

# STK를 이용한 고기동 영상관측위성 자세기동 분석도구 개발

임석재\* · 이병호\* · 김정래\*\*

## Development of a Attitude Maneuver Analysis Tool for Agile Imaging Satellites Using STK

Suk-Jae Lim\* · Byung-Ho Lee\* · Jeong-Rae Kim\*\*

### ABSTRACT

Need for agile satellites increases for performing various mission due to increase of satellite image applications and users. This paper performs attitude maneuver analysis by using Satellite Tool Kit(STK) made by AGI. In order to automate the STK analysis process, a MATLAB program is developed to generate STK input data and to process STK output data. Five attitude maneuver modes are analyzed and attitude angle variation and required torques are calculated.

### 1. 서 론

지구를 대상으로 임무를 수행하는 저궤도 관측위성에서 자세제어 및 자세결정 시스템의 성능은 성공적인 임무수행을 위한 핵심 기술이다. 관측위성은 영상 품질 향상 및 활용성 증대를 위해 이전보다 다양한 영상 촬영 모드로 운용되며, 상당한 고속 자세 기동이 요구된다. 그러므로 필요한 임무 요구 조건을 만족하는 최적의 시스템과 자세 제어가 필요하다.

위성 관측에 필요한 요구 조건을 만족하고, 효율적인 시스템을 구축하기 위해서는 우선 영상 관측 임무 시나리오 분석이 필요하다. 이에 근거하여 궤도를 계산하고 관측 대상과 위성의 자

세 요구조건을 분석하여 다양한 모드에 맞는 자세를 결정한다. 따라서 분석을 위한 프로그램과 세부 요구조건을 만족하는 도구가 필요하다.

본 논문에서는 이미 검증된 AGI사의 위성 궤도 및 자세 해석 프로그램 STK(Satellite Tool Kit)를 사용하여 분석절차를 단순화 시키고 결과의 정확성을 높이는 것에 중점을 두었다. 또한 MATLAB과 STK를 연동한 제어 프로그램을 개발하여 STK에서 위성의 Propagator를 설정하고, 더욱 정확한 궤도 적분기를 사용할 수 있으며, 확장 가능한 분석 도구를 개발함으로써 필요한 조건을 추가할 수 있다.

STK를 활용하여 다양한 임무 분석을 하기 위해 5가지 모드를 선정하고 각 모드 별 임무 시나리오를 만들고 분석하였다.

\* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jrkim@kau.ac.kr

## 2. 고기동 관측 모드

### 2.1 STK-MATLAB 구현 방법

STK는 여러 종류의 우주공간상의 임무 수행에 필요한 모델링과 분석을 위한 도구이다. 프로그램에는 우주항법이나 미사일 시스템, 궤도 추정, 다양한 임무 수행을 위한 커뮤니케이션, 위성 자세 제어 등 다양한 모듈이 내장되어 있다.

본 논문에서 중점적으로 사용하는 모듈은 위성 자세 제어 모듈이다. 이 모듈을 사용하여 관측 대상을 설정해 줄 경우, 최적화된 프로그램의 간단한 절차를 거쳐 위성의 기동을 계산할 수 있다. STK를 사용할 경우 더욱 정확한 위성 궤도 적분기를 설정할 수 있고, 대기 조건과 같은 외부효과를 적용하여 실제와 가까운 모델을 생성할 수 있다. 본 논문에서는 짧은 관측 시간 내의 기동을 분석하는 것이므로, 간단한 J2 섭동 모델을 사용하였다. 모든 임무 시나리오에서 관측지역은 길이와 폭을 가지므로, STK 내에서 직선구간을 구현하는 대상체로 항공기를 선택하였다.

STK만 단독으로 사용하는 것은 결과의 정확도를 높이는데 의미가 있으나, 입출력 값을 관리하는데 비효율적인 과정이 많다. 따라서 관측 지역을 표준화 하고 5가지 모드로 단순화하기 위한 새로운 프로그램이 필요하다. 이에 STK와 연동할 수 있는 MATLAB 프로그램을 만들었다. MATLAB 프로그램은 전반적인 입력값을 STK로 전달하고 결과를 다시 받는 구조를 이룬다. 도식화한 그림은 다음과 같다.

