

▣ 응용논문

감도분석에 의한 제조공정연구

A Study on the manufacturing process using the sensitivity analysis of stochastic network

박 기 주*
Ki-Joo Park

Abstract

A more technical perspective is needed in estimating the effect of the Manufacturing Process for improving the Productivity, there are many statistical evaluation methods, convenience sampling, frequencies, histogram, QC seven tools, control chart etc. It is more important for the companies to use six sigma to reduce defective and improve the process control than the technical definition as a disciplined quantitative approach for improvement of process control and a new way of quality innovation. Process network analysis is a technique which has the potentiality for a wide use to improve the manufacturing process which other techniques can't be used to analyze effectively. It has some problems to analyze the process with feedback loops. The branch probabilities during quality inspections depend upon the number of times the product has been rejected. This paper presents how to improve the manufacturing process by statistical process control using branch probabilities, Moment Generating Function(MGF) and Sensitivity Equation.

1. 서론

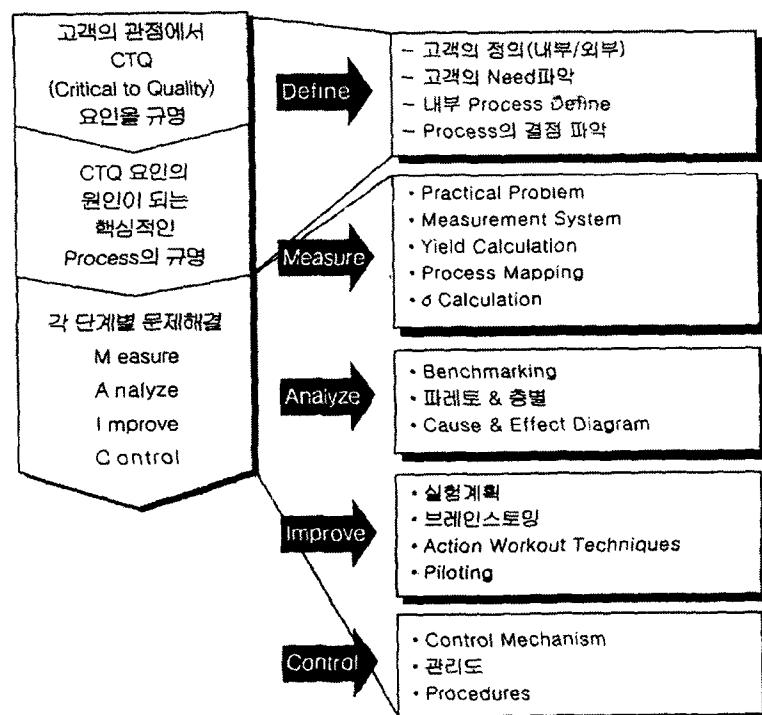
제조공정의 개선을 위한 제조공정의 연구를 6σ 품질개선의 목표를 두고 6σ plan으로 무결점(Zero Defect)목표에 도전하고, 원가 및 사이클타임의 감소, 신뢰성 및 성능향상으로 고객을 만족시키고, 경쟁력 우위 확보로 초우량 기업이 되고자 Network 분석에 의한 감도분석으로 고객 만족을 위한 품질의 CTQ를 찾아내어 6σ 의 목표를 달성하기 위한 Motorola의 품질프로그램은 참여적 관리, 생산사이클의 단축, 생산성있는 설계, 통계적 공정관리, 부품의 표준화, 협력사의 자격 강화 등으로 품질의 계획을 실현한다. 고객의 관점에서 품질에 영향을 미치는 요소를 파악하고(Measure), 품질에 미치는 결정적인 요소들 중에 불량을 발생시키는 프로세스를 파악하여(Analysis), 불량을 유발시키는 프로세스를 개선하고(Improvement), 개선된 프로세스를 지속되도록 관리(Control)하는 MAIC과정을 실시함으로서 6σ 의 목표로서 달성하고 있다. 제조공정에서 일어나는 여러 현상들은 복잡한 양상을 지니고 있으나 체계적으로 Network화 한 후 분석할 수 있는 Network 분석기법은 유용하다. Network 분석에는 Network의 특성치를 이용하여 각각 대응되는 parameter를 확률변수로하는 밀도함수(density function)를 이용한다. Network branch의 변수에 대한 특성치의 분포 및 공정이 지니는 특수성을 등가함수의 변동에 따른 감도계수로서 System을 개선하는데 이용될 수 있음을 보이고, System의 개선을 등가기대확률의 증가와 등가기대시간의 감소로서 공정을 개선하는데 Network의 감도분석기법의 유용성을 보이고자 한다.

