

# 종이 헬리콥터 실험을 통한 강건설계의 이해

변재현<sup>†</sup> · 김용태 · 이민지

경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

## Understanding Robust Design with Paper Helicopter Experiment

Jai-Hyun Byun · Yong Tae Kim · Min Ji Lee

Department of Industrial and Systems Engineering and Engineering Research Institute  
Gyeongsang National University, Jinju, 660-701

Robust design method developed by Genichi Taguchi has been very popular since the 1980s and there have been many academic and applied research works on this topic. However, college students and engineers in companies have had difficulty in understanding the method. This paper presents a procedure to implement the robust design method by an easy-to-execute paper helicopter experiment. A crossed array was adopted, which consists of a resolution IV fractional factorial design with 6 control factors and a factorial design with 3 noise factors. Three performance measures were analyzed; signal-to-noise ratio, mean, and standard deviation of the falling time of the paper helicopter that is to be maximized. Control-noise interaction plots are also given to evaluate the degree of the sensitivity of each level of the control factors to the noise factors. The procedure presented in this paper can be helpful to those who want to have basic knowledge in the robust design method.

**Keywords:** Taguchi Method, Robust Design, Paper Helicopter Experiment, Signal-to-noise Ratio, Control-noise Interaction

### 1. 서론

다구치에 의해서 개발된 강건설계 방법은 3가지 종류의 잡음, 즉, 생산요소의 변동, 사용 환경의 변화, 노후화에 둔감한 제품 또는 공정의 설계변수(Design Parameters)의 값을 구하는 방법이다. 이 방법은 제품의 주요 성능특성(Performance Characteristics)에 영향을 미치는 잡음 자체를 제거하거나 통제하기에 비용이 많이 발생하면, 잡음을 직접 제어할 것이 아니라, 잡음의 영향에 둔감한, 즉, 강건한 설계변수의 조건을 선정함으로써 잡음에 우회적으로 대응하는 방법이다(Phadke, 1989; Ross, 1988). 이 방법은 1950년대에 개발되어 일본에서 주로 적용되어 일본 제품의 품질향상과 생산성 제고에 크게 기여하였는데, 세계적으로 알려진 것은 다구치가 AT&T Bell Laboratories에서 활약한 1970년대 말이다. 이 방법이 알려진 후, 미국의 엔

지니어들은 크게 환영을 하였으나 통계학자들은 잡음에 둔감한 조건을 찾는다는 다구치 철학에 대해서는 동의를 했지만, 이러한 조건을 찾기 위한 방법론에 대해서는 비판적인 견해를 주로 피력하였다. 1992년에 당시 Technometrics의 편집위원장인 Nair가 다구치 방법에 대한 Panel Discussion을 주도하여 여러 대가들의 견해를 정리한 논문인 Nair(ed.)(1992)가 출간된 이후, 강건설계에 대한 다구치의 철학과 방법론에 대한 논란은 어느 정도 정리가 되었다. 요약하자면, 제품이나 공정설계 단계에서 잡음에 둔감한 강건한 조건을 찾는 것이 중요하다는 것에 대해서는 의견이 일치하지만, 이러한 강건성을 확보하는 조건을 찾기 위한 실험설계나 분석 대상인 성능 척도(Performance Measure)로서 SN비(Signal-to-Noise Ratio)를 사용하는 것에 대해서는 여전히 다른 서로 다른 견해를 밝히고 있다. 강건설계 실험을 보다 효율적으로 수행하기 위

이 연구는 2013년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었으며, 2012년도 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2012K1A2B1A03000793).

<sup>†</sup> 연락저자 : 변재현 교수, 660-701 경남 진주시 진주대로 501 경상대학교 산업시스템공학부, Tel : 055-772-1692, Fax : 055-762-1699,  
E-mail : jbyun@gnu.ac.kr

2013년 7월 24일 접수; 2013년 8월 23일 수정본 접수; 2013년 9월 10일 게재 확정.

한 실험계획과 보다 적합한 분석 방법이 개발되고 다구치 방법을 활용하는 응용분야가 확대되면서 1992년 이후 지금까지도 강건설계 방법론에 대한 연구는 지속되고 있다. 최근에 Yum, *et al.* (2013)은 다구치의 강건설계에 관하여 종합적인 고찰과 의견을 제시하였다. Box(1988)는 망소(Smaller-the-Better) 또는 망대특성(Larger-the-Better Characteristic)의 경우에 SN비는 위치효과(Location Effect)와 산포효과(Dispersion Effect)를 혼합한 것으로서 사용하기가 적합하지 않고, 이 성능특성은 사실상 위치척도인 표본평균에 의해 좌우된다는 것을 밝혀내었다. Shoemaker *et al.*(1991)은 각각의 잡음별로 제어인자들과의 교호작용을 파악함으로써 개별 잡음에 둔감한 제어인자의 수준을 선정하여 강건성을 확보하는 방법을 추천하였다. Box(1988)와 Shoemaker *et al.*(1991)의 이러한 비판과 제안을 수용하여, 본 연구에서는 제어인자의 각 수준에서 얻은 SN비뿐만 아니라, 위치특성과 산포특성을 별도로 파악하여 필요한 경우 모델링을 하며, 잡음별로 제어인자들과의 교호작용을 파악하기 위하여 통제배열(Control Array)로서  $L_{18}$  직교배열이 아닌 부분요인배치법을 이용하고자 한다.

