

# 검사/계측시스템의 능력분석을 포함한 비공정능력지수의 개발과 적용

민성진\* · 김계완\*\* · 류정현\*\* · 윤덕균\*\*

\* LG 생산기술원, \*\* 한양대학교 산업공학과

## Development and Application of Process Incapability Index including Capability Analysis of Inspection or Gage System

Sung-Jin Min\*, Kye-Wan Kim\*\*, Jung-Hyun Ryu\*\*, Deok-Kun Yun\*\*

\* LG PRC, \*\* Dept. of Industrial Engineering, Hanyang University

Keyword : Six-Sigma, Process Incapacity Indices, Process Capability Analysis

### Abstract

This paper presents a process incapability index to provide manager with various information of process and to reduce cost. The introduced process incapability indices indicate information about mean and variance of manufacturing process and variance of inspection process to evaluate process capability using ratio of variance and difference between target and mean to specification. This model can be used by the scale of six sigma management.

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

현재 세계 각 국은 총성 없는 전쟁이라고 표현될 만큼 국경을 초월한 무역 전쟁을 벌이고 있으며 이런 상황에서 기업은 앞으로의 존폐 여부를 확신할 수 없을 만큼 치열한 무한경쟁을 뚫고 살아남기 위해 경영혁신 또는 기업전략들을 도입하고 있는 추세이다. 이와 같은 경제 환경에서 각 국가 및 기업은 경쟁력을 확보하고 세계시장을 선점하기 위한 방안으로 21C 첨단기술의 개발 및 현재 제공

하고 있는 제품과 서비스의 질을 혁신적으로 개선하고자 하는 전사적 방법을 모색하고 있다. 이러한 이유로 최근 관심의 대상으로 부각되고 있는 것이 6시그마 경영전략으로, 이는 Top-Down 방식의 최고 경영자의 지속적인 관심과 인재의 교육·훈련, 정확한 DATA에 의한 관리 그리고 새로운 평가 시스템 구축의 추진을 강조하고 있다. 그리고 6시그마 경영에서는 성과를 구체적으로 이끌어내기 위해 여러 가지 다양한 통계적 기법을 사용하고 있다. 사용되는 통계적 기법 하나 하나가 모두 중요하지만 그 가운데 특히 강조할 수 있는 것이 공정능력분석으로, 분

석을 위해 규격과 비교하여 공정능력을 평가하는 척도로 공정능력지수가 가장 보편적으로 사용되고 있다.

제품의 생산, 판매, 유통 등의 기업활동에 있어 측정이 없는 활동이란 하나도 없다고 해도 지나친 말이 아니며 측정을 통한 검사는 제품이나 서비스의 질을 향상시키려는 조직에 있어 중요한 역할을 한다. 현재의 생산공정은 여러 가지 제품을 자동화된 공정에서 혼합하여 필요한 제품을 적시에 생산하는 방식이 많이 적용되며, 검사시스템 또한 다양한 제품을 유연하고 정밀하게 측정할 수 있도록 정밀화되고 자동화되는 추세이다. 즉, 검사공정도 사람에 의한 검사보다도 자동화된 기계를 이용한 검사시스템이 적용되고 있고 따라서 이 시스템을 보전·수리하기 위해 검사공정에 대한 관리가 한층 중요해지고 있는 것이 사실이며 이에 따라 검사공정에 대한 능력분석도 요구된다. 품질관리가 품질특성을 예측하여 예측 결과에 따라 통계적 기법 또는 기타 관리 기법을 사용하여 품질의 유지·향상을 꾀하는 수단인 이상, 품질관리에서 올바른 검사시스템의 관리를 바탕으로 할 때만이 비로소 효과적인 관리라고 할 것이다.

따라서 본 논문에서는 생산공정에 대하여 목표치가 규격의 중심에 일치하는 경우와 목표치가 규격 중심에 일치하지 않는 경우로 나누어 목표치에 대한 평균의 이탈 크기 및 분산의 변화 크기뿐만 아니라 검사공정에 대한 분산을 분리시켜 평가하도록 함으로써 보다 많은 정보를 제공할 수 있는 공정능력분석의 방안을 제안한다. 또한 보다 확장된 개념으로 검사공정의 재현성과 반복성까지도 고려하는 일반화된 방안을 제시한다. 그리고 공정의 비공정능력을 평가하여 역으로 공정

능력을 판단하는 새로 제안된 비공정능력지수를 6시그마 경영전략에 적용하여 사용할 수 있는 방안을 모색하고 이를 평가한다.

## 1.2 연구 절차 및 방법

본 연구는 총 5개의 장으로 구성되어 있으며, 그 구성 및 주요 내용은 다음과 같다. 제 2 장에서는 공정능력분석에 필요한 지금까지 연구되었던 공정능력지수와 비공정능력지수를 비교하여 고찰한다. 제 3 장은 공정의 비공정능력을 측정하여 역으로 공정능력을 분석하는 비공정능력지수가 생산공정의 평균과 분산 그리고 검사공정의 분산으로 분리되어 관리자에게 보다 많은 정보를 제공하는 비공정능력지수를 제안하고, 이를 최근 이슈가 되고있는 6시그마 경영기법에 적용하기 위한 방법을 제안한다. 제 4 장은 수치예제를 통하여 공정의 생산공정능력과 검사공정능력을 파악하는 절차를 살펴보고 기존의 공정능력지수와 비교한다. 제 5 장은 본 연구의 결론과 추후 연구 과제를 제시한다.

## 2. 공정능력분석

본 장에서는 공정능력을 분석하기 위한 기존의 연구와 방법들을 소개한다.

### 2.1 공정능력분석

공정능력은 생산 공정이 얼마나 균일한 품질의 제품을 생산할 수 있는지를 반영하는 공정의 고유능력으로 공정능력분석(Process Capability Analysis)은 제품의 개발 및 제조 단계에서 생산공정의 품질변동 정도를 측정

하고 규격과 비교·분석하여 변동의 폭을 감소시키기 위해 제반 통계적 방법들을 이용하는 것이다[2]. 공정능력분석은 품질개선을 위한 중요한 활동 중의 하나로서 공정능력분석 자료는 유용하게 이용될 수 있다.

