

# 주행시 궤도차량 바닥판의 위상최적설계에 관한 연구

황영진<sup>†</sup>·김종범<sup>\*</sup>·이석순<sup>\*\*</sup>·최창곤<sup>\*\*\*</sup>·손재홍<sup>\*\*\*</sup>

## A Study on Topology Optimization of the Tracked Vehicle Bottom Plate under Traveling Loading

Young Jin Hwang, Jong Bum Kim, Seok Soon Lee, Chang Gon Choi  
and Jae Hong Son

**Key Words:** Topology optimization(위상최적화), Iso surface(아이소서피스)

### Abstract

The tracked vehicle travel on off rod and on rod. So the tracked vehicle need a sufficient stiffness and a lightweight. In this study we performed FEA for the track vehicle and performed topology optimization based on the results of FEA. The displacements of road wheel are used as displacement constraint for topology optimization. We performed topology optimization with the control of the frame size which is the results of topology optimization and suggested the shaped of the tracked vehicle bottom plate of topology optimization

### 1. 서 론

최근 고성능화 된 컴퓨터와 유한요소 전산해석 프로그램의 발전으로 각종 복잡한 형상을 가지는 구조물의 구조해석 기술과 최적화 이론을 적용한 구조물의 최적설계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 일반적인 기계 부품뿐 아니라 자동차, 선박, 항공 산업 등과 같은 수송기계산업에서의 뚜렷한 구조 경량화 추세로 말미암아 보다 적은 무게를 가지면서도 주어진 하중이나 요구조건을 만족시킬 수 있는 구조물의 최적구조설계에 대한 관심이 매우 높아 활발한 연구가 이루어지고 있다. 최적화 문제는 크게 치수 최적화, 형상 최적화 그리고 위상 최적화로 구분된다. 치수 및

형상 최적화는 초기위상이 결정되는 동안에 구조물의 위상은 고정된 것으로 가정하게 된다. 반면에 구조물을 구성하는 다공성 물질 내에 존재하는 빈 공간의 크기를 최적화 설계변수로 이용하는 위상 최적화 기법을 이용하면 최적화 과정에서 이러한 위상의 변화를 가능하게 할 수 있다 (1,2,3,4).

주행시 궤도차량의 구조에 크게 영향을 미치는 것은 비포장도로를 최고속도로 주행할 경우이다. 그리고 돌발적인 사태에 직면하여 요구조건 이상의 충격이 차체에 가해질 수 있다.

따라서 본 연구에서는 궤도차량의 주행시 구조해석을 수행하여 궤도차량의 안전성을 검토하였다. 그리고 목표무게와 구조해석된 로드휠의 변위결과를 위상최적설계의 변위구속조건으로 이용하여 궤도차량 바닥판의 위상최적설계를 수행하였다. 이때 궤도차량에 하중이 부가되는 로드휠은 비설계영역으로 지정하여 위상이 변화되지 않게 하였고 나머지 부분은 위상변화가 가능한 설계영역으로 지정하여 위상최적설계를 수행하였다.

† 경상대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : stresshyj@nate.com  
TEL : (055)758-4719 FAX :

\* 경상대학교 대학원 기계공학과

\*\* 경상대학교 공과대학 기계항공공학부

\*\*\* 국방과학연구소

형상 모델링은 CATIA V5, 전처리기 (pre-processor)는 HyperMesh, 유한요소해석과 후처리기 (post-processor)는 ABAQUS/Standard와 ABAQUS/CAE-Visualization, 그리고 위상 최적화는 균질화법을 바탕으로 한 상용 최적설계 프로그램인 Altair사의 Optistruct 5.1을 사용하였다.

## 2. 위상최적화 기법의 기본이론

균질화법을 이용한 위상 최적화의 목표는 주어진 설계영역내에서 구조물의 가장 가볍고 강한 위상을 구하는 것이다. 이러한 방법은 초기 개념 설계에서는 일반적으로 고려된다. 개념설계에서는 우선 전체적으로 가장 강한 구조물의 위상을 갖도록 이루어지는 것이 보통이다. 이러한 목표를 갖는 위상은 주어진 하중조건에 대하여 그 변형이 최소가 되거나 혹은 컴플라이언스가 최소가 되는 구조물이다. 즉 주어진 하중조건에 대하여 구조물의 컴플라이언스를 최소화한다. 구조물의 컴플라이언스 지수는 아래의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } S = \sum_{i=1}^n W_i C_i + NF \frac{\sum_{j=1}^m (W_j / \lambda_j)}{\sum_{j=1}^m W_j} \quad (1)$$

$$\text{Subject to } g_k(d) \leq 0, \quad k=1, 4, N_c \quad (2)$$

$$d_m^l \leq d_m \leq d_m^u, \quad k=1, \dots, N_d \quad (3)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta_n \leq \frac{\pi}{2}, \quad k=1, 4, N_e \quad (4)$$

