

식스시그마 프로젝트 사례에서 혁신효과 분석을 위한 품질척도의 특성 및 적용

최성운*

*가천대학교 산업공학과

The Characteristics and Implementations of Quality Metrics for Analyzing Innovation Effects in Six Sigma Projects

Sungwoon Choi*

*Department of Industrial Engineering, Gachon University

Abstract

This research discusses the characteristics and the implementation strategies for two types of quality metrics to analyze innovation effects in six sigma projects: fixed specification type and moving specification type. Z_{st} , P_{pk} are quality metrics of fixed specification type that are influenced by predetermined specification. In contrast, the quality metrics of moving specification type such as Strictly Standardized Mean Difference(SSMD), Z-Score, F-Statistic and t-Statistic are independent from predetermined specification.

Z_{st} sigma level obtains defective rates of Parts Per Million(PPM) and Defects Per Million Opportunities(DPMO). However, the defective rates between different industrial sectors are incomparable due to their own technological inherence. In order to explore relative method to compare defective rates between different industrial sectors, the ratio of specification and natural tolerance called, P_{pk} , is used. The drawback of this P_{pk} metric is that it is highly dependent on the specification.

The metrics of F-Statistic and t-Statistic identify innovation effect by comparing before-and-after of accuracy and precision. These statistics are not affected by specification, but affected by type of statistical distribution models and sample size. Hence, statistical significance determined by above two statistics cannot give a same conclusion as practical significance.

In conclusion, SSMD and Z-Score are the best quality metrics that are uninfluenced by fixed specification, theoretical distribution model and arbitrary sample size. Those metrics also identify the innovation effects for before-and-after of accuracy and precision. It is beneficial to use SSMD and Z-Score methods along with popular methods of Z_{st} sigma level and P_{pk} that are commonly employed in six sigma projects.

The case studies from national six sigma contest from 2011 to 2012 are proposed and analyzed to provide the guidelines for the usage of quality metrics for quality practitioners.

Keywords : Fixed Specification Type, Moving Specification Type, Z_{st} , P_{pk} , SSMD, Z-Score, Quality Metrics, Accuracy, Precision

† 이 논문은 2014년 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 것임(GCU-2012-R009)

† Corresponding Author : Sungwoon Choi, 1342 Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyunggi-do, Korea MP : 011-256-0697, Email : swchoi@gachon.ac.kr

Received January 20, 2014; Revision Received March 19, 2014; Accepted March 19, 2014.

1. 서론

식스시그마는 제조업, 서비스업, 공공기관 전 분야에 걸쳐 경영혁신운동으로 자리매김하고 있으며 TPS (Toyota Production System)를 응용한 린(Lean) 식스시그마는 품질(Quality)과 시간(Takt Time)을 동시에 해결하는 혁신기법으로 활발히 도입되고 있다.

식스시그마의 품질혁신효과를 파악하는 품질척도(Quality Metrics)는 6시그마를 나타내는 Z_{st} 시그마 수준과 규격(Specification) 대비 자연공차(Natural Tolerance)의 비율인 P_{pk} 를 사용한다. Z_{st} 는 결점(Defects) 또는 불량(Defectives)을 구하는 표준 정규변수로 백만개당 불량률 PPM(Parts Per Million), DMPO (Defects Per Million Opportunities) 또는 10억개당 불량률 PPB(Parts Per Billion), DPBO(Defects Per Billion Opportunities)로 나타낸다. Z_{st} 는 P_{pk} 와는 $Z_{st} = 3P_{pk} + 1.5$ 의 관계를 가지며 Z_{st} 가 6시그마 수준인 경우 $P_{pk} = 1.5$ 가 되고 불량률은 3.4 PPM(DPMO)이 된다. 그러나 Z_{st} 와 P_{pk} 는 정해진 규격에 대한 오차(Error)의 혁신정도를 나타내는 고정규격형(Fixed Specification Type) 품질척도로 개선된 공정의 정확도와 정밀도의 효과보다 고정된 규격에 의한 개선효과가 더 크게 영향을 받는다. 또한, 개선 전후 별도로 계산된 Z_{st} , P_{pk} 두 값을 단순히 비교하거나, 개선 후의 값이 주관적으로 설정된 목표값을 초과한 경우만 개선효과를 인정하고 파악해야 하는 한계를 가지고 있다.[3,4,9]

