율전이 V0 — Phase 2 보고서: 질량과 무게중심

작성일 2026-11-17 · 대상: Raspberry Pi 5 구성(V0 보행 기준 구성) · 좌표: 원점 = 몸통 yaw축 아래 지면, +Z 위, 앞 = −Y, 왼쪽 = +X, mm

값의 출처 표기: **[형상]** STEP 형상에서 이번에 직접 계산 · **[모델]** 질량 모델에 맞춘 값 · **[가정]** 재지 않은 값 · **[제조사]** 데이터시트 · **[팀]** 팀 보고서 값 · **[재계산]** 팀 데이터로 다시 계산

---

0. 결론 요약

1. **CAD 형상과 팀 보고서는 서로 맞다.** 조립 STEP의 부품 69개를 따로 읽었더니 부피는 반올림 범위 안, 위치는 0.07 mm 안에서 팀 보고서와 같았다. 상체 링크의 질량·CoM·관성도 형상에서 다시 계산한 값이 팀 값과 0.1% 안에서 같다. → **계산 오류는 찾지 못했다.**
2. **불확실성은 계산이 아니라 입력 질량에 있다.** 2,440.2 g 가운데 제조사 값으로 정해지는 것은 약 950 g(하체 서보 13개 759.2 g, 어깨 서보 46 g, 배터리 137 g, U2D2 9 g)뿐이고, 실측값은 없다. 나머지는 질량 모델([모델]) 또는 가정([가정])이다.
3. **가정 범위를 모두 반영한 총질량은 2.15~2.92 kg, hip-roll 지표는 1.11~1.50 N·m(PhoneBot 시뮬 한도 0.93 N·m의 1.19~1.62배)다.** 가장 가볍게 잡아도 팀 목표 1.15배를 넘는다. 질량 측면에서 "현재 설계로 목표 안에 들어간다"는 경우는 없다.
4. **CoM 높이는 질량 가정에 둔감하다**: 256~272 mm. 무거운 부품(배터리, 전장)이 몸통 통 안 Z 310~370에 몰려 있고 머리 전체(덮개·유건 포함)가 199 g뿐이기 때문이다.
5. **팀 값과 1.0 mm 차이**: 전신 CoM 높이가 팀 260.1 mm, 이번 계산 259.1 mm. 원인은 서보 질량을 놓는 위치(팀은 서보 부속 전체의 부피 중심, 이번 계산은 서보 몸체 13개의 중심)다. 팀 값이 1 mm 높아 보수적인 쪽이므로 결론에 영향은 없다.
6. **감량 여지**: 상체 1,124 g 가운데 전원 부품(퓨즈 홀더 3개 58 g, 릴레이 33 g 등)이 142 g으로 머리 폼 전체보다 무겁다. hip-roll 지표는 총질량에만 비례하므로 어디서 덜어도 효과는 같다.

---

1. 무엇을 어떻게 검증했나

단계	방법	독립성	스크립트
A. PhoneBot 원본 STEP 판독	OCP XCAF로 직접 읽음. 잎 부품 1,151개마다 부피·중심·관성(BRepGProp)	팀 코드 미사용. 지면 높이 295.254 mm를 따로 다시 잼(팀 295.25)	`phase2_step_tree.py`
B. 하체 13개 링크 분해	부품 이름과 관절 높이로 링크 배정, 질량 = 부피 × 밀도, 관성 = 부품 자체 관성 + 평행축	형상은 독립. 밀도는 팀과 같은 가정(0.991 g/cm³)	`phase2_links.py`
B2. 전체 조립 STEP 대조	109 MB STEP의 부품 69개 부피·중심을 팀 BOM·질량표와 비교	형상은 독립. 질량은 팀 값	`phase2_assembly_step.py`
C. 질량 민감도	팀 질량표의 질량 행 82개를 하나씩, 또 모두 함께 바꿔 봄	위치는 팀 값 그대로	`phase2_sensitivity.py`
D. 강체 15개 모델	B + 상체(B2 형상으로 관성 재계산) + 팔	상체 관성은 독립 계산	`phase2_bodymodel.py`
E. 팀 코드 재실행	`cad.checks pi5` + pytest 543개	재현성 확인	7절

모든 스크립트는 `Analysis/`에 있고 결과는 `Analysis/phase2_out/`에 남는다. 실행 순서는 8절에 있다.

