

## 가두리 시설이 파랑과 흐름에 의해 받는 유체력 특성

김태호 · 김창길 · 김호상 · 백철인 · 류청로\*

국립수산과학원, \*부경대학교  
(2002년 3월 18일 접수)

## Hydrodynamic Forces on Fish Cage Systems under the Action of Waves and Current

Tae Ho KIM, Chang Gil KIM, Ho Sang KIM, Chul In BAIK and Cheong Ro RYU\*

National Fisheries Research and Development Institute, \*Pukyong National University  
(Received March 18, 2002)

### Abstract

In order to analyze the hydrodynamic forces on fish cage systems, made of frames and nettings, under waves and current, hydraulic model experiments for square type and circular type of fish cage system were carried out in a towing tank. Both cage systems consist of net cages supported by floating frames made of two concentric pipes and four weights hanging from the bottom corners of the nets. There was little difference in the hydrodynamic force on the square type of fish cage system by wave heading under regular waves and the peak frequency of the force on each cage system was in a good agreement with that of induced irregular wave. In addition, it was also observed that the circular type of cage system was more stable to the action of waves and current than the square type.

Key words : Hydrodynamic forces, Fish cage systems, Waves and current, Irregular wave

### 서론

프레임에 그물감을 부착하여 구성되는 가두리 시설 중 부유식의 것은 파랑, 조류 등에 의해 유체력을 많이 받는 구조물이기 때문에 만 입구 또는 외만에 설치하는 경우 작용 유체력에 의해 계류선이 절단되거나 고정용 닻이 끌리게 되어 프레임끼리 서로 충돌하게 되고, 그로 인해 가두리 시설이 파손되는 경우가 자주 발생한다. 따라서 가두리 시설은 파랑과 조류에 충분히 견딜 수 있도록 시설물을 설계해야 하는데, 이를 위해서는 우선 가두리 시설에 작용하는 유체력의 특성을 명확하게 규명하지 않으면 안 된다.

가두리 시설에 관해서는 시설물이 수평으로 이동하지 못하도록 한 상태에서 작용 유체력을 측정하고, Morison 식에 의한 계산치와 비교한 Hideshima(1982)의 결과를 비롯하여, 흐름에 대해 수직 및 평행으로 각각 설치된 평면 그물감의 저항 및 부가질량 계수를 구하고 그것을 이용하여 가두리 시설에 작용하는 파력을 계산한 Fu *et al.*(1989, 1994)의 결과, 수리 모형 실험을 통해 규칙파 중에 있는 가두리 시설의 계류선에 작용하는 최대 장력을 구한 Fujita *et al.*(1991)의 결과, 비선형 유한 요소 모델에 의해 가두리 시설에 작용하는 유체력을 선형 포텐셜 이론과 Morison 식을 조합하여 해석한(Slaattelid, 1990; Ormberg,

1991; Ormberg and Slaattelid, 1993) 결과 등 여러 가지가 있는데, 이들의 대부분은 규칙파만을 고려하였으므로 이들 결과를 이용하여 실제 해상에 설치된 가두리 시설의 유체력을 해석하기는 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 가두리 시설의 안정성 해석을 위한 기초 단계로서, 규칙파와 불규칙파 및 흐름이 공존하는 상태에서 가두리 시설에 대한 수리 모형실험을 실시하여 입사 파향 및 형태별 가두리 시설에 작용하는 유체력을 해석하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 재료

일반적으로 가두리 시설은 프레임과 우리 그물 및 침자의 세 부분으로 구성되는데, 본 연구에서는 프레임이 10×10m인 정사각형이고 깊이가 10m인 가두리와 프레임이 지름 11.4m인 원형이고 깊이가 10m인 가두리를 실험물로 정하고, 축척비는 1/20으로 하여 모형 가두리를 제작하였다 (Fig. 1).

