

## 수중운동체의 조종성능에 대한 민감도 해석법의 적용

여동진<sup>†</sup>\*, 이기표\*

서울대학교 조선해양공학과\*

### A Study on the Sensitivity Analysis of Submersibles' Manoeuvrability

Dong Jin Yeo<sup>†</sup>\* and Key Pyo Rhee\*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University\*

#### Abstract

Sensitivity Analysis(SA) is used to predict how the model response varies according to changes in the model parameters. With SA, confidences in models which are developed to approximate certain processes and their predictions can be increased. The influences of hydrodynamic coefficients on the prediction of manoeuvrability are examined by SA of direct method. The equations of motion used are the standard equations of motion for submarine(Gertler 1967), and submerged bodies with three different appendages are considered. Through numerical simulations of three kinds of sea trials, the sensitivities of motions to hydrodynamic coefficients are found. Changes of sensitivities during trials are found to be highly dependent on the actuator scenarios and geometry of submerged body.

※Keywords: Sensitivity analysis(민감도 해석), Direct method(직접법), Submersibles(수중운동체), Sea trials(실선 시운전)

#### 1. 서론

수중운동체는 군사적·학술적인 목적으로 운용되며 그 종류가 매우 다양하다. 이러한 수중운동체의 운용 중 안정성을 보장하고 목적하는 활동을 정확히 수행하기 위해서는 수중운동체의 조종성능

에 대한 정확한 예측이 필요하다. 일반적으로 시스템의 응답에 대한 예측을 위해서는 해당 시스템의 운동 응답을 기술하기 위한 수학 모델의 정립 및 수학 모델에 포함되는 계수의 추정이 필요하게 되며 수상선 및 수중운동체에 있어 이는 조종운동 방정식의 정립 및 조종성미계수 추정 즉, 조종 성능 추정의 문제에 해당된다. 수상선 및 수중운동체의 조종 성능 추정은 통상적으로 설계 단계와 건조 후 검증 및 응용 단계에 이루어진다. 건조 후 검증 및 응용 단계에서는 설계 단계에서의 조

접수일: 2005년 5월 16일, 승인일: 2005년 8월 4일

†주저자, E-mail : Lonepier@snu.ac.kr

Tel : 02-880-7339

종 성능 추정 결과를 기본으로 실제 수상선이나 수중운동체의 실선 시운전 자료 등을 통해 실선의 조종 성능에 대한 보다 정도 높은 추정을 수행하게 된다. 통상적으로 이러한 과정에는 시스템 식별법(System Identification Technique) 등이 사용된다(윤현규와 이기표 2001, 2003).

민감도(Sensitivity)란 입력 정보의 변화에 따라 모델의 출력이 양적으로, 또는 질적으로 변화하는 정도를 나타내는 것으로 수학 모형 도출의 초기에 각 계수들의 기여도를 조사하는 방법으로 사용된다.

선박의 조종성능에 대하여 조종성미계수의 민감도를 분석한 시도는 Hwang(1980)이 최초로 실시하였다. Hwang은 각 조종성미계수의 변화에 따른 상태변수 변화의 최대 차이를 민감도로 정의하고 민감도 해석을 실시하여 각 조종성미계수의 조종운동방정식에서 차지하는 비중을 확인하였다. 이러한 Hwang의 연구에 기초하여 Rhee and Kim(1999)은 Hwang이 제시한 민감도 정의의 문제점을 지적하고 상태변수 변화의 최대 차이 대신 전체 과정 중 상태변수 변화의 합을 민감도로 정의하여 여러 가지 시운전법에 대한 조종성미계수의 민감도를 분석할 수 있도록 하였다.

