율전이 V0 설계 검증: 통합 보고서

팀장님 보고용 · 작성일 2026-11-17 · 대상: Raspberry Pi 5 구성(V0 보행 기준) · 기구설계팀 검증 작업

> 이 문서는 Phase 1~4 보고서(파일 구조 → 질량 → 관절 토크 → 구조해석)와 개선안을 합친 것이다. 각 절 끝에 **요약**을 붙였다. 자세한 계산 과정과 근거는 각 Phase 보고서에 있다. 값의 출처 표기: **[제조사]** 부품 사양 · **[CAD]** 팀 CAD 값 · **[계산]** 이번에 계산 · **[가정]** 재지 않고 정한 값 · **[미확인]** 근거 자료 없음

---

1. 한 장 요약

질문: 현재 율전이 설계는 실제 제작과 보행에 적합한가?

	답	한 줄 근거
지금 CAD대로 **만들 수 있는가**	**예** (조건부)	CAD와 보고서 수치가 일치하고, 부품 간섭이 0건이며, 팀 코드·테스트가 그대로 재현된다
질량 값을 **믿을 수 있는가**	**아니오**	2,440 g 중 **실측값이 없다.** 가정을 모두 반영하면 2.15~2.92 kg
서고 걸을 **모터 토크**가 있는가	**여유가 거의 없다**	hip roll 서보(XC430)가 **한 발로 서는 것만으로** 스톨 토크의 73~84%. 걷는 순간 최댓값은 스톨을 넘을 수 있다
걸을 때 구조가 버티는가	**예**	상체 부품 응력은 1 MPa 미만
넘어질 때 구조가 버티는가	**아니오일 가능성이 크다**	머리가 먼저 땅에 닿고, 목 기둥 밑동과 몸통 회전 서보가 가장 약하다
걷는지 확정할 수 있는가	**아니오**	지금까지는 정적·준정적 계산이다. 시뮬레이션 학습과 실물 시험이 정한다

> **요약:** 제작은 가능하다. 다만 hip roll 토크 여유가 작고, 넘어질 때 목 기둥과 몸통 회전부가 취약하며, 수치 대부분은 측정 전 계산값이다.

가장 중요한 세 가지

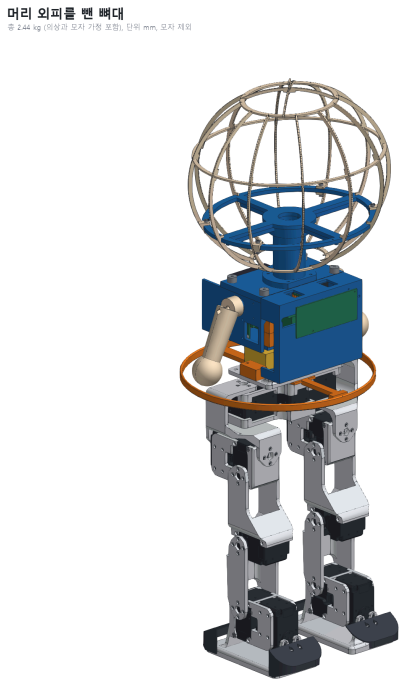
1. **무게가 모든 문제의 뿌리다.** 고관절 토크, 무릎 토크, 넘어질 때 충격 에너지가 모두 질량에 비례한다. 그래서 감량이 가장 효과가 큰 개선이다.
2. **걸을 때가 아니라 넘어질 때가 구조의 약점이다.** 머리(199 g)가 먼저 닿고, 그 충격이 목 기둥 → 뚜껑 → 몸통 회전 서보로 전달된다.
3. **우리가 가진 숫자는 대부분 "계산값"이다.** 실제 안전율을 정하려면 부품 계량, 출력 시편 시험, 머리 낙하 시험이 필요하다.

팀장님께 정해 달라고 할 것 (5절 자세히): ① 목 기둥 개선안 반영 여부와 머리 받침 휠 동시 변경 ② 몸통 회전 서보 보호 구조 방향 ③ 머리 충격 흡수 구조 ④ 시험 일정(계량, 시편, 낙하)

---

2. 로봇은 어떻게 생겼나

PhoneBot(UCLA RoMeLa의 오픈소스 이족 로봇) 하체를 **그대로** 쓰고, 그 위에 팀이 새로 설계한 상체(몸통, 목, 머리 골격, 팔, 전장)를 올린 구조다.



항목	값	출처
전체 높이	620 mm (유건 제외)	[CAD]
전체 질량	2,440.2 g (의상·덮개·배선 가정 포함)	[CAD]+[가정]
관절	15개: 다리 6×2, 몸통 회전 1, 어깨 2	[CAD]
서보	XL430 ×11(다리, 몸통), **XC430 ×2(hip roll)**, XC330 ×2(어깨)	[제조사]
무게중심(CoM)	높이 260 mm, 앞뒤 −17.7 mm	[CAD]
머리	232×206×208 mm, 전체 높이의 약 1/3, PETG 늑골 골격 + 원단 덮개	[CAD]
배터리	3S LiPo 2200 mAh (9.6~12.6 V)	[제조사]

> **요약:** 검증된 PhoneBot 하체 위에 원본보다 무겁고 높은 상체를 올린 구조다.

