

자탄 분산에 대한 도플러 레이다 신호 시뮬레이션

Doppler Signal Simulation on the Dispersion of Sub-Munition

서진배 · 류충호* · 양재원* · 정용인** · 유경우*** · 전주환

Jinbae Suh · Chungho Ryu* · Jaewon Yang* · Yong-In Jung** · Kyungwoo Yoo*** · Joohwan Chun

요 약

다수 표적군에 대한 도플러 레이다 수신신호를 시뮬레이션하기 위해서는 표적군을 이루는 개별 표적의 공기역학적 운동에 대한 모델링이 필요하다. 자탄이 탑재된 무기체계는 자탄이 방출되면서 다수 표적군을 형성한다. 본 논문에서는 자탄을 가지고 있는 무기체계 중에서 모탄에 탑재된 자탄 형상이 기하학적으로 표현하기에 쉽고, 개수가 작으며, 그리고 상대적으로 근거리에서 도플러 신호 측정이 가능한 다수의 대전차 지뢰들의 운동을 모델링하여 이들의 위치와 속도를 찾고, 이로부터 도플러 레이다 신호를 모사하였다.

Abstract

To accurately simulate signals scattered by multiple targets and received by Doppler radar, target motion under aerodynamic forces has to be modeled. We present a new technique for computing aerodynamic forces acting on flying mines of remote anti-armor mine systems (RAAMS). This weapon system is particularly attractive for detailed analysis of multiple clustered sub-munition systems, owing to their simple shape and relatively small number. The generated positions and velocities of multiple mines are then used to generate the radar echo signal received by the Doppler radar.

Key words: Doppler Radar, 6-DOF Modeling, Aerodynamic Force, RAAMS, STFT

I. 서 론

대전차 지뢰 살포 무기체계(remote anti-armor mine systems: RAAMS)는 다수의 대전차 지뢰(anti-armor scatterable mine)가 내장된 화포탄을 목표지점에 발사하여 대전차 지뢰지대 설치를 목적으로 한다^[1]. M718, M741 모

탄(화포탄)에는 M73, M70 대전차 지뢰가 각각 9개 들어 있는데^[2], 화포탄에 있는 시한 시간으로부터 점화된 방출 장약에 의해 탄저부(base)에 있는 탄저 마개가 분리된 후, 9개의 대전차 지뢰가 순서대로 방출(emmission)되어 분산 된다. 이때 탄저부 마개와 같은 모탄의 부속품, 파편(debris), 모탄 본체 등이 다수 표적군을 형성한다. 대전차

「본 연구는 2020년 국방과학연구소의 지원으로 수행된 연구임(UD18003HD).」

한국과학기술원 전기 및 전자공학부(School of Electronic Engineering, KAIST)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**한화시스템(Hanwha System)

***현대모비스(Hyundai Mobis)

· Manuscript received December 6, 2020 ; Revised January 13, 2021 ; Accepted June 23, 2021. (ID No. 20201206-107)

· Corresponding Author: Joohwan Chun (e-mail: chun@kaist.ac.kr)

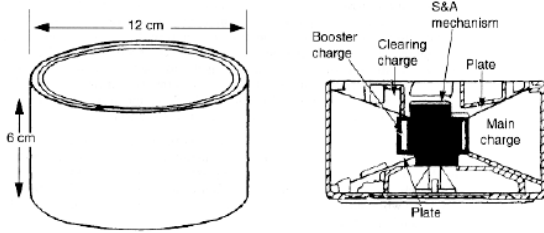


그림 1. 대전차 지뢰
Fig. 1. Anti-armor scatterable mine^[2].

지뢰 형상은 그림 1에서 보인 바와 같으며, 대략 0.585 kg의 고성능 폭약(cyclonite RDX explosive)이 채워져 있다^[2].

본 논문에서는 살포되는 대전차 지뢰의 6-DOF(degree of freedom) 운동^{[3],[4]}을 공기저항 및 지뢰 형상 등에 의한 공력(aerodynamic force)을 고려하여 모델링하였다^[5]. 6-DOF 운동모델링은 일반적인 거시적 3-DOF 모델링과 달리 강체의 미세운동^[6]을 재현할 수 있으므로 낙하 중 지뢰의 미세한 움직임과 지표면 탄착지점을 예측할 수 있다. 또한 RAAMS의 여러 가지 설계 파라미터(예를 들어 방출장약의 양, 지뢰의 형상, 신관동작시점 등)의 변화에 따른 낙하운동의 변화를 모의실험을 통하여 예측하는 데도 유용하다.

한편, RAAMS 개발 시 도플러 레이더로 자탄의 움직임을 탐지추적하여야 하는데, 지뢰의 미세운동을 알면 실제와 유사한 수신신호를 시뮬레이션으로 충실히 재현시킬 수 있다. 그러므로 실제 사격 테스트 없이도 도플러 레이더 신호처리 알고리즘 개발 및 검증에 본 논문의 결과를 이용할 수 있다^{[7]~[10]}.

제 2절에는 지뢰의 공기역학적 운동 모델링을 자세히 설명하고, 제 3절에는 이를 이용하여 날아가는 지뢰의 위치와 속도를 구하였고, 또한 지뢰의 산란점으로부터 반사되는 도플러 레이더 수신신호를 모사하였다. 결론은 제 4절에 제시하였다.

