

메타모델기반최적화를 이용한 아우터타이로드의 경량화 설계

김영준¹, 박순형², 이권희², 박영철*
¹(주)센트랄 중앙연구소, ²동아대학교 대학원 기계공학과

Lightweight Design of an Outer Tie Rod Using Meta-Model Based Optimization Technique

Young-Jun Kim¹, Soon-Hyeong Park², Kwon-Hee Lee², Young-Chul Park*²

¹Technical Center, Central Corporation

²Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 조향계부품인 아우터타이로드 조립체에 대하여 경량화를 위한 최적화를 수행하였다. 지금까지의 아우터타이로드의 최적설계해석에서는 인너타이로드가 제외되었으나 본 연구에서는 조립체에 대한 최적화를 실시함으로써 실제 시험모드와 동일한 조건을 묘사하였다. 경량화 재료는 알루미늄 단조재이며 최적화 대상은 좌굴하중에 견딜수 있는 최소 중량의 아우터타이로드 조립체의 형상이다. 형상 최적화 기법으로는 비선형 모델의 최적화 기법인 반응표면법과 크리깅 내삽법을 적용하였으며 초기모델 대비 각각 16.3%, 16.6%의 중량 감소 효과를 얻을 수 있었다. 근사모델로부터 얻은 최적설계 모델은 유한요소 해석을 통하여 검토한 결과 좌굴하중 예측치는 각각 2.6% 2.04% 중량예측치는 0.17% 0.13%의 오차를 가지고 있어 크리깅 기법 근사 모델이 더욱 최적해에 가까운 결과를 도출할 수 있을 것으로 보인다.

Abstract The outer tie rod is one of the part of steering system, the optimization process was executed to find the lightweight design. The inner tie rod was considered in the optimum design of an outer tie rod. it could be closer to the test condition than in the case of considering outer tie rod only. The aluminum forging material was considered as a weight reduction proposal. The target of optimization was the shape of the minimum weight to resist at the load of buckling. RSM and Kriging interpolation method were applied as a optimization method to consider the nonlinear shape optimization problem. Then, 16.3%, 16.6% of weight reduction was obtained from the result comparing with that of the initial model. The results of meta model optimization was compared with that of finite element method. The error values of buckling load estimation were 2.6%, 2.04%. and those of weight estimation were 0.17%, 0.13%. Therefore, it seemed that the result of Kriging model could be obtained closer to optimum value than that of RSM model.

Keywords : Buckling, Kriging Interpolation Method, Lightweight Design, OTR(Outer Tie Rod), RSM(Response Surface Method)

1. 서론

최근 들어 유해가스의 규제와 친환경 자동차의 개발과 더불어 차체 및 샤키의 부품에 대한 경량화가 부각되

고 있다. 자동차의 경량화를 위해서는 경량화 재질로 변경하는 방법, 최적화기법을 이용한 구조설계방법, 경량화를 위한 제작공법 등을 적용할 수 있다[1~5]. 본 연구에서는 강제로 된 아우터타이로드를 경량화 재질인 알루미늄

본 논문은 지식경제 기술혁신사업 지능형자동차 상용화 연구기반 구축사업, 조종안정성 및 4-Wheel Steering 지원을 위한 후륜조향모델 개발 (과제번호:10045695)로 수행된 연구결과임.

*Corresponding Author : Young-Chul Park(Donga-A University)

