

유전 알고리즘을 이용한 수중운동체 조종성미계수의 민감도 최대화 입력 설계

여동진^{†*}, 이기표^{**}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양운송안전연구본부*
서울대학교 조선해양공학과**

Design of Sensitivity-Maximizing Input for Submersibles' Manoeuvring Coefficients using Genetic Algorithm Technique

Dong-Jin Yeo* and Key-Pyo Rhee**

Marine Transportation & Safety Research Department, MOERI/KORDI*
Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng., Seoul National University**

Abstract

The accuracy of estimates of hydrodynamic coefficients can be increased by using sensitivity-maximizing inputs. In this study, sensitivity-maximizing actuator commands of a submersible, which are sequences of bang-bang type commands, were obtained using Genetic Algorithm (GA) optimization technique. By comparing the total sensitivity values, deduced actuator inputs were found to be superior to the other sea trials. Based on the sensitivity distribution of conventional sea trials and sensitivity distribution results through deduced input scenario, a review of submersibles' manoeuvring equations of motion was conducted.

※Keywords: Submersibles(수중운동체), Sensitivity-maximizing inputs(민감도 최대화 입력), Genetic algorithm (유전 알고리즘)

1. 서론

수중운동체의 조종운동을 기술하기 위해 매우

많은 항을 포함하고 있는 조종운동방정식이 사용된다. 그러나, 고려된 항이 많을수록 각 항들간의 상관 관계가 높아질 가능성이 발생하며 높은 상관관계로 인하여 시스템 식별 등의 적용이 어렵게 된다. 따라서, 수중운동체의 조종운동에 대해 시스템 식별이 용이한 입력의 설계가 필요하며 나아가 방정식에 포함된 각 항들에 대한 면밀한 검토를

접수일: 2005년 11월 1일, 승인일: 2006년 1월 9일

†주저자, E-mail : Lonepier@moeri.re.kr

Tel : 042-868-7247

통하여 현재 사용되고 있는 조종운동방정식의 형태를 검토할 필요가 있다.

조종운동방정식에 포함된 항들의 조종운동에 대한 기여도는 민감도 해석(Sensitivity Analysis)에 의해 얻어질 수 있다. 선박과 수중운동체의 조종운동에 대한 민감도 해석에는 통상적으로 동일한 조종운동에 대해 관심의 대상이 되는 항들을 차례로 일정 비율씩 변화시켜 가면서 많은 회수의 수치 시뮬레이션을 수행하여 각 수치 시뮬레이션의 결과를 비교하는 형태인 간접법(Indirect Method)이 사용되었다(Hwang 1980, Rhee and Kim 1999, Sen 2000, Perrault et al. 2003). 그러나 이러한 간접법은 시간적 소모가 많고 일반화된 민감도를 얻어내기 어려운 방법이므로 여동진과 이기표(2005)는 민감도 해석에 있어 민감도에 대한 정의를 근거로 1 차 미분 방정식 형태로 표현되는 민감도 방정식을 풀어 조종운동의 각 시간대별 민감도를 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.

시스템 식별에 있어 계수 추정 정도를 높이기 위해서는 최적화된 입력의 설계가 필요하다. 이러한 입력의 설계는 최적화하고자 하는 함수에 따라 다양하게 나타날 수 있으며 민감도 역시 입력 설계 기준이 되는 최적화 함수로 사용될 수 있다는 것이 밝혀져 있다(Kalaba and Spingarn 1982).

수상선에 있어 입력 설계에 대한 시도가 다소 이루어진 바 있다. Rhee and Kim(1999)은 직관적인 방법에 의해 조종성미계수의 민감도를 높일 수 있는 입력을 제안하였고 윤현규와 이기표(2001, 2003)는 이동 평균 모델에 있어 최적 입력으로 알려진 Pseudo Random Binary Sequence 입력을 바탕으로 수상선의 조종성미계수에 대한 시스템 식별을 시도하였다. 이후 Sung et al.(2004)은 여러 최적화 조건을 사용, Bang-Off-Bang 형태의 입력을 가정하고 포괄적 검색법을 적용하여 선박의 조종성미계수 도출을 위한 최적 입력을 설계하였으며, 연성모 등(2004)은 저속 선박의 조종성미계수 도출을 위한 입력을 설계하였다.

