

# Characteristic Analysis of the System Process Capability Indices

Dokyung Lee<sup>†</sup>

Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

## 시스템 공정능력지수의 특성분석

이 도 경<sup>†</sup>

금오공과대학교 산업공학부

Process capability indices (PCIs) have been widely used in manufacturing industries to provide a quantitative measure of process potential and performance to meet the specification limits on quality characteristics. The most of existing PCIs are concerned with a single variable. But, in many cases, people want to express a integrated PCI which includes a couple of sequential processes. In this paper, we analyzed the characteristics of system PCIs such as  $\overline{Cp}(f)$ ,  $SC_{pk}$ ,  $SC_{psk}$ ,  $C_{psk}^T(m)$  and  $SC_{pm}(m)$ .

**Keywords** : Process Capability, System Process Capability Index

### 1. 서 론

우리는 제품의 가치를 결정하는 품질특성치들을 측정하여 그 값의 높고 낮음을 통해 해당 제품이 사용 목적에 어느 정도 적합함을 판정한다. 제품이나 반제품은 물론 이들보다 작은 단위의 모듈이라 하더라도 이들 모듈은 다수의 품질특성치를 갖는다. 또한 모든 개별 특성치들은 일련된 여러 공정을 거치면서 구현된다. 이렇게 순차적인 여러 공정에 걸쳐 결정되는 품질특성치들에 대해, 해당 특성에 주어진 규격 대비 현재 공정이 어느 정도 부합하고 있는지를 파악할 필요가 있으며, 이를 위한 지수로서 시스템 공정능력지수가 사용된다. 시스템 공정능력지수는 대상 시스템을 구성하는 개별 공정들의 공정능력지수, 단일 공정능력지수들에 의해 결정된다.

공정능력이란 공정이 관리 상태에 있을 때, 그 공정에서 생산되는 제품의 품질변동이 주어진 규격에 대해 어느 수준인지 표현하는 개념이며, Feigenbaum을 비롯한 품질 분야의 여러 대가들이 정의해 왔다. 이러한 공정능

력은 이를 수치로 표현한 공정능력지수를 통해 해당 공정의 수준으로 표현된다.

단일 항목에 있어 공정능력 개념을 가장 간단하게 표시하는 방법이 해당 공정에서 생산된 제품들의 표준편차의 6배인  $6\sigma$ 로 나타내는 자연공차이다. 이 때, 공정능력의 수준은 자연공차와 주어진 규격의 상한과 하한의 구간폭과 비교하여 판단하며, 이로써 해당 공정이 주어진 규격에 맞는 제품을 생산할 수 있는 능력이 어느 정도인지 파악할 수 있다. 이와 같이 공정능력지수를 사용함으로써 제품 혹은 공정에 참여한 사람들을 포함하여 소비자들은 제품의 품질 목표 설정 및 정보소통을 훨씬 단순화할 수 있기 때문에 공정능력지수는 산업계에서 폭 넓게 사용하고 있다.

본 연구의 대상인 시스템 공정능력지수는 우선 개별 항목에 대한 공정능력지수의 선정과 다음으로 이들 여러 개별 공정능력지수들로 시스템을 대표할 수 있는 산정방법 및 시스템을 구성하는 하부 공정 수에 따라 그 특성이 결정된다.

기존의 연구에서 공정능력지수에 관한 연구방향은 크게 네 가지 분야로 진행되어 왔다. 첫째는 개별 항목에 있어 공정능력지수가 부적합률에 가능한 부합하도록 개발하는 분야로서, 이 분야는 공정능력지수에 있어 가장

주된 분야이다. Juran[8]이 공정능력을 언급한 이래 지금까지 공정능력지수는  $C_p$ ,  $C_{pk}$ ,  $C_{pm}$ ,  $C_{pmk}$ ,  $C_{psk}$  등으로 전개되어 왔다.

두 번째는 측정 자료들이 정규성 결여나 자료들 간에 상관성이 있는 경우와 같이 대상 공정이 안정화 조건을 위배할 때, 이를 반영할 수 있는 지수를 개발하는 분야이다.

세 번째는 다변량 공정능력지수 분야로서, 이 분야에서는 일반적으로 두 가지 이상의 동일한 물리적 단위를 갖는 특성자료들에 대해 이를 통합한 하나의 지수를 개발하는 분야이다.

