

생태계 제어 시설물의 설계 및 배치 최적화(1) 연승식 양식시설의 계류력 특성 및 동요저감에 관한 연구

류청로 · 김현주
부산수산대학교 해양공학과

Structural and Layout Design Optimization of Ecosystem Control Structures(1) Characteristics of Mooring Force and Motion Control of the Longline Type Scallop Culturing Facility

Cheong-Ro RYU and Hyeon-Ju KIM

Department of Ocean Engineering, National Fisheries University of Pusan,
Pusan 608-737, Korea

To develop the optimal design method for the longline type scallop culturing facilities in the open sea, numerical calculations and hydraulic model experiments are carried out for the stability and function optimization. Using the results for the motion and tension of the facilities, stable design concepts and effects of motion control system by vertical anchor and resistance discs are discussed.

The results of this study that can be applied to the design are as follows:

1) Total external forces by design wave ($H_{1/3}=6.7$ m, $T_{1/3}=12$ sec) at the coastal waters of Jumunjin for unit facility (one main line) are estimated to 5~20 tons, and required anchor weights are 10~40 tons in the case of 2-point mooring system. Though the present facilities are stable to steady currents, but is unstable to the extreme wave condition of return period of 10 years.

2) The dimensions and depth of array systems must be designed considering the ecological environments as well as the physical characteristics including the mooring and holding forces that are proportional to the length and relative depth of main line to wave length, and the number of buoys and nets.

3) Oscillation of the facility is influenced by water particle motion and the weight of hanging net, and is excited at both edge, especially at the lee side. To reduce the motion of the nets, the vertical anchoring system and the resistance disc method are recommended by the experimental results.

4) The damage of rope near the anchor by abrasion should be prevented using the ring-type connection parts or anchor chains.

Key words : Long line type scallop culturing facility, optimal design, motion control system, mooring force

서 론

최근, 연승식 양식시설을 이용한 가리비 양식이 강원도 연안에서 시도되고 있으나 저기압성 폭풍과 또는 지역성 흐름(해·조류와 동해 연안 와동과의 합성류)의 영향으로 파손 또는 유실되는 피해가 발생하고 있다. 이는 연승식 양식시설을 일본 북해도의 내만형 양식시설을 기준으로 한 경험적인 시험과정에서 일어

나는 재해로 대상 해역의 해양외력 평가 및 이에 대한 연승식 양식시설의 동적 특성과 안정성 평가 등에 대한 수산공학적인 검토의 필요성을 제기하는 것이라 강조할 수 있다.

가리비 등의 안정적인 양식어업 생산 기반을 확보하기 위해서는 양식의 적지를 천해의 내만에서 외해로 확대 시키는 방안이 긴요하며, 이 시설 적지의 해양환경 특성의 규명과 양식시설의 기능성 향상을

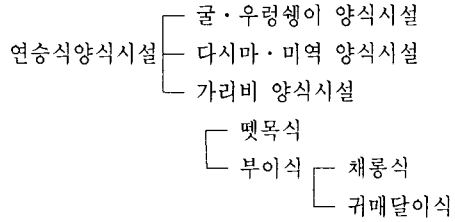
위해서는 다음과 같은 문제점을 고려하여야 한다. 대부분의 시설 적지가 외양이기 때문에 시설물 유지가 곤란하며, 외양파의 영향을 직접 받고 태풍 등의 내습시는 시설 파손으로 인한 피해가 막대하여 이에 대한 검토가 필요하다. 현재 시설의 설계기술이 일본의 예를 준용하여 의존하고 있으나 해역의 환경이 상이하며, 동해의 해양환경과 구조물의 동적거동을 충분히 고려한 계류시스템의 개발을 통한 합리적 설계가 미흡한 실정이다. 또한, 연승의 설치수심에 따라 성장기별 생산력의 변화를 보이나 이에 대한 기준의 미흡으로 생산력의 최적화가 곤란하며, 시설물의 파랑작용에 의한 동요와 부착패류의 거동 및 생리에 대한 자료의 부족으로 동요제어 등을 통한 시설의 기능 극대화를 위한 기초자료가 부족한 실정이다. 또한 해역 특성에 적합한 시공성 및 긴급 재해방지를 위한 대책의 마련이 요망되고 있다.

