

一般論文

제품 및 공정설계를 위한 다구찌 방법

염봉진* · 고선우* · 김성준*

The Taguchi Method for Product and Process Design

Bong-Jin Yum*, Sun-Woo Ko* and Seong-Jun Kim*

요 약

제품 및 공정의 설계와 개선을 위한 다구찌 방법은 제품의 품질향상을 위한 획기적 방법으로 최근 많은 관심의 대상이 되고 있다. 본 논문에서는 품질문제 해결을 위한 다구찌의 기본 전략을 종래의 전통적 개념과의 비교를 통해 소개하였으며, 구체적 방법으로서 직교배열에 의한 실험 계획과 SN비를 바탕으로 한 파라미터 설계방법에 대해 다구찌의 견해와 다른 대안들을 함께 소개하고 앞으로의 연구방향에 대해 논의하였다.

1. 서 론

제품 및 공정의 설계 또는 개선을 위한 다구찌 방법은 제품의 품질향상을 위한 획기적 방법으로 최근 많은 관심과 논의의 대상이 되고 있다.

다구찌 방법의 기본개념은 다음의 몇가지로 요약할 수 있다.

1. 품질관리 활동은 제품설계, 늦어도 공정설계 단계에서 이루어지는 것이 바람직하다. 왜냐하면 그 다음 단계인 공정관리나 최종제품의 검사 등을

통해서는 제품의 고유 품질수준을 향상시키기 어렵기 때문이다.

2. 제품의 성능특성(또는 품질특성)은 잡음의 영향으로 말미암아 목표치 또는 이상치를 일관성 있게 유지하지 못하고 변동하기 마련이다. 이러한 성능변동을 손실의 개념을 도입하여 정량화 함으로써 품질문제를 객관적, 공학적 문제로 다룰수 있다.

3. 높은 품질의 제품이란 소비자에게 끼치는 손실이 작은 제품을 의미한다. 손실은 성능변동으로

* 한국과학기술원 산업공학과

야기되기 때문에 제품이나 공정은 생산된 제품의 특성치가 잡음에 둔감하도록(즉, 잡음하에서도 성능변동이 심하지 않도록) 설계되어야 한다.

다구찌는 위와 같은 전략을 수행함에 있어 소위 직교배열(orthogonal array)이라 부르는 실험계획을 이용하여 데이터를 수집할 것과, 그 데이터로부터 유도된 SN비(signal-to-noise ratio)를 분석함으로써 제품이나 공정의 최적조건을 결정할 것을 제안하고 있다.

제품의 품질향상을 위한 다구찌의 기본전략은 그에서 비롯된 새로운 개념이라기 보다는 오랫동안 많은 사람들에 의해 추구되어 온 목표였다고 보는 것이 타당할 것이다. 다만, 다구찌의 공헌은 그와 같은 전략을 수행하는데 필요한 구체적인 방법을 마련하였다는 것과, 보다 중요한 것은 여러 분야의 실제 문제해결에 응용하여 그 방법의 효용성을 입증하였다는 데 있다고 믿어진다.

현재 다구찌 방법에 대해 많은 논의가 있으나 그의 기본전략에 대해서는 이론이 없는 것으로 보인다. 본 논문에서는 다구찌의 기본전략을 전통적 개념과 비교하여 소개하고 아울러 구체적인 방법으로 직교배열에 의한 실험과 SN비를 사용한 분석방법에 대해서도 논의하고자 한다.

2. 품질과 손실

2.1. 품질의 정의

일반적으로 제품의 품질이란 “사용하기에 적합함(fitness for use)”을 의미한다. 또한 제품검사의 목적으로는 도면에 표시된 규격에 부합되는 것(conformance to specification)을 뜻하기도 한다. 첫 번째 정의는 소비자 입장은 강조되어 있으나 지나치게 포괄적이고 품질의 개념이 정량화되어 있지 않다는 단점이 있다. 반면에 두 번째 정의는 품질의

개념을 정량화 할 수 있다는 점에서 일단 바람직하다. 즉, 제품이 규격에 맞는가 맞지 않는가를 판정함으로써 양, 불량율 결정할 수 있으며, 또한 현재의 공정에서 생산되는 제품의 불량률을 계산하여 품질문제 해결의 한 기준을 마련할 수 있다. 그러나, 이 두 번째 정의는 생산자의 입장은 강조되어 있으나 소비자의 관점이 반영되어 있지 않다는 점에서 매우 일방적인 정의라고 할 수 있다. 규격에 맞는 제품이라고 해서 모두 같은 정도의 적합도를 갖는 것은 아니다. 소비자는 단지 규격에 맞느냐 맞지 않느냐로 제품을 선택하지 않으며, 가능한 선택범위 내에서 가장 높은 적합도를 갖는 제품을 선택하기 마련이다. 따라서, 두 번째 정의는 현재와 같은 경쟁적 시장구조 하에서 생산자로 하여금 품질에 대해 매우 안이한 자세를 갖게할 우려가 있는 것이다.

여기서 품질에 관한 다구찌의 정의를 살펴보자. 다구찌[16]는 “품질이란 제품이 출하되어 사용되어질 때 야기되는 사회적 손실”이라고 정의하였다. 이와 같이 품질을 손실로서 파악하고자 하는 다구찌의 철학은 품질이란 “바람직스러운 것”, 또는 “값어치(value)”와 연관시켜 온 우리의 전통적 관점에서 비교해 볼 때, 일견 어색하기도 하고 다소 충격적이기도 하다. 다구찌에 의하면 품질을 값어치와 관련시켜 생각하는 것은 개개인의 효용성(utility)에 의존하는 것으로 마케팅 또는 제품기획의 관점에서는 바람직할지 모르나 품질문제를 객관적인 공학적 문제로 다루기에는 부적당하다는 것이다. 그렇다면 이 “사회적 손실”은 어디에서 연유하는 것인가?

2.2. 손실의 원인

한 제품은 적어도 하나의 성능특성을 갖는다. 예를 들어, 자동차의 성능특성으로서 리터당 주행거리, 제동거리, 엔진의 소음, 배기가스중 일산화

탄소의 함량 등을 생각할 수 있다. 한 특성에는 일반적으로 가장 바람직한 값이 주어져 있으며, 이를 이상치 또는 목표치라 부른다. 예를 들어, 자동차의 경우에 리터당 주행거리는 클수록 좋으므로 그 이상치는 이론적으로 가능한 최대치가 될 것이며, 배기가스의 일산화탄소의 함량은 환경오염의 관점에서 작을수록 좋으므로 그 이상치는 0이라고 볼 수 있다. 또한 엔진점화를 위한 전기회로의 출력전압은 그 정격치(또는 목표치)가 예를 들어 20kV로 정해져 있을 수 있다.

한 제품의 성능특성이 언제 어디서나 목표치를 유지할 수 있다면 이상적이라 하겠으나, 대부분의 경우에 사용환경, 부품의 노후화, 불완전 제조 등의 잡음(noise) 요인으로 말미암아 목표치로부터 변동하기 마련이다. 이와 같은 성능특성의 변동이 손실을 야기하는 주요 원인이 된다.

다구찌[16]는 이상과 같은 손실의 개념을 소위 손실함수를 도입하여 정량화하고 있다.

2.3. 손실함수

성능특성치를 y 라 하고 m 을 y 의 목표치 또는 이상치라 하자. 또한 제품의 수명기간중 임의의 시점에서 y 가 m 으로부터 벗어남으로 인하여 소비자가 감수해야 할 손실을 화폐단위로 나타낸 것을 손실함수 $L(y)$ 라 하자. 성능특성치 y 는 양의 연속적인 수치라 할 때 다음의 세 종류로 나눌수 있다.

1. 작을수록 좋은 경우(즉, $m=0$)
2. 클수록 좋은 경우(즉, $m=\infty$)
3. 특정한 목표치가 주어진 경우(즉, $0 < m < \infty$)

일반적으로 손실함수 $L(y)$ 의 정확한 형태는 알려져 있지 않거나 매우 복잡할 수 있다. 따라서 $L(y)$ 의 근사식을 생각해 보자. 특정한 목표치가 주어진 경우, $y=m$ 에서 $L(y)$ 를 Taylor series 전개하면

$$L(y) = L(m) + L'(m)(y-m) + \frac{L''(m)}{2} (y-m)^2 + \dots$$

과 같이 된다. 여기서 y 의 2차항까지만을 고려하고, $y=m$ 일 때 손실은 최소치를 가지며 그 값이 0이라고 가정하면 $L(m)=0, L'(m)=0$ 이 되므로,

$$L(y) \approx k(y-m)^2 \dots\dots\dots (1)$$

으로 근사화할 수 있다. 식 (1)에서 k 는 어떤 y 값에 대해 그에 대응하는 $L(y)$ 의 값이 알려져 있다면 정할 수 있는 상수이다. 예를 들어, 그림 1에서 보는 바와 같이 $(m-\Delta, m+\Delta)$ 가 소비자의 허용차 구간이며 y 가 이 구간을 벗어날 때 소비자가 제품을 수리하거나 폐기처분하는데 W 원의 비용이 든다고 하자. 그러면, 식(1)로부터 $k=W/\Delta^2$ 로 정해진다.

다음으로, y 가 작을수록 좋은 경우에는 다음과 같은 손실함수를 생각한다.

$$L(y) = ky^2$$

여기서 k 는 미지의 상수이며, 소비자 허용차 구간과 W 가 정해지면 $k=W/\Delta^2$ 으로 결정된다. 단, 소비자 허용차 구간은 $(0, \Delta)$ 이다. y 가 클수록 좋은 경우에도 유사하게

$$L(y) = k/y^2$$

으로 정의되며, $k=W\Delta^2$ 이 된다. 단, 소비자 허용차 구간은 (Δ, ∞) 이다.

