

# 칼만 필터를 이용한 비례항법유도 도달시간 추정기 설계

## A Time-to-go Estimator Design for Proportional Navigation Guided Missiles using Kalman Filters

황익호\*, 나원상, 박해리  
(Ick-Ho Whang, Won-Sang Ra, and Hae-Rhee Park)

**Abstract :** In this paper, we propose a new time-to-go estimation filter for PN guided missiles. The proposed estimator is derived based on the approximation of the length of the PNG homing trajectory that we newly introduced using the special coordinate system. The coordinate system is convenient for taking the target movement into account. In addition, compared with the previous time-to-go estimation techniques, the parameters required for evaluating the length can be obtained only with the seeker measurements. Moreover, the seeker measurement error statistics can effectively be considered since our filter is derived based on the Kalman filter theory. Simulation result for a typical anti-ship sea-skimming missile homing trajectory shows the excellent performance of the proposed filter.

**Keywords :** time-to-go, estimation, Kalman filter, proportional navigation guidance, anti-ship missiles

### I. 서론

도달시간(time-to-go)이란 현재시각부터 유도탄이 목표점에 도달할 때까지 소요되는 시간을 말한다. 이러한 도달시간은 유도탄의 유도조종 및 운용에 있어서 매우 중요하게 이용되고 있다. 도달시간은 최적유도제어를 구현하는 데 있어서 가장 중요한 매개변수일 뿐 아니라, 신관의 작동, 호밍 성공 판단, 유도중단 시점(guidance cut-off time)의 결정 등 유도탄의 운용에 있어서 일반적으로 많이 이용되고 있다. 특히, 대표적인 함대함 유도탄의 형태인 sea-skimming ASM(Anti-Ship Missile)의 경우에는 수직면과 수평면에 대하여 독립적으로 유도 알고리즘을 구성하는 경우가 많고, 이 경우 비행고도 등 수직면의 유도 알고리즘의 주요 이벤트 및 관련 계수들은 수평면의 유도비행궤적의 도달시간에 의하여 결정되는 구조를 가지게 된다. 또한, 적절한 시간에 탄두를 장전한다든지, 표적에 대한 공격방식을 결정한다든지, 또는 표적에 대한 호밍실패를 결정한다든지 하는 종말 유도 이벤트의 결정에도 종종 도달시간을 활용한다[1]. 본 논문에서는 2차원에서 비례항법유도(proportional navigation guidance) 비행궤적에 대한 도달시간 추정기를 설계하고 그 성능을 검토하였다.

도달시간을 추정하는 가장 간단한 방법은 표적까지 남은 거리를 접근속도(closing velocity)로 나누는 방법으로서, 표적과의 거리가 가깝거나 유도탄과 표적의 조우상황이 충돌삼각형(collision triangle)에 근접한 경우에는 상당히 정확한 추정치를 제공한다. 그러나 표적과의 거리가 멀고 초기 heading error가 존재하는 경우에는 곡선으로 형성되는 호밍궤적을 충분히 고려할 수 없으므로 상당한 추정오차를 유발한다.

이뿐만아니라 탐색기에서 제공하는 표적과의 상대거리 및 거리변화율 측정치만을 이용하여 도달시간 추정기를 구성하는 경우에는 탐색기 측정치의 불규칙오차로 인하여 추정치

에 상당한 잡음이 포함될 수 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 형태의 도달시간 추정기가 제안되었으며, 참고문헌 [2]의 결과에 이르러 기본적인 형태의 순환적 도달시간 추정방법이 제시되었다. 이 방법은 기존에 이용되어왔던 상대거리를 접근속도로 나누는 방법에 비하여 매우 우수한 성능을 보여주었으나, 도달시간 예측에 이용하는 측정치의 통계적 오차특성을 충분히 감안할 수 없는 한계를 보여 주었다. 한편, 참고문헌 [1]의 방법은 측정치 오차특성을 감안할 수는 있으나 표적의 운동을 충분히 반영하지 못하는 특성을 보인다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 본 논문에서는 표적의 이동에 따라 이동하는 좌표계를 정의하고, 이 좌표계에서 초기 heading error에 의하여 발생하는 곡선 호밍궤적을 고려하여 칼만필터를 적용함으로써 오차 특성이 고려된 필터형태의 도달시간 추정기를 제안하였다. 제안된 알고리즘은 전형적인 sea-skimming ASM의 종말호밍궤적에 대한 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검토하였다.