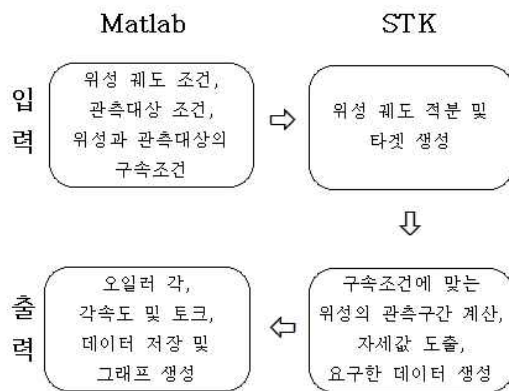


Fig. 1. MATLAB-STK Processing Structure

MATLAB 프로그램은 5개의 모드별 메인 프로그램과 구속 조건에 맞는 관측 지역을 설정하고 가장 가까운 위성 궤도를 찾아내며 관측 중 위성의 자세를 출력하는 보조 프로그램들로 구성된다. 모드별 메인 프로그램들은 위성의 궤도 조건과 관측 지역의 중심 좌표, 위성의 관측 시작 및 종료 조건을 입력값으로 받는다. 그리고 이 값들은 프로그램을 통해 STK로 전달하여 위성 궤도를 적분하고 타겟을 생성한다. 그 후 STK의 위성 궤도 데이터를 MATLAB 프로그램으로 받고 타겟과 가장 가까운 위치의 위성 궤도를 계산하여 관측 세부 조건에 맞는 관측 대상을 STK 항공기로 생성한다. 마지막으로 관측 구간에서 위성의 시선벡터가 대상체에 위치하도록 설정하고 기동시간 전후 구간의 위성 자세 데이터를 MATLAB 프로그램에서 출력한다.

지구관성좌표계에서 위성의 z축을 nadir 방향으로, x축을 속도방향으로 설정하고, 궤도를 생성하여 사용한다. 여러 모드에서 위성의 관측 시작 및 종료 지점을 구속하기 위해 Intrack Range 설정값을 사용한다. 이는 위성의 지상궤적에서 관측 지점에 대한 최소 거리에 해당하는 위치와 위성의 지상궤적 위치 간의 거리를 의미한다.

Fig.1과 같은 구조로 이루어진 MATLAB 프로그램은 필요에 따라 확장 및 변경이 가능하다. 모드별 구성에서 최적의 관측 구간을 찾는 부분은 제한적으로 이루어진다. 예를 들어, 여러개의 관측 지역을 가지는 경우 총 관측 구간에서 시작과 종료 지점을 Intrack Range와 같은 변수로 구속하여야 한다. 이때 프로그램을 통해 위성의 관측 구분은 자동으로 계산 되지만, 최적의 분배를 위한 전체 구간의 설정은 입력값이 필요하다. 이러한 부분에서 필요에 따라 확장과 변경을 할 수 있다.

### 2.2 영상 관측 모드 및 구현 방법

위성의 지상 관측 방법은 촬영 시나리오와 위성 영상의 활용분야에 따라 달라지는데 본 논문에서는 (1) Strip (2) Multi-Point (3) Stereo

(4) wide Area-Along (5) Wide-Area Cross 의 5 가지 촬영 모드를 설정하였다.

### 2.2.1 Strip 모드

지도 제작이나 GIS DB구축에 필요한 고품질의 영상을 획득하기 위해서 사용되며, 수 천 km의 긴 영역을 관측하는데 적용된다.

