

반발식 자기부상열차의 동특성해석을 위한 전자력계산

홍순흠 · 한송엽

서울대학교 전기공학과

서울시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742

차귀수

순천향대학교 전기공학과

충남 아산군 신창면 읍내리 산 53-1, 337-880

(1993년 12월 16일 받음, 1994년 5월 9일 최종수정본 받음)

초전도 반발식 자기부상열차의 동특성을 해석하기 위하여 외력에 의하여 대차가 기울어진 경우에 차량에 가해지는 전자력을 계산하였다. 집중부하방식의 열차에 있어서 크게 나타나는 단부효과를 고려하기 위하여 공극자속의 형태에 대한 가정없이 자속분포를 계산하였으며, 대차의 옆질(roll), 뒷질(pitch) 및 편주(yaw)시의 전자력특성과 복원토크를 검토하였다. 6개의 초전도자석이 탑재된 대차가 차량의 양쪽에 설치된 열차에 대해서 계산한 결과, 토크의 방향은 차량을 안정하게 하는 방향으로 나타나서 본 자기부상시스템은 기본적으로 안정한 시스템임을 보여주고 있다.

I. 서 론

초전도식 반발형 자기부상시스템의 부상 및 안내 방식은 지금까지 여러 가지가 제안되었으나 현재는 일본의 새로운 자기부상열차 시험선로(야마나시 시험선)에 채택된 방식이 가장 우수한 성능을 갖는 것으로 알려져 있다. 이 방식은 가이드웨이의 양쪽 측벽에 8자형 코일을 설치하여 부상력과 안내력을 동시에 얻을 수 있는 측벽식 자기부상시스템으로 효율(부상력 대 항력비)이 가장 좋다[1].

측벽식 자기부상시스템은 차량의 계자로서 초전도자석을 사용하므로 가이드웨이에 설치되는 지상코일은 모두 공심코일로 이루어져 있다. 따라서 시스템의 특성해석은 등가회로법에 의하여 이루어지고 있다. 이 때 초전도자석에 의하여 지상코일에 유기되는 유기전압은 지상코일과 초전도자석의 모양 및 상대적인 위치의 함수로 표현된다. 일반적으로 부상시스템의 기초적인 설계자료와 기본특성을 얻기 위한 해석 연구에서는 가이드웨이에 설치된 지상코일과 나란한 평면에 주기적으로 무한히 배치된 많은 초전도자석이 만들어 내는 자장을 가정하고 이에 의하여 지상코일에 유기되는 전압을 푸리에 급수로 전개된 형태로 취급하였다. 따라서 열차가 외란에 의하여 기울어진 경우에는 초전도자석을 지상코일에 평행한 여러 개의 코일로 구성되었다고 가정하고 전자력을 해석하였다[2, 3, 4]. 또 최근의 차량형태는 승객에게 미치는 자장의 영향을 감소시키기 위하여 2-4쌍의 초전도자석을 차량의 양끝에 위치하는 대차(bogie)에 집중적으로 배치하는 경향을 보

이고 있다[5]. 이러한 집중배치형 차량의 경우 대차 사이의 거리가 멀어 어느 하나의 지상코일이 2개의 대차에 탑재된 초전도자석으로 부티의 영향을 동시에 받는 일이 없기 때문에 단부효과가 크게 나타나게 된다. 이러한 단부효과를 고려하기 위해서는 유한 개의 초전도자석에 의하여 발생하는 자장분포를 계산하기 위해서 수치해석법을 사용하고 있다[6].

자기부상열차가 외부의 힘에 의하여 위치이동 및 회전 되었을 때, 열차제어, 복원력해석, 승차감 향상 등을 위한 설계의 기본자료를 얻기 위해서는 자기부상열차의 동특성해석이 필수적이다. 본 논문에서는 측벽식 자기부상시스템에 외란이 가해졌을 때의 시스템 동특성을 해석하는데 필요한 전자력특성 해석을 위한 이론을 도출하고, 컴퓨터 프로그램을 이용한 사례연구를 통하여 이 방식의 장 단점을 검토한다.

II. 본 론

1. 측벽식 자기부상시스템

측벽식 자기부상시스템은 Fig. 1과 같이 가이드웨이에 선형동기전동기의 전기자권선과 부상 및 안내용 코일(이하 지상코일)이 가이드웨이 양쪽의 측벽에 설치되어 있다. 지상코일은 상하 2개의 코일이 8자형으로 연결되어 영자속(null-flux) 원리에 의하여 부상력을 발생시키고 있으며 또한 좌우측벽의 8자형 코일도 영자속선으로 서로 연결되어 안내력을 발생시키고 있다. 초전도자석(이하

차상코일)은 차량 끝에 위치한 대차의 양쪽에 3개씩 모두 6개가 탑재되어 있으며, 극성은 선형전동기의 제자코일로서의 역할을 위하여 N극, S극, N극의 순으로 탑재되어 있다.

