

수치해석기법을 통한 저탄소어구 설계

이춘우

부경대학교 해양생산시스템관리학부

서론

이산화탄소 배출이 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 교토협정(Kyoto protocol)의 주요 목표는 온난화 가스를 줄여 천연 자원을 안정적으로 관리하는 데 있다. 특히 어업으로부터 발생하는 이산화탄소 문제는 1992년 멕시코 칸쿤(Mexico, Cancun)에서 개최된 책임어업에 대한 국제 컨퍼런스의 주요 관심사로 부각되었다. 급격한 유가상승으로 인하여 조업에 소모되는 연료는 비용 측면에서 어민들에게 심각한 영향을 미치며, 수산업은 경제적 어려움을 겪고 있다.

에너지 소모에 영향을 미치는 요소들로 어장까지의 거리, 악천후(거친 파도, 낮은 온도, 결빙), 어구 운용 및 어획물 보존 등을 들 수 있다. 고가 어종을 어획하기 위한 현대적 어업에서 수산물 어획은 순수 에너지 소모가 더 큰 실정이다. 그 이유는 어획된 수산물의 영양에너지에 비해 어획과정동안 에너지가 더 많이 소모되기 때문이다(Tyedmers, 2004; Ellingsen and Aanonsen, 2006).

이러한 이유들로 인하여, 어구 운용중 소모되는 유류의 소모량을 평가할 수 있는 연구들이 많이 진행되어왔다(Tyedmers, 2001; Ziegler and Hausson, 2003; Ziegler, 2006; Thrane, 2004; Schau et al., 2009). 어구의 모양을 변경시키면서 유류 소모량을 감소시키기 위한 연구들 또한 진행되었으며, Prior and Khaled (2009)는 수치해석 기법을 이용하여 어구의 저항을 분석하고, 저항을 저감할 수 있는 어구의 디자인에 대한 연구를 하였다. 또한 어선의 선형을 변화시켜 유류소모량을 감소시키려는 연구가 진행되었다(Aanonsen, 1997). 수산업에 있어서 유류소모량을 감소시키기 위한 어구 및 조업방법 개선이 필요하다. 특히, 어구 중 가장 연료를 많이 소모하는 예망어구는 조업방법을 개선시킬 수 있는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 수치해석기법을 이용하여 어획성능은 유지시키면서 어구 저항을 저감시키는 방법에 대하여 다루었으며, 천연자원보존과 비용 감소에 기여할 수 있을 것이다.

재료 및 방법

유연구조물의 수학 모델링

어구 시스템은 유연체와 강체로 구성되어 있다. 어구 시스템의 이론적 모델은 시스템을 유한개의 질점과 각 질점을 서로 연결하는 유연한 선으로 이뤄진 물리시스템으로 고려하였다. 시스템의 각 요소들은 질량 스프링 모델을 이용하여 모델링하였으며, 본 모델링 방법은 어구 시스템의 다른 요소들에도 적용가능하다. 침자, 뜸 그리고 다른 속구들은 질점으로 고려되었다. Fig. 1은 망지 및 수중유연구조물의 기본요소에 대한 모델링방법을 표현하고 있다.

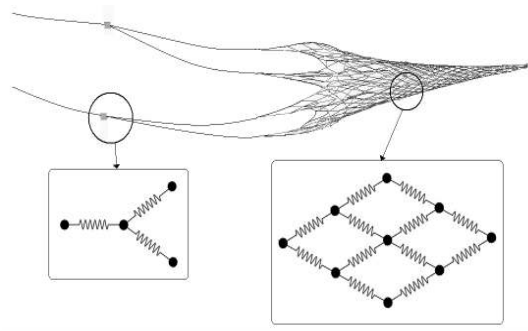


Fig. 1. Modeling of a fishing net using the mass spring model.

각 질점에 대한 운동방정식은 아래의 식으로 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 부가질량계수이며, 질점은 구로써 표현되어 1.5 이다 (Lee et al., 2008; Wakaba and Balachandar, 2007; Takaki et al., 2004).

그물발처럼 원통형 구조물의 C_m 은 아래 식으로 계산되어질 수 있다.

$$C_m = 1 + \sin \alpha$$

(3)

여기서 α 는 영각이다.

내력

내력은 질점을 연결하는 스프링의 인장과 압축에 의해서 생기는 힘이다. 내력은 망지와 로프에 대해서 인장방향으로만 작용하는 것으로 가정하였다. 또한 스프링의 인장 또는 압축되는 길이는 작용하는 힘에 선형적으로 비례하는 것으로 가정하였다.

