JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 17, No. 12 : 2944~2951 Dec. 2013

Offshore Plant용 발라스트 제어 시스템에 관한 연구

오진석*

A Study on the Ballast Control System for Offshore Plant

Jin Seok Oh*

Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

요 약

최근 유가 상승과 에너지 소비 확대로 인하여 해양 플랜트가 재조명되고 있다. 이러한 해양 플랜트는 외부 환경에 많은 영향을 받기 때문에 발라스트 시스템을 이용한 자세 제어가 필수적이다. 기존 해양 플랜트의 발라스트 시스템은 펌프 6개와 발라스트 탱크 4개를 이용하여 자세 제어를 수행하였다. 그러나 이러한 시스템은 많은 장비가 설치되어야 함으로 고장에 취약하다. 본 논문에서는 새로운 발라스트 시스템과 그에 따른 IT 기반의 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 시스템과 알고리즘은 시뮬레이터를 제작하여 실험을 진행하였으며, 그 결과 시뮬레이터가 안정적으로 제어됨을 확인하였다.

ABSTRACT

Recently, the offshore plant has been revived by rise in oil prices and energy consumption. Due to the external environmental impact, the ballast system is essential for an offshore plant.. The ballast system for the existing offshore plant, consist of pump 6EA and Ballast tank 4EA, is performed by the tilt control. However, this system is vulnerable to a failure due to the fact that a lot of equipment needs to be installed within the system. In this paper, a new concept of ballast system and the control algorithm based on IT is proposed. Simulator has been created to test the proposed system and algorithm, and as a result, it has proven that it is controlled stably.

키워드 : 해양 플랜트, 발라스트 제어, 모형 실험, 균형 제어, 기울기 제어

Key word : Offshore plant, Ballast control, Model experiment,Balance control, Slope angle control

접수일자 : 2013. 10. 01 심사완료일자 : 2013. 11. 04 게재확정일자 : 2013. 11. 15

* **Corresponding Author** Jin Seok Oh (E-mail : ojs@kmou.ac.kr, Tel : +82-10-9668-4283)
Division of Marine Engineering Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.12.2944 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

고유가 행진이 지속됨에 따라 해양 플랜트에 대한 발주가 늘어나고 있다. 이는 최근 유가 상승과 에너지 소비 확대로 심해 유전 개발 시 참여 업체의 손익이 안정적으로 확보되었기 때문이다. 최근의 해양 플랜트는 근해에서 심해로 이동함에 따라 심해지역이나 파도가 심한 해상에서 원유를 채굴 할 수 있는 선박형태의 시추설비로 개발이 되고 있다. 이러한 해양 플랜트는 대부분 많은 장비를 싣고 있으며, 작업 과정에 많은 중량물 이동이 일어난다. 이로 인하여 안정적인 평형 유지를 위한 제어가 필수적이므로, 안정적으로 평형을 유지하는 발라스트 시스템을 보유하고 있다[1]-[4].

특히, 해양 플랜트 침몰, 플랜트의 기울어짐에 의한 해저 파이프의 파손 등이 일어나게 되면 심각한 해양오염이 일어나게 된다. 그러므로 해양 플랜트용 발라스트 제어시스템의 안정성은 매우 중요하다.

일반적으로 해양 플랜트는 그림 1과 같이 4개의 발라스트 탱크와 6개의 발라스트 펌프를 이용하여 자세를 제어한다[5]. 그러나 이러한 발라스트 시스템 구조는 탱크간의 유체 이동거리가 멀기 때문에 응답성이 느리며, 많은 장비가 설치되어야 함으로 고장에 취약한 측면을 가진다. 본 논문에서는 4개의 발라스트 탱크와 1대의 발라스트 펌프, 그리고 8개의 밸브를 이용하여 전체 시스템의 자세를 제어하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 발라스트 제어시스템을 설계하고, 이를 기반으로 모형수조 실험을 수행하였다. 수조 실험을 통하여 발라스트 제어시스템이 안정적으로 동작하는 것을 확인하고자 하였다.

