

실험계획법/반응표면모형을 이용한 자동차 진동저감

이 광 기 · 구 자 겸

(엔브이에이치코리아주식회사)

1. 머리말

최적설계 알고리즘이 유한요소해석(finite element analysis) 프로그램에 성공적으로 적용되면서 최근에는 대형 구조물의 정적해석, 동적해석 등과 같은 여러 가지 다양한 기계공학의 문제에 응용되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 아직은 이러한 최적설계 알고리즘은 유한요소해석 개개의 해석 프로그램에만 국한되어 적용되고있기 때문에 실제로 유한요소해석과 경계요소해석(boundary element analysis)을 연성해서 해석해야하는 자동차의 진동저감 분야에 적용하는데에는 여러 가지 문제점들을 가지고 있다.⁽²⁾ 또한 자동차의 진동저감을 수행하기 위해서는 여러 가지 많은 성능지수(performance indices)들이 존재할 수 밖에 없으며 이 성능지수들도 역시 동시에 만족되어야만 이 최적의 진동저감 향상을 이룰 수가 있는 것이다. 따라서 자동차의 최적 진동저감 해석을 위해서는 진동저감 해석프로그램과 최적설계 알고리즘을 어떻게 결합시켜 해석할 것이냐 하는 문제와 여러 가지 많은 성능지수를 동시에 풀기 위해서 다중목적(multi-objective) 및 다분야(multidisciplinary) 통합 기법을 어떻게 효과적으로 적용할 것이냐 하는 2 가지 문제를 해결해야 한다. 앞에서 언급된 2 가지 문제를 해결하는 방법으로 최근에 가장 각광받는 방법은 실험계획법(design of experiments)과⁽³⁾ 반응표면모형(response surface model)을⁽⁴⁾ 동시에 적용하는 방법인데 반도체⁽⁵⁾, 항공⁽⁶⁾ 및 전자⁽⁷⁾ 분야의 통합설계에 이 방법이 적용되어 그 타당성을 입증받고 있다.

따라서 여러 가지 많은 성능지수(목표치, 출력

변수)를 갖고있는 자동차의 진동저감을 효과적으로 향상시키기 해서는 첫번째로 진동저감 해석프로그램에 실험계획법을 적용하여 해석을 수행한 후에 실험계획법에서 제시된 해석 방법에 따라 주어진 설계 영역(design space)내에서 성능지수에 대한 설계 인자의 민감도를 분석하여 진동저감에 영향을 미치는 중요한 설계 인자(입력변수)들을 도출하고 이 결과를 토대로 반응표면모형을 구성한다. 두번째로 실험계획법을 통하여 구성된 반응표면모형에 최적설계 알고리즘을 적용하여 여러 가지 목표치를 동시에 만족하는 최적 해를 구하면 된다. 실험계획법/반응표면모형을 자동차 진동저감에 적용하면 설계자들은 다음과 같이 3 가지의 장점을 얻을 수 있다.

(1) 설계영역에 대한 반응표면모형을 구성함으로써 많은 계산시간 및 가격이 문제가 되는 진동저감 해석프로그램 모델을 계산 시간 및 가격이 저렴한 메타모델(Meta-Model, Surrogate Model)로 변환하여 해석에 적용할 수 있다.

(2) 설계영역에 대한 반응표면모형을 분석하여 설계자들은 모든 설계 정보 및 전역 민감도 정보를 얻을 수 있으며 경우에 따라 최적설계를 하지 않고서도 설계자가 원하는 목표치를 얻을 수 있다.

(3) 목표치 및 제한조건에 대한 상관분석 등과 같은 통계적 기법을 적용하면 목표치 및 제한조건들에 대한 경향을 손쉽게 파악할 수 있기 때문에 설계초기 단계에 서로 상반되는 경향을 갖는 목표치 및 제한조건을 분리하여 설계에 적용할 수 있다.

따라서 본 글에서는 먼저 실험계획법과 반응표면법에 대한 기본적인 개념을 수행하고 몇가지 적용된 예제들을 통하여 "실험계획법/반응표면모

델을 이용한 자동차의 진동저감" 효과에 대하여 고찰해보고자 한다.

