J. Space Technol. Appl. 5(2), 73-85 (2025)
https://doi.org/10.52912/jsta.2025.5.2.73

우주기술과 응용
Journal of Space Technology and Applications
pISSN 2765-7469 eISSN 2799-3213

연구논문

누리호 성능을 고려한 Walker-Delta 군집위성 궤도설계

서성원[1], 최수진[2†]

[1] 과학기술연합대학원대학교 항공우주시스템공학과
[2] 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과

Walker-Delta Constellation Orbit Design Considering Korea Space Launch Vehicle-II (KSLV-II) Performance

Sungwon Seo[1], Su-Jin Choi[2†]

[1]Department of Aerospace System Engineering, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea
[2]Department of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 34036, Korea

Received: March 6, 2025
Revised: March 20, 2025
Accepted: March 22, 2025

†**Corresponding author :**
Su-Jin Choi
Tel: +82-41-560-1308
E-mail: jin5864@koreatech.ac.kr

Copyright © 2025 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Sungwon Seo
https://orcid.org/0009-0006-2748-7949
Sujin Choi
https://orcid.org/0000-0002-0285-2720

요 약

누리호는 투입 경사각 80도에서 최고의 성능을 나타낸다. 발사장의 지형적 위치와 안전거리 이슈로 발사 방위각이 약 172도로 고정되기 때문이다. 최근 국내 군집위성 연구에서 언급되는 45도 정도의 경사각은 요기동이 요구되어 성능에 손실이 불가피하다. 본 연구에서는 누리호의 탑재체 투입 성능을 최대화할 수 있는 80도의 투입 경사각을 기준으로 군집위성의 시스템 설계를 수행하고, 5개 및 6개의 궤도평면을 이용하는 Walker-Delta 군집위성 궤도설계를 수행하여 관심 지역의 재방문 주기를 분석하였다. 분석 결과 평균 재방문 주기는 45분 정도임을 확인할 수 있었고, 해당 군집위성의 실현 가능성을 고찰하였다.

Abstract

Korea Space Launch Vehicle-II (KSLV-II) shows the highest efficiency at an input angle of 80 degrees. The launch azimuth angle is fixed at about 172 degrees due to the geographical location and safety range issues of the launch site. The inclination angle of 45 degrees mentioned in recent domestic satellite constellation studies is required yaw maneuvers, which inevitably causes loss in performance. In this study, the satellite constellation are designed based on the 80 degrees inclination, maximizing the injection performance of the payload of KSLV-II, and the Walker-Delta constellation with 5 and 6 orbital planes are designed to analyze the revisit time (RT) of the area of interest. It was confirmed that the average RT was about 45 minutes and the feasibility of the satellite constellation was considered.

핵심어: 누리호, 군집위성, 워커델타, 궤도 설계, 재방문 주기
Keywords: Korea Space Launch Vehicle-II, satellite constellation, Walker-Delta, orbit design, revisit time

1. 서론

대한민국의 발사체 누리호(Korea Space Launch Vehicle-II, KSLV-II)는 3단형 액체 로켓으로 1.5톤급 실용위성을 태양동기궤도(SSO, sun-synchronous orbit)에 투입할 수 있는 성

능을 갖도록 개발되었다[1]. 누리호는 1단 및 2단의 낙하점 이슈로 발사장인 나로우주센터에서 방위각 172도로 발사되며, SSO로 위성을 투입하기 위해 발사 과정에서 경사각 변경을 위한 요기동을 수행하며 투입 성능은 약 1.5톤이다. 발사 과정에서 요기동을 수행하지 않고 300 km의 저궤도(경사각 80도)에 투입한다면 성능은 약 2.6톤이 된다. 최근 누리호의 성능은 약 25% 정도 향상되어[2], 300 km의 저궤도(경사각 80도)에 3.0톤을, 700 km의 SSO에 1.9톤의 수송이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 성능을 바탕으로, 특정 임무 수행을 위한 위성 군집을 운용할 경우, 목표 궤도 설정이 중요한 요소가 된다. 예를 들어, 보다 높은 투입 성능을 고려할 경우 500 km 저궤도(경사각 80도)가 하나의 유력한 후보가 될 수 있으며, 이 경우 약 2.5-2.6톤의 탑재체를 해당 궤도에 투입할 수 있을 것으로 예상된다.

