

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(9), 806-813(2016)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.9.806>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

능동 합성개구레이더위성의 다섯 개 반작용휠 운용방법

손준원*, 박영웅

Five Reaction Wheel Operation Method for Active SAR Satellite

Jun-Won Son* and Young-Woong Park

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

For satellite attitude control and maneuver, normally four reaction wheels are used through pyramid configuration. However, if satellite's moment of inertia is large or available reaction wheels' capability is small, we can consider using five reaction wheels. In this case, we should think the arrangement of wheels and their operation method.

Active SAR satellite requires high agile maneuver about roll axis to achieve looking angle change. In this research, we study the operation method of five reaction wheels configuration for fast roll maneuver.

초 록

위성의 자세제어 및 기동을 위해서는 네 개의 반작용휠을 피라미드 형태로 배치하여 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 위성의 관성모멘트가 크거나 사용할 수 있는 반작용휠의 용량이 작은 경우에는 다섯 개의 반작용휠을 사용하는 것을 생각해볼 수 있다. 이 경우, 반작용휠 배치부터 운용방법까지 여러 가지 문제를 다시 고려해야 한다.

능동합성개구레이더 위성은 관측 각도 변화를 위해서 롤축 방향으로 빠른 기동이 요구된다. 본 논문에서는 합성개구레이더 위성의 롤축 방향 기동성능 향상을 위하여 다섯 개의 반작용휠을 배치하는 경우, 이를 운용하는 방법을 연구해본다.

Key Words : Satellite High Agile Maneuver(위성 고기동), Active SAR Satellite(능동 합성개구레이더 위성), Reaction Wheel(반작용휠)

1. 서 론

광학위성과는 달리 날씨가 좋지 않을 때나 야간에도 관측이 가능하며, 처리 방법에 따라서 다양한 정보를 얻을 수 있다는 장점 때문에, 최근 들어서 다양한 합성개구레이더 위성이 개발되어 발사되고 있다 [1-4]. 국내에서도 다목적실용위성

5호가 현재 궤도상에서 운용중에 있고, 후속으로 다목적실용위성 6호도 설계 및 개발이 진행되고 있다[5].

능동 SAR 위성의 주요기동은 관측을 하는 레이다의 지향방향을 바꾸는 롤축 기동이다. 그 다음으로 도플러 중심주파수 변화를 보상하기 위해서 요축 및 피치축 기동이 이뤄지지만, 이 때의

† Received : May 27, 2016 Revised : July 18, 2016 Accepted : July 29, 2016

* Corresponding author, E-mail : jwson@kari.re.kr

기동각은 작은 편이다[6]. 따라서 능동 SAR 위성의 기동을 위한 반작용휠 배치시에는 톨축에 많은 토크 및 모멘텀이 할당되도록 이루어지는 것이 타당하다[7].

일반적으로 저궤도 위성은 네 개의 반작용휠을 피라미드 형태로 배치하여 위성 자세제어를 수행한다. 하지만 위성의 관성모멘트가 크거나, 여러 가지 사유로 토크 및 모멘텀이 작은 반작용휠을 사용할 수 밖에 없을 경우는, 추가로 반작용휠을 장착하여 다섯 개를 사용하는 방법을 고려해볼 수 있다. 본 논문에서는 능동 SAR 위성의 톨축 고기동을 위해서 다섯 개의 반작용휠을 배치하고, 이를 운용하는 방법에 대해서 연구해보고자 한다.

위성의 반작용휠 배치와 관련한 기존 연구결과는 네 개의 반작용 휠을 사용하여 3축 모두 동일한 기동성능을 가지는 것을 목표로 하거나, 정지궤도위성의 피치축 모멘텀 바이어스를 고려하여 다섯 개의 반작용 휠을 사용하는 방법에 대해서 다루었다[8-9]. 반면 본 논문에서 다루고자 하는 능동 SAR 위성의 경우, 모든 축이 아닌 톨축 기동성을 높이기 위해서 다섯 개의 반작용휠을 사용하고, 탑재체 특성상 저궤도에서 운용되어야 하므로 위성이 기동하지 않는 정상상태에서는 제로 모멘텀이 되어야 하므로, 기존 연구결과를 이용하는데는 한계가 있다. 기존 연구결과 사용할 경우, 관성모멘트가 큰 피치와 요축으로 불필요하게 많은 토크와 모멘텀이 할당되거나, 제로 모멘텀의 달성이 불가능해지는 문제가 있다.

