

무인 수중운동체를 위한 지능제어시스템 설계

An Intelligent Control System Design for Autonomous Underwater Vehicle

이 동 익, 곽 동 훈, 최 중 락
(Dong-Ik Lee, Dong-Hoon Kwak and Joong-Lak Choi)

Abstract : Autonomous Underwater Vehicles(AUVs) have become an important tool for various purposes in subsea: inspection, recovery, construction, etc., and the development of autonomous control system is highly desirable. However, there are many problems associated with designing the control system for AUV due to unknown underwater environment, the possibility of subsystem failures, and unpredictable changes in the dynamics of the vehicle. In this paper, an autonomous control system based on the intelligent control theory to enhance operation efficiency of the AUV is presented. The control system has a hierarchical structure which consists of mission planning level, mission control level, navigation level, and execution level. The performance of the control system is investigated by computer simulation. The results show that the proposed control system can be applied successfully to the AUV in spite of the possibility of failures in the vehicle and the collision hazard in the sea environment.

Keywords : AUV, intelligent control system, rule base, fuzzy inference

I. 서론

지난 십 여년 동안 무인 수중운동체는 심해 작업 또는 위험성을 내포한 환경에서의 작업을 위한 목적 등으로 급속하게 발전되었으며, 최근에는 해양 정보 수집, 해저 시설의 정비/보수, 유체역학 연구 및 적용 제어이론 개발, 근해오염 감시 등에 이르기까지 그 활용성이 증대되고 있다[1]-[4].

무인 수중운동체는 일반적으로 전원공급 및 조종을 위한 테더케이블(tether cable)의 유무에 따라서 크게 ROV (remotely operated vehicle)와 AUV(autonomous underwater vehicle)로 구분된다[1]. ROV의 경우, 인간조작자가 모선에서 테더케이블을 이용하여 운동체를 지속적으로 조종하므로 테더케이블로 인한 운동체의 기동성 및 운용심도에 제약이 뒤따른다. 이를 극복하기 위해서 1980년대 중반 이후부터 테더케이블이 없는 AUV에 관한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다[3][5]. AUV는 전원공급 측면에서 모선과 독립적으로 운행할 수 있으며, 사전에 예상치 못한 환경이나 상황에서도 적용할 수 있고 적절한 대응 행동을 취할 수 있는 자율 무인 수중운동체이다[6].

본 논문에서는, 그림 1에 나타난 것과 같은 유체력 해석 및 제어기술의 시험/검증을 위한 연구용 AUV를 제어대상으로 설정하고, 이를 위한 지능제어 시스템의 설계에 관하여 기술한다.

본 논문에서는 먼저, 수상 및 수중에서 AUV를 운용하는 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 다음과 같이 네 가지로 설정하였다.

- 다양한 임무시나리오 설정 불편
- 내부 탑재장비 고장 발생
- 장애물 또는 해저 바닥과의 충돌위험
- 모델링 오차 및 외란에 따른 제어기 성능저하

그리고, 상기 문제점을 해결하기 위하여 수중에서 장시간 항해하는 동안 사람이 직접 시스템을 조종/통제하는 것과 유사한 기능을 제공할 수 있도록 그림 2에 제시한 것과 같은 지능제어 시스템을 구성하였다. 본 논문에서 제시한 지능제어 시스템은 다음과 같이 4단계의 계층구조로 이루어진

다.

- 임무계획 단계(mission planning level)
- 임무통제 단계(mission control level)
- 항해단계(navigation level)
- 합작동 단계(execution level)

임무계획 단계는 모선이나 육상에서 오프라인으로 수행되며, 입력 파라미터와 임무 시나리오를 설정하기 위한 사용자 인터페이스 기능을 수행한다.

임무통제 단계는 온라인으로 수행되는 최상위 구조로서, AUV가 출발지점으로부터 목표지점에 도달하여 임무를 수행한 후에 원래위치로 귀환하는 모든 과정을 제어하는 종합 감시/통제 시스템이다. 즉, 항해경로, 탑재장비 작동상태, 해상환경 등을 고려하여 임무수행에 필요한 조치들을 결정한다. 본 논문에서는 이러한 기능을 수행할 수 있도록 하는 제어수단으로 규칙기반 및 퍼지추론 기법을 적용하였다.

항해단계에서는 충돌회피 알고리즘, 항해유도 알고리즘, 그리고 사전 프로그램(preprogram)된 시나리오를 직접 수행시키는 임무실행 모듈로 구성하였다.

합작동 단계에서는 심도, 침로각, 속도 제어를 위한 자동 조종장치(autopilot) 및 각종 하드웨어 관리를 위한 인터페이스 장치로 구성하였다. 본 논문에서는, AUV의 운동특성이 다소 변경되더라도 적용제어 될 수 있도록 자기구성 퍼지제어[7] 기법을 적용하여 자동조종장치를 설계하였다.

이상과 같이 구성한 지능제어 시스템에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제어성능을 고찰하였다.

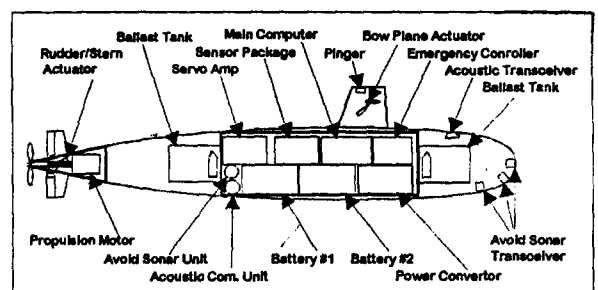


그림 1. AUV 시스템 구성개념도.
Fig. 1. AUV system layout.

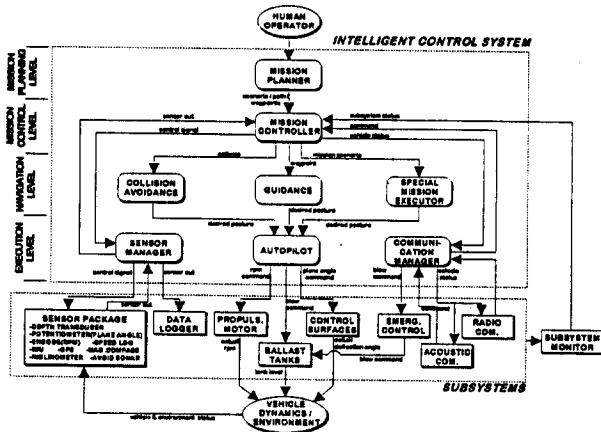


그림 2. AUV를 위한 지능제어시스템 계층구조.
Fig. 2. Hierarchical structure of an intelligent control system for AUV.

II. AUV 시스템

본 논문에서 제어대상으로 설정한 AUV 시스템의 개념도는 그림 1과 같다.

추진장치는 BLDC 모터를 이용하며, 전원은 AUV의 바닥 부분에 설치된 연축전지를 사용한다. 긴급상황 발생시 수면으로 부상하기 위해 선수부 및 선미부에 두개의 압축공기 탱크 시스템이 설치되어 있다.

컴퓨터는 다섯장의 TPM-MPC보드로 구성되며, 지능제어 시스템을 비롯하여 각종 인터페이스 소프트웨어, 모니터링 소프트웨어, 항법 알고리즘 등이 처리된다. AUV의 심도(depth), 피치각(pitch angle) 및 침로각(course)은 선수수평타(bow), 선미수평타(stern), 선미수직타(rudder)에 의해서 제어된다.

해저 바다 또는 수중 장애물을 감지할 수 있도록 탐지거리 0.7m~100m, 운용주파수 400kHz, 빔폭 4°의 회피용 소나가 선수부에 설치되어 있다.

AUV가 수중에서 동작할 때, 항법시스템로부터 얻어지는 위치정보를 모션으로 전송하고, 또 모션으로부터 긴급명령을 수신할 수 있도록 수중통신장비가 설치되어 있다.

그밖에, 임무수행 내용을 온라인으로 저장하는 데이터 기록장치가 있어서 AUV가 수중에서 항해하고 임무를 수행하는 과정에서 일어나는 환경 및 탑재장비의 상태변화와 임무동체기(mission controller)의 의사결정 내용을 기록하며, 이 데이터는 추후 제어시스템 및 규칙기반의 수정보완에 이용된다.

