 상 실제 길이는 5.2mm이다.

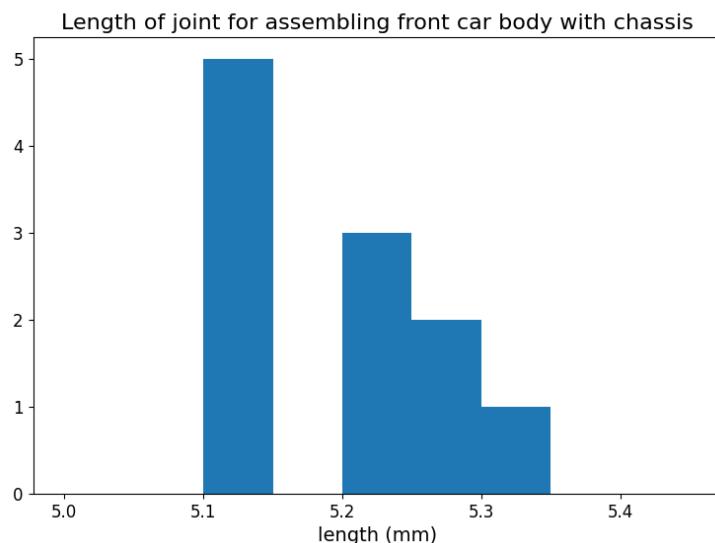


Fig.43 전면부-chassis 연결부 길이 히스토그램

구간의 크기를 0.05mm로 설정하여 히스토그램을 도시하였다. 5.1mm-5.15mm 구간에 많은 수의 sample이 모여 있는 것으로 보아, 길이 수축이 대략 0.1mm 정도 발생했다고 추측할 수 있다.

평균 길이는 5.195mm, 표준 오차(standard error, divided by $n-1$)는 0.077mm로 도출되었다. 참값 대비 상대 오차(relative error)는 0.106%이다. 사출 후 shrinkage을 고려한다면 실제 길이가 참값 5.2mm보다 작아지는 현상은 당연하다. 평균 연결부 길이가 참값보다 통계적으로 유의미하게 작은지 검증하기 위해 표준 오차(표본 표준편차)를 사용한 t-test를 수행하였다. 귀무 가설 “ H_0 : 평균 연결부 길이 = 5.2mm”, 대립 가설 “ H_1 : 평균 연결부 길이 < 5.2mm”인 일방향 검정으로 설정하였고, sample number=20을 사용하였다. p-value = 0.05을 기준으로 하여 귀무 가설을 채택할지 기각할지 결정하였다.

검정 결과 t-score = -0.3178, p-value = 0.377로 0.05보다 크기 때문에 귀무 가설이 채택되었다. 즉, shrinkage가 발생하긴 했어도 chassis 결합부 길이가 통계적으로 유의미할 만큼 수축되진 않았다고 결론을 내릴 수 있다.

3.2.2 후면부-chassis 연결부 크기



Fig. 44 후면부-chassis 연결부 측정 부위(left) & 도면 상 실제 길이(right)

1.4.2.2에서 소개했듯이 차체의 back body가 chassis와 결합되는 반원 모양의 연결부의 폭을 측정하여 통계 분석을 수행하였다. 위 figure에 나와있듯이 도면 상 실제 길이는 4.82mm이다.

