Check for updates

Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 48, No. 5, pp. 441-452, October 2022.
ISSN 1225-0988 | EISSN 2234-6457
https://doi.org/10.7232/JKIIE.2022.48.5.441
© 2022 KIIE

온도 챔버 측정시스템의 강건설계 사례연구

양일영[1] · 변재현[2†]

[1]한국산업기술시험원 항공국방신뢰성센터 / [2]경상국립대학교 산업시스템공학부

A Case Study on the Robust Design of Temperature Chamber Measurement System

Il-Young Yang[1] · Jai-Hyun Byun[2]

[1]Department of Aerospace and Defence Reliability Center, Korea Testing Laboratory
[2]Department of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National University

A case study is presented applying the signal-response robust design approach to optimize temperature measurement system of a test chamber. Control factors are identified by cause and effect diagram and noises are reflected by a compound noise factor to reduce the size of the experiment. 2_{III}^{5-2} fractional factorial design is employed with two replications and three signal factor levels. Experimental data are analyzed by the response function modeling, and optimal conditions for the control factors are determined.

Keywords: Design of Experiments, Measurement System, Temperature Chamber, Robust Design, Signal-response System, Response Function Modeling

1. 서 론

온도 챔버(Temperature chamber)는 특정한 온도 환경 조건에서 전자부품 및 정밀 기계의 내구성시험, 환경시험, 금속 및 도금 제품의 부식성 시험, 식품이나 의약품의 변성실험 등 거의 모든 제품의 시험에 필수적으로 사용되는 장비이다. 전자부품과 시스템, 자동차, 반도체, 섬유 등 다양한 산업 분야에서 온도 챔버를 이용하여 제품의 신뢰성 검증, 수명 예측, 시스템의 오류 발생 여부를 검증하고 있다. 특히, 대부분의 신뢰성 평가를 수행하는 시험자나 시스템 설계자는 온도를 신뢰성에 영향을 미치는 주요한 인자로 고려하고 있다(Lall *et al.*, 1997).

온도 챔버를 사용하여 시험평가를 수행할 때 챔버 내 온도 설정의 정확성과 시간 및 공간에 따른 정밀성은 시험평가를 수행하는 기관의 시험수행 능력을 평가하는 척도가 되므로 중요하게 관리하고 있다. 특히 한국인정기구 등이 확인하는 품질경영시스템 요구사항에서는 시험평가 기관의 역량을 검토하기 위해 주기적인 교정 및 보정을 통해 온도 챔버를 관리하도록 하고 있다.

시험기관에서는 챔버 내 온도를 측정하기 위해 국제전자기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC), 일본시험기공업회(Japan Testing Machine Association, JTM) 표준 등을 활용하고 있다. 하지만 해당 표준에서 제시하는 방법이 측정의 변동을 줄이기 위해 어떤 확인 과정을 거쳤는지는 파악하기가 어렵다. 특히 이러한 표준이나 규격에서 제시하는 측정 방법 외에 측정을 위해 선택해야 하는 케이블 길이, 소선 길이, 센서 종류와 같은 요인에 따라 측정의 정확성과 정밀성이 달라질 수 있으므로 이러한 요인들의 영향을 검증하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 온도측정시스템과 관련된 다양한 제어인자, 잡음인자를 파악하고, 온도 챔버의 신호-반응 특성을 이용해 측정시스템의 정확성과 정밀성을 향상하기 위한 최적 조건 탐색을 위한 강건설계 실험을 수행하며, 반응함수 모형(Response

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07049764).
† 연락저자 : 변재현 교수, 52828 경남 진주시 진주대로 501 경상국립대학교 산업시스템공학부, Tel: 055-772-1692, Fax: 055-772-1699, E-mail: jbyun@gnu.ac.kr
2021년 11월 20일 접수; 2022년 5월 18일 수정본 접수; 2022년 5월 30일 게재 확정.

Function Modeling, RFM) 방법을 이용하여 측정시스템의 실험 데이터를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 온도측정시스템과 관련된 구성요소, 성능측정 방법론을 요약하였고, 3장에서는 측정시스템의 신호-반응에 대한 이론적 배경을 기술하였다. 4장에서는 측정에 관련된 인자를 파악하여 부분요인배치법 실험을 설계하였고, 5장에서는 RFM 방법으로 실험결과를 분석하여 온도측정시스템의 최적 조건을 구하였다. 본 논문의 결론은 6장에 제시하였다.

2. 온도측정시스템

2.1 온도 챔버

온도 챔버는 <Figure 1>과 같이 히터, 냉각기, 제어시스템, 팬, 센서, 작동공간(working space)으로 구성되어 있다(Izumi, 2012). 장비 운영자가 시험하고자 하는 온도를 설정하면 온도제어시스템이 적정온도를 유지하기 위해 히터, 냉각기 등을 가동하고, 온도 센서 데이터를 보고 피드백하여 작동공간의 내부 온도를 제어한다.

국제전기기술위원회의 IEC(2018)와 일본시험기공업회의 JTM(2001), JTM(2007)은 온도 챔버의 성능에 대한 정의와 측정방법을 제시하고 있다. 해당 표준을 참고하여 국내 교정업무를 수행하는 기관에서도 챔버 내 온도평균(temperature average), 시간에 따른 온도변동(time fluctuation), 공간의 온도변이(position uniformity)를 주요 성능특성으로 삼아 신규 장비 도입 시 합 · 부 판정의 주요 기준으로 활용하고 있다.

2.2 온도 챔버의 성능측정

온도 챔버의 성능을 측정하기 위해 <Figure 2>와 같이 측정장치에 열전대(Thermocouple)를 연결하고, 온도 챔버 내부에 <Figure 3>에 표시한 바와 같이 중앙점을 5번으로, 나머지 꼭지점을 1~4, 6~9번으로 정한 후 열전대를 설치한다. 이때, 열전대는 IEC(2013), IEC(2008)의 표준 열전대를 사용한다.

