

상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(IV)

김봉섭, 정현갑, 유문환
한국기계연구원

An Experimental Study on Magnet for Electro-Magnetic Maglev Vehicle(IV)

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

Abstract - A magnet for urban transit Maglev is designed, analyzed and experimented to evaluate and to improve its characteristics. FEM is also used to calculate magnetic field density, magnetic force, leakage flux and losses. Seven cases of magnets are analyzed and tested for verifying the calculated characteristics and for optimizing the shape. Using the results, an improved levitation magnet is proposed for the vehicle.

1. 서 론

도시형 자기부상열차의 차량부상용 전자석은 1차량에 24개의 전자석이 소요된다. 1차량의 중량은 승객을 포함하여 27[ton]이므로 1개의 전자석이 감당해야 할 부상력은 1,125[Kg]이 되고, 여기에 안전율을 고려하여 정격 부상력은 12,000[N]으로 설계되었다. 도시형 자기부상열차용 제1호 차량에 사용되는 전자석은 개당 자중이 175[Kg]이며, 정격 전류 21[A]에서 부상력은 10,907[N]으로 부상력/자중 비 ρ 는 6.36 정도로 효율이 낮은 편이다. 따라서 ρ 의 값을 키우기 위해서는 전자석 자중을 감소시켜야만 한다. 전자석의 성능향상 즉 ρ 값을 크게 하기 위하여 필자는, ① 전자석 대향제일의 형상별, 재질별에 따른 부상력 크기 변화를¹⁾, ② 전자석 코일 형상을 알루미늄 각선재에서 알루미늄 박판재로 변경하여 경량화를 시도하였다^{2,3)}.

본 연구에서는 전자석 코일을 알루미늄 각선재에서 박판재로 대체함으로서 전자석 코아의 pole 높이를 감소시킬 수 있는 점에 착안하여 코아의 형상을 여러 형태로 변경하고, 또 코아재를 전기연철에서 일반 강재(SS41)로 대체하여 부상력 특성을 시험하여 전자석 자중을 감량시킴과 동시에 부상력 증가를 가져오게 하였다.

전기연철은 수입에만 의존하여 가격이 고가인 반면 수급 소요일자도 많이 소요되었으나 일반강재는 국내에서

손쉽게 구입이 가능 할 뿐만 아니라 가격도 저렴(일반강재의 가격은 전기연철의 약 15%정도임)하여 경제적 효과도 볼 수 있게 되었다. 본 논문에는 연구에 사용된 전자석 특성 시험기와 시험 결과에 대하여 기술하고자 한다.

2. 시험기 및 시험조건

2.1 전자석 시험기

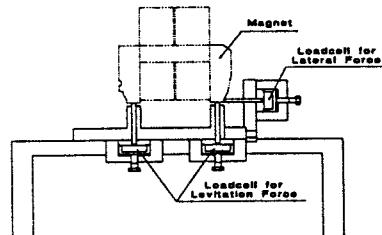


그림 1. 정적 부상력 시험기 외형도

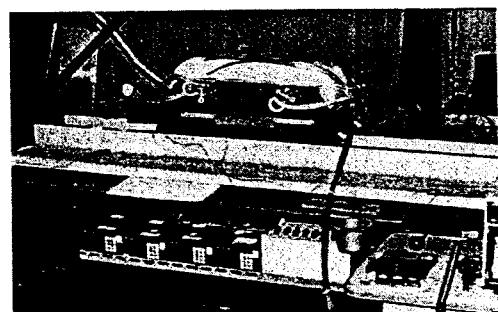


사진 1. 정적 부상력 시험기

2.2 시험용 전자석

도시형 자기부상열차용 전자석 설계사양을 표 1에 나타내고 있다. 표 1은 UTM-01의 제1호 차량용으로, 1 차량의 정격 중량은 승객을 포함하여 27ton으로 산정하고 있으므로 전자석 1개가 감당해야 할 부상력은 1,125 [Kgf]가 되며, 안전율을 고려하면 11,900[N]이 된다.

