

제조시스템에서 성과지표 중심의 프로젝트 가치평가방법론의 개발

문병근*, 조규갑**, 김준효***

* 부산대학교 산업공학과 박사과정, ** 부산대학교 산업공학과 교수, *** ㈜현대·기아자동차 기술정보시스템팀

<초록>

신뢰성 있는 프로젝트 가치평가를 위해서는 프로젝트 투자에 의해 발생하는 효과들을 정확하게 파악하고, 이를 계량적이고 객관적으로 측정할 수 있는 평가방법론을 개발하는 것이 매우 중요하다. 전통적으로 제조시스템에서의 프로젝트 가치평가는 재무적 방식에 의한 평가에 기초해 왔다. 그러나 제조시스템에서 품질, 재고, 리드타임 등 비재무적 성과지표를 화폐가치로 정량화하는 것은 매우 어렵다. 따라서 최근에는 재무적 성과지표와 비재무적 성과지표를 모두 고려하는 성과지표 중심의 프로젝트 평가방법의 개발이 보편화되고 있으며, 전통적인 프로젝트 평가에서는 고려하지 않았던 불확실성을 확률분포로 고려하는 평가방법의 개발이 요구되고 있다. 그러나 현재까지 성과지표 간의 상호관계를 고려하여 프로젝트 투자에 의한 개별 성과지표의 개선을 정량적으로 평가하는 방법론에 관한 기존연구는 거의 없다. 본 논문은 제조시스템에서의 성과지표를 중심으로 공리적 설계에서의 정보공리의 정보량 개념을 이용한 프로젝트 평가방법론에 대해 제안한다. 본 논문에서는 개별 성과지표의 정보량 계산을 위한 수학적 모델링에 대해 고찰하고, 해석적 분석의 어려움을 해결하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션의 적용에 대해 서술한다.

Keywords: 프로젝트 가치평가, 공리적 설계, 정보공리, 몬테카를로 시뮬레이션

1. 서론

프로젝트의 성과는 측정되지 않으면 관리될 수 없다. 따라서 프로젝트 투자에 의해 발생하는 효과들을 정확하게 파악하고, 이를 계량적이고 객관적으로 측정할 수 있는 평가방법론을 개발하는 것은 매우 중요하다. 기존의 프로젝트 평가방법론은 크게 재무적 방식(Financial Approach), 정성적 방식(Qualitative Approach), 다중접근 방식(Multi-criteria Approach), 통계산술적 방식(Probabilistic Approach) 등으로 나눌 수 있다. 재무적 방식은 재무관점의 비용-효과(Cost-Benefit) 기법을 통해 투자수익률(ROI: Return on Investment), 순현재가치(NPV: Net Present Value), 내부 수익률(IRR: Internal Rate of Return), 회수기간법(PB: Payback Period) 등으로 프로젝트 가치를 평가하는 방법이다. 정성적 방식은 조직.프로세스.기술에 초점을 두고 주로 정성적으로 평가하는 방법으로 주로 전략평가나 포트폴리오 분석 등에 사용된다. 다중접근 방식은 재무적인 지표와 비재무적인 지표를 모두 고려하는 방법으로 균형성과기록표(BSC: Balanced Scorecard)에 기반한 평가방법이 대표적이다. 통계산술적 방식은 실물옵션(Real Option), AIE(Applied Information Economics)과 같이 통계적이고, 수학적인 모델을 사용하여 프로젝트 가치를 평가하는 방법이다[서한준, 2003].

전통적으로 제조시스템에서의 프로젝트 가치평가는 재무적 방식에 의한 평가에 기초해왔다. 그러나 제조시스템에서 품질, 재고, 리드타임 등 비재무적 성과지표를 화폐가치로 정량화하는 것은 매우 어렵다. 따라서 최근에는 재무적 성과지표와 비재무적 성과지표를 모두 고려하는 성과지표 중심의 프로젝트 평가방법의 개발이 보편화되고 있으며, 전통적인 프로젝트 평가에서는 고려하지 않았던 불확실성을 확률분포로 고려하는 평가방법의 개발이 요구되고 있다. 그러나 현재까지 성과지표 간의 상호관계를 고려하여 프로젝트 투자에 의한 개별 성과지표의 개선을 정량적으로 평가하는 방법론에 관한 기존 연구는 거의 없다. Duta(2000)은 제조시스템에서 제조시스템 설계대안을 평가를 위해 성과지표 기반의 trade-off 분석방법을 제안하였다. 이 평가방법은 제조시스템 설계분해(Manufacturing System Design Decomposition)로부터 도출된 최하위 레벨의 성과지표를 기반으로 제조전략, 제조시스템 설계대안을 행렬의 조합으로 평가하는 방법이다. 이러한 평가방법은 전체적인 관점에서 제조시스템 설계대안과 성과지표들의 trade-off 관계에 대한 이해의 향상에 기여하지만 개별 성과지표의 향상에 대한 정량적인 평가와 평가에서의 불확실성에 대한 고려에서 한계를 가진다. 따라서 본 논문은 이러한 한계를 극복하기 위하여 제조시스템에서의 성과지표를 중심으로 공리적 설계(Axiomatic Design)에서의 정보공리(Information Axiom)의 정보량

개념을 이용한 프로젝트 가치평가방법론에 대해 제안한다. 본 논문에서는 각 성과지표의 정보량 계산을 위해 수학적 모델링을 고찰하고, 해석적 분석의 어려움을 해결하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)의 적용에 대해 서술한다.

2. 공리적 설계의 개요

공리적 설계는 설계의 기본이 되는 원리, 즉 설계공리(Design Axiom)를 이용하여 새로운 설계를 창조하거나 기존의 설계를 평가하며, 설계의 과정을 기능적 요구사항(Functional Requirements, FRs)과 설계 매개변수(Design Parameters, DPs)의 사상(mapping)과정으로 이해한다. 공리적 설계에서 설계공리는 독립공리(The Independence Axiom)와 정보공리(The Information Axiom)로 구성된다[Suh, 1990].

(1) 독립공리: 기능적 요구사항(FRs)의 독립성을 유지한다.

독립공리를 만족하기 위해 설계행렬은 대각행렬(diagonal matrix) 이거나 삼각행렬(triangular matrix)이어야 한다. 설계행렬 [A]가 만약 대각행렬이면 각 DP는 대각요소 외부에서 연성(coupling)을 유발하지 않고 오직 관련된 FRs에만 영향을 미친다. 이러한 설계는 비연성 설계(uncoupled design)라고 한다. 설계행렬이 삼각행렬이면 FRs의 독립성은 DPs가 적절한 순서에 의해 조정될 때에만 달성될 수 있다. 이러한 설계는 비연성화 설계(decoupled design)라고 한다. 이 외의 다른 모든 설계는 독립공리를 어기며, 연성 설계(coupled design)라고 한다.

(2) 정보공리: 설계의 정보량을 최소화한다.