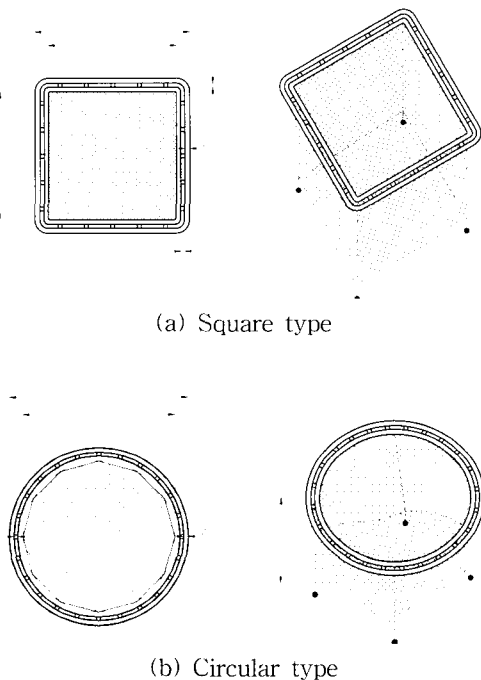


Fig. 1. Model fish cage systems used in the experiment (Unit : mm).

따라서 실험에 사용한 모형 프레임의 규격은 Table 1에서와 같이 정사각형의 경우는 각 변이 50cm가 되고, 원형의 경우는 지름이 57cm가 되는데, 둘 다 재료는 지름이 20mm인 플라스틱 파이프를 사용하고 파이프 2개씩을 서로 함께 묶어 제작하였다. 한편 프레임에 부착되는 그물의 크기는 Fig. 1에서와 같이 정사각형에서는 각 변의 길이가 각각 50cm이고, 원형에서는 지름이 57cm, 깊이가 50cm이며, 둘 다 사용 그물감의 규격은 나일론 막대그물 Td 210×3(φ0.34mm), 13.8mm로 하였다. 또한 정사각형 및 원형 그물에 부착된 침자는 총 4개의 납 추로 구성하고, 이들의 전체 무게는 각 모형 그물의 공기중 무게와 같은 0.74N 및 0.68N로 하였다.

Table 1. Specifications of model fish cage systems used in the experiment

Cage type	Cage size (cm)	Dia. of pipe (cm)	Buoyancy of frame (N)	Weight of frame in air (N)
Square	50×50×50	0.2	7.8	5.2
Circular	φ57×50	0.2	4.6	4.2

### 2. 실험 방법

실험은 삼성중공업(주)의 예인 수조(길이 : 400m, 폭 : 14m, 깊이 : 7m)에서 행하였는데, 모형 설치 및 계측 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다. 실험을 할 때는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 모형 가두리의 프레임에 고유 상수를 무시할 수 있을 만큼 매우 유연한 4개의 용수철을 달고, 이것을 조파기로부터 약 50m 떨어진 곳에 있는 예인 전차 아래에 구속하였고(용수철의 초기 길이 : 약 1m, 용수철의 양단에 작용하는 초기 장력 : 약 0.08N), 모형에 대한 파랑과 흐름의 조우각은 Fig. 3에서와 같이 정사각형 프레임의 경우 180°, 158° 및 135°의 세 가지로 하였고, 원형 프레임의 경우에는 180°만으로 하였다. Fig. 4는 정사각형의 가두리 시설에 조우하는 입사 파향을 나타낸 것이다.

실험은 모형 가두리에 파랑만 작용하는 경우와 파랑과 흐름이 동시에 작용하는 상태로 나누어 행하였으며, 파랑은 40분할의 플런저식 조파기를 사용하여 규칙파 및 불규칙파를 생성하였는데 규칙파의 경우 주기가 1.4s(파장 3m) 및 1.96s(파장 6m)의 2종류였다. 또한 불규칙파의 경우에는