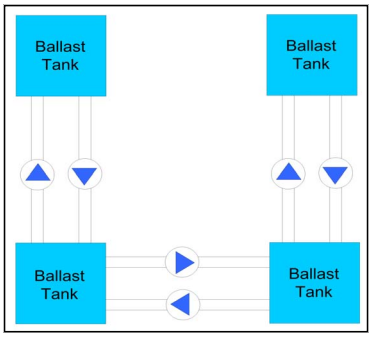

그림 1. 기존 발라스트 시스템
Fig. 1 Existing of ballast system

Ⅱ. 발라스트 제어 시스템

2.1. 플랜트 구조 모델

부력은 유체 중에 있는 유체에 작용하는 연직 상향의 힘으로써 이 힘은 물체에 의해 배제된 유체와 같은 체적의 유체의 무게와 같다. 부력을 B, 유체의 비중량을 γ, 유체 중 물체의 체적을 V로 정의 할 때 부력을 식으로 나타내면 수식 1과 같다.

$$B = \gamma \times V \tag{1}$$

위의 식에 의하여 전 구역의 부력이 동일하게 설계된 해양플랜트는 이후 적재되는 물체에 따라 무게 중심이 바뀌게 되어 불균형이 생기게 되므로 전 구역에서 발라스트 제어가 필요하다. 본 연구에서 사용한 해양플랜트 모형도 전 구역의 부력을 좌우대칭이 되게 설계하여 실험하였기에 발라스트 평형 제어에서는 별도로 부력을 고려하지 않았다.

본 연구에서 발라스트 평형 제어 알고리즘을 구축하기 위하여 그림 2와 같은 상황을 고려하였다.

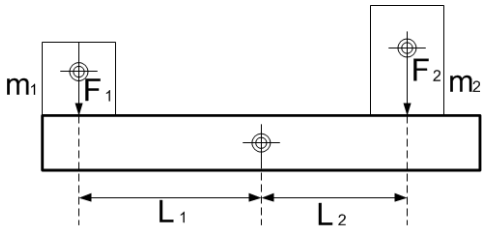

그림 2. 균형 상태에 있는 플랜트의 구조
Fig. 2 The structure of plant in balance state

플랜트 위에 물체 m_1과 m_2의 질량을 갖는 물체가 놓여있는 경우, 플랜트가 평형을 이루기 위해서는 플랜트의 무게 중심과 두 개의 물체간의 균형이 이루어져야 한다. 이를 식으로 나타내면 수식 2과 같다.

$$m_1 \times L_1 = m_2 \times L_2 \tag{2}$$

평판의 중심과 물체의 무게중심간의 거리를 L_1과 L_2로 가정했을 때, 플랜트 위에 물체가 플랜트에 가하는 힘은 F_1, F_2가 된다.

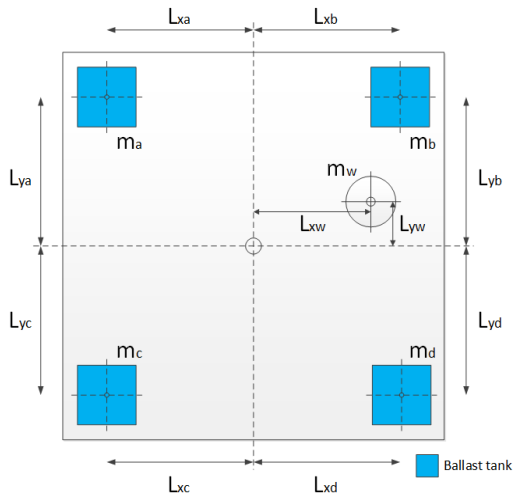

그림 3. 2-D 상태의 플랜트 구조
Fig. 3 The structure of plant on a 2-D

그림 2를 2차원 평면 구조로 나타내면 그림. 3과 같다. 플랜트위에 물체의 무게 이동이 발생하더라도 균형을 유지하기 위해서는 균형 유지를 위한 물탱크를 가져야 한다. 일반적으로 해양플랜트에서는 그림 2와 같이 4개의 물탱크가 설치되며, 물탱크의 물을 이동하면서 균형을 유지한다.

