

외해용 양식 구조물 개발에 관한 연구

신종근* · 정성재** · 윤지현***

*,**,*** 국립수산과학원 수산공학팀

A Study on the development of the aquaculture fishcage for the open sea

Jong-Keun Shin* · Seong-Jae Jeong** · Ji-Hyun Yoon***

*,**,*** Fisheries Engineering Team, National Fisheries Research & Development Institute, Pusan 619-902, Korea

요약 : 지금까지 우리나라의 양식 산업은 양적인 측면에서 괄목할 만한 성장을 하였으나, 양적인 성장의 이면에 많은 문제를 파생시켜 최근에는 여러 가지 형태로 그 부작용이 나타나고 있다. 특히, 우리나라 양식 시설의 약 82%가 남해안의 내만에 집중 시설되어 있어 생활오수와 공장폐수의 유입 및 한정된 영역에서 장기간의 고밀도 양식으로 양식장들의 자가 오염 등으로 어장환경이 악화되고 있다. 이 같은 문제를 해소하기 위한 방안으로는 수질이 양호하며 해수유동이 많아 환경 피해가 적은 외해를 이용하는 것이 점차 대두되고 있다. 그러나 외해는 수질이 비교적 양호하나, 양식시설에 직접 피해를 줄 수 있는 높은 파도와 강한 흐름이 존재하고 있어 기존 내해용 양식 시설로 외해로 진출하는 것이 곤란하므로 외해의 해양조건에 알맞은 양식 시설물의 개발이 필요하다. 본 연구는 이러한 필요성을 염두에 두고 외해양식에서 사용가능한 양식구조물의 설계에 필요한 이론적 연구와 실험적 해석을 수행하였다.

핵심용어 : 외해양식 시설, 동응답특성, 모형실험

Abstract : Until now, korean aquaculture industry has been grown largely from a quantitative viewpoint. However, an increase of quantity has caused lots of problems producing a derived effect recently. Nearly 82% of korean aquaculture farms had been installed mainly at inshore of the southern sea and also sewage, factory wastes, high density of fishcage at the limited area and autoinfection have deteriorated inshore fisheries. The offshore have been on the rise for the solution to these problems since it has clear seawater reduces the environmental pollution with much current. As a matter of fact, the existing inshore fishcage facilities have trouble advancing to the offshore due to the rough environmental conditions such as a high sea, strong currents etc.; therefore, it is necessary to develop a new cultivating equipment fit the open sea conditions. In this research, the theoretical study and experimental analysis have been carried out for the fishcage design of the structure which is able to use at the open sea

KEY WORDS : offshore fishcage, dynamic response, model test

1. 서론

지금까지 우리나라의 양식산업은 양적·질적인 측면에서 괄목할 만한 성장을 하였으나, 그 이면에는 많은 문제가 파생되어 여러 가지 형태로 그 부작용이 나타나고 있다. 특히 우리나라 양식시설의 약 82%가 남해안의 수심 20m 이내의 내만에 집중되어 있으며, 생활하수와 공장폐수의 유입 및 한정된 공간에서 장기간 이루어진 고밀도 양식으로 인해 자가오염이 심화되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수질이 양호한 외해로 양식장을 옮기는 방안이 점차 논의되고 있다. 그러나 외해는 수질이 양호하나 양식시설에 직접적으로 피해를 미칠 수 있는 강한 조류와 파도 및 태풍 등으로 인해 기존의 양식시설을 외해

(가) * 정희원, jkshin@nfrdi.re.kr 051)720-2570

(나) ** 정희원, denkmal@moma.go.kr 051)720-2592

(다) *** 정희원, yjh0851@korea.com 051)720-2592

로 이동하는 대는 한계가 있다. 따라서 외해의 해양조건에 적합하며 외해라는 특성상 태풍에 직접 노출되어도 시설피해가 적고 생물피해를 최소화 할 수 있는 양식시설물의 개발이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 외해의 특성을 충분히 고려한 설계하중의 산정과 구조물에 대한 해석을 통하여 집중하중에 의한 부재의 변형 및 비틀림을 최소화 하여야 한다. 외해양식시설에 대한 계류시스템도 파랑하중과 충격력을 고려하여 적절하고도 충분하게 설계되어야 한다. 또한 시설물이 외해에 적용될 수 있다는 문제뿐만 아니라 양식시설물에서 직접적으로 사육되는 생물의 사육환경을 고려하여야 한다. 양식시설 자동화도 설계요소의 일부분으로 추가해야 하므로 외해용 양식구조물의 설계는 양식시설의 특성을 망라하는 여러 가지 파라미터의 최적 조합을 찾는 문제로 귀결된다.

