

자기부상열차 대차프레임용 압출재 단면의 최적설계

Optimal design of the shape of extrusion for the bogie frame of Maglev

이재익*
Lee, Jae-ik

김국진**
Kim, Kuk-jin

ABSTRACT

Maglev is the vehicle which can run in levitated condition by the electro-magnets, and propelled by linear induction motors. The Maglev is divided in two parts such as carbody and bogies, and the bogies are the driving device of the vehicle. The frame of the bogie must endure many loads occurred in the operation of the vehicle. So the bogie frame is designed and manufactured in the view of good safety and maintainability.

The methods of design of frames are developed in regards of stresses and weights of structures. In this research, the extrusion of bogie frame is re-designed by the process of topology optimization with the ANSYS. By this process, the optimal shape of extrusion is acquired and additional optimization researches would be required in the view of size and shape of the members in the extrusion.

1. 서론

자기부상열차는 기존의 철도차량과는 달리 전자석의 힘에 의해 레일 위를 부상하여 주행하는 열차이다. 이러한 부상 시스템을 채용함으로써 자기부상열차는 기존 철도차량이 갖지 못했던 큰 장점을 갖는다. 즉 기존의 바퀴식 철도차량의 경우 주행시 발생하는 소음 및 진동을 막기 위해 터널 혹은 방음벽의 건설이 불가피하였으나, 자기부상열차의 경우 이러한 시설의 건설이 필요없게 되므로 노선의 건설비를 대폭 줄일 수 있으며, 비접촉 주행으로 인한 마모품의 감소로 유지보수비 또한 획기적으로 줄일 수 있게 된다. 본 연구에서는 이러한 자기부상열차의 주행장치에 해당하는 대차의 프레임에 적용되는 압출재의 단면 형상에 대한 최적 설계를 수행하는 것이다. 즉 상용화되어 있는 위상최적화 프로그램을 활용하여 현재 설계중에 있는 자기부상열차용 대차프레임용 압출재 부분에 대한 최적설계 과정을 수행하여, 열차의 운행조건에 부합하는 최적의 단면 형상을 결정한다.

2. 자기부상열차용 대차의 형상과 기능

그림 2-1은 현재 설계중인 자기부상열차 실용화 모델의 일반도를 보여 주고 있다. 자기부상열차는 일반 철도차량과 마찬가지로 크게 차체와 대차로 구분할 수 있다. 차체는 승객을 수송하기 위한 공간을 이루며, 그 골격을 이루는 구조는 알루미늄 압출재의 용접 구조이다. 그리고 승객의 편의를 위한 여러가지 설비품들이 차체 내에 설치된다. 그리고 차체의 하부에는 각종 전기장치 및 기계장치들이 설치되어 차량의 각종 기능을 담당하게 된다.

* (주)로템 주임연구원, 비회원

** (주)로템 수석연구원, 정회원

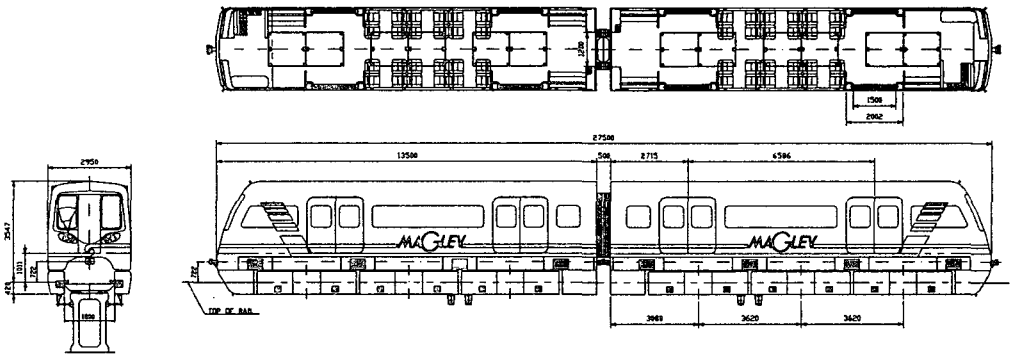


그림 2-1. 자기부상열차 일반도

대차는 차량의 주행 기능을 담당한다. 즉 차량의 부상, 추진, 제동, 및 기타 운행에 필요한 모든 기능들이 대차를 통해 수행된다. 그리하여 대차에는 이러한 기능들을 수행하기 위한 장치들이 장착된다.

