

계류된 수중 유연구조물의 설계 및 시뮬레이션 도구 개발

이춘우*·이지훈¹·최무열²·이건호³

부경대학교 해양생산시스템관리학부, ¹부경대학교 저탄소해양생산기술연구소,

²부경대학교 수산물리학과, ³국립수산과학원 시스템공학과

Design and Simulation Tools for Moored Underwater Flexible Structures

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

This paper presents a mathematical model and simulation method for investigating the performance of set net systems and fish cage systems influenced by currents and waves. Both systems consist of netting, mooring ropes, a floating collar and sinkers. The netting and ropes were considered flexible structures and the floating collar was considered an elastic structure. Both were modeled on a mass-spring model. The structures were divided into finite elements and mass points were placed at the mid-point of each element, and the mass points were connected by mass-less springs. Each mass point was subjected to external and internal forces and the total force was calculated at every integration step. An implicit integration scheme was used to solve the nonlinear dynamic system. The computation method was applied to dynamic simulation of actual systems simultaneously influenced by currents and waves in order to evaluate their practicality. The simulation results improved our understanding of the behavior of the structure and provided valuable information concerning the optimized design of set net and fish cage systems exposed to an open ocean environment.

Key words: Fish cage systems, Set net systems, Underwater flexible structures, Dynamic simulation, Mathematical model

서 론

계류된 수중 유연구조물의 종류는 정치망, 어류양식용 가두리 및 패조류 양식용 연승식 시설 등 다양하다. 정치망은 조류의 소동이 좋고, 내유하는 어군이 풍부한 외해의 수심 30 m 내외의 해역에 주로 설치되어있고, 양식시설은 강한 파랑과 조류로부터 시설물을 보호할 수 있는 내만이나 육지로부터 가까운 연안역에 주로 설치되어 있다. 그러나 얕은 수심에 설치된 정치망은 내유하는 자원의 부족으로 보다 깊은 수심의 외해 어장으로 이동 설치 요구가 많아지고 있고, 내만역의 양식시설은 산업화에 따른 내만의 매립 및 환경오염, 양식시설의 밀집으로 인한 자가 오염 등으로 양식장으로서의 가치를 잃어가고 있어 외해에 설치할 수 있는 양식시설에 대한 관심이 증대되고 있다. 조류와 파랑의 영향을 더 받는 외해에 정치망이나 양식시설을 설치하기 위해서는 높은 에너지를 갖는

외해의 환경요인을 충분히 고려할 수 있는 과학적인 설계기술의 개발이 필요하다. 이러한 설계기술은 구조물의 거동을 지배하는 모델을 기술하고, 기술된 모델을 조류나 파랑의 영향을 고려하여 정확히 계산하는 기술과 계산된 결과를 3차원 그래픽으로 표현하는 기술 및 다양한 해양조건에 대해서 구조물의 안전성을 평가할 수 있는 응용기술을 포함하고 있다 (Li et al., 2006; Fredriksson et al., 2007; Zhao et al., 2007).

정치망에 대한 설계기술은 오랫동안의 경험을 토대로 시행착오를 거치면서 정착되었기 때문에 공학적 기반에서 시설의 안전성을 평가한 연구 예는 많지 않고, 모형실험을 통한 접근이 대부분이었다 (Jeong, 1997; Lee et al., 1998; Yun et al., 2004, 2005). 반대로 양식시설에 대해서는 최근 활발하게 연구가 진행되는 분야로, 특히 양식시설의 거동과 안정성을 정확하게 해석하는데 적합한 수치모델링에 관한 연구들이 많이 이루어지고 있다. 이러한 연구들 중, Tsukrov et al. (2003)은 유한요소법으로 가두리에 사용되는 망지의 거동을 해석하였

*Corresponding author: cwlee@pknu.ac.kr

고, Fredriksson et al. (2003)은 가두리에 대한 유한요소법을 이용한 수치계산 결과와 현장 실험을 비교하여 수치모델을 검증하였으며, 또한 Li et al. (2006)은 가두리망의 거동을 집중 질량시스템으로 보고 해석하였다.

특히 뜬 파이프는 외력이 작용하면 실제로는 변형을 하지만 취급이 어려워 강체로 간주하고 해석 (Li et al., 2006; Haung et al., 2007, 2008)하던 것과는 달리 탄성체로 보고 해석하는 방법도 최근 제시되고 있다 (Fredriksson et al., 2007; Lee et al., 2008).

이러한 최근의 연구들은 경험에 의존한 과거의 설계방법과는 달리 구조물의 외력에 대한 응답을 정량적으로 평가할 수 있는 기반을 제공해 주었고, 해양환경 외력을 고려한 구조물의 안전성을 설계 단계에서 확인할 수 있으므로 보다 최적화된 시스템을 경제적으로 설계할 수 있게 해주었다. 그러나 이러한 계산 방법은 아직까지 공학적 지식이 충분한 전문가들만 가능한 일이고, 산업 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 보편화된 도구는 아직 개발되어 있지 않다.

본 연구에서는 정치망 및 양식시설과 같은 계류된 수중유연 구조물을 컴퓨터상에서 설계하고, 설계된 구조물의 환경외력에 대한 응답을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있는 해석도구를 개발하였다. 수중 유연구조물의 설계 및 해석도구는 구조물의 설계도면 작성 프로그램, 작성된 설계도면으로부터 운동방정식을 자동으로 생성하는 프로그램, 수치계산 및 3차원 그래픽 프로그램으로 구성된다. 운동방정식은 유연구조물을 유한개의 질점으로 분할하고 이들 질점들이 스프링으로 연결된 구조의 질량-스프링모델로 기술하였으며, 특히 유연체로 간주되는 망지와 로프 뿐 만 아니라 탄성체인 뜬 파이프

를 모두 질량-스프링 모델로 기술하여 해석하였다. 또한 본 연구에서 제시하는 해석방법의 유용성을 검증하기 위해서 정치망과 가두리의 거동을 조류와 파랑이 독립적으로 작용하거나 또는 동시에 작용할 때 구조물의 응답을 시뮬레이션하였고 시뮬레이션 결과 중, 정치망의 경우 실제 어장에서 측정된 자료와 비교하였다. 마지막으로 정치망 시설에 과도한 외력이 작용하여 명줄의 파단에 의해서 유실되는 과정을 시뮬레이션하여 어구 파손 과정에 대한 이해를 높이고자 하였다.

재료 및 방법

구조물의 모델링

질량-스프링 모델의 적용

본 연구에서는 망지, 로프, 뜬, 뜬 파이프, 침자 및 닻 등으로 구성되는 수중 유연 구조물을 질량-스프링 모델을 이용하여 수식화 하였다 (Lee et al., 2005). 우선 가장 많은 부분을 차지하는 망지는 매듭에 질점을 배치하고, 그물 발의 중간에도 하나의 질점을 배치하여 이들 질점이 질량이 없는 스프링으로 연결된 구조로 모델링하였다. 매듭에 배치된 질점은 구로 보았고, 발에 배치된 질점은 원통형 구조물로 간주하였으며, 발의 질점은 그물 발의 굽힘을 표현한다 (Fig. 1).

