

사역대를 갖는 수중운동체의 다변수 QLQG/LTR 심도제어

°한성익*, 김종식*, 최중락**

* 부산대학교 기계설계공학과, ** 국방과학연구소

Multivariable QLQG/LTR Depth Control of Underwater Vehicles with Deadzone

°Seong Ik Han*, Jong Shik Kim*, Jung Rak Choi**

* Pusan National University, ** Agency for Defense Development

ABSTRACT

In general, for underwater vehicles in low speed, depthkeeping operations are carried out by using the variation of the weight in the seaway tank. The depthkeeping control of underwater vehicles is difficult because of the deadzone effect in the flow rate control valve.

In this paper, the nonlinear multivariable QLQG/LTR control system using a seaway tank and bow planes is synthesized in order to improve the performance of the depth control system. The computer simulation results show the multivariable QLQG/LTR control system has good depth control performance under the deadzone effect.

1. 서론

수중운동체의 제어문제는 일반적으로 전진속도가 임계속도(약 2노트) 이하에서 수직상승 및 심도유지를, 그리고 그 이상의 속도에서는 조타 및 잠수를 위한 제어로 구분하며⁽¹⁾ 수중운동체의 제어력 발생방법도 고속에서는 제어타를 이용하고 저속에서는 수중운동체 내에 있는 해수탱크에서 해수의 유입/유출을 조절하여 수중운동체의 중량변화에 따른 부력과의 차에 의해 제어력을 발생시킨다.⁽²⁾

본 논문에서는 수중운동체의 전진속도가 임계속도 보다 속도가 약간 큰 경우에 제어타와 해수탱크를 제어입력으로 하여 해수탱크만을 이용하는 심도 제어시스템의 성능을 개선하는 문제에 대해 생각하기로 한다. 유량 제어밸브에 존재하는 사역대(deadzone) 효과와 수중운동체가 자유표면 근처에서 요구되는 여러가지 임무를 수행할 수 있도록 해파나 수중무장발사에 의한 외란에 강인한 심도 제어시스템을 설계하기로 한다.

따라서 이와 같은 특성을 갖는 수중운동체에 대한 강인한

심도 제어시스템 설계를 위하여, 해수탱크의 유량 제어밸브의 비선형 효과를 고려하고 또한 제어타를 추가입력으로 하여 해수탱크만을 제어입력으로 하는 단일일출력 심도 제어시스템의 성능을 개선하기 위해 다변수 QLQG/LTR (multivariable quasi-linear quadratic Gaussian control with loop transfer recovery) 제어시스템⁽⁴⁾을 설계하고 사역대 비선형성에 대한 영향 그리고 외란제거 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하기로 한다.

2. 수중운동체의 심도 제어시스템 모델링

수중운동체의 운동을 완전하게 묘사하기 위해서는 6 자유도 모델식⁽⁵⁾이 요구되지만 수평상관 관성을 무시할 수 있고 롤각이 작은 경우 연직면 3 자유도 운동방정식으로 간략화되며 이 때 전진속도가 작은 경우에는 다음과 같은 허브(heave) 방향과 피치(pitch) 운동만을 고려한 2 자유도 모델로 표현할 수 있다.⁽²⁾

$$m[\ddot{w} - u_o \dot{q}] = pI_4[z \ddot{q} \dot{q}] + pI_3[z \ddot{w} \dot{w} + z \dot{q} u_o \dot{q}] + pI_2[z \ddot{w} u_o \dot{w}] + pI_1[z \dot{w} |u_o| w] + z_{sw} |w \sqrt{w^2}| + pI_2[z_{bs} u_o^2 \delta_s + z_{bb} u_o^2 \delta_b] + F \cos \theta \quad (1)$$

$$I_y \ddot{q} = pI_5 M \dot{q} \dot{q} + pI_4 z \ddot{w} \dot{w} + pI_4 M \dot{q} u_o \dot{q} + pI_3 [M \cdot u_o^2 + M_{ww} u_o \dot{w} + M_{w|w|} |w| |w|] + pI_3 [M_{|w|} u_o |w| + M_{|ww|} |w| |w|] + pI_2 [M_{bs} u_o^2 \delta_s + M_{bb} u_o^2 \delta_b] + Z_B B \sin \theta \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (3)$$

$$\dot{z} = -u_o \sin \theta + w \cos \theta \quad (4)$$

여기서

u_o, w, q, θ, z = 공칭전진속도, 심도변화율, 피치변화율, 피치각, 심도(관성축)

m, I_y = 수중운동체 질량, 관성모멘트

B, F, Z_B = 부력, 중량변화력, 부력면심거리

δ_b, δ_s = bow 입력, stern 입력

$pl_2 = 1/2\rho l^2$ (l = 수중운동체 길이, ρ = 해수밀도)

이제 나머지 파라미터들은 수력학적 계수들이다.

