

상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(III)

김봉섭, 정현갑  
한국기계연구원

An Experimental Study on the Electromagnets for the Electromagnetics Maglev Vehicle(III)

Bong Seop Kim, Hyun Kap Chung  
Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract : Static tests on the performance of the electromagnets of the electromagnetic maglev vehicle were conducted. Performance of the magnets wound with the aluminum sheet were tested and compared with that of the magnets constructed with aluminum coils of rectangular cross section. It turns out that with the use of the aluminum sheet we can improve the lifting force per magnet by 19.5% and thereby make electromagnets lighter than those made with the aluminum coils of rectangular cross section.

Keyword : Electromagnet, Aluminum Sheet Coil, Lifting force per Magnet

1. 서론

필자들은 국내에서 개발 중에 있는 도시형 자기부상열차(상전도 흡인 방식)용 전자석에 관하여 2차례에 걸쳐 정적인 상태의 성능평가 시험을 하였고, 성능 평가에 대한 결과를 보고한 바 있다<sup>1)2)</sup>.

첫 번째 보고에는 전자석 코어 재질 변경에 따른 부상력의 변화에 대하여<sup>1)</sup>, 두 번째는 전자석 코어의 형상 치수 변화에 따른 부상력변화에 대하여 보고하였다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 전자석의 부상력/전자석 자중의 비율 높이기 위한 방법으로 전자석 코일의 재질을 알루미늄 각선 재에서 알루미늄 박판 재료 변경하여 정적인 상태에서 각종 성능 시험을 하였고, 성능을 평가한 결과 부상력 향상이 가능하며 부상력/자중 비를 개선할 수 있다는 결과를 얻었으며, 또한 전자석의 시험에 있어 정적인 조건하에서 부상력이 정밀하게 계측되어야 하므로 계측 장치를 개선하였다.

부상력의 변화는 정격 전류인 상태에서 전자석과 대항하는 Guide Way와의 공극 크기에 따라 크게 변화하므로 공극의 크기를 일정하게 유지시켜야 한다. 기존의 시험장치에서는 인장형 Load Cell을 사용하여 부상력, 안내력 등을 계측 하였다. 인장형 일 경우에는 공극을 일정하게 유지 하기가 곤란하였다. 그러나 개선된 시험장치에서는 압축형 Load Cell을 사용함으로써 이의 문제점을 개선할 수 있었다.

본 논문에서는 개선된 시험 장치의 구성에 대하여 소개하고, 개선된 시험 장치를 이용하여 성능시험을 하여 해석 결과와 비교 검토한 결과를 기술한다.

2. 전자석 정특성 시험 장치

2.1. 정특성 시험 장치

전자석의 정적인 시험을 위한 장치는 사진 1과 같으며, 주요 시스템 구성은 그림 1과 같다. 자기부상열차의 부상용 전자석을 시험하기 위한 장치는 기존의 2가지 방법을 이용한 바 있다. 그림 2.(a)와 같이 시험기의 상부에 대항레일을 설치하고 전자석을 4개의 Guide Post를 이용하여 인장형 Load cell을 사용한 경우와 그림 2.(b)와 같이 압축형 Load cell을 사용하고, Guide way와 시험기 사이에 Reaction Rail을 설치한 경우를 나타내고 있다. 그림 3.(a)의 경우 전자석에 흐르는 전류가 클때에 큰 부상력으로 인한 전자석과 대항 레일 사이의 공극을 일정하게 유지하는데 어려움이 발생되었다. (b)의 경우는 (a)의 단점을 보완하여 압축형 Load cell을 사용하여 공극의 조절을 시도하였다.

상기의 공극 변화를 최소화 하기 위하여 그림 1과 같이 전자석과 대항 Guide way를 뒤집어 놓은 상태로 압축형 Load cell을 이용하여 부상력에 의한 공극의 변화를 최소화(약 0.1mm 이내) 하였다.

