

## 저궤도 위성의 자율성 수준 향상을 위한 개념 제안

전문진\*, 김응현\*\*, 임성빈\*\*\*

# A Concept for improving the Level of Autonomy of an LEO Satellite

Moon-Jin Jeon\*, Eunghyun Kim\*\*, Seong-Bin Lim\*\*\*

### Abstract

The ground station which operates the LEO satellite performs monitoring state of health of the satellite, sending the commands for the imaging mission or receiving the images during about 10 minutes of contact time. To finish the planned procedure in limited contact time, specific level of autonomy is applied in the satellite and the ground system. For example, the attitude and orbit control logic has high level of autonomy because it must be operated alone for long period without operator intervention. On the other hand, the fault management logic has relatively low level of autonomy because of that failure detection and safing operation are performed on-board, whereas failure identification and recovery are on-ground operation. The level of autonomy of the satellite affects also the ground operation. The command set for mission operation is generated by ground system. If the satellite has higher level of autonomy, some of operation currently done on-ground can be performed on-board, so the ground operation can be simplified. In this paper, we discuss the level of autonomy and propose a concept for improving the level of autonomy of an LEO satellite.

### 초 록

저궤도 위성을 운영하는 지상국에서는 10분 내외의 교신 시간 동안 위성의 건강 상태를 확인한 후 영상 촬영을 위한 임무 명령을 전송하거나 촬영한 영상을 수신한다. 제한된 교신 시간 동안 매일의 임무를 위한 일련의 절차를 완료하기 위해 위성 및 지상국 시스템에는 적절한 수준의 자율성이 적용되어 있다. 예를 들어 위성의 자세 및 궤도를 유지하기 위한 제어 로직은 운영자의 개입 없이도 오랜 시간동안 자동으로 수행되어야 하므로 높은 자율성을 갖는 부분이다. 이와는 대조적으로 위성의 고장 관리 로직의 경우 고장 상황 인지 및 안전 조치는 위성에서 자동으로 수행되지만 대체적으로 고장의 원인 판단 및 복구 절차는 지상에서 수행하도록 설계하므로 상대적으로 낮은 자율성을 갖는 부분이라 할 수 있다. 위성의 자율성 수준은 지상국 운영에도 영향을 준다. 지상국에서는 촬영 임무를 위한 일련의 명령 세트 등을 생성한다. 위성이 좀더 높은 수준의 자율성을 갖는다면, 지상국에서 수행하는 동작의 일부를 위성에서 수행할 수 있을 것이며 지상국의 절차를 간소화할 수 있을 것이다. 이 논문에서는 위성의 자율성 수준에 대해 논의하고 적절한 자율성 수준을 위한 설계 개념을 제안한다.

키워드 : 인공위성 (satellite), 자율성(autonomy), 안전(safety), 자율성수준 (level of autonomy)

접수일(2014년 5월 2일), 수정일(1차 : 6월 18일), 게재 확정일(2014년 7월 1일)

\* 다목적실용위성3A호체계팀/mjjeon@kari.re.kr

\*\* 다목적실용위성3A호체계팀/ekim@kari.re.kr

\*\*\* 다목적실용위성3A호체계팀/sblim@kari.re.kr

## 1. 서 론

연구의 대상이 되는 지구 저궤도 위성은 태양 동기 궤도를 따라 지구 주위를 주기적으로 회전하며 지상을 촬영하는 임무를 수행하는 위성이다. 위성에 임무 계획을 전송하거나, 촬영한 영상을 수신하는 운영은 위성이 지상국 상공을 비행하는 패스에서 지상국과의 교신을 통해 이루어진다. 제한된 교신 시간 동안 제한된 운영 인원이 위성의 건강 상태를 모니터링하고, 임무 계획을 전송하거나 촬영된 영상을 수신하는 등의 임무 운영을 완수하기 위해 위성 시스템과 지상 시스템에는 적절한 수준의 자율성이 구현되어 있다. 위성의 자율성은 지상의 지속적인 개입 없이도 요구되는 동작을 수행할 수 있는 능력을 말한다. 예를 들어 저궤도 위성의 경우, 위성을 실시간으로 감시할 수 없는 구간이 존재하므로, 위성에는 고장 관리 로직에 의해 오동작 발생 시 자동으로 적절한 조치를 취하는 로직이 구현되어 있다 [1,2]. 또한 지상에서 전송한 한 개의 촬영 임무 명령은 탑재 소프트웨어에 의해 적절한 명령 세트로 변경되어 임무를 수행할 수 있기 때문에 명령 전송 시 필요한 시간이 최소화 된다. 자세 제어 로직은 지상의 개입이 전혀 없이도 위성의 위치 및 자세를 정확히 판단하고 유지하도록 최대한의 자율성이 적용되어 있다.

