

가스 및 석유 탐사용 플랫폼의 동위치제어를 위한 제어계 설계법에 관한 연구

유 휘 룡*, 노 용 우*, 박 대 진*, 구 성 자*, 김 상 봉**

* 한국가스공사 연구 개발원 ** 부경대학교 기계공학과

A Study on Design Method of Dynamic Positioning Control System for Gas & Oil Exploration Platforms

Hui Ryong Yoo*, Yong Woo Rho*, Dae Jin Park*, Sung Ja Koo*
and Sang Bong Kim**

* KOGAS R&D Center

** Dept. of Mechanical Eng., PUKYONG National University

1. 서론

대륙붕에서의 유전 및 가스전의 굴삭작업에 있어서 굴삭용 플랫폼 혹은 선박의 위치를 유지하기 위한 계류 수단으로써 앵커, 체인과 윈치의 결합시스템이 사용되어 왔지만, 굴삭작업이 수심 500m 이상의 해역에서 이루어지면서 부터 기존의 방식으로는 플랫폼의 정위치 유지가 기술적, 경제적으로 곤란해졌다. 그래서 플랫폼의 새로운 계류수단으로써 동위치제어 시스템(Dynamic Positioning System; 이하 DP시스템이라 칭한다.)이 고려되었다.

이러한 DP시스템의 설계에 대한 연구로서, Akasaka^(유 등[1])는 최적레귤레이터 이론을 사용하여 PID제어계에 있어서 72개의 PID 계수값을 결정하는 방법을 제안하였다. 그러나 제어계 성능에 대한 고찰이 컴퓨터 시뮬레이션 결과로써만 이루어진 아쉬움이 있고, 제어계 설계시 외란에 대한 영향과 모델링 오차는 전혀 고려되지 않고 있다. 그리고 Masahiko^(유 등[1])는 부유식 플랫폼의 계류에 DPS를 응용하기 위해서 LQI(linear quadratic with integral)법을 사용하였다. 그러나 계수결정 과정에서 생기는 오차에 대해서는 제어계 설계시 배려되지 않고 있다.

Grimble^(유 등[1])은 칼만필터를 사용하여 파도의 운동신호를 제거하고, 저주파수의 외란성분만을 추출하는 방법을 제안함으로써 추력의 발생에 사용되는 에너지를 절감하고자 했다. 제어계 설계법으로는 최적 제어법을 사용하였다.

Kasai^(유 등[1])는 반 잠수식 플랫폼의 동위치제어에 대한 연구를 피드백 이론을 기초로 하여 수행하였고, Tamehiro^(유 등[1])는 실제적인 설계측면에서 고효율적이고, 높은 실현성을 가지는 DP시스템의 설계절차를 제안하였다.

이러한 동위치제어를 위한 종래의 연구에 사용된 최적레귤레이터 이론 및 칼만필터와 적응제어 이론에 의한 제어기는 평형점이나 공칭점 근방에서의 각 파라미터에 맞추어 위치제어기를 설계하기 때문에 제어대상을 모델링할 때 나타나

는 모델링 불확실성에 대한 안정도, 강인성(robustness)의 문제를 제어기 설계시 직접 고려할 수 없게 되는 문제점을 가지고 있다. 플랫폼의 동특성은 조류나 바람 등의 해상조건에 의해 비선형적인 요소를 많이 가진다. 이러한 해상조건 및 플랫폼의 유체력을 계측하여 모델링하는데에는 상당한 어려움이 있다. 따라서 종래의 동위치제어계 설계법에서 탈피하여 제어계 설계시 모델링 오차 및 모델의 불확실성을 정량적으로 고려할 수 있고, 주파수 영역에서의 루프정형(loop shaping)이 쉬운 H_∞ 제어로의 전환은 당연하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 혼합감도문제를 이용하여 강인한 서보계를 구성함으로써 DP 시스템의 제어계를 설계하는 방법을 제안하고, LQG를 이용한 다변수 디지털 서보 제어기 및 H_∞ 최적 제어기와의 비교실험을 통하여 제안된 제어기의 유용성을 입증하고자 한다.