## 2.2 공정능력지수

공정능력지수(Process Capability Index)는 제품의 규격과 관련하여 공정능력을 평가하는 척도이다. 즉, 공정이 관리상태에 있을 때 공정에서 생산되는 제품의 품질변동이 어느 정도인가를 나타내는 양으로 전통적인 공정능력지수는 다음과 같이 공정의 자연공차(Natural Tolerance)에 대한 규격의 폭(Width of Specification)의 비율로 나타난다.

Kane[8]이 최초로 제안한 제 1 세대 공정능력지수  $C_p$

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

(여기서, USL : 규격 상한, LSL : 규격하한,  $\sigma$  : 공정의 표준편차)

는 공정의 산포만을 고려하고, 공정 평균의 위치는 고려하지 못한 단점이 있다.

이 단점을 극복하기 위한 대안으로 공정의 산포 뿐만 아니라 공정 평균의 위치까지 고려하기 위한 제 2 세대 공정능력지수  $C_{pk}$ 가 제안되었다.

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right\} \quad (2)$$

그러나  $C_{pk}$ 는 공정 목표치에 대한 공정 평균의 근접정도를 고려하지 못한 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 Chan et al[6]은 목표치로부터 공정 평균의 이탈을 고려하기 위한 공정능력지수  $C_{pm}$ 을 제안했다.

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\tau} \quad (3)$$

(여기서,  $\tau = \sqrt{E[(X-T)^2]} = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}$   $T$  : LSL < T < USL을 만족시키는 공정 목표치)

또한 Chan에 의해  $C_{pm}$ 의 일반화된 형태가 정의되었는데  $C_{pm}$ 은 목표치가 규격 중심에 위치한다는  $(USL - T) = (T - LSL)$ 의 가정에서 출발한 것으로,  $C_{pm}^*$ 는 목표치가 규격 중심에 위치하지 않을 수도 있다는  $(USL - T) \neq (T - LSL)$ 의 가정하에서 다음의 식 (4)가 제안되었다.

$$C_{pm}^* = \frac{\min(USL - T, T - LSL)}{3\tau} \quad (4)$$

즉, 위 식 (4)에서  $T = \frac{USL + LSL}{2}$  이면

$C_{pm}$ 과  $C_{pm}^*$ 는 동일한 식이 된다. 그러나 공정능력지수  $C_{pm}^*$ 는 공정 평균과 산포의 변화에 따라 민감하게 반응하지 못하는 점으로 인하여 공정 관리상태에서 공정의 미세한 변화를 반영하지 못한다는 단점이 제기되었다.

## 2.3 비공정능력지수

Greenwich & Jahr-Schaffrath[7]가 제안한 비공정능력지수(Process Incapability Index)

$C_{pb}$ 는 잘 알려진 공정능력지수  $C_{pm}^*$ 와 반대되는 개념으로 공정의 비능력을 측정한다.

그러나  $C_{pb}$ 는  $C_{pm}^*$ 의 이항 전단사적인 변환으로  $C_{pm}^*$ 와 동일한 정보를 포함하고 있으며 이 정보를 이용하여 공정능력을 평가하고자 한 지수로,  $C_{pb} = 0$ 일 때 가장 이상적인 공정이 된다. 0이 아닌  $C_{pb}$ 값은 공정이 목

표치로부터 어느 정도 이탈하거나 산포가 발생하는 정도의 크기를 가리키는 것으로, 즉 공정의 비능력 정도를 가리키며 따라서 작으면 작을수록 바람직한 공정이 되는 것이다.

비공정능력지수  $C_{pp}$ 의 수리적 개념을 살펴보면 다음과 같다.

$$C_{pp} = \left( \frac{1}{C_{pm}^*} \right)^2 = \left( \frac{\tau}{D} \right)^2 = \left( \frac{\mu - T}{D} \right)^2 + \left( \frac{\sigma}{D} \right)^2 = C_{ia} + C_{ip} \quad (5)$$

(여기서,  $D = \min \left\{ \frac{USL - T}{3}, \frac{T - LSL}{3} \right\}$ ,

$$C_{ia} = \left( \frac{\mu - T}{D} \right)^2, \quad C_{ip} = \left( \frac{\sigma}{D} \right)^2)$$

$C_{ip}$ 는 공정 목표치로부터 공정 평균의 이탈 크기를 측정하는 지수로 공정의 부정확지수(Process Inaccuracy Index)로 정의되고,  $C_{ia}$ 는 공정 산포의 크기를 측정하는 지수로 공정의 비정밀지수(Process Imprecision Index)라고 정의된다. 비공정능력지수  $C_{pp}$ 는 목표치로부터 공정 평균의 이탈을 측정하는 지수와 공정 산포의 크기를 측정하는 하위지수(Sub-index)로 분리되어 공정능력의 취약부분이 평균에 기인한 것인지 그렇지 않으면 산포에 의한 것인가에 대한 정보를 제공하기 때문에 기존 공정능력지수보다 유용하게 사용될 수 있다. 이 제공되는 정보는 시스템 관리자에게 제품 품질의 향상 및 공정관리를 위한 유용한 도구가 될 것이다.

### 2.4 검사시스템에 대한 공정능력

관측되어진 공정 변동의 일부는 제품 그 자체의 변화에 기인한 것이고, 또한 일부는 검사시스템의 변화에 따라서 발생할 수 있는

것이다. 이것을 수학적 식으로 나타내면

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{product}^2 + \sigma_{gage}^2 \quad (6)$$

(여기서,  $\sigma_{total}^2$  : 관측되어진 총 변동,

$\sigma_{product}^2$  : 제품에 기인한 변동,

$\sigma_{gage}^2$  : 측정 오차에 기인한 변동)

관측치의 총변동으로부터 생산 시스템에 대한 변동과 검사시스템에 대한 변동으로 분리시킨 정보를 이용하여 검사시스템에 대한 능력분석이 가능하다. 일반적인 방법으로 측정 제품의 규격 폭에 대한 검사시스템의 분산에 대한 비율을 비교하는 것을 P/T율 (precision-to-tolerance ratio)이라고 한다 [11].

$$\frac{P}{T} = \frac{6 \sigma_{gage}}{USL - LSL} \quad (7)$$

P/T 값은 요구되어지는 정확도를 만족시킬 수 있도록 최소 측정단위의 1/10로 조사되는 검사시스템을 요구하는 일반적 사용 규칙에 근거하여 0.1보다 작은 것이 바람직하다. 그러나 반드시 P/T가 0.1보다 작은 것이 좋은 것은 아니며 분석자의 요구정도에 따라 측정시스템의 정밀도에 기초하여 조정되는 것이 필요하다.

