



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(6), 521-528(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.6.521

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

다변량 확률밀도함수와 베이시안 정리를 이용한 교전공간내 공중항적의 격추확률 분포 특성

홍동욱¹, 예승만², 김주현³

Characteristics of Kill Probability Distribution of Air Track Within the Engagement Space Using Multivariate Probability Density Function & Bayesian Theorem

Dong-Wg Hong¹, Sung-Man Aye² and Ju-Hyun Kim³

Hanwha-system

ABSTRACT

In order to allocate an appropriate interceptor weapon to an air track for which the threat assessment has been completed, it is necessary to evaluate the suitability of engagement in consideration of the expected point of engagement. In this thesis, a method of calculating the kill probability is proposed according to the position in the engagement space using Bayesian theorem with multivariate attribute information such as relative distance, approach azimuth angle, and altitude of the air track when passing through the engagement space. As a result of the calculation, it was confirmed that the distribution form of the kill probability value for each point in the engagement space follows a multivariate normal distribution based on the optimal predicted intercepting point. It is expected to be applicable to the engagement suitability evaluation of the engagement space.

초 록

위협평가가 끝난 공중항적에 대해 적절한 대응무기를 할당하기 위해서는 교전예상지점을 고려하여 교전적합성을 평가하는 것이 필요하다. 논문에서는 공중항적이 교전공간을 통과할 때 공중항적의 상대거리, 접근방위각 및 고도 등 다변량 속성정보를 가지고 베이시안 정리를 적용하여 교전공간내 위치에 따른 격추확률을 계산하는 방법을 제시하였다. 계산결과 교전공간내에서의 각 지점별 격추확률값의 분포형태는 최적의 예상요격지점을 기준으로 다변량 정규분포를 따르고 있음을 확인하였고, 계산된 격추확률값은 교전공간을 통과하는 공중항적의 교전가능성 평가에 적용가능할 것으로 기대된다.

Key Words : Air Track(공중항적), Multivariate Normal Distribution(다변량정규분포), Kill Probability(격추확률), Bayesian Theorem(베이시안 정리), Engagement Space(교전공간)

I. 서 론

현대전에서 다수의 적 공중항적에 대한 교전을

위해서는 신속한 위협평가와 무기할당이 중요하다. 공중항적에 대한 위협평가와 무기할당은 위협을 판단하고 위협의 우선순위를 산출한 뒤 이것을 목록화

† Received : March 18, 2021 Revised : April 16, 2021 Accepted : April 22, 2021

¹ Chief Researcher, ² Senior Engineer, ³ Senior Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : hongdw5073@naver.com

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

하는 위협평가 과정과 산출된 위협에 대해 대응 가능한 무기를 할당하는 무기할당 과정으로 진행되는 데 이 과정에서 무기를 할당하기 전에 적 공중항적에 대한 교전가능성을 평가하는 과정을 거치게 된다.

교전가능성을 평가한다는 것은 공중항적의 정보와 아군 무기체계 요구성능간의 상호관계성을 판단하는 것으로 무기체계에 요구된 성능상 최적의 요격지점으로부터 공중항적의 상대적 교전가능성을 평가한다는 것과 같은 의미를 가진다.

이러한 교전가능성을 평가하는 방법으로써 공중항적에 대한 격추확률을 이용하는 방법이 많이 쓰이는데 기존의 연구[1]에서는 고정된 격추확률을 기반으로 표적의 생존확률을 최소화할 수 있도록 무기를 할당하는 방안을 제시하였고, 고정된 격추확률을 이용한 계산의 제한사항을 개선하기 위해 Kim[2]은 실시간으로 변하는 표적과 요격미사일의 상대적 위치, 고도 및 속도에 대한 비행 상태정보를 이용하여 기계학습을 통해 레이다 탐지 시점마다 해당 표적을 격추하기에 적합한 발사 위치에 배치된 요격미사일을 격추확률이 높은 시점에서 할당하는 방식을 제시하였다.

이 방식은 실시간 변화되는 상황을 고려하여 격추확률을 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 탄도 미사일과 같이 별도의 기동은 없으나 고속으로 비행하는 공중항적이 다수표적에 대해 동시공격 시 근실 시간으로 격추확률을 판단하는 데는 적용이 제한된다.

또한 무기할당을 위한 위협평가는 거리, 최단접근 지점(CPA: Closest Point of Approach)을 고려한 공격가능성, 항적의 형태/무장능력 등을 고려한 위협의 성능 및 속도/방향을 고려한 의도성 등이 종합적으로 고려되어야 하기 때문에[3] 격추확률만 가지고 위협평가를 하는 것은 어렵고, 오히려 격추확률은 무기할당을 하기 전에 위협평가가 끝난 항적들의 교전 적합성을 평가하고 무기할당의 우선순위를 결정하는 파라미터로 적용하는 것이 더 유용하다.

