

언더프레임 두께 최적화에 따른 2층열차의 구조강도비교 Strength Comparison of a Double-Deck Train Carbody by Optimization of the Underframe Thicknesses.

황원주*
Hwang, Won-Ju

김형진**
Kim, Hyeung-Jin

ABSTRACT

Aluminum alloy is very useful material for high speed transportations due to its high strength and light weight characteristics. Especially because of a weight reduction, a large extrusion of aluminum alloy carbody has been manufactured. This aluminum extruded panel is a hollow extruded panel. This shape and thickness is various by designer's sense and experience and VAW's profiles. So it is important to find an optimized shape and thickness of AEP. In this study we get the AEP's thickness to minimize a weight by applying an optimization algorithm. The results of the study can be used as basic guidelines in designing double-deck trains in the future.

Keyword : AEP(Alluminum extruded panel), EMU(Electric Multi Unit), Double-deck rolling stock vehicle
Optimization Algorithm

알루미늄 압출재로 제작되어진 차체는 경량화의 용이성과 더불어 제작공정을 단순화시킬수 있는 장점으로 인해 전세계적으로 사용이 보편화되어 가고 있다. 국내에서도 차체의 경량화를 위해 알루미늄 차체도입이 공기반과제에서 출발하여 많은 발전이 이루어졌다. 차량의 경량화에 대한 장점은 많이 이야기되고 있지만 단점에 대해서 거의 없다. 최근에 들어 경량화의 장점 때문에 알루미늄 합금 차체가 제작되어지고 있다. 알루미늄 합금 차체는 재질의 압출성을 이용하여 여러개의 압출재가 용접이 되어 제작되어지게 된다. 각각의 알루미늄 압출재는 종이박스의 단면과 같은 형상의 중공압출재의 구조로 되어있으며 상당히 규칙적으로 잘 배열되어 있다. 이러한 배열이나 형상은 설계 엔지니어의 직관에 의해 설계되어 잘 정돈된 모습으로 판단된다. 일반 차량보다 중량이 많이 나갈수 있는 2층열차의 경우 이러한 압출재를 최적의 모양으로 설계할 수 있다면 중량의 감소를 꾀할 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 압출재의 두께를 최적화함으로써 중량을 더 감소할수 있는 방법을 수행하였다. 이러한 최적화의 문제는 구하고자하는 조건에 대한 정식화만 할수 있다면 최적화 알고리즘을 사용하여 최적의 해를 구할수 있다. 본 논문에서는 중량을 최소화하는 두께를 구하기위해 문제를 정식화하였고 최적화 알고리즘을 사용하여 최적의 해를 구하여 보았다. 이를 2층열차의 모델에 적용하여 구조강도해석을 수행하였고, 처음 모델과 중량과 강도를 비교하고 이를 고찰하였다. 이 결과를 향후 2층열차의 기초자료로 활용하고자 한다.

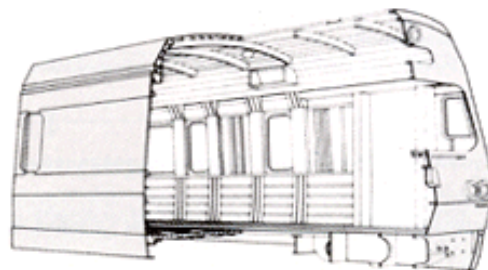


Fig. 1 알루미늄 압출재 차량(일반 전동차)

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 연구원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원

1. 서론

차체의 경량화 추세속에서 정지축중(停止軸重) 16톤 이하라고 하는 조건을 만족해야하는 2층열차를 실현하기 위해서는 중량을 최소화할수 있는 구체의 개발이 필요하다. 이는 강이나 STS로 제작된 구체보다도 알루미늄 합금으로 제작된 구체가 이 조건을 만족할수 있으리라 사료된다.[1] 2층열차 구체는 Fig. 2,3과 같이 알루미늄 합금 대형 압출형체를 차량 길이방향으로 연속 용접한 알루미늄 허니콤(honeycomb)인 샌드위치재 구체이다.

