

라틴방격법과 인공지능망 기반 브레이크 스켈 노이즈의 다목적 최적설계에 관한 연구

A Study on the Multi-objective Optimization of Brake Squeal Noise Based on Latin Square Method and Neural Networks

권성진† · 김찬중* · 이동원* · 신천세* · 배철용* · 이봉현* · 김문성**

Seong-Jin Kwon, Chan-Jung Kim, Dong-Won Lee, Chun-Se Shin, Chul-Yong Bae, Bong-Hyun Lee and Mun-Sung Kim

1. 서 론

자동차 브레이크 시스템(brake system)의 스켈 노이즈(squeal noise)는 디스크와 패드 사이의 가변적인 수직항력 및 마찰력에 따른 동적 불안정성(dynamic instability)에 기인하여 발생한다. 이는 자동차의 제동 말기에 발생하는 고주파 소음으로 운전자에게 심한 불쾌감과 브레이크 시스템의 신뢰성을 저하시키는 주요 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 대상 디스크 브레이크 시스템에 대한 유한요소 모델 기반 복소 고유치 해석(complex eigenvalue analysis)을 수행하여 스켈 노이즈 해석 기술을 개발하였다. 또한 브레이크 다이내모미터(brake dynamometer)를 이용하여 실험적인 방법으로 스켈 노이즈 발생 주파수 대역을 확인하여 해석적인 방법의 검증을 수행하였다. 이를 바탕으로 스켈 노이즈에 영향을 미치는 다양한 설계변수(design variables)에 대한 추가적인 영향도 및 부품별 기여도 분석(contribution analysis) 등을 통하여 브레이크 시스템의 설계단계에서 활용할 수 있는 해석 기술을 개발하였다.

또한 앞서의 스켈 노이즈 해석, 검증 시험, 설계변수 영향도 분석, 부품별 기여도 분석을 바탕으로 본 연구에서는 스켈 노이즈 저감을 위한 최적설계(optimal design)를 수행하였다. 이를 위하여 Fig. 1과 같은 최적설계 프로세스 및 모델을 구성하였으며, 이는 대상 디스크 브레이크 시스템의 설계변수 선정, 실험계획법(Design of Experiment, DOE) 기반 샘플링, DOE에 따른 유한요소 모델 기반 스켈 노이즈 해석 및 결과 분석, EDM(Engineering Data Mining) 기반 최적 모델 분석, 설계변수 민감도 분석 등의 순으로 수행된다. 이를 통하여 궁극적으로 스켈 노이즈 저감을 위한 최적의 설계안을 도출하고자 하였다.

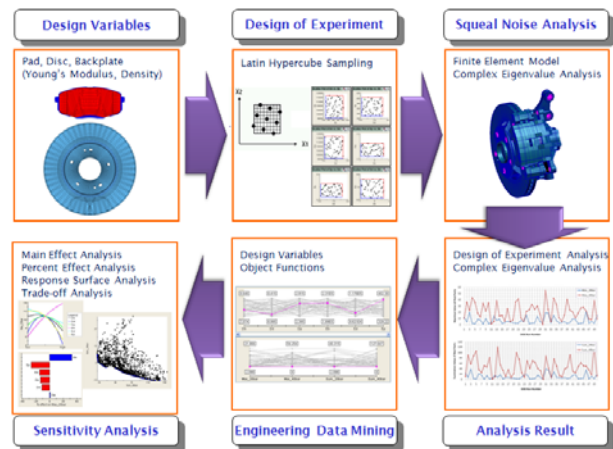


Fig. 1 Optimization process of brake squeal noise

2. 라틴방격법 기반 샘플링 및 민감도 분석

스켈 노이즈 저감을 위한 최적설계 설계변수의 선정은 총 10개의 설계변수에 따른 각각의 단일 변화(교호작용 제외)의 영향도 분석 결과를 이용하였다. 이를 통하여 스켈 노이즈에 영향을 상대적으로 크게 미치는 6개의 설계변수(디스크, 패드, 백플레이트의 탄성계수 및 밀도)를 최적설계 모델의 설계변수로 선정하였다. 또한 최적설계 모델의 목적함수는 복소 고유치 해석 결과에서 양의 실수부의 최대값과 양의 실수부 총합으로 2개를 선정하였다.

6개의 설계변수에 따른 DOE 기반 샘플링은 최적 라틴방격법(optimal latin square method)을 이용하여 총 50개의 조합을 선정하였다. 또한 제동조건(20bar, 40bar 제동압력)을 2가지로 선정하여 각각의 샘플링 및 스켈 노이즈 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 이를 통하여 최종적으로 선정한 DOE 샘플링은 30번째 설계변수 조합이며, 이는 2가지의 제동조건 모두를 최소화하는 결과로 분석되었다. 또한 이를 통하여 설계변수 민감도 분석을 수행하였으며, Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 주효과 분석(main effect analysis)을 Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 퍼센트 영향도 분석(percent effect analysis) 결과를 나타낸다.