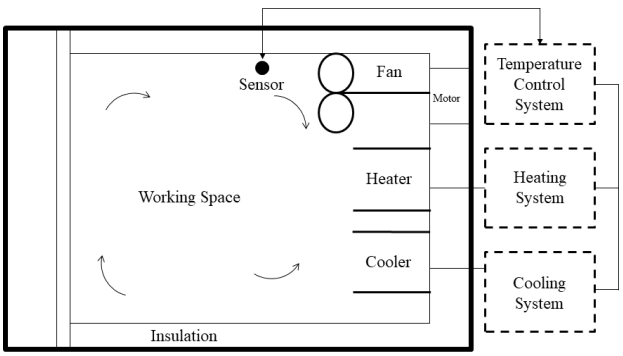


Figure 1. Schematic Diagram of Temperature Chamber

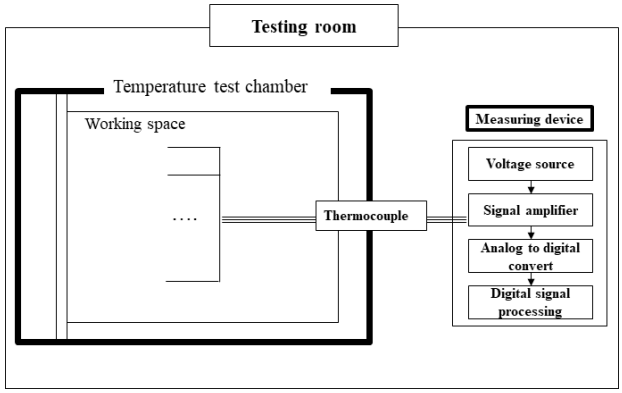


Figure 2. Temperature Measurement System

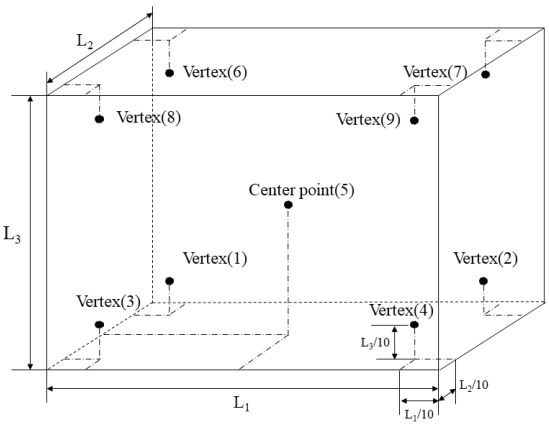


Figure 3. Measurement Positions

챔버 온도를 설정한 후, 그 온도에 도달하면 설정된 온도가 유지될 수 있도록 일정한 시간 동안 기다려야 하는데, 이때 걸리는 시간을 '안정화 시간'이라고 한다. 국제전기기술위원회의 IEC(2018)와 일본시험기공업회의 JTM(2001), JTM(2007)은 챔버의 주요 성능으로 온도평균, 시간에 따른 온도변동, 공간의 온도변이를 고려하는데, 온도평균은 챔버 내 여러 위치에서 측정한 온도의 평균, 시간에 따른 온도변동은 온도평균과의 차이가 최대가 되는 값을, 공간의 온도변이는 챔버 내 중앙점에서의 온도평균과의 차이가 최대가 되는 측정점의 온도평균으로 정의한다. 이에 따라 본 연구에서도 3개의 주요 성능특성인 온도평균 $\overline{\overline{Y}}$, 시간에 따른 온도변동 R_{time}, 공간의 온도변이 $R_{position}$를 구하기 위하여 각 실험점에서 온도가 안정되기 전까지 마지막 10분 동안 2초에 한 번씩 기록된 온도를 이용하여 계산한다. 만일 안정화 시간이 60분이면 50분에서 60분 사이 온도를 2초에 1회 기록하여 총 300회의 온도 수치를 이용하는 것이다. $\overline{\overline{Y}}$, R_{time}, $R_{position}$는 다음의 식 (1), (2), (3)으로 산출한다.

$$\overline{\overline{Y}} = \frac{\sum_{i=1}^{9}\sum_{j=1}^{300} Y_{ij}}{2{,}700} \quad (1)$$

$$R_{time} = Y_{ij}, \max imizing \left| Y_{ij} - \overline{\overline{Y}} \right| \quad (2)$$

$$R_{position} = \overline{Y_i}, \max imizing \left| \overline{Y_i} - \overline{Y_5} \right| \quad (3)$$

여기서 Y_{ij}는 i번째 위치, j번째 시간대의 온도 측정값이다. 9개의 위치에서 측정하므로 i=1 , 2, ⋯, 9이고, 300회 기록하므로 j = 1, 2, ⋯, 300이다. $\overline{\overline{Y}}$은 9개 측정 위치에서 기록한 300개 데이터 전체의 평균이고, R_{time}은 각 실험점에서 2,700개 데이터 중 $\overline{\overline{Y}}$와의 차이가 가장 큰 데이터이고, $R_{position}$은 챔버 내 측정 위치 i(i = 1, 2, ⋯, 9)에서 300개 측정값의 평균 $\overline{Y_i}$를 구하고, $\overline{Y_i}$와 $\overline{Y_5}$의 차이가 가장 큰 $\overline{Y_i}$ 값으로 정의한다.

3. 신호-반응 측정시스템의 강건설계

3.1 신호-반응 시스템

다구치(Taguchi)는 강건설계를 위하여, 목표치가 고정되어 있으면 정적 특성(static characteristic), 신호인자의 값에 따라 목표치가 이에 대응하여 변화하는 경우를 동적 특성(dynamic characteristic) 문제로 구분한다. 본 논문에서는 Miller and Wu(1996)가 동적 특성 문제를 해결하기 위하여 제시한 신호-반응 시스템의 용어를 사용하여 내용을 전개한다.

신호-반응 시스템은 품질특성 y와 신호인자 M간의 관계이며, 이는 다음과 같이 모형식으로 표현할 수 있다(Wu and Hamada, 2009).

$$y = g(M) \quad (4)$$

만일 품질특성과 신호인자의 관계를 선형으로 표현할 수 있다면, 온도측정을 위한 교정시스템은 다음과 같이 간단한 선형회귀모형으로 설명할 수 있다.

$$y = \alpha + \beta M + \epsilon \quad (5)$$

온도측정시스템 실험을 통하여 데이터를 얻으면, 다음과 같은 교정선(calibration line)을 추정할 수 있다(Wu and Hamada, 2009).

$$\hat{\alpha} + \hat{\beta} M \quad (6)$$

이 식을 이용하면 측정된 품질특성의 값 y_0가 주어졌을 때, $y_0 = \hat{\alpha} + \hat{\beta} M$으로부터 다음과 같이 신호인자 M의 값을 추정할 수 있다.

$$\hat{M} = \frac{y_0 - \hat{\alpha}}{\hat{\beta}} \quad (7)$$

3.2 신호-반응시스템 모형화

신호-반응 특성을 갖는 측정시스템의 경우, 선형 교정선의 분산과 감도가 신호-반응 시스템을 평가하는 중요한 척도이다. 다구치는 식 (8)과 같은 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio; S/N Ratio)를 성능척도(Performance Measure; PM)로 삼아서 잡음에 둔감한 제어인자의 조합을 선정하였다.

$$\omega = \ln(\beta^2/\sigma^2) \quad (8)$$

위 식을 표본에 대한 식으로 변경하면

$$\hat{\omega} = \ln(\hat{\beta}^2/s^2) \quad (9)$$

이다. 최적조건을 구하기 위해 다구치는 2단계 절차를 수립하였다. 첫 번째 단계로 $\hat{\omega}$을 최대화하는 제어인자의 수준을 정하고, 두 번째 단계로 $\hat{\omega}$에는 영향을 미치지 않고 $\hat{\beta}$에만 영향을 미치는 조정인자를 이용하여 기울기 추정치 $\hat{\beta}$을 목표값에 맞추는 방법을 제안하였다.

Wu and Hamada(2009)는 다구치의 2단계 절차가 반응변수의 분산이 기울기에 비례할 때만 유효하게 적용할 수 있다는 것을 밝히고, 이에 대한 대안으로서 성능척도 모형(Performance Measure Modeling, PMM)과 반응함수 모형(Response Function Modeling, RFM)을 제시하였다.

PMM은 제어인자들의 실험조건별로 신호인자와 잡음인자의 다양한 수준 조합에서 성능척도 값을 구하고, 성능척도를 유의한 요인들의 함수로 표현하여 제어인자의 최적 수준을 구하는 것이다. 이 방법이 다구치 2단계 최적화 절차와 다른 점은 $\hat{\beta}$, $\ln s^2$(또는 $\hat{w}$)를 모형으로 표현하여 최적조건을 구하는 것이다.

RFM은 주어진 제어인자/잡음인자의 수준 조합에서 반응변수와 신호인자의 관계식을 추정한다. 이때, i번째 수준 조합에서 구한 식의 절편, 기울기, 분산 추정치들을 $\hat{\alpha}_i$, $\hat{\beta}_i$, s_i^2이라고 하면, $\hat{\alpha}_i$, $\hat{\beta}_i$, s_i^2을 유의한 제어인자와 잡음인자의 함수로 표현하고, 제어인자의 최적 수준을 구한다.

PMM은 제어인자가 시스템의 전체 성능에 미치는 영향에 대한 정보만 제공한다. 특정 제어인자가 신호-반응 시스템에 영향을 미치거나 특정 잡음인자와 상호 작용하는지에 대한 정보가 손실된다. RFM은 이런 문제를 겪지 않고 데이터를 통해 미래 연구의 지침을 제공하는 장점이 있지만, 절차가 복잡하고 정교한 실험계획이 필요하다(Kim, 2013). 본 연구에서는 온도측정시스템의 최적 설계를 위해 RFM 분석 방법을 적용하였다.

