

## 수중 비행체의 자율제어를 위한 적응 부상 제어 알고리즘

# Adaptive Blowing Control Algorithm for Autonomous Control of Underwater Flight Vehicle

김현식

Hyun-Sik Kim

동명대학교 로봇시스템공학과

### 요 약

침수의 경우에, 수중 비행체(UFV : Underwater Flight Vehicle)는 발라스트 탱크들의 내부를 고압 공기로 비워 내어 부상을 수행한다. 동시에, 침수와 부상 순차에 의한 오버슈트 심도를 감소시키기 위해서 제어판과 추진기를 병행하여 사용한다. 그런데, 기존의 전체 고압 공기 blow-off 방법은 가벼운 침수일지라도 부상 후에는 몸체를 수면에 드러나게 한다. 이는 불필요한 임무 실패 또는 몸체 노출의 결과를 가져온다. 따라서, 부상 제어에 의해 오버슈트 심도를 감소시키고 동시에 몸체를 수면 근처에 유지시키는 것이 필요하다. 이 문제를 해결하기 위해서 심도 제어에 있어서의 전문가 지식을 확장하는 분해법 및 FBFE(Fuzzy Basis Function Expansion)를 사용하는 적응법에 기초한 적응 부상 제어 알고리즘이 제안되었다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 UFV 부상 제어가 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 제안된 알고리즘이 UFV 부상 제어 시스템에 존재하는 문제점들을 온라인으로 효과적으로 해결하고 있음을 보여준다.

키워드 : 적응 부상 제어, 전문가 지식 확장, FBFE, 수중 비행체, 발라스트 탱크

### Abstract

In case of flooding, the underwater flight vehicle (UFV) executes the blowing by blowing ballast tanks off using high pressure air (HPA), while it also uses control planes and a propulsion unit to reduce the overshoot depth caused by a flooding and blowing sequence. However, the conventional whole HPA blow-off method lets the body on the surface after blowing despite slight flooding. This results in the unnecessary mission failure or body exposure. Therefore, it is necessary to keep the body at the near surface by the blowing control while reducing the overshoot depth. To solve this problem, an adaptive blowing control algorithm, which is based on the decomposition method expanding the expert knowledge in depth control and the adaptive method using fuzzy basis function expansion (FBFE), is proposed. To verify the performance of the proposed algorithm, the blowing control of UFV is performed. Simulation results show that the proposed algorithm effectively solves the problems in the UFV blowing control system online.

Key Words : Adaptive blowing control, Expert knowledge expanding, Fuzzy basis function expansion, Underwater flight vehicle, Ballast tank

## 1. 서 론

최근에는 에너지 자원 확보, 수중 감시 및 방어 등의 다양한 요구를 충족시키기 위해서 수중 작업이 가능한 다양한 형태의 수중 로봇(robot)[1]의 개발이 점차적으로 확대되고 있는 추세이다. 그 중에서도 수중 비행체(UFV : Underwater Flight Vehicle)[2]는 여러 개의 thruster가 아닌 하나의 추진기(propulsion unit)와 여러 개의 제어판(control plane)을 가지고 있기 때문에 기동(maneuvering)을 위해서는 전진을 해야 하는 단점이 있지만 적은 유체 저항(hydrodynamic drag)을 가지고 있다. 또한, 여러 개의 탱크(tank)들을 가지고 있으므로 부력(buoyancy)을 이용한

정적 제어가 가능하다. 이러한 이유들로 인해서 추진에너지 소모 및 음향학적인 소음이 적으므로 민수 뿐만 아니라 군수 적용 측면에서도 매우 큰 장점을 가지고 있다.

이러한 UFV의 여러 분야 적용에 있어서 인적 손실을 줄이고 성공적인 임무 수행이 가능하게 하기 위해서는 자율 제어(autonomous control) 기술을 필요로 하는데, 그 구성 기술 중에서 부력 자동조종(autopilot) 분야는 심도 조절(depth regulating)[3,4]이나 긴급 부상(emergency blowing) 등 현재는 그 임무가 단순하며 연구가 활발하지 않다. 하지만 다음과 같은 새로운 임무의 수행 요구에 의해서 그 연구의 필요성이 대두되고 있다.

즉, 특정 원인에 의해서 UFV에 침수(flooding)가 발생하면, UFV는 음성(negative) 부력 상태가 되므로 침몰할 가능성이 커진다. 이를 극복하기 위한 방법으로서 UFV를 중성(neutral) 부력 상태로 만들기 위하여 공기병(air bottle) 내의 고압 공기(HPA : High Pressure Air) 전체를 배출시켜서 평상시에 물로 채워진 발라스트 탱크(ballast tank) 내의 물을 몸체 밖으로 내보낸다. 동시에, 침수 및 부상 순차

접수일자 : 2008년 4월 4일

완료일자 : 2008년 5월 20일

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00148).

