

# 다구찌 직교배열의 반응표면모델에 의한 흡차음재 소재 DB 구축

<sup>0</sup>이 광 기\*, 김 병 훈\*, 전 인 기\*, 강 경 순\*\*, 김 옥 빈\*\*

## Construction of Insulator and Isolator Database by Using Response Surface Model based on Taguchi's Orthogonal Array

Kwangki Lee, Byunghoon Kim, Inki Jun, Kyungsoon Kang and Okbin Kim

**Key Words :** Design of Experiments(실험계획법), Response Surface Model(반응표면모델), Orthogonal Array(직교배열), Insulator(흡음재), Isolator(차음재)

### Abstract

Design of experiments based on Taguchi's orthogonal array is utilized for exploring the design space and for building response surface models of insulator and isolator database in order to facilitate the effective solution of multi-objective optimization commonly occurred in NVH problems. Response surface models, called engineering database of design space, provide an efficient means to rapidly model the trade-off among many conflicting NVH goals in automotive. In the design of insulator and isolator in automotive interior part, it is important not only to construct effective matrices of NVH but also to build up engineering database of current products. The experimental design especially based on orthogonal array and the nonlinear optimization algorithms are successfully used together to obtain the optimal design of insulator and isolator. The 2<sup>nd</sup> order response surface models of absorption coefficient and insertion loss are constructed by using modified Taguchi's  $L_{12} 2^1 3^7$  orthogonal array and successfully used in optimal design of insulator and isolator.

### 1. 서론

자동차의 성능은 다양한 방법으로 평가가 되며 소비자의 기호 및 시대에 따라 성능에 대한 만족도도 변화된다. 최근에는 대형차 뿐만 아니라 소형차에서도 편안하고 안락한 고품질을 요구하는 소비자의 추세에 따라 자동차의 여러 가지 성능 중에서도 NVH(noise, Vibration and Harshness)가 중요한 성능으로 요구되고있으며 NVH에 대한 고객의 기대도 증대되는 추세이다. 따라서 설계 초기 단계에서부터 저소음/저진동에 대한 연구가 필요하게 되었다. 온도, 진동과 같은 여러 가지 다른 환경 인자들과의 상호작용으로 발생하는 소음의 정도가 커짐에 따라 승객들은 대화를 나누는데 지

장을 받게 되며 피로가 누적되기 때문에 최근 들어 자동차 산업을 중심으로 승객에게 전달되는 이러한 소음을 줄이는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 특히 귀에 거슬리는 비교적 높은 주파수의 소음을 저감하기 위해 대쉬 패드(Dash Pad), 엔진 후드(Engine Hood), 바닥(Floor), 천장(Head Lining) 등과 같은 자동차 내부에 각종의 흡음재 및 차음재가 사용되고 있으며 이들은 자동차 내부의 소음을 차단, 흡음시켜 차실 내의 정숙성을 향상시키고있다.<sup>(2)</sup> 자동차의 흡차음재로 많이 쓰이는 폼(Form) 및 원료섬유(Fiber)와 같은 흡음재는 사용의 편의성, 가격의 저렴성 등으로 인하여 소음 제어의 요소로써 광범위하게 사용되고있다. 이러한 흡음재의 중요한 특성 중의 하나는 주파수 범위가 고주파로 갈수록 흡음재와 유체와의 연성활동이 활발하여 에너지 흡수 능력이 높아지고 따라서 소음제어 성능이 우수하다는 점이다. 따라서 밀도, 섬유 직경 등과 같은 흡음재의 물성 변수들과 흡

