

강건설계를 이용한 흡기계의 저소음화 최적설계

⁰오 재웅*, 차경준**, 진정언***, 최 익성****, 이 정윤*****

The Optimum Design for Low Noise Intake System using Robust Design

Jae-Eung Oh, Kyung-Joon Cha, Chung-Un Chin, Ick-Sung Choe and Jung-Yoon Lee

ABSTRACT

Recently, the regulations from the government and the concerns of people give rise to the interest in exhaust and intake noise of passenger car as much as other vehicles. In these demands, performance prediction software was developed in the previous study.

In this study, Robust design was used for improving the noise reduction capacity of intake system with the performance prediction software. On the basis of the existing design, length and radius of each component that was thought to effect to capacity of intake system was selected. At first factors are arranged by using L₁₈ table of orthogonal array and then optimum value can be obtained by L₁₆ table of orthogonal array.

1. 서론

우리 생활에 있어서 소음에 관한 관심이 증대되고 있으며 법적 기준도 강화되고 있어 각종 운송수단으로 쓰이는 자동차의 정숙성이 더욱 절실하다. 소음환경기준의 낮 시간 도로변 지역의 기준치가 65~75dB로 제한됨으로써 이에 대응하는 차량의 파라미터 설계를 통한 저소음화 기법이 요구되고 있다. 자동차 소음의 주요 요인은 엔진 소음이며 그 중 흡기소음은 주변소음의 발생 요인임은 물론 운전 시 승차감을 저해하는 주요인으로 연구대상이 되고 있다.

흡기 소음의 특징으로는 500Hz이하의 저주파 대역의 소음은 차 실내의 부밍음을 형성하여 운전자에게 불쾌감을 주기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

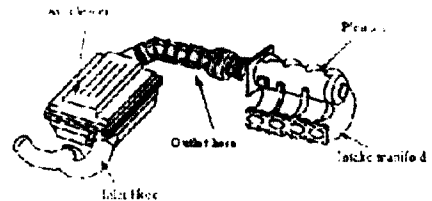


Fig. 1 Overview of a intake system

흡기계의 설계는 엔진 설계 후에 이루어지기 때문에 타부품의 위치에 의해 설계가 한정되므로 최적한 설계에 어려움이 있다. 또한 엔진 성능에 영향을 미치는 요소로서, 우선적으로 엔진 성능향상

* 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 수학과

*** 한양대학교 대학원 수학과

**** 한양대학교 대학원 항공공학과

***** 경기대학교 기계공학과

에 우선권을 두어 개발되고 그 이후에 흡기 소음에 대한 개선이 이루어졌다. 또한 이러한 여건에서의 개선방법도 시행착오적으로 이루어져 최적값을 찾는 데에 상당한 어려움이 있으며 많은 인력과 경비를 들여 실험을 하지만 최적값에 도달하기 위한 판단 근거가 마련되지 않아 파라미터 설계에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 이 한계를 극복하고자 통계적인 방법으로 최적화 기법이 필요하게 되었다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

본 연구에서는 Fig.1과 같은 흡기계를 대상으로 소음 저감 특성을 평가하고 나타난 문제점을 파악하여 이를 개선하기 위해 강건설제법을 사용하여 상대적으로 소음 저감 성능이 낮은 주파수 영역을 보완하고자 하며, 이를 위해 설계시 허용되는 경계 조건 내에서 흡기계의 최적한 설계변수 사양의 최적조건을 고려한 후에 전달행렬법과 최적화 기법을 적용한 소프트웨어를 개발하고자 한다.

2 해석 이론

2.1 흡기소음의 특성

흡기 소음은 흡기 밸브의 개폐에 따른 압력 변동에 의해 생성되며 식(2.1)과 같은 주파수 특성을 갖는다.

$$f \text{ (Hz)} = n \times rpm \times \frac{cyc}{2} \times \frac{1}{60} \quad (1)$$

여기서, f 는 결과 주파수이고, n 은 조화 차수, rpm 은 엔진 회전수, cyc 는 실린더 개수이다.

