

실험계획법과 유전자 알고리즘을 이용한 타이어 형상설계

이동우¹, 김성래², 조석수^{3*}
¹동아대학교 기계공학과
²넥센타이어(주) 연구개발본부 설계해석팀
³강원대학교 자동차공학과

Optimization of Tire Contour by using GA and DOE

Dong-Woo Lee¹, Seong-Rae Kim² and Seok-Swoo Cho^{3*}

¹Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

²R&D Center, Nexen Tire Company

³Department of Vehicle Engineering, Kangwon National University

요 약 오늘날, 차량의 성능 향상에 따라 타이어에 대한 요구가 다양화 되고 요구성능이 고도화됨에 따라 타이어의 설계기술에 보다 다양한 기반기술들이 적극적으로 사용되기 시작하였으며, 이에 대한 많은 연구 중 타이어 형상의 최적화를 통한 타이어 성능 향상을 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 타이어 형상은 운전성능, 회전저항성, 내구성, 승차감, 소음, 내마모성 등과 같은 차량의 주요성능에 직접적인 영향을 미치는 대단히 중요한 설계인자이다. 따라서 본 연구에서는 실험계획법의 하나인 직교배열표와 회귀식을 이용하여 타이어 형상설계 시에 필요한 유한요소 해석시간을 단축시키고 유전자 알고리즘을 이용하여 타이어의 주요 성능을 만족하는 다목적 형상최적설계를 수행하였다.

Abstract Today, tire performance becomes better as vehicle performance increases. Drivability, endurance, comfortability, noise, and antiwear performance is influenced by tire contour. Tire design method is developed by high-tech engineering technology. Among these studies, tire performance improvement through tire contour optimization is performed by many vehicle investigator. Therefore, in the present study, an optimum contour design system satisfying the tire performance requirements is constructed by regression analysis and genetic algorithm by using design of experiments.

Key Words : Contour design, Constraint methods, Design of experiments, Genetic algorithm

1. 서론

타이어(tire)는 인류역사에 가장 위대한 발명품의 하나로 꼽히고 있는 바퀴의 현 산물로서, 육상교통과 수송의 급격한 발전을 가져와 인류문명의 발달에 크게 기여하였으며 차량과 함께 타이어도 급속히 발전하여 타이어의 수명이라고 할 수 있는 주행거리 역시 수십 배 이상 늘어났다. 타이어의 주요기능은 차량의 하중을 지지하는 기능, 구동력 또는 제동력을 노면에 전달하는 기능, 노면에서의 충격을 완화하는 기능, 차량의 방향을 전환하거나 유지하는 기능으로 크게 구분할 수 있으며 이러한 기능

을 만족시키기 위하여 그림1과 같이 트레드부, 벨트부, 카카스부, 비드부의 4부분으로 구성되어 있다[1].

타이어 형상은 카카스부의 인장력분포를 결정하기 때문에 운전성능, 회전저항성, 내구성, 승차감, 소음, 내마모성 등과 같은 차량의 주요성능에 직접적인 영향을 미치는 대단히 중요한 설계인자이다.

타이어 형상설계(contour design)는 크게 트레드 형상(tread contour)설계와 사이드월 형상(sidewall contour)설계로 나누어지며 이에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 1928년에 카카스가 균일한 인장분포를 갖도록 형상을 설계하는 초기의 자연평형형상법(equilibrium contour)이 제

*교신저자 : 조석수(sscho394@kangwon.ac.kr)

접수일 10년 10월 29일 수정일 (1차 10년11월25일, 2차 10년 12월 15일, 3차 11년 01월 11일) 게재확정일 11년 03월 10일

시되었으며 하나의 이론만이 존재하기 때문에 설계자가 동일한 형상을 제시하는 장점이 있으나 차량의 고속주행으로 인한 성능 향상에 어려움이 있다. 1970년대에 제안되어 현재 일반적으로 사용되고 있는 비자연평형형상법(nonequilibrium contour)은 카카스의 인장력을 비드 부근에서 최대로 그리고 벨트 부근에서 최소가 되게 하여 차량성능을 향상시키는 방법을 사용하고 있으나 이 방법의 경우 어떤 획일된 이론이 존재하지 않기 때문에 설계자에 따라 카카스 형상이 달라지며 고도로 숙련된 설계자가 필요한 단점을 가지고 있다[2,3].

