

경량화를 위한 RBFr 메타모델 기반 A-필러와 패키지 트레이의 소재 선정 최적화

진성완¹⁾ · 박도현¹⁾ · 이갑성¹⁾ · 김창원²⁾ · 양희원³⁾ · 김대승³⁾ · 최동훈^{*4)}

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

Material Selection Optimization of A-Pillar and Package Tray Using RBFr Metamodel 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, Seoul 133-791, Korea

(Received 30 September 2011 / Revised 4 December 2012 / Accepted 16 February 2013)

Abstract : In this study, we propose the method of optimally selecting material of front pillar (A-pillar) and package tray for minimizing weight while satisfying vehicle requirements on static stiffness and dynamic stiffness. First, we formulate a material selection optimization problem. Next, we establish the CAE procedure of evaluating static stiffness and dynamic 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, PIA^o. 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 radial basis function regression (RBFr). Using the RBFr models, optimization is carried out an evolutionary algorithm that can handle discrete design variables. Material optimization result reveals that the weight is reduced by 49.8% while satisfying all the design constraints.

Key words : Metamodel(메타모델), Orthogonal array(직교배열법), Radial basis function regression(RBFr, 회귀 방식 기저 함수), Evolutionary algorithm(진화 알고리즘), Design optimization(최적설계)

Nomenclature

K^{B1} : bending stiffness1, N/mm	f^{LB} : lateral bending mode natural frequency, Hz
K^{B2} : bending stiffness2, N/mm	f^T : torsional mode natural frequency, Hz
K^T : torsional stiffness, Nm/deg	
f^{VB} : vertical bending mode natural frequency, Hz	allow : allowable

Subscript

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

1. 서론

최근 자동차 산업의 연구 및 개발에서는 초기 설계 단계에 많은 비용과 시간을 투자하고 있다. 초기 설계 단계에서부터 CAD 모델의 시뮬레이션을 사용함으로써 설계변경 과정을 최소화 하여 개발기간을 단축시키기 위해서다. 뿐만 아니라, 차량의 고성능(high-performance), 고연비(high-efficiency) 및 비용절감(low-cost)이 지속적인 관심의 대상이 되고 있다.¹⁾ 많은 자동차 회사에서는 이러한 고성능, 고연비 및 원가절감을 위해서 차량의 요구 성능을 만족하면서 차량 부재들을 경량화 하도록 설계하고 있다.

경량화를 위한 방법은 크게 2가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째, 보수적으로 설계되어진 부재의 형상을 변경함으로써 부재에 들어가는 소재를 보다 적게 사용하도록 하는 방법이다.^{2,3)} 두 번째, 부재의 소재를 보다 가벼운 소재로 변경함으로써 경량화를 하는 방법이다. 최근에는 차량의 소재를 강철에서 알루미늄으로 대체하려고 노력하고 있으며, 일부 고급차종을 중심으로 알루미늄 소재를 적용하여 양산하고 있다.

본 논문에서는 차량의 사이드 바디(side body)의 A-필러(A-pillar)와 리어 바디(rear body)의 패키지 트레이(package tray) 소재를 변경하였다. A-필러를 구성하는 9개의 부품과 패키지 트레이를 구성하는 8개의 부품을 차량의 요구 성능을 만족하는 범위 안에서 소재를 강철에서 알루미늄으로 바꾸어 경량화 하는 자동최적설계를 구축하였다. 실험계획법(Design of Experiment; DOE)에 의해 직교배열법(Orthogonal Array; OA)을 사용하여 실험점을 선정하고 RBFr (Radial Basis Function Regression) 모델을 생성하였다. 소재 선정을 위해 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm; EA)을 사용하여 최적해를 도출하여 경량화 하였다.

2. 설계문제

본 장에서는 A-필러와 패키지 트레이의 소재 선정 최적설계를 위한 설계 요구사항과 설계변수를 정의하고 설계문제를 정식화 하였다.

2.1 설계 요구사항

일반적으로 차체를 설계할 때 고려하는 성능지수는 정강성, 동강성, 충돌성능이 있다. 이 중 정강성은 차량의 주행 중 발생할 수 있는 비틀림이나 굽힘 등의 변형에 저항하는 정도를 나타내며, 동강성은 차체의 고유진동수를 나타낸다. 충돌성능의 경우에는 법규로 정해진 시험 조건아래에서의 성능지수들을 나타낸다. 이 중 본 연구에서는 정강성과 동강성에 대한 설계요구사항을 고려하였다.

