

# Underwater Flight Vehicle의 지능형 심도 제어에 관한 연구

## A Study on a Intelligence Depth Control of Underwater Flight Vehicle

김 현 식\*      황 수 복\*\*      신 용 구\*\*      최 중 락\*\*\*  
Kim, Hyun-Sik      Hwang, Soo-Bok      Shin, Yong-Ku      Choi, Joong-Rak

### ABSTRACT

In Underwater Flight Vehicle depth control system, the followings must be required. First, It needs a robust performance which can get over the nonlinear characteristics due to hull shape. Second, It needs an accurate performance which has the small overshoot phenomenon and steady state error to avoid colliding with ground surface and obstacles. Third, It needs a continuous control input to reduce the acoustic noise. Finally, It needs an effective interpolation method which can reduce the dependency of control parameters on speed. To solve these problems, we propose a Intelligence depth control method using Fuzzy Sliding Mode Controller and Neural Network Interpolator. Simulation results show the proposed control scheme has robust and accurate performance by continuous control input and has no speed dependency problem.

주요기술용어 : Underwater Flight Vehicle, Fuzzy Sliding Mode Controller, Neural Network Interpolators

## 1. 서 론

수중 임무 수행에 활용되고 있는 수중운동체(Underwater Vehicle) 가운데에서 몸체 및 제어판 구조를 갖는 UFV(Underwater Flight Vehicle)는 제어판에 비하여 몸체가 크고 운항속도가 느려서 제어판의 제어력이 약하기 때문에 연직면 운동에 있어서

몸체 형상에 기인한 여러 가지 비선형 특성을 나타낸다<sup>(1)</sup>.

이러한 사실에 기초하여 본 논문에서는 잠수함의 일반적인 형상으로서 상하 비대칭의 몸체 형상을 갖는 UFV에 적합한 심도 제어기의 설계를 목표로 하였으며, 이를 위해서 다음과 같은 UFV 심도 제어기 요구사항을 분석하였다. 첫째, 상하 비대칭의 몸체 형상에 기인한 비선형 특성을 극복할 수 있는 강인한 성능이 요구된다. 둘째, 지면 및 장애물과의 충돌을 피하기 위하여 오버 슈트 현상 및 정상상태 오차가 작은 정밀한 성능이 요구된다. 셋째, 음향 소음을 줄여

\* 국방과학연구소 연구원  
\*\* 국방과학연구소 선임연구원  
\*\*\* 국방과학연구소 책임연구원

서 운용시의 은닉성을 증대하기 위하여 연속적인 제어입력이 요구된다. 마지막으로, 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제를 해결하기 위하여 효과적인 보간법이 요구된다.

그런데, 기존의 UFV 심도 제어기 설계 방법에 있어서는 앞에서 언급한 요구사항의 일부만이 해결되거나 그 성능 개선이 요구되었다. 즉, 선형화를 통한 슬라이딩모드 제어기를 이용한 방법<sup>(2)</sup>에서는 연속적인 제어입력을 사용하여 정밀한 제어성능을 보였으나 상하 비대칭의 몸체 형상에 기인한 비선형 특성이 모델링에 고려되지 않았고 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제가 남아 있었다. 그리고 모델 추종형 자기구성 퍼지 제어기를 이용한 방법<sup>(3)</sup>에서는 정밀한 제어성능을 보였으나 상하 비대칭의 몸체 형상에 기인한 비선형 특성이 모델링에 고려되지 않았고 제어입력의 불연속성과 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제가 남아 있었다. 마지막으로 전문가 지식을 도입한 퍼지제어기를 사용한 방법<sup>(4)</sup>에서는 연속적인 제어입력을 사용하고 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제를 해결하여 양호한 제어성능을 보였으나 상하 비대칭의 몸체 형상에 기인한 비선형 특성을 감소시키기 위한 적분 보상항 사용에 있어서 성능 개선이 요구되었다.

따라서, 본 논문에서는 기존의 UFV 심도 제어기 설계 방법의 문제점을 보완하기 위해서 퍼지 이론<sup>(5)</sup>과 슬라이딩모드 이론<sup>(6)</sup>의 장점을 결합한 형태인 퍼지 슬라이딩모드 제어기(Fuzzy Sliding Mode Controller : FSMC)<sup>(7)</sup>와 신경망의 적용 분야인 신경망 보간기(Neural Network Interpolator : NNI)<sup>(8)</sup>를 고려하였다. FSMC는 연속적인 퍼지 제어입력을 사용하여 슬라이딩모드를 유도하므로 이를 사용하여 강인성, 정밀성, 연속적인 제어입력 등의 요구사항을 해결하였고, NNI는 구성이 간단하면서도 우수한 파라미터 보간능

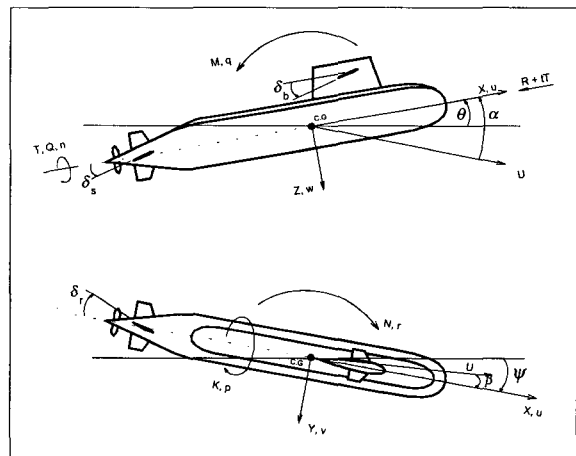
력을 가지므로 이를 사용하여 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제를 해결하였다.

