

수중운동체의 유체계수 추정에 관한 연구

A Study on the Hydrodynamic Coefficients Estimation of an Underwater Vehicle

양승윤, 이만형
(Seung Yun Yang and Man Hyung Lee)

Abstract : The hydrodynamic coefficients estimation (HCE) is important to design the autopilot and to predict the maneuverability of an underwater vehicle. In this paper, a system identification is proposed for an HCE of an underwater vehicle. First, we attempt to design the HCE algorithm which is insensitive to initial conditions and has good convergence, and which enables the estimation of the coefficients by using the measured displacements only. Second, the sensor and measurement system which gauges the data from the full scale trials is constructed and the data smoothing algorithm is also designed to filter the noise due to irregular fluid flow without changing the data characteristics itself. Lastly the hydrodynamic coefficients are estimated by applying the measured data of full scale trials to the developed algorithm, and the estimated coefficients are verified by full scale trials.

Keywords : underwater vehicle, hydrodynamic coefficient, system identification, Newton Raphson method, steepest descent method

I. 서론

수중운동체의 유체계수(Hydrodynamic Coefficients)는 수중에서 운동특성을 결정짓고 유체동력학적 거동을 나타내는 그 운동체의 고유한 계수 값으로서, 자동조종 시스템 제어 성능 향상, 기동성 예측 및 분석, 실선의 위험성 예측 및 안전운항 대책수립, 조종훈련장비의 리얼리즘(Realism) 향상에 매우 중요하다. 일반적으로 유체계수를 식별하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째 방법으로는 물리적 법칙을 이용한 해석적 방법이고, 또 다른 방법은 실험 측정치를 이용한 실험적 방법이다. 해석적인 방법은 수중운동체의 조종 시에 작용하는 복잡한 인자들로 인하여 현존 이론으로는 점성유동(Viscous Flow)에 기인되는 선형 및 회전운동의 속도성분 계수는 계산 량이 너무 방대하여 얻기 힘들고, 포텐셜유동(Potential Flow)에서 기인되는 가속도 계수 도출에 주로 활용하고 있다[1]. 실험적 방법으로는 PMM(Planar Motion Mechanism), 회전 암(Rotating Arm) 등을 이용한 모형시험이 있다. 현재까지 구축모형 시험법은 상당히 발전되어 왔으나 아직도 이 시험으로 연성계수와 비선형계수 등과 같은 추정이 곤란한 계수들이 있으며, 척도 효과(Scale Effect)의 보상이 어려운 실정이다[1]. 이상과 같은 유체계수 추정 방법들의 단점을 보완하며 실질적인 유체계수를 도출하기 위한 기법이 자유운항 모형시험이나 실선시험 등을 통한 측정치와 추정이론을 이용하는 시스템 식별법(System Identification)이다. 이 방법을 이용하여 수중운동체의 유체계수를 식별하기 위해서는 시스템에 적합한 모델 구조 선정, 유체계수 추정 알고리즘, 시스템을 자극하기 위한 제어입력, 시스템의 출력데이터 측정을 위한 계측센서 및 필터링 기법 등과 같은 요소들이 필요하다. 모델구조는 수중운동체의 주요 변수들(위치, 속도, 가속도, 오일러 각성분 및 변화율, 제어편각 등)에 대한 테일러 급수(Taylor Series)로 전개된 식에서 중요한 항들을 적절히 선택하여 모델구조를 정하고[2], 여기에 광범위한 모형시험으로부터 얻어지는 데이터 베이스(Data Base)에서의 경험식을 테일러 전개식에 적절히 대치해 넣음으로써 비선형 미분방정식 즉 모델구조를 결정한다[3]. 유체계수 추정이론으로는 최소자승법, 최대공산추정법 및 확장칼만필터 등이 이용되고 있다. 최소자승

