

막힌 비아에서 기포를 내보내는 PDA 친수성 표면

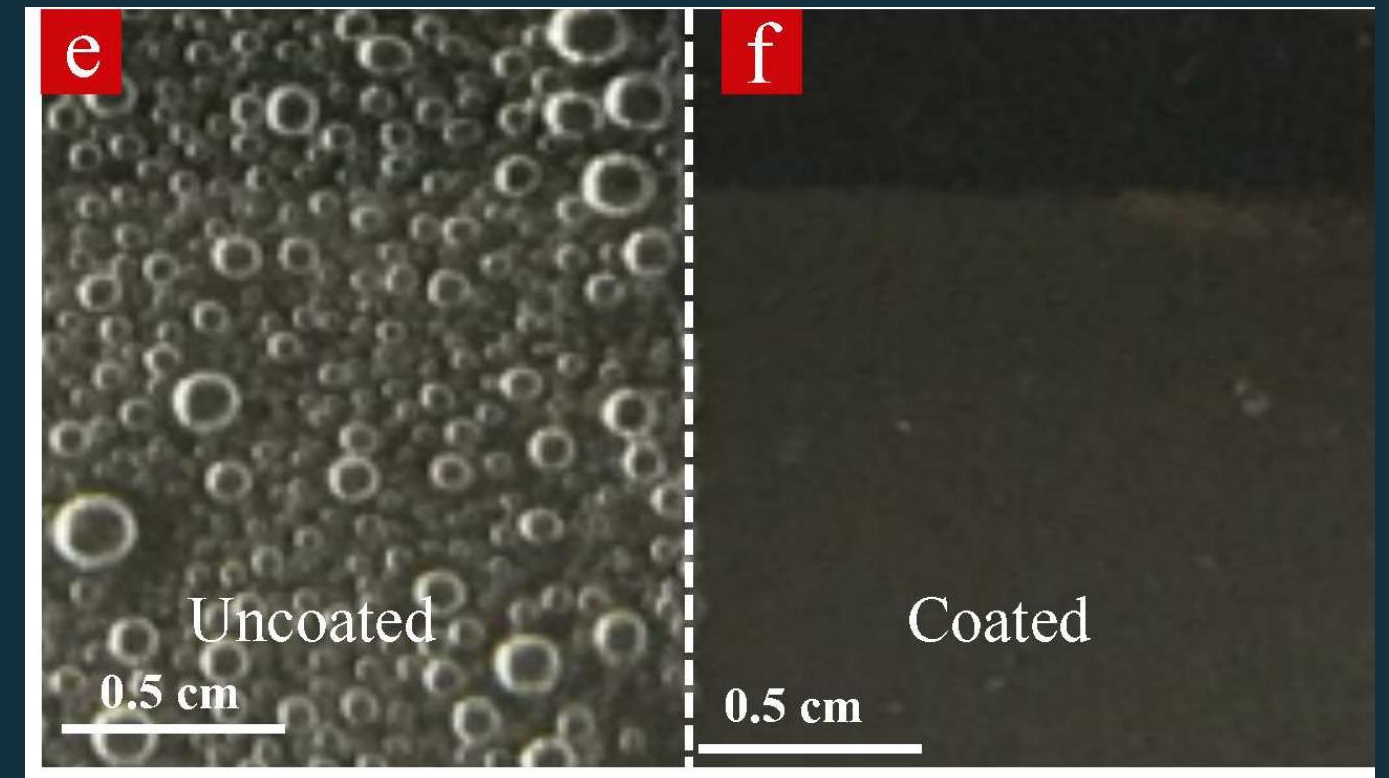
조진현 쿨스 대표 jhcho@cools.co.kr

SUMMARY

문헌은 PDA 코팅으로 물 접촉각이 66°에서 23°로 낮아지고 초음파 교반과 장시간 침지에서 기포 축적이 억제됨을 보고했다. 이를 근거로 연속 액막, 낮은 고정력, 열린 배출 경로를 비아 기포 비부착 조건으로 정리하고 나노플러싱 적용 개념을 제시한다.

