

단일권선으로 구성된 반발식 자기부상시스템의 전자력특성

홍순흠[○], 차귀수, 한송엽

한국고속철도건설공단, 서울대학교 전기공학과, 순천향대학교 전기공학과

Characteristics of Electromagnetic Forces of a Single winding EDS MAGLEV System

Soon-Heum Hong, Guee-Soo Cha, Song-Yop Hahn
Korea High Speed Rail Construction Authority, Seoul National University, Soonchunhyang University

Abstract - This paper describes the characteristics of electromagnetic forces of Combined superconducting maglev system. Generation of the levitation, the propulsion and the guidance force by a single coil is proved by the phasor-analysis. It is also shown that double-layered configuration has better characteristics in efficiency, pulsation of the forces and drag ratio than single-layered configuration.

1. 서론

단일권선으로 구성된 반발식 자기부상시스템은 지상의 전기자권선을 이용하여 추진력뿐만 아니라 부상력과 안내력을 동시에 발생시키는 구조를 취하고 있다. 이 방식은 추진코일과 부상코일이 분리된 경우와 비교하여 지상코일의 구조가 간단하여 지상코일의 제작, 설치 및 유지보수에 편리할 뿐만 아니라, 차상의 계자코일과 지상코일의 거리가 가까워져 공극의 기자력이 강하게 되는 잇점이 있다.

분리형의 경우와는 달리 이 방식에서는 지상코일, 즉 전기자권선에 부상전류가 계속 흘러 추진전류에 지속적인 영향을 미치게 된다. 따라서 상하 또는 좌우변위가 발생했을 때 추진력이 영향을 받게 되며 그 결과 추진력이 감소하게 된다.

본 논문에서는 단일권선으로 구성된 반발식 자기부상열차 시스템의 지상코일에 흐르는 전류를 페이서도를 이용하여 해석하고, 추진력, 부상력 및 안내력을 발생하는 각 성분전류로 분리함으로써 부상력 및 안내력을 원인이 되는 상하변위 및 좌우변위가 추진력에 미치는 영향을 분석하였다. 또 등가회로를 시영역으로 해석한 결과를 이용하여 지상코일이 이중층과 단일층인 경우의 전자력특성과 차상코일에 미치는 영향을 비교분석하였다.

2. 시스템의 구조와 동작원리

그림 1과 같이 가이드웨이의 측면에 상하 2개의 코일로 구성된 8자형 지상코일을 가이드웨이를 따라 설치하고 여기에 3상 교류전원을 연결하여 선형동기전동기의 전기자권선을 구성한다. 그리고 가이드웨이의 반대편 측면에도 같은 모양의 지상코일을 설치하고 양쪽 측면의 같은 상, 같은 위치의 8자코일을 서로 연결하여 좌상, 좌하, 우상, 우하의 모두 4개의 코일을 병렬로 연결되도록 한다. 이 지상코일들은 삼상교류전원에 의해 이동자계를 발생하여 추진코일의 역할을 하며, 8자코일의 상하코일에 흐르는 전류의 차에 의하여 부상력을, 그리고 좌우코일에 흐르는 전류의 차에 의하여 안내력을 발생한다. 따라서 하나로 연결된 지상코일로서 3가지 기능을 할 수 있다. 차상에는 계자권선(차상코일)으로 네 쌍의 초전도 자석이 열차를 지지하는 데차의 좌우에 같은 극성을 갖도록 교대극성(N, S, N, S)으로 탑재되어 있다. 지상코일의 피치는 전기가 90°로 하고, 코일 하나가 차지하는 전기각은 90°이다. 지상코일의 길이가 피치보다 길기 때문에 지상코일을 두 층으로 배치하고, 이웃하는 코일과는 길이의 1/3 만큼씩 겹치게 배치한다. 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.