법은 컴퓨터 계산은 비교적 간단하나 플랜트의 잡음이 클 경우 추정치가 발산하거나 표준편차가 커지게 된다[4]. 최대공산추정법은 조종시험에서와 동일한 입력을 모델에 인가하였을 때 조종시험으로부터 얻은 출력이 나올 확률을 최대화시키는 계수를 추정하는 방법으로서 측정보차나 플랜트 잡음이 있는 경우에도 편향되지 않은 추정치를 얻을 수 있으나, 계산 량이 방대하여 주로 Off Line 적용으로 제한되고 있다[4]. 확장칼만필터를 이용한 계수추정법은 상태변수에 미지의 유체계수를 포함한 새로운 상태변수식을 확장칼만필터에 적용하여 계수를 추정하는 방법이다. 이 방법은 시스템의 통계학적 모델링이 가능하고 최소의 컴퓨터 계산시간으로 편향되지 않는 추정치를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 시스템 모델링이 부적절하거나 초기치 설정이 잘못됐을 경우 발산 위험이 있다[4]. 시스템 자극을 위한 제어입력 설계는 시스템의 식별가능성을 증가시킬 뿐만 아니라 정확한 유체계수의 추정을 위해서도 매우 중요하다. Chen[5]과 Mehra[6]는 상태방정식이 선형인 경우에 대하여 최적의 입력을 일정한 크기에 반대 부호를 가지는 뱅뱅(Bang-Bang) 형태로 설계하였다. 끝으로 시스템 출력의 측정을 위한 계측센서는 운동체에 고정된 축을 따라서 가속도를 측정하는 선형 가속도계, 각속도를 측정하는 각속도계, 각속도를 측정하는 레이트 자이로(Rate Gyro), 종동요와 횡동요 각을 측정하는 수직 자이로 및 방향각을 측정하는 수평 자이로 등으로 구성된다. 또한 이들 센서뿐만 아니라 운동체의 속도센서, 타각감지장치 등이 주로 사용된다[7]. 전체적인 시스템 식별 흐름도는 그림 1과 같다.

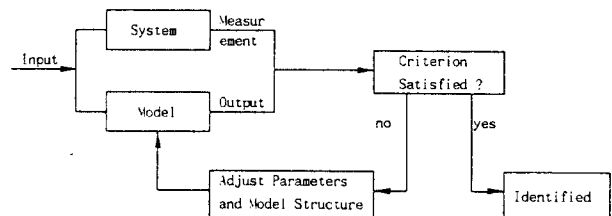


그림 1. 시스템 식별 흐름도.

Fig. 1. Flow Chart of System Identification.

현재 유체계수 식별에 관한 국내 연구현황으로는 구축모형 시험인 PMM 시험이 주로 이용되고 있고, 시스템 식별법을

이용한 계수추정은 공력계수(Aerodynamic Coefficients) 추정에는 적용되고 있으나 유체계수 추정에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 수중운동체의 유체계수를 식별하기 위하여 모델은 미해군 연구소에서 개발한 6자유도 운동방정식 [8]을 이용하여 운동 모델구조를 결정하였다. 계수추정 알고리즘은 출력 측정값과 모델 출력값의 차이인 오차로 정의되는 목적함수를 최소화되게 하는 방법으로 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson Method)과 최대경사법(Steepest Descent Method)을 이용하여 구성하였다. 시스템의 자극을 위한 제어입력은 수중운동체의 선미타 제어편각을 입력으로 하여 연직면에서의 지그재그(Zig-Zag) 운동이 되도록 인가하였으며, 이때 측정되는 시스템 출력은 속도계에서의 수중운동체 전진방향 속도, 자이로에서의 자세각, 심도계에서의 심도이다. 측정된 데이터는 DAS(Data Acquisition System)에 일괄 저장하고, 측정잡음은 FFT(Fast Fourier Transform)를 활용한 필터링기법을 이용하여 제거하였다. 본 논문의 구성은 I 장 서론에 이어 II 장에서는 수중운동체의 운동 및 유체계수 추정을 설명하였다. III 장에서는 시스템 식별법의 실선 적용과 실험적 검증결과를 나타내었으며, IV 장에서는 본 연구의 결론과 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

II. 수중운동체 운동 및 유체계수 추정

이 장에서는 시스템 식별을 위한 수중운동체의 운동방정식, 유체계수의 무차원화, 계수추정 기법 및 측정데이터 잡음제거를 위한 필터링 방법에 대해서 설명한다.

1. 수중운동체의 운동방정식

운동방정식은 Abkowitz가 체계적으로 정리한 방법인 테일러(Taylor) 급수를 이용하여 표기하는 방식[2]을 기초로 하고 각 항들을 동력학이론과 모순되지 않도록 또한 수중운동체의 특성과 맞도록 변형하여 사용하는 방법을 따른다. 수중운동체의 운동을 완전히 묘사하기 위해서는 6자유도 비선형 운동방정식이 필요하다. 이 방정식은 뉴턴의 제 2운동법칙에서 유도된다. 즉, 운동체에 작용하는 모든 외력의 합은 운동체 운동량의 변화량과 같아야 하고, 운동체에 작용하는 외부 모멘트의 합은 각운동량의 변화량과 같아야 한다. 여기서 수중운동체에 작용하는 힘 F와 모멘트 M의 관계식은 다음과 같다.

