

A study on target Sigma Level at R&D stage and robust limits for design margins

Seoung-gon Ko^{a,1}

^aDepartment of Applied Statistics, Gachon University

(Received January 18, 2016; Revised January 21, 2016; Accepted January 21, 2016)

Abstract

The Sigma Level, proposed by Motorola Inc., is one of the many Process Capability Index (PCI)'s that have been presented since the 1970's. It is used to evaluate process capability and unlike other PCI's, it has an advantage in that it uses population probability distribution. However, it is originally designed for mass production and is inadequate to evaluate prototypes or early products in the R&D stages. For use in such cases, we propose an R&D target Sigma Level, derived by considering 1.5 sigma shifts in traditional sigma level from a statistical point of view. We also explain the way to find robust limits for design tolerance because the sigma level or defect probability is useful to establish economical tolerance limits at the R&D stage and mass production.

Keywords: Process Capability Index(PCI), Sigma Level, R&D Sigma Level, 1.5 sigma shift, robust limits, design tolerance

1. 서론

20세기 이후 제품/서비스에 대한 품질 향상의 노력은 체계적인 품질 관리 기법과 품질 개선 이론을 발전시켜 왔다 (Donaldson, 2004). 특히 1970년대 C_p 를 시작으로 다양한 프로세스 능력 지수(Process Capability Index; PCI)들이 소개되었고 이에 대한 실무적 타당성과 유용성에 대한 다양한 연구가 진행되었다 (Kane, 1986; Bissell, 1990). 1980년대 식스 시그마 방법을 통하여 소개된 시그마 수준(Sigma Level)은 이러한 노력 중의 하나로서 안정적이고 연속된 생산 프로세스의 가정 하에서 표준정규분포의 분위수(percentile)를 이용하여 계산된다. 또한 합리적인 부분군(rational subgrouping)에 의하여 표본을 수집하는 경우에는 Shewhart (1931)에 의해 제안된 이상원인(special cause)과 우연원인(common cause)을 구분하여 적용한 단기(short-term)와 장기(long-term) 시그마 수준을 계산할 수 있고 이를 통하여 관리 수준의 타당성을 확인할 수 있다. 여기서, 단기 시그마 수준(Z_{ST})이란 총 변동 중에서 우연원인에 의한 변동만을 반영한 것을 말하고 장기 시그마 수준(Z_{LT})은 총 변동을 모두 반영한 것을 말한다. 또한 $Z_{ST} - Z_{LT}$ 로 정의되는 Z_{Shift} 값을 통하여 관리와 기술 부문의 개선 우선순위를 판단할 수 있도록 4-블록 다이어그램(4-Block Diagram)을 제공 한다 (Harry, 1994). 하지만 양산 중심의 시그마 수준은 다음과 같은 이유로 R&D 분야에 직접 적용하기에는 어려움이 있다 (Sleeper, 2005).

This research was supported by the Gachon University Research Fund in 2016.

¹Department of Applied Statistics, Gachon University, 1342 Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13120, Korea. E-mail: sgk@gachon.ac.kr

- (1) 개발 단계에서는 양산 단계와 같이 충분한 표본/시료를 수집하기 어려울 수 있고, 충분한 표본/시료를 수집하기 위해서는 시간과 비용이 많이 든다.
- (2) 충분한 표본/시료를 수집할 수 있다고 하더라도 개발 프로세스에서의 시제품(prototypes) 또는 초도 양산품(early production) 단계를 연속 생산 프로세스로 가정하기 어렵고 이상 원인과 우연원인을 구분하여 데이터를 수집하기 어렵다.
- (3) (1)과 (2)의 이유로 동일한 제품의 특성이라고 하더라도 양산 단계와 동일한 기준으로 개발 단계의 시그마 수준을 설정/관리하는 것은 바람직하지 못하다.

제조 기업의 개발/양산 과정을 종합적으로 고려해 보면 개발 단계에서 고려하는 제품의 중요 특성은 양산 단계의 제품에 대한 목표와 기준이라고 할 수 있지만, 양산 단계에서의 중요 특성에 대한 양산 품질은 개발 단계에서의 중요 활동에 의해 결정된다. 이러한 이유로 올바른 개발 품질의 정의를 위하여 고려되는 품질 지표에 대한 통계적 추론을 통하여 양산 이후 시장의 품질을 올바로 예측하고자 하는 연구가 꾸준히 진행되었다 (Kotz와 Johnson, 1993; Denniston, 2006). 하지만 대 표본을 전제로 한 통계적 추론을 통한 접근 방법은 표본 크기가 작은 개발 단계의 시제품/초도 양품에 대한 의미 있는 결과를 제공하기 어렵다 (Mathew 등, 2007).

이 논문에서는 양산 단계에 적용되었던 기존의 시그마 수준을 기초로 R&D 개발 단계의 목표 시그마 수준 설정 방법과 경제성을 고려한 극한 설계(extreme design)의 설계 마진을 표현하는 강건 한계(robust limits)를 제시해 보고자 한다. 제 2절에서는 양산 단계와 구별해야 하는 R&D 단계의 목표 시그마 수준 설정 방법과 고려 사항을 설명하고 제 3절에서는 산포 개선을 통한 설계 공차의 강건 한계의 도출 방법에 대하여 알아본다. 제 4절에서는 결론과 추가적인 고려 사항에 대하여 논의한다.