이때의 전류는 21[A]이며 전자석 코일 상한온도(허용온도)는 150°C이다. 제1호 차량에 사용한 전자석은 그림 2에서 initial model로 표시된 것으로, 코아재가 전기연철(외국으로부터 수입)이고, 코일은 알루미늄 각선재이다. 그림 3에서 각선 코일의 단면 크기는 3mm × 7mm = 21mm²로 전류밀도는 1[A]/mm²이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 코일은 2개의 블록으로 되어 있으며, 1개 블록의 권선 수는 330turn으로 1블록의 단면의 크기는, 각선 코일의 경우 절연지를 포함하여 가로 80mm, 높이 118mm이며, 박판 코일의 경우는 외각 절연지의 두께를 포함하여 가로 80mm, 높이 84mm이다. 따라서, 전자석 pole의 높이가 각선 코일의 경우 박판코일에 비하여 34mm 더 높은 것을 알 수 있다. 그러므로 박판코일을 사용하므로서 전자석 1개당 자중이 각선 코일을 사용하였을 경우에 비하여 약 40Kg의 감량 효과를 얻을 수 있었고, pole의 길이도 680mm에서 650mm로 짧게 할 수 있었으며, 또 공극 센서를 pole 측면에서 볼트로 한쪽만 의팔보(cantilevers type) 형태로 체결하도록 되어 있는 것을 pole 안쪽 측면에 비자성체를 용접하여 양쪽에서 양단 고정부 형태로 아래쪽으로 부터 볼트로 체결할 수 있도록 하여 공극 센서 설치가 종전에 비하여 견고하게 되었을 뿐 아니라, 체결도 용이해졌다.

표 1. 전자석 설계사양
(UTM-01 제1호 차량용)

부상력	11,900	[N]
정격부상공극	11	[mm]
pole 길이	680	[mm]
코일 재질	Al-각선(3x7)	[mm]
코일 Turn수	330x2	[Turn]
정격 전류	21(13.860(AT))	[A]
최대허용온도	150	[°C]
코아 재질	전기연철	

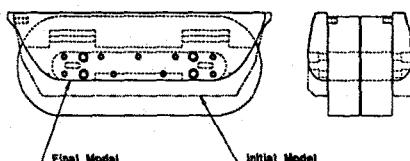


그림 2. 전자석 외형도

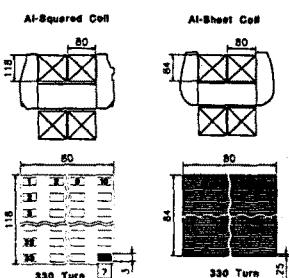


그림 3. 전자석 코아 및 코일의 단면 형상

2.3 시험 조건

전자석의 시험에는 정적 및 동적인 방법이 있다. 정적인 방법은, 전자석이 정지된 상태에서 전류 및 횡방향 변위에 따라 부상력(levitation force)과 횡방향 복원력(lateral force)이 변하는 것을 계측하는 시험을 말하며, 동적인 시험은 전자석이 실제와 같이 속도를 가지고 이동할 때에 힘의 변화를 계측하는 것을 말하지만, 동적인 시험에는 속도가 있는 경우와 속도는 없는 경우로, 속도가 있을 경우에는 전자석의 3방향에 자유도를 허용하는 경우이며, 속도가 없는 경우에는 수직방향만 자유도를 허용, 즉 상하 직선운동만을 할 수 있도록 하여 제어특성을 시험하는 semi-dynamic 시험이 있다.

본 연구에서는 정적인 시험을 통하여 전자석의 정격 부상력을 조사하였고, 부상력은 만족하지만 제어특성을 만족하는지를 semi-dynamic 시험을 하여 전자석 성능을 확인하였다.

전자석은 그림 4에서 보는 바와 같이 코일은 두께 0.25mm 알루미늄 박판을 330turn 감은 2블록을 코아의 yoke에 끼우고 yoke양측에 pole을 조립한 U자형의 전자석이다. yoke의 두께는 65mm이고, 코일과 yoke는 동일품을 사용하였으며, pole의 형상을 그림 4의 case 1~7과 같이 가공하여 시험하였다.

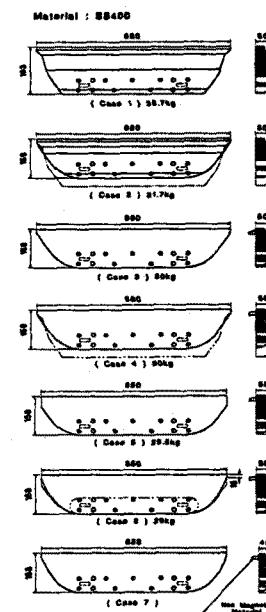


그림 4. 시험 전자석 외형도

그림 4의 각 case에 대하여, ① case 1은 자기부상열차 제1호 차량에 사용된 전자석의 코아 형상과 동일한 치수로 재질만 SS41로 했을 경우이며, ② case 2는 전자석 pole높이 193mm를 알루미늄 박판(coil)로 했을 경우의 높이 159mm로 34mm 작게 하였을 경우이다. ③ case 3은 pole 표면을 원호가 되게 하였을 경우, ④

case 4는 pole의 높이를 158mm로, 또 표면의 원호를 직선으로 하고 공극 센서취부용 bracket을 pole 안측에 용접했을 경우. ⑤ case 5는 pole 전체 길이를 680mm에서 650mm로 30mm짧게 했을 경우. ⑥ case 6은 pole 양측 끝단을 pole 길이 650mm에 맞게 유선형으로 하였을 경우이며. ⑦ case 7은 pole의 두께를 50mm에서 45mm로 작게 하였을 경우이다.