그림 1의 손실함수는 제품의 성능특성이 목표치로부터 얼마나 떨어져 있는냐에 따라 손실의 정도가 얼마나 달라지는지를 명확하게 나타내고 있다. 반면에 그림 2는 성능특성치가 허용차 구간내에 속하면 합격, 아니면 불합격이라는 종래의 이원적 개념에 대한 손실함수를 나타내고 있다. 그림 1에서 점 a, b, c 는 모두 허용차 구간내에 있으나 소비자의 관점에서 볼 때는 b 가 c 보다, a 가 b 보다 더욱 바

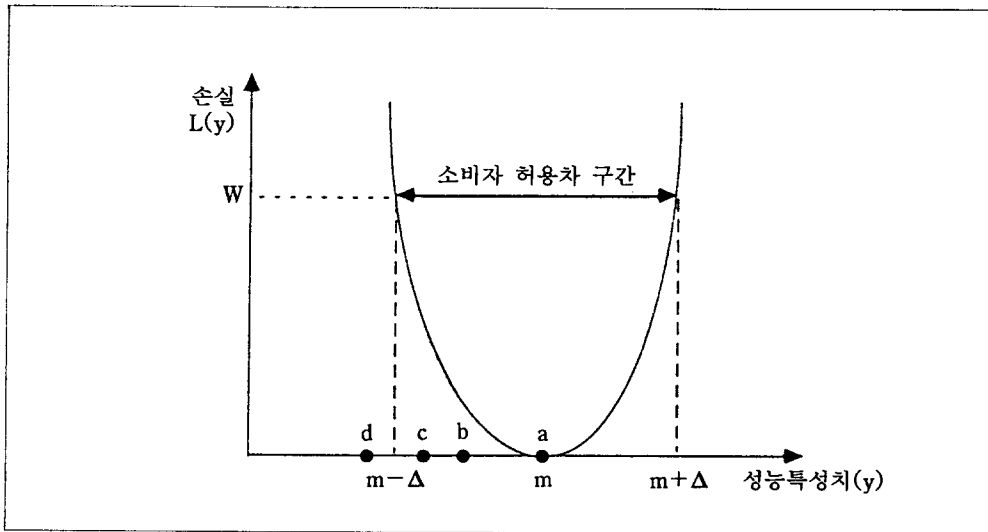


그림 1. 성능특성과 손실함수(특정한 목표치 m 이 주어져 있는 경우)

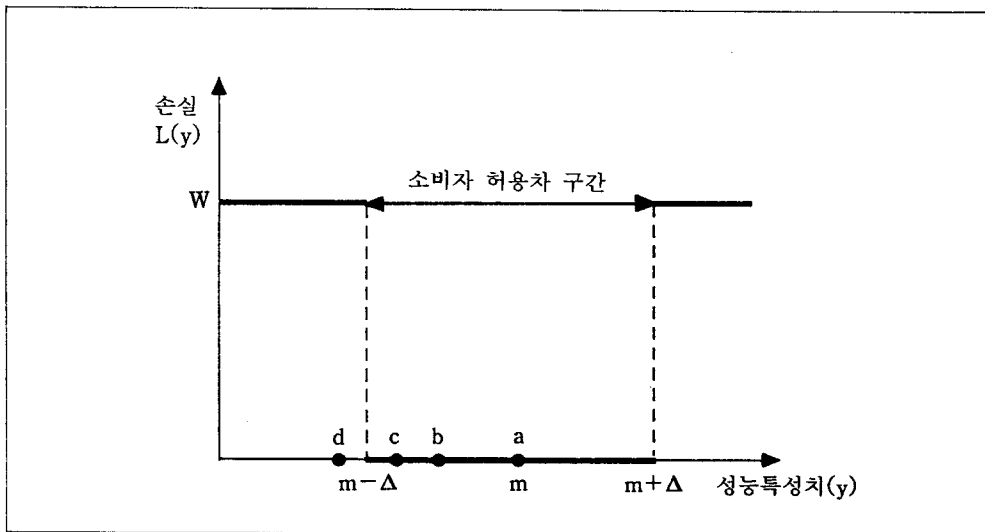


그림 2. 이원적 손실함수

람직할 것이다. 그림 1의 손실함수는 이와 같은 소비자의 선호도를 반영하고 있으나 그림 2의 이원적 손실함수는 이를 전혀 고려하고 있지 않다. 특히 그림 1과 2에서 점 c , d 를 비교해 볼 때 두

손실함수의 차이는 더욱 명확해진다. 즉 그림 1에서는 두 점에서의 손실의 차이가 거의 없으나 그림 2에서는 W 만큼의 차이가 있음을 나타내고 있다. 성능특성의 관점에서 c 와 d 는 거의 구별되지 않는

다는 점을 고려할 때, 종래의 이원적 손실함수는 소비자로부터 그 타당성을 인정받기 어렵다.

2.4. 사례(Taguchi & Wu[18])

농가의 비닐하우스에 사용되는 비닐쉬트의 두께에 대한 규격치는 $1.0 \pm 0.2(\text{mm})$ 이다. 어떤 비닐공장에서는 공정능력의 향상을 통해서 비닐쉬트의 두께의 변동을 0.02mm 이내로 유지할 수 있었다. 제품의 두께를 얇게할 수록 생산원가를 줄일수 있었으므로 위 공장에서는 평균 두께를 0.82mm 가 되도록 공정조건을 조정하여 생산된 제품을 농가에 보급하였다. 그림 3(위 상황을 가상적으로 나타낸 것)에 나타나 있듯이 위 공장에서 생산하는 비닐쉬트의 두께는 거의 대부분 허용차 안에 들어오기 때문에 불량률의 관점에서는 아무런 하자가 없었다. 그러나 이 공장의 비닐쉬트는 쉽게 파손되어

자주 교체해야 했으므로 그만큼 농가에 피해를 주게 되었다. 이 피해액은 두께의 평균치를 줄임으로써 위 공장이 취할수 있었던 이익보다 훨씬 컸으며, 따라서 사회적으로 막대한 손실이 야기되었던 것이다. 그 후 일본의 비닐쉬트 제조협회에서는 두께의 평균치가 1.0mm 여야 한다는 규정이 신설되었다고 한다.

위의 사례는 허용차안에 속하는 제품은 무조건 양호하다고 받아들이는 종래의 개념이 매우 비합리적일 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 간신히 규격을 만족하는 제품은 규격을 벗어난 제품과 거의 마찬가지로 손실을 가져다 줄 수 있으며, 다구찌의 손실함수는 이를 구체적으로 반영하고 있다.

2.5. 기대손실

제품의 성능특성치 y 는 시간과 장소에 따라 그

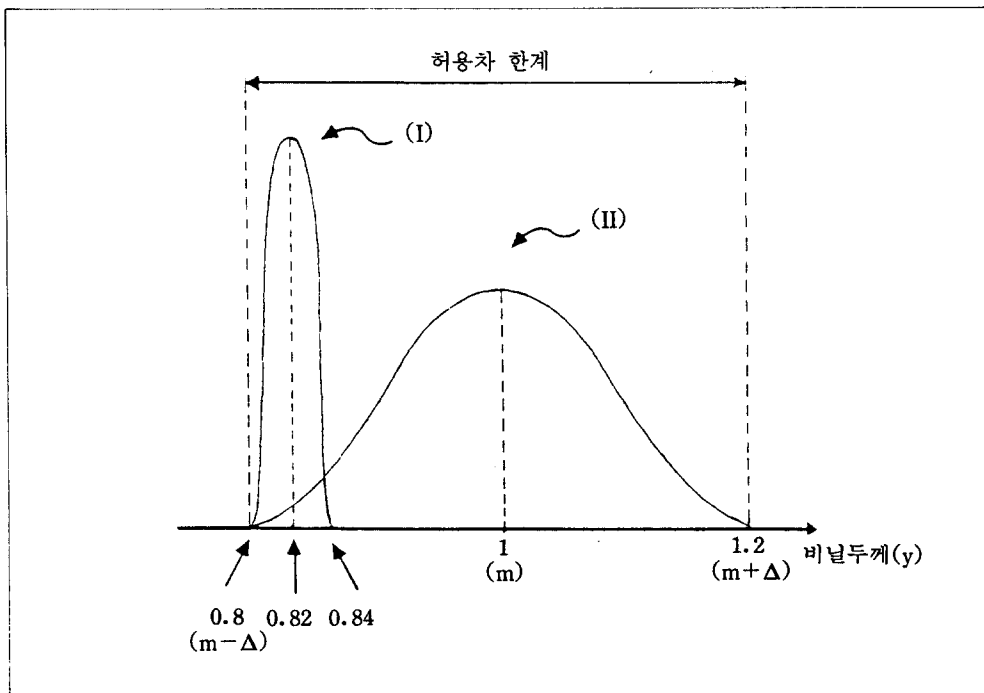


그림 3. 비닐 두께의 가상적 분포(I: 문제의 공장, II: 신설된 규격)

값이 확률적으로 변하므로 사용기간 동안의 기대 손실을 생각하는 것이 편리하다. 기대손실은 제품이 사용되어지는 기간 동안에 y 가 목표치로부터 변동함으로써 야기되는 손실의 평균치이다. 예를 들어, 특정한 목표치가 주어져 있는 경우의 기대 손실은

$$L = E\{L(y)\}$$

$$= E\{k(y-m)^2\}$$

$$= k\{\sigma^2 + (\mu - m)^2\}$$

으로 주어지며, 여기서 E 는 기대치를 의미하며, σ^2 는 y 의 분산, μ 는 y 의 평균치이다. 즉, 기대손실 L 은 특성치 y 의 평균과 목표치 m 과의 차이를 제곱하여 분산을 더한 양에 비례함을 알 수 있다. 또한 기대손실 L 을 작게하기 위해서는 y 의 분산을 줄여야 하며, y 의 평균치를 가능한한 목표치에 접근시켜야 함을 알 수 있다. 그밖에 작을수록 좋은 경우와 클수록 좋은 경우에 대해서도 표 1에 기대손실을 수록해 놓았다. 작을수록 좋은 경우에는 분산을 작게, 평균을 목표치 0에 가깝게 함으로써 기대손실을 작게 할 수 있으며, 클수록 좋은 경우에는 분산을 작게함과 동시에 평균을 가능한 한 크게 하는 것이 기대손실을 줄일수 있음을 알 수 있다.