\* 엔브이에이치코리아 ㈜

\*\* 일양산업 ㈜

음률, 삽입손실과 같은 흡음성능에 대한 흡음 메카니즘의 이론적인 선행 연구가 필요하며 무엇보다도 이러한 선행 연구와 병행하여 현재 양산되어 적용되고있는 흡음재에 대한 흡음률, 삽입손실에 대한 설계 DB(Database)를 구축하여 이를 토대로 고객이 원하는 최적의 흡음재를 설계하는 것이 우선적으로 선행되어야 한다. 따라서 흡음률, 삽입손실과 같이 여러 가지의 성능을 동시에 만족시키는 DB 를 구축하여 주어진 짧은 시간 내에 정확하고 효과적인 설계를 하기 위해서는 새로운 설계 방향의 제시가 필요하며 이에 대한 연구가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 흡음률, 삽입손실에 대한 DB 를 구축하고 최적의 흡음재 설계를 위하여 통합최적설계의 방법론으로 최근에 빠르게 적용되고 있는 통계적 방법론인 실험계획법과 반응표면모델을 적용하고자 한다.<sup>(3, 4)</sup> 현재 실험계획법 중에서 산업체에서 가장 활발히 적용되고있는 방법은 다구찌가 제안한 직교 배열이며 그 중에서도 가장 일반적인 내측 배열에 설계 인자를 적용하는 방법이 많이 사용되고 있으며 일본 Isuzu 사에서는 자동차의 최적의 승차감 선정을 위한 방법으로 사용하여 좋은 결과를 얻고 있다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 다구찌가 제안한 직교 배열을 우선적으로 적용하여 회귀분석에 의한 반응표면모델을 구성하여 1 차 DB 를 구축하여 분석한 후 추가적인 모델이 필요한 경우에는 실험계획법 중에서 최적화 알고리즘을 적용한 D-Optimal 법을 적용하여 계속적으로 2 차, 3 차 DB 를 구축해나갈 예정이다.<sup>(3)</sup>

## 2. 흡음재 측정법

### 2.1 흡음률의 측정

흡음소재의 흡음률(Absorption Coefficient)을 측정하는데는 두 가지의 표준 측정법이 있다. 하나는 임피던스 튜브(Impedance Tube)를 이용하여 수직입사음파(Normal Incident Wave)에 대한 흡음률을 측정하는 방법이고, 또 하나는 잔향실(Reverberation Chamber)을 이용하여 수직입사음파에 대한 흡음률을 측정하는 방법이다.<sup>(6, 7, 8)</sup> 즉, 이 두 가지 방법의 차이는 음이 흡음재에 입사하는 각도의 차이에 의한 것이다. 또한 임피던스 튜브를 이용한 방법에 있어서도 Standing Wave Method 와 Two-Microphone Method 법의 2 가지로 크게 나눌 수 있다. 일반적으로 이 두 가지 방법

에 의한 측정 결과는 전혀 다르게 나타난다. 즉, 여러 가지 흡음재에 대하여 흡음률의 비교시험을 수행하면 어떤 시험방법을 적용했는가에 따라서 그 결과의 순위가 완전히 다르게 나타날 수 있다. 현재 임피던스 튜브를 이용한 흡음률의 측정이 그 편의성에서 많이 이루어 지고 있으나, 측정 환경면에서는 잔향실을 이용한 흡음률의 측정이 실제 생산되는 흡음재가 적용되는 조건과 유사하다. 이는 확산음장이 실제 흡음재가 적용되는 환경과 일치하기 때문이다. 그러나, 표준 잔향실은 크기나 규모면에서 자동차 부품 분야에 적용하기 부적절한 경우가 대부분이다. 왜냐하면, 표준 잔향실은 180 m<sup>3</sup>이상의 체적과 120 m<sup>2</sup>이상의 표면적을 가진 샘플이 필요하기 때문이다. 따라서 Fig. 1 과 Fig. 2 에 표시된 간이 잔향실에 의한 흡음률의 측정이 자동차 분야에 널리 적용되고있다.