3. 시험 결과

3.1 전자석 코아재에 따른 부상력 특성

본 실험은 전자석 코아재를 전기연철에서 SS41로 변경할 수 있는지의 가능성을 조사하기 위하여 실시한 실험으로, 전자석의 코일은 알루미늄 박판재이며 코아의 형상은 case 1같다.

코아재를 전기연철과 일반 강재인 SS41로 하였을 경우의 시험 결과를 그림 5에 표시하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 정격 전류 21[A]에서 전기연철은 부상력이 10,907[N]인데 비해 SS41에서는 9,613 [N]정도로 코아재의 영향이 보이지만, 정격전류를 24[A]로 설계하면 코아재를 SS41로 변경할 수 있음을 보이고 있다.

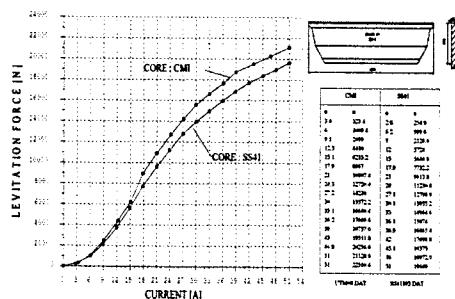


그림 5. 전자석 코아재에 따른 부상력특성

3.2 전자석 코일재에 따른 부상력 특성

전자석 코아재는 전기연철로, 코일은 알루미늄 각선과 박판으로 하였을 경우 부상력 차이를 그림 6에 표시한다.

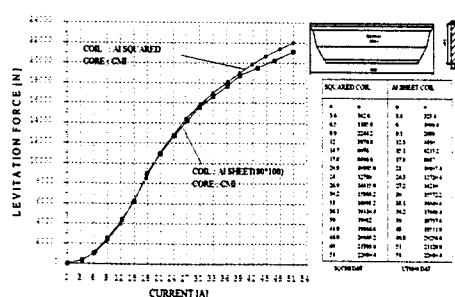


그림 6. 전자석 코일재에 따른 부상력특성

정격 전류 21[A]부근 이하 낮은 전류에서는 양자가 근

사한 값을 보이다 높은 전류에서 알루미늄 박판의 경우가 약간 낮은 값을 보이고 있다. 이것은 코일의 재질적 차이 즉 재질의 전기적 저항값이 상호 상이하기 때문으로 풀이된다. 따라서, 코일 형상의 변화에 따른 부상력의 차이는 없는 것으로 보아도 좋을 것으로 판단된다. 다시 말하여 ampere turn이 상호 같은 값을 갖는 경우는 같은 부상력을 갖는다고 말할 수 있다.

3.3 case 1과 2의 경우 부상력 비교

case 1의 경우는 도시형 자기부상열차의 제1호 차량용으로 제작된 전자석 코아의 형상 치수는 동일시하고, 코아 재질을 SS41로, 코일을 알루미늄 박판재로 하였을 경우이며, case 2는 단지 pole의 높이를 193mm에서 159mm로 작게 함과 동시에 양단의 형상을 유선형으로 가공하였을 것이다.

양자에 대한 부상력 특성을 그림 7에 표시한다. 그림에서 전류가 상승함에 따라 case 2가 case 1에 비하여 부상력이 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다.

특히 정격 전류 21[A]에서도 case 1은 부상력이 9,613[N]인데 반해, case 2에서는 10,339[N]으로, 코아재를 전기연철로 하였을 경우에 근접하고 있다. case 2에서는 case 1에 비하여 자속의 흐름을 부드럽게 해줌으로서 누설자속을 감소 할 수 있도록 한 것에 기인되는 것으로 생각된다.

case 2의 경우 부상력은 제1호 차량용 전자석에 근접하는 반면 전자석 중량은 38Kg의 감량 효과를 얻을 수 있다. 제1호 차량용 전자석의 전체 중량이 175 Kg이며, case 2의 경우는 137Kg으로 대폭 감량됨으로 부상력/자중 비인 ρ 의 값을 크게 향상시킬 수 있게 되었다.

