

## 초고속 표적의 탄도계수와 예상요격지점 정확도의 상관관계 분석 연구

이동관<sup>\*,1)</sup> · 조길석<sup>1)</sup> · 신진화<sup>1)</sup> · 김지은<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소

### An Analysis Study about Relationship between Ballistic Coefficient and Accuracy of Predicted Intercept Point of Super-High Speed Targets

Dong-Gwan Lee<sup>\*,1)</sup> · Kil-Seok Cho<sup>1)</sup> · Jin-Hwa Shin<sup>1)</sup> · Ji-Eun Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Agency for Defense Development, Korea

(Received 10 January 2014 / Revised 10 March 2014 / Accepted 29 March 2014)

#### ABSTRACT

A recent air defense missile system(ADMS) is required to have a capability to intercept super-high speed targets such as tactical ballistic missiles(TBMs) by performing engagement control efficiently. The air defense missile system should be ready to engage the TBMs as soon as the ADMS detects TBMs because falling velocity of TBM is very high and remaining time interval to engage TBM is very short. As a result, the ADMS has to predict the trajectories of TBMs accurately with estimated states of dynamics to generate predicted intercept point(PIP). In addition, it is needed to engage TBMs accurately via transmitting the obtained PIP data to the corresponding intercept missiles. In this paper, an analysis about the relationship between ballistic coefficient and PIP accuracy which is depending on geodetic height of the first detection of TBM is included and an issue about effective engagement control for the TBM is considered.

Key Words : Tactical Ballistic Missile(전술탄도미사일), Interacting Multiple Model Filter(상호작용다수모델필터), Predicted Intercept Point(예상요격지점), Engagement Control System(교전통제시스템)

#### 1. 서론

미래의 전장 환경뿐만 아니라 현대전에서도 그 위협의 수준이 나날이 증가하고 있는 단거리 탄도미사

일(TBM : Tactical Ballistic Missile)과 같은 초고속 표적에 대한 하층방어무기체계 구축에 대한 필요성은 지속적으로 대두되고 있다. 탄도탄 요격체계는 단거리 초고속 표적에 대하여 효과적인 교전통제를 수행하고, 이를 요격할 수 있는 정밀교전 능력이 필수적으로 요구된다. 초고속 표적의 궤적은 Boost Phase, Ballistic Phase, Reentry Phase와 같이 세 단계로 분류된다<sup>6,7)</sup>.

\* Corresponding author, E-mail: leedg@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

방어무기체계는 Boost Phase에서 비행 중인 초고속 표적의 정보를 획득하는 것이 탄도미사일을 요격하고 방어하는 임무를 효과적으로 수행하는 데 매우 유리하다. 그러나 실제로 하층방어무기체계는 Ballistic Phase에서 비행하는 초고속 표적에 대해 탐지/추적이 가능하며, 항공기 표적에 비하여 탐지부터 요격까지 매우 짧은 여유 시간을 가지게 된다. 센서에 의해 획득된 초고속 표적 데이터를 짧은 교전 가능시간 동안 교전통제에 활용하기 위해서는 먼저 초고속 표적에 대한 상태추정에 대한 연구가 선행되어야 하며, 최근에는 IMM(Interacting Multiple Model) 필터를 사용한 방법들이 제안되고 있고<sup>[1-3]</sup>, 이러한 상태추정 필터는 위치, 속도 추정치에 대한 빠른 수렴성이 요구된다. 또한 센서는 위치 측정치만 제공하는 반면에 정밀한 교전통제를 위해서는 표적의 정확한 속도 정보가 필요하다. 거리 방향의 속도 크기를 제공하는 센서의 사용도 가능하지만, 교전통제 관점에서 그 속력이 유용한 시점은 이미 교전이 가능하지 않은 시점이라는 문제가 있다. 요격체계는 신속하고 정밀한 요격을 위하여 조기경보체계로부터 수신되는 큐잉정보를 이용하여 초고속 표적이 날아갈 예상 비행궤적에 대해 표적을 탐지/추적을 수행하여 획득된 표적 정보를 이용하여 교전정보를 생성하여야 하며, 업링크를 통해 요격 유도탄으로 표적정보를 제공함으로써 정밀하게 표적을 요격해야 한다. 탄도탄은 추력이 종료되는 시점 이후부터는 추력이 종료될 때의 고도, 속도에 의해 결정되는 궤적을 따라 무유도로 자유 비행을 하게 된다<sup>[8]</sup>. 대기의 영향이 없는 고고도에서는 중력의 영향만을 받아 정해진 궤적을 따라 비행하지만, 대기층으로 재진입 할 때는 대기에 의한 항력의 영향이 커지기 때문에 감속과 함께 비행궤적이 정해진 궤적에서 변화될 가능성이 매우 크게 존재한다. 탄도탄의 상태변수를 추정하기 위해서는 표적의 운동을 기술하는 동역학 모델이 필요한데, 전술한 바와 같이 추력 종료 이후에는 자유낙하 비행을 하기 때문에 탄도탄 표적은 항공기에 비해 상대적으로 정확한 모델링을 할 수 있다는 이점이 있다. 그러나, 탄도탄 운동모델에 필요한 탄도계수와 같은 매개변수와 매우 큰 비선형성이 항공기에 대한 상태변수를 추정하는 것보다 탄도탄의 상태변수를 추정하는 것을 더욱 어렵게 만든다. 이에 탄도탄의 상태변수를 추정하는 필터들은 이러한 비선형 특성을 고려하여 EKF(Extended Kalman Filter) 형태를 사용하고 있으며, 탄도계수를 직·간접적으로 추정

하여 사용하고 있고, EKF의 발산을 방지하기 위한 연구가 수행되고 있다.

이에 본 논문에서는 예상요격지점을 산출함에 있어 탄도탄 표적의 최초 탐지 고도가 탄도계수 추정과 표적 상태변수 추정필터의 안정화 및 예상요격지점의 정확도에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하고, 이를 기반으로 탄도탄 정밀요격을 위한 정밀 교전통제 기법에서 고려해야 할 사항들을 고찰하고자 한다.

