

Road Noise 개선을 위한 CAE 기반 DFSS Study

CAE-based DFSS Study for Road Noise Reduction

권우성† · 유봉준* · 김병훈* · 김인동*

Woosung Kwon · Bongjun Yoo · Byounghoon Kim · Indong Kim

Key Words : DFSS(Design for Six Sigma), CMS(Component Mode Synthesis method, 부분구조합성법), DOE(Design of Experiment, 실험계획법), 95%-ile(95th Percentile), ANOVA(Analysis of Variance, 분산분석), Orthogonal Array(직교배열표), Kriging (Kriging 기법), Signal to Noise Ratio(신호 대 잡음비)

ABSTRACT

In the early phase of vehicle development, CAE is conducted as tool for vehicle performance assessment. To maintain acceptable road noise performance, solution for reduced vehicle sensitivity is required. Chassis interface dynamic stiffness characteristics are key component to isolating vibration and noise of road from the vehicle interior. This research provide how to set up the optimized dynamic characteristics under noise effect through DFSS study. CAE-based DOE is performed to build prediction math model, CMS process involves DOE to achieve very fast run times while giving results very comparable. Minimized 95th percentile of performance distribution is applied to minimize vehicle sensitivity and road noise levels variation during the optimization process. Finally, the results of optimization were reviewed for performance and robustness.

1. 서 론

전산응용해석(CAE) 기법은 차량 개발 초기에 성능을 예측 평가하는 중요한 수단으로 이용되고 있다. CAE 결과를 설계에 반영하고, 차후 실제 차량에 대한 평가를 진행하는 일련의 반복적인 절차를 통해 차량 개발에 소요되는 비용 및 시간을 절감하고 있다.

현재 개발 초기 단계 차량의 Road Noise 개선을 위해서 FEM 을 이용한 전산응용해석을 통해 개선작업이 필요하게 되었다. 본 과제의 Road Noise 는 전달 경로 측면에서 구조 전달음(Structure Borne Noise)에 해당되며, 이는 타이어가 노면의 요철 부분을 주행할 때에 탄성진동 에너지가 현가계에서 차체를 경유하여 차실내에 전달되어 음압이 발생하는 경우이다. 따라서, Chassis 의 Mount Dynamic Stiffness 특성이 노면으로부터 들어오는 진동 및 소음의 절연

과 관련된 주요한 인자가 되며, 이 인자들을 사용한 Road Noise 개선연구가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 이러한 인자들에 대한 강건 최적화를 위해 CAE 기반 DFSS 기법을 도입하여, 실험계획법을 바탕으로 한 근사 최적 설계 기법을 통해 최적의 Chassis Dynamic Mount Stiffness 조합을 제시하였다. 근사화 작업을 위해 통계적 분석 방법의 하나인 반응표면 분석법(Response Surface Method)을 적용하였다. 이 과정에서는 주어진 설계 영역 안에서 직교배열표를 이용한 실험계획법을 통해 데이터를 수집하였고, Kriging 기법을 통해 근사화 함수를 도출하여 이를 최적화에 이용하였다.^(1,2,6) 그리고 분산분석(Analysis of Variance)을 수행함으로써 각 설계 변수들의 기여도를 파악하였다. 강건성 확보를 위해 95%-ile(95th Percentile) 기법을 최적화 과정에 적용함으로써, 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise ratio)가 높은 조합을 구하였다.^(3,4)

실험계획법을 수행하는 과정에서, 정도가 높은 근사화 함수를 구하기 위해서는 다수의 해석작업이 요구 된다. 이에 수반되는 해석 시간을 줄이기 위해 Model Reduction 방법 중의 하나인 Component Mode Synthesis(CMS) 기법을 사용하여, Super-Element

† 교신저자; 정회원, GM Korea Company
E-mail : woosung.kwon@gm.com
Tel : 032-590-6423, Fax : 032-590-6002

* GM Korea Company

를 만들고 이를 반복적인 해석작업에 이용하였다. 해석 작업에는 MSC.NASTRAN 을, 실험계획법 및 반응표면 기법을 적용한 최적화 과정에는 GM-in house Program 을 사용하였다.⁽³⁾