(1)에서 상태변수 X 및 입력 U에 대한 정의는 다음과 같다.

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

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

$$U = [\delta s, \delta b, \delta r]^T$$

여기서,

$x, y, z, u, v, w, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$: x,y,z축을 따른 병진운동 변위, 속도, 가속도 성분, $\phi, \theta, \psi, p, q, r, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$: x,y,z축에 대한 회전운동 변위, 속도, 가속도 성분, $\delta s, \delta b, \delta r$: 수중운동체의 선미, 선수, 방향타각이다. (1)을 X 및 U에 대하여 테일러 급수로 전개하면 (3)과 같이 된다.

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

이 물리적 법칙은 6자유도를 가지는 수중운동체에 대하여 12개의 상태변수를 사용하여 아래와 같이 비선형 미분방정식으로 간략히 나타낼 수 있다

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) \\ + z_G(pr + \dot{q})] &= \Sigma X \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) \\ + x_G(qp + \dot{r})] &= \Sigma Y \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) \\ + y_G(rq + \dot{p})] &= \Sigma Z \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} \\ + (pr - \dot{q})I_{xy} &= \Sigma K \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} \\ + (qp - \dot{r})I_{yz} &= \Sigma M \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} \\ + (rq - \dot{p})I_{zx} &= \Sigma N \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식에서 $\Sigma X, \Sigma Y$ 및 ΣZ 는 운동체에 작용하는 힘벡터의 각 방향성분을, 그리고 $\Sigma K, \Sigma M$ 및 ΣN 는 운동체에 작용하는 모멘트벡터의 각 방향성분을 나타내는 것으로서 이 항들은 유체 역학적인 항, 부력과 중력에 의한 항, 프로펠러에 기인하는 항 등으로 구성되어 있다. 본 연구결과의 주요 적용목적인 수중운동체의 자동심도 제어기 설계를 위하여 6자유도 운동방정식에서 동체좌표계의 원점을 중력중심에 설정하고, 동체좌표축을 운동체의 관성주축으로, 또한 수중운동체가 연직면에 대하여 기하학적 대칭이고, 횡동요가 작다 또한 전진방향의 속도는 일정하다는 가정 하에서 다음과 같은 미분방정식 형태로 연직면 2자유도 운동 즉 상하동요 방정식과 종동요 방정식은 표현이 된다.

상하동요(Heave) 방정식 :

$$\begin{aligned} m\dot{w} - umq &= \frac{1}{2} \rho l^4 Z_w \dot{q} \\ &+ \frac{1}{2} \rho l^3 (Z_w \dot{w} + Z_u uq) \\ &+ \frac{1}{2} \rho l^2 (Z_u uw + u^2 (Z_{\delta s} \delta s + Z_{\delta b} \delta b)) \end{aligned} \quad (5)$$

종동요(Pitch) 방정식 :

$$\begin{aligned} I_y \dot{q} &= \frac{1}{2} \rho l^5 M_q \dot{q} \\ &+ \frac{1}{2} \rho l^4 (M_q uq + M_w \dot{w}) \\ &+ \frac{1}{2} \rho l^3 (M_w uw + u^2 (M_{\delta s} \delta s + M_{\delta b} \delta b)) + Bz_B \theta \end{aligned} \quad (6)$$

위의 상하동요와 종동요 방정식을 이용하여 상태공간 방정식으로 표현하면 (7)과 같이 표현이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{z} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & A_{24} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & A_{34} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ z \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ 0 & 0 \\ B_{31} & B_{32} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta s \\ \delta b \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $A_{11}, A_{13}, A_{24}, A_{31}, A_{33}, A_{34}, B_{11}, B_{12}, B_{31}, B_{34}$ 는 계수값이다.

2. 유체계수의 무차원화

Strom-Tejsen & Chislett 등은 무차원된 유체계수들이 상수라는 사실을 실험적으로 증명하였다[9]. 무차원화되지 않을 경우 수중운동체의 동력학적 관계를 계산하기 위해서는 유체계수들에 대한 많은 정보를 축적하고 있어야 하며, 또한 이들 시스템에 대한 식별은 매우 어렵게 된다. 이들 계수를 무차원화 함으로써 다른 수중운동체와의 비교를 가능하게 하고, 모형시험 결과로부터 실선의 동력학을 추정할 수 있게 된다. 일반적으로 특성차원 변수로는 물의 밀도 ρ , 운동체의 길이 l , 합속력 U 를 사용한다. 질량은 $1/2\rho l^3$, 길이는 l , 시간은 l/U 로 나눔으로서 모든 유체계수를 무차원화할 수 있게 된다. (5)와 (6)의 주요 계수들의 무차원화 인자

들이 표 1에 나타나 있다.

