

## 지구관측 군집위성의 RAM 모델링 및 분석

김홍래<sup>1,†</sup>, 정성근<sup>2</sup>, 오현웅<sup>3</sup><sup>1</sup>국방과학연구소, 위성체계단<sup>2</sup>㈜엠아이디<sup>3</sup>한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (국방과학연구소 겸임연구원)

## RAM Modeling and Analysis of Earth Observation Constellation Satellites

Hongrae Kim<sup>1,†</sup>, Seong-keun Jeong<sup>2</sup> and Hyun-Ung Oh<sup>3</sup><sup>1</sup>Agency for Defense Development<sup>2</sup>MID Co.Ltd.<sup>3</sup>Korea Aerospace University School of Aerospace and Mechanical Engineering (Additional post: Agency for Defense Development)

## Abstract

In the recent era of NewSpace, unlike high-reliability satellites of the past, low-reliability satellites are being developed and mass-produced at a lower cost to launch constellations satellites. To achieve cost-effective cluster satellite development, satellite users and developers need to assess the feasibility of maintaining mission performance over the expected lifespan when cluster satellites are launched. Plans for replacements due to random failures should also be established to maintain performance. This study proposed a method for assessing system reliability and availability to maintain mission performance and establish replacement strategies for Earth observation constellation satellites. In this study, a constellation reliability and availability model considering mission performance required for a satellite constellation, situations of satellite backup, and additional ground backups was established. The reliability model was structured based on the concept of a k-out-of-n system and the availability model used a Markov chain model. Based on the proposed reliability model, the minimum number of satellites required to meet mission requirements was defined and satellites needed in orbit during the required mission period to satisfy mission reliability were calculated. This research also analyzed the number of spare satellites in orbit and on the ground required to meet the desired availability during required service period through availability analysis.

## 초 록

최근 뉴스페이스 시대에는 과거의 고신뢰성 위성과 다르게 낮은 신뢰성 위성을 저가의 개발/양산 비용으로 개발하여 군집위성을 발사하고 있다. 경제적인 군집위성 개발을 위해서는 위성 사용자/개발자는 군집위성으로 발사되었을 때 기대되는 수명기간 동안 임무 성능의 유지 가능성 여부를 검토해야 한다. 또한, 성능유지를 위해 임의 고장에 의한 교체 계획도 수립되어야 한다. 본 연구에서는 지구관측 군집위성의 임무 성능의 유지와 교체 전략 수립을 위해 시스템 신뢰성 및 가용성 평가 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 위성 백업 및 지상 추가 발사 백업 상황과 군집위성에 요구되는 임무 성능을 고려한 군집위성 신뢰성 및 가용성 모델을 구성하였다. 신뢰성 모델은 k-out-of-n system의 개념으로 구성되었고 가용성 모델은 마르코프 체인 모델을 이용하였다. 제안된 신뢰성 모델을 바탕으로 임무 요구사항에 필요한 최소 위성 개수를 정의하고, 요구 임무기간 동안 요구 임무 신뢰성 만족을 위해 궤도상 필요한 위성을 계산하였다. 또한 가용성 분석을 통해 요구 서비스기간 동안 요구 가용성 만족을 위한 궤도상 위성 여분 및 지상 여분의 개수를 분석하였다. 마지막으로 비용모델을 적용하여 위성의 신뢰성 및 개발 위성 개수간에 절충분석 개념을 제안하였다.

**Key Words :** Earth Observation Satellite(지구 관측 위성), Constellation Satellite(군집위성), Reliability Analysis(신뢰성 분석), Availability Analysis(가용성 분석), Markov Chain(마르코프 체인), k-out-of-n system(k-out-of-n system)

Received: Sep. 10, 2023 Revised: Jan. 13, 2024 Accepted: Jan. 19, 2024

† Corresponding Author

Tel: +82-02-300-0116, E-mail: ohu129@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

## 1. 서 론

소형 위성 제작 비용과 발사 비용의 감소로 인해 위

성 활용 분야에서 군집위성 임무가 제안되고 있다. 이러한 추세는 지구관측위성 위성부터 통신위성, 신호정보 위성까지 영향을 주고 있으며, 정부기관 뿐만 아니라 상용 서비스업체에서 군집위성을 제안하고 있다. 최근에는 Planet, ICEYE, Capella, Umbra 등의 상용 서비스 업체에서 다수의 위성을 발사하여 군집위성을 구축 및 운용하고 있으며 이외 다수 국내외 민간기업에서도 군집위성 개발 계획하고 있다.

군집위성의 경우 상업적 목적으로 발사하기 때문에 개발기관은 양산 비용과 리스크를 타협하여 개발방안을 수립한다. 최근 군집위성 개발사에서는 위성 1기에 대한 신뢰성을 미고려하거나 낮은 신뢰성으로 경제적으로 위성을 양산할 수 있는 방법을 채택하고 있다.

하지만 경제적인 군집위성 운용을 위해서는 양산 비용을 감축을 하는 것이 최선책은 아니다. 임무 목적과 사용자의 요구에 맞게 리스크와 목표 임무 성공확률을 고려하여 필요위성 수량, 여분 위성의 개수 등이 고려되어야 한다[1]. 이러한 분석을 바탕으로 경제적인 군집위성 구성을 위해 경제적 측면에서 최적의 방안 도출이 가능하다.

이런 추세에 따라 최근 군집위성 RAM (Reliability, Availability, Maintainability)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 일반적으로 RAM분석은 종합군수지원의 한 분야로서 무기체계에 대한 신뢰성, 가용성, 정비성을 산출하여 무기체계의 고장빈도 및 정비 업무량 및 전투준비태세 등을 측정하는 척도로 활용되는 지표이다.[2] 우주 임무에서는 ILS(Integrated Logistics Support) 또는 IPS(Integrated Product Support)를 위한 지상체에 대한 RAM분석이 주로 수행되어 왔으며 [3], 위성체에 대한 RAM에 대한 연구가 최근에 시작되고 있다[4].