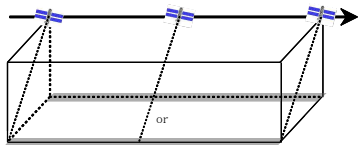


Fig. 2. Strip Mode

Strip 모드에서 위성의 지상 궤적과 관측 구간은 수평을 이루고 위성의 시선벡터는 관측 직선과 수직을 이루는 것으로 단순화한다. 관측 지역의 입력 값은 중심좌표와 관측 길이이다. 설정한 위성궤도 조건에서 관측지역과 최소거리에 위치하는 시간대의 위경도 좌표를 STK에서 MATLAB 프로그램으로 전환한다. 위성의 위경도 데이터를 관측 중심점과 비교하여 위성의 지상 궤적과 평행한 관측 구간 좌표를 프로그램으로 계산한다. 이 좌표 값을 위성의 시간 데이터와 동기화하고 STK 항공기로 관측 지점을 구현한다.

### 2.2.2 Multi-point 모드

넓은 지역에 분포되어 있는 여러 지역을 관측하는데 사용되는데 각 관측 지역은 비교적 짧고, 각 지역의 관측이 끝난 후 다음 관측 지역을 지향하기 위해서는 신속한 자세 기동이 요구된다.

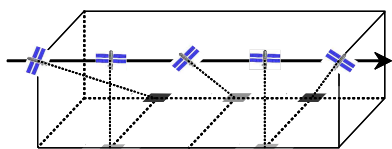


Fig. 3. Multi-point Mode

임의의 여러 지역을 선정하여 관측 대상으로 분포시킬 경우 관측에 필요한 시간 또는 구간을 선정하여 MATLAB 프로그램의 입력값 중 Intrack

Range를 제한하여 조정한다. Multi-point 모드는 관측 지역의 분포가 집중되는 경우가 있으므로, 이에 대비하여 각각에 대한 관측 시간과 관측 구간 사이의 이동을 계산하고 위성의 거동이 관측 지역에 대해 동일 간격으로 움직이도록 설정 되어있다. Strip 모드와 동일한 과정으로 관측 대상의 좌표를 얻고 프로그램을 통해 STK에서 항공기를 관측 대상으로 생성한다. 관측 대상의 시작 및 종료는 Intrack Range를 통해 총 관측시간을 제한하고 요구 조건에 부합하는 시간 간격을 프로그램이 계산하여 위성 관측 구간을 분배한다. 필요시 위 조건을 변경하여 필요한 기동 조건을 조절할 수 있다.

### 2.2.3 Stereo 모드

동일 지역에 대해 서로 다른 각도에서 촬영을 수행하는 모드로 입체 사진 등을 제작하는데 유용하다.

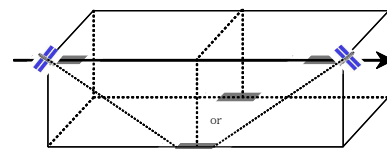


Fig. 4. Stereo Mode

Stereo 모드의 특성에 맞는 입체 영상을 얻기 위해 두 관측 구간과 관측 지점 간의 Intrack Range를 구속하여 촬영 각도를 조절한다. MATLAB 프로그램에서 자동화된 시스템을 통해 동일 구간을 움직이고 다른 시간 영역을 가지는 2개의 항공기를 STK에 생성한다.

### 2.2.4 Wide-area Along 모드

가로-세로비가 유사한 넓은 지역을 위성 진행 방향으로 분할하여 촬영하는 모드이다.

관측 지역을 3개로 분할하고 길이방향이 위성의 진행방향과 평행하도록 모델링한다. 위성의 진행방향으로 바라볼 때 좌측에서 우측으로 관측 순서가 정해진다. MATLAB 프로그램에서 관측 지역의 크기를 설정하고 세 개의 지역을 입력하여, STK에서 관측 지역과 일치하는 3개의 항공

기로 이 모드를 구현한다.

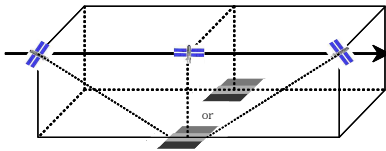


Fig. 5. Wide-area Along Mode

2.2.5 Wide-area Cross 모드

위성 진행 방향에 수직한 가로 방향으로 관측 지역을 분할하여 관측하는 모드로 다른 촬영 모드와는 달리 촬영 구간 중 위성 CCD 시선 벡터를 가로 방향으로 이동해야하므로 상당한 위성 기동이 요구된다.

