

# 입자 성분분석을 통한 클린룸 오염제어

이현철\*·김대영\*·이성훈\*·노광철†·오명도\*\*

## Cleanroom Contamination Control using Particle Composition Analysis

Hyeon-Cheol Lee, Dae-Young Kim, Seong-Hun Lee, Kwang-Chul Noh and Myung-Do Oh

**Key Words:** Cleanroom(클린룸), Contamination Control(오염제어), Particle(입자), Particle Composition Analysis(입자성분분석), Yield Enhancement(수율개선)

### Abstract

The practical studies on the method of particle contamination control for yield enhancement in the cleanroom were carried out. The method of the contamination control was considered, which is composed of data collection, data analysis, improvement action, verification, and implement control. The composition analysis for data collection and data analysis was used in the cellular phone module packaging lines. And this method was evaluated by the variation of yield loss between before and after improvement action. In case that the composition analysis was applied, the critical sources were selected and yield loss reduction through improvement actions was also investigated. From these results, it is concluded that the composition analysis is effective solutions for particle contamination control in the cleanroom.

### 1. 서론

클린룸에서의 오염원은 크게 제조설비, 사람, 공정, 환경, 원부자재 등으로 구분해 볼 수 있으며 그 비율은 제품과 제조공정에 따라 달라지긴 하지만 제어대상의 크기(critical defect size)가 감소함에 따라 원부자재와 제조설비의 비율이 증가되는 것으로 보고되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 오염원들을 효과적으로 제어하기 위하여 오염원뿐만 아니라 오염수준과 오염공정을 분석하고 생산수율을 개선하기 위한 방법들이 제시되고 있다.

입자에 의한 결함을 감소시키기 위한 오염제어 방법으로는 식품제조산업에서 오염을 막기 위해서

사용하는 위해요소중점관리기준(hazard analysis and critical control point, HACCP)을 클린룸 제조공정에 적합하게 변경하여 적용하는 것이 제안되었다.<sup>(2)</sup> 또한 Mori 등<sup>(3)</sup>은 반도체 제조공정에서 입자오염으로 인한 불량률을 감소시키기 위하여 방법론을 제안하였고 실험을 통하여 이를 증명하였다. Zhou 등<sup>(4)</sup>과 Tsunoda 등<sup>(5)</sup>은 일정 크기의 입자가 제품에 침착되면 불량을 일으키게 되는 임계면적(critical area)과 불량가능성(failure probability)에 대한 분석을 통하여 생산수율을 예측하였고 공정별로 불량손실을 계산하는 연구를 수행하였다. Papadopoulos 등<sup>(6)</sup>은 불량트리(fault tree)의 합성과 분해기법을 도입하여 전통적인 FMEA 기법의 단점을 개선하였고 그 적용범위를 확장하는 성과를 이루었다. 그리고 생산수율 향상을 위한 다양한 시험방법들이 제안되었다.<sup>(7-9)</sup>

본 연구에서는 반도체 제조라인에 비해 청정도가 낮고 다소 단순한 핸드폰 모듈 제조라인에서 불량원인을 분석하고 입자오염제어를 할 수 있는

† 회원, 서울시립대학교 산업기술연구소

E-mail : draco@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2547 FAX : (02)2248-5110

\* 삼성전기 생산기술연구소 MCC TG

\*\* 서울시립대학교 기계정보공학과

방법을 제안하였다. 그리고 제안된 입자성분분석법의 효용성을 증명하기 위한 실험과 개선활동을 수행하였고 생산되는 제품의 직행수율을 추적하여 결과를 분석하였다.

