Research Paper

Journal of Aerospace System Engineering
Vol.16, No.3, pp.10-22 (2022)

EISSN 2508-7150
http://dx.doi.org/10.20910/JASE.2022.16.3.10

군집위성 임무운영시스템 발전방향 및 자동화 우선순위 평가

정인식[1] · 윤정훈[2] · 이명신[3] · 이정현[3] · 권기범[2†]

[1]과학기술연합대학원대학교
[2]서울대학교
[3]한국항공우주연구원

Future Direction of Mission Operation System for Satellite Constellation and the Automation Priority Evaluation

Insik Jung[1], Jeonghun Yoon[2], Myungshin Lee[3], Junghyun Lee[3] and Kybeom Kwon[2†]

[1]University of Science and Technology
[2]Seoul National University
[3]Korea Aerospace Research Institute

Abstract

According to the Space Development Promotion Basic Plan, more than 110 satellites are expected to be deployed by 2031. Accordingly, the operation concept and technology for satellites constellation are required, compared to the existing few multi-satellite operations. It is essential to automate and optimize the mission operation system, for efficient operation of the satellite constellation, and preparations are urgently needed for the operation of satellite constellation in domestic as well. In this study, the development direction and strategy of the mission operation system applying automation and optimization for efficient operation of the satellite constellation are proposed. The framework for evaluating the automation level and priority of the mission operation system was developed, to identify the tasks to which automation should be applied preferentially.

초 록

우주개발진흥 기본계획에 따르면 2031년까지 110여 기의 위성이 운영될 것으로 예상되며, 이에 따라 기존의 소수의 다중위성 운영과는 다른 군집위성 운영을 위한 운영개념과 기술이 필요하다. 효율적인 군집위성 운영을 위해 임무운영시스템의 자동화 및 최적화가 필수적이며, 국내에서도 군집위성 운영을 위한 준비가 시급하다. 본 논문에서는 효율적인 군집위성 운영을 위해 자동화 및 최적화를 적용한 임무운영시스템 발전방향 및 추진전략을 제안하였으며, 임무운영시스템의 자동화 수준 및 우선순위 평가를 위한 프레임워크를 개발하여 자동화를 우선적으로 적용하여야 하는 업무를 식별하였다.

Key Words : Mission Operation system(임무운영시스템), Satellite Constellation(군집위성), Automation(자동화), Optimization(최적화), Automation Level and Priority Evaluation Framework(자동화 수준 및 우선순위 평가 프레임워크)

1. 서 론

한국항공우주연구원(KARI, 이하 항우연)의 지상시스템은 1999년 12월 발사된 저궤도 위성인 다목적실용위성(KOMPSAT) 1호를 운영하기 위해 미국 TRW 사의 기술지원을 받아 한국전자통신연구원에 의해 개발되어 대전 항우연 부지 내에 설치·운영되었다. 이후로 저궤도 위성인 다목적실용위성 2호, 3호, 3A호, 5호, 차세대중형위성(CAS-500) 1호 및 정지궤도 위성인 천리안위성 1호(COMS), 천리안위성 2A/2B호(Geo-KOMPSAT 2A/2B)를 추가로 발사·운영하면서 다중위성 운영개념을 적용한 지상시스템을 개발하여 현재까지 운영 중이다[1]. 향후 다목적실용위성 6호, 7호 및 7A호와 후속 차세대 중형위성 운영이 계획되어 있으며, 우주개발진흥계획에 따른 중·장기적 국가

Received: Jan. 18, 2022 Revised: Apr. 14, 2022 Accepted: Apr. 30, 2022
† Corresponding Author
Tel: *** - **** - **** E-mail: hallep@snu.ac.kr
ⓒ The Society for Aerospace System Engineering

인공위성에 대한 운영 수요는 지속적으로 증가할 것으로 전망된다. 2021년 6월 국가우주위원회에서 심의·확정된 제3차 우주개발진흥 기본계획 수정(안)에 따르면 2031년까지 국가안보위성, 통신위성, 우주전파관측위성, 기술검증위성 등 110여 기의 개발계획이 포함되어 있어 운영할 위성 수가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 특히 초소형위성의 경우 다수의 위성을 활용한 위성군(Constellation)을 통해 임무를 수행하는 방식으로, 임무가 각기 다른 소수의 위성을 운영하는 현재의 다중위성 운영방식과는 다른 운영개념 및 기술의 적용이 필요할 것으로 예상된다[2].

다중위성은 임무가 각각 다른 위성을 말하는 것으로 통상 서로 다른 탑재체를 탑재하거나 상이한 위성체 버스를 운용하며, 각 위성별 임무에 적합한 궤도면에서 운용된다. 반대로 군집위성은 하나의 동일한 임무를 수행하는 다수의 위성을 말하며, 통상 동일한 탑재체와 위성체 버스를 운용하며, 주로 동일한 고도 및 경사각에서 상승점 경도가 상이한 다수의 궤도면을 활용한다. 다중위성과 군집위성 모두 다수의 위성을 운영하는 개념으로 동시간에 다수의 위성을 관제해야 하는 경우가 발생한다. 이러한 상황을 대비하기 위해 안테나를 추가하거나 임무계획을 최적화하는 방안에 대한 연구가 수행되어 왔다[3, 4, 5, 6, 7]. 국외에서는 다수의 위성을 효율적으로 관제하기 위하여 임무계획의 최적화 이외에도 임무운영요소(MCE) 업무들의 자동화(Automation) 수준을 파악하고 위성 수의 증가로 인한 확장성(Scalability)에 따른 자동화 요소를 식별하는 자동화 분류체계와 확장성 분류체계가 제안된 바 있다[8, 9]. 우리나라의 경우 이러한 군집위성에 대한 운영 경험은 부재하므로 당면한 다수의 군집위성 운영을 위한 준비가 시급하다. 이를 위해 우선 경험을 이미 축적하고 있는 국외의 사례들과 연구를 기반으로 효율적 군집위성 운영을 위해 필수적인 운영개념, 기술들을 식별할 필요가 있다.

본 논문에서는 군집위성 임무운영시스템의 중요한 운영개념, 기술들을 체계적으로 식별하고 이를 바탕으로 우리나라 임무운영시스템의 발전방향을 제안하고자 한다. 추가적으로 군집위성의 효율적인 운영을 위해 필수적인 자동화 관점에서, 임무운영시스템의 자동화 우선순위 평가 프레임워크를 개발하고 실제 위성을 운영하는 전문가 평가를 통해 향후 우선적으로 자동화가 시급한 업무들을 식별하여 제시하고자 한다.

2. 위성운영 패러다임 변화

임무운영시스템을 위성의 임무를 계획하고 교신 일정을 작성하는 임무계획 서브시스템(Mission Planning Subsystem, MPS), 임무계획을 명령으로 변환하여 위성으로 전송하고 위성의 상태정보를 수신하는 위성운영 서브시스템(Satellite Operation Subsystem, SOS), 위성의 궤도를 결정하고 예측하며 유지하기 위한 각종 분석을 수행하는 비행역학 서브시스템(Flight Dynamics Subsystem, FDS)으로 구분해서 국외 임무운영시스템의 군집위성 관련 연구 동향 및 패러다임 변화양상을 식별하고 주요 이슈를 제시하고자 한다.

