

# 제품 디자인 보고서

## 재료와 제조공정 Project

<b>A. 회사 소개</b> .....	1
<b>B. 프로젝트 개요</b> .....	1
<b>C. 제품 디자인</b> .....	3
C.1. 미적 설계 .....	3
C.2. 공학 설계 .....	3
C.2.1. 정성적 모델 .....	3
C.2.2. 정량적 모델 .....	5
C.3 제품 후보군 비교 .....	10
<b>D. 소재와 안정성</b> .....	12
D.1. ABS 몰딩 .....	12
D.2. 내구도 .....	12
D.3 조립방식설계 .....	13
<b>E. Bill of materials</b> .....	14
<b>F. Gantt chart</b> .....	15

### -4 조 구성원-

이 름	학 번	소 속
송찬의	2018-17070	기계항공공학부
강지훈	2018-12728	기계공학부
신재호	2017-15593	기계공학부
하창우	2017-16289	기계항공공학부
황준호	2017-14429	기계공학부
강우준	2017-18958	기계공학부
윤석원	2019-15022	자유전공학부
최현도	2017-17939	기계항공공학부
이태훈	2017-11771	기계공학부

## A. 회사 소개

(주)관악산타는 관악산에 찾아온 산타와 같이 공대생 맞춤 장난감을 설계, 제작, 및 선물하는 회사입니다. “즐거운 공학”이라는 동일한 목표 아래 모인 9명의 엔지니어들로 구성되어 있으며, 사람들에게 “희망과 행복”, “공학의 즐거움”이라는 가치를 전달해주기 위해 꾸준히 성장중인 회사입니다. 회사 명칭은 ‘관악사에 내려온 산타’, 그리고 ‘우리를 따라 관악산을 타고 함께 나아가자’라는 중의적 의미를 지니고 있습니다.

효율적인 업무 수행을 위해 구성원들은 업무의 형태에 따라 각각의 부서로 배치되었습니다. 사내 조직도는 다음과 같습니다.

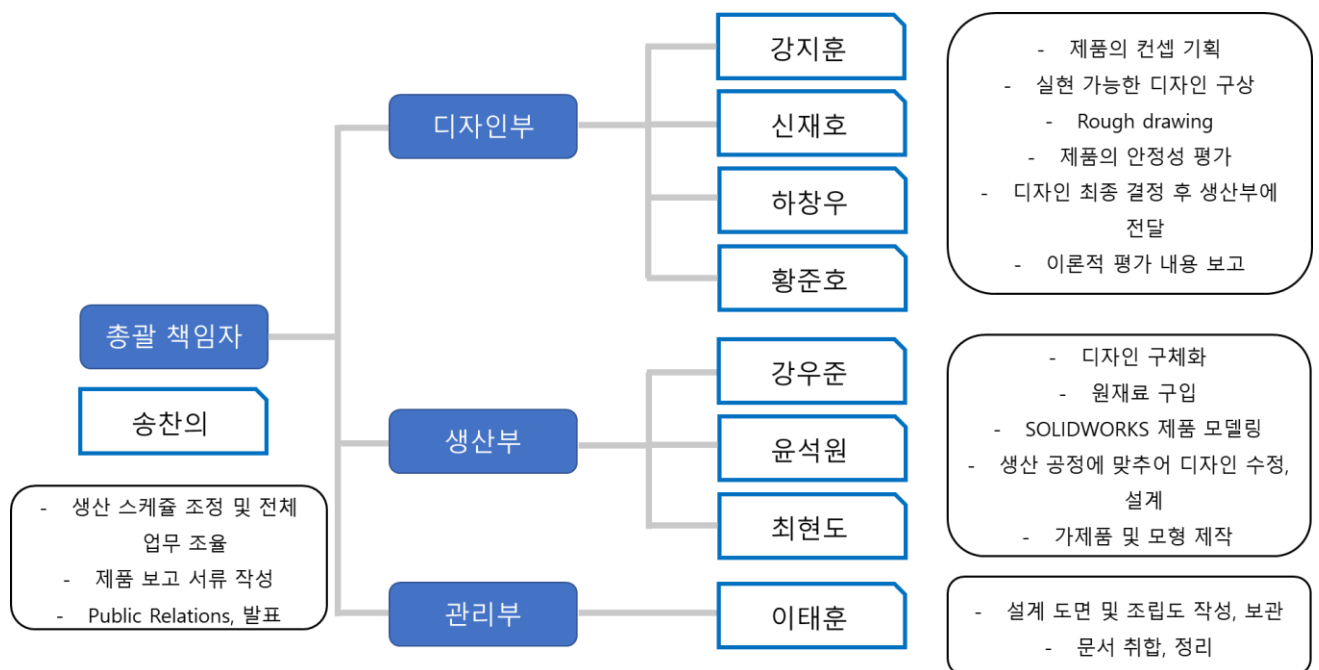


Fig. 1 Organizational structure of Team 4

## B. 프로젝트 개요

이번 프로젝트에서 저희는 중력에 의해 빗면을 따라 걸어 내려오는 장난감, 이른바 ramp walking toy를 제작하게 됩니다. Ramp walking toy는 일반적으로 커다란 몸체와 몸체에 붙어 있는 앞다리, 그리고 가운데에 달린 회전 가능한 뒷다리를 이용하여 빗면을 뒤뚱거리면서 내려갑니다. Ramp walking toy의 재밌는 점은 동력 없이 움직인다는 것과, 몸체가 중력에 의해 내려가긴 하지만 앞 뒤로 몸이 기울어지면서 마치 다리를 움직여 조금씩 조금씩 걸어 내려가는 것으로 보인다는 점입니다. 이 때 장난감이 걷다가 넘어지지 않기 위한 물리 조건을 전형적인 제품 형태에 역

(주)관악산타	<b>Product Design Report</b>	2021.09.30
		Revision -1-

학적인 분석을 시도하여 알아냅니다. 이를 통해 저희는 약 20도 경사면에서 안정적으로 작동하는 장난감을 최대한싼 값에 대량 생산하는 것을 목표로 합니다.

실제 생산에 있어서 장난감 원재료로 ABS(Acrylonitrile butadienstyrene)를 선택했고, 인젝션 몰딩 방식으로 성형해 장난감 파트를 만들고자 합니다. 또한, 구조적 허용 범위 안에서 제품의 독창성을 더해줄 요소를 넣고자 합니다. 따라서 각 부서가 이번 프로젝트에서 수행할 업무는 다음과 같습니다.

Table 1 Specific role distribution

디자인 부	아이들 장난감 컨셉에 맞추어 제품 외관을 디자인합니다. 복잡하지 않으면서도 심미성 있는 다양한 디자인을 구상합니다. 또 Walking toy가 실제로 걷기 위한 조건을 역학적으로 분석하여 정립합니다. 이를 통해 이론적 허용치 안에서 Walking toy가 가질 수 있는 독창성을 고려합니다. 이렇게 만들어진 여러가지 원안 중 공학적인 실현 가능성을 따져 최종 디자인을 선택합니다. 후보 제품들 간에 비교한 내용과 선택 근거를 보고합니다. 실제로 제작된 제품 모델에 대하여 이론적 평가를 내립니다.
생산부	몰딩을 위한 상부 몸체 파트, 하부 몸체 파트, 뒷다리 파트를 모델링합니다. 성공적인 몰딩을 위해 몸체 내부를 파내고 구배를 넣습니다. 또한 몰드 디자인에서는 엔드밀 직경과 ABS 소재의 특징을 고려하여 벽면과 돌출부의 두께를 조절합니다. 몸체 내부에 강화 구조물을 설계합니다. 설계 과정에서 제품의 개선사항이 있을 경우 기존의 후보 제품과 비교하여 이를 보고하고 수정합니다. 생산에 앞서 레이저 커팅기를 이용하여 가제품을 제작합니다. 제품의 완성도와 작동 여부를 예측합니다.
관리부, 총괄 책임자	본 문서, Product design report를 주어진 양식에 맞추어 작성합니다. 이 때 보고된 내용과 문서, 파일들을 취합하여 정리합니다. 모델링이 완성되면 제품의 도면과 조립도를 작성합니다. 전체적인 업무를 조율하고 보조합니다.

위의 기준은 절대적이지 않으며 조직은 유연하게 운영될 수 있습니다. 특히 몰드 디자인의 경우 시행착오가 예상되므로 가능한 모든 인원이 참여하도록 합니다. 또한, 실제 인젝션 몰딩 생산 과정은 기존에 협업하던 외부업체에 외주를 맡겨 진행합니다.

(주)관악산타	<b>Product Design Report</b>	2021.09.30
		Revision -1-

## C. 제품 디자인

### C.1. 미적 설계

저희 회사의 제품 출시 예상일은 12월 2일로, 주 고객층은 장난감을 좋아하는 아이들과 한 학기동안 열심히 재료와 제조공정 프로젝트에 참여한 수강생들입니다. 저희는 고객들을 위해 연말 시즌에 맞는 크리스마스 장난감을 준비하고자 합니다. 저희 회사에서 설계한 Walking Toy는 선물을 뿌리고 다니는 산타클로스입니다.

디자인을 간략히 소개하면 다음과 같습니다. 본사의 산타클로스는 변화하는 디자인 트렌드에 발맞추어 매끄러운 곡선으로 디자인되었습니다. 또 둥글 둥글한 산타와 선물 상자의 모습으로 단순한 구조속에서도 지루하지 않고 세련된 디자인을 보이는 것이 본사 Walking Toy의 특징입니다.

그동안 높고 푸근한 산타클로스의 이미지에서 벗어나 현대의 트렌드에 맞게 남녀노소 모두가 좋아할 귀여운 모양으로 설계되었습니다.

선물을 주지 않는 산타는 아무도 반기지 않습니다. 본사의 Walking Toy는 어린아이들의 꿈을 이루어 주도록 제작되었습니다. 산타의 등 뒤에 매달린 선물상자에는 작은 유리구슬을 넣을 수 있도록 설계되었습니다. 빗면을 따라 운동하기 전, 산타의 선물상자를 유리구슬로 채워주면 빗면을 따라 내려오며 사랑을 세계에 전파하는 산타의 모습을 볼 수 있습니다. 취향에 따라 선물상자를 유리구슬이 아닌 알록달록한 색모래로 채워주면 루돌프를 타고 날아가듯이 아름다운 경로를 그리며 빗면을 내려오는 산타를 만나볼 수 있습니다. 산타의 질량이 변함에 따라 달라지는 운동양식은 이 크리스마스 스타의 뒤에 불규칙적인 무늬를 그려주며 그 아름다움을 배 할 것입니다.

산타의 선물상자엔 다음과 같은 문구가 적혀있습니다. "Hope", 희망입니다. 연말이 다가오면 모두가 설레는 기분속에서 살아갑니다. 비록 한해동안 많이 고생했고 힘들었지만, 다가오는 새해에는 조금은 더 나아질 내 모습을, 더 좋아질 주변 환경을 기대하기 때문입니다. 더 좋아질 내년에 대한 희망, 그것이 아름다운 연말 분위기를 만들어주는 요인이고 우리 삶의 원동력입니다. 연말의 아이콘이 뿌리고 다니는 Hope, 그것이 저희가 전달하고 싶은 메시지입니다. 모두 지치고 힘들었던 2021년이었지만 내년엔 더 나아질 것이라는 희망을 산타를 통해 전달해주고 싶습니다.

### C.2. 공학 설계

#### C.2.1. 정성적 모델

본 모델에서는 walking toy에 관한 정성적 분석을 시도하였다. 유튜브 영상에서의 오리 장난감의 움직임을 대략적으로 분석한 결과 다음과 같은 4가지 단계를 통해 움직이는 것을 확인할 수 있었다.<sup>1</sup>

(주)관악산타	Product Design Report	2021.09.30
		Revision -1-

- 1) 오리가 뒤쪽으로 기울어져 있는 상태 (꼬리 부분이 내려간 상태).
- 2) 오리가 앞으로 넘어지면서 붙어있던 앞발과 뒷발이 떨어진 후, 앞발이 빗면에 닿은 상태
- 3) 앞발을 기준으로 오리가 회전하여 앞으로 기울어진 상태 (이 때 떨어져 있던 뒷발이 앞발과 합쳐짐)
- 4) 앞으로 기울어졌던 오리가 합쳐진 앞발과 뒷발을 기준으로 회전하여 다시 뒤로 기울어지기 시작하는 상태

위의 단계들 중 2번째 단계를 제외하고는 오리 장난감이 앞발과 뒷발이 붙어있는 상태로 운동을 알 수 있다. 따라서 나머지 단계들에서는 빗면에 놓인 오뚜기와 비슷한 운동양상을 띤다고 가정할 수 있다. 따라서 본 모델에서는 오뚜기가 빗면에 놓여 있을 때, 넘어지지 않고 운동할 조건을 구하였다.

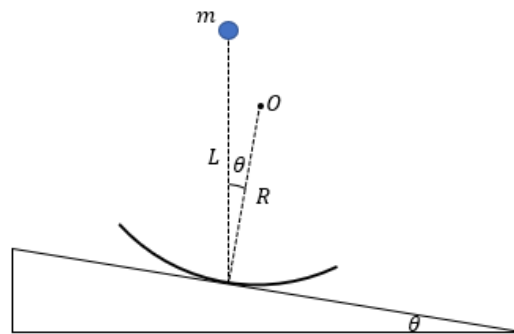


Fig. 2 Equilibrium of tumbling doll model

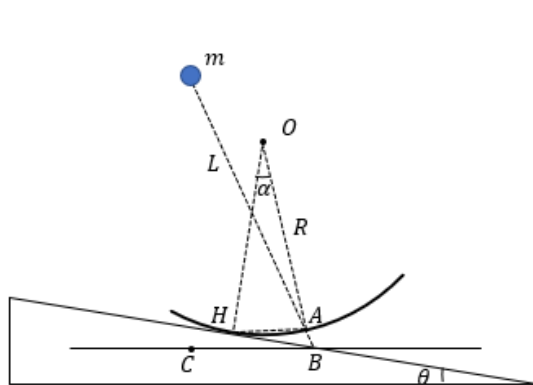


Fig. 3 Tumbling doll tilted to left

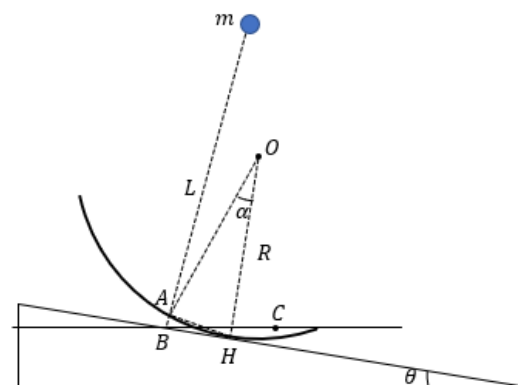


Fig. 4 Tumbling doll tilted to right

바닥 부분이 반지름이  $R$ 인 원호 형태인 오뚜기가 빗면 위에서 평형상태로 있기 위해서는 Fig. 2과 같이 질량중심이 빗면과의 접점 연직 위에 있어야 한다. 이 상태에서부터 오뚜기를 건드려 오뚜기를  $\alpha$ 만큼 회전시키면 Fig. 3와 Fig. 4와 같은 상태가 된다. (Fig. 3는 오뚜기가 시계 방향으로  $\alpha$ 만

큼 회전한 상태를, Fig. 4는 오투기가 반시계 방향으로  $\alpha$ 만큼 회전한 상태를 나타낸다.) 오투기가 넘어지지 않고 평형상태를 기준으로 좌우로 왕복운동을 하기 위해서는 질량중심에 작용하는 중력이 접점을 기준으로 복원력 역할을 할 수 있어야 한다. 따라서 Fig. 3에서는 질량 중심이 점  $H$  오른쪽에 위치하여야 하고, Fig. 4에서는 점  $H$  왼쪽에 위치하여야 한다.

