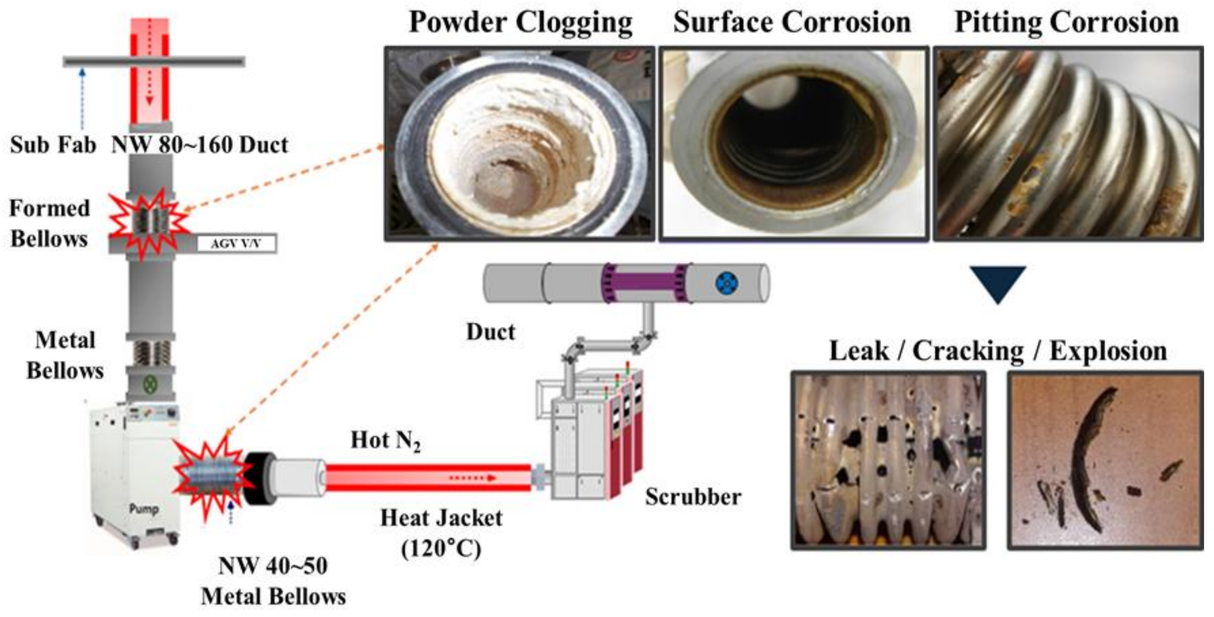
반도체 펌프-스크러버 구간의 부식 환경 모사 조건에서 스테인리스 벨로우즈 부식 및 대기 배출 평가