따라서 능동 SAR위성과 같은 1축 고기동 위성에 다섯 개의 반작용휠 배치를 하는 방법에 대해서 별도의 연구를 수행하였다[10-11]. 고기동 축 방향으로 두 개의 휠을 나란히 배치하고 나머지 세 개의 휠을 피라미드 형태로 배치하는 방법은 양방향 고기동이 가능하지만, 나머지 세 개 휠의 배치가 자유롭지 않고 휠 고장 발생시의 운용에도 제약이 있다[10]. 반면, 고기동 축 방향으로 한 개의 휠만 배치하고, 나머지 네 개의 휠은 피라미드 형태로 배치할 경우에는, 피라미드 휠의 배치가 자유롭지만, 단방향 고기동만 가능하다는 제약이 있다[11].

하지만 능동 SAR 위성의 기동 특성을 고려하면, 한쪽 방향 회전은 다섯 개의 휠을 모두 사용하여 고기동을 하고 반대방향 회전은 네 개의 휠만 사용하여 기동하는 형태로 전체 기동시간은 단축할 수 있다. 본 논문에서는 이에 대해서 살펴보고자 한다.

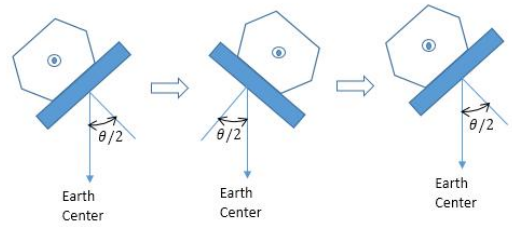


Fig. 1. SAR Satellite Main Maneuver

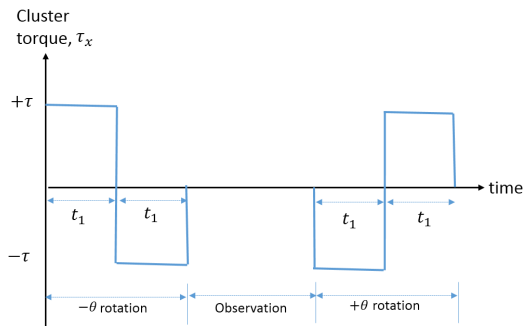


Fig. 2. Required Torque (A)

II. 본 론

2.1 능동 SAR 위성의 주요기동

능동 SAR 위성은 레이더의 지향방향을 바꾸기 위해서 Fig. 1처럼 톨축으로 기동을 한다. 평상시에는 지구중심을 기준으로 한쪽 방향만큼 치우쳐서 레이더를 지향하고 있다가, $-\theta$ 만큼 회전하여 관측을 하고, 다시 θ 만큼 회전하여 원래 자세로 돌아오는 형태이다.

위성을 bang-bang 방식으로 제어한다고 할 경우, 반작용휠로 Fig. 2와 같은 토크를 생성하면 된다. 본 연구에서는 다섯 개의 반작용휠을 배치하는 두 가지 방법을 살펴보고, 이와 같은 제어 토크를 생성하는 방법에 대해서 다루려고 한다.

2.2 반작용휠 배치 방법

본 절에서는 1축 고기동을 위한 다섯 개의 휠 배치방법에 대한 기존 연구결과를 간략하게 기술한다[10-11].

2.2.1 반작용휠 배치방법 (A) [10]

다섯 개의 휠을 Fig. 3과 같이 배치하고 각 축별 최대 가용 토크와 모멘텀을 구해보면 다음과 같다. 여기서 $\tau_{rw, \max}$ 와 $h_{rw, \max}$ 는 개별 반작용

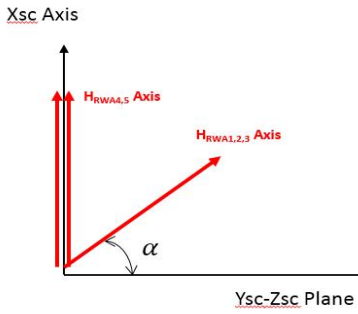


Fig. 3. Reaction Wheel Configuration (A)

휠의 최대 토크 및 최대 모멘텀을 의미한다.

$$[T_{max}, H_{max}] = \begin{bmatrix} 2 + 3s\alpha \\ \sqrt{3}c\alpha \\ 2c\alpha \end{bmatrix} [\tau_{rw,max}, h_{rw,max}] \quad (1)$$

위성이 기동을 하지 않는 정상상태에서 클러스터 모멘텀이 0이 되어야 하는 조건과, 휠의 가용범위가 양 방향 모두 동일해야 한다는 조건을 고려하면, 세 개의 휠의 배치각 α는 41.81°로 고정되고 휠의 정상상태 모멘텀은 다음과 같이 된다.

$$H_{nominal} = [+1, +1, +1, -1, -1]^T \cdot 0.5h_{rw,max} \quad (2)$$

따라서 각 축별 최대 가용토크와 모멘텀은 아래와 같아진다.

$$[T_{max}, H_{max}] = \begin{bmatrix} 4 \\ 1.29 \\ 1.49 \end{bmatrix} [\tau_{rw,max}, h_{rw,max}] \quad (3)$$

2.2.2 반작용휠 배치방법 (B) [11]

다섯 개의 휠을 Fig. 4와 같이 배치할 경우, 각 축별 최대 가용 토크와 모멘텀은 다음과 같이 나온다.

