

유동안정성 및 유동소음을 고려한 판토틀라프 팬헤드 단면의 강건설계

Robust Design of Pantograph Panhead Sections Considering Aerodynamic Stability and Noise

조운기* · 이종수**
Woonki Cho, Jongsoo Lee

Key Words : Aerodynamics(공력학), Aeroacoustics(공력소음학), Robust Design(강건설계), Parameter Design(파라미터 설계), Orthogonal Array(직교배열표)

ABSTRACT

Pantograph design process must be considered in terms of stability of aerodynamics and reduction of aeroacoustics. Furthermore Pantograph needs to be insensible to severe circumstance condition like typhoon, tunnel, a change of season. In this paper, robust design of panhead sections is conducted based on the Taguchi's design of experiment method. In the aeroacoustic noise analysis, an acoustic analogy using the Ffowcs Williams and Hawkings (FW-H) equation is used to calculate the flow induced sound pressure level. From the near-field CFD analysis data, the far-field noise is predicted at the positions of 25m away from panhead contact strips. Based on aerodynamic (CFD) and aeroacoustic (FW-H) analysis data, the optimal sizing and positioning of panhead elements are determined using robust design optimization method. Design parameters such as thickness, length and radius are controllable factors, while outdoor air temperature and atmospheric pressure are considered as uncontrollable factors in the context of Taguchi's approach. A number of CFD simulation and aeroacoustic analysis are performed based on orthogonal arrays. Using a parameter design procedure associated with signal-to-noise (S/N) ratio and sensitivity analysis, an optimal level of design parameters are extracted to minimize the disconnection ratio between contact strips and catenary system, and reduce the far-field aeroacoustic noise.

1. 서론

현재 개발중인 한국형 고속전철은 최고 주행속도가 350km/h 에 이르며, 국내의 지형 및 기후여건에 따르는 잦은 터널 진출입, 태풍, 장마, 계절의 변화 등과 같은 환경조건에 노출될 수 있다. 이러한 조건은 고속전철의 전체 설계에서 고려되어야 하는데, 특히 동력차량의 지붕위에 설치되어 있어 외부로 노출되어 있는 판토틀라프(Pantograph)의 경우에는 성능에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 보다 상세한 설계를 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 이러한 가혹환경조건에서 고속전철 판토틀라프가 갖추어야 할 유동안정성 확보 및 유동소음 저감이라는 목표에 최대한 근접할 수 있는 설계를 제시해 보고자 한다. 이러한 설계에 접근할 수 있는 대표적인 최적화 기법으로 현재 공학적인 응용성이 증대되고 있는 다구찌(Taguchi) 실

험계획법(Design of experiment)을 들 수 있다. 특히 잡음인자를 고려한 강건설계(Robust Design)는, 설계결과가 실제 현상에 적용될 경우에 발생할 수 있는 제어 불가능한 주변 잡음 인자에 대해 최대한 둔감하도록 설계인자의 수준을 결정하는 방법이다. 실험 결과는 신호 대 잡음비(Signal to Noise ratio)라는 파라미터 계산을 통해 분산분석(Analysis of Variance)을 실시하여 설계목표를 만족하는 설계인자의 수준조합을 최종 결정하게 된다. 본 연구에서는 선행된 연구결과를 바탕으로 다음과 같은 방법을 적용한다. 2 차원 단면의 모델로부터 3 수준 4 개의 제어인자(Controllable factor)를 선정하고, 환경조건에 따른 2 수준 2 개의 잡음인자(Noise factor)를 선정하여 강건설계를 수행하기 위한 직교배열표(Orthogonal array)를 구성한다. 직교배열표에 따라 시뮬레이션을 통해 유동장의 공력특성을 예측하고, CFD 결과를 이용하여 FWH(Ffowcs Williams Hawkings) 방정식의 수치적 해를 계산하여 소음을 예측한다. SN 비는 공력 및 공력소음의 설계목적에 따라 두 가지 측면에서 각각 달리 계산되며, 분산분석(Analysis of variance)을 통해 성능치에 영향을 미칠 수 있는 인자를 F-검정을 통한 유의수준을 고려하여 선정하게 된다. 본 논문에서의 연구방법을 Figure. 1 에 도시하였다

