

UTM-02 프레임 구조물의 경량화 설계

방 제 성, 남 용 윤, 한 정 우
한국기계연구원

Light-weight Design of UTM-02 Frame Structure

Je S. Bang, Yong Y. Nam, Jung W. Han
Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract - UTM-02 모델의 초기형상을 기반으로 차체 프레임 구조물에 대한 경량화 설계를 수행하였다. 전체 프레임을 14개의 부재로 나누었으며, 부재 두께를 설계 변수로 정하였다. 효율적인 설계최적화를 수행하기 위하여 반응면기법을 이용하였다. 반응면기법을 통해 근사된 목적함수와 제한조건을 이용하여 최적화를 수행하였으며 각 설계변수들에 대한 감도도 산출하였다.

1. 서 론

도시과밀화로 인한 교통문제와 환경문제로 인하여 기존 교통시스템을 대체할 수 있는 신교통시스템의 필요성이 대두되면서 환경친화적인 자기부상열차가 관심을 받고 있다. 실용화에 있어서 무엇보다 중요한 것은 경제성과 안전성으로써 이를 위해서는 자기부상열차를 구성하는 각 부품들이 주어진 각 분야의 성능을 만족하면서 경량화 및 최적화 되어야 한다. 우주발사체의 예를 들면 발사체 자체의 무게를 줄이는 것이 곧 적재할 수 Payload의 증가를 가져오기 때문에 발사체를 구성하는 엔진, 계통, 프레임 구조물 등 전체 구성품을 경량화의 대상으로 삼고 있다. 자기부상열차는 크게 차체, 실내의 설비, 대차부분으로 나눌 수 있으며, 이 중 실내외 설비는 대부분 경량화가 힘든 부분이며, 차체와 대차는 경량화의 가능성을 많이 가지고 있다. 대차는 자기부상열차의 핵심장치인 부상/안내용 전자석과 추진용 선형유도전동기를 포함하고 있으며, 차체는 자체중량과 차량이 작용하는 수직 및 수평하중을 감당할 수 있는 경량구조의 알루미늄 압출재로 구성된다. 자기부상열차의 경량화를 위해서는 전자기해석, 열해석, 동력학해석, 구조해석을 함께 고려하는 다분야해석(multi-physics)이나 다분야간 설계최적화(Multi-disciplinary Design Optimization)가 수행되어야 한다. 본 연구에서 우선 차체 프레임 구조물에 대한 경량화를 수행하였으며, 한국기계연구원에서 연구하였던 UTM-02 모델을 경량화 대상체로 정하였다.

2. 정적해석

2.1 유한요소모델

효율적인 해석을 위하여 그림 1과 같은 좌측 1/2모델을 사용하였으며, 전체 프레임 구조물에 대하여 ANSYS[1]의 Shell63 요소를 적용하였다. 총 242814개의 절점과 174752개의 요소가 사용되었다.

2.2 경계조건

대차와 에어스프링으로 연결되는 Bolster Plate는 3군데이며, 각각 16개의 볼트로 체결된다. 보수적인 설계를 위하여 위 부위들에 단순(Simply) 경계조건을 적용하였다.

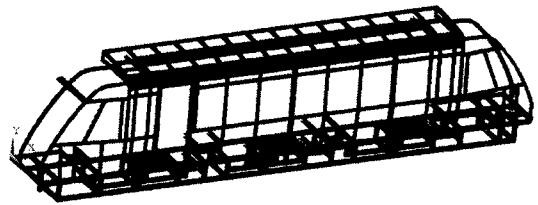


그림 1. UTM-02 차체 프레임 구조물의 유한요소모델

2.3 부재별 두께와 질량

표 1과 같이 경량화를 위하여 전체 프레임 구조물을 14개의 부재로 나누었으며, 최적화시 각 부재별 두께를 설계변수로 정하였다.

