

## 조정성과 내구성 향상을 위한 타이어 측벽형상 최적설계

조진래<sup>†</sup> · 정현성\* · 이홍우\* · 김남전\*\* · 김기운\*\*  
(2001년 3월 10일 접수, 2001년 7월 14일 심사완료)

### Optimal Design of Tire Sidewall Contours for Improving Maneuverability and Durability

Jin-Rae Cho, Hyun-Sung Jeong, Hong-Woo Lee, Nam-Jeon Kim and Kee-Woon Kim

**Key Words:** Optimum Sidewall Contour(최적 측면형상), Maneuverability(조정성), Durability(내구성), Aspiration Level(희망수준), Satisficing Trade-off Method(만족화 교환법)

#### Abstract

Automobile maneuverability and tire durability are significantly influenced by the sidewall tire contour. In order to improve these tire performances, it is very important for one to determine a sidewall contour producing the ideal tension and strain-energy distributions. However, these requirements can not be simultaneously achieved by conventional non-interactive multi-objective optimization methods based on mathematical programming, because these exhibit the conflicting behavior each other, with respect to the sidewall contour. Therefore, we execute the tire contour optimization for improving the maneuverability and the tire durability using satisficing trade-off method.

#### 1. 서론

1980년대 공기주입식 타이어가 개발된 후, 많은 연구자들에 의해 타이어의 성능을 향상시키기 위한 연구가 이루어져 왔다.<sup>(1)</sup> 하지만 초기 타이어는 접지부의 변형에 의한 마찰로 인해 내구성이 떨어지는 단점이 있었다. 이를 보완하기 위해 1915년 코드(cord)가 포함되어 있는 고무층을 삽입함에 의해 내구성을 향상시켰고, 코드재료에 있어서도 폴리에스테르, 강철, 나일론등 다양한 소재가 사용되어 성능향상에 기여하였다. 그후, 코드방향이 타이어 중립선과 35°의 각을 이루는 바이어스 타이어에서 코드방향이 중심선에 대해 90°의 각을 이루는 벨트층을 삽입해 고속주행 및 안전주행에 적합한 래디얼 타이어가 개발되었다. 그외 조정성,

내구성, 소음 등의 타이어 성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 이루어져 왔다.

여러 타이어 성능중 조정성과 타이어의 내구성은 타이어 카카스내의 코드장력분포와 변형에너지 분포를 이상적으로 분포시킴으로서 향상될수 있다. 그리고 이 두성능은 타이어 측벽부의 카카스 형상에 밀접한 영향을 가지며, 많은 연구에 의해 두 성능이 향상되어 왔다.

1928년 카카스내에 균일한 인장분포를 갖는 타이어 형상을 설계하는 natural equilibrium contour 기법이 제시되었다.<sup>(2)</sup> 하지만, 균일한 인장분포가 차량성능의 향상에 제약을 주고, 카카스와 벨트 연결부의 설계에 어려운 문제점을 주었다. 1970년대 이러한 문제점을 보완하기 위한 RCOT와 TCOT와 같은 nonequilibrium contour 기법이 제기되었지만, 획일적인 이론이 존재하지 않았고, 결과가 설계자의 경험과 지식에 의존한다.<sup>(3)</sup>

따라서 이 연구에서는 희망수준(aspiration level)의 선정의 방법을 제시함에 의해 이러한 문제점을 보완하고, STOM(satisficing trade-off method)을 적용하여 조정성과 내구성 향상을 위한 타이어 측벽형상 최적설계를 실시한다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술 연구소

E-mail : jrcho@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* (주)금호산업 연구소/특성연구팀

## 2. 타이어 형상 최적설계

### 2.1 타이어 최적설계 정식화

앞에서도 언급하였듯이 조정성과 타이어의 내구성 향상을 위하여 타이어 카카스내의 코드장력 분포와 변형에너지 분포의 최적화가 요구된다. 그리고 이 두 성능은 타이어 측벽부의 카카스 형상에 의존한다. 따라서 두 목적성능을 향상시키기 위한 설계영역을 Fig. 1에서와 같이 벨트 가장자리(p점)에서 림이 접촉되는 상단(q점)까지의 타이어 측벽부를 설계영역으로 정의한다. 그리고 가장 내부에 위치한 카카스 라인위의 임의의 절점 반경( $R_1, \dots, R_N$ )을 다음과 같이 설계변수로 정의하였다.

$$\mathbf{X} = \{R_1, \dots, R_N\}^T \quad (1)$$

여기서 Fig. 1에서와 같이 각 설계변수로 사용된 절점은 등간격이 되도록 정의하였다. 그리고 타이어의 측벽형상은 다항식 근사기법(polynomial interpolation)에 의해 아래와 같이 설계변수에 의해 표현하였다.