2.1 임무계획 서브시스템(MPS)

서론에서 언급한 바와 같이 각 지상국에서 운영하는 위성 수가 증가함에 따라 효율적인 임무계획을 위해 최적화에 관한 연구는 많이 수행되어 왔다. 위성 수가 증가해도 충분한 패스 할당이 가능했기 때문에 위성의 기동성능, 기상조건, 임무 우선순위 등 보다 현실적인 제한조건을 고려하는 형태로 연구가 진행되어 왔다. 그러나 위성 수가 100개 이상인 위성군 등 군집위성의 규모가 확장됨에 따라 발생하는 복잡성 증가 문제와 지상국과의 교신 시 패스 할당이 동시에 이루어질 수 있는 상황에서 발생하는 병목현상을 해결하고 임무계획과 자원 할당의 효율성을 증대시키기 위해 임무계획 스케줄링 간 경매 시스템(Auction System) 기법을 도입한 연구가 수행된 바 있다[10]. 경매 시스템 기법은 인공위성의 임무에 시장 지향적(Market Oriented)인 프로그래밍을 적용하는 것으로, 각 인공위성은 데이터 전송을 위해 타임 슬롯을 확보하려는 입찰자의 역할을, 각 지상국은 임무에 적합한 데이터 수신을 위해 타임 슬롯을 할당하는 경매자로 역할을 수행하게 하는 최적화 프로그래밍이다.

또한, 기존의 연구들은 인공위성의 임무계획을 위한 스케줄링 및 플래닝 문제에 있어서 추계적 방법(유전자 알고리즘 등)을 활용한 최선해를 찾는 최적화를 흔히 수행해 왔다[11]. 최선해 알고리즘은 계산시간의

효율성과 적용의 용이성 관점에서 많이 활용되지만, 임무계획의 스케줄링 및 플래닝 문제에서의 최적해를 찾는 것은 아니다. 최선해는 유전 알고리즘 등의 추계적 방법을 활용하여 최적화한 해로서 문제의 완전한 최적해가 아닌 근사 최적해에 가깝다. 따라서 기본적으로 주어진 스케줄링 및 플래닝 문제를 선형으로 모델링하고 이에 대해 최적화를 수행하여 해를 구하는 최적해 알고리즘 적용을 통해 주어진 임무계획을 위한 엄밀해를 산출하는 방안도 충분히 고려할 가치가 있다[12]. 다만, 군집위성 등 위성의 수가 증가함에 따라 최적해를 찾는 시간이 기하급수적으로 증가하는 단점(차원의 저주)으로 인해 적용이 제한될 수 있다.

임무계획 서브시스템 관련한 패러다임은 인공위성의 군집화에 따라 지상국 인프라 추가 및 분산, 최적화를 통한 이전보다 향상된 패스 할당 기술이 요구되고 있다. 또한, COTS (Commercial-Off-The-Shelf) 부품 기술의 발달에 따른 대용량 로그 및 탑재체 데이터 저장능력 향상과 군집위성 규모 증가에 따른 짧은 기간 내에 전 지구적인 커버리지 제공이 가능한 상황을 고려할 때 임무계획 서브시스템에 최적화 알고리즘의 적용은 필수적인 사항이 되고 있다.

2.2 위성운영 서브시스템(SOS)

위성운영 서브시스템의 경우 위성의 군집화에 따라 필요 운영인력에 대한 수요와 업무량이 증가하게 되고 인적오류가 발생할 확률이 높아져 주로 위성운영의 자동화가 주요 이슈가 되고 있다. 자동화 수준 분류체계에 따라 위성운영 서브시스템의 자동화 수준을 분류하고 시스템을 개발 및 활용함으로써 위성운영 비용 최소화, 운영 효율화, 인적 노력 감소 등의 효과를 기대할 수 있다. Table 1은 Robert Schwarz(1996)와 Volker Schaus(2019)가 제안한 자동화 수준 분류 방법이다[13, 14].

운영인력의 노력은 다음과 같은 자동화를 통한 운영인력 및 업무량 최적화를 통해 절감할 수 있다.

1) 일상적인 업무에 대한 자동화 및 지속적인 자동화 가능 요소 식별
2) 비용 및 위험 사이의 Trade-off를 통한 적정 인력 판단
3) 자동화에 따른 운영인력들의 인식 변화 (위성 관제사 : 시스템 관리자, 운영 엔지니어 : 비정상 상황 대처 및 수동 절차의 자동화)
4) 점진적 자동화 도입을 통해 운영인력의 적응유도
5) 운영인력의 당직 근무화 및 원격 대처

Table 1 Automation Level Classification

구 분	내 용
6단계 분류 [13]	1. Fully Automated 2. Paging 3. Supervision 4. Cueing 5. Data Filtering 6. No Automation
4단계 분류 [14]	1. Basic sequential automation 2. Distributed automation 3. Adaptive automation 4. Mission-aware automation and their impact on mission operation

자동화를 위한 Test Bed 구축을 통해 각 자동화 절차에 대한 End-to-End 시험이 필요하며, 자동화 절차 도입 후 운영인력에 대한 Interruption 수를 모니터링하여 자동화 절차에 대한 안정화 경향성을 지속적으로 파악할 필요가 있다. 위성의 데이터양이 증가함에 따라 비용 절감, 성능 향상, 확장성과 융통성을 갖춘 데이터 저장 및 처리절차가 필요하며, 이를 위해 현재 연구 및 개발되고 있는 클라우드 컴퓨팅 기술, 리눅스 컨테이너, Big Data 및 NoSQL DB를 적용할 수 있다[15, 16, 17, 18].

위성운영의 자동화를 위해 자동화가 가능한 업무목록을 도출하고, Epoch IPS, Braxton Control Point, Major Tom, Hifly Satellite Control System 등의 소프트웨어 및 도구를 활용하여 도출된 업무목록에 대한 자동화가 가능하다[19, 20]. Table 2는 SOS의 자동화 가능 업무(Task)와 각 업무별 적용이 가능한 자동화 도구(SW/Tool)를 분석한 결과이다.

군집위성의 경우 위성 규모의 방대함으로 인해 LEOP 및 Commissioning 단계까지 자동으로 수행하는 형태로 패러다임이 변화하고 있으며, 위성 개발 단계에서부터 이를 자동화할 수 있는 비행소프트웨어의 개발이 필요하다. 또한, 위성 상태의 검토 및 비정상 상황에 대한 경보와 그에 대한 대응도 자동화하며, 클라우드 기반 통제센터 및 위성운영 간 비행소프트웨어의 수정이 더욱 신속하게 수행되는 추세이다[19].

Table 2 Possible Automating Work and Automation Tool for SOS[9]

구 분	내 용
자동화 가능 업무 (Task)	1. 위성 및 지상국 간 임무 교신 시작 · 유지 · 종료 2. 일상적인 위성운영 업무 ex) 명령 전송, 응답 수신 3. Telemetry 자동 수신 · 해석 · 전시 4. Telemetry 기반 위성의 이상 상태에 대한 경보 발생 5. 외부 소프트웨어를 활용한 이상 상태 자동 분석 및 경보 발생 6. 경보 발생 시 이상 상태 회복 작업 가. 위성을 안전모드로 전환 나. 예정된 탑재체 활동 및 임무 중단 다. 여분의 위성 운용 준비 라. 절차가 정립된 이상 상태 회복 7. 자료 교환 및 사용자 지정 작업 가. 위성 Pass 수행 시 미리 코딩한 스크립트로 교신 여부 자동 판단 나. 교신 여부 판단 후 자동으로 데이터 다운로드 및 명령 업로드 8. Pass 이후 데이터 분석결과 생성 9. 위성의 중장기 성능 및 상태 도표 생성 가. 매 Pass 마다 축적된 데이터 바탕 위성 성능 및 상태 자동 생성 10. 위성운영에 필요한 외부 소프트웨어 자동 실행
SW / Tool 별 자동화 가능 업무 (Task) 분석	

SW / TOOL \ Task	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Epoch IPS	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○
Braxton Control Point	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○
Major Tom	×	○	○	○	×	×	○	×	×	×
Hifly	×	○	○	○	○	×	○	×	×	×

2.3 비행역학 서브시스템(FDS)

FDS의 자동화를 위해 각 기능별 자동화가 가능한 소프트웨어 도구 활용을 고려해야 한다[20]. 이는 군집위성 규모의 증가에 따라 지구의 편구성 및 대기 항력 등의 섭동으로 발생하는 외란에 대해 각 궤도에 대한 자동화된 궤도 유지가 필요하기 때문이다[21]. Table 3은 FDS의 자동화 가능 업무(Task)와 각 업무별 적용이 가능한 자동화 소프트웨어 및 도구(SW/Tool)를 분석한 결과이다.