위성시스템의 경우 궤도상 수리가 불가능하기 때문에 대부분의 연구에서는 정비성에 대해서는 다루지 않고 위성을 교체하는 개념으로 신뢰성과 가용성을 다루는 연구가 주로 수행되어왔다. 지구관측위성의 시스템 신뢰성과 위성군 가용성을 평가하기 위해 운용중인 위성고장과 지상 대기 위성의 추가 발사를 통해 군집임무의 가용성 확보에 대한 연구가 수행되기도 하였다[5]. Space Systems/Loral에서는 2단계 발사 계획을 갖는 군집위성의 임무 신뢰성을 경제적인 방법으로 결정을 하는 방안이 제안되었다[6]. NASA에서는 다양한 군집구성 시나리오에 대하여 군집위성의 수명 성능을 모델링하고 시뮬레이션하는 방법과 임무시간에 따른 가용성을 결정하는 방법을 제시하였다[7].

실제 군집위성 신뢰성 및 가용성 문제는 발사체 및 발사 윈도우 등과 같이 불확실한 인자들이 존재하기 때문에 모델링하기 어렵다. 이런 인자들은 신뢰성에

직접적인 영향을 주지만 사업적 상황에 따라 다양하게 변한다. 해당 이유로 본 논문에서는 비교적 상위 수준에서 결정할 수 있는 신뢰성 및 가용성 모델을 제안하였으며, 궤도상 정비를 미고려 하였다.

본 논문에서는 k-out-of-n 시스템[8]으로 군집위성을 고려하여 신뢰성 모델을 수립하였다. 해당 모델을 통해 임무성능을 만족할 수 있는 최소 위성 개수가 결정하였다. 최소 위성 개수가 결정되면 단일 위성의 신뢰성을 고려하여 군집임무 신뢰성의 만족에 필요 위성 개수 분석을 수행한다.

군집위성 가용성 모델의 경우에는 위성체의 신뢰성, 궤도상 및 지상 위성 여유분을 고려할 수 있도록 제안하였다. 본 논문에서 제안한 군집위성 가용성 모델을 지구관측 군집임무에 적용하여 궤도상 여유 위성 및 지상대기 위성의 개수를 결정하였다.

## 2. 군집위성 신뢰성 및 가용성 모델

### 2.1 단일 위성 신뢰성 및 가용성

단일 위성 신뢰성의 경우 다양한 연구가 진행되어 왔으며, MIL-HDBK-217F 및 FIDES 2009 등 다양한 신뢰성 계산 모델이 제안되었다[9]. 이러한 모델의 핵심은 구성품 및 위성체의  $\lambda$ (고장율)을 바탕으로 신뢰성을 계산하는 것이다. 신뢰성은 위성체가 요구되는 설계 수명에서 위성의 생존 확률로 정의되며, 다음 식 (1)과 같다.

$$R_{SAT} = e^{-\lambda T} \quad (1)$$

여기서  $R_{SAT}$ 은 위성체 신뢰성이고,  $\lambda$ 는 위성체 고장율,  $T$ 는 설계수명을 뜻한다. 여기서 위성체 고장율은 구성품의 고장율 및 리던던시 구조를 고려하여 FTA(Fault Tree Analysis) 분석을 통해 계산된다.

단일위성의 가용성은 식 (2)와 같이 위성의 고장 복구율을 고려하여 정의된다.

$$A_{SAT} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (2)$$

여기서  $\mu$ 는 위성체의 고장복구율을 의미한다. 위성체는 SEU (Single Event Upset) 등 확률적으로 예측가능한 고장뿐만 아니라 예측 불가능한 고장 복구, 궤도유지를 위한 위성체 기동 등과 같이 가용성에 영향을 주는 인자들을 고려하여 고장복구율을 계산한다.

### 2.2 군집위성 신뢰성 모델

군집위성 신뢰성 계산 시 지상 대기 위성의 고장율과 발사체의 고장율을 동시에 고려하면 시나리오에 따라 신뢰성 계산이 복잡해질 수 있다. 특히, 위성 제조

후 발사 대기에 따른 고장율의 변화도 존재하고, 발사체의 경우 발사가 반복되어 성공함에 따라 고장율이 낮아지게 되어 신뢰성이 변하게 된다. 본 논문에서는 발사체의 신뢰성과 지상 대기 위성의 고장율을 고려하지 않고 군집위성 신뢰성을 고려하였다.

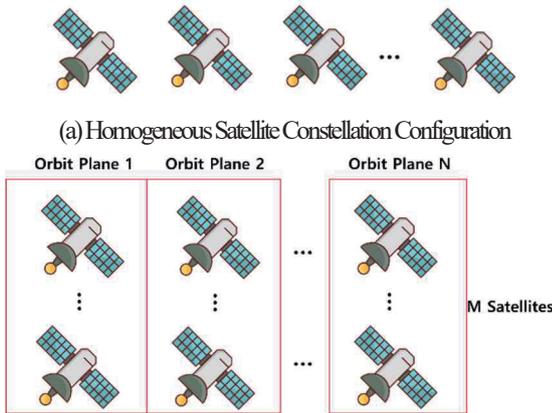
군집위성의 신뢰성은 k-out-of-n 시스템 형태로 표현할 수 있게 된다. 예를 들어, 지구관측 위성에 임무 측면에서 평균재방문주기 요구사항을 만족하기 위한 위성의 개수가  $N_{req}$  이고 발사를  $N$  개 했다면 다음 식 (3)과 같이 군집위성 신뢰성을 계산할 수 있다.

$$R_{const} = P(X \geq N_{req}) = \sum_{r=N_{req}}^{N_{sat}} \binom{N_{sat}}{r} R_{sat}^r (1 - R_{sat})^{N_{sat}-r} \quad (3)$$

### 2.2 군집위성 가용성 모델

군집위성 종류를 정의할 때는 일반적으로 형상에 따라 Walker Delta, Walker Star, Beachball, Closed-Form 등으로 임무 목적에 따라 정의한다[9]. 군집위성 가용성 계산을 위해서는 위성의 교체 가능 여부를 고려하여 군집위성 종류를 정의해야 한다. 이는 군집위성 임무 요구사항에 따라 군집을 구성하고 있는 위성 중 하나가 고장난 위성을 대체될 수 있을 수도 있는 경우도 있으나 임무 성능 때문에 요구 궤도면에 반드시 배치되어야 하는 경우도 있다. 이러한 경우를 정의하면 아래와 같이 정의되며 다음 Fig.1 과 같이 나타낼 수 있다.

