



섭동법에 의한 캡슐열차용 대차의 상하방향 불안정성 연구

Vertical Instability of Capsule Train Bogie by Perturbation Method

유원희[†] · 이진호^{*} · 이창영^{*}
Wonhee You[†], Jinho Lee^{*} and Changyoung Lee^{*}

(Received October 23, 2018 ; Revised December 11, 2018 ; Accepted December 11, 2018)

Key Words : Superconduct Magnet(초전도 전자석), Magnetic Levitation(자기부상), Perturbation Method(섭동법), Nonlinear Dynamics(비선형 동역학)

ABSTRACT

A levitation and propulsion system of a 1000 km/h subsonic capsule train is built on. The same conceptual basis as that used by electrodynamic suspension (EDS) levitation trains equipped with an electromagnetic coil on the side walls. The characteristics of the levitation spring of the capsule train are, therefore, the same as those of the levitation spring of the EDS levitation train, with both the linear spring and the nonlinear spring present simultaneously, and the spring constants varying by train speed. This is a phenomenon caused by an 8-shaped coil installed on the side wall of the guideway, which is expected to have a considerable influence on the vertical movement of the capsule train. In this study, the effect of the nonlinear characteristics of the floating springs on the EDS floating capsule train were investigated. The governing equations of the capsule train bogie were derived by consideration of the linear and nonlinear characteristics of the levitation springs. The influence of the nonlinear characteristics of the levitation springs on the instability of the system was analyzed theoretically using the perturbation method.

1. 서론

최대속도 1000 km/h 이상의 속도로 주행하는 아음속 캡슐열차의 부상/추진시스템은 측벽에 전자기 유도 부상시스템이 설치된 반발식(electrodynamic suspension, EDS) 자기부상열차와 동일한 방식을 채택하고 있다. 이에 따라 캡슐열차의 부상스프링의 특성은 자기부상열차의 부상스프링의 특성과 동일하게 선형스프링과 비선형스프링이 동시에 나타나게 되며, 속도에 따라 강성이 변화하는 특성을 가지게 된다⁽¹⁾. 이는 가이드웨이의 측벽에 설치된 8자형 코일에 의해 일어나

는 현상으로서 캡슐열차의 수직방향 운동에 많은 영향을 줄 것으로 보이며, 실제로 초전도전자석이 장착된 대차의 경우 측벽의 8자 코일에 의해 발생하는 전자기력에 의해 상하방향의 주기적인 움직임이 많이 나타나고 있다^(2,3). 이에 따라 EDS 자기부상열차의 경우 상하방향의 진동저감에 많은 노력을 기울이고 있다. 이 연구에서는 이러한 EDS 부상 캡슐열차에 가해지는 부상스프링의 비선형 특성이 캡슐열차에 주는 영향을 검토하여 보았다. 계산의 복잡성을 줄이고 비선형 특성에 의한 영향을 위주로 검토하기 위하여 캡슐열차의 대차를 대상으로 부상스프링의 선형 및 비선형 특성을 고려한 지배방정식을 유도하였다. 무차원 파라미

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Railroad Research Institute
E-mail : whyou@krii.re.kr
^{*} Korea Railroad Research Institute

[‡] Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

터를 이용하여 지배방정식을 단순화하고, 이를 토대로 섭동법을 이용하여 부상스프링의 비선형 특성이 시스템의 불안정에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고 그 래프를 통해 파악하고자 하였다.