정보공리는 독립공리를 만족하는 대안 중에서 최적의 대안을 선택하기 위한 방법으로 설계대안이 FR 을 만족할 수 있는 확률을 성공확률(P_s)이라 하면, 성공확률의 개념에 기초해서 정보량 I 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$I = \log_2\left(\frac{1}{P_s}\right) \quad (1)$$

그림 1 은 시스템에서의 정보량을 계산하기 위한 설계범위(design range), 시스템 범위(system range), 공통범위(common range)에 대해 보여준다. 여기서 설계 범위는 설계자 의해 지정된 DPs 와 관련된 공차를 나타내며, 시스템 범위는 주어진 시스템의 능력을 나타내는 공차의 향으로 정의된다. 공통영역은 설계영역과 시스템영역의 교차영역을 의미한다. 시스템에서 식 (1)에 의해 주어진 정보량에 대한 정의는 식 (2)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$I = \log_2\left(\frac{\text{시스템 영역}}{\text{공통영역}}\right) \quad (2)$$

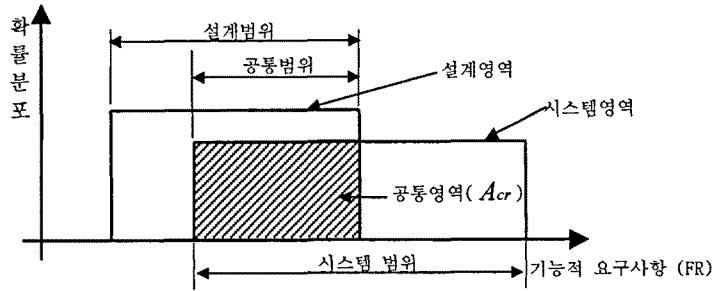


그림 1. 시스템 매개변수의 확률분포

계층구조의 FRs를 갖는 시스템에서 시스템의 정보량은 가장 높은 레벨의 FRs를 만족하는데 필요한 정보량이다. 비연성 설계에서 시스템의 정보량은 식 (3)와 같다.

$$I_{sys} = -\sum_i \log_2[\Pr(FR_i)] = -\sum_i \log_2(A_{cr})_{highest\ Level\ FRs} \quad (3)$$

비연성 설계에서 가장 높은 레벨의 성공 확률이 알려지지 않았지만 최하위 레벨인 FRs(i.e., leaves)에 대한 정보량을 계산할 수 있는 경우 전체 시스템의 정보량은 식 (4)와 같이 가장 낮은 레벨의 FRs와 관련된 정보량의 합이다[Suh, 2001].

$$I_{sys} = -\sum_i \log_2(P_{leaf}) = -\sum_i \log_2(A_{cr})_{leaf} \quad (4)$$

그러나 Suh(2001)는 비연성화 설계의 경우 FRs의 계층구조에서 각 FR을 만족하기 위한 정보량의 계산방법에 대해 제시하지 않았다.

3. 공리적 설계를 이용한 프로젝트 가치평가

3.1 공리적 설계를 이용한 제조시스템 설계의 표현

Suh et al. (1998)은 공리적 설계를 이용한 린(lean) 제조시스템 설계에 대해 제안하였다. 공리적 설계의 도메인에서 기능적 요구사항(Functional Requirements, FRs)은 제조시스템의 목표, 설계 매개변수(Design Parameter, DPs)는 제조시스템 목표의 달성수단으로 정의된다. Cochran et al.(2001)과 Linck(2001)은 공리적 설계에 기반한 제조시스템 설계의 결과인 제조시스템 설계분해(Manufacturing System Design Decomposition, MSDD)를 개발하였으며, Duta(2000)는 MSDD에서 기초해서 제조시스템의 성과지표(Performance Measures, PMs)를 개발하였다. Cochran et al.(2000)은 제조시스템의 설계와 성과측정시스템의 일치(alignment)의 중요성에 대해 주장하고, Cochran et al.(2001)은 MSDD를 이용하여 제조시스템 설계 효과에 대한 정성적 평가방법을 제안하였다. Yien(1998)은 제조시스템의 운영에 필요한 모든 지원기능의 설계를 위하여 시스템 영역(System Domain, Sys)을 추가하였다. 여기서 시스템 영역은 DPs를 실행하기 위한 조직(Organization, O), 자원(Resource, R), 정보(Information, I)로 구성된다.

본 논문에서 제조시스템의 설계분해 모델은 공리적 설계에 기반한 제조시스템 설계의 기능적 분해의 결과로서 본 모델에서 기능적 요구사항(FR), 설계 매개변수(DP), 성과지표(PM), 시스템 영역(Sys)은 각각 FR_y^l , PM_y^l , DP_y^l , Sys_y^l 로 표현하며, 각 기호에서의 l , i , j 의 의미는 다음과 같다.

- l : 분해의 l 번째 레벨
- i : 부모 분해에 대한 i 번째 위치
- j : 동일 분해 레벨에서의 j 번째 위치

FR_y^{l-1} 과 DP_y^{l-1} 의 쌍(pair)에 대한 분해인 FR_{jk}^l 과 DP_{jk}^l ($k=1\sim n$)의 관계는 비연성화 설계의 경우 식 (5)과 같이 주어진다(만약 비연성 설계의 경우에는 비대각 행렬 요소의 값이 0이다.).

$$\begin{aligned}
 FR_y^{l-1} &= f(DP_y^{l-1}) \\
 FR_{j_1}^l &= f_1(DP_{j_1}^l) \\
 FR_{j_2}^l &= f_2(DP_{j_1}^l, DP_{j_2}^l) \\
 &\dots \\
 FR_{j_n}^l &= f_n(DP_{j_1}^l, DP_{j_2}^l, \dots, DP_{j_n}^l)
 \end{aligned} \tag{5}$$

그림 2는 식 (5)에 대한 제조시스템의 설계분해 모델로서 굵은선과 화살표(-->)는 각각 FR_y^l 과 DP_y^l 간의 설계행렬 [DM]에서 대각행렬 요소와 비대각 행렬요소를 표현한다.