- 동종 위성군(Fig. 1(a)): 위성군 중 하나의 위성으로 변경 가능
- 배열 위성군(Fig. 1(b)):: N개 궤도면에 궤도면 당 M 개 위성 배치, 궤도면내에서 변경



(a) Homogeneous Satellite Constellation Configuration  
 (b) Array Satellite Constellation Configuration  
**Fig. 1** Classification of Satellite Constellation Configurations from the Perspective of Availability

동종 위성군 구성의 대표적인 예는 Planet이다. Planet의 경우에는 1개 위성이 실패하더라도 다른 위성으로 위성이 그 기능을 대체하여 임무 성능을 보장하고 있다. 배열 위성군의 대표적인 예는 연속 통신커버리지 제공이 필요한 OneWeb와 Starlink이 있으며, GPS 위성과 같이 요구 정확도 보장이 필요한 군집위성이다.

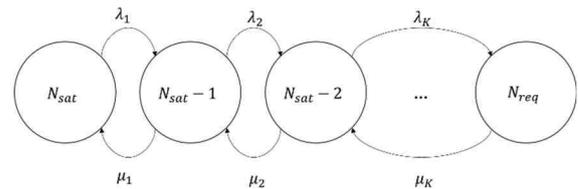
본 논문에서 평균재방문주기를 임무 요구사항을 갖는 지구관측 군집위성에는 위성의 개수가 임무 성능에 영향을 주므로 동종 위성군의 형태로 가용성 분석을 수행해야 한다.

군집위성의 가용성은 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$A_k = \sum_n^N P_k \alpha_k \quad (4)$$

여기서  $P_{k,n}$ 는  $n$ 개의 위성중에  $k$ 개가 작동하는 상태일 확률을 의미하고,  $\alpha_{k,n}$ 는 임무 요구사항을 만족할 확률을 의미한다.

$P_{k,n}$ 는 MTBF(Mean Time Between Failures) 및 MTTR(Mean Time To Repair)을 입력을 바탕으로 마르코프 체인을 이용하여 계산할 수 있다. 마르코프 체인은 군집위성의 가용성 계산에 사용된 바 있다. [11] 예를 들어,  $N_{sat}$  개의 위성이 있을 때,  $N_{req}$  개의 위성까지 줄어든다고 할 때 Fig. 2와 같이 마르코프 체인 모델을 구성할 수 있다.



**Fig. 2** Markov Chain Model of Earth Observation Satellite Constellation

위성의 가용성을 계산하기 위해서는 임무 운용 개념이 고려되어야 한다. 저궤도 경사궤도의 지구관측위성은 경우 하루에 약 15궤도가 운용되며 일부 궤도에서 영상촬영 임무를 수행한다. 해당 궤도들을 제외한 나머지 궤도에서는 위성을 수리 또는 유지를 하는 운용 개념을 고려하였다. 하나의 예시로 짧은 주기 또는 긴 주기 동안 예측되지 않는 고장이 발생하는 상황을 고려할 수 있다. 짧은 주기 고장의 경우에는 SEU와 같이 짧은 시간내에 위성이 스스로 복구가 가능한 경우를 의미한다. 긴 주기의 고장의 경우에는 고장 발생시 이를 해결하기 위해 긴 시간이 고려되는 경우를 의미합니다. 이에 따라 고장율 및 고장수리율은 다음 식

(5) ~ (13)과 같이 정의된다.

$$\lambda_i = (N_{sat} - i + 1) \times (\lambda_S + \lambda_L + \lambda_E) \quad (5)$$

$$\mu_i = \frac{\lambda_S + \lambda_L + \lambda_E}{\frac{\lambda_S}{\mu_S} + \frac{\lambda_L}{\mu_L} + \frac{\lambda_E}{\mu_E}} \quad (6)$$

$$\lambda_S = \frac{1}{M TBF_S}, \lambda_L = \frac{1}{M TBF_L} \quad (7)$$

$$\mu_S = \frac{1}{M TBR_S}, \mu_L = \frac{1}{M TBR_L} \quad (8)$$

$$\lambda_E = -\frac{\ln R_{SAT}}{T} \quad (9)$$

$$\mu_E = P_{OR}\mu_{OR} + (1 - P_{OR})P_{GR}\mu_{GR} \quad (10)$$

$$P_{OR} = \frac{N_{sat} - N_{req}}{N_{sat}} \quad (11)$$

$$P_{GR} = \frac{N_{stacked}}{N_{sat}} \quad (12)$$

$$\mu_{OR} = \frac{1}{M TBR_{OR}}, \mu_{GR} = \frac{1}{M TBR_{GR}} \quad (13)$$

식 (5)는 Fig.2 에서 각 위성의 개수가 줄어들 때의 고장율이다. 위성의 개수가  $N_{sat}$  개이면,  $\lambda_1$ 는  $N_{sat} \times (\lambda_S + \lambda_L + \lambda_E)$ 이 되고,  $\lambda_2$ 는  $(N_{sat} - 1) \times (\lambda_S + \lambda_L + \lambda_E)$ 이 된다. 여기서  $\lambda_S$ 는 짧은 주기로 발생하는 고장에 대한 고장율을 의미하고,  $\lambda_L$ 은 긴 주기로 발생하는 고장에 대한 고장율을 의미한다. 이는 각각 MTBF를 이용하여 식 (7)과 같이 계산된다. 식 (6)은 고장이 발생했을 때 고장수리율을 의미한다.  $\mu_S$ 는 짧은 주기의 고장수리율이고,  $\mu_L$ 은 긴 주기의 고장수리율이다. 이는 MTBR을 이용하여 식 (8)과 같이 계산된다.  $\lambda_E$ 는 위성체 고장율을 의미하며, 위성의 신뢰성과 임무 수명에 따라 식 (9)와 같이 계산된다. 만약 위성이 수명이 다 되어 교체가 필요할 때 위성의 교체율은 식 (10)과 같이 계산된다. 식 (11)에서  $P_{OR}$ 는 임무 요구사항을 만족하는 최소 위성 개수를 제외한 여유위성을 비율을 의미한다. 식 (12)에서  $P_{GR}$ 는 전체 군집위성 대비 지상에 위성 여유분의 비율이다. 식 (13)에서  $\mu_{OR}$ 는 궤도상에서 위성을 교체하는데 소요되는 시간( $M TBR_{OR}$ )을 이용하여 계산되고,  $\mu_{GR}$ 는 지상에 있는 여유 위성을 제작/발사하는데 소요시간( $M TBR_{GR}$ )을 이용하여 계산된다. 만약에 제작을 하는데 별도의 시간이 소요되지 않는다면  $M TBR_{GR}$ 은 줄어들게 된다.