수중운동체의 조종성미계수에 대한 민감도 분석은 Sen(2000)에 의하여 이루어졌다. Sen은 잠수함 및 축 대칭 세장 수중운동체 모델에 대하여 조종성미계수의 변화에 따른 전술 반경(Tactical Diameter), 오버슈트(Overshoot) 등 응답 변수의 변화를 민감도로 표현하고 이러한 민감도 정의를 바탕으로 조종성미계수의 값을 일정 비율 변화시킨 후 응답 변수의 변화를 구하여 민감도 행렬을 구하였다. Sen의 연구 결과를 확장시킨 것은 Perrault et al.(2003)이었다. Perrault et al.은 무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle; AUV)을 대상으로 하여 조종성미계수에 대한 민감도 해석 외에도 선체 및 제어판의 주요 치수에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 이를 위해 그는 먼저 기하학적 치수 변화에 의한 부가질량 계수의 변화를 확인하는 연구를 수행하고, 이를 바탕으로 기하학적 치수 변화 및 조종성미계수의 변화에 의한 조종운동의 변화를 확인하였다.

이와 같이 현재까지 수상선이나 수중운동체의 조종성미계수에 대한 민감도를 계산하는 과정은 조종운동방정식 중 하나의 계수를 일정 비율로 변화시킨 후 수학 모형의 출력을 계산하는 방법을 사용하였다. 간접법(Indirect Method)이라 불리는 이러한 방법은 일반적으로 동일한 조종 운동에 대한 많은 회수의 수치 시뮬레이션을 수행하는 형태로 이루어지는데 이는 시간적 소모가 많고 일반화된 민감도를 얻어내기 어려운 방법이다(Saltelli et al. 2001).

본 논문에서는 민감도에 대한 정의를 근거로 1차 미분 방정식 형태로 표현되는 민감도 방정식을 풀어 조종 운동에 대한 조종성미계수의 민감도 시간 변화를 구해내는 직접법(Direct Method)을 적용하여 민감도 해석을 수행하였다. 이러한 직접법에 의한 민감도 해석은 민감도를 최대화 시키는 입력을 구할 때도 간접법에 비해 매우 간편하게 적용될 수 있다.

## 2. 수중운동체의 조종운동방정식

수중운동체의 운동은 대상이 되는 수중운동체에 따라 좌표계 원점의 위치, 유체력의 표현 방법이 다양한 형태로 기술된다. 대상 수중운동체가 무게 중심의 위치가 크게 변화하지 않는 경우 원점을 무게 중심에 놓는 방정식이 해당 수중운동체의 운동 기술에 유리하며, 수중운동체가 상하 대칭의 형태를 가진 경우 수평면 운동에 의한 수직면 운동의 영향이나 수직면 운동에 의한 영향의 비대칭성 등이 포함되지 않는 운동방정식이 해당 수중운동체의 운동 기술에 유리하다. 본 논문에서는 모형 시험의 결과로부터 도출된 유체력 미계수가 기술되어 있는 Rhee et al.(2000)의 모형 시험 결과를 적용하여 시운전 상황에서 조종성미계수의 민감도 변화를 확인하고 최적 입력을 도출하므로 해당 연구에서 사용된 DTNSRDC의 Gertler and Hagen(1967)의 운동방정식을 사용하기로 한다.

### 2.1 좌표계

수중운동체의 운동을 표현하기 위한 좌표계는 Fig. 1 과 같이 수중운동체의 초기 선수 방향을

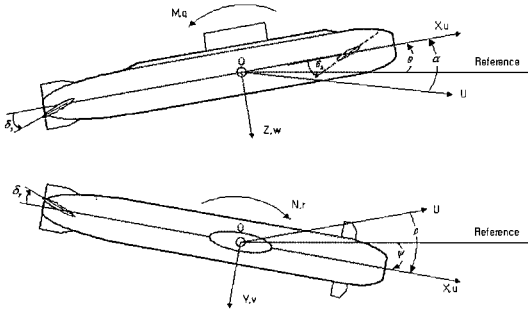


Fig. 1 Coordinate system

양의 X 축, 지구 중심을 향하는 방향을 양의 Z 축으로 하며 좌표계 원점이 수선면에 존재하는 우주직각 좌표계인 공간 고정 좌표계와 중심이 선체의 중심선에 존재하며, 선수부를 양의 x 축, 우현을 양의 y 축으로 하는 직각 우주 좌표계인 선체 고정 좌표계로 구성된다. 선체 고정 좌표계와 공간 고정 좌표계사이의 좌표변환은 선체 고정 좌표계와 공간 고정 좌표계가 이루는 각인 Euler 각에 의한 변환으로 정의된다.