네 번째 분야는 순차적 공정에서 관심 대상 일부 공정 구간에 대해 지수화한 시스템 공정능력지수 분야로서, 여러 공정들을 통합하여 하나의 지수로 표현함에 있어서는 다변량 공정능력지수와 유사한 개념이다. 그러나 시스템 공정능력지수는 여러 단계의 개별 공정의 품질특성에 대해 각기 개별 공정능력지수로 표현 후, 이들로써 전체 공정능력으로 나타내는 개념이 다변량 공정능력지수와 구분된다[7]. 그리고 순차적인 개별 공정들이 서로 독립이라고 전제함이 다변량 공정능력지수와 또 다른 차이점이라 할 수 있다.

본 연구는 앞서 언급한 네 가지 분야 중에서 마지막의 시스템 공정능력지수에 대한 것이다. 시스템 공정능력지수들의 특성 비교를 위해 먼저 여러 개별 공정능력지수들에 대해 살펴본다. 다음으로 이들 개별 공정들의 집합인 모듈에 대해 이를 대표할 수 있는 시스템 공정능력지수를 위한 기준과 방법론에 대해 언급하며, 마지막으로 이들 시스템 공정능력지수들 특성을 비교하도록 한다.

## 2. 개별 공정능력지수

시스템 공정능력지수는 대상 모듈을 구성하는 여러 단일 항목에 대해 우선 공정능력지수로 나타내야 하며, 다음으로 이들 여러 개별 항목의 공정능력지수들을 사용하여 모듈 전체의 공정능력으로 나타내야 한다. 그러므로 우선 단일 항목에 대한 개별 공정능력지수들을 살펴 보도록 한다.

$C_p$  : 표준편차의 6배 구간과 주어진 규격폭의 비율로 나타낸 가장 기본적인 개별 공정능력지수로서 Kane[9]이 제시하였으며, 아래의 식과 같다.

$$C_p = (USL - LSL) / 6\sigma$$

단,  $USL$  : 규격상한,  $LSL$  : 규격하한

$C_{pk}$  : 이 지수 역시 Kane이 제안한 것으로서  $C_p$ 와 더불어

어 산업체에서 가장 보편적으로 사용되고 있다. 공정평균이 규격상한과 규격하한의 중앙을 벗어나 치우침이 발생하는 경우,  $C_p$ 가 부적합률 차원에서 이를 반영하지 못하는 단점을 보완한 지수이다.

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right)$$

$C_{pm}$  : 공정평균이 규격상한과 규격하한의 중앙값  $(USL + LSL)/2$ 이 아닌 특정 목표값  $T$ 로 설정되어 있는 경우,  $C_{pk}$ 가 이를 반영하지 못함을 보완하기 위한 공정능력지수이다. Chan 등[4, 5]이 제안하였다.

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{E[(X - T)^2]}} = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma + (\mu - T)^2}}$$

$C_{pmk}$  : Pearn와 Kotz 등[17]이 제안했으며, 공정평균이  $C_{pm}$ 의 목표값  $T$ 가 치우친 정도를 부적합률에 반영하기 위한 공정능력지수이다.

$$C_{pmk} = \frac{\min(USL - \mu, \mu - LSL)}{3\tau} = C_{pk} / \sqrt{1 + (\mu - T)^2 / \sigma^2}$$

$C_{psk}(u, v, w)$ : Benson[1]은 공정 평균의 치우침, 공정 목표값  $T$ 의 설정 여부를 고려하여 이들 상황을 0 혹은 1을 취하는 지시변수  $u, v, w$ 로 처리함으로써  $C_p, C_{pk}, C_{pm}, C_{pmk}$  등 지금까지 제안된 공정능력지수들을 나타낼 수 있도록 일반화하였다.

$$C_{psk}(u, v, w) = \frac{\min(USL - \mu - |u - T|, \mu - LSL - |u - T|)}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} = \frac{d - u|\mu - M| - w|M - \mu|}{3\sqrt{\sigma^2 + v(\mu - T)^2}}$$

$$\text{단, } d = \frac{(USL - LSL)}{2}, M = \frac{(USL + LSL)}{2}$$

위에 소개한 공정능력지수들 외에 품질공학의 손실함수를 공정능력지수 산정에 응용한  $C_{pm}$ 에 영향을 받아 Bolyes [2]는 특성값의 단순 산포가 아닌 이에 의한 비용모형  $E[(L)]$ 으로 처리한  $C_{pm}^+$  지수를 제안했으나, 비용모형이므로 이 지수는 주어진 규격에 대한 통계적 수행능력을 직접적으로 나타내지는 못한다.

