



Received: 2026/02/25
Revised: 2026/03/09
Accepted: 2026/03/19
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Myunghoon Park
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5179-7267
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: pmh604god@gmail.com

UAV 운용 고도 및 센서 시야각에 따른 감시 바닥 투영 면적 특성 분석

Analysis of Projected Footprint Area Characteristics According to UAV Altitude and Sensor Field of View

박명훈*, 김정, 이성균, 고진용, 장재덕

LIG넥스원 M&S팀 수석연구원

Myunghoon Park*, Jeong Kim, Sungkyun Lee, Jinyong Go, Jaedeok Jang

Chief research engineer, M&S Team, LIG Nex1

Abstract

UAV 기반 감시에서 운용 고도와 센서 시야각은 감시 영역을 결정하는 핵심 기하학적 변수이다. 본 연구에서는 UAV 고도와 센서 시야각 변화에 따른 바닥 투영 면적 특성을 기하학적 관점에서 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 바닥 투영 면적은 고도 증가에 따라 단조 증가하였으며, 시야각이 클수록 동일한 고도 증가에 대한 면적 확장 효과가 증폭되는 비선형 특성이 확인되었다. 또한, 고도와 시야각은 독립적으로 작용하기보다는 상호 결합된 형태로 면적 형성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 UAV 기반 감시 시스템의 초기 설계 단계에서 고도 및 시야각 설정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 센서 성능 및 임무 요소를 고려한 확장 연구의 기반을 제공한다.

In unmanned aerial vehicle (UAV)-based surveillance, the altitude and sensor field of view (FOV) are fundamental geometric parameters that determine the coverage area. This study quantitatively analyzes the characteristics of the projected footprint area with respect to UAV altitude and sensor FOV from a geometric perspective. The results indicate that the projected footprint area increases monotonically with altitude, while larger FOVs amplify the area expansion associated with altitude variation, revealing nonlinear scaling behavior. Furthermore, the altitude and FOV are shown to interact in a coupled manner rather than independently influencing the footprint formation. The findings provide fundamental references for altitude and FOV selection in the early design stage of UAV surveillance systems. They also establish a basis for future studies incorporating sensor performance and mission-related constraints.

Keywords

UAV 감시(UAV Surveillance),
바닥 투영 면적(Projected Footprint Area),
센서 시야각(Sensor Field of View (FOV)),
운용 고도(Operational Altitude),
기하학적 모델링(Geometric Modeling),
파라메트릭 분석(Parametric Analysis)

1. 서론

무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)는 해상 감시, 정찰, 재난 대응 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 확대되고 있으며, 특히 넓은 해역을 효율적으로 관측할 수 있는 플랫폼으로 주목받고 있다[1-4]. UAV 기반 해상 감시 시스템의 설계 및 운용을 위해서는 센서 성능뿐만 아니라, UAV의 비행 고도와 센서 시야(field of view, FOV)에 따라 실제로 감시 가능한 해수면 영역이 어떻게 형성되는지에 대한 정량적인 이해가 필수적이다. 이러한 감시 면적은 시스템 설계 단계에서 요구 감시 범위를 만족하는 플랫폼 및 센서 파라미터를 결정하는 핵심 요소로 작용한다.

기존의 UAV 관련 연구들은 주로 표적 탐지 성능, 영상 처리 알고리즘, 임무 시나리오 기반 운용 효과 분석에 초점을 맞추어 수행되어 왔다. 이와 같은 연구들은 특정 시스템이나 운용 조건에서의 성능을 평가하는 데에는 유용하지만, UAV 고도나 센서 FOV와 같은 기하학적 파라미터 변화가 해상 감시 면적에 미치는 영향을 일반화된 형태로 제시하는 데에는 한계가 있다. 특히, 감시 성능 분석이나 자원 최적화 연구의 기초가 되는 바닥 투영 면적 자체를 명확한 기하 모델로 정식화하고, 파라메트릭 특성을 체계적으로 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 해상 환경에서의 감시 면적은 단순한 평면 기하 문제가 아니라 지구 곡률, UAV의 고도, 센서 조향각 및 FOV가 결합된 공간 기하 문제로 정의된다. 이러한 요소들

은 감시 면적의 크기뿐만 아니라 형상에도 영향을 미치며, 동일한 FOV를 적용하더라도 UAV 고도에 따라 감시 면적 증가 특성은 선형적으로 변화하지 않는다. 따라서 UAV 기반 해상 감시 시스템의 초기 설계 단계에서는 개별 임무나 성능 지표에 앞서, 기하학적 관점에서 감시 면적이 어떻게 형성되고 변화하는지를 정량적으로 이해할 필요가 있다.