## 2. 입자오염제어 방법론

### 2.1 오염제어 순서

Fig. 1은 클린룸에서 효과적인 오염제어를 위한 순서도를 보여주고 있다. 1차 과정에서는 실제 제품이 생산되고 있는 공정에 대해서 수율(또는 불량률) 및 불량모드 등의 데이터를 수집하고 오염제어를 위해 이루어지는 시험 데이터를 획득해야 한다. 오염제어를 위한 시험법에는 참작되는 입자의 개수를 측정하는 PWP(particle per wafer pass)와 같은 방법과 광학적 검사, 성분조사, 부유입자 개수농도 측정 등의 다양한 방법이 존재한다. 이때 시험은 생산되는 제품에 영향을 미치지 않는 적합한 방법을 선정해야만 하고 적합한 방법이 없는 경우에는 불량모드와 결함밀도(defect density)와의 관계를 근사적으로 해석할 수 있는 방안을 모색해야만 한다. 2차 과정에서는 수집된 데이터를 이용하여 각 공정에 대한 파레토(pareto) 분석 등을 수행하고 이를 통하여 불량률 우선순위에 따라 중점관리공정(critical process step) 또는 중점관리요인(critical sources) 등을 선정하게 된다. 3차 과정에서는 각 중점관리공정에서 오염원을 추적하고 오염이 전파되는 과정을 인식한 후, 설비개선 및 오염원 차단 등의 개선활동을 수행한다. 4차 과정에서는 개선활동을 통한 효과를 분석하기 위하여 개선 전과 개선 후의 수율(또는 불량률)을 비교하고 개선활동의 성과를 증명한다. 만약 개선활동을 통하여 불량률이 감소하지 않았다면 그림에서 보는 바와 같이 이전의 2차 또는 3차 과정으로 회귀하여 데이터의 분석을 재수행하거나 다른 개선활동이 행해져야만 한다. 그리고 오염제어를 위한 연구가 수행되고 있는 상태에서 관리대상 입경(critical dimension)이 줄어들거나 제품의 면적이 증가하는 경우에는 개선활동 후의 불량률이 증가할 수도 있기 때문에 이를 항상 고려해야만 한다. 5차 과정은 오염제어에 대한 개선활동의 효과를 극대화시키기 위한 것으로서 새로운 규정을 정하고 오염제어에 대한 교육을 실시한다.

이후에 설명하는 오염제어 방법은 1차 및 2차 과정에서 수행될 수 있는 2가지의 방법이다. 실제 클린룸 내부 제조라인에서는 다양한 시험 및 검사 기법들이 존재하지만 본 연구에서는 공정수가 상대적으로 많지 않고 제어대상 입자의 크기가 3 $\mu$ m이상인 제품에 대한 오염제어방법을 제시하고자 한다.

### 2.2 성분분석법

성분분석법(composition analysis)은 제품 위에서 불량률의 원인이 되는 입자들을 쉽게 채취할 수 있는 클린룸 제조라인에 대해서만 수행될 수 있는 방법이다. 먼저 생산되는 제품의 불량모드를 분류하고 각 불량모드가 차지하는 불량률을 조사한다. 그리고 각 불량모드에 의해 결함이 발생된

