

## 저궤도 군집위성의 재방문 성능 최적화를 위한 위성궤도 설계

# Orbit Design to Optimize Revisit Performance of Low Earth Orbit Satellite Constellation

이 성 섭<sup>1\*</sup> · 김 종 필<sup>2</sup> · 유 응 노<sup>2</sup> · 윤 재 혁<sup>2</sup> · 신 호 현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 우주항공시스템공학부

<sup>2</sup>위성체계연구소, LIG Nex1(주)

Soung-Sub Lee<sup>1\*</sup> · Jong-Pil Kim<sup>2</sup> · Eung-Noh You<sup>2</sup> · Jae-Hyuk Youn<sup>2</sup> · Ho-Hyun Shin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace System Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea

<sup>2</sup>Satellite Research Center, LIG Nex1, Co., Ltd.

### [요 약]

본 논문은 유전자 알고리즘의 최적화 기법을 활용하여 최적의 재방문 성능을 달성하는 위성배치 방법을 제시한다. 보편적인 위성배치 기법인 Walker 방법은 글로벌 커버리지 개념으로 한반도의 전략적 환경을 고려한 표적 중심의 위성배치에는 제한사항이 존재한다. 이러한 제한사항을 극복하기 위하여, 북한의 주요 관심지역의 표적을 설정하고 표적별 최적의 재방문 성능을 갖는 궤도 요소를 탐색하여 이를 기반으로 각 표적에 대해 유전자 알고리즘으로 최적화된 위성수를 도출하였다. 연구 결과는 지상반복궤적의 위성배치 규칙을 적용하여 최적화된 위성군이 표적별 원하는 재방문 성능을 달성함으로써 그 성능이 입증된다.

### [Abstract]

This study presents a satellite constellation method that achieves optimal revisit performance by utilizing genetic algorithm techniques. The Walker method is a global coverage concept, and there are limitations to target-centered constellation considering the strategic environment of the Korean Peninsula. To overcome these limitations, targets are set in major areas of interest in North Korea, orbit elements with optimal revisit performance for each target are searched, and based on this, the number of satellites optimized for each target is derived using a genetic algorithm. The results of this study demonstrate the performance of the optimized constellation by applying phasing rules to achieve the desired revisit performance.

**Key word** : Genetic algorithm, Repeating ground tracks, Walker method, Revisit performance, Optimization method, Satellite constellation.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.502>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 20 September 2023; Revised 12 October 2023  
Accepted (Publication) 18 October 2023 (30 October 2023 )

\*Corresponding Author; Soung Sub Lee

Tel: +82-2-3408-4403

E-mail: spacein0320@sejong.ac.kr

## I. 서론

위성군 배치의 가장 일반적인 방법은 지구의 구면체상에 위성궤도를 규칙적으로 균등하게 배치하는 것이다. 이러한 배치는 지구의 회전을 고려하지 않기 때문에 지구 표면상의 표적의 위치보다는 위성군의 외장에 의해 재방문 성능이 평가가 된다. 대표적인 위성배치 기법은 잘 알려진 Walker 방법이다. Walker 기법은 1970년 J.G. Walker에 의해 최초로 제안된 이후 다양한 연구가 수행되어져 왔다 [1]-[4]. 다른 한편으로 지구의 구면체 상에 균등하고 규칙적으로 배치하는 것의 제한사항은 지상 관측 표적과 위성간의 상대적인 역학 문제를 적용하는데 한계가 있다. 위성배치의 또 다른 기법은 지상반복궤적을 활용하여 위성군을 배치하는 것이다. 이 경우 Walker 기법의 글로벌 커버리지 성격 보다는 지역적 커버리지 성격이 강하다. 지상반복궤적을 활용한 연구는 다양하게 수행되어 왔는데 [5]-[8], 그 중에서 잘 알려진 방법은 Flower Constellation 이론이다 [9]-[11]. 본 논문에서 지상반복궤적의 위성군 배치를 위해 Flower Constellation의 위성배치규칙이 적용된다.

현재 국가차원에서 40여대의 초소형위성체계 사업이 진행 중에 있다. 초소형위성체계 사업은 SAR (synthetic aperture radar) 탑재체를 사용하며, 경사궤도를 활용할 예정이다. 이 사업의 특징은 전세계적으로 수행되었던 위성군 운용개념과 다르게, 한반도의 특수한 전략적 환경을 고려하여 평균 재방문 주기 30분이라는 명확한 목표하에 진행되고 있다. 이러한 상황에서 약 40여대의 위성군 배치를 고려할 때, 기존의 보편적인 Walker 기법을 활용하여 위성군을 배치할 경우 과연 운용개념에 부합하고 원하는 목표 성능을 달성할 수 있는지 의문점이 발생한다.