III. 운동방정식

AUV의 운동을 완전히 나타내기 위해서는 6자유도 비선형 운동방정식이 필요하다. 이 방정식은 뉴턴의 제2운동법칙에서 유도된다. 즉, 운동체에 작용하는 모든 외력의 합은 운동체 운동량의 변화량과 같아야 하고, 운동체에 작용하는 외부 모멘트의 합은 각운동량의 변화량과 같아야 한다. 여기서 AUV에 작용하는 힘 F 와 모멘트 M 의 관계식은 다음과 같다.

$$[F, M]^T = f(X, U, t) \tag{1}$$

여기서, 상태변수 X 및 입력 U 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$X = [x, y, z, \phi, \theta, \psi, u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}]^T \tag{2}$$

$$U = [\delta_s, \delta_b, \delta_r]^T$$

(1)을 X 및 U 에 대하여 테일러 급수로 전개하면 (3)과 같이 된다.

$$[F, M]^T = f(X_0, U_0, t) + \frac{\partial f}{\partial X}(X - X_0) + \frac{\partial f}{\partial U}(U - U_0) + H.O.T. \tag{3}$$

이 물리적 법칙은 6자유도를 가지는 AUV에 대하여 12개의 상태변수를 사용하여 아래와 같이 비선형 미분방정식으로 나타낼 수 있다[8].

$$\begin{aligned} \Sigma X &= m[u - vr + wq - x_c(q^2 + r^2) + y_c(pq - r) + z_c(pr + q)] \\ \Sigma Y &= m[v - wp + ur - y_c(r^2 + p^2) + z_c(qr - p) + x_c(qb + r)] \\ \Sigma Z &= m[w - uq + vp - z_c(p^2 + q^2) + x_c(rb - a) + y_c(rq + p)] \\ \Sigma K &= I_x p + (I_z - I_y)qr - (r + pq)I_{zx} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - q)I_{xy} \\ \Sigma M &= I_y q + (I_x - I_z)rp - (p + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qb - r)I_{yz} \\ \Sigma N &= I_z r + (I_y - I_x)pq - (a + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - p)I_{zx} \end{aligned} \tag{4}$$

위의 식에서 $\Sigma X, \Sigma Y$ 및 ΣZ 는 운동체에 작용하는 힘벡터의 각 방향성분을 나타내며, $\Sigma K, \Sigma M$ 및 ΣN 는 운동체에 작용하는 모멘트 벡터의 각 방향성분을 나타낸다. 힘과 모멘트의 합을 나타내는 이 항들은 유체역학적인 항, 부력과 중력에 의한 항, 프로펠러에 기인하는 항 등으로 구성된다. AUV의 운동방정식은 참고문헌 [9]에 잘 나타나 있다.

IV. 지능제어시스템 설계

1. 임무계획단계

임무계획 단계는 그림 3과 같이 5개의 부모들로 이루어져 있으며, 모두 육상 또는 모션에서 오프라인으로 수행된다.

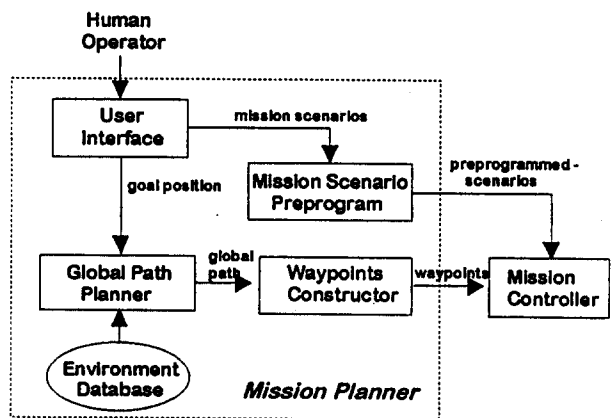


그림 3. 임무계획단계 구성도.
Fig. 3. Configuration of mission planning level.

사용자 인터페이스(user interface) 및 임무 시나리오 설정(mission scenario preprogram) 모듈은 수행하고자 하는 임무의 종류와 수행절차, 귀환장소 좌표 등을 손쉽게 입력할 수 있는 GUI를 제공한다.

임무수행과 관련된 파라미터가 입력되면, 전역경로계획(global path planner) 모듈은 환경 데이터베이스를 참조하여 목표해역까지 안전하고 빠르게 이동할 수 있는 최적경로를 계획한다.

환경 데이터베이스에는 AUV가 임무를 수행할 해역의 해저 지형과 이미 알고있는 장애물에 대한 정보를 저장한다.

경로계획 알고리즘으로는 A* 알고리즘[10] 등이 알려져 있으나, 현재 구체적인 해저 환경 데이터베이스가 구축되지 못한 상태이므로 본 논문에서는 추후 연구내용으로 남겨 두었다.

전역경로계획 모듈에서 결정된 항해경로는 지시점 생성모듈 waypoint constructor)에 의해서 일정한 간격의 지시점의 순열로 변환되어 임무통제단계로 다운로드 된다. 여기서, 지시점은 X, Y, Z 축상의 위치명령 및 항해속도 명령값으로 이루어진다[6]. 지시점과 지시점 사이의 최소 거리는 AUV가 저속에서 90° 침로 변경시 소요되는 X, Y 방향의 최대 이동거리로 설정하였다.

2. 임무통제 단계

인간 조작자가 AUV에 탑승하여 수중에서 AUV를 직접 조종하는 경우를 가정해 보자. 먼저, AUV가 정상적인 항해를 수행하고 있을 경우, 조작자는 전체 항로를 설정하고 각종 센서 출력 정보를 통해서 탑재장비들의 작동상태 및 AUV의 운용상태와 충돌위험 등을 감시하게 된다. 이때, 심도 및 침로각, 항해속도 등에 대한 제어는 조작자의 개입 없이 자동조종장치 및 항해 유도장치에 의해서 자동적으로 이루어진다. 그러나, 탑재장비의 고장 또는 외부환경 변화 등으로 인하여 위험한 상황에 이르게 될 경우, 조작자는 각종 자동제어 장치를 수동으로 운용하거나 고장난 장비의 기능을 다른 장비로 대체하는 등의 대응 행동을 수행하게 된다.

본 논문에서 설계한 임무통제 단계는 앞서 설명한 것과 같은 인간 조작자의 역할을 대신할 수 있는 AUV의 최상위 통제장치이다. 즉, 정상적인 항해 중에는 AUV의 상태를 감시하고, 긴급한 상황이 발생하면 규칙기반에 근거하여 하위 단계 부시스템의 운용모드, 입력신호, 기준명령값 등을 재설정하여 부시스템을 직접 통제한다. 임무통제 단계의 기능을 구체적으로 표현하면 다음과 같다.

- 항해감시: 임무계획 단계에서 생성된 지시점을 항해유도 모듈로 순차적으로 인가한다.
- 수중환경 감시: 수중에서 항해하는 도중에 예상치 못한 충돌 또는 운용영역 이탈의 위험이 발생했을 때 적절한 회피 알고리즘을 수행시킨다.
- 시스템 감시: 각 부시스템으로부터 입력된 고장준위 정보를 이용하여 부시스템을 통제한다.
- 임무감시: AUV의 생존성 및 운용성을 고려하여 임무시나리오를 수행하도록 하위계층을 통제한다.

본 논문에서는 이와 같은 기능을 구현하기 위해서 외부환경에 대한 상황인식이 가능하고, 이에 따른 전문가의 의사결정을 통하여 지능적인 관리/통제를 행할 수 있는 전문가 시스템 개념을 적용하였다[11][12]. 전문가 시스템은, 전문가의 수가 매우 제한적이거나 지식의 진수 또는 교육이 어려운 분야에서 인간 전문가를 대신할 수 있는 역할을 한다. 특히 제어대상이 거대, 복잡하거나 구성요소의 고장이 발생한 경우 혹은 동작조건이 심하게 변화하는 경우에도 사람의 직접적인 개입 없이 전문가의 문제해결 능력을 지식기반으로 구축하여, 제어대상의 정상동작과 여러가지 악화된 상황에서도 제어의 안정성 및 성능을 유지할 수 있게 된다 [13]-[15].

본 논문에서 설계한 임무통제 단계는 그림 4와 같이 명령결정자(mission commander)와 규칙기반(rule base)으로 이루어진 임무통제기(mission controller)로써 구성되며, 최종 출력은 항해유도 모듈을 위한 연속적인 기준입력과 하위단계의 부시스템 작동을 통제하기 위한 명령값들이다. 구체적인 설계내용은 다음과 같다.

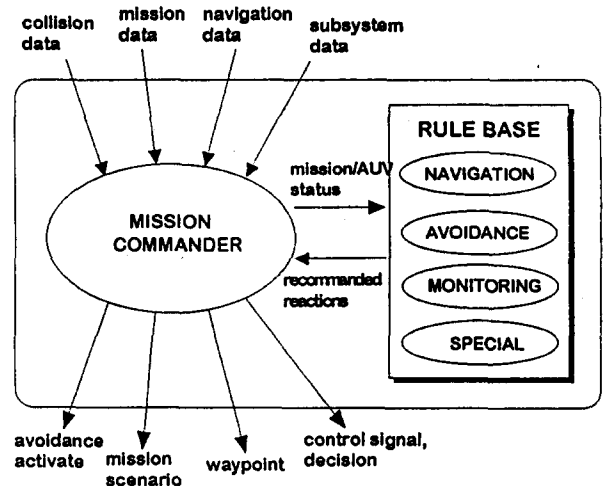


그림 4. 임무통제기 구성도.
Fig. 4. Configuration of mission controller.

