

로드 노이즈 개선을 위한 전산응용해석 기반 DFSS 연구

CAE-based DFSS Study for Road Noise Reduction

권 우 성†·유 봉 준*·김 병 훈*·김 인 동*

Woosung Kwon, Bongjun Yoo, Byounghoon Kim and Indong Kim

(2011년 5월 26일 접수 ; 2011년 6월 24일 심사완료)

Key Words : DFSS(design for six sigma), CMS(component mode synthesis method, 구분모드합성법), 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. 해석 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 로드 노이즈(road noise) 개선을 위해서 유한요소법을 이용한 전산응용해석을 통한 개선작업이 필요하게 되었다. 이 과정의

로드 노이즈는 전달 경로 측면에서 구조 전달음에 해당되며, 이는 타이어가 노면의 요철 부분을 주행할 때에 발생한 탄성진동 에너지가 현가장치와 차체를 경유하여 차실내에 전달되어 음압이 발생하는 경우이다. 따라서, 현가장치의 각 부분별 동강성 특성들이 노면으로부터 들어오는 진동 및 소음의 절연과 관련된 주요한 인자가 되며, 이 인자들을 사용한 로드 노이즈 개선연구가 필요하게 되었다.

이 연구에서는 이러한 인자들에 대한 강건 최적화를 위해 전산응용해석 기반 DFSS(design for six sigma) 기법을 도입하여, 실험계획법을 바탕으로 한 근사 최적 설계 기법을 적용하여 최적의 현가장치 동강성 조합을 제시하였다. 근사화 작업을 위해 통계적 분석 방법의 하나인 반응표면 분석법을 이용하였다^(1,5). 이 과정에서는 주어진 설계 영역 안에서 직교배열표를 이용한 실험계획법을 통해 데이터를 수집하였고, 크리깅(Kriging) 기법을 적용하여 근사화

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

* GM Korea Company

이 논문의 일부는 2011년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

함수를 도출하여 이를 최적화에 이용하였다^(1,2,6). 그리고 분산분석을 수행함으로써 각 설계 변수들의 기여도를 파악하였다. 강건성 확보를 위해 95 %-ile (95th percentile) 기법을 최적화 과정에 적용함으로써, 신호 대 잡음비가 높은 조합을 구하였다⁽³⁾.

실험계획법을 수행하는 과정에서, 정도가 높은 근사화 함수를 구하기 위해서는 다수의 해석작업이 요구 된다. 이에 수반되는 해석 시간을 줄이기 위해 모델축약 방법 중의 하나인 구분모드합성법(CMS, component mode synthesis)을 사용하여, super-element를 만들고 이를 반복적인 해석작업에 이용하였다⁽⁴⁾. 해석 작업에는 MSC.NASTRAN을, 실험 계획법 및 반응표면 기법을 적용한 최적화 과정에는 자체 개발한 최적화 프로그램을 사용하였다.

2. Superelement 생성 및 검증

2.1 구분모드합성법을 이용한 Superelement 생성

구분모드합성법은 자유도가 많고 복잡한 시스템을 부구조화기법을 이용하여 축약된 질량, 강성 및 감쇠 행렬을 갖는 superelement들로 만들고 이를 해석에 이용함으로써, 해석 시간 및 비용을 단축하는 방법이다. 현재 FEM에서 사용되고 있는 주요 모델축약법으로는 Guyan 축소법과 구분모드합성법으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 Guyan 축소법은 정적 해석에 사용되는 반면, 구분모드합성법은 모달 해석(modal analysis)과 주파수 응답해석과 같은 동적해석에 사용된다.

이 과제에서는 로드 노이즈 해석의 빠른 수행을 위하여 구분모드합성법을 Fig. 1에 보인 바와 같이 2단계로 나누어 적용하였다.

첫 번째 단계는 차량의 주요 부분들을 구분모드합성법을 통해, superelement로 만들고 외부파일에 저장하는 단계이다. NASTRAN에서는 외부 저장 파일로써 *.asm, *.pch, *.master 형식을 지원하고 있으며 각 파일에 저장되는 내용 및 사용방법은 Table 1과 같다.