### II. 비례항법 유도 비행 궤적에 대한 도달시간 추정기 설계

#### 1. 비례항법 유도 비행궤적

본 절에서는 유도탄이 등속직선운동하는 표적에 대하여 비례항법유도를 이용하여 호밍하는 경우에 대한 비행궤적 및 그 길이를 계산한다. 유도탄의 비행궤적을 계산하기 위하여 표적에 중심을 두고 표적과 함께 등속직선운동하는 관성좌표계를 생각한다. 이때 좌표계의 X축은 시간  $i$ 에서 표적과 유도탄을 잇는 시선벡터로 정하고 Y축은 이 시선벡터에 수직인 방향으로 정한다. 이와 같이 시간  $i$ 에서 선택한 좌표계를  $L_i$ -좌표계라 하자. 그림 1은  $i$  이후의 시간  $t=k$  (즉,  $k \geq i$ )에서의 유도탄과 표적간의 관계를  $L_i$ -좌표계에서 도시한 것이다. 그림에서  $V_{rel}$ 은 유도탄과 표적간의 상대속도이며,  $\psi$ 는 유도탄과 표적간의 상대속도와 상대위치벡터(또는 시간  $t=k$ 에서의 시선벡터)가 이루는 heading 각,  $\lambda$ 는 현재 시간  $t=k$ 에서의 시선각이다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 5. 15., 채택확정 : 2008. 6. 30.

황익호, 나원상, 박해리 : 국방과학연구소

(ickho@add.re.kr/wonsang@add.re.kr/phelen@add.re.kr)

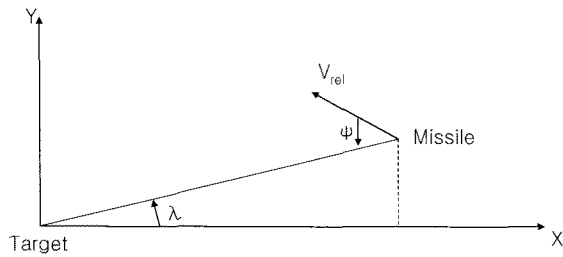


그림 1.  $L_i$ -좌표계에서의 교전 기하.

Fig. 1. Engagement geometry in  $L_i$ -frame.

유도탄이 충돌삼각형 근방에 있다고 가정하고 참고문헌 [3]의 방식을 적용하여 선형화된 유도탄 상대운동을 표현하면 다음과 같다[3].

$$\lambda \approx \frac{y}{x} \tag{1}$$

여기서

$$x \approx V_c t_{go} \tag{2}$$

이고,  $x$ ,  $y$ ,  $V_c$ 는 각각 상대위치의 X-좌표, Y-좌표, 접근속도이며,  $t_{go}$ 는 도달시간(time-to-go)이다.

유도탄이 비례항법 유도를 통하여 호밍한다고 가정하고 시간에 대한 미분을 변수 위의 점으로 표현하면

$$\dot{y} \approx -NV_c \dot{\lambda} \tag{3}$$

라 놓을 수 있고, (3)을 적분함으로써 다음 식을 얻는다.

$$\dot{y} = -NV_c \dot{\lambda} + c_1 \tag{4}$$

여기서  $N$ 은 비례항법상수(effective navigation ratio)이다. 이제 시간  $t=i$ 를 초기시간 0으로 설정하면,  $L_i$ -좌표계의 정의에 따라 다음과 같은 초기조건을 구할 수 있다.

$$y(0) = 0, \dot{y}(0) = -V_{rel} \psi_0 = \dot{y}_0 \tag{5}$$

(4)를 적분하고 선형화된 초기조건 (5)를 대입하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$y(t) = \frac{\dot{y}_0}{1-N} t_{go} \left[ \left( \frac{t_{go}}{t_f} \right)^{N-1} - 1 \right] \tag{6}$$

$$\dot{y}(t) = \frac{\dot{y}_0}{1-N} \left[ 1 - N \left( \frac{t_{go}}{t_f} \right)^{N-1} \right] \tag{7}$$

여기서  $t_f$ 는 유도종료시간,  $t_{go} = t_f - t$ 이다. (2)와 (7)을 이용

하면  $\frac{dy}{dx} = \dot{y} \left( -\frac{1}{V_c} \right)$ 를 얻을 수 있고, 따라서  $L_i$ -좌표계에서 계산된 시간  $i$  이후의 비행궤적 전체의 길이  $l_i$ 은 다음과 같이 근사하여 계산할 수 있다.