2. EDS 자기부상시스템의 특성

2.1 측벽 EDS 시스템의 특성

측벽 EDS 부상 캡슐열차의 대차는 Fig. 1에서 보는 바와 같이⁽¹⁾ 측벽에 설치된 8자 코일에 의해 그 부상특성이 영향을 받으며, 이로 인해 나타나는 부상스프링의 상하방향 강성은 식 (1)에서 보는 바와 같이 선형 성분과 3차 비선형 성분으로 표현된다⁽¹⁾.

$$K_w = K_{ave} + K_{osc} \sin(2\pi f_w t) \tag{1}$$

여기서 $K_{ave}z = k_1z - k_2z^3$, $K_{osc}z = k_{o1}z - k_{o2}z^3$ 이며 z 는 초전도전자석이 장착된 대차의 상하 변위를 나타낸다. K_{osc} 는 측벽 부상코일과 초전도 전자석에 의한 상하방향 부상강성의 주기적인 변동성분의 크기를 나타내며, K_{ave} 는 평균값을 나타낸다. k_1, k_2, k_{o1} 및 k_{o2} 은 각각 K_{ave} 의 선형 성분과 3차 비선형 성분 및 K_{osc} 의 선형 성분과 비선형 성분을 나타내는데, 이들은 모두 z 와는 무관하고 차량의 주행속도에 따라 변하는 특성을 가지며, k_1, k_2, k_{o1} 및 k_{o2} 사이에는 $k_1k_{o2} \approx k_2k_{o1}$ 인 관계가 있다. 또한, f_w 는 대차가 측벽의 전자석 코일을 지나감에 따라 주기적으로 발생하는 전자기부상력의 주파수이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 초전도전자석이 장착된 자기부상차량의 주행 동특성은 이와 같은 부상특성을 고려하여 검토되어야 하지만 대부분의 경우 계산의 용이성을 위하여 부상스프링을 비선형 성분을 제외하고

변위에 선형적으로 비례하는 선형스프링으로만 가정하여 검토하고 있다⁽²⁻⁴⁾.

2.2 1-D EDS 부상 대차의 비선형 방정식

이 연구에서는 이와 같은 선형스프링의 특성보다는 비선형 스프링의 특성에 초점을 두고 측벽 EDS 대차의 주행 중 상하 방향의 비선형 동특성을 파악하고자 하였다. 이 때 주행속도는 임의의 속도로 일정하다고 가정하였으며, 초전도 전자석이 장착된 캡슐열차용 대차는 1자유도 수송체로 가정하였다. 또한, 대차와 궤도 사이에는 전자기력의 특성에 따라 매우 약한 댐핑과 선형 및 3차 비선형 특성을 갖는 스프링이 있다고 가정하였다. 이를 그림으로 표현하면 Fig. 2와 같다⁽⁵⁾.

Fig. 2에 보여주고 있는 캡슐열차용 대차의 상하방향 운동방정식은 대차의 질량 M , 부상댐핑 C_w 및 부상스프링 K_w 를 이용하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$M\ddot{z} + C_w\dot{z} + K_wz = 0 \tag{2}$$

식 (2)에 식 (1)을 적용하여 정리하면

$$M\ddot{z} + C_w\dot{z} + (k_1 + k_{o1}\cos(2\pi f_{sc}t))z - (k_2 + k_{o2}\cos(2\pi f_{sc}t))z^3 = 0 \tag{3}$$

와 같이 된다. 계산의 용이성을 위하여 다음과 같은 무차원 파라미터를 도입한다.

$$u = \frac{z}{z_0}, \quad \tau = \pi f_{sc}t, \quad \alpha = \frac{C_w}{M\pi f_{sc}}, \tag{4}$$

$$\delta = \frac{k_1}{M(\pi f_{sc})^2}, \quad \epsilon = \frac{k_{o1}}{2M(\pi f_{sc})^2}, \quad \gamma = -\frac{k_2z_0^2}{k_1}$$

