

# 슬라이딩 모드와 능동 외란 제거 제어를 결합한 수중 운동체 강인 심도 추종 제어

## Robust Depth Tracking of AUVs via Integration of Sliding Mode and Active Disturbance Rejection Control

박대원<sup>†</sup> · 김명준<sup>1</sup> · 황종현<sup>2</sup> · 강이규<sup>2</sup>

Daewon Park<sup>†</sup>, Myungjun Kim<sup>1</sup>, Jonghyon Hwang<sup>2</sup>, Yikyu Kang<sup>2</sup>

**Abstract:** In this paper, we propose control method for the depth of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) by integrating Sliding Mode Control with Active Disturbance Rejection Control. Active Disturbance Rejection Control is one of the control strategies widely used for robust control. Active Disturbance Rejection Control consists of three main components: Tracking Differentiator, Extended State Observer, and Nonlinear Error Feedback Law. Within the Nonlinear Error Feedback Law, we applied Sliding Mode Control using the error calculated from Tracking Differentiator and Extended State Observer. The stability of the proposed controller was verified through the Lyapunov function. We implemented the nonlinear motion model of an AUV using Matlab Simulink and conducted simulations. We also applied sea wave loads to simulation and compared the proposed controller with Active Disturbance Rejection Control and PID control to verify its robustness.

**Keywords:** Autonomous Underwater Vehicle, Depth Control, Active Disturbance Rejection Control, Sliding Mode, Robust Control

### 1. 서론

Autonomous Underwater Vehicle (AUV)은 수중에서 운용되는 자율 수중 운동체로서 해양 자원 탐색을 통한 자원 관리와 같은 상업적 뿐만 아니라 정찰, 기뢰 탐색 등 군사용과 같이 각종 분야에서 활발히 활용되고 있다. 이에 따라 전 세계적으로도 AUV에 대한 관심이 크며 AUV는 특히나 정밀한 제어 알고리즘이 요구되는 시스템이기에 AUV의 정확한 제어 및 유도에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 운용되는 환경의 특성

으로 인해 AUV에 가해지는 외란의 크기와 종류가 다양할 뿐 아니라 측정이 어렵고 복잡한 요소<sup>[1,2]</sup>들이 존재하기 때문에 정확한 수학적 모델을 표현하기 어려워 정밀 제어의 성능을 보장할 수 없다. 이에 모델 불확실성 및 외란 극복을 목표로 많은 강인 제어 기법 연구들이 수행되어 왔다.

강인 제어 기법은 다양한 방법이 제시되어 왔다. L. Rodrigues et al<sup>[3]</sup>은 대표적인 강인 제어 중 하나인 시스템 상태를 목표 상태 값으로 미끄러지듯 이동하며 제어하는 슬라이딩 모드 제어 기법을 AUV 심도 제어 알고리즘에 적용하였다. 또한 Yu-Hsien Lin et al<sup>[4]</sup>은 PID제어 기법에 퍼지 추론을 접목하여 외란에 따라 제어기 내부 파라미터를 변경하는 적응 제어를 제안하였으며, Ravishankar P. Desai et al<sup>[5]</sup>은 슬라이딩 모드 제어 기법에 외란 관측기를 더하여 외란에 상응하는 값을 제어기에 보상함으로써 외란에 대한 강인성을 더욱 높이는 제어 기법을 제시하였다. 이처럼 많은 연구들이 강인한 제어를 위해 제시되고 있고 좋은 성능을 보이고 있다. 하지만 슬라이딩 모드 제어의 경우 모델 기반 제어이기 때문에 모델이 크게 부정확하면 불안정성을 야기하거나<sup>[6]</sup> 슬라이딩 모드 제어의 고질적인 문제인 채터

Received : Sep. 24. 2025; Revised : Nov. 27. 2025; Accepted : Jan. 5. 2026

※ This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement (KRIT) grant funded by the Korea government (Defense Acquisition Program Administration), (No 22-402-D00-002 (KRIT-CT-23-037), Submarine Linked Torpedo Decoy System, 2023).

1. Senior Researcher, LIG Nex1, Seongnam, Korea (myungjun.kim@lignex1.com)

2. Chief Researcher, LIG Nex1, Seongnam, Korea (jonghyon.hwang, yikyu.kang@lignex1.com)

† Researcher, Corresponding author: LIG Nex1, Seongnam, Korea (daewon.park@lignex1.com)

링<sup>[7]</sup>의 문제가 있을 수 있으며 적응형 PID 제어기의 경우 모델 기반의 슬라이딩 모드 제어와 동일하게 부정확한 모델이나 적응 알고리즘이 예측 불가능한 시스템 변화에 제대로 적응하지 못하는 경우<sup>[8]</sup> 불안정성을 야기할 수 있어 개선할 점이 존재한다.