* 경일대학교 산업시스템공학부

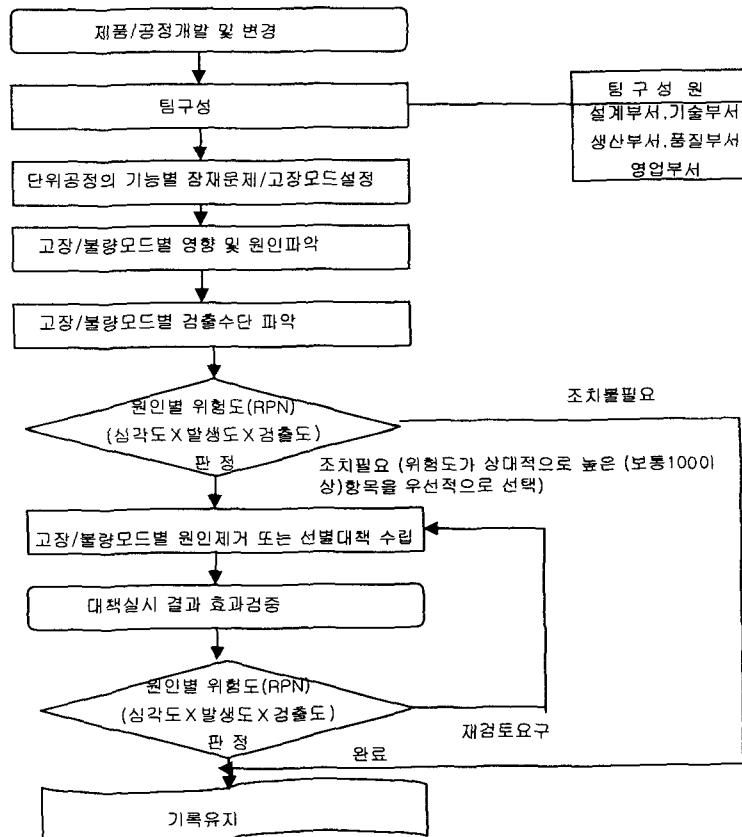
2. 공정능력과 변동

2.1 Project의 정의방법

6 σ 활동은 문제를 정의(Define)하고, 측정(Measure), 분석(Analysis), 개선(Improvement), 관리(Control)의 5단계(DMAIC)를 순차적으로 개선과정을 반복함으로서 품질향상 및 업무개선의 목표를 달성하기 위해 수행하는 것으로 5단계의 개선과정을 DMAIC 사이클이라 부르고, 개선을 위한 핵심프로세스는 Customer Surveys, Focus Group, Customer Needs Mapping, QFD, Quick Market Intelligence, FMEA, LogicTree, Process Mapping 및 Cause & Effect Matrix등의 수법으로 Fig.1과 같이 개선공정(DMAIC)의 과정은 주요고객을 정의하고, 개선 프로젝트를 선정하는 정의(Define)단계에서 고객의 요구품질의 특성인 참 특성은 QFD(Quality Function Deployment)로서 기술적인 요구사항인 대용특성으로 바꾸고, 품질에 영향을 미치는 구체적인 중점관리특성(CTQ : Critical To Quality)로 전환한다.



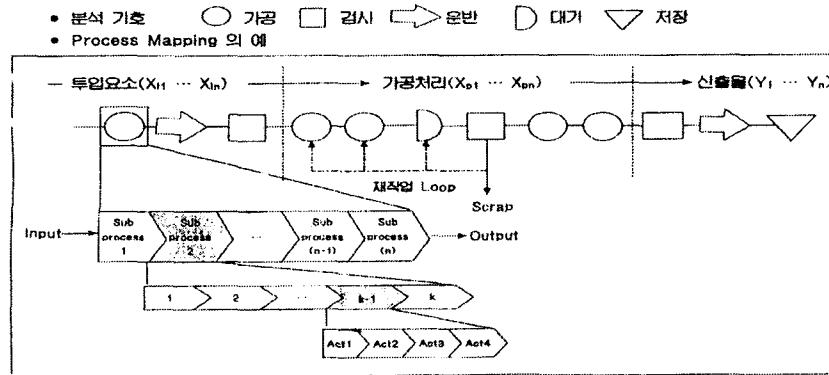
[그림 1] Steps for 6 σ



[그림 2] FMEA

고장형태 및 영향분석(Failure Mode and Effect Analysis : FMEA)을 위해 설계된 제품에 대하여 잠재적인 고장 형태를 Brainstorm으로 추출하고, 구조적으로 분석하여 고장을 예방하기 위해 각각의 잠재 고장모드에 대하여 중요도와 발생빈도를 정한다.

[그림 2]와 같이 제품의 설계에서 발생할 수 있는 예상 고장형태를 명확히 규명하고 취해야 될 적절한 Action의 순위를 정한다. FMEA에서 고장의 형태와 고장의 범위를 정하는 경우 부품을 이루는 단품 수준인지 또는 부품의 결합체인 조립품의 수준인지를 정하고, 제품 및 공정의 잠재적 고장과 그 영향을 인식하고 평가함으로서 주위 환경에 미치는 영향을 어떻게 정의 할 것인지를 결정하는 일은 어렵다. 개선하고자 하는 일반영역 또는 특별한 프로세스에서 프로세스의 경계를 정의하고 Brainstorm하여 프로세스의 단계에 대하여 [그림 3]과 같이 순서를 정한다. Symbol을 사용하여 작성된 프로세스를 검증하기 위하여 실제로 확인한다. Key Process의 값으로 Yield, Cost, 폐기비용, 작업으로 인한 Cost, Capability, Cycle Time 등을 추가하여 Process Loss 또는 낭비요소, Cycle Time 개선 등 Theme의 성격에 따른 Map을 작성하고 분석하여 현재문제가 되고 있는 곳을 파악하기 위해 정보의 흐름을 조사하여 개선의 기회를 명확히 하는 Tool로서 프로세스를 문서화하기 위하여 Process Mapping을 사용한다.