본 논문에서는 계산된 격추확률을 위협평가로 직접 이용한 기존의 논문들[1,2]과 달리 대표적 동시교전 상황에서 위협평가가 끝난 고속의 공중항적에 대해 대응 무기를 할당하기 위해 고속 공중항적의 비행특성을 이용하여 교전공간내의 각 지점에 대한 격추확률을 계산함으로써 교전적합성을 평가하는 방법을 제시하였다.

실제로 요격용 무기체계는 사용자의 요구성능을 기반으로 설계되기 때문에 탐지된 고속의 공중항적의 격추확률은 설계된 교전공간내 최적의 요격지점에서 요구된 격추확률을 기반으로 고속의 공중항적이 통과할 것으로 예측되는 교전공간내의 각 지점에 대한 격추확률을 상대적으로 계산하여 교전적합성을 판단하고 무기를 할당하는 것이 더 합리적이다.

이를 위해 사용자로부터 요구된 최적의 요격지점에 설정된 격추확률을 기반으로 교전공간내에서의

각 지점별 격추확률을 계산하기 위해 고속의 공중항적의 상대거리, 접근방위각 및 고도 등 다변량 요소를 고려하고 베이지안 추론을 통해 교전공간내 여러 지점별 격추확률을 계산하였고 계산된 격추율의 가시화를 통해 성능평가를 수행하였다. 평가결과 격추확률은 최적의 요구된 최적의 요격지점을 기준으로 다변량 정규분포를 따르고 있음을 확인하였고, 이러한 결과는 별도의 기동없이 일정한 궤적을 유지하며 교전공간을 통과하는 고속의 공중항적의 교전 적합성 평가에 적용 가능할 것으로 기대된다.

II. 본 론

2.1 공중항적의 교전환경 및 고려 요소

고속의 공중항적에 대한 격추확률을 계산하기 위해서는 공중공간에 요격체계의 교전가능 조건(요격 최저/최고 고도, 레이다 탐지범위, 요격 유도탄의 사거리 등)을 적용한 교전가능 범위를 설정해 주어야 한다.

Figure 1은 고속의 공중항적에 대한 요격무기체계의 교전공간의 개념을 나타낸다.

교전공간을 통과하는 고속의 공중항적의 격추확률은 고속의 공중항적의 비행상태와 요격무기체계와의 관계를 기반으로 예상할 수 있는데, 고속의 공중항적이 목표를 공격하려는 의도로 비행하고 요격무기체계는 그 목표를 방어하기 위해 특정 지점에 위치할 경우 고속의 공중항적과 요격무기체계의 상대거리, 고도 및 접근 방위각 등으로 상호간의 관계성을 판단할 수 있다.

요격무기체계 설계 시 교전공간내에서 요구된 사전격추확률을 적용하는 최적의 예상요격지점은 교전공간의 중심점이 되며, 요격무기체계를 운용 시에도 이 지점을 레이다 기준선의 방향으로 정렬하게 된다.

이러한 교전공간 내에서의 격추확률은 공중항적과 요격무기체계간의 상대거리, 요격무기체계 레이다 방위기준선과 고도 기준선을 중심으로 한 공중항적의 접근방위각 및 고도 등의 상태정보에 의해 영향을 받게 된다.

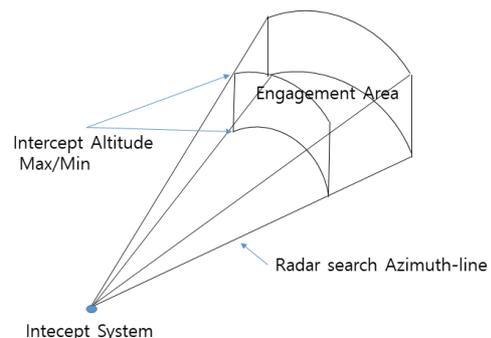


Fig. 1. Concept of the engagement area in the space

2.2 확률밀도함수

확률밀도 함수(Probability density function)는 확률변수(Random variable)와 그에 대응하는 확률값의 분포를 그래프로 나타내는 함수 $f(x)$ 로써 데이터의 관측값들이 일정 범위 안에 속할 확률을 의미한다.

확률변수 X 가 한 개인 경우에 정규분포를 나타내는 일변량 정규분포와 달리 복수의 확률변수($X_1 \cdots X_p$)가 존재할 경우의 정규분포를 나타내는 다변량 확률밀도 함수값의 분포는 일변량 정규분포의 평균을 평균 벡터로, 공분산 값은 공분산 행렬로 확장한 개념으로 함수의 분포를 그래프로 나타내면 다변량 정규분포(Multivariate normal distribution)의 형태를 갖는다. 만약 랜덤한 P 차원의 벡터가 평균 μ , 분산 Σ 를 가지고 다변량 정규분포를 따른다고 한다면 이를 식 (1)과 같이 표현하며, 평균과 분산은 각각 식 (2)와 같이 column vector와 $n \times n$ 매트릭스 형태로 나타낼 수 있다[4].

$$X \sim MVN_p(\mu, \Sigma) \quad (1)$$

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_p \end{pmatrix}, \Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \cdots & \sigma_{1p}^2 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \sigma_{p1}^2 & \cdots & \sigma_{pp}^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

다변량 정규분포의 평균과 분산은 식 (2)에서와 같이 각각 평균벡터와 공분산 행렬식으로 표현되며 이때 공분산 행렬은 항상 symmetric이고, positive definite이어야 한다.

