

<개인 보고서>

Robust & Optimized design for multi-bladed cone

이태혁*

*연세대학교 기계공학과 학부생

Robust Design for Bladed Cone

Tae. H. Lee*

* Undergraduate student, School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

Key Words: Robust Design (강건설계), Optimized Design (최적설계), Larger the better (LTB), Control factor (제어인자), Noise factor (잡음지수, 인자), variation (변동), TSS- Total Sum of square (전체 변동), ANOM (평균분석), ANOVA (분산분석), S/N ratio (Signal to Noise ratio), Interaction plot (상호작용 플롯), model (모델, 비행체)

초록: 이번 프로젝트에서는 강건설계 (robust design) 및 최적설계 (optimized Design) 방법을 비행기능을 갖는 multi-bladed cone rotor에 직접 적용하여 알아보는 것이 목표이다. 본 프로젝트에서는 Larger the better를 타겟으로 한다. 이를 위해, 설정된 noise factor에 의해 발생하는 변동 (variation)을 줄이고 체공시간을 (performance) 길게 할 수 있는 서로 독립된 4가지 control factor를 정성적으로 선정한다. 그 결과 1. 날개 이음새 길이, 2. 이음새 각도, 3. 날개의 겹, 4. 손잡이, 네 가지 인자가 선정되었으며 이를 3 수준으로 나누어 직교배열을 하였다. 이후 noise factor와 model의 경우의 수에 따라 비행 실험을 하여 체공시간의 데이터를 얻었다. 측정 데이터를 기반으로 S/N ratio를 계산하고 ANOM 분석을 통해 1. Reduce the variation, 2. Performance를 고려한 각 인자들의 수준을 선택하여 최적화된 모델을 만들었다. 그리고 ANOVA를 통하여 모델의 전체 변동 (Total Sum of square of Error)에 각 인자들의 영향력을 알아보았고 control factor간의 독립성을 확인하기 위해 Interaction plot을 제시하였다. 마지막으로 위와 같은 통계적 해석과 더불어 과학적 해석을 하여 개선 모델을 제시하였다.

Abstract: In this project, the goal is to apply Robust and Optimized design method directly to multi-bladed cone rotor with flight function. And performance target is Larger the better. for this, four independent control factors are selected qualitatively to reduce the variation caused by the two noise factors and to increase the performance of bladed-cone. The result as follows: 1. Seam length, 2. Seam angle, 3. Wing stiffness, 4. Hand grip, these four factors were selected and given 3 levels each. After that, the flight measurement-time was obtained according to the number of noise factors and models. Based on it, the S/N ratio was calculated and the ANOM analysis was performed to select the level of each factors considering 1. Reduce the variation, 2. Performance for the optimized model. And ANOVA was also performed to obtain the influence of each factors to optimized model's total variation. As the last step of statistic analysis, we suggested Interaction plot to check the independency among control factors. Finally, we showed improved model based on statistic & dynamic analysis

- 기호설명 -

β : Slope for the ideal function

y: Function (response)

M_i : Input signal (i: signal level)

k_i : numbers of input signal

r_o : numbers of combination for noise factor

θ : angle of seam (angle of attack)

† Corresponding Author, fish991@naver.com

© 2019 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론 (Introduction)

1.1) Robust Design & Optimized Design

현재 주변에서 생산되고 있는 많은 제품들은 다양한 환경 (Noise factor)에서 원하는 기능을 수행할 수 있도록 설계되어 있다. 이렇게 설계된 생산품을 Robust Product 라 하며, 디자인 과정을 강건설계 (Robust Design)라 한다.

그리고 noise factor 에 의한 변동을 줄여 제한적 조건에서 우리가 원하는 최적의 성능을 얻고자 하는 디자인을 최적설계 (Optimized Design)라 한다.

이번 프로젝트에서는 모델의 변동을 줄이기 위한 강건설계와 동시에 원하는 최적 기능을 얻고자 하는 최적설계의 방법론에 대해 이해하기 위해 진행되었다.

1.2) Outline of the project

기존 ‘multi-bladed cone rotor’ 디자인에서 모델의 변동 (variation)은 줄이면서 제공시간 (기능)을 늘리는 것이 목적이다. 따라서 제품의 제어인자 (control factor)를 독립적으로 선정하여 각 인자당 3 가지 수준으로 나누고 직교배열 시켰다 그리고 직교배열 표를 기준으로 잡음지수 (noise factor)와 수준을 바꿔 가면서 실험을 진행하였다. 측정된 데이터셋들을 통해 S/N ratio 을 구하고 이를 토대로 ANOM, ANOVA 분석을 시행했다. S/N ratio 와 성능 (\bar{Y})에 대한 ANOM graph 를 기준으로 각 인자마다의 최적 인자들의 선정을 거쳐 최적 모델을 만들었다. 그리고 Interaction plot 을 통해 제어인자들 사이의 독립성을 확인하였다. 이후 통계적, 과학적 해석을 통해 향상된 모델을 제시하였다.

1.3) Material & Initial dimensions

재료: 도화지, A-4 용지, 나무 꼬지, 스테이플러심
기존모델 [날개치수: 4 cm x 6cm, 날개수: 4 개, 콘의 형태: 14 cm x 14 cm 부채꼴]

2. P-diagram & Signal

2.1) Noise factor

잡음인자 (noise factor)는 제어할 수 없는 인자로 다양한 환경을 의미한다. 이번 프로젝트에서는 잡음인자를 Human factor (태혁, 희재, 현준) 세 사람과

Rain condition (우천조건)으로 잡았으며, 우천조건은 분무기로 모델위에 일정하게 분사하여 우천상황을 모사하였다.

2.2) Selection of control factors

기존의 디자인 요소 (Design factor)에서 4 가지 제어인자 (Control factor)를 독립적으로 선정하기 위해, 물리적으로 제공시간에 영향을 줄 수 있는 4 가지 부문으로 나누어 제어인자를 선정하였다. 선정된 물리적 변수(Physical parameter)는 다음과 같다.

