

선형 교전기하를 고려한 스트랩다운 탐색기 기반 유도탄 안정성 해석

Stability Analysis of Missiles with Strapdown Seeker Considering Linearized Engagement Kinematics

이석원^{1*}, 이재호¹, 김유단¹, 엄태윤²
서울대학교¹, 국방과학연구소²

초 록

스트랩다운 탐색기를 장착한 유도탄에 시선각 기반의 유도기법을 설계하는 경우, 시선각 정보를 위해 탐색기와 자이로 정보를 융합하는 과정에서 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 내부루프의 안정성을 고려하여 유도조종루프를 설계한다. 그러나, 내부루프의 안정화를 고려하여 설계된 경우에도 표적이 고속으로 접근하거나 파라미터가 적절히 설정되지 않은 경우에는 호밍유도 말기에 유도탄이 급격하게 기동하거나 유도조종루프가 불안정해 질 수 있다. 본 연구에서는 교전상황에서 유도탄 기동의 안정성을 확보하기 위해 선형 교전기하를 고려하여 전체루프를 구성하고, 교전상황에서 유도탄의 불안정화에 대한 분석을 수행하였다.

ABSTRACT

Strapdown seeker guidance law uses the integration of seeker and gyro to generate LOS(Line of Sight) rate, which makes parasite effect in the process of guidance filter design. To deal with the parasite effect, design parameters should be chosen to satisfy the stability of the parasitical loop. The guidance and control loop, however, may become unstable in the engagement at the terminal phase of guidance when the missile encounters a target with fast speed. In this study, linearized engagement kinematics is considered to construct the outer loop, and the overall stability of the guidance and control loop is analyzed by using Routh-Hurwitz criterion.

Key Words : Strapdown Seeker(스트랩다운 탐색기), Stability analysis(안정성 분석), Engagement kinematics(교전기하)

1. 서 론

스트랩다운 탐색기를 장착한 유도탄은 김벌 방식의 탐색기를 장착한 유도탄보다 시스템의 복잡성, 무게, 경제적 효율성 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 탐색기가 동체에 부착되어 있기 때문에 발생하는 여러가지 문제점이 존재한다. 특히 유도루프 설계에 필요한 시선각 정보는 관성좌표계에서 정의되기 때문에 이를 위해서는 동체에 부착된 탐색기 정보와 동체자세 정보의 융합이 필수적이며, 이때 발생하는 신호특성 차이로 인해 불필요한 기생루프(Parasitical loop)가 발생하여 유도조종루프가 불안정해질 수 있다. 이러한 유도조종루프의 불안정화 요인으로 두 신호의 스케일 오차에 의한 폐회로의 불안정화[1-2], 필터

시간지연에 의한 효과[2-3] 등이 있으며, 이를 위한 안정성을 폐회로에 대해 Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 분석하였다.[1-2] 그러나 고속으로 접근하는 표적에 대한 교전상황에서는 내부루프를 안정하게 설계하여도 동체가 비정상적으로 기동하거나 전체 루프의 안정화에 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 고속으로 접근하는 표적의 교전상황에 대한 안정성 분석을 위해 선형 교전기하를 고려하고, parasite effect를 안정화 시키는 내부루프를 결합하여 폐회로를 구성한다. 그리고 Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 교전상황에서 유도탄의 불안정화가 발생하는 구간과 불안정영역에 대한 잔여시간을 분석하였다. 수치 시뮬레이션을 통해 제안한 안정성 결과를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 문제정의

스트랩다운 탐색기를 장착한 유도탄이 고속으로 접근하는 표적을 타격하는 교전상황을 고려하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 사용한다.

가정 1. 탐색기와 자이로에서 발생하는 신호잡음과 센서 동역학은 무시한다.

가정 2. 유도탄과 표적은 한 평면상에서 기동하며, 표적과 유도탄의 초기 상대거리는 충분히 멀다.

가정 3. 유도탄의 운동은 등속회전 기동을 고려한다.

위의 가정들을 이용하여 구성된 스트랩다운 탐색기를 장착한 유도조종 시스템의 교전기하 상황을 고려한 블록선도는 Fig.1 과 같다. 관성좌표계에서 정의된 유도탄과 표적의 위치로부터 얻어진 교전기하 관계로부터 시선각을 내부에서 설계된 유도필터와 유도조종 장치에 의해 유도탄에 전달하는 구조로 구성된다. 구체적인 각각의 블록에 대한 정보는 아래와 같다.