2. R&D 목표 시그마 수준 설정과 고려 사항

제품의 일반적인 개발 프로세스에서의 활동과 고려해야 할 특성을 정리해 보면 Figure 2.1과 같다. 이를 단계별로 고려해 보면 고객과 시장 조사에 의해 정의되는 개념적 설계 단계(Concept Planning; CP)에서 시작된다. 제조사는 이를 통하여 고객과 시장의 요구에 적절한 제품을 정의한다. 다음 단계인 제품 설계 단계(Product Planning; PP)는 중요 기능을 포함한 구체적인 제품을 설계하고 이때 중요 특성에 대한 기능적 요구 사항을 결정한다. 이때 설계 파라미터의 공차 설계(tolerance design)을 통하여 목표값(target)과 규격한계(specification limits)를 결정한다. 설계 검증(Design Verification; DV) 단계에서는 이를 근거로 개념적 약점(conceptual vulnerabilities) 그리고 양산에서의 운영적 약점(operational vulnerabilities)을 확인한다.

설계 검증 단계를 마치면 실제 데이터를 측정할 수 있는 시제품을 제작하여 프로세스 변수들을 결정하고 생산 검증(Product Verification; PV) 단계에서 확인한다. 이를 통해 중요 특성에 대한 수정과 보완을 거친 후 초도 양산품을 통하여 관리 변수를 결정하고 생산 계획(Manufacturing Planning; MP)에 따라 양산품이 생산된다. 이 과정에서 품질 관리와 개선 방법을 통해 적절한 프로세스 운영 변수가 결정된다.

이와 같이 R&D 활동에서는 시제품과 초도 양산품 단계를 거치면서 올바른 양산 제품의 기능과 품질 기준을 설정하고 보완한다 (El-Haik, 2005). 따라서 제품/프로세스의 중요 특성은 시제품, 초도 양산품 그리고 양산품의 각 단계에서 측정될 수 있으며 이에 대한 진단과 평가를 위하여 시그마 수준 또는 프로세스 능력 지수를 활용할 수 있다.

시그마 수준은 고객의 요구 사항을 반영하는 규격 상한(Upper Specification Limit; USL) 그리고/또는 규격 하한(Lower Specification Limit; LSL)을 기준으로 프로세스로부터 취해진 표본으로부터 추정된

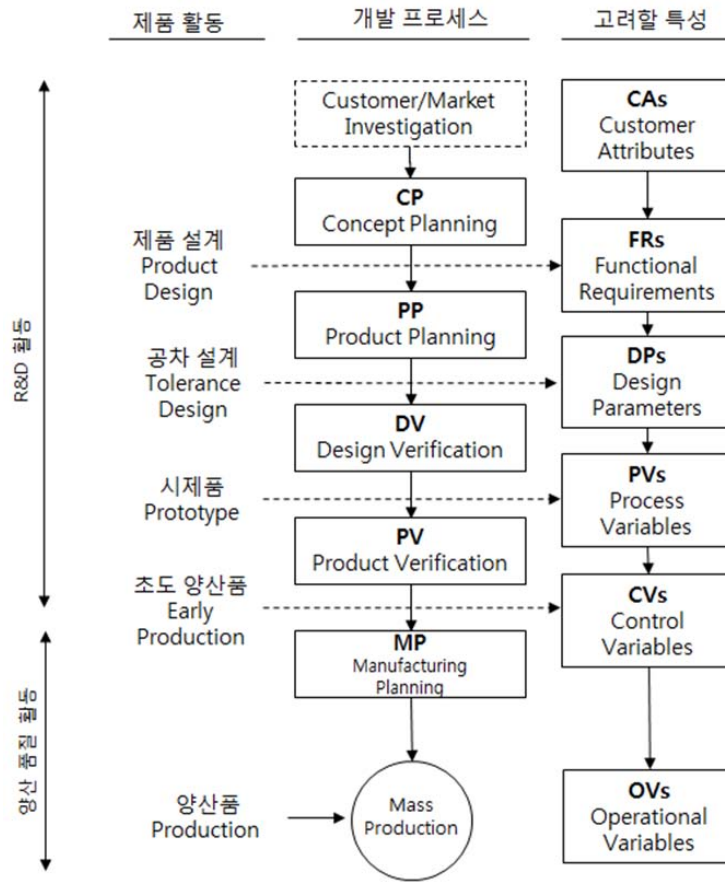


Figure 2.1. Stage-wise product type and key characteristics at the development process.

모집단 분포를 기초로 경험적 근거에 의한 산포 증가를 평균 치우침으로 변환하고 이를 이용한 표준화된 분위수로 프로세스의 능력을 표현 한다 (Harry와 Lawson, 1992). 이는 주어진 규격 한계 내에서 표본 관찰의 결과로 표현되는 불량률 또는 수율(yield)과 비교할 때 모집단의 잠재 불량 또는 수율로 표현할 수 있으며 다음과 같은 장점을 갖는다.

