

## 해양탐재체 스캔 미캐니즘의 포인팅 안정성 연구

연정흠<sup>†</sup> · 강금실 · 윤형식  
한국항공우주연구원 해양기상탐재체그룹

### Pointing Stability Study of the GOCI Scan Mechanism

Jeoung-Heum Yeon<sup>†</sup>, Gumsil Kang, and Heong Sik Youn

Payload Department, COMS Program Office, Korea Aerospace Research Institute

**Abstract** : GOCI is the core payload of the geostationary satellite COMS(Communication, Ocean and Meteorological Satellite) for ocean monitoring. It is scheduled to be launched at the end of 2008. GOCI observes ocean color around the Korean Peninsula over 2500km×2500km area. It used tilted two-axis scan mechanism to observe entire field of view. In this work, the pointing stability of the tilted two-axis method is analyzed and compared with that of gimbal method. The analysis results show that tilted two-axis method gives great stability and it is adequate for geostationary payload. The results can also be used to determine and analyze the mechanism specifications.

**Key Words** : GOCI, COMS, Scan Mechanism, Pointing Stability, Tilted two-axis, Gimbal.

**요약** : 해양탐재체는 2008년 말 발사에 예정인 정지궤도 통신해양기상위성의 주요 탑재체로, 한반도 주위의 2500km×2500km 영역의 해색을 관찰한다. 해양탐재체는 전 영역을 16개의 슬롯으로 나누어 관찰하며, 이를 위하여 이축경사 방식의 스캔 미캐니즘을 이용한다. 본 연구에서는 해양탐재체에서 사용하고 있는 스캔 방식의 포인팅 안정성을 분석하였다. 또한 분석결과를 일반적으로 많이 사용하고 있는 짐벌 방식과 비교하였다. 이를 위해 각 방식의 포인팅 모델과 포인팅 안정성 척도를 제시하였다. 분석결과 이축경사 방식이 뛰어난 포인팅 안정성을 갖는다는 것을 보일 수 있었다. 해석결과는 각 미캐니즘의 규격 선정과 분석에 활용될 수 있다.

### 1. 서론

해양탐재체(GOCI: Geostationary Ocean Color Imager)는 2008년 말 발사에 예정인 정지궤도 통신해양기상위성(COMS)의 주요 탑재체로 8개의 가시광선 채널과 500m의 해상도로 한반도 지역의 해색을 관측한다(KARI, 2004).

해양탐재체의 관측영역(Field Of View)은 한반도 주위의 2500Km×2500Km 영역으로 Fig. 1과 같다. 정지궤도상에서 해색관찰에 필요한 충분한 신호대 잡음비(signal to noise ratio)를 얻기 위해 응시방식(staring scheme)을 사용하고, 충분한 해상도를 얻기 위하여 전 관측영역을 16개의 슬롯(slot)으로 나누어 관측한다. 이를 위해서는 각 슬롯간 이동을 할 수 있게하는 스캔 미

2006년 9월 20일 접수 ; 2006년 12월 22일 수리.

<sup>†</sup> 교신저자: 연정흠(jhyeon@kari.re.kr)

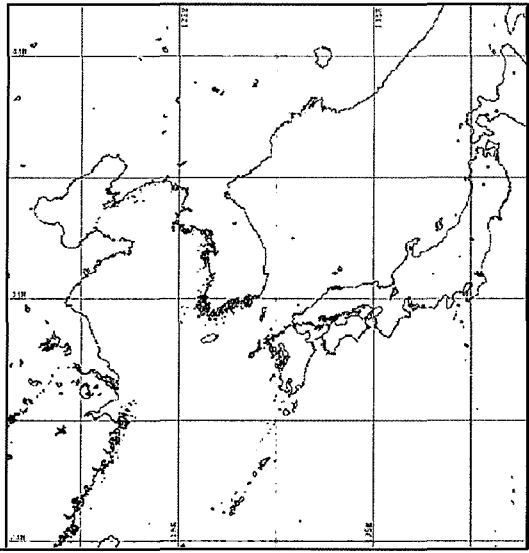


Fig. 1. Field Of View of GOCI.

메카니즘(scan mechanism)이 필요하게 된다.

스캔 메카니즘의 포인팅 안정성(pointing stability)은 광학영상성능(optical image quality)에 직접적으로 영향을 미치는 양으로 중요 규격으로 선정되어 관리된다(Bely, 2003).