2.2 조종운동방정식

수중운동체의 질량분포가 xz 평면에 대해 대칭이라고 가정할 때 뉴턴의 2 법칙에 의해 수중운동체의 6 자유도 운동 방정식을 기술하면 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + q)] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q})] &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - I_{xz}(\dot{r} + pq) - mz_G(\dot{v} - wp + ur) &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + I_{zx}(p^2 - r^2) \\
 + mz_G(\dot{u} - vr + wq) - mx_G(\dot{w} - uq + vp) &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + I_{zx}(rq - \dot{p}) + mx_G(\dot{v} - wp + ur) &= N
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

X, Y, Z, K, M, N은 수중운동체에 작용하는 외력을 표현하고 있다. 수중운동체에 작용하는 외력 성분은 다시 선체, 제어판, 프로펠러에 의한 외력 성분으로 구분된다.

앞서 기술한 것과 같이 선체에 작용하는 외력은 DTNSRDC 의 Gertler and Hagen(1967)의 외력

표현 중 선체에 작용하는 동유체력을 고려하여 나타내었다.

본 논문에서 참조한 Rhee et al.(2000)의 실험은 프로펠러가 부착되지 않은 상태에서의 실험이었고, 타 및 승강타에 관련된 유체력 미계수 또한 도출되어 있지 않았으므로 프로펠러 및 타에 의한 외력에 대하여 적절한 형태의 모델링이 필요하게 된다.

타와 승강타에 의한 외력 성분은 다음과 같은 간단한 형태의 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 X_\delta &= 0, Y_\delta = \frac{\rho}{2} l^2 Y'_{\delta r} u^2 \delta r, \\
 Z_\delta &= \frac{\rho}{2} l^2 Z'_{\delta s} u^2 \delta s + \frac{\rho}{2} l^2 Z'_{\delta b} u^2 \delta b \\
 K_\delta &= 0, M_\delta = \frac{\rho}{2} l^3 M'_{\delta s} u^2 \delta s + \frac{\rho}{2} l^2 M'_{\delta b} u^2 \delta b, \\
 N_\delta &= \frac{\rho}{2} l^3 N'_{\delta r} u^2 \delta r
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

타 및 승강타의 구동에 대해서는 식 (3)과 같은 전동 유압식 조타기의 수학적 모형을 사용하였다.

$$\dot{\delta} = \begin{cases} (\delta_{com} - \delta) / T_E & : |\delta_{com} - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{max}| \\ sign(\delta_{com} - \delta) |\dot{\delta}_{max}| & : |\delta_{com} - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{max}| \end{cases}
 \tag{3}$$

위 식에서  $\delta_{com}$  은 명령타각,  $T_E$  는 시정수,  $|\dot{\delta}_{max}|$  는 타 및 승강타의 최대 각속도를 나타내며, 본 연구에서는 시정수를 2.5(sec), 최대 각속도는 3(deg/s)로 설정하였다.

프로펠러에 의한 외력 성분은 저항과 항상 평형을 이룬다는 가정을 도입하였다.

3. 민감도 해석(Sensitivity Analysis)

민감도 해석(Sensitivity Analysis)은 입력 정보의 변화가 출력 변화에 어떻게 영향을 미치는지 확인하는 과정이다. 민감도 해석으로부터 수학적 모형의 구성에 대한 적합성과 각 입력 정보의 중요도 등을 파악할 수 있게 된다. 민감도는 전역 민감도(Global Sensitivity)와 국소 민감도(Local Sensitivity)로 나뉘며 일반적으로 민감도 해석이라는 국소 민감도 해석을 의미한다. 국소 민감도 해석에는 간접법(Indirect Method), 직접법(Direct

Method), 그린함수법(Green Function Method)이 사용된다(Saltelli et al. 2001).

### 3.1 간접법에 의한 민감도 해석

국소 민감도를 찾아내는 가장 간단한 방법은 하나의 매개변수를 약간 변화시킨 후 수학 모형에 대한 수치모사를 수행하는 방법이다. 유한 차분 형태의 가정을 통해 민감도 행렬의 항들은 다음 식 (4)와 같이 근사 시킬 수 있다.

