

Magnus Rotor형 분산자탄 탄착군의 분산 균일도 평가

사공현규^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 미사일연구원

Evaluation of The Dispersion Uniformity of Footprint of The Magnus Rotor Type Dispersive Submunition

Hyeongyu Sakong^{*,1)}

¹⁾ Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 24 November 2023 / Revised 26 January 2024 / Accepted 21 February 2024)

Abstract

Dispersion munitions are often equipped with dispersive submunitions used to scatter bombs over a wide area, and one of the types of dispersive submunitions is the Magnus rotor, commonly referred to as a self-rotating flying body. The Magnus rotor is designed to be dispersed over a wide area by utilizing the principle of the Magnus effect through self-rotation, and has various trajectories depending on the initial conditions from the mother dispersion munition. In this paper, an index to evaluate the dispersion uniformity of footprint of the dispersive submunition is presented and the dispersion uniformity according to various initial release conditions is evaluated, and it is getting larger with high incidence angle and get max value at certain initial angular velocity.

Key Words : Magnus Rotor(매그너스 로터), Dispersion(분산), Bomblet(탄), Self Rotation(자기 회전식), Dispersion Uniformity(분산 균일도)

기 호 설 명

F : 공력	M : 공력 모멘트
g : 중력	V : 속도
Ω : 좌표계 회전속도	ω : 비행체 회전속도
m : 질량	I : 관성모멘트
ρ : 공기 밀도	S : 자탄 공력 단면적

d : 자탄 공력 지름

- 공력계수
- C_X : x축 힘
- C_{L_p} : z축(매그너스 축) 힘
- C_M : z축 모멘트
- C_{l_p} : x축 댐핑
- C_{N_r} : y축 댐핑
- C_{M_p}, C_{N_p} : 각속도 커플링 댐핑(z-y면)
- C_N : y축 힘
- C_l : x축 모멘트
- C_{M_y} : y축 모멘트
- C_{M_z} : z축 댐핑

* Corresponding author, E-mail: sghk36@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

유도탄은 그 사용 목적에 따라 여러 가지 임무를 수행할 수 있는데, 그 중 하나인 분산탄은 넓은 면적에 분포한 다양한 표적을 타격하기 위한 목적이며 탄두 내 여러 개의 자탄을 탑재하고 있다. 분산탄 탄두 내의 자탄은 모탄에서 방출된 후 다양한 방법으로 분산되는데 그 중 대표적인 방식이 매그너스 효과(Magnus effect)를 이용한 자기회전식 확산 방법이다. 자기회전식(self-rotating) 비행체인 Magnus rotor는 기본적으로 구 형태를 가지며 공력에 의해 스스로 회전하기 위해 날개가 달린 형태로 설계되어왔다. 따라서 자탄 방출 후 공력에 의한 회전 시 날개에 의해 생기는 양력과 항력 데이터를 확보하는 실험적 연구가 필수적으로 동반된다^[1].

이렇게 실험적으로 확보된 공력데이터를 기반으로 분산자탄의 비행궤적을 예측할 수 있으며, 분산자탄의 비행궤적은 통상 병진 3, 회전 3, 총 6 자유도 운동방정식을 이용해 해석할 수 있다^[2-5].

자탄의 비행궤적은 모탄의 비행경로각, 자탄 방출시 속도, 회전속도, 분출 고도, 자세 등 자탄의 방출조건들에 따라 달라지며 그에 따라 다양한 분산형태가 나타난다. 이러한 분산탄에 관한 연구는 1960년대부터 활발하게 이루어졌으며 현재까지 다양한 형태로 진행하고 있다^[6-11].

분산탄은 자탄의 탄착 시 형성하는 탄착군의 형태에 따라서 무기의 효과가 달라지며 이는 분산탄의 작전운용성능을 결정하는 중요한 척도가 된다. 작전운용성능은 개발되는 무기체계의 중요한 시험평가 대상으로서 그 평가 지표를 지정하는 것은 매우 중요한 일이라고 할 수 있다. 이에 반해, Magnus rotor 형 분산자탄과 관련하여 자탄의 분산 궤적을 분석하는 연구들은 많이 진행되어왔지만 분산 탄착군으로부터 분산도를 분석하고 평가하는 연구들은 상대적으로 많이 수행되어 있지 않은데, 본 논문에서는 이에 초점을 맞추고자 한다.