II. 지뢰 운동 모델링

2-1 6-DOF 운동 방정식

그림 2에 대전차 지뢰 형상을 반지름이 r , 길이가 l 인 디스크(disk)로 근사화(approximation)하여 보였다. 디스크에 고정되어 함께 움직이는 직교 좌표계를 동체 좌표계

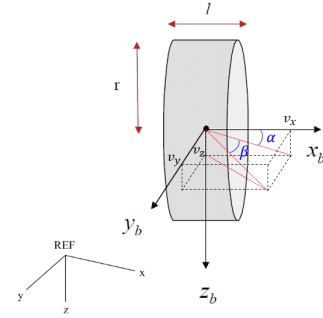


그림 2. 지뢰 동체좌표계 및 기준좌표계
Fig. 2. Body-fixed frame (BFF) of a mine and reference frame (REF).

(body-fixed frame: BFF)라고 한다. 동체 좌표계의 x_b 축은 디스크의 원 중심에서 오른쪽 방향, y_b 축은 측면에서 나오는 방향, z_b 축은 x_b 축과 y_b 축이 이루는 평면의 연직 아래 방향이다.

기준 좌표계(reference frame: REF)는 관성좌표계(inertial frame)로서 시각 $t=0$ 때 동체 좌표계와 원점 및 축이 정확히 일치한다고 가정하고, 대전차 지뢰가 낙하한 후($t>0$)에도 계속 공간상 같은 위치에 남아 있다고 가정한다.

강체(rigid body)에 작용하는 힘은 가속도를 유발하는데, 다음의 식을 따른다^[3].

$$\dot{\mathbf{v}}_b = \frac{\mathbf{f}}{m} - \boldsymbol{\omega}_{rb} \times \mathbf{v}_b \quad (1)$$

여기서 m 은 강체의 질량, $\mathbf{f} = [f_x, f_y, f_z]^T$ 는 질량중심(center of mass: CM)에 작용하는 힘의 BFF coordinates, $\mathbf{v}_b = [v_x, v_y, v_z]^T$ 는 강체의 속도의 BFF coordinates, $\boldsymbol{\omega}_{rb} = [p, q, r]^T$ 는 REF에 대한 BFF의 각속도를 의미한다.

위 식에 의한 강체의 속도를 적분하면 강체의 REF coordinate 위치를 얻는데, 이는 다음의 식으로 표현할 수 있다^[11].

$$\dot{\mathbf{x}}_r = C_{br}(\mathbf{e})\mathbf{v}_b \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{x}_r = [x \ y \ z]^T$ 는 강체의 위치의 REF coordinates, \mathbf{v}_b 는 BFF 좌표계에서 강체의 속도, $\mathbf{e} = [\psi, \theta, \phi]^T$ 는 BFF의 REF에 대한 3-2-1 오일러 각(Euler angle)이고, $C_{br}(\mathbf{e})$ 는 BFF coordinate를 REF coordinate로 바꾸는 DCM(direction cosine matrix)이다^[11].

오일러각은 직관적으로 가시화하기에 편리하지만 실제 좌표변환에 사용할 경우, 몇 가지 문제가 있어서 본 논문에서는 쿼터니언(quaternion), \mathbf{q} 를 사용한다. 식 (2)를 쿼터니온으로 표현하면 식 (3)과 같다^[11].

$$\dot{\mathbf{x}}_r = [\mathbf{q} \circ \mathbf{p} \circ \mathbf{q}^*]_{2:4} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ 는 $\mathbf{e} = [\psi, \theta, \phi]^T$ 에 상응하는 강체의 자세를 나타내는 쿼터니온으로서 다음과 같이 표현되고,

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ -\sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{q}^* = [q_0, -q_1, -q_2, -q_3]^T$ 는 \mathbf{q} 의 conjugate를 의미한다. 또한 \mathbf{p} 는 속도의 쿼터니온 표현, $\mathbf{p} = [p_0, p_1, p_2, p_3]^T = [0, \mathbf{v}_b^T]^T$ 이고, $[\mathbf{v}]_{2:4}$ 는 vector \mathbf{v} 의 2, 3, 4 elements를 택함을 의미한다. 쿼터니온 operator $\mathbf{a} \circ \mathbf{b}$ 는 다음과 같이 정의되는데

$$\mathbf{a} \circ \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 - b_1 - b_2 - b_3 \\ b_1 & b_0 & b_3 & -b_2 \\ b_2 - b_3 & b_0 & b_1 & \\ b_3 & b_2 & -b_1 & b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

associativity property를 가짐을 보일 수 있다.

강체에 작용하는 토크(torque)는 각가속도(angular acceleration)를 유발하는데 다음 식 (6)을 따른다^[3].

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{rb} = \mathbf{I}^{-1} [\mathbf{N} - \boldsymbol{\omega}_{rb} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}_{rb})] \quad (6)$$

여기서 \mathbf{I} 는 강체의 moment of inertia이다. BFF를 강체의 principal coordinate로 취하면 \mathbf{I} 는 대각행렬(diagonal matrix)이 되는데, 본 논문에서 다루는 디스크의 경우는

$$\mathbf{I} = \text{diag}(I_x, I_y, I_z), \\ I_x = mr^2/2, I_y = mr^2/4 + ml^2/12 \quad (7)$$

로 주어진다. 여기서 r, l 은 각각 디스크의 반지름, 높이를 의미한다. 식 (6)에서 $\mathbf{N} = [N_x, N_y, N_z]^T$ 는 토크의 BFF coordinate 값이고, $\boldsymbol{\omega}_{rb} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T = [p, q, r]^T$ 는 REF에 대한 BFF의 각속도 벡터이다.