2. 이론

2.1 제어시스템의 모델링

해상에서 플랫폼은 Fig. 1에서 처럼 6 자유도운동을 한다. 즉, 플랫폼의 무게중심에 설정된 이동좌표계 $G(x, y, z)$ 에서 x 축 방향으로 병진운동(서지), y 축 방향으로 병진운동(스웨이), z 축 방향으로 병진운동(히브(heave)), x 축을 중심으로 한 회전운동(롤(roll)), y 축을 중심으로 한 회전운동(피치(pitch)), z 축을 중심으로 하는 회전운동(요)을 한다.

불규칙 파랑에서 플랫폼의 운동은 규칙적인 파랑에서 플랫폼의 운동들을 중첩(superposition)함으로써 얻을수 있다고 가정하면, 추진기의 추진력 및 외부 파랑의 힘에 의해서 발생하는 플랫폼의 운동은 다음과 같은 운동 방정식으로 표현할 수 있다.

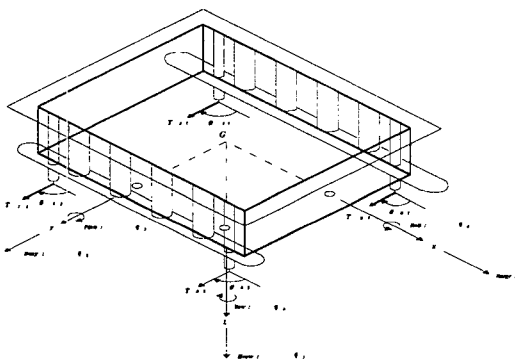


Fig. 1 Motion of floating platform and coordinate system.

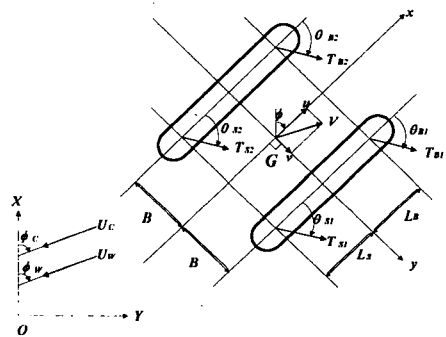


Fig. 2 Coordinate axis of a platform motion.

$$\sum_{k=1}^6 [A_{jk}\ddot{q}_k + B_{jk}\dot{q}_k + C_{jk}q_k] = F_j \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (2.1)$$

여기서 A_{jk} 는 관성모멘트 계수, B_{jk} 는 감쇄 계수, 그리고 C_{jk} 는 탄성계수이다.

본 연구에서는 플랫폼의 6 자유도운동 중에서 서지, 스웨이, 요만을 제어하는 것으로 한다. 따라서 6 자유도운동을 3 자유도운동으로 표현하기 위하여 플랫폼의 전체구조물은 수면을 부유하는 하나의 강체이이고, 플랫폼은 히브, 피치, 롤과 같은 운동을 하지 않으며 플랫폼의 무게중심은 수표면에 있는 것으로 가정한다. 위와 같은 가정하에서, 본 연구에서 고려된 제어대상은 플랫폼 하단부에 설치된 추진기의 추진력과 그 방향을 제어입력으로 하고, Fig. 2에서 공간고정좌표계 $O(X, Y, Z)$ 의 X 와 Y 축 방향의 위치 및 플랫폼의 선회각(요)를 제어출력으로 하는 시스템이다. 그리고 제어 시스템의 상태변수는 제어출력 및 제어출력들의 미분항으로 정의한다.