Tel: +82-51-200-7652 email: parkyc67@dau.ac.kr

Received September 11, 2015

Revised October 22, 2015

Accepted November 6, 2015

Published November 30, 2015

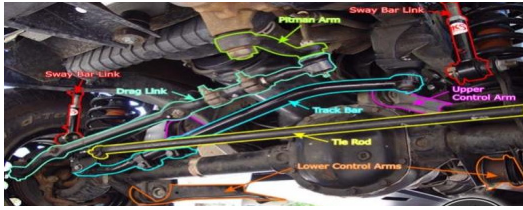


Fig. 1. Position of the OTR in Steering System

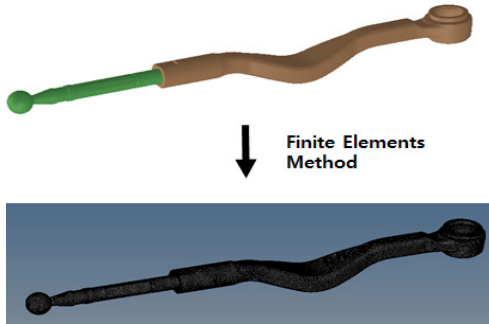


Fig. 2. CAD and FEM of OTR and ITR

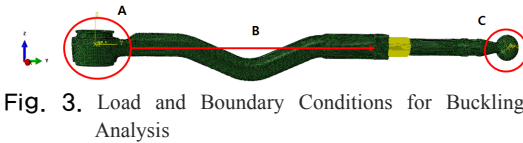


Fig. 3. Load and Boundary Conditions for Buckling Analysis

미늄으로 변경하고 구조최적설계기법을 이용하여 아우터타이로드의 경량화 설계를 제시하고자 한다.

아우터타이로드는 조향계 부품으로서 다음과 같은 역할을 한다. 조향력은 조향휠에서 조향기어, 피트먼 암, 릴레이 로드, 인너 타이로드와 연결된 아우터 타이로드를 거쳐 최종적으로 너클 암을 통해 바퀴에 전달된다. 아우터타이로드의 중량은 현가계 및 조향계의 타 부품과 비교했을 시 비교적 작다. 그러나 강재를 알루미늄으로 변경하고 아우터타이로드가 차량의 좌측, 우측에 설치되는 것을 고려하면 이의 경량화를 무시할 수 없다. 이의 설계를 위해서는 내구성능, 좌굴성능, 정적강도 특성등을 고려해야 하지만 경험적으로 좌굴조건이 제일 엄격하다. 이는 좌굴성능을 만족하게 되면 내구성능 및 정적강도 기준을 만족한다고 할 수 있다[2~5]. 따라서 본 연구에서는 구조최적설계시에 좌굴하중조건만을 고려하였다.

본 연구에서 관심을 갖고 있는 아우터타이로드는 경량화를 목적으로 알루미늄 재료로 단조공정을 적용한다. 강재에서 초기설계 중량은 약 450g을 나타내고 있다.

본 연구에서 적용한 최적화기법으로는 반응표면법과 크리깅의 메타모델을 이용한 최적설계 기법이다. 유한요소해석 프로그램과 구배기반최적화알고리즘(gradient-based optimization algorithm)을 직접 연계하고 민감도 해석을 포함시키면 우수한 최적해를 산출할 수 있다. 그러나 아우터타이로드 최적화문제는 형상설계변수와 비선형해석을 포함하고 있어 위의 적용이 어렵다. 이런 경우, 최적설계정식화에 포함되는 반응치를 근사적인 메타모델로 변경하고 최적화를 수행을 한다. 즉, 반응치가 수학적으로 설계변수에 대한 명시함수가 되므로 대치된 최적설계 정식화문제는 구배기반 최적화알고리즘이나 함수계산이 많이 요구되는 통계적알고리즘을 이용해도 문제가 없다.

메타모델을 생성하는 방법으로는 반응표면법, 크리깅, 뉴럴네트워크, 레이디얼베이스시함수 등이 있다. 본 연구에서는 3차 다항식을 이용한 반응표면법과 크리깅기법중 내삽법인 DACE기법을 각각 적용하였다[5, 6]. 아우터타이로드의 구조최적설계 시 반응치인 중량과 좌굴하중의 반응치를 반응표면모델과 크리깅 메타모델로 각각 대치하여 근사화된 최적설계 정식화를 순차이차계획법(SQP: sequential quadratic programming)을 이용하여 최적해를 산출하였다.

2. 좌굴하중을 고려한 구조최적화

2.1 아우터 타이로드의 좌굴해석

아우터타이로드는 Fig. 1과 같이 조향계의 부품으로서, 개발시 차폭방향인 횡방향 하중에 대한 좌굴특성을 반드시 검토해야 한다. 즉, 부품 결합 위치와 형상의 특성으로 인하여 길이 방향의 압축하중에 의한 좌굴강도를 검토하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 Figs. 2, 3과 같이 아우터타이로드와 인너타이로드(ITR)를 동시에 모델링하였다. 여기서 아우터 및 인너타이로드의 결합부에 장착되는 볼트와 너트 등은 생략하였다. 또한, 유한요소모델링을 위한 전처리 단계에 Hypermesh를, 좌굴해석 수행에는 Abaqus를 이용하였다. 아우터타이로드의 초기해석 모델의 중량은 약 448.8g이다. 좌굴해석에 필요한 하중 및 경계조건을 Fig. 2에 표시하였다. 하중조건으로 인너 타이로드 끝단인 C 점을 구속하여 아우터 타이로드의 소켓 중심점인 A에서



