# 확장칼만필터를 이용한 만타형 무인잠수정의 유체력계수 추정 및 운항제어기 설계

김동희\*, 김준영\*\*, 박종현\*
 \*한양대학교 기계공학과
 \*\*제주대학교 해양과학대학
e-mail: risingsun4@hanyang.ac.kr

# Navigation Controller Design and Hydrodynamic Coefficients Estimation for a Manta-type UUV Based on Extended Kalman Filter

Donghee Kim\*, Joon-Young Kim\*\*, Jong Hyeon Park\*
\*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University
\*\*College of Ocean Sciences, Cheju National University

유 의

무인잠수정이 원하는 경로를 추종할 수 있도록 안정적인 운항제어를 수행하기 위해서는 잠수정의 동역학적 특성을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 수중에서 거동하는 무인잠수정의 동역학적 특성은 제어입력뿐만 아니라 유체력계수에 의해 주로 결정되므로, 이러한 계수값을 정확하게 아는 것이 중요한요소라 할 수 있다. 일반적으로 유체력계수는 PMM 시험과 같은 실험적 방법을 통하여 얻게 되지만실험방법의 어려움과 실험장비들의 부정확성으로 인한 오차에 의하여, 얻어진 값들의 신뢰성이 많이저하된다. 계수값들을 구할 수 있는 다른 방법으로는, 확장칼만필터 등과 같은 모델기반 추정 알고리즘을 통하여 유체력계수를 추정하는 것이다. 본 논문에서는 확장칼만필터를 이용하여 유체력계수를 추정하도록 하였으며, 설계된 추정 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 기존에 수행된 PMM 시험에 의해 얻어진 유체력계수의 실험값과 비교 분석하였다. 또한 본 논문에서는 만타형 무인잠수정을 이용하여 원하는 경로를 추종할 수 있도록, 추정된 유체력계수를 사용하여 수심제어 및 방향제어를 위한 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였으며, 충분한 정확도를 가지고 원하는 경로를 추종함을 시뮬레이션을통해 확인하였다.

#### 1. 서론

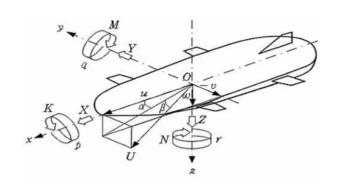
최근 여러 산업현장 뿐만 아니라 국방 분야에서는 인간이 직접 수행하기 힘든 임무를 대신할 수 있도록 하거나 인간의 조종 및 제어 능력을 대체할 수 있는 로봇이나 무인자율주행차량, 무인항공기, 무인 잠수정 등과 같은 무인화기술에 대한 관심이 점점 높아져가고 있으며, 이에 대한 연구들도 활발히 진행되고 있는 추세이다. 해양산업의 발전과 더불어 자율 주행하는 무인잠수정의 필요성과 기술개발이더욱 증대되고 있으며, 수행 목적에 적합한 무인잠수정을 설계하기 위해서는 잠수정의 조종성능과 제어성능을 수학적인 모델을 기반으로 해석해야 할 필요성이 있다<sup>[1,2]</sup>. 비선형성이 강한 잠수정의 수학적 모델에서 동적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소

는 유체력계수이다. 따라서 잠수정의 정확한 동적특성을 알기 위해서는 유체력계수들에 대한 정확한 정보가 필요하지만 일반적으로 수행하는 실험적인 방법들은 그 방법의 어려움과 실험장비들의 부정확성으로 인하여 얻어진 값들의 신뢰성이 많이 저하되며 또한 비용과 시간이 많이 소요된다. 따라서 유체력계수를 구할 수 있는 다른 방법으로 모델기반 추정 알고리즘을 통하여 계수를 추정하는 연구가 다양하게 진행되고 있다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 확장칼만필터를 이용하여 무인잠수정의 동적 거동에 큰 영향을미치는 선형감쇠계수를 추정할 수 있도록 하였다. 또한 추정된 유체력계수를 무인잠수정의 운항제어기를 설계할 때 사용하여 실제 실험에의 적용성을 높일 수 있도록 하였다.

## 2. 유체력계수의 추정

#### 2.1 작수정 모델링

본 논문에서는 만타형 잠수정의 수중에서의 동적 거동을 표현하기 위하여 다음과 같은 모델을 사용하 였으며, 비선형 운동방정식을 유도하기 위하여 좌표 계를 그림. 1과 같이 설정하였다.