본 연구의 목적은 다구치 방법을 공부하고자 하는 학생이나 현장의 일반 엔지니어들이 이 방법의 적용과정을 간단한 실험을 통하여 이해할 수 있도록 하는 데에 있다. Box and Liu(1999)는 종이헬리콥터 실험을 이용하여 순차적으로 시스템의 행태(Behavior)를 파악하고 최적화하기 위한 반응표면계획 및 분석방법을 제시하였다. 본 논문에서도 이러한 종이 헬리콥터 실험을 활용하여 다구치 강건설계의 개념과 분석방법을 제시하고자 한다. 6개의 제어인자를 각각 2수준으로 고려하여  $2^{6-2}_{IV}$  통제배열(Control Array)을 이용하고, 잡음으로는 제조결함, 사용 환경의 변화, 노후화 등 3개를 각각 2수준으로 고려한  $2^3$  잡음배열(Noise Array)을 고려하였다. 이러한 2개의 배열을 교차한 실험을 수행하여 데이터를 얻은 후, 다구치가 제안한 SN비(Signal-to-Noise Ratio) 외에 평균과 분산을 별도로 분석하고, 통제-잡음 교호작용(Control-Noise Interaction; CN 교호작용)을 이용하여 제어인자의 수준에 따라 잡음에 대한 둔감성이 달라지는 여부를 파악하였다. 데이터 분석은 Minitab 소프트웨어 버전 16을 이용하였다.

제 2장에서는 강건설계 실험계획의 개념과 실험에 고려한 제어인자와 잡음인자, 각 인자의 수준, 실험방법, 분석대상인 성능척도와 실험계획표를 제시하였고, 제 3장에서는 실험에서 얻은 데이터와 성능척도의 값을 구하였다. 각 성능척도에 따른 그래프 분석결과와 최적 조건 설정 등 분석 결과와 해석은 제 4장에 제시하였고, 제 5장에 결론과 추후 연구방향을 제시하였다.

## 2. 강건설계 실험계획

다구치가 최초로 제안하여 다구치 방법으로 알려진 강건설계의 개념은 <Figure 1>에 나타낸 바와 같이 다양한 잡음 하에서도

출력반응이 입력신호에 비례하여 일정하게 나오도록 제어인자의 수준을 강건하게 선정하는 것이다. 입력신호의 수준이 상수이거나 주어진 하나의 입력신호만 고려하면 정특성(Static Characteristic), 입력신호가 변하는 경우에는 동특성(Dynamic Characteristic)으로 구분하여 강건성을 확보하기 위한 제어인자의 수준을 결정하는 것이다.

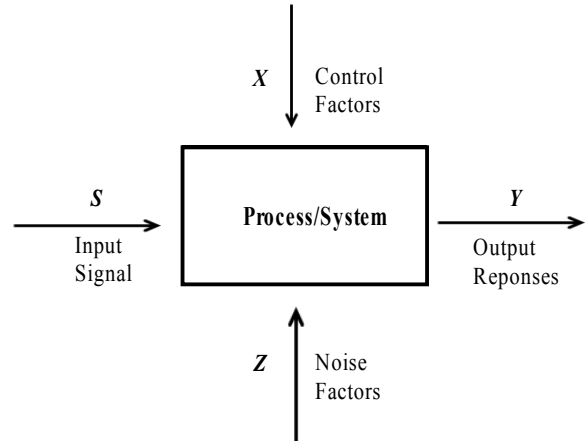


Figure 1. Block Diagram of Process/System

다구치의 강건설계 실험을 위한 종이 헬리콥터의 기본 모형을 <Figure 2>에 나타내었다. 폭의 크기를  $x$ , 전체 세로길이를  $y$ , 날개, 허리, 몸통의 길이를 각각  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 라고 하면  $y = a + b + c$ 가 된다. 그림에서 실선은 자르는 선이고, 점선은 접는 선이다. 각 날개의 폭은  $x/2$ 로 동일하며, 몸통은 3등분으로 절단한 후 접어서 딱풀로 붙이면 몸통의 폭은  $x/3$ 이 된다.

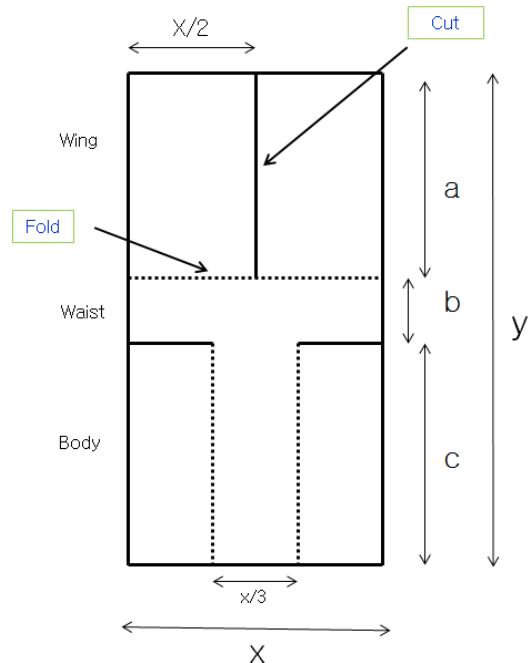


Figure 2. Paper Helicopter Design

**Table 1.** Control Factors and Their Levels

Control Factor	Clip	Paper	Length(y)	Width Ratio(x/y)	Wing Ratio(a/y)	Waist Ratio(b/y)
Low Level	Small	Thin	15	0.3	0.4	0.10
High Level	Large	Thick	20	0.4	0.5	0.15

**Table 2.** Control Array

Std Order	Run Order	clip	paper	length	width ratio	wing ratio	waist ratio
1	12	small	thin	15	0.3	0.4	0.10
2	6	large	thin	15	0.3	0.5	0.10
3	7	small	thick	15	0.3	0.5	0.15
4	8	large	thick	15	0.3	0.4	0.15
5	1	small	thin	20	0.3	0.5	0.15
6	11	large	thin	20	0.3	0.4	0.15
7	16	small	thick	20	0.3	0.4	0.10
8	5	large	thick	20	0.3	0.5	0.10
9	14	small	thin	15	0.4	0.4	0.15
10	13	large	thin	15	0.4	0.5	0.15
11	3	small	thick	15	0.4	0.5	0.10
12	15	large	thick	15	0.4	0.4	0.10
13	9	small	thin	20	0.4	0.5	0.10
14	10	large	thin	20	0.4	0.4	0.10
15	4	small	thick	20	0.4	0.4	0.15
16	2	large	thick	20	0.4	0.5	0.15