본 논문에서는 AUV의 강인한 심도 제어를 위해 능동 외란 제거 제어와 슬라이딩 모드 제어를 결합한 제어기의 설계 사항을 기술한다. 제 2장에서는 AUV 심도 제어를 위해 AUV의 종방향 운동방정식에 대한 설명을 서술한다. 제 3장에서는 능동 외란 제거 제어와 본 논문에서 제시하는 슬라이딩 모드 제어의 적용 방안을 서술한다. 제 4장에서는 Matlab Simulink를 통한 제어기 성능 확인과 PID 제어, 능동 외란 제거 제어, 본 논문에서 제시하는 제어기의 외란 견실성 비교를 통해 효용성을 검증한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 서술한다.

## 2. AUV 운동 모델링

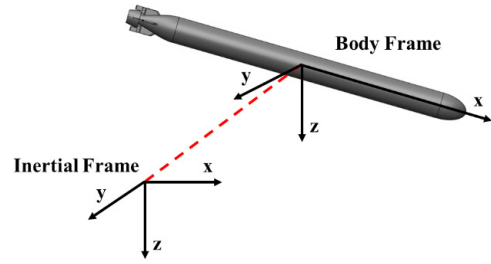
### 2.1 AUV 종방향 운동방정식

AUV 운동방정식은 뉴턴의 제 2법칙을 통해 6 자유도 비선형 운동방정식으로 표현할 수 있다. 이때 AUV의 위치( $x, y, z$ ) 및 오일러각( $\phi, \theta, \psi$ )은 관성좌표계를 통해 표현되고 선속도( $u, v, w$ ) 및 각속도( $p, q, r$ )는 동체고정좌표계를 통해 표현된다. [Fig. 1]은 관성좌표계와 동체고정좌표계를 표현한다.

뉴턴 제2법칙 및 이동 정리(Transport Theory)를 통해 AUV에 작용하는 힘과 모멘트를 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \sum X &= m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) \\ &\quad + z_g(pr + \dot{q})] \\ \sum Y &= m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) \\ &\quad + x_g(qp + \dot{r})] \\ \sum Z &= m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) \\ &\quad + y_g(rq + \dot{p})] \\ \sum K &= I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} \\ &\quad + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] \\ \sum M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} \\ &\quad + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] \\ \sum N &= I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} \end{aligned} \quad (1)$$

또한 동체고정좌표계의 중심이 부력의 중심에 위치하게 된다면 외부로부터 가해지는 힘(부력, 중력 등)을 고려하여 운동방정식을 정리하고 AUV의 주행 속도는 일정하게 주행한다고 가정할 때 AUV의 종방향 운동은 Z축 기준 병진운동 및 Y축 기준 회전 운동으로 표현할 수 있다. 여기서 AUV의 형상은  $xy, xz$  평면에 대칭이라 가정할 때 종방향 비선형 운동방정식은



[Fig. 1] AUV's Body Frame and Inertial Frame

식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - m y_g \dot{p} - (m x_g + Z_{\dot{q}})\dot{q} = m[uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_g rp - y_g rq] + (W - B)\cos\theta\cos\phi + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{q}}q + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{\delta_e}\delta_e \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m z_g \dot{u} - (m x_g + M_{\dot{w}})\dot{w} + (I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} - I_{xy}\dot{p} - I_{yz}\dot{r} \\ = (I_{zz} - I_{xx})rp + m z_g(vr - wq) + m x_g(vp - uq) \\ + I_{xy}qr - I_{zz}(P^2 - r^2) - I_{yz}pq - z_g W \sin\theta \\ - x_g W \cos\theta \cos\phi + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{q}}q + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{\delta_e}\delta_e \end{aligned} \quad (3)$$

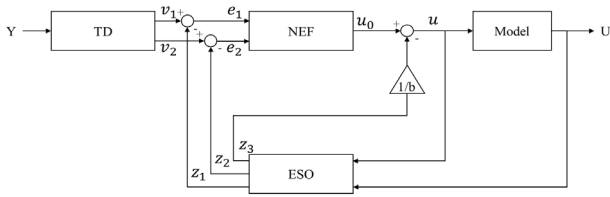
이때  $m$ 은 AUV의 질량,  $W$ 는 무게,  $B$ 는 부력,  $x_g, y_g, z_g$ 는 무게중심 및 부력중심 사이의 거리를 의미한다. 또한 운동방정식에 사용된 조종미계수 및 안정미계수는 수조모형시험을 통하여 구해질 수 있다.

## 3. 슬라이딩 모드를 접목한 능동 외란 제거 제어

### 3.1 능동 외란 제거 제어 설계

능동 외란 제거 제어(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)<sup>[9,10]</sup>는 수학적 모델에 의존하지 않는 제어 기법으로 모델 불확실성 및 외란에 강인한 특성을 갖는 제어 기법이다. 능동 외란 제거 제어는 Tracking Differentiator (TD), Extended State Observer (ESO), Nonlinear Error Feedback Law (NEF)로 구성되며 각각의 역할은 다음과 같다.

