

電磁吸引式磁氣浮上車兩의
曲線部走行特性

權 丙一 正田 英介
(東京大学)

Curvature Running Characteristics of Maglev vehicle

B. I. KWON E. MASADA
The University of Tokyo

Magnetic levitation railway is being developed as an advanced ground transport system which is high speed and has less environmental pollution.

In this paper, the effectiveness of the proposed controller is proved by a vehicle body's curvature running characteristics. We select two types of transition curves for investigation, namely clothoid and sine.

1. 序論

磁氣浮上鐵道에 있어서, 자기부상차량은 자석이 발생하는 힘에 의해 지지·안내되며, 추진계의 추진력에 의해 궤도를 따라서 진행하게 된다[1].

일본의 HSST(High Speed Surface Transportation) 시스템은 支持·案内兼用方式으로서 스테거배치페어자석(Staggered Magnet Pair: 이하, 스테거자석이라 칭함) 2개와, 추진력을 발생하는 편측식선형유도전동기(SLIM: Single Sided Linear Induction Motor)를 1개의 구조에 배치한 '磁氣車輪' 구조이다.

스테거자석은, 구조적으로는 지지계와 안내계가 일체화 되어 있으나, 제어의 측면에 있어서는 지지계와 안내계를 독립적으로 제어하는 것이 바람직하다. 또한, 횡풍, 곡선주행등을 고려하면, 안내계로서는 가능한 큰 힘을 발생하는 것이 필요하며 그러기 위해서는 큰 횡방향변위까지 제어할 필요가 있다. 그래서 우리는 큰 횡방향변위까지도 지지·안내계 相互의 간섭이 적은 準非干涉制御를 제안했다[2].

본 논문에서는 제안한 제어계의 有効性を 곡선부주행특성으로서, 확인하기로 한다. 실제의 차량에 가까운 자기부상차량및 곡선궤도를 모델화해서, 제안한 제어계에 의한 차량의 곡선부주행특성을 시뮬레이션수법[3]에 의해서 구한다. 곡선부궤도의 모델화에 있어서

는, 완화곡선의 종류에 의한 주행특성의 差異를 비교하기 위해, clothoid緩和曲線과 sine緩和曲線을 채용한다.

2. 磁氣浮上車兩모델

2.1 스테거자석과 制御系[2], [4]

HSST시스템의 스테거자석의 구조를 그림 1에 HSST-03의 스테거자석의 諸元을 표 1에 나타낸다. 스테거자석은, 그림 1에 나타내듯이, U字型궤도의 중심에 대해서 左右方向으로 스테거량 y_0 만큼 변위하도록 배치되어, 스테거자석이 左右로 변위하게 되면, 復元力の 案内力を 발생하게 되며, 스테거량의 크기에 따라서 안내계의 특성이 달라지며, 지지계에 미치는 영향도 달라진다. 안내계의 제어전압을 식(1)에, 지지계의 제어전압을 식(2)에 나타낸다. (단, 기호의 의미는 참고문헌[2]을 참고하기 바란다.)

$$e_{g1} = k_{1g}y_{c1} + k_{2g} \frac{dy_{c1}}{dt} + k_{3g} \frac{d^2y_{m1}}{dt^2} \quad (1)$$

$$e_{z1} = k_{0z} \int z_{c1} dt + k_{1z}z_{c1} + k_{2z} \frac{dz_{m1}}{dt} + k_{3z} \frac{d^2z_{m1}}{dt^2} \quad (2)$$

안내계의 제어전압의 제어정수는, 안내계의 제어가 지지계에 미치는 영향이 적도록, 또한 주행속도 100km/h까지의 乘車感條件을 만족하도록 결정하여, 표 2에 나타낸다. 지지계의 제어전압은, 外亂力에 의한 定常偏差가 零이 되도록 4次系로 하였으며, 4차계의 특성방정식의 대표근의 고유각주파수가 8, 감쇠계수가 0.5로 되도록 제어계수를 결정해서 표 3에 나타낸다.

안내계의 제어가 지지계에 미치는 영향이 적도록, 안내계의 제어전압의 제어정수를 결정하였으나, 그것만으로는 부족하므로 그림 2에 나타낸것 처럼 지지계에, 受動的 適應制御(passive adaptive control)라 불리는, 並列補償회로를 넣기로 하다. 병렬보상회로의 β 를

조정하므로써, 안내계로 부터 지지계에의 外亂 및 지지계에의 力外亂, 지지계의 파라미터 變動에 대한, 지지계의 浮上空隙長變化에의 感度를 감소시킬 수 있다.