## 2. 탄도탄 상태변수 추정필터

탄도탄 정밀교전통제를 위해서는 센서에 의해 획득된 탄도탄 데이터를 기반으로 탄도탄의 정밀한 상태변수 추정이 선행되어야 하며, 추정된 위치와 속도를 이용하여 탄도탄의 예상요격지점을 산출하여야 한다. 최근에는 IMM 기반의 필터를 사용하는 방안들이 제안되고 있다<sup>[1-3]</sup>. IMM 구조는 단일 형태의 EKF가 발산할 수 있는 경우를 방지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 [2, 9]와 [4, 10]에서 각각 제안된 Layered IMM(LIMM), VS-IMM(Variable Structure Interacting Multiple Model)을 이용하여 탄도탄의 상태변수를 추정하고, 이러한 서로 다른 구조의 상태변수 추정필터를 통해 탄도탄 표적의 최초 탐지 고도가 탄도계수 추정과 예상요격지점의 정확도에 미치는 영향을 분석하고, 그 경향 및 결과를 고찰하고자 한다. LIMM은 단일 형태의 EKF가 발산하는 것을 방지하기 위하여 센서 잡음 특성과 공기밀도 모델의 매개변수를 이용하여 2가지 가설집합을 설정하고, 각각의 가설에 해당하는 필터 동력학 모델은 탄도계수를 간접적으로 추정하여 사용할 수 있는 형태이다. 이에 반해 VS-IMM은 탄도계수를 가설집합으로 설정하고 구조를 변화시키면서 각 가설의 모드 확률을 가중치로 하여, 탄도계수를 가중치 합으로 산출할 수 있다.

### 2.1 Layered IMM

Layered IMM<sup>[2]</sup>은 센서 측정 잡음의 특성에 대한 가설 집합(Mode Set)과 고도에 따른 공기밀도에 대한 가설 집합에 대하여 IMM 알고리즘을 적용한 것이다. 센서로 표적을 측정할 때 측정잡음을 일반적으로 가우시안 분포를 하는 것으로 가정을 하지만, 탄도탄과 같은 초고속 표적을 측정할 때는 Spiky한 특성을 가

지는 글린트(Glint) 잡음을 고려해야 하는 경우가 발생할 수 있고<sup>[5]</sup>, IMM을 구성하는 모델의 가설로 처리한다. 또한 공기밀도 모델은 미국의 표준 대기밀도 모델을 사용하거나 대기를 6개의 층으로 나눈 모델을 사용하는 경우가 많으나 이는 지구 전체가 균일할 수 없으므로 지역적으로 공간적으로 사용하는데 있어 제한적일 수 있다. 이는 상황에 따라 비선형 필터가 적용된 탄도탄 상태변수 추정 필터의 발산 원인을 제공할 수 있다. LIMM은 보통의 IMM과 달리 Fig. 1과 같이 2개의 Interacting 단계를 거친다. 이러한 2번의 Interacting 단계를 통해 보다 다양한 여러 가지 불분명한 상황들을 고려함으로써 표적의 상태변수 추정시에 강건성을 향상시킬 수 있다. 첫 번째 가설집합을  $M^1 = \{M_1^1, M_2^1\}$ 라 하고, 두 번째 가설집합을  $M^2 = \{M_1^2, M_2^2\}$ 라 하면, 여기서  $M_1^1$ 과  $M_2^1$ 은 공기밀도모델 파라미터#1과 #2를  $M_1^2$ 과  $M_2^2$ 은 각각 가우시안 잡음과 글린트 잡음을 나타낸다<sup>[2]</sup>. 이 두 개의 가설집합들로부터 식 (1)과 같은 총 4개의 조합 가능한 가설집합을 만들 수 있다.

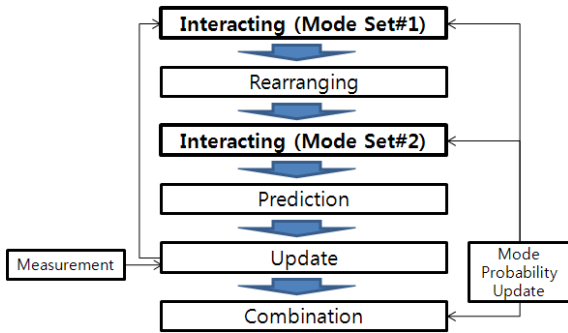


Fig. 1. Layered IMM Structure

$$M = M^1 \times M^2 \quad (1)$$

$$= \{(M_1^1, M_1^2), (M_1^1, M_2^2), (M_2^1, M_1^2), (M_2^1, M_2^2)\}$$

LIMM은 가설(Mode)의 개수와 같은 4개의 EKF로 구성되며, 상태변수  $x = (xyz\dot{x}\dot{y}\dot{z})^T$ 이고, 각 가설 별로 EKF의 동력학 모델은 동일한 형태이며 식 (2)와 같다.

$$\frac{d}{dt}x = f(x)$$

$$= \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ -\frac{\mu}{r^3} + \Omega_E^2 x - 2\Omega_E(-\dot{y}\sin\phi + \dot{z}\cos\phi) - \frac{\zeta}{2} V\dot{x} \\ -\frac{\mu}{r^3} + \Omega_E^2 \sin^2\phi y - \Omega_E^2 \cos\phi \sin\phi (z + R_E) - 2\Omega_E \dot{x} \sin\phi - \frac{\zeta}{2} V\dot{y} \\ -\frac{\mu}{r^3} + \Omega_E^2 \cos^2\phi (z + R_E) - \Omega_E^2 y \cos\phi \sin\phi + 2\Omega_E \dot{x} \cos\phi - \frac{\zeta}{2} V\dot{z} \\ -\frac{1}{K} \dot{\zeta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $\zeta$ 는 탄도계수( $\beta$ )와 공기밀도( $\rho$ )로 이루어진 새로운 변수로서  $\zeta = \rho/\beta$ 이다. 상태변수는 원점이 센서인 ENU(East North Up) 좌표계 상에서 정의된다.  $\mu$ 는 지구중력 상수,  $\Omega_E$ 는 지구자전 각속도,  $r$ 은 지구 중심에서 표적까지의 거리,  $\phi$ 는 센서의 위도,  $R_E$ 는 지구반지름,  $V$ 는 속도의 크기이다.  $K$ 는 식 (3)의 고도에 따른 근사화 된 공기밀도 모델의 모델 상수로서 일정 고도 내에서 상수로 알려져 있으나 정확한 값을 알 수 없으므로 LIMM을 구성하는 모델의 가설로 처리되었다.