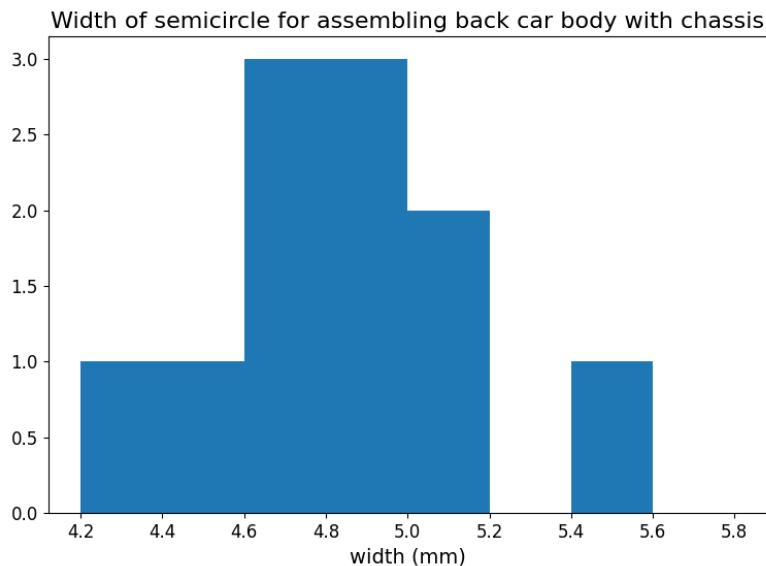


Fig. 45 후면-chassis 연결부 폭 히스토그램

3.2.1 전면-chassis 연결부의 치수에 비해 variation이 굉장히 크게 도출되었기 때문에 히스토그램의 구간의 크기를 0.2mm로 늘려 도시하였다. 측정값의 범위가 4.2mm에서 5.5mm까지 굉장히 넓게 분포하는 것으로 보아, 사출 quality가 좋지 않았다는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 몇몇 사출물에 대해서는 추가 부품이 완벽하게 고정되지 않을 가능성이 크기 때문에 사출 공정을 더욱 각별히 관리할 필요가 있어 보인다. 결합부 쪽의 grinding을 추가로 수행하는 등 mold quality를 향상시킴으로서 해결 가능할 것이다.

평균 길이는 4.864mm로 계산되었고, 표준 오차는 0.324mm로 3.2.1에서의 표준 오차 0.077mm보다 대략 4배 이상으로 크게 도출되었다. 참값과의 상대 오차는 0.913%이다. 평균 폭이 참값보다 통계적으로 유의미하게 다른지 검증하기 위해 t-test를 수행하였다. 귀무 가설 “ H_0 : 평균 폭 = 4.82mm”, 대립 가설 “ H_1 : 평균 폭 \neq 4.82mm”인 양방향 검정으로 설정하였고, sample number=20, p-value = 0.05을 기준으로 하였다.

검정 결과 t-score = 0.6073, p-value = 0.551로 0.05보다 크기 때문에 귀무 가설이 채택되었다. 즉, chassis 결합부 반원 폭이 통계적으로 유의미한 만큼 다르지 않았다고 결론을 내릴 수 있다.

3.2.3 전면부-후면부 연결부 크기

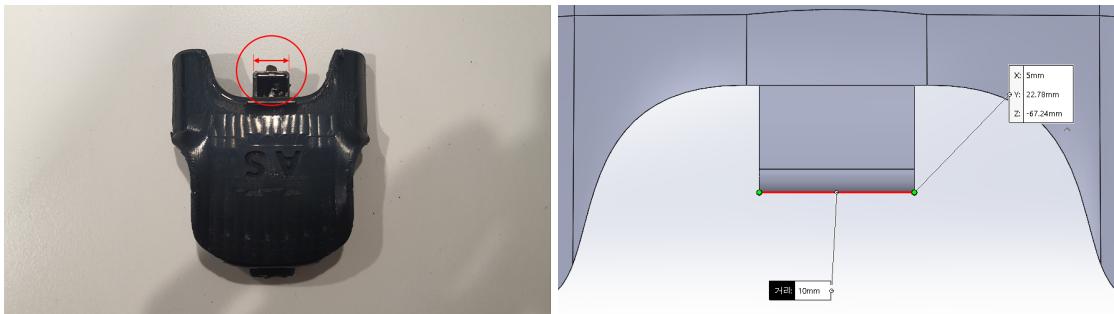


Fig. 46 전면부-후면부 연결부 측정 부위(left) & 도면 상 실제 길이(right)

1.4.2.3에서 소개했듯이 차체의 front body와 back body가 서로 결합되는 연결부의 폭을 측정하여 통계 분석을 수행하였다. 위 figure에 나와있듯이 도면 상 실제 길이는 10.0mm이다.