앞의 2.4절에서 논의된 사례에서 문제의 공장에서 생산된 제품과 새로운 규격하에서 생산된 제품에 대한 기대손실을 구해보자(그림 3 참조). 두 경우 모두 제품의 두께가 정규분포를 따른다고 가정하

표 1. 성능특성의 종류와 기대손실

성능특성의 종류(y)	기 대 손 실 (L)
작을수록 좋은 경우	$E\{L(y)\} = E\{ky^2\} = k(\sigma^2 + \mu^2)$
클수록 좋은 경우	$E\{L(y)\} = E\left(\frac{k}{y}\right) \approx \frac{k}{\mu^2} \left(\frac{3\sigma^2}{\mu^2} + 1\right)$
특정한 목표치가 주어져 있는 경우	$E\{L(y)\} = E\{k(y-m)^2\} = k\{\sigma^2 + (\mu - m)^2\}$

자. 문제의 공장에서 생산된 제품의 평균은 $\mu = 0.82$ mm이고 두께(y)가 0.8과 0.84mm 사이에서 변화하고 있으므로 이 범위가 표준편차 σ 의 6배 정도에 해당된다고 생각하면

$$\sigma = (0.84 - 0.8) / 6 \approx 0.0067$$

따라서, 문제의 공장에서 생산된 제품에 대한 기대손실은

$$L = k(\sigma^2 + (\mu - m)^2) \approx 0.0324k$$

이다.

새로 정해진 규격하에서는 평균이 목표치에 일치하도록 요구하고 있으므로 $\mu = 1$ mm이고, y 는 0.8과 1.2mm 사이에서 변화할 수 있으므로 표준편차 σ 는

$$\sigma = (1.2 - 0.8) / 6 \approx 0.0667$$

로 근사화된다. 따라서, 기대손실은

$$L = k(\sigma^2 + (\mu - m)^2) = 0.0044k$$

이다. 두 경우를 비교해 보면 문제의 공장에서 생산된 제품의 기대손실은 새로 정한 규격하에서 생산된 제품의 기대손실의 약 7.4배가 됨을 알 수 있다.

2.6. 손실함수의 역할

“품질은 손실이다”라는 다구찌의 정의는 “높은 품질의 제품이란 사용상 적은 손실을 초래하는 것이다”라는 말로 바꾸어 표현할 수 있을 것이다. 우리가 전통적으로 사용해오던 허용차 구간, 또는 불량률의 개념은 소비자의 선호도 또는 제품선택의 패턴을 충분히 반영하고 있지 못하며 생산자로 하여금 품질문제에 대해 안이한 자세를 갖게할 우려가 있다.

요즘과 같은 경쟁체제 하에서는 모든 기업은 품질향상에 지속적인 노력을 기울여야 하며, 품질향상 계획은 목표치에 대한 성능특성치의 변동을 곱

임없이 줄여나가는데 초점을 맞추어야 한다. 그 결과 상대적으로 만족스러운 제품을 소비자에게 전달할 수 있음으로써 시장의 확보, 시장점유율의 증대 등을 통하여 사업을 유지·발전시킬 수 있을 것이다. 다구찌의 손실함수는 이와 같은 기업전략의 근거를 마련해 주고 있으며, 또한 그의 기대손실은 전략수행을 위한 방안, 즉 적은 손실을 갖는 높은 품질의 제품을 생산하기 위해서는 성능특성의 변동을 줄이고 평균을 가능한한 목표치에 접근시켜야 한다는 것을 제시해 주고 있다.

3. 제품 및 공정의 설계

3.1. 잡음과 대응책

제 2절에서 논의된 바와 같이 제품의 품질은 손실의 개념을 도입하여 평가될 수 있다. 한편, 손실은 제품의 성능특성이 목표치 또는 이상치를 유지하지 못하고 변동함으로써 야기된다. 이러한 성능변동의 원인을 잡음(noise)이라 부르며, 잡음은 외란, 내란, 불완전제조 등 세 종류로 나뉘어진다 [16].

외란은 사용조건이 바람직한 상태를 유지하지 못하고 변화하는 것을 의미하며, 예를 들어 사용 온도, 사용습도 등이 알맞은 상태로부터 벗어나거나, 입력전압이 정격치로부터 변화하는 것 등이다. 외란은 노후화라고도 불리며 이는 제품이 오랫동안 사용되어짐에 따라 내부 부품의 값이 정격치로부터 벗어남으로써 야기된다. 예를 들어 어떤 전자제품의 저항이 하나 있다고 하자. 제조시에는 저항치가 정격치 10Ω이었으나 사용기간이 경과함에 따라 정격치를 벗어나 15Ω이 되었다고 한다면 이 내란으로 말미암아 성능특성이 목표치를 벗어나 손실을 야기할 수 있는 것이다. 끝으로 불완전 제조에 의한 잡음은 제조시 작업자간의 변동, 기계간의 변동, 공정변수의 변동 등으로 말미암아 제품간 성능특성이 서로 달라지는 것을 의미한다.

높은 품질의 제품을 생산하기 위해서는 위에 언급한 여러 종류의 잡음에 대해 적절한 대응책을 마련해야 한다. 어떤 대응책이 가능할 것인가를 논의하기 전에 먼저 다음의 사례를 생각해 보자.

1950년대 초 일본의 Ina Tile Company에서는 건축재료인 타일을 생산하고 있었는데, 생산된 제품의 크기가 고르지 못하여(즉, 크기가 목표치로부터 심하게 변동하여) 어려움을 겪고 있었다. 이 품질문제를 해결하기 위해 조사를 실시한 결과, 그 원인이 타일을 구워내는 가마내의 온도분포가 균일하지 못하기 때문임을 알게 되었다. 다시 말하여, 타일 제조공정에서의 주요 잡음원은 가마내의 온도가 불균형하기 때문이라는 것을 발견하였으며 이는 불완전 제조에 속하는 잡음이라고 볼 수 있다. 이 회사에서는 위의 품질문제를 해결하기 위한 방법으로서 먼저 좀 더 고른 온도분포를 갖는 새로운 가마로 대체하는 방안, 또는 현재의 가마를 그대로 사용하되 좀 더 고른 온도분포를 얻을 수 있는 방법을 모색하는 방안 등을 검토하였다. 그러나 이러한 방법들은 많은 경비를 수반하거나 기술적으로 쉽게 해결할 수 없다는 결론에 도달하게 되었다. 따라서 그 대안으로 타일의 원료배합시 구성성분의 비율을 적당히 조절함으로써 이 문제를 해결할 수 있으리라는 점에 착안하게 되었으며, 여러가지의 구성비율에 대한 실험을 수행한 결과 무엇보다도 석회석의 함량을 현행 1%에서 5%로 증가시킴으로써 현재의 가마를 그대로 사용하고서도 타일 크기의 변동을 크게 줄일 수 있음을 발견하였다. 석회석은 값싸게 구할 수 있는 원료였으므로 위 회사에서는 매우 경제적이고 손쉬운 방법으로 고질적인 품질문제를 해결할 수 있었던 것이다.

일반적으로 잡음에 대한 대응책은 크게 두가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 잡음을 제거 또는 통제하려는 직접적인 방법이며, 다음은 간접적 또는 우회적인 방법으로서 잡음을 있는 그대로 놔둔 상태에서 성능특성이 잡음에 둔감하도록(즉, 잡음하

에서도 성능특성의 변동이 심하지 않도록) 제품이 나 공정을 설계하는 것이다. 위의 Ina Tile Company의 경우에서 현재의 가마를 보다 나은 성능의 새로운 가마로 교체한다거나 좀 더 엄격한 온도제어 방법을 강구하는 것은 직접적인 대응책이며, 원료 배합의 적절한 구성비를 찾는 것은 우회적인 대응책이다. 일반적으로 직접적인 대응책은 많은 경비와 노력을 필요로 하거나 기술적으로 불가능할 때가 많다. 반면에, 제품 및 공정의 적절한 설계를 통한 우회적 대응책은 대부분의 경우에 직접적인 것보다 훨씬 경제적이며 기술적으로도 용이할 수 있다. 다구찌는 이와 같은 간접적, 우회적 대응책을 위한 체계적인 방법을 제시하고 있다.

