

## 비행 전구간 유도제어 HILS 기법을 적용한 구동제어 알고리즘 성능 평가 연구

전 완 수\* , 조 현 진\* , 이 만 형\*\*

### Performance Evaluation for Several Control Algorithms of the Actuating System Using G/C HILS Technique.

Wan Soo Jeon\*, Hyeon Jin Cho\*, Man Hyung Lee\*\*

#### ABSTRACT

This paper describes the whole development phase for the underwater vehicle actuating system with high hydroload torque disturbance. This includes requirement analysis, system modeling, control algorithm design, real time implementation, test and performance evaluations. As for driving control algorithms, fuzzy logic, variable structure and PD(Proportional - Differential) algorithm were designed and implemented on board controller using a single chip microprocessor, Intel 8797. And test and performance evaluation is carried out both single test and system integration test. We could confirm the basic performance of actuating system through the single test and general developing work of any actuating systems was finished with a single performance test of actuating system without system integration test. But, we suggested that system integration test be needed. System integration test is carried out using G/C HILS(Guidance and Control Hardware-In-the-Loop Simulation) which is constituted flight motion simulator, load simulator, real time host computer and the related subsystems such as inertial navigation system, power supply system and Guidance and Control Computer etc..The most important practical contribution of this paper is that full system characteristics such as minimal control effort, enhancement of guidance and autopilot performance by the actuating system using G/C HILS technique are investigated. Through full running G/C HILS, in spite of the passing to single tests, some control algorithm resulted in failure as to stability of full system and system time frame.

**Key Words:** Servo Control Algorithms Design(서보 제어 알고리즘 설계), Performance, Evaluation(성능 평가), G/C HILS(유도제어 HILS)

\* 국방과학연구소

\*\* 부산대학교 제어기제공학과, 기계기술연구소, 정밀정형 및 금형가공 연구소

### 기 호 설 명

- $x, y, z$  : 수중 운동체의 위치
- $u, v, w$  : 수중 운동체의 속도
- $\phi, \theta, \varphi$  : 수중 운동체의 오일러각
- $p, q, r$  : 수중 운동체의 각속도
- $\delta_r, \delta_{er}, \delta_{el}$  : 수중 운동체의 구동 타각  
(rudder, right/left elevator)
- $\theta_{los}, \varphi_{los}$  : 수중 운동체와 표적과의 시선각
- $R_{rel}$  : 수중 운동체와 표적간의 상대 거리

### 1. 서 론

수중 운동체의 구동장치는 수중 운동체가 요구 되는 위치 또는 궤적을 따라 운동하도록 자동조종장치에서 주어지는 전기적 신호를 기계적인 출력으로 변환시켜 방향타와 좌,우 승강타의 각도를 제어하는 3축 위치 제어 시스템이며 자동조종장치와 함께 수중운동체의 성능을 좌우하는 핵심 부분으로 수중운동체의 성능 고도화에 따라 구동장치의 설계 기준도 점차 엄격해지고 있으며 연구도 활발히 진행되고 있다. <sup>(1)</sup>

수중운동체 구동장치는 일반 서보 시스템의 특성 외에도 심각한 무게 및 공간상의 제약 조건, 짧은 듀티 사이클(Duty Cycle)의 작동주기, 긴 저장 수명의 요구와 부하 특성상 외란 동특성이 심하게 변하고 외란 토크의 종속성이 매우 크다는 특성을 갖는다. 따라서 제작될 구동장치는 모터와 구동전달기구, 제환 감지 센서 등의 적절한 선정과 설계를 통하여 소형,경량화 되어야 하고 고속화와 마지막 유도 단계에서의 급격한 운동에서 비롯되는 유체 부하에도 불구하고 높은 위치 정확도와 속응성을 얻을수 있도록 제어를 설계 하여야 하는데 외란 모델링의 부정확성과 구동전달 기구의 관성모멘트의 변화 등이 제어를 어렵게 하고 있다. <sup>(2,3,4)</sup>

본 연구의 내용은 이와 같은 구동장치 자체 특성과 더불어 실제 구현된 유도 시스템 전체의 요구 특성인 최소 제어력 소모 측면, 유도 성능 및 자동조종 성능 증대 측면에 가장 적합한 수중운동체의 구동제어 알고리즘을 개발하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 우선 구동장치의 원하는 제어 성능과 부하 조건을 분석하여 성능 기준 사양을 확정하였으며 비례-적분-미분제어(PID)방식의 제어 알고리즘 설계뿐만아니라 제어판의 동특성 변화, 속도 포화, 시스템 파라메타 변동 등과 같은 비선형 요소들과 환

경 및 특성 변화에도 강인한 것으로 알려진 퍼지(Fuzzy) 및 가변구조(Variable Structure)제어 알고리즘에 대한 연구도 수행 하였다. <sup>(5,6,7)</sup> 설계된 구동제어 알고리즘은 16비트 워칩 마이크로 프로세스인 인텔 8797BH에 구현하여 비행 전구간에서의 HILS(Hardware In the Loop Simulation) 환경하에서 구동장치 자체의 단독시험뿐만 아니라 유도제어 시스템 연동 시험(G/C System Integration Test)을 수행하여 성능을 검증함으로써 실제 디지털 하드웨어로 구현되었을때의 유도 및 자동조종장치(Autopilot)의 성능 증대에 가장 적합한 구동제어 알고리즘을 제시하였다. <sup>(8,9)</sup>

이러한 유도제어 HILS 시험은 소프트웨어 시뮬레이션 및 단독 시험으로서는 점검할수 없는 관련 부시스템과의 연관 효과를 포함한 전체 유도제어 성능을 평가할수 있는 방법론을 제시할 수 있다. HILS 시험 결과 구동장치 단독시험을 만족한 경우일지라도 관련 부시스템과의 연관성에서 부적절한 알고리즘을 시험 평가할 수 있었다.

### 2. 요구 성능 분석 및 시스템 모델링

#### 2.1 요구 성능 분석

주어진 요구 조건에 적합한 구동장치를 선정하기 위해서는 우선 원하는 제어 성능과 부하 조건을 만족해야 하며, 또한 설치 공간에 적합한 크기와 무게 등의 외형적 조건외에도 신뢰성,경제성,환경 적응성 등 여러가지 조건을 고려하여 구동장치를 설계 하여야 한다.

제어 성능은 정적 성능과 동적 성능으로 나뉘 수 있는데, 정적 성능 조건에는 최대 발생 토크, 최대 각변위와 최대 각속도 등이 해당되며 동적 성능으로 기준 입력 신호와 외란에 대한 토크 출력의 영향을 알아보기 위하여 시간 응답과 주파수 응답, 주파수 대역폭(bandwidth)등을 해석 하여야 한다.

정적 성능 요구 조건에서 최대 발생 토크는 비행 또는 수중 운동시 요구되는 각도로 운동체를 회전 시키기 위한 제어판의 관성력과 함께 유체 흐름으로 인한 동적 압력에 비례하는 외부 토크를 이겨내야 한다. 또한 수중 운동체가 목표물에 근접 했을때 제어판의 각변위가 클수록 제어에 필요한 큰 토크를 얻을 수 있으므로 충분한 제어 토크를 얻기 위해서는 제어판의 순간적인 각변위와 각속도가 커야만 한다.

동적 성능 요구 조건으로는 응답 속도를 결정하는 주파수 대역폭이 커야 한다. 특히 수중 운동체의 경우 높은 기

동성이 요구 되므로 구동장치도 우수한 반응 속도를 갖도록 설계 되어야 한다. 한편, 위치제어에 있어서 제어판의 각속도 포화 현상은 시스템의 동적 반응에 위상 지연을 가져오므로 우수한 주파수 반응과 자동조동장치(Autopilot)의 안정성을 위해서 높은 각속도가 필요하다. 이와 같은 구동장치의 정적 및 동적 요구 성능 조건은 유도제어부의 성능 검증을 위해 자체 개발된 프로그램에 구동장치를 모델링하여 수중운동체의 동적 응답 특성을 만족 시키

는 범위 내에서 도출 하였으며 프로그램의 구성도는 Fig.1과 같으며 기술적 요구 사양은 Table 1과 같다. 여기서 많은 경우 주파수 대역폭은 최대 변위의 10% 값의 입력 변위에 대해 -3db의 크기 또는 90도(degree) 위상 지연을 주는 주파수 값으로 요구된다.