3. 수정된 최소자승법을 이용한 유체계수 추정

유체계수 추정을 위하여 사용한 수정된 최소자승법은 출력 측정값과 모델 출력값의 차이인 오차로 정의되는 목적함수를 최소화하는 방법으로 뉴턴-랩슨법과 최대경사법을 이용한 방법이다. 수중운동체의 운동방정식은 1차의 벡터방정식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = f(X, \delta s : \alpha) : t > 0 \quad (8)$$

여기서 X는 수중운동체의 상태벡터이고, δs 는 입력, α 는 유체계수 벡터를 나타낸다. 시간 t=0 에서 초기조건 $X(0)=X_0$ 라 두면 주어진 입력 $\delta s(t)$ 에 대하여 (8)의 초기치 문제에 대한 해가 구간 $[0, t_N]$ 에서 얻어질 수 있다. 이론적 컴퓨터 계산해 즉, 모델 출력값이

$$X_c = X_c(t : \alpha) ; 0 \leq t \leq t_N \quad \text{이고} \quad (9)$$

여기서 $X_c = [z, z, \dot{\theta}, \theta]^T$.

표 1. 유체계수의 무차원화 인자.

Table 1. Dimensional factors for nondimensionalizing the hydrodynamic coefficients.

유체계수	차원요소
Z'_q, M'_w	$1/2\rho l^3 U$
$Z'_\dot{q}, M'_w$	$1/2\rho l^4$
Z'_w	$1/2\rho l^2 U$
Z'_w	$1/2\rho l^3$
$Z'_{\delta s}$	$1/2\rho l^2 U^2$
$M'_{\delta s}$	$1/2\rho l^3 U^2$
M'_q	$1/2\rho l^4 U$
$M'_\dot{q}$	$1/2\rho l^5$

상태변수의 실험측정치

$$X_e = X_e(t) ; 0 \leq t \leq t_N \quad \text{이면} \quad (10)$$

여기서 $X_e = [0, z, \dot{\theta}, \theta]^T$

X_c 와 X_e 의 차이인 오차가 최소화되게 하는 α 를 찾아내는 것이 이 문제의 해가 된다. 상태변수들의 컴퓨터 계산치와 실험측정치 사이의 차이를 정의하기 위해서 다음과 같이 정의되는 목적함수를 이용한다.

$$E = \sum_{i=1}^N \phi_i^T(\alpha) A \phi_i(\alpha) \quad (11)$$

여기서, $\phi_i(\alpha) = X_c(t_i; \alpha) - X_e(t_i)$, A는 대각선 요소를 갖는 가중치 행렬

이제 최적의 계수벡터 α^* 는 (11)로부터 α 에 대한 오차함수의 미분치가 아래와 같이 0이 되어야 한다.

$$\left[\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right]_{\alpha=\alpha^*} = 0 \quad (12)$$

α 에 대하여 (11)을 미분하게 되면

$$\left[\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right] = 2 \sum_{i=1}^N J_i^T A \phi_i \quad (13)$$

여기서 $J_i = \frac{\partial \phi_i}{\partial \alpha} = \frac{\partial X_c(t_i; \alpha)}{\partial \alpha}$ 로 정의되는 자코비안 행렬 (Jacobian Matrix) 이다.

(8)에서 비선형 형태의 함수 f는 계수벡터 α 를 이용해서 (13)의 기울기 벡터 해를 정확히 구할 수가 없다. 그래서 자코비안 행렬 J_i 의 결정을 위한 보조방법이 필요하다. α 에 관한 (8)의 미분은 결국 변분문제가 된다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial X}{\partial \alpha} \right] = \left[\frac{\partial f}{\partial X} \right] \left[\frac{\partial X}{\partial \alpha} \right] + \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha} \right] \quad (14)$$

여기서 $\left[\frac{\partial X}{\partial \alpha} \right]_{t=0} = 0$ 이다.

주어진 계수벡터 α 에 대하여 t=0에서 t= t_N 까지 (8)과 (14)를 동시에 적분함으로써 다음과 같은 함수를 생성시킨다.

$$X_c(t : \alpha), \quad \frac{\partial X_c(t : \alpha)}{\partial \alpha} \quad (15)$$

위(15)를 (13)에 대입시키면 현재의 값 α 에서 기울기벡터의 성분을 결정할 수 있다.