에 의해서 발생하는 오버슈트 심도(overshoot depth)를 감소시키기 위해서 제어판 및 추진기를 병행하여 사용한다. 그런데, 기존의 전체 고압 공기 blow-off 방법은 발라스트 탱크의 최대 배수량에 비해서 매우 작은 가벼운 침수일지라도 부상 후에는 몸체를 수면에 드러나게 한다. 이는 불필요한 임무 실패 또는 몸체 피탐의 결과를 가져온다. 따라서, 부분 고압 공기 blow-off 방법도 가능하게 하여 오버슈트 심도를 감소시킴과 동시에 몸체를 수면 근처에 유지(keeping)할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

그런데, 요구된 UFV 부상 제어 시스템은 여러 개의 발라스트 탱크와 제어판을 갖는 MIMO 시스템이므로 침수 초기조건에 의존하는 복잡한 부상 제어 절차를 가지고 있다. 또한, 무게와 같은 시스템 파라미터가 시간에 따라 변화하므로 불확실성을 가지며, 에너지 소모 및 음향학적 관점에서 제어판 명령의 연속성을 필요로 한다.

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해서 심도 제어에 있어서의 전문가 지식(expert knowledge)[5]을 확장하는 분해법(decomposition method) 및 FBF(Fuzzy Basis Function Expansion)[6]을 사용하는 적응법(adaptive method)에 기초한 적응 부상 제어 알고리즘이 제안되었다.

부상 시스템의 수학적 모델은 2장에서, 적응 부상 제어 알고리즘의 설계는 3장에서 설명되며, 시뮬레이션 결과는 4장에 기술된다. 마지막으로, 결론은 5장에 요약된다.

## 2. 부상 시스템의 수학적 모델링

본 논문에서 고려된 UFV는 심도 및 피치와 같은 수평면 제어를 위한 제어판으로는 선수 수평타  $\delta_s$ 와 선미 수평타  $\delta_r$ 를 각각 1개씩 가지고 있으며, 발라스트 탱크로서는 전방 탱크(forward tank)  $\beta_f$ 와 후방 탱크(after tank)  $\beta_a$ 를 각각 1개씩 가지고 있다. 이를 나타낸 그림은 다음과 같다.

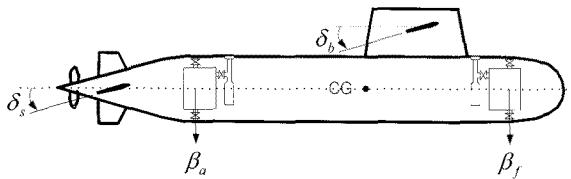


그림 1. 발라스트 탱크 및 제어판의 배치.

Fig. 1. Location of ballast tanks and control planes.

일반적인 6 자유도(DOF : Degree Of Freedom) 운동은 병진(translation) 성분인  $x, y, z$ 와 회전(rotation) 성분인  $\phi, \theta, \psi$ 를 포함한다. 이와 관련하여 속도 성분이  $u, v, w$  (surge, sway, heave), 각속도 성분이  $p, q, r$  (roll, pitch, yaw)이고, 힘 및 모멘트 성분이  $F = [X \ Y \ Z]$ ,  $G = [K \ M \ N]^T$ 일 때[7], Gertler 방정식[8]에 기초한 UFV 운동 방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$[m+m_a]a = - \begin{bmatrix} F_I \\ G_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_R \\ G_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_H \\ G_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_P \\ G_P \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $m$  질량 행렬,  $m_a$ 는 부가(added) 질량 행렬이고,  $a = [\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{w} \ \dot{p} \ \dot{q} \ \dot{r}]^T$ 는 가속도 행렬이다.  $F_I = [X_I \ Y_I \ Z_I]^T$

는 관성(inertia) 힘 벡터,  $G_I = [K_I \ M_I \ N_I]^T$ 는 관성 모멘트 벡터이고,  $F_R$  및  $G_R$ 은 부력 및 무게(weight)와 관련된 복원(restoring) 힘 및 모멘트 벡터이고,  $F_H$  및  $G_H$ 은 선체(hull) 형상과 관련된 힘 및 모멘트 벡터이고, 추진기 및  $F_R$  및  $G_R$ 은 추진기 및 제어판과 관련된 추진 힘 및 모멘트 벡터이다.

부상 제어 관점에서 지배적인 힘은 식 (1)의  $F_R$ 을 구성하는 요소인  $Z_R$ 인데, 이 힘은 음성 및 양성 부력 등의 비중성(non-neutral) 복원 힘을 발생시키는 부력 및 무게를 포함하므로 본 논문에서는 다음과 같이 모델링하였다.

$$Z_R = (B - W(Q_f, Q_b)) \cos \phi \cos \theta \quad (2)$$

여기서,  $B$ 는 부력을 의미하고  $W$ 는 무게를 의미한다. 일반적인 침수 및 부상의 과정은  $W$ 가 변화하는 과정으로 모델링될 수 있다. 우선적으로, 침수시 물의 유입과 관련된 부피 변화량  $Q_f$ 는 베르누이 방정식에 기초하여 다음과 같이 정의하였다.