최근 관련된 연구로, Yun^[11]은 시험데이터에 기반한 분산 해석모델을 구축하고 그로부터 Dual Purpose Improved Conventional Munition(DPICM)의 분산형태를 예측, 시험데이터와 ‘반경’별 분산 패턴을 비교하여 해석 모델의 타당성을 주장하였고, Bai^[12]은 Brunk^[2-5] 논문의 6 자유도 운동해석 프로그램을 참조하여 자탄의 분산형태를 예측하였고 초기 방출조건, 특히 회전

속도에 따른 분산 균일도의 정량적 평가를 수행하였다. 구체적으로는, 자탄 방출 후 탄착군의 ‘반경방향’ 분산 균일도를 평가한 것이다. 하지만, 모탄이 회전하며 자탄을 방출할 때에는 모탄의 입사각, 특히 모탄 내 방향각에 따라 자탄은 다양한 초기 회전속도를 갖게 되고 Magnus 효과에 의해 복잡한 나선형 비행궤적을 그리게 된다. 이에, ‘각도방향’의 분산 균일도에도 분명한 영향을 주기 때문에 이를 포함하여 종합적인 분산 균일도를 평가하는 것이 타당하다.

따라서 본 논문에서는 반경방향 분산 균일도뿐 아니라 각도방향을 포함하는 분산 균일도를 분산탄의 평가 지표로 제시하고자 한다. 분산 균일도는 여러 연구 분야에서 사용되고 있는 일반적인 개념으로 분산자탄을 다루지 않는 논문들^[13-16]에서도 그 사용 예시를 참고할 수 있었다.

특히, 분산 균일도를 산출하는 과정에서 샘플이 되는 탄착군의 데이터로부터 정규화 탄착군 정보별로 편향되지 않으며 분산도라는 지표로서 변별력을 가지고, 평가에 용이한 지표 값으로 도출하기 위하여 머신러닝, AI 분야에서 흔히 활성화 함수로 사용되는 Sigmoid 함수를 활용하였다.

마지막으로 본 논문에서 제시하는 지표의 평가 예시로서, 다양한 자탄 방출조건에 따른 탄착군의 분산 균일도를 평가하여 그 활용성을 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

본 논문에서는 방출된 자탄의 비행궤적을 예측하고 통계적 기법을 이용하여 자탄 탄착군의 분산 균일도를 평가한다.

2.1 운동 해석 기법

본 논문에서는 방출된 자탄의 비행궤적을 예측하기 위하여 Brunk^[2-5] 논문을 참고하여 작성한 운동 해석 프로그램 사용하였다.

2.1.1 운동방정식

모탄에서 방출되는 분산자탄은 구형의 형태에 날개가 달린 형상으로 공력에 의한 magnus 효과를 통해 자기확산하며 분산자탄의 초기조건에 따라 다양한 비행궤적을 그린다.

본 논문에서 자탄의 궤적은 중력, 공력을 포함하는

6 자유도 비행운동으로 표현되며 운동방정식은 다음과 같다. 좌표계와 기호는 참고문헌^[2]에 기술된 바와 같다.

$$\vec{F} = -m\vec{g} + m\vec{V} + \vec{\Omega} \times m\vec{V} \quad (1)$$

$$\vec{M} = I\vec{\omega} + \vec{\Omega} \times [I]\vec{\omega} \quad (2)$$

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos\xi & \sin\xi \\ 0 & -\sin\xi & -\cos\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_X \\ C_N \\ -C_{Lp} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2}\rho V^2 S \quad (3)$$

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\xi & \cos\xi \\ 0 & -\cos\xi & \sin\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_l \\ C_m \\ C_{m_p} \end{bmatrix} + \text{damping} \cdot \frac{1}{2}\rho V^2 S d \quad (4)$$

$$\text{damping}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{qd}{2V}\sin^2\xi - \frac{rd}{2V}\cos\xi\sin\xi & \frac{qd}{2V}\cos^2\xi + \frac{rd}{2V}\cos\xi\sin\xi \\ 0 & -\frac{qd}{2V}\sin\xi\cos\xi + \frac{rd}{2V}\cos^2\xi & \frac{qd}{2V}\cos\xi\sin\xi + \frac{rd}{2V}\sin^2\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{l_p} \\ C_{m_q} \\ C_{N_r} \end{bmatrix}$$