충돌 가능성 평가는 일반적으로 미 우주군 소속 18 SPCS(18th Space Control Squadron)에 의해 조정이 수행되며 관련한 전문적 지식이 필요하다. 군집위성의 수가 증가함에 따라 충돌 가능성을 평가할 수 있는 자동화 시스템을 개발하는 방향으로 패러다임이 변화하고 있다. 또한, 상용 소프트웨어 도구나 웹 기반의 서비스 활용이 가능하며, 충돌 가능성 평가 도구 및 서비스를 제공하는 업체 또는 기관은 충돌 대상이 되는 위성 운영자들 간 협상을 중계하고 적절한 회피 기동을 양측에 제안이 가능하므로 외부기관과의 협력과 전문업체의 활용이 추천된다.

Table 3 Possible Automating Work and Automation Tool for FDS[9]

구 분	내 용
자동화 가능 업무 (Task)	1. 궤도결정 및 전파 2. 기동계획 및 평가 3. 궤도상태 유지 4. 외부물체 접근 예측 및 충돌위험 평가
SW / Tool 별 자동화 가능 업무 (Task) 분석	

SW / TOOL \ Task	1	2	3	4
OASYS	○	○	○	○
Free Flyer	○	○	×	×
STK Astrogator	○	○	○	×
ESA SDO	○	○	×	○
AOC	○	○	○	×
SOCRATES	○	×	×	○
CRAMS	○	×	×	○
18SPCS	○	×	×	○

2.4 해외 군집위성 운영 사례[8]

현재 RapidEye, SkySat, Doves 등 세 종류의 군집위성을 운영 중인 Planet Lab사의 실제 군집위성 운영 사례를 통해 위성군의 규모에 따른 자동화 수준과 앞서 언급한 위성운영 패러다임 변화에 근거한 각 군집위성 별 패러다임 변화 수준을 분석하였다.

RapidEye, SkySat, Doves는 모두 태양동기궤도를 기반으로 지구관측 임무를 수행하며, RapidEye, SkySat, Doves 순으로 군집위성의 수가 증가한다. 특히 Doves의 경우 250개의 위성군으로 다른 두 군집위성 대비 많은 수의 위성을 운영하고 있다. Table 4는 각 군집위성의 특징을 정리하였다.

Table 4 Characteristic of the Constellations[9]

Constellation	RapidEye	SkySat	Doves
Number of Satellites	5 MicroSat	13 MicroSat	250 CubeSat
Launch	Single launch	Multiple launch	Multiple launch
Orbit Type	SSO	SSO	ISS / SSO
Orbit Altitude	630km	500km	ISS : 400km / SSO : 475km
Mission Design Life	~7 years	~6 years	~2 years

Table 5는 Planet Lab사에서 운영하고 있는 군집위성의 자동화 수준을 분석한 자료이다. RapidEye, SkySat, Doves의 순으로 대부분의 위성운영 기능에서

자동화 수준이 높음을 알 수 있으며, 특히 Doves의 경우 LEOP & Commissioning 업무도 자동으로 이루어지고 있다. 또한, Doves 군집위성은 반자동으로 이루어지는 다른 군집위성 대비 Ground Station Tasking 업무도 완전히 자동으로 이루어짐을 알 수 있다. Orbit Control and Maintenance와 Collision Avoidance의 경우 모두 수동으로 이루어지고 있으며, Doves의 경우 추진시스템이 부재하여 궤도 제어/유지 및 충돌 회피가 불가하여 자동화 수준을 판단할 수 없으나 Differential Drag Maneuver가 가능하다.

Table 5 Automation Level of the Constellations[8]

Task	RapidEye	SkySat	Doves
LEOP & Commissioning	수동	반자동	자동
Constellation Tasking	반자동	반자동	자동
Software Updates	수동	반자동	반자동
Configuration Changes	수동	반자동	반자동
Data Downloads	자동	자동	자동
Telemetry & Log Monitoring	반자동	반자동	반자동
Anomaly Handling	수동	반자동	반자동
Orbit Control and Maintenance	수동	수동	-
Collision Avoidance	수동	수동	-
Calibration & Validation	반자동	반자동	반자동
Ground Station Tasking	반자동	반자동	자동

군집위성 별 패러다임 변화 수준으로 RapidEye는 5대의 소형위성이 하나의 시스템으로서 작동하며, 자동화된 Telemetry Screening을 수행하지만 일반적인 상황이 아니거나 장기적인 추세에서는 여전히 수동적인 Telemetry 평가가 수행된다. SkySat은 자동화된 Telemetry Screening이 가능하며 위성이 지상국과의 첫 Contact에서 사전 프로그래밍 된 Commissioning 업무를 수행하여 반 자동화된 Commissioning이 가능하다. Dove의 경우는 군집위성과 지상국 네트워크가 하나의 시스템으로 작동하며, Telecommand와 Telemetry를 하나의 서비스로 통합하여 운영한다. 위성 내 여분의 서브시스템을 구축하기보다 여분의 위성을 운영하는 것이 더욱 강조되며, 위성의 수명이 짧지만 다수의 발사를 통해 최신 기술의 적용이 빠르다. Calibration & Validation, LEOP 및 Commissioning 등 다양한 기능이 자동화되었다. 세 가지의 군집위성 모두 소수의 전반적인 업무를 담당하는 운영자가 필요한 점은 동일하다.

현재 국내에는 아직까지 군집위성을 운영한 경험이 없다. 다수의 국가위성을 개발·운영하면서 축적한 경험을 바탕으로 다목적실용위성 3호 이후로는 다중위성 운영개념을 적용하여 효율적인 다중위성 운영을 위한 지상시스템을 구축해 왔지만 각 위성이 개별적으로 개발되어 통합운영 또는 군집운영 개념이 적용되지는 않았다. 예를 들어 LEOP는 각 위성별로 수동으로 이루어지고 있으며, 임무계획, 비행역학 및 위성관제 등의 위성운영 관련 업무는 일부 기능에 대해서만 자동화가 이루어져 있어 해당 업무의 실무자가 최종적으로 판단 및 수행하는 수동~반자동 수준으로 운영되고 있다. 현재 국내 위성 운영 관련 자동화 수준은 RapidEye와 유사하거나 다소 높은 수준으로 판단된다.

2.5 군집위성 운영 주요 이슈: 최적화 및 자동화

최근 뉴스페이스 시대를 주도하고 있는 SpaceX, OneWeb과 같은 회사들은 위성 수가 100~1000개 이상인 Mega-Constellation을 운영할 계획이며, 이러한 경우 위성 임무운영시스템에 대한 자동화(Automation) 및 최적화(Optimization)의 적극적인 적용 없이는 임무운영이 불가하거나 비용이 급속히 증가할 것으로 예상된다. 임무운영 서브시스템 별 각각 최적화 및 자동화의 중요도 경향성은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다[2].

