

유동안정성 및 유동소음을 고려한 팬터그래프 팬헤드 단면의 강건설계

Robust Design of Pantograph Panhead Sections Considering Aerodynamic Stability and Noise

조 운 기* · 이 종 수†

Woonki Cho and Jongsoo Lee

(2001년 12월 8일 접수 : 2003년 1월 23일 심사완료)

Key Words : Aerodynamics(공력학공기역학), 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 Hawkins(FW-H) equation is used to calculate the flow induced sound pressure level in aeroacoustics. From the near-field CFD analysis data, the far-field noise is predicted at the positions of 25 m away from Pantograph. 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. In this paper, two-step optimization method is used as a parameter design procedure. It is executed using signal to noise(S/N) ratio and analysis of means(ANOM) method. So Thus, an optimal level of design parameters is extracted to minimize the disconnection ration between contact strips and catenary system, and reduce the far-field aeroacoustic noise.

1. 서 론

현재 개발중인 한국형 고속전철은 최고 주행속도가 350 km/h에 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 지붕 위에 설치되어 있어 외부로 노출되어 있는 팬터그래프(pantograph)의 경우에는 성능에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 보다 상세한 설계를 필요로 하게 된다.⁽¹⁾

본 연구에서는 이러한 가혹환경조건에서 고속전철 팬터그래프가 갖추어야 할 유동안정성 확보 및 유동소음 저감이라는 목표에 최대한 근접할 수 있는 설계를 제시해 보고자 한다. 이러한 설계에 접근할 수 있

† 책임저자, 정회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : jleej@yonsei.ac.kr

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

* 연세대학교 기계공학부

는 대표적인 최적화 기법으로 현재 공학적인 응용성이 증대되고 있는 다구찌 실험계획법을 들 수 있다.⁽²⁾ 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.

본 연구에서는 선행된 연구결과를 바탕으로 Fig. 1에 도시된 방법을 적용한다. 우선 2차원 단면의 모델로부터 제어인자(controllable factor)를 설정하고, 환경조건에 따르는 잡음인자(noise factor)를 선정한다. 이는 3.3절에 보다 자세히 언급된다. 선정한 인자 및 수준을 바탕으로 강건설계를 수행하기 위한 직교배열표(orthogonal array)를 구성하고 직교배열표에 따라 유동해석 시뮬레이션을 통해 유동장의 공력특성을 예측하고, CFD 결과를 이용하여 Ffowd Williams-

Hawkings(FW-H) 방정식이 방정식의 수치적 해를 계산하여 소음을 예측한다. 각 설계목표에 따라 신호대 잡음비(signal to noise ratio, S/N ratio) 및 각 인자의 수준별 평균값을 이용한 평균분석(analysis of means, ANOM)을 실시하여 각 설계과정의 시스템특성에 따라 2단계 최적화(two-step optimization)를 수행하게 된다. 이러한 과정을 통해 공력안정성 및 공력소음저감이라는 각 설계목적에 적합한 인자의 수준조합을 최종 추출한다.