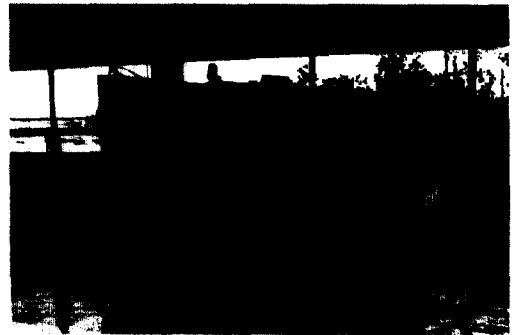


Fig. 1 Outside View of Semi-Reverberation Chamber

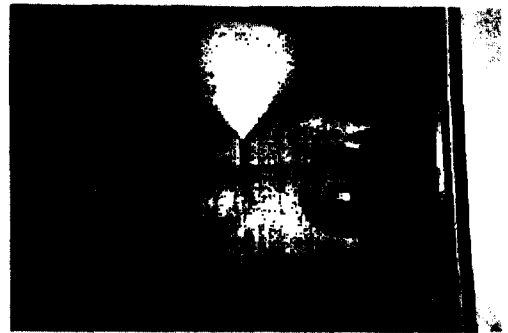


Fig. 2 Inside View of Semi-Reverberation Chamber

간이 잔향실은 국제 표준 규격의 잔향실을 일정한 비율로 축소하여 제작한 것으로 체적은 6.97 m<sup>3</sup>이고 모든 벽면은 평행하지 않고 각을 가지도록 설계되었다. 체적이 축소되었기 때문에 시료의 규

격도 1.2 m<sup>2</sup>으로 축소하였으며 이 규격은 자동차의 일반적인 후드나 헤드라이너의 크기와 비슷하다.<sup>(9)</sup> 단, 간이 잔향실의 확산음장 조건은 완전 잔향실과 비교하여 비슷한 수준이나 체적이 축소되었기 때문에 측정가능 주파수의 범위가 제한을 받게된다. 따라서 측정 가능한 주파수는 400 ~ 10,000 Hz 영역으로 제한되나, 자동차 산업에서 흡음소재를 적용할 때에 검토하는 주파수 범위의 측정에는 적절한 것이다. 간이 잔향실은 특별히 자동차 산업에 적용하기 위하여 설계되었으며 현장에서 간단한 측정장비를 이용하여 잔향시간(reverberation time)을 측정하고 소재의 흡음률과 도어 트림, 헤드라이너, 시트, 카펫 등의 등가흡음력(equivalent absorption)도 측정이 가능하다.

간이 잔향실 내에서의 측정방법은 계산식에 약간의 보정값을 주는 것 외에는 표준 잔향실에서의 측정방법과 동일하다. 즉, 흡음률 혹은 등가 흡음력은 두 번의 잔향시간 측정으로부터 구해지는데, 한 번은 비어있는 상태에서 또 한 번은 샘플은 설치된 상태에서 시행하게 된다. 잔향시간은 60dB가 감소되는 시간을 측정하며 측정된 각각의 잔향시간의 관계는 사빈(Sabine)의 식에서 정의하고 있다. 따라서, 간이 잔향실에서 측정된 흡음률이 너무 높지 않도록 측면효과를 고려하여 계산식에 보정값을 적용하여야 한다.

$$\alpha_s = C \frac{0.163V}{S} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right] \quad (1)$$

여기서,

$\alpha_s$  = 흡음률

C = 측면효과 보정계수

V = 간이잔향실의 체적

S = 시편의 표면적

T<sub>0</sub> = 빈 상태에서의 잔향시간

T<sub>1</sub> = 시편이 있는 상태에서의 잔향시간

## 2.2 삽입손실의 측정

삽입 손실이란 음원과 측정위치 사이에 시편이 없을 때와 있을 때의 음압의 차이를 측정하는 방법이다. Fig. 3 에 표시된 장비의 목적은 흡차음재의 통합 음향특성 측정을 위한 것으로 자동차의 소음이 구조 진동전달 소음과 공기전달 소음의 복합적인 전달 경로에 기인하므로 기존에 사용하였던 투과손실(Transmission Loss), 댐핑(Damping)

및 흡음(Absorption)의 측정만으로는 현재 자동차 산업에 적용되고 있는 흡차음재에 대한 비교, 평가 및 분류가 불충분한 부분을 보완하기 위하여 개발된 것이다.<sup>(10)</sup>

