

저수준 불량 공정의 개선을 위한 관리도 A Control Chart for the Improvement of Low Defective Process

박 기 주*
Park, Ki Joo

Abstract

For products that are subject to inspections that lead to either acceptance or rejection, the p chart or control chart for proportion defective is applicable. The charting technique approach to quality control aims at alerting its user to any presentations in the properties of a manufactured product.

This article presents an important tool available for quality control of a production process at the occurrence of defects in manufactured products at view low levels to improve the efficiency of the manufacturing productivity and to satisfy customer through the reduction of defect rates. To understand the consequences of the level of quality on competitive position, a more technical perspective is needed.

1. 서 론

100PPM품질혁신운동이 전개된 이래 1997년 11월 현재 300개 이상의 회사가 100PPM품질인증을 획득하였으며, 그 효과로 공정의 불량율은 크게 개선되었고, 완제품의 불량율은 거의 제로에 가까운 현상으로 불량율이 낮은 저수준 불량(PPM) 공정을 관리하고, 평가하기 위한 방법이 요구되고 있다.

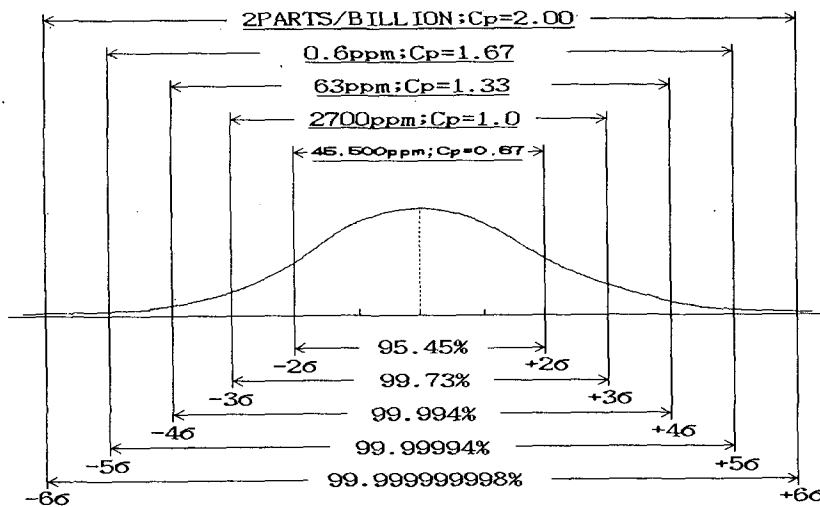
공정의 관리에 W.A.Shewhart의 $\pm 3\sigma$ 관리도가 보편적으로 이용되고 있으나 일반적인 p 관리도로서 적용할 수 없을 만큼 충분히 낮은 수준의 불량율 경우에는 2항분포의 기대값과 $\pm 3\sigma$ 의 관리한계를 적용하는 전형적인 관리도 보다는 공정관리에 더욱 신뢰할 수 있는 p 관리도의 개선이 필요하다. 불량율 p_i 값이 $LCL \leq p_i \leq UCL$ 인 경우 공정은 관리상태에 있다고 판단되어 지나, 만약 이 조건의 범위를 벗어나면 공정이 관리상태를 벗어난 것으로 판단하고 관리이탈이라고 말한다. p_i 가 UCL을 초과할 때 즉 기대보다도 더 많은 불량품이 유의적으로 생산되고 있다면 공정조사를 위해 공정은 즉시 중지되어야 한다. $\pm 3\sigma$ 의 관리상태 공정에서는 UCL을 벗어나는 p_i 의 확률은 이론적으로 $\frac{1}{2}(100 - 99.73)$ 또는 0.135%이다.[1] 샘플로부터 얻어진 불확실한 정보에 의해 공정을 부당하게 중지시킬 확률은 약 0.00135정도이므로 통계적 추론에 의해 제1종과오를 범할 확률을 나타내고 있다. 공정의 산포의 관리는 관리한계선 $\bar{x} \pm 3\sigma$ 에 규격