김동현[1], 이종철[2], 김민정[1]
[1]서울대학교 환경보건학과, [2]연세대학교 에너지환경공학부

Introduction

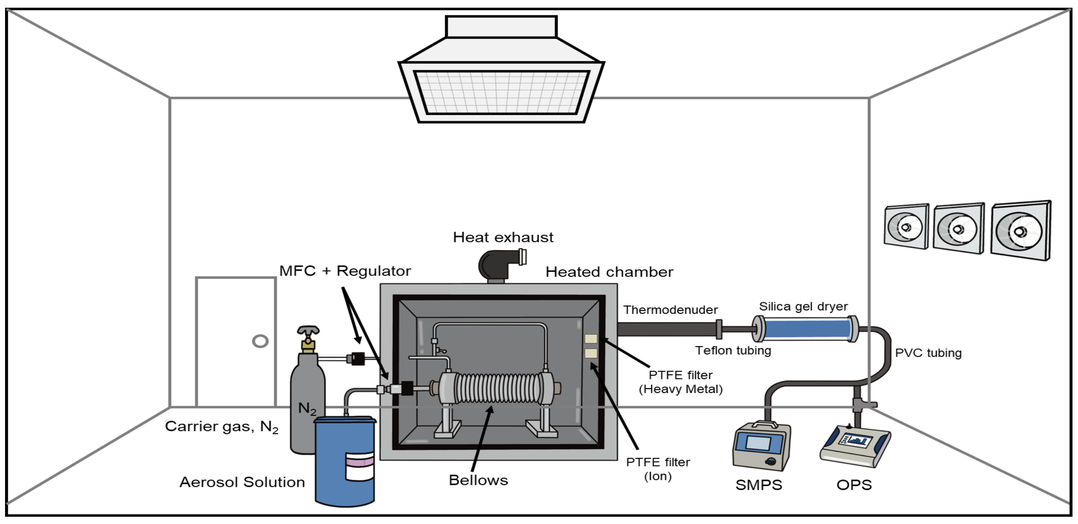
반도체 공정은 고순도 환경이 필수이며, 배기 라인의 할로겐화물(HF, HCl 등)은 금속 부품 부식을 유발해 금속 입자 방출과 성능 저하를 초래할 수 있다. 펌프–스크러버 사이의 벨로우즈는 진동·열팽창 완충의 역할을 하지만, 얇은 벽과 주름 구조로 틈새 부식이 쉽게 발생하고 있다.

불소 및 염화계열 가스는 부동태막을 파괴하고 가속화시켜 Pitting corrosion과 Crack을 유발한다. Alloy 926은 Mo·Cr·N 함량이 높아 316Ti 대비 틈새 부식 저항이 우수하나, 실제 에어로졸 환경에서의 성능 평가는 부족하다. 본 연구는 반도체의 **할로겐 공정의 실제 에어로졸 환경을 모사하여 입자·금속·이온 배출과 표면 변화를 통합 분석**한다. 이를 통해, **할로겐화 부식 발생에 따른 작업 중 유해물질 노출과 환경 영향 그리고 제어 대책 마련**에 기여할 수 있는 데이터를 구축한다.



MATERIAL & METHOD

- 시뮬레이션 (모사) 도식도



- PREN

Pitting Resistance Equivalent Number(PREN): 합금의 고유한 Pitting 부식 저항성을 평가

염화물(Cl^-) 및 불화물(F^-) 이온이 존재하는 환경에서 스테인리스강의 local pitting 부식 저항성을 추정하는 지표

$$PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$$

- XRF 분석에서 질소 함량은 직접 측정되지 않아 무시 가정
- XRF 기반 합금 조성으로 산출된 PREN 값은 두 합금 간 기초 부식 저항성을 비교하는 지표로 활용

Material (wt%)	Cr	Mo	Ni	Ti	Mn	Si	C	Fe
316Ti	17.2	2.2	10.5	0.6	1.3	0.7	0.08	Balance
Alloy 926	24.0	7.1	24.2	0.2	1.1	0.6	0.03	Balance

- 입자 수농도 분포
- SMPS(10–500 nm)와 OPS(0.3–10 μm)로 실시간 측정.
- Thermodenuder 및 Diffusion dryer로 수·잔성분 제거.
- 노출 시간별(1–72 h) 입자 수·크기 변화 확인.

- 기계적 특성 평가
- 헬륨 질량분석기로 누설 시험 (Leak rate 측정).
- ±400 N 하중, 100 mm/min 축 탄성복원 평가.
- 부식 전·후 비교를 통해 구조 강도 변화 분석.