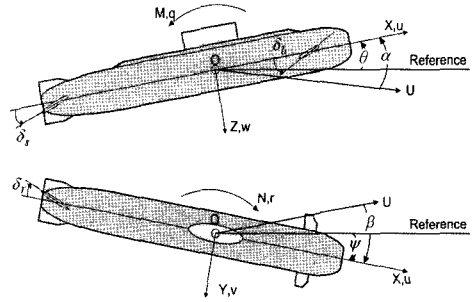


Fig. 1 Coordinate system

선박의 경우 입력이 타 하나이므로 Sung et al. 이 사용한 포괄적 검색법 등의 적용이 가능하나 수중운동체의 경우 타 및 승강타 등 입력의 수가 많으므로 검색해야 할 경우의 수가 매우 많아져 포괄적 검색법을 사용하기에는 어려움이 있다.

본 논문에서는 직접법에서 얻어진 민감도 식을 바탕으로 유전 알고리즘을 사용하여 수중운동체 조종성미계수의 민감도 최대화 입력을 도출하였다 또한, 이러한 민감도 최대화 입력 상황에서 얻어진 각 항들의 민감도 비중을 비교하여 그 결과를 기존 실선 시운전에서 얻은 민감도 비중 분포와 비교하였다. 마지막으로 이러한 결과를 조종운동방정식의 수정에 적용하기 위한 방안을 연구하였다.

2. 수중운동체의 운동방정식

본 연구는 Rhee et al.(2000)이 모형 시험의 결과로부터 도출한 유체력 미계수를 바탕으로 수행되었으므로 Rhee et al.의 연구에서 사용된 Gertler and Hagen(1967)의 운동방정식을 사용하였다.

2.1 좌표계

수중운동체의 조종운동을 기술하기 위한 좌표계는 Fig. 1 과 같이 설정된다.

2.2 조종운동방정식

수중운동체의 질량분포가 xz 평면에 대해 대칭이라고 가정하고 물체고정좌표계의 중심이 임의 원점에 놓인다고 할 때 뉴턴의 2 법칙에 의해 수중운동체의 6 자유도 운동 방정식을 기술하면 다

음 식 (1)과 같다.

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

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

선체에 작용하는 외력은 Gertler and Hagen(1967)의 외력 표현 중 선체에 작용하는 동유체력을 고려하여 나타내며 프로펠러 및 타에 의한 외력 모델링은 여동진과 이기표(2005)의 논문에서 기술되어 있으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

3. 민감도 최대화 입력의 도출

3.1 직접법에 의한 민감도 해석

여동진과 이기표(2005)는 수중운동체의 조종운동에 대하여 직접법(Direct Method)에 의한 민감도 해석(Sensitivity Analysis)을 식 (2)와 같은 민감도 미분방정식의 해를 구하는 형태로 적용하였다.

$$\dot{\mathbf{S}} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{G} \tag{2}$$

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. 민감도의 정규화는 다음 식 (3)과 같이 수행하게 되며 상태변수의 기준값은 각 상태변수의 크기를 고려하여 $[1 \ 1 \ 1 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01]^T$ 로 설정하였다.

Table 1 Constraints

항목		최대, 최소값
횡동요	각도(deg)	±15
	각속도(deg/s)	±5
타 및 수평타 각(deg)		±35

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{\theta_j}{y_{i,nd}} \cdot S_{ij} \tag{3}$$

3.2 민감도 최대화를 위한 목적 함수의 설정

시스템의 특성에 대한 파악은 적절한 입력을 가한 후 시스템의 출력을 확인하는 것으로 가능하게 된다. 이 때, 시스템의 특성을 보다 정확히 파악하기 위해서는 가능한 많은 정보를 얻을 수 있는 입력을 가해야 한다. 따라서, 출력 특성에서 가능한 많은 정보를 파악할 수 있는 최적 입력을 찾아내는 과정이 필요하다. 수중운동체의 조종운동방정식에 있어 전체 민감도를 최대화 할 수 있는 입력을 도출하고 이러한 입력 상황에서도 민감도가 낮은 항들을 파악하면 이를 근거로 수중운동체의 조종운동방정식을 수정할 수 있게 된다. 민감도 최대화 입력을 구하기 위한 목적 함수는 식 (4)와 같이 설정될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J &= tr \left[\int_0^T [\tilde{\mathbf{S}}^T \tilde{\mathbf{S}}] dt \right], \tag{4} \\
 \mathbf{x}_{\min} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max}, \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max}
 \end{aligned}$$

이 식에서 제한 조건은 입력에 있어 타와 승강타 각도, 상태변수에 있어 횡동요 각도로 설정하였으며 최대, 최소값의 크기는 Table 1과 같다.