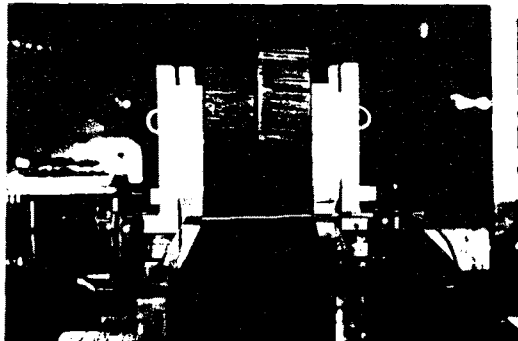


사진 1. 전자석 정특성 시험장치

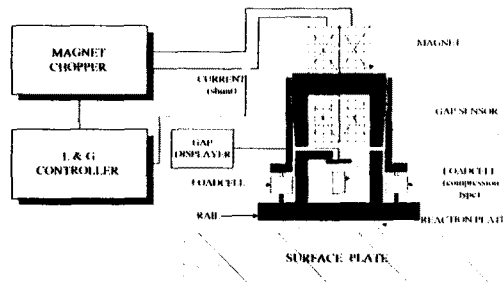
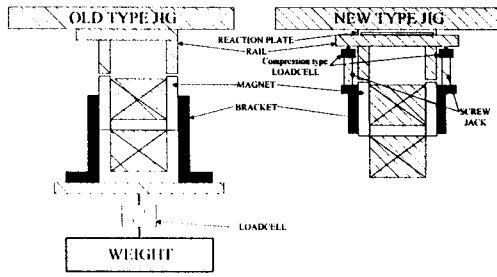


그림 1. 전자석 정특성 시험을 위한 시스템 구성도

그림 1에서의 같이 부상력을 측정하기 위하여 압축형 Load cell(1,000Kgf: 2ea, 2,000Kgf: 2ea)을 사용하였으며, 압축형 Load cell의 크기는 1,000Kgf, 2,000Kgf 둘다 높이 25mm로 좁은 구조에 설치가 용이하다. 전류의 증감을 위하여 자기부상열차 부상용 제어기를 사용하였다.



(a) 인장형 loadcell (b) 압축형 Loadcell  
그림 2. 전자석 정특성 시험 장치의 기존 방법

### 2.2. 시험에 사용된 전자석의 알루미늄 코일

시험에 사용된 전자석의 코일 형태 별 분류는 표 1과 같다. 이에 대한 그림은 그림 3과 같다.

표 1. 전자석 코일의 분류

| 항 목        | 코일크기 (W×H) [mm] | 코일1개당 턴수 | 코일 무게 [Kg] | 절연 상태 | 비 고 |
|------------|-----------------|----------|------------|-------|-----|
| COIL (a)   | 80×116          | 330      | 58.8/2ea   | NOMEX | 사용중 |
| COIL (b)   | 160×100         | 250      | 44.2/1ea   | NOMEX | 시험용 |
| COIL (c)-1 | 80×97           | 250      | 45.8/2ea   | NOMEX | 시험용 |
| COIL (c)-2 | 80×118          | 330      | 52.2/2ea   | NOMEX | 시험용 |
| COIL (d)   | 78×116          | 330      | ?          | 산화피막  | 독일* |

\* 코일 (d)는 현재 제작 중으로 시험할 예정이다.

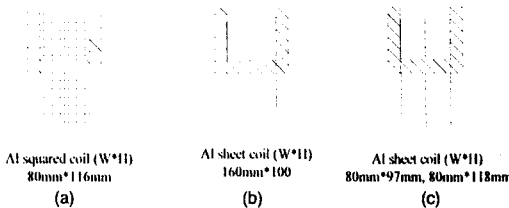


그림 3. 시험에 사용된 전자석 코일의 형태

그림 3은코일의 종류를 형태별로 보여 주고 있다. 그림 3.(a)는 현재 자기부상열차용으로 사용중에 있으며, 그림 3.(b)와 (c)는 시험용으로 국내에서 제작하여 시험한 코일이다.

### 3. 시험 방법

전자석의 코일 종류가 그림 3과 같이 3가지로 구분 됨에 따라 시험 조건을 동일시 하기 위하여 정격 전류를 코일 턴수에 비례하여 비교하였다.

시험 과정 및 방법은 먼저 그림 1의 시스템 구성도와 같이 정반위에 전자석과 대향 Guide way를 정격 공극인 11[mm]로 설치하고, 정격 전류의 4배 정도로 증감을 반복하여 시스템의 안정성 및 복원성을 확인하고 시험을 하였다. 또한 전류의 증감에 따른 공극의 변화를 관측하고 그 변화량을 주시하면서 변화량의 크기를 기록한다. 부상력 측정을 반복한 후 온도 특성 시험을 하였다. 온도 특성 시험은 자기부상열차용으로 장시간 부상 주행시 온도 특성을 보기 위함이다.

## 4. 시험 결과

### 4.1. 부상력 시험

전자석의 전류 증가에 따른 부상력의 변화는 그림 4와 같다. 그림 4의 오른쪽은 전자석 코일의 형태를 보여주고 있으며, 각각에 대한 부상력의 변화를 왼쪽에 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 3가지의 곡선에서 밑 부분이 기존의 알루미늄 각선 코일 [COIL (a)]의 경우이며, 중간 곡선은 알루미늄 박판 코일[COIL (b)]의 경우이고, 위의 곡선이 알루미늄 박판 코일[COIL (c)-1 과 COIL (c)-2 복합]이다.