2. 유동해석 및 유동소음 예측

2.1 선행 유동해석 결과

Fig. 2는 3차원 팬터그래프 모델의 2차원 이상화에 대한 과정을 보여주고 있다. 팬터그래프 상부 부품

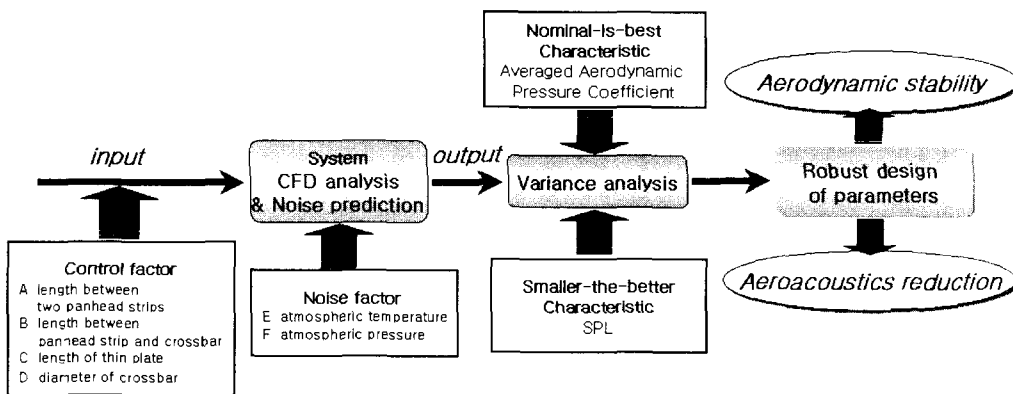


Fig. 1 Schematic of whole process of study

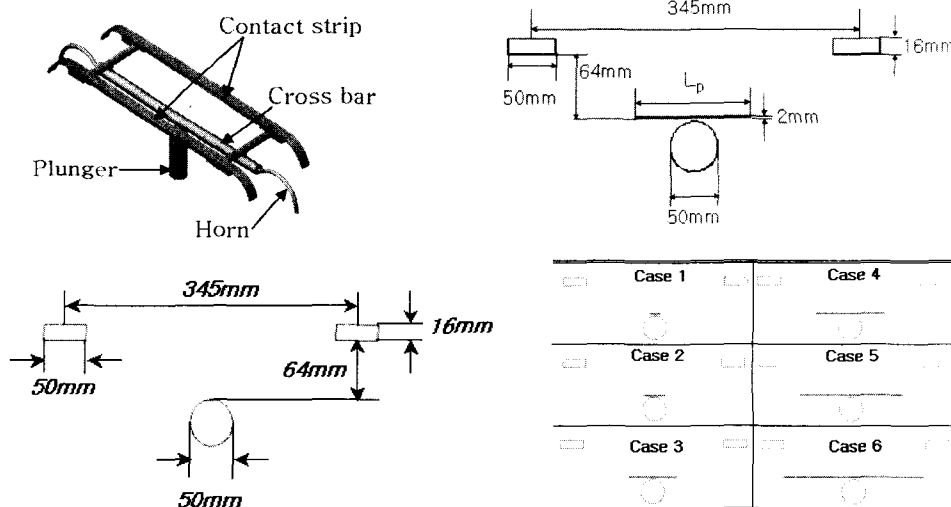


Fig. 2 2-D model generation and modification in term of aerodynamics

중 가선과 직접 접촉하는 팬헤드 스트립과 스트립 중간 하부에 위치해 있어 유동적 영향을 줄 수 있는 원형실린더가 2차원 모델 단면으로 선정되었고, 선행 수행된 박판이 부착되지 않은 경우에 대한 저속풍동 실험 저속풍동실험 및 유동 시뮬레이션의 결과는 팬헤드 스트립에서 음의 양력값을 보여 주었다.⁽³⁾ 저속 풍동실험 중 양력개선의 가능성을 보여 주었던 크로스 바 상부에 박판이 부착된 모델을 기본 해석 모델로 삼고, Fig. 3과 같이 판이 부착된 모델에 대해 판의 길이를 변화시킨 6가지 case를 생성하여 유동속도 120 km/h, 180 km/h에 대한 유동해석을 실시한 결과, 약 73 mm의 판을 부착한 경우 요구되는 공력특성을 만족시키는 결과를 보였고,⁽⁴⁾ 본 논문에서는 이 모델을 강건설계의 기본 해석모델로 삼았다.

2.2 유동해석 및 소음해석 방법

유동해석의 도구로는 유한체적법(finite volume method)을 기반으로 하는 상용 유동해석 코드인 FLUENT를 사용하였고,⁽⁵⁾ 한국형 고속전철의 목표 주행속도인 350 km/h에 대해 점성, 압축성, 비정상, standard k-ε model을 이용한 난류해석을 실시하였다. 본 논문에서 주요하게 고려된 공력특성은 직렬배열된 팬헤드 스트립에서의 양력이며, 양력[N]을 유동속도[km/h]의 제곱으로 나누어 준 공력압상계수(aerodynamic pressure coefficient, APC)를 특성치 파라미터(parameter)로 사용하였다. 공력특성은 일본에서 개발된 팬터그래프의 기준이었던 300 km/h에서의 20~25 N에 해당하는 APC값을 설계 기준으로 선정하였다.⁽³⁾

2.3 유동소음 예측 방법에는 CFD

결과 중 압력, 밀도, 속도 등의 섭동량을 이용하여 Franchescantonio⁽⁶⁾가 제시한 FW-H 방정식의 해를 수치적으로 계산하였으며, FW-H방정식의 세 가지 해 중 사극자소음(quadrupole)항은 체적적분의 어려움으로 인해 본 논문에서는 고려하지 않았다. 관찰자 위치는 실제 환경의 관찰자 위치 및 하중소음원을 고려하여 팬터그래프 후방 25 m로 설정하였으며 2차원 유동해석 결과를 3차원으로 확장하기 위해 측방향으로 유동량이 일정하다는 가정하에 1 m의 가상길이를 설정하여 계산하였다.