2. 실험계획법

2.1 실험계획법의 정의

실험계획법(design of experiments)은 1920년대의 영국인 R. A. Fisher(1890~1962)에 의해 구축되어, 처음에는 주로 농업시험에 이용되었지만, 2차대전 후에는 공장 실험에 적용되어, 수율과 품질향상에 좋은 효과를 올렸고, 최근에는 공학실험 외에도 시장조사연구, 의·약학에서의 동물 실험이나 임상시험/설계 분야에서 실험 및 전산응용공학(CAE: Computer Aided Engineering)을 포함한 모든 분야의 최적설계 및 통합설계 프레임워크 개발에까지 폭넓게 적용되고 있는 실정이다.⁽⁸⁾ 따라서 이제는 실험계획법을 "현장 실험 뿐만 아니라 전산 실험(computer experiment)을 계획하고 해석하는 기법들"을 총칭하여 정의를 내려야 하며 설계 관점에서 살펴보면 설계 영역내에서 목표치(시스템 상태)에 대한 설계 인자(입력변수)의 영향을 분석하여 설계자가 최적의 의사결정을 내릴 수 있도록 도와주는 설계 수법(프레임워크)으로 이해를 해야 한다.

실험계획법에는 주어진 목적에 따라 많은 방법들이 개발되어 왔으며 일반적으로 주효과(main effect, 선형관계) 및 제한적인 교호작용(interaction) 해석을 통하여 설계 인자의 민감도(기여도)를 보는 방법과⁽³⁾ 2차 항의 반응표면모델(2차 항의 비선형관계)을 구성하여 최적 해를 찾는 방법에⁽⁴⁾ 따라 다음의 2가지로 대별할 수 있다.

(1) 선형 및 제한적인 교호작용 해석: 일부실

시법, Plackett-Burman법, 직교배열표(tables of orthogonal arrays, 다구찌기법) 등이 많이 적용되고 있으며 많은 설계 인자 중에서 중요한 인자들을 선별(screening)할 때에 많이 적용된다.

(2) 2차 항의 비선형해석: 요인배치법, 중심합성법(CCD, Central Composite Design), Box-Benken법, D-Optimal법 등이 많이 적용되고 있으며 주어진 설계 영역내에서 최적 해를 찾을 때에 적용되며 일반적으로 2차 다항식 이상을 사용하지 않는다.

그림 1에 3수준 3인자인 경우에 중심합성법($23+2*3+1=15$ 회) 및 D-Optimal(10회)법을 비교해 놓았으며 요인배치법($3^3=27$ 회)과 비교하여 훨씬 적은 실험을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 중심합성법은 2수준 인자의 해석을 수행한 후에 순차적으로 3수준 인자로 실험을 확대할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 선형성이 강한 경우에는 D-Optimal법보다 효과적일 수 있다. 하지만 위에 언급된 여러 가지 많은 실험계획법 중에서 어떤 실험계획이 주어진 상황에 적당한 것인가를 결정하는 것과 결정된 실험계획을 어떻게 만들 것인가라는 문제는 일반적인 설계자들에게는 쉬운 일이 아니며 이러한 문제들이 공학 분야에서 실험계획법의 적용을 보편화하는데 걸림돌이 되어왔다. 하지만 최근에는 공학 분야에서도 설계자들도 실험계획법을 손쉽게 구현할 수 있도록 개발된 통계관련 프로그램들을⁽⁹⁾ 사용한 많은 응용 결과들이 출판되고 있다.⁽¹⁰⁾

2.2 직교배열표(다구찌기법)

여러 가지 실험계획법 중에서 일반적으로 요인의 수가 많을 경우에 큰 "그물"을 쳐서 주효과와

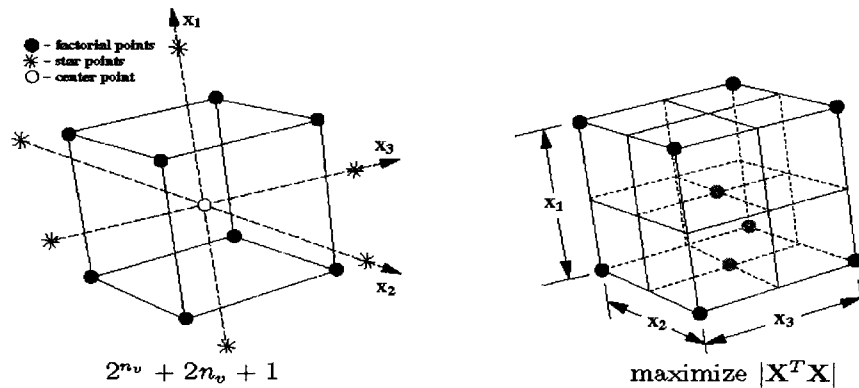


그림 1 중심합성법 및 D-Optimal법

기술적으로 있을 것 같은 교호작용을 검출하고, 기술적으로 없으리라고 생각되는 교호작용 및 고차의 교호작용에 관한 정보를 희생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 간단히 짤 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표이며 직교배열표가 가지고 있는 장점은 다음과 같다.

