

# 포/포탑 구동 시스템의 절대 각 오차 제어 모드에 대한 모션 프로파일 생성 기법

엄명환<sup>1)</sup> · 송신우<sup>2)</sup> · 박일우<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> (주)두산 모트롤 BG 방산연구개발 3팀

<sup>2)</sup> 한화디펜스(주) 화력체계 1팀

## Motion Profile Generation Method for Absolute Angular Error Control Mode of Gun/Turret Driving System

Myunghwan Eom<sup>1)</sup> · Sinwoo Song<sup>2)</sup> · Ilwoo Park<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Defense System R&D Team 3, Doosan Corporation Mottrol, Korea

<sup>2)</sup> Artillery System Team 1, Hanwha Defense, Korea

(Received 27 May 2019 / Revised 2 September 2019 / Accepted 20 September 2019)

### ABSTRACT

In this paper, we will discuss the absolute angular error control mode for the Gun/Turret driving system. The Gun/Turret driving controller receives absolute angular error calculated from the fire control system (FCS). Thus, the Gun/Turret driving controller is subjected to step command to cause residual vibration and system unstable. In order to reduce residual vibration and to ensure the system stability, we propose an error motion profile method with two types of trapezoidal and S-Curve. The validity of the proposed error motion profile method is confirmed via simulation by observing that the resulting position error, driving power, and power density satisfied the control performance.

Key Words : Absolute Angular Error Control Mode(절대 각 오차 제어 모드), Gun/Turret Driving System(포/포탑 구동 시스템), Fire Control System(사격통제시스템), Trapezoidal Error Motion Profile(사다리꼴 오차 모션 프로파일), S-Curve Error Motion Profile(S-Curve 오차 모션 프로파일)

### 1. 서론

포/포탑 구동 시스템은 사격통제시스템(Fire Control

System)으로부터 상대 각도 명령을 받아서 포/포탑의 위치 센서를 통해 구동되는 상대 각 제어 모드와 사격통제시스템이 관성항법센서(INS)로부터 측정된 포/포탑 자세 정보를 기반으로 계산된 절대 각도 오차를 명령으로 받아 포/포탑 구동 제어기가 절대 각도 오차를 0으로 수렴하게 하는 절대 각 오차 제어 모드로

\* Corresponding author, E-mail: Ilwoo2.Park@doosan.com  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

나뉜다. 여기서, 절대 각 오차 제어 모드는 일반적인 목표 명령(Target Command)에 대한 모션 프로파일을 적용할 수 없다. 절대 각도로 계산된 실시간 각도 오차 정보가 step 형태로 포/포탑 구동 제어기에 전달되기 때문에 초기 목표 각과 포/포탑의 위치의 차가 클수록 시스템의 불안정성을 야기한다. 따라서, 오차 정보에 종속적인 속도 프로파일을 설계가 필수적이며 오차가 0으로 수렴하도록 비대칭(Asymmetric) 모션 프로파일 설계가 요구 된다.

제어 시스템에서 모션 프로파일(Motion Profile) 기법은 목표 정확도 및 진동 억제를 요하는 다양한 제어 시스템에 적용 및 연구되어왔다<sup>1-5)</sup>. 모션 프로파일 개발의 핵심은 안정성을 확보하며 고속으로 구동하는 것과 구동 후 잔존하는 잔류진동(residual vibration)을 억제하는 것이다. 특히, 제어 시스템에서 기구적 강성이 많이 떨어져서 진동에 취약할 경우 모션 프로파일 제어 기술은 필수적이다. 포/포탑 시스템에서 목표 명령에 대한 시스템의 즉각적인 응답은 전력변환장치 및 모터드라이브의 공급전력 제한과 구동 모터의 최대 구동 토크 제한을 발생시킨다. 또한, 오버슈트로 인한 제어 성능 저하를 만들어 포/포탑 구동에서 제어 불안정성 및 발산의 요소가 크게 나타나게 한다. 포/포탑 시스템의 부드러운 움직임은 기준 궤적(Reference Trajectory)에 해당하는 모션 프로파일에 크게 영향을 받으며, 모션 프로파일 설계는 제어성능 및 구동장치의 파워 밀도를 결정짓는 핵심적 요소이다.

포/포탑 구동 시스템의 전력변환제어기는 요구되는 체적이 제한되어 있어 체적을 고려하여 설계하는 것이 필수적이다. 사다리꼴(Trapezoidal) 오차 모션 프로파일은 부하의 최대 구동 전력이 모션 제어에서 smoothness의 특성을 가지는 S-Curve 오차 모션 프로파일에 비해 크게 나타난다. 따라서, 반복적인 침투 전력을 보상하기 위해서는 전력변환장치의 용량을 늘리는 대신 전력변환장치 내부에 대용량 커패시터로 구성된 에너지저장기(Energy Storage)를 적용한다<sup>6,7)</sup>. 하지만, 에너지저장기는 비교적 낮은 수명을 가지고 커패시터 자체로도 전기구동 고장 발생의 주된 원인이 된다. 또한, 대기온도, 진동 및 충격에 의해 영향을 많이 받으므로 방열 및 공간 배치의 적절성이 고려되어야 하는 문제를 가진다<sup>8,9)</sup>. 따라서 에너지저장기 용량을 감소시킴으로써 전력 공급 장치의 체적감소 및 전력밀도 최적화를 위해서는 S-Curve 오차 모션 프로파일의 적용은 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 본 논

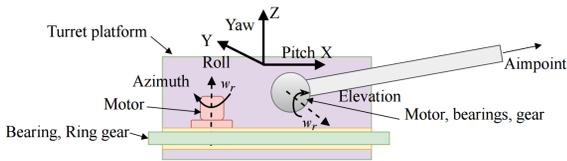
문에서는 사격통제시스템으로부터 인가되는 오차 명령에 대해 포/포탑 구동 시스템이 안정적으로 구동할 수 있도록 사다리꼴 오차 모션 프로파일과 S-Curve 오차 모션 프로파일 생성 방법을 제안한다.

본 논문의 주된 기여도는 다음과 같다. 절대 각 오차 명령에 대한 사다리꼴 오차 모션 프로파일과 S-Curve 오차 모션 프로파일 설계 방법을 제안하였고, 두 기법에 따른 모터드라이브의 구동 전력 비교 분석을 통해 전력 공급 장치의 전력밀도를 분석하여 제안한 S-Curve 오차 모션 프로파일 설계에 대한 성능을 검증하였다. 또한, 관성항법센서 없이 절대 각 오차 제어 모드를 모사하기 위해 좌표변환을 통한 포/포탑의 자세 각도를 산출하여 오차 모션 프로파일 적용을 위한 모의 환경을 구성하였다.