$$R(\theta) = \sum_{i=1}^N R_i \varphi_i, \quad \varphi_i(\theta) = \prod_{j=1, j \neq i}^N \frac{\theta - \theta_j}{\theta_i - \theta_j} \quad (2)$$

다음으로 두 목적성능을 향상시키기 위한 목적함수를 정의한다. 조정성 향상을 위해서는 타이어 카카스 측면의  $r$ 개 요소의 요소평균(element-averaged) 코드장력값을 목적함수로 정의하고, 내구성 향상을 위해서는 변형에너지가 높은 영역인 벨트 가장자리 요소의 요소평균 변형에너지 값을 목적함수로 정의하였다. 이때 타이어 조정성과 내구성 향상을 위한 목적함수를 다음과 같이 정의할 수 있으며, 식 (3)에서와 같이 다목적 최적설계(multi-objective optimization)임을 알 수 있다.

$$F(\mathbf{X}) = F\{f_1(\mathbf{X}), \dots, f_r(\mathbf{X}), f_{r+1}(\mathbf{X}), \dots, f_{r+s}(\mathbf{X})\} \quad (3)$$

여기서,  $f_i(\mathbf{X})$ 는 각 요소의 목적함수값을 나타내며,  $r$ 과  $s$ 는 각각 조정성 향상을 위해 정의된 요소 수와 내구성 향상을 위해 정의된 요소 수를 나타낸다.

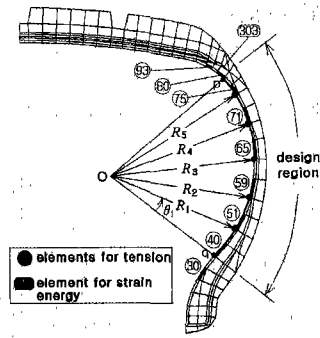


Fig. 1 Model for sidewall contour optimization

마지막으로, 타이어 최적설계에 구속조건이 따른다. 이 연구에서는 설계영역내의 총 카카스 길이와 설계변수의 반경변화를 구속한다. 이것은 타이어 형상이 제조상의 문제가 따르거나 타이어의 크기가 너무 크거나 작게 변하지 않도록 하기 위해서이다. 먼저 설계영역내의 총 카카스 길이 제한조건은 다음과 같다.

$$g_1(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} - (1 + \vartheta)L_0 \leq 0 \quad (4)$$

$$g_2(\mathbf{X}) = (1 - \vartheta)L_0 - \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (5)$$

여기서  $\vartheta$ 와  $M$ 은 설계영역내의 카카스 길이 상대 변화 허용값과 설계영역내 카카스 라인위의 총 절점의 수를 나타내고,  $(x_i, y_i)$ 는 카카스 라인위의 절점 좌표를 나타낸다. 그리고  $L_0$ 는 초기 타이어의 카카스 길이를 나타낸다.

$$L_0 = \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{(x_{i+1}^0 - x_i^0)^2 + (y_{i+1}^0 - y_i^0)^2} \quad (6)$$

또한 설계변수의 반경 구속조건은 다음과 같다.

$$g_{i+1}(\mathbf{X}) = R_i^L - R_i \leq 0, i = 1, N \quad (7)$$

$$g_{i+N+2}(\mathbf{X}) = R_i - R_i^U \leq 0, i = 1, N \quad (8)$$

여기서,  $R_i^L$ 과  $R_i^U$ 는 카카스 반경의 최소, 최대 허용값을 나타낸다. 따라서 앞의 식 (1)-(8)에 의해 조정성과 내구성 향상을 위한 다목적 최적설계 문제를 아래와 같이 구성할 수 있다.

Find  $\mathbf{X} = \{R_i\}_{i=1}^N$  (9)

Minimize  $F(\mathbf{X})$  (10)

Subject to  $g_i(\mathbf{X}) \leq 0, i = 1, \dots, 2(N+1)$  (11)

2.2 Satisficing Trade-off Method(STOM)

식 (3)에서와 같이 타이어의 조정성과 내구성을 향상시키는 최적설계문제는 목적함수가 다수 존재하는 다목적 최적설계 문제이다. 이러한 다목적함수의 최적화 문제는 목적함수들 사이의 연관성 때문에 하나의 목적성능을 향상시킬 때 다른 목적함수의 손실이 발생하므로 임의의 목적성능을 향상시키기 위해서는 다른 목적성능의 희생을 필요로 하게 된다. 따라서 설계자는 어떠한 목적성능을 향상시킬 것인지와 어떤 목적성능을 희생시킬 것인지를 판단하여야 한다. 이 경우, 설계자는 많은 사전지식이나 경험을 필요로 하게 되고, 결과 자체가 설계자의 예비지식이나 경험에 의존되게 된다. 또한 일반적인 단일 목적함수의 최적화 문제와 달리 유일해나 최적해를 보장하지를 못한다.