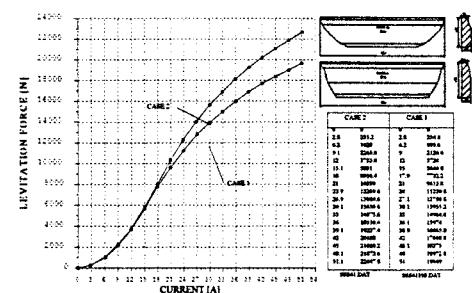


그림 7. case 1 과 case 2의 부상력

3.4 case 1과 3의 경우 부상력 비교

case 3은 pole 상면을 오목형 원호(직선일 경우에 비하여 1mm 깊게 하였음)로 pole의 표면적을 평면일 경우에 비하여 크게 하였을 것이다.

pole 상면을 오목형 원호를 두면 공극의 기준 값을 어느 부분으로 정할 것인 가가 중요하겠다. 그림 8에서 gap 1은 오목 부분의 공극이 11.5mm, pole단면 안 끝의 공극이 10.5mm일 경우이며, gap 2가 오목 부의 공

극이 11mm, 단면 양끝의 공극이 10mm일 경우이다.

case 3의 gap 2의 경우가 공극이 작기 때문에 당연히 case 3의 gap 1 및 case 1의 경우에 비하여 부상력은 크지만, 이의 경우는 실제 차량에 전자석을 취부 사용할 경우 pole 상면이 주행 레일과 충돌하게 되면 모서리 부분이 정상적인 형상을 유지할 수 없게 되어 공극의 변화가 발생 부상력 저하를 유발할 수 있으므로 유효성이 없는 경우로 판단된다. 그리고 공극의 기준을 정하기 곤란한 경우이다.

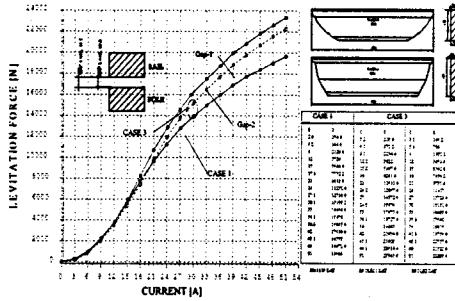


그림 8. case 1 과 case 3의 부상력

case 3의 경우는 공극 센서의 취부를 위하여 pole 안쪽 상단부에 비자성체(SUS-304)인 bracket을 용접하여 이로 인한 부상력의 영향을 조사한 경우이다. 그림 7에서 bracket의 용접에 의한 부상력의 영향은 없는 것으로 나타났다.

3.5 case 1과 4의 경우 부상력 비교

case 4는 pole의 길이 방향 중앙 단면 형상을 유선형으로 가공하였을 경우이다. case 1에서는 pole의 중앙 단면 형상이 각으로 연결되어 있다. case 4의 경우 역시 case 3과 같이 pole 안쪽 상부에 공극센서 취부용 bracket을 용접했을 경우이다. 그림 9에 부상력 비교를 나타내고 있지만, case 2의 경우보다는 정격 전류 21[A]에서 부상력이 약간 낮은 값을 보이고 있으나, 전류가 증가함에 따라 근사한 값을 나타내고 있다.

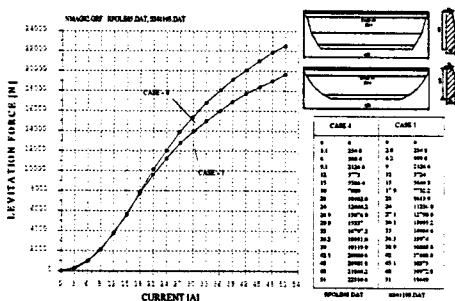


그림 9. case 1 과 case 4의 부상력

3.6 case 1과 5의 경우 부상력 비교

case 5의 경우는 pole 표면의 길이를 680mm로부터 650mm로 30mm 짧게 했을 경우의 부상력 변화를 확인한 것으로, 그의 결과를 그림 10에 표시한다.

그림 10에서 낮은 전류 영역에서는 case 4에 비하여 부상력이 작게 나타나지만 높은 전류(24[A] 이상)에서는 오히려 크게 나타나고 있다. 따라서 case 4 혹은 5의 경우를 제2호 차량에 적용토록 할 것을 추천하며, 정격 전류를 21[A]에서 24[A]로 상향 조절하고 코일의 온도 특성을 확인하는 것이 바람직하다고 생각한다.

