경량화를 위한 BIW 소재 최적설계

진 성 완¹⁾ · 박 도 현¹⁾ · 이 갑 성¹⁾ · 김 창 원²⁾ · 양 희 원³⁾ · 김 대 승³⁾ · 최 동 훈^{*4)}

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 한틀엔지니어링²⁾ · 현대자동차 고성능차개발팀³⁾ · 한양대학교 최적설계기술연구센터⁴⁾

Material Optimization of BIW for Minimizing Weight

Sungwan Jin¹⁾ · Dohyun Park¹⁾ · Gabseong Lee¹⁾ · Chang Won Kim²⁾ ·
Heui Won Yang³⁾ · Dae Seung Kim³⁾ · Dong-Hoon Choi^{*,4)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Hantool Engineering, 404 Jeljon Tower-I, 17-1 Jeongja-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 463-847, Korea

³⁾Research & Development Division, Hyundai Motors Group, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

⁴⁾The Center of Innovative Design Optimization Technology (iDOT), Hanyang University,
17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

(Received 9 December 2011 / Revised 8 December 2012 / Accepted 14 December 2012)

Abstract : In this study, we propose the method of optimally changing material of BIW for minimizing weight while satisfying vehicle requirements on static stiffness. First, we formulate a material selection optimization problem. Next, we establish the CAE procedure of evaluating static stiffness. Then, to enhance the efficiency of design work, we integrate and automate the established CAE procedure using a commercial process integration and design optimization (PIDO) tool, PIANO. For effective optimization, we adopt the approach of metamodel based approximate optimization. As a sampling method, an orthogonal array (OA) is used for selecting sampling points. The response values are evaluated at the sampling points and then these response values are used to generate a metamodel of each response using the linear polynomial regression (PR) model. Using the linear PR model, optimization is carried out an evolutionary algorithm (EA) that can handle discrete design variables. Material optimization result reveals that the weight is reduced by 44.8% while satisfying all the design constraints.

Key words : Metamodel(메타모델), Orthogonal array(직교배열법), Linear polynomial regression model(1차 회귀 모델), Evolutionary algorithm(진화 알고리즘), Design optimization(최적설계)

Nomenclature

K^B : bending stiffness, N/mm

K^T : torsional stiffness, Nm/deg

1. 서 론

최근 자동차 산업은 차량의 고성능 및 고연비 등이 지속적인 관심의 대상이 되고 있다.¹⁾ 그 중에서

도 에너지를 절약하기 위한 대책으로 자동차의 구조설계에 관한 경량화 기술의 연구와 동시에 내구성 확보 및 원가 절감을 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 차체의 전체 중량을 줄이기 위한 경량화 방법으로는 부재의 형상이나 두께 등을 변경하는 방법과, 고강도강이나 알루미늄과 같은 이종 소재를 적용하는 방법 등이 있다.

경량화와 관련된 기존의 연구를 살펴보면 주로 고강도 강재의 두께를 줄임으로써 무게를 줄이고자 하였으나²⁻⁵⁾ 두께의 변경을 통한 경량화에는 한계가

*Corresponding author, E-mail: dhchoi@hanyang.ac.kr

다가오고 있다. 가공 상의 문제로도 고강도 강 두께를 줄이는 데는 한계가 있기 때문에 무게를 더 줄이기 위해서는 구조의 변경이나 경량소재의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 강성이 필요한 부분에는 강철을 사용하고, 강성에 큰 영향이 없는 부위에 경량소재인 알루미늄을 적용함으로써 BIW의 무게 저감을 달성할 수 있었다.

BIW (Body In White)는 자동차 전체 무게의 30% 가량을 차지하기 때문에 BIW 경량화는 자동차 경량화에 큰 효과를 기대할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 차량의 요구 성능을 만족하는 범위 안에서 BIW의 소재를 강철에서 알루미늄으로 바꾸어 경량화 하는 자동최적설계를 구축하였다. 실험계획법 (Design Of Experiment; DOE)에 의해 직교배열법 (Orthogonal Array; OA)을 사용하여 실험점을 선정하고 1차 회귀(linear polynomial regression) 모델을 생성하였다. 소재 선정을 위해 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm; EA)을 사용하여 최적해를 도출하여 경량화 하였다.

2. 설계문제

본 장에서는 BIW 경량화를 위한 소재 최적설계의 설계 요구사항과 설계변수를 정의하고 설계문제를 정식화 하였다.