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계전자공학부

E-mail : jleej@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4474, Fax : (02) 362-2736

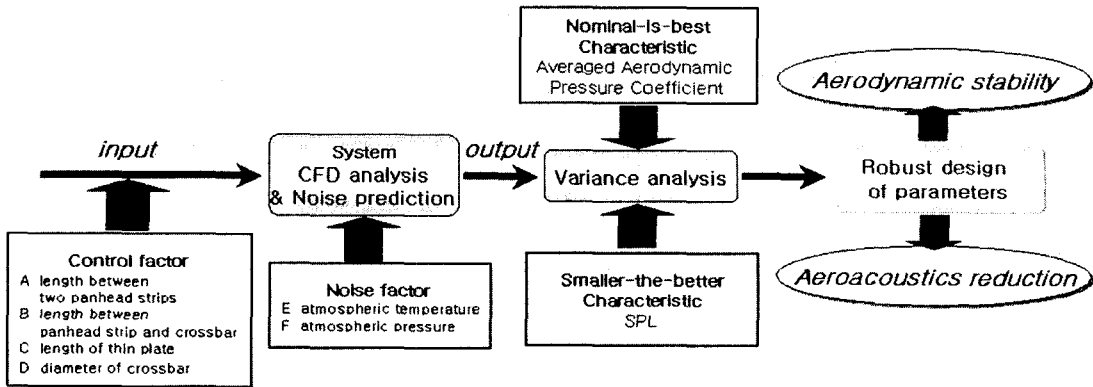


Figure. 1 Schematic of whole process of study

2. 실험계획법

2.1 다구찌 실험계획

다구찌 실험계획법은 '실험에 의하여 기술정보의 획득효율을 높여주기 위한 일반적인 기술의 전체'로 정의되고 있으며, 종래의 실험계획으로부터 공학적인 응용범위를 확장하고 있다[3]. 품질 산포의 크기를 손실함수(loss function) 또는 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise ratio)와 같은 계량특성치로 변환하여 산포를 작게 하는 인자들의 조건을 찾는 강건설계(Robust Design)를 가능하게 하였다. 이러한 다구찌 실험계획에서는 품질특성치를 망목(Nominal-the-Best, NTB), 망소(Smaller-the-Better, STB), 망대(Larger-the-Better, LTB) 특성으로 분류하여 각각에 대한 손실함수를 별도로 정의한다[5]. 망목특성은 제품의 무게 또는 길이와 같은 특정한 목표치가 주어져 있는 경우이며, 망소 및 망대특성은 특성치가 작으면 작을수록 또는 크면 클수록 좋은 경우로서 마모 혹은 수명 등을 예로 들 수 있다. 시스템의 목적에 따라 SN 비는 식(1)와 같이 시스템에 가해지는 잡음이 산출물의 품질에 미치는 변동을 측정하여 결과에 대한 신뢰성을 계량화한 것으로, 손실함수와 마찬가지로 품질특성치에 따라 다르게 정의하여 사용된다[2,4,5].

$$S/N \text{ ratio} = \frac{\text{power of signal}}{\text{power of noise}} \quad (1)$$

2.2 시스템 특성

본 연구의 경우 요구되는 설계목적은 두 가지 측면에서 고려되어야 한다. 우선 공력특성이 요구되는 수준에 적합하여야 하며, 소음레벨은 최소화가 요구된다. 즉, 공력학적인 측면에서는 망목특성, 공력소음학적인 측면에서는 망소특성의 성격을 가지고 있다. 망목특성은 측정치가 y 이고, 목표치가 m 인 경우에 손실함수는 식(2)와 같이 정의되며 그래프는 Figure. 2 (a)와 같다[3].

$$L(y) = \frac{A}{\Delta^2} (y - m)^2 \quad (2)$$

where, A = loss of customer
 Δ = half of allowable limit

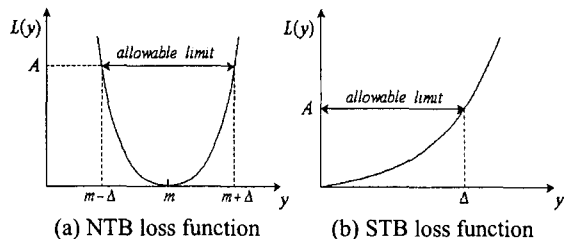


Figure. 2 Loss function for system characteristic

Figure 2. (b)는 망소특성의 그래프로 손실함수는 식(3)과 같이 표현된다[5].

