

상하가 원형 파이프로 구성된 부침식 가두리의 동적 거동 해석

이춘우* · 이지훈¹ · 최무열² · 이건호³

부경대학교 해양생산시스템관리학부*, ¹부경대학교 저탄소해양생산기술연구소,
²부경대학교 수산물리학과, ³국립수산과학원 수산공학과

Dynamic behavior of a submersible fish cage rigged with a circular floating and a sinking collar

Chun-Woo LEE*, Jihoon LEE¹, Moo-Youl CHOE² and Gun-Ho LEE³

**Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

*¹Institute of Low-Carbon Marine Production Technology, Pukyong National University,
Busan 608-737, Korea*

²Department of Fisheries Physics, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

*³Fisheries Engineering Division, National Fisheries Research and Development Institute,
Busan 619-705, Korea*

In this research, the submersible fish cage was designed to avoid structural and biological damage during harsh sea conditions. The submersible cage system consists of netting, mooring ropes, a floating collar, floats, sinkers and anchors. Whole elements of the cage were modeled on the mass-spring model. The computer simulations were carried out to investigate the dynamic behavior of the cage and to calculate mooring line tension subjected to tidal currents and waves. As expected, the tension values in the mooring line of the submerged position are 36% less compared to that of the surface cage under the same loading conditions. As the wave was used in combination with the current velocity of 1m/s, the average tensile load for the submerged cage showed 85% of the value for the floating cage. The simulation results provide an improved understanding of the behaviors of the structure and valuable information on the optimized design of the cage system exposed to open ocean environmental factors.

Key words: Submersible fish cage, Underwater flexible structures, Dynamic simulation, Sinking collar, Floating collar

*Corresponding author: cwlee@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-5891, Fax: 82-51-629-5886

서 론

최근, 연안 또는 내만의 과도한 개발에 따른 갈등을 회피하고 양호한 성육환경에서 어류를 양식하기 위해서 외해양식에 대한 관심이 국내외에서 크게 증가되고 있다. 파랑과 조류 등 해양환경 외력이 내만 보다 큰 외해에서 견딜 수 있는 양식시설을 개발하기 위해서는 보다 엄격한 조건을 충족하는 구조물의 설계기술과 고정방법을 도출해야 한다. 이러한 설계기술은 경험에 의존한 과거의 기술과는 달리 공학적인 기반에서 해양환경 외력에 대한 정확한 계산을 수행할 수 있어야 하고, 강력한 태풍 등 최악의 환경재해에서도 시설물이 견딜 수 있는지를 평가하여 시설의 안전성을 설계 단계에서 검증해야 한다.

그러나 안전성을 강조한 시설물의 설계는 시설의 조립 및 설치비를 크게 증가시키는 요인이기도 하다. 최근에는 내만보다도 환경외력이 강한 외해에 시설물을 설치하면서도 외해의 강한 에너지를 피하여 중층 또는 저층에 양식시설을 설치하는 예가 증가되었다. 이러한 가두리는 기상상태가 좋을 때는 부상해 있다가 기상상태가 나빠지면 중층으로 침하시키는 형태로 운용되므로 관리의 편리성과 시설의 안전성을 동시에 추구하는 새로운 형태의 시스템으로 많은 관심을 받고 있다.

가두리의 형태도 최근 많이 변화하고 있다. 과거의 가두리는 조립의 편리성을 고려하여 사각형의 형태가 주로 사용되었으나, 최근에는 유체저항을 줄이면서도 가두리 내부의 유효용적을 증대시키기 위해서 원형구조의 가두리가 많이 되고 있다. 특히 원형의 상부구조물 자체로 뜬의 역할을 수행할 수 있는 고강도 PE파이프를 휘어서 가두리 상부 형상 즉 뜬 파이프(floating collar) 제작에 사용되기 시작하였다.

또한 가두리 하부에는 침자를 달아서 가두리의 상하 전개를 하는 것이 일반적이나, 이 경우 조류의 영향을 받으면 가두리의 측면 형상이 많이 변형하므로, 이러한 변형을 줄이기 위해서 하

부도 원형의 구조물 즉 침자 파이프(sinking collar)를 다는 가두리가 설치되고 있다. 하부 원형 구조물로는 철재 또는 강화플라스틱 파이프가 이용되고 있다. 물리적 모델링의 대상으로써 가두리 시스템은 망자, 로프, 뜬, 침자, 닻, 뜬 파이프(floating collar) 및 침자 파이프(sinking collar) 등이 서로 결합된 복합구조물이어서 구조물의 수학적 기술이 어렵고, 구조물간의 강성의 차이가 커서 수치계산도 어려운 대상으로 알려져 있다. 최근 이러한 가두리 시스템의 구조를 수학적으로 모델링하고 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 이용하여 해석하려고 하는 연구가 수행되고 있다. Kim et al. (2002)는 유한 요소법을 이용하여 가두리 프레임 구조물의 변형 및 강도를 해석하였으며, Tsukrov et al. (2003, 2005)는 유한 요소법(finite element method)을 이용하여 가두리 시스템을 해석하기 위한 수치 모델링에 관한 연구를 수행하였으며, Fredriksson et al. (2003, 2007)은 가두리 시스템의 수치 모델링에 관한 연구를 수행하였고, Lader and Fredheim (2006)은 가두리 시스템과 같은 그물로 구성된 구조물의 3차원 모델링에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Huang et al. (2006)은 가두리 시스템의 동적 거동을 해석하기 위하여 수치 모델링에 관한 연구를 수행하였으며, Thomassen (2008)은 부상식 가두리 시스템의 피로도 및 동적 거동 해석을 위한 연구를 수행하였고, Lee et al. (2008)는 가두리 시스템의 망자와 뜬 파이프의 일괄적 해석을 위한 수치 모델링에 관한 연구를 수행하였으며, Kim (2009)는 양식시설 설계를 위한 전반적인 연구를 수행하였다.