3.3 유전 알고리즘을 사용한 민감도 최대화 입력 도출

3.3.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 자연선택(Natural Selection) 과정과 자연진화의 과정을 모방하는 최적화 알고리즘의 하나이다(Goldberg 1989). 기존의 최적화 알고리즘과 달리 유전 알고리즘은 목적 함수의 미분과정이나 특별한 수학적 연산을 필요로 하지 않

는다. 또한, 개체들이 모여 이루는 개체군에 의한 병렬적인 탐색이라는 점에서 기존의 최적화 알고리즘과는 차별화 된다. 유전 알고리즘은 탐색의 방향이나 영역이 초기값에 의해서 결정되지 않고 세대마다 확률적으로 결정되므로 국소점(Local Minimum)에 빠질 가능성이 적어 전역 최적화(Global Optimization)가 가능한 알고리즘으로 알려져 있다. 유전 알고리즘은 다음과 같은 세 가지 연산자를 통해 최적화를 수행하게 된다.

- (1) 복제(Reproduction)
 - 목적함수(Fitness Function)에 따라서 개체들을 복사하는 연산자
- (2) 교배(Crossover)
 - 개체들끼리의 유전자 배열을 섞는 연산자
- (3) 돌연변이(Mutation)
 - 유전자 배열 중의 유전자(Gene)를 무작위로 바꾸는 연산자

3.3.2 민감도 최대화 입력 탐색을 위한 개체 형성

최적화와 관련된 문제 중 제어 에너지 또는 시간을 최적화 하는 문제에 있어서 입력의 크기에 제한이 있는 경우, 제어 에너지의 최적화에는 최대 입력과 0 을 반복적으로 이용하는 Bang-Off-Bang, 시간 최적화에는 최대 입력을 반복적으로 이용하는 Bang-Bang 형태의 입력이 최적 입력으로 도출된다는 것이 일반적으로 알려져 있다 (Sung et al. 2004). 또한, 이동 평균(Moving Average; MA) 모델의 경우 최적 입력은 의사 불규칙 이진 배열(Pseudo Random Binary Sequence; PRBS) 형태로 나타나는 것이 알려져 있으므로(윤현규와 이기표 2003), 본 연구에서 도출하고자 하는 입력의 형태가 Bang-Bang 형태를 가질 것으로 가정하며 탐색 영역의 설정은 다음과 같은 조건을 고려하였다(Sung et al. 2004).

- (1) 타각 명령은 시운전(자유항주시험)에서 구현이 용이할 것.
- (2) 타각 명령 지속 시간은 선체가 타각 명령에 충분히 반응할 수 있도록 충분해야 할 것.
- (3) 전체 시험 시간은 통상적인 조종시운전과 유사한 시간을 가질 것.

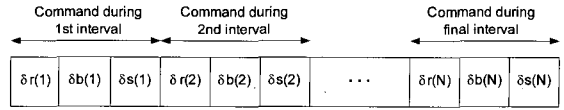


Fig. 2 Representation of gene code

Table 2 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

따라서, 본 연구에서는 Bang-Bang 형태의 타각 명령이 명령 지속 시간은 30 초, 전체 시운전 시간 300 초 동안 발생하는 경우에 대한 검색을 실시하였다. 이러한 Bang-Bang 형태의 입력 검색에 있어 유전 알고리즘을 적용하는데 이진화 등의 과정 없이 각 시간별의 제어 명령을 그대로 유전자 정보로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 검색의 대상이 되는 유전자 개체는 Fig. 2 와 같이 표현할 수 있다.

4. 조종운동방정식의 검토

4.1 수치모사 대상

본 논문에서는 Rhee et al.(2000)이 코닝 타워의 크기에 따른 조종성능의 변화를 확인하기 위해 실시한 시험에 사용된 모델 중 코닝 타워의 크기가 가장 큰 모델에 대하여 70 배 길이인 확장 모델을 가정하고 통상적인 조종운동 및 민감도 최대화 입력에 대해 가지는 민감도 비중을 확인하였다. Rhee et al.이 사용한 모델의 주요 치수는 Table 2 와 같이 주어진다.