### 2.2 시스템 모델링<sup>(10)</sup>

수중운동체 구동장치는 제어판을 움직이기 위한 구동기(Actuator), 구동기의 움직임을 제어하기 위한 서보 제어기, 구동기의 운동을 변환 또는 전달하는 동력 전달 장치, 그리고 속도와 위치를 감지하기 위한 각종 센서들로 구성된 전기식 구동장치이다. 동급의 외국 수중 유도 무기중 유압식 구동장치를 사용하는 시스템도 있으나 유압식의 큰 단점인 누설과 오염 문제를 피할 수 있으며 전기 에너지를 바로 기계적 출력으로 바꾸어 줌으로써 순수한 전기/전자적인 시스템을 구성할 수 있어 전기와 기계 장치의 인터페이스 문제를 없앨수 있다는 이점 때문에 점차 전기식 구동장치로의 전환이 이루어 지고 있는 추세이다.

수중운동체 전기식 구동장치는 영구 자석형 직류 서보모터를 사용하여 빠른 응답과 높은 위치 제어 정확도를 얻도록 설계하였으며 작은 모터로 큰 출력을 얻기 위하여 고속 회전 모터를 감속시키며 이를 위하여 스피어 기어와 볼스크류를 사용한 동력 전달 장치가 필요 하다. 설계된 구동장치는 리니어 형(Linear Type)의 구동장치로 효율이 90% 이상인 볼스크류를 사용하여 높은 위치 정확도를 얻을 수 있었으며 구성도는 Fig. 2와 같다. 부하축의 비틀림 상수의 효과를 무시한다면 모터축에 대한 등가 관성모멘트(J), 등가 점성 마찰력(B), 등가 쿨롱 마찰력(F)는 식(1)과 같이 표현된다.

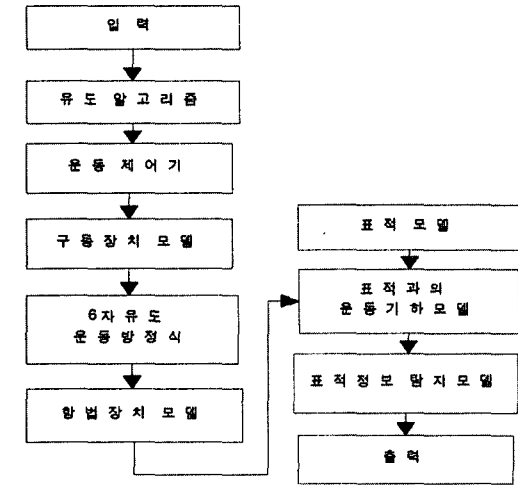


Fig. 1 Block Diagram of Requirement Spec. Generation Program.

Table 1 Requirement Specification

항목	사양	요 구 사양
전 기 적		1. 주파수 대역폭 : [Hz]이상 2. 최대 각속도 : [deg/sec] (무부하시) 3. 최대 각변위 : [deg] 4. 위치 제어 정확도 : [deg] 이하
기 계 적		최대 토크 : 400 [lb-in]
인 터 페이스		1. 50[ms] 주기마다 유도제어 컴퓨터로부터 상,하 방향타, 우현 승강타, 그리고 좌현 승강타의 타각 명령을 받는다. 2. 10[ms]마다 주행기록 컴퓨터로 현재 타의 위치 정보를 전송한다.

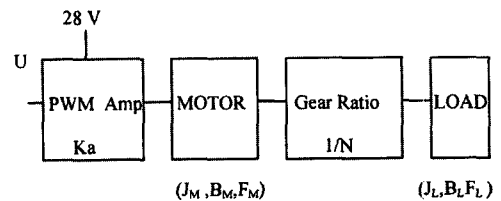


Fig. 2 Block Diagram of Plant

$$\begin{aligned}
 J &= J_M + J_L / N^2 \\
 B &= B_M + B_L / N^2 \\
 F &= F_M + F_L / N^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

위식 (1)에서 아래 첨자 M은 모터를 L은 부하를 의미한다. 이 시스템의 전달함수 구성도는 Fig. 3과 같으며 전달 함수의 구성도를 이용하여 전달 함수를 구해 보면 식(2)와 같다.

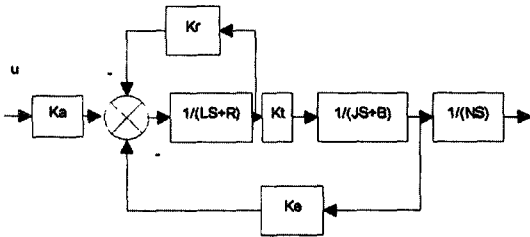


Fig. 3 Block Diagram of Transfer Function

$$\frac{X}{U} = \frac{KaKt}{NS[(LJ)S^2 + (RJ + BL + JKr)S + BR + KrB + KtKe]} \quad (2)$$

식 (2)의 모터 및 부하 관련 데이터는 Table 2에 정리되어 있으며 이것은 구동기(Actuator) 제작 업체인 프랑스 ARTUS사에서 제공된 것이다.

Table 2 Coefficients of Motor and Load

Symbol	Value	Unit	Nomenclature
PWM	2.0	-	PWM Amplifier
Kr	0.3	Ohm	Shunt
L	0.000414	H	Motor Inductance
R	0.68	Ohm	Motor Resistance
Kt	0.02769	Nm/Amp	Motor Torque Constant
Ke	0.02769	Volt/rad/sec	Motor EMF Back
J	0.00002	kg.m	Total Inertia
B	0.0001	Nm sec/rad	Viscous Friction
N	316	-	Gear Ratio
Tg	0.123	Volts/RPM	Tachometer
LIM1	±10	Volt	Limit Voltage of D/A
LIM2	±28	Volt	Limit Voltage of PWM Amp

### 2.3 부하모델링 <sup>(11,12)</sup>

작은 가로-세로비를 갖는 제어판의 토오크 특성을 이론적 및 실험적으로 해석하기 위한 연구를 수행하였다.

이론적 해석을 위해 이 경우 유체는 비점성 및 비압축성이라 가정하고 유체 유동은 비회전성이라고 가정하여, 소오스(Source) 및 다이폴(Dipole)등의 특이점을 제어판의 표면과 후류면에 분포하는 경계치 문제로 해석함으로써 제어판에 작용하는 양력, 유기 항력 및 토오크를 예측 하였다. 이때, 후류면은 제어판의 뒷날(Trailing Edge)과 양단(Tip)에서 물체로부터 박리된다고 가정하였다. 후류면의 형상은 엄밀하게는 해의 일부로서 결정되어야 하지만 계산의 효율을 위하여 제어판과 무한 원방에서 적절한 조건을 부여함으로써 그 형상을 가정하였으며 본 연구에서 취급한 것과 같은 단순한 형태의 물체의 경우에는 후류면 형상의 차이가 최종 결과에 거의 영향을 미치지 않음을 확인 하였다. 한편, 중앙 평행부를 제거한 모형선에 제어판을 부착하여, 선박연의 캐비테이션 터널(Cavitation Tunnel)에 설치하고 여러가지 조건하에서 제어판에 작용하는 토오크를 계측하였으며, 이는 이론적인 계산 결과와 비교적 잘 일치하였다. 본 연구에서는 선박연에서의 위탁 연구 결과를 토대로 제어판이 14도일때 최고 400 (lb-in)의 부하가 선형으로 변한다고 모델링하였다.

### 3. 제어 알고리즘 설계

외란으로 작용 하는 유체 부하와 정확히 모델링 되지 못한 제어판의 관성력 변화에 의한 파라메타 변화 등이 존재하더라도 요구되는 설계 사양을 만족시키는 제어 알고리즘의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 제어기 구현이 간단하면서도 성능이 비교적 우수한 비례-미분(P-D)제어기와 시스템에 대한 모델링 오차와 외란에도 불구하고 그 제어 성능이 우수한 것으로 알려진 퍼지 논리(Fuzzy Logic) 제어 알고리즘과 가변 구조 (Variable Structure) 제어 알고리즘을 사용하여 수중운동체 구동장치에 알맞은 제어기를 설계 하였다.

