

# 다구찌법과 부분구조합성법을 이용한 차실소음 강건설계

## Robust Design of Vehicle Interior Noise using Taguchi method and Substructure Synthesis Method

김효식† · DE-KERDREL Tanneguy \*·김희진\*·조효진\*

Hyosig Kim, DE-KERDREL Tanneguy, Heejin Kim, Hyojin Cho

**Key Words :** Taguchi Method (다구찌법), Substructure Synthesis Method (부분구조합성법), 강건설계 (Robust Design), 중요 흐름도 (Critical Process Diagram), 신호대 잡음비 (Ratio of Signal to Noise), 소음전달함수(Noise Transfer Function)

### ABSTRACT

This paper presents a robust design of vehicle interior noise using Taguchi method and a substructure synthesis method with a hybrid model. Firstly, the proposed method identifies the critical process of the concerned interior noise through a TPA (Transfer Path Analysis). Secondly, a strategy for a robust design is discussed, in which the major noise factor among uncertainties in the process is quality distribution of rubber bushes connecting a cradle and a trimmed body. Thirdly, a virtual test model for the process is developed by applying a substructure synthesis method with a hybrid modeling approach. Fourthly, virtual tests are carried out according to the predefined tables of orthogonal array in Taguchi robust design process. The process was performed under 2 sub-steps. The first step is sensitivity analysis of 31 panels, and the other step is weight optimization of mass dampers on sensitive panels. Finally, two vehicles with the proposed countermeasures were validated. The proposed method reduces 87.5% of trials of measurements due to the orthogonal arrays and increases robustness by 8.6dB of S/N ratio and decreases 5 dB(A)~10 dB(A) of interior noise in the concerned range of RPM.

### 기호설명

- $H_{kl}^j$  the FRF matrix of substructure j between the DOF group with subscript k and l
- $x_m^j$  the response vector of substructure j with the m-set DOFs
- $f_n^j$  the input vector of substructure j with the n-set DOFs
- c the subscript for the coupling DOFs of A and B
- i the subscript for the input DOFs of A or B
- o the subscript for the output DOFs of A or B
- S/N Ratio of the signal to noise
- $L_a(b^c)$  L : Orthogonal array where a : The num. of tests, b : The num of levels of a factor, c : The num. of factors

### 1. 서론

차량의 고풍력화 및 경량화와 개발기간의 단축이라는 요구와 아울러 고품질화에 대한 요구가 최근 자동차 개발의 중요한 과제가 되고 있다. 특히 저소음 저진동 차량에 대한 고객의 요구를 만족시킬 수 있도록 최근에는 소음 수준의 저감뿐만 아

니라 품질분포의 개선을 위한 연구들이 수행되고 있다.

품질분포의 개선을 위해서는 결정론적인 설계방법(deterministic design method)이 아닌 확률론적인 설계방법(probabilistic design method)이 적용되어야 하며 다구찌법과 신뢰성기반 강건설계 등이 주로 사용되고 있다.<sup>(1-6)</sup>

다구찌법은 이상기능(ideal function)을 최대화하면서 부효과(side effect)를 최소화하고 동시에 상대적으로 가장 강건한 설계조건을 찾아내는 강건설계기법(robust design method)이다. 다구찌법은 직교배열표와 S/N 비를 사용해서 여러 가지 요인으로부터 야기되는 불확실성을 고려해서 설계를 수행함으로써 공정설계와 전기제품의 설계에서부터 최근에는 자동차의 품질향상에 대한 연구까지 다양한 분야에 적용되고 있다.<sup>(4-6)</sup>

다구찌법을 이용해서 잡음인자들을 고려한 강건설계를 효율적이면서도 정확하게 수행하기 위해서는 (1) 실험회수의 최소화(Minimization of the number of tests), (2) 실험의 정확성(Accuracy of test results), (3) 잡음인자에 대한 실험의 적합성(Compatibility of tests to noise factors), (4) 무시된 불확실성에 대한 실험의 강건성(Robustness of the test with respect to ignored uncertainties) 등의 사항들이 고려되어야 한다. 이러한 사항들을 만족하기 위해서 다구찌법을 이용한 강건설계 과정의 정립이 필요하며 수행되는 실험에 대한 전략이 필요하다.