2.1 명령결정자

명령결정자는 외부모듈로부터 입력되는 사실(facts)에 대해서 규칙기반에 근거하여 필요한 조치를 결정하고, 해당 부시스템(objects)으로 전달하기 위한 추론엔진과 입출력 인터페이스 모듈로 구성되며, 하위계층의 시스템 분석으로부터 상위계층의 결정을 이끌어 내는 계층구조를 이루고 있다. 그런데, 전문가의 지식에는 지식을 표현하는 용어 자체에 애매함이 포함될 수 있고, 명제의 진위가 불확실한 경우가 일반적이기 때문에, 이진논리로 전문가의 지식을 효과적으로 표현하기에는 어려움이 있다[11][16]. 본 논문에서는 이러한 불확실성과 애매함을 적절히 처리할 수 있는 방법으로 많이 연구되는 퍼지근사 추론(fuzzy approximate reasoning) 기법을 적용하였다[11].

2.2 규칙기반

명령결정자가 외부 모듈로부터 입력되는 정보를 이용하여 의사결정을 내리기 위해서 지식기반이 필요하다. 지식기반은 시스템 상태에 관한 정보를 얻고 임무수행 가능성을 판단하기 위해서 하위 시스템의 상태에 관한 지식들이 저장된다[12]. 전문가 시스템을 구축하기 위하여 지식을 획득하고 그 지식을 이용가능한 형태로 구조화하는 작업은 전문가 시스템 개발의 중요한 애로사항 중의 하나이다.

본 논문에서는 관련 전문가와의 직접 접촉과 자료를 통하여 지식을 획득하였으며, 지식표현은 명확하여 이해하기 쉽고 확장성이 좋은 IF(condition) THEN (conclusion) 형태의 규칙을 이용하였다[11][13]. 본 논문에서 구성한 규칙기반의 세부설계 내용은 다음과 같다.

가. 항해규칙 (navigation rule)

AUV가 임의의 지시점에 도달 여부를 판별하기 위한 기준으로써, 지시점 주위를 감싸는 "허용영역" ρ_0 를 도입하였다. 즉, 지시점 주변의 어떤 허용영역 ρ_0 가 주어졌을 때, 지시점 $W(k) = [W_x(k), W_y(k), W_z(k)]$ 및 현재위치 $[x(t), y(t), z(t)]$ 에 대하여 (5)를 만족하면 지시점에 도달한 것으로 판단하며, 그 다음 지시점으로 변경된다.

$$\rho^2(t) = \alpha_x [W_x(k) - x(t)]^2 + \alpha_y [W_y(k) - y(t)]^2 + \alpha_z [W_z(k) - z(t)]^2 < \rho_0^2, \quad 0 \leq \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z \leq 1 \quad (5)$$

여기서, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 는 각각 W_x, W_y, W_z 의 가중치를 나타내는 파라미터이다. 항해규칙은 다음과 같다.

IF $\rho^2 < \rho_0^2$ THEN next waypoint

나. 회피규칙 (avoidance rules)

회피규칙의 주기능은 AUV로 하여금 외부환경과의 충돌 위험에 대처하도록 적절한 회피기동을 결정하는 것이다. 본 논문에서는 항해중에 발생할 수 있는 외부환경과 관련된 위험을 다음과 같이 세가지로 분류하였다.

- 해저바닥과의 충돌위험
- 운용영역 이탈위험
- 수중장애물과의 충돌위험

해저 바닥과의 충돌위험이나 운용영역 이탈위험이 발생했을 경우, 이에 대처하기 위한 회피기동은 일정 심도로 부상하거나, 좌우 또는 180도 침로각 변경으로써 비교적 단순하게 구현될 수 있다.

표 1. 회피규칙.
Table 1. Avoidance rules.

Collision Hazard	Avoidance Algorithm
Sea Bottom	Call Emergency_Ascend
Sea Surface	Call Emergency_Dive
Over Limit	Call Turn_left or Turn_right
Shallow Depth	Call Reverse
Obstacle	Call Obstacle Avoidance Algorithm

본 논문에서는 표 1과 같이 Emergency_Ascend/Dive, Turn_Left/Right, Reverse 등 다섯 가지의 긴급제어 시나리오 가운데 한 가지를 선택하도록 규칙을 설정하였다. 즉, 정상상태에서 동작하는 항해유도 모듈을 대신하여 회피 모듈로 하여금 AUV를 유도하도록 명령을 내린다.

그러나, 해저 돌출부 또는 표류 물체 등과 같은 수중 장애물과의 충돌을 피하기 위해서는 장애물과의 거리, 방위각 등을 고려한 회피 알고리즘이 필요하다. 이 논문에서는 퍼지논리를 적용한 장애물 회피시스템을 그림 5와 같이 구성하였다. 회피 알고리즘 가동을 위한 판별규칙은 다음과 같다.

IF (the path of vehicle and obstacle is **CROSS**) and IF (the obstacle is **CLOSE**) THEN the obstacle is **HAZARD**
IF (the obstacle is **HAZARD**) THEN activate the obstacle avoidance algorithm.

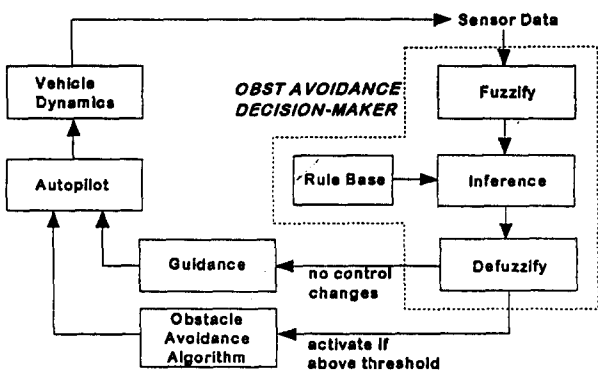


그림 5. 퍼지이론을 이용한 장애물회피 시스템 구성도.
Fig. 5. Configuration of obstacle avoidance system.

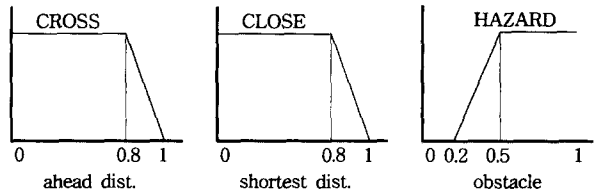


그림 6. 장애물 회피 알고리즘 가동을 위한 소속함수.
Fig. 6. Membership functions to activate obstacle avoidance algorithm.

여기서, IF-THEN 규칙에 나타나 있는 "CROSS", "CLOSE", 및 "HAZARD" 등은 언어적 퍼지변수이며 소속함수는 그림 6에 나타내었다. 장애물 회피 알고리즘은 항해유도 단계에서 설명한다.

다. 시스템 감시 규칙(system monitoring rules)

각 부시스템으로부터 입력되는 고장준위(failure level) 정보로부터 해당 시스템의 고장상태(failure status)를 점검하며, 만일 어떤 영역에서 이상이 발생하면 다음과 같이 네가지의 임무수행 단계 가운데 한가지로 결정을 내린다.

- Mission_Continue(MC): 정상 항해 및 임무 수행.
- Mission_Continue_with_Restriction(CR): 고장난 부시스템을 사용하지 않는 임무에 한해서 계속 수행.
- Mission_Abort_and_Return_Rendezvous(RR): 현재 위치에서 가장 가까운 랑데뷰 위치로 즉각 이동.
- Mission_Abort_and_Blow(AB) : 감속과 함께 압축공기를 이용하여 수면으로 긴급부상.

표 2. 부시스템 감시규칙; (a) 선수 및 선미수평타의 경우, (b) 선수 및 선미수평타 이외의 경우.

Table 2. Subsystem monitoring rules; (a) for bow and stern planes, (b) for other subsystems.

bow plane / stern plane	GOOD	MODE-RATE	FATAL
GOOD	MC	CR	CR
MODERATE	RR	RR	RR
FATAL	RR	AB	AB

(a)

failure status / subsystems	GOOD	MODE-RATE	FATAL	
rudder plane	MC	RR	AB	
navigation sensors	depth	MC	RR	AB
	speed	MC	CR	RR
	gyro	MC	RR	AB
	magnetic compass	MC	RR	RR
power battery	MC	AB	AB	
propulsion motor	MC	RR	AB	
avoidance sonar	MC	RR	RR	

(b)

이를 위한 규칙기반은 표 2에 나타내었다. 선미수평타 및 선수수평타의 경우 서로 보완적인 역할을 수행할 수 있도록 표 2(a)와 같은 규칙기반을 설계하였다. 그외에 상호 보완

관계가 없는 탑재장비들에 대해서 표2(b)와 같은 형태의 규칙기반을 작성하였다. 예를들면, 속도계 고장의 경우, 추진 모터 회전수를 오픈루프로 제어하게 함으로써 랑데뷰 위치로 이동 하도록 설계하였다.

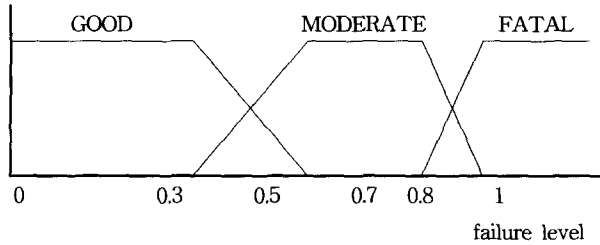


그림 7. 고장상태에 대한 소속함수.
Fig. 7. Membership function of failure status.