2. 양식시설물 연구현황

지금까지 수행된 가두리 시설에 대한 외국의 연구는 1954년 양식이 처음 시작된 일본에서 시작되어 60년대에 들어와 노르웨이와 스코틀랜드에서 본격적으로 수행되었다.

우리나라에서는 1975년부터 본격적으로 통영에서 잡은 고기 를 가두리에 넣어 품질을 키우는 축양을 시작으로 가두리 양식 이 시작되었다. 가두리 양식시설의 형태는 크게 수상에 설치되는 부유식, 필요에 따라 침하가 가능한 침하식 및 항상 적정 수심에 시설되는 수중식으로 크게 나눌 수 있다. 현재 설치된 대부분의 가두리는 부유식이며 시설 및 관리비용은 적으나 자연 재해에 취약하다는 단점이 있다. 부침식 가두리에 대한 연구는 국립수산과학원의 연구를 통해 1995년 시설되었으며 침하시의 자세제어가 원활하지 못하다는 단점이 있었다(김외, 1998). 수중식 가두리는 자연재해를 통해 겪은 경험을 토대로 일부 어업 인들에 의해 수면에서 1~2m 아래에 시설되어지기도 하였다.

체계적인 연구의 결과로 이루어진 대표적인 수중식과 외해 용 양식시설물은 스웨덴과 미국에 의해 개발되어졌다. 스웨덴의 경우에는 수심 30~50m에 시설될 수 있는 원형과 육각형의 반잠수식 시설(3000, 4500, 6000qm)이 있으며 고가에 태풍에 대한 견증이 없다는 것이 단점이다. 반면 미국의 경우 수심 40~50m에 시설이 가능한 수중식 가두리 시설(3000, 4500, 6000qm)이 있으며 역시 고가에 잠수부를 통한 작업만이 가능하기 때문에 관리비용이 높다. 미국의 UNH(University of New Hampshire)대학이 Marine만에서 외해양식시설을 개발하기 위한 프로젝트에서 실제 해상상황에 대한 Tension leg cage, modified gravity-type 및 four-cage grid 형태의 모델에 대한 유한요소 모델화를 통해 양식시설의 설치에 필요한 부속구를 장착하고 파랑과 해류에 대한 해석을 수행하였다. 이는 모델의 시뮬레이션을 통해 계류 시스템의 요소의 특성에 대한 디자인 하중 조건을 계산하는 Aqua-FE프로그램개발로 이어졌다(David W. Fredriksson, 2003).

이러한 연구결과들은 모두 자국의 해양환경에 가장 적합한 가두리 시스템을 염두에 두고 연구개발 되었기 때문에 우리에게 미치는 효용성은 상대적으로 적다. 한국형 외해 양식기술과 시설물을 개발하기 위해서는 실제로 우리나라의 해양환경을 대상으로 한 기초조사 및 파랑, 조류 등의 외력을 고려하여 가두리 시설의 역학적 해석방법의 개발이 필요하며, 이를 위해 2004년 통영의 육지도 인근의 해양환경자료를 기초로 하여 Tension leg cage를 기본으로 하여 2가지의 계류방법과 원형, 원추형 사각형의 3종류의 서로 다른 가두리의 형태에 따른 파랑응답에 대한 수치해석을 수행하는 연구가 이루어졌다(부경대학교 산학 협력단, 2004).

이러한 수치해석을 중심으로 하는 연구와 동시에 양식어업 인들에게 가장 많이 사용되는 가두리 형태를 기본으로 하여 가두리의 운동특성에 대한 실험적 해석을 수행하였고 그 연구결과를 소개하고자 한다.