공정능력이 이렇게 여러 가지로 전개되어 온 이유는

공정능력지수 값을 부적합률로 전환할 때, 가능한 그 오차를 줄이고자 하는 의도였다. 그러나 기본적으로 공정능력지수가 부적합률과 일치하는 함수적 관계가 있어야 할 의무는 없다. 만일 공정능력지수가 부적합률과 일치해야 한다면, 구태여 복잡한 공식을 사용하면서도 그 값이 부적합률 보다 불명료한 공정능력지수는 불필요하다. 이와 같은 공정능력지수들과 부적합률과의 불일치는 기본적으로 표준편차의 추정에 기인하며, Kenny와 Keeping [10]이 제시한 것과 같이, 모집단으로부터 추출한  $n$ 개의 샘플의 표본표준편차  $s$ 는 다음과 같은 분포를 취한다.

$$f(s) = 2 \frac{\left(\frac{n}{2\sigma^2}\right)^{(n-1)/2}}{\Gamma\left[\frac{1}{2}(n-1)\right]} e^{-ns^2/2\sigma^2} s^{n-2}$$

함수  $f(s)$ 는  $n$ 과  $\sigma^2$ 의 값에 따라 분포의 형태가 결정된다. 그리고 이 경우 Kotz와 Johnson[11]은 표본 표준편차의 분포함수에 의한 공정능력지수  $C_p$ 의 변화에 대해 그 기댓값을 다음과 같이 제시하였다.

$$E(\hat{C}_p) = \frac{C_p}{b_f}, \quad b_f = \sqrt{\frac{2}{f}} \frac{\Gamma(f/2)}{\Gamma[(f-1)/2]}$$

### 3. 시스템 공정능력지수

순차적으로 이어진 여러 개별 항목들의 공정능력을 통합하여 하나의 공정능력으로 표현한 공정능력지수를 시스템 공정능력으로 분류한다.

시스템 공정능력지수를 산정하기 위한 두 가지 주된 방법론은 다음과 같다. 첫 번째는 독립적으로 이어진 일련의 개별 항목의 조합으로 구성되는 모듈의 부적합률이 가능한 전체 부적합률과 유사하게 하는 방법이다. 이를 위해 개별 공정의 부적합률로 전체 부적합률을 계산하고 이를 다시 공정능력지수로 변환하는 방법이 이용된다. 여러 품질 특성들이 서로 독립이라는 가정 하에서 변량  $i$ 에 의한 부적합률을  $p_i$ 라고 할 때,  $f$ 개의 변량으로 구성된 전체 부적합률은 다음과 같다.

$$P(f) = 1 - \prod_{i=1}^f (1 - p_i)$$

이 식을 통해 전체 부적합률  $P(f)$ 를 구한 후, 역으로 이 부적합률에 해당하는 표준정규분포의  $Z$ 값을 찾아 전체 공정능력으로 전환할 수 있다. 같은 맥락으로 항목  $i$ 에 의한 개별 공정능력지수를  $C_p(i)$ 라고 할 때, 개별  $C_p(i)$ 들에 의한 수율로 전체 부적합률을 나타내고, 표준정규

분포에서 이 전체 부적합률에 해당하는 공정능력지수로 전환 가능하다.

나머지 방법은 부적합률에 무관하게 개별 항목들에 대해 공정능력지수들을 계산하고, 이들 개별 공정능력지수들을 조합하여 대상 시스템(모듈)의 공정능력을 나타내는 방법이다.

여러 개별 공정능력지수들에 대해 이를 하나의 대푯값으로 나타내는 방법으로 산술평균, 기하평균, 절사평균 등이 일반적이며, 대상 공정의 성격이나 나타내고자 하는 의도에 따라 최소값이나 최대값으로 선정할 수도 있다.

기존 연구에서 제시된 시스템 공정능력지수로 다음의 네 가지가 있다.