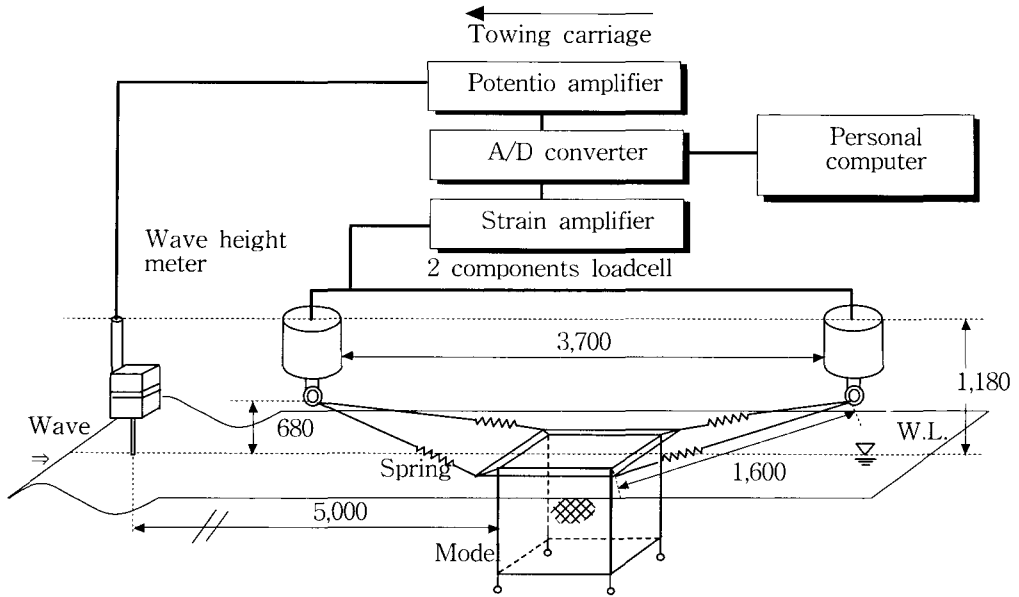
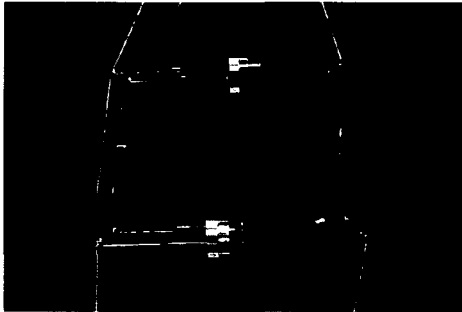
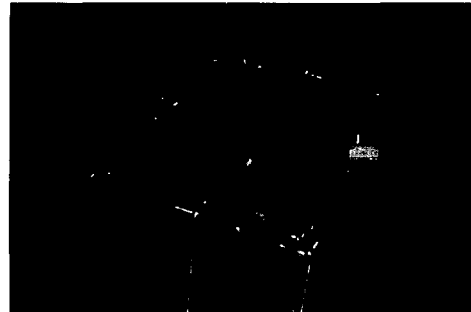


Fig. 2. Experimental setup for measuring hydrodynamic forces acting on model fish cage system (Unit : mm).



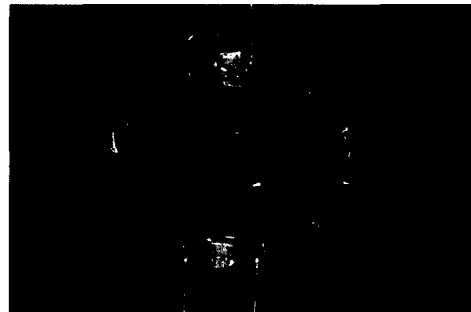
(a) Square type at 180°



(b) Square type at 158°



(c) Square type at 135°



(d) Circular type at 180°

Fig. 3. Model fish cage system placed to incident waves and current in a towing tank.

## 결과 및 고찰

### 1. 규칙파와 흐름이 미치는 유체력 특성

일반적으로 부유 구조물에 작용하는 파랑 하중은 Froude-Krylov 힘이라고 부르는 주기성을 가진 1차 파력과, 파 기울기의 제공에 비례하고 짧은 시간에서는 정적인 힘으로도 표기할 수 있는 저주파수 표류력 성분인 2차 파력으로 나눌 수 있기 때문에(Clauss, 1988), 본 연구에서는 가두리 시설에 작용하는 유체력의 실측치 평균 진폭을 파고의 진폭으로 나누고, 파력  $F(t)$ 를

$$F(t) = F_A \cdot \sin \omega t + F_B \dots\dots\dots(1)$$

과 같이 주기적인 힘의 Amplitude로서 1차 파력을 나타내는 주기력  $F_A$  성분과, 비주기적인 Bias를 가지는 2차 파력(표류력)을 나타내는 비주기력  $F_B$  성분으로 나누어 해석하였다.