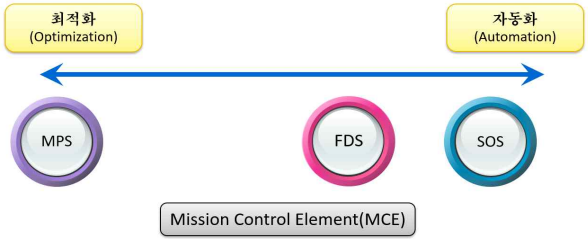

Fig. 1 Automation and Optimization Trend

임무계획 서브시스템(MPS)의 경우 상대적으로 최적화에 중요도를 나타내었으며, 위성 수의 증가에 따라 최적화가 필수이다. 위성운영 서브시스템(SOS)은 자동

화에 중요도를 나타내었으나, Anomaly와 같은 상황에 대한 대처 등 완전한 자동화는 달성이 어려울 것으로 예상된다. 비행역학 서브시스템(FDS)의 경우 최적화와 자동화의 중요도가 비슷하나 위성 수의 증가에 따른 충돌 가능성이 늘어남에 따라 충돌 가능성 평가에 대한 자동화 등 상대적으로 자동화 쪽으로 무게중심이 이동하는 경향성을 나타낸다.

3. 국내 군집위성 임무운영시스템 발전방향

3.1 국내 임무운영시스템 현 자동화 수준

Planet Lab 사의 RapidEye, SkySat, Doves 위성을 군집위성 임무운영의 자동화 수준에 따라 전체적으로 평가하면 RapidEye의 경우는 수동, SkySat의 경우는 반자동, Doves의 경우는 자동으로 평가할 수 있다[22]. 현재 국내의 경우 다중위성을 운영 중인 상황으로 군집위성 운영의 경험은 전무하다. 다만, 임무운영시스템의 자동화 수준은 Planet Lab 사의 군집위성 자동화 수준에 비추어 볼 때 운영 위성 수와 현재 자동화 수준에 근거하여 Fig. 2와 같이 RapidEye와 SkySat 중간수준으로 수동과 반자동 사이 정도로 평가할 수 있다.

Fig. 2 Automation Status of Domestic Satellite Mission Operation System

3.2 단기적 우선 추진방향

향후 급격히 증가하는 국가 운영 위성 수와 군집위성 운영 경험이 부재한 국내 상황을 고려 시, 효율적인 군집위성 운영을 위한 준비를 시급히 시작하여야 하며, 단기적으로는 위성 임무운영시스템의 자동화를 우선적으로 추진할 필요가 있다. 군집위성 운영 시 단일위성에 적용된 위성당 운영 인원수의 선형적 스케일링 방식을 적용하면 과다한 비용이 소요되며 소요 인원수에 대한 정당성이 부족하므로, 현재 자동화 수준과 향후 자동화 개발 소요를 고려, 군집위성 운영을 위한 적정 운영 인원수에 대한 정량적 근거 도출이 필요하다. Eutelsat의 사례를 보면 정지궤도 위성 18기에서 23기로 5기의 위성이 증가하였음에도 자동화를 통해 제한된 운영 인원수의 증가만으로도 원활한 임무운영을 수행하였다[23]. 군집위성 운영 시 단일위성 대비 짧은 Mean Response Time과 같이 신속한 대응과 방대한 양의 데이터 처리가 일반적이므로 수동 운영에 의한 인적오류의 가능성을 저감하여야 하며, 전체 위성군에 대한 Health/Anomaly Monitoring 및 대응절차의 자동화를 통해 위성군을 구성하는 많은 위성의 운영상 문제점에 대한 신속한 대처를 수행할 필요가 있다.

이를 위해 다음과 같은 3단계의 단계별 추진방향을 제시하고자 한다. 1단계로 대상 군집 위성에 대해 Aggregated Duty Cycle, Overall Data Amount, Coverage Metrics 등의 시스템 지표를 개발하고 이에 근거한 임무성공률(Mission Success Rate)을 정의하여야 한다. 현재의 다중위성 운영단계에서는 각기 고유의 임무를 수행하는 위성들이기 때문에 발생하는 오류는 각 위성의 임무 성공률에 큰 영향을 미치게 되나, 군집위성의 경우 다수의 위성이 동일한 임무를 수행하므로 하나의 위성 오류가 전체 위성군 임무의 성공률에 큰 영향을 미치지 않을 수도 있다. 이러한 시스템 지표들은 군집위성의 임무특성을 반영하여 개발 시 운영부서와 협의를 통해 정의할 필요가 있다. 2단계로 현재 자동화 수준을 평가하고 자동화 대상 업무의 우선순위를 자동화 수준 평가 및 우선순위 도출 프레임워크를 개발하여 도출한다. 마지막 3단계로는 자동화 대상 우선순위에 대한 자동화 구축비용과 필수 운영 인원수를 예측하여 향후 군집위성 운영을 위한 추진계획에 반영할 수 있도록 하여야 한다.

3.3 군집위성 임무운영 서브시스템 별 추진방향

임무계획 서브시스템(MPS)에서는 다중위성 및 군집위성을 동시에 운영할 때 자원 효율성을 향상시킬 수 있도록 임무 스케줄링에 대한 최적화 기법을 적극적으로 활용하여야 한다. 위성운영 서브시스템(SOS)에서는 가상화를 기반으로 한 클라우드 컴퓨팅, 리눅스 컨테

이너와 Big Data 및 NoSQL 등을 활용함으로써 군집위성이 추가됨에 따른 방대하고 복잡한 데이터를 효율적으로 관리할 방안을 모색하여야 한다. 비행역학 시스템(FDS)에서는 군집위성의 추가 운용에 따라 증가하는 충돌 가능성에 대해 효율적인 평가를 수행하고 충돌 회피 기동을 위해 외부기관과의 협력방안을 모색하여야 할 것이다. 충돌 회피 기동을 위해서는 레이더 등의 우주감시자산을 활용하여 운영 중인 위성과 위성에 접근하는 물체의 위치를 정확하게 파악할 필요가 있으나, 현재 항우연 등의 국내 위성운영 기관에서는 우주감시자산이 부재하기 때문에 우주물체를 감시하고 정확한 위치정보를 제공할 수 있는 외부기관과의 협력은 필수적이다. 또한, 향후 군집위성을 운영하는 기관이나 업체의 증가로 인해 충돌회피와 관련하여 다수의 이질적인 기관이나 업체가 상호작용하며 관련될 가능성이 증대될 것으로 예상된다. 이에 따라 국가 위성자산의 보호를 위한 효율적인 충돌회피기동을 위해서는 외부기관 간의 협력방안 모색이 더욱 필요할 것으로 예상된다. 끝으로 무엇보다 국내 군집위성 임무운영시스템 발전을 위하여 군집위성 개발 초기부터 임무운영의 자동화와 임무계획 서브시스템, 위성운영 서브시스템, 비행역학 서브시스템 등 각 서브시스템의 추진방향에 근거하여 운영 효율성을 위해 필요한 부분에 대한 적극적인 설계 반영을 요구할 필요가 있다.

4. 자동화 우선순위 평가

4.1 자동화 수준 및 우선순위 평가 방안

3절에서 언급한 바와 같이 군집위성 운영 경험이 부재한 우리나라의 경우 단기적으로 추진해야 할 것은 임무운영시스템의 자동화이다. 임무운영시스템의 자동화를 추진하기 위해서는 먼저 현재 자동화 수준을 평가하고 우선적으로 추진해야 할 업무식별 등 추진전략을 마련할 필요가 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해 현재 자동화 수준 및 우선순위를 평가할 수 있는 프레임워크를 개발하고 이를 통한 평가를 통해 자동화 추진전략 수립에 기초자료를 제시하고자 한다.

프레임워크의 기본적인 아키텍처는 자동화 우선순위에 영향을 주는 기준을 도출하고 이를 기반으로 국내 임무운영시스템의 세부업무들에 대해 현재 자동화 수준을 평가한 후 의사결정 방법론을 적용하여 각 업무의 자동화 우선순위를 도출한다.

