대기 미세 나노먼지가 반도체 불량에 미치는 영향

이종민[1,2], 박정태[1,2], 김일진[2], 이하은[2], 박세훈[2]
[1] 연세대학교 산학협력단 , [2] 삼성전자 DS부문

Objectives

- 반도체 기술 경쟁력 및 생산성 : 글로벌 산업시장의 핵심 요소로 부각
- 집적회로 미세화 및 제품 불량 개선 : Cleanroom 나노 오염제어 필요성 ↑
- 클린룸 제어 : Airborne nano- particle 모니터링 부재로 나노오염 감지미흡
- 반도체 불량: 공정,설비, 오염 등 복합적 원인으로 외기오염 영향 검증 한계
- 연구 목적 : 외기(outdoor) 나노 먼지*의 반도체 불량 영향성 정량적 규명

* 나노 먼지 : 100nm 이하의 입자로 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 일부분

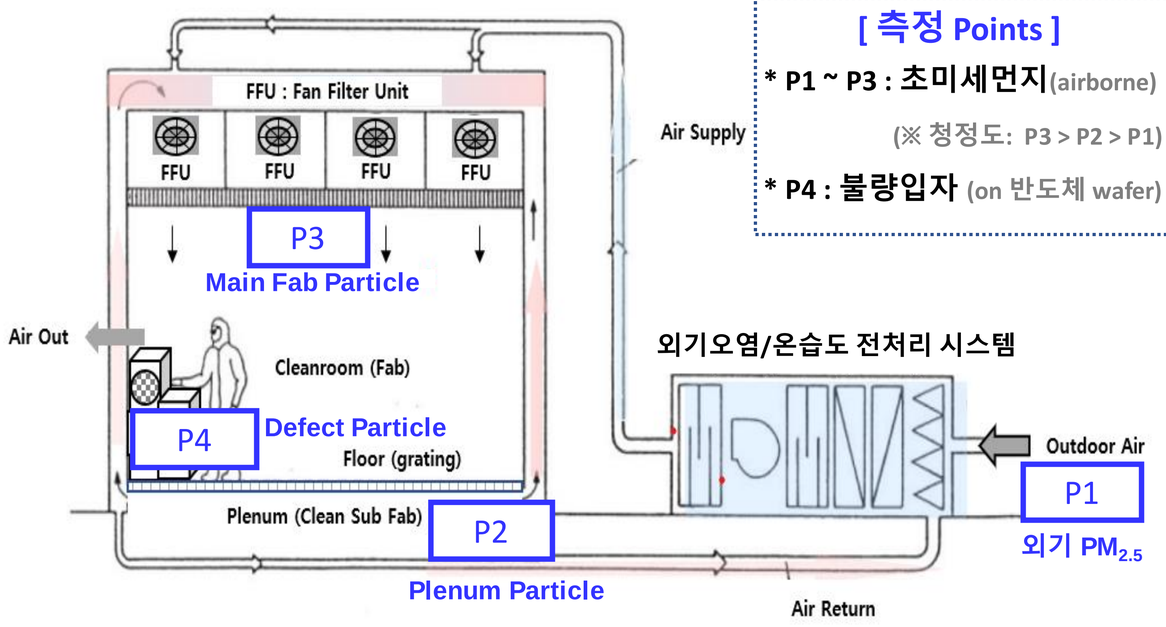
Methodology

1. 측정 개요 : 23년 1월 ~ 4월 (120일) & 4 측정 Points & 3 개 사업장

- 분석 항목 : 초미세먼지 (외기 ~ 반도체 클린룸) 및 반도체(on wafer) 불량입자

5 Data-set

① 외기 초미세먼지 ($PM_{2.5}$) ② 외기 중금속 (in $PM_{2.5}$) 5종
③ 외기 오염 전처리 시스템 (HEPA 필터) 후단 (Plenum) Particle
④ 반도체 클린룸 Main Fab (ULPA 필터) 후단 Particle
⑤ 반도체 불량 입자 (Defect particle on wafer)

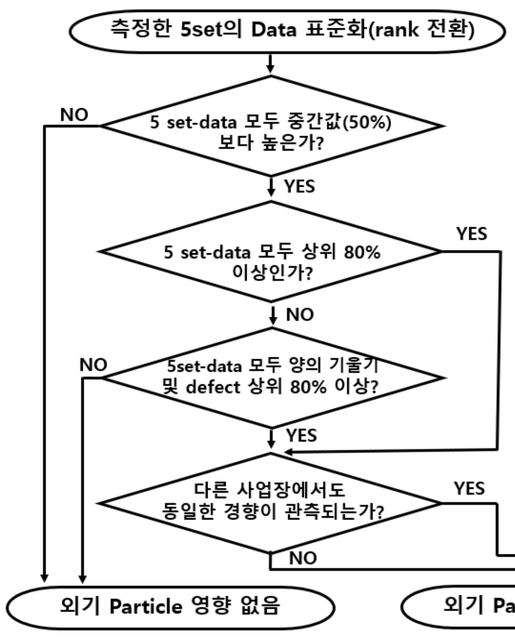


[측정 Points]
* P1 ~ P3 : 초미세먼지(airborne)
(※ 청정도: P3 > P2 > P1)
* P4 : 불량입자 (on 반도체 wafer)