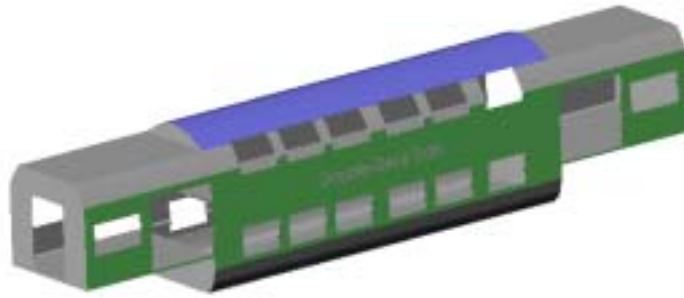


Fig. 2 2층열차의 3차원 모델

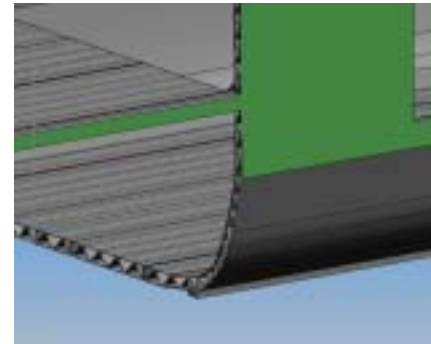


Fig. 3 2층열차의 압출재

여기서 한가지 생각해 볼것은 허니콤 구조로된 이러한 알루미늄 압출재의 형상이나 모양이 과연 최적의 모양이라고 볼수 있는냐는 의문점이 남게 된다. 우리나라에서 제작되어지고 있는 압출재의 형상은 알루미늄 전문업체의 VAW사에서 규정된 profile을 따라 설계되어지고 있다. 실제로 1톤의 제한된 알루미늄 부력으로 20 m의 긴 알루미늄 압출재를 뽑아내기 위해서는 형상을 마음대로 설계할 수도 없고 강도를 높이기위해 두께를 마냥 두껍게 할수도 없다. 국내에서도 최종적인 설계는 유럽의 알루미늄 전문업체에 의뢰하여 결정하고 있다. 압출재의 형상이 여러 가지이고 모든 부분을 다루기는 어렵다고 보아 언더프레임 중앙에 사용되는 압출재에 한정하고자 한다. 언더프레임은 Fig. 4,5와 같이 허니콤 구조로 되어있으며, t_b 와 t_c 의 두께를 가진 중공압출재이다. t_b , t_c 의 경우 우리나라 업체에서 보유하고 있는 압출기로 뽑아낼수 있는 최소의 두께가 2.5mm로 그 이하의 두께는 뽑을수 없다. 또한 너무 두껍게 하면 원하는 길이만큼 압출재를 생산할수 없으므로 두께 3mm이상은 두께로서 고려하지 않았다. 이러한 조건에서 중량을 최소화할수 있는 압출재의 두께를 구하였다.

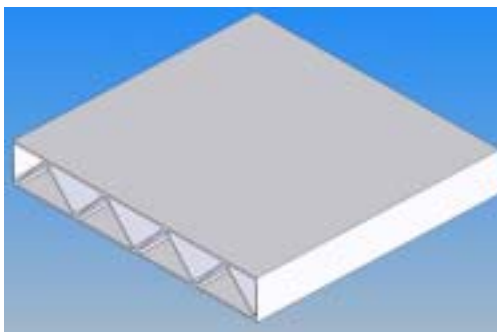


Fig. 4 압출재 모델(Underframe)

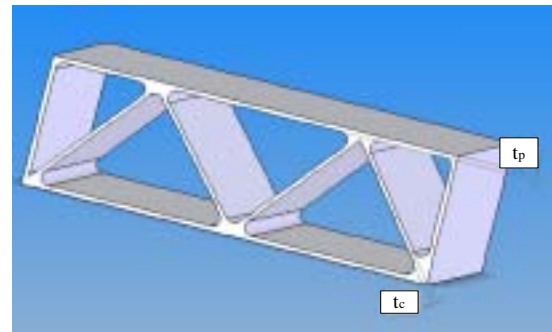


Fig. 5 압출재의 두께(t_b , t_c)

2. 최적화 문제

최적화 알고리즘은 비선형 최적 코드 Generalized Reduced Gradient(GRG)를 사용하였다. 최적화

문제는 다음과 같은 식으로 표현될수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f(x) \\ &\text{bounds } x^L \leq x \leq x^U \end{aligned}$$

여기서, x 는 $(n \times 1)$ 이다.

제시된 최적화의 문제는 중량을 최소화시킬수 있는 알루미늄의 압출재의 두께를 찾는 것이다. 문제를 정식화하기 위하여 압출재의 형상을 Fig. 6과 같이 나타내었다. 여기서, h 는 압출재의 높이, l 은 압출재의 길이, b 는 압출재의 폭, t_c 는 압출재 core의 두께, t_p 는 압출재 판재의 두께, ρ 는 알루미늄 합금의 밀도를 나타낸다.