2.1 설계 요구사항

차량에서 유지해야하는 성능으로 주로 하중에 대한 굽힘과 비틀림의 정도를 파악하는 정강성(static stiffness) 해석과 동강성(dynamic stiffness) 해석이 요구된다. 차량 주행 중에는 다양한 변형이 발생하는데, 주로 굽힘이나 비틀림 형태의 변형이 발생한다. 이것은 운전자 및 탑승자의 승차감뿐만 아니라, 안전성에도 큰 영향을 미치기 때문에 설계 단계에서 반드시 고려해야 한다.^{6,7)} 차량의 동강성 값은 질량에 반비례한다. 따라서 BIW의 중량을 감소시키는 설계 목적을 달성하면 동강성 특성은 향상될 것이므로 본 연구에서는 설계 해를 얻는 시간을 줄이기 위하여 동강성 해석을 생략하였다. 본 논문에서는 정강성 값들이 설계 기준으로 삼은 실제 차체 모델의 정강성 값들을 유지하여야 한다는 조건을 설계

요구사항으로 고려하였다. 설계 과정에서의 정강성 값들을 산출하기 위하여 상용 해석 프로그램인 Abaqus⁸⁾를 사용하여 굽힘강성(bending stiffness)과 비틀림강성(torsional stiffness) 해석을 수행하였다.

실제 차체 모델에서 차체 구조 설계가 변경된 모델을 초기모델(baseline)로 삼았다. 초기모델에서는 설계 기준으로 삼은 실제 차체 모델에 비해 중량이 늘어난 반면 굽힘 강성과 비틀림 감성도 증가하였다.

2.2 설계변수

본 논문에서는 BIW의 성능에 크게 영향을 미칠 것으로 예상되는 주요부재 60개를 선정하였다. 선정된 주요부재는 Fig. 1과 같이 프론트 바디(front body) 부재 16개와 언더바디(under body) 부재 14개, 사이드 바디(side body) 부재 23개와 루프(roof), 루프 레일(roof rail) 등을 구성하는 부재 4개, 리어 바디(rear body) 부재 3개이다. 설계변수는 강철과 알루미늄 2개의 소재 중 1개를 선택하도록 하였다.

이중 소재간의 접합이 어려운 문제이나 경량소재의 도입을 위해 최근 이중 소재간의 접합기술이 개발되고 있으며, 특히 스틸과 알루미늄 간의 접합기술은 이미 충분한 수준에 도달했기 때문에 소재를 설계변수로 선정한 것은 충분히 현실성을 고려한 선택이다.

2.3 설계문제 정식화

2.1절과 2.2절에 기술한 설계 요구사항과 설계변수를 사용하여 설계문제를 정식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Find} && x_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 60 \\ &\text{to minimize} && \text{weight} \\ &\text{subject to} && K^B \geq K_{allow}^B \\ & && K^T \geq K_{allow}^T \end{aligned}$$

본 설계문제에서는 목적함수인 중량을 최소화하기 위해 60개 부재의 소재를 정한다. 구속조건은 굽힘강성과, 비틀림강성이 허용된 값 이상이어야 한다.

3. 메타모델을 이용한 최적설계

메타모델 기법은 관심영역 또는 전체영역 안에서 실제 해석모델의 반응과 변수의 관계를 근사화한

Fig. 1 Design variables of BIW components: (a) Front body; (b) Under body; (c) Side body; (d) Roof and roof rail

메타모델을 생성하여 시간비용이 많이 소요되는 실제 해석모델을 대체하기 위한 방법으로 다양한 공학 분야에서 개발되어 왔다.

본 연구에서는 상용 PIDO (Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIA^{no}가 제공하는 메타모델링 기법을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

3.1 메타모델 생성을 위한 실험계획법

실험계획법이란 해결하고자 하는 문제에 대하여 어떻게 실험을 수행하여 데이터를 취할 것이며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하여 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 방법이다.¹⁰⁾

직교배열법(orthogonal array; OA)은 요인배치법(full factorial design; FFD)의 실험횟수를 줄이기 위해 고안된 실험계획법으로, 기술적으로 무시할 수 있는 교호작용에 관한 정보를 희생시킴으로써, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 세우도록 고안된 표이다. 또한 각 설계변수 및 교호작용이 배치된 열의 선형조합들이 통계적으로 서로 독립인 관계, 즉 직교관계를 나타내기 때문에 하나의 설계변수의 효과를 구할 때 다른 설계변수에 의한 치우침이 없게 된다.