2.2 磁氣浮上車兩 모델 [5]

자기부상차량은 2개의 스태거자석으로 구성되는 자기차륜 2개와, 1개의 車體로 구성된다. 각 자기차륜의 rolling, yawing, sway 운동은 차체에 구속되고, 그 外의 heave, pitching 운동은 自由度를 갖도록 하였다. 이상 설명한 자기부상차량을 그림 3에, 그 諸元를 표 4에 나타낸다.

지지방향의 자기차륜과 차체의 사이에는 2차suspension을 설치하여, 지지계의 제어계로서는 궤도에의 追從性만을 고려하고, 2차suspension에 의해 승차감조건을 만족시키기로 한다. 안내계에 있어서는, 자기차륜과 車體의 사이에는 2차suspension를 설치하지 않고, 제어계로서 추종성과 승차감조건을 만족시키기로 한다.

3. 曲線部軌道 모델

직선부궤도를 일정곡률곡선에 직접 연결시키면, 차량은 연결부분에서 스텝형의 遠心力을 받게되어 승차감이 나쁘게 된다. 이러한 현상을 피하기 위하여 직선궤도와 일정곡률곡선사이에 緩化曲線을 설치한다. 緩和曲線에는 sin, cos, clothoid완화곡선등이 있으며, 각 緩化曲線의 曲率과 roll각을 표 5에 나타낸다[6].

본 논문에서는 완화곡선의 종류에 따른 곡선주행특성을 조사하기 위해서 sin 완화곡선, 또는 clothoid緩化曲線을 갖는 곡선부주행특성을 일도록 한다.

곡선궤도 모델은 다음과 같다.

직선부 (1.88m) → 완화곡선 (80m) → 일정곡률곡선 (曲率長: ∞, 曲率半徑: 480m, roll角: 0.0845rad (均衡速度: 72km/h))

走行時間은 4秒이며, 그림 2 중의 β 는 5, τ 는 0.005 로 하였다.

4. 시뮬레이션 결과 및 考察

제안한 제어계 의한 clothoid緩化曲線을 갖는 곡선궤도에 대한, 곡선주행특성을 구해서 左側의 磁氣車輪과 車體의 特性을 그림 4에 나타낸다. 우측자기차륜의 각 자석의 공극장 및 전압특성은, 緩化曲線에서의 右側軌道の 上下變化가 좌측궤도의 上下變化와 반대이어서, 좌측 자기차륜의 특성과 반대이므

로 나타내지 않았다.

완화곡선의 出入口에서 각 磁石의 부상공극장은, 궤도의 급격한 변화때문에, 급격한 변화를 보인다. 각 자석의 횡방향 변위량은, 주행속도가 일정곡률곡선에서의 균형속도보다 빠르므로 約 0.08Mg(3288.8N)의 초과원심력을 받게되어, 곡선중심과는 반대쪽으로 約 9[mm]이다. 각 자석의 제어전압은, 완화곡선의 出入口에서 부상공극장 및 속도, 가속도의 급격한 변화때문에 급격한 변화를 보인다. 하지만, 일정곡률곡선에서는 일정하다. 차체의 지지방향 가속도는, 지지제어계의 병렬보상 및 자기차륜과 차체사이의 2차suspension의 설치 효과로 인하여 적은 값을 나타내고 있다. 차체의 안내방향 가속도는, 차체의 지지방향 가속도보다 크나, 절대적으로는 적은 값이다. 차체의 roll각은, 완화곡선의 入口에서 부터 거의 직선적으로 증가해서 완화곡선의 出口에서, 궤도의 roll각과 거의 일치한다. 또한, 좌측 자기차륜의 pitch 각은, 완화곡선의 入口에서 부터 거의 직선적으로 증가하나, 우측 자기차륜의 pitch 각은 거의 직선적으로 감소하여, 좌측 자기차륜 pitch 각과 반대의 특성을 갖는다. 이것은 완화곡선에서의 左右軌道の 지지방향의 변화가 반대이기 때문이다.

