

## Static Characteristics of Electrodynamic Maglev System

洪 舜 欽\*·李 良 洙\*·車 貴 守\*\*·韓 松 曄\*\*\*

(Soon-Heum Hong·Yang-Soo Lee·Guee-Soo Cha·Song-Yop Hahn)

**Abstract**—This paper deals with the combined levitation and guidance EDS(Electrodynamic Suspension) Maglev system. Levitation and guidance forces generated in figured—of—eight coil are examined. End effect of Superconducting magnets is considered in that the air gap flux has been calculated using the finite number of magnets. Induced emfs and currents of ground coils are given as results. Electromagnetic forces vary according to the built—in position of magnets. Levitation forces of the first magnet pair are the smallest and those of the second one are the largest. This result shows that the end effect of SCMs should be considered in a concentrated magnet system.

**Key Words** : EDS, Superconducting Maglev, End Effect, Levitation

## 1. 서 론

초전도자석을 이용한 자기부상시스템은 강한 자력의 잇점을 충분히 활용할 수 있는 반발식 자기부상시스템으로 발전하여 왔다. 반발식 자기부상시스템은 부상효율을 높이고 안내력을 효과적으로 얻기 위하여 주로 가이드웨이 도체의 구조에 대한 연구가 주안점이 되어 왔다. 최근에는 8자형의 지상코일을 가이드웨이의 측벽에 배치함으로써 부상력과 안내력을 하나의 지상코일로 동시에 얻을 수 있는 측벽식 자기부상시스템이 높은 부상효율을 가지는 것으로 제안되었다[1][2][3].

측벽식 자기부상 시스템은 8자형의 지상코일을 상하 지상코일에 유기되는 기전력이 서로 반대방향이 되도록 연결했고, 좌우 지상코일도 같은 방법으로 연결해서 중력과 외력에 의하여 상하방향의 변위가 존재하면 부상력이 중력과 같

아질 때까지, 또 좌우방향의 변위가 발생하면 그 변위가 없어질 때까지 횡방향으로 안내력이 발생한다. 이러한 장점때문에 이 시스템을 향후의 자기부상시스템으로 채용하고자 하는 연구가 여러 나라에서 현재 활발히 진행중이다.

열차에 탑재된 초전도자석과 지상코일 사이에 작용하는 전자력을 계산하기 위해서는 열차와 측벽사이의 공극에서의 자속분포를 정확히 구할 필요가 있다. 지금까지의 연구에서는 초전도자석이 열차의 진행방향과 상하방향으로 주기적으로 무한히 존재한다는 가정을 하고 공극자속을 푸리에 급수로 전개된 형태로 구한다[4]. 그러나 일반적인 초전도자석의 형태는 레이스트랙(race track)형으로 공극자속을 수식으로 표현하기가 어렵고, 객실의 자속을 줄이기 위하여 초전도자석이 탑재된 대차를 열차의 앞과 뒤에만 집중적으로 배치한 열차의 경우 대차간의 간격이 크고, 대차 앞뒤의 단부효과를 무시할수 없어 공극자속의 분포를 주기적이라고 가정하기가 어렵다. 본 연구에서는 단부효과를 고려하기 위하여 유한 개의 레이스트랙형 초전도자석에 의한 공극의 자장분포를 수치해석법으로 구하여 지상코일에 유기된 기전력과 전류 및 전자력에 나타난 측벽식 자기부상시스템의 특성을 검토한다.