*경일대학교 산업공학과

의 상한과 하한에 대비시켜 $Cp = \frac{S_u - S_l}{6\sigma}$ 인 공정능력지수로서 $\sigma = \frac{S_u - S_l}{6 Cp}$ 이므로 이에 따라 σ 를 관리한다면 제품의 특성을 고려하여 S_u 와 S_l 가 정해지게 되고 이에 따른 관리한계인 UCL과 LCL이 계산되므로 Cp를 지정하고 불량율을 관리할 수 있는 관리도가 작성되게 되어 공정관리가 용이하게 된다.[2] 공정에서 제품을 검사할 때 규격내의 제품 즉 양품으로 판정이 나더라도 모두 똑같은 품질의 제품이라고 볼 수 없으며 목표치에 얼마나 접근하는가에 따라 차이가 있으므로 p관리도의 결점인 부(-)의 LCL에 대한 부적절한 부분을 개선하고, 목표 PPM 불량율에 대한 발생확률과 “형태인식” 관리에 대한 검증 조건표를 만들어 불량품의 발생 확률과 대응시켜 비교하므로써 공정관리의 이상상태를 효과적으로 확인하고 조치를 취할 수 있다.

2. 공정능력지수(Cp)와 관리도

H. J. Bajarria와 R. P. Copp는 공정문제 해결에 통계적 문제해결(SPS : Statistical Problem Solving)방법으로 보다 높은 수준의 통계적 지식을 필요로 하는 관리도를 사용하고 있다. 기존의 관리도로 공정을 관리하는 경우 $\pm 3\sigma$ 범칙은 저수준의 불량률의 경우에는 더 이상 유효하지 않으며 또 다른 기준이 제시되어야 한다. 또한 2항분포 혹은 포아송 분포를 정규분포로 근사시키는 경우 샘플이 아주 크거나 np가 적어도 5이상이면 합리적인 기준이 될 수 있으나 np가 적은 경우에는 문제가 발생할 수 있다.[3] 이와 같은 문제가 발생하는 주요인으로는 공정상태가 중심선(CL : Center Line)을 중심으로 비대칭 상태로 놓여지는 경우로 p_i중에 한개라도 공정상태를 벗어나는 경우에는 이상상태로 판정하게 된다. W.A.Shewhart의 $\pm 3\sigma$ 영역을 관리범위로



<그림 1> PPM과 σ 변화에 따른 정규분포 영역

하는 관리도는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 정규분포에 대하여 99.73%가 평균을 중심으로 $\pm 3\sigma$ 사이에 놓여 있음을 의미한다. 하지만 불량율을 PPM단위로 관리하는 경우 $\pm 3\sigma$ 는 2700PPM이므로 좀더 다른 한계값을 필요로 한다.[4,5] Motorola의 $\pm 6\sigma$ 의 경우와는 불량율을 관리하는데 많은 차이점을 두고 있으며 $\pm 6\sigma$ 의 경우 Cp=2.0으로 불량율이 0.002PPM이 됨으로 2700PPM의 불량율을 논하는 기준이 다르게 되고 더 이상 유효성을 말하기 어렵기 때문에 다른 관리기준이 제시되어야 할 필요가 있다. $\pm 3\sigma$ 는 정규분포상에서 0.9973의 확률이 평균을 중심으로 $\pm 3\sigma$ 사이에 놓여 있고, 벗어나는 확률(α)이 0.0027 즉 2700PPM임을 의미하고 있으므로 $\pm 6\sigma$ 의 경우는 벗어나는 확률이 0.002PPM으로 α 에 대한 관리기준이 다르게 전개되어야 한다.