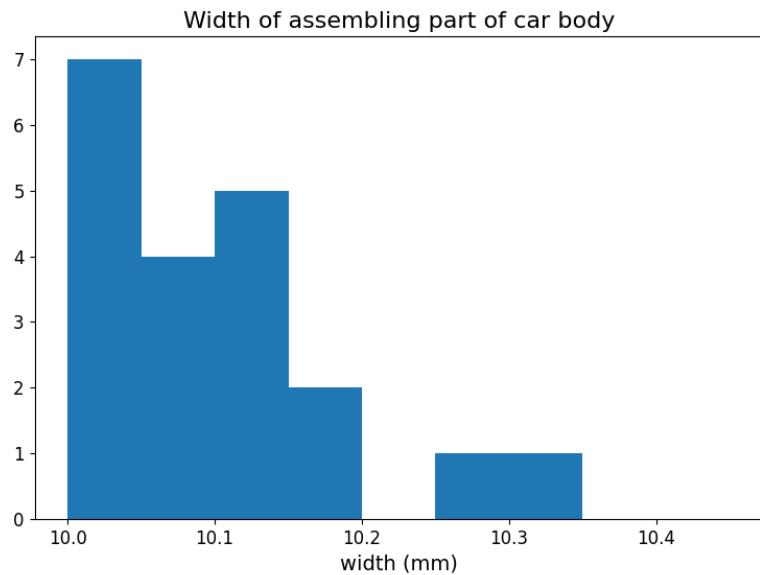


Fig.47 전면부-후면부 연결부 폭 히스토그램

히스토그램의 구간의 크기를 0.05mm로 설정하여 도시하였다. Shrinkage를 고려하면 측정 결과가 10mm보다 작게 도출되는 것이 일반적이지만 위 경우 모든 사출물의 연결부 폭이 10mm보다 크게 출력되었다. 이는 다른 외부 원인에 의해 연결부 폭의 치수가 영향을 받았다고 추측할 수 있다.

가장 먼저 고려할 수 있는 원인은 flash이다. Sample 길이를 측정하면서 연결부에 얇은 플라스틱 조각이 붙어있는 경우를 많이 관찰하였기 때문이다. 곡면으로 이루어진 연결부의 특성상 flash가 발생하기 쉬운 구조이므로, mold 가공을 좀 더 신경써서 수행한다면 이러한 문제를 해결 할 수 있을 것으로 예상된다.

평균 길이는 10.099mm, 표준 오차는 0.092mm로 계산되었다. 참값과의 상대 오차는 0.99%이다. 평균 폭이 참값보다 통계적으로 유의미하게 큰지 검증하기 위해 t-test를 수행하였다. 귀무 가설 “H0 : 평균 폭 = 10mm”, 대립 가설 “H1 : 평균 폭 > 10mm”인 일방향 검정으로 설정하였고, sample number=20, p-value = 0.05을 기준으로 하였다.

검정 결과 t-score = 1.3665, p-value = 0.094로 0.05보다 크기 때문에 귀무 가설이 채택되었다. 즉, 전면부와 후면부 사이 결합부의 폭이 참값보다 통계적으로 유의미한 만큼 크진 않았다고 결론을 내릴 수 있다. 다만, p-value가 0.05와 크게 차이나지 않기 때문에 10mm보다 어느정도 크게 사출되었다는 점은 사실이다. 좀 더 각별한 관리가 이루어질 필요가 있다.

3.2.4 파트 간 결합 완료 시 전면부-chassis 연결부와 후면부-chassis 연결부 길이

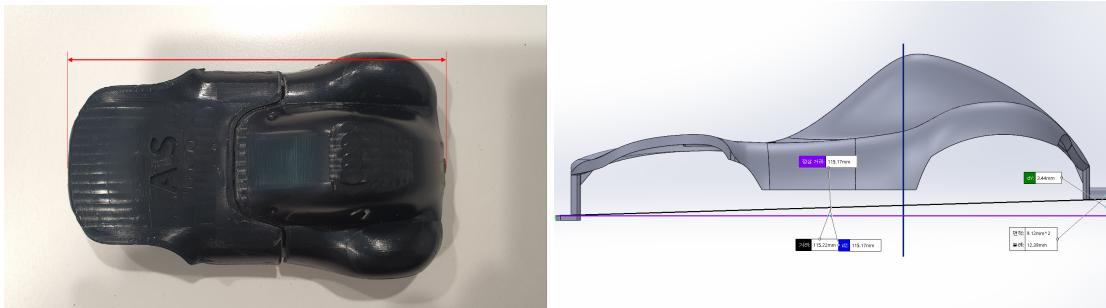


Fig.48 전면부 연결부와 후면부 연결부 사이 길이 측정(left) & 도면 상 실제 길이(right)

1.4.2.4에서 제시했듯이 파트 간 결합 완료 시 각 결합부 사이 길이는 중요한 치수이다. 따라서 front body와 back body를 결합한 후 전체 길이를 측정하여 통계 분석을 수행하였다. 위 figure에서 나와있듯이 도면 상 실제 길이는 115.17mm이다.

