

## 多性能 特性値에 관한 安定性設計

徐洵根

동아대학교 공과대학 산업공학과

崔鍾德

주성전문대학 공업경영학과

## Robust Parameter Design for Multiple Performance Characteristics

Sun-Keun Seo

Dept. of Industrial Engineering, Dong-A University

Jong-Deuk Choi

Dept. of Business Administration, Joo Sung Junior College

### Abstract

Taguchi's robust design methodology has focused only on a single performance characteristic or response, but the quality of most products is seldom defined by a characteristic, and is rather the composite of a family of characteristics which are often interrelated and nearly always measured in a variety of units. The multiple performance characteristics problem is how to compromise the conflicts among the selected levels of the design parameters for each individual performance characteristic.

In this paper, the modified desirability function using SN ratio which can be optimized by univariate technique is proposed and a parameter design procedure to achieve the best balance among several different response variables is developed. We reanalyze two existing case studies by the proposed method and compare these results with ones by the sum of SN ratios and the expected weighted loss.

## 1. 序論

製品の設計와 製造에 있어서 製品の機能 혹은 製品을 구성하는 재료의水準, 使用方法, 주위환경조건 등 여러가지 요인들에 영향을 받아 변동하게 된다. 이러한 요인들은 雜音 또는 誤差因子라 하는데 製品の品質向上과 原價節減을 효율적으로 관리하기 위해서는 雜音 그 자체를 統制하거나 除去하기 보다는 생산된 製品의 性能特性値가 雜音에 鈍感하도록(안정성 있도록) 設計되어야 한다. 이러한 技法으로 다구찌의 安定性設計(robust design, parameter design)가 최근에 많은 관심과 논의의 대상이 되고 있다[2, 13, 18].

安定性設計에 대한 다구찌 方法은 분명하게 개선의 餘地를 갖고 있지만 合理的이고 體系的인 實驗과 解析方法으로 기존의 製品과 工程을 어떻게 改良하고, 新製品과 工程을 어떻게 設計하는가에 대한 중요한 情報를 제공할 뿐만 아니라 특히, 不確實한 環境條件하에서 意思決定에 대한 經驗인 應用이 가능하다. 최근에 統計學者와 品質工學者들은 目標値에서 적은 變動뿐만 아니라 平均을 가능한 한 目標値에 접근시킬 수 있는 設計變數(design parameter, control factor, 제어인자)의 最適條件을 찾기 위해 다구찌의 基本的인 目的을 유지하면서 다구찌 方法보다 더 효과적인 다른 技法을 개발하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

다구찌는 製品의 性能을 나타내는 變數를 性能特性値라 부르는데, 하나의 製品은 적어도 하나 이상의 性能特性値를 갖는다. 예를 들면 照明에 사용되는 광램프 경우에는 소비 전력, 무게, 길이, 형상, 스위치특성, 광속유지율, 수명, 광원색, 외관등 하나의 製品이지만 여러개 性能特性値를 갖고 있다.

다구찌는 單一 性能特性値의 安定性設計 方法에 대해서는 많은 언급을 하고 있으나, 多性能 特性値의 安定性設計 方法에 대해서는 單一 性能特性値에 적용되는 方法들을 쉽게 확장시켜 적용할 수 있다고만 언급하고 구체적인 方法을 제시하고 있지 않다[田口玄一과 吉澤正孝, 1988]. 그러나 單一 性能特性値일 때는 생기지 않던 문제가 多性能特性値의 경우에는 性能特性値마다 設計變數의 最適條件이 다르게 나타나는 相衝現象이 발생하게 된다. 性能特性値나 設計變數의 수가 증가하면 증가할 수록 이러한 현상이 생길 가능성은 더욱 커진다[1, 14]. 이와 같이 복잡한 多性能 特性値 問題는 單一 性能特性値의 設計 方法으로는 해결하기 힘든 문제이고, 社會的 要求의 多樣化에 따라 이러한 문제의 重要性이 높아지고 있다.

본 연구에서는 性能特性値가 多數인 경우의 安定性設計 方法에 대해 다구찌의 基本概念을 유지하면서 相衝現象이 발생하면 이것을 折衷할 수 있는 效果的인 計量的 測度를 제시하고, 또한 設計變數를 統計的 有意性, 相衝現象, 性能特性値의 形態에 따라 세분하고 이들의 最適水準을 결정하는 체계적인 安定性設計節次를 개발하여 相衝된 多數의 性能特性値를 效率的으로 折衷하고자 한다. 그리고 既存의 實際 事例를 통하여 제시된 方法과 既存의 多性能 特性値의 安定性設計 方法들을 比較分析하고자 한다.

## 2. 既存 研究와 好感度 函數

### 2.1 既存 研究의 安定性設計 方法

多性能 特性值의 安定性設計 問題中에서 가장 중요한 性能特性值들 間に 相衡現象인데, 이 現象을 효율적으로 잘 折衷하여 最適水準을 찾는 것으로 가장 간단한 方法은 각 反應 等高線을 묘사하는 그래프적인 方法(contour plot)이다[Lind, et al., 1960]. 이러한 그래프적인 方法은 가치있는 정보를 제공하고 多性能 特性值 最適化 問題에 대해 판단 능력을 첨가할 수 있으나 3因子까지만 가능한 약점을 가지고 있다.

Myers와 Carter(1973)는 바람직한 規格 혹은 理想值를 갖는 경우에 가장 중요한 一次 特性值 函數를 最適化시키는 獨立變數의 條件을 찾는 雙對 反應 시스템에 대한 反應表面 技法을 제시하였다. 이 方法은 라그랑즈 승수법과 능형분석법의 결합으로 두가지 반응에 한정된다. Biles(1975)는 雙對 反應表面法을 확장하여 바람직한 範圍內의 二次特性值의 집합을 유지하면서 一次特性值 函數를 最適化하는 절차를 제시하였는데 최대 경사법을 수정한 非線形計劃法의 사영경사법(gradient projection technique)을 적용하였다. 그리고 Vining과 Myers(1990)는 Myers와 Carter(1973)가 제안한 方法을 이용하여 望目 特性值인 경우에 目標值는 二次特性值의 지정값으로 놓고 分散項인 一次特性值를 最適化시키며 Castillo와 Montgomery(1993)는 이를 GRG(generalized reduced gradient) 연산 절차를 이용한 비선형계획법으로 해결할 수 있는 方法을 제시하였다.