2.2.1 공중항적 상태정보 변수

공중항적을 요격하는 무기체계는 사용자의 요구성을 기반으로 하여 교전공간내 최적의 요격지점에서 격추확률에 대한 요구성을 만족할 수 있도록 설계된다.

이때 요격무기체계의 교전공간내에서 공중항적의 사전격추율은 공중항적 정보에 포함되어 있는 다변수의 상태정보를 이용한 다변량 정규분포밀도함수값을 구함으로써 계산할 수 있다[5].

교전공간내에서의 확률밀도함수를 구하기 위해서 우선 격추확률 평가에 이용할 수 있는 공중항적의 상태정보를 정의해야 한다.

논문에서는 고속의 공중항적과 위상배열 레이더 및 요격미사일을 가지고 있는 요격무기체계간의 상대거리, 접근방위각 및 고도 정보를 주요 변수로 이용하였다. 공중항적과 요격무기체계의 상대거리의 경우 상대거리가 기준점 거리보다 멀어지게 되면 유도탄의 위치예러, 기동 성능 등에 영향이 커지게 되어 격추확률이 저하되며, 기준점 거리보다 가까워지게 되면 높은 초기 회전 요구, 추진구간에서의 교전가능

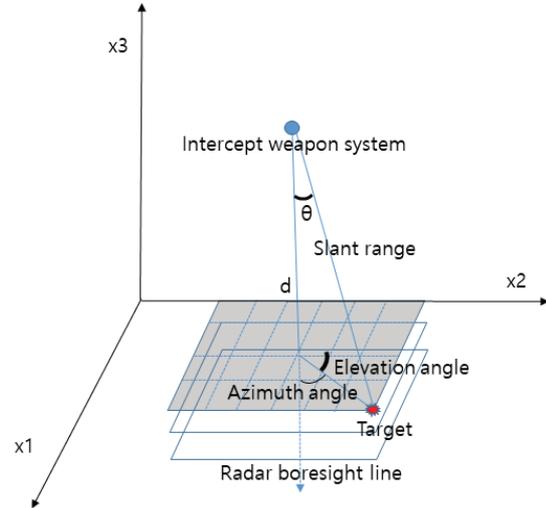


Fig. 2. Air track position in the engagement area

성 등에 따른 제약이 커지게 되어 격추확률이 저하되게 된다[6].

위상배열레이더의 경우 특성상 빔 조향각에 따른 손실에 의해 탐지성능이 불균일하게 나타날 수 있어 레이더 탐색 기준선을 중심으로 방위각이 커질수록 탐지확률이 저하될 수 있다[7].

Figure 2는 요격무기체계 기준점과 레이더 기준선을 중심으로 한 공중항적의 위치를 나타낸다.

Figure 2에서 다층의 레이어로 구성된 평면은 교전공간 최저사거리에서 최대사거리까지의 거리평면으로 거리별 공중항적의 상태정보를 계산하는 데 이용된다.

공중항적이 위치한 지점을 교전공간의 평면으로 표현하면 공중항적의 거리는 요격무기체계 위치로부터 x_3 축 방향의 레이더 기준선 거리로 고도는 요격무기체계 기준점으로부터 x_2 축 방향의 거리차이로 각각 표현할 수 있으며, 방위각은 식 (3)과 같이 기하학적으로 계산할 수 있다.

$$Az = d \times \tan \theta \quad (3)$$

식 (3)에서 Az 는 방위각, d 는 요격무기체계 위치로부터 x_3 축 방향의 레이더 기준선 거리, θ 는 레이더 기준선 거리(Radar boresight line)와 사거리(Slant range)간의 각도를 나타낸다.

2.2.2 교전공간내의 다변량 정규밀도함수

교전공간내에서 각 지점별로 다변량밀도함수를 계산하기 위해서는 공중항적의 상태정보 변수들의 단위를 일치시켜 주어야 한다. Fig. 3은 2.2.1에서 정의한 공중항적의 성분을 거리 변수로 일치시키기 위한 개념을 나타내며, 본 논문에서는 공중항적의 고도, 방위각 변수를 모두 거리 변수의 관계식으로 환산하여 계산하였다.