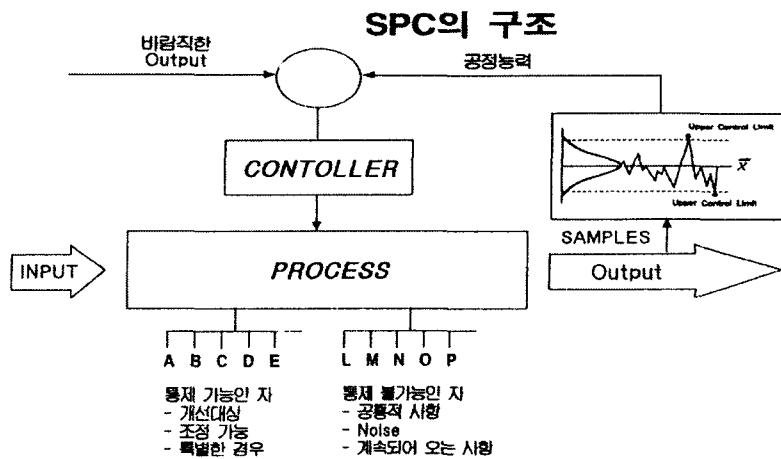
[그림 3] Process Mapping

정의된 문제에 대하여 불량은 어느 정도인가를 개량적으로 규명하여 공정을 Mapping한 다음 측정방법을 확인하여 사실에 대한 데이터를 측정(Measure)한다. 분석을 쉽게하고 목적 달성을 위해 Process Mapping, QFD, FMEA, Logic Tree, Pareto Chart 등을 이용하여 문제점에 대한 핵심 프로세스를 추출하여 현 업무의 σ 수준에서 6σ 수준으로 실제의 문제를 특성화시켜 현상파악 및 분석을 명확히 하기 위한 것으로 6σ 의 측면에서 문제의 영역을 정의하는 일은 MAIC의 기본적인 단계이다.

2.2 품질개선 단계

품질개선활동으로 문제가 될 수 있는 상황들은 QFD 및 FMEA로 초기에 예상하여 문제가 되기 전에 조치가 이루어져야 하지만 현장상황은 작업자의 능력, 자재의 산포, 환경조건, 초기 가동조건 등 여러 요인으로 인하여 공정의 설계당시와 변경될 수 있으므로 문제해결과 병행하는 지속적인 품질의 개선이란 예방적 차원에서 어렵게 한다. 품질개선에는 공정의 설계, 공정의 관리, 공정의 개선 등 세 분야로 나눌 수 있는데

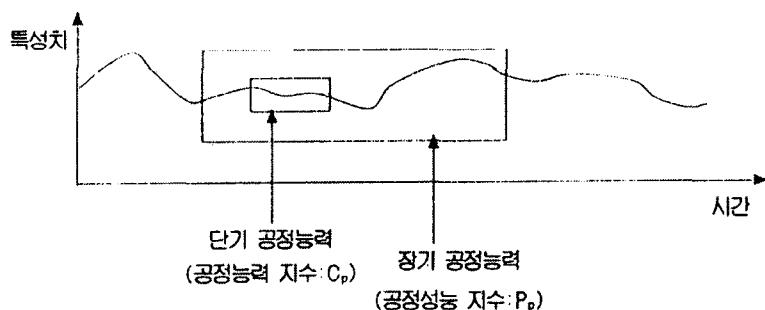
- 1) Process Design 분야는 DFMEA/PFMEA, Process Mapping, QFD, Robust Design, 잠재적 공정능력지수(Cp), 실질적 공정능력지수(Cpk), Control Plan, 게이지 반복성 및 재현성, 품질정보 데이터베이스에 대한 품질의 기법을 사용하여 개발단계에서 가능한 최고의 품질을 달성한다.
- 2) Process Control 분야는 Error Proofing, Mistake Proofing, Adaptive Control, Neural Network, SPC 등의 인증된 품질기법을 이용하여 산출물을 안정화한다.
- 3) Process Improvement 분야는 무결점 품질로 6σ 수준의 목표를 달성하기 위한 것으로 고객의 관점에서 CTQ를 설정하고 σ 목표 및 비용개선계획을 수립하여, 전 부문에서 개선 대상의 문제를 선정하여 실제문제를 통계적 문제로 변환하고, 특성(what), 문제의 유형, 발생위치(where), 현수준 정도 등으로 그림 4와 같이 SPC의 구조에 적합한 관리방법을 설정/준수하고 피드백 시스템을 구축하여 공정의 산포를 6σ 수준으로 개선함으로서 낮은 품질수준으로 인하여 발생하는 품질의 비용을 절감할 수 있다는 프로젝트의 절차서의 과정을 활용한다.



[그림 4] Logic of SPC

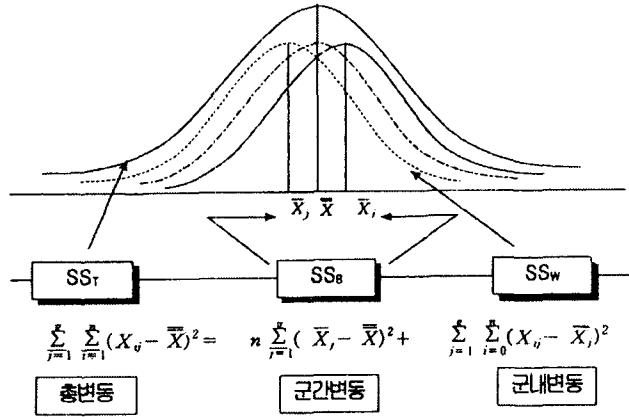
2.3 제조공정의 변동

데이터 분석시 단기와 장기의 공정능력을 분리하여 관리적 요인의 평균치이동문제인지, 기술적 요인의 산포 문제인지를 특성화하기 위해 데이터의 수집은 [그림 5]와 같이 Rational Subgroup에서 측정되어야 한다. Rational Subgroup에 포함되어야 하는 요소로 프로세스에 잠정적인 영향을 주는 5M(Man, Machine, Material, Method, Measurement)을 사용하는 것이 도움이 된다.