- (1) 모집단의 확률 분포에 기초하므로 조사된 표본의 결과가 아닌 모집단에서의 잠재적 결함을 반영하는 “예측”의 의미를 갖는다.
- (2) 연속형 데이터의 측정 단위를 제거할 수 있는 표준화를 통하여 서로 다른 연속형 특성들 간의 비교가 가능하다.
- (3) 불량률과 수율이 [0, 1]의 범위에서 값을 취하는 반면, 표준정규분포의 분위수는 $(-\infty, \infty)$ 의 범위에서 값을 취하므로 더 높은 변별력을 갖고, 개선의 난이도를 객관적으로 반영할 수 있다. 여기서, 개선의 난이도란 시그마 수준이 S-형태로 정의되는 역 누적분포함수의 형태를 이용하므로 서로 다른 범위(예: (0, 0.1], [0.2, 0.9], (0.9, 1.0))에서 정의되는 수율간의 상대적인 비교를 가능하게 한다는 것을 의미한다.

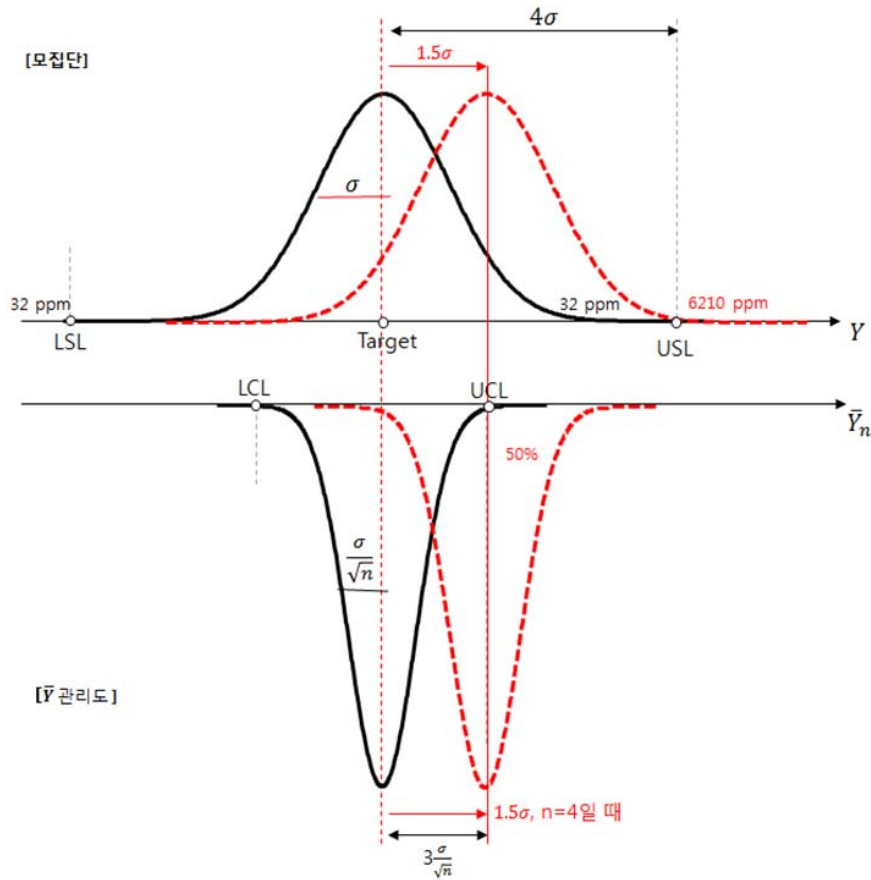


Figure 2.2. Possibility of undetection while using Control Chart with UCL and $n = 4$ when μ is shifted 1.5σ to the direction of USL (USL = Upper Specification Limit, UCL = Upper Control Limit).

DFSS(Design For Six Sigma)의 규정 설계(prescriptive design)에서는 설계 파라미터의 정의와 이에 대한 프로세스 변수간의 관계를 통하여 설계 품질을 정의한다. 이 경우 적용되는 시그마 수준은 주로 시제품과 초도 양산품에 대한 것으로 양산품으로 정의되는 일반적인 시그마 수준과 구별되어야 한다.

양산 단계에서 시그마 수준을 계산할 때는 잠재적인(단기, short-term) 시그마 수준과 실제적인(장기, long-term) 시그마 수준의 차이를 1.5로 가정 한다 (Harry, 1994). 이러한 차이는 양산이 지속됨에 따른 생산 환경의 산포 증가를 표현하는 $\hat{\sigma}_{LT} = c(\hat{\sigma}_{ST})$, $c > 0$ 로 반영하는 것으로 Bender (1962)는 $c = 1.5$ 그리고 Gilson (1951)은 $c = 1.6$ 을 제시하였다. 이를 근거로 Evans (1975)은 일반적인 제조 기업에서 $1.4 \leq c \leq 1.8$ 정도임을 주장하였다. 이에 모토롤라사는 시그마 수준을 소개할 때 합리적인 부분군의 표본 추출과 부분군의 크기 $n = 4 \sim 5$ 를 가정하고 $c = 1.5$ 를 적용하였으나 이 값에 대한 타당성에 대해서는 실무적으로 많은 논란이 있어 왔다 (Bothe, 2002).