$$\text{damping}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{qd}{2V}\sin\xi\cos\xi + \frac{rd}{2V}\sin^2\xi & \frac{qd}{2V}\sin\xi\cos\xi - \frac{rd}{2V}\cos^2\xi \\ 0 & -\frac{qd}{2V}\cos^2\xi - \frac{rd}{2V}\sin\xi\cos\xi & \frac{qd}{2V}\sin^2\xi - \frac{rd}{2V}\sin\xi\cos\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ C_{m_b} \\ C_{N_b} \end{bmatrix}$$

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad \vec{\Omega} = \vec{\omega} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad \tan(\xi) = \frac{w}{v} \quad (5)$$

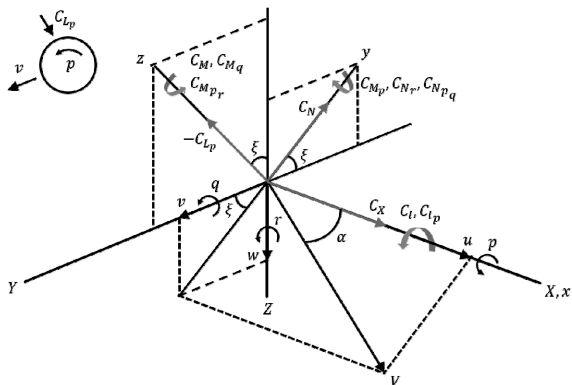


Fig. 1. Force and moment definitions (XYZ : reference coordinate)

분산자탄으로 사용되는 Magnus rotor의 공력계수는 풍동시험에서 얻은 값을 사용하였으며 축대칭 형상인 자탄의 회전좌표계는 쿼터니언을 사용하였다. 또한, 복잡한 운동방정식의 해를 구하기 위해 수치해석 방법을 사용하였으며 Milnes의 four-point method of prediction, Simpsons rule for correction, Runge-kutta는 3rd를 사용하였다^[2].

2.1.2 해석 조건

해석에 사용된 주요 파라미터는 1) 모탄의 선속력, 2) 회전각속도, 3) 입사각, 4) 고도, 5) 자탄 개수, 6) 관성량 및 7) 자탄의 초기 자세각이 있는데, 그 중 2) 회전각속도와 3) 입사각은 자탄의 받음각을 변화시켜 회전에 의한 Magnus 힘, 나아가 자탄 중심으로부터의 거리 및 각도에 영향을 주어 본 논문에서 다루고자 하는 분산 균일도를 결정하는 주요 파라미터라고 볼 수 있다. 반면, 1) 모탄의 선속력 및 4) 고도는 탄착군의 분산 반경에 주로 영향을 미친다. 이에 따라, 본 논문에서는 다른 파라미터들을 기준값으로 고정하고 2) 회전각속도와 3) 입사각에 따른 분산 균일도를 평가하였다. 파라미터 값의 범위는 문헌들을 참고하여 정하였으며 해석을 위해 사용된 수치라고 하더라도 구체적인 수치는 밝히지 않겠다. 또한, 지표면은 편평하며 탄착군은 원형으로 가정하였고 바람에 의한 영향은 무시하였다.

Table 1. Parameters of analysis

제 원	값
모탄의 선속도 (m/s)	V
모탄의 회전속도 (revolution/s)	ω[0.4 1.6]
입사각 (°)	[45 90]
분산 고도 (m)	h
자탄 개수 (개)	N
관성량 (kg·m ²)	[I]
자탄의 초기 자세	(x, y, z)

2.2 분산 균일도

본 논문에서는 Fig. 2과 같은 다량의 분산자탄의 탄착군으로부터 이론적인 도수분포 대비 탄착군의 분산을 추출하여 분산 균일도를 계산하였다.