Fig. 5 및 6은 모형 가두리 시설에 규칙파만이 작용하는 경우와 조류와 파랑이 함께 작용하는 경우에 대해 각각 측정된 유체력을 이상과 같은 방법에 의해  $F_A$  성분과  $F_B$  성분으로 나누어 해석하고, Froude 상사 법칙에 의해 실물로 환산하여 각주파수  $\omega$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 이들에서 보면, 가두리 시설에 작용하는 유체력의 크기는 정사각형 가두리 시설보다 원형 가두리 시설에서 약간 더 작고, 정사각형 가두리 시설의 경우 그것의 중심축과 파랑의 진행 방향이 이루는 각도가 달라짐에 따른 작용 유체력의 차이는 무시해도 좋을 정도로 매우 작다. 또한 조류와 파랑이 동시에 작용하는 경우는 파랑만이 작용하는

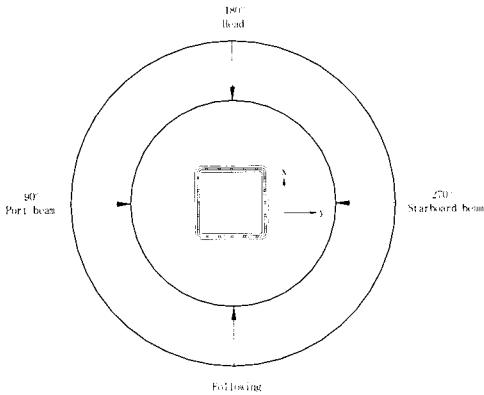


Fig. 4. Wave heading to model.

ITTC(국제 수조 회의)에서 제안하는 JONSWAP 복해 파랑 공동 관측 계획) 스펙트럼을 사용하였다.

본 실험의 경우 유의 파고  $H_{1/3}$ 은 15cm, 평균 주기  $T_1$ 은 1.4s로 하였으며, 조류의 속도는 0.28m/s였다. 이 경우 조류는 예인 전차로 재현하였으며, 예인 전차는 선형 유도 전동기에 의한 구동 방식으로 로터리 인코더로부터 속도를 피드백 받아 독립된 컴퓨터에 의해 PID(Position Integration Differential) 제어가 가능한 것으로, 정속 성능은 1/1000rms이었다. 실험에서 파고는 예인 전차에 설치된 서보식 파고계(FEL, K375A)와 전위 증폭기(Procom, PCA 21)로 측정하되, 파고계는 모형으로부터 약 5m 떨어진 지점에 설치하였다. 또한 모형 가두리 시설에 작용하는 유체력은 그것의 앞끝과 뒤끝에 각각 설치된 2개의 2분력 로드셀(JHM, 용량 : 100N)과 변형 증폭기(Procom, PCA WH 41)로 측정하되, 측정치는 모든 실험에서 40초마다 800개씩을 얻어내어 증폭기를 통해 컴퓨터에 입력하였으며, 모형 실험에서 얻어진 결과는 Froude 상사 법칙에 의해 실물로 환산하였다.

그런데 본 연구가 대상으로 하는 가두리 시설은 프레임의 경우 중력의 영향을 주로 받고 그물의 경우는 점성력의 영향을 주로 받기 때문에, 본 연구에서와 같이 모형 실험에서 얻어진 결과를 Froude 상사 법칙에 의해 실물로 환산하면 환산치에 오차가 발생할 수 있다. 따라서 모형 가두리 시설에 대해 모형 실험을 할 때는 Reynolds 수의 영향을 고려하지 않으면 안 되는데, 이에 관해서는 다음 기회에 검토하기로 하고, 여기서는 Froude 상사 법칙만을 따르는 것으로 하였다.