따라서 최적해를 결정하기 위해 설계자의 최소한의 노력이 요구되고, 체계적인 기법을 필요로 한다. 이 연구에서는 여러 다목적설계기법 중 하나인 STOM을 적용한다.<sup>(5)</sup> 이 기법은 단지 이상수준(ideal level)과 설계자가 바라는 희망수준(aspiration level)만 요구되며, 아래에 STOM의 단계별 과정을 제시하였다.

(단계1) 다목적함수의 집합 F에 대한 이상수준  $F^*$ 를 정의한다. 이상수준은 각 목적함수가 최적의 값으로 도달할 수 있는 한계를 나타내고, 이 연구에서는 단일 목적함수 최적설계(single-objective optimization)에 의해 정의한다.

$$F^* = \{f_1^*, \dots, f_r^*, f_{r+1}^*, \dots, f_{r+s}^*\} \quad (12)$$

여기서  $f_i^*$ 는 각 목적함수의 이상수준을 나타낸다.

(단계2) 반복단계 k에서의 희망수준  $\hat{f}_i^k$ 를 정의한다.

$$\hat{F}^k = \{\hat{f}_1^k, \dots, \hat{f}_r^k, \hat{f}_{r+1}^k, \dots, \hat{f}_{r+s}^k\} \quad (13)$$

여기서 각 반복단계에서의 희망수준 선택 절차를 요약하면 다음과 같다.

먼저 초기 희망수준을 선정한다. 초기 희망수준은 이상수준과 초기값 사이의 임의값을 설계자에 의해 선정한다. k회 반복후, 희망수준의 선정을 위해서는 먼저 각 목적함수를 희망수준 척도(aspiration level indicator)  $\eta_i^k$ 에 의해 세그먼트로 나눈다.

- i) 향상되어야 할 목적함수 ( $\gamma_I$ )
- ii) 완화되어야 할 목적함수 ( $\gamma_R$ )
- iii) 만족된 목적함수 ( $\gamma_A$ )

여기서, k회 반복후에 각 목적함수의 희망수준 척도  $\eta_i^k$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_i^k = |f_i - \bar{f}_i^k| / |f_i^* - \hat{f}_i^k|, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

여기서  $\bar{f}_i^k$ 는 k회 반복후의 최적값(optimum value)을 나타낸다.

다음으로 그룹  $\gamma_I$ 내의  $\eta_i^k \geq 1$ 의 값을 가진 목적함수와 그룹  $\gamma_R$ 내에  $\eta_i^k \leq 1$ 의 값을 가진 목적함수, 그리고 그룹  $\gamma_A$ 로 정의된 모든 목적함수는 현재의 희망수준을 그대로 유지시킨다. 반면에 그룹  $\gamma_I$ 내의  $\eta_i^k < 1$ 의 값을 가진 목적함수와 그룹  $\gamma_R$ 내의  $\eta_i^k > 1$ 의 값을 가진 목적함수에 대해서는 식 (15)를 만족하도록 (k+1)번째 희망수준을 선정한다.

$$|f_i - \bar{f}_i^k| / |f_i^* - \hat{f}_i^{k+1}| = 1 \quad (15)$$

(단계3) 정의된 이상수준과 희망수준에 의해 각 목적함수의 가중치(weight)  $w_j^k$ 를 도입하고, 식 (3)의 다목적함수를 다음과 같이 각 반복단계 k에서의 단일 목적함수를 정의한다.

$$F^k(\mathbf{X}) = \max \{w_j^k | f_j^* - f_j(\mathbf{X}) | \},$$

$$1/w_j^k = |f_j^* - \hat{f}_j^k| \quad (16)$$

다음으로 ALM(augment Lagrange multiplier method)을 사용하여 위의 단일 목적함수식 (16)과 제약조건을 조합하여 비제약 가목적함수(unconstraint pseudo-objective function)를 정의한다.

$$A^k(\mathbf{X}, \lambda_i, r_p) = F(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^{2(N+1)} [\lambda_i \phi_i^k + r_p (\phi_i^k)^2],$$

$$\psi_i^k = \max \left[ c_i^k g_i(\mathbf{X}^{k-1}), -\frac{\lambda_i}{2r_p} \right] \quad (17)$$