Pignatiello(1993)는 多性能 特性值에 관한 二次損失函數를 제시하고 이의 期待損失函數를 最小化하는 方法으로 直接 最小化하는 方法과 分割하여 最小化하는 方法을 제시하고 있고, 동승훈(1990)은 期待加重損失로서 상충인자를 절충하는 方法을 제시하고 있다.

또한 Elsayed와 Chen(1993)은 Box의 변환이론을 이용한 PerMIA(Performance Measure Independence of Adjustment)와 다구찌의 이차 손실함수에 의한 品質性能測定(Performance Measure on Quality, PerMQ)를 제안하고 이를 최소화하는 절차를 제시하고 있다. 그리고 Harrington(1965)과 Derringer와 Suich(1980)는 다특성치의 성능측도로서 消費者의 選好의 概念을 도입한 好感度 函數를 제시하였다. 이 好感度 函數는 性能特性值들의 相關關係와 分散을 고려하고 있지 않다는 문제점이 있으므로 Khuri와 Conlon(1981)은 線形 多性能 特性值 模型에 의하여 性能特性值의 最適化에 대한 절차를 제시하였다. 먼저 性能特性值들 사이에 線形從屬關係를 검토하며, 만약 從屬關係들이 존재하면, 다른 性能特性值의 線形函數인 從屬 特性值를 제거하고 나머지 性能特性值의 귀소계급추정식을 구한다. 이 式에 의하여 구한 性能特性值의 豫測值와 개개의 性能特性值만을 最適化하여 얻은 理想值로부터의 偏差는 距離函數에 의하여 測定된다. 最適條件의 折衷은 실험영역에서 이 距離函數를 最小化하는 것에 의하여 구할 수 있다.

또한 多性能 特性值의 安定性設計에 대한 既存의 여러가지 方法들은 대부분 最適化 問題이지 과연 다구찌가 주장하는 安定性設計 問題인가 하는 의문점을 제기할 수 있다. 예를 들면 어떤 雜音因子의 條件에서 性能特性值들의 관계식을 풀었다 하더라도 雜音因子의 다른조건에서도 그렇게 될 것인가 하는 것은 분명치 않다. 중요한 것은 인과관계를 구하여 그것이 目標函數와 일치하도록 하는 것이 아니라 평균곡선은 目標函數와 다르더라도

도 雜音因子에 의한 變動을 작게하는 設計變數의 조건을 찾는 것이다[田口玄一과 吉澤正孝, 1988].

이외에도 특성치의  $\beta$ 변환과 선형계획법의 활용을 언급한 Logothetis와 Haigh(1988)의 연구 등이 있는데, 多性能 特性値 問題에 대한 既存研究들을 <Table 1>에 정리하였다. 여기서 距離測度, 다구찌의 SN比,  $y$ 의  $\beta$ 變換, 期待加重損失, 非線形 目標計劃法, 그리고 期待損失函數에 의한 방식은 實驗計劃法에 의하여 多性能 特性値의 安定性設計를 행할 수 있지만, SN比를 사용하여 내·외측 直交配列에 의한 直積實驗에 적용할 수 있는 것은 다구찌의 SN比의 합, 期待加重損失과 品質性能測度에 의한 방법뿐인데 세번째의 방법은 Box의 變換理論을 이용하여 分散을 安定化시킬 수 있는 자료 해석절차가 선행되어야 하므로 본 논문에서 제시된 방법과의 비교대상에서 제외하였다(4절 참조).

< Table 1 > Survey of Previous Studies

method	author	performance measure	compromise and optimization methods
contour plots	Lind, Gold & Hicken (1960)	response ( $y$ )	graphic based
dual response	Myers & Carter (1973) Biles (1975) Vining & Myers (1990) Castillo & Montgomery (1993)	$y$	response model based
desirability	Harrington (1965) Derringer & Suich (1980)	desirability function	single desirability function
distance measure	Kuhri & Conlon (1981)	distance measure	response model based
Taguchi	Taguchi (1988)	$S/N$ ratio	addition of $S/N$ ratio
$\beta$ technique	Logothetis & Haigh (1988)	$\beta$ transform of $y$	linear programming
expected weighted loss	Dong, S. H. (1990)	expected loss	classification of control parameters and weighted loss function
nonlinear goal programming	Lee, Sang-Heon (1991)	$y$	nonlinear goal programming
expected loss function	Pignatiello (1993)	expected loss function	direct and partitioned optimization
performance measure on quality	Elsayed and Chen (1993)	expected loss	Box's PerMIA

## 2.2 好感度 函數

製品에는 여러개의 性能特性値가 있는데, 이 중에서 어느 하나의 性能特性値라도 消費者의 許容限界를 벗어나거나 許容限界에 가까이 있으면 다른 모든 性能特性値가 最適인 상태에 있더라도 製品의 전체적인 입장에서 보면 항상 規格値를 벗어나거나 가까이에 있는 이 性能特性値 하나 때문에 消費者의 購買 選好度도 상당히 떨어지게 된다. 好感度 函數은 어느 하나의 性能特性値라도 許容限界에 가까이 가지 않고 모든 性能特性値가 잘 조화되도록 해주므로 相衡現象이 생기면 이것을 折衷시키는데 타당한 方法중의 하나라고 할 수 있다.

Harrington(1965)은 消費者의 製品 選好의 概念을 처음으로 도입하여 好感度 函數를 제시하였다. 각 性能特性値들에 대한 消費者의 好感 程度  $d_i$ 의 값은 각 性能特性値가 規格에 벗어나면 받아들일 수 없는 값으로 0 이고, 規格의 한가운데에 있으면 가장 바람직한 性能特性値로서 1이 되도록 性能特性値를 線形變換하며 다음과 같이 性能特性値의 종류에 따라 각 性能特性値의 好感度  $d_i$ 를 구한다.