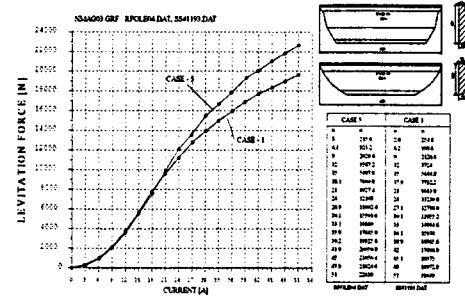


그림 10. case 1 과 case 5의 부상력

3.7 case 1과 5, 6의 경우 부상력 비교

case 6의 경우는 case 5의 경우의 pole 양 끝 상단 15mm를 제외하고 나머지 부분을 유선형으로 가공하였을 것이다.

그림 11에 시험 결과를 표시한다. 그림 11에서 case 5에 비해 case 6의 경우가 부상력이 약간 높게 나타나고 있으나 근사한 차로, 개선의 효과를 보이고 있다.

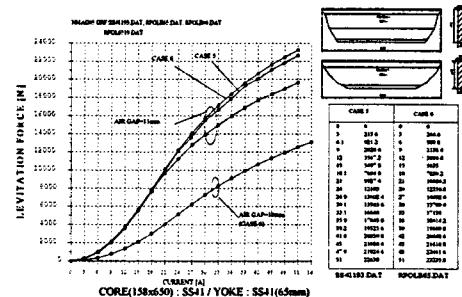


그림 11. case 1, case 5, case 6의 부상력

3.8 case 6과 7의 경우 부상력 비교

case 7은 case 6의 경우에서 pole의 두께 50mm를 외측으로부터 5mm 철삭 가공하여 45mm로 하였을 경우이다.

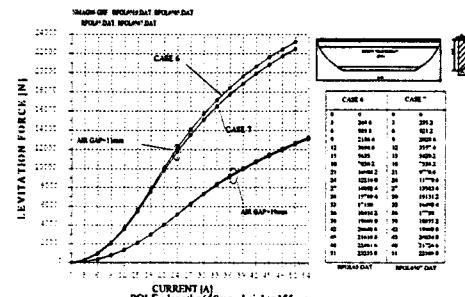


그림 12. case 6 과 case 7의 부상력

그림 12에 시험 결과를 나타내고 있다. 그림에서 case 6에 비해 case 7의 경우가 부상력이 현저히 감소됨을 알 수 있다. 이것은 제1호용 전자석의 해석 결과에서 자속밀도 분포도를 보면, pole 단면 중앙 부분에서 자속밀도가 높은 것으로 나타나 있다. 그러므로 측면을 절삭 가공해 단면적이 더욱 작아짐으로 중앙 부분에서 자속밀도는 더욱 커지고, 따라서 자속의 누설 현상이 발생하여 부상력의 저하를 초래한다고 판단된다. 그러므로 pole 중앙부 횡단면의 폭을 50mm로부터 45mm로 하는 것은 부상력 증가에 효과가 없다.

3.9 코아재 : SS41, 알루미늄 박판코일을 한국산과 독일산을 채용했을 경우 부상력 비교

한국산 박판 코일은 0.25mm 두께의 표면 절연처리(anodized)가 되지 않은 것으로 절연을 0.05mm 두께의 H-종 절연지를 사용하여 330회 권선한 것이다.

독일산 코일은 0.25mm 두께에 anodized된 것으로 절연지를 사용하지 않고 300회 권선한 것이지만 절연은 우수하다. 절연지가 사용되지 않을 경우 $330\text{회} \times 0.05 = 16.5\text{mm}$ 의 pole 높이 감소 효과를 기대할 수 있다. 그림 13에 시험 결과를 표시한다.

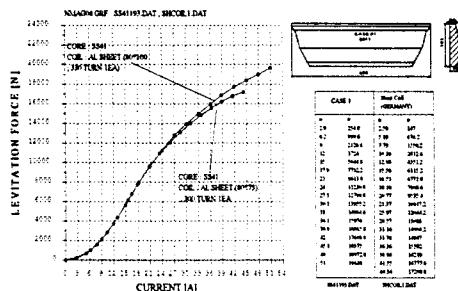


그림 13. 박판코일의 한국산과 독일산의 부상력비교

3.10 Single Magnet에 대한 Semi-Dynamic 제어특성

상기 9.1~9.9까지는 전자석의 형상 특히 pole의 형상에 따른 부상력 특성에 관하여 조사하였다. 부상력은 설계조건에 만족하더라도 제어 특성, 즉 재질이 일반 강재인 SS41이므로 잔류 자속이 전기 순찰에 비하여 클 것으로 예측된다. 잔류 자속이 크다는 것은 제어특성에 영향을 줄 가능성성이 있으므로, 제어 특성을 만족 할 수 있는지 확인하지 않으면 안된다.