수중운동체의 구동부 동역학의 경우 해수탱크는 커패시턴스 $C = 1/\rho g$ 인 위치에너지 저장요소로 모델링한다. 그리고 유량 제어밸브의 하드웨어적 특성상 존재하는 사역대 비선형성은 기술함수를 이용하여 고려하면 수중운동체의 구동부 동역학은 다음과 같이 표현된다.

$$F(t) = (N_d/C) \int Q(t)dt \quad (5)$$

여기서 $Q(t)$ 는 입력유량이며 N_d 는 유량 제어밸브의 사역대 비선형 특성을 나타내는 랜덤입력 기술함수(random input describing function) 계인($N_d = 1 - \text{erf}(\delta_p/\sqrt{2}\sigma_d)$)이다. δ_p 와 σ_d 는 각각 사역대의 크기와 사역대 입력의 표준편차이다. 그런데 고유값이 0인 구동부 모드에 대해 가제어성과 가관측이 만족되기 위해서는 설계플랜트 모델(design plant model; DPM)의 구조를 변경시켜야 할 것이다. 그래서 심도변화율을 피드백시켜 QLQG/LTR 제어를 위한 설계플랜트 모델을 설정하였다. Fig. 1은 속도 피드백 루프가 첨가된 수중운동체의 심도 제어시스템의 구조를 나타낸다.

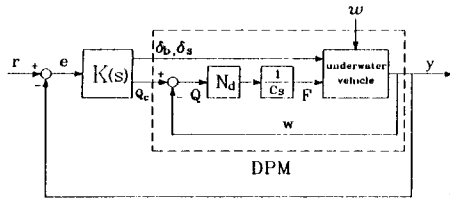


Fig. 1 Structure of the depth control system with velocity feedback loop

이제 설계플랜트 모델을 상태공간 모델식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Nx(t) + Bu(t) + \Gamma w(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6)$$

여기서

$$N = \begin{bmatrix} -1.46e-2 & 4.291e-1 & 0 & 0 & 3.07e-7 \\ 0 & 1.011e-3 & -5.123e-2 & -6.299e-3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1.544 & 0 & 0 \\ -N_d/C & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1.126e-3 & -1.121e-3 & 0 \\ 2.771e-4 & -1.035e-3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_d/C \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

그리고 상태변수 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 는 각각 심도변화율, 피치변화율, 피치각, 심도(관성축) 그리고 중량과 부력 차에 의한 힘을 나타낸다.

3. QLQG/LTR 제어이론

QLQG/LTR은 특히 쿨롱마찰, 백래시, 사역대 등과 같은 하드(hard) 비선형 요소를 포함하는 비선형 시스템을 바람직하게 제어할 수 있는 비선형 다변수 제어방법 중의 하나이다. 이 설계방법은 비선형 시스템에 대한 통계학적 선형화,⁽⁶⁾ 목표필터루프(target filter loop) 설계, 저가제어 QLQR (cheap control quasi-linear quadratic regulator) 문제⁽⁷⁾를 이용한 루프전달회복(loop transfer recovery), 그리고 역랜덤입력 기술함수(inverse random input describing function) 기법⁽⁸⁾ 등 여러 제어방법들의 조합으로 이루어진다.

3.1. QLQG/LTR 제어시스템의 구조

일반적으로 비선형 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + Bu(t) + \Gamma w(t) \quad (7)$$

여기서 $x(t)$ 는 $(n \times 1)$ 상태벡터, $u(t)$ 는 $(m \times 1)$ 제어입력벡터, $w(t)$ 는 $(l \times 1)$ 외란입력벡터, $f(x(t))$ 는 $(n \times 1)$ 의 비선형 시스템벡터, B 는 $(n \times m)$ 제어입력행렬, 그리고 Γ 는 $(n \times l)$ 외란입력행렬이다.