† 책임저자: Renault Samsung Motors Co. NVH team  
E-mail : hyosig.kim@renaultsamsung.com  
Tel : (019) 346-9100, Fax : (031) 289-7958

\* Renault Samsung Motors Co. NVH team

직교배열표에 대한 시험들을 실제 시험만으로 수행할 경우, 상기된 요구사항들을 준수하는 것이 매우 어려워지며 결과적으로 설계의 비용이 증대하고 결과의 신뢰성이 저하된다. 또한, 최근에 수행되는 대부분의 강건설계에 관한 연구들은 전산응용공학(CAE)을 이용해서 제작한 전산모델을 사용하여 가상 시험(virtual experiments)을 수행하고 있다. 그러나 전산모델을 사용할 경우, 적용분야에 따라서 전산모델의 제작비용이 매우 비싸고 전산모델의 정확성을 확보하는 것이 어려운 경우가 있다.

본 연구의 대상이 되는 자동차 차실 소음예측을 위해서 사용되는 구조-음향 연성해석(structure-acoustic coupling analysis) 전산모델이 대표적이 예라고 할 수 있다. 최근에는 유한요소법 등을 이용한 해석적 모델과 측정을 통해서 구한 실험적 모델을 이용한 혼성모델을 이용한 부분구조합성법을 사용하여 보다 효율적으로 차실소음을 예측하는 연구가 수행되고 있다.<sup>(7-10)</sup>

혼성모델을 이용한 부분구조합성법을 다구찌법을 이용한 강건설계에 적용하면 여러 가지 상승효과(synergy)를 기대할 수 있으며 주요한 장점만을 기술해 보면 다음과 같다. 먼저 설계변경이 되는 부분구조는 유한요소법을 이용한 전산모델로 제작함으로써 설계인자의 선정이 용이하게 된다. 또한, 모델링이 어려운 부분구조는 계측을 통한 실험모델로 제작함으로써 모델제작의 비용 및 시간을 절감할 수 있게 되고 아울러 직교배열표에 따른 시험을 수행할 때 요구되는 실제 시험의 횟수가 단지 시험모델에 대한 시험만으로 축소됨으로써 실제 시험을 위해서 요구되는 시간과 노력이 절감된다. 끝으로 성능 분포에 큰 영향을 미치는 부품의 품질 불확실성을 잡음인자로 정량화하는 것이 용이하다. 따라서 혼성모델을 이용한 방법은 앞서 기술한 강건설계의 요구조건들을 만족시킬 수 있는 효과적인 방법이다.

본 연구에서는 부분구조합성법과 다구찌법을 이용해서 차실소음의 강건설계를 수행하고자 한다. 제안된 방법은 강건설계 과정에 따라서 차실소음을 발생시키는 중요한 프로세스를 정의하고 크레들과 차체를 연결하는 고무부쉬의 품질산포를 고려하여 2 단계의 다구찌 강건설계를 수행한다. 첫 번째 설계는 총 31 개의 차체 패널에 대한 민감도를 파악하기 위해서 수행되고 2 번째 설계는 민감도가 큰 차체패널에 대한 질량댐퍼(mass damper)의 최적화를 위해서 수행된다. 이 때 사용되는 소음 전달함수(noise transfer function) 예측을 위한 가상

시험모델은 혼성모델을 이용한 부분구조합성법을 사용해서 제작한다. 끝으로 다구찌 강건설계로부터 구해진 최적사양에 대한 확인시험을 수행하고 제안된 방법이 강건설계를 수행하는 데, 경제적이고 우수한 효과가 있음을 확인한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 다구찌법 (Taguchi's method)

다구찌법은 이상기능(ideal function)을 최대화하면서 부효과(side effect)를 최소화하고 동시에 품질산포를 작게 하는 최상의 조건을 찾아내는 강건설계기법중의 하나이다. 직교배열표(table of orthogonal array)를 이용한 종래의 실험계획법과 달리 다구찌법은 신호입력에 따른 응답을 산출하는 과정 중에 제어가 불가능한 잡음인자들의 영향을 고려하여 신호대 잡음비(Ratio of Signal to Noise)라고 하는 특성치를 산출한 후, 신호대 잡음비를 증대하는 설계인자의 조합을 구한다. 다구찌법에서 사용되는 직교배열표는 제어인자간의 교호작용을 고려하여 무시될 수 있는 교호작용은 주효과와 교락(confounding)하여 실험횟수를 적게 할 수 있도록 만들어 놓은 실험표이다. 다구찌법을 이용한 강건설계의 과정을 간략히 정리하면 다음과 같다.