α 에 관한 기울기벡터 (13)의 테일러 급수를 이용한 전개식은 (16)과 같고, 이 식은 추정치 $\Delta \alpha$ 계산을 위한 방정식을 제공한다.

$$0 = \left[\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right]_{\alpha} + \left[2 \sum_{i=1}^N J_i^T A J_i \right]_{\alpha} \Delta \alpha \quad (16)$$

이 방법이 전형적인 최소자승법인 뉴턴-랩슨법이다. 또 다른 $\Delta \alpha$ 의 결정방법은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$0 = \left[\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right]_{\alpha} + \lambda \Delta \alpha \quad (17)$$

이 방법은 수정치가 기울기 벡터의 방향이 최소화되게 하는 방법으로 최대 경사법으로 알려져 있다. 초기 조건에 민감하지 않은 최대 경사법과 수렴성이 좋은 뉴턴-랩슨법을 이용하여 수정된 최소자승법을 구성하기 위하여 (16)과 (17)에 의해 예측되는 $\Delta \alpha$ 의 중첩을 다음과 같은 형태로 구성할 수 있다.

$$0 = \mu \left[\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right]_{\alpha} + \left[2 \sum_{i=1}^N (J_i)^T A (J_i) + \lambda \Delta \alpha \right]_{\alpha} \Delta \alpha \quad (18)$$

여기서 μ 는 수정치의 크기를, λ 는 기울기 방향을 조절한다. 위에서 구성한 최적화 절차는 (18)의 예측에 의한 α 의 수정값으로 (8)과 (14)를 연속적으로 적분함으로써 얻어진다. 이 방법은 초기조건에 민감하지 않고 수렴성이 좋으며 특히 속도 성분없이 변위 성분만으로 유체계수 추정이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있다.

4. 측정데이터 평활(Smoothing)

실선시험에서 측정된 데이터는 센서 주위의 유체 불규칙 유동 등에 의하여 측정잡음의 영향을 많이 받는다. 이러한 데이터를 그대로 적용시키면 유체계수 추정이 불가능하므로 측정데이터로 부터 특성의 변화없이 잡음을 제거하여야 한다. 잡음제거를 위해 FFT를 이용하여 다음과 같은 절차로 고주파성분의 데이터를 제거하였다[10]. 먼저 (19)를 이용하여 시간함수 X(t)를 주파수함수 X(k)로 변환한다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{n=N-1} X(n) e^{j(2\pi/N)(-nk)} \quad (19)$$

여기서, $k = \dots, -1, 0, 1, \dots$

주파수 함수에서 고주파 성분을 제거하기 위하여 윈도우 함수 W(k)를 곱해준다.

$$\hat{X}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} X(k) W(k) e^{j(2\pi/N)nk} \quad (20)$$

여기서, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

$$W(k) = 1 - \left[\frac{PTS}{N} \right]^2 k^2, k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (21)$$

여기서, N : 측정데이터 수, PTS : 윈도우 함수 크기 이때 (20)이 음이 되는 부분은 0으로 처리한다. 통과된 주파수 성분을 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)로 재 변환시킨다.

III. 실험 및 결과분석

수중운동체의 선미타 제어편각을 입력으로 연직면에서 지그재그(Zig-Zag) 조종에 의한 속도, 심도, 자세각, 타각의 실선시험 데이터를 측정하였다. 수정된 최소자승법을 이용

하여 설계된 유체계수 추정 알고리즘으로 실선의 유체계수를 식별하였고, 실선시험 궤적과의 비교를 통하여 실험적 검증을 수행하였다. 본 연구에서 유체계수를 추정하기 위하여 PC-386을 사용하였으며, 사용한 컴퓨터 언어는 포트란(Fortran) 77이다.

1. 실선시험 및 데이터 측정

가. 계측센서 구성

수중운동체의 유체계수 추정을 위해서는 선미타의 제어편각에 따른 조종시험에서의 정확한 운동측정 데이터가 필요하다. 운동데이터를 측정하기 위한 여러 항법 센서들이 계수추정에 이용되고 있다. 본 논문에서는 실선에 장착되어 있는 자이로(Gyro), 심도계, 속도계 및 타각감지장치를 측정기로 사용하였다. DAS로는 PC-AT로 RS-232C 방식으로 0.2초마다 제어입력과 출력을 저장하였다. 계측기 구성도는 그림 2와 같다.