오늘날, 차량의 성능 향상에 따라 타이어에 대한 요구가 다양화 되고 요구성능이 고도화됨에 따라 타이어의 설계기술에 보다 다양한 기반기술들이 적극적으로 사용되기 시작하였으며, 이에 대한 많은 연구 중 타이어 형상의 최적화를 통한 타이어 성능 향상을 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다[4-6].

그러나 기존의 최적화 방법으로, 타이어 형상 변경 시 유한요소절점을 직접 변화시키는 최적화 방법이 제시되고 있으나 이는 실제 설계자들이 설계하는 방식과 설계 변수가 상이한 경우가 대부분이고, 이렇게 최적화된 변수들은 다시 설계를 위한 변수로 변경해야하는 불합리한 점이 있다[7,8].

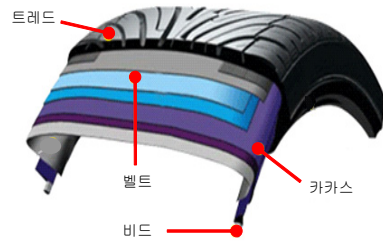
따라서 본 연구에서는 실험계획법의 하나인 직교배열표와 회귀식을 이용하여 타이어 형상 설계 시에 필요한 유한요소 해석시간을 단축시키고 John Holland[9]에 의해서 처음 제안된 자연의 유전학 및 자연도태의 원리에 근거한 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘을 이용하여 타이어의 주요 목적성능을 만족하는 다목적 형상최적설계를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 유전자 알고리즘[9]

유전자 알고리즘은 1970년대 초 John Holland에 의해 본격적으로 연구되기 시작한 알고리즘으로 자연의 유전학과 자연도태(natural selection)의 원리에 근거한 최적화 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 기존의 최적해 탐색이 한 점에서 그 다음 한 점으로 순차적으로 해를 구하는 국부적 탐색(local search)을 하는데 반해 여러 점을 동시에 탐색하는 전역적 탐색(global search)이므로 전역적인 최적해(global optimal solution)를 찾는 확률이 기존의 최적화 방법에 비해 높은 것이 특징이다. 특히 파라미터 영역의 연속성과 미분 가능성과 같은 조건이 필요없으며 결

정론적 법칙(deterministic rule)이 아닌 확률론적 변화법칙(probabilistic rule)이다.



[그림 1] Structure of a tire

2.2 제약식법[10]

파레토(Pareto) 최적해를 얻기 위한 체계적이고 간단한 방법이 제약식법이다. 제약식법은 게임이론이나 목표계획법에서와 같은 복잡한 단계를 거치지 않고도 다목적 최적화를 수행할 수 있다는 장점으로 인해 실제 구조물의 최적설계에 많이 사용되고 있다.

m개의 목적함수를 포함하는 다목적 최적화 문제는 식 (1)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & F=[f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)] \quad (1) \\ \text{subject to} \quad & g_j(X) \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, J \\ & h_n(X) = 0 \quad n=1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

이와 같이 표현된 다목적 최적화문제를 풀기위하여 가장 중요한 목적함수 하나를 선택하여 이를 주목적함수로 하고 나머지 m-1개의 목적함수를 부목적함수로 두고 즉, 제약조건으로 표현함으로써 다음의 식 (2)와 같은 단일 최적화 문제로 변환시킨 후 최적화를 수행한다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f_p(X) \quad (2) \\ \text{subject to} \quad & f_i(X) \leq \epsilon_i \quad i=1, 2, \dots, m(i \neq p) \\ & g_j(X) \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, J \\ & h_n(X) = 0 \quad n=1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