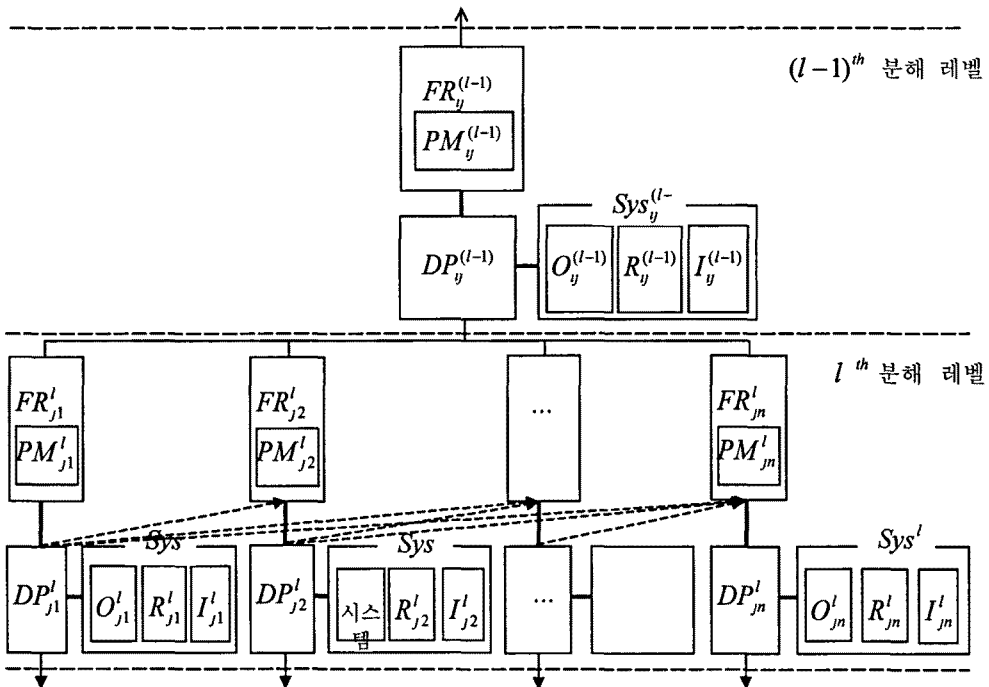


그림 2. 제조시스템의 설계분해 모델

그림 2의 제조시스템의 설계분해 모델에서 DP_y^l 과 PM_y^l 의 관계는 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} PM_{j_1}^l \\ PM_{j_2}^l \\ M \\ PM_{j_n}^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & \Lambda & 0 \\ A_{21} & A_{22} & \Lambda & 0 \\ M & M & O & M \\ A_{n1} & A_{n2} & \Lambda & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{j_1}^l \\ DP_{j_2}^l \\ M \\ DP_{j_n}^l \end{bmatrix} \quad (6)$$

제조시스템의 설계분해 모델에서 l^{th} 과 $(l-1)^{th}$ 분해 레벨의 PM_y^{l-1} 와 $PM_{j_k}^l$ ($k=1 \sim n$)

의 관계는 대각행렬 요소 $PM_y^{l-1} \Big|_{Diagonal\ Element}$ 에 대해 식 (7)로 표현된다.

$$PM_y^{l-1} \Big|_{Diagonal\ Element} = \begin{cases} \alpha_i^l \sum_{k=1}^n PM_{j_k}^l & \text{if } PM_y^{l-1} \text{와 } PM_{j_k}^l (k=1 \sim n) \text{의 차원이 동일} \\ \alpha_i^l \sum_{k=1}^n (x_{j_k}^l \times PM_{j_k}^l) & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, α_i^l 는 제조시스템 설계의 분해에서 부분의 합이 전체와 같을 경우 α_i^l 의 값은 1

이지만 분해의 불완전성을 고려하기 위한 조정계수이다. $x_{j_k}^l$ 는 서로 다른 차원을 가지는 성과지표를 같은 차원으로 변환을 위한 변환 factor 이다.

3.2 성과지표 중심의 프로젝트 가치평가 방법론의 개발

3.2.1 프로젝트 및 프로젝트 가치평가의 정의

일반적으로 프로젝트는 일정한 기간 동안 주어진 목표를 수행하기 위한 작업들의 모임이라고 정의할 수 있다. 본 논문에서 프로젝트는 공리적 설계의 도메인의 관점에서 제조시스템의 기능적 요구사항(FRs)을 달성하기 위한 일정 기간 동안의 설계 매개변수(DPs)의 개선 활동으로 정의하며, 이 활동은 시스템 영역(조직, 자원, 정보)으로 사상된다. 또한 성과지표(PMs)는 기능적 요구사항의 달성 수준을 측정하기 척도로 정의된다. 본 논문에서 프로젝트의 가치는 성과지표의 계층적 구조에서 프로젝트 투자로 의한 각 목표 성과지표에 대한 달성확률에 대한 상대적인 척도인 정보량의 개념을 이용하여 정의된다. 본 논문에서 프로젝트의 가치는 프로젝트의 성격에 따라 다음과 같이 정의한다.

Type 1: 성과지표(PM_y^l)의 설계영역을 신규로 설정하는 프로젝트

Type 1의 프로젝트는 프로젝트 투자 이전의 성과지표(PM_y^l)에 대한 정보량이 ∞ 인 프로

젝트로서 개별 성과지표의 개선값(ΔPMs)를 달성하기 위한 프로젝트의 가치($PV_{PM'_y}$)는 식 (8)와 같이 표현된다.

$$PV_{PM'_y} = I_{PM'_y} = \log_2 \left(\frac{1}{A_{cr}} \right) \quad (8)$$

그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 설계범위는 제조시스템의 설계 전략을 고려하여 설정된 성과지표의 개선값(ΔPMs)로 정의되며, 시스템 범위는 프로젝트 투자에 의한 δDP_s 에 의한 성과지표의 개선값(δPMs)로 표현된다.

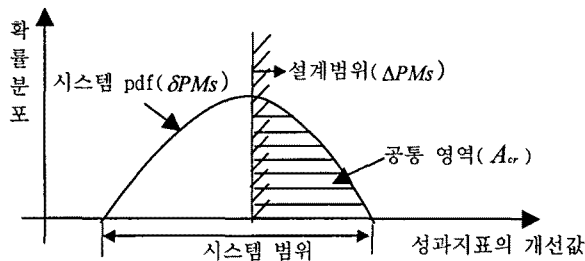


그림 3. 프로젝트 Type 1: 정보량 평가를 위한 시스템 매개변수의 확률분포

Type 2: 성과지표(PM'_y)의 설계영역을 만족하기 위한 개선 프로젝트

Type 2의 프로젝트는 현재 상태의 개선에 초점을 두는 프로젝트로서 성과지표(PM'_y)에 대한 프로젝트의 가치($PV_{PM'_y}$)는 식 (9)와 같이 프로젝트 이전과 이후의 정보량의 차이로 표현된다.

$$\begin{aligned} PV_{PM'_y} &= I_1 - I_2 \\ &= \log_2 \left(\frac{1}{A_{cr1}} \right) - \log_2 \left(\frac{1}{A_{cr2}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, A_{cr1}, A_{cr2} 는 각각 프로젝트 투자 이전과 이후의 공통영역을 의미한다.

그림 4는 설계범위인 성과지표의 개선값(ΔPMs)과 프로젝트 투자 이전과 이후의 시스템 영역과 공통영역에 대해 보여준다.

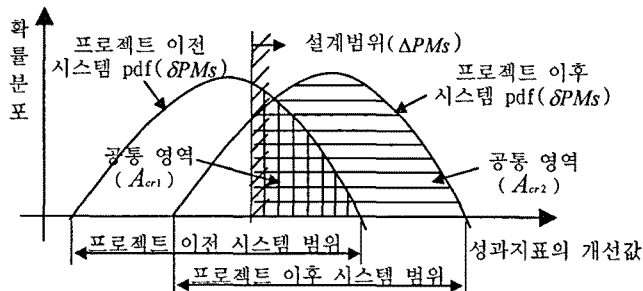


그림 4. 프로젝트 Type 2: 정보량 평가를 위한 시스템 매개변수의 확률분포

3.2.2 제조시스템의 설계분해 모델에 기반한 정보량 계산

계층구조의 성과지표를 가지는 시스템에서 시스템의 정보량은 가장 높은 레벨의 성과지표를 만족하는데 필요한 정보량이다. 제조시스템의 설계분해 모델과 같이 비연성화 설계에서 가장 높은 레벨의 성과지표에 대한 정보량이 주어지지 않았을 경우 시스템의 정보량은 최하위 레벨의 정보량에 대한 계산으로 바로 도출될 수 없다. 따라서 시스템의 정보량과 계층구조에서의 각 성과지표에 대한 정보량을 추정하기 위해서는 최하위 레벨의 성과지표에 대한 정보량의 계산에서부터 상위 레벨의 성과지표에 대한 정보량을 계산하는 Bottom-up 방식의 정보량 계산 방법이 요구된다.