4. 실험설계

4.1 인자

온도 챔버의 측정 변동에 영향을 미치는 인자 도출을 위해 일본시험기공업회 표준 JTM(2008)의 자료를 참고하였다. 챔

버의 기본성능(Basic performance)은 챔버 내 온도평균(average temperature), 공간의 온도변이(position uniformity), 시간에 따른 온도변동(time fluctuation)으로 구분할 수 있고, 이들에 영향을 미칠 수 있는 잠재 인자를 정리하면 다음과 같다:

(1) 챔버 구성(chamber construction)
(2) 제어시스템(control system)
(3) 제어센서(control sensor)
(4) 동작 조건(operating condition)
(5) 챔버 설정값(chamber setting value)
(6) 챔버 표시 값(chamber display value)
(7) 작동공간의 부피(working space volume)
(8) 챔버 제조사(chamber manufacturer)

(1) ~ (6) 인자는 제조사에서 챔버 설계 시 결정되는 인자이다. 본 연구에서는 이미 제작 완료된 챔버를 사용하기 때문에 이들은 실험에서 제어인자로 고려하지 않았다. 시험평가를 수행하는 기관은 일반적으로 여러 제조사의 다양한 시험장치를 보유하고 있고 다양한 공간에서 시험평가 업무를 수행하므로 (7) 작동공간의 부피(working space volume), (8) 챔버 제조사(chamber manufacturer)를 인자로 고려하였는데, 온도 챔버는 이미 설치하여 사용하고 있고, 작동공간의 부피는 실험환경에서 주어지므로 이들은 잡음인자로 반영하였다.

측정조건은 온도측정 장치, 표준조건, 측정과 관련된 요소로 구분할 수 있다. 각 요인에 영향을 미치는 세부 인자를 제어인자와 잡음인자로 구분하면 다음과 같다:

(1) 온도 측정 장치
(가) 열전대(thermocouple): 열전대는 측정온도 범위, 재질에 따라 다양한 종류를 활용하고 있다. 열전대는 측정자가 선택할 수 있으므로 제어인자로 고려하였다.
(나) 데이터기록장치(recorder): 다양한 종류의 장치가 있는데, 기록장치 자체의 변동은 크지 않다고 판단하여 인자에서 제외하였다.
(다) 소선 길이(stand length): 열전대 끝부분인 소선을 만들기 위해 두 선을 용접하거나 꼬아서 사용하고 있다. 용접해서 연결하는 방식은 용접 부위가 잘 끊어지는 단점 때문에 제외하였고 꼬아서 쓰는 방법을 적용하였다. 소선을 꼬아서 사용할 때 소선의 길이에 따라 측정변동에 차이가 있는지 확인하기 위해 소선 길이를 제어인자로 포함하였다.

(2) 표준조건
(가) 전원 조건(power condition): 입력 전원은 수준을 제어하기가 불가능하다고 판단하여 인자에서 제외하였다.
(나) 시험실 대기조건(external condition): IEC(2007a)는 시험실의 표준 대기조건으로서 온도, 습도, 기압의 조건을 (15~35)℃, (25~75)%R.H., (86~106)kPa로 정하고 있는데, 이런 대기조건을 만족하기 위해 공조 장치를 설치해 운용하고 있다. 본 연구에서는 해당 범위 안의 대기조건 관리 여부가 측정에 영향을 미칠 수 있다고 보고 시험실 공조 장치 작동 여부를 잡음인자로 포함하였다.
(다) 동작 조건(operating condition): 동작 조건은 작동공간 내부에 발열 혹은 전자기 현상 등이 있는 제품이 포함되었는지에 따라 다르게 결정된다. 발열 및 전자기 현상이 있는 대상물을 특정하여 실험을 수행하는 것이 어려우므로 동작 조건은 인자에서 제외하였다.

(3) 측정 요소
(가) 장비운영자(operator): 장비 운영자와 관계없이 챔버 온도는 일정하므로 인자에 포함하지 않았다.
(나) 측정위치(measurement site): IEC(2018)에서는 공간의 1/10 지점에서 측정하도록 제시하고 있다. 해당 위치에서는 측정하는 것이 측정 변동에 영향을 주는지 아닌지는 확인할 필요가 있다고 판단하여 제어인자로 포함하였다.
(다) 측정 간격(measurement interval): 측정 간격은 데이터 기록장치에서 데이터를 측정하고 저장하는 방법에 따라 정할 수 있다. 측정의 변동에 영향을 미치지 않으리라고 판단되어 인자에서 제외하였다.
(라) 측정주파수(measurement frequency): 측정 간격과 마찬가지로 데이터 기록장치에서 데이터를 처리하는 과정의 문제로 판단되어 인자에서 제외하였다.
(마) 안정화 시간(stabilization time): 국제표준에서 '온도변동이 없을 정도로 충분히 안정시키도록' 명시하고 있다. 측정자의 판단을 통해 결정되는 인자이기 때문에 제어인자로 고려하였다.

측정의 변동에 영향을 줄 수 있는 여러 요인 중 실험자가 수준을 결정할 수 있는 제어인자와 수준을 제어할 수 없는 잡음인자로 구분하여 정리한 블록 그림을 <Figure 4>에 나타내었다.

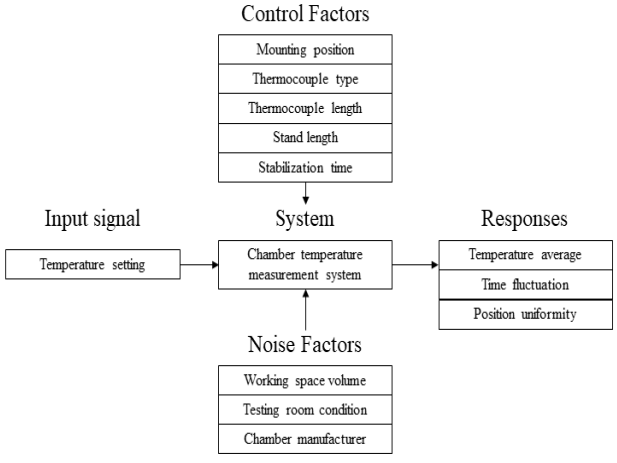


Figure 4. Block Diagram of Signal-response System

4.2 온도측정시스템의 실험설계

제어인자의 수준은 측정 현장에서 많이 사용하는 조건, 실험횟수 등을 고려하여 <Table 1>과 같이 정하였다. 잡음인자가 여러 개일 때, 이들을 모두 반영하는 것이 가장 좋지만 복합잡음인자(compound noise factor)를 이용하면 적은 수의 실험으로 수준 양극단의 효과를 탐구할 수 있다(Fowlkes and Creveling, 2007). 본 실험연구에서는 잡음인자에 해당하는 작동공간, 설치장소 대기조건, 챔버 제조사는 실험횟수를 줄이기 위하여 복합잡음인자로 묶어 <Table 2>와 같이 두 수준으로 정하였다. 측정온도의 산포는 복합잡음인자 $F=-1$ 에서는 크고, $F=+1$ 이면 작게 나타난다는 것을 경험적으로 알고 있다. 신호인자의 수준은 IEC(2007b), IEC(2007c)를 참고하여 온도 챔버에서 사용 빈도가 높은 -40℃, 20℃, 80℃로 정하였다.

실험 소요 시간을 최소화하면서 오차를 파악하기 위하여 실험을 2회 반복하기로 했다. 5개의 제어인자와 복합잡음인자, 반복 2회 실험을 완전요인배치로 실행하기에는 시행 횟수가 많아서 반복이 있는 2_{III}^{5-2} 부분요인배치법을 이용하였다. 측정실험은 챔버의 온도를 변경하여 안정화될 때까지 소요되는 시간을 고려하면 1일 2회 정도 가능하다. 측정의 편의를 위해 복합잡음인자의 저수준과 고수준을 같은 실험순서로 배치하고, 신호인자인 설정온도는 랜덤한 순서로 배열하였다. 실험순서는 <Table 3>에 나타내었다.

