DOU 결점 밀도분포를 이용한 수율 모형 분석
Analysis of Yield Model Using Defect Density Function of DOU(Defects of One Unit)

최 성 운*
Sung-woon Choi*

Abstract

The research proposes the hypergeometric, binomial and Poisson yield models for defective and defect. The paper also presents the hypothesis test, confidence interval and control charts for DPU(Defect Per Unit) and DPO(Defect Per Opportunity). Especially the study considers the analysis of compound Poisson yield models using various DOU density distributions.
Keywords: Yield Models, Defective, Defect, DPU, DPO, Compound Poisson DOU

1. 서 론

경영전략의 제품 포트폴리오 관리(Product Portfolio Management)에서 성장성은 약하지만 수익성은 강한 Cash Cow 제품군은 품질과 원가우위의 경쟁력을 동시에 추구하려면 생산기술에 의한 수율(Yield)관리를 차별화 해야 한다. 반도체, 화학, ICT, 핸드폰, 가전, 자동차 등 우리 나라 대기업 수출주도형 제품 대부분이 혁신적인 R&D 제품기술보다 개량형 생산기술을 요구하는 Cash Cow 유형이다.

수율은 자재의 생산성(Productivity)으로 양품의 제품 산출량(Output)/자재의 투입량(Input)에 의해 산출되며 양품률 또는 1-불량률로 불리운다. 제품과 자재의 단위가 EA(Each:개)인 Lot 산업에서는 수율이 계수이산형 데이터가 되나 제품과 자재의 단위가 중량의 톤으로 측정하는 Batch 산업에서는 계량연속형 데이터가 된다. 따라서 수율을 최대로 관리하려는 Batch 산업에서는 수율=제품 산출중량(ton)/자재 투입중량(ton)을 $I-MR$ 관리도로, Lot 산업에서는 불량률=1-수율=제품 불량갯수(EA)/자재 투입갯수(EA)를 최소로 관리하기 위해 P관리도를 활용한다.

* 경원대학교 산업공학과

표준자재 소요량(Standard Material Usage) 또는 BOM(Bill of Material)이라고 하는 원단위는 수율(Yield)의 역수로 자재의 투입량(Input)/제품의 산출량(Output)에 의해 계산되며 작을수록 좋다. 특히 화학, 제약, 식품, 환경처리 공정은 화학 반응식에 의한 이론적 원단위 설정이 가능하다. 기업의 생산관리 부서에서는 정해진 자재 투입량으로 최대의 양품산출량을 Loss없이 생산될 수 있도록 수율의 생산성관리를 실시해야 한다. 구매관리 부서에서는 생산로스, 창고로스 등을 감안하여 정해진 제품산출량에 대한 최소의 자재투입량을 구매소요량으로 산정한다. 이렇듯 원자재, 반제품, 완제품 등은 공정과 작업의 단계에 따라 Input과 Output으로 연계하며 관리되어야 하며 효율적인 Input은 원단위로, 효과적인 Output은 수율로 낭비제거를 위한 노력을 기울여야 한다.

이런 낭비(Loss) 제거를 현장개선활동을 통해 체계적으로 수행하는 일본의 TPS (Toyota Production System)가 있다.

수요가 소품종 대량에서 다품종 소량의 유형으로 변화됨에 따라 1회성의 Lot 또는 Batch의 수율과 원단위가 제대로 예측되어 관리되지 않을 경우, Loss에 의한 생산량이 부족하여 납품을 하지 못하거나 자재구입량이 잘못 예측되어 해외구매의 재발주를 수행할 수 없는 경우의 곤란한 지경에 빠지게 된다.

이렇듯 수율은 예측된 모형으로 자재, 반제품, 완제품의 관리를 수행해야 하며 이는 생산조건의 정적인(Static) 품질(Quality) 이외에 고객조건의 동적인(Dynamic) 신뢰성(Reliability)[4,5]을 고려한 수율이 부서별로 체계적으로 관리[1]될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 Defective와 Defect를 위한 Hypergeometric, Binomial, Poisson 수율 모형과 DPU(Defect Per Unit)와 DPO(Defect Per Opportunity)를 위한 가설검정, 구간추정, 관리도 방법을 제시한다. 특히 본 연구에서는 반도체 수율 예측 모형[2,3]을 이용하여 DOU(Defect of One Unit)의 다양한 결점 밀도분포를 고려한 Compound Poisson 수율 모형을 확장하여 분석하였다.