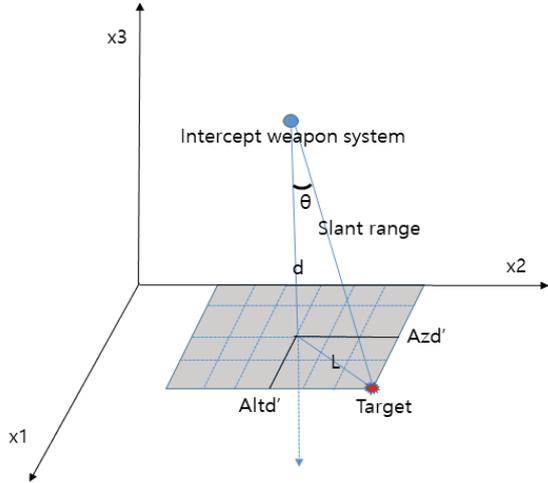


Fig. 3. Air track position parameters in the engagement plane

평면상의 공중항적의 고도 거리(L)와 방위각 거리(Slant Range)는 고도(A_{hd}')와 방위각(A_{zd}') 및 레이더 기준선 거리(d)와 고도 거리(L)의 합성성분으로 식 (4), (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$L = \sqrt{(A_{hd}')^2 + (A_{zd}')^2} \tag{4}$$

$$Slant\ Range = \sqrt{d^2 + L^2} \tag{5}$$

계산된 고도 거리와 방위각 거리의 평균(μ) = 0, 편차(σ) = 100으로 가정하고 확률밀도함수를 계산해보면 Fig. 4와 같이 정규분포를 나타낸다.

2.3. 공중항적의 사전격추확률

2.3.1. 베이저안 추론[3]

베이저안 추론은 베이즈 이론(Baysian theorem)을 기반으로 하는데 추론해야 하는 대상의 사전 확률과 추가적인 관측을 통해 해당 대상의 사후 확률을 추론하는 과정이라고 할 수 있다. 만약 추론하고자 하는 대상(k)의 사전 확률 $p(k)$ 가 주어지고, 대상(k)와 관련있는 특정상황의 조건부 확률이 $p(X|k)$ 로 주어진다고 할 때 특정상황(X) 조건 하에서 대상(k)의 사후 확률 $p(k'|X)$ 은 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$p(k'|X) = \frac{p(k) \times p(X|k)}{p(X)} \tag{6}$$

베이즈 이론은 직접적인 관측으로 쉽게 얻어낼 수 없는 현상을 사전 지식에 의해 추론할 수 있고 제한된 사전 정보를 가지고 신뢰도 높은 결과를 산출해 낼 수 있다는 장점을 갖는다.

2.3.2. 베이저안 추론을 이용한 격추확률 계산

사용자의 요구사항을 기반으로 한 요격무기체계 설계 시에는 교전공간내 최적의 요격지점에서 사용

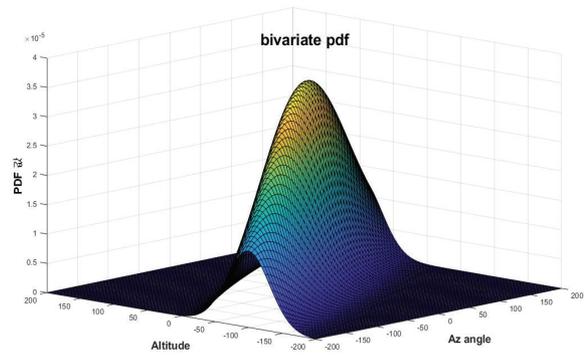


Fig. 4. Normal distribution graph with A_{hd}' and A_{zd}'

자에 의해 요구된 격추확률 값이 나올 수 있도록 하기 위해 주어지는 사전 격추확률 $p(k)$ 는 요구된 격추확률보다 크게 설계하여야 한다. 만약 사전 격추확률 $p(k)$ 가 주어지고, 주어진 조건 하에서 관계되어 있는 다변량의 상황변수확률을 $p(X|k)$ 로 가정한다면 다변량의 상황변수의 확률 $p(X)$ 조건 하에서의 사후 격추확률 $p(k'|X)$ 은 베이저안 추론을 활용하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(k'|X) = \frac{p(k) \times p(X|k)}{p(k) \times p(X|k) + p(k \sim) \times p(X|k \sim)} \tag{7}$$

식 (7)에서 분모는 식 (6)에서의 전체확률 $P(X)$ 에 해당하는 값으로 격추와 미격추를 포함하는 전체 조건 하에서의 특정 상황변수의 확률을 의미한다. $p(k \sim)$ 는 사전 미격추확률로 식 (8)과 같이 계산된다.

$$p(k \sim) = 1 - p(k) \tag{8}$$

2.4. 교전공간내 공중항적의 격추확률 계산

본 논문에서는 교전공간내 특정지점별 공중항적의 격추확률을 계산하기 위해 격추확률에 영향을 주는 항적의 상태정보로 거리, 방위각 및 고도 정보 등 다변량 상태정보를 이용하여 주어진 사전 격추확률 조건에서의 공중항적의 다변량 밀도함수값을 계산한 뒤 베이저안 추론을 이용하여 사후 격추확률을 구하는 방식을 사용하였다. Table 1은 계산처리 과정을 나타낸다.