$$L(y) = \frac{A}{\Delta^2} y^2 \quad (3)$$

2.3 신호 대 잡음비

SN 비는 식(1)에서 언급된 바와 같이 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 비율을 나타낸 것으로, 다루려는 모평균의 제곱값과 분산의 추정값의 비로서 식(4)와 같이 표현하였다[3].

$$S/N = \frac{\text{estimation value of } \mu^2}{\text{estimation value of } \sigma^2} \quad (4)$$

SN 비는 통신공학에서와 같이 상용대수를 취하고 10 을 곱하여 데시벨 (dB) 단위로 표시하게 되며, 본 연구에 사용될 망목 및 망소특성의 SN 비는 식 (5), (6)과 같이 표시할 수 있다[4].

$$S/N_{NTB} = 10 \log[\sigma^2 + (\bar{y} - m)^2] \quad (5)$$

where, \bar{y} = mean of characteristics

$$S/N_{STB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (6)$$

2.4 인자(factor) 선정

파라미터(parameter)는 시스템 성능에 영향을 주는 제어 가능한 인자를 의미하며, 파라미터 설계는 이러한 인자들의 최적 수준을 결정하는 것을 의미한다. 이러한 파라미터의 설계목적은 시스템 성능이 제어하기 힘든 변량인자 또는 성능특성치와 같은 잡음 요소에 둔감하도록 설계변수의 최적 조합을 결정하는 것이라고 할 수 있다. 본 연구에서의 파라미터 설계는 5 장에서 보다 구체적으로 언급된다. 본 연구에서는 제어인자(Controllable factor) 및 잡음인자(Noise factor)를 다음과 같이 설정하였다.

제어인자의 선정에 앞서, 본 연구에서 유동해석을 수행한 판토폴라프의 상부 부품의 2 차원 모델을 살펴보면 Figure. 3 과 같다. 본 모델은 팬헤드 단면에서의 양력을 발생시키기 위해 크로스 바 상부에 얇은 평판을 부착하여 기존 판토폴라프의 공력특성을 개선한 모델이다[6]. 공력특성 및 유동소음에 영향을 줄 수 있는 제어 가능한 설계인자로는 Figure. 3 에 도시된 바와 같이 팬헤드사이의 간격, 크로스바의 중심에서 팬헤드까지의 거리, 평판의 길이, 크로스바의 직경을 선정하여 각각 A, B, C, D 로 표시하였다. 제어인자의 수준은 3 수준으로 설정하였다. A, B, D 인자의 경우 기존 치수를 기준으로 하였으며, C 인자의 경우 저속 유동해석 결과를 바탕으로 하여 요구되는 공력특성을 만족하는 구간에서의 평판의 길이 평균값을 기준으로 하

였다[6]. 제어인자의 변폭은 실제 설계에 반영될 경우를 고려하여 변폭량의 수준이 지나치게 크지 않으면서 판토폴라프 각 부품의 치수 및 위치가 유동장 변화에 미치는 정성적인 영향을 살펴볼 수 있는 정도로 Table. 1 과 같이 설정하였다.

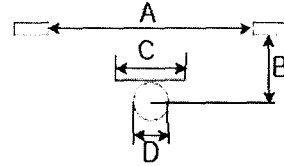


Figure. 3 Schematic of Simplified panhead section and Controllable factors

Table. 1 Dimension of Controllable factors

Factor	0 Level[mm]	1 Level[mm]	2 Level[mm]
A	250.75(-15%)	295*	339.25(+15%)
B	75.65(-15%)	89*	102.35(+15%)
C	62.05(-15%)	73*	83.95(+15%)
D	40(-20%)	50*	60(+20%)

* indicates a current level

잡음인자는 실제 실험에서 제어할 수 없는 인자로서, 시뮬레이션을 도구로 이용하는 본 연구에 있어서는 인위적으로 인자값을 조절해 주어야 한다.