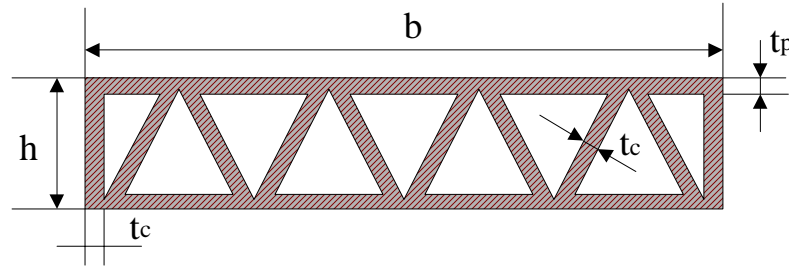


Fig. 6 제안된 압출재 단면

밀도를 알고 있기때문에 중량은 압출재의 부피를 알면 구할수 있다. 또한, 압출재의 폭과 길이는 알고 있는 값이므로 높이와 두께의 범위만 정해주면 된다. 압출재의 두께는 t_p 와 t_c 가 되며 각각 그 범위는 2.5~3mm 이다. 이는 현 압출기로 생산할수 있는 압출재의 최소 두께가 2.5mm이며, 현재 생산된 압출재의 최대두께가 3 mm이기 때문이다. 또한 h 는 50~80.5 mm로 정하였는데, 이는 VAW profile에 명시된 최소 높이가 50 mm이며, 현 생산된 압출재의 최고 높이가 80.5 mm이므로 그안에서 제한을 두었다. 이렇게 주어진 값들과 변수들의 제한조건들을 가지고 중량을 최소화 할수 있는 두께와 높이를 찾고자 한다. 설계요구사항은 중량을 최소화시키는 것으로 두었다. 이러한 문제를 정식화하여 식(1)~(6)에 나타내었다.

2.1 설계 요구사항(Design requirements)

최적화의 목적은 중량을 최소화할수 있는 두께를 구하는 문제이다. Fig. 6에 나타낸 압출재 형상에 대해서 t_p 와 t_c 그리고, h 값을 변수로 두고 주어진 조건하에서 중량을 최소화할 수 있는 두께를 구하고자 한다. 중량을 구하기 위해서는 부피를 구해야 하므로 압출재의 넓이를 구하고, 이에 부피를 구하여 정식화 하였다. 이를 식 (1)에 나타내었다.

$$V = [h \times b - \{(h - 2t_p) \times (b - 2t_c)\} + 8 \times \{t_c \times (h - 2t_p)\}] \times l \quad \dots\dots\dots(1)$$

2.2 설계변수(Design variables)

설계변수는 압출재의 plate의 두께, 그리고 core의 두께, 높이로 두었다. 이를 각각 $x_1 = t_c$ (the thickness of the core), $x_2 = t_p$ (the thickness of the plate), $x_3 = h$ (the height of the a)라는 변수로 두었다. 각 설계변수를 식 (2)에서 (4)에 나타내었다. 식 (1)에 이를 적용하면 (4)식과 같이 표현되게 된다.

$$2.5 \leq x_1 \leq 3 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$2.5 \leq x_2 \leq 3 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$50 \leq x_3 \leq 80.5 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$V = [x_3 \times b - \{(x_3 - 2x_2) \times (b - 2x_1)\} + 8 \times \{x_2 \times (x_3 - 2x_1)\}] \times l \quad \dots\dots\dots(5)$$

2.3 목적함수(Objective function)

최적화의 목적은 중량을 최소화하는 것이며, 부피에 관한 식이 있고, 밀도값을 알기때문에 중량을 구할수 있다. 밀도와 부피를 사용하여 중량의 식을 표현하면 아래와 같다.

$$W = \rho \times V \quad \dots\dots\dots(6)$$

여기서, $b = 1228$, $l = 200000 \text{ mm}$, $\rho = 2.817 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$ 이다.

최적화 알고리즘을 이용하여 Unconstraint 문제를 풀었다. 이상에서 최적화 알고리즘을 이용하여 구한 결과는 $x_1 = 2.5 \text{ mm}$, $x_2 = 2.8 \text{ mm}$, $h = 70 \text{ mm}$ 이다. 즉 $x_p = 2.5$, $x_c = 2.8$, $h = 70$ 의 결과를 얻었다. 이렇게 얻은 결과를 전체 모델에 적용하고, 원래 모델과 비교하였다. 최적화 알고리즘을 통해 구한 두께를 적용한 모델의 중량을 비교하여 Table 1에 나타내었다. 처음 모델은 모델 1이라고 하고 나중 모델을 모델 2라 하겠다.