### ① 양측 규격인 경우

$$d_i = \exp[-(|y_i'|)^{\gamma}]$$

$\gamma$  : 상수 ( $0 < \gamma < \infty$ )  
 $y_i'$  : 線形變換된 性能特性値

(1)

단,

$$y_i' = \begin{cases} -1, & y = y_{\min} \text{ (規格下限)} \\ \frac{2y_i - (y_{\max} + y_{\min})}{y_{\max} - y_{\min}}, & y_{\min} < y < y_{\max} \\ +1, & y = y_{\max} \text{ (規格上限)} \end{cases}$$

어떤 값  $y_i$ 는 위의 식과 같이  $y_i'$ 로, 즉 -1과 1사이의 값으로 변환되고,  $d_i$ 는 上限과 下限規格의 中央에서 最大가 된다. 式 (1)의  $\gamma$ 는 曲線의 형태를 결정하는데  $d_i$ 와  $y_i'$ 의 특정한 하나의 쌍( $y_i', d_i$ )에 의하여 다음과 같이 정할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\ln \ln(1/d_i)}{\ln |y_i'|}$$
(2)

### ② 단측 규격인 경우

$$d_i = \exp[-\exp(-y_i')], \quad -\infty < y_i' < \infty$$
(3)

이 경우에는  $\gamma$ 가 포함되지 않으며  $y$ 와  $y'$ 의 선형관계에 따라  $d_i$ 의 경사도가 결정된다.

여러 학자가 Harrington의 호감도 함수를 수정한 측도를 제시하고 있는데[Walters, et al., 1991], 이 중에서 Derringer와 Suich(1980)는 Harrington(1965)이 제안한 각 性能特性値의 好感度 函數  $d_i$ 는 양측 규격인 경우에 目標値가 소비자 許容限界의 중앙값일 때에 한하여 구할 수 있고, 目標値가 중앙값이 아닌 경우에는 구할 수 없는 問題點을 가지고 있으므로 이것을 수정 보완하여 式 (4), (5)와 같이 一般化시켰다. 設計變數가  $p$ 개, 性能特性値가  $m$ 개 있을 때 각각의 性能特性値와 設計變數 사이의 函數關係는 복잡하거나 알려져 있지 않으므로 回歸分析등을 통하여 근사적인 多項 函數式을 추정하며, 이를 사용하여 性能特性値의 推定量  $\hat{y}_i$ 를 구하여 다음과 같이 性能特性値의 종류에 따라 好感度  $d_i$ 를 구한다.

① 단측 규격인 경우

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i \leq y_{i(\min)} \\ \left| \frac{\hat{y}_i - y_{i(\min)}}{y_{i(\max)} - y_{i(\min)}} \right|^\alpha, & y_{i(\min)} < \hat{y}_i < y_{i(\max)} \\ 1 & y_{i(\max)} \leq \hat{y}_i \end{cases} \quad (4)$$

② 양측 규격인 경우

$$d_i = \begin{cases} \left| \frac{\hat{y}_i - y_{i(\min)}}{C_i - y_{i(\min)}} \right|^\beta, & y_{i(\min)} \leq \hat{y}_i \leq C_i \\ \left| \frac{\hat{y}_i - y_{i(\min)}}{C_i - y_{i(\min)}} \right|^\gamma, & C_i \leq \hat{y}_i \leq y_{i(\max)} \\ 0 & \hat{y}_i < y_{i(\min)} \text{ or } \hat{y}_i > y_{i(\max)} \end{cases} \quad (5)$$

- 단,  $y_i$  :  $i$ 번째 性能特性値  $y_i$ 의 推定値
- $y_{i(\min)}$  :  $i$ 번째 性能特性値의 許容 下限
- $y_{i(\max)}$  :  $i$ 번째 性能特性値의 許容 上限
- $C_i$  :  $i$ 번째 特性値의 目標値
- $\alpha, \beta, \gamma$  : 使用者가 결정하는 상수

여기서 式 (4)는 性能特性値가 클수록 좋은 경우이고, 式 (5)는 특정한 目標値가 주어져 있는 경우이다. 性能特性値가 작을수록 좋은 경우는 性能特性値가 클수록 좋은 경우의 역수를 취하면 원하는  $d_i$ 를 式 (4)에서 쉽게 얻을 수 있다.  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 사용자에 의해 결정되는 常數로 다구찌의 二次損失函數를 고려하면 1보다 커야 될 것으로 판단된다.

製品 전체에 대한 바람직한 好感度 函數는 여러 個體 好感度  $d_i$ 들을 結合하는 것이며,

式 (6)과 같이 定量化하여 여러개의 性能特性值들을 單一化한 測度を 製品 전체의 好感度 函數로 사용할 것을 제안하고 있다.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m)^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

式 (6)에서 각 性能特性值의 好感度を 幾何平均을 사용하여 製品全體의 好感度  $D$ 를 구하는 이유는 가장 작은 好感度  $d_i$ 를 갖는 性能特性值에 가장 강한 加重值를 부여하기 위해서이다. 여기서  $D$ 와  $d_i$ 가 1에 가까이 갈수록 消費者的 好感度は 커지고, 0일 때는 消費者的 好感度は 매우 낮음을 나타낸다. 하나의 個體 好感도가 0이면 다른 個體 好感도에 관계없이 全體好感度は 0이 됨을 알 수 있다.

이 方法은 간단하고 적용하기 쉬우나, 각 性能特性值에 대한 使用者의 主觀이 반영되며  $\alpha, \beta, \gamma$ 의 값을 使用者가 결정하도록 하기 때문에 使用者의 경험이 부족하거나 잘못 결정할 경우에는 오히려 바람직스럽지 못한 방향으로 작용할 수 있고, 또한, 이 方法은 性能特性值의 分散이나 각 性能特性值들 간의 相關關係를 고려하고 있지 않다는 問題點을 가지고 있다. 그러므로 推定值와 理想值와의 間격을 性能特性值들의 共分散行列로 표준화한 Khuri와 Conlon(1981)의 距離測度を 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 反應에 대한 獨立性 검토가 필요한 것이 아니고  $SN$ 比에 대한 獨立性 검토가 필요하며 好感度 函數보다 취급하기가 용이하지 않기 때문에 距離測度 보다는  $SN$ 比를 이용한 好感度 函數를 사용하여 相衝因子를 折衷하고자 한다.

### 3. 多性能 特性值의 安定性設計

어떤 製品에 性能特性值가 여러개 있을 때 이것들의 性能特性值의 合을 취하여 하나의 單一 性能特性值 問題로 다루는 것이 곤란한 安定性設計問題를 多性能 特性值 問題라 부른다.

즉, 多性能 特性值의 安定性設計를 할 경우에는 單一 性能特性值일 때는 발생하지 않던 相衝現象이 발생하게 된다. 이러한 相衝現象은 단지 單一 特性值에 적용되는 方法으로는 해결할 수 없는 問題點을 가지고 있다. 어떤 性能特性值는 다른 性能特性值를 포기하고서야 달성될 수 있는 것도 있으며, 모든 性能特性值가 동시에 달성할 수 있으면 좋으나 그런 경우는 現實적으로 불가능하다. 그러므로 어떻게 效率적으로 이러한 相衝現象을 折衷하느냐가 중요한 문제중의 하나이다.

