

# 퍼지 슬라이딩모드 제어기 및 신경망 보간기를 이용한 Underwater Flight Vehicle의 심도 제어

論 文

50D-8-2

## Depth Control of Underwater Flight Vehicle Using Fuzzy Sliding Mode Controller and Neural Network Interpolator

金賢植\* · 朴晋玄\*\* · 崔榮奎\*\*\*

(Hyun-Sik Kim · Jin-Hyun Park · Young-Kiu Choi)

**Abstract** - In Underwater Flight Vehicle depth control system, the followings must be required. First, it needs robust performance which can get over modeling error, parameter variation and disturbance. Second, it needs accurate performance which have small overshoot phenomenon and steady state error to avoid colliding with ground surface or obstacles. Third, it needs continuous control input to reduce the acoustic noise and propulsion energy consumption. Finally, it needs interpolation method which can solve the speed dependency problem of controller parameters. To solve these problems, we propose a depth control method using Fuzzy Sliding Mode Controller with feedforward control-plane bias term and Neural Network Interpolator. Simulation results show the proposed method has robust and accurate control performance by the continuous control input and has no speed dependency problem.

**Key Words** : Underwater Flight Vehicle, Fuzzy Sliding Mode Controller, Neural Network Interpolator

### 1. 서 론

여러 가지 형태의 수중운동체(Underwater Vehicle) 가운데서 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[1]. 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, 복잡한 연성 효과 및 상하 비대칭의 몸체 형상에 기인한 비선형 특성을 가지므로 이러한 특성을 극복할 수 있는 강인한 심도 제어기가 요구된다[2]. 둘째, 지면 및 장애물과의 충돌을 피하기 위하여 오버 슈트 현상 및 정상상태 오차가 작은 정밀한 심도 제어기가 요구된다. 셋째, 제어입력의 변화량이 적은 연속적인 제어입력을 사용함으로써 음향소음 및 추진에너지 소모량을 줄여서 운용시의 정숙성 및 은닉성을 증대할 필요가 있다. 마지막으로, 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제를 해결하여야 한다.

그런데, 기존의 UFV 심도 제어기 설계 방법에 있어서는 앞에서 언급한 요구사항의 일부만이 해결되거나 그 성능 개선이 요구되었다. 즉, 선형화를 통한 슬라이딩모드 제어기를

이용한 방법[3]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 자기 구성 퍼지 제어기를 이용한 방법[4]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[5]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 방법에 있어서의 문제점을 보완하기 위해서 퍼지 이론[6]과 슬라이딩모드 이론[7]의 장점을 결합한 형태인 퍼지 슬라이딩모드 제어기(Fuzzy Sliding Mode Controller : FSMC)[8-10]와 신경망 보간기(Neural Network Interpolator : NNI)[11]를 고려하였다. 퍼지 슬라이딩모드 제어기는 연속적인 퍼지 제어입력을 사용하여 슬라이딩모드를 유도하므로 이를 사용하여 강인성, 정밀성, 연속적인 제어입력 등의 요구사항을 해결하였다. 신경망 보간기는 UFV의 운용속도 구간 내의 일부 속도값들에 대해서 획득된 제어기 파라미터들로 구성된 신경망 학습데이터를 사용하고 역전파(back propagation)알고리즘에 의해 학습되어 운용속도 구간에서 제어기 파라미터 보간능력을 가지므로 이를 사용하여 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제를 해결하였다. 제안된 UFV 심도 제어기의 성능을 검증하기 위해서 UFV의 운동특성을 나타내는 6자유도 운동방정식에 대하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 제시하였다.

\* 正 會 員 : 國防科學研究所 研究員 · 工博

\*\* 正 會 員 : 晉州産業大 産業自動化工學科 助教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 釜山大 電子電氣情報컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 3月 30日

最終完了 : 2001年 7月 11日

본 논문의 2장에서는 UFV의 개요 및 수학적모델을, 3장에서는 제어기 설계를, 4장에서는 시뮬레이션 및 고찰을, 5장에서는 결론을 밝힌다.

### 2. UFV의 개요 및 수학적 모델

본 논문에서 심도 제어 대상으로 고려한 UFV는 길이 대 직경비  $l/D$ 가 10 정도이고 최대 속도가 8kts 정도인 1톤급의 모형으로서 자율제어와 원격제어 방식을 가지며 추진장치, 주제어 컴퓨터, 감시/데이터저장 컴퓨터, 항법장치 및 센서, 통신장치, 발라스트장치 등을 탑재하고 수조 또는 호수에서 시스템 식별 시험을 수행하는 기능을 가진다.

고려된 UFV의 대략적인 형상은 그림 1과 같고 좌표계는 오른손 좌표계를 사용하였다.