제안된 UFV 심도 제어기의 성능을 검증하기 위해서 UFV의 운동 특성을 나타내는 6자유도 운동방정식에 대하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 제시하였다. 본 논문의 2장에서는 UFV의 개요 및 수학적 모델을, 3장에서는 제어기 설계를, 4장에서는 시뮬레이션 및 고찰을, 5장에서는 결론을 밝힌다.

## 2. UFV의 개요 및 수학적 모델

본 논문에서 고려한 UFV는 길이 대 직경비  $l/D$ 가 10 정도이고 최대 속도가 8kts 정도인 1톤급의 모형이다. UFV의 형상은 그림 1과 같은 오른손 좌표계를 사용한다.

그림 1에서 UFV의 운동은 병진운동과 회전운동인  $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ 의 6자유도 운동으로 표현됨을 알 수가 있는데, 각각의 운동과 관련된 힘과 모멘트는  $X, Y, Z, K, M, N$  이고, 속도와 각속도는  $u, v, w, p, q,$



[그림 1] UFV에 적용된 좌표계

$r$ , 가속도와 각속도는  $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ 이다.

이러한 좌표계 정의와 관련이 있는 UFV 운동방정식은 미국 NSRDC에서 Gertler가 유도한 식<sup>(9)</sup>에 기초하여 자체 정립한 6자유도 운동방정식으로서 식(1) 및 식(2)와 같이 표현된다.

$$[m + m_a] \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ K_1 \\ M_1 \\ N_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ K_2 \\ M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ K_3 \\ M_3 \\ N_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \\ K_4 \\ M_4 \\ N_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 질량행렬,  $m_a$ 는 UFV가 유체속을 이동할 때 함께 이동하는 주변 유체량을 질량으로 환산한 부가 질량행렬이다. 그리고  $[X_1 Y_1 Z_1 K_1 M_1 N_1]^T$ 는 관성력이고,  $[X_2 Y_2 Z_2 K_2 M_2 N_2]^T$ 는 정지된 유체 속을 UFV가 이동할 때 받는 hull force,  $[X_3 Y_3 Z_3 K_3 M_3 N_3]^T$ 는 무게와 부력에 의한 정력학적 힘,  $[X_4 Y_4 Z_4 K_4 M_4 N_4]^T$ 는 제어판에 의한 힘과 추진력이다.

식(2)의 힘과 모멘트 가운데에서 연직면 운동에 작용하는 주요 hull force인  $Z_2$ 는 식(3)과 같이 표현되는데, 유체력 계수  $Z'_\star$ 는 상하 비대칭의 몸체 형상에 기인한 비선형 특성으로서 속도  $u$ 의 자승에 비례하는 부력을 유발하여 심도 제어 성능에 결정적인 영향을 준다.

$$\begin{aligned} Z_2 = & \frac{\rho}{2} l [Z'_{pp} p^2 + Z'_{rr} r^2 + Z'_{rp} rp] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Z'_{vr} vr + Z'_{vp} vp] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Z'_q uq + Z'_{w|q|} \frac{w}{|w|} |\sqrt{(v^2+w^2)}| |q|] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Z'_\star u^2 + Z'_w uw + Z'_{w|w|} |\sqrt{(v^2+w^2)}|] \\ & + \frac{\rho}{2} l^2 [Z'_{|w|} u|w| + Z'_{ww} |w\sqrt{(v^2+w^2)}| + Z'_{vw} v^2] \end{aligned} \quad (3)$$

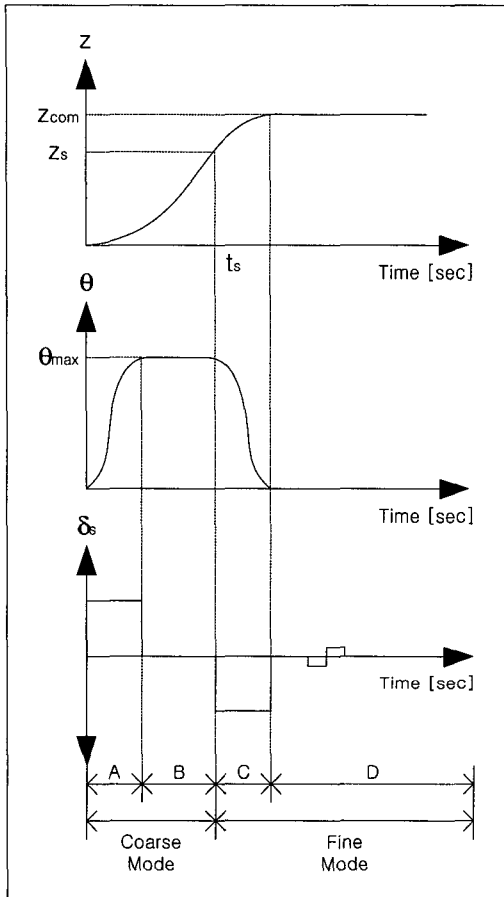
그리고, 식(2)의 여러 가지 힘과 모멘트 가운데에서 hull force를 발생하는 유체력 계수들은 모델링 과정에서 모델링에 사용된 유체력 계수의 식별 정밀도에 기인한 모델링 오차를 포함한다. 예를 들어 모델링 과정에서  $Z'_\star$ 의 경우에는 식별값  $\widehat{Z'_\star}$ 가 사용된다.

### 3. 제어기 설계

본 논문에서의 UFV 심도제어기 설계과정은 다음과 같다.

먼저, UFV 심도 제어 운용 절차와 관련된 조타수의 경험 및 지식에 의해서 복잡한 연성 효과를 갖는 다변수 UFV 심도 제어 시스템을 비연성화한다.

