율전이 V0 — Phase 4 보고서: 구조 안전성과 개선안

작성일 2026-11-17 · 대상: Pi 5 구성 · 입력: Phase 2 강체 모델, Phase 3 관절 토크, 팀 출력용 STEP 코드: `Analysis/phase4_*.py`, `Analysis/fea_core.py` · 결과: `Analysis/phase4_out/`

출처 표기: **[계산]** 이번 계산 · **[FEA]** 이번 유한요소해석(오픈소스, 아래 1.3절) · **[TDS]** 필라멘트 제조사 자료 · **[CAD]** 팀 CAD · **[가정]** 내가 정한 값 · **[미확인]** 자료 없음

> **안전율은 확정하지 않았다.** 하중의 핵심 입력(넘어질 때 머리가 찌그러지는 깊이)과 출력물 실제 강도가 측정되지 않았기 때문이다. 이 보고서는 "응력 / 재료 강도" 비율과 그 민감도를 보여 준다. 확정은 시편 시험과 낙하 시험 뒤에 한다(7절).

---

0. 결론 요약

1. **걷는 하중은 상체 구조에 문제가 되지 않는다.** 목 기둥 밑동 굽힘 응력은 0.02 MPa, yaw 혼 나사 인장은 약 2 N, XC430 케이스 나사는 나사당 약 10 N이다. 상체 출력 부품의 문제는 **넘어질 때**다.
2. **Phase 1의 의심 S4(XC430 케이스 나사 M2.5×4, 진입 2.45 mm)는 강도 문제가 아니다.** 최대 토크 1.55 N·m에서 나사 8개 중 가장 큰 힘이 약 10 N이고, 나사산이 5.4개 물린다. 남는 위험은 조립 때 과조임으로 나사산을 뭉개는 것이다.
3. **넘어질 때는 머리가 먼저 땅에 닿는다**(뒤로 82.8°, 앞으로 86.5° 기울었을 때). 팀이 열어 둔 질문(13절 7번: 뒤로 넘어질 때 머리가 범퍼 리브보다 먼저 닿는가)의 답은 **"그렇다"**이다. 그래서 머리 → 목 기둥 → 뚜껑 → 몸통 → yaw 서보가 충격 경로가 된다.
4. **목 기둥 밑동이 가장 약한 고리다.** 뒤로 넘어질 때 목 뒤쪽의 케이블 구멍(10×16 mm) 모서리에 응력이 집중된다(공칭의 약 4.4배, FEA). 머리가 **25 mm 이상** 찌그러지며 충격을 흡수하지 못하면 이 모서리의 응력이 PLA의 층간 방향 인장강도(35 MPa, TDS)를 넘는다. 목 기둥은 플랜지를 아래로 출력하므로 굽힘 응력이 **층과 층 사이를 직접 떼어 내는 방향**이다.
5. **yaw 서보는 넘어질 때 걸을 때의 수백 배 모멘트를 받는다.** 머리 충돌 순간 yaw 접합부 굽힘 모멘트는 31~196 N·m(찌그러짐 깊이 30~5 mm)로, 걸을 때 0.12 N·m의 260배 이상이다. XL430 출력축·혼이 견디는 한계는 **[미확인]**이지만, 이 크기면 혼 나사(M2) 인장이 460~2,900 N이 되어 손상 가능성이 높다.
6. **개선 우선순위**: ① 머리를 충격 흡수 구조로(찌그러짐 깊이 ≥ 25~30 mm 목표) ② 목 기둥 재설계(케이블 구멍 위치, 모서리 둥글림, 필렛, 지름, 출력 방향) — **② 중 구멍 이동·둥글림·필렛은 6.3절에서 실제로 만들어 검증했다(응력 40~59% 감소, 필요한 찌그러짐 깊이 25 → 약 10 mm)** ③ yaw 접합부에 굽힘 하중 우회 경로 ④ 낙하 시험으로 실제 하중 확인. 자세한 내용은 6절.
7. **HipBracket(PhoneBot 원본 부품)은 걸을 때 최대 약 15.7 MPa**(PLA 강도의 40~45%)로 정적으로는 버티지만, PhoneBot보다 34% 높은 응력이 매 걸음 반복되므로 **피로 시험이 필요**하다(4.3절).

---

1. 방법

1.1 재료 [TDS]

Bambu Lab PLA Basic 기술 자료(V2.0, 표준 시편, 55 °C 8시간 건조·어닐링 후 시험)를 기준으로 삼는다. 이 PC에 Bambu Studio가 설치되어 있어 같은 계열 필라멘트를 쓸 가능성이 높다고 봤지만, **팀이 실제로 쓰는 필라멘트는 확인하지 않았다.**

항목	X-Y (층 방향)	Z (층에 수직)	시험 규격
인장강도	39 ± 2 MPa	35 ± 3 MPa	ISO 527
굽힘강도	76 ± 3 MPa	68 ± 2 MPa	ISO 178
굽힘탄성률	2,750 MPa	2,370 MPa	ISO 178
영률(제3자 사본)	2,680 MPa	2,160 MPa	—

- PETG HF는 Z 방향 충격강도 10.6 kJ/m²(X-Y 31.5)로 층간 충격에 약하다. Z 인장강도는 신뢰할 출처를 찾지 못했다 **[미확인]**.
- **TDS 값은 상한으로 본다.** 표준 시편은 꽉 찬 출력이고 어닐링했다. 실제 부품(벽 2~3겹, 인필, 노즐 온도, 냉각)의 층간 강도는 이보다 낮을 수 있다. 실제 값은 같은 설정으로 출력한 시편으로 정해야 한다(7절).
- FEA는 등방성 선형 탄성(E = 2,160 MPa, ν = 0.35 **[가정]**)으로 풀고, 결과의 **층에 수직인 응력(σ_zz)**을 Z 강도와 비교한다. 정적으로 결정되는 하중이라 응력은 E에 거의 무관하다.