위에 작성한 것과 같이 계산된 고장율 및 고장 수리율을 고려하면 식 (4)에서  $P_k$ 는 다음 식 (14) 및 (15)와 같이 계산된다.

$$P_k = \left( 1 + \sum_{j=1}^{N_{sat}} \prod_{m=1}^j \frac{\lambda_m}{\mu_m} \right)^{-1} \quad (k = N_{sat}) \quad (14)$$

$$P_k = \frac{\lambda_{k+1}}{\mu_{k+1}} P_{k+1} \quad (k > 1) \quad (15)$$

$\alpha_k$ 는 임무 요구사항을 만족할 확률로 STK 또는 FreeFlyer와 같은 시뮬레이션 도구를 이용해서 계산해야 한다. 만약에 특정 지역에 대한 재방문주기가 임무 요구사항 이하로 만족해야 한다면 확률계산이 필요하다. 예를 들어, 한반도 주변 해역의 재난/재해 감시를 위해 재방문주기가 30분 이내에 들어와야 한다는 요구사항[12]이 있다면, 위성이 고장남에 따라 영상촬영이 불가능하여 군집위성의 재방문주기가 30분 이내에 들어올 확률이 점차 줄어들게 되어 위성의 개수에 따라  $\alpha_k$ 가 달라지게 된다. 만약 평균재방문주기의 관점에서 만족 여부만 고려한다면  $\alpha_k$ 는 0 또는 1이 되게 된다.

다음 Fig.3는 M&S 도구를 이용하여 지구관측 군집위성을 구성하기 위한 위성 개수에 따라 재방문주기의 추이를 변화를 보여준 예시이다. 32개 이상에서 재방문주기가 30분 이내에 들어오는 것을 알 수 있으며, 이에 따라  $\alpha_k$ 는 위성 개수가 32개 이상에서 1이고, 32개 미만에서는 0이라인 것을 확인할 수 있다.

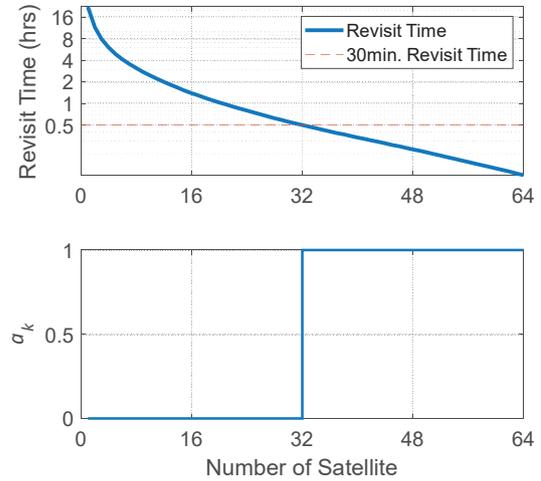


Fig. 3 Revisit Time and  $\alpha_k$  based on the number of satellites

Table 1 Parameters for Constellation Reliability Analysis

Item	Value
Number of Satellites	32 ... 64
Single Satellite Reliability	0.5 ... 0.8
Mission Performance Requirement	less than 30 minutes (Average Revisit Time)
Mission Reliability Requirement	0.7
Minimum Number of Satellites for Mission Performance Satisfaction	32

### 3. 군집위성 신뢰성 및 가용성 분석

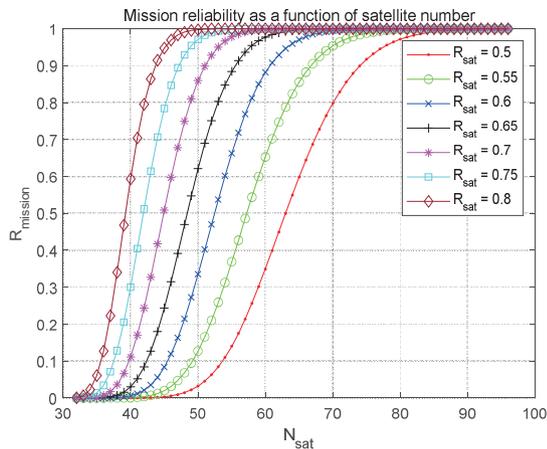
#### 3.1 군집위성 신뢰성 분석

본 논문에서는 위성체의 신뢰성을 요구사항에 따라 필요한 위성 수량을 군집위성 신뢰성 관점에서 분석을 수행하였다. 주요 매개변수를 다음 Table 1과 같이 고려하여 제안된 과정을 적용하였다. 이에 따라 각 위성체 신뢰성 및 위성 개수에 따른 임무 신뢰성은 Fig. 4와 같이 산출된다.

해당 분석을 통해 요구 임무 신뢰성 0.7을 만족하기 위한 위성 개수 산출은 Table 2와 같다.

**Table 2** Number of Satellites Required to Achieve a Mission Reliability of 0.7

Single Satellite Reliability	Number of Satellites for Constellation Satellite Reliability (0.7) Satisfaction
0.5	68 (Mission Reliability 0.728)
0.6	56 (Mission Reliability 0.719)
0.7	48 (Mission Reliability 0.749)
0.8	41 (Mission Reliability 0.704)



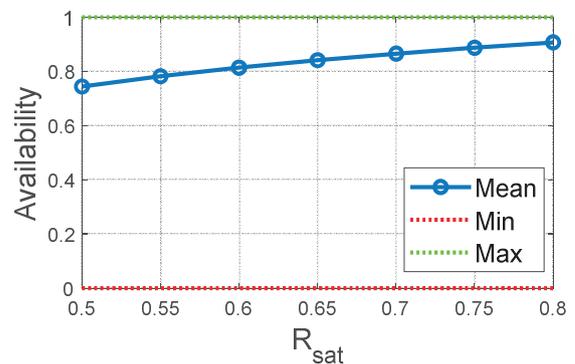
**Fig. 4** Mission Reliability based on the number of satellites and Satellite Reliability.

