

# 수중운동체의 자율운항을 위한 수학적모델 확립과 최적운항 제어기법

김종화<sup>+</sup>·손경호<sup>++</sup>·공길영<sup>+++</sup>·이승건<sup>++++</sup>

## Mathematical Model Identification and Optimal Navigation Control for Automatic Navigation of Underwater Vehicle

Jong-Hwa Kim<sup>+</sup>, Kyeong-Ho Son<sup>++</sup>, Gil-Yeong Kong<sup>+++</sup> and Seung-Geon Lee<sup>++++</sup>

**Abstract** : This paper presents an integrated navigation control concept for underwater vehicles under high speed navigation circumstance. First of all, in order to control an underwater vehicle with respect to automatic navigation, an integrated navigation control method is suggested in view of synchronous control for course keeping, diving and depth control. An exact nonlinear model equation with six-degree-of-freedom is derived for control algorithm. To identify various hydrodynamic coefficients of the equation, an experimental approach is introduced and results are demonstrated for MANTA type model.

**Key words** : Underwater vehicle(수중운동체), Integrated control(통합제어), Automatic navigation(자동운항), Oblique towing test(사향시험), Hydrodynamic derivatives(유체력 미계수)

### 1. 서론

상업용으로 사용되는 수중운동체와는 달리 상대적으로 빠른 속력으로 기동하는 전투용 수중운동체의 자동운항 제어를 위해서는, 유체력의 비선형 변화로 인한 제어판의 비선형적 타력변화 및 모델링오차로 인한 비선형성의 영향을 많이 받기 때문에 되도록이면 정확한 비선형 운동방정식을 유도해야 하고, 이를 기반으로 한 비선형제어를 수행해야 한다. 또한 항로제어, 잠수제어 및 심도제어 사이에는 서로 연성이 일어나 이들을 따로 분리하여 생각할 수 없기 때문에, 제어를 위한 현재의 시점에서 수중운동체의 운동 형태와 자세에 입각한 통합적인 운동분석을 토대로 각각의 액츄에이터에 대한 구동명령을 생성하고 이를 추종적으로 제어하는 통합제어방법이 연구되어야 한다.

본 논문에서는 통합적인 관점에서의 제어방법을 제시하고, 이를 위하여 비선형 6자유도 운동방정식을 소개한다. 운동방정식의 계수를 추정하기 위한 접근으로 실험적인 접근방법과 이론적인 수식에 의한 접근방법을 소개하고, 이들을 통하여 얻어진 계수들의 정확성에 대해 검토한다.

### 2. 최적운항을 위한 통합제어방법

#### 2.1 제어네트워크 기반의 통합제어방법

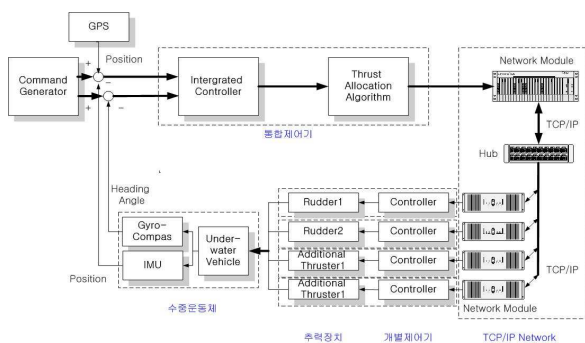


Fig. 1 An integrated control example for underwater vehicle

그림1은 수중운동체의 통합제어를 수행하는 네트워크기반 제어시스템의 예를 제시한 것이다. 주요요소의 기능을 설명하면 다음과 같다.

(1) Integrated controller는, 먼저 항해명령에 대해 수중운동체가 가져야 할 자세를 6자유도의 정확한 수학적모델을 기반으로 통합적인 관점에서 계산하여야 하고, IMU등의 센서로부터 들어오는 자세정보와 비교하여 오차를 계산한 다음, 역학적인 관점에서 6자유도 운동을 제어하기 위한 3축 방향의 힘과 3축 방향의 모멘트를 계산한다.

(2) Thrust allocation algorithm은 원하는 6자유도 운동을 발생시키는데 필요한 힘과 모멘트를 수중운동체의 추력장치가 실제로 발생시켜야 하는 힘과 모멘트로 환산한다.

(3) 네트워크모듈 사이의 통신을 이용하여 추력장치에 할당하는 힘과 모멘트가 추력장치를 제어하는 개별제어기의 명령 입력으로 전달된다. 이 때 사용되는 네트워크는 수중운동체의 크기와 통신거리, 실시간 제어시간 등에 따라 결정된다.