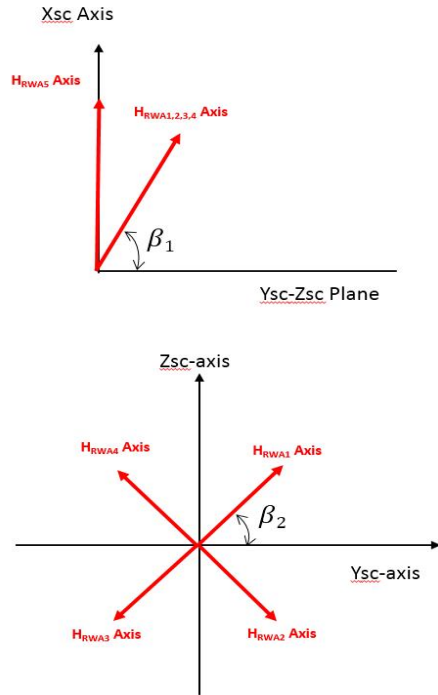


Fig. 4. Reaction Wheel Configuration (B)

$$[T_{max}, H_{max}] = \begin{bmatrix} 4s\beta_1 + 1 \\ 4c\beta_1c\beta_2 \\ 4c\beta_1s\beta_2 \end{bmatrix} [\tau_{rw,max}, h_{rw,max}] \quad (4)$$

반작용휠들의 정상상태 모멘텀은 다음과 같이 설정한다.

$$H_{nominal} = \begin{bmatrix} + (0.5h_{rw,max} - \Delta/4s\beta_1) \\ - (0.5h_{rw,max} + \Delta/4s\beta_1) \\ + (0.5h_{rw,max} - \Delta/4s\beta_1) \\ - (0.5h_{rw,max} + \Delta/4s\beta_1) \\ \Delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Δ는 0에 가까운 작은 값이지만 휠의 토크 특성이나 수명에는 영향을 주지 않을 정도로 회전할 때의 모멘텀을 의미하며, 위성의 고기동 회전 방향에 따라서 + 또는 - 값으로 잡아준다. 예를 들어서, Fig. 4와 같은 배치에서 물축을 시계방향으로 회전시키는데 다섯 개의 휠을 모두 사용하면, Δ를 +로 잡으면 된다.

2.3 반작용휠 배치방법 (A)의 운용

Figure 3과 같은 배치에서 위성 기동을 위하여 Fig. 2와 같은 토크를 생성하는 방법을 살펴보자. 휠의 모멘텀이 포화되지 않는다면 Fig. 2와

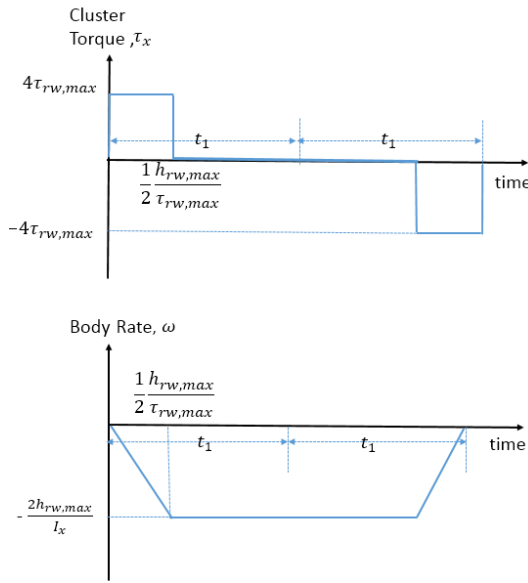


Fig. 5. Output Torque and Body Rate(A)

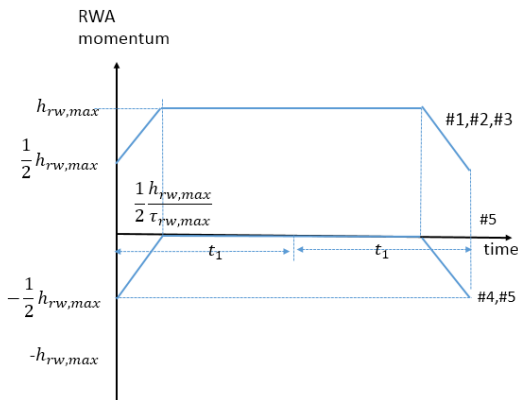


Fig. 6. Reaction Wheel Momentum (A)

같은 토크를 생성할 수 있지만, 회전각 θ 의 절대값이 클 경우에는 휠 모멘텀이 포화되므로 bang-bang 방식이 아니라 아래와 같은 bang-off-bang 방식이 된다.

$$(i) 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}}$$

다섯 개의 휠이 모드 토크를 생성가능하며, 전체 토크는 $4\tau_{rw,max}$ 가 된다.

$$(ii) t \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}}$$

모든 휠의 모멘텀이 포화되어 생성 토크는 0이

된다.

