

클린룸 제조공정에서 공정분할평가법을 이용한 입자오염제어

이현철*·박정일*·이성훈*·노광철†·오명도**

Particle Contamination Control in the Cleanroom Production Line using Partition Check Method

Hyeon-Cheol Lee, Jung-Il Park, Seong-Hun Lee, Kwang-Chul Noh and Myung-Do Oh

Key Words: Cleanroom(클린룸), Contamination Control(오염제어), Particle(입자), 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 proposed, which are composed of data collection, data analysis, improvement action, verification, and implement control. The partition check method for data collection and data analysis was used in the cellular phone module production lines. And this method was evaluated by the variation of yield loss between before and after improvement action. In case that the partition check method was applied, the critical process step was selected and yield loss reduction through improvement actions was observed. From these results, it is concluded that the partition check method is effective solution for particle contamination control in the cleanroom production lines.

1. 서 론

클린룸에서 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.⁽¹⁾ 또한 Mori 등⁽²⁾은 반도체 제조공정에서 입자오염으로 인한 불량률을 감소시키기 위하여 방법론을 제안하였고 실험을 통하여 이를 증명하였다. Zhou 등⁽³⁾과 Tsunoda 등⁽⁴⁾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. Kwon 등⁽⁵⁾과 Wei⁽⁶⁾, Kennedy⁽⁷⁾는 생산제품의 전기적인 시험을 통하여 안정성을 분석하는 불량모드 및 효과 분석(failure mode and effect analysis, FMEA) 방법을 사용하여 불량을 일으키는 공정을 분석하였다. Papadopoulos 등⁽⁸⁾은 불량트리(fault tree)의 합성과 분해기법을 도입하여 전통적인 FMEA 기법의 단점을 개선하였고 그 적용범위를 확장하는 성과를 이루었다.

이전에 수행된 대부분의 연구들은 주로 반도체 제조라인에서 불량원인을 분석하고 생산수율을 향상시키기 위한 방법론들로서 다른 제품이 생산되는 제조라인에 그대로 적용하는 것은 부적합한 면이 있다. 따라서 본 연구에서는 반도체 제조라인에 비해 청정도가 낮고 다소 단순한 제조라인에서 불량원인을 분석하고 입자오염제어를 할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 제안된 방법의 효용성을 증명하기 위한 실험과 개선활동을 수행

† 회원, 서울시립대학교 산업기술연구소

E-mail : draco@uos.ac.kr

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

* 삼성전기 생산기술연구소 MCC TG

** 서울시립대학교 기계정보공학과

하였고 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 침착되는 입자의 개수를 측정하는 PWP(particle per wafer pass)와 같은 방법과 광학적 검사, 성분조사, 부유입자 개수농도 측정 등의 다양한 방법이 존재한

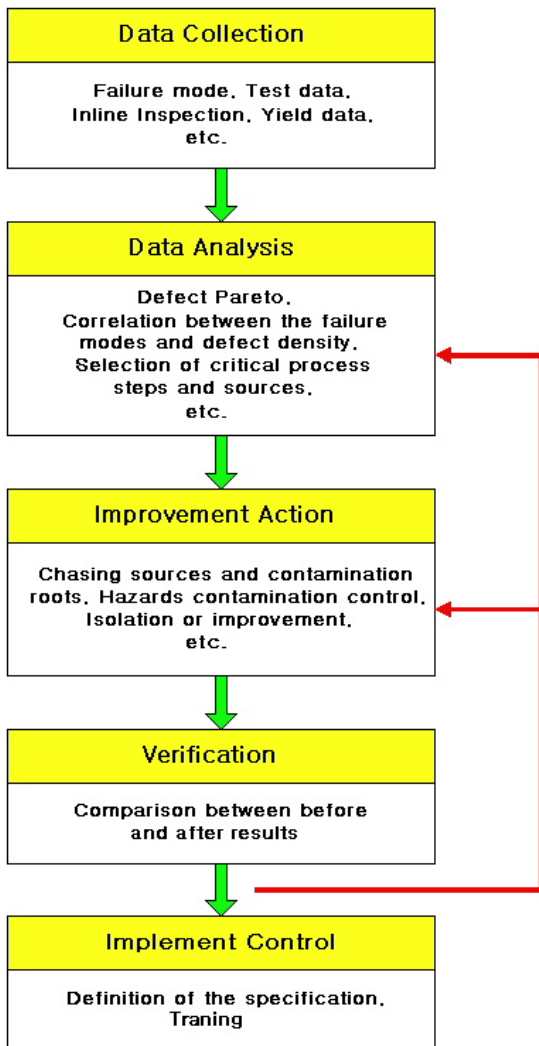


Fig. 1 Flow chart of the contamination control

다. 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)을 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 및 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 μ m이상인 제품에 대한 오염제어방법을 제시하고자 한다.