본 연구에서는 이에 대한 기초적 연구로서 내과성 연승식 양식시설의 단위 요소에 대한 유체력 산정 및 특성에 대해 사용가능한 종래의 연구결과를 종합 정리하고, 양식물의 성장 및 시설 제원에 따른 유체력, 계류력 특성을 종합적으로 검토하고자 한다. 파랑에 의한 동적응답 특성은 수리실험을 통해 변동장력 및 동요특성을 중심으로 검토하고, 기능 최적화를 위한 시설의 동요 저감대책을 비교 검토함으로써 최적설계를 위한 기준 및 긴급 대책을 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 또한, 현장시설의 피해사례로부터 안정성 향상을 위한 계류기초의 보강대책을 정리하고자 하였다.

연승식 양식시설의 개요 및 현황

1. 연승식양식시설의 종류 및 적용

연승식 양식시설은 다시마, 미역 등의 양식에 주로 이용되어 온 방법으로 가리비 양식에도 적용되고 있다. 가리비양식에 대한 적용은 뗏목식과 부이식으로 나뉘어지며, 부이식은 채롱식에 양식물은 넣어 양식하는 채롱식과 귀매달이로 수하시켜 양식하는 방법으로 이용되고 있다.



현 시설기준은 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 연승시설의 길이는 100 m이며 중간부이를 20 m 간격으로 설치하여 시설을 유지시키며 부이 및 채롱을 1 m 간격으로 설치하고 계류기초는 8~15 ton을 사용하는 것으로 되어있다. 또한, 양식물의 성장 및 부착생물의 증가에 따라 부이를 증설하여 관리하는 방법으로 이용되고 있다.

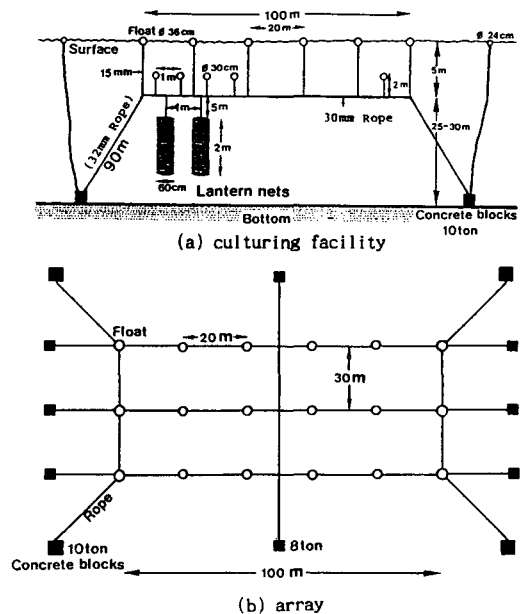


Fig. 1. Standard design and array for the longline type scallop culturing facilities. (a) culturing facility, (b) array.

2. 연승식 양식시설의 문제점 및 설계 방향

연승식 가리비양식시설은 한해성 패류인 가리비를 대상으로 하므로 강원 연안 수심 30~40 m의 해역에 해안방향 또는 직각방향으로 시설되고 있다. 현 시설들은 강원 연안의 해양환경 특성을 고려한 수산공학 적 검토 없이 일본의 시설 제원을 그대로 적용하여

많은 문제점들이 내포되어 있다. 이로부터 시설의 피해가 다발하고 있으며, 최적 설계에 대한 검토가 요망되고 있다.

현장조사 결과에 의하면 연승식시설의 피해는 황천시에 발생하며, 강원 연안의 경우 닻줄이 닻에 마모되어 절단되어 채룡의 파손 및 비틀림 등으로 나타나며 일본의 경우 태풍 내습시의 급격한 수위변화에 기인한 강한 흐름에 의해 시설 전체가 끌리며 이동하여 간승과 지승이 비틀리며 꼬여 엉클리는 양상으로 피해가 발생하고 있다.

이로부터 해양환경의 평가 및 예보 관리체제의 확립, 해양외력환경을 고려한 설계 및 배치계획 수립, 채룡의 간격 및 간승의 길이에 따른 계류력 특성 및 소요 계류력 기준의 확립, 계류사와 기초의 안정성 평가 및 적정계류구조의 도출, 간승간의 적정 간격 유지, 닻줄의 마모방지를 위한 보완책 강구 등이 요망되고 있다.