임무의 복잡성이 증가함에 따라 위성의 성능이 향상되면, 위성의 자율성 수준도 임무 수준에 맞게 조정될 수 있다. 또한 운영하는 위성의 수가 증가함에 따라 제한된 지상국 자원을 이용해 효율적으로 다수의 위성을 운영하기 위해 위성의 자율성 수준이 조정될 수 있다. 위성의 자율성 수준이 높아질수록 위성이 스스로 판단해 처리하는 운영의 범위가 넓어진다. 그에 따라 지상에서 교신 시에 수행할 업무가 줄어들게 되므로 지상에서는 위성 운영을 좀 더 효율적으로 수행할 수 있게 된다. 이 논문에서는 저궤도 위성에 적용된 자율성 수준을 설명하고, 고장 관리와 임무 운영 측면에서 적절한 자율성 수준을 제안한다. 2장에서는 인공위성의 자율성 수준에 대해 설명하고,

3장에서는 적절한 자율성 수준을 제안한다. 4장에서 결론 및 추후 과제에 대해 고찰한다.

## 2. 인공위성의 자율성 수준

시스템에 자율성(autonomy)이 있다는 것은 외부의 개입 없이 스스로 특정 목적을 위해 동작할 수 있다는 것이다. 시스템에 지능(Intelligence)이 있다는 것은 시스템 자신과 주변 상황의 정보를 이용해 판단하고 미리 계획되지 않은 동작을 계획해서 수행할 수 있다는 것이다. 자율성과 지능은 별개의 특성으로 볼 수도 있지만, 일반적으로 자율성 수준이 높은 인공위성 시스템은 지능 시스템의 특성도 가진다고 할 수 있다. 인공위성 시스템의 자율성 수준은 다양한 단계로 정의되어 왔다. AFRL(Air Force Research Laboratory)의 위성 자율성 프로그램에서는 인공위성의 자율성을 지상국 자동화와 탑재 자동화의 결합으로 정의하였으며, 이는 모든 위성 시스템은 지상에 의한 수동 조작, 지상에 의한 자동화, 탑재 시스템에 의한 자율성 중에 최소한 하나 이상의 기능을 갖기 때문이다[3]. NASA에서는 항공우주 시스템의 자율성 수준에 관한 연구 결과로 6단계의 지능적 사고 단계를 정의했다[4,5]. 가장 낮은 1단계인 수동(manual) 조작 단계는 모든 판단과 운영을 지상의 운영자가 수행한다. 2단계인 자동 통지(automatic notification) 단계는 텔레메트리의 한계치 초과 경보 등이 자동으로 제공되지만 관련된 조작은 지상의 운영자가 수행한다. 3단계인 지상 운영자에 의한 지능적 사고(intelligent reasoning on ground with human control) 단계는 한계치 초과 경보 및 적절한 대응을 위한 정보가 제공되며 이에 따른 조치는 지상에서 수행된다. 4단계인 지상 시스템의 자율적인 지능적 사고(intelligent reasoning on ground with autonomous control) 단계는 지상국 시스템에 자율성이 구축되어 있어 임무 수행을 위한 명령 절차가 자동으로 수행되어 위성으로 전송되는 단계이다. 5단계인 위성에 의한 지능적 사고(intelligent reasoning onboard) 단계는 임무 목

표가 위성에 전달되었을 때 임무 수행을 위한 명령 절차가 위성에서 생성되어 수행되는 단계이다. 마지막으로 자율적으로 사고하는 인공위성 (autonomous thinking spacecraft) 단계는 위성이 자율적으로 임무 목표를 설정하고, 이를 달성하기 위한 모든 동작을 계획하고 수행하는 단계이다.