---

2. 질량 출처 분해 — 2,440.2 g은 무엇으로 이루어졌나

묶음	질량	근거 등급	비고
서보 13개 + 케이블	791.7 g	[제조사] 57.2 g×11, 65.0 g×2 + [가정] 케이블 2.5 g×13	가장 확실한 덩어리
PhoneBot 출력 부품 18개	412.4 g	**[모델]** 416.2 cm³ × 0.991 g/cm³	논문 총질량 1.8 kg에 맞춘 역산 밀도
PhoneBot 나사·베어링	82.8 g	[형상] 부피 × 강철 7.85 g/cm³	재질 가정
배터리, TorsoBase, U2D2, 허브	220.5 g	배터리 137 [제조사], U2D2 9 [제조사], TorsoBase 57.5·허브 17 [모델]	
새 출력 부품	340.7 g	[형상] × [가정] 밀도·채움률	PLA는 고체 밀도의 80%
구매 부품	307.8 g	일부 [제조사], 다수 [가정]	Pi 5 70, 스피커 35, 마이크 12 등
가정 질량	299.9 g	**[가정]**	덮개 85, 의상 91.8, 배선 40, 체결류 25, 유건 35, 기타

2.1 상체(yaw축 위) 1,123.7 g 분해 [재계산]

묶음	질량	질량 중심 Z
머리(폼 18조각, 덮개, 유건, 받침 휠)	198.7 g	531.6 mm
목 기둥	36.6 g	428.9 mm
새 몸통 구조(통, 뚜껑, 카트리지, 클립, 스톱, 트레이)	184.7 g	369.3 mm
전원 부품(퓨즈 홀더, 릴레이, 스위치, 강압, 단자, 표시등, 스탠드오프, PPTC, 소켓)	142.3 g	361.6 mm
배터리	137.0 g	317.3 mm
컴퓨터·오디오(Pi 5, 마이크, 스피커)	117.0 g	361.9 mm
의상(조끼·치마 가정)	91.8 g	267.8 mm
PhoneBot 몸통 부품(TorsoBase, U2D2, 허브)	83.5 g	327.0 mm
배선·체결류(가정)	65.0 g	357.7 mm
팔·어깨 서보·허브·스냅	63.4 g	378.0 mm
IMU	3.7 g	359.0 mm

주의: 의상 치마(43.3 g, Z 170.9)는 팀 모델에서 "몸통과 함께 도는" 질량이다. 새 의상 목표(바지를 골반 고리에 거는 방식)에서는 바지가 회전하지 않는 골반에 붙으므로 이 배정을 바꿔야 한다. 총질량과 CoM에는 거의 영향이 없지만 yaw 관성과 전도각 계산에는 영향이 있다.

---

3. 링크별 질량, 중심, 관성 (강체 15개, Pi 5)

자세: STEP에 저장된 다리를 편 자세(영점 자세). 관성은 각 링크 질량중심 기준이고 설계 좌표축 방향이다. 오른쪽 링크는 X 부호만 반대다.

링크	질량 g	CoM x	CoM y	CoM z	Ixx	Iyy	Izz	들어 있는 것
pelvis	266.9	0.0	−6.2	278.5	1.68e−4	3.61e−4	4.40e−4	PelvisTop/Bottom, hip yaw 서보 2, torso yaw 서보, 베어링, 나사, 고관절 가리개 18.1 g

링크	질량 g	CoM x	CoM y	CoM z	Ixx	Iyy	Izz	들어 있는 것
hip_bracket_L	35.7	64.9	−6.1	259.2	3.31e−5	2.31e−5	2.89e−5	HipBracket, 나사
hip_block_L	156.9	52.9	−4.8	215.9	9.68e−5	4.45e−5	8.33e−5	**XC430**(hip roll) + XL430(hip pitch), MotorConnection, IdlerServoBracket
upper_leg_L	32.4	52.5	−31.0	159.1	2.06e−5	2.27e−5	1.64e−5	UpperLegLink
lower_leg_L	86.1	53.3	−29.7	117.8	5.27e−5	4.81e−5	3.39e−5	LowerLegLink + 무릎 서보(케이스가 정강이 쪽 경계 상자 안)
ankle_block_L	148.1	53.0	−39.8	44.2	9.10e−5	4.23e−5	7.85e−5	XL430 2개(ankle pitch, roll), MotorConnection, IdlerServoBracket
foot_L	65.7	53.1	−34.7	7.1	8.43e−5	2.14e−5	9.90e−5	Foot + TPU 신발 조각 5.8 g
torso_above_yaw	1,109.9	1.5	−14.7	380.6	9.33e−3	9.52e−3	1.72e−3	팔을 뺀 yaw축 위 전부 + 가정 질량
arm_L	6.9	85.8	−4.0	350.8	4.8e−6	6.3e−6	2.0e−6	팔 + 허브
전신	**2,440.4**	**0.7**	**−17.8**	**259.1**	**0.0539**	**0.0567**	**0.0063**	관성은 전신 CoM 기준