이를 그림으로 표시해보면 Fig. 5 및 6과 같다. 해당 그림은 Fig. 2의 '- θ rotation'에 대응되며, '+ θ rotation'은 그림들을 뒤집으면 된다.

위성의 기동각은 Fig. 5의 위성 각속도를 적분한 값으로 표시된다. 기동시간은 이를 역으로 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$(i) 0 \leq \theta \leq \frac{1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{1}{4} \frac{I_x \cdot \theta}{\tau_{rw,max}}} \quad (6)$$

$$(ii) \theta \geq \frac{1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}}$$

$$t_1 = \frac{1}{4} \frac{I_x \cdot \theta}{h_{rw,max}} + \frac{1}{4} \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}} \quad (7)$$

위 식에서 나온 값은 t_1 으로 θ 회전에 소요되는 전체 시간은 $2t_1$ 이다. 그리고 $-\theta$ 기동과 $+\theta$ 기동에 걸리는 전체 시간은 $4t_1$ 이 된다.

2.4 반작용휠 배치 방법 (B)의 운용

Figure 4와 같은 배치를 하고 Δ 를 +로 잡은 상태로 Fig. 2와 같은 토크를 생성하는 경우를 살펴보자. Bang-bang 방식으로 롤축을 시계방향으로 회전시킬 경우, 5번 휠의 모멘텀이 Δ 에서 +방향으로 증가하여 +토크를 내다가 시간이 t_1 에 도달하면, 다시 -방향으로 감소하며 -토크를 내다가 Δ 로 돌아온다.

하지만 반시계방향으로 회전하는 구간에서도 5번 휠을 사용할 경우, 속도가 0을 지나서 방향전환을 해야만 하는데 이는 휠 수명에 좋지 않은 영향을 준다.

하지만 이 배치에서 반대방향 기동이 불가능한 것은 아니다. Δ 를 +로 잡았을 경우에도, 1번부터 4번까지의 휠은 양방향으로 자유롭게 움직일 수 있으므로, 롤축을 반시계 방향으로 회전시킬 수도 있다.

Figure 4와 같은 배치에서 한쪽 방향으로는 다섯 개의 휠을 사용하고, 반대쪽 방향으로는 네 개의 휠만 사용하여 기동할 때에 대해서 살펴보자. 이 때의 토크 특성은 휠모멘텀이 포화되지 않는다는 전제하에서 Fig. 2가 변형된 Fig. 7과 같을 것이다. $+\theta$ rotation의 시간이 t_1 에서 t_2 로 변경되었다.

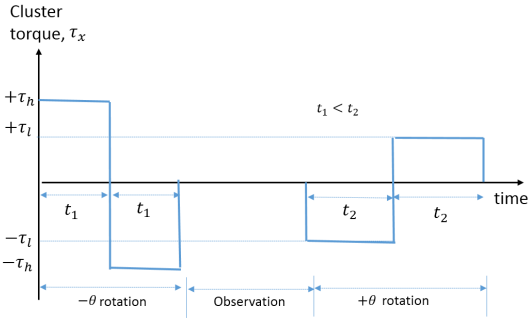


Fig. 7. Required Torque (B)

이제 위성 기동을 위하여 Fig. 7과 같은 토크를 생성하는 방법을 살펴보자.

2.4.1 다섯 개의 휠을 사용가능한 회전

Figure 7의 ‘ $-\theta$ rotation’에 해당하는 부분이다. 다섯 개의 휠이 모두 사용 가능한 경우는 Fig. 8과 같이 롤 축 방향으로 bang-off-bang 방식의 제어토크를 생성할 수 있다. 표시 및 해석의 단순화를 위해서 Δ 로 인한 영향은 5번 휠의 정상상태 모멘텀을 제외하고는 생략하였다. Δ 가 작은 값으로 가정하였으므로, 전체적인 경향이나 결과에는 큰 영향을 주지 않는다.

