

지구곡률을 고려한 지상국에서 바라본 비행체 자세 변화 연구

양재원^{*.1)} · 서동수¹⁾ · 하태형¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제6기술연구원 안흥종합시험센터

A Study on Flight Vehicle's Attitude Changes with Respect to a Ground Station by Considering Earth Curvature

Jaewon Yang^{*.1)} · Dongsoo Seo¹⁾ · Taehyeong Ha¹⁾

¹⁾Anheung Test Center, 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 7 November 2024 / Revised 31 December 2024 / Accepted 7 January 2025)

Abstract

When a ground station is tracking a flight vehicle, flight vehicle's aspect angle with respect to a ground station is required to predict a received signal strength and determine an optimal time to conduct radar handovers. When determining a flight vehicle's aspect angle with respect to a ground station, range/azimuth/elevation coordinate system referenced to a ground station and attitude(roll/pitch/yaw) of a flight vehicle are needed. If tracking range between a ground station and a flight vehicle is sufficiently far, additional compensation for roll and pitch angles should be considered. In this paper, angular compensation method for roll and pitch is proposed in a consideration of earth curvature. And then, flight vehicle's aspect angles with respect to the ground station are obtained and flight vehicle's attitude changes with respect to three ground stations are visualized.

Key Words : Aspect Angle(입사각), Earth Curvature(지구곡률), Flight Dynamics(비행역학), Roll/Pitch/Yaw(롤/피치/요)

1. 서론

유도무기 시험평가 과정에서 비행체의 실시간 시공 간위치정보(TSPI, Time Space Positioning Information) 및 비행체 내 정보를 획득하거나 비행체를 통제하기 위하여 지상국에서는 비행체와 무선으로 통신한다.

비행체가 비정상 비행을 하거나 안전영역을 벗어날

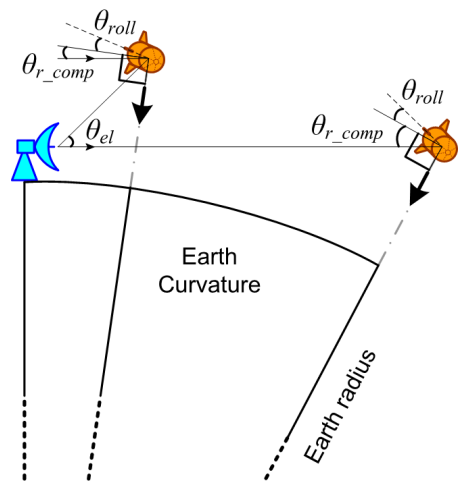
경우, 지상국에서는 비행종료명령을 무선으로 송신하고, 비행체에 탑재된 안테나에서 무선 신호를 수신하여 비행 임무를 강제로 종료시킨다^[1]. 그리고 비행체의 실시간 전압, 전류, 각종 센서 정보를 수신하기 위해서는 비행체 내에 원격측정 송신 장치가 탑재되어 비행체의 실시간 정보를 지상국으로 송신한다^[2]. 비행체의 실시간 위치 정보를 획득하기 위하여 지상 레이더가 펄스 신호를 송신하고, 비행체에 탑재된 비콘 안테나는 레이더 신호를 수신 및 증폭하여 지상으로 송신한다^[3]. 따라서 지상 레이더는 비행체의 거

* Corresponding author, E-mail: fship01@nate.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

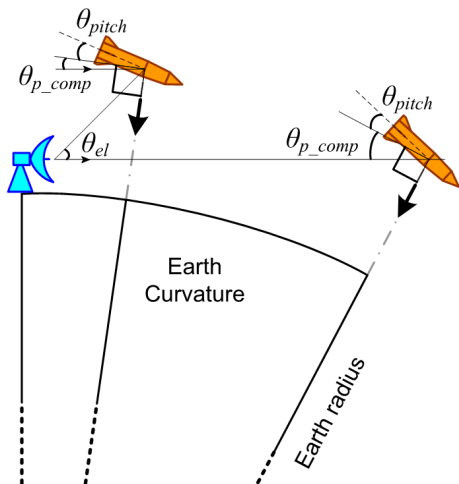
리, 방위각, 고각 등의 정보를 획득 및 계산하여 3차원 공간에서 비행체의 실시간 위치(위도/경도/고도)를 추정할 수 있다^[4]. 이때, 지상국의 위치는 고정이지만 비행체는 위치(위도/경도/고도) 및 자세(롤/피치/요)가 실시간으로 바뀌기 때문에 지상국 안테나에서 바라본 비행체의 비행자세가 실시간으로 변화한다^[5,6]. 이는 지상국과 비행체에 탑재된 안테나의 수신신호 세기(RSS, Received Signal Strength) 변화에 영향을 준다^[7,8]. 따라서 비행체 및 안테나의 자세 변화에 따른 수신신호 세기를 미리 예측할 수 있다면, 최적의 지상국 위치를 결정하거나 다중국소 송신 장비의 전환 시점(Hand-Over Time)을 판단하는 근거로 활용할 수 있겠다.