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_j} \approx \frac{y(\theta_j + \Delta\theta_j) - y(\theta_j)}{\Delta\theta_j}, \quad j=1, \dots, m \quad (4)$$

위와 같은 근사를 통해 각 매개변수의 크기를 일정 비율 변화시킨 후 얻어지는 출력 상태변수의 차를 확인하여 민감도를 구해낸다. 이러한 방법을 본능적 방법(Brute Force Method) 또는 간접법(Indirect Method)라 한다. 이 방법의 장점은 수학 모형에 대한 수정이나 추가적인 코드의 제작이 필요 없이 수치모사 코드만으로 민감도를 구할 수 있다는 점이다. 그러나, 이 방법은 보다 정교한 방법에 비해 정확도가 떨어지며 계산시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 매개변수가 많은 수중운동체의 경우 이 방법은 매우 많은 계산시간이 필요하게 된다.

### 3.2 직접법에 의한 민감도 해석

수중운동체의 운동방정식은 다음과 같은 형태로 표현 된다.

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) \quad (5)$$

여기에서  $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$ 는 6행 6열인 수중운동체의 관성행렬,  $\mathbf{x}$ 는 6행 1열인 상태변수 벡터,  $\boldsymbol{\theta}$ 는 1행 87열인 부가질량계수를 포함한 수중운동체의 조종성미계수 벡터이고  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})$ 는 6행 1열인 수중운동체에 작용하는 외력을 표시하는 벡터이다.

직접법에 의한 민감도 식을 구하기 위해 식 (5)의 양변에 관성행렬의 역행렬을 곱하면 다음의 식 (6)이 얻어진다.

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) \quad (6)$$

이제 위 식의 양변을 조종성미계수 벡터로 편미

분하면 다음과 같은 민감도 미분방정식을 얻을 수 있게 된다.

$$\dot{\mathbf{S}} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{G} \quad (7)$$

위 식에서 시스템 자코비안( $\mathbf{J}$ ; 6X6)과 조종성미계수 자코비안( $\mathbf{G}$ ; 6X87)은 각각 식 (8), (9)와 같이 나타난다.

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \mathbf{x}^T} = \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \mathbf{x}^T} \quad (8)$$

$$\mathbf{G} = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \sum_i \frac{\partial \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} \quad (9)$$

직접법에 의한 민감도 해석은 위와 같은 미분방정식의 해를 구하는 것이다. 위 식을 풀기 위해서는 시스템 매개변수의 참값을 알고 있어야 하며, 시스템 미분방정식의 해 즉, 시스템 상태변수도 함께 구하여야 한다.

### 3.3 민감도의 정규화(Normalization)

직, 간접법을 통해 구한 민감도는 각 상태변수 및 매개변수의 단위에 따라 크기가 달라진다. 따라서, 도출된 민감도 값이 상태변수와 매개변수의 단위에 무관한 값을 가지기 위해서는 정규화가 필요하다. 정규화된 민감도 행렬을  $\tilde{\mathbf{S}}$ 라 하면 이는 다음 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{\theta_j}{y_{i, std}} \cdot S_{ij} \quad (10)$$

정규화된 민감도는 통상적으로 매개변수  $\theta_j$ 의 1% 변화에 따른 상태변수  $y_i$  변화 비율을 의미하며  $y_{i, std}$ 는 기준이 되는 상태변수의 값으로 대개 상태변수가 가질 수 있는 최대값이 사용된다. 이와 같은 정규화로 서로 다른 민감도 값 간의 비교가 가능해진다. 위 식에서 상태변수의 기준값은 각 상태변수의 크기를 고려하여  $[1 \ 1 \ 1 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01]^T$ 로 설정하였다.

## 4. 조종운동 중 민감도 변화

Table 1 Principal dimensions Rhee et al.(2000)

Hull		Coning tower		
L	0.7093 m	Chord	0.14 m	
		Thickness	0.03 m	
B	0.0876 m	Height	Model A 0.04 m	
D	0.0976 m		Model B	0.08 m
			Model C	0.12 m

4.1 수치모사 대상

본 논문에서는 Rhee et al.(2000)이 코닝 타워의 크기에 따른 조종성능의 변화를 확인하기 위해 실시한 시험에 사용된 모델의 70 배 길이인 확장 모델을 가정하여 조종 운동 중 민감도 변화를 살펴보았다. Rhee et al.(2000)이 사용한 모델의 주요 치수는 Table 1 과 같이 주어진다.