3. 불량율관리도(p 관리도)

합격이나 불합격 등의 검사를 해야하는 제품에 대해서는 제품불량에 대한 관리도로서 p관리도, Pn관리도, C관리도, U관리도가 유용하다. 불량율 관리도 p관리도의 경우 중심선(CL) 및 관리한계선(UCL, LCL)을 구하기 위하여 크기 n인 샘플 k개가 있다고 하자. k는 25이상이고 d_i 는 $i(i=1,2,3,\dots,k)$ 번째 샘플의 불량개수라고 하면 i 번째 샘플의 불량율 p_i 는

$$p_i = \frac{d_i}{n} \quad (1)$$

k개 샘플에 대한 평균불량율은 (2)식과 같다.

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^k d_i}{kn} \quad (2)$$

정규분포의 성질에 의해 모든 p_i 값의 99.73%가 실질적으로 평균을 중심으로 양쪽면상의 $\pm 3\sigma$ 내에 존재할 것으로 기대될 수 있는 p관리도의 관리한계의 범위 CL, UCL, LCL은

$$CL = \bar{p} \quad (3)$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (4)$$

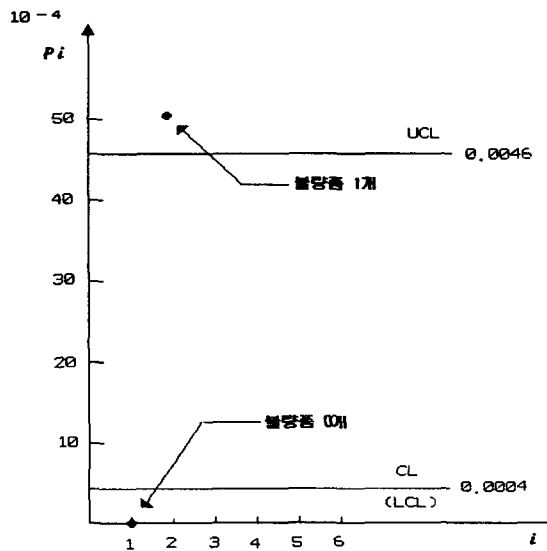
$$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (5)$$

p_i 값들은 관리도상에 타점되고 공정의 이상 유무를 판단하게 된다. 관리이탈이 있는 경우 LCL이나 UCL의 어느 쪽이든 한쪽을 벗어나는 p_i 값은 제거되고 CL, LCL, UCL은 재 계산되고 관리한계선내에 떨어지는 모든 p_i 값으로 타점하므로써 공정의 상태를 해석하고, 공정의 진행중에 발생하는 미래의 불량 p_i (단 $i \geq k$)값을 관리하기 위해 사용될 수 있다. 관리도상에 타점된 p_i 가 (6)식을 만족하는 경우 공정은 관리상태에 있다고 판단한다.

$$LCL \leq p_i \leq UCL \quad (6)$$

일반적인 불량율(p) 관리도의 경우 p_i 값에 따라 (6)식을 만족하는 관리한계선을 구하여 관리이탈의 경우를 살펴보기 위해 공정평균 불량율이 0.04%로서 400PPM인 저수준의 불량 공정을 생각해보자, 즉 \bar{p} 가 0.0004이고, 검사 샘플의 크기 n이 200이라고 가정하면 (3),(4),(5)식에 의해 CL=0.00040, UCL=0.00464, LCL=-0.00384가 되나 LCL의 경우에는 음수이므로 고려하지 않으며 관리도의 그래프상에서는 LCL=0으로 대체되어 작성되므로 p관리도는 <그림 2>와 같다.