대차의 구조는 그림 2-2와 같다. 대차 프레임은 알루미늄 조립 구조이며, 두개의 용접 구조와 두개의 Tie beam 이 Hinge 로 결합되는 구조이다. 대차의 경우 구체와는 달리 그 기능 및 유지보수성 향상을 위해 완전한 압출재 용접구조로 제작하는 것은 곤란하며, 기본적인 압출재에 판재 혹은 주조품으로 이루어진 구조를 조립하여 제작한다. 이러한 프레임에 부상용 전자석, 추진용 선형 유도전동기, 제동장치 및 현수장치 등의 여러가지 기구들이 장착된다.

그러므로 대차 프레임은 이 기능품들의 하중과 차체의 하중, 그리고 주행시에 외부로부터 작용하는 각종 하중에 대해 항복이 일어나지 않아야 하며, 강도뿐만 아니라 강성에 관한 제약조건도 갖게 된다. 또한, 이와는 반대로 부상계의 관점에서 생각하면, 대차프레임은 어느 정도의 유연성을 가질 필요가 있다. 즉 본 자기부상열차의 경우 대차의 4 코너에 대한 독립적인 부상 제어를 실시하고 있으며, 이러한 시스템의 경우 대차 프레임이 유연해야만 각 코너가 다른 코너의 영향을 받지 않고 부상 기능을 수행할 수 있게 된다. 그리하여 자기부상열차용 대차 프레임 설계시에는 일반적인 구조물에 적용하는 강도 및 강성뿐만 아니라 적당한 유연성을 확보하기 위한 수단도 강구해야 한다.

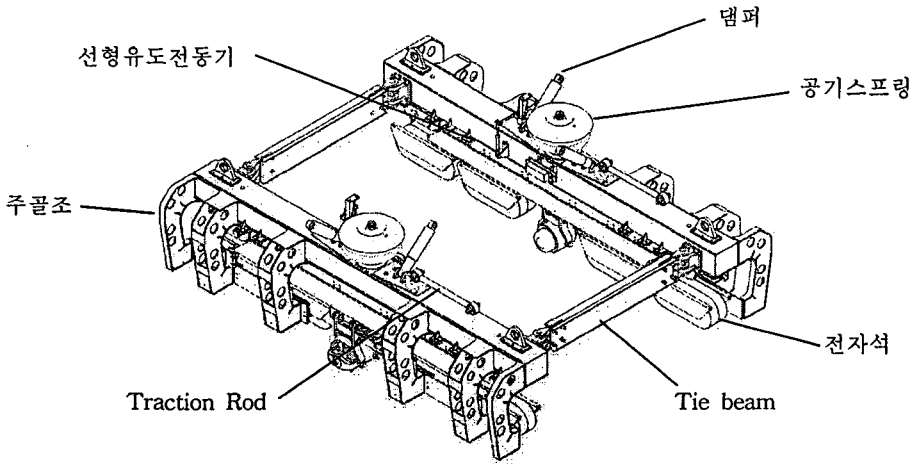


그림 2-2. 자기부상열차용 대차의 형상

3. 대차 프레임 최적화 방법

3.1 최적화 대상 및 재료의 특성

본 연구에 적용된 자기부상열차용 대차프레임의 형상 및 치수는 그림 3-1과 같다. 대차프레임 구조는 알루미늄 압출재로 이루어진 주구조에 알루미늄 주조로 제작된 Rib가 조립된다. 그리고 이 Rib에 전자석이 설치되어, 차량 주행시에는 이 전자석이 차량의 중량을 지지하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 프레임에서의 압출재의 단면 형상을 최적화 대상으로 삼았다. 주구조를 이루는 알루미늄 압출재의 재질은 A6005이며, Rib를 이루는 알루미늄의 재질은 AC4C이다. 이들의 기계적 특성은 표 3-1과 같다.

