

반도체 FAB의 비밀에 의한 감염병 전파 가능성 연구

오건환¹ · 김기연^{1,2*}

¹서울과학기술대학교 융합과학대학원, ²서울과학기술대학교 안전공학과

Possibility of Spreading Infectious Diseases by Droplets Generated from Semiconductor Fabrication Process

Kun-Hwan Oh¹ · Ki-Youn Kim^{2*}

¹Graduate School of Convergence Science, Seoul National University of Science and Technology

²Department of Safety Engineering, Seoul national University of Science and Technology

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study is to verify whether droplet-induced propagation, the main route of infectious diseases such as COVID-19, can occur in semiconductor FAB (Fabrication), based on research results on general droplet propagation.

Methods: Through data surveys droplet propagation was modeled through simulation and experimental case analysis according to general (without mask) and mask-wearing conditions, and the risk of droplet propagation was inferred by reflecting semiconductor FAB operation conditions (air current, air conditioning system, humidity, filter conditions).

Results: Based on the results investigated to predict the possibility of spreading infectious diseases in semiconductor FAB, the total amount of droplet propagation (concentration), propagation distance, and virus life in FAB were inferred by reflecting the management parameter of semiconductor FAB.

Conclusions: The total amount(concentration) of droplet propagation in the semiconductor fab is most affected by the presence or absence of wearing a mask and the line air dilution rate has some influence. when worn it spreads within 0.35~1m, and since the humidity is constant the virus can survive in the air for up to 3 hours. as a result the semiconductor fab is judged to be an effective space to block virus propagation due to the special environmental condition of a clean room.

Key words: Droplets, Infectious diseases, Mask, Semiconductor FAB

I. 서 론


2020년 1월 중국에서 발생한 COVID-19는 전 세계를 범 유행으로 몰아넣으며, 전 세계 2.6억 명이 넘는 확진자를 발생시키고 있고, 5백만 명이 넘는 사망자를 만들었다(Rodriguez-Urrego, 2020). 국내에서도 43만 명이 넘는 사람들이 감염되어, COVID-19 이전 세계로 돌아갈 수 있을지에 대한 의구심이 들 정도다. 21

년 12월 현재까지 치료제는 없으며, 증상에 따른 해열제, 수액공급 등 대증치료만이 유일한 치료책이다(Lu et al., 2020).

반도체산업은 재료원가 대비 부가가치가 50배에 달하는 고부가가치 산업이지만 신규 FAB (fabrication: 이후 FAB으로 표현함) 증설에 수조 원이 필요하다. 또한, 제품 교체 주기가 빠르고, 설비투자비용을 짧은 기간 내에 회수해야 해서 조기 대량생산을 통해서 양산

*Corresponding author: Ki-Youn Kim, Tel: 02-970-6376, E-mail: kky5@seoultech.ac.kr
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811

Received: February 18, 2022, Revised: March 29, 2022, Accepted: May 29, 2022

 Kun-Hwan Oh <https://orcid.org/0000-0002-6770-5713>

 Ki-Youn Kim <https://orcid.org/0000-0002-9321-9620>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

경쟁이 펼쳐지는 것이 필연적이다. 대규모 투자를 하는 장치산업으로 공급과잉상태가 지속 되어 시장가격이 급락하면 생산을 줄이기보다 생산량을 더 늘려서 치킨게임 하게 된다. 가격 변화에 따른 공급 조절이 어려워서 경기에 민감할 수밖에 없고, 이러한 민감한 경기에 대응하기 위해 반도체 FAB은 24시간 운영되고 있고, FAB이 멈추면 곧 커다란 경영악화로 이어질 수밖에 없다(Choi et al., 2015).