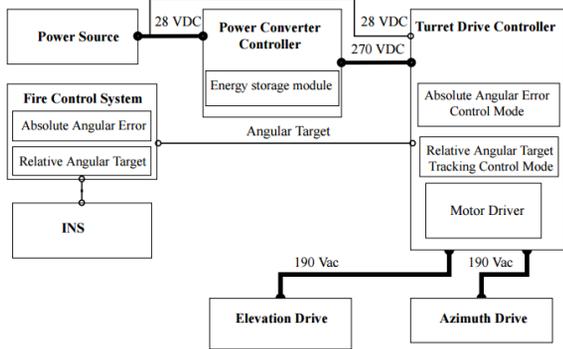
## 2. 본 문

### 2.1 포/포탑 구동 시스템

본 논문에서 제시하고 있는 포/포탑 구동 시스템은 Fig. 1 (a)와 같으며, 선회 및 고저 2축에 대한 구동이 가능하다. 사격통제시스템은 Fig. 1 (b)에서 볼 수 있듯이 관성항법센서로부터 절대 좌표정보를 획득 및 자세 계산을 통해 포/포탑 구동 제어기(Gun/Turret Drive Controller)로 절대 또는 상대 구동 명령을 전달하여 포/포탑을 구동하게 한다. 포/포탑 구동 제어기는 선회 및 고저 2축의 서보 모터를 정밀한 토크 제어를 통해 위치 제어할 수 있고, 전력변화장치는 저전압의 입력 전원을 고전압으로 승압하여 부하 구동에 필요한 에너지를 공급하는 기능을 수행한다. 여기서, 상대 각 제어 모드는 사격통제시스템에서 계산된 상대 명령 각도를 전송받아 위치 센서 기반 구동 제어를 수행한다. 반면, 절대 각 오차 제어 모드는 관성항법센서를 통해 사격통제시스템으로부터 절대 각 오차를 전송받아 절대 각도로 구동하게 된다. 일반적으로 상대 각 제어 모드는 목표 명령에 대한 모션 프로파일을 통해 목표 위치로 구동하면 되지만, 절대 각 오차 제어 모드의 경우는 사격통제시스템으로부터 오차 정보를 받기 때문에 오차 정보에 대한 별도의 모션 프로파일 없이 구동하는 것은 발산의 위험성이 존재하며 시스템의 불안정성을 초래한다. 따라서, 오차 정보에 대한 모션 프로파일 설계는 필수적이며 2.3절과 2.5절에서 오차에 대한 모션 프로파일 설계 방법에 대해 자세히 설명한다.



(a) Gun/Turret driving system



(b) Block diagram of a Gun/Turret control system

Fig. 1. Structure of a Gun/Turret driving system

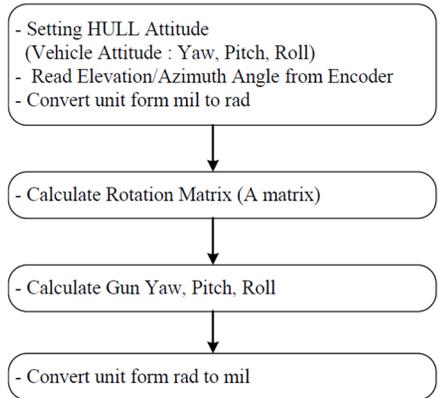
2.2 절대 각 오차 제어 모드

본 절에서는 관성항법센서없이 좌표변환을 통한 포/포탑의 자세 각 정보를 계산하는 방법에 대해 설명한다. Fig. 2에서 포 자세 계산의 흐름도를 볼 수 있으며, 차체(HULL) 자세 yaw, pitch, roll 각과 차체 기준 방위각, 고각으로부터 포의 자세 yaw, pitch, roll 각도를 계산하게 된다. 여기서, 차체와 포의 상대적 위치는 포/포탑의 엔코더 위치 센서로부터 측정 가능하며 차체 기준 포탑의 선회 각도는  $\theta_t$ , 포탑 기준 포 고각은  $\theta_g$ 로 표현된다. 따라서, 체계 좌표계로부터 차체 및 포 좌표계 변환 식을 통해 관성항법센서의 각도를 산출할 수 있으며

$$R_x(\theta_{INS})R_y(\phi_{INS})R_z(\psi_{INS}) = R_y(\phi_G)R_z(\psi_T)R_x(\theta_{Hull})R_y(\phi_{Hull})R_z(\psi_{Hull}) \quad (1)$$

$$A \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

과 같이 유도된다. 여기서, 좌변은  $\theta_{INS}$ ,  $\phi_{INS}$  및  $\psi_{INS}$ 는 각각 관성항법센서의 롤, 피치, 요 각도,  $\theta_G$ ,  $\psi_T$ 는 포의 피치, 포탑의 요 각도이며,  $\theta_{Hull}$ ,  $\phi_{Hull}$  및  $\psi_{Hull}$ 은 차체의 롤, 피치, 요 각도로 정의된다. 식 (1) 좌변의 좌표변환 행렬(Coordinate Transformation Matrix)은



(a) Flow chart of absolute angular control mode

$$\begin{bmatrix} i_g \\ j_g \\ k_g \end{bmatrix} = R_x(INS_{Roll})R_y(INS_{Pitch})R_z(INS_{Yaw}) \begin{bmatrix} I \\ J \\ K \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_h \\ j_h \\ k_h \end{bmatrix} = R_x(HULL_{Roll})R_y(HULL_{Pitch})R_z(HULL_{Yaw}) \begin{bmatrix} I \\ J \\ K \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_g \\ j_g \\ k_g \end{bmatrix} = R_y(Gun_{EL})R_z(Turret_{AZ}) \begin{bmatrix} i_h \\ j_h \\ k_h \end{bmatrix}$$

$$R_x(INS_{Roll})R_y(INS_{Pitch})R_z(INS_{Yaw}) = R_y(Gun_{EL})R_z(Turret_{AZ})R_x(Hull_{Roll})R_y(Hull_{Pitch})R_z(Hull_{Yaw})$$

A matrix

(b) Calculation of absolute angular

Fig. 2. Absolute angular control mode

$$\begin{bmatrix} C_{\psi_{INS}}C_{\phi_{INS}} & C_{\psi_{INS}}S_{\phi_{INS}} & -S_{\psi_{INS}} \\ S_{\psi_{INS}}S_{\phi_{INS}}C_{\psi_{INS}} - C_{\psi_{INS}}S_{\psi_{INS}} & S_{\psi_{INS}}S_{\phi_{INS}}S_{\psi_{INS}} - C_{\psi_{INS}}C_{\psi_{INS}} & S_{\psi_{INS}}C_{\phi_{INS}}C_{\psi_{INS}} - C_{\psi_{INS}}S_{\phi_{INS}} \\ S_{\psi_{INS}}C_{\phi_{INS}}C_{\psi_{INS}} - C_{\psi_{INS}}S_{\psi_{INS}} & S_{\psi_{INS}}S_{\phi_{INS}}C_{\psi_{INS}} - C_{\psi_{INS}}S_{\psi_{INS}} & S_{\psi_{INS}}S_{\phi_{INS}}S_{\psi_{INS}} - C_{\psi_{INS}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

와 같이 표현된다. 여기서,  $C$ 는 코사인 함수,  $S$ 는 사인 함수를 나타내며, A matrix는  $A \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ 로 정의된다. 관성항법센서의 각도인 차체 자세는

$$\begin{aligned} INS_{Yaw} &= \psi_{INS} = \text{atan2}\left(\frac{a_{12}}{\cos\phi_{INS}}, \frac{a_{11}}{\cos\phi_{INS}}\right) \\ INS_{Pitch} &= \phi_{INS} = -\text{asin}(a_{13}) \\ INS_{Roll} &= \theta_{INS} = \text{atan2}\left(\frac{a_{23}}{\cos\phi_{INS}}, \frac{a_{33}}{\cos\phi_{INS}}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

과 같이 유도된다. 따라서, 절대 각 오차는 목표 각도와 INS의 피치, 요 각도의 차로

$$\begin{aligned} Error_{AZ} &= Target_{AZ} - INS_{Yaw} \\ Error_{EL} &= Target_{EL} - INS_{Pitch} \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 정의되며, 절대 각 오차를 0으로 제어 하는 것을 목표로 한다. 여기서,  $Target_{AZ}$ ,  $Target_{EL}$ 은 각 각 선회, 고저 목표 명령 각도이다.