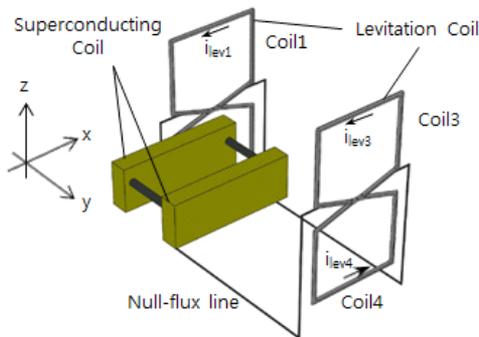


Fig. 1 Side wall electrodynamic suspension

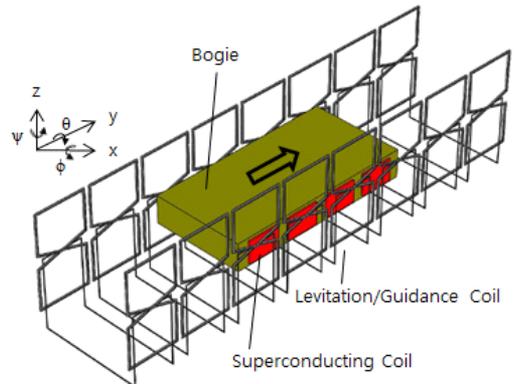


Fig. 2 Bogie system for capsule train

즉, δ 는 평균 부상스프링의 1차항에 대한 것이고, ϵ 은 평균 부상스프링의 주기 항에 대한 것이며, γ 는 평균 부상스프링의 1차 및 3차 항의 비에 관한 것을 나타낸다. 아울러 k_1, k_2, k_{o1} 및 k_{o2} 사이에는 $k_1 k_{o2} \approx k_2 k_{o1}$ 인 관계가 있으므로⁽¹⁾ 식 (3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{u} + \alpha \dot{u} + (\delta + 2\epsilon \cos(2\tau))u + \gamma(\delta + 2\epsilon \cos(2\tau))u^3 = 0 \tag{5}$$

매우 작은 감쇠를 가지는 자기부상스프링의 특성을 고려하여 식 (5)에서 감쇠항을 제외하면 최종적으로 다음 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{u} + (\delta + 2\epsilon \cos(2\tau))u + \gamma(\delta + 2\epsilon \cos(2\tau))u^3 = 0 \tag{6}$$

3. 섭동법에 의한 비선형 동특성 해석

3.1 3차항을 제외한 표준 Mathieu 식

식 (6)에서 3차항을 제외하면 다음 식 (7)과 같은 표준 Mathieu 식이 된다⁽⁶⁾.

$$\ddot{u} + (\delta + 2\epsilon \cos(2\tau))u = 0 \tag{7}$$

표준 Mathieu 식에 대한 동특성은 여러 자료에서 볼 수 있으며, 대체로 다음과 Fig. 3과 같은 특성을 가진다. 이 그림에서⁽⁷⁾ 그늘진 영역이 불안정 영역을 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있는 변이곡선(transient curve)의 식은 ϵ^3 이상의 고차항을 제외하면 식 (8)과 같이 표현된다^(7,8).

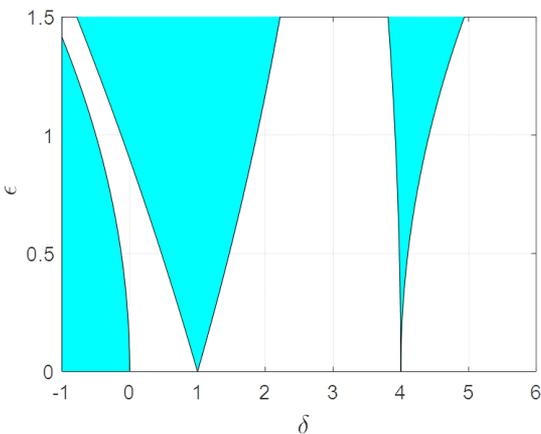


Fig. 3 Unstable zone of Standard Mathieu Equation

$$\begin{aligned} \delta &= -\frac{1}{2}\epsilon^2 \\ \delta &= 1 - \epsilon - \frac{1}{8}\epsilon^2 \\ \delta &= 1 + \epsilon - \frac{1}{8}\epsilon^2 \\ \delta &= 4 + \frac{5}{12}\epsilon^2 \\ \delta &= 4 - \frac{1}{12}\epsilon^2 \end{aligned} \tag{8}$$

3.2 3차항을 포함한 Mathieu 식

이 절에서는 식 (6)에 대하여 섭동법을 이용하여 변이곡선을 찾고자 한다. 일반적으로 고차 비선형항을 가지는 미분방정식의 경우 공진주파수 부근의 전달함수의 모양이 한 쪽으로 기울어지는 현상을 나타내며, 위상 또한 선형 미분방정식과는 약간 다르게 나타난다^(6,7). 또한 고차 비선형항에 의해 Mathieu 식의 불안정성을 그림으로 나타내고 있는 Fig. 2의 변이곡선의 형태가 바뀔 것으로 예상된다.

