

# 공정능력지수의 유형화 및 정규성 검정의 응용 Application of Normality Test and Classification of Process Capability Index

최성운\*

## Abstract

This research presents an implementation strategy of Process Capability Index (PCI) according to the types of process characteristics. The types of process feature are classified as four perspectives of variation range, time period, error position, and process stage. The paper examines short-term or long-term PCI, within or between variation, position of precision or accuracy, and inclusion of measurement or calibration stage. Moreover, the study proposes normality test of unilateral PCI.

**Keywords : PCI, Process Characteristics, Variation Range, Time Period, Error Position, Process Stage, Normality Test**

## 1. 서론

관리(Management)는 계획(Planning)과 통제(Control)의 두가지 기능으로 계획은 목표(Plan)를 세우고 통제는 실시(DO), 확인(Check), 조치(Action)의 PDCA 관리 Cycle을 수행한다. 품질관리(QC)도 목표 스펙(Specification)에 대해 실제 데이터와의 차이인 부적합품(불량)을 확인한 후 이를 사전, 사후에 제거하는 조직활동이다. QC의 사후 활동은 검사(Inspection)에 의해 수행되고 사전활동은 SPC(Statistical Process Control)에 의해 이루어진다.

---

\* 경원대학교 산업공학과

SPC는 1단계 : 관리도에 의한 공정의 이상원인 제거, 2단계 : 스펙과 히스토그램의 비교, 3단계 : 공정능력지수의 산출 등의 3단계 활동으로 구성된다. SPC 1단계 활동은 매일매일 또는 Lot별 생산된 초기제품을 Subgrouping 하여 작업일지에 수치로 적는 대신, 꺾은선 그래프를 이용하여 미리 그어진 관리한계를 벗어나는 이상원인의 생산기술조건을 사전에 개선하는 가시관리 방식이다. 2단계 활동은 관리도에 의해 작성된 한 달간의 작업일지 데이터를 모아서 월말에 1회 히스토그램을 작성하여 목표 스펙과 막대그래프로 비교하는 가시(Visual)관리 방식이다. 3단계 활동은 양쪽스펙, 상한스펙, 하한스펙 3가지 스펙과 실제 데이터와 차이인 오차를 정확도(치우침)와 정밀도(산포)의 상대적 비율인 1점만점의 척도로 비교하는 숫자관리 방식이다.

특히 공정능력지수(Process Capability Index : PCI)는 개개 제품이 아닌 Lot 또는 공정(Process)의 품질능력(Capability)을 파악하는 지수로 공정의 특성을 반영해야 한다. 그러나 실제 현장에서는 통계적 중심극한정리(Central Limit Theorem)를 이용하는 Rational Subgrouping 여부, 시제품 양산단계 또는 설비도입 초기 안정화 단계여부, 오차의 분류관점 등의 공정특성이 반영되지 않은 PCI가 임의로 적용되어 효율적이고 효과적인 품질개선 활동이 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 군내, 군간변동과 단기, 장기의 관점[6], 양쪽, 한쪽스펙의 관점[1-4], 오차의 정확도, 정밀도 관점[7], 생산, 측정, 교정 프로세스 관점[5] 등의 4가지 공정특성에 따라 유형화하여 적용방안을 제시한다. 또한 한쪽(Unilateral)스펙인 경우의 PCI 오적용 사례에 대한 개선방안과  $C_{PU}$ ,  $C_{PL}$ 에 대한 정규성 검정의 절차를 제안한다.

본 연구의 차별성은 현장 실무자를 위해 공정특성을 고려한 PCI의 4가지 유형을 제시하고 특히 한쪽스펙에 대한 간이 정규성검정을 제안하는 데 있다.

## 2. 공정능력지수의 유형화

### 2.1 군내, 군간변동과 단기, 장기의 관점

공정능력지수  $C_p = (USL - LSL) / 6\sigma$ 에서 표준편차(Standard Deviation)의 포함범위는 SPC의 1단계인  $\bar{x} - R$  또는  $\bar{x} - S$  관리도에서 결정된다.  $\bar{x}$  관리도는 중심극한정리(Central Limit Theorem)를 이용한 합리적인 군구분(Rational Subgrouping)으로 In-Control인 Random Cause와 Out-of-Control인 Assignable Cause를 판정한다.  $\sigma_x^2 = \sigma_b^2 + \sigma_w^2 / n$ 에서 군간변동(Between Variation)  $\sigma_b$ 는 이상원인으로, 군내변동(Within Variation)  $\sigma_w$ 는 우연원인으로 판정되도록 로트별, 날짜별 등 5M1JP (Man, Machine, Material, Method, Measurement, Jig&Fixture, Part)의 생산기술 조건별로 층별된 합리적인 군구분을 형성해야 한다.