즉, 심도 명령값  $z_{com}$ 이 발생하면 숙련된 조타수는 그림 2와 같이 구간 A, B로 이루어진 coarse Mode와 구간 C, D로 이루어진 fine Mode로 구분된 운용 절차를 수행한다. 구간 A에서는 피치  $\theta$ 가 최대피치각  $\theta_{max}$ 를 얻을 때까지 선미 수평타  $\delta_s$ 를 최대로 구동시키고 구간 B에서는 심도  $z$ 가  $z_s$ 가 될 때까지 선미 수평타  $\delta_s$ 를 원위치로 구동시킨다. 그리고 구간 C에서는 심도 명령값  $z_{com}$ 이 될 때까지 선미 수평타  $\delta_s$ 를 반대 방향으로 최대로 구동시키며 구간 D에서는 피치각 및 심도 오차가 최소화 될 수 있도록 선미 수



[그림 2] UFV 운용 절차

평타  $\delta_s$ 를 적절히 구동시킨다.

그림 2를 살펴보면 coarse Mode에서는 UFV 심도 제어 시스템이 피치 제어 시스템으로서의 단일 입출력 시스템으로 고려될 수 있으나, fine Mode에서는 피치 및 심도 제어 시스템으로서의 다변수 시스템으로 고려될 수 있다. 이는 UFV의 피치 및 심도의 변화율이 식(4)와 같은 운동 역학적 관계를 가지기 때문이다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} &= q \end{aligned} \quad (4)$$

그런데, 그림 2의 D 구간에서는  $w$  및  $\theta$ 의 값이 매우 작으므로  $u = U_0$ 에서 식(4)를 근사화하면  $\dot{z} \approx -U_0 \theta$ 와 같이 표현되어 피치 및 심도가 비연성화 가능하다<sup>(4)</sup>.

앞에서 설명한 조타수의 운용 절차를 심도 제어기 설계에 반영하면 UFV 심도 제어 시스템의 비연성화가 가능하므로 이후의 과정에서는 이러한 사실에 근거하여 UFV 심도 제어기를 설계한다.

심도 명령값이  $z_{com,old}$ 에서  $z_{com}$ 으로 변화하는 경우에 피치 명령값  $\theta_{max}$ 를 발생하기 위해서는 UFV 기동 성능 지표로서 단위 심도변경에 소요되는 시간  $T_{sec/m}$ 를 일정하게 유지하도록 하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_{dist} &= |z_{com} - z_{com,old}| \\ \theta_{max} &= \sin^{-1}(z_{dist}/(u \cdot t_{req})) \\ &= \sin^{-1}(1/(u \cdot T_{sec/m})) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $t_{req}$ 는  $T_{sec/m} \cdot z_{dist}$ 이고,  $u$ 는  $x$  방향의 속도이다.

제안된 UFV 심도 제어기를 구성하는 하나의 요소인 FSMC의 구성에 사용된 퍼지 추론 방법은 식(6)과 같이 결론부가 상수의 형태를 갖는 simplified 방법이다.

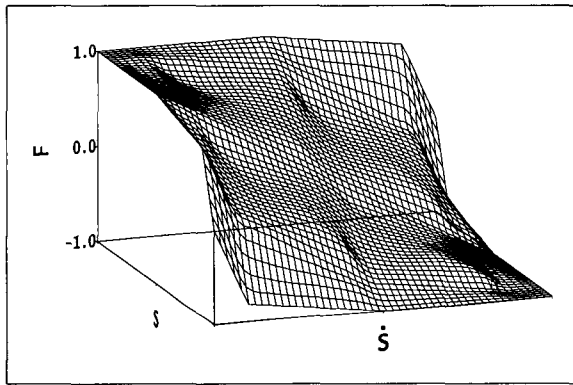
$$R_i : \text{If } s \text{ is } A_i \text{ and } \dot{s} \text{ is } B_i \text{ then } F = c_i \quad (6)$$

여기서  $s$ 는 슬라이딩 신호,  $\dot{s}$ 는 슬라이딩 신호의 미분치이다.

제안된 퍼지룰은 표 1과 같은데, 슬라이딩 존재조건  $s\dot{s} < 0$ 을 만족하여 오차가 슬라이딩 평면  $s=0$

[표 1] 제안된 퍼지룰

$s \backslash \dot{s}$	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	1.0	1.0	1.0	0.8	0.0
PM	1.0	1.0	0.8	0.0	-0.8
ZO	1.0	0.8	0.0	-0.8	-1.0
NM	0.8	0.0	-0.8	-1.0	-1.0
NB	0.0	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0

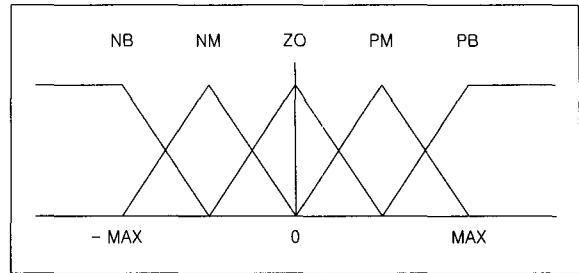


[그림 3] 제어 평면

을 따라 영으로 수렴하도록 하기 위한 것이다. 이와 관련한 FSMC 입출력 관계를 나타낸 제어 평면은 그림 3이다.

일반적으로 퍼지 이론을 사용하는 제어기의 안정도 해석은 어려운 문제로 알려져 있으나 제안된 FSMC의 경우에는 슬라이딩 존재조건을 만족시키는 퍼지룰에 의해서 상태 벡터가 슬라이딩 평면을 따라 영으로 수렴하도록 되어 있으므로 제안된 퍼지룰이 FSMC의 안정도를 보장하는 역할을 한다.

