

시간지연을 갖는 추력기 자세제어시스템의 Limit Cycle 분석

Limit Cycle Analysis Of Attitude Control System Using Thruster Under Time Delay Effect

“안재명”, 노웅래”, 정호락”, 최형돈”

* 한국항공우주연구소 우주기반기술연구부 (Tel : (042)-860-2927, E-mail:jmahn@kari.re.kr)

Abstract : Limit cycle analysis of attitude control system using gas jet thrusters is performed. Schmitt-Trigger and PD control laws are applied and solenoid valve time delay is considered. Phase plane method is used for calculation of characteristics of limit cycle. Important characteristics of resultant limit cycle such as frequency, amplitude, maximum rate, and duty ratio could be expressed analytically by proposed method.

Keywords : Limit Cycle, Phase Plane, Time Delay, Attitude Control, Thruster

1. 서론

입력의 크기를 조절할 수 없는 추력을 사용하는 자세제어 시스템의 경우, 채터링(chattering)을 방지하기 위하여 슈미트 트리거(Schmitt Trigger)를 사용하게 되는 경우가 많다. 이 때 보통 Limit Cycle이 발생하게 되며, 발생하는 Limit Cycle의 특성들은 Schmitt Trigger의 Parameter, 추력기의 추력, 제어 대상의 Inertia Property 등에 의하여 결정되게 된다. 한편 추력을 열거나 닫기 위하여 명령을 주었을 때, 명령과 실제 추력기 밸브의 개/폐 사이에는 시간지연(Time Delay)이 발생하게 되는데, 이 또한 자세제어 시스템의 Limit Cycle 특성을 결정하는 요소 중 하나가 된다.

이런 Limit Cycle을 분석하는 방법으로 표기함수 기법(Describing Function Method)과 상 평면 기법(Phase Plane Method)을 들 수 있다.[1][2] 표기함수 기법의 경우 입력과 응답을 정현파 신호로 가정하고 문제에 접근하는 방식으로, 정현파와 유사한 응답을 가지는 Limit Cycle의 경우 그 특성을 근사적으로 구할 수 있다. 상 평면 기법은 제어 대상의 속도와 변위를 상 평면 위에 나타내어 Limit Cycle의 특성을 구해 내는 방법인데, 표기함수 기법에서와 같은 가정이 포함되어 있지 않으므로 정확한 Limit Cycle 특성을 찾을 수 있다.

본 논문에서는 상 평면 기법을 이용하여 슈미트 트리거를 사용한 로켓의 물 자세 제어 시스템의 Limit Cycle을 시간 지연효과까지 고려하여 분석하였다. 분석을 통하여 외란이 존재하지 않을 때와, 일정한 크기의 외란이 존재할 때의 Limit Cycle에 대하여 주기와 진폭을 해석적으로 구해 낼 수 있었다.

2. 로켓의 물 자세제어 시스템

피치 및 요 자세 변화가 적어, 커플링을 고려하지 않을 때, 공기력에 의한 힘을 무시할 수 있는 구간에서 로켓 물 방향의 자세 운동방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\phi} = p$$

$$p = \bar{T}_c f(\phi, p, t_{\text{don}}, t_{\text{doff}}) + \bar{T}_d$$

여기서,

ϕ : 로켓의 물 각

p : 로켓의 물 각속도

t_{don} : 추력기 ON 명령시의 시간 지연

t_{doff} : 추력기 OFF 명령시의 시간 지연

$\bar{T}_c = \frac{T_c}{I_{xx}}$, T_c : Control Torque

f : 시간 지연 효과를 고려한 추력기 On-Off 함수 (PD형태의 되먹임을 입력으로 갖는 Schmitt Trigger).[3]

$\bar{T}_d = \frac{T_d}{I_{xx}}$, T_d : 로켓의 편 비성렬에 의한 오차 토크

이 중 공기력에 의한 감쇄항은 편에 의해 공력적으로 발생하며 시간에 따라 매우 크게 변한다. 이러한 작용이 Transient 구간에서는 큰 영향을 주기 때문에 시뮬레이션에서는 반드시 고려해야 되지만, 수렴된 Limit cycle 근처에서는 각속도가 크지 않으며, 안정성을 지하시키는 역할을 하지는 않으므로, 해석적인 분석이 가능하도록 본 논문에서는 고려하지 않았다.

이와 같은 시스템을 블록선도로 나타내면 [그림 1]과 같다.

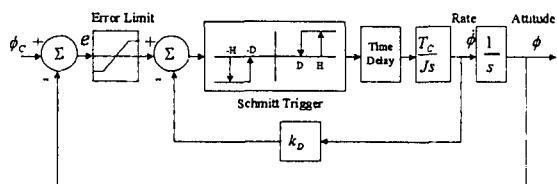


그림 1. 로켓의 물 방향 자세제어 시스템

3. 상 평면위에서의 궤적 분석

3.1 추력기 동작 상태에 따른 상 평면위에서의 궤적

3.1.1 외란 토크가 작용하지 않는 경우

제어기로 쓰인 슈미트 트리거는 “양(Positive) 방향 토크 사용”/