모든 비선형 요소들이 대칭이고 단가(single-valued)의 특성을 갖는다면 비선형 시스템의 상태방정식은 통계학적 선형화기법을 이용하여 다음과 같이 선형화 될 수 있다.

$$\dot{x}(t) = N(\sigma_x)x(t) + Bu(t) + \Gamma w(t) \quad (8)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (9)$$

여기서 $N(\sigma_x)$ 는 통계학적으로 선형화된 $(n \times n)$ 시스템행렬이고, σ_x 는 상태변수들의 표준편차이다. 그리고 $y(t)$ 는 $(m \times 1)$ 출력벡터 그리고 $v(t)$ 는 $(m \times 1)$ 센서잡음벡터이다.

만약, 통계학적으로 선형화된 시스템이 안정가능(stabilizable)하고 검출가능(detactable)하다면 Fig. 2에 표시된 모델기준보상기(model based compensator; MBC)를 설계할 수 있으며, QLQG/LTR 제어시스템의 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} N(\sigma_x) & -B\Gamma(\sigma_x) \\ H(\sigma_p)C & N(\sigma_x) - H(\sigma_p)C - B\Gamma(\sigma_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & \Gamma & 0 \\ -H(\sigma_p) & 0 & H(\sigma_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(t) \\ w(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

여기서 $r(t)$ 는 $(m \times 1)$ 명령입력벡터, $N(\sigma_x)$ 는 $(n \times 1)$ 통계학적으로 선형화된 보상기행렬, σ_x 는 보상기 상태변수들의 표준편차, σ_p 는 필터 이노베이션 f 의 표준편차 그리

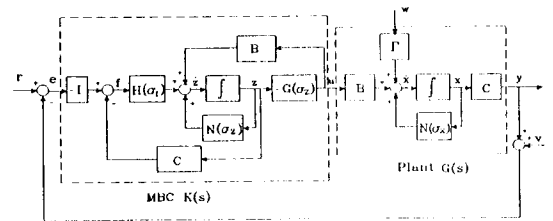


Fig. 2 Structure of the QLQG/LTR control system

고 $H(\sigma_p)$ 는 $(n \times m)$ 필터계인행렬이고 $G(\sigma_s)$ 는 $(m \times n)$ 제어계인행렬이다.

3.2. QLQG/LTR 제어시스템의 설계절차

QLQG/LTR 제어시스템의 비선형 모델기준보상기 설계를 위한 QLQG/LTR 제어시스템의 상세한 설계과정은 참고문헌에 제시되어 있으며^(2, 4) 개략적인 설계절차는 다음과 같다.

- 1) 비선형 플랜트모델에 대한 수학적 모델식 설정
- 2) 통계학적으로 선형화된 시스템 해석 및 설계사양 결정
- 3) 관심 작동범위에 대한 0-평균 백색잡음 명령입력 선정 및 제어기 설계를 위한 작동점 선정
- 4) 선정된 작동점에서 비선형 요소에 대한 기술함수(DF) 계인 가정과 목표필터루프 설계 및 저가제어 QLQR 문제를 이용한 루프전달회복 과정 수행
- 5) 보상된 플랜트에 대한 Lyapunov 방정식을 풀고 비선형 요소들의 DF 계인 계산
- 6) 계산된 DF 계인과 가정한 DF 계인의 차가 허용 범위 내로 작아질 때까지 4)에서 6)까지의 과정 반복 수행
- 7) 계인들(필터, 제어, DF)과 표준편차(보상기 상태변수)들과 필터 이노베이션(innovation)들을 저장
- 8) 각 작동점에 대하여 4)에서 8)까지의 설계과정 반복
- 9) 계인들(필터, 제어, DF)과 정상상태에서 표준편차들과의 관계를 얻음. 즉, $H(\sigma_p)$, $G(\sigma_s)$, $N(\sigma_s)$ 들을 결정(여기서 σ_p , σ_s 는 각각 필터 이노베이션과 보상기 상태 변수들의 표준편차)
- 10) 역랜덤 기술함수법을 이용, 계인들에 대한 바람직한 비선형 함수들을 합성
- 11) 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 비선형 QLQG/LTR 제어시스템의 출력 및 제어입력 평가

4. QLQG/LTR 제어기 설계

우선 설계대상인 수중운동체의 심도제어를 위한 플랜트의 입력으로 제어타(bow, stern)와 해수탱크 그리고 출력은 심도변화율, 피치각, 심도로 선정하였고 비선형 사역대 크기 δ_p 는 0.006으로 선정하였다. Fig. 3은 3노트의 전진속도에서의 3-입력, 3-출력 플랜트에 대한 특이값선도이다.