2. CMS 기법

2.1 CMS Process

CMS 기법은 자유도가 많고 복잡한 system을 갖고 있는 Model을 Sub-Structuring하여 Reduced Stiffness, Mass, Damping Matrix를 갖고 있는 Super-Element로 생성하고 이를 해석에 이용함으로써, 해석 시간 및 비용을 단축하는 방법이다. 현재 FEM에서 사용되고 있는 주요 Model Reduction 방법으로는 Guyan Reduction과 CMS(Component Mode Synthesis method) Reduction으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 Guyan Reduction은 Static Solution에 사용되는 반면, CMS Reduction은 Modal Analysis와 Frequency Response Function Analysis(FRF)와 같이 Dynamic solution을 구하는데 사용된다.

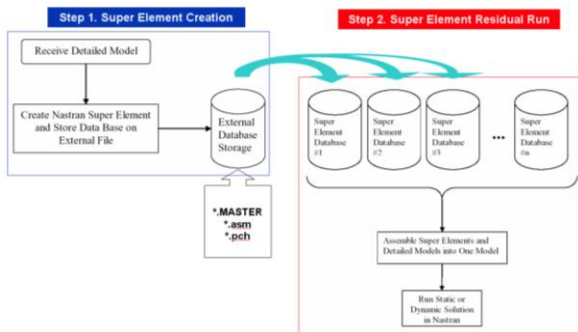


Fig. 1 CMS Build Process

Table 1 External Storage and Containing Data

Included file to Residual Run	Containing Data	Remark
*.asm	Exterior Grid	Included anywhere in the "Bulk Data" section before the first *.pch file is included
*.pch	Boundary Grid Interior Grid PLOT Element QSET	Nothing can come after the first included *.pch file, except more included *.pch files
*.master	Super element database	Only if the "ESTSEOUT" option "MATRIXDB" is used

본 과제에서는 Road Noise FRF를 구하기 위해 CMS 기법을 적용하였으며 Fig. 1과 같이 2단계로 나

눌 수 있다.

첫 번째 단계는 Component Detail FE-Model로부터 Sub-structuring 및 Model Reduction 과정을 통해, Super Element를 생성하여 External Data Base Storage에 저장하는 단계이다. NASTRAN에서는 External Data Storage 로써 *.asm, *.pch, *.master 파일 형식을 지원하고 있으며 각 파일에 저장되는 내용 및 사용방법은 Table 1 과 같다.

Model Reduction과정에서 사용되는 고유치 문제는 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$K u = \lambda M u \quad (1)$$

K : Stiffness Matrix

M : Mass Matrix

λ : Eigen value

u : Displacement vector

여기에서 행렬들을 Exterior DOF와 Interior DOF로 분류해서 다시 정리하면 다음과 같다.

$$u = \begin{Bmatrix} u_e \\ u_i \end{Bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_{ee} & K_{ei} \\ K_{ie} & K_{ii} \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} M_{ee} & M_{ei} \\ M_{ie} & M_{ii} \end{bmatrix} \quad (2)$$

변위 u에 다시 변환행렬을 적용해보면 (3)과 같이 정리된다.

$$u = \begin{Bmatrix} u_e \\ u_i \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} u_e \\ y_\delta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

T : Transformation Matrix

y_δ : Truncated set of general modal coordinate

Craig-Bampton Method에 따르면, Exterior DOF를 모두 고정시키고 해당 Component의 Normal Mode를 얻는다. 이 결과는 Constraint Mode에 의해 보완하게 되는데, Constraint Mode란 각 Exterior DOF에 단위 변위를 가하고 나머지 Exterior DOF는 고정된 상태에서 얻은 Mode를 일컫는다. 모든 Exterior DOF에 대해 이 작업을 반복하면 단위 변위가 가해진 Exterior DOF에 직접적으로 연관된 Interior DOF만이 0이 아닌 값을 얻게 됨을 이용한다. 이 같은 과정을 통해 Component Level의 Normal Mode를 생성한다.