3. 타이어의 형상최적설계

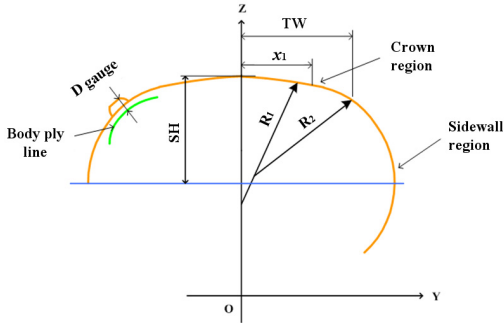
3.1 타이어의 설계변수

그림 2는 설계변수를 나타낸 것으로서 트레드 형상과 사이드월 형상을 결정하는 반경 R₁, R₂ 및 위치결정을 위한 길이 SH(section height), x₁, TW(tread width)와 트레드

부와 사이드월부의 연결부의 성능에 관계된 구조변수인 D gauge 등 6개를 설계변수로 결정하였다. 그리고 표 1은 각 설계변수에 대한 범위를 나타낸 것이다.

3.2 타이어의 유한요소해석

본 연구에 사용한 타이어의 해석프로그램은 비선형 해석에 강점이 있는 상용프로그램 ABAQUS 6.5이다[11].



[그림 2] Design variables for tire contour

[표 1] Bounds of design variables

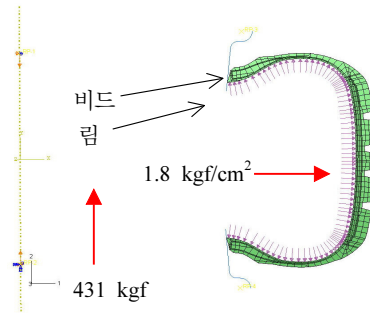
	Bounds (mm)
Tire contour	$400 \leq R_1 \leq 1200$
	$180 \leq R_2 \leq 350$
	$30 \leq x_1 \leq 50$
	$70 \leq TW \leq 90$
	$57.375 \leq SH \leq 76.5$
	$7 \leq D \leq 9$

그림 3과 4는 각각 2차원과 3차원 유한요소모델을 나타낸 것이다. 타이어에 작용하는 하중은 내부의 공기압과 지면과 접촉할 때 발생하는 하중이 있다. 따라서, 타이어의 유한요소해석은 2단계로 이루어진다. 먼저, 내부에 작용하는 공기압은 타이어를 축대칭으로 간주하여 2차원 해석을 수행한다. 그리고 2차원 해석을 수행한 결과를 기초로 3차원 모델을 구성한 후, 타이어가 지면과 접촉할 때의 하중을 3차원으로 해석한다.

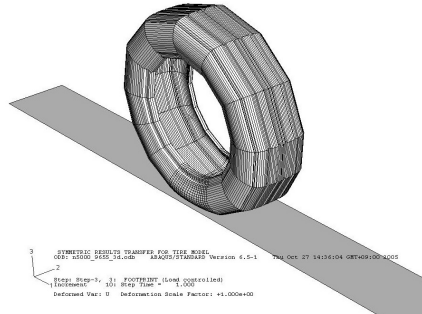
그림 3은 타이어의 2차원 유한요소모델에 대한 경계조건과 하중 조건을 나타낸 것이다. 그림3과 같은 초기 상태에서 타이어에 공기압을 불어넣게 되면 타이어는 림을 따라 변형을 하게 된다. 따라서 공기압을 불어넣은 후의 타이어 상태를 모델링하기 위하여 림에 연결된 비드부를 고정한 후, 공기압을 가하였다. 공기압은 유한요소 모델 내부에서 균일한 압력으로 작용하며 크기는 1.8

kgf/cm²이다.

그림 4는 3차원 유한요소모델의 경계조건과 하중조건에 대한 것이다. 넓은 판과 같은 형상을 한 강체모델로 지면을 대신하여 설정한다. 경계조건은 타이어 유한요소 모델이 실제와 같이 타이어가 지면과 닿아 있는 상태와 같이 접촉하는 것이다. 지면의 역할을 하는 강체모델을 고정시키고 일정 거리를 상승시키면서 유한요소모델과 접촉 시킨다. 그 후에 431 kgf의 하중을 주어 해석을 실시하였다.