Table 1의 계산과정에서 공분산 행렬은 Cholesky 분해를 이용하여 계산하였다. Cholesky 분해는 공분산 행렬(A)가 positive definite matrix이고 lower triangular matrix(L)이 positive일 때 사용할 수 있으며 식 (9)는 Cholesky 분해식을 나타낸다[8].

$$A = L \times L^T \tag{9}$$

positive definite matrix lower triangular inverse matrix

식 (9)의 Cholesky 분해를 이용하여 공분산 행렬은 식 (10)과 같이 계산하였다.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{RR}^2 & & \\ \sigma_{\theta R}^2 & \sigma_{\theta R}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2 & \\ \sigma_{AR}^2 & \sigma_{AR}^2 + \sigma_{A\theta}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2 & \end{pmatrix} \quad (10)$$

(symmetric)

식 (10)과 같이 구해진 공분산 행렬과 Determinant 값을 다변량확률밀도함수 계산식인 식 (11)에 대입하여 함수값을 계산한다[4].

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} |\Sigma|^{1/2}} * \exp(-1/2)(X-\mu)^t \Sigma^{-1} (X-\mu) \quad (11)$$

식 (11)과 같이 공중항적으로부터 수신되는 다변량 상태정보의 확률밀도함수를 계산하게 되면 주어진 사전 격추확률 조건 및 미격추확률 조건에서의 확률 밀도함수값을 가지고 베이저안 추론을 이용하여 사후 격추확률을 계산하게 된다. 본 논문에서는 베이저안 추론에 기반한 사후격추 확률 계산을 위해 식 (12)를 이용하였다[5].

$$p(k'|R, \theta, A) = \frac{p(k) \times p(R, \theta, A|k)}{p(k) \times p(R, \theta, A|k) + p(k^{\sim}) \times p(R, \theta, A|k^{\sim})} \quad (12)$$

식 (12)에서 $p(k'|R, \theta, A)$ 는 특정 다변량 상황변수 조건에서의 사후 격추확률을 나타내며, $p(k)$ 는 사전

Table 1. Calculation process of posterior kill probability

Input :	
- Parameters : Altitude(A_{ud}'), Azimuth angle(A_{zd}'), Radar boresight line distance(d)	
- Class : Kill probability($p(k)$), Average(μ), Standard deviation(σ)	
- Parameters unity : Change parameters to Altitude distance(L), Azimuth distance (Slant Range) & Radar boresight line distance(d)	
Calculate :	
- Covariance matrix : $\Sigma = E(x-\mu)(x-\mu)^T$	
- Determinant : $ \Sigma $	
- Multivariate PDF : $f(x)$	
Bayesian theorem :	
- Conditional prior probability : $p(R, \theta, A k)$	
- Conditional prior no kill probability : $p(R, \theta, A k^{\sim})$	
Output :	
- Conditional posterior probability : $p(k' R, \theta, A)$	

격추확률을, $p(R, \theta, A|k)$ 는 주어진 $p(k)$ 조건 하에서 다변량 상황변수의 확률밀도 함수를 나타낸다. 또한 $p(k^{\sim})$ 는 사전 미격추확률을 나타내며, $p(R, \theta, A|k^{\sim})$ 는 주어진 $p(k^{\sim})$ 조건 하에서 관계되어있는 다변량의 상황변수의 확률밀도 함수를 나타낸다.

2.5 수치실험 결과

2.5.1. 실험 조건

본 논문에서 제시한 확률밀도함수와 교전공간내 사후 격추확률을 계산하기 위한 실험 조건을 아래와 같이 가정하였다.

- 사용자로부터 요구받은 요구 격추확률은 시스템 상의 최적의 요격지점에서의 격추확률을 나타낸다.
- 요격무기체계의 공중항적에 대한 격추확률은 공중 항적과의 상대거리, 고도 및 접근 방위각에 따라 달라진다.
- 격추확률 계산범위는 요격무기체계의 성능을 기반으로 한 공중공간내 일정영역으로 Table 2와 같이 제한한다.

Figure 5는 격추확률 계산을 위한 모의 교전공간내의 파라미터들로 요격무기체계를 기준으로 한 거리, 고도, 방위각 범위를 그림으로 나타낸 것이다.

위의 교전공간을 모사한 수치실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Numerical experiments condition within the engage space

Assortment		Contents	
D o m a i n	Range	20 ± 10 km	
	Altitude	Radar boresight line altitude ± 10 km	
	Az' Angle	Radar boresight line azimuth ± 45°	
prior kill probability $p(k) : 80\%$		Mean	Standard Deviation
	Range(R)	$\mu_R = 20$	$\sigma = 10$
	Az' Angle(Φ)	$\mu_\theta = 0$	$\sigma = 10$
	Altitud(θ)	$\mu_A = 0$	$\sigma = 10$
prior no-kill probability $p(k) : 20\%$		Mean	Standard Deviation
	Range(R')	$\mu'_R = 20$	$\sigma' = 30$
	Az' Angle(Φ)	$\mu'_\theta = 0$	$\sigma' = 30$
	Altitud(θ)	$\mu'_A = 0$	$\sigma' = 30$