본 논문에서는 서술상의 편의를 위해 프로젝트 Type 1에 대한 프로젝트 가치평가에 대해 서술하며, 제조시스템의 설계분해 모델에서 설계행렬(예, A, B 등)과 각 성과지표에 대한 설계범위 $\Delta PM'_j$ 는 주어지며, 각 계층에서 각 PM'_j 에 대한 분해에서의 형태의 개수는 n 으로 가정한다. 그림 5는 l^{th} 과 $(l-1)^{th}$ 분해 레벨에서의 $\delta DP'_{jk}$ ($k=1 \sim n$)에 의한 성과지표의 정보량 계산을 위한 제조시스템의 설계 분해 모델에 대해 보여준다.

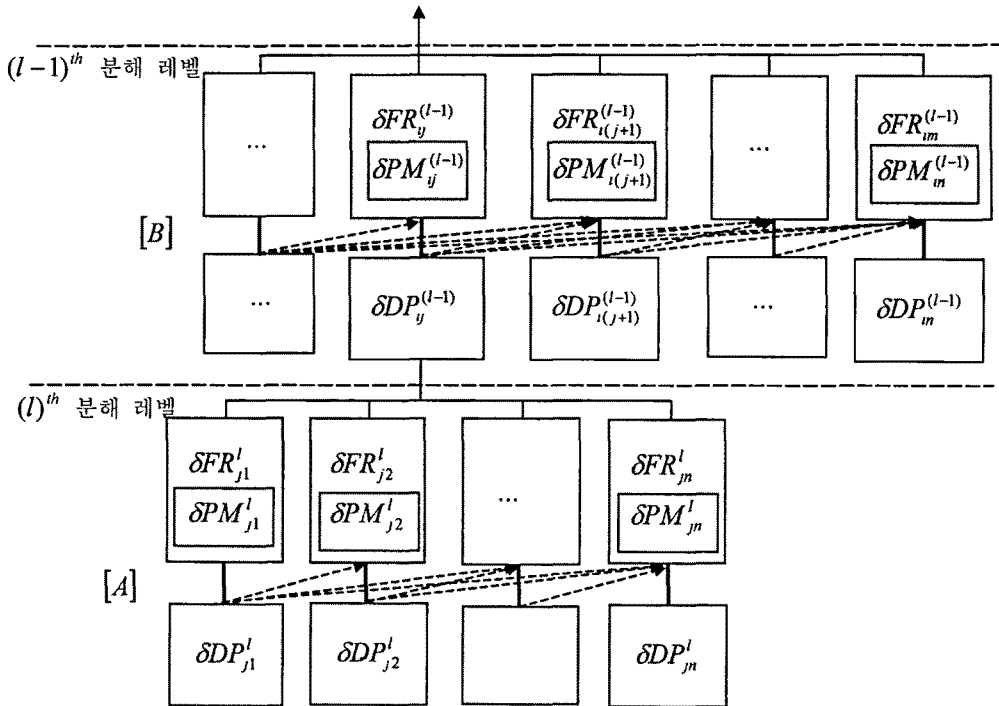


그림 5. 계층구조에서의 성과지표에 대한 정보량 계산을 위한 제조시스템의 설계분해 모델

$l^{th}, (l-1)^{th}, \dots, 1^{st}$ 분해 레벨에서 성과지표에 대한 정보량 계산 과정은 다음과 같다.

- (1) l^{th} 의 분해 레벨

$\delta DP'_{jk}$ ($k=1 \sim n$)로 인한 PM'_{jk} 의 개선값($\delta PM'_{jk}$)은 식 (10)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \delta PM'_{j1} \\ \delta PM'_{j2} \\ \text{M} \\ \delta PM'_{jm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & \Lambda & 0 \\ A_{21} & A_{22} & \Lambda & 0 \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ A_{n1} & A_{n2} & \Lambda & A_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta DP'_{j1} \\ \delta DP'_{j2} \\ \text{M} \\ \delta DP'_{jm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $A_{xy} = \frac{\partial PM'_{jk}}{\partial DP'_{xy}}$ 로 A_{xy} 의 값이 상수이면 선형 시스템, A_{xy} 이 DP'_{jk} 의 함수로 표현되면 비선형 시스템을 의미한다.

개별 성과지표(PM'_{jk})에 대한 정보량(I'_{jk})은 $\delta PM'_{jk}$ 의 통계적 독립의 여부에 따라 다음과 같이 계산된다(여기서, $k=1 \sim n$).

Case 1: $\delta PM'_{jk}$ ($k=1 \sim n$)의 통계적 독립

PM'_{jk} 에 대한 정보량 (I'_{jk})은 식 (11)에 의해 순차적으로 계산된다.

$$I'_{jk} = \log_2(1/\Pr'_{jk}) = \log_2[1/\Pr(\delta PM'_{jk} \geq \Delta PM'_{jk})] \quad (11)$$

Case 2: $\delta PM'_{jk}$ ($k=1 \sim n$)의 통계적 종속

PM'_{jk} 에 대한 정보량(I'_{jk})은 식 (12)에 의해 순차적으로 계산된다.

$$I'_{jk} = \log_2(1/\Pr'_{jk}) = \log_2[1/\Pr((\delta PM'_{jk} \geq \Delta PM'_{jk}) | \{\delta PM'_{jm} \geq \Delta PM'_{jm}\}_{m=1, k-1})] \quad (12)$$

여기서, $\Pr(\delta PM'_{jk} \geq \Delta PM'_{jk} | \{\delta PM'_{jm} \geq \Delta PM'_{jm}\}_{m=1, k-1})$ 은 조건부 확률을 의미한다.