지상국에서 바라본 비행체의 입사각(Aspect Angle)을 계산하기 위해서는 지상국에서 측정한 방위각/고각 정보와 비행체에서 측정된 비행자세(롤/피치/요) 정보가 필요하다. 방위각/고각은 지상국과 비행체의 위치로부터 계산되고, 비행자세(롤/피치/요)는 비행체 내에 탑재된 가속도/자이로/지자기 센서로부터 측정된 데이터를 보정하여 사용한다. 이때, 보정된 롤/피치 값은 비행체의 위치에서 수평선(Horizontal plane)을 기준으로 측정된 자료이다. 참고문헌 [9], [10]에서는 지상국에서 바라본 비행체의 입사각을 계산하고, 이를 시뮬레이션으로 검증하였다. 하지만 지구곡률에 따른 각도 보상이 반영되지 않아 지상국과 비행체 간의 거리가 멀어질수록 입사각 계산에 오차가 커지게 된다. Fig. 1은 지상국에서 비행체를 바라보았을 때, 비행체의 비행자세(롤/피치)를 그림으로 표현한 것이다. 비행체의 비행자세(롤/피치)는 동일하고 비행 위치가 다르다고 가정할 경우, 지상국에서 바라본 비행체의 비행자세는 다르게 나타난다. 이는 지상국과 비행체 간의 거리가 멀어질수록, 지상국에서 바라본 비행체의 입사각 계산에 오차를 발생시킨다. 따라서 장거리 비행체에 대한 입사각 계산 오차를 최소화하기 위해서는 지구곡률을 고려하여 지상국에서 바라본 비행체의 비행자세(롤/피치)에 각도 보상이 필요하다^[11].

본 논문에서는 지상국과 비행체 간의 거리 및 지구곡률을 고려하여 지상국에서 바라본 비행체의 비행자세(롤/피치) 각도 보상 값을 계산하고, 지구곡률 보상 전과 후의 입사각 계산 값을 비교한다. 그리고 3차원 비행체 모델링 및 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다.



(a) Roll angles with respect to a ground station



(b) Pitch angles with respect to a ground station

Fig. 1. Flight attitude according to earth curvature

2. 지구곡률을 고려한 비행체 입사각 계산

2.1 지상국에서 바라본 비행체 비행자세

Fig. 1은 지상국에서 비행체를 바라보았을 때, 지구곡률에 따른 비행체의 비행자세(롤/피치) 변화를 표현한 것이다. 실시간으로 이동하는 비행체는 자신의 위치에서 수평선을 기준으로 롤(θ_{roll})과 피치(θ_{pitch}) 값을 측정한다. 따라서 지상국과 비행체의 위치(위도/경도)가 다른 경우, 지상국에서 바라본 비행체 비행자세를

계산할 때 지구곡률을 고려하여야 한다. 지상국에서 바라본 비행체의 롤(θ_{roll_ground})은 비행체에서 측정된 롤(θ_{roll})과 추가로 보상되어야하는 값(θ_{r_comp})의 합이며, 식 (1)로 표현된다. 마찬가지로 지상국에서 바라본 비행체의 피치(θ_{pitch_ground})는 식 (2)와 같이 측정된 피치(θ_{pitch})와 추가 보상 값(θ_{p_comp})의 합으로 표현된다. 이때, 지구는 반지름(r_{earth})이 6,371 km으로 일정한 구(Sphere)라고 가정한다.

$$\theta_{roll_ground} = \theta_{roll} + \theta_{r_comp} \tag{1}$$

$$\theta_{pitch_ground} = \theta_{pitch} + \theta_{p_comp} \tag{2}$$

2.2 지구곡률에 의한 비행자세 보상

지상국에서 바라본 비행체의 비행자세 θ_{roll_ground} 와 θ_{pitch_ground} 를 계산하기 위해서는 지상국의 지향 방향과 비행체의 비행방향 간의 내각(Interior Angle, θ_b)을 알아야 한다. Fig. 2는 지상국과 비행체 간의 내각을 그림으로 표현한 것이다. 내각은 지상국 방위각 θ_{az} 와 비행체의 비행방향 θ_{fd} 의 차에 대한 절대값으로 표현되며, 이는 식 (3)으로 표현된다. 이때, r_m 은 지상국과 비행체 간의 거리를 의미한다. 그리고 x 와 y 는 r_m 을 빗면으로 하는 직각삼각형의 높이와 밑변을 의미하며 식 (4)와 (5)로 표현된다.