[그림 1] 만타형 잠수정 모델 및 좌표계

잠수정의 정확한 동적 거동을 표현할 수 있도록 하기 위해 식 (1)과 같이 비선형 6자유도 운동방정 식을 유도하였다.

$$\begin{split} m \Big[ v\&-vr + wq - x_G \left(q^2 + r^2\right) + y_G \left(pq - r\&) + z_G \left(pr + e^{x}\right) \Big] &= X \\ m \Big[ v\&-wp + ur + x_G \left(pq + r\&) - y_G \left(p^2 + r^2\right) + z_G \left(qr - p^2\right) \Big] &= Y \\ m \Big[ v\&-uq + vp + x_G \left(pr - e^{x}\right) + y_G \left(qr + p^2\right) - z_G \left(p^2 + q^2\right) \Big] &= Z \\ I_{xx} p\&+ \left(I_{zz} - I_{yy}\right) qr + I_{xy} \left(pr - e^{x}\right) - I_{yz} \left(q^2 - r^2\right) \\ - I_{xz} \left(pq + r\&) - m \Big[ -y_G \left(v\&-uq + vp\right) + z_G \left(v\&-wp + ur\right) \Big] &= K \\ I_{yy} e^{x}+ \left(I_{xx} - I_{zz}\right) pr - I_{xy} \left(qr + p\&) + I_{yz} \left(pq - r\&) \\ + I_{xz} \left(p^2 - r^2\right) + m \Big[ -x_G \left(v\&-uq + vp\right) + z_G \left(v\&-vr + wq\right) \Big] &= M \\ I_{zz} r\&+ \left(I_{yy} - I_{xx}\right) pq - I_{xy} \left(p^2 - q^2\right) - I_{yz} \left(pr + e^{x}\right) \\ + I_{xz} \left(qr - p\&) + m \Big[ x_G \left(v\&-wp + ur\right) - y_G \left(v\&-vr + wq\right) \Big] &= N \end{split}$$

여기서 *m*은 잠수정의 질량, *Ixx*, *Iyy*, *Izz*는 각각 *x*, *y*, *z*축에 대한 관성모멘트를 나타내고, *x<sub>G</sub>*, *y<sub>G</sub>*, *z<sub>G</sub>* 는 무게중심의 위치를 나타낸다. 또한 *u*, *v*, *w*와 *p*, *q*, *r*은 각각 *x*, *y*, *z*축에 대한 병진운동의 속도 및 회전운동의 각속도를 나타낸다. 식 (1)의 우변에 있는 *X*, *Y*, *Z*, *K*, *M*, *N*은 각각 *x*, *y*, *z*축에 대한 외력과 모멘트를 나타낸다. 유도된 비선형 6자유도 유동

방정식은 추후 유체력계수 추정을 위한 확장칼만필 터, 운항제어를 위한 제어기 설계에 사용된다.

## 2.2 확장칼만필터(Extended Kalman Filter)

확장칼만필터는 선형칼만필터 이론을 비선형 모델로 확장하여 적용한 방법으로서, 플랜트 섭동이나센서 잡음이 포함된 확률적인 시스템에서 최적으로 상태변수를 추정하는 방법이다. 또한 확장칼만필터를 시스템에 적용함에 있어서 미지의 파라미터 등을일반 상태변수와 함께 추정하고자 할 때는 이를 상태변수로 변환하여 추정할 수 있는 방법도 있다. 본논문에서는 잠수정 모델링에 사용된 유체력계수 중10개의 선형감쇠계수를 미지의 파라미터로 설정하고, 이를 확장칼만필터 이론을 적용하여 추정할 수 있는 알고리즘을 설계하였다. 일반적인 비선형 시스템의 이산 상태공간 방정식은 식(2)와 같다.

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{g}(\mathbf{z}_k, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{u}_k) + \mathbf{n}_k$$
$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{z}_k, \boldsymbol{\xi}) + \mathbf{v}_k$$
(2)

여기서  $z \in R^n, u \in R^n, \xi \in R^p, y \in R^m$ 는 각각의 해당하는 차원을 갖는 상태벡터, 입력벡터, 미지의 파라미터를 나타내는 벡터 그리고 출력벡터이다. 또한  $n \in R^n, v \in R^m$  은 각각 플랜트 섭동과 센서 잡음을 나타내는 벡터이다. 위의 비선형 시스템에서 추정하고자 하는 파라미터  $\xi$ 를 상태변수에 추가하여 증가된 상태공간 방정식을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k$$
(3)

여기서  $x \in \mathbb{R}^{n+p}$  은 상태변수와 미지의 파라미터를 나타내는 증가된 상태변수 벡터이다. 위의 비선형 상태공간 모델을 기반으로 다음과 같이 식(4)<sup> $\sim$ </sup>(6)에 의한 확장칼만필터를 적용할 수 있다.