Table. 2 Noise factors

Factor	0 Level	1 Level
E(outdoor air temperature)	15℃	30℃
F(atmospheric pressure)	101325 Pa	104325 Pa

잡음인자는 Table. 2 와 같이 외부 대기온도 및 대기압을 인자로 삼았다. 온도는 계절의 변화를 고려하여 평균 온도인 15℃를 0 수준으로 하고 30℃를 1 수준으로 선정하였다. 대기압은 표준대기압을 1 수준으로, 터널 통과시의 기압변화를 가정한 3000 Pa 증가된 대기압을 1 수준으로 선정하였다[9].

2.5 직교배열표(Orthogonal Array)

파라미터 설계는 주로 직교배열표를 이용하여 설계되는데, 반복테이터를 얻거나, 잡음인자를 변화시키지 않은 상태에서 반복하여 측정하거나, 잡음인자들이 수준을 정하여 수준조합에서 성능을 측정하는 방법이 사용되며, 본 연구에서는 마지막 방법을 사용하였다. 이러한 실험계획의 경우, 2 개의 직교배열표가 교차하는 형태로 구성되는데, 제어인자로 이루어진 배열을 내측배열, 비제어인자로 구성된 직교배열을 외측배열이라 부른다. 내측

배열의 경우 시뮬레이션 회수의 적정수준을 고려하여 교호작용을 고려하지 않은 3 수준계의 $L_9(3^4)$ 형을, 외측배열의 경우에는 2 수준계 $L_4(2^3)$ 형을 이용하였다. 본 연구에 계획된 직교배열표는 Table. 3 과 같다. Table. 3 의 Y_{ij} 값은 공력특성의 경우 양력 [N]을 유동속도[km/h]의 자승으로 나누어 준 공력압상계수(Aerodynamic Pressure Coefficient, APC)를 사용하였고, 소음특성의 경우 SPL[dBA]를 이용하였다.

Table. 3 Orthogonal arrays

Expe No.	Inner Array				Outer Array				S/N	
	A	B	C	D	Experiment No.					
	Controllable factor				1	2	3	4		Noise factor
					0	0	1	1		
1	2	3	4	0	1	0	1	D		
1	0	0	0	0	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}		
2	0	1	1	1	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}		
3	0	2	2	2	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}		
4	1	0	1	2	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}		
5	1	1	2	0	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{54}		
6	1	2	0	1	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{64}		
7	2	0	2	1	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}	Y_{74}		
8	2	1	0	2	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}	Y_{84}		
9	2	2	1	0	Y_{91}	Y_{92}	Y_{93}	Y_{94}		

3. 유동 해석

3.1 유동장 설정

유동속도는 고속전철의 목표 주행속도인 350km/h 로 설정하였고, 이에 해당하는 마하수는 0.283 이므로 국부적인 유동장에서의 압축성을 고려하여, 압축성, 점성, 비정상 난류 해석을 실시하였다. 난류모델로는 2 equation 방법 중 하나인 standard k-epsilon 모델을 이용하였으며, 시간간격은 0.025 ms 로 설정하여 상용 유동해석 코드인 FLEUENT 5.4 를 사용하여 해석하였다[8]. 제어인자 3 수준에 의한 9 가지 해석 모델은 Figure 4. 와 같다.

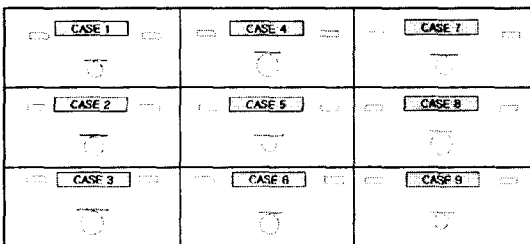
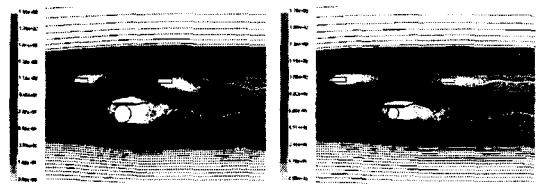