$$\theta_b = |\theta_{fd} - \theta_{az}| \tag{3}$$

$$x = r_m \sin \theta_b \tag{4}$$

$$y = r_m \cos \theta_b \tag{5}$$

Fig. 3은 지구곡률에 따른 지상국과 비행체의 내각을 3차원으로 표현한 것이다. 롤(roll) 값에 대한 보상 값 θ_{r_comp} 을 계산하기 위해서는 지상국과 비행체의 비행방향이 직각을 이루는 (a) 위치로 비행체를 이동해야 한다. 이때, 지상국에서 비행체 (a)까지의 거리는 x 로 표현된다. 피치(pitch) 값에 대한 보상 값 θ_{p_comp} 을 계산하기 위해서는 지상국을 원점으로 하고 비행체의 비행방향과 평행하는 선 위인 (b) 위치로 비행체를 이동하여야 한다. 이때, 지상국과 비행체 (b)까지의 거리는 y 로 표현된다.

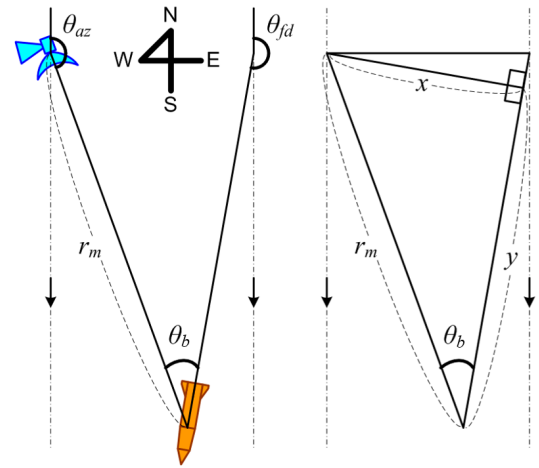


Fig. 2. Interior angle between a ground station and a flight vehicle

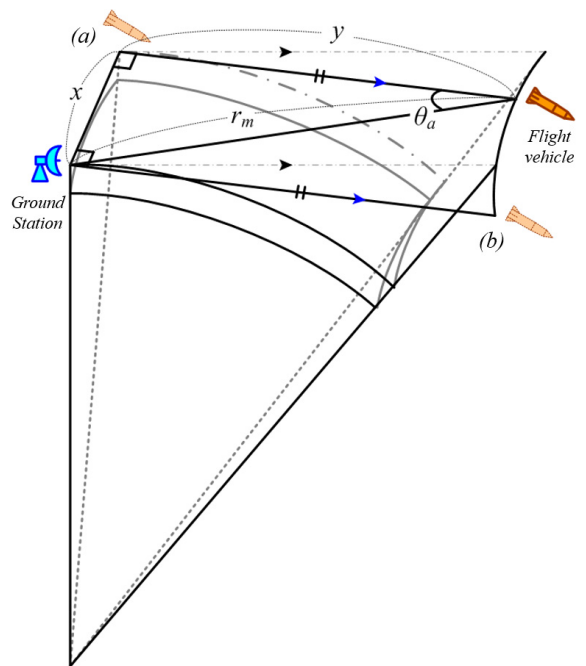


Fig. 3. Interior angle according to earth curvature

Fig. 4는 지구곡률에 따른 비행체의 롤 보상 값 θ_{r_comp} 을 계산하기 위하여 지상국과 비행체 위치 (a), 그리고 지구 중심을 세 점으로 하는 삼각형을 그림으로 나타낸 것이다. 이때, r_{earth} 는 지구 반지름을, h_{ground} 는 WGS84 좌표계의 지상국 고도를 의미하며, 식 (6)과 (7)로부터 롤 보상 값을 계산할 수 있다.

$$\theta_{fd} < \theta_{az}, \theta_{r_comp} = \tan^{-1}\left(\frac{x}{r_{earth} + h_{ground}}\right) \quad (6)$$

$$\theta_{fd} \geq \theta_{az}, \theta_{r_comp} = -\tan^{-1}\left(\frac{x}{r_{earth} + h_{ground}}\right) \quad (7)$$