Figure 8에서 표시한 토크는 Fig. 7의 $\pm \tau_h$ 부분에 해당된다. 위성의 회전각 θ 가 작은 경우는 Fig. 8의 $\pm (4s\beta_1 + 1)\tau_{rw,max}$ 의 토크에 해당하는 부분만으로도 충분히 기동이 가능하므로 Fig. 7과 같이 +와 - 토크가 연속된 형태가 나온다. 하지만 회전각이 클 때는, 휠의 모멘텀이 포화되면서 Fig. 8과 같이 시간이 지날수록 크기가 줄어드는 계단 형태의 토크가 클러스터에서 나온다.

시간에 따른 생성토크의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

$$(i) 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}}$$

다섯 개의 휠이 모두 토크를 생성할 수 있으며, 전체 토크는 $(4s\beta_1 + 1)\tau_{rw,max}$ 가 된다.

$$(ii) \frac{1}{2} \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}} \leq t \leq \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}}$$

1번부터 4번휠은 모멘텀이 포화되어 토크를 못 내지만 5번 휠은 계속 토크 생성이 가능하다.

$$(iii) t \geq \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}}$$

모든 휠의 모멘텀이 포화되어서 토크 생성이 불

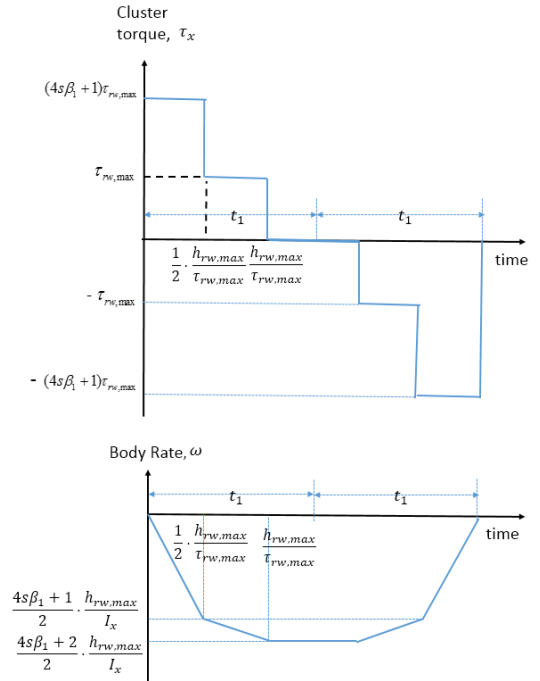


Fig. 8. Output Torque and Body Rate (B-1)

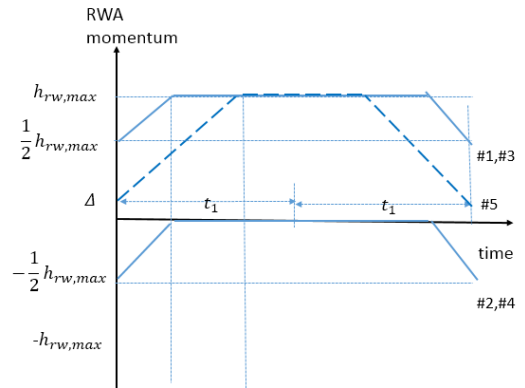


Fig. 9. Reaction Wheel Momentum (B-1)

가능하다.

위와 같은 기동을 할 때의 다섯 개의 휠의 모멘텀 변화는 Fig. 9와 같다. 1번부터 4번 휠은 $1/2 \cdot h_{rw,max}$ 만큼의 범위를 움직이지만 5번 휠은 $h_{rw,max}$ 의 범위만큼 움직인다.

위성이 실제로 회전하는 회전각은 Fig. 8의 위성 회전각속도를 적분하면 나온다. 이를 토대로 위성의 기동시간을 역으로 계산할 수 있다. 회전각의 절대값을 θ 라고 할 경우, t_1 을 계산해보면 다음과 같이 나온다. 식을 단순화하기 위해서 Δ

는 0으로 두었다.

$$(i) 0 \leq \theta \leq \frac{4s\beta_1 + 1}{4} \cdot \frac{1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{1}{4s\beta_1 + 1} \cdot \frac{I_x \cdot \theta}{\tau_{rw,max}}} \quad (8)$$

$$(ii) \theta \geq \frac{4s\beta_1 + 1}{4} \cdot \frac{1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}} \quad \& \quad (9)$$

$$\theta \leq (3s\beta_1 + 1) \cdot \frac{1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}}$$

$$t_1 = -2s\beta_1 \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}} + \sqrt{(4s^2\beta_1 + s\beta_1) \left(\frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}} \right)^2 + \frac{I_x \cdot \theta}{\tau_{rw,max}}}$$

$$(iii) \theta \geq (3s\beta_1 + 1) \cdot \frac{1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}} \quad (10)$$

$$t_1 = \frac{1}{4s\beta_1 + 2} \left\{ \frac{I_x \cdot \theta}{h_{rw,max}} + (s\beta_1 + 1) \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}} \right\}$$

위의 값은 t_1 이므로, 다섯 개의 반작용휠을 사용하여 θ 만큼 회전하는데 소요되는 전체시간은 $2t_1$ 으로 계산하면 된다.