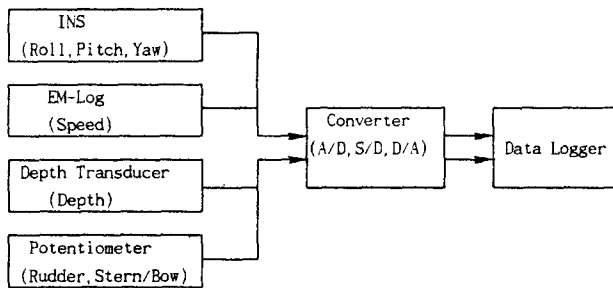
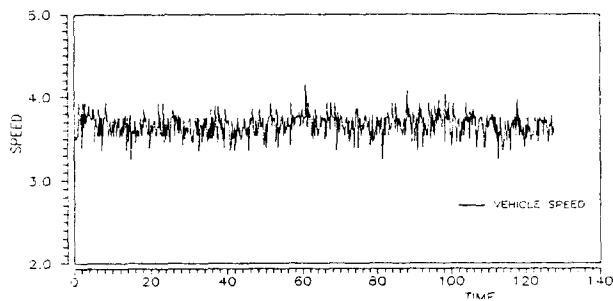
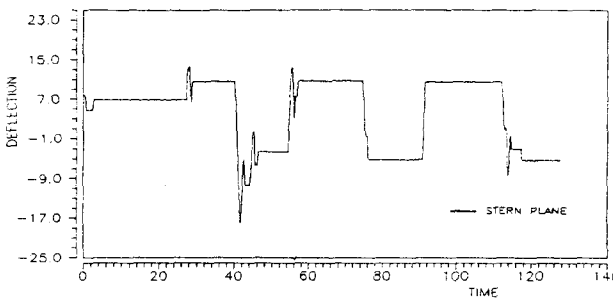


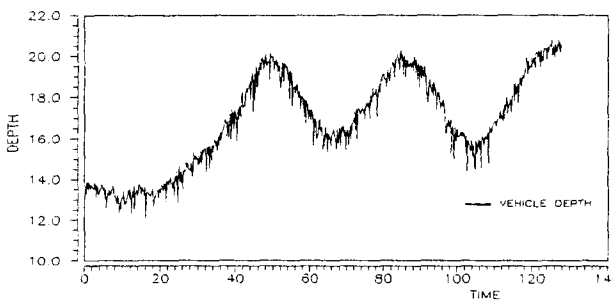
그림 2. 계측 구성도.
Fig. 2. Measurement configuration.



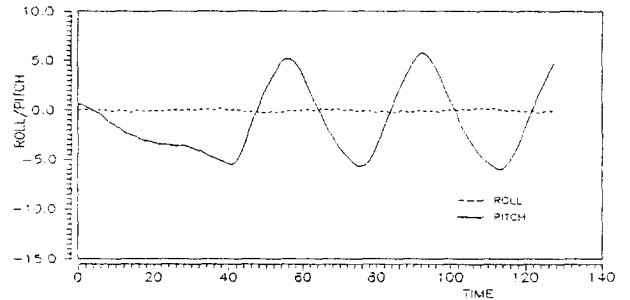
(a) 속도



(b) 선미타각



(c) 심도



(d) 종동요각과 횡동요각

그림 3. 실선시험 측정데이터.
Fig. 3. Measurement data of full scale test.

나. 실선시험 절차 및 데이터 측정

수중운동체의 특성을 나타내는 임.출력 측정데이터를 얻기 위한 실선시험 절차는 먼저 시험속도 및 시험심도에서 발라스트(Ballast)와 트림(Trim)을 맞추고 기본침로를 유지한다. 이때 방향타는 고정시킨다. 그리고 연직면에서 제어입력에 따른 지그재그 조종을 수행한다. 이런 시험절차에 따라 연직면에서 조종을 약 120초간 수행하였으며, 조종시험에서 측정된 데이터는 선미타 제어편각, 수중운동체 속도, 종동요각, 횡동요각 및 심도이다. 이들 실선시험 측정데이터는 그림 3에 나타나 있다.

2. 유체계수 식별 및 결과분석

가. 유체계수 식별

실선시험에서 측정된 데이터 중에서 심도데이터는 심한 측정잡음으로 인하여 그대로 사용이 불가능하므로, 실제로 측정된 데이터로부터 필터링 알고리즘을 사용하여 잡음을 제거하였다. 잡음을 제거한 평활한 심도 데이터는 그림 4와 같다.