(1. 저항, 2. 압력차이, 3. 유동방향, 4. 날개의 강도)

위의 물리적 현상을 Cone rotor 에 반영하기 위해 우리 모델에 해당되는 제어인자 후보들을 나열했다. 그리고 잡음지수 (noise factor)에 의한 변동 (variation)을 최소화 하며 제공시간 (performance)을 최대화하는 변수들을 선정한 결과는 다음과 같다.

1. 이음새길이 (저항),
2. 이음새 각도 (압력차이, 유동방향)
3. 날개의 강도 (Stiffness)
4. 손잡이 (Human factor 고려)

위의 4 개의 제어인자를 선택한 이유는 다음과 같다. 이음새 길이는 저항 면적을 넓혀 비행체의 낙하 속도를 지연시킬 수 있고 이음새 각도는 회전운동을 유발하여 비행체가 안정적으로 오랜 시간 비행을 할 수 있게 도와줄 것이며 날개의 강도는 우천조건에서 날개가 젖어도 강도를 유지할 수 있게 할 것이다. 마지막으로 손잡이는 사람이 비행체를 놓는 위치를 일정하게 하여 변동을 줄일 수 있을 것이다.

2.3) Input signal (Signal factor)

기본적으로 Input energy 개념으로 사용된다. 이번 프로젝트에서는 비행체를 떨어뜨리는 높이 (Potential energy)이 Signal factor 이며 2m, 2.8m, 4.9m 세 수준에서 실험을 하였다.

2.4) y (response - flight time)

사람들이 제품에 바라는 기능 (성능)에 해당된다. 이번 프로젝트에서는 비행체의 비행 시간 (flight time)이 response 이다.

2.5) P-diagram (Parameter-diagram)

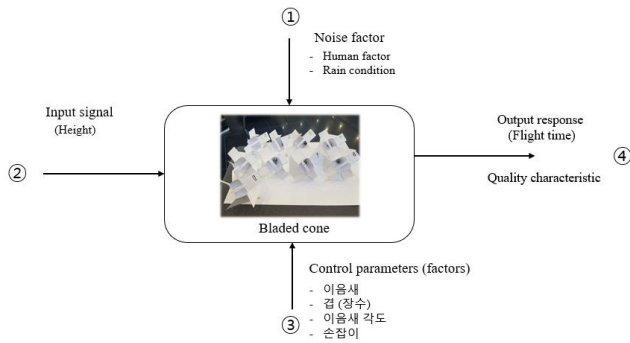


Fig. 1 P-diagram for multi-bladed cone rotor

앞서 선택한 네 가지 제어인자와 2 가지 잡음인자를 토대로 P-diagram 을 만들었다. 그림의 흐름은 Input signal 이 들어오면 제어인자에 의해 response 가 달라지고 동시에 잡음인자에 의해 불확실성이 생겨 기능적 측면에서 시행마다 편차가 생긴다.

3. Orthogonal array table

Table 1. 4 control factors & 3 level (s)

	1 Level	2 Level	3 Level
이음새 (날개길이 대비)	¼ Cover	½ Cover	1 Cover
이음새 각도 (°)	30°	45°	60°
손잡이 (개)	0	1	3
Stiffness (굽)	1	2	3

위의 Table1 에서 네 가지 각 factor 에 대한 세 가지 수준을 나타내었다.

Table. 2 Orthogonal array table

Run	이음새 (ratio)	이음새 각도 (°)	손잡이 (개)	Stiffness (굽)
1	¼ Cover	30°	0	1
2	¼ Cover	45°	1	2
3	¼ Cover	60°	3	3
4	½ Cover	30°	1	3
5	½ Cover	45°	3	1
6	½ Cover	60°	0	2
7	1 cover	30°	3	2
8	1 cover	45°	0	3
9	1 cover	60°	1	1
Original	½ cover	45°	1	2

Table 2 는 직교성 (Orthogonality)를 이용하여, 네 가지 제어인자가 독립적이라는 가정아래 종속적인 요

소들을 소거한후 9 가지 모델과 초기 모델에 대해 표로 제시하였다.

4. Test Results

Table 3. Test results (reference state)

2m	태력	외재	원준	2.8m	태력	외재	원준	4.9m	태력	외재	원준
input 1	Noise1			input 2	Noise1			input 3	Noise1		
1	1.32 s	1.25 s	0.92 s	1	1.29s	1.32 s	1.41 s	1	2.16s	2.05 s	2.16 s
2	1.1 s	0.98 s	0.79 s	2	1.22s	1.32 s	1.29 s	2	1.88s	1.71 s	1.8 s
3	0.98 s	0.93 s	0.96 s	3	1.35s	1.32 s	1.19 s	3	1.70s	1.97 s	1.65 s
4	1.12 s	0.92 s	0.92s	4	1.52s	1.18 s	1.06 s	4	1.93s	1.77 s	1.75 s
5	1.09 s	0.92 s	0.92s	5	1.33s	1.38 s	1.29 s	5	2.02s	2.01 s	1.96 s
6	1.23 s	1.00 s	0.93s	6	1.3s	1.12 s	1.39 s	6	2.03s	1.84 s	1.9 s
7	1.16s	1.00 s	1.05s	7	1.33s	1.25 s	1.4 s	7	2.02s	2.11 s	1.96 s
8	0.98s	1.13 s	0.99s	8	1.32s	1.29s	1.5 s	8	1.86s	1.91s	2.04 s
9	1.06s	1.12s	1.12s	9	1.45s	1.31s	1.45 s	9	2.25s	2.17s	2.15 s
(Origin)	1.03s	1.12s	1.06s	(Origin)	1.38s	1.39s	1.43 s	(Origin)	2.01s	2.04s	2.02 s

Table 4. Test results (rain condition)