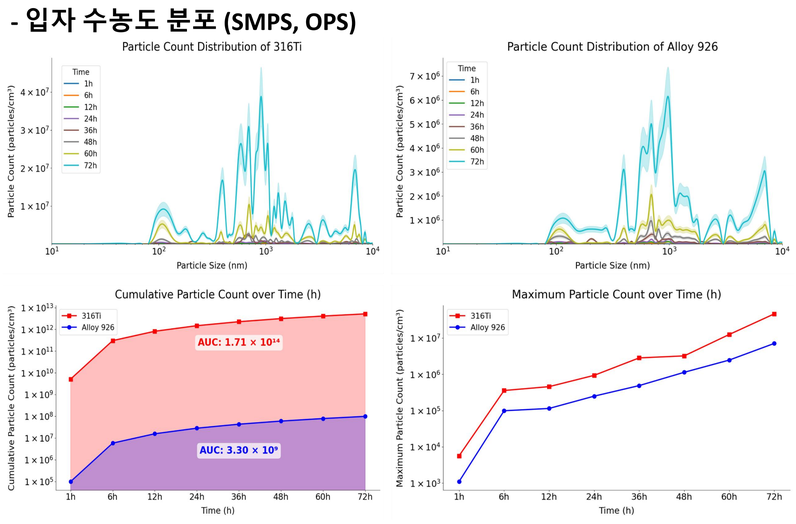
- 공기 중 시료 채취 및 분석
- 37 mm PTFE 필터 + 3단 Cascade Impactor 측정.
- 1–72 시간, 1.2–1.5 m 높이 호흡 노출 측정.
- ICP-MS: 금속(Fe, Cr, Ni, Mo), IC: 부식성 가스 (F^-, Cl^-) 분석.

- 표면 구조 및 성분 분석
- 현미경으로 표면 변색, Pitting 부식, Formation 손상 관찰.
- SEM-EDS: 미세구조와 부식 생성물 성분 정밀 분석.
- XRF: 합금 조성 및 부식 전후 표면 성분 정량 분석.