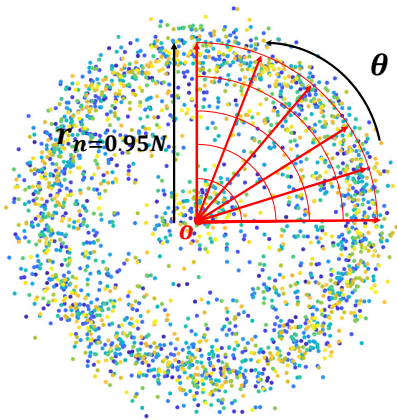


Fig. 2. Submunition footprint

분산 탄착군은 원형으로 가정하며 중심점(O)는 Fig. 2와 같이 분산자탄 개수의 95 %를 포함하는 최소의 접원^[17]의 중심으로 정의하였다. 탄착군은 이 중심점(O)을 기준으로 반경(발산) 방향과 각도(반시계) 방향으로 등 분할하여 구획을 나누었으며 Fig. 2에 원을 반경 및 각도 방향으로 각각 5개 및 20개(총 100개)로 분할한 예시를 사분원(에는 25개 구획만 표시)을 통해 나타내고 있다. 하지만, 본 논문에서 균일도 산출 시에는 예시와 달리 반경 및 각도 방향의 구획 분할 개수(Num_r , Num_θ)를 각 30개로 설정하여 계산하였다.

2.2.1 이론적 도수분포 - 반경 및 각도 방향 고려

반경 및 각도 방향은 중심점(O)을 기준으로 각각 발산 및 반시계 방향으로 정의하며 자탄의 95 %를 포함하는 최소의접원의 반경($r_n=0.95N$)을 구하여 이를 원형 탄착군의 반경으로 정의한다. 그리고 이 원을 반경 및 각도 방향으로 각각 적당한 개수($Num_r = 30$, $Num_\theta = 30$)로 등 분할하여 구획을 나눈다. 구획 내, 자탄의 이론적 도수분포는 자탄이 원내에 균일하게 분포되어 있다는 가정하에 부채꼴 영역(circular shell sector)의 면적에 비례하기 때문에 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

- 반경($r[i]$) 방향 i 번째, 각도($\theta[j]$) 방향 j 번째에 위치한 구획 내 자탄의 이론적 도수분포($\hat{N}_{i,j}$)

$$\hat{N}_{i,j} = (r_i^2 - r_{i-1}^2) / r_n^2 \times (0.95N) / Num_\theta \quad (7)$$

$$r_i = r_n \times i / Num_r, \quad r_{Num_r} = r_n, \quad r_0 = 0$$

$$Num_r = Num_\theta = 30 \quad (i = 1 \dots Num_r, j = 1 \dots Num_\theta)$$

2.2.2 분산 균일도 산출

원형 탄착군의 분산 균일도는 식 (7)의 이론적 도수분포 대비 탄착군의 도수분포 차이를 고려한 편차에 기반하며 이를 전달 함수를 통해 $[0, 1]$ 으로 mapping 하여 분산 균일도를 산출하였다. 다음은 분산 균일도의 산출 과정이다.

- 1) 먼저, 구획별로 이론적 도수분포($\hat{N}_{i,j}$)에 대한 탄착군의 도수분포($N_{i,j}$) 차에 대한 표준편차를 분산 편차로 정의하고 식 (8)과 같이 구한다.

- 분산(dispersion) 편차

$$Standard\ Deviation = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (\hat{N}_{i,j} - N_{i,j})^2}{Num_r \times Num_\theta}} \quad (8)$$

- 분산 편차 정규화

원형 탄착군을 반경방향으로 q 개, 각도방향으로 p 개 로 나눌 때, 반경방향으로 k 번째 위치한 구획의 이론적 자탄 개수는 식 (9)와 같고

$$\hat{x}_k = \frac{(k^2 - (k-1)^2) \cdot 0.95N}{q^2} \cdot \frac{1}{p} = \frac{(2k-1) \cdot 0.95N}{q^2} \cdot \frac{1}{p} \quad (9)$$

$$(Num_r = q, Num_\theta = p, k = 1 \dots q)$$

자탄의 분산 편차의 최대값은 임의의 각도방향의 첫 번째 구획($k = 1$, m : 임의값)에 모든 자탄이 분포할 때이므로 일반성을 잃지 않고 임의의 m 값은 1이라고 할 때 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

