

# 제품 디자인 보고서

## 재료와 제조공정 Project

A. 회사 소개 .....	1
B. 프로젝트 개요 .....	1
C. 제품 디자인 .....	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
D. 소재와 안정성 .....	12
D.1. ABS 몰딩 .....	12
D.2. 내구도 .....	12
D.3 조립방식설계 .....	13
E. Bill of materials .....	14
F. Gantt chart .....	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.

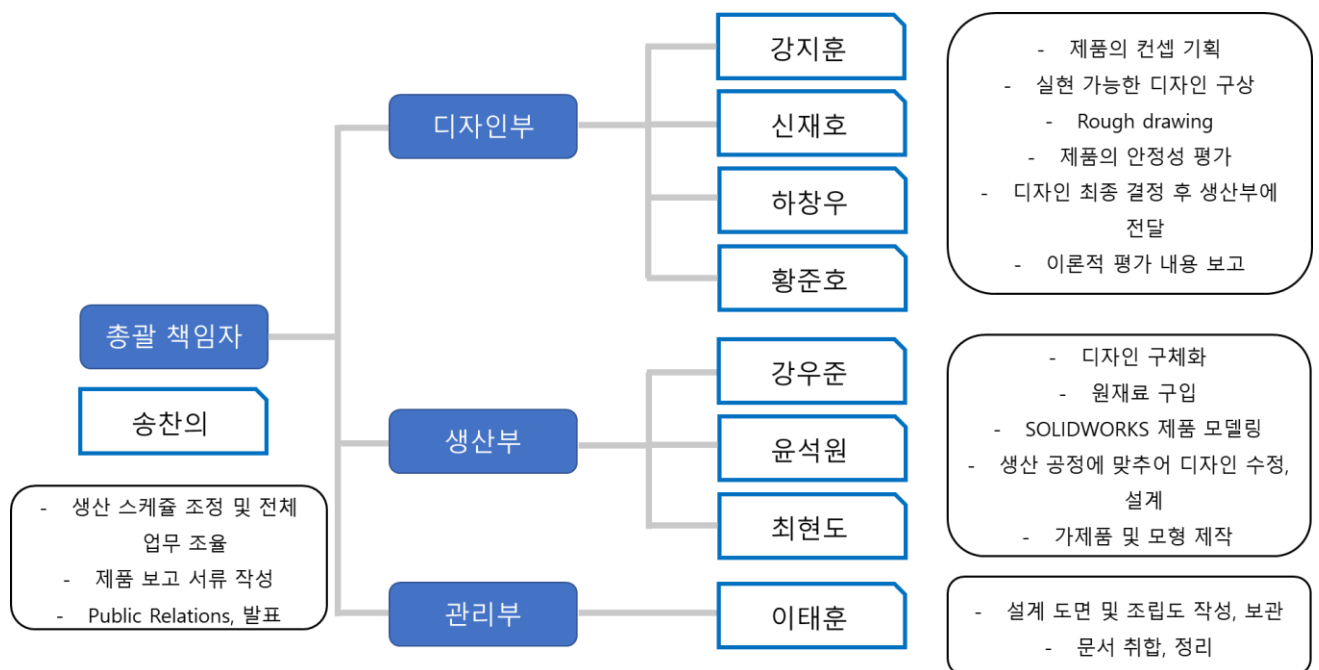


Fig. 1 Organizational structure of Team 4

## 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 제조과정 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	<b>Product Design Report</b>	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.