인공위성의 자율성 수준이 높다고 항상 바람직한 것은 아니다. 자율성 수준을 결정하는데 가장 큰 영향을 미치는 것은 비용 문제이다. 자율성이 높을수록 운영에 소요되는 비용은 줄어들 수 있지만, 개발 과정에 소요되는 비용이 훨씬 더 클 수 있기 때문이다[6]. 자율성이 높은 위성은 동작을 예측하기 어려울 수 있으며, 이는 비상 상황 발생 시의 운영자의 대처 방법을 더 복잡하게 만들 수 있다. AFRL의 연구에서는 인공위성의 자율성을 높이는 것을 어렵게 하는 9가지 장애물에 대해 설명하고, 각각의 장애물을 극복할 수 있는 방법에 대해 설명했다[3].

자율성을 높이는데 극복해야 할 다양한 어려움에도 불구하고, 높은 자율성 수준을 갖는 위성 시스템은 지속적으로 연구되어 왔다. ESA의 PROBA(Project for On-Board Autonomy) 위성은 탑재 자율성을 보이기 위한 초소형 위성으로 고장 복구 기능, 임무 계획 기능, 다양한 사용자에게 자동으로 데이터를 전송하는 기능 등의 높은 수준의 자율성이 가능함을 보였다[7]. NASA에서는 Earth Observing 1(EO-1) 위성을 이용해 자동화된 위성 운영이 가능함을 보였다[8]. 지상에서는 위성의 임무 수행을 위해 세부적인 명령을 전송하는 대신 높은 수준의 목표를 전달하면 EO-1 위성에 탑재된 Autonomous Sciencecraft Experiment(ASE) 소프트웨어에서는 촬영한 영상을 분석해 목표를 달성했는지, 임무 계획을 수정할지 등의 의사 결정을 수행한다[9]. Deep Space One(DS-1)에 적용된 에이전트 기술인 Remote Agent Experiment는 높은 수준의 임무 목록을 이용해 명령 계획을 생성하고 환경을 고려해 계획을 변경하거나 고장 발생 시 복구 동작까지 자체적으로 판단해 수행한다[10]. 지상에서는 탑재 소프트웨어의 지능적 사고의 결과를 추적한다.

에이전트 기술을 위성 시스템에 적용하면 위성의 현재 상태 및 주변 환경의 정보를 이용해 고장 탐지 및 복구 (FDIR, Failure Detection, Isolation and Recovery), 임무 운영, 지능적 임무 계획, 상황 판단 등을 수행할 수 있다[11]. 예를 들어, 위성에 기존에 발생한 적이 없는 이상 현상이 발생한 경우, 자체적으로 복구 방법을 도출해 낸다. 이외에도 다양한 수준의 자율성이 NEMO mission, BIRD mission, PEACH project 등을 통해 위성 시스템에 적용되었다.[11,12]

### 3. 저궤도 위성의 적절한 자율성 수준

#### 3.1 저궤도 위성에 적용된 자율성 수준

연구의 대상이 되는 저궤도 위성에 적용된 자율성은 그 기능 별로 각기 다른 수준으로 적용되어 왔다. 첫째, 대기 모드에서 태양 지향 자세를 유지하기 위한 자세 제어 로직은 완전히 자동화되어 있다. 별도의 외부 개입이 없이도 일정 기간 동안 자율 동작이 보장된다. 둘째, 궤도 유지에 지상에 의해 수행된다. 임무 수행에 요구되는 궤도를 벗어날 경우, 지상에서 궤도 조정 절차를 수행해 궤도를 유지시킨다. 셋째, 촬영 임무는 지상에서 계획해 위성에 전송한다. 지상 시스템은 일부 자동화 되어 있다. 운영자가 높은 수준의 촬영 임무를 입력하면 위성 기동 프로파일, X-band 안테나 프로파일, 명령 계획 등이 자동으로 생성된다. 준비된 명령은 교신 시에 운영자에 의해 위성에 전송된다. 넷째, 고장 탐지에 따른 안전 모드 진입 동작은 자동화되어 있다. 고장 탐지 로직은 각종 센서 출력 값 또는 탑재 소프트웨어에 의해 계산된 특정 텔레메트리 값이 제한 범위를 넘으면 위성을 안전 모드로 진입시킨다. 다섯째, 고장의 원인 판단 및 복구는 지상에서 수행한다. 시스템 레벨의 안전 모드 진입의 원인은 탑재 소프트웨어에 기록되어 있지만, 고장의 근본적인 원인은 탑재 소프트웨어에서 판단하지 않으며 지상에서 다양한 위성 텔레메트리를 종합적으로 분석해 판단한다. 판단 결과에 따라

적절한 복구 방안을 계획해 수행한다. 정리하자면, 고장 관리 및 임무 계획 관련 로직은 부분적으로 자동화가 되어 있지만 낮은 수준의 자율성을 갖는다고 할 수 있다.