그러나 이런 모델링 방법을 망지에 직접 적용하면 너무 많은 질점과 스프링이 만들어져서 수치계산의 효율이 떨어진다. 본 연구에서는 여러 개에서 수백 개까지의 실제 그물코를 하나의 수학적 그물코로 근사하는 방법을 사용하여 계산의 부하를 줄였다 (Fig. 2).

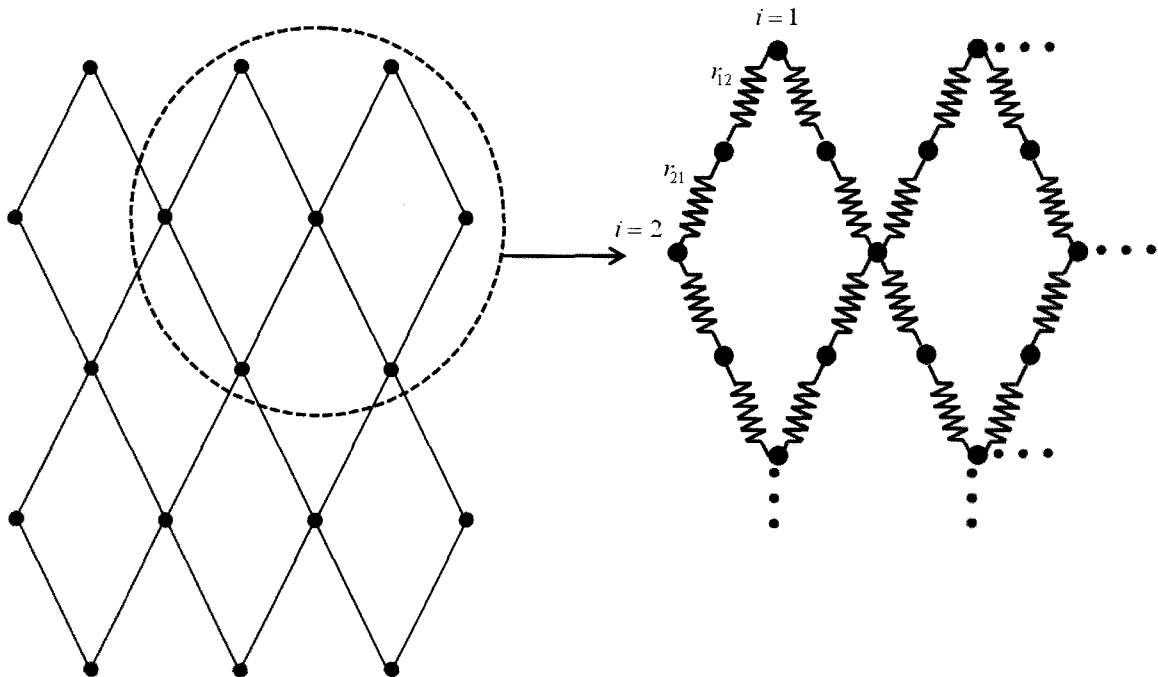


Fig. 1. Modeling for the meshes using the masses and the spring elements.

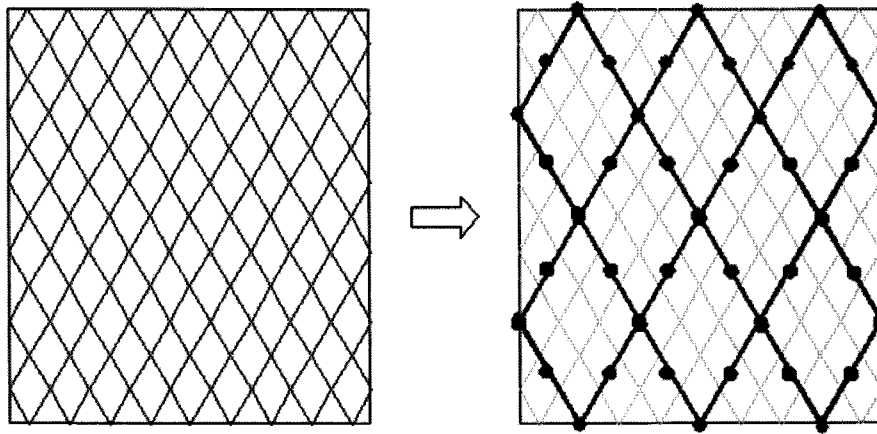


Fig. 2. Placement of virtual mathematical mesh using mesh grouping method.

여기서 근사된 수학적 그물코가 가지는 물리적인 값, 즉, 투영면적, 비중, 무게 또는 부력 등은 원래의 그물감이 가지고 있는 값을 모두 합한 값이다. 즉 수학적 매듭이 가지는 물리적인 값은 원래 망지의 모든 매듭의 면적을 합한 값이고, 밧에 배치된 질점도 원래 망지의 밧이 가지고 있는 모든 면적을 합한 값이다. 또한, 원래 망지와 근사된 망지는 기하학적 상사 관계가 성립하는 것으로 가정하였다. 즉 원래망지와 수학적으로 근사된 망지는 동일한 성형율을 가지며, 흐름에 대한 밧의 영각도 같다. 로프에 대해서는 로프를 일정한 길이로 분할하고, 분할된 요소의 중앙에 질점을 배치하였으며, 인접한 질점 사이를 스프링으로 연결한 구조로 수식화하였다. 따라서 로프에 배치된 각 질점은 해당 길이의 로프가 가지는 투영면적, 질량 및 수중 무게를 가진다 (Fig. 3).

무게가 작용한다. 각 질점에 대해서 부력 또는 공기 중의 무게 중 어느 것이 작용하는가는 각 질점이 수중에 있는지 또는 공기 중에 있는지를 매 계산 스텝마다 검사하여 수중에 있는 경우에는 부력이 작용하도록 하였고, 공기 중에 있는 경우에는 무게가 작용하도록 하였다.

그 밖에 구조물을 구성하는 뜬, 침자 및 닻 등은 기존의 로프 또는 망지의 질점에 해당 속구의 물리적 양이 반영되도록 하였다. 즉 원래의 질점에 뜬이 추가될 경우에는 뜬의 부력, 질량, 투영면적 등이 추가되고, 침자가 추가될 경우에는 침자의 수중 무게, 질량, 투영면적 등이 추가된다. 각 질점에는 구조물의 저항, 양력, 부력, 침강력 등 외력이 작용하며, 질점을 연결한 스프링에는 스프링의 인장과 압축에 따른 내력이 존재한다 (Fig. 4).