제안한 제어계에 의한, sin 완화곡선을 갖는 곡선궤도에 대한 곡선주행특성을 구해서 좌측의 자기차륜과 차체의 특성을 그림 5에 나타낸다. 완화곡선의 출입구에서 각 자석의 부상공극장은, 지지궤도의 완만한 변화때문에, 완만한 변화를 보인다. 각 자석의 횡방향 변위량의 변화는 완화곡선의 출입구에서는 완만하다. 각 자석의 제어전압은 완화곡선의 출입구에서 부상공극장 및 속도, 가속도의 완만한 변화때문에 완만한 변화를 보인다. 차체의 roll각 및 좌우측 자기차륜의 pitch 角도 그 변화가 완만하며, 일정곡률곡선에서는 clothoid완화곡선을 갖는 곡선궤도에 대한 곡선주행특성의 결과와 같다.

5. 結論

제안한 제어계의 有効性을 曲線部走行特性으로서 확인하였다. 실제의 차량에 가까운 磁氣浮上車兩 및 곡선부궤도를 모델화해서, 제안한 제어계에 의한 차량의 제어특성을 clothoid완화곡선을 갖는 곡선부 및, sin 완화곡선을 갖는 곡선부에 대하여 곡선부주행특성을 시뮬레이션수법에 의해서 구하였다. 그 결과, 제안한 제어계는 兩曲線部の 주행에 문제가 없는 것으로 판명되었다. 또한, clothoid완화곡선을 갖는 곡선부의 주행특성과 sin 완화곡선을 갖는 곡선부의 주행특성을 비교

한 결과, sin 완화곡선을 갖는 곡선부의 주행특성이 clothoid완화곡선을 갖는 곡선부의 주행특성보다 우수함을 알 수 있었다.

6. 参考文献

[1] 正田英介, 權丙一, " 磁氣浮上鐵道の 現象과 展望 ", 전기학회지, Vol.37, No. 4, pp.5 8-70, 1988

[2] 權丙一, 正田英介, " 스테거配置 페어磁石의 支持系, 案内系非干涉制御의 考察 ", 대한전기학회추계학술대회, 논문88-b-1 (1988)

[3] 藤崎, " 電磁吸引制御式 磁氣浮上車兩의 曲線走行simulation ", simulation, 논3-4, 88(昭和59-7)

[4] 權丙一, 正田英介, " 剛体台車와 비틀림応答型台車の 制御特性 ", 대한전기학회추계종합학술대회 논문집, pp.142-145(1989)

[5] 權丙一, " 電磁吸引式 磁氣浮上車兩의 左右案内制御 ", 東京大学学位論文 (1989)

[6] Y.Hikasa, M.Iwaya, K.kusunoki, Y.Hosoda, " A Study of Curvature Running of HSST Vehicle ", Int.Conf. Maglev and Linear Drives . Canada, pp.127-137(1986)

표1. HSS T-03 의 스테거자석의 諸元

負荷質量	M=780 [kg]
電磁石inductance	$L_0=0.234[\text{H}]$
" 卷線抵抗	$R=0.54[\Omega]$
" 定常電流	$i_0=30.8[\text{A}]$
" coil卷數	$n=270[\text{turn}]$
" x 方向長	$l_m=0.94[\text{m}]$
" 極幅	$w=0.025[\text{m}]$
標準浮上gap 長	$z_0=0.011[\text{m}]$
stagger 量	$y_0=0.005[\text{m}]$

표2 案内系의 制御定數

k_{1g}	1786.65[v/m]
k_{2g}	586.33[v·s/m]
k_{3g}	200.[v·s ² /m]

표3 支持系의 制御定數

k_{0s}	689,703.[v/m/s]
k_{1s}	62,084.7[v/m]
k_{2s}	2632.9[v·s/m]
k_{3s}	31.9[v·s ² /m]