<그림 2>에서와 같이 저수준 불량 공정의 p관리도는 CL을 중심으로 비대칭적이며, 샘플 중에 불량품이 한 개라도 발생하는 경우 불량률 p 는 $p = \frac{1}{200} = 0.0050$ 이 되어 UCL을 벗어나는 현상이 나타나 관리이탈을 보이게 되므로 공정을 이상상태로 판정하게 된다. 따라서 저수준의 불량률(PPM)을 관리함에 있어서는 일반적인 p관리도로서의 관리는 부적절함을 알 수 있다. [6,7]



<그림 2> $\bar{p} = 0.0004$ 일 때 p관리도

4. PPM불량률 관리도

연속적인 샘플의 수를 N 개, 한 샘플내 d 개의 불량품을 가지고 있을 확률은 $\Pr(d)$, 불량품 d 개를 가지고 있는 샘플의 수를 R 이라고 할 때 주어진 형태가 발생할 확률은 샘플들 사이에 독립이라고 가정하면, 2항분포에 의하여

$${}_N C_R [\Pr(d)]^R [1 - \Pr(d)]^{N-R} \tag{7}$$

공정이 관리상태라면 $\pm 3\sigma$ 의 관리한계범위를 벗어나서, 특정형태가 발생할 확률은 0.00135이다. 즉 이것은 p관리도에서 p_i 중에 한 개가 UCL을 벗어날 확률이 $\alpha = 0.00135$ 로 일반적으로 벗어날 확률을 α 라하면

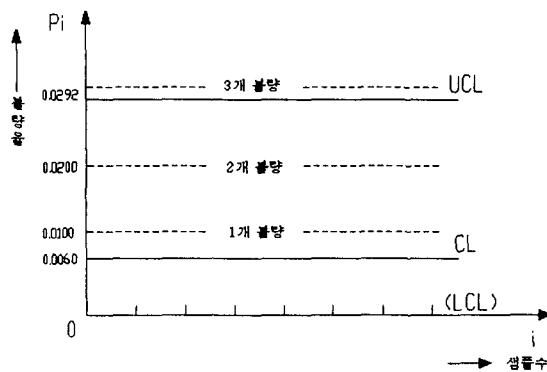
$${}_N C_R [\Pr(d)]^R [1 - \Pr(d)]^{N-R} = \alpha \tag{8}$$

가 되어 $Pr(d)$ 의 값은 구해진다. 불량품의 개수 d 의 값은 i 번째의 불량개수에 대한 변수로서 상황에 따라 정해질 것이므로 <표1>은 여러 상황에 대응되는 $Pr(d)$ 의 값들을 나타내고 있고, 저불량을 공정을 관리하기 위한 검증조건표로서 활용된다.[8]

<표 1> 저 수준 불량을 공정형태의 “형태인식” 검증 조건표

Pr(d)	형태 인식
0.015	4개중 2개의 불량
0.021	3개중 2개의 불량
0.037	연속 2개의 불량
0.053	5개중 3개의 불량
0.072	4개중 3개의 불량
0.110	연속 3개의 불량
0.130	5개중 4개의 불량
0.200	연속 4개의 불량
0.270	연속 5개의 불량
0.330	연속 6개의 불량
0.390	연속 7개의 불량

저 수준 불량율의 관리 한계선에 의한 관리이탈의 경우를 명백히 규명하기 위해 공정 평균불량율이 다소 높은 0.6% 불량공정 즉 \bar{p} 가 0.006이고, n 이 100인 경우 (3)(4)(5)식에 의해 $CL=0.006$, $UCL=0.0292$, $LCL=-0.072$ 가 관리한계선으로 계산된다. 관리도상에서 $d_i=0, 1$ 또는 2 일 때 $p_i = 0, 0.01, 0.02$ 로서 관리상한선이 0.0292이보다 낮은 불량율이 되어 관리상한선내에 존재하게 되어 공정에 이상이 없는 것으로 판정될 수 있다. 즉 100개 가운데 2개가 불량이면 불량율은 2% 즉 0.02가되고 0.02까지는 관리한계선내에 존재하나 <그림3>에서 보는 바와 같이 불량개수가 3개 이상이 되면 불량율은 0.03이 되어 상한선 0.292를 넘게되어 관리이탈로 나타나게 된다. 일단 한 샘플이 3개이상의 불량품이 포함하고 있음이 발견되기만 하면 공정에 이