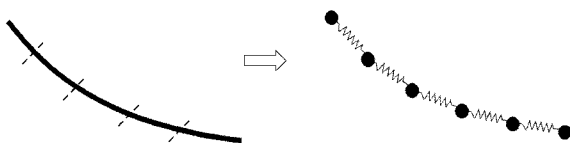


Fig. 3. Modeling of a rope using a mass-spring model.

뜬 파이프의 구조는 하나의 큰 고강도 파이프 (High density PE)나 두개의 작은 고강도 파이프를 병렬로 연결하여 원형 또는 사각형의 가두리 상부 구조를 만들고, 그 위에 핸드 레일이 설치되어있는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 모델링의 편리성을 위해 하나의 원형 뜬 파이프에 대해서만 모델링하였고, 핸드레일에 대한 모델링은 생략하였다. 뜬 파이프에 대한 질점은 원래의 입체구조물과 유사한 직육면체를 만들고 각 모서리에 질점을 배치하였다 (Lee et al., 2008).

스프링은 모서리 면을 따라 배치하고 다음으로 대각선으로도 배치하여 외력이 어느 방향에서 작용하더라도 구조물의 원래 모양이 유지되도록 하였다. 각 질점의 투영면적, 부력 또는 공기 중의 무게는 파이프의 전체 값을 질점의 개수로 나눈 값으로 하였다. 각 질점에는 유체력 이외에 부력 또는

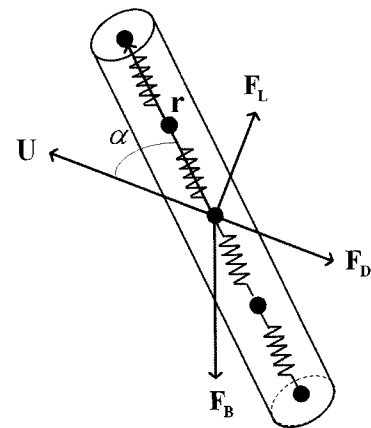


Fig. 4. Forces acting on the rope element (F_B , representing the forces of buoyancy and gravity; F_L , lift force; F_D , drag force; r , position vector between neighboring mass points; U , speed vector; α , angle of attack).

운동방정식

질량-스프링 모델을 적용한 구조물의 각 질점에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 기술 할 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 질점의 가속도, \mathbf{F}_{int} 는 질점간에 작용하는 내력, \mathbf{F}_{ext} 는 질점에 작용하는 외력이다. 부가질량은 다음과 같이 계산할 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 부가질량 계수로 그물의 매듭, 뜬, 침자 등은 구로 간주하여 1.5로 하였고 (Takaki, et al., 2004; Wakaba and Balachandar, 2007; Lee et al., 2008), 그물의 발과 뜬 파이프와 같은 원통형의 구조물에 대해서는 다음의 식으로 계산하였다.

$$C_m = 1 + \sin \alpha \quad (3)$$

여기서 α 는 영각이다.

외력과 내력의 기술

스프링에 작용하는 내력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}_{\text{int}} = -\mathbf{n} \frac{EA}{l^0} (|\mathbf{r}| - l^0) \quad (4)$$

여기서 \mathbf{n} 은 스프링에 대한 위치벡터의 단위벡터, E 는 재료의 영률 (Young Modulus), A 는 재료의 유효 단면적 (Effective Area), $|\mathbf{r}|$ 는 각 스프링에 해당하는 위치벡터의 크기, l^0 는 스프링의 원래 길이이다. 내력은 망지와 로프에 대해서는 인장방향으로만 작용하는 것으로 가정하였고, 뜬 파이프는 인장방향뿐만 아니라 압축방향으로도 내력이 작용하는 것으로 가정하였다. 또한, 인장방향 또는 압축방향으로 스프링이 늘어나거나 줄어드는 길이는 작용하는 힘에 선형적으로 비례한다고 가정하였다. 스프링 상수 값은 각 재료가 가지는 고유의 영률값과 질점 간의 거리 및 재료의 유효단면적을 고려하여 구할 수 있다. 유효단면적은 망사나 로프의 경우에는 겉보기 단면적의 60%로 하였고, 섬유 로프나 망지의 영률은 꼬인 줄로 구성되므로 장력이 가해지면 꼬임이 느슨해지면서 늘어나는 성질이 있으므로 유효 영률을 적용해야한다 (Gere and Goodno, 2009). 본 연구에서는 섬유 재료의 유효 영률을 원재료 영률의 60%로 보았다. 뜬 파이프는 외경에서 내경을 뺀 PE파이프의 순수한 재료의 면적을 그대로 사용하였다. 뜬 파이프의 대각선 방향의 스프링 상수는 직선방향의 값과 같은 것으로 간주하였다.

외력은 외부로부터 받는 힘으로 항력 \mathbf{F}_D , 양력 \mathbf{F}_L , 부력과 침강력 \mathbf{F}_B 로 이루어져 있다.

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_B \quad (5)$$

항력 \mathbf{F}_D 와 양력 \mathbf{F}_L 은 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_D = -\frac{1}{2} C_D \rho_w S V^2 \mathbf{n}_V \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w S V^2 \mathbf{n}_L \quad (7)$$

C_D 와 C_L 은 각각 항력과 양력의 계수이며, ρ_w 는 해수의 밀도, S 는 구조물에 대한 질점의 투영 면적이다. 그물과 뜬 파이프와 같이 원통형으로 간주한 구조물의 저항계수와 양력 계수는 전보의 논문 (Kim et al., 2007; Lee et al., 2008)에서의 값을 사용하였다. V 는 합성 속도벡터 \mathbf{V} 의 크기이고 \mathbf{n}_V 는 합성속도 방향의 단위벡터다. 이 합성 속도 벡터는 질점의 속도벡터 \mathbf{V}_m , 조류 속도벡터 \mathbf{V}_c 그리고 파랑에 의한 물 입자 속도 벡터 \mathbf{V}_w 로 구성되어 있다.

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

본 연구에서 파랑은 비점성, 비압축성의 이상적인 유체에 의한 2차원 규칙파라고 가정하였으며, 파는 물입자의 운동이 해저까지 닿는 천해파로 가정하였다. 이때 \mathbf{V}_w 는 수심 z 에서 아래와 같은 수평방향과 연직방향 성분으로 구성된다.

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (9)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (10)$$

u 는 물입자의 수평방향 속도성분, w 는 물입자의 연직방향 속도성분, H 는 파고, T 는 주기, k 는 파수, z 는 물입자의 수심, h 는 해저의 수심이다.

\mathbf{n}_L 은 양력방향에 대한 단위벡터이고 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{n}_L = \frac{(\mathbf{V} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{V}}{|(\mathbf{V} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{V}|} \quad (11)$$

\mathbf{r} 은 각 요소의 위치벡터이다.

질점의 부력과 침강력 \mathbf{F}_B 는 다음과 같이 기술된다.

$$\mathbf{F}_B = (\rho_i - \rho_w) V_N \mathbf{g} \quad (12)$$

여기서 ρ_i 는 재료의 밀도, ρ_w 는 해수의 밀도, V_N 은 질점의 부피, \mathbf{g} 는 중력 가속도이다.