본 논문은 초소형위성체계의 원하는 재방문 성능을 달성하기 위하여 최적화 기법인 유전자 알고리즘을 사용하였다. 그리고 지상반복궤적을 중심으로 최적의 재방문 성능을 발휘하는 궤도요소를 찾고, 이를 기반으로 위성군이 표적에 대해 일관성있는 비행을 하도록 배치함으로써, 최적의 위성수로 표적별 원하는 재방문 성능을 달성하도록 설계하는 방안을 제시한다.

## II. 유전자 알고리즘 최적화 문제

본 논문은 저궤도에서 운용하는 군집위성을 대상으로 최적의 재방문 성능(평균 재방문 주기)을 갖는 궤도요소 및 위성수를 찾는 것을 목적으로 한다. 관심을 갖는 군집위성의 임무고도는 저궤도 중에 고도 450 km~550 km사이의 초소형위성군 활동 구간이다. 최적화 기법은 유전자 알고리즘을 사용하였다. 일반적으로 유전자 알고리즘을 활용한 최적화 문제는 크게 단일/다중 목적 문제로 구분된다. 단일 목적 문제는 목적함수가 하나만 존재하여, 이를 최대

화 또는 최소화하여 최적의 해답을 찾는 것이다. 그리고 다중 목적 문제는 여러 목적 함수가 존재하며, 이들을 동시에 최대화 또는 최소화하기 위해 상충 관계를 고려한다. 본 논문에서는 두가지 문제를 동시에 적용한다. 먼저, 관측 표적에 대해 평균 재방문 주기를 최소화하는 궤도요소를 찾기 위해서 다중 목적 문제를 적용하였고, 이를 기반으로 관측 표적별 최적의 위성수를 찾는 문제는 단일 목적 문제로 다루었다.

최적의 궤도요소를 찾는 다중 목적 문제는 주어진 궤도요소의  $(a, e, i, \Omega, \omega, M_0)$  색적 범위에서 설정된 관측 표적에 대해 최대 접근 횟수를 갖는 궤도요소를 찾는 것이다. 본 논문은 저궤도 원형궤도로 가정을 하였으며, 6개의 궤도요소 중 3개의 궤도요소  $(a, i, \Omega)$  만을 찾는다. 평균 근점이 각  $M_0$ 는 본 논문의 후반부에서 위성군이 동일한 지상궤적을 비행하도록 하는 위성배치 규칙이 설명되면서 생략되는 이유가 제시될 것이다. 그리고, 단일 목적 문제는 다중 목적 문제에서 찾은 궤도요소를 기반으로 원하는 재방문 성능을 달성하기 위한 표적별 위성수를 찾는다.

유전자 알고리즘은 항상 최적의 해를 탐색하는데 성공적인 것은 아니며, 랜덤 개체군 기반으로 휴리스틱 탐색을 함으로써 적절한 옵션의 선택이 이루어지지 않으면, 최적의 해가 존재하지 않거나, 탐색에 실패하여 매 실행시마다 다른 결과가 나타날 수 있다. 또한 학습 대상인 전체 위성수를 목적함수로만 할 경우 최적화 값은 매년 다른 결과 값을 갖는다. 따라서, 유전자 알고리즘 적용을 위한 옵션을 신중하게 선택하여야 한다. 앞에서 제시된 두 개의 최적화 문제는 MATLAB의 유전자 알고리즘 내장함수가 활용되어진다. MATLAB은 공학분야에서 다양한 최적화 문제를 위한 Solver 를 제공하는 소프트웨어 프로그램 중의 하나이다. 특히, 다중/단일 목적 문제를 위해서는 두 개의 Solver를 가지고 있다. 다중 목적 문제는 MATLAB의 'gamultiob' 내장함수를 사용하고, 이는 STK (system tool kits) 와 연동하여 수행되어진다. 그리고 단일 목적 문제는 MATLAB의 'ga' 내장함수를 사용한다.