- Tracking Differentiator: 제어 명령을 부드럽게 추적하여 유한한 시간 내에 정해진 명령을 추적할 수 있도록 함으로써 오버 슈트와 반응속도 사이의 모순점을 해결.
- Extended State Observer: 능동 외란 제거 제어의 핵심 구성 요소로서 모델 불확실성 및 외란의 크기를 추정하고 보상하여 제어 강인성을 향상.
- Nonlinear Error Feedback: TD를 통해 생성된 명령과 ESO를 통해 생성된 상태 및 외란을 바탕으로 제어 신호를 생성. 능동 외란 제거 제어의 구조는 [Fig. 2]와 같이 구성된다.



[Fig. 2] Block diagram of Active Disturbance Rejection Control

### 3.1.1 Tracking Differentiator 설계

TD는 미분 방정식을 통해 계단 입력값에 대한 근사 미분값을 제공한다. 이를 활용해 추적 명령을 생성하여 빠르고 오버슈트 없이 부드럽게 추적할 수 있도록 해준다. TD는 다음 식 (4)와 같이 서술된다.

$$\begin{cases} \dot{f}h = fhan(x_1 - x, x_2, r, h_0) \\ \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f\dot{h} \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $r, h_0$ 은 파라미터이며 이 중  $r$ 은 추적 속도를 결정한다. 값이 작으면 오버슈트가 발생하며 추적 속도가 느려지고 값이 크면 추적속도가 너무 빨라 계단 입력값과 차이가 사라져 TD의 효과가 없어지게 된다. 일반적으로  $h_0$ 는  $r$ 보다 작게 설정한다.

내부에 사용된  $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 은 시간 최적 제어 기반 함수로써 다음 식 (5)와 같이 서술된다.

$$\begin{cases} d = rh, d_0 = hd, y = x_1 + hx_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan = \begin{cases} -r \text{sign}(a), & |a| > d \\ -r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

### 3.1.2 Extended State Observer 설계

ESO는 제어 대상의 입력값과 상태값을 통해 현재 제어 대상의 상태를 추정할 수 있으며 이에 따라 모델 불확실성을 포함한 모든 요소를 외란으로 추정하여 도출할 수 있으며 이를 통해 제어기에 보상함으로써 외란에 더욱 강인하게 반응할 수 있도록 하여준다. ESO는 다음 식 (6)과 같이 서술된다.

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - z \\ \dot{f}e_1 = fal(e, \alpha_1, \delta) \\ \dot{f}e_2 = fal(e, \alpha_2, \delta) \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}f e_1 + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}f e_2 \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $\alpha_1, \alpha_2, \delta, \beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 은 파라미터이며  $\alpha_1, \alpha_2$ 는 일반적으로 각각 0.5, 0.25를 사용한다.  $\delta, \beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 는 시스템의 오버슈트 및 응답시간에 대한 영향을 가지게 되므로 적절한 조정이 필요하다.

내부에 사용된  $fal(e, \alpha, \delta)$ 는 원점에서 선형을 구간 가지는 연속함수로써 다음 식 (7)과 같이 서술된다.

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta(1-\alpha)} & , |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

### 3.1.3 Nonlinear Error Feedback Law 설계

일반적으로 ADRC를 설계하는데 있어 NEF는 다음 중 하나를 일반적으로 선택하여 사용한다.

- (1)  $u_0 = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2$
- (2)  $u_0 = \beta_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta) + \beta_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta)$
- (3)  $u_0 = -fhan(e_1, e_2, r, h)$
- (4)  $u_0 = -fhan(e_1, ce_2, r, h)$

여기서  $e$ 는 TD와 ESO의 차이이며 이 중 본 논문에서는 비교를 위해 다음과 같이 식 (8)을 사용하였으며 (1)의 식에서 Steady-State Error 제거를 위해 적분 제어를 결합하여 적용하였다.

$$u_0 = \beta_1 e_1 + \beta_2 e_2 + \beta_3 \int e_1 \quad (8)$$

앞서 식 (6)을 통해 얻어낸  $z_3$ 와  $b$ 를 통해 제어 입력값은 다음 식 (9)와 같이 정의된다.

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b} \quad (9)$$

$b$ 는 앞서 ESO에서 사용된 파라미터이며 일반적으로 1을 사용한다. 시스템이 발산하는 경우 적정값으로 조정하여 사용한다.

