

상전도 흡인식 자기부상차량용 전자석의 실험적 연구(V)

김 봉섭¹, 정 현갑¹, 하 경덕², 신 판석²

¹한국기계연구원, ²홍익대학교 전기공학과

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

Bong Seop Kim¹, Hyun-Kap Chung¹, Kyoung-Duck Ha² and Pan Seok Shin²

¹Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM), ²Hong-Ik University

Abstract - Experiments and design efforts have been made to improve performance of the levitation magnet. One pole of the pair-magnet is manufactured as a solid core without stagger and its test result gives a 5 % increment of levitation force. One effort is to make molding coil to protect it from vibration and precipitation due to outdoor usage. In addition, a permanent magnet embeded type has been designed and analyzed by using FEM program.

연상태를 검토하여 습득한 시험 결과들을 보고한다.

2. 부상용 전자석 개선 연구

2.1 일체형 pair-magnet 제작 및 특성실험

현재 사용 중인 전자석은 하나의 bogie에 4 개의 전자석을 약 5 mm 정도의 stagger를 주어 일렬로 각각 배치하여 부착함으로써 전자석간의 누설자속이 많은 것으로 관찰되었다. 이것을 보완하기 위하여 최근에 설계되어 제작되는 부상용 전자석은 stagger 없이 부착함으로써 bogie 측에 부착되는 1 조(pair magnet)의 전자석 풀을 하나의 몸체로 제작함으로써 누설량이 감소되고 부상력이 증가되며 또한 조립성이 좋아질 것으로 예상된다. 그림 1은 일체형 pair-magnet의 전자석 코아 형태를 보여주고 있으며, 한쪽 풀은 하나의 코아 즉 일체형으로 한 것이다. 그림 2는 pair-magnet로 제작된 일체형 전자석의 외형사진이다. 그림 3과 4는 pair-magnet의 한쪽 풀을 일체형으로 했을 경우의 공극에서의 자속분포와 부상력을 보여주고 있다. 부상력은 각각의 전자석으로 제작된 경우보다 정격전류에서 약 5%의 증가를 나타냈으며 이것은 공극의 자속분포에 나타난 것과 같이 일체형의 pole에서는 두 개의 풀로 나누어지는 경우와는 다르게 연결되는 부분의 약 50 mm 부분에서 누설자속이 없이 균등하게 공극자속 밀도가 분포되기 때문으로 판단된다.

1. 서 론

도시형 자기부상열차(UTM : Urban Transit Maglev Vehicle)는 상전도 흡인방식의 부상용 전자석을 사용하고 있다. 차량 1량에는 24세트의 전자석을 사용하고 있다. 그러므로 자기부상차량의 경량화를 위하여는 전자석의 경량화 즉, 부상력대 자중비의 증가 노력은 무엇보다도 중요하다.

필자들은 상전도 흡인방식의 전자석에 대한 각종 시험을 통하여 적절한 시험기의 개발과 시험기법을 확립하였고, 전자석 성능 개선에 많은 공헌을 하였다^{1)~5)}. 특히 전자석의 코일재를 알루미늄 각선에서 박판으로 교체함으로써 전체 형상을 축소시켜 자중을 감소시켰고, 코일재를 전기연철에서 일반구조용강으로 대체하여 재료비절감 효과를 얻게 하였다^{4,5)}.

본 연구에서는 부상용 전자석의 부상력대 자중비를 더욱 증가시키기 위하여 전자석의 코아 풀(pole)에 영구자석을 삽입하는 것과, 2세트의 전자석을 1조(pair-magnet)로 하였을 때 횡방향 변위(stagger)를 두지 않을 경우 코아 양측 풀의 한쪽은 일체형 풀로 다른 한쪽은 2개의 풀로 하였을 경우에 대하여 부상력 검토를 하였고, 코일 외부에 손상방지용 물딩처리를 하였을 경우의 온도 특성과 이때의 절