2.2 전달 행렬법

전달행렬법은 전기계에서 사용하고 있는 임피던스 개념을 도입하여 음향의 전달특성을 모델링하는 방법으로서 행렬의 계산이 간단하고 임의의 형태로 조합된 음향계에 적용할 수 있어 많이 이용되고 있다. 또한 음향계를 각 요소별로 모델링하여 전체계를 구성하므로 설계 변경이 용이한 방법이다⁽⁷⁾.

전달행렬법에서 사용되는 두개의 상태변수는 음향 요소 양면의 음압 p 와 입자속도 v 를 사용하고 양면의 조건에 따라 전달행렬계수(four-pole parameter)를 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} p_r \\ v_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Transfer matrix} \\ 2 \times 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{r-1} \\ v_{r-1} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $\{p_r \ v_r\}^T$ 는 입구점 r 에서의 상태 벡터이고 $\{p_{r-1} \ v_{r-1}\}^T$ 는 출구점 $r-1$ 에서의 상태 벡터이다. Fig. 2은 전달행렬법에 대한 개략적인 개념도이다.

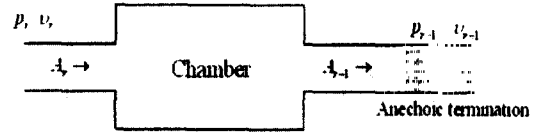


Fig. 2 Model of an acoustic system

2.3 전달 손실

전달손실은 음향요소만의 에너지 손실을 표현하는 것으로서 음향 요소의 입출구 사이의 음압비율 dB로 나타낸다. 즉, 음향 요소에 입사된 음압과 통과된 음압과의 비를 말하는 것으로 음향 요소 끝단에는 반사파의 영향을 제거하기 위하여 두 음향 탐측자법(two-microphone methods)을 사용한다.

$$TL \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left| \frac{w_i}{w_t} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{P_1^+}{P_2^-} \right| \quad (3)$$

여기서, w_i 는 입구측 에너지이고, w_t 는 출구측 에너지, P_1^+ 는 입구측 진행 음압, P_2^- 는 출구측 진행 음압이다. Fig. 3은 전달손실 측정의 개략도이다.

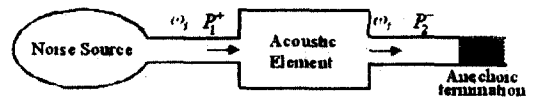


Fig. 3 Diagram for transmission loss

3 흡기계 성능 평가 및 설계조건

3.1 두 음향 탐측자법

두 음향 탐측자법은 관내의 반사파와 입사파를 분리할 수 있는 방법으로서 전달손실은 Fig.4와 같이 두개의 마이크로폰을 사용하여 식(4)와 같이 표현 될 수 있다.

$$TL(dB) = 10 \log_{10} \frac{S_{in}}{S_{out}} \quad (4)$$

여기서, S_{in} 는 입구단의 입사스펙트럼이고 S_{out} 는 출구단의 입사스펙트럼이다.

반사파의 완전한 분리를 위하여 출구단에 무반사단을 설치하였다.

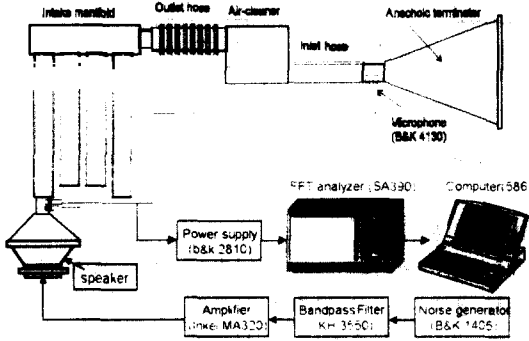


Fig. 4 Experimental setup

3.2 흡기계의 성능 평가

본 연구에서 사용된 흡기계 성능 평가 소프트웨어의 신뢰성을 검증하기 위해서 Fig.1과 같은 흡기계의 전달 손실(Transmission Loss)을 실험을 통하여 구하였다.