[그림 5] Process Performance

Rational Subgrouping이란 Subgroup내에서는 군내변동만 존재하고, Subgroup간에서는 군간변동만을 발생하도록 하는 Grouping방법으로 프로세스 변동에 잠정적인 영향을 주는 변동 인자 를 구별할 수 있으므로 장기/단기의 공정능력분리가 가능하게 된다. 데이터의 종류에 관계없이 가능한 짧은 기간 동안에 동질성(同質性)의 조건에서 작업된 Sample군인 Rational Subgroup은 Subgroup들 사이에서 Subgroup내에서는 군내변동(white noise)이 존재하고, Subgroup간에는 군간변동(black noise)이 존재하게 된다. 변동의 개념은 Rational Subgroup들 사이에서 장기간에 걸쳐 측정된 데이터의 분포는 [그림 6]과 같이 군내변동과 군간변동이 포함되게 되고 군간변동과 군내반동의 합이 총변동이다.



[그림 6] Variation through Rational Group

white noise(군내변동)인 white noise는 모든 공정에서 존재하는 일상적인 요인에 의한 변동인 우연원인으로, 현존하는 기술(업무처리)에서는 통제 불가능한 변동이고, 일반적으로 공정의 산포에 영향을 미치는 변동으로 주로 기술적 요인에 의해서 발생한다. black noise(군간변동)인 black noise는 공정상에 외부의 요인이 영향을 미쳐서 평균치가 Shift되는 변동이 발생하는 것으로 원인규명이 가능한 요인에 의한 변동인 이상원인으로, 현재의 공정상에서 통제가 가능한 변동이고, 일반적으로 목표치에서 평균치가 shift되도록 영향을 미치는 변동으로 실제적으로 시간의 경과에 따른 공정능력이 어느 정도인지를 나타낸다.

3. Network의 Sensitivity Equation

System의 현장조건이나 외적조건의 변화가 System의 구성요소를 변동시킬 때 그 요소의 변동분이 평가함수의 변동분에 미치는 영향을 정량적으로 표현하는 중심적인 개념이 감도(Sensitivity)로서 $S_{x,y}$ 는 parameter x 에 관한 y 의 감도를 표현하는 의미를 가지는 기호이다.

$$S_{x,y} \Big|_{x_i=x_0} = \left[\left(\frac{w_i}{y} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \right]_{x_i=x_0} \quad (i=1,2, \dots, N) \quad (1)$$

상등함수 y 의 증분 Δy 는 Taylor 전개 후 Δx 에 관한 이차이상의 항을 무시하면 식(2)에 근사하게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta y &= y(x + \Delta x) - y(x) \\ &= \frac{\partial y}{\partial x_1} \Big|_{x=x_0} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Big|_{x=x_0} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_N} \Big|_{x=x_0} \Delta x_N \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \Big|_{x=x_0} \Delta x_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Δy 와 y 와의 비로서 나타낸 색은 식(3)과 같은 다량 parameter감도와 parameter증분과의 함수로 된다.

$$\begin{aligned}\frac{\Delta y}{y} &= \left[\frac{x_1}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_1} \right] \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} \right) + \left[\frac{x_2}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_2} \right] \left(\frac{\Delta x_2}{x_2} \right) + \dots + \left[\frac{x_N}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_N} \right] \left(\frac{\Delta x_N}{x_N} \right) \\ &= S_{x,y} \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} \right) + S_{x,y} \left(\frac{\Delta x_2}{x_2} \right) + \dots + S_{x,y} \left(\frac{\Delta x_N}{x_N} \right) \\ &= \sum_{i=1}^N S_{x,y} \left(\frac{\Delta x_i}{x_i} \right)\end{aligned}\quad (3)$$

이 식을 이용하면 System의 평가함수 y 의 희망하는 변동량을 얻기 위하여 필요한 Δx_i 를 결정할 수 있고 상등함수 y 에 가장 큰 영향을 미치는 parameter를 결정하는 것도 가능하게 된다. 따라서 제조공정의 process를 Network로 나타내고 각 branch에 대한 parameter의 변화량 Δx_i 를 결정하고 확률에 영향을 받는 parameter와 영향을 받지 않는 parameter를 구별하여 Network의 상등함수를 위한 감도방정식을 구함으로서 공정의 개선에 필요한 정보를 얻을 수 있다. Δx_i 에 대한 Network의 출력은 확률(P)와 시간(t) 등의 parameter에 영향을 받으므로 parameter 전체의 개수를 N, 확률 parameter의 개수를 K라 하면 식(2)는

$$\Delta y = \sum_{i=1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (4)$$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 = \sum_{i=1}^K \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i + \sum_{i=K+1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (5)$$

확률 parameter 개수 K개 중에는 등식제약조건이 성립되는 M개의 식이 존재한다. 즉

$$f_m(x) = 0 \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

확률 parameter는 등식제약조건에 영향을 받는 parameter L개와 받지 않는 parameter (K-L) 개로 나눌 수 있으므로 Δy 는

$$\begin{aligned}\Delta y &= \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 \\ &= \sum_{i=1}^L \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i + \sum_{i=L+1}^K \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i + \sum_{i=K+1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i\end{aligned}\quad (7)$$