## III. 궤도요소 최적화

본 절은 유전자 알고리즘을 통해 6개의 궤도요소 중 3개의 궤도요소  $(a, i, \Omega)$ 에 대해 표적별 재방문 성능을 최대화 하는 최적해를 찾는다. 먼저, 궤도 장반경( $a$ )의 최적해는 지상반복궤적의 궤도를 중심으로 탐색을 하였다. 지상반복궤적은 궤도의 임무분석기간 동안 표적에 대해 일정한 패턴으로 동일한 접근횟수를 갖기 때문에 임무분석기간을 주기로 최적화 적용이 가능하다. 다음은 지상반복궤적을 정의하는 관계식이다[12].

$$n + \dot{M} + \dot{\omega} = \gamma(\omega_{\oplus} - \dot{\Omega}) \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 위성의 평균운동,  $\dot{M}$ 는 평균운동의 변화량,  $\dot{\omega}$ 는 근지점의 변화량,  $\dot{\omega}_{\oplus}$ 는 지구의 회전속도,  $\dot{\Omega}$ 는 승교점의 변화량이다. 식 (1)에서 각  $J_2$  섭동 항은 다음과 같다.

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2}n J_2 \left(\frac{R_e}{p}\right)^2 \cos i \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2}n J_2 \left(\frac{R_e}{p}\right)^2 (4 - 5 \sin^2 i) \quad (3)$$

$$\dot{M} = n + \frac{3}{4}n J_2 \left(\frac{R_e}{p}\right)^2 \sqrt{1 - e^2} (3 \cos^2 i - 1) \quad (4)$$

식 (2)-(4)에서  $p = a(1 - e^2)$ 이고,  $R_e$ 는 지구반경이며,  $J_2 = 0.00108263$ 이다. 궤도주파수  $\gamma$ 는 nodal day  $N_q$ 와 위성의 회전수  $N_p$ 간의 분수로 이루어진다.

$$\gamma = \frac{N_p}{N_q} \quad (5)$$

식 (5)에서  $N_p, N_q$ 는 서로소인 자연수이다. 식 (5)에서 보는 바와 같이, 표적에 대해 재방문 성능을 최대화 하는 궤도장반경을 찾는 것은 주어진 탐색범위에서  $N_p, N_q$  값을 찾는 것과 동일하다. 하지만, 주어진 탐색범위 450 km~550 km 사이에는 무한대의 지상반복궤적이 존재하기 때문에 일정 범위에서 탐색범위를 좁힐 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 표 1에서 보는 바와 같이 임무분석기간 10일 ( $N_q = 10$ )을 기준으로 궤도주파수 소수점 한자리까지 탐색범위를 좁혔다.

표 1. 궤도장반경 탐색범위

Table 1. Semi-major axis search range

$N_q$	Minimum value	$N_p$	Maximum value
1	14.5	15	15.5
2	29	19-31	31
3	43.5	44-46	46.5
4	58	58-62	62
5	72.5	73-77	77.5
6	87	87-93	93
7	101.5	102-108	108.5
8	116	116-124	124
9	130.5	130-139	139.5
10	145	145-155	155

다음으로, 최적의 경사각( $i$ )해를 찾기 위한 탐색은 모의 시간의 효율성을 위하여 경사각을  $0 \sim 90^\circ$  까지의 범위를 고려하지 않고, 재방문 성능이 좋은 표적의 위도  $+3^\circ \sim 5^\circ$  를 고려하여 표적의 위도  $+0 \sim 10^\circ$  범위로 설정하였다[13]. 마지막으로, 승교점 경도( $\Omega$ )는 지상반복궤적의 대칭성을 활용하였다. 성공적인 지상반복궤적을 가지

기 위해서는  $\frac{2\pi}{\gamma \cdot N_q}$  간격으로 궤적이 반복이 된다. 따라서, 승교점 경도의 탐색범위는  $0 \sim \frac{2\pi}{\gamma \cdot N_q}$  으로 설정하였다.

최적 궤도요소 색적을 위한 대상표적은 그림 1에서 보는 바와 같이 북한의 탄도미사일작전구역 (BMOA: ballistic missile operation area) 중심으로 9개 표적을 설정하였다. 실제 BMOA 표적은 대략  $50\text{km} \times 50\text{km}$ 의 지역 표적이거나, 본 논문에서는 점 표적으로 가정하였다. 그리고, 위성은 incidence angle  $15 \sim 35^\circ$  의 SAR (synthetic aperture radar) 탐재체를 고려하였다.