### 3.2 고장 관리의 자율성 수준 제한

안전 조치를 제외한 위성의 모든 동작은 지상에서 계획되어 수행되므로 특정 시점의 위성의 상태를 정확히 예측할 수 있다. 이러한 점은 운영자에 의한 위성 상태 분석이 간단하고 명료하다는 장점이 있다. 반면, 위성의 동작을 지상에서 계획해야 하고, 고장 발생 시에 분석 및 복구에 필요한 시간이 많이 소요된다는 점은 부담스러운 부분이라 할 수 있다. 어떤 원인에 의해 위성이 안전모드에 진입하면 계획했던 임무가 모두 취소되고, 정상 모드에서 사용하던 장치의 전원이 모두 차단되고 위성이 재설정된다. 치명적인 고장에 의해 안전 모드에 진입하는 것은 고장의 전파를 방지하고 안전한 장치를 사용하도록 하므로 꼭 필요한 동작이다. 그러나 사소하거나 복구 가능한 오동작에 의해 안전 모드에 진입하는 것은 지상에서 수행하는 복구 절차에 소요되는 노력을 고려하면 최소화해야 한다. 예를 들어 다음과 같은 상황을 가정해 볼 수 있다. 위성이 안전모드에 진입하였으며, 모든 장치는 Redundant side로 재설정된 상황이다. 위성 개발자로 구성된 비상 운영 지원팀에 의한 분석 결과, 안전 모드 진입의 원인은 위성의 각속도가 갑자기 증가해 제한 범위를 초과했기 때문이며, 근본 원인은 탑재 소프트웨어의 특정 변수의 초기화가 누락된 것으로 파악된 상황이다. 현재 시스템으로는 오동작 발생 후 위성 및 지상국에서는 다음과 같은 과정을 겪게 된다. 오류가 있는 로직에 의해 위성의 오동작이 발생하고, 고장 관리 로직에 의해 위성이 안전 모드에 진입한다. 운영자는 위성이 안전모드에 진입한 후 정상적인 교신이 안 되기 때문에 비상 운영 절차를 수행한다. 비상 교신을 통해 위성의 안전 모드 진입을 확인한 후 긴급히 비상 운영 지원팀을 소집하고, 관련 분석이 수행된다. 분석 완료 후, 복구 절차를 수행하고, 근본 원인을 해결하는 방법을 적용한다. 만약 자율성 수준