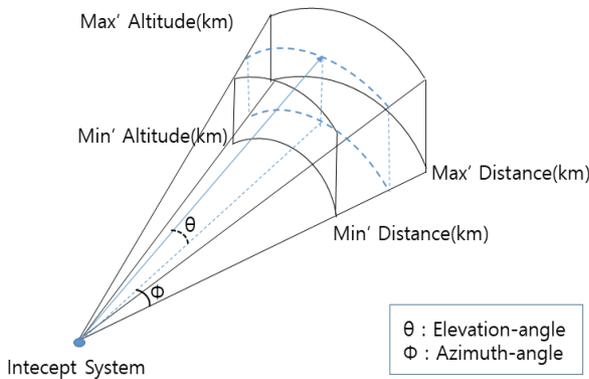


Fig. 5. Parameters in the Engagement Area

2.5.2. 실험 결과

Figure 6은 요격무기체계와 공중항적간 레이더 기준선 거리가 20km의 평면상에서 공중항적의 고도와 방위각 위치 변화에 따른 확률밀도함수값의 변화를 나타내고 있다.

방위각 변화에 따른 확률 밀도함수값은 레이더 기준선을 기준으로 정규분포 형태를 가지며, 기준점으로부터 멀어질수록 낮은 값을 나타내었다.

고도변화에 따른 확률밀도함수값의 변화도 마찬가지로 기준점에서 멀어질수록 낮은 값을 나타내었으나 그 변화량은 크지 않았는데 이것은 사용자의 요구사항이 반영된 교전공간의 크기 자체가 방위각 상으로 넓고 고도상으로 좁기 때문으로 판단된다.

Figure 7은 요격무기체계로부터 20km 떨어진 지점의 고도와 방위각 범위를 축으로 한 평면상에서의 지점별로 계산된 사후 격추확률값을 나타내고 있다.

일반적으로 공중항적과 요격무기체계의 상대거리가 기준점 거리보다 멀어지면 요격유도탄의 위치예러, 기동성능 등에 영향을 받으며, 기준점 거리보다 가까워지게 되면 높은 초기 회전 요구, 추진구간에서의 교전가능성 등에 따른 제약이 발생하며[6], 위상배열 레이더의 경우에는 빔의 조향각이 요격체계의 레이더 기준선을 중심으로 상하좌우로 각도가 커질수록 빔

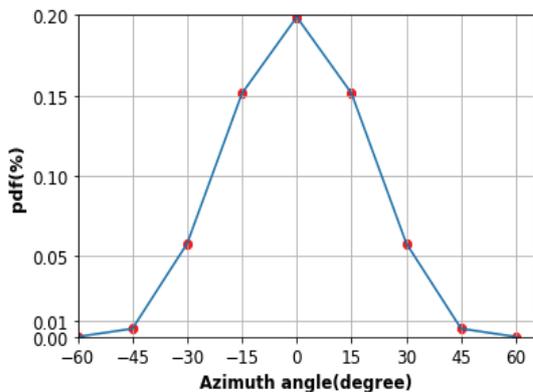


Fig. 6. PDF according to azimuth & altitude difference at 20km

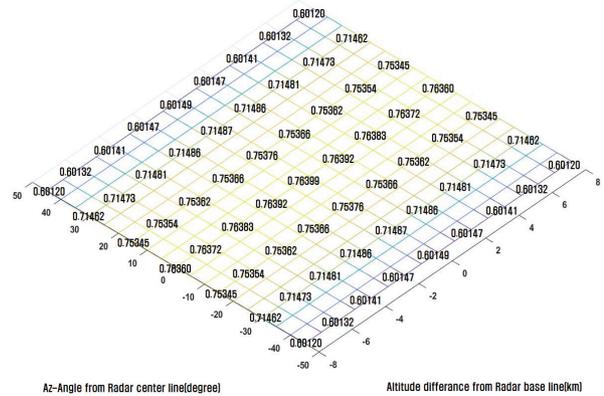


Fig. 7. Kill probabilities according to azimuth & altitude difference at 20km(%)

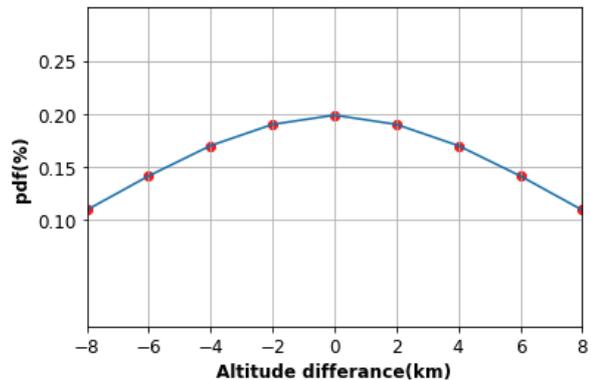
조향각에 따른 손실에 의해 탐지성능이 불균일하게 나타날 수 있기 때문에[7] 교전공간의 중심점에서 벗어날수록 격추확률이 낮아지게 된다.

본 논문에서는 다변량의 확률밀도함수를 계산한 뒤 베이저안 추론을 이용하여 교전공간내에서의 사후격추 확률을 계산하였다.