(2) $(I-1)^{th}$ 의 분해 레벨

$\delta DP'_{ik}^{I-1}$ 와 $\delta PM'_{jk}^{I-1}$ 의 관계는 식 (13)와 같이 표현되지만 $\delta DP'_{ik}^{I-1}$ 이 알려지지 않았을 경우 이 값은 추정이 요구된다(여기서, $k=j \sim n$).

$$\begin{bmatrix} \delta PM'_{jy}^{I-1} \\ \delta PM'_{i(j+1)}^{I-1} \\ \text{M} \\ \delta PM'_{in}^{I-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{jj} & 0 & \Lambda & 0 \\ B_{(j+1)j} & B_{(j+1)(j+1)} & \Lambda & 0 \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ B_{ny} & B_{n(j+1)} & \Lambda & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta DP'_{jy}^{I-1} \\ \delta DP'_{i(j+1)}^{I-1} \\ \text{M} \\ \delta DP'_{in}^{I-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

δDP_{ik}^{l-1} 의 추정은 대각행렬 요소 $PM_{ik}^{l-1} \Big|_{Diagonal\ Elements}$ 에서 PM_y^{l-1} 와 $PM_{jk}^l (k = j \sim n)$

의 관계인 식 (14)에 기초한다.

$$B_{kk} \times \delta DP_{ik}^{l-1} = \delta PM_{ik}^{l-1} \Big|_{Diagonal\ Elements} \quad (14)$$

여기서, $PM_y^{l-1} \Big|_{Diagonal\ Element}$ 에 대하여 제조시스템의 설계분해 모델에서 l^{th} 과 $(l-1)^{th}$

분해 레벨의 PM_y^{l-1} 와 $PM_{jk}^l (k = 1 \sim n)$ 의 관계는 식 (7)과 같이 정의되므로, δPM_{ik}^{l-1} 는 식 (15)에 의해 추정된다.

$$\therefore \delta DP_{ik}^{l-1} = \begin{cases} \frac{\alpha \sum_{k=1}^n \delta PM_{jk}^l}{B_{kk}} & \text{if } PM_y^{l-1} \text{와 } PM_{jk}^l \text{의 차원이 동일} \\ \frac{\alpha \sum_{k=1}^n (x_{jk}^l \times \delta PM_{jk}^l)}{B_{kk}} & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

여기서, $k = j \sim n$ 이다.

그러므로 $(l-1)^{th}$ 의 분해 레벨에서 PM_{ik}^{l-1} 에 대한 정보량 (I_{ik}^{l-1})는 δPM_{ik}^{l-1} 의 통계적 독립 여부에 따라 식 (11) 혹은 (12)와 같은 방법으로 계산된다.

(3) $(l-2)^{th} \sim 1^{st}$ 의 분해 레벨

$(l-2)^{th} \sim 1^{st}$ 의 분해 레벨에서 개별 성과지표에 대한 정보량은 $(l)^{th} \sim (l-1)^{th}$ 의 분해 레벨에서의 정보량 계산과 같은 절차에 의해 계산된다. 이러한 Bottom-up 과정을 통해 계산된 개별 성과지표 (PM_{ik}^l)에 대한 정보량(I_{ik}^l)은 개별 프로젝트에 대한 가치를 평가하기 위한 척도로서 이용되며, 시스템에서의 정보량(I_{sys})은 최종적인 프로젝트의 가치에 대한 척도로서 사용된다.

3.3 몬테카를로 시뮬레이션

$\delta DP_{jk}^l (k = 1 \sim n)$ 이 분포함수로 주어질 경우 각 성과지표에 대한 정보량 계산을 위한 수리적 모델을 해석적인 방법으로 푸는 것은 매우 어렵다. 이 절에서는 몬테카를로 시뮬레이션 (Monte Carlo Simulation) 기법을 적용하여 각 성과지표에 대한 정보량을 추정하는 방법에 대해 서술한다. 몬테카를로 시뮬레이션이란 구하고자 하는 수치의 확률적 분포를 반복 가능한 실험의 통계로부터 구하는 방법을 말한다. 많은 수의 실험으로부터 통계 자료를 얻어 그 결과를 역산하여 어떤 특정한 수치나 확률 분포를 구하는 방법이다. 이러한 특성상 통계 자료가

많고 입력 값의 분포가 고를수록 결과의 정밀성이 보장되고 대부분 컴퓨터를 이용하여 분석이 행해진다. 몬테카를로 시뮬레이션 실험을 설계하기 위해서는 입력값의 확률분포와 실험의 수학적 모델링이 정확해야 함에 유의해야 하며 난수의 분포가 분석에 큰 영향을 미치므로 필요한 난수의 범위와 올바른 난수 생성함수에도 주의를 기울여야 한다.

몬테카를로 시뮬레이션의 적용 절차는 다음과 같다.

[단계 1] 초기화

시뮬레이션에 사용되는 모든 변수들에 대해 초기화를 수행한다.

[단계 2] δDP_y^l ($j=1 \sim n$)에 대한 분포의 발생

0~1사이의 난수를 발생시켜 δDP_y^l 에 적합한 확률 분포를 독립적으로 발생시킨다.

[단계 3] δDP_{ik}^l , δPM_{ik}^l ($l=1 \sim 1, i=1 \sim n, k=1 \sim n$)의 계산

```

For( $l=1; l < 1; l--$ )
  For( $i=1; i < n; i++$ )
    For( $k=1; k < n; k++$ )
      {
        IF  $\delta DP_{ik}^l$  are given
          Calculate  $\delta PM_{ik}^l$ 
        ELSE
          Estimate  $\delta DP_{ik}^l$  by Equation (15)
          Calculate  $\delta PM_{ik}^l$ 
      }

```

[단계 4] 각 성과지표에 대한 정보량(I_{ik}^l , $l=1 \sim 1, i=1 \sim n, k=1 \sim n$)의 계산

```

For( $l=1; l < 1; l--$ )
  For( $i=1; i < n; i++$ )
    For( $k=1; k < n; k++$ )
      {
        IF  $\delta PM_{ik}^l$  are independent
          Calculate  $I_{ik}^l$  by Equation (11)
        ELSE
          Calculate  $I_{ik}^l$  by Equation (12)
      }

```

[단계 5] 종료여부 판단

시뮬레이션 종료 조건 즉 시뮬레이션 반복횟수를 판단하여 시뮬레이션 종료여부

를 판단한다.

[단계 6] 시뮬레이션 결과값 출력

실험결과를 요약 정리하여 출력한다.

3.4 개별 성과지표에 대한 정보량 계산 결과의 이용

조직의 계층별 수준에서 최고 관리자는 수익, 비용, 투자액 등 재무적인 성과지표, 중간관리자는 종합적인 비재무적인 성과지표, 라인 엔지니어는 기술적인 비재무적인 성과지표에 관심의 초점을 두고 있다. 본 논문에서의 개별 성과지표에 대한 정보량 계산은 성과지표의 특성에 상관없이 적용될 수 있는 가치평가척도로서 목표 성과지표에 대한 달성 가능성 평가, 개별 프로젝트에 의한 전체 성과지표에 대한 기여의 파악, 프로젝트의 선정 및 포트폴리오 선정 등 다양한 목적으로 이용될 수 있다. 개별 프로젝트 성과지표의 정보량의 계산에서 설계영역인 (ΔPM_k^{l-1})는 제조시스템의 전략적 중요도에 따라 설정된다.

4. 적용

4.1 제조시스템의 설계분해 모델의 예

표 1은 반복 생산하는 제조시스템의 일반적 목표와 달성수단에 대한 공리적 설계에 기반한 설계 분해의 결과인 제조시스템의 설계분해 모델의 전체적인 구조의 예를 보여주고 있다.