COVID-19의 범유행 상황이 심해짐에 따라 기침, 재채기, 호흡 등으로 인한 비말의 전파에 따른 사회적 거리, 마스크 착용, 집단 모임 등에 대한 기준을 쉽게 정할 수 있도록 시뮬레이션을 통해 연구한 결과에 따르면, 기류가 없는 조건에서는 분출된 비말의 크기에 따라 중력의 영향이 커져 큰 비말일수록 빠르게 가라앉는 경향을 보였고, 바람의 영향이 없는 조건인 기류가 0 km/h 조건에서는 전파 거리가 2m 이내에 수렴되는 반면 기류 조건이 4 km/sec 15 km/sec로 커짐에 따라 전파 거리는 비례하여 증가하였다 (Dbouk & Drikakis, 2020a). Anfinrud et al.(2020)은 상대습도 90% 이상에서는 비말에 포함된 바이러스가 상대습도 50%일 경우 대비 60~200배 더 오래 생존함을 확인할 수 있었고, 난류 속도와 상대습도에 따라 바이러스의 생존율은 엄청나게 증가할 수 있어 2m라는 사회적 거리 두기는 실제 비말의 적용 범위를 고려할 때 부적절함을 지적하였다. 또한 마스크 착용 시 전파거리 및 비말배출 농도를 예측하기 위해 시뮬레이션을 수행한 Dbouk & Drikakis(2020b)의 연구 결과에 따르면, 기침 이후 총 5초간의 시뮬레이션 결과 마스크 미착용 시에는 70cm가량 전파되었던 비말이 마스크 착용 결과 이 절반인 35cm까지 전파되어 마스크 착용에 따른 전파 거리는 절반 가량 감소하였고, 마스크 착용으로 인한 비말 차단 효과도 누적된 비말의 질량을 통해 계산해 본 결과, 시뮬레이션 초기값에 근접하는 90%의 차단율을 확인할 수 있었다.

FAB에서는 마스크를 착용하고 근무하고 있으나 정비 또는 보수 등의 비정형 작업을 수행하는 경우 불가피하게 마스크를 착용하지 못하는 상황이 있어 만약 반도체 FAB에 COVID-19와 같은 감염병이 발생하는 경우 반도체 FAB에 대한 방역을 위해 FAB 가동이 중지될 수 있고, 이를 예방하기 위해서 반도체 FAB의 공조 특성 및 감염 경로를 사전에 파악하여 효과적으로 차단할 수

있는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 반도체 FAB 구조 및 공조 특성을 조사하여 반도체 FAB에서의 비말 전파양상을 예측하는 데 있다.

II. 대상 및 방법

1. FAB 구조 및 공조 특성

A 반도체 공장 관리자의 협조를 통해 자체적으로 관리하고 있는 FAB의 설계도를 입수하여 내부 구조 및 공조시스템(HVACs)의 운용 현황을 파악하였다.

2. 비말 전파 총량

비말 전파의 총량을 추정하기 위한 검토 항목으로 감염자 기침에 의한 비말 생성 총량, 마스크차단율, FA flow ratio, ULPA filter 차단율을 대상으로 하였다. 각 항목의 경우의 수 중 비말 전파 총량의 best case(총량 최저)와 worst case(총량 최대)를 구분하여 총량을 예측하고, 두 case의 총량(농도)에 대해 비교하였다.

1) Best Case (비말 총량 최저)

- 조건: 마스크 착용, 300 mm FAB 최대회석, 1회 환기 Cycle 조건
- 비말 농도 A가 마스크 차단율(90%)를 반영하여 0.1A 농도로 외부로 분출
- 0.1A의 비말 농도는 300 mm FAB의 25% 희석을 통해 배출 총량 농도는 0.075A
- ULPA Filter를 통해 99.9999% 차단되고, 0.0001%만 남았을 경우의 농도는 $0.075A \times 10^{-6} (ULPA Filter) = 7.5 \times 10^{-8} A$

2) Worst Case (비말 총량 최대)

- 조건: 마스크 미착용, 200 mm FAB 최소희석, 1회 환기 Cycle 조건
- 비말농도 A가 마스크 미착용을 반영하여 1A 농도로 외부로 분출
- 1A의 비말 농도는 200 mm라인 8%희석을 통해 배출 총량 농도는 0.92A
- ULPA Filter를 통해 99.9999% 차단되고, 0.0001%만 남았을 경우 농도는 $0.92A \times 10^{-6} (ULPA Filter) = 9.2 \times 10^{-7} A$