<그림 3> 일반적인 p 관리도의 관리이탈의 예

상이 있는 것으로 판정하기 때문에 그 공정은 계속되는 것이 허용될 수가 없다. 따라서 불량율을 PPM수준으로 관리하고자 할 때는 p관리도의 사용은 부적절하게 되므로 관리도의 관리한 개선에 대한 개념을 다르게 전개해야 한다. 불량율이 낮은 특별한 공정 즉 저수준 불량(PPM) 공정의 관리를 위하여 Pr(d)를 식(9)에서 구한다. 식(2)에 의해 k개의 사전 샘플로부터 계산된 평균 불량률 \bar{p} 로부터 π 의 추정치가 구해지면 π 를 \bar{p} 로 대체함으로써 d=1,2,3,...에 대한 Pr(d)의 값이 계산된다.

$$\Pr(d) = {}_n C_d \pi^d (1-\pi)^{n-d} \quad (9)$$

불량개수 d=1,2,3에 따라 구해진 Pr(d)값과 <표 1>의 “형태인식”에 나타난 값을 비교하여 가장 가까운 값에 대응되는 형태가 정해진다. 이 형태들 중에 한 개가 관리도상에서 확인될 때마다 공정은 관리이탈로 생각되고 공정에 대한 조치가 실시된다. <그림 3>의 경우를 저수준 불량(PPM)관리도에 적용해보면 Pr(d)는 $\bar{p} = 0.0060$, $n = 100$ 인 공정에서 불량개수 d=1,2,3,4일 확률 Pr(d)를 구해보면

$$\Pr(1) = {}_{100} C_1 (0.006)^1 (0.994)^{99} = 0.33 \quad (10)$$

같은 방법으로 d=2일 때 Pr(2)=0.10, d=3일 때 Pr(3)=0.02, d=4일 때 Pr(4)=0.003이므로 <표 1>과 비교하여 α 를 벗어나는 공정의 여부를 판단하게 된다. 이는 p관리도의 결점을 보완하고 현장에서 검증조건표를 활용하여 공정의 이상유무를 파악, 관리이탈의 경우를 해석하므로써 공정의 개선의 목표를 달성할 수 있다. 가령 식(10)에서 불량 d=1인 경우 확률 Pr(1)은 0.33으로 <표 1>에서 대응되는 적절한 검증형태는 6개의 점들이 연속적으로 나타나는 경우에 대응되고, 이는 6개의 샘플(N=6)에서 불량품이 각 한 개(d=1)씩 들어 있는 샘플이 연속적으로 6회(R=6) 나타날때의 확률과 같고, 이 때 규격을 벗어날 확률이 0.00135를 의미하므로 공정에 이상이 있음을 나타낸다. 이와 같이하여 d=2일 때는 확률이 0.10으로 <표 1>에서 대응되는 적절한 형태는 불량품이 2개 들어있는 샘플 3개(N=3)를 연속적으로 3회(R=3) 나타날 때와 비슷한 확률이므로 이와 같은 현상이 나타나면 공정은 이상이 있는 것으로 판단하여 조치를 취하도록 한다.

