율전이 V0 — Phase 1 보고서: 파일·설계 구조 파악

작성일 2026-11-17 · 대상: `yuljeon/` 폴더의 zip 4개 + `yuljeon_paper.pdf` 재현: `Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase1_inventory.py` → `Analysis/phase1_out/phase1_result.json`

값의 출처 표기: **[CAD]** 팀 CAD 코드가 계산한 값 · **[모델]** 질량 모델에 맞춘 값(측정 아님) · **[가정]** 팀이 정한 가정값 · **[제조사]** 데이터시트 · **[논문]** 율전이 논문 · **[재계산]** 이번에 다시 계산한 값 · **[미확인]** 아직 근거를 보지 못한 값

---

0. 한 줄 요약

설계는 Inventor 파일이 아니라 **CadQuery(Python) 코드 CAD**이고, 논문의 기준값(2,440.2 g, CoM 260.1 mm, 1.257 N·m)은 모두 **같은 코드의 `cad/checks.py` 가 낸 값**이다. 따라서 "논문값과 CAD값 비교"는 독립 검증이 되지 못한다. 독립 검증은 (1) STEP 형상 재계산, (2) 실물 계량, (3) 팀이 아직 하지 않은 관절별 토크·구조해석에서 나온다.

---

1. 폴더와 파일 구조

1.1 원본 (수정하지 않음)

파일	크기	내용
`yuljeon_paper.pdf`	1.8 MB, 8쪽	**팀 자체 논문 초안** "Yuljeon: Bringing a University Mascot to Life on an Open-Source Bipedal Platform" (SKKAI). RoMeLa의 PhoneBot 논문이 아님
`..._part_1_cad_pi5.zip`	24 MB, 166개	CAD 코드(`cad/`), 테스트, 출력용 STL/STEP 40개, BOM·점검 JSON, Pi 5 전체 조립 STEP(109 MB)
`..._part_2_jetson_phonebot.zip`	26 MB, 14개	Jetson 전체 조립 STEP, **PhoneBot 원본 조립 STEP**(`vendor/phonebot/PhoneBot_Asm.step`), 부품군별 BREP 캐시
`..._part_3_viewer_renders.zip`	25 MB, 34개	렌더 PNG, glTF(.glb), 웹 3D 뷰어 HTML
`..._part_4_docs_electrical.zip`	12 MB, 161개	설계 설명서 `docs/design.md`(+PDF), 전원·배선 설계, 조사 메모 `docs/research/`, 의상 패턴

zip 4개 모두 CRC 정상 **[재계산]**. 풀어 놓은 사본: `yuljeon/_extracted/skku-mascot-v0/` (389 MB).

1.2 CAD 포맷과 참조 관계

```
vendor/phonebot/PhoneBot_Asm.step   (RoMeLa 공개, CC BY-NC 4.0)
        │  cad/base.py 가 읽어 부품군별로 분리
        ▼
cache/base_*.brep  (printed 18, servo 336, fastener 188, bearing 31, torso_base, battery, phb, u2d2,
orig_upper 560, phone 2)
        │
cad/params.py  ← 모든 치수의 단일 원천
        │
cad/frame.py, head.py, head_form.py, hip_guard.py, limbs.py, vitamins.py, actuators.py ...
        │  cad/assembly.py 가 조립
        ├─► cad/checks.py  → out/report/checks_<c>.json  (질량, CoM, 전도각, 간섭, hip-roll 지표,
sim_links)
        ├─► cad/export.py  → out/step/skku_mascot_v0_<c>.step, out/printables/{stl,step}/,
bom_<c>.json, viewer
        └─► cad/views.py, figure/ → out/renders/
docs/design.md ← 위 JSON 수치를 인용      yuljeon_paper.pdf ← design.md / JSON 수치를 인용
```

- 원천(source of truth)은 **`cad/*.py` 코드**다. STEP/STL은 생성물이다.
- Inventor 네이티브 파일(.ipt/.iam), iLogic 규칙은 **없다**. Inventor는 STEP을 불러와 교차 확인하거나 Nastran FEA에 쓰는 보조 도구가 된다.
- 재생성에는 `cadquery>=2.8`, Python ≥ 3.10이 필요하다. 현재 환경에는 cadquery가 **설치되어 있지 않다** (Phase 2에서 설치 예정).
- 좌표계: 원점 = 몸통 회전축 바로 아래 지면, +Z 위, 앞 = −Y, 왼쪽 = +X, mm.

