

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.4.332

스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 안정성 해석

김태훈*, 박봉균*, 권혁훈**, 김윤환**, 탁민제***

Stability Analysis of Missiles with Strapdown Seeker

Tae-Hun Kim*, Bong-Gyun Park*, Hyuck-Hoon Kwon**, Yoon-Hwan Kim** and Min-Jea Tahk***

ABSTRACT

A missile with a strapdown seeker should properly estimate line-of-sight(LOS) rate using its attitude information and the look angle of the seeker because LOS rate information in an inertial coordinate system, which is used for a proportional navigation(PN) homing guidance, can not be obtained directly. However, an unnecessary feedback loop(Parasite Loop) is formed in the guidance and control loop, and it may cause the guidance performance degradation or even the instability of the system(Parasite Effect). This paper presents estimation methods for the LOS rate information and effective ways to minimize the parasite effect using Routh-Hurwitz stability criterion. Various numerical simulations are also included to verify the proposed methods.

초 록

스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 경우, 비례항법 호밍유도를 위한 관성좌표계 기준 시선각속도 정보를 직접적으로 획득하지 못하기 때문에 유도탄의 자세정보와 탐색기의 지향각 정보를 활용하여 적절히 추정하여야 한다. 하지만, 시선각속도를 추정하는 방법에 따라 획득된 시선각속도 정보에 동체 자세각속도 정보가 포함되어 불필요한 피드백 루프(Parasite Loop)가 형성되고, 이로 인해 유도성능이 감소하거나 전체 유도조종루프가 불안정하게 되는 현상(Parasite Effect)이 발생하기도 한다. 본 논문에서는 비례항법 호밍 유도를 위한 시선각속도 정보 추정방법과 이에 따라 발생하는 Parasite Loop 원인을 살펴 보며, Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 Parasite Effect를 최소화하는 방안을 제시하도록 한다. 또한 다양한 시뮬레이션을 통해 제안한 방법에 대해 검증하도록 한다.

Key Words : Strapdown Seeker(스트랩다운 탐색기), Stability Analysis(안정성 해석), Routh-Hurwitz(루쓰허위츠), Parasite Loop(유해루프), PNG(비례항법유도)

1. 서 론

유도탄 가격의 1/3 이상을 차지하는 고가의 김발 영상탐색기는 경제적인 측면에서의 단점뿐만 아니라, 시스템의 복잡성, 그리고 유도탄 전체의 중량을 증가시키는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 유도탄 동체에 고정되는 스트랩다운(strapdown) 방식의 영상탐색기를 장착한 유도무기의 연구가 대두되고 있다. 스트랩

† 2011년 1월 7일 접수 ~ 2011년 3월 23일 심사완료

* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

** 정회원, LIG Nex1 PGM 2팀

*** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
교신저자, E-mail : mjtahk@fdcl.kaist.ac.kr
대전광역시 유성구 구성동 373-1

다운 탐색기는 김발시스템을 가지지 않기 때문에 유도탄의 전체 중량을 줄일 뿐만 아니라, 가격도 저렴하다는 장점이 있다. 또한 김발시스템에서 나타나는 기계적, 구조적 결함이 발생하지 않으며, 정비보수가 용이하고 유도탄에 탑재가 간단하여 스트랩다운 탐색기의 활용도가 클 것으로 여겨진다.

하지만, 김발 탐색기와는 달리 스트랩다운 탐색기는 유도탄 동체축과 시선(LOS) 간의 지향각 정보만을 제공하기 때문에, 비례항법 유도기법을 적용하기 위해서는 관좌좌표계 기준의 시선각속도 정보의 추정이 필요하고, 비례항법 이외의 유도기법을 적용하기 위해서는 지향각 정보로부터 표적과 유도탄간의 상대운동을 추정할 수 있는 필터의 설계가 요구된다. 참고문헌 [1]에서는 Unscented Kalman Filter(UKF)를 이용하여 상대운동을 추정하고 이를 종말 호밍유도에 활용하는 방안에 대해 논하였으며, 참고문헌 [2~4]에서는 $\alpha-\beta$ 필터로 시선각속도를 추정하여 비례항법 호밍유도를 적용한 기법을 제안하였다. 특히 이 논문에서는 시선각속도 추정 시 발생하는 자세각속도의 불필요한 피드백 루프(Parasite Loop)를 살펴보고, 유도조종루프를 불안정하게 만드는 현상(Parasite Effect)를 제거하기 위한 한 방법을 제시하였다. [5~6]에서는 탐색기와 자이로가 가지는 잡음특성 중 scale-factor error에 의해서 비례항법 유도 적용 시 시스템이 불안정해지거나 유도성능이 감소하는 문제점을 제시하였다.

본 논문에서는 비례항법 호밍유도를 위한 유도탄의 동체 자세운동 모델과 자동조종장치 모델을 고려하여 전체 페루프 유도조종루프를 구현하고, 유도명령 생성을 위한 시선각속도 추정방법에 대해 살펴본다. 또한 시선각속도 추정방법에 따라 발생하는 Parasite Loop의 원인을 분석하고, Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 페루프 시스템의 안정성 해석과 더불어 Parasite Effect를 최소화하기 위한 방안들에 대해서 기술하도록 한다.