PDA 친수성 표면의 기포 이탈 원리

막힌 비아의 침지와
나노플러싱을 위한 이론적 근거



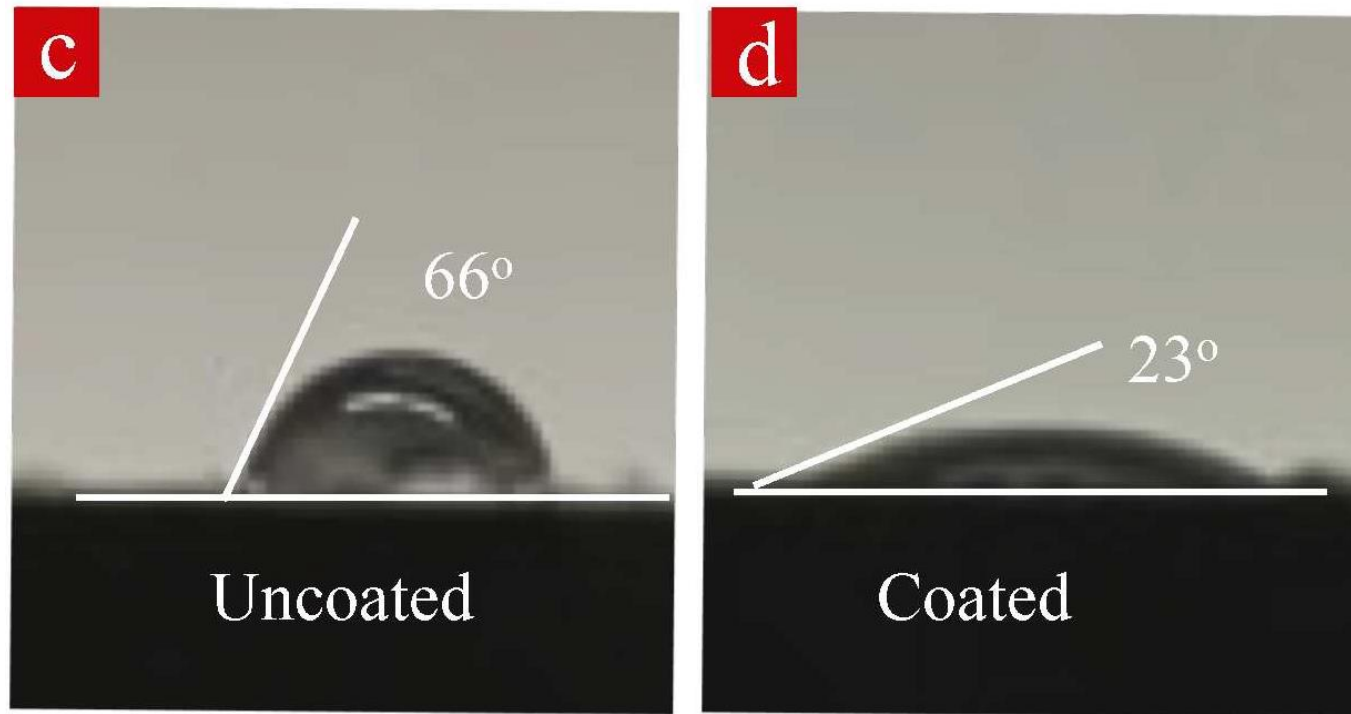
무코팅

PDA 코팅

초음파 교반 0.5 h 후 실제 표면 사진

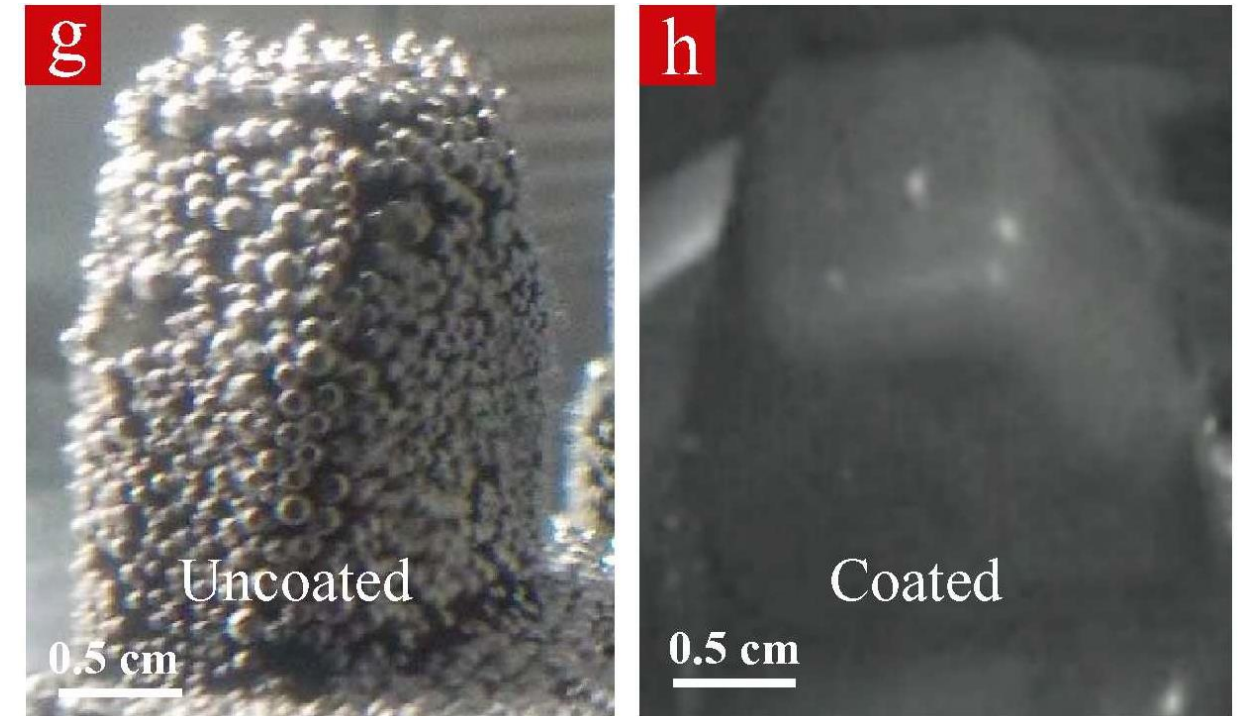
핵심: 물이 벽면을 점유하도록 유지하고, 성장한 기포가 빠져나가게 한다

PDA 코팅 후 기포 축적이 실제로 억제됐다



물 접촉각 $66^\circ \rightarrow 23^\circ$