### 2.3 Trapezoidal 오차 프로파일 생성 기법

2.2절에서 설명한 절대각 오차 제어 모드의 경우, 포/포탑 구동 제어기는 사격통제시스템으로부터 오차 명령을 받는다. 이때, 오차 명령은 포/포탑 구동 제어기 측면에서 보면 step 신호로 인가되므로 포/포탑 구동 시스템에 기구적 충격을 줄 뿐만 아니라 시스템 발산의 가능성이 높다. 오차 명령에 대한 프로파일은 일반적으로 모션 프로파일에서 많이 적용되고 있는 Trapezoidal 프로파일을 응용할 수 있다. 프로파일은 구동부의 물리적인 제한을 만족하는 가속구간, 등속구간, 감속구간의 속도 프로파일을 생성하고, 속도 프로파일을 속도 제어기의 명령으로 사용한다. 가속구간과 등속구간에서는 입력되는 위치 오차 명령과 상관없이 계산 가능하므로, 최대속도와 최대가속도 제한이 가능하다. 감속구간의 시작점은 위치 오차의 크기(남은 이동 거리)로부터 결정되고, 그 기울기 또한 위치 오차의 크기와 관계있다. 즉, 속도 프로파일로부터 생성되는 위치 프로파일과 실제 이동 거리의 차이가 많을수록 감속 기울기는 줄어드는 경향이 있다. 단, 정지 판단 조건 설정 시 가속도(감속도) 값이 최대가속도가 넘지 않도록 위치 오차 및 속도 변화량을 고려하여야 한다. 본 논문에서 제안한 Trapezoidal 오차 명령에 대한 프로파일 설계는 가속구간과 등속구간은 기존 속도 프로파일 생성 기법과 동일하며, 감속구간의 경우는 속도와 위치의 상관관계를 구하여 적용한다. 남은 위치에 대한 속도 값을 계산하여 프로파일을 생성하며 생성 함수는

$$\begin{aligned} V_{acc} &= A_{max}t \\ V_{const} &= V_{max} \\ V_{dec} &= \sqrt{2A_{max}|E_p|} \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 여기서,  $V_{acc}$ ,  $V_{const}$ ,  $V_{dec}$ 는 각각

가속, 등속, 감속으로 정의되며,  $V_{max}$ ,  $A_{max}$ ,  $E_p$ 는 각각 최대속도, 최대가속도, 위치 오차로 정의된다. 속도 및 위치의 관계식은

$$\begin{aligned} v &= at \\ P &= |P_{Target} - P_{Current}| = \frac{1}{2}at^2 \end{aligned} \quad (6)$$

과같이 표현할 수 있다. 여기서,  $P_{Target}$ ,  $P_{Current}$ 는 각각 목표 위치 및 현재 위치로 정의된다. 이때, 식 (6)을 이용하여

$$\begin{aligned} t &= \pm \sqrt{2P/a} \\ P &= |P_{Target} - P_{Current}| \\ &= |E_p| \\ V_{dec} &= A_{max}(\pm \sqrt{2P/A_{max}}) \\ &= \pm \sqrt{2A_{max}P} \\ &= \pm \sqrt{2A_{max}|E_p|} \end{aligned} \quad (7)$$

과 같이 감속도의 관계식을 유도할 수 있다. 따라서, 오차 모션 프로파일은

$$V_{profile} = \begin{cases} \min[V_{acc}, V_{const}, V_{dec}], E_p \geq 0 \\ \max[V_{acc}, -V_{const}, -V_{dec}], E_p < 0 \end{cases} \quad (8)$$

과 같이 설계할 수 있다. Fig. 3은 식 (8)을 이용하여 오차 명령 30 deg, 최대속도 및 최대가속도가 각각 10 deg/s, 10 deg/s<sup>2</sup> 조건에 대한 Trapezoidal 오차 프로파일을 생성한 결과를 보여준다.

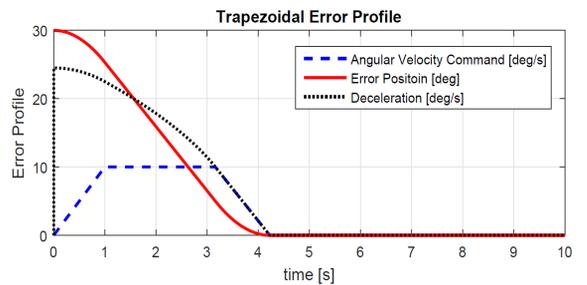


Fig. 3. Trapezoidal error motion profile

### 2.4 구동 최대 전력 요구 사항

본 논문에서 개발되고 있는 포/포탑 구동 시스템의 요구 사항은 목표 위치로 주포를 이동시키기 위해 선

회와 고저 방향으로 최대 각속도 10 deg/s와 최대 각속도 10 deg/s<sup>2</sup>로 구동되는 것과 포/포탑 구동의 최대 부하 전력을 공급하기 위한 전력 공급부의 요구체적인 50 kcm<sup>3</sup>을 만족해야 한다. 요구되는 구동 각속도 및 각가속도로 부하를 구동할 때 부하의 토크와 최대 소요 전력은

$$\begin{aligned} T_E &= B\dot{w} + J\ddot{w} + T_L \\ P_E &= T_E\dot{w} \end{aligned} \quad (9)$$

와 같다. 여기서  $B$ 와  $J$ 는 부하의 총 마찰 및 관성 계수이며  $T_L$ 은 불균형 토크 및 외란 토크 등의 부하의 토크이다. 전력변환장치는 출력 전압을 일정하게 유지하기 위한 필요전력인  $P_E$ 를 실시간으로 공급해야 하므로 빠른 전압 출력의 동특성을 가져야 한다. 일반적으로 관성 부하가 큰 시스템에서는 빠른 에너지 보상 특성을 가지는 대용량의 커패시터를 출력 측에 전력변환장치와 병렬로 연결한다. 에너지저장기의 용량을 고려한 전력변환장치의 출력 전압 변동률은 부하의 정격 속도에서 모터의 역기전력을 고려하여 선정된다. 전력변환장치의 설계 기준은 정격 전압의 5% 이내로 출력 전압을 유지해야 한다면 전력변환장치의 출력 측에 병렬로 연결된 에너지저장기의 커패시턴스는

$$C_E = 2P_E t / C_T (V_{DC0} - V_{DC1})^2. \quad (10)$$

과 같이 계산된다. 여기서,  $V_{DC0}$ 와  $V_{DC1}$ 는 변동 전과 후의 최대 출력 전압의 크기이며,  $C_T$ 는 커패시터의 수명을 고려한 커패시턴스 변동 계수이다. Trapezoidal 형태의 속도 프로파일을 고려하여 계산된 에너지저장기의 용량은 약 180 mF이 필요하고, 36 mF, 360 V 커패시터를 5개 병렬 구성하여 전력변환장치에 적용할 때의 체적은 약 64 kcm<sup>3</sup>로 요구되는 공간보다 큰 문제가 있다. 따라서, 에너지저장기의 커패시턴스를 낮추기 위해서는 부하의 단시간 최대 전력 크기를 낮추는 방안이 필요하다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Trapezoidal 형태에서 S-Curve 형태의 속도 프로파일을 적용할 때, 부하의 최대 전력의 크기는 크게 감소됨을 확인할 수 있고 에너지저장기의 커패시턴스를 낮출 수 있는 장점을 가지게 된다. 따라서, 2.5절에서 S-Curve 오차 모션 프로파일을 생성 방법에 대해 설명한다.