Fig. 1은 상기의 가정과 3자유도만을 제어하는 제어목적에 의해서 Fig. 2로 표현할 수 있으며, 식(2.1)을 각 방향에 대해서 자세히 표현하여 비선형 운동 방정식을 얻은 후 공칭점근방에서 선형화 후 정리하면 다음과 같은 상태방정식^(유·동²⁾)을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + \delta(t) \quad (2.2a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.2b)$$

여기서,

$$x^T(t) = [X, Y, \phi, \frac{dX}{dt}, \frac{dY}{dt}, \frac{d\omega}{dt}],$$

$$u^T(t) = [\theta_{B1}, \theta_{B2}, \theta_{S1}, \theta_{S2}, T_{B1}, T_{B2}, T_{S1}, T_{S2}],$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & a_{65} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} & b_{47} & b_{48} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} & b_{57} & b_{58} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} & b_{67} & b_{68} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 강인한 서보계 설계에 의한 제어기 설계

서보계 설계를 위한 성립조건은 다음과 같이 주어진다.

(a) 제어입력 u 의 수는 제어량 z_0 의 수 이상이어야 한다.

(b) 제어대상 $P(s)$ 는 목표치 발생모델 $g(s)$ 의 극과 동일한 영점을 가지지

않는다.

(c) 제어기 $K(s)$ 가 $g(s)$ 와 동일한 극을 가지지 않으면 안된다

본 논문에서는 로바스트제어 중 혼합감도문제를 적용하여 서보계를 설계하고자 한다. 그러나 전절에서 고려된 플랫폼의 경우 서보계 성립조건 (b)항과 혼합감도문제의 가해조건을 만족하지 않고 있다. 즉 허수축에 극과 영점을 가지고 있으므로 서보계의 성립이 곤란할 뿐만 아니라 혼합감도문제 자체의 해결이 어려워진다. 따라서 이러한 문제를 쌍선형 변환을 이용하여 다음과 같이 해결하였다.

1) 먼저 다음과 같은 쌍선형 변환식을 고려한다.

$$s = \frac{\hat{s} + \varepsilon_1}{\frac{\hat{s}}{\varepsilon_2} + 1} \quad (2.3)$$

단, $\varepsilon_2 = \infty$, $\varepsilon_1 < 0$

2) 식(2.3)을 이용하면 플랜트 $P(s) = (ag, bg, cg, dg)$ 를 \hat{s} 영역으로 사상시킬 수 있으며, 이것은 식(2.4)와 같이 $j\omega$ 축을 ε_1 만큼 왼쪽으로 이동 (Shift)하는 것과 동가이다.

$$ag \leftarrow ag - \varepsilon_1 I \quad (2.4)$$

3) 이동된 $P(\hat{s})$ 에 대해서 혼합감도 H_∞ 제어기

$$K(\hat{s}) = (acp, bcp, ccp, dcp)$$

를 구한 후 다시 식(2.5)처럼 ε_1 만큼 역으로 이동한다. 이러한 $j\omega$ 축 이동은 제어기 $K(s)$ 가 프로퍼(Proper)하도록 만든다.

$$acp \leftarrow acp + \varepsilon_1 I \quad (2.5)$$

그리고 혼합감도 문제를 적용한 서보계의 설계는 식(2.6)의 사양을 만족하고 $P(s)$ 를 내부안정화하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 문제로 된다. 감도함수 $S(s)$ 에 대한 하중함수 $W_1(s)$ 는 저감도화를 고려하여 저주파 영역에서 그 크기를 크게 하고 고주파 영역에서는 작게 되도록 설계한다. 제어대상을 모델링할 때나 운행조건 변화에 의해 나타나는 불확실성은 다음과 같은 승법적 섭동(Multiplicative Perturbation)으로 정의된다.