군집위성은 일반적으로 재방문 주기를 기준으로 평가된다. 기존 연구에서는 군집위성의 재방문 주기를 최소화하기 위한 최적 배치 알고리즘을 제시하거나, 위성 유형에 따른 재방문 주기의 특성을 분석하는 데 초점이 맞춰져 왔다. Lee et al.은 유전알고리즘 최적화 기법을 사용하여 관심 지역인 북한 지역을 대상으로 최적의 재방문 주기를 가지는 위성 배치 방법을 제시하였다[3]. 관심 지역인 북한 9개 지역마다 최적 궤도요소를 구하고, 지상 반복 궤도의 최적 위성 수를 계산하였다[3]. 북한 9개 지역별로 최적의 궤도 요소를 산출하여 재방문 주기를 최소화하였지만, 각 지역마다 다른 최적 궤도를 적용하려면 다수의 개별 발사가 필요하거나 추가적인 궤도 변경 기동이 요구되는 현실적인 운용 제약이 고려되지 않았다. Kim et al.은 유전알고리즘을 사용하여 최대 재방문 주기를 최소화하는 궤도 요소들을 제시하여, 기존 태양 동기 궤도를 사용한 Walker 군집위성과 최적 궤도 요소를 적용한 군집위성의 재방문 주기를 비교하였다[4]. 최적 궤도 요소를 적용하여 최대 재방문 주기를 최소화하는 방법을 제시하였으나, 한국의 지형적 특성을 고려할 때 실제 위성 배치에 따른 제약이 반영되지 않아, 실질적인 적용 가능성에 대한 논의가 부족하다. Shin et al.은 기하학적 분석을 통해 최적 경사각을 계산하여 최소 재방문 주기를 가지는 군집위성 배치를 제안하였다. 대상 지역은 한반도 및 지역 국가의 주요 도시 9개 중 관심 도시 지역의 가중치를 다르게 선택하여, 위성 수 20-30개일 때 궤도 평면을 다르게 하여 재방문 주기를 비교 분석하였다[5]. 하지만, 위성별 서로 다른 최적 궤도 요소를 적용하여 위성을 배치하려면, 실질적으로 각기 다른 궤도로 위성을 투입해야 하므로 더 많은 발사체가 필요하거나 추가적인 궤도 변경 기동이 요구되는 현실적인 제약이 존재한다. 특히, 최적화 과정에서 도출된 경사각은 대략 35-45도로, 이는 한국의 발사 환경에서 직접 배치하기 어렵다. Cho et al.은 태양 동기 궤도와 지상 반복 궤도를 함께 사용한 BB 군집위성(beach ball constellation)을 제시하였다. BB 군집위성은 Walker-Delta 군집위성과 다르게 재방문 주기(revisit time)가 일정하고, 최대 재방문 주기를 줄일 수 있다는 장점을 보여주었지만, 비슷한 평균 재방문 주기를 가지는 위성군의 위성 수가 Walker-Delta 군집위성보다 많다는 단점이 있다[6]. Song et al.은 SAR 위성 6-48개의 Walker-Delta 위성군의 북한 전체 지역, 북한 특정 지역에 대한 재방문 주기를 비교하였다. 군집위성의 개수를 증가시키며, 재방문 주기의 변화 추세를 분석하였다[7]. 하지만 해당 연구들은 북한 지역의 재방문 주기를 줄이기 위해 궤도 요소, 특히 경사각 최적화에 중점을 두었고, 발사체에 대한 논의는 부재한 상황이다. 해당 연구에서 제시하는 경사각(약 45도 내외)을 적용하려면 국내 발사체로는 직접 투입이 어렵고, 국외 발사장을 이용한 단독 발사가 불가피하다. 또한, Walker_Delta의 궤도 평면의 변화에 따른 재방문 주기 분석이 부족하다.

이러한 한계를 보완하기 위해, 본 연구에서는 국내 보유 자산(발사장 및 발사체)을 고려하여 현실적으로 운용 가능한 군집위성 설계를 수행하였다. 특히, 누리호의 성능을 극대화할 수 있는 경사각 80도를 활용하여 국내 발사 환경에서 실현 가능한 군집위성 배치 전략을 제시하고, 빔 폭 30도의 센서를 탑재한 30기의 군집위성을 활용하여 북한 지역의 재방문 주기를 분석하였다. 그 결과, 북한을 촬영하기 위한 재방문 주기가 평균 45분 정도로 짧다는 것을 확인하였다.

본 논문의 주요 기여점은 다음과 같다. 첫째, 기존 연구들이 최적 경사각을 설정하여 위성군의 재방문 주기를 최소화하는 데 초점을 맞춘 반면, 본 연구는 누리호의 발사 성능을 함께 고려하여 실질적인 군집위성 배치 전략을 제안하였다. 이를 통해, 한국의 발사 환경에서 현실적으로 적용 가능한 위성 배치 방안을 마련하였다. 둘째, Walker-Delta 위성군의 위상차에 따른 재방문 주기 변화를 정량적으로 분석하여, 위성군의 배치 방식이 재방문 주기 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 통해, 위상차가 재방문 주기에 미치는 영향을 분석하고, 현실적인 위성 배치 전략을 제시하였다. 셋째, 위성군 배치와 지구 자전의 영향으로 인해 특정 지역에서 짧은 재방문 주기와 긴 재방문 주기가 형성되는 원인을 분석하였다. 이를 바탕으로, 위성 배치 방식이 재방문 주기에 미치는 영향을 파악하고, 향후 위상차 조정 및 추가적인 위성 배치 전략을 수립하는 데 필요한 기초 데이터를 도출하였다. 넷째, 재방문 주기의 특성을 종합적으로 분석하기 위해 최소, 평균, 최대 재방문 주기를 비교하고, 북한 지역을 격자(grid) 단위로 세분화하여 각 지역별 재방문 주기를 평가하였다. 이를 통해, 관심 지역에 따라 최적의 위성 배치를 선택할 수 있도록 정량적인 데이터를 제공하였다.

2장에서는 군집위성의 임무 성능 지수 중 대표적으로 사용되는 재방문 주기의 정의와 최소, 최대, 평균 재방문 주기에 대해 설명하며, 3장에서는 군집위성 배치에 많이 사용되는 Walker-Delta 위성군에 관해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 조건과 시뮬레이션 결과에 대해 분석한 내용이며, 5장에서는 본 논문의 결론을 기술하였다.

