

클린룸 국소환경에서 이물의 위험을 평가

노 광 철, 오 명 도*†

연세대학교 기계정보공학부, 서울시립대학교 기계정보공학과*

Evaluation of Risk rates for Foreign Materials in a Minienvironment

Kwang-Chul Noh and Myung-Do Oh*†

School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

*Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

ABSTRACT: In this study, the risk rates of different contamination sources of the Foreign material in a minienvironment were analyzed through CFD simulation. From the results, the ambient contamination sources mainly affect wafers in the FOUP, whereas the internal contamination sources mainly affect wafers laid on the robot arm in the minienvironment. And the purging plenum system is very useful in protecting the wafers in the FOUP from Foreign materials transferred from the FFU. However, this system is unable to protect the wafers on the robot arm from internal Foreign materials and the wafers in the FOUP from sources of the interface between the FOUP and the minienvironment.

Key words: Cleanroom(클린룸), Contamination Control(오염제어), Minienvironment(국소환경), Particle(입자), Risk Rate(위험율)

1. 서 론

클린룸에서 사용되고 있는 국소환경은 제품의 생산수율을 증대시킬 수 있고 비용절감, 작업자의 만족도와 생산성을 향상시킬 수 있는 이점을 갖고 있다. 이러한 이유로 클린룸 공정에서는 제품의 불량률과 직접적으로 연관이 되는 주요영역(critical zone)을 보호하기 위하여 국소환경의 사용이 점차 증가되고 있는 추세이다.

일반적인 국소환경의 평가는 교차오염(cross contamination)과 에너지 소비를 줄이는 관점에서 순환영역(recirculation zone) 크기와 압력분포

에 의해 이루어 졌다.⁽¹⁻⁵⁾

현재까지는 국소환경에서 이물의 농도에 대한 정성적인 평가로서 기류와 압력분포에 대한 연구가 대부분이었고 오염원의 위치가 제품의 불량에 얼마나 영향을 미치는 지에 대한 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 CFD를 이용하여 오염원의 위치가 제품의 불량에 미치는 영향을 평가할 수 있는 위험율(risk rate)을 새롭게 정의하였고 이를 이용하여 제품의 수율향상을 위하여 국소환경 시스템이 변화되는 경우 오염원의 위치가 주요영역에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 위험 평가(risk assessment)

국소환경에서 위험평가를 위하여 Whyte⁽⁶⁾가 위험요인(risk factor)을 선택하고 점수를 부가하

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2756; fax: +82-2-2210-5575

E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

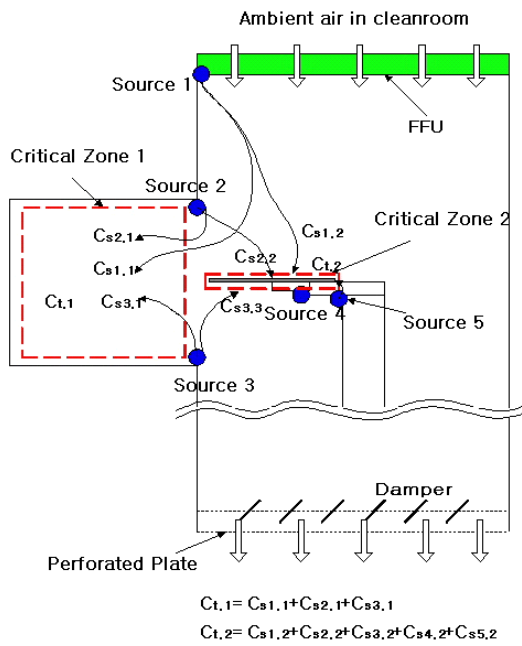


Fig. 1 Description of critical zone and the linear summation of foreign materials

여 평가하는 방법을 제시하였으나 이는 수학적으로 정확하지 않을 뿐만 아니라 입력정보의 불확실성은 정확한 예측을 방해할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이물질이 유동에 대한 피동요소 (passive component)라는 것을 이용하여 위험율을 새롭게 정의하였다. 국소환경에서 유동형태가 결정되었다고 가정하자. 그렇다면 각 오염원에서