이 과정에서 변환행렬 T는 다음과 같이 구성된다.

$$[T] = \begin{bmatrix} I & 0 \\ G_{ie} & \Phi_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

$G_{ie} = -[K_{ee}]^{-1}[K_{ie}]$: Redundant Static Constraint Mode

Φ_e : Fixed Exterior DOF Normal Mode
 I : Unit Matrix

(3)식을 (1)식에 적용하면 최종적으로 축약된 Model의 지배방정식을 얻을 수 있다. 이 과정 중에서 축약된 질량행렬과 강성행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [\bar{M}] &= [T]^T[M][T] \\ [\bar{K}] &= [T]^T[K][T] \end{aligned} \quad (5)$$

두 번째 단계는 Reduced Model(Super-Element)들과 나머지 부분들을 조합하여 필요한 해석을 수행하는 과정이다. 이 과정은 Residual Running 과정으로서 앞서 생성된 External Storage File들을 추가로 Include하는 점을 제외하고는 일반적인 해석 방법과 동일한 과정이다.

Fig. 2와 같이 최적화 대상에 해당 되지 않고 자유도가 많은 Trimmed body와 Acoustic Cavity를 합쳐서 한 개의 Structure-Acoustic Coupled Super-Element로 만들었으며, Front Cradle도 Super-Element로 만들었다. 이에 반해 Chassis, Bushing, Driveline Component들은 자유도가 크지 않고, 최적화를 위한 설계 변수들로 사용하기 위해서 Detail FE Model을 사용하였다.

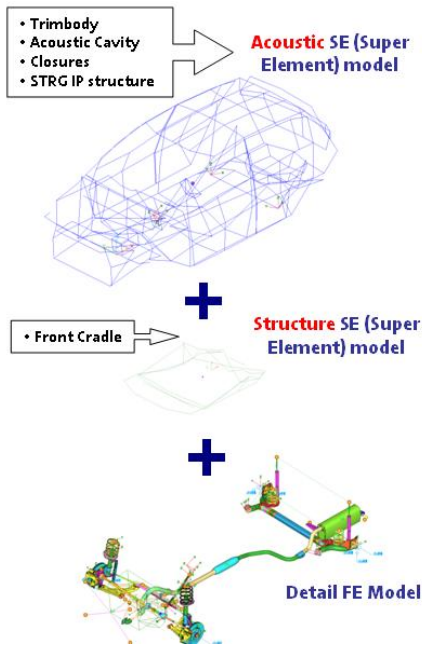


Fig. 2 Total Vehicle Model with CMS Model

2.2 CMS Model 검증

Road Noise 해석 시 소요되는 시간을 CMS Model을 사용한 경우와 Model Reduction없이 FE-Model만을 사용한 경우에 대해서 Table 2에 비교하였으며, 이 두 Model에 대한 Road noise FRF 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. CMS Model을 사용하는 경우 FE Model만을 사용하는 경우보다 CPU 사용 개수를 반으로 줄였지만 해석 시간은 1/10으로 단축되었고, Road Noise 결과는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 생성된 CMS Model은 사용에 적합함을 알 수 있다.

Table 2 CMS & Full FE Model Comparison

Model Type	Full FE Model	CMS Model
No. of Node	1,761,786	494,125
No. of Element	1,654,296	321,819
No. of CPU	4	2
Solving Time(sec)	36,530	3,363