$$Q_f = C_n \cdot A \cdot \sqrt{2gz} \quad (3)$$

여기서,  $C_n$ 는 침수 상수,  $A$ 는 파공 면적이다. 그리고,  $g$ 는 중력 상수,  $z$ 는 6자유도 운동의 병진 성분 중의 하나인 심도이다. 본 식을 통하여 침수량은 침수 당시의 심도와 파공 면적에 비례함을 알 수 있다. 다음으로, 부상시 물의 배출 질량  $Q_b$ 는 다음과 같다[9].

$$Q_b = \frac{\dot{m}tR(T_m + T_k)}{P_m} \rho \quad (4)$$

여기서,  $R$ 은 기체 상수,  $T_m$  및  $P_m$ 은 각각 탱크 내의 온도 및 압력,  $T_k$ 는 절대 온도 상수이다.  $\rho$ 는 물의 밀도이다. 일반적으로, 탱크 내의 압력은 심도에 의존하는 특성을 가지지만 본 논문에서는 심도에 무관한 상수 값으로 단순화하여 적용하였다. 그리고 공기 유량  $\dot{m}$ 는 다음과 같다.

$$\dot{m} = \frac{A_b P_b}{\sqrt{R(T_b + T_k)}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left\{ \left( \frac{P_m}{P_b} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_m}{P_b} \right)^{\frac{(k+1)}{k}} \right\}} \quad (5)$$

여기서,  $A_b$ 는 공기병 배출부의 배관 면적,  $T_b$  및  $P_b$ 는 각각 공기병 내의 온도 및 압력,  $k$ 는 비열비(specific heat ratio)이다.

식 (2)~(5)의 모델링을 통해서, 요구된 UFV 부상 제어 시스템은  $\beta_f, \beta_a, \delta_b$  및  $\delta_s$ 를 각각 1개씩 가지고 있는 MIMO 시스템이며, 침수 이후의 안정적인 부상 제어를 위해서는 그림 1의 CG(Center of Gravity)를 기준으로 한 침수 위치,  $z$  및  $A$  등의 침수 초기조건에 따라서 그 절차가 상이하게 이루어 질 수 있음을 알 수 있었다.

## 3. 적응 부상 제어 알고리즘의 설계

이 장에서는 심도 제어에 있어서의 전문가 지식을 확장하는 분해법 및 FBF(Fuzzy Basis Function Expansion)을 사용하는 적응법에 기초한 적응 부상 제어 알고리즘이 설계된다.

설계의 첫 번째 단계로서, 심도 제어에 있어서의 전문가 지식을 확장하는 분해법을 제안하였다. 제안된 UFV 부상

제어 절차는 그림 2와 같은데, 그림 1의  $\delta_b$ 와  $\delta_s$ 는 서로 다른 위치와 극성을 가지나 기구학적으로는 동일하므로 단순화하여  $\delta$ 로 표현하였다.

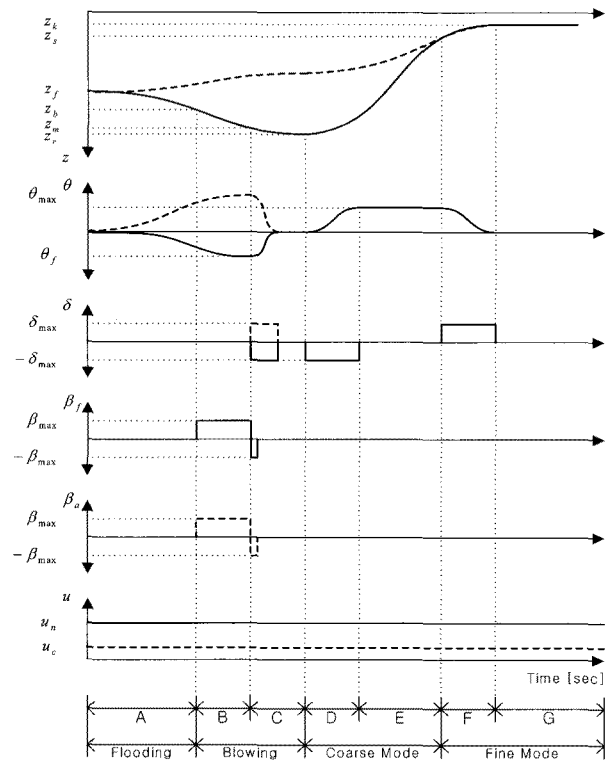


그림 2. UFV 부상 제어 절차.  
Fig. 2. UFV blowing control procedure.

앞의 그림에서 실선 표시 부분은 전방 침수의 경우에 대한 부상 제어 절차를 나타내고, 점선 표시 부분은 후방 침수의 경우에 대한 부상 제어 절차를 나타낸다. 여기서는 제어 성능의 안정성 확보를 위해서는 선체의 안정성 확보가 우선적으로 필요하다는 사실에 기초하고 있다. 이와 관련하여 A~G 구간에 대한 구간별 설명 및 분석은 다음과 같다.