1.3 조립 구성 (문서·코드에서 확인)

구역	내용	출처
하체 (Z 0–301)	PhoneBot 원본 그대로: 발, 다리 링크, 고관절 브래킷, 골반, 몸통 yaw 스러스트 베어링. 관절 높이: 발목 roll 32, 발목 pitch 56, 무릎 126.5, 고관절 pitch 204, 고관절 roll 228 mm. hip-roll 축 X = ±52.5 mm	[CAD] STEP 실측 (`docs/research/step_axes.md`)
액추에이터	XL430-W250-T ×11 (torso yaw, 다리별 hip yaw/pitch, knee, ankle pitch/roll), **XC430-W240-T ×2 (hip roll)**, XC330-T288-T ×2 (어깨) — 총 15 DoF	`cad/actuators.py`
몸통 (Z 301–402)	원본 TorsoBase+배터리 받침 위에 새 PLA ㄷ자 통(벽 4 mm, 폭 114) + 6 mm 뚜껑, PETG 가슴 카트리지(Pi 5 / Jetson)	`cad/frame.py`
목·머리 (Z 402–620)	PLA 목 기둥 + 머리 받침 휠, PETG 늑골 등롱 머리 폼(18조각, 35.1 g), 원단 덮개. 머리 중심은 yaw축보다 18 mm 앞	`cad/head.py`, `head_form.py`
팔	LW-PLA 팔(6.0 g) + 허브, XC330 1축	`cad/limbs.py`
고관절 가리개	골반 고정 링(LW-PLA) + 앞/뒤 받침(PLA)	`cad/hip_guard.py`
체결	XC430 케이스 M2.5×4 (나사 진입 2.45 mm / 한계 3.0 mm), 뚜껑·카트리지 M3 인서트, 목·휠 나사 3개	`docs/design.md` 3, 5.3절

---

2. 논문 기준값 대조

항목	프롬프트 값	실제 확인한 값	성격
전체 높이	620 mm	620 mm (유건 제외)	[CAD]

항목	프롬프트 값	실제 확인한 값	성격
질량	2,440.2 g	2,440.2 g (Jetson 2,524.9, 비관 2,659.0)	[CAD]+[모델]+[가정] 혼합. **측정값 없음**
CoM 높이	260.1 mm	(0.7, −17.7, 260.1) mm	같음
Hip-roll 지표	1.257 N·m	M·g·0.0525 = 2.4402×9.81×0.0525 = **1.2568 N·m**	[재계산] 공식 일치
XL430 시뮬 한계	0.93 N·m	PhoneBot 시뮬 모델의 "최대 가속 토크"(≤ 2.0 rad/s), 제동 1.4 N·m	PhoneBot 논문(팀 요약본으로만 확인)
XC430 스톨	~1.7 N·m	**11.1 V에서 1.7, 12.0 V에서 1.9 N·m**	[제조사] (design.md 인용)
배터리	3S 2200 mAh	Zeee 3S 2200 mAh, 137 g, 사용 9.6–12.6 V	[제조사]/[가정]
전압 충돌	12.6 V vs 12.0 V	XL430·XC330 = 6.5–12.0 V, **XC430은 14.8 V까지 사양 안**. 기본 Max Voltage Limit 14.0 V라 펌웨어는 셧다운하지 않음	[제조사] 조사 메모

[재계산] 일관성 확인: `checks_pi5.json`의 질량 행 82개를 다시 합하면 총질량 2,440.2 g, CoM (0.7, −17.7, 260.1), yaw 위 질량 1,123.7 g, 상체 CoM (1.5, −14.6, 380.2)로 보고값과 정확히 같다. → 문서·논문·JSON 사이 **전사 오류는 없다**. 단, 같은 데이터를 다시 더한 것이므로 독립 검증이 아니다.