$$l_i = \left| \int_{x_i}^0 \sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2} dx \right| \approx \left| \int_{x_i}^0 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right| \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &= \left| \int_{x_i}^0 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{y}}{V_c} \right)^2 \right] V_c dt_{go} \right| \\ &= x_0 \left( 1 + \frac{1}{2(2N-1)} \left( \frac{\dot{y}_0}{V_c} \right)^2 \right) \\ &= x_0 \left( 1 + \frac{\psi_0^2}{2(2N-1)} \right) \end{aligned}$$

여기서 아래첨자 0은 모두 시간  $t=i$ 에서의 값을 나타낸다. (8)은  $L_i$ -좌표계에서의 유도탄의 비행궤적의 길이이므로 이 길이를  $L_i$ -좌표계에서 호밍궤적의 평균속력  $S_i$ 으로 나누어 주면 다음과 같은 도달시간의 근사식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} t_{go}(i) &= \frac{x_0}{S_i} \left( 1 + \frac{1}{2(2N-1)} \left( \frac{\dot{y}_0}{V_c} \right)^2 \right) \\ &= \frac{x_0}{S_i} \left( 1 + \frac{\psi_0^2}{2(2N-1)} \right) \end{aligned} \tag{9}$$

(9)를 살펴보면 시간  $t=i$ 에서의 도달시간은 그 시각에서의 상대거리  $x_0$ , 시선벡터와 상대속도간의 heading오차  $\psi_0$ ,  $L_i$ -좌표계 평균 호밍속력  $S_i$ 에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 또한, 정상적인 호밍유도가 수행되는 상황에서는  $L_i$ -좌표계에서의 유도탄과 표적간의 상대속력은 대체로 접근속도와 유사하게 된다. 따라서 (9)를 계산하기 위하여 필요한 변수는 다음과 같이 시간  $t=i$ 에서 탐색기로 측정할 수 있는 상대거리  $r(i)$ , 상대거리 변화율  $\dot{r}(i)$  시선변화율  $\dot{\lambda}(i)$  등을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_0 = r(i) \tag{10}$$

$$\psi_0 = \frac{\dot{y}_0}{V_c} = \frac{r(i)\dot{\lambda}(i)}{-\dot{r}(i)} \tag{11}$$

$$S_i \approx \sqrt{V_c^2 + \dot{y}_0^2} = V_c \sqrt{1 + \psi_0^2} \tag{12}$$

따라서, 탐색기 측정치와 위의 결과를 이용하여 적절한 필터를 구성함으로써 도달시간 추정기를 설계할 수 있다.

### 2. 도달시간 추정기 설계

본 절에서는 앞 절의 결과를 이용하여 탐색기 측정치로부터 도달시간을 추정하는 추정필터를 설계한다. 도달시간 추정기의 기본적인 설계개념은 매시간  $L_k$ -좌표계를 새로 정의하고, 이 좌표계에서 예측한 도달시간인 (9)의 결과를 측정치로 고려하여 필터를 구성하는 것이다. 전술하였듯이, 시간  $t=k$ 에서의  $L_k$ -좌표계의 갱신 및 (9)의 도달시간 추정식의 계산을 위한 파라미터는 탐색기의 측정치로부터 획득한다. 그러나 이 측정치들은 측정오차를 가지고 있으므로 그 통계적 특성을 이용하여 칼만필터를 적용함으로써 보다 양호한 성능의 도달시간 추정기를 구성할 수 있다. 본 논문에서 제안한 도달시간 추정기는 상대거리-접근속도 추정기, heading오차 추정기와 이들 추정기의 추정치를 이용하여 도달시간을 추정하는 도달시간 추정기로 구성된다.

상대거리, 상대거리 변화율, 시선변화율에 대한 탐색기 측

표 1. 상대거리-접근속도 추정기.

Table 1. Range-closing velocity estimator.