**Table 3.** Noise Array

Deterioration	New				Old			
	No		Yes		No		Yes	
Wind	Good	Bad	Good	Bad	Good	Bad	Good	Bad
Manufacturing								

강건성 확보를 위하여 3가지 종류의 잡음인자(Noise Factor)와 각 잡음을 반영하기 위한 2개의 수준을 다음과 같이 고려한다 :

- (1) 불완전 제조(Manufacturing Imperfection) : 날개를 자를 때에, ‘일직선’으로 자르는 것과 ‘2mm 정도 대각선으로 자르는 것’
- (2) 사용 환경의 변화(Wind) : 천정에 있는 ‘히터를 작동하지 않는 경우’와 ‘히터를 작동하고 히터 옆 60cm 옆에서 낙하하는 경우’
- (3) 노후화(Deterioration) : ‘헬리콥터를 접고 처음 낙하시험’을 하는 것과 ‘헬리콥터 날개를 10회 접은 후, 날개의 가운데를 1mm 더 잘라서(overcut) 낙하시험’ 하는 것

실험에 이용한 6개의 제어인자(Control Factor)와 각 수준을 <Table 1>에 나타내었다.

6개의 제어인자를 각각 2수준으로 반영하기 위하여 해(resolution) IV 인  $2^{6-2}$  부분요인배치 실험계획을 이용하여 <Table 2>와 같이 통제배열을 작성하였다. 다구치는 실험순서의 랜덤화의 필요성을 언급하지는 않았지만 본 실험에서는 Minitab을 이

용하여 실험계획을 작성하였고, 이 소프트웨어에서 제시하는 랜덤한 순서대로 실험을 수행하였다. <Table 2>에는 런 순서(Run Order)가 아닌 표준 순서(Standard Order)로 통제배열의 실험계획표를 나타내었다.

<Table 2>의 실험조건별로, 각 2수준인 3개의 잡음인자를 반영하는 잡음배열의 구성을 위하여  $2^3$  요인배치 실험계획을 <Table 3>과 같이 정하였다.

### 3. 실험데이터와 분석 대상

#### 3.1 실험데이터

2013년 3월 첫 주에 265cm 높이의 실험실의 천정에서 종이 헬리콥터를 각 실험조건에서 떨어뜨려 종이 헬리콥터가 <Figure 3>과 같이 회전하면서 바닥에 도착할 때까지의 낙하시간을 측정하였다. 통제배열의 각 16개의 실험조건에서 3개의 잡음인자인 노후화(Deterioration; Det.), 바람(Wind)의 영향, 제조결함(Manufacturing Imperfection; Mfg.) 여부를 모두 반영하여  $2^3 = 8$

Table 4. Experimental Data

New				Old				Det.			
No		Yes		No		Yes		Wind			
Good	Bad	Good	Bad	Good	Bad	Good	Bad	Mfg.			
y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	y <sub>8</sub>	mean	SD	log_SD	SN Ratio
2.29	2.29	2.20	2.21	2.22	2.54	1.89	1.67	2.159	0.266	-0.575	6.487
2.40	2.30	2.32	2.18	2.24	2.49	2.00	1.91	2.229	0.196	-0.707	6.870
2.92	2.65	2.61	2.45	2.76	2.86	2.41	2.15	2.598	0.255	-0.593	8.175
2.17	1.95	1.94	1.86	2.17	1.96	1.75	1.80	1.948	0.155	-0.810	5.720
2.61	3.12	2.51	2.73	1.79	3.09	2.34	2.20	2.546	0.446	-0.351	7.726
2.44	2.20	2.06	2.15	2.06	2.18	2.07	1.95	2.138	0.147	-0.832	6.548
2.52	2.60	2.37	2.35	2.39	2.61	2.14	2.22	2.399	0.170	-0.769	7.541
2.59	2.72	2.08	2.24	2.37	1.90	1.89	1.92	2.211	0.324	-0.489	6.659
2.18	2.26	1.89	1.97	1.70	2.25	2.00	1.83	2.008	0.204	-0.691	5.936
2.57	2.43	2.21	2.16	2.44	1.93	2.13	1.76	2.201	0.273	-0.564	6.667
2.90	2.73	2.56	2.33	2.58	2.64	2.43	2.11	2.533	0.243	-0.614	7.960
2.09	1.90	1.89	1.89	2.01	1.91	1.78	1.71	1.896	0.118	-0.927	5.513
2.94	2.98	2.44	2.29	2.35	2.79	2.06	1.81	2.456	0.420	-0.376	7.446
2.49	2.21	2.07	1.81	2.11	2.12	2.03	1.82	2.081	0.217	-0.664	6.244
2.28	2.49	2.01	1.99	1.98	2.29	1.58	1.60	2.025	0.324	-0.489	5.816
2.50	2.36	2.18	2.09	2.33	2.42	2.29	1.73	2.236	0.242	-0.617	6.827

개의 잡음조합에서 종이 헬리콥터 낙하시험을 수행한 결과를 <Table 4>에 나타내었다. 여기서, 예를 들어, y<sub>7</sub>은 노후화(Det.)가 진행되었고(Old), 바람(Wind)의 영향이 받으며(Yes), 제조결함(Mfg.)이 없는(Good) 상태에서 실험을 하여 얻은 결과를 나타낸다.