2m	태력	외재	원준	2.8m	태력	외재	원준	4.9m	태력	외재	원준
input 1	Noise1			input 2	Noise1			input 3	Noise1		
1	0.98s	1.12s	1.03 s	1	1.36s	1.20s	1.38s	1	1.85s	2.03s	2.03s
2	0.99s	1.06s	1.07 s	2	1.23s	1.32s	1.39s	2	1.9s	1.78s	1.9s
3	0.96s	1.38s	1.12 s	3	1.26s	1.21s	1.19s	3	1.65s	1.84s	1.65s
4	0.98s	0.86s	1.00 s	4	1.30s	1.12s	1.38s	4	1.85s	1.91s	2.1s
5	1.2s	0.92s	1.12 s	5	1.35s	1.26s	1.32s	5	2.0s	2.10s	1.9s
6	1.05s	1.06s	0.93 s	6	1.26s	1.38s	1.38s	6	2.13s	1.90s	1.97s
7	1.11s	0.99s	1.13 s	7	1.32s	1.25s	1.45s	7	1.95s	1.96s	1.98s
8	1.03s	0.86s	1.16 s	8	1.3s	1.19s	1.25s	8	1.98s	1.96s	1.9s
9	1.13s	1.06s	0.96 s	9	1.29s	1.25s	1.39s	9	2.05s	2.03s	2.02s
(Origin)	1.03s	0.92s	0.96 s	(Origin)	1.32s	1.18s	1.39s	(Origin)	1.98s	1.91s	1.97s

Table2 의 Orthogonal array table 을 기준으로 Table3 은 비가 오지 않은 reference state 에 대해 Table4 는 비가 온 rain condition 에 대해 세 사람이 세 가지 Input signal (2m, 2.8m, 4.9m)에서 10 가지 모델을 실험한 결과표이다.

5. Static Analysis

실험결과에 의해 생성된 데이터셋을 이용하여 통계적 분석을 하여 최적 모델을 선정하는 과정이다.

5.1) Dynamic S/N ratio & β (slope)

Signal to Noise ratio 의 약자로 신호 대비 잡음 비율을 의미한다. 즉, 다시 말해 주변 방해 요인이 있음에도 불구하고 Input signal이 얼마나 잘 전달되어 기능을 하는지를 비율로 나타낸 것이 S/N ratio 이며 그

에 대한 수식은 다음과 같다.

$$S/N = 10 \log\left(\frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) = 10 \log\left(\frac{\beta^2}{MSE}\right) - (1)$$

B (slope)은 각 모델의 회귀식 (ideal function)의 기울기를 의미하며 물리적으로는 체공시간 성능에 대한 평가 지표가 된다.

MSE 는 Mean Square of Error 의 약자로 회귀식으로 설명하지 못하는 실제 데이터값과의 차이에 대해 제공하여 평균낸 값을 의미한다. 이것은 모델의 변동 (variation)을 의미한다. 따라서 S/N ratio 에 대해 통계적 해석 또한 '신호 대비 잡음비율'의 의미를 설명할 수 있다.

5.2) Ideal function & β (slope) for each model

B (slope)은 성능에 대한 평가 지표가 된다. 9 가지 모델에 대한 Ideal function 과 slope 은 다음과 같다.

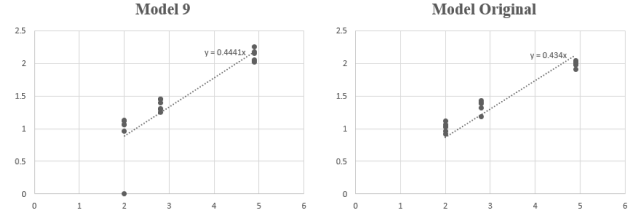
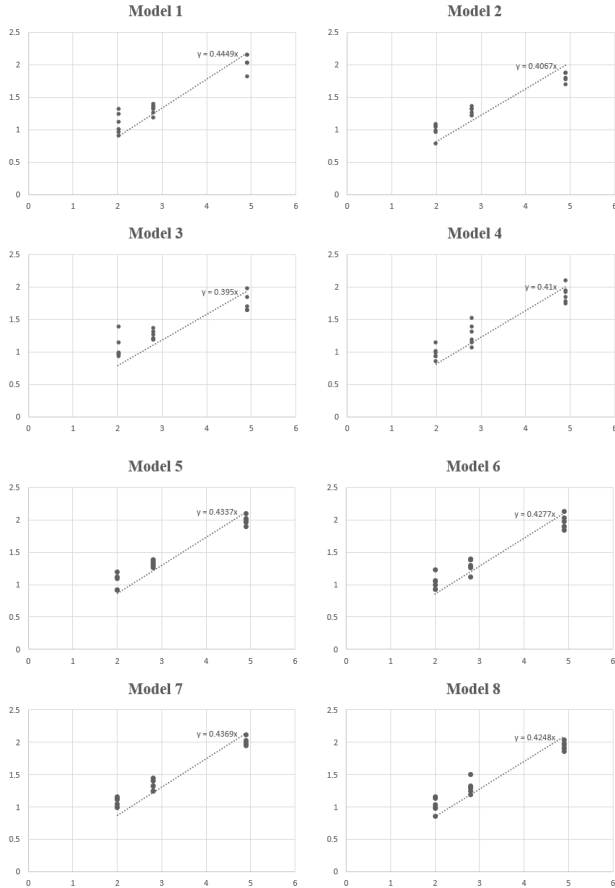


Fig. 2 Ideal function for each model

Table 5. B (slope)

B1	B2	B3	B4	B5
0.4449	0.4067	0.395	0.41	0.4337
B6	B7	B8	B9	B (origin)
0.4277	0.4369	0.4248	0.4441	0.434

5.3) MSE (Mean Square of Error)

MSE (Mean Square Error)는 다음과 같은 식으로 구성되어 있으며, 값을 구하기 위해 필요한 식들을 제시해 놓았다.

$$MSE = \frac{SS_v}{r_0 k - 1} = \frac{1}{r_0 k - 1} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} (y_{i,j} - \beta M_i)^2 - (2)$$

$$SS_v = SS_T - SS_B - (3)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} (y_{i,j})^2 - (4)$$

$$SS_B = \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} M_i y_{i,j})^2}{r} = \frac{(\sum_{j=1}^{r_0} L_j)^2}{r} - (5)$$

$$r = r_0 \sum_{i=1}^k M_i^2 - (6)$$

r_0 : numbers of combination for noise factor

M_i : Input signal (i: signal level)

k : numbers of input signal

($r_0=6$, $k=3$, $M_1 = 2$ m, $M_2 = 2.8$ m, $M_3 = 4.9$ m)

통계적으로 SS_T 는 실제 데이터값의 자승에 대한 합을 의미하며, SS_B 는 회귀식 (Ideal function)으로 설명할 수 있는 정도를 의미하며, SS_v 는 variation 합으로 회귀식으로 설명하지 못하는 부분을 나타낸다. 따라서 MSE 는 SS_v 를 자유도로 나눈값으로 전체 데이터 variation 의 평균을 의미한다.

