

## 선형동기전동기의 전기자권선을 이용한 초전도 반발식 자기부상열차 시스템

홍순흠\*, 차귀수\*\*, 이기식\*\*\*, 한승엽\*

\* 서울대학교 전기공학과, \*\* 순천향대학교 전기공학과, \*\*\* 단국대학교 전기공학과

Electrodynamic Superconducting Maglev  
System with Quadruple Armature Windings

Soon-Heum Hong\*, Guee-Soo Cha\*\*, Ki-Sik Lee\*\*\* and Song-Yop Hahn

\*Dept. of Elec. Eng., Seoul National University

\*\*Dept. of Elec. Eng., Soonchunhyang University

\*\*\* Dept. of Elec. Eng., Dankook University

**ABSTRACT** — In this paper, The characteristics of the new superconducting maglev system which has quadruple armature windings is examined. This system can generate guidance force and levitation force as well as propulsion force by single ground coil. The time-domain analysis method and phasor analysis method are derived to analyze the characteristics of the proposed system. From the numerical examples for two kind of armature winding configurations, it is shown that the levitation force and guidance force can be generated by single armature winding of the linear synchronous motor without any other ground coils for levitation and guidance, and that double layer configuration has better characteristics in the qualitative characteristics, like as efficiency, pulsation of the electromagnetic forces and drag ratio, than the single layer configuration.

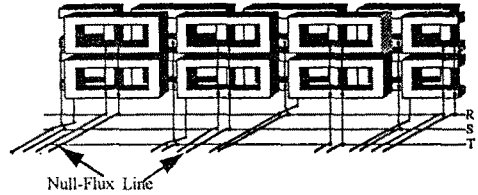


그림 1. 이중층방식의 권선연결도

### 1. 서론

선형 동기전동기로 추진되는 반발식 자기부상열차 시스템의 가이드웨이에는 추진력, 안내력 그리고 부상력을 얻기 위하여 선형 동기전동기의 전기자 권선과 부상코일(또는 부상용 도전시트) 등의 지상코일을 설치된다. 따라서 시스템의 효율을 높이고, 지상코일에 사용되는 도체의 양을 줄이며 동시에 가이드웨이에 지상코일을 간편하게 설치할 수 있도록 추진, 안내 및 부상을 위한 지상코일을 효과적으로 배치하는 방법이 여러 가지로 연구되어 왔다. 최근의 연구에서 선형 동기전동기의 전기자 권선을 이용하여 부상력과 안내력 및 추진력을 동시에 발생할 수 있는 구조가 제안되었다. 이 방식은 기존 축력식 자기부상시스템의 부상전용코일을 제거할 수 있어 지상코일의 구조를 크게 간단히 하였다. 본 논문에서는 패시 해석법을 통하여 이 방식의 추진력 및 안내력의 발생원리를 확인하고, 시영역 해석에 의한 사례연구를 통하여 이 시스템의 전자력을 계산하였다. 그 결과 시스템의 효율, 전자력의 배동률 및 양항비등의 질적인 면에서 우수한 이중층방식의 지상코일 구조를 제안하였다.

### 2. 시스템의 구조 및 원리

전기자 권선을 이용한 자기부상열차 시스템은 가이드웨이의 양쪽 측벽에 8자형으로 연결된 상하 2개씩의 동일한 코일들을 좌우측벽에 설치하고, 이 8자형코일을 다시 병렬로 연결하여 영자속 원리에 의하여 부상력과 안내력을 발생시킨다. 그리고 이 병렬로 연결된 코일들을 직렬로 연결하여 삼상 전원에 접속함으로써 선형 동기전동기의 전기자 권선 역할을 동시에 할 수 있도록 한다. 이 가이드웨이에 설치된 전기자 권선 또는 지상코일의 피치를 전기적 각도로  $60^\circ$  로 하고, 지상코일 하나의 차지하는 부분을 전기각도  $60^\circ$  이하로 하면 지상코일을 한 층에 배치할 수 있다. 이하 이러한 방식을 단일층방식 (single-layered) 이라 부른다.

단일층방식의 지상코일구조는 공극자속의 형태가 나빠 전자력에 많은 변동이 생긴다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 그림 1와 같이 지상코일의 피치를 첫번 째와 마찬가지로  $60^\circ$  로 하고 코일 하나가 차지하는 길이의 전기적 각도는  $90^\circ$  가 되도록 한다. 이 방식에서는 지상코일의 길이가 피치보다 길어 지상코일을 두 층으로 배치하고, 이웃하는 코일과는 길이의 1/3 만큼씩 겹치게 배치한다. 이를 이중층 (double-layered) 방식이라 한다. 두 경우 모두 전원의 연결순서는 열차진행방향으로 R, T', S, R', T, S'의 순으로 되어 있다.