3. 재료 및 방법

3.1 모형 가두리의 제작

양식어업인들이 현재 가장 많이 사용하고 있는 부유식 가두리는 사각형으로 만들어진 형태를 가지고 있고, 크기는 주로 10×10m, 12×12m, 14×14m이다. 프레임의 재질은 목재가두리인 경우 수입목재인 아피통(Apitong)이 주로 사용되며, 최근 보급되고 있는 내파성 가두리의 경우 고밀도 PE하수관 300mm를 주로 사용하고 있다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 이번 실험에 사용된 모형가두리는 형태별로 사각형과 원형을 기본으로 하였으며 그물을 고정시키고 계류를 원활하게 하기 위한 다리를 추가한 것과, 사각형의 경우에는 하부구조를 추가한 육면체 형태의 총 5종류이다. 재질은 고밀도 PE관을 사용하였으며 PE의 물성은 Table. 1에 나타내었다. 또한 PE재질이 가지는 고유한 특성인 탄성은 고려하지 않았으며 모든 부재는 강체로 가정하였다.

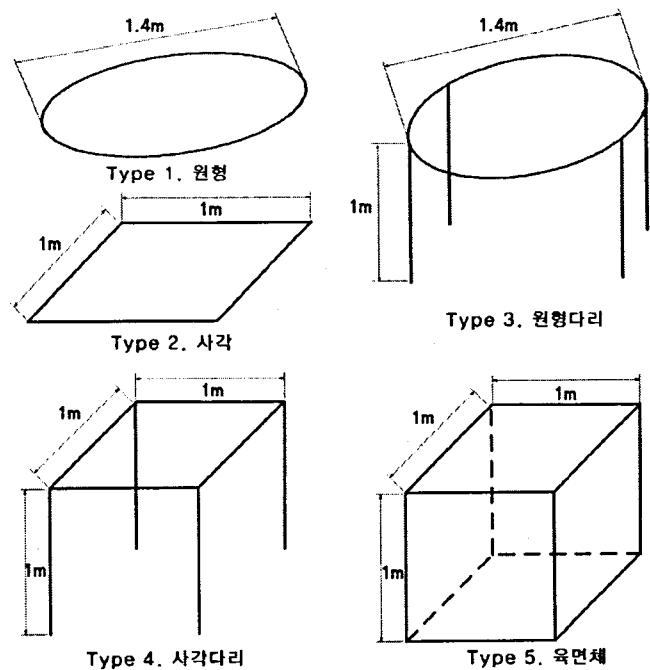


Fig. 1 Model of Fishcage for Experiment

모형가두리는 1mm 굵기의 강선(wire)으로 고정시켜 계류하였고, Tension leg계류는 수조저면에 설치된 계류장치에 자석을 이용하여 계류하였으며, 기존에 사용되고 있는 사각형과 원형의 부유식 가두리는 Catenary 계류방법을 적용하였다. 모든 모형가두리는 열용착을 통해 수밀을 유지하도록 제작되었다. 또한 미리 수행한 부력계산을 통해 침하깊이 조절이 곤란한 모형과, 운동측정을 위한 치구로 인한 손실되는 부력을 보충해 줄 수 있는 추가 부력재를 사용하였다. 이 부력재는 각 1.4kgf의 추가부력을 가두리에 생성시켜 주며 가두리의 하단에 설치되었다. 가두리의 자중계산에 있어서 가두리 용착용 부속구는 고려하지 않고 단일파이프로 이루어져 있는 것으로 하였다.