1.2 하중 케이스

케이스	정의	근거
W 보행	수직 1.3 g, 좌우 2.0 m/s², 앞뒤 1.0 m/s²	Phase 3 LIPM 상한
F 넘어짐	다리를 편 채 뒤(발뒤꿈치 축) 또는 앞(발끝 축)으로 강체 회전, 첫 접촉점에서 충돌	아래 식

넘어짐 하중 **[계산]**:

- 첫 접촉: 머리 타원체(232×206×208 mm, 중심 Y −18, Z 516), 뒤판 범퍼 리브(Y 54), 가슴 카트리지 앞면을 회전시켜 가장 먼저 지면에 닿는 점을 찾는다.
- 충돌 에너지 `E = M g (z_CoM,시작 − z_CoM,접촉)`, 회전 관성 `I_pivot = Σ[m(Δy²+z²) + I_xx]` (Phase 2 강체 15개).
- 머리가 깊이 d만큼 선형 스프링처럼 찌그러지며 에너지를 모두 흡수한다고 보면 최대 접촉력 `F = 2E/d`.
- 단면 모멘트(달랑베르): 각가속도 `α = F R_c / I_pivot`, 단면 위쪽 강체들의 관성력 모멘트를 뺀다. 목 밑동 단면 위에는 머리 묶음(198.7 g, Phase 2)만 있다.
- **d(머리 찌그러짐 깊이)는 측정값이 없어 5~30 mm로 훑었다 [가정].** 머리 덮개의 폼 안감은 3 mm이고, PETG 늑골 등롱이 얼마나 휘며 버티는지는 시험해야 안다.
- 이 모델은 보수적이다: 다리가 접히지 않고, 팔·엉덩이가 먼저 닿지 않고, 에너지가 모두 머리 한 점에서 흡수된다고 본다. 실제 넘어짐은 이보다 부드러울 가능성이 크다.

1.3 FEA 도구와 검증

- gmsh 4.15(메시) + scikit-fem 12.0(2차 사면체, P2) 직접 구성. Inventor Nastran은 GUI 도구라 이번에는 쓰지 않았고, 같은 조건을 팀이 Nastran으로 재현할 수 있게 8절에 설정표를 남겼다.
- **벤치마크**(`phase4_fea_benchmark.py`): 목과 같은 단면의 관(바깥 34, 안 24, 길이 66 mm) 외팔보. 굽힘 응력이 보 이론과 **0.4~2.2%** 안에서 일치(2 mm 메시), 끝 처짐 0.1067 mm로 티모셴코 보 0.1107 mm와 **4%** 안. → 메시·하중 적용·응력 계산이 맞다.
- 한계: 접촉 없음, 볼트 예압 없음, 소성·파괴 없음, 등방성. 날카로운 모서리(필렛 없는 CAD)의 응력은 메시를 줄일수록 커지는 특이점이라 **메시 두 단계 결과를 함께 적었다.**

---

2. 보행 하중 (W) — 문제 없음

확인	값	비교
목 밑동 굽힘(머리 198.7 g × 2.0 m/s² × 지렛대 124 mm)	0.049 N·m → 공칭 0.017 MPa	PLA 35 MPa의 0.05%

확인	값	비교
yaw 접합부 순 전복 모멘트(좌우 2.0 m/s²)	0.12 N·m → M2 혼 나사 인장 1.8 N	무시 가능
XC430 케이스 나사(토크 1.55 N·m, 나사 8개 볼트 군)	최대 10.1 N/나사(그중 면에 수직 9.0 N), 나사산 5.4개 물림	강도 문제 아님
hip roll 혼 나사(M2 4개, PCD 16)	전단 48 N/나사	강도 문제 아님

XC430 케이스 나사 계산: 나사 위치(측면 ±14.25 mm, 혼 축 아래 4·28 mm, 측면당 4개) **[팀 조사 메모의 XL430 도면 판독값]**, `F_i = τ r_i / Σr_j²`, Σr² = 4,824 mm², r_max = 31.4 mm.

---

3. 넘어짐 하중 (F)

3.1 첫 접촉과 충돌 에너지

방향	첫 접촉	접촉 시 기울기	충돌 에너지 E	회전 관성	접촉 속도
뒤로 (발뒤꿈치 축)	**머리** (Y 84.1, Z 502.4 mm)	82.8°	4.58 J	0.221 kg·m²	3.26 m/s
앞으로 (발끝 축)	**머리** (Y −120.8, Z 509.7 mm)	86.5°	4.34 J	0.230 kg·m²	3.14 m/s

뒤판 범퍼 리브(Y 54 mm)는 약 84.4°에서 닿으므로 **머리가 1.6° 먼저 닿는다.** 범퍼 리브가 뒤판 부품(토글, 잭, 표시등, 스피커)을 지킨다는 전제는 다리를 편 채 넘어지는 경우 성립하지 않는다.