#### 3.1 多性能 特性值의 折衷 方法

다구찌의 基本概念을 토대로 하여 多性能 特性值의 安定性設計를 하고자 한다. 먼저, 각 性能特性值別 安定性設計를 다구찌의 파라미터 설계절차에 의하여 행하고, 얻어진 각 性能特性值들 간의 最適水準을 비교하여 設計變數를 <Table 2>와 같이 분류한다.

< Table 2 > Classification of Control Parameters

category	characteristic	statistical significance		conflict phenomenon	type of factor	determining step
1	NTB LTB(STB)	SN ratio	mean insig. SN ratio	— —	nonconflict	finish
2	NTB LTB(STB)	SN ratio	sign. SN ratio	<i>n</i> <i>n</i>	nonconflict	optimization
3	NTB LTB(STB)	SN ratio	sign. SN ratio	<i>c</i> <i>c</i>	conflict	compromise
4	NTB LTB(STB)	mean only	sign. SN ratio	<i>n</i> <i>n</i>	nonconflict	optimization
5	NTB LTB(STB)	mean only	sign. SN ratio	<i>c</i> <i>c</i>	conflict	compromise
6	NTB LTB(STB)	mean only	sign. SN ratio	<i>n</i> —	potential conflict	adjustment
7	NTB LTB(STB)	mean only	sign. SN ratio	<i>c</i> —	potential conflict	adjustment

Note

NTB : nominal-the-best    *n* : nonconflict  
 STB : smaller-the-better    *c* : conflict  
 LTB : larger-the-better

제 1군은 각 性能特性値의 SN比와 望目 特性値의 平均이 모두 유의하지 않으므로 經濟性이나 便利性에 따라 수준이 정해지고, 제 2군의 設計變數는 각 性能特性値의 SN比가 모두 유의하지만 非相衝因子이므로 각 性能特性値에 대한 最適水準이 그대로 최적수준이 된다. 제 3군은 각 性能特性値의 SN比가 모두 유의하고 相衝因子이므로 折衷段階에서 제시된 好感度 函數를 사용하여 最適水準을 설정할 수 있다. 제 4군은 각 望小, 望大 特性値의 SN比가 유의하고 望目 特性値의 平均에 유의하며 非相衝因子이므로 最適化 段階에서 水準을 결정하지만, 望目 特性値의 調整段階에서 다른 因子(6군)로서 調整이 되지 않을 경우에 이를 포함시켜 다시 검토한다. 제 5군은 각 望小, 望大 特性値의 SN比가 모두 유의하고 望目 特性値의 平均도 유의하며 상충현상이 있으므로 折衷段階에서 折衷해야 한다. 제 6군은 각 性能特性値의 SN比는 유의하지 않고 望目 特性値의 平均에만 유의하며 非相衝因子이므로 調整段階에서 感度分析을 통하여 性能特性値를 目標値에 調整할 수 있다. 제 7군은 각 性能特性値의 SN比는 유의하지 않고 望目 特性値의 平均에 유의하며多數의 望目 特性値에 대하여 相衝現象이 발생하기 때문에 潛在的 相衝因子로 調整段階에서 6군과 4군의 調整因子로서 目標値의 調整이 되지 않는 경우에 調整因子로 이용한다. SN比에 의한 安定性設計 方法은 望小와 望大 特性値일 때는 期待損失을, 望目일 때는 調



整後 期待損失을 最小化한다. 따라서 調整因子가 되는 6군, 7군은 最適化나 折衷段階에서 水準을 결정하지 않고 調整段階에서 水準을 결정하는 것이 합리적이다. 그리고 折衷段階에서 相衡現象을 일으키는 因子중에서 망목특성치의 평균에만 유의한 調整因子를 별도로 구분하지 않으며 相衡現象이 생기지 않는 因子를 最適水準으로 고정한 상태에서 相衡因子를 折衷한다. 본 연구에서는 相衡因子들을 折衷할 수 있는 측도로서 好感度 函數를 다음과 같이 표현하고자 한다.

$$d_{ij} = \begin{cases} 0 & \hat{SN}_{ij} \leq SN_i^L \\ \left( \frac{\hat{SN}_{ij} - SN_i^L}{SN_i^H - SN_i^L} \right)^\gamma & SN_i^L < \hat{SN}_{ij} < SN_i^H \\ 1 & \hat{SN}_{ij} \geq SN_i^H \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $d_{ij}$ 는 性能特性值  $i$ 의  $j$ 번째 실험에서의 好感度이고,  $\hat{SN}_{ij}$ 는 性能特性值  $i$ 에 대한  $j$ 번째 實驗에서  $SN$ 比의 推定值이며,  $SN_i^H$ 는 性能特性值  $i$ 에 대한 각 實驗組合에서 추정된  $SN$ 比의 最大值이다.  $SN_i^L$ 은 望小(望大) 特性值의 경우에는 上限(下限) 許容규격치가  $\Delta$ 일 때  $SN$ 比의 推定值로서 다음과 같이 구할 수 있다. 예를 들면  $\Delta = 100$ 이고 望小 特性值의 경우에  $SN$ 比는  $10 \log 1/\sigma^2$  이므로  $SN_i^L$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$SN_i^L = 10 \log \frac{1}{100} = -20$$

望大 特性值의 경우는 역수를 취하여 望小 特性值와 마찬가지로 취급할 수 있다. 望目 特性值의 경우는 望小(望大) 特性치와 같은 방법으로 구할 수 없으므로 다른 방법에 의해  $SN_i^L$ 를 추정한다. 望目 特性值의  $SN$ 比는  $\log \mu^2/\sigma^2$  이므로  $\mu^2$ 은  $(T-\Delta)^2$ 를,  $\sigma^2$ 은 각 實驗組合에서 구한  $s^2$ 의 最大值를 사용하여  $SN_i^L$ 을 정할 수 있다. 예를 들면 目標值가 100이고 上限, 下限 許容差  $\Delta$ 가 20이고 각 實驗組合에서  $s^2$ 의 최대값이 150이라면 다음과 같이  $SN_i^L$ 을 계산할 수 있다.

$$SN_i^L = 10 \log \frac{80^2}{150} = 16.30$$

$\gamma$ 는 사용자가 선택하는 상수로  $d_{ij}$ 의 경사도를 결정하는데, 각 性能特性值에 대한  $SN$ 比의 양태를 고려하여 정해주어야 하며 二次損失函數를 고려하면 2를 선택할 수 있다.