5.4) S/N ratio Calculation & result

위의 (2) - (6) 식을 이용하여 각 모델에 대한 MSE

값을 구하고 (1)식을 이용하여 각 모델의 S/N ratio를 구한 결과는 다음과 같다.

Table 6. S/N ratio result for each model

Model	SSt	SSb	SSv	MSE	B (slope)	S/N ratio
1	43.2136	42.57782427	0.635775732	0.037399	0.4449	7.236698
2	36.2123	35.58496105	0.627338954	0.036902	0.4067	6.51495
3	34.6001	33.56532264	1.034777359	0.060869	0.395	4.087962
4	36.7233	36.15503007	0.568269926	0.033428	0.41	7.01462
5	40.8937	40.46470026	0.428999744	0.025235	0.4337	8.723707
6	39.886	39.34657373	0.539426272	0.031731	0.4277	7.607953
7	41.5746	41.0628374	0.511762603	0.030104	0.4369	8.021445
8	39.3299	38.80782531	0.522074686	0.03071	0.4248	7.690853
9	44.832	44.4442149	0.3877851	0.022811	0.4441	9.368193
(Origin)	40.9476	40.51155649	0.43604351	0.02565	0.434	8.658986

5.5) ANOM analysis (S/N, \bar{y})

위의 S/N ratio 결과값과 실험에 의해 구해진 제공 시간에 대한 ANOM 값을 구한 결과는 다음과 같다.

Table 7. ANOM (S/N)

이음새 (Ratio)	ANOM (S/N)
0.25	95.946536639
0.5	7.782093408
1	8.360163716
이음새 (Angle)	ANOM (S/N)
30°	7.42425404
45°	7.643170148
60°	7.021369575
손잡이 (개)	ANOM (S/N)
0	7.511834718
1	7.632587742
3	6.944371303
Stiffness (겹)	ANOM (S/N)
1	8.44286623
2	7.38144934
3	6.26447819

Table 8. ANOM (\bar{y})

이음새 (Ratio)	ANOM (\bar{y})
0.25	1.405555556
0.5	1.417777778
1	1.468518519
이음새 (Angle)	ANOM (\bar{y})
30°	1.443518519
45°	1.416111111
60°	1.432222222
손잡이 (개)	ANOM (\bar{y})
0	1.450185185
1	1.419074074
3	1.422592593
Stiffness (겹)	ANOM (\bar{y})
1	1.484814815
2	1.425
3	1.382037037

분석을 하기 위해 그래프화 하여 다음과 같이 나타내어 분석을 하였다.

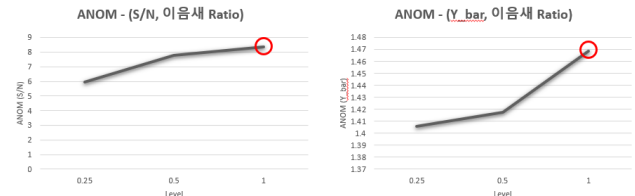


Fig. 3 Seam ratio (ANOM analysis graph)

이음새 길이에 대해서는 S/N ratio와 \bar{y} 에 대해 둘 다 3 수준이 높기 때문에 3 수준으로 선택하였다. Ratio = 1로 날개길이와 동일한 5 cm로 선정하였다.

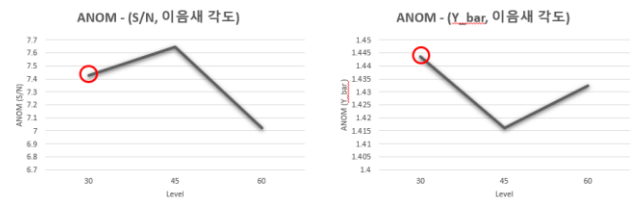


Fig. 4 Seam angle (ANOM analysis graph)

이음새 각도는 S/N ratio는 2 수준, \bar{y} 는 1 수준이 가장 높다. 하지만, \bar{y} 가 2 수준에서 급감하므로 약간의 S/N ratio를 손해보더라도 1 수준을 선택하였다.

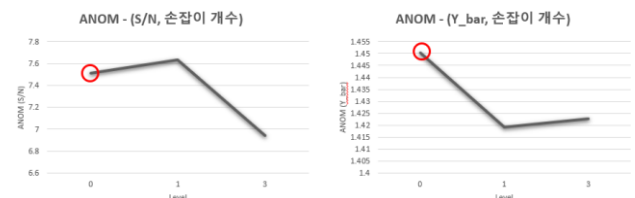


Fig. 5 number of handgrip (ANOM analysis graph)

손잡이 개수 또한 이음새 각도와 같은 이유로 2 수준에서 \bar{y} 가 급감하므로 약간의 S/N ratio를 손해보더라도 1 수준을 선택하였다.

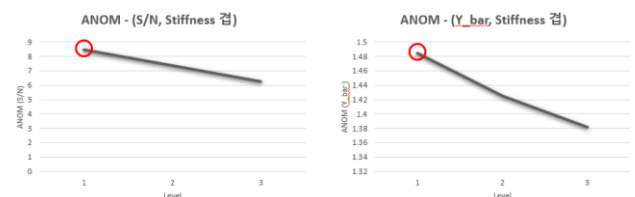


Fig. 6 Stiffness (ANOM analysis graph)

날개의 겹의 경우 S/N ratio와 \bar{y} 둘 다 1 수준이 높기 때문에 1 수준으로 선택하였다.