(1) 기계적인 조작으로 이론을 모르고도 일부실시법, 분할법, 교락법 등의 배치를 쉽게 할 수 있다.

(2) 실험 데이터로부터 요인변동의 계산이 용이하고, 따라서 분산분석표의 작성이 수월하다.

(3) 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 요인을 짜 넣을 수 있으며, 실험의 실사가 용이하다.

특히 직교배열표를 적용한 실험계획 및 해석기법을 표준화하여 산업계에 보편화시킨 다구찌기법은⁽¹¹⁾ 1980년부터 미국 자동차 산업을 중심으로 폭넓게 적용되어 성능 뿐만 아니라 품질도 향상시킨다는 관점에서 좋은 결과들을 얻었으며 국내에서도 전자회사를 중심으로 다구찌기법을 적용하여 제품의 품질 향상에 기여를 하고 있다. 다구찌기법은 기본 개념을 익히기만 하면 누구나 손쉽게 사용할 수 있기 때문에 실험계획법을 처음 접하는 설계자들은 다음의 2수준 및 3수준을 적용한 다구찌기법을 먼저 사용해보기를 권하고 싶다.

(1) 수준 직교배열표

2수준의 실험에서는 각 요인의 자유도는 1이고, 직교배열표에서 각 열의 자유도도 1이다. 따라서 모든 교호작용이 무시되고 오차를 구하지 않아도 좋은 경우에 $L_4(2^3)$ 형에서는 3개의 요인, $L_8(2^7)$ 형에서는 7개의 요인, $L_{16}(2^{15})$ 형에서는 15개의 요인, $L_{32}(2^{31})$ 형에서는 31개의 요인, $L_{64}(2^{63})$ 형에서는 63개의 요인까지 배치가 가능하다. 교호작용을 구하고자 하는 경우에는 배치될 수 있는 요인의 수는 교호작용의 자유도만큼 적게 된다. 직교배열표를 이용할 때에 한 열에 요인 x 를, 다른 열에 요인 y 를 배치하면 교호작용 $x \times y$ 가 어느 열에 나타나는가는 기본표시를 사용하여 구할 수 있으나, 다음 표 1과 같은 표를 이용하면 쉽게 찾을 수 있다. 하나의 열은 횡축에, 다른 열은 대각선 열[()로 나타냄]에 나타내고, 각각의 열이 교차하는 난으로부터 교호작용의 열을 찾아낼 수 있다. 예를 들어, 요인 A

를 4열에 배치하고 요인 B 를 9열에 배치하면 교호작용 $A+B$ 는 13열에 나타난다.

표 1 2열간의 교호작용을 구하는 표

군	1	2	3				4								
열	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	(1) 3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14
	2		(2) 1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
				(3) 7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
	3				(4) 1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11
						(5) 3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
							(6) 1	14	15	12	13	10	11	8	9
								(7) 15	14	13	12	11	10	9	8
4								(8) 1	2	3	4	5	6	7	
									(9) 3	2	5	4	7	6	
										(10) 1	6	7	4	5	
											(11) 7	6	5	4	
												(12) 1	2	3	
													(13) 3	2	
														(14) 1	

표 2 3요인 교호작용을 구하는 표

열 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
(1)	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11	
	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12	
(2)	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7		
	4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10		
(3)	1	9	10	8	7	5	6	6	7	5			
	2	13	11	12	12	13	11	10	8	9			
(4)	10	8	9	6	7	5	7	5	6				
	12	13	11	13	11	12	9	10	8				
(5)	1	1	2	3	4	2	4	3					
	7	6	11	13	12	8	10	9					
(6)	1	4	2	3	3	2	4						
	5	13	12	11	10	9	8						
(7)	3	4	2	4	3	2							
	12	11	13	9	8	10							
(8)	1	1	2	3	4								
	10	9	5	7	6								
(9)	1	4	2	3									
	8	7	6	5									
(10)	3	4	2										
	6	5	7										
(11)	1	1											
	13	12											
(12)	1												
	11												