$$\|T_{rz}\|_{\infty} \leq 1 \quad (2.6)$$

여기서, $T_{rz(s)} \triangleq \begin{bmatrix} \gamma W_1 S(s) \\ W_2 K(s) S(s) \\ W_3 T(s) \end{bmatrix}$,

$$S(s) = [I + P(s)K(s)]^{-1}, \quad T(s) = P(s)K(s)[I + P(s)K(s)]^{-1}$$

$$\Delta P(s) = P_r(s)P_n^{-1}(s) - I \quad (2.7)$$

여기서, 첨자 n 은 공칭상태(Nominal State)를 r 는 섭동된상태((Perturbed State)를 의미한다. 이러한 불확실성을 고려하기 위해서 식(2.6)의 W_3 는 다음 식이 만족하도록 설계한다.

$$W_3 = W_3^* I$$

$$W_3^*(s) = \{ |W_3^*(s)| \geq \overline{\sigma}(\Delta P(s)), \forall s \quad (2.8)$$

여기서 $\overline{\sigma}(\cdot)$ 는 최대 특이치를 나타낸다.

종래의 이론에 의해 계단형태의 목표치를 추종하는 서보시스템을 설계하는 경우는, 공칭 플랜트 $P_n(s)$ 에 적분형 보상기를 추가하여 확대계를 구성하는 것이 꼭 필요하게 된다. 그러나 이런 경우 확대계가 원점에서 극을 갖게 되므로 H_{∞} 제어에서는 해가 구해지지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 하중함수 $W_1(s)$ 에 적분기를 추가하여 $W_1(0) = \infty$ 를 만족하도록 $W_1(s)$ 를 선정함으로써, 제어기 $K(s)$ 에 자동적으로 적분기를 더하도록 한다. 여기서 $W_1(s)$ 를 다음과 같이 둔다.

$$W_1(s) = \widehat{W}_1 \cdot \Lambda(s) \quad (2.9)$$

$$\text{단, } \widehat{W}_1(s) = W_1^*(s) \cdot I_{z_0},$$

$$\Lambda(s) = a^{-1}(s) \cdot I_{z_0} \quad (2.10)$$

$$a(s) = \frac{s}{s + \beta} : \beta > 0$$

보통 $W_1(s)$ 는 안정이고 최소위상이 되도록 선정한다. 혼합감도문제에 있어서 $W_1(s)S(s)$ 가 안정인 것을 요구하고 있는 점을 고려하면, 식 (2.9)과 같이 하중함수 $W_1(s)$ 를 선정함으로써 제어기 $K(s)$ 가 적분기를 갖게되고 목표값과의 오차를 없일 수 있다. 이렇게 하여 설계된 제어기 $\widehat{K}(s)$ 로부터 실제 사용될 제어기 $K(s)$ 는 식(2.11)로 된다.

$$K(s) = \tilde{K}(s) \cdot \Lambda(s) \quad (2.11)$$

이상의 내용을 종합하면 Fig. 3으로 되고 일반화 플랜트는 식(2.12)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1(s) - \tilde{W}_1(s)P \\ 0 & W_2 \\ 0 & W_3(s)P \\ I & -P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

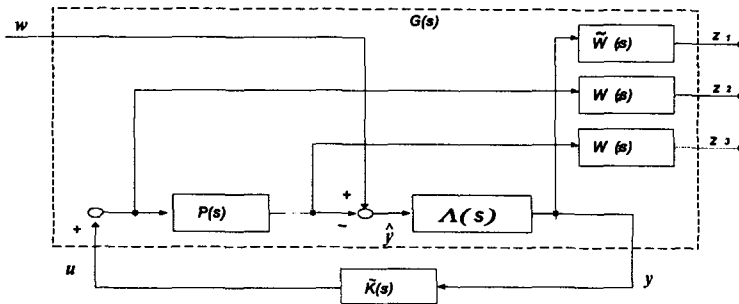


Fig. 3 Block diagram of generalized plant with the controller.

3. 실험

3.1 실험장치의 구성

제작된 플랫폼은 부유식이고, 두개의 폰툰(pontoon)을 가진 형태이며, Photo. 에 그 모형을 나타내었다 모델 플랫폼은 목재로 제작되었으며, 추진기 및 추진력 회전을 위한 장치에는 갑판위 모서리에 설치된 DC 서보모터를 사용하였고, 그 제어에는 8096 마이크로 컴퓨터를 이용하였다.