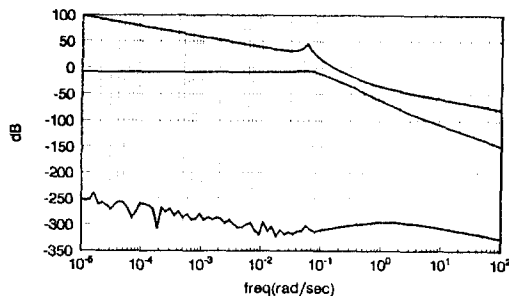


Fig. 3 Singular value plot of the 3x3 plant

이 플랜트는 최소특이값 방향과 최대특이값 방향에 대한 상태도(condition number = 최대특이값/최소특이값)가 너무 커서 적절한 필터계인 선정이 어려웠다. 이것은 제어타와 해수탱크 시스템을 결합시 발생하는 고유한 문제이므로 상태변수나 입출력 변수의 스케일링만으로는 해결하기가 까다롭다. 이러한 문제에 대한 해결방법으로 저속에서 비교적 기여도가 작은 stern 타의 입력을 제외하고 출력변수도 피치각을 제외시켜 플랜트의 상태도가 개선되도록 bow 타와 해수탱크를 입력으로, 심도와 심도변화율을 출력으로 선정하고 bow 타와 해수탱크 입력에 대해 제어력이 균등하게 작용되도록 제어입력에 대해 스케일링한 2입력, 2출력 플랜트에 대해 제어시스템을 설계하기로 한다. 제어입력에 대한 스케일링행렬 S_u 는 다음과 같다.

$$S_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1.45 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Fig. 4는 2입력, 2출력 플랜트에 대한 특이값선도를 나타내며, 이 그림으로부터 시스템의 상태도가 개선된 것을 알 수 있다.

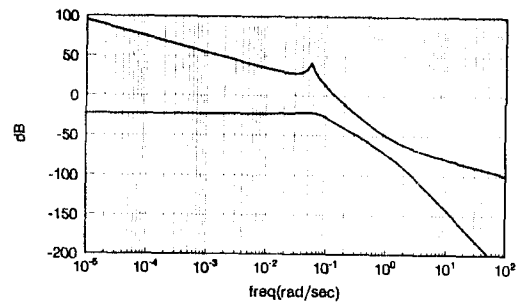


Fig. 4 Singular value plot of the 2x2 plant

이제 QLQG/LTR 제어시스템 설계를 위하여 명령입력 크기에 따른 필터계인행렬 H 를 구하기 위해 명령입력 $r(t)$ 를 강도 R 이 $1.5 \times 10^{-4} \sim 10$ 의 범위에 있는 0-평균 백색잡음으로 가정하고, 강도 R 의 크기가 1.5×10^{-4} , 5×10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 0.1 , 1 , 10 인 7개의 작동점을 선정하였다.

심도 제어시스템이 요구하는 계인교차주파수 0.1 rad/sec 그리고 일정한 입력에 대하여 0-정상상태오차를 만족하도록 각각의 제어입력에 적분요소를 첨가하고 목표필터루프를 설계하기 위해 설계파라미터 μ 와 L 행렬은 저주파와 고주파에서 특이값이 모든 방향에서 일치하도록 각각 다음과 같이 선정하였다.

$$\mu = 100$$

$$L = \begin{bmatrix} -(CA^{-1}B)^{-1} \\ C^T(CC^T)^{-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

그리고 플랜트는 2개의 자유적분요소를 포함하는 특이 시스템이므로 다변수 루프형성을 위해 플랜트의 동특성용 크게 변화시키지 않는 안정한 고유값 -10^{-7} 으로 대체시키고 가

정된 명령입력에 따른 목표필터루프 설계를 수행하였다. 여기서는 대표적으로 명령입력의 강도 R=1일 때 설계된 목표필터루프의 특이값선도를 Fig. 5에 나타내었다.