■ 시간에 따른 갱신:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k}^{-} = \mathbf{f} \left( \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1} \right) \\ \mathbf{P}_{k}^{-} = \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_{k-1}^{T} + \mathbf{W}_{k-1}$$
(4)

■ 측정치에 따른 갱신:

$$\mathbf{K}_{k} = \mathbf{P}_{k}^{-} \mathbf{H}_{k}^{T} \left[ \mathbf{H}_{k} \mathbf{P}_{k}^{-} \mathbf{H}_{k}^{T} + \mathbf{V}_{k} \right]^{-1}$$

$$\mathbf{P}_{k} = \left[ \mathbf{I} - \mathbf{K}_{k} \mathbf{H}_{k} \right] \mathbf{P}_{k}^{-}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k} = \hat{\mathbf{x}}_{k}^{-} + \mathbf{K}_{k} \left[ \mathbf{y}_{k} - \mathbf{h} \left( \hat{\mathbf{x}}_{k}^{-}, \mathbf{u}_{k} \right) \right]$$
(5)

여기서 P는 오차 상호분산이고. W와 V는 각각

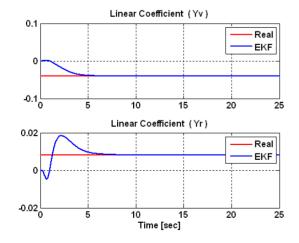
플랜트 잡음 상호분산, 센서 잡음 상호분산을 나타내는 행렬이다. K는 확장칼만필터 게인행렬을 나타내며, F와 H는 식 (6)에 표현된 자코비안 행렬이다.

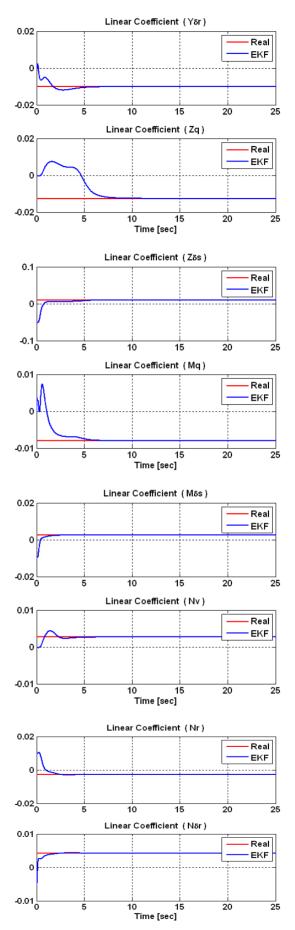
$$\mathbf{F}_{k+1,k} = \frac{\partial \mathbf{f}\left(\mathbf{x}_{k}, \mathbf{u}_{k}\right)}{\partial \mathbf{x}} \bigg|_{\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}_{k}}$$

$$\mathbf{H}_{k} = \frac{\partial \mathbf{h}\left(\mathbf{x}_{k}\right)}{\partial \mathbf{x}} \bigg|_{\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}_{k}}$$
(6)

#### 2.3 계수추정 시뮬레이션

앞 절에서 잠수정의 선형감쇠력과 연관된 유체력 계수를 추정하기 위하여 설계된 확장칼만필터의 성 능을 확인할 수 있도록 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 무인잠수정의 동적 거동이 다양한 형태 를 나타낼 수 있도록 입력변수인 승강타와 방향타를 동시에 조절하여 추정 값의 정확도를 높일 수 있게 하였다. 본 논문에서는 잠수정이 초기속도 1.0 m/s 를 갖도록 하였으며, 승강타와 방향타를 최대 20°의 각도로 입력하여 지그재그 운동을 할 수 있게 하였 다. 성능 비교를 위해 잠수정의 실제 선형감쇠계수 에 해당하는 유체력계수 값들은 PMM 시험을 통하 여 얻은 정보를 사용하였다. 추정 시뮬레이션 결과 는 그림 2에서 보는 바와 같이 초기 추정치의 오차 가 있음에도 불구하고 실제 유체력계수의 값을 잘 추정함을 보이고 있다. 이처럼 확장칼만필터를 이용 하여 추정된 선형감쇠계수를 추후 운항제어기 설계 에 적용할 수 있도록 하였다.