#### 3.1 비례-미분 제어기

식(2)의 전달함수에 대하여 비례-미분 제어기를 설계 하였다. 비례 이득  $K_p$ ,  $K_D$  는 시간영역에서의 응답 속도와 오버슈트를 고려하여 Table 1의 설계 사양을 만족

시기도록  $K_p = 4.0$ ,  $K_D = 10.0$  으로 정하였다.

3.2 퍼지 논리 제어기(Fuzzy Logic Controller) <sup>(13,14)</sup>

퍼지 규칙(Fuzzy Rule)을 정량화하여 도표(Look-Up Table)화 함으로써 추론과정을 제거하여 구동장치의 빠른 응답 특성을 얻기 위해 비례-미분(P-D)형태의 제어규칙을 사용하였다. 제어 규칙의 입력 변수는 명령값과 측정값의 편차 ( $e$ )와 편차의 변화율( $\dot{e}$ )이 되며 출력 변수는 제어입력( $U$ )인 전압 명령이 된다.

입출력 변수를 언어학적인 값(Linguistic Value)으로 5등급 양자화하여 정의 하면 다음과 같다.

- PB : Positive Big
- PS : Positive Small
- ZE : Zero
- NS : Negative Small
- NB : Negative Big

이에 따라 제어규칙(Control Rule)을 정의하면 Table 3과 같으며 양자화 하여 나타내면 Table 4와 같다. 여기서 편차의 범위는  $-4(\text{Deg.})$ 에서  $+4(\text{Deg.})$ , 편차의 변화율은  $-80(\text{Deg./Sec})$ 에서  $+80(\text{Deg./Sec})$  로 선정하였고 이보다 클 경우에는 최대 제어 입력이 걸리도록 하였다.

각 양자화 단계에 해당되는 이산형(Discrete) 멤버십 함수를 정의하면 Table 5와 같다. 플랜트의 제어입력( $I$ )은 무게 중심법(Center of Gravity Method)을 사용하여 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{\sum (\mu_n \times U_n)}{\sum \mu_n} \tag{3}$$

여기서  $\mu_n$ 는 멤버십 함수이고  $U_n$ 은 유니버스 오버 디스 코스(Universe of Discourse), 그리고  $n$ 은 제어 규칙의 수이다. Table 3의 언어학적인 규칙을 도표(Look-Up Table)로 만들면 Table 6과 같다.

Table 4 Quantize variables

e (Deg)	$\dot{e}$ (Deg/Sec)	(Volt)	Quantize Level
-4.0	-80.0	-1.0	-5
-3.2	-64.0	-0.8	-4
-2.4	-48.0	-0.6	-3
-1.5	-32.0	-0.4	-2
-0.5	-16.0	-0.2	-1
0.0	0.0	0.0	0
0.5	16.0	0.2	1
1.5	32.0	0.4	2
2.4	48.0	0.6	3
3.2	64.0	0.8	4
4.0	80.0	1.0	5

Table 5 Discrete Membership Function

Quantized Level / Linguistic Level	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
PB									0.2	0.6	1.0
PS							0.4	0.8	0.8	0.4	
ZO				0.2	0.6	1.0	0.6	0.2			
NS		0.4	0.8	0.8	0.4						
NB	1.0	0.6	0.2								

Table 3 Control Rule

Error Change(e) / Error(e)	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	NB	NS	NB	NS	NS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	PS	PS	PB	PS	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

Table 6 Look -Up table

(e) / (e)	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
-4	-5	-5	-4	-4	-4	-5	-4	-4	-4	-4	-4
-3	-5	-4	-4	-4	-4	-5	-4	-4	-3	-3	-3
-2	-5	-4	-3	-3	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-1
-1	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	1	2
0	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	-2	-1	-1	0	1	2	2	2	3	4	5
2	1	1	1	2	2	4	3	3	3	4	5
3	3	3	3	4	4	5	4	4	4	4	5
4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

### 3.3 가변 구조 제어기(Variable Structure Controller)<sup>(15)</sup>

가변 구조 제어기의 설계를 위하여 구동장치 모델식 (2)를 상태 방정식으로 표현하면 다음의 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = A_p \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + B_p \cdot U \quad (4)$$

여기서,  $X_1, X_2$ 는 제어관의 변위와 속도이며  $A_p, B_p$ 는 식 (5)와 같다.

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -a_p \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ b_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (2)와 Table 2를 사용하여 정리 하면  $a_p, b_p$ 는 다음과 같다.

$$a_p = -35, b_p = 13752 \quad (6)$$

여기서 상태 변수를 위치 오차와 속도 오차로 표현하여 나타내면 식 (7), (8), (9)와 같다.

$$e_1 = r - X_1 \quad (7)$$

$$\dot{e}_1 = \dot{e}_2 = \dot{r} - \dot{X}_1 = -X_2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \ddot{r} - \ddot{X}_1 = \ddot{r} - \dot{X}_2 = a_p X_2 - b_p U \\ &= -a_p e_2 - b_p U \end{aligned} \quad (9)$$

위 식들에서 외부입력을 나타내는  $r$ 은 일정하다고 했을 때  $\dot{r}$ 와  $\ddot{r}$ 는 0이된다. 그러므로 식(7), (8), (9)를 오차 상태 방정식으로 나타내 보면 (10)식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -b_p \end{bmatrix} U \quad (10)$$

이제 절환 평면  $\sigma(x)$ 를 다음의 식(11)과 같이 나타내고 제어법칙의 절환이득을 선형게환(Linear Feedback)으로 잡으면 제어입력은 식(12)와 같이 표현된다.

$$\sigma(e) = C_1 * e_1 + e_2, \sigma(0) = 0 \quad (11)$$

$$U = -L \cdot e \quad (12)$$

여기서  $L$ 은  $[L_1 \ L_2]$ 로  $1 \times 2$  행렬이다.

제어 입력  $U_{eq}$ 를 다음의 식 (13)과 같이 정의하자.

$$U_{eq} = -L \cdot e \quad (13)$$

슬라이딩 모드의 존재 조건식은 식(14)와 같다.

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} \sigma(x) \dot{\sigma}(x) < 0 \quad (14)$$

식(13)을 (10)식에 대입하고 (11)식으로 정리하여 슬라이딩 모드 존재 조건식 (14)가 만족되도록 하면 (15)식과 같이 나타낼 수 있다. 이렇게해서 가변 구조 제어기는 식 (15)를 만족시키는  $e$ 와  $U_{eq}$ 의 값을 선정하는 문제로 귀납된다.

$$\sigma(e) \dot{\sigma}(e) = \sigma(e) [CAe + CB(-Le)] < 0 \quad (15)$$

식 (15)의 조건을 만족하는 제어 이득,  $L_1, L_2$ 의 조건을 구해 보면 다음의 식 (16)과 같다.

$$L_1 < 0 \quad \text{if } \sigma(e)e_1 > 0$$

$$L_1 > 0 \quad \text{if } \sigma(e)e_1 < 0$$

$$L_2 < \frac{a-c_1}{b} \quad \text{if } \sigma(e)e_2 > 0 \quad (16)$$

$$L_2 > \frac{a-c_1}{b} \quad \text{if } \sigma(e)e_2 < 0$$

여기서는,  $L_1, L_2$ 의 값을 5와 -5로 각각 선정 하였다.

### 3.4 시뮬레이션 및 결과 고찰

이상과 같이 설계된 비례-미분 제어기, 퍼지 논리 제어기, 가변 구조 제어기의 성능 분석 및 설계 타당성을 분석하기 위해서 전산 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 전달함수의 구성도는 앞의 Fig. 3과 같고 설계 사양은 Table 1에 주어졌으며 시뮬레이션 흐름도는 Fig. 4와 같다. 프로그래밍에 사용한 언어는 MS-C이며 PC-486에서 시뮬레이션 하였다. Fig. 5,6은 명령값을 0도에서 14도로 주었을 경우 타각과 제어 입력을 도시한 것이다. 시뮬레이션 결과 수중 운동체 성능에 중요한 영향을 끼치는 응답 시간과 위치 제어 정확도가 모두 만족됨을 알 수 있다.