발생된 이물질은 유동을 따라 확산되어 주요영역에서 이물질의 총 농도에 기여하게 된다. 이때 주요영역에서 이물질의 총 농도는 각 오염원에서 발생되어 주요영역으로 전달된 이물질 농도의 선형합 (linear summation)이어야 한다. 따라서 각 오염원의 위험율은 주요영역에서 이물질의 총 농도에 대한 각 오염원에서 주요영역으로 유입되는 이물질의 개별농도의 비로서 식(1)과 같이 정의될 수 있다.

$$C_{t,j} = \sum_i C_{si,j} = C_{s1,j} + C_{s2,j} + C_{s3,j} + \dots \quad (1)$$

$$Risk\ rate = \frac{C_{si,j}}{C_{t,j}} \quad (2)$$

여기서, C는 이물질의 농도(part/m³)이고, 하첨자 t는 총합을 의미하며, S는 오염원, i는 오염원 위치, j는 주요영역의 위치를 나타낸다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 국소환경에서 2개의 주요영역과 5개의 오염원이 존재한다고 가정하자. 정의에 의해서 주요영역 1에서 첫 번째 오염원의 위험율은 C_{S1,1}/C_{t,1}이 되고, 주요영역 2에서 첫 번째 오염원의 위험율은 C_{S1,2}/C_{t,2}가 된다. 다른 주요영역에서의 위험율도 동일한 방법으로 구할 수 있다. 국소환경에서 주요영역은 웨이퍼 상부의 국소체적 뿐만 아니라 하부의 국소체적도 포함된다. 이는 웨이퍼의 하부로 유입된 입자나 가스들이 웨이퍼 상부로 순환되어 웨이퍼를 손상시킬 수 있기 때

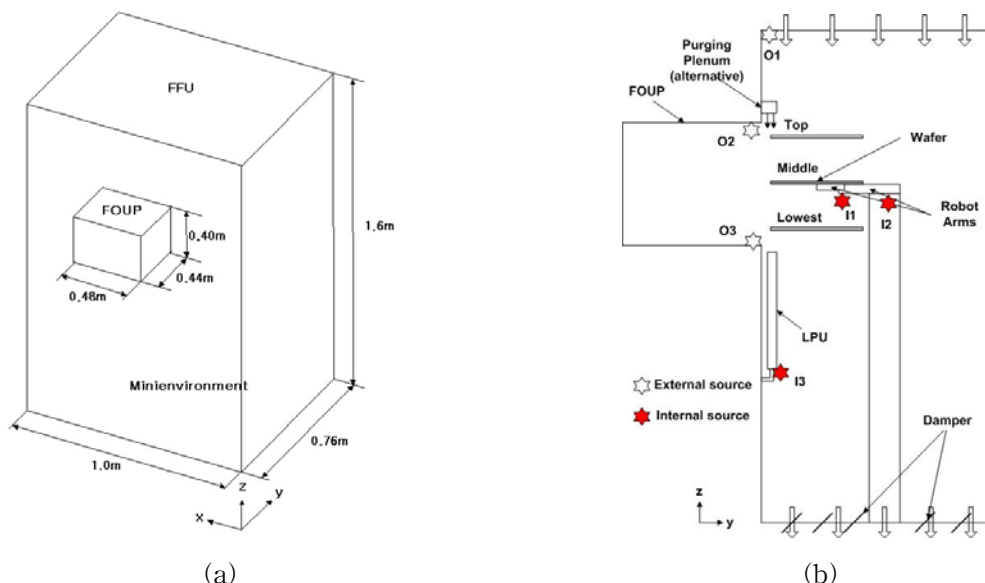


Fig. 2 Schematic design of the minienvironment system and positions of contamination source

Table 1 six different cases to evaluate the risk rate

Case	Purging plenum	Inlet velocity (m/s)	Wafer position
1	No	0.45	Top
2	No	0.45	Middle
3	No	0.45	Lowest
4	Yes	0.45	Top
5	Yes	0.45	Middle
6	Yes	0.45	Lowest

문이다.