모델축약 과정에서 사용되는 고유치 문제는 다음과 같이 수식화 할 수 있다.

$$Ku = AMu \quad (1)$$

- K : Stiffness matrix
- M : Mass matrix
- λ : Eigen value
- u : Displacement vector

여기에서 행렬들을 exterior DOF(degree of freedom)와 interior DOF로 분류해서 다시 정리하면

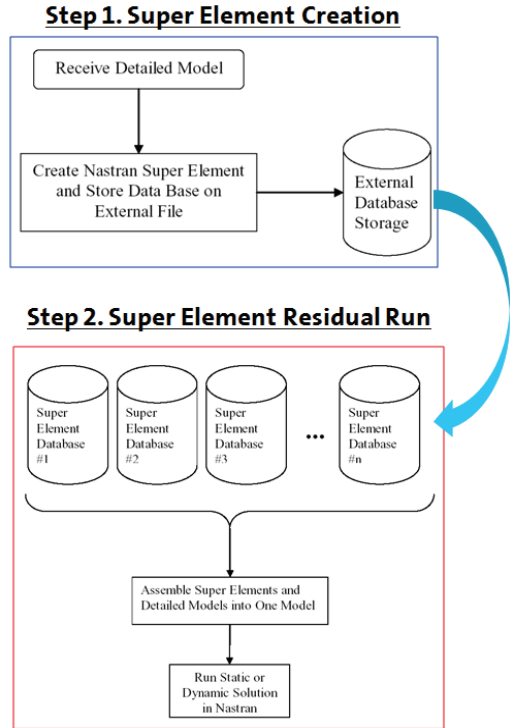


Fig. 1 Superelement build process

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 PLOTTEL element QSET	Nothing can come after the first included *.pch file, except more included *.pch files
*.master	Superelement database	Only if the "ESTSEOUT" option "MATRIXDB" is used

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 u 에 다시 변환행렬을 적용해보면 식 (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 부분모델의 정규 모드를 얻는다. 이 결과는 constraint mode에 의해 보완하게 되는데, constraint mode란 각 exterior DOF에 단위 변위를 가하고 나머지 exterior DOF는 고정된 상태에서 얻은 모드를 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 각 부분모델의 정규 모드를 생성한다.

이 과정에서 변환행렬 T 는 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

식 (3)식 (1)식에 적용하면 최종적으로 축약된 모델의 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 앞서 구한 superelement들과 나머지 부분들을 조합하여 필요한 해석을 수행하는 과정이다. 이 과정은 residual running 과정으로서 앞서 생성된 외부저장 파일들을 추가하는 점을 제외

하고는 일반적인 해석 방법과 동일하다.

Fig. 2와 같이 최적화 대상에 해당 되지 않고 자유도가 많은 trimmed body와 실내음향 cavity를 합쳐서 한 개의 structure-acoustic coupled superelement로 만들었으며, 프런트 크래들(front cradle) 역시 superelement로 만들었다. 이에 반해 현가장치, 마운트 부싱, 구동계들은 자유도가 크지 않고, 최적화를 위한 설계 변수들로 사용하기 위해서 축소되지 않은 FE model을 그대로 사용하였다.

2.2 Superelement 검증

로드 노이즈 해석 시 소요되는 시간을 superelement를 사용한 경우와 모델축약 없이 해석한 경우에 대해서 Table 2에 비교하였으며, 이 두 모델에 대한 로드 노이즈 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2에 따르면 superelement를 사용하는 경우는 그렇지 않은 경우보다 CPU 사용 개수를 반으로 줄였음에도 불구하고, 해석 시간은 1/10으로 단축되었고, 해석 결과는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 생성된 superelement들은 축소 모델로서 사용에 이상이 없는 것으로 판단되며, 반응표면 분석법을 통한 예측 모델을 만들기 위한 다수의 해석에 이용되었다.