퍼지 입력부 멤버십 함수는 그림 4와 같은 삼각형 형태를 사용하였다.



[그림 4] 멤버십 함수 형태

비퍼지화는 식(7)과 같이 무게중심법을 사용하였다.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N W_i c_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (7)$$

여기서  $N$ 은 퍼지룰의 개수,  $R_{A_i}(s), R_{B_i}(\dot{s})$ 가 각각  $A_i, B_i$ 의 멤버십 함수들일 때  $W_i = \text{Min} \{R_{A_i}(s), R_{B_i}(\dot{s})\}$ 이다.

앞에서 기술된 퍼지 추론 방법은 퍼치 및 심도 제어부에 동일하게 적용되는데, 퍼치 및 심도 제어부 각각의 슬라이딩 신호  $s_\theta, s_z$ 는 식(8)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} s_\theta &= C_\theta e_\theta + \dot{e}_\theta \\ s_z &= C_z e_z + \dot{e}_z \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $e_\theta, e_z$ 는 퍼치 및 심도 오차,  $C_\theta, C_z$ 는 슬라이딩 평면의 기울기로서 상수이다.

식(7)의 퍼치 및 심도 제어부 FSMC 출력은 각각  $F_\theta, F_z$ 로 표현되는데, 그림 2의 조타수의 운용 절차를 반영한  $\delta$ 는 식(9)와 같이 구성하였다.

$$\delta = (\text{ratio} \cdot \delta_z + (1 - \text{ratio}) \cdot \delta_\theta) \cdot R2D \quad (9)$$

$$\text{여기서 } \delta_z = K_{F_z} F_z + K_{s_z} s_z + K_{i_z} \int e_z$$

$$\delta_\theta = K_{F_\theta} F_\theta + K_{s_\theta} s_\theta + K_{i_\theta} \int e_\theta$$

$$\text{ratio} = \begin{cases} 0.0 & \text{if } e_z > \text{const} \\ 0.7 & \text{if } e_z < \text{const} \end{cases}$$

R2D는 상수

식(9)에서  $K_{F_\theta} F_\theta$  및  $K_{F_z} F_z$ 는 강인하고 정밀한 성능을 보장하기 위한 FSMC 출력항,  $K_{s_\theta} s_\theta$  및  $K_{s_z} s_z$ 는 강인성을 증대하기 위한 슬라이딩 신호 보상항,  $K_{i_\theta} \int e_\theta$  및  $K_{i_z} \int e_z$ 는 정밀한 성능을 증대하여 오버슈트 현상 및 정상상태 오차가 거의 없도록 하기 위한 적분 보상항이다.

앞의 내용을 바탕으로 최종적으로 설계된 FSMC의 출력인 선미 수평타 명령각  $\delta_s$  및 선수 수평타 명령각  $\delta_b$ 는 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_s &= \delta + \delta_{level} \\ \delta_b &= -1.5 \cdot \delta \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $\delta_{level}$ 은  $Z_\star$ 에 기인한 부력의 영향을 감소시키기 위한 제어관 편향항으로서 level flight 조건이다.

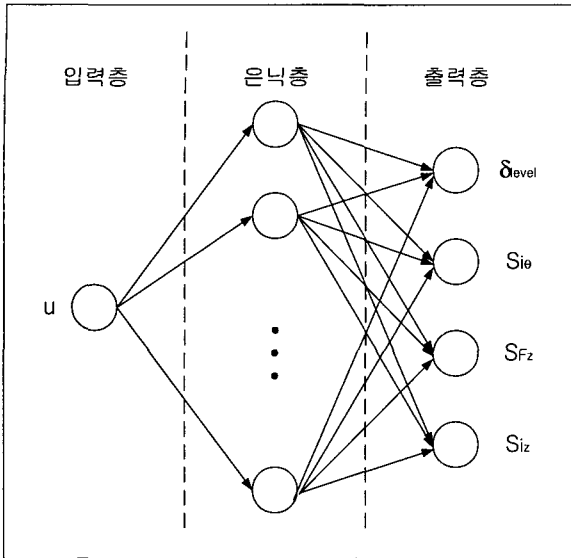
식(10)에서 선미 수평타가 UFV 선체에 미치는 힘이 선수 수평타의 힘에 비해서 크므로 구현 및 효과도 측면에서 제어관 편향항  $\delta_{level}$ 을  $\delta_s$ 에만 첨가하였는데, 이 값은 제안된 제어기의 성능을 지배하는 주요 파라미터이다. 또한, 제안된 제어기를 적용한 여러 번의 시뮬레이션을 통해서 제어기 성능에 지배적인 영향을 주는 주요 파라미터들로서 피치 제어부 적분

계인  $K_{i_\theta}$ , 심도 제어부 FSMC 출력계인 및 적분계인  $K_{F_z}$ ,  $K_{i_z}$ 을 도출하였다. 따라서, FSMC의 성능을 지배하는 주요 제어기 파라미터는 파라미터는  $\delta_{level}$ ,  $K_{i_\theta}$ ,  $K_{F_z}$ ,  $K_{i_z}$ 의 4종류인데, 이들 값은 모두가 UFV의 속도  $u$ 에 의존한다. 그런데, UFV 운용속도 전구간에 대해서 이들 값을 획득하기는 현실적으로 불가능하므로 비용 대 효과 측면에서 속도별 보간능력을 갖는 보간기가 요구된다.

