팔각기둥형 가두리 시스템의 수중 안정성 분석

양용수* · 박성욱 · 이경훈 · 이동길 · 정성재 · 배재현¹

국립수산물과학원 시스템공학과 · ¹동해수산업연구소 해역산업과

Analysis on underwater stability of the octagonal pillar type fish cage and mooring system

Yong-Su YANG*, Seong-Wook PARK, Kyoung-hoon LEE, Dong-Gil LEE, Seong-Jae JEONG and Jaehyun BAE¹

Fisheries System Engineering Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-902, Korea

¹Aquaculture Industry Division, East Sea Fisheries Research Institute, Gangneung, 210-861, Korea

The sea cage in marine aquaculture might be varied such as on the stability and shape in the open sea by environmental factors. To evaluate the stability of net cage structures in the open sea, the physical and numerical modeling techniques were applied and compared with field observations. This study was carried out to analyse the stability and the volume loss which would have an effect on the fish swimming behavior in the octagonal pillar type fish cage under the open sea. As a results, the volume loss ratio of the fish cage as measured using a depth sensor was indicated a value of the 30.3% under the current velocity (1.1m/s). The fish cage should be consisted of a concrete block with a weight over 10 tons, a mooring rope diameter over 28mm PP, and a shackle of 25mm under the current speed of 1m/sec for reasonable stability.

Keywords : Octagonal pillar type fish cage, Current speed, Volume loss ratio, Stability

서 론

어업에 의해 어획되는 수산 자원의 감소 및 인구의 증가에 따른 식량문제 해결을 위한 대안으로 수산 양식에 대한 관심이 집중되고 있으나, 기존의 내만 양식은 이미 포화상태이며, 잉여사료나 양식어류 배설물 등으로 인한 양식장의 오염이 심각한 상태이다. 이와 함께 국내 수산양식은 저가 양식 어류의 수입, 사료비 및 유류비의 폭등, 소비의 다변화 미비, 양식어종의 단순화 등으로 대외 경쟁력은 점차 저하되고 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 외해 양식기술 확립, 유전육종 연구, 사료 기술개발 등 다양한 시도를 하고 있으나, 현재까지 두드러지는 가시적인 성과는 미흡한 실정이다.

따라서, 양식경쟁력 확보를 위하여 내만 양식장의 외해 이전, 양식품종의 다양화, 사료비 절감을 위한 사료연구 등과 같은 다양한 방법으로 양식 경쟁력 확보를 위해 노력하고 있다. 이러한 다양한 방법들 가운데 하나로 참다랑어를 주 대상어종으로 하여 외해에서 완전 양식기술을 개발하기 위하여 노력하고 있으며, 외해라는 지리적, 환경적 요인을 극복하기 위해 국내 · 외 연구기관에서는 외해 양식 시설물 개발을 위한 노력이 현재까지 지속적으로 진행되고 있다 (Huang et al., 2008; Suhey et al., 2005). 그러나 외해에 설치되는 가두리 같은 경우에는 내만에 비해 자연적인 외력, 즉 조류이나 파고에 크게 노출되어 있어 양식시설물을 설치할 경우 해상에서 발생할

*Corresponding author: ysyang@korea.kr Tel: 82-51-720-2580 Fax:82-51-720-2586

수 있는 모든 외력을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 하지만, 우리나라에 시설되는 대부분의 양식 시설물은 개인적인 경험을 근거로 시설함으로써 자연 재해에 무방비로 노출되어 있는 경우가 대부분이다. 특히, 2011년 태풍 “무이파”로 인해 완도군, 진도군의 전복양식시설이 인접 양식시설을 덮쳐 해안으로 밀려와 약 260억원의 피해를 발생시키는 엄청난 피해를 발생시켰다.