2. Defect, Defective의 수율 모형

2.1 랜덤 Defect

제품에 대한 고객의 요구사항을 설계목표치로 도면과 함께 설정하는 것이 Specification(스펙, 규격, 시방, 사양, 제원, 명세)이다. <표1>과 같이 Rod의 Unit Overall Specification(UOS)은 지름 5 ± 0.5, 길이 10 ± 1, 긁힘, 외관 등의 4가지 Unit Individual Specification(UIS)으로 구성되어 있다. 기업에서 실제 생산된 Data가 UIS를 벗어날 경우 Defect(Noncoformity, Nonconformance, 부적합, 결점)라 하고 UOS 관점에서 1개의 Defect가 포함될 경우 Unit 기준의 Defective(Nonconforming Unit, 부적합품, 불량)라 한다. 따라서 Defect가 모여 1 Unit의 Defective가 된다.

<표1.2>에서 5 Unit의 #1로트에서 Defect=8개, Defective=4 Unit로 Defect가 대부분의 Rod Unit에 랜덤하게 골고루 발생하고 있다. DPU(Defect Per Unit)=Defect/Unit=8

개/5 Unit=1.6개/Unit, DPO(Defect Per Opportunity)=Defect/Opportunity=Defect/(UIS ×Unit)=8개/(4UIS×5UNIT)=0.4개/Opportunity 이다. DPU, DPO는 무단위의 Ratio가 아닌 Rate의 단위를 갖는다. <표1.2>에서 랜덤 Defect의 #1로트에 대한 수율을 <표2>에 의해 구하면 $Y_p = 1.83\%$, $Y_{P1} = 0.03\%$, $Y_{P2} = 20.2\%$, $Y_{P3} = 67.0\%$로 Defect에 의한 Y_{P1}이 과소평가, DPO에 의한 Y_{P3}가 과대평가되고 있으며 식스 시그마 운동에서는 Y_{ps} 사용을 권장하고 있다.

2.2 군집(Clustered) Defect

<표1.2>의 #1로트는 1 Defect가 1 Unit, 2 Defect가 2 Unit, 3 Defect가 1 Unit로 랜덤하게 발생한 반면에, 2로트는 4 Defect가 2 Unit로 군집되어 있다.

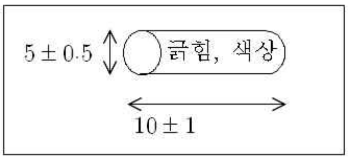
이 경우 Y_{P1}, Y_{P2}, Y_{P3}는 #1로트와 동일하나 Y_p=13.5%로 Defective에 의한 수율이 좋게 나온다.

그러나 <표1.2>의 Poisson 수율 모형은 <표1.2>의 #1로트같이 Defect가 랜덤하게 독립적으로 나타나는 경우만 적용이 가능하며 #2로트같이 군집으로 Defect가 특정 Unit에 몰려 있는 경우 사용이 불가능하다.

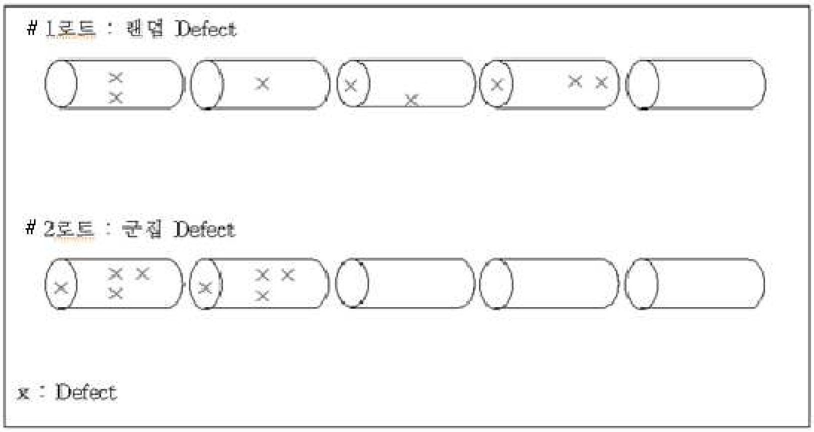
따라서 본 연구에서는 결점밀도 분포함수를 고려한 수율모형을 4절에서 제시한다.

<표1> Rod Unit의 Specification과 Data

<표1.1> Specification



<표1.2> Data



<표2> Defective 수율 모형과 Defect 수율 모형

<표2.1> Defective 수율 모형

Hypergeometric 수율 모형 : $Y_H = {}_{N-NP}C_n / {}_N C_n$

조건 $N \to \infty, \frac{N}{n} \geq 10, \frac{n}{N} < 10$

↓

Binomial 수율 모형 : $Y_B = (1-p)^n$

$n \to \infty, p \to 0$ 또는 $np = 0.1 \sim 10$

↓

Poissom 수율 모형 : $Y_p = e^{-np}$

<표2.2> Defect 수율 모형

Poisson 수율 모형 : $Y_{p_1} = e^{-c}$

$Y_{p_2} = e^{-DPU}$

$Y_{p_3} = e^{-DPO}$

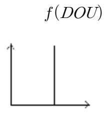
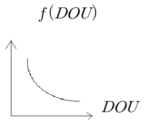
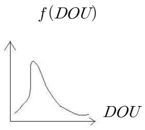
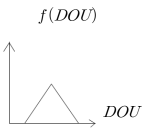
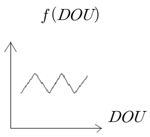
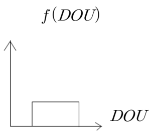
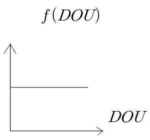
3. DPU, DPO 추론과 관리도 모형