본 논문에서 적용한 자동화 분류체계는 항공교통관리(Air Traffic Management) 분야에서 활용되는 체계를 준용한 것으로 LOAT(Level Of Automation Taxonomy)로 불리며, 이 분류체계에서는 고려하는 업무(Task)를 여러 개의 하위 업무로 분류하고 각 하위 업무별로 상이한 수준의 자동화(완전수동~완전자동)를 가질 수 있다. 비록 LOAT가 항공교통관리 분야에 적용하기 위해 개발되었지만 각 항목이 일반적인 수준에서 정의되었기 때문에 위성 운영과 같은 다른 분야에도 적용할 수 있다[8]. LOAT 자동화 분류체계의 일반적인 하위 업무는 정보획득(Information Acquisition), 정보분석(Information Analysis), 의사결정 및 조치선정(Decision and Action Selection), 조치수행(Action Implementation)의 4가지로 분류한다. Table 6은 LOAT에서의 하위임무 기능의 예시를 보여준다.

Table 6 Example of LOAT Sub-Function[9]

A : 정보획득	B : 정보분석	C : 의사결정	D : 조치수행
A0 : 수동정보획득	B0 : 메모리 작업 기반	C0 : 인간 결정	D0 : 수동
A1 : 인간 보조	B1 : 인간 보조	C1 : 인간 보조	D1 : 인간 보조
A2 : 저수준 자동화	B2 : 저수준 자동화	C2 : 의사결정 지원자동	D2 : 단계별 조치 지원
A3 : 중간수준 자동화	B3 : 중간수준 자동화	C3 : 업필 의사결정 지원	D3 : 느린수준 지원
A4 : 고수준 자동화	B4 : 고수준 자동화	C4 : 저수준 자동화	D4 : 고수준 지원
A5 : 완전 자동화	B5 : 완전 자동화	C5 : 고수준 자동화	D5 : 저수준 자동화
		C6 : 완전 자동화	D6 : 중간수준 자동화

제안된 확장성(Scalability) 분류체계는 Computer Science 분야에서 활용되는 분류체계를 준용한 것으로 위성 수의 증가에 따라 추가로 요구되는 자원 및 업무량의 증감에 대한 민감도를 판단기준을 정성적으로 제공한다. 확장성(Scalability) 분류체계에서는 확장성을 Fig. 3과 같이 위성 수 증가에 따른 자원(또는 비용) 및 업무 요구량의 변화에 따라 Constant, Sublinear, Linear, Superlinear로 판단할 수 있다.

기존에 제안된 자동화 및 확장성 기준 외에 본 연구에서는 자동화 우선순위를 판단하기 위한 기준으로 업무 빈번도(Task Frequency)와 자동화에 따른 신뢰도(Reliability)를 추가로 고려하였다. 업무 빈번도는 군집위성의 위성 수 증가에 따른 업무의 빈번도를 고려

하며 업무 빈번도가 높을수록 오류를 줄여 업무의 정확도를 높이고 운영인력 수의 증가를 저감시키기 위해 자동화를 추진하여야 함을 의미한다. 또한, 원하는 자동화 수준에 따라 이를 구축하기 위한 비용과 구축된 자동화 시스템에 대한 신뢰도가 달라지므로 일반적으로 구축비용과 신뢰도를 고려한 최적의 자동화 수준을 파악할 필요가 있다[24].

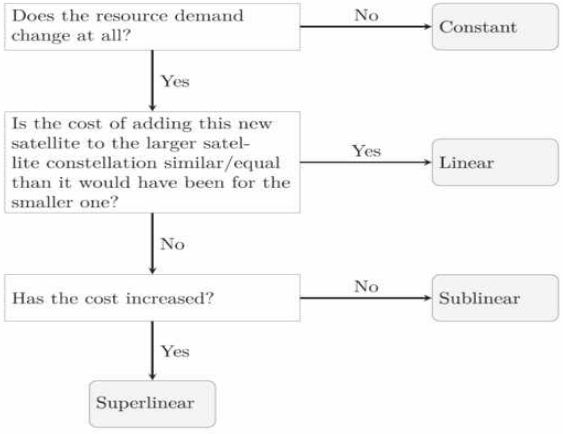

Fig. 3 Scalability Criteria according to Number of Satellite Increasing[9]

Figure 4는 자동화 수준에 따른 비용 및 신뢰성 관계를 나타내며 수명주기 비용을 고려 시 최적 자동화 수준이 존재함을 알 수 있다. 자동화를 통한 신뢰성이 높을수록 자동화 추진에 대한 우선순위가 높을 것으로 판단된다.

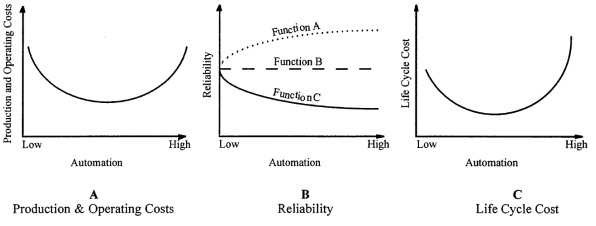

Fig. 4 Relation of Cost and Reliability according to Automation Level[13]

4.2 자동화 우선순위 평가 프레임워크

자동화 우선순위 평가 프레임워크는 다음의 절차를 적용하였으며, 향후 확장성을 위해 엑셀 기반으로 개발하였다.

< 1단계 : 임무운영 업무체계 파악 >

임무운영 업무체계는 WBS(Work Breakdown Structure) 또는 ECSS(European Cooperation for Space Standardization)[25, 26] 등을 참고하여 항우연에서 현재 수행하고 있는 대표적인 임무운영 업무를 식별하였고, 각 업무를 수행하고 있는 전문가의 조언에 따라 실제로 수행하고 있는 세부업무를 추가로 식별하였다.

< 2단계 : 평가체계 정립 >

업무별 자동화 우선순위 도출 시 바람직한 의사결정을 지향하기 위해 평가 결과가 될 수 있으면 정량적으로 산출될 수 있도록 Automation Level, Scalability, Frequency, Reliability에 대한 기준별 정량적 평가체계를 설정하였다. Automation 항목은 4.1절에서 언급한 바와 같이 LOAT 자동화 분류체계를 종합적으로 고려하여 기준을 설정하였으며, Scalability 항목은 Fig. 3.을 참고하여 설정하였다. Frequency 항목은 업무수행 중 단발성으로 그치는 업무는 One time으로, 간혹 발생하는 업무는 Sporadic으로, 정기적이지만 일정 기간을 두고 수행하는 업무는 Low로, 정기적으로 수행하는 업무는 Medium으로, 지속적으로 매번 수행하여야 하는 업무는 High로 구분하였다. Reliability 항목은 신뢰도가 자동화 수준의 증가와 무관하면 Not Reliable로 나머지 Low ~ Full 항목은 전문가의 전문성에 기반하여 정성적으로 평가하도록 하였다.

Table 7 Quantitative Evaluation System by Evaluation Criteria

Automation	Value	Scalability	Value	Frequency	Value	Reliability	Value
Manual	1	Constant	1	One time	1	None	1
Low	3	Sublinear	3	Sporadic	3	Low	3
Medium	5	Linear	5	Low	5	Medium	5
High	7	SuperLinear	7	Medium	7	High	7
Full	9	-		High	9	Full	9

결과적으로 Table 7과 같이 업무별 자동화 수준이 낮을수록, 확장성이 높을수록, 업무 빈번도가 높을수록, 자동화에 따른 업무 결과의 신뢰도가 증가할수록 해당 업무에 대해 기준별 우선순위가 높은 것으로 설정하였다.