Fig. 3에서 질량중심이 위치한 점을  $M$ 이라고 하였을 때, 질량중심이 점  $H$ 보다 오른쪽에 있기 위해서는  $\overline{MB} \cos \angle MBC < \overline{BH} \cos \angle HBC$  이어야 한다. (점  $C$ 는 점  $B$ 를 지나는 지면과 평행한 직선 위의 한 점이다.)  $\angle OAM = \theta, \angle OAH = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}, \angle AHB = \frac{\alpha}{2}, \angle HAB = \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} + \theta, \angle MAH = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} - \theta, \angle MBH = \frac{\pi}{2} - \alpha - \theta, \angle MBC = \frac{\pi}{2} - \alpha, \overline{HA} = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$ 임을 쉽게 확인할 수 있다. 그리고 삼각형  $AHB$ 에서 사인법칙을 이용하면,  $\overline{BH} = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \times \frac{\sin(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} + \theta)}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha - \theta)} = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \times \frac{\cos(\frac{\alpha}{2} + \theta)}{\cos(\alpha + \theta)}$ 임을 알 수 있다. 위의 값들을  $\overline{MB} \cos \angle MBC < \overline{BH} \cos \angle HBC$ 에 대입해보면  $2R \sin \frac{\alpha}{2} \cos \theta \times \frac{\cos(\frac{\alpha}{2} + \theta)}{\cos(\alpha + \theta)} > L \sin \alpha$  식이 질량중심이 점  $H$ 보다 오른쪽에 있기 위한 조건임을 알 수 있다. Fig. 4에서도 마찬가지로의 방법으로 조건식을 구해보면  $2R \sin \frac{\alpha}{2} \cos \theta \times \frac{\cos(\frac{\theta - \alpha}{2})}{\cos(\theta - \alpha)} > L \sin \alpha$ 임을 알 수 있다. 이 식들에  $\theta = 20^\circ$ 를 대입해보면,  $2 \times \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \alpha} \times \frac{\cos(\frac{\pi - \alpha}{9})}{\cos(\frac{\pi}{9} - \alpha)} \cos \frac{\pi}{9} > \frac{L}{R}$  꼴임을 알 수 있다. (한 식에  $\alpha$ 대신  $-\alpha$ 를 넣으면 다른 식이 나온다. 따라서 다른 식에 대한 그래프를 보고 싶으면 원래 식의 그래프를  $y$ 축에 대해 좌우대칭 시키면 된다.) 좌변의 식을  $y = f(\alpha)$ 꼴의 그래프로 그려보면 Fig. 5와 같은 개형의 그래프임을 알 수 있다. (Fig. 5의 그래프는  $y = \frac{\sin \frac{x}{2}}{\sin x} \times \frac{\cos(\frac{\pi - x}{9})}{\cos(\frac{\pi}{9} - x)}$ 에 대한 그래프이다.) Fig. 5의 그래프에서 극솟값은 0.492이다. 따라서  $2 \times \cos \frac{\pi}{9} \times 0.492 = 0.924 > \frac{L}{R}$ 이면 항상 중력이 복원력 역할을 하여 오투기가 쓰러지지 않도록 할 수 있다. 만약 실제 장난감이 위 조건을 만족시키지 못해 문제가 발생한 경우에는 발바닥의 곡률을 조절하여 쉽게 해결할 수 있다.

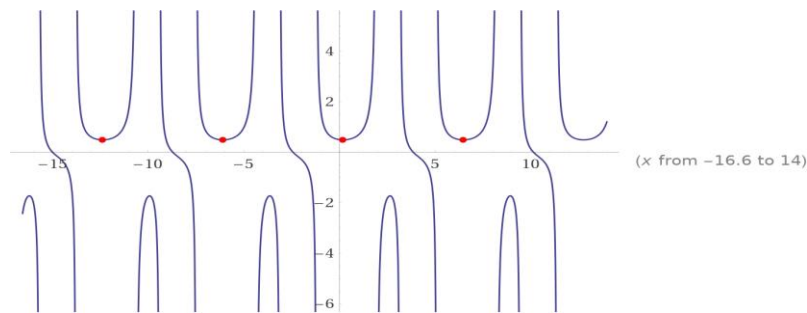


Fig. 5. Graph  $y = \frac{\sin \frac{x}{2}}{\sin x} \times \frac{\cos(\frac{\pi - x}{9})}{\cos(\frac{\pi}{9} - x)}$

## C.2.2 정량적 모델

본 모델에서는 walking toy에 관한 정량적 분석을 시도한다. Fig. 6과 같이 실제 walking toy의 움직임을 관찰해 하나의 주기를 7가지 단계로 구분했고, 이를 바탕으로 아래와 같은 5가지 가정과 Fig. 7와 같은 모델링을 통해 수치적으로 만족해야 할 조건들을 구했다. 관찰은 유튜브 영상 분석

(주)관악산타	Product Design Report	2021.09.30
		Revision -1-

을 통해 이루어졌고, 대상은 아래의 5가지 가정 모두 성립했다.<sup>1</sup>

- 1) Two-piece linkage; hind leg (P1) & body + frontal leg (P2)로 구성된 시스템이다.
- 2) P2의 질량은 P1의 질량에 비해 훨씬 크다.
- 3) 전체 시스템의 질량중심 CM은 뒷다리의 회전축에 위치한다
- 4) 빗면과 닿는 발의 모양은 원호의 일부분이고, 발이 빗면과 접촉하는 점은 미분 가능하다 (발 끝점까지 도달하지 않는다).
- 5) Fig. 6 과정 1~7까지의 에너지 손실은 무시하고, 7에서 1로 넘어가는 과정에서 모든 에너지 손실이 일어난다.

Fig. 6의 7가지 단계에 대한 설명은 다음과 같다. 빗면의 각도는  $\theta = 20^\circ$ 이고, Fig. 7의 왼쪽 상태의 모델에서 출발한다.  $C_i$ 는 walking toy 발의 시작 접점,  $D_i$ 는  $P_i$  발의 마지막 접점을 의미하고, prime(')이 붙게 되면 이는 운동 방향과 walking toy의 형상이 달라져 새로운 운동방향을 기준으로 한 접점을 의미한다. 편의를 위해 Fig. 1의 각 단계를 지칭할 때 k번째 단계를 (k)로 표기한다. 먼저,  $\overline{C_1CM}$ 과 중력 방향 연직선이 이루는 예각이  $\alpha$ 인 (1)과 같은 상황을 한 주기의 초기조건, I.C.로 정의한다. 이때 가정 4)에 의해  $\overline{O_1C_1}$ 과 빗면은 수직하다(관찰 대상이 가정4)를 만족했다). Fig. 7(a)의 상태를 유지한 상태에서 (2)로 넘어가 (3)까지 진행하고, 형태가 Fig. 7(b)로 바뀌면서 (4)와 같다. 이때  $D_2$ 와  $C_1'$ 은 (3)에서 (4)로 넘어갈 때 P1이 P2와 충돌하며 미세하게 달라지지만 육안으로 달라지지 않았고, 가정 2)이 성립함을 확인할 수 있다. (2)의 상황 역시 충돌로 인한 에너지 손실이 일어나지만, 육안으로 확인했을 때 극단적인 디자인이 아니라면 거의 매끄럽게 넘어가는 양상을 보여 가정 5)를 확인할 수 있었다. (4)부터 (6)까지는 Fig. 7(b) 형상으로 기존의 운동방향을 바꾸어 진행하고, (5)에서 (2)와 마찬가지로 충돌이 일어나지만 그 영향을 무시한다. 마지막 (6)에서 (7)로 넘어가 형상이 다시 Fig. 7(a)로 바뀌며 접점은  $D_1'$ 으로 바뀌며, (7)에서 (1)로 넘어가며 형상이 미끄러지고 약간 붕 뜨게 되면서 (1)로 회귀, 접점은  $D_1'$ 보다 아래인  $C_1$ 로 바뀐다. 형상이 붕 뜨고 미끄러지는 이유는 (7)의 에너지가 (1)보다 작아 각각 빗면과 수직, 나란한 방향의 운동량이 존재하기 때문이다. 이러한 과정을 거쳐 하나의 주기가 완성된다.

<sup>1</sup> Bruce Yeany, "Toy Physics--Ramp Walker ///Homemade Science with Bruce Yeany", 2014.6.14 게시, 2021.9.26 방문, <https://www.youtube.com/watch?v=aBq6VArNyQY>

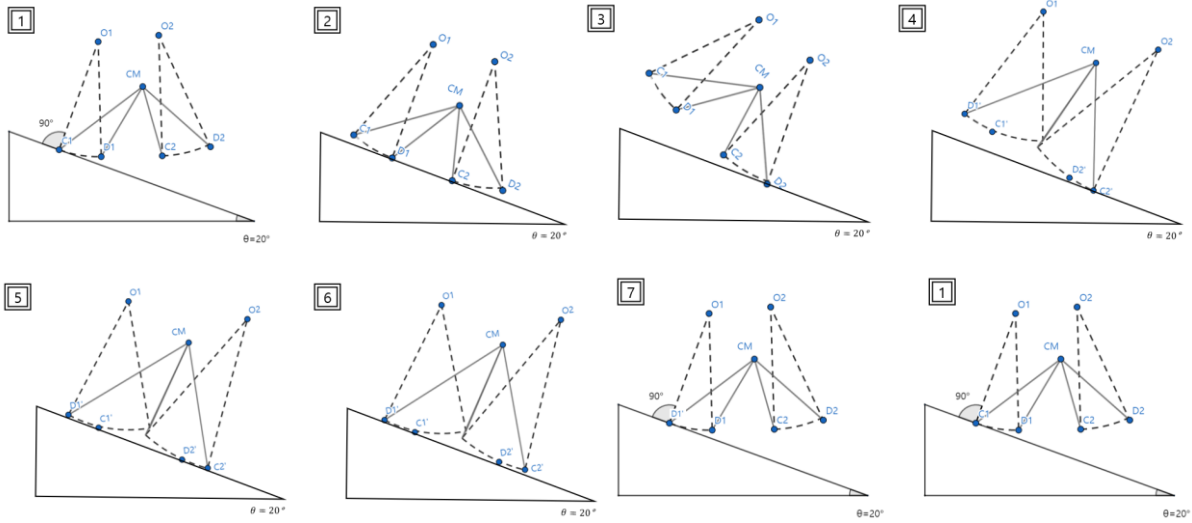


Fig. 6 Cyclic movement of walking toy, 7 step analysis

Fig. 7는 Fig. 6의 한 주기에서 나타나는 두 유형의 시스템 형상의 수치를 표현한 것이다. 회전축과 일치하는 CM을 중심으로, 각 점점까지의 거리를  $L$ 로 표현했고, 점점은 발의 곡면상에 존재하기 때문에 곡률 반지름을  $R$ 로 표현하였다. 곡률 중심은  $O$ 로 표기했다. 두 다리 사이의 최대 각도로 이해할 수 있는  $\angle D_1 C M C_2$ 는  $\phi$ 로 표현하고, 각 점점에 대한 원주각으로  $\phi_1, \phi_2$ 를 표현했다. Fig. 7(a)는 Fig. 6의 (1)~(3)과 (7)에서 나타나는 형상, Fig. 7(b)는 Fig. 6의 (4)~(6)에서 나타나는 형상으로 형상이 바뀌면서 prime(')에 대한 점점의 위치가 바뀌고, 이에 따라  $\overline{D_1' C M} = L_{1C'}$ ,  $\phi_1'$ 으로 바뀐 수치들을 표현했다. 나머지 형상의 수치는 불변이므로 Fig. 7의 (a), (b)에서 동일하게 표기했다.

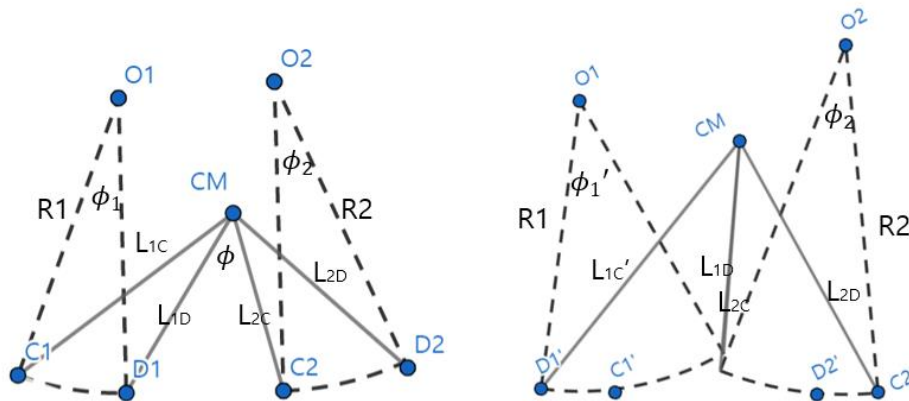


Fig. 7 Model and dimensions of walking toy; (a, left) hind leg and frontal leg apart, (b, right) hind leg and frontal leg joined

정량적 분석은 (1)~(3), (3)~(4), (4)~(6)에 대한 에너지 보존 및 기하학적인 충분조건을 분석했다. 이 조건들의 대부분은 필요조건들로, 에너지 손실이 발생하는 실제 세계에서 walking toy가 반드시 만족해야 할 조건들이다. 일부는 충분조건으로 만족한다면 그 요인에 의한 walking toy의 오작



(주)관악산타	<b>Product Design Report</b>	2021.09.30
		Revision -1-

동은 일어나지 않는다. 한편 위의 5가지 가정이 성립하는, 과정 (1)~(7) 사이 에너지 손실을 무시할 수 있는 상황이라면 필요충분조건으로 바뀌어, 정상 작동에 대한 여부를 미리 예측할 수 있게 된다.

#### I Fig. 6 (1)~(3) 정량 분석

##### I (i) (1)에서 (2)로 진행할 필요조건

(1)에서의 접점  $C_1$ 을 기준으로 한 y좌표 비교에서, 에너지 보존에 의해 과정 중 (1) 상태의 y좌표가 가장 커야 한다. Fig. 6에서 x는 오른쪽, y는 위쪽 방향을 기준으로 삼는다.  $y_1 > y_2$ 가 성립해야 하므로, 아래와 같이 정의된 변수  $N_1$ 이 양수여야 한다.

$$y_1 = L_{1C} \cos \alpha$$

$$y_2 = -(R_1 \phi_1) \sin \theta + 2R_1 \sin \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \times \sin \left( \theta + \frac{\phi_1}{2} \right) + L_{1C} \cos (\alpha + \phi_1)$$

$$N_1 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{y_1 - y_2}{L_{1C}} = \{ \cos \alpha - \cos (\alpha + \phi_1) \} - \frac{R_1}{L_{1C}} \left\{ 2 \sin \left( \frac{\phi_1}{2} \right) \times \sin \left( \theta + \frac{\phi_1}{2} \right) - \phi_1 \sin \theta \right\} > 0$$

##### I (ii) (1)에서 (3)으로 진행할 충분조건

(2)의 과정에서 충돌로 인한 에너지 손실이 일어나지 않는다고 가정했으므로, (1)에서 (3)사이 이동 과정에서 에너지 보존을 사용할 수 있다. 이때 (3)은 정지 상태이므로  $D_2$ 에서 그은 연직선  $l$ 을 기준으로 CM은 왼쪽에 존재해야 다시 (4)에 이어 (5)로 진행할 수 있다. 임계조건은 CM이  $l$ 위에 존재하는 때로, 이때의 y좌표를  $y_3$ 이라 했을 때 다음과 같이 계산된다.

$$y_3 = - \left( R_1 \phi_1 + R_2 \phi_2 + \sqrt{L_{1D}^2 + L_{2C}^2 - 2L_{1D}L_{2C} \cos \phi} \right) \sin \theta + L_{2D}$$

임계 y좌표에 대해  $y_1 < y_3$ 이 성립해야 하므로, 아래와 같이 정의된 변수  $S_2$ 가 양수여야 한다.

$$S_2 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{y_3 - y_1}{L_{1C}} = \frac{L_{2D} - \left( R_1 \phi_1 + R_2 \phi_2 + \sqrt{L_{1D}^2 + L_{2C}^2 - 2L_{1D}L_{2C} \cos \phi} \right) \sin \theta}{L_{1C}} - \cos \alpha > 0$$

#### II Fig. 6 (3)~(4) 정량 분석

(3)에서 (4)로 진행하는 과정에서 walking toy의 기하학적인 형상 때문에 Fig. 7(a)에서 Fig. 7(b)로 전이하는 과정에서 다리와 빗면과의 충돌이 발생해 운동양상이 바뀔 수 있다. 이는 walking toy의 오작동을 의미하지는 않지만, 매끄러운 운동을 방해하고 잠재적인 오작동 원인이 될 수 있다. 이에 대한 조건 두가지를 아래에 정리했다. 첫번째 식은  $\overline{D_1CM}$ 이 빗면과 충돌하지 않기 위한 필요충분조건으로,  $N_3$ 가 양수여야 한다. 두번째 식은 P1이 빗면과 충돌하지 않기 위한 충분조건으로, 단순한 디자인 가이드를 제공하며  $S_4$ 가 양수여야 한다.

$$N_3 \stackrel{\text{def}}{=} 2R_2 \sin^2 \left( \frac{\phi_2}{2} \right) - (L_{1D} - L_{2C}) > 0$$

$$S_4 \stackrel{\text{def}}{=} \max(L_{1D}, L_{2C}) - L'_{1C} > 0$$

(주)관악산타	Product Design Report	2021.09.30
		Revision -1-

처음으로  $L'_{1C}$ 가 등장했는데, 이는 접점에 관한 식으로 디자인만으로는 정확히 파악할 수 없다. 그러나 디자인에서 발의 곡면은 곧 접점을 포함하므로, 접점을 발의 끝점으로 근사해 대입하거나 그 근방 지점의 값을 대입하면 된다.