Fig. 4. Buckling Analysis Result of OTR

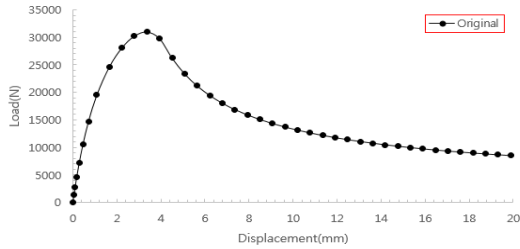


Fig. 5. Force-Displacement Curve Of Initial Design

B방향으로 변위하중을 적용시켰다. 여기서 A점에서 발생하는 좌굴하중의 기준은 C업체에서 제시한 23kN 이상이다[3,4].

초기설계의 좌굴해석 수행 결과, Figs. 4, 5와 같이 아우터타이로드와 결합된 인너타이로드 연결부위에서 좌굴이 발생함을 알 수 있었다. 이 때 좌굴하중은 30.9kN이다.

초기설계는 허용좌굴하중을 크게 초과하는 값으로서 구조최적화를 통한 경량화 된 설계가 가능하다. Fig. 5는 해석결과로부터 산출되는 하중-변위 곡선을 표시한 것이다

2.2 최적설계 정식화

아우터타이로드의 경량화를 위해서 Fig. 6과 같이 단면을 구성하는 파라미터인 x_1 과 x_2 를 설계변수로 설정하였다. 지면과 수직방향인 z 방향의 형상은 타 부품과의 패키지를 위해서 일정하게 설정하였다. 아우터타이로드의 경량화를 위한 정식화는 식 (1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize Weight}(x_1, x_2) \\ & \text{Subject to } F_B \geq F_A \\ & 6\text{mm} \leq x_1 \leq 8\text{mm}, \quad 12.5\text{mm} \leq x_2 \leq 14.5\text{mm} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Weight는 아우터타이로드의 중량을 F_B 는 좌굴

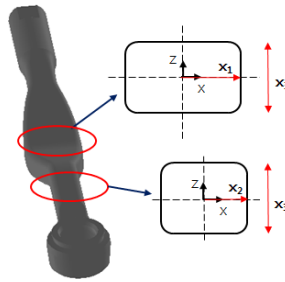


Fig. 6. Definition of Design variables

Table 1. Latin Hypercube Design Experiments

No.	x_1 (mm)	x_2 (mm)	F_B (kN)	W(g)
1	6.24	13.73	21643.5	361.76
2	6.33	13.99	22032.9	364.47
3	7.95	12.72	20878.9	365.86
4	7.57	13.81	22384.5	371.82
5	6.55	13.70	21775.8	363.72
6	7.82	14.49	23471	378.98
7	7.42	13.18	21416.3	365.75
8	6.41	12.61	20200.2	354.08
9	6.89	12.99	21528	360.49
10	6.10	12.78	20278.2	353.23
11	6.98	14.21	22726.1	370.81
12	7.45	14.03	22689.6	372.71
13	6.76	13.57	20811.6	360.94
14	7.11	12.85	20811.6	360.94
15	6.06	13.31	20950.5	357.15
16	7.69	14.14	22930.9	375.29
17	6.71	14.32	22611.9	369.06
18	6.81	13.28	21307	362.23
19	7.16	13.88	22328	369.47
20	6.64	13.10	20976.6	359.6
21	7.86	12.94	21195.3	366.96
22	7.25	13.51	21859.9	367.17
23	7.62	13.38	21732.8	368.76
24	7.33	14.37	23093.4	374.56
25	6.16	12.50	19936.8	351.43

하중, F_a 는 좌굴하중의 허용값이다. 설계변수 x_1 , x_2 의 초기값은 10mm, 20mm으로서 단면의 대칭면을 기준하여 폭의 하한값 및 상한값 범위를 설정하였다. 본 연구에서는 식 (1)의 Weight와를 반응표면모델과 크리깅모델로 근사시킨 후 SQP 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행한다. 메타모델을 생성하는 방법에는 반응표면법, 크

리깅, 신경망(Neural Network) 방법, RBF(Radial Basis Function) 방법 등이 있다. 본 연구에서는 반응표면법과 크리깅을 이용하여 신뢰성을 비교 평가하였다.