위치계측 시스템은 CCD카메라, 이미지 프레임 그레버 (SeeEye256, 분해능 256 × 256), 멀티싱크 모니터로 구성하였다. 플랫폼의 위치계측을 위하여 갑판의 플랫폼의 중심 및 선수쪽에 장착되어 주변환경보다 매우 큰 밝기값을 가지는 발광다이오드를 설치하였다. 동위치 제어 실험을 위해 제작된 시스템의 전체적인 하드웨어 구성도는 Fig. 4에 나타낸 것과 같다.

3.2 실험결과

감도함수 $S(s)$ 에 대한 가중함수 $W_1(s)$ 는 저감도화를 고려하여 저주파영역에서 게인은 크고, 고주파영역에서는 게인이 작게 되도록 다음과 같이 선정하였다. 그리고 식(2.10)의 $a(s)$ 는 식(3.2)과 같이 선정하였고 식(2.8)의 W_3 는 식(3.3)과 같이 선정하였다.

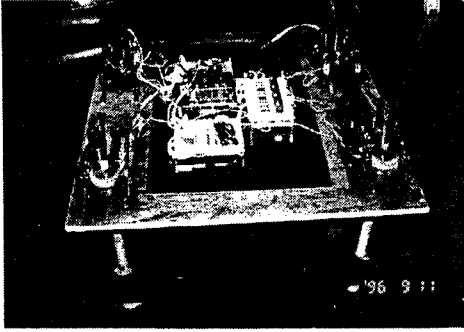


Photo. 1 Photograph of model platform.

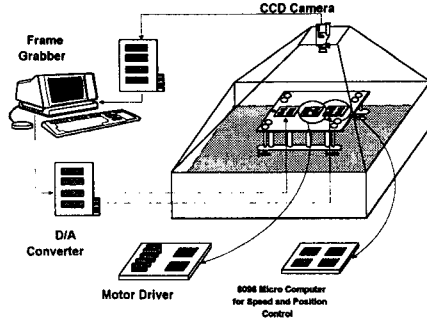


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus.

$$W_1^* = 45 \frac{100(0.02s^2 + 2 \times 0.9 \times 0.1 \times \sqrt{0.02}s + 0.1^2)}{100s^2 + 2 \times 0.9 \times 0.1 \times \sqrt{100}s + 0.1^2} \quad (3.1)$$

$$a(s) = \frac{s}{s + 0.000015} \quad (3.2)$$

$$W_3^* = 4.5 \frac{12s^2 + 2 \times 0.9 \times 3.5 \times \sqrt{2}s + 35^2}{3s^2 + 2 \times 0.9 \times 35 \times \sqrt{3}s + 35^2} \quad (3.3)$$

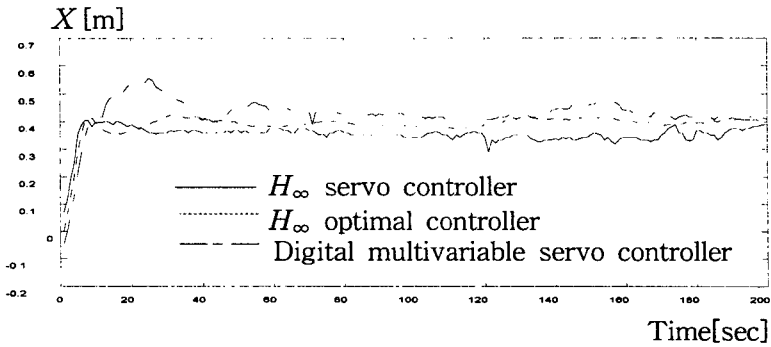


Fig. 5 Experimental results for step reference(X direction).