### III Fig. 6 (4)~(6) 정량 분석

(4)에서 (6)으로 넘어가는 과정은 (1)에서 (3)으로 넘어가는 과정과 매우 유사하고, 차이점은 빗면의 방향이 반대인 점과 walking toy 형상이 Fig. 7(a) 대신 Fig. 7(b)라는 점이다. 초기 조건은 연직방향에 대한 각도가  $\alpha$ 에서 시작하는 것이 아닌  $\alpha'$ 에서 시작하고,  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 의 관계식은 (1)과 (3)사이 에너지 보존에 의해 아래와 같다. I (i) (1)에서 (2)로 진행할 필요조건식에  $\theta$ 대신  $-\theta$ 를 대입하고  $L_{1C}$  대신  $L_{2D}$ ,  $R_1$ 대신  $R_2$ ,  $\phi_1$ 대신  $\phi_2$ , 그리고 초기각  $\alpha$ 대신  $\alpha'$ 를 대입해 정리하면 새로운 조건식  $N_5$ 와 같다. 이때  $N_5$ 는 양수여야 하며, 값이 클수록 좋다.

$$\alpha' = \cos^{-1} \left[ \frac{L_{1C} \cos \alpha + (R_1 \phi_1 + R_2 \phi_2 + \sqrt{L_{1D}^2 + L_{2C}^2 - 2L_{1D}L_{2C} \cos \phi}) \sin \theta}{L_{2D}} \right]$$

$$N_5 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{y_3 - y_5}{L_{2D}} = \{ \cos \alpha' - \cos(\alpha' + \phi_2) \} - \frac{R_2}{L_{2D}} \left\{ 2 \sin \left( \frac{\phi_2}{2} \right) \times \sin \left( -\theta + \frac{\phi_2}{2} \right) + \phi_2 \sin \theta \right\} > 0$$

### IV 정량 분석 결론

Fig. 6의 전과정에 걸친 정량 분석을 정리하면 Table 2와 같다. N은 필요조건, S는 충분조건을 뜻하며 필요충분조건은 N으로 표기했다. 디자인한 실제 walking toy의 수치는 Table 3에 정리되어 있으며, 수치를 대입한 값이 Table 2 오른쪽에 정리되어 있다. Table 3에서 가시성을 위해 각도 단위를 degrees로 표현했지만 실제 Table 2 수식에 대입할 때는 radian으로 환산했다. Table 2의 조건변수 단위는 무차원으로 만들기 위해 조건변수가 길이 차원을 가지는 경우 1(mm)로 나누어 오른쪽 Value에 기입했다. 조건 중 마지막  $N_5$ 은 클수록 좋은 특성을 가지고 있으며, 필요조건 변수 값은 모두 양수이어야 한다.  $\alpha$ 는 유일하게 디자인에 영향을 받지 않고 초기상태를 어떻게 주는지에 따라 달라지는데, 값들을 작은 순서대로 대입해 만족하는 각도를 찾는다. 조건식을 만족하는  $\alpha$ 를 찾을 수 없을 시에는 모델에 기초해 디자인을 바꾼다.

정량 분석 결과  $\alpha$ 가 61도 이상을 기준으로 Table 2의 5개 조건들이 모두 충족되었다.  $\alpha$ 가 61도 일 때 CM과 뒷발 접점을 이은 선은 빗면과 49도를 이루게 된다. 한편 물체가 Fig. 7(a) 상태에서 CM과 뒷발 접점을 이은 선이 빗면과 이루는 각도는 62도로, 빗면에 walking toy가 Fig. 7(a)의 형상으로 놓인 상태에 대해 13도 들린 상태다. 정리하면, 본 정량적 모델에 의하면 디자인한 walking toy는 빗면에 놓인 상태에 대해 13도 이내로 들어 운동을 시작하면 성공적으로 주기운동을 할 수 있다. 운동 양상은 Fig. 6을 따르므로 작은 들림으로 시작한 운동도 Fig. 7(a)에서 Fig. 7(b)로 변하며 빗면을 내려가기 때문에 비교적 빠른 운동 양상을 보이고, 초기조건에 있어 13도의 안전범위가 있음을 예측한다.

Table 2 Necessary or sufficient conditions for walking toy model

Condition	Equation	Value
$N_1$	$\{ \cos \alpha - \cos(\alpha + \phi_1) \} - \frac{R_1}{L_{1C}} \left\{ 2 \sin\left(\frac{\phi_1}{2}\right) \times \sin\left(\theta + \frac{\phi_1}{2}\right) - \phi_1 \sin \theta \right\}$	0.25
$S_2$	$\frac{L_{2D} - \left( R_1 \phi_1 + R_2 \phi_2 + \sqrt{L_{1D}^2 + L_{2C}^2 - 2L_{1D}L_{2C}\cos\phi} \right) \sin \theta}{L_{1C}} - \cos \alpha$	0.02
$N_3$	$2R_2 \sin^2\left(\frac{\phi_2}{2}\right) - (L_{1D} - L_{2C})$	3.15
$S_4$	$\max(L_{1D}, L_{2C}) - L'_{1C}$	1.60
$N_5$	$\{ \cos \alpha' - \cos(\alpha' + \phi_2) \} - \frac{R_2}{L_{2D}} \left\{ 2 \sin\left(\frac{\phi_2}{2}\right) \times \sin\left(-\theta + \frac{\phi_2}{2}\right) + \phi_2 \sin \theta \right\}$ $\alpha' = \cos^{-1} \left[ \frac{L_{1C} \cos \alpha + \left( R_1 \phi_1 + R_2 \phi_2 + \sqrt{L_{1D}^2 + L_{2C}^2 - 2L_{1D}L_{2C}\cos\phi} \right) \sin \theta}{L_{2D}} \right]$	0.04

Table 3 Dimensions of actual walking toy design

Dimension	$L_{1C}$ (mm)	$L'_{1C}$ (mm)	$L_{1D}$ (mm)	$L_{2C}$ (mm)	$L_{2D}$ (mm)	$\phi$ (deg)	$\phi_1$ (deg)	$\phi_1'$ (deg)	$\phi_2$ (deg)	$R_1$ (mm)	$R_2$ (mm)	$\alpha$ (deg)
Value	12.9	12.9	14.5	14.5	20.2	56	28	28	28	27	27	61

### C.3 제품 후보군 비교

#### 1. 좌우 vs 앞뒤

빗면을 걷는 방법으로 내려와야 하는 장난감의 특성상, 모든 Ramp walking toy의 발바닥은 빗면 방향 (앞뒤)의 곡률을 항상 갖고 Aspect ratio가 항상 1보다 작다. 앞뒤 방향으로만 진동하는 제품은 무게 중심이 빗면 방향의 평면에서 움직이는 반면, 좌우 방향으로 진동하는 장난감은 추가적으로 좌우 방향으로도 진동하기에 3차원 공간에서 무게중심이 움직인다. 이는 위의 C.1, C.2의 결과로 도출된 Configuration 조건에 더해 좌우 방향으로의 운동 조건이 추가로 붙게 됨을 의미한다. 1보다 작은 Aspect ratio를 갖는 불안정한 형상의 발바닥으로 대량생산이 가능하고 신뢰성 있는 3D-Motion toy를 제작하는 일은 프로젝트의 취지에 부합하지 않는다 생각하여 앞뒤 방향으로만 움직이는 방식을 선정하였다.

#### 2. 모래 vs 유리구슬

디자인 컨셉인 '선물을 나누어 주는 산타 할아버지'에 걸맞게 본 회사의 제품은 빗면을 내려옴과

(주)관악산타	<b>Product Design Report</b>	2021.09.30
		Revision -1-

동시에 뒷주머니에 있는 짐을 빗면 위에 뿌린다. 두 방식을 비교하기 위해 장난감이 다음과 같은 조건을 만족함을 가정한다.

- (1) 한 번의 주기 동안 뒤로 젖혀졌을 때 물건이 떨어지며 두 방식이 떨어뜨리는 질량은 같다.
- (2) 분석하는 운동 과정 동안 장난감은 안정적인 조건을 유지한다.
- (3)  $t=0$ 에서 무게중심은 뒷다리 선상에 위치한다.
- (4)  $T$ 초 후 무게중심의 수평 변위  $\Delta x$ 는 같다.

운동 전후 질량의 차이는 두 경우가 같으므로 C.3에서는 모래를 쏟아내는 시간인  $T$ 초 동안의 운동 비교에 집중하겠다. 분석의 편의성을 위해 반 주기 동안 회전축이 정점으로 일정한 삼각형 형태의 장난감을 가정하고 초기질량을  $m_0$ , 감소한 질량을  $m'$ , 무게 중심의 초기 수평 변위를  $x_0$ 라 하자. 모래의 경우  $T$ 초동안  $m'$ 이 감소하기에 연속적으로 무게중심이 움직이고, 구슬의 경우 운동 시작 순간에 모든 질량  $m'$ 을 버린다고 생각할 수 있다.  $T$ 초동안 복원력인 중력에 의한 각운동량 변화량은 각각의 경우에  $\int_0^T \left(x_0 + \frac{\Delta x}{T}t\right) \left(m_0 - \frac{m'}{T}t\right) g dt \dots (1), (x_0 + \Delta x)(m_0 - m')gT \dots (2)$ 가 되고 값을 비교하기 위해 두 식을 빼면  $(1)-(2) = \left(\frac{2}{3}\Delta x m' - \frac{1}{2}\Delta x m_0 + \frac{1}{2}x_0 m'\right)gT \dots (3)$ 가 된다.

물건을 빼낸 이후 지나치게 큰 각운동량을 갖는 장난감은 안전성 측면에서 좋지 못하다. 식 (3)의 결과 각운동량의 비교 결과는 dominant한 값인 초기질량  $m_0$ 와 무게중심의 초기 위치  $x_0$ 의 설계에 따라 달라진다. 따라서 이러한 측면에서의 비교는 설계적으로 조정이 가능하기에 큰 의미가 없음을 확인했다.

유리구슬과 비교하였을 때 모래는 무게중심이 변화하는 상황에서 일정한 질량감소  $m'$ 을 기대하기 힘들다. 상대적으로 유리구슬은 정량적인 무게 추정이 가능하여 공학적인 분석이 용이하기에 유리구슬을 떨어뜨리는 방식을 채택했다.

(주)관악산타	<b>Product Design Report</b>	2021.09.30
		Revision -1-

## D. 소재와 안정성

### D.1. ABS 몰딩

ABS 플라스틱은 아크릴로나이트릴, 뷰타다이엔, 스타이렌의 수지를 합성하여 만든 플라스틱 소재로, 대표적인 열가소성 플라스틱이다. ABS는 가공이 쉽고, 특히 injection molding 생산 방식에서도 보편적으로 사용되는 소재이기 때문에 실제 몰드를 디자인할 때 고려해야 할 ABS의 특성에 관한 경험적인 정보들을 많이 찾아볼 수 있다.

성공적인 몰딩을 위해 가장 중요한 원칙은 벽 두께를 일정하게 만드는 것이다. 벽 두께가 일정하지 않거나 급하게 변하는 경우, ABS가 식으면서 수축하는 과정에서 방향에 따른 수축 정도의 차이에 의해 sink mark, crack, residual stress와 같은 문제가 생길 수 있다. 또한, 몰딩 과정에서 벽 두께가 바닥 두께보다 큰 경우, 벽으로 진입한 액체가 제품을 둘러싸는 벽 부분에서 먼저 채워지는데 이 때 밀려난 공기가 바닥면에 갇히게 되는 에어 트랩현상이 생길 수 있다.

이러한 문제를 사전에 예방하기 위해, 본사의 제품은 설계에서부터 제품 두께에 대한 고려사항을 반영하였다. 거의 모든 벽과 바닥면의 두께를 3mm로 통일하여 얇게 유지하였고, 상자의 모서리 부분처럼 벽면이 급하게 꺾이는 부분에서는 fillet을 주어 벽의 두께를 일정하게 유지시켰다. 이것으로 실제 생산될 제품에 근접한 모델링을 완성하였고, 무게중심 위치 분석과 같은 역학적 접근이 더 타당성을 얻게 되었다.

추가적으로, 실제 몰딩에서 여러 가지 고분자 소재에 대해 액체 상태 소재가 채워지는 몰드의 두께(T)와 gate로부터 액체가 도달해야 하는 끝부분까지의 거리(L)의 비인 flow path ratio(L/T)가 경험적으로 알려져 있다. ABS의 경우 약 280~120으로 제시된다. 따라서 이 값은 액체가 몰드에 모두 채워지도록 하기 위한 게이트 설계의 가이드라인이 된다. 그러나 이 값은 엄밀히 특정 압력과 제품 두께 조건 하에서 얻어지는 값이며, 복잡한 제품 형상에 적용하려면 시뮬레이션을 통해 L/T band를 파악해야 한다. 따라서 몰드 디자인이 완성될 때 시뮬레이션을 이용해 공정 변수를 설정하고 gate 위치를 정하도록 한다.

### D.2. 내구도

ABS는 내충격성이 높아 각종 부품의 공업용품에서 금속 대용으로 사용되기 때문에 여기에서도 높은 내구도를 유지하는데 도움이 될 것으로 보인다. ABS 플라스틱의 상온에서의 물성치는 다음과 같다.<sup>2</sup>

1. Ultimate tensile strength (MPa): 28~55

---

<sup>2</sup>Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, Manufacturing Process for Engineering Materials 5<sup>th</sup> ed., p. 585

(주)관악산타	<b>Product Design Report</b>	2021.09.30
		Revision -1-

2. Young's Modulus (GPa): 1.4–2.8

3. Elongation in 50mm (%): 75–5

영률이 최소값인 1.4GPa라고 해도, 여기서 제작한 원축의 단면적인  $7.07\text{mm}^2$ 으로도 9,898N(1010kgf)의 힘을 버틸 수 있는 힘을 가진다. 플라스틱의 밀도가  $1.05\text{g/cm}^3$ 정도로 거의 물과 같은 수준의 무게 이므로 물체 내에서 발생하는 응력으로 인한 제품의 손상은 무시할 수 있을 수준이라고 결론지었다.

### D.3 조립방식설계

이 제품에서 외곽 부분의 결합은 손으로 쉽게 결합할 수 있을 만큼의 정밀급 끼워맞춤(press-fit), 외곽 축과 뒷다리의 결합은 서로 회전이 가능해야하므로 회전틈새 끼워맞춤(drive fit)을 사용하기로 했다. 일반적인 정밀 가공에서 사용하는 규격<sup>3</sup>에 따라 전자의 경우 H6, h6, 후자는 h6, F6에 맞추기로 하였다. 이 때 ABS 소재의 물성치를 활용하여 Press fit에서 축에서 반지름의 변화량을 이론적으로 구한다. 이는 다음과 같은 식

$$\delta_{rs} = -\frac{r_f p_f}{E_s} \left( \frac{r_f^2 + r_i^2}{r_f^2 - r_i^2} - \nu_s \right)^4$$

으로 계산되므로 h6에 맞출 경우 구멍의 크기가 그대로 같다면 압력( $p_f$ )은 대략 8.62MPa로 충분히 큰 값이 나와 끼워맞춤결합이 강할 것으로 예상된다. 또한, 회전축에서의 끼워맞춤은 F로 구멍의 크기가 약간 크게 설정되므로 안정적으로 운동을 할 수 있을 것으로 보인다.