메타모델기반 최적화기법을 이용하기 위해서는 먼저 표본점의 생성이 필요하다. 표본점을 생성하는 방법은 전조합실시법, 중심합성법, D-optimal 방법, 라틴하이퍼큐브, 직교배열표 등이 있는데 본 연구에서는 Matlab에 내장되어 있는 *Ihstdesign* 명령어를 이용한 라틴하이퍼큐브디자인 방법을 채택하였다. 표본점은 경험적[1~5]으로 25개로 하였으며 이와함께 25회의 비선형유한요소해석으로부터 산출된 좌굴하중값과 중량을 Table 1에 표시하였다.

3. 메타모델생성과 최적설계과정

3.1 반응표면법을 이용한 구조최적설계

설계변수 x_1, x_2 에 대한 반응치 f 의 기대값은 다음과 같이 삼차함수로 가정해 볼 수 있다.

$$E(f) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1^2 + \beta_4x_2^2 + \beta_5x_1x_2 + \beta_6x_1^3 + \beta_7x_2^3 + \beta_8x_1^2x_2 + \beta_9x_1x_2^2 \quad (2)$$

실험점 n 개에 대해 식 (2)를 적용하면

$$\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T, \quad \boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T,$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{11}^2 & x_{12}^2 & x_{11}x_{12} & x_{11}^3 & x_{12}^3 & x_{11}^2x_{12} & x_{11}x_{12}^2 \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{21}^2 & x_{22}^2 & x_{21}x_{22} & x_{21}^3 & x_{22}^3 & x_{21}^2x_{22} & x_{21}x_{22}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n1}^2 & x_{n2}^2 & x_{n1}x_{n2} & x_{n1}^3 & x_{n2}^3 & x_{n1}^2x_{n2} & x_{n1}x_{n2}^2 \end{bmatrix}$$

로 표시되고 \mathbf{f} 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\mathbf{f} = X\boldsymbol{\beta} \quad (3)$$

여기서 $\boldsymbol{\beta}$ 의 추정치는 다음 식에 의해 산출된다.

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{f} \quad (4)$$

여기서 ‘은 전치행렬을 표시한다. 표본점 개수가 크면 클 수록 메타모델은 정확하게 되지만 그 만큼 해석시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

Table 2. Parameters in 3rd Order RSM Model

β	F_B (kN)	W(g)
0	-0.009	-0.023
1	0.138	0.318
2	0.661	0.483
3	-0.895	-0.367
4	1.177	0.734
5	0.183	0.233
6	0.898	0.3207
7	-0.136	-0.043
8	-1.144	-0.553
9	0.144	-0.0577

함수 \mathbf{f} 대신에 F_B 과 W 로 대치하면 각각에 대한 반응 표면모델을 구성할 수 있다. 중량 Weight와 좌굴하중 F_B 에 대한 식 (4)에 의해 산출된 삼차함수의 계수를 Table 2에 표시하였다. 반응표면모델의 신뢰도를 평가할 수 있는 결정계수 R^2 와 수정결정계수 R_{adj}^2 는 Table 3과 같다. 중량에 대한 결정계수 및 수정결정계수는 모두 1에 가깝고 좌굴하중에 대한 결정계수 및 수정결정계수도 90%이상이어서 신뢰도 높은 근사모델이라 할 수 있다. 따라서 이 근사모델을 이용하여 최적화를 수행하였다. 그 결과 최적설계변수는 $x_1^* = 6.0\text{mm}$ $x_2^* = 14.34\text{mm}$ 이며 최적해에서의 중량 및 좌굴하중값을 Table 4에 표시하였다. 근사모델에 의한 좌굴하중값과 중량의 예측값과 유한요소해석에 의해 산출된 값을 비교해 본 결과 오차가 각각 2.6%, 0.17%로 보이고 있다. 최적해에서의 힘변위 곡선을 Fig. 7에 표시하였다.