정치망이나 가두리의 망지 중 조류의 후면에 위치한 망지는 차폐효과로 인하여 전면의 망지보다 감소된 유속이 작용한다. 후면 망지의 유속감소율은 Aarsnes et al. (1990)의 실험결과 및 전보 (Lee et al. 2008)를 참고하여 6~10%를 적용하였다.

정치망 및 가두리 시스템에 대해 기술된 운동방정식은 Backward Euler method를 이용하여 적분하였다.

설계 및 시뮬레이션 도구

정치망 설계도구

본 설계 도구에서는 정형화된 정치망의 구조를 미리 제시하고 있다. 여기서 제시하는 정형화된 정치망은 현재 한국과 일본에서 일반적으로 사용되는 정치망의 형태 (Lee et al., 1998)이며, Fig. 5에 나타내었다.

물론 정형화된 틀에서 벗어나는 특수한 형태의 정치망은 임의의 형태 유연구조물 설계기능을 쓰면 되므로 이 도구는 실질적으로 모든 형태의 정치망을 설계할 수 있다. 정형화된 틀을 제시한 이유는 설계의 편리성을 높이기 위한 것으로, 이것에 의해서 설계의 범위가 한정되지는 않는다. 설계자가 정형화된 구조 중에서 어느 한 형태를 선택해서 각 부분의 치수를 결정하고 각 부분별로 망지와 속구를 결정하면 설계도면이 쉽게 만들어진다.

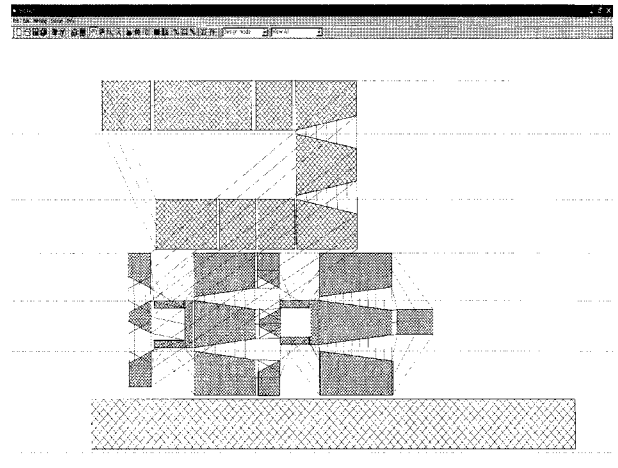


Fig. 5. The designed set net using the drawing tool.

양식시설 설계도구

양식시설 설계도구는 어류를 가두어 놓고 기르는 시설인 어류용 가두리와 해조류 또는 패류를 양식하는 데 사용되는 연승식 시설을 설계할 수 있다. 가두리는 사각형 및 원형의 가두리를 설계할 수 있다. 또한 사용자가 설계하려는 시설의 구조가 특수한 경우에는 앞에서 소개한 임의의 형상 구조물 설계기능으로 설계할 수 있다. 본 연구에서 개발된 설계도구에서 제시하는 정형화된 가두리의 형태를 Fig. 6에 나타내었다.

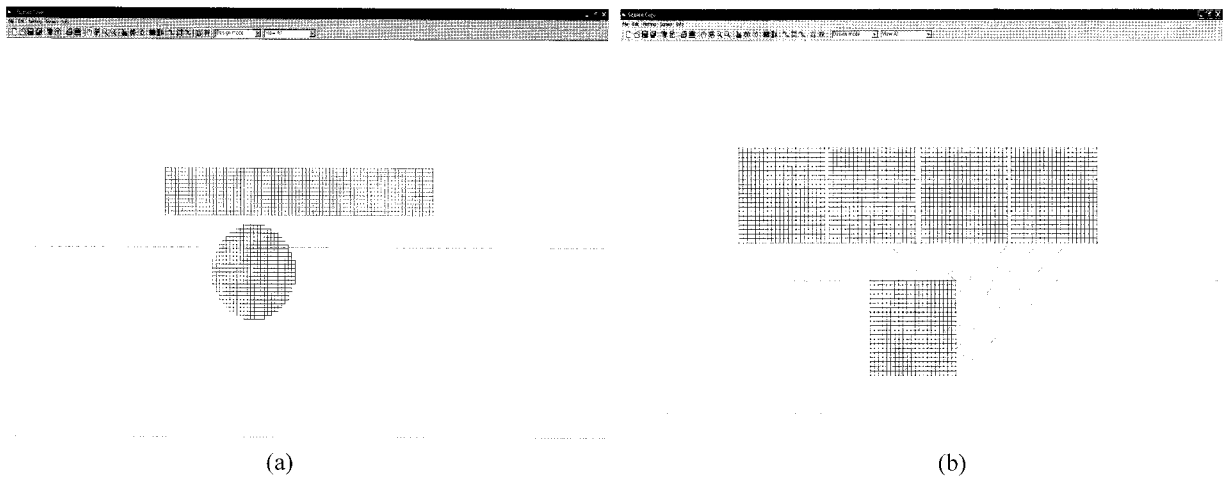


Fig. 6. The designed cages using the drawing tool. (a) Circular type of a cage, (b) Square type of a cage.

자동 모델링 및 그래픽 도구

개발된 계류식 유연 구조물 설계 및 시뮬레이션 도구는 설계도면 작성용 프로그램을 이용하여 구조물의 설계도를 작성하고, 어구재료 데이터베이스 프로그램을 이용하여 각 부분의 재료 및 규격을 결정하면 설계 도면이 작성된다. 다음으로 망지와 구조물에 질점의 개수 또는 근사 비율을 입력하고 속성이 다른 구성요소 간의 질점에 대한 연결 정보를 주면 각 질점에 대한 운동방정식이 기술되어 시뮬레이션 준비가 완료된다.

3차원 그래픽 해석 시스템은 수치로 표현된 시설물의 계산 결과를 3차원 형태로 가시화 시켜주는 프로그램으로써 수중에서의 시설의 거동을 현실에서 보는 것과 같은 모양으로 가시화시켜 시설에 대한 조류 및 파랑 등에 대한 응답을 시간별로 확인할 수 있는 시스템이다 (Fig. 7). 본 시스템 개발은 Visual Studio 6.0 MFC (Microsoft Foundation Class) 프로그래밍 개발 환경을 기반으로 하였고, 여기에 실리콘 그래픽스사가 개발한 3차원 그래픽 라이브러리인 OpenGL을 이식하여 사용하였다.