구간 A는 침수가 발생한 이후에 이를 동정(identification)한 후에 파공 부분에 있어서의 물의 유입을 차단함으로써 대응(countermeasure)이 완료된 구간으로서, 일정한 시간이 소모되는데, 본 논문에서는 가장 보편적인 20/20 룰(rule)을 가정하였다. 즉, 20 mm 직경의 파공과 20 초의 대응 완료 시간을 가정하였다.

구간 B는 정상시에 물로 채워진 발라스트 탱크의 내부에 고압 공기를 배출시키거나 외부의 물을 유입시키는 구간으로서, 탱크 각각이  $\Delta W \approx 0$ 일 때 까지  $\beta_f$  또는  $\beta_a$ 를 적절히 구동시킨다. 즉,  $\Delta W > 0$ 이면 탱크 각각의 내부에 고압 공기를 배출시키고,  $\Delta W < 0$ 이면 탱크 각각의 내부에 외부의 물을 유입시킨다.

구간 C는 침수로 인해서 발생한 피치(pitch) 각을 회복하는 구간으로서,  $\theta \approx 0$ 일 때 까지  $\delta$ 를 적절히 구동시킨다.

구간 D는 침수로 인해서 발생한 심도를 회복하기 위해 양의 피치 각을 확보하는 구간으로서,  $\theta \approx \theta_{max}$ 일 때 까지  $\delta$ 를  $-\delta_{max}$ 까지 구동시킨다.

구간 E는 현재 피치 각을 유지하면서 스위칭(switcing) 심도까지 도달하는 구간으로서,  $z \approx z_s$ 일 때 까지  $\delta$ 를 영

(zero)으로 구동시킨다.

구간 F는 피치 각이 영이 되도록 하면서 유지 심도까지 도달하는 구간으로서,  $z \approx z_k$ 일 때 까지  $\delta$ 를  $\delta_{max}$ 까지 구동시킨다.

구간 G는  $z_k$ 를 유지하기 위해서  $\delta$ 를 미세히 구동시킨다.

구간 A~C의 절차를 통해서 오버슈트 심도를 감소시킬 수 있으며, 구간 D~G의 피치 및 심도 제어 절차[5]를 통해서 물체를 수면 근처에 유지할 수 있다.

구간 A~G 전체에 걸쳐서는 속도 명령은 일정하게 주고 있는데, 오버슈트 심도를 줄이기 위한 관점에서는 속도 명령값을 최대로 하여 제어력을 크게 하는 것이 바람직하지만, 수면 유지와 관련한 오버슈트를 줄이기 위한 관점에서는 속도 명령값을 최소로 하여 제어력을 줄이는 것이 더 중요하다. 더구나, C 구간이 없게 되면 두가지 경우의 침수에 필요 이상의 양의 피치 각이 확보되어 coarse mode가 정상적으로 동작하지 않게 되어 안정적인 제어가 어려울 수 있다. 특히,  $z_f$ 와  $z_k$ 의 차이가 작을 수록 그 발생 가능성은 높다. 따라서, 전방 침수의 경우에는 정상(normal) 운항 속도  $u_n$ 을 속도 명령값으로 사용하였고, 후방 침수의 경우에는 침수가 이루어지는 순간에 이미 양의 피치 각을 확보하게 되므로 제어력을 줄이기 위해서 UFV의 동적 제어가 가능한 최소한의 속도인 임계(critical) 속도  $u_c$ 를 속도 명령값으로 사용하였다.

앞서 언급한 절차들을 분석하면, 구간 A는 침수 구간이며, 구간 B는 무게 제어 구간, C, D 및 E는 피치 제어 구간, F는 피치 및 심도 제어 구간, G는 심도 제어 구간이다. 즉, 발라스트 탱크, 제어판으로 구성된 입력 변수를 갖고, 무게, 피치 및 심도로 구성된 출력 변수를 갖는 MIMO 시스템으로서의 UFV 부상 제어 시스템이 전문가의 지식을 확장하여 무게, 피치, 심도 제어부로 비연성화될 수 있음을 의미한다. 즉, 제안된 절차를 수행하는 분해법이 UFV 부상 제어 시스템에 있어서의 MIMO 시스템 문제를 해결하면서도 침수 위치,  $z$  및  $A$  등의 침수 초기조건에 무관하게 매우 간단한 부상 제어를 가능하게 해 줌을 알 수 있다.

설계의 두 번째 단계로서, 앞의 분해법에 기반한 각각의 부 제어기(sub-controller)에 FBFE들을 부분적으로 사용하는 적용법을 제안하였다.

우선적으로, 부상 제어를 위한 부 제어기들 가운데 하나로서 무게 제어기는 다음과 같이 설계하였다.