$\overline{C_p}(f)$ : Lee[13]가 제시한 지수로서 모듈이  $f$ 개의 개별 항목으로 구성되고, 이들 개별 항목의 공정능력지수를  $C_p(i)$ 로 나타낼 때,  $f$ 개의 개별 공정에 의해 구성되는 시스템 공정능력지수를  $\overline{C_p}(f)$ 로 나타내고 다음 식과 같은 산술평균 개념을 제시했다.

$$\overline{C_p}(f) = \sum_{i=1}^f \alpha_i C_p(i)$$

단,  $\alpha_i$ 는 공정  $i$ 의 가중치로서  $\sum_{i=1}^f \alpha_i = 1$ 이며, 모든 개별 항목이 불량과 관련된 공정이라면,  $\alpha_i = 1/f$ 이 된다. 시스템 공정능력지수  $\overline{C_p}(f)$ 는  $f$ 개의 개별 항목의  $C_p(i)$ 들에 의한 가중평균으로 표현되기 때문에, 그 식의 표현이나 개념이 매우 단순한 장점을 가진다. 그리고 그 계산에 있어,  $C_p(i)$ 들에 대해 부적합률 환산 절차가 필요하지 않아 시스템 공정능력지수 산정 계산 자체도 매우 간단하다.

$SC_{pk}$  : Robert[19]가 다단계 공정의 시스템 공정능력을 평가하기 위해 제안한 지수로서, 각각의 개별 공정능력을 지수  $C_{pk}$ 를 사용하여 계산하고,  $m$ 개의 하위 공정으로 구성되는 최종 시스템 공정능력을 이들 하위 공정능력들의 기하평균으로 표현하였다.

$$SC_{pk} = \left[ \prod_{i=1}^m C_{pk}(i) \right]^{1/m} = \left[ \prod_{i=1}^m \min\left(\frac{USL_i - \mu_i}{3\sigma_i}, \frac{\mu_i - LSL_i}{3\sigma_i}\right) \right]^{1/m}$$

공정능력지수가 규격과 산포를 포함한 척도이므로 부

적합률을 어느 정도 반영하고자 하는 의도는 있지만, 공정능력지수와 부적합률은 1대 1 대응함수가 아니다. 따라서 이 방법은 원래 공정능력지수의 의미대로 공차와 산포의 비교에 의한 만족도를 나타내기 위한 개념에 충실한 지수이다.

$SC_{psk}$  : Cho 등[6]은 개별 공정능력지수를  $C_{psk}(i)$ 로 나타내고 시스템 공정능력지수는 Robert와 동일하게 기하평균으로 나타내었다.

$$SC_{psk} = \left[ \prod_{i=1}^m C_{psk}(i) \right]^{1/m}$$

$C_{psk}^T(m)$  : Lee와 Lee[14]는 단일공정이지만 측정위치가 한곳이 아닌 여러 곳의 경우를 설정하고 이를 시스템 공정능력의 개념으로 해석할 수 있음을 보였다. 이들은 전체 공정능력지수를 여러 개의 개별 공정능력지수들에 대해  $C_{psk}(i)$ 로 계산하고 시스템 공정능력지수는 이들의 최소값으로 설정하였다.

$$C_{psk}^T(m) = \min C_{psk}(i), \quad i = 1, 2, \dots,$$

이는 패널 공정의 특성상 한 곳의 개별 위치에서라도 불량 발생하면 대상 모듈 전체가 부적합품으로 처리되기 때문이다.

$SC_{pm}$  : Kotz와 Lovelace[12] 및 Palmer와 Tsui[16]의 지적처럼 공정능력지수  $C_{pmk}$ 는 공정의 부적합률이 공정이 정규성에서 멀어질수록, 동일한 부적합률에 대해 지수가 상대적으로 넓은 영역의 값을 갖기 때문에 신뢰도가 떨어진다. 그러므로 Lee[15]는 이들의 단점을 보완하여 위치 공정능력지수로서  $C_{pm}$ 을 적용한 최소 기준의 시스템 공정능력지수를 다음과 같이 제안하였다.

$$SC_{pm}(m) = \min C_{pm}(i), \quad i = 1, 2, \dots, m$$

#### 4. 시스템 공정능력지수의 특성 비교 및 결론

본 장에서는 제 3장에서 소개한 다섯 개의 시스템 공정능력지수  $\overline{Cp}(f)$ ,  $SC_{pk}$ ,  $SC_{psk}$ ,  $C_{psk}^T(m)$  그리고  $SC_{pm}$ 에 대해서 그 특성을 비교하고자 한다.