Table 1 중량을 최적화 했을때의 결과

	t_p	t_c	h	중량
모델 1	3	2.8	80.5	8,600 kg
모델 2	2.8	2.5	70	7,860 kg

이상에서 최적화 알고리즘을 적용하여 알루미늄 압출재 언더프레임에 대하여 중량을 최소화할수 있는 두께를 찾는 문제의 해를 구하였다. 모델 1의 경우보다 모델 2의 경우 약 9%의 중량 감소를 확인할 수 있었다. 하지만 이런 값들이 중량을 줄일수 있는 최적해 일수는 있지만 강도측면에서는 어떤지에 대해서 살펴보기위해 결과값들을 모델에 적용하여 강도해석을 수행하였다.

3. 강도해석 비교

최적화를 수행하여 얻은 t_p 와 t_c 값을 전체모델에 적용하여 강도해석을 수행하였다. 또한 이 결과와 처음 모델에 대한 강도해석과 그 값들을 비교하였다. 적용한 모델은 2층열차 차종 중에 T car에 대해 적용하였다. 사용된 유한요소 프로그램은 NISA II / DISPLAY III이며, 셀요소를 사용하여 모델링을 하였다. 수직하중과 압축하중은 half 모델, 비틀림하중은 전체모델에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 9,11,13은 처음모델에 대한 해석결과이며 Fig. 10,12,14는 최적화를 통해 얻은 두께를 적용한 모델의 해석결과를 나타내고 있다.

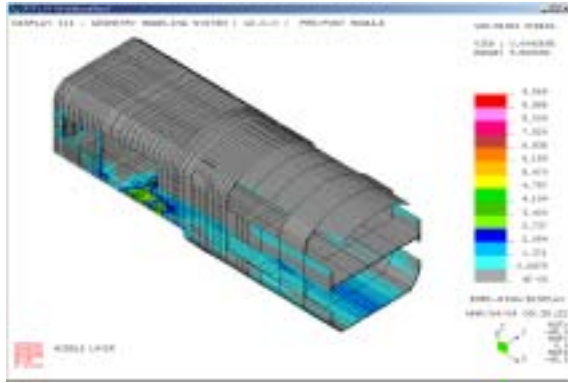


Fig. 9 수직하중(Von-Mises,Model 1)

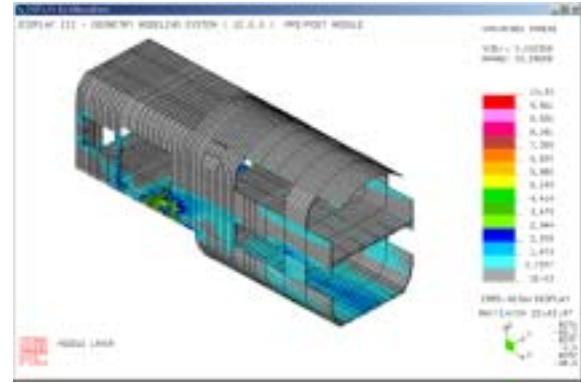


Fig. 10 수직하중(Von-Mises,Model 2)

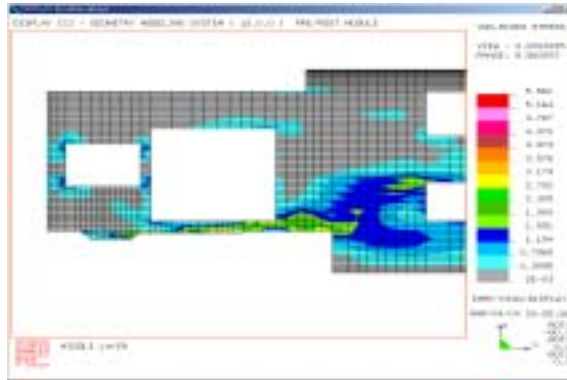


Fig. 11 압축하중(Von-Mises,Model 1)

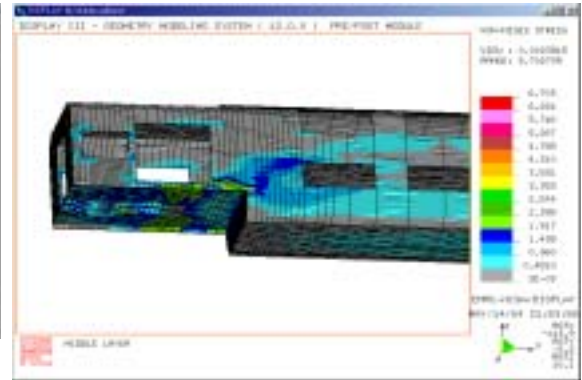


Fig. 12 압축하중(Von-Mises,Model 2)