충돌성능을 고려하지 않고 정강성과 동강성에 대한 설계요구사항만을 고려한 이유는 차체를 구성하는 부재들 마다 가지는 역할이 다르기 때문이다. 차체를 구성하는 많은 부재들 중 하중이에 저항하며 하중을 지지하는 역할을 하는 부재들에 강성이 높은 재료를 사용하고, 반대로 하중을 지지하지 않는 부재에 경량소재를 도입함으로써 효과적으로 차체의 경량화가 가능하다. 반면에 충돌 성능은 Front side rail 이나 rear floor 부분의 rib 구조 등 충돌시 찌그러지면서 충돌에너지를 흡수하는 일부 부재의 역할이 중요한데, 이는 차체 전체의 부재들에 적용할 소재를 변경하여 충돌성능에 대한 요구사항을 만족하는 것 보다는 충돌성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 front side rail의 단면 구조 변경, rear floor 부분의 rib 구조 변경 등을 통해서 충돌성능에 대한 목표치를 맞추는 것이 보다 효과적이기 때문이다.

동강성 및 정강성은 실제 자동차의 강성의 90% 이상이 되도록 구속조건을 선정하였으며, 중량을 최소화하도록 목적함수를 선정하여, 실제 차량의 강성의 90% 수준의 정·동강성을 만족하는 동시에 중량을 최소화하도록 설계요구사항을 선정하였다. 이러한 설계요구사항들은 현대자동차의 전문가들의 요청에 의해 설정하였다. 이러한 연구를 통해 10%의 강성을 양보함으로써 적절한 소재매치를 통해 얻을 수 있는 중량개선효과를 알 수 있다.

Fig. 1은 이러한 해석을 수행하기 위한 유한요소 모델을 각각 하중조건에서 나타낸 것이다. 모드해석의 경우 별도의 하중 및 경계조건이 없기 때문에 유한요소 모델만을 표시하였다.