$j$ 번째 실험점에서 전체 好感度  $D_i$ 는 單一 測度로서 式 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_i = \left[ \prod_{j=1}^m d_{ij}^{w_j} \right]^{1/m}, \quad \text{단, } \sum_{j=1}^m w_j = m, w_j > 0 \quad (8)$$

$w_i$ 는 性能特性値들 간의 중요함을 나타내며 性能特性値  $i$ 에 대한 重要度を 표시하는 것으로, 損失函數의 상수  $k$ 를 이용하여  $k_i$ 의 가장 큰 값에 대한 각  $k_i$ 의 상대적인 비를 구한 후에 합이  $m$ 이 되도록  $w_i$ 를 정할 수 있다.  $D_i$ 는 제품 전체의 好感度を 나타내며,  $D_i$ 가 클수록 좋은 값이므로 安定性設計 方法은 제품 전체의 好感度  $D_i$ 를 最大로 하는 設計變數의 수준을 찾는 것이다.

### 3.2 多性能 特性値의 安定性設計 節次

多性能 特性値의 경우의 安定性設計 節次는 다음과 같다.

#### 단계 1) 性能特性値別 安定性設計

다구찌의 單一 性能特性値의 安定性設計 節次에 따라 각 性能特性値別 安定性設計를 하여 性能特性値別 最適水準을 선택한다. 단, 望目 特性値의 경우는 다구찌의 2단계 最適化 過程에 의하여 구한다.

#### 단계 2) 因子의 分類

단계 1)에서 얻어진 각 性能特性値別 最適水準의 設計變數들이 서로 어떤 關係에 있는가를 <Table 2>와 같이 分類한다. 만일 각 性能特性値別 最適水準이 모두 일치하면 最適水準이 결정된다. 만일 交互作用이 있으면 主效果보다 우선적으로 고려한다.

#### 단계 3) 最適化 段階

각 性能特性値의 SN比나 望目 特性値의 平均에 有意한 因子중 非相衡한 것(2군, 4군)의 最適水準을 결정한다.

#### 단계 4) 折衷 段階

각 性能特性値의 SN比에 有意한 因子중 相衡하는 것(3군, 5군)이 있으면 式(8)의 好感度 函數를 最大로 하는 設計變數를 最適水準으로 결정한다.

#### 단계 5) 調整 段階

(i) 望目 特性値別로 독립적인 하나 이상의 調整因子(6군)가 있는 경우, 각 性能特性値에 대하여 가장 큰 感度を 가지는 調整因子를 택하여 각 性能特性値별로 平均에 調整할 수 있다.

(ii) 性能特性値別로 다른 性能特性値와 중복되는 調整因子(6군)가 있는 경우  
 $y_i(x_a, x_b) = C_i, \quad i = 1, 2, \dots, m$

단,  $x_a$  : 조정인자

$x_b$  : 조정인자를 제외한 설계변수

를 검토하여 潛在的 相衡現象이 발생하는지 파악한 후에 目標値에 調整한다.

(iii) (ii)에서 調整이 안되면 4군을 포함시켜 검토하여 調整한다.

(iv) (iii)에서 調整이 안되면 7군을 포함시켜 검토하여 調整한다.

(v) (iv)까지 調整이 안되면 5군까지 포함시켜 相衡現象을 고려하여 調整한다.

즉, 目標値 調整과 다른 특성치의 最適水準 변경에 대한 相反關係(예, 期待損失을

기준)를 검토하여 調整한다.

#### 단계 6) 整理 段階

SN比와 平均에 有意하지 않고 非相衡한 인자(1군)는 費用이나 便利性を 고려하여 水準을 선택한다.

본 절차에서 望目 特性值일 경우에 調整因子는 工學的으로 사전 判별이 가능한 경우도 있겠지만, 감도에 관한 分散分析을 통하여 調整因子를 선정하며 상충인자를 절충한 후에 단계 5의 절차에 따라 性能特性值를 目標值에 근접하도록 한다. 제시된 好感度 函數를 사용하여 相衡因子를 折衷하는 節次는 단순하고 적용하기가 쉬우므로 實用的이라 할 수 있다. 또한 統計的 有意性, 相衡現象, 性能特性值의 형태에 따라 設計變數를 7가지로 구분하여 그 特性에 따라 因子의 水準을 決定하는 단계를 체계적으로 정립하였으며, 제시된 安定性設計節次를 이용할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다.

## 4. 既存 事例에의 適用

제시된 다성능특성치의 안정성설계방법에 대한 타당성을 보이기 위하여 망소, 망대 특성치로만 이루어진 사례와 망목특성이 포함된 사례를 선정하여 재분석하고 기존의 방법과 비교하고자 한다.

### 4.1 자동차 液晶計器板의 직접소자 性能改善 事例

Pirring(1986)의 직접소자의 性能改善 事例로서 液晶計器板의 性能特性值를 다음과 같이 두개로 선택할 수 있다.

- ① 결합부위의 電氣的 抵抗(望小 特性值)  
許容規格値는 3000(ohms)
- ② 직접소자의 結合力(望大 特性值)  
許容規格値는 300(pounds)

고려되는 設計變數와 水準을 <Table 3>에 나타내었다.

< Table 3 > Control Factors and Factor Levels

factors	level
A	4 levels(D1, H-20-E, 88-1, H-20E-175)
B	2 levels(90min @ 90℃, 60min @ 120℃)
C	2 levels(Cu, Hi)
D	2 levels(Yes, No)
E	2 levels(Tin, Silver)

直交配列  $L_8(2^7)$ 에 할당하여 실험한 결과는 <Table 4>와 같다.

〈 Table 4 〉 The Result of Experiment

exp. No.	A	B	C	D	E	SN ratio (1)	SN ratio (2)
1	1	1	1	1	1	-23.42	56.35
2	1	2	2	2	2	-53.44	54.67
3	2	1	1	2	2	-15.02	55.40
4	2	2	2	1	1	-56.34	59.09
5	3	1	2	1	2	-73.51	58.98
6	3	2	1	2	1	-20.00	57.99
7	4	1	2	2	1	-58.99	54.67
8	4	2	1	1	2	-15.76	59.30

단계 1) 性能特性値別 安定性設計

각 分析 대상별로 有의한 因子의 水準을 SN比가 최대가 되도록 결정하면 〈Table 5〉와 같다.