위와 같은 개념 모형에 대하여 선회, 지그재그, meander 시험에 대하여 수치모사를 수행하여 민감도의 변화를 살펴보았다. 시험 수행시간은 300 초로 설정하였다.

4.2 조종 시운전 중 민감도 변화

4.2.1 35° 좌현 선회

35° 좌현 선회 중 부가질량과 관련된 계수들의 민감도는 선회 초기에 그 변화가 주로 나타나며 이후 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 이것은 선회 운동에 있어 속도 변화가 초기에 주로 발생하고 점차 정상 상태로 수렴하는 형태를 보이는 것과 관련이 있는 것으로 생각된다.

감쇠력과 관련된 계수들의 35° 좌현 선회 중 민감도 변화는 선회 전반에 걸쳐 발생하는 경향을 보인다. 그러나 그 최대값은 선회 초기에 발생 하

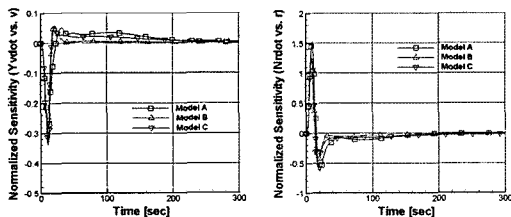


Fig. 2 Time history of normalized sensitivity ( $Y_v$  to sway and  $N_r$  to yaw, 35° port turn)

는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 운동방정식을 사용하였을지라도 모델의 형상이 변화함에 따라 민감도의 변화가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 감쇠력과 관련된 계수들의 선회 중 민감도 변화를 Fig. 3 과 4 에 나타내었다.

4.2.2 10°/10° 지그재그

10°/10° 지그재그 시험에서의 민감도 변화는 시험의 전반에 걸쳐 지속적으로 발생한다. 또한, 35° 좌현 선회의 결과와 비교할 때 민감도의 크기가 전반적으로 크게 나타나며 모델 형상 변화에 따른 민감도의 차이도 확연히 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5~7 은 10°/10° 지그재그 시험 중 유체력 계수들의 민감도 변화를 나타낸 그림이다.

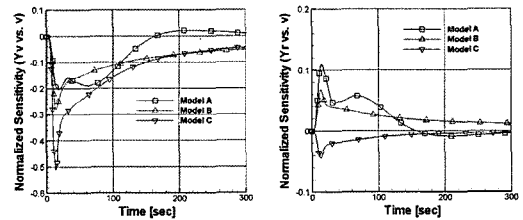


Fig. 3 Time history of normalized sensitivity ( $Y_v$  and  $Y_r$  to sway, 35° port turn)

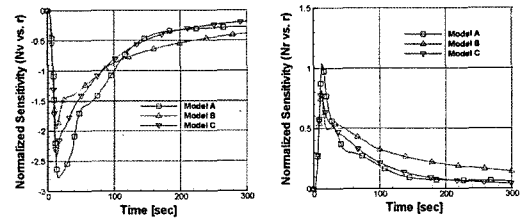


Fig. 4 Time history of normalized sensitivity ( $N_v$  and  $N_r$  to yaw, 35° port turn)

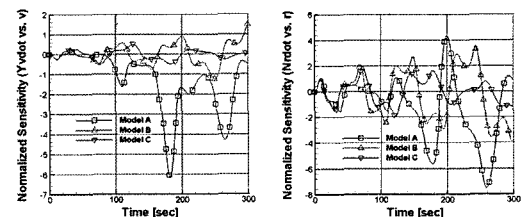


Fig. 5 Time history of normalized sensitivity ( $Y_v$  to sway and  $N_r$  to yaw, 10°/10° zigzag)