II. 본 론

2.1 호밍유도의 선형모델

유도탄과 표적간의 호밍 유도과정을 나타내기 위해 그림 1에 도시된 중축운동에 대한 호밍 유도 기하학을 살펴보자. 우선 유도탄은 일정한 속도(V_M)로 비행하고, 표적은 상대적으로 작은 속도를 가진다고 하여 정지표적으로 가정하도록 한

다. 또한 받음각의 크기가 무시할 정도로 작다고 가정하여 유도탄의 수직 가속도(a_n)와 비행경로각(γ)간의 관계를 다음 식과 같이 정리한다.

$$a_n = V_M \dot{\gamma} \tag{1}$$

또한 유도탄 동체의 자세각 운동을 나타내기 위해 아래 식을 고려하면,

$$\dot{\theta} = \dot{\gamma} + \dot{\alpha} = \dot{\gamma} + (\alpha/\gamma) \cdot \dot{\gamma} \tag{2}$$

와 같고, 위 식에 (1)을 대입하여 수직 가속도와 유도탄 동체의 자세각속도 간의 전달함수를 다음과 같이 유도할 수 있다 [7~8].

$$\frac{\dot{\theta}}{a_n} = \frac{1}{V_M} (1 + T_\alpha s) \tag{3}$$

여기서 turning rate time constant는 다음과 같이 정의되며,

$$T_\alpha = \frac{\alpha}{\dot{\gamma}} \tag{4}$$

이 상수는 유도탄의 속도, 무게, 고도, 공력계수 등의 유도탄의 형상과 비행조건에 따라 변화하게 되는 값이다.

한편, 가속도 제어를 위한 유도탄의 자동조종 장치의 경우, 실제 시스템과 유사하게 나타내기 위해서는 3차 이상의 고차 시스템으로 표현되어야 하지만, 용이한 유도조종루프의 해석을 위해 식 (5)와 같이 시상수 τ 를 가지는 1차 시스템으로 정의하였다.

$$\frac{a_n}{a_{nc}} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{5}$$

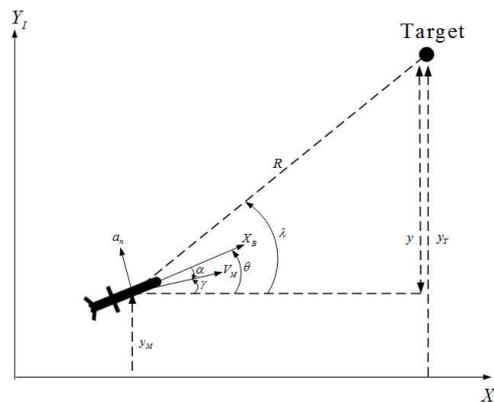


그림 1. 유도탄과 표적간의 호밍 유도 기하학

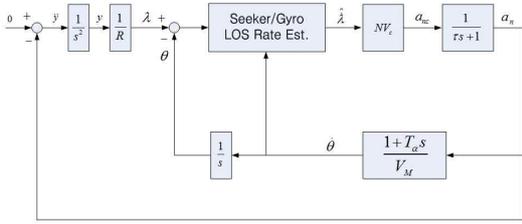


그림 2. 비례항법유도의 호밍 유도루프

비례항법유도로 호밍되는 유도탄의 페루프 유도조종루프를 small angle approximation 가정 하에, 식 (3)과 식 (5)의 전달함수를 이용하여 나타내면 그림 2에 도시된 블록다이어그램 형태가 된다. 시선각 $\lambda \approx y/R$ 으로 나타낼 수 있으며, 스트랩다운 탐색기가 동체의 X_B 축을 기준으로 장착되어 있다면 탐색기의 측정치는 지향각(Look Angle, σ)이 되며 이는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\sigma = \lambda - \theta \tag{6}$$

비례항법유도를 호밍 유도에 활용하기 위해서는 시선각속도($\dot{\lambda}$)의 정보가 필요한데, 스트랩다운 탐색기는 지향각만을 측정치로 제공하기 때문에, 유도탄의 INS를 통한 자세각 정보와 지향각 정보를 활용하여 시선각속도 정보를 추정할 수 있는 적절한 필터의 설계가 요구된다. 하지만, 시선각속도 추정 방법에 따라 전체 페루프 시스템의 유도성능을 저하시킬 수 있으며, 경우에 따라서는 불안정성을 야기할 수 있다. 다음 절에서는 그림 2의 시스템을 기반으로 시선각속도 추정 방법과 그에 따라 나타나는 Parasite Loop의 원인에 대해 살펴보도록 한다. 또한 호밍 유도루프의 안정성해석을 통해 Parasite Effect를 제거하기 위한 여러 방안들에 대해서 논의하도록 한다.

2.2 시선각속도 추정 및 Parasite Loop 원인 분석

탐색기 중심점이 유도탄 동체의 X_B 축을 지향하도록 탑재되어 있다는 가정 하에, 시선각속도의 추정방법을 2가지의 경우로 나누어서 고려해 본다. 또한 각 경우에 따라 발생하는 Parasite Loop 원인을 살펴보자.