그림 1. 미사일작전구역의 9개 표적

Fig. 1. 9 targets of BMOA

표 2. 최적 궤도요소 결과

Table 2. Optimal solution of orbit elements

Targets	Latitude (deg)	Longitude (deg)	$\gamma$	$\Omega$ (deg)	$i$ (deg)
# 1	38.4	126.4	15.0	6.4	41.8
# 2	38.7	126.9		7.1	41.9
# 3	38.9	127.5		7.5	42.2
# 4	39.9	126.5		6.5	42.3
# 5	40.3	127.3		8.8	43.5
# 6	40.8	128.5		8.3	44.2
# 7	39.9	125.3		5.4	43.2
# 8	40.6	126.5		6.4	44.0
# 9	41.4	126.9		7.5	44.7

표 2는 유전자 알고리즘이 찾은 9개 표적에 대한 최적의 궤도요소 결과이다. 궤도주파수는 모든 9개 표적이  $\frac{15}{1}$  값을 가졌으며, 이는 대략 490 km 부근의 고도로 임무분석기간이 1일인 지상반복궤적이다. 위성군 임무설계자는 매 1일 간격으로 9개 표적에 대해 일관된 영상을 획득할 수 있다는 의미있는 결과를 나타낸다. 승교점 경도의 경우는  $6^\circ \sim 9^\circ$  의 값을 가지고, 경사각은 표적 위도  $+3.2^\circ \sim 3.4^\circ$  의 값을 가진다. 유전자 알고리즘을 통해 찾은 표적의 위치를 보면, 그림 2에서 보는 바와 같이 9개의 표적이 지상반복궤적의 중앙에 위치하는 것을 확인할 수 있

으며, 모든 표적이 하루에 4번의 접근 횟수를 가진다.

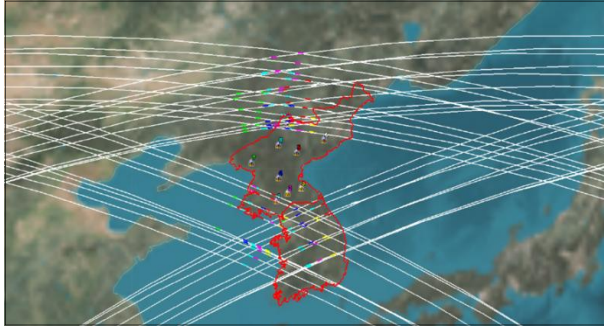


그림 2. 지상반복궤적에 대한 9개 표적의 위치  
Fig. 2. Positions of 9 targets relative to RGT

그림 3은 최적의 궤도요소를 탐색하기 위한 알고리즘을 나타낸다.

```

Algorithm 1. Finding Optimal Orbit Parameters
1: Input : nvals, generations, populations, number of targets
2: STK operation for Genetic Algorithm
   - Function=@(x)stk_operation(x)
   - FitnessFunction=@(x)[Function(x)]
3: Repeat k = 1 : number of targets
4: Decision values : ascending node, inclination, gamma,
   targets
5: upper bound, lower bound
6: options = optimoptions('gamultiobj',....)
7:[x,fval,exitflag,output]=gamultiobj(FitnessFuction,nvars,
   [],[],[],[],lb,up,options)
8:results(k,:)= [x fval]
9: until stop optimal parameters
10: Return
    
```

그림 3. 최적 궤도요소 탐색알고리즘  
Fig. 3. Optimal orbital element search algorithm

#### IV. 접근횟수 상관관계

이전의 절에서는 표적별 재방문 성능을 최적화하는 지상반복궤적의 궤도요소를 결정하였다. 지상반복궤적의 특성은 이론적으로 위성의 임무수명 동안 임무분석기간을 주기로 궤적 패턴 및 접근횟수가 표적에 대해 일관성있게 반복된다. 만약, 이러한 지상반복궤적에 대해 다수의 표적이 고려해 진다면 표적별 접근횟수는 상관관계를 가진다. 표적의 일련번호를  $k=1,2,3,\dots,m$  이라 하고, 각 표적별 할당되는 위성의 수를  $S_j$ 라 하자. 즉, 하나의 표적에 5개의 위성이 할당된다면 표기법은  $S_j=5$ 가 되고 5대의 위성이 동일한 지상반복궤적을 비행하게 된다. 이러한 특성은 표적

접근횟수를 두 개의 개념으로 분류시킬 수 있다 : Apparent access ( $A_k$ )과 Relative access ( $R_{kj}$ ). Apparent access는  $k$  표적에 대해 결정된 최적의 궤도요소 기반으로  $S_j$  위성군을 배치하였을 때  $k$  표적이 자체적으로 갖는 접근횟수를 의미한다. 이는 표적별 최적의 궤도요소를 활용하기 때문에 통상적으로  $A_k=4$ 이다. Relative access는  $k$  표적에 할당된  $S_j$ 의 위성군이  $k$  표적 이외의 다른 표적에 대해 접근한 횟수를 의미한다. 이러한 접근횟수의 상관관계는 그림 4와 같이  $m \times m$  정방행렬의 형태를 가진다.