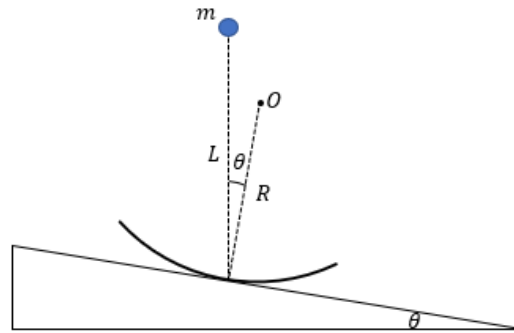


Fig. 2 Equilibrium of tumbling doll model

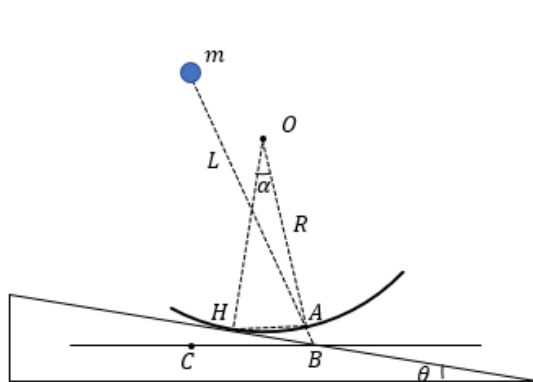


Fig. 3 Tumbling doll tilted to left

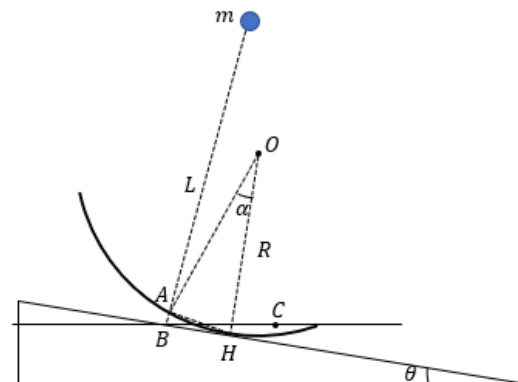


Fig. 4 Tumbling doll tilted to right

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.

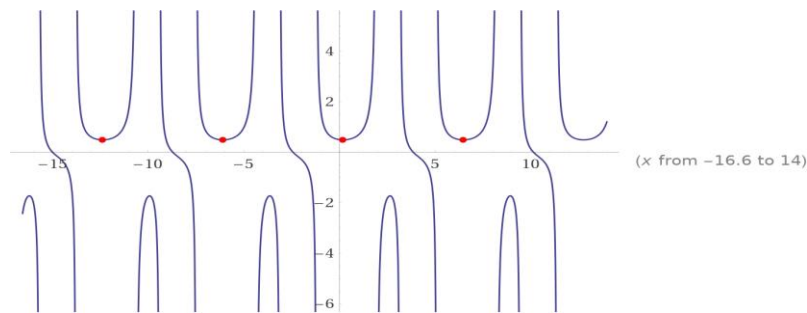


Fig. 5. Graph  $y = \frac{\sin \frac{x}{2}}{\sin x} \times \frac{\cos(\frac{\pi - x}{9})}{\cos(\frac{\pi}{9} - x)}$

## 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>

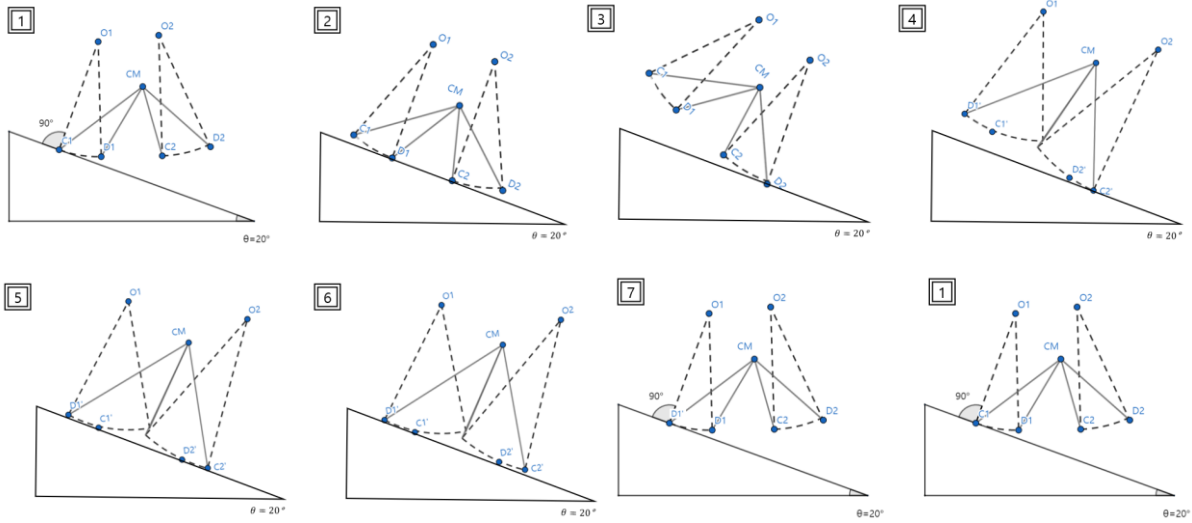


Fig. 6 Cyclic movement of walking toy, 7 step analysis

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.