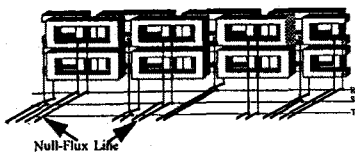


그림 1. 지상코일의 권선연결도

3. 시영역해석에 의한 지상코일의 전류 및 전자력 계산

같은 전원공급 구간에 속한 모든 전기자 권선에는 열차가 그 구간을 모두 지나갈 때까지 인버터를 통하여 공급되는 전원에 연결된 상태로 있다. 일반적으로 한 구간의 길이는 차량의 길이보다 길기 때문에, 지상코일은 차량에 탑재된 초전도자석의 영향의 크기에 따라 크게 유기기전력이 생기는 코일군과 생기지 않는 코일의 두 가지로 나눌 수 있다. 열차가 지나갈 때 유기기전력이 생기지 않는 지상코일에는 상하좌우로 병렬연결된 지상코일에 동일한 위상의 전류가 흐르고 열차에 가해지는 전자력을 발생시키지 않기 때문에 네 개의 지상코일전류를 각각 구할 필요가 없고, 이러한 이유로 유기기전력이 생기지 않는 부분은 등가임피던스로 환산하여 등가회로에 표시한다. 유기기전력이 생기는 지상코일에는 부하각에 따라 각각 다른 위상과 크기의 전류가 흐르고 열차에 가해지는 각 방향의 전자력계산에 직접 필요하므로 모든 지상코일전류를 직접 구할 수 있도록 등가회로를 구성한다.[1]

열차의 속도를 U_r 라하면 등가회로의 진행방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx} \{I\} = \frac{1}{U_r} [L]^{-1} \{V\} - [E] - [R] \{I\} \quad (1)$$

여기서 $[L]$, $[L]$, $[R]$, $[V]$ 및 $[E]$ 는 각각 지상코일의 전류, 인덕턴스, 저항, 인가전압, 역기전력을 나타내는 행렬이다.

위의 식을 4차 Runge-Kutta방법을 이용하여 수렴오차가 0.1% 미만 이 될 때까지 반복계산하여 열차가 지나가는 부분의 각 지상코일에 흐르는 전류를 구한다.

지상코일의 전류는 차상의 초전도마그네트와 작용하여 추진력, 부상력 및 안내력을 동시에 발생시킨다. 지상전류를 각 방향의 전자력을 발생시키는 데 기여하는 역할을 알아보기 위하여 그림 2와 같이 각각 추진전류, 부상전류 및 안내전류를 정의한다[2]. 여기서 부상전류와 안내전류는 영자속 원리, 즉 좌우 또는 상하 지상코일간에 유기기전력의 차이에 의한 부상력 및 안내력을 발생하는 전류를 말한다.

$$I_{pr} = \frac{1}{4} (i_1 + i_2 + i_3 + i_4), \quad I_L = \frac{(i_2 - i_1) + (i_4 - i_3)}{4}$$

$$I_{su} = \frac{i_1 - i_3}{2}, \quad I_{gl} = \frac{i_2 - i_4}{2} \quad (2)$$

여기서 I_{pr} , I_L , I_{su} 그리고 I_{gl} 은 각각 추진전류, 부상전류, 상단코일간의 안내전류 및 하단코일간의 안내전류이다.

각 지상코일에 흐르는 전류에 의하여 지상코일과 차상의 초전도 마그네트 사이에 작용하는 전자력은 가상변위법에 의하여 차상코일과 지상코일 사이에 축적된 에너지의 각 방향에 대한 변화율로부터 구하였다.

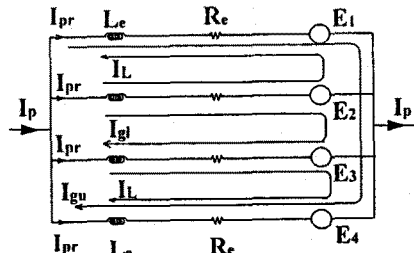


그림 2. 지상코일 성분전류의 정의

4. 페이서도를 이용한 해석

지상코일의 전류를 페이서해석에 의하여 구하기 위하여 한 상의 등가회로를 구하면 그림 3과 같다. 여기서 각 코일간의 상호인덕턴스는 무시하였다. 등가회로에서 사용된 변수의 의미는 다음과 같다.