각속도 $\boldsymbol{\omega}_{rb}$ 는 강체의 자세 변화를 유발하는데 이는 \mathbf{q} 에 대한 다음의 식을 따를 수 있다^[11].

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega} \mathbf{q} \quad (8)$$

여기서 $\boldsymbol{\Omega}$ 는 $\boldsymbol{\omega}_{rb}$ 의 elements로 다음과 같이 구성된 메트릭스이다.

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

위의 식 (1), 식 (3), 식 (6), 식 (8)이 강체의 질량중심에 대한 6-DOF 운동을 기술하는데, 식 (1), 식 (3)은 병진운동(translational motion)을 식 (6), 식 (8)은 회전운동(rotational motion)을 나타낸다. 또한 식 (3), 식 (8)은 단순한 kinematic equation을, 식 (1), 식 (6)은 역학적 입력값(forcing term)이 있는 dynamic equation을 기술한다.

이들 4개의 벡터 식은 총 13개의 scalar 연립 미분방정식(coupled differential equations)을 구성하는데, 식 (10)에 벡터 함수 \mathbf{h} 로 간략히 표현하였다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{h}(t, \mathbf{x}), \quad \mathbf{x} = [\mathbf{x}_r, \mathbf{v}_b, \boldsymbol{\omega}_{rb}, \mathbf{q}]^T \quad (10)$$

식 (10)을 풀기 위하여 본 논문에서는 4차 Runge-Kutta method(RK-4)를 사용하였다^{[12][13]}. 즉, 초기 조건 \mathbf{x}_0 로부터 다음의 수식을 반복하여 계산한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_1 &= \Delta t \mathbf{h}(t_i, \mathbf{x}_i) \\ \mathbf{k}_2 &= \Delta t \mathbf{h}(t_i + \Delta t/2, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_1/2) \\ \mathbf{k}_3 &= \Delta t \mathbf{h}(t_i + \Delta t/2, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_2/2) \\ \mathbf{k}_4 &= \Delta t \mathbf{h}(t_i + \Delta t, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_3) \\ \mathbf{x}_{i+1} &= \mathbf{x}_i + (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4)/6 \end{aligned} \quad (11)$$

2-2 공력해석

식 (1) 의 \mathbf{f} [단위: Newton]는 지뢰에 초기 방출장약에 의한 힘과 이후 공기저항에 의한 힘을 포함한다. 식 (6) 의 \mathbf{N} [단위: Newton×meter]은 힘의 작용점(point of action)에 대한 초기 방출장약에 의한 토크와 이후 공기저항에 의한 토크이다. 공기저항에 의한 힘과 토크를 공력(aerodynamic force)이라고 부르는데^{[14][15]}, 공력은 강체의 형상, 자세, 속력(Mach #)의 함수로서 공기가 uncompressible fluid 라고 가정하고, Navier-Stokes equation^[5]을 풀어 얻어 수 있다. 하지만 분석적으로 풀 수 없고, 수치해석적으로 풀어야 하며^[12], 또한 계산량이 너무 많아서 실시간 계산할 수 없다. 그러므로 사전에 가능한 모든 자세와 속력에 대하여 계산하거나 혹은 실험으로 얻어서 표로 만들어 놓고, 식 (10)을 풀 때 불러와야 한다.

표를 만들기 위하여 강체의 자세를 정의하는 데 오일러 각도같은 3개의 파라메타가 필요하지는 않고, 받음각(angle of attack: AOA) α , 미끄럼각(angle of sideslip: AOS) β 두 개면 충분하다. 이들 두 각도는 식 (12)로 정의되는 데^[15]

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_z}{v_x}, \quad \beta = \tan^{-1} \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} \quad (12)$$

그림 2에 α, β 를 보였다.

본 논문에서는 FloEFD 소프트웨어^[16]를 이용하여 ICAO (International Civil Aviation Organization)의 표준 대기 (standard atmospheric) 모델 조건 하^[17]에 \mathbf{f} 와 \mathbf{N} 을 구하였다. 모든 α, β 에 대하여 계산하기는 너무 많은 시간이 소요되므로 α, β 를 -180° 에서 180° 범위에서 30° 간격으로, 그리고 0.1, 0.5, 1.0 세 개의 Mach #에 대해 계산하였다. 따라서 $f_x, f_y, f_z, N_x, N_y, N_z$ 각각 6개 값에 대해 모두 507번($13 \times 13 \times 3$)의 계산이 수행된다. 이들 507개 데이터는 다시 $361 \times 361 \times 91$ 데이터로 3차 스플라인(cubic spline)을 이용해^[12] 내삽(interpolation)하였다. 또한 마하수 0~0.1 구간은 Mach # 0에서 이들 6개의 값이 zero 라고 가정하고 외삽(extrapolation) 하였다. 이상에 의하여 6개의 data cube가 형성되는데, 그림 3에 data cube 하나를 보였다. 하지만 실제 α, β 는 $361 \times 361 \times 91$ data cube 격자점 상에 놓여 있지 않을 터이므로 식 (11)을 푸는 과정