3.2 찌그러짐 깊이별 하중

d	최대 접촉력	목 밑동 모멘트 (뒤 / 앞)	목 밑동 공칭 응력 (뒤 / 앞)	목 플랜지 볼트 인장 (뒤 / 앞)	yaw 접합부 모멘트 (뒤 / 앞)	yaw 혼 M2 나사 인장 (뒤 / 앞)
5 mm	1,834 / 1,737 N	118 / 126 N·m	40.8 / 43.6 MPa	1,639 / 1,749 N	188 / 197 N·m	2,780 / 2,902 N
10 mm	917 / 869 N	59 / 63 N·m	20.4 / 21.8 MPa	819 / 875 N	94 / 98 N·m	1,390 / 1,451 N
20 mm	458 / 434 N	30 / 32 N·m	10.2 / 10.9 MPa	410 / 437 N	47 / 49 N·m	695 / 725 N
30 mm	306 / 290 N	20 / 21 N·m	6.8 / 7.3 MPa	273 / 292 N	31 / 33 N·m	463 / 484 N

- 공칭 응력 = M / S, 관 단면계수 S = π(34⁴ − 24⁴)/(32·34) = 2,901 mm³.
- 플랜지 볼트: D자 플랜지의 평평한 앞 가장자리(축에서 20 mm)를 회전 중심으로 본 볼트 군, `F_max = M d_far / Σd²`.
- yaw 혼 나사: 스러스트 베어링 롤러 가장자리(R 20.1 mm)를 회전 중심, 나사 4개(M2, PCD 16, 45°)를 거리 비례로 분배.
- **비교 기준(참고)**: M3 열압입 인서트 뽑힘은 약 1,180 N(CNC Kitchen 시험의 2차 요약, 재질 미기재), 옆면 포켓은 약 830 N. M2 나사의 강도 등급과 XL430 혼 재질은 **[미확인]**이다.

---

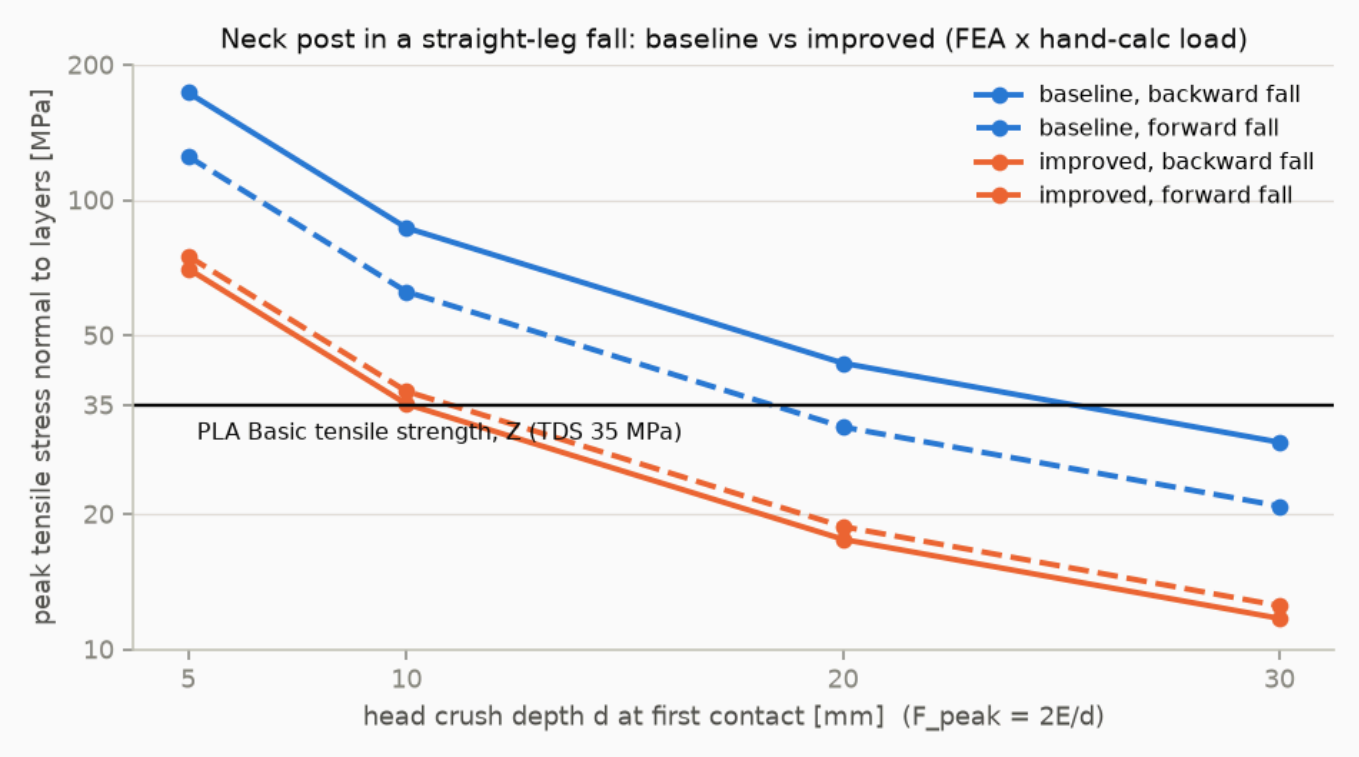
4. FEA 결과

4.1 목 기둥 (PLA, 플랜지를 아래로 출력 = 층이 Z 평면)

조건: 플랜지 밑면 고정(볼트 체결보다 단단한 가정), 위 12 mm 띠(머리 받침 휠 슬리브 자리)에 옆 방향 힘, 밑동(Z 408) 모멘트 10 N·m 기준. 결과는 선형이라 모멘트에 비례한다.

하중 방향 (모멘트 10 N·m 당)	메시 (모서리 크기)	최대 주응력	층에 수직 응력 σ_zz 최대	위치
−Y (뒤로 넘어짐: 머리가 앞으로 밀림)	0.8 mm	14.6 MPa	13.6 MPa	케이블 구멍 아래 모서리 (Z 411)
−Y	0.4 mm	16.5 MPa	15.2 MPa	같음
+Y (앞으로 넘어짐)	0.8 / 0.4 mm	10.8 / 11.6 MPa	9.8 / 10.2 MPa	플랜지-관 모서리 앞쪽 (Z 408). 1 mm 위에서 6.9 / 6.6 MPa
+X (옆으로)	0.8 / 0.4 mm	14.7 / 13.8 MPa	10.8 / 11.0 MPa	케이블 구멍 옆 모서리 / 플랜지 모서리
공칭(구멍·모서리 없는 관)	—	3.45 MPa	3.45 MPa	Z 408

- **케이블 구멍 모서리의 응력 집중 계수는 약 4.4**(15.2 / 3.45), 플랜지-관 날카로운 모서리는 약 2.9(모서리 1 mm 위 약 1.9). 두 곳 모두 메시를 줄일수록 값이 커져(13.6 → 15.2) 날카로운 모서리 특이점의 영향이 있다. 실제로는 출력 해상도(노즐 0.4 mm)가 모서리를 조금 둥글게 만든다.
- 구멍에서 떨어진 단면(Z 432~448)의 σ_zz는 보 이론과 5~8% 안에서 맞는다(4.2절).