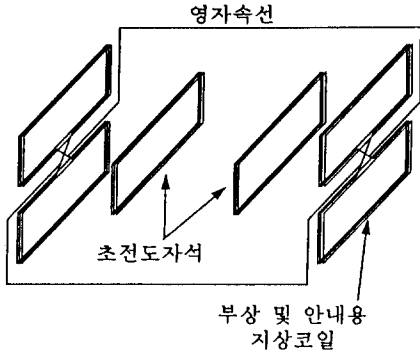


Fig. 1 Coil configuration of the combined EDS

2. 해석모델

2. 1 공간에서 자유체의 운동

공간에서 움직이는 자유체는 자유도가 6이다. 이 중에서 셋은 병진운동과 관계가 있고 나머지 셋은 회전운동에 관계된 것이다. 외부에서 자유체에 가해지는 모든 힘의 분포를 알면 선형 및 각운동량 (angular momentum)을 이용하여 차량의 운동방정식을 유도할 수 있다. 이 때 필요한 힘은 각 방향으로 작용하는 힘과 토크의 6가지로서 각 순간 열차속도와 위치에 있어서의 각 차상코일에 작용하는 전자력의 분포로부터 구할 수 있다.

2. 2 병진운동 및 회전운동 때의 차상코일의 위치

대차 사이의 거리는 서로의 영향을 무시할 수 있을 만큼 떨어져 있기 때문에 본 논문에서는 하나의 대차에 탑재된 6개의 차상코일에 대해서만 생각한다. 차상코일과 지상코일의 위치를 나타내기 위하여 Fig. 2와 같이 좌표계를 설정한다. 그림에서 대차 중심이 가이드웨이의 yz 평면 원점으로부터 y, z 방향으로 벗어난 거리를 각각 ΔY , ΔZ 라 한다. 대차의 위치가 가이드웨이와 나란하고 대차 중심과 yz 평면의 원점과 일치할 때의 차상코일 위치를 (x_0, y_0, z_0) 라 하고, x, y, z 축 중 어느 한 축을 회전축으로 하여 회전각도 각각 α , β , γ 만큼 대차가 기울어진 경우의 차상코일의 위치 (x, y, z) 는 다음과 같이 표시할 수 있다. 즉, 대차의 롤링각 (α), 피칭각 (β) 및 요잉각 (γ)은 Fig. 3과 같고 각 경우의 좌표는 아래와 같이 α , β , γ 를 이용하여 표시할 수 있다.

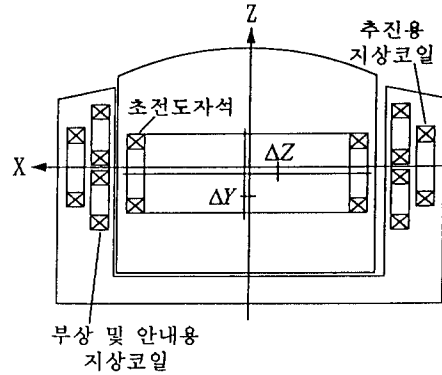


Fig. 2 Coordinate system for the coil configuration

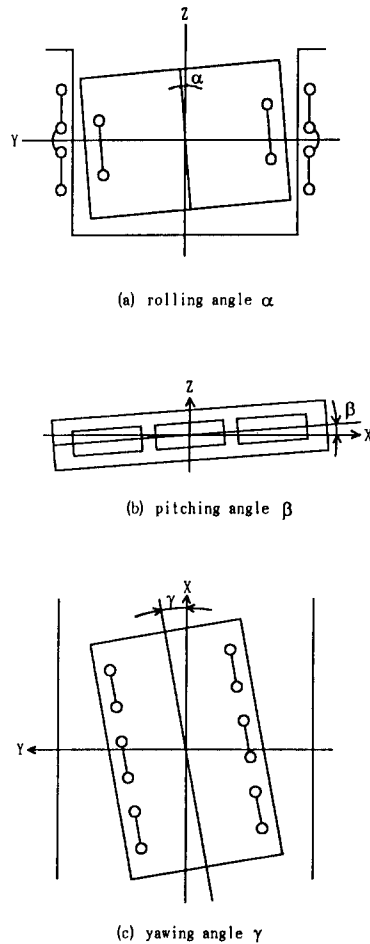


Fig. 3 The definitions of rolling angle (α), pitching angle (β), yawing angle (γ)