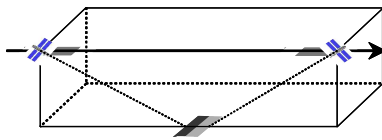


Fig. 6. Wide-area Cross Mode

MATLAB 프로그램에서 다른 모드와는 다르게 관측 지역을 설정해야 하므로, 보조 프로그램을 통해 위성의 지상궤적 데이터를 사용하여 수직 방향의 관측 지역을 계산한다. 관측 지역을 지나가는 위성의 시선벡터 속도는 다른 모드와 동일하게 설정되어 있으나, 필요에 따라 수정 가능하다. 관측 시작은 두 지역 모두 위성의 속도 방향으로 볼 때 왼쪽에서 오른쪽으로 진행된다. 이 조건을 만족하는 대상을 STK에 생성하여 본 모드를 구현한다.

3. 관측 모드 별 자세 변화 분석

각 관측 모드 별 시나리오를 만들고 관측영역과 지상 궤적 및 자세 변화 등을 정리하였다. 모든 모드는 고도가 677km, 이심률이 0.001, 경사각이 98.3° 인 위성 궤도를 5일간 생성하여 사용하였다. 자세 기동을 나타내는 그래프는 오일러각을 사용하고 순서는 123을 기준으로 하였다.

3.1 Strip Mode

관측 길이가 600km이고, 관측 폭이 15km인 영역을 Fig.7과 같이 선정하였다. Ascending 궤적에서 시작 및 종료지점은 각각 T1, T2이다.

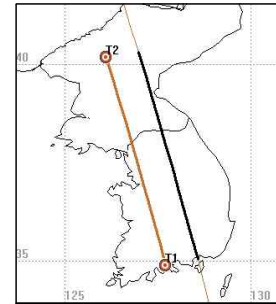


Fig. 7. Ground Track and Observation Points - Strip Mode

Fig.8은 위 시나리오의 오일러 각 변화를 나타낸다. 롤의 경우 최대값은 6.7° 이다. 이때 위성의 위치와 관측 지역의 좌표를 통해 사이 각을 구하면 롤과 일치하는 것을 확인하였다. 관측 시간동안 롤이 미세하게 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이는 고위도 지점으로 갈수록 위경도 차이가 줄어드는 지구의 구면에 의한 현상이다. 피치는 0.5° 까지 도달하고 감소하지만 그 값이 작기 때문에 큰 영향을 미치지 않는다. 요 값은 최대 6.5° 회전한다. 이 중 약 4.0° 는 관측지역이 지구 자전에 의해 총 관측시간 동안 이동하기 때문에 발생한다. 나머지 2.5° 는 지구의 고위도 지역으로 갈수록 같은 위경도 차이에서 상대적인 길이가 줄어들고, 위성의 지상궤적과 관측지역의 거리가 멀수록 큰 요 값이 요구되기 때문이다.

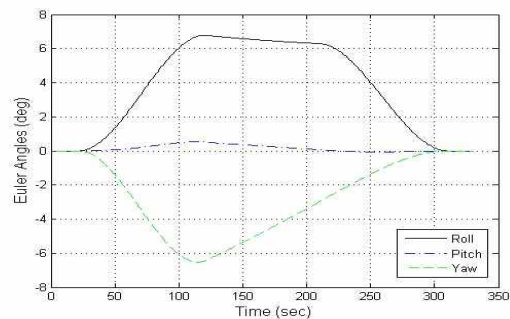


Fig. 8. Euler Angle Variation - Strip Mode

### 3.2 Multi-point Mode

Figure 9에서 6개의 관측 지점을 선정하고, 각각의 대상에 대해 45km길이로 일정하게 설정하였다. Intrack Range로 200km 제한하여 위성의 관측 시작 및 종료 지점을 계산한다. 총 관측에 필요한 시간은 151.0초이고, 하나의 관측 대상에 대한 관측시간 6.6초이다.