3. 해석모델

Fig. 2는 본 연구에서 고려한 국소환경의 개념도이다. 크기는 1.00m (L)×0.76m(D)×1.60m(H)이다. 그리고 국소환경 외면에 설치된 FOUP의 크기는 0.48m(L)×0.44m(D)×0.40m(H)이다. 로봇 구조물은 웨이퍼의 운송을 위해 국소환경 중앙부에 설치되었다. 청정한 공기는 상부에 설치된 FFU를 통과한 후 국소환경으로 공급되고 댐퍼와 다공패널을 거쳐 외부로 배출된다.

주요영역으로 FOUP 내부체적과 웨이퍼의 상하부가 선정하였다. 오염원에 대한 위험율을 평가하기 위해서 Table 1과 같이 6가지의 다른 경우가 고려되어 졌다. 그리고 웨이퍼의 위치에 따른 위험율 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 2와 같이 높이에 따라 3개의 웨이퍼 위치가 고려되었다. 오염원은 Fig. 2에서와 같이 외부 3곳(O1~O3), 내부 3곳(I1~I3)으로 총 6곳이 선정되었다.

산소와 수분으로 웨이퍼를 보호하기 위하여 사용되는 정화플레넘(purging plenum)⁽⁷⁾이 FOUP에서 0.5m 상부에 설치되었다. 정화플레넘의 크기는 0.48m(L)×0.03m(D)×0.04m(H)이다.

4. CFD 시뮬레이션

클린룸 국소환경에서의 유동은 3차원 정상상태 비압축성으로 가정된다. CFD계산에 있어서 유동 및 농도는 식(4)에 표현된 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 계산하였고 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 이 사용되었다.^(2,5,8)

$$\text{div}(\rho V\Phi - \Gamma_{\phi,eff} \text{grad} \Phi) = S_{\phi} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 공기밀도(kg/m³), $\Gamma_{\phi,eff}$ 는 유효확산 계수(kg/m·s), U 는 유속벡터(m/s), S 는 방정식 특성에 기인한 생성항, ϕ 는 각 방향의 속도, 난류에너지, 난류소산에너지, 가스농도를 나타낸다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌^(8,9)에 기술되어 있다.

FFU에서의 유속은 0.45m/s이고, 정화플레넘으로부터 토출되는 불활성가스의 속도는 0.6m/s이다. 난류에너지의 유입조건을 지정하기 위하여 난류강도를 5~10%로 채택하였다. 이는 유입구의 난류강도가 클린룸 해석 영역에 큰 영향을 미치지 않는다는 이전의 연구결과⁽¹⁰⁾에 기인한다. 유입구에서의 난류에너지 소산율은 $\epsilon=C_{\mu}^{3/4}k^{3/2}/l$ 로 선정하였고 혼합길이(l)는 유입구 수력직경의 7%로 선정하였다.⁽⁸⁾ 그리고 6개의 오염원에서 발생하는 이물의 농도는 10,000ppm으로 가정하여 해석을 수행하였다.

식(4)의 지배방정식은 SIMPLE 알고리즘⁽⁹⁾을 적용하고 상용 CFD코드인 STAR-CD를 사용하여 계산이 수행되었다. 그리고 대류항에 대한 계산을 위하여 2차의 상류차분도식(second order upwind scheme)을 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 외부오염원 위험율

Table 2는 주요영역에서 외부오염원에 의한 평균농도와 계산된 위험율의 결과를 보여주고 있다. 정화플레넘이 사용되지 않은 경우 오염원에 대한 위험율의 순서는 O2>O1>O3이고, 오염원 O1과 O2가 주요영역에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, 웨이퍼가 가장 낮은 위치에 있는 경우(case 3)에는 오염원 O3가 로봇팔 위에 놓인 웨이퍼에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 웨이퍼가 FOUP으로부터 빠져 나오는 기류의 흐름을 방해하여 O3에서 발생된 이물의 배출을 방해하고 웨이퍼의 하단으로 이들을 이동시키기 때문이다. 그리고 FOUP에서의 이물 농도가 웨이퍼주변에서의 이물농도보다 큰 것으로 나타나서 FOUP이 보다 중요한 주요영역임을 알 수 있었다. 일반적으로 웨이퍼가 FOUP에 머

Table 2 The average concentrations of foreign material and the risk rates for external sources