\*正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程

\*\*正 會 員 : 順天鄉大 工大 電氣工學科 副教授·工博

\*\*\*正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授·工博

接受日字 : 1993年 11月 10日

1 次修正 : 1994年 5月 2日

2 次修正 : 1994年 6月 9日

## 2. 시스템의 구조 및 동작원리

축벽식 자기부상시스템의 코일배치를 차량에 탑재된 초전도자석과 가이드웨이에 설치된 지상코일 각 한 쌍에 대하여 나타내면 그림 1과 같다. 열차에는 초전도자석이 좌우에 3개씩 N, S극이 교대로 해서 탑재되어 있다. 여기에서는 초전도자석을 '차상코일'로 가이드웨이에 설치된 부상 및 안내결용코일을 '지상코일'로 부른다. 열차를 추진시키는 선형동기전동기(Linear Synchronous Motor)의 전기자코일은 해석대상에서 제외하여 그림에는 나타내지 않았다. 그림에서 좌측의 8자형 지상코일과 우측의 8자형 지상코일은 영자속선(Null-Flux Line)에 의해 서로 연결되어 있다. 열차의 중심이 가이드웨이 중심에서 좌우방향으로 벗어난 정도를 좌우변위( $\Delta Y$ )라 하고, 상하지상코일의 중심을 기준으로 아래쪽으로 벗어난 정도를 상하변위( $\Delta Z$ )라 한다. 열차가 좌우변위와 상하변위가 없는( $\Delta y=0, \Delta z=0$ ) 상태에서 주행하고 있는 경우에는 좌우측 지상코일의 상단코일과 하단코일에는 각각 동일한 크기의 기전력이 유기되고, 지상코일이 8자형으로 꼬여있기 때문에 상하단코일의 두 기전력이 서로 상쇄되어 코일에는 전류가 흐르지 않는다. 상하변위가 존재하는 경우( $\Delta z \neq 0$ )에는 상단코일과 하단코일 크기와 방향이 서로 다른 기전력이 유기되고, 이 기전력의 차이에 의해서 상하단 코일에는 유도전류가 흐르게 되고 이 전류와 차상코일의 전류의 작용으로 부상력이 발생한다. 같은 방법으로 좌우변위가 존재하는 경우( $\Delta z \neq 0$ )에는 좌우측의 지상코일에 유도되는 기전력의 크기가 서로 달라져 영자속선으로 전류가 흘러 열차는 가이드웨이 중앙으로 복원되는 안내력을 받게 된다[1].

## 3. 특성계산

### 3.1 전기파라미터 계산

반발식 부상시스템에서는 충분한 기자력을 얻기 위하여 차상코일로 초전도자석을 사용하므로 지상코일은 모두 공심코일로 이루어져 있어 지상코일의 전기적 파라미터는 모두 선형적인 성질을 가진다. 지상코일의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스 그리고 차상코일과 지상코일 사이의 상호인덕턴스 등의 등가회로 구성에 필요한 전기

적 파라미터는 다음과 같이 수치 해석법으로 구한다.

자기부상용 초전도자석은 대개 레이스트랙형으로 제작되며 따라서 곡선부분이 많이 존재한다. 특히 외란을 받는 경우 초전도자석과 지상코일은 평행하지 않게 된다. 이러한 경우 유한 개의 초전도자석에 의한 단부효과를 무시하더라도 초전도자석에 의한 공극자속을 각 코일의 치수로 표현된 수식으로 전개하기는 쉽지 않다. 또한 초전도자석의 폭과 길이는 초전도자석과 지상코일 사이의 공극에 비하여 훨씬 크다. 따라서 곡선부분에 대한 계산을 간략히 하고, 초전도자석이 지상코일에 대하여 어떤 위치에 있더라도 공극자속을 정확하게 계산하며, 각 코일 필라멘트의 위치에 따른 효과를 고려하기 위하여 초전도자석을 많은 유한직선도체로 구성되었다고 가정하고, 각 직선도체에 흐르는 전류에 의한 공극자속을 합하여 전체 초전도자석에 의한 공극자속을 구한다.

하나의 유한 직선도체에 의한 공간 위의 임의의 점(x, y, z)의 자석밀도는 Biot-Savart 법칙에 의하여 다음과 같다.

$$\vec{B}(x,y,z) = \frac{\mu_0 I_s}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} \quad (1)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 공기중의 투자율,  $I_s$ 는 유한직선도체의 전류,  $d\vec{l}$ 는 미소전류 도선벡터,  $\vec{R}$ 은 미소전류도선에서 공간의 점(x,y,z)까지의 거리벡터이다. 식(1)의 자속밀도에서 y방향 성분을 구하면

$$B_y = \frac{\mu_0 I_s}{4\pi} \frac{2\{(x-x_1')(z_2'-z_1') - (z-z_1')(x_2'-x_1')\}}{4AC - B^2}$$

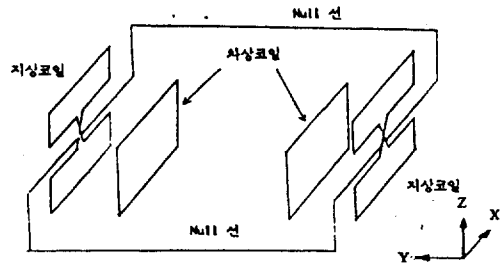


그림 1 권선 연결도

Fig. 1 Configuration of coils

$$\times \left( \frac{2C+B}{\sqrt{A+B+C}} - \frac{B}{\sqrt{A}} \right) \quad (2)$$