계산된 확률값의 분포는 Fig. 7과 같이 요격무기체계의 교전공간 중심점을 기준으로 평면상의 가운데가 가장 높고 교전공간의 모서리 쪽이 가장 낮은 값의 분포를 보였는데 이를 통해 다변량 확률밀도함수를 이용하여 계산된 사후 격추확률값의 분포를 이용하여 교전공간내에서 고속의 공중항적의 위치에 따른 교전 적합성 판단이 가능함을 알 수 있다.

Figure 8은 요격무기체계로부터 20km 떨어진 지점에서 레이더 기준선을 기준으로 공중항적의 고도와 방위각 변화에 따른 사후 격추확률의 변화 추세를 나타낸다.

Figure 8에서 고도에 따른 격추확률의 변화추세는 변화율이 적어 기울기가 완만하게 나타났으며, 방위각에 따른 격추확률의 변화는 방위각 증가에 따라 기울기가 급격하게 감소하였는데, 방위각 45°를 기준으로 격추확률이 급격하게 감소하고 있음을 볼 수 있



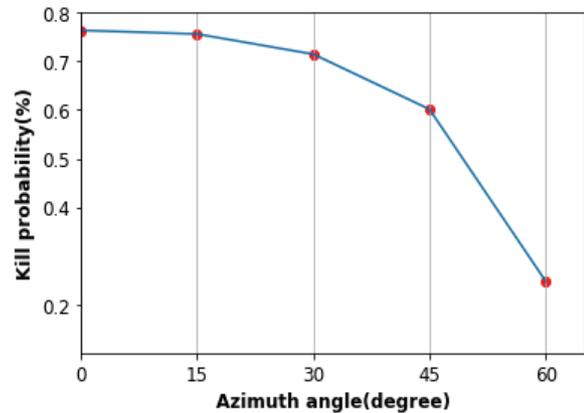
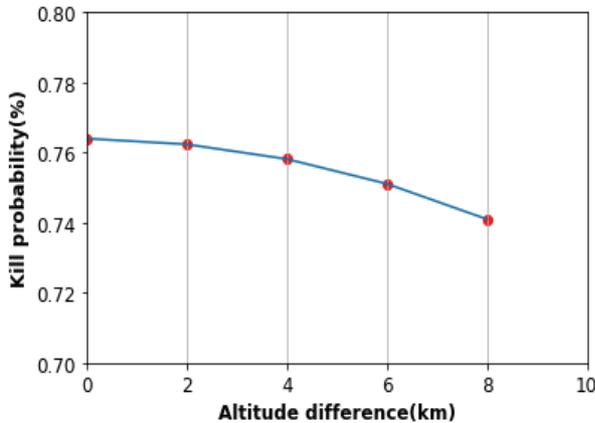


Fig. 8. Kill probabilities according to altitude difference and azimuth angle at 20km

다. 베이지안 추론을 기반으로 계산되는 격추확률 $p(k')$ 값은 다변량 상황변수들의 확률밀도 함수 $p(X)$ 에 의해 영향을 받는데 확률밀도 함수 $p(X)$ 값의 변화가 Fig. 6과 같이 방위각상으로 크고 고도상으로는 적기 때문에 격추확률도 방위각 변화에 따른 감소량이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

Figure 9는 사용자의 요구에 의해 정해지는 최적의 요격지점(20km)을 중심으로 레이더 기준선상에서의 공중항적의 거리 증감(-8 ~ +8km)에 따른 격추 확률의 변화를 나타낸다. 레이더 기준선상에서의 격추확률 변화량은 거리별로 큰 차이를 보이지는 않았지만 최적의 요격지점에 가장 높은 76.49% 격추확률값을 보였고 중심에서 멀어질수록 76.37% ~ 76.13%까지 격추확률이 감소하였다.

Figure 10은 요격무기체계로부터 20km 떨어진 지점에서 레이더 기준선을 기준으로 공중항적의 고도와 방위각이 변화함에 따른 사후 격추확률의 변화를 3차원 그래프로 나타낸 것이다.

Figure 10에서 방위각에 따른 격추확률이 급격하게 감소하는 것과 달리 고도에 따른 격추확률은 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

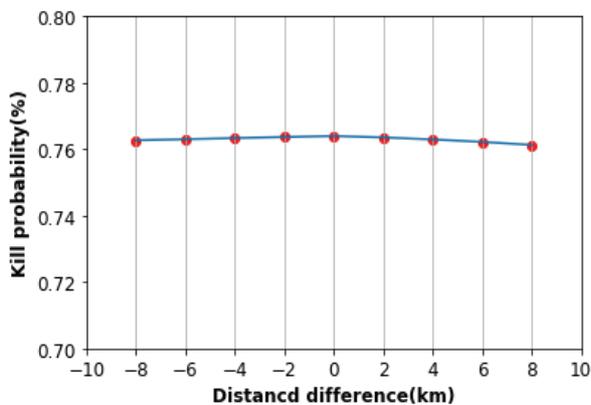


Fig. 9. Kill probabilities according to distance difference at azimuth 0

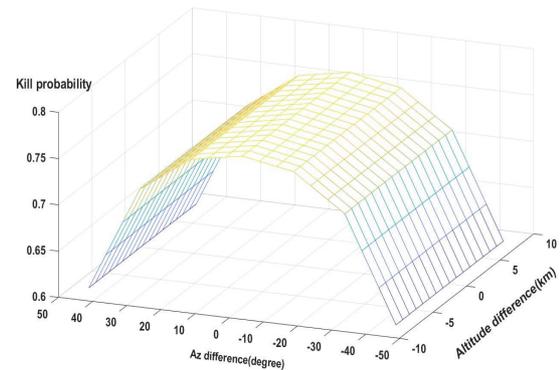


Fig. 10. Kill probabilities according to azimuth & altitude difference at 20km(3D)