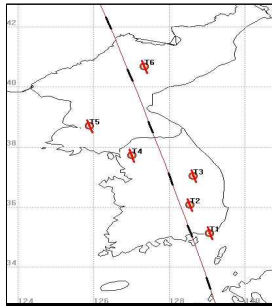


Fig. 9. Ground Track and Observation Points - Multi-point Mode

Fig.10과 같이 롤 값이 최대인 5번째 관측구간에서 롤 값은  $10.4^\circ$ , 피치 값은  $-11.4^\circ$ , 요 값은  $13.0^\circ$  를 나타낸다. 관측 대상과 위성의 지상궤적 사이의 거리는 롤 값과 비례한다. 피치 값은 Fig.9에 나타나듯이, 밀집한 관측 지역을 일정 분포된 구간에서 각각 기동하도록 설정되어있다. 따라서 Fig.10의 피치 그래프는 점대칭을 이룬다. Fig.9의 여섯 번째 관측 지역 시작점에서 위성과 관측 지역의 거리는 약 175km이고 위성의 고도는 689km이다. 두 값을 이용해 위성에서 nadir 방향과 관측지점 방향의 사이각을 구하면 약  $14.0^\circ$  로 위 그래프와 동일하다. 요 값은 Strip 모드에서 설명한 바와 같이 작용한다.

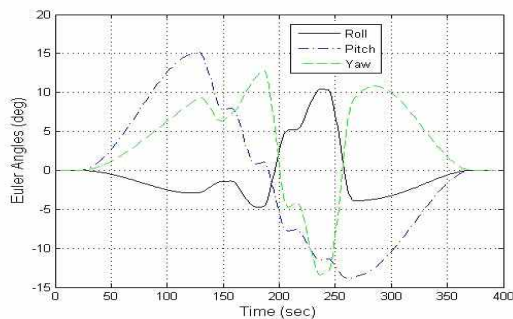


Fig. 10. Euler Angle Variation - Multi-point Mode

### 3.3 Stereo Mode

관측 길이가 100km인 관측 지역을 선정하고, Intrack Range를 150km로 구속하여 시작과 종료 구간을 설정하였다. 아래 Fig.9는 Stereo 모드에서 위성이 관측 구간을 2회 관측 하는 것을 나타낸다.

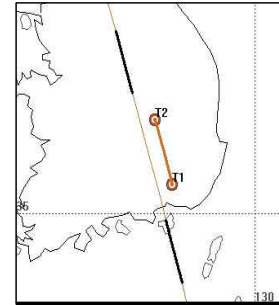


Fig. 11. Ground Track and Observation Points - Stereo Mode

Fig.12에서 롤 값은 처음 관측 시  $-1.1^\circ$ , 두 번째 관측 시  $-2.4^\circ$  이다. 이는 지구 자전에 의해 관측 대상이 위성에서 조금 멀어지는 현상에 기인한다. 피치 값은 관측 대상에 대해 대칭한 위치에서 2회 관측 하므로 회전각 그래프도 대칭을 이룬다. 요 값은 롤 값과 같은 이유로 두 번째 관측에서 값이 커진다.

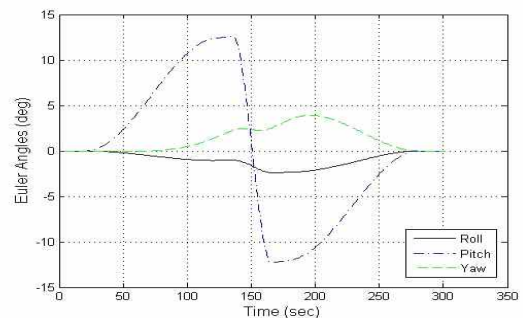


Fig. 12. Euler Angle Variation - Stereo Mode

### 3.4 Wide-area Along Mode

위성의 지상궤적과 평행하게 15km 씩 떨어진 3개의 관측지점을 다룬다. 각각의 관측지점의 길이는 60km로 설정하였다. Fig.13에서 위성의 지상궤적에 나타난 것과 같이 관측 구간을 설정하고, 3번에 걸쳐 관측한다. 두 번째 관측은

Strip 모드와 동일한 양상을 지니고, 첫 번째와 세 번째 관측은 Stereo 모드와 유사하다.