각 물탱크의 질량을 m_a, m_b, m_c, m_d, 임의의 물체의 질량을 m_w로 정의한다. 플랜트의 무게 중심에서 각 탱크의 거리를 x축은 $L_{xn}(n=a,b,c,d)$, y축은 $L_{yn}(n=a,b,c,d)$로 표시하고, 임의의 물체와 플랜트의 중심점과의 떨어진 거리를 x축은 L_{xw}, y축은 L_{yw}로 정의 한다. 만일 플랜트가 균형 상태에 있다면 수식 3이 성립하게 된다[5]-[7].

$$\text{x-aixs}: m_aL_{xa}+m_cL_{xc}=m_bL_{xb}+m_dL_{xd}+m_wL_{xw}$$
$$\text{y-aixs}: m_aL_{ya}+m_bL_{yb}+m_wL_{yw}=m_cL_{yc}+m_dL_{yd} \quad (3)$$

수식 3은 수식 2의 1차원을 2차원으로 확장한 것이다. 물체의 위치에 따라 수식은 변화된다. 즉 플랜트의 무게 중심점을 기준으로 하여 좌변의 모멘트와 우변의 모멘트가 같아야 한다. 그러므로 물체에 의해 발생하는 모멘트 m_wL_{xw}, m_wL_{yw}는 물체 위치에 따라 부호가 결정된다.

2.2. 시스템 구성

본 논문에서는 실제 해양플랜트와 유사한 형태의 정사각형의 부체를 제작하고 네 모서리 부근에 발라스트 탱크를 설치하였다. 또한, 단일 펌프에 8개의 밸브를 이용하여 각각의 발라스트 탱크의 입출력을 제어하여 하나의 탱크에서 다른 탱크로 물의 흐름을 제어할 수 있도록 하였다. 다음 그림 4는 논문에 사용된 해양플랜트용 발라스트 탱크 모형의 구조를 나타낸 것이다.

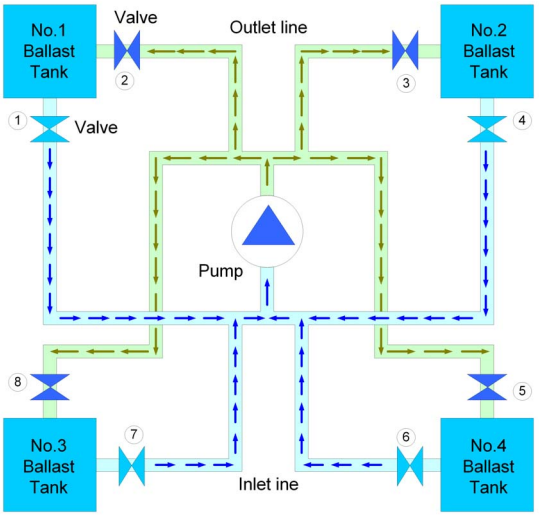

그림 4. 제안하는 발라스트 시스템
Fig. 4 Suggested the ballast system

발라스트 시스템의 중앙 제어 장치는 상황에 따라 펌프와 밸브의 on/off를 제어함으로써 해양 플랜트의 자세 제어를 수행한다. 이때, 각 발라스트 탱크의 수위차에 의한 펌프의 토출 유량의 변화는 시뮬레이터 제작상 펌프 입구측 압력의 변화가 작기 때문에 본 시뮬레이션에서는 고려하지 않았다.

2.2.1. Power Controller

(1) 중앙 제어부

중앙 제어부는 마이크로 컨트롤러로 구성되어 있으며, 발리스트 컨트롤 시스템의 지시를 받아 I/O 보드를 제어하는 역할을 한다. 그림 5는 중앙 제어기 구성도를 나타낸 것이다. 마이크로 프로세서의 소스 전류가 하나의 채널당 최대 20mA이다. 그러나 트랜지스터가 On 되기 위해서 요구되는 전류는 솔레노이드 밸브의 크기에

따라 좌우된다. 그러므로 ULN2984를 이용하여 중앙제어기의 출력을 낮추고 스위칭 소자인 TIP31C의 요구전류는 높일 수 있고, 이를 통하여 회로의 안정성을 확보할 수 있다.

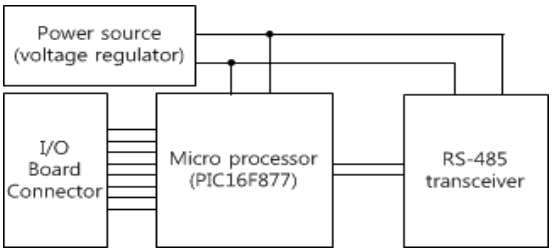

그림 5. 중앙 제어기 구성도
Fig. 5 Diagram of central controller

(2) I/O 보드

I/O 보드는 각각의 솔레노이브 밸브의 On/Off 제어 및 펌프를 제어한다. 다음 그림 6은 I/O의 기본구조를 나타낸 것이다.