본 논문에서 열차의 진행방향을 직각좌표계의 x방향, 진행방향으로 보아 왼쪽을 y방향, 그리고 위쪽을 z방향으로 한다. 따라서 진행방향으로 작용하는 전자력을 추진력, 좌우방향 및 상하방향의 전자력을 각각 안내력과 부상력으로 정의한다. 좌우 차상코일의 상하 및 좌우방향의 중심이

네 개의 지상코일의 중심으로부터 상하좌우 어느 방향으로 이탈하여 변위가 생기면 그 변위에 따르는 지상코일과 차상코일 상호간 위치의 변동이 생기고, 이로 인하여 각 지상코일에 유기되는 기전력의 크기와 위상이 각각 달라진다. 이에 따라 각 지상코일에는 서로 다른 전류가 흐르게 되고 그 결과로 차상코일에 작용하는 전자력의 크기도 달라져 그 방향에 따라 부상력과 안내력을 발생한다.

### 3. 특성 해석

#### 3.1 시스템의 등가회로

가이드웨이에 설치된 지상코일은 추진력을 얻기 위하여 각 구간별로 여자된다. 동시에 여자되는 구간내의 지상코일은 차상코일의 영향을 받아 유기기전력이 생기는 부분과 유기기전력이 생기지 않는 부분의 두 부분으로 나누어 생각할 수 있다. 유기기전력이 생기는 부분의 지상코일

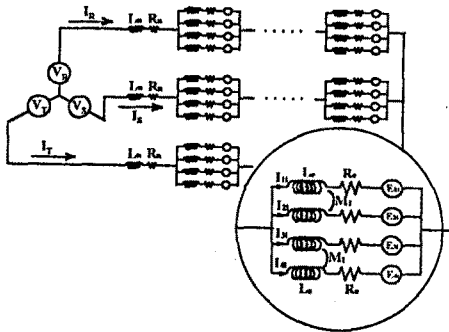


그림 2. 여자구간의 등가회로

에 흐르는 전류는 차상코일과의 상호작용으로 발생하는 전자력을 결정하게 되므로 상하좌우 지상코일에 흐르는 전류를 정확하게 계산할 필요가 있다. 여자구간내의 지상코일에 대한 등가회로는 그림 2과 같다. 유기기전력이 생기지 않는 부분의 지상코일은 등가임피던스( $R_n, L_n$ )로 처리했다.

#### 3.2 지상코일의 유기기전력

자기부상용 초전도자석은 대개 레이스트랙형으로 제작되며 이 초전도자석코일의 폭과 길이도 초전도자석과 지상코일 사이의 공극에 비하여 무시할 수 없다. 따라서 곡선부분에 대한 계산을 간략히 하고 각 코일의 폭과 길이에 따른 영향을 충분히 고려하기 위하여 초전도자석을 많은 유한 직선도체로 구성되었다고 가정하고, 각각의 유한 직선도체에 의한 공극자속을 합하여 초전도자석 전체에 의한 공극자속으로 사용한다. 하나의 유한 직선도체에 의한 공간 위의 임의의 점 ( $x, y, z$ )의 자석밀도는 Biot-Savart 법칙에 의하여 계산하였다.

지상코일에 유기되는 기전력은 열차의 한 대에 탑재된 모든 차상코일쌍에 의한 유기기전력의 합으로 구할 수 있다. 따라서 차량이 선형 동기전동기에 의하여 일정한 속도  $V_s$ 로 추진되고 있을 때 지상코일의 유기기전력은 식 (1)과 같이 차상코일과 지상코일과의 상대적인 위치함수로 표현할 수 있다.

$$e_i = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -V_s \sum_{j=1}^N \frac{\partial \phi_{ij}(x)}{\partial x} \quad (1)$$

여기서,  $e_i, N, \phi_{ij}(x)$ 는 각각  $i$ 번째 지상코일의 유기기전력, 열차의 한 대에 탑재된 차상코일쌍의 수, 그리고  $j$ 번째 차상 코일에 의하여  $i$ 번째 지상코일을 통과하는 쇠교자속수이다.