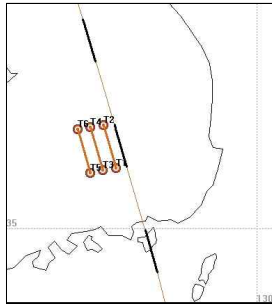


Fig. 13. Ground Track and Observation Points - Wide-area Along Mode

롤 값은 관측 대상이 15km 씩 멀어지므로 값이 커지고 최대값은 2.8°이다. 피치 그래프는 세 번에 걸쳐 관측하는 특성과 관측 구간의 등분포를 나타내고 그 모양은 대칭을 이룬다. 요 값은 1° 정도의 작은 변화를 나타낸다.

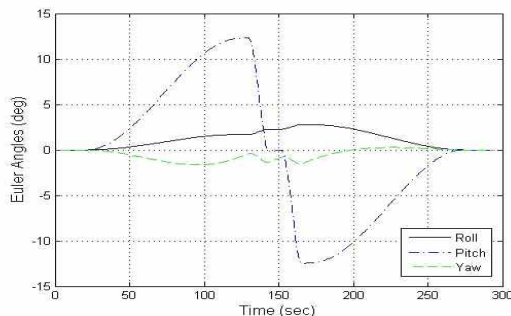


Fig. 14. Euler Angle Variation - Wide-area Along Mode

### 3.5 Wide-area Cross Mode

관측 지역의 길이는 150km이고, 전체 폭은 30km로 설정하였다. 본 모드는 위성의 지상궤적과 수직인 직선을 관측하므로 관측 중에도 위성의 큰 자세변화가 요구된다.

Fig.16에서 첫 번째 관측 지점에 해당하는 120초~141초 구간과 두 번째 관측 구간은 다른 모드와 확연히 다른 양상을 지닌다. 특히 롤 그래프는 관측 중에도 많은 기동이 필요함을 나타내고, 최대값은 16.9°이다. 피치 값은 Intrack Range의 값에 따라 최대값을 달리하고, 대칭한 그래프 양상을 가진다. 위성의 시선벡터는 관측

지역에 대해 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이므로 관측 구간 사이에서 롤 값과 요 값의 변화율은 두 번 0이 된다.

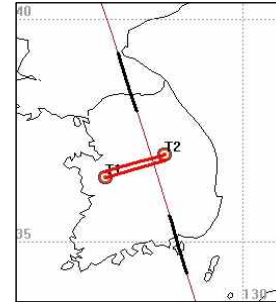


Fig. 15. Ground Track and Observation Points - Wide-area Cross Mode

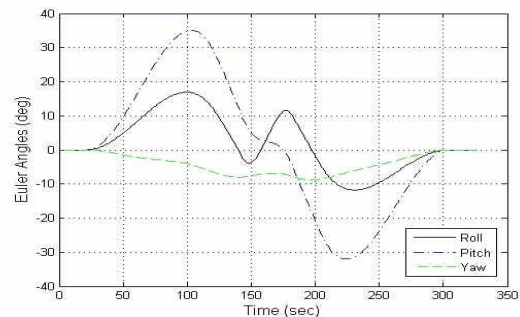


Fig. 16. Euler Angle Variation - Wide-area Cross Mode

### 3.6 각속도 및 토크 변화

모드 별 관측 구간 중 토크 값이 가장 큰 Wide-area along 모드의 각속도 및 토크 변화를 계산하였다.