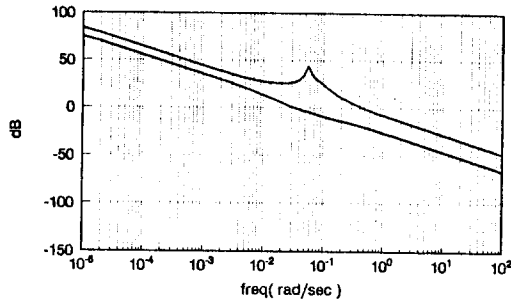


Fig. 5 Singular value plot of the target filter loop $G_F(j\omega)$

위 그림에서 알 수 있듯이 최대특이값 방향에서 과도응답에 큰 영향을 주는 교차주파수 근처에서 주파수응답 특성이 매우 나쁘다. 그리고 최대특이값 방향이 관심있는 심도에 대한 특이값 방향이므로 이 방향의 루프특성을 개선하기 위해 다음과 같은 가중행렬 W 를 L 행렬에 곱한 보정된 L 행렬로 다시 목표필터를 설계하였다. 보정된 L 행렬은 다음과 같고, Fig. 6은 보정된 L 행렬로 설계된 목표필터루프의 특이값선도이다.

$$L = \begin{bmatrix} -(CA^{-1}B)^{-1}W \\ C^T(CC^T)^{-1}W \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서

$$W = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

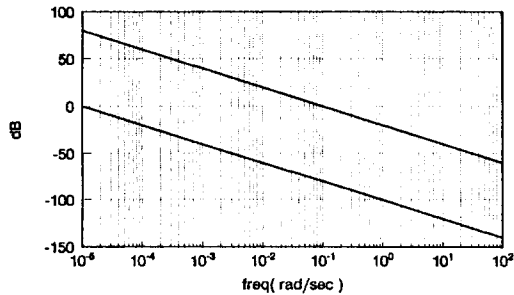


Fig. 6 Singular value plot of the target filter loop $G_F(j\omega)$ using the weighted L matrix ($R=1$)

Fig. 6에서 알 수 있듯이 최대특이값 방향의 주파수응답 특성이 상당히 개선되어 원하는 설계사양을 만족시킬 수 있게 되었다. 이 때 선정된 필터게인행렬 H 는 모든 작동점에서 다음과 같이 일정하였다.

$$H^T = \begin{bmatrix} 0.316 & 1.32e-4 & 1.45e-5 & 1.0e-5 & 7.66e-11 & 6.48e-6 & 1.21e-8 \\ 0.324 & 1.77e-7 & 1.79e-9 & 1.21e-8 & 4.29e-10 & 8.33e-9 & 0.1 \end{bmatrix}$$

그리고 루프전달회복 과정을 위하여 선정된 설계 파라미

터 ρ 는 0.01이다. Fig. 7은 $R=1$ 일 때 설계된 목표필터루프와 회복된 루프전달함수에 대한 특이값선도를 나타낸다.

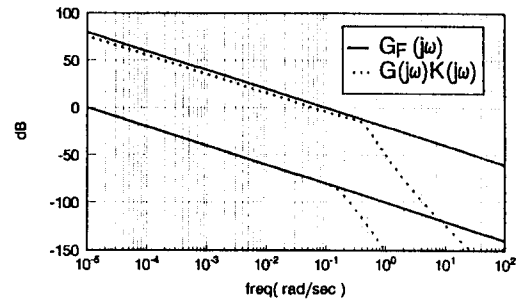


Fig. 7 Singular value plot of the target filter loop and recovered loop transfer functions of the QLQG/LTR control system ($R=1$)

최종적으로 가정한 7개의 작동점에서 설계된 QLQG/LTR 제어시스템으로부터 Table 1에 표시된 바와 같은 해수탱크의 입력유량의 사역대 비선형에 대한 비선형 기술함수계인 N_d 와 사역내 입력의 표준편차 σ_d 보상에기 구현시킬 N_d^k 와 보상기의 사역내 입력의 표준편차 σ_d^k 를 구할 수 있다. 여기서 σ_d 와 σ_d^k 는 다음과 같이 계산된 것이다. 그리고 $E[\cdot]$ 는 기대값을 의미한다.

$$\sigma_d = \sqrt{E[(u_2 - x_1)^2]} \quad (14)$$

$$\sigma_d^k = \sqrt{E[(z_2 - z_3)^2]} \quad (15)$$

Table 1 Describing function gain N_d and N_d^k obtained in all the operating points

R	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0005	0.00015
N_d	0.998	0.994	0.981	0.938	0.803	0.719	0.461
σ_d	2.460	0.778	0.246	0.077	0.024	0.012	0.008
N_d^k	0.999	0.996	0.988	0.963	0.884	0.837	0.712
σ_d^k	4.030	1.275	0.404	0.128	0.041	0.029	0.016