<sup>3</sup>산업표준심의회, KS B 0401. 치수공차의 한계 및 끼워맞춤

<sup>4</sup>Steven R. Schmid, Bernard J. Hamrok, Bo O. Jacobson, Fundamentals of Mechanical Product Design SI version 3<sup>rd</sup> ed., p. 252

## E. Bill of materials

제품 분해도와 자재 명세서는 Fig. 8, Fig 9와 같다.

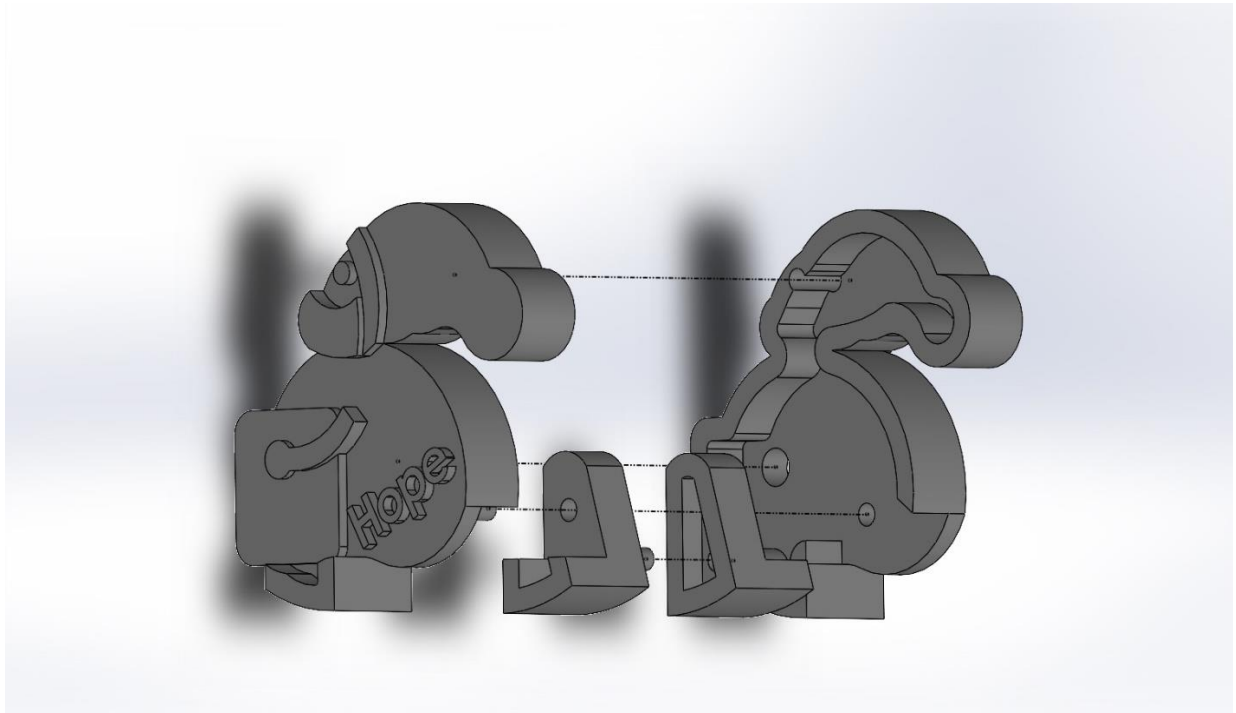


Fig. 8 Exploded view of walking toy, Part A, B, C, and D starting from left

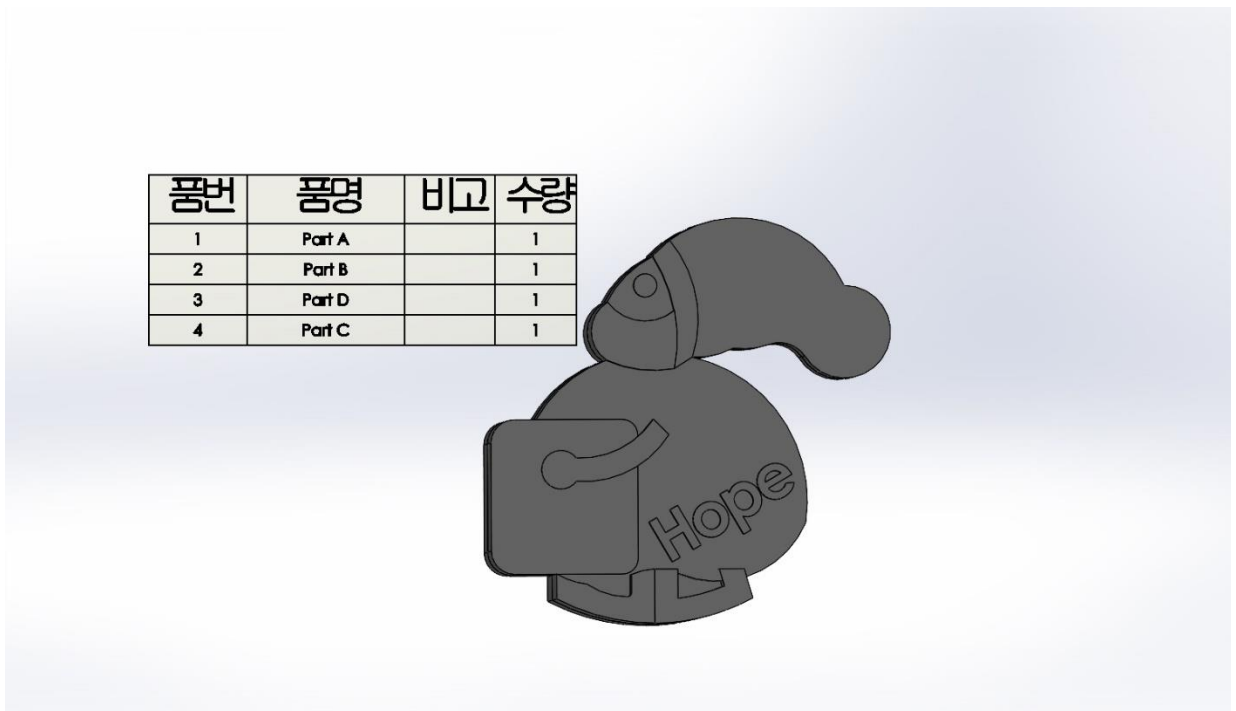


Fig. 9 Bill of materials

## F. Gantt chart

이번 프로젝트의 일정은 Fig. 10과 같다. 일정에 표시한 빨간 줄은 각각 개천절, 한글날 대체공휴일이다. CNC 몰드 가공의 경우 외부업체로부터 수행되어 11월 초에 끝날 것으로 예상되고, 인젝션 몰딩은 제작된 몰드 수령 후에 가능하다.

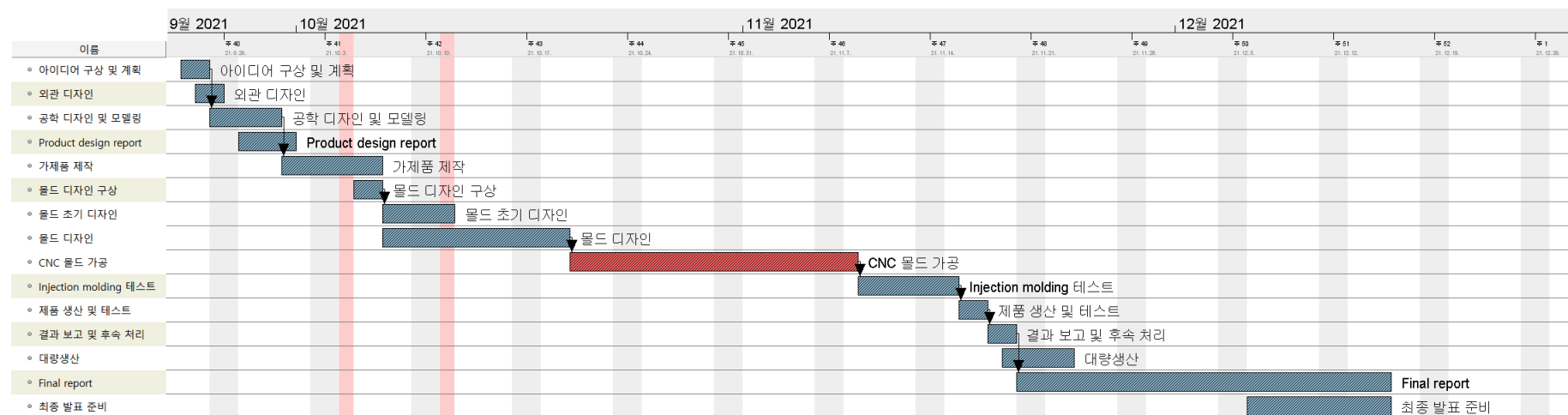


Fig. 10 Gantt chart for project management, from 9/23 to 12/15



(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

# 제품·몰드 디자인 보고서

## 재료와 제조공정 Project

<b>A. 제품 디자인</b> .....	2
A.1. 작동 최적화.....	2
A.1.1. 디자인 변천.....	2
A.1.2. 운동 시뮬레이션.....	6
A.2. Design for Manufacturing .....	7
<b>B. 몰드 제작</b> .....	9
B.1. 분리선 결정과 하코어의 종류.....	9
B.2. 부품 배치.....	9
B.3 몰드 시뮬레이션 .....	11
B.3.1. 파트별 시뮬레이션 .....	11
B.3.2 전체 시뮬레이션 .....	12

### -4 조 구성원-

이 름	학 번	소 속
송찬의	2018-17070	기계항공공학부
강지훈	2018-12728	기계공학부
신재호	2017-15593	기계공학부
하창우	2017-16289	기계항공공학부
황준호	2017-14429	기계공학부
강우준	2017-18958	기계공학부
윤석원	2019-15022	자유전공학부
최현도	2017-17939	기계항공공학부
이태훈	2017-11771	기계공학부

## A. 제품 디자인

### A.1. 작동 최적화

#### A.1.1 디자인 변천

##### (1) 1차 디자인

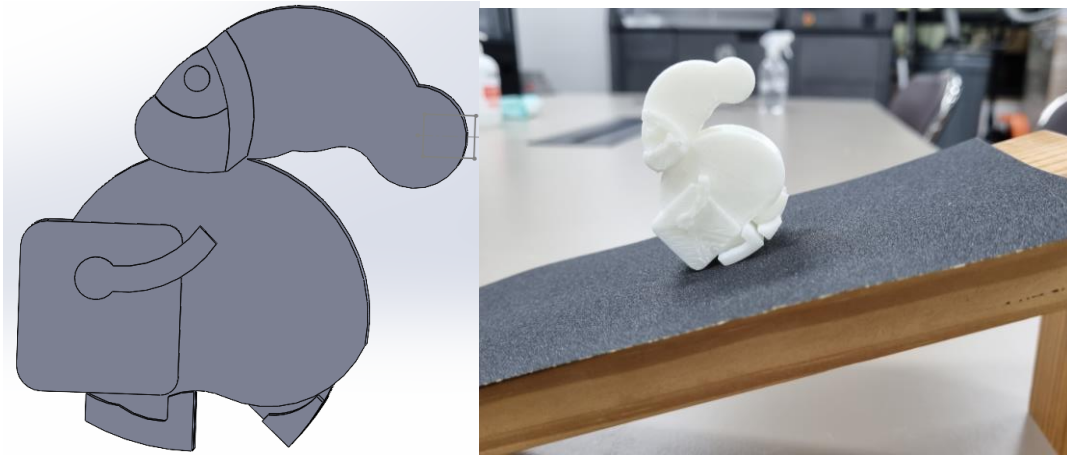


Fig 1. Model 1 design

1차 보고서에 제출한 디자인을 FDM 방식으로 모델링하여 빗면에서 직접 실험한 결과, 자유롭게 움직여야 할 뒷다리의 운동에 문제점이 있음을 확인하였다. 양 몸통과 지나치게 맞물려 있어 거의 긴 형태였다. 따라서 운동 양상을 확인할 수 없었고 Press fit 역시 구멍이 지나치게 작아 결합에 어려움이 있었다.

##### (2) 2차 디자인

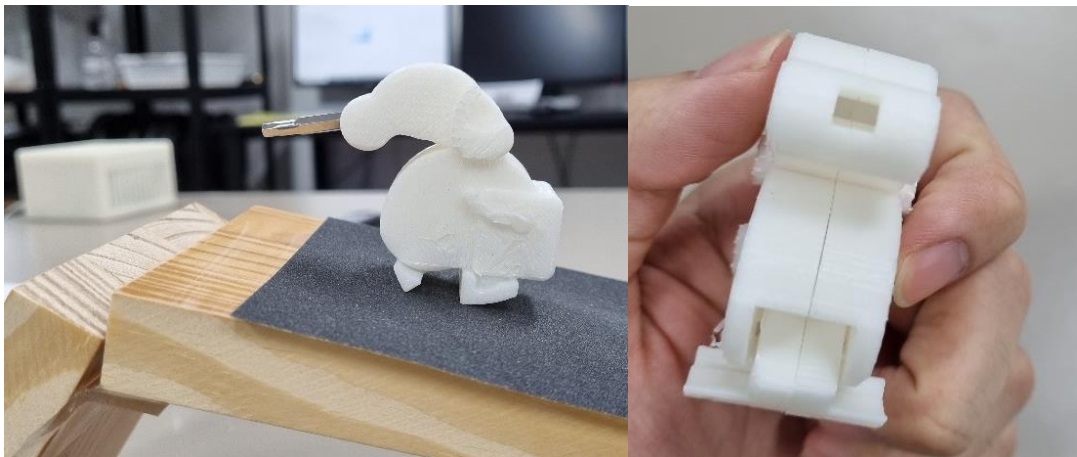


Fig 2. Model 2 design

(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

뒷다리와 몸통의 맞물림을 방지하기 위해 다리의 폭을 깎아내고 Press fit 결합 구멍의 반경을 0.2mm 증가시켰다. 그 결과 장난감이 운동함을 확인하였지만 다리가 앞뒤로 움직이며 걸어 내려가지 않고 앞으로 쏠려 굴러 내려가는 운동을 하였다. 장난감의 머리 쪽의 모자 디자인과 앞 쪽의 선물 상자로 인해 무게중심이 지나치게 높고 앞쪽이기에 발생한 문제였다. 이에 대한 해결책을 실험하기 위해 무게중심을 이동시킬 목적으로 뒤쪽에 쇠못을 테이프로 접착하였다.

그 결과 장난감이 일반적인 Ramp walker의 운동과 비슷한 양상으로 움직이긴 하였으나 안정적인 범위 안에서 앞뒤로 움직이지 않았다. 그러나 장난감이 안정된 운동 범위를 벗어나지만 앞쪽의 선물상자와 뒤쪽의 쇠못이 빗면을 치면서 그 반발력으로 넘어지지 않고 내려가는 형태의 운동을 보였다. 이는 목표로 한 장난감의 움직임이 아니었기에 무게중심의 수정과 더불어 안정적으로 내려가게끔 디자인을 수정할 필요가 있었다.

### (3) 3차 디자인



Fig 3. Model 3 design

위의 문제점을 해결하고 운동의 안정성을 늘리고자 뒷다리의 곡률반경과 폭을 증가시켰다. 그러자 장난감 초기의 위치에 따라 다른 방식으로 문제점이 생김을 관찰하였다. 먼저 초기 각도를 지나치게 젖힐 경우 장난감의 질량 중심이 빗면과의 접촉점보다 뒤쪽에 위치하여 뒤로 넘어갔다. 또는 각도를 줄여 앞 쪽으로 무게중심이 위치하더라도 앞다리의 길이가 빗면에 닿을 만큼 충분하지 않아 장난감이 앞으로 굴러갔다.

당일 1차 실험과 마찬가지로 쇠못을 접착하여 운동하여도 비슷한 문제점이 발생하였다. 이로부터 디자인의 문제점이 무게중심의 위치가 아닌 앞다리와 뒷다리의 형상에 있다고 추측하였고 수정 전 기존 모델에서 다리의 형상을 수정하기로 결정하였다.