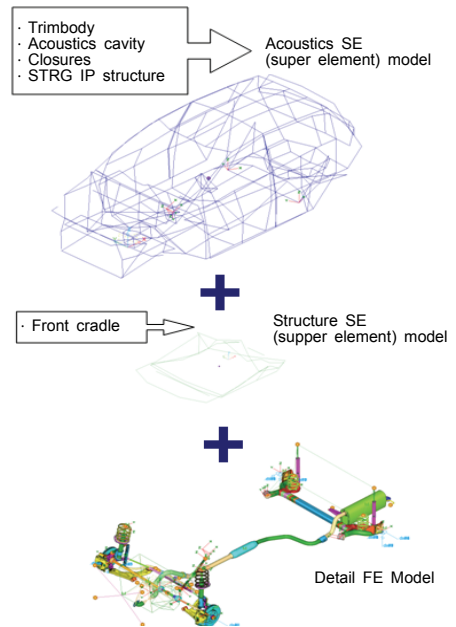


Fig. 2 Total vehicle model with superelement model

Table 2 Superelement & full FE model comparison

Model type	Full FE model	Superelement 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

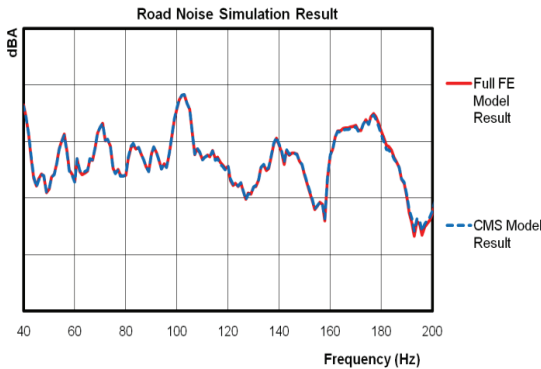


Fig. 3 CMS & full FE model road noise result comparison

3. DFSS 기법을 이용한 강건 최적설계

3.1 설계 인자 및 수준 선정

현가장치와 차체의 연결부위에 해당되는 마운트 부싱, 코일스프링 재질의 동강성과 프런트 크래들 체결 방식을 고려하여, Fig. 4와 같이 총 38개의 제어인자를 선정하였으며, 설계 범위 내에서 수준을 설정하였다. 이 중에서 프런트 크래들 체결 방식은 차체와 연결되는 방법에 따라 고무 부싱을 적용한 절연 방식과 볼트로 연결되는 직접 체결 방식으로 2개의 이산 수준으로 설정하였다. 따라서 연속 수준을 갖는 36개의 설계 인자와 이산 수준을 갖는 2개의 설계 인자로 구성된다.

3.2 실험 계획법을 통한 예측 모델 생성

정도가 높은 근사화 모형을 구하기 위해서는 충분한 수의 해석 결과 값이 요구된다. 이를 위해 충전 (space filling) 방식인 확장된 개념의 직교 배열표를 이용하여 연속된 설계 변수 공간으로부터 근사화 모형을 구현할 수 있도록 하였다. 총 200번의 해석을 수행하였으며, 로드 노이즈 결과 값들을 1 Hz 간격

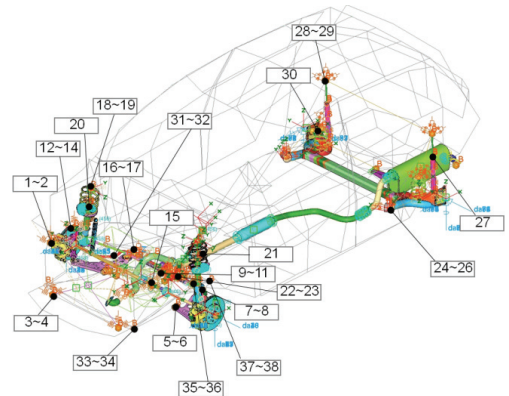


Fig. 4 Control factors

으로 기록하여 반응표면 분석법을 통해 예측 모델을 생성함으로써 관심주파수 대역에서 소음도를 예측할 수 있도록 하였다.

반응표면 함수를 구하는 과정에서 크리깅 기법을 적용하였다. 크리깅 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 상관관도를 반영하기 위한 가중치를 적용한 공분산(covariance) 값을 이용하여 해당 위치의 값을 추정하게 된다^(4,5). 크리깅에 의한 전역적 근사 모형은 아래와 같이 구성된다.

$$y(X) = m(X) + Z(X) \tag{6}$$

여기서 $y(X)$ 는 구하고자 하는 함수이며, $m(X)$ 는 알고 있는 함수이며 다항함수로 표현된다. $Z(X)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률 변수이며, 크리깅이 각 데이터 점들을 보간 할 수 있도록 국소적인 변동을 만들어내는 부분으로 응답 모델의 불확실성을 나타내준다. 다음 식은 $Z(X)$ 의 공분산을 나타내는 식이다.