가. 롤링(rolling)의 경우

$$\begin{aligned} x &= x_0 \\ y &= y_0 \cos(-\alpha) - z_0 \sin(-\alpha) \\ &= y_0 \cos \alpha + z_0 \sin \alpha \\ z &= y_0 \sin(-\alpha) - z_0 \cos(-\alpha) \\ &= -y_0 \sin \alpha + z_0 \cos \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

나. 피칭(pitching)의 경우

$$\begin{aligned} x &= z_0 \sin(-\beta) + x_0 \cos(-\beta) \\ &= -z_0 \sin \beta + x_0 \cos \beta \\ y &= y_0 \\ z &= z_0 \cos(-\beta) - x_0 \sin(-\beta) \\ &= z_0 \cos \beta + x_0 \sin \beta \end{aligned} \quad (2)$$

다. 요잉(yawing)의 경우

$$\begin{aligned} x &= x_0 \cos \gamma - y_0 \sin \gamma \\ y &= x_0 \sin \gamma + y_0 \cos \gamma \\ z &= z_0 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 등가회로

Fig. 4는 지상코일 한 쌍에 대한 등가회로이다. 그림에서 E₁, E₂, E₃, E₄는 각 3개씩의 차상코일에 의해 좌측 상하단 및 우측 상하단 지상코일에 유기되는 유기기전력이며 R, L, M₁, M₂는 각각 지상코일의 저항, 자기인덕턴스, 상하단 코일간의 상호인덕턴스, 인접 코일간의 상호인덕턴스이다.

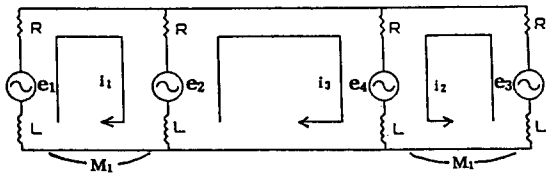


Fig. 4 Equivalent circuit of a single ground connection

4. 유기기전력

초전도자석에 의하여 발생하는 지상코일 부근의 자장 분포를 계산하기 위하여 초전도자석을 유한 직선 도선들의 집합으로 간주한다. 전류 I_s가 흐르는 유한 직선 도선에 의한 공간 위의 점(x, y, z)의 자속밀도는 Biot-Savart 법칙에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B}(x, y, z) = \frac{\mu_0 I_s}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \hat{R}}{R^3} \quad (4)$$

지상코일은 xz 평면과 나란하게 설치되어 있으므로 지상코일을 쇠교하는 자속 Φ는 식 (5)와 같이 자속밀도의 y 방향 성분을 지상코일의 면적에 대하여 적분을 하여 구한다.

$$\Phi = \int_s B_y(x, y, z, x', y', z') dS \quad (5)$$

여기서 (x', y', z')는 차상코일의 좌표이다.

하나의 차상코일에 의하여 유기되는 지상코일의 유기기전력 e_s는 열차의 속도를 V_s라 하면 다음과 같이 지상코일의 쇠교자속을 x'에 대하여 미분함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_s &= -\frac{d\Phi}{dt} = -V_s \frac{\partial \Phi}{\partial x'} \\ &= -V_s \frac{\partial}{\partial x'} \int_s B_y(x, y, z, x', y', z') dS \\ &= -V_s \int_s \frac{\partial B_y(x, y, z, x', y', z')}{\partial x'} dS \end{aligned} \quad (6)$$

하나의 차상코일에 의한 유기기전력은 차상코일을 이루는 각각의 직선 도체에 의한 쇠교자속을 모두 합하여 구한다. 하나의 대차에는 양쪽으로 3쌍의 차상코일이 탑재되어 있으며, 코일의 극성은 선형동기전동기의 계자로서의 역할을 위하여 N극, S극, N극의 순으로 되어 있다. 따라서 하나의 대차에 탑재된 차상코일에 의한 유기기전력은 각각의 차상코일에 의한 유기기전력의 합으로 구할 수 있다.

$$e_s(t) = \sum_{i=1}^N e_{si} \quad (7)$$

여기서 e_{si}는 i번째 차상코일에 의하여 유기되는 기전력이고, N은 대차의 한 편에 탑재된 초전도자석의 갯수이다.