비교 대상 다섯 개 지수중에서  $\overline{Cp}(f)$ 는 산술평균개념이며,  $SC_{pk}$ 와  $SC_{psk}$ 는 기하평균, 그리고  $C_{psk}^T(m)$ 와  $SC_{pm}$

는 최소값 개념이다.

$\overline{Cp}(f)$ 는  $f$ 개의 개별 항목의 공정능력지수  $Cp(i)$ 의 산술평균이므로, 당연히  $Cp(i)$  값에 영향을 받는다. 또, 모듈 구성 항목수  $f$ 에 의한 함수로서  $f$ 의 증가에 따른 전체 공정 불량률  $P(f)$ 은 선형적인 증가를 나타내며, 정확하게는 미약한 위로 볼록(concave) 함수 형태를 취한다. Lee[13]가 제시한 수치예제에서 하부 공정수를 3개로 설정한 경우,  $\overline{Cp}(f)$ 의 증가에 대한 부적합률의 특성변화를 정리하면 다음과 같다. 하부 항목수  $f$ 를 3개인 경우를 예시한 것은 이어지는  $SC_{pk}$ 와  $SC_{psk}$  지수에서의 예제와 동일한 상황을 설정함으로서 간접 비교를 위해서이다.

$\overline{Cp}(3)$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$P(f=3)$	0.350	0.200	0.103	0.048	0.020	0.008

해당 연구에서는  $\overline{Cp}(f)$  값을 0.5에서 1.0 값 구간에서 0.1 간격으로 설정하고, 하부 항목 수  $f$ 를 1개에서 7개까지 증가시키면서 부적합률의 변화를 모의실험 결과로 제시하였다. 개별 항목의 불량관여 가중치  $\alpha_i$ 가  $f$ 개 구성에서 일부로 편중할수록 공정의 부적합률은 낮아지므로 시스템 공정능력지수  $\overline{Cp}(f)$  값은 증가한다. 그러나 해당 논문에서는  $\alpha_i$ 를 동일하게 설정함으로서  $\alpha_i$ 의 변화에 대한 부적합률의 특성변화를 제시하지는 않았다.

$SC_{pk}$ 와  $SC_{psk}$ 는 기하평균 개념이므로 대상 모듈이 동일 수준의 공정능력으로 구성된 하부 공정이라면, 이들 시스템 공정능력은 산술평균 개념인  $\overline{Cp}(f)$ 에 비해서 작게 나타나게 된다.  $SC_{pk}$ 는 하부 개별공정- $i$ 에 대해  $C_{pk}$ 로 공정능력을 산정하므로, 공정의 치우침이 발생하는 경우  $Cp$ 로 산정하는  $\overline{Cp}(f)$ 에 비해 그 값이 작아지게 된다. 공정평균의 치우침은 그 이동 정도에 따라 공정능력에 영향을 미치지만, 설사 모집단은 평균의 치우침이 없더라도 표본에 의한 분석에서는 미약한 정도라도 발생함이 일반적이다. 그러므로 시스템 공정능력 수준을 보수적으로 즉, 작게 표현하는 경향을 보인다.  $SC_{psk}$  또한 치우침을 고려한 지수이므로,  $SC_{psk}$ 가  $\overline{Cp}(f)$ 에 대비해 보이는 상대적 효과는  $SC_{pk}$ 와 동일하다. Cho와 Lee[6]는 모의 실험을 통해 하부 개별공정을 3개로 설정하고 공정 목표값  $T$ 를 공정 중심에서 8단계로 증가시키면서  $SC_{psk}$ 의 변화를 제시하였다. 해당 연구에서 제시한 자료를 기준으로 분석 결과  $SC_{psk}$ 는  $\overline{Cp}(f)$ 에 비해 보다 더 보수적으로 산정됨을 보였다. 그러나 해당 연구에서 예시한 예제에서는 목표값  $T$ 에 대한 치우침을 설정하지 않았으므로, 실제로는 개별 공정능력지수로  $C_{pmk}$ 를 적용한 결과로 해석해야 한다.

