

# 적용하기 쉬운 기능창 실험데이터 분석 방법

주혜진 · 변재현<sup>†</sup>

경상국립대학교 산업시스템공학부

## An Easy Analysis Method for Operating Window Experimental Data

Hyejin Ju · Jai-Hyun Byun

Department of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National University

An easy-to-implement method is proposed to analyze data on operating window and applied to four case studies. Operating window factor is a physical quantity of energy transfer that is critical to system performance. Operating window(OW) is a range of OW factor values in which failure does not occur. A non-parametric method to determine OW threshold values of lower and upper limits is presented. OW threshold data are analyzed, important factors are determined by elbow method, and optimal factor level combinations are set. Engineers working on product development and process improvement are expected to benefit from this paper when they can find an OW factor of energy transfer which is related to system performance.

**Keywords:** Operating Window, Design of Experiments, Data Analysis, Robust Design

### 1. 서론

실험계획은 제품이나 공정의 성능 관점에서 실험의 목적을 정하고, 성능에 영향을 미치리라 기대되는 인자와 인자의 수준을 정한 다음, 실험을 시행하여 특성치 데이터를 수집하고 분석하여 최적조건을 탐색하는 과정이다. 본 논문은 실험의 목적과 직결되는 시스템 성능이 실패율이나 결함을 등으로 평가될 수 있을 때, 시스템 성능과 연결된 에너지 변환 물리량의 기능창(operating window) 데이터를 쉽게 분석하는 방법을 제안하고, 4가지의 사례를 통하여 그 적용성을 확인하고자 한다.

기능창 개념은 1970년대 미국의 제록스(Xerox) 복사기 성능을 개선하는 업무를 담당한 Don Clausing이 개발하였다(Clausing, 1994). 그는 신형 복사기를 개발하여, 시험 복사할 때 종이가 걸리거나 2장 이상이 한꺼번에 나오는 문제를 접하고 종이와 복사기 롤러 간 마찰력(friction force)을 기능창 인자로 삼아서 복사기의 종이이송 성능을 개선하였다. 이후 기능창 실

험은 웨이브 납땜(wave soldering), 저항 용접(resistance welding), 이미지 전송(image transfer) 등 다양한 프로세스에 활용되고 있다(Joseph and Wu, 2002). 기능창 데이터를 분석하는 기본적인 방법은 다구치가 제안한 SN비(Signal-to-Noise ratio)를 이용하는 것이다(Peace, 1993). 하지만 SN비는 분산이 평균제곱에 비례할 때는 유용하지만, 그렇지 않으면 분산과 평균제곱이 구분되지 않아 데이터의 중심위치와 산포에 대한 정보가 섞여 있으므로 바람직하지 않다(Wu and Hamada, 2009). Joseph and Wu(2002)와 Joseph and Wu(2004)는 이러한 SN비의 문제점을 개선한 새로운 방법을 제시하였다. Joseph and Wu(2002)는 조정변수와 무관한 성능척도(Performance Measure Independent of Adjustment: PerMIA)를 활용한 방법을, Joseph and Wu(2004)는 실패(failure)가 자주 나타나도록 기능창 인자를 조절하여 실패를 증폭시키는 방법을 제시하였다. 그러나 두 방법은 모두 매우 복잡한 식을 이용하여 전개되므로, 통계적 지식이 충분하지 않은 엔지니어가 완전히 이해하여 실제로 실험을 통한 제품

이 논문은 2023년도 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구지원비와 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원을 받아 수행된 자원순환(재제조) 산업 고도화 인력양성사업(No.20214000000520)의 연구 결과입니다.

<sup>†</sup> 연락처 : 변재현 교수, 52828 경남 진주시 진주대로 501 경상국립대학교, Tel: 055-772-1692, Fax: 055-772-1699, E-mail: jbyun@gnu.ac.kr  
2025년 1월 14일 접수; 2025년 2월 8일; 2025년 3월 5일 수정본 접수; 2025년 3월 10일 게재 확정.

개발이나 공정개선 업무를 수행하기는 어렵다.

본 논문에서는 기능창의 하한과 상한 데이터로부터 경계값을 정하고, 이 값을 분석하여 최적조건을 정하는 비모수적 방법을 제시하고자 한다. 우선 하한과 상한 경계값을 정하고 이 값에 영향을 미치는 인자들을 엘로우 기법으로 선정한다. 이 인자들을 하한( $l$ )과 상한( $u$ ) 경계값 중 어느 하나에만 영향을 미치는 특정인자, 둘 다에 영향을 미치지만 서로 충돌이 없는 비충돌 공통인자, 양쪽에 영향을 미치면서 서로 최적 수준이 어긋나는 충돌 공통인자로 구분한다(Byun *et al.*, 2017). 특정, 비충돌 공통인자의 최적 수준을 정한 다음, 충돌 공통인자는 기능창을 가장 크게 하는 수준으로 정한다. 제품/공정 개발 분야에서 활동하는 엔지니어들이 이 방법을 활용하면, 실험을 통해 수집한 데이터를 별도로 가공하지 않고 데이터 자체를 이용하여 비교적 간단하게 기능창 데이터를 분석할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 기능창 실험계획, 실험데이터 분석의 기본 개념과 기존 분석 방법을 간략하게 소개하고, 제3장에서 기존 분석 방법들의 단점을 보완한 적용하기 쉬운 새로운 분석 방법을 제안한다. 제안된 방법을 4가지 기능창 사례 데이터에 맞게 적용하여 분석하는 과정과 결과를 제4장에, 기능창 데이터 분석에 관한 토의사항은 제5장에 제시하며, 제6장에 결론을 기술한다.

## 2. 기능창 개념과 분석

기능창의 기본 개념을 복사기의 종이이송 예로 알아보기로 한다. 종이이송 기능은 종이를 담은 함(tray)에서 종이 한 장을 원하는 장소로 이동하는 것이다. 이 기능의 실패유형은 종이 가 걸리거나(misfeed), 2장 이상 이송되는(multi-feed) 것이다. 이러한 두 가지 유형의 실패 없이 종이이송 프로세스를 설계하기 위하여 실험을 시행하고 데이터를 분석하여 주요 인자들의 최적조건을 정할 때, 어떤 데이터를 반응변수로 삼을 것인지를 생각해보자. 가장 먼저 떠오르는 것은 각 실험점에서 1,000 장을 복사할 때 두 가지 유형의 실패 없이 한 장씩 이송된 비율이다. 하지만 이런 방법을 이용하여 특히 실패율이 낮은 실험 조건별 차이를 파악하기 위해서는 한 실험점에서 반복 횟수가 아주 커야 하고, 불필요한 교호작용이 유발된다(Phadke, 1989). Phadke는 패널토의 논문 Nair(1992)에서, 분석 대상인 반응변수는 제품이나 공정의 기본 메커니즘에서 에너지 전달 연속변수로 삼아야 한다고 강조한다. Shin Taguchi는 같은 논문에서 결함은 필요한 기능에 문제가 있어서 발생한 증상이고, 이러한 결함의 원인은 에너지가 변환될 때 나타나는 주요 기능의 변동이라고 주장한다.

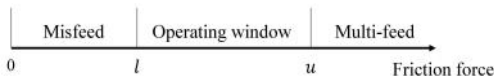


Figure 1. Operating Window for a Paper Feeder Example

기능창(Operating Window: OW)은 바로 에너지 전달과 관련된 일종의 물리량이 어떤 유형의 실패도 일으키지 않는 값의 범위이다. <Figure 1>은 종이이송 예에서 종지와 롤러의 마찰력(friction force)이 OW의 하한인  $l$ 보다 작으면 종지가 걸리고, 상한인  $u$ 보다 크면 2장 이상의 종지가 이송되는 것을 나타낸 그림이다. 종이이송 프로세스에서 마찰력은 기능창 인자(operating window factor)라고 부르는데, 마찰력의 OW는  $l$ 과  $u$  사이의 범위인  $(l, u)$ 가 된다. 마찰력을  $(l, u)$ 의 한가운데인  $(l+u)/2$ 에 두고 프로세스를 진행하면 종지가 걸리거나 두 장 이상이 이송되지 않는 것이다. 종이이송 프로세스가 진행될 때 마찰력에 변동이 있거나, 잡음을 반영하면 OW는 더 좁아질 수 있다. <Figure 2>는 잡음 수준이  $N_1, N_2$ 에 있을 때 OW를 나타낸다. 이런 경우 두 가지 잡음 수준을 반영한 하한( $l$ )과 상한( $u$ ) 경계값으로는, 잡음별 OW의 교집합에 해당하는  $(l_{max}, u_{min}) = (l_2, u_1)$ 를 이용한다. 잡음의 영향으로 OW가 좁아지면 실패율은 높아지므로 잡음에 강건한 프로세스를 설계하거나 개선하기 위해서는, 실패를 일으킬 수 있는 잡음의 영향을 고려하여 OW에 영향을 미치는 인자를 선별하고 OW를 가장 크게 만드는 인자의 최적조건을 찾아야 한다.

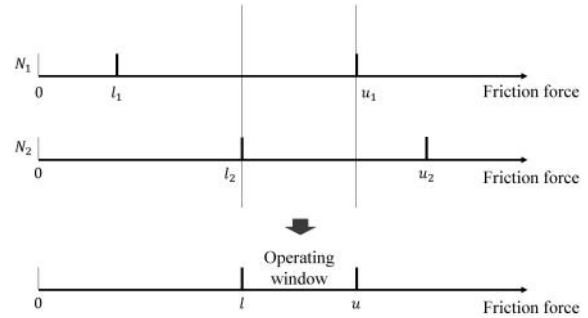


Figure 2. Operating Window Reduction by Noise

한 실험점에서 여러 개의  $(l, u)$  데이터를 얻을 때, Clausing (2004)은 경계값을 결정하기 위한 실패율(failure rate)로서 10%~50%를 추천한다. 즉, 하한 경계값은  $l$  값들의 상위 10~50%, 상한 경계값은  $u$  값들의 하위 10~50%에 해당하는 값으로 정하는 것이다. 기능창 실험데이터 중에서 이 범위에 있는 실제 데이터를 쓰면, 데이터 자체를 쓰면서도 극단값을 포함하지 않게 된다.