각 질점에 작용하는 내력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}_{int} = -\sum_{i=1}^n k_i \mathbf{n}_i (|\mathbf{r}_i| - l_i^0)$$

(4)

여기서 k_i 는 스프링의 강성, \mathbf{n}_i 은 스프링 방향의 단위 벡터, $|\mathbf{r}_i|$ 는 스프링의 위치벡터, l_i^0 는 스프링의 원래 길이이다.

스프링의 강성은 각 재질에 따라서 아래의 식으로 계산되어질 수 있다.

$$k = \frac{EA}{l^0}$$

(5)

여기서 E 는 재료의 유효 영율(Young modulus), A 는 재료의 유효 단면적이다. 그물발 또는 로프의 유효 단면적은 재료 단면적의 60%이다. 주어진 인장 하중에서, 로프는 꼬임 때문에 같은 재질의 강성 막대와 금속재질을 가진 막대의 단면적에 비해 보다 높은 신장률을 가진다 (Gere and Goodno, 2000). 그러므로, 로프의 탄성율 또는 유효 탄성율은 그물발 또는 로프 재질을 가진 강성 막대의 탄성율의 60%정도로 추정되어진다.

외력

질점에 작용하는 외력은 저항 (\mathbf{F}_D), 양력 (\mathbf{F}_L), 부력 및 침강력 (\mathbf{F}_B)으로 구성되며 다음 식으로 나타낸다.

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_B \quad (6)$$

그물발에 작용하는 힘은 Fig. 2에 나타내었다.

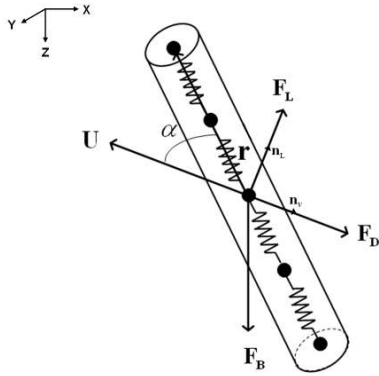


Figure 2. Forces acting on the rope element: \mathbf{F}_B , representing the forces of buoyancy and gravity; \mathbf{F}_L , the lift force; \mathbf{F}_D , the drag force; \mathbf{r} , the position vector between neighboring mass points; \mathbf{U} , the speed vector; α , the angle of attack.

조류는 균일한 정상류로 가정하였고, 관성력은 무시하였다. 저항과 양력은 아래의 식과 같다.

$$\mathbf{F}_D = -\frac{1}{2} C_D \rho_w S V^2 \mathbf{n}_v \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w S V^2 \mathbf{n}_L \quad (8)$$

여기서 C_D 는 저항계수, S 는 질점의 투영면적, V 는 합력 속도 벡터, \mathbf{n}_v 는 항력 벡터

의 단위 벡터, C_L 은 양력계수, \mathbf{n}_L 은 양력의 작용 방향을 나타내는 단위 벡터로 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

(9)

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

합 속도벡터 \mathbf{V} 는 질점의 속도 벡터 \mathbf{V}_m , 조류의 속도 벡터 \mathbf{V}_c 에 의해 아래와 같이 계산되어진다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_m - \mathbf{V}_c$$

(10)

그물발의 유체역학적 계수는 그물발과 속도벡터에 의해 구성되는 영각에 의해 결정된다. 이 영각은 아래의 식으로 구해질 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{r}}{|\mathbf{V}| |\mathbf{r}|} \right]$$

(11)

그물코 매듭, 뜰 그리고 침자는 구로 간주하여, 항력은 작용하나 양력은 작용하지 않는 것으로 하였다. 이때 항력계수는 1.5로 가정하였다 (Fredheim and Faltinsen, 2003). 부력과 침강력 \mathbf{F}_B 는 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{F}_B = (\rho_i - \rho_w) V_n \mathbf{g}$$

(12)

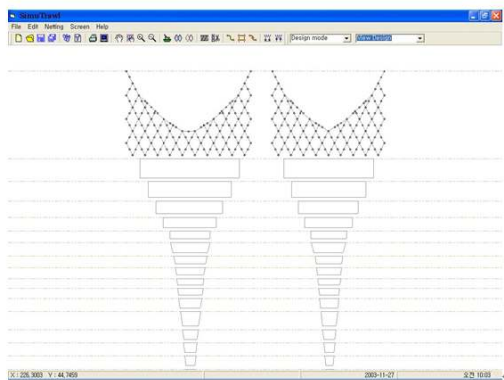
여기서 ρ_i 는 재료의 밀도, \mathbf{g} 는 중력가속도이다. 어구 시스템에 대해 기술된 운동방정

식은 4차 Runge-kutta 법을 이용하여 적분하였다.