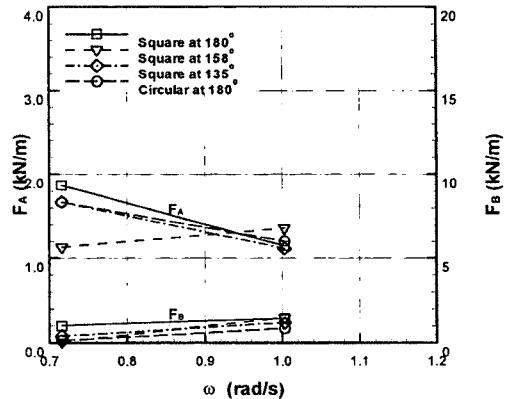


Fig. 5. Hydrodynamic forces acting on fish cage systems under waves only.

경우에 비해  $F_A$ 는 작은 데 비해  $F_B$ 는 매우 커지는 경향이다.

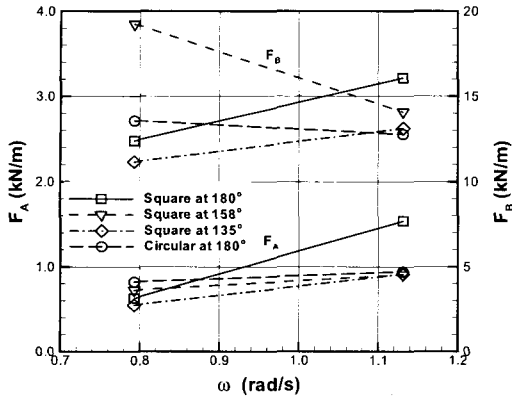
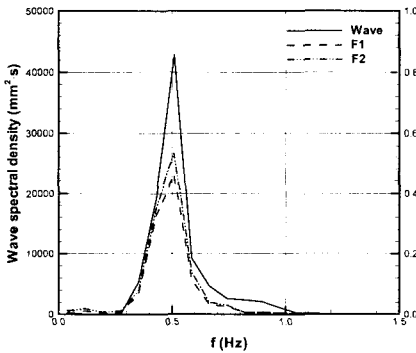


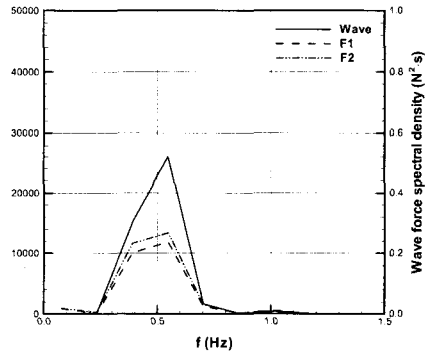
Fig. 6. Hydrodynamic forces acting on fish cage systems under waves and current ( $U : 1.25m/s$ ).

## 2. 불규칙파와 흐름이 미치는 유체력 특성

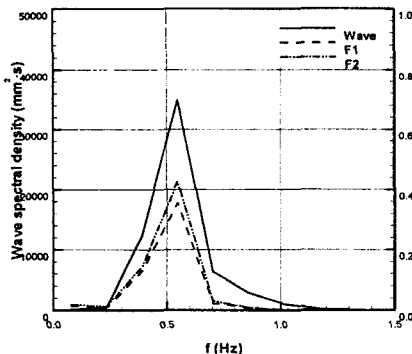
Fig. 7은 모형 가두리 시설에 불규칙파를 작용하게 하고 그것의 중심축이 파랑의 진행 방향과 이루는 각을 정사각형 가두리 시설의 경우는  $180^\circ$ ,  $158^\circ$  및  $135^\circ$ 의 세 가지로, 원형 가두리 시설의 경우는  $180^\circ$ 만으로 한 상태에서 저파측 유체력  $F_1$ 과 조파측 유체력  $F_2$ 를 측정 한 후, FFT (Fast Fourier Transform)에 의해 스펙트럼 해석을 한 결과이다. 이것에서 보면, 실험시 유의파 주기  $T_{1/3}$ 은  $1.4s$ 이었으나 파 에너지의 경우 주파수  $f$ 는  $0.3 \sim 5.0Hz$ , 즉 주기가  $0.2 \sim 3.3s$  범위에 퍼져 있고, 파 에너지가 가장 집중되어 있는 피크 주파수  $f_p$ 는 약  $0.47Hz$ 로서, 유의파고 주파수인 약  $0.71Hz$ 보다 매우 작게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 주파수  $f$ 가  $0.5Hz$ 인 파랑 속에서 그것의 진행 방향과  $180^\circ$ 의 각을 이루는 정사각형 가두리와 원형 가두리의 경우를 비교해 보면, 파 스펙트럼 밀도는 전자가 후자의 2배 정도 되는데, 이