표 1. 각 부재별 두께와 질량

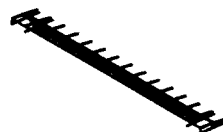
Assemble	Part	두께(mm)	질량(Kg)	질량(Kg)
Under frame	Under frame 1	7	228.8	621.0
	Under frame 2	10	80.8	
	Under frame 3	7	93.9	
	Under frame 4	7	166.9	
	Under frame 5	7	50.6	
Side frame	Side frame 1	3	97.4	228.3
	Side frame 2	5	83.5	
	Side frame 3	5	47.4	
Roof	Roof 1	3	54.8	105.3
	Roof 2	4	30.6	
	Roof 3	5	19.7	
Cabin	Cabin 1	5	27.6	82.7
	Cabin 2	5	14.4	
	Cabin 3	5	40.7	



(a) Under frame



(b) Side frame



(c) Roof



(d) Cabin

그림 2. 각 Assemble

2.4 재료적 특성값

설계기준에 의해 참조할 수 있는 재료적 특성값들은 다음과 같다.

재질 : AL6061
탄성계수(Young's modulus) : 7135.6 Kgf/mm^2
포아송비(ν) : 0.33
밀도 : $2.905 \times 10^{-10} Kgfs^2/mm^4$
허용응력 : 12.4 Kgf/mm^2
[인장강도의 70%(18.6)/안전계수(1.5)]

2.5 하중조건

구조물에 손상을 가장 크게 주는 자유낙하(2g) 조건을 사용하였으며, 각 부재에 부과되는 하중조건은 표 2와 같다. Under frame의 중량은 대차 및 에어스프링이 감당하는 중량이므로 부과하지 않았다.

표 2. 각 부재별 두께와 질량

대상	하중값 (Kg)	부과위치
Cabin의 중량	82.7	Under frame, Cab 접점에 고부 본포
Roof의 중량	105.3	Side frame, Cabin, Roof 접점에 고부 본포
Side frame 중량	228.3	Under frame, Side frame 접점에 고부 본포
Skin, 유리창, 내장품의 중량	2212.7	Under frame에 고부 본포
승객중량	3000.0	Under frame에 고부 본포

2.6 결과

정적해석 결과 Von Mises criteria에 의한 최대등가응력(maximum equivalent stress)이 허용응력을 넘지 않으며, 최대처짐(maximum deflection)도 에어스프링에서 감당할 수 있는 수치이다.

최대처짐 : 차체 후방 Cabin 부분에서 발생(5.893 mm)
최대등가응력 : 차체 전방 Bolster Plate 부분에서 발생
(11.834 Kgf/mm^2)

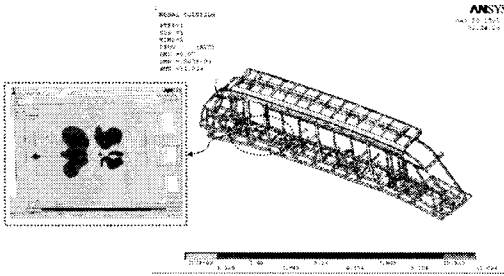


그림 3. 초기상태의 최대등가응력이 가해지는 부위

3. 최적화

3.1 목적함수와 제한조건

최적화 문제를 식(1)과 같이 정의하였다. 각 절점에서의 최대등가응력(σ_{max})이 허용응력을 넘지 않으며, 최대처짐(δ_{max})이 초기상태를 크게 넘지 않을 정도인 6.0을 넘지 않는다는 제한조건하에서 전체 프레임 구조물의 중량(W)을 최소화 하는 문제로 정의하였다.