3. 최적설계 방법

3.1 다구찌 실험계획의 강건설계

다구찌 실험계획법은 품질 산포의 크기를 손실함수(loss function) 또는 S/N 비와 같은 계량특성치로 변환하여 산포를 작게 하는 인자들의 조건을 찾는 강건설계를 가능하게 하였다.⁽²⁾ 이러한 다구찌 실험계획에서는 품질특성치를 망목(nominal-the-best, NTB), 망소(smaller-the-better, STB), 망대(larger-the-better, LTB) 특성으로 분류하여 각각에 대한 손실함수 및 S/N비를 별도로 정의한다.⁽⁷⁾ 망목특성은 제품의 무게 또는 길이와 같은 특정한 목표치가 목표치가 주어져 있는 경우이며, 망소 및 망대 특성은 특성치가 작으면 작을수록 또는 크면 클수록 좋은 경우로서 마모 혹은 수명 등을 예로 들 수 있다.

본 연구의 경우 요구되는 설계목적은 두 가지 측면에서 고려되어야 한다. 공기역학적 측면에서는 공력특성이 요구되는 수준에 적합하여야 하며, 소음레벨은 최소화가 요구된다. 즉, 공력학적인 측면에서는 망목특성, 공력소음학적인 측면에서는 망소특성의 성격을 가지고 있다. 시스템의 목적에 따라 S/N비는 식 (1)과 같이 시스템에 가해지는 잡음이 산출물의 품질에 미치는 변동을 측정하여 결과에 대한 신뢰성을 계량화한 값으로 다구찌는 모평균의 제곱값과 분산의 추정의 비로써 표현하였다.⁽⁷⁾

$$S/N = \frac{\text{power of signal}}{\text{power of noise}} = \frac{\text{estimation value of } \mu^2}{\text{estimation value of } \sigma^2} \quad (1)$$

3.2 2단계 최적화(two-step optimization)

본 논문에서 사용한 설계방법은 2단계 최적화(two-step optimization) 방법이며, 본 기법의 접근방법은 다음과 같다. 우선 설계에 반영하고자 하는 제어인자와 비제어인자를 선정하여 다구찌 실험계획에 따른 직교배열표를 구성하고, 계획에 따라 실험을 수행하게 된다. 실험결과로부터 S/N비와 평균분석을 통해 각 인자의 수준별 영향을 판단하여 설계목적에 부합하는 제어인자의 조합을 결정하게 된다.⁽⁸⁾ S/N비는 3.1절에서 언급한 시스템특성에 따라 달리 정의되는데 본 논문에서 사용된 망목 및 망소특성의 S/N비는 식 (2, 3)과 같이 표시할 수 있다.⁽⁹⁾ S/N비는 통신공학에서

와 같이 상용대수를 취하고 10을 곱하여 데시벨(dB) 단위로 표시하게 되며, 잡음에 대한 성능치의 정도를 표시하므로 최적화는 S/N비를 최대화하는 수준조합을 탐색하여 이루어진다.

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

$$S/N_{STB} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

where, \bar{y} = mean of characteristics
 m = target value
 σ^2 = variance of each experiment
 y_i = raw data values
 n = number of raw data

ANOM은 각 인자의 수준별 평균값을 파악하여 최적의 설계인자 수준을 결정하는 방법이다.⁽⁹⁾ 망목특성의 경우에는 목표치에 가장 근접한 인자수준으로 결정되고, 망소특성의 경우 최소 결과값을 보이는 인자수준이 최적수준으로 결정된다. 2단계 최적화는 S/N비 및 ANOM 두 가지 모두를 고려하여 설계인자의 수준을 결정하는 방법으로, S/N비를 최대로 하는 인자별 수준조합과 시스템 특성에 맞는 ANOM 결과를 총괄하여 최종 수준조합을 결정하게 된다.

3.3 인자(factor) 선정

파라미터는 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 5장에서 보다 구체적으로 언급된다. 본 연구에서는 제어인자(controllable factor) 및 잡음인자(noise factor)를 다음과 같이 설정하였다.