Table 1. Control Factors

Factor		Level	
		-	+
A	Mounting position	1/10	2/10
B	Thermocouple type	t type	k type
C	Thermocouple length	5 m	10 m
D	Stand length	1 cm	2 cm
E	Stabilization time	1 hr	2 hr

Table 2. Compound Noise Factor

Label	Noise Factor	Level
$F=-1$	Working space volume Testing room condition Chamber manufacturer	large non-operation B
$F=+1$	Working space volume Testing room condition Chamber manufacturer	small operation A

Table 3. Design Matrix

Std. order	Run order	A	B	C	D	E	M (run order)			F
							-40	20	80	
10	1	1	-1	-1	-1	-1	3	2	1	-1
15	2	-1	1	1	-1	-1	3	2	1	-1
8	3	1	1	1	1	1	1	3	2	-1
7	4	-1	1	1	-1	-1	2	1	3	-1
9	5	-1	-1	-1	1	1	2	1	3	-1
1	6	-1	-1	-1	1	1	1	2	3	-1
16	7	1	1	1	1	1	1	3	2	-1
12	8	1	1	-1	1	-1	3	1	2	-1
5	9	-1	-1	1	1	-1	3	1	2	-1
3	10	-1	1	-1	-1	1	2	3	1	-1
14	11	1	-1	1	-1	1	2	3	1	-1
11	12	-1	1	-1	-1	1	1	2	3	-1
4	13	1	1	-1	1	-1	1	2	3	-1
13	14	-1	-1	1	1	-1	2	1	3	-1
2	15	1	-1	-1	-1	-1	2	3	1	-1
6	16	1	-1	1	-1	1	1	3	2	-1
10	1	1	-1	-1	-1	-1	3	2	1	1
15	2	-1	1	1	-1	-1	3	2	1	1
8	3	1	1	1	1	1	1	3	2	1
7	4	-1	1	1	-1	-1	2	1	3	1
9	5	-1	-1	-1	1	1	2	1	3	1
1	6	-1	-1	-1	1	1	1	2	3	1
16	7	1	1	1	1	1	1	3	2	1
12	8	1	1	-1	1	-1	3	1	2	1
5	9	-1	-1	1	1	-1	3	1	2	1
3	10	-1	1	-1	-1	1	2	3	1	1
14	11	1	-1	1	-1	1	2	3	1	1
11	12	-1	1	-1	-1	1	1	2	3	1
4	13	1	1	-1	1	-1	1	2	3	1
13	14	-1	-1	1	1	-1	2	1	3	1
2	15	1	-1	-1	-1	-1	2	3	1	1
6	16	1	-1	1	-1	1	1	3	2	1

5. 실험결과분석

측정된 데이터를 기반으로 반응변수인 측정온도의 평균, 시간에 따른 온도변동, 챔버 내부 위치에 따른 공간의 온도변이를 산출하여 <Table 4>, <Table 5>에 나타내었다.

Table 4. Measurement Data for $F=-1$

Run order	Response									Noise
	-40			20			80			
	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	
1	-39.10	-39.30	-39.95	20.60	19.93	20.18	80.80	79.74	80.19	-1
2	-40.50	-39.46	-39.66	20.60	20.06	19.94	78.80	79.21	79.67	-1
3	-40.40	-40.13	-39.86	19.45	20.00	19.84	79.90	80.11	80.23	-1
4	-40.50	-39.28	-39.52	20.60	20.15	19.97	79.00	79.37	79.72	-1
5	-40.60	-39.85	-40.06	19.65	20.18	20.09	80.55	79.99	80.18	-1
6	-40.65	-39.89	-40.09	19.70	20.17	19.99	79.90	80.11	80.25	-1
7	-40.35	-40.15	-39.84	19.40	19.98	19.83	79.90	80.07	80.23	-1
8	-39.70	-39.50	-39.21	20.20	19.72	19.87	80.20	79.75	79.90	-1
9	-38.85	-39.05	-39.32	20.30	20.19	20.05	79.30	79.54	79.72	-1
10	-39.60	-38.67	-38.79	19.70	20.30	20.18	80.70	79.80	80.06	-1
11	-40.60	-40.37	-39.99	19.70	19.86	20.11	81.00	80.34	80.52	-1
12	-39.65	-39.07	-39.26	20.30	19.76	19.89	80.40	79.60	79.84	-1
13	-39.60	-39.12	-39.26	20.25	20.02	19.87	80.35	79.78	79.92	-1
14	-39.95	-39.35	-39.47	19.65	20.06	19.97	79.05	79.25	79.55	-1
15	-39.10	-39.31	-39.90	19.60	19.80	20.00	79.80	79.97	80.31	-1
16	-38.80	-40.31	-40.05	20.40	19.93	20.10	80.25	80.41	80.56	-1

Table 5. Measurement Data for $F=+1$

Run order	Response									Noise
	-40			20			80			
	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	
1	-38.50	-38.73	-39.55	20.90	20.07	20.39	79.30	79.52	79.97	+1
2	-38.20	-38.55	-39.08	19.90	20.06	20.33	78.50	79.33	79.71	+1
3	-38.85	-39.11	-39.47	20.75	19.93	20.16	79.40	79.58	79.91	+1
4	-40.10	-38.78	-39.08	20.90	20.45	20.29	79.00	79.30	79.77	+1
5	-40.50	-39.28	-39.74	19.80	20.30	20.16	79.10	79.31	79.74	+1
6	-39.25	-38.32	-38.61	19.55	19.71	20.03	82.80	81.77	82.22	+1
7	-39.70	-39.00	-39.25	20.00	20.20	20.39	79.55	79.78	80.06	+1
8	-38.40	-38.61	-38.91	19.95	20.13	20.28	79.15	79.32	79.67	+1
9	-38.15	-38.41	-38.95	20.05	20.64	20.46	78.45	78.76	79.43	+1
10	-37.60	-38.12	-38.59	19.90	20.09	20.46	79.10	79.37	79.78	+1
11	-38.40	-39.28	-39.57	20.00	20.19	20.53	80.60	79.83	80.14	+1
12	-38.15	-38.34	-38.60	20.10	20.37	20.53	78.60	78.74	79.53	+1
13	-39.35	-38.61	-38.89	20.00	20.22	20.41	79.45	79.60	79.90	+1
14	-39.65	-38.76	-38.95	20.50	20.32	20.24	78.90	79.05	79.45	+1
15	-38.60	-38.74	-39.50	19.80	20.17	20.46	79.40	79.57	79.97	+1
16	-38.45	-38.69	-38.90	21.10	20.90	19.75	80.25	79.53	79.75	+1

각 실험점에서 3개의 반응변수별로 적합한 회귀식은 거의 차이가 없으므로, 이들을 통합하여 구한 식을 <Figure 5>에 나타내었다. <Figure 5>을 보면, 설정온도에 따른 측정값이 직선으로 표현되기 때문에 다음의 회귀직선으로 데이터를 적합하였다.