그리고 검사시스템의 분산은 다음과 같이 재현성인 측정 오차와 반복성인 게이지 오차의 두 원소로 구성된다.

$$\sigma_{gage}^2 = \sigma_{repeatability}^2 + \sigma_{reproducibility}^2 \quad (8)$$

재현성(Reproducibility)은 동일한 검사장비를 이용하여 다른 조건, 즉 운영자가 다르거나 또는 환경, 시간이 다를 때 기인하는 변화를 나타내는 것이고 반복성(Repeatability)은 검사장비 그 자체의 고유 정밀도를 반영하는 것이다.

### 3. 검사/계측시스템의 공정능력을 고려한 비공정능력지수

이 장에서는 기존의 공정능력지수와 비공정능력지수에 비교하여 보다 많은 정보를 제공하고 반도체 산업과 같이 검사 공정이 필수적으로 요구되는 산업에 사용될 수 있는 새로운 비공정능력지수에 대하여 고찰한다. 그리고 제안하는 비공정능력지수를 새로운 경영혁신기법인 6시그마 경영전략에 적용하는 방안을 제안한다.

#### 3.1 검사/계측시스템의 분산을 고려하는 비공정능력지수

Greenwich & Jahr-Schaffrath[7]에 의해 제안된 비공정능력지수  $C_{pm}$ 는 기존의 공정능력지수와 반대되는 개념으로서 공정의 비공정능력 정도를 측정하여 공정 평균의 이탈 크기와 분산의 크기를 분리하여 분석하는 장점을 가지고 있다. 그러나 현재의 산업은 전체 공정안에 검사공정을 포함시켜 생산 제품을 관리하고 있다. 특히 반도체 산업이나 치명적인 결점이 발생해서는 안되는 많은 산업에 검사공정의 중요성이 한층 부각되고 있으며 또한 앞으로의 생산 공정에서 검사자동화를 통한 전수검사의 형태로 변화 추세에 따라 검사시스템에 대한 관리/감독의 필요성이 증대되고 있는 것이 현실이다. 이에 따라, 본 장에서는 전체 프로세스에 그 필요성이 확대

되어지고 기본적으로 프로세스에 포함되는 검사/계측시스템의 관리를 위해 검사/계측시스템의 변동 크기까지도 고려하여 평가하는 비공정능력지수를 제안한다.(그림 1)

보편적으로 검사공정의 능력을 나타내는 P/T율(precision-to-tolerance ratio)를 이용하여 공정 관리자에게 보다 많은 정보를 제공하고자 하는 개선된 비공정능력지수  $C_{pp}^*$ 를 다음 식과 같이 정의한다.

$$C_{pp}^* = \left( \frac{1}{C_{pm}^*} \right)^2 = \left( \frac{\tau}{D} \right)^2$$

$$= \left( \frac{\mu - T}{D} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{product}}{D} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{gage}}{D} \right)^2$$

$$= C_{ia} + C_{ip} + C_{ig} \tag{9}$$

(여기서,

$$C_{pm}^* = \frac{\min(USL - T, T - LSL)}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}$$

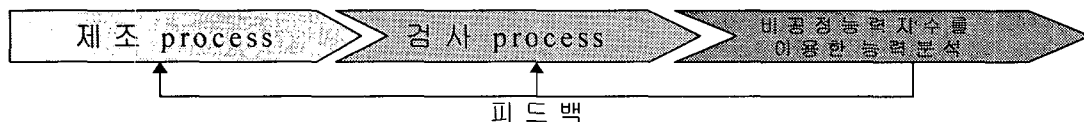
$$= \frac{\min(USL - T, T - LSL)}{3\sqrt{\sigma_{product}^2 + \sigma_{gage}^2 + (\mu - T)^2}}$$

$$D = \min\left\{ \frac{USL - T}{3}, \frac{T - LSL}{3} \right\},$$

$$C_{ia} = \left( \frac{\mu - T}{D} \right)^2, C_{ip} = \left( \frac{\sigma_{product}}{D} \right)^2,$$

$$C_{ig} = \left( \frac{\sigma_{gage}}{D} \right)^2)$$

보다 많은 정보를 제공하는 비공정능력지수  $C_{pp}^*$ 는 생산 및 검사공정에 관한 데이터를 수집한 후 공정의 비공정능력 정도를 계



[그림 1] 공정능력지수에 관한 정보의 흐름

산·분석하고 이 분석값을 이용하여 역으로 공정능력을 평가한다. 그리고 평가 자료를 가지고 각각 다시 제조 공정과 검사공정으로 나누어 피드백시키는 공정능력지수로서  $C_{pp}^* = 0$ 일 때 이상적이고 바람직한 공정이 된다.

비공정능력지수  $C_{pp}^*$ 는 목표치로부터 공정 평균의 이탈 크기를 나타내는 지수인 생산공정의 부정확지수(Manufacturing Process Inaccuracy Index)  $C_{ia}$ 와 생산 공정(제품)의 변동 크기를 나타내는 지수인 생산공정의 비정밀지수(Manufacturing Process Imprecision Index)  $C_{ip}$ , 그리고 검사 공정의 변동을 나타내는 지수인 검사공정의 비정밀지수(Inspection/Gage Process Imprecision Index)  $C_{ig}$ 로 분리되어진다. 이 세 개의 하위지수  $C_{ia}$ ,  $C_{ip}$ ,  $C_{ig}$  또한 0일 때 이상적이고 바람직한 것으로  $C_{pp}^*$ 는 전체적인 공정능력을  $C_{ia}$ ,  $C_{ip}$ ,  $C_{ig}$ 는 세부적인 공정능력을 나타내게 된다. 따라서 비공정능력지수  $C_{pp}^*$ 를 세 개의 하위지수로 분리시킴으로서 얻은 정보는 기존 공정능력지수와 Greenwich & Jahr-Schaffrath[7]가 제안한 비공정능력지수보다 동일한 제품에서 얻은 데이터로부터 전체 생산 공정에 있어 생산공정과 검사공정으로 세분화된 정보를 제공할 수 있다는 장점이 있다.