표 3은 BMOA 9개 표적에 대한 위성의 접근횟수를 매트릭스로 나타낸 결과이다. 표 3에서 보는 바와 같이, 각 표적에 대한 Apparent access는 4이며, Relative access는 0~3이고, 이러한 접근횟수는 임무분석주기인 1일 간격으로 계속 반복 되어진다.

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	...	$S_m$
TGT # 1	$A_1$	$R_{12}$	$R_{13}$	...	$R_{1m}$
TGT # 2	$R_{21}$	$A_2$	$R_{23}$	...	$R_{2m}$
TGT # 3	$R_{31}$	$R_{32}$	$A_3$	...	$R_{3m}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
TGT # m	$R_{m1}$	$R_{m2}$	$R_{m3}$	...	$A_m$

그림 4  $m \times m$  접근횟수 매트릭스  
Fig. 4  $m \times m$  access matrix

표 3. 표적별 위성 1기의 접근횟수  
Table. 3. Number of accessess of a satellite to each target

	SAT 1	SAT 2	SAT 3	SAT 4	SAT 5	SAT 6	SAT 7	SAT 8	SAT 9
#1	4	2	2	2	1	1	1	0	0
#2	3	4	1	2	2	1	2	1	0
#3	3	3	4	2	2	1	2	1	0
#4	2	2	2	4	2	1	2	2	0
#5	0	2	2	2	4	2	3	2	2
#6	0	0	0	1	2	4	3	2	2
#7	2	2	2	2	1	0	4	2	1
#8	0	0	1	2	3	2	2	4	2
#9	0	0	0	0	2	3	2	2	4

#### V. 위성수 최적화

본 절에서는 표 3에서 구한 access matrix를 기반으로 유전자 알고리즘을 활용하여 원하는 재방문 성능을 달성하기 위한 최적의 위성을 찾는다. 지상반복궤적의 특성은 주어진 임무분석기간을 주기로 동일한 궤적을 가진다. 따라

서, 표적의 재방문 성능을 위성의 수와 선형적인 관계를 가진다. 표 3의 *access matrix*는 각 표적에 대한 위성 하나의 접근 횟수를 나타낸다. 만약 표적별 재방문 성능을  $\chi_j$  라 하면, 위성 하나 당 표적별 재방문 성능을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\chi_k = A_k + \sum_{k=1}^m R_{kj} \quad (j \neq k) \quad (6)$$

좀 더 개념을 확장해서, 표적별  $S_j$ 의 위성이 동일한 지상반복체적을 비행한다고 가정하면, 각 표적별 재방문 성능을 다음과 같다.

$$\chi_k = A_k \cdot S_j + \sum_{k=1}^m R_{kj} \cdot S_j \quad (j \neq k) \quad (7)$$

식 (7)는 각 표적별 원하는 재방문 성능 달성을 위한 최적화 문제에 쉽게 적용할 수 있다. 최적화 문제를 위한 목적함수를  $f$ 라 하고 결정변수를  $S$ 라 하면 각 표적별 최적화 문제를 위한 일반적인 형태는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Minimize } f = \sum_{k=1}^m S_k \quad (8)$$

그리고,

$$A_k \cdot S_j + \sum_{k=1}^m R_{kj} \cdot S_j \leq \bar{\chi}_k \quad (9)$$

식 (8)은 식 (9)의 구속조건에 의해 최적의 해를 산출하게 된다. 식 (9)에서  $\bar{\chi}_k$ 는 각 표적별 원하는 평균재방문주기를 의미한다. 본 논문에서는 편리성을 위해서  $\bar{\chi}_k$ 는 모두 동일한 값으로 가정하였고, 표적별 접근횟수의 함수로 구한다면 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\chi} = \frac{86,400}{\text{Number of Access}} \quad (10)$$