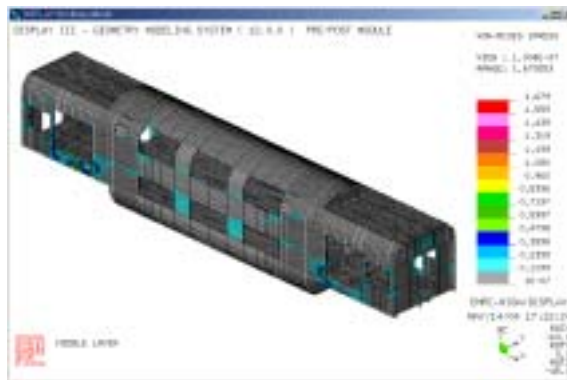


Fig. 13 비틀림 하중(Von-Mises,Model 1)

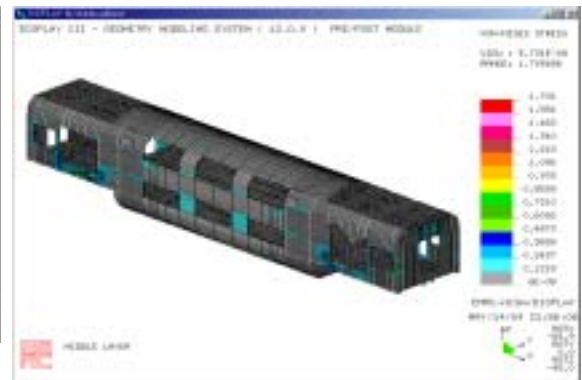


Fig. 14 비틀림 하중(Von-Mises,Model 2)

해석결과, 처음모델보다 최적화기법을 통해 얻은 두께를 적용한 모델의 용력값이 다소 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 수직하중의 경우 최대용력이 10.3kg/mm²이 나왔으며, 처음모델보다 1.27kg/mm² 높게 나왔다. 압축하중의 경우 최대용력이 6.7kg/mm²이 나왔으며 처음모델보다 1.03kg/mm² 높게 나왔다. 하지만 비틀림용력의 경우 최대용력이 1.7kg/mm²로서 처음모델 1.97kg/mm²보다 0.27kg/mm² 낮게 발생함을 확인할 수 있었다. 이 결과를 정리해서 Table 2에 나타내었다.

Table 2 해석결과 정리 (단위 : kg/mm²)

CASE	모델 1	모델 2	오차(%)
수직하중	9.03	10.3	12.3
압축하중	5.67	6.7	15
비틀림 하중	1.97	1.7	15.8

4. 결론

최적화 기법을 이용하여 중량을 최소화할수 있는 압출재의 두께를 구하였다. 이는 기존의 압출재보다 9%정도 중량감소가 있었다. 다만 강도측면에서 다소 떨어지는 것을 확인할수 있었다. 중량을 최소화하는 두께를 구하기위해 최적화 알고리즘을 적용하여 두께를 구하였다. 이를 위해 압출재의 단면을 정식화 하고 주어진 조건들을 이용하여 최적화를 수행하였다. 하지만 위의 얻은 결과가 최적의 해라고는 볼수는 없다. 이는 차체에 미칠수 있는 강도, 피로등 더 많은 조건들에 대한 고려를 하지 않았기 때문이다. 향후 적절한 강도를 가지면서 중량을 감소시킬수 있는 constraint 문제에 대한 최적화를 고려하고자 한다.

후기

이상의 연구는 건설교통부 건설교통기술혁신사업의 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 황원주의3인,알루미늄 압출재를 적용한 2층열차의 개념설계 및 구조강도해석,한국철도학회,2000.5
2. 황원주의 3인, "Al 압출재 및 SUS 2층열차 차체의 강도해석 비교 검토",한국철도학회,2001,p801~806,
3. 황원주의 1인, "2층열차 차체의 구조해석 관한 연구", 철도학회
4. 한국철도기술연구원,"2층급행열차 운영을 위한 기술개발 및 설계기준에 관한 연구", 건설교통 기술혁신사업 제2차연도 연차보고서,
5. 권태수, "알루미늄 차체의 압출재 형상결정을 위한 토폴로지 최적화기법의 적용에 대한 고찰", p378~385
6. J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, 1989
7. 강부병외3인,"철도차량총서",기전연구소,p427~447,
8. "도시철도표준사양"건설교통부,1998.2
9. "도시철도 차량의 성능시험에 관한 기준" 건설 교통부, 2000.5
10. 軌道車輛構体の荷重試験方法,JIS E 7105
11. 한국철도기술연구원, "전동차 표준사양 연구보고서", 1997
12. UIC 566 OR
13. Center for Engineering and Computer Technology, "NISA II User's manual", Vol. I, EMRC