(2) 3수준 직교배열표

일반적으로는 2수준 인자에 대한 실험을 많이 적용하지만 비선형 특성을 고려하여 수준이 반드시 3개이어야 하거나, 또는 요인이 계량치여서 현재의 조건보다 큰 쪽이 좋은가, 작은 쪽이 좋은가가 명확하지 않을 때에는 3수준 인자의 실험을

사용하고 있다. 3수준 인자의 실험은 요인의 수가 4이하인 경우로서 요인간의 교호작용이 없을 때에는 $L_9(3^4)$ 을 사용하여 배치할 수 있고 요인의 수가 13개 이하인 경우에는 $L_{27}(3^{13})$, 요인의 수가 40개 이하인 경우에는 $L_{81}(3^{40})$ 을 사용할 수 있다. 3수준의 교호작용도 표 2를 사용하면 표 1과 동일한 방법을 사용하여 쉽게 찾을 수 있다.

3. 반응표면법

2절의 실험계획법에 의하여 구해진 결과(목표치)를 해석하는 방법은 크게 다음의 2가지로 대별할 수 있다.

(1) 분산분석(ANOVA: ANalysis Of VAriance)

신호인자의 효과를 유지하면서 잡음인자의 종합적 영향을 최소화하는 목적으로 사용되며 특히 S/N비(signal-to-noise ratio)를 구하기 위해 신호인자와 잡음인자를 할당해 분산분석을 하는 것은 정확한 인과관계를 구하기 위해서가 아니라 모든 출력을 신호인자의 효과와 나머지 효과로 분해해서 두 효과의 비를 설계평가에 이용하기 위한 것임을 항상 염두에 두어야 한다.

(2) 회귀분석(regression analysis)

실험의 출력(반응 : response)에 대해 여러가지 변수(제어인자, 신호인자, 잡음인자들을 포함)의 영향을 분석하는 목적으로 사용되고 있으며 입력에 대한 정확한 응답곡면을 구하여 최적 해를 구하는 목적으로 많이 적용되어왔다.

하지만 최근에는 연구 및 설계 부서에서는 다구찌가 제안한 다구찌의 직교배열표를 적용한 분산분석보다는 회귀분석을 적용한 반응표면모델을 구성하여 해석하는 경우가 많이 늘고 있다. 이것은 다구찌가 제안한 신호와 잡음이라는 생산적인 측면의 해석보다는 설계 및 연구 단계에서는 주어진 여러가지의 변수(제어인자, 신호인자, 잡음인자 등)에 대한 각각의 영향을 분석하는 것이 훨씬 유용한 결과를 주기 때문이다. 반응표면모델 해석에서 반응에 대한 설계인자 효과의 종속성은, 단일 설계인자들의 수준 조합인 경우에는 반응곡선(response curve)으로 표현되며, 둘 이상의 설계인자들의 수준 조합인 경우에는 반응표면(response surface)의 형태로 표현된다. 그리고, 반응곡선이나 반응표면의 형태를 탐색하여 설계인자와 반응(목표치), 또는 입력변수(input variable)

와 출력변수(output variable) 간의 구조적 관계를 분석할 수 있으며, 더 나아가 최소든 최대든 최적 반응(optimal response)을 주는 조합을 찾을 수 있다.

물론 모델의 정확한 구조를 안다는 것은 불가능하지만, 실험계획과 반응표면모델(회귀분석)을 반복하면 설계 인자(입력변수)와 반응(출력변수) 간의 관계를 근사시키는 것이 항상 가능하며, 이러한 목적을 달성하도록 적용되는 모든 통계 방법을 반응표면법(RSM : Response Surface Methodology)이라고 한다. 반응표면법의 주된 분석법은 물론 분산분석이 아닌 회귀분석이지만, 반응표면법은 기본적으로 실험계획에 기초하여 설계된 회귀분석이라는 점에서 일반적인 회귀분석의 개념과는 다르며 반응표면방법론을 염두에 두고 개발된 실험계획들을 반응표면계획(response surface design)이라 부른다.