여기서,  $\lambda_i$ 는 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)이고,  $r_p$ 는 벌칙상수(penalty parameter)이다. 또한 목적함수에 대한 각 구속조건의 정규화(normalizing)를 위한 척도계수(scailing factor)  $c_i^k$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$c_i^k = \frac{|F(\mathbf{X}^{k-1} + \delta \mathbf{X}) - F(\mathbf{X}^{k-1})|}{|g_i(\mathbf{X}^{k-1} + \delta \mathbf{X}) - g_i(\mathbf{X}^{k-1})|} \quad (18)$$

위의 비제약 가목적함수의 해는 다음절에 언급될 증분기법(incremental scheme)과 민감도해석에 의해 계산될 것이다.

(단계4) 정의된 해가 설계자의 판단에 의해 만족스러운지 혹은 반복계산이 필요한지를 결정하고, 후자의 경우, 단계 2로 되돌아가 새로운 희망수준을 정의하여 반복계산한다.

2.3 증분기법 및 민감도 해석

앞절에서 정의된 가목적함수(pseudo-objective function)  $A^k(\mathbf{X}, \lambda_i, r_p)$ 는 타이어의 물성, 기하, 경계조건이 비선형거동을 보이고 구속조건내에도 비선형항을 포함하고 있으므로, 가목적함수의 해를 계산하기 위해서는 다음과 같이 증분기법을 필요로 한다.<sup>(6)</sup>

$$\mathbf{X}^{k'} = \mathbf{X}^{k'-1} + \Delta \mathbf{X}^\ell, \quad \Delta \mathbf{X}^\ell = \alpha^\ell \mathbf{S}^\ell \quad (19)$$

여기서 우리는 이전단계의 값  $\mathbf{X}^{k'-1}$ ,  $\lambda_i^{\ell-1}$ ,  $r_p^{\ell-1}$ 에 의해 민감도 해석을 수행하여 강화방향(search direction)  $\mathbf{S}^\ell$ 을 계산한다.

$$\mathbf{S}^\ell = -\{\partial A^{k'-1} / \partial \mathbf{X}_1, \dots, \partial A^{k'-1} / \partial \mathbf{X}_N\}^T \quad (20)$$

또한 황금분할법(golden section method)과 다항식 근사기법(polynomial interpolation)에 의해 양의 상수  $\alpha^\ell$ 을 계산하며, 수렴조건식 (21)이 만족될 때까지 반복수행한다.

$$|\lambda_i^\ell - \lambda_i^{\ell-1}| \leq \epsilon_\lambda, \text{ or } |(F^{k'} - F^{k'-1}) / F^{k'}| \leq \epsilon_F \quad (21)$$

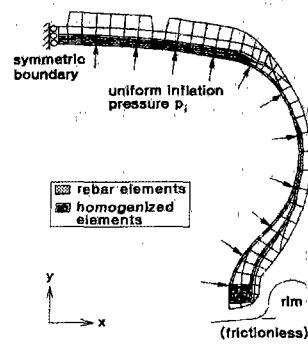


Fig. 2 Finite element model for tire analysis

여기서  $\epsilon_\lambda$ 와  $\epsilon_F$ 는 최적설계를 위한 라그랑지 승수와 목적함수의 수렴률을 나타낸다. 마지막으로 각 반복단계동안 라그랑지 승수와 벌칙상수는 아래와 같이 갱신한다.

$$\lambda_i^{\ell+1} = \lambda_i^\ell + 2r_p^\ell \left\{ \max \left[ c_i g_i(\mathbf{X}), -\frac{\lambda_i^\ell}{2r_p^\ell} \right] \right\} \quad (22)$$

$$r_p^{\ell+1} = \gamma \cdot r_p^\ell \quad (23)$$

3. 수치실험 및 결과

앞에서 정의된 최적설계 알고리즘과 상용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS에 의한 타이어 해석을 통해 조정성과 내구성을 향상시키는 타이어 카카스 측면 형상 최적설계를 실시하였다. 해석에 사용된 타이어는 P205/65R14이며, Fig. 1에서와 같이 타이어 측면 카카스를 설계영역으로 정의하고, 이 영역내의 5개 절점반경을 설계변수로 정의하여 카카스 측면 형상을 정의하였다. 또한 카카스 측면 내의 9개 요소(30, 40, 51, 59, 65, 71, 75, 80, 93번)의 요소평균 코드장력값을 조정성 향상을 위한 목적함수로 정의하고, 벨트 가장자리 요소(303번)의 요소평균 변형에너지값을 내구성 향상을 위한 목적함수로 정의하였다.