공력특성 및 유동소음에 영향을 줄 수 있는 제어 가능한 설계인자로는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 팬헤드사이의 간격, 크로스바의 중심에서 팬헤드까지의 거리, 평판의 길이, 크로스바의 직경을 선정하여 각각 A, B, C, D로 표시하였다. 이와 같은 설계인자는 선행된 연구결과를 바탕으로 평판의 길이를 새로운 제

어인자로 추가 선정하여 이루어졌다.⁽¹²⁾ 제어인자의 수준은 3수준으로 설정하였다. A, B, D인자의 경우 기존 치수를 기준으로 하였으며, C인자의 경우 저속 유동해석 결과를 바탕으로 하여 요구되는 공력특성을 만족하는 구간에서의 평판의 길이 평균값을 기준으로 하였다.⁽⁴⁾ 제어인자의 변폭은 실제 설계에 반영될 경우를 고려하여 변폭량의 수준이 지나치게 크지 않으면서 팬터그래프 각 부품의 치수 및 위치가 유동장 변화에 미치는 정성적인 영향을 살펴볼 수 있는 정도로 Table 1과 같이 설정하였다.

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

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

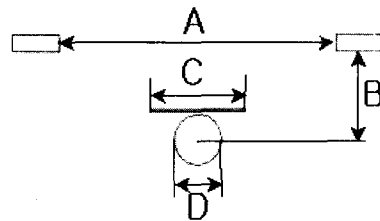


Fig. 3 Schematic of simplified panhead section and controllable factors

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

Table 2 Noise factors

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

* indicates a current level

3.4 직교배열표(orthogonal array)

파라미터 설계는 주로 직교배열표를 이용하여 설계 되는데, 반복데이터를 얻거나, 잡음인자를 변화시키지 않은 상태에서 반복하여 측정하거나, 잡음인자들이 수준을 정하여 수준조합에서 성능을 측정하는 방법이 사용되며, 본 연구에서는 마지막 방법을 사용하였다. 이러한 실험계획의 경우, 2개의 직교배열표가 교차하는 형태로 구성되는데, 제어인자로 이루어진 배열을 내측 배열, 비제어인자로 구성된 직교배열을 외측배열이라 부른다. 내측배열의 경우 시뮬레이션 회수의 적정수준을 고려하여 교호작용을 고려하지 않은 3수준계의 $L_9(3^1)$ 형을, 외측배열의 경우에는 2수준계 $L_4(2^1)$ 형을 이용하였다. 본 연구에 계획된 직교배열표는 Table 3과 같다. Table 3의 Y_j 값은 공력특성의 경우 양력 [N]을 유동속도[km/h]의 자승으로 나누어 준 공력압상계수(aerodynamic pressure coefficient, AAPC)를 사용하였고, 소음특성의 경우 SPL[dBA]를 이용하였다.

4. 유동 해석

4.1 유동장 설정

유동해석은 2.2절에서 언급한 바와 같이 FLUENT를 이용하였다. 본 논문에서 이용한 유동코드에 대한 검증은 선행 연구자들의 결과 및 저속 풍동실험 결과와 비교되어 이루어졌으며,^(4,11) 해석결과가 비교적 타당함을 입증하였다.

Table 3 Orthogonal arrays

No.	Inner array				Outer array				S/N ratio	Mean
	A	B	C	D	Experiment No.					
	Controllable factor				1	2	3	4	Noise factor	
	1	2	3	4	0	0	1	1	E	
	1	2	3	4	0	0	1	1	F	
1	0	0	0	0	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	S/N_1	M_1
2	0	1	1	1	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	S/N_2	M_2
3	0	2	2	2	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	S/N_3	M_3
4	1	0	1	2	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	S/N_4	M_4
5	1	1	2	0	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{54}	S/N_5	M_5
6	1	2	0	1	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}	Y_{64}	S/N_6	M_6
7	2	0	2	1	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}	Y_{74}	S/N_7	M_7
8	2	1	0	2	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}	Y_{84}	S/N_8	M_8
9	2	2	1	0	Y_{91}	Y_{92}	Y_{93}	Y_{94}	S/N_9	M_9

유동해석에서의 시간간격은 나이퀴스트(nyquist) 샘플링 이론을 바탕으로 인간의 최대 가청주파수를 고려하여 0.025 ms로 설정하였고, 계산격자 및 경계조건은 Fig. 4와 같다. 제어인자 3수준에 의해 직교배열을 통해 구성된 9가지 해석 모델은 Fig. 5와 같다.