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-\frac{h}{K}} \quad (3)$$

### 2.2 VS-IMM

VS-IMM<sup>[4]</sup>은 IMM을 구성하는 모델이 고정되어 있지 않고, 적절하게 구조가 변화하는 특징을 갖고 있다. 즉, 각 모드에 대한 필터동력학 모델의 탄도계수에 대한 가설집합을 고정하는 것이 아니고, IMM의 구조 변화를 통해 각 모델의 탄도계수들을 적절하게 변경시킴으로써 탄도탄이 가지는 실제 탄도계수 값으로 수렴하여 탄도탄에 대한 정보가 부재한 상황에서도 탄도계수의 불확실성의 영향을 줄이고, 상태변수 추정성능 향상 및 정확한 탄도계수의 추정을 가능하게 한다. VS-IMM은 3개의 EKF로 구성되며, 상태변수  $x = (xyz\dot{x}\dot{y}\dot{z})^T$ 이고, 필터의 동력학 모델은 다음 식 (4)와 같다. 상태변수는 원점이 센서인 ENU 좌표계 상에서 정의된다.

$$\frac{d}{dt}x = f(x) \tag{4}$$

$$= \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ -0.5\frac{\rho(h)}{\beta} V\dot{x} + 2\Omega_E(\sin\phi\dot{y} - \cos\phi\dot{z}) - g_x \\ -0.5\frac{\rho(h)}{\beta} V\dot{y} - 2\Omega_E\sin\phi\dot{x} - g_y \\ -0.5\frac{\rho(h)}{\beta} V\dot{z} + 2\Omega_E\cos\phi\dot{x} - g_z \end{pmatrix}$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $\Omega_E$ 는 지구자전 각속도,  $\phi$ 는 센서의 위도,  $V$ 는 속도의 크기를 각각 나타낸다.  $\beta$ 는 탄도계수로서 각 모델 별로 서로 다른 값을 가지며, Search와 Estimation 단계를 거치면서 값이 변화한다. VS-IMM은 실제적으로 탄도탄의 탄도계수를 정확히 알 수 없는 상황에서 각 모델별로 탄도계수를 적절한 범위 내에서 초기화 할 수 있는 장점이 있다. IMM 구조를 변화시키기 위한 Search 단계는 탄도계수를 찾아가는 단계이고, Estimation 단계는 찾아낸 탄도계수에 대한 정밀한 추정치를 구하는 단계이다. VS-IMM은 새로운 탄도계수 값이 찾아진 경우에 이 값을 적용하는 새로운 모델이 활성화 되고 기존 모델과 교체되어 필터의 상태변수, 오차공분산 및 모드 확률에 대한 초기화가 이루어진다. 구조변화가 발생할 때는 Fig. 2와 같이  $\beta_2$ 와  $\beta_3$  사이에서 새로운  $\beta_{new}$ 가 찾아진 경우에 모드 1( $\beta_1$ )이 없어지고 기존의  $\beta_2$ 가 모드 1이 되면서  $\beta_{new}$ 는 모드 2가 되고,  $\beta_3$ 는 모드 3으로 남는다. 이러한 구조변화가 이루어지면서 실제 탄도계수 값으로 수렴하게 된다.

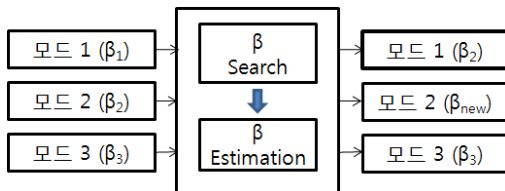


Fig. 2. An example of structural change

### 3. 탄도탄 예상요격지점 산출

탄도계수  $\beta = \frac{m}{SC_D}$ 로 보통 정의되는데, 여기서  $S$

는 탄도탄 표적의 Reference Area,  $C_D$ 는 탄도탄 표적의 항력계수,  $m$ 은 탄도탄 표적의 질량으로서, 고고도에서는 공기 밀도가 희박하여 가관측성이 없어 추정이 거의 불가능하고 재진입하여 공기 밀도가 증가하는 고도 40 km 이하에서 추정이 가능하다. 이 탄도계수의 추정 정확도에 따라 상태변수의 추정 성능이 영향을 받으며 최악의 경우에 상태변수 추정필터가 발산할 수 있는 상황이 발생할 수 있다. 특히 상태변수 추정 필터를 이용하여 수~수십 초 동안의 탄도탄의 미래 위치를 예측할 때 고고도에서는 탄도탄 표적의 실제 탄도계수 값에 근사한 초기 값을 사용해야 할 필요가 있다.