고차 비선형항이 있는 경우 식 (6)으로부터 변이곡선을 도출하기 위하여 다음 식 (9)와 같이 가정한다^(6,7).

$$\begin{aligned} u &= \epsilon u_0 + \epsilon^2 u_1 + \epsilon^3 u_2 + \dots \\ \delta &= \delta_0 + \epsilon \delta_1 + \epsilon^2 \delta_2 + \dots \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)를 식 (6)에 대입하여 ϵ 에 대해 정리하면 다음과 같다. 여기서는 ϵ^3 까지만 고려하고, 고차항은 제외한다.

$$\epsilon^1 : \ddot{u}_0 + \delta_0 u_0 = 0 \tag{10}$$

$$\epsilon^2 : \ddot{u}_1 + \delta_0 u_1 = -\delta_1 u_0 - 2\cos(2\tau) u_0 \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \epsilon^3 : \ddot{u}_2 + \delta_0 u_2 &= -\delta_2 u_0 - 2\cos(2\tau) u_1 \\ &\quad - \delta_1 u_1 - \gamma \delta_0 u_0^3 \end{aligned} \tag{12}$$

식 (10)의 해는 다음과 같다.

$$u_0 = a \cos(\sqrt{\delta_0} \tau), \quad b \sin(\sqrt{\delta_0} \tau) \tag{13}$$

표준 Mathieu 식을 만족하는 해의 주기는 $2\pi n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)이므로 식 (13)으로부터 $\sqrt{\delta_0}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\delta_0 = n^2, \quad n = 0, 1, 2, \dots \tag{14}$$

식 (14)에서 보는 바와 같이 Mathieu 식을 만족하는 해는 매우 많다. 그러나 비선형 시스템의 불안정성을 해

석하는 경우 n 값이 작을 때 그 특성이 잘 나타나므로 이 연구에서는 $n=0, 1, 2$ 인 경우를 위주로 해석하였다.

(1) $n=0$ 인 경우

$n=0$ 인 경우 식 (14)로부터 $\delta_0=0$ 가 되고 이를 식 (10)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다.

$$u_0 = a \tag{15}$$

여기서 a 는 상수이다. 식 (15)를 식 (11)에 적용하면

$$\ddot{u}_1 = -a\delta - 2a\cos(2\tau) \tag{16}$$

이 되며, 이로부터 다음을 구할 수 있다.

$$u_1 = \frac{a}{2}(-1 + \cos(2\tau) - \delta_1\tau^2) \tag{17}$$

u_1 에서 시간이 지남에 따라 증가하는 영년항(secular term)이 없어야 하므로 $\delta_1=0$ 이 되어야 한다. 이를 식 (17)과 함께 식 (12)에 적용하면

$$\ddot{u}_2 = -\frac{1}{2}(a + 2a\delta_2 - 2a\cos(2\tau) + a\cos(4\tau)) \tag{18}$$

이 되고, u_2 에서 영년항이 존재하지 않아야 하므로 $\delta_2 = -\frac{1}{2}$ 가 되어야 한다. 따라서 최종해와 변이곡선은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u = \epsilon A - \frac{1}{2}\epsilon^2 A(1 - \cos(2\tau)) + O(\epsilon^3) \tag{19}$$

$$\delta = -\frac{1}{2}\epsilon^2 + O(\epsilon^3) \tag{20}$$

(2) $n=1$ 인 경우

$n=1$ 인 경우 식 (14)로부터 $\delta_0=1$ 이 되고 이를 식 (10)에 대입하면

$$u_0 = a\cos(\tau), \quad b\sin(\tau) \tag{21}$$

와 같이 된다. 이로부터 $u_0 = a\cos(\tau)$ 와 $u_0 = b\sin(\tau)$ 각각에 대하여 해를 구한다.