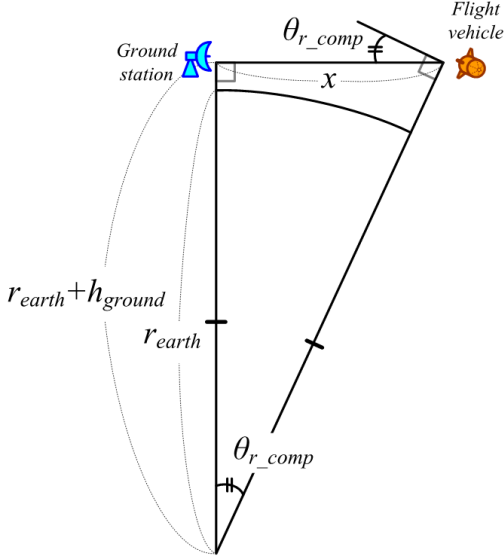


Fig. 4. Compensated roll angle for flight vehicle

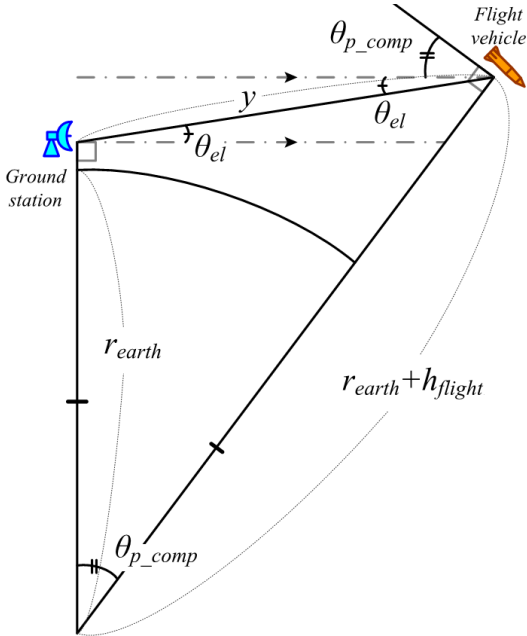


Fig. 5. Compensated pitch angle for flight vehicle

Fig. 5는 지상국과 비행체 위치 (b), 그리고 지구 중심을 세 점으로 하는 삼각형을 그림으로 표현하였다. 지구곡률에 따른 비행체의 피치 보상 값 θ_{p_comp} 은 식 (8)과 (9)로부터 계산될 수 있다. 이때, h_{flight} 는 비행체의 비행고도를 의미하며, 본 논문에서는 WGS84 좌표계를 사용하였다.

$$\theta_b > 90, \theta_{p_comp} = \sin^{-1}\left(\frac{y \cdot \cos\theta_{el}}{r_{earth} + h_{flight}}\right) \quad (8)$$

$$\theta_b \leq 90, \theta_{p_comp} = -\sin^{-1}\left(\frac{y \cdot \cos\theta_{el}}{r_{earth} + h_{flight}}\right) \quad (9)$$

2.3 지상국에서 바라본 비행체 입사각 계산

비행체 입사각 계산에 대한 수식은 참고문헌 [1]-[3]을 인용하였다. Fig. 6은 미국 ATACMS 유도무기를 3D 모델링하여 비행체 입사각 θ 와 ϕ 를 그림으로 나타낸 것이다. 입사각 θ 는 비행체의 전방 x_a 축을 기준으로 x_a 축과 y_a 축을 포함하는 평면에서 지상국 지향각을 시계방향으로 측정된 값을 의미한다. 입사각 ϕ 는 x_a 축과 y_a 축을 포함하는 평면에서 벡터 \vec{V}'_{AR} 까지의 각도를 시계방향으로 측정된 값을 나타낸다. 이때, \vec{V}'_{AR} 은 비행체 원점에서 지상국을 바라본 벡터이다. 비행체 입사각 θ 와 ϕ 는 식 (10)과 (11)로부터 계산될 수 있다. 식 (12)-(15)는 벡터 \vec{V}'_{AR} 의 스칼라 값을 수식으로 나타낸 것이다. Az 는 지상국 방위각, El 은 지상국 고각, ξ 는 비행체 롤, η 는 비행체 피치, ξ 는 LLH(Latitude-Longitude-Height) 좌표계에서 비행체의 비행방향을 의미한다. 그리고 $\xi' (= \xi - 90)$ 는 ENU(East-North-Up) 좌표계에서의 비행체 비행 방향을 의미한다. 비행자세(롤/피치/요)는 요, 피치, 롤 순서의 회전이다.