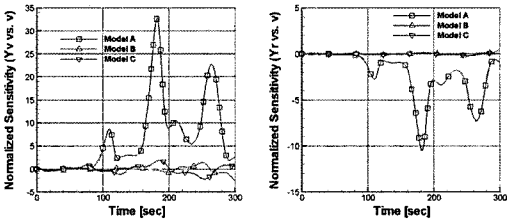


Fig. 6 Time history of normalized sensitivity ( $Y_v$  and  $Y_r$  to sway,  $10^0/10^0$  zigzag)

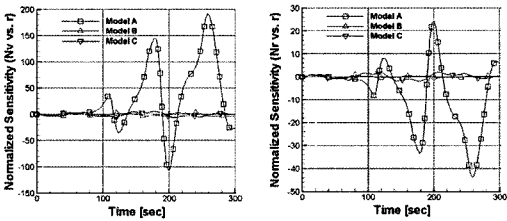


Fig. 7 Time history of normalized sensitivity ( $N_v$  and  $N_r$  to yaw,  $10^0/10^0$  zigzag)

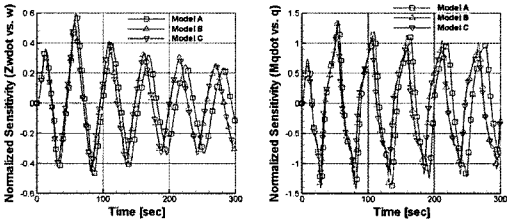


Fig. 8 Time history of normalized sensitivity ( $Z_w$  to heave and  $M_g$  to pitch, meander)

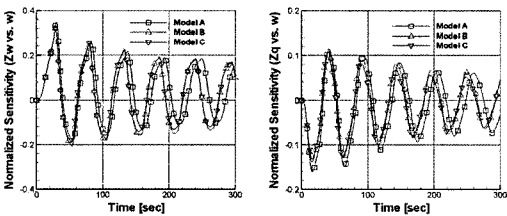


Fig. 9 Time history of normalized sensitivity ( $Z_w$  and  $Z_q$  to heave, meander)

### 4.2.3 Meander

Meander 시험 중 각 계수들의 민감도 변화는 모델의 형상 변화에 따른 차이가 크게 보이지 않는다. 이것은 각 모델이 선형은 동일하고 코닝 타

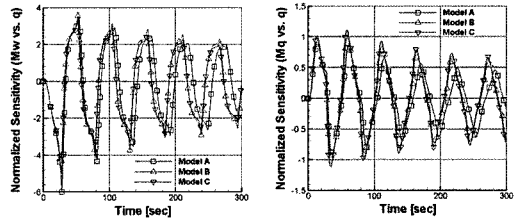


Fig. 10 Time history of normalized sensitivity ( $M_w$  and  $M_g$  to pitch, meander)

위의 상하 방향 길이의 차이가 존재하는데 이러한 형상 변화는 수직면 운동에 큰 영향을 주지 못하기 때문으로 생각된다. 또한, 수중운동체는 일반적으로 수직면 운동에 의한 수평면 운동이 야기되지 않기 때문에 meander 시험 중 계수들의 민감도 변화가 수평면 시운전 때에 비해서 단순한 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. Meander 시험에서 유체력 계수들의 민감도 변화를 Fig. 8~10에 나타내었다.

### 4.2.4 유체력 계수의 민감도 분포

각 조종 시운전에 대하여 한 유체력 계수의 민감도 변화를 모두 합하여 전체 계수의 민감도 합에 대해 차지하는 비율을 확인하면 해당 시운전에서 나타나는 유체력 계수들의 민감도 분포를 확인할 수 있다. Fig. 11~12는 좌우동요와 선수동요에 관한 관련된 유체력 계수들의 민감도 분포를 나타낸 그림이다. 모델의 형상과 시운전 종류의 변화에 따라서 각 유체력 계수들이 차지하는 비율이 많이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