〈 Table 5 〉 Optimal Level of Characteristics

factor	characteristic-1		characteristic-2	
	SN ratio	optimal level	SN ratio	optimal level
A <sub>1</sub>	-38.43		55.51	
A <sub>2</sub>	-35.68	○	57.25	
A <sub>3</sub>	-46.76		58.49	○
A <sub>4</sub>	-37.38		56.99	
B <sub>1</sub>	-42.74		56.35	
B <sub>2</sub>	-36.39	○	57.76	○
C <sub>1</sub>	-18.55	○	-	-
C <sub>2</sub>	-60.57			
D <sub>1</sub>	-42.26		58.43	○
D <sub>2</sub>	-36.86	○	55.68	
E	-	-	-	-

단계 2) 因子의 分類

〈Table 5〉에서 보면 性能特性値 (1)의 最適水準은 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>2</sub> 이고 性能特性値 (2)의 最適水準은 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>D<sub>1</sub> 이다. 단, 性能特性値 (2)의 인자 A는 有意水準이 0.05보다 크지만 거의 0.05에 가까운 값이므로 有의한 인자에 포함시켰다. 設計變數들을 分類하면 다음과 같다.

因子 A : 3군      因子 D : 3군  
 因子 B : 2군      因子 E : 1군  
 因子 C : 2군

### 단계 3) 最適化 段階

因子 B, C는 2군에 속하므로 最適水準을 因子 B는 2水準, 因子 C는 1水準으로 설정할 수 있다.

### 단계 4) 折衷 段階

相衡因子는 3군에 속하는 因子 A와 D이므로 이 因子들의 각 수준의 조합에 대하여 性能特性值의 SN比를 추정하면 <Table 6>과 같다.

( Table 6 ) The Estimates of SN Ratio for Conflicting Factors

No.	A	D	SN <sub>1</sub>	SN <sub>2</sub>
1	1	1	-16.95	57.58
2	1	2	-11.55	54.83
3	2	1	-14.20	59.32
4	2	2	- 8.80	56.57
5	3	1	-25.28	60.56
6	3	2	-19.88	57.81
7	4	1	-15.90	59.06
8	4	2	-10.50	56.31

<Table 6>의 각 性能特性值의 SN比의 推定值로서 個體 好感度  $d_{ij}$ 와 全體 好感度  $D_j$ 를 구하면 <Table 7>과 같다.

( Table 7 ) Individual Desirabilities and Overall Desirability

No.	$d_{1j}$	$d_{2j}$	$D_j$
1	0.7514	0.5152	0.6222
2	0.9121	0.2092	0.4368
3	0.8313	0.7789	0.8047*
4	1	0.3871	0.6222
5	0.5340	1	0.7308
6	0.6707	0.5470	0.6057
7	0.7814	0.7361	0.7584
8	0.9452	0.3571	0.5810

\* : optimum value

여기서,  $\gamma$ 는 일반적으로 2를 많이 사용하므로 동일하게 2를 주고 加重值  $w_i$ 는 1로 주었다. <Table 7>의 結果를 보면 因子  $A$ 와  $D$ 의 最適水準은  $A_2 D_1$ 이다.

단계 5) 調整 段階

本 事例에서는 望目 特性値가 없으므로 調整할 需要가 없다.

단계 6) 整理 段階

因子  $E$ 는 1군에 속하므로 經濟性 및 便利性 등을 고려하여 정하면 된다.

따라서 다구찌의 방법과 동승훈의 期待加重損失의 경우는  $A_2 B_2 C_1 D_2$ 이지만 본 연구의 結果에 의한 最適水準은  $A_2 B_2 C_1 D_1$ 으로 다르게 나타남을 알 수 있으며 각 性能特性値의 全變動에 대한 寄與率을 기준으로한 Pirrung(1986)의 結果와 일치한다(동승훈(1990)은 각 性能특성치에 동일한 가중치를 줄 경우에 因子  $D$ 만을 相衡因子로 하여 折衷한 結果에 따라  $D_2$ 를 最適水準으로 정하였다).

본 연구의 結果와 期待加重損失 및 SN比의 합에 의한 結果를 비교하여 보면 <Table 8>과 같다.

< Table 8 > The Comparison of Results

No.	$D_j$	sum of SN ratios	expected weighted loss
1	0.6222	40.63	49.5450
2	0.4368	43.28	14.2889
3	0.8047*	45.12	26.3027
4	0.6222	47.77*	7.5858*
5	0.7308	35.28	337.2873
6	0.6057	37.93	97.2747
7	0.7584	43.16	38.9045
8	0.5810	45.81	11.2202

\* : optimum value

性能特性値들의 SN比 간의 線形的 從屬關係를 조사하기 위하여 각 性能特性値의 SN比들 간의 共分散 行列을 구하여 그것의 固有値를 Khuri와 Conlon(1981)의 방법에 의하여 계산하여 본 結果 最小 固有値의 값이 28.37이기 때문에 線形的인 關係가 없음을 알 수 있으므로 改良된 好感度 函數를 충분히 사용할 수 있다.

또한 好感度 函數의 係數들( $\gamma, SN_i^L, SN_i^H$ )의 변화에 따라 好感度 函數의 最適水準이 어떻게 변화하는지 敏感度 分析을 하여 선택된 최적수준을 <Table 9>에 정리하였는데  $\gamma$ 의 계수에는 매우 둔감하고 허용규격치에는 약간 민감하였다. 따라서 성능특성치들 간에 허용규격치를 균형있게 잡으면 본 연구의 호감도 함수를 이용한 安定性設計節次의 적용은 적절하다고 판단된다.