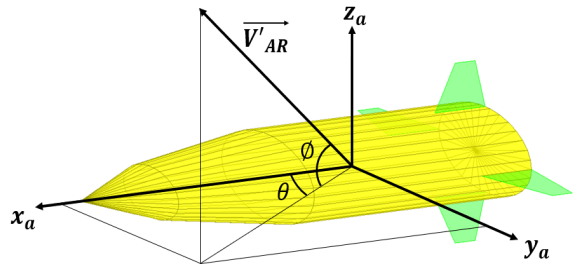


Fig. 6. Flight vehicle aspect angles with respect to a ground station

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{V'_{ARx}}{\sqrt{(V'_{ARx})^2 + (V'_{ARy})^2}}\right) \quad (10)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{V'_{ARz}}{\sqrt{(V'_{ARx})^2 + (V'_{ARy})^2}}\right) \quad (11)$$

$$\vec{V}'_{AR} = V'_{ARx} \vec{x}_a + V'_{ARy} \vec{y}_a + V'_{ARz} \vec{z}_a \quad (12)$$

$$V'_{ARx} = -\cos(\xi')\cos(\eta)\sin(Az)\cos(El) + \sin(\xi')\cos(\eta)\cos(Az)\cos(El) - \sin(\eta)\sin(El) \quad (13)$$

$$V'_{ARy} = -\{\cos(\xi')\sin(\eta)\sin(\zeta) + \sin(\xi')\cos(\zeta)\} \times \sin(Az)\cos(El) - \{-\sin(\xi')\sin(\eta)\sin(\zeta) + \cos(\xi')\cos(\zeta)\} \times \cos(Az)\cos(El) + \cos(\eta)\sin(\zeta)\sin(El) \quad (14)$$

$$V'_{ARz} = -\{-\cos(\xi')\sin(\eta)\cos(\zeta) + \sin(\xi')\sin(\zeta)\} \times \sin(Az)\cos(El) - \{-\sin(\xi')\sin(\eta)\cos(\zeta) + \cos(\xi')\sin(\zeta)\} \times \cos(Az)\cos(El) - \cos(\eta)\cos(\zeta)\sin(El) \quad (15)$$

비행체의 위치(위도/경도/고도)는 LLH 좌표계에서 ECEF(Earth-Centered Earth-Fixed) 좌표계와 ENU 좌표계로 변환하는 과정에서 지구곡률이 고려된다. 하지만 비행체의 비행자세 롤(ζ)과 피치(η)는 지구곡률이 고려되지 않고 식 (13)-(15)에 사용된다. 이는 지상국과 비행체 간의 거리가 멀어질수록, 지구곡률의 영향을 받아 비행체 입사각 계산에 오차를 크게 발생시킨다. 이를 해결하기 위해서는 지구곡률에 따른 비행체의 비행자세를 보상해주어야 하고, 식 (1)과 (2)에서 계산된 롤(θ_{roll_ground})과 피치(θ_{pitch_ground})를 기존의 롤(ζ), 피치(η)에 대입하면 장거리 비행체에 대하여 지구곡률이 보상된 입사각을 계산할 수 있다.

3. 시뮬레이션 검증

Fig. 7과 8은 시뮬레이션에 사용된 비행체의 비행궤적, 비행자세, 지상국 3곳의 위치를 2차원과 3차원 공간으로 나타낸 것이다. 비행궤적은 발사점을 원점으로 가시화하였고, 최대 사거리는 400 km로 임의 가공하

였다. 비행체가 남동쪽으로 비행한다고 가정하였고, 지상국 3곳은 비행궤적의 동쪽에 위치하도록 설정하였다. 지상국 3곳의 위치는 발사점을 기준으로 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Location of three ground stations

	Site#1	Site#2	Site#3
East [km]	4.66	-25.53	-38.83
North [km]	-18.23	-173.50	-326.11
Up [km]	-0.03	-2.42	-8.39