Table 1. Dimension and hydrostatic character of model-fishcage

모형 형식	Type3	Type4	Type5
크기 (m)	지름:1.4	1x1x1	1x1x1
높이 (m)	0.7	1	1
수면 위 상부 구조높이(m)	반침하	0.15	0.15
	침하	0	0
부력 (kgf)	반침하	7.60	8.69
	침하	8.14	9.23
초기텐션 (kgf)	반침하	5.31	6.14
	침하	5.85	6.68
초기텐션 (kgf/1계류식)	반침하	1.33	1.54
	침하	1.46	1.67
모형의 자중(kgf)	2.29	2.55	3.82
추가부력재(4x1.4 kgf)	5.6	5.6	5.6

3.2 수조와 실험조건

국립수산과학원이 보유한 3차원 조파수조($85 \times 10 \times 3.5\text{m}$)에서 실험이 수행되었다. 최대파고 50cm를 생성 시킬 수 있으며, 6 종류의 스펙트럼의 구현이 가능한 시스템으로 제어프로그램이 구성되어 있다. 실험을 위해서 플린저형식의 조파기로 생성된 규칙파와 불규칙파를 이용하였다. 규칙파는 추후 시뮬레이션과 검증을 위해 파고 $H=0.2\text{m}$ 와 주기 $T=1.5\text{s}$ 를 사용하였다. (정성재, 2003)

불규칙 파랑은 다음과 같이 정의되는 ISSC 스펙트럼을 사용하였으며, 실험을 위해 만들어진 파랑은 유의파고 $H_{1/3}$, 평균주기 T 를 각각 $H_{1/3}=0.2\text{m}$ 및 주기 $T=1.5\text{s}$ 로 하여 생성하였다.

유의파고 $H_{1/3}$, 평균주기 T 를 갖는 ISSC 스펙트럼(Bartrop, N., 1998)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S(\omega) = 0.11 \frac{H_{1/3}^2 T}{2\pi} \left(\frac{T\omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left(-0.44 \left(\frac{T\omega}{2\pi} \right)^{-1} \right) \quad (1)$$

ω 는 원진동수로서 $2\pi/T$ 이다. 해면의 높이 ζ 는 수많은 조화파형의 합의 극한으로서 다음식과 같이 된다.

$$\zeta(\square) = \lim_{\omega_{\square} \rightarrow \infty, \delta\omega \rightarrow 0} \sum_{\square=1}^{\infty} \cos [\omega_{\square}\square + \epsilon(\omega_{\square})] [2S_{\zeta}(\omega_{\square})\delta\omega]^{1/2} \quad (2)$$

ω_{\square} 은 $\square \times \omega$ (\square 은 정수), $[2S_{\zeta}(\omega_{\square})\delta\omega]^{1/2}$ 은 성분파의 진폭, $\epsilon(\omega_{\square})$ 은 위상차이다.

비접촉식 6자유도계(Rodym)를 사용하여 파랑 하에서 움직이는 모형가두리에 장착된 LED신호를 받아 6개의 운동량 성분인 변위와 각을 계측하였다. 실험에 적용된 좌표, 파랑의 진행 방향 및 운동성분의 방향을 Fig. 2에 나타내었다.

각 가두리 모형은 유체정력학적인 계산을 통해 구속이 없는 부유 상태에서, 모형이 가지는 수면 위 상부높이, 부력, 초기텐션과 자중을 계산하였다. 침하상태는 가두리의 상부구조가 수면에 위치할 때이며, 반침하 상태는 상부구조가 수면 위 15cm에 놓여있을 때로 정의하였다. 실험에 사용된 가두리 모형의 주요 치수와 유체정력학적인 특징들을 Table. 2에 정리하였다.

Table 2. Character of the material for models (PE)

밀도 (g/cm^3)	0.95
인장강도 (kg/cm^2)	200 이상
신율 (%)	600 이상
충격강도 ($\text{kg cm}/\text{cm}^2$)	13
선팽창계수 ($\text{cm}/\text{cm } ^\circ\text{C}$)	11×10^{-4}



Fig. 2 Coordinate and progress wave in Experiment

4. 결과 및 고찰

4.1 부유식 가두리의 운동

내파성 가두리로 알려져 기존 양식어업인들이 선호하고 있는 부유식 가두리를 표준으로 하여 사각형과 원형의 2종에 대한 운동을 측정하였다. 규칙파를 이용하여 실험하였을 때 얻어진 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 실험은 반사파의 영향을 고려하여 수행하였고, 결과는 90초까지만 나타내었다.