Meander 시험의 경우 수평면 운동 성분을 발생시키지 않으므로 유체력 계수의 민감도가 0으로 나타나는 것도 확인할 수 있다. 또, 수평면 운동에 대하여 지배적인 영향을 주는 유체력 계수가 존재하는 것이 보여진다. 각 방향 운동에 지배적인 영향을 미치는 계수는 각 방향 선속도 관련 계수로 본 연구에서 대상으로 삼은 수중운동체의 경우 수평면에서는  $Y_{v|v}$ , 수직면에서는  $M_w$ 가 그 영향이 큰 것으로 나타났다. 수평면에 있어 코닝 타워의 길이 변화에 따른 유체력 미계수의 민감도 변화를 살펴보면 수평면 운동에 지배적인 영향을

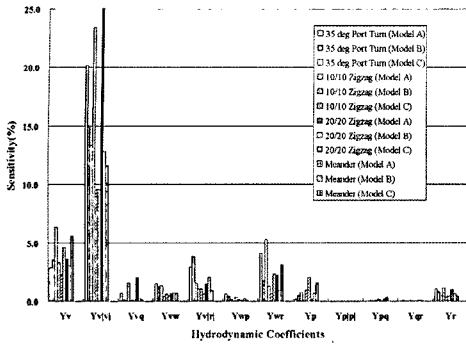


Fig. 11 Sensitivity distribution of hydrodynamic coefficients corresponding to sway

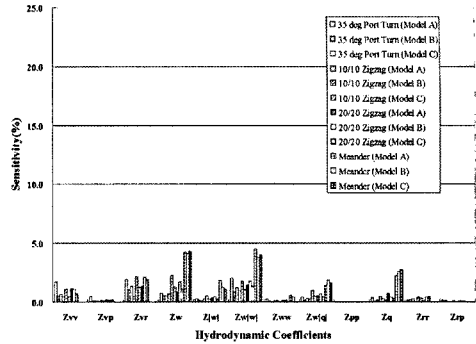


Fig. 13 Sensitivity distribution of hydrodynamic coefficients corresponding to heave

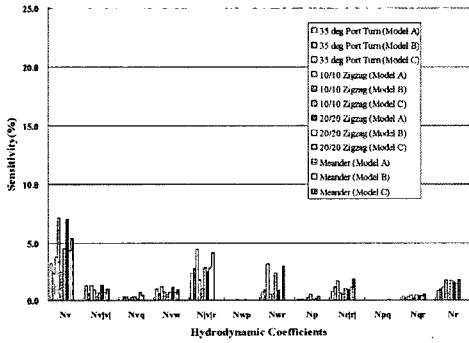


Fig. 12 Sensitivity distribution of hydrodynamic coefficients corresponding to yaw

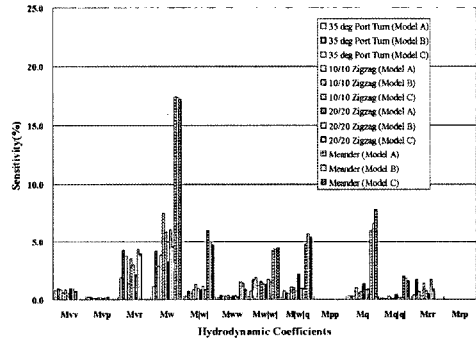


Fig. 14 Sensitivity distribution of hydrodynamic coefficients corresponding to pitch

미치는  $Y_v$ ,  $Y_{v|v|}$  를 살펴볼 때  $Y_v$  의 민감도 비중은 커지고  $Y_{v|v|}$  의 민감도 비중이 작아지는 형태를 보인다.

수직면의 상하동요, 종동요와 관련된 유체력 계수들의 민감도 분포를 나타낸 Fig. 13~14 에서는 meander 시험에 의한 민감도 분포도 확인할 수 있다. 수평면의 결과와 유사하게 수직면 운동에서도 지배적인 영향을 주는 유체력 계수들이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, meander 시험의 결과를 살펴보면 모델의 변화에 따른 민감도 분포의 변화가 수평면 시험의 결과에서 보다 작은 것을 확인할 있으며, 이로서 코닝 타워의 상하 방향 길이 변화는 수평면 운동 특성에 주로 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 또한, meander 시험의 결과와 다른 시험의 결과를 비교해 볼 때 시운

전 종류의 변화에 따라 민감도에도 큰 변화가 나타나는 것을 예상할 수 있다.