[그림 3] Boundary and load conditions for 2D analysis



[그림 4] Boundary and load conditions for 3D analysis

3.3 설계문제의 정식화

본 연구에서는 타이어의 요구성능 중에서 타이어의 내구성에 영향을 미치는 벨트부 끝단의 변형률에너지밀도 (ρ)를 최소화하는 것과 조중성에 영향을 미치는 비드부의 장력(T)을 최대화하는 것을 목적함수로 정의하였다 [12-15].

따라서, 타이어의 형상 최적화를 위한 정식화는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{find design variables } R_1, R_2, x_1, TW, SH, D \quad (3) \\ &\text{to minimize} \quad \text{Tension } f(-T) \\ &\quad \quad \quad \text{Strain energy density } f(\rho) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{subject to} \quad & 400 \leq R_1 \leq 1200 \\ & 180 \leq R_2 \leq 350 \\ & 30 \leq x_1 \leq 50 \\ & 70 \leq TW \leq 90 \\ & 57.375 \leq SH \leq 76.5 \\ & 7 \leq D \leq 9 \end{aligned}$$

이와 같이 표현된 다목적 최적화문제를 풀기 위하여 내구성에 관련이 있는 변형률에너지밀도(SED)를 주목적 함수로 선택하고 비드부의 장력을 부목적함수로 하여 아래와 같이 단일 최적화문제로 변환시킨 후 최적화를 수행하였다. 여기서 비드부 장력은 표 6에 나타난 승용차용 타이어 P195/65R15 89H의 유한요소해석값의 10 %를 제약조건으로 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{find design variables} \quad & R_1, R_2, x_1, TW, SH, D \quad (4) \\ \text{to minimize} \quad & \text{Strain energy density } f(\rho) \\ \text{subject to} \quad & f(-T) \leq 44.658 \\ & 400 \leq R_1 \leq 1200 \\ & 180 \leq R_2 \leq 350 \\ & 30 \leq x_1 \leq 50 \\ & 70 \leq TW \leq 90 \\ & 57.375 \leq SH \leq 76.5 \\ & 7 \leq D \leq 9 \end{aligned}$$

3.2 설계변수를 고려한 직교배열표 결정

실험을 실시하기 이전에 실험에 대한 충분한 계획 없이는 소기의 목적을 달성하기 어렵다. 실험계획법이란 실험에 대한 계획을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라 정의할 수 있다. 그리고 실험에 있어서 목적함수 값에 영향을 준다고 생각되는 무수히 많은 원인들 중에서 실험에 직접적인 영향을 주는 원인을 인자(factor)라 하며 실험을 하기위한 인자의 조건을 인자의 수준(level)이라 한다. 이 인자의 수준으로 취한 값의 수를 수준수라 한다. 인자수 및 수준수, 교호작용의 유무는 실험회수를 정하는 중요한 요인이 된다[16].

일반적으로 인자의 수준을 2 수준을 사용하면 실험회수는 3 수준보다 줄어들지만 데이터 분석 시 1 차식(선형)으로 표현되기 때문에 데이터의 비선형성을 고려하기가 어렵다[17]. 반면에 3 수준 이상의 실험을 하면 실험회수는 증가하나 데이터 분석이 2 차식(비선형)으로 표현되어 비선형성을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 타이어의

설계변수 개수를 고려하여, 타이어 형상을 결정하는 주요 설계변수 6 개를 인자로, 타이어의 목적성능에 영향을 미치는 비드부의 바디플라이 장력과 벨트부 끝단 고무의 변형률에너지밀도 범위를 반응값으로 하여 표 2에 나타난 인자 6 개, 5 수준의 $L_{25}(5^6)$ 직교배열표로 결정하였다. 표 3은 인자 6 개의 수준을 나타낸 것이다.

T는 비드부의 바디플라이 장력을 ρ 은 벨트부 끝단 고무의 변형률에너지밀도 범위를 나타낸 것이다.

3.5 직교배열표를 이용한 회귀식 추정

본 절에서는 최적설계 수행에 많은 시간을 차지하고 있는 유한요소해석 시간을 줄이기 위하여 표 2의 직교배열표를 이용하여, 각 목적함수에 대하여 독립변수가 2개 이상이고 종속변수와의 관계가 1차 함수 이상인 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 적용하였다.