2. 재방문 주기 정의

재방문 주기는 위성이 관심 지역을 재관측하기까지 걸리는 기간을 의미하며, 군집위성의 대표적인 특성 중 하나로 사용된다. 재방문 주기는 전체 관심 지역에 대한 재방문 주기와 특정 지점에 대한 재방문 주기로 구분된다[7]. 전체 지역 재방문 주기는 위성이 관심 지역(북한) 어느 부분이라도 커버리지를 제공하지 못했을 때부터 다음 커버리지를 제공할 때까지의 기준으로 계산된 재방문 주기고, 격자별 재방문 주기는 북한 전체 지역을 개별 격자로 나누어 계산한 재방문 주기이다. Fig. 1은 재방문 주기에 대한 일반적인 개념을 도식화하였다.

군집위성의 재방문 주기는 관심 지역에 대해 최소, 최대, 평균 재방문 주기로 구분되며 평균 재방문 주기의 경우 관심 지역에서 발생한 재방문 주기의 산술 평균으로 표현된다. 평균 재방문 주기는 식 (1)과 같다. 이때 N은 관심 지역에서 발생한 재방문 횟수이고 ART (average revisit time)는 평균 재방문 주기, RTn(revisit time)는 관심 지역에 대한 n번째 재방문 주기이다.

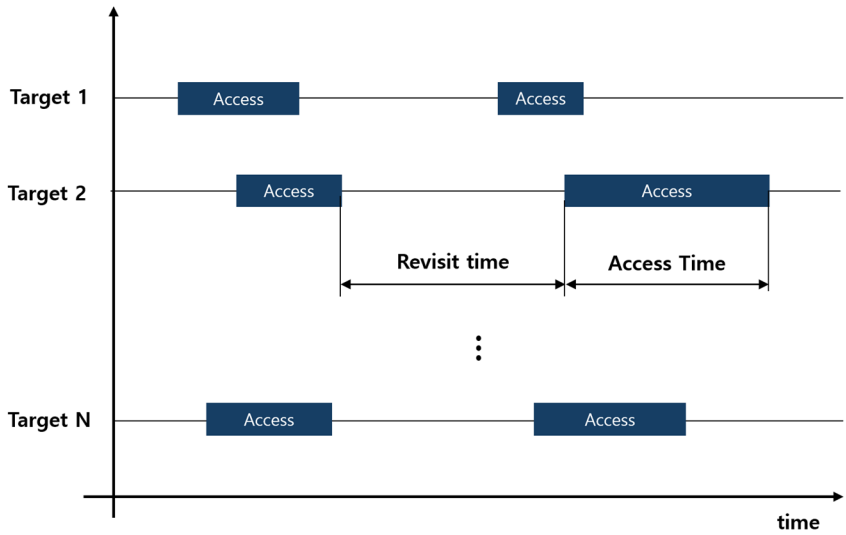


Fig. 1. Concept of revisit time.

$$ART = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} RT_n \tag{1}$$

3. Walker-Delta 군집위성 정의

Walker-Delta 군집위성은 J. G. Walker가 Walker-Star 군집위성과 함께 제안한 위성 배열 방식으로, 위성을 전 지구적으로 균등하게 배치하여 전 세계 또는 특정 지역을 효율적으로 관측하는 것을 목표로 한다[8-12].

3.1 군집 변수

Walker-Delta 군집위성은 4개의 군집 변수인 경사각(i), 전체 위성수(t), 궤도면의 수(p), 위상차(f)을 사용하여 표현할 수 있고, 식 (2)와 같다. 한 궤도면에 대한 위성의 수(s)는 식 (3)과 같다.

$$i: t/p/f$$
$$for\ 0 \le f \le p-1 \tag{2}$$

$$s = \frac{t}{p} \tag{3}$$

Walker-Delta 군집위성은 모든 위성이 동일한 고도와 경사각을 가지며, 이심률이 0인 원형 궤도로 구성된다. 또한 군집위성의 RAAN(right ascension of ascending node, Ω)과 AoL (argument of latitude, μ)는 앞서 언급된 군집 변수인 경사각, 전체 위성 수, 궤도면 수, 위상차를 기반으로 설계된다. 군집위성의 궤도 평면의 RAAN은 식 (4)과 같이 전체 궤도 평면의 개수에 의해 결정된다. 이때 Ωj는 j번째 궤도 평면의 RAAN을 의미한다.

$$\Omega_j = \frac{2\pi}{p} j\ rad$$
$$for\ 0 \le j \le p-1 \tag{4}$$

Walker-Delta 군집위성을 구성하고 있는 위성의 AoL은 식 (5)와 같이 전체 궤도 평면의 개수와 위상 매개변수를 통해 표현된다.

Walker-Delta 군집위성의 군집변수가 80°:30/5/0인 군집위성의 예시는 Fig. 2와 같다.

$$\mu_{jk} = \left(\frac{2\pi}{s}k + \frac{2\pi f}{sp}j\right) rad$$
$$for\ 0 \le k \le s-1 \tag{5}$$

4. Walker-Delta 위성군 재방문 주기 특성 분석

4.1 누리호 성능을 고려한 군집위성 궤도설계

서론에서 정리한 바와 같이, 누리호는 500 km의 고도 및 80도의 경사각에 약 2.5톤의 탑재체를 투입할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 Table 1과 같이 500 kg의 소형위성 5기를 한 궤도에 올려 6개의 평면을 이용하거나 400 kg의 소형위성 6기를 한 궤도에 올려 5개의 평면을 이용하는 방안을 고려하였고, 500 kg의 위성은 현재 대한민국에서 개발된 중형위성 플랫폼인 CAS500을 기준으로 하였다.