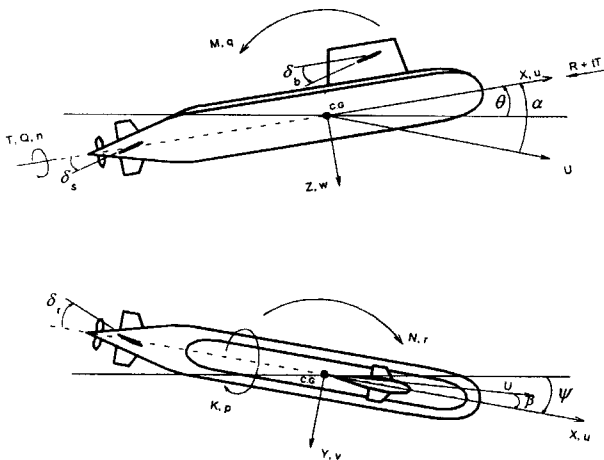


그림 1 UFV에 적용된 좌표계  
Fig. 1 The coordinate system of UFV

그림 1을 살펴 보면 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  $u, v, w, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ , 가속도와 각가속도는  $\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{w}, \ddot{\phi}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}$ 이다. 이러한 좌표계 정의와 관련한 UFV 운동방정식은 미국 NSRDC에서 Gertler가 유도한 식[12]을 근간으로 자체 정립한 6자유도 운동방정식으로서 식(1)과 같이 표현된다.

$$[m + m_a] \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{w} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ K_1 \\ M_1 \\ N_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ K_2 \\ M_2 \\ N_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \\ K_3 \\ M_3 \\ N_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \\ K_4 \\ M_4 \\ N_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 UFV의 질량행렬,  $m_a$ 는 UFV가 유체속을 이동할 때 함께 이동하는 주변 유체량을 질량으로 환산한 부가질량행렬, 그리고  $[X_1 Y_1 Z_1 K_1 M_1 N_1]^T$ 는 관성력,

$[X_2 Y_2 Z_2 K_2 M_2 N_2]^T$ 는 정지된 유체속을 UFV가 이동할 때 받는 hull force,  $[X_3 Y_3 Z_3 K_3 M_3 N_3]^T$ 는 무게와 부력에 의해서 발생하는 정력학적 힘,  $[X_4 Y_4 Z_4 K_4 M_4 N_4]^T$ 는 제어판에 의해서 발생하는 힘과 추진력이다.

앞에서 언급한 UFV 운동방정식을 구성하는 힘과 모멘트 가운데에서 연직면 운동에 작용하는 주요 hull force인  $Z_2$ 는 식(2)와 같이 표현되는데, 식(2)의 구성 요소인 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.

$$Z_2 = \frac{\rho}{2} l [Z'_{pp} \dot{p}^2 + Z'_{rr} r^2 + Z'_{rp} r \dot{p}] + \frac{\rho}{2} l^2 [Z'_{vr} vr + Z'_{vp} v \dot{p}] + \frac{\rho}{2} l^3 [Z'_a uq + Z'_{w|q|} \frac{w}{|w|} |\sqrt{(v^2+w^2)}| |q|] + \frac{\rho}{2} l^3 [Z'_{\star} u^2 + Z'_{wuw} u w + Z'_{w|w|} |\sqrt{(v^2+w^2)}|] + \frac{\rho}{2} l^3 [Z'_{|w|u|} u |w| + Z'_{uw} u w \sqrt{(v^2+w^2)} + Z'_{vw} v^2] \quad (2)$$

그런데, UFV의 모델링에서는 실제 UFV의 유체력 계수 값인  $Z_{\star}$ 가 아닌 그 식별값인  $\widehat{Z}_{\star}$ 가 사용되며, 이와 관련된 실험식은 식(3)과 같다.

$$\widehat{Z}_{\star} = C_{PMM} \times \frac{\nabla}{\frac{\rho}{2} l^3} \quad (3)$$

여기서  $C_{PMM}$ 은 상수,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\nabla$ 은 UFV의 배수량으로서 단위는[kg],  $l$ 은 UFV의 길이로서 단위는[m]이다.

식(3)의  $C_{PMM}$ 은 PMM(Planar Motion Mechanism)에 의한 구속 모형시험에 의해서 구해지는데 다음의 과정을 거친다. 먼저, 형상은 동일하나 크기 스케일이 다른 모형별로 구속 모형시험을 수행하여  $x$  방향의 계측힘에 대한  $z$  방향의 계측힘의 비율값을 구한다. 다음으로, 모형별로 구해진 비율값들의 평균값을 구하여 그 형상을 대표하며 크기 스케일에 무관한 상수값인  $C_{PMM}$ 으로 근사화한다. 따라서  $\widehat{Z}_{\star}$ 의 식별 정밀도는  $C_{PMM}$ 의 계측 오차 및 근사화 오차에 의존한다.

### 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 최대피치각  $\theta_{max}$ 를 얻을 때까지 선미 수평타  $\delta_s$ 를 최대로 구동시키고 구간 B에서는 UFV의 심도가  $z_s$ 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 피치 각 및 심도 오차가 최소화 될 수 있도록 선미 수평타  $\delta_s$ 를 적절히 구동시킨다.