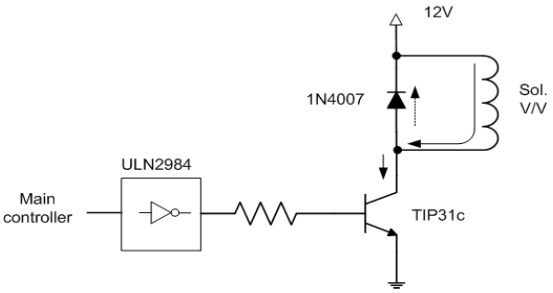

그림 6. I/O 기본 설계
Fig. 6 A basic design of I/O

솔레노이드 밸브가 On 되어 있을 때 솔레노이드 밸브를 통하여 전류가 흘러 스위칭 소자인 트렌지스터 TIP31C로 흐른다. 만일 제어 신호가 Off이면 스위칭 소자는 전원을 차단하지만 솔레노이드 밸브의 남은 기전력으로 전류의 흐름이 지속적으로 발생한다. 이러한 전류흐름은 Free-Wheeling 다이오드를 통하여 회전하면서 전력을 소모한다.

2.2.2. 통신 시스템 구성

발라스트 시스템은 각 제어기와 센서 간에 RS-485 통신을 사용한다. 각도 센서는 고유 인식 문자를 갖고 있으며, Power Controller도 별도의 통신 프레임을 갖고 있다. 또한 통신은 전체 시간 1초를 두고 제어할 수 있도록 하였으며, 각 제어기들과 약 200~300rns 단위로 통신을 수행하도록 하였다. 그림 7, 8은 통신 프레임을 나타낸 것이다.

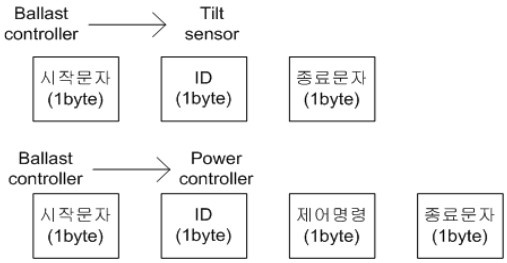

그림 7. 통신 프레임(발라스트 컨트롤러 명령)
Fig. 7 Communication frame(Command of ballast controller)

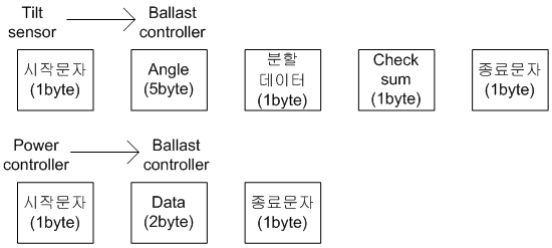

그림 8. 통신 프레임(응답 데이터)
Fig. 8 Communication frame(Response data)

Ⅲ. 발라스트 제어 알고리즘

3.1. 기본 제어 동작

발라스트 시스템의 자세 제어는 해양 플랜트에 설치된 4개의 발라스트 탱크 유체를 이동하여 균형을 맞출 수 있도록 구성된다. 해양 플랜트의 발라스트 시스템을 단순화하면 그림 9와 같다. 그림 9에서 각 탱크를 a, b, c, d로 명칭을 정한다.

해양 플랜트 모형의 y축 상단은 선수, 하단을 선미로 가정하면, 해양 플랜트의 기울기를 좌표 평면상에 나타낼 때, 해양 플랜트의 기울기를 나타내 점 P는 (x,y)로 나타낼 수 있다. 이때, x축 값은 해양 플랜트의 Heeling의 정도를 나타내며, y축 값은 해양 플랜트의 Trim의 정도를 나타내도록 하였다.

x축 값이 +일 경우, STBD의 흘수가 PORT의 흘수보다 큰 경우를 나타내며, -일 경우, STBD의 흘수가 PORT의 흘수보다 작은 경우를 나타낸다. y축 값이 +일 경우, 선수의 흘수가 선미의 흘수보다 큰 경우를 나타내며, -일 경우, 선수의 흘수가 선미의 흘수보다 작은 경우를 나타낸다. 점 P가 (0,0)인 경우, 해양 플랜트의 Trim와 Heeling은 모두 0이 된다.