4.2 시뮬레이션 조건

본 논문에서는 누리호 성능 및 발사장의 환경을 고려하여 Table 2와 같이 Walker-Delta 군집위성의 궤도를 설정하였고, 궤도 평면 개수를 5개와 6개로 나누어 위상 매개변수에 따른 군집위성의 재방문 주기를 분석하였다.

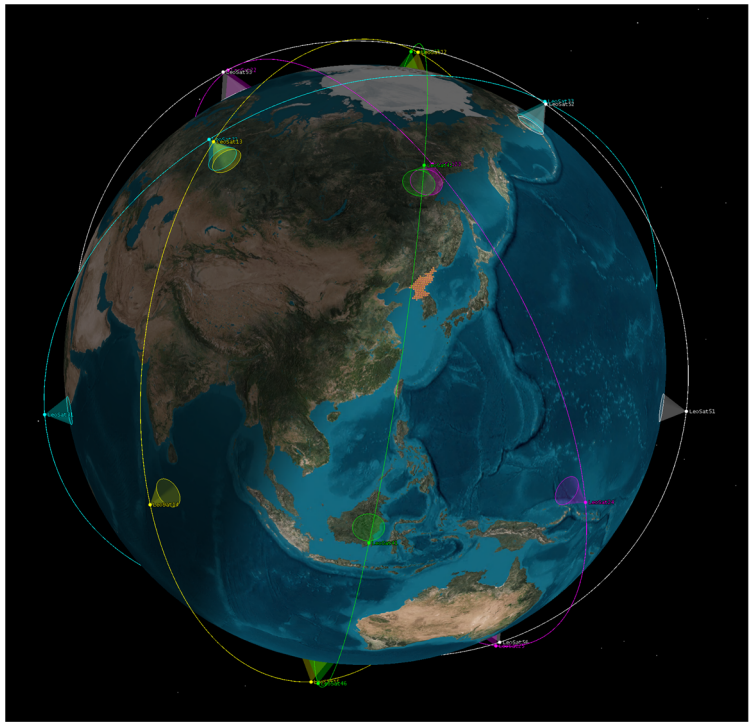


Fig. 2. Walker Delta example illustration (80°:30/5/0), altitude 500 km.

Table 1. Mass of satellite and numbers of the satellite per orbit

Planes	Mass of satellite	Number of Sat. per orbit
6	500 kg	5
5	400 kg	6

Table 2. Satellite constellation orbit parameters

Walker-Delta constellation parameters	
Altitude	500 km
Inclination (i)	80°
Total satellites (t)	30
Planes (p)	5, 6
Field of view	30°
Simulation time	1 day, 1 week, 1 month

위상차는 인접한 궤도평 면에서 위성 간의 상대적 위치 차이를 나타내는 값으로, 궤도 평면 간 위성의 분포를 균등하게 조정하는 데 중요한 역할을 한다. 구체적으로, 위상차는 각 궤도 평면에 위치한 위성이 궤도상의 특정 위치에 고르게 분포되도록 설정된다. 따라서 본 연구에서는 위상차가 군집위성 재방문 주기에 미치는 영향을 평가하기 위해 $0 \leq f \leq p-1$과 같이 모든 위상차에 대한 군집위성의 재방문 주기를 분석하였다. 북한 전체 지역의 재방문 주기 경향을 파악하기에는 1주일이 적합하다고 판단하였고, 격자별 재방문 주기 경향을 파악하기에는 1일, 1주일, 1개월이 적합하다고 판단하여 해당 기간으로 설정하였다.

본 논문에서는 군집위성 형상이 보존되는 경우를 분석하기 위해 외란이 없는 이상적인 환경을 가정하였다. 위성의 궤도 전파는 식 (6)로 표현되는 운동 방정식을 따른다[13].

$$\ddot{\boldsymbol{r}} = -\frac{\mu}{r^3}\boldsymbol{r} \tag{6}$$

μ는 지구의 gravitational parameter, r은 지구중심에서 위성까지의 거리, r은 지구 중심에서 위성까지 위치 벡터다.

4.3 북한 전체 지역 재방문 주기 결과

Fig. 3은 위성 수 30개, 궤도면 5개일 때, 북한 전체 지역에 대한 위상차별 재방문 주기를 20분 간격으로 나타낸 히스토그램이다. 재방문 주기는 짧은 재방문 주기 구간(60분 미만)인 구간과 긴 재방문 주기 구간(180-200분)으로 구분되어 나타났다. 60분 미만일 경우는 85%

정도 되며, 180-200분 사이는 약 15% 정도로 나타났다. 60분 미만의 짧은 재방문 주기는 주로 같은 궤도면에 배치된 위성이 관심 지역을 재방문하며 발생한다.