만약 2절의 다구찌의 직교배열표에 대한 반응표면모델로서 입력변수들의 선형 함수를 선택하면 2수준 인자인 경우에는 최소자승법(least square method)을 적용하여 다음 식 (1)과 같이 제한적인 교호작용을 갖는 일차 모형(first-order model)을 얻는다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \right) + \epsilon \quad (1)$$

다구찌의 3수준 인자인 경우에는 다음 식 (2)에서 제한적인 교호작용을 갖는 이차 모형(second-order model)을 얻을 수 있으며 중심합성법과 같은 실험계획법을 적용하면 교호작용도 포함된 완전 이차 모형을 얻는다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \right) + \epsilon \quad (2)$$

4. 진동저감 적용사례

자동차 진동저감에 실험계획법 및 반응표면모델을 응용한 예제들을 많이 접할 수가 있으나 아직은 다구찌나 Plackett-Burmann의 직교배열에 의한 선형 해석이 주종을 이루고 있다. 다구찌 기법의 적용 사례는 기어 소음저감에 대한 논문과⁽¹²⁾ 자동차의 아이들 진동저감에 대한 논문을⁽¹³⁾ 참조하면 가능하고 Plackett-Burmann법의 적용 사례는 엔진마운트 진동저감에 대한 논문을⁽¹⁴⁾ 참조하면 실제 문제에 적용을 할 수 있을 것이다.

따라서 본 절에서는 앞에서 언급된 일반적인 실험계획법과 분산분석에 의한 적용 사례보다는 설계 및 연구 분야에서 적용할 수 있도록 전산응용역학(CAE) 분야에 대한 실험계획법과 반응표면모델의 적용 사례 2가지를 소개하고자 한다.

4.1 철도차량 현수장치 진동저감⁽¹⁵⁾

철도차량은 휠과 레일의 접촉역학으로 운행되는 시스템이므로 무엇보다도 휠의 주행강성을 유지시키며 승차감을 최적화시키기 위해서는 그림 2의 여러 가지 현가 요소 중에서 탄성조인트의 설계가 우선적으로 선행되어야 한다. 따라서 탄성조인트 병진방향의 탄성계수 3가지를 설계인자로 선정하였으며 목표치는 5대 차량시스템 편성모델의 승차감 2가지, 안정성에 관련된 탈선지수 4가지, 윤증감소 4가지의 10가지를 선택하였다.

(1) 실험계획법에 의한 반응표면모델 구성

철도차량 전용 해석 프로그램에 3개의 설계인자를 바꿔가며 그림 2-1의 중심합성법을 선택하여 10개의 목표치에 대한 총 15회의 해석을 수행하였다. 10개 목표치에 대한 반응표면모델을 식 (2)를 적용하여 구성하면 총 10개의 반응표면모델을 얻을 수 있으며 다음 그림 3에 탈선지수 목표치에 대한 한가지 결과를 표시하였다.

반응표면모델의 장점은 3절에 언급한대로 분산분석에서 수행되는 주효과에 대한 분석뿐만 아니고 3차원 표면도를 통하여 모든 설계영역에 대한 정보(민감도)를 얻을 수 있다는 데 있다. 즉 그림 3의 반응표면모델의 주효과를 그림 4에 3차원선 표면도를 그림 5에 표시하였으며 그림 4에서 y방향 탄성계수가 가장 큰 영향을 준다는 것을 그림 5에서는 x방향과 y방향 탄성계수 변화에 따른 탈선지수의 변화를 설계단계에서 손쉽게 예측할 수