2.4.2 네 개의 휠을 사용가능한 회전

Figure 7의 '+ θ rotation'에 해당하는 부분이다. 5번 휠의 정상상태 모멘텀인 Δ 와 반대방향으로 토크를 내야 하는 경우에는, 5번 휠을 제외한 네 개의 반작용휠만 사용가능하다. 5번 휠은 이론적으로는 사용이 가능하지만 휠 속도가 0을 지나쳐서 회전방향이 변하므로 수명에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 따라서 1번부터 4번까지의 휠만 사용한다.

이 때는 Fig. 10과 같이 롤 축 방향으로 bang-off-bang 방식의 제어토크를 생성할 수 있다. 다섯 개의 휠과는 달리, 네 개의 휠을 사용할 때는 모든 휠이 동시에 포화된다. Fig. 10에서 표시한 토크는 Fig. 7의 $\pm \tau_l$ 부분에 해당된다.

Figure 11은 Fig. 10과 같은 기동시의 반작용휠 모멘텀 변화이다. 5번 휠은 사용하지 않으므로, 모멘텀이 그대로 유지되고, 나머지 휠들은 $1/2 \cdot h_{rw,max}$ 만큼의 범위를 움직이며 한쪽 방향으로 토크를 낸다.

위성이 실제로 회전하는 회전각은 Fig. 10의 위성 회전각속도를 적분하면 나오며, 이를 토대

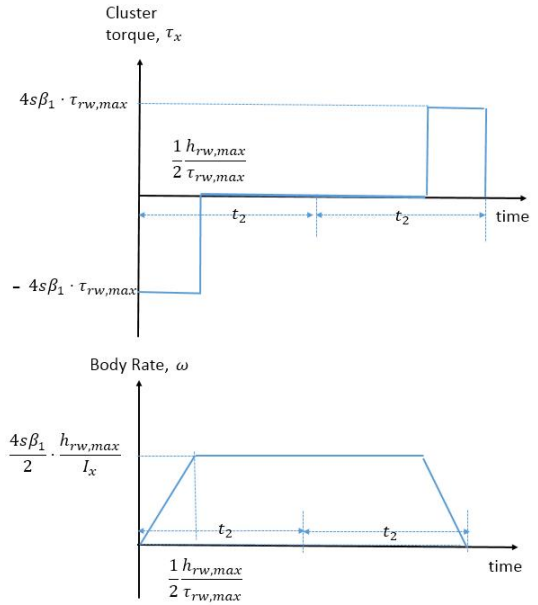


Fig. 10. Output Torque and Body Rate (B-2)

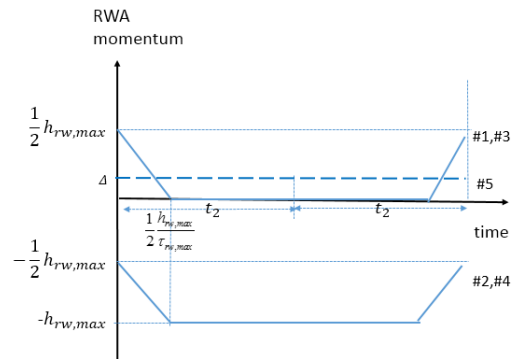


Fig. 11. Reaction Wheel Momentum (B-2)

로 위성의 기동시간을 역으로 계산할 수 있다. 식을 단순화하기 위해서 Δ 는 0으로 두고 계산해보면 식(11)~(12)와 같이 나온다.

$$(i) 0 \leq \theta \leq \frac{s\beta_1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}}$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{1}{4s\beta_1} \cdot \frac{I_x \cdot \theta}{\tau_{rw,max}}} \quad (11)$$

$$(ii) \theta \geq \frac{s\beta_1}{I_x} \cdot \frac{h_{rw,max}^2}{\tau_{rw,max}}$$

$$t_2 = \frac{1}{4s\beta_1} \frac{I_x \theta}{h_{rw,max}} + \frac{1}{4} \frac{h_{rw,max}}{\tau_{rw,max}} \quad (12)$$

정리하자면 위성이 네 개의 반작용휠을 사용하여 절대값 θ 만큼 톨축을 중심으로 회전할 경우에는 회전각의 크기에 따라서 식(11) 또는 식(12)에서 계산한 t_2 의 2배인 $2t_2$ 만큼의 시간이 필요하다.