특히 부침식 가두리에 대해서는, Kim (2007)은 압축공기를 이용한 부침식 가두리 시설의 부침특성에 대한 수치해석에 의한 연구를 수행하였고, Li et al. (2006) 및 Huang et al. (2007)은 침하형 양식시설에 대한 파도와 조류의 영향에 대한 연구를 수행하였고, Zhao et al. (2007)은 침하형 양식시설의 3차원 변형에 관한 연구를 수행

하였다. 그러나, 부침식 가두리의 조류와 파랑에 대한 거동 연구는 아직 미진하며, 특히 부상된 위치보다 침하된 위치에서 어느 정도 외력이 적게 걸리는지, 상하의 뜬 파이프 및 침자 파이프의 조류와 파랑에 대한 응답 등 설계에 필요한 요인은 거의 분석되지 않았다.

본 연구에서는 외해용 부침식 가두리를 설계하기 위한 기초자료를 얻기 위해서 뜬 파이프 및 침자 파이프로 조립된 부침식 가두리 시스템의 모든 구성요소를 질량-스프링모델을 이용하여 수식화하였고, 다양한 해양환경 외력에 대한 가두리의 응답을 계산하였고, 부상된 위치보다 침하된 위치에서 어느 정도 환경외력이 감소하는지를 명확히 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

부침식 가두리의 모델링

부침식 가두리 시스템은 전보 (Lee et al., 2008)에서 제시한 질량-스프링모델로 수식화 하였다. 가두리를 구성하는 요소 중 망지와 로프는 유 연구조물로 보고, 뜬 파이프 및 침자 파이프는 탄성체로 간주하였다. 질량-스프링모델은 가두리를 구성하는 요소들을 유한개의 작은 요소로 다시 분할하고, 이 분할된 요소의 중점에 질점을 배치하고, 질점과 질점 사이를 질량이 없는 스프링으로 연결된 시스템으로 기술하는 방법으로 어구 시스템의 해석에서 많이 응용되었다 (Lee and Cha, 2002; Lee et al., 2005).

질량-스프링모델을 망지에 적용할 경우 그물코의 매듭은 질점으로 간주하고, 그물의 발은 스프링으로 간주하면 자연스럽게 질점과 질점이 스프링으로 연결된 구조의 그물코를 얻을 수 있다 (Fig. 1). 그러나 보다 상세한 그물코의 표현을 위해서 발의 중간에도 하나의 질점을 배치하여 그물발의 구부러짐을 표현하였다. 그러나 이 방법을 망지에 직접 적용시키면 너무 많은 질점과 스프링이 생성되어 계산의 효율이 떨어진다. 본 연구에서는 계산의 부하를 줄이기 위해서 여

러 개의 실제 그물코를 하나의 가상의 수학적 그물코로 근사하는 방법을 사용하였다. 명줄과 로프는 일정한 길이로 나누는 후 각 요소의 중간에 질점을 배치하고, 질점 사이를 스프링으로 연결한 형태로 모델링하였다.

뜬 파이프는 가두리의 상부에 하나 또는 두 개의 고강도 PE 파이프를 병렬로 배치하여 원형으로 굽혀서 가두리의 상부 형태를 만들면서 뜬의 역할을 수행한다. 뜬 파이프의 상부에는 핸드레일과 발판이 설치되어 양식장 관리자가 작업할 수 있도록 해준다. 최근에는 가두리의 밑에도 가두리 망의 변형을 줄이기 위해서 사용되는 경우가 있다. 본 연구에서는 수치모델을 간단히 기술하기 위해서 하나의 뜬 파이프를 모델링 하였고, 핸드레일의 모델링은 생략하였고, 가두리의 바닥 부위에는 침자의 역할을 하는 침자 파이프가 있는 가두리를 해석 대상으로 하였다.

뜬 파이프 및 침자 파이프의 세로방향 질점은 Fig.1과 같이 원통의 단면에 마름모꼴로 질점과 스프링을 배치하고, 정 마름모꼴의 어느 한 질점에 외력이 가해져도 형상이 크게 변형되지 않게 하기 위해서 대각선으로도 스프링을 배치하였

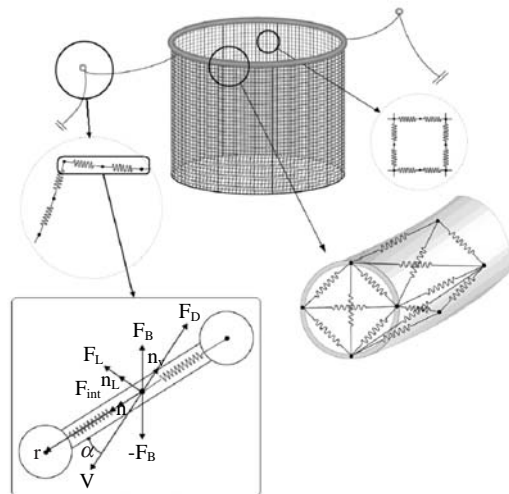


Fig. 1. Modeling of the fish cage net, the mooring line and the floating collar.

다. 뚝 파이프의 길이 방향의 질점은 뚝 파이프를 일정한 길이로 나눈 단면에 앞에 설명한 방법으로 마름모꼴 질점을 배치하고, 여기서 만들어진 질점을 스프링으로 연결하여 직사각형을 만들고 다음으로 직사각형의 대각선으로도 스프링을 배치하여 외력에 대해서도 변형이 최소화 되도록 하였다.

그 밖의 뚝, 침자 및 닻은 각각을 질점으로 간주하여 스프링으로 가두리 구조물과 연결하거나 또는 기존의 질점에 이들의 물리적 속성을 반영시키는 방법으로 모델링하였다.