Case	Source	FOUP		Wafer at the top	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
1	O1	54.2	41.0	21.2	35.5
	O2	75.5	57.1	28.3	47.3
	O3	2.5	1.9	10.2	17.1
	Total	132.2	100.0	59.7	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the middle	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
2	O1	55.8	40.8	18.0	41.2
	O2	80.1	58.5	18.9	43.3
	O3	0.9	0.7	6.8	15.6
	Total	136.8	100.0	43.6	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the lowest	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
3	O1	67.6	30.0	22.6	21.3
	O2	154.5	68.6	35.9	33.8
	O3	3.0	1.3	47.5	44.8
	Total	225.1	100.0	106.0	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the top	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
4	O1	18.2	16.3	15.8	46.1
	O2	74.9	66.8	14.9	43.4
	O3	19.0	17.0	3.6	10.4
	Total	112.1	100.0	34.3	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the middle	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
5	O1	21.3	16.7	15.9	52.7
	O2	101.4	79.5	10.6	35.1
	O3	4.8	3.8	3.7	12.2
	Total	127.5	100.0	30.2	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the lowest	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
6	O1	24.5	11.8	21.3	45.7
	O2	166.3	79.9	19.0	40.8
	O3	17.2	8.3	6.3	13.5
	Total	208.1	100.0	46.7	100.0

무르는 시간이 길기 때문에 이물이 국소환경 외부에서 유입되는 경우에는 O1과 O2가 주요 오염 제어 대상임을 알 수 있었다.

정화플레넘이 사용된 경우, 주요영역에서의 오염농도는 정화플레넘이 사용되지 않은 경우보다 낮아지는 것으로 나타났다. FOUP에서 오염원의 위험을 순위는 O2>O1>O3이고, 로봇팔 위에 있는 웨이퍼에서 위험을 순위는 O1>O2>O3로 나타났다. 정화플레넘이 사용되지 않은 경우와 비교를 하였을 때, O1에서의 위험율이 크게 감소하

는 것을 확인할 수 있었고 정화플레넘의 사용은 산소와 수분이 FOUP으로 침투하는 것을 방해하여 웨이퍼를 보호할 수 있다는 이전의 연구결과와 잘 일치함을 보여준다.⁽⁹⁾ 그러나, 정화플레넘의 사용으로 인하여 O2와 O3의 위험율은 반대로 증가하는 경향을 보였고 이는 불량률을 증가시키는 원인이 된다. 이러한 결과로부터 정화플레넘과 같은 오염제어를 위한 방법이 생산수율에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있기 때문에 오염위치에 따른 위험율을 확인하는 것이 중요한 작업이 될

Table 3 The average concentrations of foreign material and the risk rates for internal sources

Case	Source	FOUP		Wafer at the top	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
1	I1	1.9874	75.1	21.865	55.3
	I2	0.6547	24.7	17.617	44.6
	I3	0.0051	0.2	0.052	0.1
	Total	2.6471	100.0	39.534	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the middle	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
2	I1	0.00314	87.6	11.456	61.8
	I2	0.00044	12.3	7.091	38.2
	I3	0.00000	0.0	0.001	0.0
	Total	0.00358	100.0	18.548	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the lowest	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
3	I1	0.00031	21.5	0.15049	24.3
	I2	0.00032	22.8	0.12238	19.7
	I3	0.00079	55.7	0.34728	56.0
	Total	0.0	100.0	0.6	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the top	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
4	I1	4.0283	66.2	16.155	46.3
	I2	2.0591	33.8	18.756	53.7
	I3	0.0000	0.0	0.000	0.0
	Total	6.0874	100.0	34.911	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the middle	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
5	I1	0.2559	71.3	13.139	48.8
	I2	0.1030	28.7	13.756	51.1
	I3	0.0001	0.0	0.007	0.0
	Total	0.3589	100.0	26.902	100.0

Case	Source	FOUP		Wafer at the lowest	
		Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)	Ave. conc. (ppm)	Risk rate (%)
6	I1	0.0012	7.3	0.1438	12.2
	I2	0.0013	7.6	0.1098	9.3
	I3	0.0141	85.0	0.9288	78.6
	Total	0.0166	100.0	1.1823	100.0

것으로 판단된다.