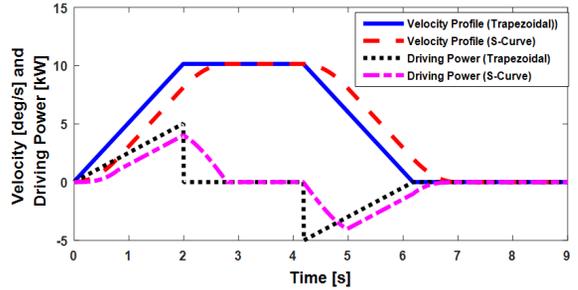


Fig. 4. Comparison of trapezoidal and S-curve profile

### 2.5 S-Curve 오차 프로파일 생성 기법

2.3절의 Trapezoidal 오차 프로파일 생성 방법은 모션의 시작과 등속 구간의 진입, 감속 구간의 시작, 구동의 마침 부분에서 큰 가속도의 변화가 일어나므로, 이 부분에서 시스템의 진동을 많이 발생시키며 2.4절에서 설명한 바와 같이 구동 전력이 크게 소모된다. 따라서, 부드러운 모션 프로파일인 S-Curve 오차 프로파일에 대한 설계가 필요하다. 가속 구간 프로파일 생성을 위해 식 (11)과 같이 시 구간(time interval)을 계산하고, 프로파일을 생성한다.

$$\begin{aligned} t_{ja} &= A_{\max} / Jerk \\ t_a &= V_{\max} / A_{\max} - t_{ja} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $t_{ja}$ 는 저크 가속 구간의 시간,  $t_a$ 는 속도 가속 구간의 시간으로 정의된다. 사다리꼴 프로파일의 감속 구간과 같이 위치와 속도와의 관계를 구하기 위해서는 속도 프로파일이 하나의 함수로 구성되어야 하나, S-Curve 프로파일을 위해서는 Fig. 5와 같이 감속 구간은 3구간으로 이루어져야 하므로 오차 명령에 대한 모션 프로파일 생성은 해석적으로 구하기 힘들다. 따라서, 본 논문에서 감속구간의 프로파일은 속도와 위치 그래프를 이용하여 Curve Fitting을 적용한다.

먼저, S-curve의 가속구간은

$$\begin{aligned} V_{acc1} &= Jerk / 2t_j^2 \\ V_{acc2} &= Jerk \cdot t_j (t_j / 2 + t_a) \\ V_{acc3} &= Jerk \cdot t_j (t_j + t_a) \end{aligned} \quad (12)$$

와 같이 구해진다. 여기서,  $V_{acc1}$ 은  $t_0 \sim t_1$ ,  $V_{acc2}$ 는  $t_1 \sim t_2$ ,  $V_{acc3}$ 는  $t_2 \sim t_3$  시 구간에서의 속도이며 등속 구간은

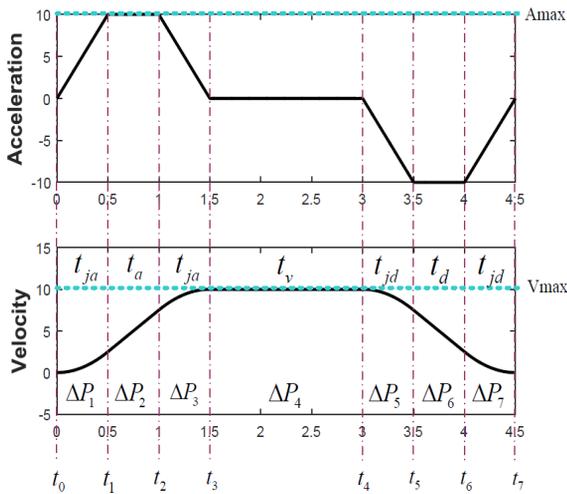


Fig. 5. Time interval of the S-curve profile

$$V_{const} = V_{max} \quad (13)$$

과 같이 표현할 수 있다. 오차 프로파일의 감속구간은 Fig. 6과 같이 속도와 위치 그래프를 이용하여 5차 다항식으로 Curve Fitting을 통하여 사용한다. 단, 프로파일 제한조건에 따라 V-P 곡선은 변하기 때문에 필요한 다항식은 미리 계산하여 적용해야 한다.

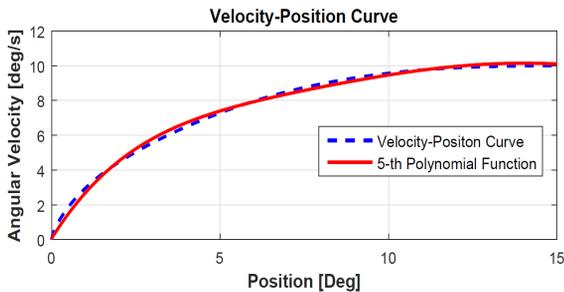


Fig. 6. Velocity-position curve

Fig. 6에서 곡선은 생성된 속도 프로파일과 위치 프로파일과의 관계에 의한 그래프이고, 실선은 5차 다항식의 계수(Polynomial Coefficient)를 구하여 Curve Fitting을 적용한 그래프이다. Fitting 된 다항식은

$$V = aP^5 + bP^4 + cP^3 + dP^2 + eP \quad (14)$$

과 같다. 여기서, 다항식의 계수는

$$\begin{aligned} a &= 2.8443 V_{max}/P^5 \\ b &= -9.1170 V_{max}/P^4 \\ c &= 11.2869 V_{max}/P^3 \\ d &= -7.5550 V_{max}/P^2 \\ e &= 3.5408 V_{max}/P \end{aligned} \quad (15)$$

과 같이 구해진다. 결국, 식 (12)-(14)의 S-curve 프로파일 함수를 식 (8)에 적용하여 S-Curve 오차 프로파일을 만들 수 있다. Fig. 7은 오차 명령 30 deg., 최대속도 및 최대가속도가 각각 10 deg/s, 10 deg/s<sup>2</sup>의 조건에 대한 S-Curve 오차 프로파일을 생성한 결과를 보여주고 있으며

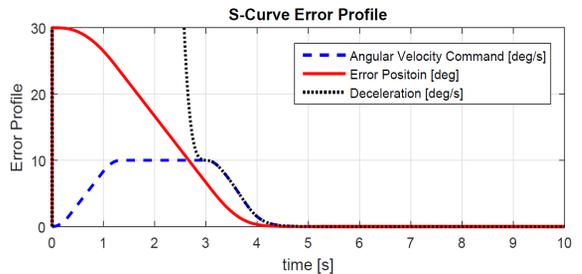


Fig. 7. S-curve error motion profile

### 3. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 유효성을 검증하기 위해 Matlab를 통해 시뮬레이션을 수행하였으며, INS Calculation Logic 블록과 선회/고저 제어 블록, 모터 드라이버 블록 및 포/포탑 구동 시스템으로 구성된다. 또한, 포/포탑 구동 시스템은 현재 개발하고 있는 포/포탑의 3D모델링을 Matlab의 Simmechanics를 통해 물리적인 관성, 불평형 모멘트, 마찰력 등 실제 부하와 유사하게 모사하였다. 관성항법센서의 모사를 위해 INS Calculation Logic 블록은 포/포탑의 절대 좌표 및 오차 계산으로 구성되며, 실제 사용되고 있는 관성항법센서의 sampling 주파수 50 Hz로 동작하게 하였다. 모의실험을 위한 전기식 구동 시스템의 사양 및 주요 파라미터는 Table 1과 같다. 포/포탑의 제어주기는 2 kHz를 가지며, 속도 제어기는 PI + Anti-windup + 속도 Feed-forward 제어기, 위치 제어기는 P 제어기로 구성되었다. 또한, 각 전력변환장치의 제어주기 및 스위칭 주파수는 70 kHz이며, 모터드라이브의 제어주기 및 스위칭주파수는 10

kHz이다. 전력변환장치는 선회 및 고저방향의 동시 가속 시 발생하는 최대 구동부하를 공급하기 위해 에너지저장기를 내부에 적용하여, 단시간 최대 출력 전력 기준 약 10 kW의 유효 전력을 공급할 수 있다. 또한, 모터드라이브는 토크 지령 기준의 전류제어를 통해 PWM 전압을 모터에 인가한다. 전력변환장치는 입력 전압을 270 VDC 구동 전원으로 승압 동작을 하고, 부하 변동에도 일정 출력 전압으로 유지하는 제어를 수행한다. 모의실험은 Table 2와 같이 3가지 Case로 설정하였으며 차체(HULL) 자세는 고정으로 시간에 따라 변하지 않는다고 가정한다. Case I, Case II는 제

안한 오차 프로파일인 Trapezoidal과 S-Curve 프로파일의 성능 비교이며, Case III의 경우 차체 자세가 경사지(롤 10 deg, 피치 -8 deg)에서 기울어진 환경을 모사하였다.