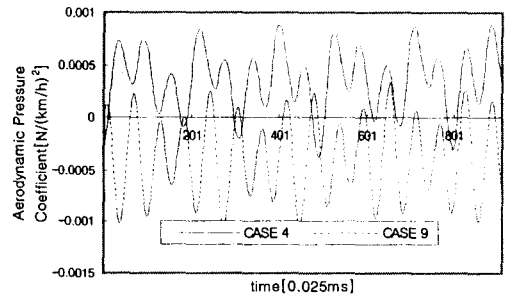
Figure. 4 9 CASE models with 3 controllable level

3.2 유동해석 결과

시뮬레이션은 직교배열표에 의해 계획된 36 가지 경우에 대해 수행되었다. 36 가지 경우 중 Figure. 5 는 CASE 4 와 CASE 9 에 대한 유선 및 공력압상계수의 변화를 나타낸 것으로 직교배열표의 외측 배열 2 열에 해당하는 경우이다. 제어인자의 조합에 따른 유선형상 및 공력압상계수의 변화를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 평균 공력압상계수에 대해서만 고려하므로, 물리적인 해석은 생략한다.



(a) Streamline of CASE 4 and CASE 9



(b) APC distribution

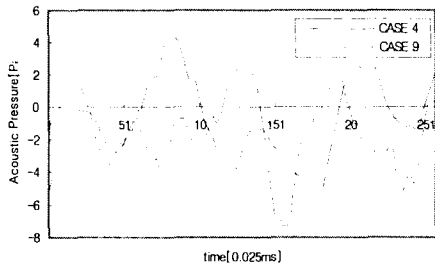
Figure. 5 Aerodynamic characteristics for CASE 4 and CASE 9

4. 소음 예측

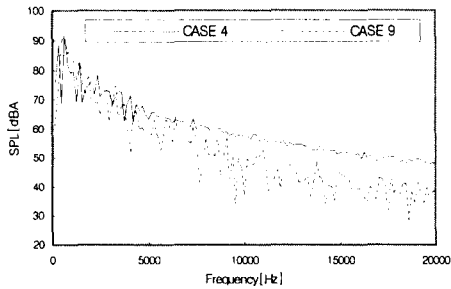
4.1 예측방법 및 결과

공력소음 해석을 위한 방법으로는 Lighthill의 음향상사이론을 기반으로 하여 발전된 지배식인 Ffowcs Williams-Hawkings(FWH)방정식을 이용하였다. 계산시간의 증대와 체적 적분과 같은 어려움으로 사극자소음항은 계산에서 제외하였다[7]. 2 차원 해석결과는 측면방향으로 1m의 가상의 길이가 존재한다는 가정 하에 동일하게 확장되어 3 차원 소음해석에 사용되었다. 관찰자 위치는 유동방향으로 판토티그래프의 후방 25m 위치에서 측정하였

다. 압축성 유동장을 고려하여 제어면 상에서의 마하수의 변동을 고려한 수치해석 코드를 개발하여 소음을 예측하였고, A-보정을 통한 SPL 을 계산하였다. 소음특성 또한 공력특성과 마찬가지로 CASE 4, 9의 경우만 Figure 6.에 음압변동 및 주파수 특성을 도시하였다.



(a) Acoustic pressure distribution



(b) SPL spectrum

Figure. 6 Aerodynamic characteristics for CASE 4 and CASE 9

5. 파라미터 설계

5.1 분산분석(Analysis of variance, ANOVA)

망소 및 망목특성의 파라미터 설계 방법은 다음과 같은 공통점이 있다. 우선 직교배열표에 의한 계획에 따라 실험을 실시한 후 SN 비를 계산한다. SN 비에 대한 분산분석을 통하여 SN 비에 영향을 미치는 제어인자를 찾는다. 이 과정에서 찾은 유의한 제어인자들의 최적수준은 SN 비를 최대로 하는 수준조합이 된다. SN 비에 유의한 영향을 못 주는 제어인자는 경제성, 작업성 등을 고려하여 적절한 수준을 선택하게 된다[3]. SN 비에 의한 설계인자의 최적수준조합은 SN 비를 최대로 하는

수준에서 결정된다. Table 4.는 시뮬레이션을 통한 평균 공력압상계수 및 SPL 값에 따라 계산된 SN 비에 대한 결과이다.