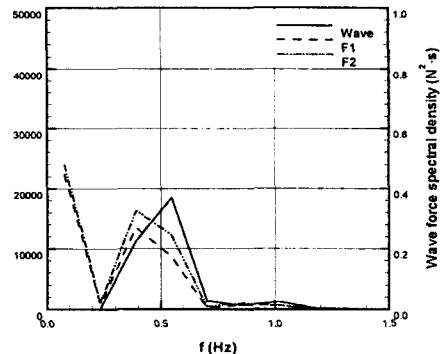
(a) Square type at  $180^\circ$



(b) Square type at  $158^\circ$



(c) Square type at  $135^\circ$



(d) Circular type at  $180^\circ$

Fig. 7. Hydrodynamic force spectra on model fish cage systems under irregular wave only.

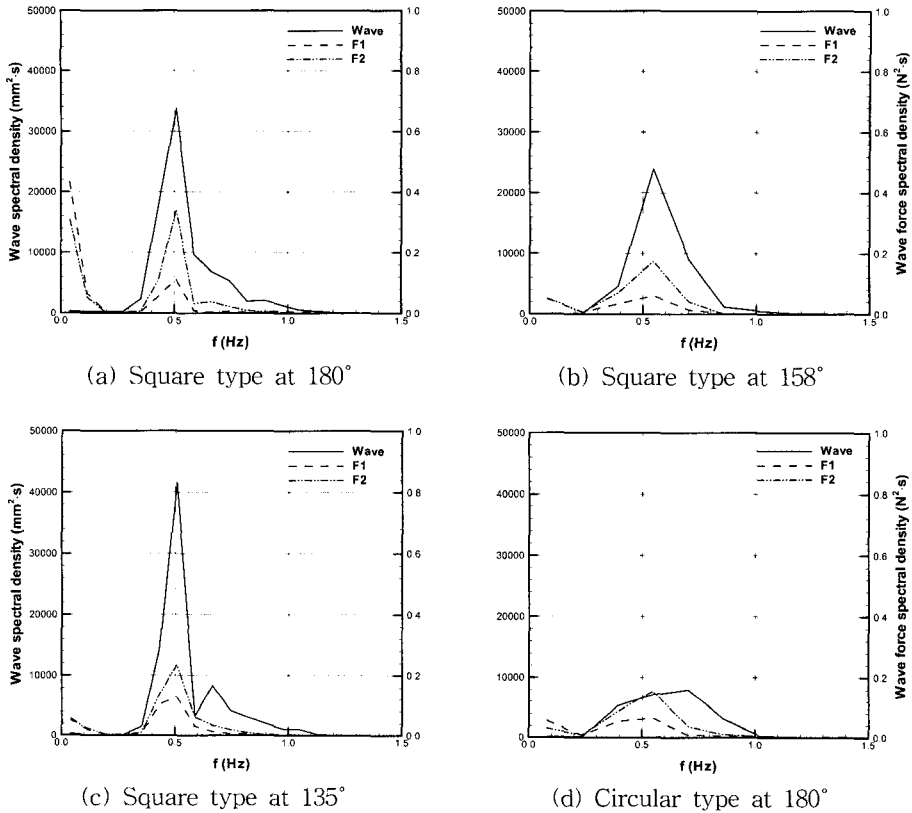


Fig. 8. Hydrodynamic force spectra on model fish cage systems under irregular wave and current( $U : 0.28m/s$ ).

러한 결과는 파랑 속에 있는 모형 가두리의 운동에 의해 생성된 방사파(Radiation wave)의 영향에 의해 발생된 것이라고 사료된다. 한편 모형에 작용하는 파력 스펙트럼을 보면, 에너지 밀도의 경우  $0.1 \sim 1.0Hz$ 의 범위에 퍼져 있고, 파력 에너지가 가장 집중되어 있는  $f_p$ 는  $0.43 \sim 0.48Hz$ 로서 파 스펙트럼의 해석 결과와 비교적 잘 일치하고 있으며, 가두리 시설의 형태별 파력 에너지 밀도는 정사각형 가두리에 비해 원형 가두리에서 작은 경향이다.

