윤지인, 정수은, 김주영, 김다린

가천대학교 Energy Functional Materials Lab.

휴머노이드 로봇을 위한
고에너지·고출력 파우치셀 설계 및 제작



Advanced Mobility Global Contest 2026

가천대학교 Gachon University

EFM LAB ENERGY FUNCTIONAL MATERIALS LAB.

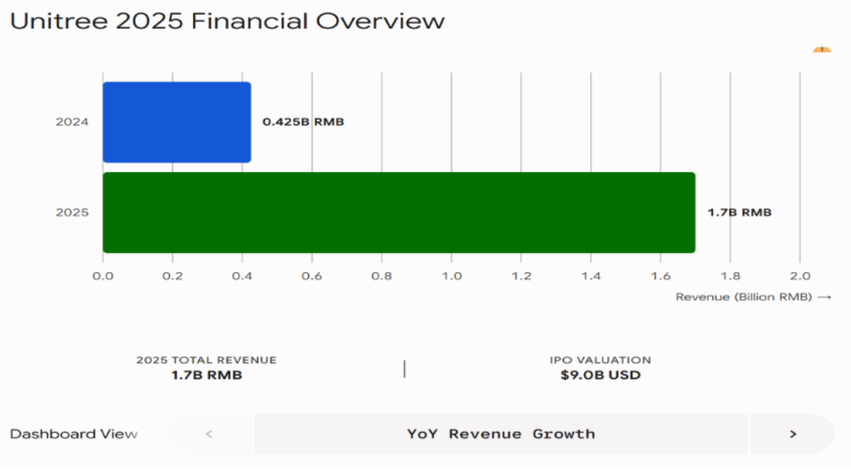
휴머노이드 로봇 시장의 급격한 성장

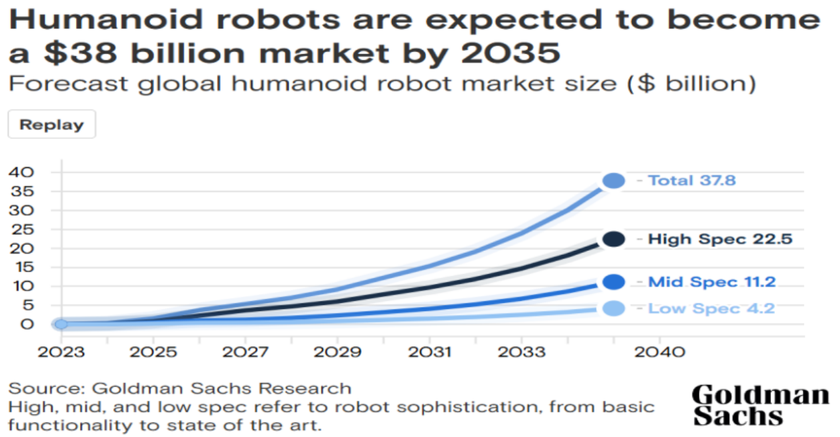
✔ **연구 단계에서 산업 실전 투입 단계로 전환** : AI 기술 발전과 로봇 하드웨어 고도화로 실제 제조, 물류 현장 상용화 본격 진행

✔ **Unitree 시장 성장 실적 사례** :

- 2025년 매출액 17억 위안 (전년 대비 4배 성장)
- 휴머노이드 매출 8.68억 위안 (4족 로봇 매출 초과)
- 2026년 상하이 IPO 추진 (기업가치 약 90억 달러 평가)