무코팅 HDPE와 PDA 코팅 HDPE



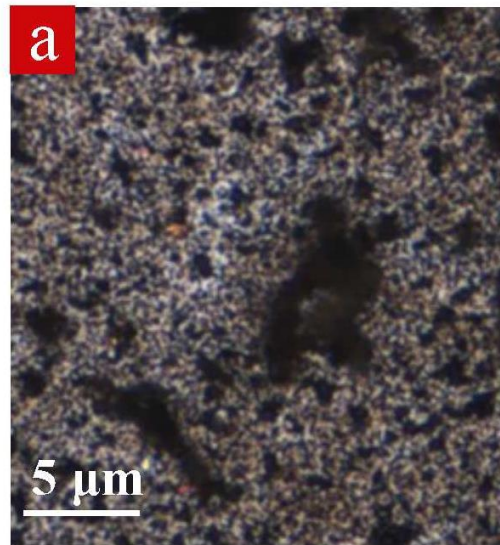
60 °C에서 4 h 초음파 교반

무코팅: 기포 축적

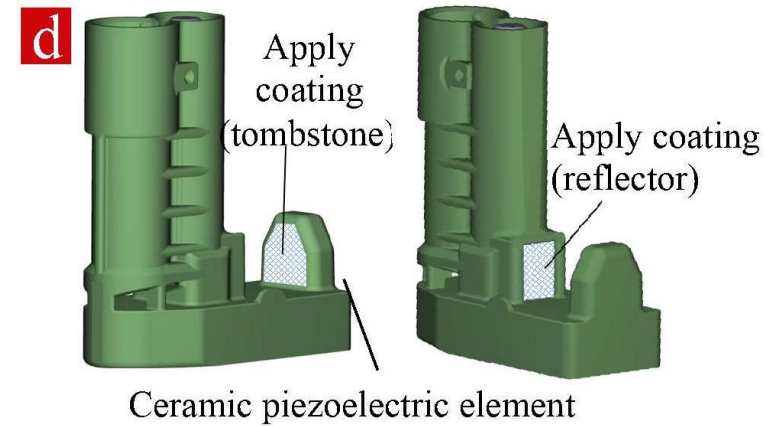
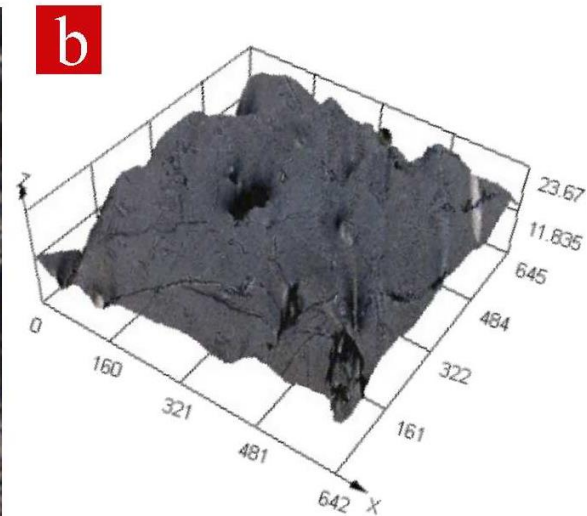
PDA 코팅: 관찰된 표면에 기포 없음

23°는 PDA 코팅 HDPE의 공기 중 물방울 접촉각이다. 수중 기포 접촉각과는 측정 정의가 다르다.