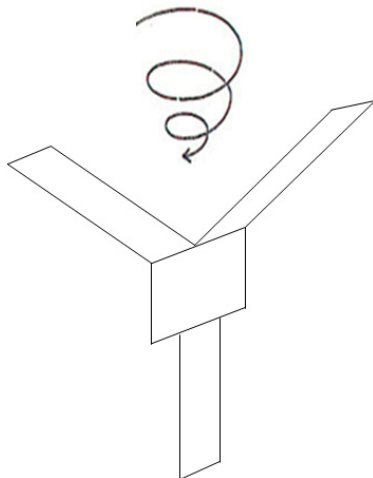


Figure 3. Helicopter Falling

3.2 분석 대상

16개의 각 통제배열의 실험 조건에서 3가지 잡음을 반영하여 8개의 잡음조합에서 얻은 <Table 4>의 데이터를 이용하여 3

가지 통계량인 SN비, 평균, 표준편차와 CN 교호작용 그림을 이용하여 낙하시간을 최대화하며 잡음의 영향을 덜 받는 제어인자의 수준을 파악하고자 하였다. 다양한 잡음조건 하에서도 종이 헬리콥터의 낙하시간을 최대화하기 위한 조건을 찾기 위한 실험이므로, 성능척도로서는 아래 식 (1)처럼 우선 다구치가 제시한 망대특성의 SN비와 평균과 분산(분산의 로그함수)을 고려하였다. 평균과 분산을 별도로 분석하는 것은 Box(1988)의 의견에 따른 것이다. 반응변수 Y의 역수를 W라고 하면, Box(1988)는 식 (1)의 SN비의 로그함수 내에 있는 W의 평균제곱이 식 (2)와 같이 표현될 수 있으며, 이 식에서 편차조정계수인 7/8을 제외하면 이 평균제곱이 W의 표본평균과 표본분산을 합한 것으로서, 이것을 이용하면 데이터가 가지고 있는 정보의 상당 부분이 유실된다는 사실을 밝혀내었고, 망대특성의 SN비를 구성하는 2개의 요소인 표본평균과 표본분산 중에서 표본평균이 거의 결정적인 요소라는 것을 보여주었다.

$$SN_i = -10 \log \left\{ \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \frac{1}{y_{ij}^2} \right\} \tag{1}$$

$$\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 \frac{1}{y_{ij}^2} = \bar{y}^2 + \frac{7}{8} s^2 \tag{2}$$

이러한 3개의 성능척도 외에 개별 잡음에 대한 둔감성에 영향을 미치는 인자를 별도로 파악하기 위하여 Shoemaker et al. (1989)이 제안한 제어인자와 잡음인자의 교호작용인 CN 교호작용을 파악하였다.

### 4. 데이터 분석결과와 해석

#### 4.1 SN비 분석

데이터로부터 식 (1)과 같이 망대특성의 SN비를 구하고 이를 대상으로 구한 주효과 그림과 파레토 차트를 <Figure 4>와 <Figure 5>에 각각 나타내었다.

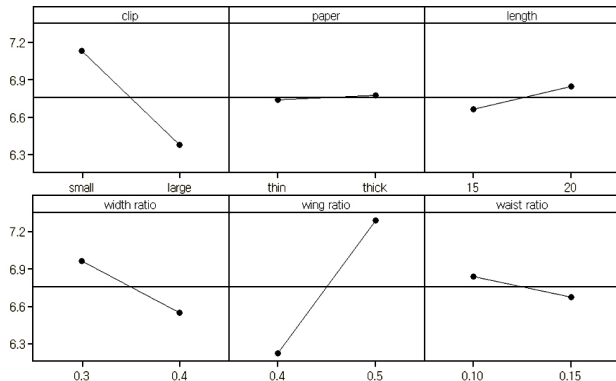


Figure 4. Main Effect Plot of the SN Ratio

표준화된 효과의 Pareto 차트  
(반응은 SN Ratio, 알파 = 0.10)

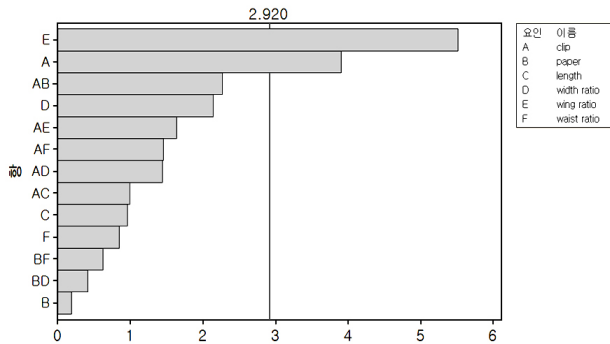


Figure 5. Pareto Chart of the SN Ratio

<Figure 5>의 결과에 따라, 유의하지 않은 요인을 오차항에 풀링한 후, 분산분석을 하여 분산분석표를 <Table 5>에 나타내었다.