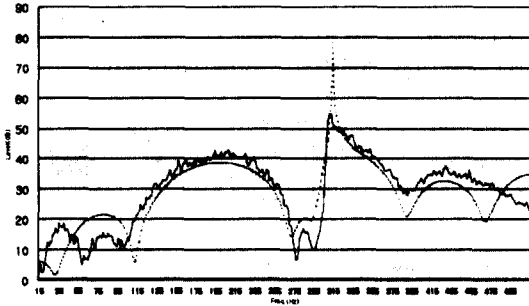


Fig. 5 Transmission Loss of intake system
(experiment : -, prediction : --)

Fig.5의 결과에서 알 수 있듯이 흡기계 성능 평가 소프트웨어가 흡기계의 성능을 잘 예측함을 알 수 있으므로 이용된 해석 소프트웨어의 신뢰성과 최적화 기법 및 강건설계법과의 활용을 검증할 수 있다.

4. 강건설계에 의한 설계변수의 최적조건

4.1 강건설계와 S/N 비

강건설계법은 기본적으로 품질이라는 개념을 가지고 모든 제품의 성능을 평가한다. 품질이라고 하는 것은 제품이 출하된 후에 발생하는 세 가지 손실(기능의 산포에 의한 손실, 사용 코스트, 피해 항목에 의한 손실)의 합으로 정의한다. 그리고 이에 따른 손실 함수를 사용하여 S/N비를 유도해 낸다⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. 측정값이 y 이고 목표값이 m 이라 할 때 손실함수(Lost function) $L(y)$ 를 m 에 대하여 Taylor 급수전개한 것은 식(6)과 같다.

$$L(y) = L(m) + L'(m)(y-m) + \frac{L''(m)}{2}(y-m)^2 + \dots \quad (5)$$

여기서, $L(m) = L'(m) = 0$ 이고 3차이상의 항을 무시한 손실 함수는 식(7)과 같다.

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad (6)$$

이렇게 유도된 손실 함수와 강건설계에서 제시하는 S/N비는 Table 1과 같다.

Table 1 Class of quality characteristics

| | Loss function | S/N ratio |
|-------|--------------------------------------|--|
| 망목 특성 | $L(y) = k(y-m)$ | $10 \log \left[\frac{(\bar{y})^2 - \frac{V}{n}}{V} \right]$ |
| 망대 특성 | $L(y) = k\left(\frac{1}{y^2}\right)$ | $-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$ |
| 망소 특성 | $L(y) = ky^2$ | $-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$ |

인자를 결정 후 실험배치를 직교적으로 구성함으로써 중복되는 실험이 없이 효과적인 분산분석을 하여 각 인자의 변동효과를 평가할 수 있는 지표인 S/N비로 인자들의 최적 수준을 결정 할 수 있다.

4.2 강건설계의 수행과정

본 연구의 강건설계의 수행과정은 다음과 같다.

- (1) 특성치의 선택
- (2) 실험 인자의 선택
- (3) 직교배열표 선정 : L_{18} 직교배열표를 선택
- (4) 실험 결과값과 S/N비 산출
- (5) 분산분석과 요인분석
- (6) 주인자 검출 후 주인자의 7수준 배열 :
주인자를 변형 L_{16} 직교배열표의 7수준열에 배치
- (7) 16개의 실험 결과값과 S/N비 산출
- (8) 분산분석과 요인분석
- (9) 주인자 범위 내의 최적값 도출

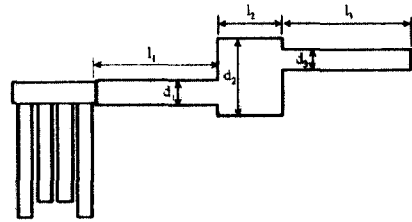


Fig. 7 Simplified model of intake system

Fig. 7은 흡기계의 성능 평가를 위해 Fig. 1을 단순화한 그림이며, 각 설계 변수와 수준은 Table 2에 나와 있다.