2.2.1 시선각속도 추정방법 #1

그림 1을 통해 볼 수 있듯이, 관성좌표축을 기준으로 한 시선각은 탐색기에서 내어주는 지향각

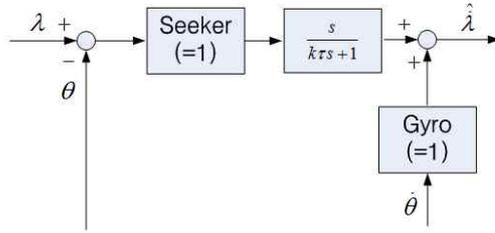


그림 3. 시선각속도 추정방법 #1

과 동체의 자세각 정보의 합으로 나타낼 수 있다. 그러므로 시선각속도는 지향각의 미분치와 동체의 자세각속도 정보를 더함으로써 쉽게 계산될 수 있다. 지향각의 미분치의 경우 탐색기의 정보를 받아 high-pass filter나 칼만 필터를 거쳐 구할 수 있으며, 본 연구에서는 그림 3과 같이 $k\tau$ 의 시상수를 가지는 1차 high-pass filter를 고려하였다. 여기서 상수 k 는 양의 실수 값을 가진다.

탐색기와 자이로의 센서 잡음 및 응답모델을 고려하지 않는다면, 그림 3과 같은 과정을 거쳐 추정되는 시선각속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\lambda} = \frac{s}{k\tau s + 1}(\lambda - \theta) + \dot{\theta} \tag{7}$$

위 식을 다시 정리한다면,

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{k\tau s + 1} \dot{\lambda} + \frac{k\tau s}{k\tau s + 1} \dot{\theta} \tag{8}$$

와 같이 되며, 식 (8)을 통해 시선각속도 추정치에는 $(k\tau s / k\tau s + 1) \dot{\theta}$ 만큼의 자세각속도 정보가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이 추정치는 비례항법 호밍유도를 위한 유도명령 생성에 활용되어 유도조종루프로 피드백되는데, 추정치에 포함된 자세각속도 정보가 동시에 피드백 됨으로써 유도성능을 저하시키거나 페루프 시스템을 불안정하게 만드는 결과를 초래하게 된다. 바로 시선각속도 추정치에 포함된 자세각속도 정보가 Parasite Loop의 원인이 되며, 이 요소를 제거하여야만 Parasite Effect가 발생하지 않는다.

2.2.2 시선각속도 추정방법 #2

앞 선 시선각속도 추정방법 #1은 시선각속도를 지향각의 미분치와 자세각속도의 합으로 구하였으며, 이는 시선각속도 추정치에 자세각속도 정보가 내포되어 Parasite Loop이 형성되는 것을

볼 수 있었다. 지향각과 자세각의 합으로 시선각을 구하고, 이를 미분하여 시선각속도를 추정한다면 이 추정 결과에서는 앞 선 Parasite Loop이 발생하지 않게 된다. 즉, 탐색기와 자이로는 잡음 특성 및 응답특성을 무시할 정도로 정밀하고 자이로의 출력을 수치 적분하여 정확한 자세각 정보를 얻을 수 있다면 다음과 같이 시선각속도를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}' &= \frac{s}{k\tau s + 1} \left[(\lambda - \theta) + \frac{1}{s} \theta' \right] \\ &= \frac{1}{k\tau s + 1} \lambda' \end{aligned} \quad (9)$$

탐색기의 지향각 정보와 유도탄의 INS 또는 자이로를 통해서 얻어지는 자세각 정보가 정확하다면, 식 (9)와 같이 시선각의 미분을 통해 자세각속도가 포함되지 않는 시선각속도를 추정할 수 있지만, 탐색기와 자이로의 scale-factor error가 존재한다면 이 또한 Parasite Loop을 형성하게 된다. 그림 4는 각 센서에 scale-factor error를 고려하여 시선각속도를 추정하는 블록다이어그램이다.

K_s, K_g 는 탐색기와 자이로의 scale-factor로서 이상적인 센서일 경우에는 각각 1의 값을 가지지만, scale-factor error가 존재할 경우에는 1이 아닌 양의 실수값을 가지게 된다. 이 scale-factor가 1일 경우(이상적인 센서조건)에는 그림 4의 시선각속도 추정치는 식 (9)와 같이 동체의 자세각속도 정보를 포함하지 않게 되지만, 1이 아닌 임의의 값을 가지면서 동시에 서로 다르다면

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}' &= \frac{s}{k\tau s + 1} \left[K_s(\lambda - \theta) + \frac{1}{s} K_g \theta' \right] \\ &= \frac{1}{k\tau s + 1} \left[K_s \lambda' + (K_g - K_s) \theta' \right] \end{aligned} \quad (10)$$

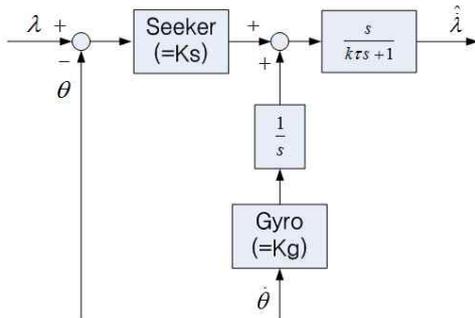


그림 4. 시선각속도 추정방법 #2

와 같이 나타내어지며, K_s 와 K_g 의 차이만큼의 자세각속도 정보가 포함되게 된다. 그러므로 시선각을 이용하여 시선각속도를 추정할 경우, 이상적인 센서조건에서는 Parasite Loop이 발생되지 않지만 센서의 scale-factor error가 고려된다면 이 또한 Parasite Effect가 생기게 된다.