Fig. 2에서와 같이 타이어 해석을 위하여 타이어의 비드부위의 림과 접하는 영역에서 접촉조건을 적용하고 타이어의 내부에는 30psi의 내압을 적용하였으며, 축대칭(axisymmetric)문제에 의해 해석을 수행하였다. 고무소재는 초탄성(hyperelastic) 재료로 정의하고, 코드소재의 경우

Table 1 Simulation data

Simulation Parameters	Value
Number of design variables, N	5
Relative tolerance of carcass arc length, $\vartheta$	0.1
Relative tolerance of design variable,	5.08mm
Convergence ratio, $\epsilon_\lambda, \epsilon_F$	0.001, 0.01
Initial Lagrange multiplier, $\lambda_i^0$	0
Initial penalty parameter, $r_p^0$	1
Inflation pressure, $p_i$	207kPa
Friction coefficient, $\mu$	0

는 과탄성(hypoelastic) 재료로 적용하였다. 또한 고무내에 코드가 심어져 있는 카카스와 두장의 벨트는 REBAR 요소를 사용하여 처리하였으며, 비드영역은 고무와 코드의 등가물성치 값을 사용하였다. 아래의 Table 1은 타이어 측면 형상 최적설계에 사용된 최적설계 파라미터들을 정의하였다.

3.1 선행연구

앞에서도 언급하였듯이, 다목적 최적설계를 실시하기에 앞서 STOM을 위한 선행연구로 이상수준을 정의한다. 이상수준은 각각의 목적성능이 취할 수 있는 최대 한계를 뜻한다. 따라서 각각의 목적성능의 단일 최적설계에 의해 이상수준을 정의한다. Fig. 3에는 단일 최적설계에 의한 결과값과 이상수준값을 도시하였다. 여기서 조정성 향상을 위한 최적의 코드장력 분포는 비드쪽에서 높고 벨트쪽으로 갈수록 낮은 코드장력분포이며, 내구성 향상을 위한 변형에너지 분포는 벨트 가장자리에서 낮은 변형에너지 값을 가진다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 비드쪽 4요소(30, 40, 51, 59)에 대해서는 최대화를 실시하고, 벨트쪽 5요소(65, 71, 75, 80, 93)와 벨트 가장자리 요소(303)에 대해서는 최소화를 실시하였다.

이때 이 단일 최적설계에 의한 결과를 이상수준으로 정의하였고, 단지 65번 요소는 타이어의 중앙 부분, 즉 코드장력이 최대에서 최소로 전환되는 부분이므로 최대, 최소를 판단하기가 어렵다. 그리고, Fig. 3에서 알 수 있듯이 매우 낮은 값에 위치해 있으므로 이상수준을 단일최적설계 값을 사용하지 않고 초기값 근처에 위치하도록

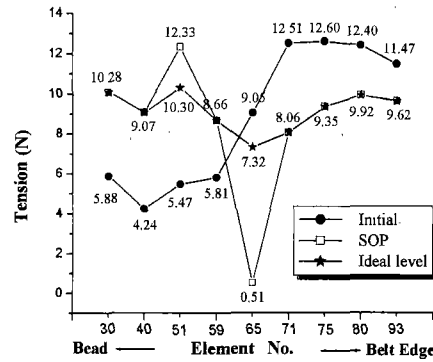


Fig. 3 Single-optimum value and ideal level

정의하였다. 그리고 51번 요소의 경우, 비드쪽 다른 요소에 비해 상대적으로 높은값을 가지므로 다른 비드쪽 요소의 값을 참조하여 정의하였다.

그리고 303번 요소의 경우는 다른 목적함수와 동일하게 단일최적설계값 2.078을 이상수준으로 사용하였다.

3.2 다중최적설계에 의한 수치해석

먼저 초기 목적함수 값과 앞에서 정의된 이상수준에 의해 초기 희망수준(initial aspiration level)을 정의한다. 이때 희망수준은 초기값에서 이상수준으로 향하도록 초기값과 이상수준 사이에 정의하였다. 초기 희망수준의 상세한 수치값은 Table 2에 제시하였다.

먼저 초기 희망수준에 의해 최적설계를 수행하였을때의 최적치와 희망수준의 척도  $\eta_i$ 를 Table 2에 제시하였다. 이때 비드쪽 세 요소의 코드장력은 정의된 희망수준보다 더욱 향상된 것을 알 수 있으며, 반면에 다른 목적함수들은 희망수준에 도달하지 못한 것을 알 수 있다. 특히, 중앙부분의 네 요소 59, 65, 71, 75는 초기 코드장력 값 보다 더욱 나빠진 것을 알 수 있다.