연승식양식시설의 최적설계는 크게 두가지 관점, 즉 안정설계와 기능설계로 대별할 수 있다. 안정설계는 해양외력환경에 대해 시설을 유지할 수 있도록 안전하게 설계하는 것이며, 기능설계는 양식 대상물의 적정 생태환경의 조성 및 관리를 위한 설계기술이다. 이를 위해 안정설계면에서 시설 기준 및 성장단계에 따른 작용유체력 및 계류력 특성, 소요 중량을 산정 검토하여 설계 및 관리를 위한 기준을 제시하고, 기능설계면에서 동요특성 및 동요 저감대책을 수리실험적으로 검토하여 제시하고자 한다.

수리모형실험 및 해석

연승식 양식시설의 단위요소에 작용하는 유체력특성을 규명하기 위해 종래의 연구결과를 정리하고, 강원연안의 해황 특성(유속; $U=0.3$ m/sec, 설계파(재원주기 10년); $H_{1/3}=6.7$ m, $T_{1/3}=12$ sec)을 기준으로 기본시설 및 시설 제원 변화에 따른 유체력 특성 및 이에 의한 계류력 및 소요 닻 중량 등을 산정하고, 시설의 안정성 및 적정 시설기준을 검토하고자 한다. 또한, 파랑에 대한 응답특성을 수리모형실험을 통해 종합적으로 정리하고자 한다.

수조의 제원, 수리모형실험장치 및 각종 계측기의

배열은 Fig. 2와 같고, 크게 조파수조, 파랑 및 계류력 계측 및 채룡의 동요 계측으로 구성된다. 입사파, 장력 및 동요의 측정과 해석을 위한 장치 및 절차는 Fig. 3과 같다. 입사파는 외양측 닻 상부에서 용량식 파고계를 이용하여 측정하고, 계류구조에 대한 계류력은 해안측 및 외양측 닻 연결부에 스트레인게이지를 이용한 장력측정장치를 제작, 설치하여 측정하였다. 파고 및 변형증폭기에 의해 증폭된 수위 및 장력의 시간과형은 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터로 기록되고, 이를 해석하여 입사파와 작용력 간의 관계를 정리하였다.

양식시설의 동요특성은 중앙부 및 외양측 채룡을 대상으로 비디오 카메라를 이용하여 녹화와 동시에 화상해석장치를 이용하여 실시간 해석하였다. 화상해석장치는 이동 물체추적장치로서 비디오 카메라로 포착한 화면상의 목표점을 image frame grabber card를 이용하여 0.033 sec 간격으로 화면상의 좌표값으로 읽어 들여 컴퓨터에 저장하고 해석하는 장치이다.

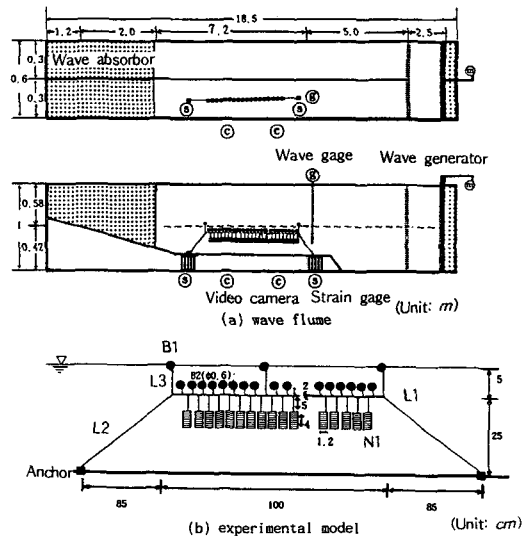


Fig. 2. Layout of wave flume and arrangement of experimental apparatus. (a) wave flume, (b) experimental model.