4.2 민감도 최대화 입력의 도출 및 민감도 비교

4.2.1 민감도 최대화 입력과 궤적

3.3.2 절의 설명과 같이 30 초간 지속되는 타 및 승강타각 명령이 300 초간의 시운전에 발생한

다는 것을 가정하여 유전 알고리즘을 통해 민감도 최대화 입력을 도출하였다. 곡선 근사와 같은 문제에서는 근사 시키려는 값과의 오차 등으로 유전 알고리즘의 종료 조건을 설정할 수 있으나 본 연구에서 다루는 문제와 같이 목적함수의 최대, 최소를 구하는 문제에서는 그러한 종료 조건을 사용하기 어려우므로 본 연구에서는 설정된 세대 경과 동안 세대의 진화가 발생하지 않는 상태를 종료 조건으로 하였다. Fig. 3 은 도출된 입력 시나리오이며 Fig. 4 는 해당 입력 시나리오에 의해 얻어지는 3 차원 궤적 정보를 표현한 그림이다.

4.2.2 민감도 향상과 민감도 분포 변화

Fig. 5 는 기존의 시운전 방법과 도출된 민감도 최대화 시나리오에서 얻어진 민감도의 총합을 비교한 그래프이다. 그래프에서 보여지는 것과 같이 민감도 최대화 입력에 의해 전체적인 민감도가 월등히 향상되는 것을 확인할 수 있다. $10^\circ/10^\circ$, $20^\circ/20^\circ$ 지그재그 시험의 민감도 총합을 비교할

경우 입력의 크기는 $10^\circ/10^\circ$ 지그재그 시험이 작으나 민감도의 총합은 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 지그재그 시험의 특성상 동일한 300 초 내의 입력 변화에서 $10^\circ/10^\circ$ 지그재그의 입력이 더 많은 변화를 발생시키고 이것이 민감도에 더 큰 영향을 주었기 때문이다. 즉, 지그재그 시험의 경우 상태 변수의 변화와 무관하게 선수각

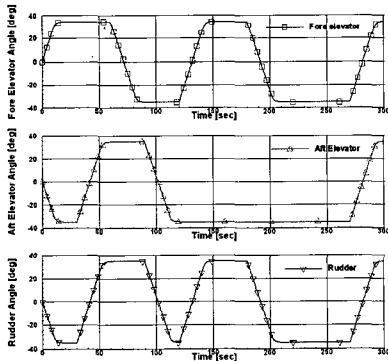


Fig. 3 Sensitivity maximizing inputs

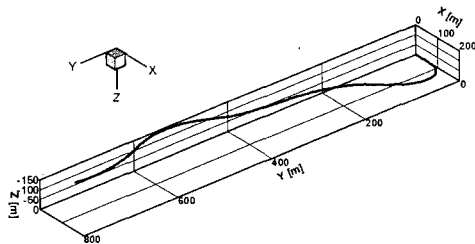


Fig. 4 Trajectory through sensitivity maximizing inputs

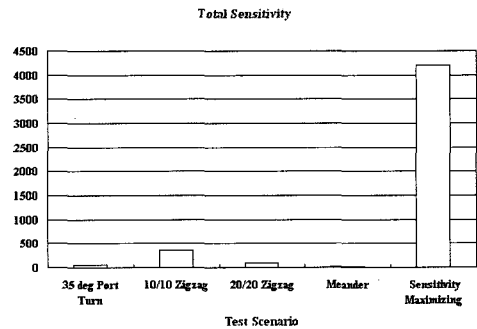


Fig. 5 Comparison of total sensitivity

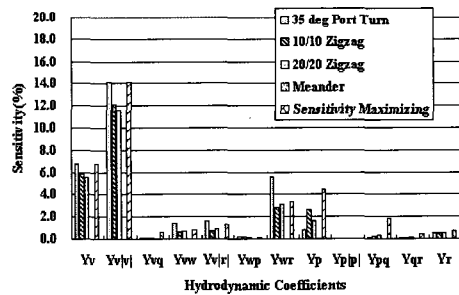


Fig. 6 Sensitivity distribution (sway)

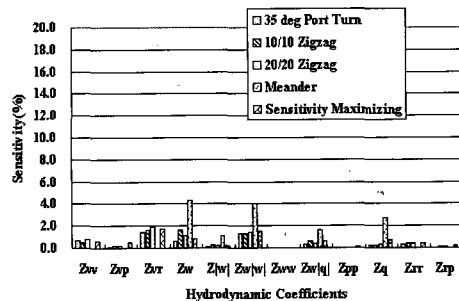


Fig. 7 Sensitivity distribution (heave)