<p><b>System Propagation:</b></p> $P_{rvc}(k+1 k) = F_{rvc} P_{rvc}(k k) F_{rvc}^T + Q_{rvc}(k),$ $\hat{x}_{rvc}(k+1 k) = F_{rvc} \hat{x}_{rvc}(k k)$ <p>여기서, <math>\hat{x}_{rvc}(k k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_0(k k) \\ \hat{V}_c(k k) \end{bmatrix}</math>, <math>F_{rvc} = \begin{bmatrix} 1 &amp; -\Delta t \\ 0 &amp; 1 \end{bmatrix}</math>.</p> <p><b>Measurement Update:</b></p> $K_{rvc}(k+1) = P_{rvc}(k+1 k) [P_{rvc}(k+1 k) + R_{rvc}(k+1)]^{-1}$ $P_{rvc}(k+1 k+1) = [I - K_{rvc}(k+1)] P_{rvc}(k+1 k)$ $\hat{x}_{rvc}(k+1 k+1) = \hat{x}_{rvc}(k+1 k) + K_{rvc}(k+1) \left( \begin{bmatrix} r_m(k+1) \\ -\dot{r}_m(k+1) \end{bmatrix} - \hat{x}_{rvc}(k+1 k) \right)$
---

정치를 각각  $r_m(i)$ ,  $\dot{r}_m(i)$ ,  $\dot{\lambda}_m(i)$  라 하고, 이들이 각각 다음과 같이 영평균 백색잡음을 가지는 선형확정방정식으로부터 얻어진다고 모델링하자.

$$r_m(i) = r(i) + v_i^r, \quad v_i^r \sim N(0; R_i^r) \quad (13)$$

$$\dot{r}_m(i) = \dot{r}(i) + v_i^{\dot{r}}, \quad v_i^{\dot{r}} \sim N(0; R_i^{\dot{r}}) \quad (14)$$

$$\dot{\lambda}_m(i) = \dot{\lambda}(i) + v_i^{\dot{\lambda}}, \quad v_i^{\dot{\lambda}} \sim N(0; R_i^{\dot{\lambda}}) \quad (15)$$

여기서  $N(m; R)$  은 평균  $m$ , 분산  $R$  인 정규분포를 가지는 확률변수(random variable)임을 의미한다.

상대거리-접근속도 추정기는 탐색기의 상대거리 및 그 변화를 측정치를 이용하여  $t=k$  에서의 상대거리와 접근속도의 추정치인  $\hat{x}_0(k|k)$  와  $\hat{V}_c(k|k)$  를 추정하는 필터로서, 접근속도가 시간에 대하여 거의 변화하지 않는다는 가정하에 칼만필터[4]를 적용하여 표 1과 같이 설계하였다.

헤딩오차 추정기는 (11)의  $\psi_0$  를 추정하는 필터로서 접근속도가 거의 일정하며, (3)으로 주어지는 비례항법유도를 이용하여 호밍한다는 가정하에 설계되었다. 이러한 가정에 입각하여 (16)의 근사화된 운동방정식을 고려하여 헤딩오차의 운동모델을 구하였다.

$$\frac{d}{dt} \psi \approx \frac{\ddot{y}}{V_c} = \frac{-N V_c \dot{\lambda}}{V_c} = -N \dot{\lambda} \quad (16)$$

샘플링 간격을  $\Delta t$  라 하고 (16)을 이산화하고, (11)의 관계를 이용하여 측정모델을 설정하면, 다음과 같이 칼만필터를 구성하기 위한 시스템모델 및 측정모델을 구성할 수 있다.

$$\psi_0(k+1) = \psi_0(k) - N \Delta t \dot{\lambda}_m(k) + w_k^\psi \quad (17)$$

$$z_k^\psi = \frac{r_m(k) \dot{\lambda}_m(k)}{\hat{V}_c(k|k)} = \psi_0(k) + v_k^\psi \quad (18)$$

여기서  $w_k^\psi \sim N(0; Q_k^\psi + (N \Delta t)^2 R_k^{\dot{\lambda}})$ ,  $v_k^\psi \sim N(0; R_k^\psi)$  이며,  $R_k^\psi$

는  $R_k^\psi \approx \left( \frac{r_m(k)}{\hat{V}_c(k|k-1)} \right)^2 R_k^{\dot{\lambda}} + \left( \frac{\dot{\lambda}_m(k)}{\hat{V}_c(k|k-1)} \right)^2 R_k^r$  로 근사화하

표 2. 헤딩오차 추정기.

Table 2. Heading error estimator.