최근 양식시설물의 안전성 평가를 기초로 가두리 적지 선정 등과 같은 양식시설 표준안 확립의 필요성이 증대되고 있다. 여기서, 해양환경의 외력에 대한 가두리 운동 특성을 검증하기 위하여, 수리학적인 모형을 이용한 수조 실험적인 차원에서 동역학적 운동해석 (Kim et al., 2000; Huang et al., 2006; Lee et al., 2012), 양식구조물의 계류력 산정 및 이를 위한 유체력 해석 (Kim et al., 2002), 수치이론모델 기반 모델 해석 (Lee et al., 2010a; Lee et al., 2010b) 등과 같은 기초적인 연구가 진행되고 있다. 하지만, 수조에서 이루어지는 모형실험만으로는 가두리의 운동 특성 및 안정성 평가를 하기 위해서는 많

은 한계가 있다. 왜냐하면, 실제 설치해역은 수조 내에서 구현하지 못하는 다양한 방향의 불규칙 흐름이 존재하기 때문이다 (Fredriksson et al., 2003).

본 연구에서는 기존 가두리 모형 수조 실험과 이론적인 모델 해석을 기반을 둔 시뮬레이션 해석 방식을 보다 발전시키기 위하여, 자연환경 조건에서 해역의 유속장 및 파랑 중 실측한 데이터를 취득하여 팔각기둥형 가두리의 거동 특성을 분석하고, 양식 어류의 유영행동에 영향을 미치는 용적 손실을 실측을 위한 실험적 방법을 제시하였다. 또한, 해양환경의 외력에 대한 측정 실험 결과를 통하여 팔각기둥형 가두리가 설치되는 실제 해역 적지 선정 등 외해 가두리 시설 표준안을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

팔각기둥형 가두리 특징

참다랑어 양식을 위한 팔각기둥형 가두리는 Fig. 1 및 Table 1과 같이 4점 계류방식으로 제작하여 가두리 규격은 높이 15.0m, 지름 14.6m, 사육용적 2,460m³의 팔각 기둥

Fig. 1. Schematic sketch (A) and photograph (B) of a aquacultural cage system moored by 4 point ropes.

Table 1. Specification of aquacultural cage system moored by 4 point ropes for offshore

	Material	Diameter	buoyancy or bottom weight	Strand	Value
Upper and bottom frame[mm]	ST	250	2,000	—	—
Mooring line	PP	50	—	—	—
Weight [kg]	Cocreate	—	20,000	—	—
External nets	Compound	20	—	—	—
Internal nets[mm]	PE	5	—	40	—
# of mooring line	—	—	—	—	4
Volume	—	—	—	—	2,460

형태로 상부 림 (Upper collar)과 하부 림 (Bottom collar)으로 구성되며, 각 림 내부에는 공기의 주입량을 조절하여 가두리의 형태가 유지되도록 그물감이 설치되어 있다.

설치해역 해저지형 조사

팔각기둥형 가두리가 설치된 통영 욱지도 ($34^{\circ} 37.3246' N$, $128^{\circ} 14.0264' E$) 주변 해저지형 조사하

Fig. 2. Sea bottom image processing at aquacultural cage station.

기 위하여, 다방향음향측심기 (Multibeam 7101-ST, Reson, Denmark)를 이용하였다. Fig. 2는 욱지도 덕동항을 출항하여 가두리가 시설된 시험어장 주변 해역을 약 4-5knot로 항해하면서 자료 수집 소프트웨어 (PDS2000, Reson, Denmark)를 이용하여 저장하였고, 후처리소프트웨어 (Fledermaus Ver 7.0, QPS, USA)를 이용하여 이미지 처리한 가두리 시설 주변 위치 및 해저지형은 Fig. 3과 같다. 욱지도 덕동항 입구로부터 일정각도로 경사면을 나타내며, 내파성 가두리가 설치된 수심은 38-40m정도로서 비교적 평탄한 해저지형을 이루고 있다는 것을 확인하였다.

데이터 수집 장치 구성

경상남도 통영 욱지도 시험장에 설치된 팔각기둥형 가두리의 유속장에 따른 내구성, 거동 특성 및 그물 내용적손실을 분석하기 위해, 계류삭의 장력 및 사육 해양 환경 (용존산소, 수온) 모니터링을 위해 Fig. 4와 같이 실시간 정보 전송 시스템을 구성하여 관측 부이 내부에 설

Fig. 3. Installation position of the octagonal pillar type fish cage and mooring system.

