

테더가 있는 인공위성의 동특성 분석

Nonlinear dynamic analysis of a tethered satellite system

정원영* · 정진태†
Wonyoung Jung, Jintai Chung

1. 서론

테더는 두개의 인공위성 혹은 분리되어 있는 두 개 이상의 서로 다른 구조물을 기계적으로 연결하는 긴 케이블을 지칭한다. 테더가 있는 인공위성은 정상궤도에 안착한 후 기저위성으로부터 테더를 전개하며 중력구배를 안정화의 기능을 하는데 기저위성은 때로는 우주선이나 우주정거장등으로 가정되어 연구가 진행되기도 한다. 최근 해외에서 진행중인 테더가 있는 인공위성 시스템(TSS)에 대한 연구를 살펴보면 단순히 테더가 인공위성의 안정성 확보만을 목적으로 하는 것이 아니다. 예를들면 전기 테더(electric tether)는 지구의 자기장과 테더에 유도된 전기력의 상관관계를 이용하여 인공위성의 궤도를 제어하는 기능을 하도록 연구가 진행되고 있고 지구 궤도 주변에 있는 위험요소로 존재하는 운석들의 비행궤적을 바꾸기 위한 테더-밸러스트 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 뿐만아니라 테더의 길이를 증가시켜 우주에서 채취한 샘플을 지구로 가져오는 임무를 수행하는 목적으로 유럽우주국의 주관하에 전세계의 여러대학들이 참가한 YES2 프로젝트를 통해 연구되고 있으며 30km 길이의 테더를 전개하는 실험이 우주공간에서 진행되기도 하였다. 이와 같이 테더에 대한 연구는 인공위성의 자세 제어 외에도 유체 및 물질의 이송, 전기역학적 에너지의 전달등에 사용되기 위하여 그 중요성이 날로 커지고 있다.

본 연구에서는 테더가 있는 인공위성 시스템 및 내부에 이송되는 유체를 질점과 연속체로 묘사하고 Extended Hamilton principle 에 기초하여 지배방정식을 유도할 것이다. 또한 비선형 방정식에 적합한 시간적분법을 이용하여 동적 거동을 살펴볼 것이다. 유체의 이송에 따른 질점으로 묘사된 두 개의 인공위성의 질량의 변화가 인공위성 시스템의 궤적에 미치는 영향을 알아볼 것이다.

2. Tether가 있는 인공위성의 운동방정식

2.1 테더가 있는 인공위성의 모델수립

테더에 의해 연결되어 있는 두 개의 인공위성모델은 Fig.1 과 같다. 두개의 인공위성은 질점, 테더와 유체는 연속체로 가정하였으며 테더는 내경이 존재하는 원형의 강체로 가정하였다. 테더의 길이 L 은 일정하고 내부에 흐르는 유체는 U 의 속도로 이송되며 이송속도는 일정하다고 가정하였다. 또한 테더가 있는 인공위성 시스템의 자전각의 변화는 공전 궤도 평면상에 존재한다고 가정하여 면외각을 고려하지 않은 2 차원으로 모델을 수립하였다. 따라서 본 연구에서는 satellite 1 과 지구중심과의 거리 r , 공전각 ψ , 자전각 θ 의 일반좌표에 의해 지배방정식을 유도하기 위하여 3 자유도 2 차원모델을 수립하였다.

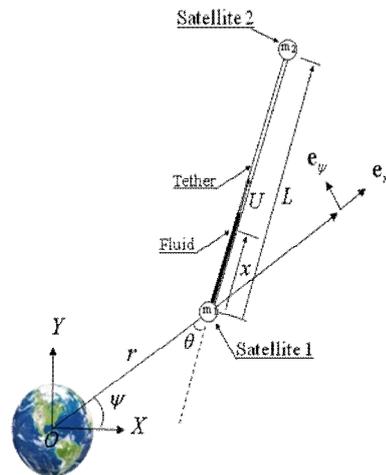


Fig. 1 Simplified model of tethered satellite

2.2 테더가 있는 인공위성의 운동방정식 유도

본 연구에서는 정의된 일반좌표에 의해 표현된 운동에너지와 위치에너지를 Extended Hamilton principle 에 적용하여 시스템의 지배방정식을 유도하였다. 운동에너지와 위치에너지는 위치벡터와 속도벡터에 의

† 교신저자; 한양대학교 기계공학과
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
Tel : (031) 400-5287, Fax : (031) 406-6964
* 한양대학교 일반대학원 기계공학과

해 나타낼 수 있는데 각 질점과 임의의 테더와 유체에 대한 위치 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r}_1 = r \mathbf{e}_r \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_2 = (r + L \cos \theta) \mathbf{e}_r + L \sin \theta \mathbf{e}_\psi \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_t = (r + x \cos \theta) \mathbf{e}_r + x \sin \theta \mathbf{e}_\psi \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_f = (r + x \cos \theta) \mathbf{e}_r + x \sin \theta \mathbf{e}_\psi \quad (4)$$

여기서 \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_ψ 과는 satellite1 의 반경방향과 접선 방향의 단위벡터를 나타낸다. (1) - (3)의 위치벡터를 시간에 대하여 미분하여 속도벡터를 구할 수 있고 (4)의 이송되는 유체의 위치벡터는 물질미분을 통해 속도벡터를 구할 수 있는데 이는 (5) - (8)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{v}_1 = \dot{r} \mathbf{e}_r + r \dot{\psi} \mathbf{e}_\psi \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_2 = (\dot{r} - L(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \sin \theta) \mathbf{e}_r + (r \dot{\psi} + L(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \cos \theta) \mathbf{e}_\psi \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_t = (\dot{r} - x(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \sin \theta) \mathbf{e}_r + (r \dot{\psi} + x(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \cos \theta) \mathbf{e}_\psi \quad (7)$$

$$\mathbf{v}_f = (\dot{r} - x(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \sin \theta + U \cos \theta) \mathbf{e}_r + (r \dot{\psi} + x(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \cos \theta + U \sin \theta) \mathbf{e}_\psi \quad (8)$$