Bothe (2002)는 식스 시그마 수준의 계산에서 경험적으로 가정된 1.5σ 치우침에 대한 연구에서 이러한 기준이 $\bar{X} - R$ 관리도의 부분군의 크기에 따른 진단 민감도에 따라 결정됨을 설명하였고, Figure 2.2와 같이 부분군의 크기 $n = 4$ 일 때, 평균 치우침에 대한 진단 가능성을 통계적으로 고려하여 관리도

Table 2.1. 50% detectable shift of μ , $k_n\sigma$, with respect to subgroup size(n) and target Sigma Level for the type of specification Limits.

n	k_n	목표 시그마 수준	
		단측 규격한계	양측 규격한계
1	3.00	7.5	7.65
2	2.12	6.6	6.77
3	1.73	6.2	6.38
4	1.50	6.0	6.15
5	1.34	5.8	5.99

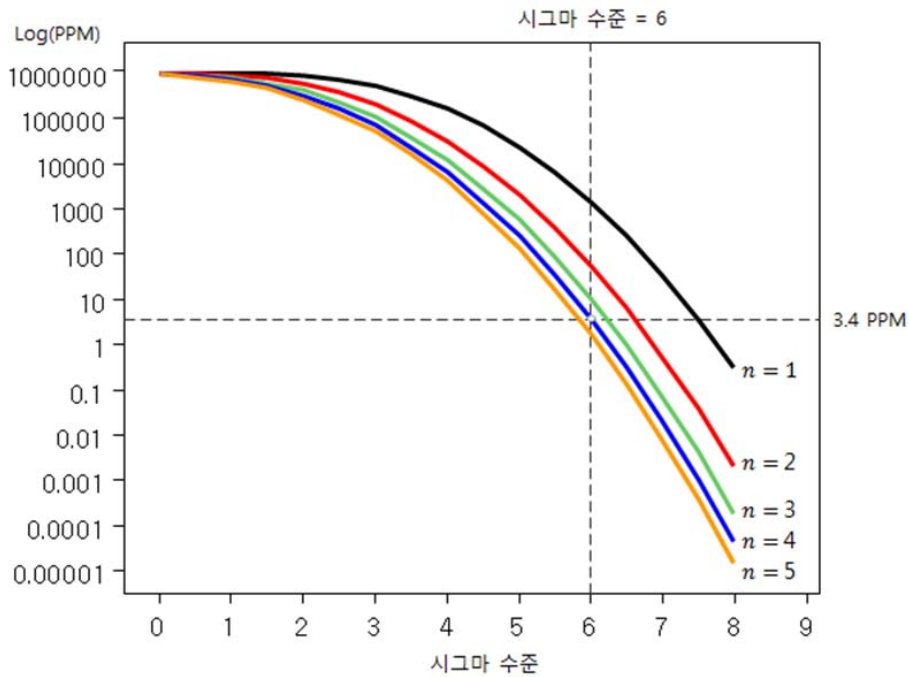


Figure 2.3. Log(PPM) for the given Sigma Levels with respect to subgroup size(n) (PPM = Parts Per Million).

에서 μ 의 치우침을 50% 정도 진단할 수 있는 기준 값이 1.5σ 정도임을 확인하였다. 즉, 합리적인 부분군(rational subgrouping)의 가정 하에서 시그마 수준 계산에서 가정된 치우침은 부분군의 크기에 따라 달라질 수 있음을 주장하였다.

일반적으로 R&D 분야에서 고려되는 시제품과 초도 양산품의 중요 특성의 경우, 합리적인 부분군을 실행할 수 없거나($n = 1$), 실행하더라도 양산 단계보다는 적은 $n < 5$ 인 경우가 대부분이다. 따라서 R&D 분야에서 시그마 수준을 정의하기 위해서는 이러한 부분군의 크기를 반영할 수 있어야 한다. Table 2.1은 양산 단계의 시그마 수준에서 가정된 1.5σ 치우침을 기준으로 부분군의 크기, $1 \leq n \leq 5$ 에 따른 치우침 계수와 목표 시그마 수준을 정리한 것이다. 예를 들어, 양산에서 3.4 PPM(parts per million)인 6 시그마 수준을 달성하기 위해서는 시제품에서는 규격 한계의 종류에 따라 약 7.5~7.65 시그마 수준 그리고 초도 양산품인 경우에는 고려되는 부분군의 크기에 따라 그 목표가 결정되어야 한다. 부분군의 크기에 따라 정의된 치우침을 반영한 시그마 수준별 PPM은 Figure 2.3과 Table 2.2와 같다.