그리고 검사시스템에 대하여 보다 많은 정보를 얻고자 할 때 그리고 검사시스템에 이상원인 발생시 그 원인에 대한 정보를 주는 비공정능력지수로 다음과 같이 확장된 식을 얻을 수 있다.

$$C_{pp}^* = \left( \frac{1}{C_{pm}^*} \right)^2 = \left( \frac{\tau}{D} \right)^2 = \left( \frac{\mu - T}{D} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{product}}{D} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{repeatability}}{D} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{reproducibility}}{D} \right)^2 \quad (10)$$

(여기서,

$$C_{pm}^* = \frac{\min(USL - T, T - LSL)}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} = \frac{\min(USL - T, T - LSL)}{3\sqrt{\sigma_{product}^2 + \sigma_{repeatability}^2 + \sigma_{reproducibility}^2 + (\mu - T)^2}}$$

$(\sigma_{repeatability}/D)^2$ 은 검사시스템의 반복능력(Repeatability)을, 즉 시스템이외의 조건을 측정하기 위한 지수가 되고  $(\sigma_{reproducibility}/D)^2$ 은 검사시스템의 재현능력(Reproducibility)을, 즉 검사시스템 자체의 성능을 측정하기 위한 지수가 된다.

그러나 위와 같이 여러 원인에 따른 많은 정보를 제공하는 반면 이들 분산으로 나누어 주기 위해서는 동일한 제품에 대하여 반복적인 검사·측정을 필요로 하고 얻어진 데이터로부터 총변동을 구하여 각각의 분산을 구하는 절차가 필요하다. 예를 들어, 제품에 대한 분산과 검사시스템에 대한 분산으로 나누어 주기 위해서는 최소 2번의 반복 측정 절차가 필요하며 보다 세분화해 주기 위해서는 보다 많은 반복을 필요로 하는 문제가 제기될 수 있다. 그러므로 검사 공정에 대한 공정능력을 포함시킨 새로운 비공정능력지수는, 검사 비용에 비하여 불량제품 출하시 이로 인한 손실비용이 큰 제품을 생산하는 공정이나 자동차의 브레이크와 같은 사람의 생명에 치명적인 영향을 줄 수 있는 제품을 생산하는 공정, 그리고 검사가 자동화되어 반복 측정에 많은 시간이 소요되지 않는 상태로 전수 검

사하는 검사시스템에, 이상이 발생하면 많은 제품에 대하여 잘못된 검사를 수행할지도 모르는 공정에 적용하는 것이 바람직하다.

### 3.2 새로운 비공정능력지수 $C_{pp}^*$ 의 6시그마에의 적용

6시그마는 하나의 기업전략(Business Strategy)으로 현재 세계의 많은 기업들이 고객만족(Customer Satisfaction)을 넘어 고객행복(Customer Happiness)을 추구하는 품질경영전략이다. 이와 같은 6시그마 전략을 실행함에 있어 최고 경영자의 강력한 의지와 교육 및 훈련도 중요한 핵심 요소이지만 6시그마의 실행 수단인 통계적 척도 또한 무시할 수 없는 중요성을 가지고 있다. 통계적 척도 가운데 핵심적인 것이 공정능력분석으로, 이는 현 공정에 대한 상태를 파악할 뿐만 아니라 공정 개선후 개선 정도를 파악하기 위해서도 사용될 수 있다.

6시그마 경영전략에서 공정능력을 분석함에 있어 공정의 분산을 주관심사로 하고 있

지만 공정평균 또한 목표치로부터 어느 정도의 이탈을 허용하는 조항을 붙여 공정능력을 분석하고 있다. 왜냐하면, 아무리 정밀한 공정이라 할지라도 공정 평균이 목표치에 고정되어 있기는 매우 어려우며 항상 변화하기 때문이다. 이런 관점에서 기존에 연구되어진 공정능력지수보다 목표치로부터 평균의 이탈 크기까지도 평가할 수 있는 비공정능력지수를 6시그마 경영혁신 전략에 적용하는 것보다 효과적이다.

그러나 공정평균의 이동을 어디까지 허용하느냐 하는 문제는 현재 많은 논란이 되고 있으며 6시그마 경영기법에서 적용하고 있는 1.5 $\sigma$  변화 크기의 허용 또한 개선의 여지가 크다고 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 1.5 $\sigma$ 가 아니라 한쪽 규격에 대하여 1/4 크기의 평균 이동을 허용하는 관점에서 앞에서 제안된 새로운 비공정능력지수의 판정기준을 <표 1>과 같이 제안한다. 그러나 사용하는 조건에 따라서는 이 판정 기준을 조정해 줌으로써 각 기업에 적합한 기준을 제시할 수 있다. 새로 제안된 비공정능력지수에 대한 판

[표 1]  $C_{pp}^*$ 에 대한 새로운 판정기준

$C_{ip}$	$C_{ia}$ (USL-T)=(T-LSL)	$C_{ia} (USL - T \neq T - LSL)$		$C_{ig}$
		$T = m \pm \frac{USL - LSL}{24}$	$T = m \pm \frac{USL - LSL}{12}$	
$C_{ip} = 0$	$C_{ia} \leq 0.5625$	$C_{ia} \leq 0.298$	$C_{ia} \leq 0.09$	$C_{ig} = 0$
$0 < C_{ip} \leq 0.25 (6\sigma)$	( $\sigma$ 단위로 규격폭에 대한 평균의 이동 크기) $6\sigma : 1.50\sigma$ $5\sigma : 1.125\sigma$ $4\sigma : 1.00\sigma$ $3\sigma : 0.75\sigma$			$C_{ig} \leq 0.000001$
$0.25 < C_{ip} \leq 0.36 (5\sigma)$				$C_{ig} \leq 0.0001$
$0.36 < C_{ip} \leq 0.5625 (4\sigma)$				$C_{ig} \leq 0.01$
$0.5625 < C_{ip} \leq 1 (3\sigma)$				
$1 < C_{ip}$	$0.5625 < C_{ia}$	$0.298 < C_{ia}$	$0.09 < C_{ia}$	$0.01 < C_{ig}$

정기준은 21세기형 경영혁신기법인 6시그마의 개념을 적용하여 공정 능력에 따른 단계로 분류·설정하고 생산공정에 대한 상태 파악 및 작업자에게 공정 향상을 위한 동기부여를 제공할 수 있을 뿐만 아니라 고부가가치를 창출하기 위한 산업에 필수적으로 요구되는 검사공정에 대하여 상태 파악 및 향상을 위한 정보를 제공한다.