#### 3.2 군집위성 가용성 분석

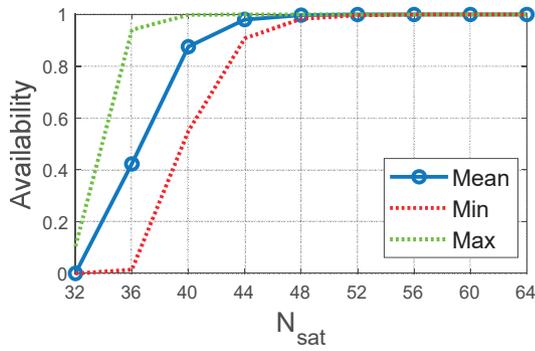
진술한 바와 같이 가용성 분석을 위해서는 다양한 변수를 고려해야 한다. 본 분석을 위해서 기존 연구 [13]의 결과를 바탕으로 다음 Table 3와 같이 변수를 가정하였다.

**Table 3** Parameters for Constellation Availability Analysis

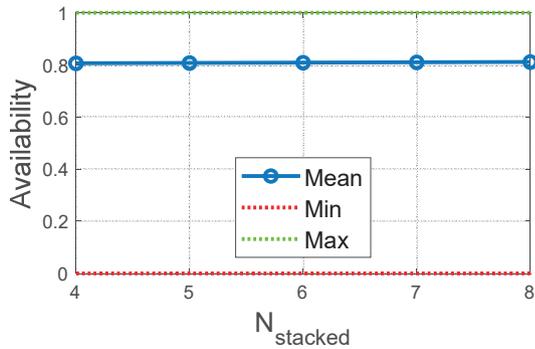
Item	Values
Number of Satellites ( $N_{Sat}$ )	32 ... 64
Single Satellite Reliability	0.5 ... 0.8 @ 3 years
Mission Performance Requirement	less than 30 minutes (Average Revisit Time)
Minimum Number of Satellites for Mission Performance Satisfaction ( $N_{req}$ )	32
Number of Stacked Satellite on Ground ( $N_{stacked}$ )	4 ... 8 satellites
Short-term MTBF ( $MTBF_S$ )	15 days
Short-term MTBR ( $MTBR_S$ )	2 hours
Long-term MTBF ( $MTBF_L$ )	365 days
Long-term MTBR ( $MTBR_L$ )	1 day
Replacement Lead Time for On-orbit Spare Satellite ( $MTBR_{OR}$ )	7 days
Replacement Lead Time for Ground Spare Satellite ( $MTBR_{GR}$ )	30 ~ 360 days (more than 120 days for new manufacturing)



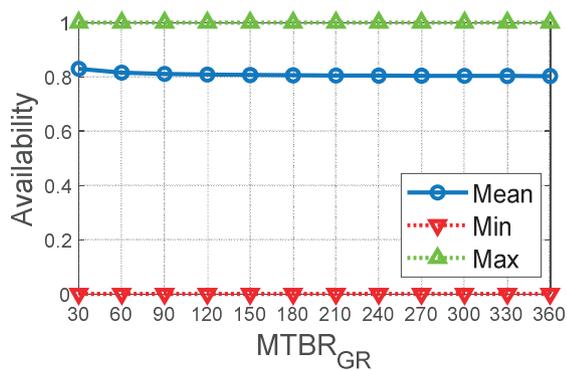
(a) Availability Changes According to Satellite Reliability



(b) Availability Changes According to the Number of Satellites

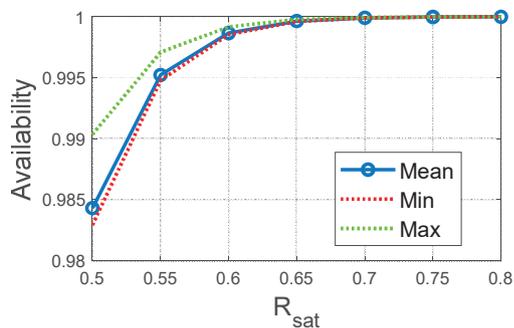


(c) Availability Changes According to the Number of Satellites in Ground Standby

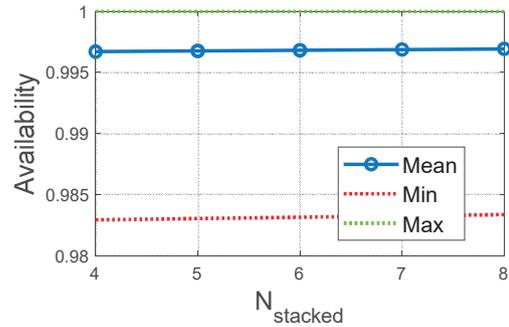


(d) Availability Changes According to the Replacement Time

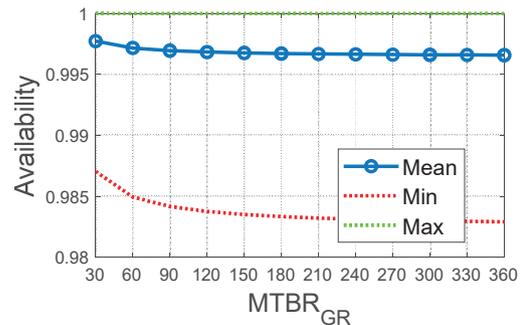
**Fig. 5** Analysis of the Main Effects of Availability Depending on Key Variables



(a) Availability Changes According to Satellite Reliability



(b) Availability Changes According to the Number of Satellites in Ground Standby



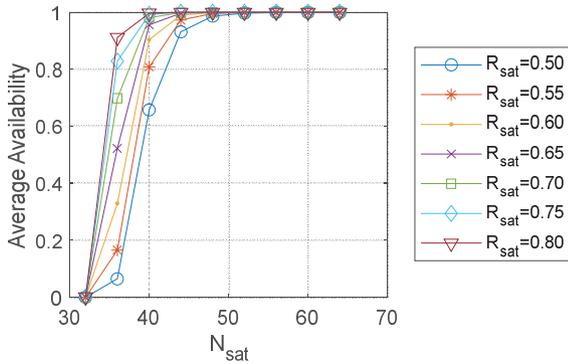
(c) Availability Changes According to the Replacement Time