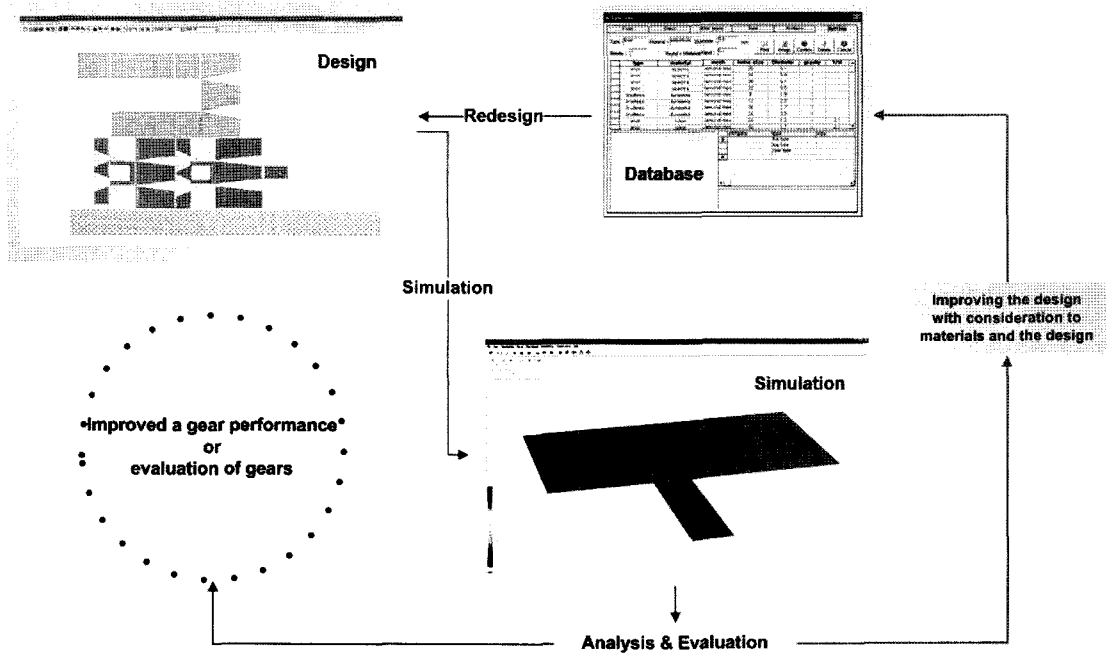


Fig. 7. Flow chart of the design and simulation tool.

실물 시스템의 시뮬레이션 조건

정치망

시뮬레이션을 수행한 정치망은 경남 거제도 장승포 연안에 설치된 정치망으로 구조는 이중 편낙망이며 운동장, 승망, 원통, 두개의 입구 그물과 하나의 길그물로 구성되어 있다. 길그물의 전장이 590 m이고, 운동장부터 원통까지의 길이가 238 m 이며 허릿줄 폭이 41 m이다. Fig. 8에 평면 설계도를 나타내었다. 정치망의 구성 부위별 망지는 PA재질이고, 길그물 망목의 크기는 0.15 m, 망사의 굵기는 3 mm, 통그물 망목의 크기는 0.034 m, 망사의 굵기는 1.2 mm, 허트통과 원통 망목의 크기는 0.012 m, 굵기는 1.2 mm이다. 멩줄은 PP재질이고, 굵기는 50 mm이다. 사개줄과 멩줄에 위치한 뜸의 총부력은 475,300 N이며, 정치망 침자의 총침강력은 51,352 N이다. 정치망의 시뮬레이션을 위한 상세한 규격을 Table 1에 나타내었다.

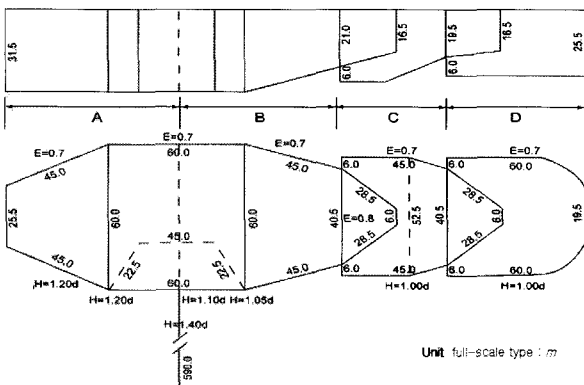


Fig. 8. Drawing plan of the set net (Lee et al. 2006).

Table 1. Physical characteristics of calculation parameters of the actual set net for the netting and the mooring lines

Items	Mass (kg)	Projected area (m ²)	Stiffness (N/m)	Initial length (m)
Guide net	0.0498	0.010575	71,251	3.5
Fish court	0.004854	0.0024	28,740	2
Barrier net	0.0029	0.00144	81,430	1.2
Bag net	0.0029	0.00144	81,430	1.2
Mooring line	9.8	0.25	196,000	5

Table 2. Physical characteristics of calculation parameters of the actual cage for the floating collar, netting and mooring lines

Items	Mass (kg)	Projected area (m ²)	Stiffness (N/m)	Initial length (m)
Floating collar	4.76	0.254	8,160,053* 39,372,206**	2 0.46
Cage netting	0.40	0.53	322,254	2
Mooring line	20.74	0.86	11,836,048	15.5

*Lengthwise spring, **Crosswise spring.

가두리

본 연구에서 시뮬레이션을 수행한 가두리 시스템은 지중해에서 참치를 축양하는 시설로, 직경이 50 m인 원형 뜸 파이프로 된 상부 구조물에 깊이 20 m의 원통형 그물이 달려있다. 가두리 시스템은 멩줄로 고정되며, 뜸 파이프는 PE재질이고, 직경이 50.8 cm이며, 두께가 46.2 mm인 튜브로 원주 길이는 157 m이다. 이 길이에 해당하는 총 부력은 282,142 N 이고, 뜸 파이프에 배치된 질점의 수는 300개이다. 가두리의 망지는

PES재료의 라셀 (Raschel)망이고, 망목의 크기는 55 mm, 망사의 굵기는 4 mm이다. 전체 그물코의 수는 1,701,999개이고, 이를 근사하여 1,412개의 수학적 질점으로 줄여서 수치계산하였다. 가두리의 총 침강력은 12,828 N이다. 가두리의 시뮬레이션을 위한 상세한 규격을 Table 2에 나타내었다.

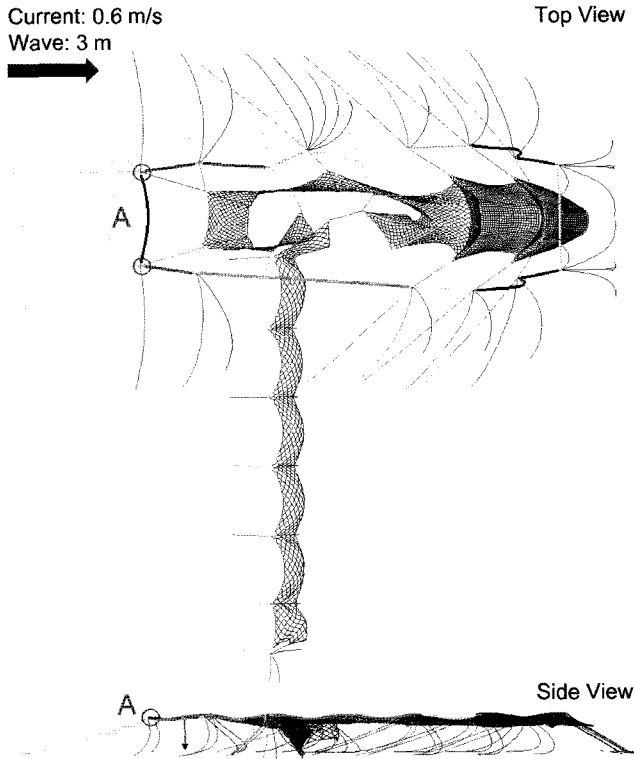


Fig. 9. Shapes of the set net under the tidal current(0.6 m/s) and waves(length: 50 m, height: 3 m) act in the same direction.