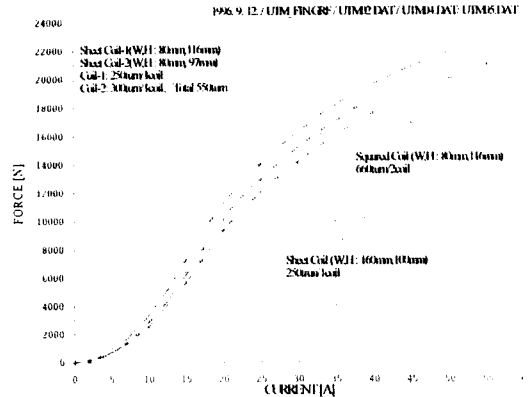


그림 4. 전자석 코일 종류 별 전류에 따른 부상력 변화

코일 (c)의 경우가 가장 높은 부상력을 보였으며, 기존의 알루미늄 각선 코일 보다 19.5%의 증가를 보였다. 코일 (b)의 경우는 각선 코일 보다 8.9%의 증가를 보였는데 이 경우 코일의 턴수가 적어 실제로 흐르는 전류가 상당히 높아 초퍼의 용량이 상대적으로 커야 한다.

그림 5에서는 알루미늄 각선 코일을 사용한 경우와 알루미늄 박판 코일을 사용할 경우에 대하여 전자석의 코어 높이의 감소량을 예측 비교한 것이다. 그림의 (A)는 알루미늄 각선 코일의 외형 크기이며, (B)는 알루미늄 박판 코일의 폭과 높이를 보여 주고 있다. 그림의 오른쪽은 전자석 코어의 한쪽 단면으로 시험 코일 (b)의 경우 코어의 높이가 약 15[mm] 정도 감소되는 부피가 될 것이다. 따라서, 그림의 밑 부분은 코일 자체 무게의 감소량과 코어 높이 감소에 따른 코어의 무게 감소량을 보여 주고 있다. 이와 같이 시험한 3가지의 코일에 대한 부상력의 증가량과 부상력/중 비율 표 2에 잘 나타내고 있다.

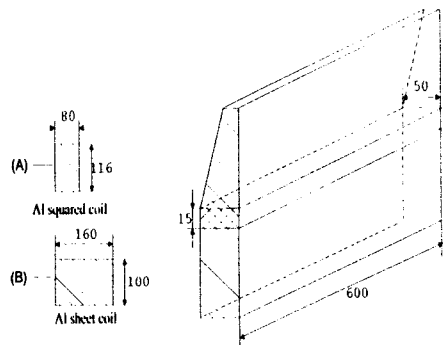


그림 5. 전자석 코일 높이 감소에 따른코어 높이 감소 및 전자석의 중량 감소 예상치

표 2. 부상력 시험 결과에 따른 부상력 비교

| 항 목        | 전자석<br>무게<br>[Kg] | 코아 무게<br>감소치<br>[Kg] | 부상력<br>21[A]에서<br>[Kg] | 부상력<br>/자중 비 | 부상력<br>증가율<br>[%] |
|------------|-------------------|----------------------|------------------------|--------------|-------------------|
| 코일종류       |                   |                      |                        |              |                   |
| COIL (a)   | 178.1             | —                    | 1,014                  | 5.69         | 100.0             |
| COIL (b)   | 156.5             | -7                   | 1,104                  | 7.06         | 108.9             |
| COIL (c)-1 | 156.2             | -8.9                 | 1,212                  | 7.76         | 119.5             |
| COIL (c)-2 | 171.3             | —                    |                        | —            | —                 |

4.2. 공극 내의 자속 분포

전자석과 Guide Way사이의 정격공극(11.0mm)내의 자속 분포를 알아 보기 위하여 자속 밀도를 측정하였다. 측정 결과를 그림 6에 표시한다. 그림 6에서 알 수 있듯이 전자석 pole의 중앙 부분에서부터 자속 밀도가 증가 하여 가다 Pole의 끝 부분에서는 (1) Gap Sensor를 취부하기 위한 볼트 구멍 때문에 자속의 누설 영향에 의하여 자속밀도가 급격히 떨어지며, (2) 볼트 구멍이 없는 경우에는 오히려 자속 밀도가 상승 함을 알 수 있다. 따라서, 코아 형상의 설계시에는 볼트 구멍 위치 선정을 고려하여야 한다. 자속 측정 장비는 Lakeshore-420 Gauss metet 를 사용하였다.