규격에 영향을 많이 받는 규격종속형(Specification-Dependent Type) Z_{st} 와 P_{pk} 의 관계를 극복하기 위해 규격을 고려하지 않고 개선 전후의 정밀도 개선과 정확도 개선의 효과를 파악하기 위하여 사용되는 규격독립형(Specification-Independent Type) 품질 척도가 F-Statistic과 t-Statistic이다. 정밀도 개선 효과를 파악하기 위해 F-Statistic의 유의확률(Significance Probability)에 의해 등분산(Pooled or Equal Variance), 이분산(Nonpooled or Unequal Variance)을 검토한 후 각각의 가정에 대한 t-Statistic의 P-Value로 미리 정해진 유의수준(Significance)과 비교하여 정확도 개선에 대한 유의성을 판정한다. 그러나 이 두 Statistic은 개선 전후의 샘플크기 n_1 , n_2 과 상대적 비에 따라 통계적 유의성(Statistical Significance) 판정에 영향을 크게 받아 실무적 유의성(Practical Significance)의 오도된 결과로 유도할 수 있다.[7,8,12]

또한 정확도와 정밀도의 정도를 두 개의 꺾은선 그

래프로 나타내는 계량형 관리도(Control Chart)인 경우 개선 전후의 개선효과를 시각적으로 나란히 비교하는 주관화된 방법만을 사용하고 있으며 개선 전후 관리도의 정확도 개선에 대한 유의성 연구는 $\bar{x}-R$ 관리도에 국한되어 있다.[10,11]

고객이 기대하는 상한규격(STB: Smaller-The-Better), 하한규격(LTB: Larger-The-Better), 양쪽규격(NTB: Nominal-The-Best)에 대해 혁신의 방향성(Orientation)이 정해지면 0%~100% 혁신기준, STB인 경우는 0%를, LTB인 경우는 100%를, NTB인 경우는 50%(Nominal Value)의 개선목표를 향해 끊임없는 식스시그마 혁신활동이 수행되어야 한다. 이 경우 규격은 기업에서 정적으로 정해진 목표가 아니고 고객이 기대하는 혁신의 방향성에 따라 동적으로 움직이는 목표로 인식하고 개선 전후의 정밀도 개선과 정확도 개선의 종합적인 척도로 혁신효과를 파악해야 한다.[5] 그러나 정밀도와 정확도의 품질척도에 대한 연구는 신약개발의 고생산성 선별(High Throughput Screening)의 제약 분야[2,6,13-15]에서는 활발히 연구가 진행되고 있으나, 제조업 또는 서비스의 식스시그마 분야에서는 거의 연구가 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 고객의 기대를 끊임없이 추구하는 연동규격형(Moving Specification Type) 식스시그마 프로젝트에서 정밀도 혁신과 정확도 혁신 관점에서 개선효과를 파악하는 SSMD(Strictly Standardized Mean Difference)와 Z-Score 품질척도를 제안하고 기존의 품질척도의 특성과 비교, 평가한다.

또한 공정의 모니터링(Monitoring)과 개선을 시각적으로 표현하는 $\bar{x}-R$ 관리도에서 개선전후의 정밀도와 정확도 개선 효과파악을 위한 LSD 유의성 판정방법을 $\bar{x}-s$ 관리도와 $\tilde{x}-R$ 관리도로 확장한다.

본 연구의 차별성은 2011년-2012년 국가품질경영대회 식스시그마분야에 출전했던 프로젝트[16]를 대상으로 Z_{st} , P_{pk} , F-Statistic, t-Statistic의 기존 품질척도의 오적용(Misuse) 사례를 분석하고 본 연구에서 제안한 SSMD와 Z-Score의 올바른 적용방안을 제시하여 실무자의 사용과 이해를 돕는 데 있다. 본 연구의 결과는 현재의 제품기술에 비해 혁신적인 제품규격을 연구 개발하는 경우와 자의적인 공정규격에 영향을 받지 않는 규격독립형 공정정확도, 정밀도 혁신활동에 적용이 가능하다.

2. 식스시그마 품질척도의 특성

용어 :