가두리 구조물의 운동방정식

가두리 시스템에 걸리는 외력은 질점에만 집중하여 작용하고, 질점을 연결한 스프링에는 외력이 작용하지 않으며 스프링의 인장과 압축에 따른 내력만 작용한다. 가두리 구조물의 각 질점에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(m + \Delta m)\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}_{\text{int}} + \mathbf{F}_{\text{ext}} \quad (1)$$

여기서 m 은 질점의 질량, Δm 은 부가질량, $\ddot{\mathbf{q}}$ 는 가속도 벡터, \mathbf{F}_{int} 는 질점간의 내력, \mathbf{F}_{ext} 는 질점에 작용하는 외력이다. 부가질량은 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta m = \rho_w V_n C_m \quad (2)$$

여기서 ρ_w 는 해수의 밀도, V_n 은 질점의 부피, C_m 은 부가질량계수이다.

질점에 작용하는 내력은 질점을 연결하는 스프링의 인장과 압축에 의해서 생기는 힘이다. 내력은 망지와 로프에 대해서는 인장 방향으로만 작용하는 것으로 가정하였고, 뚝 파이프와 침자 파이프는 탄성체이므로 인장과 압축 방향 모두에 작용하는 것으로 하였다. 또한 스프링의 인장 또는 압축되는 길이는 작용하는 힘에 선형적으로 비례하는 것으로 가정하였다. 내력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}_{\text{int}} = -\mathbf{n} \frac{EA}{l^0} (|\mathbf{r}| - l^0) \quad (3)$$

여기서 E 는 재료의 영율 (young modulus), A 는 재료의 유효 단면적, l^0 는 스프링의 원래 길이, \mathbf{n} 은 스프링 방향의 단위 벡터, $|\mathbf{r}|$ 는 스프링의 위치 벡터이다.

질점에 작용하는 외력은 저항, 양력, 부력 및 침강력으로 구성되며 다음 식으로 나타낸다.

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_B \quad (4)$$

저항과 양력은 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_D = -\frac{1}{2} C_D \rho_w S V^2 \mathbf{n}_v \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w S V^2 \mathbf{n}_L \quad (6)$$

여기서 C_D 는 저항계수, S 는 질점의 투영면적, V 는 합력 속도 벡터, \mathbf{n}_v 는 합력 속도 벡터에 대한 단위 벡터, C_L 은 양력계수, \mathbf{n}_L 은 양력의 작용 방향을 나타내는 단위 벡터로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{n}_L = \frac{(\mathbf{V} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{V}}{|(\mathbf{V} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{V}|} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{r} 은 질점을 연결하는 스프링의 위치 벡터이다.

합 속도 벡터 \mathbf{V} 는 질점의 속도 벡터 \mathbf{V}_m , 조류의 속도 벡터 \mathbf{V}_c 및 파랑에 의해서 야기되는 물입자의 속도 벡터 \mathbf{V}_w 의 합으로 다음과 같다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_m - \mathbf{V}_c + \mathbf{V}_w \quad (8)$$

본 연구에서는 조류와 파랑이 동시에 작용할 경우에도 시뮬레이션을 수행하였으나, 이때 조류와 파랑의 상호 간섭은 고려하지 않았다. 저항계수와 양력계수는 그물의 밧, 로프 및 뚝 파이프 등 원통형의 구조물에 대해서는 기존에 연구된 내용을 따른다 (Lee et al., 2005; Kim et al.,

2007). 부력과 침강력은 다음과 같다.

$$F_B = (\rho_i - \rho_w)V_n g \quad (9)$$

여기서 ρ_i 는 재료의 밀도, g 는 중력가속도이다. 가두리 시스템에 대해 기술된 운동방정식은 4차 Runge - kutta 법을 이용하여 적분하였다.

계산된 가두리의 파라미터

부침식 가두리의 물리적 특성을 파악하기 위해서 침하가 가능한 해양의 표층에 설치하는 중력 가두리의 거동을 실제 가두리의 사양과 동일하게 적용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션의 대상 가두리는 직경이 25m이고 깊이가 15m인 원형의 가두리로 뜸 파이프 및 침자 파이프는 PE 파이프로 외경이 370mm, 두께가 20mm인 파이프이고, 뜸 파이프에는 480개의 질점이 배치되어있다. 침자 가두리가 수면에 부상해있을 때의 파이프의 총 부력은 71,712N이고, 침하시의

부력은 19,772N이며 가두리의 총 침강력은 20,781N이다.

망지는 DYNEEMA 재질의 망지이다. 가두리 망의 그물 발의 길이는 22.5mm, 그물실의 굵기는 1.8mm이고, 망지의 총 매듭의 수는 2,326,872개 인데 6,314개의 질점으로 근사하였다. 가두리 시스템의 시뮬레이션에 필요한 상세한 규격은 Table 1에 나타내었다. 또한 시뮬레이션의 상세

Table 1. Physical characteristics of calculation parameters of the cage system

Items	Specifications
Floating collar	
Material	PE
Diameter of tube (mm)	370
Thickness of tube (mm)	20
Total buoyancy (N)	71,712
Diameter of collar (m)	28
Sinking collar	
Material	PE
Diameter of tube (mm)	370
Thickness of tube (mm)	20
Total sinking force (N)	20,781
Diameter of collar (m)	25
Netting	
Material	DYNEEMA
Density (g/cm ³)	0.96
Twine diameter (mm)	1.8
Mesh size (mm)	22.5
Total mass (kg)	576.9
Mooring lines	
Material	PES
Diameter (mm)	50
Buoys	
Material	Plastic
Size (m)	1.7262 × 1.15
Buoyancy (N)	19,600
Number of pieces	4