앞 절에서 언급한 파고와 주기를 가진 규칙파를 사용하여 Catenary 계류방법으로 설치된 원형 가두리 모형에서 측정된 6 개의 운동성분에 대한 응답을 Fig. 3에 나타내었으며, 동일한 조건으로 측정된 사각형가두리의 응답은 Fig. 4에 보였다. 두 모형에서 공통적으로 wave train이 모형과 조우하였을 때 Surge 값이 가두리 크기의 1/2 정도의 변화량을 보여주고 있으며 이것은 일정한 시간이 지나 wave train이 규칙파로 바뀌면 특정값의 범위 내에서 주기적으로 움직이는 운동을 하는 것을 알 수 있다. Pitch 운동은 Type 1의 가두리 모형이 Type 2에 비하여 Factor 1.5 정도의 낮은 것으로 나타났다. 이는 원형가두리가 Catenary 계류방식에 있어서는 파의 입사각 90° 일 때 파랑에 접하는 단면적이 적고 또한 형태적으로 안정되어 있기 때문에 상대적으로 운동량이 적다고 할 수 있다. Heave 운동은 계류사이 최대장력을 받고 있을 때 가두리 자체가 상승하는 힘이 구속되어 있으므로 단지 Amplitude와 비슷한 크기로 정수중의 자유수면에서 파저를 따라서 움직이며 운동하고 있다.

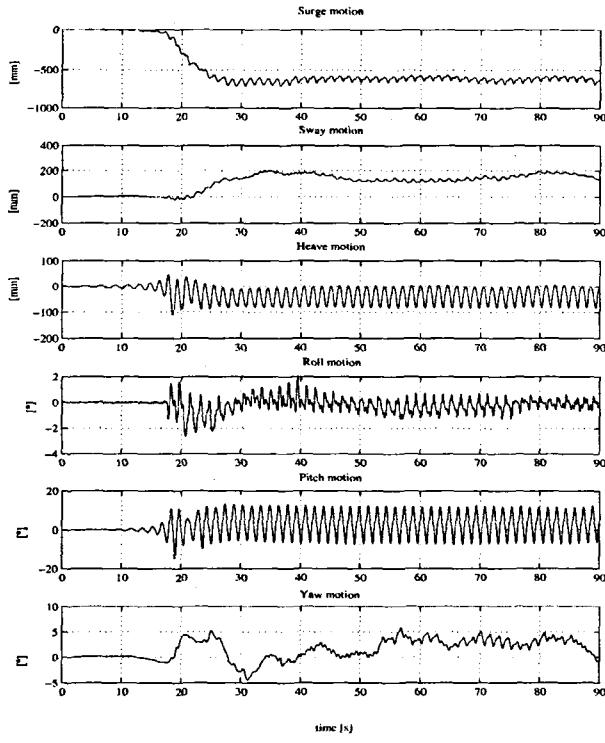


Fig. 3 Response of the Type 2 model with the catenary mooring under the regular wave train

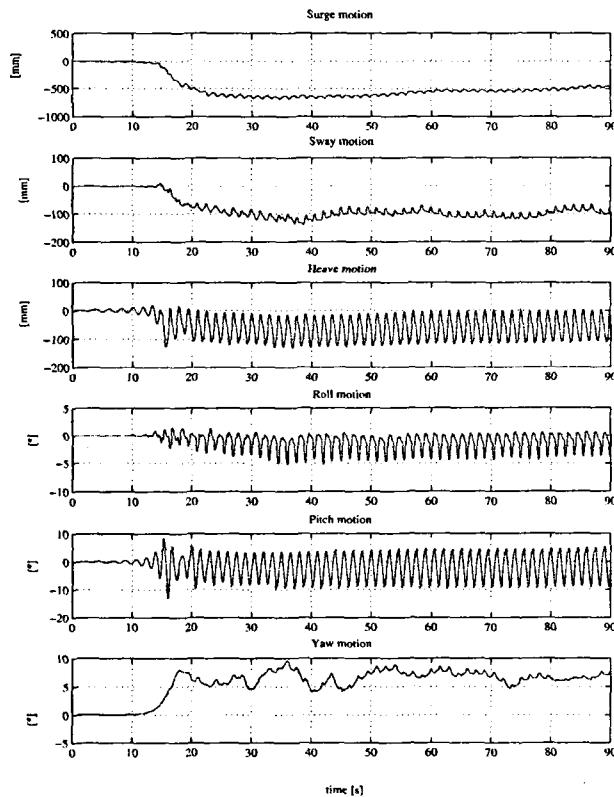


Fig. 4 Response of the Type 1 model with the catenary mooring under the regular wave train