- 교전기하 모델: 선형 교전기하

$$\lambda(s) / y_{miss\,diss}(s) = 1/R \quad (1)$$

- 유도탄 모델: 등속회전기동

$$q(s) / a_z(s) = (1 + T_\alpha s) / V_m \quad (2)$$

- 자동조종장치: 1 차 시간지연 모델

$$a_m(s) / a_{m_c}(s) = 1 / (\tau s + 1) \quad (3)$$

- 유도법칙: 비례항법

$$a_{m_c}(s) / \dot{\lambda}(s) = NV_c \quad (4)$$

여기서 τ, T_α 는 각각 동역학과 제어기의 시간상수, V_m, N 은 유도탄의 속도와 유도상수, R, V_c 은 표적과의 상대거리와 접근속도를 나타낸다.

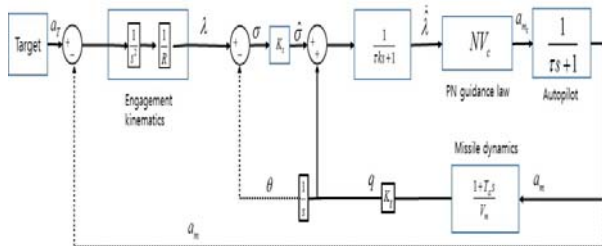


Fig. 1 교전기하를 포함한 스트랩다운 탐색기 기반 유도탄 블록선도

시선각 변화율을 추정하기 위한 과정에서 발생하는 루프의 불안정성의 주요 원인으로 스케일 상수 오차에 의한 영향과 융합하는 신호의 시간지연에 의한 오차가 있다. 본 연구에서는 참고문헌 [2]의 관측각속도 시간지연으로 인해 발생하는 오차에 대한 영향을 고려한다. 이를 위한 내부루프의 블록선도는 Fig.2 와 같다. 이때 내부루프에서 발생하는 Parasite effect 를 줄이기 위한 내부루프의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{a_n}{\dot{\lambda}} = \frac{NV_c}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1) - N^*k\tau s(1 + T_\alpha s)} \quad (5)$$

식(5)를 이용하여 구한 내부루프의 안정화 영역은 다음과 같다.

$$\tau / T_\alpha > N^* \quad (6)$$

$$1 + (1 - N^*)k > 0$$

여기서 $N^* = NV_c / V_m$ 은 유효이득이고, k 는 필터 시간상수이다.

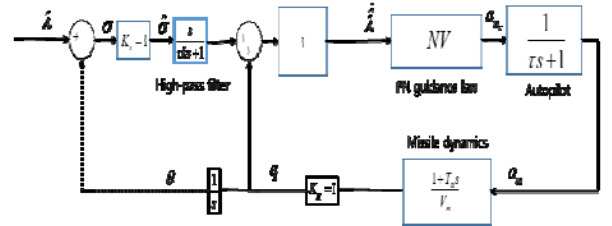


Fig. 2 시선각 변화율 추정을 위한 내부루프 구조: 각속도 합성

2.2 안정성 분석

본 절에서는 교전기하를 고려하여 교전상황에서 시스템의 안정성을 분석한다. 교전기하 블록을 포함하여 외부루프의 안정성을 살펴보기 위해 Fig.1의 블록선도에 내부루프를 고려하여 시스템을 재구성하면 Fig.3 과 같이 표현된다. 이때 표적의 측방향 가속도와 수직거리 오차에 대한 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{y_{miss\,dist}}{a_T(s)} = \frac{1}{s^2} \left(1 - \frac{\frac{1}{s^2} \frac{1}{R} G_{parasite}}{1 + \frac{1}{s^2} \frac{1}{R} G_{parasite}} \right) \quad (7)$$

$$= \frac{1}{s^2 + \frac{1}{R} G_{parasite}}$$

여기서 $G_{parasite}$ 는 앞 절에서 설계된 시선각에 대한 유도탄의 가속도 전달함수이다.

$$G_{parasite} = \frac{NV_c s}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1) - N'(k\tau s)(1 + T_\alpha s)} \quad (8)$$