**Fig. 6** Analysis of the Main Effect of Availability Depending on Key Variables ( $N_{sat} : 48$ )

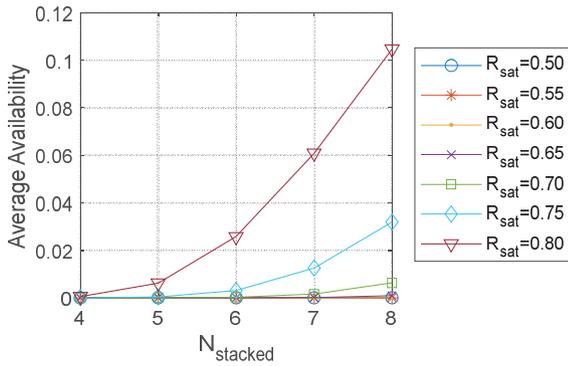
매개변수에 따라서 가용성에 어떤 영향을 주는지 분석하기 위해서 위의 Table 3에 언급한 변수의 변화에 대한 주효과 분석을 수행하였다. 주효과도 분석 시 값의 분포추이를 보기 위해서 최소/최대값도 같이 산출하였다. 해당 결과를 통해 평균적으로 가용성에 가장 큰 영향을 주는 인자에 대해서 식별할 수 있다.

Figure 5(a)를 통해 단일 위성체의 신뢰성이 군집위성 가용성 향상에 직접적인 영향을 주는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 경우에는 발사 위성의 개수에 따른 가용성을 보여주며, 일정 개수까지는 가용성 향상에 영향을 크게 주는 것을 알 수 있다. 하지만 지상 대기 위성의 경우 군집위성 가용성에 향상에 기여가 가능하지만 그 효과는 적다는 것을 Fig. 5(c)을 통해 알 수 있다. 지상 대기 위성으로 교체시간이 짧을수록 군집위성 가용성을 향상시키는데 기여하지만 그 효과는 낮은 것을 Fig. 5(d)를 통해 알 수 있다.

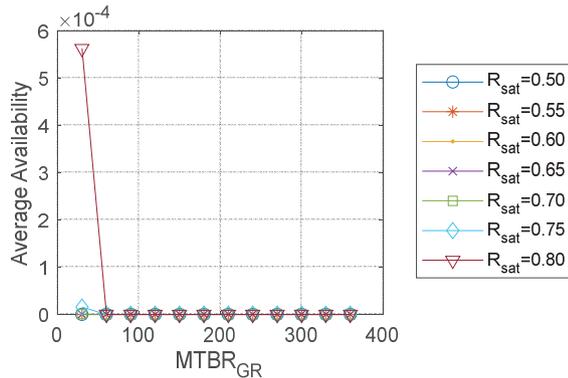
Figure 5(b)를 통해서 군집위성의 개수가 48개가 넘으면 가용성이 0.95가 넘는 것을 알 수 있다. 위성의 개수만 48개로 고정하고 가용성의 주효과도는 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 해당조건으로 군집위성의 가용성을 향상시키기 위해서는 위성체 신뢰성을 향상시키거나 위성을 미리 준비하여 바로 발사할 수 있도록 해야함을 알 수 있다.



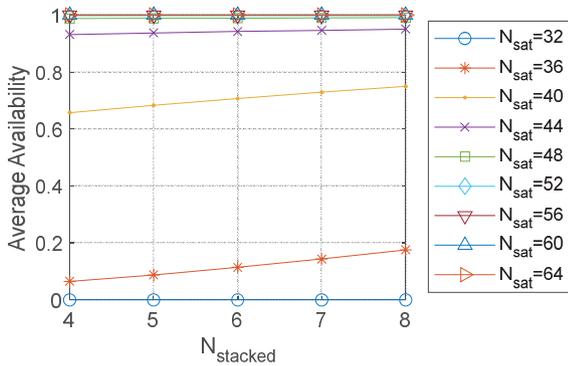
(a) Number of Satellite Constellations and Satellite Reliability



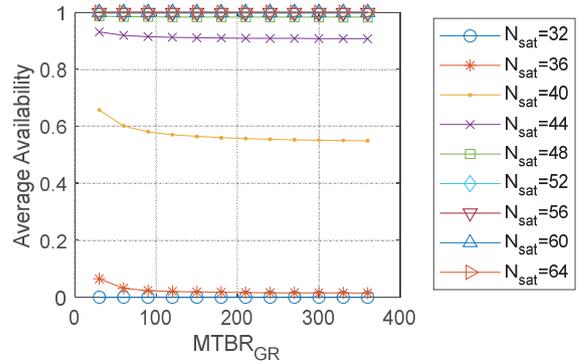
(b) Number of Ground Standby Satellites and Satellite Reliability



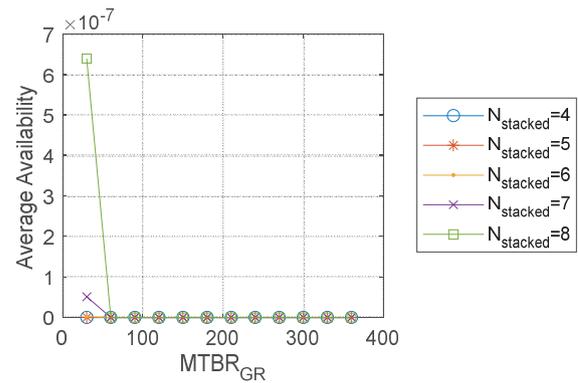
(c) Replacement Time and Satellite Reliability



(d) Replacement Time and Satellite Reliability



(e) Number of Ground Standby Satellites and Number of Cluster Satellites



(f) Replacement Time and Number of Ground Standby Satellites

**Fig. 7** Availability Interaction Effect Between Each Variables

Figure 7은 각 변수간 가용성에 주는 상호 작용에 대한 분석 결과를 보여준다. 본 분석을 통해서 각 변수가 상호 작용하여 군집위성 가용성에 어떤 영향을 주는지 분석하여 어떤 인자가 가용성 향상에 효과적인지를 검토 가능하다.