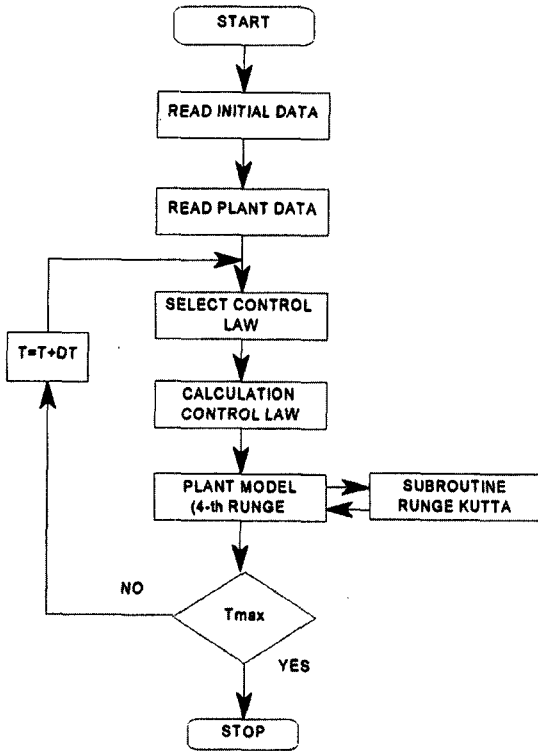


Fig. 4 Flow Chart of Simulation Program

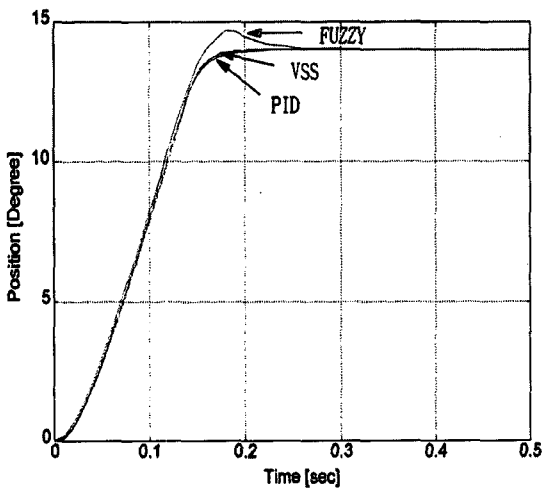


Fig. 5 Simulation Results(Position)

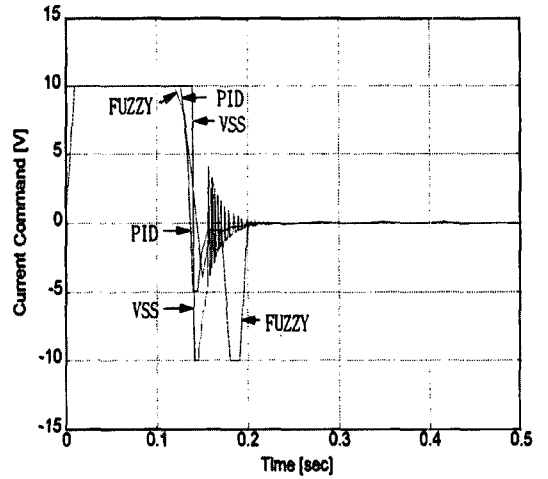


Fig. 6 Simulation Results(Control U)

#### 4. 실시간 구현 및 유도제어 HILS 시험

3장에서 소프트웨어적으로 설계된 구동제어 알고리즘을 실제로 하드웨어로 구현하여 목표한 구동장치의 성능이 달성되는지를 부하 시뮬레이터(Load Simulator)를 이용하여 자체 시험을 실시하였다. 아울러 각 구동제어 알고리즘에 따른 유도 제어 시스템 성능을 발사부터 주행 종료까지의 전 구간에 대해 유도제어 HILS 시험을 통하여 실제 상황과 거의 유사한 환경하에서 정밀 분석하였다.

##### 4.1 실시간 구현 및 단독 시험<sup>(8)</sup>

앞서 제안된 제어 알고리즘을 Intel 8797 16비트 마이크로 프로세서를 사용하여 서어보 제어기(구동장치 제어기)로 실시간 구현하였다. 서어보 제어기는 하드웨어 측면에서 크게 중앙 연산 처리부, 자체 진단부, 그리고 전력 증폭부로 나뉜다. 중앙 연산 처리부는 제어 알고리즘을 계산하고 수중 운동체의 항법 및 조종 장치를 포함하고 있는 유도 제어부, 해상시험시 시험 결과를 저장하여 분석하기 위한 주행 기록 컴퓨터, 그리고 정비 장비와의 통신을 위한 기능들을 포함하고 있다. Intel 8797BH는 시스템 클럭 12 (MHz), 원 스테이트 타임(One State Time) 4 (MHz)이므로 50 (msec)마다 위치 명령을 받고 10 (msec)마다 제어 알고리즘을 수행하기에 충분하다. 또한 8797BH는 내부에 8 (Kbyte)의 EPROM과 232바이트(BYTE)의 레지스터를 내장하고 있으므로 별

도의 외부 메모리는 사용하지 않았으며, A/D 컨버터 역시 내장된 8채널 10bit 짜리를 사용함으로써 보드의 크기를 줄였다. 계산된 제어 명령은 4채널 12비트(bit)의 D/A 컨버트 Hs9342를 통하여 전력 증폭부에 인가 된다.

자체 진단부는 초기 전원이 인가되었을때, 또는 정비포트를 통하여 요구가 들어올때 구동장치의 각 부분의 상태를 판단하기 위한 회로들과 H-브릿지(BRIDGE)회로를 구성하는 전계 효과 트랜지스트(FET)에 인가되는 게이트(GATE)전압을 만드는 회로로 구성된다.

전력 증폭부는 모터를 구동하기 위해 전계 효과 트랜지스트로 구성되는 H-브릿지(BRIDGE)회로와 PWM IC인 UC1637, 그리고 전류 제한을 위한 LEM사의 전류 센서 LF50P와 리미터 스위치를 썼을때 명령을 반대로 내주어 구동기의 파손을 방지하는 회로로 구성된다.

서버보 제어기의 소프트웨어는 어셈블러 언어로 자기

진단(SELF TEST)루틴, 제어알고리즘 루틴, 그리고 통신 루틴으로 이루어진다. 자기 진단 루틴은 각 통신 채널의 루프 백(LOOP BACK)시험과 A/D, D/A 컨버터 시험, 그리고 PWM출력과 게이트 드라이브 파워어(GATE DRIVE POWER)출력을 시험하는 루틴들로 구성하였다. 이 루틴들은 최초 전원이 투입되면 먼저 수행되어 시스템 이상 유무의 결과를 가지고 있다가 유도제어 컴퓨터로부터 요구가 오면 이 결과를 전송하여 구동장치의 이상여부를 판단할 수 있도록 한다. 통신 루틴은 서버보 제어기가 듀얼 포트 메모리(DUAL PORT MEMORY)와 외부 인터럽트를 이용하여 유도제어 컴퓨터와 통신을 하며, 내장된 통신기능을 이용하여 주행 기록 컴퓨터와 통신을 수행하도록 구성하였다. 제어 알고리즘 루틴은 유도제어 컴퓨터의 명령에 빨리 추종할 수 있도록 위치 센서와 속도 센서의 출력을 되먹임 받아 적절한 전류명령을 만들어 주는 루틴이다. Fig. 7은 이 루틴의 순서도이다.