탄도탄의 예상요격위치(PIP : Predicted Intercept Point)는 센서로부터 측정치가 수신되어 상태변수 추정치가 갱신된 시점의 위치와 속도를 초기 값으로 하여 예상되는 요격 고도까지 동력학 식 (2) 또는 (4)를 시간 적분하여 산출한다. PIP 산출은 IMM을 구성하는 각 모드별로 수행되며, 최종적으로 출력되는 PIP는 각 모드의 갱신된 모드 확률과 각 모드 별로 계산된 PIP를 가중치 합으로서 식 (5)와 같이 산출한다.

$$X_{PIP} = \sum_{i=1}^n X_{PIP,i} Prob(i) \tag{5}$$

여기서,  $n$ 은 가설 집합을 구성하는 전체 모드의 개수를 나타내며,  $X_{PIP,i}$ 는  $i$ 번째 모드에서 계산된 탄도탄의 PIP이다. Layered IMM은  $n = 4$ 이고, VS-IMM은  $n = 3$ 이다. 탄도탄의 동력학 식으로 탄도탄의 예상요격위치를 예측하는데 탄도계수의 영향이 크게 미치기 때문에 정확한 값을 알 필요가 있다. Layered IMM은 탄도계수를 직접적으로 추정하지는 않지만, 7번째 상태변수인  $\zeta$ 를 통해서 탄도계수의 영향을 받으며, VS-IMM은 각 모드별로 탄도계수가 변화됨에 따른 탄도계수의 영향을 받는다. Fig. 3은 PIP 산출 기하를 보여주고 있다. 탄도탄 교전을 위해서는 하층방어무기체계의 요격 가능고도 영역 내에서 PIP가 산출되어야 한다. 요격 가능고도 이하에서는 탄도탄을 요격하는 것이 무의미하기 때문이다.

시간 적분 구간은 탄도탄의 현재 시간으로부터 예상요격고도까지 도달 시간이며, 예상요격고도는 예측 가능 최대 고도와 최소 고도 사이에 존재한다. 적분은 수치적으로 4차 Runge-Kutta 방법을 적용하였다.

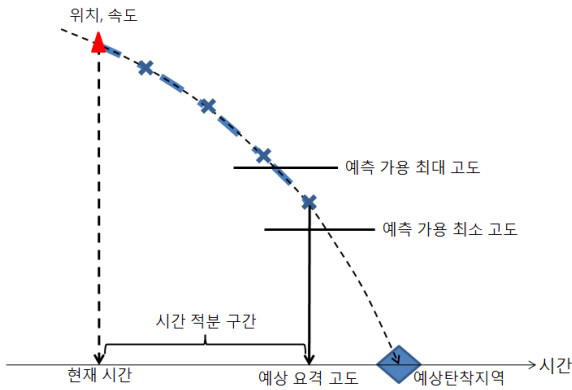


Fig. 3. Geometry for PIP Production

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

하층방어무기체계는 센서의 짧은 탐지범위로 인하여 탄도탄의 교전에 시간제한을 받게 된다. 본 논문에서는 탐지 범위 제한에 따른 최초 탐지 고도와 예상요격 고도 및 탄도계수 추정을 고려하여 탄도탄의 예상요격지점의 예측 정확도에 대한 경향을 분석하였다. 이러한 탄도탄의 최초 탐지 고도에 따른 예상요격지점 산출 경향을 분석하기 위하여 Table 1과 같은 300 km급, 500 km급 탄도탄에 대한 시나리오를 작성하고, 100회의 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 탄도탄은 센서를 기준으로 경사거리 80 km일 때 고도 약 55 km와 40 km에서 최초 탐지되어 고도 16 km까지 예상요격지점을 산출하는 경우에 대하여 예상요격지점 오차를 분석하였다. 예상요격지점 산출은 표적이 탐지되어 필터가 초기화 된 이후부터 고도 16 km까지 필터가 갱신되는 매 순간 지속적으로 수행되었다. Fig. 4와 Fig. 5는 센서 기준 ENU 좌표계에서 각각 300 km급과 500 km급 탄도탄 표적의 고도 및 속도 프로파일을 나타내며, 파랑색의 ‘o’로 표기된 선은 상태변수 추정을 위한 필터링이 수행된 구간의 예를 나타낸다. Table 1과 Fig. 4, 5로부터 최대 속도가 되는 구간까지 탄도탄 표적의 상태추정 및 PIP를 산출해야 한다.

센서의 센싱 오차의 표준편차  $1\sigma$ 값은 거리 150 m, 각도 2.5 mrad으로 설정하였다. 필터링 주기는 100 msec이다. 센서와 탄도탄의 발사 및 탄착 지점의 경도는 동일하게 설정하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 대기에 의해 탄도탄이 급속히 감속하는 구간에 예상요격 고도가 위치하기 때문에 최초 탐지

Table 1. TBM Scenario & Flight Characteristics

		사거리 300 km	사거리 500 km
발사 위도		40 도	40 도
탄착 위도		37.5431 도	35.5794 도
연소 시간		62 초	68 초
연소종료 속도		1485 m/s	2006 m/s
정점	고도	81.28 km	140.91 km
	속도	1051 m/s	1401 m/s
최대 속도	고도	17.35 km	17.05 km
	속도	1500 m/s	2078 m/s

되는 고도부터 예상요격 고도까지 정확한 PIP를 예측 하기에 매우 어려운 여건이 만들어진다. 본 논문은 필터 자체에 대한 성능분석이 목적이 아니기 때문에 글린트 잡음이 모델링되지 않은 VS-IMM을 고려하여 글린트 잡음의 발생 확률을 10%미만으로 설정하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 LIMM을 구성하는 모드 중에 가우시안 잡음에 대한 모드가 포함된 ( $M_1^1$ ,  $M_1^2$ )과 ( $M_2^1$ ,  $M_2^2$ )의 확률의 합이 0.9이상으로 크게 나타남을 확인하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 사거리 300 km, 500 km에 대하여 LIMM(a)과 VS-IMM(b)을 이용하여 최초 탐지 고도 40 km부터 최종 고도 5 km까지 탄도계수를 추정 한 결과에 대하여 평균을 도시한 것으로서 고도가 낮아질수록 탄도계수에 대한 가관측성이 확보되면서 실제 탄도계수 값에 근접해 가는 것을 확인할 수 있다. LIMM의 경우는 대기로 재진입한 이후부터 탄도계수의 추정이 이루어지는 것을 알 수 있고, VS-IMM의 경우에는 각 모드의 탄도계수들이 확률 값에 따라 가중치 합으로 계산되기 때문에 LIMM보다는 상대적으로 탄도계수 추정 오차가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. LIMM은 공기밀도 모델 가설 집합의 모드를 포함하는 모델별로 탄도계수 초기 값을 10,000과 50,000으로 설정하였으며, VS-IMM은 3개의 모드에 대해 각각 탄도계수의 초기 값을 10,000과 25,000 및 50,000으로 설정하였다. 필터 구조의 차이로 VS-IMM의 경우 LIMM 보다 가관측성이 없는 구간에서도 평균적으로 오차가 작게 나타나는 경향이 있음을 볼 수 있다.