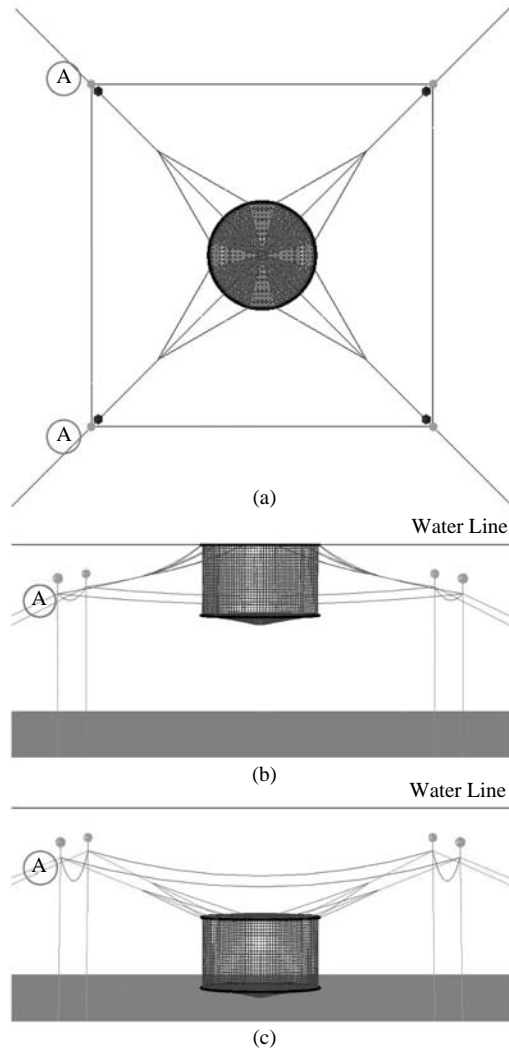


Fig. 2. The top view (a) and the side views of the fish cage in still water (b) at the surface position and (c) at the submerged position. A: referenced point for the tension values.

Table 2. Simulation conditions of the fish cage

		Case 1	Case 2	Case 3
Floating collar position	Surface			Surface
	Submerged (20m below the surface)			
Current (m/s)		0.5, 1	1	0.8
Wave	Height (m)	-	6	6
	Period (sec)	-	20	10
	Length (m)	-	156	156
Breaking strength of the mooring line (ton)		-	-	5 - 5.5

한 조건은 Table 2에 나타내었다.

가두리의 부상시와 침하시의 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 가두리를 부상된 위치에서 침하시키는 방법은 뜬 파이프의 부력을 침하시의 부력으로 변경시킴으로서 가능하다. 본 시물레이션에서 뜬 파이프에 배치된 각 질점의 부상시 부력은 15.2kg이고 침하시는 7.6kg이다. 부력을 절반으로 줄이면 가두리는 천천히 침하하기 시작하여 수면 밑 20m의 수심에 뜬 파이프가 위치하는 침하상태로 안정되게 된다.

결과 및 고찰

부침식 가두리의 수면상 위치와 침하 위치(수면으로부터 20m)에서의 조류의 속도 0.5m/s, 1m/s에 대한 응답을 각각 Fig. 3과 4에 나타내었다. 조류는 전 수층에서 균일한 조류가 동일한 방향으로 작용하도록 하였고, 수층별 속도의 차이는 고려하지 않았다. 수면 또는 침하 위치에서 가두리의 측면 형상은 조류가 강해짐에 따라 망지의 변형이 많이 되고, 가두리 자체도 조류의 하류측으로 변위되었다. 뜬 파이프의 형상은 조류에 대해서도 크게 변형하지 않으면서 가두리의 상부 구조물의 모양을 유지시켜 주었으나 조류속도가 0.5m/s 이상에서는 약간씩 변형되었다. 전체적으로 보았을 때 수면상의 위치와 침하된 위치에서 가두리의 조류에 대한 응답의 차이는 침하된 위치에서 뜬 파이프의 앞단이 부상하여 유속 0.5m/s에서 수심 16.35m에, 1m/s에

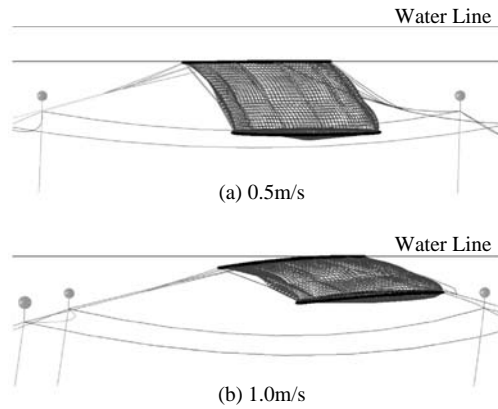


Fig. 3. The side views of the floating fish cage in surface position when the uniform tidal currents of (a) 0.5m/s and (b) 1.0m/s are applied.

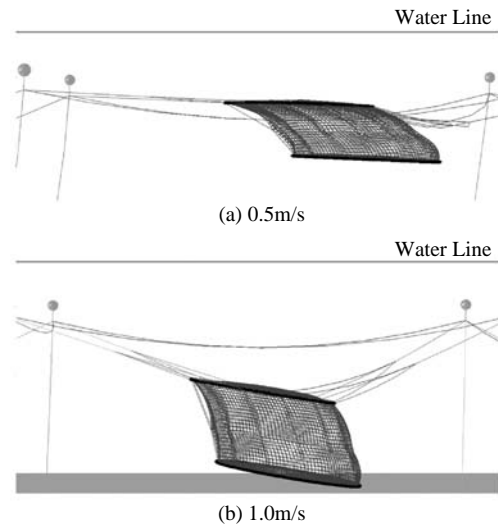


Fig. 4. The side views of the floating fish cage in submerged position when the uniform tidal currents of (a) 0.5m/s and (b) 1.0m/s are applied.