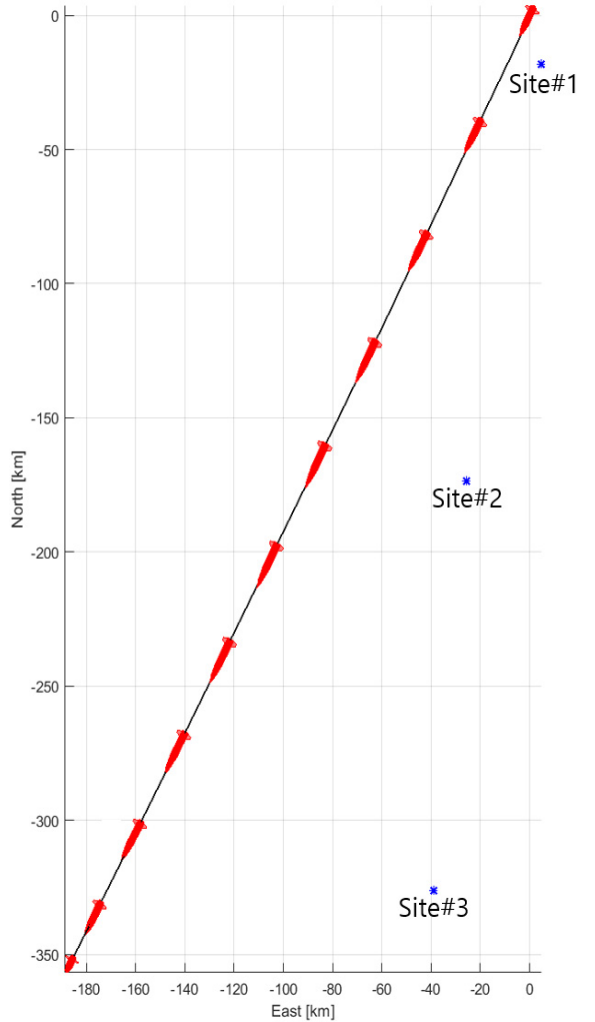


Fig. 7. 2D Trajectory and three ground stations

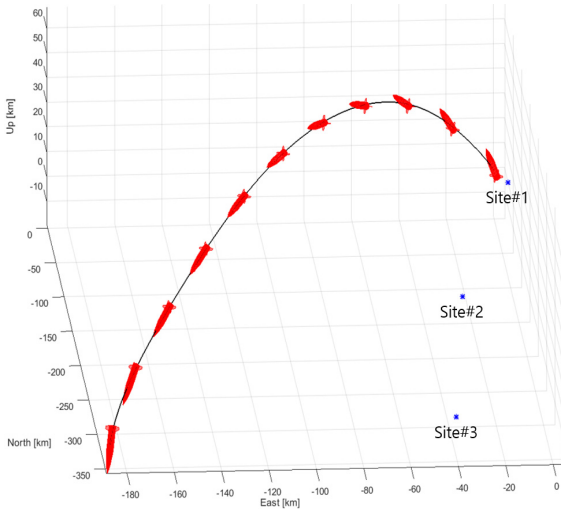


Fig. 8. 3D Trajectory and three ground stations

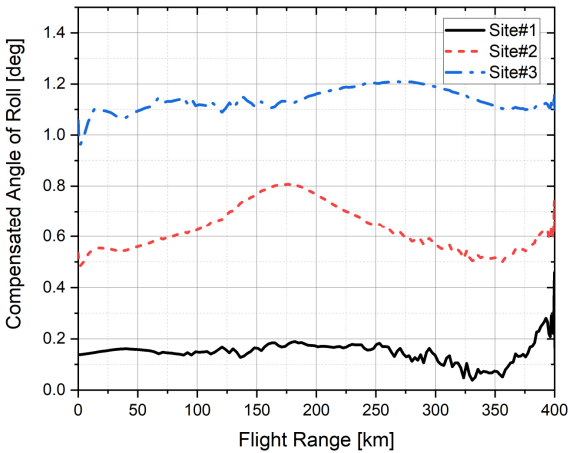


Fig. 9. Compensated angles of roll for three sites

Fig. 9는 지구곡률을 고려하여 지상국 3곳 위치에서 바라본 비행체에 대하여 보상해야 하는 롤(θ_{r_comp}) 값을 비행 거리에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 지상국 3곳이 모두 비행궤적의 동쪽에 위치하기 때문에, 보상해야 하는 롤 값이 모두 (+) 값을 가지게 된다. 지상국 Site#1은 발사점 근처에 위치하기 때문에 보상해야 하는 롤 값이 약 0.2도 이내로 계산되었다. 하지만 지상국 Site#3는 비행궤적에서 이격된 거리만큼 롤 값을 최대 1.2도 보상해줘야 한다.

Fig. 10은 지구곡률을 고려하여 지상국 3곳 위치에서 바라본 비행체에 대해 보상해야 하는 피치(θ_{p_comp})

값을 비행 거리에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 지상국 Site#1은 발사점 근처에 위치하기 때문에 비행 초기에는 보상해야 하는 피치 값이 적지만, 탄착 직전에는 피치 값을 -3.6도 보상해줘야 한다. 지상국 Site#2는 비행 초기에는 최대 1.37도의 피치 값을 보상해줘야 하고, 비행거리 165 km에서는 비행체의 비행 벡터와 지상국에서 비행체를 바라본 벡터가 직각을 이루기 때문에 피치에 보상해야 하는 값은 0이다.