공정의 비정밀도에 대한 지수(Process Imprecision Index)인  $C_{ip}$ 의 판정기준은 다음과 같다.

$C_{ip}=0$ 는 공정의 변동이 전혀 없는 이상적인 경우로 실제 공정에서는 불가능하다.

$0 < C_{ip} \leq 0.25$ 은 공정의 자연공차  $6\sigma$ 에 대하여 규격의 폭이  $12\sigma$ 이상인, 즉  $C_p \geq 2$  또는  $6\sigma$ 를 달성한 매우 만족스러운 21세기형 공정임을 나타낸다.

$0.25 < C_{ip} \leq 0.36$ 은 공정의 자연공차  $6\sigma$ 에 대하여 규격의 폭이  $10\sigma \sim 12\sigma$ 인, 즉  $1.67 \leq C_p < 2$  또는  $5\sigma$ 를 달성한 매우 만족스러운 공정임을 나타낸다.

$0.36 < C_{ip} \leq 0.5625$ 은 자연공차인  $6\sigma$ 에 대하여 규격의 폭이  $8\sigma \sim 10\sigma$ 인 즉

$1.33 \leq C_p < 1.67$  또는  $4\sigma$ 를 달성한 만족스러운 공정임을 나타낸다.  $0.5625 < C_{ip} \leq 1.00$ 은 자연 공차인  $6\sigma$ 에 대하여 규격의 폭이  $6\sigma \sim 8\sigma$  즉,  $1 \leq C_p < 1.33$  또는  $3\sigma$ 를 달성한 양호한 공정임을 나타낸다.

측정시스템의 비정밀도에 대한 지수(Gage

Imprecision Index)인  $C_{ig}$ 의 판정기준은 다음과 같다.  $C_{ig}=0$ 는 측정시스템에 변동이 존재하지 않는 이상적인 경우로 실제 측정시스템에는 불가능하다.

$C_{ig} \leq 0.000001$ 은 매우 정밀하게 단위의  $1/1000$ 로 조사되는 측정 시스템을 요구하는 공정에 바람직한 측정시스템 임을 나타낸다.

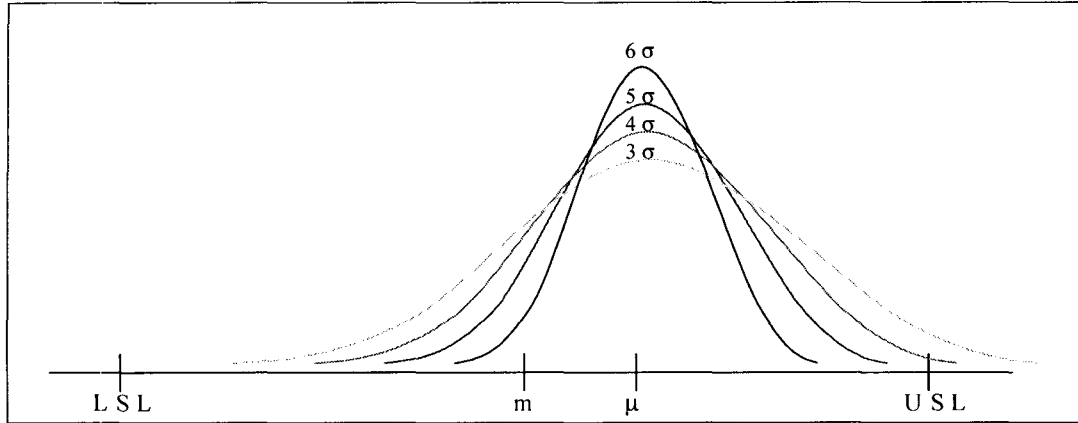
$C_{ig} \leq 0.0001$ 은 정밀하게 단위의  $1/100$ 로 조사되는 측정 시스템을 요구하는 공정에 만족스러운 측정시스템 임을 나타낸다.

$C_{ig} \leq 0.001$ 은 단위의  $1/10$ 로 조사되는 측정

[표 2] 단일공정에 대한 비공정능력지수  $C_{pb}^*$ 에 따른 DPU와 RTY( 평균의 이탈 크기에 있어 ①은 규격의 1/4까지 허용, ②는  $1.5\sigma$ 까지 허용하는 경우)

$C_{ip}$	$C_{ia}$ (USL-T)=(T-LSL)	①DPU	②DPU	①RTY(%)	②RTY(%)
$0 < C_{ip} \leq 0.25(6\sigma)$	$C_{ia} \leq 0.5625$	0.0000034	0.0000034	99.99966	99.99966
$0.25 < C_{ip} \leq 0.36(5\sigma)$		0.0000884	0.0002326	99.99116	99.97674
$0.36 < C_{ip} \leq 0.5625(4\sigma)$		0.0013502	0.0062097	99.86498	99.37903
$0.5625 < C_{ip} \leq 1(3\sigma)$		0.0123129	0.0668106	98.76871	93.31894
$1 < C_{ip}$	$0.5625 < C_{ia}$	0.0730169	0.3087701	92.69831	69.12299





[그림 2] 공정 평균의 최대 허용이탈크기에서 각 산포의 크기에 따른 정규분포

시스템을 요구하는 공정에 양호한 측정시스템 임을 나타낸다.