---

**Algorithm 2. Finding Optimal Number of Satellites**

---

```

1: Input : access matrix, desired revisit time
2: Initial condition for Genetic Algorithm
   - nvars
   - upper bound, lower bound
3: options = optimoptions('ga'...)
4: [x,fval]=ga(ObjectiveFunction,nvars,[],[],[],lb,up,
   ConstraintFunction,options)
5: results=[x fval]
6: ObjectiveFunction(x) = sum(x)
7: ConstraintFunction(x) = desired revisit time-sum(x)

```

---

그림 5. 최적의 위성수 탐색알고리즘  
Fig. 5. Optimal number of satellites search algorithm

본 논문에서는 BMOA 9개에 대하여 표적별 평균재방문주기 30분 이내 달성을 위해 그림 5의 알고리즘에 의해 최적화 문제를 적용하였다. 적용된 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } f = \sum_{k=1}^9 S_k \quad (11)$$

그리고 구속조건은 다음과 같다.

$$A_k \cdot S_j + \sum_{k=1}^9 R_{kj} \cdot S_j \leq 48 \quad (12)$$

유전자 알고리즘의 최적화 문제는 전술한 바와 같이 랜덤 객체 기반의 휴리스틱 탐색을 적용하기 때문에 여러개의 최적해가 존재한다. 표 4는 앞에서 언급한 최적의 궤도 요소 기반으로 표적별 평균 재방문주기 30분 달성을 위한 위성수의 최적해 10개를 보여준다. 실제 모의실험 과정에서는 500번의 실행을 통해 152개의 중복되는 최적해를 구할 수 있었으며, 대부분의 해는 표 4에서 보는바와 같이 28~29개의 위성이 필요하였다. 이러한 다수의 최적해는 임무설계자가 원하는 총 위성수에 대해 임무환경에 맞게 선택할 수 있는 장점을 제공한다.

표 4. 표적별 평균 재방문주기 30분 달성을 위한 위성수  
Table. 4. Number of satellites to achieve average revisit time of 30 minutes for each target

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	Total
	TGT	TGT	TGT	TGT	TGT	TGT	TGT	TGT	TGT	Sats
1	7	0	1	1	7	4	5	0	3	28
2	8	0	0	2	4	4	4	2	4	28
3	7	0	0	1	6	4	8	0	2	28
4	7	1	0	0	6	6	6	1	1	28
5	8	1	1	1	5	2	3	3	5	29
6	6	0	1	5	2	6	4	1	4	29
7	7	0	3	1	4	4	4	2	4	29
8	8	0	2	0	4	4	4	4	3	29
9	9	0	0	2	4	2	2	5	5	29
10	5	0	4	1	2	10	6	1	0	29

## V. 위성군 설계 및 재방문 성능 결과

본 절에서는 이전의 절에서 구한 평균 재방문주기 30분 달성을 위한 위성 수의 최적해를 기반으로 위성군을 배치하고 원하는 재방문 성능의 달성 여부를 확인한다. **본 논문**의 전반부에서  $\gamma=15$ 의 심플한 지상반복체적을 최적해로 얻었으며, 이 궤도의 효과적인 위성군 배치 방법은 최적의



궤도요소를 기반으로 재방문 성능 향상 및 궤도 일관성 확보를 위해 위성군이 동일한 지상반복궤적을 비행하도록 설계하는 것이다. 이를 위해서는 다음의 위성궤도 주기조건 (periodic condition)을 만족해야한다[12].

$$\frac{M_0}{\Omega} = \frac{M_0 - \gamma(\omega_{\oplus} - \dot{\Omega})P_t}{\Omega + (\omega_{\oplus} - \dot{\Omega})P_t} = constant \quad (13)$$

식 (13)에서  $P_t$ 는 위성의 궤도주기이다. 그리고, 식 (13)은 다음과 같은 간단한 관계식을 갖는다.

$$M_0 = -\gamma\Omega \quad (14)$$

식 (14)을  $N_s$ 개의 위성이 동일한 지상반복궤적을 비행하도록 하는 위성배치 규칙으로 표현한다면 다음과 같다.