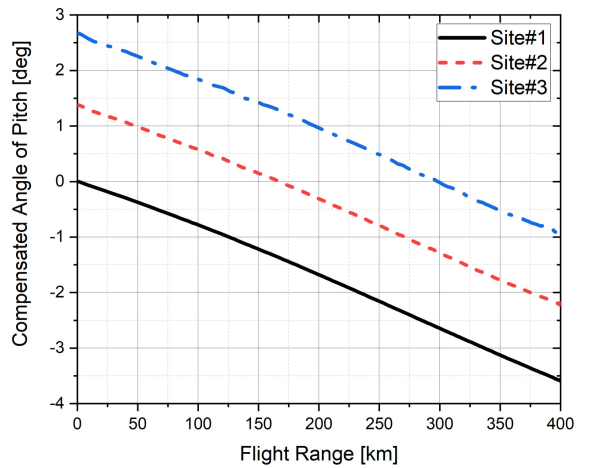


Fig. 10. Compensated angles of pitch for three sites

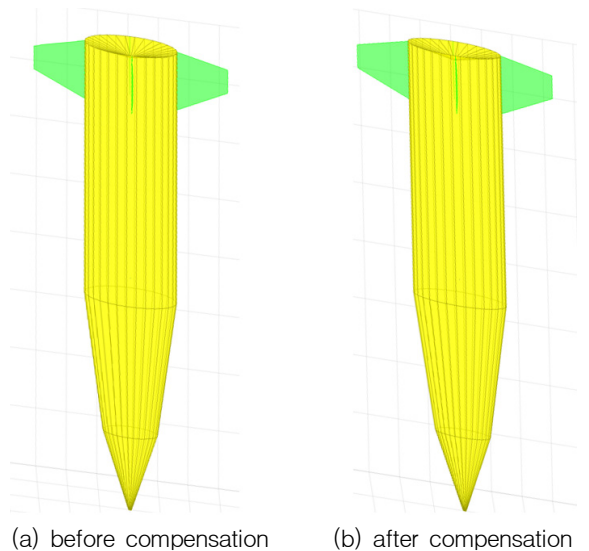


Fig. 11. Flight attitude with respect to site#1 before and after compensation when flight range is 400 km

Fig. 11은 비행체의 비행거리가 400 km일 때, 지상국 Site#1에서 바라본 비행체의 자세이다. Fig. 11(a)는 지구곡률을 고려하지 않았고, Fig. 11(b)는 롤 보상 값 0.2도와 피치 보상 값 -3.6도를 적용한 것이다. 지상국과 비행체 간의 거리가 멀수록, 지구곡률에 따른 피치 보상 값이 커지게 된다.

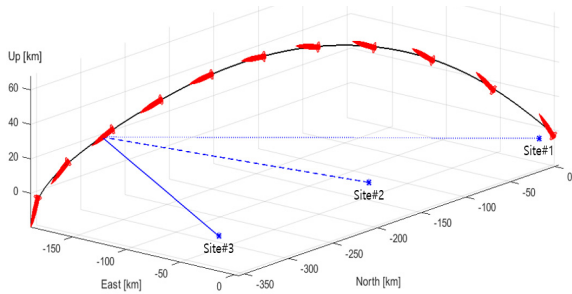


Fig. 12. 3D Trajectory and tracking lines of ground stations when flight range is 350 km

Fig. 12는 3차원 공간에서 지상국 3곳으로부터 비행거리 350 km 지점까지를 실선/파선/점선으로 연결한 것이다. 지상국 3곳에서 350 km 지점까지의 거리는 Site#1에서 335.8km, Site#2에서 194.3 km, Site#3에서 129.7 km이다.

Fig. 13~15는 비행체의 비행거리가 350 km이고 지상국 3곳에서 비행체를 바라보았을 때, 비행체의 자세를 3차원 가시화한 것이다. 지상국에서 바라본 비행체의 입사각을 계산할 때, 지구곡률에 따른 롤/피치 보상 값을 적용하였다. Table 2는 비행거리가 350 km일 때, 지상국 3곳에서 바라본 비행체 입사각 계산에 보상된 롤/피치 각도이다.