로 표시되고 식(6)에서 등식제약조건의 parameter의 개수 L개중에서 M개의 상태변수(state variable)과 T개의 결정변수(decision variable)로 나누어 보면 $L=M+T$ 가 되고

$$x_i = s_m \quad (m = 1, 2, \dots, M) : \text{상태변수(state variable)}$$

$$x_i = d_t \quad (t = 1, 2, \dots, T) : \text{결정변수(decision variable)}$$

이때 L개의 parameter중에 어느 것이 결정변수가 되던 상태변수가 되던 상관이 없으며

$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= \sum_{m=1}^L \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \\ &= \sum_{m=1}^M \frac{\partial y}{\partial s_m} \Delta s_m + \sum_{t=1}^T \frac{\partial y}{\partial d_t} \Delta d_t\end{aligned}\quad (8)$$

Δy_1 의 변량을 표현할 수 있고 식(6)에서 확률 parameter의 증분을 고려하면 $\Delta x_i (i=1, 2, \dots, L)$ 의 변동들은 M개의 선형방정식을 만족시켜야 하므로

$$\sum_{i=1}^L \frac{\partial f_m}{\partial x_i} \Delta x_i = 0 \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

상태변수 (s_m)나 결정변수 (d_t)를 고려한 등식제약 조건의 증분은

$$\sum_{i=1}^L \frac{\partial f_m}{\partial x_i} \Delta x_i = \sum_{m=1}^M \frac{\partial f_j}{\partial s_m} \Delta s_m + \sum_{t=1}^T \frac{\partial f_j}{\partial d_t} \Delta d_t \quad (j=1, 2 \dots M) \quad (10)$$

J , C , $V_s y$, $V_d y$ 를 다음과 같이 두면 식(8), 식(10)은 식(11), 식(12)로 표현된다.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial s_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial s_M} \\ \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial f_M}{\partial s_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_M}{\partial s_M} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial d_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial d_T} \\ \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial f_M}{\partial d_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f_M}{\partial d_T} \end{pmatrix}$$

$$V_s y = [\frac{\partial y}{\partial s_1} \dots \dots \frac{\partial y}{\partial s_M}] \quad V_d y = [\frac{\partial y}{\partial d_1} \dots \dots \frac{\partial y}{\partial d_T}]$$

$$\Delta y_1 = V_s y + V_d y \quad (11)$$

$$0 = J \Delta s + C \Delta d \quad (12)$$

식(12)로 부터 $\Delta s = -J^{-1}C \Delta d$ 므로 식(11)은

$$\Delta y_1 = [V_d y - V_s y J^{-1} C] \Delta d \quad (13)$$

상태변수(state variable)와 결정변수(decision variable)의 대각행렬(diagonal matrix)을 S , D 라 하면 SS^{-1} 와 DD^{-1} 를 식(13)에 작용시킨후 Δy_1 을 y 로 나누면

$$\Delta y_1 = [V_d y - V_s y S S^{-1} J^{-1} C] D D^{-1} \Delta d \quad (14)$$

$$\frac{\Delta y_1}{y} = \frac{1}{y} [V_d y D - (V_s y S) R] D^{-1} \Delta d \quad (15)$$

여기서 $R = S^{-1} J^{-1} C D$

$$= \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{M1} & \gamma_{M2} & \dots & \gamma_{MT} \end{pmatrix} \text{로서 } (M, T) \text{행렬이다.}$$

식(15)를 정리하여 식(3)의 형태로 표기하면

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y_1}{y} &= \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{\partial y}{\partial d_t} d_t - \sum_{m=1}^M \left(\sum_{s=1}^L \frac{\partial y}{\partial s_m} s_m \gamma_{mt} \right) \right\} \sum_{t=1}^T \frac{\Delta d_t}{d_t} \\ &= \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{d_t}{y} \frac{\partial y}{\partial d_t} - \sum_{m=1}^M \frac{s_m}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial s_m} \gamma_{mt} \right\} \frac{\Delta d_t}{d_t} \\ &= \sum_{t=1}^T \left\{ S_d y - \sum_{m=1}^M S_{sm} y \gamma_{mt} \right\} \frac{\Delta d_t}{d_t} \end{aligned} \quad (16)$$

식(7)을 y 로 나누어 식(16)에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y}{y} &= \frac{\Delta y_1}{y} + \frac{\Delta y_2}{y} + \frac{\Delta y_3}{y} \\ &= \frac{1}{y} \sum_{i=1}^L \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{1}{y} \sum_{i=L+1}^K \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{1}{y} \sum_{i=K+1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \\ &= \sum_{i=1}^L S_x y \frac{\Delta x_i}{x_i} + \sum_{i=L+1}^K S_x y \frac{\Delta x_i}{x_i} + \sum_{i=K+1}^N S_x y \frac{\Delta x_i}{x_i} \\ &= \sum_{i=1}^L \left\{ S_d y - \sum_{m=1}^M S_{sm} y \gamma_{mt} \right\} \frac{\Delta d_t}{d_t} + \sum_{i=L+1}^K S_x y \frac{\Delta x_i}{x_i} + \sum_{i=K+1}^N S_x y \frac{\Delta x_i}{x_i} \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)은 Network의 System에 대한 performance measure의 평가량을 바라는 목적으로 달성하기 위해서 각 branch의 확률과 MGF의 변수에 필요한 변동량을 결정하도록 하는 각 branch의 결정근거가 되고 있으며 이것을 감도방정식(sensitivity equation)이라 부르고 parameter의 변화 ($\frac{\Delta x_i}{x_i}$)의 계수가 감도계수 S_{xy} 이므로 계수의 값이 크면 큰 감도를 수반하며 이 parameter는 평가함수 y 에 큰 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 감도함수에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 parameter를 결정하는 것은 가능하게 되고 의사결정을 할 때 parameter 결정의 근거가 되고 있다.