Fig. 8은 Case I의 모의 실험결과이다. Fig. 8의 (a), (b)를 보면 생성된 Trapezoidal 오차 속도 프로파일 명령에 대한 선회/고저 응답에 따라 Fig. 9의 (c), (d), (e), (f)에서 볼 수 있듯이 절대 각 오차가 0으로 수렴하며, 상대 위치 센서로부터 목표 위치로 선회/고저 각각 수렴함을 알 수 있다. Fig. 8의 (g)는 Trapezoidal 오차 프로파일 구동 시 선회 및 고저장치의 모터 구동 토크로서 선회장치는 관성 부하의 비중이 크며, 고저장치는 불평형부하가 부하로서 크게 작용함을 알 수 있다. Fig. 8 (h)는 선회 및 고저장치의 구동 전력을 전력변환장치의 출력 전력과 비교함으로써, Fig. 8 (i)의 1초 지점에서 DC-Link 전압의 변동폭이 클 때 선회 및 고저 모터드라이브의 전압 출력에 제한 없음을 확인하였다. 동시에 2개의 부하를 구동하기 위해서 전력변환장치와 에너지저장기는 DC-Link 전압이 정격의 5%의 허용치 이내로 제어되도록 최대 전력을 공급하고 있다. 에너지저장기의 용량은 Trapezoidal 프로파일을 적용하고 2개 부하가 동시에 가동되는 조건으로 산정되었다. Fig. 8 (j)는 선회 및 고저장치용 모터 드라이브의 전류제어 성능을 보인다.

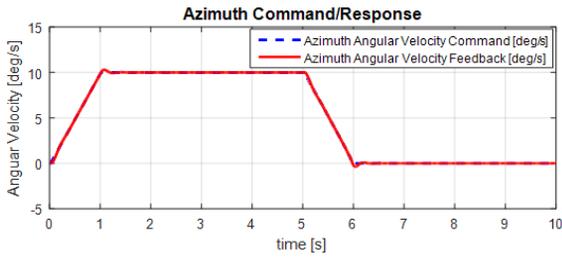
Fig. 9는 Case II의 모의 실험결과이다. Fig. 9의 (a), (b)를 보면 생성된 S-Curve 오차 속도 프로파일 명령에 대한 선회/고저 응답에 따라 Fig. 9의 (c), (d), (e), (f)에서 볼 수 있듯이 Trapezoidal 오차 프로파일과 마찬가지로 절대 각 오차가 0으로 수렴하며, 상대 위치 센서로부터 목표 위치로 선회/고저 각각 수렴함을 알 수 있다. Fig. 9의 (g), (j)는 S-Curve 오차 프로파일로 구동 시 선회 및 고저장치의 모터 구동 토크 및 모터 드라이브의 출력 전류로서 Fig. 9의 결과와 비교하면, 최대 토크와 최대 출력 전류도 함께 감소함을 알 수 있다. Fig. 9 (h)는 선회 및 고저장치의 구동 전력으로 전체 소요되는 침투전력이 감소하여 전력변환장치만으로 DC-Link 전압이 허용치 이내로 제어됨을 알 수 있다. 전력변환장치의 출력전압 제어성능 확보와 구동장치로부터 회생되는 에너지의 저장하기 위한 용량의 에너지저장기만 적용이 가능함을 확인할 수 있다. 본 모의실험에서는 Case I에 적용된 에너지저장기 용량의 약 5 %만을 적용하여 모사하여 전압 변동성능이 만족됨을 확인하였다.

Table 1. Specification of an electrical Gun/Turret driving system

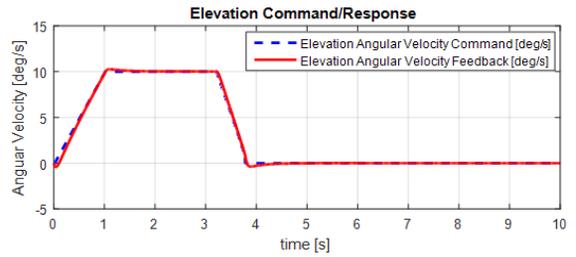
Driving Spec.	Value	Unit
Azimuth Maximum Angular Velocity	10.0	deg/s
Elevation Maximum Angular Velocity	10.0	deg/s
Azimuth Maximum Angular Acceleration	10.0	deg/s <sup>2</sup>
Elevation Maximum Angular Acceleration	10.0	deg/s <sup>2</sup>
Maximum Permissible Output Power of a Power Supplier	10.0	kW
Maximum Permissible Torque of a Azimuth Motor	80.0	Nm
Maximum Permissible Torque of an Elevation Motor	80.0	Nm
Rated DC-link Voltage	270	VDC

Table 2. Scenario of simulation

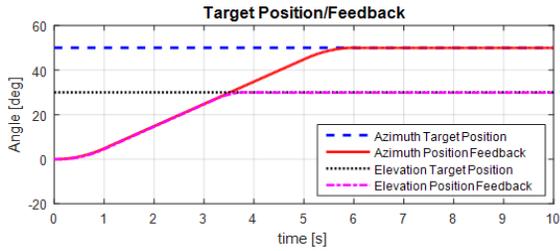
Cases	HULL Attitude (Yaw, Pitch, Roll) [deg]	Target Point (AZ, EL) [deg]	Maximum (Vel, Acc) [deg/s, deg/s <sup>2</sup> ]	Error Profile Type
Case I	(0, 0, 0)	(50, 30)	(10, 10)	Trapezoidal
Case II	(0, 0, 0)	(50, 30)	(10, 10)	S-Curve
Case III	(0, -8, 10)	(50, 30)	(10, 10)	S-Curve



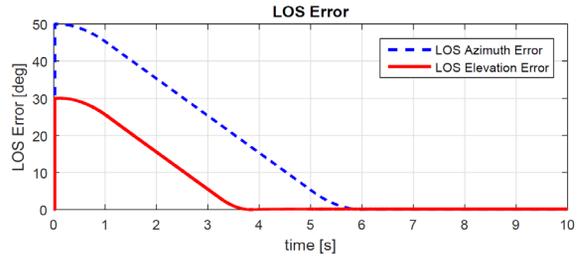
(a) Azimuth angular velocity command/response



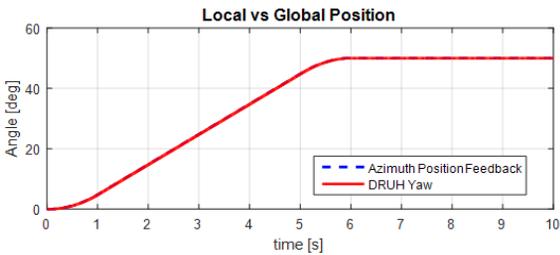
(b) Elevation angular velocity command/response