측정대상 시편은 철판 위에 장착되고 아래에서 쇠구슬(steel ball)을 철판에 튀겨서 가진하여 이때 발생하는 공기에 의한 소음으로서의 충격음을 측정한다. 발생하는 소음은 잔향시간이 실제 차량의 평균 잔향시간과 동일하도록 설계된 철판 상부 챔버의 마이크로폰에서 측정이 된다. 이때 철판만 있을 때 측정된 소음의 스펙트럼과 시편이 장착되었을 때 측정된 소음의 스펙트럼의 차로부터 통합 음향효율로서의 삽입손실을 구할 수 있다.

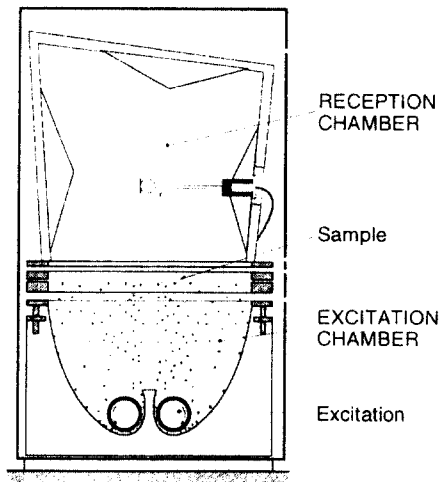


Fig. 3 Insertion Loss Measurement Device

## 3. 반응표면모델

### 3.1 반응표면모델

일반적으로 다구찌가 제안한 2 수준계의 직교 배열도 실험계획법의 관점에서 살펴보면은 통계학에서 언급하는 선별(Screening)의 한 방법인 일부 실시법(Fractional Factorial Design)으로 볼 수 있으며 설계 인자가 결정되면 다구찌가 제안한 여러 가지 직교 배열 중에서 적당한 것을 선택하여 사용하면 된다. 하지만 다구찌 방법은 제한적인 교호 작용만을 고려하는 문제점을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 다구찌 선형 회귀 모델과 2 차항의 반응표면모델을 혼용하여 흡차음재 DB 를

구성하여 민감도 및 최적화를 수행하고자 한다.

반응표면모델의 설계변수는 일반적으로 다음 식 (2)를 적용하여 [-1, 1]의 영역으로 정규화하여 사용한다. 흡차음재 DB 관점에서는 소재의 면밀도, 두께 등과 같은 재료의 물성치를 의미한다.

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{c_i}, c_i = \text{const.} \quad (2)$$

여기서  $\bar{x}_i$ 는 설계변수  $x_i$ 의 평균값을 의미한다. 설계변수에 대한 응답들의 상관관계인 반응표면모델은 식 (3)과 같은 다항식의 반응표면모델로 구성할 수 있다.

$$Y = X^T \beta + \varepsilon \quad (3)$$

여기서  $Y = [Y_i]$ ,  $X = [X_i(X_j)]$ 이며, 식 (3)의 반응표면모델의 미지 계수 항인  $\beta = [\beta_i]$ 는 최소자승법(least square method)을 적용하여 다음 식 (4)와 같이 구한다.

$$L = \sum \varepsilon^2 = \sum (Y - X^T \beta)^T (Y - X^T \beta) \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \therefore \beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

따라서 식 (3)는 다음과 같다.

$$Y = X^T \beta + \varepsilon = X^T [(X^T X)^{-1} X^T Y_0] \quad (5)$$

여기서  $Y_0$ 는 응답변수(출력)를 의미하며 흡차음재 DB 관점에서는 흡음률과 삽입손실과 같은 측정값들을 의미한다.