Table 2.2. PPM for the given Sigma Levels with respect to subgroup size(n) (PPM = Parts Per Million)

시그마 수준	부분군의 크기(n)				
	1	2	3	4	5
0.0	998650.1	982997.0	958184.9	933192.8	909877.3
0.5	993790.3	947383.9	890651.4	841344.7	799545.8
1.0	977249.9	868643.1	767304.9	691462.5	633071.7
1.5	933192.8	732371.1	590954.1	500000.0	436440.5
2.0	841344.7	547758.4	393580.1	308537.5	254626.9
2.5	691462.5	351972.7	220649.9	158655.3	123024.4
3.0	500000.0	189429.7	102042.3	66807.2	48457.2
3.2	420740.3	140071.1	70780.9	44565.5	31442.8
3.4	344578.3	100272.6	47459.7	28716.6	19699.3
3.6	274253.1	69436.6	30741.9	17864.4	11910.6
3.8	211855.4	46478.7	19226.2	10724.1	6946.9
4.0	158655.3	30054.0	11603.8	6209.7	3907.0
4.2	115069.7	18762.8	6755.7	3467.0	2118.2
4.4	80756.7	11303.8	3792.6	1865.8	1106.7
4.6	54799.3	6569.1	2052.4	967.6	557.1
4.8	35930.3	3681.1	1070.3	483.4	270.1
5.0	22750.1	1988.4	537.7	232.6	126.1
5.1	17864.4	1441.2	375.8	159.1	85.0
5.2	13903.4	1035.0	260.2	107.8	56.7
5.3	10724.1	736.4	178.5	72.3	37.5
5.4	8197.5	519.0	121.3	48.1	24.5
5.5	6209.7	362.4	81.6	31.7	15.9
5.6	4661.2	250.7	54.4	20.7	10.2
5.7	3467.0	171.8	35.9	13.3	6.5
5.8	2555.1	116.6	23.5	8.5	4.1
5.9	1865.8	78.4	15.2	5.4	2.6
6.0	1349.9	52.2	9.8	3.4	1.6
6.1	967.6	34.5	6.2	2.1	1.0
6.2	687.1	22.5	3.9	1.3	0.6
6.3	483.4	14.6	2.4	0.8	0.4
6.4	336.9	9.3	1.5	0.5	0.2
6.5	232.6	5.9	0.9	0.3	0.1
6.6	159.1	3.7	0.6	0.2	0.1
6.7	107.8	2.3	0.3	0.1	0.0
6.8	72.3	1.4	0.2	0.1	0.0
6.9	48.1	0.9	0.1	0.0	0.0
7.0	31.7	0.5	0.1	0.0	0.0
7.1	20.7	0.3	0.0	0.0	0.0
7.2	13.3	0.2	0.0	0.0	0.0
7.3	8.5	0.1	0.0	0.0	0.0
7.4	5.4	0.1	0.0	0.0	0.0
7.5	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0
7.6	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0
7.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
7.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
7.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
8.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0

3. 극한 설계를 통한 설계 마진의 강건 한계 결정

품질 관리와 검사의 기준이 되는 설계 공차(design tolerance)는 고객의 요구 사항과 함께 생산 비용을 고려하여 결정되어야 한다. 이 절에서는 DV 단계에서 고려되는 시제품의 설계 공차의 설계 마

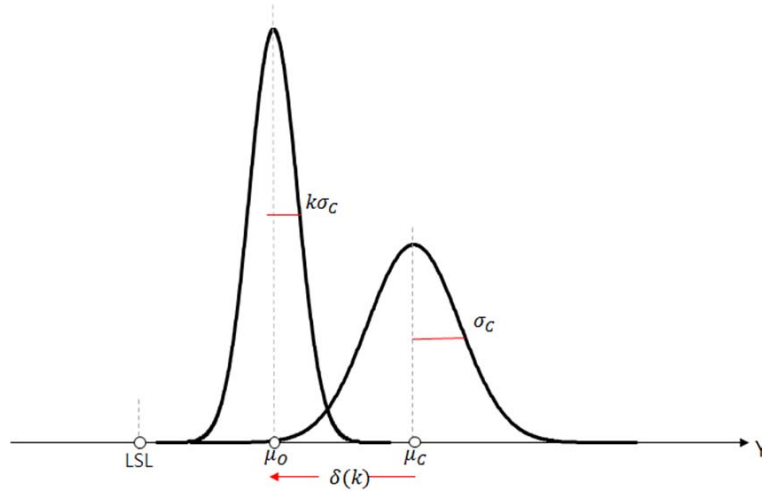


Figure 3.1. Deriving robust limit($\delta(k)$) of the key characteristic by variance reduction: one-sided specification limit.

진(design margins)을 확보하기 위한 산포 개선 목표 설정 또는 활동을 중심으로 강건 한계(robust limit)를 결정하는 방법을 고려해 보기로 한다. 고려되는 특성은 연속형을 가정한다. 먼저 LSL만 존재하는 경우를 고려해 보면 Figure 3.1과 같다.