단위: 질량 g, 위치 mm, 관성 kg·m². 전체 텐서(비대각 항 포함)는 `phase2_out/body_model_pi5.json`에 있다.

- 한쪽 다리(hip roll 아래)는 489 g이고, 그중 발목 블록과 발이 214 g(44%)이다. 다리 질량이 아래쪽에 몰려 있어 스윙 다리의 관성 부담이 생긴다(Phase 3에서 계산).
- 무릎 서보 배정은 경계 상자로 판단했다(정강이 링크 상자 안에 있음). 무릎 서보 중심이 무릎축과 같은 높이라 어느 쪽에 붙여도 무릎·고관절의 중력 토크 차이는 작지만, 실물에서 케이스가 어느 링크에 고정되는지 확인할 것.
- **상체 링크 독립 확인**: 조립 STEP 형상과 팀 질량으로 다시 계산한 값은 1,109.9 g, CoM (1.5, −14.7, 380.6), Ixx/Iyy/Izz = 0.009334 / 0.009517 / 0.001716 kg·m²이다. 팀 값(1,109.8 g, 같은 CoM, 0.009337 / 0.009518 / 0.001715)과 같다. 형상이 없는 점질량 8개(의상, 덮개, 유건, 배선, 체결류, PPTC, 소켓)는 자체 관성 없이 넣었다. 덮개(85 g)는 실제로 머리 둘레의 껍질이므로 상체 Izz를 약간 과소평가할 수 있다.

3.1 지지발 관절이 받치는 질량 (왼발 지지, 다리 편 자세)

관절	받치는 질량	의미
ankle roll	2,374.7 g	발 아래쪽 링크만 빠짐
ankle pitch	2,226.6 g	
knee	2,140.5 g	
hip pitch	2,108.1 g	
hip roll	1,951.2 g	지지 다리(489 g)를 뺀 질량
hip yaw	1,915.5 g	

hip-roll 지표(M·g·52.5 mm)가 총질량 2,440 g을 쓰는 것은 2.2절(Phase 1 보고서)의 식이 대수적으로 그렇게 정리되기 때문이다. 실제로 지지측 hip roll 위에 있는 질량은 1,951 g이고, 반대쪽 다리 489 g이 두 배 지렛대(105 mm)에 있어 결과가 같아진다. 관절별 토크는 Phase 3에서 이 질량 분포로 계산한다.

---

4. 출력 부품 밀도 가정의 영향

PhoneBot 원본 출력 부품의 밀도는 측정값이 아니다. 팀은 논문 총질량 1.8 kg에서 휴대폰 195 g(가정) 등을 빼고 남은 질량을 출력 부품 부피에 나눠 0.991 g/cm³(PLA 고체의 80%)를 얻었다. 일반 FDM 출력(벽 2~3겹, 인필 15~40%)으로 보기에는 높은 값이다.