2.2 공정분할평가법

공정분할평가법(partition check method)은 반도체 제조라인에서 결함밀도(defect density)를 측정하는 PWP 시험과 유사한 방법으로서 생산되는 제품과 동일한 모조품을 제조라인에 투입하여 실제 제품과 동일한 제조과정을 경험하게 하고 모조품(dummy)에 침착되는 입자수를 측정하여 결함밀도 등의 정보를 수집하는 방법이다. Fig. 2는 공정분할평가법(partition check method)의 개념도를 보여주고 있다. 클린룸 내부에서 이루어지는 공정

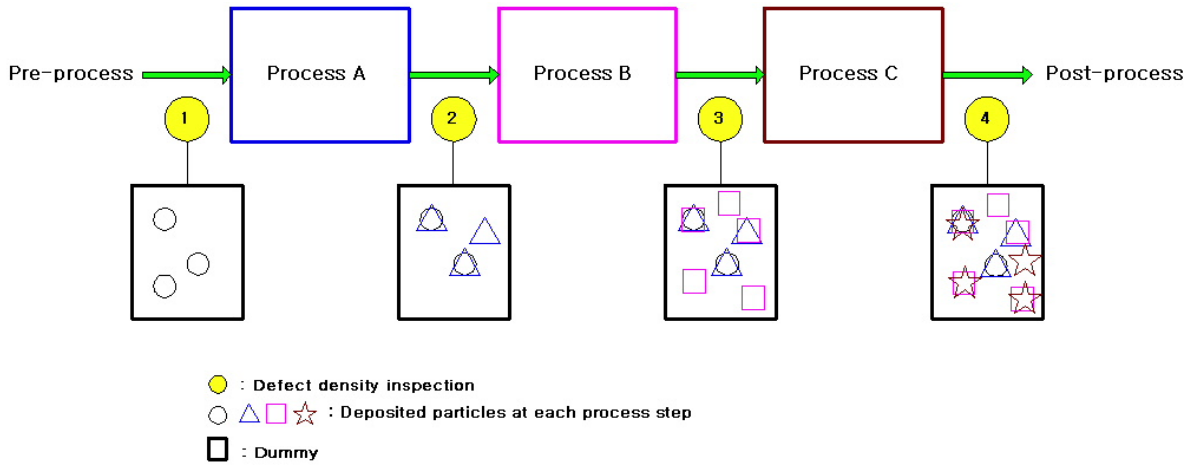


Fig. 2 Schematic diagram of the partition check method

(process)이 A, B, C로 나누어져 있다면, 각 공정의 전단과 후단에서 모조품에 침착된 입자의 개수를 검사하고 각 공정에서 발생하는 결함밀도를 분석한다. 이때, 검사를 수행하는 방법에는 검사자가 직접 검사하는 광학적인 방법을 이용한 수동검사(manual inspection)와 자동으로 패턴을 검사하는 자동검사가 있다. 수동검사는 결함을 일으키는 관리 입자크기가 $3\mu\text{m}$ 이상인 경우에만 사용이 가능하고 가장 비용이 적게 드는 장점이 있다.⁽²⁾ 자동검사에서는 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 입경에 대해서도 정확한 검사가 가능한 장점이 있지만 가격이 상당히 비싸고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.⁽²⁾ 모조품 상부로 침착된 입자 개수를 검사할 때에는 이전의 공정에서 전이된 입자 개수, 현재 공정에서 제거된 입자 개수, 현재 공정에서 새롭게 침착된 입자 개수 등을 명확히 구분해야만 각 공정이 불량률에서 차지하는 비중을 알 수 있다. 이러한 분석으로부터 클린룸 내부에 있는 제조라인에 대해 관리대상의 우선선위와 중점관리공정을 파악할 수 있다.

일반적인 제조라인에서는 Fig. 2에서 보는 것과 같은 대단위 공정과 각 대단위 공정을 구성하는 소단위 공정(sub-process step)으로 구분할 수 있다. 따라서 지금까지 설명한 공정분할평가를 다시 소단위 공정에 대해서도 동일하게 적용할 수 있고 이로부터 오염제어 대상공정에 대한 정밀한 분석을 수행할 수 있게 된다. 이러한 방법은 Papadopoulos 등⁽⁸⁾이 그들의 연구에서 제안한 불량트리의 합성 및 분해의 개념과 유사한 것이다.