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

식 (7)에서 R 은 상관행렬이며 $R(X^i, X^j)$ 는 실험 데이터 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

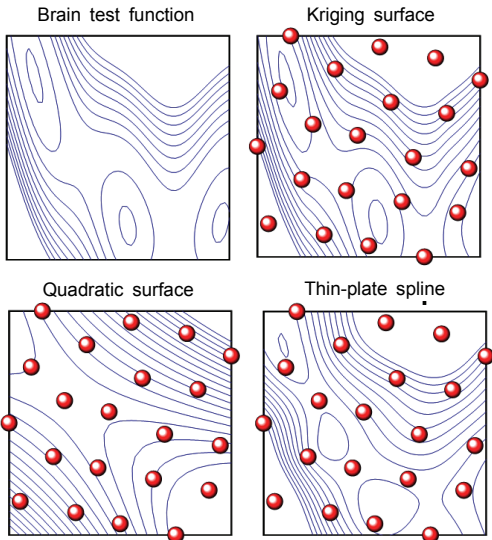


Fig. 5 Contours comparison of test function

하게 된다.

Fig. 5는 크리깅 함수의 특징을 보여주는 예제로써, 두 변수에 대해 근사화 함수에 따라 예측한 등고선을 비교한 것이다. 왼쪽 상단의 값이 두 변수에 대한 실측 함수이고, 나머지 3개는 크리깅, quadratic, TPS(thin-plate spline) 기법을 사용하여 주어진 21개의 실측 자료로부터 근사 함수를 추정한 것이다. 결과적으로 크리깅 기법은 비선형 특징을 갖고 있는 함수에서도 정도가 높은 근사값을 추정할 수 있음을 알 수 있다⁽³⁾.

3.3 분산분석(ANOVA) 및 잡음 인자 선정

분산분석을 통해 로드 노이즈 제한치를 초과하는 주파수 대역에 대해 기여도가 높은 제어인자들을 선별하였다. Fig. 6은 각 피크 값들에 대하여 기여도가 높은 제어인자들을 나타낸 것이다. 특히 120 Hz를 기준으로 120 Hz 이하에서는 rear trailing arm 부싱의 동강성과 앞 현가장치 코일스프링 재질의 기여도가 높으며, 120 Hz 이상에서는 프런트 크래들과 차체를 연결하는 체결 방식의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

우선적으로 기여도가 높은 인자들에 대한 잡음 효과를 고려하기 위하여 rear trailing arm 부싱 동강성과 앞 현가장치 코일스프링의 영률(Young's modulus)을 잡음인자로 선정하였다. 고무 부싱의 동강성과 강재 코일스프링의 영률은 제작과정에서

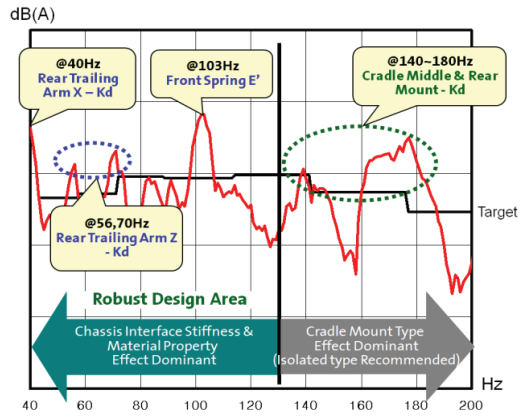


Fig. 6 Road noise plot & main contributor

Table 3 Noise factors and boundary

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 %

필연적으로 재질의 산포가 발생되며, 일반적으로 발생하는 산포 범위를 고려하여 Table 3과 같이 잡음인자 범위를 설정하였다. 선별된 인자들은 주로 120 Hz 이하의 소음도에 영향을 주고 있으므로, 120 Hz 이하의 로드 노이즈를 강건설계 적용 범위로 설정하였다.