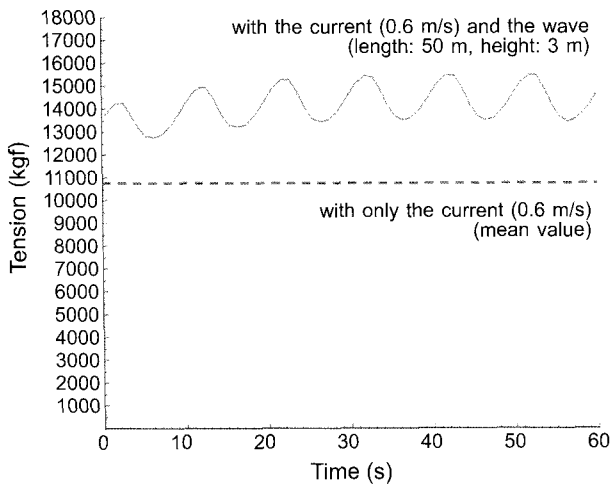


Fig. 10. Tension of mooring lines under the current and waves acting in the same direction.

결과 및 고찰

유속과 파랑의 동시 작용에 대한 응답

정치망에 조류가 단독으로 작용할 때의 거동은 시뮬레이션 결과와 모형실험 결과 (Lee et al., 2006)를 비교한 결과 오차는 $\pm 10\%$ 이내로 나타났다. 정치망이나 가두리에 조류와 파랑이 동시에 작용하면 보다 복잡한 거동을 나타낸다. 정치망에 조류와 파랑이 동일한 방향으로 작용하였을 때의 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 이때 시뮬레이션 입력조건으로 조류는 0.6 m/s, 파랑은 파장 50 m, 주기 10초, 파고 3 m 이다 (Jeong, 2003). 그물의 형상변화와 운동은 조류나 파랑이 하나만 작용했을 때보다 커졌다. 상단부분의 명줄 (A점-Fig. 9 참조)에 발생하는 장력은 파랑의 영향으로 인해 규칙적으로 변화였고 조류만 작용하였을 때 보다 최대 150%까지 높아졌다 (Fig. 10).

가두리에 조류와 파랑이 동시에 동일한 방향으로 작용할 때의 형상을 Fig. 11에 나타내었다.

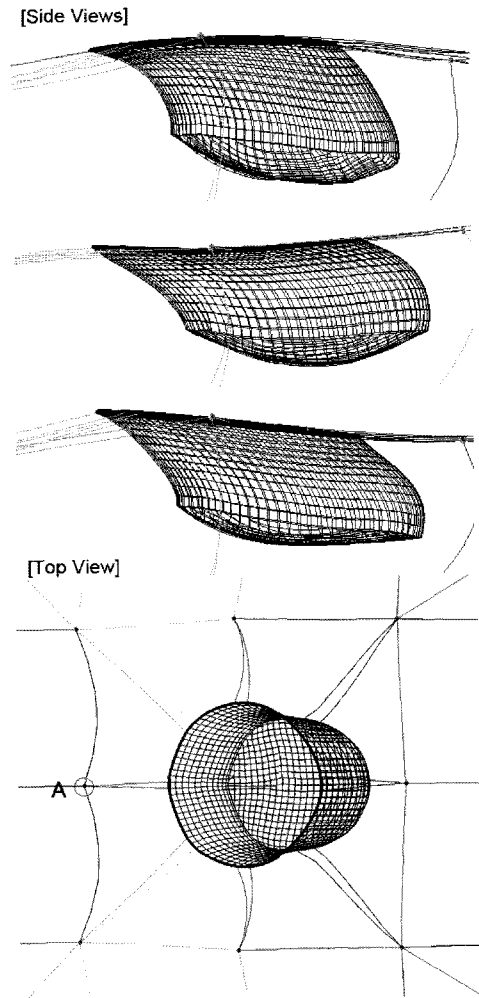


Fig. 11. Successive shapes of the fish cage under the tidal current(0.75 m/s) and waves(length: 156 m, height: 6 m) act in the same direction.

이때 적용된 조류와 파랑의 조건은 전보 (Lee et al., 2008)와 동일하게 주었다. 조류의 작용으로 구조물의 측면형상은 크게 변형되었고, 파랑의 작용이 추가되었을 때 주기적인 상하운동을 나타내었다. 뜬 파이프의 거동을 확대한 Fig. 11 상단 그림을 보면 뜬 파이프는 약간의 시간 지연을 가지고 파랑에 의한 수면의 상하 운동을 추종하고 있는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 수행된 시뮬레이션에 의하면, 뜬 파이프는 조류나 파랑에 대한 응답은 정성적으로는 현장에서 관찰되는 것과 유사하였으나, 정량적인 분석은 현장 자료가 확보되지 않아서 수행되지 못하였다. 이러한 조건하에서 상류측 명줄 A점에서의 장력을 Fig. 12에 나타내었다.

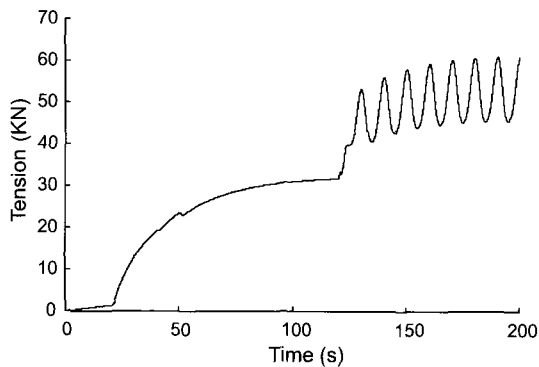


Fig. 12. Variations in tension acting on the upper side mooring line at the point A in Fig. 11 exposed to current and waves.