Table. 4 S/N ratio and Sensitivity results from orthogonal array

	mean APC		SPL
	S/N ratio [dB]	Sensitivity [dB]	S/N ratio [dB]
1	63.27532	-58.43683	-32.68498
2	66.05409	-84.12531	-34.56716
3	78.31389	-80.75232	-34.79268
4	78.65140	-80.69550	-35.02523
5	63.61331	-79.89200	-34.17695
6	63.78195	-72.27933	-33.68413
7	63.76793	-65.77316	-33.25063
8	71.39212	-81.07918	-34.68040
9	63.77159	-79.70937	-39.18109

5.2 ANOVA in Aerodynamics

망목특성을 갖는 공력학적 측면에서는 일본에서 개발되었던 판토히그라프의 공력기준인 유속 300km/h 에서의 20~25N 을 기준으로 삼아, 평균값인 22.5N 에 해당하는 공력압상계수값인 2.5×10^{-4} 를 목표치로 설정하였다. Table 4.의 SN 비를 각 인자별 수준에 대한 변동을 구하여 Table 5.와 같은 분산분석표를 작성할 수 있다. 이 때, 오차항이 없으므로, F-검정을 실시하기 위해, S 값이 제일 작은 항을 오차항으로 이용하여 작성하였다. Table 5.와 같이 SN 비 측면에서는 B 인자를 오차항으로 삼았다[3].

Table. 5 ANOVA table for mean APC

Factor	S	D.O.F	V	F ₀
A	8.78066	2	4.39033	2.16173
C	17.43234	2	8.71617	4.29170
D	232.21275	2	116.10637	57.16889
error(B)	4.06187	2	2.03094	

Table. 5 에서 살펴보면 D 인자만 유의수준 5%에서 유의한 것으로 확인되었다. 유의한 인자 D의 최적수준을 결정하기 위해 신뢰도 95%에 해당하는 구간추정을 실시할 경우 평균값 및 신뢰구간은 Table. 6 과 같다. 이를 그래프로 그려보면 Figure. 7 과 같다.

Table. 6 Reliable region for mean APC

Factor D	Reliable region		
	lower	mean	upper
0	60.01296	63.55341	67.09386
1	60.9942	64.53465	68.07511
2	71.24528	74.78574	78.32619

$$\pm t(\phi_E; 0.025) \sqrt{\frac{V_E}{3}} = \pm 3.54045$$

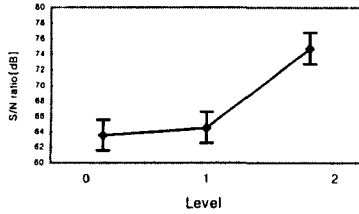


Figure. 7 SN ratio in Aerodynamic(Factor D)

이러한 결과를 토대로 잡음인자로 선정된 온도 및 압력조건에 대해 최대한 둔감하면서, 요구되는 공력조건을 만족시킬수 있는 제어인자의 조합을 살펴보면 다음과 같다. 우선 공력특성에 대해 유의한 인자는 크로스바의 직경이며, 현재 수준보다 클 경우 최적수준이 된다. 에러항으로 삼은 두 팬헤드간의 거리는 현수준으로 채택하고, 크로스바의 중심과 팬헤드와의 간격 및 크로스바 상부 평판의 길이 또한 특성에 큰 영향을 미치지 못하므로 현재수준으로 설정할 경우, 공기역학적 측면에서의 최적조합은 $A_1B_1C_1D_2$ 의 조합이 된다.

5.3 ANOVA in Aeroacoustics

5.2 절의 공력특성과 마찬가지로 공력소음의 경우에도 SPL 에 대한 분산분석을 실시하였다. Table.7 에서 확인할 수 있듯이 B 인자를 에러항으로 삼을 경우, A 및 D 인자는 5%에서, C 인자는 10%에서 유의한다. 유의한 인자들에 대해 신뢰도 95%에 해당하는 구간추정을 실시하면 Table. 8 및 Figure. 8 과 같다.