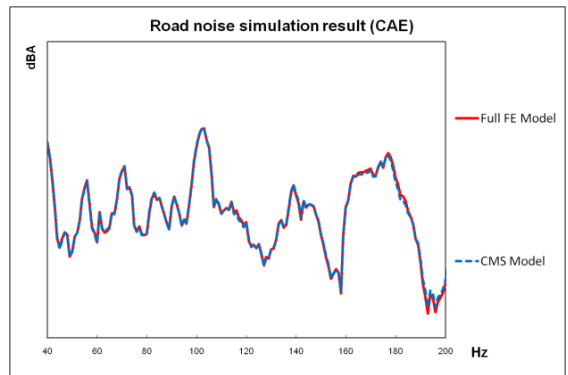


Fig. 3 CMS Model & Full FE Model Result Comparison

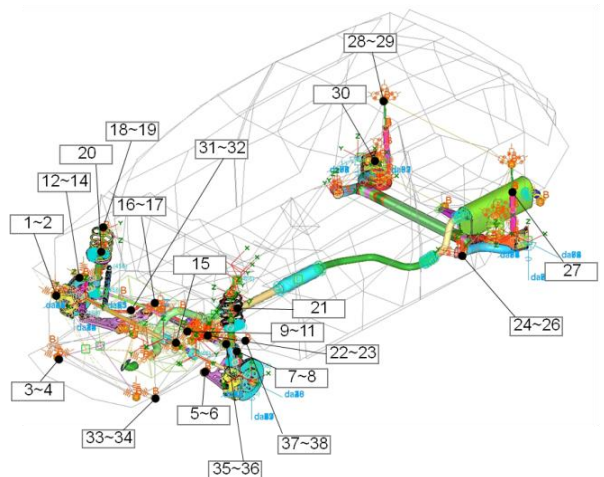


Fig. 4 Control Factors

3. DFSS Study

3.1 설계 인자 및 수준 선정

Chassis Interface Point에 해당되는 Bushing과 Spring의 Dynamic stiffness와 Front Cradle Mount Type을 고려하여, Fig. 4와 같이 총 38개의 설계인자(Control Factor)를 선정하였으며, 설계 가용 범위 내에서 수준(Level)을 설정하였다. 이 중에서 Front Cradle Mount Type은 BIW (Body in White)와 연결되는 방식에 따라 Bushing을 적용한 Isolated Mount Type과 Bolting으로 연결되는 Rigid Mount Type으로 2개의 수준으로 설정하였다. 따라서 연속 수준을 갖는 36개의 설계 인자와 이산 수준을 갖는 2개의 설계 인자로 구성하였다.

3.2 실험 계획법을 통한 예측 모델 생성

정도가 높은 근사화 모형을 구하기 위해서는 충분한 수의 해석 결과 값이 요구되며, 이를 위해 확장된 개념의 직교배열표를 이용하여 연속된 설계 변수 공간으로부터 근사화 모형을 구현할 수 있도록 하였다. 총 200번의 해석을 수행하였으며, Road Noise Sound Pressure Level dB(A) 결과 값들을 관심 주파수 대역에서 1Hz 간격으로 정리하여 전체 Noise Plot을 예측할 수 있도록 하였다.

반응표면 함수를 구하기 위해 Kriging 기법을 적용하였다. Kriging 기법은 예측하고자 하는 지점의 특성치를 알기 위해 이미 그 값을 알고 있는 측정점 값들의 선형조합뿐만 아니라, 주변의 많은 측정값을 통계적으로 분석하여 값을 추정한다. 즉 값을 추정할 때 실측 값과의 거리뿐만 아니라, 주변의 이웃한 각 실측 값 사이의 상관강도를 반영하기 위한 가중치를 적용한 공분산(Covariance) 값을 이용하여 해당 위치의 값을 추정하게 된다.^(4,5) Kriging에 의한 전역적 근사 모형은 아래와 같이 구성된다.

$$y(X) = m(X) + Z(X) \quad (6)$$

여기서 $y(X)$ 는 구하고자 하는 함수이며, $m(X)$ 는 알고 있는 함수이며 다항함수(Polynomial function)로 표현된다. $Z(X)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률변수이며, Kriging이 각 데이터 점들을 보간 할 수 있도록 국소적인 변동을 만들어내는 부분으로 응답모델의 불확실성을 나타내준다. 다음 식은 $Z(X)$ 의 공분산(Covariance)을 나타내는 식이다.

$$Cov[z(X^i), Z(X^j)] = \sigma^2 R([R(X^i), X^j]), i, j = 1, \dots, n \quad (7)$$

식(7)에서 R 은 상관행렬이며 $R(X^i, X^j)$ 는 실험데이터 내 임의의 두 점 X^i 와 X^j 사이의 상관함수이다. 이를 통해 n 개의 실험점의 평균제곱오차(Mean Squared Error)가 최소가 되게 함으로써 보간 하게 된다.