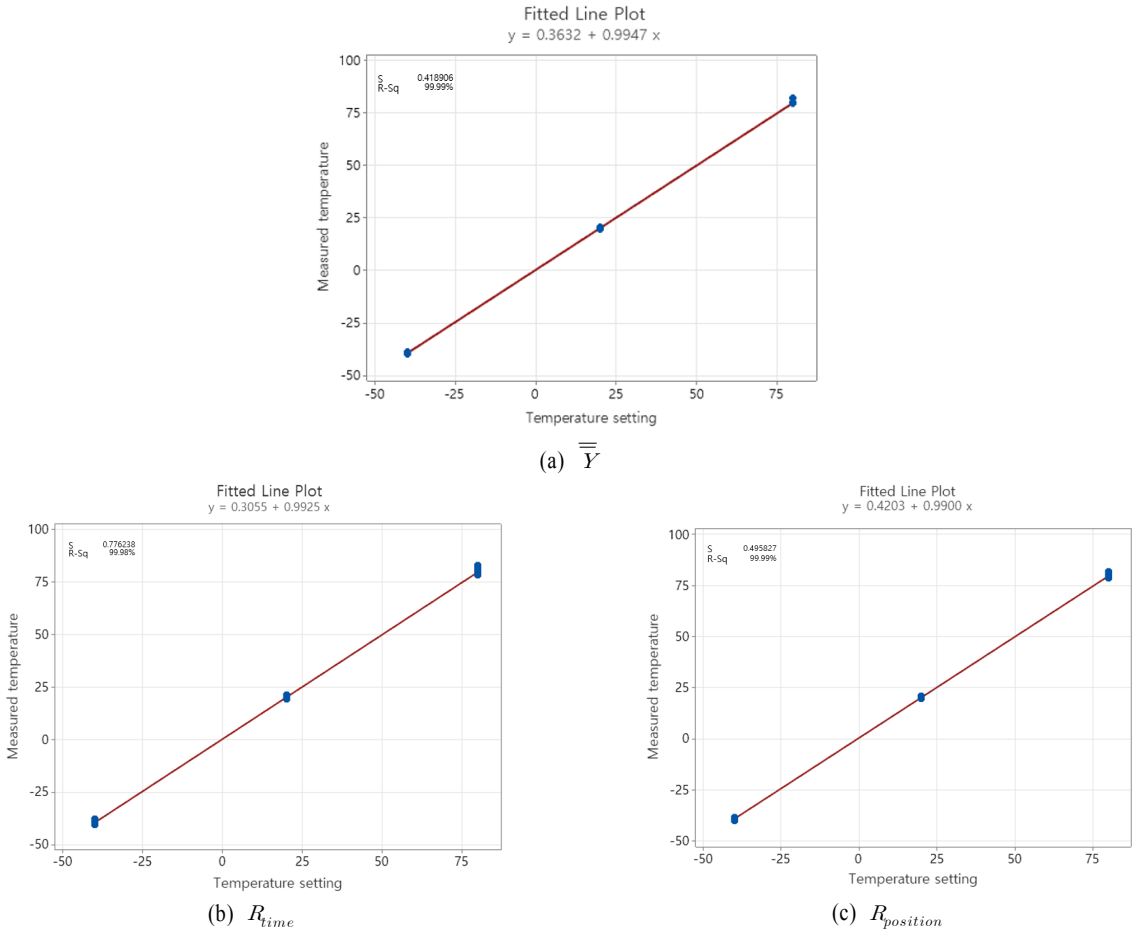
$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 P_1(M) \tag{10}$$

여기서 $P_1(M)$은 1차 직교다항식이다. 각 신호 수준 -40, 20, 80에 해당하는 직교다항식 회귀계수 P_1 값은 -1, 0, 1이다. 이러한 계수 값을 이용하면, 신호인자의 수준 -40℃, 20℃, 80℃

에서 회귀식은 식 (11)과 같다.

$$y = 20 + 60x \tag{11}$$

RFM 분석을 위해 반복 실험을 수행한 각 열에 대해 식 (10)의 모형을 적합하고, 그 결과는 <Table 6>에 나타내었다. <Figure 5>에서 보듯이 설정온도에 따른 온도 측정값이 확연히 직선형태로 나타나므로 적합 결여는 고려하지 않고 순수오차의 크기를 분석하였다. 실험데이터를 분석할 때는 순수오차의 분산 $\hat{\sigma}_p^2$보다 $\ln\hat{\sigma}_p^2$를 사용하는 것이 분산 안정성이 높으므로 분산을 로그 변환한 후에 제어인자의 조합에 따른 인자의 효과를 확인하였다(Wu and Hamada, 2009). 그리고 복합잡음인자 2 수준을 추가 인자로 설정하여 A, B, C, D, E, F 6개 인자를 수준별로 재배열하여 후속 분석을 수행하였다.



(a) $\overline{\overline{Y}}$ (b) R_{time} (c) $R_{position}$

Figure 5. Regression lines of the performance characteristics

Table 6. Estimated Parameters for RFM

Row	R_{time}								$R_{position}$								$\overline{\overline{Y}}$							
	$F=-1$				$F=+1$				$F=-1$				$F=+1$				$F=-1$				$F=+1$			
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\ln\hat{\sigma}_l^2$	$\ln\hat{\sigma}_p^2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\ln\hat{\sigma}_l^2$	$\ln\hat{\sigma}_p^2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\ln\hat{\sigma}_l^2$	$\ln\hat{\sigma}_p^2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\ln\hat{\sigma}_l^2$	$\ln\hat{\sigma}_p^2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\ln\hat{\sigma}_l^2$	$\ln\hat{\sigma}_p^2$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\ln\hat{\sigma}_l^2$	$\ln\hat{\sigma}_p^2$
1	20.43	59.70	-1.10	-1.10	20.38	58.95	-5.70	-1.58	20.14	59.58	-1.51	-4.44	20.31	59.14	-2.24	-6.12	20.14	60.09	-4.94	-4.78	20.29	59.75	-2.93	-6.64
2	19.67	59.70	0.96	-5.01	20.00	58.95	-0.73	-0.21	20.01	59.33	-3.58	-4.55	20.30	58.99	-4.97	-3.34	20.02	59.64	-4.33	-5.54	20.32	59.41	-7.34	-6.91
3	20.31	60.09	-1.25	-2.58	20.33	58.36	-1.15	-2.32	20.29	59.28	-1.62	-2.52	20.35	58.64	-3.04	-2.43	20.32	59.49	-1.44	-2.82	20.52	59.13	-6.43	-4.55
4	19.65	60.14	-1.88	-7.09	20.19	59.38	-2.29	-1.52	19.98	60.12	-7.88	-7.73	20.23	59.37	-2.47	-3.86	20.07	60.04	-1.76	-9.03	20.30	59.67	-6.38	-3.87
5	20.33	60.16	-1.48	-0.33	20.85	59.43	-1.31	-1.50	19.98	60.36	-3.92	-6.08	20.41	59.33	-2.93	-1.86	20.21	60.28	-3.41	-7.26	20.44	59.59	-2.46	-2.27
6	19.76	60.43	-3.87	-2.64	20.25	60.41	-0.01	0.94	20.11	59.96	-5.53	-5.64	20.58	59.67	0.01	0.20	20.06	60.15	-6.71	-5.97	20.63	60.08	-0.14	0.22
7	19.92	59.29	-4.58	-1.26	20.02	58.79	-1.61	-0.82	20.11	59.30	-7.00	-3.49	20.27	58.74	-2.02	-2.97	20.08	59.52	-4.10	-4.66	20.28	59.20	-4.27	-4.79
8	20.28	59.96	-4.58	-5.14	20.13	59.96	-4.58	-1.80	20.11	59.54	-1.78	-3.24	20.34	59.04	-2.44	-4.25	20.18	59.57	-1.24	-7.51	20.41	59.34	-4.33	-4.46

$\overline{\overline{Y}}$, R_{time}, $R_{position}$ 별로 $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$, $\ln\hat{\sigma}_p^2$에 대해 영향을 미치는 요인을 반정규확률 그림을 통해 분석한 결과를 각각 <Figure 6>, <Figure 7>, <Figure 8>에 나타내었다. 신호인자의 수준 변화에 따른 변동을 최소화하는 것이 신호-반응 강건설계의 목적이기 때문에 우선 순수오차의 산포 $\ln\hat{\sigma}_p^2$에 유의한 요인효과를 구하고자 한다. 반응변수 $\overline{\overline{Y}}$ 의 순수오차의 산포에 유의한 인자는 없으며, R_{time}은 인자 B와 복합잡음인자 F가 유의하고, 잡음과 제어인자의 교호작용인 BF, ABF+DF가 다소 유의해 보인다. 그리고 $R_{position}$에는 주효과 A, F가 유의하다.