서 수심 15.86m에 위치하고 뜬 파이프가 약간 경사하는 것 외에는 큰 차이를 발견할 수 없었다. 침자 파이프는 뜬 파이프보다 적은 변형을 나타내었다.

그러나, 내부 용적은 유속이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었고, 부상된 가두리 보다 침하된 가두리에서 용적의 감소가 작은 것을 알 수 있다. 이것은 부상된 가두리의 경우는 뜬 파이프의 위치가 수면상으로 한정되는 반면 침하된 가두리의 경우는 뜬 파이프가 운동할 수 있는 공간이 더 많기 때문으로 생각된다.

수면상과 침하 위치에서의 가두리 중앙 부분의 명줄 점 A에서의 유속별 장력을 Fig. 5에 나타내었다. 유속만 적용하였을 경우, 장력은 유속의 증가에 따라 증가하였고, 조류의 수층별 변화를 주지 않았으므로 수면상의 위치와 침하 위치간의 장력 차이도 거의 없었다. 또한 유속과 파랑을 동시에 적용하였을 경우, 두 경우 모두 주기적인 장력 변동을 나타내고 있으나 수면상의

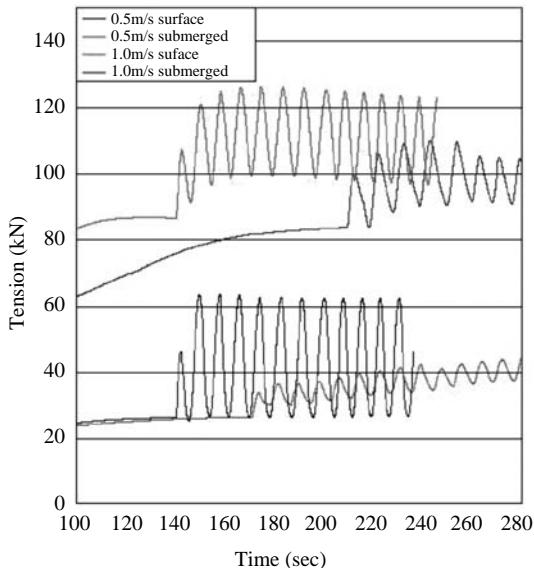


Fig. 5. Variations in tension acting on the upper side mooring line at the point A in fig. 2 for the cage at the surface and submerged positions under different environmental loading conditions.

위치보다 침하된 위치에서 장력이 36% 작게 나타났다. 이것은 파랑에 의한 물 입자의 운동을 그대로 반영한 것으로 판단된다.

가두리가 수면상에 떠 있을 때는 뜬 파이프가 모두 잠기지 않으며, 조류가 작용할 경우 저항을 계산해야 하는 면적도 뜬 파이프 전체면적보다 작다. 본 연구에서는 뜬 파이프에 배치된 각 질점이 수면상인가 수면하인가를 계산하여 수면상에 있는 질점의 저항을 계산하지 않고, 수면상의 질점이 가지는 면적만 고려하여 저항을 계산하였다. 또한 뜬 파이프가 수면상에 있을 때는 조파저항도 발생하나, 본 계산에서는 고려하지 않았다.

부침식 가두리의 수면상 및 침하된 위치에서의 조류와 파랑이 같은 방향으로 작용할 경우의 시뮬레이션 결과를 Fig. 6과 7에 나타내었다. 시뮬레이션에서 입력된 파랑은 파고 6m, 주기 20 sec, 파장 156m이며, 유속은 1m/s이다. 수면상에 위치한 가두리는 뜬 파이프가 파랑에 의한 수면의 상하 운동에 약간의 시간차를 가지고 추종하고, 망지도 그에 따라 상하 운동을 하였다. 이때 뜬 파이프의 진폭은 6m로 파고와 같았다.

조류와 파랑이 결합되어 가두리에 작용하면, 가두리의 거동은 조류에 의한 변형과 파랑에 의한 상하운동이 결합되어 복잡한 양상을 나타내었다. 그러나 상하운동의 진폭은 침하된 가두리에서 작게 나타났고, 장력 또한 36% 정도가 작았다. 본 시뮬레이션에서는 전 수층에 걸쳐서 일정한 조류를 외력으로서 입력하였으나, 일반적으로 수심이 깊어질수록 조류의 속도가 감소하므로 실제로는 침하식 가두리의 명줄에 걸리는 장력은 여기서 계산된 것보다 더 작을 것으로 예측된다.

대부분의 가두리 파손 사고는 조류의 방향과 파랑의 방향이 같아서 시설물에 과도한 외력이 작용할 때 발생할 것이다. DeCew et al. (2005)와 Huang et al. (2008)은 조류 및 파랑의 변화에 따른 부침식 가두리의 명줄에 걸리는 장력 및 가두