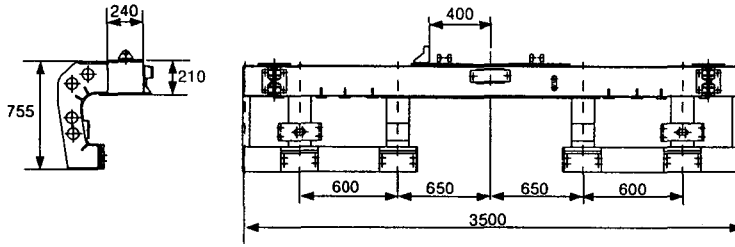


그림 3-1. 대차프레임의 치수

표 3-1. 대차프레임 재료의 기계적 특성

| Material | A6005-T6 | AC4C-T6 |
|---------------------------------------|----------|---------|
| Tensile Strength (N/mm ²) | 270 | 205 |
| Yield Strength (N/mm ²) | 225 | - |
| Youngs Modulus (N/mm ²) | 70,000 | 70,000 |
| Elongation (%) | 8 | 2 |

3.2 유한 요소 모델

대차프레임의 유한요소 모델의 형상은 그림 3-2와 같다. 본 위상 최적화 해석을 수행하기 위한 프로그램으로 ANSYS 7.0을 이용하였으며, 작업의 효율을 높이기 위해 해석시에는 대차프레임의 Half-model을 적용하였다. 최적화의 대상인 압출재 부분의 요소는 Solid 95 20-nod을 적용하였으며, 최적화에서 제외된 Rib 부분의 요소는 Shell 93 8-Nod를 적용하였다. 그리고 총 Node의 수는 41636개, Element의 수는 11697개이다.

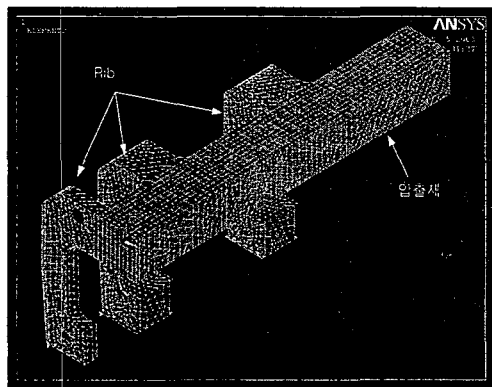


그림 3-2. 대차 프레임의 유한 요소 모델

3.3 경계 조건

본 대차프레임의 최적화를 위한 경계조건은 그림 3-3과 같다. 대차에 최대의 하중이 걸리는 상황은 대차가 주행중 레일 상면에 낙하하며 제동하는 경우로, 압출재에는 차체에 의한 수직하중 및 Rib와 직접 연결된 제동장치에 의한 제동하중을 받게 된다. 그리하여 수직하중의 작용점은 대차프레임 중심 상면이 되며 그 크기는 68,600 N 이다. 그리고 수직하중에 대한 고정점은 대차 하면에 설치된 비상 착지 바퀴의 위치가 된다. 또한 제동시 차체에 의해 작용하는 하중은 4,375 N 이며 그 작용점은 대차 프레임 상면의 Traction Rod Bracket 의 위치이다. 그리고 제동 하중에 대한 고정점은 제동 장치가 부착된 지점, 곧 Rib 하단의 내측면이 된다. 또한 해석 및 최적화 작업을 간소화하기 위하여 대차프레임 중심면에 대칭 조건을 부여한다.

위의 경계조건을 고정점 및 하중으로 구분하면 표 3-2 및 표 3-3과 같다.

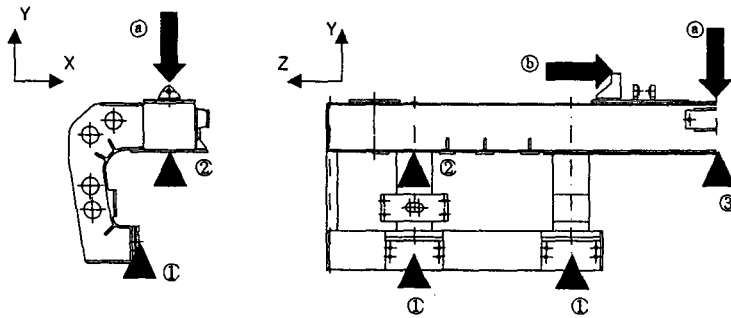


그림 3-3. 대차프레임 최적화를 위한 경계 조건

표 3-2. 지지점의 위치 및 방향별 구속 여부

| 고정점 번호 | 위치 | 각 방향별 구속 여부 | | |
|--------|---------------|-------------|---|---|
| | | x | y | z |
| ① | 제동장치 설치부 | 0 | 0 | 0 |
| ② | 비상 착지 바퀴 설치부 | - | 0 | - |
| ③ | 프레임 중심면 (대칭면) | - | - | 0 |