목적함수 : 중량(W) 최소화 (1)
제한조건 : $\sigma_{max} < 12.4 Kgf/mm^2$, $\delta_{max} < 6.0 mm$

3.2 반응면기법을 이용한 근사화

대상체의 자유도(D.O.F)가 크기 때문에 최적화 알고리즘을 바로 해석 코드와 연결하여 최적화를 수행하기에는 반복적인 계산에 의해 많은 시간이 걸리며, 최적화 연산 중 numerical noise에 의한 발산의 여지도 많다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 설계최적화를 위하여 반응면기

법(Response Surface Method)을 도입하였다. 이는 설계영역을 잘 근사할 수 있는 몇 개의 추출점(Sampling Point)에서 해석을 수행한 뒤 목적함수와 제한조건을 설계변수에 대한 다항식으로 근사하는 기법이다. Saturated design method[2]를 사용하였으며 각 설계변수의 초기상태를 기준으로 하여 초기상태 값의 $\pm 20\%$ 에 해당하는 설계영역을 근사하였다. 설계최적화를 위한 절차는 그림 4와 같다.

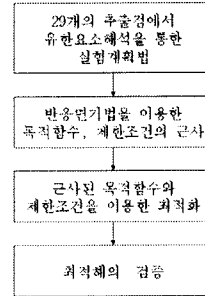


그림 4. 설계최적화를 위한 절차

먼저 식(2)와 같이 각 설계변수(X_i) 대신에 normalize한 변수(U_i)로 변환하였다.

$$U_i = \frac{X_i - X_i^{init}}{0.2X_i^{init}} \quad (2)$$

여기서 X_i^{init} 은 각 설계변수의 초기 값으로 표 1과 같다. 각 설계변수의 실제 영역은 식(3)과 같다. 실제 설계문제에서는 많은 제약사항으로 인해 실제영역의 조절이 필요하며, 이를 위하여 변수로 α 를 정의하였다.

$$(1 - 0.2\alpha)X_i^{init} \leq X_i \leq (1 + 0.2\alpha)X_i^{init} \quad (3)$$

또한 식(4)부터 식(6)과 같이 목적함수와 두 개의 제한조건을 normalize한 설계변수에 대한 2차항까지 근사하였다.

$$W \approx W^{approximated} = a_0 + \sum_{i=1}^{14} a_i U_i + \sum_{i=1}^{14} b_i U_i^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{max} \approx \sigma_{max}^{approximated} = c_0 + \sum_{i=1}^{14} c_i U_i + \sum_{i=1}^{14} d_i U_i^2 \quad (5)$$

$$\delta_{max} \approx \delta_{max}^{approximated} = e_0 + \sum_{i=1}^{14} e_i U_i + \sum_{i=1}^{14} f_i U_i^2 \quad (6)$$

설계변수가 14개이므로 세 개의 식마다 29개의 계수를 얻어야 한다. 이를 위하여 위의 식을 잘 근사할 수 있는 29개의 추출점에서 유한요소해석을 수행하였고, 표 3부터 표 5와 같은 근사식의 계수들을 얻을 수 있었다.

표 3. 중량에 대한 근사식의 계수

계수	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
값	1037.4	45.772	16.157	18.777	33.391	10.119	19.475	16.709	9.4795
계수	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}			
값	10.959	6.1612	3.9439	5.5290	2.8725	8.1380			

계수	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
값	-1.66×10^{-3}	-1.6×10^{-4}	-1.6×10^{-4}	-1.6×10^{-4}	-6.6×10^{-4}	-3.16×10^{-3}
계수	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
값	1.0×10^{-5}	-3.66×10^{-3}	-1.6×10^{-4}	2.5×10^{-5}	-3.28×10^{-3}	-1.6×10^{-4}
계수	b_{13}	b_{14}				
값	-8.8×10^{-4}	-1.6×10^{-4}				