2.3 Parasite Effect 제거 방안

앞 절에서 시선각속도 추정을 위한 2가지 방법과 각 경우에서 나타나는 Parasite Loop의 원인들을 살펴보았다. 본 절에서는 시선각속도 추정방법을 호밍 유도루프에 적용하여 전체 페루프 시스템의 안정성을 분석하고 Parasite Effect를 최소화할 수 있는 방안에 대해 논하도록 한다.

2.3.1 #1 추정방법에서 나타나는 Parasite Effect 제거 방안

그림 3에 도시된 시선각속도 추정방법 #1을 그림 2에 대입하여 호밍 유도루프를 다시 나타내면 그림 5와 같다. 여기서 센서 모델은 고려되지 않았으며, 식 (8)을 통해 시선각속도 추정치에는 자세각속도 정보가 포함되어 지속적으로 피드백 되는 것을 볼 수 있다. 그러므로 이 시스템의 경우에는 항상 Parasite Loop이 존재하게 되는데, 이는 유도조종루프의 불안정성을 야기하게 된다. 시스템의 안정성을 파악하기 위해 페루프의 전달함수를 구하고, 얻어지는 특성 방정식(characteristic equation)과 Routh-Hurwitz 안정성 판별기법을 이용하여 안정성 해석을 수행하도록 한다.

먼저 그림 5의 페루프 전달함수를 구하면

$$\frac{a_n}{\lambda'} = \frac{NV_c}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1) - \frac{NV_c}{V_M}(k\tau s)(1 + T_a s)} \quad (11)$$

와 같으며, 특성 방정식은

$$(\tau - N'T_a)k\tau s^2 + (1 + k - N'k)\tau s + 1 = 0 \quad (12)$$

이다. 여기서 $N' = NV_c / V_M$ 이고, $k = 0$ 일 경우에

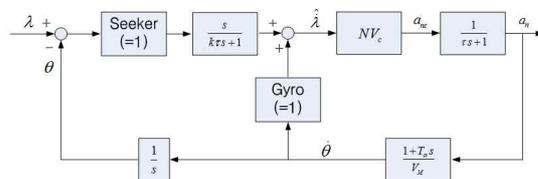


그림 5. 시선각속도 추정방법 #1을 적용한 호밍 유도루프

는 비례항법유도에 τ 의 시상수를 가지는 1차 자동중장치를 고려한 안정한 유도루프가 된다.

$$\left. \frac{a_n}{\lambda^n} \right|_{k=0} = \frac{NV_c}{(\tau s + 1)} \quad (13)$$

하지만, 실제 시스템에서는 high-pass filter의 계인이 $k > 0$ 이므로, 이로 인해 식 (12)의 특성 방정식이 양의 근을 가지면서 불안정해질 수 있다. $k > 0$ 인 조건에서 페루프 시스템이 안정할 조건(특성 방정식이 음의 근을 가질 조건)을 Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 구하면 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau/T_\alpha > N' \\ 1 > (N' - 1)k \end{aligned} \quad (14)$$

즉, #1 추정방법을 이용하여 유도루프를 설계시, 발생하는 Parasite Effect를 줄이고 시스템을 안정하게 만들기 위해서는 유도 이득 N' 을 τ/T_α 보다 작게 선정하고, 필터의 이득 k 를 최대한 작게 설계하여야 한다.

Parasite Loop을 완전하게 제거하기 위한 방법으로 자세각속도 정보에 응답 지연 보상기를 추가하는 방안이 있다. 식 (8)과 같이 시선각속도 추정치에 자세각속도 정보가 포함되는 이유는 지향각 미분치의 계산 결과와 자이로 정보간의 시간차가 존재하기 때문이다. 그러므로 그림 6과 같이 지향각 미분치 계산에서 발생하는 응답 지연효과만큼 자세각속도 정보에 1차 지연 필터를 추가하여 합한다면, 시선각속도 추정치는 다음과 같고,

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{k\tau s + 1} \lambda \quad (15)$$

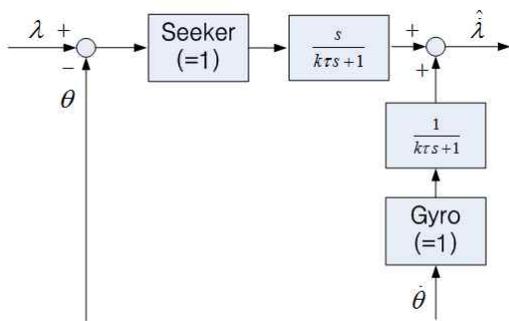


그림 6. 지연 보상을 통한 추정방법 #1에 의해 발생하는 Parasite Loop 제거

이를 적용한 호밍 유도루프의 전달함수는 다음과 같이 안정한 시스템으로 나타내어진다.