실험모형은 Froude상사칙을 적용하였고, 그 제원은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 수리실험은 수심 30 cm, 파고 2.05 cm~7.11 cm, 주기 0.64~2.19 sec에 대한 8 case의 실험파랑을 대상으로 하였다. 이를 이용하여 1/100 축적의 기본 모형(S1)을 기준으로 채룡간격을

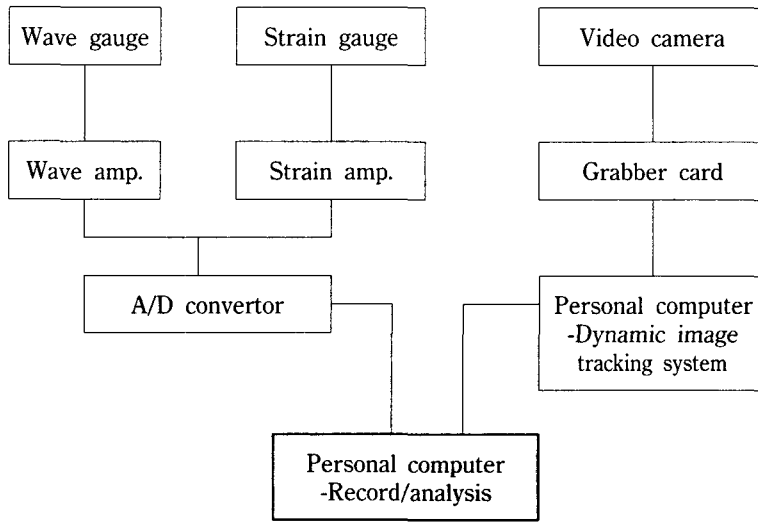


Fig. 3. Measuring and processing procedures on dynamic response of longline type scallop culturing facility.

달리한 모형(S2)과 1/50 모형(S3)과 이에 3종의 저항관(R1, R2, R3)을 부착한 경우를 대상으로 한 것이다. 또한, 계류시스템에 의한 동요저감대책의 적용성 실험을 위해 기본시설에 완충부자를 부설하거나 연직 및 분지식 4점 계류시스템으로 변형하여 동요량을 비교함으로써 시설의 동요특성 및 저감대책을 검토하였다.

입사파랑 및 장력변화의 시간과형의 예를 Fig. 4에 나타내었다. 그림은 기본 시설에 대한 실험 예로서, 파랑은 파별해석에 의해 파고, 주기 등을 구하고, 장력은 최대치 및 평균치에 대한 변동장력 특성 등을 해석하여 파랑 특성에 따른 장력의 변동 특성 및 간승의 길이와 입사파장의 공진 관계 등을 검토하고자 하였다.

Table 1. Structural model conditions

(unit : cm, g)

Part	S	Model type												material		
		S1			S2			S3			R1	R2	R3			
		D	L	W	D	L	W	D	L	W	D	D	D			
Buoy(B1)	sphere	1.6		1.1	1.6		1.1	1.6		1.1						plastic
Buoy(B2)	sphere	0.8			0.8			0.6								Styrofoam
Interval of buoy		5.0			2.5			5.0								
Net(N1)	cylinder	1.2	2.0	0.6	1.2	2.0	0.6	1.2	4.0	0.35						steel wire
Interval of net		5.0			5.0			5.0								nylon
rope(L1)	line	0.03			0.03			0.03								nylon
rope(L2)	line	0.03			0.03			0.03								nylon
rope(L3)	line	0.015			0.015			0.015								nylon
Resistance disc												0.6	1.2	1.8		plastic

S: shape, D: diameter, L: length, W: weight, B1, B2, N1, L1, L2, L3: refer to Fig. 2.

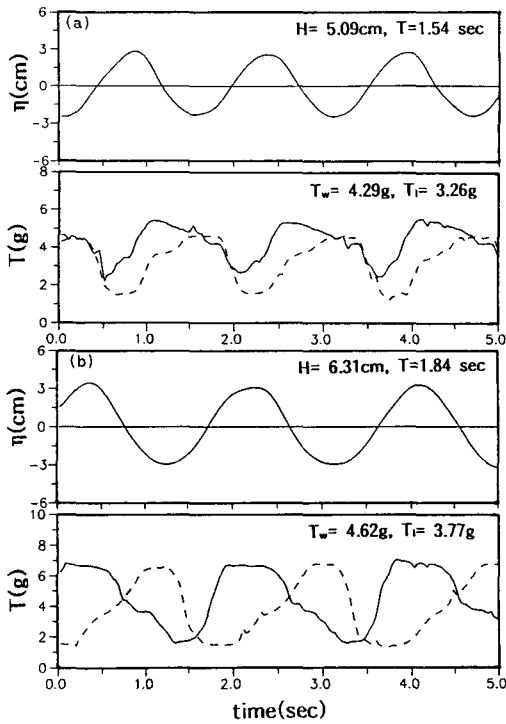


Fig. 4. Example time series of water elevation and tension.