무게 제어기는 발라스트 탱크 내의 밸브(valve) 제어를 그 핵심 내용으로 한다. 제어 특성은 밸브의 종류에 따라 상이하나 본 논문에서는 단순화하여 밸브 자체의 특성을 무시하였다. 제안된 제어기는 P(Proportional) 형 제어기를 사용하였는데, 탱크별 무게 제어 기준값  $W_r$ 을 가정할 때, 그 출력  $\beta$ 는  $|e_w| > W_r$ 인 경우에 대해서 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \begin{cases} K_{out} \text{sat}(|e_w|), & \text{if } e_w > 0 \\ K_{in} \text{sat}(|e_w|), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $e_w = \Delta W$  이고,  $\text{sat}(\cdot)$ 는 포화함수인데, 이는 실제 탱크의 순간 배출량은 일정한 양을 넘어설 수 없다는 입력 제약성을 의미한다.  $K_{out}$  및  $K_{in}$ 는 각각 물의 배출과 유입에 관련된 이득(gain)이다. 이를 기반으로한 개별 탱크의 출력은  $\beta_f = \beta_a = \beta$ 이다.

다음으로, 부상 제어를 위한 나머지 부 제어기들로서

피치 및 심도 제어기는 다음과 같이 설계되었다[5].

제안된 적용법으로서의 적응 피치 슬라이딩 모드 제어기는 비선형 시스템을 위한 피치 기술로서 FBFE를 사용하는 데, 이는 singleton fuzzifier, product inference 및 Gaussian 멤버쉽 함수로 구성된 피치 시스템과 등가이다. FBFE를 위한 추론법은 단순화(simplified) 방법[10]을 도입하고 있는데, 이들을 이용한 피치 슬라이딩 및 적용물은 다음과 같이 표현된다.

$$R^j: \text{if } S \text{ is } A_1^j \text{ and } \dot{S} \text{ is } A_2^j \text{ then } \hat{f} = w^j$$

$$R^n: \text{if } U \text{ is } B_1^n \text{ and } \dot{S} \text{ is } B_2^n \text{ then } \hat{\xi} = W^n$$

여기서,  $S$ ,  $\dot{S}$  및  $U$ 는 각각 적분형 슬라이딩 신호[5]  $s$ , 그 미분치  $\dot{s}$  및 속도  $u$ 의 정규화 값들이고,  $A_1^j$ ,  $A_2^j$ ,  $B_1^n$  및  $B_2^n$ 은 해당 멤버쉽함수들,  $\hat{f}$ 는  $R^j$ 와 관련된 언어 변수 PM의 중심값이다. 이들 피치 슬라이딩 및 적용물은 FBFE의 형태를 가지고 있다. 이 FBFE들은 각각의 부 제어기에 동일하게 적용되는데, 부제어기의 출력은 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_\theta = C_\theta \hat{f}_\theta(x_\theta) + K_\theta s_\theta$$

$$\delta_z = C_z \hat{f}_z(x_z) + K_z s_z$$

여기서,  $C_\theta$  및  $C_z$ 는 각각 피치 및 심도 제어기의 스케일 상수이고,  $x_\theta = [S_\theta \ \dot{S}_\theta]$  및  $x_z = [S_z \ \dot{S}_z]$ 는 입력 벡터이고,  $\hat{f}_\theta$  및  $\hat{f}_z$ 는 FBFE들이고,  $K_\theta$  및  $K_z$ 는 슬라이딩 모드 계인 이고,  $s_\theta$  및  $s_z$ 는 적분형 슬라이딩 모드 신호들이다. 최종적인  $\delta$ 는 다음과 같다.

$$\delta = (\text{ratio} \delta_z + (1 - \text{ratio}) \delta_\theta) \gamma$$

여기서,  $\gamma$ 는 상수이고, 합성률은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{ratio} = \begin{cases} 0.0, & |e_z| > Z_s \\ C_{ratio}, & |e_z| \leq Z_s \end{cases}$$

여기서,  $C_{ratio}$ 를 결정하기 위한 피치 합성률 결정물은 다음과 같이 표현되는데, 이 또한 FBFE를 이용하고 있다.

$$R^m: \text{if } S_\theta \text{ is } C_1^m \text{ and } S_z \text{ is } C_2^m \text{ then } C_{ratio} = W^m$$

여기서,  $S_\theta$  및  $S_z$ 는  $s_\theta$  및  $s_z$ 의 정규화된 값들이고,  $C_1^m$  및  $C_2^m$ 은 해당 멤버쉽함수들이다.