시제품(또는 초도 양산품) 단계에서 고려된 중요 특성(Y)은 원하는 품질 수준(Z_0 또는 $p_0 = 1 - \Phi(Z_0)$)을 만족하며 $N(\mu_C, \sigma_C^2)$ 을 따른다고 가정했을 때, 표준편차를 $k\sigma_C$, $0 < k < 1$ 로 개선한다면 다음의 관계식에 의하여 강건 한계 $\delta_1^L(k)$ 을 계산할 수 있다.

$$p_0 = \Pr(Y \leq \text{LSL}) = \Pr\left(Z \leq \frac{\text{LSL} - \mu_C}{\sigma_C}\right) \equiv \Pr\left(Z \leq \frac{\text{LSL} - (\mu_C - \delta_1^L(k))}{k\sigma_C}\right).$$

이를 간단히 하면 강건 한계 $\delta_1^L(k) = (\text{LSL} - \mu_C)(k - 1)$ 가 되고, 그 특성을 고찰하기 위하여 $\text{LSL} = -1$ 그리고 $\mu_C = 0$ 을 가정한다면 $\delta_1^L(k) = (1 - k)$ 로 간단히 표현된다. 즉, $\text{LSL} - \mu_C$ 를 1이라고 가정했을 때, $k\sigma_C$ 로 산포를 개선하는 경우 LSL 과 μ_C 의 단위 거리의 $(1 - k)$ 만큼의 비율로 강건 한계를 확보할 수 있다. 동일한 방법으로 규격 상한만 존재하는 경우를 고려해 보면 강건 한계 $\delta_1^U(k) = (\text{USL} - \mu_C)(1 - k)$ 가 된다. 이 경우 역시 $\text{USL} = 1$ 그리고 $\mu_C = 0$ 을 가정한다면 $\delta_1^U(k) = 1 - k$ 로 간단히 표현할 수 있고 이는 규격 하한만 존재하는 경우와 반대 방향으로 동일한 크기의 강건 한계를 갖는다. 또한 단일 규격한계를 갖는 경우에는 시그마 수준(또는 불량률/PPM)의 값에 영향을 받지 않는다.

양측 규격인 경우에는 목표값(target; T)을 만족하는 경우를 중심으로 강건 한계를 고려해 보기로 한다. Figure 3.2는 규격 상한 방향(+)으로 강건 한계를 확보하는 경우를 보여준다.

품질 수준 $p_0 = 1 - \Phi^{-1}(Z_0)$ 를 고려하고 규격 상한 방향(+)으로 단측 강건 한계 $\delta_2^U(k)$ 를 고려해 보면 다음과 같다. 만일 T 를 달성하지 못했으나 품질 수준은 만족한다면 T 대신에 μ_C 를 이용하면 원하는 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} p_0 &= \Pr(Y \leq \text{LSL}|T) + \Pr(Y \geq \text{USL}|T) = \Pr\left(Z \leq \frac{\text{LSL} - T}{\sigma_C}\right) + \Pr\left(Z \geq \frac{\text{USL} - T}{\sigma_C}\right) \\ &\equiv \Pr\left(Z \leq \frac{\text{LSL} - (T + \delta_2^U(k))}{k\sigma_C}\right) + \Pr\left(Z \geq \frac{\text{USL} - (T + \delta_2^U(k))}{k\sigma_C}\right), \quad 0 < k < 1. \end{aligned}$$

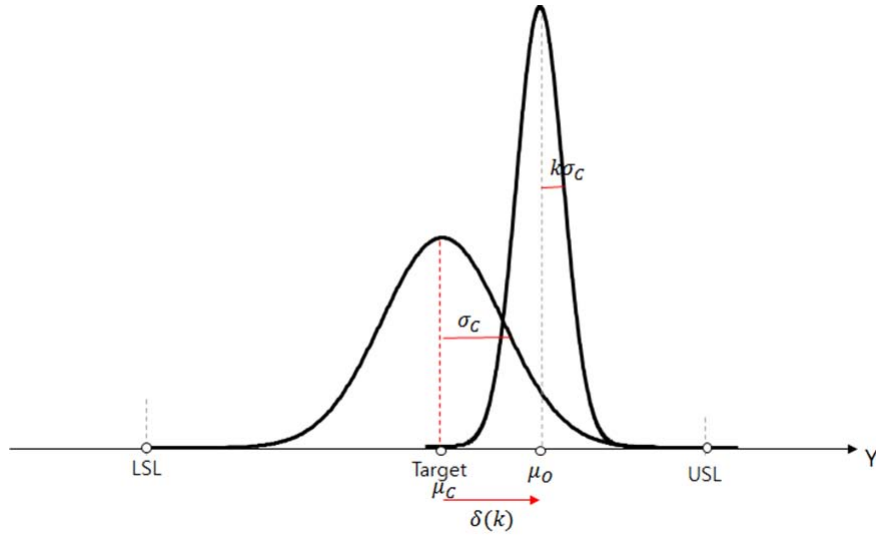


Figure 3.2. Deriving robust limit($\delta(k)$) of the key characteristic by variance reduction: two-sided specification limits.

이때, 규격 상한(+) 방향으로의 강건 한계를 구한다면 규격 상한(-) 방향의 확률은 거의 0이 되므로 다음을 이용하여 근사적인 해를 구할 수 있다. 여기서, $\Phi(\bullet)$ 는 표준정규분포의 누적함수를 나타낸다.

$$p_0 = \Pr\left(Z \geq \frac{\text{USL} - (T + \delta_2^U(k))}{k\sigma_C}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\text{USL} - (T + \delta_2^U(k))}{k\sigma_C}\right), \quad 0 < k < 1.$$

이를 간단히 하면 다음과 같다. 여기서, $\Phi^{-1}(\bullet)$ 는 표준정규분포의 역 누적함수를 나타낸다.