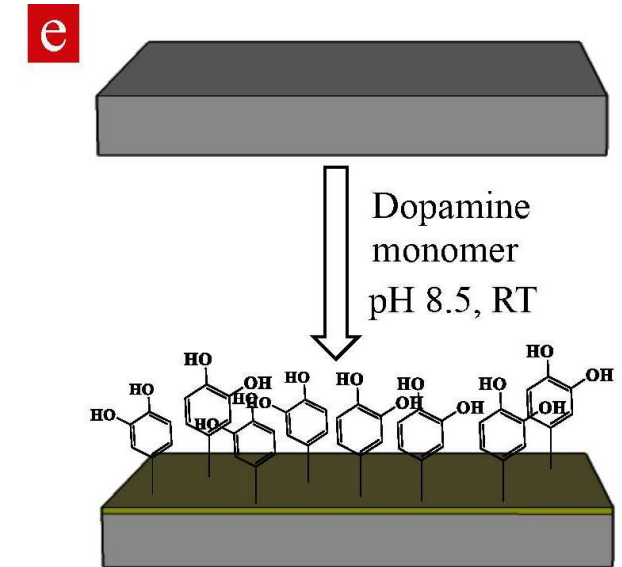
PDA의 친수성 작용기가 고체 표면의 젖음을 바꾼다



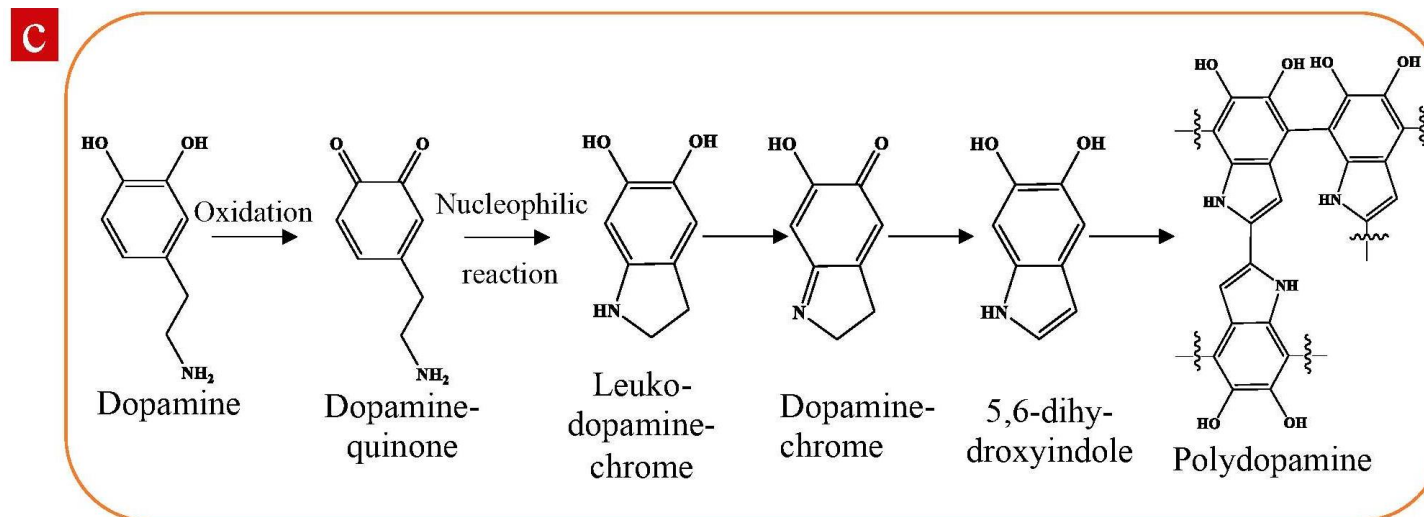
PDA 코팅 표면과 3D 형상



HDPE 발신부와 금속 반사부



수용액에서 표면 코팅

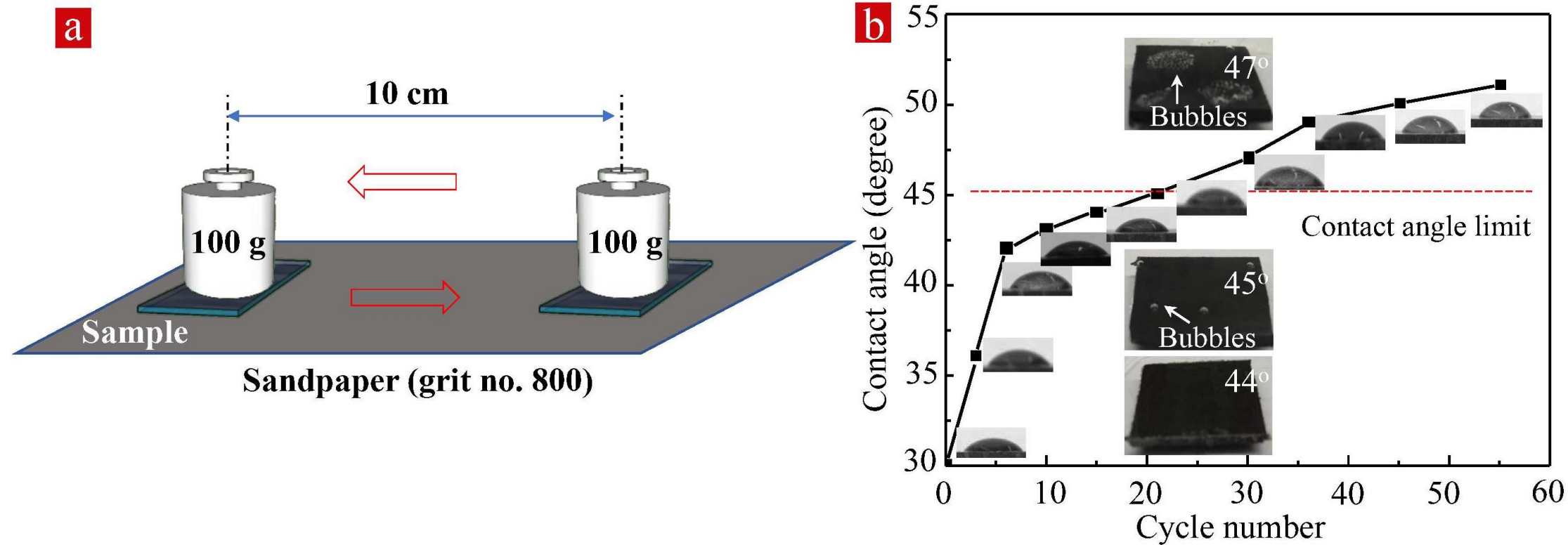


-OH / -NH

물과 상호작용하는
표면 작용기

도파민의 산화·중합을 통한 PDA 형성. 반응 도식은 논문 Figure 2c의 제안 구조를 인용했다.