기능창 실험데이터를 분석하는 가장 흔한 방법은 다구치(Taguchi)의 신호-잡음 비(Signal-to-Noise ratio: SN비)를 사용하는 것이다(Peace, 1993). 한 실험점에서 잡음을 고려하여 구한 데이터가  $n$ 개 있다면, 다음의 식 (1)처럼 하한의 SN비( $SN_l$ )와 상한의 SN비( $SN_u$ )를 계산하고, 식 (2)와 같이 이들을 합한 SN비( $SN_T$ )를 구하여 분석하는 것이다.

$$SN_l = -\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i^2\right), \quad SN_u = -\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i^2}\right) \quad (1)$$

$$SN_T = -\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i^2\right) - \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{u_i^2}\right) \quad (2)$$

실험에 고려한 인자를 대상으로 실험계획에 의하여 실험점을 구성하고, 각 실험점에서  $SN_T$ 를 구한 다음, 중요한 인자를 파악하여 이들의 최적 수준 조합을 정하고, 기능창 인자의 수준을 최적 OW의 한가운데 값으로 정한다. 하지만  $SN_T$ 의 로그안의 식은  $l$  데이터  $n$ 개의 분산  $\times \left(\frac{n-1}{n}\right)$  과 평균제곱의 합이고,  $SN_u$ 는  $u$ 의 역수인  $1/u$   $n$ 개의 분산  $\times \left(\frac{n-1}{n}\right)$  과 평균제곱의 합이다. 그러므로  $SN_l, SN_u, SN_T$  모두 평균과 분산을 더한 값이다. SN비 방법의 단점을 보완하기 위해 Joseph and Wu(2002)는 데이터로부터 기능창 경계값을 추정하고자 일반화 선형모형(Generalized Linear Model: GLM)을 제안하였다. Joseph and Wu(2004)는 실패 증폭(failure amplification) 개념을 도입하여 OW 방법의 적용 범위를 더 확장하였다. 이 방법은 실험에서 정보를 많이 얻기 위해 실패 확률을 증폭한 것이다. 실패 확률값( $p_i$ )에 영향을 주는 기능창의 하한, 상한 경계값은 식 (3)과 같이, 기능창 인자( $M$ )의 로그값에 관한 1차 함수에 의해 결정된다. 이때 실패유형별로 반응변수 모델링 방법을 이용하여 제어인자( $X$ )와 잡음인자( $N$ )의 함수로 기울기( $b_i$ )와 절편( $a_i$ )을 표현한다(Joseph and Wu, 2004; Wu and Hamada, 2009).

$$\Phi^{-1}(p_i) = a_i(\mathbf{X}, \mathbf{N}) + b_i(\mathbf{X}, \mathbf{N}) \log M \quad (3)$$

식 (3)에서 실패 확률  $p_i$ 는 <Figure 3>에 나타낸 것처럼 기능창 인자의 값에 따라 달라진다. 두 가지 유형의 실패가 일어나도록 기능창 인자의 값을 여러 군데 설정하여 실패율을 계산하고, 이들을 이용하여 실패 확률 곡선을 추정한다. 이후 실험자가 실패 확률의 임계값(threshold value)을 정하고, 그에 대응하는 기능창 인자의 경계값을 구하는 것이다.

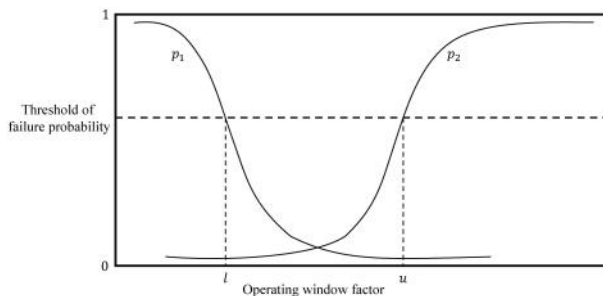


Figure 3. Probability Failure Curves Against OW Factor (Joseph and Wu, 2004)

Joseph and Wu(2004) 방법을 확장하여 Wang et al.(2022)은 기능창 문제를 분할법(split-plot design)으로 해석하고, 일반화

된 선형 혼합효과 모델을 이용하여 실패유형별로 반응변수를 모형화하는 방법을 제시하였다. Joseph and Wu의 두 가지 방법은 데이터를 이용하여 자세하게 분석할 수 있다는 장점이 있으나, 분석 과정이 매우 복잡하다. 따라서 제품을 개발하거나 공정을 개선하고자 하는 실험 엔지니어들이 활용하기는 어렵다. 본 연구에서는 엔지니어들이 익숙한 에너지 전달과 관련된 연속변수의 실측값으로 기능창의 하한과 상한 경계값을 정하고, 이들을 분석하여 기능창 최적조건을 찾는 방법을 제안하고자 한다.

### 3. 쉽게 적용할 수 있는 기능창 실험데이터 분석 방법

하한과 상한 경계값은 ( $l, u$ ) 데이터가 4개 이상 있는 경우에는 (상위 25%, 하위 25%), 즉 오름차순으로 볼 때 ( $l_{0.75}, u_{0.25}$ )에 가장 가까운 데이터로 정한다. 이 위치의 값들은 아주 크거나 아주 작은 극단치를 제외한 비모수적 방법으로 구한 경계값이 된다. ( $l, u$ ) 데이터가 2개 또는 3개씩 있으면,  $l_{max}$  와  $u_{min}$ 을 각각 하한과 상한의 경계값으로 정한다. 경계값이 정해지면,  $l$ 을 최소화하고  $u$ 를 최대화하여 궁극적으로 기능창 크기(Operating Window Size: OWS)인 ( $u-l$ )을 최대화하는 조건을 선정한다.

먼저,  $l$ 과  $u$ 의 경계값에 영향을 미치는 인자를 파악해야 한다.  $l$ 과  $u$ 의 경계값 데이터로 각 인자의 수준별 평균을 구하고, 인자의 효과(effect)를 수준별 평균의 최대값과 최소값의 차이로 계산한다. 효과의 절댓값을 오름차순으로 나열한 뒤, <Figure 4>와 같이 꺾은선 그래프를 작성하여 인자의 중요성 여부를 판단한다. <Figure 4>는 4.1절의 사례 분석에서 사용할 웨이브 납땜(wave soldering) 실험 결과의  $u$  경계값 데이터로부터 인자의 효과를 구하여 그린 그래프이다. <Figure 4>를 보면, 효과값이 완만하게 커지다가 인자 D를 지나서 급격히 꺾어 올라간다. 효과값이 D보다 큰 인자 M, H, J를 중요한 인자로 판단한다. 즉, 꺾은선 그래프에서 효과값이 조금씩 증가하다가 팔꿈치처럼 크게 꺾이는 첫 번째 지점을 기준으로 삼고, 이보다 효과의 절댓값이 큰 인자를 중요한 인자로 판단한다. 이 방법은 K-평균 군집화(K-means clustering)에서 사용하는 ‘엘보우 기법(elbow method)’의 개념을 적용한 것이다.

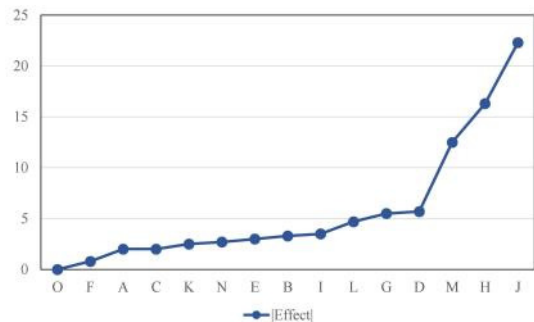


Figure 4. Line Graph of the |Effect|

엘로우 기법을 통하여  $l$ 과  $u$ 의 경계값에 영향을 미치는 인자들을 선정한 다음, 이들의 최적 수준을 정해야 한다. 문제는 어떤 인자의  $l$  경계값 측면 최적 수준이  $u$  경계값 측면에서 보면 최적이지 아닐 수 있다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 Byun *et al.*(2017)이 제시한, 중요한 인자를 3개의 그룹으로 나누어 다수반응변수를 최적화하는 방법을 쓰기로 한다. 중요한 인자가 하나의 반응변수에만 영향을 미치면 ‘특정인자(specific factor)’, 여러 반응변수에 영향을 미치고 그 최적 수준이 일치하면 ‘비충돌 공통인자(non-conflicting common factor)’, 최적 수준이 반응변수별로 다르게 나타나면 ‘충돌 공통인자(conflicting common factor)’로 구분한다. 특정인자, 비충돌 공통인자의 최적 수준을 먼저 정한다. 충돌 공통인자의 경우에는  $l$ 과  $u$  경계값 측면의 최적조건을 각각  $opt_l, opt_u$ 라고 할 때,  $\Delta OWS$ 를 식 (4)와 같이 정의하여,  $\Delta OWS$ 가 0보다 크면  $opt_u$ 를, 0보다 작으면  $opt_l$ 을 취하면 된다.

$$\Delta OWS = (u - l)_{opt_l \rightarrow opt_u} \quad (4)$$

최적 수준에서 경계값의 예측치는 가법모형(additive model)에 근거하여 계산한다. 만일  $l$ 에 영향을 미치는 인자가 A와 C이고, A와 C의 최적 수준이 각각 2와 1일 경우, 최적 조건에서  $l$ 의 예측값( $l_{opt}$ )은 식 (5)와 같이 구한다. 이때  $m$ 은 데이터 전체평균,  $m_{A_2}, m_{C_1}$ 는 각각 A와 C의 최적 수준의 데이터 평균값을 의미한다.

$$l_{opt} = m + (m_{A_2} - m) + (m_{C_1} - m) \quad (5)$$

기능창 최적화를 위한 분석 과정을 <Figure 5>에 흐름도로 작성하였다.