그림 2의 등가회로에 대한 전압방정식을 전류에 대하여 정리하면 식(4)와 같다.

$$[I] = -[L]^{-1}[R][I] + [L]^{-1}[E] \quad (2)$$

여기서,  $[E], [I], [L]$  및  $[R]$ 는 각각 회로의 유기기전력, 쇠교전류, 인덕턴스 및 저항행렬이다. 식 (2)를 Runge - Kutta법으로 풀어서 전류를 구한다.

#### 3.3 전자력 계산

차상코일과 지상코일의 전류에 의하여 발생하는 전자력은 두 코일사이에 축적된 에너지의 각 방향에 대한 미분으로 표시할 수 있다. 하나의 차상코일이 받는 힘은 유도전류가 흐르고 있는 모든 지상코일과의 상호작용에 의하여 생긴다. 그리고 차량의 무게중심에 작용하는 힘은 각 차상코일이 받는 힘의 합으로 나타난다. 따라서 차량의 상하 및 좌우변위가  $\Delta Y, \Delta Z$  이 때  $i$ 번째 차상코일의 중심에 미치는 부상력은 식(3)과 같다. 추진력과 안내력도 같은 방법으로 구한다.

$$F_{iz}(\Delta Y, \Delta Z) = -\sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^2 I_{jk} \frac{\partial \phi_{ik}(\Delta Y, \Delta Z)}{\partial z} \quad (3)$$

### 4. 사례 연구

차량의 중심변위가 가이드웨이의 중심으로 부터 상하변위와 좌우변위를 동시에 가질 때의 지상코일의 유기기전력은 그림 3과 같다. 상하좌우의 4개 지상코일에 유기된 유기기전력이 각각 서로 다르며, 차상코일이 진입하기 전후에 많은 단부효과가 있음을 알 수 있다.

차상코일에 의한 유기기전력이 생기는 부분의 지상코일에는 유기기전력의 차이에 의하여 각각 다른 위상과 크기의 전류가 흐른다 이 전류를 전자력을 발생시키는 방향에 따라 성분별로 분리하면 그림 4와 같이 추진전류, 부상전류 및 안내전류로 나눌 수 있다. 부상전류와 안내전류는 열차가 지나가는 부분에만 흐르며 추진전류는 어디서나 같음을 알 수 있다. 또 하단코일에 흐르는 안내전류가 상단

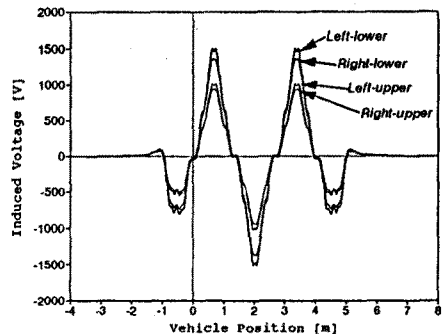


그림 3. 지상코일의 유기기전력

코일의 안내전류보다 커서 하단코일에 의한 안내력이 상단의 안내력보다 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 5은 부하각과 속도에 따른 부상력과 변화이다. 부상력과 진부하각을 통하여 큰 변화가 없으며 단지 속도에 의해서만 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 이 시스템은 요구되는 추진력을 얻기 위하여 부하각을 제어하더라도 안정된 부상력과 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 6은 균형변위에서 좌우변위가 있을 때의 각 지상코일 전류와 유기기전력의 웨이서도이다. 상하단코일을 비교하면 각 유기기전력의 차이로 인하여 상단과 하단 지상코일의 전류 위상이 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 그 결과 상하단코일에는 모두 부상력이 발생하는 방향으로 전류가 흐르게 됨을 쉽게 알 수 있다. 이에 비하여 좌우코일간을 비교하면 차상코일과의 거리가 가까워지는 쪽의 전류 위상은 빨라지고, 멀어지는 쪽의 전류 위상은 늦어져 좌우코일에 의하여 발생하는 전자력의 차이에 의하여 안내력이 발생함을 알 수 있다.

대차당 요구되는 부상력과 추진력을 낼 수 있는 인가 전압과 균형변위에서 단일층 방식과 이중층방식의 순시추진력의 맥동을 그림 7에서 비교하여 보았다. 단일층 방식보다 이중층 방식의 경우가 변동폭이 훨씬 적은 것을 볼 수 있다. 각각의 초전도자석에 작용하는 추진력의 경우 변화폭은 두가지 경우 비슷하지만, 변화하는 주파수에 있어서 이중층방식보다 단일층방식이 두 배나 높다. 따라서 단일층인 경우가 훨씬 더 많은 초전도마그네트의 내부 열손실을 발생함으로써 더 큰 차상 냉동시스템을 필요로 함을 보여준다.