< Table 9 > Sensitivity Analysis for Parameters of Desirability Function

$\gamma$	$SN_2^H$	$SN_1^L$ (Lower Tolerance Limit)				
	(Upper T.L.)	-100 ( $10^{-5}$ )	-70 (3000)	-50 (300)	-40 (100)	-26.99 (20)
0.5	30 (30)	3	3	4	4	4
	40 (100)	3	3	3	4	4
	50 (300)	3	3	3	3	4
	54.77 (500)	5	3	3	3	3
1	30 (30)	3	3	4	4	4
	40 (100)	3	3	3	4	4
	50 (300)	3	3	3	3	4
	54.77 (500)	5	3	3	3	3
2	30 (30)	3	3	4	4	4
	40 (100)	3	3	3	4	4
	50 (300)	3	3	3	3	4
	54.77 (500)	5	3	3	3	3
3	30 (30)	3	3	4	4	4
	40 (100)	3	3	3	4	4
	50 (300)	3	3	3	3	4
	54.77 (500)	5	3	3	3	3
5	30 (30)	3	3	4	4	4
	40 (100)	3	3	3	4	4
	50 (300)	3	3	3	3	4
	54.77 (500)	5	3	3	3	3

Note

3 :  $A_2 D_1$ , 4 :  $A_2 D_2$ , 5 :  $A_3 D_1$

### 4.2 양면 SMT 電子組立 作業에서 땀남개선 事例

또한 望目 特性值가 多數가 있는 경우는 調整段階가 복잡하여지지만, 이런 사례는 드물게 나타난다. 이 중에서 Peace(1993)의 땀남개선 事例를 선택하여 제시된 방법의 적용 가능성을 입증하기 위해 재분석하고자 한다. 性能特性值들을 다음과 같이 3가지를 선정하여 실험하였다.

(i) 땀남의 質量(望目 特性值)

目標値 = 4.2 grams

許容規格値 = ± 2.0 grams

(ii) 뿔납의 높이(望目 特性値)

目標値 = 10 mils

許容規格値 = ± 4 mils

(iii) 接着力(望目 特性値)

許容規格値 = 8 inch-ounces

고려되는 因子는 A, B, C, D, E, F의 6개의 因子를 선정하고, 이때 因子 A와 B의 交互作用의 效果도 알고자 하였다. 水準을 모두 2水準으로 하여  $L_8(2^7)$  直交配列에 할당하고 두개의 雜音을 고려하여 두 번 反復實驗을 행한 觀測値의 結果는 <Table 10>에 주어졌다.

< Table 10 > Double-sided SMT Assembly Experiment

exp.	A						solder paste mass				solder paste height				glue torque			
	×						M1		M2		M1		M2		M1		M2	
	No.	A	B	C	D	E	F	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1
1	1	1	1	1	1	1	4.15	3.42	3.95	3.80	11.00	10.62	8.85	11.00	15.90	12.95	11.60	13.55
2	1	1	1	2	2	2	4.13	4.46	4.13	3.33	9.23	9.56	9.23	7.73	15.33	13.66	13.50	10.70
3	1	2	2	1	1	2	3.15	3.12	2.97	2.02	11.28	11.58	9.13	9.78	15.02	13.29	10.74	10.39
4	1	2	2	2	2	1	2.99	2.29	2.63	2.64	11.15	10.80	11.15	11.15	16.55	13.60	14.70	14.20
5	2	1	2	1	2	1	4.22	4.52	4.87	4.07	11.97	11.92	12.27	10.77	19.35	19.70	20.80	18.00
6	2	1	2	2	1	2	5.74	6.73	6.53	6.38	8.90	9.55	7.05	9.20	18.48	20.11	17.46	19.41
7	2	2	1	1	2	2	4.72	5.70	5.35	5.35	13.19	13.84	13.49	13.49	20.95	22.58	22.38	21.88
8	2	2	1	2	1	1	3.27	3.57	4.07	3.12	5.72	5.67	3.87	4.52	12.92	13.27	11.92	11.57

각 性能特性値別 最適水準을 정리하여 <Table 11>에 나타내었다.

<Table 11>에서 보면 性能特性値 (1)의 最適水準은  $A_2 B_1 F_1$ 이고, 性能特性値 (2)의 最適水準은  $B_2 D_2 F_1$ 이며 性能特性値 (3)은 最適水準이  $A_2$ 이다. 단, <Table 11>에서 괄호로 표기된 因子는 유의하지는 않지만 거의 유의수준에 가깝기 때문에 유의하다고 간주하였다. 따라서 設計變數들을 분류하면 다음과 같다.

- A : 2군      D : 2군
- B : 3군      E : 6군
- C : 6군      F : 2군



〈 Table 11 〉 Optimal Level of Characteristics

factor	solder paste mass			solder paste height			glue torque	
	SN ratio	opt. level	sensitivity ( $S_1$ )	SN ratio	opt. level	sensitivity ( $S_2$ )	SN ratio	opt. level
$A_1$	18.504		10.268	23.951	-	20.139	22.388	
$A_2$	21.512	○	13.569	22.918		19.147	24.971	○
$B_1$	21.415	○	13.164	20.910		19.863	23.979	-
$B_2$	18.600		10.673	25.959	○	19.423	23.380	
$C_1$	20.115	-	11.989	24.538	(○)	21.164	24.138	(○)
$C$	19.901		11.848	22.331		18.122	23.220	
$D_1$	19.539		11.884	17.899		18.315	22.826	
$D_2$	20.476	(○)	11.953	28.970	○	20.971	24.532	(○)
$E_1$	20.393	(○)	10.964	23.958	-	19.103	23.337	
$E_2$	19.623		12.873	22.911		20.183	24.022	-
$F_1$	21.708	○	12.640	27.008	○	20.634	24.513	-
$F$	18.308		11.197	19.862		18.652	22.846	
$A_1 B_1$	20.151		11.855	20.414		19.659	22.345	
$A_1 B_2$	16.858	-	8.681	27.488	-	20.620	22.430	-
$A_2 B_1$	22.679		14.473	21.407		20.066	25.613	
$A_2 B_2$	20.335		12.665	24.430		18.227	24.330	

因子  $A$ 와  $D$ ,  $F$ 는 2군에 속하므로 最適水準으로서 因子  $A$ 와  $D$ 는 각각 2水準, 因子  $F$ 는 1水準으로 설정할 수 있다. 因子  $B$ 는 3군에 속하는 相衝因子이므로 각水準別 SN比를 추정하면 〈Table 12〉와 같다.

〈 Table 12 〉 Estimates of SN Ratio for a Conflicting Factor

$B$	$SN_1$	$SN_2$	$SN_3$
1	24.6194	30.0189	-
2	21.8047	35.0675	-

個體 好感度  $d_{ij}$ 와 全體 好感度  $D_j$  및 期待加重損失(각 성능특성치에 동일한 가중치 부여)과 SN比의 합에 의한 결과를 〈Table 13〉에 정리하였다.

〈 Table 13 〉 The Comparison of Results

No.	$d_{1j}$	$d_{2j}$	$D_j$	sum of SN ratios	expected weighted loss
1	1	0.5756	0.7587	54.6384	7.2142*
2	0.5961	1	0.7721*	56.8722*	7.2508

\* : optimum value

〈Table 13〉에서 보면 本研究의 結果와 SN比의 合의 結果가 일치하고 있으나, 期待加重 損失은 다르게 나타난다. 望目 特性値의 調整因子는 6군에 속하는 因子 C와 E인데 各水準의 平均値를 추정하면 〈Table 14〉와 같다.