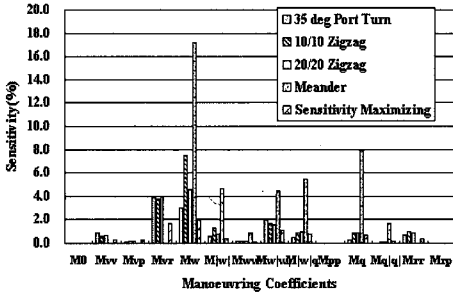


Fig. 8 Sensitivity distribution (pitch)

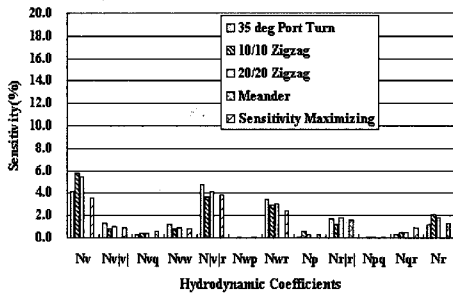


Fig. 9 Sensitivity distribution (yaw)

Table 3 Hydrodynamic coefficients of low sensitivity portion

Hydrodynamic Coefficients	
Surge	X_{vv}, X_{rp}
Sway	$Y_{\dot{p}}, Y_{p p }, Y_{pq}, Y_{qr}$
Heave	$Z_{vp}, Z_{pp}, Z_{rp}, Z_{rr}$
Roll	$K_{\dot{p}}, K_{\dot{r}}, K_{ v }, K_{wp}, K_{p p }, K_{pq}, K_{qr}$
Pitch	M_{vp}, M_{pp}, M_{rp}
Yaw	$N_{\dot{p}}, N_{\dot{v}}, N_{wp}, N_{pq}$

에 따른 입력 변화를 발생시키므로 민감도에 대한 고려가 배제되게 된다.

Fig. 6~9는 기존의 시운전 방법과 민감도 최대화 시나리오를 통한 시운전에서의 민감도 비중 분포를 비교한 그래프이다.

그래프에서 보여지는 것과 같이 기존의 시운전에서 민감도 비중이 낮게 얻어지는 여러 항들에

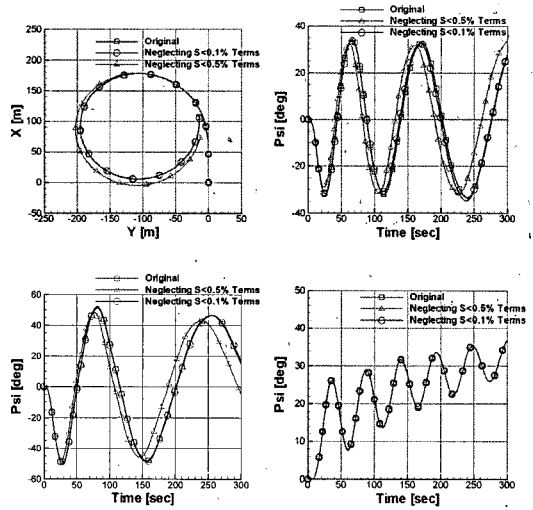


Fig. 10 Comparison of simulation results

대하여 민감도가 개선되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 민감도 비중이 여전히 낮은 항들도 존재하며 이러한 항들은 수중운동체의 조종운동에 대하여 미치는 영향이 매우 작을 것으로 예상된다.

4.3 민감도 비중을 고려한 조종운동방정식의 검토

민감도 비중이 낮은 항이 조종성능 추정에 미치는 영향을 확인하기 위해 통상적인 시운전 및 민감도 최대화 입력에 의한 민감도 해석의 결과 모두 민감도 비중이 0.1% 보다 낮은 조종성미계수 군과 0.5% 보다 낮은 조종성미계수 군을 제외시킨 상태로 수치모사를 수행하여 모든 조종성미계수를 포함한 경우와 비교, 해당 항들의 조종성능 추정에 있어서의 유효성을 검토하였다. Table 3은 민감도 비중이 0.5%보다 낮은 조종성미계수이며 Table 에서 음영 처리된 항들은 민감도 비중이 0.1%보다 높고 0.5%보다 낮은 항들이다. 민감도 비중이 낮은 항들은 주로 각운동과 관련된 항들이 많았으며 특히 횡동요 운동에 영향을 주는 항들이 많았다. 또한, 부가질량과 관련된 항도 민감도 비중이 낮은 항들이 많이 존재했다.