$$\Omega_k = \Omega_1 + \Theta(k-1), \quad k=1,2,3...N_s \quad (15)$$

$$M_{k0} = M_{10} - \frac{N_p}{N_q}\Theta(k-1) \quad (16)$$

식 (15)-(16)의 위성배치 규칙은  $\Omega$ 와  $M_0$ 의 배열로 이루어졌으며, 표 4의 최적해 중 제일 상단에 있는 값을 활용하여 총 28대 (7 0 1 1 7 4 5 0 3)의 위성군에 대해 설계를 하였다. 모의실험의 도구는 잘 알려진 System Tool Kits와 MATLAB을 연동하여 최적해로 나온 값의 적용을 통해 위성군을 배치하였다. 그림 6은 BMOA 9개 표적에 대해 최적의 위성수 28대로 배치한 결과로, 각각의 표적이 원하는 평균 재방문 주기 30분 이내로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 최소의 재방문 주기를 갖는 표적은 BMOA #5, 6이고, 30분이내에서 최대 재방문 주기를 갖는 표적은 BMOA #7이다. 그림 7은 표적별 재방문 주기의 등고선 분포를 보여준다. 특이할 만한 사항은 보편적으로 사용하는 Walker 기법으로 위성군을 배치하면, 궤도의 특성 때문에 재방문주기의 등고선 분포가 띠의 형태를 가지는데, 표적에 최적화된 궤도를 활용하여 위성군을 배치하게 되면, 그림에서 보는 바와 같이 표적에 맞춤화되어 재방문 성능의 분포가 이루어 지는 것을 알 수 있다.

본 논문은 북한의 관심지역인 BMOA를 중심으로 표적을 설정하여, 표적별 재방문 성능을 최적으로 하는 궤도요소를 찾고, 그 궤도요소 기반으로 유전자 알고리즘을 활용하여 재방문 성능을 최대로 하는 표적별 위성의 수를 도출한다. 이러한 최적의 비행조건은 위성군이 표적에 대하여 동일한 지상반복궤적을 가지기 때문에 최적의 재방문 성능을 달성할 수 있다. 본 논문의 프로그램 도구는 다양한 표적 분포 및 위성군의 임무환경에 대해서도 적용되어진다.

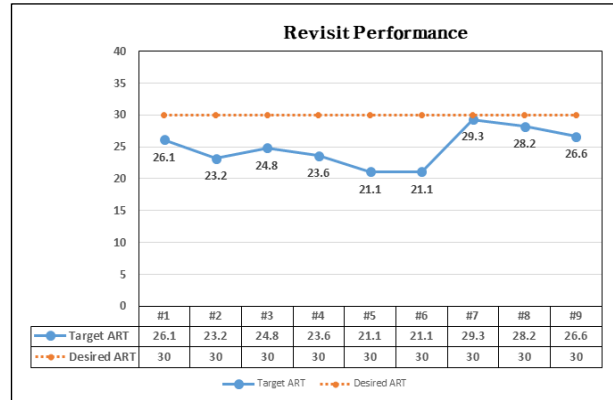


그림 6. BMOA 9개에 대한 평균재방문주기 달성 결과

Fig. 6. Results of achieving Average Revisit Time for 9 BMOA

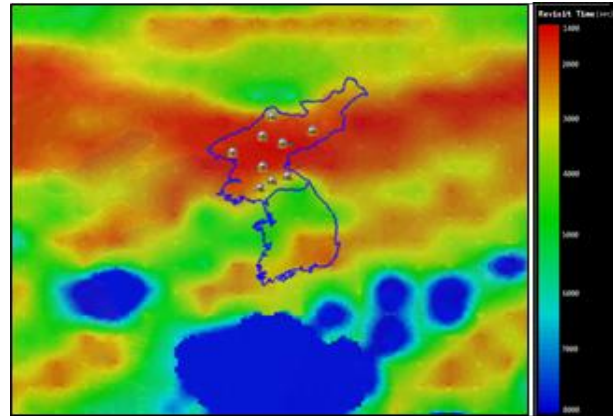


그림 7. BMOA 9개의 평균재방문주기 등고선 분포

Fig. 7. Average Revisit Time Contour distribution of BMOA 9

## VI. 결 론

본 논문은 국가 초소형위성체계의 운용개념 달성을 위하여 유전자 알고리즘의 최적화 기법을 적용하였다. 표적의 설정은 한반도의 전략적 환경 등을 고려하여 북한의 9개 BMOA로 설정을 하였고, 이 표적에 대해서 최적의 궤도요소를 탐색하였다. 탐색한 결과, 궤도는 임무분석기간이 1일인  $\gamma=15$ 의 궤도주파수가 도출되었으며, 경사각 및 승교점은 위 궤도의 지상궤적 중심지점으로 접근횟수가 하루에 4번인 위치이다. 전체 표적에 대한 최적의 위성수는 재방문주기 30분 달성을 위해 28~29대 정도 요구되었다.