직교배열법은 일부실시법과 분할법, 교락법 등의 배치를 쉽게 할 수 있는 장점이 있다. 또한 요인변동의 계산이 용이하여 분산분석표의 작성이 쉽고, 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 넣을 수 있으며, 실험 데이터의 해석이 용이하다.

본 논문에서는 강철과 알루미늄, 2종류의 소재만 사용하기 때문에 선형성도 잘 표현할 수 있는 2수준 직교배열법 OA L120(260)을 사용하여 120개의 실험점을 선정하였다.

3.2 R²에 의한 메타모델 선정

메타모델이 적합한 정도를 측정하는 척도는 통계학에서 사용하는 결정계수 R²를 사용한다. 이는 메타모델의 독립변수가 종속변수 변동의 설명 가능한 부분의 비율을 나타내며 메타모델의 정확도를 평가할 때 사용된다. R²의 값이 1에 가까울수록 메타모

Table 1 R^2 of linear polynomial regression

R^2	Weight	K^B	K^T
Linear PR	1.0000	0.9941	0.9892

텔의 정확성은 높아진다.¹¹⁾

반응표면 모델(response surface model; RSM)인 다항회귀(polynomial regression) 모델이 메타모델 중에서 가장 대중적으로 사용된다. 본 설계문제와 같이 2종류의 소재만 사용하여 선형인 경우, 1차 회귀(linear polynomial regression) 모델만으로도 매우 정확한 메타모델을 생성할 수 있다.

1차 회귀 모델의 중량과 굽힘강성, 비틀림강성에 대한 R^2 는 Table 1과 같이 1에 매우 가까운 정확한 값이다. 그러므로 본 논문에서는 직교배열법으로 선정한 120개의 실험점을 사용하여 1차 회귀 모델을 생성하고 메타모델 기반의 근사 최적설계를 수행하였다. 중량과 굽힘강성, 비틀림강성에 대한 1차 회귀 모델의 예측값과 실제 해석값을 Fig. 2와 같이 비교함으로써 1차 회귀 모델의 정확성을 다시 확인할 수 있었다.

3.3 다항회귀 모델

다항회귀 모델(polynomial regression; PR)은 반응표면 모델로서 공학 분야에서 가장 오랫동안 널리 사용된 메타모델이다. 다항회귀 모델은 다항함수(polynomial function)의 형태를 미리 정의하고 최소제곱법(least square method)을 사용하여 다항함수의 회귀계수(regression coefficient)를 정하여 생성하는 메타모델이다. 일반적으로 개념이 쉽고 수치적 과정이 복잡하지 않다는 장점이 있으며 시스템의 전체적인 경향을 파악하는데 효과적이고 특히 임의의 오차를 갖는 실제 실험에서 유용하다. 그러나 사용자가 다항함수의 형태를 미리 정해줘야 하며 이에 따라 근사모델의 예측 성능이 크게 달라진다는 단점을 가지고 있다. 또한 비선형성이 심한 시스템의 근사화에는 적합하지 않다. 그리고 설계변수의 수가 증가하게 되면 메타모델 생성을 위해 필요한 실험점의 수, 즉 해석의 수가 급증한다는 단점이 있다. 본 논문에서 사용한 1차 회귀 모델은 식 (1)과 같이 표현된다.

(a)

(b)

(c)

Fig. 2 Actual by predicted plot of each response: (a) Weight; (b) Bending stiffness; (c) Torsional stiffness

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad (1)$$

여기서 β 는 다항함수의 회귀계수로서 예측된 값들의 편차제곱의 합을 최소로 하는 최소제곱법을 사용하여 계산한다.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2)$$

$$\hat{y} = X \hat{\beta} \quad (3)$$

3.4 소재선정을 위한 진화 알고리즘

진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm; EA)¹²⁾은 자연계의 염색체 진화과정을 모방한 방법으로 실제 진화 과정의 선택(selection), 재결합(recombination), 돌연변이(mutation)의 단계를 통해 전역 최적해를 탐색하는 방법이다.

진화 알고리즘의 수행 과정은 Fig. 3과 같다. 선택 단계는 미리 만들어진 모집단(population) 중에서 목적함수 값이 우수한 해를 선택하는 과정이다. 이러한 과정에서 선택된 해는 부모(parent)가 되어 새로운 세대(generation)의 해를 만드는 역할을 한다. 교배 단계는 선택한 부모를 이용하여 새로운 자손(offspring)을 만들게 된다. 이 때 목적함수 값이 우수한 부모의 성질을 닮은 자손이 생성되고 반복적인 수행을 통하여 최적해에 접근하게 된다. 돌연변이 단계는 만들어진 자손 중에서 임의로 선택하여 돌연변이를 일으키는 과정이다. 이러한 돌연변이 과정은 설계 변수의 전 영역에서 해를 탐색하도록 하여 국부 최적해에 수렴하는 경우를 방지하는 역할을 한다.