친수성 저하와 함께 기포가 다시 나타났다



약 45°

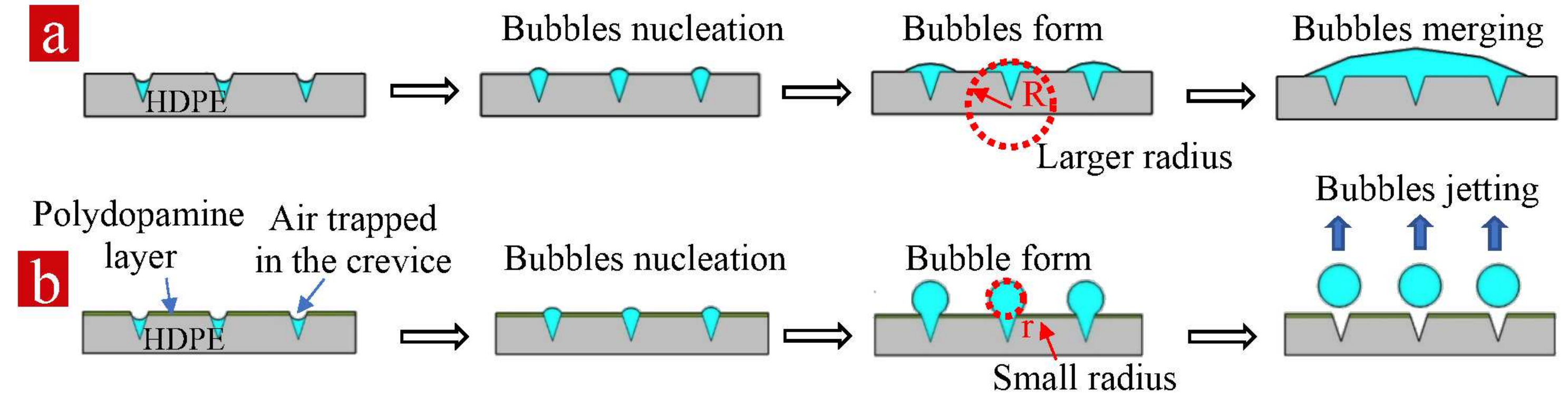
HDPE 마모 시험에서
기포 출현의 경계

60 °C DI water
초음파 교반 0.5 h

낮은 접촉각을 유지하는 코팅 상태가 기포 억제에 중요하다

45°는 이 실험계의 경험적 경계다. 비아 배출의 보편적인 임계각으로 사용하지 않는다.