본 연구에서는 해양탐재체에서 채택하고 있는 이축경사(tilted two-axis) 방식의 포인팅 안정성을 분석하고 일반적으로 많이 사용하고 있는 짐벌(gimbal) 방식과 성능을 비교한다. 이를 위하여 각 방식에 대한 포인팅 모델과 포인팅 안정성을 나타내기 위한 척도를 제안한다. 또한, 스캔 메카니즘을 구성하고 있는 각 구동유닛의 안정성이 전체 포인팅 안정성에 미치는 영향을 분석한다.

## 2. 포인팅 모델

본 장에서는 해양탐재체에서 채택하고 있는 이축경사 방식의 스캔 메카니즘에 대하여 개략적으로 설명하고, 포인팅 안정성을 구하기 위한 포인팅 모델을 수립하였다. 또한, 일반적으로 많이 사용하고 있는 짐벌 방식의 스캔 메카니즘에 대해서도 포인팅 모델을 수립하여 비교하였다.

### 1) 이축경사 방식

이 방식은 포인팅 미러에 두개의 구동유닛(drive unit)이 작은 경사각을 가지고 순차적으로 고정되어 있는 방식이다. 각 구동유닛은 고정자(stator)와 회전자(rotor)로 구성되며, 회전자는 고정자를 기준으로 상대적 회전운동을 한다.

해양탐재체의 스캔 메카니즘을 개략적으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 구동유닛1의 고정자1은 해양탐재체 구조부에 고정되어 있고, 회전자1은 고정자1에 대하여 회전운동을 한다. 회전자1은 구동유닛2의 고정자2에  $\theta_1$ 의 경사각을 가지고 고정되어 있고, 회전자2는 고정자2에 대하여 회전운동을 한다. 또한 회전자2는 포인팅 미러에 대하여 경사각  $\theta_2$ 를 가지고 고정되어 있다.

설정된 경사각 때문에 구동유닛이 회전함에 따라 포인팅 미러가 지시하는 방향을 바꾸게 된다.

포인팅 미러의 지시방향은 포인팅 미러면의 수직 벡터를 의미한다. 용어의 간결성을 위하여 이를 포인팅 벡터라고 통칭하기로 한다.

포인팅 벡터가 2500Km×2500Km의 관측영역 모두 스캔하기 위해서는 경사각들 사이에 다음과 같은 관계식이 성립해야 한다.

$$2(\theta_1 + \theta_2) D > 2500\text{Km} \quad (1)$$

여기서  $D$ 는 위성과 지상간의 거리를 의미한다.

해양탐재체에서는 충분한 마진(margin)을 가지고 위의 조건을 만족시키기 위해 다음과 같은 경사각을 사용하여 설계를 진행시키고 있다.

$$\theta_1 = \theta_2 = 1.05^\circ \quad (2)$$

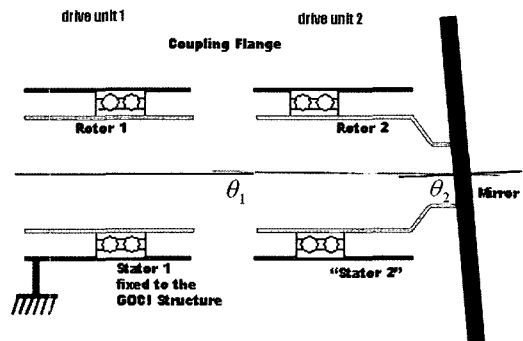


Fig. 2. GOCI scan mechanism (Tilted two-axis method).

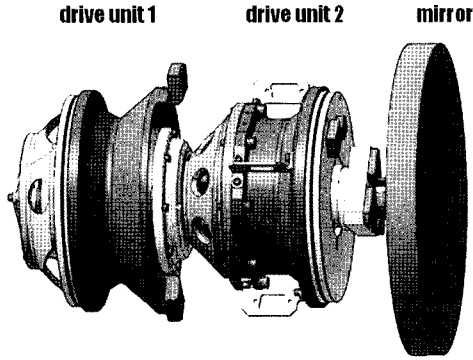


Fig. 3. 3-D view of GOCI scan mechanism.