## 3.2 슬라이딩 모드를 접목한 NEF 설계

능동 외란 제거 제어의 ESO는 외란을 오차없이 정확하게 추정하기 어렵다. 하지만 슬라이딩 모드 제어를 결합할 경우 제어 입력값의 견고성 증대를 통해 ESO의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 슬라이딩 모드 제어가 가진 채터링 문제 또한 ESO를 통해 제거될 수 있으므로 상호 보완적인 관계를 가진다<sup>[11]</sup>.

먼저 TD와 ESO를 통해 심도에 대한 오차는 다음과 같이 식 (10)으로 정의할 수 있다.

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - z_1 \\ e_2 = x_2 - z_2 \end{cases} \quad (10)$$

또한 슬라이딩 표면은 다음 식 (11)과 같이 정의한다.

$$s = \dot{e}_1 + \dot{e}_2 + \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_2 \quad (11)$$

이때 슬라이딩 표면을 미분하면 다음 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{s} = \ddot{e}_1 + \ddot{e}_2 + \lambda_1 \dot{e}_1 + \lambda_2 \dot{e}_2 \quad (12)$$

여기서 오차에 대한 미분을 앞서 정의한 TD와 ESO의 식 (6)을 정리하면 다음 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{z}_1 = x_2 - z_2 + \beta_{01} e \\ \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{z}_2 = fh - z_3 + \beta_{02} f e_1 - bu \\ \ddot{e}_1 = \ddot{x}_1 - \ddot{z}_1 = fh - z_3 + \beta_{02} f e_1 - bu + \beta_{01} \dot{e} \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)을 식 (12)에 대입하여 정리하면 다음 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{s} = \ddot{e}_2 + \lambda_1 (x_2 - z_2 + \beta_{01} e) + \beta_{01} \dot{e} + (1 + \lambda_2)(fh - z_3 + \beta_{02} f e_1 - bu) \quad (14)$$

여기서 식 (9)를 대입하여 최종적으로 정리하면 다음 식 (15)와 같이 슬라이딩 표면의 미분 식을 정리할 수 있다.

$$\dot{s} = \ddot{e}_2 + \lambda_1 (x_2 - z_2 + \beta_{01} e) + \beta_{01} \dot{e} + (1 + \lambda_2)(fh + \beta_{02} f e_1 - bu_0) \quad (15)$$

이에 따라 시스템의 점근적 안정성을 위해 다음 식 (16)과 같이 제어 입력을 정의할 수 있다.

$$u_0 = \frac{1}{(1 + \lambda_2)b} (\ddot{e}_2 + \lambda_1 (x_2 - z_2 + \beta_{01} e) + \beta_{01} \dot{e} + \gamma(fh + \beta_{02} f e_1) + \epsilon \tanh(s) + ks) \quad (16)$$

식 (16)내 스위칭 텀(Switching Term)은 채터링을 보완하기 위해 Signum Function 대신 Hyperbolic Tangent Function을 사용하여 연속성을 가지도록 설정<sup>[12]</sup>하였으며 파라미터  $\gamma$ 은  $(1 + \lambda_2)$ 과 같게 설정한다.

안정성을 판별하기 위해 Lyapunov 함수를 정의하면 다음 식 (17)과 같다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (17)$$

이때 Lyapunov 함수 V에 대한 1차 미분식은 다음 식 (18)과 같이 주어진다.

$$\dot{V} = s\dot{s} = s[\ddot{e}_2 + \lambda_1 (x_2 - z_2 + \beta_{01} e) + \beta_{01} \dot{e} + (1 + \lambda_2)(fh + \beta_{02} f e_1 - bu) + \gamma(fh + \beta_{02} f e_1) + \epsilon \tanh(s) + ks] \quad (18)$$

위 식 (18)에서 Lyapunov 함수의 미분 값이 항상 음의 정부호를 가질 때 슬라이딩 표면의 안정성을 보장할 수 있다. 이에 앞서 정의한 식 (13)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = s[\ddot{e}_2 + \lambda_1 (x_2 - z_2 + \beta_{01} e) + (1 + \lambda_2)(fh + \beta_{02} f e_1 - bu) + \beta_{01} \dot{e} + \gamma(fh + \beta_{02} f e_1) + \epsilon \tanh(s) + ks] \quad (19)$$

여기서 식 (19)를 정리하고  $\gamma$ 가  $(1 + \lambda_2)$ 과 같게 설정하였으므로 소거되어 최종적으로 식 (20)으로 정리된다.

$$\dot{V} = -ks^2 - \epsilon \tanh(s)s \leq 0 \quad (20)$$

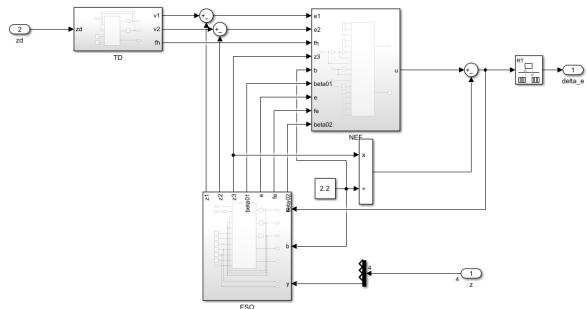
이를 통해 본 논문에서 제시한 제어기의 점근적 안정성을 수식적으로 확인할 수 있다.