이 설계에서 알아 둘 점

- PhoneBot 원본은 1.8 kg이었다. 율전이는 **상체(약 1.1 kg)가 머리까지 포함해 원본보다 훨씬 무겁고 높다.**
- 설계는 Inventor 파일이 아니라 **CadQuery(Python) 코드**다. 치수는 `cad/params.py`에서 바꾸고, STEP/STL은 거기서 생성된다.

---

3. 단계별 검증 결과

3.1 Phase 1: 파일과 설계 구조

- 논문의 기준값(2,440.2 g, CoM 260.1 mm, 1.257 N·m)은 **같은 코드가 낸 값**이다. 그래서 "논문값과 CAD값이 같다"는 독립 검증이 아니다. 독립 검증은 형상 재계산, 실측, 이 문서의 후속 계산에서 나온다.
- 학습·시뮬레이션용 PhoneBot 논문 원문과 모델(MJCF), 목표 보행 조건은 폴더에 없어서 팀 요약 메모로만 확인했다 **[미확인]**.
- 확인할 의심 지점 8개를 뽑았고, Phase 2~4에서 하나씩 확인했다.

> **요약:** 논문값과 CAD값의 일치는 같은 코드의 출력이라 독립 검증이 아니므로, 형상에서 다시 계산해 확인했다.

3.2 Phase 2: 질량과 무게중심

확인한 것: 조립 STEP의 부품 69개의 위치·부피가 팀 보고서와 0.07 mm 안에서 일치한다. 팀 코드를 다시 돌려도 같은 결과가 나온다(총질량, CoM, 간섭 0건 모두 일치, 테스트 521개 통과, 1개는 의도된 보류). **계산 오류는 찾지 못했다.**

문제: 입력 질량의 출처가 약하다.

묶음	질량	근거
서보 13개 + 케이블	792 g	**[제조사]** 서보, [가정] 케이블
PhoneBot 출력 부품 18개	412 g	**논문 총질량 1.8 kg에서 역산한 값** (실측 아님)
새 출력 부품	341 g	형상 부피 × 가정 밀도
구매 부품	308 g	일부 제조사, 다수 가정
가정 질량(의상·덮개·배선·유건 등)	300 g	**전부 가정**

경우	총질량	CoM 높이	hip roll 지표	시뮬레이션 한도(0.93 N·m) 대비
모두 낙관	2.15 kg	256 mm	1.11 N·m	1.19배
기준(팀 값)	**2.44 kg**	**260 mm**	**1.26 N·m**	**1.35배**
모두 비관	2.92 kg	272 mm	1.50 N·m	1.62배

→ 가장 낙관적인 경우에도 팀 목표(1.15배)를 넘는다. 총질량을 줄이는 길 말고는 이 지표를 낮추는 방법이 거의 없다.

> **요약:** 계산 오류는 없으나 입력 질량에 실측값이 없다. 가장 낙관적인 가정에서도 hip roll 지표가 목표를 넘으므로, 감량이 가장 직접적인 해결책이다.

3.3 Phase 3: 관절 토크

방법: 강체 15개 모델(Phase 2)로 한 발 지지와 두 발 지지의 중력 토크를 계산하고, 걷는 동안의 최댓값은 선형 도립진자(LIPM) 모델로 훑었다(수직 하중 ×1.3, 압력중심 이동).

(강체 15개 모델: 로봇을 변형하지 않는 링크 15개와 관절로 단순화한 모델. 수직 하중 ×1.3: 보행 중 발이 받는 수직력이 체중의 1.3배까지 늘어난다는 가정.)

관절(서보)	서 있기	한 발 지지 정적	걷는 동안 상한	스톨 토크 (11.1 V / 9.6 V)	판정
hip roll (XC430)	0.34	**1.24**	**1.55**	1.70 / 1.49	**여유 거의 없음**
무릎 (XL430), 15° 굽힘	0.28	0.53	0.97	1.40 / 1.11	굽힐수록 악화
무릎 (XL430), 30° 굽힘	0.44	0.87	1.48	1.40 / 1.11	**스톨 초과**
발목 좌우축 (XL430)	0.34	0 (기울이면)	1.02	1.40 / 1.11	9.6 V에서 여유 8%
고관절 앞뒤축 (XL430)	0.10	0.13	0.29	1.40 / 1.11	여유 있음

(단위 N·m. 앞의 세 열은 계산값, 스톨 열은 제조사 값. 스톨 토크는 **순간 최대값**이지 연속으로 낼 수 있는 값이 아니다.)

> **요약:** hip roll은 한 발 지지 정적 토크만으로 스톨의 73~84%이고, 무릎은 30° 굽힘에서 스톨을 넘는다.