STB: Smaller-The-Better

LTB: Larger-The-Better

NTB: Nominal-The-Best

\bar{x}_1 : 개선 전 평균

\bar{x}_2 : 개선 후 평균

s_1^2 : 개선 전 분산

s_2^2 : 개선 후 분산

n_1 : 개선 전 샘플크기

n_2 : 개선 후 샘플크기

$\bar{\bar{x}}_1$: 개선 전 \bar{x} 관리도 총평균

$\bar{\bar{x}}_2$: 개선 후 \bar{x} 관리도 총평균

$\bar{\bar{R}}_1$: 개선 전 R 관리도 총평균

$\bar{\bar{R}}_2$: 개선 후 R 관리도 총평균

k_1 : 개선 전 군의 수

k_2 : 개선 후 군의 수

A_2 : $\frac{3}{\sqrt{n}d_2}$ 의 $\bar{x}-R$ 관리도 계수

\bar{s}_1 : 개선 전 s 관리도 총평균

\bar{s}_2 : 개선 후 s 관리도 총평균

A_3 : $\frac{3}{\sqrt{n}c_4}$ 의 $\bar{x}-s$ 관리도 계수

$\bar{\tilde{x}}_1$: 개선 전 \tilde{x} 관리도 총평균

$\bar{\tilde{x}}_2$: 개선 후 \tilde{x} 관리도 총평균

m_3A_2 : $\tilde{x}-R$ 관리도 계수

SBR: Signal-to-Background Ratio

SNR: Signal-to-Noise Ratio

SW: Signal Window

AVR: Assay Variability Ratio

SSMD: Strictly Standardized Mean Difference

MLE: Maximum Likelihood Estimator

UMVUE: Uniformly Minimal Variance Unbiased Estimator

2.1 Z_{st} 와 P_{pk} 품질척도의 특성 및 한계

Z 시그마 수준은 PPM 또는 DPMO의 불량률을 구하기 위한 표준 정규변수로 $Z_{st}\sigma = Z_{lt}\sigma + 1.5\sigma$ 의 값을

갖는다. 통상 식스시그마(6σ)의 명칭은 Short-Term Z인 Z_{st} 를 나타내며 Long-Term Z인 Z_{lt} 는 1.5σ 의 치우침을 반영한 4.5σ 로 3.4 PPM의 불량률을 갖는다. $Z_{st} = 7.5\sigma$ 일 때, $Z_{lt} = 6\sigma$ 이고 2 PPB의 불량률을 가지며 진정한 식스시그마는 1.5σ 치우침을 반영하지 않은 $Z_{lt} = 6\sigma$ 로 불리우고 계산되어야 한다.

6σ 일 경우 3.4 PPM의 목표불량률을 달성할 수 있듯이 기업의 경영혁신의 목표를 Z_{st} 시그마 수준으로 설정하여 개선활동을 추구하게 된다. 그러나 주단조(Cast & Forged) 금형사출(Injection Modeling and Extrusion) 산업의 경우 전자, 자동차조립산업보다 업종의 기술적 관점에서 불량률이 전반적으로 높으므로 산업간 기업간 경영혁신활동수준을 비교하기 위한 무단위(Dimensionless)의 품질척도로 규격대비 자연공차의 상대적 비율인 C_{pk} 와 P_{pk} 를 사용한다. 정밀도 개선 효과만을 파악하는 C_p 와 P_p 는 이론으로만 가능한 값이기 때문에 정확도 개선효과를 동시에 파악하는 C_{pk} 와 P_{pk} 를 주로 사용한다. C_{pk} 는 관리도가 In-Control인 경우 군내표준편차(Within Standard Deviation)로 계산되며 P_{pk} 는 관리도가 Out-of-Control인 경우 군내표준편차와 군간표준편차(Between Standard Deviation)를 합성한 종합표준편차(Overall Standard Deviation)로 구한다. 따라서 $C_{pk} \leq P_{pk}$ 로 보수적인 관점에서 모든 표준편차를 고려하거나 새로운 기계도입으로 인한 공정안정화, 신제품의 양산검토시 P_{pk} 를 사용하는 것이 바람직하다. 단 시스템을 조립하는 전자, 자동차 산업과 같이 공정이 안정된 상태(관리도가 In-Control)에서 한 단계 Level-Up(평균축을 목표로 Quantum-Leap)하는 혁신활동을 추구하는 경우 C_{pk} 를 사용하는 것이 바람직하다.

그러나 P_{pk} 는 공정에서 수행한 정확도 개선과 정밀도 개선보다 기업이 아이টে에 따라 설정한 규격에 더 큰 영향을 받는 규격종속형(Specification-Dependent Type) 품질척도의 한계를 가지고 있다.

2.2 F-Statistic과 t-Statistic의 특성 및 한계

규격종속형 품질척도인 P_{pk} 의 한계를 극복하기 위해 개선전과 개선후의 정확도와 정밀도만으로도 효과를 파악하기 위한 규격독립형(Specification-Independent Type) 품질척도가 F-Statistic과 t-Statistic 등과 같은 표준 확률분포 변수이다.

정밀도 개선효과를 분석하기 위한 F-Statistic은 유의확률(Significance Probability) P-Value가 미리 정해

진 유의수준(Significance Level) α 보다 클 경우 등분산(Equal or Pooled Variance), 작을 경우 이분산(Unequal or Nonpooled Variance)으로 판정한다.