3.2. 제품개발에 따른 대응책

한 제품이 생산되기까지는 제품설계, 공정설계, 제조 등의 여러 단계를 거치게 된다. 각 단계에서 잡음에 대한 대응책 마련의 가능성을 그림 4에 표시하였다. 즉, 외란과 내란에 대한 대응책은 오직 설계단계에서만 가능하고, 공정설계나 제조단계

또는 사용 현장에서는 이미 시기적으로 늦게 되어 그 대응책을 강구할 수 없다. 불완전 제조에 대해서는 제품설계, 공정설계, 제조단계에서 모두 대응책을 마련할 수 있으나 그 성격에 차이가 있다. 즉, 제품설계와 공정설계시의 대응책은 간접적 우회적인 것이나 제조시의 대응책은 검사, 공정관리 등을 통한 직접적인 것이다.

제품설계나 공정설계를 통한 품질관리 활동은 오프라인(off-line) QC라고 부르기도 하며, 이에 반하여 제조시의 품질관리 활동은 온라인(on-line) QC라고 부르기도 한다.

여기서 품질관리 활동의 시대적 변천과정을 살펴보기로 하자(그림 5 참조). 초기의 품질관리는 주로 제품의 검사에 치중되어 있었다. 즉, 생산된 제품의 불량여부를 판단하여 불량품이 소비자에게 전달되는 것을 방지하려 하였다. 그러나 제품의 고유 품질수준은 검사로 향상될 수 없으므로 생산 공정에서 품질을 보증하고자 하는 노력이 뒤따르게 되었다. 이를 흔히 공정관리라 부르며, 공정의 관측(monitoring), 이상유무에 대한 진단(diagnosis), 그리고 조정(adjustment) 등의 활동이 여기에 포

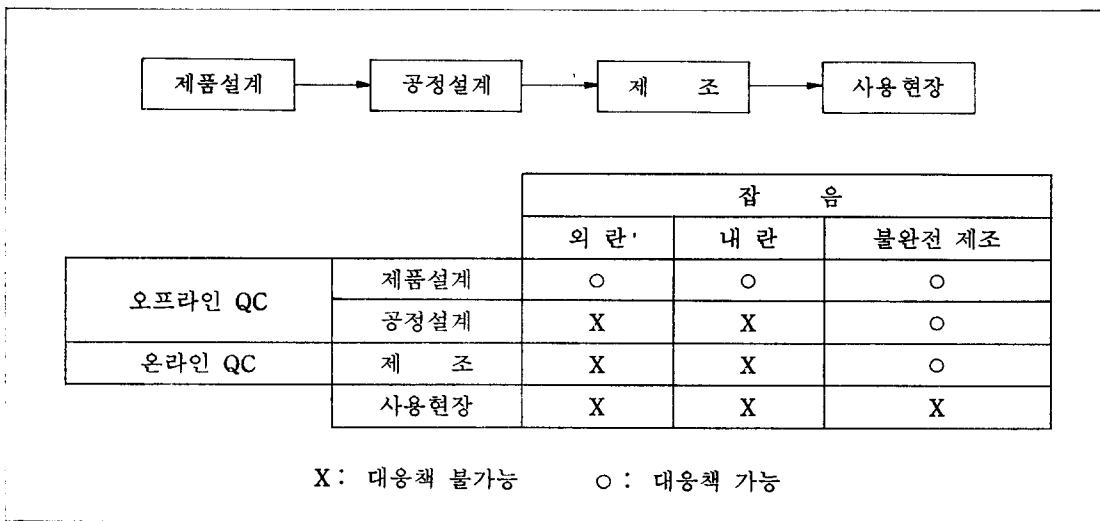


그림 4. 성능변동의 원인과 제품개발 단계별 대응책

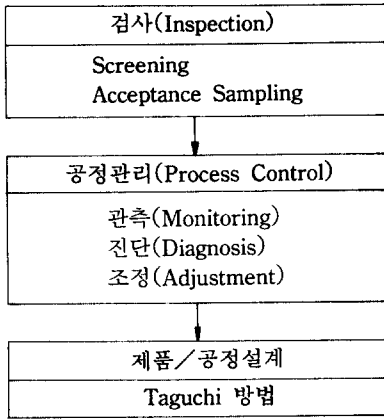


그림 5. 품질관리 활동의 변천과정

함된다. 예를 들어, 우리에게 잘 알려진 \bar{X} 또는 R 관리도는 관측과 진단을 하기 위한 도구로서 오랫동안 사용되어 왔다. 그러나 공정관리 보다 좀 더 품질의 근원에 가까운 것은 공정의 설계이다. 이는 불충분한 공정능력을 가진 생산공정은 아무리 공정관리가 완벽하다고 하더라도 적절치 못한 상태로 남아있을 수 밖에 없기 때문이다. 유사한 논리가 제품의 설계에도 적용될 수 있다. 즉, 제품 설계는 공정설계 보다 더욱 품질의 근원에 가까운 것이다. 따라서 최근의 경향은 품질을 제품에 심어야 한다는 의도에서 제품과 공정의 설계에 관한 관심이 고조되고 있다. 다시 말하여 오프라인 QC에 대한 중요성이 어느 때보다 강조되고 있는 것이다.

다구찌는 이 오프라인 QC를 위한 체계적인 방안을 제시하고 있으며, 그 원리는 잡음을 제거하거나 직접 통제하지 않고 특성이 잡음에 둔감하도록 제품이나 공정을 설계하자는 것이다. 여기서 둔감하다는 의미는 제품의 성능특성이 잡음으로 말미암아 목표치를 유지하지 못하는 정도가 작음을 의미한다. 오프라인 QC를 위한 통계적 방법에는 다구찌방법 외에도 반응표면 분석법(Response Surface Methodology), EVOP법(Evolutionary Opera-

tion) 등이 알려져 있다. 다구찌 방법이 영어권에 소개된 이래 많은 논의가 있었으나, 그 기본원리에 대해서는 품질향상을 위한 훌륭한 전략으로 받아들여지고 있다. 다만, 다구찌의 구체적인 방법에 대해서 수정 또는 확장을 위한 노력들이 시도되고 있으나 아직 이론적인 단계에 머물고 있으며, 실제 문제해결에 있어서 대안들의 효용성을 입증하기 위해서는 상당한 유예기간이 필요할 것으로 보인다.

3.3. 설계의 세 단계

다구찌[16]는 제품 및 공정의 설계과정을 시스템 설계(System Design), 파라미터 설계(Parameter Design), 허용차 설계(Tolerance Design) 등의 세 단계로 나누고 있다.

시스템 설계단계에서는 전문지식, 기술, 경험을 통하여 주어진 목적기능을 갖는 제품의 원형(原型, Prototype)을 개발하게 되며, 일반적으로 설계변수의 최적화는 시도되지 않는 것이 보통이다.

파라미터 설계는 다구찌 방법의 주요 연구대상으로서, 그 목적은 제품의 성능특성이 잡음에 둔감하도록 설계변수의 최적조건을 구하는 것이다. 3.1절에서 소개한 Ina Tile Company의 경우는 배합원료의 구성비율을 설계변수로 삼아 파라미터 설계를 시도한 대표적인 예이다.

파라미터 설계의 원리는 제 2절에서 논의된 손실의 개념을 도입하여 설명할 수 있다. 성능특성치에 특정한 목표치 m 이 주어져 있는 경우, 기대손실은 다음과 같이 주어진다.

$$L = k(\sigma^2 + (\mu - m)^2) \dots\dots\dots (2)$$

단, k 는 상수, σ^2 은 성능특성 y 의 분산, 그리고 μ 는 y 의 평균이다. 여기서 제품이나 공정의 설계변수를 d 라 하면, σ^2 과 μ 는 일반적으로 d 에 따라 변화하게 된다. 파라미터 설계의 원리는 기대손실 L 을 최소로

하는 설계변수 d 의 최적치를 찾는 것이다.

예를 들어, 어떤 전자제품의 성능특성 y 는 부품 A 의 값에 따라 그림 6과 같이 변화한다고 하자. 설명을 간단히 하기 위해 다른 부품의 영향은 무시하기로 한다. 성능특성 y 의 목표치가 60이라면 그림으로부터 A 의 값은 20이 되어야 함을 알 수 있다. 그러나 제조시 A 의 값을 정확히 20으로 하였다 하더라도 수명기간 동안의 노후화, 사용조건 변화 등으로 A 는 20을 유지하지 못하고 변화하기 마련이다. 예를 들어, A 의 변화량이 중앙값 20으로부터 $\pm 10\%$, 또는 18에서 22까지라고 하면, 이러한 A 의 변화는 성능특성에 전파되어 y 는 예를 들어 55와 67 사이의 변동을 보이게 된다. 그림에서 보듯이 A 가 A_0 근방의 값을 가질 때에는 A 와 y 와의 관계가 급한 기울기를 가지므로 y 는 A 의 작은 변화에도 매우 민감하게 변동하게 된다. 이를 극복하기 위해 변동량이 매우 작은 고급의 부품을 채택하는 것은 일반적으로 높은 비용을 수반하기 때문에 경제적인 설계방법이 되지 못한다. 반면에 A 의 중앙값이 50인 A_1 의 경우를 생각해 보자. 이 부근에서는 A 와 y 의 관계가 완만한 기울기를 가지므로 A 의 제법 큰 변화에도 불구하고 y 의 변동은 매우 작을 수 있다. 예를 들어, A 가 중앙값 50으로부터 $\pm 20\%$ 까지 변하더라도 y 는 38에서 43까지의 작은 변동을 보이게 된다. 다만 이때 한가지 문제점은 y 의 대략적 평균치가 40이 되어 목표치 60으로부터 벗어나 있다는 것이다. 그러나 이 경우에 제 3의 설계변수 B 가 존재하여 이를 적절히 조정함으로써 y 의 변동하는 정도는 그대로 유지되 평균치만을 목표치에 접근시킬 수 있다면 식 (2)의 손실의 관점에서 볼 때 매우 바람직할 것이다. 또한 설계의 경제성의 관점에서 볼 때에도 A 의 변화량이 어느 정도 커도 무방하므로 저급의 값싼 부품을 이용할 수 있다는 장점이 있는 것이다. 이와 같은 설계변수 B 를 다구찌는 조정변수(調整變數: Adjustment Parameter)라고 칭하였다.