넘어짐 하중과 합치면 (σ = M × FE 응력/10 N·m, 고운 메시):

d	뒤로: 케이블 구멍 모서리 σ_zz	앞으로: 플랜지 모서리 1 mm 위 σ_zz	PLA Z 인장강도(TDS) 35 MPa 대비
5 mm	180 MPa	83 MPa	5.1배 / 2.4배
10 mm	90 MPa	42 MPa	2.6배 / 1.2배
20 mm	45 MPa	21 MPa	1.3배 / 0.6배
30 mm	30 MPa	14 MPa	0.86배 / 0.40배

→ 뒤로 넘어질 때 머리가 약 **25 mm** 이상 찌그러지며 충격을 받아 주지 않으면 목 기둥 뒤쪽(케이블 구멍)이 층간 파단될 수 있다. 하중 모델이 보수적이라 "반드시 부러진다"는 뜻은 아니지만, **설계에서 가장 먼저 손볼 곳**이다.

4.2 (보충) 목 기둥 FEA의 보 이론 확인

구멍과 플랜지에서 떨어진 단면(Z 432~448)에서 FE의 σ_zz를 점마다 `M(z)·(굽힘 방향 좌표)/I`와 비교한 중앙값 비율 **[FEA]**:

하중 방향	FE / 보 이론
±Y	1.082
+X	0.951

벤치마크 관(같은 단면)은 1.004였다. 실제 목은 D자 플랜지, 케이블 구멍, 위쪽 반지름 방향 인서트 구멍(Z 462, 하중 띠 안)이 있어 하중 분포가 대칭이 아니라 5~8% 벗어난다. 응력 집중 계수 판단에는 영향이 작다.

4.3 HipBracket (PhoneBot 원본, 걷는 하중)

형상: PhoneBot STEP에서 왼쪽 HipBracket만 뽑아냄(33.7 cm³). 위 허브(hip yaw 혼, Z 약 252)와 두 판(hip roll 축 Y, Z 228; 혼 쪽 +Y 판, 아이들러 쪽 −Y 판)으로 된 U자 브래킷.

조건	값
구속	허브의 M2 구멍 4개 면 고정(혼 면 접촉은 넣지 않음 → 실제보다 유연, 허브 주변 응력은 과대)
수직력	1.3 × 1.951 kg × 9.81 = 24.9 N, 두 판에 반씩 (Phase 3: 지지측 hip roll이 받치는 질량)
옆 방향 힘	수직력의 0.26 = 6.5 N (Phase 3 LIPM 최악 경우)
hip roll 토크	1.55 N·m, +Y 판 M2 구멍 4개에 접선 방향 (Phase 3 걷는 상한)
재료	PLA 등방성 (PhoneBot 출력 재질·방향 **[미확인]**)
메시	10,562 절점, 37,709 사면체, 자유도 201,924

하중	최대 주응력(구멍 주변 포함)	구멍에서 떨어진 곳의 최대 주응력	위치	최대 변위
수직 + 옆	12.6 MPa	2.8 MPa	허브 근처	0.48 mm
수직 + 옆 + 토크 1.55 N·m	49.5 MPa	**15.7 MPa**	+Y 판과 허브 연결부 (X 73.9, Y 25.2, Z 249.6)	1.86 mm

- 구멍 주변 49.5 MPa는 구멍 면만 묶은 경계조건 때문에 생긴 국부 값이다(실제로는 혼 면이 넓게 받친다). 판정에는 **구멍에서 떨어진 15.7 MPa**를 쓴다.
- 15.7 MPa는 PLA 인장강도(X-Y 39 / Z 35 MPa, TDS)의 40~45%다. 정적으로는 버티지만, 걸을 때마다 반복되므로(1.5 Hz면 시간당 약 5,400회) **피로가 문제**가 될 수 있다. FDM PLA의 피로 강도는 자료가 없어 판정하지 못했다 **[미확인]**.
- 응력은 토크가 대부분 만든다(토크 없이 2.8 MPa). PhoneBot 원본의 같은 순간 토크는 약 1.34배 작으므로, 원본은 같은 곳이 약 11.7 MPa였을 것이다(비례 추정). **율전이는 PhoneBot이 이미 검증한 응력 수준보다 34% 높은 곳에서 반복 하중을 받는다.**
- 최대 변위 1.86 mm는 허브 경계조건이 유연해서 과대하게 나온 값이다. 실제 강성은 혼 면 접촉을 넣어 다시 봐야 한다.