## 4. 흡차음재 DB 구축

### 4.1 흡음률 DB 구축

흡음률 DB 를 구축하기 위하여 산업체의 설계자들과 협의하여 면밀도 3 수준, 시편 두께 3 수준 및 데니어(Denier) 2 수준의 총 3 가지의 설계 변수를 선정하였다. 선정된 설계 변수에 대한 다구찌 직교배열인  $L_{18}2^13^7$  을 적용해도 되지만 실험 횟수를 최소한으로 줄이기 위하여 다구찌 직교배열에 D-optimal 법을 적용하여 다음 Table 1.과 같은 12 가지의 실험계획을 하였다. Table 1.의 실험계획에 따라 12 가지 흡차음재 샘플을 제작하여 간이 잔향실에서 흡음률 측정을 실시하였다. 측정된 광범위한 주파수 대역에서는 흡음재의 성능을 객관적으로 비교 평가하기가 어렵다. 따라서 흡음률은 125 Hz 에서 4000 Hz 까지의 16 개의 1/3 옥타브밴

드에 대하여 흡음률 값이 표시되고 있으며 이것을 하나의 대표값으로 나타내는 단일평가지수를 사용하여 나타낸다. 본 연구에서도 일반적으로 소음감소계수(NRC: Noise Reduction Coefficients)로 널리 사용되는 250, 500, 1000, 2000 Hz 4 개의 주파수 산술평균에 대한 지수를 적용하여 해석하였다.

Table 1. Design of Experiments

면밀도(xn1)	두께(xn2)	데니어(xn3)
1	1	1
0	0	1
-1	-1	1
1	1	-1
0	1	-1
-1	1	1
1	0	1
0	0	-1
-1	0	-1
1	-1	-1
0	-1	1
1	-1	-1

소음감소계수값에 대한 설계변수의 주효과(Main Effect)는 다음 Fig. 4 와 같으며 상대적으로 두께에 대한 영향이 면밀도와 데니어에 비하여 크다는 것을 알 수 있다.

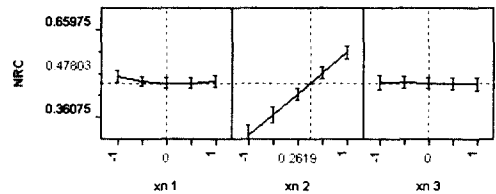


Fig. 4 Main effect of NRC

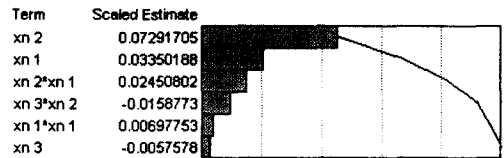


Fig. 5 Pareto plot of NRC

Fig. 4 의 주효과 분석과 같이 Fig. 5 의 파레토도 분석을 통하여 소음감소계수값에 영향을 주는 두께와 면밀도의 교호작용까지도 포함한 각각의 설계 변수에 대한 기여도를 알 수가 있다. Fig.4 에서

와 같이 소음감소계수값 변화에 가장 큰 영향을 주는 두께는 약 45%의 기여도를 갖는다는 것을 보여준다.

Fig. 4 와 Fig. 5 의 분석을 통하여 면밀도, 두께, 데니어의 변화가 소음감소계수값에 미치는 민감도를 분석하였으며 궁극적으로는 Fig. 6 과 같은 반응표면모델을 구성하여 설계자들에게 유용한 흡차음재 설계 DB를 구축하였다.<sup>(12)</sup> Fig. 6 은 면밀도를 0 으로 놓은 상태에서 두께와 데니어에 의한 소음감소계수값을 등고선도와 3 차원도로 보여주며 설계자들은 두께와 데니어의 변화에 따른 소음감소계수값의 변화를 시각적으로 예측할 수 있다.