#### Step 1. Definition of a project

- .Critical process
- .Ideal function and real response

#### Step 2. Robust design plan

- 3.1 Plan for signal and response
- 3.2 Plan for noise factors
- 3.3 Plan for control factors
- 3.4 Plan for experiments
- .Table of an orthogonal array

#### Step 4. Tests based on a table of an orthogonal array

#### Step 5. Analysis of response tables

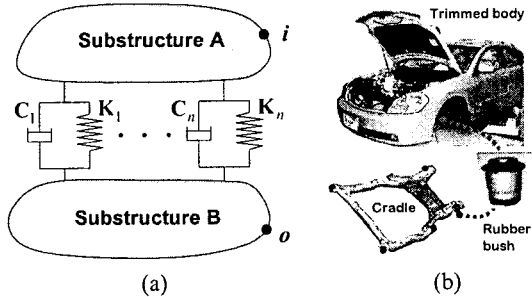
- .S/N ratio
- . Prediction of the optimum

#### Step 6. Validation

### 2.2 혼성모델을 이용한 부분구조합성법 (Substructure synthesis method with a hybrid modelization)

전체구조 C가 부분구조 A와 부분구조 B로 구성되고 서로 스프링과 감쇠로 연결되어 있는 경우를 고려해 보면 Fig. 1. (a)와 같다. 부분구조합성법의 예로써 Fig. 1. (b)의 트림차체(trimmed body)를 부분구조로 분리해 보면 부분구조 A는 크레들

(cradle)이 되며 부분구조 B는 크레들을 제외한 트림차체가 되고 이들 부분구조들은 스프링과 감쇠로 표현되는 4개의 고무부쉬에 의해서 연결된다.



(a) Schematic illustration of a substructure synthesis  
(b) Hybrid modelization of a trimmed body  
Fig. 1 Substructure synthesis with a hybrid modelization

트림차체의 차실내 응답점에서의 소음은 소음 전달함수와 각 연결경로에 대한 전달력의 곱으로 다음과 같이 구해진다.

$$p_o^C = H_{oi}^C f_i^C \quad (1)$$

부분구조 A에 입력이 가해지고 부분구조 B에서의 소음에 관심이 있는 경우, 소음전달함수  $H_{oi}^C$ 는 다음과 같이 부분구조들의 전달함수와 연결부 컴플라이언스로 표현된다.

$$H_{oi}^C = H_{oc}^B [H_{cc}^A + H_{cc}^B + H^C]^{-1} H_{ci}^A \quad (2)$$

$$\text{where } H^C = [K^C - \sqrt{-1} \omega C^C]^{-1}$$

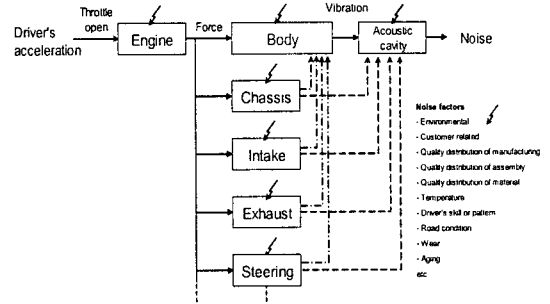
여기서  $K^C$  및  $C^C$ 는 각각 연결요소의 강성행렬 및 감쇠행렬이며  $H^C$ 는 부분구조 A 및 B의 연결부 물리좌표들이 강성 및 감쇠요소에 의해서 연결되어 있는 탄성결합의 경우에 대한 연결요소의 컴플라이언스 행렬이다.