F-Statistic에 의해 등분산, 이분산으로 판정한 정밀도 개선효과를 가정으로 정확도 개선효과를 분석하기 위해 각각 (1), (2)와 같은 t-Statistic을 사용한다.

$$t - Statistic = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{s_2^2}{n_2} + \frac{s_1^2}{n_1}}} \quad (1)$$

$$t - Statistic = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{(n_2 - 1)s_2^2 + (n_1 - 1)s_1^2}{n_2 + n_1 - 2}}} \sqrt{\frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_1}} \quad (2)$$

t-Statistic은 P-Value에 의해 통계적 유의성(Statistical Significance)을 쉽게 판정하는 장점이 있으나 개선전과 개선후의 샘플크기 n_1 과 n_2 에 의해 영향을 크게 받아 실무적 유의성(Practical Significance)의 오도된 결과로 판정될 수 있다. 포퍼의 반증원리(Falsibility By Popper)에 의해 검증된 RHPT(Research Hypothesis Present Type)의 연구가설에 의한 실무적 유의성이, 귀류법(Proof By Contradiction)의 NHST(Null Hypothesis Significance Test)에 의한 통계적 유의성과 반드시 일치하지 않는다. NHST는 증명하고 싶은 H_1 대립가설에 대한 모순을 찾기 위해 상호배반적인 H_0 귀류가설로 반박(Negation)하는 경우 수학적으로 가정한 확률통계모형을 사용하기 때문에 실제의 유의성과는 다른 결과를 도출할 수 있다.

2.3 관리한계 LSD 품질척도의 특성 및 확장

식스시그마의 Measure와 Control 단계에서 현상파악, 결과분석, 사후관리를 실시할 경우 정확도와 정밀도의 모니터링과 개선을 꾀은선 시각적인 그래프로 나타내는 방법이 $\bar{x} - R$ 관리도(Control Chart)이다.

개선전후 $\bar{x} - R$ 관리도의 정확도 개선효과를 파악하기 위한 LSD(Least Significant Difference)의 품질척도는 식 (3)과 같다.

$$|\bar{x}_2 - \bar{x}_1| \geq A_2 \sqrt{\frac{k_2 R_2 + k_1 R_1}{k_2 + k_1}} \sqrt{\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_1}} \quad (3)$$

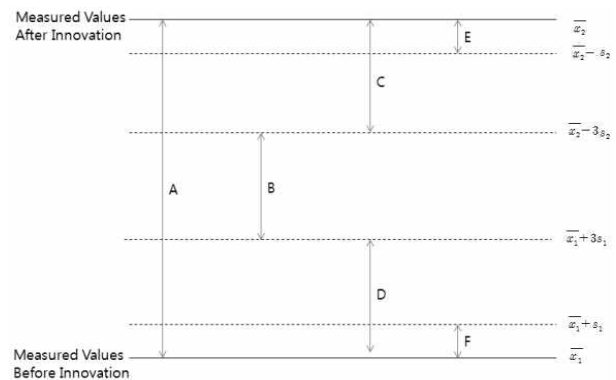
개선전후 $\bar{x} - s$ 관리도, $\tilde{x} - R$ 관리도의 정확도 개선효과를 파악하기 위한 LSD의 품질척도는 식(4), (5)와 같다.

$$|\bar{x}_2 - \bar{x}_1| \geq A_3 \sqrt{\frac{(k_2 - 1)s_2^2 + (k_1 - 1)s_1^2}{k_2 + k_1 - 2}} \sqrt{\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_1}} \quad (4)$$

$$|\bar{x}_2 - \bar{x}_1| \geq m_3 A_2 \sqrt{\frac{k_2 R_2 + k_1 R_1}{k_2 + k_1}} \sqrt{\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_1}} \quad (5)$$

3. Z-Score와 SSMD 품질척도의 제안

식스시그마 혁신전후의 평균과 표준편차에 의한 정확도와 정밀도의 개선효과를 파악하기 위한 품질척도를 그래프로 나타내면 <Figure 1>과 같다.