표 1. 제조시스템의 설계분해 모델의 전체적인 구조의 예

Code	대분류	Code	세부분류
11	Design Effectiveness (설계효과)	I	Continuous Improvement(지속적 개선)
		Q	Quality (품질)
		P	Predictable Output(예측가능 산출)
		R	Identifying and Resolving Problems (문제파악 및 해결)
		T	Delay Reduction(지연단축)
		C	Operational Cost(운영비용)
111	Design Efficiency (설계효율)	DT	Design Time(설계시간)
		DC	Design Cost(설계비용)
112	Design Investment(설계투자)	113	Design Investment(설계투자)
12	Construction Performance (설치성과)	CQ	Construction Quality(설치품질)
		CE	Construction Efficiency(설치효율)
		CI	Construction Investment(설치투자)

본 모델은 제조시스템의 영역을 생산라인의 설계, 설치 영역으로 구분하며, 설계영역은 설계효과, 설계 효율, 설계 투자 영역으로, 설치영역은 설치품질, 설치효율 영역으로 구분한다. 설계영역과 설치영역에서의 가장 상위의 기능적 요구사항은 장기적 ROI(Return on

Investment)의 최대화이며, 다음 설계분해는 ROI의 구성요소에 기초해서 진행된다.

그림 6은 생산라인의 설계효과 영역에 대한 상위 레벨의 설계분해로서 제품생산의 개선 영역, 설계사양에 따른 제품의 생산 영역, 비용 유발 영역으로 구성된다. 본 모델은 대량생산 체계를 가지는 생산라인 설계의 특성을 고려하여 생산방해의 최소화, 생산방해에 대한 신속한 대처, 고객 리드타임의 만족을 비용 유발 영역의 세부 구성항목으로 고려한다. 설계효과 최대화 영역의 각 세부 영역(①~⑥)영역에서의 각 code에 대한 FR-DP-PM에 대한 세부 설명은 첨부 1을 참고하기 바란다.

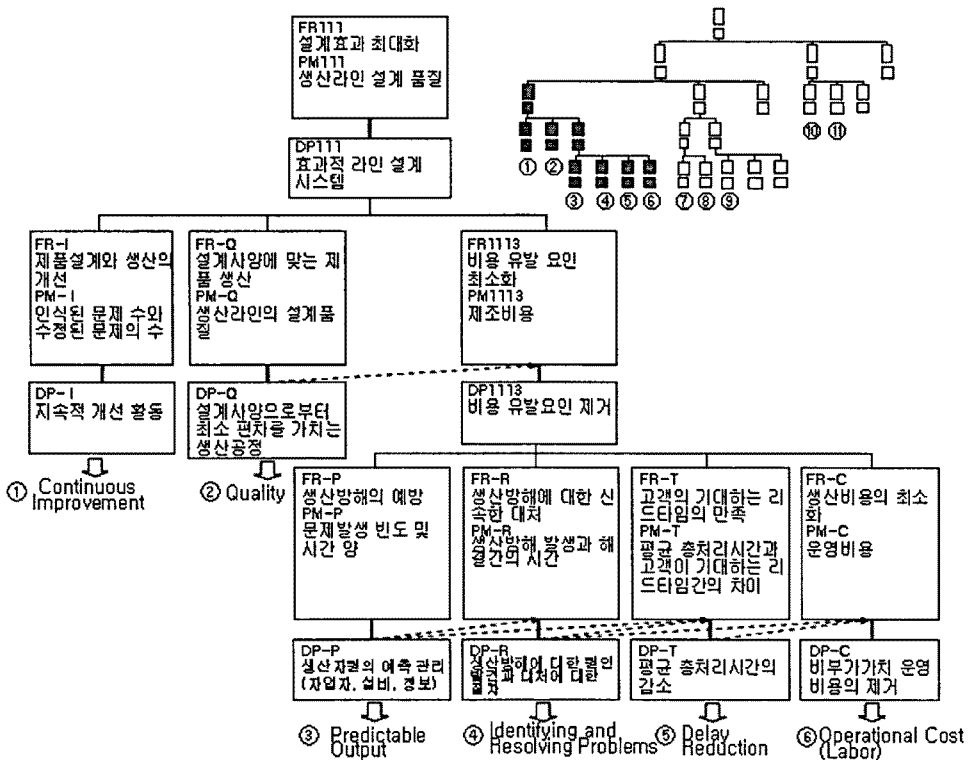
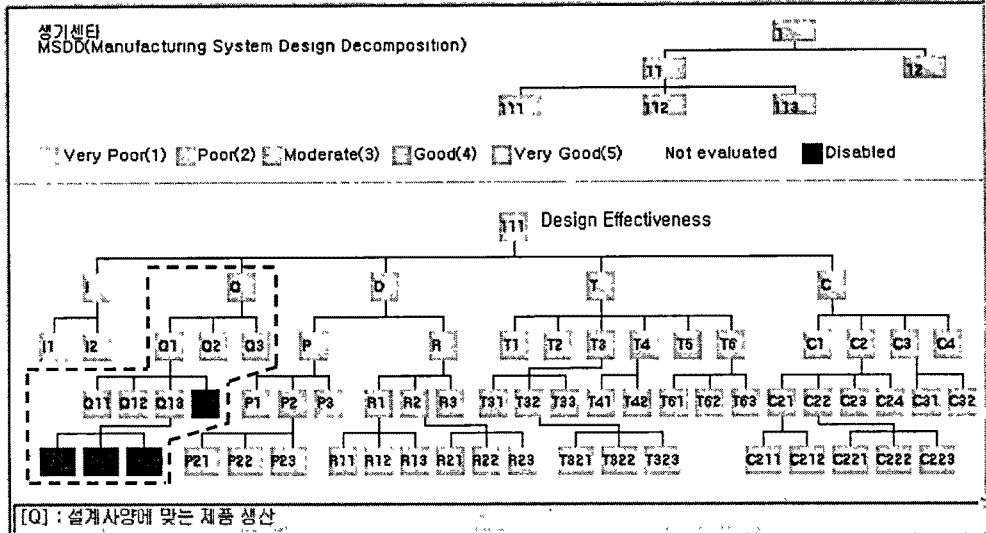


그림 6. 설계효과 영역에서의 제조시스템의 설계분해 모델의 상위 계층의 예

4.2 프로젝트에 대한 가치평가

프로젝트 평가를 위한 입력자료는 각 계층에서 설계 매개변수와 성과지표의 관계를 표현하는 설계 행렬, 각 성과지표에 대한 설계 범위, 최하위 레벨에서의 설계 매개변수의 개선값이다. 그림 7은 프로젝트 가치평가를 위한 설계효과 영역에서의 전체 성과지표의 구조와 프로젝트 가치평가의 대상영역을 보여준다.



■ : 프로젝트 평가에서 선정된 성과지표

그림 7. 제조시스템 설계효과 영역에 대한 전체 성과지표의 구조

표 2는 프로젝트 평가 입력 자료와 몬테카를로 시뮬레이션의 결과에 대해 보여준다.