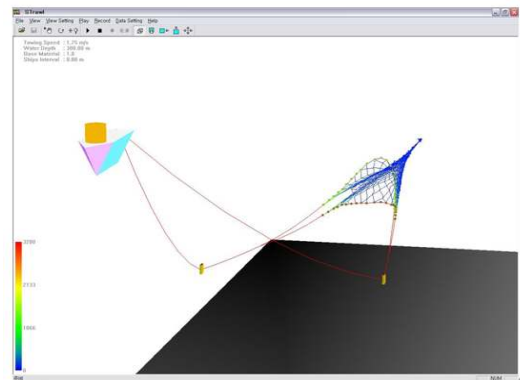
결과 및 고찰

트롤 시스템을 설계하기 위하여 여러 가지 변수들을 고려하여야 한다. 트롤 어구 시스템의 총저항, 트롤선의 예망력, 망고, 망폭, 전개판 간격, 예망수심에 대한 끌줄 길이는 적정 예망속도에서 균형을 이뤄야한다.

어구를 설계하는 단계에서 망지, 로프, 뜸 그리고 침자와 같은 요소의 성질을 데이터베이스에서 선택함으로써 컴퓨터에 입력된다. 어구 설계가 마무리되었을 때, 망지 그리고 다른 속구들의 성질은 자동으로 저장되어진다. Fig. 4(a)는 중층 트롤어구 시스템 설계의 예를 나타내고 있다.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Designed plan of a trawl system using the software tool and (b) simulation example of a mid-water trawl system

Fig. 4(b)는 중층트롤어구의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 트롤의 중첩이미지는 예망속도가 증가할수록 전개판 간격과 어구의 수심이 증가하며 망고가 감소함을 나타내고 있다 (Fig. 5). 시뮬레이션으로 나타난 어구의 운동 특성은 해상 실험에서 관측된 결과와 잘 일치한다 (Lee et al., 1998).

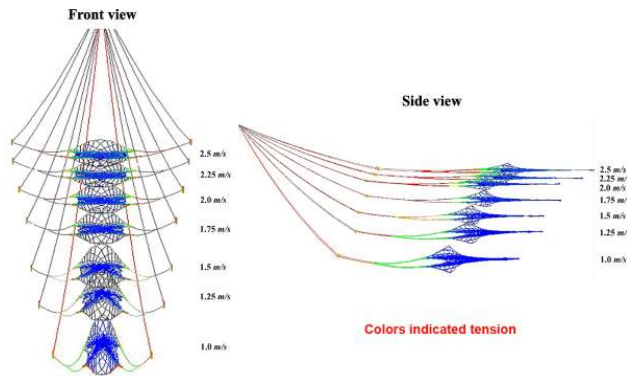


Fig. 5. Comparison of a mid-water trawl gear behavior and tension states by the towing speed.

조업중 어구에 대한 저항은 유류 소모량을 증가시킬 것이므로, 조업중 어구 시스템에서 저항이 많이 발생하는 부위를 찾기 위하여 어구 저항 분석을 수행하였다.

저탄소 어구를 설계하기 위한 단계로써, 첫 번째 현용 어구를 설계 소프트웨어를 이용하여 설계한다. 두 번째 단계로 설계된 어구를 적합한 조업조건에서 시뮬레이션을 수행한다. 세 번째 단계로 어구 전체에 작용하는 저항력과 어구 각부에 작용하는 저항을 각각 분석한다. 네 번째 단계로 Dyneema와 같은 고강사 재질을 이용하여 시뮬레이션 결과 저항이 가장 많이 작용하는 부위에 적용하여 어구를 재설계한다. 마지막으로 재설계된 어구를 시뮬레이션한 후, 어느 정도의 저항 감소효과가 나타나는지 분석한다 (Fig. 6).

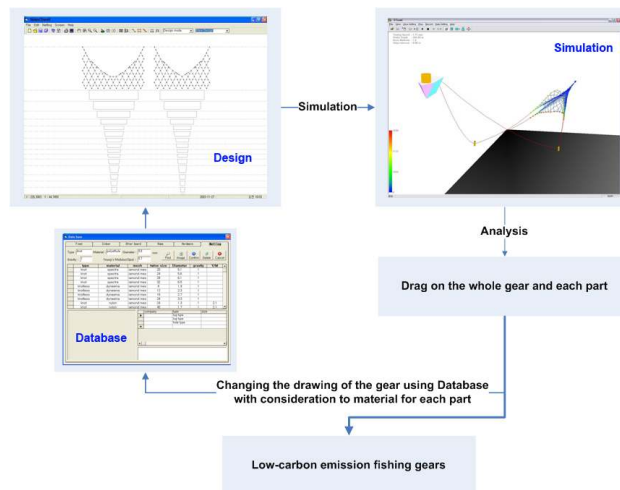


Fig. 6. Flow chart of the low-carbon emission fishing gear design using numerical methods.