III. 결 론

본 논문에서는 위협평가가 끝난 적 공중항적에 대해 요격무기체계를 할당하기 위해 공중항적으로부터 수신되는 다변량의 비행상태정보를 이용하여 교전공간내의 각 지점에 대한 격추확률을 계산함으로써 교전적합성을 평가하는 방법을 제시하였다.

격추확률을 계산하기 위해 먼저 공중항적의 상대거리, 접근방위각 및 고도 등의 다변량 상태정보를 이용하여 확률밀도함수값을 계산하였으며, 계산된 확률밀도함수값의 분포는 정규분포 형태를 따르며 기준점으로부터 멀어질수록 낮은 값을 나타내었다. 확률밀도함수값은 방위각에 따라서는 큰 차이를 보인 반면, 고도값에 따라서는 변화량이 크지 않았는데 이것은 요격무기체계의 성능으로 요구된 교전공간의 크기 자체가 방위각상으로 넓고 고도상으로 좁기 때문으로 판단된다.

교전공간내의 각 지점별로 계산된 확률밀도함수값을 토대로 요격무기체계의 최대성능으로 설정된 격추확률을 사전 격추확률로 가정한 뒤 베이지안 추론을 통해 교전공간내에 설정한 임의의 지점에 대한

사후 격추확률을 계산하였고 계산된 격추율의 가시화를 통해 성능평가를 수행하였다.

평가결과 교전공간내에서 요격무기체계의 사후격추확률값의 분포는 무기체계의 성능으로 요구된 최적의 요격지점을 기준으로 다변량 정규분포를 따르고 있음을 확인하였고 이러한 결과는 교전공간을 통과하는 공중항적의 교전적합성을 평가하는데 적용 가능할 것으로 기대된다.

다만 본 논문을 통해 요격무기체계의 교전공간내에서의 격추확률값의 분포 경향은 알 수 있었으나 요격무기체계로부터 동일한 거리를 갖는 위상배열 레이더 빔의 단면을 구면의 형태가 아닌 평면으로 가정하고, 유도탄의 동력학을 고려하지 않아 무기체계의 격추 확률값을 계산하기에는 제한이 따랐다.

또한 기동하지 않고 일정한 궤적을 비행하는 고속의 공중항적을 가정하여 계산함으로써 궤적이 수시로 변하는 기동항적에 대해서는 추가적인 고려가 필요하다.

향후 추가적인 연구를 통해 평면을 구면으로 환산하여 기하학적 변환을 적용하고 유도탄의 동력학을 포함한 유도탄과 적 공중항적의 기동성능 및 위상배열레이더의 신호손실을 추가로 고려하여 더 신뢰성 있는 격추확률값을 계산할 필요가 있다.

References

- 1) Karasakal, O., "Air defense missile-target allocation models for a naval task group," *Computer & Operations Research*, Vol. 35, No. 6, 2008, pp. 1759~1770.
- 2) Kim, J. C., "Adaptive Weapon-Target Assignment Model Based on the Real Time Prediction of Hit Probability," *Department of Industrial Engineering, The Graduate School of Yonsei University*, December 2018.
- 3) Choi, B. M. and Han, M. M., "A Study of Threat Evaluation using Learning Bayesian Network on Air Defence," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, Vol. 22, No 6, December 2012, pp. 715~721.
- 4) Soongsil University, "Chapter 4. Multivariate Normal Distribution," c2017 [cited 2017 April 4], Available From: <https://ssuocw.ssu.ac.kr/post/1392> (accessed April. 9, 2021)
- 5) Kim, J. E., "Threat evaluation system and method against anti-air target and computer readable storage medium having a program recorded thereon where the program is to carry out its method," *Korea Patent, Application no 10-2011-0044370*, May 2011.
- 6) Park. H. W. and Lee. H. M., "A Study on Optimal Operation against Anti-Air Missiles with Consideration of Anti-Surface Missile Kill Probability," *Journal of KIMST*, Vol. 22, No. 6, 2019, pp. 815~823.
- 7) Ahn, C. S., Roh, J. E. and Kim, S. J., "A Study on Beam Operation of an Airborne AESA Radar with Uniform Search Performance in Whole Scan Area," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, June 2012, pp. 740~747.
- 8) Department of Defense Interface Standard "Tactical Data Link Message Standard," January 2017, pp. 4~300.