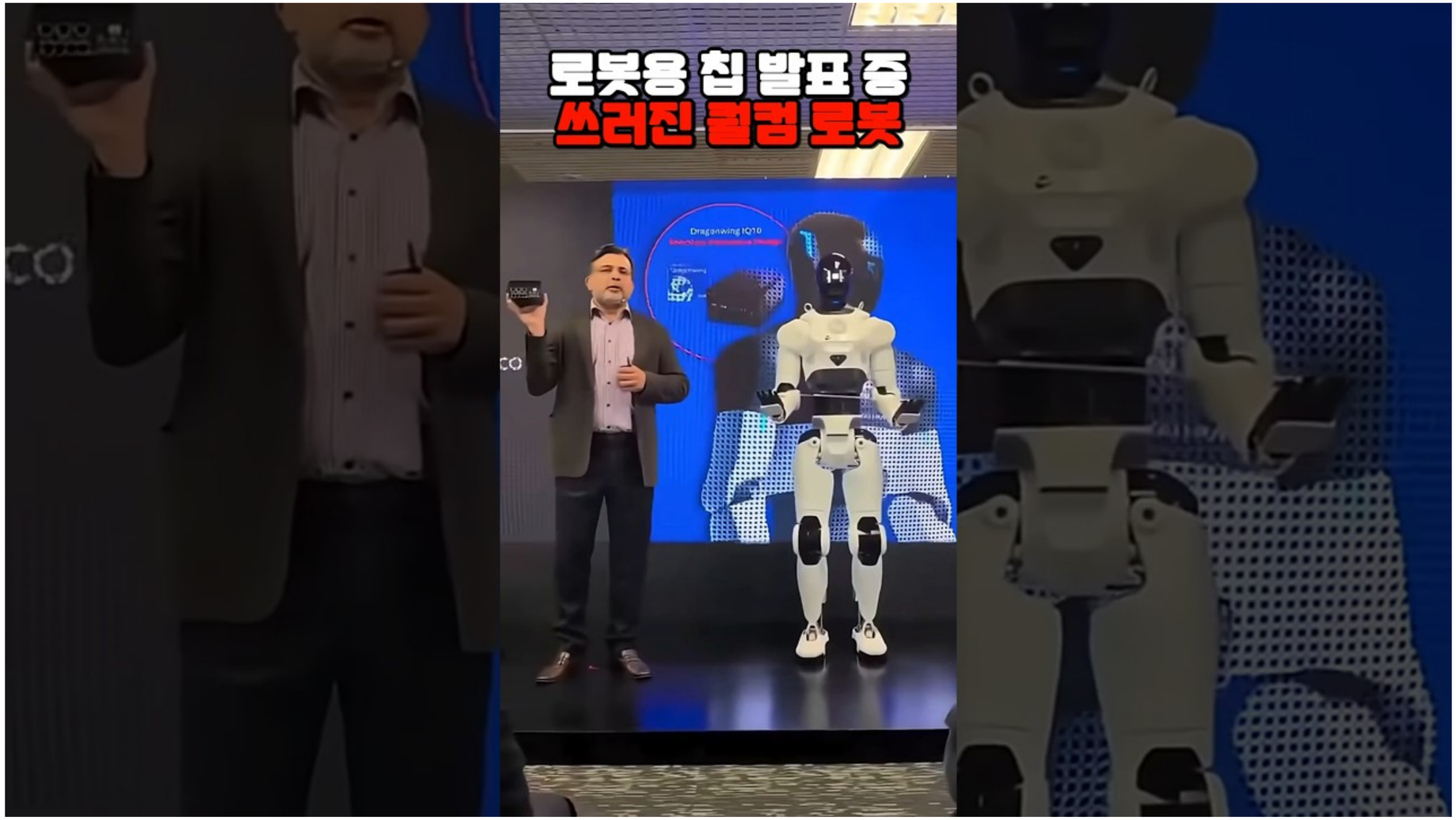
✔ **Goldman Sachs 글로벌 전망** : 2035년 휴머노이드 시장 380억 달러 규모 도달, 2030년 연간 출하량 25만 대 돌파 예상





✔ **핵심 성장 동력 :** ① AI 기술의 발전 ② 산업 현장의 인력 부족 및 고령화 ③ 실전 작업 투입 확대

휴머노이드 로봇의 전력 및 배터리 요구사항



휴머노이드 로봇의 전력 및 배터리 요구사항

요구 성능 (Requirement)	기술적 사유 (Rationale)	파우치셀 적용 이점
High Energy Density	이동, 자세 유지, AI 연산 복합 수행 시 장시간 작동 필요	부피 대 에너지 효율 극대화 (스페이스 최적화)
High Power Density	보행, 점프, 작업 시 순간적인 High-C Rate 출력 요구	넓은 탭(Tab) 면적으로 우수한 방전 출력을 확보
Low Internal Resistance	고출력 연속 구동 시 전압 강하(Voltage Drop) 최소화	Multi-tab 및 적층 구조로 내부 저하 최소화
Long Cycle Life	반복적인 고부하 충·방전 조건하 수명 안정성 확보	면압 유지를 통한 국소적 열화 차단
Lightweight / Compact	로봇 관절 부하 감소 및 유효 페이로드(Payload) 확충	캔(Can) 용기 대비 얇은 파우치 외장재로 경량화