3.4 Parameter Diagram

주어진 제어인자와 잡음인자를 P-diagram으로 정리하면 Fig. 7과 같다. 신호는 60 KPH 속도로 거친 노면을 주행할 때 wheel spindle에 입력되는 가진력이며, 1개의 입력 값만 고려되므로 정특성 문제로 정의할 수 있다. 그리고 로드 노이즈를 저감시키는 것이 목적이므로 망소 특성에 해당된다. 결국 주어진 입력 신호에 대해 현가장치 제어인자들의 강건 최적화를 통해 차량의 로드 노이즈 민감도를 낮추는 문제로 정의할 수 있다.

3.5 95%-ile 최적 설계

실험계획법을 통해 구한 반응표면 함수를 이용

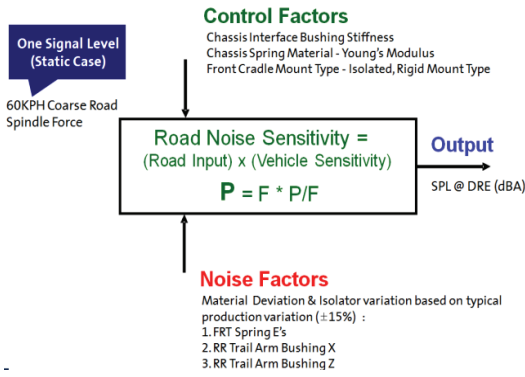


Fig. 7 P-diagram(parameter diagram)

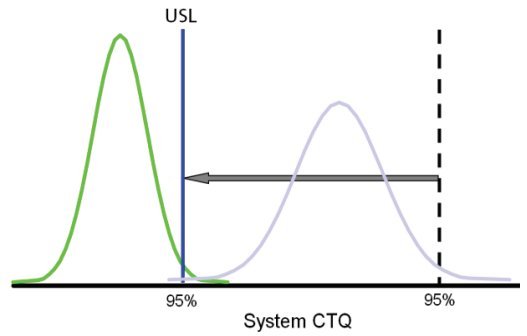


Fig. 9 95 %-ile of performance distribution optimization

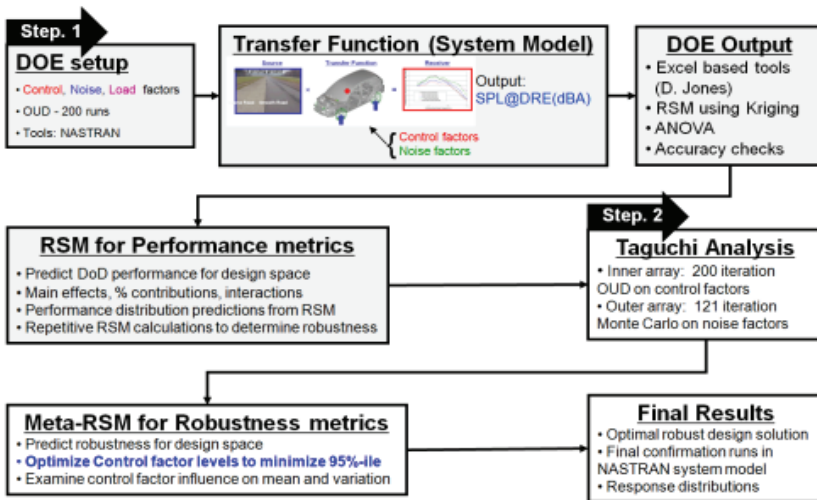


Fig. 8 Robust optimization process

하여 강건 최적설계를 수행하였다. 목적함수는 로드 노이즈 저감을 최대로 하는 것이고, 제약조건은 로드 노이즈 허용치이다. 강건 최적설계는 Fig. 8과 같이 2단계로 진행되었다.

첫 번째 단계에서는 실험계획법으로부터 반응표면함수를 구하고 분산분석을 수행하여 기여도가 높은 인자들을 선정한다. 이는 잡음인자를 고려해야 할 제어인자들을 줄임으로써 강건 최적설계에 소요되는 시간 및 정보량을 최소화하기 위함이다.