치하였으며, 수집된 데이터는 CDMA 통신을 통해 육상의 PC에서 데이터가 수집된다. 또한, 가두리의 내구성 및 거동 특성, 그리고 가두리 그물 내 용적손실률을 분석하기 위해서 장력계, ADCP (WH-300, Teledyne RDI, USA) 및 수심센서를 Fig. 5와 같이 설치하였다.

수증가두리 장력 변화

수증에 설치된 가두리의 외력에 대한 안정성은 이론 계산과 실측 측정에 의해 산정할 수 있는데, 설치 해역의 해상용 관측 부이로부터 실측된 측정값과 비교하기 위하여 계산식에 의한 가두리에 미치는 힘을 분석하였

※ DAS : Data Acquisition System
DO : Dissolved Oxygen
CT : Current Transformer

Fig. 4. Schematic diagram for acquisition data of tension, DO, sea-water temperature.

다. 수증에 설치된 가두리의 계류삭에 인가되는 장력은 가두리의 유수저항, 부력, 양력의 영향을 받으며, 중성 부력상태로 가정하고 부력의 영향을 고려하지 않을 경우, 본 연구에서 적용한 팔각기둥형 수증가두리에 미치는 전체 유수저항은 그물감의 저항, 가두리 프레임의 저항, 가두리 계류삭의 저항으로 구성될 수 있다. 가두리 전체에 미치는 힘은 이러한 저항의 벡터 합으로 산정할 수 있으며, 변형을 고려하지 않는 그물의 경우는 후류의 영향을 고려하여 각각의 그물감에 작용하는 유수저항을 독립적으로 고려하여 계산하고, 이러한 요소들을 합산하여 전체 저항으로 채택하여도 큰 차이가 없으므로 수증가두리의 저항을 계산할 수 있다. 이 때, 그물의 저항은 이론값과 측정값을 비교하기 위하여 Fridman에 의한 평면 그물감의 저항으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{net} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D S_p v^2 \quad (1)$$

$$C_{Drag} = \frac{2 R_{net}}{\rho S v^2} \quad (2)$$

$$S = 2 \cdot E_k \cdot (D_t/M_L) \cdot L_0 \cdot H_0 \quad (3)$$

여기서, 가로 성형률 0.707로 하여 영각 90° 일 경우, 실험에 사용된 평면 그물감의 매듭 계수비 (E_k)는 매듭그물감의 경우 1.0로 계산하였으며, L_0 , H_0 는 각각 그물감의 수평 및 수직으로의 뻗친 길이이다. 그물실의 굵기 (D_t)는 1.0mm, 그물코의 크기 (M_L) 24.5mm인 PE 그물감로, 가로 성형률 약 0.707로 하여 영각 90°로 계산하였다. 또한, S_n 는 그물감의 유효면적 (Kim, 1999)이며, 면적 비

Fig. 5. Observation buoy (a) and Installed position (b) of tension meter, depth sensors and ADCP at an aquacultural cage.

Table 2. Change of resistance value and drag coefficients according to current speed

Current speed (m/s)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
Resistance of net (kg · f)	0.14	0.28	0.47	0.76	1.07	1.45	1.86	2.25	2.75	3.54	3.89
Drag coefficients	1.76	1.56	1.49	1.55	1.51	1.50	1.47	1.41	1.40	1.49	1.37

는 식 (5)와 같다.

$$S_n = \frac{d}{L} \cdot \frac{S}{\sin\phi\cos\phi} \quad (4)$$

$$\frac{S_n}{S} = \frac{d}{L\sin\phi\cos\phi} \quad (5)$$

그물에 작용하는 유수저항을 계산하기 위해, 저항계수 C_d 는 유체의 점성과 유속, 영각의 함수로 이루어지며, 그물감 벽면적 S , 그물의 투영면적 S_m , 그물감의 투영면적 S_n , 저항 R 은 저항계수 k ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$), 그물감의 면적을 S , 유속을 U 로 계산한다.

$$R = KSU^2 \quad (6)$$

여기서, 저항계수 k 는 레이놀즈수에 의한 영향은 일정 이상의 유속에서는 상수화된다.