본 논문에서는 UAV 기반 해상 감시를 위한 기하학적 바닥 투영 면적 모델을 제시하고, UAV 고도 및 센서 FOV 변화에 따른 감시 면적 특성을 파라메트릭 분석을 통해 정량적으로 분석한다. 제안된 모델은 센서 시선과 해수면(구면) 간의 교차 관계를 기반으로 바닥 투영 영역을 정의하며, 특정 시스템 성능이나 운용 시나리오에 의존하지 않는 일반화된 형태로 구성된다. 이를 통해 UAV 고도 및 센서 FOV가 감시 면적 증가에 미치는 영향을 직관적이면서도 정량적으로 제시하고자 한다.

본 논문의 주요 기여는 다음과 같다. 첫째, 지구 곡률을 고려한 기하학적 모델을 통해 UAV 센서의 해상 바닥 투영 면적을 정식화한다. 둘째, UAV 고도 및 센서 FOV 변화에 따른 감시 면적의 증가 특성과 민감도를 파라메트릭 분석을 통해 제시한다. 셋째, 제안된 분석 결과를 바탕으로, 요구 감시 면적을 만족하기 위한 UAV 고도 및 센서 FOV 설정에 대한 기초적인 설계 관점을 제공한다. 본 연구에서 제시하는 모델과 분석 결과는 향후 UAV 기반 해상 감시 시스템의 설계 및 성능 분석 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 기하기반 UAV 해상 감시 모델

본 장에서는 UAV 기반 해상 감시에서 센서 시야가 해수면에 투영되어 형성되는 감시 영역을 기하학적으로 모델링한다. 본 연구의 목적은 특정 센서 성능이나 운용 시나리오를 고려하기에 앞서, UAV의 고도와 센서 FOV가 해상 바닥 투영 면적에 어떠한 구조적 영향을 미치는지를 일반화된 형태로 정식화하는 데 있다. 이를 위해 지구 곡률을 고려한 공간 기하 모델을 기반으로 센서 시선과 해수면 간의 교차 관계를 정의하고, 해당 교차점들의 집합으로 구성되는 바닥 투영 영역을 감시 면적으로 규정한다.

제안하는 모델은 센서의 시선 방향을 연속적인

ray 집합으로 표현하고, 각 ray가 해수면과 교차하는 지점을 계산함으로써 감시 영역의 경계를 형성한다. 이러한 접근은 특정 구현 방식이나 소프트웨어 도구에 종속되지 않으며, UAV 고도, 센서 조향각, FOV와 같은 기하 파라미터가 감시 면적에 미치는 영향을 직관적이면서도 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 제공한다. 본 장에서는 먼저 좌표계 정의와 기본 가정을 명확히 한 뒤, 센서 시선 기반 바닥 투영 모델과 감시 면적 산출 방법을 순차적으로 설명한다.

2.1 좌표계 정의 및 기본 가정

UAV 기반 해상 감시 기하 모델을 정식화하기 위해, 본 연구에서는 지구를 반지름을 갖는 구면으로 가정하고, UAV는 해수면 상공 고도에 위치한 점으로 모델링한다[5]. 좌표계의 경우 지구 중심을 원점으로 하는 지구 고정 좌표계(earth centered earth fixed, ECEF)를 사용하며, UAV의 위치 벡터는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_e + h \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, R_e : 지구 반지름(m),

h : 해수면 상공 고도(m).