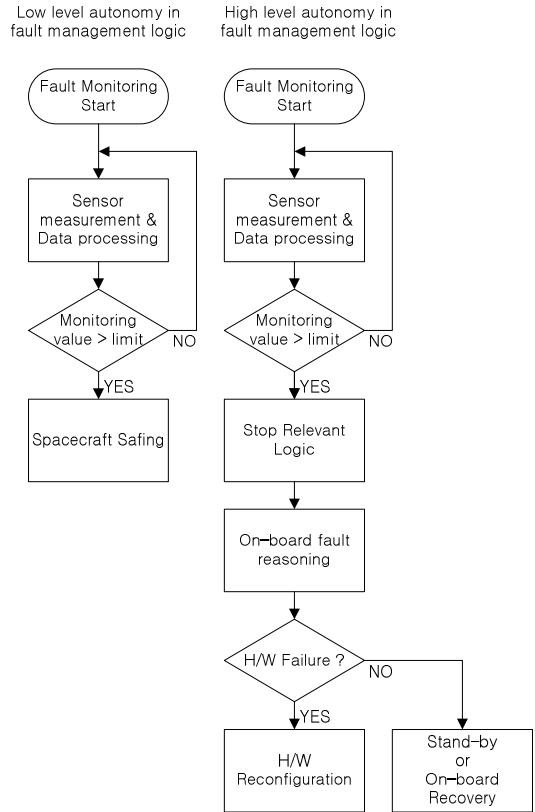


그림 1. 서로 다른 자율성 수준을 갖는 고장 관리 로직의 동작 비교

을 높여, 위성에서 고장을 판단하도록 할 경우, 다음과 같은 과정을 예상할 수 있다. 오류가 있는 로직에 의해 위성의 오동작이 발생한다. 고장 관리 로직에서는 위성의 각속도가 갑자기 증가한 것을 확인하고 자세 제어 로직을 중지시킨다. 중지된 로직에 영향을 받는 임무 계획도 모두 중단하고 탑재체 장치를 대기 모드로 변경시킨다. 긴급 조치 이후, 각 장치 및 시스템의 상태를 모니터링하고, 사용하고 있는 장치에 문제가 있는 것으로 판단되면 해당 장치의 전원을 차단하고 장치와의 통신링크, 관련 로직을 중단한다. 모든 조치가 완료되면 지상국 교신 시에 위성 상태 이벤트를 통해 운영자에게 고장 상황을 알린다. 운영자는 상황을 인지하고, 비상 운영 지원팀의 분석을 통해 근본 원인에 대한 조치를 취한다. 그림

### Inference System Operation Concept

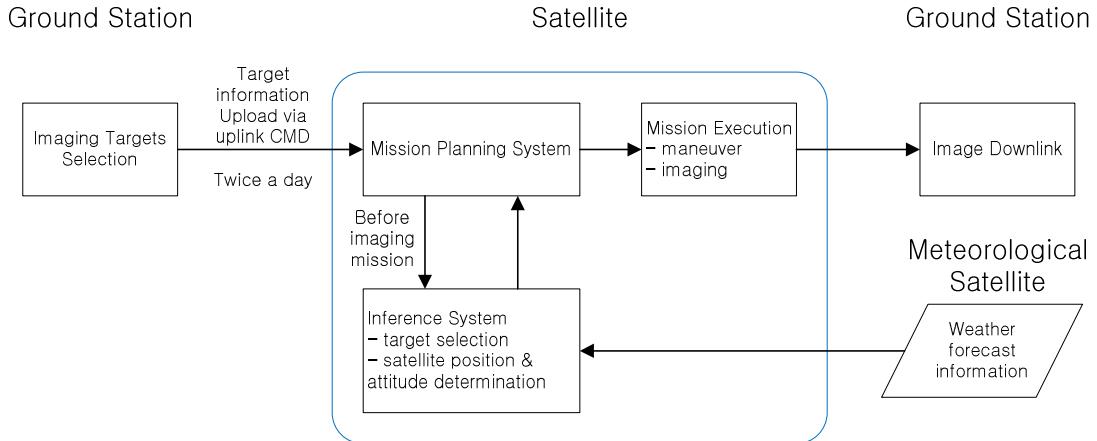


그림 2. 탑재 추론 시스템 운영 개념

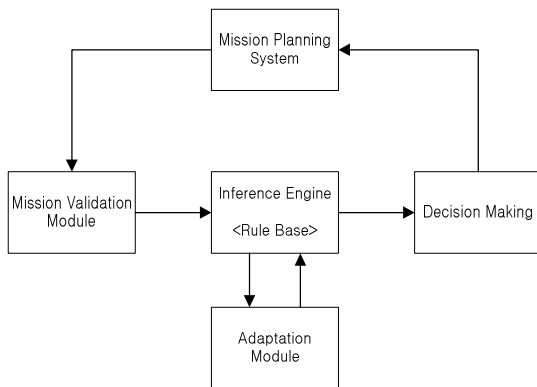


그림 3. 탑재 추론 시스템 동작

1은 자율성 수준에 따른 고장 관리 로직의 동작 흐름을 나타낸다. 현재 시스템에 비해 자율성이 높은 시스템의 중요한 차이점은 위성의 고장 관리 로직이 고장을 일차적으로 판단해 긴급 조치를 취한다는 점이다. 이러한 조치로 안전 모드 진입을 억제하는 효과를 얻을 수 있으며, 결과적으로 정상 운영으로 복구하는데 소요되는 시간을 절약하게 된다. 그러나 즉각적으로 안전 모드로 진입해야 하는 상황에서 고장관리 로직의 판단 오류로 인해 위성의 재설정이 늦어지는 경우에 대한 고장 전파 등의 영향성도 있을 수 있다는

점을 감안해 고장 관리 로직의 자율성 수준을 설계해야 한다.