이다. 여기서  $(x', y', z')$ 는 차상코일의 좌표이고,

$$A = (x'_1 - x')^2 + (y'_1 - y')^2 + (z'_1 - z')^2 \quad (3)$$

$$B = 2\{(x'_2 - x'_1)(x'_1 - x) + (y'_2 - y'_1)(y'_1 - y) + (z'_2 - z'_1)(z'_1 - z)\} \quad (4)$$

$$C = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2 \quad (5)$$

이다. 지상코일을 쇄교하는 자속은 지상코일을 이루는 각 루프의 면적에 대하여 식 (2)의  $Bv$ 를 수치적분하여 구한다.

$$\Phi = \int_S Bv(x, y, z, x', y', z') dS \quad (6)$$

### 3.2 지상코일 전류 계산

그림 2는 지상코일 배열 한 쌍에 대한 등가 회로이다. 그림에서  $e_1, e_2, e_3, e_4$ 는 모든 차상코일에 의한 좌측 상하단 및 우측 상하단 지상코일의 유기기전력이다.  $R, L$ 은 각각 지상코일의 저항 및 자기 인덕턴스이고,  $M_1$ 은 상하단 지상코일간의 상호 인덕턴스이다. 모든 지상코일은 동일한 전기적 파라미터를 가지고 있고, 이러한 지상코일 구조가 열차의 진행방향으로 무한히 배열되어 있으므로 모든 지상코일에 흐르는 전류는 시간축 위에서 동일한 패턴을 가진다. 따라서 지상코일 한 쌍에 대해 전류를 구하면 모든 지상코일의 전류를 구할 수 있다. 따라서 인접한 코일 사이에 존재하는 상호 인덕턴스( $M_2$ )를 고려하여 인접한 5쌍의 지상코일의 등가회로를 해석하여

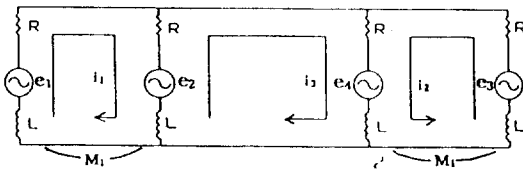


그림 2 지상코일 한쌍에 대한 등가 회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of one-pair ground coil

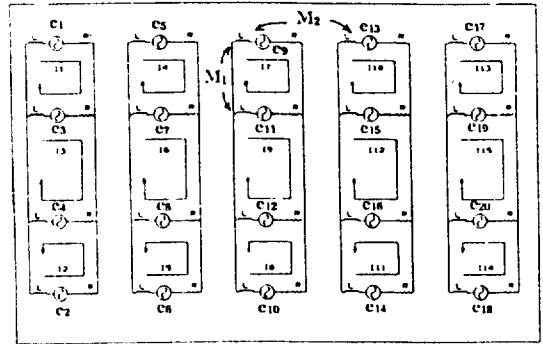


그림 3 지상코일 5쌍에 대한 등가 회로  
Fig. 3 Equivalent circuit of five-pair ground coils

전류를 구한 후, 한가운데의 지상코일에 흐르는 전류( $i_7, i_8, i_9$ )를 지상코일의 전류로 삼아, 그것을 지상코일의 피치만큼 이동시켜 다른 지상코일의 전류를 구한다. 인접한 5쌍에 대한 등가회로는 그림 3과 같다.

하나의 지상코일에 유기되는 기전력은 열차의 한 대에 탑재된 모든 차상코일쌍에 의한 유기기전력의 합으로 구할 수 있다. 따라서 차량이 선형동기전동기에 의하여 일정한 속도  $v$ 로 추진되고 있을 때 지상코일의 유기기전력은 식 (7)과 같이 차상코일과 지상코일과의 상대적인 위치함수로 표현할 수 있다.

$$e_i(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -v \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Phi_{ij}(x)}{\partial x'} \quad (7)$$

여기서,  $e_i, N, \Phi_{ij}(x)$ 는 각각  $i$ 번째 지상코일의 유기기전력, 열차의 한 대에 탑재된 차상 코일쌍의 수, 그리고  $j$ 번째 차상 코일에 의하여  $i$ 번째 지상코일을 통과하는 쇄교자속수이다. 그림 3의 등가회로에 대한 전압방정식은 다음과 같다.