수평면 관련 유체력 계수와 수직면 관련 유체력 계수들의 민감도 분포를 비교해 보면 수평면 운동에 대한 비선형 계수의 영향이 수직면에 비해 더 크다는 것을 유추할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 수중운동체의 조종운동에 대하여 직접법을 통해 민감도 해석을 수행하였다. 조종운동방정식은 Gertler and Hagen(1967)의 잠수함에 대한 표준 조종운동방정식을 적용하였으며 대상체로는 코닝 타워의 높이가 서로 다른 세 개

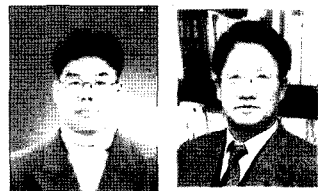
지 수중운동체 개념 모형을 사용하였다. 35° 좌현 선회, 10°/10° 지그재그, 그리고 meander 시험과 같은 조종 시운전에 대한 수치모사를 통해 각 시운전 상태에서의 민감도 변화를 확인한 결과 다음의 결론을 도출할 수 있었다.

- 조종운동방정식이 동일한 경우라도 모델의 형상 및 시행하는 시운전에 따라 민감도의 변화 경향에는 차이가 발생한다.
- 코닝 타워의 상하 방향 길이 차이는 수평면 운동에는 많은 영향을 발생시키나 수직면 운동에는 큰 영향을 미치지 못한다.
- 민감도 분포를 확인한 결과 수평면 운동에 대해서는  $Y_{v|v}$ , 수직면 운동에 대해서는  $M_w$ 의 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 계수들이 수평, 수직 운동 상황에서 운동의 형태를 크게 결정짓게 될 것을 예상할 수 있다.
- 본 연구에서 대상으로 삼은 수중운동체의 경우 수평면 운동에 대한 비선형 계수의 영향이 수직면에 비해 더 크게 나타난다 이것은 수중운동체의 형상이 좌우는 대칭이나 상하는 비대칭인 형태인 점에 기인한다고 생각된다.
- 모델의 형상 및 시행하는 시운전에 따라 민감도의 변화 경향에 차이가 발생하므로 민감도의 대소에 근거한 조종운동방정식의 수정은 대상체에 대한 많은 민감도 분석 자료를 바탕으로 수행되어야 할 것이다.
- 시행 시운전에 따라 민감도에 차이가 발생하므로 민감도 최적화를 위한 적절한 시운전의 도출이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 윤현규, 이기표, 2001, “ 모델링 전 추정기법을 이용한 조종시운전시의 외력 및 조류 변수 추정,” 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 4 호, pp. 30-39.
- 윤현규, 이기표, 2003, “ 선박 조종미계수 식별 시 모델링 전 추정기법과 확장 Kalman 필터에

- 의한 계수추정법의 비교에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 5 호, pp. 43-53.
- Gertler, M. and Hagen, G.R., 1967, Standard equations of motion for submarine simulation, DTNSRDC Report.
- Hwang, W.Y., 1980, Application of system identification to ship maneuvering, Ph. D. Thesis, M.I.T.
- Perrault, D., Bose, N., O' Young, S., and Williams, C. D., 2003, “ Sensitivity of AUV response to variations in hydrodynamic parameters,” Ocean Engineering, Vol. 30, Issue 6, pp. 779-811.
- Rhee K.P. and Kim, K., 1999, “ A new sea trial method for estimating hydrodynamic derivatives,” Ship & Ocean Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 25-44.
- Rhee, K. P., Yoon, H.K., Kim, S.H., Sung, Y. J. and Kang, J.N., 2000, “ An experimental study on hydrodynamic coefficient of a submerged body using planar motion mechanism and coning motion device,” International Workshop on Ship Manoeuvrability, pp. 1-20.
- Saltelli, A., Chan, K., and Scott, E.M., 2001, Sensitivity Analysis, John Wiley & Sons Inc.
- Sen, D., 2000, “ A study on sensitivity of maneuverability performance on the hydrodynamic coefficients for submerged bodies,” Journal of Ship Research, Vol. 44, No. 3, pp. 186-196.



< 여 동 진 > < 이 기 표 >