< 3단계 : 전문가 평가 >

임무운영 업무별 Automation Level, Scalability, Frequency, Reliability에 대하여 항우연 내에서 실제로 업무를 수행하는 전문가에 의한 평가를 통해 평가의 신뢰도를 확보한다.

< 4단계 : 자동화 우선순위 도출 >

자동화 우선순위는 업무별 OEC(Overall Evaluation Criteria) 산출을 통해 도출할 수 있다. OEC 산출은 다속성 의사결정 방법 중 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 방법을 활용하며, 이를 기반으로 자동화 우선순위를 도출한다. TOPSIS 방법은 기준별 중요도에 근거하여 선호도를 결정하는 절충적인 방법으로, Fig 5와 같이 최적의 방안은 이상적인 방안에 가장 가깝고 비이상적인 방안에 가장 먼 방안으로 N-차원의 유클리디언(Euclidean) 거리를 계산하여 최적의 방안을 도출하는 방법이다.

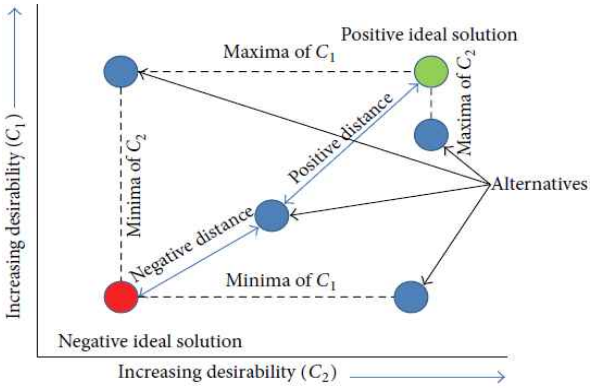

Fig. 5 Concept of TOPSIS[27]

< 5단계 : 평가 결과 활용 >

자동화 관점에서 평가 결과를 분석하여 업무별 특징 및 이에 따른 잠재적인 도전점과 해결책을 파악하고, 자동화 우선순위가 높은 대상 업무들의 식별을 통해 자동화 추진전략을 수립한다.

4.3 평가 결과

우선 항우연의 임무운영 관련 업무를 두 개 수준의 계층적 구조로 파악 및 식별하였다. 자동화 관점에서 항우연의 임무운영 업무는 Table 8과 같이 6개의 상위 업무와 18개의 세부업무로 식별되었다.

Planning and scheduling 업무는 위성-지상국 간 교신 일정을 분석하는 Contact Scheduling 업무, 위성 교신, 데이터 송수신, 영상 촬영 계획 등을 포함하는 위성 임무계획을 작성하는 Mission Planning 업무, 임무계획을 기반으로 위성에 송신할 명령을 작성하는 Command Planning 업무, 위성 궤도 및 사용자 요구사항을 기반으로 영상 촬영 계획을 작성하는 Image Collection Planning 업무로 구분된다. LEOP and Commissioning 업무는 위성 발사 이후 초기운영 단계에서 수행하는 업무인 LEOP 업무만 포함한다.

Table 8 Tasks of Automation Priority Evaluation

Tasks of Interest for Automation	
Planning and Scheduling	Contact Scheduling
	Mission Planning
	Command Planning
	Image Collection Planning
LEOP and Commissioning	LEOP
Nominal Operations and Anomaly Handling	Routine Operation
	Anomaly Handling
Software and Configuration	Distributor
	Satellite Operation System
	Direct Ingestion System
	Software Update and Management
Orbit Maintenance and Collision Avoidance	Orbit Determination
	Orbit Maintenance
	Collision Avoidance Maneuver
	Conjunction Assessment
Calibration and Validation	Non-Uniformity Correction
	Focus Calibration
	MTF Validation

Nominal Operations and Anomaly Handling 업무는 관제, 수신, 활용 등 평시 운영단계에서 수행하는 업무인 Routine Operation 업무와 관제, 이상 판단, 고장 수리 등 위성 이상 발생 시 수행하는 업무인 Anomaly Handling 업무로 구분된다.

Software and Configuration 업무는 위성 서브시스템 별 관제데이터를 배포하는 Distributor 업무, 명령 송신 및 상태정보를 수신하는 Satellite Operation System 업무, 위성 원본 영상을 수신하는 Direct Ingestion System 업무, 관제시스템(SW) 업데이트를 관리하는 Software Update and Management 업무로 구분된다.

Orbit Maintenance and Collision Avoidance 업무는 수신받은 위성 상태정보를 활용하여 위성 궤도를 결정하고 향후 궤도를 예측하는 Orbit Determination

Automation Priority Evaluation Framework

No	Mission Task Element	Evaluation of Current Automation Level	Scalability	Frequency	Reliability	OEC	Ranking
10	Direct Ingestion System (Software and Configuration)	0.21394	0.43580	0.33705	0.25855	0.7763	1
13	Orbit Maintenance (Orbit Maint. Coll. Avoidance)	0.14976	0.31129	0.26215	0.25855	0.7038	2
14	Collision Avoidance Maneuver (Orbit Maint. Coll. Avoidance)	0.08558	0.31129	0.18725	0.25855	0.6704	3
4	Image Collection Planning (Planning and Scheduling)	0.20325	0.31129	0.29960	0.22162	0.6621	4
16	Non-Uniformity Correction (CalVal)	0.19255	0.31129	0.26215	0.18468	0.6238	5
18	MTF validation (CalVal)	0.19255	0.31129	0.18725	0.18468	0.5664	6
9	Satellite Operation System (Software and Configuration)	0.10697	0.18677	0.26215	0.18468	0.5580	7
6	Routine Operation (Nominal Operation, Anomaly Handling)	0.24604	0.18677	0.33705	0.25855	0.5415	8
8	Distributor (Software and Configuration)	0.10697	0.18677	0.18725	0.25855	0.5362	9
15	Conjunction Assessment (Orbit Maint. Coll. Avoidance)	0.24604	0.18677	0.18725	0.33242	0.4587	10
12	Orbit Determination & Prediction (Orbit Maint. Coll. Avoidance)	0.38510	0.18677	0.33705	0.25855	0.4563	11
17	Focus Calibration (CalVal)	0.14976	0.18677	0.11235	0.18468	0.4264	12
7	Anomaly Handling (Nominal Operation, Anomaly Handling)	0.21394	0.18677	0.18725	0.18468	0.4253	13
11	Software Update and Management (Software and Configuration)	0.21394	0.18677	0.18725	0.18468	0.4253	13
5	LEOP (LEOP and Commissioning)	0.12837	0.18677	0.03745	0.18468	0.4052	15
2	Mission Planning (Planning and Scheduling)	0.38510	0.06226	0.26215	0.25855	0.3255	16
3	Command Planning (Planning and Scheduling)	0.38510	0.06226	0.26215	0.25855	0.3255	16
1	Contact Scheduling (Planning and Scheduling)	0.29952	0.06226	0.03745	0.25855	0.1759	18
	Best	0.08558	0.43580	0.33705	0.33242		
	Worst	0.38510	0.06226	0.03745	0.18468		
	Average	0.21691	0.21444	0.21846	0.23188		

Fig. 6 Result of Automation Priority Evaluation Framework

업무, 궤도 섭동에 의한 위성 궤도 변경 분석 및 목표 궤도를 유지하는 Orbit Maintenance 업무, 위성과 우주파편 간 충돌이 예상될 경우 충돌 회피 기동을 계획하는 Collision Avoidance Maneuver 업무, 위성과 우주파편 간 충돌 확률, 접근 거리 및 시간 등을 분석하는 Conjunction Assessment 업무로 구분된다.

끝으로 Calibration and Validation 업무는 복사보정(CCD 센서의 픽셀별 출력 특성을 평준화)을 수행하는 Non-Uniformity Correction 업무, 별을 촬영하여 위성 광학계의 Focus를 조정하는 Focus Calibration 업무, 위성 영상의 흑/백 경계를 선명하게 구분할 수 있게 보정하는 MTF Validation 업무로 구분된다.