그런데, 본 논문에서 고려된 UFV는 선수 수평타  $\delta_s$ 와 선미 수평타  $\delta_b$ 를 각각 1개씩 가지고 있으므로 UFV 제어판의 출력은 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_s = \delta + \delta_{NLF}$$

$$\delta_b = -(L_b/L_s)\delta$$

여기서,  $L_b$  및  $L_s$ 가 상수이고,  $\delta_{NLF}$ 는 최저 운항속도에서의 NLF(Neutral Level Flight) 조건을 위한 편향(bias) 항이다. 그런데 이 값은 상하비대칭 형상을 갖는 UFV의 경우에만 사용되는데,  $\delta_{NLF}$ 는 운항속도에 의존하므로 전 운항영역에서 그 값을 변화시켜주어야 하지만, FBFE들이 적응 능력을 가지므로 이 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

설계된 부 제어기들을 살펴 보면, 비록 무게 제어기가  $W$ 만큼의 오차 범위를 갖는 P형 제어기 일지라도 표준

배수량(SD : Standard Displacement)의 0.5 %에 해당하는 시스템 외란에 대해서 검증된 강인한 피치 및 심도 제어기 [5]를 토대로 하고 있으므로 안정적이면서도 용이한 설계 특성을 갖는다. 최종적인 UFV 부상 제어 시스템의 블록선도는 다음의 그림과 같다.

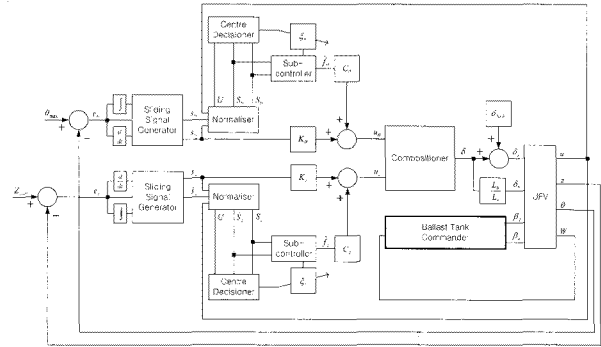


그림 3. UFV 부상 제어 시스템 블록선도.

Fig. 3. Block diagram of UFV blowing control system.

위의 과정으로부터 심도 제어에 있어서의 전문가 지식을 확장하는 분해법 및 FBFE를 사용하는 적용법에 기초한 적응 부상 제어 알고리즘이 설계가 완료되었다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

제안된 적응 부상 제어 알고리즘의 성능 검증은 UFV의 6 자유도 방정식을 적용하여, 수평면에서의 침로(course) 변화 없이 수직면에서의 부상 제어 문제에 대해서 이루어졌다.

우선, UFV 기동 시나리오는 다음과 같이 정의되었다. 즉, 1~100초 동안에는 속도 변화, 100~300초 동안에는 심도 변화, 300~320초 동안에는 전방 침수, 320~600초 동안에는 부상 제어, 600~620초 동안에는 후방 침수, 620~900초 동안에는 부상 제어, 900~920초 동안에는 전후방 침수, 920~1200초 동안에는 부상 제어이다. 이는 표 1에 주어진 다.

표 1. UFV 기동 시나리오.

Table 1. Scenario for UFV maneuvering.

시간 (초)	$Z_{com}$ [m]	$Z_k$ [m]	$u_{com}$ [knots]	침수 (%) of SD
1~100	-	-	4	없음
100~300	40	-	4	없음
300~320	-	30	4	전방, 2.5
320~600	-	30	4	없음
600~620	-	20	2	후방, 2.5
620~900	-	20	2	없음
900~920	-	5	4	전후방, 5.0
920~1200	-	5	4	없음

앞의 표에서 전후방 침수는 피치 제어의 관점에서 시스템이 상대적으로 안정적이므로 의미있는 성능 검증을 위해서 SD의 관점에서 침수량을 늘렸다. 또한, 침수 모델링 과

라메터는 표 2와 같다.

표 2. 침수 모델링 파라미터.

Table 2. Parameters for flooding modeling.

	기호[단위]	값
침수 상수	$C_n$	0.7
파공 면적	$A [m^2]$	0.000314
절대 온도 상수	$T_k$	273
기체 상수	$R [J/kg \cdot k]$	287
물의 밀도	$\rho [kg/m^3]$	1026
탱크 내 온도	$T_m [^\circ C]$	20
탱크 내 압력	$P_m [N/m^2]$	200,000
배관 면적	$A_b [m^2]$	0.00001256
공기병 내 온도	$T_b [^\circ C]$	10
공기병 내 압력	$P_b [N/m^2]$	1,000,000
비열비	$k$	1.4

이들 파라미터 값들은 다음과 같이 정해 졌다. UFV의 운항 심도를 50 m 이내로 가정하였으며, 따라서 수압은 5 bar ( $1\text{bar} = 100,000\text{N}/\text{m}^2$ ) 이내가 되는데, 이를 밀어 내기 위한 조건으로서 공기병 내의 압력은 임의로 10 bar로 정하였다. 결과적으로 발라스트 탱크 내의 압력은 수압과 공기병 내 압력의 상대 압력으로서 5~10 bar 정도가 되나, 단순화 적용하여 대략 2 bar로 가정하였다.