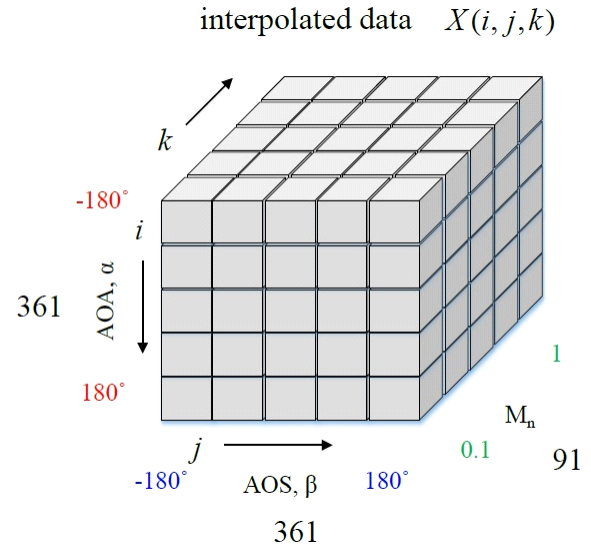


그림 3. 내삽을 이용한 공력 계수 결정

Fig. 3. Determination of aerodynamic parameter using cubic spline interpolation.

에서 다시 6 point 선형 내삽(linear interpolation)하여 \mathbf{f} 와 \mathbf{N} 를 구한다.

그림 4~그림 9에 6개의 data cubes를 그래프로 보였다. 그림 4~그림 9에 보인 \mathbf{f} 와 \mathbf{N} 는 평균 해수면 고도 $h=0$ 에서의 값이다. 그러므로, 이보다 높은 고도에서는 대기 밀도 변화에 따른 조정이 필요하다. 표준대기모델^[17]에 따르면 대기밀도 ρ [kg/m³]는 다음과 같이 절대온도 (T)와 압력 (p)의 함수이다.

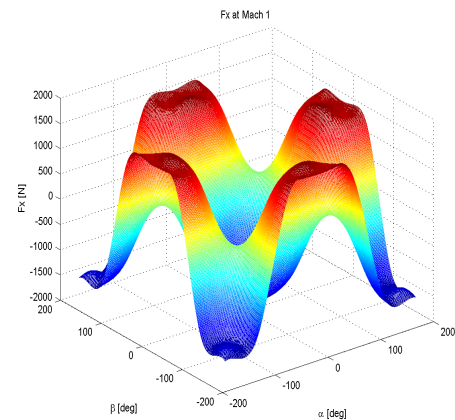


그림 4. 받음각, 미끄럼각에 따른 x 축 힘

Fig. 4. Fx vs AOA and AOS.

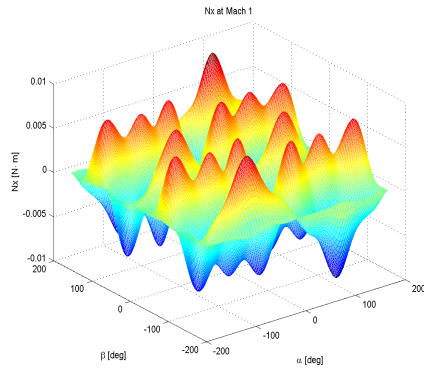


그림 5. 받음각, 미끄럼각에 따른 x축 토크
Fig. 5. N_x vs AOA and AOS.

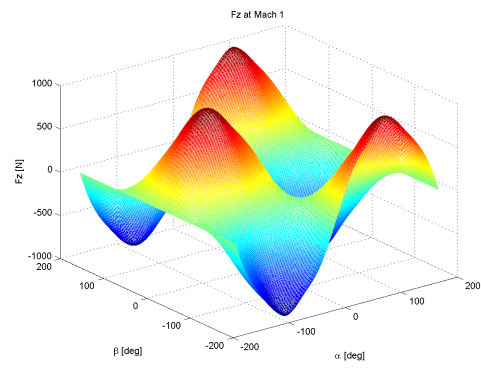


그림 8. 받음각, 미끄럼각에 따른 z축 힘
Fig. 8. F_z vs AOA and AOS.

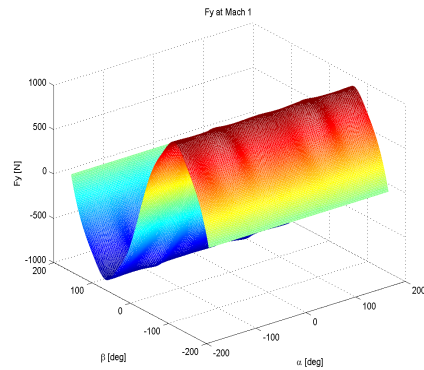


그림 6. 받음각, 미끄럼각에 따른 y축 힘
Fig. 6. F_y vs AOA and AOS.

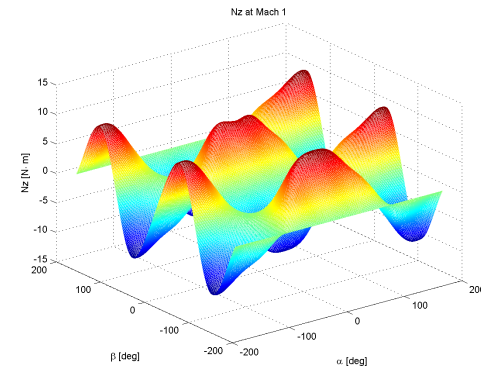


그림 9. 받음각, 미끄럼각에 따른 z축 토크
Fig. 9. N_z vs AOA and AOS.