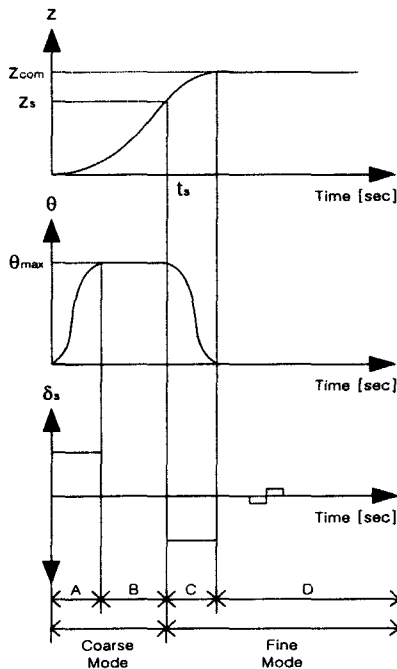


그림 2 운용 절차  
Fig. 2 Maneuvering procedure

그림 2를 살펴보면 피치 제어 구간인 coarse Mode에서는 UFV 심도 제어 시스템이 단일 입출력 시스템으로 고려될 수 있으나 피치 및 심도 제어 구간인 fine Mode에서는 피치  $\theta$  및 심도  $z$ 가 연성(coupling)되어 UFV 심도 제어 시스템이 다변수 시스템으로 고려됨을 알 수가 있다. 이것은 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[5].

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 심도 명령값의 변화에 따른 피치 명령값  $\theta_{max}$ 를 발생하기 위

해서는 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 제어기의 출력을 구성하는 주된 요소인 퍼지 슬라이딩모드 입력항의 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, 0,  $\pm 0.8$ ,  $\pm 1.0$ 은 식(6)의 상수  $c_i$ 에 해당하는 값으로서 슬라이딩 존재조건  $s\dot{s} < 0$ 을 만족하여 오차가 슬라이딩 평면  $s=0$ 을 따라 영으로 수렴하는 퍼지 슬라이딩모드 제어 알고리즘을 유도하기 위한 일반적인 제어 규칙이 적용되었다. 이와 관련한 퍼지 입출력 관계를 나타낸 제어 평면은 그림 3이다.

표 1 제안된 퍼지룰  
Table 1 Proposed fuzzy rule

$s \backslash \dot{s}$	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

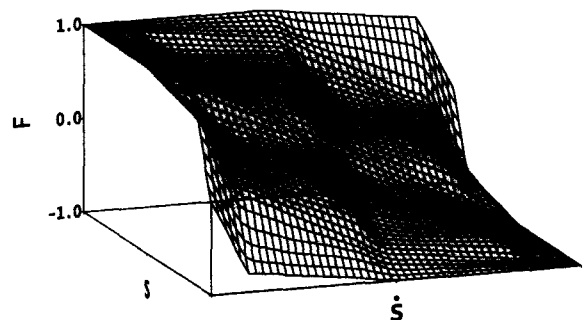


그림 3 제어 평면  
Fig. 3 Control surface

앞에서 언급한 내용과 관련한 퍼지 슬라이딩모드 제어기의 안정도(stability) 해석은 다음과 같다. 일반적으로 퍼지 이론을 사용하는 제어기의 안정도를 해석하는 것은 어려운 문제로 알려져 있으나 제안된 퍼지 슬라이딩모드 제어기의 경우에는 슬라이딩 존재조건  $s\dot{s} < 0$ 을 만족시키는 퍼지룰에 의해서 상태 벡터가 슬라이딩 평면  $s=0$ 을 따라 영으로 수렴하도록 되어 있으므로 제안된 퍼지룰이 퍼지 슬라이딩모드 제어기의 안정도를 보장하는 역할을 한다.

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

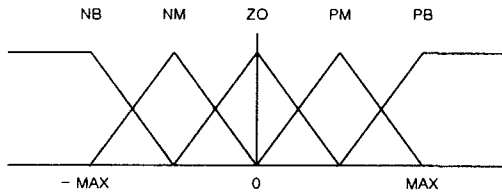


그림 4 멤버쉽 함수 형태  
Fig. 4 Membership function shape

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 멤버쉽 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 오차로서  $e_\theta = \theta_{\max} - \theta, e_z = z_{\text{com}} - z$ 로 표시되며,  $C_\theta, C_z$ 는 슬라이딩 평면의 기울기로서 상수이다.

식(7)의 퍼치 및 심도 제어부 퍼지 슬라이딩모드 출력은 각각  $F_\theta, F_z$ 로 표현되는데, 그림 2의 조타수의 운용 절차를 반영하여 Coarse Mode와 Fine Mode의 전환을 위해서 ratio를 변화하는 형태의 제어입력  $\delta$ 는 식(9)와 같이 구성하였다.