제안된 제어기의 성능을 비교하기 위해서, 그림 2의 구간 C 없이 침수 시간과 동일한 시간 동안에 시간당 일정한 비율로 무게 제어가 이루어지는 기존 방식을 고려하였다. 샘플링 주기  $T=0.02$ 로 정하였고, 스위칭 심도  $Z_s=3.5$ , 제어관 편향항  $\delta_{NLF}=0.37$ , 탱크별 무게 제어 기준값  $W_r=1$  (0.008 % of SD)이다. 식 (6)의 포화함수와 관련된 순간 배출량은 기존 방식의 2배로 제한하였다. 피치 및 심도 제어기와 관련된 FBFE의 파라미터는 EAFSMC[5]와 동일하다.

그림 4~6은 각각 심도, 피치 및 무게 제어 성능을 나타내는데,  $|z_f - z_k| \leq 10$ 인 혹독한 경우에 대해서도 기존 방식에 비해서 오버슈트 심도, 수면 유지, 침수 초기조건, 시스템 강인성 등의 관점에서 주어진 부상 제어 문제를 효과적으로 해결하고 있다.

그림 7 및 8은 각각 앞의 성능과 관련된 선미 수평타, 발라스트 탱크 명령값을 나타내는데, 제어관 명령의 연속성, 탱크 명령의 입력 제약성 문제를 잘 해결하고 있다.

시뮬레이션 결과를 종합한 성능 비교는 표 3과 같다.

표 3은 제안된 제어기와 기존 방식의 수치적 성능 비교를 보여주는데,  $|e_z|_{avg}$  및  $|e_\theta|_{avg}$  는 각각 그림 2의 fine mode에 있어서 심도 및 피치 제어 오차 절대치의 평균값들이고,  $|\dot{\delta}_s|_{avg}$  는 각각 coarse 및 fine 모드에 있어서 선미수평타 명령각 및 그 미분치 절대치의 평균값들이다. 이 값들은 제안된 적응 부상 제어 알고리즘이 다양한 UFV 침수에 대해서 매우 효과적임을 정량적으로 증명하여 준다.

앞의 결과들을 통하여 제안된 적응 부상 제어 알고리즘이 주어진 UFV의 부상 제어 문제의 해결에 매우 적합함을 검증할 수 있었다.

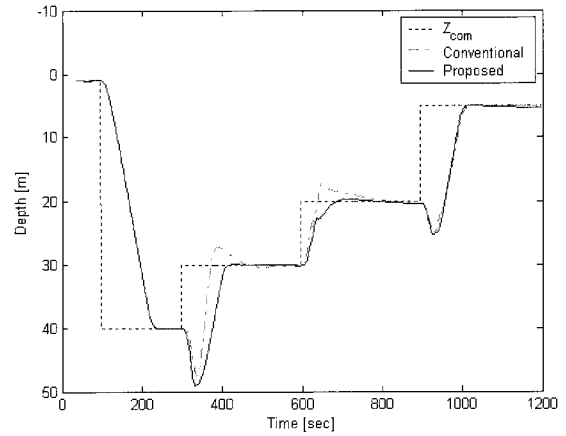


그림 4. 심도 제어 성능.

Fig. 4. Performance of depth control.

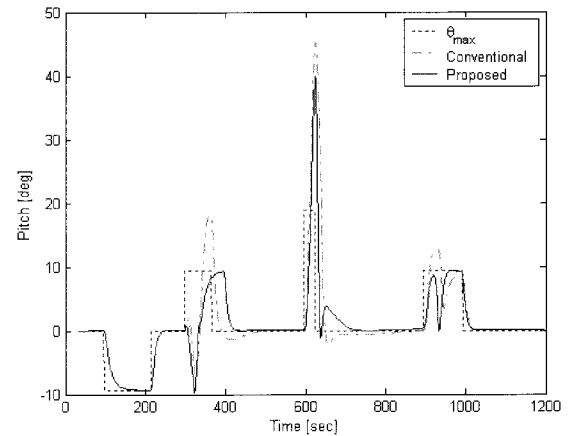


그림 5. 피치 제어 성능.

Fig. 5. Performance of pitch control.

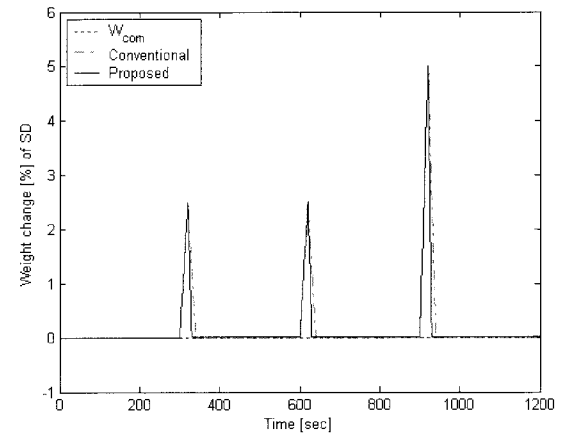


그림 6. 무게 제어 성능.

Fig. 6. Performance of weight control.