그러나, 추진장치나 선미수직타 등 임무수행에 중대한 영향을 미치는 부시스템의 고장이 발생하면 즉시 수상으로 부상하도록 고려하였다. 여기서, 고장상태는 "GOOD", "MODERATE", "FATAL" 등 세가지의 언어값으로 표현하였으며 그림 7과 같은 소속함수를 갖는다. 실제에 있어서는 각각의 센서나 작동장치의 고장상태는 그림 7과 같은 동일한 형태의 소속함수를 갖지 않지만, 본 논문에서는 편의상 동일하다고 가정하였다. 이때, 고장상태를 결정하기 위한 고장준위 정보는 해당 부시스템의 고장 정도를 표시하는 파라미터로서 [0, 1] 사이의 값을 갖는다. 예를들면, 제어판의 경우 다음과 같이 표현될 수 있다[17].

$$failure\ level \propto \frac{1}{T} \int_b^{b+T} [u\delta(t) - \delta(t)]^2 dt \quad (6)$$

그리고, 추후 시스템 설계제작 단계에서 각각의 부품에 대한 신뢰도 등을 고려한 고장준위 평가 및 고장상태의 소속함수가 결정되면 보다 실질적인 시스템 감시규칙 설계가 가능하게 될 것이다.

라. 임무수행 규칙 (special mission rule)

이 규칙은 목표해역에 도착하여 사전에 입력된 임무 시나리오를 수행하도록 명령을 내린다. 본 연구에서는, 직접적인 임무수행 과정은 항해단계의 임무실행 모듈에서 제어하며, 임무통제기에서는 해상환경이나 시스템 상태를 고려하여 "MC" 또는 "CR" 일 때에만 임무수행 명령("do_mission")을 내리도록 설계하였다. 임무실행 규칙은 다음과 같다.

```

IF (goal_area Arrival is true)
  and (mission_status is MC or CR)
  and (end_mission is false)
THEN do_mission is true
    
```

그런데, 임무수행 도중에 충돌 또는 운용영역 이탈의 위험이 있을 경우, 회피규칙에 의해서 임무수행은 즉시 중지되며 위험상황이 해소된 이후에 중단된 임무를 다시 수행한다. 그러나 동일한 임무에 대하여 두번이상 수행이 중단되면 임무실행 모듈은 다음 시나리오를 수행하도록 설계하였다.

3. 항해 단계

항해단계는 항해유도(guidance), 충돌회피(collission avoidance), 그리고 임무실행(special mission executor) 등 세개의 모듈로 구성된다.

3.1 항해유도 모듈

항해유도 모듈은 AUV가 임무계획 단계에서 설정된 지시

점 $W(k)$ 를 따라서 항해하도록 연속적인 명령값 $[\Psi_{com}, Z_{com}, \theta_{com}, U_{com}]$ 을 계산하여 자동조종장치의 명령값으로 넘겨준다. 여기서, $\Psi_{com}, Z_{com}, \theta_{com}, U_{com}$ 은 각각 침로각, 심도, 피치각 및 항해속도 명령값을 나타낸다.

어뢰 또는 미사일의 유도제어 시스템과 비교할 때, AUV의 경우 유도명령의 변화속도에 비해서 동적특성이 느리며, 심도 및 침로를 동시에 변경해야 되는 지시점은 없다고 가정하였다[6]. 따라서 본 논문에서는 침로각, 심도, 피치각 및 속도명령값을 각각 분리하여 계산하였다. 자동침로 제어장치를 위한 침로각 명령은 현재의 x, y 위치와 목표 지시점 사이의 시선(line-of-sight)으로부터 (7)과 같이 계산한다 [6][18].

$$\Psi_{com} = \tan^{-1} \left[\frac{W_y(k) - y(t)}{W_x(k) - x(t)} \right] \quad (7)$$

속도, 심도 및 피치각 명령은 (8)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} U_{com} &= W_u(k) \\ Z_{com} &= W_z(k) \\ \theta_{com} &= \sin^{-1} \left[\frac{-(W_z(k) - z(t))}{D} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$D = \sqrt{[W_x(k) - x(t)]^2 + [W_y(k) - y(t)]^2 + [W_z(k) - z(t)]^2}$$

3.2 충돌회피 모듈

충돌회피 모듈은 앞서 설명한 바와 같이 다양한 긴급제어 방법들을 포함하고 있으나, 이 절에서는 장애물 회피 알고리즘에 대해서만 설명한다.

가. 주변 모듈과의 인터페이스

장애물 회피모듈과 직접적으로 연결된 모듈은 임무통제기, 회피소나 신호처리부 및 자동조종장치 등이다. 정상적인 항해 과정에서는 항해유도 모듈에 의해서 AUV가 유도되고 장애물회피 모듈은 작동하지 않는다. 그러나, 임무통제기로부터 장애물 회피 명령이 입력되면 항해유도 모듈을 대신하여 작동하며, 충돌위험이 없어질 때까지 침로각 또는 심도 명령을 자동조종장치로 인가하여 AUV를 안전한 경로로 유도한다.

나. 회피 소나 출력신호

본 AUV에 적용된 회피 소나의 경우, 장애물의 3차원 정보를 제공할 수 없고 단순히 장애물과의 거리만을 출력한다. 따라서 본 논문에서는 그림 8과 같이 다섯개의 음향 트랜시버(acoustic transceivers)를 각기 다른 방향으로 설치하여 간접적으로 장애물과의 상대 방위각을 추정할 수 있도록 하였다. 그림 8에서 #1, #4, #5번 트랜시버는 수평면상에서 회피할 때 사용되며, #1, #2, #3번 트랜시버는 연직면 상에서의 장애물 회피를 위해 사용된다.

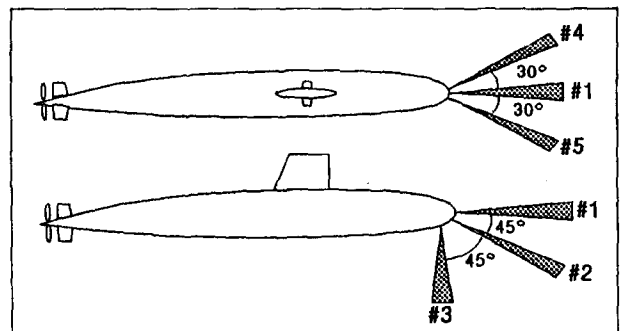


그림 8. 회피 소나 트랜시버 설치방향.
Fig. 8. Direction of avoidance sonar transceivers.

다. 회피 알고리즘 설계

일반적으로, 장애물 회피 알고리즘은 장애물의 형상, 이동 속도 및 진행방향, 장애물과의 거리, 방위각 등의 정보를 필요로 한다[19][20]. 그러나, 본 AUV에서 이용할 수 있는 정보로써는 장애물과의 거리와 음향 트랜시버 설치방향각 뿐이다. 본 논문에서는 이러한 제한적인 정보만을 이용하여 장애물을 회피할 수 있도록 그림 9와 같은 개념을 제안하였다. 즉, 그림 9로부터 다음과 같은 IF-THEN 형식의 규칙을 설계할 수 있으며, 이 규칙을 이용하여 수평면상에서 장애물을 회피할 수 있는 침로각 명령값의 변화율($\Delta\psi_{com}$)을 계산할 수 있다.

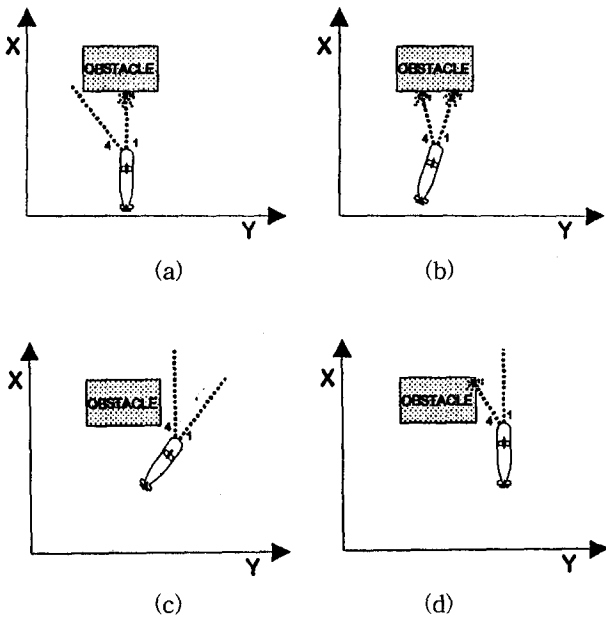


그림 9. 장애물회피 알고리즘 개념도.

Fig. 9. Conceptual diagram for the obstacle avoidance algorithm; (a) Trans. #1=detect, Trans. #4=no detect, (b) Trans. #1, #4=detect, (c) Trans. #1, #4=no detect, (d) Trans. #1=no detect, Trans. #4=detect.