Fig. 5는 Kriging 함수의 특징을 보여주는 예제로써, 두 변수에 대해 근사화 함수에 따라 예측한 Contour를 비교한 것이다. 왼쪽 상단의 값이 두 변수에 대한 실측 함수이고, 나머지 3개는 Kriging, Quadratic, TPS(Thin-Plate Spline) 기법을 사용하여 주어진 21개의 실측 Data로부터 근사 함수를 추정한 것이다. 결과적으로 Kriging 기법은 비선형 특징을 갖고 있는 함수에서도 정도가 높은 근사값을 추정할 수 있음을 알 수 있다.⁽³⁾

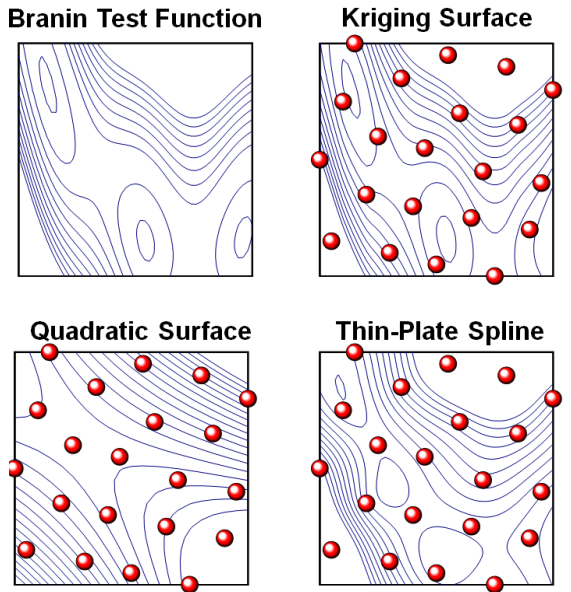


Fig. 5 Contours Comparison of Test Function

3.3 분산분석(ANOVA) 및 잡음 인자 선정

분산분석을 통해 Target을 넘는 Frequency(Hz)대역에 대해 기여도가 높은 설계인자들을 선별하였다. Fig. 6은 Road Noise Plot과 각 Peak 값들에 대하여 기여도가 높은 설계인자들을 나타낸 것이다. 특히 120Hz를 기준으로 120Hz이하에서는 Rear Trailing Arm Bushing Stiffness와 Front Suspension Spring 재질의 기여도가 높으며, 120Hz 이상에서는 Front Cradle과 BIW을 연결하는 Mount Type의 기여도가 높음을 알 수 있다.

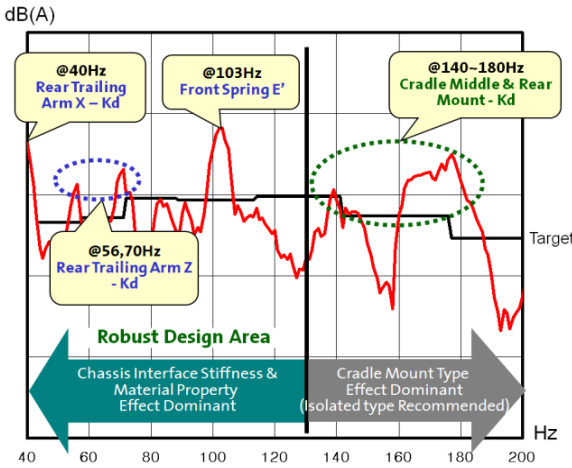


Fig. 6 Road Noise Plot & Main Contributor

기여도가 높은 설계인자인 Trailing Arm Bushing Stiffness 와 Front Suspension Spring재질에 대하여 잡음인자(Noise Factor)를 고려하였다. Rubber Bushing과 Chassis Suspension Steel Spring의 제작과정에서 발생하는 일반적인 재질의 산포 값을 고려하면 Table 3 과 같이 잡음인자 범위를 설정할 수 있다. 선별된 인자들은 120Hz 이하의 Peak 값들에 영향을 주고 있으므로 120Hz 이하를 강건설계 범위로 설정하였다.