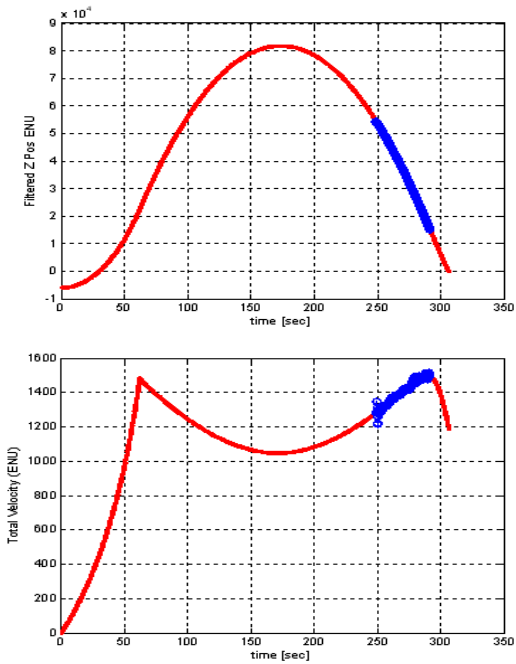


Fig. 4. 300 km TBM Height & Velocity Profile

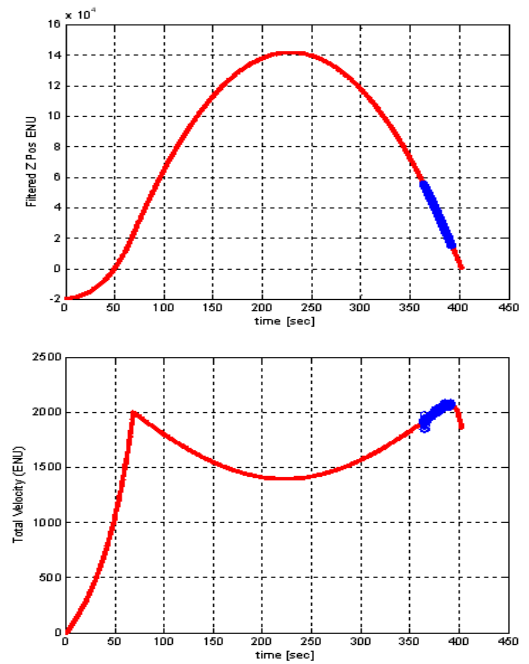
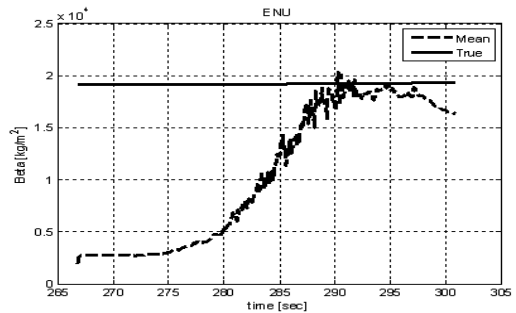
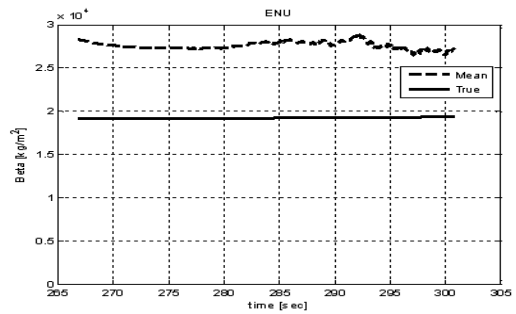