본 측정 실험은 반복이 있는 2^{5-2}_{III} 부분요인배치를 이용했으므로 주효과와 2인자 교호작용이 교락되어 있다. 부분요인실험의 정의대비(defining relation)는 I=ABD=ACE=BCDE로서, 앞에서 유의한 인자로 파악되었던 ABF는 DF와 교락되어 있다. 따라서 제어인자 D와 복합잡음인자 F의 교호작용이 유의하는지를 확인하기 위해 추가실험을 수행하였다. 추가실험은 반복이 있는 2^2 완전요인실험을 수행하였고, 그 결과는 <Table 7>과 같다. 앞에서 분석한 방법과 동일하게 3개의 성능특성인 $\overline{\overline{Y}}$, R_{time}, $R_{position}$ 각각에 대하여 모수 추정치 $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$, $\ln\hat{\sigma}_p^2$의 효과를 추정한 후 교호작용효과 DF가 유의한지 확인하였다 (<Table 8>). 3개의 성능특성별 추정치 $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$, $\ln\hat{\sigma}_p^2$에 DF 교호작용효과는 유의하지 않기 때문에, 교락된 효과인 'ABF+DF'는 ABF 효과로 가정하고 후속 분석을 수행하였다.

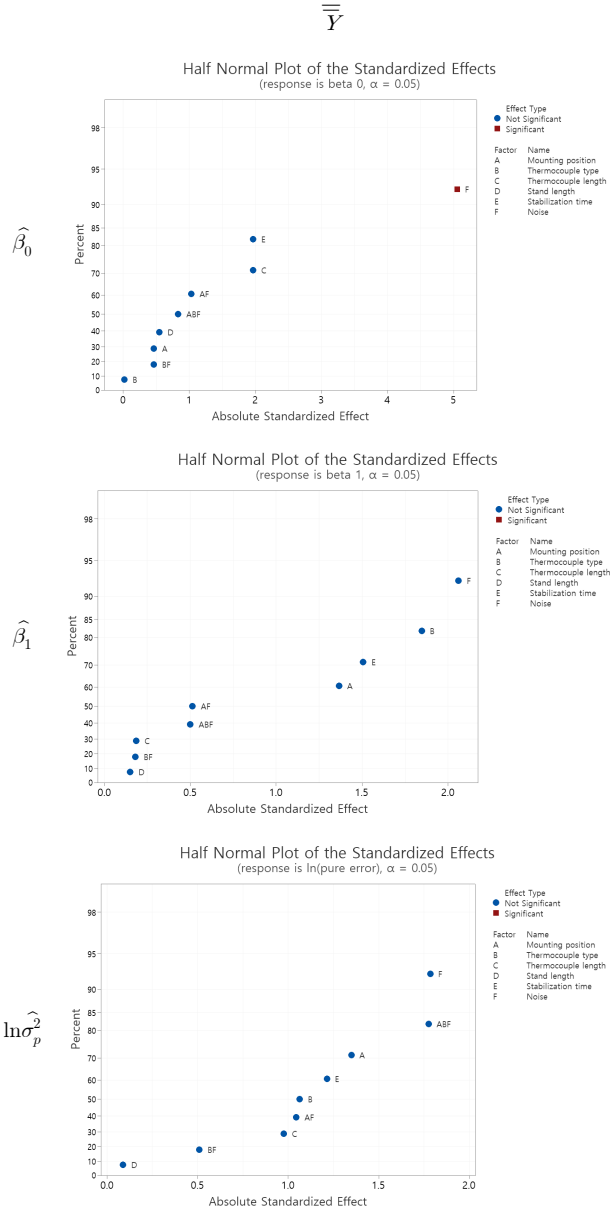


Figure 6. Half-normal plots of $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ and $\ln\hat{\sigma}_p^2$ for $\overline{\overline{Y}}$

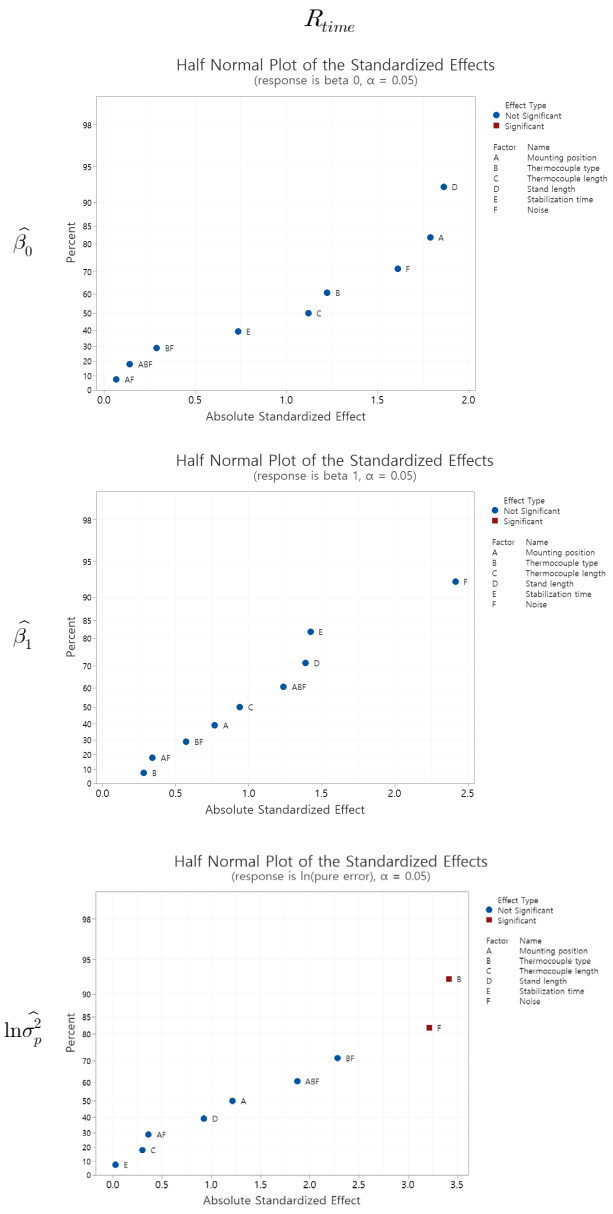


Figure 7. Half-normal plots of $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ and $\ln\hat{\sigma}_p^2$ for R_{time}

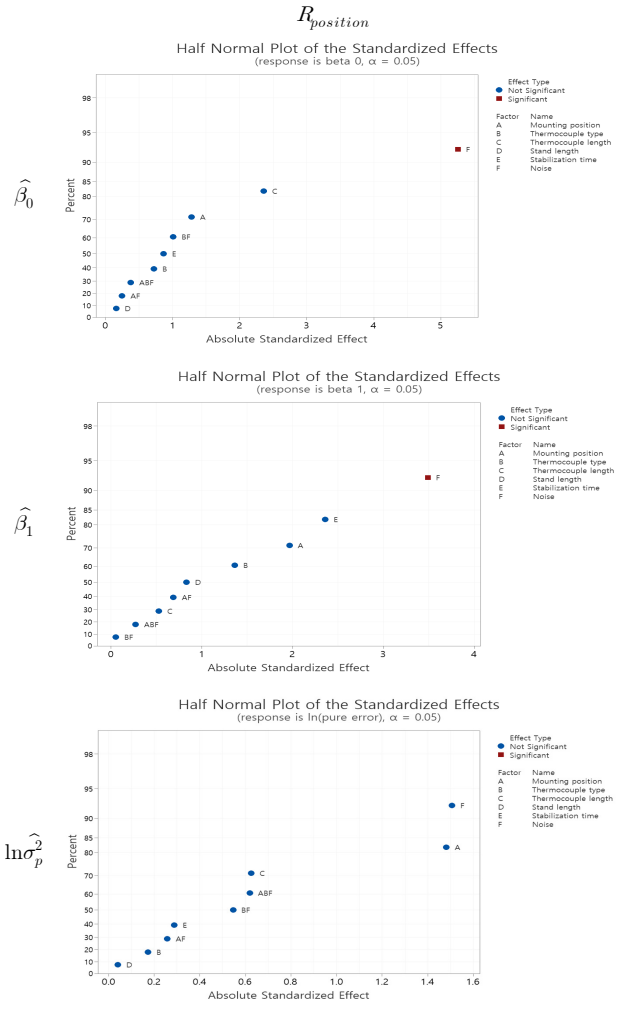


Figure 8. Half-normal plots of $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_1$ and $\ln\hat{\sigma}_p^2$ for $R_{position}$