표 3-3. 하중의 크기와 방향

| 하중 번호 | 위치 | 방향 | 크기 (N) |
|-------|-----------|----|--------|
| a | 공기스프링 지지부 | -y | 34,300 |
| b | 견인장치 고정부 | -z | 4,375 |

4. 최적화 수행 결과

위에서 정의된 유한요소 모델에 대하여 압출재 단면의 최적화 작업을 수행하였다. 즉 본 프레임의 하중 조건에 대하여 압출재에 대한 위상 최적화 작업을 수행하여, 제거 가능한 압출재의 부분을 파악하였으며, 그 결과는 그림 4-1 ~ 4-6에서 보는 바와 같다. 그리고 본 최적화 작업의 반복 회수는 40회이며, 각 최적화 과정에서의 체적 감소율은 70% 이다.

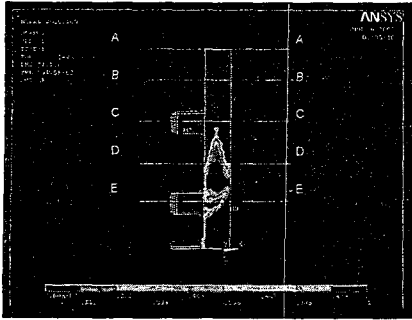


그림 4-1. 최적화 결과와 각 단면의 위치

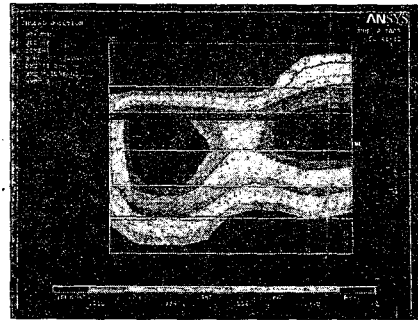


그림 4-2. 단면 A-A에서의 최적화 결과

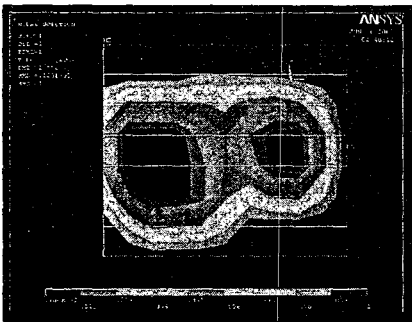


그림 4-3. 단면 B-B에서의 최적화 결과

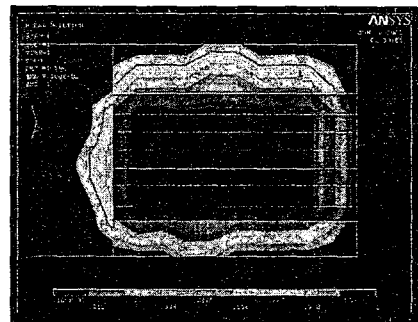


그림 4-4. 단면 C-C에서의 최적화 결과

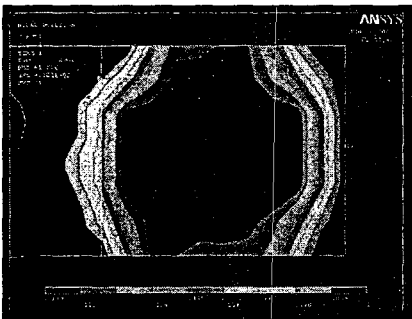


그림 4-5. 단면 D-D에서의 최적화 결과

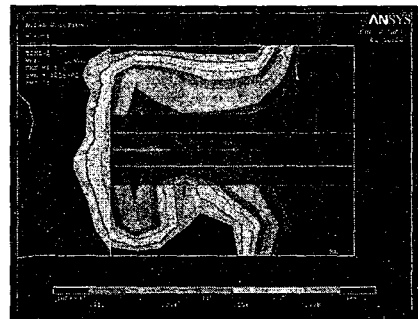


그림 4-6. 단면 E-E에서의 최적화 결과

그림 4-2는 대차프레임의 중앙부의 최적화 결과를 나타내고 있다. 대차프레임 중앙부의 경우 공기 스프링을 통하여 차체의 하중을 지지하게 되므로 사각 단면 중앙부에서 상하 방향의 휨이 발생하게 되며, 그 변형을 방지하기 위해 상하 방향의 보강이 필요한 것으로 이해할 수 있다.