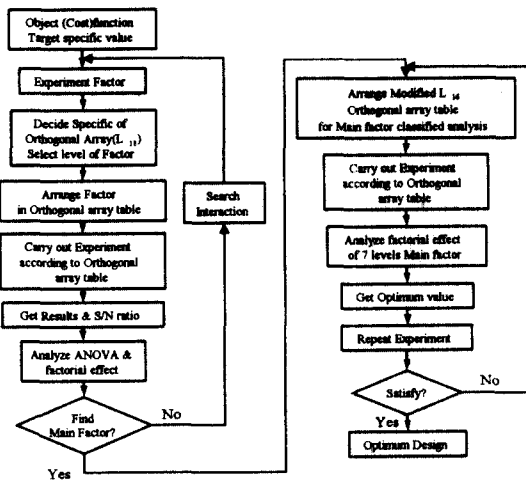


Fig. 6 Flow chart of Robust design

4.3 L_{18} 설계

4.3.1 L_{18} 설계의 인자 및 수준

흡기계를 구성하는 요소인 메니폴드, 폴리넵, 에어크리너, 파이프, 공명기중, 메니폴드, 폴리넵은 엔진 성능을 고려하여 설계가 이루어져 있으므로 설계 인자에서 제외하였다. 그리고, 공명기는 기본적인 흡기계의 구성이 이루어진 뒤에 설계가 이루어지므로 설계 인자에서 제외하였다.

Table 2 Control factors and levels(unit :m)

| Control factor | | level | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| A(a/c직경) | d_2 | 0.22 | 0.242 | × |
| B(출력관길이) | l_1 | 0.48 | 0.60 | 0.72 |
| C(출력관직경) | d_1 | 0.052 | 0.065 | 0.078 |
| D(a/c길이) | l_2 | 0.126 | 0.14 | 0.154 |
| E(입력관길이) | l_3 | 0.60 | 0.75 | 0.90 |
| F(입력관직경) | d_3 | 0.052 | 0.065 | 0.078 |

현재 사양은 굵게 표시 되어있고, 설계 변수 A의 경우는 클수록 좋으므로 증가된 값만을 수준으로 선정하였다.

4.3.2 직교 배열표

앞에서 정의한 설계 변수들과 수준을 평가하기 위해서는 $2^1 \times 3^7$ 의 조건을 만족하는 실험을 수행해야 한다. 본 연구에서는 설계에 사용된 인자가 6개이므로 직교배열표에서 쓰인 열은 2수준인자 1개, 3수준인자 5개이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교 배열표를 이용하여 Table 3과 같이 배치를 하여 실험을 수행하면 각각의 실험 결과에 대한 특성치를 얻을 수 있고, 이 특성치로부터 S/N비를 구한 결과는 Table 4와 같다.

여기서, 특성치는 0~500Hz까지의 전달 손실(Transmission Loss) 오버올(overall) 값으로 하였다.

Table 3 $L_{18}(2 \times 3^7)$ orthogonal array table

| Experiment NO. | Factor | | | | | | | data |
|----------------|--------|---|---|---|---|---|----------|------|
| | A | B | C | D | E | F | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_1 | |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | y_2 | |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | y_3 | |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | y_4 | |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | y_5 | |
| 6 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | y_6 | |
| 7 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | y_7 | |
| 8 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | y_8 | |
| 9 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 1 | y_9 | |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | y_{10} | |
| 11 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | y_{11} | |
| 12 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | y_{12} | |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | y_{13} | |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | y_{14} | |
| 15 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | y_{15} | |
| 16 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | y_{16} | |
| 17 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | y_{17} | |
| 18 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | y_{18} | |