### 3. 다꾸찌법을 이용한 강건설계

#### 3.1 Step 1. Definition of a project

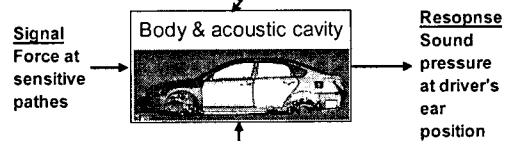
운전자의 의도에 따른 페달조작에 의해서 차량은 가속 또는 감속된다. 이 과정 중에 차량 내외의 여러 가지 잡음인자들에 의해서 기대하지 않는 부효과(side effect)들이 발생하게 된다. 차실내 소음도 부효과들 중에 하나로서 그 발생과정을 살펴보면 Fig. 2. (a)와 같이 여러 가지의 경로에 의해서 발생된다. 본 연구는 이들 경로에 대한 전달경로 분석(TPA : Transfer Path Analysis)을 통해서 크레들

(cradle)에 작용하는 엔진 가진력에 의한 구조기인 소음이 주된 부효과(major side effect)를 발생시키는 중요 흐름(critical process)임을 확인하고 이에 대한 강건설계를 수행하고자 한다. 중요 흐름에 대한 신호 및 응답인자, 잡음 및 설계인자들을 정리해 보면 Fig. 2. (b)와 같다.



(a) Overall process diagram

**Noise factor**  
Quality distribution of dynamic characteristics, stiffness and damping of the cradle mount bush



**Control factor**  
1. Dynamic characteristics, stiffness and damping of the cradle mount bush  
2. Structural characteristics of the cradle structure  
3. Contribution of body panels

(b) Critical process diagram

Fig. 2 Process diagram

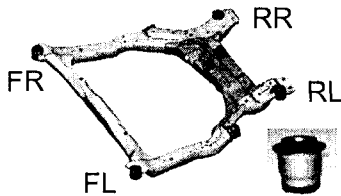
#### 3.2 Step 2. Plan for robust design

Fig. 2. (b)의 중요 흐름도에서 신호(signal) 및 응답(response)은 각각 크레들에 장착된 전방 엔진마운트에 작용하는 엔진 가진력과 작용력에 의해서 발생하는 실내소음이 된다. 이 경우 신호 및 응답간의 관계는 해당 전달경로의 소음전달함수(NTF : Noise Transfer Function)를 이용해서 표현할 수 있다.

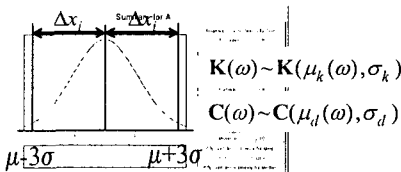
잡음인자(noise factor)에 대해서 알아보면 다음과 같다. 주요 하중경로가 크레들에 장착된 전방 엔진마운트인 경우 Fig. 3. (a)의 크레들과 차체를 연결하는 고무부쉬(이하 크레들 장착 고무부쉬)를 통해서 차체에 전달되므로 소음전달함수는 고무부쉬의 동특성에 의해서 많은 영향을 받을 수 있다. 일반적으로 고무부쉬의 품질분포는 타 부품에 비해서 크므로 소음전달함수에 대한 설계시, 결정론적인 설계만을 수행해서 소음전달함수를 설계한다

면 고무부쉬의 품질분포로 인해서 예기치 않은 성능상의 저하가 발생할 수 있다. 따라서 크레들 장착 고무부쉬의 품질분포에 둔감하면서도 실내소음에 대한 설계목표를 만족할 수 있는 강건한 설계안은 확률론적인 설계를 통해서 구해질 수 있으며 본 연구에서는 다구찌 강건설계를 수행해서 구하고자 한다.