또한 작동점에 따라 설계된 제어게인 요소 G_{ij} 의 일부는 명령입력크기 R 에 거의 무관하고 일부는 명령입력크기 R 값에 따라 변화했다. 거의 일정한 제어게인 요소 G_{ij} 는 다음과 같이 일정한 값으로 선정하였고, 명령입력크기 R 에 따라 비선형성을 나타내는 G_{ij} 와 보상기 상태 표준편차 σ_z 는 각각 Table 2와 Table 3에 요약되어 있다.

$$G_{13} = -26.06 \quad G_{14} = 178.38 \quad G_{16} = -5.16$$

$$G_{17} = -2.5e-5 \quad G_{23} = 56.15 \quad G_{24} = -157$$

Table 2 Control gain G_{ij} obtained in all operating points

G_{ij} \ R	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0005	0.00015
G_{11}	0.327	0.327	0.328	0.333	0.349	0.362	0.421
G_{12}	-0.225	-0.225	-0.226	-0.228	-0.236	-0.241	-0.246
G_{15}	50.97	51.11	51.57	53.11	58.78	62.97	80.86
G_{21}	-0.225	-0.225	-0.226	-0.228	-0.235	-0.240	-0.246
G_{22}	0.912	0.911	0.907	0.891	0.838	0.801	0.648
G_{25}	-85.64	-85.64	-85.64	-85.62	-85.14	-84.39	-77.39
G_{27}	6.4e-5	6.4e-5	6.4e-5	6.5e-5	6.8e-5	7.0e-5	7.5e-5

Table 3 Standard deviation σ_z obtained in all operating points

$\sigma_z \backslash R$	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0005	0.00015
σ_{z1}	2.711	0.860	0.274	0.090	0.032	0.025	0.018
σ_{z2}	3.972	1.257	0.398	0.126	0.041	0.029	0.016
σ_{z3}	0.079	0.025	0.008	0.002	7.4e-4	5.1e-4	2.4e-4
σ_{z4}	4.2e-3	1.3e-3	4.2e-3	1.4e-4	4.7e-5	3.5e-5	2.3e-5
σ_{z5}	0.02	7.5e-3	2.4e-3	7.8e-3	2.7e-3	2.0e-4	1.4e-4
σ_{z6}	0.627	0.198	0.063	0.019	6.3e-3	4.5e-3	2.5e-3
σ_{z7}	7.1e+4	2.2e+4	6.9e+3	2.1e+3	620	410	160

이제 Table 1에서 3에 주어진 기술함수 계인 N_d , N_d^k 와 제어계인 요소 G_{ij} 와 표준편차 σ 와의 관계, 즉 $N_d(\sigma_d)$, $N_d^k(\sigma_d^k)$, $G_{ij}(\sigma_z)$ 로부터 바람직한 비선형 QLQG/LTR 보상기를 설계하기로 한다. 역기술함수법을 적용하여 Table 1에 표시된 기술함수 계인 N_d 와 표준편차 σ_d 의 관계로부터 원래 플랜트에 주어진 사역대의 크기 δ_p 가 역시 0.006인 사역대 비선형 함수를 얻을 수 있으므로 설계과정이 잘 된 것으로 생각할 수 있다. 그리고 플랜트에 대응되는 보상기의 N_d^k 와 σ_d^k 의 관계로부터 보상기의 사역대의 크기 δ_k 도 역시 0.006으로 계산되었다. 비선형성을 나타내는 제어계인 요소 G_{ij} 에 대한 설계된 결과는 Fig. 8과 Table 4에 요약되어 있다. Fig. 8은 보상기에 포함되는 비선형 제어계인 요소 G_{ij} 의 비선형 형태를 나타내고, Table 4에는 제어계인 요소 G_{ij} 를 Fig. 8에 표시된 비선형 형태와 구체적인 파라미터 값들이 표시되어 있다.

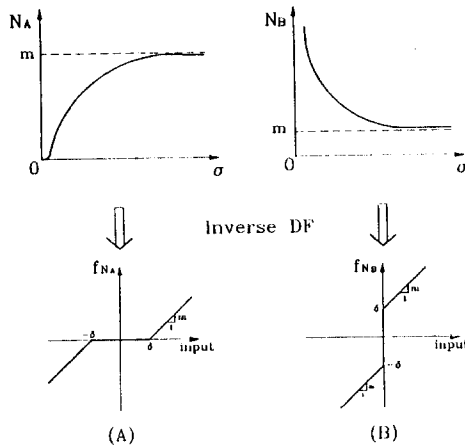


Fig. 8 Nonlinear functions corresponding to their DF gains via IRIDF techniques

이제, 끝으로 이와 같이 설계된 비선형함수들을 Fig. 2에 표시된 비선형 다변수 QLQG/LTR 제어시스템에 첨가하여, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비선형 다변수 QLQG/LTR 제어시스템에 대한 성능분석을 수행해야 할 것이다.