$\bar{x}$  관리도가 In-Control인 경우  $\sigma = \sigma_w$ , Out-of-Control인  $\sigma = \sigma_x$ 로 공정능력지수  $C_p$ 의 공식에 대입하면 된다. 따라서 군내변동  $\sigma_w$ 로 계산된 공정능력지수를 PCI(Process

Capability Index)라 하고 전체변동  $\sigma_x$ 로 계산된 공정성능지수를 PPI(Process Performance Index)라 한다. PCI는 우연원인으로만 이루어진 관리도가 정상으로 판정된 경우에만 사용이 가능하며 이상원인으로 판정된 관리도의 경우에는 전체변동이 고려된 PPI를 사용해야 한다. 최근 일부 전문가가 단기(Short-Term) 공정능력을 파악할 경우는 PCI로, 장기(Long-Term) 공정능력을 파악할 경우는 PPI로 사용하고 있으나 이는 크게 잘못된 일이다. 단기일 경우는 MINITAB에서 계산된  $Z$  시그마 수준을 그대로 사용하고 장기일 경우는  $1.5\sigma$ 를 더할 것을 권고하고 있다. 이러한 근거는 6 시그마 활동이 실제로는  $1.5\sigma$  Shift 된 4.5 시그마 활동이기 때문이다. 그러나 이는 소비자에 대한 기만행위이며 6 시그마 활동으로 과대 선전된 명칭을 4.5 시그마 활동으로 변경할 경우  $1.5\sigma$ 를 더해 주는 모순된 행동을 저지를 필요가 없다.

$1.5\sigma$  Shift의 치우침을 단기, 장기 관점으로 사용하고 싶다면 이는 2.3절의 정확도(편의)가 반영된 공정능력지수로 고려되어야 한다. 정밀도(산포) 관점에서  $\sigma_w$ 만 고려하는 경우  $PCI_p$ ,  $\sigma_x$ 가 고려되는 경우  $PPI_p$ , 정확도와 정밀도가 같이 고려되는 경우  $PCI_{pk}$ ,  $PPI_{pk}$ 가 된다.

## 2.2 양쪽, 한쪽 스펙의 관점

HOQ(House of Quality)의 VOC(Voice of Customer)에서 전개된 스펙(Specification)은 망대특성(Larger The Better)인 LSL(Lower Specification Limit), 망소특성(Smaller The Better)인 USL(Upper Specification Limit), 망목특성(Nominal The Best)인  $(USL + LSL)/2 \pm (USL - LSL)/2$ 의 세가지 유형이 있다.

PPI는 PCI의  $\sigma_w$ 를  $\sigma_x$ 로 바꾸어 주면 되므로 PCI의 양쪽, 한쪽스펙의 관점으로만 기술하기로 한다. 양쪽스펙의 경우 오차를 정확도와 정밀도로 구분하여 산출하는  $C_p = (USL - LSL)/6\sigma$ ,  $C_{PK} = (1 - k)(USL - LSL)/6\sigma$  where  $K = |((USL + LSL)/2 - \mu)/((USL - LSL)/2)|$ 이고, 오차를 한꺼번에 나타내는  $C_{PK} = \text{Min}\{C_{PU}, C_{PL}\}$ 이다. 한쪽스펙의 경우 오차를 한꺼번에 나타내는  $C_{PU} = (USL - \mu)/3\sigma$ ,  $C_{PL} = (\mu - LSL)/3\sigma$ 이고 오차를 정확도와 정밀도로 구분하여 산출하는  $C_{PUK} = (1 - k)(USL - \text{Target Value})/3\sigma$ , where  $K = |(\mu - \text{Target Value})/(USL - \text{Target Value})|$ ,  $C_{PLK} = (1 - K)(\text{Target Value} - LSL)/3\sigma$ , where  $k = |(\text{Target Value} - \mu)/(\text{Target Value} - LSL)|$ 이다.