여기서

$W_i$  = Weighting for subcase  $i$

$C_i$  = Compliance for subcase  $i$

$W_j$  = Weighting for mode  $j$

$\lambda_j$  = Eigenvalue for mode  $j$

NF = Normalization factor

$n$  = Total number of load cases of interest

$m$  = Total number of Eigenvalues of interest

$d, q$  : Design Variables

$g(d)$  : Constraints

각 경우(subcase)에 대한 컴플라이언스는 식 (5)와 같이 얻어진다<sup>(6)</sup>.

$$C_i = \frac{1}{2} U_i^T K_i U_i = \frac{1}{2} F_i^T U_i \quad (5)$$

여기서,

$U_i$  = Displacement vector for subcase  $i$   
 $K_i$  = Stiffness matrix related to subcase  $i$   
 $F_i$  = Load vector for subcase  $i$

위상최적화는 형상과 크기 최적화에서 사용되는 구조물의 좌표와 두께같은 설계변수를 사용하지 않고, 구조물을 구성하고 있는 다공성 물질 내에 존재하는 빈 공간의 크기를 최적화를 위한 설계변수로 이용한다. 이것을 일반적으로 재료밀도라고 부른다. 이 재료밀도가 0이면 비워져 있는 공간을 의미하며 재료밀도가 1이면 꽉 채워져 있는 요소를 의미한다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 셸 요소의 재료밀도를 나타낸다. 그리고 재료밀도는 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$\rho_{MAT} = 1 - (1 - a)(1 - b) \quad (6)$$

식(6)항은 최적화 과정에서 변하면서 컴플라이언스 치수가 최소가 될 때 수렴하게 된다. 재료밀도가 1이면 공간이 없다는 것을 의미하며 재료밀도가 0이면 입체요소가 존재하지 않다는 것을 의미한다<sup>(6)</sup>.

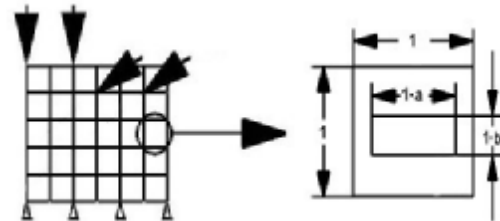


Fig. 1 Design variable a and b for a shell design element

## 3. 유한요소 해석

### 3.1 유한요소 모델링

차량의 모델은 Fig. 2와 같다. 모델은 셸 요소 (shell element)를 사용하였다. 차체 및 외관은 모두 50mm이며 차체의 칸막이는 30mm이다. 유한요소 모델링에 사용된 요소는 총 25,960개이며 절점의 수는 26,090개이다. 그리고 재질은 알루미늄 2519이며 재료물성치는 Table 1에 나타내었다.

차량차체의 길이방향은 x, 중력의 반대방향은 z로 정의하였다. 그리고 차체를 앞에서 바라볼 때 기준으로 좌,우측을 정의하였다.

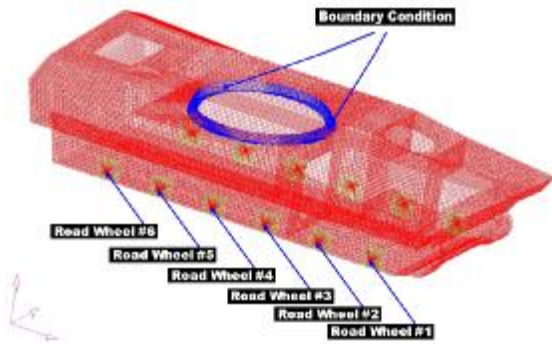


Fig. 2 Full Model

Table 1 Material Properties

Comp. name	Young's modulus (GPa)	Yield Strength (MPa)	Modified fatigue strength(MPa)	Poisson's ratio	Density (kg m <sup>3</sup> )
Chassis	72.39	372	50.3	0.33	2,710

3.2 하중 및 구속조건

궤도차량이 운행중 지면으로부터 받는 주행하중은 로드휠(Road Wheel)로부터 차체로 전달된다. 궤도 차량에 총 12개의 로드휠이 있으며 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 각 로드휠에 번호를 부여하였다.