III. 결과 및 고찰

1. 반도체 FAB 클린룸(C/R)의 관리 변수

반도체 산업은 첨단산업 분야로 미세공정을 통한 집적도 향상을 목표로 제품개발을 하고 있고, 미세공정은 0.1 μ m 크기의 먼지(particle)와 같은 작은 입자도 품질에 큰 영향을 주기 때문에 C/R을 설계하여 청정도를 유지하고 제품을 생산하고 있다(Choi et al., 2015). 반도체 제품 품질에 영향을 주는 오염요소는 미세입자인 먼지 외에도 오염물질(금속이온, 화학물질), 미생물, 바이러스 등이 있으며, 이러한 요소를 얼마나 효과적으로 제어하느냐에 따라 제품 수율에 영향을 많이 받는다.

반도체 C/R의 관리 parameter는 언급한 청정도 외에도 온도, 상대습도, 기류속도, 차압, 환기계수 등 항목이 관리되며, 200 mm FAB과 300mm FAB의 관리 기준이 청정도, FA(fresh air) flow ratio만 제외하고 동일하게 관리되고 있다. 위 항목은 감염병의 확산 조건에 밀접 연관된 관리항목으로 판단된다. 상대습도는 바이러스 수명에 영향을 주며, 45(\pm 5)%로 관리된다. 기류 속도는 기류 방향에 따라 바이러스 전파 거리에 영향을 주는데 top-down 방식으로 0.32~0.48 m/s로 관리된다. FA flow ratio 및 환기 계수는 바이러스 전파농도 즉 공기 중 희석에 영향을 주는데, FA는 200 mm C/R은 8~10%로, 300 mm C/R은 20~25%로 희석공급 된다. 즉, 300 mm C/R이 200 mm C/R 대비 2배 이상 공급하여 FA로 공기를 희석하는 것으로 판단된다. 환기 계수는 두 C/R 모두 60~80 cycle/hr로 환기하는데, 공기순환 횟수는 바이러스가 상부의 필터를 거치는 횟수로 판단할 수 있어, 환기 계수가 클수록 바이러스의 순환 전파 확률은 필터 차단율의 곱으로 표현될 수 있다.

2. 비말 전파 거리

비말 전파의 경우, 기류에 영향을 많이 받으나 0 m/s 임을 가정했을 때, 비말의 크기에 따라 전파 거리가 최소 0.7 m~최대 2 m까지 전파될 수 있다. 마스크를 착용했을 경우 이 전파 거리는 반으로 줄어들어 0.35 m~1 m까지 전파될 수 있다고 가정하였다(Lai & Cheng, 2007). 반도체 FAB의 경우 상부 FFU에서 top-down으로 기류를 만들고 이는 일반적인 기침의 방향과 수직이기 때문에 전파 거리는 이보다도 더 줄어

들 수 있다. 전파 거리에 영향을 주는 요소는 감염자의 입에서 배출된 기침의 유속, 마스크 착용 여부 및 기류 방향과 기류 속도로 정리될 수 있는데, 일반적으로 반도체 FAB은 200 mm, 300 mm 모두 같아서 일정한 값으로 반영할 수 있다.

반도체 FAB 내에서 비말 전파 거리에 영향을 미칠 수 있는 가장 큰 변수는 마스크 착용 여부로 판단되고, 그 외 전파 거리에 영향을 줄 수 있는 변수는 감염자의 기침 유속이나, 이 값은 주변 환경의 변수가 아닌 개인의 변수이므로 실험 평균값인 10.2 m/s로 가정하였다(Lai & Cheng, 2007). 그 외 기류 속도와 기류 방향은 반도체 FAB 관리 parameter로 0.32 m/sec(최소), 0.48 m/sec(최대)로 정의할 수 있고, 기류 방향은 일반적인 기침 방향과 수직인 top-down으로 기침 유속 및 전파 거리에 90도의 방향으로 영향을 준다.