- 분산편차의 최대값($S.D.$)_{max}

$$x_{k,m \neq 1} = x_{k \neq 1,1} = 0, \quad x_{1,1} = 0.95N = N'$$

$$\sqrt{\frac{[\sum_{m=2}^p \sum_{k=1}^q (x_{k,m} - \hat{x}_{k,m})^2] + [\sum_{k=2}^q (x_{k,1} - \hat{x}_{k,1})^2] + (x_{1,1} - \hat{x}_{1,1})^2}{pq}}$$

$$= \sqrt{\frac{[\frac{N'^2}{p^2 q^4} \sum_{m=1}^p \sum_{k=1}^q (4k^2 - 4k + 1)] + (N')^2 - 2x_{1,1}N'}{qp}} \quad (10)$$

$$= \sqrt{\frac{N'^2}{p^2 q^4} (\frac{q(2q+1)(2q-1)}{3} + q^4 p - 2q^2)}$$

$$= \sqrt{\frac{N'^2}{pq} (\frac{4}{3qp} - \frac{1}{3q^3 p} + 1 - \frac{2}{q^2 p})} \approx \frac{N'}{\sqrt{qp}} \quad (q, p \gg 1)$$

2) 그 다음, 분산 편차를 식 (11)와 같이 자탄 개수에 대해 정규화시켰고, 식 (12)와 같이 전달 함수 (Transfer Function ; T.F)를 통해 정규화된 분산 편차를 mapping [0, 1] 하여 평가 지표인 ‘분산 균일도’로 정의하였다.

$$Normalized\ S.D = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} (\hat{N}_{i,j} - N_{i,j})^2}{q \times p}} \times \frac{q^{0.5} \times p^{0.5}}{N'} \quad (11)$$

• 분산 균일도(Dispersive Uniformity)

$$T.F : 1 - \exp\left(-\frac{1}{(18\ Normalized\ S.D)^2}\right) \quad (12)$$

과정 2)에서 사용된 전달 함수는 본 논문에서 제시하는 함수로 모든 값을 [0 1] 사이의 값으로 변별력있게 매핑(mapping) 하도록 튜닝하였고, 미분가능한 수로 변환하는 특징을 갖기 때문에 분류(Logistic classification) 문제의 가설과 비용 함수(cost function)로서의 기능도 기대해 볼 수 있는 함수이다. 식 (12)에서 산출되는 분산 균일도는 원형 탄착군의 분포($N_{i,j}$)가 이론적 도수분포($\hat{N}_{i,j}$)에 가까울수록 1에 근접하고 멀어질수록 작아지며 [0 1] 사이의 값을 가지도록 정의되어 있다.

본 논문에서 제시하는 분산 균일도는 자탄이 원 내에 고르게 분포하는 상황을 균일한 것으로 생각하여 비교 기준이 되는 분포로 가정하였지만, 작전 요구성에 따른 목표 분포형태가 있다면 기준이 되는 도수 분포를 변형하여 적용하여도 무방할 것으로 사료된다.

3. 결과 및 분석

본 장에서는 운동 해석 프로그램 사용하여 해석한 결과에 대해 논의하고자 한다. 해석은 2.1.2 절에서 언급한 대로 분산 시 모탄의 회전각속도와 입사각에 따른 탄착군을 도출하였고 그에 따른 분산 균일도 값을 비교하였다.

3.1 자탄 탄착군 분포

Fig. 3, 4는 입사각이 45°, 90° 일 때, 모탄의 회전속도에 따른 자탄의 탄착 분포이며 단위는 (m) 이다.

입사각이 90° 일 때는 자탄의 분포가 각도방향에 따라 비교적 고르게 분포되어있으나, 입사각이 45° 일 때는 전체체적이 약간 타원형의 형태로 변형되어 있

으며 모탄 회전속도 및 각도방향에 따라 불균일하게 자탄이 분포되어있는 것을 확인할 수 있다.