연구 목표

✔ **목표 :** 휴머노이드 응용을 위한 파우치셀 설계, 제작 및 cell-level 성능 검증

✔ **주요 연구 항목 :**

- **Cell Fabrication :** Multi-layer 적층 구조 기반의 실전 파우치셀 제작

- **Design Optimization :** 슬라이드 조성, Loading Level, N/P Ratio, 전극 수 최적화

- **Cell-Level Evaluation :** 용량, C-rate 출력 특성, 사이클 수명 평가



스스로 정의하는 '탐험(Exploration)'

✔ **Why :** 왜 파우치셀인가?

코인셀 (Coin Cell)

Small & Simple

- 소형 구조
- 제작 및 조립 용이
- 단일 셀의 용량이 작음
- 높은 전력 요구를 충족하려면 많은 셀을 연결해야 함
- 셀 개수가 증가하면 연결부·배선·패키징으로 인한 무게와 공간 증가

→ 대규모 전원 공급에는 적합 X

파우치셀 (Pouch Cell)

High Capacity & Flexible Design

- 넓은 전극 면적 확보 가능
- 전극을 여러 층 적층하여 용량 확장
- 높은 에너지 및 출력 요구에 대응 가능
- 얇고 가벼운 외장재 → 중량 효율
- 다양한 크기와 형태로 설계 가능
  → 로봇 내부 공간 활용

→ 휴머노이드 배터리 시스템에 맞게 확장 가능 O

스스로 정의하는 '탐험(Exploration)'

✔ **How :** 무엇을 탐험했는가?



✔ **탐험의 핵심 :** 한번에 정답을 찾는 것이 아니라, 실패 원인을 좁혀가며 설계를 다시 바꾸는 과정을 기록

"성능을 확인하는 데서 끝나지 않고, 셀을 만드는 과정 자체를 탐험했다."

초기 설계 목표

Graphite	94wt%
Super P	3wt%
SBR	2wt%
CMC	1wt%

Casting Gap	200㎛
Cathode L.L	25mg/cm²
Anode L.L	15mg/cm²
Target Capacity	400mAh

Try & Error ① 슬러리가 아예 밀리지 않았다

Graphite	Super P	SBR	CMC
0.94g	0.03g	0.05g	0.01g



✔ 1차 시도 :

완전히 건조한 상태

→ 캐스팅 불가능

✔ 원인 가설 :

① SBR/CMC 제조 문제

② Graphite 자체 문제

③ 수분 부족

+ D.I water 1g

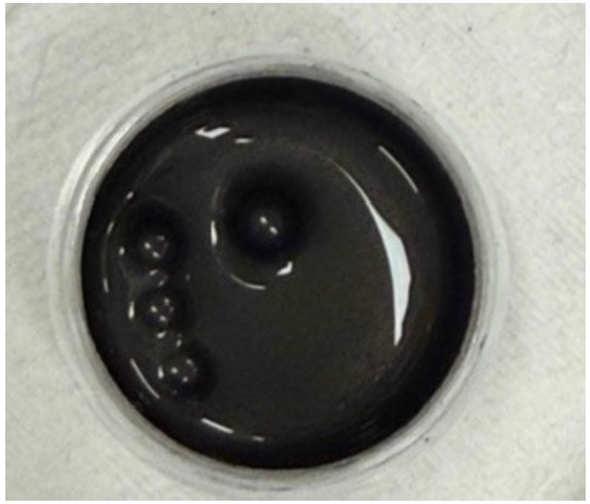
너무 묽어짐

→ 캐스팅 불가

+ D.I water 0.2g

캐스팅 가능한 정도

→ 입자/분산 문제는 남음



✔ 결론 :