Table 1은 유한요소모델의 정보 및 1회 해석에 소요되는 시간을 나타낸 것이다. 3개의 정강성은 각각

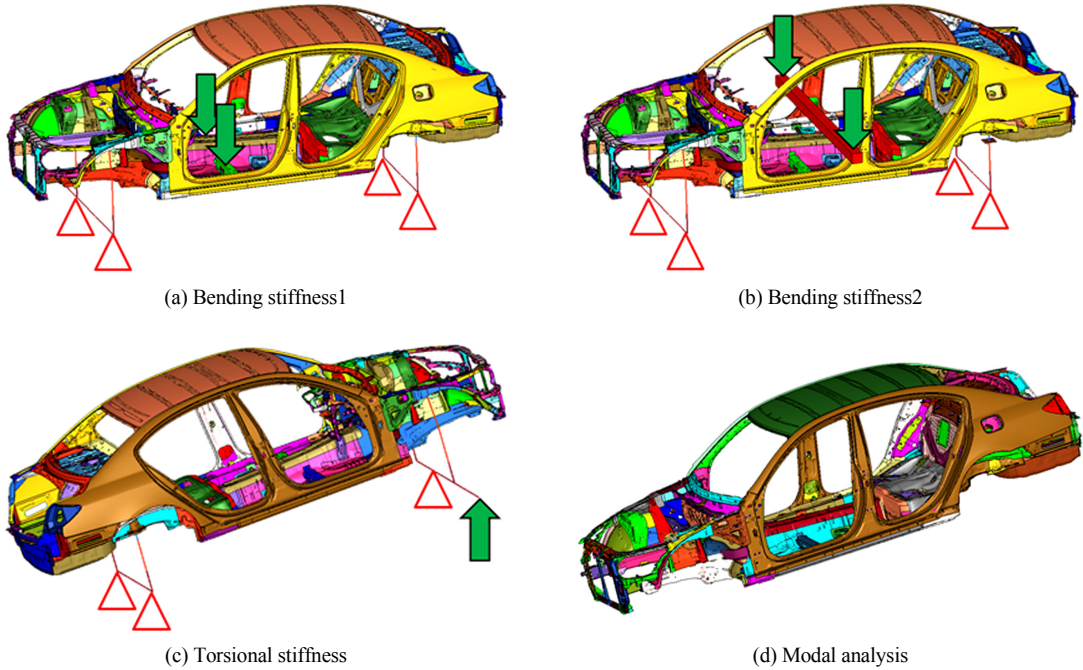


Fig. 1 FE model with loading and boundary conditions for each analysis

Table 1 FE model information and analysis time for each analysis

	Bending stiffness1	Bending stiffness2	Torsional stiffness	Modal analysis
No. of assemblies	26	27	26	27
No. of components	1941	1943	1941	538
No. of elements	499454	499964	499454	845432
No. of nodes	498689	499171	498689	812865
Analysis time	6 min.	6 min.	6 min.	60 min.

의 하중조건에서 한 번씩 해석해야 하며, 동강성에 해당하는 3가지 모드의 고유주파수들은 한 번의 Modal analysis를 수행하여 얻을 수 있다.

2.2 설계변수

본 논문에서는 A-필러를 구성하는 9개의 부재와 패키지 트레이를 구성하는 8개의 부재의 소재를 설계변수로 정하였다. 모든 설계변수는 소재이므로 이산설계변수이며 스틸 혹은 알루미늄이라는 값을 가진다.

Fig. 2는 설계변수로 잡은 대상 부재들을 나타낸다. x_1 - x_9 는 A-필러에 속하는 9개 부재, x_{10} - x_{17} 은 패키지 트레이에 속하는 8개 부재에 적용할 소재를 나타내며, 각각 강철 혹은 알루미늄이라는 값을 가진다.

2.3 설계문제 정식화

2.1과 2.2에서 정의한 설계 요구사항과 설계변수를 종합하여 설계문제를 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && x_i, i = 1, 2, 3, \dots, 17 && (1) \\
 &\text{to minimize} && \text{Weight} \\
 &\text{subject to} && K^{B1} \leq K_{allow}^{B1} \\
 &&& K^{B2} \leq K_{allow}^{B2} \\
 &&& K^T \leq K_{allow}^T \\
 &&& f^{VB} \leq f_{allow}^{VB} \\
 &&& f^{LB} \leq f_{allow}^{LB} \\
 &&& f^T \leq f_{allow}^T
 \end{aligned}$$

이와 같은 설계문제를 풀어서 적재적소에 스틸과

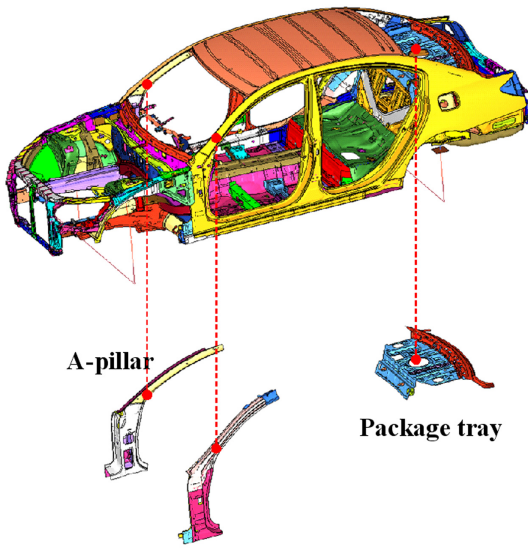


Fig. 2 Panels of A-pillar and package tray corresponding to the design variables

경량소재인 알루미늄을 도입함으로써 총 6개의 정강성 및 동강성에 관련된 성능지수들에 대한 구속 조건을 만족하는 동시에 목적함수인 중량을 최소화 할 수 있다.

3. 메타모델 기반 최적설계

메타모델 기법은 관심영역 또는 전체영역 안에서 실제 해석모델의 반응과 변수의 관계를 근사화한 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 PIANO⁴⁾가 제공하는 메타모델링 기법을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

3.1 메타모델 생성을 위한 실험계획법 수행

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.⁵⁾

직교배열법(Orthogonal Array; OA)은 완전요인배치법(Full Factorial Design; FFD)의 실험횟수를 줄이

기 위해 고안된 실험계획법으로, 무시할 수 있는 교호작용에 관련된 효과를 제외시킴으로써, 완전요인배치법 보다 적은 실험횟수로 실험계획을 수행하는 방법이다.