표 4. 최대응력에 대한 근사식의 계수

계수	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
값	11.834	9.825×10^{-2}	-3.7232	-9.15×10^{-4}	-6.12×10^{-2}	-7.47×10^{-3}
계수	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}
값	-2.494×10^{-2}	-9.825×10^{-2}	-1.868×10^{-1}	-8.52×10^{-3}	-2.554×10^{-3}	-3.867×10^{-3}
계수	c_{12}	c_{13}	c_{14}			
값	-2.192×10^{-2}	-1.094×10^{-2}	-9.382×10^{-3}			
계수	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
값	4.75×10^{-3}	9.151×10^{-4}	1.515×10^{-3}	4.2×10^{-3}	-1.33×10^{-2}	1.584×10^{-2}
계수	d_7	d_8	d_9	d_{10}	d_{11}	d_{12}
값	3.725×10^{-3}	1.6395×10^{-2}	4.1×10^{-4}	4.815×10^{-3}	-3.7×10^{-3}	8.65×10^{-4}
계수	d_{13}	d_{14}				
값	8.4×10^{-4}	8.395×10^{-3}				

표 5. 최대처짐에 대한 근사식의 계수

계수	e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	
값	5.8931	-4.267×10^{-1}	-1.826×10^{-1}	-3.922×10^{-2}	-2.949×10^{-1}	
계수	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	
값	-5.98×10^{-2}	-5.104×10^{-2}	-6.852×10^{-3}	-5.254×10^{-2}	-2.79×10^{-3}	
계수	e_{10}	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}	
값	-1.14×10^{-3}	-3.847×10^{-3}	-5.486×10^{-2}	-5.878×10^{-2}	-1.723×10^{-1}	
계수	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
값	5.325×10^{-2}	2.015×10^{-2}	1.159×10^{-2}	2.258×10^{-2}	4.1×10^{-3}	4.1×10^{-3}
계수	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}
값	5.725×10^{-3}	4.187×10^{-2}	6.9×10^{-5}	14×10^{-4}	-8.57×10^{-4}	7.45×10^{-4}
계수	f_{13}	f_{14}				
값	5.555×10^{-3}	1.284×10^{-3}				

3.3 최적화 결과

식(3)에서 언급했던 설계영역을 조절하기 위한 계수 α 를 이용하여 설계영역을 변화해 가면서 최적해를 찾아보았다. $\alpha=0.5 \sim 2.0$ 인 각 설계영역에 대해 각각 최적해를 구해 보았으며, 이 중 $\alpha=1.9$ 인 설계영역에서 가장 이상적인 최적해를 얻을 수 있었다. 표 6과 같이 12.9%의 중량감소 효과를 얻을 수 있었으며, Under frame 1, Under frame 2, Cabin 1, Cabin 2, Cabin 3 부재는 두께를 늘리고, 나머지 부재는 두께를 줄임으로써 최적해를 얻을 수 있었다. 응력집중과 처짐을 많이 감당하는 부재는 두께를 늘림으로써 응력집중과 처짐을 완화하고 여유가 있는 부재는 두께를 줄임으로써 최종적으로 경량화에 이룰 수 있음을 보여준다.

- $X_i^{optimal}$: 부재별 최적두께 (mm)
- $W_i^{optimal}$: 최적화된 프레임 구조물의 부재별 중량 (Kg)
- X_i^{init} : 부재별 초기두께 (mm)
- W_i^{init} : 초기상태의 프레임 구조물의 부재별 중량 (Kg)
- $\Delta W_i = W_i^{optimal} - W_i^{init}$: 부재별 중량 변화량 (Kg)

표 6. 초기상태와 최적화 후의 두께와 중량 비교

Part	$X_i^{optimal}$	$W_i^{optimal}$	X_i^{init}	W_i^{init}	ΔW_i
Under frame 1	8.0940	264.6	7.0	228.8	35.8
Under frame 2	12.0126	97.1	10.0	80.8	16.3
Under frame 3	4.3400	58.2	7.0	93.9	-35.7
Under frame 4	5.8949	135.8	7.0	168.3	-31.1
Under frame 5	4.3400	31.4	7.0	50.6	-19.2
Side frame 1	1.8600	60.4	3.0	97.4	-37.0
Side frame 2	3.1000	51.8	5.0	83.5	-31.7
Side frame 3	3.1000	29.4	5.0	47.4	-18.0
Roof 1	1.8600	34.0	3.0	54.8	-20.8
Roof 2	2.4800	19.1	4.0	30.8	-11.7
Roof 3	3.1000	12.2	5.0	19.7	-7.59
Cabin 1	6.9000	38.1	5.0	27.6	10.5
Cabin 2	6.9000	19.9	5.0	14.4	5.47
Cabin 3	6.3000	58.2	5.0	40.7	15.5
TOTAL		908.0		1037.3	-129.35