OW 최적조건을 선정한 다음, 분석 결과의 재현성을 검증하기 위해 확인실험을 해야 한다. 그런데 확인실험 환경은 기능창 실험의 환경과 다를 수 있다. 따라서 확인실험은 최적조건

뿐만 아니라 최초 조건에서도 시행해야 한다. 그래야 실험 환경이 변했다더라도 기능창 실험을 통하여 선정한 최적조건과 최초 조건의 차이가 확인실험에서도 유지된다면 최적조건의 재현성이 보장된다고 판단할 수 있기 때문이다.

#### 4. 기능창 실험데이터 사례 분석

이제 4가지 사례의 기능창 실험데이터를 이용하여 본 연구에서 제안한 방법으로 분석하고자 한다. Peace(1993)는 15개의 제어인자로 구성된 실험점별로 운반 장치를 5번 바꿔가면서 실험을 진행하였다. Jean *et al.*(2007)은 7개의 제어인자 배열과 3개의 잡음인자 배열을 교차하여 실험을 설계하였다. 이 경우, 제어인자와 잡음인자 간 교호작용을 이용하여 잡음에 둔감한 제어인자의 조건을 파악할 수 있다. Kim *et al.*(2008)은 데이터 수집 장비(센서)의 성능과 관련된 3개의 잡음을 고려할 때, 감지성능을 높이는 잡음들의 수준과 낮추는 수준을 각각 조합하여 2개의 복합잡음(compound noise) 수준을 구성하였다. 이 사례에서는 기능창 실험을 2개의 실험 환경에서 별도로 진행했기 때문에, 각 실험의 분석 결과를 통합하는 과정이 필요하다. 제록스(Xerox) 종이이송 문제(Miyakawa, 1993)는 8개의 제어인자와 2수준 잡음인자 1개를 고려한 실험을 설계하고, 실험점별로 기능창 인자인 마찰력 수준을 4~6개 정도 지정한 후, 각 마찰력에서 종이이송 실험을 5번씩 실시하였다. 5회 반복 실험에서 실패가 발생한 횟수를 데이터로 수집하였으므로, 데이터는 0에서 5 사이의 정수(integer)로 나타난다. 종이이송 사례는 앞선 3가지 경우와 달리, 이 데이터로부터 하한( $l$ )과 상한( $u$ )을 정해야 한다.

##### 4.1 웨이브 납땜(wave soldering) 관련 사례

웨이브 납땜(wave soldering) 공정에서 온도로 인해 발생하는 결함을 줄이고자 기능창 실험을 시행한 사례 데이터(Peace,

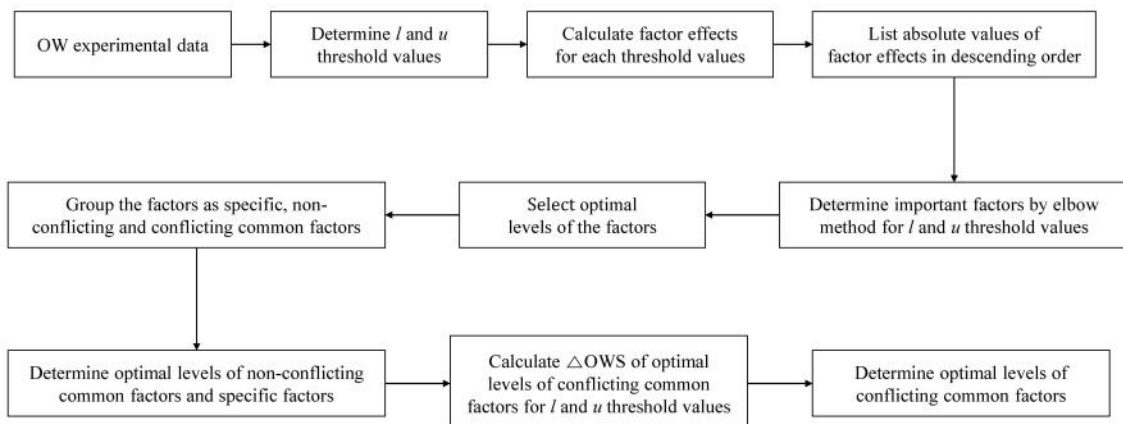


Figure 5. Flow Chart for Analyzing Operating Window Data

1993)를 분석한다. 웨이브 납땜을 사용하여 전자부품이 인쇄 회로기판(PCB)에 조립되는 과정에서 상단 보드의 온도가 낮으면 납땜 내부에 구멍이 생기는 ‘솔더 보이드(solder void)’가 발생하고, 온도가 높으면 과도한 납땜으로 필요하지 않은 곳이 연결되는 ‘솔더 브릿지(solder bridge)’가 발생한다. 기능창 인자를 ‘상단 보드의 온도’로 삼아 솔더 보이드가 발생하지 않는 최저 온도인  $l$ 과, 솔더 브릿지가 발생하지 않는 최고 온도인  $u$  데이터를 수집하였다.

제어인자 15개를 대상으로  $L_{16}(2^{15})$  직교배열을 이용하여 실험을 설계하고(<Table 1>), 각 실험점에서 캐리어 5개를 골라  $l$ 과  $u$  데이터를 기록했다. 이때 하한( $l$ ) 경계값은 2번째로 큰 데이터( $l_{0.75}$ ), 상한( $u$ ) 경계값은 2번째로 작은 데이터( $u_{0.25}$ )를 선택하여 분석에 이용하였다. 실험으로 수집한 데이터와 각 경계값은 <Table 2>에 나타내었다.

하한과 상한의 경계값인  $l_{0.75}$ 과  $u_{0.25}$  데이터를 이용하여 수준별로 평균값을 계산하고, 이로부터 효과(effect)를 구한 다

**Table 1.**  $L_{16}(2^{15})$  Orthogonal Array

No	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

**Table 2.** Wave Soldering Data

No	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_{0.75}$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_{0.25}$
1	247	245	242	245	240	245	253	260	265	265	250	253
2	235	232	230	232	230	232	231	235	238	238	240	235
3	229	223	220	225	220	225	273	280	290	280	275	275
4	234	230	235	233	228	234	222	230	235	230	228	228
5	242	235	234	235	230	235	228	235	234	235	230	230
6	242	230	238	234	237	238	252	260	258	264	257	257
7	237	234	235	230	232	235	248	255	245	260	252	248
8	238	235	236	235	230	236	234	240	246	235	240	235
9	241	240	235	240	235	240	270	275	285	270	275	270
10	230	225	222	215	215	225	215	225	222	215	225	215
11	224	220	215	212	212	220	261	268	265	262	272	262
12	231	230	228	228	226	230	225	230	238	228	236	228
13	239	235	235	230	235	235	235	235	235	240	245	235
14	239	235	238	235	230	238	235	235	238	245	250	235
15	223	220	215	218	218	220	245	255	265	238	258	245
16	222	220	215	224	218	222	255	260	265	244	268	255

음, 그 절댓값(|effect|)을 크기순으로 나열하여 <Table 3>, <Table 4>에 정리하였다. 각 경계값에 큰 영향을 미치는 인자를 선정하기 위해 꺾은선 그래프를 작성했다(<Figure 6>).

$l_{0.75}$ 에 관한 효과의 꺾은선 그래프(<Figure 6(a)>)를 보면, 효과 절댓값이 0 부근에서 일정하게 유지되다 인자 C를 지나 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 인자 C보다 효과 절댓값이 큰 J, E, G, L, N, A, D를  $l$ 의 경계값에 영향을 미치는 인자로 판정한다.  $l_{0.75}$  최소화를 위한 각 인자의 최적조건은

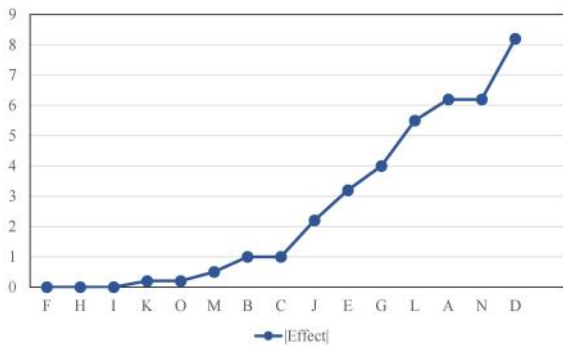
<Table 3>으로부터 구할 수 있는데, 2개 수준의 평균 중 값이 작은  $A_2D_2E_1G_2J_2L_2N_2$ 로 결정한다.  $u_{0.25}$ 에 관한 효과의 꺾은선 그래프(<Figure 6(b)>)를 통해 M, H, J를 중요한 인자로 파악하고, 인자별 최적조건은 <Table 4>에서 평균값이 큰  $H_1J_1M_2$ 로 선정한다.  $l_{0.75}$ 와  $u_{0.25}$  양쪽에 영향을 미치는 공통 인자는 J 하나만 있는데, J의 최적 수준이  $l_{0.75}$ 와  $u_{0.25}$  측면에서 각각 2수준, 1수준이므로 이것은 충돌 공통인자이다. 충돌 공통인자 J의 최적 수준을 결정하기 위해 식 (4)의  $\Delta OWS$ 를