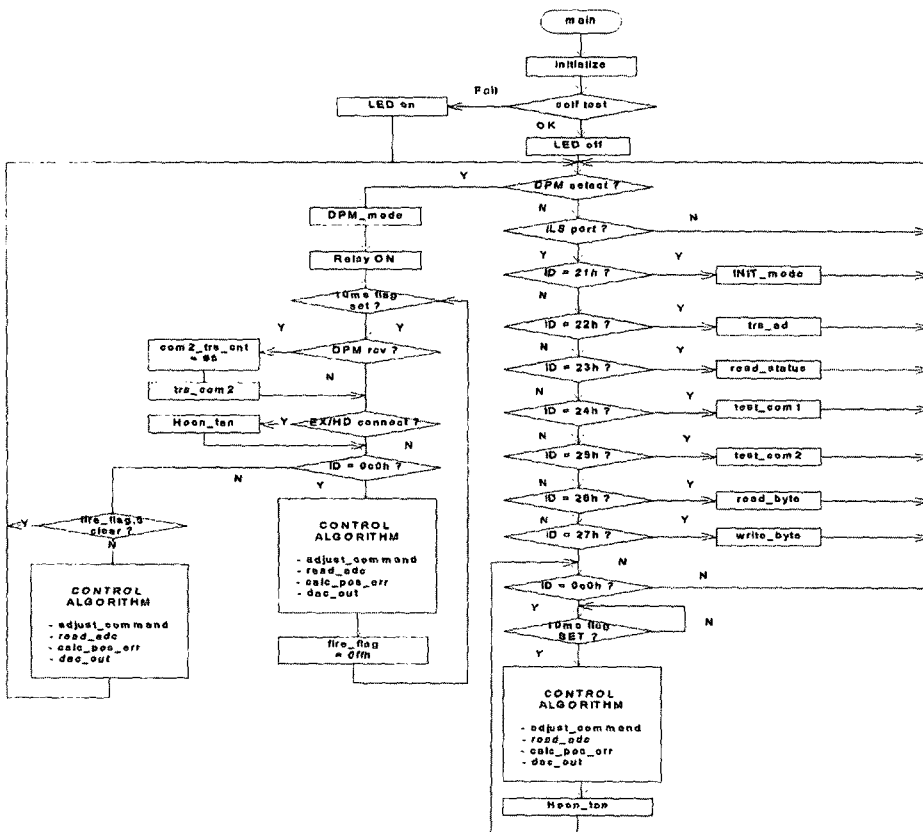
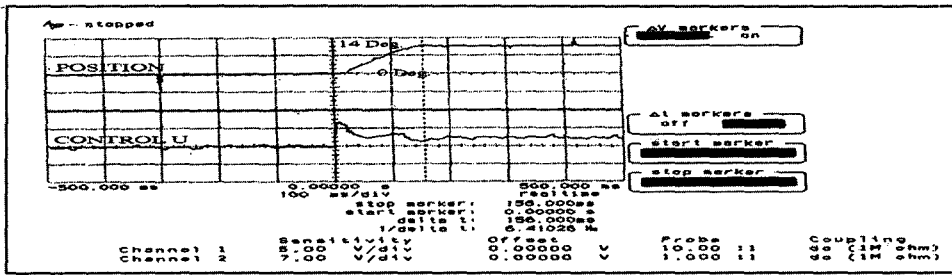
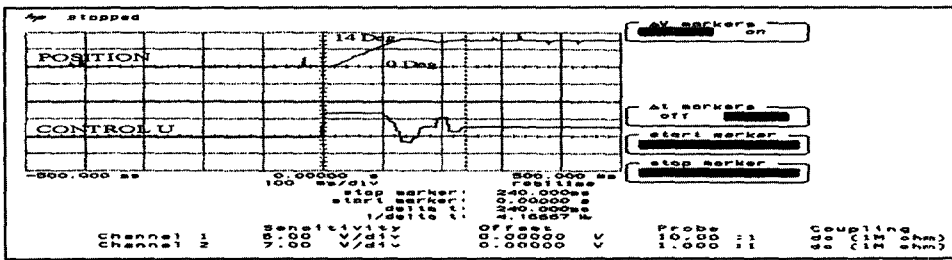


Fig. 7 Control Algorithms Routine

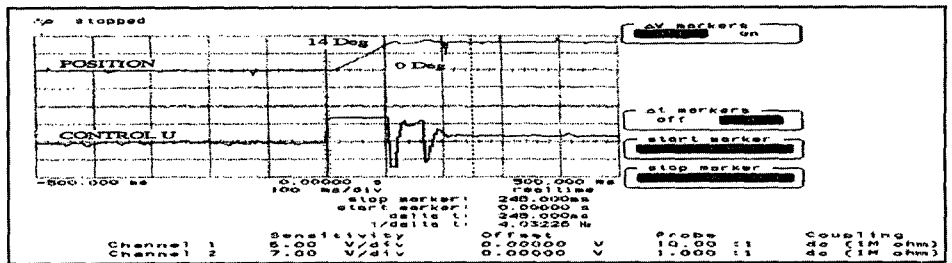




(a) P-D Controller



(b) Fuzzy Logic Controller



(c) Variable Structure Controller

Fig. 8 Experiment results

유도제어 컴퓨터로부터 명령이 왔을때와 정비포트로부터 명령이 왔을때 명령의 종류를 판단하고 이에 따른 적절한 동작을 수행하기 위한 루틴들로 구성되어있다.

구동장치 단독 시험은 서버보 제어기의 정비 포트로 PC-486으로 타각 명령을 주어 이 명령대로 구동기가 정확히 동작하는 지를 확인하여 Table 1의 설계 사양 만족 여부를 검증하였으며 시험 결과는 Fig. 8과 같다. 시험에 사용된 Load Simulator는 2.3절에서 모델링된 부하를 시뮬레이션해주는 장치인데 이 장치는 14도 일때 최고 400 (lb-in)의 부하가 걸리도록 되어있다. Fig. 8의 단독 시험 결과는 부하인가시 응답 속도와 정상 상태의 오

차가 Table 1의 설계 사양을 공히 잘 만족한다는 것을 보여주고 있다.

#### 4.2 유도제어 HILS 시스템 구성 및 시험<sup>(9)</sup>

하나의 유도 무기 체계를 개발하기 위해서는 크게 설계, 시뮬레이션, 그리고 제작의 3가지 과정을 거치게 되며 제작이 완료된 후 시스템의 성능을 점검하기 위해서는 몇개로 나누어지는 부시스템을 각각의 단독 성능 시험을 실시한 후 각 부시스템을 연결하여 시스템 전체에 대한 하드웨어 점검 및 유도 무기의 실질적인 성능을 점검해야 하는데 여기에는 HILS(Hardware In the Loop Simu-