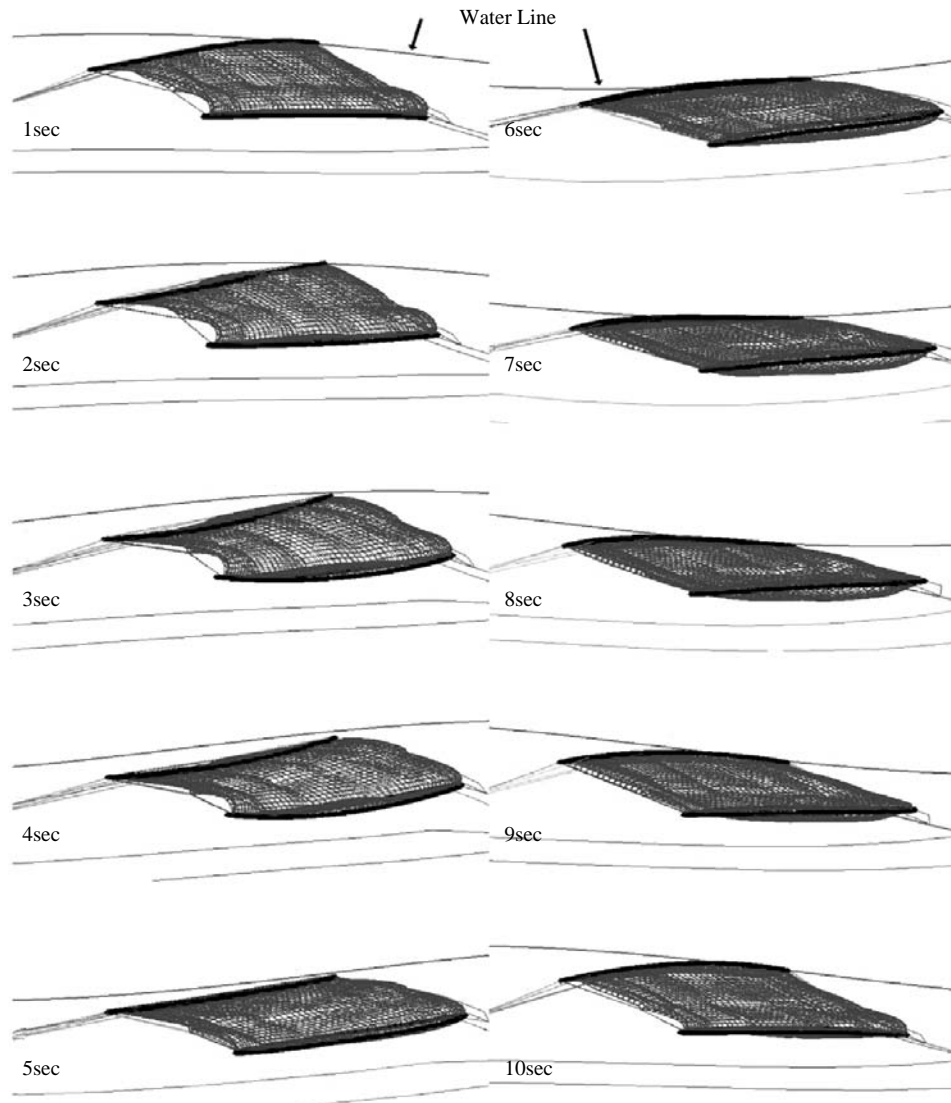


Fig. 6. Successive side shapes of the cage at surface position when current of 1.0m/s and waves (height: 6m, period: 20sec and length: 156m) are applied simultaneously.

리의 용적 감소량에 관하여 분석하였다. 본 연구에서는 조류 및 파랑의 변화에 따른 명줄에 걸리는 장력, 가두리 형상을 해석하였으며, 가두리 유실사고가 발생하는 과도한 외력을 가두리에 가해주어 가두리를 고정한 명줄의 파단에 의한 가두리의 유실과정을 시뮬레이션하여 Fig. 8에

나타내었다.

시뮬레이션에서는 명줄의 파단 장력을 5 - 5.5톤으로 하였고, 닛은 밀리지 않는 것으로 가정하였고, 조류의 속도는 0.8m/s, 파고는 6m, 주기 10sec, 파장 156m의 파랑을 입력하였다. 조류와 파랑에 의한 외력이 작용하면, 명줄에 걸리