Table 3 Noise Factors

Noise Factor	Lower Boundary	Upper Boundary
FRT SPRING Young's Modulus	-15%	+15%
RR Trail X-dir Dynamic Stiffness	-15%	+15%
RR Trail Z-dir Dynamic Stiffness	-15%	+15%

3.4 Parameter Diagram

주어진 설계인자와 잡음인자를 P-Diagram으로 정리하면 Fig. 7과 같다. Signal은 60KPH Coarse Road를 주행할 시 Wheel Spindle에 입력되는 Force이며, 1개의 입력 값만 고려되므로 정특성 문제로 정의할 수 있다. 그리고 Road Noise(dBA)를 저감시키는 것이 목적이므로 망소 특성 문제(Smaller the Better)문제로 볼 수 있다. 결국 주어진 Input Signal에 대해 Chassis interface Point 인자들의 강건 최적화를 통해 Vehicle Structure의 Road Noise Response Sensitivity를 낮추는 문제로 요약된다.

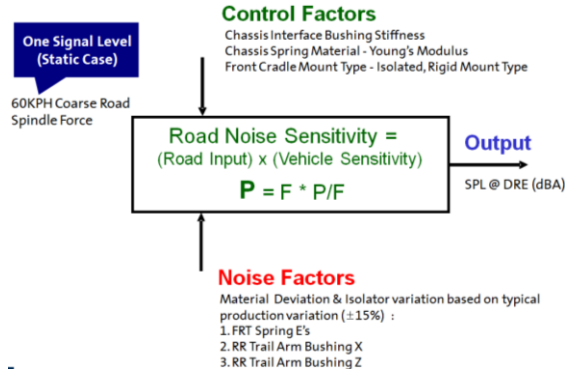


Fig. 7 P-Diagram (Parameter Diagram)

3.5 95%-ile 최적 설계

실험계획법을 통해 구한 반응표면 함수를 이용하여 최적설계를 수행하였다. 목적함수는 Road Noise 저감을 최대로 하는 것이고, 제약조건은 Road Noise 허용치이다. 최적 설계는 2단계로 나누어 진행되었다.

첫 번째 단계에서는 실험계획법으로부터 반응표면 함수를 구하고 분산분석을 수행하여 기여도가 높은 인자들을 선정한다. 이는 잡음인자를 고려해야 할 설계인자들을 줄임으로써 최적 설계에 소요되는 시간 및 정보량을 최소화 하기 위함이다.

두 번째 단계는 선정된 설계 인자들의 잡음 인자에 의한 영향을 고려하기 위하여, Monte Carlo 기법을 이용하여 통계적 확률모형(Stochastic Model)을 만들어 각 설계점에 대한 분산 정보를 얻는다. 그리고 그 모형에서 95%(95th Percentile)에 해당하는 값이 Road Noise 허용치를 만족할 수 있도록 최적 설계를 수행하였다. 즉 각 수준 조합에 대한 단일 결과값을 이용한 최적 설계가 아니라, Fig. 8과 같이 각 수준 조합에서 잡음인자에 의한 분포까지 고려한 확률모형을 대상으로 최적 설계를 수행함으로써 강건성을 확보하는 것이다.