---

5. 부위별 판정

부위	걷기	넘어짐	판정	근거
목 기둥 밑동(케이블 구멍)	무시 가능	d < 25 mm면 Z 강도 초과	**개선 필요**	4.1

부위	걸기	넘어짐	판정	근거
목 플랜지 볼트·뚜껑 인서트	무시 가능	d = 10 mm에서 볼트당 820~875 N (인서트 뽑힘 참고값 약 1,180 N, 옆면 830 N)	**확인 필요**	3.2
yaw 접합부(XL430 혼, M2 4개, 베어링)	1.8 N/나사	31~197 N·m, 나사당 460~2,900 N	**개선 필요** (서보 보호)	3.2
XC430 케이스 나사	10 N/나사	(다리 충돌은 미계산)	문제 없음	2
hip roll 혼 나사	48 N/나사(전단)	미계산	문제 없음	2
HipBracket (PhoneBot 원본)	15.7 MPa (강도의 40~45%)	미계산	**피로 확인 필요**	4.3
뚜껑(6 mm PLA 판), 몸통 통 바닥, 스탠드오프	무시 가능	미계산	FEA 후보	8
머리 받침 휠, 머리 폼	무시 가능	충격 흡수 부재로 다시 설계	6절	

---

6. 개선안

6.1 넘어짐 대책 (가장 중요)

1. **머리를 충격 흡수 구조로 만든다.** 목표: 머리 뒤·앞에서 25~30 mm 이상 찌그러짐. 방법 후보: 머리 덮개 폼 안감을 뒤·앞쪽만 20~30 mm로 두껍게(외곽 치수 유지 위해 늑골 등롱을 그만큼 작게), 늑골 등롱을 휘어도 되는 구조로 두고 휠과의 결합을 유연하게. 낙하 시험으로 찌그러짐-힘 곡선을 잰다.
2. **목 기둥 재설계** - 케이블 구멍을 관 벽에서 없앤다: 케이블을 플랜지 아래·뚜껑 구멍으로 빼거나, 구멍을 위쪽(모멘트가 작은 곳)으로 옮긴다. 구멍을 둬야 하면 모서리를 R ≥ 2 mm로 둥글린다. - 플랜지-관 모서리에 필렛 R 3~5 mm. - 지름 키우기: 바깥 40 / 안 30 mm면 단면계수 4,295 mm^3(현재의 1.48배) **[계산]**. 머리 목 구멍(지름 76 mm)과 케이블 공간 안에서 가능한지 확인 필요. - 출력 방향: 관을 눕혀 출력하면 굽힘 응력이 층을 따라 걸린다(층간 박리 방지). 서포트와 원형도 문제를 함께 검토. 또는 PLA 대신 층간 접착이 좋은 재질 시편 시험. - 금속 보강: 관 안에 알루미늄 관(예: 바깥 24 mm에 맞는 관)을 넣는 방법.
3. **yaw 접합부 보호**: 상체(1.1 kg)의 굽힘 모멘트가 XL430 혼과 출력축으로만 가지 않게, TorsoBase와 골반 사이에 모멘트를 받는 링(지름이 큰 베어링 또는 미끄럼 링, 스토퍼)을 둔다. PhoneBot 원본은 상체가 약 0.48 kg(추정)이었다.
4. **의도된 "약한 고리"(퓨즈) 정하기**: 팀은 팔을 "먼저 부러지는 부품"으로 정했다. 머리-목도 같은 원칙으로, 휠-목 결합(반지름 M3 나사 3개)을 나일론 전단 핀 등으로 바꿔 **큰 충격에서 머리가 빠지게** 하면 목·뚜껑·yaw 서보를 지킬 수 있다(머리가 떨어지는 대가).
5. **운용**: 시험 초기에는 안전줄·스탠드를 항상 쓴다(논문에도 명시). E-stop을 누르면 로봇이 주저앉으므로 E-stop 시험 때도 안전줄이 필요하다.

6.2 그 밖의 개선

- 목 플랜지는 뚜껑 아래 인서트 대신 **관통 볼트 + 너트**(뚜껑 아래 너트 홈)로 바꾸면 인서트 뽑힘 문제가 사라진다.
- XC430 케이스 나사는 그대로 두되, 조립 토크를 낮게 정하고(손 조임) 재조립 횟수를 줄인다.
- hip roll 부담(Phase 3)과 넘어짐 에너지($E \propto M$)는 둘 다 질량에 비례하므로 **감량은 구조와 토크 모두에 효과가 있다.**

6.3 개선안 검증 결과 (목 기둥 v1, 실제로 만들고 다시 계산함)

무엇을 바꿨나 (`cad/head_v2.py`, 팀 파일은 수정하지 않고 작업 사본에 새 모듈로 추가)

항목	원래	개선 v1
케이블 구멍(10×16 mm) 위치	플랜지 바로 위(중심 Z 417)	**위로 이동(중심 Z 440)**: 낙하 모멘트가 작은 곳
케이블 구멍 모서리	날카로움(R0)	**R3 둥글림**
관-플랜지 모서리	날카로움(R0)	**필렛 R2.5** (볼트 구멍 가장자리 r 20.3과 간섭하지 않는 한계)
그 밖의 치수		바깥 34 / 안 24 mm, 플랜지 56×6, 볼트 4개, 휠 슬리브 구멍 3개, 높이 **모두 그대로** → 다른 부품 변경 없음

팀 검사 결과 (같은 팀 코드, 목 기둥만 교체한 Pi 5 조립): 총질량 2,440.2 g(목 기둥 36.59 g, 원래 36.6 g), CoM와 hip-roll 지표 같음, 부품 간섭 0건, 검사 실패 0건, yaw 간격 6.5 mm 같음.