(i) $u_0 = a\cos(\tau)$ 인 경우

$u_0 = a\cos(\tau)$ 를 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$\ddot{u}_1 + u_1 = -a\delta_1\cos(\tau) - a\cos(\tau) - a\cos(3\tau) \tag{22}$$

을 얻게 되고, u_1 에 영년항이 존재하지 않아야 하므로 $\delta_1 = -1$ 이 되어야 한다. 그러면 식 (22)는

$$\ddot{u}_1 + u_1 = -a\cos(3\tau) \tag{23}$$

이 되며 u_1 의 해는 $u_1 = \frac{1}{8}a\cos(3\tau)$ 가 된다. 이를 식 (12)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \ddot{u}_2 + u_2 = & -a\frac{1}{8}(1 + 6a^2\gamma + 8\delta_2)\cos(\tau) \\ & + a\frac{1}{8}(1 - 2a^2\gamma)\cos(3\tau) - a\frac{1}{8}\cos(5\tau) \end{aligned} \tag{24}$$

여기에서 u_2 에 영년항이 존재하지 않으려면 $\delta_2 = -\frac{1}{8}(1 + 6a^2\gamma)$ 가 되어야 한다. 따라서 최종해와 변이곡선을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u = \epsilon a\cos(\tau) + \frac{1}{8}\epsilon^2 a\cos(3\tau) + O(\epsilon^3) \tag{25}$$

$$\delta = 1 - \epsilon - \frac{1}{8}(1 + 6a^2\gamma)\epsilon^2 + O(\epsilon^3) \tag{26}$$

(ii) $u_0 = a\sin(\tau)$ 인 경우

$u_0 = a\sin(\tau)$ 를 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$\ddot{u}_1 + u_1 = -b\delta_1\sin(\tau) + b\sin(\tau) - b\sin(3\tau) \tag{27}$$

을 얻게 되고, u_1 에 영년항이 존재하지 않으려면 $\delta_1 = 1$ 이 되어야 한다. 그러면 식 (27)은

$$\ddot{u}_1 + u_1 = -b\sin(3\tau) \tag{28}$$

이 되며 u_1 의 해는 $u_1 = \frac{1}{8}b\sin(3\tau)$ 가 된다. 이를 식 (12)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \ddot{u}_2 + u_2 = & -b\frac{1}{8}(1 + 6b^2\gamma + 8\delta_2)\sin(\tau) \\ & - b\frac{1}{8}(1 - 2b^2\gamma)\sin(3\tau) - b\frac{1}{8}\sin(5\tau) \end{aligned} \tag{29}$$

이 되고 u_2 에서 영년항이 존재하지 않으려면 $\delta_2 = -\frac{1}{8}(1 + 6b^2\gamma)$ 가 되어야 한다. 따라서 최종해와 변이곡선을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u = \epsilon b\sin(\tau) + \frac{1}{8}\epsilon^2 b\sin(3\tau) + O(\epsilon^3) \tag{30}$$

$$\delta = 1 + \epsilon - \frac{1}{8}(1 + 6b^2\gamma)\epsilon^2 + O(\epsilon^3) \quad (31)$$

(3) $n=2$ 인 경우

$n=2$ 인 경우 식 (14)로부터 $\delta_1=4$ 가 되고 이를 식 (10)에 대입하여 초기조건 (10)을 적용하면 다음을 얻을 수 있다.

$$u_0 = a \cos(2\tau), \quad b \sin(2\tau) \quad (32)$$

따라서 $u_0 = a \cos(2\tau)$ 와 $u_0 = b \sin(2\tau)$ 각각에 대하여 다음과 같이 해를 구한다.