특히 고도의 전문화된 6시그마 프로젝트 수행시 계량연속형 데이터로 스펙을 벗어나는 오차를 정밀도와 정확도로 구분하여 개선하는 경우 본 연구에서 제안한 계산식이 유용하게 사용될 수 있다.

### 2.3 정확도, 정밀도 관점

2.1절에서는 단기, 장기 공정능력을 정밀도에 의한 PCI, PPI가 아닌 정확도 여부에 따라 사용할 것을 권고하였으며 2.2절에서는 정밀도와 정확도의 분리여부에 따른 별도의 PCI 산출식을 제안하였다.

따라서 본 절에서는 PCI의 정확도, 정밀도의 위치에 따른 문제점과 개선식을 고찰하고자 한다. 정확도와 정밀도가 고려된  $C_{PK} = (1 - K)(USL - LSL)/6\sigma$ , where  $K = |((USL + LSL)/2 - \mu)/((USL - LSL)/2)|$ 에서 분자의 치우침 정도  $((USL + LSL)/2 - \mu)$ 와 분모의 정밀도  $6\sigma$ 가 서로 상쇄되어 공정능력을 제대로 평가하지 못하는 단점을 지니고 있다. 따라서 오차=정밀도+정확도 라는 정의와 분산의 Propagation 원리에 따라 정밀도와 정확도를 모두 분모에 위치하는 PCI를 사용하고 있으며 이는 Taguchi Robust Design에서 S/N Ratio를 최적화하는 것과 같은 효과의 산출식이다. 이러한 PCI는  $C_{PM} = (USL - LSL)/6(\sigma^2 + ((USL + LSL)/2 - \mu)^2)^{1/2}$ 으로 모든 오차가 분모에 모여 있어  $C_{PK}$ 같은 단점을 피할 수 있다.

그러나 하나의 PCI값으로 공정오차인 정밀도와 정확도를 파악할 수 없으며 반드시 히스토그램의 가시관리를 통한 해석과 다양한 PCI의 병용으로 공정의 이상원인을 조기에 모니터링하고 개선해야 한다.

### 2.4 생산, 측정, 교정 프로세스 관점

PCI가 생산공정에서만 반영될 경우 측정, 교정 단계에서의 오차인 정밀도와 정확도의 영향이 배제되어 품질의 이상원인을 파악할 수 없게 된다. 측정오차인 경우 MSA(Measurement System Analysis)와 Gage R&R(Reproducibility & Repeatability)의 적용으로 측정정확도와 측정정밀도가 가능하다.

그러나 교정단계에서는 오차(Error)가 아닌 불확도(Uncertainty)가 최근 사용되고 있다. 교정기의 참값(True Value)이 정해져 있다는 관점은 오차(Error)이고 계속 찾아야 한다는 관점이 불확도(Uncertainty)이다. 불확도는 교정데이터를 중심극한정리의 표준오차(Standard Error)에 의해 구하는 A형 불확도와 과거 알려진 경험분포인 정규분포, t분포, 사각분포, 삼각분포, U분포로 구하는 B형 불확도가 있다. 이를 포함인자(Coverage Factor)의 확장 불확도  $U_E$ 로 최종 산출한다.

따라서 분산의 Propagation 원리에 따라 생산 정밀도  $\sigma_p$ , 측정 정밀도 R&R, 교정 불확도  $U_E$ 가 반영된 통합 공정능력지수  $PCI = (USL - LSL)/6(\sigma_p^2 + R\&R + U_E^2)^{1/2}$ 이다. 따라서 SPC 활동의 Process는 생산단계, 측정단계, 교정단계의 오차를 최소화하기 위해 목표정밀도와 목표정확도를 사전에 개선하여 제어하는 통합적 공정관리 방식이 요구된다.

### 3. $C_{PU}$ , $C_{PL}$ 의 오적용과 정규성 검정

#### 3.1 $C_{PK}$ 의 오적용

2.2절과 같이  $C_{PK}$ 는 양쪽스펙에서만 사용이 가능한 데도 불구하고 한쪽스펙인 경우  $C_{PK}$ 를 MINITAB으로 산출하는 오적용 사례가 품질분임조활동과 식스시그마 활동에서 빈번하게 발생한다. 이 경우 LSL 또는 USL의 한쪽에 임의의 값을 넣고 계산한 결과로 공식의 의미를 모르는 경우도 있으나 한쪽스펙의 경우 MINITAB이 정규성검정을 지원하지 않은 경우 양쪽 스펙의 정규성검정을 사용하려는 편법에 기인한다.