2.1 2,440.2 g의 구성 — 무엇이 진짜이고 무엇이 맞춘 값인가

구분 (kind)	질량	성격
base (PhoneBot 원본 하체·몸통 부품)	1,491.8 g	서보 57.2 g×13은 [제조사]. **나머지 출력 부품 412.4 g은 논문 총질량 1.8 kg에서 역산한 [모델]** (유효 밀도 0.991 g/cm³ = PLA의 80%)
printed (새 출력 부품)	340.7 g	형상 부피 × 가정 밀도 [CAD]+[가정]
purchased (구매 부품)	307.8 g	일부 [제조사], 다수 [가정] (Pi 5 70 g, 스피커 35 g 등)
extra (가정 질량)	299.9 g	머리 덮개 85, 한복 91.8, 배선 40, 체결류 25, 유건 35 … **전부 [가정]**

가장 큰 불확실성은 하체 1.49 kg이 **측정이 아니라 맞춘 값**이라는 점이다. 원본 PhoneBot 부품을 실제로 출력해 달면 가장 크게 바뀔 수 있다.

2.2 Hip-roll 지표의 물리적 의미 (Phase 3에서 정밀화)

한 발 지지에서 지지측 hip-roll 축(X = +52.5 mm)에 걸리는 중력 토크는 그 관절 **위**에 있는 질량(상체 + 반대쪽 다리)만으로 정해진다.

τ = g [(M − 2m_leg)·(d/2) + m_leg·d] = g·M·d/2 (d = 105 mm, 전신 CoM이 정중선에 있다고 가정)

- 대수적으로 m_leg가 소거되어 총질량만 남는다(팀 조사 메모에도 명시). 공식 자체는 맞다.
- 그러나 이 자세는 **정적 평형이 아니다**(CoM이 지지발 밖). 실제 보행은 CoM을 지지발 쪽으로 옮겨 토크를 줄이고, 대신 가속도 항이 더해진다. → 이 값은 "옆흔들림 없는 순간"의 지표일 뿐 필요 토크가 아니다.

> **정정 (Phase 3 결과):** 다리를 기울여 CoM을 지지발 위에 두는 정적 한 발 지지에서도 골반이 수평이면 hip roll 토크는 1.243 N·m로 이 지표와 같다. 즉 지표는 "평형이 아닌 순간"의 값이 아니라 **골반 수평 한 발 지지의 실제 정적 토크**다. 토크를 줄이려면 골반(상체)을 지지발 쪽으로 기울여야 한다. 자세한 내용

> 은 Phase 3 보고서 3.2절.

- 비교 대상도 구분해야 한다: 1.257 N·m는 **스톨 토크(순간 최대)** 와 비교되었다. 연속 사용 토크는 별개이고, XL430의 연속 토크 추정은 스톨의 20% ≈ 0.28 N·m [제조사 판매처 추정]이다. XC430의 연속 토크 근거는 **[미확인]**.

---

3. 사용 가능한 해석 도구 (이 PC에서 확인)