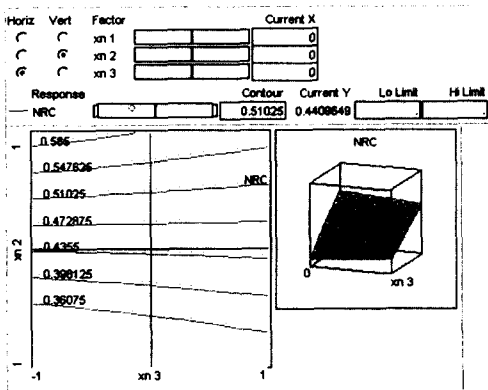


Fig. 6 Response Surface Model of NRC

#### 4.2 삽입손실 DB 구축

4.1 절과 같이 Table 1.의 실험계획에 따라 삽입손실 측정기에서 삽입손실 측정을 실시하였다. 역시 측정된 광범위한 주파수 대역의 값을 단일 평가 지수로 표현하기 위하여 200 Hz 에서 6000 Hz 까지의 주파수 대역을 대화의 명료도로서 대화가 배경 소음에 의해 어느 정도 방해받을 것인지를 판단하는 척도로 많이 쓰이고있는 AI(Articulation Index)평가 방법을 적용하여 삽입손실을 정량적으로 평가하였다.<sup>(11)</sup>

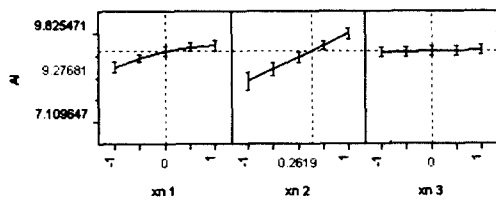


Fig. 7 Main effect of AI

삽입손실에 대한 설계변수의 주효과(Main Effect)는 Fig. 7 과 같으며 두께와 면밀도에 대한 영향이 데니어의 영향에 비하여 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 의 파레토도 분석을 통하여 삽입손실에 영향을 주는 면밀도, 두께 등의 교호작용까지도 포함된 각각의 설계 변수에 대한 기여도를 알 수 있다.

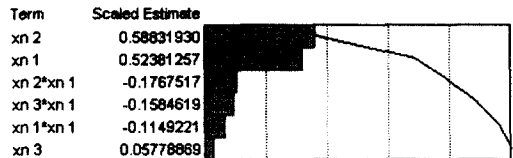


Fig. 8 Pareto Plot of AI

Fig. 9 와 같은 삽입손실에 대한 반응표면모델을 구성하여 설계자들에게 유용한 흡차음재 설계 DB를 구축하였다. Fig. 9 는 데니어를 0 으로 놓은 상태에서 두께와 면밀도에 의한 삽입손실을 등고선도와 3 차원도로 보여주며 설계자들은 두께와 면밀도의 변화에 따른 삽입손실의 변화를 설계 시에 손쉽게 예측할 수 있다.

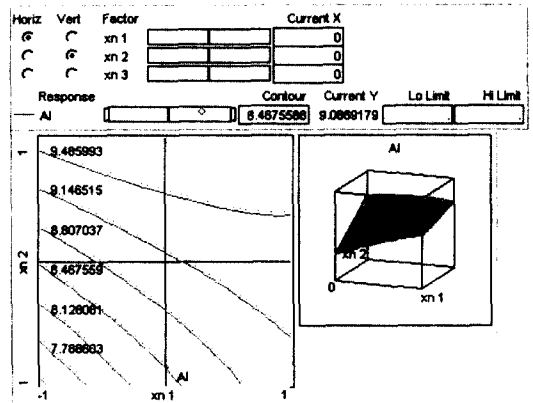


Fig. 9 Response Surface Model of AI

#### 4.3 흡차음재 DB를 통한 최적설계

4.1 절과 4.2 절에서 흡차음재 소재에 다구찌 기법을 포함한 실험계획법을 적용하여 흡음률 및 삽입손실에 대한 반응표면모델(흡차음재 DB)를 구축하였다. Fig. 6 과 Fig. 9 에 구축된 흡음률 및 삽입손실의 반응표면모델과 Fig. 10 에 Pyw 로 표시

된 총 중량에 대한 반응표면모델을 사용하여 흡차음재 소재에 대한 설계를 수행하였다. Fig. 10 은 총 중량을 현재 설계값을 유지하면서 흡음률 및 삽입손실의 성능을 최대화 해주는 경우에 면밀도, 두께, 테니어의 최적의 조합을 구한 것을 한 예로 보여주고 있으며 이 때의 소음감소계수값(PNRC)은 초기 설계값에 비하여 37%, 삽입손실(PAI)은 초기 설계값에 비하여 8%의 성능향상을 가져왔다.