Table 5. Analysis of Variance Table for the SN Ratio

Source	SS	df	MS	F	p-value
A : Clip	2.280	1	2.280	9.09	0.010
E : Wing Ratio	4.542	1	4.542	18.10	0.001
Error	3.262	13	0.251		
Total	10.084	15			

<Figure 4>, <Figure 5>, <Table 5>로부터 유의한 요인은 인자 A와 E의 주효과이다. 그리고 <Figure 4>를 보면, SN비를 최대화 하는 조건의 조합은 A<sub>1</sub>E<sub>2</sub>, 즉, Clip은 Small, 길이 대비 날개

의 비율은 0.5임을 알 수 있다. 데이터 평균을 m, 인자 X의 k수 준에서의 평균을 m(X<sub>k</sub>)라고 하면, 최적조건에서 SN비의 추정치는 다음의 식 (3)과 같이 구할 수 있다:

$$\widehat{SN}(opt) = m + \{m(A_1) - m\} + \{m(E_2) - m\} = 6.758 + 0.378 + 0.533 = 7.669 \quad (3)$$

<Table 2>를 보면, A<sub>1</sub>E<sub>2</sub>(Small clip with wing ratio of 0.5) 수준조합과 일치하는 실험조건은 표준순서로 실험번호 3, 5, 11, 13이며, <Table 4>로부터, 이 조건들의 SN비 값은 각각 8.175, 7.726, 7.960, 7.446이며, 그들의 평균은 7.827임을 알 수 있다. Minitab 분석 결과, A<sub>1</sub>E<sub>2</sub> 조건에서의 SN비의 95% 신뢰구간 (Confidence Interval)과 예측구간(Prediction Interval)은 각각 (7.200, 8.137)과 (6.489, 8.848)이다. 최적조건에서의 4개의 SN비 평균값은 7.827로서 신뢰구간에 들어가고, 4개의 개별 SN비 값은 예측구간에 포함될 것을 알 수 있다.

#### 4.2 평균과 표준편차 분석

제어인자의 각 실험조건에서 잡음을 반영하여 얻은 8개 데이터의 평균 낙하시간을 대상으로 한 주효과 그림과 파레토 차트를 각각 <Figure 6>과 <Figure 7>에 나타내었다.

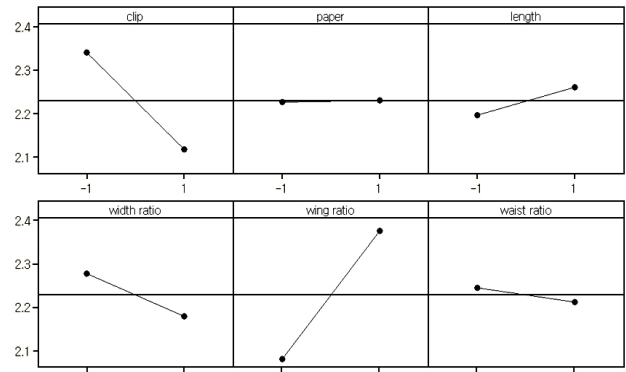


Figure 6. Main Effect Plot of the Mean Response

표준화된 효과의 Pareto 차트  
(반응은 y\_mean, 알파 = 0.10)

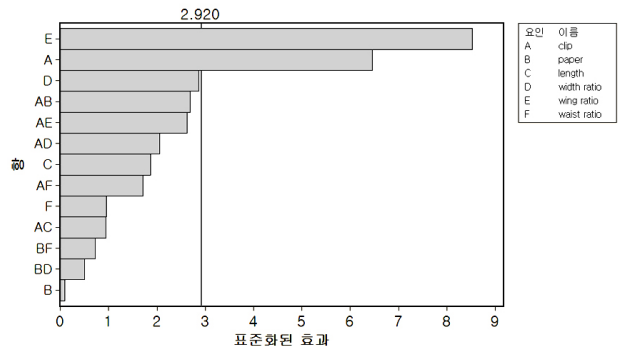


Figure 7. Pareto Chart of the Mean Response

평균 낙하시간에 대한 <Figure 7>의 분석결과를 바탕으로, 유의하지 않은 요인을 오차항에 풀링한 후, 분산분석을 수행한 결과를 <Table 6>에 나타내었다.

**Table 6.** Analysis of Variance Table for the Mean Response

Source	SS	df	MS	F	p-value
A : Clip	0.199	1	2.280	14.40	0.002
E : Wing Ratio	0.347	1	4.542	25.09	0.000
Error	0.180	13	0.033		
Total	0.726	15			

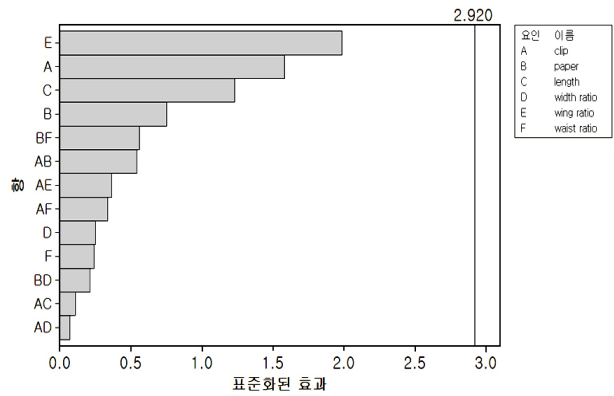
평균값을 대상으로 한 분석 결과, 유의한 효과는 SN비의 결과와 마찬가지로 인자 A와 E의 주효과이며, 낙하시간의 평균을 최대화하는 최적조건도 A<sub>1</sub>E<sub>2</sub>이다. 이 조건에서의 평균값의 추정치는 식 (4)에서 구한 바와 같이 2.747이다 :

$$\begin{aligned} \widehat{Mean}(opt) &= m + \{m(A_1) - m\} + \{m(E_2) - m\} \\ &= 2.229 + 0.223 + 0.295 = 2.747 \end{aligned} \quad (4)$$

A<sub>1</sub>E<sub>2</sub> 수준조합과 일치하는 실험조건은 <Table 2>에 나타난 표준순서로 실험번호 3, 5, 11, 13이며, <Table 4>로부터 이 조건들에서 낙하시간의 평균값은 각각 2.598, 2.546, 2.533, 2.456 이고 그들의 평균은 2.533 임을 알 수 있다. Minitab 분석 결과, A<sub>1</sub>E<sub>2</sub> 조건에서 평균값의 95% 신뢰구간은 (2.378, 2.598)인데, 4가지 낙하시간 평균값의 평균 2.533이 이 구간에 포함되고, 4개의 낙하시간의 각 평균값들이 예측구간 (2.211, 2.765)안에 들어감을 알 수 있다.