$$e_1 - e_3 = vLi_1 + R(i_1 - i_3) + v(L + M_1)(i_1 - i_3) - vM_2i_4 + vMi_1 - vM_2(i_4 - i_6)$$

$$e_2 - e_4 = vLi_2 + Ri_2 + R(i_2 + i_3) + v(L + M_1)(i_2 + i_3) - vM_2i_5 + vMi_2 - vM_2(i_5 + i_6)$$

$$e_3 - e_4 = vL(i_3 - i_1)R(i_3 - i_1) + R(i_2 + i_3) + vL(i_2 + i_3) - vM_2(i_6 - i_4)$$

$$\begin{aligned}
 & -vM_{1i1} + vM_{1i2} - vM_2(i_5 + i_6) \\
 & \dots \\
 e_{19} - e_{20} = & vL(i_{15} - i_{13}) + R(i_{15} - i_{13}) + R(i_{14} + i_{15}) \\
 & + vL(i_{14} + i_{15}) - vM_2(i_{12} - i_{10}) - vM_{1i13} \\
 & + vM_{1i14} - vM_2(i_{11} + i_{12}) \quad (8)
 \end{aligned}$$

식 (8)을 행렬식으로 표현하면 식 (9)와 같고, 전류에 대하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 [E] &= [L][\dot{I}] + [R][I] \quad (9) \\
 [\dot{I}] &= -[L]^{-1}[R][I] + [L]^{-1}[E] \quad (10)
 \end{aligned}$$

여기서,  $[E]$ ,  $[I]$ ,  $[L]$  및  $[R]$ 는 각각 회로의 유기전력, 페로전류, 인덕턴스 및 저항 행렬로 식(11)~식(13)와 같다.

$$[E] = \begin{bmatrix} e_1 - e_3 \\ e_2 - e_4 \\ \dots \\ \dots \\ e_{19} - e_{20} \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ \dots \\ i_{15} \end{bmatrix} \quad [\dot{I}] = \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dot{i}_{15} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} 2v(L+M_1) & 0 & -v(L+M_1) & -2vM_2 & \dots & 0 \\ 0 & 2v(L+M_1) & v(L+M_1) & 0 & \dots & 0 \\ -v(L+M_1) & v(L+M_1) & 2vL & vM_2 & \dots & 0 \\ -2vM_2 & 0 & vM_2 & 2v(L+M_1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & -2vM_2 & -v(L+M_1) & v(L+M_1) & 2vL \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 2R & 0 & -R \\ 0 & 2R & R \\ -R & R & 2R \end{bmatrix} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} 2R & 0 & -R \\ 0 & 2R & R \\ -R & R & 2R \end{bmatrix} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \begin{bmatrix} 2R & 0 & -R \\ 0 & 2R & R \\ -R & R & 2R \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (9)~(10)을 Runge-Kutta법으로 풀어서 전류를 구한다.

### 3.3 전자력 계산

움직이는 차상코일로 인한 자장의 변화로 지상코일에 유도전류가 흐르면 차상코일의 전류와

의 상호작용에 의하여 전자력이 생긴다. 이러한 전자력은 작용하는 방향에 따라 부상력(levitation force), 열차를 선로 중앙으로 인도하는 안내력(guidance force), 그리고 열차의 진행을 방해하는 자기항력(magnetic drag force)으로 나눌 수 있다.

전류가 흐르는 차상코일과 지상코일 사이에 작용하는 힘은 그 사이에 축적된 에너지로부터 구할 수 있다. 전류가 흐르는 두 코일 사이에 축적된 에너지는 식 (14)과 같다.

$$W = \frac{1}{2}L_s I_s^2 + \frac{1}{2}L_\sigma I_\sigma^2 + M_{s\sigma} I_s I_\sigma \quad (14)$$

여기서,  $L_s$ ,  $L_\sigma$ 는 각각 차상코일과 지상코일의 자기인덕턴스,  $M_{s\sigma}$ 는 차상코일과 지상코일 사이의 상호인덕턴스,  $I_s$ ,  $I_\sigma$ 는 각각 차상코일과 지상코일의 전류이다. 열차의 진행방향, 좌우방향 및 상하방향을 각각 좌표축의 x, y 및 z방향으로 정의하면, 각 방향으로 작용하는 힘은 두 코일 사이에 축적된 에너지의 각 방향에 대한 미분으로 표시되며 식 (15)~(17)와 같다.

$$F_z = -\frac{\partial W}{\partial z} = -I_\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (15)$$

$$F_y = -\frac{\partial W}{\partial y} = -I_\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (16)$$

$$F_x = -\frac{\partial W}{\partial x} = -I_\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (17)$$