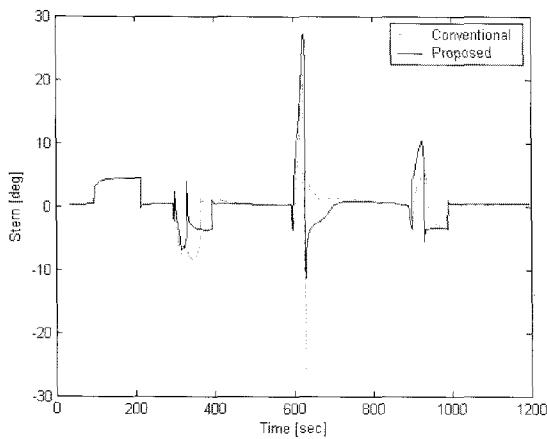


그림 7. 선미 수평타 명령값.  
Fig. 7. Stern command.

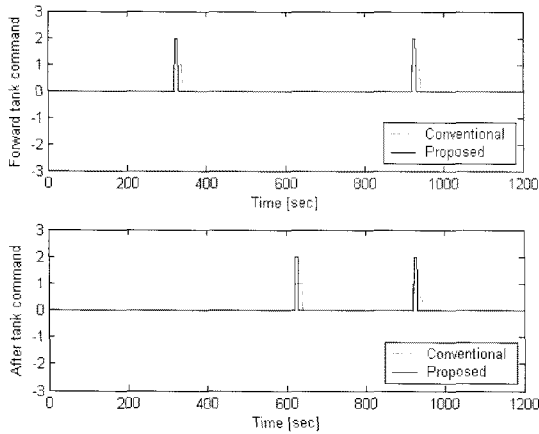


그림 8. 발라스트 탱크 명령값.  
Fig. 8. Ballast tank command.

표 3. 성능 비교.

Table 3. Comparison of performances.

	Conventional	Proposed
$ e_z _{avg}$	0.545	0.328
$ e_\theta _{avg}$	1.304	0.585
$ \delta_s _{avg}$	1.800	1.992
$ \dot{\delta}_s _{avg}$	0.156	0.152

### 5. 결 론

본 논문에서는 전문가 지식을 확장하는 분해법 및 FBFE를 사용하는 적응 부상 제어 알고리즘이 제안되었다.

제안된 알고리즘은 다음의 장점을 갖는다. 즉, 본 알고리즘은 분해법에 기초한 MIMO 시스템 문제의 효과적 해결을 통하여 오버슈트 심도를 감소시키고 동시에 오버슈트 없이 몸체를 수면 근처에 유지할 수 있으며, 다양한 침수 초기조건에 비해 단순한 부상 제어 절차를 가지고 있다. 또한, 적응성으로 인해 침수 및 부상 결과에 의한 무게와 같은 시스템 파라미터 변화나 제어관 명령의 연속성 등의 문제를

효과적으로 해결할 수 있다. 또한, 알고리즘의 구조와 파라미터 관점에서 용이한 설계가 가능하다.

적응 부상 제어 알고리즘의 성능 검증은 UFV의 6 자유도 방정식을 적용하여, 수평면에서의 침로 변화 없이 수직면에서의 부상 제어 문제에 대해서 이루어 졌다. 시뮬레이션 결과는 제안된 알고리즘이 실시간 시스템 적용에서 존재하는 문제점들을 효과적으로 해결할 수 있음을 보였다.

### 참 고 문 헌

- [1] G. Antonelli, *Underwater Robots*, Springer, 2006.
- [2] R. K. Lea, R. Allen and S. L. Merry, "A Comparative study for control techniques for an underwater flight vehicle," *International Journal of System Science*, vol. 30, pp. 947-964, 1999.
- [3] M. Xu and S. M. Smith, "Fuzzy rule based depth controller for variable ballast system of autonomous underwater vehicles," *Proceedings of the 2005 Systems and Information Engineering Design Symposium*, vol. 30, pp. 947-964, 1999.
- [4] Paul A. DeBitetto, "Fuzzy Logic for Depth Control of Unmanned Undersea Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 242-248, 1995.
- [5] H. S. Kim and Y. K. Shin, "Expanded adaptive fuzzy sliding mode controller using expert knowledge and fuzzy basis function expansion for UFV depth control," *Ocean Engineering*, vol. 34, pp. 1080-1088, 2007.
- [6] C. T. Leondes, *Fuzzy Theory Systems*, Academic Press, 1999.
- [7] J. Yuh, "Modeling and control of underwater robotic vehicles," *IEEE Transactions on Man and Cybernetics*, vol. 20, no. 6, pp. 1475-1483, 1990.
- [8] M. Gertler and G. R. Hagen, "Standard equation of motion for submarine simulation," *Naval Ship Research and Development Center Report 2510*, 1967.
- [9] M. Zucrow and J. Hoffman, *Gas dynamics*, Wiley, 1976.
- [10] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control," *IEEE Transactions on Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, pp. 116-132, 1985.

### 저 자 소개

김현식(Hyun-Sik Kim)

제17권 제7호 참조