Single magnet의 제어 특성을 확인하기 위하여 사진 2에서 보여준 시험기를 사용하여 제어 특성 시험을 실시하였다.

사진 2에서 시험기 frame 상부에는 실제 궤도용 guide way를 설치하고, 직하부에 single magnet을 hinge로 연결된 arm 끝 부분에 설치하였다. magnet 하부에는 정격 하중 1,100Kg(전자석 자중 포함)이 작용하도록 되어 있으며, 전자석은 상하만이 자유도를 갖도

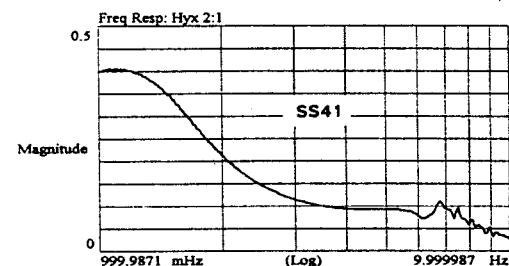
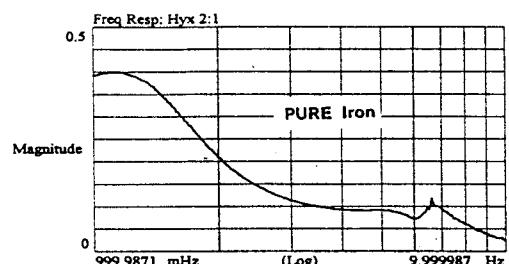


그림 13(a). 전자석의 주파수 제어응답특성(magnitude)

도록 되어 있어 전류를 공급하게 되면 초기 공극 19mm에서 11mm로 부상 제어 되도록 되어 있다.

시험 결과를 그림 14, 15에 표시한다. 그림 14은 전자석을 제어할 때의 주파수 응답성을 검토한 것으로, 전기연철과 SS41 양자가 유사한 값을 보이고 있어 주파수 응답성은 문제가 없다고 판단된다.

그림 15는 시간에 대한 응답성 시험 결과로 시간 응답성에도 양자가 근사한 값을 유지하고 있다. 따라서 전기연철의 대체 재질로 SS41을 채용하여도 제어 특성에는 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

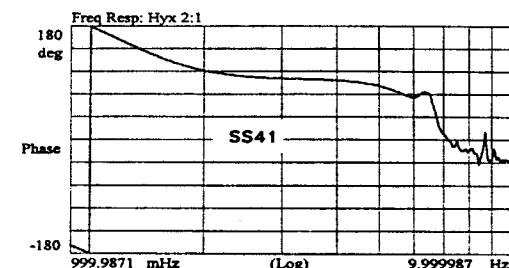
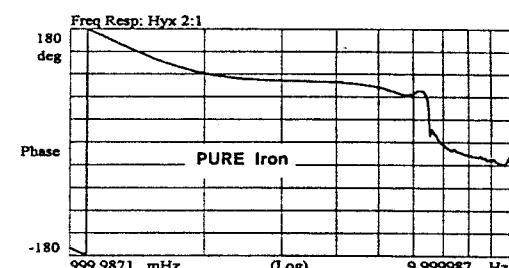
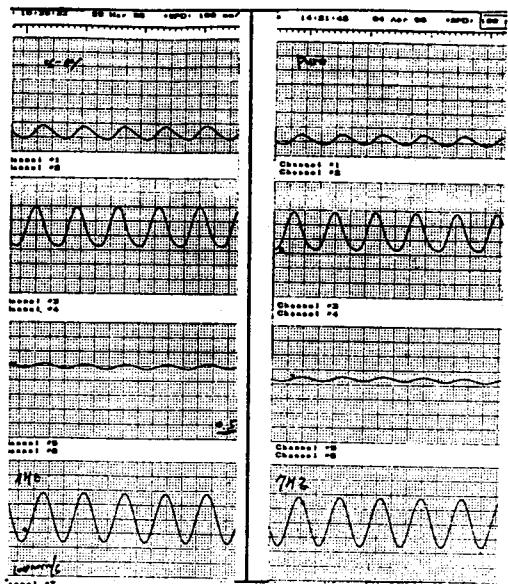
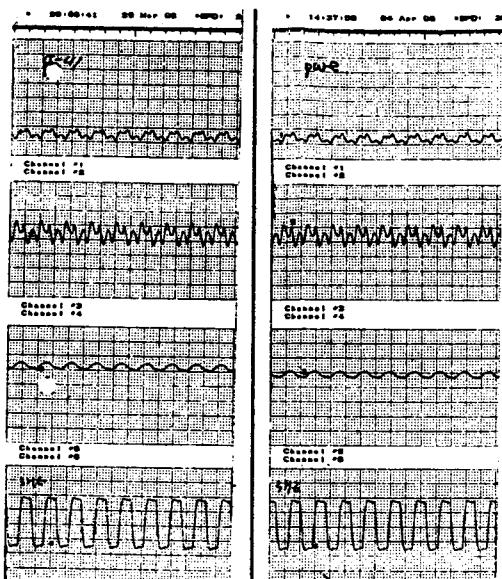