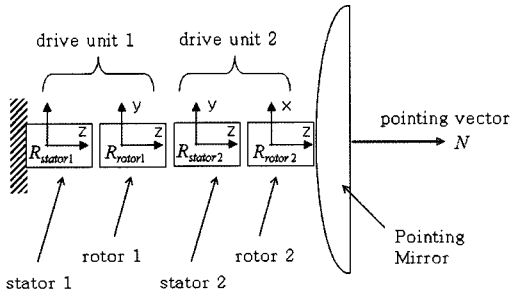


Fig. 4. Schematic diagram of tilted two-axis method.

지금 개발중인 해양탐재체의 스캔 메커니즘은 Fig. 3과 같다.

우선 회전자2의 회전축을 z축으로 갖는 좌표계를 생각하자. 이 좌표계에서 포인팅 벡터는 회전축에  $\theta_2$ 만큼 기울어져 있으므로, xz 평면상으로  $[0 \ 0 \ 1]$  벡터를  $\theta_2$ 만큼 회전시킨 벡터가 포인팅 벡터가 되도록 x축을 잡을 수 있다. 이 좌표계를  $R_{rotor2}$ 라고 하자.

이 좌표계에 대하여 포인팅 벡터를 나타내면 다음과 같다.

$$N_{rotor2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_2 \\ 0 \\ \cos \theta_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

좌표계  $R_{rotor2}$ 와 같은 z축을 갖고, xy 평면에서  $a_2$ 의 각도로 기울어져 고정자2에 고정되어있는 좌표계를  $R_{stator2}$ 라고 하자. 좌표계  $R_{rotor2}$ 의 벡터를 좌표계  $R_{stator2}$ 로 변환시켜주는 변환행렬은 다음과 같다.

$$stator2C_{rotor2} = \begin{bmatrix} \cos a_2 & \sin a_2 & 0 \\ -\sin a_2 & \cos a_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $a_2$ 는 회전자2가 고정자2에 대해 회전하는 각도이므로 0에서 360도까지 변화하는 각도이다.

또한, 고정자2와 같은 y축을 갖고 xz 평면에서  $\theta_1$ 의 각도로 기울어져 회전자1에 고정되어있는 좌표계를 생각할 수 있다. 이 좌표계를  $R_{rotor1}$ 라고 하자. 그러므로, 좌표계  $R_{stator2}$ 의 벡터를 좌표계  $R_{stator2}$ 로 변환시켜주는 변환행렬은 다음과 같다.

$$rotor1C_{stator2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

좌표계  $R_{rotor1}$ 과 같은 z축을 갖고, xy 평면에서 의 각도로 기울어져 고정자1에 고정되어있는 좌표계를  $R_{stator1}$ 라고 하자. 좌표계  $R_{rotor1}$ 의 벡터를 좌표계  $R_{stator1}$ 으로 변환시켜주는 변환행렬은 다음과 같다.

$$stator1C_{rotor1} = \begin{bmatrix} \cos a_1 & \sin a_1 & 0 \\ -\sin a_1 & \cos a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $a_1$ 도 회전자1이 고정자1에 대해 회전하는 각도이므로 0에서 360도까지 변화한다.

고정자1은 해양탐재체 구조부에 고정되어 있으므로, 이 좌표계를 기준좌표계로 하여 포인팅 벡터를 기술할 수 있다.

좌표계  $R_{stator1}$ 에 대하여 포인팅 벡터를 기술하면 다음과 같다.

$$N^{stator1} = stator1C_{rotor1} \cdot rotor1C_{stator2} \cdot stator2C_{rotor2} \cdot N^{rotor2} \quad (7)$$

이를 이용하여 포인팅 벡터를 정리하면 다음과 같다.

$$N^{stator1} = \begin{pmatrix} -Ca_1C\theta_1Ca_2S\theta_2 - Ca_1S\theta_1C\theta_2 + Sa_1Sa_2S\theta_2 \\ Sa_1C\theta_1Ca_2S\theta_2 + Sa_1S\theta_1C\theta_2 + Ca_1Sa_2S\theta_2 \\ -S\theta_1Ca_2S\theta_2 + C\theta_1C\theta_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서  $C(\cdot) = \cos(\cdot)$ ,  $S(\cdot) = \sin(\cdot)$ 을 의미한다.

## 2) 짐벌 방식

짐벌 방식은 각 구동유닛이 한축의 회전을 전담하도록 설계된 방식이다.