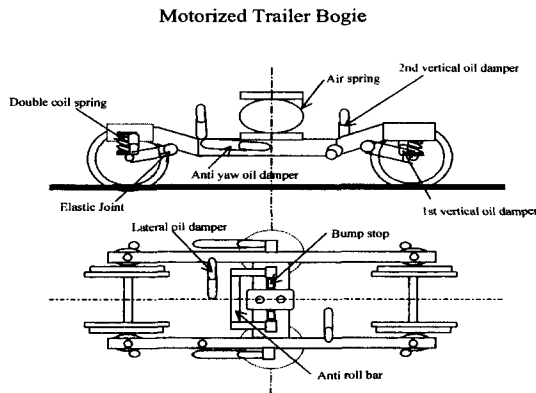


그림 2 동력객차용 동력대차(MTB)의 현가 요소

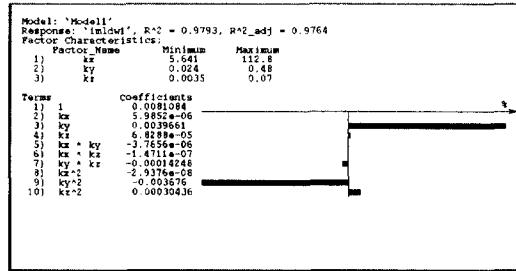


그림 3 탈선지수의 반응표면모델

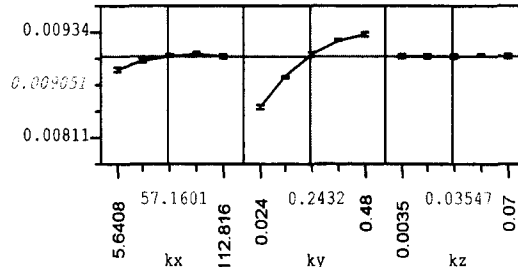


그림 4 탈선지수의 주효과

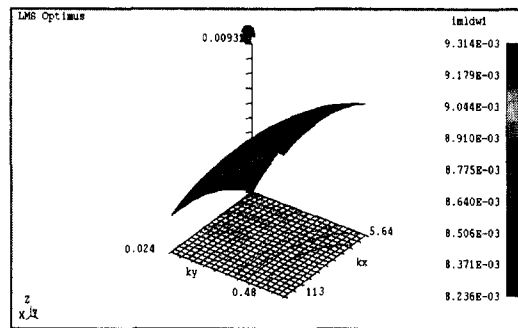


그림 5 탈선지수의 3차원 표면도

있다는 것을 보여준다. 다른 9가지 목표치에 대한 분석도 동일한 절차를 통하여 수행하여 10개의 모든 목표치에 대한 설계인자의 민감도 및 3차원 표면도(설계식)를 얻었으며 이 결과를 설계 단계에 적용하였다.

(2) 반응표면모델에 의한 최적설계

반응표면모델이 가진 또하나의 장점은 목표치의 가중치 및 제한조건이 수시로 변하는 설계 최적화에 손쉽게 응용이 된다는 데 있다. 만약 설계영역이 변하지 않는다면 설계자는 철도차량 전용 해석 프로그램을 다시 수행할 필요없이 이미 2차 다항식으로 구성된 10가지 목표치의 반응표면모델을 가지고 모든 경우의 수를 고려한 최적설계를 수행할 수 있다. 그림 6에 최대/최소법을 적용한 횡변

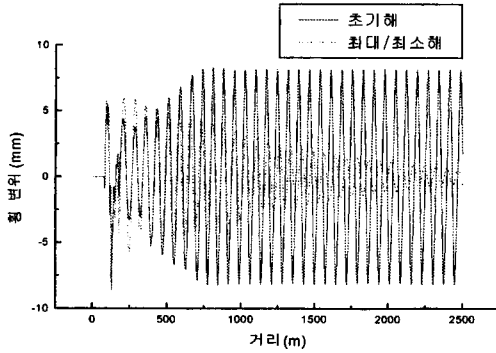


그림 6 횡변위의 동적안정성

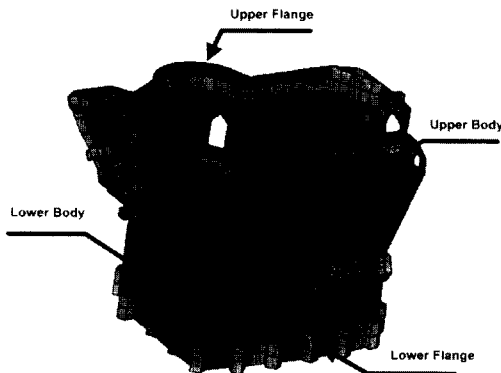


그림 7 기어박스 설계인자

위에 대한 최적설계 결과를 나타내었으며 초기 설계와 비교하여 좋은 동적안정성을 보여준다.

4.2 기어박스 두께 최소화⁽¹⁶⁾

그림 7은 500 Hz에서 1500 Hz의 주파수 범위에서 발생하는 기어박스의 방사에너지를 최소화하는 기어박스 4개 부분의 최적 두께를 찾는 예제이며 유한요소해석 및 음향해석 프로그램을 결합하여 해석한 내용이다. 이때 질량 및 최대응력은 초기 설계 값보다 작아야하는 제한조건을 갖는다.