보간기 설계를 위한 기존의 방법으로서 헤르미트 보간 함수를 이용한 방법이 있다<sup>(10)</sup>. 그런데 이 방법은 우수한 보간능력을 가지지만 여러 보간점들 가운데에서 이웃한 두 점들로 이루어진 여러개의 세그먼트별로 보간기를 각각 구하여야 하므로 보간점의 개수가 증가하게 되면 보간기의 개수도 증가하게 되며, 보간이 요구되는 파라미터별로 각각의 보간기를 설계하여야 하는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 보간기 설계 방법에 있어서 기존의 문제점을 해결하기 위해서 feedforward 형태의 신경망을 구성한 후, UFV의 운용속도 구간 내의 일부 속도값들에 대해서 획득된 제어기 파라미터들을 신경망의 학습데이터로 사용하고 역전파(back propagation) 알고리즘<sup>(8)</sup>에 의해 학습하여 운용속도 전구간에서 제어기 파라미터 보간능력을 갖는 NNI를 설계하였다. 설계된 NNI를 사용하면 보간점 개수의 변화는 신경망 학습데이터 개수의 증감으로 간단히 해결할 수 있으며, 보간이 요구되는 파라미터의 종류에 무관하게 단 1개의 보간기만을 설계하면 되므로 기존의 문제점을 효과적으로 해결할 수 있다.

그림 5는 제안된 신경망의 구조를 나타내는데 함수 근사화에 있어서 효과적인 성능을 보이는 구조로서, 입력층, sigmoidal 노드들로 구성된 은닉층, linear 노



[그림 5] 제안된 신경망의 구조

드들로 구성된 출력층의 3층을 가지며 각층의 노드들은 바이어스항을 가진다<sup>(11)</sup>. 입력층 노드는  $u$ , 출력층 노드는 제어판 편향항  $\delta_{level}$ , 스케일요소  $S_{i\theta}$ ,  $S_{Fz}$ ,  $S_{iz}$ 로 구성되며, 은닉층 노드는 실험적으로 5개로 구성하였다. 스케일 요소들은 신경망의 학습이 용이하도록  $K_{i\theta}$ ,  $K_{Fz}$ ,  $K_{iz}$ 를 정규화한 값들이다.

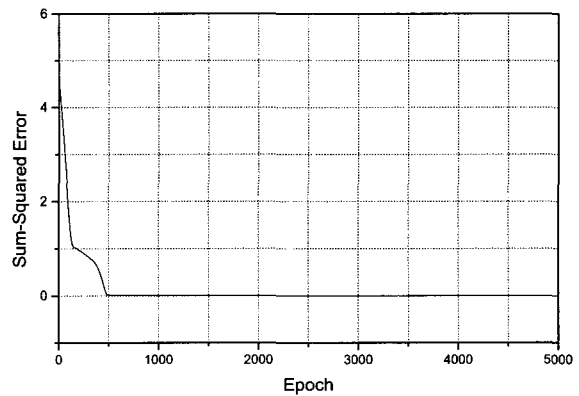
제안된 NNI의 구성에 있어서 운용속도 구간내의 일부 속도값인 4, 6, 8 knots에 대해서 FSMC의  $\delta_{level}$ ,  $S_{i\theta}$ ,  $S_{Fz}$ ,  $S_{iz}$ 의 값을 획득하였으며, 운용속도 전구간인 4~8 knots에 대해서는 NNI를 이용하여 FSMC의  $\delta_{level}$ ,  $S_{i\theta}$ ,  $S_{Fz}$ ,  $S_{iz}$ 의 값을 생성하였다.

표 2는 제안된 신경망을 학습하기 위한 신경망 학습 파라미터값들이고, 그림 6은 신경망 학습 추이로서 자승합 오차를 나타낸다.

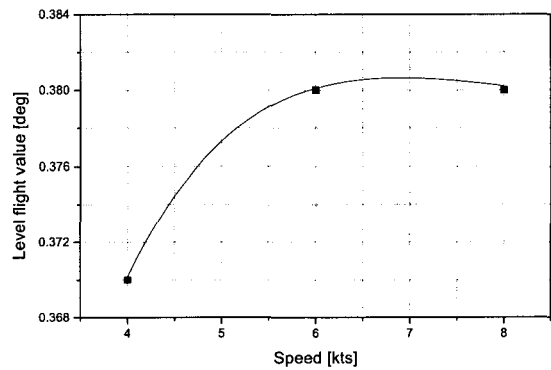
그림 7은 그림 5의 신경망에 의해 생성된 속도별  $\delta_{level}$ 의 값으로서 속도가 증가할수록 그 값이 포화되는 특성을 보이는데, 이는 속도의 증가로 인하여  $Z^*$

[표 2] 신경망 학습 파라미터

구분	설정값
Sum-squared error goal	0.000001
Learning rate	0.001
Learning rate increase	1.01
Learning rate decrease	0.75
Momentum constant	0.95

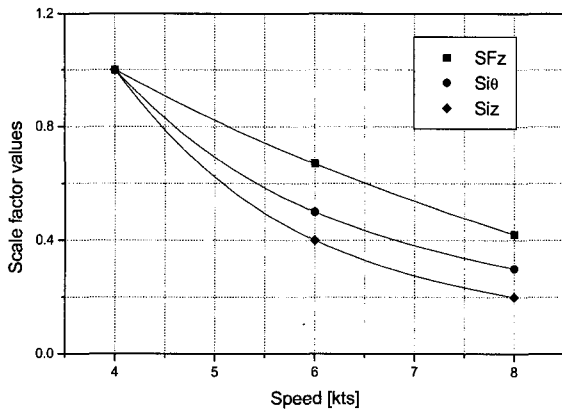


[그림 6] 신경망 학습 추이

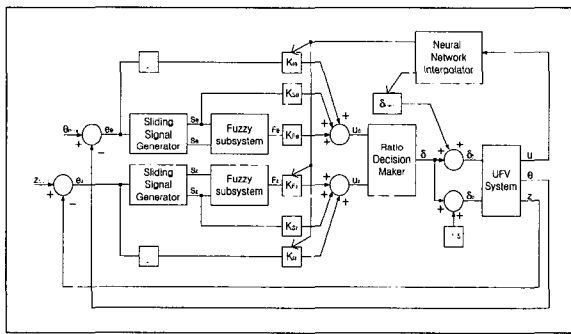


[그림 7] 신경망에 의해 생성된  $\delta_{level}$  값.