진화 알고리즘은 전역 최적해를 탐색할 수 있을 뿐만 아니라, 함수의 민감도를 요구하지 않기 때문에 함수 형태와 상관없이 적용할 수 있고, 이산형 변수를 효과적으로 다룰 수 있는 장점이 있다. 하지만 함수 계산을 비교적 많이 하기 때문에 해석모델에

따라 최적설계를 수행하는데 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 전역 최적해를 탐색할 수 있을 뿐만 아니라, 소재선정을 위해 이산형 변수를 효과적으로 다룰 수 있는 진화알고리즘을 사용하였다. 함수 계산은 시간비용이 매우 적은 근사모델을 사용함으로 수치적인 부담은 없다.

4. 최적설계 결과

1차 회귀 모델과 진화 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행한 결과, 주어진 설계 요구사항을 모두 만족하면서 정상 수렴하였다. Fig. 4와 Table 2는 최적설계 결과 성능지수와 설계변수의 변화를 나타낸

Fig. 3 Evolutionary algorithm procedure

(a)

(b)

(c)

Fig. 4 Optimization results (performance): (a) Weight; (b) Bending stiffness; (c) Torsional stiffness

Table 2 Optimization results (Design variables)

	Design variable	Baseline	Optimal		Design variable	Baseline	Optimal
Front body	x_1	Steel	Aluminum	Rear body	x_{31}	Steel	Steel
	x_2	Steel	Aluminum		x_{32}	Steel	Aluminum
	x_3	Steel	Aluminum		x_{33}	Steel	Aluminum
	x_4	Steel	Aluminum		x_{34}	Steel	Aluminum
	x_5	Steel	Aluminum	Side body	x_{35}	Steel	Aluminum
	x_6	Steel	Aluminum		x_{36}	Steel	Aluminum
	x_7	Steel	Steel		x_{37}	Steel	Aluminum
	x_8	Steel	Aluminum		x_{38}	Steel	Steel
	x_9	Steel	Aluminum		x_{39}	Steel	Aluminum
	x_{10}	Steel	Steel		x_{40}	Steel	Aluminum
	x_{11}	Steel	Aluminum		x_{41}	Steel	Aluminum
	x_{12}	Steel	Aluminum		x_{42}	Steel	Aluminum
	x_{13}	Steel	Aluminum		x_{43}	Steel	Aluminum
	x_{14}	Steel	Aluminum		x_{44}	Steel	Steel
	x_{15}	Steel	Aluminum		x_{45}	Steel	Aluminum
	x_{16}	Steel	Steel		x_{46}	Steel	Aluminum
Under body	x_{17}	Steel	Aluminum		x_{47}	Steel	Aluminum
	x_{18}	Steel	Aluminum		x_{48}	Steel	Aluminum
	x_{19}	Steel	Aluminum		x_{49}	Steel	Aluminum
	x_{20}	Steel	Steel		x_{50}	Steel	Aluminum
	x_{21}	Steel	Steel		x_{51}	Steel	Aluminum
	x_{22}	Steel	Aluminum		x_{52}	Steel	Aluminum
	x_{23}	Steel	Steel		x_{53}	Steel	Aluminum
	x_{24}	Steel	Aluminum		x_{54}	Steel	Aluminum
	x_{25}	Steel	Aluminum		x_{55}	Steel	Steel
	x_{26}	Steel	Aluminum	Roof	x_{56}	Steel	Aluminum
	x_{27}	Steel	Aluminum		x_{57}	Steel	Aluminum
	x_{28}	Steel	Aluminum		x_{58}	Steel	Aluminum
	x_{29}	Steel	Aluminum		x_{59}	Steel	Steel
	x_{30}	Steel	Aluminum		x_{60}	Steel	Aluminum

다. Baseline은 초기모델이고, Linear PR은 근사모델의 예측값이며, Optimum은 근사최적해에서 실제해석을 수행한 결과이다. 최적설계의 결과는 Fig. 4와 같이 모든 구속조건을 만족하면서, 중량을 Baseline에 비해 44.8% 감소시킨 설계안을 구할 수 있었다.