- (i) IF Trans. #1 is DETECT and Trans. #4 is NO DETECT THEN turn heading angle to starboard: (Fig.9(a))
- (ii) IF Trans. #1 is DETECT and Trans. #4 is DETECT THEN turn heading angle to starboard: (Fig.9(b))
- (iii) IF Trans. #1 is NO DETECT and Trans. #4 is NO DETECT THEN turn heading angle to port:(Fig.9(c))
- (iv) IF Trans. #1 is DETECT and Trans. #4 is NO DETECT THEN keep heading angle steady: (Fig.9(d))

그리고, 자동침로 제어장치를 위한 침로각 명령은 (9)와 같이 주어진다.

$$\psi_{com}(k+1) = \psi_{com}(k) + \Delta\psi_{com} \quad (9)$$

이상과 같은 개념으로 설계한 장애물 회피 시스템의 전체 구성은 그림 10과 같다. 그리고, 추론규칙은 표 3, 입력 및 출력변수를 위한 소속함수는 그림 11에서 각각 제시하였다. 여기서, 회피소나의 탐지거리는 100m로 고정하였다. 연직면 회피의 경우, 측면 소나출력 신호 대신에 하향45도 및 연직면 방향의 소나출력(#2 및 #3 트랜시버)을 사용하여 표 4와 유사한 개념으로 심도 명령을 계산할 수 있다.

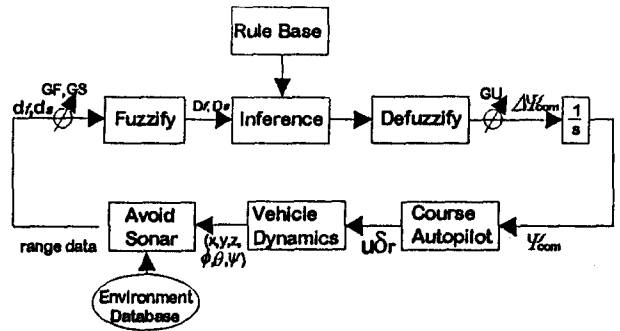


그림 10. 장애물회피 시스템 블럭선도.

Fig. 10. Block diagram of obstacle avoidance system.

표 3. 장애물 회피 규칙.

Table 3. Obstacle avoidance rules(CL Close, FR Far, and ND No Detect).

Trans. #4 or #5 (d_s) Trans. #1 (d_p)	CL	FR	ND
CL	PB	PB	PB
FR	PM	PM	PM
ND	PM	ZO	NM

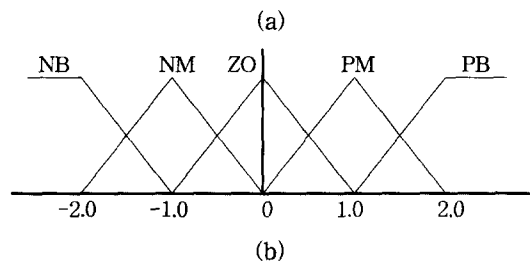
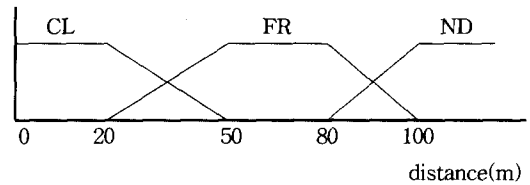


그림 11. 장애물 회피 알고리즘의 소속함수.

Fig. 11. Membership functions of obstacle avoidance algorithm; (a) input, (b) output.

3.3 임무실행 모듈

임무실행 모듈은, AUV로 하여금 사전프로그램밍 시나리오 대로 임무를 수행할 수 있도록 직접 제어하는 장치이다. AUV가 목표지점에 도달하면 임무통제기는 임무계획단계에서 입력된 시나리오를 수행하도록 임무실행 모듈로 "do_mission" 명령을 내리며, 이때 임무실행 모듈은 필요한 계측센서나 카메라 등을 작동시켜서 임무를 수행한다. 임무수행이 모두 끝나면 임무통제기로 "end_mission" 신호를 출력한다.

4. 함작동 단계

함작동 단계에서는 각종 센서모듈 및 통신장치를 관장하기 위한 인터페이스 장치와 AUV의 심도, 침로각 및 피치각을 제어하기 위한 자동조종장치(autopilot)로 구성된다. 그러나, 이 장에서는 인터페이스 장치에 대한 설명은 생략하고 자동조종장치에 대해서만 기술한다.

4.1 자동조종장치 개요

자동조종장치는 다음과 같이 세가지로 구분된다.

- 자동침로 제어장치(course autopilot: CAP)
- 자동심도 제어장치(depth autopilot: DAP)
- 자동속도 제어장치(speed autopilot: SAP)

그런데, AUV의 경우 상하 비대칭의 외부형상과 유체역학적 특성 때문에 복잡한 연성(coupling) 및 강한 비선형성을 가진다[21]. 또한 부가장비(센서 패키지, 카메라 등)에 의해서 외부선형이나 운동특성이 자주 변경될 수 있다. 따라서 AUV에 대한 정확한 수학적 모델링 및 관련 유체력계수 추정 은 매우 어려울 뿐 아니라 많은 예산이 소요되며, 이로 인해서 제어기 설계에 어려움이 있다[21]. 본 논문에서는 이러한 어려움을 극복하기 위해서, AUV의 동적특성에 대한 사전 지식이 비교적 적게 요구되며, 시스템 특성의 변화에 자동적으로 적용할 수 있는 자기구성 퍼지제어(self-organizing fuzzy logic control)[7] 기법을 적용하여 자동조종장치 제어알고리즘을 설계하였다.

4.2 자동침로 제어장치

자기구성 퍼지제어기는 1979년 Procyk[7] 등에 의해서 처음으로 제시되었으며, 학습알고리즘과 제어성능 평가를 통해 제어규칙을 수정하는 일종의 적응제어 시스템으로써, 이미 함안정기[22], 의료장비 분야[23] 등 비선형 시스템에 폭 넓게 적용되어 좋은 결과를 보여주고 있다.

자기구성 퍼지제어기를 이용한 자동침로 제어장치의 구성은 그림 12와 같다. 성능평가지수는 기준입력과 플랜트 출력사이의 오차 및 오차변화율과 제어입력 사이의 관계에 대한 제어 전문가의 경험으로부터 얻어지며, 본 논문에서는 Procyk이 제시한 성능평가지수표를 사용하였다. 증분모델은 상수를 사용하였다.

규칙개정은 성능평가지수의 출력에 따라 이루어진다. 시간 t 에서의 시스템 제어성능은 nT 시간 이전의 제어입력에 의해서 영향을 받는다고 가정할 때, 시간 t 에서의 제어성능을 개선시키기 위해서는 제어입력 $u(t-nT)$ 대신에 $u(t-nT)+r(t)$ 로 바뀌어야 한다. 여기서 $r(t)$ 는 제어성능 평가로부터 평가지수표를 통해 구해지는 제어입력 보정값이다. 초기제어규칙은 표 4(a)에 나타내었다.

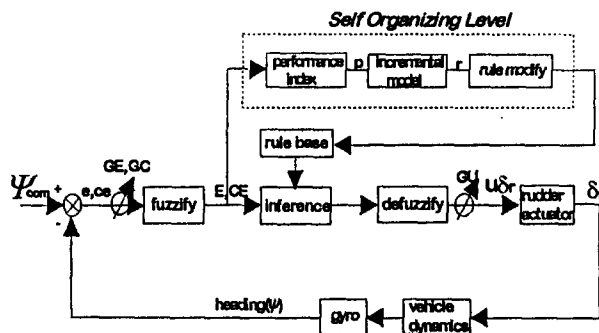


그림 12. 자동침로 제어장치 블럭선도.
Fig. 12. Block diagram of course autopilot.

4.3 자동심도 제어장치

AUV를 위한 자동심도 제어장치의 경우, 침로각 또는 항해속도 제어기와는 또다른 어려움을 갖는다. 즉, 두개의 제어입력 —선미수평타(δ_s), 선수수평타(δ_b)— 및 두개의 플랜트 출력 —심도(z), 피치각(θ)— 을 갖는 다변수 제어 문제이기 때문에 많은 제어규칙수를 필요로 한다[24][25]. 다변수 퍼지제어기에 대한 설계방법 및 기본개념은 이미 제시되어 있으나, 시스템의 차수 및 퍼지변수가 증가되면 실

간 구현을 어렵게 한다[25][26]. 이러한 문제점들을 극복하기 위한 방법으로써, 세부적인 시스템 특성분석과 숙련된 전문가의 경험 및 지식을 기반으로 다변수 시스템을 단일 입출력 시스템으로 비연성화(decoupling) 시켰다[24]. 그리고 그림 13와 같이 기준모델, 자기구성 알고리즘, 규칙개정 판별 알고리즘 및 퍼지제어기로 이루어진 기준모델 자기구성 퍼지제어기(model-reference self-organizing fuzzy logic controller: MRSOC)를 설계하였으며, 구체적인 설계내용은 참고문헌 [27]에 잘 나타나 있다.