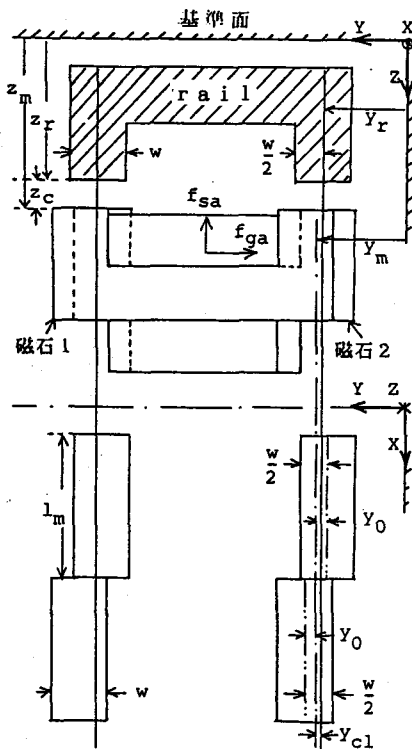


그림1 스테거磁石

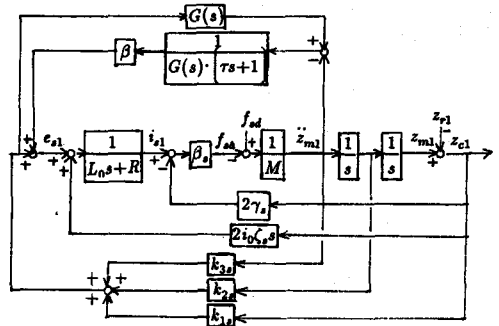


그림2 병렬보상을 고려한 支持界의 block 線圖

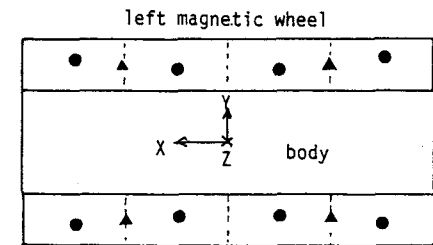
표4 磁氣浮上車兩의 諸元

車体質量	2663[kg]
車体のrolling 慣性能率	3333[kg·m ²]
車体のpitching 慣性能率	2881[kg·m ²]
車体のyawing 慣性能率	3689[kg·m ²]
車体長	3.76[m]
磁氣車輪質量	780[kg]
磁氣車輪pitching 慣性能率	870[kg·m ²]
2次suspension spring 係數	49,400 [N/m]
2次suspensionon damping 係數	2310[N·s/m]

표 5 緩和曲線の 種類

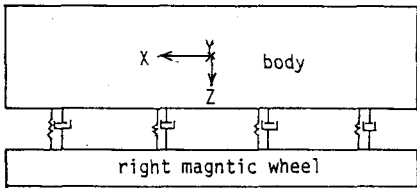
緩和曲線	曲率	roll 角
clothoid	$\frac{s}{s_0 R_0}$	$\tan^{-1} \left(\frac{v_c^2}{s_0 R_0 g} s \right)$
cos	$\frac{1}{2 R_0} \left(1 - \cos \left(\frac{s \pi}{s_0} \right) \right)$	$\tan^{-1} \left[\frac{v_c^2}{2 R_0 g} \left(1 - \cos \left(\frac{s \pi}{s_0} \right) \right) \right]$
sin	$\frac{1}{2 R_0} \left(\frac{2s}{s_0} \sin \frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi s}{s_0} \right) \right)$	$\tan^{-1} \left[\frac{v_c^2}{2 R_0 g} \left(\frac{2s}{s_0} - \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{2\pi s}{s_0} \right) \right) \right]$