#### (4) 4차 디자인

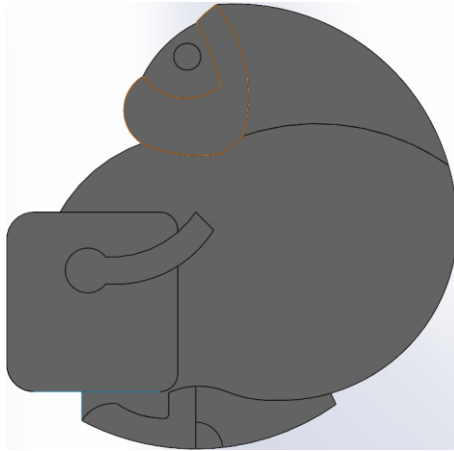


Fig 4. Model 4 design

기존 모델에서 뒷다리의 회전축과 질량 중심이 일치하도록 디자인을 수정하였으나 다리의 곡률 반경은 변화하지 않았기에 10월 11일 모델과 마찬가지로 빗면에서 굴러 떨어졌다.

#### (5) 5차 디자인

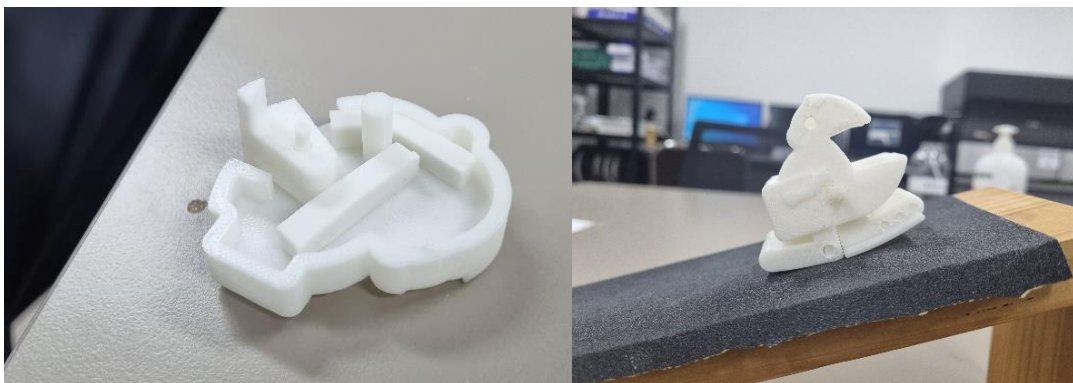


Fig 5. Model 5 design

다리의 회전축과 질량중심이 일치하는 조건을 유지한 채 다리의 곡률 반경을 기존에 비해 4배 증가시켜 안정적으로 운동을 하게끔 수정하였다. 그 결과 장난감을 내려놓은 후 얼마 안된 운동 초기에는 Ramp walker 장난감과 같이 운동하였으나 발이 지나치게 커 큰 마찰력이 작용하고 무게중심의 위치가 적절하지 않았기에 몇 초 뒤에 장난감이 정지하였다. 또한 정지한 시점에서 장난감을 관찰하였을 때 앞발이 빗면에 닿고 몸체가 앞으로 쏠린 채로 멈추었다.

이로부터 무게중심의 위치를 더 뒤로 옮겨야 하고 중력에 의한 복원력을 키우기 위해 위로 올려야 한다는 결론을 얻었다. 이를 실험적으로 확인하기 위해 뒷부분에 다시 못을 달아 실험을 한 결과 운동이 안정적으로 이루어졌다. 따라서 언급한 방향으로 디자인을 수정하기로 계획하였다.

## (6) 6차 디자인과 7차 최종 디자인

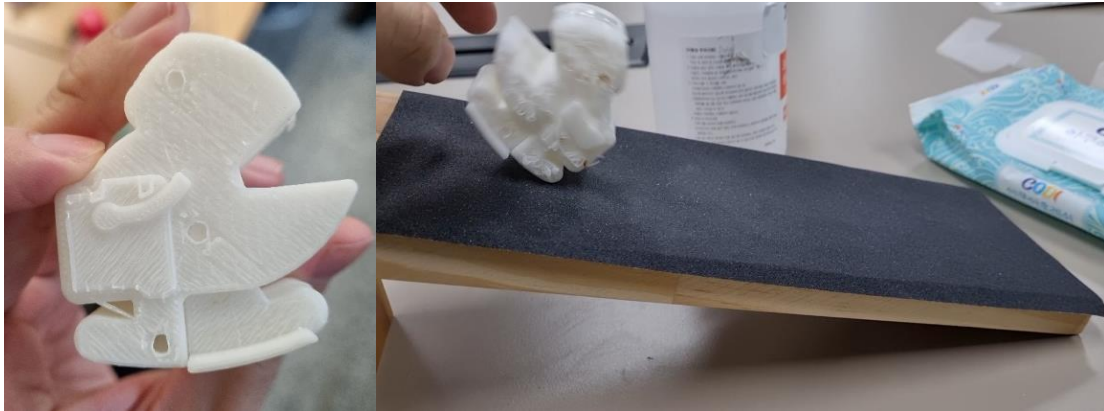


Fig 6. Model 6 design

이전 디자인에서 보인 문제점이었던 지나치게 큰 다리와 이로 인한 마찰력을 줄이기 위해 다리의 곡률 반경을 기존 100mm에서 60mm로 축소하고 발의 크기도 축소하였다. 무게중심의 위치를 언급한대로 위쪽, 뒤쪽으로 옮기기 위해 모자 부분의 부피를 늘리고 뒤쪽으로 이동시켰다. 이렇게 수정하여 다시 실험을 한 결과, 장난감이 이전 모델과 마찬가지로 빗면에서 굴러 떨어졌다.

이로부터 다리의 곡률반경과 발의 크기는 100mm의 길이로 유지하는 것이 가장 안정적이라는 것을 확인하였다. 따라서 이전 디자인에서 무게중심의 위치만 모자를 통해 수정하고, 주어진 몰드의 상판과 하판에 장난감이 들어가야 하므로 앞발의 크기를 소폭 감소시켰다. 또한 뒷다리를 사출 시에 8mm 직경의 밀핀으로 밀 수 있어야 하므로 뒷다리의 두께를 충분히 늘려주었다. 이를 바탕으로 아래와 같이 Model 7 design을 디자인하고 출력한 후 실험해 정상 작동을 여러 번의 실험에 걸쳐 확인했다.

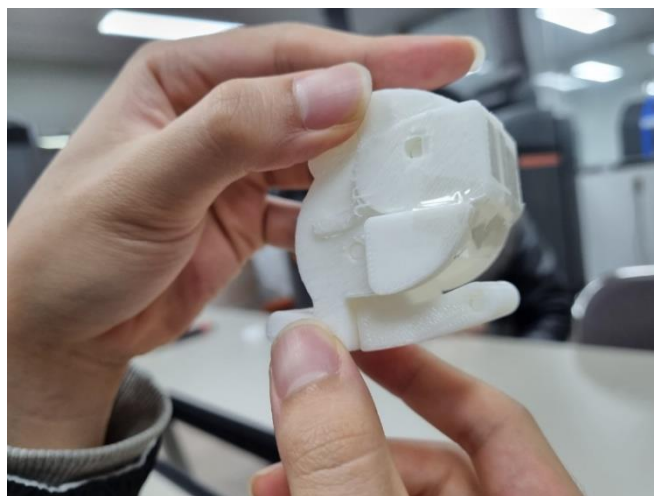


Fig. 7 Model 7 design

(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

### A.1.2 운동 시뮬레이션

후보군마다 3D 모델을 직접 출력을 해 수작업으로 하기 어려우므로, 실험과 동시에 아래와 같이 SolidWorks 프로그램에서 지원하는 운동 시뮬레이션을 활용해 여러 모델을 실험했다. 빗면의 각도는 실험과 동일하게 20도로, 부품은 앞다리를 포함한 원통형의 몸통과 뒷다리 두개로 설정했다. 질량중심을 축에 놓기 위해 원통을 길다랗고 크게 만들었고, 좌우로의 움직임을 제한했다. 발 곡면과 다리 길이와 형태를 변화시키고, 앞서 만든 ramp walking toy 이론의 5가지 조건을 만족하는 해를 실험하며 적절한 형태의 산타 장난감 수치를 실험했다. 몸통과 빗면 사이, 뒷다리와 빗면 사이, 그리고 몸통과 뒷다리가 겹치지 않게 구속 조건을 설정하고 마찰과 충돌계수 등을 변화시키며 실험했다.

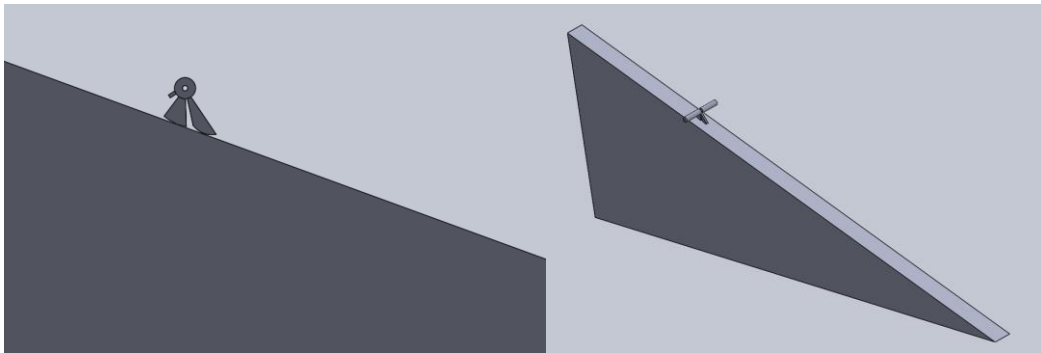


Fig 8. Dynamic simulation using Solid Works Program

### A.2. Design for Manufacturing

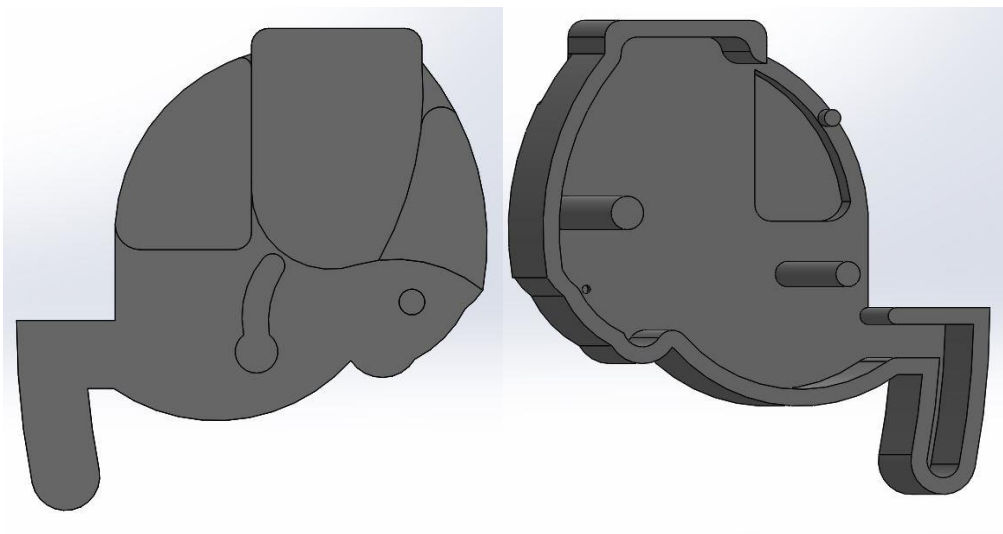


Fig 9. Design before considering manufacture



(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

산타 장난감을 위와 같이 제작할 시 빗면 상에서 잘 작동함을 확인하였지만 여러 제작 상의 제한 조건으로 인해 크게 세 가지의 문제점이 존재하였다. 첫 번째로 다리와 몸통 폭이 지나치게 두꺼워 2mm 반경, 6mm 날길이의 Flat 엔드밀로 벽면을 가공하는 것이 불가능했다. 또한 몰드 크기에 비해 큰 폭을 갖는 형상은 사출 시에 어려움이 존재하므로 전체적인 장난감의 폭을 줄이는 일이 불가피하였다.

다음으로 장난감을 조립하는 결합부에 문제점이 있었다. 이전 디자인에서는 몸통 안쪽 바닥에서부터 돌출된 직경 2mm 축이 반대쪽 몸통의 구멍과 결합하는 방식으로 조립하였으나 이는 다음과 같은 이유로 수정이 필요한 디자인이었다. 먼저 얇고 긴 길이의 형상을 갖는 축은 구조적으로 매우 불안정하다. 실제 FDM으로 모델링하여 만든 제품의 결합부는 약한 충격에도 흔들릴 정도로 약했다. 또한 몸통의 경우와 마찬가지로 28mm의 긴 축은 몰드 사출시에 어려움이 존재할 것으로 예상되었으며 이를 가공할 수 있는 조건의 엔드밀 또한 존재하지 않았다. 드릴을 사용할 경우 가공이 가능한 디자인이었지만 끝이 평평해지지 않는다는 점, 드릴의 사용 가능여부가 확실하지 않다는 점으로 인해 다른 결합 방법을 찾아야만 했다.

마지막으로 가공 후 몰드 돌출부의 직경이 2mm를 넘어야했기에 원래 디자인에서 작은 간격을 갖는 돌출부 사이를 다듬을 필요가 있었다. 수정 후 디자인은 아래 그림과 같다. 수정 전 존재했던 팔과 엉덩이 사이 두 면이 닿는 틈새를 메웠으며 팔과 몸통을 합쳤다. 또한 몸통과 다리 piece 각각의 두께가 각각 15mm, 12mm였으나 모두 7mm씩 줄여 수정 후에는 8mm, 5mm가 되었다.

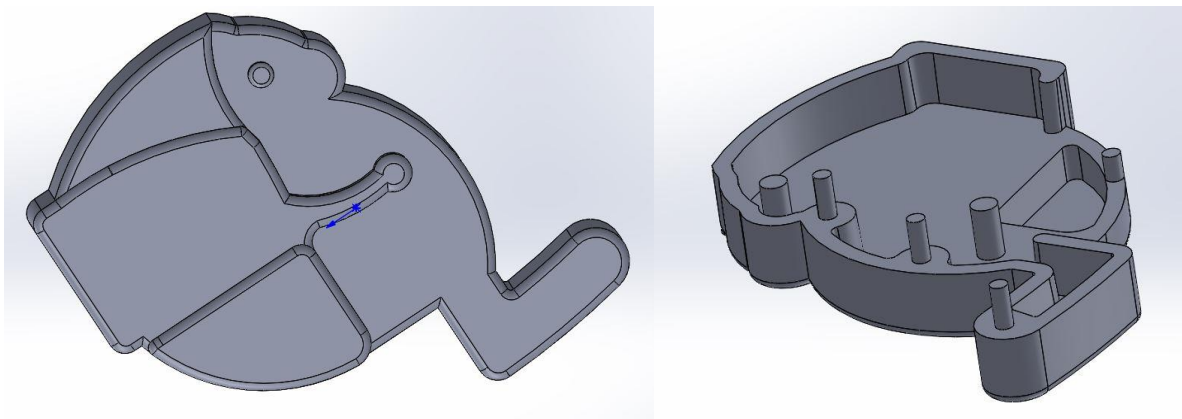


Fig 10. Design after considering manufacture, exterior(left) and interior(right), lettering not included

가장 큰 문제였던 결합부의 축은 엔드밀의 길이 조건을 맞추기 위해 몸통 안쪽의 바닥이 아닌 둘레 벽면에서부터 돌출되게끔 디자인하였다. 옆의 면으로부터 2mm씩 여유를 주어야 하므로 기존의 벽면에서 결합 축을 설치할 원형의 여유 공간을 확장하여 그 위에 결합부를 만들었다. 이러

(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

한 방법을 통해 제작 조건을 만족시켰을 뿐만 아니라 벽면을 확장하여 결합부를 설치할 위치를 임의로 조절해 무게중심의 위치를 좀 더 안정적으로 만들 수 있었다. 무게중심의 위치를 기존의 위치보다 약간 앞으로 이동시킬 필요가 있었기에 결합부의 위치를 대부분 앞쪽으로 디자인한 모습을 위의 그림에서 확인할 수 있다.