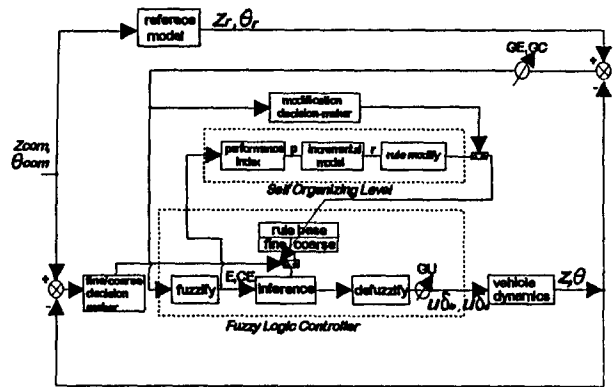


그림 13. 자동심도 제어장치 블럭선도.
Fig. 13. Block diagram of depth autopilot.

자동심도 제어장치를 위한 초기규칙은 표 4(c),(d), 그리고 제어기에 사용된 소속함수는 그림 15와 같다. 퍼지제어기의 출력은 선미수평타 명령각($u\delta_s$)만을 고려하였으나, 선수수평타가 운동역학적으로 AUV에 미치는 힘은 선미수평타에 비해하고, 방향만 반대이므로 선수수평타 명령각($u\delta_b$)은 (10)과 같이 계산하였다.

$$u\delta_b = -1.5 u\delta_s \tag{10}$$

4.4 자동속도 제어장치

퍼지제어기는 대부분 PD형과 PI형의 두가지로 구분할 수 있으며, 각각의 장단점은 참고문헌 [28]에 잘 나타나 있다. 그런데, AUV의 속도제어는 심도 또는 침로에 비해서 명령값이 바뀌는 빈도가 적고, 명령값의 변화량도 크지 않으므로 빠른 상승시간이 덜 요구된다. 오히려, 임무수행에 필요한 일정속도를 유지시켜주는 기능이 더욱 중요하다고 판단되므로 본 논문에서는 (11)과 같이 오차와 오차 변화율로부터 제어입력 증분값(Δu)을 계산하는 PI형태의 속도제어기를 구성하였으며, 제어규칙은 표5(b)에 나타내었다.

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k) \tag{11}$$

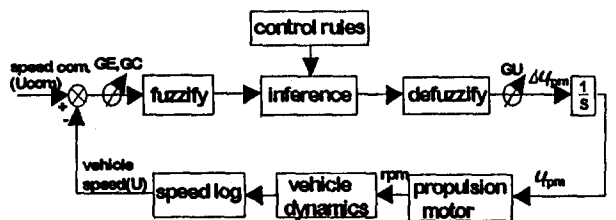


그림 14. 자동속도 제어장치 블럭선도.
Fig. 14. Block diagram of speed autopilot.

자동조종장치에서 설계된 제어규칙, 입출력 변수 및 조정인자, 증분모델들을 표 4와 표 5에서 요약제시하였다. 소속함수는 그림 15에 제시한 것과 동일한 형태를 사용하였으며

추론엔진 및 비퍼지화는 최대-최소합성법과 무게중심법을 사용하였다.

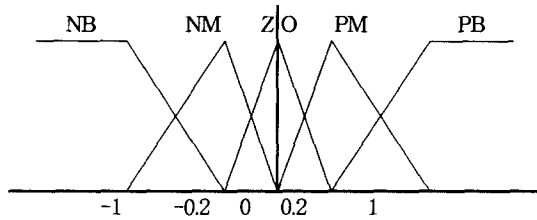


그림 15. 자동조종장치를 위한 소속함수.
Fig. 15. Membership functions of autopilots.

표 4. 자동조종장치를 위한 퍼지 제어규칙.
Table 4. Fuzzy control rule sets for autopilots.

e	ce	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	NB	NB	NB	NM	ZO	
PM	NB	NB	NM	ZO	PM	
ZO	NB	NM	ZO	PM	PB	
NM	NM	ZO	PM	PB	PB	
NB	ZO	PM	PB	PB	PB	

(a) CAP

e	ce	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	ZO	PM	PB	PB	PB	
PM	NM	ZO	PM	PB	PB	
ZO	NB	NM	ZO	PM	PB	
NM	NB	NB	NM	ZO	PM	
NB	NB	NB	NB	NM	ZO	

(b) SAP

e	ce	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	NB	NB	NB	NM	ZO	
PM	NB	NB	NM	ZO	PM	
ZO	NB	NM	ZO	PM	PB	
NM	NM	ZO	PM	PB	PB	
NB	ZO	PM	PB	PB	PB	

(c) DAP-COARSE

e	ce	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	ZO	
PM	PB	PB	PM	ZO	NM	
ZO	PB	PM	ZO	NM	NB	
NM	PM	ZO	NM	NB	NB	
NB	ZO	NM	NB	NB	NB	

(d) DAP-FINE

표 5. 자동조종장치 입출력 변수 및 조정인자 요약.
Table 5. Summary of input/output variables and scaling factors for autopilots.

		CAP		DAP				SAP	
				COARSE		FINE			
Algorithm		SOC		MRSOC				PI FLC	
input	var. def.	$e = \psi$ [deg]	$\dot{e} = \dot{\psi}$ [deg/s]	$e = \theta_r - \theta$ [deg]	$\dot{e} = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}$ [deg/s]	$e = z_r - z$ [m]	$\dot{e} = \dot{z}_r - \dot{z}$ [m/s]	$e = U_{com}$ u [kt]	$\dot{e} = \dot{U}_{com}$ [kt/s]
	scale factor	3.0	6.0	1.0	0.5	1.0	0.5	0.2	0.4
output	var. defin	rudder angle [deg]		stern angle [deg]		stern angle [deg]		motor rpm = rpm + Δrpm	
	scale factor	10.0		4.0		4.0		50.0	
incom. model (M^{-1})		0.01		0.01		0.02		-	

V. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서 설계한 지능제어 시스템의 제어성능을 고찰하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 시뮬레이션 방법

AUV의 동적 특성은 앞서 III장에서 설명한 비선형 운동 방정식을 사용하여 재현하였으며, 제어판 구동장치 및 추진 모터 모델은 1차 지연함수를 사용하였다. 회피 소나 출력 신호는 그림 16과 같이 설정한 소나 빔에 장애물 모델의 일부

가 교차하면 장애물과의 거리가 출력되는 것으로 모델링 하였으며[20], 각 음향 트랜시버의 탐지거리는 100m, 빔폭은 4°로 설정하였다.

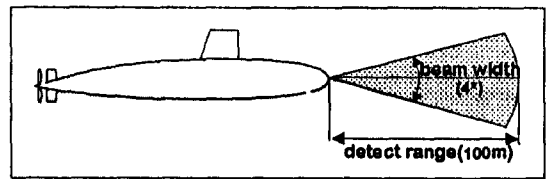


그림 16. 회피소나 빔 형상.
Fig. 16. Avoidance sonar beam profile.

그밖의 센서 및 탑재장비들은 지능제어 시스템에서 사용될 수 있도록 입출력 관계로 고려되었다.

시뮬레이션 시나리오는 다음과 같이 세가지로 설정하였다.

1.1 표준 운항

본 논문에서 제어대상으로 고려된 AUV의 중요한 기능 가운데 한가지는 수중 운동체의 유체력 해석 연구를 위한 데이터 계측이며, 이를 위한 전형적인 표준 운항 절차는 그림 17과 같다. 먼저, 육상에서 장비점검을 수행하고, 이어서 지능제어 시스템의 임무계획 단계를 이용하여 시험해역 정보, 시험 시나리오, 귀환위치 등을 입력한 뒤 AUV를 수중에 진수시킨다. AUV가 수중에 진수된 이후부터는 본 논문에서 설계한 지능제어 시스템에 의해서 통제되며, 자동조종장치를 이용하여 시험수행 위치로 이동하여 시험을 위한 초기상태를 유지한다. 시험을 위한 준비가 완료되면 사전 프로그래밍된 시험 시나리오에 의해서 시험을 수행하며, 새로운 시험종목을 수행하기 이전에는 다시 초기상태를 유지한다. 모든 시험이 종료되면 지정된 위치로 귀환하게 된다.

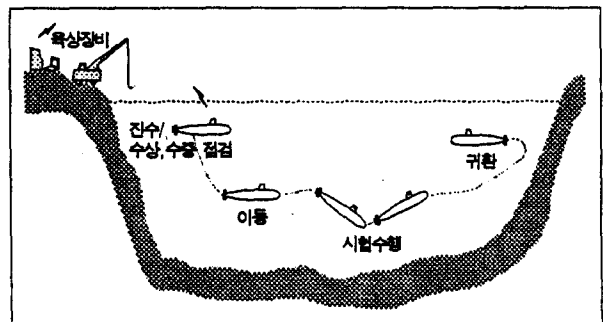


그림 17. 표준 운항 절차.
Fig. 17. A typical maneuvering procedure.