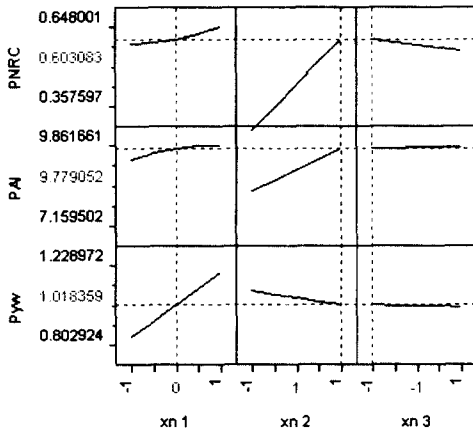


Fig. 10 Optimal Solution from response surface model

Fig. 10 은 여러 가지 설계 안 중에서 한가지 설계 예만을 보여준 것이며 산업계 설계자들과 같이 이미 구성되어있는 흡음률, 삽입손실, 총중량에 대한 흡차음재 DB 를 통하여 설계자가 원하는 모든 경우의 수에 대한 설계를 수행할 수 있었다.

## 5. 결론

다구찌 직교배열과 D-optimal 과 같은 실험계획법을 적용하여 흡음률 및 삽입손실에 대한 반응표면모델을 구성하여 흡차음재 소재의 설계 DB 를 구축하였다. 제안된 반응표면모델에 의한 흡차음재 DB 를 사용하여 흡차음재 소재의 최적설계에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡음률 및 삽입손실을 반응표면모델로 구성하면 설계영역에서의 변화를 등고선도와 3 차원도를 사용하여 손쉽게 분석할 수 있다.
- 2) 흡음률, 삽입손실, 총중량 등과 같은 반응표면모델을 구성하여 반응표면모델에 의한 다중목적함수 문제로 손쉽게 변환하여 풀 수 있다.
- 3) 흡음률, 삽입손실, 총중량 등과 같은 반응표면

모델을 이미 구성하였기 때문에 설계 영역 내에서의 통합설계를 수행하는 과정에서 많은 시간과 노력을 줄일 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Bryan, E., W. Tempest and D. Williams, 1978, "Vehicle Noise and the Passenger," *Applied Ergonomics*, pp. 70 ~ 77.
- (2) 한국자동차공학회, 1996, *자동차 기술 핸드북 1*, pp. 259 ~ 275.
- (3) Myers, R.M. and Montgomery, D.C., 1995, *Response Surface Methodology - Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York.
- (4) 박성현, 1998, *현대실험계획법*, 민영사.
- (5) Sakai, T., 1991, "The Optimum Designing of Riding Comfort by Application of Taguchi Methods," *SAE 912673*.
- (6) SAE J-1400, *Laboratory Measurement of the Airborne Sound Barrier Performance of Automotive Materials and Assemblies*.
- (7) ASTM C-384, *Impedance and Absorption of Acoustical materials by the Impedance Tube Method*.
- (8) ISO 10534-2, *Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2 : Transfer-function method*.
- (9) Andre Chappuis, 1993, "Small Size Devices for Accurate Acoustical Measurement of Materials and Parts Used in Automobiles," *SAE Proceedings of 1993 Noise and Vibration Conference*, 931266.
- (10) S. Terashi, M. Asai, and J. Natio, 1989, "Damping Analysis of Body Panels for Vehicle Interior Noise Reduction," *SAE Proceedings of 1989 Noise and Vibration Conference*, 891135.
- (11) Kryster, K. D., 1970, *The Effect of Noise on Man*. Academic Press, pp. 70 ~ 77.
- (12) SAS Institute Inc., 1999, *JMP User's Guide*.