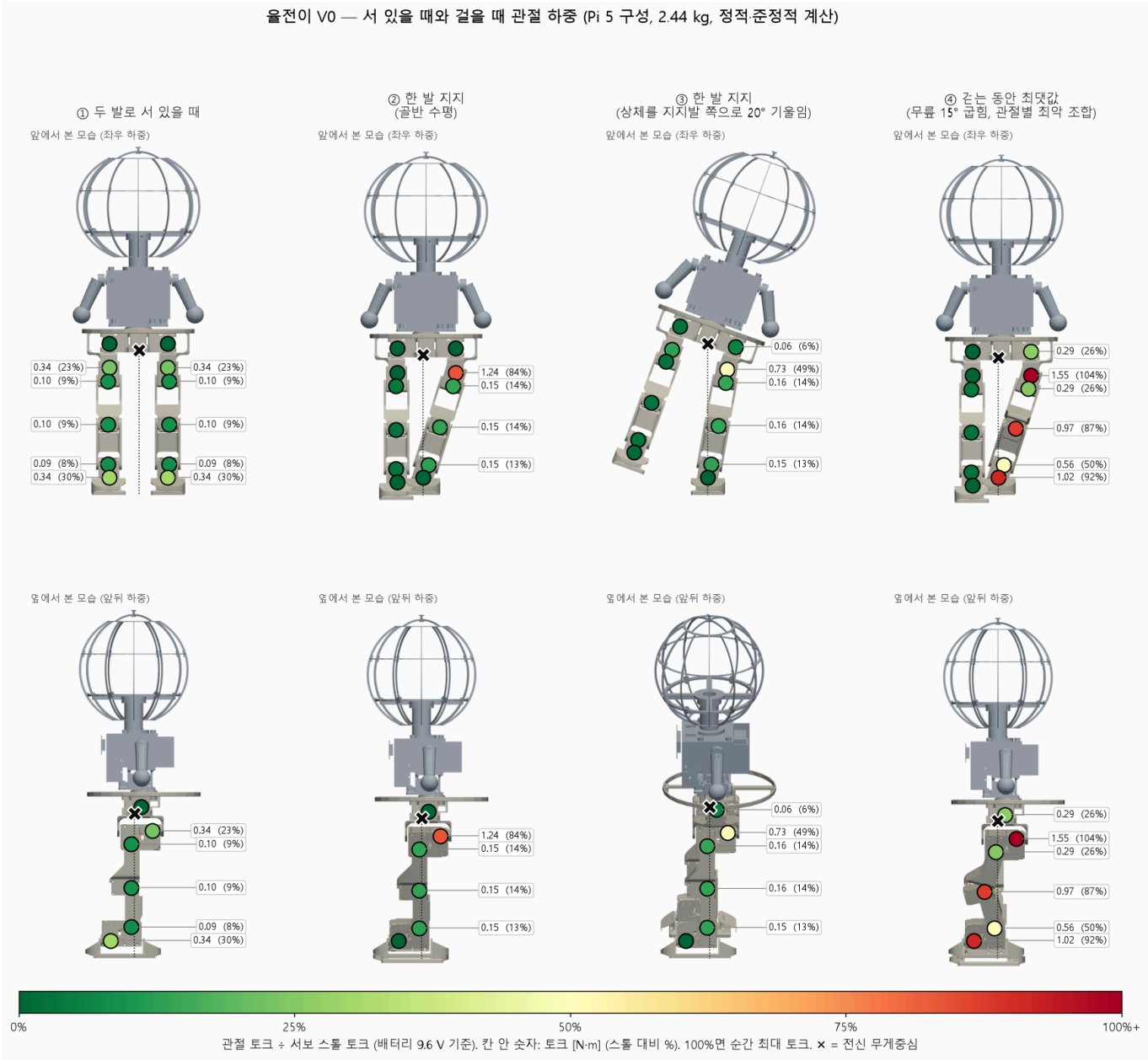
핵심 발견

1. **hip roll 지표 1.257 N·m는 "거친 상한"이 아니라 골반을 수평으로 둔 한 발 지지의 실제 정적 토크다**(계산 1.243). 이전에는 이 값이 평형이 아닌 순간이라 더 작을 수 있다고 봤는데, 정정했다.
2. **상체를 지지발 쪽으로 기울이면 이 토크가 줄어든다**: 12°면 시뮬레이션 한도 0.93 N·m 안, 20°면 0.73 N·m. 대신 머리가 옆으로 크게 흔들린다. 걸음 방식(정책)이 정할 일이다.
3. **무릎은 15° 넘게 굽히면 시뮬 한도(0.93)를 넘는다.** 무릎을 거의 편 채 걷는 정책이 필요하다.
4. **시상면 관절(무릎, 고관절 앞뒤, 발목 앞뒤)의 부하는 PhoneBot의 1.5~2.9배**다. 팀이 계산한 1.35배는 hip roll 하나의 값이고, 나머지는 이전에 계산되지 않았다.
5. **연속 구동과 발열은 판정하지 못한다.** 연속 정격이 제조사 값이 아니라 판매처 추정(스톨의 20%)뿐이고 XC430은 그것도 없다. 옷 속에서 열이 갇히는 문제는 실물 열 시험이 필요하다.

> **요약:** 상체 기울임과 무릎을 편 걸음으로 토크를 줄일 수 있다. 연속 구동과 발열은 실측 없이 판정할 수 없다.