Table 4 Characteristic value and S/N ratio

| Exp. No | overall of TL | S/N ratio | Exp. No | overall of TL | S/N ratio |
|---------|---------------|-----------|---------|---------------|-----------|
| 1 | 65.15 | 36.28 | 10 | 63.38 | 36.04 |
| 2 | 75.72 | 37.58 | 11 | 79.42 | 38.00 |
| 3 | 77.81 | 37.82 | 12 | 71.17 | 37.05 |
| 4 | 91.57 | 39.24 | 13 | 80.36 | 38.10 |
| 5 | 89.84 | 39.07 | 14 | 98.10 | 39.83 |
| 6 | 90.73 | 39.16 | 15 | 98.78 | 39.89 |
| 7 | 100.48 | 40.04 | 16 | 102.33 | 40.20 |
| 8 | 90.08 | 39.09 | 17 | 81.22 | 38.19 |
| 9 | 82.91 | 38.37 | 18 | 100.10 | 40.01 |

Table 4에서 구한 S/N비를 이용하여 분산 분석을 수행한 결과는 Table 5에 나타났다.

Table 5 ANOVA Table

| Source | DF | SS | Mean Square | F-Value |
|--------|---------|-----------|-------------|---------|
| A | 1 | 0.024562 | 0.024562 | 0.26 |
| B | 2 | 18.324883 | 9.162441 | 95.54 |
| C | 2 | 0.530591 | 0.265295 | 2.77 |
| D | 2 | 0.463280 | 0.231640 | 2.42 |
| E | 2 | 3.476664 | 1.738332 | 18.13 |
| F | 2 | 4.282543 | 2.141271 | 22.33 |
| Total | 17 | 27.782547 | | |
| R^2 | 0.99310 | S/N Mean | 38.553443 | |

Table 5에서 $R^2 = \frac{S_A + S_B + S_C + S_D + S_E + S_F}{S_T}$ 로서

전체변동에서 오차인자를 제외한 제어인자의 비이고 SS는 Sum of Square, Mean Square는 분산값이다.

분산 분석을 한 결과를 이용하여 각 변수의 요인 분석도를 그려보면 Fig.8과 같다.

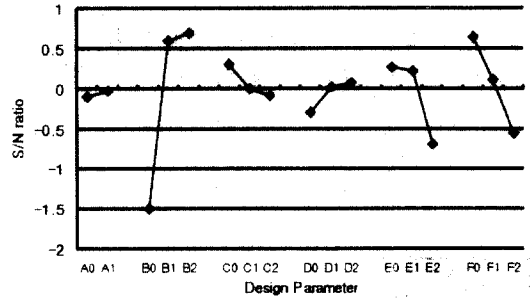


Fig. 8 S/N ratio versus Design parameter

Fig.8에 의해 각 변수별 최적수준을 구하면 $A_1B_2C_0D_2E_0F_2$ 이고 특성치에 민감한 설계 변수는 B(출력관 길이), E(입력관 길이), F(입력관 반경)임을 알 수 있다.

4.4 변형 $L_{16}(2^3 \times 3^3 \times 7)$ 설계

4.4.1 변형 $L_{16}(2^3 \times 3^3 \times 7)$ 설계의 인자 및 수준
 변형 L_{16} 직교배열표는 7수준의 인자가 있기 때문에 주인자를 더욱 세분화하여 분석할 수 있다.

L_{18} 실험에서 주인자가 B인자로 판명되었으므로 각 인자의 수준은 Table 6과 같이 구성한다.

Table 6 Control factors and levels

| Control factor | level | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | | | | |
| A(a/c직경) | d_2 | 0.22 | 0.242 | x | | | |
| C(출력관직경) | d_1 | 0.052 | 0.065 | 0.078 | | | |
| D(a/c길이) | l_2 | 0.126 | 0.154 | x | | | |
| E(입력관길이) | l_3 | 0.60 | 0.75 | 0.90 | | | |
| F(입력관직경) | d_3 | 0.052 | 0.065 | 0.078 | | | |
| Control factor | level | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| B(출력관길이) | l_1 | 0.48 | 0.52 | 0.56 | 0.60 | 0.64 | 0.68 |
| | | 0.72 | | | | | |

현 사양은 굵은 표시로 되어 있고 F-value가 높은

E, F 인자는 3수준으로 상대적으로 낮은 A, C, D 인자는 2수준으로 구성하여 인자를 분석하였다.