Fig. 5. 500 km TBM Height & Velocity Profile

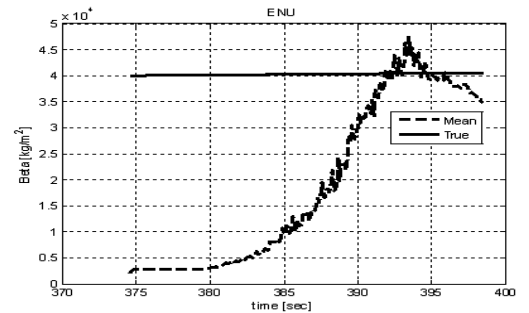


(a) LIMM

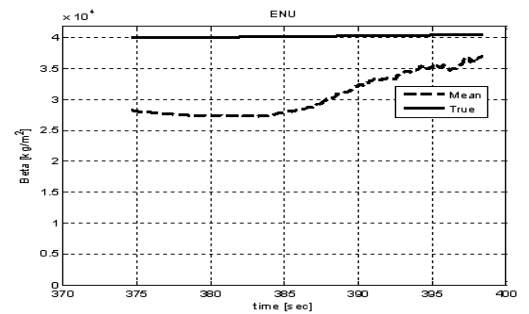


(b) VS-IMM

Fig. 6. Mean Estimated Value of Ballistic Coefficient for 300 km TBM



(a) LIMM



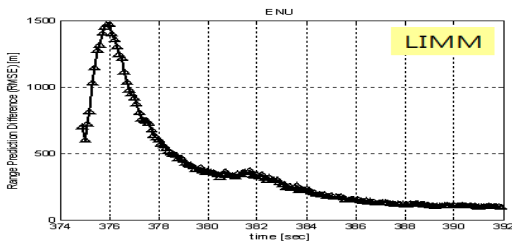
(b) VS-IMM

Fig. 7. Mean Estimated Value of Ballistic Coefficient for 500 km TBM

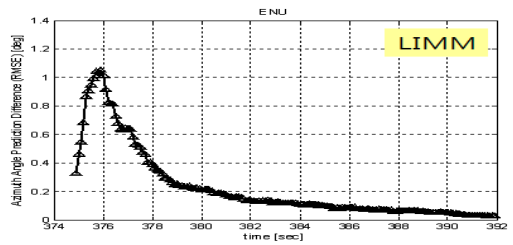
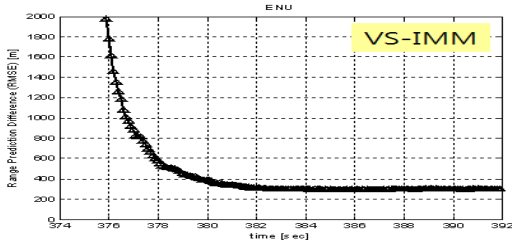
Fig. 8은 500 km급 탄도탄에 대하여 각각 고도 약 40 km와 55 km에서 최초 탐지하고 LIMM과 VS-IMM을 이용하여 필터 초기화 직후부터 PIP를 지속적으로 예측한 경우에 센서를 기준으로 한 거리 오차를 도시한 것이고, Fig. 9는 센서를 기준으로 한 방위각 오차, Fig. 10은 센서를 기준으로 한 고각 오차에 대한 결과를 도시한 것이다. Fig. 8~Fig. 10에 도시된 오차는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 탄도탄 상태변수 추정 필터가 갱신된 때 시점에 예상 요격 고도까지의 예측된 위치에 대한 거리, 방위각, 고각 오차로서 Fig. 6와

Fig. 7에 나타난 것과 같이 탄도계수가 수렴될수록, 그리고 예측시간 간격이 줄어들수록 PIP 산출 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히, 상태변수가 갱신된 시점의 고도가 예측고도에 근접할수록 오차가 0으로 수렴한다.

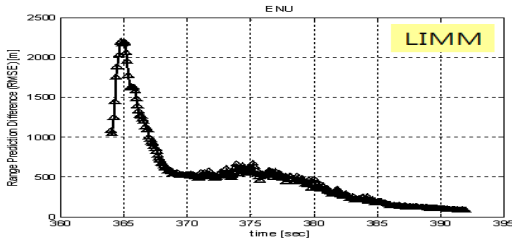
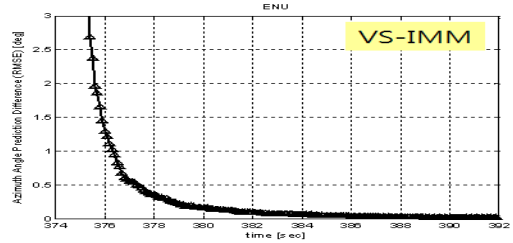
Table 2는 LIMM과 VS-IMM을 이용하여 사거리 300 km, 500 km 각각에 대해 최초 탐지 고도가 약 55 km, 40 km일 경우에 대해 필터 안정화에 소요되는 시간을 분석한 결과이다. 필터 안정화는 산출된 PIP가 오차 범위 이내로 수렴하여 유지되는 것을 의미하며, 센서



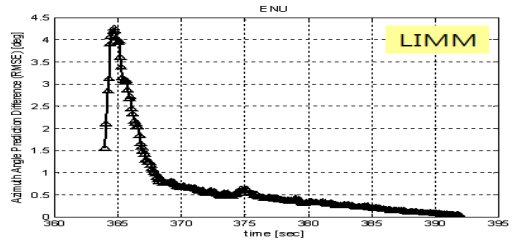
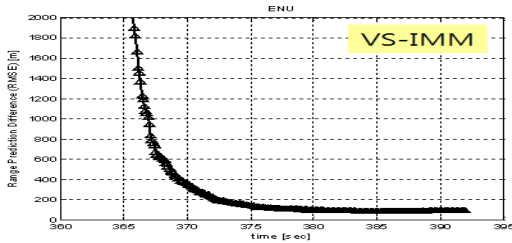
(a) LIMM/VIS-IMM @40 km



(a) LIMM/VIS-IMM @40 km



(b) LIMM/VIS-IMM @55 km



(b) LIMM/VIS-IMM @55 km

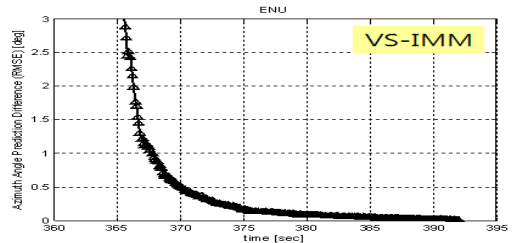
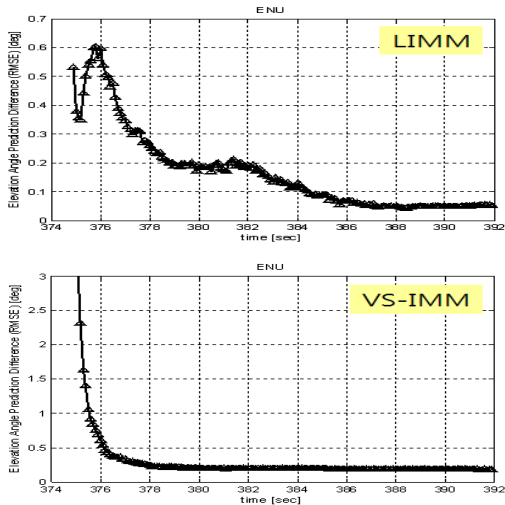


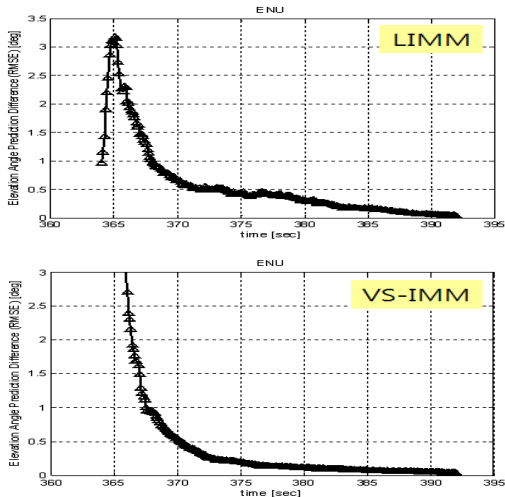
Fig. 8. Range Error of PIP for the 500 km TBM