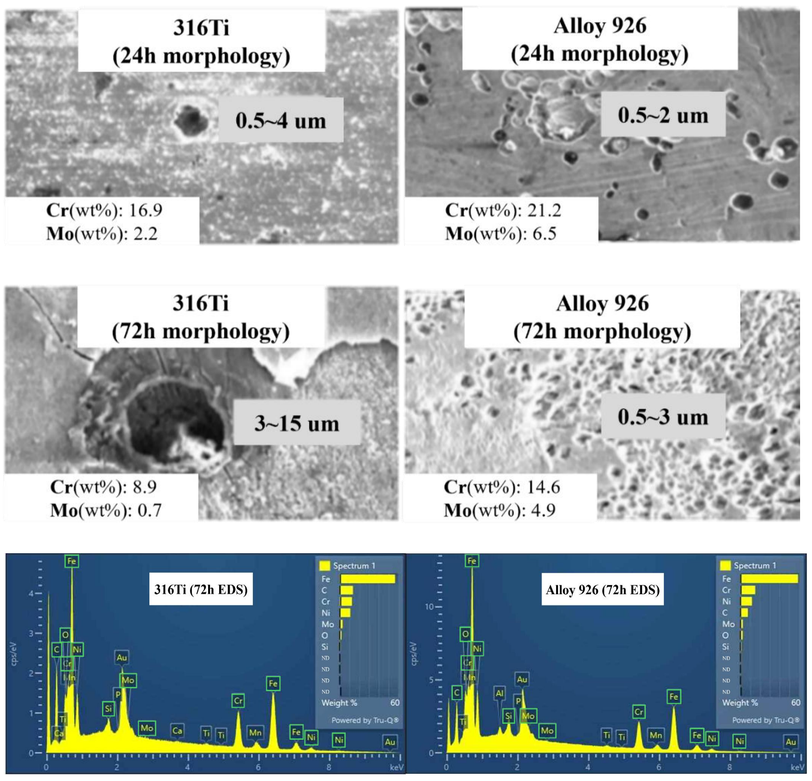
RESULTS

- 결과 해석
- 316Ti의 Fe, Cr, Ni 방출 농도는 1시간 각각 69.6, 43.5, 32.3 μg/m³에서 72시간 4,520.7, 11,678.0, 8,579.6 μg/m³로 증가했다.
- 주요 방출 농도는 24시간 이후, 특히 48~72시간 사이에 크게 증가하였다.
- F^-와 Cl^- 은 일정한 유량으로 흘려주었고, 이는 실제 반도체 벨로우즈의 부식조건의 농도를 가중 계산하였으며, 각각 402.2, 389.0 μg/m³였다.
- Alloy 926은 주로 200 nm 이하 입자 크기를 유지하며, 총 입자 수는 증가했다.
- 316Ti 누적 입자수는 ~1.71×10¹⁴, Alloy 926은 ~3.30×10⁹ particles·h/cm³였다.
- 316Ti는 시간이 지날수록 피트가 확대되고 표면 미세균열이 나타났다.
- Alloy 926은 작은피트를 보였으며, 72시간동안 다공성 피트 수가 증가했다.
- 두 Alloy(Alloy 926 & 316Ti) Cr, Ni, Mo이 F- 및 Cl-에 노출될수록 감소했다.
- Alloy 926은 초기 Ni 함량이 높았으나, 많은 부분이 공기 중으로 방출되었다.
- O, C와 P, Ca, Si, Ti 부식이 관찰되어 2차 산화반응을 예측할 수 있다.

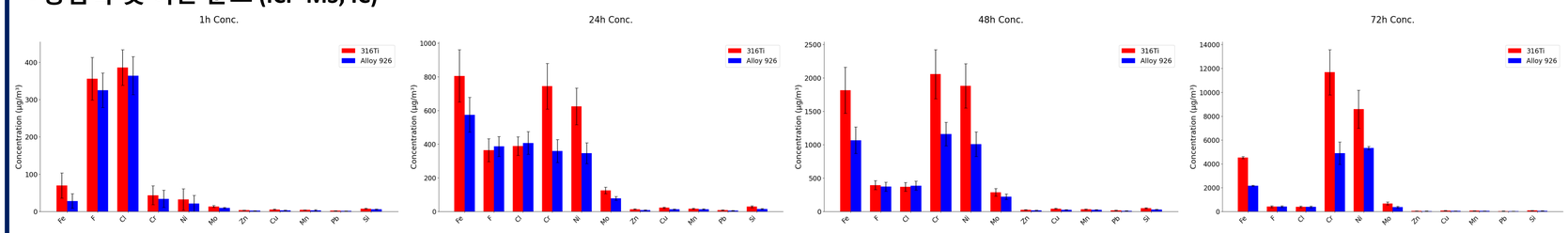
- 입자 수농도 분포 (SMPS, OPS)



- 표면 구조 및 성분 분포 (Stereo microscope, SEM-EDS)



- 중금속 및 이온 분포 (ICP-MS, IC)



CONCLUSION

반도체 공정의 혼합 (Cl^-/F^-) 환경을 모사하여 316Ti와 Alloy 926 스테인리스 벨로우즈의 부식에 따른 방출 특성을 분석하였다. 316Ti는 Fe, Cr, Ni의 방출량과 미세입자 비율이 높아 환경 배출과 호흡기 노출 위험이 컸다. Alloy 926은 Mo 함량과 PREN이 높아 표면 안정성이 유지되었고, 금속 및 입자 방출이 적어 상대적으로 안전했다. 두 Alloy 모두 할로겐 이온 농도는 높게 유지되었지만, 오염물질 방출과 표면 손상 정도는 합금별 트렌드를 가졌으며, 서로의 차이가 뚜렷했다. 연구 결과는 저내식성 합금의 경우 점검·교체 주기 강화가 필요하며, 고내식성 합금 교체 사용과 부식 모니터링이 반도체 환경 오염 저감과 작업자 안전 향상에 효과적임을 시사한다.

ACKNOWLEDGEMENT

서울대 농생명과학공동기기원/농업생명과학대학, 연세대 과학기술대학, 한국자동차연구원과 함께 진행함.