공정의 부정확도에 대한 지수(Process Inaccuracy Index)인  $C_{ia}$ 의 판정기준은 공정 분산이  $6\sigma$ 를 달성했을 때 평균값의 허용 범위인  $1.5\sigma$ , 즉 규격의 1/4까지를 받아들인다는 것이다. 품질 특성치가 정규분포를 따른다는 가정하에서  $(USL - T) = (T - LSL)$ 일 때와  $(USL - T) \neq (T - LSL)$ 일 때 모두 동일하게 공정평균 변화량을 규격의 1/4까지만 허용한다. 이때의 단위당 결함수(DPU : defects per unit)와 누적 수율(RTY : Rolled Throughput Yield)을 나타내면 <표 2>와 같다.

통계적 방법인 비공정능력지수 판정 기준표를 이용하여 각 기업은 자신의 공정이 어느 정도의 생산능력을 가지고 있는지 파악할 수 있고 각 단계별로 상위단계의 공정을 목표로 하여 궁극적으로는  $6\sigma$ 수준 달성을 지향하는 공정 개선의 동기를 부여할 수 있다.

## 4. 수치예제 및 분석

본 장에서는 Montgomery & Runger[9]의 논문에서 사용되어진 수치를 사용하여 Greenwich[7]의 논문에서 고려되지 않은 검사공정의 공정능력분석까지 고려하며, 산출되어진 공정능력지수를 6시그마 경영전략의 통계적 척도에 적용하는 방법을 제시한다.

### 4.1 수치예제

본 연구에서는 제조공정과 검사공정 또는 게이지의 능력분석을 위하여 다음의 간단한 사례가 설명된다. <표 3>은 공정에서 20개의 부품이 무작위로 선택되고 각 부품이 특정 검사장비를 사용하여 2차례 측정된 데이터들이다. 검사공정의 능력을 평가하기 위해 각 부품이 반복 측정되어진 값이 사용되어진다. 주어진 데이터로부터 총변동은 제품 자체와 측정에 따른 두 가지의 분산 요소로 나누어지고 각각의 분산은 다음의 절차를 이용하여 추정값을 계산할 수 있다.

[표 3] 공정능력분석을 위한 반복 측정 데이터

Part Number	Measurements		$\bar{x}$	R
	1	2		
1	21	20	20.5	1
2	24	23	23.5	1
3	20	21	20.5	1
4	27	27	27.0	0
5	19	18	18.5	1
6	23	21	22.0	2
7	22	21	21.5	1
8	19	17	18.0	2
9	24	23	23.5	1
10	25	23	24.0	2
11	21	20	20.5	1
12	18	19	18.5	1
13	23	25	24.0	2
14	24	24	24.0	0
15	29	30	29.5	1
16	26	26	26.0	0
17	20	20	20.0	0
18	19	21	20.0	2
19	25	26	25.5	1
20	19	19	19.0	0
			$\bar{\bar{x}}=22.3$	$\bar{R}=1.0$

$$\hat{\sigma}_{gauge} = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{1.0}{1.128} = 0.887$$

$$\hat{\sigma}_{total}^2 = 10.05, \hat{\sigma}_{total} = 3.17$$

식(6)으로부터,

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{product}^2 &= \hat{\sigma}_{total}^2 - \hat{\sigma}_{gauge}^2 \\ &= 10.05 - (0.887)^2 = 9.26 \end{aligned}$$

$$\hat{\sigma}_{product} = 3.04$$

<그림 3>는 <표 3>에 주어진 데이터의 분포로 목표치 T가 달라질 때 공정 평균값과 목표치간의 차와 목표치과 규격간의 최소차를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 주어진 데이터의 분포는 규격 중심으로부터 많이 벗어나 있고 변동은 크지 않다는 것을 나타내지만 제품 자체의 평균과 변동, 검사과정에서의 측정 변동에 대한 자세한 정보는 제공하지 않는다. 따라서 앞에서 제안한 비공정능력지수를 적용하여 얻어진 데이터로부터 공정에 대한 보다 많은 정보를 얻고자

[표 4] 공정의 목표치 변화에 따른 공정능력지수

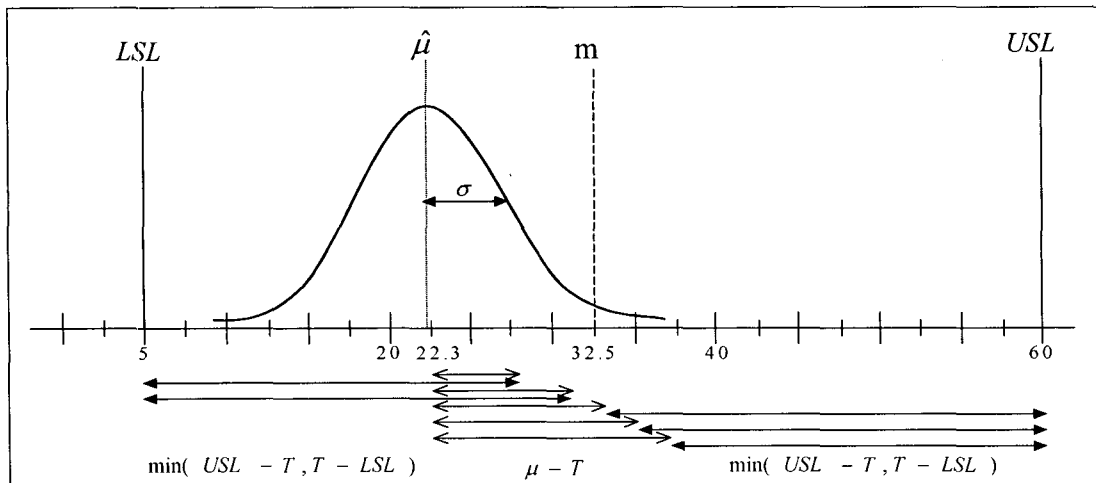
		$C_{ip}$	$C_{ia}$	$C_{ig}$
(USL-T)=(T-LSL)		0.11	1.23	0.0094
(USL-T)≠(T-LSL)	T=34.8	0.13	2.21	0.0112
	T=37.1	0.16	3.76	0.0135
	T=30.2	0.13	0.88	0.0112
	T=27.5	0.16	0.48	0.0135

한다.

목표치 T가 규격 중심 m에 일치하는 경우로  $(USL-T)=(T-LSL)$ 인 경우로 부품의  $USL=60, LSL=5, m=32.5$ 이다. 그리고 목표치 T가 규격 중심 m에 일치하지 않는 경우는 목표치를 변화시켜가면서 각각에 대한 공정능력지수를 평가한다. 각 결과치를 <표 4>에 나타낸다.