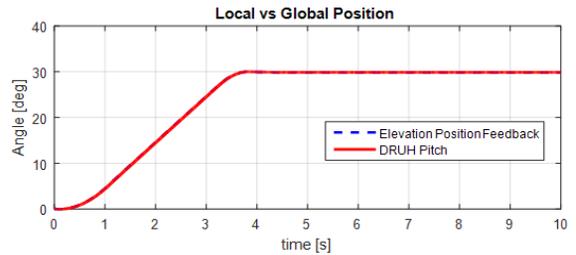
(c) Target command/response



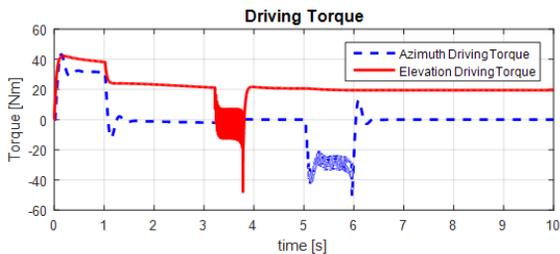
(d) LOS(Line of sight) error



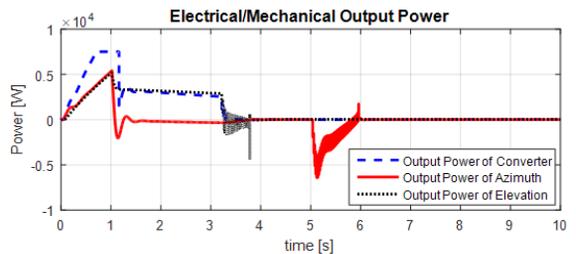
(e) Azimuth position angle/INS yaw angle



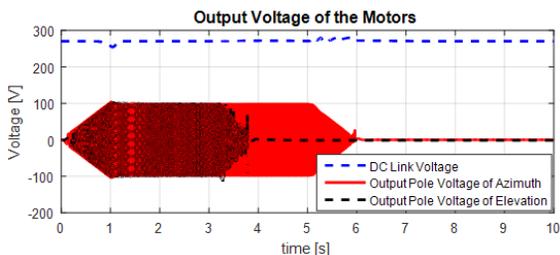
(f) Elevation position angle/INS pitch angle



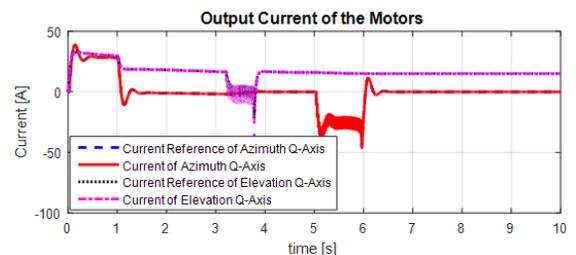
(g) Azimuth/Elevation driving torque



(h) Electrical/Mechanical power

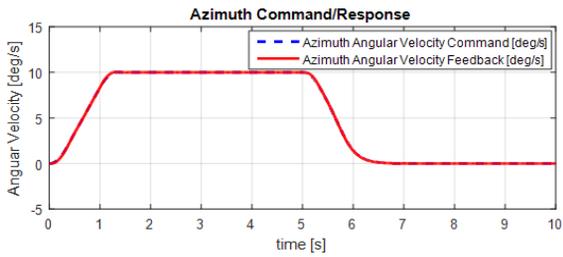


(i) Motor output voltage

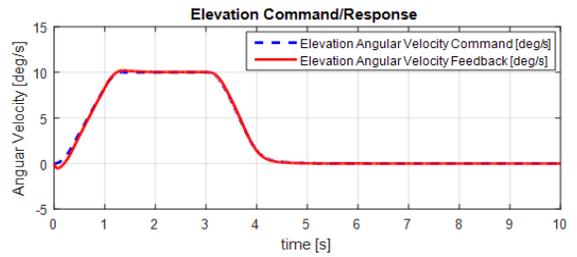


(j) Motor output current

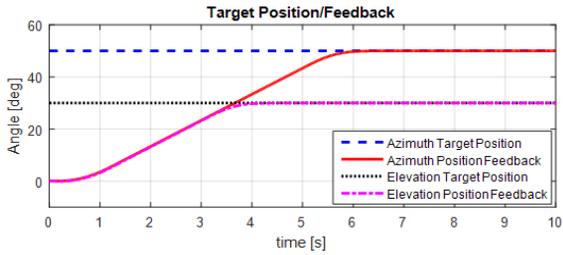
Fig. 8. Simulation result of case I



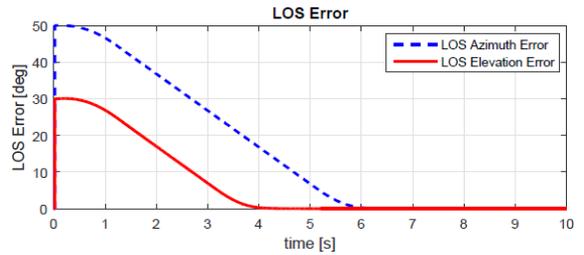
(a) Azimuth angular velocity command/response



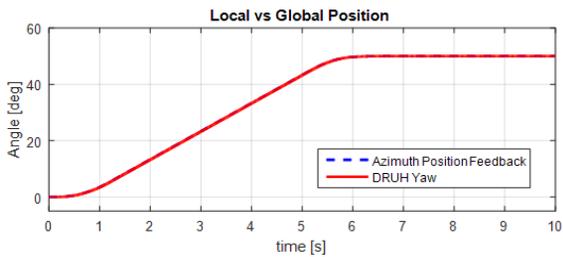
(b) Elevation angular velocity command/response



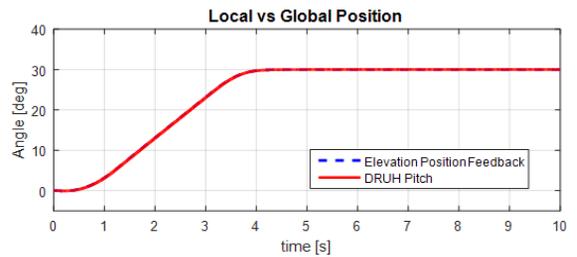
(c) Target command/response



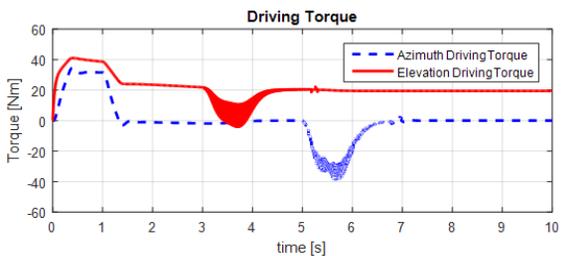
(d) LOS(Line of sight) error



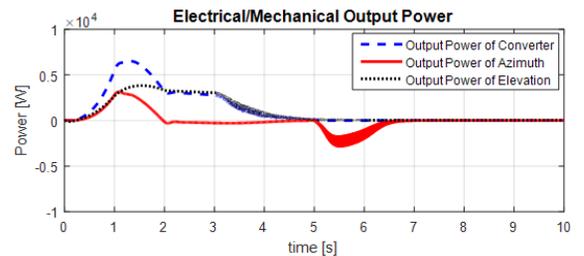
(e) Azimuth position angle/INS yaw angle



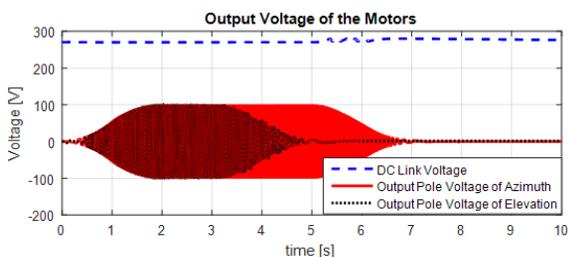
(f) Elevation position angle/INS pitch angle