위의 예는 비록 단순하고 가상적인 것이지만 파라미터 설계의 핵심을 잘 나타내 주고 있다. 즉, 성능특성과 설계변수간의 비선형적 관계와 조정변수를 활용하여 적은 비용으로 높은 품질의(즉, 손실이 작은) 제품을 설계할 수 있다는 것이다.

공정설계에서도 유사한 개념을 활용할 수 있다. 즉, 앞의 예에서 A 를 하나의 공정변수라 보면 A 의 변화량은 기계의 마모, 부정확한 제어(control) 등으로 말미암아 중앙값으로부터 변화하는 정도를 나타낸다. 그림 6에서 A 가 A_0 근방인 경우는 마모율이 작은 기계를 사용하거나 A 의 변화량을 엄격히 제어하는 상태를 나타내고, A_1 근방인 경우는 마모율이나 제어면에서 A_0 보다 상대적으로 못한 상태를 나타낸다고 볼 수 있다. 일반적으로 A_1 인 경우가 A_0 인 경우에 비하여 적은 노력과 경비를 필요로 하기 때문에, 만일 조정변수가 존재하여 A 를 A_1 으로 삼아 y 의 평균치를 목표치에 접근시킬 수 있다면 공정설계의 관점에서 매우 바람직할 것이다.

앞으로 설계변수(제품변수 및 공정변수)의 변화량(중앙값으로부터 변화하는 정도)을 그 설계변수의 허용차라 부르기로 한다.

실제 설계문제는 위의 예와 같이 단순하지는 않다. 우선, 설계변수의 수가 수십 수백개가 될 수 있고, 또한 설계변수들과 성능특성 y 와의 관계가 잘 알려져 있지 않은 경우가 많기 때문이다. 이와 같은 경우에 실험적 방법에 의존하는 것이 문제해결의 한 효율적 방안일 수 있다. 즉, 설계변수들의 여러 조합에서 성능특성이 잡음에 어떻게 영향을 받는가를 관찰하여 분석함으로써 가장 바람직한 설계변수 값을 정할 수 있다. 이때, 실험적 연구의 경제성과 통계적 효율성을 고려하여 적절한 실험계획을 선정하는 것이 중요하다. 다구찌는 파라미터 설계를 위한 실험계획으로서 소위 직교배열(orthogonal array)을 추천하고 있다. 다구찌의 실험계획은 가능하면 잡음을 구체적으로 실험에 포함

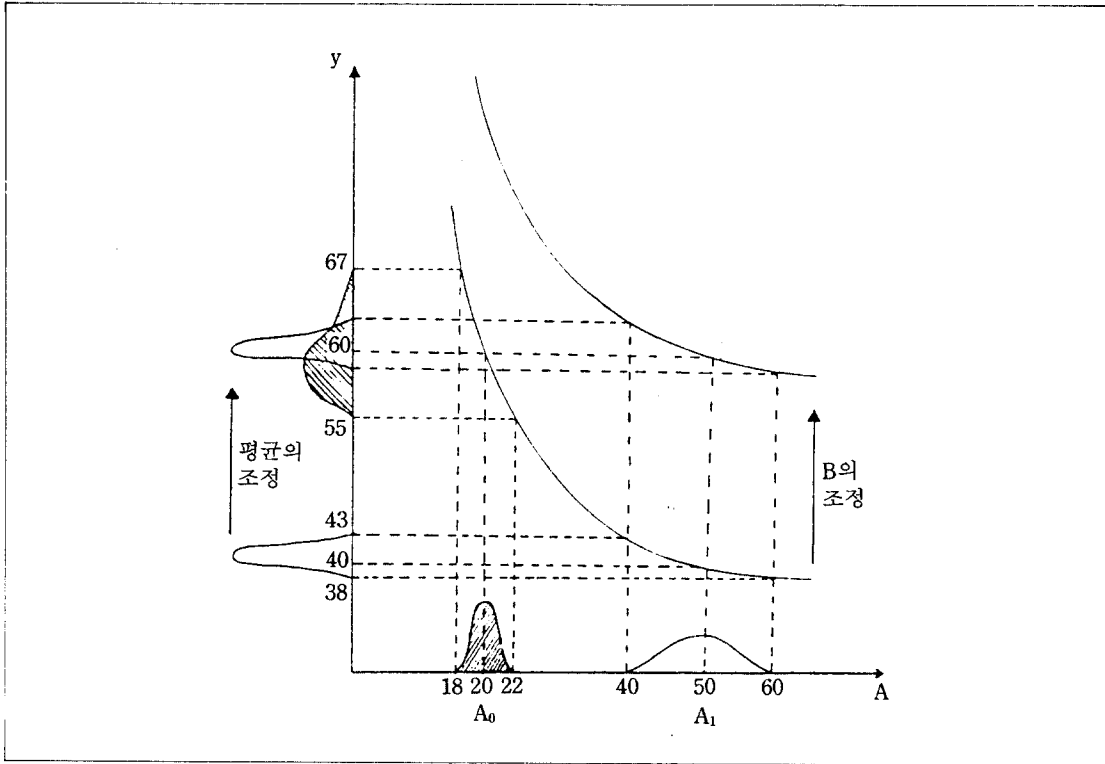


그림 6. 설계변수와 성능특성 y의 관계

시킨다는 것이 전통적 실험계획법과 근본적으로 다른 점이다. 예를 들어, 그림 6에서 A의 중앙값 A_0 와 A_1 에서만 실험을 행하는 것이 아니라 18, 20, 22, 그리고 40, 50, 60 등에서 실험을 행하여 y값이 A의 변화(즉, 잡음)에 어떻게 영향을 받는가를 관찰한다. 또한 다구찌의 자료분석 방법도 전통적 방법과 상당한 차이가 있다. 이에 관해서는 제 5절에서 논의될 것이다.

파라미터 설계에 의해 설계변수의 최적조건을 구하였으나 성능특성의 변동이 아직 만족할만한 상태가 아닐 때 허용차 설계를 수행하게 된다. 허용차 설계 역시 실험에 의존하게 되며, 그 목적은 성능특성치의 변동에 큰 영향을 미치는 설계변수를 선택하여 그 허용차를 줄여줌으로써 궁극적으로

성능특성치의 변동을 바람직한 수준 이하로 유지해 주는데 있다.

지금까지 다구찌의 파라미터 설계와 허용차 설계의 기본개념에 대해 살펴보았다. 한가지 유의할 점은 파라미터 설계시에 지나치게 고급의(허용차가 작은, 따라서 비싼) 부품이나 지나치게 엄격히 제어된 공정조건에서 실험하는 것은 바람직하지 않다. 왜냐하면 위와 같은 상태에서 결정된 설계는 일반적으로 많은 비용과 노력을 필요로 할 뿐더러 다른 심각한 잡음조건 하에서는 최적설계가 되기 어렵기 때문이다. 따라서 파라미터 설계에서는 제품이나 공정의 수행에 지장이 없는 범위내에서 설계변수에 잡음(허용차)을 허용하여 성능특성이 이 잡음, 또는 그외의 잡음에 둔감하도록 설계변수의

최적치를 찾고, 허용차 설계를 통해 설계변수의 허용차를 선별적으로 조정하는 것이 바람직하다.

4. 직교배열

다구찌는 파라미터 설계와 허용차 설계에 직교배열을 사용할 것을 추천하고 있다. 다구찌가 제안하고 있는 직교배열은 두 문자 L로 시작하고 있으며, $L_N(s^k)$ 또는 $L_N(s^{k_1} \times s^{k_2})$ 등으로 불리운다. 전자는 1에서 s까지의 정수로 이루어진 $N \times k$ 행렬의 형태를, 후자는 k_1 개의 열은 1부터 s_1 까지, k_2 개의 열은 1부터 s_2 까지의 정수로 이루어진 $N \times (k_1 + k_2)$ 행렬의 형태를 취하고 있다. 여기서 N은 총 실험횟수(또는 행의 수), k, k_1 , k_2 는 최대 수용할 수 있는 설계변수의 수(또는 열의 수), s, s_1 , s_2 는 해당되는 설계변수의 수준수를 의미한다. 여기서 수준이라 함은 어떤 설계변수가 실험에서 취하는 값을 의미한다. 예를 들어 설계변수가 하나의 저항치 일때 실험에서 10(Ω), 20(Ω), 30(Ω)의 3가지 값을 취한다면 각각을 수준이라 부르고 그 설계변수(저항치)의 수준수는 3이라고 말한다. 따라서 $L_N(s^{k_1} \times s^{k_2})$ 는 수준수가 s_1 인 설계변수가 최대 k_1 개, 수준수가 s_2 인 설계변수가 최대 k_2 개까지 존재하는 요인실험(factorial design)을 N회에 수행할 수 있도록 만들어진 직교배열을 의미한다. 특히 $L_N(s^k)$ 는 모든 k개의 설계변수가 같은 수준수 s를 가지므로 동일 수준계라 부르고, $L_N(s^{k_1} \times s^{k_2})$ 는 혼합 수준계라 부른다.

직교배열은 다구찌에 의해 창안된 것은 아니며 전통적으로 잘 알려진 일부 실시법(fractional factorial design)의 일종이다. 다만, 다구찌의 공헌은 그 효율성을 재발견하였다는 것과 보다 효율적인 활용방법을 제시하였다는데 있다고 믿어진다.