$$k_0 = g \left(\frac{d}{l\cos\phi} \right)^{0.8}, (\text{영각 } \theta=0^\circ) \quad (7)$$

$$k_{45} = 100 \left(\frac{S_n}{S_m} \right)^{1.2} \left(\frac{S_n}{S} \right)^{1.6}, (0^\circ < \theta \leq 45^\circ) \quad (8)$$

$$k = 100 \left(\frac{S_n}{S_m} \right)^{1.2} \left(\frac{S_n}{S} \right), (45^\circ < \theta \leq 90^\circ \text{ 일 경우}) \quad (9)$$

$$k_{90} = 100 \left(\frac{S_n}{S_m} \right)^{1.2}, (\text{영각 } \theta=90^\circ) \quad (10)$$

팔각기둥형 수중가두리의 유수저항은 저항계수 k , 그물감 벽면적 S , 유속 U 에 비례하므로, 대상으로 하는 그물감을 통과한 유속 감소가 후면의 그물감에 영향을 주는 것으로 알 수 있으며, 기존 정육면체 사각형 모형 그물의 유수저항 $R = kSU^{1.76 \sim 1.83}$ 에 비례한다 (Kim et al, 2000)는 결과를 고려하여 $R = kSU^{1.8}$ 에 비례하는 것으로 계산하였다. 여기서, 유속범위 0.2 – 1.2m/s로 0.1m/s씩 증가시키며 측정하였다. 그물실의 직경에 대한 유속 0.6m/s, 물의 동점수계수 (ν)는 20° C 일 때 $1.004 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 이므로, 평면그물감의 레이놀즈수 ($Re = D \cdot V/\nu$)는 6.0×10^2 이다.

따라서, 그물감의 레이놀즈수와 유속에 따른 저항값

과 항력계수의 변화는 Table 2와 같다. Fridman의 그물감 레이놀즈수에 의한 저항계수 변화에 관한 실험결과에서 항력계수가 약 1.4이며 본 실험에서는 1.5로 나타났다. 레이놀즈수가 3.0×10^2 이상 높은 영역에서 저항계수의 변화가 매우 작으며, 거의 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 가두리 프레임의 유수저항은 식 (11)과 같다.

$$D = \sum \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 \quad (C_d=1.0, \rho=1,030 \text{kg} \cdot \text{m}^3) \quad (11)$$

결과 및 고찰

팔각기둥형 가두리 양식 육지도 시험장에 도플러유향유속계 (ADCP)를 설치하여 2011년 12월 17 – 21일까지 5일간 측정된 유속장 자료를 Fig. 6과 같으며, 측정 기간 동안 평균 유속은 0.4m/s, 최대 유속 1.1m/s로 나타났으며, 평균 수심은 38m로 나타났다. 유속장 내에서 가두리의 용적 손실률을 측정하기 위해서, 상부 림 (Upper Collar)과 하부 림 (Bottom Collar)에 각각 수심센서 2개씩을 수직 대칭 및 동시에 수평 대칭으로 부착하였다. 한편, 상 · 하부 림에 설치된 수심센서로 부터 2011년 12월 18일 – 27일까지 12일간 측정된 수중가두리 상 · 하부 림의 수심변화 데이터는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 결과를 보다 정밀한 분석을 위하여, 기간 내 유속 변화가 심한 2011년 12월 20일 일정 시간대 (09:59 – 23:19)를 분석영역으로 설정하고, 동 시간에 유향유속에 따라 계류삭에 걸리는 4점의 장력을 합산한 값과 용적손실률 계산을 위해 부착한 수심센서의 변화를 Fig. 8과 같다. 그 데이터로부터 유속장에 따라 분석영역에서 장력의 변화 및 2차원적인 용적손실률을 아래와 같이 분석이 가능하다.

한편, 계류식에 의해 계산된 수중가두리에 미치는 유수저항의 이론값과 현장에서 장력계에 의한 측정값을 상호 비교한 결과는 Fig. 9와 같다. 계산식에 의한 0.4 및 0.6, 0.8, 1.0m/s의 유속에 대한 이론값은 각각 $489.8 \text{kg} \cdot \text{f}$, $1,016.3 \text{kg} \cdot \text{f}$, $1,705.7 \text{kg} \cdot \text{f}$, $2,548.9 \text{kg} \cdot \text{f}$ 로 나타났고, 측정값은 $405.2 \text{kg} \cdot \text{f}$, $821.0 \text{kg} \cdot \text{f}$, $1,502.0 \text{kg} \cdot \text{f}$, $2,208.0 \text{kg} \cdot \text{f}$ 로 나타났다. 그림과 같이, 두 곡선은 2차함수의

Fig. 6. Current speed data for time elapsed.