5.6) Optimized model

Table 9. Optimized level for each factor

Optimized Design			
이음새 ratio	이음새 angle	손잡이 개수	Stiffness 겹
1:1	30°	0	1

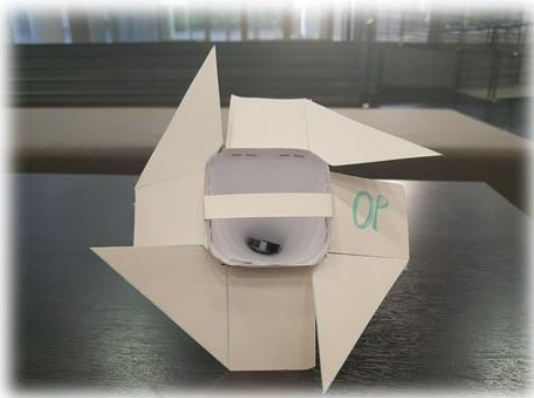
**Fig. 7 Optimized model**

Table9는 각 제어인자의 최적화된 수준을 표로 정리하여 제시해 놓았다. ANOM 분석 결과대로 ‘이음새 길이’는 날개 길이비와 같은 5 cm, ‘이음새 각도’는 30°, 손잡이 개수는 0 개, ‘날개의 겹’은 도화지 한장으로 하였다. 그리고 Fig.7 과 같이 최적화 모델을 제작하였다.

5.7) ANOVA – Parameter sensitivity

ANOVA, 분산분석은 본래 표본 평균사이의 차이가 표본의 분산 (MSE)을 비 (ratio)로 비교하여 (평균사이의 거리와 표본분산 사이의 거리를 비교) F-test를 통해 통계적으로 유의미한 평균 차이가 있는지 확인하는 방법으로 알려져 있다.

$$\text{Total SS} = \sum_{i=1}^{\# \text{ models}} (S/N_i - \overline{S/N})^2 - (7)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{\# \text{ levels}} (\text{of exp. at } A_i) (S/N_{Ai} - \overline{S/N})^2 - (8)$$

이번 프로젝트에서는 위의 두 식을 이용하여 각 모델 (표본)의 전체 변동량 (variation)에 대해 각 제어인자 수준마다의 변동량의 합으로 나누었다. 그리고 제어인자마다의 영향력을 얻어냈다. SS_T 는 모든 표본 데이터의 총변동량을 의미하며 SS_A 는 각 제어인자에

따른 변동량을 의미한다. 이를 SS_T 로 나누어 비율을 구한 것은 다음과 같다.

Table 10. ANOVA

	TSS	SS(ratio)	SS (angle)	SS (손잡이)	SS (겹)
Value	18.056	9.529	0.597	0.811	7.120
Percentage (%)	100%	52.78 %	3.30 %	4.49%	39.43%

Model variance (TSS-error) – 100%

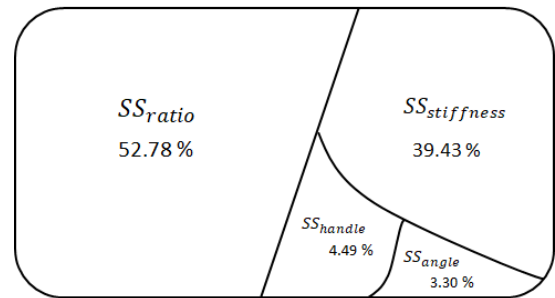
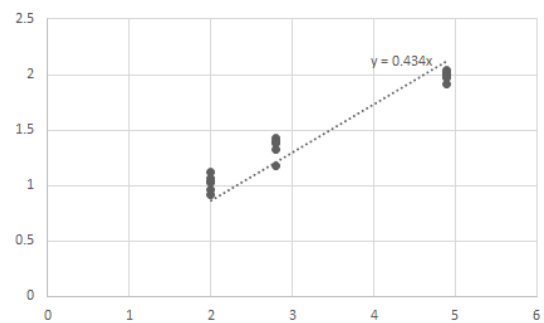
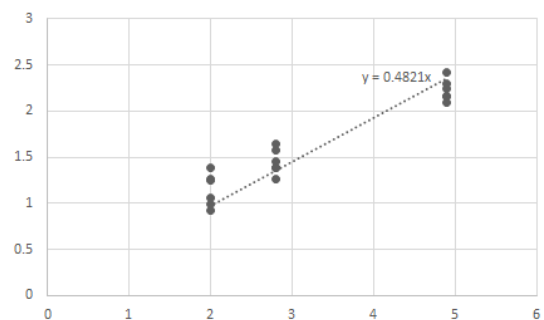
**Fig. 8** ANOVA influence percentage

Table10 과 Fig.8 에서는 제어인자마다 전체 모델의 변동량 (variation)에 미치는 영향을 정리하고 도식화하여 제시하였다.

6. Initial & Optimized model

Model Original**Model Optimized****Fig. 9** Ideal function (Initial & Optimized model)

초기모델과 최적화된 모델의 성능적 측면, 안정성 (변동)의 측면에서 비교하였다. Fig.9 는 초기모델과 최적모델의 ideal function 을 도시한 것이다.

이에 대한 각 performance 를 나타내는 β 와 변동을 알아보기 위해 표준편차를 다음과 같이 제시하였다.

Table 11. Slope & Standard deviation

β_{origin}	0.434
$\beta_{optimized}$	0.4821
Std_{origin}	0.419139
$Std_{optimized}$	0.490161

Table11 에 따르면 초기모델보다 최적모델의 B 가 0.434 에서 0.4821 로 증가하였으므로 성능은 향상되었다고 판단할 수 있다. 하지만 동시에 표준편차가 0.419 에서 0.49 로 증가하여 변동 (variation)에 대한 감소는 이루지 못하였다. 이는 ANOM 분석에서 약간의 S/N ratio 를 포기하고 \bar{y} 를 높이는 수준을 선택한 것과 일맥상통한다.