(i) $u_0 = a \cos(2\tau)$ 인 경우

$u_0 = a \cos(2\tau)$ 를 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$\ddot{u}_1 + 4u_1 = -a - a\delta_1 \cos(2\tau) - a \cos(4\tau) \quad (33)$$

을 얻게 되고, u_1 에 영년항이 존재하지 않으려면 $\delta_0=1$ 이 되어야 한다. 그러면 식 (33)은

$$\ddot{u}_1 + 4u_1 = -a - a \cos(4\tau) \quad (34)$$

가 되며 u_1 의 해는 $u_1 = -\frac{1}{4}a + \frac{1}{12}a \cos(4\tau)$ 가 된다.

이를 식 (12)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \ddot{u}_2 + 4u_2 &= a \frac{1}{12}(5 - 36a^2\gamma - 12\delta_2) \cos(2\tau) \\ &\quad - a \frac{1}{12}(1 + 12a^2\gamma) \cos(6\tau) \end{aligned} \quad (35)$$

u_2 에 영년항이 없으려면 $\delta_2 = \frac{5}{12} - 3a^2\gamma$ 가 되어야 하며, 이에 따라 최종해와 변이곡선을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u = \epsilon a \cos(2\tau) - \frac{1}{12}\epsilon^2 a(3 - \cos(4\tau)) + O(\epsilon^3) \quad (36)$$

$$\delta = 4 + \epsilon^2 \left(\frac{5}{12} - 3a^2\gamma \right) + O(\epsilon^3) \quad (37)$$

(ii) $u_0 = a \sin(2\tau)$ 인 경우

$u_0 = a \sin(2\tau)$ 를 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$\ddot{u}_1 + 4u_1 = -b\delta_1 \sin(2\tau) + b \sin(4\tau) \quad (38)$$

을 얻게 되고, u_1 에 영년항이 존재하지 않으려면 $\delta_1=0$ 이 되어야 한다. 그러면 식 (38)은

$$\ddot{u}_1 + 4u_1 = -b \sin(4\tau) \quad (39)$$

가 되며 u_1 의 해는 $u_1 = \frac{1}{12}b \sin(4\tau)$ 가 된다.

이를 식 (12)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \ddot{u}_2 + u_2 &= -b \frac{1}{12}(1 + 36b^2\gamma + 12\delta_2) \sin(2\tau) \\ &\quad - b \frac{1}{12}(1 - 12b^2\gamma) \sin(6\tau) \end{aligned} \quad (40)$$

u_2 에 영년항이 없으려면 $\delta_2 = -\left(\frac{1}{12} + 3b^2\gamma\right)$ 가 되어야 한다. 따라서 최종해와 변이곡선을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u = \epsilon b \sin(2\tau) - \frac{1}{12}\epsilon^2 b \sin(4\tau) + O(\epsilon^3) \quad (41)$$

$$\delta = 4 - \epsilon^2 \left(\frac{1}{12} + 3b^2\gamma \right) + O(\epsilon^3) \quad (42)$$

이상에서 해석한 바와 같이 δ 와 ϵ 사이의 관계를 ϵ^3 이상의 고차항을 제외하고 정리하면 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta &= -\frac{1}{2}\epsilon^2 \\ \delta &= 1 - \epsilon - \frac{1}{8}(1 + 6a^2\gamma)\epsilon^2 \\ \delta &= 1 + \epsilon - \frac{1}{8}(1 + 6b^2\gamma)\epsilon^2 \\ \delta &= 4 + \left(\frac{5}{12} - 3a^2\gamma \right) \epsilon^2 \\ \delta &= 4 - \left(\frac{1}{12} + 3b^2\gamma \right) \epsilon^2 \end{aligned} \quad (43)$$