## 4. 결 과

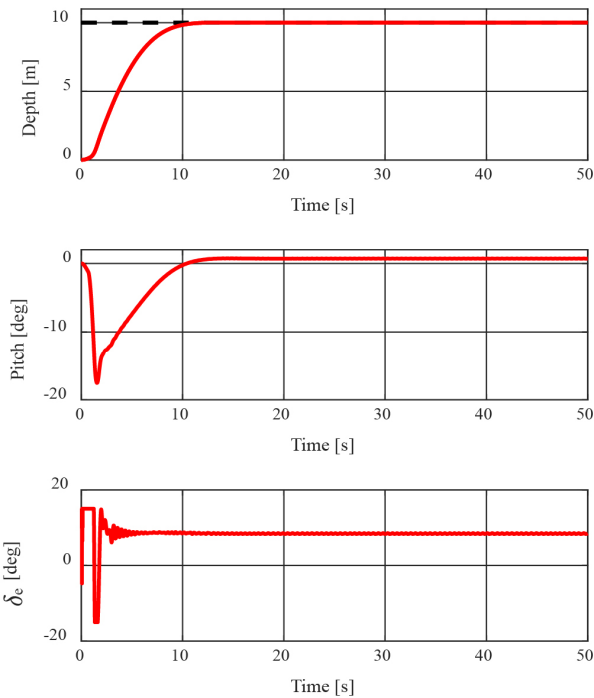
### 4.1 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증

본 논문에서 제시하는 제어기인 Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control (SMADRC)의 성능을 검증하기 위해 Matlab Simulink를 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 길이는 50 s 동안 진행하였으며 샘플링 간격은 10 ms, 적분 방법은 Runge-Kutta 방법으로 설정하였다. AUV의 운용 조건은 초기 자세 0 deg, 심도 0 m, 심도 명령 10 m, 타각 구동기 구동 제한은  $\pm 15$  deg로 선정하였다.

아래 [Fig. 3]은 구성한 제어기의 Simulink 그림이며 [Fig. 4]는 이에 대한 AUV 모델링의 Depth, Pitch,  $\delta_e$  결과값이다. [Table 1]은 본 시뮬레이션을 통해 나온 제어기의 계단 명령에 대한 성능을 수치화 시킨 것으로 각각 오버슈트(Overshoot,  $M_p$ ), 상승 시간(Rising Time,  $t_r$ ), 정착 시간(Settling Time,  $t_s$ ), 정착 이후 명령 대비 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE)를 의미한다. 이를 확인해 볼 때 제어 입력과 타각 동기의 구동이 가능한 범위 내에서 오버슈트 없이 빠르고 안정적이게 설정된



[Fig. 3] Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control Simulink Diagram



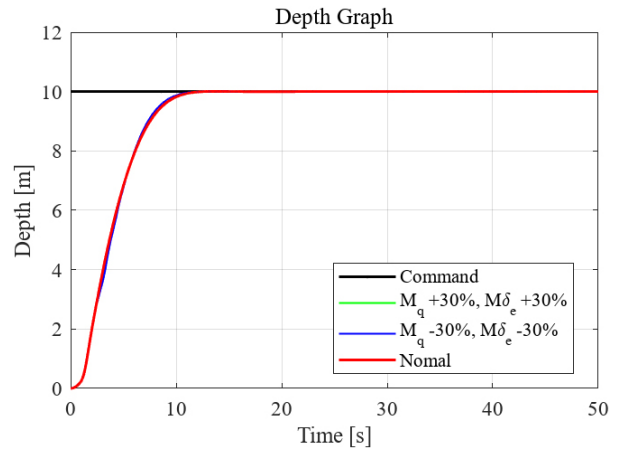
[Fig. 4] Graph for AUV's Depth, Pitch,  $\delta_e$  Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control

[Table 1] Performance for AUV's Depth, Pitch,  $\delta_e$  Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control

Controller	$M_p$ [m]	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]	MAE [m]
SMADRC	0.0352	5.8527	9.7156	0.0005

심도에 도달하여 정착할 수 있음을 확인할 수 있다.

또한 모델 불확실성에 대한 제어기의 강건성을 확인하기 위해 심도 운동모델 중 가장 영향이 큰 유체력 계수인  $M_q$ ,  $M_{\delta_e}$ 의 크기를 각  $\pm 30\%$ 로 조정하여 동일한 시뮬레이션을 반복하여 진행하였으며 [Fig. 5]와 같이 유체력 계수 차이와 무관하게 AUV가 강건히 목표 심도 값을 추종하는 모습을 확인할 수 있으며 이는 제안한 제어기가 모델 불확실성에 강건함을 보여준다.