3. 바이러스 수명

SARS-CoV-2 COVID-19 바이러스의 수명은 인체 표면에서 얼마나 오랫동안 살 수 있는지는 알려지지 않았다. 다만 사스와 메르스 등에 관한 연구에 의하면 이들 바이러스는 금속, 유리, 플라스틱 등의 표면에서 최대 9일 동안 생존한다. 일부 저온에서 최장 28일 동안 살아남을 수 있다는 보고도 있다. 과학저널을 통해 공식 발표되지는 않았지만, 기침으로 공기 중에 나온 비말에 바이러스가 최대 3시간까지 살아있을 수 있다고 말한다(N van Doremalen et al., 2020). 공기의 이동이 없으면 1~5 μ m 크기의 미세한 방울은 수 시간 동안 남아 있을 수 있다.

본 연구에서는 비말을 통한 감염전파만을 다루고 있고, 물체 표면에 부착된 바이러스에 의한 전파를 제외한다면, 공기 중 비말의 바이러스의 수명을 3시간으로 가정할 수 있다. 연구사례에서 상대습도가 높을수록 수명이 급상승할 수 있으나(상대습도 90%일 경우 50% 대비 바이러스 수명은 60~200배 증가), 반도체 FAB은 상대습도를 45 \pm 5%로 유지하기 때문에 바이러스 수명을 늘리는 요인은 없어 공기 중 바이러스 수명은 최장 3시간으로 추정된다.

4. 결론

본 연구의 목적은 반도체 FAB에서의 비말을 통한 바이러스 전파에 대한 예측이다. 바이러스 전파는 일반적

으로 감염원이 피감염자의 호흡기를 통해 전파되는데, 바이러스가 포함된 비말이 감염자의 기침을 통해 직접 전파되는 비말 전파와 감염자의 입에서 나온 비말이 물체에 표면에 묻거나, 감염자의 신체를 통해 물체의 표면에 묻은 바이러스의 접촉으로 인한 접촉전파가 있다. 본 논문에서는 접촉 전파는 제외하고 비말로 인한 전파에 한정하여 반도체 FAB에서의 전파 양상만을 파악하고자 하였다.

이를 위해 일반적인 상황에서의 비말 전파 모델이 필요했고, 자료조사로 시뮬레이션 2가지 사례, 실험 1가지 사례를 통한 결과를 인용하여 감염자의 입을 통해 기침의 형태로 배출된 비말의 분출 속도(평균 10.2 m/s)와 비말의 크기에 따른 전파 거리에는 차이가 있지만, 최악의 조건을 고려한 상황으로 최대전파 거리(0.7~2 m, 기류 0 m/s 조건) 및 습도에 따른 바이러스 수명의 연관성(상대습도 50% 대비 90% 상승 시 60~200배 상승)을 확인할 수 있었다. 또한, 비말은 공기 중 기류의 속도, 방향에 큰 영향을 받는데, 일반적으로 비말 전파 방향으로 기류(바람)가 있으면 전파 가능 최대거리는 3배(6 m 이상)가량 증가할 수 있었다. 전파 거리는 비말 전파 방향으로 부는 기류(풍속), 기침 분출 속도에는 비례하여 비말 전파 거리를 증가시키는 요소로 비말의 크기는 크기가 클수록 중력의 영향을 받아 전파 거리를 감소시키는 요소로 판단되었다.

반도체 FAB은 제품의 품질이 엄격하게 관리되고 있고, 품질에 영향을 주는 먼지, 화학물질을 비롯해 오염물질을 관리하고 있다. 특히 0.1 μ m 크기의 먼지도 용납할 수 없도록 청정도를 유지하고 있는데, 이를 위해 방진복을 비롯하여 방진 마스크를 필수적으로 착용하고 있다. 반도체 FAB에서의 비말 전파양상을 예측하기 위해서는 일반적인 FAB 내 기본 복장인 마스크 착용 시 비말 전파 모델이 필요하고, 이를 통해 마스크 착용 시 비말 차단율과 최대전파 거리를 예측하고자 했다. 대표적인 마스크의 차단율은 PFE(particle filtration efficiency), BFE(bacterial filtration efficiency), VEF(viral filtration efficiency)가 있고, 이중 바이러스 차단율은 VEF로 대변될 수 있다. 일반적으로 차단 효과가 떨어지는 수술용 마스크도, VEF가 90% 이상 되고, 반도체 FAB에서 사용하는 마스크의 BEF도 90% 이상인 것으로 추정해 봤을 때, 바이러스 차단율도 90% 수준일 것으로 가정하였다. 마스크 착용 시 비말 최대전파 거리는 시뮬레이션 결과를 인용하여 확인하였