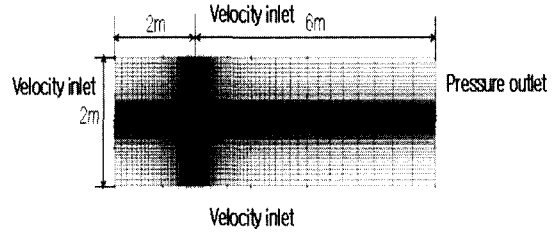


Fig. 4 Computational grid and boundary conditions

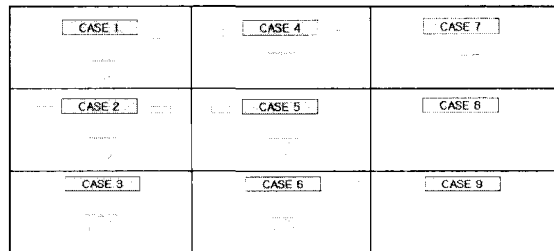


Fig. 5 9 case models with 3 controllable level

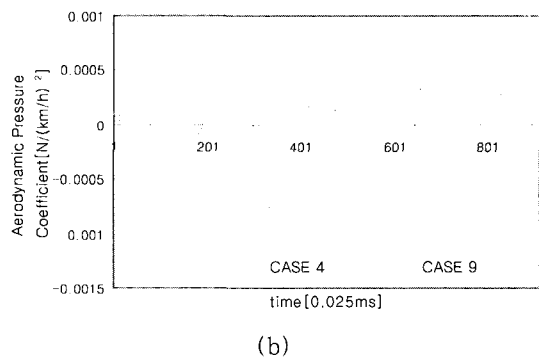
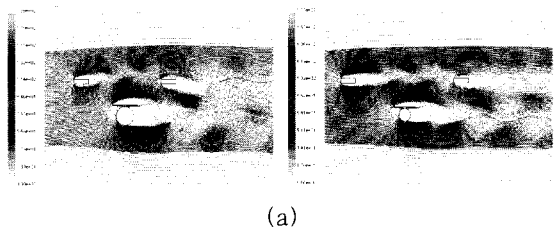


Fig. 6 (a) Streamlines and (b) APC distribution for CASE 4 and CASE 9 in 2nd outer array

4.2 유동해석 결과

시뮬레이션은 직교배열표에 의해 계획된 36가지 경우에 대해 수행되었다. 36가지 경우 중 Figs. 5, 6은 CASE 4와 CASE 9에 대한 유선 및 공력압상계수의 변화를 나타낸 것으로 직교배열표의 외측 배열 2열에 해당하는 경우이다. 제어인자의 조합에 따른 유선형상 및 공력압상계수의 변화를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 평균 공력압상계수에 대해서만 고려하므로, 물리적인 해석은 생략한다.

5. 소음 해석

한국형 고속전철의 목표 주행속도인 350 km/h는 마하수 약 0.283에 이르게 되므로 국부적인 유동장에서의 압축성을 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서는 제어면에서의 마하수의 변동을 고려한 수치해석 코드를 통하여 소음을 예측하였다. 소음해석은 2.2절에서 언급된 바와 같이 FW-H방정식을 이용하였고, 소음 레벨은 인간의 가청 주파수 민감도를 고려한 A-보정(A-weighting)을 이용하여 표시하였다.

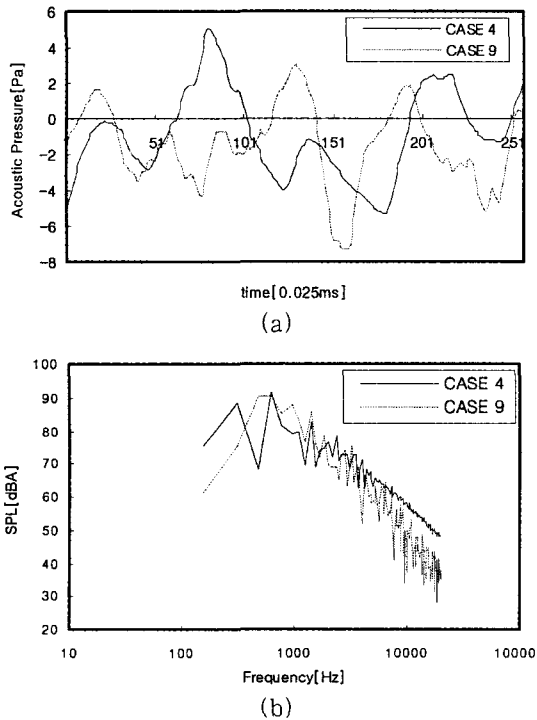


Fig. 7 (a) Acoustic pressure distribution and (b) SPL spectrum for CASE 4 and CASE 9 in 2nd outer array