표 2. 프로젝트 평가 입력자료 및 평가결과

		프로젝트 평가 입력자료			평가결과 (N=5000)	
Code		설계행렬(DM)	설계범위 ($\Delta P M'_u$)	입력값 ($\delta D P'_u$)	달성확률 (P_s)	정보량 (I'_{jk})
Q			4	-	0.78	0.35
Q	Q1	$\begin{bmatrix} 1 & & \\ 0.2 & 0.8 & \\ 0.1 & 0.2 & 0.9 \end{bmatrix}$	3	-	0.80	0.31
	Q2		0.5	-	0.93	0.10
	Q3		0.5	-	0.30	1.72
Q	Q11	$\begin{bmatrix} 1 & & & \\ 0.1 & 0.8 & & \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.7 \end{bmatrix}$	0	-	1	0
	Q12		0	-	1	0
	Q13		2.5	-	0.58	0.79
	Q14		1.5	$\sim U[1,2]$	0.51	0.97
Q	Q131	$\begin{bmatrix} 0.8 & & \\ 0.3 & 0.8 & \\ 0.1 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix}$	0.5	$\sim U[0,1]$	0.38	1.39
	Q132		1.5	$\sim U[1,2]$	0.37	1.44
	Q132		0.8	$\sim U[0.5,1]$	0.37	1.44

* N: 시뮬레이션의 횟수

본 몬테카를로 시뮬레이션 실험에서 $\alpha'_i=1$ 로 가정하며, 선택된 성과지표의 차원은 동일하다.

5. 결론

제조시스템에서의 프로젝트 가치평가에서는 재무적인 성과지표와 비재무적인 성과지표를 모두 고려하는 평가방법이 요구되고 있다. 본 논문은 성과지표 중심의 프로젝트 가치평가를 위한 새로운 평가방법론으로서 제조시스템의 설계분해 모델을 기반으로 공리적 설계의 정보공리의 정보량의 개념을 이용하는 접근이다. 이러한 접근은 성과지표 중심 프로젝트 평가에서 조직의 계층별 수준에 따른 성과지표의 관리를 위한 일관된 의사결정을 제공한다. 본 프로젝트 평가방법의 실질적 적용을 위해서는 제조시스템의 설계분해 모델의 구조에 대한 정확한 분석, DPs와 PMs의 관계에 대한 설계행렬과 이중 성과지표를 동일한 성과지표로 변환하기 위한 변환 factor의 정확한 추정이 요구된다.

참고문헌

- 서한준, 정보화 투자성과 평가의 이론 및 방법론, 시사컴퓨터 Tech Report, 2003. 12. (<http://www.itdata.co.kr/column/200312/tech/tr04.asp>).
- Cochran D.S., J. F. Arinez, J.F., J. W. Duda, and L. Linck, "A Decomposition Approach for Manufacturing System Design", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 20 , No. 6, pp. 371-389, 2001.
- Cochran, D. S., Y. S. Kim, and J. Kim, "The Alignment of Performance Measurement with the Manufacturing System Design", *The First International Conference on Axiomatic Design ICAD 2000*, Cambridge, MA, USA, June 2000.
- Cochran, D.S., and D.C. Dobbs, "Evaluating manufacturing system design and performance using the manufacturing system design decomposition approach", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 20 , No. 6, pp. 390-404, 2001.
- Duta, J., *A Decomposition-Based Approach to Linking Strategy, Performance Measurement, and Manufacturing System Design*, Ph. D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- Kim, Y. S., *A Decomposition-Based Approach for the Integration of Product Development and Manufacturing System*, Ph. D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- Linck, J., *A Decomposition-Based Approach for Manufacturing System Design*, Ph. D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- Suh, N. P., *Principles of Design*, New York: Oxford University Press, 1990.
- Suh, N.P., *Axiomatic Design: Advances and Applications*, Oxford University Press, New York, 2001.
- Suh, N. P., D.S. Cochran, and P. C. Lima, "Manufacturing System Design", 48th General Assembly of CIRP, *Annals of CIRP*, Vol. 47, No. 2, pp. 627-639.
- Yien, T. S., *Manufacturing System Design Methodology*, The Hong Kong University of Science and

첨부 1: 설계 효과 최대화를 위한 FRs-DPs-PMs에 대한 설명

Code		기능적 요구사항 (FRs)	설계 매개변수(DPs)	성과지표 (PMs)
I	I	제품설계와 생산의 개선	지속적 개선 활동 (Kaizen)	인식된 문제의 수와 수정된 문제의 수
	I1	고객 피드백의 반영	고객 피드백 프로세스	고객이 제기한 문제의 수와 수정된 문제의 수
	I2	작업팀 피드백의 반영	작업팀 피드백 프로세스	작업자 제안내용의 수와 수정된 문제의 수
Q	Q	설계사양에 맞는 제품 생산	설계사양으로부터 최소편차를 가지는 생산공정	공정능력
	Q1	공정을 관리한계선 내에서 작업	품질변동의 유발 요인 제거	유발원인에 따른 n개 부품당 결함의 수
	Q11	기계 이상원인의 제거	실패 모드와 효과	기계로 인하여 유발된 n개 부품당 결함의 수
	Q12	작업방법 이상원인의 제거	공정계획	작업방법으로 인하여 유발된 n개 부품당 결함의 수
	Q13	작업자 이상원인의 제거	작업자로부터의 안정적 출력	작업자로 인하여 유발되는 n개 부품당 결함의 수
	Q131	작업자의 과업에 대한 지식보유 보장	교육 프로그램	작업자의 작업방법에 대한 이해부족으로 유발되는 n개 부품당 결함의 수
	Q132	작업자의 일관되게 작업수행 보장	표준작업방법	비표준작업으로 유발되는 n개 부품당 결함의 수
	Q133	작업자 오류의 불량 전이 방지	오류가 안생기는(Mistake proof) 작업	작업자 과오로 유발되는 n개 부품당 결함의 수
	Q14	자재 이상원인의 제거	공급자의 품질 프로그램	납품되는 자재품질에 의해 유발되는 n개 부품당의 결함의 수
	Q2	목표에 대한 프로세스 평균의 맞춤	파라미터 조정	공정평균과 목표간의 차이에 의해 유발되는 n개 부품당의 결함의 수
	Q3	공정 외란에 대한 영향 최소화	강건한 공정설계	프로세스 산출물의 편차에 의해 유발되는 n개 부품당의 결함의 수
P	P	생산방해의 최소화	생산자원의 예측 관리 체계(작업자, 설비, 정보)	생산방해 발생의 수와 이로 인한 손실 시간
	P1	관련 생산정보의 가용성 보장	신뢰성있는 생산정보시스템	정보 방해로 유발된 생산방해의 발생수, 중단된 시간
	P2	설비 산출의 예측성 보장	설비 신뢰도의 보전	미계획된 설비고장의 발생수, 미계획된 설비고장의 손실시간
	P21	쉬운 설비 서비스 보장	서비스 용이하도록 설계된 기계	설비 서비스에 필요한 시간
	P22	설비에 대한 정기적 서비스	정기적 예방 보전 프로그램	설비 서비스 빈도