<Figure 1> Graphic Representations of Quality Metrics

<Figure 1>에서 SBR(Signal-to-Background Ratio) = \bar{x}_2 / \bar{x}_1 으로 정확도의 비율이고 SNR(Signal-to-Noise Ratio) = $A/F = (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) / s_1$ 으로 Noise가 개선전의 정밀도에 의해서만 정규화되며 Glass's $\delta = -A/E = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / s_2$ 로 개선 후의 정밀도에 의해서만 정규화되고 Cohen's $d = A / ((n_2 - 1)E^2 + (n_1 - 1)F^2) / (n_2 + n_1 - 2)^{1/2} = (\bar{x}_2 - \bar{x}_1) / s_p$ 로 합동표준편차(Pooled Standard Deviation)에 의해서만 정규화된다. SW(Signal Window) = $B/F = (|\bar{x}_2 - \bar{x}_1| - 3(s_2 + s_1)) / s_1$ 으로 개선전의 정밀도로만 정규화되고 AVR(Assay Variability Ratio) = $(C+D)/A = 3(s_2 + s_1) / (\mu_2 - \mu_1)$ 으로 개선전후의 이격밴드(Separation Band)를 고려하지 않는다.[14]

이상과 같은 품질척도의 단점을 피하고 정확도와 정밀도에 대한 개선효과를 파악하는 품질척도가 식 (6)과 같은 Z-Factor이다.

$$Z - Factor = A/E = 1 - \frac{3(s_2 + s_1)}{|\mu_2 - \mu_1|} \quad (6)$$

Z-Factor는 규격에 영향을 받는 2.1절의 Z_{st} , P_{pk} 와 다르게 개선전후의 정확도와 정밀도에 의해서만 개선효과를 파악하는 연동규격형(Moving Specification Type) 품질지수로서 $0.5 \leq Z\text{-Factor} < 1$ 일 경우 분모의 두 정확도의 차가 제일 크고 분자의 두 정밀도의 폭이 제일 작아 개선효과가 우수하게 판정된다.

SSMD(Strictly Standardized Mean Difference)의 MLE(Maximum Likelihood Estimator)와 UMVUE(Uniformly Minimal Variance Unbiased Estimator)는 식 (7), (8)과 같다.

$$SSMD_{MLE} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{n_2 - 1}{n_2} s_2^2 + \frac{n_1 - 1}{n_1} s_1^2}} \quad (7)$$

$$SSMD_{UMVUE} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{\frac{2}{n_2 + n_1 - 3.5} ((n_2 - 1)s_2^2 + (n_1 - 1)s_1^2)}} \quad (8)$$

그러나 식 (7), (8)의 SSMD는 2.2절의 F-Statistic, t-Statistic과 같이 n_1 과 n_2 의 영향을 받는다. 따라서 <Figure 1>에서 Moment Method에 의한 SSMD를 구하면 식 (9)와 같으며 개선전후의 샘플크기에 영향을 받지 않는다.

$$SSMD = \frac{A}{\sqrt{E^2 + F^2}} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{s_2^2 + s_1^2}} \quad (9)$$

SSMD ≥ 2 일 경우 개선효과가 우수하다고 판정되는데 이는 분자의 정확도의 차가 분모의 두 정밀도의 폭의 2배가 될 경우를 의미한다.

이와 같이 Z-Factor와 SSMD는 규격에 영향을 받지 않고 개선전후의 정확도와 정밀도에 의해 개선효과를 파악하며 이해하기도 쉽고 계산하기 간편하므로, 규격 종속형 품질척도인 Z_{st} 와 P_{pk} 와 보완적 관계로 사용하는 것이 바람직하다.

4. 식스시그마 적용사례

4.1 조사대상기업과 스펙유형

조사대상기업은 2011년-2012년 국가품질경영대회 식스시그마 분야에 출전했던 프로젝트중 계량형 CTQ(Critical To Quality)를 대상으로 한 전자업종 7개, 화학업종 2개, 조선업종 1개, 전기배전 2개, 전기발

전 1개, 군대정비창 1개 등 14개를 선정하였다. CTQ의 유형은 제품규격의 관리항목인 체적량, 칩깨짐, 들뜸유형1, 치우침, 들뜸유형2, 칩들뜸, 금선간격 등 7가지이고, 공정규격의 점검항목인 소비전력역률, 증류스팀사용량, 폐수처리량, SF₆가스채취량, 가공시간유형1, 스팀사용량, 가공시간유형2 등 7가지이다.