여기서  $F_x$ ,  $F_y$  및  $F_z$ 는 각각 자기항력, 안내력 및 부상력을 나타낸다. 하나의 차상코일이 받는 힘은 유도전류가 흐르고 있는 모든 지상코일과의 상호작용에 의하여 생긴다. 그리고 차량의 무게중심에 작용하는 힘은 각 차상코일이 받는 힘의 합으로 나타난다. 차량의 좌우 및 상하변위가  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ 일 때  $i$ 번째 차상코일의 중심에 미치는 부상력, 안내력 및 자기항력은 각각 다음과 같다.

$$F_z(\Delta Y, \Delta Z) = -\sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^2 I_{\sigma jk}^2 \frac{\partial \phi_{ijk}(\Delta Y, \Delta Z)}{\partial z} \quad (18)$$

$$F_{yi}(\Delta Y, \Delta Z) = - \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^2 I_{\theta jk} \frac{\partial \phi_{ijk}(\Delta Y, \Delta Z)}{\partial y} \quad (19)$$

$$F_{xi}(\Delta Y, \Delta Z) = - \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^2 I_{\theta jk} \frac{\partial \phi_{ijk}(\Delta Y, \Delta Z)}{\partial x} \quad (20)$$

여기서, 밀침자  $i, j, k$  는 각각 차상코일, 열차진행 방향의 지상코일, 상하의 지상코일을 나타낸다. 또  $I_{\theta jk}$ 는 모든 차상코일에 의하여  $jk$ 번째의 지상코일에 유도된 전류이다.

반발식 자기부상시스템에서는 지상코일이 일정한 간격으로 설치되어 있으므로, 지상코일과 차상코일의 상대적인 위치에 따라 전자력의 크기가 주기적으로 변하며 그 주기는 지상코일의 열차진행방향 피치와 같다. 따라서 차량이 받는 평균전자력은 식 (21)과 같다.

$$F_{avg} = \sum_{i=1}^{2N} \frac{\sum_{j=1}^{N_R} F_{ij}}{N\theta} \quad (21)$$

여기서  $N_{\theta}$ 는 지상코일 한 피치사이에 전자력을 계산한 횟수이다.

#### 4. 사례연구

제시한 해석방법을 이용하여 한 쪽에 3개씩 모두 6개의 초전도자석을 가진 측벽식 자기부상열차의 대차 하나에 대하여 전자력 정특성을 살펴보았다. 대상모델의 사양은 표 1과 같으며 참고문헌[3]을 참고로 하였다. 계산결과 지상코일의 전기파라미터값은  $L=2.54[mH]$ ,  $M_1=0.29[mH]$ ,  $M_2=0.09[mH]$ ,  $R=75.5[m\Omega]$  이다.

차량의 위치에 좌우변위가 없고 상하변위만 있을 때 ( $\Delta Z=2\text{ cm}$ ), 500 km/h로 달리는 열차에 탑재된 3개의 차상코일에 의해 한 쌍의 지상코일에 유기된 기전력은 그림 4와 같다. 상하변위만 존재하므로 좌우측코일의 기전력은 같고, 아래쪽 지상코일(LB, RB)에 유기된 기전력이 위쪽코일(LU, RU)의 유기기전력보다 크다는 것을 알 수 있다. 이 경우에 대하여 지

표 1 시스템 사양

Table 1 Specification of the system

차상코일	갯수	6/bogie
	피치[mm]	2,700
	길이[mm]	2,200
	폭[mm]	500
	기자력[kAT]	700
	권수[회]	1,024
	좌우차상코일간의 거리[mm]	3,000
지상코일	피치[mm]	900
	길이[mm]	800
	폭[mm]	340
	권수[회]	49
	좌우지상코일간의 거리[mm]	3,360
상측코일하변과 하측코일상변사이의 거리[mm]	80	

상전류를 구하면 그림 5와 같다. 좌우변위가 없으므로 좌우코일사이의 영자속선을 따라서는 전류( $i_3$ )가 흐르지 않고, 좌우측코일에 같은 크기의 전류( $i_1, i_2$ )가 흐르고 있음을 보여준다. 따라서 상하코일에는 서로 반대방향의 전류가 흐른다.