표 7부터 표 9와 같이 초기상태와 최적화 후 각 부재들에 대한 중량과 최대응력, 최대처짐의 감도(Sensitivity)를 산출하였다. 각 설계변수에 대한 중량의 감도는 크게 변하지 않았으나, 각 부재들에 대한 최대응력과 최대처짐의 감도는 일부 부재에 집중되었던 것이 조금 완화되었다. 이는 최적화를 통하여 일부 부재가 응력집중과 처짐을 감당하던 것을 여러 부재에 분산시킨 결과와 일치하는 경향이다.

표 7. Normalize한 각 설계변수에 대한 중량의 감도 (a) 초기상태 (b) 최적화 후

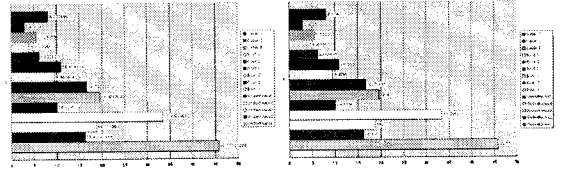


표 8. Normalize한 각 설계변수에 대한 최대응력의 감도 (a) 초기상태 (b) 최적화 후

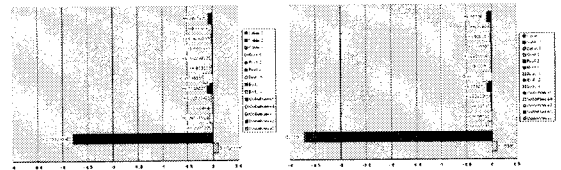
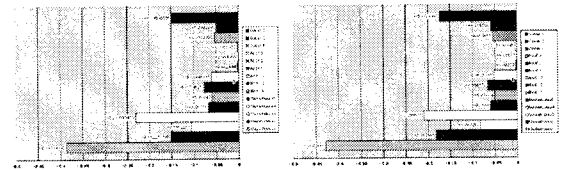


표 9. Normalize한 각 설계변수에 대한 최대처짐의 감도 (a) 초기상태 (b) 최적화 후



3.4 최적해의 검증

본 연구에서는 최적화시 근사기법을 이용했기 때문에 검증에 위해 최적화된 두께를 이용하여 해석을 수행하였다. 제한조건을 잘 만족하는 것을 알 수 있었고 초기상태보다 safety margin이 많지 않음을 알 수 있었다.

최대처짐 : 차체 후방 Cabin 부분에서 발생(5.919 mm)
 최대등가응력 : 차체 후방 Roof와 Cabin 연결부
 (12.329 Kgf/mm²)

4. 결론

UTM-02 모델의 초기형상을 기반으로 차체 프레임 구조물에 대한 경량화 설계를 수행하였으며, 12.9%의 중량감소 효과를 얻을 수 있었다. 현재로서는 차체부분만을 고려하였으며, 대차부분은 경량화의 가능성을 더 많이 가지고 있다. 이를 위해선 우선 하중/제한 조건과 같은 각종 기초자료들에 대한 연구가 선행되어야 하며, 경량화를 위해 재료를 변경할 경우 비용상승 여부를 고려해야 한다. 가능하다면 각 전장품들도 소형화해야 할 것이다. 이러한 선행 연구결과들을 바탕으로 전자기해석, 열해석, 동력해석, 구조해석 등 여러 분야를 함께 고려하는 다분야해석이나 다분야간 설계최적화가 수행되어야 한다.

[참고 문헌]

- [1] ANSYS Release 9.0 Documentation
- [2] Achintya Haldar, "Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis", John Wiley, 2000