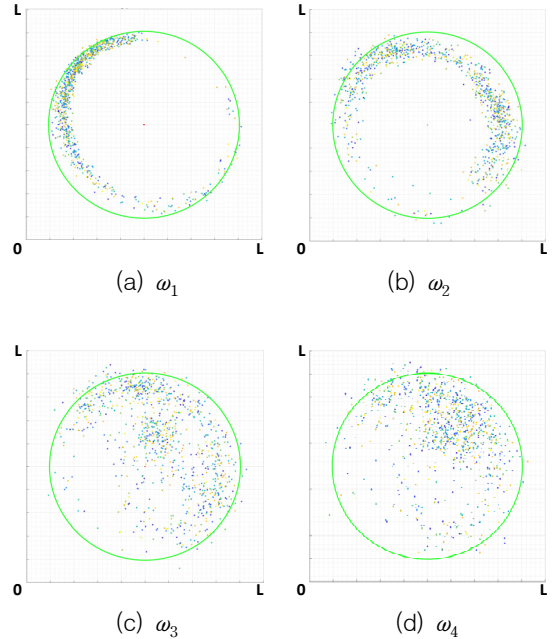


Fig. 3. Submunition footprint according to ω at 45°

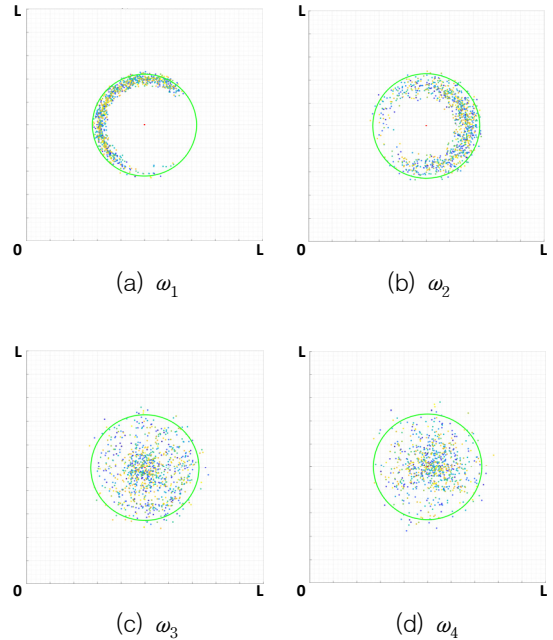


Fig. 4. Submunition footprint according to ω at 90°

3.2 탄착군의 자탄 분포도

Fig. 5, 6은 3.1 절의 각도, 회전속도별 자탄 탄착군 (Fig. 3, 4)와 이론적 도수분포의 차이를 구획별로 나타낸 그래프이다. 그래프 내 작은 점 하나하나가 구획의 각도 및 반경 중심에 위치하며 색은 도수분포 차이의 절대값에 따라 달라진다. 분산탄의 자탄 분산 시, 모탄의 회전속도가 증가할수록 ($\omega_1 \rightarrow \omega_4$) 내부에 탑재된 자탄의 초기 회전속도는 증가하게 된다. 이로 인해, 자기분산형 자탄의 궤적은 초기 회전속도가 없는 경우와 비교하여 원주 방향으로 휘어지며 결국 원의 중심점(O)에 가깝게 탄착하는 경향이 있는데, 이는 Fig. 5, 6의 (a), (b), (c), (d)의 비교로 확인할 수 있다.

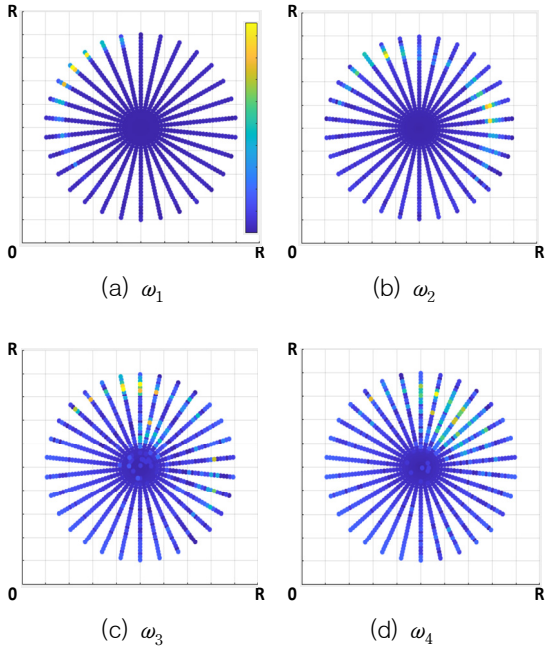


Fig. 5. Sectional submunition distribution according to ω at 45°

Fig. 5, 6의 x, y 축 좌표계는 동일한 축적으로 산출하였다. 3.1 절의 Fig. 3, 4와 같이 입사각이 90° 일 때는 각도에 따라 자탄이 비교적 고르게 분포되어 있으나, 입사각이 45° 일 때는 각도별로 편차가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 이론적으로는 모탄의 입사각이 감소함에 따라 탄착군의 형태가 타원형을 띠지만, 본 논문에서는 이를 반영하지는 않았다.