6.1) Probability density function

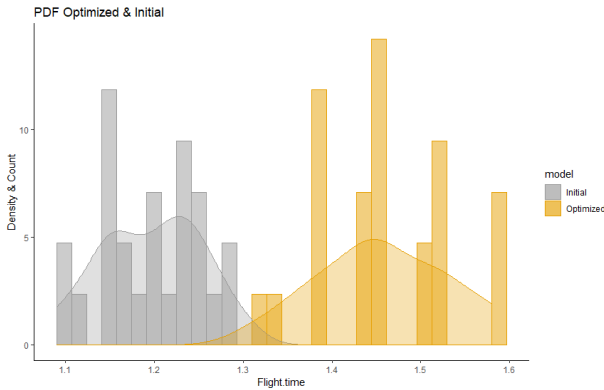


Fig. 10 PDF (Initial & Optimized model)

Table 11. Dataset for initial & Optimized models

Run#	Initial (s)	Optimized (s)
1	1.1	1.51
2	1.2	1.39
3	1.09	1.45
4	1.29	1.38
5	1.23	1.38
6	1.16	1.58
7	1.23	1.38
8	1.23	1.52
9	1.15	1.45
10	1.23	1.39
11	1.19	1.32
12	1.12	1.58
13	1.29	1.44
14	1.15	1.45

15	1.15	1.51
16	1.26	1.44
17	1.25	1.45
18	1.2	1.45
19	1.25	1.52
20	1.15	1.33
21	1.16	1.52
22	1.2	1.58
23	1.25	1.52
24	1.22	1.46
25	1.15	1.44

초기모델과 최적모델의 확률밀도함수를 도시하기 위해 2.8 m 같은 위치에서 같은 조건하에 각 25 번씩 실험하였다. 그 결과를 Table 11 에 정리하였다. 그리고 Table11 을 기반으로 확률밀도함수를 도식화한 것이 Fig.10 이다. 평균은 올라갔지만 분산이 증가한 것을 확인 할 수 있다.

7. Interpretation (Discussion)

7.1) Discussion of control factors

각 제어인자들마다 초기설정의 예상효과부터 통계학적 분석 결과, 과학적 분석. 위의 세가지 절차를 통해 해석하였다.

1. 이음새 길이 (이음새 ratio)

Step1. Selection of control factor

이음새의 길이는 저항면적을 높이고 저항압력을 비행체 고르게 분포하여 안정성을 높일 것으로 예상하였다.

Step2. Statistic interpretation

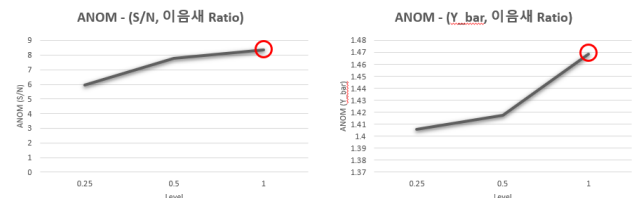


Fig. 3 Seam ratio (ANOM analysis graph)

Fig.3 에서 S/N ratio, \bar{y} 에 대해서 고찰해 보아도 이음새 길이가 증가할수록 값이 올라간다. 이는 공기저항에 의해 체공시간이 길어지고 모델에 저항을 고르게 분포시켜 낙하산과 같은 원리로 안정적으로 낙하하게 됨을 의미한다.

Step3. Physical interpretation

공기 저항력 (Drag force)의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{fluid} v^2 C_D A - (9)$$

물리적 수식차원에서 A (area)면적으로 저항력 크기를 충분히 설명할 수 있다.

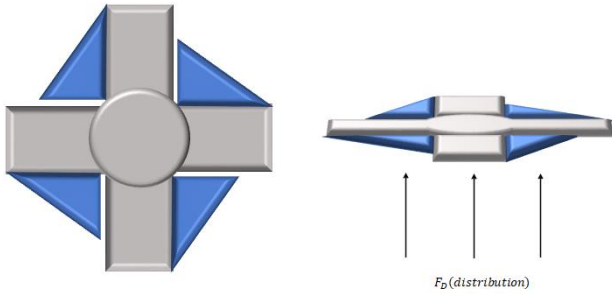


Fig. 11 Force distribution diagram

이음새 길이가 길어질수록 Fig.11 과 같이 힘의 분포가 전반적으로 고르게 된다. 즉, 힘의 불균형으로 돌림힘 (moment)에 의해 전복될 확률이 줄어들어 안정적으로 낙하한다. 결과적으로 S/N ratio 와 \bar{y} 모두 증가시킬 수 있었다.

2. 이음새 각도 (이음새 angle)

Step1. Selection of control factor

이음새의 각도는 압력차이에 의한 양력 (Lift force)와 유동흐름의 변화에 의한 회전운동을 유발하여 체공시간과 안정성 모두 증가할 것으로 예상하였다.

Step2. Statistic interpretation

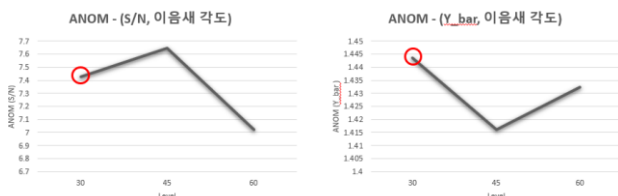


Fig. 4 Seam angle (ANOM analysis graph)

Fig.4 에서 S/N ratio 은 2 수준에서, \bar{y} 은 1 수준에서 가장 높았다. Step1 에서의 예상 결과와는 어긋나고 결국 약간의 S/N ratio 를 포기하고 1 수준을 선택했다.

Step3. Physical interpretation

Bernoulli equation

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \gamma h = \text{Const} - (10)$$

Continuity equation (Reynolds transport theorem)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA = 0 - (11)$$

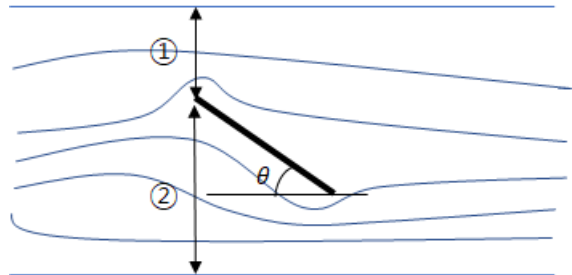


Fig. 12 Streamline around seam (or wing)

Bernoulli equation (10)과 Continuity equation (11)에 의해 이음새의 각도에 따른 속도장을 해석해보면 Fig.12 와 같다. Continuity equation 에 의하면, 유동 질량이 같아야 하며 밀도가 같을 경우 유량이 같아야 한다.

$$Q = Au (m^3/s) - (12)$$

즉, 식 (12)의 유량 Q 가 일정해야 한다. 속도 u 는 면적 A 에따라 달라지며, 베르누이 식 (10)에 의하면 속도에 따라 정압 (static pressure)이 달라진다.