그림 14(b). 전자석의 주파수 제어응답특성(phase)



(SS41) (전기연철)
(a) Sinusoidal Input



(SS41) (전기연철)
(b) Step Input

그림 14. 전자석의 시간 응답 특성

4. 결 론

도시형 자기부상열차의 차량지지안내 시스템에서 중요한 요소라고 하면 부상력을 내는 전자석이라 하겠다. 또한 1차량에 소요되는 전자석의 수량은 24개로서 차량 전체무게에 차지하는 비율은 크다.

현재 사업단이 개발 중에 있는 도시형 자기부상열차 제호 1 차량의 정격 중량은 승객포함 27 ton이며, 전자석 총중량은 24개 \times 175Kg = 4,200 Kg이 된다. 따

라서, 전자석이 차지하는 무게는 약 15.6%에 달한다. 그러므로 전자석의 부상력 향상도 중요 하지만 자중을 저감시키는 일 역시 중요하다.

본 연구는 이러한 문제점, 즉 전자석의 부상력 향상과 자중 저감으로 적하량(pay load)를 증가시키는 일에 있다. 이를 위하여 다수의 전자석을 여러 가지 형상으로 가공 제작하여 각각의 경우에 대한 시험을 하였다. 본 연구결과를 정리하면 아래와 같다.

- ① 표 2에서 전자석 코일을 알루미늄 각선재로부터 박판재로 변경하였다.
- ② 알루미늄 박판재에 절연지를 사용하지 않고 표면을 산화 피막 처리(Anodized)하였다.
- ③ 표면처리 한 박판재를 사용함으로서 권선수에 따른 코일 블록 전체의 두께를 감소시켰다.
- ④ 따라서, 코일의 무게가 58.4Kg에서 43Kg으로 15.4Kg 감소되어 26.4%의 효과를 얻게 되었다.
- ⑤ 코일 블록 전체 두께가 감소됨에 따라 코아 pole의 높이를 낮게 할 수 있게 되었다.
- ⑥ 코아 높이가 낮게됨으로 코아무게를 24.2Kg 감소시켰다.
- ⑦ 코아 높이가 낮게됨으로 코아무게를 24.2Kg 감소시켰다.
- ⑧ 코일과 코아무게($15.4 + 24.2 = 39.6$ Kg)가 감소됨에 따라 표 2의 전자석 부상력 비교로부터 알 수 있듯이 전자석의 부상력/자중비인 ρ 의 값이 6.04에서 7.6으로 향상되었으며, 사진 3의 제1호 차량용 전자석과 개선된 전자석과의 비교 사진을 보아 전자석의 크기가 상당량 감소되었음을 알 수 있다.

표 2. 전자석 coil

코일 형상	제작 사	크기(mm)		무게 [Kg] /1ea	권선 수 량	절연 상태
		코 일 전 체 면 [W] x[H] [mm]	코 일 단 면 [W] x[H] [mm]			
Al- 각선	현대 정공	80x116	7x3	29.2	330	2 노екс
Al- 박판	사업 단	80x102	80x0.25	24.3	330	2 노екс 0.05mm
Al- 박판	사업 단	80x116	80x0.25	26.0	250	1 노екс 0.13mm
Al- 박판	사업 단	80x97	80x0.25	22.9	300	1 노екс 0.13mm
Al- 박판	독일	80x75	80x0.25	19.5	300	4 아노다이즈
Al- 박판	독일	80x82.5	80x0.25		330	4 아노다이즈

⑨ 부상력의 비교 표 3으로부터 SS41일 경우 정격 전류 21[A]에서 정격 부상력 12,000[N]에 미달되는 것은 코일의 온도 특성을 조사 24[A]로 상향 조절해야 할 것을 추천한다.