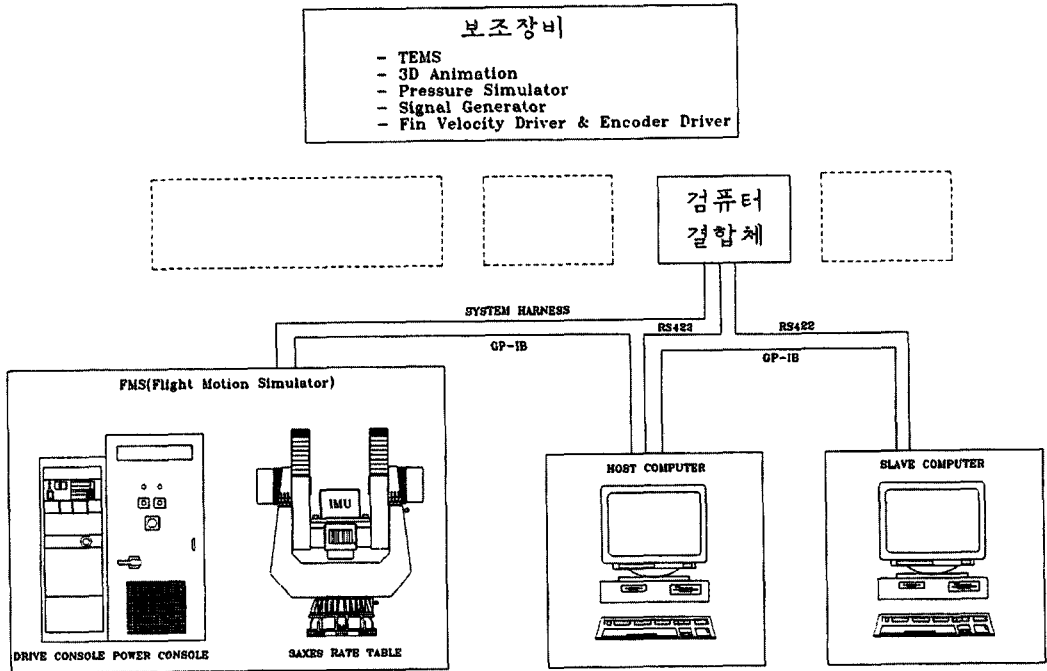


Fig. 9 Block Diagram of G/C HILS

lation)의 도입이 필수적이다. 따라서 설계 및 단독 성능 시험을 마친 구동장치의 수중 운동체 전체에 미치는 영향을 분석하기 위해 유도 제어 HILS를 통한 구동 장치의 체계 연동 시험이 필수적이다. Fig. 9는 유도 제어 HILS의 구성도이며 Fig. 10은 수중운동체의 페루프 구성도이다. 타의 움직임을 주전산기가 읽어 들이고 이 정보를 이용하여 6자유도 운동 방정식을 푼다. 그리고 이 결과를 이용하여 3축 비행 운동 재현기(Flight Motion Simulator)를 구동하여 수중 항법 장치에 운동을 만들어 준다. 수중 항법 장치의 항법값은 유도 제어 컴퓨터에 인가되어 구동장치 서어보 제어기에 타각 명령을 만들어 준다. 타각은 타각 감지 장치에서 주전산기로 주어지게 된다. 유도제어 HILS 시험에는 수중운동체의 유도 제어 성능에 큰 영향을 미치는 모든 하드웨어, 감지기 및 소프트웨어를 포함하고 있으며, 실제 수중운동체의 운용 상황 및 환경 조건을 최대한 유사하게 시뮬레이션 할수 있도록 하였다. 자이로(Gyro)와 가속도계로 구성된 관성측정장치를 사용하여 실제 운동 상황에서의 운동 오차 발생값을 운동제어 알고리즘 및 디지털 프로세스로 구현된 하드웨어의 현실성 점검에 직접 입력되게 하였다.

유도 제어 성능에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 관성 측정장치의 바이어스 오차(Day to Day Repeatability)와 편류 오차(Random Drift)등의 디지털 프로세스의 시간 지연항이다. 이들중 건실-안정 성능면에 큰 영향을 주는 것이 디지털 프로세스의 계산 주기(Time Frame)와 관성측정장치의 바이어스 오차이며 이러한 오차항은 강한 비선형 성질로 인해 설계시는 대략적인 반영만 가능하므로 하드웨어로 구현후 반드시 HILS등의 방법으로 실제 하드웨어 운용상에서 성능 점검을 하여야 한다.

구동장치의 HILS 상에서의 검증을 통하여 체계 연동시 발생하는 문제점들을 도출하고 해결하기위해 설정 심도 20m, 200m 직진 주행후 800m의 사형 탐색을 통하여도 표적을 찾지 못했을 경우 원형 탐색을 하는 시나리오를 설정하여 구동장치 HILS를 수행하였으며 유도 궤적 및 주요 상태 변수들을 Fig. 11,12,13,14로 그 결과를 정리하였다. 여기서 Fig. 11은 각 구동 제어 알고리즘에 따른 수평면 궤적을 나타내었으며, Fig. 12는 그 궤적에 따른 오일러각에 대한 출력이며, Fig. 13는 그때의 각속도 상태값을 그린 것이다. Fig.14는 앞의 Fig. 11,12,13에서 나타난 상태 변수값에 대응하는 입력값으

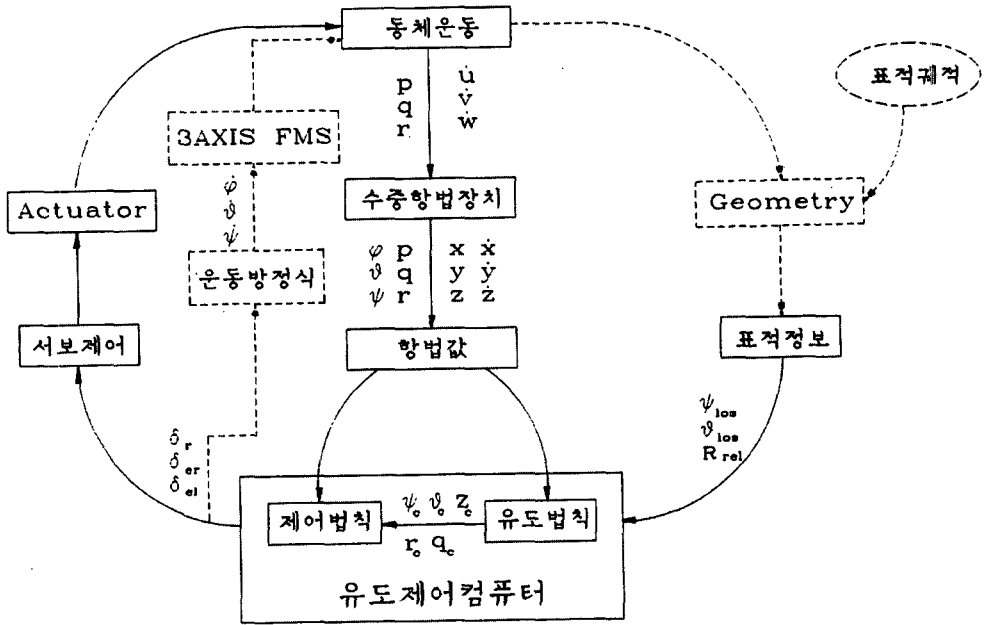


Fig. 10 Underwater Vehicle Close Loop Block Diagram

로 구동장치에 의해 작동하는 제어판(Control Surface)의 위치값을 나타낸 것이다.

#### 4.3 유도제어 HILS 시험 결과 분석

Fig. 8의 단독 시험 결과에서 구현된 세가지 알고리즘 모두가 Table 1의 설계 사양을 만족함을 알 수 있었다. 이와같이 단독 시험이 설계사양을 만족할 경우 기존의 구동장치 개발과정에서는 더 이상의 최적화 방안이 없었다. 그러나 단독적인 설계사양을 만족하는 경우에 있어서도 구동장치가 포함된 실제 유도 제어 폐루프(Close Loop)상에서의 운용 전구간 성능은 Fig. 11~14에서 나타난 바와같이 각 알고리즘에 따라 큰 차이를 나타낸다.

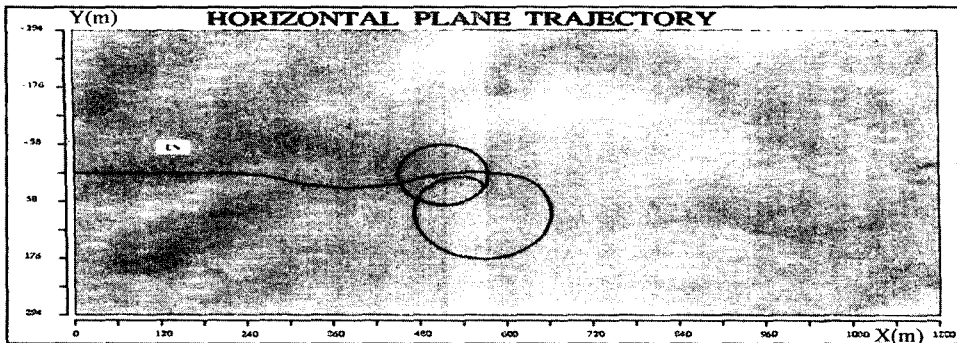
Fig. 11은 중기유도(Midcourse Guidance)와 탐색단계(Search Phase)의 궤적을 나타낸 것인데 가변 구조 제어 알고리즘의 경우 롤 제어 측면에서 과도한 진동((xx))으로 인해 제어 안정성은 파괴되지 않았으나 과도한 기동이 발생하는 탐색단계에서는 유도 명령값대로 제어하지 못함으로써 임무를 달성하지 못함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 Fig. 11의 각 유도 궤적에 따른 자세각 출

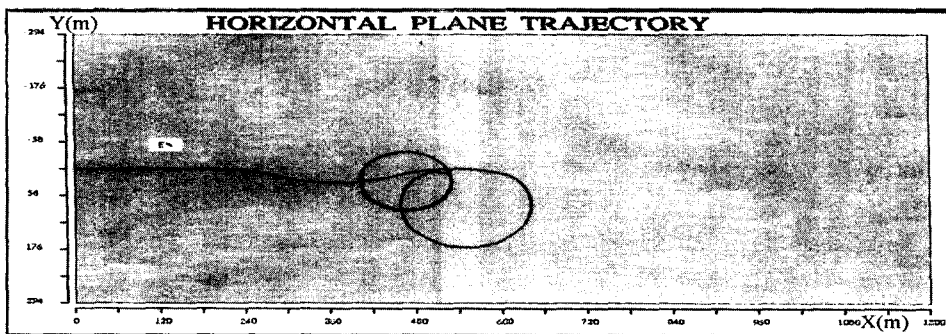
력을 나타낸 것으로 비례-미분(P-D)과 퍼지 로직 구동제어 알고리즘 모두 설계 목표는 만족하나 수중운동체의 안정성 판단의 중요 척도인 롤 제어 성능에서 비례-미분(PD) 제어 알고리즘을 채택하는 것이 유리함을 알 수 있다. Fig. 13은 자세각 변화율을 나타낸 것으로서 제어 성능 측면에서 롤 변화율이 작은 비례-미분(P-D)제어 알고리즘이 유리함은 물론 시스템 전체 유도 제어 측면에서 탐색기(Seeker)가 수중운동체의 앞부분에 고정 부착 방식(Strap-down Type)으로 되어 있으므로 롤 변화율이 최소화 되는 것이 중요하다. Fig. 14는 제어판의 위치를 기록한 것으로서 최소제어력(Minimum Control Effort) 사용 측면에서 비례-미분(P-D), 퍼지로직, 가변 구조 제어 알고리즘 순으로 유리함을 알 수 있었다.