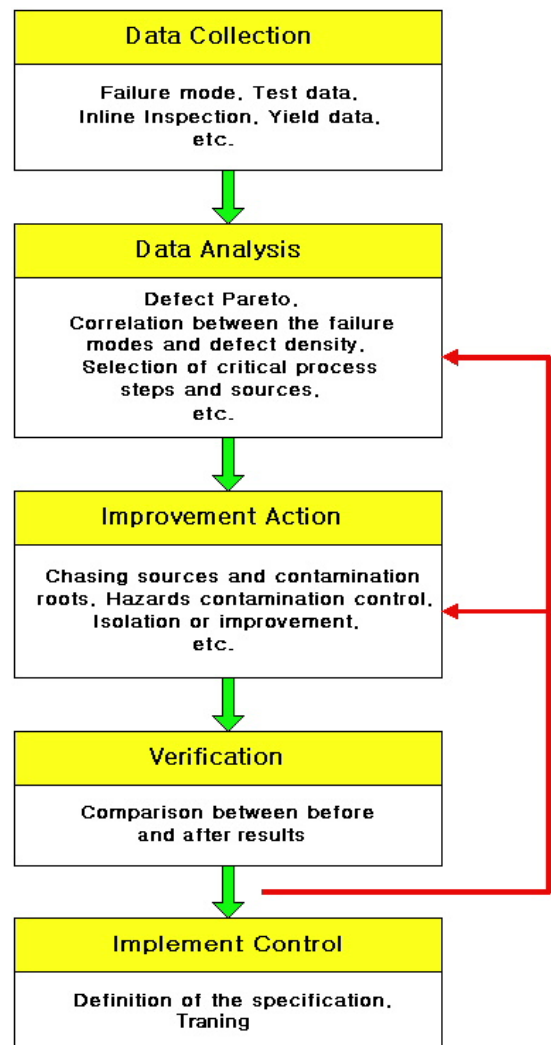


Fig. 1 Flow chart of the contamination control

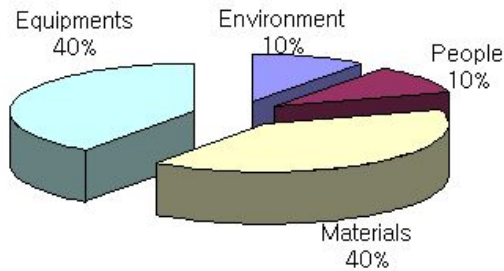


Fig. 2 Main sources of particle contaminants in the cleanroom

제품만을 수집한 후 침착된 입자를 채집하고 성분분석을 수행하여 주요 오염원 또는 중점관리공정이 무엇인가를 찾아가는 방법이다. 1990년대에 클린룸에서 측정된 오염원의 주요 구성과 비율은 Fig. 2에서 보는 바와 같다.<sup>(1)</sup> 오염원은 크게 공기 환경, 작업자, 원부자재, 제조설비 등의 4가지로 나눌 수 있기 때문에 클린룸 제조라인에서 발생하는 수십 가지의 오염원을 4가지로 구분하여 분석하면 오염제어 대상을 쉽게 선택할 수 있다. 최종적으로 오염원의 불량률에 대한 파레토 분석을 실시하여 불량모드별 중점관리공정이나 오염원 우선순위를 추적하고 오염제어를 수행하게 된다.

일반적인 제조공정은 적층이나 조립과 같이 순차적으로 이루어지기 때문에 제품에서 초래되는 불량모드도 제조공정을 따라 순차적으로 형성되는 경우가 많다. 이런 경우에는 Papadopoulos<sup>(6)</sup>가 제안한 불량트리의 합성 및 분해의 개념을 불량모드별 오염원에 적용하면 각 공정별 중점관리요인이 무엇인지를 파악할 수 있다.

### 3. 실험

클린룸 내부에서 핸드폰 모듈 중 하나의 품목을 생산하는 제조라인에 성분분석법을 적용하여 입자 오염제어에 관한 실험을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 모듈 제조라인은 전체 공정이 클린룸 내부에서 이루어지고 있었고 관리대상입경은 5 $\mu$ m였다. 효과적인 오염제어를 위하여 먼저 불량모드를 3가지로 구분하여 각각에 대한 불량률 분석을 수행하였고 각 불량모드에서 결함을 일으키는 입자를 채취하여 그들의 성분을 분석하였다. 성분분석에 사용한 장비는 전자주사현미경,

에너지분산형 분석기와 적외선 분광기이다. 전자주사현미경(field emission scanning electron microscopy, S-4700, Hitachi)과 에너지분산형 분석기(Energy Dispersive Spectroscopy, Vantage, Horiba)는 공정 중에 침착된 입자를 채취하여 무기성 입자의 표면구조 분석 등을 수행하는데 사용하였다. 적외선 분광기(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTS3000 Excalibur Series/UMA600, Varian)는 유기성 입자의 성분을 분석하는데 이용하였다.

검사데이터의 신뢰성을 위하여 각 결함모드별로 수십 개 이상의 불량품에서 입자를 채취하였다. 성분분석 결과로부터 오염원을 크게 4가지로 구분하여 파레토 분석을 수행하였고 제어해야할 오염원 우선순위를 추적하였다. 이후 개선활동을 통하여 작업방법이나 제조설비 등의 개선을 진행하였고 최종적으로 개선 전과 후의 불량률 데이터를 비교하여 성분분석법의 타당성을 검증하였다.