두 번째 단계는 선정된 설계 인자들의 잡음 인자에 의한 영향을 고려하기 위하여, 몬테카를로 (Monte Carlo) 시뮬레이션을 이용하여 통계적 확률 모형(stochastic model)을 만들어 각 설계점에 대한 분산 정보를 얻는다. 그리고 그 모형에서 95% (95th percentile)에 해당하는 값들까지 로드 노이즈

허용치를 만족할 수 있도록 최적 설계를 수행하였다. 이것은 각 수준 조합에 대한 단일 결과값을 이용한 최적 설계가 아니라, Fig. 9와 같이 각 수준 조합에서 잡음인자에 의한 통계적 확률모형을 대상으로 최적 설계를 수행함으로써 강건성을 확보하는 기법이다.

95 %-ile 방법에서는 실험계획법의 각 실험마다, 확률모형을 만들어 주기 위한 몬테칼로 시뮬레이션이 실행되므로, 이 해석에서는 총 실험횟수가 기하급수적으로 증가하게 된다. 그래서 첫 번째 단계에서 생성된 반응표면 함수로부터 구한 근사모형을 이용하여 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다.

3.6 결과 및 강건성 평가

잡음인자 영향에 대한 고려 없이 수행된 일반적인

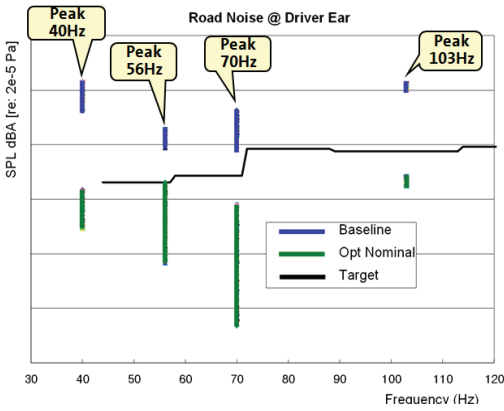


Fig. 10 Normal optimization result

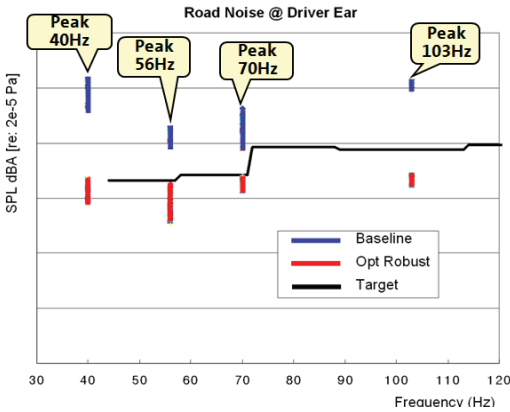


Fig. 11 95 %-ile optimization result

최적 설계 결과와 잡음인자를 고려한 95 %-ile 방법에 따른 최적 설계 결과를 정리하면 각각 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 각 그림은 제한치를 넘는 40 Hz, 56 Hz, 70 Hz, 103 Hz 값들에 대해, 잡음인자 영향에 의한 결과 값의 분포까지 고려하여 나타낸 것이다. Fig. 12는 강건 최적 설계 전후의 로드 노이즈 결과를 전체 주파수 영역에 대하여 비교한 것이다.

Fig. 10의 경우 최적 설계 전과 비교할 때 로드 노이즈는 전반적으로 개선이 되었지만 재질의 산포에 따라 56 Hz와 70 Hz 결과 값의 산포가 증가하였다.

이에 반해 95 %-ile 결과의 경우 Fig. 11에서와 같이 로드 노이즈 개선과 더불어, 값의 산포가 개선 전에 비해 비슷하거나 줄어들었다. 이를 신호 대 잡음 비로 정리하면 Table 4와 같이 95 %-ile 방법을 적용했을 때 신호 대 잡음비가 일부 주파수 대역에서 개선되었음을 알 수 있다.