5. 지상코일의 전류

가이드웨이에는 열차의 진행방향으로 같은 모양의 지상코일이 무한히 나열되어 있으므로 각 지상코일의 전류는 시간 축에 대하여 동일한 패턴을 가진다. 따라서 어느 한 지상코일의 전류를 구한 후 시간적으로 이동시켜서 다른 모든 지상코일의 전류를 구할 수 있다. 인접한 코일간의 상호인덕턴스의 영향을 최대한 고려하기 위하여 인접한 5쌍의 지상코일을 택하여 각 코일에 흐르는 전류를 구하고, 한가운데 코일에 흐르는 전류를 지상코일의 피치만큼 이동시켜 모든 지상코일의 전류를 구한다. 5쌍의 지상

코일에 대한 등가회로는 그림 5와 같으며 전압방정식은 다음의 식 (8)과 (9)와 같이 행렬식으로 표현할 수 있다 [6].

$$[E] = [L][i] + [R][i] \quad (8)$$

$$[i] = -[L]^{-1}[R][i] + [L]^{-1}[E] \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 풀어 전류를 구하기 위하여 Runge-Kutta 법을 사용한다.

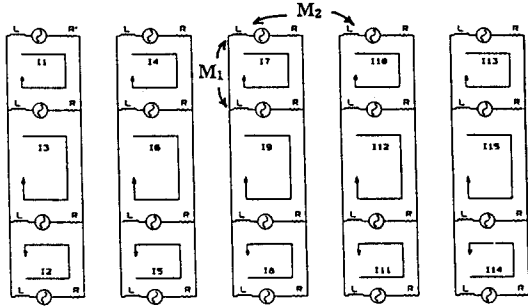


Fig. 5 Equivalent circuit of five ground connections

6. 전자력 계산

차상코일에 의하여 지상코일에 유도전류가 흐르면 차상코일과 지상코일 사이에는 전자력이 발생하게 되는데 이 전자력은 성분의 방향에 따라 부상력 (levitation force), 안내력 (guidance force), 그리고 저항력 (drag force)으로 나누어진다.

계자전류 I_s 가 흐르는 차상코일과 유도전류 I_g 가 흐르는 지상코일 사이에 축적된 에너지는 다음과 같다.

$$W = \frac{1}{2} L_s I_s^2 + \frac{1}{2} L_g I_g^2 + M_{sg} I_s I_g \quad (10)$$

여기서 L_s, L_g, I_g, M_{sg} 는 각각 차상코일 및 지상코일의 자기인덕턴스, 전류, 그리고 두 코일간의 상호인덕턴스이다. F_x, F_y, F_z 를 각각 저항력, 안내력, 그리고 부상력이라 하면 이동하는 차상코일과 지상코일 사이에 작용하는 각 방향의 전자력은 식 (11) - (13)과 같이 축적에너지의 각 방향으로의 미분으로 표시된다.

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial x} = -I_g I_s \frac{\partial M_{sg}}{\partial x} = I_g \frac{\partial (I_s M_{sg})}{\partial x} = -I_g \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (11)$$

같은 방법으로

$$F_y = \frac{\partial W}{\partial y} = -I_g \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (12)$$

$$F_z = \frac{\partial W}{\partial z} = -I_g \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (13)$$

가이드웨이의 중심으로부터의 대차 중심변위가 $\Delta Y, \Delta Z$ 이고, 롤링, 피칭, 또는 요잉각이 θ 일 때, 각 차상코일의 무게중심이 받는 전자력은 그 차상코일 주변의 유기전류가 흐르고 있는 모든 지상코일로부터 받는 전자력의 합으로 표시되며 식 (14) - (16)과 같다.

$$F_{iz}(\Delta Y, \Delta Z, \theta) = -\sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^2 I_{gjk} \frac{\partial \Phi_{ijk}(\Delta Y, \Delta Z, \theta)}{\partial z} \quad (14)$$

$$F_{iy}(\Delta Y, \Delta Z, \theta) = -\sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^2 I_{gjk} \frac{\partial \Phi_{ijk}(\Delta Y, \Delta Z, \theta)}{\partial y} \quad (15)$$

$$F_{ix}(\Delta Y, \Delta Z, \theta) = -\sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^2 I_{gjk} \frac{\partial \Phi_{ijk}(\Delta Y, \Delta Z, \theta)}{\partial x} \quad (16)$$

여기서 i, j, k 는 각각 차상코일, 열차진행방향의 지상코일, 상하의 지상코일을 나타낸다. 또 I_{gjk} 는 모든 차상코일에 의한 jk 번째의 지상코일의 전류이다.