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

$$\begin{aligned} \delta_z &= K_F F_z + K_s s_z + K_i \int e_z \\ \delta_\theta &= K_F F_\theta + K_s s_\theta + K_{i_\theta} \int e_\theta \\ \text{ratio} &= \begin{cases} 0.0 & \text{if } e_z > \text{const} \\ 0.7 & \text{if } e_z < \text{const} \end{cases} \end{aligned}$$

식(9)에서  $R2D$ 는 radian 값을 degree 값으로 변환하는 상수이고,  $K_F F_\theta$  및  $K_F F_z$ 는 강인하고 정밀한 성능을 보장하기 위한 퍼지 슬라이딩모드 출력항,  $K_s s_\theta$  및  $K_s s_z$ 는 강인성을 증대하기 위한 슬라이딩 신호 보상항,  $K_{i_\theta} \int e_\theta$  및  $K_i \int e_z$ 는 정밀한 성능을 증대하여 오버슈트 현상 및 정상 상태 오차가 거의 없도록 하기 위한 적분 보상항이다.

앞에서 언급한 내용을 바탕으로 최종적으로 설계된 UFV 심도 제어기의 출력을 나타내는 선미수평타 명령각  $\delta_s$  및 선수수평타 명령각  $\delta_b$ 는 식(10)과 같다.

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

여기서  $\delta_{\text{level}}$ 은  $Z_\star$ 에 기인한 부력의 영향을 감소시키기 위한 feedforward 제어판 편향항으로서 level flight 조건이며, -1.5는 선미 수평타의 면적이 선수 수평타의 면적에 비해 1.5배 크므로 제어판이 동일한 외력을 받도록 한다는 가정과 제어판의 발생력 측면에서 선수 수평타의 방향이 선미 수평타의 방향과 반대라는 사실을 고려한 상수이다.

식(10)에서 선미 수평타가 UFV 선체에 미치는 힘이 선수 수평타의 힘에 비해서 크므로 구현 및 효과도 측면에서 feedforward 제어판 편향항  $\delta_{\text{level}}$ 을 선미 수평타 명령각  $\delta_s$ 에만 첨가하였는데, 이 값은 제안된 제어기의 성능을 결정하는 주요 파라미터이다. 또한, 제안된 제어기를 적용한 여러 번의 시뮬레이션을 통해서 제어기 성능에 지배적인 영향을 주는 주요 파라미터들로서 퍼치 제어부 적분게인  $K_{i_\theta}$ , 심도 제어부 퍼지 슬라이딩모드 출력게인 및 적분게인  $K_F, K_i$ 을 도출하였다.

본 논문에서 도출된 주요 제어기 파라미터는  $\delta_{\text{level}}, K_{i_\theta}, K_F, K_i$ 의 4종류인데, 이들 값은 모두가 UFV의 속도  $u$ 에 의존한다. 그런데, UFV 운용속도 구간에 대해서 이들 값을 획득하기는 현실적으로 불가능하므로 비용 대 효과 측면에서 속도별 보간능력을 갖는 보간기가 요구된다.

보간기 설계를 위한 기존의 방법으로서 매개 변수 3차곡선의 형태를 가진 헤르미트 보간 함수를 이용한 방법이 있다 [13]. 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 알고리즘[11]에 의해 학습하여 운용속도 구간에서 제어기 파라미터 보간능력을 갖는 신경망 보간기

를 설계하였다. 설계된 보간기를 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 노드들로 구성된 출력층의 3층을 가지며 각층의 노드들은 바이어스항을 가진다[14]. 입력층 노드는  $u$ , 출력층 노드는 제어판 편향항  $\delta_{level}$ , 피치 제어부 적분계인의 스케일요소  $S_{i_0}$ , 심도 제어부 퍼지 슬라이딩모드 출력계인 및 적분계인의 스케일요소  $S_{F_z}$ ,  $S_{i_1}$ 로 구성되며, 은닉층 노드는 실험적으로 5개로 구성하였다. 스케일 요소들은 신경망의 학습이 용이하도록  $K_{i_0}$ ,  $K_{F_z}$ ,  $K_{i_1}$ 를 정규화(normalize)한 값들이다.

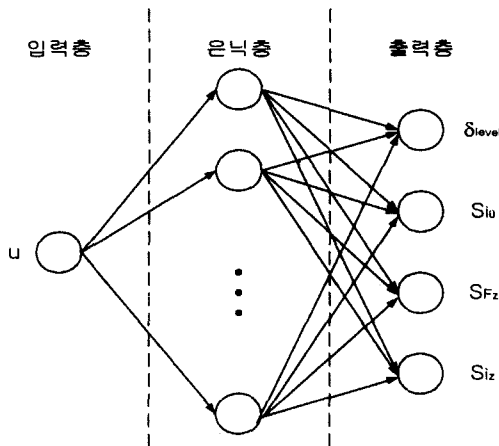


그림 5 제안된 신경망의 구조  
Fig. 5 Structure of proposed neural network

표 2는 제안된 신경망을 학습하기 위한 신경망 학습 파라미터 값들이다. 신경망의 학습 결과로서 획득되어진 신경망 연결 강도(weight)들은 데이터 파일로 저장되는데, 저장된 신경망 연결 강도 및 feedforward 형태의 신경망을 이용하여 최종적인 신경망 보간기를 구현하였다. 그림 6은 신경망 학습 추이로서 자승합 오차(sum-squared error)를 나타낸다.