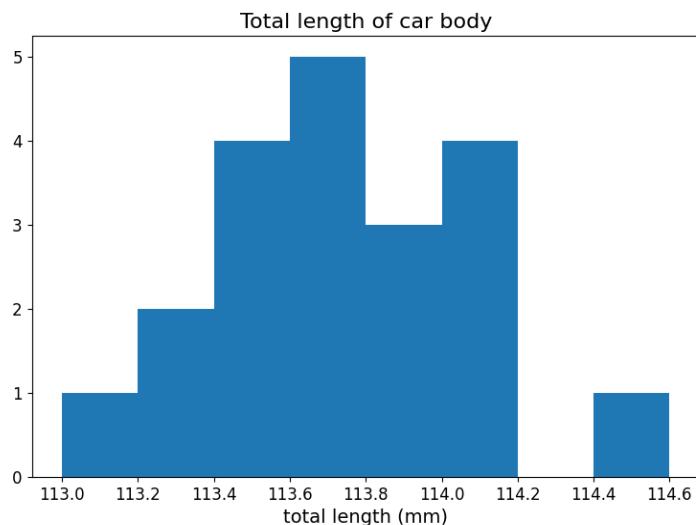


Fig.49 전면부-후면부 연결부 폭 히스토그램

히스토그램의 구간의 크기를 0.1mm로 설정하여 도시하였다. Shrinkage 영향으로 전체 길이가 참값 115.17mm보다 크게 감소하였다. 이는 chassis와의 정밀한 결합에 큰 영향을 미칠 수 있다. 도면 제작 시 shrinkage를 미리 고려하여 목표 길이보다 1~2mm정도 크게 설정할 필요가 있다.

평균 길이는 113.744mm, 표준 오차는 0.332mm로 계산되었다. 참값과의 상대 오차는 1.25%이다. 평균 폭이 참값보다 통계적으로 유의미하게 작은지 검증하기 위해 t-test를 수행하였다. 귀무 가설 “H0 : 평균 길이 = 115.17mm”, 대립 가설 “H1 : 평균 폭 < 115.17mm”인 일방향 검정으로 설정하였고, sample number=20, p-value = 0.05을 기준으로 하였다.

검정 결과 t-score = -19.683, p-value ~ 0로 0.05보다 매우 작아 대립 가설이 채택되었다. 즉, 각 결합부 사이 길이가 참값보다 통계적으로 유의미하게 작았다. Shrinkage를 고려한 설계가 이루어질 필요가 있다.

3.3. Discussions of why the dimensions of machined molds and plastic parts do or do

not meet the target. Calculate shrinkage and compare with the typical shrinkage values of materials

Table 1.1 Dimensional stability data

Material	Thermal expansion (mm/mm K ⁻¹ × 10 ⁶)
ABS (rigid)	80
Acetal	80
Cellulose acetate	100
Fluorinated ethylene propylene	90
Nylon 6,6	120
Nylon 6	100
Nylon 11	150
Nylon 12	104
Polybutyleneterephthalate	90
Polycarbonate	70
Polyethylene (LD)	170
Polyethylene (HD)	120
Polymethylmethacrylate	85
Polypropylene	110
Polyphenylene oxide (modified)	55
Polystyrene (GP)	70
Polystyrene (rubber modified)	120
Polyethersulphone	55
Polyvinyl chloride (rigid)	55
Styrene acrylonitrile	70
Steel	11–13

The above are typical values for unfilled grades

Fig. 50 ABS 소재의 thermal expansion coefficient

사출 성형에 사용한 ABS 소재의 경우 thermal expansion coefficient가 80×10^{-6} 로 알려져 있다. ABS 사출 성형에 사용하는 melting plastic의 온도는 보통 200~238°C를 사용하는 것으로 알려져 있으므로 상온 15°C와 비교해서 cooling 시 평균 200°C의 온도차가 발생한다. 이로부터 이론적인 수축률을

$$l - l_0 = l_0 \alpha \Delta T, \text{ 수축률} = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% = \alpha \Delta T \times 100\% = 1.6\%$$

로 계산할 수 있다.