본 실험연구에서 성능특성별로 가장 중요한 반응변수인 $\ln\hat{\sigma}_p^2$에 대해서 보면, 3개의 성능특성 $\overline{\overline{Y}}$, R_{time}, $R_{position}$중에서 ABF가 유의한 R_{time}에 대해 먼저 분석하였다(<Figure 7>). 효과 유전 원칙(Effect heredity principle)에 따라 3인자 교호작용 항에 포함된 주효과 A와 교호작용효과 AB와 AF를 모형식에 포함하여 모형을 수립하면 다음 식 (12)와 같다.

$$\ln\hat{\sigma}_p^2 = -2.124 - 0.386X_A - 1.086X_B + 1.023X_F - 0.294X_{AB} - 0.114X_{AF} + 0.726X_{BF} + 0.596X_{ABF} \quad (12)$$

측정시스템이 잡음의 수준 변화에 영향을 받지 않기 위해서는 잡음에 대한 계수의 절대값을 가능한 한 작게 만들어야 한다. 이를 위해 식 (12)에서 잡음인자가 포함된 항들을 잡음인자의 계수로 묶어 정리하면 다음 (13)과 같다. 제어인자인 A와 B의 수준 변화에 따른 계수 값을 계산한 결과는 <Table 9>와 같다. 잡음의 영향을 최소화하려면 X_F의 계수에 해당하는 식의 절대값의 크기를 가장 작게 만들어야 하는데, 이에 해당하는 수준 값은 $X_A = +1$, $X_B = -1$이다.

$$(1.023 - 0.114X_A + 0.726X_B + 0.596X_{AB})X_F \quad (13)$$

Table 9. Coefficient of Noise Factor

	$X_A = -1$	$X_A = +1$
$X_B = -1$	1.01	-0.41
$X_B = +1$	1.27	2.23

Table 7. Additional Experimental Results

D	F	Response								
		-40			20			80		
		R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$	R_{time}	$R_{position}$	$\overline{\overline{Y}}$
1	1	-39.60	-39.37	-38.87	20.20	20.32	20.66	80.30	79.38	79.72
-1	1	-39.60	-38.43	-38.88	20.20	20.43	20.73	80.40	79.40	79.73
1	-1	-39.00	-39.72	-39.47	19.90	20.11	20.27	79.50	79.71	79.92
-1	-1	-39.90	-39.66	-39.45	20.60	20.02	20.20	80.40	79.83	80.04
-1	-1	-38.90	-39.78	-39.50	20.60	19.94	20.16	80.40	80.17	79.99
1	-1	-38.90	-39.59	-39.35	20.60	20.07	20.24	79.40	80.18	80.01
1	1	-37.90	-38.26	-38.67	20.30	20.59	20.83	79.40	79.58	79.86
-1	1	-38.00	-38.29	-38.70	21.40	20.59	20.84	79.30	79.51	79.79

Table 8. Estimated Effects from the Additional Experiment

	R_{time}			$R_{position}$			$\overline{\overline{Y}}$		
	D	F	DF	D	F	DF	D	F	DF
$\hat{\beta}_0$	-0.2250	0.1417	0.0583	-0.0621	0.3476	-0.1022	0.0146	0.3320	0.0118
$\hat{\beta}_1$	-0.3626	-0.2376	0.3376	0.0899	-0.8044	0.1510	-0.0263	-0.4358	0.0305
$\ln\hat{\sigma}_p^2$	-0.5064	**1.8174**	0.1669	1.8772	0.4194	1.3094	**1.7720**	**1.7344**	-0.2842

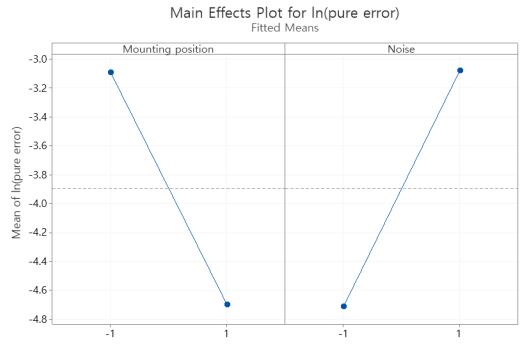
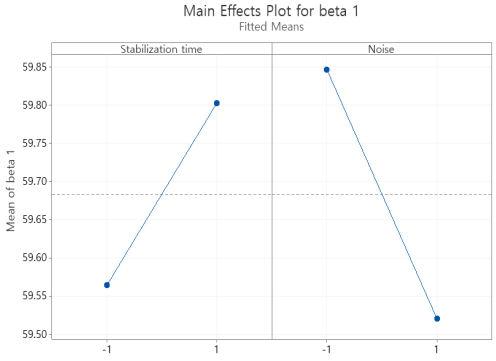


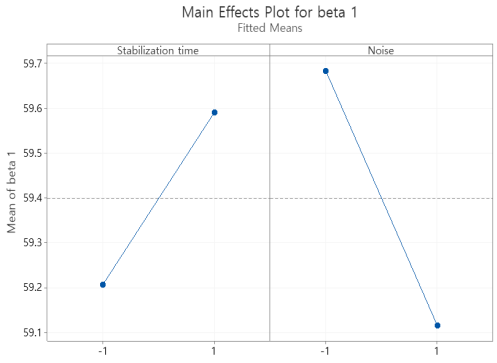
Figure 9. Main effects plot of $\ln\hat{\sigma}_p^2$ on $R_{position}$

<Figure 9>를 보면, $R_{position}$의 순수오차의 산포를 줄이기 위해서는 $X_A = +1$을 선택해야 하는데, 이는 앞선 R_{time}에 대한 분석 결과와 같다. $\overline{\overline{Y}}$에 대한 순수오차의 산포에는 유의한 인자가 없었다.

다음으로 챔버 온도의 선형성에 대한 분석을 위하여 회귀계수 $\hat{\beta}_1$에 대한 분석을 수행하였다. <Figure 6>을 보면 $\overline{\overline{Y}}$에 대해 유의한 인자는 A, B, E, F다. A, B는 앞에서 수준을 결정했기 때문에 잡음 F를 제외하고 인자 E를 고려하였다. 식 (11)에서 보는 바와 같이, β_1의 목표값이 60이기 때문에 <Figure 10(a)>의 주효과 그림을 통해 안정화 시간(Stabilization time)

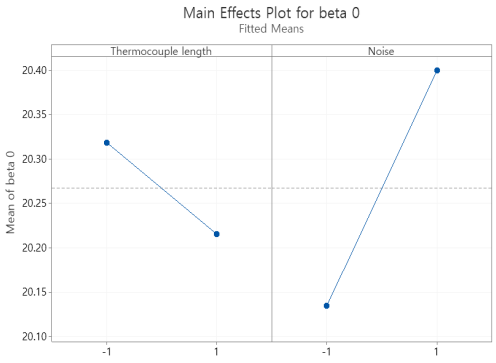


(a) $\overline{\overline{Y}}$

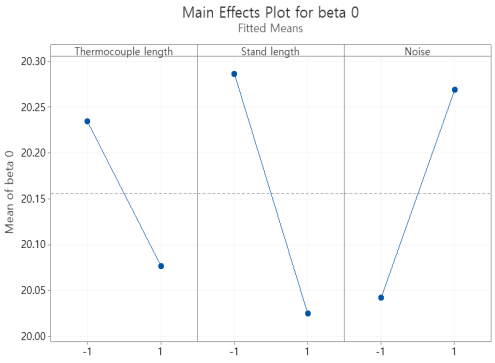


(b) $R_{position}$

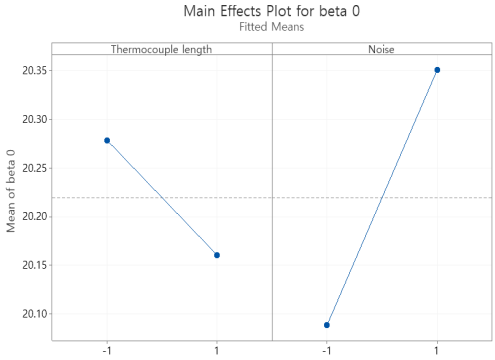
Figure 10. Main effect plot of $\hat{\beta}_1$