기준별 평가체계는 앞서 언급한 바와 같이 프레임워크 개발 시 제시된 정량적 평가체계를 우선 적용하였으며, 각 세부업무에 대해 항우연의 실제 업무를 수행하는 전문가에 의한 평가를 수행하였다. Figure 6은 다속성 의사결정 방법인 TOPSIS를 활용하여 세부업무별 OEC를 산출하고 OEC에 근거하여 업무별 자동화 우선순위를 순서에 따라 정리한 결과이다.

자동화 수준을 평가하는 Automation 기준은 하위 4가지 항목에 대해 업무별로 총합을 구한 후 전체 업무의 각 평가치를 제곱하여 더한 총합의 제곱근을 분모로 하여 규준화(Nomalization)를 수행하였다. Scalability, Frequency, Reliability 기준의 경우 동일하게 전체 업무의 각 평가치를 제곱하여 더한 총합의 제곱근을 분모로 하여 규준화를 수행하였다. 규준화된 값으로부터 Automation 기준의 경우는 각 업무에 대한 평가값 중 가장 낮은 값을, Scalability, Frequency, Reliability 기준들의 경우는 가장 높은 평가값을 채택하여 가장 이상적인 대안(Best)을 산출하였다. 가장 비이상적인 대안(Worst)은 기준별, 각 업무에 대한 평가값 중 이상적인 대안 산출과 반대의 값을 활용하여 산출하였다. 업무별 평가치에 대한 이상적인 대안과 비이상적인 대안으로부터의 유클리디언 거리를 계산하여 OEC를 산출하였고, 최종적인 각 업무별 자동화 우선순위는 우선순위가 높은 순에서 낮은 순으로 정렬하였다. 각 업무별 평가치와 더불어 각 평가치가 항목별 평균보다 좋은 경우에는 붉은색 화살표로 아닌 경우에는 파란색 화살표로 각각 구분하여 표시하였다. 예를 들면 Automation 기준은 평가값이 낮은 경우 이상적인 대안이므로 평균보다 낮은 평가값을 아래쪽 방향의 붉은색 화살표로 표시하였다.

4.4 분 석

Figure. 6에 나타난 프레임워크를 활용한 평가 결과에서 붉은색 화살표는 기준별로 업무별 평가치의 평균으로부터 자동화 우선순위가 높은 방향으로 평가 결과가 산출되었다는 것을 의미하고, 파란색 화살표는 자동화 우선순위가 낮은 방향이라는 것을 의미한다.

자동화 우선순위가 가장 높은 업무는 Software and

Configuration의 Direct Ingestion System 업무로서 모든 기준에서 자동화가 우선순위가 높은 방향으로 평가되었으며 특히 Scalability와 Frequency 기준에서 자동화가 매우 필요한 업무로 파악되었다. Orbit Maintenance 업무도 2번째 자동화 우선순위가 높은 업무로서 다른 기준 대비 상대적으로 현재 자동화 수준이 낮은 업무로 파악되었다. 물론 Orbit Maintenance 업무는 3번째로 자동화 우선순위가 높은 업무인 Collision Avoidance Maneuver 보다는 현재 자동화 수준이 높으나 Collision Avoidance Maneuver 업무는 Frequency 기준에서 업무 빈번도가 낮은 것으로 평가되어 자동화 우선순위에서 Orbit Maintenance 업무보다 낮게 평가되었다. 자동화 우선순위 4번째 업무인 Image Collection Planning의 경우는 다른 모든 기준은 자동화 우선순위가 높은 방향으로 평가되었으나 자동화를 구축할 경우 신뢰도가 다른 기준 대비 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다. Conjunction Assessment 업무의 경우는 자동화 우선순위가 10번째로 평가되었는데, 현재 자동화 수준도 높고 확장성도 낮을 뿐 아니라 업무 빈번도도 낮아 낮은 순위로 평가되었다. 하지만 자동화를 구축할 경우 신뢰도는 높은 것으로 평가되었다. 자동화 우선순위가 10번째 이하인 업무 중 Focus Calibration, Anomaly Handling, Software Update and Management, LEOP 업무들은 확장성도 낮고, 업무 빈번도도 낮으며, 자동화 구축 시 신뢰도도 낮아 우선순위가 낮으나 현재 업무의 자동화 수준은 평균적으로 다른 업무 대비 낮은 것으로 평가되었다.

자동화 우선순위의 마지막 3가지 업무는 Planning and Scheduling의 Mission Planning, Command Planning, Contact Scheduling 업무들로서 이미 자동화 수준이 높아 우선순위가 낮게 평가되었으나, 개선된 자동화를 구축할 경우 신뢰도가 높은 것으로 평가되어 최적화를 고려하여 현재 자동화 수준을 개선한다면 바람직할 것으로 판단된다.

본 논문에서 분석한 자동화 우선순위 평가 결과는 현재 위성을 운영하고 있는 전문가에 의해 검토되고 평가된 것으로, 군집위성 운영에 대한 실제 경험이 부재한 상태에서 수행되어 다수의 군집위성 운영을 가정 시 예측과 다소 상이한 결과를 보이는 부분이 있다. 예를 들면 우선순위가 낮게 평가된 Focus Calibration, Anomaly Handling, Software Update and Management, LEOP 관련 업무는 운영위성의 규모가 증가함에 따라 업무빈번도가 대폭 증가할 것으로 예상되는 업무로 향후 군집위성 운영에 대한 경험이 축적된 이후 자동화 우선순위를 재평가하면 우선순위가 높게 평가될 가능성이 있다.

자동화 우선순위 업무 도출 결과는 우선적으로 전체적인 자동화 구축비용과 필수 운영 인원수를 예측하는데 활용될 수 있으며 향후 임무운영시스템의 자동화 추진전략의 기초자료로 활용할 수 있다. 자동화 우선순위 평가를 통해 제시된 업무들에 대해 가용한 예산을 검토하여 우선순위상 자동화를 적용할 업무의 범위를 결정하고, 이를 바탕으로 업무를 자동화하였을 경우 자동화 정도에 따라 감축할 수 있는 운영 인원수를 예측할 수 있을 것이다.

5. 결 론

군집위성을 효율적으로 운영하기 위해서는 자동화와 최적화는 필수적인 요소로 작용한다. 국외의 자동화 및 최적화 연구들을 분석해 보면 임무운영시스템 중 임무계획 서브시스템은 상대적으로 최적화에 중요도를 나타내고 있으며, 비행역학 서브시스템, 위성운영서브시스템은 자동화에 중요도를 나타내고 있다. 국내의 경우 군집위성 운영경험이 부족하기 때문에 현재 자동화 수준과 향후 자동화 개발 소요를 고려한 적정 운영 인원 수에 대한 정량적 근거 도출이 필요하며, 전체 위성군에 대한 Health/Anomaly Monitoring 및 대응 절차의 자동화를 통해 위성군 전체에 대한 신속한 대처를 수행할 필요가 있다.