시뮬레이션 도구는 다양한 조업환경에서 어구의 저항을 계산할 수 있으며, 어구를 제작에 소요되는 재료의 비용을 결정할 수 있다. 이러한 계산은 저항 감소량과 비용 증가분의 균형을 통하여 최적의 어구를 설계할 수 있게 해준다. 일반적으로 저탄소 어구와 같이 새로운 어구를 개발하기 위해서는 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 하지만, 이러한 수치해석기법을 통한 저탄소 어구 설계는 비용과 시간을 절약가능하게 해주며, 저탄소 어구 시스템은 천연자원보존에 기여할 것이다.

참고문헌

- Aanonsen, S.A., Life cycle assessments of environmental performance used as a tool in ship design (In Norwegian: Livsløpsanalyser for beregning av miljøpåvirkning brukt som verktøy ved prosjektering av skip). Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 1997.
- Ellingsen, H. and Aanonsen, S.A., Environmental impacts of wild caught cod and farmed salmon - a comparison with chicken. *Int J Life Cycle Assess*, 2006, 11(1):60-5.
- Fredheim, A. and Faltinsen, O.M., Hydroelastic Analysis of a Fishing Net in Steady Inflow Conditions. *Hydroelastic in Marine Technology*, Oxford, UK, 2003, pp.1-10.
- Gere, J.M. and Goodno, B.J., *Mechanics of Materials*. 7th ed. Cengage Learning, 2009.
- Kim, H.Y., Lee, C.W., Shin, J.K., Kim, H.S., Cha, B.J. and Lee, G.H., Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification. *Fisheries Research*. 2007, vol. 88, pp. 109-119.
- Lee, C.W., Jang, C.S., Kim, M.S., Shin, H.O. and Kim, I.J., Measurements of Midwater Trawl System and Dynamic Characteristics. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.*, 1998, vol. 34(3), pp.294-301.
- Lee, C.W., Lee, J.H., Cha, B.J., Kim, H.Y. and Lee, J.H. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation. *Ocean Engineering*, 2005, vol. 32, pp. 331-347.
- Lee, C.W., Kim, Y.B., Lee, G.H., Choe, M.Y., Lee, M.K. and Koo, K.Y. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Engineering*, 2008, vol. 35, pp. 1521-1532.
- Prior, D. and Khaled, R., Optimisation of Trawl Energy Efficiency under Fishing Effort Constraint. In *Proc. Of the 9th International Workshop "DEMaT09"*, Nara, Japan, 2009.

- Schau, E.M., Ellingsen, H., Endal, A. and Aanonsen, S.A., Energy consumption in the Norwegian fisheries. *J Cleaner Prod.*, 2009, vol, 17, pp. 325–334.
- Takaki, T., Shimizu, T., Suzuki, K., Hiraishi, T. and Yamamoto, K., Validity and layout of “NaLA”: a net configuration and loading analysis system. *Fisheries Research*, 2004, vol. 65, pp. 235–243.
- Thrane, M., Energy consumption in the Danish fishery: identification of key factors. *J Ind Ecol.*, 2004, vol. 8, pp. 223–239.
- Tyedmers, P., Energy consumed by North Atlantic fisheries. Fisheries Centre Research Report. In: Zeller D, Watson R, Pauly D, editors. *Fisheries impacts on North Atlantic ecosystems: catch, effort and national/regional datasets*, 2001, vol. 9(3). Vancouver: Fisheries Centre, University of British Columbia, p.12–34.
- Tyedmers, P., Fisheries and energy use. In: Cleveland CJ, editor. *The encyclopedia of energy*. SanDiego:AcademicPress/ElsevierScience,2004,p.683–693.
- Ziegler, F. and Hausson, P–A., Emissions from fuel combustion in Swedish cod fishery. *J Cleaner Prod.*, 2003, vol. 11, pp. 303–314.
- Ziegler, F., Environmental life cycle assessment of seafood products from capture fisheries. Göteborg: Department of Marine Ecology, Göteborg University and SIK, Swedish Institute for Food and Biotechnology, 2006.
- Wakaba, L. and Balachandar, S., On the added mass force at finite Reynolds and acceleration numbers. *Journal of Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2007, vol. 21, pp.147–153.