Table 3. R^2 and R_{adj}^2 for Buckling Load and weight

	F_B (kN)	Weight(g)
R^2	0.96	0.99
R_{adj}^2	0.93	0.99

Table 4. Responses at the optimum solution (RSM)

	F_B (kN)	Weight(g)
Predicted Value	23.0	376.25
Analysis Value	22.4	375.6
Error[%]	2.6	0.17

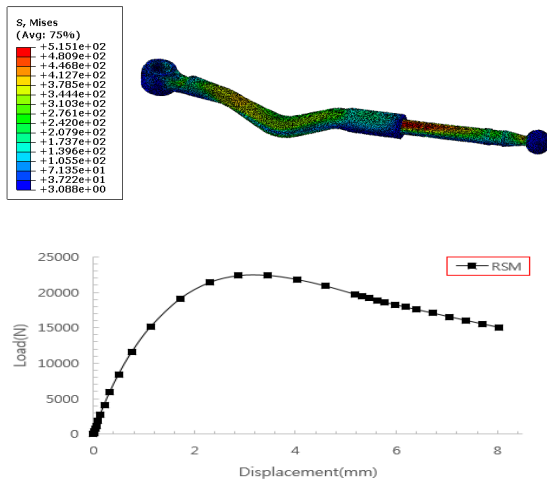


Fig. 7. Load-Displacement Curve Of RSM

3.2 크리깅기법을 이용한 구조최적설계

크리깅기법은 내삽법의 일종으로 비선형성이 크고 잡음이 있는 함수의 예측에 적합하다고 알려져 있다[1~5]. 뿐만 아니라 일반적으로 반응표면법과 비교하여 우수한 예측성능을 갖고 있다. 예측하고자 하는 함수를 $f(x)$ 라고 하면 설계변수벡터 x 에 대하여 다음 식으로 표시 가능하다.

$$f(x) = b + z(x) \tag{5}$$

여기서 b 는 상수이고, $z(x)$ 는 정규분포를 따르고 평균이 0이고 분산이 s^2 이라고 가정한다. 불편추정량 조건을 만족시키면서 $\hat{f}(x)$ 와 $f(x)$ 의 평균제곱오차를 최소화하면 $\hat{f}(x)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\hat{f}(x) = \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y - \hat{\beta}i) \tag{6}$$

여기서 R 은 상관행렬, r 은 상관벡터, y 는 데이터벡터이다. 상관행렬 및 상관벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R(X^j, X^k) = \text{Exp}\left[-\sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2\right], (j = 1, \dots, n_s, k = 1, \dots, n_s) \tag{7}$$

$$r(x) = [R(x, x^{(1)}), R(x, x^{(2)}), \dots, R(x, x^{(n_s)})]^T \tag{8}$$

식 (7)의 미지의 파라미터 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 는 다음을 풀면 구할 수 있다.

$$\text{maximize} - \frac{[n_s \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |R|]}{2} \tag{9}$$

여기서 $\theta_i (i=1,2) > 0$.

반응표면모델과 동일하게 표본점으로서 Table 1을 이용하였다. 좌굴하중과 중량에 대한 각각의 최적화 된 θ , β 를 Table 5에 표시하였다.

Table 5. Optimum Parameters of θ and β

	$F_B(\text{kN})$	$W(\text{g})$
θ_1	7.65	5.17
θ_2	2.36	1.98
β	21.6	364.9

즉, 식 (1)의 정식화에서 반응치를 식 (6) 및 Table 5의 값을 이용하여 대치하고 SQP알고리즘을 이용하여 최적해를 산출하였다. 크리깅근사모델로 구성된 최적설계 정식화문제에 대한 최적해는 $x_1^* = 7.3\text{mm}$ $x_2^* = 14.3\text{mm}$ 이며 최적해에서의 반응치를 Table 6에 정리하였다. 또한 최적해에서의 힘-변위 곡선을 Fig.8에 표시하였다.