이를 Fig. 12 에 적용해 보면, 1 번 구간 (Nozzle)의 면적은 2 번 구간 (Diffuser)의 면적보다 더 작기 때문에 1 번 구간에서의 속도가 2 번 구간의 속도보다 더 빠르게 되며 정압은 2 번 구간이 더 크게 된다. 즉, 각도 θ 에 따라 압력차가 커진다.

이에 따라 이음새 각도 45°일때가 30°일때보다 압력차가 크고 회전힘이 커서 더 빠르게 안정적으로 돌아가는 현상이 일어난다. 마치 빠른 팽이가 느린팽이보다 안정적으로 회전하는 것과 유사하다.

각도 60°일때는 S/N ratio 가 급락하는 것을 확인할 수 있는데 이는 박리 (separation)등의 현상에 의해 유동이 불안정해진 것으로 해석했다.

하지만 \bar{y} 의 관점에서 보면 45°일때가 가장 낮다. 위 해석 두 가지를 모두 고려해보면, 여러 경우의 해석을 할 수 있다. 그 중 제시하고자 하는 하나의 해석은 다음과 같다. '짧은 높이에서 안정적으로 회전하는 것과 낙하속도는 크게 상관이 없다'라는 해석이다.

회전하기 시작하며 압력차에 의해 양력을 받으며 내려오는 높이 (거리)가 길지 않았다. 그래서 더 많은 면적으로 공기저항을 받는 30°일때가 S/N ratio 는 좀

더 작았지만, 체공시간은 더 길었다는 해석이 나왔다. 즉, 현 조건에서는 베르누이에 의한 양력보다 공기의 저항력의 영향을 더 많이 받는다고 설명된다.

3. 손잡이 개수

Step1. Selection of control factor

손잡이의 개수는 사람에 대한 잡음인자를 제어하기 위해 선정된 제어인자이다. 놓는 위치를 일정하게 하여 사람의 영향을 최소화하기 위함이다.

Step2. Statistic interpretation

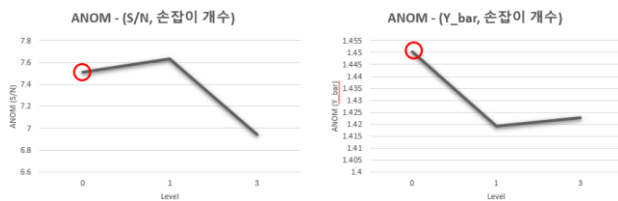


Fig. 5 number of handgrip (ANOM analysis graph)

Fig.5 에서는 앞의 이음새 각도 인자와 마찬가지로 S/N ratio 를 약간 포기하고 체공시간인 \bar{y} 을 좀 더 고려하여 1 수준을 선택하였다.

Step3. Physical interpretation

예상대로 손잡이 1 개일 때 가장 안정적으로 사람에 대한 잡음인자를 제어할 수 있었다. 하지만 손잡이를 다는 동시에 체공시간이 급락하였음을 확인할 수 있었다. 실제로 손잡이는 직경이 약 (2 mm) 정도 되는 나무꼬치로 되어 있었으며 종이에 비해 무게를 무시할 수 있을 정도는 아니었다. 따라서 나무꼬치의 무게 때문에 체공시간이 많이 떨어진 것으로 해석하였다.

$$\text{Weight of hand grip} = m (\text{hand grip}) \times g$$

4. 날개의 겹

Step1. Selection of control factor

날개의 겹은 도화지를 층으로 쌓아서 구현하였으며 세 가지 수준에 따라 1 장, 2 장, 3 장으로 적층 하였다. 우천조건 (rain condition)에 대한 잡음인자를 제어하고자 선정한 인자이다. 우천시 빗물에 날개가 젖어도 그 강도를 유지시키고자 하였다.

Step2. Statistic interpretation

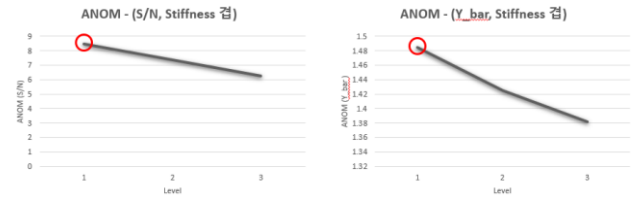


Fig. 6 Stiffness (ANOM analysis graph)

Fig.6 에서 확인할 수 있듯이 날개의 겹이 증가할수록 S/N ratio, 체공시간 \bar{y} 모두 하락하는 것을 확인할 수 있었다.

Step3. Physical interpretation

종이 자체의 무게뿐만 아니라 종이가 친수성 물질이기 때문에 물을 뿌리면 그 물을 흡수하고 더욱 무게가 증가한다. 특히 공시간 \bar{y} 측면에서 보면 한 겹일때보다 강도는 더 좋을지 모르지만, 무게측면에서 큰 손실을 봤다는 것을 알 수 있다.

Paper (Hydrophilic)

8. Interaction plot

8.1) Interaction plot (reference A)

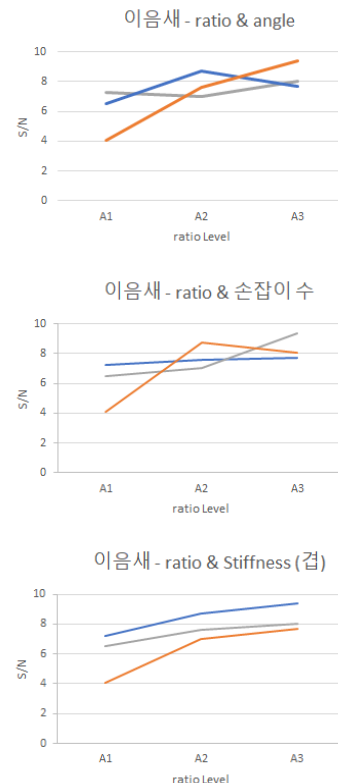


Fig. 13 Interaction plot (reference, seam ratio)

초기에 제어인자들 사이에 독립성을 배제하기 위해 4 가지 물리적 변수로 나누어 인자를 선정하였는데, 이음새 길이와 날개의 겹 두 인자 외의 다른 인자들은 약하게 종속적임을 확인할 수 있다.