[Fig. 5] Comparison graph of varying coefficient response to step input

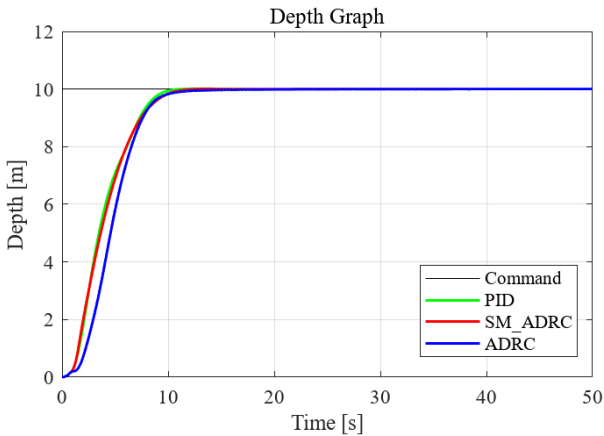
제어기를 구성하는 파라미터는 아래와 같이 조정한다. ADRC의 경우 일반적으로 큰 값을 설정하면 빠른 반응성을 가지게 되고 낮은 값을 설정하면 부드러운 반응성을 가지게 된다. 이에 목표 제어 성능( $M_p$ ,  $t_r$ ,  $t_s$  등)을 설정하고 시뮬레이션을 통해 점진적으로 조정하는 과정을 수행한다. 또한 본 논문에서 제시한 슬라이딩 모드의 슬라이딩 면 내  $\lambda$  경우 PID와 경향이 비슷하며 스위칭 팀의 이득 값은 일반적으로  $\lambda$ 의 5 ~ 10배를 설정한 후 채터링이 발생하지 않는 선에서 목표 제어 성능에 맞게 점진적으로 조정한다.

#### 4.2 AUV 제어기에 따른 외란 강건성 비교

본 논문에서 제시하는 제어기의 강건성을 비교하기 위해 Matlab Simulink를 통해 제어기 비교 시뮬레이션을 수행하였다. 제어기는 PID, Active Disturbance Rejection Control과의 비교를 위해 비슷한 제어 성능을 가지도록 하였다. 이때 AUV의 운용 조건은 4.1절과 동일하게 시뮬레이션 길이는 50 s 동안 진행하였으며 샘플링 간격은 10 ms, 적분 방법은 Runge-Kutta 방법으로 설정하였다. AUV의 운용 조건은 초기 자세 및 심도 0 deg 및 0 m, 심도 명령은 10 m, 타각 구동기 구동 제한은  $\pm 15$  deg로 선정하였다. [Fig. 6]는 심도 명령에 대한 각 제어기의 반응이며 [Table 2]는 제어 성능을 기술한 표이다.

[Table 2] Performance comparison for AUV's Depth, Pitch,  $\delta_e$

Controller	$M_p$ [m]	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]	Z MAE [m]
PID	0.1275	5.7189	9.0821	0.0006
SMADRC	0.0352	5.8527	9.7156	0.0005
ADRC	0.0043	5.3519	9.7917	0.0035

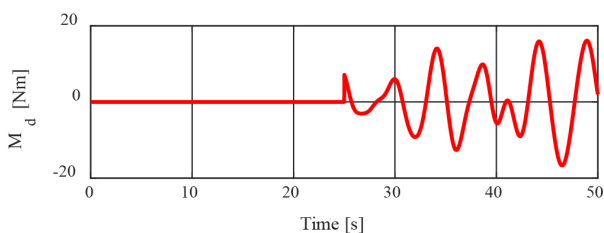


[Fig. 6] Comparison graph of controller response to step input

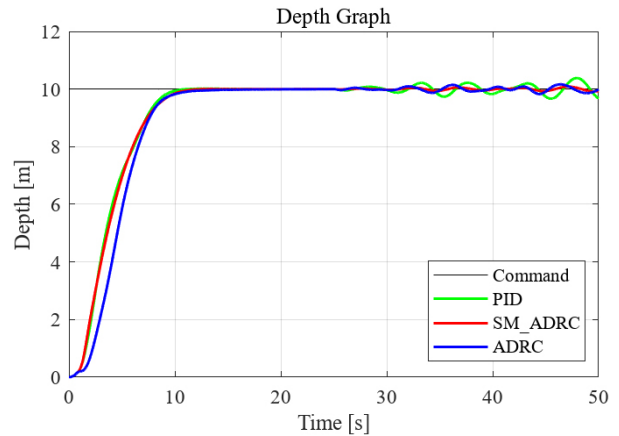
각 제어기의 강인성 비교를 위한 외란은 관련 자료<sup>[13]</sup>를 참고하여 AUV의 z축 모멘트에 가해지는 해파력을 운동모델에 적용하였다. 또한 실제 해파력의 무작위성을 모사하기 위해 JONSWAP Spectrum을 활용하여 임의의 크기를 가진 무작위 외란을 설정하고 운용 시작 이후 25 s 부터 [Fig. 7]와 같이 적용하였다.