Table 3. Factor Effects for  $l_{0.75}$

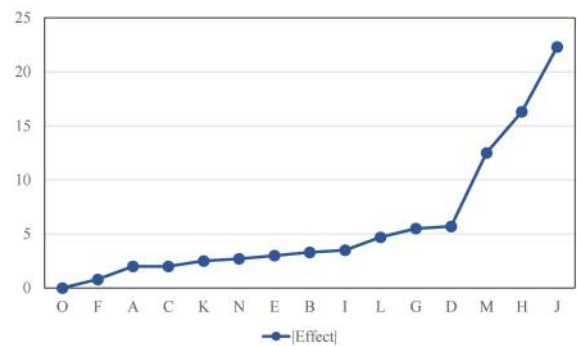
Factor	F	H	I	K	O	M	B	
Level 1	231.9	231.9	231.9	231.8	231.8	231.6	231.4	
Level 2	231.9	231.9	231.9	232.0	232.0	232.1	232.4	
Effect	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.5	1.0	
Rank	13	13	13	11	11	10	8	
Factor	C	J	E	G	L	A	N	D
Level 1	231.4	233.0	230.3	233.9	234.6	235.0	235.0	236.0
Level 2	232.4	230.8	233.5	229.9	229.1	228.8	228.8	227.8
Effect	1.0	2.2	3.2	4.0	5.5	6.2	6.2	8.2
Rank	8	7	6	5	4	2	2	1

Table 4. Factor Effects for  $u_{0.25}$

Factor	O	F	A	C	K	N	E	
Level 1	244.1	244.5	245.1	245.1	242.9	245.5	245.6	
Level 2	244.1	243.8	243.1	243.1	245.4	242.8	242.6	
Effect	0.0	0.8	2.0	2.0	2.5	2.7	3.0	
Rank	15	14	12	12	11	10	9	
Factor	B	I	L	G	D	M	H	J
Level 1	245.8	242.4	241.8	241.4	241.3	237.9	252.3	255.3
Level 2	242.5	245.9	246.5	246.9	247.0	250.4	236.0	233.0
Effect	3.3	3.5	4.7	5.5	5.7	12.5	16.3	22.3
Rank	8	7	6	5	4	3	2	1



(a)  $l_{0.75}$  Values



(b)  $u_{0.25}$  Values

Figure 6. Line Graph for  $l$  and  $u$  Threshold Values

계산하면, 식 (6)과 같다.  $\Delta OWS$ 가 0보다 크므로, 인자 J는  $u_{0.25}$  측면의 최적 수준인  $J_1$ 으로 결정한다.

$$\begin{aligned} \Delta OWS &= (u_{0.25} - l_{0.75})_{J_2 \rightarrow J_1} \quad (6) \\ &= (255.3 - 233.0) - (233.0 - 230.8) \\ &= 22.3 - 2.2 = 20.1 \end{aligned}$$

다른 주요 인자들은 모두 특정인자이므로, 앞서 구한 최적 수준으로 결정한다. 즉, 웨이브 납땜 공정에서 얻은 데이터를 분석한 최적조건은  $A_2D_2E_1G_2H_1J_1L_2M_2N_2$ 이다.  $l_{0.75}$ 와  $u_{0.25}$ 에 영향을 미치는 인자의 최적조건인  $A_2D_2E_1G_2J_1L_2N_2$ 와  $H_1J_1M_2$ 에서 예측치는 각각  $l_{opt} = 216.45$ ,  $u_{opt} = 269.75$ 이므로, 최적조건에서 기능창 크기의 예측값  $OWS_{opt}$ 는 53.3이다.

### 4.2 전자빔 용접 공정 관련 사례

Jean *et al.*(2007)은 전자빔(Electron Beam: EB) 용접 공정에서 용접 접합 위치에 불룩하게 올라온 곳인 용융 비드(melting bead)에 나타나는 결함을 방지하는 실험 조건을 찾기 위해 기능창 실험을 시행하였다. 용접 시 이송속도(travel speed)가 느리면 표면 비드에 왜곡, 수축, 언더컷이, 빠르면 균열, 공극(porosity) 등과 같은 결함이 발생한다. 따라서 이송속도를 기능창 인자로 삼아, 결함이 발생하지 않는 최저 이송속도( $l$ )와 최고 이송속도( $u$ ) 데이터로 수집하려고 하는데, 이러한 최저/

최고 이송속도에 영향을 미칠 수 있는 용접재료, 형상(shape), 표면거칠기를 잡음인자로 반영하였다.

제어인자 7개는  $L_8(2^7)$ , 잡음인자 3개는  $L_4(2^3)$  직교배열에 각각 배치하고, 두 개의 배열을 교차하여 설계행렬을 구성하였다(<Table 5>). 각 실험점에서 수집한 데이터 4개 중에서 하한 경계값은 2번째로 큰 데이터, 상한 경계값은 2번째로 작은 데이터를 선택하였다. 이들은 각각 상위 33%, 하위 33% 백분위(percentile)에 있는  $l_{0.67}$ ,  $u_{0.33}$  값이다. 실험데이터와 각 경계값을 정리한 결과를 <Table 5>에 설계행렬과 함께 나타내었다.

<Table 5>의 데이터로 하한과 상한 경계값별로 인자의 효과를 구하고, 그 절댓값을 크기순으로 나열하여 꺾은선 그래프를 작성하면,  $l$ 과  $u$  경계값 모두 인자 A, B가 중요하다. 하한 경계값에서 최적 수준은  $A_1B_1$ 이고, 상한 경계값에서 최적 수준은  $A_2B_2$ 이어서 인자 A, B는 모두 충돌 공통인자에 해당한다. 인자 A, B의 최적조건을 파악하기 위해 계산한  $\Delta OWS$ 는 0.5로 매우 작아 두 최적조건인 OWS 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

해당 사례는 잡음인자 3개를  $L_4(2^3)$  직교배열에 배치하여 실험한 것이므로 제어인자와 잡음인자 간 교호작용을 알 수 있다. 잡음에 둔감한 제어인자의 조건을 파악하기 위하여 <Figure 7>과 같이 제어인자와 잡음인자 간 교호작용을 작성하였다. <Figure 7>은 <Table 5>의  $u$  데이터를 바탕으로 제어인자 C와 잡음인자 Q, P 간 교호작용 그림을 각각 그린 것이다.

Table 5. Design Matrix and Data of Electron Beam Process

No	A	B	C	D	E	F	G	P	1	1	2	2	$l_{0.67}$	$u_{0.33}$
								Q	1	2	1	2		
								R	1	2	2	1		
1-4	1	1	1	1	1	1	1	$l$	16	18	14	17	17	30
								$u$	28	30	31	33		
5-8	1	1	1	2	2	2	2	$l$	15	16	14	12	15	27
								$u$	26	29	27	30		
9-12	1	2	2	1	1	2	2	$l$	18	19	21	22	21	32
								$u$	32	33	31	34		
13-16	1	2	2	2	2	1	1	$l$	19	25	22	24	24	35
								$u$	35	37	34	36		
17-20	2	1	2	1	2	1	2	$l$	23	24	26	24	24	37
								$u$	37	39	36	37		
21-24	2	1	2	2	1	2	1	$l$	22	21	24	20	22	35
								$u$	34	36	37	35		
25-28	2	2	1	1	2	2	1	$l$	26	28	27	25	27	39
								$u$	38	39	42	40		
29-32	2	2	1	2	1	1	2	$l$	23	25	23	21	23	37
								$u$	37	38	35	39		

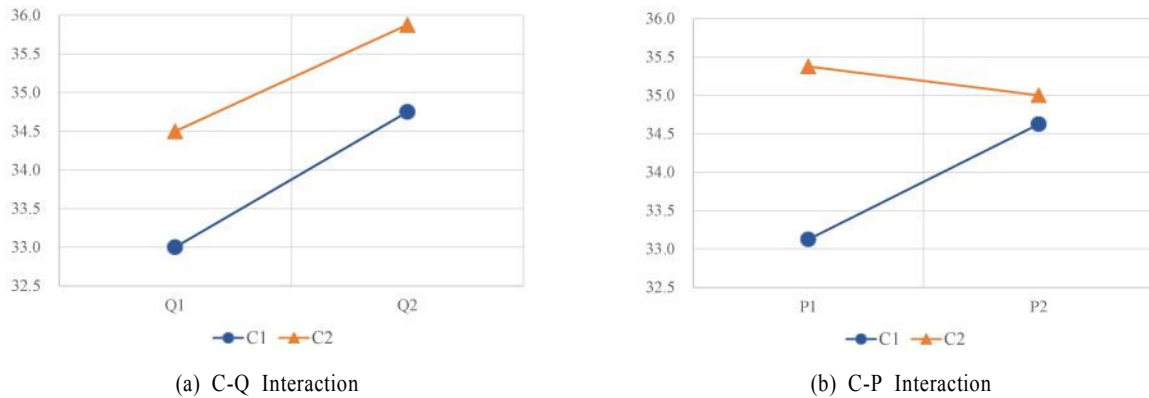


Figure 7. Interactions of Control-Noise Factors

<Figure 7(a)>에서는, 잡음인자 Q의 수준이 변화할 때  $u$  데이터의 변동은 제어인자 C와 상관없이 일정하다. 따라서 인자 C는 잡음인자 Q에 둔감한 조건을 도출할 수 없다. 이와 달리 <Figure 7(b)>를 보면, 잡음인자 P의 변화에 따른  $u$  데이터의 변동이 제어인자 C의 수준이 1일 때보다 2일 때 더 작게 나타나므로  $C_2$ 가 잡음인자 P에 둔감한 조건임을 알 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하여 잡음인자 P, Q, R에 둔감한 제어인자 수준을 확인한 것을 <Table 6>에 정리하였다.