5.2 내부오염원 위험율

Table 3은 주요영역에서 외부오염원에 의한 평균농도와 계산된 위험율의 결과를 보여주고 있다. 모든 경우에 있어서 오염농도는 FOUP보다 로봇팔 위에 놓인 웨이퍼 주변에서 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 로봇의 접합부나 구동부에서 발생한 이물이 국소환경에 위치한 웨이퍼에

큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 또한 웨이퍼에 손상을 입히는 90%이상의 이물 오염원이 마찰 구동부와 연관이 있다는 이전의 연구결과⁽⁸⁾로부터 내부오염원에 대한 해석이 매우 중요하다고 판단된다.

case 3과 6을 제외한 모든 경우에 있어서 오염원 I1이 가장 큰 영향을 미치는 내부오염원이었다. 그러나 case 3과 6에서는 오염원 I3가 가장 지배적인 오염원이었다. 이는 LPU와 로봇 지지대 사이에서 형성된 와류가 오염물을 상승시켜

웨이퍼의 하단을 오염시키기 때문이다. 그리고 국소환경에서 웨이퍼가 높게 위치할수록 이물의 평균농도는 증가하는 경향을 나타냈다. 이로부터 웨이퍼에서의 위험율은 웨이퍼의 위치가 높아짐에 따라 점차 증가됨을 알 수 있었다. 정화플레넘이 없는 경우 전체 오염원에 대한 첫 번째 웨이퍼의 위험율은 67.4%로 계산되어 맨 위에 위치한 웨이퍼가 가장 많이 오염될 수 있다는 것을 예상할 수 있다. 정화플레넘이 설치된 경우에는 웨이퍼가 중간과 가장 낮은 곳에 위치할 때 오염원 I2의 위험율이 정화플레넘이 설치되지 않은 경우에는 비해 증가된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 주요 오염원이 I2인 경우 정화플레넘의 사용이 제품의 생산수율에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 결과이다. 따라서 국소환경에서 경계조건 등의 변화가 있을 때에는 오염 위치에 따른 위험율을 측정하는 것이 중요한 작업이라는 것을 재차 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 국소환경에 대한 CFD 시뮬레이션을 통하여 여러 가지 오염원에 대한 위험율을 조사하였고 이를 기초로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 국소환경을 평가하기 위하여 본 연구에서 제안된 위험율 평가방법은 오염원의 위험정도를 평가하기에 적합한 것으로 판단되었다.

(2) 주요영역에서 오염농도와 위험율의 결과로부터 외부오염원에서 유입된 오염원들은 주로 FOUP에 위치한 웨이퍼에 영향을 미치는 반면, 로봇 구동부와 같은 내부오염원에서 발진된 이물은 로봇팔에 놓인 웨이퍼에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(3) FOUP에 위치한 웨이퍼를 보호하기 위해 사용되는 정화플레넘은 FFU를 통해 유입되는 이물을 대해 유용하지만 주요오염원이 내부에 있는 경우에는 제품의 생산수율에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. Xu, T., 2006, A Study on the Operation Performance of a Minienvironment System, *Journal of the IEST*, Vol. 49, pp. 63-71
2. Tannous, A. G., 1997, Optimization of a Minienvironment Design Using Computational Fluid Dynamics, *Journal of the IEST*, Vol. 40, pp. 29-34.
3. Schliesser, J. and Staudt-Fischbach P., 1999, Minienvironments and Thermal Effects, *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, IEEE, pp. 432-439.
4. Zhu, S. B., 2002, Study of Airborne Molecular Contamination in Minienvironments. *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, IEEE, pp. 309-313.
5. Shiu, H. R., Huang, H. Y., Chen, S. L., and Ke, M. T., 2003, Numerical Simulation for Air Flow in Minienvironment and SMIF Enclosure, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 16, pp. 60-67.
6. Whyte, W., 2001, *Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation*, John Wiley and Sons, Chichester.
7. Keyhani, K., Abu-Zaid, S., and Zhang H., 2004, Purging FOUPs that Open to Front-end Minienvironments using an Inert-gas Curtain, *Micromagazine*, September.
8. Noh, K. C., Lee, H. C., Park, J. I. and Oh, M. D., 2007, Evaluation and Prediction of Cleanliness Level in the Mini-environment System using Local Mean Air-age, *Transaction of KSME*, Vol. 31, No. 5, pp. 457-466.
9. Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington DC.