<표 4>는 데이터를 제공한 공정에 대한 능력을 판단할 수 있는 기준을 제공하는 것으로  $(USL-T)=(T-LSL)$ 인 경우 생산 공정에서 제조된 제품의 분산에 대하여, 즉

정밀도에 관련되어진 지수  $C_{ip}<0.25$ 이므로 매우 만족스러운 공정임을 나타낸다. 그러나 제품의 평균에 대해서는, 즉 정확도와 관련되어진 지수  $C_{ia}=1.23>0.5625$ 이므로, 목표치로부터의 이탈이 허용한계를 넘어서는 바람직하지 못한 상태임을 나타낸다. 그리고 검사공정의 능력을 나타내는  $C_{ig}=0.0094<0.01$ 로 양호한 상태임을 나타낸다. 그리고 <표 4>에서  $(USL-T)≠(T-LSL)$ 인 경우에는 공정 정밀도에 대한 지수가 다소 과장되는 경향이 있으나 일반적인 공정의 경우,



[그림 3] [표 3]의 데이터에 대한 분포와 규격간의 관계

[표 5] 검사공정의 재현성과 반복성의 분리를 위한 반복 측정 데이터

Part No.	Operator 1				Operator 2				Operator 3			
	Measurements				Measurements				Measurements			
	1	2	$\bar{x}$	R	1	2	$\bar{x}$	R	1	2	$\bar{x}$	R
1	21	20	20.5	1	20	20	20.0	0	19	21	20.0	2
2	24	23	23.5	1	24	24	24.0	0	23	24	23.5	1
3	20	21	20.5	1	19	21	20.0	2	20	22	21.0	2
4	27	27	27.0	0	28	26	27.0	2	27	28	27.5	1
5	19	18	18.5	1	19	18	18.5	1	18	21	19.5	3
6	23	21	22.0	2	24	21	22.5	3	23	22	22.5	1
7	22	21	21.5	1	22	24	23.0	2	22	20	21.0	2
8	19	17	18.0	2	18	20	19.0	2	19	18	18.5	1
9	24	23	23.5	1	25	23	24.0	2	24	24	24.0	0
10	25	23	24.0	2	26	25	25.5	1	24	25	24.5	1
11	21	20	20.5	1	20	20	20.0	0	21	20	20.5	1
12	18	19	18.5	1	17	19	18.0	2	18	19	18.5	1
13	23	25	24.0	2	25	25	25.0	0	25	25	25.0	0
14	24	24	24.0	0	23	25	24.0	2	24	25	24.5	1
15	29	30	29.5	1	30	28	29.0	2	31	30	30.5	1
16	26	26	26.0	0	25	26	25.5	1	25	27	26.0	2
17	20	20	20.0	0	19	20	19.5	1	20	20	20.0	0
18	19	21	20.0	2	19	19	19.0	0	21	23	22.0	2
19	25	26	25.5	1	25	24	24.5	1	25	25	25.5	0
20	19	19	19.0	0	18	17	17.5	1	19	17	18.0	2
	$\bar{x}_1=22.30, \bar{R}_1=1.00$				$\bar{x}_2=22.28, \bar{R}_2=1.25$				$\bar{x}_3=22.60, \bar{R}_3=1.20$			

(USL - T) ≠ (T - LSL)인 경우는 생산이 나 비용적인 문제로 발생하므로 목표치 T가 규격중심으로부터 크게 벗어나지 않는다. 또한 평균에 비하여 분산에 관한 지수 변화의 폭이 크지 않고 목표치가 규격중심으로부터 어느 정도 벗어나느냐에 따라서 공정에 대한

새로운 지수의 기준을 적용해줄 수가 있다. 보다 포괄적인 두 번째 사례는 검사시스템 또는 계측기의 R&R, 즉 반복성과 재현성에 대한 능력을 측정하기 위한 지수로 위에서와 마찬가지로 USL=60, LSL=5로 할 때, 아래의 데이터를 이용하여 검사공정에 대한 반복성과 재현성의 능력지수를 계산할 수 있는

[표 6] 반복성과 재현성으로 분리한 비공정능력지수

$C_{ip}$	$C_{ia}$	$C_{ig}$	Repeatability	Reproducibility
1.22	0.11	0.0128	0.0124	0.0004

것으로 계산절차는 다음과 같다. 여기에서는 다른 작업자에 대한 동일 부품의 반복 측정이 요구되어진다.

<표 5>에서 주어진 데이터를 이용하여 반복성(Repeatability)은

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \frac{1}{3}(\bar{R}_1 + \bar{R}_2 + \bar{R}_3) \\ &= \frac{1}{3}(1.00 + 1.25 + 1.20) = 1.15\end{aligned}$$

$$\hat{\sigma}_{repeatability} = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{1.15}{1.128} = 1.02$$

이고 재현성(Reproducibility)은

$$\bar{x}_{\max} = \max(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = 22.60$$

$$\bar{x}_{\min} = \min(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = 22.28$$

$$\begin{aligned}R_x &= \bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min} \\ &= 22.60 - 22.28 = 0.32\end{aligned}$$

$$\hat{\sigma}_{reproducibility} = \frac{R_x}{d_2} = \frac{0.32}{1.693} = 0.19$$

로 계산되어진다.

따라서 검사시스템 또는 계측기의 분산은

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_{gauge}^2 &= \hat{\sigma}_{repeatability}^2 + \hat{\sigma}_{reproducibility}^2 \\ &= (1.02)^2 + (0.19)^2 = 1.08\end{aligned}$$

이고 총분산은  $\hat{\sigma}_{total}^2 = 10.71$ 이므로 제품에 대한 분산은

$$\hat{\sigma}_{product}^2 = \hat{\sigma}_{total}^2 - \hat{\sigma}_{gauge}^2$$

$= 10.71 - 1.08 = 9.63$  이다.

<표 6>은 <표 5>에서 주어진 데이터를 이용하여 공정에 대한 능력지수를 나타낸다.