산타 장난감의 결합부는 원기둥 축과 이를 끼울 수 있는 반대편 piece의 구멍으로 구성 되어있으며, 장난감의 앞발 끝부분과 배를 포함해 총 3곳에 배치되어있다. 유의할 점은 두 몸체 piece가 적절한 힘에 의해 결합하기 위해서는 최종 제품의 축 지름과 구멍 내경 지름이 최대한 비슷해야 한다는 것이고, 이를 위한 적절한 디자인 수치가 필요하다. 구멍과 수축율에 대한 데이터는 공지 사항에 기재되어 있는데, 축 직경 5.95mm, 구멍 내경 6mm일 때 도구를 사용하지 않고 적당한 힘으로 결합 가능하다고 한다. 따라서 같은 비율로 2mm의 축 직경에 대해서는 2.015mm의 구멍 내경이 필요하다고 계산했고, 이를 결합부 도면에 적용시켰다. 뒷발도 결합부가 발 끝쪽에 하나 존재하는데, 동일하게 처리했다.

몸통에 뒷발을 끼워 맞추는 디자인 원리에 따라 근본적으로 뒷발의 폭이 앞발에 비해 작을 수밖에 없다. 앞발의 폭은 16mm, 뒷발의 폭은 10mm로 이전 디자인에서 두께를 줄임에 따라 뒷다리의 안정성이 떨어졌고, 실제로 FDM을 사용해 직접 작동 양상을 관찰한 결과 잘 작동했지만 운동이 진행하며 뒷다리에 의해 불안정해지는 양상을 보였다. 그러나 2mm endmill 두께에 따른 벽 두께의 제한에 의해 앞다리와 몸통, 뒷다리의 전반적인 제품 두께의 감소는 불가피했다. 이에 뒷다리의 발 끝 부분만 폭을 키워 디자인해, 이러한 근본적인 문제를 해결할 수 있었다. 방법은 발 밑면에 2mm 오프셋을 주고 3mm만큼 돌출시켜 마치 스케이트 날 보조와 같은 형상을 만들었다. 이러한 방법으로 다시 발 자체의 폭을 계산하면 앞발의 폭은 16mm, 뒷발의 폭도 16mm로 안정적인 운동을 위한 디자인을 완성했다.

제품 외관 표면에는 모두 1mm 필렛을 부여했고, sharp corner를 형성하는 외부 벽면에 대해서도 2.5mm 필렛을 부여했다. 또한 이에 대응하는 내부 sharp corner는 0.5mm 필렛을 부여했는데, 이는 abs가 흐르는 벽 두께를 일정하게 유지시키기 위함이다. 필렛으로 인해 매끄러운 형상이 만들어지며, 몰드에 물릴 때 수축함에 따라 상코어 및 하코어에서 외부 벽면이 떨어져나가기 때문에 바깥 면에 대한 구배는 넣지 않았다. 바깥면에 대한 구배를 넣지 않은 다른 이유는 앞다리와 뒷다리 둘 다 두개의 piece가 결합부로 서로 결합하는 제품 디자인에서, 구배에 의해 빗면을 내려올 때 운동이 불안정해질 수 있기 때문이다. 한편 벽면 내부는 0.5mm 필렛을 부여했고 뒷다리의 경우 바닥까지 필렛을 부여했으나 뒷다리와 몸통을 포함한 piece는 옆 내부 벽면만 필렛을 부여했다. 이론적으로는 뒷다리와 몸통 역시 내부 바닥까지 필렛을 부여하는 것이 좋을 것이나, 형상이 복잡해 잘 부여되지 않았고, 내부의 형상은 외관에 영향을 미치지 않기 때문에 최종적으로 내부 바닥은 필렛을 부여하지 않았다. 내부 벽면은 외벽과 달리 ABS(Acrylonitrile butadienstyrene)가 수축함에 따라 몰드에 물리기 때문에 2도 구배를 주어 분리를 도왔다.



(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

## B. 몰드 제작

### B.1. 분리선의 결정과 하코어의 종류

하코어와 상코어의 경계에 부품이 놓이게 되는 경우, 분리선은 부품의 바닥 면 근방으로 잡아 외관이 보이는 면을 상코어 쪽으로 가게 했을 때 정상적인 사출에 유리하다. 바닥 면을 기준으로 분리선까지의 거리를 결정했고 크게 세가지 요인을 고려해 결정했다. 첫번째는 cooling 과정 후 상코어와 하코어가 분리될 때 하코어에 부품이 붙어있어야 한다는 것이다. 이는 복잡한 형상이 하코어 쪽에 와야 하고, 전체 부품의 부피의 반절 이상이 하코어에 오도록 설계해야 함을 의미한다. 두번째는 러너를 통해 게이트로 ABS 주입시 에어트랩이 없어야 하고, 싱크마크를 최소화해야 한다는 것이다. 또 ABS가 채워지는 지점이 부품의 아래쪽이나 위쪽이 되거나, 충전 과정 속에 중앙에 공기가 갇히게 되면 가스밴드를 통해 공기가 나오지 못해 제품 형상에 문제가 생긴다. 세번째는 산타 몸체 부품에는 바닥면보다 더 깊게 들어간 면이 있는데, 이는 하코어 쪽에 위치해야 한다는 것이다. 첫번째와 두번째 이유를 고려해 분리선은 산타 몸체의 경우 부품 내부 바닥면에서 1mm 들어간 지점, 다리의 경우 바닥면으로 설정했고 세번째 이유를 고려해 하코어는 양각 하코어를 사용해 디자인했다.

### B.2. 부품 배치

안정적인 제조 과정을 위해선 하코어에 무겁거나 몰드를 잡을 수 있는 구조를 배치하는 것이 좋기 때문에, 각 부품의 내부가 하코어 방향을 향하도록 하였다. 하코어와 상코어의 경계는 내부의 벽의 경계와 같다. 원하는 운동을 위해서 제작하려는 파트의 크기를 크게 설계하였으나, 몰드의 크기가 제한적이기 때문에, 적절한 부품 배치가 필요했다. 러너의 좌우에 균형 있는 분배를 위해 한쪽에 각각 몸통과 다리 부분을 한 파트씩 배치하였다. 특히, 밀핀의 위치를 평평한 내부에 맞추는 것이 중요하였다. 원활한 배치를 위해 각 밀핀을 하나씩 막아 양쪽에 밀핀이 3개씩 사용되도록 하였고, 각각의 밀핀의 길이는 6개 모두 25mm이다. 그 결과, 그림Fig 11, 12와 같이 적절한 배치가 완성했다. 가스 벤트는 각 파트의 중심에서 적당한 지름으로 4개의 원을 그려 형성하였다. 각 원의 반지름은 그림의 왼쪽부터 40, 34, 34, 40이었고, 각 원의 중심은 정중앙에서 양옆으로 50, 14로 배치했다.

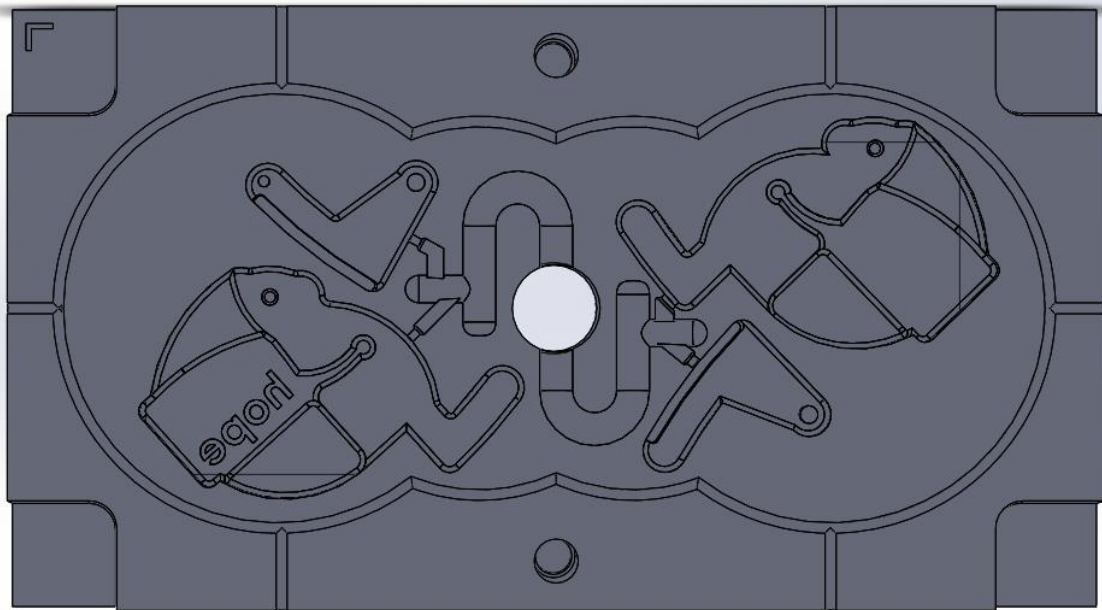


Fig 11. Positioning of parts on mold

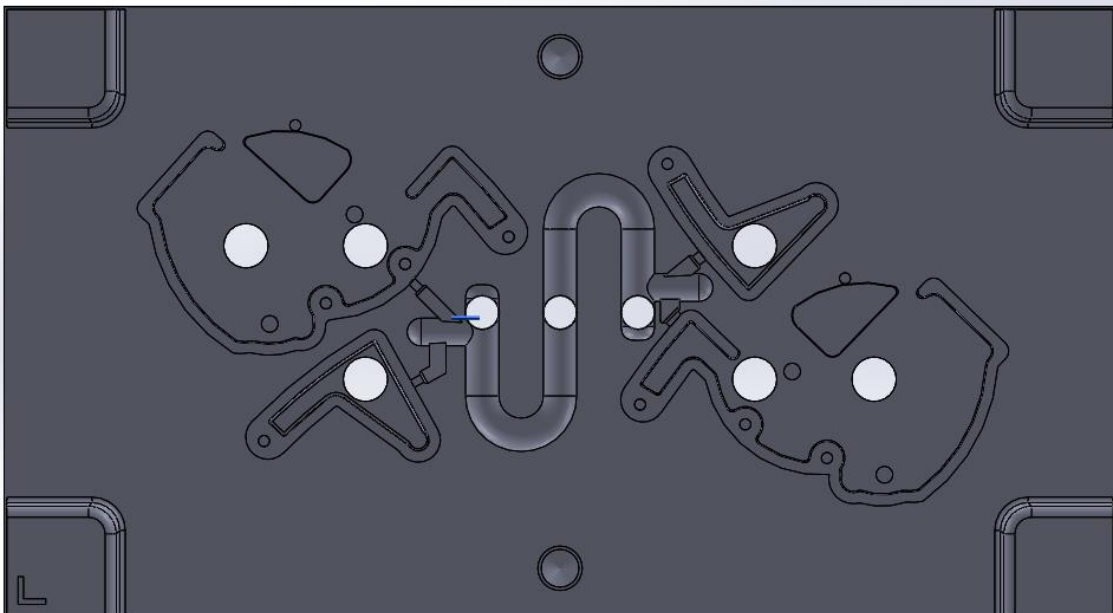


Fig 12. Positioning of ejector pin on mold

(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

### B.3. 몰드 시뮬레이션

#### B.3.1 파트 시뮬레이션

몰드 플로우 시뮬레이션을 통해 실제 몰드 가공에 앞서 발생할 수 있는 문제점이나 현상을 미리 파악하였다. 특히, 문제가 생길 수 있는 제품의 부분이나 게이트 형상, 위치 등을 파악해 수정해 나가는 것을 목표로 하였다. 이 때 앞서 언급한 바와 같이 파트의 형상과 밀핀 위치, 하코어의 양각 부분을 고려하여 파트들을 배치하였을 때 러너에서 나오게 될 게이트의 위치는 한정적이다. 따라서 먼저 게이트가 연결될 만한 파트의 영역에 사출점을 지정하여 몰드 플로우 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통해 각 파트 별 ABS 몰딩의 특성, 특히 충전시간을 분석하였다. 해당 결과로부터 각 파트로 연결되는 게이트의 단면적비와 형상을 설계하고 러너-게이트-파트로 연결되는 전체 형상을 설계하였다.

위에서 제시한 배치로부터 실현 가능한 게이트의 위치를 하나씩 정하고 솔리드웍스를 이용해 몰드 플로우 시뮬레이션을 진행하였다. 이 때 메쉬 설정은 산타의 몸통(Part A, C)는 사이즈 2mm 사면체로, 다리(Part B, D)는 사이즈 1mm인 사면체로 진행하였다. 이것은 해당 부품들에 곡면이 많이 포함되어 있기 때문이다. 해당 시뮬레이션의 충전시간, 충전 완료시의 압력과 온도 분포, 싱크마크에 관한 결과는 E-drawing 형태 파일로 첨부하였다.

이로부터 충전 시간은 산타 몸통의 경우 약 2.17 초(Part A)와 2.56 초(Part C) 정도이고 다리의 경우 약 1.55 초(Part B)와 1.60 초(Part D)정도 걸린다는 결과가 도출되었다. 다리의 경우 상당부분이 대칭으로 같기 때문에 비슷한 결과를 내었으나, 몸통의 경우 특히 결합부 측 부분이 있는 Part C 가 모두 채워지는 데 더 오랜 시간이 걸린 것으로 확인되었다. 충전 완료시 압력과 온도 분포의 경우 파트의 대부분의 영역에서 일정한 편임을 확인할 수 있다. 그러나 실제 몰딩 과정에서 발생할 압력, 온도 분포는 러너와 게이트를 합친 전체 형상의 시뮬레이션을 통해서 유의미한 값을 얻을 수 있다. 산타의 엉덩이 쪽 썰매 형상이 가장 두껍기 때문에 싱크마크가 가장 크게 생길 것임을 쉽게 예상할 수 있었고, 따라서 안쪽 벽 부분에서 썰매 형상의 오프셋을 따라 면을 파내어 해당 부분의 싱크마크를 획기적으로 줄일 수 있었다. 위에서 언급한 양각 하코어를 사용해야만 하는 면이 바로 이 부분이다. 첨부된 최종 디자인에서의 결과를 볼 때 싱크마크는 썰매보다 위에 있는 상자 부분/레터링 된 부분에서 최대 0.06mm 정도로 가장 크게 발생하나, 모든 결합축과도 멀리 떨어져 있으며 기능을 하지 않는 부분이기 때문에 이 정도 변화로는 문제가 생기지 않을 것이라 판단하여 보존하였다. 장난감이 잘 걸기 위해서는 뒤 쪽의 질량이 일정 수준 이상 필요하기 때문이기도 하다.

(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

### B.3.2 전체 시뮬레이션

완전한 대칭의 몰드를 만들 수는 없었지만, 균형 있는 형상이 되도록 게이트를 설계하였다. 우선 게이트의 단면은 다리 파트는 2mm\*1mm, 몸통 파트는 3mm\*1mm로 설계하였고, 각 파트와 수직인 방향으로 주입되도록 하였다. 사출 후 분리를 원활하게 하기 위해 게이트에서 두께를 특히 얇게 했다. 게이트 직전 사출구는 이 게이트보다 높이와 너비가 0.5mm씩 더 크게 디자인하였고, 원활한 ABS의 흐름을 위해 5도의 구배를 주었다.

이를 통해 Fig 13와 같은 전체 파트를 설계하고 전체 몰드 시뮬레이션을 실행하여 예상되는 문제점을 파악하였다. 이것이 1차 시뮬레이션이다. 이 때 모든 전체 형상 시뮬레이션에서 메쉬 설정은 2mm 사면체로 통일하였으며 사출 지점은 러너의 중앙부분에, 직경 6mm로 배치되었다. 이는 이전의 프로젝트에서 실제 사출된 스프루와 러너가 만나는 부분의 직경을 참고한 것이다. 마찬가지로 각 시뮬레이션 결과에서 충전 시간, 압력, 온도, 싱크마크를 E-drawing 파일로 첨부한다. 모든 drawing에서 좌측 위의 레터링이 되어 있는 파트에서부터 시계방향으로 Part A, D, C, B이다. (좌측-Part A, B, 우측-Part C, D)

1차 시뮬레이션 결과에서 눈에 띄는 불균형은 충전 시간과 충전 후 압력 분포다. Fig 14를 보면 충전 시간의 경우 비교적 균일하나 우측의 산타 몸통인 Part C의 끝부분이 약 2.12초로 다른 파트에 비해 늦게 완료가 됨을 볼 수 있는데, 이는 게이트의 위치가 중앙 쪽 배 부분에 달려있는 Part A와 달리 중앙에서 떨어진 발바닥 부분에 배치되어 있기 때문이다. 따라서 게이트로부터 멀리 있는 벽, 특히 결합축 부분들이 늦게 채워지게 된다. 압력의 경우 Fig 15와 같이 좌우가 상반된 모습을 보였으며, 최대 압력 차이는 약 34MPa으로 계산되었다. 서로 형상 자체는 거의 비슷함에도 불구하고 좌측의 압력이 눈에 띄게 높게 형성되었다. 이것 역시 좌측의 경우 우측보다 먼저 완전히 채워지기 때문으로 보인다. 이러한 분포는 대량생산을 해야 하는 몰드 생산에 있어서 몰드 수명이나 제품 형상에 좋지 않은 형태다. 따라서 게이트의 위치나 형상을 수정하여야 한다.