### 4. 결과 및 고찰

핸드폰 모듈을 생산하는 제조라인에서 성분분석법을 적용하여 입자에 대한 오염제어를 수행하기 위해서 먼저 불량모드와 각 모드가 차지하는 불량률을 조사하였고 그 결과를 Table 1에 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 불량모드는 FM1, FM2, FM3의 3가지로 구분할 수 있었고 불량품에서 이들이 차지하는 비율은 각각 40%, 40%, 20%였다. 이후 불량품에 침착되어 결함을 일으키는 것으로 분석된 입자들을 채취하여 각 불량모드별로 무기물과 유기물로 구분하여 성분분석을 수행

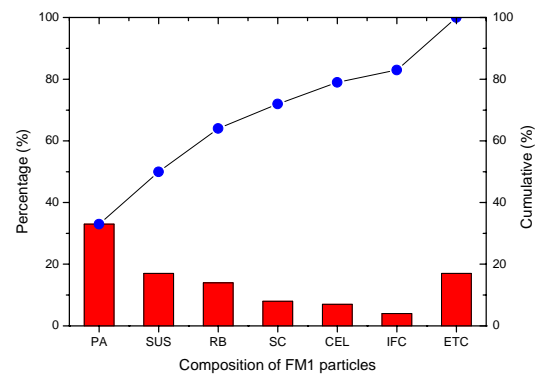


Fig. 3 Composition of particles for a failure mode

**Table 1** Yield loss ratio versus the failure mode

Failure mode	FM1	FM2	FM3
Yield loss ratio (%)	40 ( $a_1$ ) <sup>1)</sup>	40 ( $a_2$ )	20 ( $a_3$ )

1) : Coefficients classified by the failure mode, refer to the equation (1).

**Table 2** Composition of the particles for the failure modes

	Composition of particles (%)						
	PA <sup>1)</sup>	IFC	RB	SC	CEL	SUS/AI	ETC
FM1	33 ( $A_1$ ) <sup>2)</sup>	4 ( $B_1$ )	14 ( $B_2$ )	8 ( $B_3$ )	7 ( $B_4$ )	17 ( $C_1$ )	17 ( $D_1$ )
FM2	41 ( $A_2$ )	18 ( $B_5$ )				16 ( $C_2$ )	25 ( $D_2$ )
FM3	17 ( $A_3$ )	33 ( $B_6$ )			17 ( $B_7$ )	17 ( $C_3$ )	16 ( $D_3$ )

1) : Chemical components, which cannot be revealed due to the company's confidential information.

2) : Index for classifying the sources of contaminants. A, B, C, and D mean people, raw or subsidiary materials, equipments, and unknowns respectively. refer to the equation (1).

**Table 3** Yield loss allocation by failure modes and contaminant sources

	Yield loss ratio (%)				
	People	Materials	Equipments	Unknowns	Total
FM1	13.2	13.2	6.8	6.8	40
FM2	16.4	7.2	6.4	10.0	40
FM3	3.4	10.0	3.4	3.2	20
Total	33.0	30.4	16.6	20	100

하였다. Fig. 3은 불량모드 FM1에서 채취한 입자에 대해 성분을 분석하고 성분별 비율과 누적분포의 결과를 도시한 그래프이다. 가로축 입자들의 성분은 회사의 기밀사항이기 때문에 자세한 표기는 하지 않았다. 불량모드 FM2와 FM3의 입자 성분별 비율은 Table 2에 나와 있다. Table 2에 나와 있는 성분비율은 각 불량모드에서 제어해야할 오염원의 우선순위를 나타내는 것이기 때문에 이들을 추적하여 제거하면 오염제어를 효과적으로 할 수 있다. 성분분석을 수행한 결과, PA는 사람으로부터 발생한 것이었고, IFC, RB, SC, CEL은 원부자재, SUS/AI은 장비에서 발생된 것으로 분류되었다.

불량모드별 불량률과 입자의 성분별 비율을 합성하는 식(1)을 이용하여 본 연구의 대상이 되는 클린룸 제조라인에서 제어해야할 주요 오염원 순

위를 분석하였다.

$$\sum a(\sum A + \sum B + \sum C + \sum D) = 1 \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 불량모드를 나타내고, A, B, C, D는 각각 사람, 원부자재, 장비, 기타의 주요 오염원을 나타내는 기호이다.