여기서 실험자료 분석의 몇가지 기본 개념에 대해 살펴보자. 우선 어떤 설계변수의 주효과란 그 설계변수의 수준이 변화함으로써 야기된 특성치의

평균변화량을 의미한다. 관심의 대상이 되는 또 다른 효과로서는 설계변수들간의 교호작용이 있다. 예를 들어, 설계변수 A의 효과가 B의 서로 다른 수준에서 일관성있게 나타난다면 두 설계변수 A, B간에는 교호작용이 없다고 하고, 만일 B가 어떤 수준에 있을 때의 A의 효과가 B가 다른 수준에 있을 때의 A의 효과와 차이가 있을 때는 두 설계변수 A, B간에 교호작용이 존재한다고 말한다. 앞으로 주 효과는 A, B, C, ... 등으로, 교호작용은 AB, BC, AC, ... 등으로 표시하고자 한다.

다구찌는 직교배열을 손쉽게 사용할 수 있도록 기본표시, 선점도, 교호작용표 등을 대부분의 직교배열에 첨부하여 놓았다. 예를 들어, 표 2의 직교배열 $L_8(2^7)$ 에 나타나 있는 기본표시, 그림 7의 선점도, 그리고 표 3의 교호작용표와 같다.

기본표시는 다음과 같은 의미를 갖는다. 즉, 표 2에서 설계변수 A를 1열에, B를 2열에 할당하였다면 1열의 기본표시는 a이고 2열의 기본표시는 b이므로 교호작용 AB는 기본표시 ab에 해당되는

표 2. 직교배열 $L_8(2^7)$ 과 기본표시

열 \ 실험	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
기본표시	a	b	a b	c	a c	b c	a b c

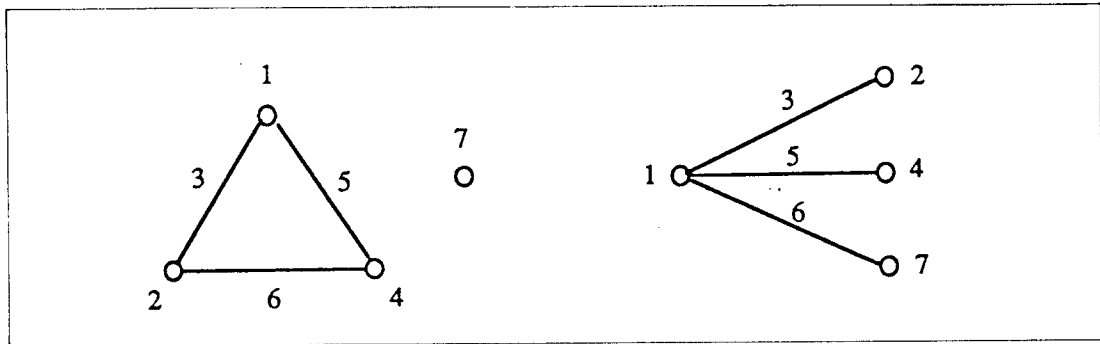


그림 7. $L_8(2^7)$ 의 선점도

표 3. 직교배열 $L_8(2^7)$ 의 2인자 교호작용표

열 열	1	2	3	4	5	6	7
1		3	2	5	4	7	6
2	3		1	6	7	4	5
3	2	1		7	6	5	4
4	5	6	7		1	2	3
5	4	7	6	1		3	2
6	7	4	5	2	3		1
7	6	5	4	3	2	1	

3열에서 구할 수 있다. 하나의 직교배열에는 여러 개의 선점도가 존재할 수 있다. 그리고, 어떤 선점도에서든지 점과 선은 각각 어떤 열에 해당되며, 특히 두점을 잇는 선은 그 두 점의 교호작용을 나타낸다. 예를 들어 그림 7의 선점도에서 1열과 2열에 할당된 설계변수의 교호작용은 3열에 나타나는 것을 알 수 있다. 끝으로, 표 3과 같은 교호작용표는 임의의 두 설계변수간의 교호작용이 어떤 열에 나타나는가를 보다 완전하게 파악할 수 있도록 해주는 역할을 한다. 예를 들어 $L_8(2^7)$ 의 6열과 7열에 할당된 설계변수간의 교호작용은 표 3으로부터

터 1열에 나타나게 됨을 알 수 있다.

여기서 선점도를 이용한 실험의 할당방법에 대해 살펴보자. 예를 들어 2 수준의 설계변수 A, B, C, D에 관한 실험에서 모든 주효과와 교호작용 AB, BC에 대한 정보를 얻고자 한다고 하자. 이 실험을 직교배열 $L_8(2^7)$ 을 사용하여 수행한다고 하고, 우선 그림 8과 같은 '요구선점도'를 작성한다. 다음, 그림 7의 선점도 중에서 그림 8의 pattern이 나타나는 것을 선택하여 matching 시키면 예를 들어 그림 9와 같이 된다. 즉, A, B, C, D를 각각 1, 2, 4, 7열에 할당하여 실험한 후 주효과는 해당되는 열에서 구하고 교호작용 AB, BC는 각각 3, 6열에서 구하게 된다. 아무것도 할당하지 않은 5열에서는 실험오차에 대한 정보를 얻게 된다.

물론, 직교배열의 활용방법이 언제나 위와 같이 단순하지는 않다. 보다 다양한 경우에 대한 활용방법에 관해서는 다구찌[3, 17]를 참조하기 바란다.

실험 후에는 일반적으로 분산분석을 통해 어떤 효과(주효과 또는 교호작용)가 특성치에 유의한 영향을 미치는가를 판정하여 설계변수의 최적조건을 구하게 된다. 분산분석 방법은 본 논문의 범위를 벗어나므로 생략하며 자세한 내용은 다구찌[3, 17]나 일반 실험계획법에 관한 서적을 참조하기 바란다

다.

끝으로, 직교배열에 의한 실험은 설계변수들의 모든 가능한 수준조합에서 이루어지지 않고 그 일부에 대해서만 이루어지므로 모든 주효과와 교호작용을 독립적으로 파악할 수 없다. 따라서 어떤 효과들끼리는 서로 뒤섞이게 되는데 이를 교락현상이라 부른다. 예를 들어, 직교배열 $L_8(2^7)$ 을 사용하여 7개의 설계변수 A, B, ..., G를 각각 1, 2, ..., 7열에 할당하였다면, 표 3의 교호작용표로부터 각 열에서 얻어지는 효과는 다음과 같다는 것을 알 수 있다.

1열 : A+BC+DE+FG

2열 : B+AC+DF+EG

:

7열 : G+AF+BE+CD

즉, 각 주효과는 3개씩의 교호작용과 교락되어 있다. 전통적인 실험계획법에서는 위와 같은 실험은 가능한 한 피할 것을 권하고 있다. 그러나, 다구찌는 오히려 위와 같은 교락현상을 직교배열의 유용한 성질로서 파악하고 있다. 그의 주장에 의하면, 우선 많은 설계연구가 주로 연구실에서 수행되는데 이것이 참다운 설계연구가 되기 위해서는 연구실의 결과가 생산현장이나 사용현장에서 재현될 수 있어야 한다는 것이다. 다음, 위와 같은 교락현상에도 불구하고 각 열의 효과를 주효과로 간주하여 이들중 크기가 두드러진 주효과만으로 특성치의 변화를 잘 설명할 수 있다는 것이 연구실에서 입증될 수 있다면, 연구실의 실험에서 미처 고려하지 못한 다른 요인들이 복잡하게 얽힌 생산현장, 사용현장에서도 연구실에서 결정한 설계변수의 최적조건이 그대로 재현될 가능성이 높다는 것이다(다구찌[1]). 이와 같은 다구찌의 견해는 많은 논의의 대상이 되고 있으나, 그 타당성 여부는 이론보다는 실제문제 해결을 통해 밝혀져야 할 것으로 믿어진다.

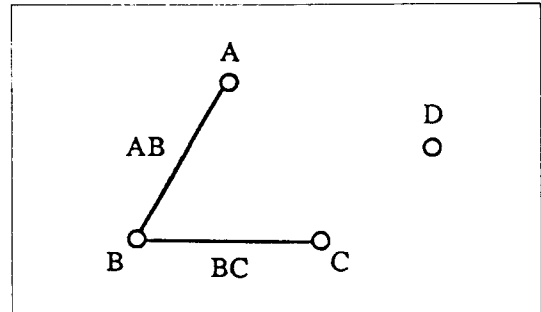


그림 8. 요구선점도

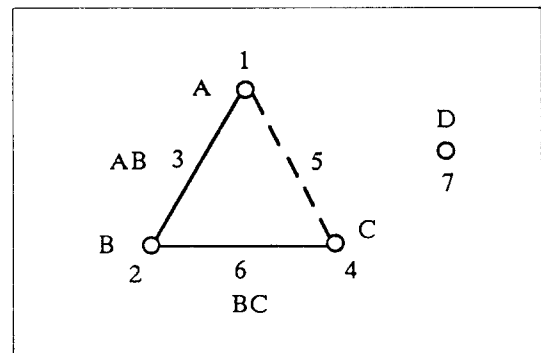


그림 9. 선점도와 요구선점도의 matching

5. 파라미터 설계

5.1. 실험방법과 SN비의 계산

파라미터 설계에서는 설계변수의 한 조합(즉, 직교배열의 한 행)에서 성능특성치를 여러번 관측한다. 이는 한 실험점에서 성능특성치에 대한 잡음(내란, 외란, 또는 불완전제조)의 영향을 파악하기 위해서이며 특성치를 반복해서 얻는 방법에는 크게 다음 두가지가 있다.