Table 6. Responses at the optimum solution (Kriging)

	$F_B(\text{kN})$	$W(\text{g})$
Predict Value	23.03	374.51
Analysis Value	23.5	374.1
Error[%]	2.04	0.13

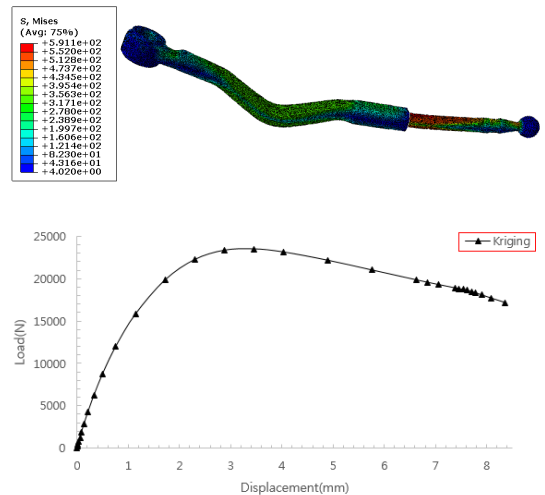


Fig. 8. Load-Displacement Curve Of Kriging

4. 결론

본 연구에서 자동차 조향장치 부품 중 아우터타이로드에 대한 반응표면법과 크리깅기법을 이용하여 경량화 설계를 제시하였다. 즉, 강재에서 Al6061 재질로 변경된 아우터타이로드의 경량화를 위하여 메타모델기반 최적설계를 수행하였다. 반응표면법과 크리깅을 적용한 경우 알루미늄으로된 초기모델 대비 각각 16.3%, 16.6%의 중량 감소 효과를 보였으며 모두 좌굴하중에 대한 기준을 만족하고 있다. 기존의 연구에서는 인너타이로드를 배제한 상태에서 구조설계를 진행한 반면 본 연구에서는 시험조건과 동일하게 아우터타이로드, 인너타이로드를 결합한 부품에 대한 구조설계를 수행하였다.

References

- [1] J.K. Kim, H.J. Son, S.W. Kang, Y.C. Park, K.H. Lee "Structural Optimization of an Outer Tie Rod for Passenger Car," KSAE Annual Conference and Exhibition, pp.1019~1025, 2009.
- [2] J.K. Kim, Y.J. Kim, W.H. Yang, Y.C. Park, K.H. Lee "Structural Design of an Outer Tie Rod for a Passenger Car", International Journal of Automotive Technology, Vol 12, Issue 3, pp.375-381, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12239-011-0044-6>
- [3] B.K. Seo, J.K. Kim, D.J. Lee, S.M. Seo, K.H. Lee, Y.C. Park "Structural Design of the Outer Tie Rod for and Electrical Vehicle," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 9, pp.4171-4177, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4171>
- [4] Y.J. Kim, K.J. An., K.H. Lee, Y.C. Park "Structural Optimization of an Outer Tie Rod Using RSM and Kriging," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol 16, No. 1 pp. 27-34, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.1.27>
- [5] J.K. Kim, Y.M. Kwon, Y.C. Park, K.H. Lee "Shape Design of an Outer Tie Rod, Considering Durability Criteria," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 4, pp.54-60, 2009.
- [6] B.C. Song, Y.C. Park, S.W. Kang, K.H. Lee "Structural Optimization of an Upper Control Arm, Considering the Strength," Journal of Automobile Engineering, Vol. 223, No. 6, pp. 727-735, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09544070JAUTO1090>

김 영 준(Young-Jun Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 부산대학교 기계공학과 대학원 (석사)
- 1989년 1월 ~ 2008년7월 : 현대모비스기술연구소부장
- 2008년7월 ~ 현재 : 센트럴중앙연구소상무

<관심분야>
구조설계, 최적설계

박 순 형(Soon-Hyeong Park)

[준회원]



- 2013년 8월 : 동아대학교 기계공학과 (학사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 대학원(석사과정)

<관심분야>
최적설계, 구조설계

이 권 희(Kwon-Hee Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학박사)
- 1994년 6월 ~ 1999년 6월 : 대우자동차 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
기계설계, 최적설계

박 영 철(Young-Chul Park)

[정회원]



- 1982년 2월 : 부산대학교 금속학과 대학원(공학석사)
- 2002년 2월 : 일본 동북대학교 기계공학과 대학원(공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 7월 : 동아대학교 산학협력단 단장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

금속재료, 구조설계