- E_k : 상하좌우코일에 유기되는 유기기전력
- I_i : 상하좌우코일에 흐르는 전류 ($i=1, 2, 3, 4$)
- I_p : 지상코일의 상전류
- L_e : 지상코일의 자기인덕턴스
- L_n : 유기기전력이 발생하지 않는 코일군의 등가자기인덕턴스
- N : 지상코일의 수 ($N_n + N_c$)
- N_c : 유기기전력이 발생하는 지상코일의 수
- R_e : 지상코일의 저항
- R_n : 유기기전력이 발생하지 않는 코일군의 등가저항
- V : 상전압
- V_c : 유기기전력이 발생하는 지상코일 양단의 전압

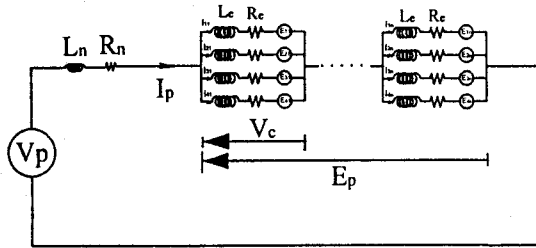


그림 3. 등가회로

등가회로부터 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$V = (R_p + j\omega L_p)I_p + E_p \quad (3)$$

여기서 E_p , R_p 및 L_p 는 각각 상당등가 유기기전력, 등가저항, 등가인덕턴스로서 식 (4), (5)와 같다.

$$E_p = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{i=1}^4 E_{ki} \quad (4)$$

$$R_p = \frac{N}{4} R_e \quad L_p = \frac{N}{4} L_e \quad (5)$$

전압방정식으로부터 상전류 I_p 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_p = \frac{V - E_p}{R_p + j\omega L_p} \quad (6)$$

지상코일의 평균양단전압을 식 (7)과 같이 정의하면 유기기전력이 생기는 코일의 상하좌우 지상코일에 흐르는 전류는 식 (8)과 같다.

$$V_c = \frac{V - (R_n + j\omega L_n)I_p}{N_c} \quad (7)$$

$$I_i = \frac{V_c - E_i}{R_e + j\omega L_e} \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

5. 사례 연구

5.1 계산모델

본 사례연구에서 사용한 모델은 지상코일이 이중층으로 되어 있으며, 하나의 대차에는 좌우로 4개씩 모두 8개의 초전도자석이 탑재되어 있다. 초전도 자석과 지상코일의 치수는 표 1과 같다. 초전도자석은 현재 외국에서 이미 개발된 것과 같은 크기의 기저력과 치수를 택했다[3]. 지상코일은 선택된 초전도자석을 사용하는 경우 필요한 부상력과 추진력을 얻을 수 있는 크기를 사용하였다.

표 1. 사례연구 모델의 사양(이중층)

	초전도자석	지상코일	단위
길이	1,070	675	mm
폭	500	345	mm
단면적	64	30.25	cm ²
권회수	1,024	24	turns
피치	1,350	900	mm
좌우 폭	3,000	3,350	mm
		3,500	
상하코일 간격		30	mm

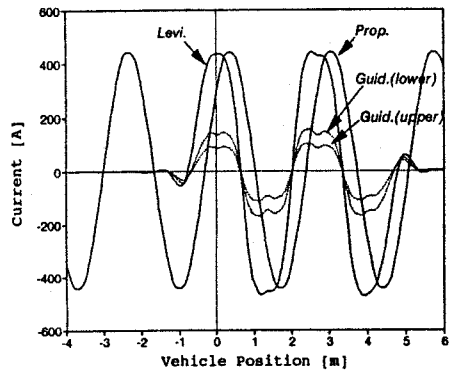


그림 4. 상하 및 좌우변위에 의한 성분전류

5.2 추진, 부상 및 안내전류

열차의 시속 500 km, 부하각 30° 에서 정격 추진력과 부상력을 발생하고 있을 때 즉, 상하 및 좌우변위가 동시에 있을 때의 각 성분전류를 그림 4에서 비교하였다. 그림에서 부상전류와 안내전류는 차상코일이 지나가는 부분에만 흐르며, 추진전류는 모든 영역에서 일정하게 흐르는 것을 볼 수 있다. 안내전류를 보면 하단코일의 안내전류가 상단코일의 안내전류보다 커서 하단코일에 의한 안내력의 영향이 더 큼을 알 수 있다.