반면, 180분에서 200분 사이의 긴 재방문 주기는 지구의 자전으로 인한 궤도면의 상대 움직임에 따른 결과로 나타난다. 따라서 인접한 궤도면이 이동하는 동안 관심 지역에 커버리지를 제공하는 못하는 시간이 주기적으로 대략 180분에 200분 사이로 나타남을 알 수 있다. 위상차(f)를 다양하게 적용하여 시뮬레이션을 수행한 경우, Fig. 3에 도시된 바와 같이 재방문 주기에는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

Fig. 4과 같이 궤도면이 6개면, 위상차(f)가 1, 3, 5일 경우 재방문 주기가 40분보다 적은 비율은 80% 정도가 되고, 위상차(f)가 0, 2, 4일 경우 65% 정도가 된다. 궤도면이 5개인 경우와 비교하면 재방문 주기는 위상차에 따라 변화가 다소 있음을 알 수 있다. 따라서 궤도면을 추가할수록 위상차에 대한 재방문 주기의 분포는 더욱 다양할 수 있음을 추론할 수 있다. 6개의 궤도면을 사용하는 군집위성군의 재방문 주기는 60분 미만의 짧은 주기와 120분 이상 160분 미만의 긴 주기 특성이 나타난다. 5개의 궤도면을 이용한 경우와 마찬가지로 120분 이상 160 분 이하의 재방문 주기는 궤도면 사이의 변화로 나타나는 특징임을 알 수 있다.

최대 재방문 시간은 궤도면이 5개일 때 180분에서 200분 사이지만, 궤도면이 6개일 때는 140분에서 160분 사이로 궤도면 6개일 때 더 짧다는 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 북한 지역 전체에 대한 궤도면 5개, 6개 각각의 위상차별 평균 재방문 주기를 나타낸다. 각각의 평균 재방문 주기는 43분에서 47분 사이로 나타났으며, 전반적으로 45분의 재방문 주기를 갖는 것을 확인하였다.

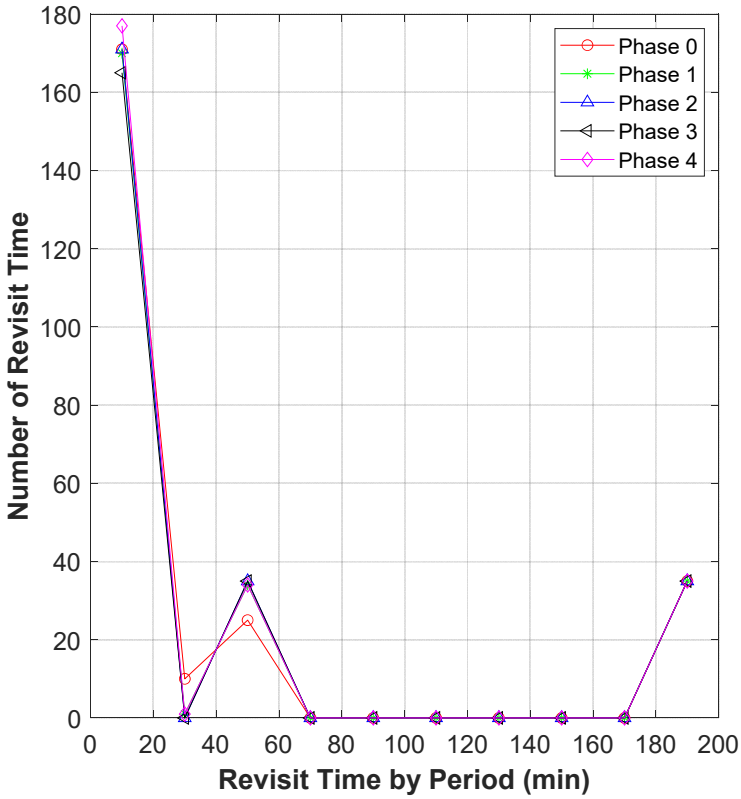


Fig. 3. The number of revisit time for 5 planes for 1 week.

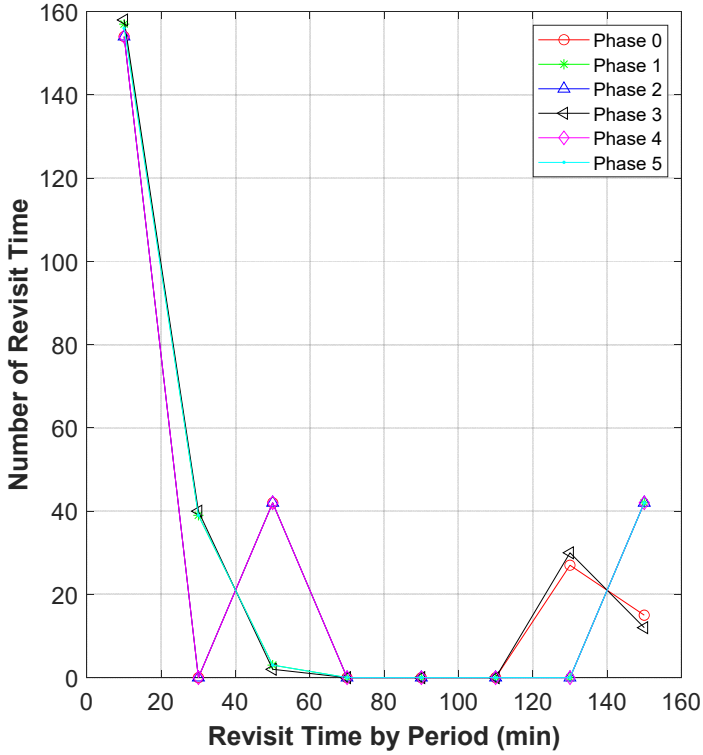


Fig. 4. The number of revisit time for 6 planes for 1 week.