이 경우를 개략적으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 구동 유닛2는 Fig. 5에 나타나 있는 좌표축에서 y축으로의 회전을 담당하고, 구동유닛1은 z축으로의 회전을 담당한다.

이 경우는 Fig. 6과 같은 구면좌표계(spherical

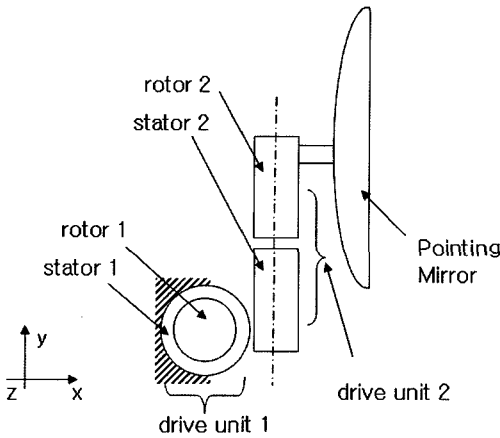


Fig. 5. Schematic diagram of Gimbal method.

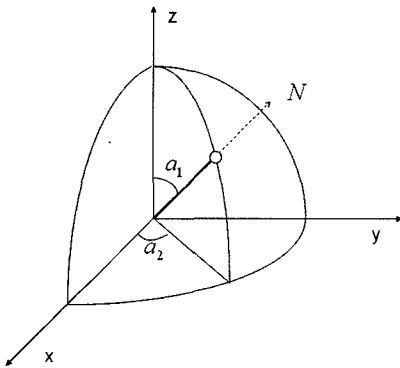


Fig. 6. Spherical coordinate system and pointing vector.

coordinate)의 각좌표  $a_1, a_2$ 가 각 구동유닛을 조절하는 것과 같은 효과를 나타낸다.

구면좌표계를 이용하여 집벌 방식의 포인팅 벡터를 정리하면 다음과 같다.

$$N^{rotor2} = \begin{Bmatrix} \sin a_1 \cos a_2 \\ \sin a_1 \sin a_2 \\ \cos a_2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

### 3. 포인팅 안정성

#### 1) 포인팅 안정성 척도

스캔 미캐니즘의 불안정성(unstability)은 각각의 구동유닛의 불안정성에 기인한다. 즉, 각 구동유닛이 지정된 각도  $a_1, a_2$ 에 정확히 이르지 못하고 어떤 섭동

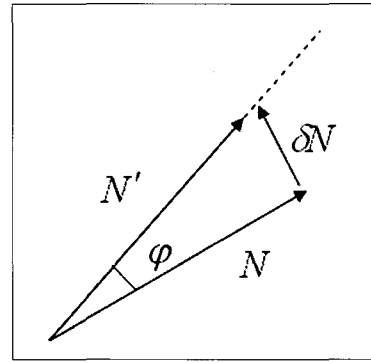


Fig. 7. Pointing vector and perturbation.

(perturbation)값을 갖고  $a_1 + \delta a_1, a_2 + \delta a_2$ 이 되기 때문에 발생한다.

구동유닛에서 발생하는 섭동때문에, 포인팅 벡터  $N$ 에 섭동량  $\delta N$ 이 생겨서 포인팅 벡터가  $N'$ 으로 바뀌게 된다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 7과 같다.

여기서  $N$ 과  $N'$ 이 이루는 각도  $\phi$ 는 포인팅 안정성을 나타내는 기준이 될 수 있다.

$N'$ 은 단위 벡터이므로 다음과 같이 써질 수 있다.

$$N' = \frac{N + \delta N}{\|N + \delta N\|} \quad (10)$$

또한  $N \perp \delta N$ 이므로, 내적의 정의에 의하여 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\cos \phi = N \cdot N' = \frac{1}{\|N + \delta N\|} \quad (11)$$

즉,  $\|N + \delta N\|$ 이 최대값이 될 때,  $\phi$ 가 최대값을 갖는다.

본 연구에서는 각 구동유닛의 움직임에 대하여  $\phi$ 가 취할 수 있는 최대값을 포인팅 안정성을 나타내는 척도(measure)로 고려하였다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\|\phi\|_{\infty} = \max \phi = \max_{a_1, a_2} \cos^{-1} \left( \frac{1}{\|N + \delta N\|} \right) \quad (12)$$

여기서,  $0^\circ \leq a_1, a_2 \leq 360^\circ$ 이다.