산포에 대한 분석을 위하여 각 조건에서 얻은 8개 데이터의 표준편차의 로그를 취한 데이터에 대한 파레토 차트를 <Figure 8>에 나타내었는데, 이 그림으로부터 산포에 유의한 영향을 미치는 요인이 없음을 알 수 있다.

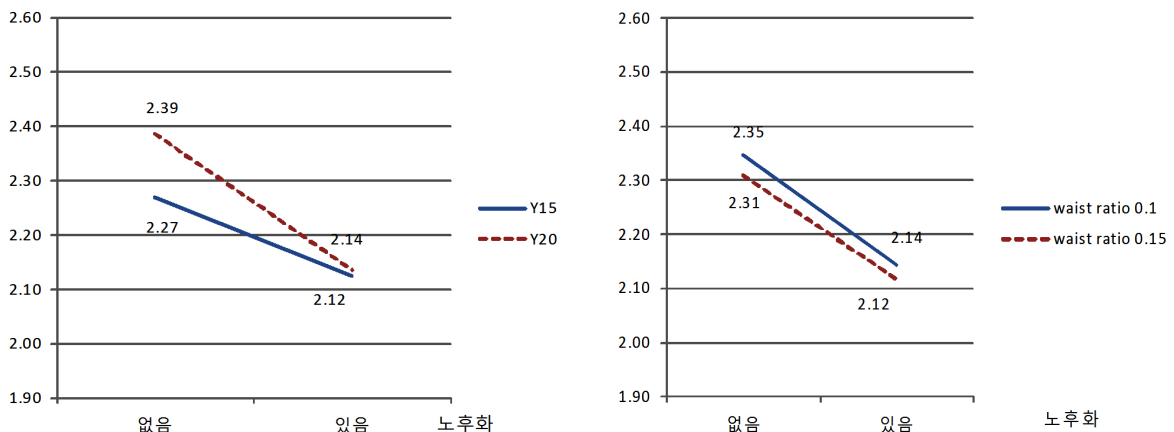
표준화된 효과의 Pareto 차트  
(반응은 log<sub>e</sub>SD, 알파 = 0.10)



**Figure 8.** Pareto Chart of the Log Value of Standard Deviation

### 4.3 통제-잡음 교호작용 분석

Shoemaker *et al.*(1991)은 제어인자와 잡음인자 간의 교호작용을 통하여 각 제어인자가 사용 환경의 잡음(바람의 영향), 노후화, 제조상의 잡음에 어느 정도 민감한지를 파악하기 위한 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 각 잡음인자에 대한 제어인자의 수준별 민감도를 통제-잡음 교호작용(CN 교호작용) 그림을 통하여 파악하였다. 아래 <Figure 9>~<Figure 11>에는 노후화, 사용 환경(바람의 영향), 제조결함 등 잡음인자와 제어인자 간의 교호작용을 나타내었다. 노후화와 사용 환경의 잡음의 경우에는 제어인자와 교호작용을 크게 일으키지 않아서 교호작용을 가장 큰 것과 가장 작은 것만 나타내었다. 제조결함은 제어인자들과 비교적 큰 교호작용을 나타내기 때문에, 6개의 교호작용 모두를 나타내었다. <Figure 9>를 보면 노후화 잡음에 대해서는 헬리콥터의 길이(Y)가 15cm일 때가 20cm일 때보다 잡음의 영향을 덜 받는 수준임을 알 수 있고, 사용 환경의 잡음인 바람의 영향과 교호작용을 일으키는 제어인자는 없음을 <Figure 10>으로부터 알 수 있다.