용매량 조절만으로는 한계

→ 캐스팅 가능한 수준은 되었지만

입자/분산 문제가 남는다

Try & Error ② 입자 / 분산 문제도 설계 변수였다

SBR / CMC

초기 바인더 시스템
→ 추가 용매량에 따라 점도 변화가 커짐
→ 입자/분산 문제가 남았다

→

PAA 10wt% in EtOH

→ 상온에서 용매가 빠르게 증발
→ 슬러리 제조 중 점도가 계속 변함
→ 재현성 확보가 어려움

→

PAA 10wt% in D.I water

→ 용매 증발이 상대적으로 느림
→ 믹싱 상태도 양호
→ 최종 바인더 시스템으로 정착

→ 용매량 조절만으로는 한계가 있어, 슬러리 제조의 재현성을 높이기 위해 바인더 시스템 자체를 재검토하였다

Try & Error ③ 기존 설계에서 'N/P ratio' 가 너무 높았다

✔ 기존 레시피로 전극 제작 :

	단면 로딩레벨
Graphite 음극	4.0736 mg/cm²
NCM622 양극	2.7094 mg/cm²

✔ N/P ratio : Assume : Graphite 이론 비용량 = 372 mAh/g, NCM622 이론 비용량 = 274 mAh/g

$$N/P = \frac{4.0736 \times 372}{2.7094 \times 274}$$

→ 2.023

✔ 목표 범위 (1.1 ~ 1.25) 보다 높은 N/P ratio :

→ 음극이 양극에 비해 과도하게 많음
→ 불필요한 음극 사용량 증가
→ 셀 설계 및 전극 수 증가

Try & Error ③ 기존 설계에서 'N/P ratio' 가 너무 높았다

✔ 그래서 설계를 '다시' 바꿨다 :

Cathode recipe	N/P ratio 목표	전극 수 감소
80:10:10 → 92:4:4	1.2	양극 15장 → 6장 수준
활물질 비율 대폭 증가	셀 밸런스를 우선	음극 16장 → 7장 수준

✔ '400mAh 를 만드는 것'에서 '실제로 구동 가능한 셀을 만드는 것'으로 전환

Try & Error ④ 사이클 조건도 직접 검증해야 했다

✔ 사이클 방전용량 오류 :

첫 사이클 방전용량 = 669 mAh/g

이론용량 372 mAh/g 의 약 2배 → 결과 자체를 신뢰할 수 없음

Step index	Step name	Step time(hh:mm:ss)	Voltage(V)	Current(mA)	Cut-off voltage (V)	Cut-off curr.(mA)	C-rate (C)	Others
1	Rest	nn:00:00						3600
2	CCCV DChg		0.01V	A		A*0.1		60
3	Rest	0:30:00						60
4	CC Chg			A	1.5V			60
5	Rest	0:30:00						60
6	Cycle	Start step ID:2	Cycle count:2					60
7	CCCV DChg		0.01V	A*20 (↓0.05C)		(A*0.1)*20		60
8	Rest	0:30:00						60
9	CC Chg			A*20 (↓0.05C)	1.5V			60
10	Rest	0:30:00						60
11	Cycle	Start step ID:7	Cycle count:100					60
12	End							
		Active Material	소수점 3번째까지	mg				

1~5	Formation	0.05C (예시)
7~11	Main Cycle	1C (예시)

A	AM*이론용량*C-rate	단위 [=] mA

✔ 원인 분석 :

Graphite에 CCCV 방전을 적용하면서 낮은 전압에서 Li plating 부반응이 발생

✔ 최종 수정 :

CC Dchg → CC Chg

Formation 0.1C / 3 Cycle → Main 1C / 100 Cycle

Cell Design



✔ 음극(Anode) 레시피 :

[음극 레시피]

- 총 재료무게 : 2.85 g

Super P	0.15 g
Graphite	1.2 g
PAA	1.5 g
D.I	0.3 g
2000rpm, 10min	
2000rpm, 10min	
500rpm, 5min	