설계의 관점에서 살펴보면 설계자가 관심있는 것은 기어박스의 두께를 변화시켰을 때 원하는 주파수 범위에서 방사에너지가 어떤 분포를 갖느냐하는 것이지만 어떤 프로그램을 적용해서 어떤 해석을 수행하느냐가 아니다. 즉 실제로는 그림 8과 같이 중심합성법을 적용하면 4개의 설계 인자에 대하여 총 25회(=24+2*4+1)의 유한요소해석 및 음향해석을 순차적으로 수행한 것이지만 이 해석 결과에 최소자승법을 적용하여 식 (2)와 같은 반응표면모델을 구성하면 설계자가 관심있는 기어박스의 두께와 방사에너지에 대한 새로운 설계 영역

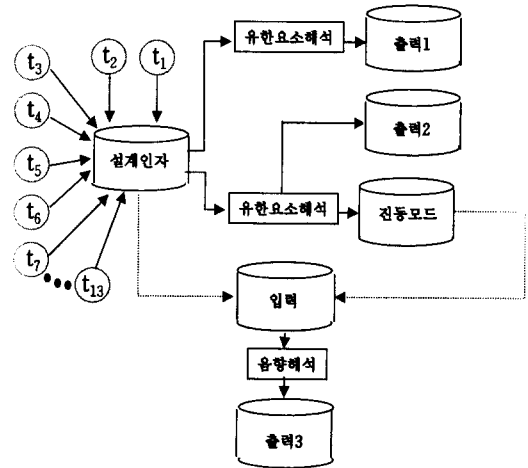


그림 8 해석 절차

으로 변환을 시킬 수 있으며 설계자는 이 변환된 설계 영역에서 3차원 선도 및 등고선도를 통하여 민감도 해석 및 최적설계를 수행하면 된다.

1250 Hz에 대한 반응표면모델을 통한 최적설계의 결과를 다음 그림 9에 표시하였으며 초기 설계와 비교하여 총 질량은 약 0.03 kg이 감소하였으나 전체 방사에너지는 27%의 높은 성능 향상을 가져왔다.

또한 참고문헌 (16)에는 유한요소해석 및 음향해석 프로그램을 결합하여 해석한 오일팬, floor pan 및 머플러 진동저감에 대한 다른 응용 예제들도 포함되어 있으므로 관심있는 독자들은 참조하기를 바란다.

5. 맺음 말

자동차 진동저감에 실험계획법 및 반응표면모델을 효과적으로 적용하는 방법들에 대하여 고찰을 해보았으며 국내에서의 적용은 앞 절에서 언급한대로 직교배열에 의한 선형해석이 주를 이루고 있는 현실이다. 하지만 최근의 선진국의 동향을 살펴보면 이미 반응표면모델과 최적설계의 적용을 넘어서 반응표면모델을 불확실성까지 고려한 강건설계 및 신뢰성설계에까지 통합하여 적용하고 있다. Wei Chen 등은⁽¹⁷⁾ 다구찌의 강건설계, 반응표면모델 및 절충형 의사결정 방법론을 결합하여 강건설계탐색법을 개발하여 초기 설계에서 외란 및 공차를 고려할 수 있도록 하였으며 Ford에서도⁽¹⁸⁾ 역시 반응표면모델 및 통계기법을

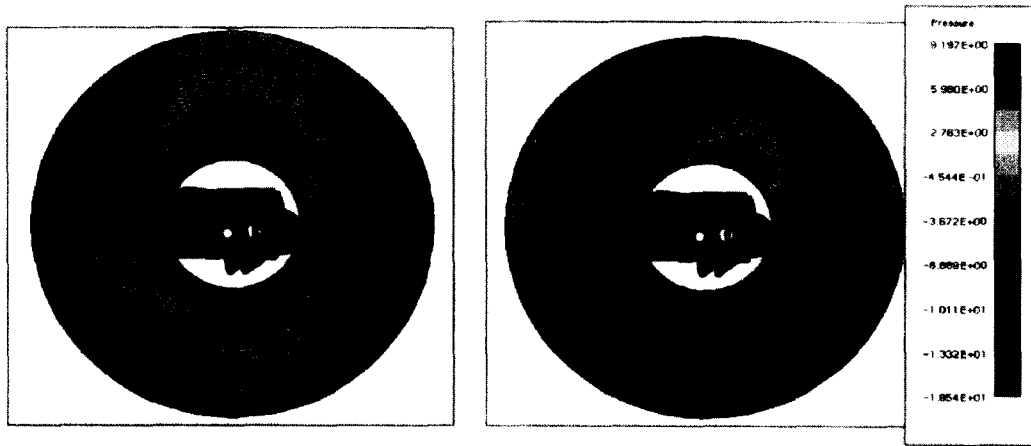


그림 9 기어박스 해석 결과(초기설계와 최적설계)