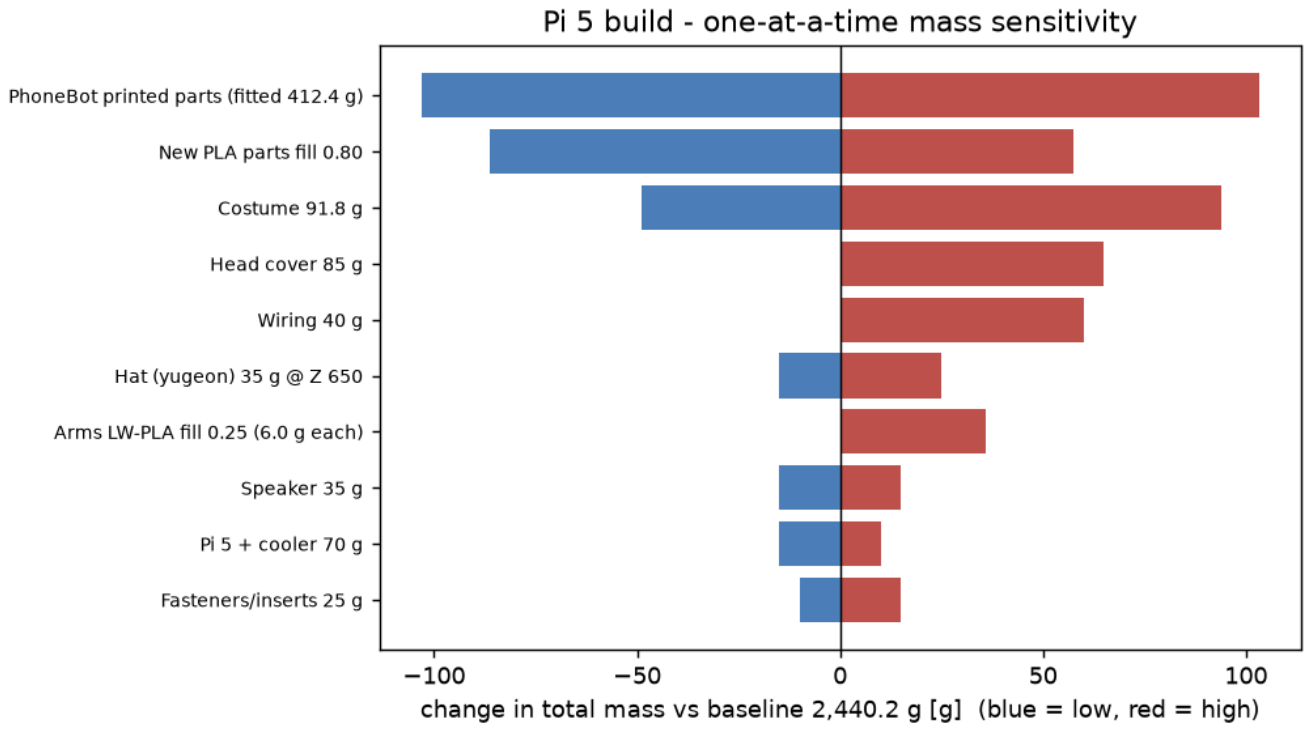
원본 출력 밀도	하체 합계	비고
0.620 g/cm³ (PLA의 50%)	1,132.5 g	얇은 벽, 낮은 인필
0.991 g/cm³ (팀 모델)	1,287.0 g	
1.240 g/cm³ (꽉 찬 PLA)	1,390.5 g	상한

질량이 바뀌는 곳은 주로 발(37.8~74.6 g), 고관절 브래킷, 넓적다리다. 서보가 하체 질량의 61%를 차지하므로 링크 CoM 위치는 밀도에 거의 영향을 받지 않는다(정강이 CoM z 116~121 mm).

밀도가 낮으면 1.8 kg과의 차이는 어디로 가는가? 원본 1.8 kg이 맞다면 낮은 밀도는 곧 "모델에 없는 질량"(케이블, 커넥터, 휴대폰 질량 차이)이 더 있다는 뜻이다. 그래서 하체 질량 범위는 실제 계량으로만 좁힐 수 있다.

---

5. 질량 민감도 (한 번에 하나씩, 그리고 모두 함께)



매개변수 (기준값)	범위	총질량 변화	CoM 높이 변화	hip-roll 지표 N·m	뒤 전도각 °
PhoneBot 출력 부품 (412.4 g)	±25%	−103 / +103 g	+5.8 / −5.3 mm	1.204 / 1.310	8.1 / 8.6
새 PLA 부품 채움률 (0.80)	0.50~1.00	−86 / +58 g	−5.0 / +3.1	1.212 / 1.286	8.6 / 8.2
의상 (91.8 g)	43~185.6 g	−49 / +94 g	−0.2 / +0.3	1.232 / 1.305	8.4 / 8.3
머리 덮개 (85 g)	85~150 g	0 / +65 g	0 / +6.7	1.257 / 1.290	8.3 / 8.1
배선 (40 g)	40~100 g	0 / +60 g	0 / +2.2	1.257 / 1.288	8.3 / 8.2
유건 (35 g, Z 650)	20~60 g	−15 / +25 g	−2.4 / +4.0	1.249 / 1.270	8.4 / 8.2
팔 LW-PLA 채움률 (0.25, 6.0 g씩)	0.25~1.0	0 / +36 g	0 / +1.2	1.257 / 1.275	8.3 / 8.3