Fig. 7. Data of depth sensor attached at the cage.

Fig. 8. Resistance and depth change for time elapsed.

비슷한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 두 그래프에서의 오차는 이론값에서 가정한 평면 그물감의 저항에 관한 계산식이 실제 가두리 설치 시에는 평면 그물감이 아닌 곡면으로 설치된 것과, 가두리 각 부의 흐름 방향과 일정한 각도를 가짐으로써 발생하는 오차는 계산식에서는 흐름에 직각으로 받는다고 계산됨으로써 발

생하는 오차이므로, 이론값이 다소 14–24% 높게 산정되었으나 이론값과 측정값이 서로 비슷한 경향을 나타내며 잘 일치하고 있다 ($R^2=0.997$).

한편, 수중가두리는 흐름장내에 존재하므로 흐름의 강약에 따라 용적이 변화하게 된다. 수중가두리의 용적이 변화하게 되면, 사육하는 어류의 행동에 영향을 미치

Fig. 9. Theoretical and experimental values of nets according to current speed.

Fig. 10. Depth difference of vertical frame at a cage.

Fig. 11. Aquatic cage shape at static state (a) and current speed 1.1 m/s (b).

게 되므로 생물에 적합한 가두리시설을 설계하기 위해서 이에 대한 추가적인 분석이 필수적으로 필요하다. 따라서, 수중가두리 상·하부에 각각 2개의 수심센서를 장착하여 상하부의 움직임을 파악함으로써 유속변화에 따른 가두리의 용적 변화를 확인하였다. 분석영역에서의 수중가두리의 용적 손실률을 계산을 하기 위해서, 동시간에 상·하부 림의 높이인 각 부림의 수직방향의 수심 단차 (B2-U1, B4-U2)의 데이터가 필요하다. 여기서, 수심센서 B2와 U1의 단차는 대략 9.8m, 수심센서 B4-U2은 11.2m이다 (Fig. 10).

또한, 분석영역에서 설계 도면상 가두리 용적과 최대 유속 1.1m/s에서의 용적을 계산하여 손실된 용적률을 계산하였다. 설계도면상 수중가두리 용적률은 가두리의 팔각형 모서리의 길이 (L) 6.0m, 수중가두리의 팔각형 직경 (R) 14.0m 및 밑면의 넓이 (S), 164m², 높이 (H) 15.0m이므로, 전체 용적 (P)은 2,460m³로 산정된다. 또한, 실제 해상에서 수중가두리의 거동은 측정값을 적용하면, 하부 림은 계류삭에 의해 고정되어 거의 거동이 없으며, 상부 림만 상하 거동하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 유속 1.1m/s에서의 용적은 수중가두리의 팔각형 밑면의 넓이는 164m², 수심센서 B2-U1의 단차 (D1)는 9.8m, 수심센서 B4-U2의 단차 (D2)는 11.1m가 되어 1,714m³로 나타나 용적손실률은 30.3%로 산정되었다. 이러한 용적손실률 산정값은 일반 해면가두리의 해수 유동에 의한 밑면 그물감 날림들을 고려하면 큰 용적 손실률은 아니라고 판단된다.

또한, 분석영역에서 하부 림이 계류삭에 의해 수평으로 고정되어 있다고 가정한다면, 최대유속 1.1m/s에서 대략적으로 가두리의 상부 림이 유속에 의해 기울어진 정도를 쉽게 구할 수 있으며, 그 결과 약 5.3° 정도 기울어 저서 용적 손실이 30.3%로 산정되었다 (Fig. 11). 여기서, Fig. 11 (a)는 정조시의 수중가두리형상을, Fig. 11 (b)는 최대유속 1.1m/s에서의 수중가두리 형상을 나타낸 모식도이다. 그 결과, 팔각기둥형 수중가두리의 경우 용적 손실을 최소화하기 위해서 상부 림의 부력을 현재 2배로 확대하는 것이 필요할 것으로 판단되며, 팔각기둥형 수중가두리의 관리 및 유지 보수를 위해서 작업이 불편하여 많은 어려움이 발생하므로, 하부 림에 고정된 로프를 수정하여 로프와 부력을 이용하여 자연스럽게 부상 부침이 가능하도록 개선하는 것도 필요하다고 판단된다.