4.2 계류방법에 따른 운동량

계류방법으로 인해 구속되는 운동성분을 확인하기 위해 사각형 가두리를 대상으로 계류방법에 따른 규칙파 아래서의 운동량을 Fig. 5에, ISSC 스펙트럼 식(1)을 사용하여 생성된 불규칙파에서의 운동을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있듯이, 구속되는 성분인 Heave와 Pitch 운동은 Catenary계류에 비해 아주 작아 무시할 수 있을 정도이다. 또한 파랑의 입사각 방향으로 뒤쪽으로 현저히 밀리는 Surge운동은 규칙파나 불규칙파의 경우 모두 계류삭이 초기에 고정되어 있던 위치를 크게 벗어나지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 계류방법에 문제가 없고 계류삭의 강도만 충분하다면 Heave 및 Pitch운동성분이 현저하게 줄어드는 tension 계류는 가두리 속에서 사육되는 생물을 고려한다면 상하운동이 구속되어 변위가 적다는 이유로 인해 최적의 환경을 제공할 수 있는 것으로 판단된다.

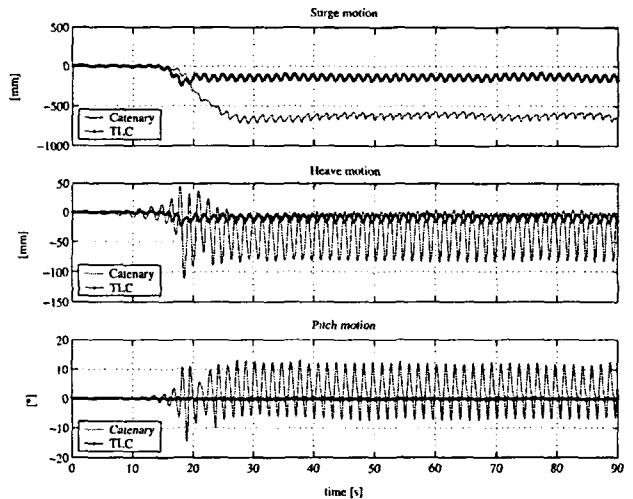


Fig. 5 Response of the Type 2 model-cage by the mooring methods under the regular wave train

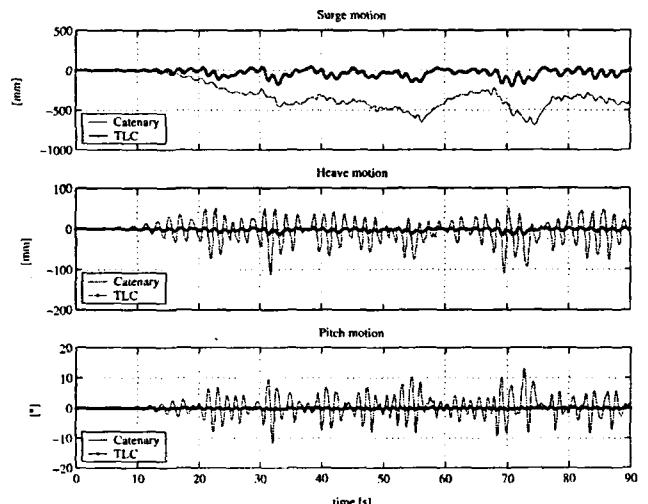


Fig. 6 Response of the Type 2 model-cage by the mooring methods under the irregular wave train