a. 도면 설계 치수 – pin 직경 5.95mm, hole 내경 6mm

b. 실제 사출물 크기 – pin 직경 5.862mm, hole 내경 5.867mm

pin 의 수축률은 1.49%, hole은 2.21%

Fig. 51 알려진 수축율 값

한편 실제 사출 성형 시 알려진 수축률 값에 따르면 shaft의 수축률은 1.49%, hole의 수축률은 2.21%이다. 이와 같이 shaft와 hole의 수축률이 차이나는 이유는 형상의 기하학적 구조에 따라 residual stress이 다르기 때문이다. 3.3.1, 3.3.2에서는 실제 shaft와 hole의 수축율을 측정하여 위에서 제시한 값들과 비교를 수행하도록 할 것이다.



Fig. 52 Rear wing의 shaft와 back body의 hole의 press fit 결합

본 제품에서 가장 critical한 치수는 서로 다른 파트가 결합하는 부위이다. 하지만 차체와 chassis와의 결합 부위는 제대로 사출된 제품이 없었기 때문에 shrinkage 정도를 측정할 수 없었다. 따라서 차체 back body와 rear wing과 shaft-hole press fit으로 결합되는 부분의 shrinkage를 측정하고 이를 알려진 값과 비교하였다. 사출이 제대로 수행된 제품을 선별하여 rear wing shaft, back body hole 각각 8회 측정하였다.

3.3.1 Rear wing shaft의 직경 shrinkage 측정 및 비교

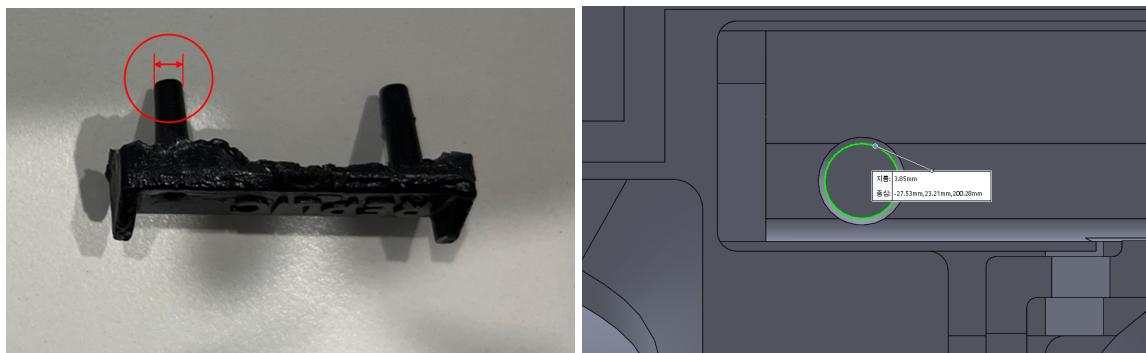


Fig. 53 Rear wing shaft 측정 부위 (left) & 도면 상 실제 길이(right)

위의 figure에서 표시한 부위를 8회 측정하였다. Mold 도면 상에서 참값은 3.85mm로 나타난다.

Table. 2 Rear wing shaft 측정 결과

측정 횟수	1	2	3	4	5	6	7	8	평균
결과(mm)	3.73	3.71	3.76	3.77	3.79	3.77	3.79	3.76	3.76

8회 측정 결과 평균 3.76mm으로 도출되었고, 참값 3.85mm와 비교하여 2.34%의 수축률을 보였다. 이는 이론적으로 계산한 수축률 1.6%, 알려진 수축률 2.21%와 비교하여 더 큰 값이다. 이러한 원인으로는 앞서 언급하였듯이 형상의 기하학적 구조에 따라 residual stress이 다르기 때문인 것으로 예상된다. 그 외에도 shaft의 경우 mold의 말단부에 위치하기 때문에 melting plastic이 끝까지 도달하지 못하여 직경이 작게 측정되었을 가능성이 있다. 이러한 경우 근본적으로 short shot 현상에 의한 것이기 때문에 injection molding condition을 조절하면 해결 가능할 것이다.