에 의한 부력의 증가와 더불어 제어판의 타력이 증가하는 현상에 기인한 것으로 판단된다. 그리고, 그림 8



[그림 8] 신경망에 의해 생성된 스케일요소 값



[그림 9] 시스템 블록선도

또한 그림 5의 신경망에 의해 생성된 속도별  $S_{i_\theta}$ ,  $S_{F_z}$ ,  $S_{i_z}$ 의 값으로서 속도가 증가할수록 이들 값이 지수 함수적으로 감소하는 특성을 보이는데, 이는 속도의 증가로 인하여 제어판의 타력이 증가하는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

앞의 내용을 종합하여 제안된 UFV의 심도 제어 시스템을 표현한 블록 선도는 그림 9와 같다.

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

제안된 UFV 심도 제어기가 UFV 심도 제어기 요

구 사항을 모두 만족시키는 성능을 가짐을 검증하기 위해서 UFV의 개발/운용을 통해서 정밀화된 UFV 운동방정식에 근거한 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문의 UFV 심도 제어 시뮬레이션의 수행 내용은 크게 FSMC의 성능 검증 부분과 NNI의 성능 검증 부분으로 나누어 지는데, FSMC의 성능 검증을 위해서는 UFV 운용 속도 구간내의 일부 속도 값인 4, 6, 8 knots에 대해서 FSMC의 주요 제어기 파라미터를 획득한 후, 획득된 제어기 파라미터 값을 적용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 그 성능을 검증하였다. 또한, NNI의 성능 검증을 위해서는 NNI를 이용하여 5, 7 knots에 대해서 FSMC의 주요 제어기 파라미터들을 생성한 후, 생성된 제어기 파라미터값을 적용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 그 성능을 검증하였다.

그림 10~12는 4 knots에 대해서 설계된 FSMC를 적용한 시뮬레이션 결과이다.

설계된 제어기의 성능을 시뮬레이션을 통해서 검증한 이후 실제 시험에서 제어기를 실선(real ship)에 적용하는 과정에서는 시뮬레이션에 사용된 유체력 계수의 식별 정밀도에 기인한 모델링 오차가 발생할 수 있는데, 이를 극복하기 위해서는 제어기의 강인성이 요구된다. 표 3은 4 knots에 대해서 설계된 FSMC 및 실용성 측면에서 UFV 제어에 널리 사용되고 있는 PID 제어기의 강인성을 비교하기 위해서  $\hat{Z}_\star$ 를 50% 변화한 경우의 시뮬레이션 결과를 요약한 것인데,  $|e_z|_{\max}$  및  $|e_\theta|_{\max}$ 는 정상 상태에서의 심도 및 피치 오차 절대치의 최대값을 나타낸다. PID 제어기에 제어판 편향항인  $\delta_{level}$ 를 첨가한 경우에는 PID 제어기만을 사용한 경우에 비해서 심도 및 피치 제어 성능이 더욱 정밀한 특성을 보였고, 제안된 제어기의 경우에는 PID 제어기에 제어판 편향항인  $\delta_{level}$ 를 첨가한 경우에 비해서 심도 및 피치 제어 성능이 더욱



[표 3] 제어기 강인성 비교(4kts 시)

구 분	제안된 제어기		PID + $\delta_{level}$		PID only	
	변화전	변화후	변화전	변화후	변화전	변화후
$ e_z _{max}$	0.0162	0.0293	0.0496	0.0539	0.2420	0.2732
$ e_\theta _{max}$	0.0232	0.0255	0.1732	0.1815	0.2927	0.3942

[표 4] 속도별 제어기 성능

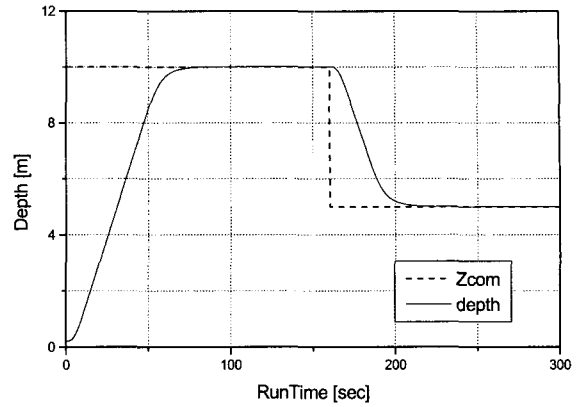
구 분	실제 획득			보간법 적용	
	4 knots	6 knots	8 knots	5 knots	7 knots
$ e_z _{max}$	0.0162	0.0198	0.0161	0.0188	0.0170
$ e_\theta _{max}$	0.0232	0.0248	0.0215	0.0260	0.0252

더 정밀하고 강인한 특성을 보였다. 결과적으로 기존의 제어기에 대해서도 제어판 편향항  $\delta_{level}$ 을 사용하면 정밀성을 증대할 수 있으며, 제어판 편향항  $\delta_{level}$ 을 갖는 FSMC를 사용하면 정밀성 및 강인성 모두를 증대할 수 있음을 확인할 수 있다.