Fig. 8은 불규칙파와  $0.28m/s$ 의 흐름이 함께 작용하는 상태에서 모형 가두리에 작용하는 유체력의 스펙트럼을 분석한 결과이다. 이것에서 보면, 파 에너지가 가장 집중되어 있는  $f_p$ 는 정사각형 가두리에서 약  $0.53Hz$ , 원형 가두리에서 약  $0.47Hz$ 이고, 유체력의  $f_p$ 는 정사각형 가두리에서  $0.51 \sim 0.53 Hz$ , 원형 가두리에서 약  $0.47 Hz$ 이다.

따라서 정사각형 가두리와 원형 가두리가 불규칙파를 받을 때는 작용 유체력의 피크 주파수가 비교적 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 파랑과 흐름의 영향을 동시에 받는 경우의 유체력 특성과 Kim *et al.*(2001)이 본 연구와 동일한 조건에서 실험한 모형 가두리 시설의 운동 특성 결과를 종합해 보면, 원형 가두리 시설이 정사각형 가두리 시설보다 파랑과 흐름에 대해 더욱 안정적인 구조물이라고 볼 수 있다.

## 요 약

규칙파와 불규칙파 및 흐름이 함께 작용하는 상태에 놓인 가두리 시설에 대해 작용 유체력을 가두리 시설의 부설 방향별로 해석하기 위하여, 정사각형 모형 가두리 시설과 원형 모형 가두리 시

설을 대상으로 예인 수조에서 수리 모형 실험을 실시하였다. 실험에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 규칙파를 받고 있는 정사각형 가두리 시설에 작용하는 유체력은 가두리 시설의 부설 방향별로 큰 차이를 보이지 않았다.
2. 불규칙파와 흐름을 동시에 받고 있는 가두리 시설에 작용하는 파력 에너지의 피크 주파수는 파의 그것과 잘 일치하였고, 작용 유체력은 정사각형 가두리 시설보다 원형 가두리 시설에서 더 작았다.
3. 가두리 시설의 안정성에서 있어서는 그 구조가 원형인 것이 정사각형인 것보다 나은 편이었다.

### 참고문헌

- Clauss, G., Lehmann, E. and Östergaard, C. (1988) : Ocean structure engineering, Verlag Berlin Heideiberg, 288-321.
- Fu, E. B., Sato, O., Nashimoto, K. and Yamamoto, K. (1989) : Fluid force on simplified models of aquaculture net cage, Nippon Suisan Gakkashi 55(7), 1211-1216 (in Japanese).
- Fu, E. B., Nashimoto, K., Yamamoto, K., Hiraishi, T. and Takagi, T. (1994) : Model experiment examination of mooring method in aquaculture net cage, Bulletin of the Faculty of Fisheries, Hokkaido University 45(1), 9-18 (in Japanese).
- Fujita, S., Fukahori, K. and Nishinokubi, H. (1991) : Tension of the mooring ropes on the net cage model of raft type in regular waves, Nippon Suisan Gakkashi 57(12), 2229-2235 (in Japanese).
- Hideshima, Y. (1982) : Fundamental study on mooring force of the aquacultural wire netting cage (1), Fisheries Engineering 19(1), 1-6 (in Japanese).
- Kim, T. H., Kim, J. O. and Ryu, C. R. (2001) : Dynamic motions of model fish cage systems under the conditions of waves and current, J. Korean Fish. Soc. 34(1), 67-84 (in Korean).
- Ormberg, H. (1991) : Non-linear response analysis of floating fish farm systems, Ph. D. thesis, Division of Marine Structures, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 54-79.
- Ormberg, H. and Slaattelid, O. H. (1993) : Response analysis of floating fish farms, Proceedings of The First International Conference on Fish Farming Technology, 185-192.
- Slaattelid, O. H. (1990) : Model test with flexible, circular floats for fish farming, Engineering for Offshore Fish Farming Conference, Glasgow, United Kingdom, 93-106.