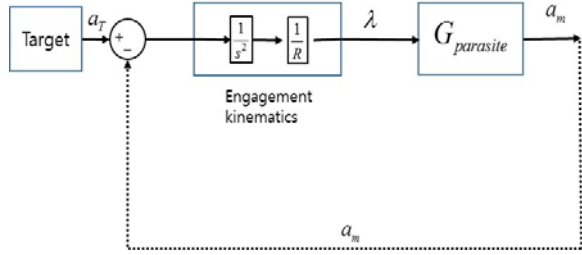


Fig. 3 교전기하를 포함한 외부루프 블록선도

폐회로를 구성한 시스템의 안정성을 판단하기 위해 식(7)의 특성방정식을 구하면 다음과 같다.

$$(k\tau^2 - N'k\tau T_\alpha)s^3 + \{1 + (1 - N')k\}\tau s^3 + s^2 + \frac{NV_c}{R}s = 0 \quad (9)$$

식 (9)의 근이 안정한 영역에 있는지 판별하기 위해서 Routh-Hurwitz array 를 이용하면 다음과 같은 안정영역 경계를 얻을 수 있다.

$$\tau / T_\alpha > N'$$

$$\{1 + (1 - N')k\} > \frac{1}{R}NV_c(\tau - N'T_\alpha)k \quad (10)$$

식 (10)을 살펴보면, 식 (6)에서 표현된 내부루프 안정영역이 유도탄과 표적의 상대거리로 표현된 크기만큼 한정영역이 이동함을 알 수 있다. 이는 표적과의 상대거리가 가까워질수록 안정영역의 여유가 줄어들며 일정 시점 이후로 기동의 불안정화가 시작됨을 의미한다. 불안정화가 시작되는 구간을 시간에 대해 나타내기 위해 표적과 유도탄의 접근속도를 $V_c = R t_{go}$ 로 단순화하여, 잔여시간 t_{go} 에 대해 나타내면 불안정화가 시작되는 잔여시간을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{go_unstable} = \frac{N(\tau - N'T_\alpha)k}{1 + (1 - N')k} \quad (11)$$

여기서 식 (11)의 pole 과 zero 는 각각 내부루프의 stability criterion 을 구성하는 값이다. 따라서 내부루프에서 parasite effect 가 안정하도록 설계된 파라미터에 의해 불안정화가 시작되는 잔여시간을 예

측할 수 있다. 이때 접근하는 목표물의 속도에 따른 $t_{go_unstable}$ 의 영향을 알아보기 위해 유효이득 N' 에 표현하면 Fig.4 와 같다.

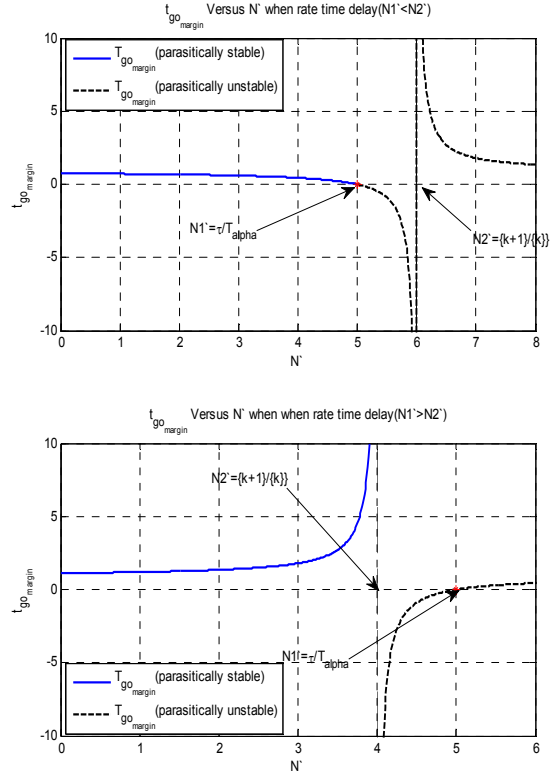


Fig. 4 유효이득에 따른 불안정화 충돌 잔여시간 변화

3. 수치 시뮬레이션

본 연구에서 수행한 안정성 해석을 검증하기 위하여 교전상황에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 유도탄에 정면을 향해 일정한 속력으로 접근하는 표적을 요격하는 교전상황을 가정하였다. 교전상황에 대한 초기값과 파라미터는 Table 1 에 정리하였다.