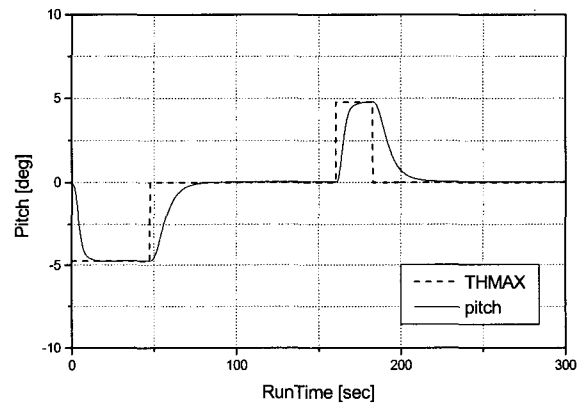
그림 13~15는 4 knots에 대해서 설계된 FSMC의 강인성을 검증하기 위해서  $Z_{\star}$ 를 50% 변화한 경우의 시뮬레이션 결과이다.

표 4는 속도별 제어기 성능을 나타내는데 이들 결과값들을 살펴보면 제안된 NNI가 매우 효과적이고 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 그림 16~18는 5 knots에 대해서 NNI에 의해 생성된 제어기 파라미터를 사용하는 FSMC를 적용한 시뮬레이션 결과이다.

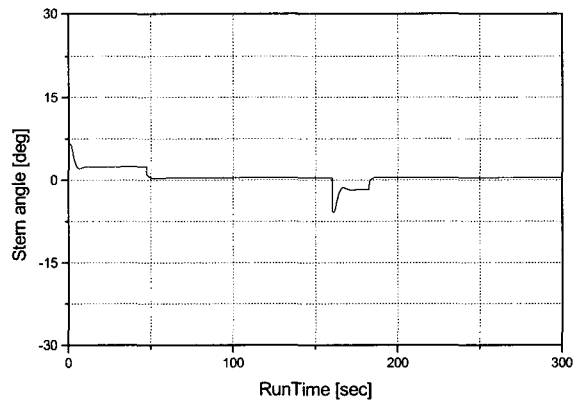
UFV의 속도에 무관하게 모든 시뮬레이션 결과에 있어서  $|e_z|_{max}$  및  $|e_\theta|_{max}$ 가 명령값의 5% 이내를 만족하는 강인하고 정밀한 성능을 보였으며,  $\delta_s$ 의 최대 동작각이  $\pm 30^\circ$  임에 비하여 실제 명령각은 그 크



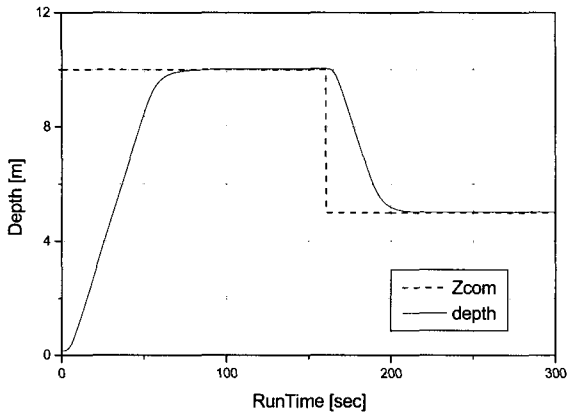
[그림 10] 심도 제어 성능(4kts 시)



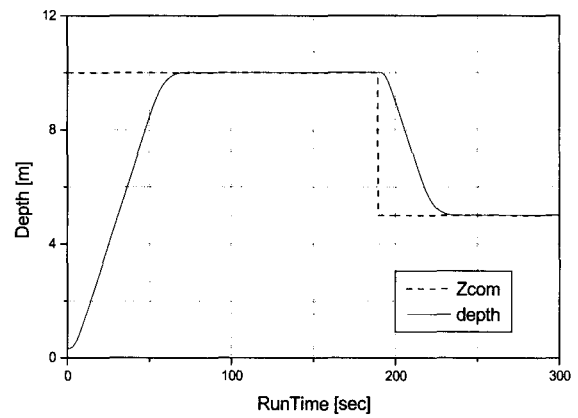
[그림 11] 피치 제어 성능(4kts 시)



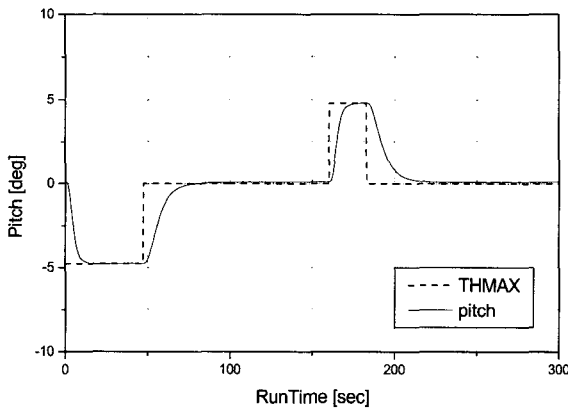
[그림 12] 선미 수평타 명령각(4kts 시)



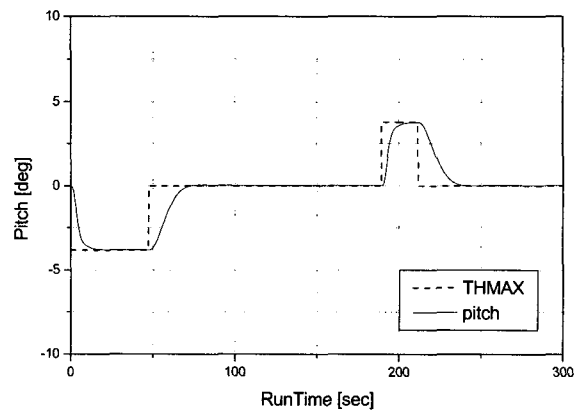
[그림 13] 심도 제어 성능(4kts,  $\hat{z}_*$  50% 변화시)