매개변수 (기준값)	범위	총질량 변화	CoM 높이 변화	hip-roll 지표 N·m	뒤 전도각 °
스피커 (35 g)	20~50 g	±15 g	∓0.7	1.249 / 1.264	8.4 / 8.2
체결류·인서트 (25 g)	15~40 g	−10 / +15 g		1.252 / 1.264	
Pi 5 + 쿨러 (70 g)	55~80 g	−15 / +10 g		1.249 / 1.262	

경우	총질량	CoM z	hip-roll 지표	0.93 N·m 대비	뒤 전도각(정면 / 몸통 ±90°)	yaw 베어링 전복 가속도
모두 낙관	2,147.1 g	256.1 mm	1.106 N·m	1.19배	8.6° / —	0.49 m/s²
기준(팀)	2,440.2 g	260.1 mm	1.257 N·m	1.35배	8.3° / 6.7, 7.0°	0.67 m/s²
모두 비관	2,920.6 g	271.8 mm	1.504 N·m	1.62배	7.8° / 6.3, 6.5°	0.86 m/s²

공식: $M = \Sigma m_i$, $r_{CoM} = \Sigma m_i r_i / M$, $\tau_{hr} = M \cdot g \cdot 0.0525$, 전도각 $\theta = \text{atan}$(지지 가장자리까지 거리 / z_CoM), yaw 전복 가속도 $a = g(R_{roller} - e) / (z_{upper} - 300.9)$. 발 범위 x 22.5~82.5, y −89.6~20.4 mm(왼발), $g = 9.81$ m/s².

읽는 법

- 범위의 대부분을 PhoneBot 출력 부품, 새 PLA 부품 채움률, 의상 세 가지가 만든다. 앞의 두 가지는 **실물 출력 후 계량**으로, 의상은 새 의상 설계로 정해진다.
- 머리 덮개와 유건은 총질량 영향은 작지만 CoM을 올린다(덮개 +65 g에 CoM +6.7 mm).
- 팀이 정한 "비관" 경우(2,659.0 g)는 덮개·의상·배선만 올린 값이고, 출력 부품 밀도 불확실성은 들어 있지 않다. 이번 비관 값 2,920.6 g은 그것까지 넣은 값이다.
- "모두 낙관"이어도 1.19배로 목표 1.15배를 넘는다. 목표 총질량은 1.15 × 0.93 / (9.81 × 0.0525) = 2,076.6 g이고, 낙관적인 경우에도 약 70 g, 기준 경우에는 363.6 g을 덜어야 한다.
- 이상하게 보일 수 있는 점: yaw 베어링 전복 가속도가 낙관 경우에 더 낮다(0.49 m/s²). 상체가 가벼워지면 상체 CoM이 머리 쪽으로 올라가고 앞으로 치우치는 정도(e)가 커지기 때문이다. 질량을 줄일 때 yaw축 위 질량 배치도 함께 봐야 한다는 뜻이다.

---

6. 의심 지점 정리 (Phase 1의 S1, S2)

#	내용	Phase 2 결과	남은 일
S1	하체 1.49 kg은 측정값이 아님	형상과 분해는 맞음. 질량 범위 1,132~1,390 g(원본 하체만). 하체는 서보 61%로 위치는 확실함	**원본 부품 출력 후 계량**. 출력 설정(인필, 벽 수) 확보
S2	팔 6.0 g은 너무 가벼움	팀 코드의 `ARM_FILL = 0.25` × LW-PLA 0.60 g/cm³ = 0.15 g/cm³로 의도된 값. 형상(39.9 cm³)은 맞음	시험 출력해 계량. 꽉 채우면 24 g씩(+36 g)
새	서보 질량 위치 차이로 CoM 1.0 mm 차이	팀 값이 보수적(높음)	없음
새	의상 치마가 "몸통과 함께 도는" 질량으로 들어 있음	새 의상(골반 고리에 거는 바지)과 맞지 않음	의상 재설계 때 바지는 골반 링크로 옮김
새	덮개 85 g을 점질량으로 둠	상체 yaw 관성을 과소평가	시뮬 모델에서는 타원체 껍질로 넣기 권장

---

7. 팀 코드 재실행

원본 zip을 푼 사본을 `Analysis/work/skku-mascot-v0/`에 따로 복사해 거기서 돌렸다(원본은 손대지 않음). Python 3.12, cadquery 2.8.0, Windows 11.