이는 일반성을 잃지 않는 범위 내에서 모델을 단순화하기 위한 가정으로, UAV가 위치한 지표 바로 아래 지점을 기준으로 국소적인 접평면을 정의할 수 있도록 한다. UAV 바로 아래의 해수면 상 지점은 다음과 같이 정의된다.

$$s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

해당 지점에서의 접평면을 감시 면적 분석을 위한 기준 평면으로 사용하며, 이 평면의 두 축은 각각 동쪽과 북쪽 방향으로 정의한다. 이후 계산되는 모든 바닥 투영 점들은 이 접평면 좌표계로 변환되어 면적 계산에 활용된다.

센서의 시야는 방위각과 고각으로 정의되며, 방위각은 접평면의 동쪽 방향을 기준으로 반시계 방향을 양(+),의 방향으로 설정한다. 고각은 수평면을

기준으로 정의하며, 위쪽 방향을 양(+)으로, 아래쪽 방향을 음(-)으로 설정한다. 따라서 해수면을 관측하는 센서 시선은 일반적으로 음의 고각 값을 갖는다. 센서의 중심 시선(boresight)은 방위각 α_c , 고각 β_c 로 정의되며, 센서의 FOV는 방위 및 고각 방향으로 각각 전체각 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 를 갖는 직사각형 형태로 가정한다.

본 연구에서는 다음과 같은 기본 가정을 적용한다. 첫째, 해수면은 평균 해수면을 기준으로 한 매끄러운 구면으로 가정하며, 파랑이나 해상 요동에 따른 미세한 변형은 고려하지 않는다. 둘째, 센서 시선은 직선으로 전파되며 대기 굴절 효과는 무시한다. 셋째, 감시 면적은 센서 시야 경계에 해당하는 시선들이 해수면과 교차하여 형성하는 폐곡선 영역으로 정의한다. 이러한 가정은 해상 감시 면적의 기하학적 특성을 분석하기 위한 최소한의 조건을 제공하며, 이후 장에서 수행되는 파라메트릭 분석의 해석을 명확하게 하는데 목적이 있다.

2.2 센서 시선 기반 바닥 투영 모델

본 절에서는 UAV에 탑재된 센서의 시선과 해수면 간의 기하학적 교차 관계를 이용하여, 해상 바닥 투영 영역을 정의하는 방법을 제시한다[6,7]. 센서 시야는 연속적인 시선들의 집합으로 표현되며, 각 시선이 해수면과 교차하는 지점들의 집합이 감시 영역의 경계를 형성한다. 이러한 접근은 센서의 고도, 조향각, FOV 변화가 감시 면적에 미치는 영향을 직관적이면서도 정량적으로 분석할 수 있는 기반을 제공한다.

센서 시선은 방위각 α 와 고각 β 로 정의되는 단위 방향 벡터로 표현된다. 본 연구에서 사용하는 좌표계 정의에 따라, 방위각은 접평면의 동쪽 방향을 기준으로 반시계 방향을 양(+)으로 하며, 고각은 수평면을 기준으로 위쪽을 양(+)으로 정의한다. 이때, 특정 방위각 및 고각을 갖는 센서 시선 방향 벡터는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$d(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\alpha \\ \cos\beta\sin\alpha \\ \sin\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, α : 방위각,
 β : 고각.

UAV 위치 벡터 P 에서 출발하는 센서 시선은 매개변수 $t \geq 0$ 에 대해 식 (4)와 같은 직선 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$r(t) = P + td \quad (4)$$

해수면은 반지름 R_e 를 갖는 구면으로 모델링되며, 해당 표면은 다음 조건을 만족하는 점들의 집합으로 정의된다.

$$\|X\|^2 = R_e^2 \quad (5)$$

센서 시선과 해수면의 교차점은 위 두 식을 연립함으로써 계산할 수 있다. 이를 정리하면 식 (6)과 같은 2차 방정식을 얻게 된다.

$$\|P + td\|^2 = R_e^2 \quad (6)$$

해당 방정식의 해 중 양의 값을 갖는 해 t^* 는 UAV로부터 해수면까지의 시선 방향 거리이며, 이를 통해 교차점 q 는 다음과 같이 결정된다.

$$q = P + t^*d \quad (7)$$

센서 시선이 해수면을 향하지 않거나, 시선이 지평선 위를 향하는 경우에는 실수 해가 존재하지 않거나 $t^* \leq 0$ 가 되어 교차점이 정의되지 않는다. 이러한 경우 해당 시선은 바닥 투영 영역 형성에 기여하지 않는 것으로 간주한다.