그림 6은 열차가 500 km/h의 속도로 지상코일 한 피치를 통과할 때의 발생하는 부상력의 순시치로, 지상코일이 일정한 간격으로 배치되어 있기 때문에 일어나는 부상력의 맥동을

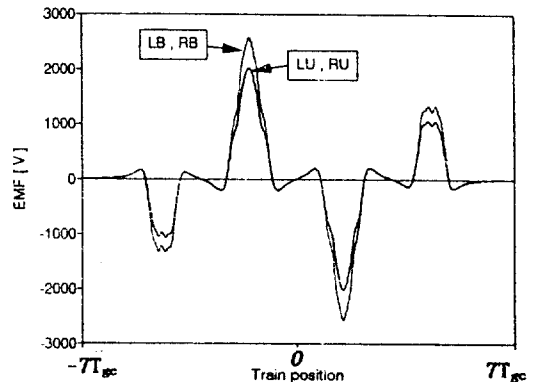


그림 4 지상코일 3개에 의한 유도기전력  
Fig. 4 Emf of a ground coil

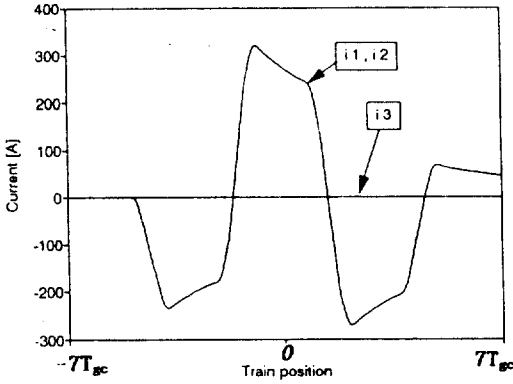


그림 5 지상코일의 전류  
Fig. 5 Current of a ground coil

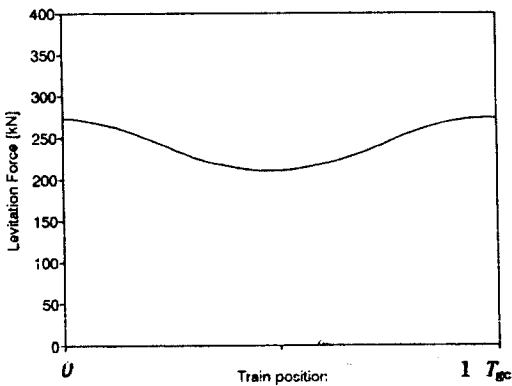


그림 6 지상코일 한 피치를 지나는 동안의 부상력  
Fig. 6 Levitation force between two ground coils

잘 보여주고 있다. 즉, 차상코일과 지상코일의 상대위치에 따라 전자력이 지상코일 피치만큼 씩 주기적으로 맥동한다. 부상력의 크기는 약  $240 \pm 30$  [kN]으로, 지상코일과 차상코일의 중심이 일치할 때의 부상력이 가장 크고, 차상코일의 중심이 서로 이웃한 두 지상코일의 사이에 지날 때 가장 약해진다.

그림 7은 열차의 속도가 500 km/h일 때 상하변위의 크기에 따른 부상력의 크기와 부상력 대 자기항력비, 즉, 양항비를 나타낸 것이다. 열차의 상하변위가 12 cm 부근일 때 최대의 부상력이 얻어진다. 양항비는 평균부상력을 평균항력으로 나눈 값으로서 자기부상시스템의 효율성을 나타내는 파라미터이다. 상하변위가 커질수록 자기항력이 점점 증가하는 반면 부상력은 어느 값 이상은 증가하지 않으므로 양항

비는 감소하게 된다.

그림 8은 열차의 중심변위가  $\Delta Y=0$  cm,  $\Delta Z=2$  cm 인 경우에 속도에 따른 부상력과 자기항력이다. 열차의 속도가 증가함에 따라 지상코일의 순수저항분이 임피던스에서 차지하는 비중이 작아지므로 전류는 속도에 따라서 커지지 않는다. 그러므로 부상력도 속도의 증가에 따라 포화되어 더 이상 커지지 않는다. 고속으로 갈수록 항력이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

열차의 무게에 상당하는 부상력이 얻어지는 상하변위  $\Delta Z$ 의 값을 균형변위라 말하며 실제 열차는 주어진 속도에서 이 균형변위의 위치에서 달리게 된다. 그림 9는 속도에 따른 균형변위와 양항비를 보여주는데, 속도가 증가할수록 부상력이 커지므로 열차의 위치는 높아지며 양항비는 속도에 대해 거의 비례하여 증가함을 알 수 있다.