(4) 개별제어기는 해당추력장치의 수학적모델을 토대로 명령 입력을 원하는 성능내로 유지하도록 제어한다.

이와같이 수중운동체의 운동역학적 관점에서 일련의 통합 제어 방법이 매 샘플링시간마다 이루어지므로써, 3개의 제어평면상에서 운동요소들 사이에 서로 연성되는 비선형 수중운동체의 주어진 항해명령을 잘 추종할 수 있도록 한다.

#### 2.2 수중운동체의 비선형 모델방정식

(1)에서 (6)은 그림2와 같이 정의된 수중운동체의 동체좌표 관점에서 유도된 6자유도 운동방정식을 나타낸 것이다. 선속도와 회전각속도 사이에 연성된 비선형 방정식임을 알 수 있다.

$$m[\dot{u} + qw - rv - x_G(\dot{q}^2 + \dot{r}^2) + z_G(p\dot{r} + \dot{q})] = X \quad (1)$$

$$m[\dot{v} + ru - pw + z_G(q\dot{r} - \dot{p}) + x_G(q\dot{p} + \dot{r})] = Y \quad (2)$$

$$m[\dot{w} + pv - qu - z_G(\dot{p}^2 + \dot{q}^2) + x_G(r\dot{p} - \dot{q})] = Z \quad (3)$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - m[z_G(\dot{v} + ru - pw) + x_G z_G(p\dot{q} + \dot{r})] = K \quad (4)$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp \quad (5)$$

$$+ m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu) + x_G z_G(\dot{p}^2 - \dot{r}^2)] = M$$

<sup>+</sup> 김종화(한국해양대학교 IT공학부), E-mail:kimjh@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4343

<sup>++</sup> 손경호, 한국해양대학교 해양시스템공학부

<sup>+++</sup> 공길영, 한국해양대학교 항해시스템공학부

<sup>++++</sup> 이승건, 부산대학교 조선해양공학부

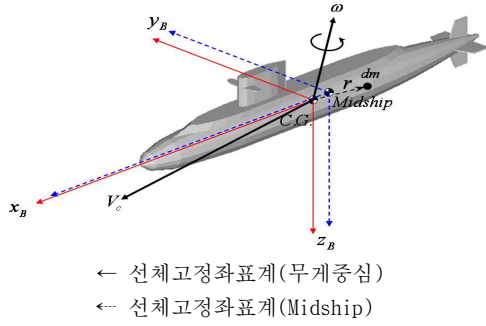


Fig. 2 Body-fixed coordinate of underwater vehicle

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + m[x_G(\dot{v} + ru - pw) + z_G v_G(rq - \dot{p})] = N \quad (6)$$

### 3. 운동방정식의 계수추정방법

#### 3.1 계수추정을 위한 선형모형 시험-사항시험

다음 그림3은 수중운동체를 대상으로 운동방정식의 계수를 추정하기 위하여 사항시험을 수행하는 장치를 나타낸 것이다. 스트레인게이지 타입의 6분력계를 사용하여 동체에 작용하는 3축방향의 힘과 모멘트를 측정할 수 있는 메커니즘으로 구성되어 있다. 그림4는 MANTA형 수중운동체의 모형을 대상으로 롤 및 피치에 대한 경사메커니즘을 나타낸 그림이다.

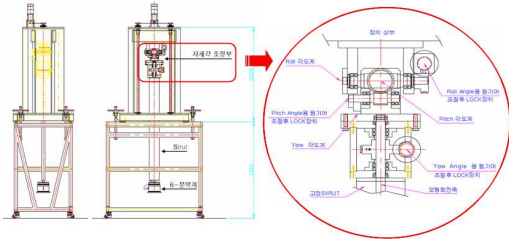


Fig. 3 An experimental apparatus for oblique towing test

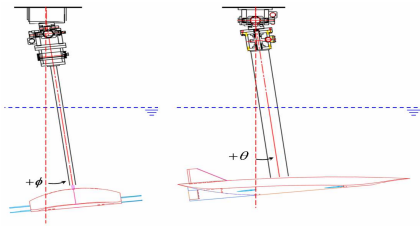
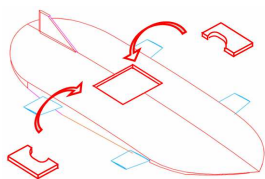


Fig. 4 Roll and pitch oblique mechanism for MANTA model

### 3.2 사항시험을 통한 계수추정 결과

#### 3.2.1 사항시험에 사용된 MANTA형 모델

다음은 실험에 사용된 MANTA형 수중운동체 모형과 실험에 사용된 주요 제원을 나타낸 것이다.