추가로 온도의 경우 Fig 16와 같이 पार्ट끼리는 거의 비슷하지만 러너 상에서 불균형이 존재하였고, 싱크마크의 경우 개별 파트에서 예측되었던 최대 수치와 거의 비슷한 수치로 같은 위치에서 발생하였다. 이것의 단면도는 Fig 17와 같다. 단면 형상의 바닥면에서 파트가 살짝 파인 것을 볼 수 있다. 그러나 이는 위에서 언급했듯 제품에 무시할 수 있을 만한 영향을 줄 것으로 생각된다. 에어 트랩의 경우 Fig 18와 같이 점으로 표시되었다.

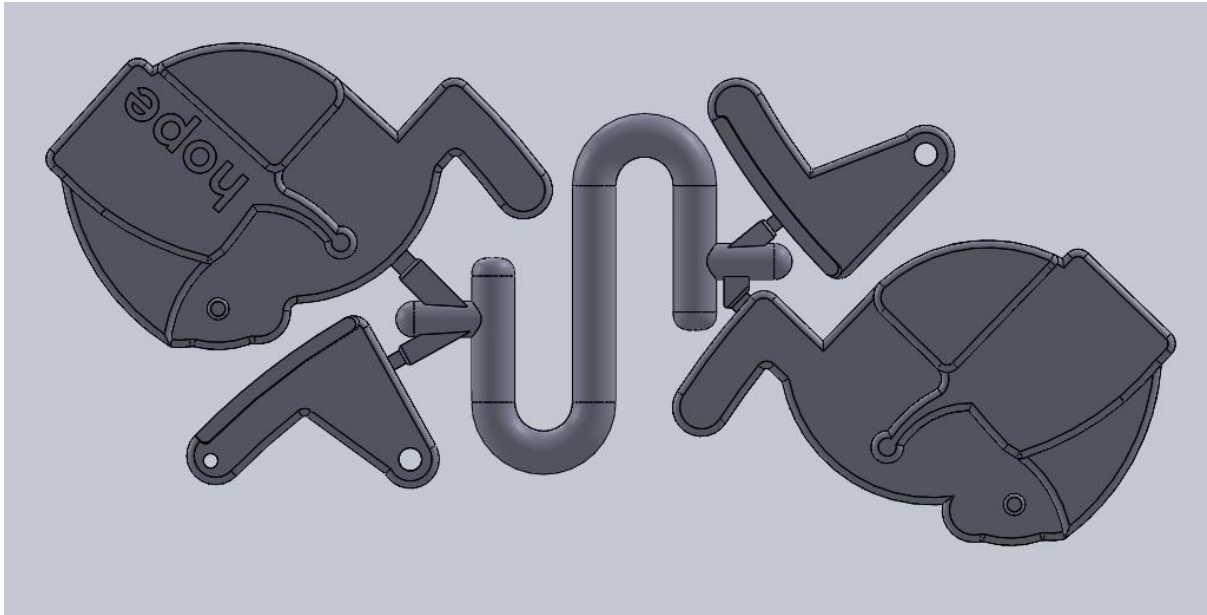
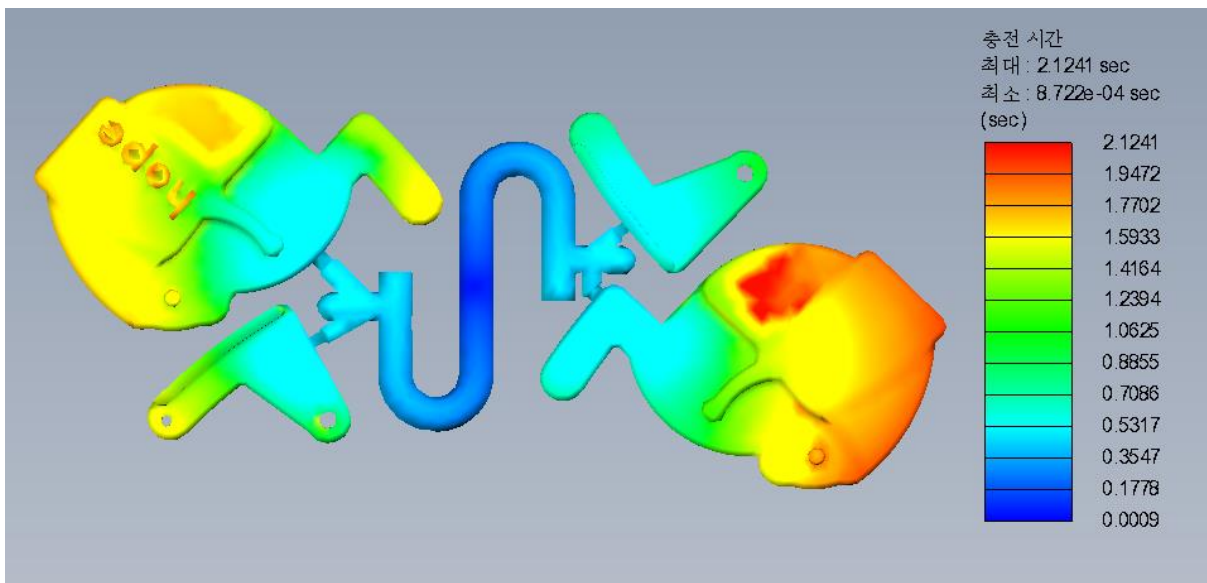
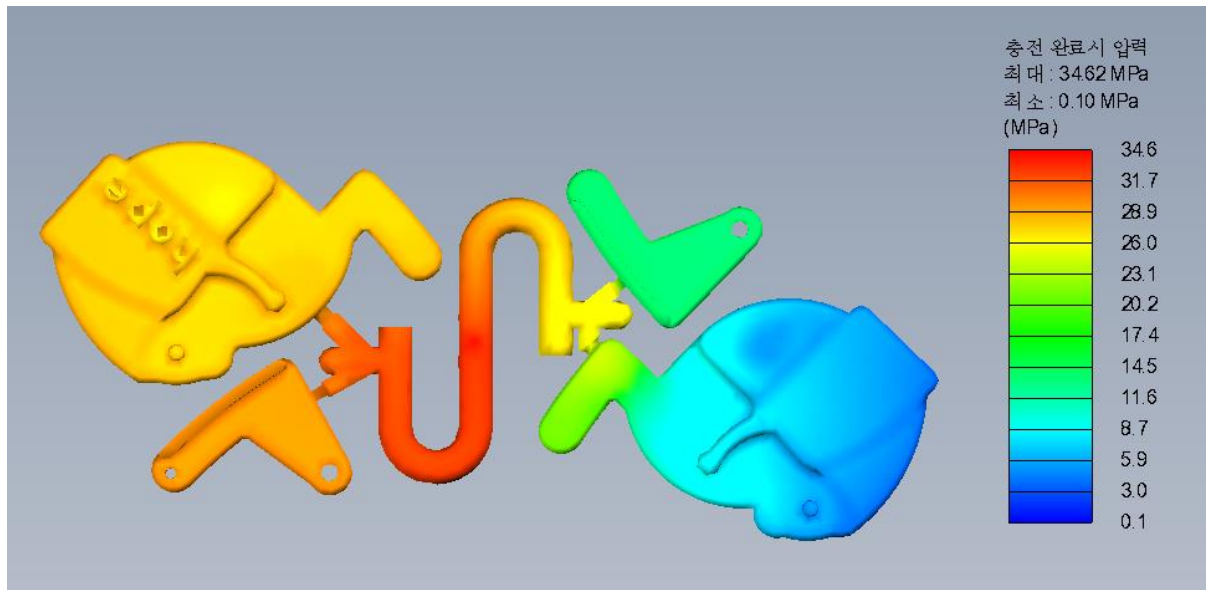
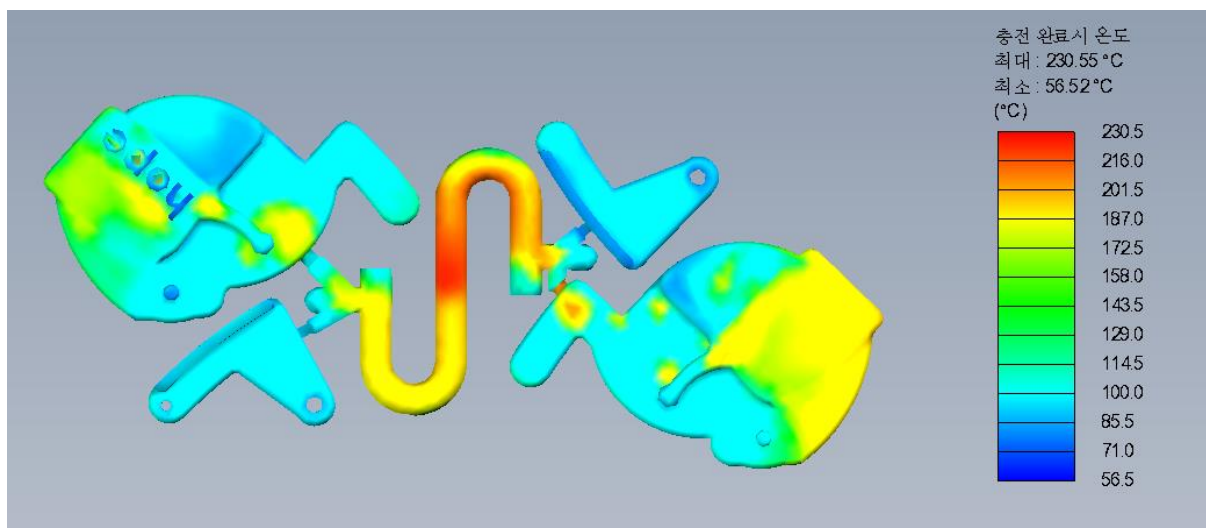
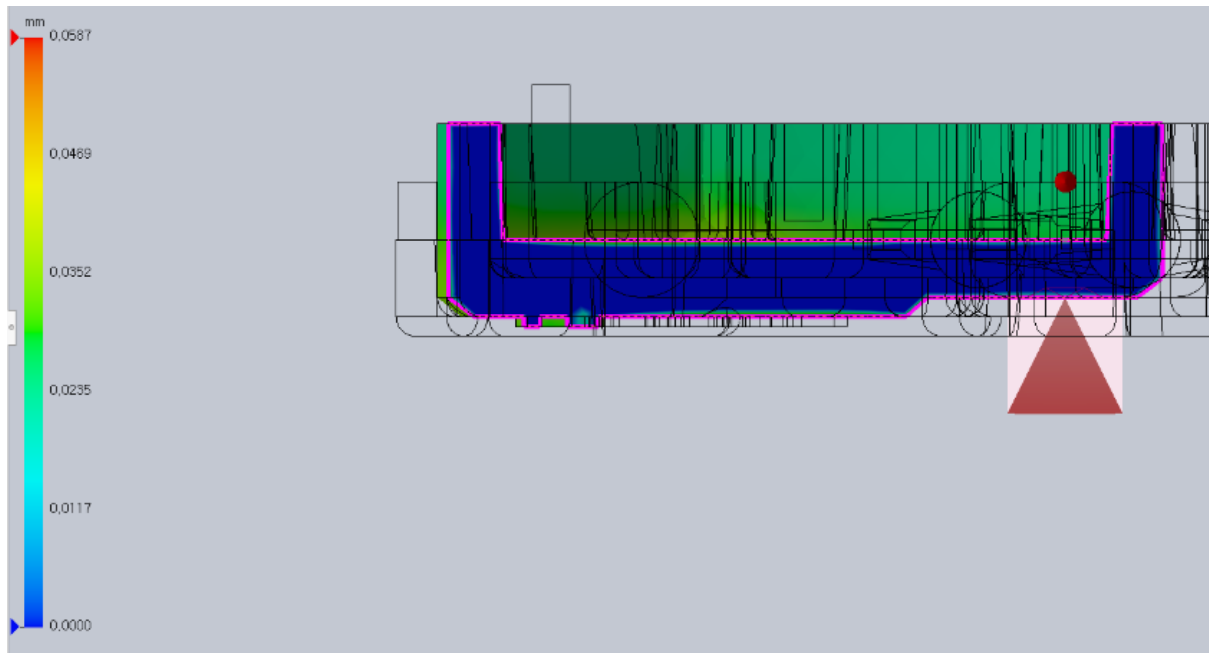
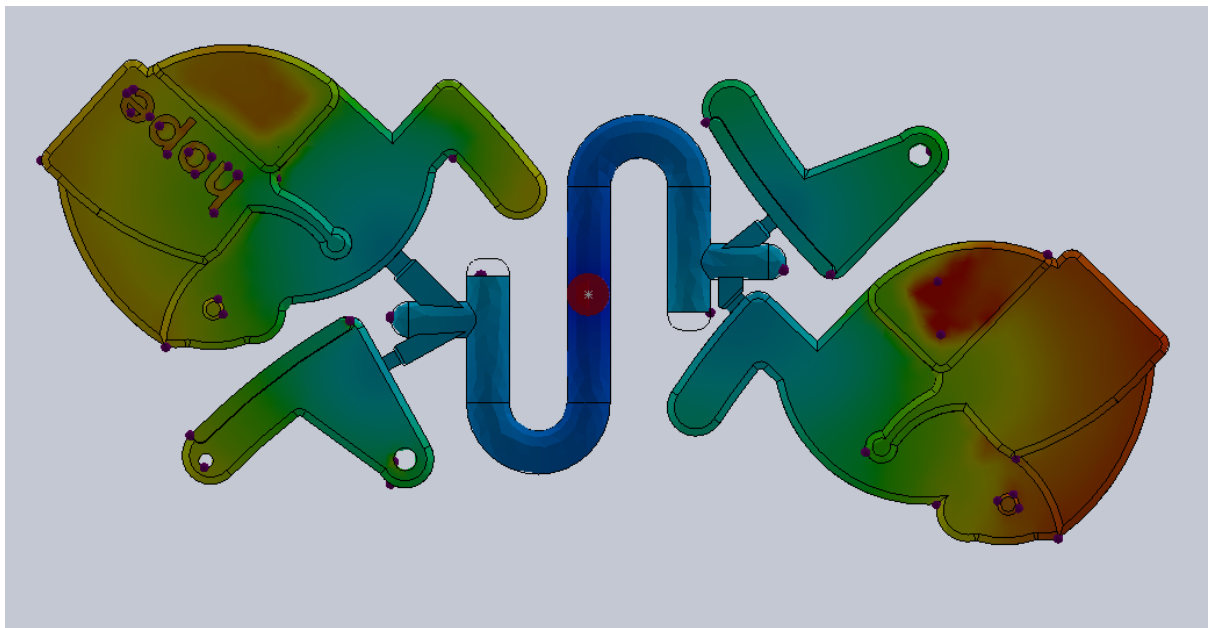


Fig 13. First formation of mold design

Fig 14. Filling time (1<sup>st</sup>)

Fig 15. Pressure distribution after filling (1<sup>st</sup>)Fig 16. Temperature distribution after filling (1<sup>st</sup>)

Fig 17. Maximum sink mark region (1<sup>st</sup>)Fig 18. Air trap plotted (1<sup>st</sup>)

위에서 발생한 문제를 해결하기 위해 게이트를 수정하고 다시 몰드 시뮬레이션을 하며, 이를 2차 시뮬레이션이라 하였다. 이렇게 최종 5차 시뮬레이션 까지에 대한 각각의 게이트 형상과 발생했던 문제점, 수정 사항을 Table 1에 정리하여 제시하였다. 모든 시뮬레이션 결과는 따로 첨부하였다.