[Fig 1. Data Collection Points]

2. 분석 방법 : 외기 영향성 검증 알고리즘 新개발 및 적용

【 외기 Particle 영향성 검증 알고리즘 】



【 비 고 】

측정항목 및 Data 그룹간 효율적 상대비교
(각 data 그룹내 가장 큰 값 100%, 작은값을 1% 서열화)

Data 중간값(median) 이하는 일상적인 수준으로 정의
(측정항목간 상호 영향성이 없는 수준)

각 Data 그룹내 상위 80% 이상은 측정항목의
영향력이 발현하는 구간으로 정의

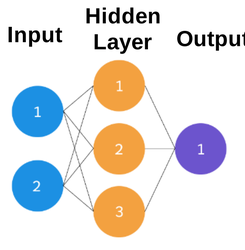
5 set의 모든 data 값이 전일 대비 증가 및
반도체 불량(defect)값이 상위 80% 이상인 경우
인과 관계 (외기 particle의 반도체 불량 영향) 추정

다른 2개 이상의 사업장에서 동일결과 발생유무 검증
(재현성 확보 시 상호 인과관계 확인)

3. 알고리즘 유효성 검증 : 인공신경망(ANN*) 통한 불량 예측

* Artificial Neural Network

- 대상 : 사업장별 외기 Particle 잠재 및 중대 영향 Data-Set only
- 불량 particle 예측 : ANN 모델링 (관측 data 학습기반 unknown 예측, 머신 러닝)



[ANN 모델링 구성 요소]
- **Input** : (1) 외기 particle 농도 (2) Main Fab particle 농도
- **Hidden layer** : Activation Function 적용 (Sigmoid 함수)
- **Output** : 반도체 불량 particle (Network Training : 10,000 회)

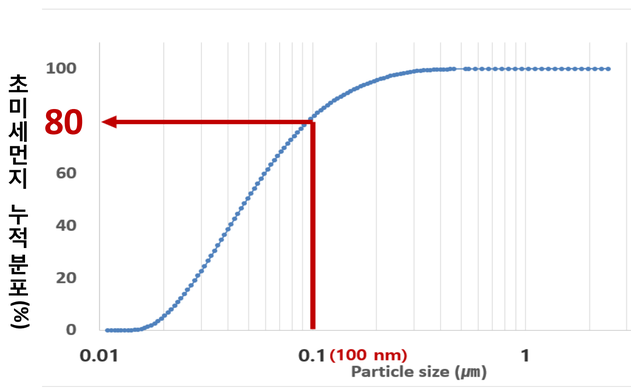
- 검증방법 : 사업장별 반도체 불량 Particle 실측 vs 예측 오차 확인 (by Python)

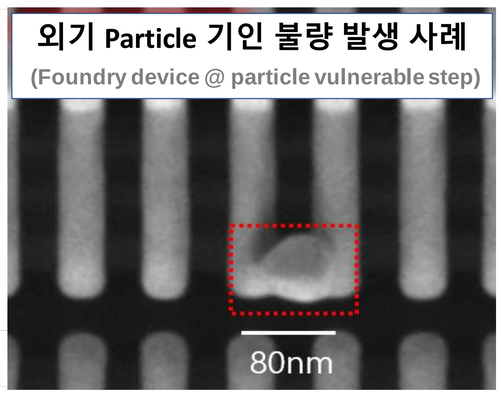
(※ If 오차율 10% ↓ , 외기 영향성 예측 가능하여 알고리즘 유효성 입증)

Results/Discussion

1. 반도체 사업장 인근 외기 $PM_{2.5}$ 입경(size) 분포 및 제품 영향성

- 외기 초미세먼지($PM_{2.5}$) : 100nm 이하의 나노 먼지가 약 80% 차지
- 나노 먼지 : Diffusion force 기반 wafer 표면 흡착 (나노 먼지 : 중력 침강 weak)