$$\frac{a_n}{\lambda^n} = \frac{NV_c}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1)} \quad (16)$$

이 방법은 참고문헌 [2~4]에서 제시한 방법과 동일한 방법이지만, 실제 시스템에 구현하기 위해서는 지향각 미분치 계산에서 발생하는 필터의 응답 지연효과를 정확히 예측하여야 하는 문제점이 있다. 만약 자세각속도 정보에 잘못 예측된 지연 필터를 추가한다면, 이 또한 Parasite Loop을 발생시키는 원인이 되기도 한다.

#1 시선각속도 추정방법을 이용할 경우, 시스템의 안정성을 확보하기 위해서는 식 (14)의 조건을 만족하도록 유도 이득과 high-pass filter의 이득을 선정하거나, 그림 6과 같이 자세각속도 정보에 응답 지연 보상기를 추가하여 Parasite Loop을 제거할 수 있다.

2.3.2 #2 추정방법에서 나타나는 Parasite Effect 제거 방안

#2의 시선각속도 추정방법은 정밀한 센서조건에서 지향각과 자세각 정보가 정확할 때 Parasite Loop이 발생하지 않지만, 센서의 scale-factor error가 존재하면 이에 의해 자세각속도가 유도루프로 피드백되는 현상이 나타나게 된다. 그림 4에 도시된 시선각속도 추정방법과 센서 모델을 그림 2의 호밍 유도루프에 적용하여 블록다이어그램으로 나타내면 그림 7과 같다. Scale-factor가 $K_s \neq K_g$ 이라면, 시선각속도 추정치는 식 (10)과 같으면서 Parasite Loop을 형성하는데, 이는 유도루프를 불안정하게 만들거나 유도성능을 저하시킨다.

그림 7의 호밍 유도루프의 페루프 전달함수를 구하면,

$$\frac{a_n}{\lambda^n} = \frac{NV_c K_s}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1) + \frac{NV_c}{V_M} (K_s - K_g)(1 + T_\alpha s)} \quad (17)$$

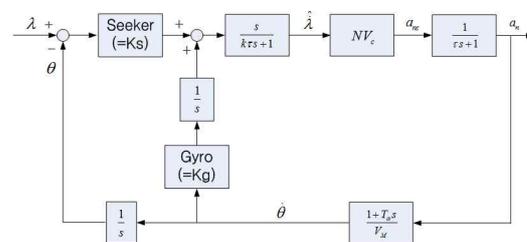


그림 7. 시선각속도 추정방법 #2를 적용한 호밍 유도루프

와 같고, 특성 방정식은 식 (18)과 같다.

$$k\tau^2 s^2 + (\tau + k\tau + N'K_d T_\alpha) s + (1 + N'K_d) = 0 \quad (18)$$

여기서 $K_d = K_s - K_g$ 이고, $K_s = K_g$ 라면 유도루프는 다음과 같이 안정한 시스템이 된다.

$$\frac{a_n}{k} \Big|_{K_s=K_g} = \frac{NV_c K_s}{(\tau s + 1)(k\tau s + 1)} \quad (19)$$

식 (17)의 유도루프가 안정한 조건이 되기 위해서는 Routh-Hurwitz 판별법에 의해서 특성 방정식의 모든 계수가 양의 값을 가져야 하는데, $K_d > 0$ 일 때에 위 조건을 항상 만족하는 것을 볼 수 있다. 즉, $K_s > K_g$ 면 특성 방정식은 음의 근을 가지면서 페루프 시스템은 항상 안정하게 된다. 하지만, $K_d < 0$ 일 경우에는 아래의 조건을 만족해야만 호밍 유도루프가 안정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{T_\alpha} &> -\frac{1}{1+k} N' K_d \\ N' K_d &> -1 \end{aligned} \quad (20)$$

위 조건을 이용하여 그림 7의 페루프 시스템의 안정 영역을 나타내면 그림 8과 같다. 그림에서 $x = N' K_d$, $y = \tau / T_\alpha$ 를 말하며 $K_d > 0$ 일때는 항상 안정한 조건이 되지만, $K_d < 0$ 일때는 안정한 영역이 제한되어 있는 것을 볼 수 있다. 만약 scale-factor error에 의해 유도루프가 불안정한 영역에 존재할 경우, k 의 크기를 키워 불안정한 조건을 커버할 수 있도록 안정 영역을 넓히거나, τ 를 증가시키거나 또는 N' 을 감소시켜 안정 영역 안으로 들어오게 만들어야 한다. 다시 말해,

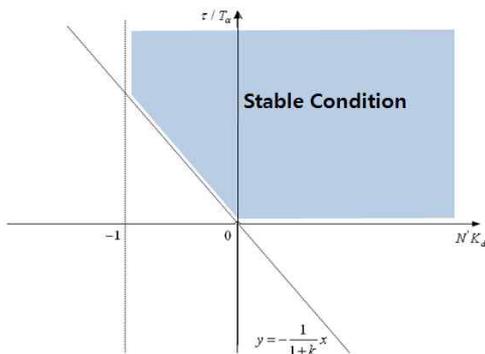


그림 8. 시선각속도 추정방법 #2를 적용한 호밍 유도루프의 안정 영역

시선각속도 추정을 위한 high-pass filter의 성능을 감소시키거나, 느린 응답특성을 가지도록 자동조종장치/필터를 설계하거나, 또는 유도 이득을 작게 선정하여야만 scale-factor error에 의해 발생하는 Parasite Effect를 줄일 수 있게 된다.