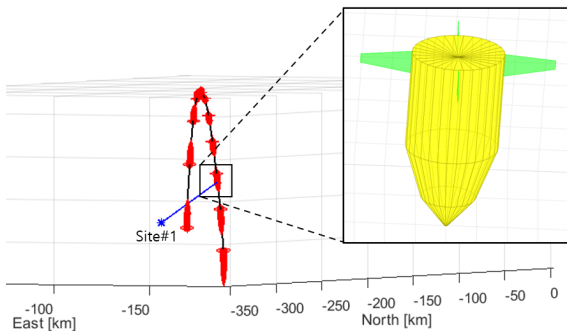


Fig. 13. Flight attitude with respect to site#1 when flight range is 350 km

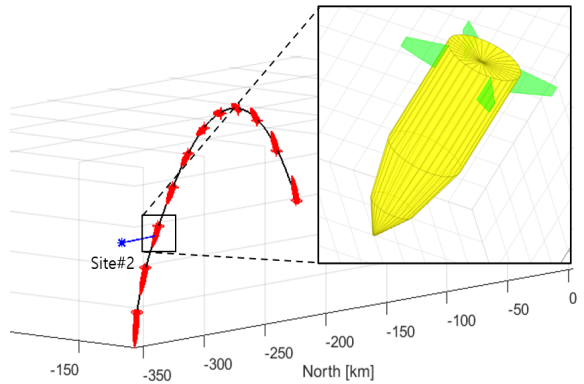


Fig. 14. Flight attitude with respect to site#2 when flight range is 350 km

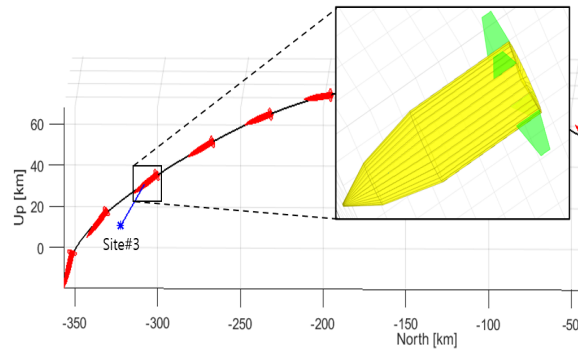


Fig. 15. Flight attitude with respect to site#3 when flight range is 350 km

Table 2. Compensated roll/pitch angles at 350 km

	Site#1	Site#2	Site#3
Roll [deg]	0.074	0.52	1.16
Pitch [deg]	-3.12	-1.77	-0.51

4. 결론

본 논문에서는 지상국과 비행체 간의 거리에 따른 지구곡률 보상 값을 계산하는 방법에 대하여 설명하였다. 단거리 비행체의 경우, 지구곡률에 의한 보상 값이 크지 않기 때문에 무시할 수 있지만, 장거리 비행체의 경우 지구곡률에 의한 롤/피치 각도 보상을 하여야 정확한 입사각을 획득할 수 있겠다.

References

- [1] D. Yoon, "Development of Ground System to Improve Link Reliability of Flight Termination System for Guided Missiles," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 24, No. 7, pp. 891-89, 2020.
- [2] S. Lee, "A Study on a Tracking Method of Telemetry Signal using Self-Slaving," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 50-57, 2008.
- [3] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2008.
- [4] Josh T. Nessmith, "Range Instrumentation Radars," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-12, No. 6, pp. 756-766, 1976.
- [5] Willie D. Caraway III and David C. Abell, "Method for the Determination of Target Aspect Angle with Respect to a Radar," *US Army Missile Command, Technical Report RD-MG-96-32*, pp. 3-8, April 1996.
- [6] Kerem Sen, Sinan Aksimsek, and Ali Kara, "Dynamic RCS Modeling and Aspect Angle Analysis for Highly Maneuverable UAVs," *Aerospace*, Vol. 11, No. 9, 775, 2024.
- [7] F. sellmaier, T. Uhlig, and Michael Schmidhuber, "Spacecraft operations," Springer, Berlin, 2015.
- [8] E. H. Day and J. H. Pannell, "Effects of Airborne Transponder Antenna Lobe Switching on En Route (PCD) and Terminal(BDAS) Beacon Reply Processing," *Project Report ATC-18*, Jan. 1974.
- [9] C. Ryu, S. Ye, G. Hwang, I. Seo, "An Analysis of Instrumentation Radar's Beacon Tracking Performance Considering a Target Attitude," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 561-568, 2010.
- [10] J. Yang, S. Yoo, J. Yoon, D. Lee, T. Ha, "Radar Simulation of Tracking a Guided-Missile in consideration of Beacon's Antenna Position," *KIMST Annual Conference Proceedings*, 2021.
- [11] J. Yang, D. Seo, T. Ha, "Aspect Angle Calculation between a Ground Station and a Flight Vehicle in consideration of Earth Curvature," *KIMST Annual Conference Proceedings*, 2022.