공정분할평가법은 실제 제조라인에서 이루어지기 때문에 다른 방법에 비해 실제에 근사한 결과를 도출할 수 있는 장점이 있지만 침착된 입자가 실제로 불량을 일으키는 비율을 알아야만 정량적으로 좋은 결과를 얻을 수 있는 단점이 있다.

3. 실험

클린룸 내부에서 기관을 생산하는 제조라인에 본 연구에서 제안한 공정분할평가법을 적용하여 입자에 대한 오염제어가 가능한지를 평가하는 실험을 수행하였다. 일반적인 기관의 제조라인은 클린룸 외부에서 전처리 작업이 수행된 후 클린룸으로 투입되어 적층, 노광 등의 작업이 이루어지기 때문에 모조품을 전처리 작업이 이루어지는 부분에서 투입하여 실험을 수행하였다. 클린룸 내부의 제조라인에 구성된 대단위 공정의 수는



Fig. 3 Halogen and UV ramp devices for detecting foreign particles on test dummies

Fig. 2에서 보는 바와 같이 3개였고 공정을 분할하여 모조품을 검사하는 위치는 총 4점이었다.

본 연구가 수행된 제조라인에서 생산되는 제품은 면적이 약 0.25m²이고 관리대상입경이 20µm 이상이었기 때문에 모조품을 암실로 운반하여 Fig. 3에서 보여지는 검출용 할로겐램프와 자외선램프를 사용해서 침착된 입자의 개수를 육안으로 측정하였다. 할로겐램프(halogen lamp, SLS-F100HS, Light Bank)는 필름이 도포된 제품 표면에 직광 또는 측광을 조사하여 입자개수를 측정하는데 사용하였고, 자외선램프(ultra violet lamp, PID-SPU35L, Kwangtech)는 금속제품 표면에서 입자개수를 측정하는데 이용하였다.

검사데이터의 신뢰성을 위하여 모조품은 총 9매를 사용하여 실험을 수행하였다. 이때 얻어진 데이터를 이용해서 Fig. 1에 제시된 순서대로 개선을 위한 우선순위 공정과 중점관리공정을 선정하였다. 개선활동을 통하여 제조설비 등의 개선을 진행하였고 개선활동의 성과를 분석하기 위하여 공정분할평가법을 개선 전과 동일하게 재수행하였다. 최종적으로 개선 전과 후의 결과를 비교하여 공정분할평가법의 타당성을 검증하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 1은 기관을 생산하는 제조라인에 있는 4개의 검사점에서 공정분할평가법으로 계측된 입자의 개수를 보여주고 있다. 제시된 입자의 개수는 9개의 모조품에서 측정된 입자의 총수를 의미한다. 표에서 계측입자수(detected particles)는 각 검사점에서 실제로 계측된 입자수를 의미하고 전달입자수(delivered particles)는 검사점 이전 공정에서 전달된 입자의 개수를 나타낸다. 제거입자수

(removed particles)는 검사점 직전 공정에서 제거된 입자의 개수를 의미하고 각 검사점에서 제거입자수와 전달입자수의 합이 이전 검사점에서의 계측입자수와 동일하다. 그리고 각 검사점에서의 새롭게 침착된 입자수(newly deposited particles)는 계측입자수에서 전달입자수의 차로부터 계산되었다.

Table 1의 결과로부터 결함밀도가 큰 공정은 C 공정 > B 공정 > A 공정과 같이 순서대로 나열할 수 있었다. 그리고 A 공정과 C 공정에서는 제거입자수가 많은 것을 확인할 수 있는데 이는 제조라인 중간에 제품을 세정하는 장치가 설치되어 있기 때문이다. 본 연구의 대상이 되는 제조라인에서 제품의 불량모드는 크게 3가지로 구분해 볼 수 있으나 이 중에서 개선활동을 통해 수율향상이 가능한 입자침착에 의한 무작위 불량(random defect)⁽³⁻⁴⁾에 영향을 미치는 모드는 1가지였다. 이 무작위 불량에 미치는 모드의 불량률과 각 공정에서의 침착입자수로부터 Fig. 4와 같이 공정별 불량률 파레토 분석을 수행하였고 이로부터 C 공정이 중점관리대상이라는 것을 알 수 있었다.

개선활동을 극대화시키기 위하여 C 공정에 대한 세부 공정분석을 다시 수행하였고 이 결과로부터 개선항목을 선정하였다. 본 연구에서 구체적으로 적용된 개선활동은 클린룸 내부에서 오염원의 제거 및 차단, 제조장비 내부에서 기류개선 및 발진원 격리, 차압조정 등이었다.