Table 4 Type of the nonlinear function for control gains G_{ij}

G_{ij}	Type	δ	m
G_{11}	B	8.451e-04	0.33
G_{12}	A	0.0019	-0.225
G_{15}	B	0.0023	50.97
G_{21}	A	0.0015	-0.225
G_{22}	A	0.0035	0.9
G_{25}	B	1.0767	-85.64
G_{27}	B	0.0025	6.38e-05

5. 심도 제어시스템의 성능 분석

Fig. 9는 사역대 크기가 0.006인 사역대 비선형 요소를 갖는 해수탱크만을 이용한 단일입출력 플랜트, 그리고 제어타와 해수탱크 입력을 병행한 다변수 플랜트에 대하여 설계된 선형 LQG/LTR 제어시스템, 그리고 앞에서 구한 비선형함수가 포함된 QLQG/LTR 제어시스템의 시간역 성능을 나타낸다. 이때 명령입력은 제어입력의 포화방지를 위해 최대가속-최대속도-최대감속으로 원하는 위치로 움직이도록 다음과 같은 바람직한 명령입력을 고려하기로 한다.

$$Z_r = \begin{cases} A/2 [1 - \cos(\omega t)] & 0 \leq t \leq T \\ A & t > T \end{cases} \quad (16)$$

여기서 A는 원하는 심도 변화량, ω 는 명령입력 주파수 그리고 T는 정현파입력이 가해지는 시간이다. 명령입력 주파수 ω 와 시간 T는 다음 식을 이용하여 선정한다.

$$\omega = \frac{2}{A} |\dot{z}|_{\max} \quad (17)$$

$$T = \frac{\pi}{\omega} = \frac{\pi A}{2 |\dot{z}|_{\max}} \quad (18)$$

하드웨어 특성에 의해 주어지는 심도변화율의 최대값 $|\dot{z}|_{\max} = 0.35 \text{ m/sec}$ 그리고 심도 변화량 $A = 1\text{m}$ 로 가정한다.

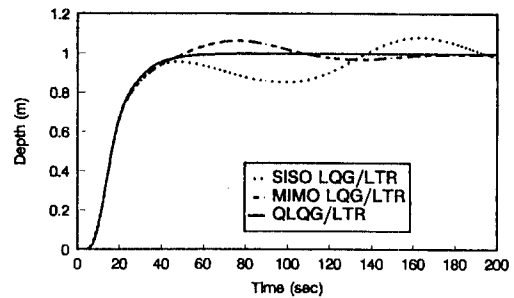


Fig. 9 Time responses of the SISO, multivariable LQG/LTR and QLQG/LTR control systems for the command input

Fig. 9에서 해수탱크만을 사용하는 단일입출력 LQG/LTR 제어시스템의 경우 사역대 비선형성에 대해 시간응답은 제어타와 결합해서 사용하는 다변수 제어시스템보다 좋지 않다. 반면에 다변수 LQG/LTR 제어시스템은 비선형성에 대한 영향이 작게 나타나고 있는데 이는 bow 타의 보조작용에 기인하기 때문이다. 그러나 다변수 선형 LQG/LTR 제어시스템은 사역대 비선형성에 대한 영향으로 정상상태오차가 발생하고 있다. 그래서 이러한 비선형성을 고려하여 설계한 다변수 QLQG/LTR 제어시스템은 정상상태 및 과도응답능력이 현저하게 개선되어 사역대 비선형성에 강한함을 보여주고 있다.

Fig. 10은 충격외란이 가해졌을 때의 외란입력에 대한 성능을 보여 주고 있다. 이 때 외란입력 $d(t)$ 의 형태는 수중무장발사시 발생하는 다음과 같은 반삼각파 형태의 입력으로 가정하였다.

$$d(t) = \begin{cases} 2000t & 0 < t \leq 5 \\ 0 & t > 5 \end{cases} \quad (19)$$