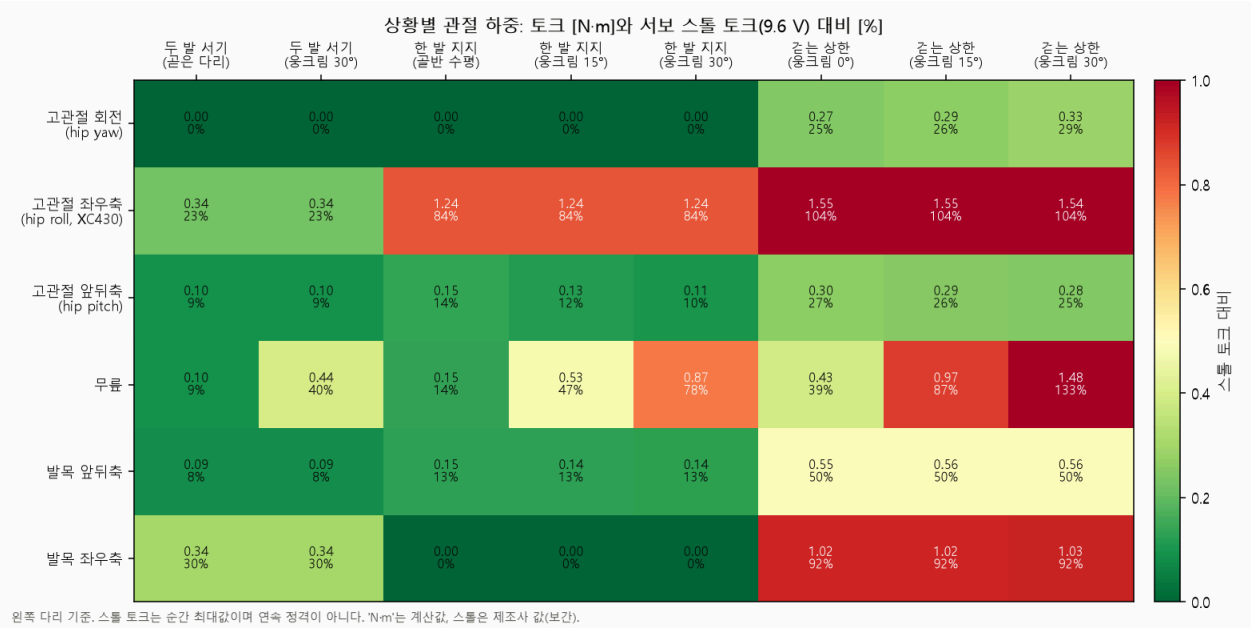
하중이 상황에 따라 어떻게 변하나 (그림)

아래 그림은 로봇 3D 모델 위에 **관절별 토크를 서보 스톨 토크(9.6 V) 대비 색으로** 칠한 것이다. 초록은 여유, 빨강은 한계에 가까움이다. 같은 로봇을 앞(좌우 하중)과 옆(앞뒤 하중)에서 본다. ×는 전신 무게중심이다. 그림 속 글자는 영어이고, 관절 옆 숫자는 토크(N·m)와 스톨 대비 백분율이다.



상황	눈에 띄는 변화	왜
① 두 발로 서 있을 때	모든 관절이 30% 이하(발목 좌우축 30%, hip roll 23%)	무게가 두 다리에 나뉘어 걸린다
② 한 발 지지(골반 수평)	**hip roll이 23% → 84%**로 급증. 발목 좌우축은 0%(몸을 기울여 무게중심을 발 위로)	상체와 반대쪽 다리 무게가 한쪽 고관절에 쏠린다
③ 상체를 지지발 쪽으로 20° 기울임	hip roll이 84% → **49%**로 감소	상체 무게중심이 고관절 위로 오면서 지렛대가 짧아진다
④ 걷는 동안 최댓값	hip roll **104%**, 발목 좌우축 92%, 무릎 87%, 발목 앞뒤축 50%	수직 하중 1.3배와 압력중심 이동이 겹치는 최악 조합

> **요약:** 상체를 지지발 쪽으로 기울이면 상체 무게의 모멘트 팔이 짧아져 hip roll 부하가 84%에서 49%로 준다. ④는 관절별 최악값의 조합이며 실제 한 순간의 자세가 아니다.



히트맵은 같은 내용을 **상황 × 관절** 표로 정리한 것이다. 가로로 보면 한 관절이 상황에 따라 어떻게 변하는지, 세로로 보면 한 상황에서 어느 관절이 가장 힘든지 한눈에 보인다. 서 있을 때(왼쪽 두 열)는 대부분 초록이고, **한 발 지지로 가면 hip roll**이, **걷는 상한과 무릎을 굽힌 상태에서는 무릎·발목 좌우축**이 빨갛게 변한다.

주의: 스톨 토크는 순간 최대값이라 100% 미만이어도 연속으로 낼 수 있다는 뜻은 아니다. 그림의 자세는 설명용이고(④의 자세는 걷는 순간의 한 장면이 아니라 무릎 15° 굽힘 자세), 값은 정적·준정적 계산이다.

3.4 Phase 4: 구조 안전성

방법: 걸을 때와 넘어질 때(다리를 편 채 뒤·앞으로 쓰러지는 경우)의 하중을 계산하고, 출력용 STEP을 유한요소해석(FEA)으로 풀었다. 해석 도구는 FEA를 관 외팔보 이론과 대조해 **오차 0.4~2%** 안임을 확인했다.