전산응용역학(CAE)에 적용하여 MFO(Multi-Function Optimization)라는 강건설계 프레임워크를 구축하여 진동저감 및 내구성능 향상에 이미 적용하고있는 현실이다. 국내에서도 빨리 반응표면 모델, 통계기법, 의사결정 방법론 등의 기법을 적용 통합하여 강건설계 프레임워크의 개발을 하여야 하며 궁극적으로 자동차의 진동저감도 이러한 강건설계 개념이 도입되어야만이 생산 현장의 불확실성도 고려된 최적의 성능 및 가격을 갖는 제품 개발에 응용될 수 있다고 생각된다.

참 고 문 헌

(1) Erwin H. Johnson, 1998, "Considerations In The Performance of Large Structural Optimization Tasks", Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization-Part 1, pp. 165~169.
 (2) Coyette, J., Fyfe, K. R., 1989, "Solution of Elasto-Acoustic Problems Using a Variational Finite Element/Boundary Element Techniques", The Winter Annual Meeting of the ASME, Int. Symposium on Numerical Techniques in Acoustic Radiation, pp. 15~25.
 (3) 박성현, 1999, 현대실험계획법, 민영사, 서울.
 (4) Myers, Montgomery, 1995, Response Surface Methodology-Process and product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York.

(5) Fukuda, K., Nishi, K., 1997, "Applications of TCAD to Designing Advanced DRAM and Logic Devices", Proceedings of the 1997 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, pp. 17~20.

(6) Chuck A. Baker, Bernard Grossman, Raphael T. Haftka, 1998, "HSCT Configuration Design Space Exploration Using Aerodynamic Response Surface Approximations", Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization-Part 2, pp. 769~777.

(7) Tarim Tuna, Ismail Mohammed, 1999, "Functional Yield Enhancement and Statistical Design of a Low Power Transconductor", Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Vol. 2, pp. 436~439.

(8) Tappeta, R., Nagendra, S., Renaud, J. E., 1998, "A Multidisciplinary Design Optimization Approach for High Temperature Aircraft Engine Components", Proceedings of the 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASX Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit and AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum-Part 2, pp. 1055~1065.

(9) SAS Institute Inc., 1994, JMP Computer Program and User's Guide, Cary, NC.

- (10) Schrage, D.P., 1999, "Technology for Rotorcraft Affordability Through Integrated Product/Process Development(IPPD)", 1999 Alexander A. Nikolsky Lecture, Proceedings of the 55th National Forum of the American Helicopter Society.
- (11) Ross, P. J., 1988, Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill, New York.
- (12) Ramanand R., John Kinsella, 1992, "Gear Noise Development Using Dr. Taguchi's Tolerance Design of Experiment Approach", SAE 920763.
- (13) Hiroaki Hoshino, Hiroshi Isoyama, 1997, "Reduction of Idle Shake by Combining Simulation with Taguchi Method", Proceedings of the 9th International Pacific Conference on Automotive Engineering, pp. 427~432.
- (14) Jui-Chi Hunag, Ruey-Sheng Shih, 1995, "The Effective Use of Experimental Design of Studying Dynamic properties in Hydroelastic Engine Mount", Proceedings of the ANTEC '95, Vol. 3, pp. 3335~3340.
- (15) 이광기, 박찬경, 2000, "반응표면모델에 의한 철도차량 대차의 탄성조인트 최적설계", 대한기계공학회 논문집, 제 24권, 제 3호, pp. 661~666.
- (16) Tzannetakis N., Migeot, J. L., 1997, "A Methodology for Multu-Disciplinary Optimal Design Synthesis, and Applications", Proceedings of the Japan Modal Analysis Conference.
- (17) Wei Chen, Allen, J. K., 1996, "A Procedure for Robust Design: Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors", Journal of Mechanical Design, Vo. 118, No. 4, pp. 478~485
- (18) Liaw, L., DeVries, R., Cronin, D., 1998, "An MDO-Compatible Method for Robust Design of Vehicles, Systems, and Components", Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, pp. 609~619.