2. 외기 나노먼지 vs 반도체 불량 인과 관계

* Note : 파운드리 특정 제조공정 1 step 평가 결과 base

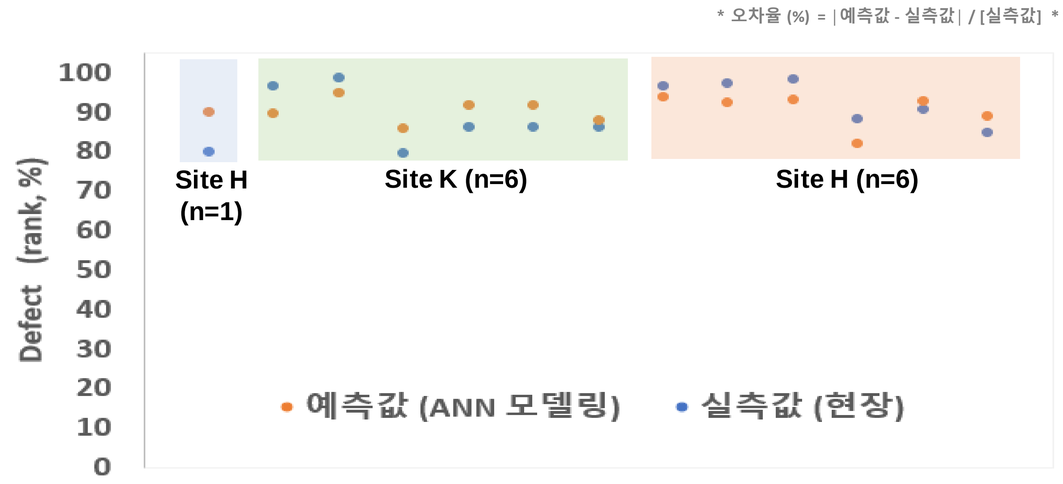
- 외기 Particle 기인 반도체 제품 불량 영향성 : 1 ~ 6% 수준* (하기 도표 참조)
  (반도체 클린룸 HEPA/ULPA 필터 : 100 nm 크기 이상의 particle 제어에 최적화 되어 있음)
- 반도체 불량 황사 영향성 : 황사일 vs 외기 Particle 영향일 일치율 약 13% (2/16일)
  (수도권 23년 1~4월 황사 경보일(총 16일) 중 3개 사업장 외기 Particle 영향일과 2일 일치)

구 분	항 목	측정 장소 (반도체 사업장)			비 고
		Site H	Site K	Site P	
측정 Data	평가 기간 (Daily 5 set)	120일	94일	120일	日 평균값 적용 ('23 1.1 ~ 4.30)
	반도체 제조건물(클린룸) 연식	5년	25년	3년	건물 완공시점 기준(age)
Ratio of Average Airborne Particle Level	외기 $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) (평균 ± 표준편차)	1 (29±19)	1 (29±18)	1 (30±20)	사업장간 상관계수 ~0.96 (사업장간 거리 : 2 ~ 30 km)
	Plenum Particle (ea/ft^3)	1	4.8	8.5	>100 nm Particle 기준
	Main Fab Particle (ea/ft^3)	1	7.5	1	
상관계수 (Correlation Coefficient)	외기 $PM_{2.5}$ vs 외기 중금속	0.19	0.14	0.17	중금속 5종 (Ca, Pb, Mn, Ni, Zn)
	외기 $PM_{2.5}$ vs Plenum Particle	**0.74**	**0.74**	**0.83**	
	외기 $PM_{2.5}$ vs Main Fab Particle	0.09	0.18	0.11	
외기 $PM_{2.5}$ 반도체 불량 영향 (중금속 영향성)	잠재 영향성	None	5일(3일)	5일(3일)	
	중대 영향성*	1일(1일)	1일(0일)	1일(1일)	*사업장간 재현성 검증/확보
	합계	**1일(1일)**	**6일(3일)**	**6일(4일)**	Site H:1/120일(1%), Site K: 6/94일(6.3%) Site P: 6/120일 (5%)

3. 외기 Particle 영향성 검증 알고리즘 유효성

- 대상 : 외기 Particle 잠재 & 중대 영향 총 13일 (3 sites) Data
- 결과 : ANN 기반 불량 Particle 예측 오차율* : 평균 5.7% (알고리즘 유효성 확보)

* 오차율 (%) = |예측값 - 실측값| / [실측값] * 100



Conclusions

Insight

- 외기 나노먼지 : 반도체 Defect Particle 의 잠재 원인 (정량적 규명)
  (반도체 제품 정밀화로 나노오염 risk 증가 → 외기환경 나노오염 제어 要)

기대효과

- 외기 영향성 검증 알고리즘 : 반도체 불량원인 분석 tool로 활용 가능
  (복잡/다양한 chip 불량원인 규명 : 고도화된 Data Science 기술 적용 needs ↑)