$C_{pk}$ 와  $C_{psk}$ 는 공정 평균의 치우침을 고려하는 점은 동일하지만, 그 기준이 규격의 중앙값인가 목표값인가의 차이점이 있다. 이들 두 개별 공정능력지수  $C_{pk}$ 와  $C_{psk}$ 로 구성되는 시스템 공정능력지수  $SC_{pk}$ 와  $SC_{psk}$ 는 동일한 조건하에서 상대적으로  $SC_{psk}$ 가  $SC_{pk}$ 에 비해 공정능력을 보수적으로 표현한다. Cho와 Lee는 앞서의 모의실험을 통해 다음의 결과를 제시했다.

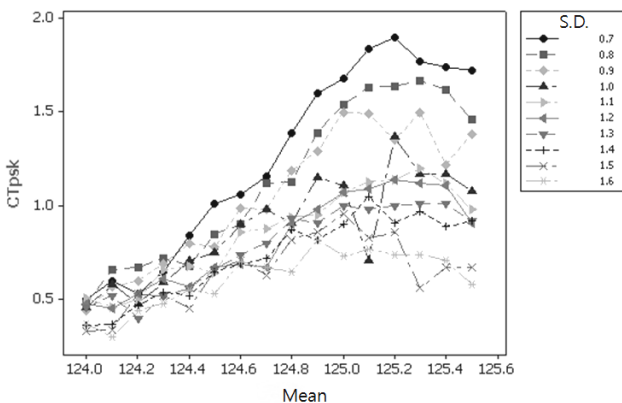
	1	2	3	4	5	6	7
$SC_{pk}$	.921	.734	.799	.585	.714	.783	.613
$SC_{psk}$	.936	.700	.774	.520	.620	.653	.518

이 표에서 확인할 수 있듯이  $SC_{psk}$ 는  $SC_{pk}$ 에 비해 91.7% 수준에 해당한다(단, 예제에서  $SC_{psk} = 0.805$ ,  $SC_{pk} = 0.978$ 로 비해 비정상적으로 크게 나온 예가 있었으나, 이는 이론적으로 불가능한 경우이므로 분석에서 제외했다).

$C_{psk}^T(m)$ 는 하부 개별 공정에 대해 공정능력을  $C_{psk}$ 로 산정함은 앞서의  $SC_{psk}$ 와 동일하지만, 이들로 계산하는 시스템 공정능력은  $SC_{psk}$ 의 기하평균 개념과 달리 이들 중 최소값으로 산정하는 방식이다. 이러한 하부 공정능력에 대한 최소값 선정 기준은  $SC_{pm}(m)$ 도 동일하다.  $C_{psk}^T(m)$ 은 공정평균이 목표값  $T$ 에서 멀어질수록 공정능력이 감소하는데 이것은 모든 공정능력지수에서 나타나는 일반적인 성질이다.

그러나 Lee 등[14]이 제시한 <Figure 1>을 보면  $T = 125$ 를 중심으로 공정평균이  $LSL$  쪽으로 이동할 때 감소하는 정도는 급한 반면  $USL$  쪽으로 이동할 때 감소하는 공정능력지수 값의 정도는 완만한 비대칭성을 갖는다. 비대칭 정도는 공정 산포  $\hat{\sigma}$ 가  $(USL - LSL)/6$ 보다 작아질수록 심화되는 경향을 보인다.

시스템 공정능력은 여러 개의 하부 개별공정을 통합



<Figure 1>  $C_{psk}^T(m)$  by Process Mean Shift

한 표현이므로 하부 공정의 개수  $f$ 에 의한 특성변화가 가장 중요한 특성이다. 그러나 앞서 소개한 네 가지 시스템 공정능력 지수들은 시스템 공정능력지수를 구성하는 개별 공정에 시용한 공정능력지수가 다르다.