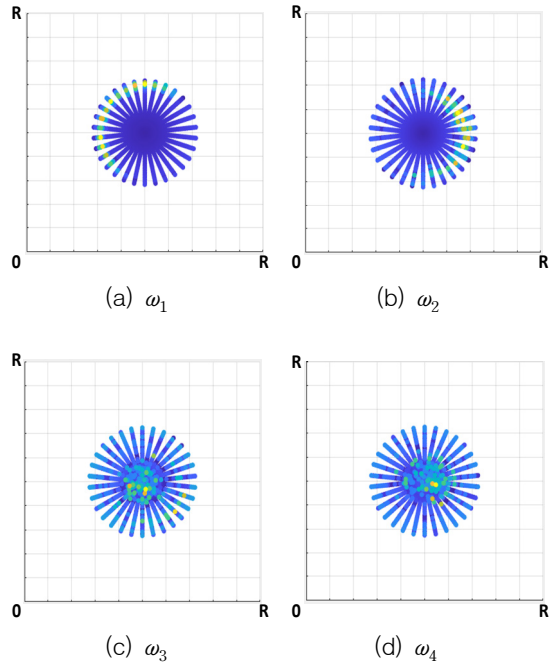


Fig. 6. Sectional submunition distribution according to ω at 90°

3.3 탄착군의 분산 균일도

Fig. 7은 자탄 분포도를 기반으로 계산한, 4가지 입사각에 대해 모탄의 회전속도에 따른 분산 균일도 그래프이다. 이는, 3.1 절과 3.2 절의 Fig. 3, 4, 5, 6을 통해 논의된 내용을 모두 반영하고 있으며 다량의 자탄에 대해 육안으로는 비교/파악 어려운 분산 균일도를 반경/각도 방향을 고려하여 정량적으로 비교하고 있다.

첫 번째로, 분산 균일도는 입사각이 커질수록 증가하는 경향이 있는데 이는 입사각에 따른 탄착군 형태 변형을 고려한다면 달라질 수 있는 결과로 판단된다, 두 번째로, 4가지 입사각에 대해 모두 모탄의 회전속도가 빨라질수록 분산 균일도가 커졌다가 작아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 회전속도가 빨라질수록 외곽에 위치하던 자탄 탄착 위치가 내부로 이동하여 반경 방향 균일도를 증가시키기 때문이며, 자탄 방출 조건별 최적의 회전속도가 존재한다는 것을 예측할 수 있다. 더욱이, 사용한 균일도 산출에 사용된 전달 함수는 미분 가능한 함수라는 장점이 있어 여러 변수에 대한 파라미터 분석에도 용이하기 때문에 궤적정보에 따른 고도, 입사각, 속도가 결정된다면 균일한

자탄 분산을 위한 모탄의 회전속도 도출에 본 방법론을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

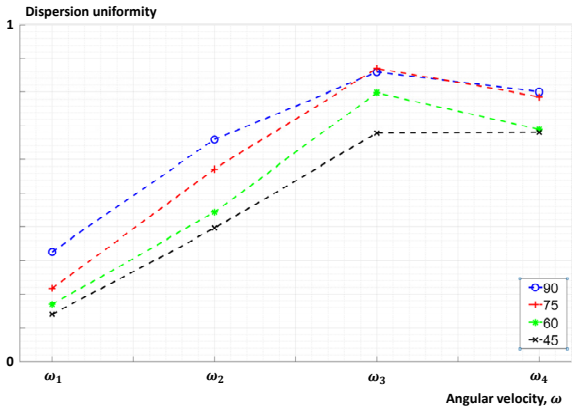


Fig. 7. Dispersion uniformity
(‘o’ : 90°, ‘+’ : 75°, ‘*’ : 60°, ‘x’ : 45°)