3.1 DPU, DPO 가설검정

Defective np, Fractional Defective p, Defect c, DPU u의 관측 검정통계량은 각각 $Z = (np - nP_0)/(nP_0(1-P_o))^{1/2}$, $Z = (p - P_0)/(P_o(1-P_0)/n)^{1/2}$, $Z = (c - C_o)/C_o)^{1/2}$, $Z = (u - U_o)/(U_o/n)^{1/2}$이다.

DPO인 경우 가설검정(Hypothesis Test)의 1단계는 가설설정으로 $H_o : DPO = DPO_0$, $H_1 : DPO \neq DPO_0$, 2단계는 관측 검정통계량 계산으로 $Z = (DPO - DPO_o)/(DPO_o/n)^{1/2}$이며 3단계는 유의수준 α에 따른 판정으로 $|Z| \geq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 일 경우 H_o를 기각한다.

<표3> DOU 결점밀도분포에 의한 Compound Poisson 수율 모형

$f(DOU)$	pdf 모양	수율모형	Y_{NB} 의 α NB : Negative Binomial
Vertical 분포		최대수율이 나오는 이상적 모형	
Gamma 분포	α에 의한 다양한 모양	$Y_G = Y_{NB} = (1 + DOU/\alpha)^{-\alpha}$	$\mu = \alpha\beta$ $\sigma^2 = \alpha\beta(\beta+1)$
Exponential 분포		$Y_E = (1 + DOU)^{-1}$	$\alpha = 1$
Right Skew 분포		$Y_{RS} = (1 + DOU/3)^{-3}$	$\alpha = 3$
Symmetric Triangular 분포 (근사 Gauss Normal 분포)		$Y_{ST} = ((1 - e^{-DOU})/DOU)^2$ 또는 $Y_{NB=4.2} = (1 + DOU/4.2)^{-4.2}$	$\alpha = 4.2$
Poisson 분포		$Y_{P_2} = e^{-DPU}$	$\alpha = \infty$
Uniform 분포		$Y_u = (1 - e^{-2DOU})/2DOU$	$\alpha = \infty$
Horizontal 분포		최소수율이 나오는 비관적 모형	

3.2 DPU, DPO 구간 추정

Defective np, Fractional Defective p, Defect c, DPU u의 $1-\alpha$ 신뢰수준(Confidence Level)에 의한 구간추정(Interval Estimation) 식은 각각 $np \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}}(np(1-p))^{1/2}$, $p \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}}(p(1-p)/n)^{1/2}$, $c \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}}(c)^{1/2}$, $u \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}}(u/n)^{1/2}$이다. DPO 신뢰구간은 $DPO \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\ (DPO/n)^{1/2}$이다.

3.3 DPU, DPO 관리도

Defective np, Fractional Defective p, Defect c, DPU u의 3σ Shewhart 관리도는 Subgroup Size를 Unit n개로, Subgroup Number를 k개로 했을 경우 각각 $n\overline{p}\pm 3(n\overline{p}(1-\overline{p}))^{1/2}$, $\overline{p}\pm 3(\overline{p}(1-\overline{p})/n)^{1/2}$, $\overline{c}\pm 3(\overline{c})^{1/2}$, $\overline{u}\pm 3(\overline{u}/n)^{1/2}$이다. DPO 3σ관리도는 $\overline{DPO}\pm 3(\overline{DPO}/n)^{1/2}$이다.

4. DOU 밀도함수를 고려한 Compound Poisson 수율 모형

Defect c는 랜덤하고 독립적으로 발생하므로 Poisson분포를 사용할 수 있으나 DPU(Defects of One Unit)는 1 Unit에서의 Defects의 밀도 pdf(Density pdf : Probability Density Function)로 <표3>과 같이 군집 Defect의 모양을 띄게 된다.