본 논문에서는 강철과 알루미늄, 2종류의 소재만 사용하기 때문에 2수준 직교배열법 OA L₃₆(2¹⁷)을 사용하여 36개의 실험점을 선정한 후, 실험계획에 따라 상용 해석 프로그램인 Abaqus⁶⁾와 Nastran⁷⁾을 사용하여 정강성과 동강성 해석을 수행하였다.

3.2 메타모델 생성

소재는 이산 설계변수이기 때문에 연속적으로 표현할 수 없지만 본 연구에서는 스틸과 알루미늄만을 사용하며 실제로 해석을 수행할 때는 소재에 따른 물성치 값을 이용하기 때문에 설계변수 대신 파라미터를 이용해 소재를 대신하여 표현할 수 있다.

이 파라미터는 1에서 2 사이의 값을 가지며, 1일 경우는 스틸의 물성치, 2일 경우에는 알루미늄의 물성치를 가지도록 설정하였다. 메타모델을 이용하여 이러한 파라미터 값이 1~2사이의 변화할 때, 성능지수들의 변화를 예측할 수 있다.

메타모델로는 PIANO에서제공하는 Linear PR⁸⁾ 모델과 RBFr⁹⁾ 모델을 각각 생성해보았으며, Fig. 3은 각각의 메타모델에 대한 R² 값을 나타낸다. 여기서

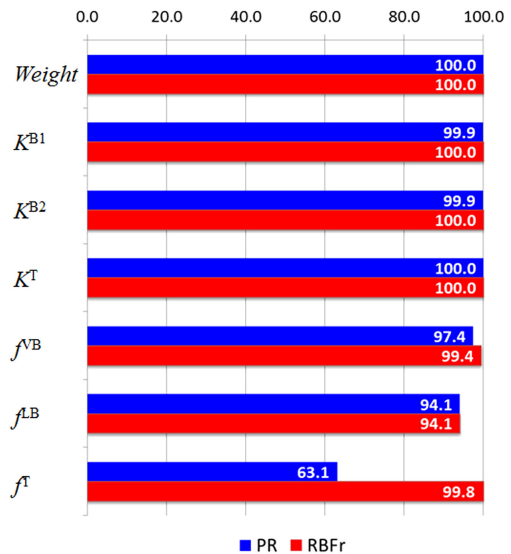


Fig. 3 Comparison of R² between linear PR and RBFr

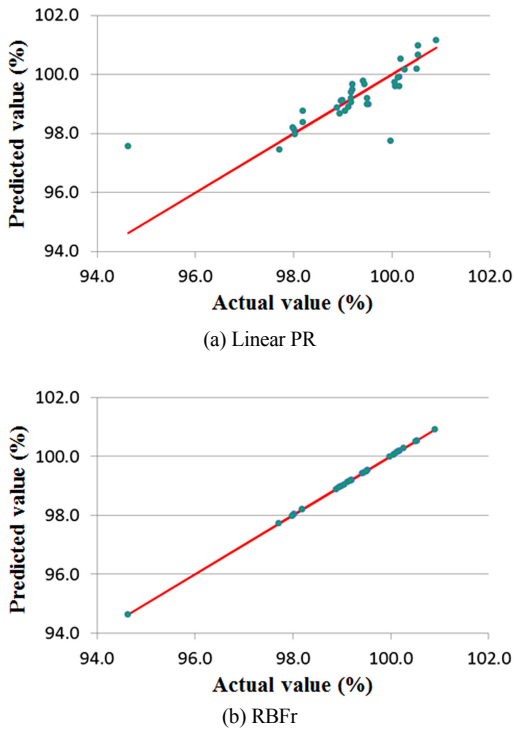


Fig. 4 Actual by predicted plot for linear PR and RBFr meta-model of torsional mode natural frequency

R^2 는 회귀 메타모델의 정확도를 나타내는 값으로 값이 1에 가까울수록 정확하며, 일반적으로 0.95 이상이면 충분한 정확도를 가진다고 판단할 수 있다.