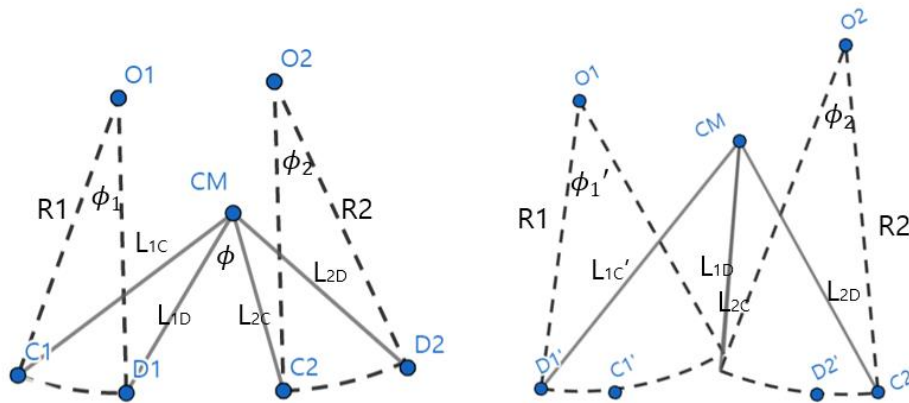


Fig. 7 Model and dimensions of walking toy; (a, left) hind leg and frontal leg apart, (b, right) hind leg and frontal leg joined

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	Product Design Report	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	Product Design Report	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.