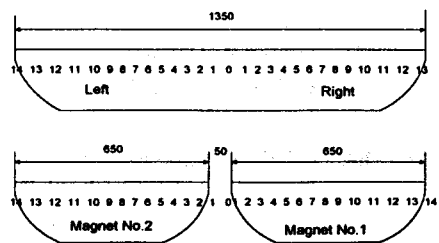


그림 1. 일체형 pair-magnet의 전자석 형태도

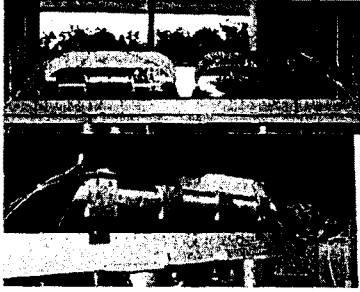


그림 2. 일체형 pair-magnet의 제작된 외형사진

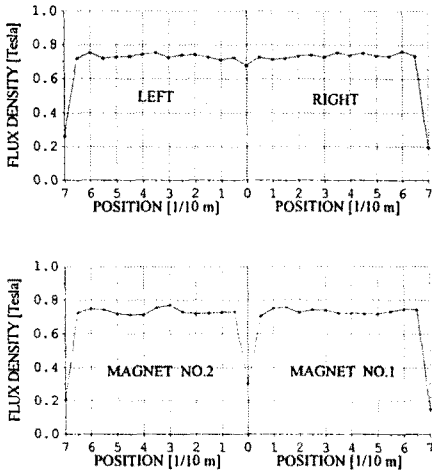


그림 3. 장대폴과 2개의 폴 표면에서의 자속분포 측정결과

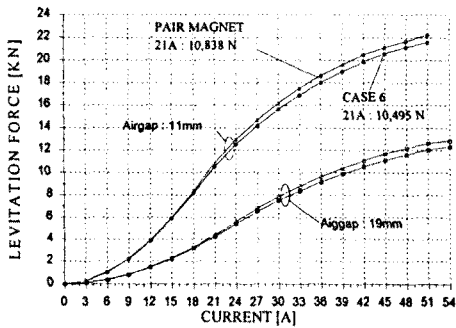


그림 4. 일체형 pair-magnet의 부상력 측정 결과

2.2 물딩 코일의 절연 및 온도특성 시험

자기부상열차용 전자석은 옥외에서 사용하므로 coil의 절연 상태는 양호하게 보호되어야 하며, 열과 진동에도 견딜 수 있는 구조를 가져야 한다. 이러한 점을 실현하기 위하여 Al-sheet로 된 coil을 에폭시로 물딩하고 열적인 특성을 점검하기 위하여 온도 상승 실험을 하였다. 먼저 코일을 그림 5와 같이 물속에 넣은 후에 절연시험을 하였으나 선간 및 대지간 절연은 모두 1100 MΩ이상으로 양호하게 나타났

다. 그림 6은 온도상승 실험을 하기위하여 전자석에 설치할 써머커플의 위치를 표시하고있으며, 그림 7은 온도상승 실험을 한 결과를 나타내고 있다. 물딩한 경우의 coil 중심의 온도가 140도, 물딩하지 않은 경우는 120도, 코일의 표면온도는 110도 정도에서 포화됨으로서 열적인 문제는 발생되지 않을 것으로 판명되었다.

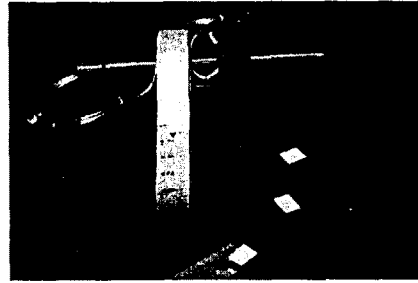


그림 5. 전자석코일의 누수실험 장면

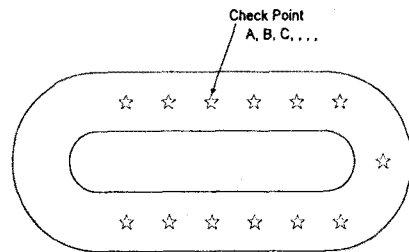


그림 6. 전자석 코일의 온도 및 절연 측정 위치

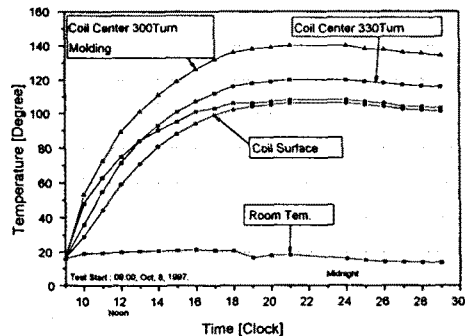


그림 7. 물딩 코일의 온도 특성 측정결과

2.3 영구자석 매입형 전자석의 설계

부상용 전자석의 효율은 부상력대 자중비로 평가되기 때문에 그것을 높이기 위한 한가지 방법으로 희토류 영구자석을 그림 8에 나타낸 것처럼 삽입하는 것이다. NdFeB는 잔류자속밀도가 1.0~1.2 tesla

이므로 현재 사용중인 core에 삽입할 경우 전자석의 효율과 전체 전원 system을 개선하는 효과가 기대되어 영구자석의 두께(t), 삽입모양(a) 및 매입위치(h) 등 여러 가지 상황을 고려하여 설계하고 해석하였다. 영구자석을 V 자 형태로 삽입하는 경우 누설을 줄일 수 있으며 동일한 부상력에서 coil의 크기를 작게 할 수 있기 때문에 보다 compact한 설계가 예상된다.