Table 3. Average revisit time w.r.t. planes

Phase (f)	5 planes (min)	6 planes (min)
0	45.7	45.4
1	43.7	43.5
2	45.3	46.3
3	43.9	43.2
4	43.7	45.2
5	-	44.6

Fig. 5는 재방문 주기가 5개 평면에서 180-200분과 같은 긴 재방문 주기가 산출되는 이유를 나타낸다. Fig. 5에서는 관심 지역(area of Interest)이 커버리지를 제공받는 궤도면이 Plane 1에서 Plane 2로 바뀌는 것을 보여주며, 이때 걸리는 시간이 궤도면 5개일 때, 180-200분 소요되며, 궤도면이 증가할수록 재방문 주기가 작아짐을 쉽게 유추할 수 있다.

4.4 격자별 재방문 주기 결과

본 절에서는 북한지역을 0.1도 간격의 격자로 나누어 재방문 주기를 분석하였다. Fig. 6는 군집위성의 궤도면 수 5개, 위상차 0에 대한 격자별 재방문 주기를 나타낸다. 시뮬레이션 기간은 1일, 1주일, 1개월 단위로 진행하였으며, 각각에 대한 격자별 최소, 평균, 최대 재방문 주기

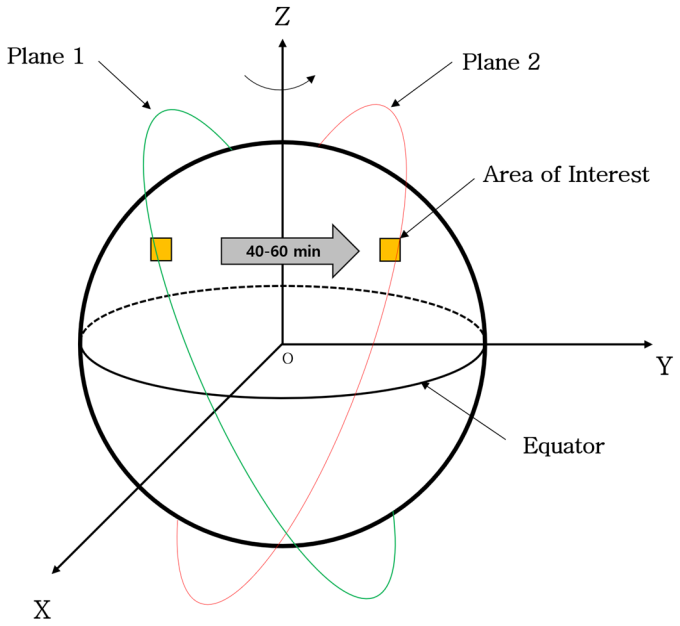


Fig. 5. Area of interest shifting during 180–200 minutes.

결과이다. 재방문 시간이 짧을수록 파란색, 재방문 주기가 길수록 빨간색으로 표시하였다. 범례의 숫자는 재방문 주기를 나타내며 단위는 초(sec)다.

4.4.1 최소 재방문 주기

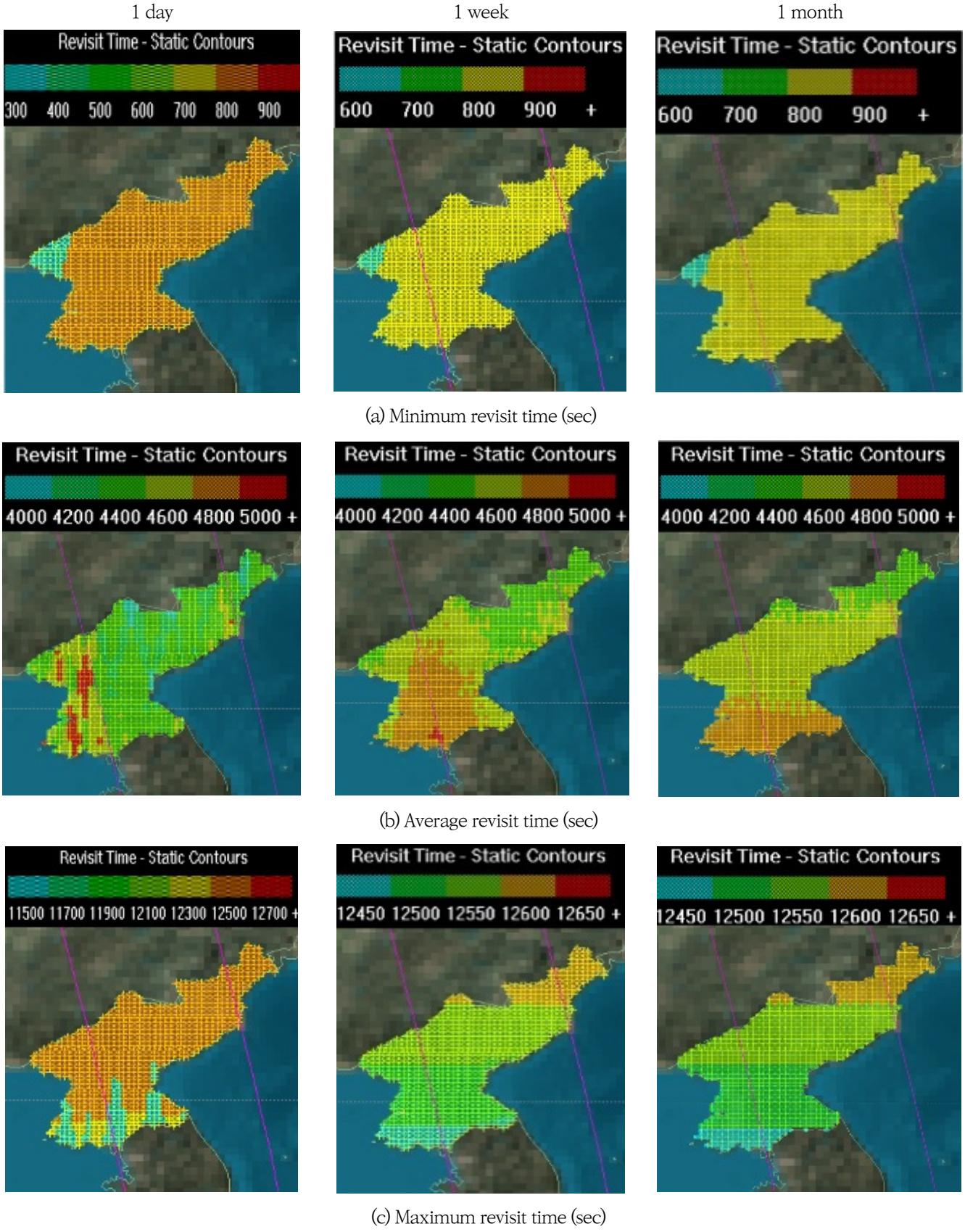
해당 부분에서는 격자별 최소 재방문 주기에 대해 분석하였다. 시뮬레이션 기간을 1일로 설정했을 때 최소 재방문 주기의 격자 분포를 분석한 결과, 재방문 주기가 800초 이상 되는 지역이 넓게 퍼져 있는 것으로 나타났다. 반면, 재방문 주기가 400초 이하가 되는 지역은 특정 지역에 집중되는 경향을 보였으며, 특히 서쪽 지역에 편향되어 일부 지역에만 분포하는 특징을 확인할 수 있었다.