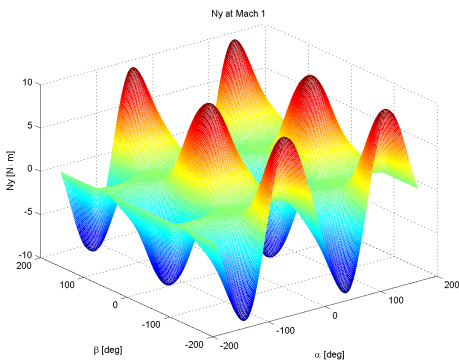


그림 7. 받음각, 미끄럼각에 따른 y축 토크
Fig. 7. N_y vs AOA and AOS.

$$\rho(T, p) = p / (0.2869 \cdot (T + 273.1)) [\text{kg/m}^3] \quad (13)$$

여기서 T, p 는 다시 다음의 식을 따른다.

$$h < 11,000 \text{ m}:$$

$$T = 15.04 - 0.00646h$$

$$p = 101.29 \cdot \left(\frac{T + 273.1}{288.08} \right)^{5.256}$$

$$h \geq 11,000 \text{ m}, h < 25,000 \text{ m}:$$

$$T = -56.46$$

$$p = 22.65 \cdot \exp(1.73 - 0.000157h);$$

$$h \geq 25,000 \text{ m}:$$

$$T = -131.21 + 0.00299h$$

$$p = 2.488 \left(\frac{T + 273.1}{216.6} \right)^{-11.388};$$

그러므로 결국 고도의 함수로 대기밀도 $\rho(h)$ 를 구하고 원하는 f 와 N 는 data cube 값에 식 (14)에 보인 density ratio s 를 곱하여 얻는다.

$$s = \frac{\rho(h)}{\rho(0)} \quad (14)$$

f 와 N 을 data cube에서 읽을 때 Mach # 값이 필요하므로 식 (10)의 강체의 속력 $\|\mathbf{v}\|$ 를 다음 식 (15)를 이용하여 Mach #로 변환하여야 한다.

$$M_n = \frac{\|\mathbf{v}\|_2}{v_s} \quad (15)$$

여기서 v_s 는 음속(speed of sound)인데, 고도 h 의 함수로서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h \geq 10.97 \text{ m:}$$

$$v_s(h) = 295.30 \text{ m/sec}$$

$$h \geq 0 \text{ m, } h < 10.97 \text{ m:}$$

$$v_s(h) = 29.06 \sqrt{518.7 - 3.57 \left(\frac{1000h}{0.3048} \right)} \times \frac{1852}{3600}$$

$$h < 0 \text{ m:}$$

$$v_s(h) = 340.48 \text{ m/sec}$$

III. 시뮬레이션 결과

3-1 자탄운동 시뮬레이션

방출초기에는 그림 10과 같이 REF(x, y, z)와 BFF(χ_b, y_b, z_b)가 일치한다. 초기에 모탄(즉 내장된 지뢰 역시)은

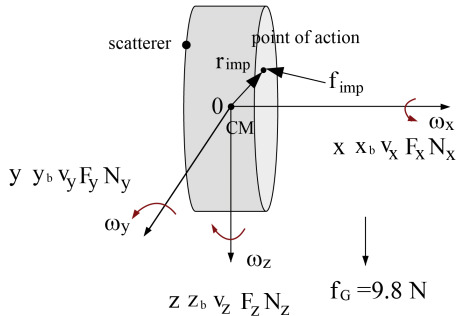


그림 10. 지뢰의 6 자유도 운동 파라메터 정의
Fig. 10. Definitions of 6-DOF motion parameters of a mine.

그림 10에 보인 자세로 원점에 위치하며 정확히 +x 축 오른쪽 방향으로 날아간다고 가정한다.

지뢰의 질량은 $m=2.38 \text{ kg}$, 직경은 $2r=127 \text{ mm}$, 높이는 $l=60 \text{ mm}$ 이다. 지뢰 CM(center of mass), 즉 좌표계 원점은 고도 $h=794.6 \text{ m}$ 이고, 모탄의 앞부분에 위치한 방출장약 폭발에 의한 impulsive 힘 f_{imp} 는 $0 \leq t \leq T_{imp}$ ($T_{imp}=0.01 \text{ sec}$) 동안 대략 원편 random 방향으로 그림 5에 보인 random 작용점(point of action)에 가하여지며, 9개의 지뢰마다 다른 값을 갖는다. 즉, 첫 번째 지뢰는 가장 큰 힘 (1,000 Newton)을 받고, 다음 지뢰들은 차츰 작아져서 500 Newton이 된다.

$t > T_{imp}$ 에는 $f_{imp}=0$ 이므로 지뢰에 작용하는 힘은 중력 f_G (9.8 m Newton)와 공력이 있고, 지뢰에 작용하는 토크는 공력만 있다.

지뢰들이 원편으로 방출될 때 선형모멘텀(conservation of linear momentum)이 보존되어야 하므로 매 지뢰마다 방출때마다 모탄의 속력이 약간씩 커져서 최종적으로 320 m/sec가 된다. 또한 모탄이 오른쪽으로 날아가고 있으므로 지뢰가 방출되는 T_{imp} 동안 매 지뢰마다 초기 x 좌표가 조금씩 증가하여서 최종적으로 30 m가 된다.