앞에서 설명하였듯이, 이 연구에서 조정성을 향상시키기 위해 비드쪽 요소에 대해서는 최대화를 실시하고 벨트쪽 요소에 대해서는 최소화를 실시한다. 또한 벨트 가장자리에서의 변형에너지는 최소화를 실시한다. 그 결과, 고려되어지는 목적함수에 대해서는 높은 가중치를 주고, 나머지 목적함수에 대해서는 낮은 가중치를 준다. 목적에 따라 중앙부분의 네 요소를 제외한 나머지

**Table 2** Selection of the first aspiration level and optimization results at the first iteration

Element No.	Element-averaged carcass tension(N)									strain energy
	30( $f_1$ )	40( $f_2$ )	51( $f_3$ )	59( $f_4$ )	65( $f_5$ )	71( $f_6$ )	75( $f_7$ )	80( $f_8$ )	93( $f_9$ )	
Ideal level	10.08	9.07	10.30	8.66	7.32	8.06	9.35	9.92	9.62	0.364
Initial level	5.88	4.24	5.47	5.81	9.05	12.51	12.60	12.40	11.47	0.453
Asp. level 1	6.86	5.49	6.64	6.06	8.81	12.13	11.90	11.78	10.98	0.403
Optimum 1	7.79	6.46	7.31	5.26	9.10	12.70	12.93	12.31	11.39	0.418
Indicator 1	0.711	0.729	0.814	1.310	1.194	1.143	1.405	1.284	1.302	1.401
Decision 1	I	I	I	R	A	A	R	I	I	I

**Table 3** Selection of the second aspiration level and optimization results at the second iteration

Element No.	Element-averaged carcass tension(N)									strain energy
	30( $f_1$ )	40( $f_2$ )	51( $f_3$ )	59( $f_4$ )	65( $f_5$ )	71( $f_6$ )	75( $f_7$ )	80( $f_8$ )	93( $f_9$ )	
Ideal level	10.08	9.07	10.30	8.66	7.32	8.06	9.35	9.92	9.62	0.364
Optimum 1	7.79	6.46	7.31	5.26	9.10	12.70	12.93	12.31	11.39	0.418
Asp. level 2	7.79	6.46	7.31	5.26	8.81	12.13	12.93	12.77	10.98	0.403
Optimum 2	7.82	6.41	7.16	5.27	8.81	12.70	12.99	12.22	11.32	0.413
Indicator 2	0.987	1.021	1.052	0.997	1.000	1.141	1.019	1.236	1.250	1.252
Decision 2	I	I	R	R	A	R	R	I	I	R

지 요소에 대해서는 향상시키기 위해 그룹  $\gamma_I$ 로 정의하고, 나머지 네 요소 중 희망수준의 척도가 1에 근접한 65, 71번 요소에 대해서는 그룹  $\gamma_A$ 로 정의한다. 그리고, 중요시 되지 않는 중앙부위에서 희망수준의 척도가 상대적으로 매우 큰 59, 75번 요소에 대해서는 그룹  $\gamma_R$ 로 정의하여 희생시키는 대신  $\gamma_I$ 로 정의된 요소를 향상시킨다.

이제 앞에서 정의된 희망수준 선정기준에 따라 새로운 희망수준을 정의한다. 새로운 희망수준은 아래의 Table 3에 제시하였고, 이때 30, 40, 51, 59 그리고 75번 요소의 목적함수만 새로운 값으로 정의되어지고, 변화된 희망수준에 대해서는 밑줄에 의해 표시하였다.

새로운 희망수준에 의해 두번째 최적설계를 수행하였을 때의 최적값과 희망수준의 척도값  $\eta_i$ 를 Table 3에 제시하였다. 이 결과값을 Table 2와 비교해 보았을 때 각각의 목적함수에 대해서 최적값에 차이가 있지만 두 번 반복을 수행하고 난 후에는 첫번째에 비해서 현격하게 값이 줄어들었다. 뿐만 아니라 80, 93, 303 요소를 제외하고

는 희망수준의 척도값  $\eta_i$ 가 단위값으로 일치되었다. 먼저 51, 303번 요소를 그룹  $\gamma_I$ 에서 그룹  $\gamma_R$ 로 변화시킨다. 그 이유는 다른 목적함수를 보다 개선하기 위해서는 전자의 것은 30, 40번 요소에 비해 덜 중요하고, 후자의 것은 93번 요소와 상반된 결과를 나타내기 때문이다. 그리고 71번 요소는 가중치를 증가시키지 않기 위해서 그룹  $\gamma_R$ 로 변화시킨다.