`python -m cad.checks pi5` (1분 46초, 종료 코드 0)

항목	재실행 결과	원래 보고서 (`checks_pi5.json`)
총질량	2,440.2 g	같음
전신 CoM	(0.7, −17.7, 260.1) mm	같음
yaw 위 질량	1,123.7 g	같음
hip-roll 지표	1.257 N·m (1.35배)	같음
뒤 전도각	8.3° (몸통 +90° 6.7°, −90° 7.0°)	같음
yaw 베어링 전복 가속도	0.67 m/s²	같음
부품 겹침 / 실패한 쌍	0 / 0	같음
질량표 82줄, `sim_links`	전부 일치	—
가리개 회전 간격	고리-팔 9.39 mm, 앞 받침 3.10 mm(예외 기준 3.0), 뒤 받침 5.10 mm(요구 5.0)	같음

→ 팀 코드를 다시 돌려 같은 결과가 재현된다(수치 비교 항목 전부 일치).

`pytest tests --ignore=tests/test_build_pdf.py` (20분 27초, 종료 코드 0): **521개 통과, 1개 xfail, 실패 0개.**

- xfail 1개는 `tests/test_owner_review.py:156`의 `strict` 표시로, 사유가 "Jetson 캐리어 구멍 위치를 키트로 실측한 뒤"다. 의도된 보류이고 Pi 5 구성과 관계없다.
- **팀 문서의 543개와 개수가 다르다.** 내가 센 개수는 522개(진행률 표시와 통과 표시로 역산)다. 차이의 원인은 확인하지 못했다. 추정: 내 작업 사본에서 용량 때문에 `out/step`, `out/viewer`, `out/concept`, `out/costume`을 지웠고, 일부 테스트가 이 폴더의 파일을 기준으로 항목을 만들기 때문일 수 있다(미확인). 통과·실패 판정에는 영향이 없지만 "543개 모두 통과"를 그대로 재현했다고는 말할 수 없다.
- `test_build_pdf.py`(문서 PDF 도구 검사)는 이번 범위에서 뺐다.

---

8. 재현 방법

`yuljeon/` 폴더에서 차례로 실행한다(가상환경 `Analysis/.venv`, Python 3.12, cadquery 2.8.0).

```
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase2_step_tree.py        # PhoneBot STEP 판독 (약 1분)
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase2_links.py            # 하체 링크, 밀도 인수로 바꿈 (예:
0.000620)
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase2_assembly_step.py    # 전체 조립 STEP 대조 (약 2분)
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase2_bodymodel.py        # 강체 15개, 전신 확인
Analysis/.venv/Scripts/python -I Analysis/phase2_sensitivity.py      # 민감도, 그림
```

입력은 `_extracted/`(원본 zip을 푼 사본)와 팀 보고서 사본 `phase2_out/checks_pi5_original.json`이다. 원본 zip, PDF, `_extracted/`는 수정하지 않았다. 팀 코드 재실행은 따로 만든 사본 `Analysis/work/skku-mascot-v0/`에서 했다.

---

9. Phase 3으로 넘기는 것

- 강체 15개의 질량·CoM·관성: `phase2_out/body_model_pi5.json` (기준 경우)
- 질량 범위: 총질량 2.15~2.92 kg, CoM z 256~272 mm → Phase 3 토크는 기준값과 비관값 두 경우로 계산

- 관절축 위치: `docs/research/step_axes.md`(팀이 STEP에서 잼). hip pitch, knee, ankle pitch 축은 y −22.8 mm, hip roll 축 y +14.5 mm 높이 228 mm, ankle roll 축 y −60.1 mm 높이 32 mm
- Phase 3 핵심 질문: 연속 토크(스톨 아님) 대비 관절별 여유, 한 발 지지와 무릎 굽힌 자세, 스윙 다리 가속 토크