또한, 이러한 분포 특성은 시뮬레이션 기간을 1주일 또는 1개월로 확장했을 때도 유사한 경향을 유지하였다. 즉, 재방문 주기(700초 이하)가 짧은 지역은 지속적으로 특정 지역에 국한되는 반면, 긴 재방문 주기(800초 이상)를 갖는 지역은 전반적으로 넓은 영역에 걸쳐 분포하는 패턴을 보였다. 이를 통해, 특정 지역의 재방문 주기를 정량적으로 평가할 수 있으며, 임무 설계에 참고할 수 있다.

4.4.2 평균 재방문 주기

해당 부분에서는 격자별 평균 재방문 주기에 대해 분석하였다. 시뮬레이션 기간을 1일로 설정한 경우, 재방문 주기가 4,800초 이상 되는 지역이 특정 지역에 편향되어 분포하는 경향을 보였다. 즉, 일부 지역에서는 위성의 재방문 주기가 짧아 위성의 방문 빈도가 높지만, 다른 지역에서는 상대적으로 재방분 주기가 길어지는 불균형이 존재하였다.

시뮬레이션 기간을 1주일로 확장했을 때, 이러한 경향이 보다 뚜렷하게 나타났다. 특히, 재방문 주기가 4,800초 이상 되는 지역이 남부 지역에 주로 분포하는 반면, 북한 북부 지역에서는 4,200초 이하의 짧은 재방문 주기를 가지는 지역이 집중적으로 나타났다.



(a) Minimum revisit time (sec)

(b) Average revisit time (sec)

(c) Maximum revisit time (sec)

Fig. 6. Revisit time contour maps, $i{:}t/p/f$ (80°:30/5/0).

이러한 분포 특성은 시뮬레이션 기간을 1개월로 연장했을 때도 유사하게 유지되었으며, 북한 북부 지역의 재방문 주기가 상대적으로 짧은 반면, 남부 지역에서는 재방문 주기가 길어지는 차이가 더욱 두드러졌다. 이를 통해, 위성군의 배치 방식과 재방문 주기의 지역별 편차를 정량적으로 분석할 수 있으며, 향후 특정 지역의 감시 효율성을 개선하기 위한 전략적 배치 방안을 도출하는 데 유용한 기초 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

4.4.3 최대 재방문 주기

해당 부분에서는 격자별 최대 재방문 주기에 대해 분석하였다. 시뮬레이션 기간을 1일로 설정한 경우, 12,500초 이상의 최대 재방문 주기를 가지는 격자들이 북한 북부 지역 대부분을 차지하는 반면, 11,700초 이하의 최대 재방문 주기를 가지는 지역은 북한 남부의 일부 지역에 한정되어 분포하는 것으로 나타났다. 이는 특정 지역에서 감시 공백이 상대적으로 길어지는 현상을 보여준다. 이러한 경향은 시뮬레이션 기간을 1주일 및 1개월로 확장했을 때도 유사하게 유지되었다. 즉, 북한 북부 지역은 최대 재방문 주기가 길게 나타났다.

그러나, 평균 재방문 주기와 비교했을 때, 1주일 및 1개월 동안 북한 북부 지역은 평균 재방문 주기가 짧았지만, 최대 재방문 주기는 길게 나타나는 차이를 보였다. 즉, 북한 북부 지역에서는 위성이 자주 관측하지만, 일정 시간 동안 감시 공백이 길어지는 경우가 존재하며, 반대로 북한 남부 지역은 전체적인 감시 빈도는 낮지만, 감시 간격이 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이러한 분석을 통해, 위성군 배치에 따라 특정 지역에서 재방문 주기가 길어질 가능성이 있음을 확인할 수 있으며, 임무에 맞는 전략을 선택하기 위한 데이터로 제공될 수 있다.