센서 FOV는 중심 시선(α_c , β_c)을 기준으로 방위 및 고각 방향으로 각각 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 의 전체각을 갖는 직사각형 영역으로 정의된다. 바닥 투영 영역의 경계는 이 FOV 경계에 해당하는 시선들에 의해 형성되므로, 본 연구에서는 FOV의 네 변을 따라 방위각 및 고각을 균일하게 샘플링하고, 각 샘플에 대해 앞서 정의한 ray-surface 교차 계산을 수행한다. 이렇게 얻어진 교차점들의 집합은 해수면 상에서 감시 영역의 경계를 근사적으로 구성한다.

산출된 해수면 상의 교차점들은 UAV 바로 아래의

기준점을 원점으로 하는 국소 접평면 좌표계로 투영된다. 이를 통해 3차원 공간상의 교차점 집합은 2차원 평면상의 다각형으로 표현되며, 해당 다각형이 UAV 센서에 의해 감시 가능한 바닥 투영 영역을 나타낸다. 최종적으로 감시 면적은 이 다각형의 면적을 계산함으로써 정량화된다.

제안된 센서 시선 기반 바닥 투영 모델은 특정 센서 구현이나 수치 계산 기법에 종속되지 않는 일반화된 형태를 갖는다. 따라서 UAV 고도, 센서 조향각, FOV 변화가 감시 면적에 미치는 영향을 동일한 기하학적 틀 내에서 일관되게 분석할 수 있으며, 이후 장에서 수행되는 파라메트릭 분석의 이론적 기반을 제공한다.

2.3 바닥 투영 면적 산출 방법

본 절에서는 2.2절에서 정의한 센서 시선 기반 바닥 투영 경계로부터 감시 면적을 정량적으로 산출하는 방법을 제시한다[8,9]. 센서 시선과 해수면의 교차 계산을 통해 얻어진 교차점 집합은 3차원 공간 상에 정의되므로, 면적 계산을 위해서는 이를 적절한 2차원 좌표계로 변환한 후 수학적으로 면적을 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 UAV 바로 아래의 기준점을 기준으로 한 국소 접평면을 이용하여 바닥 투영 영역을 평면 다각형으로 표현하고, 해당 다각형의 면적을 계산한다.

먼저, 2.2절에서 계산된 해수면 상의 교차점 q_i 를 국소 접평면 좌표계로 투영한다. 기준점 s 에서 정의되는 접평면의 두 직교 단위 벡터를 e_x, e_y 라 할 때, 각 교차점의 평면 좌표 (x_i, y_i) 는 다음과 같이 계산된다.

$$x_i = (q_i - s)e_x, \quad y_i = (q_i - s)e_y \quad (8)$$

이를 통해 센서 FOV 경계에 해당하는 모든 시선에 대해 2차원 좌표 집합 $[(x_i, y_i)]_{i=1}^N$ 을 얻을 수 있으며, 이 점들은 바닥 투영 영역의 경계를 순차적으로 근사한다. 이때 N 은 FOV 경계를 따라 샘플링된 시선의 개수로, 충분히 큰 값을 선택함으로써 경계 곡선을 다각형 형태로 정확하게 근사할 수 있다.

이론적으로, 바닥 투영 면적은 식 (9)와 같이 접평면 상에서 정의된 폐곡선 C 로 둘러싸인 영역의 면적으로 정의할 수 있으며, 선적분 형태로 표현된다.

$$A = \frac{1}{2} \oint_C (x dy - y dx) \quad (9)$$

위 식은 연속적인 경계 곡선에 대한 면적 정의를 나타내며, 바닥 투영 영역의 형상이 임의의 곡선 형태를 갖더라도 일반적으로 적용 가능하다. 실제 수치 계산에서는 경계 곡선을 다각형으로 근사하므로, 해당 적분식은 이산 형태의 면적 계산식으로 변환된다. 경계 점들이 시계 방향 또는 반시계 방향으로 정렬된 다각형을 이룰 때, 바닥 투영 면적은 식 (10)과 같은 다각형 면적 계산식을 통해 근사적으로 계산된다.

$$A \approx \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^N (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right| \quad (10)$$

여기서 $(x_{N+1}, y_{N+1}) = (x_1, y_1)$ 로 정의하여 다각형이 폐곡선을 이루도록 한다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 센서 FOV 경계를 따라 방위각 및 고각을 균일하게 샘플링함으로써 경계점들의 순서를 자연스럽게 보장하며, 이를 통해 안정적인 면적 계산이 가능하도록 한다.