4.3 가두리 형태에 따른 운동량

사각형 가두리에 다리를 달아 만든 Type 4와 육면체 형태인 Type 5를 규칙파와 불규칙 파랑에서의 응답을 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. 두 가지 형식의 가두리 모형실험에서 알 수 있는 명백한 차이는 Type 5의 경우에는 Table. 1에 나타낸 것처럼 하부의 가로부재 추가로 인한 자중 증가가 생기고, 그에 따른 부력 또한 자중의 증가량을 넘는다는 것이다. 따라서 tension 계류의 경우 초기 tension이 증가하는 효과가 있지만 결국 변위가 구속되어 있으므로 Heave운동량에는 영향을 미치지 못한다. Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 Surge와 Heave 운동의 시간당 변화량은 거의 차이가 없지만 증가된 부력으로 인해 Pitch 운동은 현저하게 줄어들었다. 불규칙파랑에서의 운동 역시 규칙파와 비슷한 경향을 보이며 특히 Surge와 Heave 운동은 거의 동일하게 나타나고 Pitch운동은 Type 5의 가두리 모형이 Type 4에 비하여 우수하게 나타났다.

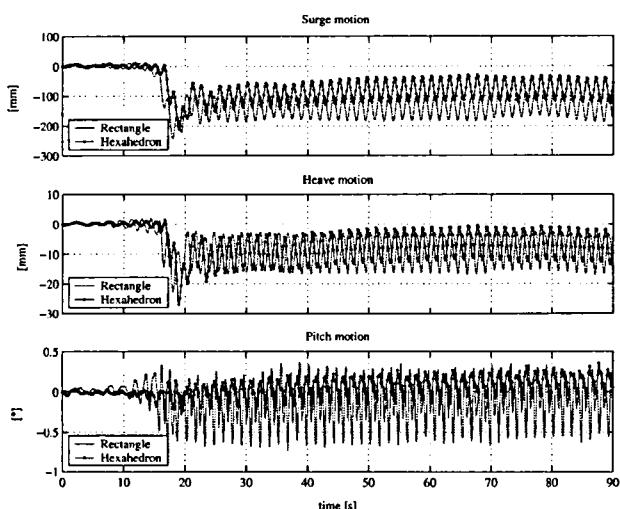


Fig. 7 Response of the two models under the regular wave

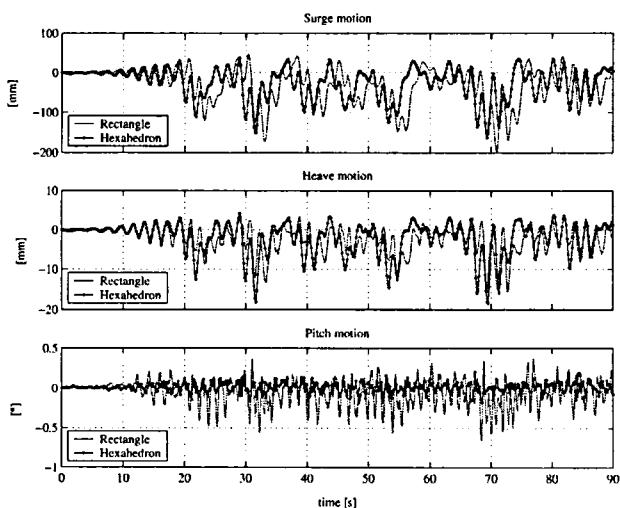


Fig. 8 Response of the two models under the irregular wave

4.4 원형가두리의 운동

원형가두리 모델에 다리를 달아 만든 Type 3의 모형을 침하와 반침하시에 규칙파에서 측정한 운동을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 TLC로 표시된 운동은 침하시지를 가리키고 있으며 TLC-15로 표시된 운동은 반침하시, 즉 가두리의 상부구조물이 수면위로 15cm 상승하여 있을 때를 의미한다. Surge의 경우 전체적인 운동 정도는 큰 차이가 없지만, 운동이 시작될 때 침하식 가두리의 상부구조가 서서히 밀려오는 주기적으로 파도에 노출됨으로 인해 가두리가 파도에 의해 뒤로 밀려 약간의 침하를 일으킨 다음 정상적인 주기운동이 시작되었다는 것을 알 수 있다. 이와는 반대로 반침하의 경우는 입사파에 의해 뒤로 밀리는 정도가 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다. Heave 운동의 경우는 Surge와 마찬가지의 경향을 보이고 있으나 절대적인 운동의 크기는 침하식 가두리보다 약간 줄어든다는 것을 확인하였다. 이것은 접수면적의 차이로 인해 받는 유체력의 크기로 서로 다르기 때문에 발생된 현상이라 설명할 수 있다. Pitch는 침하와 반침하 상태에서 특별한 차이를 확인할 수 없을 정도의 운동형태를 보이고 있다.