<Table 6>에서 제어인자 A, D, F, G는 잡음인자별로 강건한 수준이 다르다. 이때 제어인자의 수준을 결정하는 기준은 다음과 같다: 1) 최대한 많은 잡음에 강건한 수준을 택한다. 2) 잡음인자의 수준에 따라 제어인자의 효과 변동이 더 큰 수준은 피하는 것이다. 예를 들면, <Table 6>에서 제어인자 A의 수준은 1보다 2일 때 더 많은 잡음에 강건하므로,  $A_2$ 를 최적조건으로 선택한다. 제어인자 D와 같이 잡음에 강건한 수준의 수가 같다면, 잡음인자별로 수준 간 제어인자의 효과 변동을 파악한 뒤 2번 기준에 따라 최적조건을 선택하여 반응변수의 변동을 최대한 줄이도록 한다. 이렇게 두 개의 기준에 따라 선정한 OW 최적조건은  $A_2B_1C_2D_1E_1F_2G_2$ 이고,  $OWS_{opt}$ 는 15.88이다.

Table 6. Control Factor Levels Robust to Noise Factors

Limit	Noise Factor	Control Factor						
		A	B	C	D	E	F	G
$l$	P							
	Q	2	1				2	2
	R	1			1	1		
$u$	P			2	2		1	2
	Q	2					2	1
	R							

4.3 자동차 에어백 오작동 관련 사례

Kim et al.(2008)은 자동차 충돌 시, 에어백이 작동되어야 할

때 전개되지 않거나, 작동되지 않아야 할 때 잘못 전개되는 사고를 방지하기 위한 실험을 진행하였다. 에어백은 차량이 저속 운행 중 정면충돌이 일어나면 전개되지 않아야 하며, 고속으로 운행 중 차량 앞부분의 일부가 장애물에 부딪히는 옆셋충돌이 일어나면 전개되어야 한다. 에어백 전개 여부는 전방충돌 센서(Front Impact Sensor: FIS)의 펄스 신호 값을 통해서 결정된다. 저속 정면충돌과 고속 옆셋충돌 간 FIS 신호 피크값의 차이가 커야만 에어백이 실패 없이 작동할 수 있는데, ‘12마일 정면충돌 - 25마일 옆셋충돌’과 ‘18마일 정면충돌 - 40마일 옆셋충돌’ 각 조합은 이 피크값이 서로 비슷하게 나와서 에어백 오작동이 우려된다. 따라서 FIS 신호 피크값을 에어백 오작동 방지를 위한 기능창 인자로 삼아, 이를 저속 정면충돌 때는 낮추고 고속 옆셋충돌 때는 높여서 감지성능의 변별력을 향상하기 위한 실험을 진행했다.

FIS 신호 값이 잘 구분되는 조건을 모색하기 위해 (1) 12마일 정면충돌( $l$ )과 25마일 옆셋충돌( $u$ )일 때, (2) 18마일 정면충돌( $l$ )과 40마일 옆셋충돌( $u$ )일 때 별도로 기능창 실험을 진행하였다. 사내 규정상 위 2가지 정면충돌과 옆셋충돌 조합에서 센싱 변별력이 모두 확보되어야 하므로, 두 차레 기능창 실험을 진행하였다. 5개의 제어인자는 <Table 7>의  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  직교 배열의 8개의 열 중 첫 5개 열인 A~E 열에 배치하였다. 그리고 차량 무게, 범퍼 백빔과 사이드 멤버의 강성과 강도의 산포를 잡음으로 고려하여 복합잡음( $N_1, N_2$ )을 구성하였다. 여기서 범퍼 백빔은 범퍼의 뼈대 역할을 하고, 사이드 멤버는 차체 골격을 구성하는 주요 부품이다. 강성(stiffness)은 외부 힘과 변형량의 비율로서, 외부 힘에 변형되지 않는 정도이고, 강도(strength)는 외부에서 가해지는 힘에 대응할 수 있는 저항력의 최대값이다. 복합잡음  $N_1$ 은 FIS 감지성능이 좋지 않을 것이라 예상되는 조합인 (무게 100kg 증가, 산포 10% 증가)이고,  $N_2$ 는 FIS 감지성능이 좋을 것이라 예상되는 조합 (무게 100kg 감소, 산포 10% 감소)이다. 각 실험점의 잡음 조건  $N_1, N_2$ 에서 실험을 시행하여  $l$ 과  $u$  값을 얻었고, 하한과 상한 경계값은 각각  $l_{max}$ 와  $u_{min}$ 을 선택하였다.

**Table 7.**  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  Orthogonal Array

No	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

(1) ‘12마일 정면충돌과 25마일 오프셋충돌’ 기능창 실험

12마일의 저속 정면충돌과 25마일의 고속 오프셋충돌에 대해 실험을 진행하고, FIS 신호 피크값을 수집하였다. 실험으로 수집한 데이터와 각 경계값은 <Table 8>과 같다.

**Table 8.** Data of Airbag Sensibility: 12 mile Frontal versus 25 mile Offset Crush

No	$l_1$	$l_2$	$l_{max}$	$u_1$	$u_2$	$u_{min}$
1	1195	1220	1220	533	554	533
2	1147	1119	1147	217	193	193
3	1196	1178	1196	504	504	504
4	1556	1543	1556	441	656	441
5	1702	1693	1702	552	587	552
6	1534	1538	1538	555	720	555
7	1550	1559	1559	695	989	695
8	1484	1482	1484	740	930	740
9	1474	1460	1474	899	1015	899
10	1054	799	1054	1941	1861	1861
11	1163	1220	1220	2064	2052	2052
12	943	743	943	1862	1949	1862
13	862	626	862	2060	2020	2020
14	1171	982	1171	2210	2337	2210
15	1062	957	1062	2379	2217	2217
16	1061	636	1061	2212	2353	2212
17	992	825	992	2110	2127	2110
18	1061	773	1061	2343	2309	2309

$l$  경계값인  $l_{max}$  와  $u$  경계값인  $u_{min}$  에 대한 인자 효과를 구하여 절댓값 크기순으로 나열하고, 엘보우 기법을 이용하여 중요한 인자를 선정했다. 그 결과,  $l$  경계값에는 인자 A, B가 중요하고 최적조건은  $A_2B_1$ 이며,  $u$  경계값에는 인자 A가 중요하고 최적조건은  $A_2$ 이다. 따라서, 인자 A는 비충돌 공통인자, 인자 B는 특정인자로 구분된다. 충돌 공통인자가 없으므로, OW 최적조건은  $A_2B_1$ 이며, 이때  $OWS_{opt}$ 는 1,157이다.

(2) ‘18마일 정면충돌과 40마일 오프셋충돌’ 기능창 실험

18마일의 저속 정면충돌과 40마일의 고속 오프셋충돌 실험으로 수집된 FIS 신호 피크값, 이들의 하한과 상한 경계값을 <Table 9>에 정리했다.

**Table 9.** Data of Airbag Sensibility: 18 mile Frontal versus 40 mile Offset Crush

No	$l_1$	$l_2$	$l_{max}$	$u_1$	$u_2$	$u_{min}$
1	1631	1598	1631	1084	1171	1084
2	1698	1698	1698	1410	1068	1068
3	1686	1774	1774	1243	1332	1243
4	2008	2043	2043	684	938	684
5	2460	2341	2460	1099	978	978
6	2298	2285	2298	981	1159	981
7	2203	2241	2241	1357	1614	1357
8	2094	2087	2094	1308	1516	1308
9	1946	1937	1946	1389	1587	1389
10	1510	1393	1510	2392	2447	2392
11	1755	2409	2409	2612	3264	2612
12	2039	2351	2351	2463	3105	2463
13	1782	2259	2259	3078	3230	3078
14	1350	1358	1358	2809	3066	2809
15	1536	1324	1536	3060	3002	3002
16	1054	1016	1054	2750	3001	2750
17	1358	1260	1358	2729	2852	2729
18	1131	744	1131	2855	3033	2855

$l_{max}$  와  $u_{min}$  에 관한 분석 결과,  $l_{max}$  에 중요한 인자와 그들의 최적 수준은  $A_2B_3D_3$ 이고,  $u_{min}$  에 중요한 인자와 그들의 최적 수준은  $A_2$ 이다. 이때, 인자 A는 비충돌 공통인자, 인자 B, D는 특정인자이므로, OW 최적조건은 두 결과를 통합한  $A_2B_3D_3$ 이고,  $OWS_{opt}$ 는 1,445이다.

(3) 자동차 에어백 오작동 방지 실험 결론

2차례 진행한 기능창 실험 결과를 정리하면, ‘12마일 정면충돌( $l$ )과 25마일 오프셋충돌( $u$ ) 실험’의 최적조건은  $A_2B_1$ 이고, ‘18마일 정면충돌( $l$ )과 40마일 오프셋충돌( $u$ ) 실험’의 최적조건은  $A_2B_3D_3$ 이다. 두 결과에서 인자 B의 최적조건이 일치하지 않는다.  $A_2D_3$ 로 고정한 상태에서 인자 B의 두 수준( $B_1, B_3$ )에

다른 OWS를 계산한 결과를 <Table 10>에 정리하여 나타냈다.

**Table 10.** Optimal Conditions for Airbag Sensibility Experiments

Case	OWS		Optimal Conditions
	$A_2B_1D_3$	$A_2B_3D_3$	
12mile frontal versus 25mile offset crush	1,157	1,015	$A_2B_1D_3$
18mile frontal versus 40mile offset crush	1,186	1,445	$A_2B_3D_3$

<Table 10>을 보면, 두 실험에서 인자 B의 최적 수준이 다르게 나타난다.  $B_1$ 보다는  $B_3$ 를 선택함으로써 ‘18마일-40마일’ 실험에서 얻는 OWS 이득이 ‘12마일-25마일’ 실험의 OWS 손해보다 크므로 최적조건은  $A_2B_3D_3$ 로 정한다.