(a) $\overline{\overline{Y}}$



(b) R_{time}



(c) $R_{position}$

Figure 11. Main effect plot of $\hat{\beta}_0$

$X_E=+1$을 선택한다. <Figure 7>의 R_{time} 회귀계수 $\hat{\beta}_1$에 대해서는 유의한 인자가 없는 것으로 보인다. <Figure 8>을 보면, $R_{position}$도 $\overline{\overline{Y}}$와 동일하게 A, B, E, F의 주효과가 크게 나온다. <Figure 10(b)>의 주효과 그림을 보면 $X_E=+1$일 때 회귀계수 $\hat{\beta}_1$의 값이 목표인 $\beta_1=60$에 보다 근접하게 나온다.

<Figure 6>, <Figure 7>, <Figure 8>을 보고, 절편 $\hat{\beta}_0$에 비교적 큰 영향을 미치는 잡음변수 X_N을 제외한 효과는 $\overline{\overline{Y}}$: C, E; R_{time}: A, B, C, D, E; $R_{position}$: C이다. 이 중에서 앞선 분석에서 그 수준이 결정된 A, B, E를 제외하면, 절편항의 목표값 $\beta_0=20$ 을 달성하는 데 있어서 $\overline{\overline{Y}}$에 대해 유의한 인자는 C, R_{time}은 C와 D, $R_{position}$은 C이다. <Figure 11>의 주효과 그림을 통해 목표로 하는 $\beta_0=20$ 에 가까운 인자 수준인 $X_C=+1$, $X_D=+1$를 선택한다.

분석한 인자 수준을 종합해서 온도측정시스템의 최적수준을 선정하면 $X_A=+1$, $X_B=-1$, $X_C=+1$, $X_D=+1$, $X_E=+1$이다.

6. 결 론

본 논문은 온도 챔버의 신호-반응 특성을 이용한 온도측정시스템의 강건설계 방법에 관한 사례연구 결과를 제시했다. 먼저 온도 챔버의 구조 및 동작 방법과 국제 또는 단체표준에서 정의하는 측정 및 성능평가 과정을 기술했다. 신호-반응 시스템의 다구치 방법과 다구치 방법에 대한 대안으로 제시된 성능척도 모형(PMM)과 반응함수 모형(RFM) 방법을 간단히 소개하였다.

온도측정시스템에 영향을 미치는 제어인자로 측정위치, 열전대 종류, 케이블 길이, 소선 길이, 안정시간을 도출하였다. 잡음인자인 작동공간 부피, 설치장소 대기조건, 챔버 제조사의 영향을 파악하기 위해 이들을 복합잡음인자로 반영하여 실험 수를 줄이고자 했다. 제어인자와 잡음인자의 수준은 사용빈도가 높은 조건으로, 신호인자의 수준은 국제표준을 고려하여 정하고, 실험의 효율성을 위해 반복이 있는 2_{III}^{5-2} 부분요인 배치법을 채택하였다.

실험에서 얻은 데이터는 RFM을 통해 분석하였다. 분석결과 잡음과 교호작용을 일으키는 요인은 인자 A(측정위치), B(열전대 종류)의 주효과와 그들의 교호작용 AB임을 확인하여, 성능척도가 잡음에 가장 둔감하도록 A와 B의 조건을 정하였다. 그리고 순수오차, 회귀계수, 절편 각각에 유의한 인자를 파악하고 최적 수준 조합을 확인하였다. 측정위치는 작동공간 내부의 가로, 세로 그리고 높이 길이의 2/10 지점, 열전대 종류 t type, 케이블 길이 10m, 소선 길이 2cm, 안정시간 2시간일 때, 측정의 변동을 최소화하고, 회귀계수와 절편을 각각 목표값에 맞출 수 있다.

본 연구에서 제시한 온도 챔버 측정시스템의 강건설계 방법은 온도측정과 관련된 여러 시험평가 현장에서 적용할 것으로 판단한다. 첫째, 국내 시험평가 기관에서는 자동차, 국방 등 여러 산업 분야에서 요구하는 온도 사양에 맞는 다양한 제조사의 챔버를 도입하고 있는데, 본 연구의 온도측정시스템 결과를 활용하여 여러 챔버의 성능을 정확히 비교할 수 있다. 둘째, 전자제품이나 부품의 신뢰성에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 온도인데, 선정한 최적조건으로 정밀하게 측정하여 발열 온도를 낮춰주는 방열 설계 등의 개선 대책을 수립하면 전자제품의 사용 연한을 향상할 수 있다. 마지막으로, 본 사례연구에서 적용한 절차는 동특성 평가가 필요한 다른 측정시스템의 강건성을 확보하는 데 도움이 되리라 기대한다.

참고문헌

Dasgupta, T., Miller, A., and Wu, C. F. J. (2010), Robust Design of Measurement Systems, *Technometrics*, 52(1), 80-92.

International Electrotechnical Commission (IEC) (2007a), IEC 60068-1, Environmental testing - Part 1: General and guidance.

International Electrotechnical Commission (IEC) (2007b), IEC 60068-2-1, Environmental testing - Part 2-1: Tests - Test A: Cold.

International Electrotechnical Commission (IEC) (2007c), IEC 60068-2-2, Environmental testing - Part 2-2: Tests - Test B: Dry heat.

International Electrotechnical Commission (IEC) (2008), IEC 60751, Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors.

International Electrotechnical Commission (IEC) (2018), IEC 60068-3-5, Environmental testing-Part 3-5: Supporting documentation and guidance - Confirmation of the performance of temperature chambers.

International Electrotechnical Commission (IEC) (2013), IEC 60584-1, Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances.

Izumi, J. (2012), Combined Environmental Tests of Vibration, Temperature and Humidity for Electric and Electronic Equipments, Sung An Dang, Seoul.

Japan Testing Machine Association (JTM) (2001), JTM K 07, New JTM standards for temperature test chambers - Methods of testing and indicating performance.

Japan Testing Machine Association (JTM) (2007), JTM K 08 Estimation method for temperature uncertainty of temperature chambers.

Kim, S. J. (2013), A Review on the Taguchi Method and Its Alternatives for Dynamic Robust Design, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **39**(5), 351-360.

Miller, A. and Wu, C. F. J. (1996), Parameter Design for Signal-Response Systems: A Different Look at Taguchi's Dynamic Parameter Design, *Statistical Science*, **11**, 122-136.

Lall, P. Pecht, M. and Hakim, E. (1997), *Influence of Temperature On Microelectronics and System Reliability*, CRC, Orlando, Florida.

Taguchi, G. (1988), *Signal-to-Noise Ratios for Quality Assessment*, Quality Engineering Series, Volume 3, Japanese Standard Association, Tokyo.

Fowlkes, W. Y. Creveling, C. M. (2007), *Engineering Methods for Robust Product Design*, Addison-Wesley, MA.

Wu, C. F. J. and Hamada, M. (2009), *Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*, Wiley, New Jersey.

저자소개

양일영: 수원대학교 산업정보공학과에서 학사, 한양대학교 산업공학과에서 석사학위를 취득하고, 한국산업기술시험원에서 선임연구원으로 근무하고 있다. 연구 분야는 실험계획법, 품질공학, 신뢰성공학이다.

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