식 (8)과 식 (43)을 비교해 보면 첫 번째 곡선은 $\delta = -\frac{1}{2}\epsilon^2$ 로서 동일한 곡선을 나타내고 있으며, 그 외의 곡선은 ϵ^2 항에서 a 와 b 및 γ 에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다. a 와 b 는 초기조건과 관계가 있으며, γ 는 평균 부상스프링의 1차 및 3차 항의 비에 관한 것이므로 이들의 변화에 따른 불안정 영역과 안정영역 사이의 변이곡선을 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 4는 $a = 1, b = 1$ 인 경우를 나타낸다. γ 값이 0인 경우는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 표준 Mathieu 식의 경우와 동일하게 나타남을 볼 수 있으며, γ 값이 0보다 작은 경우에는 변이곡선이 오른쪽으로 기울어지고, 0보다 큰 경우에는 왼쪽으로 기울어짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 $\gamma = 0.1$ 인 경우를 나타내고 있다. 초기조건과 관계가 있는 a 와 b 에 대하여 $a = 2, b = 2$ 인 경우 $a = 1, b = 1$ 인 경우보다는 변이곡선이 왼쪽으로 기울어짐을 알 수 있다. 즉, 초기조건에 따라 불안정 영역이 달라짐을 알 수 있다.

따라서, 초전도전자석-부상코일 설계 시 부상스프링에 의한 대차의 비선형 불안정성을 반드시 고려해야 하며, 특히 초기조건과 평균 부상스프링의 1차 및 3차 항의 비에 유의하여야 함을 알 수 있다.

3.3 안정성에 영향을 주는 요소에 대한 검토

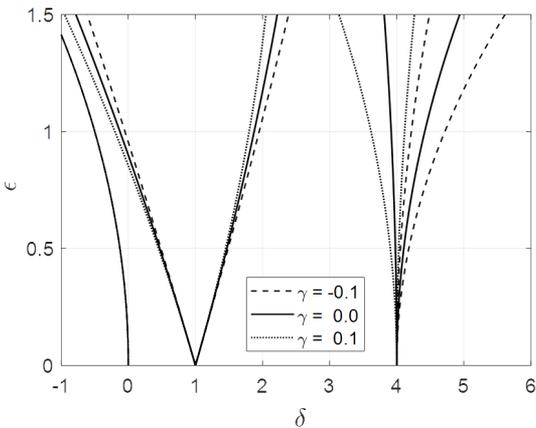


Fig. 4 Unstable zone ($a = 1, b = 1$)

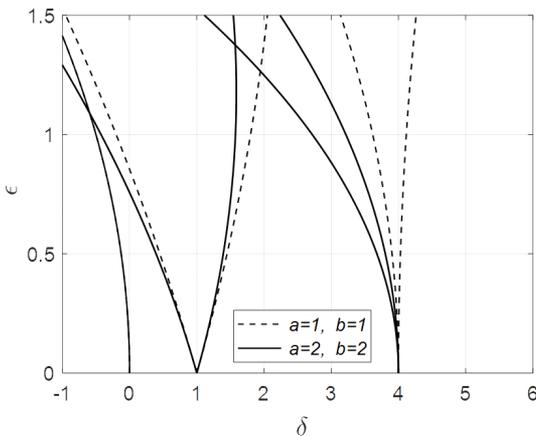


Fig. 5 Unstable zone($\gamma = 0.1$)

앞 절에서 언급한 바와 같이 EDS 자기부상 대차의 비선형 불안정성을 해소하기 위해서는 초기조건과 평균 부상스프링의 1차 및 3차 항의 비에 유의하여 설계를 수행해야 한다.

자기부상열차가 저속에서 바퀴를 이용하여 주행하다가 정해진 주행속도에서 부상을 하게 되는데, 이때 열차의 무게중심의 변화가 이 연구의 초기조건과 관계가 있다. 즉, 바퀴 주행 시의 무게중심과 부상 주행 시의 무게중심의 변화가 급격히 이루어지지 않도록 설계하거나 혹은 그 변화가 최소화되도록 하는 것이 중요하다. 이는 캡슐열차에 탑재되는 초전도 전자석의 위치와 주행 바퀴의 접는 메커니즘 및 부상코일, 추진코일의 배치와 관계가 있다.