4. 결론

- 1) 본 논문에서는 Brunk^[2-5] 논문을 참고하여 방출된 자탄의 비행궤적을 예측하였고
- 2) 이렇게 확보한 다량의 자탄 탄착군으로부터 통계적 기법을 이용하여 원형 탄착군의 가장 아래 분산 균일도를 평가하기 위한 평가 지표를 제안하였다. 향후에는 입사각에 따라 탄착군 형태가 원형에서 타원형으로 변화하는 것을 반영할 필요가 있을 것으로 사료된다.
- 3) 또한, 모탄의 입사각과 회전속도에 따른 자탄 탄착군으로부터 구획별 분포도를 그려보고 이를 기반으로 분산 균일도를 평가하여 지표의 활용성을 검증해 보았다.
- 4) 본 논문에서 사용한 전달 함수는 모든 실수값에 대해 미분 가능한 특징을 갖기 때문에 파라미터 스터디에도 사용하기 용이할 것으로 판단되어 사용하였지만, 이외에도 다른 함수들을 고안하고 그를 이용한 방안과 반경/각도 방향별 가중치를 이용하여 평가 지표를 설정하는 연구도 향후, 고려할 예정이다.

- 5) 마지막으로 본 논문에서는 분산탄의 입사각과 회전속도만을 파라미터로 해석하였지만, Table 1 및 그 외 설계 파라미터들 특히, 초기 과도응답과 관련된 자탄들의 탑재 시 자세각에 대한 분산 균일도 스터디를 통해 최적의 분산 균일도를 갖는 모탄의 자탄 방출 조건을 도출하는데 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Platou, A., “Magnus Characteristics of finned and nonfinned projectile,” AIAA Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 83-90, 1965.
- [2] Brunk, J., “User’s manual: Extended capability magnus rotor and ballistic body 6-DOF trajectory program,” Alpha Research, InC., Technical report AFATL-TR-70-40, 1970.
- [3] Brunk, J., “Flight dynamics and dispersion characteristics of S-curve and roll-through-zero bomblets,” Alpha Research, InC., Technical report AFATL-TR-72-181, 1972.
- [4] Brunk, J., “Aerodynamics and flight mechanics of magnus-rotor bomblets Volume III. special aerodynamic studies,” Alpha Research, InC., Technical report AFATL-TR-68-73, 1968.
- [5] Brunk, J. et al., “The dynamics of spinning bodies at large angle of attack,” Air force office of scientific research, Technical report AF 29(600)-2936, 1962.
- [6] Tobak, M. et al., “Aerodynamics of bodies of revolution in coning motion,” AIAA Journal, Vol. 7, No. 1, January, 1969.
- [7] Tobak, M. et al., “Aerodynamics of bodies of revolution in nonplanar motion,” AIAA 6th Aerospace Sciences Meeting, No. 68-20, January 22-24, 1968.
- [8] Sedney, R., “A model for bomblet ejection from missiles,” Journal of spacecraft, Vol. 15, No. 4, pp. 229-235, 1978.
- [9] Peterson, K., “Numerical simulation investigations in weapon delivery probabilities,” Naval postgraduate school, Ph.D thesis, 2008.
- [10] Zipfel, P., “On flight dynamics of magnus rotors,”

- Department of Army, Technical report 117, 1970.
- [11] Yun, S. and Hwang, J., "Precise distribution simulation of scattered submunitions based on flight test data," *Int'l J. of Aeronautical&Space*, 18(1), pp. 108-117, 2017.
- [12] Bai, I., "Quantitative analysis of initial dispersion condition effects on randomness of magnus rotor bomblet," *Journal of Korea Society for Simulation*, Vol. 28, No. 3, pp. 83-89, 2019.
- [13] Baum, M. et al., "Analysis of Residential Irrigation Distribution Uniformity" *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 336-341, 2005.
- [14] Li, P. et al., "CFD study on flow distribution uniformity in fuel distributors having multiple structural bifurcations of flow channels," *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, pp. 9186-9198, 2010.
- [15] Ebrahimi, M. et al., "Designing of ECAP parameters based on strain distribution uniformity," *Progress in Natural Science*, Vol. 22, No. 5, pp. 452-460, 2012.
- [16] Luo, L. et al., "Numerical study on the improvement of flow distribution uniformity among parallel mini-channels" *PCHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING*, 95, pp. 63-71, 2015.
- [17] John, D., "A suite of minimal bounding objects," *MATLAB Central File Exchange*, version 1.2.0.0, 2024.