주요 제원(Hull only)	
축적비	1/6
길이	2.00 m
폭	0.73 m
높이	0.20 m
배수용적	0.1476 m <sup>3</sup>

#### 3.2.2 사항시험 조건

표1은 사항시험을 수행하기 위한 조건을 나타낸 것이다.

Table 1. Condition for oblique towing tests

Test parameters	Towing speed ( $U_0$ ) = 1.0 m/sec
	Reynolds number = $1.75 \times 10^6$
Emerging depth	모형중심 : 수면하 0.77m에 위치
Angle variation	$\phi = 0^\circ \sim \pm 10^\circ$ ( $\Delta\phi = 5^\circ$ )
	$\theta = 0^\circ \sim \pm 10^\circ$ ( $\Delta\theta = 5^\circ$ )
	$\psi = 0^\circ \sim \pm 10^\circ$ ( $\Delta\psi = 5^\circ$ )

#### 3.2.3 사항시험 결과

다음 수식은 무차원화 시킨 6자유도 모델에 대한 힘과 모멘트를 나타낸 것이며, 사항시험 결과를 바탕으로 추정된 유체력 계수들을 나타낸 것이다.

$$X' = X'_{vw}v'w' + X'_{uw}u'w' + X'_{uu}u'^2 + X'_{vv}v'^2 + X'_{ww}w'^2 \quad (7)$$

$$Y' = Y'_v v' + Y'_w w' + Y'_{uu} u'^2 + Y'_{uv} u'v' + Y'_{uuw} u'^2 w' + Y'_{vw} v' w' \quad (8)$$

$$Z' = Z'_u u' + Z'_v v' + Z'_w w' + Z'_{uv} u'v' + Z'_{vw} v'w' \quad (9)$$

$$K' = K'_v v' + K'_w w' + K'_{uv} u'v' + K'_{uw} u'w' + K'_{vw} v'w' \quad (10)$$

$$M' = M'_u u' + M'_v v' + M'_w w' \quad (11)$$

$$N' = N'_v v' + N'_w w' + N'_{uv} u'v' + N'_{vw} v'w' + N'_{uw} u'w' \quad (12)$$

Surge Force (X)	Sway Force(Y)	Heave Force(Z)			
$X'_{vw}$	-0.01558745	$Y'_v$	-0.25569756	$Z'_u$	0.05195799
$X'_{uw}$	0.10622219	$Y'_w$	-0.00854580	$Z'_v$	0.18706832
$X'_{uu}$	-0.00923463	$Y'_{uu}$	0.00152828	$Z'_w$	-0.55938459
$X'_{vv}$	-0.00751184	$Y'_{uv}$	0.21156224	$Z'_{uv}$	-0.20435160
$X'_{ww}$	0.11039679	$Y'_{uw}$	0.01953400	$Z'_{vw}$	0.12962159
		$Y'_{vv}$	-0.01962974		
		$Y'_{vw}$	0.30671499		

Roll Moment (K)	Pitch Moment (M)	Yaw Moment (N)			
$K'_v$	-0.05857004	$M'_u$	-0.00288206	$N'_v$	-0.08300116
$K'_w$	0.02861499	$M'_w$	-0.00080282	$N'_w$	-0.00634453
$K'_{uv}$	0.07278611	$M'_v$	0.11066101	$N'_{uv}$	0.08895570
$K'_{uw}$	-0.10868190			$N'_{uw}$	0.00378606
$K'_{vw}$	-0.02013904			$N'_{vw}$	0.01668234

### 4. 결론 및 후기

본 논문에서는 수중운동체의 통합제어를 위한 네트워크기반의 통합제어방법을 제시하고 유도된 비선형 6자유도 운동방정식을 나타내었으며, MANTA 모델을 대상으로 사항시험을 이용한 유체력 계수 추정실험 및 그 결과를 나타내었다. 본 논문은 수중운동체 특화연구센터의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며 지원에 감사드린다.

#### 참고문헌

- [1] 수중운동체특화연구센터, 1단계 중간평가 자료, 2005.
- [2] 이병걸, "선박의 자동항행을 위한 최적항로 결정과 LOS 가이드 시스템," 한국해양대 박사논문, 2005.
- [3] 이병걸, 김중화, 임재권, 프로펠러와 부가추력장치를 갖는 특수선의 모델링 및 통합제어기 개발," 한국박용기관학회지, 제29권 제2호, pp. 96-102, 2005.
- [4] T.I. Fossen, Marine Control Systems, Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002.