[표 2] $L_{25}(5^6)$ Orthogonal arrays

Exp. No.	Factors						Responses	
	R_1	R_2	x_1	SH	TW	D	T_{max}	ρ_{min}
1	1	1	1	1	1	1	44.26	0.145
2	1	2	2	2	2	2	41.44	0.161
3	1	3	3	3	3	3	39.85	0.203
4	1	4	4	4	4	4	39.41	0.192
5	1	5	5	5	5	5	40.46	0.139
6	2	1	2	3	4	5	40.26	0.239
7	2	2	3	4	5	1	43.48	0.151
8	2	3	4	5	1	2	32.87	0.0726
9	2	4	5	1	2	3	44.02	0.0789
10	2	5	1	2	3	4	42.09	0.142
11	3	1	3	5	2	4	33.66	0.0971
12	3	2	4	1	3	5	44.31	0.0948
13	3	3	5	2	4	1	46.07	0.0864
14	3	4	1	3	5	2	44.61	0.11
15	3	5	2	4	1	3	34.67	0.0659
16	4	1	4	2	5	3	45.57	0.125
17	4	2	5	3	1	4	36.29	0.0492
18	4	3	1	4	2	5	34.78	0.12
19	4	4	2	5	3	1	37.84	0.111
20	4	5	3	1	4	2	47.59	0.0904
21	5	1	5	4	3	2	38.93	0.0951
22	5	2	1	5	4	3	37.80	0.158
23	5	3	2	1	5	4	47.45	0.125
24	5	4	3	2	1	5	38.57	0.0632
25	5	5	4	3	2	1	40.59	0.0766

[표 3] Levels of factors

Level	Level of factor					
	R ₁	R ₂	x ₁	SH	TW	D
1	400	180	30	57.375	70	7
2	600	222.5	35	62.156	75	7.5
3	800	265	40	66.938	80	8
4	1000	307.5	45	71.719	85	8.5
5	1200	350	50	76.5	90	9

3.5.1 비드부 장력의 회귀분석

회귀식은 식 (5)(유의수준 0.05)와 같으며 결정계수 R² 값과 수정 결정계수 R²_{adj} 값은 각각 0.994와 0.991이다.

$$T = 54.0+0.000305R_1+0.00285R_2+0.0201x_1 -0.473SH+0.344TW-1.39D \quad (5)$$

3.5.2 벨트부 끝단의 변형률에너지밀도의 회귀분석

회귀식은 식 (6)(유의수준 0.05)과 같으며 결정계수 R² 값과 수정 결정계수 R²_{adj} 값은 각각 0.903과 0.855이다.

$$SED = 0.161-0.000040R_1-0.000213R_2 -0.00324x_1-0.000143SH+0.00248TW -0.00277D \quad (6)$$

표 4와 5는 분산분석을 이용한 회귀식의 타당성을 검증한 것으로 유의확률이 0.000으로 5% 유의수준에서 통계적으로 타당함을 보여주고 있다.

[표 4] Analysis of variance for tension

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	20.392	70.065	423.55	0.000
Residual Error	18	2.647	0.165		
Total	24	23.038			

[표 5] Analysis of variance for SED

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	0.01893	0.00315	18.63	0.000
Residual Error	18	0.00203	0.00016		
Total	24	0.02096			

또한, 표 6은 승용차용 레이디얼 구조의 일반 사계절 용 타이어(P195/65R15 89H)에 대한 유한요소 해석결과와 회귀식을 비교한 것으로, 벨트부의 장력과 변형률에너지밀도에 대한 오차가 각각 0.8%와 5.7%를 보여 회귀식이 타당함을 확인할 수 있었다.