4.4.2 직교 배열표

제어인자의 수준에 대한 배치를 Table 7과 같은 변형 L_{16} 직교배열표에 배치하여 실험을 실시하였다. 설계인자는 모두 6개이므로 6개인자를 사용할 수 있는 변형 L_{16} 직교배열표의 모든 열을 사용하였다.

Table 7 Modified $L_{16} (2^3 \times 3^3 \times 7)$ orthogonal array table

| Experiment NO. | Factor | | | | | | | data |
|----------------|--------|---|---|---|---|---|----------|------|
| | A | B | E | F | C | D | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_1 | |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | y_2 | |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | y_3 | |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | y_4 | |
| 5 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | y_5 | |
| 6 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | y_6 | |
| 7 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | y_7 | |
| 8 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | y_8 | |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | y_9 | |
| 10 | 1 | 0 | 2 | 2 | 2 | 1 | y_{10} | |
| 11 | 1 | 4 | 0 | 0 | 2 | 1 | y_{11} | |
| 12 | 1 | 4 | 2 | 2 | 0 | 0 | y_{12} | |
| 13 | 1 | 5 | 0 | 2 | 0 | 1 | y_{13} | |
| 14 | 1 | 5 | 2 | 0 | 2 | 0 | y_{14} | |
| 15 | 1 | 6 | 0 | 2 | 2 | 0 | y_{15} | |
| 16 | 1 | 6 | 2 | 0 | 0 | 1 | y_{16} | |

Table 8에서의 S/N비를 이용하여 구한 분산분석을 실시하면 Table 9와 같이 나타난다.

Table 8 Characteristic value and S/N ratio

| Exp. No | overall of TL | S/N ratio | Exp. No | overall of TL | S/N ratio |
|---------|---------------|-----------|---------|---------------|-----------|
| 1 | 64.18 | 36.14 | 9 | 70.00 | 36.90 |
| 2 | 75.79 | 37.59 | 10 | 73.69 | 37.35 |
| 3 | 82.65 | 38.35 | 11 | 94.49 | 39.51 |
| 4 | 83.67 | 38.45 | 12 | 91.02 | 39.18 |
| 5 | 91.51 | 39.23 | 13 | 102.83 | 40.24 |
| 6 | 80.95 | 38.16 | 14 | 79.63 | 38.02 |
| 7 | 91.18 | 39.20 | 15 | 100.78 | 40.07 |
| 8 | 85.94 | 38.68 | 16 | 84.62 | 38.55 |

Table 9 ANOVA Table

| Source | DF | SS | Mean Square | F-Value |
|--------|---------|-----------|-------------|---------|
| A | 1 | 0.754750 | 0.754750 | 1.91 |
| B | 6 | 12.789886 | 2.131648 | 32.32 |
| C | 2 | 0.134004 | 0.067002 | 0.34 |
| D | 1 | 0.457134 | 0.457134 | 1.16 |
| E | 2 | 0.586211 | 0.293105 | 1.48 |
| F | 2 | 3.505134 | 1.752567 | 8.86 |
| Total | 15 | 18.62290 | | |
| R^2 | 0.97875 | S/N Mean | 38.477257 | |

ANOVA table의 분석에서 B인자의 F-value를 통해 가장 유의한 인자임을 확인할 수 있으며 이를 통한 요인분석도는 Fig. 9와 같이 나타난다.

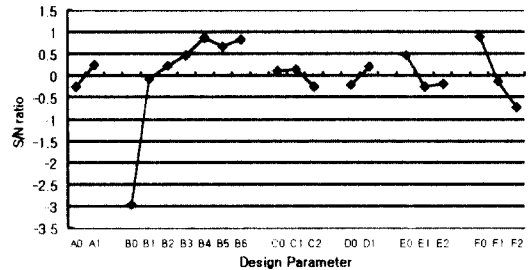


Fig. 9 S/N ratio versus Design parameter

Fig. 9에 의한 분석결과 B인자 중 B_4 값이 가장 유익하게 나옴을 알 수 있다. 그러므로 최적값은 $A_1B_4C_1D_1E_0F_0$ 가 되며 B인자, C인자를 제외한 나머지인자는 모두 L_{18} 의 값과 같게 나왔다. C인자의 경우 차이가 미약하고 원래 유의하지 않은 인자이기 때문에 최적값의 변화에 영향을 주지않으므로 0수준과 1수준의 성능차이는 발생되지 않는다.