Fig. 10은 수중운동체 조종운동방정식의 모든 항들을 포함한 수치모사 결과와 민감도 비중이 낮은 항들을 제외한 경우에 대한 수치모사 결과를

비교한 그림이다. 왼쪽 위부터 시계 방향으로 각각 35° 좌현 선회, 10°/10° 지그재그, 20°/20° 지그재그, Meander 시험의 결과를 비교한 것이다.

민감도 비중 0.5% 미만인 항들을 제외한 경우 운동의 초기에는 조종운동방정식의 모든 항을 고려한 경우와 유사한 형태를 보이거나 점차 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있으며 민감도 비중 0.1% 미만인 항들을 제외한 경우에는 전반적으로 조종운동방정식의 모든 항을 고려한 경우의 운동 형태를 거의 유사하게 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 민감도 비중 0.1% 미만의 항들을 제외한 경우에도 지그재그 운동의 후반부에서 약간의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있으나 실제적으로 조종 성능을 비교 평가하는데 사용되는 선회 직경이나 1st, 2nd 오버슈트의 크기 등에 있어서는 큰 차이를 나타내지 않으므로 수중운동체의 조종 성능 추정에 큰 문제가 되지 않을 것으로 생각된다. Meander 시험의 경우에는 민감도 비중 0.5% 미만의 항들을 제외한 결과에서도 모든 항을 고려한 경우와 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 Meander 시험에 있어 수직면 운동만이 발생하여 앞서 민감도가 낮은 항들 중 수직면과 관련된 계수들의 영향만이 포함되게 되기 때문으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 수중운동체의 조종운동에 대하여 민감도 해석 방법인 직접법을 기반으로 시스템 식별이 용이한 입력을 설계하였다. 최적화 기법으로는 특별한 수학적 연산을 필요로 하지 않으며 전역 최적화가 가능한 기법인 유전 알고리즘을 적용하였다. 그 결과 유전 알고리즘이 수중운동체의 민감도 최대화 입력을 도출하는데 유용하게 사용될 수 있는 것을 확인하였다. 또한, 유전 알고리즘으로 도출된 입력을 통해 조종성미계수의 민감도가 기존의 실선 시운전 결과에 비해 매우 크게 얻어지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 민감도 최대화 입력을 적용하여도 민감도의 비중이 여전히 매우 낮게 나타나는 조종성미계수가 존재하였으며 이렇게 민감도 비중이 낮은 항들에 대한 소거의

결과가 수중운동체의 조종성능 예측에 어느 정도의 영향을 보이는지를 확인하였다. 그 결과, 민감도 비중 0.1% 미만의 항들의 경우 제외하여도 조종성능 예측에 큰 문제가 없는 것을 확인할 수 있었다. 조종운동방정식에 포함된 각 항들의 민감도 비중은 대상 수중운동체에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 잠수함과 같은 수중운동체의 경우 그 형상에 큰 변화를 나타내지 않으므로 다른 수중운동체에 있어서는 유사한 경향을 보일 것으로 생각된다.

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.
- 여동진, 이기표, 2005, “ 수중운동체의 조종성능에 대한 민감도 해석법의 적용,” 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 5 호, pp. 448-455.
- 연성모, 이기표, 여동진, 김선영, 윤현규, 2004, “ 저속 수확모형 정립을 위한 자유항주시험 시나리오 설계,” 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 800-805.
- Gertler, M. and Hagen, G.R., 1967, Standard equations of motion for submarine simulation, DTNSRDC Report.
- Goldberg, D.E., 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Hwang, W.Y., 1980, Application of system identification to ship maneuvering, Ph. D. Thesis, M.I.T.
- Kalaba, R. and Spingarn, K., 1982, Control, Identification and Input Optimization, Plenum Press, New York.
- 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 Derivates," *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.
 - 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.
 - Sung, Y.J., Rhee, K.P., Yeo, D.J. and Yun, K.H., 2004, "Optimal Design of Scenarios for Rudder to Estimate the Manoeuvring Coefficients of a Ship from Free-Sailing Test," *Proceedings of the Pacific 2004 International Maritime Conference*, Sydney, AUSTRALIA, Vol 2, pp. 597-609.



< 여 동 진 > < 이 기 표 >