표 2 신경망 학습 파라미터  
Table 2 Neural network training parameters

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

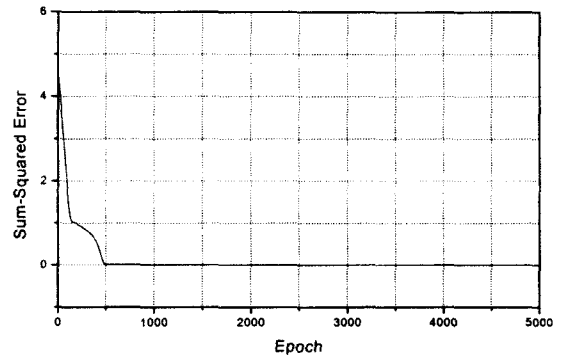


그림 6 신경망 학습 추이  
Fig. 6 Neural network training trends

앞의 내용을 종합하여 제안된 UFV의 심도 제어 시스템을 표현한 블록 선도는 그림 7과 같다.

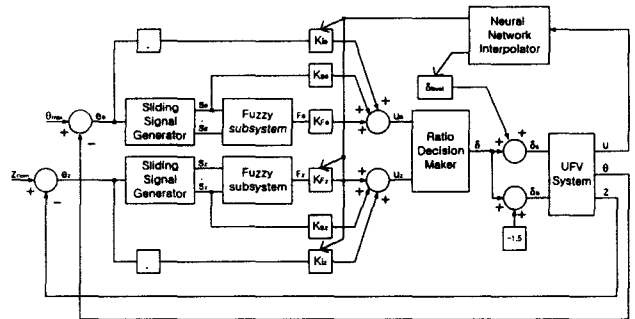


그림 7 시스템 블록 선도  
Fig. 7 System block diagram

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션을 통한 제안된 제어기의 성능 검증은 위해서 UFV의 거동을 모사할 수 있는 유체력 계수들이 필요하므로 본 논문에서는 대부분의 유체력 계수는 설계된 선형에 대해서 유체력 계수를 추정할 수 있는 유체력 계수 추정프로그램을 이용하여 획득한 이론적인 유체력 계수를 사용하였고, 일부 유체력 계수는 구속 모형시험을 통해서 획득한 유체력 계수를 사용하였다.

본 논문의 시뮬레이션에서는 운용속도 구간내의 일부 속도값인 4, 6, 8 knots에 대해서 퍼지 슬라이딩모드 제어기의  $\delta_{level}$ ,  $S_{i_0}$ ,  $S_{F_z}$ ,  $S_{i_1}$ 의 값을 획득하였으며, 운용속도 전 구간에 대해서는 신경망 보간기를 이용하여 퍼지 슬라이딩모드 제어기의  $\delta_{level}$ ,  $S_{i_0}$ ,  $S_{F_z}$ ,  $S_{i_1}$ 의 값을 생성하였다.

그림 8은 그림 5의 신경망에 의해 생성된 속도별  $\delta_{level}$ 의 값으로서 속도가 증가할수록 그 값은 점차로 포화되는 특성을 가지게 되는데, 이는 속도가 증가하게 되면 본 논문의 시뮬레이션에 사용된  $\hat{Z}_*$ 에 기인한 부력이 증가함과 동시에

$\delta_{level}$ 에 의한 제어판의 타력이 상대적으로 급격하게 증가하는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

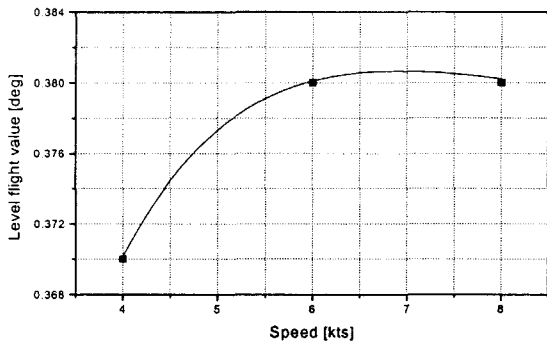


그림 8 신경망에 의해 생성된  $\delta_{level}$  값  
Fig. 8  $\delta_{level}$  value by neural network

그림 9 또한 그림 5의 신경망에 의해 생성된 속도별  $S_{i_z}$ ,  $S_{F_z}$ ,  $S_{i_x}$ 의 값으로서 속도가 증가 할수록 이들 값이 지수 함수적으로 감소하는 특성을 가지게 되는데, 이는 속도가 증가하게 되면  $\delta_s$  및  $\delta_b$ 에 의한 제어판의 타력이 급격하게 증가하는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