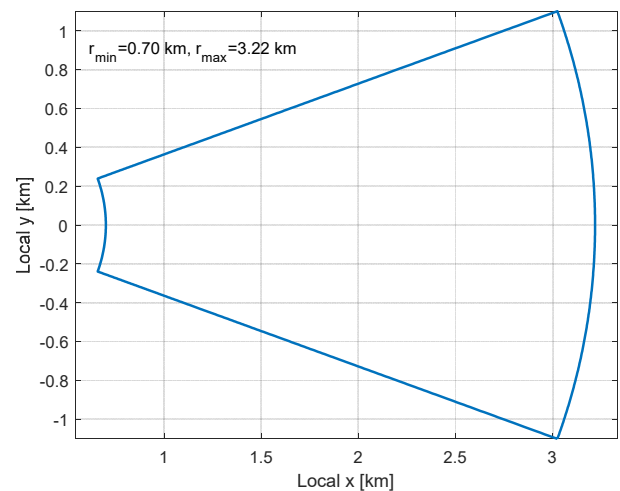


Fig. 1. Result of footprint area on the ground surface

이와 같은 면적 산출 절차는 특정 센서 모델이나 구현 방식에 의존하지 않는 일반화된 형태를 갖는다. UAV 고도, 센서 조향각, FOV 변화는 센서 시선의 방향 분포에만 영향을 미치며, 이후의 투영 및 면적 계산 과정은 동일한 수학적 틀 내에서 수행된다. 따라서 제안된 바닥 투영 면적 산출 방법은 다양한 UAV 기반 해상 감시 시나리오에 대해 일관된 기준으로 감시

면적을 비교·분석할 수 있는 기초 도구로 활용될 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

UAV 기반 해상 감시 기하 모델의 특성을 정량적으로 분석하기 위하여, 본 장에서는 UAV 고도 및 센서 FOV를 주요 변수로 설정하고 파라메트릭 시뮬레이션을 수행하였다. 분석의 목적은 특정 임무나 센서 성능을 평가하는 것이 아니라, 기하학적 바닥 투영 면적이 운용 파라미터 변화에 따라 어떻게 변화하는지를 체계적으로 확인하는 데 있다. 이를 위해 고도와 FOV를 독립 변수로 설정하고, 각 변수 변화에 따른 감시 면적의 절대값, 증가율, 민감도 특성을 비교·분석하였다.

본 장에서는 먼저 분석에 사용된 파라미터 범위 및 설정 조건을 제시한 후, 고도 변화에 따른 면적 특성, FOV 변화에 따른 면적 특성, 그리고 고도-FOV 조합에 따른 2차원 분포 특성을 순차적으로 제시한다. 마지막으로 대표 구간에 대한 증가량 및 민감도 지표를 통해 정량 비교를 수행한다.

3.1 시뮬레이션 설정 및 분석 파라미터

본 연구에서는 UAV 기반 해상 감시에서 고려될 수 있는 현실적인 운용 개념을 반영하여, UAV 고도와 센서 FOV를 주요 분석 변수로 설정하였다. 분석의 목적은 특정 기체나 장비 성능을 평가하는 것이 아니라, UAV 고도와 센서 시야각이 해상 바닥 투영 면적에 미치는 기하학적 영향을 일반화된 관점에서 정량적으로 분석하는 데 있다.