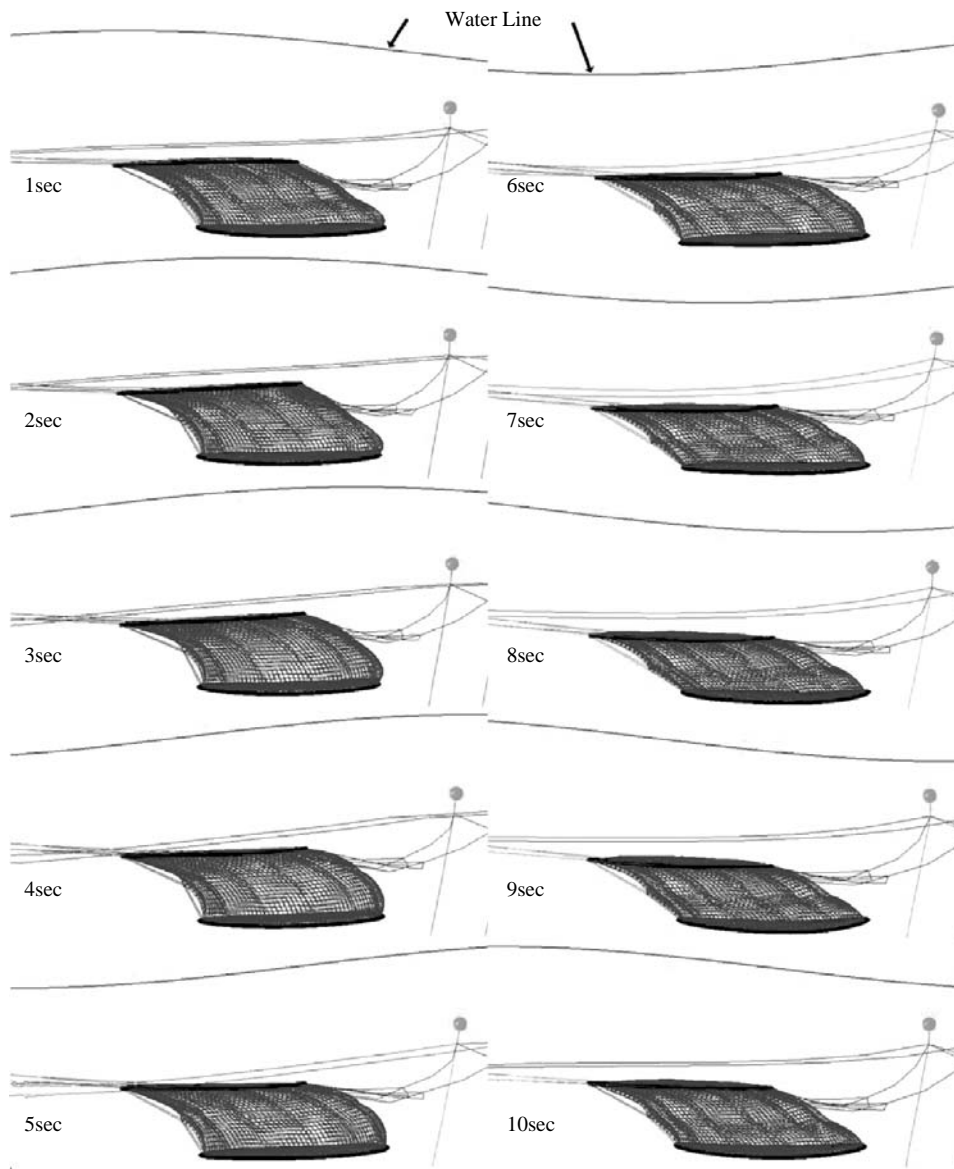


Fig. 7. Successive side shapes of the cage at submerged position when current of 1.0m/s combined with waves (height: 6m, period: 20sec and length: 156m) are applied.

는 장력이 증가하여 작용하는 장력이 앞에서 지정된 5.5톤을 넘어서면 명줄이 파단된다. 유실 과정을 보면 명줄의 장력이 가장 크게 작용하는 중앙의 명줄이 먼저 파단되고, 이 파단된 명줄에 작용하던 장력이 주변의 다른 명줄에 전가되어 다른 명줄들도 견딜 수 있는 한계를 벗어나

서 결국 도미노 효과처럼 차례로 파단되어 명줄이 차례대로 파단되는 것으로 나타났다. 그러나 이런 과정에서도 뜬 파이프는 크게 변형될 때도 있으나 파손되지 않고 가두리의 모양을 유지하고 있었다.

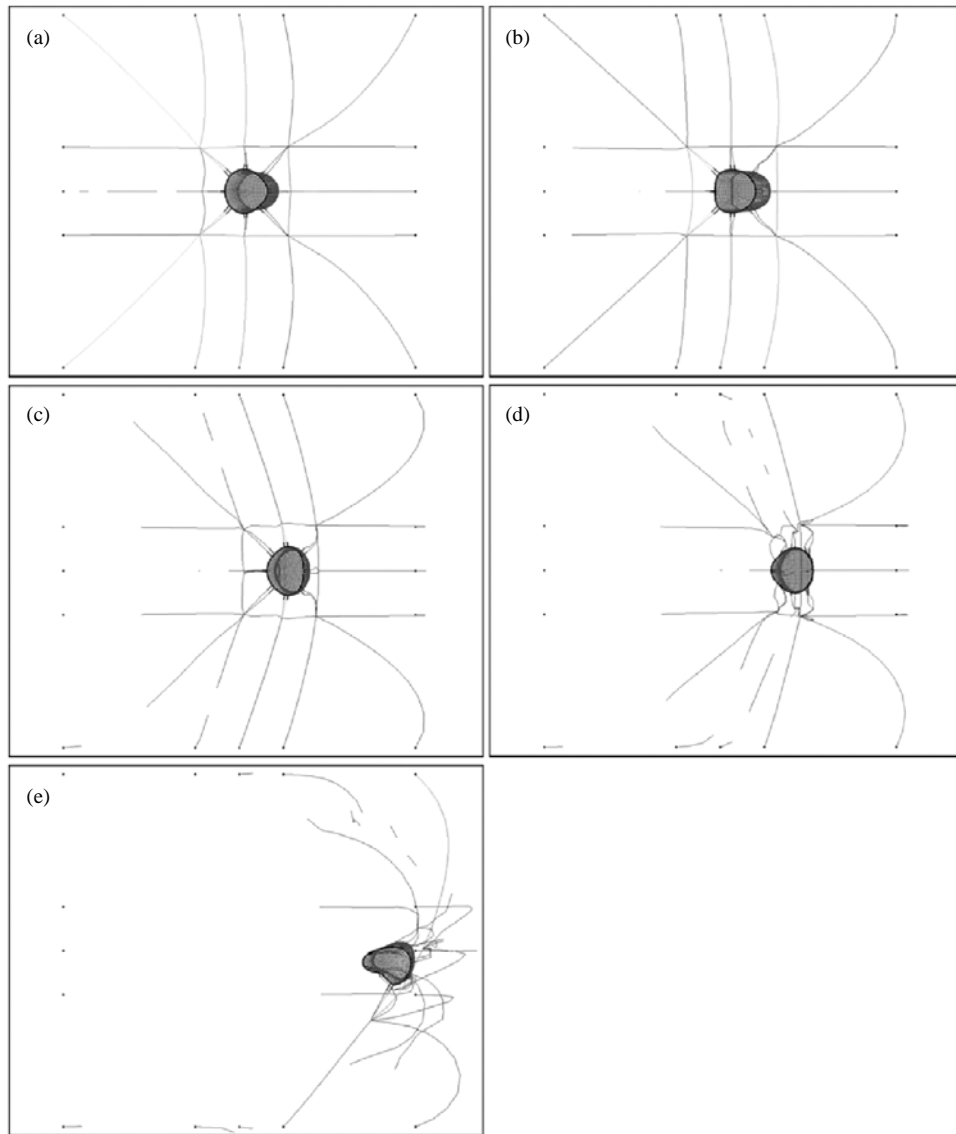


Fig. 8. Simulation of fatal damage by breaking the mooring lines of the cage due to strong current (0.8m/s) and waves (height:6m), (a): start to breaking the mooring line, (b) - (d): increased loads transferred to the remaining lines and breaks one by one, (e): whole system swept away.