Figure 7(a)는 위성의 개수와 위성체 신뢰성이 상호 작용하였을 때 위성체 신뢰성에 영향을 주는 것을 보여준다. 36개 이하에서는 위성체의 신뢰성을 향상시키기에 따라 군집위성 가용성 향상 효과가 존재함을 알 수 있고, 그 이상부터는 효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7(b)는 지상 대기 위성과 위성체 신뢰성이 군집위성 가용성에 상호작용하는 결과를 보여준다. 위성체의 신뢰성이 낮을수록 지상에서 위성을 대기시키는 것이 군집위성 가용성 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

Figure 7(c)는 지상 대기 시간을 60일까지는 효과적으로 가용성 향상이 가능함을 의미한다. 이는 미리 위성을 대기하여 발사하거나 위성을 짧은 시간에 조립하여 발사할 수 있는 개념의 기술이 적용되어야 한다는 것을 의미한다. 만약 지상 대기 위성의 제작 및 발

사 시간이 늦어 질수록 실질적으로 군집위성 가용성에 향상에 주는 영향이 미미함을 의미한다. 이는 Fig. 7(f)에서도 유사한 결과를 획득할 수 있음을 알 수 있다. 지상 대기 시간이 60분 이상에서는 위성의 지상 대기 위성 개수는 군집위성 가용성 향상에 기여도가 낮다.

Figure 7(d)는 군집위성의 개수가 44개까지는 지상 대기 위성의 개수가 군집위성 가용성 향상에 영향을 주지만 그 외의 경우에는 지상 대기 위성 개수에 따라 가용성 향상에 큰 영향이 없음을 볼 수 있다. Fig. 7(e)도 Fig. 7(d)는 같이 위성체가 44개까지는 가용성 향상에 효과가 크지만 그보다 위성의 개수를 늘리는 것은 효과가 낮음을 알 수 있다.

군집위성 가용성 요구사항을 만족하는 가장 경제적인 조합의 선정을 위해 비용모델을 고려해야 하며 생산성, 인플레이션, 양산에 따른 학습률(Learning Rate), 발사 방법에 따른 발사 비용 등이 함께 고려되어야 한다. 본 연구에서는 문제를 단순화하여 위성의 개수와 신뢰성 측면에서만 비용을 고려하였다.

신뢰성에 따른 비용모델은 간단히 정의되기 어렵고 위성체의 성능에 따라 달라진다.[14] 본 논문에서는 개념적 분석을 위해 식 (16)과 같은 단순식을 이용하였다.

$$C_{sat}(R) = C_{sat@R=0.5} \times (F_R)^{\left(\frac{R-0.5}{0.1}\right)} \quad (16)$$

$F_R$ 은 위성체 신뢰성이 0.5 기준으로 0.6으로 상승시 소요되는 개발비용의 상승 분을 의미한다. 예를 들어  $F_R$ 이 1.5라고 한다면 신뢰성이 0.5에서 0.6으로 상승을 위해서 1.5배의 비용이 소요되며, 0.5에서 0.7로 상승에는 1.75배의 비용이 소요되는 것이다.

이에 따라서 위성 제작 비용은 다음 식 (17)과 같이 나타나게 된다.

$$C_{constellation} = C_{sat}(R) \times (N_{sat} + N_{stacked}) \quad (17)$$

$F_R$ 을 1.1에서 2에서 변경함에 따른 최소 비용의 경우는 다음 표와 같이 나타나게 된다. 이를 통해 지상 대기 위성의 개수는 최소화된 경우가 선택됨과 동시에  $F_R$ 조건에 따라 위성체 신뢰성 및 임무 성능을 만족하는 위성의 개수가 선정될 수 있다. 가용성 기준으로 위성의 개수를 선정하게 되면 군집위성이 임무 종료시점에서 군집위성 신뢰성은 상당히 낮은 것을 알 수 있다.

**Table 4** Availability Satisfaction of 0.99 and Minimum Cost Case

$F_R$	1.05	1.1	1.2
Single Satellite Reliability	0.75	0.6	0.5
Number of Satellite for Launch	40	44	52
Number of Ground Spare Satellites	4	4	4
Replacement Time	30 days	30 days	30 days
Relative DD&TE Cost	49.708	52.800	56
Constellation Satellites Availability	0.9928	0.9901	0.9973
Constellation Satellites Reliability	0.300	0.056	0.063

**Table 5** Availability Satisfaction of 0.99 and Minimum Cost Case (No Ground Standby Satellites)

$F_R$	1.05	1.1	1.2
Single Satellite Reliability	0.8	0.55	0.5
Number of Satellite for Launch	40	48	52
Relative DD&TE Cost	46.305	51.474	52
Constellation Satellites Availability	0.9963	0.9947	0.9964
Constellation Satellites Reliability	0.593	0.0683	0.063

**Table 6** Availability Satisfaction of 0.7 and Minimum Cost Case (No Ground Standby Satellites)

$F_R$	1.05	1.1	1.2
Single Satellite Reliability	0.75	0.55	0.5
Number of Satellite for Launch	36	40	44
Relative DD&TE Cost	46	46	46
Constellation Satellites Availability	0.718	0.725	0.9049
Constellation Satellites Reliability	0.0342	0.00883	0.0018

**Table 7** Case of Availability 0.99 and Mission Reliability 0.7 or Higher Satisfaction and Minimum Cost

$F_R$	1.05	1.1	1.2
Single Satellite Reliability	0.75	0.5	0.5
Number of Satellite for Launch	44	68	68
Number of Ground Spare Satellites	4	4	4
Replacement Time	30 days	30 days	30 days
Relative DD&TE Cost	49.708	60.915	72
Constellation Satellites Availability	0.999	1	1
Constellation Satellites Reliability	0.706	0.728	0.728

반면에 군집위성 임무 신뢰성 요구사항을 0.7이상을 만족하기 만족하기 위한 조건을 고려하면 Table 4와 같은 결과를 획득하게 된다.