## Acknowledgments

본 논문은 2022년도 (주) LIG 넥스원의 재원을 지원 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## References

- [1] J. G. Walker, “Circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage,” *Royal Aircraft Establishment Technical Report 70211*, Nov. 1970.
- [2] J. G. Walker, “Continuous whole earth coverage by circular orbit satellite patterns,” *Royal Aircraft Establishment Technical Report 77044*, Mar. 1977.
- [3] T. J. Lang, “Symmetric circular orbit satellite constellations for continuous global coverage,” *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference*, Kalispell, MT, U.S.A., 1987.
- [4] T. J. Lang, and W. S. Adams, “A comparison of satellite constellations for continuous global coverage, in: Mission Design & Implementation of Satellite Constellations,” *Dordrecht*, pp. 51–62, 1998.
- [5] M. Aorpimai, P. L. Palmer, “Repeat-groundtrack orbit acquisition and maintenance for Earth-observation satellites,” *J. Guid. Control Dyn.* pp. 654–659. 2007.
- [6] M. Lara, R. P. Russell, “Fast design of repeat ground track orbits in high-fidelity geopotentials,” *J. Astronaut. Sci.* pp. 311–324. 2008.
- [7] S. D. Vitpil, “Newman, Determining an Earth observation repeat ground track orbit for an optimization methodology,” *J. Spacecraft Rockets.* pp. 157–164. 2012.
- [8] X. He, H. Li, “Analytical solutions for Earth discontinuous coverage of satellite constellation with repeating ground tracks,” *Chin. J. Aeronaut.* pp. 275–291. 2022.
- [9] F. S. Marzano, D. Cimini, A. Memmo, M. Montopoli, T. Rossi, M. De Sanctis, M. Lucente, D. Mortari, S. Di Michele, “Flower constellation of millimeter-wave radiometers for tropospheric monitoring at pseudogeostationary scale,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* pp. 3107–3122. 2009.
- [10] D. Mortari, M. De Sanctis, M. Lucente, “Design of flower constellations for telecommunication services,” *Proc. IEEE.* pp. 2008–2019. 2011.
- [11] D. Mortari, M. P. Wilkins, “Flower constellation set theory. Part I: Compatibility and phasing,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* pp. 953–962. 2008.
- [12] S. S. Lee, “Closed-form solution of repeat ground track orbit design and constellation deployment strategy,” *Acta Astronaut.*, Vol 180, pp. 588-595, Mar. 2021.
- [13] X. Fu, M. Wu, and Y. Tang, “Design and maintenance of Low-Earth repeat-ground track successive-coverage orbit,” *Journal of Guidance Control and Dynamics*, Vol. 35, No.2, pp. 686-691, Mar. 2012.



**이 성 섭 (Soung-Sub Lee)**

2009년 3월 : 미국 버지니아공대 우주공학 박사  
2018년 1월 : 국방부 미사일우주정책 과장  
2021년 3월 ~ 현재 : 세종대학교 우주항공시스템공학부 교수  
※관심분야: 군집위성 궤도설계 및 제어,  
머신러닝/딥러닝 기반 위성궤도 역학 등



**김 종 필 (Jong-Pil Kim)**

2010년 2월: 아주대학교 전자공학과 석사  
2000년 10월~ 현재: LIG Nex1 위성체계연구소 소장  
※관심분야: 초소형위성체계 운용 설계/검증,  
SAR탑재체 임무성능 구현/검증



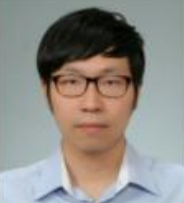
**유 응 노 (Eung-Noh You)**

2003년 2월: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사  
2003년 3월 ~ 현재: LIG Nex1 위성체계연구소 팀장  
※관심분야: 초소형위성체계 운용 설계/검증,  
SAR탑재체 임무성능 구현/검증



**윤 재 혁 (Jae-Hyuk Youn)**

2014년 2월: 광운대학교 전자공학과 박사  
2014년 1월 ~ 현재: LIG 넥스원 위성체계연구소 연구원  
※관심분야: 초소형위성 군지상체 SAR 신호처리,  
레이더 신호처리



**신 호 현 (Ho-Hyun Shin)**

2014년 8월: 서울대학교 기계항공공학부 박사  
2014년 9월 ~ 현재: LIG Nex1 위성체계연구소 재직  
※관심분야: 초소형위성체계 운용 설계/검증,  
SAR탑재체 임무성능 구현/검증