정치망의 유실과정

본 도구에서는 각각의 명줄이 최대로 견딜 수 있는 파단 강도를 설정할 수 있다. 이 기능을 이용하면 명줄의 파단에 의한 시설물의 파손현상을 시뮬레이션 할 수 있다. 파단강도가 5톤에서 7톤인 명줄에 고정된 정치망에 0.8 m/s의 조류와 6 m의 파랑이 동시에 같은 방향으로 작용하였을 때의 어구 파손과정을 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13을 통한 파손과정을 보면, 처음에 여러 명줄 중 파단 강도가 가장 약한 명줄에 자신의 파단 강도를 초월하는 힘이 가해질 때 파단 된다. 이로 인해 이 명줄에 걸리고 있던 장력이 인접한 다른 명줄로 전가되므로 주변에 남아있는 명줄의 장력도 크게 증가한다. 그렇게 되면 결국 남아있는 명줄도 증가된 하중을 견디지 못하고 차례로 파단되어 도미노효과처럼 명줄이 차례로 파단되고, 어구 전체가 유실되게 된다.

이런 현상은 빠른 조류와 높은 파도가 동시에 작용하는 폭풍이나 태풍이 내습할 때 흔히 일어난다. 특히 정치망이나 가두리는 구조물에 생물이 부착하므로, 구조물을 설치한 후 시간이 경과함에 따라 구조물의 투영 면적이 크게 증가하고 그에 따라 저항도 같이 증가되므로 조류와 파랑의 영향을 더욱 크게 받게 된다. 여름철에는 부착생물의 성장속도가 빠르므로 부착생물에 의한 그물의 저항이 2~4배까지 증가되는 경우도 있다 (Løland et al., 1988). 따라서 시설물 설계 시에는 이러한 현상이 충분히 고려되어야만 한다.

수치계산과정의 고찰

저항계수와 양력계수는 기본적으로 영각, 재료의 공극률,

Reynolds수의 세 가지 요소에 크게 의존하며, 이들의 영향을 종합적으로 고려해 주어야 한다. 그렇지만, 본 연구에서는 가두리를 구성하는 망지, 로프 및 뜬 파이프의 저항계수와 양력계수를 영각에 대해서 기술한 값을 사용하였다. 본 연구에서 이러한 유체력 계수들을 사용한 이유는 영각에 의한 영향이 가장 현저하였고, 나머지 두 요소는 그 영향의 정도가 현저하지 않았기 때문이다 (Lee et al., 2008). 그러나 보다 정확한 계산을 위해서는 영각, 공극률 및 Reynolds 수를 모두 고려한 유체력 계수가 필요하다. 본 연구에서는 주요 실험유속의 범위 (0.3~0.6 m/s)에서 Reynolds 수와 무관하게 실험으로부터 구해진 유체역학적 계수를 사용했기 때문에 저속역에서는 유체력이 저평가될 우려가 있고, 고속역에서는 유체력이 다소 고평가될 우려가 있다.

정치망이 정상적으로 계류된 상태에서, 뜬 수면에 나온 부분과 잠긴 부분이 있다. 이때 유수저항의 계산은 물에 잠긴부분만 계산해야 정확하다. 그러나 물에 잠기는 정도가 조류의 세기 및 파랑에 따라 달라지므로 정확한 침수면적을 구하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 모든 뜬이 침수된 것으로 가정하여 뜬의 전체면적을 기준으로 저항을 계산하였다.

일반적으로 정수 중 또는 그다지 강하지 않은 균일한 조류가 작용할 경우의 뜬 파이프는 일정한 부분까지는 수중에 잠겨있고 나머지 부분은 공기 중에 있게 된다. 이러한 경우 본 연구에서는 잠겨 있는 부분에 대해서는 저항과 양력 등 유체력을 계산하였고, 공기 중에 노출된 부분에 대해서는 무게를 고려하였다. 그러나 파랑 또는 조류와 파랑이 동시에 작용하는 상태에서 구조물에 대한 유체력 계산은 보다 복잡해진다. 왜냐하면 뜬 파이프의 부분별로 잠겨있는 정도가 다르고, 유체력도 부분별로 달라지기 때문이다. 본 논문에서 제시하는 질량-스프링 모델은 뜬 파이프를 여러 개의 질점으로 분해하여 각 질점별로 유체력을 계산하고 있다. 즉 유체력을 계산할 때는 뜬 파이프에 배치된 질점이 수중에 있는지 공기 중에 있는지를 먼저 판별하여, 수중에 있을 때는 그 질점에 해당하는 부력, 저항 및 양력을 계산하고, 공기 중에 있을 때는 무게를 계산하는 방법을 사용하므로, 이 모델은 뜬 파이프가 어떤 상태에 있더라도 작용하는 외력을 계산할 수 있다. 이때, 잠겨있는 정도에 따라 유체력 계수들이 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 완전히 잠겨있는 상태에서 구해진 계수들을 사용하였다. 수치계산 방법을 적용하여 구조물의 거동을 계산할 때 우선 고려해야할 사항은 계산모델의 정확성 검증이다. 본 연구에서 사용한 수치모델은 전보 (Lee et al., 2008)에서 제시된 모델을 그대로 사용하였고, 유연구조물에 대한 모델링 및 수치계산의 정확성에 대한 연구는 모형실험으로 수행하였는데 그 결과는 다음 논문으로 발표될 예정이다. 또한, 현장의 정치망 자료와의 비교에서도 그 정확성이 입증되었다.

따라서, 본 연구에서 개발된 설계 도구는 경험에 의존한 과거의 설계방법과는 달리 구조물 요소에 작용하는 힘을 공학적인 기법을 통하여 과학적으로 계산하고, 시설물을 현장에 설치하기 전에 환경외력에 대한 영향을 평가할 수 있으므로 안전한 시스템을 경제적으로 설계하는데 도움이 될 것이다