결 론

본 연구에서는 우리나라의 외해 가두리로서 실용화되고 있는 상부 및 하부가 원형 튼 파이프 및 침자 파이프로 구성된 부침식 가두리를 질량 - 스프링 모델로 수식화하여 조류와 파랑이 독립적으로 작용할 경우와 동시에 작용할 경우

의 거동을 시뮬레이션 하였다. 질량 - 스프링 모델은 가두리 상하부의 탄성구조물은 물론 망지 및 로프 등 모두를 가두리 구성요소의 모델링에 적합한 모델링 방법임이 입증되었다. 시뮬레이션 결과, 부상된 위치보다 침하된 위치의 가두리가 명줄에 걸리는 장력이 36% 작게 걸렸고, 가

두리의 상하 운동도 크게 억제되어 보다 안전할 뿐 만 아니라 양식 어류에 대한 스트레스도 덜 할 것으로 판단된다. 외해는 내만에 비해서 조류와 파랑의 영향을 더 받으므로 환경외력에 대한 정확한 분석이 필수적이다. 외해에 설치할 가두리를 설계할 경우 이러한 수치 시뮬레이션을 먼저 수행하면 예상할 수 있는 외해의 환경 외력을 정량적으로 분석한다면 안전한 시스템을 경제적으로 설계할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2006년도 부경대학교 연구년 연구비의 지원(PS-2006-027)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- DeCew, J., D.W. Fredriksson, L. Bugrov, M.R. Swift, O. Eroshkin and B. Celikkol, 2005. A case study of a modified gravity type cage and mooring system using numerical and physical models. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30 (1), 47 - 58.
- Fredriksson, D.W., M.R. Swift, J.D. Irish, I. Tsukrov and B. Celikkol, 2003. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. *Aquacultural Engineering*, 27, 117 - 146.
- Fredriksson, D.W., J.C. DeCew and I. Tsukrov, 2007. Development of structural modeling techniques for evaluating HDPE plastic net pens used in marine aquaculture. *Ocean Engineering*, 34, 2124 - 2137.
- Huang, C.C., H.J. Tang and J.Y. Liu, 2006. Dynamical analysis of net cage structures for marine aquaculture: Numerical simulation and model testing. *Aquacultural Engineering*, 35, 258 - 270.
- Huang, C.C., H.J. Tang and J.Y. Liu, 2007. Modeling volume deformation in gravity-type cages with distributed bottom weights or a rigid tube - sinker. *Aquacultural Engineering*, 37, 144 - 157.
- Huang, C.C., H.J. Tang and J.Y. Liu, 2008. Effects of waves and currents on gravity - type cages in the open sea. *Aquacultural Engineering*, 38, 105 - 116.
- Kim, H.Y., C.W. Lee, J.K. Shin, H.S. Kim, B.J. Cha and G.H. Lee, 2007. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification. *Fisheries Research*, 88, 109 - 119.
- Kim, T.H., C.R. Ryu and D.A. Kim, 2002. Analysis on deformation and stiffness of frame structure for fishery using finite element methods. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.*, 38 (4), 307 - 316.
- Kim, T.H. and K.U. Yang, 2007. Numerical analysis on the submerging characteristics of submersible fish cage system operated by compressed air. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 43 (1), 38 - 48.
- Kim, T.H., 2009. Design of fish cage structures. Chonnam Univ. Press, Korea, pp. 40 - 183.
- Lader, P.F. and A. Fredheim, 2006. Dynamic properties of a flexible net sheet in waves and current - a numerical approach. *Aquacultural Engineering*, 35, 228 - 238.
- Lee, C.W. and B.J. Cha, 2002. Dynamic simulation of a midwater trawl system's behavior. *Fisheries Science* 68, 1865 - 1868.
- Lee, C.W., J.H. Lee, B.J. Cha, H.Y. Kim and J.H. Lee, 2005. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation. *Ocean Engineering*, 32, 331 - 347.
- Lee, C.W., Y.B. Kim, G.H. Lee, M.Y. Choe, M.K. Lee and K.Y. Koo, 2008. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Engineering*, 35, 1521 - 1532.
- Li, Y.C., Y.P. Zhao, F.K. Gui and B. Teng, 2006. Numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of submerged plane nets in current. *Ocean Engineering*, 33, 2352 - 2368.
- Thomassen, P., 2008. Methods for dynamic response analysis and fatigue life estimation of floating fish cages. Ph. D thesis. Institute of Marine Technology NTNU, Trondheim, Norway. pp. 218.
- Tsukrov, I., O. Eroshkin, D.W. Fredriksson, M.R. Swift and B. Celikkol, 2003. Finite element modeling of

- net panels using a consistent net element. Ocean Engineering, 30, 251 - 270.
- Tsukrov, I., O. Eroshkin, W. Paul and B. Celikkol, 2005. Numerical modeling of nonlinear elastic components of mooring system. IEEE Journal of Oceanic Eng., 30 (1), 37 - 46.
- Zhao, Y.P., Y.C. Li, G.H. Dong, F.K. Gui and B. Teng, 2007. Numerical simulation of the effects of structure size ratio and mesh type on three-dimensional deformation of the fishing-net gravity cage in current. Aquacultural Engineering, 36, 285 - 301.
-
- 2009년 11월 24일 접수
2010년 1월 8일 1차 수정
2010년 1월 12일 수리