Table 3은 식(1)을 이용하여 입자에 의한 불량률을 불량모드와 오염원에 대한 비율로 표현한 결과를 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 제품의 불량에 영향을 미치는 인자를 비율의 순서대로 나열하면 작업자 > 원부자재 > 장비 순이다. 따라서 본 연구를 수행한 제조라인에서 작업자와 원부자재에 관련된 개선활동을 우선적으로 수행하였다. 작업자와 관련된 개선활동은 작업방법, 작업시간, 동선, 기류 등을 개선하는 것이었고,

원부자재와 관련된 개선활동은 원부자재 선정, 동선, 검사방법 등을 개선하는 것이었다. 최종적으로 장비와 관련된 개선은 오염물 발진이 많이 발생하는 공정을 추적하여 차단하거나 기류를 통하여 오염의 확산을 막았으며 로봇 등의 작업경로를 수정하여 이동시에 침착될 수 있는 오염물을 최소화하는 것으로 이루어졌다.

성분분석법은 결함을 일으키는 입자를 채취하여 분석하는데 시간이 오래 걸리기 때문에 개선 후에는 불량품에 대한 모드조사 및 성분분석을 수행하지는 않았다. 하지만 개선활동 후에 최종단에서 검사된 제품의 불량률이 개선활동 전보다 70% 이상 감소하는 것으로 나타나서 개선활동이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있었다. 이로부터 데이터의 수집과 분석을 위해 수행되었던 성분분석법이 입자오염원 기준으로 오염제어를 수행하고 수율을 개선하는데 있어서 타당한 방법임을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

전자장비 생산 클린룸 내부의 제조라인에서 불량원인을 분석하고 입자오염제어를 할 수 있는 방법을 제안하였고 성분분석법을 이용한 실험 및 개선활동을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 클린룸에서 효과적인 입자오염제어를 위한 순서로 데이터 수집, 데이터 분석, 개선활동, 결과증명, 관리의 5개 과정으로 제안하였다.

(2) 클린룸 내부에서 핸드폰 모듈을 생산하는 제조라인에 성분분석법을 적용하여 데이터의 수집 및 분석을 수행하였고 이를 통하여 주요 오염원을 선정하였다. 주요 오염원에 대하여 개선활동을 수행한 후, 불량률이 70% 이상 감소하는 것으로 나타나서 개선활동이 성공적으로 수행되었다는 것을 알 수 있었고 본 연구에서 제안한 성분분석법이 입자오염원 기준으로 오염제어를 수행하기 위한 좋은 방법임을 확인할 수 있었다.

(3) 성분분석법은 결함의 원인계를 쉽게 추적하여 오염제어를 할 수 있는 장점이 있지만 실험에 있어서 많은 시간과 비용을 초래하는 단점이 있다.

## 참고문헌

- (1) Cho, S. J., 2006, VOCs Contamination Control in the Cleanroom, *The 6th Advanced Course for Cleanroom Technology*, Korea Air Cleaning Association, pp. 245-264.
- (2) Whyte, W., 2001, *Cleanroom Technology - Fundamentals of Design, Testing, and Operation*, Johnson Wiley & Sons, England.
- (3) Mori, K., Nam, N., Keeten, D., Burns, R., 1994, Yield Enhancement with Particle Defects Reduction, *Proceedings of IEEE International Workshop on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*, IEEE, pp. 246-253.
- (4) Zhou, C., Ross, R., Vickery, C., Metteer, B., Gross, S., Verret, D., 2002, Yield Prediction Using Critical Area Analysis with Inline Defect Data, *2002 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, IEEE, pp. 82-86.
- (5) Tsunoda, Y., Kanamitsu, K., Iwata, Y., Matsumoto, C., Kamoda, K., Hamamura, Y., Kojika, F., 2005, Integrated Yield Management System using Critical Area Analysis, *Proceedings of IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, IEEE, pp. 233-236.
- (6) Papadopoulos, Y., Parker, D., Grante, C., 2004, Automating the Failure Modes and Effects Analysis of Safety Critical Systems, *Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering*, IEEE, pp. 310-311.
- (7) Guldi, R. L., 2004, In-Line Defect Inspection From a Historical Perspective and Its Implications for Future Integrated Circuit Manufacturing, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, IEEE, Vol. 17, No. 4, pp. 629-640.
- (8) Abuzeid, S., 1995, Total Contamination Control: The Minienvironment Era, *Proceedings of IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, IEEE, pp. 269-276.
- (9) Tokunaga, N., Okamura, S., Sasaki, S., Nakamura, S., Mieno, F., 1995, Particle Count and Analysis by using a Cyclone Particle Count, *Proceedings of IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, IEEE, pp. 175-177.