Fig. 3의 결과를 보면 Linear PR모델의 경우 비틀림 고유진동수에 대한 근사모델의 정확도가 매우 낮게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 비틀림모드 고유주파수가 선형 모델만으로는 충분히 표현하기가 부족하다는 의미이다. 그러나 RBFr모델의 경우 선형모델을 표현하기 위해 필요한 18개의 실험점(설계변수개수인 17개+1개)보다 많은 36개의 실험점에서의 응답을 이용해 비틀림모드 고유주파수를 적절하게 근사화할 수 있는 메타모델을 생성할 수 있었다.

Fig. 4는 actual by predicted plot을 나타내는데 이를 통해서도 메타모델의 정확도를 판단할 수가 있다. x축은 실험계획법을 수행한 실험 점에서의 실제 값을 나타내며, y축 실험점에서의 예측 값을 나타낸다. 붉은 색 직선은 실제 값과 예측 값이 같은 선을 나타내는데 실험점들이 붉은색 선에 가까이 배치되

어 있을수록 메타모델이 정확함을 나타낸다. Fig. 4를 통해서도 RBFr모델의 정확도가 Linear PR모델에 비해 우수함을 확인할 수 있다.

3.3 소재선정을 위한 진화 알고리즘

진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm; EA)¹⁰은 자연계의 염색체 진화과정을 모방한 방법으로 실제 진화 과정의 선택(selection), 재결합(recombination), 돌연변이(mutation)의 단계를 통해 전역 최적해를 탐색하는 방법이다.

본 연구에서는 근사모델에서 사용한 설계변수가 1 또는 2이라는 이산화 된 값만을 가지므로 이산 최적설계가 가능한 최적화기법으로써 진화알고리즘을 선택하였다. 진화 알고리즘은 최적해로 충분히 수렴하기 위해서는 매우 많은 수의 함수계산이 필요하다라는 단점을 가지지만, 본 연구에서는 근사모델을 이용해 최적설계를 수행하기 때문에 진화알고리즘에서 요구하는 매우 많은 수의 함수해석은 문제가 되지 않는다. 진화알고리즘을 이용해 얻은 최적해에서는 실제해석을 한 번 수행하여 실제 성능지수 값들을 확인하였다.

Table 2는 사용한 진화알고리즘의 파라미터들을 나타낸다.

Table 2 EA parameters

Population size	100
Maximum number of generations	200
Violated constraints limit	0.003
No. of consecutive generations without improvements	200
Mutation probability	0.01
Selection probability	0.15

4. 최적설계 결과

RBFr 모델과 진화 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행한 결과, 주어진 설계 요구사항을 모두 만족하면서 정상적으로 수렴하였다. Fig. 5-6은 최적설계 결과 성능지수의 변화를 나타낸 것이고, Table 3은 설계 변수 값의 변화를 나타낸 것이다. 파란색은 초기모델을 나타내고, 녹색은 최적해에서 RBFr 모델의 예측결과를 나타내며, 붉은색은 최적해에서

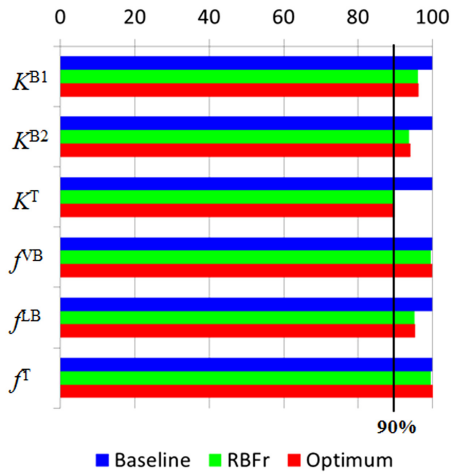


Fig. 5 Performance comparisons of baseline, prediction of RBFr and optimum

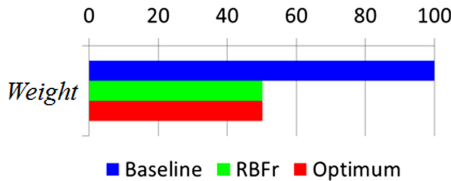


Fig. 6 Weight comparison of baseline, prediction value of RBFr and optimum

Table 3 Comparison of design variables between the initial and the optimal design