Table. 7 ANOVA for SPL

	S	D.O.E	V	F0
A	2.69963	2	1.34982	
C	0.12199	2	0.06099	15.55264
D	2.53568	2	1.26784	
	0.00784	2	0.00392	

Table. 8 Reliable region for SPL

Factor	Level	Reliable region		
		lower	mean	upper
A	0	-40.92158	-40.76600	-40.61042
	1	-39.67582	-39.52024	-39.36466
	2	-39.86755	-39.71197	-39.55639
C	3	-40.03140	-39.87582	-39.72024
	4	-40.12257	-39.96699	-39.81141
	5	-40.31099	-40.15541	-39.99983
D	0	-39.62900	-39.47342	-39.31784
	1	-40.88178	-40.72621	-40.57063
	2	-39.95417	-39.79859	-39.64301

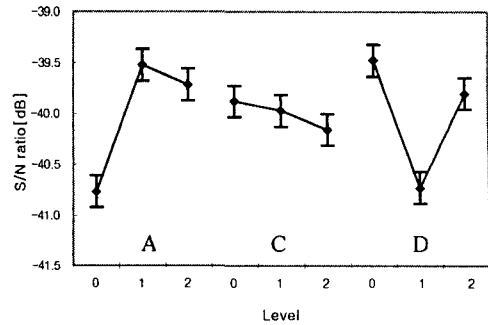


Figure. 8 SN ratio for aeroacoustic

Figure. 8 에서 소음을 최소화하는 인자의 조합을 구해보면, 팬헤드간의 거리는 현수준으로, 평판의 길이는 현수준보다 작은 수준으로, 크로스바의 직경은 작을수록 보다 저소음의 경향을 보이고 있다. 즉, 공력소음 저감 측면에서의 최적조합은 $A_1B_1C_0D_0$ 이 된다.

6. 결론

고속전철의 전력공급장치인 판토품라프 팬헤드 단면설계에 유동안정성 및 유동소음 저감을 목적으로 다구찌의 실험계획법을 이용한 강건설계를 수행하였다. 망목특성을 갖는 공력학적 설계결과는 팬헤드 스트립 간의 거리, 크로스바 중심과 팬헤드간의 거리 및 평판의 길이는 현수준으로 하고, 크로스바의 직경은 현수준보다 큰 경우가 최적수준의 조합이 되며, 망목특성의 소음측면에서는 공력설계 결과에서 크로스바 중심과 팬헤드 간의 거리가 현수준보다 작고, 크로스바 직경 또한 작은 경우가 소음저감에 최적한 수준이 된다. 네 가지의 설계인자 중 크로스바의 직경은 공력 및 공력소음의 측면에서 볼 때 상반된 결과를 보이고 있어 양 측면을 모두 고려할 경우 적절한 치수가 결정되어야 할 것으로 예상된다. 3 차원 기반의 유동 해석 및 소음예측을 수행하고, 교호작용을 고려한 직교배열표를 고려한다면 각 인자간의 영향을 파악할 수 있어 보다 정확한 해석이 이루어질 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) 판토품라프 개발, 1998, "고속전철기술개발사업 2 차년도 연차보고서", 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, pp. 33~44.
- (2) Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Shin Taguchi, 2000, Robust Engineering, McGraw-Hill Inc, New York.
- (3) 박성현, 2000, 현대실험계획법, 민영사.

(4) William Y. Fowlkes, Clyde M. Creveling, 1995, Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley Publishing Company, Canada.

(5) Madhav S. Phadke, 1989, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

(6) 조운기, 이종수, 2001, “고속전철 판토품의 팬헤드 단면에 대한 공력특성 해석”, 춘계학술대회 논문집 E, 대한기계학회, pp. 367~372.

(7) Kenneth S. Brentner and F. Farassat, 1997, An analytical comparison of the acoustic analogy and kirchhoff formulation for moving surfaces, American Helicopter Society 53rd Annual Forum, pp. 1~10.

(8) FLUENT Solver User Guide, 1998, Fluent Inc., Lebanon, NH, chapter 8, pp. 1~5, chapter 17, pp.1~32.

(9) 김동현, 강부병, 신민호, 2001, “철도터널 통풍공의 공기역학적 성능에 대한 연구”. 춘계학술대회 논문집 E, 대한기계학회, pp. 341~348.