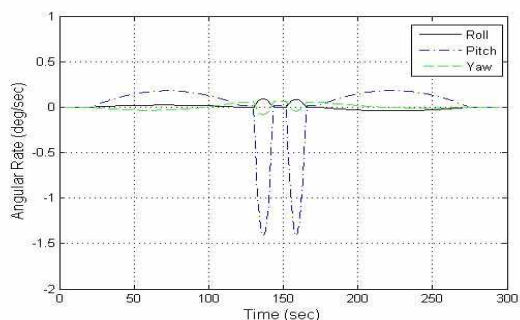


Fig. 17. Angular Rate - Wide-area Along Mode

Fig.17에서 모든 각속도가 각각 8.7초인 세 개의 관측 구간에서는 0으로 기동이 거의 없는 것

을 나타낸다. 롤과 요 값은 최대  $0.1^\circ/s$ 로 매우 작게 나타나고, 상대적으로 큰 움직임은 관측 구간 사이에서 일어난다. 피치 축 각속도는 최대  $-1.4^\circ/s$ 로 다른 각속도와 동일하게 관측 구간 사이에서 발생한다.

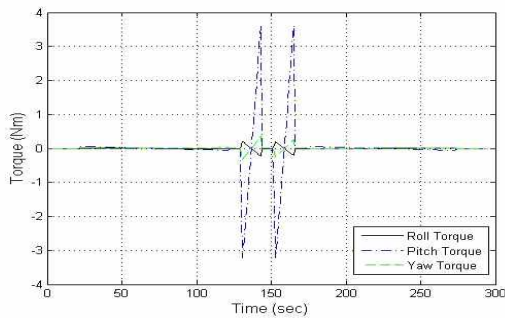


Fig. 18. Torque - Wide-area Along Mode

Fig.18은 오일러각 변화에 대한 요구 토크량 변화를 나타낸 것으로, 관성모멘트는 세방향 모두  $500\text{km}^2$ 으로 설정하였다. 롤과 요 축은 최대 토크가 약  $0.2\text{Nm}$ 로 매우 작다. 관측 지역이 위성의 지상궤적에서 멀리 떨어져 있지 않기 때문에 모드 특성 상 피치의 변화가 가장 크다. 피치 축의 최대 토크는 약  $3.6\text{Nm}$ 이다.

#### 4. 결론

우주 임무 수행을 분석하는 도구인 STK를 활용하여 관측위성의 자세제어 요구 조건을 도출하는 프로그램을 개발하였다. 다섯 가지 모드에 관한 임의의 시나리오를 만들고 요구되는 조건에서 관측을 위해 위성의 기동 조건을 오일러 각과 각속도 및 토크를 출력하도록 프로그램을 구성하였다. 모든 모드는 위성 궤도를 적분하고, 그 위치 데이터를 활용하여 관측 지역에서 최적의 관측 궤도를 선정하여 사용한다. 프로그램은 위성과 관측 지역에 대한 정보를 입력 값으로 받고 관측 중 위성의 자세 기동을 결과로 출력한다.

임무 수행을 위한 자세 제어 요구 조건을 도출하여 실제 계획 단계의 시스템 수립에 활용할 수 있다. 또한 각각의 프로그램은 STK에 기반을 두고, STK에서 활용할 수 있는 궤도 적분기와 결과 값인 오일러 또는 쿼터니언 등 다양한 형태로 변형 가능하다. 필요에 따라 프로그램을 확장하여 본 논문에서 사용한 모드 외의 구성에도 활용할 수 있다.

본 논문은 기본 단계의 시스템 설계에 활용할 수 있는 관측 위성의 기동 조건을 도출에 목적을 두었기에 향후 위성의 기동에 관한 제약 조건을 구체화하여 임의의 임무에서 최적의 자세제어를 위한 확장이 필요하다.

#### 후기

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2010-0024050).

#### 참고 문헌

- [1] 김희섭, 정대원, 김응현, 김규선, "TDI를 사용하는 고해상도 위성의 임무 및 기동 분석", 한국항공우주학회지, 34권 9호, 2006. pp.53-59
- [2] 김정래, 정명숙, "임무계획 및 스케줄링을 이용한 자세제어 유도알고리즘 개발", 한국항공우주연구원 위탁과제 보고서, 2007.
- [3] 김정래, 정명숙, 김희섭, 김규선, "고기동 영상관측위성 임무설계 및 분석도구 개발", 한국항공우주 춘계학술대회, 2007.
- [4] [www.agi.com](http://www.agi.com)
- [5] [www.mathworks.co.kr](http://www.mathworks.co.kr)