[표 6] Comparison between regression and FEA

	Tension	SED
FEA results	40.597	0.12533
Regression value	40.272	0.11818
Error(%)	0.8	5.7

3.6 타이어 형상의 다목적 최적설계

본 연구에서는 실험계획법의 하나인 직교배열표와 회귀식을 이용하여 타이어 형상 설계 시에 필요한 유한요소 해석시간을 단축시키고 자연의 유전학 및 자연도태의 원리에 근거한 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘과 제약식법을 이용하여 타이어의 주요 목적성능을 만족하는 다목적 최적화를 단일최적화문제로 변환하여 최적화를 수행하였다.

또한 일반적인 공학문제와 마찬가지로 타이어 설계의 경우에도 요구 목적 성능이 다양하기 때문에 유일한 최적해가 존재하지 않고 다양한 파레토해가 존재한다. 따라서 타이어의 목적성능은 3.5절에서 서술한 조건으로 최적화를 수행하였다.

표 7은 유전자 알고리즘의 교배 및 돌연변이 확률을 나타낸 것으로 Schaffer의 실험결과를 토대로 집단의 크기를 기준으로 해서 각각 0.75와 0.01로 결정하였다[18].

[표 7] Parameter values of GA

Items	Values
Population size	50
Crossover rate	0.75
Mutation rate	0.01
Maximum generation	100,000

표 8은 비드부의 장력을 제한조건으로 변형률에너지밀도의 최적화를 수행한 결과를 나타낸 것으로 제한조건 내에서 변형률에너지밀도가 기존의 값보다 약 23.9 % 향상된 값을 구할 수 있었다. 또한 표 9는 이 때의 타이어의 각 치수를 나타낸 것이다.

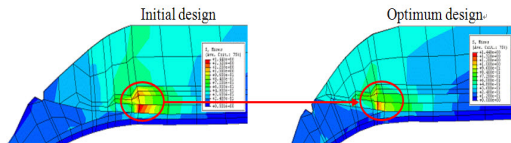
[표 8] Results of optimized design for tire

	Tension	SED
Initial value	40.597	0.12533
Optimal value	44.658	0.09543

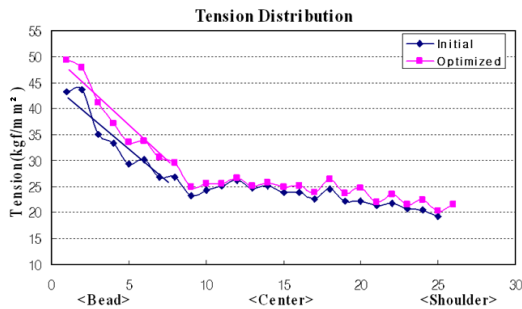
[표 9] Results of optimized design variables by GA

	R ₁	R ₂	x ₁	SH	TW	D
Initial value	527.00	203.00	41.50	63.75	75.50	8.00
Optimal value	1003.23	312.49	40.48	61.45	81.23	7.36

또한 그림 5와 6은 표 9에 나타난 최적화치수에 대한 유한요소해석결과를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보이는 것과 같이 변형률에너지밀도가 초기 설계값보다 감소한 것을 알 수가 있다. 그림 6은 타이어 각 부분에서의 장력 값의 분포를 나타낸 것으로 초기 설계값보다 장력값이 전체적으로 증가한 것을 알 수가 있다.



[그림 5] Comparison between initial and optimum design for stress energy density



[그림 6] Comparison between initial and optimum design for tension distribution

4. 결론

본 연구에서는 실험계획법, 유전자 알고리즘과 제약식법을 이용하여 타이어의 요구성능을 최대화하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 직교배열표와 회귀식을 이용하여, 타이어 형상설계 최적화에 필요한 유한요소해석 시간을 감소시킬 수 있었다.
- (2) 타이어 형상설계와 같은 다변수 다목적 최적화 문제에 제약식법과 유전자 알고리즘을 이용한 방법을 제안하였다.
- (3) 타이어의 내구성은 승객의 안전과 직결된 중요한 요구성능이다. 따라서, 본 연구에서는 내구성과 관련된 변형률에너지밀도를 주목적함수로, 조종성과 관련된 장력을 제약조건으로 타이어의 형상최적화를 수행하였으며, 그 결과 변형률에너지밀도를 약 23.9% 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