소음특성 또한 공력특성과 마찬가지로 CASE 4, 9의 경우만 Fig. 7에 음압변동 및 주파수 특성을 도시하였다. 공력특성과 마찬가지로 제어인자 조합에 따라 음압 및 주파수 특성이 변화하고 있음을 확인할 수 있으며, 실험계획을 통한 시뮬레이션에는 첫번째 harmonic SPL값만을 고려하였다.

6. 파라미터 설계

6.1 신호 대 잡음비 및 평균분석

2단계 최적화(two-step optimization)를 수행하기 위해 계산된 각 실험별 S/N비 및 평균값은 Table 4와 같다. Table 4의 데이터를 이용하여 직교배열표의 각 실험별로 인자별 수준의 합계를 구하여 2단계 최적화(two-step optimization)를 수행하게 된다.

6.2 음향풍동시험과의 비교

본 논문의 시뮬레이션 결과를 실제 팬터그래프 모델에 대해 G7 고속전철기술개발사업의 일환으로 2001년에 일본의 RTRI 풍동센터에서 수행된 음향풍동시험⁽¹³⁾ 자료와 비교해 보았다. 음향풍동시험은 팬터그래프 측면 5m에서의 측정소음을 거리감쇠율에 따라 25m의 소음으로 예측하고 있으며, 본 논문과는 측정위치 및 시험모델에 약간 차이를 보이고 있다. 풍동시험 결과 중 본 논문의 모델과 가장 유사한 조건의 결과가 Table 5에 제시되어 있다. Table 5의 풍동시험 결과를 25m에서의 소음도로 환산해 보면 약 87 dB(A)이다.⁽¹³⁾

Table 4 S/N ratio and mean value from orthogonal array

Exp. No.	Aerodynamics		Aeroacoustics	
	S/N sratio[dB]	Mean[N/(km/h) ²]	S/N sratio[dB]	Mean [dB(A)]
1	63.27532	-0.00042	-40.1298	101.5
2	66.05409	-0.00025	-41.4194	117.75
3	74.31369	5.78E-05	-40.7487	109
4	78.6514	0.000366	-39.3004	92.25
5	63.61331	-0.00041	-39.1093	90.25
6	63.79195	-0.0004	-40.151	101.75
7	63.75793	-0.0004	-40.6082	107.25
8	71.39212	0.000519	-39.3466	92.75
9	63.77159	-0.0004	-39.18111	91

6.3 강건설계 결과

망목특성을 갖는 공력학적 측면에서는 앞서 기술한 바와 같이 평균값인 22.5N에 해당하는 공력압상계수 값인 2.5×10^{-4} 을 목표치로 설정하였다.

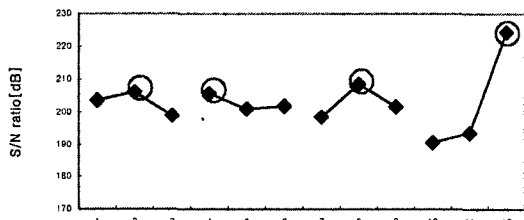
Table 4의 S/N비를 각 인자별 수준에 대한 변동을 구하여 Fig. 8과 같이 도시할 수 있다. 이러한 결과를 토대로 잡음인자로 선정한 온도 및 압력조건에 대해 최대한 둔감하면서, 요구되는 공력조건을 최대한 만족시킬 수 있는 제어인자의 조합을 살펴보면 다음과 같다. 우선 각 인자에서 S/N비를 최대 만족시키는 수준조합은 $A_1B_0C_1D_2$ 이며, 평균분석을 통해 목표치에 가장 근접한 인자조합은 $A_2B_1C_1D_2$ 가 된다. 두 최적화과정에서 A 및 B 인자가 상이한 결과를 보이고 있는데, 이는 설계자의 관점에서 결정되어야 한다. 본 논문에서는 그래프의 상대 기울기를 비교하여 수준을 결정하였으며, 공력특성 개선을 위한 최종 단면조합은