Fig. 9. Azimuth Error of PIP for the 500 km TBM





(a) LIMM/VS-IMM @40 km



(b) LIMM/VS-IMM @55 km

Fig. 10. Elevation Error of PIP for the 500 km TBM

Table 2. Time interval for PIP Error Convergence below Predefined Error Bound

	최초 탐지 고도	사거리 500 km	사거리 300 km
VS-IMM	40 km	1.9 초	2.8 초
	55 km	3.6 초	5.8 초
LIMM	40 km	2.2 초	3.4 초
	55 km	4.0 초	6.2 초

의 탐지/추적 빔 운용 및 측정 오차 특성을 고려하여 정의하였다. Table 2에서 최초 탐지 고도가 높을수록 필터 안정화에 소요되는 시간이 길어지는 것을 알 수 있으며, 이는 고고도에서 부정확한 탄도계수를 이용하여 탄도탄의 PIP를 산출한 결과로 볼 수 있다. 이는 두 필터가 탄도계수를 파라미터로 사용하기 때문에 고도 약 30 km 이하에서 탄도계수에 대한 가관측성이 발생하는 시점부터 요격지점에 대한 예측 성능이 향상되는 것을 의미한다. 상대적으로 탄도계수 추정오차가 적은 VS-IMM이 LIMM보다 필터 안정화 시간이 단축되는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 최초 탐지 고도가 같더라도 예상 요격 고도가 낮아질수록 필터 안정화 시간은 증가한다. 이것은 부정확한 탄도계수를 이용하여 더 오랜 시간 예측을 수행해야 하기 때문이다.

따라서 탄도탄에 대한 신속한 교전을 위한 정확한 PIP 산출을 위해서는 하층방어무기체계의 탐지/추적 성능 및 대상 표적의 궤적 특성과 연계하여 종합적으로 분석되어야 한다. Table 2에 300 km급이 500 km급보다 안정화 시간이 다소 길게 나타난 것은 두 필터가 500 km급에 맞게 튜닝된 것으로 판단된다. Fig. 11은 500 km급 탄도탄에 대해 거리 80 km, 고도 40 km에서 최초 탐지된 경우 고도 16 km까지 PIP를 산출하는 동안 남아 있는 예측 시간 간격을 도시한 것이다. Fig. 6~Fig. 10의 결과를 보면 정확하지 않은 탄도탄의 탄도계수를 이용하여 10초 이상의 오랜 시간 구간 동안 예측을 수행하는 것이 많은 오차를 유발할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 이러한 결과는 요격 유도탄이 발사된 시점의 PIP 오차를 보상하기 위하여

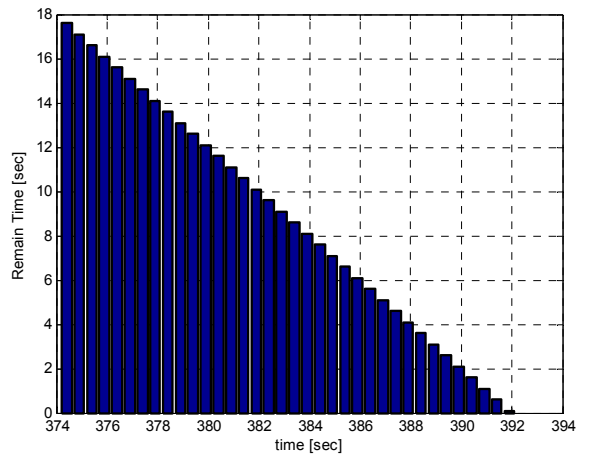
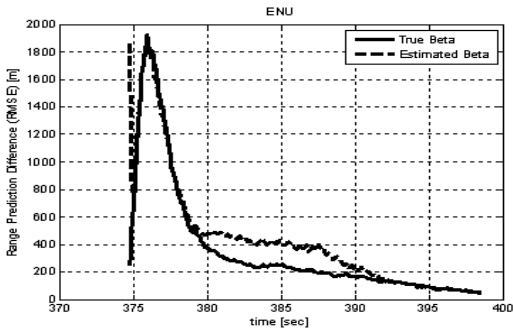
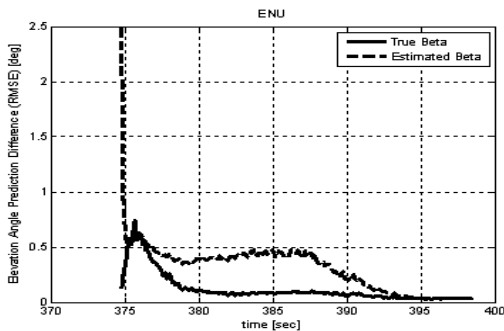


Fig. 11. Remain time to predict for PIP

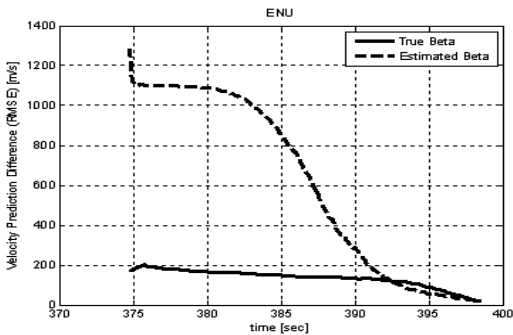




(a) Range Prediction Error



(b) Elevation Prediction Error



(c) Velocity Prediction Error

Fig. 12. Error Comparison between Estimated and True Ballistic Coefficient

탄도탄 표적을 요격할 때까지 지속적으로 가능한 한 빠른 주기로 탄도탄 표적 데이터를 요격 유도탄으로 업링크하여 PIP를 실시간으로 갱신해야 할 필요가 있음을 보여준다. Fig. 12는 500 km급 탄도탄에 대해 고도 40 km에서 최초 탐지된 경우 LIMM을 이용하여 PIP를 산출할 때 위치와 속도는 추정치를 사용하면서 추정된 탄도계수를 사용한 것과 실제 탄도계수 값을