크레들 장착 고무부쉬의 동적인 특성 즉, 강성 및 감쇠는 주파수에 따라서 변하는 동적인 특성을 가지며 재질, 형상 및 온도 외에 제조공정 등의 여러가지 요인으로 인하여 Fig. 3. (b)에서 보는 바와 같은 품질분포를 갖는다. 분포의 형태가 정규분포라고 가정하면 각 분포의 99.7%는 평균에서  $3\sigma$  내에 존재하게 된다. 크레들 1 개당 4 개의 고무부쉬가 품질분포 범위내에서 임의로 조합되어 장착될 것이므로 잡음인자는 4 개의 고무부쉬에 대한 강성 및 감쇠로 설정하고 각각의 잡음인자의 수준은 품질분포의  $(\mu - 3\sigma)$  및  $(\mu + 3\sigma)$ 의 값을 각각 최대 및 최소값으로 해서 2 수준으로 하였으며 정리하면 Table 1 과 같다.



(a) Position and shape of a cradle mount bush



(b) Probabilistic density function of a stiffness at 100 Hz and 20 °C

Fig. 3. Probabilistic characteristics of a cradle mount rubber bush

Table 1. Noise factors

|    | Factors                         | Level 1         | Level 2         |
|----|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| N1 | K and D of the front left bush  | $\mu - 3\sigma$ | $\mu + 3\sigma$ |
| N2 | K and D of the front right bush | $\mu - 3\sigma$ | $\mu + 3\sigma$ |
| N3 | K and D of the rear left bush   | $\mu - 3\sigma$ | $\mu + 3\sigma$ |
| N4 | K and D of the rear right bush  | $\mu - 3\sigma$ | $\mu + 3\sigma$ |

제어인자(control factor)는 크게 2 종류로서 크레들의 입력점 강성(input point inertance)의 증대를 위한 구조 변경안과 차체 패널들의 진동저감을 위한 질량댐퍼(mass damper) 장착안이다.

다구찌 설계는 2 단계로 수행하고자 한다. 첫번째 설계는 31 개의 차체 패널들의 소음전달함수에 대한 민감도를 분석하고 민감도가 큰 패널들을 선택하기 위해서 수행된다. 이어서 2 번째 설계는 선택된 패널들에 장착되는 질량댐퍼의 무게를 최적화하기 위해서 수행된다. 각각의 설계를 위한 제어인자의 종류와 수준을 정리하면 다음의 Table 2 와 같다.

Table 2. Control factors

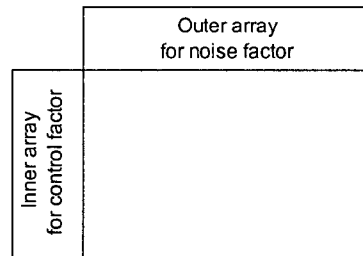
(a) 1st design for selection of sensitive panels

| Factors          |  | Level 1 | Level 2 |
|------------------|--|---------|---------|
| $C_i, i = 1, 31$ | Mass damper at the # i-th position on panels | 0.0     | 1EA     |

(b) 2nd design for weight optimization of the mass dampers on the selected panels with cradle reinforcement

| Factors         |   | Level 1  | Level 2 | Level 3 |
|-----------------|---|----------|---------|---------|
| C1              | Reinforcement of the front member of the cradle           | Baseline | Reinf.  |         |
| $C_i, i = 2, 6$ | Mass damper at the # i-th position on the selected panels | 0.0      | 1EA     | 2EA     |

설정된 잡음인자 및 제어인자에 대한 직교배열표를 작성하면 다음의 Fig. 4. (a)와 같고 내측 및 외측배열에 사용된 직교배열의 종류는 Fig. 4. (b)와 같다.



(a) Arrangement of the inner and outer arrays

| Step \ Array | Inner array              | Outer array | Design target       |
|--------------|--------------------------|-------------|---------------------|
| 1st design   | $L_{32}(2^{31})$         | $L_8(2^3)$  | Panel sensitivity   |
| 2nd design   | $L_{18}(2^1 \times 3^5)$ | $L_8(2^3)$  | Weight optimization |

(b) Orthogonal array for inner and outer array

Fig. 4 Orthogonal arrays

### 3.3 Step 3. Plan for experiments

Fig. 4. (a)의 직교배열표내 각각의 시험을 가상시험을 통해서 구하고자 한다. 가상시험은 혼성모델을 이용한 부분구조해석법을 적용해서 수행되며 신호에 대한 응답은 소음전달함수로 정의된다.