이러한 해양 플랜트의 기울기를 나타내는 점 P의 움직임은 발라스트 탱크의 위치와 파이프 라인의 구성에 의하여 시간에 따라 D_1, D_2, D_3, D_4, 4개 축의 8가지 방향으로 나타난다. D_1 방향의 움직임은 a와 b, c와 d 탱크간 유체의 흐름이 에 의해 발생하며, D_2 방향의 움직임은 a와 c, b와 d 탱크간 유체의 흐름에 의해 나타난다. D_3 방향의 움직임은 b와 c 탱크간 유체의 흐름에 의해 나타나며, D_4 방향의 움직임은 a와 d 탱크간 유체의 흐름에 의해 나타난다.

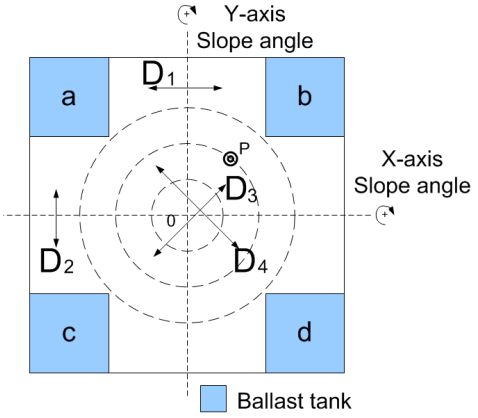

그림 9. 유량 제어의 방향
Fig. 9 The direction of flow control

3.2. 발라스트 시스템의 유체 제어

본 연구에서 제안하는 발라스트 시스템의 유체 제어는 4개의 방향으로만 가능하다. 유체 제어는 무게 중심의 이동을 의미하며, 무게 중심 이동은 해양 플랜트의 기울기 변화로써 나타나게 된다. 그림 10은 해양 플랜트의 기울기를 나타내는 점 P가 임의의 점에 위치할 때, 원점 (0,0) 지점으로 이동하는 것을 나타낸 것이다. 이때 가장 빠르게 0점으로 안정화 할 수 있는 방법은 점 P이 R_1 경로로 이동하는 것이다. 그러나 발라스트 시스템의 구조상 점 P의 이동 경로는 4가지 이동 방법(D_1, D_2, D_3, D_4)의 조합으로 나타나는 R_2, 또는 R_3로만 가능하다.

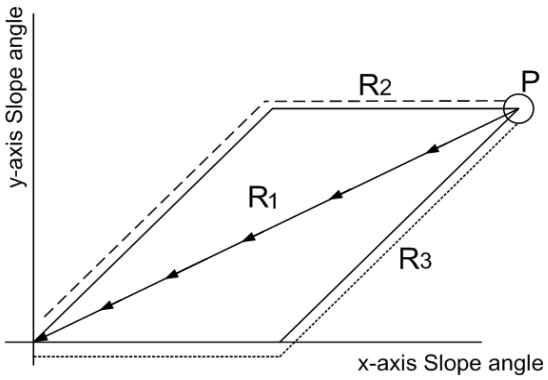

그림 10. 경사 각도 제어의 경로
Fig. 10 The route of slope angle control

본 연구에서 제안하는 발라스트 시스템의 자세 제어 성능의 기준은 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 해양 플랜트의 Heeling과 Trim이 0이 되는데 까지 걸리는 시간이고, 두 번째는 기울기를 나타내는 점 P가 원점에서 떨어져있는 시간에 원점에서 부터의 거리를 곱한 값을 적분한 값이다. 이 두 번째 기준은 해양 플랜트의 안정성을 나타내는데, 이 값이 작을수록 해양 플랜트의 안정성이 높은 것으로 판단할 수 있다.

발라스트 시스템의 펌프 토출 유량이 일정한 경우, 그림 10에서 이동경로 R_2, R_3 어느 경로를 선택해도 해양플랜트의 기울기를 나타내는 점 P가 (0,0)으로 도달하는데 걸리는 시간은 동일하지만, 해양 플랜트의 안정성은 차이가 발생한다. 다음 그림 11의 화살표는 일정 시간에 같은 기울기의 이동 거리를 이동하더라도 접근 방식에 따라 시간에 따른 해양 플랜트의 안정성이 차이가 발생한다는 것을 나타내고 있다.