2.4.3 전체 기동 시간

SAR 위성은 Fig. 1처럼 $-\theta$ 회전과 $+\theta$ 회전을 연속으로 수행하여 다시 원래 위치로 돌아온다. 이 때 소요되는 전체 기동 시간은 Fig. 3과 같은 배치(A)에서는 $4t_1$ 이었다. 하지만 Fig. 4와 같은 배치(B)는 방향별 기동시간이 달라져서, 전체 기동시간은 $2t_1 + 2t_2$ 가 된다.

2.5 시뮬레이션

다음과 같이 위성 및 반작용휠을 가정하고 시뮬레이션을 수행하여 기동시간을 계산해보았다. I_x 는 위성의 톨축 관성모멘트를 의미한다.

반작용휠 배치는 배치(A)와 배치(B)의 최대출력토크 및 모멘텀이 비슷하도록 설정하였다.

Table 1과 같은 환경에서 배치(A) 및 배치(B)의 최대출력 토크 및 모멘텀은 아래와 같다. 배치각이 자유롭지 않은 배치(A)와는 달리 배치(B)는 배치각이 자유로우므로 우리가 원한다면 얼마든지 톨축 방향으로 토크를 더 키워줄 수도 있다.

$$\begin{bmatrix} T_{\max} \\ H_{\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 1.29 \\ 1.49 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{rw, \max} \\ h_{rw, \max} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} T_{\max} \\ H_{\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.48 \\ 1.29 \\ 1.49 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{rw, \max} \\ h_{rw, \max} \end{bmatrix} \quad (14)$$

배치(B)에서는 최대 $4.48\tau_{rw, \max}$ 의 토크를 생성할 수 있지만, 우리는 2.3절에서 살펴본 바와 같이 기동방향에 따라서 사용하는 반작용휠 개수를 달리한다. 따라서 다섯 개의 반작용휠을 모두 사용하는 기동방향은 $(4s\beta_1 + 1)\tau_{rw, \max}$ 에 해당하는 $4.48\tau_{rw, \max}$ 의 토크를 생성할 수 있지만,

Table 1. Satellite and RWA Size

I_x	2000 kg · m ²
$\tau_{rw, \max}$	0.1 Nm
$h_{rw, \max}$	10 Nms
α	41.81°
β_1	60.48°
β_2	49.11°

네 개의 반작용휠만 사용하는 기동방향에서는 $4s\beta_1$ 에 해당하는 $3.48\tau_{rw, \max}$ 의 토크만 생성 가능하다.

Figure 12는 두 가지 반작용휠 배치를 사용해서, 위성을 θ 만큼 톨축으로 회전시켰을 때의 시간을 식(6)~(7), 식(8)~(10), 식(11)~(12)를 이용하여 계산해본 결과이다. 그림에서 A는 배치(A)의 환경에서 $-\theta$ 회전 또는 $+\theta$ 시 소요되는 기동시간 $2t_1$ 을 의미한다. B-1은 배치(B)의 환경에서 다섯 개의 반작용휠을 이용하여 $-\theta$ 회전시 소요되는 기동시간 $2t_1$ 을, B-2는 네 개의 반작용휠을 이용하여 $+\theta$ 회전시의 기동시간 $2t_2$ 를 의미한다.

B-1이 다섯 개의 반작용휠로 최대 $4.48\tau_{rw, \max}$ 를 낼 수 있으므로 가장 빠르고, A가 다섯 개의 반작용휠로 최대 $4\tau_{rw, \max}$ 를 낼 수 있으므로 그 다음으로 빠르며, B-2가 네 개의 반작용휠로 최대 $3.48\tau_{rw, \max}$ 를 낼 수 있으므로 가장 느리다.

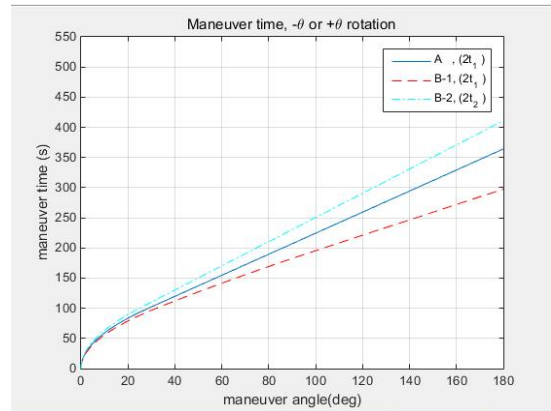


Fig. 12. Maneuver Time (θ rotation)