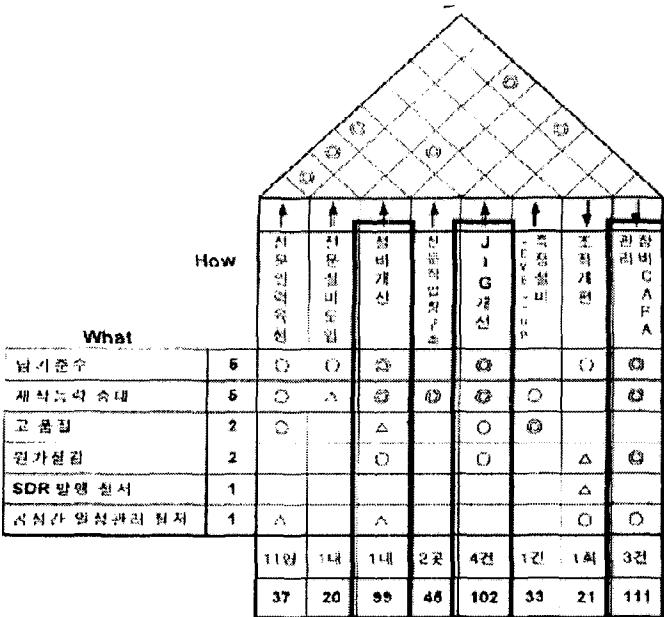
4. 사례 연구

4.1 적용절차 및 공정개요

제조공정을 분석하여 생산capacity를 향상시키기 위하여 DMAIC를 활용하여 공작기계 제작부문에서 상당한 생산실적을 올리고 있는 K중공업 회사의 선반제조공정에 관심을 두었다. 선반의 제조 공정은 광범위하고 복잡함으로 선반의 부품중에 가장 중요한 주축(Main Spindle)의 제조공정을 선택하여 분석하였다. 주축의 제조에 수반되는 주요작업은 선반(Turning)작업, Milling작업, Taper작업 및 열처리(Heat Treatment)와 연삭(Grinding)작업으로 이루어진다. Main Spindle의 제조공정에서 작업완료성공확률과 작업완료기대시간에 가장 큰 영향을 주는 부분을 찾아 기대확률을 증가시키고 기대시간을 줄이고자 하였으며 이를 위한 정량적 척도로서 감도방정식을 이용하여 그 계수를 구하여 개선점을 찾으려고 시도한다.

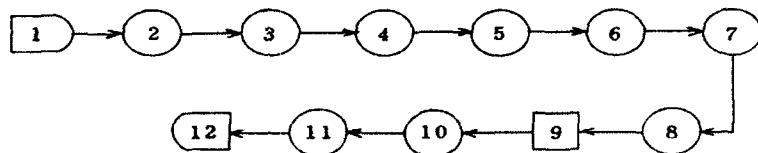
고객의 만족을 유도하고 기업의 목표를 달성하기 위해 선반의 전용가공을 위한 Tool과 Jig를 개선하여 주축(Main Spindle)의 가공방법을 개선하고자 생산품목에 대한 현상파악은 6시그마의 추진계획 아래 고객의 관점에서 각 공정별 CTQ를 정하고 시그마의 목표 및 개선 계획을 수립하여 project의 전부분에서 공정의 개선을 위해 단계별로 DMAIC를 진행한다. Project추진 일정은 고객의 만족 및 요구조건을 충족시키기 위해 QFD 및 Product/Process Tree를 이용하여 문제를 정의하고 Project를 정하고(Define), Spread Sheet에 수집한 데이터를 기입하고(Measure), Process Mapping과 Pareto Chart를 활용 데이터를 분석한다(Analyze). Cause and Effect Diagram, Brain Storming, FMEA로서 Spread Sheet, Gage R & R 및 Six Sigma Process Report를 작성하여 결과를 검토, 분석하여 효과를 파악하여(Improvement) 목표달성의 여부를 확인하고 그 결과를 유지, 관리하기 위하여 관리방안을 설정하여 Gage R & R 및 Spread Sheet로서 작업실적분을 지속 적용함으로서 사후관리한다.

제조공정의 개요는 주축의 제조에 수반되는 주요작업은 set-up작업, 정면 및 측면의 황삭작업, 치수 체크 및 tool의 교체작업, 정면 및 측면의 정삭작업, 절삭작업 등으로 이루어진다. 주축(Main Spindle)의 제조공정에 따른 주요 작업내용과 적업에 대한 개략적인 작업과정은 단조물이 입고되면 정면 및 측면 황삭가공을 위한 선삭작업에 대한 set up작업이 실시되고 Deep Hole Boring Machine 전용기로 Drill작업, Lathe 면치 선삭가공, NC Lathe로 외형가공 Taper



[그림 7] CTQ & QFD

작업, Key 흄파기 작업 Milling 전용기 사용, Radial Drilling Machine로 Drill Tap작업후 Tap 가공, 고주파열처리기로 표면담금질 열처리 작업, 열처리 가공후 크랙검사, Grinding Machine으로 외경연삭 가공 및 Grinding Machine으로 내경연삭 가공을 거친 후 조립단계로 넘어가기 위해 대기되며 Initial qualitative Network는 [그림 8]과 같다.