〈 Table 14 〉 Estimates of Mean for Adjustment Factors

characteristic-1		characteristic-2	
$E_1$	$E_2$	$C_1$	$C_2$
3.5988	4.6131	11.5113	8.4050

望目 特性値의 因子 E와 C는 各 性能特性値 1과 2에만 有의한 調整인자이므로 感度로부터 性能特性値 (1)의 因子 E의 各水準에서의 平均을 推定하여 目標値와 일치하도록 水準을 調整하고 性能特性値 (2)의 因子 C의 各水準에서의 平均을 推定하여 目標値와 일치하도록 水準을 調整할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 절차에 따라 구한 設計變數들의 最通水準은 A, B, D, F<sub>1</sub>이 된다.

그리고 性能特性値들의 SN比 간의 線形的 從屬關係를 조사하기 위하여 各 性能特性値別 SN比들 간의 共分散行列을 구하여 그것의 固有値를 계산하여 본 결과에 따르면 最小固有値의 값이 6.79이기 때문에 線形的인 關係가 없음을 파악하였다.

### 5. 結論

多性能 特性値의 安定性設計에 있어서는 먼저 既存의 研究結果들을 考察하고 性能特性値들 간에 相衡現象을 절충할 수 있는 測度로서, 各 실험점에서 다구찌가 제안한 方法에 의하여 各 性能特性値別 SN比를 推定하였으며 이것들을 결합한 측도인 개량된 好感度 函數를 제시하였다. 개량된 好感度 函數는 계산이 간략하고 적용하기 쉬우며 性能特性値들 간에 서로 均衡적으로 잘 조화된 最通設計變數의 수준을 찾을 수 있다. 또한 이를 이용한 새로운 安定性설계절차는 設計變數를 통계적 有의성, 상충현상, 성능특성치의 형태에 따라 7가지로 구분하여 최적화, 절충, 조정, 마무리 단계에서 이들의 수준을 결정하는 체계

적인 방법을 제시하고 이런 절차에 따라 기존의 두가지 사례를 재분석하여 제시된 방법의 유용성을 입증하였다. 두가지 既存事例외에 多數의 (數值) 實驗에 적용하여 비교한 결과에 따르면 다구찌가 주장하는 SN比의 합과 동승훈의 期待加重損失을 이용하는 방법은 제시된 방법보다 어느 하나의 性能特性値는 상당히 좋으나 다른 性能特性値는 매우 나쁜 設計變數의 水準을 선택하는 경향이 있다.

이 외에도 多數의 實際事例에 적용하여 제시된 방법의 長短點, 相衝現象의 여러가지 樣態, 性能特性値, 設計變數와 이의 水準選擇에 따른 固有技術 측면에서의 相衝現象의 除去方法 등에 관한 研究가 계속적으로 요망된다.

### 參考文獻

- [ 1 ] 동승훈(1990), 「性能特性이 多數인 경우의 파라미터 設計에 관한 研究」, 碩士學位論文, 韓國科學技術院.
- [ 2 ] 염봉진, 고선우, 김성준 (1990), “제품 및 공정설계를 위한 다구찌방법,” 「경영과학」, 제7권, 2호, pp. 3-21.
- [ 3 ] Biles, W. E. (1975), “A Response Surface Method for Experimental Optimization of Multi-Response Processes,” *Industrial and Engineering Chemistry. Process Design and Development*, Vol. 14, pp. 152-158.
- [ 4 ] Castillo, E. D. and Montgomery D. C. (1993), “A Nonlinear Programming Solution to the Dual Response Problem,” *Journal of Quality Technology*, Vol. 25, pp. 199-204.
- [ 5 ] Derringer, G. and Suich, R. (1980), “Simultaneous Optimization of Several Response Variables,” *Journal of Quality Control*, Vol. 12, pp. 214-219.
- [ 6 ] Elsayed, E. A. and Chen, A. (1993), “Optimum Levels of Process Parameters for Products with Multiple Characteristics,” *International Journal of Production Research*, Vol. 31, pp. 1117-1132.
- [ 7 ] Harrington, E. C. Jr. (1965), “The Desirability Function,” *Industrial Quality Control*, Vol. 21, pp. 494-498.
- [ 8 ] Khuri, A. I. and Conlon, M. (1981), “Simultaneous Optimization of Multiple Responses Represented by Polynomial Regression Function,” *Technometrics*, Vol. 23, pp. 363-374.
- [ 9 ] Lee, Sang Heon (1991), *Efficient Design and Optimization of Robust Parameter Experiments*. Unpublished Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
- [ 10 ] Lind, E. E., Goldin, J. and Hickman, J. R. (1960), “Fitting Yield and Cost Response Surfaces,” *Chemical Engineering Progress*, Vol. 56, pp. 62-69.
- [ 11 ] Logothetis, N. and Haigh, A. (1988), “Characterizing and Optimizing Multi-

- Response Process By the Taguchi Method," *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 4, pp. 159–169.
- [12] Myers, R. H. and Carter, W. H., Jr. (1973), "Response Surface Techniques for Dual Response Systems," *Technometrics*, Vol. 15, pp. 301–317.
- [13] Peace, G. S. (1993), *Taguchi Methods : A Hands-On Approach*, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [14] Pignatiello, J. J. (1993), "Strategies for Robust Multiresponse Quality Engineering," *IIE Transactions*, Vol. 25, No. 3, pp. 5–15.
- [15] Pirrung (1986), "Optimization of Bond Strength and Contact," ITT SWF (West Germany), *Fourth Symposium on Taguchi Method*, American Supplier Institute.
- [16] Vining, G. G. and Myers, R. H. (1990), "Combining Taguchi and Response Surface Philosophies: A Dual Response Approach," *Journal of Quality Technology*, Vol. 22, pp. 38–45.
- [17] Walters, F. H. and Parker, L. R., Morgan, S. L., and Deming, S. N. (1991). *Sequential Simplex Optimization; A Technique for Improving Quality and Productivity in Research, Development, and Manufacturing*, CRC Press.
- [18] 田口玄一, 吉澤正孝 (1988), 「品質工學講座 1 : 開發 設計段階の品質工學」, 日本規格協會.