도구	상태	쓸 곳
Python 3.12 venv (`Analysis/.venv`)	numpy, trimesh, pypdf 설치함	질량·CoM·토크 계산, STL 검사, 보고서
CadQuery	**미설치** (pip로 설치 가능, ~수백 MB)	팀 코드 재실행, STEP의 부품별 부피·관성 재계산
Autodesk Inventor 2026	설치됨, iLogic DLL 있음	STEP 불러와 iProperties 질량·관성 교차 확인. COM 자동화 가능 (Phase 2 선택)
Inventor Nastran 2026	설치됨	부품 FEA (선형 정적, 좌굴, 모달) — Phase 4 주 도구 후보
ANSYS Student	설치됨	FEA 대안 (Student 판은 노드 수 제한)
Fusion 360	설치됨	STEP 확인, 간단한 FEA(클라우드 크레딧 필요할 수 있음)
Bambu Studio	설치됨	출력 방향, 인필별 질량 추정 → 질량 모델 교차 확인
pdftoppm(poppler)	없음	PDF 그림 렌더링 불가. 텍스트만 추출함

---

4. 확인한 것 / 확인하지 못한 것

4.1 실제 파일에서 확인함

- 설계 구조, 부품 목록 40개(출력), 관절별 서보 배치, 관절축 높이, 좌표계 — 코드·문서·JSON 일치
- 질량·CoM·hip-roll 지표가 JSON 행 합계와 일치 [재계산]
- 출력 부품 STL 40개 중 38개 닫힌 메시. **`arm_left/right.stl` 은 닫혀 있지 않음** → 부피 계산 불가
- STL 부피 ÷ BOM 질량 = 유효 밀도: PLA 0.99 (고체의 80%), PETG 1.25–1.29 (≈100% 인필), TPU 1.21, LW-PLA 가리개 0.59, **LW-PLA 팔 0.15 g/cm³**
- 팀 자체가 열어 둔 과제(design.md 13절): 나머지 11개 관절 토크 미계산, 머리 폼과 외곽 7.68 mm³ 겹침, 서보 버스 W36 3.16 A > 커넥터 3 A, 전도각(몸통 ±90°) 6.6–7.0° < 요구 8°
- 인터넷 3D 뷰어, 렌더 PNG 존재 (내용은 아직 안 봄)

4.2 아직 확인하지 못함

- **CAD 형상 자체에서 독립 계산한 질량·관성**: cadquery 미설치로 아직 못 함 (Phase 2 첫 작업)
- 109 MB 전체 조립 STEP의 내용 (부품 수, 단위, 조립 계층)
- PhoneBot 원본 논문(arXiv:2610.08737) 원문과 phonebot.dev — 팀의 요약 메모 (`docs/research/paper_phonebot_*`)로만 확인
- PhoneBot 시뮬레이션 모델(MJCF) — 폴더에 없음
- 원본 하체 부품의 실제 출력 설정(인필, 벽 수)과 실측 질량
- 렌더/도면 이미지의 시각 확인
- 팀 테스트 543개 재실행 (cadquery 필요)
- 전원 계산 세부 (`electrical_design.md` 1,200줄 중 목차와 요약만 읽음)

5. Phase 1에서 보인 의심 지점 (뒤 단계에서 확인할 것)

#	의심	근거	확인 단계
S1	하체 1.49 kg은 측정이 아님. 역산 밀도 0.991 g/cm³는 일반 인필 출력치고 높다고 팀 메모에도 적혀 있음	`step_mass.md`	Phase 2 + 실물 계량
S2	팔 6.0 g = 39.9 cm³ × 0.15 g/cm³. LW-PLA 발포 최저 밀도(대략 0.4 g/cm³ 안팎, **[미확인]**)보다 낮아 보임. STL도 열린 메시	[재계산]	Phase 2
S3	스톨 토크 대비 비율로만 판정. 연속 토크·발열(의상 속 69–86 W 발열 추정)과 비교한 적 없음	design.md 7.2절	Phase 3
S4	XC430 케이스 나사 M2.5×4, 진입 2.45 mm(자가 탭 플라스틱 추정). 가장 큰 토크가 걸리는 관절의 체결이 가장 짧음 → 뽑힘 위험	design.md 3절	Phase 4
S5	상체 1.12 kg 전체가 yaw 서보 혼 M2 나사 4개 + 롤러 반지름 20.1 mm 스러스트 베어링에 얹힘. 수평 0.67 m/s² 넘으면 합력이 롤러 원 밖	design.md 14절	Phase 3–4
S6	머리(높이의 1/3)가 PLA 목 기둥 하나에 외팔보로 얹힘. 넘어짐 충격 하중 검토 없음	design.md	Phase 4
S7	뒤로 넘어질 때 머리가 범퍼 리브보다 먼저 닿을 수 있음 (팀 미해결)	design.md 13.7	Phase 4
S8	정적 hip-roll 지표는 평형이 아닌 자세. 동적 하중(보행 가속) 미반영	2.2절	Phase 3