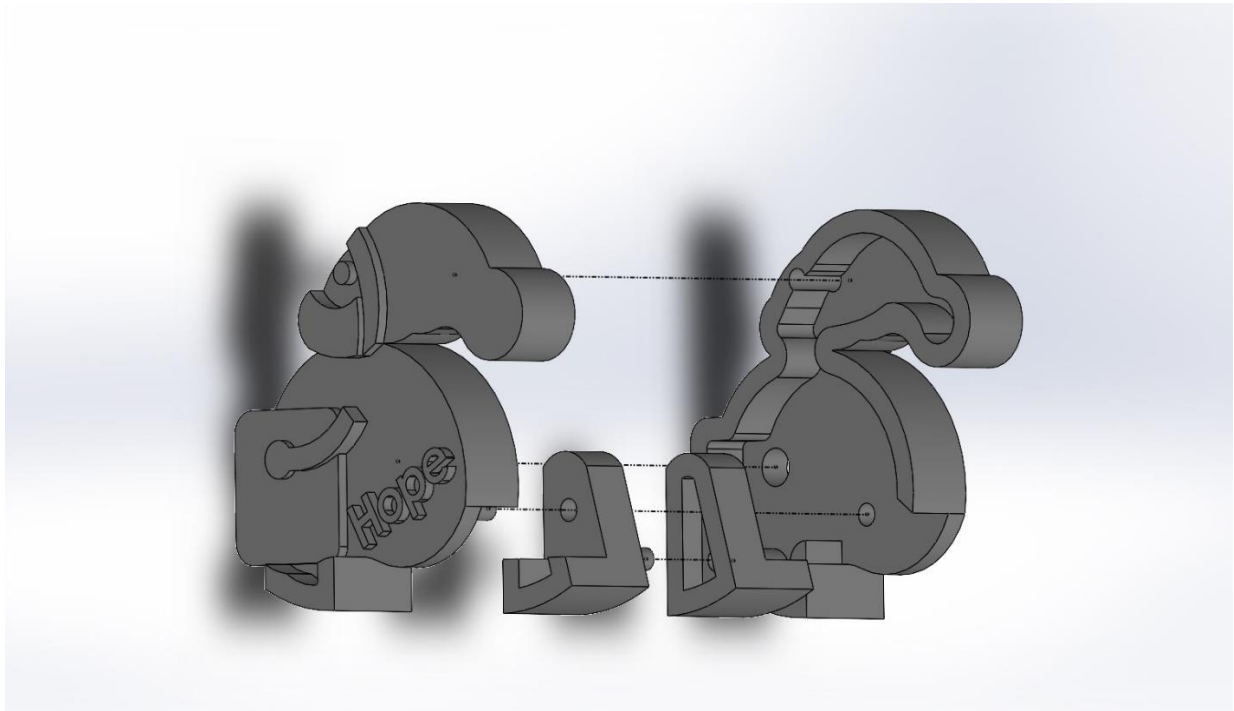


Fig. 8 Exploded view of walking toy, Part A, B, C, and D starting from left

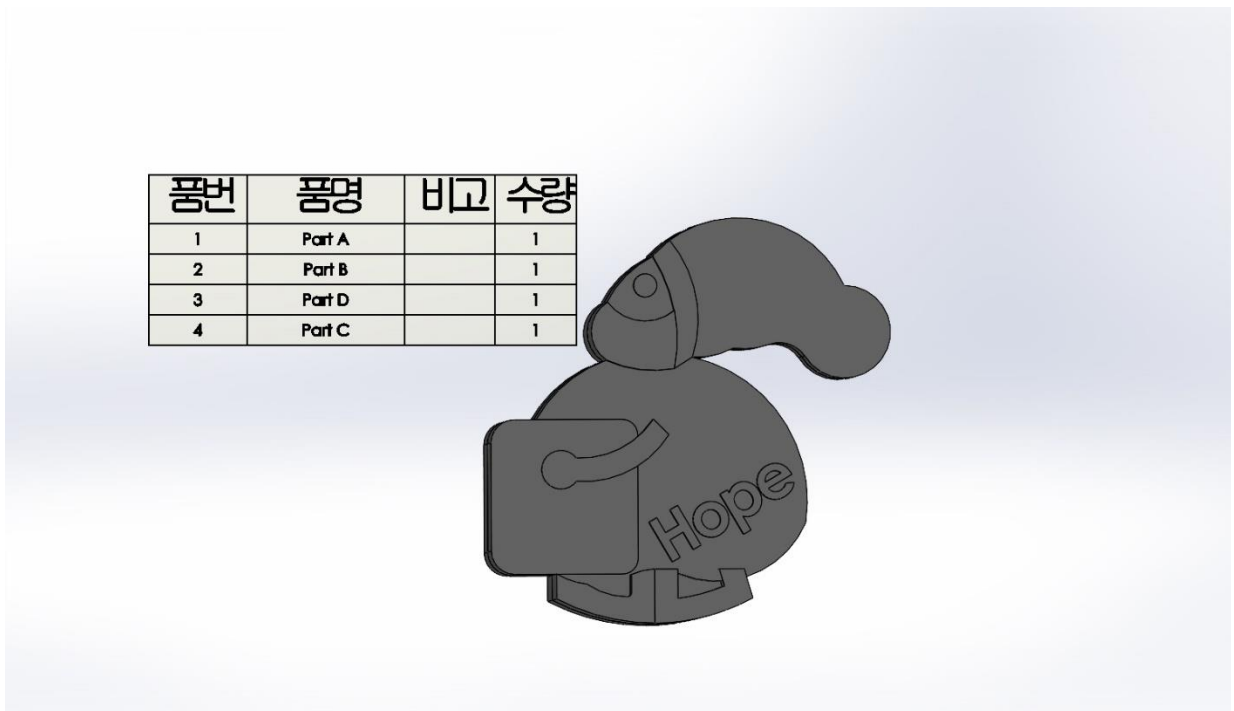


Fig. 9 Bill of materials

## 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.

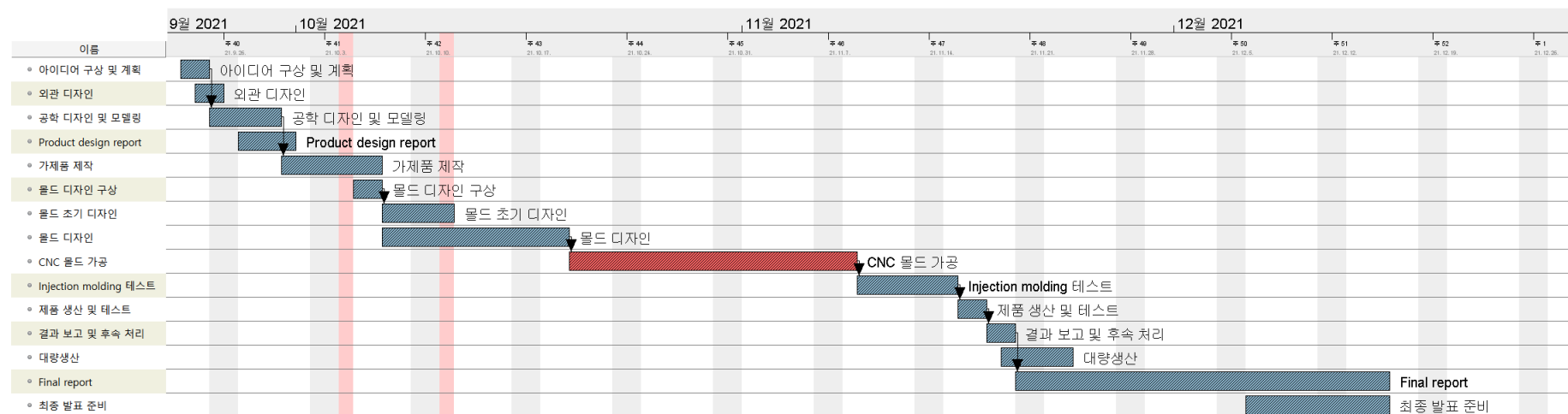


Fig. 10 Gantt chart for project management, from 9/23 to 12/15