따라서 Table 4에서와 같이 5개 목적함수의 희망수준을 조절해서 세번째 최적설계를 수행했을 때의 결과를 Table 4에 나타내었다. 30, 65번 요소를 제외한 목적함수를 제외한 나머지 목적함수들은 상당히 수렴하는 것을 볼 수 있다.

그룹  $\gamma_I$ 의 모든 목적함수는 계속해서 개선되지만 그룹  $\gamma_A$ , 그룹  $\gamma_R$ 은 몇몇 목적함수에 대해서만 약간의 개선을 보여준다. 여기서 최적설계 과정을 수행하는 동안 51, 93번 요소는 서로 상반되는 관계를 보여준다. 그래서 51번 목적함수의 가중치를 줄이게 된다. 다른 한편으로 그룹  $\gamma_R$ 로 정의된 목적함수들은 세번째 최적

**Table 4** Selection of the third aspiration level and optimization results at the third iteration

Element No.	Element-averaged carcass tension(N)									strain energy
	30( $f_1$ )	40( $f_2$ )	51( $f_3$ )	59( $f_4$ )	65( $f_5$ )	71( $f_6$ )	75( $f_7$ )	80( $f_8$ )	93( $f_9$ )	
Ideal level	10.08	9.07	10.30	8.66	7.32	8.06	9.35	9.92	9.62	0.364
Opimum 2	7.82	6.41	7.16	5.27	8.81	12.70	12.99	12.22	11.32	0.413
Asp. level 3	<u>7.82</u>	6.46	<u>7.16</u>	5.26	8.81	<u>12.70</u>	<u>12.99</u>	11.78	10.98	<u>0.413</u>
Optimum 3	8.04	6.48	7.03	5.17	8.48	12.67	12.98	11.85	11.04	0.414
Indicator 3	0.902	0.994	1.042	1.026	0.780	0.995	0.997	1.039	1.044	1.029
Decision 3	I	I	R	A	I	A	A	I	I	A

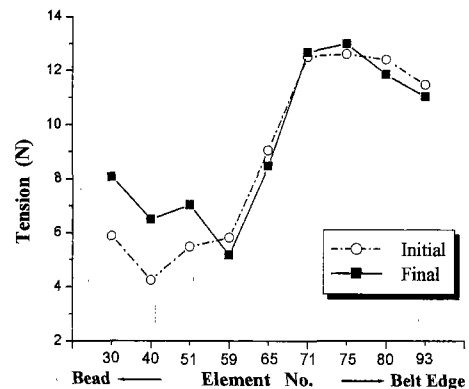
**Table 5** Selection of the fourth aspiration level and optimization results at the fourth iteration

Element No.	Element-averaged carcass tension(N)									strain energy
	30( $f_1$ )	40( $f_2$ )	51( $f_3$ )	59( $f_4$ )	65( $f_5$ )	71( $f_6$ )	75( $f_7$ )	80( $f_8$ )	93( $f_9$ )	
Ideal level	10.08	9.07	10.30	8.66	7.32	8.06	9.35	9.92	9.62	0.364
Opimum 3	8.04	6.48	7.03	5.17	8.48	12.67	12.98	11.85	11.04	0.414
Asp. level 4	8.04	<u>6.48</u>	7.03	5.26	8.48	12.70	12.99	11.78	10.98	0.412
Optimum 4	8.06	6.49	7.02	5.16	8.46	12.67	12.98	11.84	11.03	0.414
Indicator 4	0.993	0.997	1.001	1.028	0.982	0.994	0.997	1.028	1.032	1.032
Decision 4	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

설계 과정동안 팔목할 만한 변화를 보여주지 않는다. 그 결과는 현재의 값을 수용할 수 있다는 결론을 보인다. 반면에 계속적으로 개선을 보여주는 65번 요소는 개선되도록 결정해야 한다.

따라서 4개의 목적함수의 희망수준을 조절하고 4번째 최적설계를 수행한다. Table 5에 현재 희망수준, 이전 최적값, 최적설계후의 최적값을 나타내었다. 최적설계후 Table 5에서 확인되는 바와 같이 모든 희망수준에 최적값이 거의 일치함을 알 수 있다. 즉, 희망수준의 척도  $\eta_i$ 가 모두 단위(unit)값에 근접해졌다. 따라서 모든 목적함수의 값은 만족스럽고 그값을 수용할 수 있다.