부위	걸을 때	넘어질 때	판정
목 기둥 밑동(케이블 구멍)	응력 0.02 MPa, 무시	머리 찌그러짐이 25 mm 미만이면 PLA 층간 강도(35 MPa) 초과	**개선 필요**
목 플랜지 볼트, 뚜껑 인서트	무시	10 mm에서 볼트당 약 820~875 N (인서트 뽑힘 참고값 1,180 N)	확인 필요
몸통 회전(yaw) 서보 접합부	M2 나사 2 N	31~197 N·m, 나사당 460~2,900 N	**개선 필요** (서보 보호)
XC430 케이스 나사 (M2.5×4)	나사당 약 10 N	—	**문제 없음**
HipBracket(PhoneBot 원본)	최대 15.7 MPa(강도의 40~45%)	—	**피로 확인 필요**

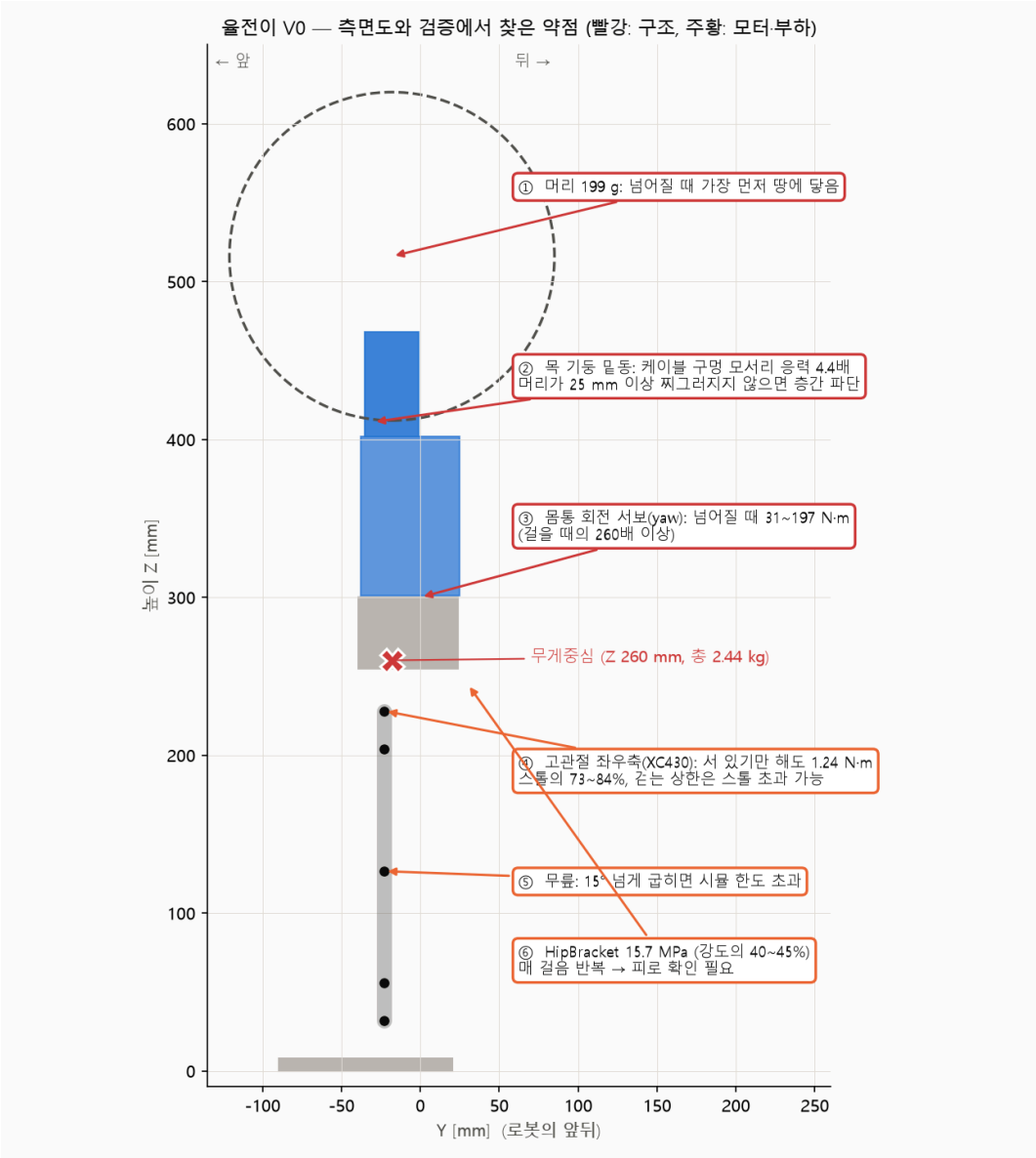
> **요약:** 보행 하중은 무시할 수준이고 문제는 넘어짐이다. 목 기둥과 몸통 회전 서보 접합부가 개선 대상이며, 뚜껑·몸통 통·스탠드오프는 아직 해석하지 않았다.