그림 11의 점선은 해양 플랜트 무게중심의 원점 (0,0)에서 같은 거리의 점을 이어 원을 그린 것이다. 점 H와 점 L에서 각 유체 제어 방향에 따라 점선에 도달하는데 걸리는 시간의 차이가 발생한다. 점 H에서는 H_b 경로로 이동했을 때 점선에 도달하는데 걸리는 시간이 H_a 경로로 이동하는 경우보다 더 빠르며, 점 L에서는 L_a 경로로 이동했을 때 점선에 도달하는데 걸리는 시간이 L_b

경로로 이동하는 경우보다 더 빠르게 도달함을 직관적으로 확인할 수 있다.

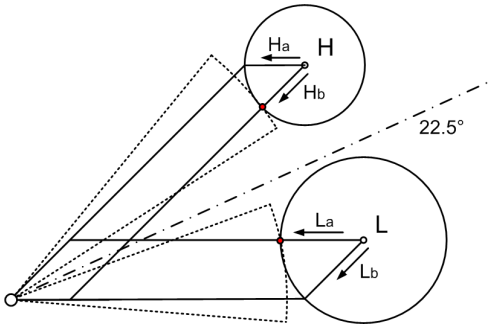

그림 11. 경사 각도 제어의 방법
Fig. 11 The method of slope angle control

3.3. 발라스트 시스템 제어 알고리즘

앞서 언급한 발라스트 시스템의 유체 제어를 일반화하면 해양 플랜트의 기울기를 나타내는 점 P가 임의의 값을 가질 때, 원점으로 복원하기 위한 유체의 이동 경로는 그림 12와 같이 나타낼 수 있다.

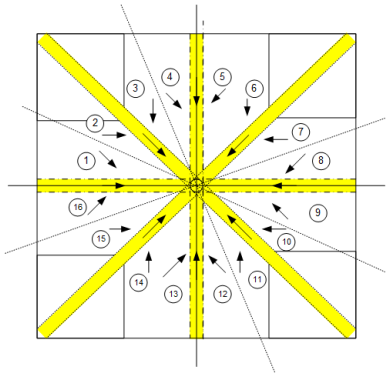

그림 12. 경사 각도 제어의 방향
Fig. 12 The direction of slope angle control

그림 12에서 제어 시스템은 일정한 오차 범위를 갖도록 하였다. 즉 0°로 접근할 때 ±0.1°의 오차 범위를 주어 －0.1~0.1° 사이를 0으로 판단하도록 함으로써 제어 안정성을 확보하였다. 이러한 범위는 그림 12에서 음영으로 표시한 상하 좌우 대각선 방향의 경우에도 동일하게 적용하였다. 그림 13은 제어 알고리즘을 나타낸 것이다.

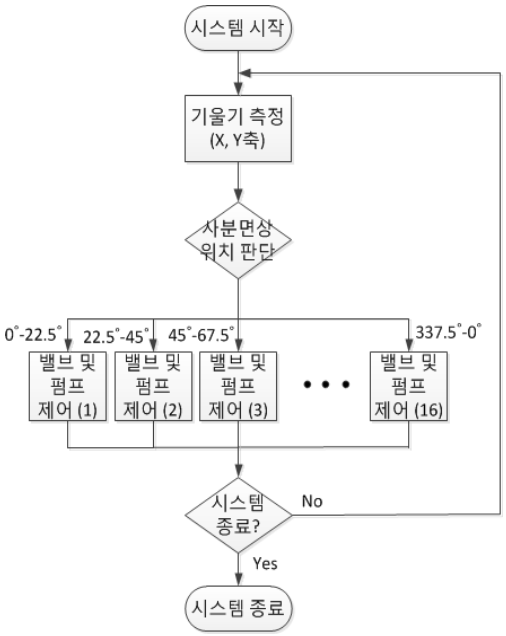

그림 13. 경사 각도 제어 알고리즘
Fig. 13 The slope angle control algorithm

Ⅳ. 실험 및 고찰

4.1. 실험 장치 구성

발라스트 시스템의 제어 알고리즘을 테스트하기 위하여 해양 플랜트 중에서 Semi-submersible 모형을 아크릴로 제작하였다. 발라스트 탱크의 크기는 500mm x 500mm x 240mm 이며, 표 1은 실험장치의 사양을 나타낸 것이다.