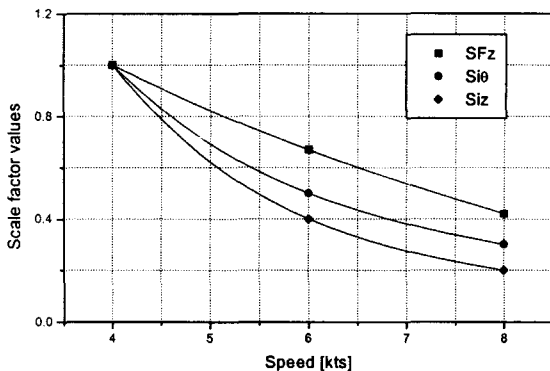


그림 9 신경망에 의해 생성된 스케일요소 값  
Fig. 9 Scale factor values by neural network

그림 10~12는 4 knots에 대해서 설계된 퍼지 슬라이딩모드 제어기를 적용한 시뮬레이션 결과이다.

시뮬레이션을 통해서 설계된 제어기의 성능을 검증한 이후 검증된 제어기를 실제 시험에서 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 퍼지 슬라이딩모드 제어기 및 실용성 측면에서 UFV 제어에 널리 사용되고 있는 PID 제어기의 강인성을 비교하기 위해서 본 논문의 시뮬레이션에 사용된  $\hat{Z}_*$ 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 더욱더 정밀하고 강인한 특성을 보였다. 결과적으로 기존의 제어기에 대해서도 제어판 편향항  $\delta_{level}$ 을 사용하면 정밀성을 증대할 수 있으며, 제어판 편향항  $\delta_{level}$ 을 갖는 퍼지 슬라이딩모드 제어기를 사용하면 정밀성 및 강인성 모두를 증대할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 13~15는 4 knots에 대해서 설계된 퍼지 슬라이딩모드 제어기의 강인성을 검증하기 위해서  $\hat{Z}_*$ 를 50% 변화한 경우의 시뮬레이션 결과이다.

표 3 제어기 강인성 비교 (4kts 시)

Table 3 Controller robustness comparison (at 4kts)

구분	제안된 제어기		PID + $\delta_{level}$		PID only	
	변화전	변화후	변화전	변화후	변화전	변화후
$ e_z _{max}$	0.016224	0.029345	0.049613	0.053988	0.242055	0.273221
$ e_\theta _{max}$	0.023233	0.025531	0.173206	0.181537	0.292714	0.394214

표 4는 속도별 제어기 성능을 나타내는데 이들 결과값들을 살펴보면 제안된 신경망 보간기가 매우 효과적이고 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 그림 16~18는 5 knots에 대해서 신경망 보간기에 의해 생성된 제어기 파라미터를 사용하는 퍼지 슬라이딩모드 제어기를 적용한 시뮬레이션 결과이다.

표 4 속도별 제어기 성능

Table 4 Controller performance on speed

구분	실제 획득			보간법 적용	
	4 knots	6 knots	8 knots	5 knots	7 knots
$ e_z _{max}$	0.016224	0.019861	0.016146	0.018840	0.017073
$ e_\theta _{max}$	0.023233	0.024815	0.021562	0.026012	0.025209

제안된 제어기를 사용한 모든 시뮬레이션 결과에 있어서 UFV의 속도에 무관하게  $|e_z|_{max}$  및  $|e_\theta|_{max}$ 가 명령값의 5% 이내를 만족하는 강인하고 정밀한 성능을 보였으며, 선미 수평타 명령각의 최대 동작범위가  $\pm 30^\circ$  입에 비하여 실제 명령각은 그 크기 및 변화량이 적은 연속적인 형태를 가지고 있었다. 그림 12, 15, 18의 정상상태에서 나타난 바이어스 성분은 UFV의 level flight를 위한 feedforward 제어판 편향항  $\delta_{level}$  값이다.

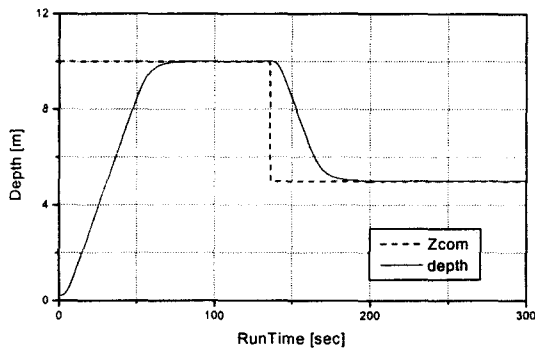


그림 10 심도 제어 성능 (4kts 시)  
Fig. 10 Depth control performance (at 4kts)

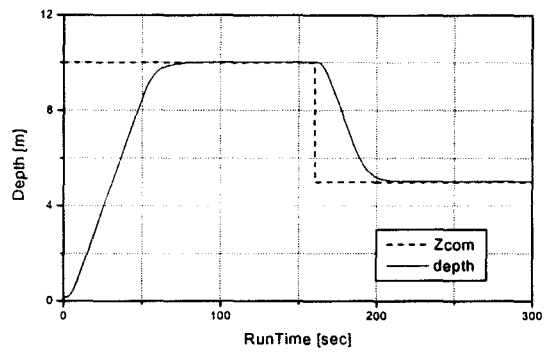


그림 13 심도 제어 성능 (4kts,  $\hat{Z}_\star$  50% 변화시)  
Fig. 13 Depth control performance (at 4kts,  $\hat{Z}_\star$  50% changed)