III. 수치 시뮬레이션

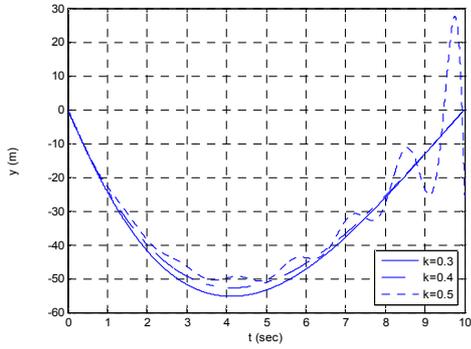
앞서 기술한 Parasite Effect를 살펴보기 위하여 그림 2의 선형운동을 기반으로 수치 시뮬레이션을 수행한다.

우선 관성좌표계의 X축을 기준으로 정지 표적과 유도탄이 동일선상에 있다고 가정($y(t_0) = 0$) 하였으며, 유도탄은 초기 $\theta(t_0) = 5^\circ$ 의 자세각으로 $300m/s$ 의 등속도를 가지고선 발사된다고 설정하였다. 또한 turning rate time constant $T_\alpha = 0.3sec$ 로 일정하며, 접근속도(V_c)는 유도탄의 속도와 동일하다고 가정하였다. 선형운동모델에서 상대거리는 $R \approx V_c(t_f - t)$ 로 설정할 수 있으며, 여기서 종말시간 $t_f = 10sec$ 라 하였다. 이를 기본 시뮬레이션 조건으로 하고, 이 외의 시뮬레이션 조건은 시선각속도 추정방법에 따라 다양하게 고려하였다.

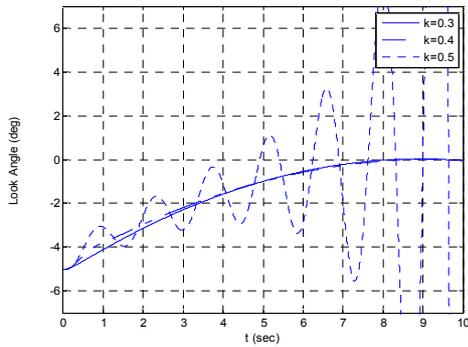
3.1 #1 시선각속도 추정방법 적용

#1의 시선각속도 추정방법에 유도 이득 $N = 3$ 을 적용하기 위해서는 식 (14)의 조건에 따라 자동조종장치의 시상수 τ 는 $N'T_\alpha$ 보다 커야하며, k 는 $1/(N'-1)$ 보다 작아야 한다. 그러므로 $\tau = 1sec$ 로 설정하고 $k = 0.3 \sim 0.5$ 로 변화(case 1) 하면서 호밍 유도루프의 거리오차, 지향각, 시선각속도 추정치의 응답을 살펴보도록 한다. 또한 $\tau = 1sec$, $k = 0.5$ 인 조건에서 그림 6과 같이 자세각속도 정보에 응답 지연 보상기를 적용(case 2) 한 경우의 시뮬레이션을 수행하도록 한다.

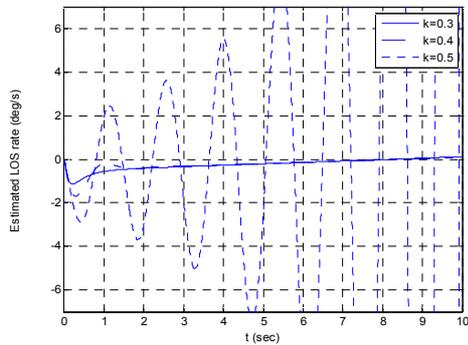
그림 9는 $\tau = 1sec$ 인 상태에서 $k = 0.3 \sim 0.5$ 로 변화시킨 case 1의 시뮬레이션 결과로서, 결과 그래프를 통해 k 가 증가할수록 점점 유도루프는 불안정해지는 것을 알 수 있다. 이는 k 가 증가하면서 Parasite Effect가 커지고 식 (14)의 안정조건을 만족시키지 못하면서 발생하는 현상으로, Parasite Loop에 의해 시스템이 안정하기 위해서는 자동조종장치의 시상수는 $N'T_\alpha$ 보다 커야하며