3.3.2 Back body hole의 직경 shrinkage 측정 및 비교

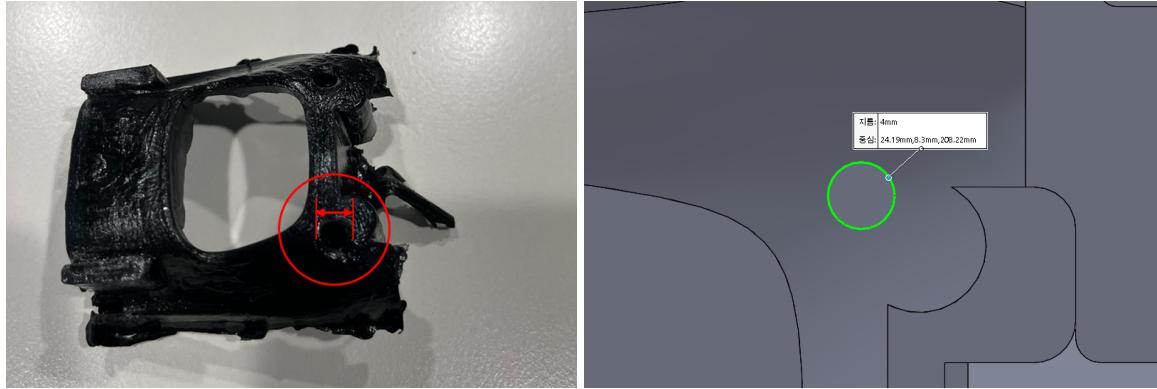


Fig.54 Back body hole 측정 부위 (left) & 도면 상 실제 길이(right)

위의 figure에서 표시한 부위를 8회 측정하였다. Mold 도면 상에서 참값은 4.00mm로 나타난다.

Table. 3 Back body hole 측정 결과

측정 횟수	1	2	3	4	5	6	7	8	평균
결과(mm)	3.85	3.96	3.99	3.97	3.97	3.85	4.03	3.81	3.93

8회 측정 결과 평균 3.93mm으로 도출되었고, 참값 4.00mm와 비교하여 1.75%의 수축률을 보였다. 이는 이론적으로 계산한 수축률 1.6%, 알려진 수축률 1.49%과 비교하여 더 큰 값이다. 이러한 원인으로는 앞서 언급하였듯이 형상의 기하학적 구조에 따라 residual stress이 다르기 때문인 것으로 예상된다. 그 외에도 mold의 grinding이 제대로 수행되지 않아 mold의 hole 직경이 설계 시 의도했던 값과 달라졌을 가능성이 있다.

4. Cost and scale-up

4.1. Analysis of the cost of your parts

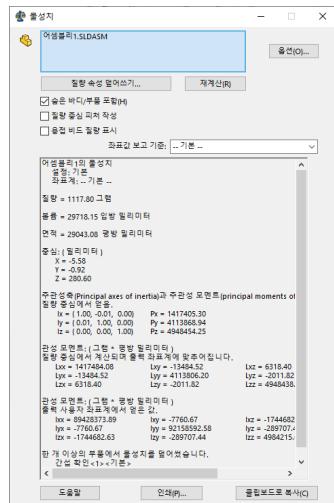


Fig.54 몰드 캐비티 (Scrab + Part) 의 총 부피

4.1 절은 REPLICAR 가 생산하는 스포츠카 바디의 상품성을 정량적으로 평가하기 위해 한 개의 part 를 생산하기 위해서 필요한 Scrab 과 Part 의 재료 가격을 계산한다.

1개의 part를 생산하기 위한 비용을 측정한다. 이를 측정하기 위해서는 필요한 Scrab과 part의 부피를 계산하고 이에 해당하는 재료의 가격을 산출해야 한다. Fig.48에서 SolidWorks를 이용한 결과 총 29718 mm^3 의 재료가 필요하다. injection molding에 사용되는 material은 1kg당 2000원 가량이다. ABS의 밀도는 $1.05 \times 10^{-6} kg/mm^3$ 이므로, 한 part 당 소요되는 재료 비용은 약 62원이다. 따라서, REPLICAR 팀트를 Injection molding 으로 제작시 파트에 소요되는 재료 비용은 매우 적고 2.3.1. 절에서 밝힌 대로 한 part 생산에 필요한 시간은 약 15초 이므로, 대량 생산에 유리하다는 결론을 내릴 수 있다. 4.2 절에서는 실제로 REPLICAR 제품의 가격을 채택하고 이를 통해 완구 시장에서 어느 정도의 순이익을 낼 수 있는지 분석한다.