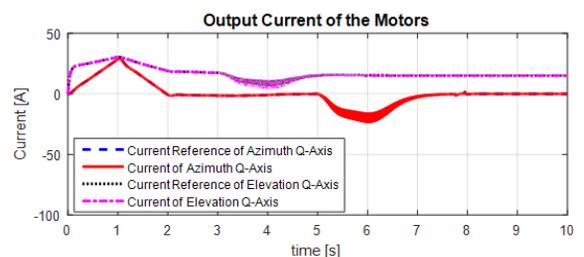
(g) Azimuth/Elevation driving torque



(h) Electrical/Mechanical power

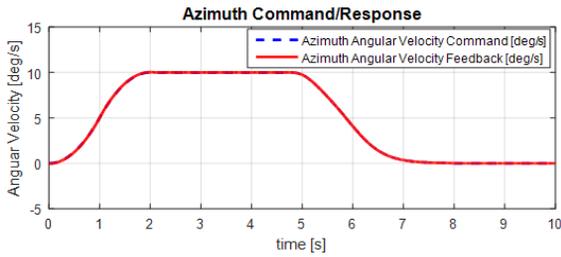


(i) Motor output voltage

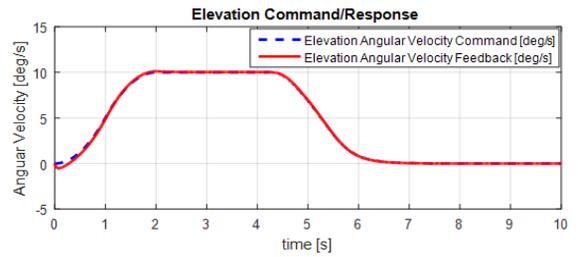


(j) Motor output current

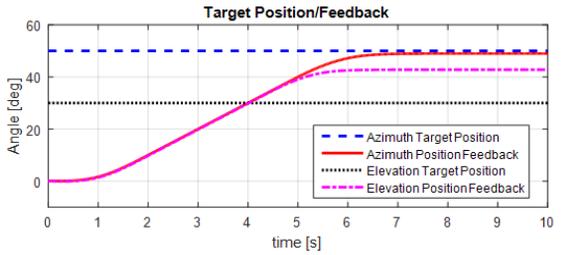
Fig. 9. Simulation result of case II



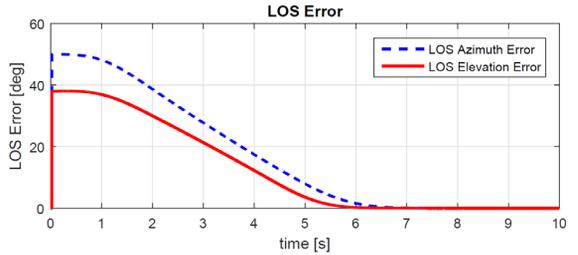
(a) Azimuth angular velocity command/response



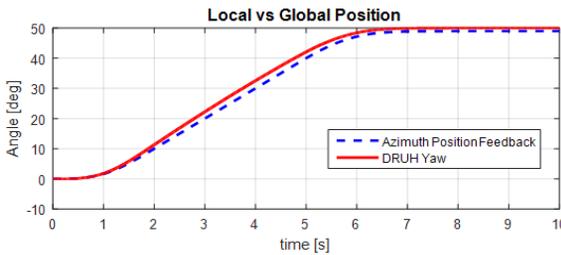
(b) Elevation angular velocity command/response



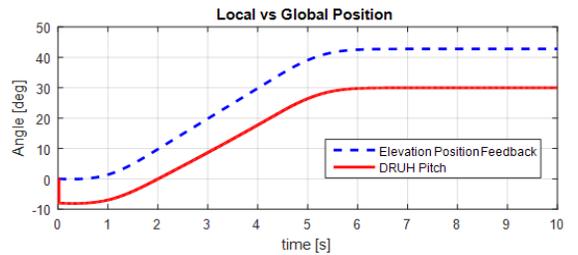
(c) Target command/response



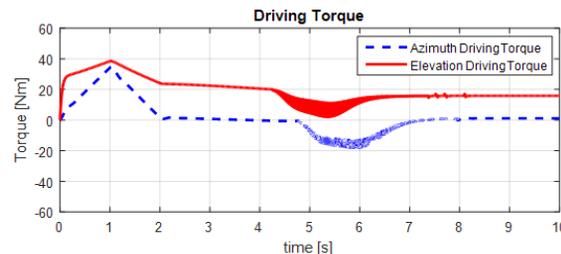
(d) LOS(Line of sight) error



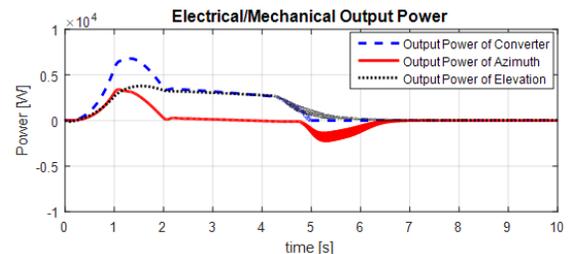
(e) Azimuth position angle/INS yaw angle



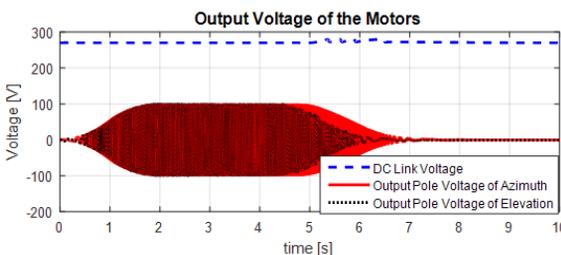
(f) Elevation position angle/INS pitch angle



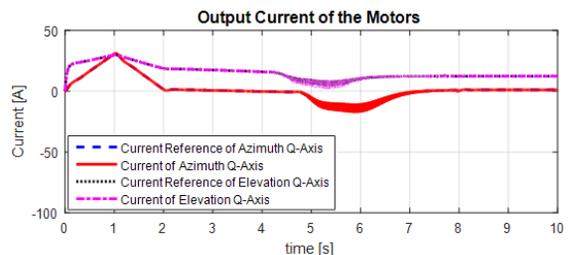
(g) Azimuth/Elevation driving torque



(h) Electrical/Mechanical power



(i) Motor output voltage



(j) Motor output current

Fig. 10. Simulation result of case III

Fig. 10은 Case III의 모의 실험결과로서, 차체를 경사지에서 구동하므로 선회 구동부하가 변동됨을 알 수 있다. Fig. 9와 동일한 에너지저장기 용량을 적용 시에도 성능이 만족됨을 Fig. 10의 (i)를 통해 확인할 수 있다. Fig. 11은 Case III의 포/포탑의 구동 Image Sequence이며 3D 모델을 통해 포/포탑 구동 상태를 시각적으로 확인할 수 있다.

모의실험 Case에 따라 선회장치와 고저장치가 동시에 구동할 때의 최대 전력 및 DC-Link 전압 감소 값을 Table 3에 정리하였다. DC-Link의 최저 허용값은 정격 전압의 95 %인 256.5 VDC로 제한된다. 최저 DC-Link 제한 값의 선정은 모터드라이브의 전류제어 성능 확보를 위한 요구전압 기준이다. Case I의 Trapezoidal 오차

프로파일을 적용할 때 선회 및 고저 장치의 구동 전력의 합은 전력변환장치의 최대 출력 전력보다 큰 첨두 값(peak value)를 가진다. 이는 DC-Link 전압의 설계 기준 내로 전압은 유지되지만, 전압 허용의 마진이 거의 없다. 반면, Case II와 Case III의 S-Curve 오차 프로파일 적용 시 전압 변동의 설계 기준 내로 출력 전압이 유지되며 마진이 충분하다. 식 (10)으로부터 에너지저장기의 커패시턴스를 계산한 결과 Trapezoidal 프로파일을 적용할 경우보다 작은 커패시턴스로 전압 변동을 최소화할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 4에서는 Table 3의 DC-Link 전압 감소 값 기준으로 에너지저장기 용량을 재설계하였을 때 적용 가능한 커패시터 개수와 전력변환장치의 전력밀도를