$SC_{pm}(m)$ 은  $C_{psk}^T(m)$ 과 같이 하부 공정능력에 대한 최소값 선정 기준이므로 두 시스템 공정능력지수를 비교 분석함이 바람직하다. 공정능력지수는 표준편차 추정량으로 무엇을 선택에 따라 매우 민감하게 영향을 받는다[3]. 그러나 Lee가 제시한  $SC_{pm}(m)$  지수 산정에서 표준편차의 추정량으로 앞서 지수들과는 다른 합동추정량  $S_p$ 를 사용함으로써 이들 지수를 단순 비교하는 것은 불가능하다.

$$S_p(i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{r=1}^n (x_{ijr} - \bar{x}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^k (n-1)}}$$

$x_{ijr}$  :  $i$ 항목의  $j$ 군  $r$ 번째 자료

( $i=1 \dots m, j=1 \dots k, r=1 \dots n$ )

$SC_{pm}(m)$ 은 규격의 상한과 하한, 목표값, 측정 위치 수 그리고 표준편차 등 많은 매개변수들로 구성되어 있어 해당 연구에서는 단순히  $SC_{pm}(m)$ 을 계산하는 절차만 제시하였다.

앞으로 이들 시스템 공정능력지수들에 대해 보다 다양한 비교분석이 이어져야 할 것으로 생각하며, 이를 위해서는 단기와 장기간에 대한 기준을 포함하여 Pyzdek [18]이 제시한 통일된 표준편차의 세부 추정량의 선정이 선행되어야 할 것이다.

### Acknowledgement

This study was supported by the Research fund of Kumoh National Institute of Technology.

### References

- [1] Benson, E.D., Statistical Properties of a System of Fourth-Generation Process Capability Indices  $C_{psk}$  ( $u, v, w$ ), Ph.D. Dissertation, University of Maryland, U.S.A., 1994.
- [2] Boyles, R.A., The Taguchi Capability Index. *Journal of Quality Technology*, 1991, Vol. 23, No. 1 pp. 17-26.
- [3] Breyfogle III F.W., Implementing Six Sigma, second Ed., John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, U.S.A. : 2003.
- [4] Chan, L.K., Cheng, S.W., and Spring, F.A., A Multivariate Measure of Process Capability. *International Journal of Modeling and Simulation*, 1991, Vol. 11, pp. 1-6.

- [5] Chan, L.K., Cheng, S.W., and Spring, F.A., A New Measure of Process Capability. *Journal of Quality Technology*, 1988, Vol. 20, pp. 162-175.
- [6] Cho, N.H. and Lee, Y.H., A New Multivariate System Process Capability Index. *Journal of Korean Safety Management and Science*, 2003, Vol. 5, No. 3, pp. 145-156.
- [7] Davis, R.B., A Capability Index For Multiple Process Streams. *Quality Engineering*, 1999, Vol. 11, No. 4, pp. 613-618.
- [8] Juran, J.M., *Quality Control Handbook*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1974.
- [9] Kane, V.E., Process Capability Indices, *Journal of Quality Technology*, 1986, Vol. 18, No. 1, pp. 41-52.
- [10] Kenney, J.F. and Keeping, E.S., *The Distribution in Mathematics of Statistics*, 2nd ed., Princeton, NJ : Van Nostrand, 1951, pp. 170-173.
- [11] Kotz, S. and Johnson, N.L., Process Capability Indices- A Review, 1992~2000. *Journal of Quality Technology*, 2002, Vol. 34, No. 1, pp. 2-19.
- [12] Kotz, S. and Lovelace, C., *Introduction to Process Capability Indices*, Arnold, London, U.K. : 1998.
- [13] Lee, D.K., A New Multivariate Process Capability Index. *K.N.U.T Research Journal*, 1999, Vol. 20, pp. 153-160.
- [14] Lee, D.K. and Lee, H.S., Process capability index for single process with multiple measurement locations. *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2007, Vol. 30, No. 3, pp. 28-36.
- [15] Lee, D.K., The Process capability Index of minimum base on the multiple measuring locations. *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2011, Vol. 34, No. 4, pp. 114-119.
- [16] Palmer, K. and Tsui, K.L., A Review and Interpretations of Process Capability Indices. *Annals of Operation Research*, 1999, Vol. 87, pp. 31-47.
- [17] Pearn, W.L., Kotz, S., and Johnson, N.L., Distributional and Inferential Properties of Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, 1992, Vol. 24, No. 4, pp. 216-231.
- [18] Pyzdek, T., How Do I Compute  $\sigma$ ? Let Me Count The Ways, *Quality Digest*, May : 1998.
- [19] Robert, D.P., Process Capability : A Criterion for Optimizing Multiple Response Product and Process Design. *IIE Transactions*, 2001, Vol. 33, pp. 497-509.

**ORCID**Dokyung Lee | <https://orcid.org/0000-0003-3255-0261>