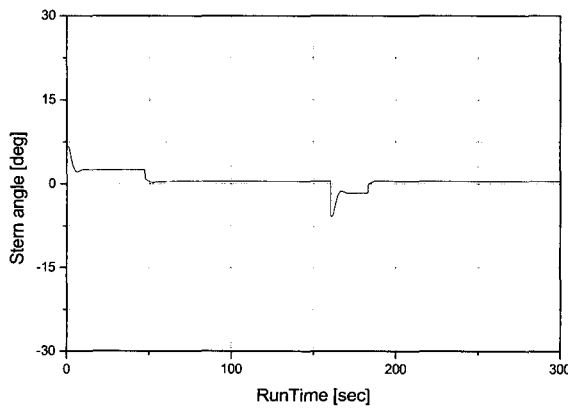
[그림 16] 심도 제어 성능(5kts, 보간법 사용시)



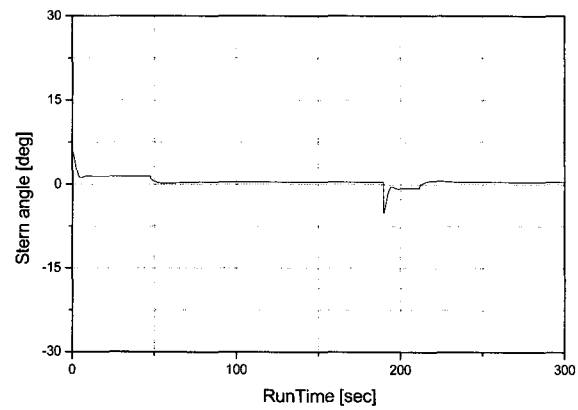
[그림 14] 피치 제어 성능(4kts,  $\hat{z}_*$  50% 변화시)



[그림 17] 피치 제어 성능(5kts, 보간법 사용시)



[그림 15] 선미 수평타 명령각(4kts,  $\hat{z}_*$  50% 변화시)



[그림 18] 선미 수평타 명령각(5kts, 보간법 사용시)

기 및 변화량이 적은 연속적인 형태를 가지고 있었다. 그림 12, 15, 18의 정상상태에서 나타난 바이어스 성분은 UFV의 level flight를 위한 제어판 편향항  $\delta_{level}$  값이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 UFV가 몸체 형상에 기인한 여러 가지 비선형 특성을 나타낸다는 사실에 기초하여 잠수함의 일반적인 형상인 상하 비대칭의 몸체 형상을 갖는 UFV에 적합한 심도 제어기의 설계를 목표로 하였다.

UFV 심도 제어기 설계를 위해서 강인성, 정밀성, 연속적인 제어입력, 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제 해결 등의 요구 사항을 분석하였으며, 기존의 UFV 심도 제어기 설계 방법들에 있어서의 문제점을 보완하기 위해서 FSMC와 NNI를 이용하였다. FSMC를 설계한 후 적용하여 제안된 제어 시스템이 연속적인 제어입력을 사용하면서도 플랜트 파라미터의 변동에 대하여 강인하고 정밀한 제어 성능을 가지도록 하였으며, NNI를 사용하여 UFV의 고유 특성인 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제를 효과적으로 해결하고자 하였다.

제안한 UFV 심도 제어기가 제어기 요구사항을 모두 만족시키는 성능을 가짐을 검증하기 위해서 UFV 운동방정식에 근거한 시뮬레이션을 수행함으로써 제안한 UFV 심도 제어기가 연속적인 제어입력을 가지면서도 강인성, 정밀성이 우수함을 알 수 있었고, 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제가 해결되었음을 알 수 있었다. 따라서 제안한 UFV 심도 제어 기술이 UFV 심도 제어기 설계시의 모든 요구 사항을 만족시

키는 성능을 가짐을 검증할 수 있었다. 그런데, 본 논문에서는 UFV 운동 방정식의 여러 가지 요소 가운데에서 지배적인 요소의 영향만을 고려하여 제어기를 설계하였으므로 추후에는 다양한 요소의 영향을 고려하여 제어기를 설계함으로써 그 성능을 개선할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

1. R. K. Lea, R. Allen and S. L. Merry, "A Comparative study of control techniques for an underwater flight vehicle," *International Journal of Systems Science*, vol. 30, pp. 947~964, 1999.
2. S. Y. Yang, *Path Tracking and Depth Control for Autonomous Underwater Vehicles based on Sliding Mode Control*, Ph.D. Thesis, Pusan National University, 1998.
3. D. I. Lee, D. H. Kwak and J. L. Choi, "An Intelligent Control System Design for Autonomous Underwater Vehicle," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 227~237, 1997.
4. J. L. Choi and C. S. Hwang, "Real-time Implementation of a Fuzzy Logic Controller for AutoDepth Control System of a Submersible Vehicle," *Trans. KIEE*, vol. 44, no. 8, pp. 1075~1084, 1995.
5. L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338~358, 1965.
6. S. V. Drakunov and V. I. Utkin, "Sliding

- mode control in dynamics systems," *INT. J. Control*, vol. 55, no. 4, pp. 1029~1037, 1992.
7. Cornelius T. Leondes, *FUZZY THEORY SYSTEMS*, Academic Press, 1999.
8. Jacek M. Zurada, *Introduction to Artificial Neural Systems*, West Publishing Company, 1992.
9. Morton Gertler and Grant R. Hagen, *Standard Equation of Motion for Submarine Simulation*, TASK, June 1967.
10. H. C. Lee et al, *Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers*, Sigma Press, pp. 261~266, 1996.
11. Howard Demuth and Mark Beale, *Neural Network Toolbox User's Guide*, The MathWorks Inc., pp. 5~20, 1994.