대개의 경우 열차는 균형변위에서 상하변위만 있는 상태로 주행하게 된다. 따라서 추진전류는 여자구간내의 모든 코일에서, 부상전류는 열차가 지나가는 부분의 코일에서 항상 흐르고, 안내전류는 좌우방향의 외란이 있는 경우에만 열차가 지나가는 부분의 코일에 순차적으로 흐르게 됨을 알 수 있다. 자기항력은 주로 이 부상전류에 의한 지상코일의 동손에 기인하며, 상하변위가 없는 경우와 선형동기전동기 입력을 비교해도 알 수 있다. 부상전류와 안내전류는 부하각이나 인가전압의 크기에 큰 영향을 받지 않고 차량의 속도 및 변위의 크기에만 영향을 받는다.

5.3 페이서도에 의한 해석

자기부상열차시스템의 지상코일전류와 전자력특성을 살펴보기 위하여 그림 5에 상하변위와 좌우변위가 동시에 존재하는 경우의 정상상태에서의 지상코일 전류와 인가전압 및 역기전력에 대한 페이서도를 보였다. 변위가 없는 경우 상하좌우의 지상코일에 흐르는 전류는 모두 같은 위상과 크기를 가진다. 이 때 상하변위가 발생하면 하단코일의 전류는 위상이 빨라지고 상단은 늦어져 약 140° 이상의 위상차가 난다. 그러나 역기전력과의 위상차가 모두 예각을 이루고 있어 모두 정방향의 추진력을 발생한다. 또 상하방향 쇠교자속변화율과의 위상차도 모두 예각이어서 상하코일 모두 부상력을 발생하고 있다. 여기서 좌측으로 좌우변위가 발생하면 가까워진 쪽과 멀어진 쪽 지상코일 전류위상은 다시 벌어져 그림과 같이 각각 다른 크기의 위상과 크기를 가진 전류가 흐르게 된다. 이 때 안내력의 방향은 좌측상단과 우측하단의 경우 전류와 자속 변화량과의 위상차가 90° 보다 작어 (+y) 방향의 안내력을 발생하고, 우측 상단과 좌측하단 코일의 경우 그의 위상차가 90° 보다 커서 (-y) 방향의 안내력을 발생하며 크기의 차이에 의하여 (-y) 방향의 안내력이 발생함을 알 수 있다.

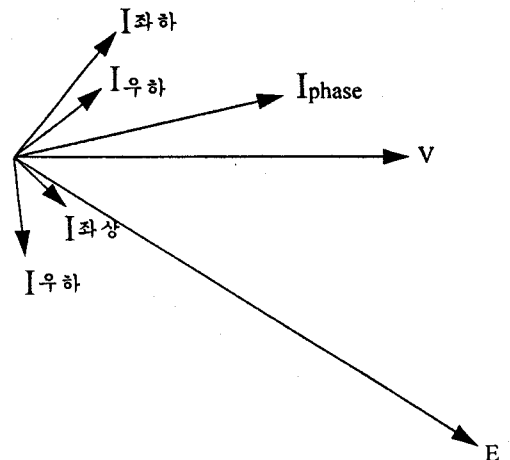


그림 5. 상하 및 좌우변위가 동시에 존재하는 경우의 페이서도

5.4 단일층방식과 이중층방식의 비교

단일층방식은 지상코일의 길이를 퍼치보다 짧게하여 지상코일을 한 층에 설치하는 방식을 말한다. 이 방식은 이중층 방식에 비해 코일의 구성이 더욱 간단해진다. 여기서는 이 두방식의 전자력, 효율 및 양항비 등을 살펴봄으로써 장단점을 비교하였다. 비교는 부하각 30°에서 요구되는 추진력과 부상력을 낼 수 있는 상하변위와 인가전압에서 하였다.