(1) 잡음을 제어하지 않고 있는 그대로 봐둔 상태에서 특성치를 반복 관측하는 것이다. 예를 들면, 3.1절의 Ina Tile Company의 예에서는 잡음의 일

종인 가마온도의 불균형 상태를 그대로 놔두고 실험이 수행되었다.

(2) 잡음인자들의 수준을 정하여 이들 수준의 조합에서 성능특성치를 관측하는 것이다.

(2)의 경우, 전체 실험계획은 2개의 직교배열이 cross되어 있는 형태로 주어지며 예를 들면 그림 10과 같다. 그림 10에서 왼쪽의 직교배열 $L_8(2^7)$ 에는 설계변수 A, B, C, D, E가 각각 1, 2, 3, 4, 6열에 할당되어 있으며 이를 설계변수 행렬 또는 내측 직교배열이라 부른다. 한편 오른쪽 윗부분의 직교배열 $L_4(2^3)$ 에는 잡음인자 U, V, W가 각각 1, 2, 3열에 할당되어 있는데 이를 잡음인자 행렬 또는 외측 직교배열이라 부른다. 실험은 예를 들어 실험번호 2인 경우 다음과 같이 수행된다. 즉, 설계변수 A, B, C, D, E를 각각 수준 1, 1, 1, 2, 2에 해당되는 값으로 놓고 잡음인자 U, V, W의 4가지 조건에서 성능특성치를 관측하여 $y_{21}, y_{22}, y_{23}, y_{24}$ 를 얻는다. 다른 실험점에 대해서도 마찬가지이다. 그리고, 그림 10의 설계변수 행렬에서 아무것도 할당하지 않은 열(5열과 7열)로부터는 나중에 실험오차에 대한 정보를 얻게 된다.

다구짜는 가능한 한 두번째 방법으로 파라미터

실험	설계변수							잡음인자					
	A	B	C	D	E	6	7	1	2	3	4	실험	열
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	U
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	V
3	1	2	2	1	1	2	2						W
4	1	2	2	2	2	1	1						
5	2	1	2	1	2	1	2						
6	2	1	2	2	1	2	1						
7	2	2	1	1	2	2	1						
8	2	2	1	2	1	1	2						

그림 10. 설계변수 행렬과 잡음인자 행렬

설계를 위한 실험을 수행할 것을 추천하고 있다. 이는 잡음의 영향이 적극적으로 y에 반영되게 함으로써 참으로 잡음에 둔감한 설계변수의 조합을 찾기 위한 것으로 믿어진다. 또한, 두번째 방법의 변형으로서 오차인자들의 수준을 조합한 조합 오차인자를 만들어 외측 직교배열의 규모를 줄이는 방법도 있다(다구짜[1, 3]).

어떤 방법으로 성능특성치를 반복 관측하든지, 각 실험점에서 다음의 SN비를 계산하여 분석함으로써 설계변수의 최적조합을 찾는다.

(1) 작을수록 좋은 경우

$$SN_i = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2\right) \dots\dots\dots (3)$$

단, y_{ij} 는 설계변수 행렬의 i번째 실험점에서 관측된 j번째의 성능특성이고, n은 한 실험점에서의 y의 반복수이다.

(2) 클수록 좋은 경우

$$SN_i = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2}\right) \dots\dots\dots (4)$$

(3) 특정한 목표치가 있는 경우

$$SN_i = 10 \log\left(\frac{\bar{y}_i^2}{s_i^2}\right) \dots\dots\dots (5)$$

단,

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}$$

$$s_i^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

5.2. 파라미터 설계의 절차

특성치의 성격에 따른 파라미터 설계방법은 다음과 같다.

(1) 작을수록 좋은 경우 또는 클수록 좋은 경우

(a) 설계변수들로 이루어진 실험(직교배열)을

구성한다. 5.1절에서 언급한 방법에 의해 각 실험 점에서 y의 반복 관측치를 얻는다.

(b) 각 실험점의 반복관측치로부터 (3) 또는 (4) 식의 SN비를 계산한다.

(c) SN비에 대한 분산분석을 통하여 SN비에 영향을 미치는 설계변수를 찾는다.

(d) (c)에서 찾은 설계변수의 수준을 SN비를 최대로 하는 수준으로 하고, (c)에서 SN비에 영향을 미치지 않는 변수는 비용, 편리성 등을 고려하여 적절한 수준에 둔다.

(e) (d)에서 결정된 설계변수의 수준에서 실험을 수행하여 과연 성능특성치의 개선이 이루어졌는지를 확인한다.

(2) 특정한 목표치가 주어져 있는 경우

(a) (1)의 (a)와 같다.

(b) 실험점의 관측치로부터 \bar{y}_i 와 (5)식의 SN_i 를 계산한다.

(c) SN비에 대한 분산분석 등을 통하여 SN비에 영향을 미치는 설계변수를 찾아낸다.

(d) 각 실험조건의 평균 \bar{y}_i 에 대한 분산분석을 통하여 \bar{y} 에 영향을 미치는 설계변수를 찾아낸다.

(e) 설계변수들을 다음과 같이 분류한다.

통제변수 : SN비에 영향을 미치는 변수

조정변수 : 평균 \bar{y} 에만 영향을 미치는 변수

나머지 설계변수

(f) 통제변수를 SN비를 최대로 하는 수준에 놓고, \bar{y} 가 목표치 m에 접근하도록 조정변수의 수준을 조정한다. 그밖의 설계변수들은 비용, 편리성 등을 고려하여 적절한 수준을 선택한다.

(g) (1)의 (e)와 같다.

특정한 목표치가 주어져 있는 경우에는 SN비와 \bar{y} 를 분석하는 2단계 최적화 과정을 거침으로써 설계변수를 통제변수와 조정변수로 구분한다는데 유의할 필요가 있다. 조정변수는 제품이나 공정설계 시 매우 유용하게 활용될 수 있다. 즉, 성능특성의 목표치가 사용자의 주문에 따라 달라지더라도 한

목표치에 의해 결정된 통제변수의 최적조건은 다시 변경할 필요가 없으며 다만 조정변수를 이용하여 성능특성의 평균을 조절하면 된다(Phadke[11]). 한편 작을수록 좋은 경우나 클수록 좋은 경우에는 목표치가 0 또는 ∞ 으로 고정되어 있으므로 특정한 목표치가 있는 경우처럼 조정변수를 꼭 발견해야 할 필요는 없다.

5.3 SN비와 기대손실과의 관계

위의 파라미터 설계과정이 원래의 목적, 즉 표 1의 기대손실을 최소화하는 설계조건을 찾는 것과 어떻게 연관되어 있는지에 대해 살펴보자. 우선, 작거나 클수록 좋은 경우에 식(3) 또는 (4)의 SN비는 표 1의 기대손실과 직접적인 관련이 있다. 즉 식 (3)의 $1/n\sum y_i^2$ 은 i번째 실험점에서 $E(y^2)$ 의 추정량이라 볼 수 있으며 SN_i 는 설계변수들의 효과의 가법성을 유도하기 위해 log 변환을 취한 것이다. 클수록 좋은 경우에도 식(4)의 $1/n\sum 1/y_i^2$ 은 $E(1/y^2)$ 의 추정량이라 볼 수 있다. 특정한 목표치가 주어져 있는 경우, 다구찌는 5.2절의 2단계 최적화 과정이 표 1이나 식 (2)의 기대손실을 최소화하는 문제와 어떻게 연관되어 있는냐에 대해서는 언급하지 않았다. 그러나, 최근 Leon[10] 등은 다구찌의 2단계 최적화 과정은 다음과 같은 관계가 성립할 때에만 기대손실을 최소화하게 된다는 것을 보였다. 즉,

$$\sigma^2(c, a) = \mu^2(c, a)P(c) \dots\dots\dots (6)$$

여기서, σ^2 과 μ 는 y의 분산과 평균이며 (c, a)는 설계변수들로 이루어진 벡터이다. 식(6)은 예를 들어 다음과 같은 모형에서 성립된다.

$$y = \mu(c, a)\epsilon(N, c) \dots\dots\dots (7)$$

단, N은 잡음인자로 이루어진 벡터이고 ϵ 은 확률 변수로서 $E\{\epsilon(N, c)\} = 1, \text{Var}\{\epsilon(N, c)\} = P(c)$ 이다.

식(6)의 관계를 식(2)에 대입하면

$$L = k(\mu^2 P + (\mu - m)^2) \dots\dots\dots (8)$$

이 된다. 다음 L을 μ 에 대해 편미분하여 0으로 놓고 풀면

$$\mu = m / (1 + P) \dots\dots\dots (9)$$

이 되며, (9)를 (8)에 대입하여 정리하면

$$L = km^2 P / (1 + P) \dots\dots\dots (10)$$

가 된다. 식 (10)에서 L은 P의 증가함수이므로 L은 P가 최소일 때 역시 최소가 된다. 한편, 식 (6)에서 $P = \sigma^2 / \mu^2$ 이므로 L은 σ^2 / μ^2 이 최소일 때, 또는 μ^2 / σ^2 이 최대일 때 최소가 된다. P^* 를 P의 최소값이라고 하면, 식 (9)로부터 μ 의 최적값은

$$\mu^* = m / (1 + P^*) \dots\dots\dots (11)$$

이 된다.