Cell Design



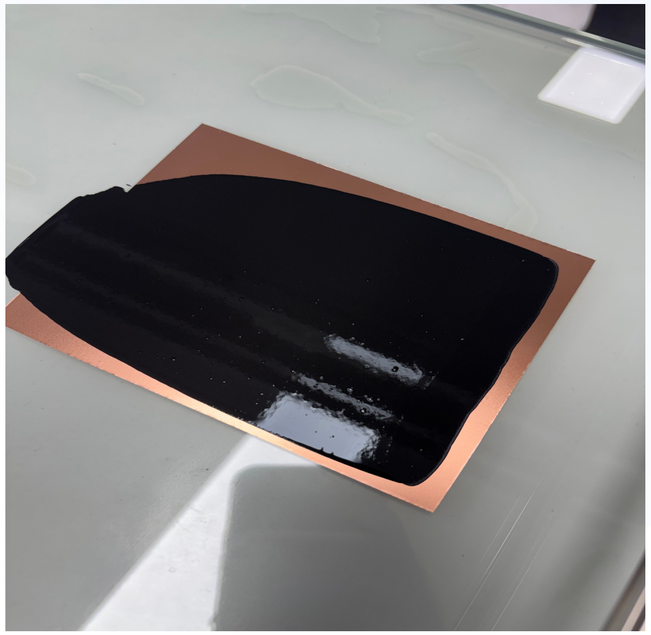
✔양극 (Cathode) 레시피 :

[양극 레시피]

- 총 재료무게 : 1.8 g

PVDF 10wt%	0.72 g
Super P	0.072 g
NMP	0.35 mL
2000rpm, 10min	
NCM622	1.656 g
NMP	0.65 mL
2000rpm, 10min	
600rpm, 5min	

Cell Design



✔캐스팅 Gap :