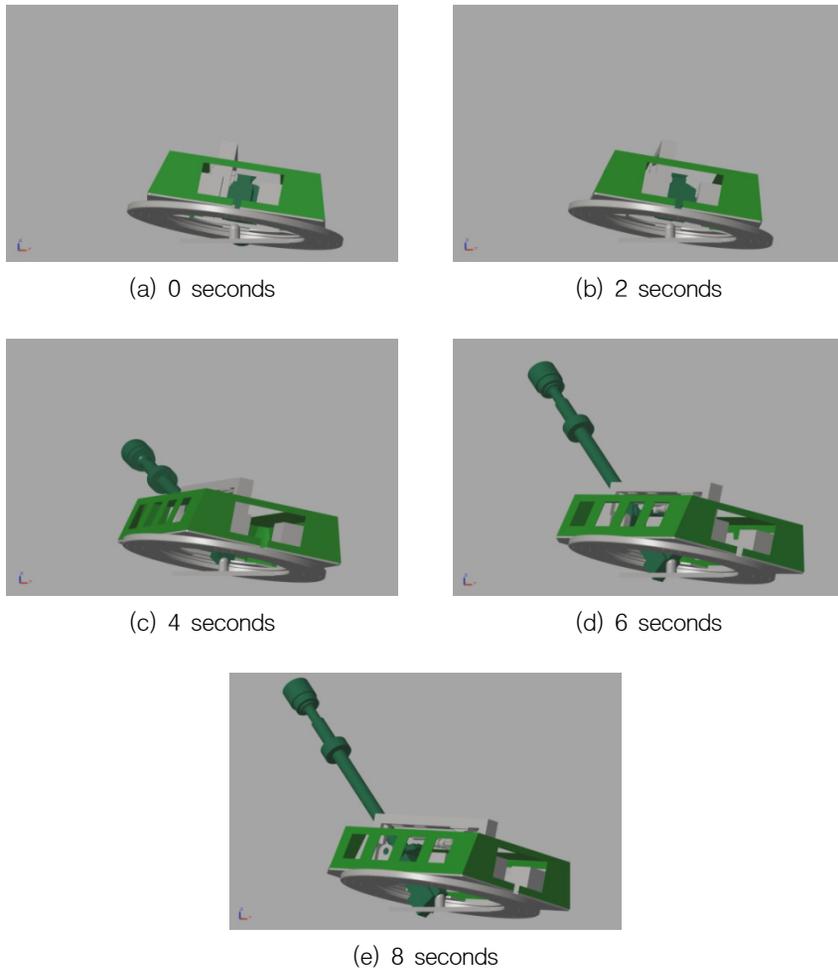


Fig. 11. Image sequences(in seconds) of the gun/turret driving in case III

산정한 결과이다. 전력밀도는 기존의 Trapezoidal 프로파일 적용 시 보다 S-Curve 오차 프로파일로 구동 시 Case II와 Case III에서 32 %의 체적이 감소 되었고, 전력 밀도는 약 10 % 개선됨을 알 수 있다.

Table 3. Comparison of DC-link voltage reduction width in the case of maximum driving power

Cases	Driving Power	DC-Link Voltage	Lowest Voltage Tolerance
Case I	10,500 W	13.0 VDC	13.5 V (± 5 % of Rated Voltage)
Case II	6,950 W	1.0 VDC	
Case III	7,380 W	2.0 VDC	

Table 4. Comparison of the energy storage capacity of the DC-link voltage reduction tolerance

Cases	Energy Storage Capacitance	Converter Dimension (P.U)**	Power Density* (P.U)**
Case I	180 mF	1.0	1.0
Case II	9 mF	0.68	1.1
Case III	9 mF	0.68	1.1

\* 전력밀도 = 전력변환장치 최대출력전력(W)/체적(m<sup>3</sup>)

\*\* (P.U) = (산출값)/(Case I의 기준값)

Fig. 12는 에너지저장기의 용량이 감소됨으로써 전력변환장치의 체적 변화를 보여준다. 전력변환장치 내에 대용량 커패시터 및 버스바 류, 차단기 등이 제거됨에 따라 약 32 %의 체적이 감소되었음을 확인할 수 있다. 또한, 전력공급을 위해 산정된 요구 체적인 50 cm<sup>3</sup> 보다 13 % 감소한 수치로 요구 기준을 만족한다.

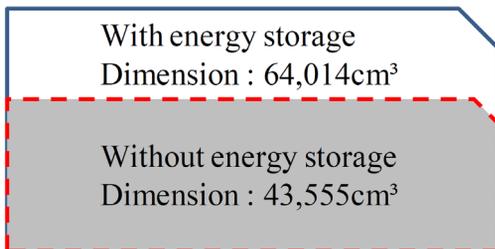


Fig. 12. The volume change of the converter

#### 4. 결론

본 논문에서는 포/포탑 구동 시스템에서 절대 각 오차 제어 모드 시 진동이나 시스템 불안정성을 야기하는 오차 명령에 대해 Trapezoidal 오차 모션 프로파일과 S-Curve 오차 모션 프로파일 설계 방법을 제시하였다. 기존에 일반적으로 적용되어왔던 모션 프로파일을 변형하여 오차 정보에 종속되어 오차가 0으로 수렴할 수 있도록 속도 프로파일의 감속 구간을 설계함으로써 절대 각 오차 제어 모드 시 포/포탑 구동 시스템이 제어 및 전력 측면에서 효율적으로 구동함을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 또한, Trapezoidal 오차 프로파일에 비해 S-Curve 오차 모션 프로파일을 적용하면 구동장치에 요구되는 최대 전력이 크게 감소되어 일반적으로 적용되는 에너지저장기의 용량을 감소시킬 수 있어서 전력변환장치의 전력밀도를 크게 증가시킬 수 있다. 또한, 에너지저장기 내 커패시터를 줄임으로써 포/포탑 구동시스템의 추가적인 공간을 확보할 수 있고, 일반적으로 낮은 수명을 가지는 대용량 커패시터를 적용하지 않음으로써 전기식 포/포탑 구동 시스템의 신뢰성을 높일 수 있다.

#### References

- [1] Meckl, P. H. and Seering, W. P., "Minimizing Residual Vibration for Point-to-Point Motion," Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, Vol. 107, No. 4, pp. 378-382, 1985.
- [2] Macfarlane, S. and Croft, E. A., "Jerk-Bounded Manipulator Trajectory Planning : Design for Real-Time Applications," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 19, No. 1, pp. 42-52, 2003.
- [3] Rubio, F, Valero, F., Sunyer, J., and Cuadrado, J., "Optimal Time Trajectories for Industrial Robots with Torque, Power, Jerk, and Energy Consumed Constraints," Journal of Industrial Robot, Vol. 39, No. 1, pp. 92-100, 2012.
- [4] Li, H. A., "A Jerk-Constrained Asymmetric Motion Profile for High-Speed Motion Stages to Reduce Residual Vibration," Journal of Computer Application in Technology, Vol. 53, No. 2, pp. 149-156, 2016.
- [5] Rew, K. -H. and Kim, K. -S., "Using Asymmetric

- S-Curve Profile for Fast and Vibrationless Motion,” In Proceedings of the Conference on Control Automation and Systems. Seoul, Korea, pp. 500-504, Oct. 2007.
- [6] Dyvik, Jahn, et al., “Recent Activities in Electrothermal Chemical Launcher Technologies at BAE systems,” IEEE Transactions on Magnetics 43.1, pp. 303-307, 2006.
- [7] Herbig, J., and R. Appleton, “A Compact Pulsed Power Supply for ETI Applications,” 2005 IEEE Pulsed Power Conference. IEEE, 2005.
- [8] Sahoo, Satya Ranjan, et al., “Physics of Failure based Analysis of Aluminium Electrolytic Capacitor,” SRESA's International Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering 5.2, pp. 15-19, 2016.
- [9] Renwick, Jason, Chetan S. Kulkarni, and José R. Celaya, “Analysis of Electrolytic Capacitor Degradation under Electrical Overstress for Prognostic Studies,” Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2015.