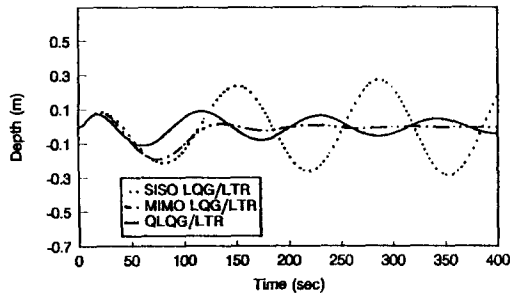


Fig. 10 Time responses of the SISO, multivariable LQG/LTR and QLQG/LTR control systems for the disturbance input

Fig. 10에 나타나듯이 동일한 외란에 대해 단일입출력 LQG/LTR 제어시스템은 외란에 대해 다변수 제어시스템에 비해 취약한 외란제거 성능을 나타내고 있고 다변수 LQG/LTR 제어시스템은 단일입출력의 경우보다 빠르게 정착하고 있다. 다변수 QLQG/LTR 제어시스템은 일정한 깊이하로 선형의 경우보다 빠르게 정착하고 있으나 약간의 진동현상을 보이고 있다. 결과적으로 제어타와 해수탱크를 병행시킨 경우 해수탱크부의 비선형 효과를 제어타에서 보완시키는 역할을 하고 있고 외란입력에 대해서도 더 강한함을 보여주고 있다는 것을 알 수 있다.

또한 속도가 더 증가하면 해수탱크 입력의 효과가 떨어지므로 보조타를 제어입력에 추가시킬 수 있다면 명령추종 성능도 해수탱크만을 입력으로 하는 경우에 비해 더 개선시킬 수 있는 가능성을 예상할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 수중운동체의 심도제어 성능을 개선하기 위

하여 다변수 비선형 QLQG/LTR 제어기를 설계하였고 유량 제어밸브가 갖는 비선형 사역대 영향에 대한 명령추종 및 외란제거 성능을 분석하였다. 사역대의 크기가 큰 경우에는 명령입력 크기의 변화에 대해 선형 LQG/LTR 제어시스템은 만족스러운 성능을 얻기 어려우며 비선형성을 고려한 다변수 QLQG/LTR 제어시스템은 명령추종 및 외란제거 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 저속에서 해수탱크 단독으로 심도 제어를 제어하는 경우에 비해 제어타를 병행하여 심도 제어시스템을 구성하는 방법이 비선형성과 외란에 대해 더 강한함을 알 수 있었다.

이와 같이 본 논문에서 제안한 다변수 QLQG/LTR 제어방법은 사역대뿐만 아니라 콜롱마찰, 백래시 등과 같은 하드 비선형 요소를 포함하는 비선형 시스템을 제어할 수 있는 실용적인 제어방법임을 입증하였으며 새롭게 시도한 제어타와 해수탱크를 결합시켜 운용하는 방법은 효율적인 심도 제어방법이 될 수 있음을 제시하였다. 추후 연구로는 모든 제어타와 해수탱크 입력을 결합시키때의 주파수역의 루프특성 개선과 6 자유도 모델에 대한 다변수 심도 제어시스템을 설계하여 전진속도에 따른 플랜트 모델 변화에 적응할 수 있는 제어기의 설계가 연구되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1)Koh, I., "Submarine Automatic Maneuvering Controller/Estimator", ASME, Winter Annual Meeting, 88-WA/DSC-21, 1988.
- (2)김종식, "수중운동체의 정적/동적 운동제어를 위한 시스템 모델링 및 제어알고리즘 연구", 국방과학연구소 위탁과제 연구보고서, 1992.
- (3)Doyle, J. C. and Stein, G., "Multivariable Feedback Design: Concept for a Classical/Modern Synthesis", IEEE Trans. AC, Vol. AC-28, pp. 4-16, 1981.
- (4)Kim, J. S., "Nonlinear Multivariable Control Using Statistical Linearization and Loop Transfer Recovery", Ph. D. Thesis, Dept. of Mech. Eng., M.I.T., 1987.
- (5)Gerlter, M. and Hagan, B. R., "Standard Equation of Motion for Submarine Simulation," Naval Ship Research and Development Report 2520, 1967.
- (6)Gelb, A. and Vander Velde, W. E., Multiple-Input Describing Function and Nonlinear System Design, McGraw-Hill, 1968.
- (7)Beaman, J. J., "Nonlinear Quadratic Gaussian Control", Int. J. of Control, Vol. 39, pp. 343-361, 1984.
- (8)Suzuki, A. and Hedrick, J. K., "Nonlinear Controller Design by an Inverse Random Input Describing Function Method", Proc. ACC, pp. 1236-1241, 1985.