[그림 8] Initial qualitative Network of the Manufacturing process of Main Spindle.

4.2 Main Spindle 공정의 감도방정식

주축의 제조에 쓰이는 전용 Machine의 capacity는 process mapping을 작성하여 각 작업에서 관련되는 목표치를 달성하기 위한 데이터를 process의 가공시간의 변수 Y를 평가함수, Process의 작업 step에 대한 X를 변동량으로 정의하고 가공시간 $Y = F(X)$ 에 영향을 주는 CTQ를 선정한다.

주축의 전 공정의 W-함수의 정의에 의해서 $W_E(s)$ 를 구하면

$$W_E(s) = e^{\frac{2}{3}s} \left[p_1 \left(1 - \frac{s}{m}\right)^{-1} + p_2 \left(1 - \frac{s}{m}\right)^{-1} e^{\frac{1}{2}s} p_3 \left(1 - \frac{s}{n}\right)^{-1} \right] \\ \times \left[p_4 e^{\frac{1}{3}s} + p_5 e^{\frac{2}{3}s} + p_6 e^s \right] p_7 e^s \quad (18)$$

$$P_E = W_E(0) = (p_1 + p_2 + p_3) p_7 = 0.8689 \quad (19)$$

적률모함수 (M G F)를 구하여 μ_E 을 구하면

$$M(s) = \frac{W(s)}{W(0)} \text{ 이므로 } \mu_E \text{을 구하려면} \\ \mu_E = \frac{\sigma}{\sigma s} M(s)|_{s=0} = \frac{\sigma}{\sigma s} \left(\frac{W(s)}{W(0)} \right) |_{s=0} \\ = \left[p_1 p_4 \left(\frac{1}{m} + 2 \right) + p_1 p_5 \left(\frac{1}{m} + \frac{7}{3} \right) + p_1 p_6 \left(\frac{1}{m} + \frac{8}{3} \right) + p_2 p_3 p_4 \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{5}{2} \right) \right. \\ \left. + p_2 p_3 p_5 \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{17}{6} \right) + p_2 p_3 p_6 \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{19}{6} \right) \right] / (p_1 + p_2 p_3) \\ = 3.74 \text{ (시간)} \quad (20)$$

4.2.1 μ_E 의 변동량 계산

선삭부분의 기대시간 μ_E 의 변동량을 계산하여 감도계수를 구하기 위해 $y = \mu_E$, $x_1 = p_1$, $x_2 = p_2$, $x_3 = p_9$, $x_4 = p_4$, $x_5 = p_5$, $x_6 = p_6$, $x_7 = p_3$, $x_8 = m$, $x_9 = n$ 이라 놓으면 변수의 개수는 $N = 9$, 확률변수의 개수 $K = 7$, $L = 6$ 이고 이때 상태변수(state variable)는 $M = 2$, 결정변수(decision variable)는 $T = 4$ 가 된다. $f_1(x)$ 에서는 p_1 을 $f_2(x)$ 에서는 p_4 를 상태변수로 하면 나머지는 결정변수가 된다. 2개의 제약방정식이 존재하므로 식(7)에 의해

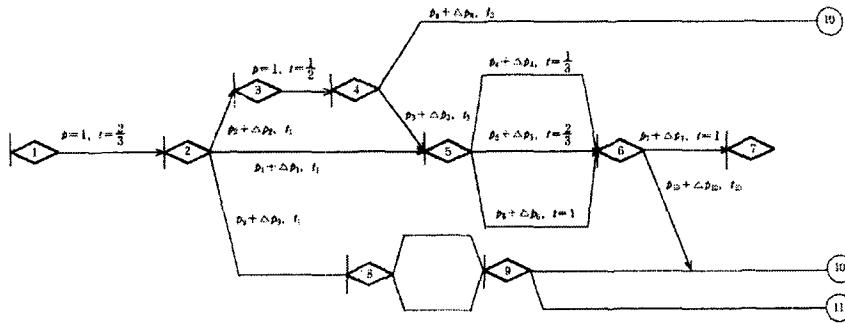
$$p_1 + p_2 + p_9 - 1 = 0 = f_1(x) \\ p_4 + p_5 + p_6 - 1 = 0 = f_2(x) \\ \Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 \\ = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i + \sum_{i=7}^7 \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i + \sum_{i=8}^9 \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (21)$$

p_1, p_4 를 상태변수로 하여 $s_1 = p_1$, $s_2 = p_4$, p_2, p_9, p_5, p_6 를 결정변수로 하여 $d_1 = p_2$, $d_2 = p_9$, $d_3 = p_5$, $d_4 = p_6$ 라 하면,

$$J = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad V_{sy} = \left[\frac{\partial y}{\partial s_1}, \frac{\partial y}{\partial s_2} \right] \\ V_{dy} = \left[\frac{\partial y}{\partial d_1}, \frac{\partial y}{\partial d_2}, \frac{\partial y}{\partial d_3}, \frac{\partial y}{\partial d_4} \right], \quad S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 \end{bmatrix} \\ R = \begin{bmatrix} \frac{d_1}{s_1} & \frac{d_2}{s_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d_3}{s_2} & \frac{d_4}{s_2} \end{bmatrix} \text{ 가 된다.}$$