여기서 위의 결과 분석에 관해 몇가지 언급하고자 한다.

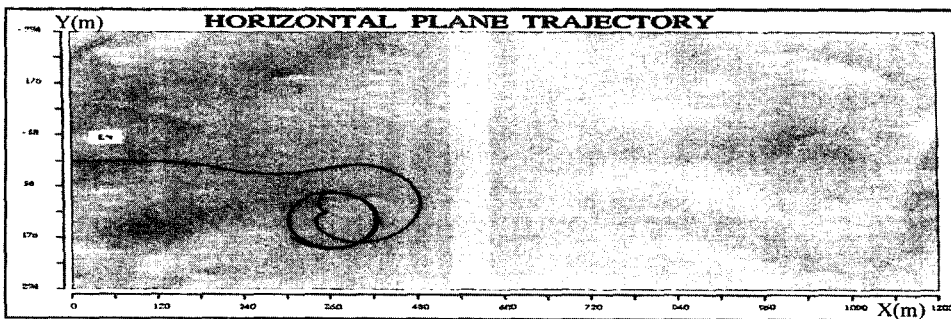
첫째로 이 논문에서 제시한 HILS 시험 결과 비례-미분(P-D) 구동제어 알고리즘이 가장 유리하였다는 것은 필자가 개발한 수중운동체의 경우에 한정한다는 사실이다. 이것은 또한 자이로(Gyro) 등의 감지기의 오차 특성과 디지털 제어 프로세스의 종류가 달라지면 결과는 바뀔수 있다는 것을 의미한다. 그러므로 본 논문에서 제시하고자 하는 것은 일반적



(a) PD Control Algorithm



(b) Fuzzy Logic Control Algorithm



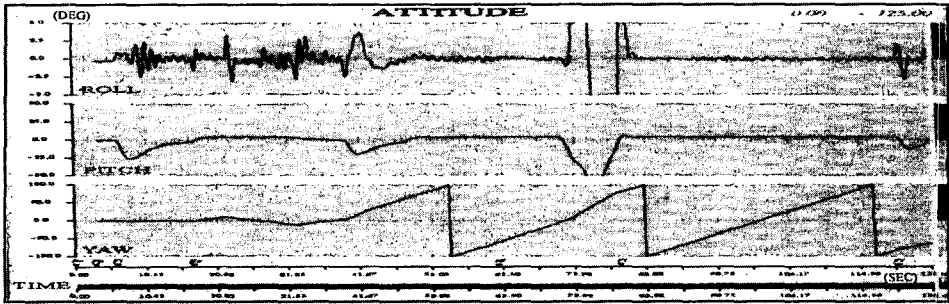
(c) Variable Structure Control Algorithm

Fig. 11 Horizontal Plane Trajectory according to each Algorithm.

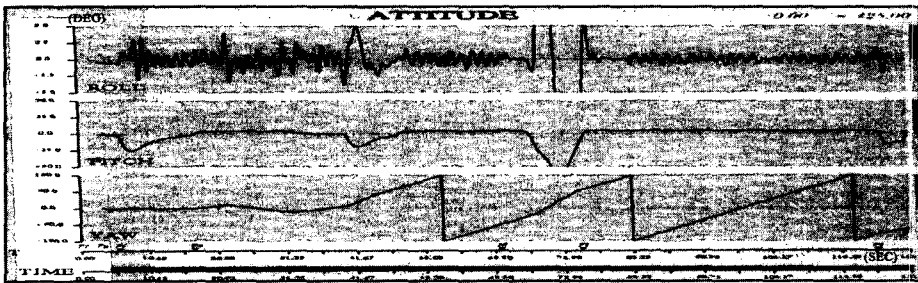
으로 유도제어 알고리즘을 개발할때 유도 알고리즘, 제어 알고리즘 및 구동제어 알고리즘을 분리하여 설계하며 각각의 하드웨어 역시 따로 설계 제작하는 것은 물론 구동장치의 경우 단독 시험만으로 개발과정을 끝내는 것이 전체 시스템의 최적 성능 증대 측면에서 부족하므로 유도제어 HILS시험이라는 구동제어 알고리즘 성능 평가의 새로운 방법론을 적용하였다.

둘째로 구동제어 알고리즘 각각의 이득 조정(Gain Tuning)을 통해 얼마간의 전체 성능이 변할수 있음을 인정하며 이 논문에서 사용한 이득은 단독적인 하드웨어 성능 시험에서 가장 좋은 성능을 보여줄 때의 조정값(Tuning Value)을 기준으로 정했다는 사실이다.

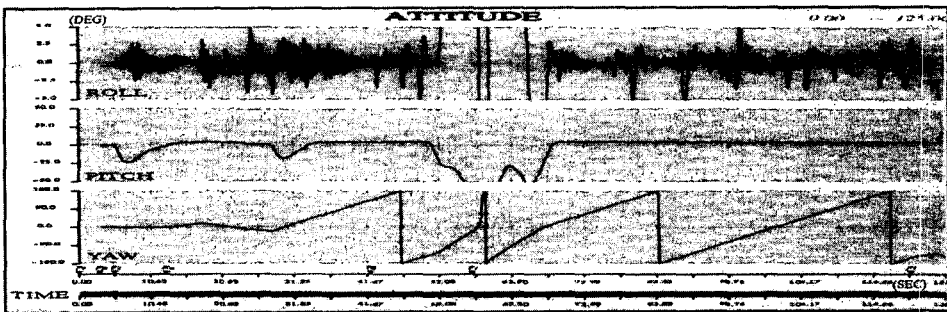
마지막으로 비례-미분(P-D) 제어 알고리즘으로 수중운동체의 전체 시스템을 사용하여 실제 수중에서 심수회에 걸쳐



(a) PD Control Algorithm



(b) Fuzzy Logic Control Algorithm



(c) Variable Structure Control Algorithm

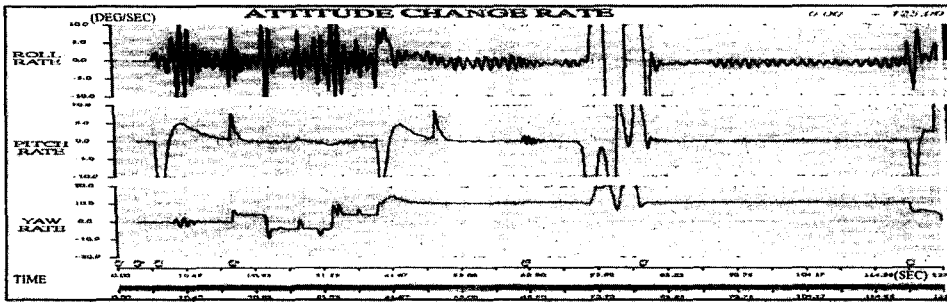
Fig. 12 Euler Angle according to each Algorithm

주행 운용 시험을 실시하였으며 그 결과 유도 제어 HILS 시험에서의 거의 유사한 성능의 결과를 얻었음을 밝힌다.