표면 기포의 용해와 이탈을 함께 설명하는 모델



작은 기체 포켓의 용해

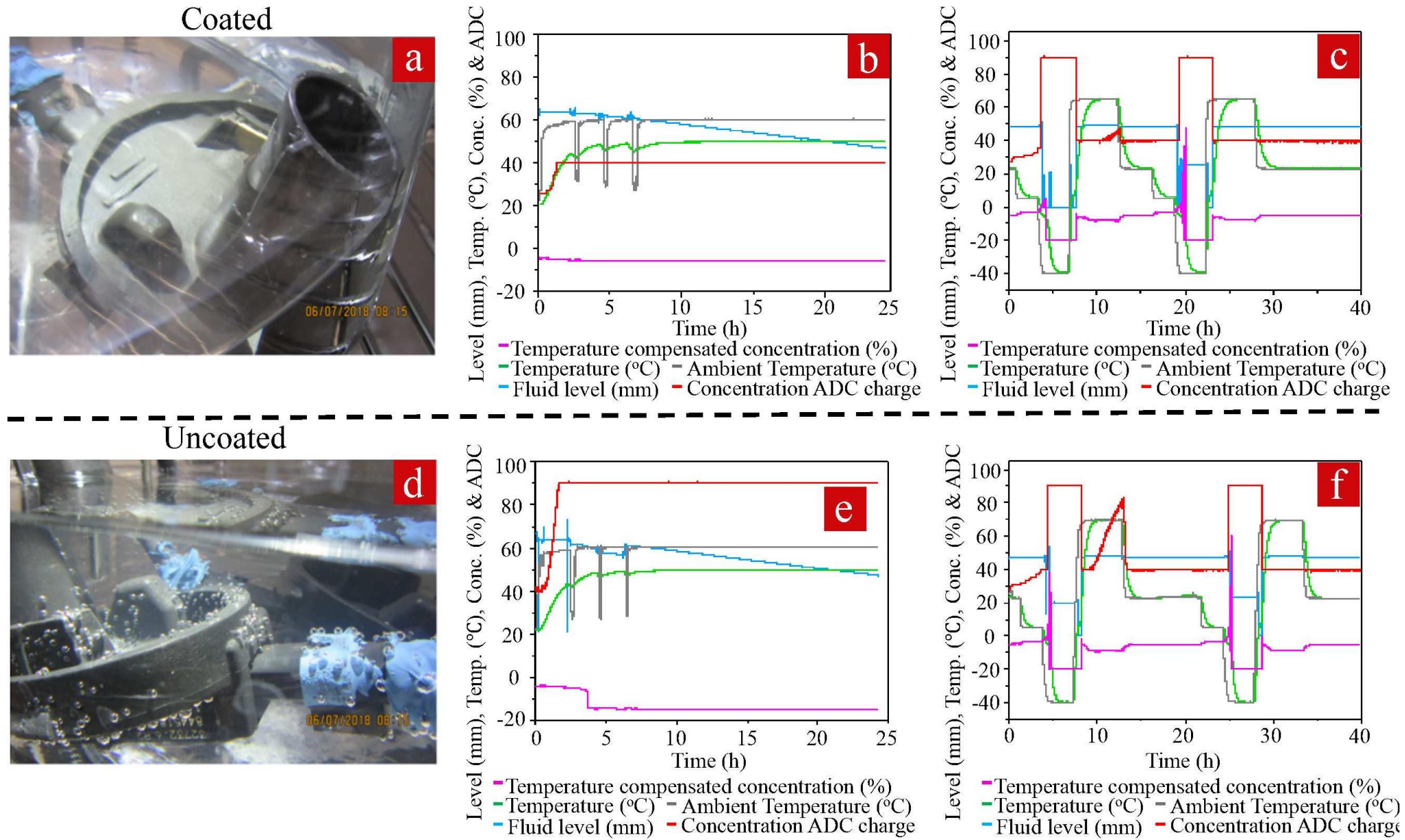
$$\Delta p = 2\gamma / R$$

곡률에 따른 내부 압력 증가와 기체 확산

성장한 기포의 이탈

부력·음향력이 고정력을 넘으면 분리

24시간 침지와 열 사이클에서도 기포 억제 효과가 이어졌다



코팅 표면

사진에서 기포 축적 억제
가열 후 ADC 약 40

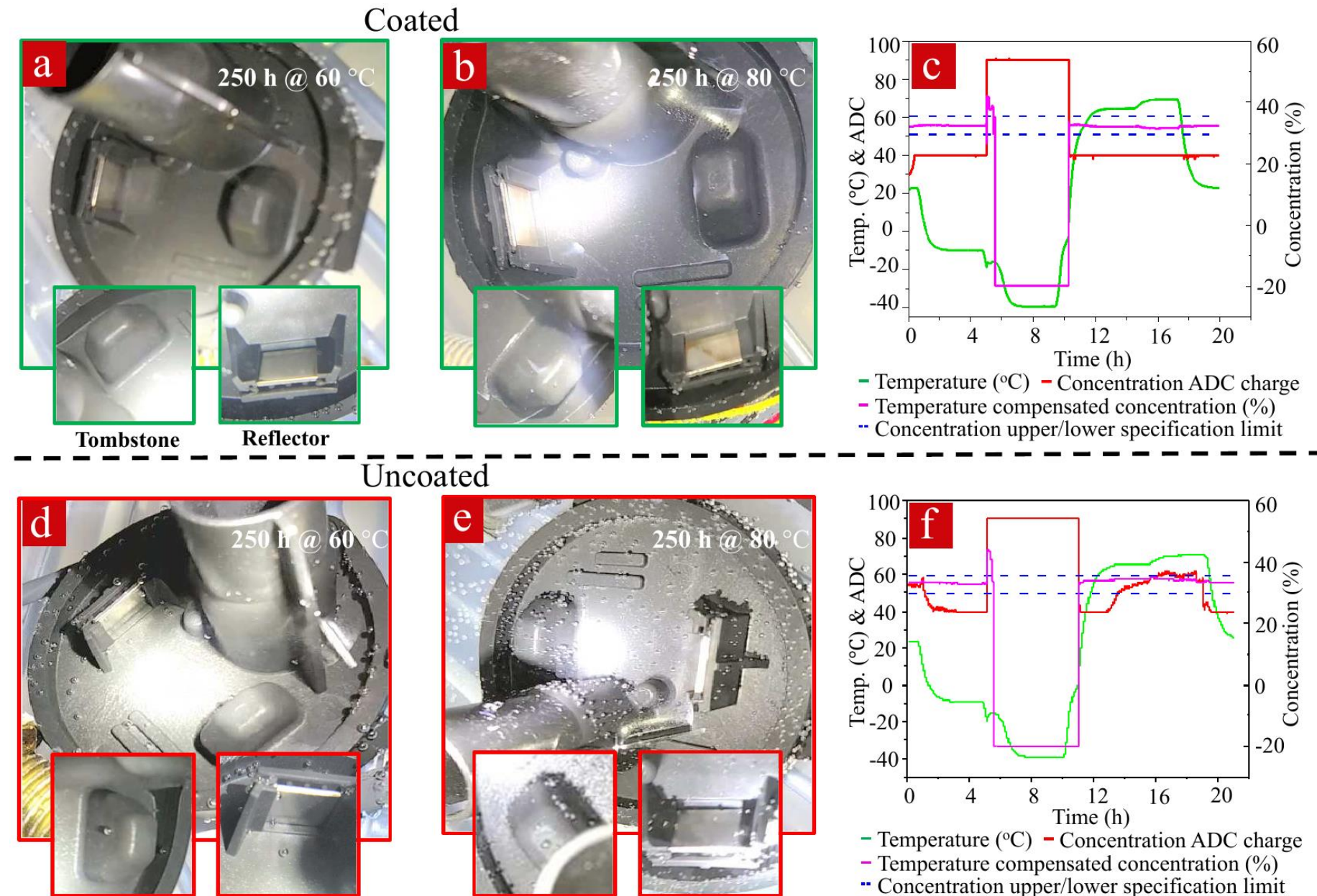
무코팅 표면

다수의 기포 축적
가열 후 ADC 약 90

ADC가 낮고 안정적일수록
이 센서의 기포 영향이 작음

왼쪽: 중앙: 60 °C, 24 h DI water 시험. 오른쪽: -40~70 °C 열 사이클 시험.