식(14)와 식(15)에 의해

$$\begin{aligned}\frac{\Delta y_1}{y} &= \sum_{t=1}^4 \left[S_d y - \sum_{m=1}^2 S_{s_m} y \gamma_{mt} \right] \frac{\Delta d_t}{d_t} \\ &= \left(S_{p_2} y - S_{p_1} y \frac{p_2}{p_1} \right) \frac{\Delta p_2}{p_2} + \left(S_{p_9} y - S_{p_1} y \frac{p_9}{p_1} \right) \frac{\Delta p_9}{p_9} + \left(S_{p_5} y - S_{p_1} y \frac{p_5}{p_1} \right) \frac{\Delta p_5}{p_5} \\ &\quad + \left(S_{p_6} y - S_{p_1} y \frac{p_6}{p_1} \right) \frac{\Delta p_6}{p_6}\end{aligned}\quad (22)$$



[그림 9] Network of Manufacturing Process

즉 등식의 제약조건 영향을 받는 변수에 의한 변동의 계산이므로 식(22)를 식(17)에 이용하면

$$\begin{aligned}\frac{\Delta y}{y} &= \frac{\Delta y_1}{y} + \frac{\Delta y_2}{y} + \frac{\Delta y_3}{y} \\ &= \frac{\Delta y_1}{y} + S_{p_2} y \frac{\Delta p_3}{p_3} + S_{m} y \frac{\Delta m}{m} + S_{n} y \frac{\Delta n}{n} \\ &= 0.1444 \frac{\Delta p_2}{p_2} + 0.00216 \frac{\Delta p_9}{p_9} + 0.0317 \frac{\Delta p_5}{p_5} + 0.0326 \frac{\Delta p_6}{p_6} \\ &\quad + 0.1071 \frac{\Delta p_3}{p_3} + (-0.2674) \frac{\Delta m}{m} + (-0.1072) \frac{\Delta n}{n}\end{aligned}\quad (23)$$

식(23)은 μ_E 의 감도를 나타내고 있으며 p_2, p_5, p_6 및 p_3 을 감소시키고 m 과 n 을 증가시킴으로서 μ_E 의 기대시간을 줄일 수 있다.

5. 결론

생산성 향상을 위한 현장개선활동은 1987년 발표된 Motorola사의 6시그마계획(Six Sigma Plan)은 공정에 변동이 발생하는 경우 불량품의 생산으로 이어질 수 있기 때문에 PPM환경 아래서는 각 기업의 고품질 목표를 달성하기 위하여 Rational Subgroup에서 수집된 데이터를 활용하여 통계적 공정관리로 산포를 관리함으로서 공정을 개선한다. 산포관리항목 중 품질에 치명적인 항목은 기존의 SPC활동과 연계하여 지속적으로 산포를 줄여 나가는 활동을 하고, 중점 관리항목과 기본준수항목은 공정을 안정화시키기 위해 주기적으로 관리해야 한다. 제품의 산포를 탄력적으로 운영함으로서 품질의 변화 및 품질의 개선 면에서 효율적으로 관리할 수 있다.

선반의 주요부품인 Main Spindle의 제조공정을 감도방정식을 활용하여 구해본 결과 주축의 제조공정의 기대시간은 3.74시간으로 나타나고 있다. 이들의 감도방정식의 감도계수를 보면 재작업확률 p_2 의 감도계수가 가장크며 이것에 큰 영향을 받고 있으므로 p_2, p_5, p_6 및 p_3 을 감소시키고 m 과 n 을 증가시킴으로서 μ_E 의 기대시간을 줄일 수 있다.

본 논문은 Main Spindle의 project를 정의하고, 고객만족을 위한 CTQ를 적절하게 선정하여 개선함으로서 6시그마 계획 개선활동이 반복적인 PDCA cycle의 활용으로 개선목표를 달성하고 표준화로서 사후관리되는 관리방안을 제시하고, 공정을 개선, 유지 관리하기 위하여 p_2 의 감소로 제조시간을 체계적으로 단축시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Efrain Turban and N. Paul Loomba,"Readings in Management Science, Business Publications, Inc.,Dallas,Texas,pp145-158,1976.
- [2] Digman,L.A.,and Green.G.I., "A Framework for Evaluation Network Planning Control Techniques", Research Management, Vol.24,No.1,pp10-17,1981.
- [3] Fred R. mcFadden, "Six-Sigma Quality Programs", Quality Progress, June 1993.
- [4] Statistical Process Control : The Motorola Guide to SPC for Continuous Improvements Towards Six Quality, Motorola, 1988.
- [5] Fontenot, G.,Bahara, R., and Gresham,A."Six Sigma in Customer Satisfaction,"Quality Progress, pp.73-76,1998.
- [6] Hoerl, R.W., "Six Sigma and the Future of the Quality Profession". Quality Progress, pp.35-42,July 1998.
- [7] Whitehouse,G.E., "System Analysis and Design Using Network Techniques." Prentice-Hall Inc.,1973.
- [8] Edward R.Clyton and Laurence J. Moore, "Journal of Systems Management", Vol.23.No.2,pp.11-19,1972.
- [9] Elmaghraby,S.E., "An Algebra for the Analysis of Generalized Activity Network", Management Science, Vol. X, No.3,pp.494-514,April 1964.
- [10] Elmaghraby,S.E., "Activity Network : Project Planning and control by Network Models", John Willy and Sons, Inc.,pp321-356,1977.
- [11] Harry,M.J. "Six Sigma : A Breakthrough Strategy for Profitability" Quality Progress, pp.60-64, May 1998.
- [12] Statistical Process Control : The Motorola Guide to SPC for Continuous Improvements Towards Six Quality, Motorola, 1988.