#### 4.4 복사기 종이이송 사례

제록스(Xerox)의 ‘복사기 종이이송’ 사례(Miyakawa, 1993)에서 기능창 인자는 ‘롤러의 마찰력’으로서, 종이이송 실패를

**Table 11.** Data From the Paper Feeder Experiment

No	Misfeed										Multi-feed													
	$N_1$					$N_2$					$N_1$					$N_2$								
1	20	40	<b>42.5</b>	45	50	60	20	<b>30</b>	40	50	60	70	<b>80</b>	82.5	85	90	120	160	60	62.5	<b>65</b>	70	80	90
	5	5	1	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	1	1	3	2	3
2	0	10	<b>15</b>	20	30	40	0	10	<b>15</b>	20	40	60	30	<b>35</b>	40	50	60	30	40	60	<b>70</b>	75	80	
	5	3	0	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	1	3	3	3	0	1	1	1	2	2	
3	0	10	<b>15</b>	20	25		0	10	15	<b>20</b>	30	40	<b>20</b>	25	30	40		20	30	<b>35</b>	40	50		
	5	5	1	1	0		5	3	2	0	0	0	0	2	2	2		0	1	1	3	3		
4	20	25	<b>30</b>	40	60		0	20	<b>25</b>	30	40		50	<b>60</b>	65	70	80	40	<b>50</b>	55	60			
	5	3	1	0	0		5	5	1	0	0		0	1	2	2	2	0	0	2	2			
5	20	<b>25</b>	30	40	50		20	<b>25</b>	30	40	50		30	<b>40</b>	45	50	60	40	<b>50</b>	55	60			
	4	1	0	0	0		4	1	0	0	0		0	1	3	3	3	0	0	2	2			
6	10	15	<b>20</b>	30	40		10	<b>15</b>	20	30	40		30	<b>40</b>	45	50		30	<b>40</b>	50	55	60		
	4	2	1	0	0		3	0	0	0	0		0	1	2	3		0	1	2	2	3		
7	10	20	30	<b>35</b>	40		10	20	<b>25</b>	30	40		20	<b>30</b>	35	40	50	20	30	40	<b>60</b>	70	80	
	5	4	2	1	0		5	3	0	0	0		0	1	2	2	3	0	1	1	1	2	2	
8	15	20	30	35	<b>40</b>		20	30	35	<b>40</b>	60	70	70	80	<b>100</b>	110	120	60	<b>70</b>	75	80	100		
	3	2	2	3	0		5	2	4	1	1	0	0	1	1	2	2	0	1	2	2	2		
9	10	15	<b>20</b>	30	40		10	15	20	25	<b>30</b>	40	40	60	<b>65</b>	70	80	40	50	<b>55</b>	60	70		
	5	4	1	0	0		5	5	5	4	0	0	0	1	1	2	3	0	0	1	2	3		
10	0	<b>5</b>	10	15	20		0	<b>5</b>	10	15	20		5	10	<b>15</b>	20	30	0	5	<b>15</b>	20	30		
	5	1	0	0	0		5	0	0	0	0		0	1	1	3	3	0	1	0	2	2		
11	0	5	<b>10</b>	15	20		0	<b>5</b>	10	15	20		5	10	<b>15</b>	20	30	0	5	10	<b>15</b>	20	30	
	5	2	0	0	0		5	1	0	0	0		0	1	1	4	3	0	1	1	0	2	2	
12	0	10	<b>15</b>	20			0	10	<b>15</b>	20			30	40	<b>50</b>	55	60	40	45	<b>50</b>				
	5	4	0	0			5	4	0	0			0	1	1	2	5	0	0	1				
13	0	10	<b>15</b>	20			0	10	15	<b>20</b>			30	40	<b>80</b>	85	90	100	<b>55</b>	60				
	5	5	1	0			5	4	2	0			0	1	1	4	3	2	0	2				
14	10	20	25	30	<b>35</b>	40	10	20	<b>25</b>	30	35	40	20	30	<b>35</b>	40	45	20	25	30	<b>35</b>	40	50	
	5	3	2	2	0	0	5	4	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	1	4	3	
15	<b>0</b>	5	10	15			0	<b>5</b>	10	15	20		20	<b>30</b>	35	40	50	10	<b>15</b>	20	30			
	1	0	0	0			4	0	0	0	0		0	1	3	2	4	0	1	4	4			
16	5	<b>10</b>	20	30	35		5	<b>10</b>	20	30	40		20	30	<b>35</b>	40	50	60	30	40	<b>50</b>	55	60	
	5	1	0	0	0		5	1	0	0	0		0	1	0	2	3	5	0	1	1	2	2	
17	10	20	30	40	<b>45</b>	50	10	20	<b>25</b>	30	40		80	90	95	<b>100</b>		100	105	<b>110</b>				
	5	4	5	2	0	0	5	3	0	0	0		0	1	1	1		0	1	1				
18	10	15	<b>20</b>	30			10	20	30	<b>35</b>	40		60	<b>65</b>	70	80	90	120	60	<b>70</b>	75	80	90	
	5	5	1	0			5	5	5	0	0		0	1	2	2	2	3	0	1	2	2	3	

**Table 12.** Illustrations of the Threshold Friction Force of the Paper Feeder Experiment

No	Misfeed					Multi-feed															
	$N_1$		$N_2$			$N_1$		$N_2$													
7	10	20	30	<b>35</b>	40	10	20	<b>25</b>	30	40	20	<b>30</b>	35	40	50	20	30	40	<b>60</b>	70	80
	5	4	2	1	0	5	3	0	0	0	0	1	2	2	3	0	1	1	1	2	2
	$l_1 = 35$					$l_2 = 25$					$u_1 = 30$					$u_2 = 60$					

없애기 위해 ‘종이걸림’이 발생하지 않는 마찰력( $l$ )과 ‘다중이송’이 발생하지 않는 마찰력( $u$ )을 기능창 실험으로 수집하였다.

8개의 제어인자는  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 에 배치하고(<Table 7>), 잡음인자는 종이를 담는 함(tray)에 쌓여 있는 종이가 ‘적은 쪽’과 ‘많은 쪽’의 2수준을 고려하였다. 제어인자 중 D는 2수준이라서 D 열의 ‘수준 3’은 ‘수준 1’로 변경하여 실험하였다. 각 실험점에서 실패가 어느 정도 나올 때까지 마찰력을 4~6번 변경하면서, 마찰력별로 5회 반복 실험을 시행하고, 발생한 실패 횟수를 <Table 11>에 나타내었다. 분석에 사용한 데이터는 각 실패유형이 1회 발생할 때까지를 기준으로 잡은 임계 마찰력으로서, 종이걸림이 1회 발생하는 최소 마찰력과 다중이송이 1회 발생하는 최대 마찰력이 이에 해당한다. 만일 실패가 1회 발생한 마찰력이 없을 때는 엄격한 기준을 적용하여 2회 이상에서 0회로 줄어들 때의 마찰력을 기록하였다. 임계 마찰력에 관한 예시를 <Table 12>에 나타내었다. <Table 11>에 실험별 임계 마찰력을 밑줄로 표시하고, 이들을  $l$ 과  $u$  값으로 <Table 13>에 제시했다. 각 실험점에서 잡음을 반영한 하한과 상한 임

계 마찰력 ( $l_1, l_2$ ), ( $u_1, u_2$ )을 각각 구하고, 이들을 이용하여 하한과 상한 경계값을 각각  $l_{max}$ 와  $u_{min}$ 으로 선정했다.

상한과 하한 경계값을 대상으로 인자들의 효과를 구하고, 효과 절댓값을 크기순으로 그린 다음 엘보우 기법으로 중요한 인자를 선정했다.  $l$  경계값에는 D를 제외한 모든 인자가 중요하고 최적 수준은  $A_2B_1C_3E_2F_3G_2H_2$ 이며,  $u$  경계값에 영향을 미치는 인자는 B, F이고, 최적 수준은  $B_3F_1$ 이다. 인자 B, F는 층돌 공통인자, 인자 A, C, E, G, H는 특정인자로 구분할 수 있다. 층돌 공통인자의 최적조건을 정하기 위해  $\Delta OWS$ 를 계산하면, 35.84가 나온다.  $\Delta OWS$ 가 0보다 크므로, 층돌 공통인자의 최적조건은  $u$  경계값에 맞춘  $B_3F_1$ 이다. 따라서 종이이송 실험에서 얻은 데이터를 분석한 최적조건은  $A_2B_3C_3E_2F_1G_2H_2$ 이고, 각 경계값 최적조건에 의한  $OWS_{opt}$ 는 63.22이다.

**4.5 사례 데이터 분석 결과 요약**

네 가지 사례의 분석 과정을 요약하고, 각 사례를 기존의 분석방법 결과와 비교했다. 4.1절 웨이브 납땜 공정 사례는 각 실험점에서 구한 5개 데이터로부터 하한과 상한 경계값을 각각 두 번째로 큰 값과 작은 값으로 정하였는데, 이들은 상위 25%, 하위 25% 지점에 있는  $l_{0.75}$ 와  $u_{0.25}$  위치의 값들이다. 인자의 효과를 구하고, 효과 절댓값을 대상으로 엘보우 기법을 적용하여 중요한 인자를 선정했다. 이 중에서 인자 J가 층돌 공통인자라서,  $\Delta OWS$ 를 계산하여 J의 최적 수준을 결정하였다.