실제 실험에서는 μ 나 σ^2 의 참값은 알 수 없으므로, 먼저 μ^2 / σ^2 의 추정치를 log- 변환한 값이라 볼 수 있는 SN비를 분석하여 설계변수 c를 찾아 그 수준을 SN비가 최대로 되도록 결정하고, 조정변수 a를 이용하여 평균치를 $m / (1 + \hat{P}^*)$ 에 맞추게 된다. 단, \hat{P}^* 는 P^* 의 추정치이다.

문헌에서 μ^2 / σ^2 또는 μ 와 같은 양을 성능척도(performance measure)라 하고 그에 대한 추정량 SN비 또는 \bar{y} 는 성능통계량(performance statistics)이라 부른다.

다구찌는 5.2절의 파라미터 설계절차를 제시함에 있어 식(6) 또는 (7)과 같은 가정을 하고 있지 않다. 그러나 Leon 등의 결과에서 알 수 있듯이 보다 합리적인 파라미터 설계를 위해 어떤 성능척도 또는 어떤 성능 통계량을 사용해야 할 것인가에 대한 결정은 주어진 상황에 따라 달라질 수 있다. 따라서 다구찌의 SN비에 대한 대안을 마련하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있으며 그 중 몇가지를 다음 절에 소개하였다.

5.4. 기타 파라미터 설계방법

Leon[10] 등은 특성치 y에 대한 모형(transfer function)이 알려져 있고 조정변수에 대한 사전지식이 있을 때 다구찌의 SN비에 대한 대안으로서 소위 PerMIA(Performance Measure Independent of Adjustment)를 이용한 파라미터 설계방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 사전에 위와 같은 충분한 지식이 없을 때에는 사용하기 어렵다는 단점이 있다.

Box[7]는 특정한 목표치가 주어져 있는 경우 다구찌의 SN비를 이용한 2단계 방법의 대안으로서, 특성치 y의 변환(transformation)에 근거를 둔 2단계 방법을 제안하였다. Box는 먼저 σ / μ 는 근사적으로 σ_m 에 비례하므로 다구찌의 SN비는 결국 y를 ln- 변환한 새로운 특성치 Y의 분산과 대등하다는 것을 보였다. 그렇다면 ln- 변환에만 국한할 필요없이 좀 더 다양한 변환을 시도하여(예를 들면, $Y = y^\lambda, \lambda \neq 0; Y = \ln y, \lambda = 0$) 그 중 설계변수의 분리와 모형의 경제성 관점에서 가장 바람직한 변환을 선택한 후(즉, λ 를 선택하여) 다음과 같은 2단계 절차를 거쳐 파라미터 설계를 하자는 것이 Box의 제안이다(단, s_y 와 \bar{Y} 는 각각 변환된 특성치 Y의 표본 표준편차와 평균이다).

(a) ln s_y 에 영향을 미치는 설계변수 c를 찾아서 s_y 를 최소로 하는 c^* 를 정한다.

(b) \bar{Y} 에만 영향을 미치는 설계변수 a를 찾는 후, c를 c^* 에 고정시킨 상태에서 \bar{Y} 를 적절한 값(Box[7] 참조)에 맞춘다.

이상으로 다구찌의 SN비, Leon의 PerMIA, 그리고 Box의 변환에 의한 파라미터 설계방법을 소개하였다. 앞으로 어떤 경우에 어떤 방법이 좀 더 효과적인가를 파악하기 위해 이론적, 실제적으로 많은 연구가 수행되어야 하리라 믿어진다.

6. 결 론

제품 및 공정설계를 위한 다구찌 방법의 기본 철학과 구체적인 방법에 대해 살펴보았다. 앞서 언급하였듯이 품질향상을 위한 다구찌의 기본 철학에 대해서는 이론이 없는 것으로 보이나 직교배열을 이용한 실험계획과 SN비를 이용한 분석방법은 많은 논란의 대상이 되고 있다. 특히, 4절에서 언급한 효과들간의 교락현상에 대한 다구찌의 입장, SN비의 타당성 내지는 통계적 효율성 등에 논의의 초점이 모아지고 있다. 그러나, 다구찌 방법이 비록 이론적으로 완벽하지는 않다 하더라도 그동안 많은 실제 문제의 해결을 통해 품질향상을 위한 하나의 유용한 방법으로 인정받고 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

다구찌 방법의 개선 또는 보완을 위해 앞으로 다구찌가 제안하고 있는 직교배열 외에 다른 실험계획의 활용가능성에 대한 연구, 다구찌 성능 통계량인 SN비와 그 대안들에 대한 비교연구, 한 제품에서 성능특성치가 여러개일 때의 최적 설계에 관한 연구 등이 수행되어야 하리라고 여겨진다.

본 논문에서 다루지 못한 허용차 설계방법, 성능특성치가 연속적인 값을 취하지 않고 몇개의 클래스로 분류되는 경우에 대한 분석방법(예를 들어, 누적법 등), 그리고 계측기의 경우와 같이 성능특성의 목표치가 그때 그때 달라지는 동특성(動特性)에 대한 파라미터 설계방법에 관해서는 다구찌[1, 2, 3]를 참조하기 바란다.

끝으로, 본 논문에서 언급한 것 외에 다구찌 방법에 대한 참고문헌을 소개하면, 다구찌 방법의 전반적인 내용에 관한 논문으로서 Kackar[9], Pignatiello[14] 등이 있고 영어권의 참고서적으로는 Dehnad[8], Phadke[12] 등이 있다. 사례에 관한 논문으로는 Phadke 등[13]이 영어권에서 거의 최초로 발표된 것이며, 사례집으로는 다구찌[4, 5,

6]와 [15]가 있다.

참고문헌

- [1] 田口玄一, 품질공학강좌 1, 개발·설계단계의 품질공학, 일본규격협회, 도쿄, 1988.
- [2] 田口玄一, 품질공학강좌 3. 품질평가를 위한 SN비, 일본규격협회, 도쿄, 1988.
- [3] 田口玄一, 품질공학강좌 4. 품질설계를 위한 실험계획법, 일본규격협회, 도쿄, 1988.
- [4] 田口玄一, 품질공학강좌 5. 품질공학사례집 일본편 일반, 일본규격협회, 도쿄, 1988.
- [5] 田口玄一, 품질공학강좌 6. 품질공학사례집 구미편 일반, 일본규격협회, 도쿄, 1989.
- [6] 田口玄一, 품질공학강좌 7. 품질공학사례집 계측편, 일본규격협회, 도쿄, 1988.
- [7] Box, G.E.P., "Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations," (with discussion), *Technometrics*, Vol. 30(1988), pp.1-40.
- [8] Dehnad, K., *Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method*, Wadworth & Brooks/Cole, Pacific Grove, 1989.
- [9] Kackar, R.N., "Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method," (with discussion), *Journal of Quality Technology*, Vol. 17(1985), pp.176-209.
- [10] Leon, R.V., Shoemaker, A.C., and Kackar, R.N., "Performance Measures Independent of Adjustment," (with discussion), *Technometrics*, Vol. 29(1987), pp.253-285.
- [11] Phadke, M.S., "Quality Engineering Using Design of Experiments," *Proceedings of the American Statistical Association, Section on Statistical Education*, Cincinnati, 1982, pp.11-20.
- [12] Phadke, M.S., *Quality Engineering Using*

Robust Design, Prentice Hall, New Jersey, 1989.

[13] Phadke, M.S., Kackar, R.N., Speeney, D.V., and Grieco, M.J., "Off-Line Quality Control in Integrated Circuit Fabrication Using Experimental Design," *Bell System Technical Journal*, Vol. 62(1983), pp.1273-1309.

[14] Pignatiello, J.J., Jr., "An Overview of the Strategy and Tactics of Taguchi," *IIE Transactions*, Vol. 20(1988), pp.247-254.

[15] Proceedings of Supplier Symposia on Taguchi Methods, American Supplier Institute, Dear-

born, 1984-1989.

[16] Taguchi, G., *Introduction to Quality Engineering*, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.

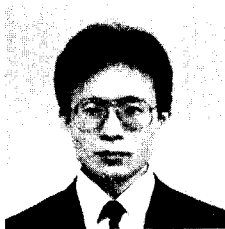
[17] Taguchi, G., *System of Experimental Design*, Vol. 1 and 2, UNIPUB/Kraus International Publications, New York, 1987.

[18] Taguchi, G. and Wu, Yu-In, *Introduction to Off-Line Quality Control*, Central Japan Quality Control Association, Nagaya, 1985.

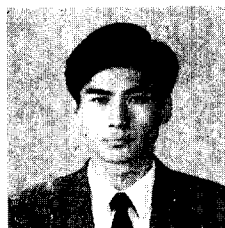
저자소개



저자(염봉진)는 현재 한국과학기술원(KAIST) 산업공학과 부교수로 재직중이며, 서울대학교 전자공학과에서 학사, 오레곤주립대 산업공학과에서 석사, 그리고 오하이오 주립대 산업공학과에서 박사학위를 취득하였다. 주요 관심분야로는 실험계획법, 수명시험의 설계와 분석, 통계적 방법에 의한 제품 및 공정설계 등이다.



저자(고선우)는 고려대학교 산업공학과에서 학사, KAIST 산업공학과에서 석사를 마치고 현재 산업공학과 박사과정에 재학중이다. 품질공학, 실험계획, 다구찌 방법 등에 많은 관심을 가지고 연구하고 있다.



저자(김성준)는 연세대학교 응용통계학과에서 학사를 마치고 현재 KAIST 산업공학과 석사과정에 재학중이다. 동적특성에 대한 파라미터 설계방법에 관한 연구를 수행중이며 박사과정에 진학할 예정으로 있다.