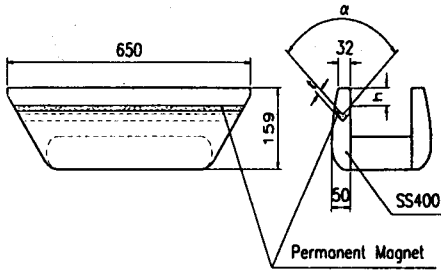


그림 8. 영구자석 매입형 전자석의 단면도

본 연구는 유한요소 프로그램인 FLUX2D를 이용하고, 반복하여 해석해보는 시행착오법으로 영구자석의 형태를 결정하였다. 그림 9는 영구자석의 형태를 결정하고 부상력을 해석하기 위한 모델을 보여주고 있으며, 그림 10은 정격전류에서의 자속선도를 보여주고 있고, 영구자석의 위치에서의 자속선도를 관찰하면 폴의 폭이 좁아지는 곳에서 안쪽으로 모아지는 경향이 있다는 것을 알 수 있다. 그림 11은 영구자석으로부터 폴페이스까지 거리 h[mm]를 결정하기 위하여 해석한 결과이며 거리가 가까울수록 부상력에 좋은 영향을 주지만 제작성을 고려하여 25 mm로 결정하였다. 그림 12는 V 자형 영구자석의 삽입각도(a)를 변수로 하여 해석한 결과이며 제작성을 고려하여 90도로 선정하였다. 그림 13은 영구자석의 두께(t)를 변수로 하여 해석한 결과로서 영구자석 자체가 투자율이 공기와 같기 때문에 두꺼울수록 자기저항의 역할을 하므로 15 mm 이상이 되면 부상력이 감소하는 현상이 나타났으며 현재 생산되고 있는 규격을 감안하여 10 mm로 결정하였다. 이상과 같이 결정된 전자석에 대한 부상력 특성은 그림 15에 나타났으며 정격에서는 약 20 %의 부상력 증가 효과가 있지만 인가전류가 높아지면서 그 효과는 점점 줄어들고 있는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에 사용되는 영구자석은 NdFeB로서 그림 14에 나타난 온도 특성과 같이 160 °C 정도까지는 선형적으로 변하고 있으므로 포화온도인 140 °C 까지 운용된다면 온도로 인한 감자효과에 따라 포화자속밀도를 1.0 T로 계산하면 정확한 simulation

이 될 것이다.