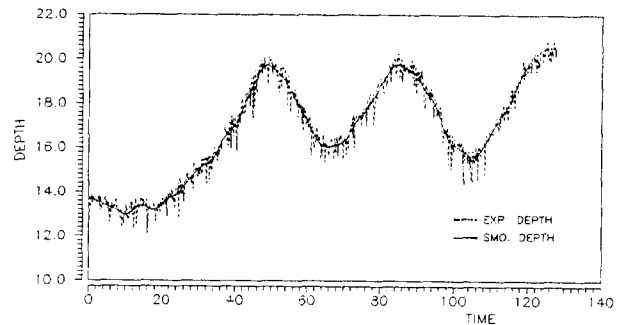
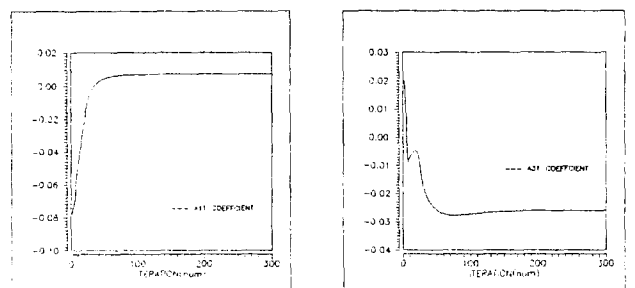


그림 4. 평활화된 심도데이터.
Fig. 4. Smoothed depth data.

여러 항법센서에서 측정된 운동데이터를 유체계수 추정 알고리즘에 적용하여 식별한 유체계수 식별결과는 그림 5에 나타나 있다.



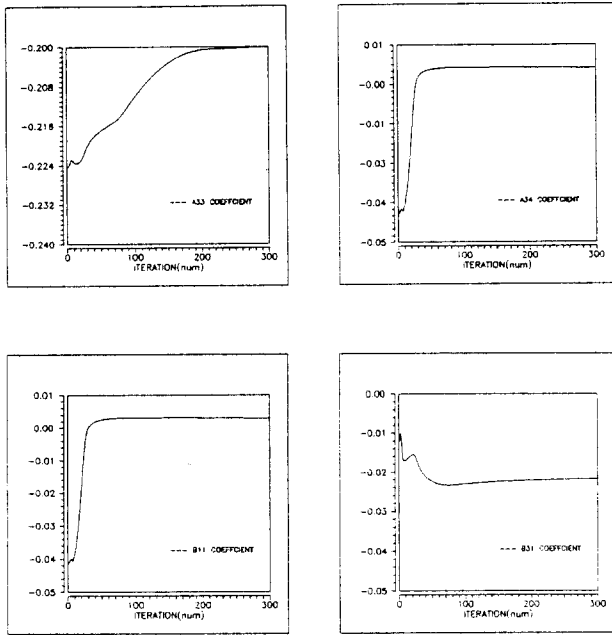
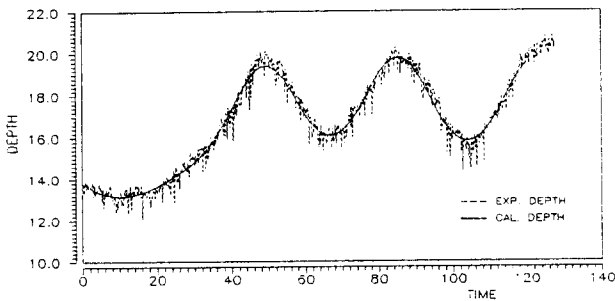


그림 5. 유체계수 식별 결과.

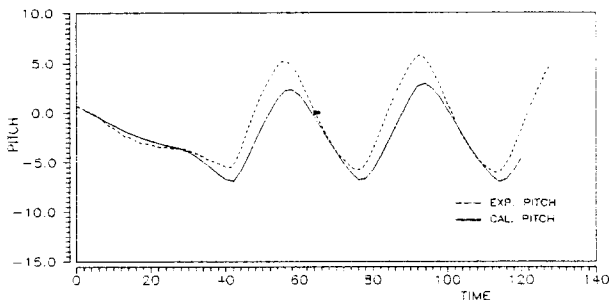
Fig. 5. Result of hydrodynamic coefficient identification.

나. 결과분석

수정된 최소자승법을 이용하여 설계한 유체계수 추정 알고리즘으로 식별된 유체계수는 일정한 되풀이 후에 어떤 특정 값으로 수렴하는 경향을 나타내었다. 추정 결과를 실험적으로 검증하기 위하여 실선시험의 운항궤적과 식별된 유체계수를 이용한 궤적을 서로 비교 검토하였다. 두 궤적 비교결과 실선시험 궤적에 비교하여 심도의 경우에는 상당히 잘 추종하였다. 또한 종동요의 경우에도 약간의 오차가 있으나 대체적으로 추종하는 경향을 나타내고 있다.