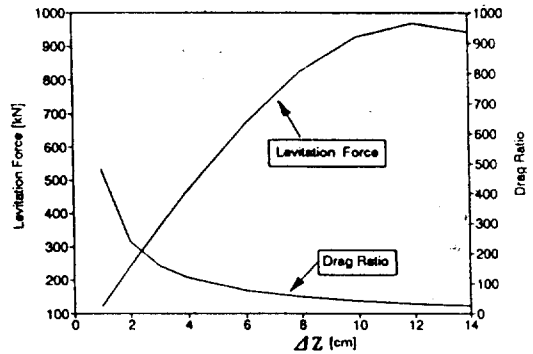


그림 7 z변위의 증가에 따른 부상력 및 항력  
Fig. 7 Levitation force and drag ratio vs.  $\Delta Z$

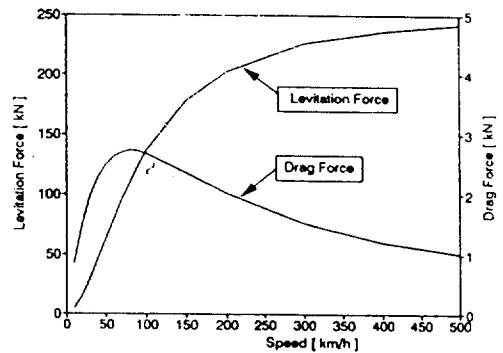


그림 8 열차의 속도에 따른 부상력 및 항력  
Fig. 8 Levitation and drag force vs. train speed

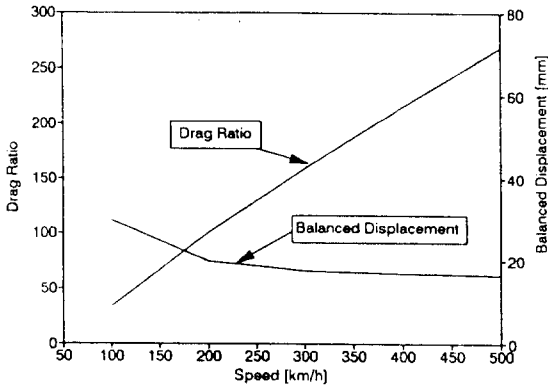


그림 9 열차의 속도에 따른 균형영 변위 및 양 항비

Fig. 9 Balanced displacement and drag ratio

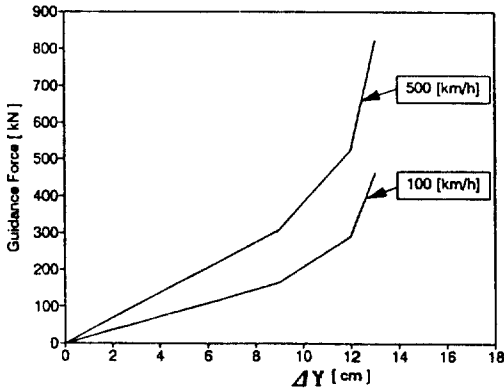


그림 10 y변위의 증가에 따른 안내력

Fig. 10 Guidance force vs.  $\Delta Y$

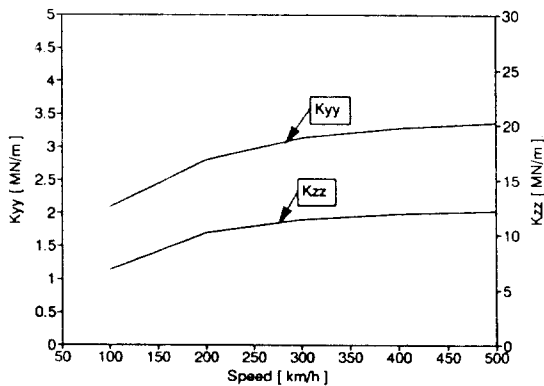


그림 11 열차의 속도에 따른 Stiffness  
Fig. 11 Stiffness vs. train speed

그림 10은 좌우변위의 변화에 대한 안내력의 변화이다. 대상모델의 차상코일과 지상코일 간의 중심거리가 18 [cm] 이다. 그림에서 열차가 지상의 안내측벽으로 접근할수록 열차를 밀어내는 힘은 급격하게 커지는 것을 볼 수 있다.

열차가 어느방향으로 미소거리 움직였을 때 열차가 받는 전자력의 변화를 그 방향의 강인성(stiffness)이라 한다. 그림 11은 속도에 따른 좌우방향과 강인성으로 속도에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림에서  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ 는 각각 좌우방향과 상하방향의 강인성이다.