반발식 자기부상 시스템의 지상코일은 일정한 간격으로 떨어져 가이드웨이에 설치되어 있다. 따라서 식 (14) - (16)으로 표시된 각 전자력은 지상코일과 차상코일의 상대적인 위치에 따라 지상코일의 피치와 같은 주기로 반복적으로 변하게 된다. 대차 하나가 받는 전자력은 다음식과 같이 각 위치에서의 전자력의 평균값인 F_{avg} 를 사용하였다.

$$F_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} F_i}{N_g} \quad (17)$$

여기서 N_g 는 지상코일사이의 전자력을 계산한 횟수이다.

III. 사례 연구

해석방법의 유용성을 검토하기 위하여 축벽식 자기부상시스템의 전자력, 복원토크, 그리고 단부효과 등의 해석 문제에 적용시켜 보았다. 반발식 자기부상열차는 일

반적으로 2-4쌍의 초전도자석이 탑재되어 있는 대차가 차량 양쪽에 설치되어 있지만, 대차 사이의 거리가 초전도자석의 크기에 비하여 매우 크므로 대차사이의 영향은 무시할 수 있다. 따라서 대차의 양쪽에 3개씩 모두 6개의 초전도자석이 탑재되어 있는 하나의 대차에 대하여 적용하였으며, 지상코일과 차상코일의 치수는 표 1과 같다.

Table 1. Specification of system

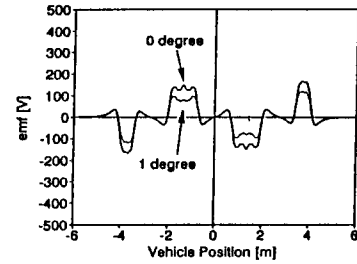
Super-conducting coil	Number	6 / bogie
	Pitch [mm]	2,700
	Length [mm]	2,200
	Width [mm]	500
	M. M. F. [kAT]	700
	Turn	1,024
	Distance between left and right magnet [mm]	3,000
Ground coil	Pitch [mm]	900
	Length [mm]	800
	Width [mm]	340
	Turn	49
	Distance between left and right coil [mm]	3,360
	Gap between upper and lower coil side [mm]	80

1. 유기기전력 및 지상코일전류 파형

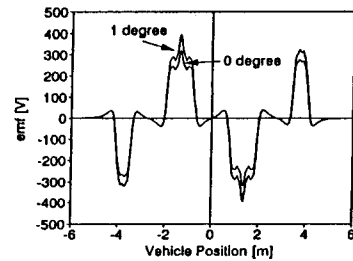
달리는 차량좌우에 탑재된 초전도자석에 의해 상하 좌우로 연결된 지상코일에 유기되는 유기기전력과 전류는 열차의 부상높이, 좌우치우침, 롤링, 피칭, 요잉등의 기울어짐 그리고 열차의 속도에 따라 달라진다.

Fig. 6은 속력이 100 km/hr 이고, 열차의 중심이 아래로 4cm (즉, $\Delta Z=4\text{cm}$) 내려와 있으며 1도의 롤링이 있을 때 (진행방향으로 보아 왼쪽으로 1도 기울어진 경우) 서로 연결된 상하 좌우의 4개 지상코일에 유기된 기전력을 비교한 유기기전력에 미치는 롤링의 영향이다. 그림 6의 (a)와 (c)에서 롤링에 의하여 차상코일이 왼쪽 위와 오른쪽 아래 지상코일에서 멀어져 원래의 유기기전력보다 적어지고, 반대로 (b), (d)에서와 같이 왼쪽 아래와 오른쪽 위 지상코일은 차상코일과 가까와져서 유기기전력이 커지게 된다. 곧, 열차가 기울어진 쪽의 상하 지상코

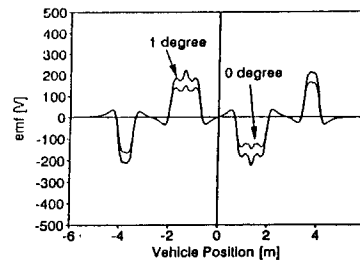
일에 유기된 기전력의 차이는 커지고, 반대쪽의 경우는 차이가 적어져 열차를 바로 세우려는 복원토크를 일으키게 된다.