(a) 심도 궤적 비교



(b) 종동요 궤적 비교

그림 6. 수정된 최소자승법에 의한 수중운동체 궤적.
Fig. 6. Underwater vehicle's trajectory using modified least square.

IV. 결론

수중운동체의 자동조종장치(Auto-Pilot System) 설계, 기동성 예측 및 조종성능 평가, 수중운동체 조종 시뮬레이터의 설계 등을 위해서는 수중운동체의 유체계수 추정이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 논문에서는 수중운동체의 정확한 유체계수를 식별하기 위하여 시스템 식별기법을 설계하였다. 시스템 식별기법 설계를 위하여 먼저 수중운동체의 운동방정식을 유도하여 시스템 모델구조를 결정하였고, 실선시험에서 문제가 되는 초기조건에 민감하지 않고, 수렴성이 좋으며, 수중운동체의 변위성분 측정치만으로도 계수식별이 가능한 유체계수 추정 알고리즘을 설계하였다. 또한 실선시험 데이터 측정을 위한 센서 및 계측기를 구성하였고, 유체의 불규칙 유동 등에 기인된 측정데이터의 잡음을 데이터 특성 변화없이 제거할 수 있는 데이터 평활 알고리즘도 설계하였다. 실선시험 측정데이터를 유체계수 추정 알고리즘에 적용하여 실선의 유체계수를 식별하였고, 실선시험을 통하여 실험적 검증이 가능하였다. 이 연구결과는 수중운동체의 조종장치 제어성능 향상 및 조종훈련장비의 리얼리즘(Realism) 향상에 유용하게 활용될 것으로 기대된다. 앞으로 연구과제는 실선에 따른 여러 가지 제약으로 효과적인 유체계수 식별에 많은 어려움이 따르므로 자유운동 모형 시험기법의 개발 적용에 관한 연구가 많이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] J. Feldman, "State of the art for predicting the hydrodynamic characteristics of submarines", *Proc of the Symposium on Control Theory and Navy Application*, Monterey, California, U.S NPS, 1975.
- [2] M. A. Abkowitz, *Stability and Motion Control of Ocean Vehicles*, MIT Press, Cambridge, Mass, 1969.
- [3] J. Feldman, "Discussion of submarine equation of motion", *Ship Hydromechanics Department Report*, 1987.
- [4] J.R. Kelsey, "Real-time estimation of aerodynamic coefficients by means of an extended Kalman filter", SAND 78-2032, System Studies Division III, 5613, Sandia Laboratories, U.S.A, 1979.
- [5] Chen Robert, "Input design for aircraft identification using time optimal control formulation," AGARD CP-172, 1975.
- [6] R. K. Mehra, "Optimal inputs for linear systems identification", *proc. JACC*, 1972.
- [7] L. Moran Thomas and B. Wemple. Abigail "Mariner surface ship system identification", SPD-1041-01, David W. Taylor, Naval Ship Research and Development Center, 1983.
- [8] Morton Gertler and R. Hagen. Grant "Standard equations of motion for submarine simulation", Research and Development Report 2510, Naval Ship Research and Development Center, Washington, D.C., 1967.
- [9] Strom-Tejsen and Chislett, "A model testing technique and method of analysis for the prediction of steering and maneuvering qualities of surface ships", *Sixth Symposium on Naval hydrodynamic*, pp. 317-381, Washington, D.C., Government Printing Office, 1966.

[10] D. Strum. Robert and E. Kirt. Donald *Discrete Systems and Digital signal Processing*, Addison-

Wesley Publishing Company, 1989.



양 승 운

1960년 11월 19일생. 1983년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업 (공학사). 1989년 2월 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1994년 ~ 현재 동 대학원 정밀기계공학과 박사과정. 1989년 ~ 현재 국방과학연구소 선임 연구원.

연구분야 수중운동체 조종제어 및 자율제어.



이 만 형

1946년 10월 18일생. 1969년 2월 부산대학교 전기공학과 졸업 (공학사). 1971년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1983년 2월 오리건 주립대학교 전기,컴퓨터공학과(공학박사). 1975년 3월 ~ 현재 부산대학교 제어기계공학과 교수. 1995년

9월 ~ 현재 부산대학교 연구기획 실장. 연구분야는 메카트로닉스, 확률제어, 랜덤프로세스 및 필터링.