결론

본 연구에서는 통영 욕지도 시험어장에 설치된 팔각기둥형 수중가두리의 현장 실증실험으로 외력 (유속장, 파고)에 대한 가두리의 내구성 (장력, 거동 특성 등)을 검증하고, 그 결과를 검토하여 가두리 시설 표준안을 제시하였다. 경남 욕지도에 설치된 팔각기둥형 가두리는 현장 실증 실험결과로부터 욕지도의 외력 (유향유속, 파고) 등을 고려할 때 요구되는 가두리의 계류삭과 샤클의 사양을 규격화의 필요성을 제시하였으며, 향후 지속적인 해양환경 관측 및 기존 수심 년의 해양관측자료 분석을 통해, 정밀한 수중가두리의 표준시설 기준안을 제시해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 팔각기둥형 수중가두리의 현장 실증실험에서 개선 사항으로는 그물형상을 유지하는 상부 림의 부력증가 (320.0kg) 및 그물망 교체의 편의성이 고려되어야 할 것이다. 또한, 수심센서를 이용하여 상·하부 림의 단차분석을 통해 유향유속별 가두리의 거동 특성을 2차원적인 분석방법으로 수행되었으나, 향후에는 가두리의 거동 특성을 정밀 관찰하기 위해서 3차원적인 해석방법을 위한 데이터 수집 방법 및 분석 기술을 고려해야 할 것으로 사료된다. 더욱이, 수중가두리의 내구성을 측정하는 수심센서, Pitch & Roll, 장력계의 데이터 수집을 통해 동기화시키고, 수중가두리 실시간 거동 특성을 가시화 시킬 수 있는 후처리 프로그램 개발도 필요할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 국립수산물학원 수산연구시험사업 (RP-2014-FE-003)의 지원에 의해 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 완성도를 높여 주신 심사위원님들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Fredriksson DW, Swift MR, Irish JD, Tsukrov I, Celikkol B. 2003. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. *Aquacult Eng* 27, 117–146. (DOI:http://dx.doi.org/10.1016/s0144-8609 (02) 00043-2)
- Huang CC, Tang HJ, Liu JY. 2006. Dynamical analysis of net cage structures for marine aquaculture: Numerical simulation and model testing. *Aquacult Eng* 35, 258–270. (DOI:http://

- dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.03.003)
- Huang CC, Tang HJ, Liu JY. 2008. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea. *Aquacult Eng* 38, 105 – 116. (DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.01.003)
- Kim TH, Kim DA, Ryu CR, Kim JO, Jenong EC. 2000. Flow resistance of model cage net. *J Korean Fish Soc* 33, 514 – 519.
- Kim TH, Kim CG, Kim HS, Baik CI, Ryu CR. 2002. Hydrodynamic forces on fish cage systems under the action of waves and current. *J Kor Soc Fish Tech* 38, 190 – 196.
- Lee CW, Lee J, Choe MY, Lee GH. 2010. Dynamic behavior of a submersible fish cage rigged with a circular floating and a sinking collar. *J Kor Soc Fish Tech* 46, 20 – 31. (DOI:http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2010.46.1.020)
- Lee CW, Lee J, Choe MY, Lee GH. 2010. Design and simulation tools for moored underwater flexible structures. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 159 – 168. (DOI:http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2010.43.2.159)
- Lee GH, Cha BJ, Jeong SJ. 2012. Analysis of submerging characteristics and stability of the model submersible fish cage operated by buoyancy control. *J Kor Soc Fish Tech* 48, 40 – 50. (DOI:http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.1.040)
- Suhey JD, Kim NH, Niezrecki C. 2005. Numerical modeling and design of inflatable structures-application to open-ocean-aquaculture cages. *Aquacul Eng* 33, 285 – 303. (DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.03.001)
-
2014. 4.14 Received
 2014. 5.19 Revised
 2014. 5.23 Accept