$$\delta_2^U(k) = (\text{USL} - T) - k\sigma_C\Phi^{-1}(1 - p_0) = (\text{USL} - T) - k\sigma_C(Z_0).$$

동일한 방법으로 규격 하한 방향(-)으로의 강건 한계 $\delta_2^L(k)$ 를 구해보면 다음과 같다.

$$\delta_2^L(k) = (T - \text{LSL}) + k\sigma_C\Phi^{-1}(p_0) = (T - \text{LSL}) - k\sigma_C(Z_0).$$

만일 양쪽 방향으로 등 간격을 갖는 강건 한계 $\delta_2^B(k)$ 를 구한다면 다음을 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} p_0 &= \Pr(Y \leq \text{LSL}|T) + \Pr(Y \geq \text{USL}|T) = \Pr\left(Z \leq \frac{\text{LSL} - T}{\sigma_C}\right) + \Pr\left(Z \geq \frac{\text{USL} - T}{\sigma_C}\right) \\ &\equiv \Pr\left(Z \leq \frac{\text{LSL} - (T - \delta_2^B(k))}{k\sigma_C}\right) + \Pr\left(Z \geq \frac{\text{USL} - (T + \delta_2^B(k))}{k\sigma_C}\right), \quad 0 < k < 1. \end{aligned}$$

등 간격의 가정 하에서 구해진 강건 한계 $\delta_2^L(k)$ 는 다음과 같다. 만일 등 간격이 바람직하지 않다면 고려된 p_0 를 각 규격한계를 중심으로 $p_0^L = w_1p_0$, $p_0^U = w_2p_0$, $w_1 + w_2 = 1$, 구분하여 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_2^B(k) &= (\text{USL} - T) - k\sigma_C\Phi^{-1}\left(1 - \frac{p_0}{2}\right) + (T - \text{LSL}) + k\sigma_C\Phi^{-1}\left(\frac{p_0}{2}\right) \\ &= 2\left[(\text{USL} - T) - k\sigma_C\Phi^{-1}\left(1 - \frac{p_0}{2}\right)\right] = 2\left[(T - \text{LSL}) + k\sigma_C\Phi^{-1}\left(\frac{p_0}{2}\right)\right] \\ &= 2[(T - \text{LSL}) - k\sigma_C(Z_0^*)], \end{aligned}$$

Table 3.1. Robust Limit for the type of specification limits, $\delta(k)$, $0 < k < 1$

규격 한계	방향	강건 한계, $\delta(k)$
규격하한	*	$\delta_1^L(k) = (\mu_C - LSL)(1 - k)$
규격상한	*	$\delta_1^U(k) = (USL - \mu_C)(1 - k)$
양측규격 (등 간격)	LSL 방향(-)	$\delta_2^L(k) = (T - LSL) - k\sigma_C(Z_0)$
	USL 방향(+)	$\delta_2^U(k) = (USL - T) - k\sigma_C(Z_0)$
	양쪽 방향(\pm)	$\delta_2^B(k) = 2[(T - LSL) - k\sigma_C(Z_0^*)]$, 여기서 $Z_0^* = -\Phi[(1 - \Phi^{-1}(Z_0))/2]$

여기서 $Z_0^* = -\Phi[(1 - \Phi^{-1}(Z_0))/2]$ 이다.

지금까지 논의된 규격 한계의 종류별 강건 한계를 정리하면 Table 3.1과 같다. 이는 개발과 양산 전 단계에서 원하는 설계/운영 공차의 강건 한계 값에 대한 산포 개선 목표 설정하고자 하는 경우에도 동일하게 적용할 수 있다.

4. 결론 및 보언

지금까지 양산 단계의 시그마 수준에서 반영된 1.5 시그마 치우침에 대한 통계적 고찰을 통하여 R&D 분야의 시제품/초도 양산품에 대한 목표 시그마 수준 설정 방법과 개발 단계에서 정의되는 허용 공차의 강건 한계에 대하여 알아보았다. 이는 양산 단계에서 고객 불만족 요소를 줄일 수 있는 실제적 프로세스 능력을 달성하기 위하여 개발 단계에서 올바른 목표를 설정하고 이를 근거로 경제적인 개발과 양산을 위한 합리적인 공차 조정 방법으로 활용할 수 있다.

이러한 노력은 1980년대 식스 시그마 방법이 소개되기 전부터 다양한 분야에서 연구되어 왔으며 최근 관심을 모으고 있는 자동차 부품 관련 분야에서는 QS-9000을 중심으로 현장에서 널리 적용되고 있다 (Munro, 2000). 여기서 주의해야 할 점은 이러한 기존의 방법과 식스 시그마 방법에서 사용하는 용어에서 서로 다른 의미로 사용되는 부분이 존재한다는 것이다. 따라서 식스 시그마 방법을 폭넓게 적용 하였던 국내의 IT업체가 자동차 부품 관련 시장에 진출하기 위해서는 이러한 용어들을 먼저 확인해 볼 필요가 있다. 예를 들어, 본 논문에서 고려된 시그마 수준과 같은 프로세스 성과 지표의 경우를 보면, QS-9000에서는 단기 능력을 부품사의 잠재 프로세스 능력 또는 시제품 프로세스 능력으로 판단하지만 식스 시그마 방법에서는 시제품에 대한 고려를 하지 않을 뿐만 아니라 이를 해당 프로세스의 달성 가능한 기본 프로세스 능력으로 해석한다. 이러한 경우, 본 논문에서 논의된 R&D 시그마 수준은 개발 초기의 시제품 프로세스 능력을 평가하는 좋은 대안이 될 수 있을 것이라고 기대한다.