> **Phase 3·4 이후 판정:** S4는 강도 문제가 아님(나사당 최대 약 10 N). S6·S7은 사실로 확인됨(넘어질 때 머리가 먼저 닿고 목 기둥 밑동이 가장 약함). S8은 Phase 3에서 정적 토크가 지표와 같음을 확인. 자세한 내용은 Phase 4 보고서 11절.

6. 누락 데이터 — 팀에 요청할 것

우선	자료	왜 필요한가
★★★	PhoneBot 원본 부품 **실측 질량** (이미 출력했거나 출력할 때) 또는 출력 설정(인필%, 벽 수, 재질)	2.44 kg 중 1.49 kg이 역산값
★★★	XC430-W240-T **토크-속도 곡선**과 연속 정격 (ROBOTIS e-Manual, 또는 벤치 측정)	토크 판정 기준
★★	출력 재질·프린터 정보 (PLA/PETG/LW-PLA 브랜드, 노즐, 층 높이, 인필)	질량 모델, FEA 재료 물성, 이방성
★★	PhoneBot 논문 원문 PDF, 시뮬레이션 MJCF	0.93 N·m 한계의 정의, 링크 관성
★★	목표 보행 조건 (속도, 보폭, 보행 주파수 — 논문에서 TBD)	동적 토크 계산 입력
★	의상(조끼·바지) 최신 질량 추정	가정 질량 갱신
★	팀이 Inventor 원본으로 다시 그릴 계획이 있는지	자동화 경로 결정

7. 역할 분담 제안

7.1 Claude(이 세션)가 할 수 있는 것

- 코드 CAD 재실행과 STEP 형상에서 부피·질량·관성 **독립 재계산** (cadquery/OCP)
- 질량 민감도, CoM, 지지 다각형, 전도각 계산
- 관절별 정적·준정적 토크 (대표 자세, 한 발 지지), 단순 동적 추정 (역동역학, 가정 보행 궤적)
- 토크를 스톨 / 연속 / 시뮬 한계 / 전압별로 구분 비교
- FEA 하중·구속·재료 정의서 작성, 간단한 손계산(굽힘, 나사 뽑힘, 베어링 모멘트)
- 오픈소스 FEA(gmsh + 파이썬 솔버) 또는 Inventor COM 자동화 스크립트 시도
- 모든 계산을 재현 가능한 Python + Markdown으로 남김

7.2 Claude가 할 수 없거나 하면 안 되는 것

- 실물 계량, 출력, 조립, 공차 측정
- 서보 전원 인가·구동, 벤치 토크 측정 (작업 원칙상 금지)
- 인화 시험 없이 3D 출력물 강도 확정 (이방성·층간 강도는 실측이 필요)
- GUI FEA 결과의 육안 검토 (Inventor Nastran은 사람이 결과 화면을 봐야 신뢰도 확보)

7.3 기구설계팀(사용자)이 맡을 것

- 부품 계량표 작성 → `Analysis/`의 질량 모델에 입력
- 시편 출력 (인장·굽힘 쿠폰, 출력 방향별) — FEA 물성 근거
- Inventor Nastran / ANSYS로 Phase 4 선정 부품 해석 실행 (Claude가 준 정의서 사용)
- 설계 변경 결정과 `cad/params.py` 수정 (원본 저장소 소유자와 협의)