[Fig. 8]은 설정한 외란이 AUV의 Z축 모멘트 토크에 가해졌을 때의 제어기에 따른 AUV 심도 운용 그래프이며 [Fig. 9]은 외란이 가해졌 때 유동이 발생한 부분(25 s ~ 50 s)을 크게 확대한 그래프이다. 또한 [Table 3]은 정착 이후 명령 대비 각 제어기의 평균 절대 오차 값과 최대 오차를 나타낸다.

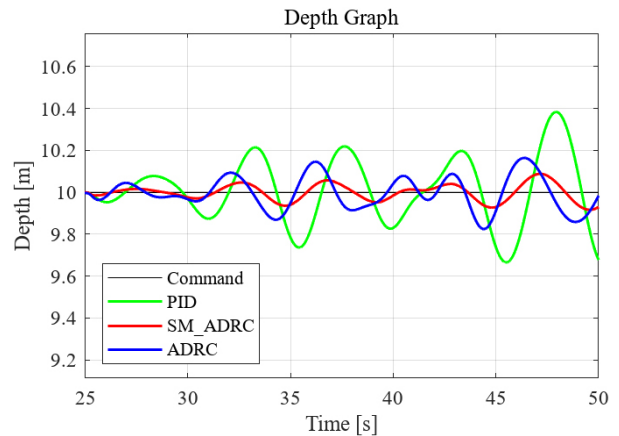
AUV에 주로 사용되는 PID 제어의 경우 외란이 가해졌을 때 해파력의 크기에 따라 최대 0.38 m 가량 상하로 유동이 심하여 심도 유지가 어렵고 크게 진동하는 모습을 확인할 수 있다. 이에 비해 강건 제어 기법 중 하나인 Active Disturbance Rejection Control의 경우 어느정도 외란에 강건하게 저항하여 PID에 비해 작은 오차로 명령 심도를 유지하는 모습이 확인된다. 하지만 본 논문에서 제시한 제어기의 경우 Active Disturbance Rejection Control보다도 더욱 강건하게 심도를 유지하여 최대오차 0.088 m 및 MAE 0.023 m 정도로 눈에 띄게 성능이 향상됨을 확인할 수 있다. 또한 운용하며 슬라이딩 모드 제어의 고질적 문제점인 채터링도 발생하지 않고 잘 운용되는 모습을 확인할 수 있다.



[Fig. 7] Random disturbance based on the JONSWAP spectrum



[Fig. 8] Comparison graph of controller response to step input with sea wave load (0 s ~ 50 s)



[Fig. 9] Comparison graph of controller response to step input with sea wave load (25 s ~ 50 s)

[Table 3] Performance comparison for AUV's Depth Mean Absolute Error with sea wave load

Controller	Z MAE [m]	Max Error [m]
PID	0.0919	0.3837
SMADRC	0.0229	0.0883
ADRC	0.0489	0.1644

## 5. 결론

본 논문에서는 AUV의 강인한 심도 제어를 위한 제어기 알고리즘을 제안하였다. 기존 Active Disturbance Rejection Control 기법의 Tracking Differentiator와 Extended State Observer를 설계하고 이를 통해 Nonlinear Error Feedback Law 에 슬라이딩 모드 제어를 접목하였으며 이를 AUV의 비선형 모델에 적용하여 심도 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 본 과정에서 제안한 제어기의 성능과 모델 불확실성에 대한 검증을 확인하였다. 또한

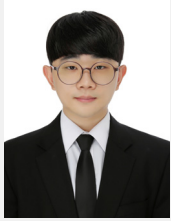
AUV의 대표적인 제어기법들과의 외란에 대한 강건성 비교를 진행하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 본 과정을 통해 아래와 같은 결과를 확인할 수 있었다.

- 제안한 제어 기법에 의한 AUV의 응답은 적정 시간 이내에 목표하는 심도에 잘 수렴하여 목표 심도를 추종함을 확인하였다.
- 제안한 제어 기법은 모델 불확실성에 대해 강건함을 검증하였다.
- 해파력에 의한 Z축에 가해지는 외란을 모사하여 시뮬레이션을 구성하였다. 이에 강건하고 채터링이 발생하지 않는 만족스러운 제어 성능을 보였으며 타 제어 기법과의 비교를 통해 강건성을 수치적으로 검증하였다.