개선활동의 성과를 분석하기 위하여 개선 후 개선 전과 동일한 검사점에서 침착된 입자수를 다시 계측하였다. Fig. 5는 C 공정에 대해서만 개선활동을 수행하였을 때, 개선 전과 후의 총 침착입자수와 불량률의 변화를 보여주고 있다. 본 연구에서 수행한 개선활동을 통하여 침착입자수는 65%가 감소하였고 불량률은 42%가 감소하는

Table 1 Detected, delivered, removed, and deposited particles at each inspection point

Inspection point	Total number of particles (parts)			
	1	2	3	4
Detected particles at each inspection point	82	37	78	763
Delivered particles from all previous steps	82	13	9	17
Removed particles	-	69	28	61
Newly deposited particles	-	24	69	746

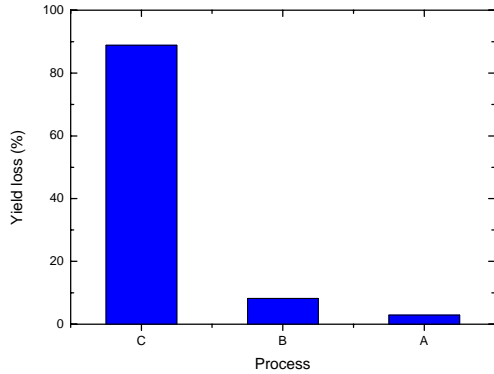


Fig. 4 Yield loss pareto by process step

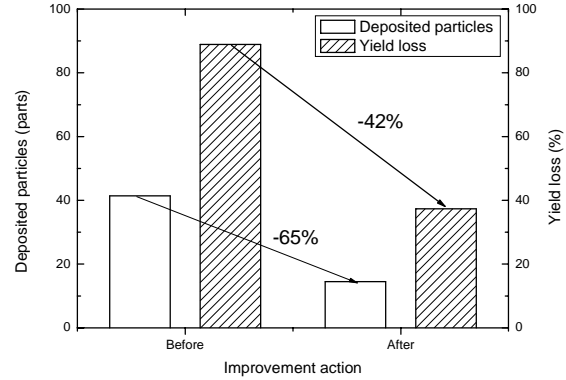


Fig. 5 Variation of deposited particles on a dummy and yield loss through improvement actions

것으로 나타나서 본 연구에서 수행한 자료분석과 개선활동이 성공적으로 수행되었다는 것을 알 수 있었다. 이로부터 공정분할평가법이 클린룸 내부의 제조라인에서 공정기준 입자오염제어를 수행하기 위한 적절한 방법임을 확인할 수 있었다. 그러나 개선 전과 후의 결과에서 보듯이 침착입자수의 감소율에 비해 불량률의 감소율이 적은 이유는 실제에 있어서 제품에 불량을 일으키지 않는 위치에 침착된 입자들은 불량으로 인식되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서의 결과보다 정량적인 비교가 가능한 결과를 도출하기 위해서는 제품이 갖는 임계면적 분석, 시스템수율(systematic yield) 분석, 치명율(killing rate)분석 등과 같은 연구⁽³⁻⁴⁾가 선행되어야만 할 것이다.

5. 결론

전자장비 생산 클린룸 내부의 제조라인에서 불량원인을 분석하고 입자오염제어를 할 수 있는 방법을 제안하였고 공정분할평가법을 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 기판을 생산하는 제조라인에 공정분할평가법을 적용하여 데이터의 수집 및 분석을 수행하였고 중점관리공정을 선정하였다.

중점관리공정에 대하여 개선활동을 수행한 후, 불량률이 42%가 감소하는 것으로 나타나서 개선활동이 성공적으로 수행되었다는 것을 알 수 있었고 본 연구에서 제안한 공정분할평가법이 공정기준 입자오염제어를 수행하기 위한 적절한 방법임을 확인할 수 있었다.

(3) 공정분할평가법은 모조품을 이용하여 비교적 짧은 시간에 중점관리공정을 분석할 수 있는 장점이 있지만 임계면적 분석 등이 수행되어야만 정량적으로 우수한 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Whyte, W., 2001, Cleanroom Technology - Fundamentals of Design, Testing, and Operation, Johnson Wiley & Sons, England.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Kwon, Y. J., Walker, D. M. H., 1995, Contamination Control using Production Test Data, *Proceedings of IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, IEEE, pp. 70-76.
- (6) Wei, B. C., 1991, A Unified Approach to Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA), *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE, pp. 260-271.
- (7) Kennedy, M., 1998, Failure Modes and Effects Analysis of Flip Chip Devices Attached to Printed Wiring Boards (PWB), *Proceedings of IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, IEEE, pp. 232-239.
- (8) 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.