4.2. Projection of the cost for a production of 100,000 parts

100,000 개의 part를 생산하기 위한 총 비용은 고정 비용과 각 파트에 요구되는 변동 비용의 합으로 표현된다. 이때, 고정 비용은, 1) 임금, 2) 공장 부지 비용, 3) 알루미늄 몰드 비용 4) Injection molding 장비 비용 5) CNC machining 비용의 합으로 표현된다. 각 요인에 대한 가격 책정은 아래와 같이 이루어진다.

첫 번째, 팀 내 회의를 통해 REPLICAR의 8명의 한 달 임금 비용을 100만원으로 정하였다. 두 번째, 부지 임대 비용은 매매 대금 (대량 80%에 해당) 및 건물분 부가세 (대략 10%에 해당) 그리고 기타 비용 (취등록 세 및 이사비) 을 포함하여 10억 원의 부지 비용을 책정하였다. 세 번째, 상하코어 한 쌍의 알루미늄 몰드를 만들어 생산을 진행한다. 이때, 알루미늄 코어의 길이 수치는 가로 200mm, 세로 110mm, 높이 30mm이며 상하코어 각각 하나씩 생산한다고 가정한다. 한국자원정보 서비스 (검색 일자 2022. 12.

17) 의 자료에 따르면 알루미늄의 원가는 2464\$/ton이며 알루미늄의 밀도는 $2.7g/cm^3$ 이다. 이를 이용해 계산한 알루미늄 몰드의 원가는 12000원으로 계산할 수 있다. 추가로, 여분의 몰드와 추가적인 가공을 고려하여 10만원의 가격을 책정하였다. 네 번째, Injection molding 장비는 YUDO 회사의 Hot runner system 을 이용하며, 가격은 2억원으로 책정하였다. 마지막으로 CNC machining 은 서울대학교의 VESTA-660-10K 장비를 대여 활용하고, 가격은 따로 책정하지 않는다.



Fig. 48 Injection molding machine, YUDO ©

한편, 변동 가격은 1) 생산직 임금 2) 파트 및 Scrab 의 재료 가격의 합으로 표현된다. REPLICAR 팀원이 직접 생산을 진행하므로 생산직 임금은 요구되지 않는다. 파트 및 Scrab의 가격은 위 4.1에서 서술하였듯이 하나의 파트 당 62원이다.

따라서 100,000개의 parts를 생산하는데 필요한 재료의 비용은 약 620만원이라고 할 수 있다.

이를 실제 시장의 완구 가격과 비교하면, 실제 시장은 car body 이외에도 샤시, 배터리 등 부속품을 같이 판매한다. ‘타미야 현대 i20 쿠페 WRC 미니카 95517’ 모델의 경우 시장에서 15000원에 판매되고 있다.

이에, 4.2. 절에서 다룰 고정 비용을 고려하여 완제품의 가격을 10000원으로 설정할 시, 100,000개의 레플리카를 판매해 얻을 수 있는 총 수입은 약 5억원이다. 이때, 샤프와 배터리 등의 가격을 고려하여 한개의 파트를 판매했을 때 얻을 수 있는 이익은 약 5000원이라고 가정한다.

부지 비용과 인젝션 몰딩 기기기의 경우 사업이 끝난 후 다시 판매할 수 있기 때문에 순이익을 계산하는 과정에서 고려하지 않아도 괜찮다고 판단했다. 따라서 100,000개의 part를 팔아서 발생한 순이익은 총 수입 5억원에서 월 800만원의 급여 12개월 총합 1억 6천만원, 재료비용 620만원, 몰딩 제작비 10만원을 뺀 약 3억 3천만원이라고 볼 수 있다. 추가로 판매하는 REPLICAR 의 제품의 개수를 늘리면 늘릴수록, Injection molding 특성 상 변동 비용이 매우 작으므로, 1개 제품 판매당 취할 수 있는 순이익이 증가한다는 점도 주목할 만하다.

4.3. Discussion on how your product design was adapted to meet the constraints of the available manufacturing equipment for this course, and how you would change it for mass production (You do not need to present a new design, but a succinct description along with any visuals indicating features on the prototype molds/design that would be changed.)

4.3.1 몰드의 크기

우선 제작 과정에 가장 많은 영향을 미친 제약 조건으로 몰드의 크기가 있었다. 이러한 몰드 크기 제한은 injection molding을 하는 기계에 들어갈 수 있는 크기가 정해져 있기 때문이라고 생각해 볼 수 있다.