따라서 본 연구에서는 한쪽스펙에 대한 간이 정규성검정을 3.2절에 제시하기로 한다.

#### 3.2 $C_{PU}$ , $C_{PL}$ 의 정규성 검정

정규성검정(Normality Test)에는 경험적(Empirical) CDF(Cumulative Density Function)를 사용하는 Anderson-Darling법, Kolmogorov-Smirnov법, Watson법, Cramer-Von Mises법과 회귀분석을 사용하는 Shapiro-Wilk법, Ryan-Joiner법이 있다.

가시관리를 위해 NPP(Normal Probability Plot)를 사용하는 정규성 검정의 3단계는 다음과 같다. 1단계 : 한쪽스펙의  $C_{PU}$ ,  $C_{PL}$ 에 대한 정규성 검정을 실시할 경우 원 데이터  $x_i$ 에 대한 좌우대칭인 복제(Copy) 데이터  $-x_i$ 를 구하고  $x'_i = \{x_i, -x_i\}$  오름차순(Increasing Order)으로  $x'_i$ 을 정렬(Sorting)한다. 2단계 : 경험적 CDF  $F(x'_i)$ 를 다음 8가지 방법으로 구한다. 메디안순위, 평균순위, 모드순위, Midpoint순위인 경우  $(i-0.5)/(n+0.4)$ ,  $i/(n+1)$ ,  $(i-1)/(n-1)$ ,  $(i-0.5)/n$ 이고 Blom추정량, IEC56추정량, Tukey추정량, Filliben추정량, Kaplan-Meier추정량인 경우  $(i-0.375)/(n+0.25)$ ,  $(i-0.5)/(n+0.25)$ ,  $(i-1/3)(n-1/3)$ ,  $(i-0.3175)/(n+0.365)$ ,  $i/n$ 이다. 3단계 :  $(x'_i, F(x'_i))$ 를 NPP에 타점하여 직선이면 P-Value  $> \alpha$  로  $H_0$ :정규분포를 만족하는 것으로 판정한다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 실무자의 사용편의성을 위해 다양한 공정특성을 반영한 공정능력지수를 유형화하여 적용방안을 제시하였다. 공정의 정상원인인 경우 PCI를, 이상원인으로 판정된 경우 PPI를 사용해야 하며 단기, 장기는 정밀도가 아닌 치우침(정확도)의 관점에서 사용할 것을 권고하였다. 또한 오차통합형과 오차분리형의 공정능력의 영향에 관해 논의하였다. 특히 생산, 측정, 교정 프로세스의 모든 정밀도가 반영된 통합 공정능력지수와 한쪽스펙에 대한 간이 정규성 검정법을 제안하였다.

## 5. 참 고 문 헌

- [1] Bothe D.R., Measuring Process Capability : Techniques and Calculations for Quality and Manufacturing Engineers, McGraw-Hill, 1997.
- [2] Kotz S., Process Capability Indices in Theory and Practice, A Hodder Arnold Publication, 1998.
- [3] Relyea D.B., The Practical Application of the Process Capability Study : Evolving From Product Control to Process Control, Productivity Press, 2011.
- [4] 최성운, “타구치 로버스트 계획에서 응용모형의 개발”, 대한안전경영과학회지, 13(1)(2011) : 203-209.
- [5] 최성운, “생산, 측정 및 교정프로세스에서 오차 유형화에 의한 확장 공정능력지수의 개발”, 대한안전경영과학회지, 11(2)(2009) : 117-126.
- [6] 최성운, “우연, 이상원인의 유형에 따른  $C_{PK}$ ,  $P_{PK}$ 의 이해와 적용방안”, 대한안전경영과학회 추계학술대회 발표문집, (2009) : 549-555.
- [7] 최성운, “정확도 및 정밀도 관점에서의 통계적 품질기법의 해석”, 대한안전경영과학회지, 9(1)(2007) : 119-131.