이상의 고려에 의하여 미분방정식 (10)의 초기조건은 다음과 같이 가정하였다.

$$\psi = \theta = \phi = 0^\circ$$

$$\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$$

$$v_x = 231 : 11.25 : 320, \quad v_y = v_z = 0 \text{ [m/sec]}$$

$$\mathbf{f} = f_{imp} [f_1, f_2, f_3]^T$$

$$f_{imp} = -1000 : 75 : -500 \text{ [N]}$$

$$f_1 \sim N(-0.99, 0.01^2) \quad f_2 \sim 0.1 U(-0.5, 0.5)$$

$$f_3 = b \sqrt{1 - (f_1^2 + f_2^2)}, \quad b \sim B(-1, 1)$$

$$x = 0 : 3.75 : 30, \quad y = z = 0 \text{ [m]}$$

$$\mathbf{r}_{imp} = [x_{imp}, y_{imp}, z_{imp}]^T$$

$$x_{imp} = 30 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$y_{imp} = z_{imp} \sim 0.4r U(-0.5, 0.5) \text{ [m]}$$

여기서 $a:b:c$ 는 초기값과 마지막값이 각각 a, c 이고, 등차가 b 인 수열을 의미하며, $N(m, \sigma^2)$ 은 평균이 m 이고, 분산이 σ^2 인 정규분포 확률변수(Gaussian random va-

riable), $U(a,b)$ 는 a, b 사이의 균등분포확률변수(uniform random variable), $B(-1,1)$ 은 동일한 확률 ($p=0.5$)의 $-1, 1$ 두 값을 갖는 Bernoulli 확률변수를 의미한다.

식 (11)은 RK-4 수행 시 discretization 간격은 $\Delta t=0.0001$ sec로 하였다.

미분방정식 (10)을 푼 결과를 그림 11~그림 14에 보였다. 지뢰가 지표면에 도달할 때까지 약 27초가 걸렸으며, 그림 11에 한 개의 지뢰에 대하여 얻은 위치(x, y, z) 및 자세(ψ, θ, ϕ)를 약 4초 간격으로 보였다. 공력에 의하여 지뢰가 tumbling함을 볼 수 있다. 또한 방출장약이 초기에 $-x$ 방향으로 힘을 주지만 모탄이 $+x$ 방향으로 빠른속도

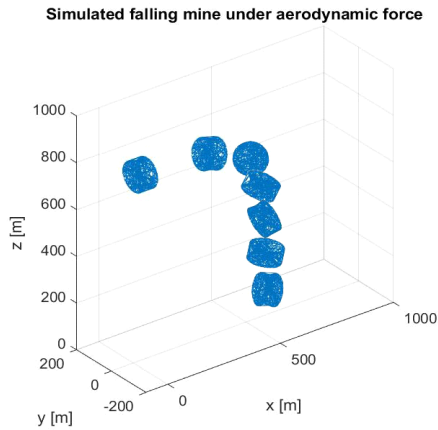


그림 11. 방출 후, 지뢰의 6-DOF 운동
Fig. 11. 6-DOF motion of a mine after emission.

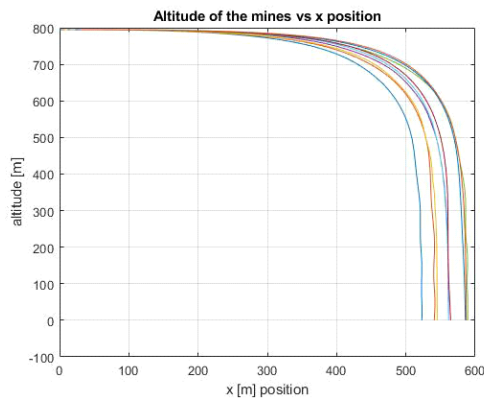


그림 12. 9개 지뢰의 x 축에 대한 고도
Fig. 12. Altitude vs x of nine mines.

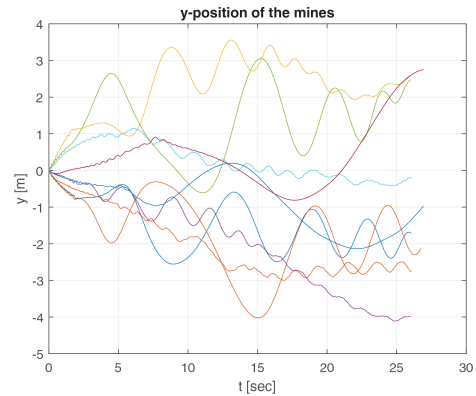


그림 13. 9개 지뢰의 시간에 따른 y 좌표
Fig. 13. y vs t of nine mines.

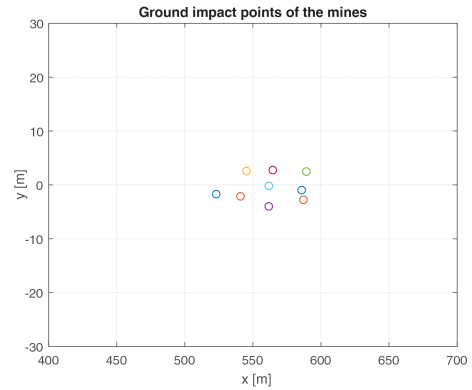


그림 14. 9개 지뢰의 지표면 탄착점
Fig. 14. Ground impact points of nine mines.

로 날아가므로 지뢰 역시 $+x$ 방향으로 이동함을 볼 수 있다.

그림 12에 9개 지뢰 CM의 고도를 x 축에 대하여, 지표면에 도달할 때까지 27초간 보였다. 공기 저항 때문에 $+x$ 방향 속도가 급격히 감소하게 되고, 자유낙하 상태가 됨을 볼 수 있다. 또한 27초간 이동한 거리는 600 m가 안됨을 알 수 있다.