[그림 2] 유체력계수 추정 시뮬레이션

#### 3. 운항제어기

# 3.1 제어기 설계

본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어기를 기반으로 잠수정의 운항 제어를 수행할 수 있도록 하였으며, 특히 슬라이딩 모드 제어기를 설계할 때 필요한 상대변수와 유체력계수를 앞 장에서 설계한 확장칼만 필터를 이용하여 추정된 정보를 사용하였다. 수직방향 및 수평평면에 대하여 각각 선형화된 운동방정식을 기반으로 슬라이딩 모드 이론과 극점배치법을 적용하여 다음 식 (7)의 게인값들을 구하면 각각의 제어입력을 구할 수 있다.

$$\delta_{s} = k_{d1}q(t) + k_{d2}\theta(t) + K_{d} \tanh\left(\frac{\sigma_{d}}{\Phi_{d}}\right)$$

$$\delta_{r} = k_{h1}v(t) + k_{h2}r(t) + K_{h} \tanh\left(\frac{\sigma_{h}}{\Phi_{h}}\right)$$
(7)

여기서  $\delta_s$ 는 승강타 입력각도를 나타내고,  $\delta_r$ 은 방향타 입력각도를 나타낸다. 또한  $\sigma_d$ 와  $\sigma_h$  는 각각 수심제어와 방향제어기의 슬라이딩 평면을 나타내며,  $\Phi_d$ 와  $\Phi_h$ 는 채터링을 방지하기 위한 수심 및 방향제어기의 경계층이다.

#### 3.2 제어 시뮬레이션

앞 절에서 설계된 수심제어기와 방향제어기를 이용하여 그림 3에서와 같은 3차원의 경로를 추종할수 있도록 시뮬레이션을 수행하였다. 무인잠수정이미리 선정한 경유점을 지나 원하는 경로를 잘 추종함을 볼 수 있으며, 이러한 결과는 각각의 수심제어와 방향제어의 결과에서 살펴볼 수 있듯이 목표 수심과 목표 방향각을 큰 오차 없이 잘 추종함으로써이루어지게 된다.

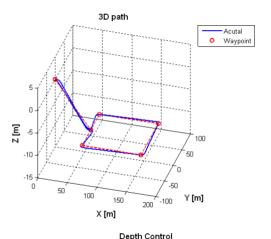
#### 4. 결론

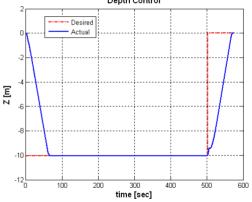
잠수정의 조종성능과 제어성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 유체력계수에 대한 정보를 모델기반 관측기인 확장칼만필터를 이용하여 선형감쇠계수를 추정할 수 있도록 하였으며, 시뮬레이션을 통하여설계된 관측기의 성능을 확인하였다. 또한 무인잠수정이 원하는 경로를 잘 추종할 수 있도록 슬라이딩모드 기법을 이용하여 운항제어기를 설계하였으며 다양한 경로에 대한 시뮬레이션을 수행함으로써 제어기의 성능을 입증하였다. 제어기 설계 시 확장칼

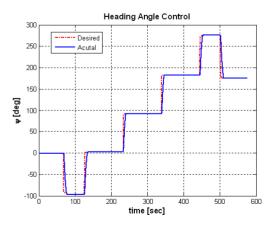
만필터를 통하여 추정된 유체력계수 값들을 사용함으로써, 추후 실제 실험으로의 적용성을 확대시키기용이하도록 하였다.

# 후기

본 연구는 ADD(Agency Defense Development) 수중운동체특화센터(UVRC)의 지원으로 수행된 연 구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드 립니다.







[그림 3] 운항제어 시뮬레이션

# 참고문헌

- [1] 변승우, 임종국, 김준영, "Manta 형상 무인잠수정의 설계과정 및 제어실험에 관한 연구", 한국산학기술학회 추계학술대회논문집, pp. 152-155, 2009.
- [2] Anthodny J. Healey et al., "Multivariable Sliding-Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 18, No. 3, pp. 327–339, 1993.
- [3] Joonyoung Kim et al., "Estimation of Hydrodynamic Coefficients for an AUV Using Nonlinear Observers", *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol. 27, No. 4, pp. 830–840, 2002.