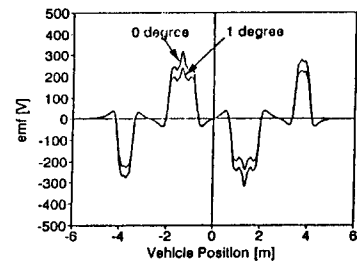
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Induced emf of the ground coil with rolling angle α ($V_s=100\text{ km/hr}$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=4\text{ cm}$, $\alpha=1^\circ$)

지상코일에 흐르는 유기전류는 각각의 코일에 유기된 기전력과 저항, 인덕턴스 등의 전기적 파라미터에 따라 달라진다. 측벽식 자기부상시스템은 4개의 지상코일에 유기되는 기전력의 방향이 서로 반대가 되도록 연결되어 있어서 열차가 좌우 지상코일의 중앙에 위치하고 기울어지지 않았을 때는 부상 높이에 관계없이 좌우 코일사이를 연결한 영자속선에는 전류가 흐르지 않고 상하 코일 사이에만 전류가 흘러 부상력을 발생시킨다. Fig. 7은 좌우 지상코일에 흐르는 전류의 크기를 보여준다. Fig. 6에서 보듯이 기울어진 쪽의 상하 지상코일의 유기기전력 차이가 크므로 좌우 지상코일에 흐르는 전류차가 심한 것을

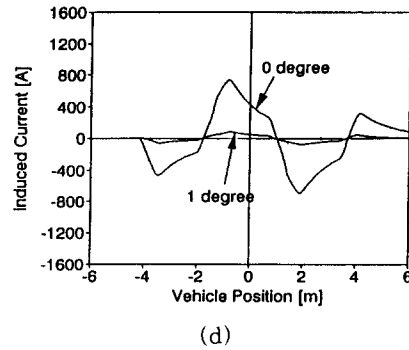


Fig. 7 Induced current of the ground coil with rolling angle α ($V_s=100\text{ km/hr}$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=4\text{ cm}$, $\alpha=1^\circ$)

알 수 있다. 상하 지상코일의 전류도 미소한 차이를 보이고 있는데, 이것은 롤링의 영향에 의한 것으로 상하 지상코일 전류의 차이만큼 영자속선으로 흘러 작은 안내력을 발생시키고 있다.

2. 롤링(rolling) 토크 특성

Fig. 8은 수직방향변위(ΔZ)가 각각 0, 2, 4 cm인 경우에 대하여 롤링이 없을 경우와 있을 경우 ($\alpha=1^\circ$) 좌우에 탑재된 모두 6개의 차상코일에 미치는 수직방향의 전자력(부상력)이다. 롤링이 없는 경우 ΔZ 가 증가함에 따라 부상력이 증가하지만 좌우의 부상력의 크기는 같다.

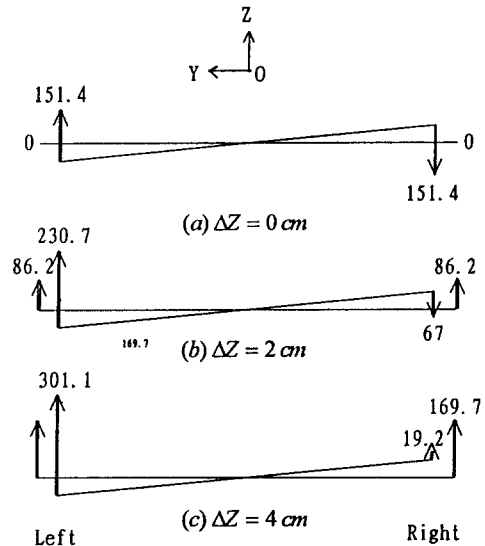
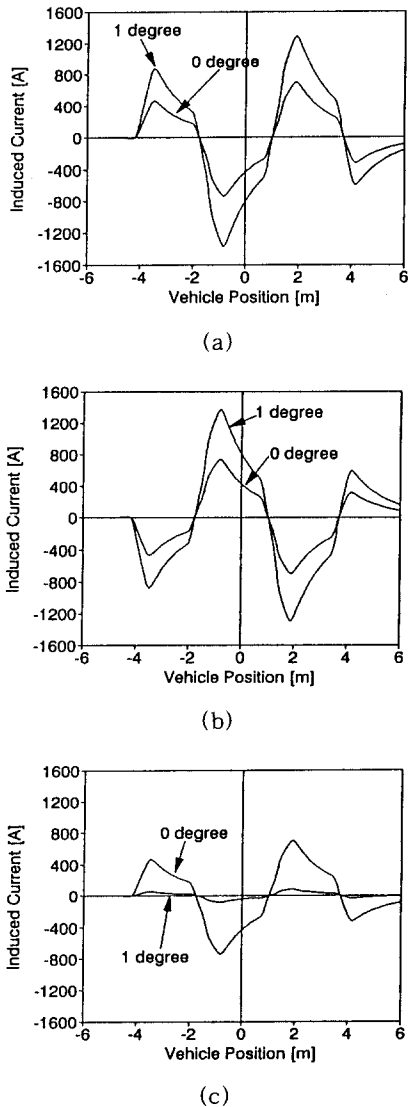