<표 1>의 Pr(d)의 확률과 식(9)에서 구해진 확률 즉 $\alpha=0.00135$ 로서 관리이탈이 발생할 확률과 비교하여 이에 대응되는 확률의 상황이 발생한 것으로 임의의 α 를 목표 수준의 저불량율 즉 PPM수준의 저불량 공정의 개선을 위한 관리가 가능하게 된다. 또한 d=3인 경우 Pr(3) = 0.02에 대응되는 <표 1>의 적절한 형태는 샘플 3개(N=3)중에 2개에는 불량품이 3개(d=3), 그 나머지 한 개의 샘플에는 결점 d=0, d=1 또는 d=2개일 수 있으며, 공정의 판단은 이들 형태중에 한 가지 형태가 관찰되거나 한 샘플내에서 결점이 3개를 초과(d>3)하는 경우에는 공정의 이상상태로 판단한다.[8] 관리도상에 타점되는 점들이 각 샘플에서 나타나는 확률이 아니고 각 샘플에서 발견되는 불량품의 실제 수라는 것이 특별한 점으로 관리도의 작성과 사용에 용이하다. 임의의 평균 불량율을 어느 값으로 정하느냐에 따라 관리하고자 하는 공정의 목표불량율 관리가 용이하고, p관리도상에서 부(-)의 LCL이 생기지 않기 때문에 매우 효과적인 관리방법이라고 생각된다. 따라서 저수준의 불량 공정을 관리하기 위하여 목표 PPM불량율에 대한 발생확률과 검증형태에 대한 검증 조건표를 만들어 놓으므로써 실제 발생하는 불량품의 발생 확률과 비교하여 관리이상상태를 확인하여 조치를 취할 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

p관리도의 관리한계선인 $\pm 3\sigma$ 의 범위를 적용하면 <그림 3>에서 처럼 공정상의 한 샘플에서 불량품이 3개 이상일 경우 관리상한선을 벗어나므로 공정이 즉시 중지된다. 그러나 “형태인식” 해결방법의 경우 연속적인 샘플 3개 가운데 2개이상 일어나지 않는 한 임의의 한 샘플 내의 불량품이 3개까지 출현하는 것은 허용되고 있으므로 p관리도는 수치 예에서 보는 것처럼 관리한계선에서 공정의 상태를 판단하는데 저수준 불량(PPM)관리도와는 차이가 있다. 저수준의 불량관리는 관리한계기준이 d개의 불량을 가지는 확률 Pr(d)기준으로 정리함으로서 UCL과 LCL의 영향을 받지 않는 불량관리가 가능하다. 불량율이 0.1%이하로 적은 저수준 불량(PPM)공정을 관리하는데 있어서 p관리도에 대한 관리한계가 부(-)의 LCL 값일 때 LCL의 값은 0으로 대체하므로써 CL에 대해 비대칭적으로 나타나는 부적절한 경우에 적용될 수 있으므로 합리적인 관리가 이루어진다. α 를 벗어나는 제1종과오의 영역으로 정해서 Pr(d)값이 구해지게 되고, Pr(d)의 확률값이 $\alpha=0.002$ PPM일 경우는 $C_p=2$ 인 Motorola의 $\pm 6\sigma$ 의 목표를 달성할 수 있는 관리법으로 현장에서 실용화될 수 있다. 이는 일반적인 p관리도로서는 관리할 수 없는 관리한계를 Pr(d)의 값으로 관리한 것으로 저수준의 불량 공정의 개선에 유의한 관리방법으로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 황의철, 「품질경영」, 박영사, 1992.
- [2] 송서일, 경제적 품질보증수준확보를 위한 공정능력지수의 최적화에 관한 연구, 1988, 9.
- [3] 100PPM 품질혁신추진본부, “100PPM 품질혁신 전국 순회 교재”, 100PPM 품질혁신추진본부, p.9, 1995.
- [4] Behara, R.S., Fontenot, G.F., and Gresham, A., “Customer satisfaction measurement and analysis using six sigma,” International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 12, No. 3, pp. 9-18, 1995.
- [5] Fred R. mcFadden, “Six-Sigma Quality Programs”, Quality Progress, June 1993.
- [6] Goh, T.N., “Statistical Monitoring and Control of a Low defect Process”, International Quality and Reliability Engineering, Vol 7, pp.479-483, 1991.
- [7] Calvin, T.W., “Quality Control Techniques for Zero Defects”, IEEE Trans. Components, Hybrids and Manuf. Technol., CHMT-6, pp.323-328, 1983.
- [8] Goh, T.N., “A Charting Technique for Control of Low-Defective Production”. Quality and Reliability Engineering International, Vol.4, pp.53-62, 1987.