(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

Table 1. Summary of mold flow simulation with different gate formations

	게이트 형상	발생한 문제점	수정 사항
1차	Part A, C: 3mm*1mm Part B, D: 2mm*1mm 기본 형상	Part C가 충전시간이 많이 소요되고, 좌측의 압력이 높음	게이트C가 문제라 판단, 게이트 위치 변경
2차	Part A, C: 3mm*1mm Part B, D: 2mm*1mm 게이트 C의 위치를 엉덩이 쪽으로 이동	예상과 달리 충전시간과 압력차이가 더 벌어짐.	엉덩이 부분이 두께가 더 얇기 때문이라 판단, 위치는 1차와 같게 되돌리고 좌측(게이트 A, B)의 크기를 줄임
3차	Part A: 2.5mm*1mm Part B: 1.5mm*1mm 위와 같이 변경 게이트 위치 1차와 동일	1차보다 시간과 압력차이가 다소 줄어들었으나, 그 효과가 미미함	게이트의 형상을 바꾸지 않고 사출구 쪽을 조작하는 방법을 고안, 즉 압력이 가장 높은 B로 가는 사출구에 두꺼운 방을 만들
4차	3차와 동일 Part B 사출구에 방을 수직으로 만들	거의 영향을 주지 않음	결국 거의 대칭인 다리 보다는 산타 몸통 부분의 차이가 불균형을 만든다 판단, 게이트 A의 크기를 획기적으로 줄임
5차	Part A: 1.5mm*1mm Part B: 1.5mm*1mm 위와 같이 변경	시간 차이와 압력 차이가 좌우측이 매우 줄어들	최종 결정

자세한 결과는 E-drawing을 참고할 수 있다. 최종 결정된 5차 게이트 형상에서 충전 시간은 거의 균형적으로 발생하였고, 압력의 경우 다리는 거의 똑같으나 몸통 부위가 다소 다르다. 그러나 이전 결과들과는 달리 압력의 크기가 가장 큰 러너 부분에서 압력이 거의 대칭적으로 발생하게 됨을 볼 수 있으므로, 이 형상을 최종 선택하였다. 위의 1차 결과와 마찬가지로 5차의 결과를 Fig 19~24에 제시한다.



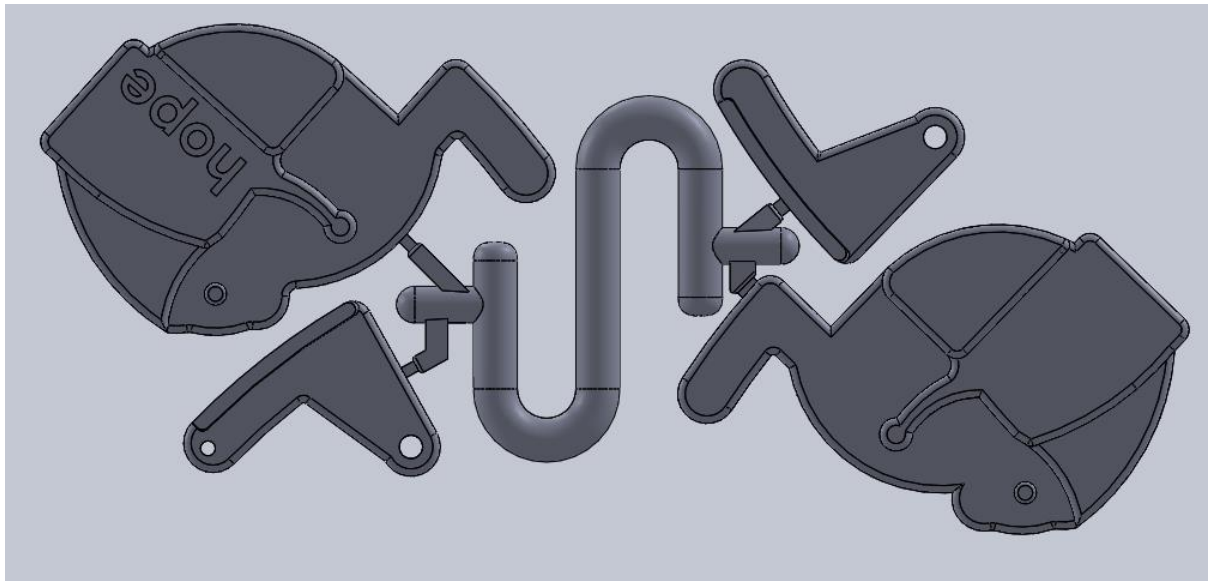


Fig 19. Fifth formation of mold design

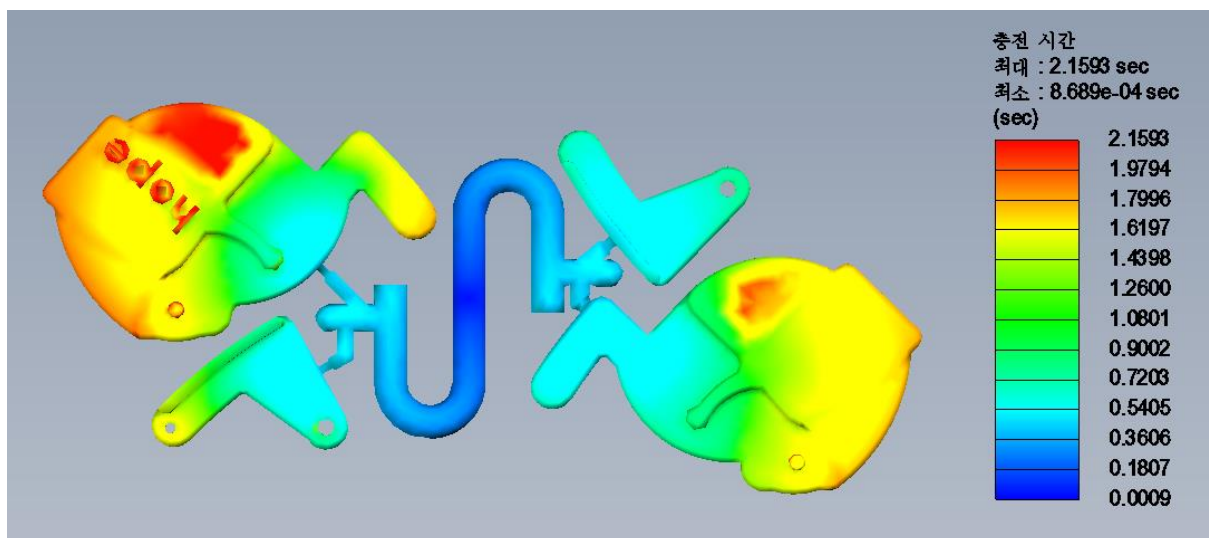
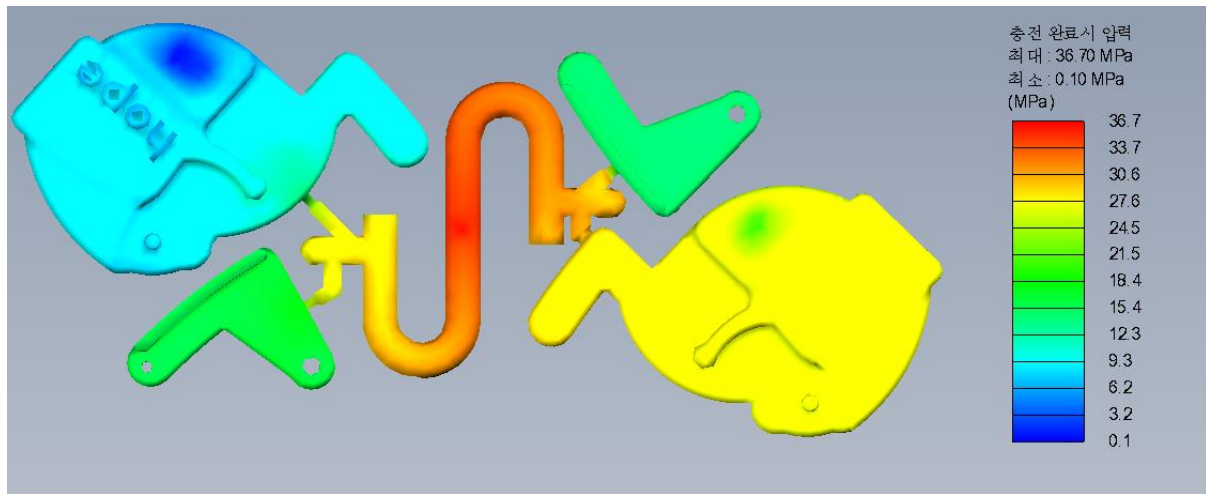
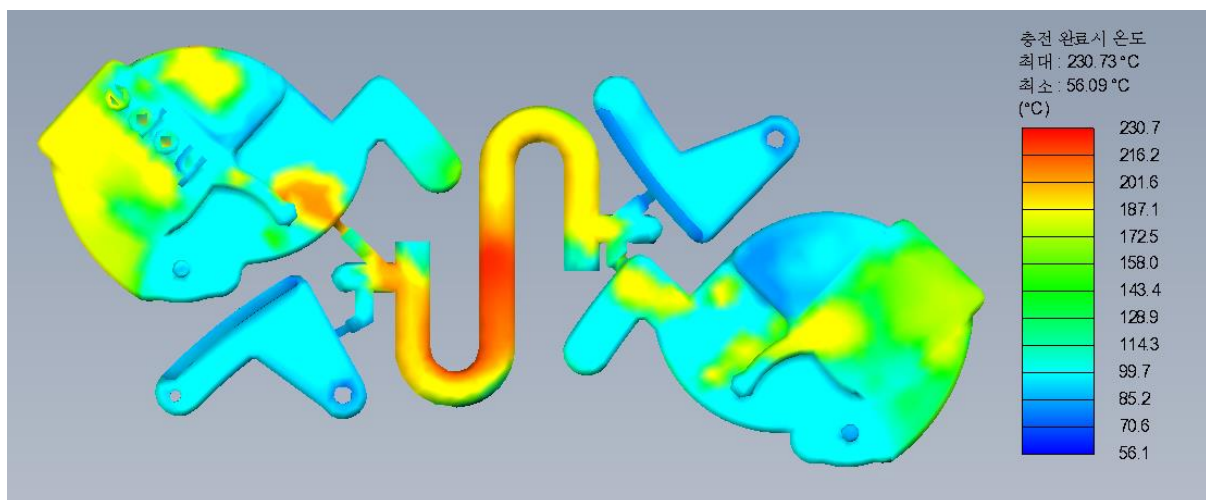


Fig 20. Filling time (5<sup>th</sup>)

Fig 21. Pressure distribution after filling (5<sup>th</sup>)Fig 22. Temperature distribution after filling (5<sup>th</sup>)

(주)관악산타	<b>Mold Design Report</b>	2021.10.21
		Revision -2-

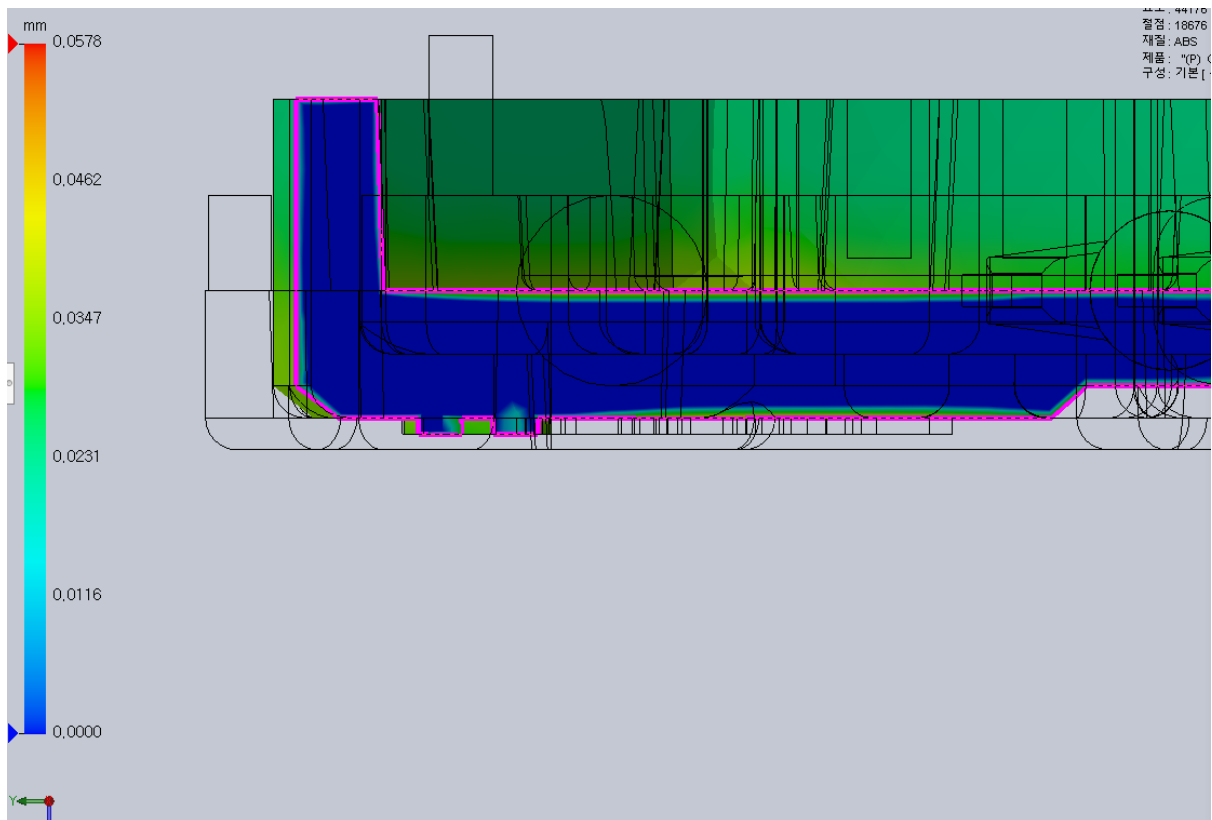


Fig 23. Maximum sink mark region (5<sup>th</sup>)

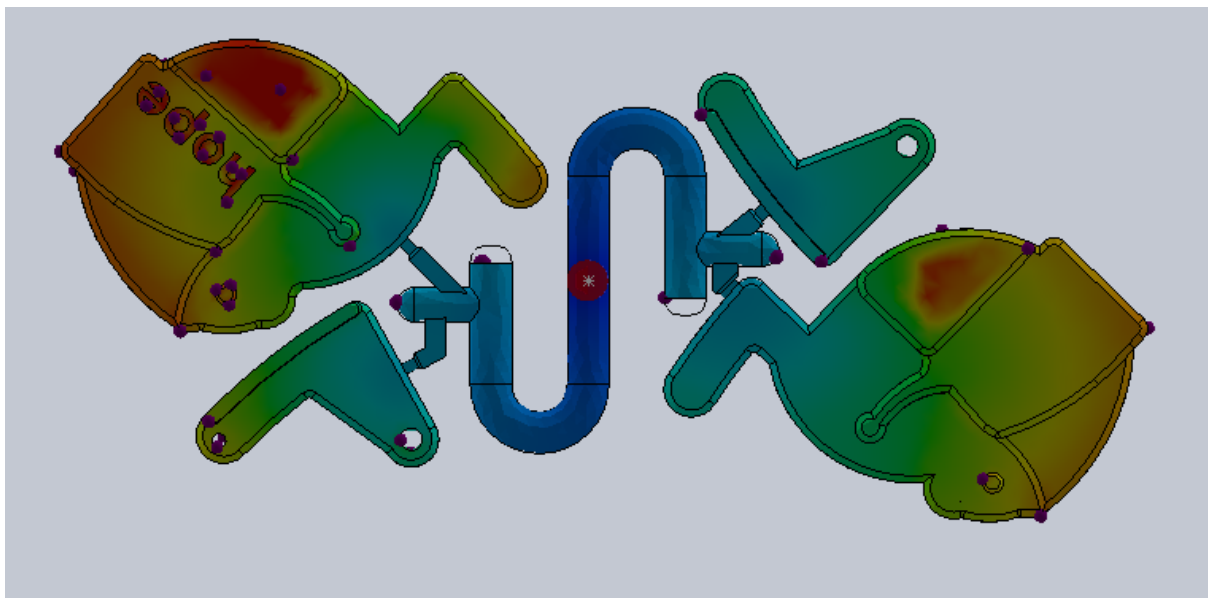


Fig 24. Air trap plotted (5<sup>th</sup>)