**Figure 9.** CN Interaction with Deterioration Noise

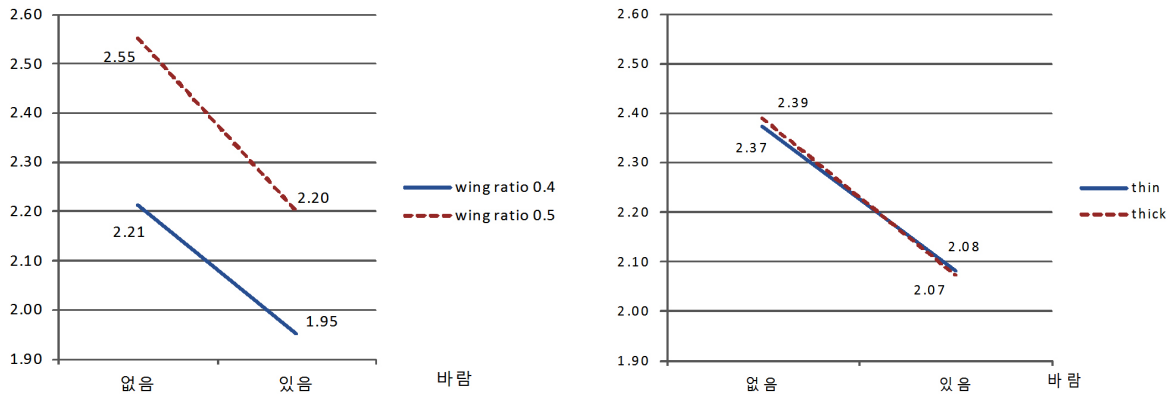


Figure 10. CN Interaction with Environment(Wind) Noise

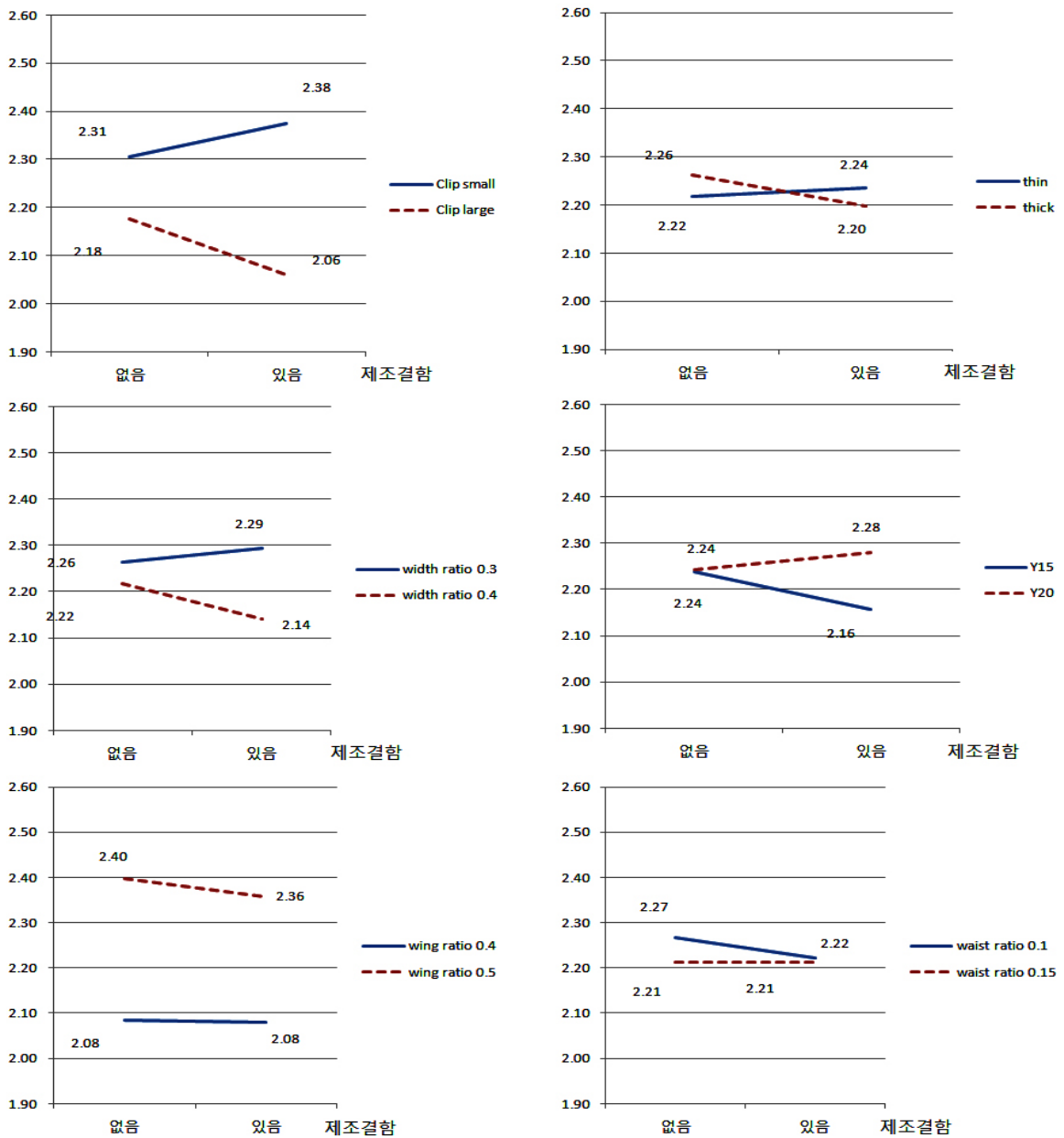


Figure 11. CN Interaction with Manufacturing Noise



<Figure 11>을 보면, 제조결함은 날개의 비율(Wing Ratio)을 제외한 5개의 제어인자와 교호작용 효과가 있음을 알 수 있다. 강건성 측면에서 보면, 종이두께(Paper Thickness)는 얇은 것(thin), 폭 비율(Width Ratio)은 0.3, 헬리콥터 길이(Length)는 20cm, 허리비율(Waist Ratio)은 0.15가 추천할만한 수준임을 알 수 있다.

**4.4 확인실험**

제 4.1절과 제 4.3절의 분석 결과에 따라, 최적조건인 A<sub>1</sub>E<sub>2</sub>, 즉, 날개의 비율은 0.5이고, 작은 Clip을 이용하는 조건에서 잡음 조건별로 2회에 걸쳐 종이헬리콥터를 낙하하는 확인실험을 수행하였다. 이때에 유의하지 않은 나머지 인자들은 제 4.3절의 결과에 따라, 종이두께(Paper Thickness)는 얇은 것(thin), 폭 비율(Width Ratio)은 0.3, 헬리콥터 길이(Length)는 20cm, 허리비율(Waist Ratio)은 0.15로 정하였다. 확인실험을 통한 낙하시간 데이터를 <Table 7>에 나타내었다.

<Table 7>의 데이터를 이용하여 SN비를 구하면 그 값이 7.895이며, 이는 4.1절에서 구한 최적조건에서의 SN비의 신뢰

**Table 7. Confirmation Experiment Results**

Mfg.	Wind	Det.	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>
Good	No	New	2.71	2.66
Bad	No	New	2.99	2.91
Good	Yes	New	2.37	2.40
Bad	Yes	New	2.45	2.49
Good	No	Old	2.62	2.59
Bad	No	Old	2.66	2.60
Good	Yes	Old	2.01	2.05
Bad	Yes	Old	2.40	2.44

구간에 포함된다. 16개 데이터의 평균값은 2.522로서, 이 값도 낙하시간 평균값의 신뢰구간에 들어간다.