		P23	설비상태에 대한 정보 관리	설비관리 시스템	설비 상태에 대한 정보관리의 효율성		
		P3	자재의 가용성 보장	표준 자재 보충 시스템	자재부족으로 유발된 생산방해의 수와 손실시간		
R	R		생산방해에 대한 신속한 대처	생산방해에 대한 원인발견과 대처에 대한 절차	생산방해의 발생과 해결간의 시간		
		R1	생산방해에 대한 신속한 인식	신속한 생산방해의 파악을 위한 하위 시스템 구성	생산방해의 발생과 파악간의 시간		
			R11	생산방해의 발생시점 파악	장비 상태에 대한 작업자의 샘플링 검사율의 증가	생산방해의 발생과 인식간의 시간	
			R12	생산방해의 발생위치의 파악	단순화된 자재흐름 경로	생산방해의 파악과 발생 위치 파악 간의 시간	
			R13	생산방해 내용의 파악	내용에 민감한 피드백	생산방해의 위치 파악과 방해 내용 파악 간의 시간	
			R2	생산방해에 대한 담당자와의 의사소통	운영 상태의 피드백에 대한 공정	생산방해의 내용 파악과 지원 자원의 생산방해 내용의 이해 간의 시간	
				R21	정확한 지원 자원의 파악	각 실패 모드에 대한 명시된 지원자원의 내용	생산방해의 내용 문제파악과 지원자원 파악간의 시간
				R22	정확한 지원자원의 접촉 시간의 최소화	신속한 지원자원예의 접촉 절차	문제파악과 지원자원 접촉 간의 시간
				R23	지원자원의 생산방해의 내용에 대한 이해시간 최소화	생산방해 내용의 전달 체계	지원자원 접촉과 지원자원의 생산방해의 내용 이해의 시간
				R3	신속한 문제의 해결	근본 원인의 파악과 제거를 위한 표준방법 설계	문제 이해와 해결간의 시간차이
		T	T		고객의 기대하는 리드타임 만족	평균 총처리시간의 감소	평균 총처리시간과 고객이 기대하는 리드타임간의 차이
				T1	정보지연의 감소	작업과 통합된 정보(visual factory, Kanban system)	요구된 정보발송과 수신간의 시간
				T2	로트 지연의 감소	Transfer 배치 크기의 감소	로트 크기의 지연에 따른 재고
T3	공정지연의 감소			Takt time 맞게 설계된 생산	공정지연에 의한 재고		
	T31			적절한 Takt Time 의 정의	이상적인 범위의 Takt Time 달성을 위한 고객 정의	Takt Time 정의 여부(Yes/No)	
	T32			Cycle Time = Takt Time 보장	요구된 Takt Time 을 만족시키는 하위시스템	생산시간과 Takt Time 의 차이	
				T321	Automatic Cycle Time <= 최소 Takt Time 의 보장	각 작업장의 적절한 작업량의 설계	FR-T321 의 달성 여부 (Yes/No)
				T322	수동 Cycle Time <= Takt Time 의 보장	적절한 작업자 작업내용, Loop 설계	FR-T322 의 달성여부(Yes/No))
				T323	Level Cycle Time Mix 보장	다른 Cycle Time 으로 부품의 Stagger 생산	평균 사이클 타임이 Takt time 보다 적은가?
				T33	부품 도착시간 = 서비스 Rate 보장	Downstream 작업부품도착	부품 도착시간과 서비스 시간의 차이
				T4	Run size 지연의 감소	각 수요기간 동안 요구된 제품 혼합과 수량의 생산	Run size 지연에 의한 재고
		T41	요구제품 Mix(부품형식과 수량)의 지식제공	최종 고객으로부터의 정보흐름	이 정보의 제공여부 (Yes/No)		

	T42	충분히 적은 로트 사이즈로 생산	자재취급과 설비에 대한 신속한 변경이 가능한 설계	장비를 위한 Quick Change
	T5	이송 지연의 감소	자재흐름지향 layout 설계	이송지연에 의한 재고
	T6	체계적인 운영지연의 감소	생산방해를 피하는 하위시스템 설계	자원간 간섭에 의해 손실된 생산시간
	T61	지원자원과 생산 자원간의 간섭이 없음	지원자원과 생산자원을 구분하는 하위시스템 설비	생산자원과 간섭을 일으키는 지원자원에 의해 손실된 생산시간
	T62	생산자원간의 간섭이 없음	생산 작업 패턴의 종합화 고려 및 분해	다른 생산자원과 간섭을 일으키는 생산자원에 의해 손실된 생산시간
	T63	지원자원간의 간섭이 없음	지원작업의 패턴의 종합화 고려 및 분해	다른 지원자원과 간섭을 일으키는 지원 자원에 의해 손실된 생산시간
C		생산비용의 최소화	비부가가치 비용의 제거	제조비용
	C1	낭비 공정 프로세스의 감소	부가가치가 없는 공정단계의 제거	낭비 프로세스 단계의 수
	C2	직접노동에서 낭비 감소	비부가가치 수작업의 제거	비부가가치 작업에 소비한 시간의 %
	C21	작업자의 기계에서의 대기 제거	기계-사람 분리설계	작업자의 장비에서의 대기 시간의 %
	C211	각 작업장에서 작업자의 비부가가치 작업에 소비한 시간의 감소	자율운영의 기계, 작업장 설계	작업장에서 대기하는 동안 비부가가치 작업에 소비된 작업자 시간의 %
	C212	작업자의 다기능 요구	여러 작업장에서의 작업훈련	각 작업자가 운영할 수 있는 전체 시스템에서의 작업장의 %
	C22	작업자의 낭비동작 제거	작업자의 작업을 촉진시키는 작업장, 작업루프의 설계	낭비동작에 소비되는 시간의 %
	C221	작업자의 작업장간 이동의 낭비동작의 최소화	활동거리감소를 위한 기계, 작업장 구성	작업장간 이동에 소비된 작업자 간의 %
	C222	작업자의 작업 준비중 낭비동작 최소화	작업장의 지정된 위치에 표준공구 및 장비배치 (5S)	작업 준비동안 낭비동작에 소비된 작업자 시간의 %
	C223	작업자의 작업중 낭비동작의 최소화	작업자, 기계, 고정구 간의 인간공학적 인터페이스	작업중 낭비동작에 소비된 작업자 시간의 %
	C23	타 작업자에 대한 대기 제거	균형화된 작업 루프 설계	타 작업자 대기에 소비되는 시간의 %
	C24	생산관리자의 효과성 향상	자율적 작업 팀	시스템 관리에 소요되는 시간
	C3	간접노동에서 낭비 제거	간접노동량의 감소	시스템 간접비
	C31	생산관리자의 효율 개선	자발적인 작업 팀(수평적 조직)	시스템 관리에 필요한 간접노동력의 %
	C32	정보 장애의 제거	유연한 정보흐름 (visual factory)	시스템의 일정을 조정하는데 필요한 간접노동력의 %
	C4	설비비용의 최소화	설비자원의 사용공간의 감소	설비비