핵심 발견

1. **넘어질 때 머리가 먼저 땅에 닿는다**(뒤로 82.8°, 앞으로 86.5°). 팀이 열어 둔 질문(뒤판 범퍼가 먼저 닿는가)의 답은 "머리가 1.6° 먼저"다.
2. **목 기둥 케이블 구멍 모서리에 응력이 4.4배 집중된다.** 목 기둥은 플랜지를 아래로 출력해서 굽힘이 **층과 층 사이를 떼어 내는 방향**으로 걸리는 것도 불리하다.

3. **몸통 회전 서보는 넘어질 때 걸을 때의 260배 이상**의 굽힘 모멘트를 받는다. XL430 출력축이 견디는 한계는 **[미확인]**이지만 이 크기면 손상 가능성이 높다.
4. 충돌 하중은 **머리가 찌그러지는 깊이(5~30 mm)**에 크게 달려 있고, 이 값은 측정되지 않았다. 그래서 안전율은 확정하지 않았다.

> **요약:** 최약부는 목 기둥 케이블 구멍 모서리다(응력 집중 4.4배, 층간 방향 하중). 안전율을 정하려면 머리 압축 깊이부터 측정해야 한다.



4. 개선안과 개선 결과

개선한 것: 목 기둥 (부품 하나, 다른 부품은 변경 없음)

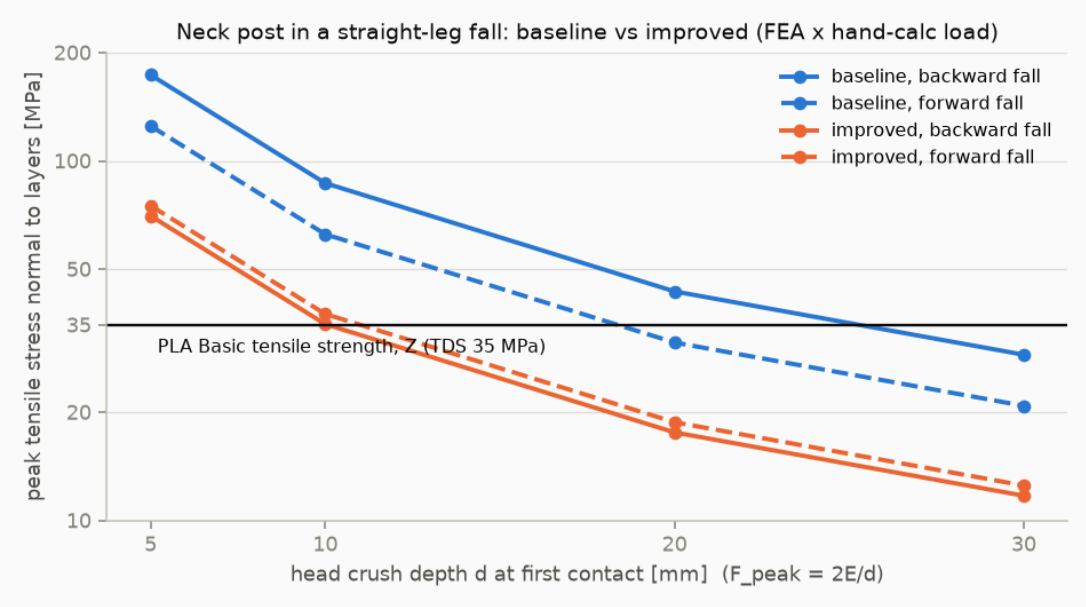
넘어질 때 가장 약한 곳이 목 기둥 밑동의 케이블 구멍 모서리였다. 그래서 인터페이스(바깥·안 지름, 플랜지, 볼트 구멍, 머리 받침 휠 연결)는 그대로 두고 세 가지만 바꿨다.