이 척도를 이용하여, 각 스캔 방식에 대하여 포인팅 안정성을 계산하고 비교하였다.

#### 2) 포인팅 안정성 계산

##### (1) 이축경사 방식

이때의 포인팅 벡터는 (8)식과 같고, 이의 변분량은

다음과 같다.

$$\delta N = \frac{\partial N}{\partial a_1} \delta a_1 + \frac{\partial N}{\partial a_2} \delta a_2 \quad (13)$$

$$\frac{\partial N}{\partial a_1} = \begin{pmatrix} Sa_1 C\theta_1 Ca_2 S\theta_2 + Sa_1 S\theta_1 C\theta_2 + Ca_1 Sa_2 S\theta_2 \\ Ca_1 C\theta_1 Ca_2 S\theta_2 + Ca_1 S\theta_1 C\theta_2 - Sa_1 Sa_2 S\theta_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial N}{\partial a_2} = \begin{pmatrix} Ca_1 C\theta_1 Ca_2 S\theta_2 + Sa_1 Ca_2 S\theta_2 \\ -Sa_1 C\theta_1 Sa_2 S\theta_2 + Ca_1 Ca_2 S\theta_2 \\ S\theta_1 Sa_2 S\theta_2 \end{pmatrix}$$

$\varphi$ 의 최대값은  $\|N + \delta N\|^2$ 이 최대값일 때 발생한다. 이를 다음과 같이 변수  $a_1, a_2$ 에 대한 최적화 (optimization) 문제로 바꿀 수 있다.

$$\max_{a_1, a_2} \|N + \delta N\|^2 \quad (14)$$

여기서 목적함수(objective function)에 해당하는  $\|N + \delta N\|^2$ 는 사인(sine)과 코사인(cosine)의 곱으로 이루어진 함수이기 때문에, 일반적으로 많이 사용하는 순차적 이차 계획법(SQP; Sequential Quadratic Programming)으로 최대값을 구할 수 있다 (Belegundu and Chandrupatla, 1999). 이를 이용하여 포인팅 안정성  $\|\varphi\|_\infty$ 를 얻을 수 있다.

(2) 짐벌 방식

이때의 포인팅 벡터는 (9)식과 같고, 이의 변분량은 다음과 같다.

$$\delta N = \begin{pmatrix} \cos a_1 \cos a_2 \delta a_1 - \sin a_1 \sin a_2 \delta a_2 \\ \cos a_1 \sin a_2 \delta a_1 + \sin a_1 \cos a_2 \delta a_2 \\ -\sin a_1 \delta a_1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

이경우도 마찬가지로  $\|N + \delta N\|^2$ 의 최대값을 순차적 이차 계획법으로 구하여, 포인팅 안정성  $\|\varphi\|_\infty$ 을 계산할 수 있다.

이축경사 방식과 짐벌 방식의 포인팅 안정성을 예제를 통하여 비교하였다.

같은 종류의 구동유닛 1, 2를 사용하여 스캔 메커니즘을 구성하면, 각 구동유닛의 최대 섭동량도 다음과 같이 같다고 가정할 수 있다.

$$\delta a_1 = \delta a_2 \quad (16)$$

이때에 각 구동유닛의 최대 섭동량이 100 $\mu$ rad에서 500 $\mu$ rad 사이에 있을 때 각 방식의 포인팅 안정성을 계산하면 Table 1, Fig. 8과 같다.

Table 1. Pointing stability of tilted two-axis and gimbal method.

drive unit stability ( $\mu$ rad)	pointing stability ( $\mu$ rad)	
	Tilted two-axis	Gimbal
500	27.5	707
400	22.0	566
300	16.5	424
200	11.0	283
100	5.50	141

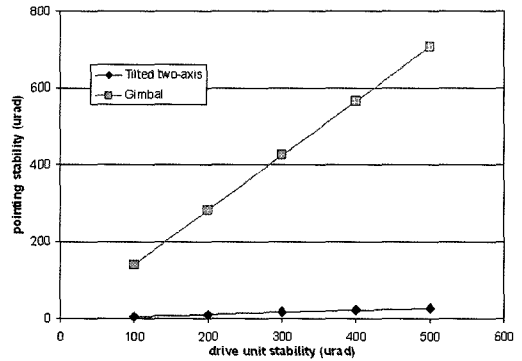


Fig. 8. Pointing stability according to the driving unit stability.