4.2절 전자빔 용접 공정은 각 실험점에서 잡음을 반영한 데이터가 4개 있다.  $l$ 과  $u$  경계값으로 각각 두 번째로 큰 값과 작은 값을 이용했는데, 이들은 상위 33%, 하위 33% 위치의 값들이다. 분석을 통하여 선정한 중요한 인자가 모두 층돌 공통인자에 해당하여  $\Delta OWS$ 를 계산한 결과, 그 값이 작았다. 따라서 제어인자와 잡음인자 간 교호작용을 파악하고 잡음에 둔감한 제어인자 수준을 고려하여 최적조건을 결정하였다.

4.3절과 4.4절은 각 실험점에서 잡음을 반영한 경계값이 2개라서 하한은 큰 값인  $l_{max}$ , 상한은 작은 값인  $u_{min}$ 을 경계값으로 정하여 기능창 분석 실험을 진행하였다. 4.3절의 에어백 오작동 사례에서는 사내 규정상 2가지 실험을 별도로 시행했다. 두 개의 실험에서 각각 최적조건을 정한 뒤, 그 결과를 통합하여 최종 최적조건을 도출하였다. 4.4절의 종이이송 사례는 4.1절~4.3절의 사례와 달리 하나의 잡음 조건에서 실패가 나오는 데이터를 다양하게 얻기 위해 기능창 인자인 마찰력을 조정하

**Table 13.** Threshold Values of the Friction Force

No	$l_1$	$l_2$	$l_{max}$	$u_1$	$u_2$	$u_{min}$
1	42.5	30.0	42.5	80	65	65
2	15.0	15.0	15.0	35	70	35
3	15.0	20.0	20.0	20	35	20
4	30.0	25.0	30.0	60	50	50
5	25.0	25.0	25.0	40	50	40
6	20.0	15.0	20.0	40	40	40
7	35.0	25.0	35.0	30	60	30
8	40.0	40.0	40.0	100	70	70
9	20.0	30.0	30.0	65	55	55
10	5.0	5.0	5.0	15	15	15
11	10.0	5.0	10.0	15	15	15
12	15.0	15.0	15.0	50	50	50
13	15.0	20.0	20.0	80	55	55
14	35.0	25.0	35.0	35	35	35
15	0.0	5.0	5.0	30	15	15
16	10.0	10.0	10.0	35	50	35
17	45.0	25.0	45.0	100	110	100
18	20.0	35.0	35.0	65	70	65

**Table 14.** Summary of the Data Analysis for the Four OW Experiments

Case Study	Operating Window Size			
	Method	Optimal Conditions	OWS	
Wave soldering	GLM	$A_2D_2G_2H_1J_1L_2M_2N_2$	57.15	
	Proposed	$A_2D_2E_1G_2H_1J_1L_2M_2N_2$	60.20	
Electron beam	SN ratio	$A_1B_1C_1D_2E_1F_2G_2$	12.75	
	Proposed	$A_2B_1C_2D_1E_1F_2G_2$	13.00	
Airbag sensibility	SN ratio	$A_2B_3C_1D_3E_1$	Case 1	1,168
			Case 2	1,585
	Proposed	$A_2B_3D_3$	Case 1	1,181
			Case 2	1,560
Paper feeder	Response Modeling	$A_2B_2C_1D_2E_3F_3G_2H_1$	36.40	
	Proposed	$A_2B_3C_3E_2F_1G_2H_2$	48.20	

면서 실험을 진행하여 마찰력에 따라 실패 횟수가 다르게 나온다. 따라서 마찰력의 하한( $l$ )과 상한( $u$ )은 별도의 기준에 따라 선별하여 기능창 최적화를 위한 데이터로 정리하였다.

본 논문에서 제안한 분석 방법과 각 사례의 분석 결과를 최적조건, OWS 측면에서 비교하여 <Table 14>에 제시하였다. 기존 분석에서 웨이브 납땜 사례는 Joseph and Wu(2002)의 일반화 선형모형(GLM) 방법을, 전자빔 용접과 에어백 오작동 사례는 SN비를, 종이이송 사례는 Joseph and Wu(2004)의 반응변수 모델링 방법을 사용하였다. 전자빔 용접과 에어백 오작동 사례는 실험자들이 기존 SN비를 그대로 이용한 것이다. 웨이브 납땜과 종이이송 사례는 통계적 지식이 풍부한 학자들이 이론적 연구를 통해 실험데이터를 일반화 선형 모델이나 반응변수 모델링 방법으로 분석하였다. 다만 이런 방법이 실제 제품개발이나 공정개선을 하는 엔지니어들이 익혀서 쓰기에는 어려움이 있으므로 본 연구에서는 이해하고 적용하기 쉬운 방법을 제시한 것이다. 방법 간 정확한 비교를 위해 <Table 14>에서 제시한 OWS는 각 실험의 최적조건에 포함된 모든 인자를 대상으로 예측치를 계산하였다. 비교한 결과를 보면, 제안한 방법의 최적조건으로 계산한 OWS와 기존 분석 방법들의 OWS가 큰 차이는 없는 것을 알 수 있다. 웨이브 납땜 사례를 제외한 나머지 사례의 기존 분석 결과는 모든 실험 인자에 대해 최적조건을 도출하였다. 이렇게 하면 효과가 크지 않아서 실험오차로 볼 수 있는 인자의 최적조건을 정하여 반영함으로써, OWS를 실제보다 크게 예측하는 오버슈팅(overshooting) 문제를 일으킬 수 있다. 중요한 인자를 선정할 때, 본 연구에서 적용한 엘보우 기법을 이용하면 이러한 문제를 방지하는 데 도움이 될 것이다.

비교 결과를 자세히 살펴보면, 웨이브 납땜 사례의 두 가지 방법의 분석 결과는 비슷하다. 인자 E 외에는 중요한 인자와 그 최적 수준이 같고, OWS의 차이는 인자 E의 포함 여부에 따라 나타난 것으로 보인다. 전자빔 용접 사례는 인자 A, C, D의 최적조건이 서로 다르게 나타났지만, OWS 결과는 큰 차이가

없다. 본 연구에서 인자의 최적조건은 잡음에 강건한 조건을 고려하여 수준을 결정했다는 점에서 SN비를 이용한 방법보다 OW가 더 안정적일 거라고 기대한다. 에어백 사례의 경우, SN비를 이용한 분석과 달리 제안된 방법은 인자 C, E가 중요한 인자 목록에서 제외되었지만, 두 분석 방법에서 동시에 중요하다고 판단한 인자 A, B, D의 최적조건은 일치한다. OWS는 제안한 방법이 두 가지 실험 중, 한 실험에서는 더 크고, 다른 실험에서는 더 작다. 종이이송 사례는 인자 D의 포함 여부 외에도, 최적조건이 일치하는 인자가 2개(A, G)뿐이라는 점에서 기존 분석과 제안된 방법의 분석 결과에 큰 차이가 있고, OWS는 제안된 방법이 더 크다.

### 5. 기능창 실험데이터 분석 토의

본 연구에서는 적용하기 쉬운 데이터 기반 비모수적 방법을 이용하여 설정한 기능창 데이터의 하한과 상한 경계값을 분석하는 방법을 제안하고, 네 가지 사례의 실험데이터를 분석한 결과를 제시하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하면 실험자가 처한 상황이나 의도에 따라 경계값을 정하는 기준을 유연하게 정할 수 있다.

본 연구에서 제안한 방법에 관하여 몇 가지 의견을 밝히고자 한다. 우선 잡음에 따른 데이터 변동의 크기에 따라 경계값을 정하는 기준에 관한 것이다. 변동이 크지 않을 때는 실패율이 50%인  $l_{0.5}$ 와  $u_{0.5}$  값, 즉, 중위수를 이용하여 분석한다. 만일 잡음에 따라 데이터의 변동이 크다면, 엄격한 기준을 따른다. 2개 또는 3개의 데이터만 얻었다면, 4.3, 4.4절처럼  $l_{max}$ 와  $u_{min}$ 을 이용하여 분석하고, 4.1, 4.2절과 같이 4개 또는 5개의 데이터가 있는 경우, 하한( $l$ )은 상위 2번째 값, 상한( $u$ )은 하위 2번째 값을 이용할 수 있는데, 이는 각각 ( $l_{0.67}$ ,  $u_{0.33}$ )과 ( $l_{0.75}$ ,  $u_{0.25}$ )에 해당한다. 만일 데이터의 수가 6개 이상이라면,  $l$ 은 상위 25%인  $l_{0.75}$ 에 가까운 실측값을,  $u$ 는 하위 25%에 해당하는

$u_{0.25}$ 에 가까운 실측값을 이용한다. 경계값을 정하는 기준을 정리하여 <Table 15>에 제시하였다.

**Table 15.** Guideline of Threshold Determination

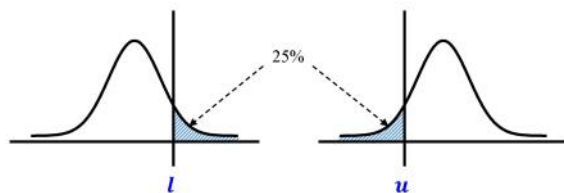
Number of $(l, u)$ limits	Variation of the $(l, u)$ limits	
	Small	Large
2	$(l_{0.5}, u_{0.5})$	$(l_{max}, u_{min})$
3		$(l_{max}, u_{min})$
4		$(l_{0.67}, u_{0.33})$
5		$(l_{0.75}, u_{0.25})$
6 or more		$(l_{0.75}^*, u_{0.25}^*)$

$l_{0.75}^*$ : measured limit closest to  $l_{0.75}$

$u_{0.25}^*$ : measured limit closest to  $u_{0.25}$

그런데 하한과 상한 쪽 경계값 기준을 다르게 정할 수도 있다. 예를 들어, 하한 쪽 실패는 가능한 한 막아야 하고, 상한 쪽 실패는 그리 심각한 것이 아니라면 하한은  $l_{max}$ , 상한은  $u_{0.5}$ 를 경계값으로 삼아 분석할 수도 있는 것이다.