표 1. 실험 장치 사양
Table. 1 Specifications of simulator

	장비명	모델명	제작사
1	기울기센서	M360	DAS
2	솔레노이드밸브	HDW2120	HYOSIN
3	펌프모터	P/Motor-P1	RoHS

그림 14와 15는 제어장치의 구성도 발라스트 실험 모형을 나타낸 것이다. 제어장치는 하부에 유체 시스템을 배치하고, 상부에 제어 시스템을 배치하는 형태로 구성하였다. 발라스트 자동 조절 장치의 제어는 아크릴

로 구성하고 펌프 및 밸브는 12V 전원을 사용하는 것으로 구성하였다. 전체 시스템의 유체 파이프는 PVC형태의 고무관을 사용하여 구성하였다. 또한 기울기 센서는 Roll축에 1기, Pitch 축에 1기를 설치하여 측정하였다. 그림 15의 빨간색 표시부분은 테스트를 위해 사용한 추를 나타낸 것이다.

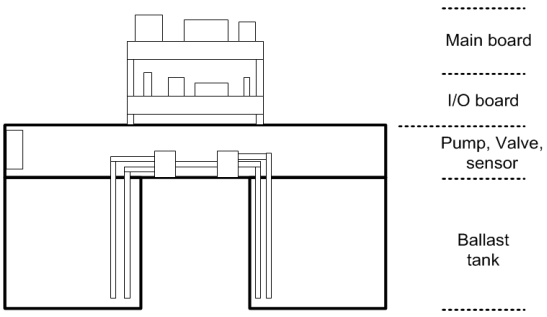

그림 14. 플랜트 모델 구조
Fig. 14 The structure of plant model

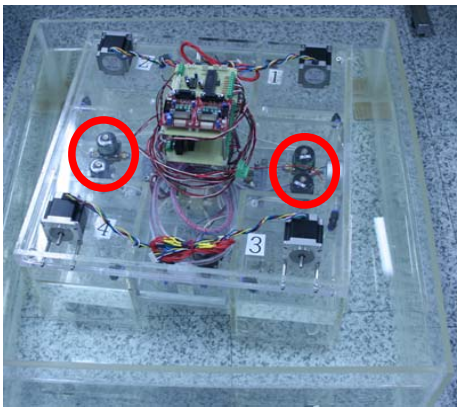

그림 15. 실험 모델
Fig. 15 Experiment model

4.2. 실험 결과

본 논문에서 제안한 발라스트 제어 알고리즘을 테스트하기 위해 1kg의 추를 플랜트위에 위치시켜 플랜트를 기울인다. 이후 제어 알고리즘을 구동하여 플랜트가 수평을 찾아가는 과정을 NI의 DAQ 장비를 이용하여 0.1초 간격으로 기울기를 측정하였다. 다음 그림 16은 실험결과를 나타낸 것이다.

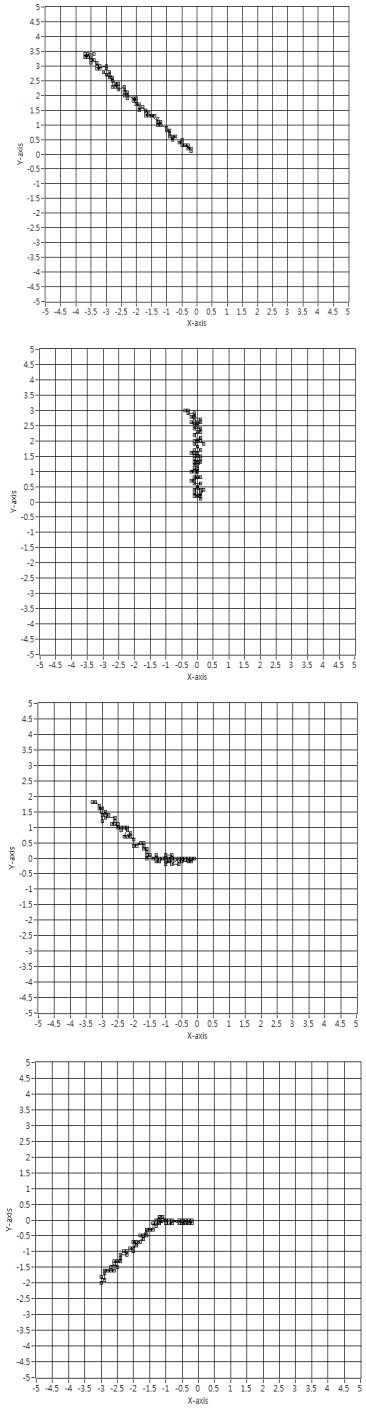

그림 16. 경사 각도 조절 시스템 실험 결과 (처음부터 차례대로 (a), (b), (c), (d))
Fig. 16 The experiment result of slope angle control system