Fig. 8 The characteristics of the rolling torques ($V_s=100\text{ km/hr}$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=0, 2, 4\text{ cm}$, $\alpha=1^\circ$)

따라서 회전토크가 없기 때문에 열차는 안정상태를 그대로 유지하게 된다. 열차의 앞쪽이 진행방향으로 보아 왼쪽으로 1도 기울어진 경우 좌우 차상코일이 받는 부상력의 크기에 차이가 생김을 알 수 있다. 특히 수직방향변위가 적을 때에는 오른쪽 차상코일의 부상력이 음의 값을 가져 정상상태로 돌아오려는 큰 복원토크가 생긴다. 따라서 수직방향변위가 커짐에 따라 부상력은 증가하고 복원토크는 조금씩 감소한다.

3. 피칭(pitching)토크 특성

Fig. 9는 수직방향변위가 각각 0, 2, 4cm인 경우에 대하여 피칭이 없는 경우와 있는 경우($\beta=1^\circ$) 좌우에 탑재된 모두 6개의 차상코일에 미치는 수직방향의 전자력(부상력)을 보여준다. 수직방향의 변위가 커지면 좌우의 차상코일이 받는 부상력의 차이가 커져 복원토크가 커지는 것을 볼 수 있다.

롤링의 경우와 달리 피칭이 전혀 없는 경우에도 대차 앞쪽의 차상코일에 작용하는 전자력은 뒤쪽의 그것보다 작은 것을 볼 수 있는데 이는 지상코일 인덕턴스의 영향으로 전류가 지연되어 마지막 차상코일에 영향을 주기 때문이다. 각 차상코일의 수직방향변위가 같을 때 부상력을 살펴보면 제일 앞쪽의 차상코일이 받는 부상력이 가장 적고 두번째 코일이 가장 큰 부상력을 받으며, 뒤쪽에 위치한 차상코일일수록 단부효과의 영향을 적게 받는다. 따라서 차량의 앞뒤에 2-4쌍의 차상코일이 집중적으로 배치되어 있는 집중배치형 차량의 경우에는 단부효과의 영향으로 차상코일은 각각 서로 다른 부상력을 받게 된다. 이때

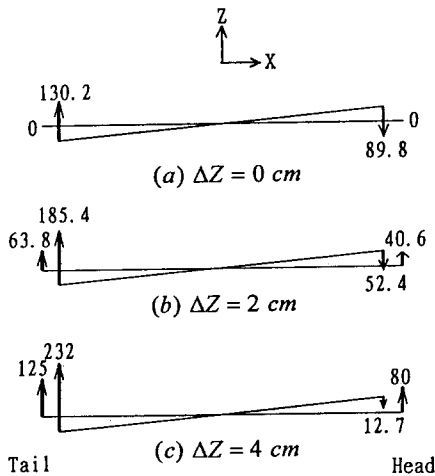


Fig. 9 The characteristics of the pitching torques ($V_s=100\text{ km/hr}$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=0, 2, 4\text{ cm}$, $\beta=1^\circ$)

대차는 앞으로 기울어지는 토크를 받게 되어 대차의 뒤쪽이 앞쪽보다 높은 상태에서 안정을 이루게 된다.

4. 요잉(yawing) 토크 특성

Fig. 10은 수직방향변위가 각각 0, 2, 4cm인 경우에 대하여 요잉이 없는 경우와 있는 경우($\gamma=1^\circ$) 좌우에 탑재된 모두 6개의 차상코일에 미치는 횡방향의 전자력(안내력)을 차상코일의 중심위치와 함께 표시한 것이다. 차량이 안정한 위치에 있을 때 앞뒤의 차상코일 중심에 미치는 횡방향 전자력은 균형을 이루고 있다. 열차의 앞부분이 왼쪽으로 1도 기울어졌을 때의 횡방향 전자력을 그림에서 살펴보면 수직방향변위가 없을 때는 모든 횡방향 전자력에 의한 복원토크의 방향은 같다. 수직방향변위