<p><b>System Propagation:</b></p> $P_\psi(k+1 k) = P_\psi(k k) + Q_k^\psi + (N \Delta t)^2 R_k^{\dot{\lambda}}$ $\hat{\psi}_0(k+1 k) = \hat{\psi}_0(k k) - N \Delta t \dot{\lambda}_m(k)$ <p><b>Measurement Update:</b></p> $K_\psi(k+1) = P_\psi(k+1 k) [P_\psi(k+1 k) + R_{k+1}^\psi]^{-1}$ $P_\psi(k+1 k+1) = [I - K_\psi(k+1)] P_\psi(k+1 k)$ $\hat{\psi}_0(k+1 k+1) = \hat{\psi}_0(k+1 k) + K_\psi(k+1) \left( \frac{r_m(k+1) \dot{\lambda}_m(k+1)}{\hat{V}_c(k+1 k)} - \hat{\psi}_0(k+1 k) \right)$ <p>여기서, <math>R_k^\psi \approx \left( \frac{r_m(k)}{\hat{V}_c(k k-1)} \right)^2 R_k^{\dot{\lambda}} + \left( \frac{\dot{\lambda}_m(k)}{\hat{V}_c(k k-1)} \right)^2 R_k^r</math></p>
---

여 적용한다. 이와 같은 필터모델에 대하여 칼만필터를 적용하면 표 2와 같은 헤딩오차 추정기를 구할 수 있다.

도달시간 추정기를 설계하기 위한 시스템 모델은 현지점에서의 도달시간은 이전에 추정된 도달시간에서 현재까지 경과된 시간만큼 줄어든 것이라는 사실에 기반하여 다음과 같이 유도하였다.

$$t_{go}(k+1) = t_{go}(k) - \Delta t + w_k^{Tgo}, \quad w_k^{Tgo} \sim N(0; Q_k^{Tgo}) \quad (19)$$

여기서  $Q_k^{Tgo}$  는 도달시간 모델의 오차 공분산으로서 탐색기 등의 센서와 유도조종컴퓨터간의 통신 지연, 유도탄 및 표적 운동의 불확실성으로 인한 교전기하의 변화, 유도조종컴퓨터 내에서의 계산프로세스의 계산시간 변화 등의 불확실성을 고려하여 결정한다.

도달시간 추정기의 측정치는 (9)의 결과를 기반으로 하여 설계하였다. (9)에 (10)-(12)의 결과를 대입하고  $\hat{\psi}_0$  의 2차식으로 근사한 후, 표 1 및 표 2의 추정치를 대입하면 다음과 같다.

$$z_k^{Tgo} = \frac{\hat{x}_0(k|k)}{\hat{V}_c(k|k) \sqrt{1 + \hat{\psi}_0(k|k)^2}} \left( 1 + \frac{\hat{\psi}_0(k|k)^2}{2(2N-1)} \right) \approx \frac{\hat{x}_0(k|k)}{\hat{V}_c(k|k)} \left( 1 + \frac{1-N}{2N-1} \hat{\psi}_0(k|k)^2 \right) \quad (20)$$

이제  $\hat{x}_0$ ,  $\hat{V}_c$ ,  $\hat{\psi}_0$  의 추정오차를 각각 그 변수의 앞에  $\Delta$  를 붙여서 표현하고,  $\Delta \hat{x}_0$ ,  $\Delta \hat{V}_c$  와  $\Delta \hat{\psi}_0$  사이의 상관도가 매우 낮다고 가정하자. (20)을 테일러 급수로 전개하여 추정오차 확률변수에 대한 2차 모멘트까지만을 취하여 근사시키면 다음과 같은 측정치 모델을 얻을 수 있다.

$$z_k^{Tgo} = \frac{(x_0(k) + \Delta \hat{x}_0(k|k)) \left( 1 + \frac{(1-N)(\psi_0(k) + \Delta \hat{\psi}_0(k|k))^2}{2N-1} \right)}{[V_c(k) + \Delta \hat{V}_c(k|k)]} \approx t_{go}(k) + b_k^{Tgo} + v_k^{Tgo} \quad (21)$$

표 3. 도달시간 추정기.

Table 3. Time-to-go estimator.