각 방식의 포인팅 안정성은 구동유닛의 안정성에 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있다. 짐벌 방식의 포인팅 안정성은 구동유닛의 안정성이 직접적으로 영향을 미쳐 같은 크기정도(order of magnitude)의 포인팅 안정성을 보이지만, 이축경사 방식에서는 경사각에 의한 경감효과로 포인팅 안정성이 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 크기를 비교해보면 이축경사 방식이 짐벌 방식보다 26배정도 뛰어난 포인팅 안정성을 보인다.

예를 들어, 10 $\mu$ rad 정도의 포인팅 안정성을 구현하도록 짐벌방식의 스캔 메커니즘을 구성한다면 구동유닛의 안정성은 10 $\mu$ rad 이하의 크기를 가져야 한다. 그러나, 이축경사 방식을 사용한다면 100 $\mu$ rad-200 $\mu$ rad의 안정성을 갖는 구동유닛으로 원하는 포인팅 안정성을 구현할 수 있다.

구동유닛1과 2의 안정성이 스캔 메커니즘의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 구동유닛1의 안정성이  $\delta a_1 = 300\mu$ rad으로 고정되어 있을 때 구동유닛2의 안정성에 대한 변화와, 구동유닛2의 안정성이  $\delta a_2 = 300\mu$ rad으로 고정되어 있을 때 구동유닛1의 안정성에 대한 변화를 계산하였다. 결과는 Table 2, Fig. 9와 같다.

Table 2. Pointing stability according to each driving unit stability.

drive unit stability $\delta a_1$ or $\delta a_2$ ( $\mu\text{rad}$ )	Tilted two-axis pointing stability ( $\mu\text{rad}$ )	
	$\delta a_1 = 300 \mu\text{rad}$	$\delta a_2 = 300 \mu\text{rad}$
500	20.2	23.8
400	18.3	20.2
300	16.5	16.5
200	14.7	12.8
100	12.8	9.16

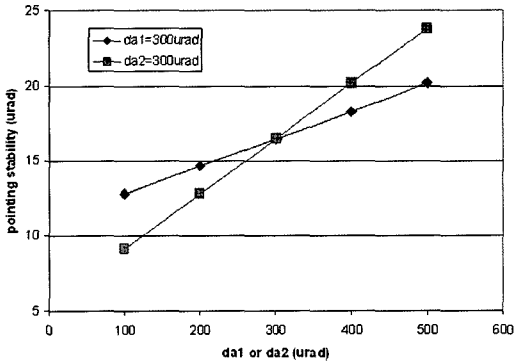


Fig. 9. Pointing stability according to each driving unit stability.

스캔 미케니즘의 포인팅 안정성은 구동유닛2보다 구동유닛1에 더 민감하게 변하는 것을 알 수 있다. 이는 구동유닛1의 성능을 향상시키면 더 효과적으로 포인팅 안정성을 높일 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 해양탐재체에서 채택하고 있는 이축경사 방식의 포인팅 안정성을 분석하였다. 이를 위하여 포인팅 모델을 제시하였고, 포인팅 안정성을 판단하기 위한 척도를 제시하였다.

분석결과, 이축경사 방식은 일반적으로 많이 사용하고 있는 짐벌 방식보다 26배정도 뛰어난 안정성을 갖는 것을 알 수 있었다. 또한, 구동유닛1이 구동유닛2보다 포인팅 안정성에 더 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

본 연구결과를 활용하면 해양탐재체에서 원하는 포인팅 안정성을 얻기 위하여 필요한 각 구동유닛의 안정성을 역으로 계산할 수 있다. 이는 미케니즘의 규격선정 및 분석에 활용 가능하다.

#### 참고문헌

- Belegundu, A. D. and Chandrupatla, T. R., 1999. Optimization concepts and applications in engineering, Prentice Hall, NY, USA.
- Bely, P. Y., 2003. The Design and Construction of Large Optical Telescopes, Springer, NY, USA.
- KARI, 2004. 통신해양기상위성 해양탐재체 개발사업 (1), 연차보고서.