Table 1 시뮬레이션 교전상황

파라미터	변수	값
제어기 시상수	τ	1.5
유도상수	N	3
필터 시상수	k	1/3.7

동역학 시상수	T_α	0.3
유도탄 속력	V_m	300
초기자세	θ_0	5deg
유도탄 초기위치	$(X_m, Y_m)_0$	(0,1000)
표적 초기위치	$(X_T, Y_T)_0$	(3000,1000)

서로 다른 속도로 접근하는 표적에 대한 결과를 살펴보기 위해 정지표적($V_T = 0$) 과 유도탄 속도의 1/2 수준으로 접근($V_T = 160$)하는 표적에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 수치 시뮬레이션 결과는 Table 2 와 Fig.5 에 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면 정지표적을 타격하는 경우 관측각과 시선각 변화율이 일정하게 수렴하며 목표물을 명중하였고, 이때 본 연구에서 계산한 불안정화 충돌 잔여시간은 1.058 초로 계산되었다. 한편 1/2 수준의 속도로 접근하는 표적에 대해서는 관측각과 시선각 변화율이 호밍말기 구간에서 발산하는 형태가 나타나며, 전체 궤적에서 말기에 급격한 기동을 하는 것을 볼 수 있다. 이는 정지표적에 비해 불안정화 충돌 잔여시간이 3.6 초로 증가함에 따라 3.6 초 동안 불안정화가 진행되었기 때문에 내부루프가 안정하도록 파라미터를 설계하였음에도 불구하고 교전상황에서 급격한 기동과 함께 상태변수가 발산하는 형태가 됨을 알 수 있다.

Table 2 시뮬레이션 결과 (최종값)

	$V_T = 0$	$V_T = 160$
$t_{go_unstable}$	1.0588	3.6
$y_{miss_dist}(t_f)$	-0.1221	1.8716
$\sigma(t_f)$ (deg)	-0.089	9.1195
$\dot{\lambda}(t_f)$ (deg/s)	0.3432	667.116

4. 결 론

본 연구에서는 스트랩다운 탐색기 기반의 유도탄의 안정성을 확보하기 위해 내부루프 안정성을 바탕으로 교전기하를 고려한 외부루프의 안정성을 분석하였다. 상대거리가 가까워 짐에 따라 안정성에 대한 한계 구간이 나타나며, 이때 내부루프를 안정하도록 설계된 파라미터에 의해 구간의 크

기와 불안정화 잔여시간이 결정됨을 확인하였다. 따라서 내부루프를 설계할 때 새로 제안된 안정영역을 고려하여 파라미터를 설계하는 것이 필요하다.

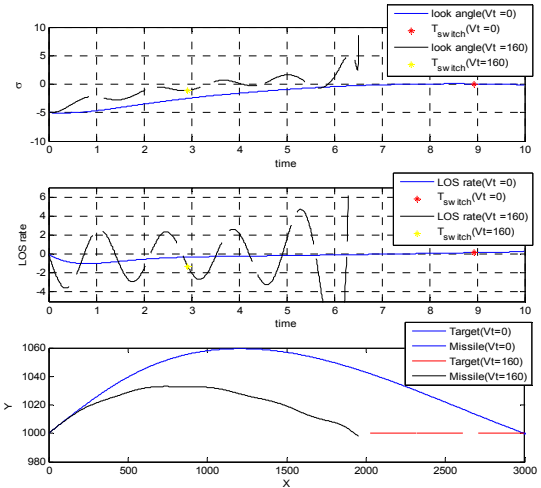


Fig. 5 시뮬레이션 결과 (관측각, 시선각 변화율, 궤적)

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구지원을 받아 수행되었습니다(계약번호 UD140081CD).

참고문헌

- [1] Y. Du, Q. Xia, and T. Guo, "Study on Stability of Strapdown Seeker Scale Factor Error Parasitical Loop," *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering*, Changchun, China, August 2010.
- [2] 김태훈, 박봉균, 권혁훈, 김윤환, 탁민제, "스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 안정성 해석," *한국항공우주학회지*, 제 39 권, 제 4 호, 2011 년, pp. 332-340.
- [3] 홍주현, 유창경, "스트랩다운 탐색기 기반 호밍루프 설계," *한국항공우주학회지*, 제 42 권, 제 4 호, 2014 년, pp. 317-325.