사용한 경우를 비교한 것으로서 PIP 산출 오차를 거리와 고각 및 속도로 나타낸다. 실제 탄도계수를 사용하는 경우가 PIP 산출 오차를 줄일 수 있음을 잘 나타내고 있다. 또한 속도 측면에서 실제 탄도계수를 사용하는 경우에는 유용한 속도 예측 값을 획득하는 것이 가능함을 볼 수 있다. 탄도탄 표적이 경도를 따라 비행함에 따라 탄도계수에 따른 방위각 예측오차는 거의 나지 않았다.

이상에서 살펴본 바와 같이 탄도탄에 대한 정밀교전통제 관점에서 탄도탄 요격을 위해서는 정확한 예상요격위치를 산출해야 하는데, 이를 위해서는 탄도탄 모델의 특성인 탄도계수를 정확히 알아야 할 필요가 있다. 또한 센서의 탐지거리 내에서 비록 높은 고도에서 탄도탄이 탐지되더라도 물리적으로 탄도계수에 대한 가관측성이 나타나는 고도까지는 부정확한 PIP를 산출할 수 있고, 교전에 필요한 적정한 탄도탄 표적 데이터가 산출되는 시점과 교전 가능한 잔여 시간을 조정해야 한다.

## 5. 결론

탄도탄 교전통제 관점에서 탄도탄의 최초 탐지 고도에 따른 탄도탄의 탄도계수와 예상요격지점 산출의 정확도의 상관관계를 두 가지 서로 다른 구조의 탄도탄 상태변수 추정필터를 통해 분석하고 경향을 고찰하였다. 탄도탄 표적 모델링 시에 필요한 탄도계수를 정확히 추정하지 못하는 고도에서는 비록 갱신된 필터의 상태변수가 안정화 되더라도 탄도계수의 부정확성으로 인해 PIP의 정확도는 떨어진다. 그러나 탄도계수에 대한 가관측성이 향상되어 정확한 탄도계수 추정이 가능한 고도 40 km 이하의 영역에서는 교전통제에 활용 가능한 정밀한 탄도탄 정보(위치, 속도, 탄도계수)를 산출 및 획득할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 탄도탄 표적에 대한 정확한 탄도계수를 사전에 알고 있다면, 40 km 이상의 고도에서 최초 탐지가 되더라도 정확한 PIP를 산출할 수 있음을 확인하였다.

신속한 교전을 위해서는 탄도탄이 최초 탐지되고 적정한 제한 시간 이내에 탄도탄 요격이 가능한 오차범위 내의 PIP를 산출하고, 이를 기점으로 요격 유도탄을 발사 한 뒤에 요격이 이루어지는 순간까지 하층방어무기체계의 지상 장비는 반드시 요격 유도탄으로 최신의 탄도탄 위치, 속도 등의 정보를 업링크를 통해

지속적으로 빠른 주기로 갱신시켜 주어야 한다. 유도탄은 이를 바탕으로 예상요격위치를 재계산함으로써 이에 대한 정확도를 높여 발사 시의 초기 PIP 오차를 줄여야 할 필요가 있다. 추후에는 정확한 PIP 산출을 위한 탄도계수 추정 성능이 우수한 상태변수 추정 필터 또는 탄도계수에 민감하지 않은 PIP 예측 기법에 대한 연구가 필요하다. 또한 가능한 한 많은 종류의 탄도탄과 다양한 궤적 형태에 따른 탄도계수를 데이터베이스로 구축하여 이를 활용하는 PIP 산출 기법에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

### References

- [1] William J. Farrell, III, "Interacting Multiple Model for Tactical Ballistic Missile Tracking," IEEE Transactions on AES, Vol. 44, No. 2, pp. 418-426, 2008. 4.
- [2] 이동관, 송택렬, "Glint가 존재하는 상황에서 LIMM을 이용한 Re-entry 표적의 추적," 제12차 유도무기 학술대회, pp. 180-183, 2003.
- [3] Robert L. Cooperman, "Tactical Ballistic Missile Tracking using the Interacting Multiple Model Algorithm," Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion, Vol. 2, pp. 824-831, 2002.
- [4] 김태한, 이동관, 조길석, 송택렬, "구조변화 상호작용 다중모델 알고리즘을 이용한 탄도계수 추정 기법 연구," 제16차 유도무기학술대회, pp. 363-366, 2012.
- [5] Jinwhan Kim, Monish Tandale, P. K. Menon, "Particle Filter for Ballistic Target Tracking with Glint Noise," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2-5 Aug. 2010, Toronto, Ontario Canada
- [6] 이운형, "탄도 비행궤적의 특성 고찰," 국방기술 연구, 제4권, 제4호, pp. 62-77, 1998. 10.
- [7] 권용수, 김정희, 이경행, "성공적 하층 미사일방어 수행을 위한 시스템 요구능력 도출," 한국국방경영분석학회지, 제37권, 제2호, pp. 11-24, 2011. 6.
- [8] 고덕근, "단거리 탄도탄 기술 동향," 국방과학기술플러스, Vol. 18, 2006. 9.
- [9] E. Daeipour and Y. Bar-Shalom, "IMM Tracking of Maneuvering Targets in the Presence of Glint," IEEE Trans. On AES, Vol. 34, No. 3, pp. 996-1003, Jul. 1998.
- [10] Tae Han Kim, Kyung Rok Moon, Taek Lyul Song, "Variable-Structured Interacting Multiple Model Algorithm for Ballistic Coefficient Estimation of a Re-entry Ballistic Target," International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol. 11, No. 6, pp. 1204-1213, Dec. 2013.