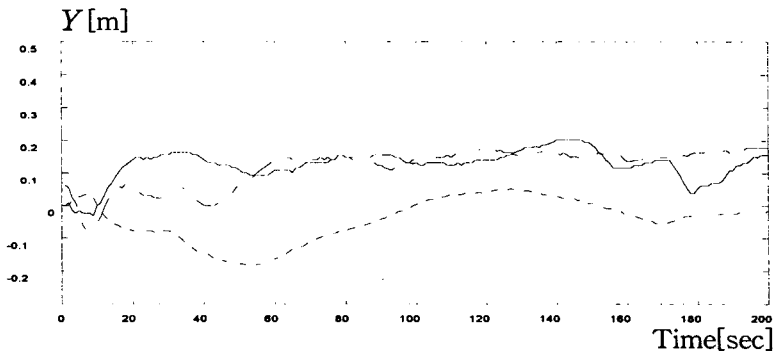


Fig. 6 Experimental results for step reference(Y direction).

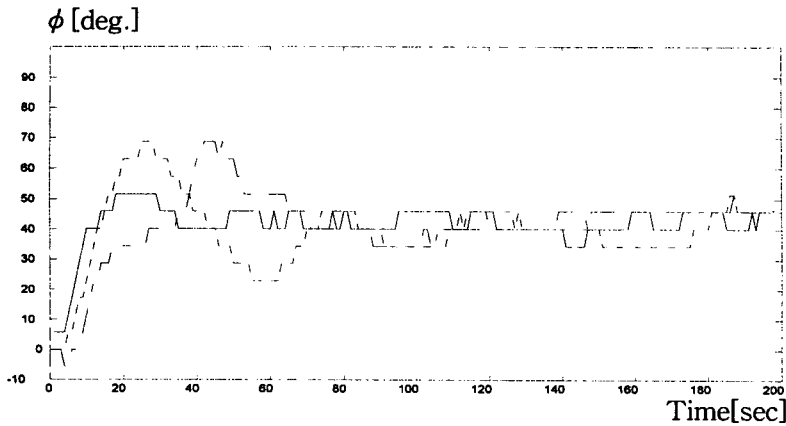


Fig. 7 Experimental results for step reference(ϕ direction).

Fig. 5, Fig. 6 그리고 Fig.7에서 LQG를 이용한 다변수 디지털 서보 제어기(일점쇄선), H_{∞} 최적제어기(점선) 및 제안된 H_{∞} 서보 제어기(실선)의 응답결과이다. 목표값은 X 방향으로 0.39[m], Y 방향으로 0.15[m], ϕ 방향으로 $\pi/4$ 이었다. 정정시간이나 정상편차의 크기를 비교해 볼 때 그 제어성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

4.결론

본 논문에서는 정확한 추력벡터를 생성할 수 있는 수진식 추진장치를 채용한 반잠수식 2-폰툰형 플랫폼에 대하여 모델링 오차에 의한 불확실성과 강인성을 고려할 수 있고 정상편차를 없앨 수 있는 강인한 동위치 제어기 설계법을 H_{∞} 제어법을 사용하여 제안하였다. 그 유용성을 검증하기 위해 8096 원칩기술과 화상처리기술을 복합한 시스템을 구현하여 모델실험을 행하였다.

실험결과에서, 강인한 서보제어기 설계사양인 정상상태에서의 편차를 없애는 것을 확인할 수 있으므로, 종래의 동위치제어기 설계법보다는 제안된 동위치제어시스템이 모델링오차와 정상편차에 대해 강인하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] 유휘룡, 김성근, 김상봉, “반잠수식 해양구조물의 동위치제어에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회지, 제 19권 제3호, pp. 661-669, 1995.
- [2] 유휘룡, 김성민, 김상봉, “ H_{∞} 제어법을 이용한 부유식 플랫폼의 동위제어”, 한국정밀공학회 '96춘계학술대회논문집, pp 437-442, 1996