추후에는 더 다양한 외란에 대한 성능을 검증하고 AUV의 침로 제어와 Roll 제어에도 접목하여 AUV의 실 운용에 대한 강건성을 확보할 예정이며 이를 적용하여 HILS 시험 및 실제 운용 시험을 통해 강건한 AUV 시스템을 구현하는 연구를 진행할 계획이다.

## References

- [1] K. Kim and T. Ura, "Optimal and Quasi-Optimal Navigations of an AUV in Current Disturbances," *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, pp. 3661-3667, 2008, DOI: 10.1109/IROS.2008.4650690.
- [2] J. Falnes and A. Kurniawan, 2020, May, 12, *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interaction including Wave-Energy Extraction* (2nd edition), DOI: 10.1017/9781108674812.
- [3] L. Rodrigues, P. Tavares, and M. Prado, "Sliding mode control of an AUV in the diving and steering planes," *OCEANS 96 MTS/IEEE Conference Proceedings. The Coastal Ocean - Prospects for the 21st Century*, Fort Lauderdale, FL, USA, pp. 576-583, 1996, DOI: 10.1109/OCEANS.1996.568291.
- [4] Y. Lin, C.-M. Yu, I. Chen, and C.-Y. Wu, "The depth-keeping performance of autonomous underwater vehicle advancing in waves integrating the diving control system with the adaptive fuzzy controller," *Ocean Engineering*, vol. 268, no. 113609, Jan., 2023, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113609.
- [5] R. P. Desai and N. S. Manjarekar, "Disturbance Observer Based Sliding Mode Control for Lateral Motion of an AUV," *2021 Seventh Indian Control Conference (ICC)*, Mumbai, India, pp. 1-6, 2021, DOI: 10.1109/ICC54714.2021.9703168.
- [6] W. Liu, H. Ye, and X. Yang, "Model-Free Adaptive Sliding Mode Control Method for Unmanned Surface Vehicle Course Control," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 10, pp. 1904, Sep., 2023, DOI: 10.3390/jmse11101904.
- [7] K. Kim, Y. Choi, and J. Park, "Design of Chattering Free Sliding Mode Controller for AUV," *2006 Proceedings of the KIEE Conference*, pp. 1850-1851, Jul., 2006, [Online], <http://www.koreascience.kr/article/CFKO200603977413934.page>.
- [8] B. D. O. Anderson, "Failures of Adaptive Control Theory and their Resolution," *Communications in Information and Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 1-20, Jun., 2005, DOI: 10.4310/cis.2005.v5.n1.a1.
- [9] J. Han, "From PID to Active Disturbance Rejection Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900-906, February, 2009, DOI: 10.1109/tie.2008.2011621.
- [10] T. Chen, W. Zhang, J. Zhou, H. Yu, X. Liu, and Y. Hao, "Depth control of AUV using active disturbance rejection controller," *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, Nanjing, China, pp. 7948-7952, 2014, DOI: 10.1109/chicc.2014.6896328.
- [11] C. Wei, J. Xu, Q. Chen, C. Song, and W. Qiao, "Full-Order Sliding-Mode Current Control of Permanent Magnet Synchronous Generator With Disturbance Rejection," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 128-136, Jan., 2023, DOI: 10.1109/JESTIE.2022.3192735.
- [12] Y. Ding, C. Liu, S. Lu, and Z. Zhu, "Hyperbolic Sliding Mode Trajectory Tracking Control of Mobile Robot," *Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018)*, Xian, China, pp. 234-238, 2018, DOI: 10.2991/eame-18.2018.49.
- [13] C. J. Willy, "Attitude control of an underwater vehicle subjected to waves," M.S thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States, 1994, DOI: 10.1575/1912/5550.



**박 대 원**

2020 세종대학교 항공우주공학과(학사)  
2021 세종대학교 지능형드론융합전공 및 항공우주공학과(석사)  
2021~2024 한컴인스페이스 주임연구원  
2024~현재 LIG넥스원 무인플랫폼연구소 연구원

관심분야: 수중운동체, 강인제어, HILS



**황 종 현**

2007 세종대학교 항공우주공학과(학사)  
2009 세종대학교 항공우주공학과(석사)  
2012 세종대학교 항공우주공학과(박사수료)  
2013~현재 LIG넥스원 무인플랫폼연구소 수석연구원

관심분야: 수중운동체 유도 항법 및 제어



**김 명 준**

2020 한국해양대학교 기계공학과(학사)  
2022 한국해양대학교 기계공학과(석사)  
2022~현재 LIG넥스원 무인플랫폼연구소 선임연구원

관심분야: AUV, ROV, Thruster fault diagnosis



**강 이 규**

2009 전북대학교 전기공학과(학사)  
2011 아주대학교 전자공학과(석사)  
2011~현재 LIG넥스원 해양연구소 수석연구원

관심분야: 수중유도무기, SONAR, 전력전자