최적해에서의 성능지수들을 살펴보면 굽힘강성과 비틀림강성이 모두 구속조건에 하한치에 걸려있다. 두 강성 중 하나가 하한치보다 높다면 그만큼 더 중량을 감소할 수 있음을 의미하는데 최적설계기법

을 도입하여 소재를 적절히 배치함으로써 두 개의 구속조건이 동시에 하한치에 걸려있는 설계안을 도출해 낼 수 있었다. 이를 통해 주어진 구속조건을 만족하는 범위 내에서 무게를 최소한으로 줄인 것을 확인할 수 있다.

근사 모델을 사용하여 해석의 시간비용을 감소시켰고, 이것을 통해 근사모델 기반 최적설계의 유효성을 검증할 수 있다. 최적설계 결과 설계변수의 변화를 살펴보면 60개 부재가 모두 강철인 Baseline에

서 49개 부재를 알루미늄으로 변경하여 설계요구사항을 만족하며 중량을 감소시킬 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 BIW 중량을 최소화 하도록 최적설계를 수행한 결론은 다음과 같다.

- 1) BIW의 중량을 최소화 하도록 설계변수와 설계요구사항을 정하고 설계문제를 정식화 하였다.
- 2) 실험계획법에 의해 직교배열법을 이용하여 중량 계산 및 정강성 해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 1차 회귀 모델을 생성하였다.
- 3) 1차 회귀 모델과 진화 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 그 결과, 모든 설계 요구사항을 만족하면서 목적함수인 중량을 초기모델에 44.8% 감소시킨 최적해를 구하였다.

본 연구를 통해 제시된 PIDO 기술을 이용한 연구 방법은 메타모델 기반 최적설계의 유용성 및 유효성을 입증하였다. 또한 이러한 접근방법은 향후 많은 산업제품 설계의 해석 및 설계 프로세스에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

또한 추후 연구로 스틸과 알루미늄 이외의 마그네슘, 플라스틱 등의 재료를 추가한 소재배치 최적화에 대해 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “Multi-Material Mix 초경량 승용차체 개발”사업과 2012년도 2단계 두뇌한국21사업과 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2012-0005530)을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 이 연구를 위하여 PIDO 툴인 PIAAnO 소프트웨어를 제공한 (주)피도텍에 감사드립니다.

References

- 1) J. S. Koo and H. J. Cho, “Weight-reduction Prediction for the Conceptual Design of Carbody with Shell Type Section Using the Material Substitution Technique,” Transactions of KSAE, Vol.15, No.4, pp.17-26, 2007.
- 2) Y. Zhang, P. Zhu, G. L. Chen and Z. Q. Lin, “Study on Structural Lightweight Design of Automotive Front Side Rail Based on Response Surface Method,” Journal of Mechanical Design, Vol.129, No.5, pp.553-557, 2007.
- 3) P. Zhu, Y. Zhang and G. L. Chen, “Metamodel-based Lightweight Design of an Automotive Front-body Structure Using Robust Optimization,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, Vol.223, No.9, pp.1133-1147, 2009.
- 4) K. H. Lee, J. K. Shin, S. I. Song, Y. M. Yoo and G. J. Park, “Automotive Door Design using Structural Optimization and Design of Experiments,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, Vol.217, No.10, pp.855-865, 2003.
- 5) M. K. Shin, B. S. Kang and G. J. Park, “Application of the Multidisciplinary Design Optimization Algorithm to the Design of a Belt-integrated Seat while considering Crashworthiness,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering, Vol.219, No.11, pp.1281-1292, 2005.
- 6) Y. K. You, H. J. Yim and K. C. Kim, “Development of an Optimal Design Program for Vehicle Side Body Considering the B.I.W Stiffness and Light Weight,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1729-1735, 2006.
- 7) J. Maeng and C. Cho, “Concept Car Development using Personal Digital Design Process based on Engineering Technology,” Transactions of KSAE, Vol.18, No.5, pp.9-19, 2010.
- 8) Abaqus 6.8-1 Analysis User's Manual, Dassault Systemes Simulia Corp., 2008.
- 9) PIAAnO (Process Integration, Automation and Optimization) User's Manual, Ver.3.3, PIDO-TECH Inc., 2011.
- 10) D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, USA, 2005.
- 11) R. H. Myers and D. C. Montgomery, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, USA, 1995.
- 12) T. Bäck, Evolutionary Algorithms in Theory and Practice, Oxford University Press, Oxford, 1996.