그림 13에 시간에 따른 지뢰 CM의 y좌표를 보였다. 모탄의 y축방향 속력이 zero이므로, y축 속력은 단지 초기 f_{imp} 의 random misalignment에 의한 y 성분과 공력에 의한 것이므로 멀리는 이동하지 않는다.

그림 14에 9개의 지뢰의 지표면 탄착점을 보였다. 모든 지뢰가 $x=510$ m 지점을 중심으로 반경 75 m 내에 분포함을 볼 수 있다.

3-2 레이더 수신신호 시뮬레이션

본 논문에서 도플러 레이더는 한 개의 주파수 $f_0=10$ GHz를 갖는 CW(continuous wave) 레이더이고^[7], 지표면 x 축상 원점에서 왼쪽으로 100 m($x=-100$) 떨어진 지점에 놓여 있다고 가정하였다. 즉, 도플러 레이더의 REF 좌표는 $r_k=[-100, 0, 794.6]$ m로 주어진다.

지뢰가 레이더 신호를 받으면 몇 개의 산란점들(scatterers)이 나타나는데, 여기서는 그림 5에 보인 것과 같이 디스크 한쪽 면 모서리에 한 개의 고정된 산란점이 있다고 가정하고, 도플러 레이더 수신신호를 모사하였다. 즉, 식 (10)을 풀어서 얻은 x_r, v_b, q 를 이용하여 레이더부터 산란점까지의 거리(range) 및 radial 방향의 속도(range rate)를 구할 수 있다.

그림 15에 레이더로부터 9개 지뢰의 산란점까지의 거리 r 을 보였다. 지뢰가 초기 5초간 +x 방향으로 날아갈때는 멀어지다가, 공기저항으로 자유 낙하하면서 가까워짐을 볼 수 있다. 그림 15에는 9개의 궤적을 구분하여 보였지만, 레이더 측정치로부터 이들 다수표적(multi-targets)을 탐지, 추적하는 일은 간단하지 않을 수 있다.

그림 16은 9 지뢰의 range rate를 보였는데, 지뢰가 tumbling하므로 산란점이 미세하게 진동하는 미세도플러(micro Doppler) 효과^[6]가 잘 나타나 있다. 그림 15에서는 산란점의 수 cm 진동이 수백 미터 range scale에 비하여 매우 작으므로 보이지 않는다.

도플러 레이더는 모든 지뢰들로부터의 반사파의 합을

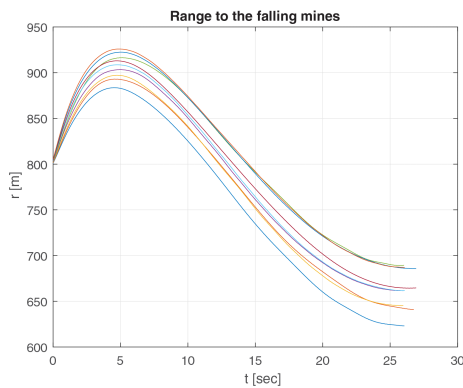


그림 15. 9개 지뢰의 시간에 따른 거리
Fig. 15. Range vs t of nine mines.

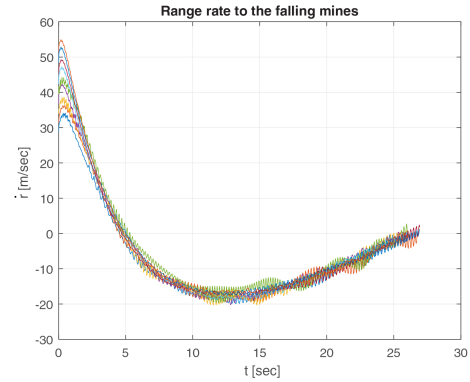


그림 16. 9개 지뢰의 시간에 대한 range rate
Fig. 16. Range rate vs t of nine mines.

받게 되므로, 기저대역(baseband) 수신신호는 다음의 $s(t)$ 로 표현된다.

$$s(t) = \sum_{m=1}^M \rho_m(t) e^{-j\phi_m(t)} \quad (16)$$

$$\phi_m(t) = 2\pi f_0 \tau_m, \quad \tau_m = 2r_m/c_0$$

여기서 $M=9$ 는 지뢰의 개수이고, r_m 은 m 번째 지뢰의 scatterer까지의 거리이고, $c_0=3 \times 10^8$ m/sec는 빛의 속도이다. 이 수신신호로부터 개별 지뢰의 range rate를 찾을 때 가장 많이 사용하는 방법은 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform: STFT)^[6]을 이용하는 것이다.

그림 17은 식 (16)의 단시간 푸리에 변환 결과이다. 이때 다음의 파라미터를 사용하였다.

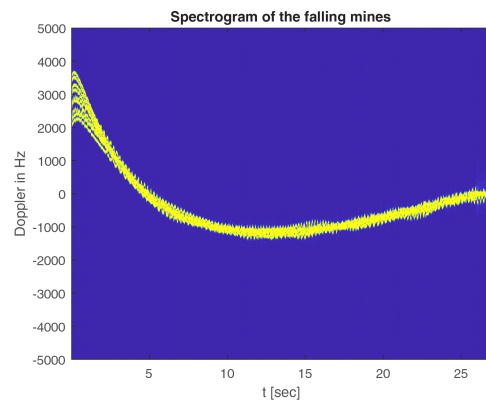


그림 17. 도플러레이더 신호의 STFT
Fig. 17. STFT result of Doppler radar signal.