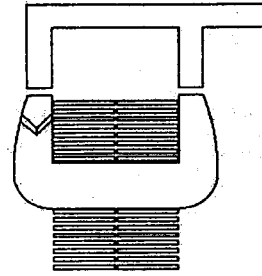


그림 9. 영구자석 매입형 전자석의 해석 모델

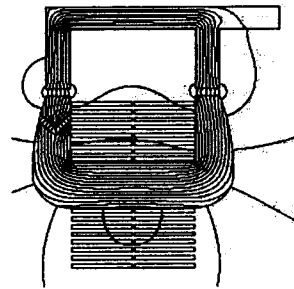


그림 10. 영구자석 매입형 전자석의 정격에서의 자속선도

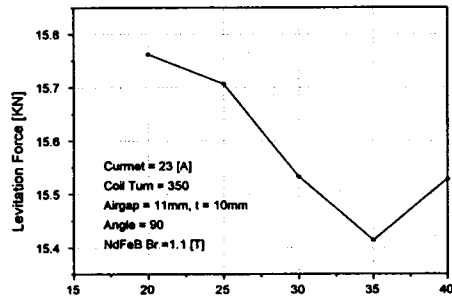


그림 11. 영구자석으로부터 폴페이스까지 거리(h)에 따른 부상력

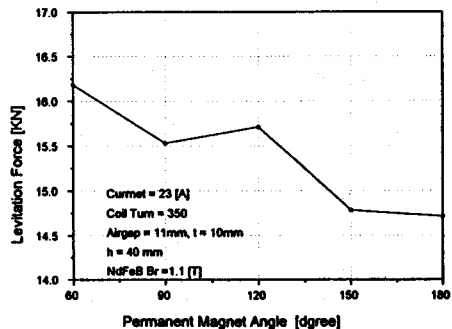


그림 12. 영구자석의 각도에 따른 부상력

3. 결론

부상용 전자석의 특성을 개선하기 위하여 pair-magnet의 한쪽 폴을 일체형으로 제작하여 부상력특성을 실험한 결과 약 5%의 개선효과가 있었으며, 이 형태는 제작과 조립의 용이성도 가져오리라 기대된다. 부상용 전자석은 옥외에서 사용되고 많은 기계적 진동과 열적인 스트레스가 예상되므로 코일을 보호하는 것이 필요하며, 이를 위하여 에폭시로 몰딩한 경우의 온도특성을 실험한 결과 코일 중심의 온도가 140 도에서 포화됨으로서 anodizing 된 Al sheet로 coil을 제작한 경우에 온도상승은 문제가 되지 않음이 밝혀졌다. 또한 현재의 전자석 형태에 영구자석을 삽입하는 경우의 전자석을 설계하고 유한요소프로그램으로 해석한 결과 정격전류에서 약 20%의 부상력 상승효과가 나타남이 밝혀졌으나 입력전류의 크기가 높아지면 영구자석 부분이 자기저항의 역할을 하기 때문에 부상력의 상승정도는 둔화되는 것으로 나타났다. 보다 실질적인 모델을 재설계하고 최적화하여 제작하고 영구자석 매입의 효과가 검증된다면 전자석의 특성이 크게 개선될 것으로 예상된다.

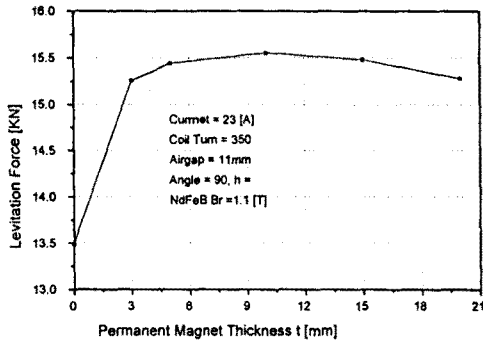


그림 13. 영구자석의 두께에 따른 부상력

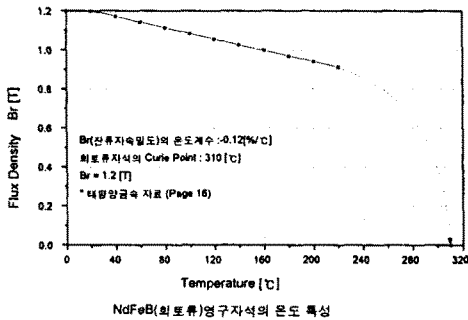


그림 14. 희토류 영구자석의 온도감자특성

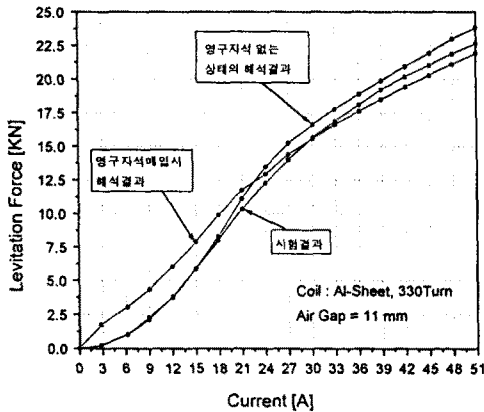


그림 15. 매입형 영구자석의 부상력 특성

참 고 문 헌

- [1] 김봉섭, 정현갑 : 「상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(I)」, '95 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 46~49, 1995. 7. 20~22.
- [2] 김봉섭, 정현갑 : 「상전도 흡인식 자기부상열차용 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.
- [4] 김봉섭, 정현갑, 유문환 : 「상전도 흡인식 자기부상열차용 전자석에 대한 실험적 연구(IV)」, '97 대한전기학회 50주년 하계학술대회 논문집(EMO20), pp. 67~73, 1997. 7. 21~23.
- [5] H.K. Chung, B.S. Kim, M.W. Yoo, P.S. Shin : 「A Design and Analysis of A Magnet for Urban Transit Maglev Vehicle(UTM-01) in Korea」, Fifteenth International Conference on Magnet Technology, Beijing, China, Paper No. PB-40, Oct. 20~24, 1997.