### 3.3 임무 운영의 자율성 수준 제안

현재 연구의 대상이 되는 저궤도 위성의 경우 모든 임무 계획을 지상에서 수행한다. 지상의 임무 계획 시스템은 일정 수준 자동화되어 있다. 운영자는 촬영 계획 시스템을 이용해 촬영할 목표 지점에 대한 촬영 계획을 수립한다. 촬영 계획 시스템은 날씨 정보, 위성의 배터리 상태, 메모리 상태 등의 제한 조건 및 궤도 전파, 자세 기동 특성 등을 이용해 목표 지점에 대한 최적화된 임무를 도출해 낸다. 촬영 계획이 수립되면 임무 계획 시스템에서는 수립된 촬영 계획을 명령 절차로 변환한다. 생성된 명령 절차에는 촬영과 관련된 명령, 자세 기동 프로파일, 영상 수신을 위한 X-band 안테나 프로파일 등이 포함된다. 제안하는 높은 자율성을 갖는 위성 시스템은 현재 구축된 지상의 임무 계획 시스템을 활용할 수 있으며, 별도로 높은 수준의 임무, 즉 촬영할 목표 정보만 위성에 전송할 수도 있다. 탑재 소프트웨어에 포함된 탑재 추론 시스템은 상황을 인지하고 판단한 후 위성의 동작을 결정하는 기능을 수행한다. 지상에서 임무 계획을 수행했던 시

점의 상황과 현재의 상황이 달라졌을 경우, 현재의 상황을 이용해 자체적으로 임무 계획을 변경하고자 하는 것이다. 예를 들어 다음과 같은 상황을 가정해 볼 수 있다. 우리나라의 몇몇 도시의 영상을 확보하고자 하며, 구름 없는 깨끗한 영상만 필요한 상황이다. 현재 지상의 촬영 계획 시스템에서는 촬영 목표 지역 중에 우선순위가 높은 지역을 선택해 계획을 수립하고, 임무 계획 시스템에서는 명령 절차를 생성해 위성에 전송한다. 촬영 계획 시점과 임무 수행 시점의 시간 차이가 있어서 맑았던 날씨가 흐려졌으나 임무는 계획대로 수행되었고, 수신한 영상을 확인한 결과, 구름 때문에 영상을 활용하기 어려운 것으로 결정될 수 있다. 자율성이 높은 위성은 촬영 임무를 수행하기 전에 탑재 추론 시스템에서 예정된 촬영 임무의 수행 여부를 최종 결정한다. 기상 위성 등 언제나 접속할 수 있는 위성으로부터 직접 수신한 업데이트 된 날씨 정보를 이용해 촬영 지역에 구름이 많은 것으로 판단되면 임무를 변경할 수 있다. 해당 지역을 다른 위치에서 촬영하도록 변경하거나, 우선순위가 낮은 다른 지역을 촬영하는 것으로 변경할 수 있다.

그림 2, 3은 탑재 추론 시스템의 동작 개념을 나타낸다. 1) 지상국에서는 위성과의 교신 시간을 이용해 촬영 지역 정보를 위성에 전송한다. 이 때 전송되는 촬영 지역 정보는 일차적으로 지상국 시스템에서 임무 적합성이 검증된 지역이다. 2) 위성의 탑재 임무 계획 시스템은 지상에서 전송된 촬영 지역 정보를 이용해 자세 기동 및 촬영과 관련된 일련의 명령 세트를 생성한다. 3) 해당 지역을 촬영하기 일정 시간 전에 탑재 임무 계획 시스템에서는 탑재 추론 시스템을 통해 해당 임무를 최종 검증 받는다. 4) 탑재 추론 시스템은 요청된 검증 작업을 수행한다. 임무 검증 모듈(Mission Validation Module)에서는 기상 위성으로부터 직수신한 기상 정보를 활용한다. 기상 위성으로부터의 직수신 시스템은 아직 보유하고 있지 않은 시스템이며, 기상 위성과 저궤도 위성의 통신 인터페이스 및 운영 인터페이스를 갖춘다면 가능할 것으로 판단된다. 5) 규칙 기반의 추론 엔진은 날씨, 기동 성능, 전력 여유/메

모리 여유와 같은 임무 제한 조건 등의 다양한 정보를 이용해 계획된 현재 임무가 적합한지, 적합하지 않다면 대체 임무가 가능한지 판단한다. 규칙의 예는 다음과 같다.

- 만약 날씨가 흐리고, 동일 지역 촬영을 위해 위성의 다른 위치에서 촬영이 가능하다면, mission script와 guidance profile을 변경한다.