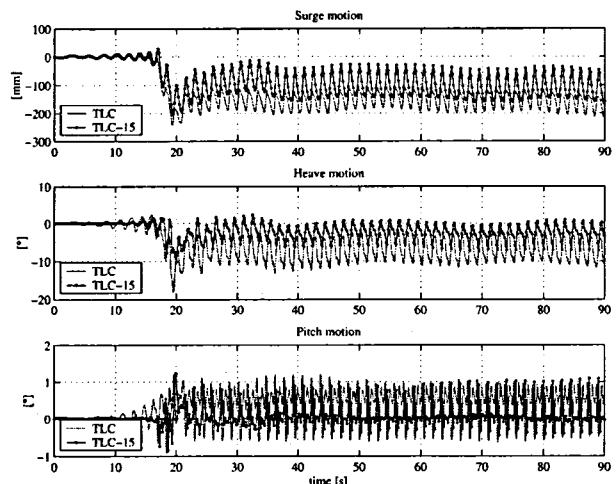


Fig. 9 Response of the Type 3 model under the regular wave

5. 결론

한국형 외해가두리 개발에 필요한 가두리의 최적설계를 위하여 외해에 적합한 다양한 가두리 모델을 선정하여 파랑하의 운동응답을 분석하였다. 이 논문에서는 5개의 가두리 모형을 사용하여 규칙파와 불규칙파랑에서 운동하는 가두리를 Surge, Heave, Pitch운동을 중심으로 비접촉식 6자유도계를 이용하여 운동실험을 수행한 후 결과를 비교 분석하였다. 기존에 사용되고 있는 부유식 가두리는 구조와 계류방법의 특성상 Heave, Pitch운동이 파랑과 동일하게 움직이기 때문에 운동량이 많아 사육 생물에 스트레스를 많이 발생시킬 소지가 큰 것으로 분석되었다. 이 논문에서는 새롭게 제시한 형태가 다른 모형가두리를 사용하고 계류방법을 기존의 Catenary 계류에서 Tension으

로 하여 운동 실험과 분석을 수행하였다. 도입된 3개의 가두리 모형 중 육면체 모델인 Type 5의 가두리의 운동이 Tension 계류를 사용하였을 때 Surge와 Pitch 운동량이 최소화 되었다. 이는 이러한 형태의 가두리 설계와 계류방법의 도입이 운동측면에서는 생물사육에 가장 이상적인 환경을 제공한다는 것으로 규명되었다.

보다 우수한 외해용 가두리 설계를 위해서는 그물이 설치되었을 때 그로 인해 발생되는 추가 항력이 가두리에 미치는 영향과 운동, 계류에 필요한 중량 추정을 위한 모형실험 등이 수행되어야 한다.

후기

이 논문은 2004년도 국립수산과학원의 지원에 의하여 연구되었음.(과제번호)

참고문헌

- [1] 부경대학교 산학협력단(2004), “외해 가두리시설의 설계외력 산정 및 역학적 특성 해석”, 국립수산과학원
- [2] 김재오, 김태호, 오희국, 정의철(1998), “침하식 어류양식 가두리 개발에 관한 연구 - 1, - 부침과 운동의 특성 -”, 수진연구보고 54호
- [3] 정성재(2003), “Ein Beitrag zur Erzeugung nichtlinearer Entwurfsseegaenge im numerischen Wellenkanal”, Technische Universitaet Berlin, D83
- [4] Bartrip, N.(1998), “Floatig Structure: a guide for design and analysis” CMPT
- [5] David W. Fredriksson(2003), “Open Ocean Fish Cage and Mooring System Modeling”, 수조공학수조 활용에 관한 국제심포지엄, p.109-122