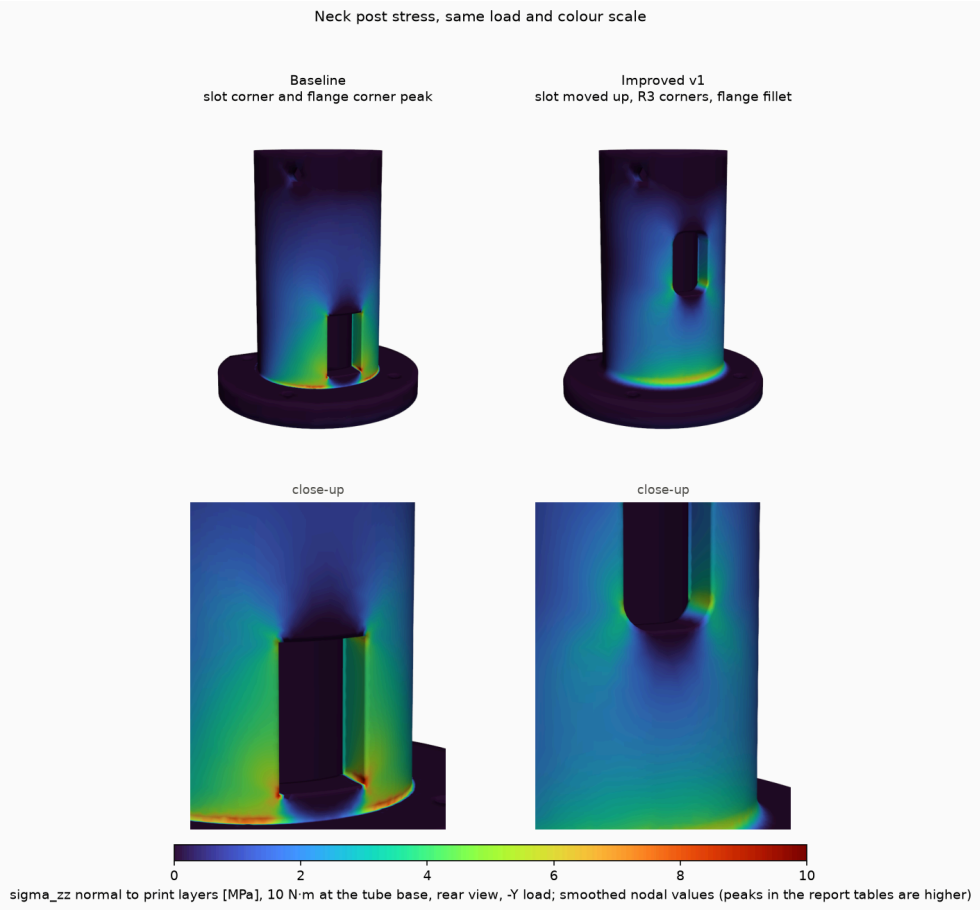
FEA 결과 (같은 하중, 같은 메시 설정, 밑동 모멘트 10 N·m 당, Z 402~454 구간 최대 σ_zz = 층에 수직인 응력)

하중 방향	기존	개선 v1	감소
−Y (뒤로 넘어짐)	14.65 MPa (케이블 구멍 모서리)	**5.94 MPa** (플랜지 필렛 시작점)	−59%
+Y (앞으로 넘어짐)	9.89 MPa (플랜지 모서리)	**5.94 MPa**	−40%
+X (옆으로)	11.88 MPa	**6.16 MPa**	−48%
응력 집중 계수 (최대 σ_zz ÷ 공칭 3.45 MPa)	약 4.2	**약 1.7**	
위 끝 처짐 (−Y)	0.208 mm	0.181 mm	−13%

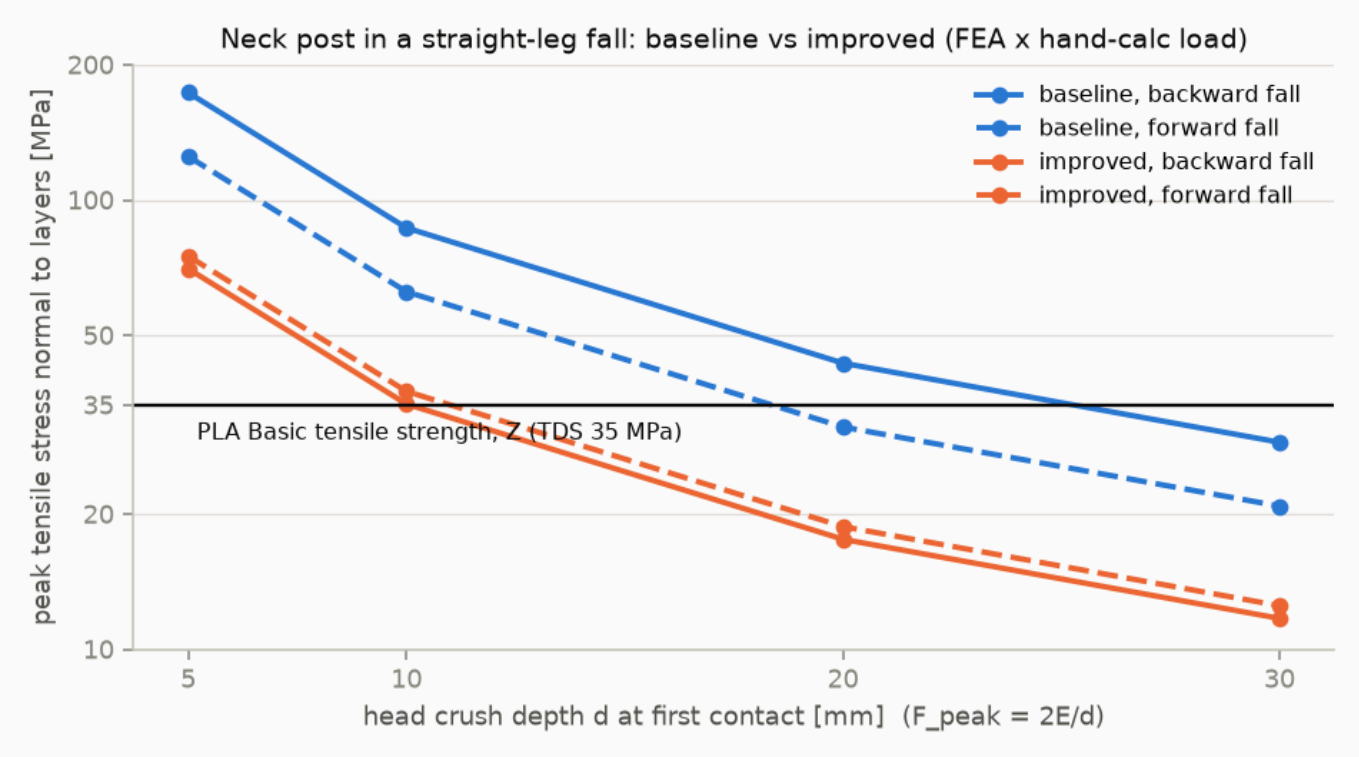
(기존 값은 이전 4.1절 값(15.2 MPa, 모서리 메시 0.4 mm)보다 4% 낮다. 이번 비교는 두 형상 모두 모서리 메시 0.5 mm, 같은 설정이라 같은 조건이다.)