본 논문에서는, 대표적인 시험 가운데 하나인 수평면 선회 시험과 및 연직면 지그재그 시험을 수행하는 과정에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 수평면 선회 시험은 AUV의 선미수직타를 일정한 각도로 유지한 채 수평면 상에서 회전하도록 하는 시험으로써, 심도와 항해속도는 자동 심도 및 속도 제어장치를 이용하여 일정하게 유지해야 한다. 연직면 지그재그 시험은 피치각이 -10°가 될 때까지 선미수평타를 일정한 각도로 유지하고, 이어서 피치각이 +10°가 되도록 선미수평타를 반대로 유지하는 과정을 반복하므로써 AUV가 연직면 상에서 지그재그로 운동하게 한다. 표준 운항 시뮬레이션을 위하여 임무계획 단계에서 입력한 주요 파라미터는 다음과 같다.

- 항해심도: 10m
- 시험위치: $(x, y, z) = (150, 0, 10)$
- 귀환위치: $(x, y, z) = (0, 0, 3)$
- 시험내용:
 - 수평면 선회 2회: 선미수직타각= 10° , 심도=10m, 항해속도=5knot
 - 연직면 지그재그 2회: 선미수평타각= $\pm 10^\circ$, 항해속도=5knot

1.2 장애물 회피

이 시뮬레이션에서는 AUV가 지시점을 따라서 항해하는 도중에 예상치 못한 장애물이 발견되었을 경우를 가정하여 본논문에서 설계한 장애물 회피 알고리즘의 성능을 고찰하였다. 수중 장애물은 육면체의 해저 돌출부로 모델링 하였다.

1.3 고장 대처

고장의 종류를 계측센서 고장 및 제어판 구동장치 고장으로 구분하였다. 고장상태로 설정되면 해당 센서 출력값 또는 제어판이 0으로 고정되도록 하였다. 본논문에서는 $x=250m(t=100초)$ 지점에서 AUV의 속도센서가 고장난 경우와, 선미수평타 구동장치에 고장이 발생하여 제어판이 0도로 고정된 경우에 대해서 각각 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 결과 및 고찰

2.1 표준운항

그림 18의 시뮬레이션 결과는 AUV를 이용한 전형적인 임무수행 과정을 보여준다. 즉, AUV가 시험 위치로 이동하여 수평면 선회 시험 및 연직면 지그재그 시험을 수행하고, 사전에 입력된 지시점을 따라서 귀환위치로 도달하였다. 따라서 본 논문에서 설계된 지능제어 시스템의 임무통제 모듈, 항해유도 모듈, 임무실행 모듈 및 자동조종장치가 정상적으로 작동함을 확인할 수 있다. 특히 수평면 선회 또는 속도 가변시에도 심도유지 오차 0.1m 이내의 만족스런 제어성능을 나타내었으며(그림 18(b)), 속도제어도 시험을 수행하는 동안에 정상상태 오차 없이 명령속도를 유지하였다(그림 18(c)).

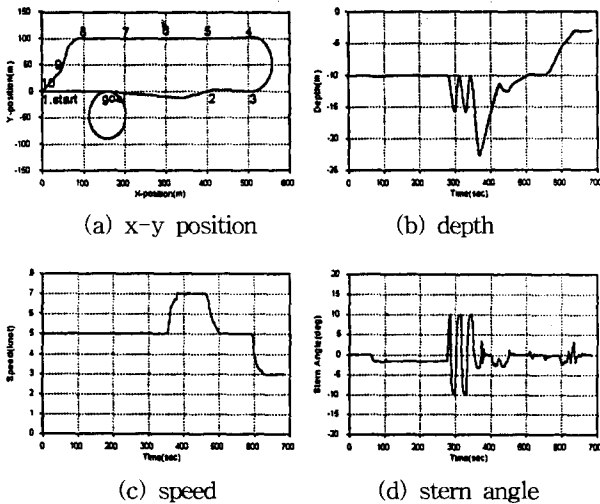


그림 18. 표준 운항 시뮬레이션 결과.
Fig. 18. Simulation results of a typical maneuvering procedure.

2.2 장애물 회피

그림 19(a)로부터 본 논문에서 제시한 장애물 회피 알고리즘이 해저 돌출부와 충돌 방지를 위해 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다. 즉, $(x, y, z)=(350, 0, 20)$ 위치에서

회피 소나를 이용하여 장애물을 탐지하고, 임무통제기는 장애물 회피 모듈로 하여금 AUV를 유도하도록 하므로써 예상치 못한 장애물을 피해서 항해하는 과정이 정상적으로 이루어졌다. 지시점-4 부근에서 y방향 오버슈터는 충돌회피 항해 직후 원래의 경로로 되돌아 갈 수 있는 국부경로계획 모듈이 설계되면 개선될 수 있을 것이다[31]. 그리고, 충돌 회피를 위한 급격한 침로변경에도 불구하고 적절한 심도제어가 이루어졌으며, 속도제어에 있어서도 일시적으로 최대 0.5노트 정도의 속도오차가 발생했지만 곧 명령속도로 수렴함을 알 수 있다.

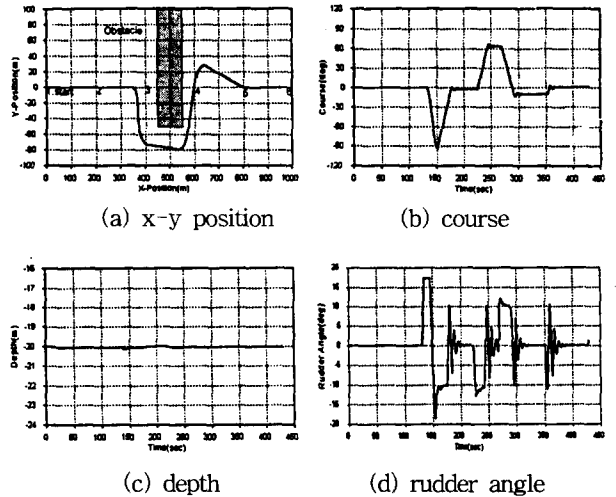


그림 19. 장애물 충돌회피 시뮬레이션 결과.
Fig. 19. Simulation results of collision avoidance against an obstacle.

2.3 고장 대처

가. 속도센서 고장

그림 20에 나타낸 것처럼 $x=250m(t=100초)$ 지점에서 AUV의 속도센서에 고장이 발생하여 출력값이 0으로 고정되었다. 즉, 속도신호의 고장상태가 그림 7의 소속함수 "FATAL"로 입력되었을 때, 표 2(b)에 설정된 규칙기반에 의해서 임무수행단계가 "RR"로 변환되어 사전에 입력된 귀환위치(출발점)로 돌아가는 과정을 볼 수 있다. 속도신호가 고장나면 임무통제기는 자동속도 제어장치가 속도신호 제한 대신에 추진모터 회전수 명령값만을 이용한 오픈루프 제어를 수행하도록 운용모드 변경을 지시한다. 따라서 선회 또는 심도변경시 AUV의 실제속도는 일정치 못하게 나타났지만(그림 20(c)), 귀환위치로 무사히 돌아감을 확인할 수 있다.

자동심도 및 침로 제어장치의 속도입력은 추진모터 회전수로부터 추정된 상수값이 인가되므로 AUV의 실제속도와 차이가 있으나, 제어규칙의 적응성에 의해서 심도 및 침로 각 제어가 적절히 이루어짐을 확인할 수 있었다(그림 20(b), (d)).

나. 선미수평타 구동장치 고장

선미수평타 및 선수수평타는 어느 한쪽에 고장이 발생했을 때 서로 보완적인 역할을 수행할 수 있다. 이 시뮬레이션에서는, 수평타와 같이 여유도(redundancy)를 갖는 부시스템의 고장 발생시 지능제어 시스템의 대처 과정을 고찰하고 제어성능을 확인하였다.

그림 21(a)에서 보는 것처럼 AUV가 항해 도중에 선미수평타 구동장치에 고장이 발생하여 제어판이 0도로 고정되었다. 따라서, 임무통제기는 표 2(a)에 설정된 규칙기반에 의

해서 임무수행 단계를 "RR"로 변환하고 귀환위치(출발점)로 돌아가도록 항해유도 모듈로 명령을 내린다. 시뮬레이션 수행결과, 선미수평타 고장에 대한 지능제어 시스템의 대처 과정이 적절히 이루어짐을 알 수 있다.

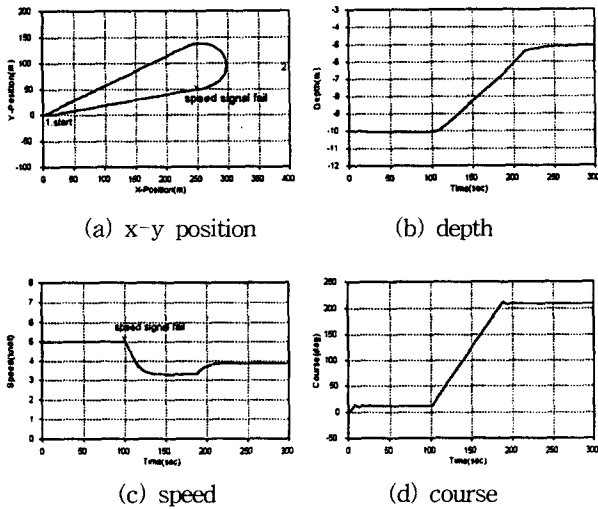


그림 20. 속도센서 고장 시뮬레이션 결과.
Fig. 20. Simulation results of speed signal failure.