<Table 1>에서 14개의 규격 중 상한규격 LTB가 8개, 양쪽규격 NTB가 6개이고 개선전후의 샘플크기 n_1 , n_2 , 평균 μ_1 , μ_2 , 표준편차 σ_1 , σ_2 의 값을 나타내고 있다. <Table 1.a>는 개선전과 개선후의 샘플크기가 다른 7가지의 프로젝트 사례이고 <Table 1.b>는 개선전후 동일한 샘플크기를 갖는 7가지의 프로젝트 사례이다. <Table 2>는 3가지 품질척도의 판정기준으로 P_{pk} 는 6(Z_{st})시그마 수준에 해당하는 1.5를 I등급으로, SSMD는 정확도와 정밀도의 상대적 비율의 3배를 I등급의 기준으로 5등급으로 분류하였다. Z-Factor의 경우 이격밴드의 정확도를 고려한 정밀도의 개선효과가 0.5~1.0인 경우가 이상적이지만 14개 프로젝트 모두 개선전후의 정확도와 정밀도의 영향보다 고정된 규격에 더욱 영향을 받는 규격종속형 CTQ로 인해 모두 음수값이 나와 이를 5단계로 등급 구분하였다. 따라서 <Table 2>의 Z-Factor 분류는 본 연구에서 다른 14개의 프로젝트에 의한 구분으로 이상적인 Z-Factor는 0.5~1.0을 기준으로 기업실정에 따라 다양한 등급구분이 가능하다.

<Table 1> Specification Values, Sample Sizes, Means and Standard Deviations of Before-and-After Innovation

(a) Different Sample Sizes ($n_1 \neq n_2$)

Specific ation Values	Before Innovation			After Innovation		
	n_1	μ_1	σ_1	n_2	μ_2	σ_2
0.0028~0.0081	710	0.0063	0.0010	104	0.0051	0.0007
Less than 25	4078	12.34	4.78	210	10.18	4.19
Less than 50	1229	23.40	8.81	207	19.85	8.53
Less than 40	183817	24.71	6.33	183564	14.51	5.33
10~50	183817	20.54	4.10	183564	29.4	3.69
-8~8	2710	2.572	2.459	481	0.953	1.960
Less than 200	1838	101.17	36.20	222	72.11	32.34

(b) Same Sample Sizes ($n_1 = n_2$)

Specific ation Values	Before Innovation			After Innovation		
	n_1	μ_1	σ_1	n_2	μ_2	σ_2
90~100	90	78.9	0.23	90	98.8	0.23
Less than 3360	90	3542.48	78.52	90	3123.02	79.57
Less than 6.6	31	6.41	0.13	31	6.78	0.06
15~30	1270	30.79	2.32	1270	19.04	1.43
Less than 49	50	52.92	1.58	50	45.08	1.09
Less than 3100	90	3129.69	47.48	90	2852.43	44.61
870~930	30	908.6	25.56	30	902.2	7.31

(b) Same Sample Sizes ($n_1 = n_2$)

Categories	P_{pk}	SSMD	Z-Factor
I. Very Excellent	1.50 이상	3.00 이상	-0.99 이하
II. Excellent	1.25~1.49	2.00~2.99	-1.00~-2.99
III. Good	1.00~1.24	1.00~1.99	-3.00~-4.99
IV. Inferior	0.75~0.99	0.50~0.99	-5.00~-7.99
V. Poor	0.74 이하	0.00~0.49	-8.00 이상

4.2 Z_{st} 와 P_{pk} 의 적용 및 분석

<Table 1>의 규격, 평균, 표준편차로 개선전후의 Z_{st} 와 P_{pk} 를 구하면 <Table 3>과 같다. Z_{st} 와 P_{pk} 는 $Z_{st} = 3P_{pk} + 1.5$ 의 비례적 관계를 가지므로 품질척도의 등급분류는 <Table 2>와 같이 P_{pk} 에만 수행한다.

<Table 3.a>의 개선전후의 P_{pk} 는 <Table 3.b>의 개선전후의 P_{pk} 보다 <Table 2>의 등급분류 관점에서 높은 등급을 유지하고 있다. 이는 개선전후의 샘플크기와 상대적비율 n_1/n_2 에 기인한다.

<Table 3> Z_{st} and P_{pk} of Before-and-After Innovation

(a) Different Sample Sizes ($n_1 \neq n_2$)

#	Before Innovation		After Innovation	
	Z_{st}	P_{pk}	Z_{st}	P_{pk}
1	3.20	0.57	4.65	1.05
2	4.15	0.88	5.04	1.18
3	4.53	1.01	5.04	1.18
4	3.92	0.81	6.27	1.59
5	4.07	0.86	6.75	1.75
6	3.72	0.74	5.01	1.27
7	4.22	0.91	5.42	1.31

(b) Same Sample Sizes ($n_1 = n_2$)

#	Before Innovation		After Innovation	
	Z_{st}	P_{pk}	Z_{st}	P_{pk}
8	0	-0.50	5.13	1.21
9	-0.85	-0.78	2.97	0.99
10	0.04	-0.49	4.29	0.93
11	1.16	-0.11	4.32	0.94
12	-0.98	-0.83	5.10	1.20
13	0.87	-0.21	4.92	1.14
14	1.85	0.12	4.40	0.97

4.3 F-Statistic과 t-Statistic의 적용 및 분석

<Table 3>의 규격, 샘플크기, 평균, 표준편차로 개선 전후의 정밀도 개선효과를 파악하기 위한 F-Statistic, P-Value와 정확도 개선효과를 파악하기 위한 t-Statistic, P-Value의 결과는 <Table 4>와 같다.