본 논문에서는 비모수적 방법을 이용했는데, 잡음을 명시적으로 고려하기 어려워 반복을 통하여 수동적으로 잡음이 반영되도록 하는 실험을 할 때는 모수적 방법을 이용할 수도 있다. 이때는 데이터의 평균과 분산을 구하여 <Figure 8>처럼  $l$ 과  $u$ 의 경계값으로 각각 상위와 하위 25% 해당하는 값인  $l_{0.75}$ 와  $u_{0.25}$ 를  $t$ -분포나 정규분포표로 구하여 분석하면 된다.



**Figure 8.** Lower and Upper Threshold Values from a Distribution

엘보우 기법을 이용하여 중요한 인자의 수를 결정하는 방법에 관한 것을 보자. Haaland는 Hamada and Balakrishnan(1998)의 논문 토의(Discussion)에서 적은 수의 실험으로 많은 인자를 실험하여 중요한 인자를 선정할 때, 중요하지 않은 인자를 포함하는 제1종 오류보다는 중요한 인자를 놓치는 제2종 오류가 더 심각하다고 강조한다. 같은 논문을 토의하면서 Lenth 역시 많은 인자를 적은 수의 실험으로 시행하는 선별실험에서 중요한 인자를 추후 실험에서 제외하지 않기 위해서는 유의수준  $\alpha$ 를 0.20 정도로 두는 것이 적합하다는 의견을 냈다.

기능창 실험에서 생산 잡음 외에 사용환경의 잡음도 고려할 수 있다. 예를 들어, 4.4절의 종이이송 실험은 함에 있는 종이의 양을 잡음으로 반영했지만, 습도, 종이 간 마찰계수, 종이의 두께 등도 추가 잡음으로 고려할 수 있다. 여러 개의 잡음을 고

려하여 실험을 계획하면 실험의 크기가 커질 수 있는데, 이때에는 4.3절의 사례처럼 복합잡음인자(compound noise factor) 개념을 써서 실험 수를 줄일 수 있다. 예를 들어, 종이이송 기능창 실험에서, 습도가 높거나 마찰계수가 크거나 종이가 얇으면 OW의 상한인  $u$  값이 낮아질 것이다. 실험에서 습도, 종이 간 마찰계수, 종이 두께의 3가지 잡음을 고려하고자 한다면,  $N_1$ : (습도, 마찰계수, 두께) = (높음, 높음, 얇음),  $N_2$ : (습도, 마찰계수, 두께) = (낮음, 낮음, 두꺼움)의 두 가지로 정하여 실험하면 된다.  $N_1$ 에서는 다중이송이 우려되고,  $N_2$ 에서는 다중이송 문제는 없지만, 종이결림 문제가 생길 수 있을 것이다.

기능창 실험을 최적화할 때 잡음의 강도는 점진적으로 높여야 한다. 처음에는 중간 정도 강도의 잡음을 반영하여 OW를 구한 다음, 잡음 강도를 높이면 OW가 점차 좁아진다. 그러면 새로운 실험을 시행하여 OW를 넓히는 조건을 탐색한다. 이런 과정을 잡음 강도의 최대치까지 실험하여 충분히 넓은 OW를 얻는 강건설계를 할 수 있다(Clausing, 2004).

OW 개념을 처음 개발한 Don Clausing은 제록스에서 이 방법을 1970년대 후반 종이이송 장치에 적용하여 1981년 복사기에 활용하여 강건성을 입증하였다. 이후 15년간 OW 방법은 성공적으로 활용되었다(Clausing, 2004). OW를 이용하여 잡음에 강건한 제품이나 공정의 설계조건을 찾고 나면, 이 방법의 강건성으로 인하여 유사한 제품이 두루 활용할 수 있다.

## 6. 결론

실험을 통하여 제품개발과 공정개선 업무를 수행하는 엔지니어들은 가능한 한 적용하기 쉬운 방법론을 선호한다. 본 논문은 실험의 목적과 직결되는 시스템 성능이 실패율이나 결함률 등으로 평가될 수 있을 때, 시스템 성능과 연결된 에너지 변환 물리량의 기능창 데이터를 쉽게 분석하는 방법을 제시하고, 4가지의 사례를 통하여 그 적용성을 확인하였다. 에너지 전달과 관련된 물리량 값이 일정 수준 이상 높거나 낮을 때 실패가 일어나는데, 기능창은 이러한 물리량이 어떤 유형의 실패도 일으키지 않는 값의 범위이다.

각 사례에서 기능창 인자의 하한( $l$ )과 상한( $u$ ) 데이터로부터 경계값을 구하여,  $l$ 과  $u$ 에 영향을 미치는 인자를 엘보우 기법으로 각각 선정한 다음,  $l$ 이나  $u$  중 어느 하나에만 영향을 미치는 특정인자, 양쪽에 영향을 미치고 최적조건이 일치하는 비충돌 공통인자, 양쪽에 영향을 미치면서 서로 최적 수준이 어긋나는 충돌 공통인자로 구분하였다. 우선 특정인자와 비충돌 공통인자의 수준을 먼저 정하고, 충돌 공통인자의 최적 수준은 기능창을 가장 크게 하는 수준으로 결정하는 과정을 제시하였다. 4개의 사례 연구 이후에는 실험자가 처한 상황이나 의도에 따라 경계값을 결정하기 위한 기준, 다양한 잡음을 고려하는 방법 등에 관한 의견을 기술하였다.

OW 개념과 방법은 실험계획법으로 수집한 데이터뿐만 아

나라 공정 운영 과정에서 수집되는 관측 데이터가 OW의 특성을 가졌을 때 적용할 수 있다. 1) 우선 실패나 결함 발생 등 문제가 되는 공정에서 이러한 문제를 일으키는 에너지 변환 물리량인 기능창 인자를 구한다. 2) 그래프 분석, 회귀분석 등 통계적 방법, 또는 머신러닝 방법으로 기능창 인자의 하한( $l$ )과 상한( $u$ )을 각각 반응변수로 삼아 영향력이 큰 중요한 공정변수를 파악한다. 3) 중요한 공정변수들은  $l$ 과  $u$  각각에 미치는 영향에 따라 특정인자, 비충돌 공통인자, 충돌 공통인자로 구분한다. 4) 최적조건은 3장에서 제시한 방법에 따라 결정한다. 5) 결정된 최적조건에서 확인실험을 실행한다.

본 논문은 실험계획 관련 기본 지식만 있으면 어려운 통계적 방법 없이 쉽게 적용할 수 있는 기능창 데이터 분석 방법을 제안했다. 본 연구가 실험을 통하여 제품개발이나 공정개선 업무를 수행하는 엔지니어들이 에너지 전달과 관련이 있는 연속변수를 기능창 변수로 삼아 기능창을 최적화하는 데 도움이 되기를 바란다.

## 참고문헌

- Byun, J. -H., Lee, K. -C., Suh, P. S., Kwak, K. -H., and Jang, S. I. (2017), A Study on Securing Multiple Quality Requirements of New Product Using Screening Design with a Case Study, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **43**(2), 127-134.
- Clausing, D. P. (1994), *Total Quality Development: A Step-by-Step Guide to World-Class Concurrent Engineering*, ASME Press, NY.
- Clausing, D. P. (2004), Operating Window: An Engineering Measure for Robustness, *Technometrics*, **46**(1), 25-29.
- Hamada, M. and Balakrishnan, N. (1998), Analyzing Unreplicated Factorial Experiments: A Review with Some Proposals [with Discussion], *Statistica Sinica*, **8**(1), 1-41.
- Jean, M. D., Lin, B. T., and Chou, J. H. (2007), The Development of Adaptive Modified Appearance Using Operating Window Methods for Optimizing Electron Beam, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **35**, 480-492.
- Joseph, V. R. and Wu, C. F. J. (2002), Operating Window Experiments: A Novel Approach to Quality Improvement, *Journal of Quality Technology*, **34**(4), 345-354.
- Joseph, V. R. and Wu, C. F. J. (2004), Failure Amplification Method: An Information Maximization Approach to Categorical Response Optimization, *Technometrics*, **46**(1), 1-12.
- Kim, B., Lee, S., and Bae, H. (2008), Study on Improvement of Frontal Crash Sensing Performance Using Taguchi Method, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, **16**(2), 29-34.
- Miyakawa, M. (1993), Logistic Regression Analysis for Observations From the Operating Window Method, *Technical Report IA-TR-93-4*, Science University of Tokyo, Japan.
- Nair, V. N., ed. (1992), Taguchi's Parameter Design: A Panel Discussion, *Technometrics*, **34**(2), 127-161.
- Peace, G. S. (1993), *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*, Addison-Wesley, MA.
- Phadke, M. S. (1989), *Quality Engineering Using Roust Design*, Prentice-Hall, NJ.
- Wang, J., Byun, J. -H., and Ma, Y. (2022), Analysis and Optimization of Split-Plot Operating Window Experiments: Methodology and Application, *Quality and Reliability Engineering International*, **38**(3), 1189-1206.
- Wu, C. F. J. and Hamada, M. S. (2009), *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, NJ.

## 저자소개

**주혜진** : 경상국립대학교에서 산업공학 학사학위를 취득하였고, 산업시스템공학과 석사과정을 수료하였다. 관심 분야는 실험계획법, 품질공학, 품질빅데이터 분석이다.

**변재현** : 서울대학교에서 산업공학 학사, KAIST에서 산업공학 석사 및 박사 학위를 취득하였고, 현재 경상국립대학교 산업시스템공학부에서 교수로 근무하고 있다. 관심 분야는 실험계획법, 품질경영, 데이터 분석공학이다.