$A_1B_1C_1D_2$ 가 된다. 즉, 두 팬헤드간의 거리, 크로스 바의 중심과 팬헤드와의 간격 및 크로스 바 상부 평판의 길이는 현 수준으로 유지하고, 크로스 바의 직경은 늘리는 것이 공력특성에 유의한 인자조합이 된다. Fig. 9의 소음 저감 측면에서는, 두 과정 모두 동일한 결과를 보여주고 있다. S/N비는 최대로 하고, 인자수준별 평균값은 최소화 할 수 있는 인자조합은 $A_1B_1C_0D_0$ 이 된다. 즉, 팬헤드간의 거리, 팬헤드와 크로스 바의 거리는 현수준으로, 평판의 길이 및 크로스 바의 직경은 현수준보다 작을수록 저소음의 경향을 보이고 있다.

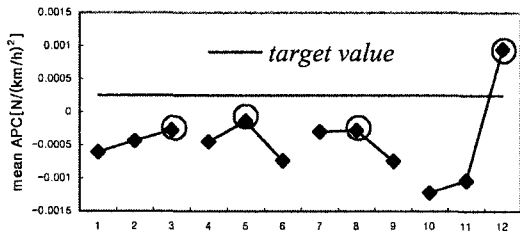
이상의 결과를 종합해 보면 Table 5, 6과 같다. 팬헤드 간 거리 및 팬헤드와 크로스 바 간의 거리는 현 수준으로 유지하는 것이 두 설계목적에 모두 부합하고 있다. 하지만, 판의 길이와 크로스 바의 직경은 서로 다른 결과를 보이고 있으며, 특히 크로스 바의 직

Table 5 Comparison this study with wind tunnel test

	Wind tunnel test ⁽¹³⁾	Simulation(study)
Velocity	350 km/h	
Measurement position	Side, 5 m	Rear, 25 m
Results (dB(A))	100.8(No. 7)	101.5(Case 0)

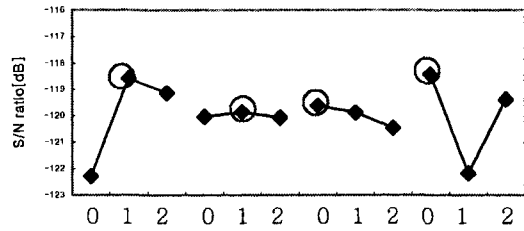


(a)

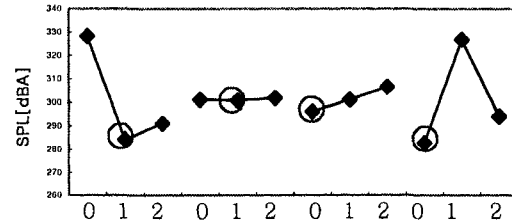


(b)

Fig. 8 (a) S/N ratio & (b) ANOM response graph in aerodynamic



(a)



(b)

Fig. 9 (a) S/N ratio & (b) ANOM response graph in aeroacoustics

Table 6 Results of two-step optimization in each design process

Controllable factor	Aerodynamics	Aeroacoustics
Length between two panhead strips	-	-
Length between panhead strip and crossbar	-	-
Length of thin plate	-	↓
Diameter of crossbar	↑	↓

경은 상반된 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 다음과 같이 예측해 볼 수 있다. 크로스 바 상부에 적당한 길이의 판이 존재할 경우에는 크로스 바 전방의 유동을 정체 시켜 전방에 위치한 팬헤드를 밀어올리는 효과가 있으므로 공력특성 측면에서는 바람직하며, 크로스 바의 직경을 늘리는 결과 또한 이와 같은 면에서 부합된다고 할 수 있다. 반면 소음측면에서는 유동장 내 아력압력, 밀도 등의 섭동이 소음을 유발하게 되므로, 판의 길이와 크로스 바의 직경을 줄여서 요동을 약하게 하는 수준조합이 이루어진 것으로 판단된다.

마지막으로 상이한 결과를 보여주고 있는 판의 길이와 크로스 바의 직경에 대한 교호작용의 유무를 S/N비에 대해 Fig. 10과 같이 고려해 보았다. 우선 (a)의 공력특성에 관한 결과를 살펴보면, 최적수준에 대해 인자 간 독립적인 경향을 보이고 있다. 따라서 2단계 최적화의 결과를 인자별로 독립적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 (b)의 소음특성을

살펴보면, C인자의 수준별 S/N비의 변화가 D인자의 수준에 따라 다른 경향을 보이고 있다. 따라서 소음 특성에 관한 직교배열표를 구성할 경우 C 및 D인자의 교호작용을 고려해야 할 것으로 예측된다.