	Design variable	Initial design	Optimal design
A-Pillar	x_1	Steel	Aluminium
	x_2	Steel	Aluminium
	x_3	Steel	Aluminium
	x_4	Steel	Steel
	x_5	Steel	Aluminium
	x_6	Steel	Aluminium
	x_7	Steel	Aluminium
	x_8	Steel	Aluminium
	x_9	Steel	Aluminium
Package Tray	x_{10}	Steel	Aluminium
	x_{11}	Steel	Steel
	x_{12}	Steel	Aluminium
	x_{13}	Steel	Aluminium
	x_{14}	Steel	Aluminium
	x_{15}	Steel	Aluminium
	x_{16}	Steel	Steel
	x_{17}	Steel	Aluminium

의 실제 해석 결과를 나타낸다. 최적설계 결과, 모든 설계요구사항을 만족하면서 목적함수인 중량을 강철로 구성되었던 초기모델에 비해 49.8% 감소시킬 수 있었다.

하나의 실험점에서 7개의 성능지수를 뽑아내는 데는 대략 78분 가량의 시간이 소요되었다. 실험계획법을 수행할 때 36번의 해석을 했고, 근사최적해에서 실제 해석을 한번 수행했으므로 총 37번의 해석을 통해 최적해를 도출할 수 있었다. 근사모델 기반 최적설계의 장점 중 하나는 다수의 컴퓨터를 이용해 동시 해석이 가능하다는 것으로 2개의 컴퓨터를 이용해 24시간정도면 최적해의 도출이 가능하며, 보다 많은 수의 컴퓨터를 활용할 경우 최적설계 수행에 필요한 시간을 더욱 줄일 수 있다.

RBFr 모델의 예측값과 실제 해석결과는 거의 차이가 나지 않는 것을 볼 수가 있는데 이는 메타모델의 정확도 평가를 바탕으로 예측성능이 우수한 메타모델을 선택했기 때문에 가능한 것이다. 예측성능이 우수한 메타모델을 사용함으로써 해석에 드는 비용을 감소시켜 짧은 시간 내에 목표 성능을 만족하면서 중량을 효과적으로 줄인 설계안을 도출해낼 수 있었으며, 근사모델 기반 최적설계기법의 유효효성을 검증할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 A-필러와 패키지 트레이의 중량을 최소화 하도록 최적설계를 수행하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 정·동강성에 대한 목표값을 만족하는 동시에 목적함수인 중량을 최소화하도록 설계문제를 정식화하였다.
- 2) 실험계획법으로 직교배열표에 따라 실험점을 배치한 후, 중량 및 정·동강성 해석을 수행하였으며, 해석결과를 이용하여 메타모델을 생성하였다. 메타모델의 종류는 R^2 값을 바탕으로 가장 정확한 메타모델인 RBFr 모델을 선택하였다.
- 3) 제시된 근사모델 기반 최적설계 절차를 이용하여 모든 구속조건을 만족하면서 목적함수인 중량을 초기모델에 비해 49.8% 감소시킬 수 있었으며 이를 통해 제시된 메타모델 기반 최적설계

절차의 유효성을 검증할 수 있었다.

- 4) 해석모델, 설계대상, 목표 성능지수 등이 변경되더라도 동일한 설계 절차를 도입하여 짧은 시간 내에 원하는 목표 성능을 만족하면서 동시에 중량을 최소화하는 설계안을 도출할 수 있으므로 차체 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “Multi-Material Mix 초경량 승용차체 개발” 사업과 2011년도 2단계 두뇌한국21사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이 연구를 위하여 PIDO 툴인 PIAO 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. 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.
- 3) 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.
- 4) PIAO (Process Integration, Automation and Optimization) User's Manual, Version 3.3, PIDOTECH Inc., 2011.
- 5) D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- 6) Abaqus 6.8-1 Analysis User's Manual, Dassault Systemes Simulia Corp., 2008.
- 7) MSC NASTRAN User's Manual, MSC Software Corporation, 2008.
- 8) R. H. Myers and D. C. Montgomery, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- 9) M. J. L. Orr, “Introduction to Radial Basis Function Networks,” Citeseer, pp.1-67, 1996.
- 10) T. Bäck, Evolutionary Algorithms in Theory and Practice, Oxford University Press, Oxford, 1996.