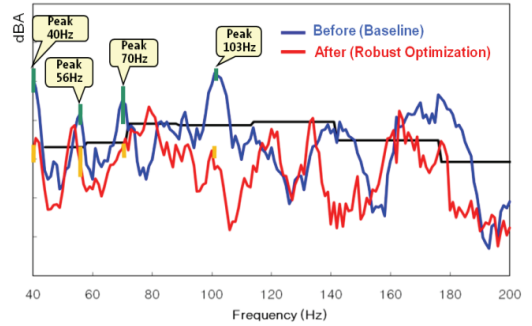


Fig. 12 Road noise overall level improvement

Table 4 Signal to noise ratio comparison

	S/N (40 Hz)	S/N (56 Hz)	S/N (70 Hz)	S/N (103 Hz)
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

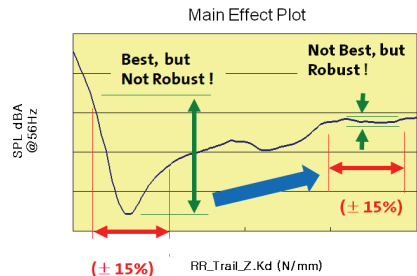


Fig. 13 Rear trailing arm bushing main effect plot

결과에 대해 고찰해 보면, 95 %-ile 강건 최적설계 결과를 적용하는 경우, Fig. 13과 같이 rear trailing arm 부싱의 동강성이 현재 사양 대비 증가함으로써 로드 노이즈가 소폭 증가하지만, 제한치를 만족하는 범위에서 산포가 줄어든 강건한 최적값을 얻을 수 있다. 이 결과로부터 로드 노이즈 측면에서는 강건하면서 차량의 조종성과 내구성에 좀더 유리하도록 동강성이 높은 rear trailing arm 부싱을 선정하는 것이 가능하다.

4. 결 론

전산응용해석 기반 DFSS 기법을 적용하여, 강건 최적 설계를 수행함으로써 최적의 현가장치 동강성

조합을 구현하였다. 크리깅 기법을 적용하여 반응표면 함수를 구하였으며, 반응표면 함수로부터 구한 확률모델을 95 %-ile 최적 설계 기법에 이용하여 강건 최적 설계를 수행하였다. 이 과제에 대한 결론은 아래와 같다.

(1) 95 %-ile 기법을 적용한 강건 최적설계를 수행한 결과, 그렇지 않은 경우 대비 신호 대 잡음비가 전반적으로 개선되는 현가장치를 구현할 수 있었으며, 로드 노이즈도 목표치를 만족하는 수준으로 감소하였다.

(2) 강건 최적 설계를 통해 rear trailing arm 부싱 동강성을 좀더 높게 설정할 수 있었으며, 이는 조종성과 내구성도 같이 개선할 수 있는 기회를 제공한다.

(3) 실험 계획을 수행하는 과정에서 모델축약법 중의 하나인 구분모드합성법을 이용한 superelement를 사용함으로써, 해석 결과의 정확도를 유지하면서 해석에 소요되는 시간을 1/10로, CPU 사용량은 반으로 줄일 수 있었다. 특히 차체구조물과 실내음향 cavity를 합성 하여 한 개의 superelement를 생성하는 기법의 도입으로, 앞으로 소음 해석 시 많은 응용이 예상된다.

참 고 문 헌

(1) Lee, K. H. and Park, G. J., 2005, A Global

Robust Optimization Using the Kriging Based Approximation Model, Transactions of the KSME, Vol. 29, No. 9, pp. 1243~1252.

(2) Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P., 1989, Design and Analysis of Computer Experiments, Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp. 409~435.

(3) Jones, D. R., 2002, Variable Screening and Robust Design Using Sequential Latin Hypercube Sampling and Kriging Response Surfaces, GM CAE Conference.

(4) Mallikarjuna, B., 2009, Superelement, Component Mode Synthesis and Automated Multilevel Substructuring for Rapid Vehicle Development, SAE International Journal of Passenger Cars, Vol. 1, No.1, pp. 268~279.

(5) Sim, H. J., Park, S. G., Joe, Y. G. and Oh, J. E., 2009, Design of Low Noise Engine Cooling Fan for Automobile Using DACE Model, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 5, pp. 509~515.

(6) Sim, H. J., Park, S. G., Kim, H. S. and Oh, J. E., 2008, Analysis of the Front Disk Brake Squeal Using Kriging Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 1042~1048.