5. 결론 및 향후계획

누리호는 발사장의 지형적 제약과 안전거리 문제로 투입 성능을 최대화할 수 있는 방향으로 발사하면 위성의 경사각은 80°가 된다. 이를 바탕으로 위상차에 따른 북한 전역의 재방문 주기 분석하고자 본 연구에서는 경사각 80°, 위성 30기, 궤도면 5개/6개로 구성된 Walker-Delta 군집위성을 구상하였다. 분석 결과, 북한 전체 지역의 평균 재방문 주기는 43-47분 사이로 나타났으며, 긴 재방문 주기는 지구 자전에 따른 궤도면 간 커버리지 이동으로 인해 발생하는 것으로 확인되었다. 또한, 북한 지역을 격자 단위로 나누어 최소, 평균, 최대 재방문 주기를 상세 분석한 결과, 최소 재방문 주기는 특정 지역에 편향되고, 평균 재방문 주기는 북한 북부 지역에서 짧게 나타나는 반면, 최대 재방문 주기는 북한 남부 지역에서 더 길게 분포하는 경향을 보였다.

본 연구는 누리호의 발사 환경과 제한 요소를 고려하여 실질적인 군집위성 배치 방안을 제안하고, 이를 바탕으로 북한 지역의 재방문 주기를 정량적으로 평가하였다. 기존 연구들이 궤도 요소 최적화에 집중한 것과 달리, 본 연구는 누리호의 실제 발사 성능을 반영한 최적 위성군 배치를 도출한 점에서 차별성이 있다. 본 연구를 통해, 한국의 발사체 환경에서의 제약 조건을 고려한 실질적인 군집위성 배치 방안을 제시하였으며, 이를 기반으로 향후 군집위성 설계 및 운용 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 초소형위성개발 저변확대(2단계, 2022M1A3C2014567)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문은 2024년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

1. Roh WR, Cho SB, Sun BC, Choi GS, Jung DW, et al., Mission and system design status of Korea space launch vehicle-II succeeding Naro launch vehicle, Proceedings of the KSAS Fall Conference 2011, Yongpyong, Korea, 11 Nov 2011.
2. Donga Science, Dong-A Science (2025) [Internet], viewed 2025 Jan 20, available from https://www.dongascience.com/news.php?idx =57409
3. Lee SS, Kim JP, You EN, Youn JH, Shin HH, Orbit design to optimize revisit performance of low Earth orbit satellite constellation, J. Adv. Navig. Technol. 27, 502-509 (2023). https://doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.502
4. Kim Y, Kim M, Han B, Kim Y, Shin H, Optimum design of an SAR satellite constellation considering the revisit time using a genetic algorithm, Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 18, 334-343 (2017). https://doi.org/10.5139/IJASS.2017.18.2.334
5. Shin JY, Park SY, Son JH, Song SC, Design of regional coverage low Earth orbit (LEO) constellation with optimal inclination, J. Aeronaut. Space Sci. 38, 217-227 (2021). https://doi.org/10.5140/JASS.2021.38.4.217
6. Cho S, Cho N, Space mission design for reconnaissance micro-satellite constellation using Sun synchronous-ground repeating orbit, J. KIMS Technol. 23, 125-138 (2020). https://doi.org/10.9766/KIMST.2020.23.2.125
7. Song S, Kim H, Chang YK, Analysis on figure of merits of small SAR constellation satellites for targets detection, J. Aeronaut. Space Sci. 47, 130-142 (2019). https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.2.130
8. Walker JG, Circular orbit patterns providing continuous whole Earth coverage, RAE Technical Report 70211 (1970).
9. Walker JG, Some circular orbit patterns providing continuous whole Earth coverage, J. Br. Interplanet. Soc. 24, 369-384 (1971).
10. Walker JG, Continuous whole Earth coverage by circular orbit satellites, International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Surveillance, London, UK, 13-15 Mar 1973.
11. Walker JG, Continuous whole Earth coverage by circular orbit satellites, RAE Technical Memorandum Space, 1973.
12. Walker JG, Continuous whole-Earth coverage by circular-orbit satellite patterns, Technical Report 77044 (1977).
13. Howard DC, Orbital Mechanics for Engineering Students (Butterworth-Heinemann, British, 2021).

Author Information

서 성 원 laplaseo9007@gmail.com

한국기술교육대학교 기계공학과에서 학사학위를 취득한 후, 과학기술연합대학원대학교에서 석사학위 과정 중에 있다. 2023년 한국항공우주연구원에서 군집위성 및 자세제어 관련 연구를 수행하고 있다.

최 수 진 jin5864@koreatech.ac.kr

서울대학교 항공우주공학과에서 2007년 석사학위를 취득한 후, 한국항공우주연구원에서 다목적실용위성 운영 및 관제시스템 개발, 다누리 기획연구 및 임무설계 수행, 소형발사체 임무확장 연구 수행 중 2022년 한국과학기술원 항공우주공학과에서 박사학위를 취득하고, 2024년부터 한국기술교육대학교에서 우주모빌리티의 임무설계 및 유도항법제어 연구를 수행하고 있다.