UAV 고도는 해상 감시에서 일반적으로 운용 가능한 저고도에서 중고도 구간을 포괄하도록 200 m에서 3,000 m까지 설정하였다. 수백 미터 수준의 저고도는 함정 탐제 또는 근거리 해상 감시 상황을 반영하며, 수 킬로미터 수준의 중고도는 전술급 UAV의 광역 감시 운용을 대표한다. 이 범위는 해상 감시 임무에서 현실적으로 고려 가능한 고도 영역을 포함하면서도, 고도 변화에 따른 기하학적 면적 증가 특성을 충분히 관찰할 수 있도록 설정되었다.

센서 시야각(FOV)은 방위 및 고각 방향으로 동일한 전체각을 갖는 경우를 기본 가정으로 하였으며,

FOV 범위는 10°에서 80°까지로 설정하였다. 좁은 시야각은 고해상도 중심 감시 개념을, 넓은 시야각은 광역 감시 개념을 각각 대표한다. 본 연구는 센서 성능이나 해상도 조건을 직접적으로 고려하지 않고, 순수 기하학적 투영 특성에 초점을 두므로, FOV 변화가 바닥 투영 면적의 스케일링에 미치는 영향을 명확히 관찰할 수 있도록 폭넓은 범위를 설정하였다.

센서 중심 시선은 해수면을 관측하는 조건을 가정하여 수평 기준 음의 고각을 갖도록 설정하였다. 지구는 반지름 R_e 를 갖는 구면으로 모델링하였으며, 대기 굴절 및 해면 요동은 고려하지 않았다. 바닥 투영 면적은 2장에서 제시한 ray-surface 교차 기반 모델을 통해 계산되었으며, 각 파라미터 조합에 대해 동일한 계산 절차를 적용하여 일관된 비교가 가능하도록 하였다.

이와 같은 설정을 통해, 본 연구는 UAV 고도와 센서 FOV가 해상 감시 면적 형성에 미치는 영향을 기하학적 관점에서 체계적으로 분석하였다.

3.2 바닥 투영 면적 특성 분석

UAV 고도는 해상 감시 면적을 결정하는 가장 직관적인 변수 중 하나이다. 고도가 증가하면 센서 시선과 해수면 사이의 기하학적 교차 거리가 증가하며, 그 결과 바닥에 형성되는 투영 영역의 크기 또한 확대된다. 그러나 이러한 증가가 단순한 선형 관계로 나타나는지, 혹은 고도 구간에 따라 증가 특성이 달라지는지는 정량적 분석을 통해 확인할 필요가 있다.

이를 위해 대표적인 FOV 값으로 20°, 40°, 60°를 선택하고, 고도를 200 m에서 3,000 m까지 변화시키며 바닥 투영 면적을 계산하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

전반적으로 모든 FOV 조건에서 고도가 증가할수록 투영 면적은 단조 증가하는 경향을 보인다. 그러나 증가 곡선의 기울기는 FOV에 따라 뚜렷한 차이를 보인다. 협시야(예: 20°) 조건에서는 고도 증가에 따른 면적 증가가 비교적 완만하게 나타나는 반면, 광시야(예: 60°) 조건에서는 동일한 고도 증가에 대해 훨씬 큰 면적 증가가 관찰된다. 이는 센서 시야 경계의 기하학적 확장이 고도뿐 아니라 시야각의 탄젠트 항에 의해 함께 증폭되기 때문이다. 특히 중고도 영역(약 1,000 m 이상) 이상부터는 고도 증가에 따른 면적 증

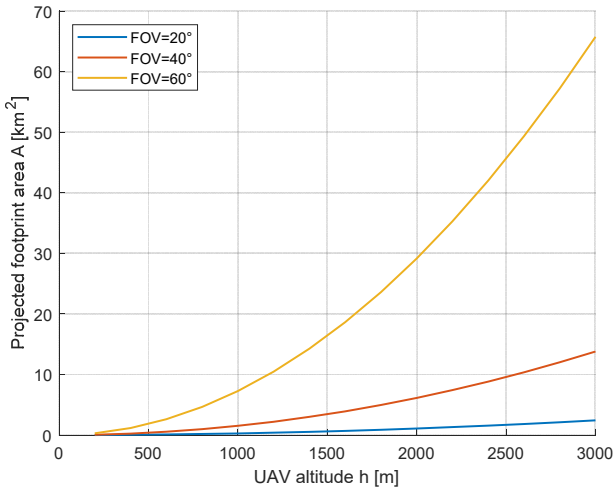


Fig. 2. Result of footprint area according to UAV altitude

가 폭이 점차 확대되는 경향을 보이며, 이는 고도와 FOV가 결합되어 면적 스케일이 가속적으로 증가함을 의미한다.