<Table 4>에서 등분산(Equal or Pooled Variance)인 #8, #9를 제외한 나머지 프로젝트 모두 이분산(Unequal or Nonpooled Variance)으로 판정되었으며 개선전후 정확도 개선효과는 #1을 제외한 모든 프로젝트에서 $\alpha = 5\%$ 유의수준에서 통계적 유의성의 결과를 얻었다.

<Table 4> F-Statistic and t-Statistic of Precision and Accuracy Effect

(a) Different Sample Sizes ($n_1 \neq n_2$)

#	Precision Effect		Accuracy Effect	
	F-Statistic	P-Value	t-Statistic	P-Value
1	2.04	0.000 *	1.75	0.084
2	1.30	0.013 *	7.23	0.000 *
3	1.07	0.564 *	5.39	0.000 *
4	1.41	0.000 *	528.32	0.000 *
5	1.23	0.000 *	-688.45	0.000 *
6	1.57	0.000 *	16.02	0.000 *
7	1.25	0.032 *	17.10	0.000 *

*: Statistical significance at $\alpha = 5\%$

(b) Same Sample Sizes ($n_1 = n_2$)

#	Precision Effect		Accuracy Effect	
	F-Statistic	P-Value	t-Statistic	P-Value
8	1.0	1.000	-580.41	0.000*
9	0.97	0.901	35.60	0.000*
10	4.69	0.000*	-14.39	0.000*
11	2.63	0.000*	44.18	0.000*
12	2.10	0.011*	28.88	0.000*
13	1.30	0.008*	10.58	0.000*
14	12.23	0.000*	63.13	0.000*

*: Statistical significance at $\alpha = 5\%$

4.4 SSMD와 Z-Score의 적용 및 분석

<Table 1>에서 규격을 고려하지 않고 개선전후의 평균과 표준편차에 의한 정확도와 정밀도의 개선효과를 파악하는 SSMD와 Z-Score를 구하면 <Table 5>와 같다.

<Table 3>에서 #1~#7 프로젝트의 Z_{st} , P_{pk} 가 #8~#14 프로젝트보다 우수한 등급판정을 받는 반면에 <Table 5>에서는 #8~#14 프로젝트의 SSMD와 Z-Factor가 더 우수한 등급판정을 받는다. 이렇게 상반된 결과가 나온 것은 <Table 1.a>의 #1~#7 프로젝트는 <Table 1.b>의 #8~#14 프로젝트에 비해 개선전과 개선후의 샘플크기 n_1 , n_2 가 상당히 크고 상대적 비율 n_1/n_2 이 같지 않아 이로 인한 영향으로 Z_{st} , P_{pk} 가 SSMD, Z-Score에 비해 과대평가된 등급판정의 결과를 얻었다. <Table 5>에서 #8~#14의 공정규격의 점검 항목이 #1~#7의 제품규격의 관리항목에 비해 규격의 조정이 자유로워 상대적으로 규격의 영향을 덜 받는 관계로 개선전후의 정확도와 정밀도의 개선효과를 파악하는 SSMD와 Z-Score가 더 우수한 등급판정을 받았다. 그러나 <Table 3>의 #7 프로젝트같이 NTB인 경우는 STB와 LTB처럼 정확도의 절대크기만 고려하는 Z-Score만 사용해서는 안 되고 목표치의 일치여부를 검토하기 위한 P_{pk} 를 우선적으로 고려해야 한다.

따라서 식스시그마 경영혁신 수행시 사용했던 Z_{st} , P_{pk} , F-Statistic, t-Statistic은 개선전후의 샘플의 크기, 샘플크기의 비율, 제품규격과 공정규격의 유형에 따라 영향을 크게 받기 때문에 개선효과와 파악에 오도된 영향을 받지 않는 SSMD와 Z-Factor 품질척도를 보완적 관계로 사용해야 한다.