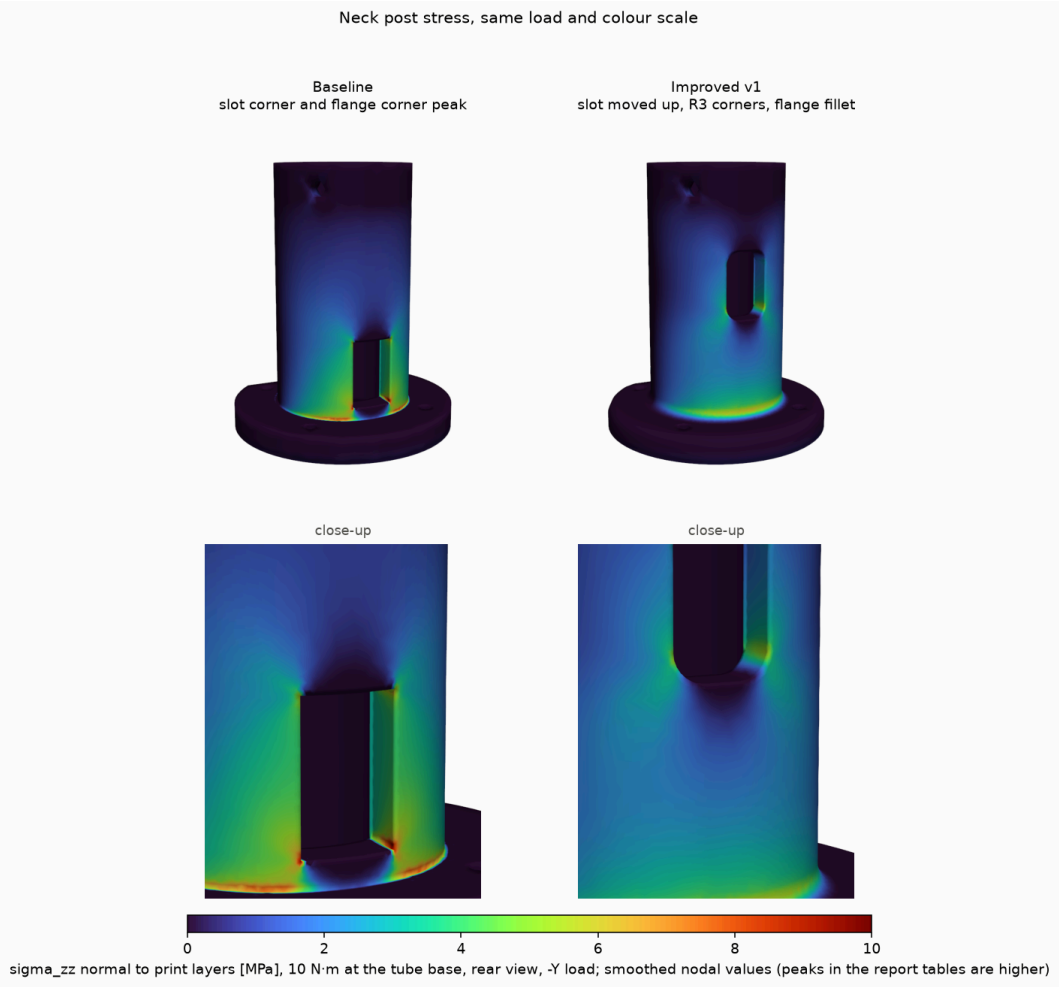
바꾼 것	원래	개선
케이블 구멍 위치	플랜지 바로 위(Z 417)	**위로 이동(Z 440)**: 넘어질 때 모멘트가 작은 곳

바꾼 것	원래	개선
케이블 구멍 모서리	날카로움	**R3 둥글림**
관-플랜지 모서리	날카로움	**필렛 R2.5**

검증 결과

확인	결과
팀 검사(질량, 간섭) 재실행	총질량 2,440.2 g, CoM 동일, **간섭 0건, 검사 실패 0건**, yaw 간격 6.5 mm (원래와 같음)
목 기둥 질량	36.59 g (원래 36.6 g): 거의 변화 없음
최대 응력(층에 수직, 밑동 모멘트 10 N·m 당)	뒤로 14.65 → **5.94 MPa (−59%)**, 앞으로 9.89 → **5.94 (−40%)**, 옆으로 11.88 → **6.16 (−48%)**
응력 집중 계수	약 4.2 → **약 1.7**
필요한 머리 찌그러짐 깊이(PLA 층간 강도 35 MPa 이하로 버티려면)	뒤 **약 25 mm → 약 10 mm**, 앞 약 18 mm → 약 11 mm





위 그림 읽는 법: 같은 하중(뒤로 넘어질 때 밑동 모멘트 10 N·m)을 같은 색 범위(0~10 MPa)로 칠했다. **빨강·주황이 응력이 큰 곳**이다. 왼쪽(기존)은 케이블 구멍 아래 모서리와 플랜지 모서리가 주황~빨강인데, 오른쪽(개선)은 구멍이 위로 올라가 응력이 낮은 파랑 영역에 있고 밑동도 초록 정도다. (그림은 부드럽게 평균낸 절점 값이라 최댓값이 표의 숫자보다 낮게 보인다.)

요약: 같은 충격에서 목 기둥의 최대 응력이 절반 안팎으로 줄었고, 머리가 조금만 찌그러져도(약 10 mm) 부러지지 않는 수준이 됐다. 다만 10 mm 미만의 딱딱한 충돌에서는 여전히 한계를 넘으므로 **머리 충격 흡수 구조는 여전히 필요**하다(필요한 깊이만 25~30 mm에서 약 10~15 mm로 낮아짐).

고려했지만 하지 않은 것

- **목 지름 38 mm**: 단면은 1.56배 튼튼해지지만 +13 g이고 머리 받침 휠 슬리브도 같이 바꿔야 한다. 이번 개선만으로 충분히 줄어서 보류했다(해석은 하지 않음).
- **몸통 회전 서보 보호, 머리 충격 흡수**: 다른 부품과 엮이는 큰 변경이라 팀장님 방향 확인 후에 진행한다.

확인이 필요한 점: 케이블 구멍 위치를 옮겨도 되는지(이 구멍으로 무엇이 지나가는지 팀 문서에 없음 **[미확인]**).