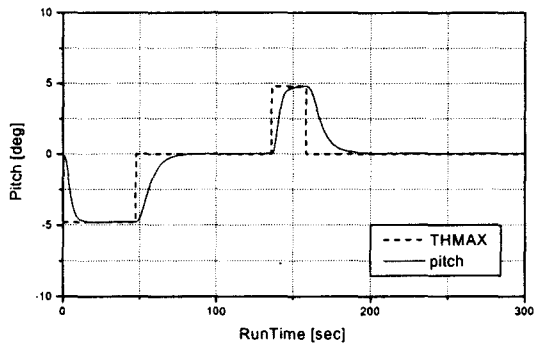


그림 11 피치 제어 성능 (4kts 시)  
Fig. 11 Pitch control performance (at 4kts)

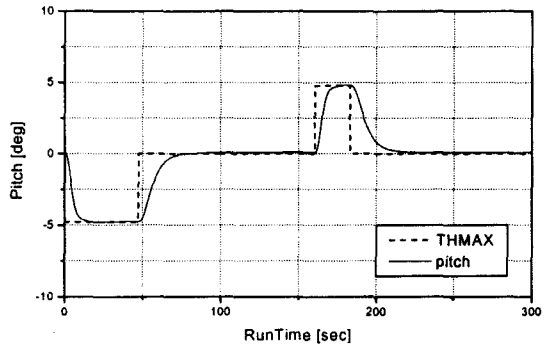


그림 14 피치 제어 성능 (4kts,  $\hat{Z}_\star$  50% 변화시)  
Fig. 14 Pitch control performance (at 4kts,  $\hat{Z}_\star$  50% changed)

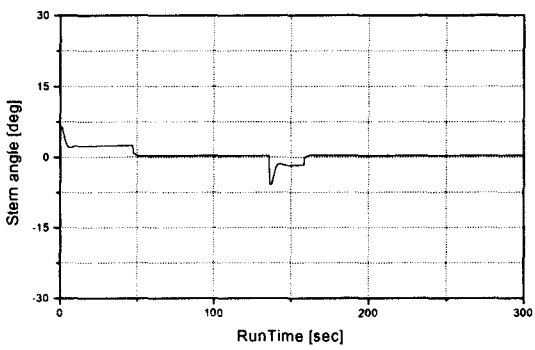


그림 12 선미 수평타 명령각 (4kts 시)  
Fig. 12 Stern command angle (at 4kts)

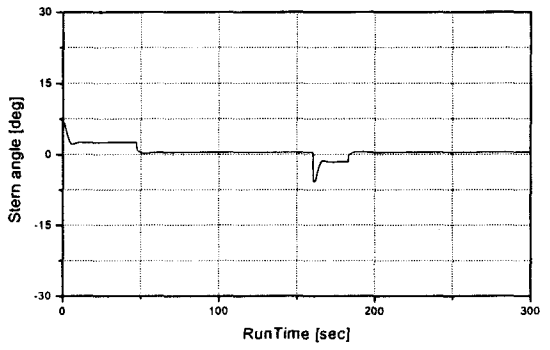


그림 15 선미 수평타 명령각 (4kts,  $\hat{Z}_\star$  50% 변화시)  
Fig. 15 Stern command angle (at 4kts,  $\hat{Z}_\star$  50% changed)

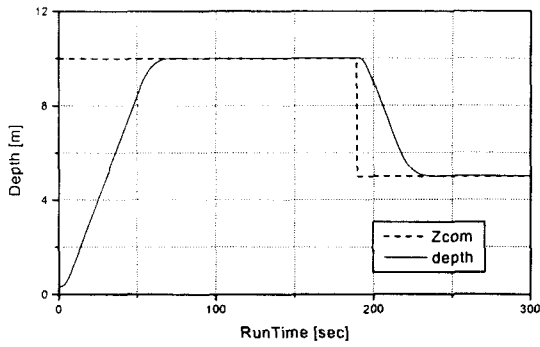


그림 16 심도 제어 성능 (5kts, 보간법 사용시)  
Fig. 16 Depth control performance (at 5kts, interpolated)

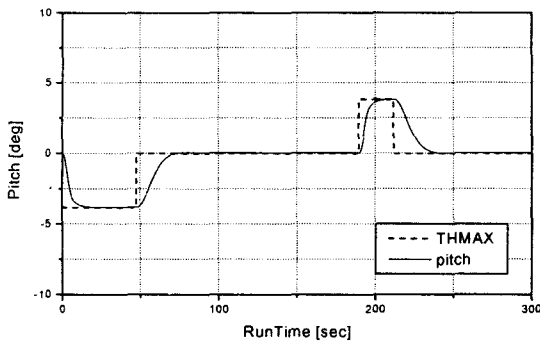


그림 17 피치 제어 성능 (5kts, 보간법 사용시)  
Fig. 17 Pitch control performance (at 5kts, interpolated)