그림 16의 실험 결과를 분석해 보면, (a)는 좌표 좌측 상단에 위치한 기울임이 시간이 경과하면서 보정되어 수평 좌표 (0,0)으로 이동하는 것을 보여주고 있고, (b)는 Y축 상부에 있던 기울임이 시간에 따라 수평위치인 좌표 (0,0)으로 이동하는 것을 보여주고 있으며, (c)와 (d)의 경우도 기울어진 해양 플랜트 모형이 일정 시간을 거쳐서 좌표(0, 0)으로 평형을 되찾고 있음을 확인 할 수 있다. 본 실험은 소형 수조에서 실험하였기 때문에, 모형의 움직임에 따라 약간의 파랑이 발생하고 수조에 의한 반사파의 영향으로 모형이 움직이게 된다.

이러한 모형의 움직임은 기울기 센서에서 약간의 떨림으로 나타나게 되며, 이러한 문제를 해결하기 위해 적용한 오차범위 안에서 정상적으로 제어 되고 있음을 확인 할 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 기존 해양 플랜트의 자세 제어를 위한 발라스트 시스템에 대해 조사 및 검토를 진행하였으며, 기존의 방식보다 유지 보수 및 정비가 비교적 간단한 새로운 해양 플랜트용 발라스트 시스템을 제안하였다.

기존의 해양 플랜트 중 Semi-Submersible 발라스트 시스템은 Semi-auto 개념으로 운용되는 경우가 대부분인 것으로 파악하고 있다. 본 제어방식은 갑판 및 수면 상부 구간의 하중변화로 인해 안정성에 영향을 받는다. 본 연구는 궤적추종 기반의 자동 발라스트 제어시스템에 관하여 연구한 것으로 기존의 시스템과 메커니즘적으로 차이가 있다.

제안한 해양 플랜트용 발라스트 시스템을 모형으로 제작하였으며, 단일 펌프와 밸브를 이용하여 해양 플랜트의 자세제어를 수행하였다.

실험 결과, 본 논문에서 제안한 시스템이 모형의 자세 제어를 안정적으로 수행하는 것을 알 수 있었다. 앞으로 실제 파랑이나 계류 등의 영향을 고려한 평형 유지에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 또한, CAN 기반의 중앙제어 시스템과 연동할 수 있는 신호처리 시스템에 대하여 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

REFERENCES

[1] S. Y. Hong, P. M. Lee, Y. C. Kim and D. C. Hong, “An Experimental Analysis on th Motion Response of a Moored Semi-Submersible Platform in Regular Waves ”, Journal of ocean engineering and technology, vol.2, no.1, pp.59-70, 1988.

[2] A.R. Cho, N. G. Koo, G. P. Park, G. Y. Lee, “Modeling and Dynamic Analysis of Drill string compensator for Offshore Drilling”, in proceeding of the annual autumn meeting SNAK, mokpo, pp 887-893, 2011.

[3] M. S. Kim, J. J. Park, Y. K. Ahn, B. W. King an K. Eom “Hydrodynamic characteristics of Drillship for North Sea”, in proceeding of Naval Architects of Korea, Vol. 2011, No.6, 2011.

[4] Thor I. Fossen, *Marine Control Systems*, pp77-88, 2002

[5] D. K. Kim, “A Summary on the System for Drilling Drillship”, in proceeding of Korean Society of Marine Engineering, Vol. 2006, pp. 229-300, 2006.

[6] M. S. Lee, S. W. Namkung, H. B. Kwon, S. S. Kim and T. O. Tak, “A Study on the Development of Vehicle Center of Gravity Measurement System,” in Proceeding of the KSAE spring conference, Vol.2, pp.800-806, 2006.

[7] MioMir Vukobratovic, Branislav BoRovac, “Zero Moment Point-Thirty five years of its life”, International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 1, pp.157-173, 2004.

오진석(Jin Seok Oh)

1983년 한국해양대학교(공학사)
1989년 한국해양대학교(공학석사)
1996년 한국해양대학교(공학박사)
2009년 일본큐슈대학(공학박사)
2009 ~ 현재 한국해양대학교 산학연 ETRS 센터 소장
1996년 ~ 현재 한국해양대학교 기관공학부 교수
※관심분야 : Ocean Plant, Monitoring & Control System, Communication System