강건 한계의 확인과 이를 통한 설계 마진의 확보는 경쟁이 치열해 지는 제조 환경에서 시간/비용이 많이 소요되는 특성에 대한 경쟁력을 높일 수 있는 방법 중의 하나이다. 또한 현재 제시된 방법은 개발과 양산 단계 모두에 적용 가능한 것으로 비용 절감 그리고/또는 기능 향상을 위한 산포 개선의 목표를 설정할 때도 유용하게 사용할 수 있다. 만일 동시에 고려해야 하는 특성들이 많은 경우, 복합 강건 한계 또는 강건 한계의 할당을 고려할 수 있다. 이러한 연구는 R&D 분야의 체계적이고 경제적인 개발 과정을 도울 수 있으며 이를 식스 시그마 지표와 연결하고자 하는 노력은 단일 종합 품질 척도인 시그마 수준의 유용성을 더 높일 수 있을 것이라 기대한다.

References

Bender, A. (1962). Bendorizing tolerances-a simple practical probability method of handling tolerances for limit-stack-ups, *Graphic Science*, 17.

- Bissell, A. F. (1990). How reliable is your capability index?, *Applied Statistics*, **39**, 331–340.
- Bothe, D. R. (2002). Statistical reason for the 1.5 sigma shift, *Quality Engineering*, **14**, 479–487.
- Denniston, B. (2006). Capability indices and conformance to specification: the motivation for using Cpm, *Quality Engineering*, **18**, 79–88.
- Donaldson, P. D. (2004). 100 years of Juran, *Quality Progress*, **37**, 25–37.
- El-Haik, B. (2005). *Axiomatic Quality: Integrating Axiomatic Design with Six-Sigma, Reliability, and Quality Engineering*, John Wiley & Sons.
- Evans, D. H. (1975). Statistical tolerancing: the state of the art, part III, methods for estimating moments, *Journal of Quality Technology*, **7**, 1–12.
- Gilson, J. (1951). *A New Approach to Engineering Tolerances*, Machinery Publishing Co, London.
- Harry, M. J. (1994). *The Vision of Six Sigma: Tools and Methods for Breakthrough*, Sigma Academy, Phoenix, AZ.
- Harry, M. J. and Lawson, J. R. (1992). *Six Sigma Producibility Analysis and Process Characterization*, Addison-Wesley, MA, 2–3.
- Kane, V. E. (1986). Process capability indices, *Journal of Quality Technology*, **18**, 41–52.
- Kotz, S. and Johnson, N. L. (1993). *Process Capability Indices*, CRC Press.
- Mathew, T., Sebastian, G., and Kurian, K. M. (2007). Generalized confidence intervals for process capability indices, *Quality and Reliability Engineering International*, **23**, 471–481.
- Munro, R. A. (2000). Linking six sigma with QS-9000, *Quality Progress*, **33**, 47.
- Shewhart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, ASQ Quality Press.
- Sleeper, A. (2005). *Design for Six Sigma Statistics: 59 Tools for Diagnosing and Solving Problems in DFFS Initiatives: 59 Tools for Diagnosing and Solving Problems in DFFS Initiatives*, McGraw Hill Professional.

R&D 분야의 목표 시그마 수준 설정과 설계 공차의 강건 한계 결정에 대한 연구

고승근^{a,1}

^a가천대학교 응용통계학과

(2016년 1월 18일 접수, 2016년 1월 21일 수정, 2016년 1월 21일 채택)

요약

시그마 수준(sigma level)이란 미국 모토롤라사에 의해 소개된 프로세스 능력 지수로서 1970년대 이후 널리 활용되고 있는 다양한 지수들 중의 하나이다. 이는 다른 지수들과 비교할 때 모 프로세스의 확률 분포에 기초한다는 장점을 갖지만 양산 단계를 가정한 것으로 R&D 분야의 시제품 그리고/또는 초도 양산품 단계에 직접 적용하는 것은 적절하지 못할 수 있다. 이에 본 논문은 시그마 수준을 계산할 때 가정하는 치우침에 대한 통계적 고찰을 통하여 양산 단계에서 6 시그마 품질 수준을 달성하기 위한 개발 단계의 시제품 그리고/또는 초도 양산품의 목표 시그마 수준 설정 방법을 소개한다. 그리고 이를 기초로 개발과 양산 단계에서 경제성을 달성할 수 있는 설계 공차의 강건 한계 도출 방법을 제시해 보고자 한다.

주요용어: 프로세스 능력 지수, 시그마 수준, R&D 시그마 수준, 1.5 시그마 치우침, 강건 한계, 설계 공차

이 연구는 2016년도 가천대학교 지원에 의한 결과임.

¹(13120) 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342, 가천대학교 응용통계학과. E-mail: sgk@gachon.ac.kr