60~80 °C의 장시간 시험에서도 코팅 효과가 유지됐다



250 h + 250 h

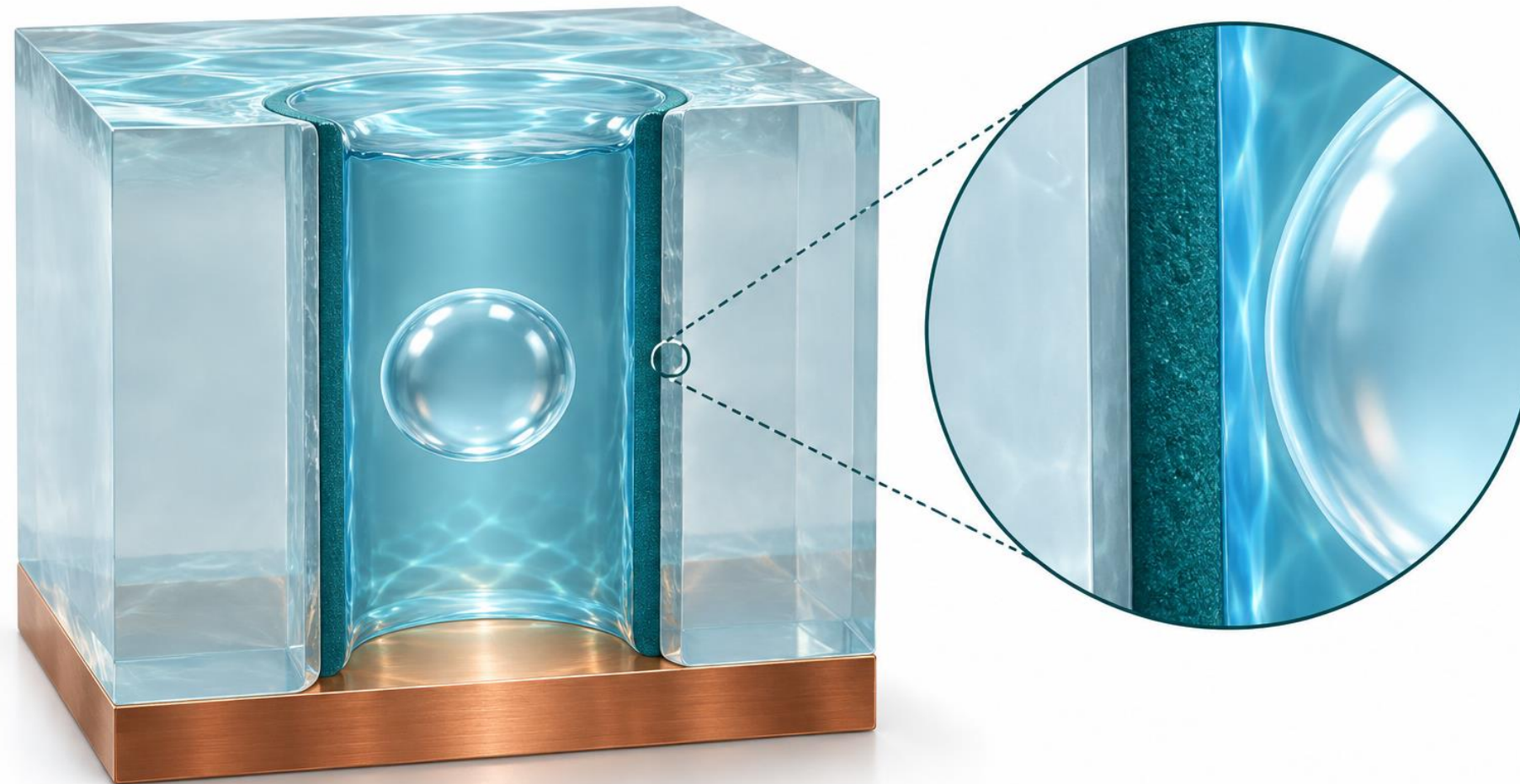
60 °C와 80 °C
누적 500시간 시험

PDA 코팅 센서는
관찰 부위의 기포 축적을
지속적으로 억제

반복 침지·순환 공정에 필요한
표면 기능의 지속성을 뒷받침

Figure 5a-f 전체 인용. DEF는 요소 수용액이다. 실제 도금액에서의 수명과는 별도 조건이다.

기포 비부착의 조건은 연속적인 젖음과 낮은 고정력이다



벽면 확대

글라스

PDA

액막

Cu 포일

개념 이미지. 첫 PDA 코팅액의 침투는 코팅 전 글라스·Cu의 젖음성에 따른다.