† 교신저자: 자동차부품연구원
E-mail : sjkwon@katech.re.kr
Tel : (041) 559-3337, Fax : (041) 559-3070

* 자동차부품연구원
** 인지니어스 코리아

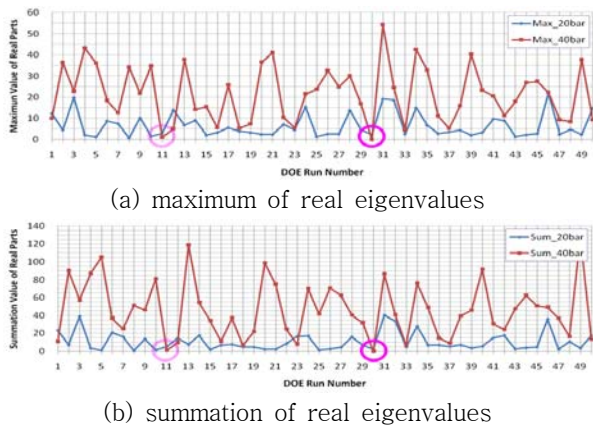


Fig. 2 Complex eigenvalue analysis by DOE sampling

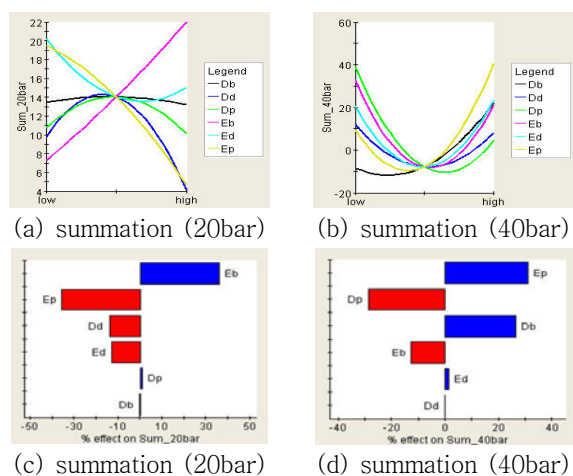


Fig. 3 Sensitivity analysis of design variables

3. 인공신경망 기반 다목적 최적설계

제동조건(20bar, 40bar 제동압력)에 따른 DOE 기반 샘플링 데이터를 활용하여 RBF 인공신경망(Radial Basis Function Neural Network) 기반 근사 모델을 구성하였다. 이는 스칼라 노이즈 해석이 유한요소 모델 기반이기 때문에 해석 시간이 상대적으로 오래 걸리는 관계로 근사 모델을 구성하여 추가적인 설계변수 민감도 및 목적함수의 상관관계를 규명하기 위함이다. 특히 본 연구에서 구성한 스칼라 노이즈 저감을 위한 최적설계는 제동조건이 2가지이기 때문에 다목적 최적설계(multi-objective optimization)문제로 정의할 수 있으며 이에 따른 특성을 분석하고자 하였다.

RBF 인공신경망 모델을 바탕으로 본 연구에서는 다목적 최적설계 문제의 접근을 위하여 다목적 유전자 알고리즘(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)을 이용한 최적화를 수행하였다. 적용한 다목적 유전자 알고리즘은 20 population을 가지는 100세대를 선정하여 근사모델 상에서 총 2,000번의 시뮬레이션을 수행하였다. 이에 따른 결과는 Fig. 4와 같으며, 검은색으로 표시한 지점이 MOGA를 이용

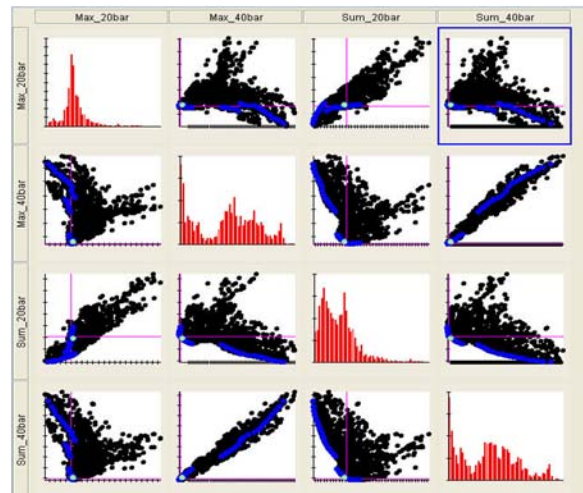


Fig. 4 Pareto optimum of multi-objective optimization

한 2,000번의 해석을 수행한 결과이며, 이 중에서 파란색으로 표기한 지점이 다목적 최적설계 문제의 해(solution)가 되는 파레토(pareto) 해 집단을 의미한다. 이를 통하여 2가지 제동조건(20bar, 40bar)에서 스칼라 노이즈 저감을 위한 다목적 최적설계 해를 검토할 수 있으며, 각각의 목적함수 관계를 분석할 수 있다.

각각의 제동조건에서 복소 고유치 해석의 실수부의 최대값과 실수부의 총합은 상대적으로 선형적인 관계를 가진다. 제동조건에 따라 복소 고유치 해석의 실수부의 최대값과 실수부의 총합을 비교해 보면 다목적 최적설계 문제에서의 상충(trade-off) 관계로 분석된다. 즉 20bar 제동압력 조건과 40bar 제동압력 조건에서 스칼라 노이즈 발생을 최소화하는 최적해의 선정은 다목적 최적설계 문제로 접근해야 함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 디스크 브레이크 시스템의 스칼라 노이즈 저감을 위한 라틴방격법 기반 DOE 샘플링 및 RBF 인공신경망 기반 다목적 최적설계 기술을 개발하였다. 이를 통하여 2가지의 제동조건 모두에서 스칼라 노이즈를 저감할 수 있는 최적의 설계안을 도출하였다. 이와 같은 결과는 디스크 브레이크 시스템의 동적성능(모달, 동역학, 진동소음)이 주요 성능인자로 부각함에 따른 고성능 고부가가치 브레이크 패드 개발을 위한 기반 기술로 활용이 기대된다.

후 기

본 논문은 한국산업기술진흥원에서 주관하는 부품소재전문기업기술지원사업(자동차용 브레이크 부품 진동소음 저감을 위한 CAE/CAT 기반 최적화 설계 기술 지원)의 성과물로서 관계자 여러분께 감사드립니다.