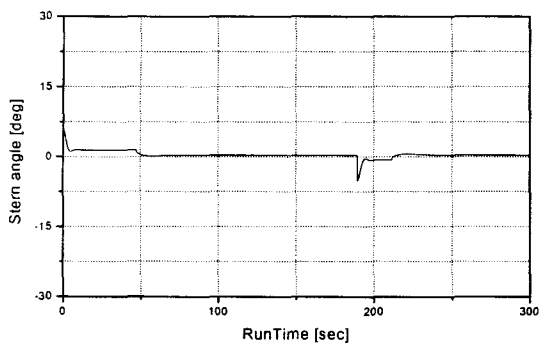


그림 18 선미 수평타 명령각 (5kts, 보간법 사용시)  
Fig. 18 Stern command angle (at 5kts, interpolated)

5. 결 론

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

UFV 심도 제어기 설계를 위해서 강인성, 정밀성, 연속적

인 제어입력, 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제 해결 등의 요구사항을 분석하였으며, 기존의 UFV 심도 제어기 설계 방법들에 있어서의 문제점을 보완하기 위해서 퍼지 슬라이딩모드 제어기와 신경망 보간기를 이용하였다. 퍼지 슬라이딩모드 제어기를 설계한 후 적용하여 제안된 제어 시스템이 연속적인 제어입력을 사용하면서도 플랜트 파라미터의 변동에 대하여 강인하고 정밀한 제어 성능을 가지도록 하였으며, 신경망 보간기를 사용하여 UFV의 고유 특성인 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제를 효과적으로 해결하고자 하였다.

제한한 UFV 심도 제어기가 제어기 요구사항을 모두 만족시키는 성능을 가짐을 검증하기 위해서 UFV 운동방정식에 근거한 시뮬레이션을 수행함으로써 제한한 UFV 심도 제어기가 연속적인 제어입력을 가지면서도 강인성, 정밀성이 우수함을 알 수 있었고, 제어기 파라미터의 속도 의존성 문제가 해결되었음을 알 수 있었다. 따라서 제한한 UFV 심도 제어 기술이 UFV 심도 제어기 설계시의 모든 요구 사항을 만족시키는 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] E. Eugene Allmendinger, "Submersible Vehicle System Design," *Published by The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, pp. 250-254, 1990.
- [3] S. Y. Yang, *Path Tracking and Depth Control for Autonomous Underwater Vehicles based on Sliding Mode Control*, Ph.D. Thesis, Pusan National University, 1998.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-358, 1965.
- [7] S. V. Drakunov and V. I. Utkin, "Sliding mode control in dynamics systems," *INT. J. Control*, vol. 55, no. 4, pp. 1029-1037, 1992.
- [8] J. S. Glower and J. Munighan, "Design fuzzy controllers from a variable structure standpoint," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 5, pp. 138-144, 1997.
- [9] M. B. Ghalia, A. T. Alouani, "Sliding Mode Control Synthesis Using Fuzzy Logic," *Proc. of the American Control Conference, Seattle, Washington*, pp. 1528-1532,



- 1995.
- [10] Cornelius T. Leondes, *FUZZY THEORY SYSTEMS*, Academic Press, 1999.
  - [11] Jacek M. Zurada, *Introduction to Artificial Neural Systems*, West Publishing Company, 1992.
  - [12] Morton Gertler and Grant R. Hagen, *Standard Equation of Motion for Submarine Simulation*, TASK, June 1967.
  - [13] H. C. Lee et al, *Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers*, Sigma Press, pp. 261-266, 1996.
  - [14] Howard Demuth and Mark Beale, *Neural Network Toolbox User's Guide*, The MathWorks Inc., pp. 5-20, 1994.

## 저 자 소 개



**김 현 식 (金賢植)**  
 1972년 2월 7일 생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1998~현재 국방과학연구소 연구원

Tel : 055-540-6217, Fax : 055-542-3737  
 E-mail : hskimm@sunam.kreonet.re.kr



**최 영 규 (崔榮奎)**  
 1957년 6월 18일 생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1990~1991년 CALTECH Visiting

Scholar. 1998~1999년 University of Southwestern Louisiana Visiting Professor. 1986~1990년 부산대 전기공학과 교수. 1990~현재 부산대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수  
 Tel : 051-510-2371, Fax : 051-510-0212  
 E-mail : ykichoi@hyowon.pusan.ac.kr



**박 진 현 (朴晉玄)**  
 1967년 3월 2일 생. 1992년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997~1999년 부산정보대학 전기전자계열 전임강사. 1999~

현재 진주산업대 산업자동화공학과 조교수  
 Tel : 055-751-3386, Fax : 055-751-3399  
 E-mail : jh-park@cjcc.chinju.ac.kr