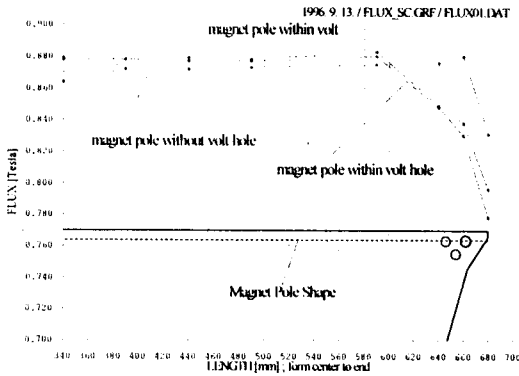


그림 6. 공극 내의 자속 밀도 분포(공극 11[mm], 정격 전류)

4.3. 온도 특성 시험

온도 특성 시험은 자기부상열차의 운행 성격상 상시 부상과 일시 부상의 경우가 있는데 일반적으로 상시 부상은 자기부상열차의 차량 시험 등의 경우이며, 운행 정지시는 착지를 원칙으로 하고 있다. 그림 6은 정격 전류를 가한 상태의 온도 특성 시험 결과이다. 그림에서 윗부분이 코일 (c)-1이고 아래 부분이 코일 (c)-2의 경우이다.

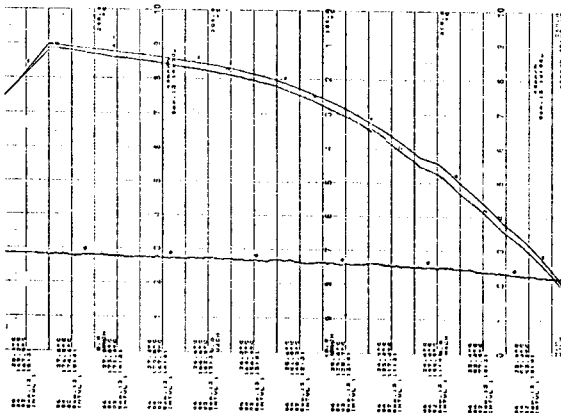


그림 6. 코일 (c)-1, (c)-2 를 사용한 전자석의 온도

5. 검토 및 결론

본 연구에서는 도시형 자기부상열차 개발에 있어 자기부상 차량의 부상용 전자석에 대한 성능 개선을 위하여 (1) 정격 전류 및 공극에서 부상력/전자석 자중의 비를 높이기 위한 방법으로 전자석 코일의 재질을 알루미늄 각선재에서 알루미늄 박판재로 변경하여 정적인 상태에서 부상력과 온도 특성시험을 하여 시험치와 해석치를 비교 검토하였고, (2) 또한 전자석의 시험에 있어 정격인 조건하에서 부상력이 정밀하게 계속되도록 계속 장치를 개선하여 계속하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) 부상력/자중비에 있어 기존의 알루미늄 각선 재를 코일로 한 경우에는 부상력/자중 = 5.7 정도 였으나, 알루미늄 박판재를 사용하였을 경우는 7.8 정도의 개선 효과를 얻을 수 있었다. 이때의 부상력은 알루미늄 각선재의 경우에는 정격 전류 및 공극하 에서 정격 부상력인 12,000 N 보다 적은 10,000N 정도였던 것에 비하여 알루미늄 박판을 사용했을 경우에는 19.5%의 부상력 향상을 보게 되었다.

2) 온도 특성에 있어서도 정격 전류를 장시간(약 6시간) 통전하여 시험한 결과 알루미늄 각선재 코일 및 알루미늄 박판 코일 양측 모두 H중 절연지의 내열 온도인 180℃ 부근까지 온도 상승을 보았으나 차량이 정지된 상태에서 장시간 부상 운전하지 않으므로 주행 시에는 자연 냉방 되어 사용에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

3) 부상력 계속에 있어 공극의 일정 유지는 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 기존의 인장형 Load Cell을 사용했을 경우에 발생 하였던 부상력 상승에 따른 공극 변화를 압축형 Load Cell을 사용함으로써 극소로 최소화 할 수 있어 정밀한 부상력 계속이 가능하게 되었다.

이상과 같은 결과로 전자석 성능의 개선 효과를 보았으나, 향후 전자석의 부상력/자중비를 7.8에서 8.5 이상으로 개선하기 위하여 코일의 절연을 H중 절연지를 사용하던 것을 알루미늄 박판의 표면 자체를 표면 절연처리 하여 사용함으로써 알루미늄 박판 적층 두께를 얇게하여 전자석 코아의 높이를 낮춤으로서 코아 무게를 감량시킴은 물론 코일 자체의 무게를 줄이도록 계속하여 연구할 계획이다.

끝으로 본 연구를 위하여 물심 양면으로 도와주신 제위께 지면을 통하여 감사 드립니다.

<참고문헌>

- 1) 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구", 대한전기학회 하계학술대회, 1995.7, pp.46-49
- 2) 김봉섭, 정현갑, 강병관, 강만식, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(II)", 대한전기학회 추계학술대회, 1995.11.18, pp.49-51
- 3) 正田 英介, "磁氣浮上鐵道の技術", オム社, 1992