8.2) Interaction plot (reference B)

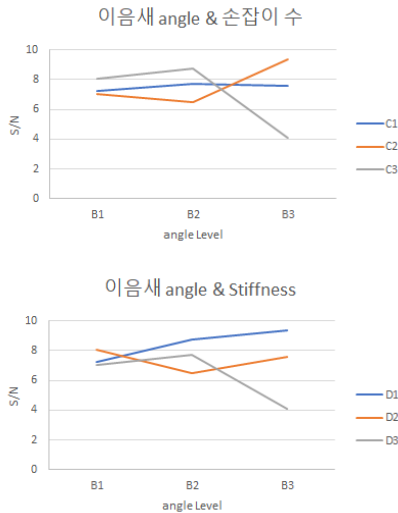


Fig. 14 Interaction plot (reference, seam angle)

이음새 각도에 대한 Interaction 은 이음새 길이를 기준 Interaction 보다 더 강한 종속적 관계를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

8.3) Interaction plot (reference C)

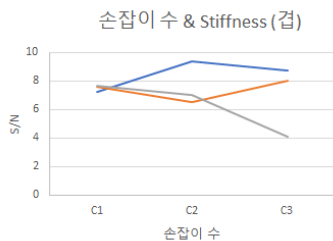


Fig. 15 Interaction plot (reference, # of hand grip)

손잡이 수와 날개의 겹 또한 강한 종속적 관계를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

9. Distinct Features

앞서 통계적분석과 더불어 공학적 분석을 통하여 제어인자들 사이의 상관관계, 성능과 변동의 관계, 각 인자들마다 모델의 변동에 미치는 영향력 등에 대해

서 알아보았다. 이를 토대로 현재 모델의 딜레마가 무엇인지 알아보고 개선모델을 제시하였다. 이는 다음과 같다.

9.1) Dilemma of current model

현재 모델은 체공시간을 늘리기 위해 무게를 감소하면 무게중심이 위로 올라가 전복되는 등의 안정성에 문제가 생기며 반대로 안정성을 위한 장치를 달면 무게가 늘어나며 체공시간이 감소한다. 따라서 무게를 줄여 체공시간을 증가시키며 안정성을 높일 수 있는 모델을 다음과 같이 제시하였다.

9.2) Improved model

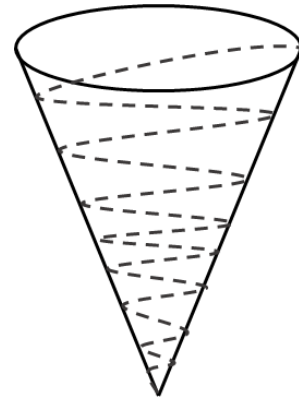


Fig. 15 Improved model schematic

현재 모델에서 날개를 없애고 Fig.15 와 같이 옆면을 따라 나선형태의 이음새를 부착하여 공기저항을 받는 단면적을 늘린다. 이는 체공시간을 연장시킬 것이며, 이음새가 원뿔 모양을 360°로 여러 번 감겨 추가 안정장치가 필요없이 안정적으로 낙하할 것이다.

10. Conclusion

이번 프로젝트에서 multi-bladed cone rotor 에 관한 제어인자 (control factor)를 잡음인자 (Noise factor)와 체공시간 \bar{y} 를 고려하여 독립적으로 선정하였다. 각 모델마다 실험을 하여 데이터셋을 얻고 이 데이터셋을 기반으로 ANOM 분석, ANOVA 등의 통계적 분석 방법을 통해 최적 모델을 선정하는 작업을 하였다. 위 설계과정에서 통계적 분석결과를 기반으로

공학적 또는 과학적 추론 과정을 거친다. 이번 프로젝트에서는 약간의 S/N ratio 를 기회비용으로 체공시간(response)를 얻는 선택을 하였고 그에 따라 최적모델은 체공시간은 길어졌지만, 분산은 증가하는 모습을 볼 수 있었다. 위의 사례에서 알 수 있듯이 통계적인 것은 많은 데이터 결과 속에서 패턴을 찾고 대표되는 값, 최적화된 값 등을 알려줄 뿐 결론적으로는 공학도들이 물리적인 지식을 기반으로 선택을 해야 한다. 그래서 처음 제어인자에 대한 예측효과와 통계적 분석결과와 함께 공학적 분석을 하였다.

마지막으로 위의 통계적, 공학적 분석에 의해 중요한 요소들을 파악할 수 있었고 이를 기반으로 더 이상 현재의 제어인자로 개선시킬 수 없는 부분에 대해 초기 디자인 요소를 바꾸어 좀 더 향상된 개선 모델을 제시할 수 있었다. 그에 대한 예시로써 이번 프로젝트에서는 무게를 줄이면서 안정적으로 비행할 수 있게 날개를 없애고 이음새를 나선형태에 따라 부착하는 모델을 제시하였다.

이번 프로젝트를 통해서 기존 모델에서의 강건, 최적 설계의 전반적인 이해를 할 수 있었고 더 나아가 다른 여러 제품들에 같은 방법과 원리로 확장해 갈 수 있을 것이다. 또한 직접 모든 제품들을 실험하기 힘들 것이라 생각되기 때문에 시뮬레이션 테크닉 또한 중요한 요소일 것이라 생각된다.

11. References

- (1) William Y. Fowlkes, Clyde M. Creveling., 1995, "Engineering Methods for Robust Product Design" pp.93~115, 125~315.
- (2) Philip M. Gerhart, Andrew L. Gerhart, 2017, "Munson's Fluid Mechanics," Global edition 169, pp.82~88, 161 ~165.