Window length=256
 Overlapping length=128
 Fft size=2,048

이때 sampling 주파수는 $f_s = 1/\Delta t = 10$ kHz로 주어진 다. 그림 17에서도 그림 16과 같이 미세도플러 효과를 볼 수 있는데, y 축을 $i = f_d \lambda / 2$ 을 이용해 range rate로 바꾸면 그림 16과 동일하게 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 RAAMS에서 살포된 대전차 지뢰의 6-DOF 운동을 전산유체역학 소프트웨어로 힘과 토크를 구하여 공기역학적으로 모델링하였다. 또한 이를 통하여 얻은 지뢰들의 산란점의 위치와 속도를 이용하여 도플러 레이더 수신신호를 모사하였다. 본 논문의 결과는 RAAMS 설계 파라미터 결정을 위한 초기 가이드라인으로도 유용하고, 또한 RAAMS 테스트를 위한 도플러 레이더의 위치선정과 신호처리 알고리즘 개발 및 검증에 유용하게 사용될 수 있다.

References

- [1] J. Kwon, J. Baek, "Analysis of the test result and improvement proposals for its evaluation about the 155 mm K320 and K321 anti tank family of scatterable mines(FASCAM)," in *Weapon System Test & Evaluation Seminar*, Jun. 2016.
- [2] FAS, "Family of scatterable mines-FASCAM." Available: <https://fas.org/man/dod-101/sys/land/fascam.htm>
- [3] D. H. Titterton, J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Stevenage, UK, The Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [4] R. C. Hibbeler, S. C. Fan, *Engineering Mechanics: Statics & Dynamics*, 14th ed. Singapore, Pearson, 2015.
- [5] Y. Çengel, J. Cimbala, "Fluid mechanics: Fundamentals and applications." Available: <https://epdf.pub/fluid-mechanics-fundamentals-and-applications.html>
- [6] V. C. Chen, *The Micro-Doppler Effect in Radar*, Norwood, MA, Artech House, 2011.
- [7] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. Chennai, McGraw-Hill, p. 1, 105, 2001.
- [8] C. Young, *The History of Radar & RCA Instrumentation Radar's*, Bethesda, MD, Lockheed Martin, pp. 13-15, 2006.
- [9] Electronic Trajectory Measurement Group Range Commanders Council, "The radar roadmap," New Mexico, Document 260-98, Sep. 1998.
- [10] C. Ryu, I. Choi, S. Yoo, and J. Kim, "Doppler signal acquisition and analysis of various ammunitions," *Agency for Defense Development*, ADDR-514-132188, 2013.
- [11] D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, 2nd ed. Norwood, MA, Artech House, 2013.
- [12] J. Stoer, R. Bulirsch, *Introduction to Numerical Analysis*, New York, NY, Springer, 2002.
- [13] Wikipedia, "Runge-Kutta methods." Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Runge-Kutta_methods
- [14] M. Noda, F. Nagao, "Simulation of 6 DOF motion of 3D flying debris," in *Proceedings of 5th International Symposium on Computational Wind Engineering*, Chapel Hill, May. 2010.
- [15] G. M. Siouris, *Aerospace Avionics Systems: A Modern Synthesis*, San Diego, CA, Academic Press, 1993.
- [16] Mentor Graphics Corporation, *FloEFD Technical Reference: Software Version 17*, Wilsonville, OR, Mentor Graphics Corporation, 2018.
- [17] Wikipedia, "International Standard Atmosphere." Available: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Standard_Atmosphere

서 진 배 [한국과학기술원/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3612-4382>



2015년 2월: 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)
2015년 3월~현재: 한국과학기술원 전기전자공학부 석·박사통합과정
[주 관심분야] 레이더 신호처리

정 용 인 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0619-7559>



2007년 1월~현재: 한화시스템 기계설계팀 전문연구원
[주 관심분야] 열역학, 유체역학

류 충 호 [국방과학연구소/책임연구원]

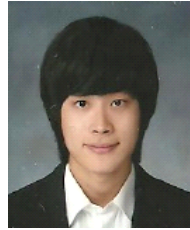
<https://orcid.org/0000-0002-9516-1856>



2000년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2012년 2월: 충남대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2001년 7월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호 처리, 다수 표적 추적, 전자파 수치 해석

유 경 우 [현대모비스/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9003-1748>



2012년 2월: 인하대학교 전기공학전공 (공학사)
2014년 2월: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 (공학석사)
2020년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
2021년 2월~현재: 현대모비스 선임연구원
[주 관심분야] Signal Processing for Radar Systems

양 재 원 [국방과학연구소/선임연구원]

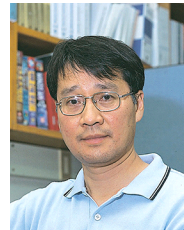
<https://orcid.org/0000-0002-2553-2033>



2011년 2월: 서울과학기술대학교 전자공학부 (공학사)
2014년 2월: 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 회로, 신호 처리

전 주 환 [한국과학기술원/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3506-1722>



1980년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1984년 4월: 코넬대학교 전기공학과 (공학석사)
1989년 6월: 스탠퍼드대학교 전기공학과 (공학박사)
1989년 6월~1992년 8월: 제네랄 일렉트릭 직원

1992년 9월~현재: 한국과학기술원 전기전자공학과 교수
[주 관심분야] 레이더 신호 처리