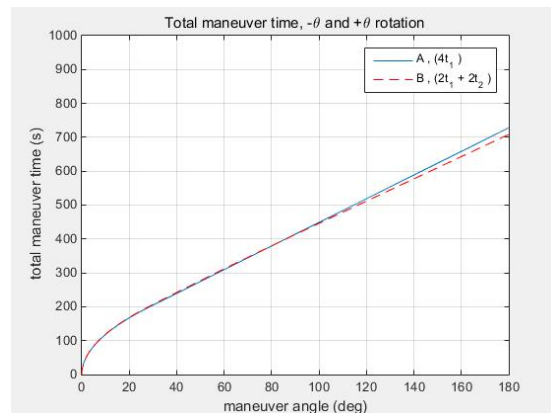


Fig. 13. Maneuver Time (2θ rotation)

SAR 위성이 다시 원래 위치로 돌아오는 기동 시간을 비교해본 결과는 Fig. 13과 같다. 배치(A)와 배치(B)의 시간이 거의 비슷하며, 기동각이 큰 경우는 배치(B)가 조금 더 빠른 것을 알 수 있다. 배치(B)의 경우 다섯 개의 휠을 사용할 때는 배치(A)보다 빠르고, 네 개의 휠을 사용할 때는 배치(B)보다 느리다. 따라서 두 개를 합쳤을 때는 배치(A)와 비슷해질 수 있다.

기존 연구결과에서 분석해본 결과에 따르면, 여러 가지 측면에서 배치(B)가 더 좋다는 것을 알 수 있다[11]. 따라서 전체 기동시간도 Fig. 13 처럼 비슷하게 만들 수 있다면 배치(B)를 이용하여 SAR 위성을 기동시키는 것이 바람직하다.

III. 결 론

능동 SAR 위성은 롤축으로 정해진 각도만큼 회전하였다가 다시 반대로 회전하여 원래 위치로 돌아오는 기동을 주로 수행한다. 해당 기동을 빠르게 수행하기 위하여 롤축으로 많은 토크를 할당해야 한다. 본 연구에서는 다섯 개의 반작용휠을 배치하여 롤축으로 많은 토크를 할당하는 두 가지 방법을 비교해보았다. 배치방법(A)의 경우는 양쪽 방향 회전시간이 동일하고, 배치방법(B)의 경우는 한쪽 방향 회전은 빠르게 다른 쪽 방향 회전은 느리게 회전을 하지만, 이 둘을 합친 전체 시간은 배치방법(A)와 거의 비슷하게 나올 수 있음을 확인하였다. 자유도나 안정성 측면에서 배치방법(B)가 더 좋으므로, 능동 SAR 위성에서 다섯 개의 휠을 이용한다면 배치방법(B)를 사용하는 것이 타당하다.

References

1) Covello, F., Battazza, F., Coletta, A., Manoni, G., and Valentini, G. "Cosmo-skymed Mission Status: Three Out of Four Satellites in Orbit", IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009, pp. 773-776.

2) Werninghaus, R., and Buckreuss, S., "The TerraSar-X Mission and System Design", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 48, No. 2, 2010, pp. 606-614

3) Rodriguez-Cassola, M. et. al, "First Bistatic Spaceborne SAR Experiments with TanDEM-X", IEEE Geoscience and Remote Sensing letters, Vol. 9, No., 1, 2012, pp. 33-37.

4) Arikawa, Y., Sarywatari, H., Hatooka, Y., and Suzuki, S., "ALOS-2 Launch and Early Orbit Operation Result", IEEE International GeoScience and Remote Sensing Symposium, 2014, pp. 3406-3409

5) Lee, S.-Y., Kim, J.-H., and Yoon, J.-C., "Development of KOMPSAT-5 System," Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2012 Fall, pp. 846~850.

6) Oh, S.-H. Lee, S.-H., Yoon, S.-T., and Kim, J.-H., "Satellite Attitude Command Generation Minimizing the Doppler Centroid," Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2012, Spring, pp. 1059~1063.

7) Son, J.-W., and Park, Y.-W., "A Study on Active SAR Satellite Maneuver Time Reduction through Sequential Rotation," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science, Vol. 43, No. 7, 2015, pp. 648~656

8) Yoon, H.-J., Seo, H.-H., and Choi, H.-T., "Optimal uses of reaction wheels in the pyramid configuration using a new minimum infinity-norm solution," Aerospace Science and Technology, Vol. 39, 2014, pp. 109-119

9) Park, Y.-W., and Choi, H.-T., "Study on the wheel allocation and the wheel momentum off-loading for COMS having asymmetric solar array configuration," Aerospace Engineering and Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 57-63

10) Son, J.-W., Lee, S.-H., and Choi, H.-T., "Reaction Wheel Arrangement of 1-axis Highly Agile Satellite," Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Science, 2014, Autumn, pp. 563~567

11) Son, J.-W., and Park, Y.-W., "Five Reaction Wheel Arrangement for 1-axis One Directional Highly Agile Satellite," Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2015, Autumn