한편, 평균 부상스프링의 1차 항과 3차 항의 비 또한 중요한 사항인데, 이는 평균 부상스프링의 특성으로부터 결정된다. 부상스프링의 특성을 결정하는 가장 중요한 요소는 초전도 전자석의 성능 즉, 초전도 전자석을 이루는 금속의 조성과 매우 큰 관계가 있다. 초전도 전자석의 성능 및 경제성을 동시에 판단하여 고려해야 할 사항이다. 초전도 전자석의 성능과 함께 부상스프링의 특성을 결정짓는 중요한 요소는 측벽 부상코일의 배치에 관한 것이다. 즉, 초전도 전자석과 부상코일의 거리에 따라 부상스프링의 특성이 변하게 된다. 아울러 부상코일에 흐르는 전류 또한 부상스프링의 특성을 변화시키는 요소이다. 이 외에도 여러 가지 많은 요소가 부상스프링의 특성을 변화시킬 수 있는데, 가능한 한 이러한 요소들을 최대한 반영하여 대차의 비선형 불안정성을 검토해야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

초전도전자석과 측벽 부상코일 방식의 최대 주행속도 1000 km/h의 아음속 캡슐열차의 대차에 대하여 섭동법을 이용한 비선형 동특성 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평균 부상스프링의 1차 및 3차 항의 비가 클수록 불안정 영역과 안정영역을 구분하는 변이곡선은 왼쪽(음의 방향)으로 기울어지는 현상을 보인다.
- (2) 초기조건이 커짐에 따라 변이곡선은 왼쪽(음의 방향)으로 기울어지는 현상을 보인다.
- (3) 초전도전자석-부상코일 설계 시 부상스프링에 의한 대차의 비선형 불안정성을 반드시 고려해야 하

며, 특히 초기조건과 평균 부상스프링의 1차 및 3차 항의 비에 유의하여야 한다.

후 기

이 논문은 한국철도기술연구원의 주요사업인 ‘아음속 캡슐트레인 핵심기술개발’ 과제의 연구결과임.

References

(1) Ohashi, S., Ohsaki, H. and Masada, E., 1997, Equivalent Model of the Side Wall Electrodynamic Suspension System, *Denki Gakkai Ronbunshi*, Vol. 117, No. 6, pp. 758~767.

(2) Watanabe, K., Yoshioka, H., Suzuki, E., Toatake, T. and Nagai, M., 2007, A Study of Vibration Control Systems for Superconducting Maglev Vehicles, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 1, No. 4, pp. 703~713.

(3) Hoshino, H., Suzuki, E. and Watanabe, K., 2008, Reduction of Vibrations in Maglev Vehicles Using Active Primary and Secondary Suspension Control, *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 49, No. 2, pp. 113~118.

(4) Song, M. K., 2008, Dynamic Analysis of Guideway Structures by Considering Ultra High-speed Maglev Train-guideway Interaction, *Structural Engineering and Mechanics*,

Vol. 29, No. 4, pp. 355~380.

(5) Yonezu, T., Watanabe, K, Suzuki E. and Sasakawa, T., 2018, Characteristics of Magnetic Springs for the Guidance of Superconducting Maglev Vehicles, *RTRI Report*, Vol. 32, No. 3, pp. 11~16.

(6) Nayfeh, A. H. and Mook, D. T., 1993, *Nonlinear Oscillations*, John Wiley & Sons, New York.

(7) Nayfeh, A. H., 1993, *Introduction to Perturbation Techniques*, John Wiley & Sons, New York.

(8) Park, C. I., 2013, Stability Analysis of Mathieu Equation by Floquet Theory and Perturbation Method, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 23, No. 8, pp. 734~741.



Wonhee You received his Ph.D. from Department of Mechanical Engineering at Yonsei University in 1993. He has working for Rolling Stock Research Division and New Transportation Innovative Research Center at Korea Railroad Research Institute. His research interest includes railway vehicle dynamics, active suspension, noise and vibration.