01 물의 우선 점유

연속 액막이 기체와 고체의 직접 접촉을 억제

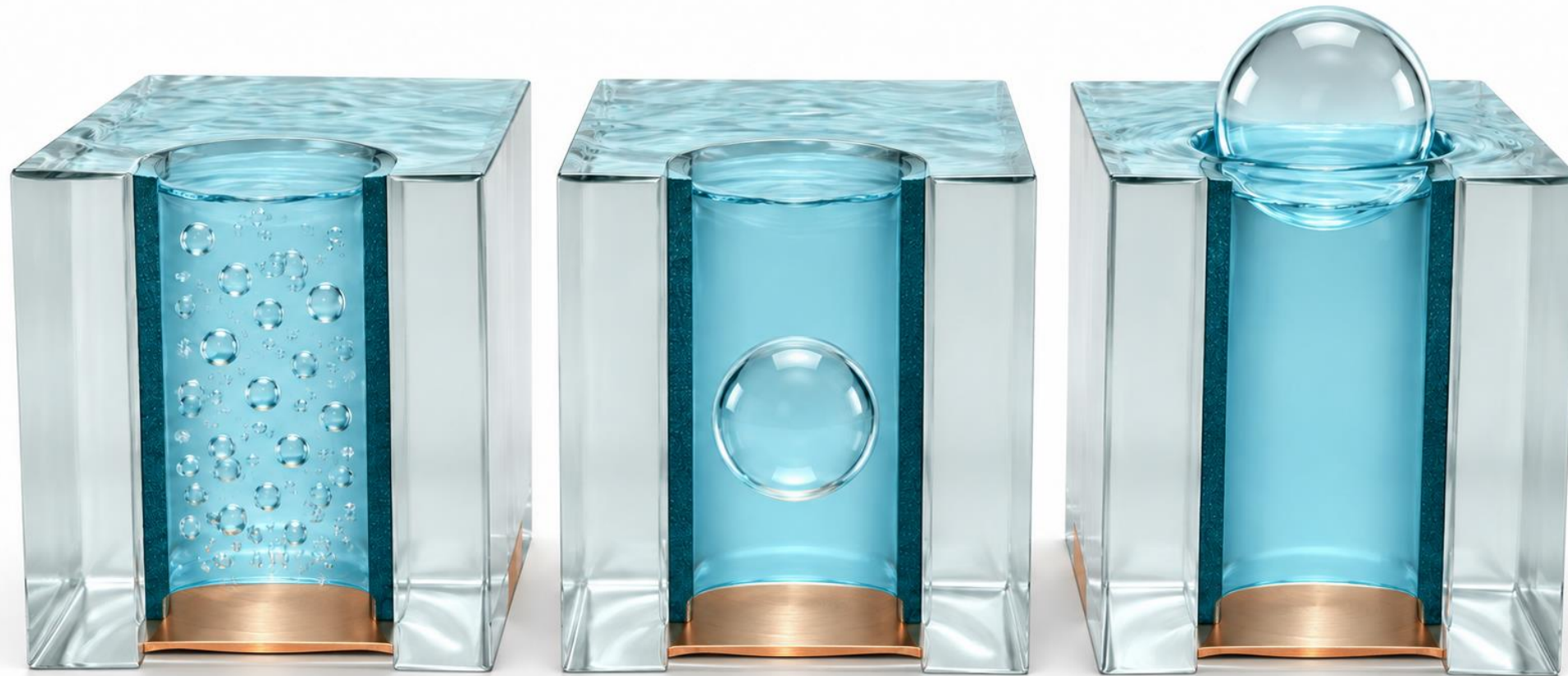
02 작은 접촉선 저항

낮은 접촉각 이력과 적은 결함·오염·노출부

03 열린 배출 경로

위쪽으로 열린 입구와 벽면을 따른 액체 유입

기포 성장으로 부력은 커지고, PDA는 벽면 고정을 줄인다



나노버블 공급

액중 성장

입구를 통한 배출

$$F_{\beta} = \Delta \rho \, g \, V$$

$$\propto R^3$$

성장할수록 부력 증가

$$F_{\text{고정}} \sim \gamma \, a \, \Delta \cos \theta$$

접촉선 크기와 이력에 의존
액막은 직접 고정을 줄임

배출 구동력 >
벽면 고정력 + 입구 저항

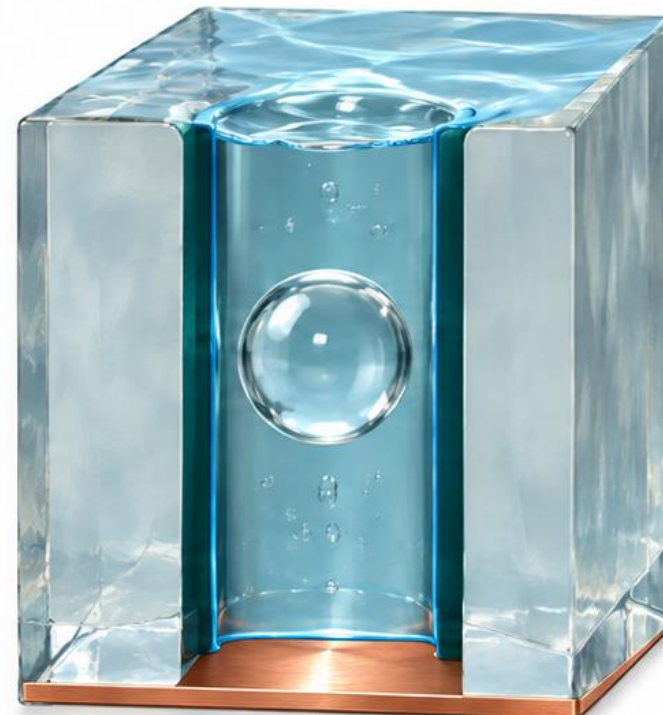
개념 이미지이며 기포는 확대 표현했다. 힘의 식은 스케일 비교이고, 실제 이탈은 비아 형상과 입구 저항에 따른다.

기포 성장·배출을 이용한 비아 내부 용액 교환

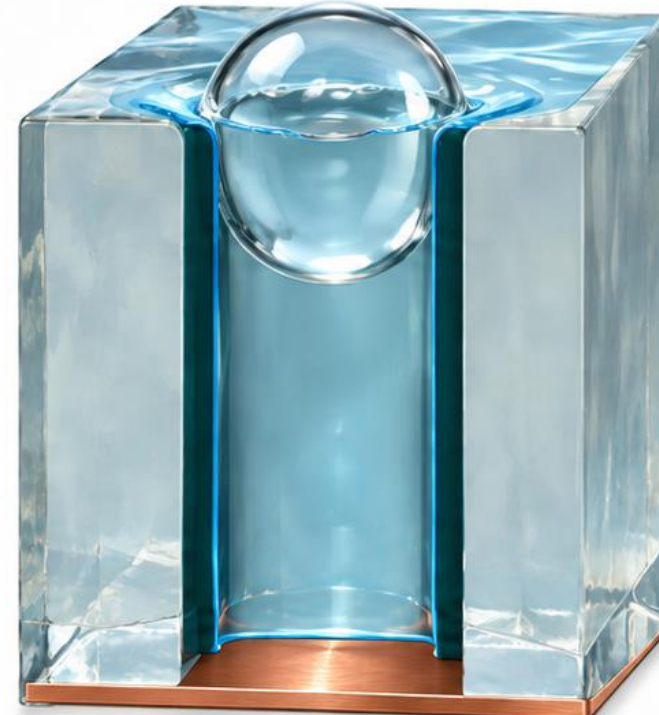
① 기포 공급 → ② 내부 성장 → ③ 기포 배출 → ④ 새 용액 유입



액중 나노버블이
비아 내부에 도달



체적 증가로
내부 용액을 밀어냄



벽면에 고정되지 않고
상부 입구로 이동



외부의 새 용액이
빈 공간을 채움

개념 이미지. PDA 내벽과 구리 포일 바닥을 유지한 상태에서 상부 입구로 기포 배출과 용액 교환이 이루어진다.



주식회사 쿨스

대표이사 조진현

본사 | 경상남도 창원시 의창구 중동북로 23

지사 | 경기도 화성시 동탄구 삼성1로 160

M. 010-2280-9414

E. jhcho@cools.co.kr

H. www.cools.co.kr