하중은 도로상태에 따라 다르며 본 연구에서는 주행시 장애물을 통과하는 조건을 사용하였다. 로드휠 1번에 주행하중 100% 작용시 나머지 로드휠은 주행하중 50%작용하는 조건을 사용하여 총 6가지의 주행하중을 로드휠에 강제요소를 생성하여 부가하였다. 사용된 하중은 Table 2에 나타내었다.

경계조건은 차체의 상판 부위를 1~6방향으로 고정하였다.

3.3 유한요소 해석 결과

유한요소해석 후 최대응력값과 변위값을 구하였다. Fig. 3은 Step 6일때의 유한요소 결과이며 Step 1~ Step 6일때의 최대응력 및 변위는 Table 3에 나타내었다. 최대응력 및 최대변위는 모두

로드휠 부근에서 나타났다. 최대응력은 재료의 항복강도 이하의 값이므로 구조적으로 안전한 것으로 판단된다. Fig. 4와 Table 4는 구조해석된 로드휠의 변위이며 이 값들은 궤도차량의 최대응력 및 최대 변위값보다 작은 값들이 나타났다.

Table 2 Applied Load for FEA

Step	Force Direction	RW #1	RW #2	RW #3	RW #4	RW #5	RW #6
Step 1 (kN)	-x	460	150	140	95	80	70
	z	200	90	65	55	50	60
Step 2 (kN)	-x	230	300	140	95	80	70
	z	100	180	65	55	50	60
Step 3 (kN)	-x	230	150	280	95	80	70
	z	100	90	130	55	50	60
Step 4 (kN)	-x	230	150	140	190	80	70
	z	100	90	65	110	50	60
Step 5 (kN)	-x	230	150	140	95	160	70
	z	100	90	65	55	100	60
Step 6 (kN)	-x	230	150	140	95	80	140
	z	100	90	65	55	50	120

4. 위상최적화

4.1 위상최적화 모델링 및 경계조건

위상최적화의 하중조건 및 차체의 구속조건은 유한요소해석조건과 동일하다. 그리고 Fig. 4와 Table 4에 나타난 로드휠의 변위는 위상최적화의 변위구속조건으로 사용하였다.

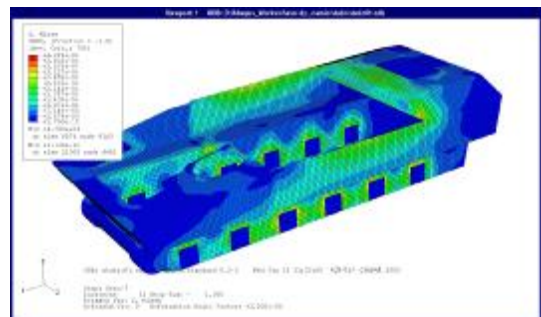
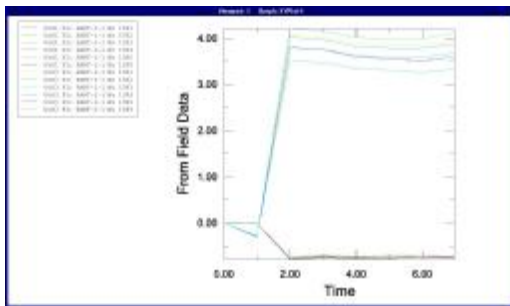
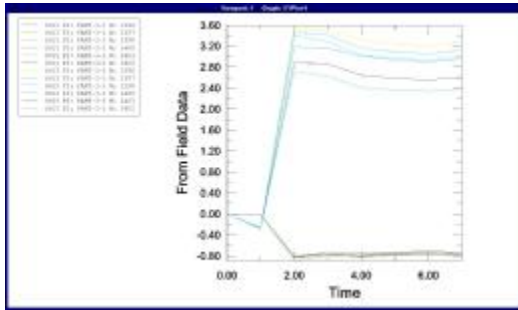


Fig. 3 Max. stress of FEA

**Table 3** Max. stress and displacement of FEA

Step	Max. Stress (kN)	Max. Disp (mm)
Step 1	44.59	4.88
Step 2	44.05	4.76
Step 3	45.47	4.66
Step 4	42.78	4.58
Step 5	42.02	4.58
Step 6	42.89	4.73