는데, 총 5초간의 시뮬레이션 결과 마스크 미착용 대비 마스크 착용 시 전파 거리가 절반으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. (마스크 미착용: 70 cm, 마스크 착용: 35 cm)

클린룸(FAB) 이라고 불리는 공간으로 관리되는 반도체 FAB은 항온, 항습을 비롯 차압, 청정도, 기류 등이 엄격히 관리된다. 이는 감염병 차단의 목적은 아니나, 품질관리를 위해 상시 모니터링되고 있고 이는 바이러스 전파를 효과적으로 막을 수 있는 공간이다. 반도체 FAB의 비말을 통한 바이러스 전파양상을 알기 위해서는 위에서 정리한 일반적인 상황에서의 전파 모델에 FAB관리 환경을 접목하여 판단해야만 했다. 현재 반도체 생산라인은 제품인 Wafer의 Size에 따라 200 mm, 300 mm FAB으로 구분되고, 일반적으로 300 mm FAB이 최신형 FAB이라고 할 수 있다. 두 FAB은 거의 모든 Parameter의 관리기준이 같으나, 청정도(200 mm: Class1, 300 mm: Class1000) 및 FA flow ratio (200 mm: 8~10%, 300 mm: 20~25%)라고 하는 공기 희석 비율에 일부 차이가 있었다. FAB은 공간의 목적에 맞게 깨끗한 공간을 유지하기 위해 외부로부터의 먼지를 비롯한 오염물질을 근원적으로 차단하기 위해 룸 내부의 압력을 양압으로 유지하고 있고, particle이라고 불리는 주요 불량원인에 대응하기 위해 top-down(0.32~0.48 m/sec) 기류를 유지하여 particle을 grating이라고 불리는 구멍이 난 바닥을 통해 FAB 하부층(CSF:clean sub fab)으로 RA(return air) 보내고, 항온, 항습 및 오염물질이 제거된 FA와 섞여 DCC(dry cooling coil)에서 필요한 온도로 제어되어 supply plenum을 거쳐, 상부의 ULPA filter를 통해 공급되게 된다. 이를 통해 FAB에 공급되는 공기는 순환하게 되며, 200 mm, 300 mm 라인 모두 60~80 회/hr 순환되며 ULPA filter(차단 입자: 0.1 μ m, COVID-19 바이러스: 0.1~0.2 μ m)로 바이러스를 비롯한 오염물질은 제거된다.

선행연구 분석 결과, 비말 전파 거리는 기류에 영향을 크게 받으며, 기류가 없으면 0.7~2 m까지 전파할 수 있고, 전파 방향으로 바람이 불 때 전파 거리가 3배 이상 증가했다. 바이러스의 수명은 상대습도에 영향을 받으며, 상대습도가 높아지면 바이러스의 수명은 최대 200배가량 증가할 수 있었다. 마스크를 착용할 경우, 비말 전파 차단율은 90% 이상으로 추측할 수 있었고, 전파 거리는 반 이하로 줄어들어 0.35~1 m로 예측되

었다 (Forouzandeh et al., 2021).