넘어질 때 응력 = 밑동 모멘트 × 위 값/10 N·m (PLA Z 인장강도 35 MPa와 비교):

머리 찌그러짐 d	기존 뒤 / 앞	개선 뒤 / 앞	강도 ÷ 응력, 개선 뒤 / 앞
5 mm	174 / 125 MPa	70 / 75 MPa	0.50 / 0.47
10 mm	87 / 63 MPa	**35 / 38 MPa**	1.0 / 0.93
20 mm	43 / 31 MPa	18 / 19 MPa	**2.0 / 1.9**
30 mm	29 / 21 MPa	12 / 13 MPa	3.0 / 2.8



위 그림: 뒤로 넘어질 때(밑동 모멘트 10 N·m) 층에 수직인 응력 σ_zz를 같은 색 범위(0~10 MPa)로 칠한 것이다. 빨강·주황이 큰 곳이다. 기존은 케이블 구멍 아래 모서리와 플랜지 모서리가 주황~빨강, 개선은 구멍이 응력 낮은 영역으로 올라가고 밑동이 초록 정도다. 그림은 L2 투영으로 평균낸 절점 값이라 최댓값이 표의 값보다 낮다(기존 약 10 vs 14.65 MPa, 개선 약 6.2 vs 5.94 MPa 근처). 생성: `phase4_stress_images.py`.



→ 목 기둥이 층간 강도 이하로 버티기 위해 머리가 찌그러져야 하는 깊이가 **뒤 25 mm → 약 10 mm, 앞 약 18 mm → 약 11 mm**로 줄었다. 10 mm 미만의 딱딱한 충돌에서는 여전히 초과하므로 **머리 충격 흡수 구조(6.1절 1번)는 여전히 필요**하지만 목표가 25~30 mm에서 약 10~15 mm로 낮아져 현실적이 된다. 몸통 회전(yaw) 서보 접합부의 하중은 이 변경과 무관하므로 그대로다.

검토했지만 해석하지 않은 변형: 바깥지름 38 mm — 손계산으로 단면계수가 2,901 → 4,530 mm³(×1.56), 공칭 응력이 3.45 → 2.21 MPa로 줄지만 질량이 약 +13 g(hip roll 토크 +6.7 mN·m)이고 머리 받침 휠 슬리브(바깥지름 44 mm, 벽이 4.9 → 2.9 mm)도 같이 바꿔야 한다. FEA는 시간 때문에 돌리지 않았다(시작했다가 중단). v1만으로 목표 응력에 가까워졌으므로 휠을 바꿀 이득이 크지 않다고 본다.

주의할 점

- 케이블 구멍을 위로 옮기면 케이블이 지나는 위치가 바뀐다. 팀 문서에는 이 구멍으로 무엇이 지나는지 적혀 있지 않다 **[미확인]**. 위치 변경이 가능한지 확인이 필요하다.
- 출력 방향(플랜지 아래)은 그대로이고, 필렛과 둥근 모서리는 서포트가 필요 없다.
- 이 FEA도 선형 탄성이고 모서리 필렛 시작점의 응력은 메시에 약간 의존한다.
- Inventor용 파일: `Analysis/improved/inventor/skku_mascot_v0_pi5_improved.iam`(부품 69개, 7.2 MB). STEP에서 가져온 형상만 들어 있고 스케치·치수 이력은 없다. 다시 열어서 부품 수 69개, 높이 약 622 mm, 부피가 원본 조립과 0.8% 이내임을 확인했다. 개선 STEP: `Analysis/improved/step/skku_mascot_v0_pi5_improved.step`, 목 기둥만: `Analysis/improved/step/neck_post_improved.step`.

---

7. 안전율 확정에 필요한 시험

시험	목적	결과로 바뀌는 것
시편 인장 시험 (실제 프린터·필라멘트·설정, X-Y와 Z)	실제 층간 강도	4.1절의 강도 기준
머리 낙하 시험 (머리 폼 + 덮개를 목 모형에 달고 3 m/s로 충돌)	찌그러짐 깊이 d와 최대 힘	3.2절 표 전체
목 기둥 시편 굽힘 시험 (실제 형상, 케이블 구멍 포함)	파단 모멘트 직접 측정	FEA 대신 실측 한계
인서트 뽑힘 시험 (뚜껑 보스)	M3 인서트 실제 한계	플랜지 볼트 판정
전신 낙하 시험 (안전줄, 다리 편 자세 / 무릎 접힘)	실제 넘어짐 하중과 손상 부위	하중 모델 검증