Fig. 4과 Fig. 5은 각각 초기 타이어와 최적화된 타이어의 코드장력분포와 타이어내의 변형에너지 분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 비드영역에서 코드장력값이 증가하고 벨트영역에서는 감소한 것을 알 수 있다. 또한 변형에너지 값이 높은 영역인 벨트 가장자리에서 변형에너지 값이  $0.453 N \cdot mm/mm^2$ 에서  $0.414 N \cdot mm/mm^2$ 으로 감소한 것을 관찰할 수 있다. 하지만 타이어 중앙



**Fig. 4** Comparison of carcass cord tensions

영역의 코드장력은 상대적으로 나빠진 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서도 언급하였듯이 각 목적함수가 서로 연계되어 있으므로, 비드영역과 벨트영역의 코드장력을 향상시키기 위해 중앙영역의 코드장력값을 희생하였기 때문이다.

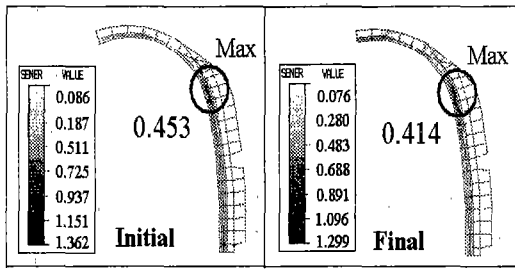


Fig. 5 Strain energy distributions

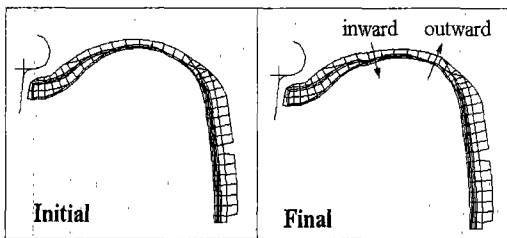


Fig. 6 Comparison of carcass contours

Fig. 6은 초기와 최적화 되었을때의 타이어 형상을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 조정성과 내구성이 향상된 타이어 형상은 벨트 가장자리에서 반경이 외부로 나온 형태이고, 중앙영역과 비드쪽에서는 내부로 들어간 형태를 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 조정성과 타이어의 내구성 향상을 위한 타이어의 측벽형상 최적설계를 실시하였다. 이 두 성능의 향상을 위해 설계자의 최소한의 노력이 요구되는 다목적 최적설계기법인 STOM을 적용하였다. 그리고 STOM기법에서 요구되는 이상수준과 희망수준선정시 설계자의 부담을 줄이기 위해 이상수준과 희망수준의 선정기준을 제시하였다. 그 결과, 4회의 최적설계 반복을 통해 카카스내의 코드장력 분포를 향상시키고 벨트 가장자리에서의 변형에너지가 최소화되는 최적의 타이어 측벽형상을 제시하였고, 이때 두 목적성능을 향상시키는 타이어의 형상은 벨트 가

장자리에서 외부로 나온 형태이고, 타이어 중앙부와 비드쪽에서는 내부로 들어간 형태를 보였다.

#### 후기

본 연구는 금호산업(주) 타이어사업부의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Clark, S. K., 1982, *Mechanics of Pneumatic Tires*, U.S. Government Printing Office : Washington D.C.
- (2) Day, R. B. and Gehman, S. D., 1963, "Theory for the Meridian Section of Inflated Cord Tires," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 36, p. 11.
- (3) Yamagishi, K., Togashi, M., Furuya, S., Tsukahara, K. and Yoshimura, N., 1987, "A Study on the Contour of the Radial Tire: Rolling Optimization Theory-(RCOT)," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 15, No. 1, pp. 3~29.
- (4) Nakajima, Y., Kamegawa, T. and Abe, A., 1996, "Theory of Optimum Tire Contour and Its Application," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 24, No. 3, pp. 184~203.
- (5) Nakayama, H. and Furukawa, K., 1985, "Satisficing Trade-off Method with an Application to Multiobjective Structural Design," *Large Scale Systems*, Vol. 8, pp. 47~57.
- (6) Vanderplaats, G. N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications*, McGraw-Hill, Singapore.
- (7) 김광현, 오상현, 1996, "조정안정성에 관한 차량동역학의 신개념," *대한기계학회논문집 A권*, 제 20권 제 7호, pp. 632~643.
- (8) 조진래, 정현성, 이홍우, 김남전, 김기운, 2001, "Sidewall 반경변화에 따른 타이어 Carcass 장력 분포 변동추이에 관한 유한요소 해석," *대한기계학회논문집 A권*, 제 25권 제 6호, pp. 980~987.