반도체 FAB(클린룸)은 감염병 예방을 목적으로 만들어지지 않았으나, 품질관리를 위해 먼지(particle) 제거를 목적으로 청정도를 유지하며 이를 위해 양압 조건, 환기계수, 희석율, top-down 기류, ULPA filter를 통해 부유할 수 있는 오염물질을 제거하고 있다. 선행 연구 분석 결과를 토대로 반도체 FAB의 관리 현황을 반영하여 비말 전파 총량(농도), 전파 거리, 바이러스 수명을 예측한 결과 반도체 FAB에서의 비말 전파 총량(농도)은 마스크 착용 여부가 가장 크게 영향을 미치며 라인 공기 희석율(FA flow ratio)이 일부 영향을 미치나 총량(농도)은 최대값과 최소값이 12.26배의 농도 차이를 보였다. 단, 해당 농도 차이도 FAB 환기 계수(60~80 회/hr)에 따라 천장의 ULPA Filter를 1분 이내로 거치며 99.9999% 제거되어 농도는 백만 분의 1 수준으로 현저히 낮아진다. 바이러스 전파 거리도 top-down 기류(0.32~0.48 m/s)로 인해 마스크 착용 시 최대 0.35~1 m 이내로 전파되며, 바이러스 수명을 증가시킬 습도 조건을 45(±5)%로 유지하므로, 공기 중 최대 3시간으로 수명을 한정할 수 있었다. 결과적으로 반도체 FAB은 클린룸이라는 특수 환경 조건에 의해 바이러스 전파를 차단하기에 효과적인 공간으로 판단된다.

IV. 결 론

반도체 산업은 대한민국 경제에 큰 비율을 차지하고 있어 감염병으로 인한 라인 가동 중지가 발생하면 공급 차질로 인한 국가 경쟁력 약화로 이어질 수 있다. 본 연구의 목적은 반도체 FAB(클린룸)에서의 비말 전파에 의한 감염병 가능성 예측을 통해 COVID-19와 같은 신규 감염병이 발병할 경우 비말 전파를 통한 감염병 확산에 대한 안전성을 검증하는 것이다. 이를 위해 일반적인 상황과 마스크 착용 상황의 비말 전파양상을 선행 연구 분석(시뮬레이션, 비말 전파 실험사례)을 통해 추론하였다. 본 연구를 통해 반도체 FAB(클린룸)은 비말 전파로 인한 감염병을 예방하기에 효과적인 공간임을 증명하고자 하였으며, 연구 결과 FAB 내 감염자가 발생하더라도 감염자의 1 m 거리를 유지할 경우 전파감염 확률은 매우 적어 건물 폐쇄와 같은 방역 조치는 불필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(NRF-2020R1A6A1A03042742).

References

- Anfinrud P, Stadnytskyi V, Bax CE, Bax A. (2020) Droplets and Aerosols in the Transmission of SARS-CoV-2. *New England Journal of Medicine* 2020;382:2063
- Choi KM, Lee JE, Cho KY, Kim KS, Cho SH. Clean room Structure, air conditioning and contamination control systems. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 2015;25(2):202-210
- Dbouk T & Drikakis D. On Coughing and Airborne Droplet Transmission to Humans. *Physics of Fluids* 2020a; 32:1-10
- Dbouk T & Drikakis D. On respiratory droplets and face masks. *Physics of Fluids* 2020b;32:11-17
- Doremalen V et al. Aerosol and surface stability of HCoV-19 (SARS-CoV-2) compared to SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*. 2020;382: 1564-1567
- Doremalen V et al. Aerosol and surface stability of HCoV-19 (SARS-CoV-2) compared to SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*. DOI: 10.1056/NEJMc2004973 (2020)
- Forouzandeh P, O'Dowd K, Pillai SC. Face mask and respirators in the fight against the COVID-19 pandemic: An overview of the standards and testing methods. *Safety Science* 2021;133:2-7
- Lai ACK, Cheng YC. Study of expiratory droplet dispersion and transport using a new Eulerian modeling approach. *Atmospheric Environment* 2007;35: 7473-7484
- Lu H, Stratton CW, Tang YW. Outbreak of pneumonia of unknown etiology in Wuhan, China: The mystery and the miracle. *Journal of medical virology* 2020;92(4): 401-406
- Rodriguez-Urrego D. Air quality during the COVID-19: PM_{2.5} analysis in the 50 most polluted capital cities in the world. *Environmental Pollution* 2020;115042

<저자정보>

오건환(연구원), 김기연(교수)