- [1] B. G. Rhee, and S. M. Oh, "Study on the Friction Characteristics for Automotive Tires," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.9, No.6, pp. 1538-1540, 2008.
- [2] H. W. Kim, et al., "Tire Engineering," Goldenbell, pp.39-45, 2004.
- [3] R. B. Day, and S. D. Gehman, "Theory for the Meridian Section of Inflated Cord Tires," Rubber Chemistry and Technology, Vol.36, pp.11, 1963.
- [4] K.Yamagishi, M. Togashi, S. Furuya, K. Tsukahara, and N. Yoshimura, "A Study on the Contour of the Radial Tire: Rolling Contour Optimization Theory-(RCOT)," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.15, No.1, pp.3-29, 1987.
- [5] J. R. Cho, H. S. Jeong, H. W. Lee, N. J. Kim, and K. W. Kim, "Optimal Design of Tire Sidewall Contours for Improving Maneuverability and Durability," Transactions of KSME, Vol.25, No.10, pp.1636-1643, 2001.
- [6] J. R. Cho, S. W. Shin, and W. S. Yoo, "Crown Shape Optimization for Enhancing Tire Wear Performance by ANN," Computers & Structures, Vol.83, Issues12-13, pp.920-933, 2005.
- [7] G. Unnithan, R. KrishnaKumar, and A. Prasad, "Application of a Shell-Spring Model for the Optimization of Radial Tire Contour Using a Genetic Algorithm," Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.31, No.1, pp.39-63, 2003.
- [8] W. M. Yang, and Y. Cheng, "CAD/CAE and Optimum Design of Radial Tire," Symposium of International Rubber Conference, pp.15-18, 2004.

[9] D. E. Goldberg, "A Note on Boltzmann Tournament Selection for Genetic Algorithms and Population-Oriented Simulated Annealing," *Complex Systems*, Vol.4, pp.445-460, 1990.

[10] Z. Louis, and M. Z. Cohn, "Multiobjective Optimization of Prestressed Concrete Structures," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No.3, pp.794-808, 1993.

[11] ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.5, ABAQUS Inc., 1995.

[12] Y. Nakajima, Y., T. Kamegawa, and A. Abe, "Theory of Optimum Tire Contour and Its Application", *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol.24, No.3, pp.184-203, 1996.

[13] Y. Nakajima, T. Kamegawa, and K. Ueno, "Application of a Neural Network for the Optimization of Tire Design," *Tire Science and Technology*, Vol.27, No.2, pp.62-83, 1999.

[14] S. H. Heo, J. S. Shim, H. S. Kim, and W. H. Shon, "Experimental Comparative Analysis and Subjective Evaluation on the Handling Stability Characteristics of Passenger Cars," *Journal of KSAE*, Vol.3, No.4, pp.30-40, 1995.

[15] S. R. Kim, K. D. Sung, S. J. Kim, and C. T. Cho, "A Study on the Belt Width and Separation of Tire using FEM," *Journal of KSPE*, Spring Conference Proceeding, pp.2006-2010, 2005.

[16] S. H. Park, "Modern Design of Experiments," *Minyoungsa press*, pp.281-330, 1995.

[17] H. S. Park, S. H. Rhee, and K. W. Um, "Estimation of CO2 Laser Weld Bead by using Multiple Regression," *Journal of KWS*, Vol. 17, No. 3, pp.26-35, 1999.

[18] J. D. Schaffer, "A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithm for Function Optimization," *Proceeding of the 3rd International Conference on Genetic Algorithm*, pp.51-61, 1989.

이 동 우(Dong-Woo Lee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학석사)
- 2003년 8월 : 동아대학교 기계공학과(공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
파괴역학, 구조최적설계

김 성 래(Seong-Rae Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학사)
- 2003년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 넥센 타이어(주) 연구개발본부 설계해석팀

<관심분야>
타이어 구조해석, 최적설계

조 석 수(Seok-Swoo Cho)

[정회원]



- 1991년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학사)
- 1993년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 기계공학과(공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 자동차공학과 교수

<관심분야>
재료강도평가, 구조최적설계