소음전달함수  $H_{oi}^C$  는 Fig. 5 에서와 같이 구해진다

다. 설계변경대상인 크레들의 동특성  $H_{ci}^A$  및  $H_{cc}^A$  는 유한요소모델(finite element model)을 이용해서 계산하고 크레들을 제외한 트림차체의 동특성  $H_{oc}^B$  및  $H_{cc}^B$  은 실제 시험을 수행해서 측정하며 연결요소의 컴프라이언스  $H^C$  은 시험과 유한요소 해석을 병용해서 구한다.

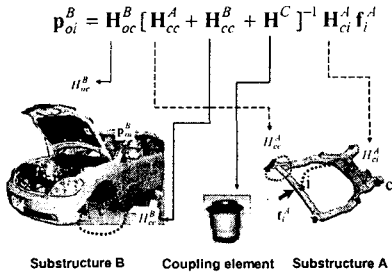


Fig. 5 Virtual test for the critical process by using a substructure synthesis method with a hybrid model

### 3.4 Step 4. Tests based on a table of an orthogonal array

혼성모델을 이용한 부분구조합성법을 사용해서 초기 설계안에 대한 소음전달함수를 계산한 후 시험결과와 비교해 보면 Fig. 6 과 같이 실내소음이 정확하게 예측되고 있음을 알 수 있다. 또한, 직교배열표의 실험을 수행하기 위해서 요구되는 실제 시험의 총 횟수는 Table 3 에서와 같이 실제 시험만을 수행하는 경우 대비 12.5%로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Table 3. Comparison of the number of real tests

| Step       | Array   |          | Ratio (%) |
|------------|---------|----------|-----------|
|            | Current | Proposed |           |
| 1st design | 256     | 32       | 12.5      |
| 2nd design | 144     | 18       | 12.5      |

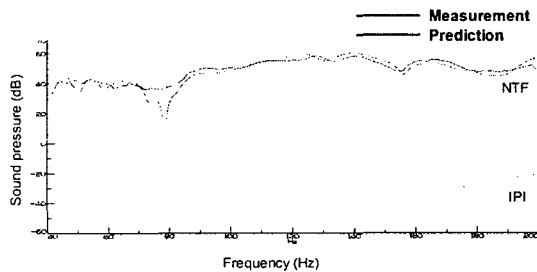
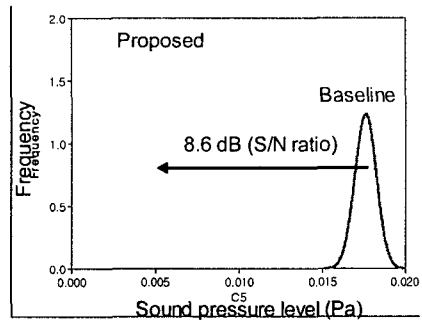


Fig. 6 Comparison of noise transfer functions and input point inductance between measurements and the proposed method of a hybrid approach

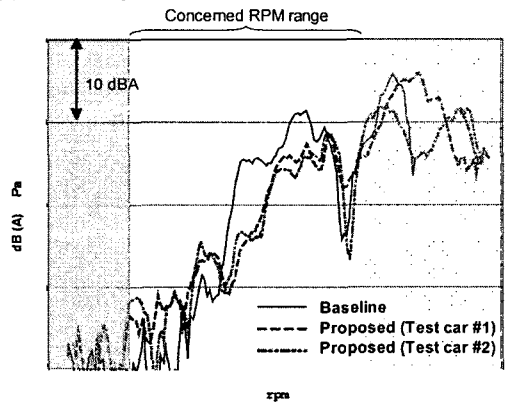
### 3.5 Step 5. Analysis of response tables

Fig. 4 의 1 차 설계에 대한 직교배열표에 따라서 가상 시험을 실시하고 망소특성(Smaller-is-better performance)에 따른 S/N 비를 계산한 후, S/N 비의 반응표(response table)를 정리한다. 1 차 설계안의 반응표에서 각 제어인자들의 기울기를 비교해 보면 5 개의 제어인자가 상대적으로 큰 기울기를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이들을 2 차 설계의 제어인자로 사용해서 1 차 설계와 같은 과정을 통해 2 차 설계에 대한 S/N 비의 반응표를 구한 후, S/N 비를 최대화 하는 제어인자의 조합을 구하면 실내소음저감을 위한 설계안이 된다.