**Fig. 4** The displacement of the road wheel

**Table 4** The displacements of the road wheel

	Left(mm)		Right(mm)	
	X	Z	X	Z
RW #1	-8.929 E-1	3.409	-8.205 E-1	2.712
RW #2	-8.283 E-1	3.464	-8.045 E-1	2.899
RW #3	-8.182 E-1	3.544	-8.081 E-1	3.191
RW #4	-7.893 E-1	3.795	-7.917 E-1	3.511
RW #5	-7.741 E-1	3.803	-7.590 E-1	4.023
RW #6	-7.626 E-1	4.083	-7.362 E-1	4.224

4.2 위상최적화 방법

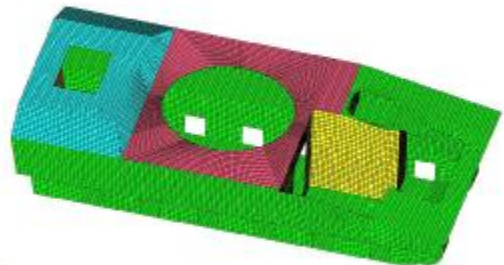
위상최적화는 2가지 경우에 대하여 수행하였다. 첫 번째 경우에는 위상최적결과로 나타나는 프레임 치수를 제한하지 않았으며 두 번째의 경우에는 20mm이상의 크기의프레임만 생성하게 하였다.

4.3 설계 및 비설계영역

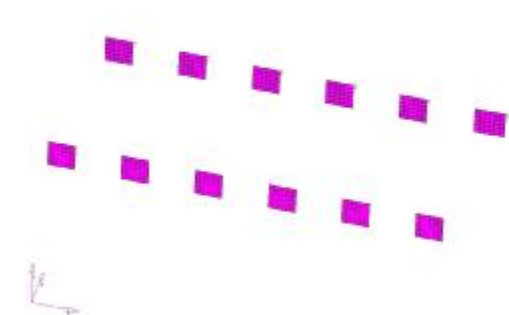
설계영역(design domani)이란 최적의 재료밀도 분포를 구하여 최적의 위상을 가지도록 형상을 변화시키는 영역이다.

비설계영역(non-design domain)이란 최적화를 위한 유한요소해석시에는 적용되지만 최적화를 수행하여도 설계변수의 조절로 인한 형상의 변화가 발생하지 않는 영역이다.

본 연구에서는 Fig. 5와 6처럼 하중이 부과되는 로드휠을 제외한 부분을 설계영역으로 지정하였다.



**Fig. 5** Design domain



**Fig. 6** Non design domain

4.3 위상최적화 결과

위상최적화 결과는 케도차량의 주 관심부위인 바닥판에 대하여 나타내었다.

위상최적화 결과는 아이소서피스(iso-surface,  $\rho$ )의 값으로 표현하였다. 아이소서피스란 각 단위셀의 설계질량과 구조물의 원소재의 질량비인 설계질량비가 같은, 즉 동등한 재료의 밀도분포를 가지는 단위셀들의 집합체를 의미하는 것으로 0 ~ 1사이의 값을 가진다.

4.2.1 프레임 치수를 제한하지 않은 경우

(1) Fig. 7은 위상최적화 결과의 전체형상을 나타내었다. 차체의 앞부분의 형상이 변화되었다.

(2) Fig. 8은 위에서 바라본 위상최적화 결과의 바닥판형상을 나타내었다. 위상최적화된 바닥판은 세로방향으로 3개, 가로방향으로 1개 프레임 형상이 나타났으나 명확하지 않다.

(3) Fig. 19는 아이소서피스의 변화에 따른 바닥판의 위상최적형상을 나타내었다.

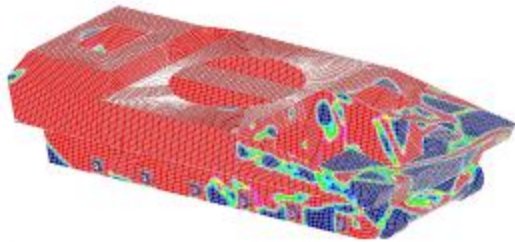


Fig. 7 The results of topology optimization for case1(iso view)

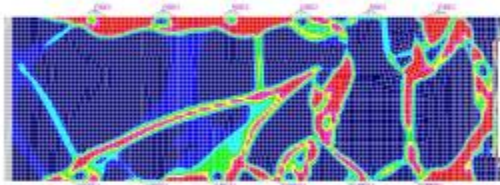


Fig. 8 The results of topology optimization for case1(top view)



(a) iso-surface( $\rho$ ) = 0.1



(b) iso-surface( $\rho$ ) = 0.2



(c) iso-surface( $\rho$ ) = 0.3

Fig. 9 The results of topology optimization for case1

4.2.2 프레임 치수를 제한(20mm이상)한 경우

(1) Fig. 10은 위상최적화 결과의 전체형상을 나타내었다. 첫 번째 경우와 비슷한 형상이 나타났다.