7.4 다른 팀과 맞물리는 것

- 제어/RL 팀: 동적 토크와 안정성은 결국 시뮬레이션이 판정. 우리는 `sim_links` 질량·관성 검증값과 관절별 토크 여유를 넘겨줌
- 전장 팀: 12.6 V 문제, 커넥터 3 A 초과, 퓨즈 — 우리는 전류 추정의 기계 측 입력(관절 토크)만 제공

---

8. GPT 설계 프롬프트에 대한 조정 제안

프롬프트 내용	실제 상황	조정
"Inventor COM API, iLogic 자동화 검토"	Inventor 파일 없음. 원천은 CadQuery 코드	우선순위 낮춤. Inventor는 STEP 교차 확인 + Nastran FEA 용도
"논문 기준값으로 검증"	논문값 = 같은 코드의 출력	기준값은 "팀 계산값"으로 다루고, 독립 경로(STEP 재계산·실측)를 따로 둠
"XC430 스톨 약 1.7 N·m"	11.1 V 값. 12.0 V는 1.9 N·m, 배터리 9.6–12.6 V	전압별로 표기
구조 검증 항목	낙하·넘어짐 충격, 나사 뽑힘(S4), yaw 베어링(S5)이 빠짐	Phase 4 항목에 추가
전원 검증	전장 문서에 이미 상세 분석 있음	기구팀은 토크→전류 입력만 담당하고 중복 분석은 줄임
CAD "누락 부품·간섭"	팀 간섭 검사는 원본 부품끼리, 머리 폼–외곽을 제외함	제외 범위를 명시하고 필요한 쌍만 추가 확인

---

9. 우선순위 계획

Phase 2 — 질량·CoM (독립 경로 확보)

1. cadquery 설치, 팀 코드 `cad.checks pi5` 재실행 → 543개 테스트 재현
2. STEP/BREP에서 부품별 부피·관성 직접 계산 (팀 질량 모델과 분리)
3. 질량 민감도: 하체 밀도(60–100%), 머리 덮개, 의상, 배선 → CoM·지표 범위
4. 링크별 질량·관성 (다리 링크 포함) — 시뮬 팀에 넘길 표
5. 의심 S1, S2 정리

Phase 3 — 관절 하중·토크

1. 관절별 정적 토크: 양발 서기, 한 발 지지(CoM 정중선 / 지지발 위), 무릎 굽힘 자세 범위
2. 준정적 보행: 가정 궤적(PhoneBot f = 1.5 Hz 등)으로 역동역학
3. 스톨 / 연속(추정) / 시뮬 한계 / 전압별 비교, 발열 관점 RMS 토크
4. yaw 베어링 모멘트, 전도각 재확인

Phase 4 — 구조

1. FEA 대상 선정: XC430 케이스 체결부, hip-roll 브래킷, 목 기둥, 머리 휠, 몸통 바닥판·스탠드오프, 뚜껑, PelvisTop
2. 재료 물성(출력 방향별)·하중(정적 ×동적 계수, 넘어짐 충격)·구속 정의서
3. 손계산 → FEA (Inventor Nastran) → 안전율 (FEA 결과 나온 뒤에만 확정)
4. 개선안 (형상, 재질, 체결, 감량)

---

10. 작업 환경 메모

- 원본 zip·PDF는 건드리지 않음. 풀린 사본은 `_extracted/`, 분석 산출물은 `Analysis/`.
- 현재 git 저장소 최상위가 **작업자 PC의 사용자 홈 폴더**로 잡혀 있다. 이 폴더에서 커밋하면 홈 전체가 대상이 된다. 버전 관리가 필요하면 `yuljeon/`에서 별도 `git init` + `.gitignore`(`_extracted/`, `Analysis/.venv/`)를 권장.
- PhoneBot 원본 형상은 CC BY-NC 4.0 — 학교 마스코트(비상업)는 대체로 해당되지만, 후원·협찬 시 저작권자 확인이 필요하다고 팀 문서에 적혀 있음.