또한 그림 4-6에서 보는 바와 같이 Rib 부착 부위에서는 횡방향 부재의 중요성이 부각되고 있다. 이는 본 자기부상열차의 경우 제동장치에 의해 발생된 제동력이 Rib를 통하여 주구조에 전달되므로, 그 하중을 지지하기 위해서 횡방향의 보강재가 필요하다는 것을 의미한다.

5. 최적화 수행 결과에 대한 고찰

5.1 최적의 압출재 단면 형상

상기의 수행 결과에서 볼 수 있듯이, 본 압출재의 최적의 형상은 그림 5-1과 유사한 형태가 된다. 단 본 연구에서 수행한 위상 최적화 과정은 보강재의 배열 및 위치에 관한 최적화 과정이며, 향후 추가적인 연구를 통하여 단면내의 각 부재에 대한 치수 최적화 과정을 통하여 보다 경량이며 강도가 높은 구조를 구현하도록 한다.

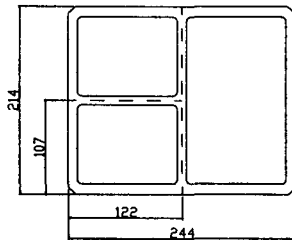


그림 5-1. 최적화 과정을 통해 얻어진 프레임 단면의 형상

5.2 기존 대차프레임용 압출재와의 비교

그림 5-2와 같이 기존에 만들어진 자기부상열차에 적용된 압출재의 형상도 역시 사각 중공 단면을 적용하고 있다. 다만 기존 차량의 경우 압출재 단면의 설계에 있어서 별도의 최적화 과정을 수행하지 않았으므로 이 연구결과 얻어진 단면의 형상과는 많은 차이가 있다. 그러므로 본 최적화 연구의 수행의 결과를 실제 차량 설계에 적극적으로 반영하여 대차프레임 구조의 안전성을 높여 결과적으로 자기부상열차 시스템 전체의 안전성을 높일 필요가 있다고 판단된다.

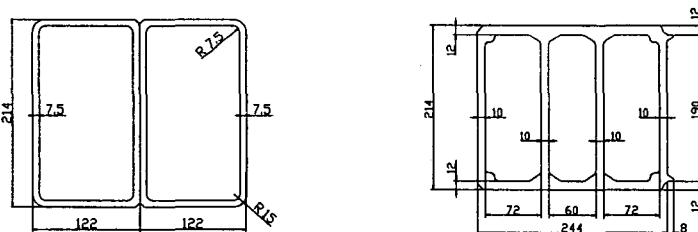


그림 5-2. 기존 자기부상열차용 대차프레임 단면의 형상

6. 결론

- (1) 자기부상열차용 대차프레임에 적용된 압출재에 대한 최적화 과정을 수행함으로써 현재 설계되고 있는 차량의 조건에 부합되는 압출재의 단면을 얻을 수 있었다.
- (2) 이번 최적화 연구를 통하여 추가해야 할 보강재의 위치를 파악할 수 있었으며, 본 연구 결과를 실제 차량 설계에 적극 반영하여 차량의 안전성을 높일 필요가 있다.
- (3) 본 연구를 통하여 얻어진 단면의 형상에 대하여 향후 치수 최적화 과정을 추가적으로 수행하여 보다 경량화된 압출재의 형상을 구현하도록 한다.

참고 문헌

1. 송영준 외(1999), "유한요소법과 최적구조설계 CAE", pp300~306, 성인당
2. 이재익 외(2002), "자기부상열차용 대차프레임의 설계", 2002 철도학회 추계 학술대회 논문집, pp845~850
3. 정광석 외(1998), "철도차량 구조용 알루미늄 압출형재 및 차체구조 개발에 관한 연구", pp32, 산업자원부
4. 전형용 외(2002), "윈공배열 결정에 최적기준법에 의한 전동차 크로스빔의 위상최적화에 관한 연구", 2002 철도학회 추계학술대회 논문집, pp876~883