<표 6>에서 보는바와 같이 검사공정 또는 계측공정은 양호하지 않은 상태로 보여지며 그 이유로 R&R을 평가해보면 재현성보다는 반복성에 문제가 있음이 밝혀진다. 따라서 이와 같은 정보를 이용하여 관리자는 공정 이상원인의 출처를 밝혀내어 보다 양호한 상태로 운영할 수 있게된다.

## 4.2 6시그마 경영전략에의 적용

우리는 앞에서 제안된 공정능력에 대한 지수를 6시그마 경영전략에 통계적 척도로 적용하는 해석방법을 설명한다. <표 4>에서 얻은 정보를 이용하여  $C_{ip}=0.11 < 0.25$ 이므로 <표 3>의 데이터를 제공한 공정은 공정 분산에 있어  $6\sigma$  이상인 아주 만족할 만한 품질 수준의 공정을 갖고 있다고 판단할 수 있다. 그러나 평균과 관련된  $C_{ia}=1.23 > 0.5625$ 이므로 6시그마 경영전략에서 허용하는  $1.5\sigma$  수준의 공정 평균 이탈을 초과하는 공정이라고 말할 수 있다. 따라서 이 공정의 경우 불량품의 비율을 낮추기 위해서는 공정의 분산보다는 목표값으로부터 평균의 이탈 크기를 줄이려는 노력이 필요하다는 결론을 내릴 수 있다. 게다가 검사시스템에 대한 공정 능력척도  $C_{ig}=0.0128$ 까지 제공하여 총체적

인 능력분석을 제공한다. 이로부터 6시그마 경영전략을 실시하고 있는 기업의 경우 1.5  $\sigma$ 의 변화 허용크기까지도 지수화하여 자사의 현 공정이 검사공정까지 포함하여 어느 정도의 품질 수준을 달성하고 있는지에 대한 보다 세부적인 통계적 척도로 사용되어 질 수 있는 것이다.

### 5. 결론 및 추후 연구과제

기존의 제 1 세대부터 제 4 세대까지의 일반적인 공정능력지수는 점차 보다 많은 정보를 포함하여 공정이 관리상태일 때 자연오차에 대한 공정능력을 분석·평가하는 방법으로만 이용되어져 왔다. 그러나 시간이 흐름에 따라 고객의 요구는 보다 다양해지고 제품이나 서비스의 질적 만족도 또한 까다로워지는 추세이다. 결국 공급자에게 유연한 프로세스의 보다 엄격한 관리와 유지를 추구하게 하였으며 이를 위해 보다 많은 정보를 얻을 수 있는 분석·평가방법인 공정의 비능력을 측정하여 역으로 공정능력을 평균과 분산으로 나뉜 정보로 제공하는 비공정능력지수가 대두되었다.

본 연구는 Greenwich[7]의 연구를 확장시켜 일반적인 생산공정 뿐만 아니라, 검사공정이나 측정공정을 포함하는 비공정능력지수를 제안하였고, 새롭게 제안된 지수의 6시그마 경영전략에의 적용 가능성을 고려하였다.

본 연구는 기존의 공정능력지수와 비교하여 목표치가 규격 중심에 일치하는  $(USL - T) = (T - LSL)$ 의 경우뿐만 아니라 생산 기술적인 면이나 비용의 문제로 일치하지 않는  $(USL - T) \neq (T - LSL)$ 의 경

우에도 생산 공정의 정확성에 대한 능력과 정밀성에 대한 능력, 그리고 최근 그 중요도가 날로 더해가는 계측기나 검사시스템에 대한 능력을 분리하여 평가함으로써 보다 많은 정보를 제공하기 위한 연구를 수행하였다.

생산공정에서 제품을 생산함에 따라 공정 평균을 일정하게 유지한다는 것은 불가능하며 이 변화를 어느 정도 수준으로 유지하는 가도 공정 관리의 큰 이슈가 되고 있다. 즉, 목표치 T로부터 평균의 이탈을 어느 수준까지 허용하느냐 하는 문제는 6시그마 경영 전략에서조차 논의의 여지가 아직 남아있는 것으로 이에 대한 연구가 필요하며 또한 앞으로 경제적인 입장에서 목표치를 규격 중심이 아닌 값으로 설정할 때 이를 비공정능력지수에 있어 경제적 판단 기준까지도 고려하는 연구 방법이 요구되어진다.

### 6. 참고 문헌

- [1] 김홍준, 송서일(1998), "비정규 공정에 대한 공정능력의 새로운 척도:  $C_{psk}$ ", *품질경영학회지*, 26권, 1호, pp. 48-60.
- [2] 배도선, 최신 통계적 품질관리(1992), pp. 179-195, 영지문화사.
- [3] (사)한국능률협회 6시그마 추진센터(1999), 「6시그마 도입전략」, 21세기 북스.
- [4] Behara, R. S., Fontenot, G. F., and Gresham, A.(1995), "Customer Satisfaction Measurement and Analysis using Six Sigma", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 12, No. 3, pp. 9-18.
- [5] Boyles, R. A.(1991), "The Taguchi Capability Index", *Journal of Quality*

- Technology*, Vol. 23, No. 1, pp. 17-26.
- [6] Chan, L. A., Cheng, S. W., and Spiring, F. A.(1988), "A New Measure of Process Capability :  $C_{pm}$ ", *Journal of Quality Technology*, Vol. 20, No. 3, pp. 162-175.
- [7] Greenwich, M. and Jahr-Schaffrath, B. L.(1995), "A Process Incapability Index", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 12, No. 4, pp. 58-71.
- [8] Kane, V. E.(1986), "Process Capability Indices", *Journal of Quality Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 41-52.
- [9] Montgomery, D. C., Runger, G. C.(1993), "Gauge Capability Analysis and Designed Experiments. Part I: Basic Methods", *Quality Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 115-135.
- [10] Montgomery, D. C., Runger, G. C.(1993), "Gauge Capability Analysis and Designed Experiments. Part II: Experimental Design Models and Variance Component Estimation", *Quality Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 289-305.
- [11] Montgomery, D. C.(1996), *Introduction to Statistical Quality Control*, 3rd ed., Wiley & Sons, NY.
- [12] Rodriguez, R. N.(1992), "Recent Developments in Process Capability Analysis", *Journal of Quality Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 176-187.