---

8. Inventor Nastran 교차 확인 설정표 (팀용)

항목	목 기둥	HipBracket
형상	`out/printables/step/neck_post.step`	`Analysis/phase4_out/HipBracket.step`
재료	등방성 E 2,160 MPa, ν 0.35	같음
구속	플랜지 밑면(Z 402) 고정	위 허브의 M2 구멍 4개 면 고정
하중	위 12 mm 바깥면(Z 456~468)에 −Y 방향 185.2 N(밑동 모멘트 10 N·m)	두 판 M2 구멍에 수직 12.45 N + 옆 3.24 N씩, +Y 판 구멍에 토크 1.55 N·m
메시	전역 2.5 mm, 케이블 구멍·플랜지 모서리 0.4~0.8 mm, 2차 사면체	전역 2 mm, 구멍 주변 0.6 mm
비교할 값	케이블 구멍 아래 모서리 σ_zz ≈ 13.6~15.2 MPa, 위 끝 처짐 ≈ 0.21 mm	구멍에서 떨어진 최대 주응력 ≈ 15.7 MPa (+Y 판-허브 연결부). 혼 면 접촉을 넣으면 허브 주변 값이 바뀐다

---

9. 재현

```
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase4_fea_benchmark.py       # FEA 검증 (약 2분)
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase4_loads.py               # 하중과 손계산
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase4_fea_neck.py 0.8        # 목 기둥 FEA (모서리 메시 0.8
/ 0.4)
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase4_extract_parts.py HipBracket
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase4_fea_hipbracket.py
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase4_fea_neck_variants.py v0_baseline
v1_slot_up_round_fillet
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/improved/build_improved.py   # 개선 조립 검사 + STEP (약 15
분)
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/step_to_inventor.py
Analysis/improved/step/skku_mascot_v0_pi5_improved.step Analysis/improved/inventor   # .iam
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase4_plots.py
```

---

10. 종합 판단 — "현재 설계는 제작과 보행에 적합한가?"

질문	답	근거
지금 CAD대로 만들 수 있는가	**예, 조건부.** CAD와 보고서가 맞고(부품 69개 일치, 간섭 0), 팀 코드·테스트가 재현된다. 출력 방향이 정해지지 않은 부품이 남아 있다	Phase 1, 2
질량은 믿을 만한가	**아니오.** 2,440 g 중 실측값이 없고, 범위는 2.15~2.92 kg이다	Phase 2
서 있고 걸을 토크가 있는가	**여유가 거의 없다.** hip roll 정적 1.24 N·m(XC430 스톨의 73~84%, 연속 추정의 3.7배). 골반을 기울이지 않으면 시뮬 한도 0.93을 넘는다. 무릎은 15° 넘게 굽히면 위험	Phase 3
걸을 때 구조는 버티는가	**예.** 상체 부품 응력은 1 MPa 미만. 단 HipBracket은 PhoneBot보다 34% 높은 응력이 반복되어 피로 확인 필요	Phase 4
넘어질 때 구조는 버티는가	**아니오일 가능성이 크다.** 머리가 먼저 닿고, 머리가 25 mm 이상 찌그러지며 받아 주지 않으면 목 기둥 밑동(케이블 구멍)과 yaw 서보 접합부가 손상될 수 있다	Phase 4
걷는지 확정할 수 있는가	**아니오.** 정적·준정적 계산과 경계값뿐이다. 시뮬레이션 학습과 실물 시험이 정한다	Phase 3

해야 할 일 (우선순위)

1. **실측**: 출력 부품·구매 부품 계량, XC430 토크-속도 곡선(9.6~12.6 V), 출력 시편 강도(X-Y, Z).
2. **감량**: 질량은 hip roll 토크, 무릎 토크, 넘어짐 에너지에 모두 비례한다. 전원 부품(142 g), 출력 채움률, 의상·머리 덮개가 후보다.
3. **넘어짐 대책**: 머리를 충격 흡수 구조로, 목 기둥 재설계(케이블 구멍 이동, 필렛, 지름, 출력 방향), yaw 접합부에 굽힘 하중 우회 경로, 머리-목 결합을 의도된 약한 고리로.
4. **제어 팀에 전달**: hip roll 한도를 따로(0.93 N·m로는 한 발 지지 불가), 상체를 지지발 쪽으로 기울이는 걸음, 무릎 굽힘 제한, 넘어짐을 줄이는 정책, 시험 때 안전줄.
5. **시험**: 7절의 다섯 가지 시험, 그리고 옷을 입힌 열 시험(Phase 3 6절).

11. 이전 보고서 정정

보고서	원래 내용	정정
Phase 1, 2.2절	hip-roll 지표의 자세는 "정적 평형이 아니다", 실제 토크는 더 작을 수 있다	다리를 기울여 CoM을 지지발 위에 두어도 골반이 수평이면 hip roll 토크는 1.243 N·m로 지표(1.257)와 같다. 지표는 **골반 수평 한 발 지지의 실제 정적 토크**다. 줄이려면 골반을 기울여야 한다(Phase 3, 3.2절)
Phase 1, 5절 S4	XC430 케이스 나사(진입 2.45 mm) 뽑힘 위험	최대 10 N/나사, 나사산 5.4개 물림. 강도 문제 아님. 과조임만 주의(Phase 4, 2절)
Phase 1, 5절 S6, S7	목 기둥 외팔보 충격, 뒤로 넘어질 때 머리 먼저 닿음	둘 다 사실로 확인. 목 기둥이 넘어짐에서 가장 약한 고리(Phase 4, 3·4절)

참고 자료

- Bambu Lab, *Bambu PLA Basic Technical Data Sheet* — https://cdn.shopify.com/s/files/1/0380/5149/files/Bambu_PLA_Basic_Technical_Data_Sheet.pdf
- Bambu Lab PETG HF 자료(제3자 사본) — https://www.additive-x.com/shop/mpattachments/file/viewonline/id/596/product_id/2346 , 제품 페이지 https://eu.store.bambulab.com/en-ro/products/petg-hf
- CNC Kitchen 인서트 뽑힘 시험의 2차 요약 — https://www.embeddedcomputing.com/home-page/3d-printed-fasteners-part-1-inserts
- DYNAMIXEL 사양: 팀 조사 메모 `docs/research/parts_dynamixel.md`, `finder_r2.md` (ROBOTIS e-Manual 인용)