그리고, t=100초 부근에서 침로변경과 심도변경이 동시에 수행되었기 때문에 피치가 꺾적(그림 21(d))이 다소 불안정하게 나타났으나, 심도는 최대오차 0.1m 미만의 안정된 심도유지 성능을 나타내었다.

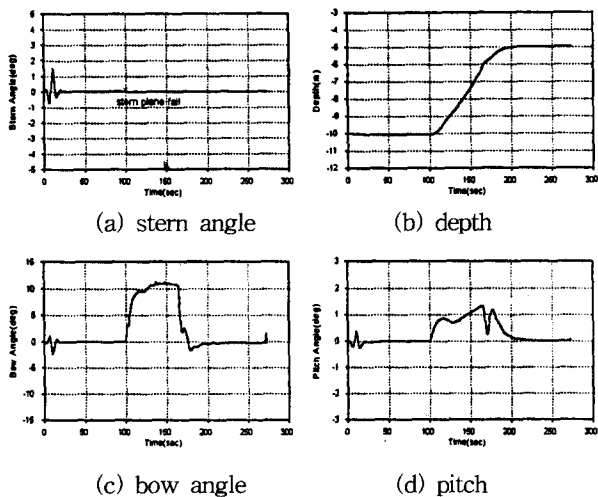


그림 21. 선미타 구동장치 고장 시뮬레이션 결과.
Fig. 21. Simulation results of stern plane failure.

VI. 결론

본 논문에서는, AUV가 수중에서 항해하는 동안 인간 조작자의 역할을 대신하여 항해과정 및 탑재시스템 동작상태를 종합적으로 감시/분석하고 임무수행 과정을 통제할 수 있도록 규칙기반 및 퍼지이론을 적용한 지능제어시스템을 제시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 제어성능을 고찰하였다.

본 논문에서 개발한 지능제어 시스템은 임무계획 단계, 임무통제 단계, 항해단계, 그리고 합작동 단계로 구분되는 계층적 소프트웨어로 구성하였다. 각 단계 별 주요 연구내용은 다음과 같다:

- 임무계획 단계: 임무수행 시나리오 및 관련 파라미터를

입력할 수 있는 사용자 인터페이스 설계.

- 임무통제 단계: 수중에서 AUV가 항해하는 동안, 탑재 시스템 및 외부환경을 감시/분석하여 필요한 결정을 도출할 수 있는 규칙기반 및 추론모듈 설계.
- 항해단계: 해저바닥 또는 예상치 못한 장애물과의 충돌을 피하기 위한 장애물 회피 알고리즘 설계.
- 합작동 단계: AUV의 운동특성 변화 또는 모델링 오차에 적용할 수 있도록 학습능력을 갖는 자동조종장치 설계.

이상과 같이 설계한 지능제어 시스템을 임의의 AUV 모델에 적용하여 표준운항, 장애물 회피, 속도센서 고장, 선미타 구동장치 고장 등 네가지 상황에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과, 본 논문에서 제시한 지능제어 시스템의 설계 타당성을 확인할 수 있었다. 본 논문의 연구내용은 AUV뿐 아니라 각종 선박의 운용인력 감축 및 고신뢰성 자동화 시스템 설계에도 활용될 수 있을 것이다.

끝으로, 본 논문에서 구성한 지능제어 시스템을 실제 AUV에 적용하기 위해서는,

- 운용해역에 대한 데이터 베이스 구축 및 이를 이용한 경로계획 알고리즘
- 시뮬레이션 소프트웨어를 위한 센서/해상환경 상세 모델링
- 조류가 있는 상황에서 저속에서의 정밀한 제어기술
- 시스템 고장검출 및 내고장성 제어(Fault Tolerant Control) 기법 등의 연구가 계속되어야 한다.

참고문헌

- [1] F. Busby and J. R. Vadus, "Autonomous underwater vehicle R&D trends," *Sea Technology*, pp. 65-73, May, 1990.
- [2] D. Foxwell, "Autonomous underwater vehicles: the naval force-multiplier," *International Defense Review*, pp. 145-150, Feb., 1992.
- [3] D. Blidberg, "Autonomous underwater vehicles: current activities and research opportunities," *Intelligent Autonomous Systems*, pp. 51-64, 1989.
- [4] 해사기술연구소, "해양작업 시스템 개발(I)," UCN-207-1353.D, 1990.
- [5] D. Steiger, "Autonomous undersea vehicle technology development in the US: an update," *UDT proc.*, pp. 11-14, 1994.
- [6] A. J. Healey and M. R. Good, "The NPS AUV II autonomous underwater vehicle testbed: design and experimental verification," *Naval Engineers Journal*, pp. 191-202, May, 1992.
- [7] T. J. Procyk and E. H. Mamdani, "A linguistic self-organising process controller," *Automatica*, vol. 15, pp. 15-30, 1979.
- [8] M. A. Abkowitz, *Stability and Motion Control of Ocean Vehicles*, MIT Press, 1969.
- [9] J. Feldman, "DTNSRDC revised standard submarine equations of motion," DTNSRDC/spp-0393 -03, 1979.
- [10] N. J. Nilsson, *Principles of Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, 1982.
- [11] C. V. Negoita, *Expert Systems and Fuzzy Sys-*

- tems, Benjamin/Cummings, 1985.
- [12] R. Forsyth, *Expert Systems: Principles and Case Studies*, Chapman & Hall, 1989.
- [13] 국방과학연구소, "첨단 군화기 고장진단을 위한 전문가 시스템 개발에 관한 연구(II)," ATRC-409-940870, 1995.
- [14] 국방과학연구소, "전문제어시스템에 관한 연구(II)," ATRC-409-940861, 1994.
- [15] 최영찬 외, "퍼지추론에 의한 XLPE 케이블의 절연진단 전문가 시스템 구축," 전기학회 논문지 44권 2호, pp. 248-255, 1995.
- [16] 이광형, 오길록, 퍼지이론 및 응용(I),(II), 홍릉과학출판사, 1991.
- [17] R. Doraiswam and J. Jiang, "Performance monitoring in expert control systems," *Automatica*, vol. 25, no. 6, pp. 799-811, 1989.
- [18] M. J. Cloutier, "Guidance and control system for an autonomous vehicle," AD-A222709, 1990.
- [19] 주영훈 외, "자율 이동로봇의 퍼지제어기에 관한 연구," 전기학회논문지 41권 9호, pp. 1071-1084, 1992.
- [20] C. A. Floyd, "Design and implementation of a collision avoidance system for the NPS AUV II utilizing ultrasonic sensors," AD-A246177, 1991.
- [21] K. R. Goheen and E. R. Jefferys, "Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles," *IEEE Trans. Oceanic Engineering*, vol. 15, pp. 144-151, 1990.
- [22] R. Sutton, "Scope and limitation of a fuzzy self-organizing controller for warship stabilisation," *Proc. of International Conference on Modelling and Control of Marine Craft*, U.K., 1990.
- [23] D. A. Linkens and S. B. Hasnain, "Self-organising fuzzy logic control and application to muscle relaxant anaesthesia," *IEE proc.-D.*, vol. 138, pp. 274-284, 1991.
- [24] J. L. Choi, D. K. Lee and H. Y. Kim, "The use of fuzzy logic theory in the design of depth control system for a submersible vehicle," *Warship '93 RINA Intl. Symposium on Naval Submarines 4*, London, UK, paper no. 23, 1993.
- [25] M. M. Gupta et al, "Multivariable structure of fuzzy control systems," *IEEE Trans. Sys., Man and Cybern.*, vol. 16, no. 5, pp. 638-655, 1986.
- [26] G. M. Trojan and J. B. Kiszka, "Solution of multivariable fuzzy equations," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 23, pp. 271-279, 1987.
- [27] J. L. Choi, D. I. Lee and C. S. Hwang, "A model reference self-organizing fuzzy logic controller for auto depth control system of a submersible vehicle," *Proc. IFAC Workshop CAMS'95*, Trondheim, Norway, pp. 417-423, 1995.
- [28] J. Lee, "On methods for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 298-301, Nov., 1993.
- [29] D. P. Brutzman, "NPS AUV integrated simulator," AD-A248120, 1992.
- [30] T. W. Caddell, "Three dimensional path planning for the NPS II AUV," AD-A246016, 1991.



이 동 익

1987년 경북대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1990). 1990년 ~ 현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 고장허용제어, 퍼지 및 전문가 시스템, 수중운동체 제어 및 응용.



최 중 락

1977년 고려대 전자공학과 졸업. 1987년 서울대 제어계측공학과(석사). 1997년 부산대 전기공학과(박사). 1978년 ~ 현재 국방과학연구소 책임연구원. 관심분야는 퍼지 및 신경망 관련 지능제어, 수중운동체 제어 및 응용.



곽 동 훈

1989년 부산대 기계설계공학과 졸업. 동대학원 석사(1992). 1992년 ~ 현재 국방과학연구소 연구원. 관심분야는 신경회로망을 이용한 시스템 식별, 유압 시스템 제어, 수중운동체 제어 및 응용.