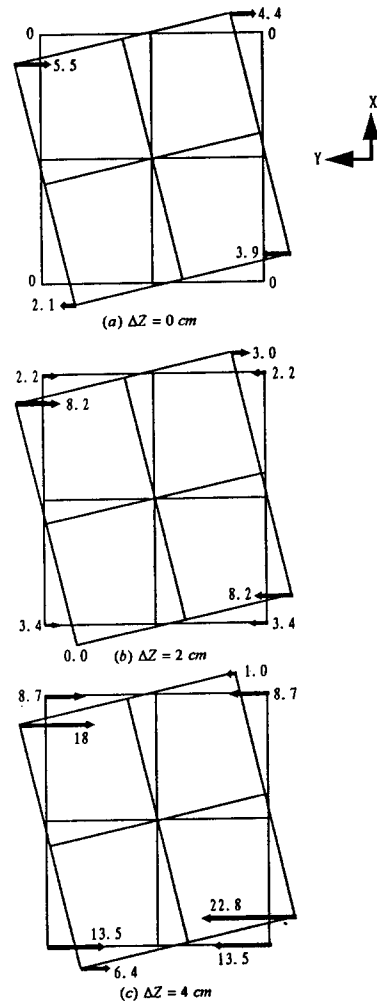


Fig. 10 The characteristics of the yawing torques ($V_s=100\text{ km/hr}$, $\Delta Y=0$, $\Delta Z=0, 2, 4\text{ cm}$, $\gamma=1^\circ$)

가 증가함에 따라 좌우지상코일의 횡방향 전자력은 반대 방향으로 작용하지만 그 차이는 증가하여 복원토크는 증가함을 알 수 있다.

IV. 결 론

영자속(null flux)형 초전도 자기부상시스템의 기계적 과도특성을 해석하기 위한 전자력을 해석하였다. 차량에 초전도자석을 탑재하고 지상에 축벽식 8자 코일을 설치한 시스템을 고려하였으며, 차량에 작용하는 롤링, 피칭, 및 요잉토크를 해석하였다. 해석방법으로는 차량이 정상 위치에서 임의의 방향으로 기울어졌을 때 지상코일에 유기되는 전압과 전류를 구하고 이것에 의하여 초전도자석에 작용하는 횡방향, 종방향 및 수직방향의 힘을 구하였으며, 이로부터 롤링, 피칭, 및 요잉토크를 계산하였다.

6개의 초전도자석이 대차의 양쪽으로 각 3개씩 탑재된 대차에 대해서 롤링, 피칭 및 요잉각이 각각 1°인 경우의 복원토크를 보면 모든 경우에 토크의 방향은 차량을 안정하게 하는 방향으로 나타나서 본 자기부상시스템은 기본적으로 안정한 시스템임을 보여주고 있다.

본 해석방법은 자기부상열차의 위치와 속도가 주어지면 운동방정식의 계산에 필요한 파라미터(전자력)를 제공함으로써 축벽식 자기부상열차의 동특성해석에 많은

도움이 될 것이라 생각되며, 가이드웨이 코일의 방식이 달라져도 등가회로 부분만 변경하면 적용 가능하므로 새로운 부상시스템의 특성해석에도 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Fujiwara, Trans. of JIEE, **108-D**, No. 5, pp. 439-446, 1988
- [2] J. H. He, D. M. Rote, H. T. Coffey, International Symposium on Magnetic Suspension Technology, August 19-23, 1991
- [3] E. Ohno, M. Iwamoto, T. Yamada, Proceedings of IEEE, **61**, No. 5, 1973
- [4] F. Albicini, M. Andriollo, G. Martinelli, A. Morini, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, **3**, No. 1, pp. 425-429, 1993
- [5] S. Matsuda, K. Ito, H. Nakao, Toshiba Review, **46**, No. 11, pp. 869-872, 1991
- [6] S. H. Hong, Y. S. Lee, S. Y. Hahn, G. S. Cha, H. J. Cho, I. K. Kim, Proceedings of The Int'l Conference on Speedup Technology for Railway and Maglev Vehicles, **1**, pp. 70-74, 1993

Analysis of magnetic forces for dynamic characteristics of electrodynamic Maglev System

S. H. Hong, S. Y. Hahn

Dept. of Electrical Eng., Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

G. S. Cha

Dept. of Electrical Eng., Soonchunhyang University, Choongnam, Korea

(Received 16 December 1993, in final form 9 May 1994)

This paper deals with the magnetic forces of the combined levitation and guidance EDS(Electrodynamic Suspension) maglev system when the car bogie is tilted by the roll, pitch and yaw. The end effect on the magnetic forces are considered by calculating the air-gap flux without the assumptions for its pattern. Induced voltages and currents of the ground coils are given as results. The restoring torque due to roll, pitch and yaw of the bogie body are also examined. It has been shown that the end effect of the concentrically loaded vehicle are not negligible and the combined EDS is stable maglev system against disturbing forces.