본 논문에서는 국내 군집위성 임무운영시스템의 발전을 위해 현재 임무운영시스템의 자동화 수준을 평가하고 자동화 대상 업무의 우선순위를 도출하여 우선순위에 대한 자동화 구축비용과 필수 운영 인원수를 예측하는 3단계의 단기적 추진방향을 제시하였다. 또한, 자동화 수준 및 우선순위 평가를 위한 프레임워크를 제안하였으며, 분석결과 Direct Ingestion System 관련 업무가 자동화 우선순위가 가장 높은 것으로 확인되었다. Orbit Maintenance, Collision Avoidance

Maneuver 관련 업무의 자동화 우선순위가 다음으로 높은 것으로 확인되었으며, 이들 업무는 현재의 자동화 수준이 낮고 향후 자동화를 적용 시 확장성이 높다는 공통점이 있었다. 자동화 우선순위 분석결과는 실무운영 전문가에 의해 검토되고 평가되었으나, 군집위성 운영에 대한 실제 경험이 부재한 상태에서 수행되었으므로, 향후 군집위성 운영경험이 축적됨에 따라 자동화 수준 및 우선순위를 재평가할 필요가 있다. 예를 들면 현재 우선순위가 낮게 평가된 Focus Calibration, Anomaly Handling, Software Update and Management, LEOP 관련 업무는 군집위성의 규모가 상당 수준으로 증가할 경우 업무빈번도가 대폭 증가하여 우선순위가 높게 평가될 가능성이 있다.

현재 항우연은 다중위성 통합운영을 위해 제주에 국가위성통합운영센터를 구축하고 있다. 본 논문에서 제안한 자동화 수준 및 우선순위 평가 프레임워크에 군집위성 운영개념을 적용하여 자동화가 시급한 업무를 식별하여 개선한다면 보다 효율적인 다중위성 운영을 위한 국가위성통합운영센터를 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 다수의 위성운영에 따라 동시·중복 관제 관련 문제가 발생할 수 있으며 현재 가용한 운영시스템의 성능을 벗어날 수도 있다. 이를 해결하기 위해 증가하는 위성 수에 따른 적절한 안테나 개수를 분석하여 추가 설치도 고려하여야 하며, 이와 더불어 다수의 위성을 효율적으로 운영하기 위한 임무계획 방법에 대한 최적화도 이루어져야 한다. 임무의 우선순위에 따른 안테나 할당 방안, 긴급임무 발생 시 임무계획 수정 등에 대한 자동화 및 최적화가 필요하다. 위성 수 증가에 따라 발생하는 주파수 할당 관련 문제도 고민하여야 한다. 한정된 자원인 주파수를 모든 위성에 다르게 적용하는 것은 사실상 불가하므로 군집위성 간 주파수 공유, 위성 배치에 따른 주파수 공유 등의 효율적인 주파수 자원 할당 및 공유 방안을 모색하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 위성정보공공활용사업(다중위성 임무운영시스템 운영 최적화 연구, 2021040F21D-00)의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] D. Chung, “Prospect and Direction of Korean Ground System Development,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences,* Vol. 44, No. 8, pp.718-727, 2016.

[2] J. Yun, H. Kim, H. Seol, K. Kwon, M. Lee, J. Lee, “The Future Directions and Strategy of the Domestic Mission Operation System for Satellite Constellation,” *2021 KSAS Fall Conference,* 2021.

[3] J. Lee, H. Kim, H. Chung, K. Ko, “Genetic Algorithm-based Scheduling for ground support of mulitple Satellites and Antennae Considering Operation Modes,” *International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 17(1),* 2016.

[4] Spangelo S, Cutler J, Gilson K, Cohn A, “Optimization-based scheduing for the single-satellite, multi-ground station communication problem,” *Comput Oper Res 57*, pp.1-16, 2015.

[5] Rao J, Soma P, Padmashree G, “Multi-satellite scheduling system for LEO satellite operations,” *In: proceedings of SpaceOps, Tokyo,* 1998.

[6] Soma P, Venkateswarlu S, Santhalakshmi S, Bagchi T, Kumar S, “Mulit-satellite scheduling using genetic algorithms,” *In: Proceedings of ISTRAC/ISRO, SpaceOps,* 2004.

[7] J. Lee, H. Kim, H. Chung, K. Ko, “Genetic algorithm-based scheduling for ground support of mulitple satellites and antennae considering operation modes,” *Int J Aeronaut Space Sci 17,* pp.89-100, 2010.

[8] Ben-Larbi, Mohamed Khalil, et al, “Towards the automated operations of large distributed satellite systems. Part 1: Review and paradigm shifts,“ *Advances in Space Research 67.11,* pp.3598-3619, 2021.

[9] Ben-Larbi, Mohamed Khalil, et al, “Towards the automated operations of large distributed satellite systems. Part 2: Classifications and tools,“ *Advances in Space Research 67.11,* pp.3620-3637, 2021.

[10] Gauthier Picard, “Auction-based and Distributed Optimization Approached for Scheduling Observations in Satellite Constellations with Exclusive Orbit Portions,” *International Workshop on Planning and Scheduling for Space(OWPSS 2021),* 2021.

[11] S. Han, S. Baek, D. Jo, H. Kim, “Optimization of the Satellite Mission Scheduling Using Genetic Algorithms,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Science, 36(12),* pp.1163-1170, 2008.

[12] M. Lee, S. Yoo, T. Kim, H. Kim, K. Kwon, M. Lee, J. Lee, “Misxed-Integer Linear Progamming Model for Scheduling the Missions and Communications of Multi-Satellites,” *2021 KSAS Fall Conference,* 2021.

[13] Robert Schwarz, et al, “A Probabilisic Model for the Determination of the Effects of Automation of Satellite Operations on Life Cycle Costs,” *Space mission operations and Ground Data System – SpaceOps ‘96,* pp.954-962, 1996.

[14] Volker Schaus, et al, “Automated Constellation Management with Self Regulating Data-Economic Actors,” *70th International Astronautical Congress,* 2019.

[15] Dishan, Q., Chuan, H., Jin, L., & Manhao, M., “A dynamic scheduling method of earth-observing satellites by employing rolling horizon strategy,” *The Scientific World Journal,* 2013.

[16] Fuchs, C., & Moll, F., “Ground Station Network Optimization for Space-to-Ground Optical Communication Links,” *Journal of Optical Communications and Networking 7(12),* pp.1148-1159, 2015.

[17] Gilles, Kbidy. “Flying Large Constellations Using Automation and Big Data,” *14th International Conference on Space Operations,* 2016.

[18] Hajjaji, Yosra, and Imed Riadh Farah, “Performance investigation of selected NoSQL databases for massive remote sensing image data storage,” *2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP),* 2018.

[19] Arkali, G., Dawande, M., & Sriskandarajah, C., “Scheduling support times for satellites with overlapping visibilities,” *Production and Operations Management 17(2),* pp.224-234, 2008.

[20] S. Baek, K. Cho, D. Lee, H. Kim, “A Comparison of Scheduling Optimization Algorithm for the Efficient Satellite Mission Scheduling Operation,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 38(1),* pp.48-57, 2010.

[21] S. Han, S. Baek, D. Jo, H. Kim, “Optimization of the Satellite Mission Scheduling Using Genetic Algorithms,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Science 36(12),* pp.1163-1170, 2008.

[22] Ben-Larbi, Mohamed Khalil, et al, "Towards the automated operations of large distributed satellite systems. Part 1: Review and paradigm shifts," *Advances in Space Research 67.11,* pp.3598-3619, 2021.

[23] Edoardo Benzi, Tiziana Casinelli, “Eutelsat Automatic Spacecraft Operations: *System Evolution and Consolidation,” SpaceOps 2010 Conference,* 2010.

[24] S. Baek, S. Han, K. Cho, D. Lee, J. Yang, P. Bainum, H. Kim, “Development of a scheduling algorithm and GUI for autonomous satellite missions,” *Acta Astronautica 68(7),* pp.1396-1402, 2011.

[25] NASA, “NASA Work Breakdown Structure(WBS) Handbook”, *NASA,* 2018.

[26] ESA-ESTEC, 2003, “Space Project Management”, ECSS-M-10B

[27] A. Chauhan, R. Vaish, “Fluid Selection of Organic Rankine Cycle using Decicsion Making Approach,” *Hindawi Research Article,* 2013.