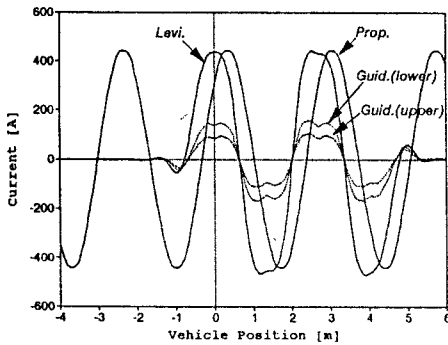


그림 4. 지상코일 전류

## 5. 결론

본 논문에서는 선형 동기전동기의 전기자 권선을 이용하여 별도의 부상용 코일없이 부상력과 안내력을 얻을 수 있는 새로운 초전도 자기부상열차 시스템의 특성을 해석하였다. 웨이서도를 사용한 해석방법에 의하여 추진, 부상 및 안내력이 동시에 발생하는 원리와 부상력과 안내력의 부하각에 따르는 영향을 해석하였으며, 시영역해석에 의한 사례연구를 통하여 제안된 시스템의 전자력 특성을 정량적으로 보였다.

지상코일을 단일층으로 구성한 경우와 이중층으로 구성한 경우의 사례연구에서 단일층에 배치한 경우보다 이중층에 설치한 경우가 효율, 양항비 등의 질적인 면에서 우수했고, 전자력의 맥동율이 작아 계자코일인 초전도자석에 미치는 영향이 작았다.

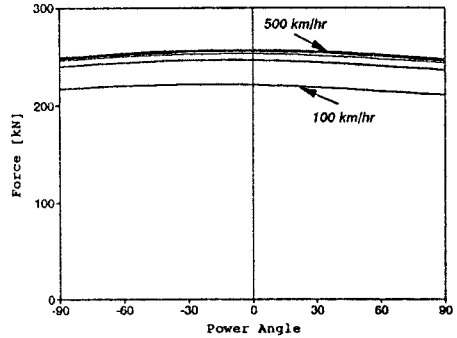


그림 5. 부하각에 따른 부상력의 변화

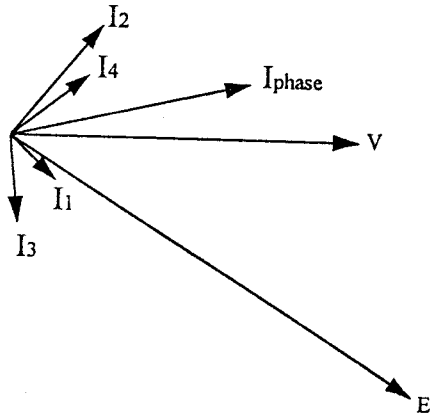


그림 6. 균형변위와 좌우변위에 의한 전류의 위상관계

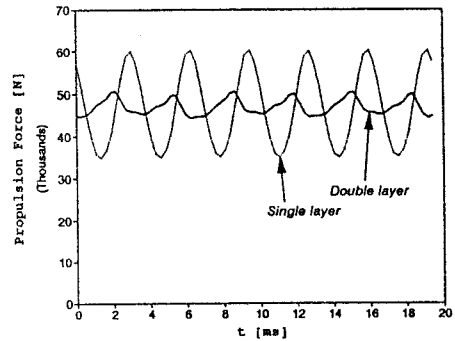


그림 7. 이중층방식과 단일층방식의 추진력의 맥동비교

본 연구에서 개발된 해석프로그램은 웨이서도를 사용한 해석방법에서 다루기 힘든 대차 앞뒤의 지상코일에 유기되는 기전력에 미치는 단부효과와 차상코일에 의한 유기기전력이 존재하는 부분의 전류 등에서 좋은 결과를 보였으며, 앞으로 최적화 기법을 병행하여 사용하면 자기부상열차 시스템의 지상코일과 차상코일의 최적화에 많은 도움이 되리라 생각된다.

## Reference

[1] Fujiwara, S., Fujimoto, T., Characteristics of the Combined Levitation and Guidance System Using Ground Coils on the Side Wall of the Guideway, 11th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev '89), pp 241-244, Yokohama July 7-11 1989