(a) 거리오차

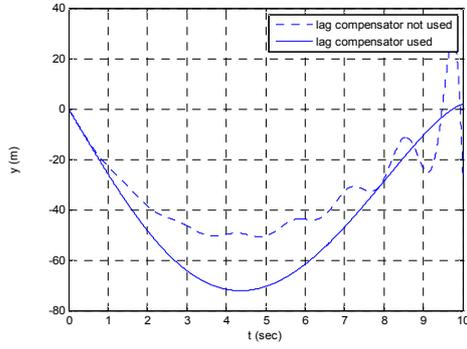


(b) 지향각

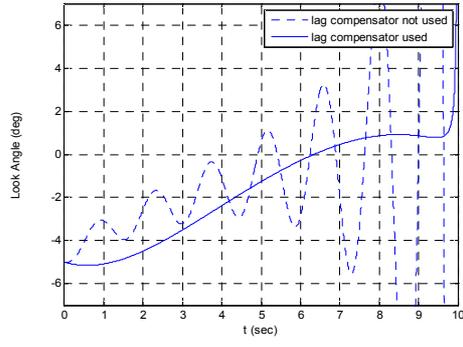


(c) 시선각속도 추정치

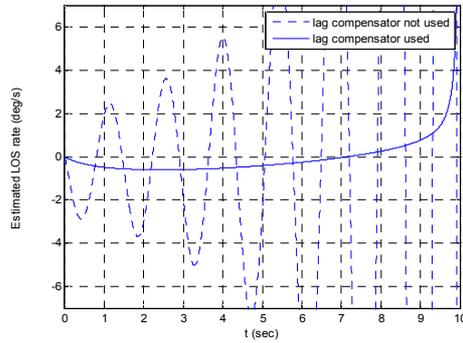
그림 9. case 1의 시뮬레이션 결과



(a) 거리오차



(b) 지향각



(c) 시선각속도 추정치

그림 10. case 2의 시뮬레이션 결과

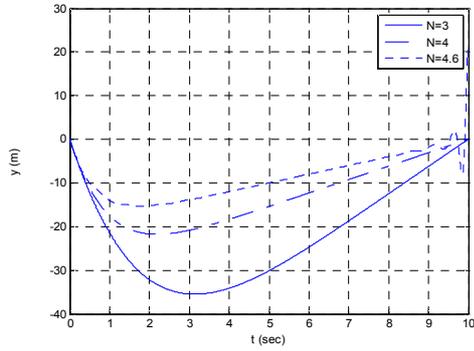
지향각 미분치 계산을 위한 필터는 이상적인 미분기의 형태를 가져야 한다. 또한 자동조종장치의 시상수가 고정되어 있다면 유도 이득을 안정 조건을 만족하도록 조정해야 한다.

그림 10은 $\tau = 1\text{sec}$, $k = 0.5$ 의 불안정한 조건에 대해 자세각속도 정보에 시간 지연효과를 추가한 case 2 결과로서, 그림을 통해 볼 수 있듯이 응답 지연 보상기를 추가함으로써 Parasite Loop이 제거되고 유도루프 시스템을 안정화시킬 수 있다.

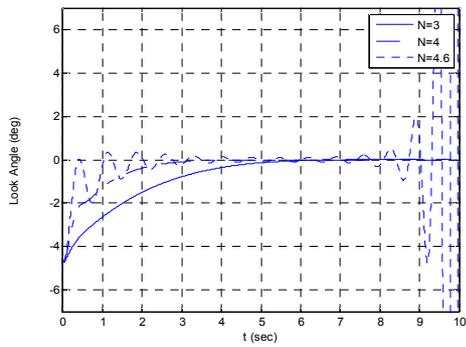
또한 이는 식 (14)의 안정 조건을 만족시킬 필요가 없다. 하지만, 지향각 미분치와 지연된 자세각속도 정보간의 시간차가 존재한다면 이 또한 시스템을 불안정하게 만드는 Parasite Effect가 존재하게 된다.

3.2 #2 시선각속도 추정방법 적용

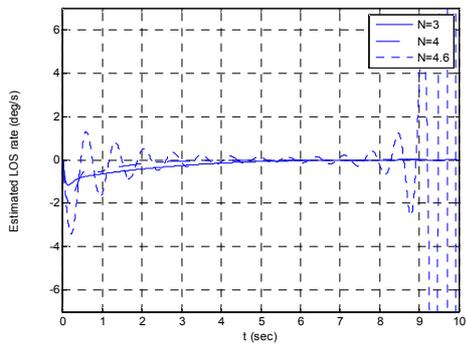
그림 7과 같이 #2의 추정방법에서 발생하는 Parasite Effect를 살펴보기 위해 기본 시뮬레이션 조건과 함께 $k = 0.1$, $K_s = 0.95$, $K_g = 1.1$ 을 고