<p><b>System Propagation:</b></p> $P_{Tgo}(k+1 k) = P_{Tgo}(k k) + Q_k^{Tgo},$ $\hat{i}_{go}(k+1 k) = \hat{i}_{go}(k k) - \Delta t$ <p><b>Measurement Update:</b></p> $K_{Tgo}(k+1) = P_{Tgo}(k+1 k) [P_{Tgo}(k+1 k) + R_{k+1}^{Tgo}]^{-1}$ $P_{Tgo}(k+1 k+1) = [I - K_{Tgo}(k+1)] P_{Tgo}(k+1 k)$ $\hat{i}_{go}(k+1 k+1) = \hat{i}_{go}(k+1 k) + K_{Tgo}(k+1) (z_{k+1}^{Tgo} - b_{k+1}^{Tgo} - \hat{i}_{go}(k+1 k))$ <p>여기서, <math>b_k^{Tgo}</math> 와 <math>R_k^{Tgo}</math> 는 (22), (23)으로 주어짐.</p>
---

여기서,  $v_k^{Tgo} \sim N(0; R_k^{Tgo})$  이고,  $M = \frac{(1-N)}{(2N-1)}$  이며,

$$b_k^{Tgo} = M \frac{\hat{x}_0(k|k)}{\hat{V}_c(k|k)} P_\psi(k|k), \tag{22}$$

$$R_k^{Tgo} = \left( \frac{1 + M \hat{\psi}_0(k|k)}{\hat{V}_c(k|k-1)} \right)^2 [1 \ 0] P_{rvc}(k|k) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \left( \frac{\hat{i}_{go}(k|k-1)}{\hat{V}_c(k|k-1)} \right)^2 [0 \ 1] P_{rvc}(k|k) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \left( 2M \frac{\hat{x}_0(k|k-1) \hat{\psi}_0(k|k-1)}{\hat{V}_c(k|k-1)} \right)^2 P_\psi(k|k) \tag{23}$$

이다. 따라서, (19)와 (21)-(23)에 대하여 칼만필터를 적용하여 표 3과 같은 도달시간 추정기를 유도할 수 있다.

전체적인 도달시간 추정기는 표 1과 표 2의 추정기를 이용하여 상대거리, 접근속도, 헤딩오차를 추정하고, 그 추정치를 이용하여 다시 한번 표 3의 필터를 구동하는 방식으로 구현된다. 비록 3개의 필터가 동시에 구동되어야 하지만 1차 필터 2개와 2차필터 1개로만 이루어져 있으므로 전체적인 계산량은 대단히 적을 것으로 예상되어 실시간 구현에 적합할 것으로 기대된다.

**III. 시뮬레이션 결과 검토**

II장에서 제안한 도달시간 추정기에 대하여 시뮬레이션을 통하여 성능을 검토하였다. 시뮬레이션은 전형적인 sea-skimming 대함 유도탄의 수평면 호밍궤적에 대하여 수행되었다. 시뮬레이션에 이용된 조건들은 다음과 같다.

- 유도탄과 표적간의 초기 거리 = 5Km
- 유도탄과 표적간의 초기 헤딩오차 = 30°
- 표적속도 = [15 15] [m/s]
- 비례항법유도 유효항법상수 = 3
- 탐색기 거리측정오차 표준편차 = 50m
- 탐색기 접근속도 측정오차 표준편차 = 20m
- 탐색기 시선각 측정오차 표준편차 = 0.3°
- 탐색기 시선각 속도 측정오차 표준편차 = 0.5°

이 조건에 따라 작성된 비행궤적은 그림 2와 같다. 그림에

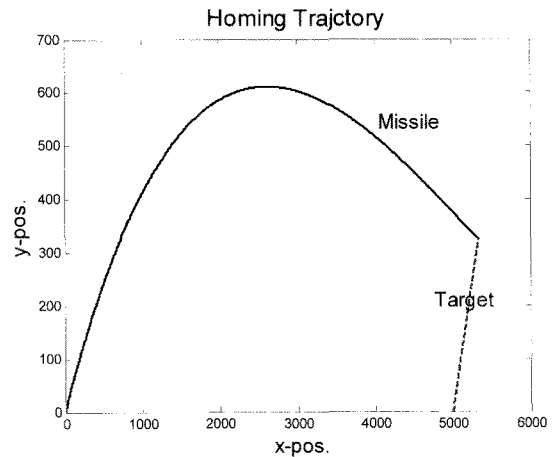


그림 2. 시뮬레이션에 이용된 호밍궤적.

Fig. 2. Homing trajectory for the simulation.