만든 파일

파일	내용
`Analysis/improved/inventor/skku_mascot_v0_pi5_improved.iam`	개선 반영 전체 조립 (Inventor 2026, 부품 69개, 7.2 MB). STEP에서 가져온 형상이라 **치수 이력은 없다** → 보기, 조립 확인, 도면, Nastran 해석용
`Analysis/improved/step/skku_mascot_v0_pi5_improved.step`	같은 조립의 STEP (109 MB)

파일	내용
`Analysis/improved/step/neck_post_improved.step`	개선 목 기둥만 (출력·교체용)
`Analysis/work/skku-mascot-v0/cad/head_v2.py`	개선 목 기둥 CadQuery 코드 (팀 원본 코드 수정 없이 추가)

반영 방법 (팀 코드에): `cad/head.py`의 `neck_post()`를 `cad/head_v2.py`의 `neck_post_v2()`로 바꾸면 된다(인터페이스 동일).

---

5. 팀장님과 정해야 할 것

#	결정 사항	우리가 추천하는 방향	이유
1	목 기둥 개선안(구멍 이동, 필렛) 반영	**반영.** 인터페이스가 같아 바로 교체 가능, 팀 검사 통과	부품 하나로 최대 응력 40~59% 감소
2	목 기둥 지름 확대(34→38 mm)	반영하려면 **머리 받침 휠 슬리브도 같이** 바꿔야 함. 효과와 비용 비교 후 결정	휠 질량·간섭 변경
3	몸통 회전 서보 보호	큰 베어링 링이나 스토퍼로 굽힘 하중 우회	서보 출력축 한계를 모르기 때문에 보수적으로
4	머리 충격 흡수 구조	앞·뒤 폼 두께 20~30 mm 확보, 늑골 결합을 유연하게	머리가 먼저 닿는 것이 근본 원인
5	머리-목 결합을 "의도된 약한 고리"로	큰 충격에서 머리가 빠지도록(나일론 핀 등)	팔을 먼저 부러지게 한 팀 원칙과 동일
6	감량 목표와 방법	전원 부품 142 g, 출력 채움률, 의상·덮개	모든 부하가 질량에 비례
7	시험 일정	계량 → 시편 인장 → 머리 낙하 → 전신 낙하 → 열 시험	안전율을 확정할 유일한 방법
8	제어·시뮬 팀에 전달할 조건	hip roll 한도 별도 설정, 상체 기울임 걸음, 무릎 굽힘 제한, 안전줄	3.3절 발견 1~3

> **요약:** 1번은 즉시 반영 가능하다. 3~5번은 설계 방향 결정이 필요하고, 6~8번은 수치 확정과 다른 팀 조율이다.

---

6. 앞으로 할 일

우리(기구설계팀)가 할 수 있는 일

- 뚜껑·몸통 통·스탠드오프 FEA, Nastran 교차 확인(설정표는 Phase 4 보고서 8절). 목 기둥 개선 CAD는 완료
- 몸통 회전 서보 보호 구조, 머리 충격 흡수 구조 설계(팀장님 방향 확정 뒤)

실물과 장비가 필요한 일 (컴퓨터 계산으로 대신할 수 없음)

1. 부품 계량(출력 부품, 구매 부품, PhoneBot 원본 부품)과 출력 설정(필라멘트, 인필, 벽 수) 기록
2. XC430 토크-속도 곡선 측정(9.6~12.6 V), 서보 열 시험(옷을 입힌 채)
3. 출력 시편 인장 시험(X-Y와 Z 방향)
4. 머리 낙하 시험, 인서트 뽑힘 시험, 전신 낙하 시험(안전줄)
5. 시뮬레이션 학습 결과에서 hip roll 필요 토크, 걸음 중 압력중심 기록

> **요약:** 남은 불확실성은 실물 측정으로만 해소된다. (Nastran: 상용 FEA 프로그램. 이번 계산의 교차 확인용)

---

7. 정확도와 한계

- **측정값이 없다.** 질량, 강도, 서보 곡선, 열, 넘어짐 충격 모두 계산 또는 가정이다.
- **보행 데이터가 없다.** 토크 상한과 스윙 다리는 가정한 보행 조건으로 계산했다.
- **FEA는 선형 탄성**(등방성, 접촉 없음, 파괴 없음)이다. 출력물 이방성은 Z 방향 강도와 비교해 보완했다.
- **넘어짐 하중**은 머리가 선형 스프링처럼 찌그러진다는 단순 모델이고 보수적이다(다리가 접히지 않고 에너지를 머리 한 점에서 흡수한다고 봄).
- **PhoneBot 비교**는 원본 상체 위치를 팀의 추정값에 맞춘 것이라 오차가 있다.
- 팀 테스트 재현은 521개 통과, 1개 보류(Jetson 캐리어 구멍 실측 전)이고, 팀 문서의 543개와 개수가 달라 원인을 확인하지 못했다.

> **요약:** 경향과 상대 비교는 유효하지만, 절대적인 안전 여부는 측정 후에 판단할 수 있다.

---

8. 한 줄 결론

> **율전이 V0는 만들 수 있고, 서서 걷기 시작할 가능성은 남아 있지만, 토크 여유가 거의 없고 넘어짐에 약하다.**
> 먼저 목 기둥 개선을 반영하고, 부품 계량과 시편·낙하 시험으로 숫자를 확정하며, 감량과 머리 충격 흡수·몸통 회전 서보 보호 구조를 팀장님과 정하는 것이 순서다.