이 경우 Compound Poisson(Generalized Double Poisson) 수율 모형[3]이 사용되며 $p(X=x)=\int_0^{\infty} e^{-c}c^x/x!\,f(DOU)dDOU$ 또는 $p(X=x)=\sum e^{-c}c^x/x!f(DOU)$이다. 만약 $f(DOU)$가 계량연속형 pdf가 아닌 계수이산형 pmf(Probability Mass Function)인 경우 $\int$는 $\sum$으로 바뀐다. <표3>의 수율 모형 $y=p(X=0)=\int_0^{\infty} e^{-c}f(DOU)dDOU$에 의해 유도되었으며 이는 반도체 Wafer 면적에 의한 수율 모형[2]을 응용하였다.

<표3>에서 포괄적인 Gamma분포의 $f(DOU)=1/(\Gamma(\alpha)\beta^{\alpha})\cdot(DOU)^{\alpha-1}e^{-DOU/\beta}$에서 $\mu=\alpha\beta, \sigma^2=\alpha\beta(\beta+1)$이고 α는 Shape 모수, β는 Scale 모수이다. $\alpha=1$인 Exponential 분포는 작은 DOU에 많은 Unit가 군집되어 있어 수율이 최대가 나오는 반면, $\alpha=\infty$인 Poisson 또는 Uniform분포는 모든 DOU에 Unit가 걸쳐 있어 수율이 최소가 된다.

$\alpha=1$인 Exponential인 경우 y축의 $f(DOU)$의 $\mu_{y,}\ \sigma_y^2$이 커야 수율이 최대가 나온다. 그러나 CV(Coefficient of Variation)$=\sigma_y/\mu_y$관계에 의해 평균과 분산을 동시에 크게 할 수는 없어 $f(DOU)$의 산포도 크면서 Unit가 나오는 빈도 확률이 크게 나오는 이상적인 분포는 Vertical 모양일 경우에만 가능하다. 따라서 Gamma분포의 Shape 모수 α는 $f(DOU)$의 형상에 의해 낙관적 Vertical분포와 비관적 Horizontal분포의 사이에서 y축의 분산과 평균에 의해 수율을 결정하는 역할을 하게 된다.

$\alpha=1$인 경우 Gamma분포의 Scale 모수 β는 x축의 DOU의 μ_x, σ_x^2이 작아야 수율이 최대가 나온다. 그러나 $CV=\sigma_x/\mu_x$관계에 의해 평균과 분산을 동시에 작게 할 수는 없다. 따라서 $\alpha=\mu_x^2/(\sigma_x^2-\mu_x)$에서 $\alpha>0$이 되도록 분모의 $\sigma_x^2-\mu_x>0$ 조건이 벗어나지 않는 한도내에서 β로 σ_x^2의 폭을 Tuning해야 한다.

참고로 Gamma분포의 Kernel은 수직분포 $y=x$, 반비례분포 $y=-x$, 지수분포 $y=e^{-x}$, Long Tail분포 $y=x^3e^{-x}$, 삼각분포 $y=x^{4.2}e^{-x}$, 포아송분포 $y=x^{\infty}e^{-x}$이고

Convex를 위한 Ladder of Transformation은 $e^x, x^3, x^2, x, x^{1/2}$, log$x$이고 Concave를 위해서는 $x^{-1/2}, x^{-2}, x^{-3}, e^{-x}$이다.

$f(DOU)$는 분산이 가장 큰 분포를 사용하려면 y축의 수직적 관점을 고려해야 하며 Negative Binomial분포인 경우 $\mu^2 > \sigma^2$, Exponential분포인 경우 $\mu^2 = \sigma^2$이나 Poisson 분포는 x축의 수평적 관점에서 $\mu^2 = \sigma^2$이다.

5. 결 론

본 연구에서는 Defective에 대한 Hypergeometric, Binomial, Poisson 수율 모형과 Poisson Defect 수율 모형을 제시하였으며 DPU, DPO 의 가설검정, 구간추정, 관리도 운영 방안을 제안하였다.

특히 DOU의 결점 밀도 분포를 고려한 Compound Poisson 수율 모형을 반도체 수율 예측 모형[2,3]을 응용하여 개발하였으며 사용자의 편의를 위해 Shape, Scale 모수의 성질을 분석하였다.

6. 참 고 문 헌

[1] 최성운, "생산, 측정 및 교정 프로세스에서 오차 유형화에 의한 확장 공정능력지수의 개발", 대한안전경영과학회지, 11(2) 2009 : 117-126.

[2] Cunningham J.A, "The Use and Evaluation of Yield Models in Integrated Circuit Manufacturing", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 3(2)(1990) : 60-71.

[3] Ferris-Prabhu A.V., Introduction to Semiconductor Device Yield Modeling, Artech House, 1992.

[4] Kim K.O., Zuo M.J., Kuo W., "On the Relationship of Semiconductor Yield and Reliability", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 18(3)(2005) : 422-429.

[5] Kuo. W., Chien W.T.K., Kim T., Reliability, Yield, and Stress Burn-In, Kluwer, 1998.