인공위성 모델을 질점과 연속체로 가정하였기 때문에 운동에너지는 (9) 식을 이용하여 구할 수 있다. 또한 중력 퍼텐셜 에너지는 (10)과 같이 표현 할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2}(m_1 - m_f U t) \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_1 + \frac{1}{2}(m_2 + m_f U t) \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{v}_2 \quad (9)$$

$$+ \frac{1}{2} m_t \int_0^L \mathbf{v}_t \cdot \mathbf{v}_t dx + \frac{1}{2} m_f \int_0^L \mathbf{v}_f \cdot \mathbf{v}_f dx$$

$$V = -\frac{GM_e(m_1 - m_f U t)}{R_1} - \frac{GM_e(m_2 + m_f U t)}{R_2} - \int_0^L \frac{GM_e m_t}{R_t} dx - \int_0^L \frac{GM_e m_f}{R_f} dx \quad (10)$$

정의된 운동에너지와 위치에너지를 (11)과 같이 표현될 수 있는 Extended Hamilton principle 을 사용하여 유도된 테더를 통해 물질을 이송하는 인공위성 시스템의 지배방정식은 (12) - (14)과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta V + \delta W_{nc} - \delta M) dt = 0 \quad (11)$$

$$M_1 \ddot{r} - M_2 \sin \theta \ddot{\psi} - M_2 \sin \theta \ddot{\theta} - M_1 r \dot{\psi}^2 - M_2 (\dot{\theta} + \dot{\psi})^2 \cos \theta - 2m_f U (\dot{\theta} + \dot{\psi}) \sin \theta + m_f \dot{U} \cos \theta + \frac{GM_e(m_1 - \rho_f A_f U t)}{R_1^2} + \frac{GM_e(m_2 + \rho_f A_f U t)(r + L \cos \theta)}{R_2^3} + \frac{GM_e(m_1 + m_f)}{R_1 R_2} = 0$$

$$M_2 \sin \theta \ddot{r} - (M_1 r^2 + 2M_2 r \cos \theta + M_3) \ddot{\psi} - (M_2 r \cos \theta + M_3) \ddot{\theta} - 2M_1 r \dot{r} \dot{\psi} - 2M_2 \dot{r} \dot{\psi} \cos \theta + 2M_2 r \dot{\theta} \dot{\psi} \sin \theta + M_2 r \dot{\theta}^2 \sin \theta - m_f U r \dot{\theta} \cos \theta - m_f \dot{U} r \sin \theta - m_f \dot{U} r \sin \theta = 0$$

$$M_2 \sin \theta \ddot{r} - (M_2 r \cos \theta + M_3) \ddot{\psi} - M_3 \ddot{\theta} - M_2 r \dot{\psi}^2 \sin \theta - m_f L U (\dot{\theta} + \dot{\psi}) - 2M_2 \dot{r} \dot{\psi} \cos \theta + \frac{GM_e(m_2 + \rho_f A_f U t) r L \sin \theta}{R_2^3} + \frac{GM_e(m_1 + m_f)}{L \sin \theta} - \frac{GM_e(m_1 + m_f)(r \csc \theta + L \cot \theta)}{L R_2} = 0$$

여기서 m_t , m_f , M_1 , M_2 , M_3 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m_t = \rho_f A_f L, \quad m_f = \rho_f A_f L, \quad M_3 = (m_2 + \rho_f A_f U t + (m_1 + m_f) / 3) L^2$$

$$M_1 = m_1 + m_2 + m_t + m_f, \quad M_2 = (m_2 + \rho_f A_f U t + (m_1 + m_f) / 2) L$$

3. Tether가 있는 인공위성의 동적 응답 분석

유체의 속도를 1.5m/s, 0m/s, -1.5m/s 으로 변화시키면서 satellite1 의 거리 변화와 시스템의 자전각의 시간응답을 Fig. 2 에 나타내었다.

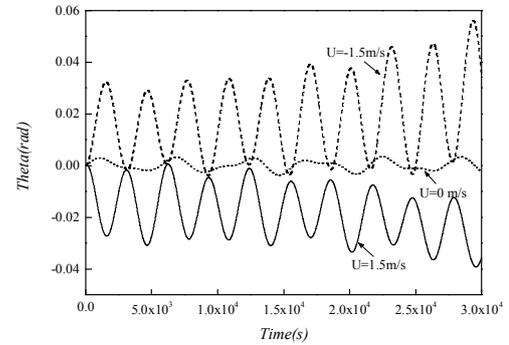
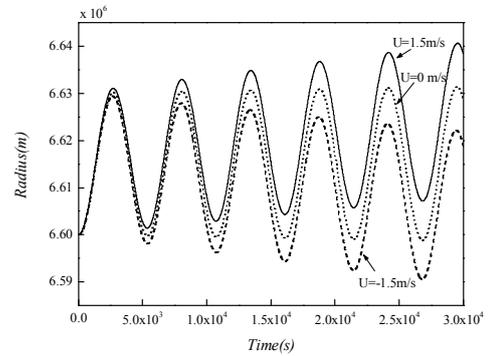


Fig. 2 Dynamic response of the satellite with various velocity of fluid

4. 결론

본 논문에서는 테더를 통해 물질을 이송하는 인공 위성 시스템의 유도된 운동방정식을 통해 유체의 속도를 변화시키며 시간응답을 확인하였다. 차후에는 테더의 전개 및 질량의 이동이 시스템에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행할 것이다.

후기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2010-0016998)