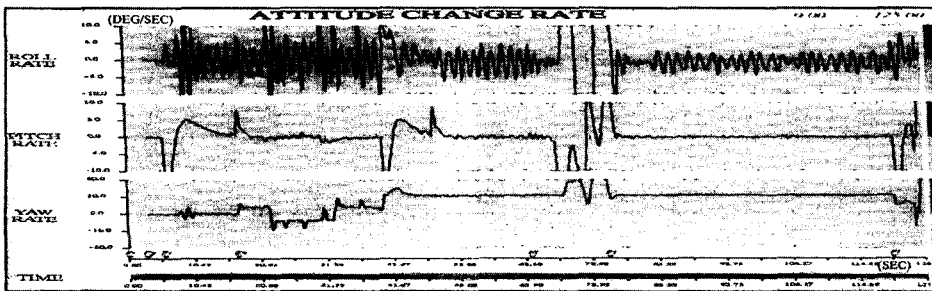
### 5. 결론

본 연구에서는 수중운동체의 구동장치 개발에 관해 요구 사양 분석 및 모델링, 제어 알고리즘 설계, 실시간 구현, 단독 시험 및 유도제어 HILS시험의 전 단계에 대해 기술하였

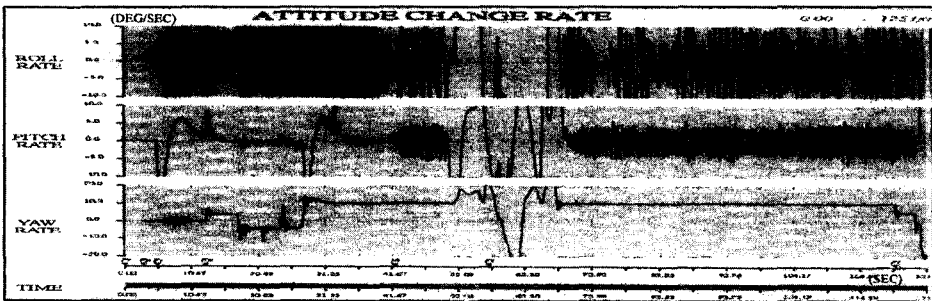
다. 구동제어 알고리즘으로 비례-미분(P-D), 퍼지 논리 및 가변 구조 제어 이론을 적용하여 모두 목표 설계 사양을 만족함을 부하 시뮬레이터를 이용한 단독시험으로 입증하였다. 또한 수중운동체의 유도 제어의 전체 성능 점검 측면에서 구동제어 알고리즘의 최적 선택 방안으로서 유도제어 HILS 시험 기법을 제안하였다. 제안된 유도제어 HILS시험에서는 구동장치와 연관된 모든 부시스템을 포함함으로써 소프트웨어 시뮬레이션 및 단독 시험으로는 점검할 수 없는



(a) PD Control Algorithm



(b) Fuzzy Logic Control Algorithm



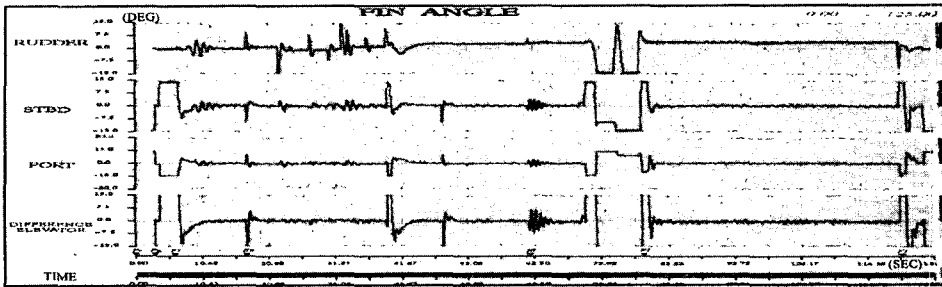
(c) Variable Structure Control Algorithm

Fig. 13 Angular Rate according to each Algorithms

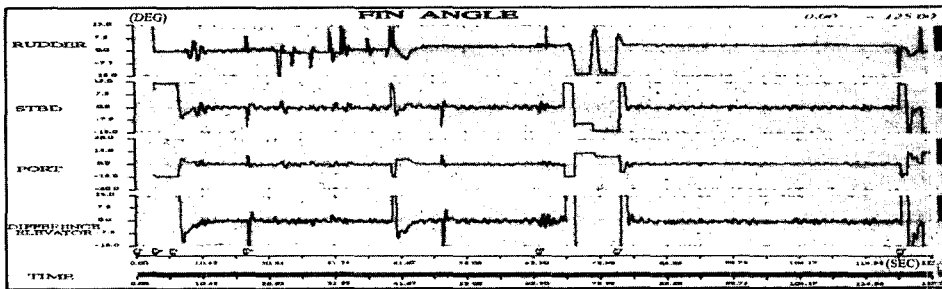
실제적인 성능 점점을 가능케한다. 이 결과 개발 대상인 수중운동체의 구동제어 알고리즘으로서 가변 구조 제어기는 단독 시험은 만족하였으나 전체 유도 제어 페루프 상에서는 부적절한 것으로 판명되었는데 이것은 경계층 설정이나 유도 제어 HILS 재구성 등의 추후 연구를 통하여 해결해야할 과제로 사료 된다.

### 참 고 문 헌

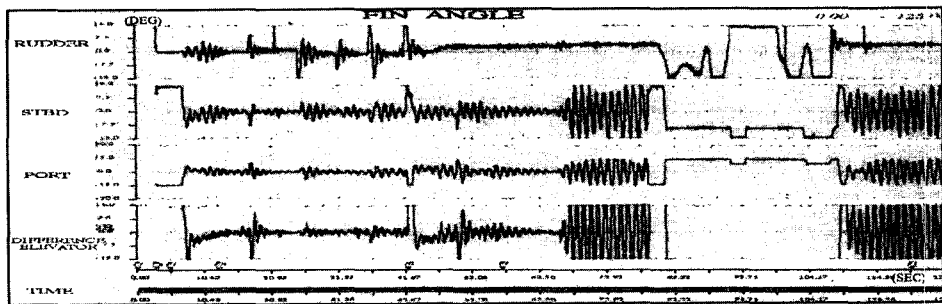
1. 문익준, "유도무기 체계 구동장치의 기술 현황," 제1차 유도무기 유도조종 학술대회 논문집, pp.72~96, 1991.
2. M.M.A. Pourzanjani, Modelling and Control of Marine Craft, Elsevier Applied Science, 1991.
3. 조현진, 양승윤, 최중락, 이동권, "퍼지 제어를 이용한



(a) PD Control Algorithm



(b) Fuzzy Logic Control Algorithm



(c) Variable Structure Control Algorithm

Fig. 14 Fin Position according to each Algorithm

- 수중 운동체의 구동장치 설계," '91 한국자동제어학술회의 논문집(I), pp.616~619, 1991.
4. Yasuhiko Dote, Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors, Prentice Hall, 1990.
5. K.T.Parker, "Design of Proportional-Integral-Derivative Controllers by the use of optimal-linear-regulator theory," Proc. IEEE, Vol. 119, NO.7. 1972.
6. U.Itkis, Control Systems of Variable Structure, Halsted Press Book, 1976.
7. E.H.Mamdani, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of a Simple Dynamic Plant," Proc. IEEE, Vol.121, pp.1585~1588, 1974.
8. Embedded Controller Applications Handbook, Intel Corp, 1991.
9. 이원, 김삼수, 이재명, 박홍배, "수중 물수체의 제어

- HILS 기법 및 데이터 분석," '94 한국자동제어학술회의 논문집(I), pp.639~643, 1994.
10. Willium M.Humphrey, Introduction to Servo-mechanism System Design, Prentice Hall, 1973.
  11. 공인영, 강창구, 이창민, "타 단독 특성의 이론적 해석," 대한조선학학회 논문집 제 29권 1호, pp.29~42, 1992.
  12. 공인영, 강창구, 작은 가로-세로비를 갖는 제어판 토  
오크 특성 연구, 한국기계연구원 선박, 해양 공학연구센터, 국방과학연구소 위탁결과 보고서, 1993.
  13. Y.F.Li, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE Control Systems Magazine, April, 1989.
  14. George J.Klir, Fuzzy Sets, Uncertainty and, Information, Prentice Hall, 1988.
  15. Vadim I. Utkin, Sliding Modes in Control Optimization, Springer-Verlag, 1992.