단일층방식의 경우 지상코일의 길이가 차상코일의 길이보다 길어지기 때문에 이중층방식에 비하여 유기기전력에 많은 고조파를 포함하고 있다. 지상코일은 공간적으로 집중권으로 구성되어 있어 차상코일과의 상대적인 위치에 따라 전자력의 크기가 변하게 된다. 이에 유기기전력에 포함된 고조파는 전자력의 맥동을 심화시킨다. 그림 6에 두방식의 추진력의 순시치를 비교하였다. 이중층방식의 경우가 변동폭이 약 반정도로 작다. 한편 개개의 초전도코일에 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 한다.

그림 7에 두 방식의 균형변위와 양항비를 비교한 것이다. 이중층의 경우가 더 적은 상하변위에서 필요한 부상력을 발생함을 알 수 있다. 이것은 영자속 부상방식에서 효율은 균형변위에 비례하여 나빠지므로 단일층의 경우가 효율이 나쁜 것을 의미한다. 특히 저속에서 효율이 더욱 나빠진다. 양항비는 부상력과 그것에 수반되어 발생하는 자기항력의 비로 부상효율을 나타내는 지표로 사용된다. 그림에서 이중층방식의 양항비가 매우 큰 것을 볼 수 있다. 곧 같은 부상력을 발생하는데 필요한 소비전력이 적은 것을 의미한다.

6. 결론

분석결과 지상코일에 흐르는 안내전류와 부상전류는 각각 좌우변위와 상하변위에 크게 의존하며, 각각의 전류가 추진력에 미치는 영향, 즉 상하 또는 좌우변위에 의한 영향은 크지 않았다. 또 페이서해석에 의하여 상하지상코일의 부상전류 위상의 차이에도 불구하고 정방향의 추진력을 발생함을 보았다. 또 단일층인 경우에 비하여 이중층의 경우가 구조는 다소 복잡하지만 효율 및 전자력의 맥동 등 질적인 면에서 장점을 가지고 있어 계자코일로 초전도자석을 사용할 때 유리함을 알았다.

참 고 문 헌

- [1] 홍순홍, 네 개의 전기자전선을 가진 초전도자기부상열차 시스템, 서울대학교, 1994
- [2] 藤原, "浮上コイル側磁配電磁氣浮上方式の特性", 電學論 D- 10, 439, 1988
- [3] 正田英介 et al, 磁氣浮上鐵道の技術, オム社, 1992

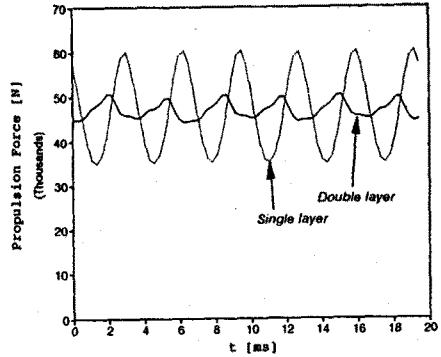


그림 6. 추진력의 비교

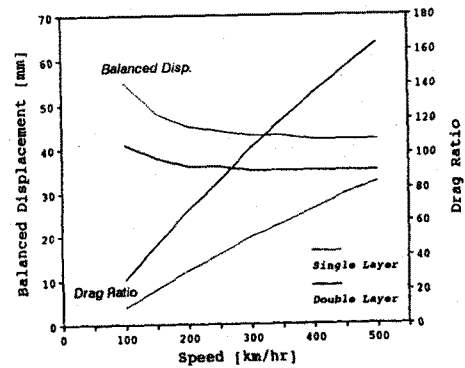


그림 7. 균형변위와 양항비의 비교