⑩ 부상 제어특성 시험으로 전자석 코아재를 전기연철의 대체 재료로 SS41을 채용하여도 제어 특성에 영향을 주지 않는다는 것을 확인하였다.

표 3. 전자석 부상력 비교

종 류	전류 [A]	부상력 [N]	부상력 순위	전자석 중량 [Kg]	부상력/ 차중
core : SS41 coil : Al-박판, 330 turn yoke : SS41, 65mm	21	9,613.8	⑨	162.5	⑩6.04
core : CMI coil : Al-박판, 330 turn yoke : SS41, 65mm	21	10,907.3	②	162.5	⑦6.85
core : CMI coil : Al각선, 330 turn yoke : SS41, 65mm	21	10,985.8	①	175.0	⑧6.41
case 1 yoke : SS41, 65mm	21	9,613.8	⑨	165.0	⑪5.95
case 2 yoke : SS41, 65mm	21	10,339.0	④	146.5	④7.20
case 3 yoke : SS41, 65mm	21	10,691.8 9,731.4	③ gap10.0mm ⑧ gap10.5mm	143.1	①7.62 ⑥6.94
case 4 Yoke : SS41, 65mm	21	10,162.6	⑤	143.0	③7.25
case 5 yoke : SS41, 65mm	21	9,927.4	⑦	142.0	⑤7.13
case 6 yoke : SS41, 65mm	21	10,084.2	⑥	141.0	②7.30
core : SS41 coil : Al-박판 독일산300회/개	21	9,535.4	⑩	152.9	⑨6.36

주 : Case 6 의 경우,

독일산 Al-박판코일 330Turn을 사용시

코일무게 : $21.5\text{Kg} \times 2 = 43\text{Kg}$

Pole 무게 : $29 \times 2 = 58\text{Kg}$

Yoke 무게 : 34.5Kg

합계: 135.5 Kg , 부상력/차중=7.6 이 된다.

⑪ 코아재를 SS41로 대체 함으로서 경제적인 기대 효과가 증대되었다. SS41의 재료비는 전기연철 재료 구입비의 최대 15%정도면 국내 구입이 가능한 것으로 조사되었다.

본 연구를 통하여 상기의 기대 효과를 얻을 수 있도록 되었으며, 도시형 자기부상열차 제2호 차량 제작(1998년도에 제작할 예정임)에는 본 연구 결과를 적용할 것으로 판단된다.

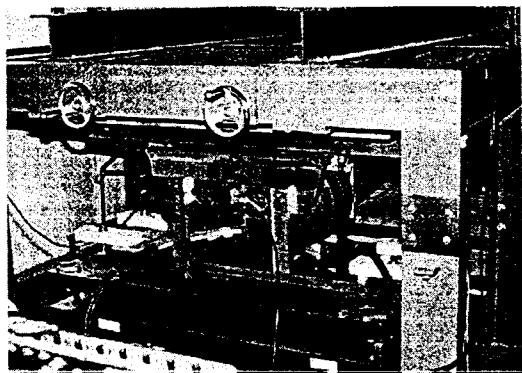


사진 2. Semi-dynamic 시험기

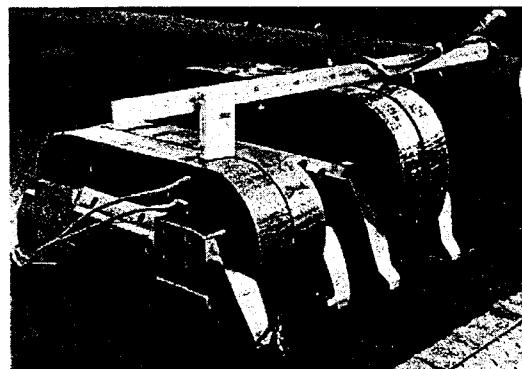


사진 3. 제1호 차량용 전자석과 개선된전자석과의 비교

(참 고 문 헌)

- [1] 김봉섭, 정현갑, "상전도흡인식 자기부상 열차용 전자석에 대한 실험적 연구(I)", '95 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.46~49, 1995. 7.20~22.
- [2] 김봉섭, 정현갑 외, "상전도흡인식 자기 부상 열차용 전자석에 대한 실험적 연구(II)", '95 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.49~51, 1995.11.18.
- [3] 김봉섭, 정현갑, "상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(III)", '96 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.12~14, 1996. 11.16.