### 3.6 Step 6. Validation



(a) Probability density function and S/N ratio



(b) Interior sound level under driving condition  
Fig. 7 Validation of the proposed design

초기사양과 제안된 설계안의 시제품(prototype)에 대한 S/N 비와 확률밀도함수(PDF: Probability Density Function)를 비교해 보면 Fig. 7. (a)과 같다. 제안된 설계안의 S/N 비를 예측해 보면 초기 설계안 대비 6.7dB 가 증가하며 시험을 통해서 확인해보면 8.6 dB 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과로부터 제안된 설계안이 초기 설계안 대비 고려된 잡음인자에 대해서 강건해진 것을 확인할 수 있

다. 또한, 실차 주행시험을 통해서 실내소음의 개선량을 확인해 보면 Fig. 7. (b)과 같으며 관심 RPM 구간에서 5~10dB(A)가 저감된 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구의 연구결과를 정리해 보면 다음과 같다.

- 1) 차실소음을 발생시키는 중요한 프로세스를 정의하고 크레들 장착 고무부쉬의 품질분포를 고려하여 민감도 해석 및 질량 최적화를 위한 2 단계의 다구찌 강건설계를 수행하였다.
  - 2) 혼성모델을 이용한 부분구조합성법을 다구찌 직교배열표와 연계해서 사용함으로써 수행된 실제 시험의 횟수를 전체시험의 12.5%로 감소하였다.
  - 3) 강건설계의 결과로써 S/N 비를 비교해 보면 제안된 설계안의 S/N 비가 초기 설계안 대비 8.6 dB 증가하는 것을 볼 수 있다.
  - 4) 실차 주행시험을 수행해서 실내소음의 시험 결과를 비교해 보면 중요한 RPM 구간 내에서 4 ~ 7dB(A) 감소한 것을 알 수 있다.
- 본 연구를 통하여 제안된 방법이 강건설계를 위한 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

(1) Kim, H. S., Kin, C. B. and Yim, H. J., 2002, "Quality improvement for brake judder using design for six sigma with response surface method and sigma based robust design", Internal journal of automotive technology, Vol. 4, Num. 4, pp.193-201.

(2) 한형석 등, 1996, "반응표면분석법을 이용한 기구의 강건설계", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.743~748.

(3) Lee, S. B., Baik, S. and Yim, H. J., 2003, "Optimal reliability design for thin-walled beam of vehicle structure considering vibration", Internal journal of automotive technology, Vol. 4, Num. 3, pp.135-140.

(4) 이권희 등, 2004, "다구찌법을 이용한 운전석 에어백의 강건설계", Trans. Of KSAE, Vol. 12, No. 2, pp.131~138.

(5) 안태길 등, 2003, "다구찌 방법을 이용한 휠 베어링 유니트의 형상설계, 한국정밀공학회지 제 20 권 제 10 호, pp. 164~168.

(6) 박현민 등, 2005, "다구찌 실험계획법을 이용한 자동차 내장품 covering shelf 의 형상설계", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, KSAE05-S0123, pp. 765~770.

(7) 허덕재 등, 2001, 주파수응답함수의 부분구조합성법을 이용한 차 실내소음 예측, 한국소음진동공학회지, 제 11 권 4 호

(8) Lee, D. H., Whang, W. S. and Kim, C. M., 2001, "Noise sensitivity analysis of an engine mount system using the transfer function synthesis method", SAE 2001-01-1532.

(9) Ren, Y. and Beards, C. F., 1995, "On substructure synthesis with FRF data", J. od Sound and Vibration, 185(5), pp. 845~866.

(10) Sakai, T., Terada, M., Ono, S. and Mas. P, 2001, "Development procedure for interior noise performance by virtual vehicle refinement, combining experimental and numerical component models", SAE, 2001-01-1538.