고도에 따른 면적 증가 특성은 FOV 변화와 결합될 때 더욱 뚜렷해진다. Fig. 3는 대표 고도 500 m, 1,500 m, 3,000 m에서 FOV를 변화시킨 결과를 나타낸다.

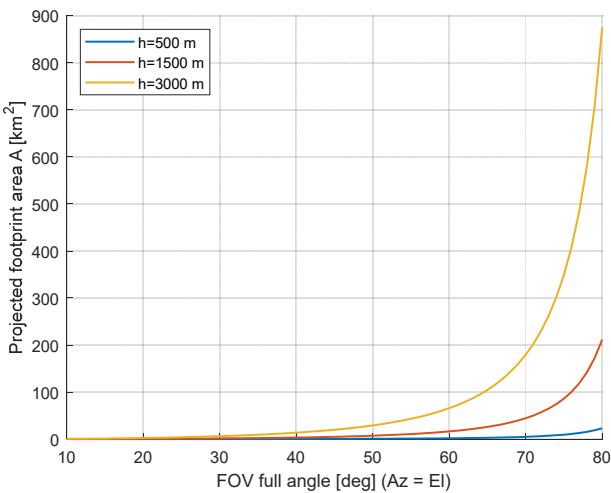


Fig. 3. Result of footprint area according to sensor FOV

저고도 조건에서는 FOV 증가에 따른 면적 확장이 상대적으로 제한적으로 나타나지만, 고도가 증가할수록 동일한 FOV 증가에 대한 면적 증가 폭이 현저히 커진다. 이는 FOV가 단독 변수로 작용하는 것이 아니라, 고도에 의해 확장된 기하학적 스케일 위에서 작동하기 때문이다. 다시 말해, 고도가 높을수록 FOV의 영향력이 증폭되는 구조를 갖는다. 이러한 경향은 고

도와 FOV를 동시에 고려한 2차원 파라메트릭 분포에서 더욱 명확하게 확인된다.

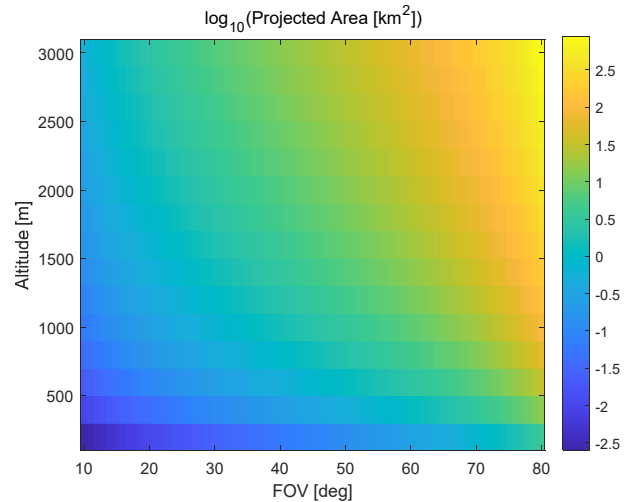


Fig. 4. Result of footprint area according to UAV altitude and sensor FOV

Fig. 4는 고도와 FOV 조합에 따른 바닥 투영 면적을 색상으로 표현한 결과이다. 저고도-협시야 영역에서는 면적 변화가 비교적 완만하게 나타나지만, 고도와 FOV가 동시에 증가하는 영역으로 이동할수록 면적이 급격히 확대되는 경향이 확인된다. 특히 중고도 이상 구간에서 FOV가 40°를 초과하는 영역부터 면적 증가율이 가속되는 양상이 나타나며, 이는 고도와 시야각의 상호작용이 단순 가산적이 아니라 비선형적으로 결합됨을 시사한다.