(2) Fig. 11은 위에서 바라본 위상최적화 결과의 바닥판형상을 나타내었다. 첫 번째 경우와는 다르게 비교적 뚜렷하게 프레임 형상이 세로방향으로 4개, 가로방향으로 1개가 나타났다.

(3) Fig. 12는 아이소서피스의 변화에 따른 바닥판의 위상최적형상을 나타내었다.

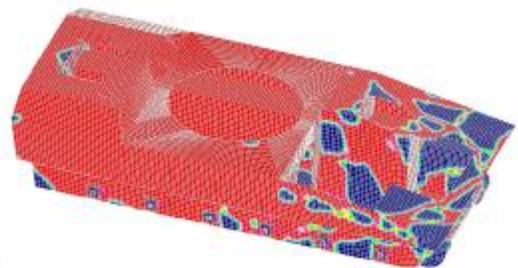


Fig. 10 The results of topology optimization for case2(iso view)

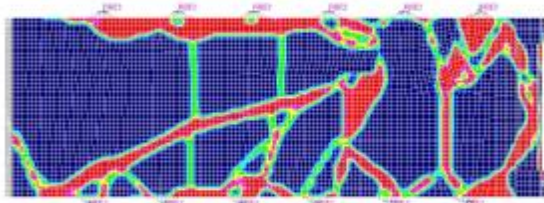
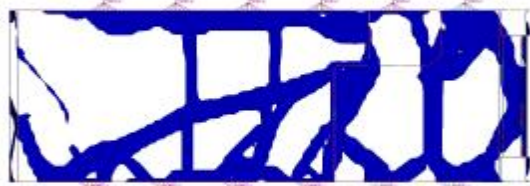
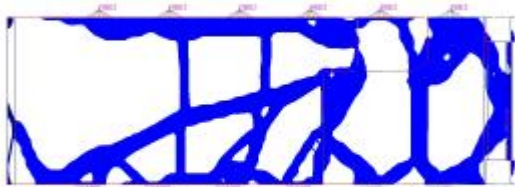


Fig. 11 The results of topology optimization for case2(top view)



(a) iso-surface( $\rho$ ) = 0.1



(b) iso-surface( $\rho$ ) = 0.2



(c) iso-surface( $\rho$ ) = 0.3

Fig. 12 The results of topology optimization for case2

### 5. 결론

주행시 궤도차량의 바닥판 위상최적설계에 관한 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 주행시 궤도차량의 유한요소해석 수행결과 로드휠 주변에 최대응력 및 최대변위가 발생하였으나 구조적으로 안전한 값이 나타났다.

- (2) 프레임의 치수를 제한하지 않은 경우 세로방향으로 3개, 가로방향으로 1개의 보강재 배치 형상이 나타났으나 명확하지는 않았다.
- (3) 프레임의 치수를 제한(200mm이상)한 경우 세로방향으로 4개, 가로방향으로 1개의 보강재 형상이 비교적 명확하게 나타났다.
- (4) 프레임의 치수를 제한한 경우의 결과는 주행시 궤도차량의 바닥판 형상을 재설계에 적용하기에 적합한 결과로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 항공기부품기술연구센터(ReCAPT)와 지역대학육성사업(BK21)의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Suzuki, K. and Kikuchi, N., "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization," *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 93, pp. 291 ~ 318., 1991.
- (2) Bendsoe, M. P., "Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem," *Struct. Optimization*, Vol. 1, pp.193 ~ 202, 1989.
- (3) Allaire, G. and Kohn, R. V., "Topology Optimization and Optimal Shape Design Using Homogenization," in *Topology Design of Structures* (Eds. M.P. Bendsoe and C. A. Mota Soares), Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, pp. 207 ~ 218, 1993.
- (4) Bendsoe, M. P., "Optimization of Structural Topology, Shape and Material," Springer, pp. 6 ~ 9, 1995.
- (5) *OptiStruct User's Manual*, Altair Engineering, pp. 53 ~ 56, 2002.