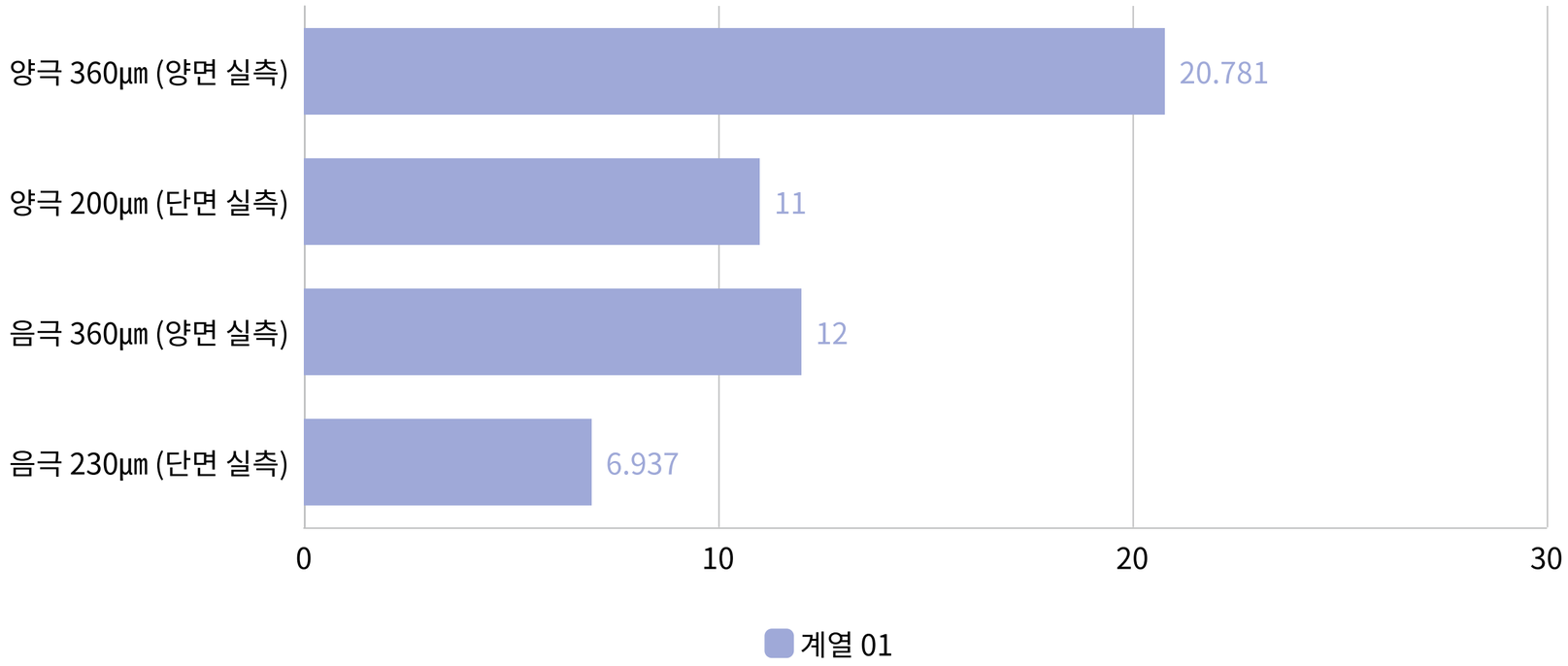
<u>전극 두께 제어 (200 VS 230)</u>

양극은 200㎛ 갭 설정을 통해 고밀도 양면 코팅층을 형성하였으며, 음극은 230㎛ 갭을 적용하여 리튬 삽입 공간을 충분히 확보

슬러리 레오놀로지 최적화를 거쳐 건조 후 균일한 표면 형태와 집전체(Al/Cu Foil)와의 뛰어난 접착력을 확인

Cell Design

✔ Loading Level :



Cell Design

✔N/P Ratio 계산 및 검증 :

1.10~1.22

N/P Ratio 범위

안정 구간 (1.10 ~ 1.25) 완벽 충족

안전성 및 용량 설계 검증

$$\text{N/P Ratio} = \frac{\text{Cap}_{\text{Anode}} \times \text{L.L.}_{\text{Anode}}}{\text{Cap}_{\text{Cathode}} \times \text{L.L.}_{\text{Cathode}}}$$

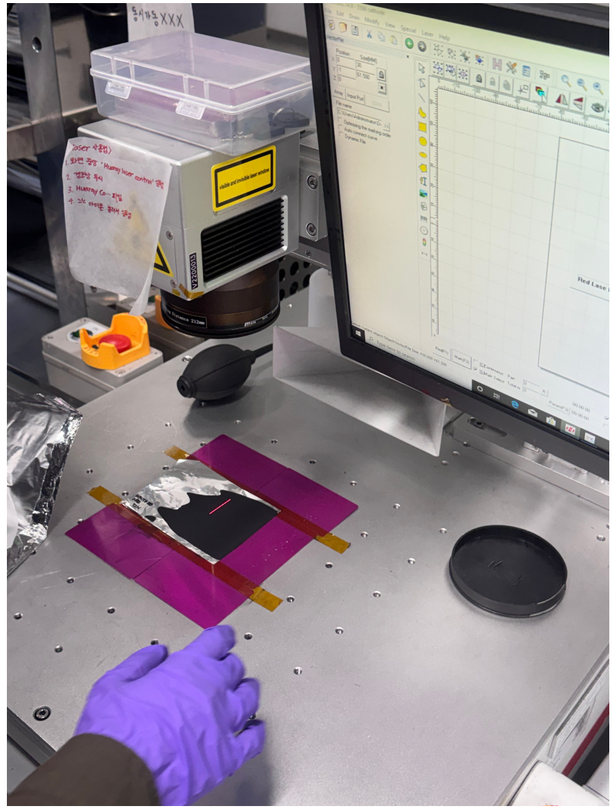
- 양극 용량: 20.781 mg/cm² × 0.92 × 170 mAh/g ≈ 3.25 mAh/cm²

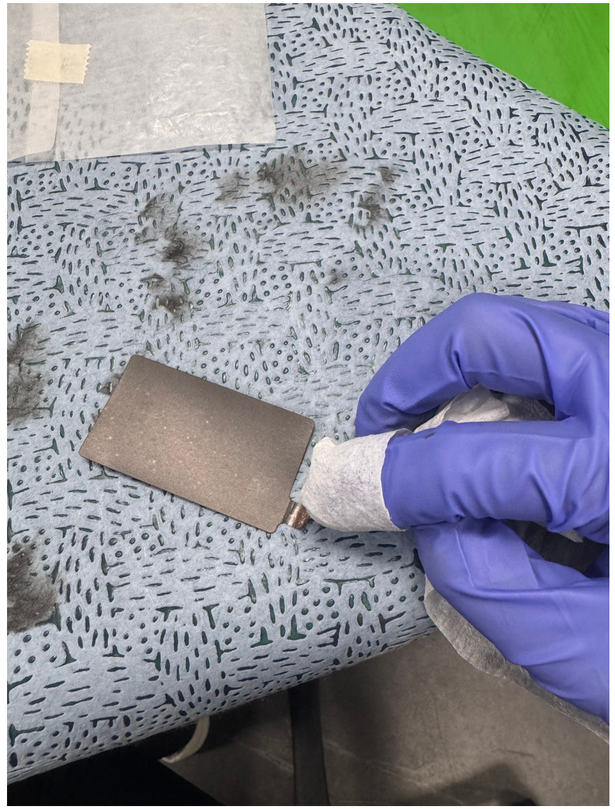
- 음극 용량: 12.0~13.5 mg/cm² × 0.80 × 330 mAh/g ≈ 3.17~3.56 mAh/cm²