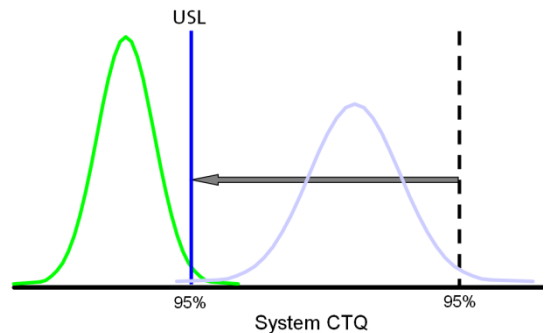


Fig. 8 95%-ile of Performance Distribution Optimization

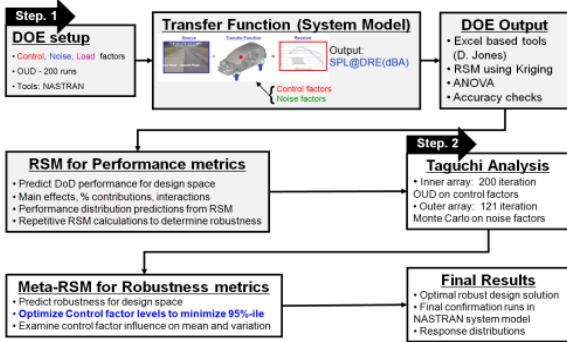


Fig. 9 DFSS Process

95%-ile 방법에서는 실험계획법의 각 실험(Inner Array)마다, 확률모델을 만들어 주기 위한 Monte Carlo Simulation(Outer Array)이 실행되므로, 본 해석에서는 총 실험횟수가 기하 급수적으로 증가하게 된다. 그래서 첫 번째 단계에서 생성한 반응표면 함수로부터 구한 근사모델을 이용하여 최적 설계를 수행하였으며, 이 과정들을 정리하면 Fig. 9와 같다.

3.6 결과 및 강건성 평가

잡음인자 영향에 대한 고려 없이 수행된 일반적인 최적 설계(Normal Optimization) 결과와 잡음인자를 고려한 95%-ile 방법에 따른 최적 설계 결과를 정리하면 각각 Fig.10 및 Fig. 11과 같다. 각 그림은 40Hz, 56Hz, 70Hz, 103Hz Peak 값들에 대해 잡음인자 영향에 의한 결과 값의 분포까지 고려하여 나타낸 것이다. Fig. 12는 강건 최적 설계 전후의 Road Noise Overall Plot을 최종적으로 비교한 것이다.

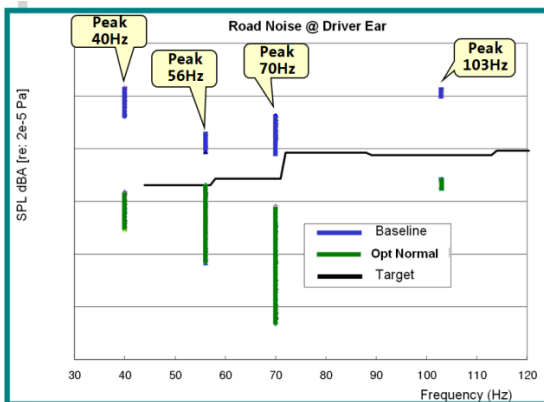


Fig. 10 Normal Optimization Result

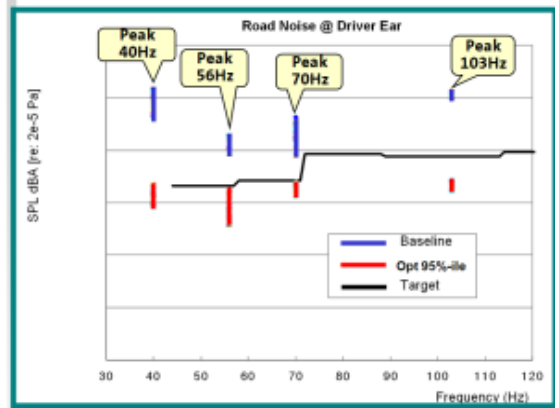


Fig. 11 95%-ile Optimization Result

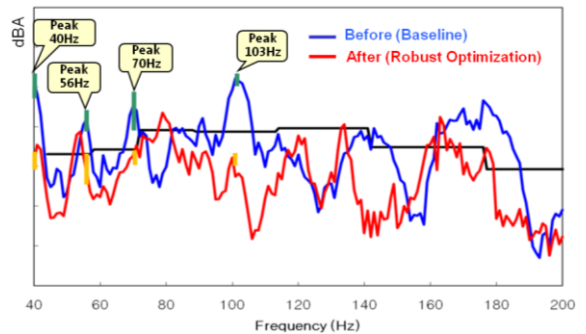


Fig. 12 Road Noise Overall Plot

Fig. 10의 경우 최적 설계 전과 비교할 때 Road Noise는 전반적으로 개선이 되었지만 재질의 산포에 따라 56Hz와 70Hz 결과 값의 산포가 증가하였다. 이에 반해 95%-ile의 결과의 경우 Fig. 11에서와 같이 Road Noise가 개선이 되면서, 값의 산포가 개선 전 대비 비슷하거나 줄어들었다. 이를 신호 대 잡음비로 정리하면 Table 4와 같다. 95%-ile 방법으로 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)가 일부 개선되었음을 알 수 있다.