**4.5 분석 결과의 해석과 최종 조건 선정**

SN비와 평균값 분석 결과, 유의한 요인과 최적조건이 유사하게 나왔다. 이는 Box(1988)가 밝힌 ‘망대특성의 경우에 SN비는 평균값에 좌우된다’는 사실이 그대로 반영된 것이다. CN 교호작용 분석 결과, 노후화와 사용 환경 잡음은 제어인자들과 별다른 교호작용 효과가 없고, 제조결함은 5개의 제어인자와 교호작용을 가지는 것으로 나타났다.

SN비와 평균값을 대상으로 분석한 결과, 유의한 요인은 주효과 A(Clip)와 E(Wing Ratio)이고, 최적조건은 A<sub>1</sub>E<sub>2</sub>이다. Small Clip을 이용하고 날개의 비율은 0.5인 종이 헬리콥터가 낙하시간을 가장 길게 유지하는 것이다. 이들을 제외한 다른 인자들의 수준 결정은 CN 교호작용을 보고 판단하는 것이 바람직하겠다. CN 교호작용을 나타내는 3개의 그림으로부터 B, C, D, F의 바람직한 수준을 <Table 8>에 나타내었다.

<Table 8>로부터 종이 헬리콥터의 길이를 나타내는 인자 D의 경우 수준선정에 상충(Conflict)이 발생한다. <Figure 9>를 보면, 노후화가 종이 헬리콥터의 길이(Length)와 관련하여 낙하시간에 미치는 영향은 길이가 15cm일 때에는 2.27-2.12 = 0.15이고, 길이가 20cm이면 2.39-2.14 = 0.25이다. 제조결함이 길이와 연관되어 낙하시간에 미치는 영향은 <Figure 11>로부터 알 수 있는데, 길이가 15일 때 미치는 영향은 2.24-2.16 = 0.08이고, 길이가 20일 때에는 2.24-2.28 = -0.04이다. 이와 같이 길이(Length) 인자의 경우, 잡음의 영향을 보다 적게 받는 수준이 서로 상충하지만, 본 실험은 낙하시간을 최대화 하는 것이므로 낙하시간을 크게 만드는 길이 20cm를 선정하도록 한다. 낙하시간을 최대화 하면서도 잡음에 강건한 최종 최적 조건은 <Table 9>에 나타내었다.

**Table 8. Robust Condition Based on CN Interaction**

Noise Factor	Control Factor			
	B(Paper Thick.)	C(Width Ratio)	D(Length)	F(Waist Ratio)
Deterioration	-	-	15	-
Wind(User Environment)	-	-	-	-
Manufacturing Imperfection	thin	0.3	20	0.15

**Table 9. Optimal Condition**

A(Clip)	B(Paper Thick.)	C(Width Ratio)	D(Length)	E(Wing Ratio)	F(Waist Ratio)
small	thin	0.3	20	0.5	0.15



## 5. 결론과 추후 연구방향

본 논문은 종이 헬리콥터 실험을 활용하여 다구치의 강건설계 방법의 개념과 분석방법을 제시하였다. 통제배열로는 6개의 인자를 각각 2수준으로 고려한  $2^{6-2}$  부분요인배치를 이용하고, 잡음은 제조결함, 사용 환경의 변화, 노후화 등 3개를 각각 2수준으로 고려한  $2^3$  요인배치를 이용하여 반영하였다. 이러한 2개의 배열을 교차하여 실험을 수행한 후, 분석은 다구치가 제안한 SN비 외에 평균과 분산에 대하여 별도로 실행하였는데, SN비와 평균값에 영향을 미치는 인자와 최적조건은 일치하였고, 분산에 영향을 미치는 유의한 인자는 존재하지 않았다. CN 교호작용을 이용하여 3가지 종류의 잡음별로 각 제어 인자 수준의 민감성을 파악하였는데, 3개의 잡음인자 중, 제조결함의 경우에 몇 개의 제어인자가 의미 있는 교호작용을 나타내었다. 본 논문은 다구치의 강건설계 개념과 활용절차를 학습하고자 하는 사람들에게 유용한 자료로 이용될 수 있으리라 기대한다.

추후 연구로는 (1) 다양한 방법으로 잡음을 반영하는 것, (2) 종이 헬리콥터를 낙하하는 높이를 신호인자로 보는 동특성 문제, (3) Welch *et al.* (1990)이 제안한 바와 같이 실험의 수를 줄이기 위하여 단일배열(Single Array)을 활용하여 경제적으로 수행하는 실험방법을 생각할 수 있겠다.

## 참고문헌

- Box, G. E. P. (1988), Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations (with discussion), *Technometrics*, **30**(1), 17-40.
- Box, G. E. P. and Liu, P. Y. T. (1999), Statistics as a Catalyst to Learning by Scientific Method Part I-An Example, *Journal of Quality Technology*, **31**(1), 1-15.
- Myers, R. H. and Montgomery, D. C. (2002), *Response Surface Methodology : Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 2nd Edition, Wiley, New York.
- Nair, V. N. (ed.) (1992), Taguchi's Parameter Design : A Panel Discussion, *Technometrics*, **34**(2), 127-161.
- Phadke, M. S. (1989), *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall, London.
- Ross, P. J. (1988), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Shoemaker, A. C., Tsui, K.-L., and Wu, C. F. J. (1991), Economic Experimentation Methods for Robust Design, *Technometrics*, **33**(4), 415-427.
- Welch, W. J., Yu, T. K., Kang, S. M., and Sacks, J. (1990), Computer Experiments for Quality Control by Parameter Design, *Journal of Quality Technology*, **22**(1), 15-22.
- Yum, B.-J., Kim, S.-J., Seo, S.-K., Byun, J.-H., and Lee, S. -H. (2013), The Taguchi Robust Design Method : Current Status and Future Directions, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **39**(5), 325-341.