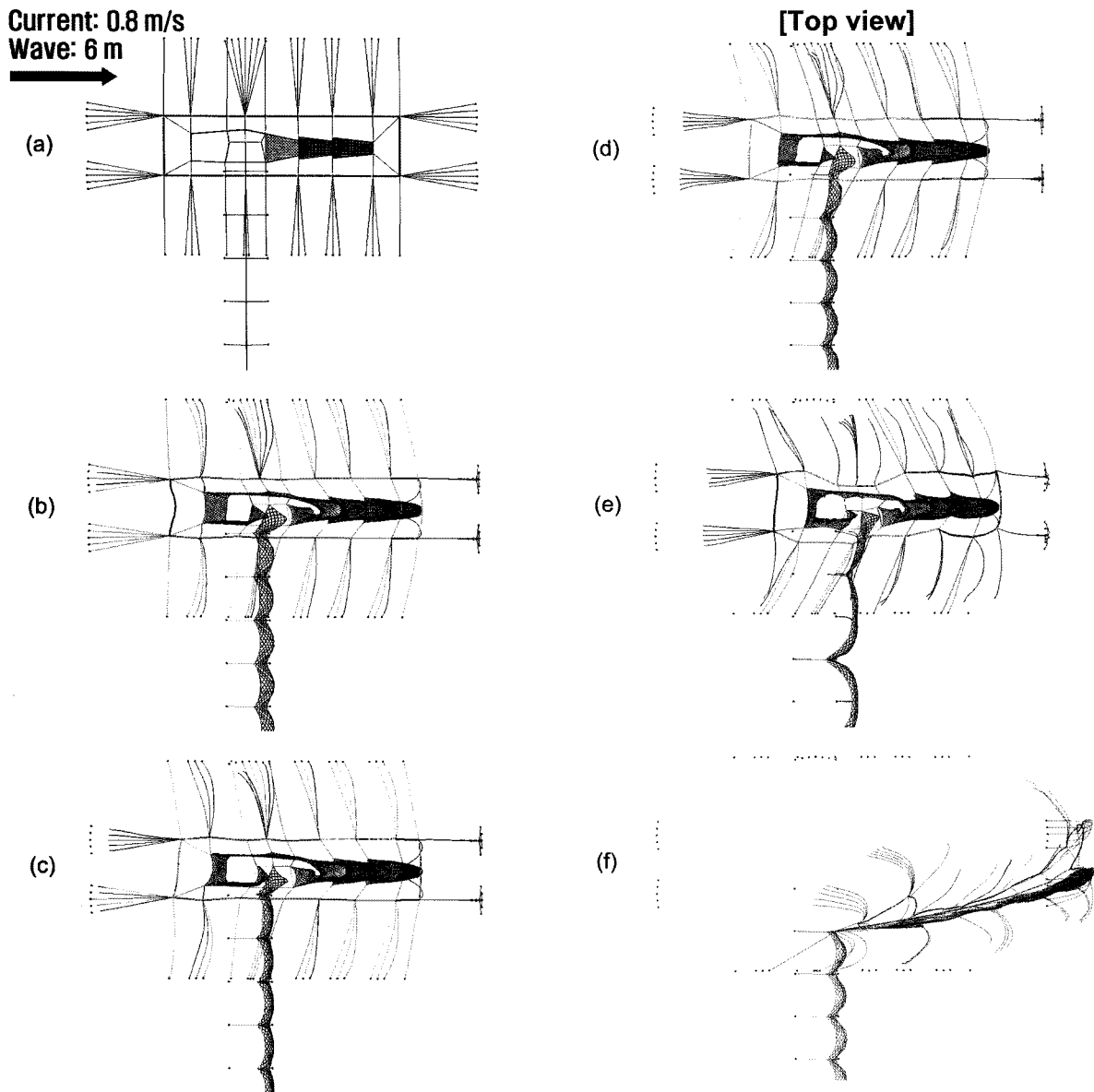


Fig. 13. Simulation of fatal damage by breaking the mooring lines of the set net due to strong tidal current (0.8 m/s) and waves (height: 6 m), (a): in still water, (b)~(d): start to breaking the mooring line having the smallest breaking strength, (e): increased loads applied on the remaining lines and breaks one by one, (f): whole gear swept away.

사 사

이 논문은 2006년도 부경대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었음(PS-2006-027).

참고문헌

Aarsnes JV, Rudi H and Loland G. 1990. Current force on cage, net deflection, Engineering for Offshore Fish Farming, Tomas Telford, London, U.K., 137-152.

Choi J, Kim SY, Kim DE and Jeong SJ. 2006. A Study on Performance Analysis of a Fish Cage using Air Chamber Structure. J Kor Soc Nav Arch 43, 119-127.

Fredriksson DW, Swift MR, Irish JD, Tsukrov I and Celikkol B. 2003. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. Aquacultural Engineering 27, 117-146.

Fredriksson DW, DeCew JC and Tsukrov I. 2007. Development of structural modeling techniques for evaluating HDPE plastic net pens used in marine aquaculture. Ocean Engineering 34, 2124-2137.

Gere JM and Goodno BJ. 2009. Mechanics of Materials,

- 7th ed. Cengage Learning. Toronto, Canada. 68-71.
- Huang CC, Tang HJ and Liu JY. 2007. Modeling volume deformation in gravity-type cages with distributed bottom weights or a rigid tube-sinker. *Aquacultural Engineering* 37, 144-157.
- Huang CC, Tang HJ and Liu JY. 2008. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea. *Aquacultural Engineering* 38, 105-116.
- Jeong GC. 1997. Dynamic Behavior of Model Set Net in the Flow. Master Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, 4-26.
- Jeong SJ. 2003. Ein Beitrag zur Erzeugung nichtlinearer Entwurfsseegänge im numerischen Wellenkanal. PhD Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 9-42.
- Kim HY, Lee CW, Shin JK, Kim HS, Cha BJ and Lee GH. 2007. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification. *Fisheries Research* 88, 109-119.
- Lee JH, Kim JK, Lee DJ, Lee CW, Shin HO, Kwon BG, An YI and Kim HY. 1998. A study of development for an improved set net. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries Report. Korea. 21-86.
- Lee CW, Lee JH, Cha BJ, Kim HY and Lee JH. 2005. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation. *Ocean Engineering* 32, 331-347.
- Lee CW, Lee JH, Kwon BG, Kim HS, Shin JK, Cha BJ, Jeong SJ, Lee MW and Lee GH. 2006. Development of the design and analysis system for pound net. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries Report. Korea, 122-157.
- Lee CW, Kim YB, Lee GH, Choe MY, Lee MK and Koo KY. 2008. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Engineering* 35, 1521-1532.
- Li YC, Zhao YP, Gui FK and Teng B. 2006. Numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of submerged plane nets in current. *Ocean Engineering* 33, 2352-2368.
- Løland G, Rudi H and Aarsnes JV. 1988. Teori for beregning av nøter, Krefter og gjennomstrømning på enkeltpanel og merdsystem. MARINTEK Rapport No OR 513039.00.02.88.
- Takaki T, Shimizu T, Suzuki K, Hiraishi T and Yamamoto K. 2004. Validity and layout of "NaLA": a net configuration and loading analysis system. *Fisheries Research* 66, 235-243.
- Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson DW, Swift MR and Celikkol B. 2003. Finite element modeling of net panels using a consistent net element. *Ocean Engineering* 30, 251-270.
- Wakaba L and Balachandar S. 2007. On the added mass force at finite Reynolds and acceleration numbers. *J Theor Comput Fluid Dyn* 21, 147-153.
- Yun IB, Lee JH, Kwon BG, Cho YB, Yoo JB, Kim SH and Kim BY. 2004. A study on improvement for fishing gear and method of pound net-. *J Kor Soc Fish Tech* 40, 268-281.
- Yun IB, Lee JH, Kwon BG, Yoo JB and Cho YB. 2005. Shape of the model pound net according to added sinker-In case of the upperward flow with fish court net-. *J Kor Soc Fish Tech* 41, 17-26.
- Zhao YP, Li YC, Dong GH, Gui FK and Teng B. 2007. A numerical study on dynamic properties of the gravity cage in combined wave-current flow. *Ocean Engineering* 34, 2350-2363.

2009년 11월 10일 접수

2010년 3월 29일 수정

2010년 4월 12일 수리