그림 12는 열차에 실린 차상코일의 갯수가 3쌍인 경우와 15쌍인 경우에 대해, 각 차상코일에 미치는 부상력의 크기를 비교한 것이다. 이 때 차상코일과 지상코일의 사양은 두 경우 모두 서로 같다. 3쌍의 차상코일이 차량의 한 부분에 집중적으로 배치된 경우, 첫번째 차상코일이 가장 작은 부상력을, 두번째 차상코일이 가장 큰 부상력을 받게 되어 모든 차상코일에 대한 단부효과의 영향이 큼을 알 수 있다. 따라서 가운데와 마지막 차상코일이 받는 부상력은 각각 첫번째 차상코일 부상력의 142%와 120%로 각 차상코일의 기자력이 같을 경우 차상코일마다 균형 변위가 달라져 차량이 피칭 토오르크를 받게 된다. 15쌍의 경우와 같이 차상코일이 열차의 모든 부분에 고르게 배치된 경우에도 열차의 전단부에는 역시 같은 정도의 단부효과를 가지게 되고, 뒤로 갈수록 고른 부상력을 받게됨을 알 수 있다. 두 경우의 비교

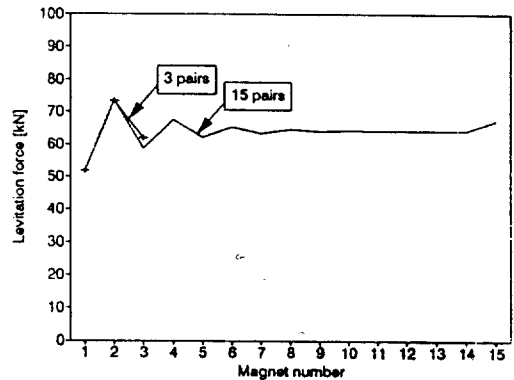


그림 12 각각의 마그네트에서 발생하는 부상력  
Fig. 12 Levitation force on each magnet pair

에서 특히 차상코일이 열차의 앞뒤에 집중배치된 경우 단부효과를 무시할 수 없음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 영자속효과를 이용하는 8자형 지상코일을 가이드웨이의 측벽에 배치함으로써 부상력과 안내력을 동시에 얻는 측벽식 자기부상시스템의 전자력을 구하고 이 부상 방식의 특성을 해석하였다.

해석의 예로는 외력에 의하여 차량의 중심이 가이드웨이 중심에서 좌우방향 또는 상하방향으로 약간의 이동이 생겼을 때 일정한 속도로 달리는 차상코일에 의하여 지상코일에 유기되는 기전력과 전류를 구하고, 차상코일이 열차 진행방향, 상하방향 및 좌우방향으로 받는 전자력을 구하였다. 또, 차상코일이 집중적으로 배치된 경우와 고르게 배치된 경우를 비교하여 각 차상코일에 미치는 전자력에 대한 단부효과를 살펴보았다.

차상코일의 배치형태에 따라 2가지의 사례연구를 통하여 지상코일의 유기기전력, 전류 및 전자력의 제특성을 고찰한 결과, 열차의 대차후단에서의 단부효과는 무시될 수 없음을 알

수 있었다.

본 해석방법은 수치해석법에 의하여 초전도 자석에 의한 공극의 자속을 계산하여 전자력특성을 해석하므로 초전도자석의 형태나 치수의 영향과 단부효과를 충분히 고려할 수 있는 방법으로 가이드웨이코일과 초전도자석의 기본설계에 많은 도움이 되리라 생각된다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] 藤原, “浮上コイル側壁配置磁氣浮上方式の特性”電學論 D-10, 439, 昭63-5
- [ 2 ] S.Fujiwara, T.Fujimoto, “Characteristics of the Combined Levitation and Guidance System Using Ground Coils on the Side Wall of the Guideway”, 11th Int.Conf. on MagLev and Linear Drives, p.241, 1989
- [ 3 ] 藤原, 藤本, “浮上と案内を兼用する誘導反發磁氣浮上の特性”, 電學論 D-5, 112, 平成4年
- [ 4 ] 田中章雄, 武平信夫, 戶田主一, “移動平板導體に相對した 方形コイルの 解析”, 電學論 A-51, 405, 昭56-8

## 저 자 소 개



### 홍순흠(洪舜欽)

1960년 3월 28일생. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1985.3~1988.5 현대중전기 기술연구소 연구원. 1988.5~1989.5 태산정밀 기술연구소 연구원. 1989.5~1990.10 금성기전 자동화기기공장 과장. 1990.9~현재 기초전력공학공동연구소 초전도연구실 위촉연구원.



### 이양수(李良洙)

1968년 2월 17일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



### 차귀수(車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육과 졸업. 1982년 동 대학원 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(공학). 현재 순천향대 공대 전기공학과 부교수.

### 한송엽(韓松擘)

전기학회 논문지 4호 참조.