7. 결 론

고속전철의 전력공급장치인 팬터그래프 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, 망소특성의 소음측면에서는 공력학적 설계 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. 특히 공력소음 측면에서는 판의 길이와 크로스 바의 직경에 대한 교호작용을 고려한 실험계획을 추가하여 인자간 영향을 좀 더 명확히 해석해야 할 것으로 예측된다. 이외에 3차원 기반의 유동해석 및 소음예측이 선행된다면 좀 더 명확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 최적설계신기술연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 팬터그래프 개발, 1998, "고속전철기술개발사업 2차년도 연차보고서," 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, pp. 33~44.
- (2) Taguchi, G., Chowdhury, S. and Taguchi, S., 2000, Robust Engineering, McGraw-Hill Inc, New York.
- (3) 조운기, 이종수, 2001, "고속전철 팬터그래프의 팬헤드 단면에 대한 공력특성 해석," 대한기계학회

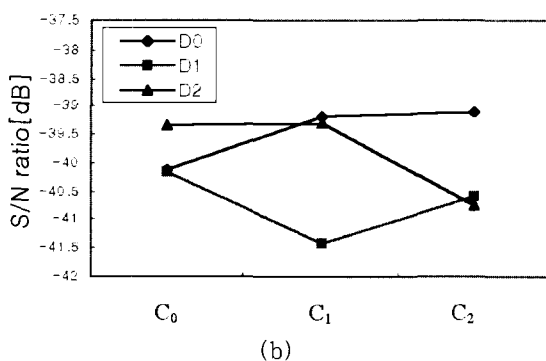
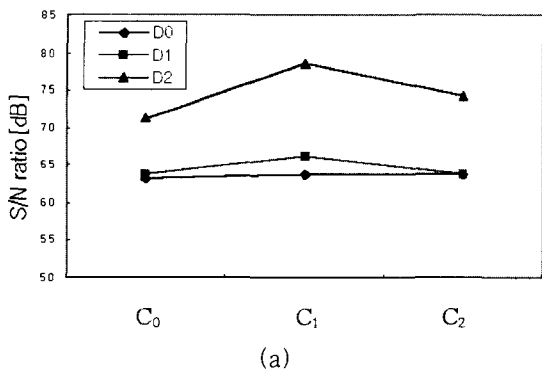


Fig. 10 Interaction between C & D factors (a) in aerodynamics and (b) aeroacoustic design process

춘계 학술대회 논문집E, pp. 367~372.

(4) 조운기, 이종수, 2001, "저속풍동실험 및 유도양석을 유동해석을 통한 고속전철 팬터그래프의 유동소음 예측," 한국소음진동공학회 추계학술대논문집 II, pp. 1207~1214.

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

(6) Francescantonio, P. DI., 1997, A New Boundary Integral Formulation for the Prediction of Sound Radiation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 202, No. 4, pp. 491~509.

(7) 박성현, 2000, 현대실험계획법, 민영사.

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

(9) William, Y. F. and Clyde, M. C., 1995, Engineering Methods for Robust Product Design, Addison-Wesley Publishing Company, Canada.

(10) 김동현, 강부병, 신민호, 2001, "철도터널 통풍공의 공기역학적 성능에 대한 연구," 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집 E, pp. 341~348.

(11) Brentner, K. S., Cox, J. S., Rumsey, C. L. and Younis, B. A., 1997, "Computation of Sound Generated by Flow Over a Circular Cylinder : An Acoustic Analogy Approach," Second Computational Aeroacoustics Workshop on Benchmark Problems, NASA Conference Publication 3352, NASA, pp. 289~296.

(12) 김우석, 2000, "다량으로 배열된 단면 주위에서 발생하는 공력특성에 관한 수치적 해석," 연세대학교 대학원 석사학위 논문.

(13) 정경렬, 김상현, 박수홍, 김휘준, 2001, "한국형 고속전철용 팬터그래프의 풍동소음시험," 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집 II, pp. 1215~1220.

(14) 김영국, 박찬영, 박태원, 배대성, 2001, "바람이 고속전철 동적 안정성에 미치는 영향 분석," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 8 호, pp. 349~356.