이 크기에 맞도록 차체 사이즈를 줄이기 위한 구조를 고민하여 설계하였고, 몰드 안에서 세 개의 파트가 어떠한 위치 관계를 가져야 정상적인 사출이 가능할지 지속적으로 고려하였다. 이러한 과정에서 몰드에서의 각 파트의 높이를 조절해가며 공간을 확보하였고, 러너로부터 뻗어 나오는 가지의 형상도 다양하게 배치해 보았다.

이렇게 어느 정도 해결을 했더라도 이는 그저 작은 몰드에 필요한 파트들을 겨우 끼워 맞춘 수준에 불과하였으며, 다양한 문제가 발생할 수밖에 없었다. 우선, 러너와 파트를 연결해 주는 게이트의 형상이 복잡해져, 설계, CNC 가공, 그리인딩, 등의 과정에서 디테일적인 부분을 제대로 구현하는 것에 많은 어려움이 생겼다. 또, 공간의 제한 때문에 가지가 파트와 연결되는 부분을 여러 개 둘 수 없이 하나로 제한할 수밖에 없어, 사출 시 효율을 올리지 못함과 동시에 short shot, weld line, 등 결함을 대비하지 못하였다.

만약 더 큰 몰드를 사용하였다면 제약 없이 파트를 배치하여, 효율적 injection molding을 위한 다양한 요소들을 자유롭게 고려할 수 있었을 것이다. 후면부로 이어진 gate의 경우 하단 연결부로 연결되어 주입 초반에 퍼지기 쉬운 형태가 아닌 것이라는 등의 문제가 존재하는데, 이를 해결하기 위해 양쪽으로 사출되도록 하는 설계적 변화를 자유롭게 진행할 수 있을 것이다. 전면부로 이어진 gate의 경우 원래 gate는 유지하되, 마찬가지로 양쪽으로 사출되는 gate를 추가하여 short shot을 방지할 수 있을 것이다. 또한 리어윙과 연결된 gate의 길이를 조절하여 파트 간 충전 시간 balance도 쉽게 조절할 수 있었을 것이다.

4.3.2 깊고 얕은 몰드의 cavity

본 제품의 초기 설계 단계에서, 심미성을 강조하기 위하여 실제 자동차와 최대한 유사한 형상을 만들었다. 이 이유 때문에 생긴 제품의 특징 중 하나가 얕고 세로 형태인 옆면이 생겼다는 것이다. 이 옆면을 사출하기 위해 몰드에서 깊고 얕은 cavity가 생겼는데, 이는 cnc 가공과 injection molding 시 ejection에 부정적인 영향을 끼쳤으며, 수없이 많은 수정 과정을 거치게 한 원인이 되었다. 디자인 초기 단계에 심미성보다는 몰드 가공과 injection을 고려한 설계를 우선적으로 하고, 그 이후에 심미성을 고려하였다면 보다 효율적이고 성공적인 몰드 설계와 injection이 이루어졌을 것이다.

4.3.3 상하 코어 가공 공차

CNC 가공에서도 많은 제약이 있었는데 가공 도구의 종류와 치수 제한, 시간의 제약, 상하코어 가공 업체의 차이, 등이 있었다. 가공 도구 종류와 치수 제한, 그리고 시간의 제약을 해결하기 위해 앞서 서술한 바 있듯이 가공 quality를 어느 정도 포기하고 cnc machining을 진행할 수밖에 없었다. 이는 가공 공차의 증가를 야기하여, 몰드 합형에 어려움을 주었다. 또, 상하코어 CNC machine의 차이도 두

Machine에서 발생하는 오차에 의해 합형에 어려움을 주었다. 이러한 합형의 어려움으로 인해 손으로 그라인딩 작업을 하는 것이 불가피했고, 손으로 한 그라인딩 작업은 몰드에 불균일함과 부정확함을 야기하여 flash 등의 defect를 야기했다.

대량 생산을 위한 작업인 만큼 금전적, 시간적 제한을 적게 두어 보다 다양한 도구로 오랜 시간 가공할 수 있었다면, 기계적으로 정밀한 몰드를 이용할 수 있어 injection molding을 이용한 대량 생산이 성공적으로 이루어졌을 것이다.