Table 10 Optimum Specification of a intake system

| | Outlet pipe | Air-Cleaner | Inlet pipe |
|----------|-------------|-------------|------------|
| Length | 0.64 | 0.154 | 0.90 |
| Diameter | 0.052 | 0.242 | 0.052 |

위에서 구한 최적조건을 적용하여 흡기계 성능 평가 소프트웨어로 재해석을 수행한 결과 Fig. 10과 같으며, TL의 오버울 레벨이 현재의 설계보다 8.49dB

향상된 결과를 얻었다.

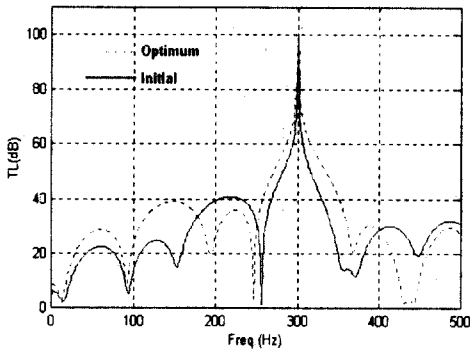


Fig. 10 Comparison between current and optimum design(- - : Optimum, — : Initial)

5. 결론

강건설계 법과 최적화 기법에 의하여 흡기계의 저소음화 기법의 제안을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존 설계와 최적화 설계를 비교해 보면 전달 손실의 오버올(overall) 값이 8.49 dB 향상된 흡기계를 설계 할 수 있었다.
- 2) B(출력관 길이), E(입력관 길이), F(입력관 반경) 설계 변수들이 흡기계의 전달 손실에 민감하였다.
- 3) L_{18} 직교배열표에 의한 실험 후 변형 L_{16} 직교배열표에 의한 세분화 최적설계를 통하여 더욱 향상된 최적값을 찾을 수 있었다.

참고 문헌

- 1.M. L. Munjal, "Plane Wave Analysis of Side Inlet/Outlet Chamber Mufflers With Mean Flow", *Applied Acoustics*. pp.165~175. 1997
- 2.오재용, 한광희, 이규태, "자동차 흡기소음저감을 위한 설계기법에 관한 연구(1)-공명기의 적정위치 선정-", 대한기계학회논문집(A) 제21권 제10호. pp.1648~1655. 1997
- 3.오재용, 한광희, 김상현, "자동차 흡기소음저감을 위한 설계기법에 관한 연구(2)-흡기계의 사양 개

선", 대한기계학회논문집(A) 제21권 제10호.

pp.1656~1665. 1997

- 4.오재용, 한광희, 홍정혁, "자동차 흡기소음평가 시뮬레이터 개발 및 이를 이용한 소음저감 성능 개선", 대한기계학회논문집(A) 제22권 제2호. pp.391~398. 1997
- 5.박성근, 김진동, "회전형 압축기용 저소음 머플러 개발을 위한 다구찌 기법의 적용", 대한기계학회, 춘계학술대회논문집 B. pp.91~95. 1997
- 6.Park. S. K, "Application of Quality Engineering for Energy Efficiency of Compressor", The 12th Annual Taguchi Symposium, Rochester, New York. pp.199~211. 1994
- 7.M. L. Munjal, "Acoustics of Ducts and Mufflers", John Wiley & Sons. 1987
8. 박성현, "현대실험계획법", 민영사. 1995
9. 이우선, "최신실험설계", 영풍문고. 1998
- 10.田口玄一, "품질설계를 위한 실험계획법", 한국공업표준협회. 1991
- 11.John W. Parsons, "Reduction of Exhaust and Air Induction System Noise by a Predictive Method", SAE 931338. pp.611~618. 1993