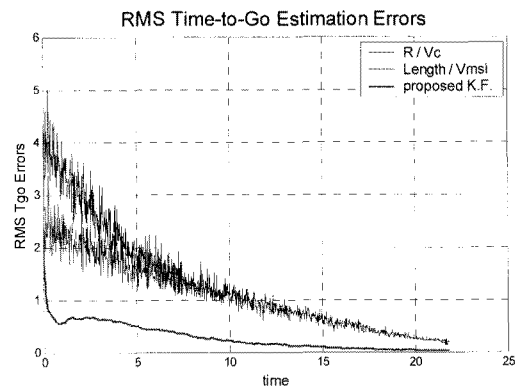


그림 3. 도달시간 추정치에 대한 RMS 오차.

Fig. 3. RMS errors for time-to-go estimation.

서 볼 수 있는 바와 같이 유도탄의 비행궤적은 초기 헤딩오차와 표적의 이동에 따라 곡선궤적을 이루게 되므로 단순히 상대거리를 접근속도로 나누는 방법으로는 정확한 도달시간을 얻기 어려울 것을 예상할 수 있다.

필터 설계를 위하여 이용된 공정잡음 공분산 값은 다음과 같다.

- 상대거리-접근속도 추정기  $Q_{rvc}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/4 \end{bmatrix}$
- 헤딩오차 추정기  $Q_k^\psi = 0.01 \text{ deg}^2$
- 도달시간 추정기  $Q_k^{Tgo} = 0.01 \text{ sec}^2$

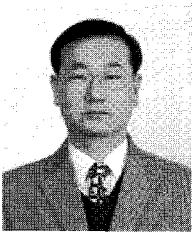
도달시간 추정기의 성능을 검토하기 위하여 (i)단순히 상대거리를 접근속도로 나누는 방법, (ii) (9)에 탐색기 측정치를 직접 대입하는 방법, (iii) 제안된 칼만필터를 이용하는 방법을 비교하였다. 참고로 (ii)의 방법으로 획득한 결과는 참고문헌 [2]의 결과와 유사한 성능을 보인다. 그림 3은 상기한 조건에 대하여 50회의 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였을 때 발생한 도달시간 추정오차의 RMS(Root Mean Squares)값을 비교한 것이다. 그림을 살펴보면 제안된 필터는 다른 어떠한 필터에 비해서도 매우 우수한 성능으로 도달시간(time-to-go)을 추정하고 있음을 알 수 있다.

**VI. 결론**

본 논문에서는 수평면에서 비례항법유도를 수행하는 sea-skimming ASM에 적용할 수 있는 실제적이고 효과적인 도달 시간 추정기를 제안하였다. 도달시간 추정기는 유도탄의 호밍레적을 근사화하고 센서오차를 동시에 고려하여 적절한 칼만필터를 구성함으로써 구성하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 방법은 우수한 도달시간 추정성능을 보여주어, 실제 시스템에 적용시 효과적으로 유도성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

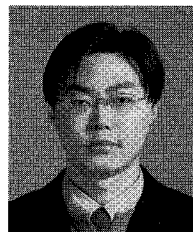
**참고문헌**

- [1] 황익호, “함대함 유도탄을 위한 Time-to-go 추정기설계,” 유도무기 학술대회 논문집, 2001.
- [2] M. J. Tahk, C. K. Ryoo, H. Cho, “Recursive time-to-go estimation for homing guidance missiles,” *IEEE Trans. on Aerosp. & Electr. Syst.*, Jan. 2002.
- [3] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, 2nd ed., vol. 157, Progress in Astronautics and Aeronautics, A Volume in the AISS Tactical Missile Series, 1994.
- [4] F. L. Lewis, *Optimal Estimation*, John Wiley & Sons, 1986.



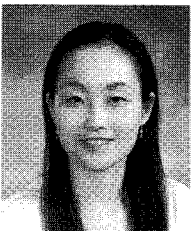
**황 익 호**

1988년, 1990년, 1995년 서울 대학교 공과대학 제어계측공학과 공학사, 공학석사, 공학박사. 1995년~현재 국방과학연구소 유도조종부 책임연구원. 관심분야는 유도조종기법, 추정론, 표적추적필터 등.



**나 원 상**

1998년 연세대학교 공과대학 전기공학과(공학사). 2000년 동 대학 대학원 전기 컴퓨터공학과(공학석사). 2000년~현재 국방과학연구소 유도조종부 선임연구원. 관심분야는 강인상태추정기법, 유도조종기법 등.



**박 해 리**

2001년 충남대학교 전자공학과 학사. 2003년 KAIST 전기 및 전자공학 석사. 2003년~현재 국방과학연구소 재직. 관심 분야는 의도 추출, 모델링 & 시뮬레이션.