결론적으로, 고도 증가에 따른 바닥 투영 면적 확장은 단순한 비례 관계가 아니라, FOV와 결합된 비선형 스케일링 특성을 갖는다. 저고도 영역에서는 고도 변화가 주요 지배 변수로 작용하지만, 고도가 증가함에 따라 FOV의 영향이 상대적으로 확대되며, 두 변수의 결합 효과가 면적 증가를 가속화하는 구조를 보인다. 이러한 특성은 UAV 기반 해상 감시에서 요구 면적을 충족하기 위한 고도 및 FOV 설정 시, 단일 변수 최적화가 아닌 결합 변수 관점에서의 분석이 필요함을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 UAV 기반 해상 감시에서 센서 시야각과 운용 고도가 바닥 투영 면적에 미치는 영향을 기

하학적 관점에서 체계적으로 분석하였다. 특정 장비 성능이나 임무 시나리오에 종속되지 않도록, 센서 시선과 구면 해수면의 교차를 기반으로 한 일반화된 기하 모델을 구성하였으며, 이를 통해 바닥 투영 영역을 정량적으로 산출하는 절차를 제시하였다.

제안한 모델을 기반으로 UAV 고도(200 m-3,000 m)와 센서 FOV(10° - 80°)를 변화시키며 파라메트릭 분석을 수행한 결과, 바닥 투영 면적은 단순 선형 관계가 아닌 비선형 스케일링 특성을 보이는 것으로 확인되었다. 고도 증가에 따라 투영 면적은 단조 증가하였으며, 특히 FOV가 클수록 동일한 고도 증가에 대한 면적 확장 효과가 더욱 크게 나타났다. 반대로 FOV 증가에 따른 면적 확장 역시 고도에 따라 증폭되는 경향을 보였다. 이는 고도와 FOV가 독립적으로 작용하는 것이 아니라, 기하학적으로 결합된 형태로 면적 형성에 영향을 미친다는 점을 의미한다.

정량적 민감도 분석 결과 또한 이러한 결합 특성을 뒷받침하였다. 저고도 영역에서는 고도가 주요 지배 변수로 작용하는 반면, 고도가 증가함에 따라 FOV의 영향력이 상대적으로 확대되는 구조가 확인되었다. 따라서 요구 감시 면적을 만족하기 위한 파라미터 설정 시, 단일 변수의 변화만을 고려하는 접근은 한계를 가지며, 고도-FOV 결합 특성을 기반으로 한 통합적 설계 관점이 필요함을 확인하였다.

본 연구는 UAV 기반 해상 감시의 기초 기하 특성을 정량화하였다는 점에서 의의를 가진다. 제시된 모델과 분석 결과는 향후 센서 성능, 탐지 확률, 임무 지속 시간 등 운용 요소를 추가적으로 고려하는 확장 연구

의 기초 자료로 활용될 수 있다. 특히 UAV 운용 고도 및 센서 시야각 설정과 관련된 초기 설계 단계에서, 본 연구에서 도출된 면적 특성 분석 결과는 파라미터 선택의 기준 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Lav Gupta, Raj Jain, & Gabor Vaszkun, 'Survey of Important Issues in UAV Communication Networks,' IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. 18, NO. 2, 2016, pp. 1123-1152.
- [2] İlker Bekmezci, Ozgur Koray Sahingoz, & Şamil Temel, 'Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey,' Ad Hoc Networks, VOL. 11, NO. 3, 2013, pp. 1254-1270.
- [3] Reg Austin, Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment, Wiley, 2010.
- [4] I. Colomina & P. Molina, 'Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review,' ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, VOL. 92, 2014, pp. 79-97.
- [5] Elliott D. Kaplan & C. J. Hegarty, Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications (3rd ed.), Artech House, 2017.
- [6] Tomas Akenine-Moller, Eric Haines, & Naty Hoffman, Real-Time Rendering (3rd ed.), CRC Press, 2008.
- [7] John C. Curlander & Robert N. McDonough, Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing, Wiley, 1991.
- [8] Thomas M. Lillesand, Ralph W. Kiefer, & Jonathan W. Chipman, Remote Sensing and Image Interpretation (7th ed.), Wiley, 2015.
- [9] Merrill I. Skolnik, Radar Handbook (3rd ed.), McGraw-Hill, 2008.