Table 4 Signal to Noise Ratio

	S/N (40Hz)	S/N (56Hz)	S/N (70Hz)	S/N (103Hz)
Base	-32.02	-25.22	-31.38	-17.12
Normal Optimization	-27.66	-39.66	-43.02	-21.16
95%-ile Optimization	-27.94	-32.58	-24.60	-21.18

본 결과에 대해 고찰해 보면, 95%-ile Optimization 결과를 적용하는 경우, Fig. 13과 같이 Rear Trailing Arm Bushing의 Dynamic Stiffness가 현재 사양 대비 증가 되면서 비록 Road Noise가 소폭 증가하지만

Road Noise 허용치를 만족하면서, 산포가 줄어든 강건한 결과 값을 얻을 수 있다. 즉 Road Noise 측면에서는 강건하면서 차량의 Handling 성능에는 유리하도록 좀더 Stiff한 Rear Trailing Arm Bushing Stiffness 값을 설정할 수 있다.

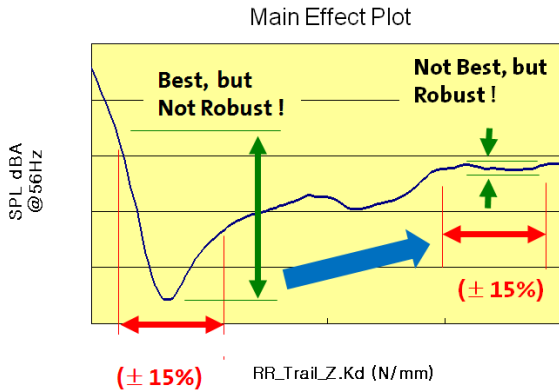


Fig. 13 Rear Trailing Arm Bushing Main Effect Plot

4. 결 론

CAE 기반 DFSS Study를 수행하여, 강건 최적 설계를 수행함으로써 최적의 Chassis Dynamic Mount Stiffness 조합을 구현하였다. CMS 기법을 이용하여 실험계획법을 수행하는 데 필요한 시간을 줄였으며, Kriging 기법을 적용하여 반응표면 함수를 구하였다. 반응표면 함수로부터 구한 확률모델을 95%-ile 최적 설계 기법에 이용하여 강건 최적 설계를 수행하였다. 본 과제에 대한 결론은 아래와 같다.

- 1) 95%-ile 기법을 통해 최적 설계를 수행한 결과, 그렇지 않은 경우 대비 신호 대 잡음비가 전반적으로 개선 되었고, Road Noise도 목표치를 만족하는 수준으로 저감되었다.
- 2) 강건 최적 설계를 통해 Rear Trailing Arm Bushing Dynamic Stiffness를 좀더 Stiff하게 설정할 수 있었으며, 이는 Handling 성능도 같이 높일 수 있는 기회를 제공한다.
- 3) Model Reduction 방법 중의 하나인 CMS 기법을 도입함으로써, 실험계획법에 소요되는 시간을 1/10로 절감할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Lee, K.H. and Park, G.J. "A Global Robust Optimization Using the Kriging Based Approximation Model", KSME, Vol 29, No.9 ,pp.1243~1252, 2005.
- 2) Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J.and Wynn, H.P., "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol.4, No.4, pp.409~435. 1989
- 3) Jones, Donald R., "Variable Screening and Robust Design Using Sequential Latin Hypercube Sampling and Kriging Response Surfaces", GM CAE Conference, 2002.
- 4) Hicks, John A., "Sigma V6 Diesel Idle Noise and Vibration Sensitivity" GM DFSS Project. 2006.
- 5) Sim, H.J., Park, S.G, Joe, Y.G, and Oh, J.E., "Design of Low Noise Engine Cooling Fan for Automobile using DACE Model", KSNVE, Vol.19, No.5, pp.509~515, 2009.
- 6) Sim, H.J., Park, S.G, Kim, H.S., and Oh, J.E., "Analysis of the Front Disk Brake Squeal Using Kriging Method", KSNVE, Vol.18, No.10, pp.1042~1048, 2008.