(a) 거리오차

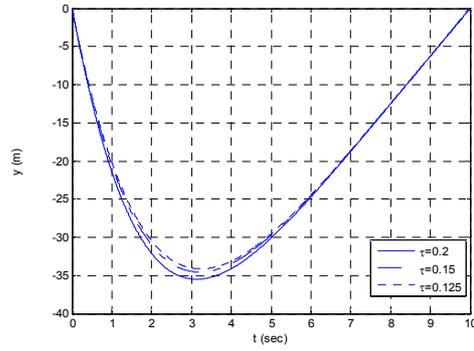


(b) 지향각

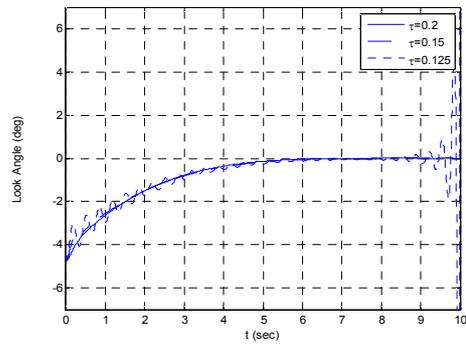


(c) 시선각속도 추정치

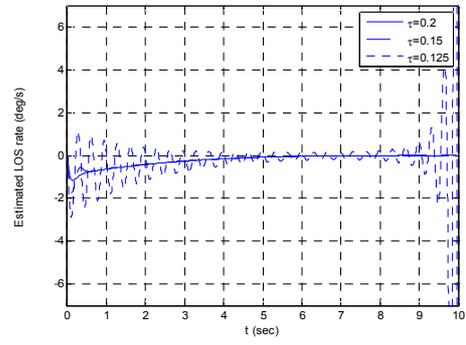
그림 11. case 3의 시뮬레이션 결과



(a) 거리오차



(b) 지향각



(c) 시선각속도 추정치

그림 12. case 4의 시뮬레이션 결과

려하였다. 우선 시상수 $\tau = 0.2\text{sec}$ 로 고정시키고 유도 이득을 3부터 4.6까지 증가(case 3)시키면서 변화하는 유도루프의 특성과 유도 이득을 3으로 고정시키고선 τ 를 0.125까지 감소(case 4)시킨 경우로 나누어서 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 11~12를 통해 볼 수 있듯이, scale-factor error와 필터, 자동조종장치의 시상수가 고정되어 있을 경우 유도 이득이 증가할수록 유도루프가 불안정해지고, 반대로 유도 이득이 고정되어 있을 경우 필터/자동조종장치의 응답이 빠르게 나

타날수록 불안정한 영역으로 다가가게 된다. 그러므로 scale-factor error를 고려하여 시선각속도 추정방법 #2를 적용할 경우, 안정 영역에 존재하기 위한 적합한 유도이득과 응답특성을 가지는 필터/자동조종장치의 설계가 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 비례항법 호밍유도를 위한 전체 페루프

유도조종 시스템을 고려하여, 시선각속도 추정에 따라 발생하는 Parasite Loop의 원인을 살펴보았다. 또한 Routh-Hurwitz 판별법을 이용하여 Parasite Loop에 의해 발생하는 유도조종루프의 불안정 조건을 구하고, Parasite Effect를 제거하여 시스템을 안정화시키는 방법에 대해 논하였다. 본 연구들 통해 알 수 있듯이, Parasite Loop은 시선각속도 추정방법에 따라 다양하게 존재할 수 있으며, 이에 대한 영향을 줄이기 위해서는 작은 유도 이득을 사용하거나, 느린 응답을 가지는 자동조종장치 및 필터의 설계가 필요하다. 추후 연구에서는 실제 시스템과 유사한 고차의 자동조종장치 모델을 기반으로 Parasite Loop에 의한 영향을 분석하고, 더불어 유도성능까지 분석하도록 한다.

후 기

본 연구는 LIG Nex1의 “스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도무기의 유도조종루프 설계 및 분석 연구” 과제의 지원을 받아 수행된 연구의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) 오승민, "스트랩다운 탐색기를 장착한 전술 유도탄의 UKF 기반 종말호밍 유도", *한국항공우*

주학회지, 제 38권 제 3호, 2010. 3, pp. 221~227.

2) 장세아, 유창경, 최기영, 탁민제, "스트랩다운 탐색기를 탑재한 휴대용 전술유도무기 유도루프 설계", *한국항공우주학회 2008년도 춘계 학술발표회*, 2008. 4, pp. 319~322.

3) 장세아, 유창경, 최기영, "스트랩다운 탐색기를 탑재한 유도탄의 Parasite Loop 보상", *제 15차 유도무기 학술대회*, 2009. 10.

4) S. A. Jang, C. K. Ryoo, K. Choi and M. J. Tahk, "Guidance Algorithm for Tactical Missiles with Strapdown Seeker", *SICE Annual Conference 2008*, Japan, Aug. 2008, pp. 2616~2619.

5) 김태훈, 김윤환, 권혁훈, 탁민제, 황성환, "스트랩다운 영상탐색기를 장착한 유도무기의 안정성 분석 연구", *제 5회 국방 정보 및 제어기술 학술대회*, 2009. 9.

6) R. K. Mehra and R. D. Ehrlich, "Air-to-Air Missile Guidance For Strapdown Seekers", *Proc. of 23rd Conf. on Decision and Control*, Las Vegas, NV, Dec. 1984, pp. 1109~1115.

7) P. Zarchan, "Tactical and Strategic Missile Guidance", 2nd ed., Washington, DC: AIAA Inc., 1994.

8) F. W. Nesline and P. Zarchan, "Radome induced miss distance in aerodynamically controlled homing missiles", *AIAA GN&C Conference*, Seattle, WA, Aug. 1984, pp. 99~115.