규칙에 사용되는 특징 및 각 특징의 속성은 예를 들면 다음과 같다.

- 해당 촬영 지역의 중요도 (높음, 낮음)
- 해당 촬영 지역의 날씨 (맑음, 흐림)
- 대체 위치 존재 여부 (있음, 없음)
- 대체 위치의 위성 tilt angle (크다, 작다)
- 대체 임무 전력 소모 (크다, 작다)
- 이미 계획된 임무와의 충돌 (있음, 없음)

의사 결정 모듈 (Decision Making)에서는 추론 시스템의 결론을 도출한다. 적응 모듈 (Adaptation Module)에서는 추론 시스템의 규칙 및 규칙에 사용되는 특징의 속성에 대한 소속 함수를 적용 시킨다. 기본적인 탑재 추론 시스템은 사용자의 특성에 무관한, 일반적으로 통용되는 규칙을 기반으로 한다. 각 영상 촬영 임무가 종료된 이후에는 탑재 추론 시스템의 의사 결정 결과를 지상에서 검토하고, 사용자가 의도하지 않은 결과일 경우, 의도를 반영한 결과를 피드백한다. 적응 모듈에서는 피드백 받은 결과를 이용해 규칙 및 소속 함수를 적용시키며, 이 과정이 반복되면 추론 시스템의 판단 결과가 사용자의 의도를 더 정확히 반영하게 된다.

## 4. 결 론

이 논문에서는 저궤도 위성의 자율성 수준을 설명하고, 다양한 해외 위성 시스템에 적용된 자율성 수준을 소개했다. 저궤도 위성의 자율성 수준은 위성의 임무에 따라 적절히 설계되어야 한다. 연구 대상인 저궤도 위성에 적절한 자율성 수준을 적용함으로써 위성에서 발생 가능한 다양한 수준의 고장 상황에 대해 좀 더 강인하고 지

능적으로 대처하는 개념을 제안했다. 또한 높은 수준의 임무 명령에 대해 위성 자체적으로 임무 계획을 수립하고, 임무 적합성을 판단해 임무 계획을 변경하는 탑재 추론 시스템을 제안했다. 위성의 자율성이 높아질수록 지상국의 운영은 간소화될 수 있다. 그러나 위성 개발 시의 탑재 소프트웨어 설계 및 시험이 복잡해져서 개발 및 시험 기간 및 비용이 급격하게 증가할 수 있다. 그러므로 개발과 운영을 복합적으로 고려한 최적의 방안을 찾아야 하며, 최적화된 방안이 저궤도 위성의 자율성 수준이 될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 전문진, 권동영, 이나영, 김대영, “지구 저궤도 위성의 전력 고장 관리”, 2010 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집, pp. 525-528
2. 전문진, 김대영, “지구 저궤도 위성의 자세제어계 고장에 강인한 초기 동작 설계”, 2011 대한전자공학회 정보 및 제어 심포지엄 논문집, pp. 295-296
3. Steve Lindsay and Paul Zetocha, "A feasible approach for implementing greater levels of satellite autonomy", Proc. of the AIAA Defense and Civil Space Programs Conference and Exhibit 1998
4. LaVallee, David B., et al., "Intelligent Control For Spacecraft Autonomy - An Industry Survey", Proc. of the Space 2006
5. NASA document NAS2-13945 - Automation Life Cycle Cost Model
6. J. Wertz and W. Larson, eds, "Space Mission Analysis and Design", 3rd ed, Springer, 1999
7. Teston, Frederic, et al., "PROBA: ESA's autonomy and technology demonstration mission", Proc. of the 48th International Astronautic Congress (IAC 1997)
8. Chien, Steve, et al., "An autonomous earth observing sensorweb", IEEE Intelligent Systems, Vol. 20, No. 3, 2005, pp.16-24
9. Sherwood, Robert L., et al., "Real-time decision making on EO-1 using onboard science analysis.", Proc. of the SPIE 2004 Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space
10. Bernard, D.E. et al., "Design of the Remote Agent Experiment for Satellite Autonomy", Proc. of the IEEE Aerospace Conference 1998
11. Zetocha, Paul, and Lance Self, "An Overview of Agent Technology for Satellite Autonomy." FLAIRS Conference. 1999
12. Zhou, Guoqing, et al., "Concept design of future intelligent earth observing satellites." International Journal of Remote Sensing, Vol. 25, No. 14, 2004, pp.2667-2685