g : 重力加速度, s : 緩和曲線으로부터의 距離, s₀ : 緩和曲線長, R₀ : 一定曲率曲線の半径, v_c : 균형속도

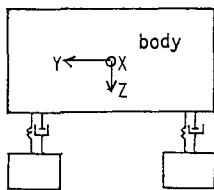


● gap sensor ▲ accelerometer

(a) 平面圖

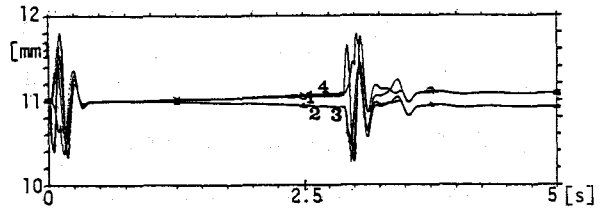


(b) 右側面圖

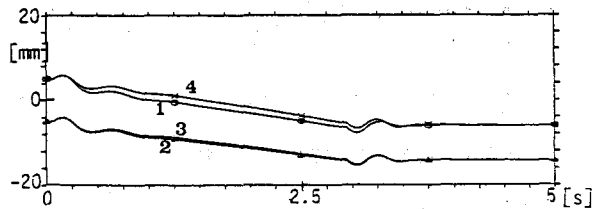


(c) 正面圖

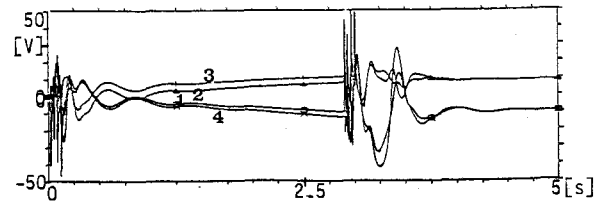
그림 3 磁氣浮上車兩



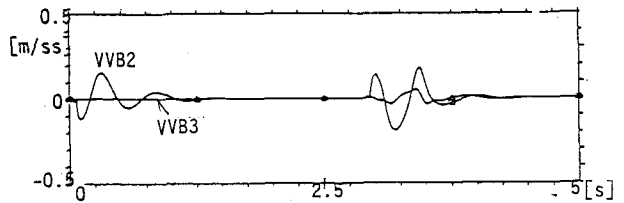
(a) 磁氣車輪의 각 磁石의 浮上空隙長



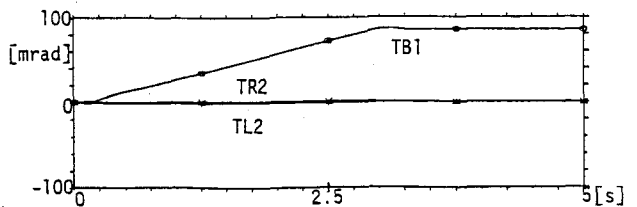
(b) 磁氣車輪의 각 磁石의 橫方向變位置



(c) 磁氣車輪의 각 磁石의 制御電壓

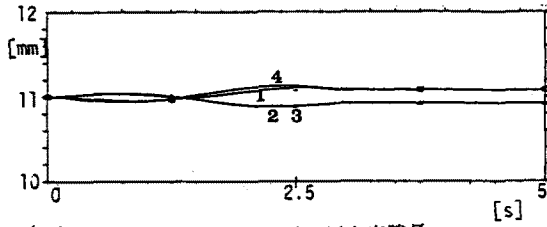


(d) 車體의 加速度

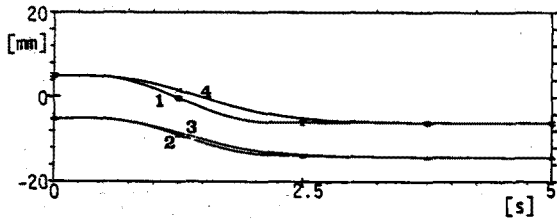


(e) 磁氣車輪과 車體의 姿勢

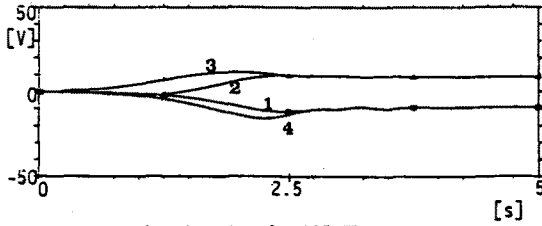
그림 4 clothoid緩和曲線을 갖는 曲線部에 대한 曲線走行特性



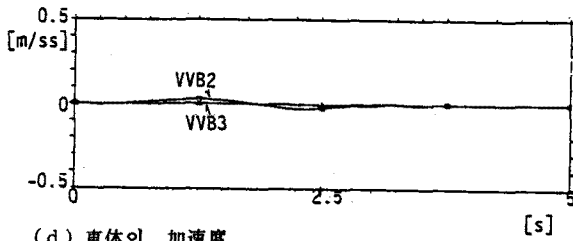
(a) 磁氣車輪의 각 磁石의 浮上空隙長



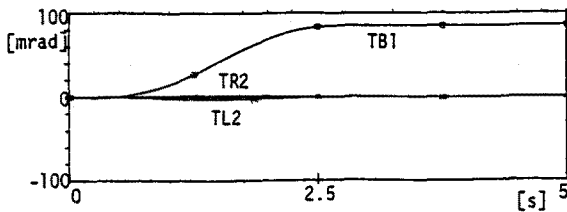
(b) 磁氣車輪의 각 磁石의 橫方向變位量



(c) 磁氣車輪의 각 磁石의 制御電圧



(d) 車體의 加速度



(e) 磁氣車輪과 車體의 姿勢

그림 5 sin 擾和曲線을 갖는 曲線部에 대한 曲線走行特性

(VVB2: 車體의 橫方向의 加速度, VVB3: 車體의 支持方向의 加速度, CB2: 車體의 橫方向의 變位, CB3: 車體의 支持方向의 1 變位, TL2: 左側磁氣車輪의 pitch 角, TR2: 右側磁氣車輪의 pitch 角, TB1: 車體의 roll 角)