레이저 커팅 및 탭 부분 전극 제거

✔ 레이저 커팅 : 파우치셀 규격에 맞게 레이저 커팅을 진행

✔ 탭 전극 제거 : 탭 부분에 용접을 진행해야하므로 에탄올을 활용하여 전극을 제거





Z-스태킹 정밀 적층 구조

✔ 6-stack 전극층 Z-스태킹 정렬

전극 적층 구성:

- 음극 단면 (Single-sided Anode): 2장 (최외곽 상/하단)
- 음극 양면 (Double-sided Anode): 2장 (내부 적층)
- 양극 양면 (Double-sided Cathode): 3장 (내부 적층)



✔ 구조적 이점:

지그재그 분리막 폴딩(Z-Folding)으로 전극 간 정밀 정렬을 유지하며, 와인딩 방식 대비 모서리 응력 집중이 없어 수명 및 고출력 특성이 우수

파우치 외장재 봉합 및 디개싱

✔ 파우치 성형 및 1차 봉합 :

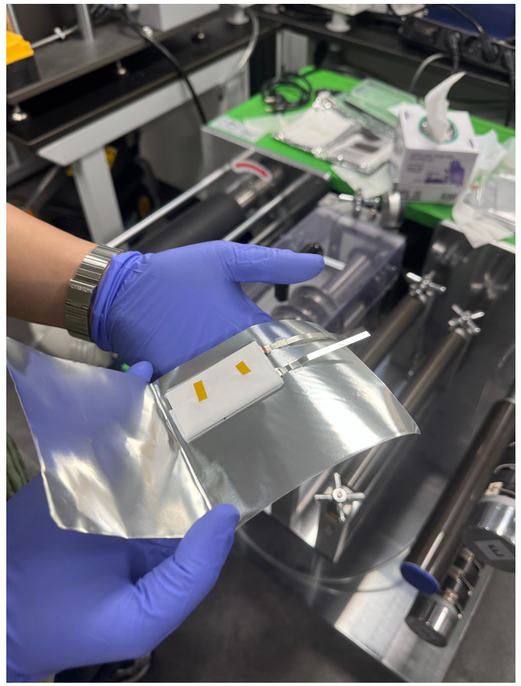
파우치 컵 형성 (Cup Forming): Al 라미네이트 필름에 스태킹 젤리롤 수용 딥드로잉 파우치 포켓 성형

Top & Side 열실링: 탭 리드부에 탭 필름 부착 후 상단 및 측면 170°C 고온 열압착 1차 실링 완료 (가스 포켓부 개방 유지)

✔ 포메이션 후 디개싱 (Degassing) :

가스 포켓 제거: 초기 포메이션 과정에서 발생하는 가스가 가스 포켓으로 모이도록 설계

진공 최종 실링: 가스 포켓부를 진공 분위기에서 컷팅 및 디개싱 수행 후 최종 2차 진공 실링 완결



전해액 3.0mL 정량 주입 및 함침

3.0 mL



✔ 전해액 진공 정량 주입 조건

수분 제어 : 노점(Dew Point) -45°C 이하 드라이룸 환경에서 전해액 주입 수행

전해액 스펙 : 1.0M LiPF6

진공 함침 (Vacuum Wetting) : 정량 3.0 mL 주입 후 진공 감압 및 감압-가압 퍼지 사이클을 거쳐 다층 전극 기공 내부까지 완벽 함침 유도