Table 4 ~ 7에서 알 수 있듯이 k-out-of-n 시스템으로 고려하여 군집위성의 신뢰성을 고려하는 경우와 가용성 기준으로 필요한 위성이 달라짐을 알 수 있다. 또한, Figure 4와 Fig. 7(a)를 통해 단일위성의 신뢰성과 위성의 개수가 군집위성의 신뢰성과 가용성에 대한 영향성 검토가 가능하다. 예를 들어, 위성의 개수가 50개이고, 위성체 신뢰성이 0.5인 경우 군집위성 신뢰성이 0.03 이하고, 군집위성 가용성은 0.99 이상이다. 이는 k-out-n 시스템 형태를 고려하면 임무 요구사항을 만족하기 위해 위성의 개수가 가용성 기준으로 도출된 위성의 개수에 비해 많이 도출된다는 것을 의미한다.

Table 6에서 위성체 신뢰성 0.7인 경우 가용성은 지상대기 위성 없이도 가용성 0.7의 만족 여부를 확인할 수 있다. 그리고 Table 7을 통해 신뢰성 0.7만족을 위해서는 위성의 개수를 8기 더 발사해야 함을 알 수 있다. 본 분석 결과를 통해 군집위성의 개수를 경제적으로 예측하기 위해서는 군집위성의 신뢰성보다는 가용성 관점에서 산출하는 것이 보다 경제적인 결과를 알 수 있음을 의미한다.

최근 저비용 위성 개발 개념을 활용하기 때문에 산술적인 신뢰성은 더 낮을 수 있다. 이런 관점에서 군집위성 신뢰성 향상을 위해서는 위성의 개수가 기하급수적으로 필요할 수 있음을 의미한다. 하지만 군집위성 가용성 측면에서는 각 위성이 상호 리던던시로 고

려되기 때문에 상대적으로 경제적으로 위성의 개수 선정이 가능하다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 군집위성의 신뢰성 및 가용성 모델을 제시하고 이에 따른 특성을 비교 분석하였다. 군집위성 신뢰성 모델은 전통적인 신뢰성 모델인 k-out-of-n 시스템을 적용하였고, 군집위성 가용성 모델은 마르코프 체인 모델에 기반한 가용성 모델을 제시하였다.

군집위성 가용성 모델에 근거하여 제시한 설계 변수들이 군집위성의 가용성 향상에 기여하는 정도를 주요 과도 분석 및 상호작용 분석을 통해서 검토하였다. 분석을 통해서 군집위성의 개수가 가용성 향상에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

신뢰성에 따른 비용모델을 개념적으로 적용하는 개념을 제시하였다. 해당 개념을 활용하여 신뢰성 또는 가용성 요구사항을 만족하는 최소 비용의 변수 조합형태를 도출하였다. 위성대수 및 요구성능은 임의로 적용하여 분석하였으며, 본 분석을 통해서 군집위성에 요구되는 신뢰성 및 가용성 요구사항에 따라 군집위성 구성에 필요한 위성의 개수와 비용의 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

본 논문을 통해 도출된 모델은 다른 군집위성 개발에 있어서 임무 성능 및 임무 가용성 또는 신뢰성에 근거한 제작 필요한 위성의 개수 도출에 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 다만 신뢰성에 따른 위성의 비용 모델에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 국방과학연구소의 2019 미래도전기술개발사업 PM 기획사업(초소형 SAR 위성군 설계 및 제작을 통한 운용능력 확보)을 통해 도출된 연구결과입니다.

## References

- [1] A. Sanchez, T. Soares, and A. Wolahan "Reliability aspects of mega-constellation satellites and their impact on the space debris environment," *In: 2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2017. p. 1-5. Mar, 2017
- [2] S. Sung, "The Role of Reliability Engineering in the Transition from Integrated Logistics Support to Integrated Product Support." *Journal of Applied Reliability*, vol. 22,

- no.3, pp. 319-324
- [3] J. Roca, "Cosmo-Skymed Ground Segment Ram Analysis. In: Safety and Reliability". *Taylor & Francis*, 2013. p. 31-55.
- [4] L. Bitetti, R. Bernard, B. Ratti, F. Giandomenico, and A. Pirovano, "RAMS analyses and tool supporting end of life decision." *CEAS Space Journal*, 2023, 1-10.
- [5] H. Zhang, D. Meng, and T. Xin, "A modeling and analysis strategy of constellation availability using on-orbit and ground added launch backup and its application in the reliability design for a remote sensing satellite," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 4, 2018
- [6] W. Huang, W. Huang, J. Loman, R. Andrada, M. Hanson, and D. Borja. "An Optimal Two-Stage Launch Plan of a Satellite Constellation to Maintain Mission Reliability Requirement." *In: 2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, 2018. pp. 1-7. Sep, 2018
- [7] B. Merrel, J. Chrono, J. Dempsey, S. Deacon, and M. Nadeau. "A Methodology for Reliability Assessments of Arbitrary Satellite Constellations". *In: ASCEND 2022*, p.4204, Oct. 2022
- [8] A. Elasyed, "Reliability Engineering", *Wiley*, 2020, pp. 231-235
- [9] S. Yoo, Y. Jin, and J. Lee, "A Study on the Reliability Management Program during Spacecraft Development," *Journal of Applied Reliability*, vol.8, no. 3, pp. 145-154.
- [10] H. Kim, K. Lee, T. Kim, H. Lee, J. Son, S. Song, and H. Oh, "Analysis of FoM and Operational Concept for Small SAR Satellite". *In proceeding of 2020 KSAS Conference*, pp. 392-393. Nov. 2020
- [11] Y. Kim, Y. Chun, C. Lee, J. Lee, D. Ahn, J. Hur, and J. Jang, "A Study for New-Reliability and Availability Prediction/Analysis Methods for Clustered Microsatellites." *In proceeding of 2022 KSAS Conference*, pp. 620-621. Nov. 2022
- [12] S. Song, H. Kim, and Y. Chang, "Analysis on Figure of Merits of Small SAR Constellation Satellites for Targets Detection", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 47, no. 2, pp.130-142.
- [13] J. Son, Y. Song, J. Park, S. Song, and H. Oh, "Orbit Design and Mission Performance Analysis of Small SAR Satellite Constellations for Regional Surveillance and Reconnaissance Missions.", *In proceeding of 2022 KSAS*, pp. 1507-1509. Nov. 2022.
- [14] Y. Chang, H. Kim, J. Kang, "Development of reliability-corrected cost model for small earth observation satellites". *Acta Astronautica*, Vol. 88, pp. 163-175.