<Table 5> SSMD and Z-Factor by CTQ Specification Type

(a) Product CTQ Specification Type

#	SSMD	Z-Factor	Specification Type
1	-0.1697	-3.25	Product
2	0.3398	-11.46	Product
3	0.2895	-13.65	Product
4	-1.2326	-2.43	Product
5	-1.6062	-1.64	Product
6	-0.5149	-7.19	Product
7	-0.5987	-6.08	Product

(b) Process CTQ Specification Type

#	SSMD	Z-Factor	Specification Type
8	61.1801	0.93	Process
9	-3.7522	-0.13	Process
10	2.5842	-0.54	Process
11	-4.3114	0.04	Process
12	-4.0844	-0.02	Process
13	-4.2258	0.004	Process
14	-11.5254	0.68	Process

5. 결론

본 연구는 식스시그마 프로젝트에서 개선효과를 파악하기 위해 Z_{st} 시그마 수준, P_{pk} 의 고정규격형(Fixed Specification Type) 품질척도와 F-Statistic, t-Statistic, SSMD(Strictly Standardized Mean Difference), Z-Factor의 연동규격형(Moving Specification Type) 품질척도의 특성 및 적용방안을 사례중심으로 제시하였다.

PPM, DPMO의 불량률을 구하는 Z_{st} 시그마수준은 업종에 따른 고유기술 불량률의 차이로 업종간 비교가 불가능하며 이를 위해 규격대비 자연공차의 비율인 P_{pk} 를 사용할 수 있는데 이 또한 기업에서 정한 규격에 영향을 많이 받는 한계를 가지고 있다.

규격에 영향을 받지 않고 순수한 개선전후의 정확도와 정밀도의 개선효과를 파악하는 품질척도가 F-Statistic, t-Statistic이나 이 통계량 역시 통계모형의 종류, 개선전후 샘플의 크기와 샘플크기의 비율에 따라 통계적 유의성의 결과가 실무적 유의성의 결과와 일치하지 않는다.

따라서 규격, 통계적 모형, 샘플의 크기 등에 영향을 받지 않고 개선전후의 정확도와 정밀도의 개선효과를 효율적으로 판정하는 표준척도 SSMD와 Z-Factor를 기존의 식스시그마 품질척도와 보완적 관계로 사용해야 한다.

6. References

- [1] Antony J.(2003), Design of Experiments for Engineers and Scientists, Elsevier.
- [2] Birmingham A. et al.(2009), "Statistical Methods for Analysis of High-Throughput RNA Interference Screens", Nature Methods, 6, 569-575.
- [3] Breyfogle F.W.(2003), Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods, John Wiley & Sons.
- [4] Brook Q.(2010), Lean Six Sigma and MINITAB, 3 Edition, OPEX Resources.
- [5] Choi s.(2013), "Implementation of Z-Factor Statistics for Performance Evaluation of Quality Innovation in the High Throughput Process", Journal of Korea Safety Management and Science, 15(1), 293-301.
- [6] Iversen P.W. et al.(2006), "A Comparison of Assay Performance Measures in Screening Assays: Signal Window, Z Factor, and Assay Variability Ratio", Journal of Biomolecular Screening, 11, 247-252.
- [7] Koch K.R.(2010), Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer.
- [8] Lehmann E.L., Romano J.P.(2010), Testing Statistical Hypothesis, Springer.
- [9] McCarty T.Jordan M, Probst D.(2011), Six Sigma for Sustainability, McGraw-Hill Professional.
- [10] Quesenberry C.P.(1997), SPC Methods for Quality Improvement, John Wiley & Sons.
- [11] Rauwendaal C.(2008), SPC: Statistical Process Control in Injection Modeling and Extrusion, 2 Edition, Hanser Publications.
- [12] Wilcox R.R.(2012), Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing, 3 Edition, Academic Press.
- [13] Zhang J.H., Chung T.D.Y, Oldenburg K.R.(1999) "A Simple Statistical Parameter for Use in Evaluation and Validation of high Throughput Screening Assays", Journal of Biomolecular Screening, 4, 67-73.
- [14] Zhang X.H.D(2007), "A Pair of New Statistical Parameters for Quality Control in RNA Interference High-Throughput Screening Assays", Genomics, 89, 552-561.
- [15] Zhang X.H.D.(2011), Optimal High -Throughput Screening: Practical Experimental Design and Data Analysis for Genome-Scale RNA Research, Cambridge University Press.
- [16] www.q-korea.net

저자소개

최성운



현 가천대학교 산업공학과 교수. 한양대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 취득하고, 1994년 한국과학재단 지원으로 University of Minnesota에서 1년간 Post-Doc을 수행했으며, 2002년부터 1년 반 동안 University of Washington에서 Visiting Professor를 역임하였음. 주요 관심분야는 자동화 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 통신, 정보시스템의 보안, 신뢰성 설계 및 분석, 서비스 사이언스, 재무금융공학, RFID시스템, Wavelet에도 관심을 가지고 있음.

주소: 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342가천대학교 산업공학과