연승식 양식시설에 대한 유체력 특성 및 안정설계

1. 단위요소에 대한 유체력 산정

1) 구체에 대한 유체력 특성

구체에 대한 작용력은 Iwata and Mizutani (1989)의 실험 및 해석결과를 사용할 수 있다. Iwata and Mizutani (1989)는 Morison식을 이용하여 구에 대한 파력 특성을 논의하였으며, 자유수면 부근의 경우, 계면효과를 고려한 수정된 Morison형 파력산정식을 제안하였고, 수중 구체에 대한 파력특성은 식(1)과 같은 Morison식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$F = \frac{1}{8} C_D \rho \pi D^2 u |u| + \frac{1}{6} C_M \rho \pi D^3 \dot{u} \quad (1)$$

여기서 C_D 는 항력계수, C_M 는 관성력계수이며, D 는 구의 직경, u 는 수평 및 수직방향의 수립자 속도, \dot{u} 는

수립자운동 가속도를 나타낸다. 유체력의 관성력계수는 1~1.5, 항력계수는 파형경사에 따라 0.0~1.0까지 변화하며, KC수($u_m T/D$)에 따라 달라지므로 이에 대한 Iwata and Mizutani(1989)의 실험결과를 이용할 수 있다.

2) 수하연 1조에 대한 유체력 특성

채롱에 작용하는 파력 산정은 다소 복잡하나 Morison식을 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다. 채롱의 경우 원통형 골조 구조에 망지를 쓴 형태이며, 관성력은 항력에 비해 아주 작은 편이다. 따라서, 유체력은 식(2)와 같고, 항력계수는 Matsubara et al. (1990)의 실험결과(식(3))를 적용할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \quad (2)$$

여기서, A 는 투영면적, U 는 유속(정상류 또는 파동류), C_D 는 항력계수를 나타낸다. 망지에 대한 항력계수는 망사의 길이에 대한 망사 직경의 비 또는 차폐율(망사길이를 기준으로 한 망목의 면적에 대한 투영면적의 비)과 밀접한 관계를 가진다. 이를 레이놀즈수 $Re(Ud/v)$, d 는 망사 직경)로 정리하여, 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$C_D = 9.84 Re^{-0.36} \quad (3)$$

한편, 양식물의 성장에 따른 수하연에 대한 작용유체력의 산정을 위해서는 시간경과에 따른 양식대상 패류의 성장 및 부착생물의 영향을 고려하여야 한다. 여기서는 부착생물에 의한 유체력 증분은 망사 직경 및 망지의 차폐율 증가로, 양식물은 구체로 환산할 수 있는 것으로 가정하여 고려하였다.

양식대상 패류를 담고 수하된 채롱은 시간 경과에 따라 그 중량이 증가하며, 생물부착량도 증가하므로 그 증가분만큼의 부이를 증가시켜 시설을 유지관리하여야 한다. 따라서, 유체력도 증가하게 된다. 가리비의 성장(Yoo, 1979)을 고려하고, 부착생물의 증가를 시간 경과에 따라 고려하면 수하연의 시간경과에 따른 중량의 변화는 Table 2와 같다.

채롱을 포함한 수하연의 수중중량 증가분에 대해 부이를 부설하여 시설을 유지관리하여야 하며, 수중

Table 2. Variation of the growth of scallop and weight of lantern net

Time lapse (yr)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Length of shell (cm)	0.0	2.1	5.0	8.25	10.6	11.7
Weight of shell (g)	0.0	15.0	45.0	90.0	200.0	275.0
Weight of pendent (kg)	10.0	14.5	23.5	37.0	70.0	92.5

중량은 다음과 같이 간략히 산출하여 사용하였다. 가리비 10미의 각장을 측정하고, 각각의 체적을 배수용적으로 측정하여 평균하여, 12 cm의 가리비 체적은 190 cm³ 정도임을 알아내었다. 한편, 각장 12 cm의 가리비 중량을 종래자료를 최소자승법으로 정리한 각장과 중량에 관한 다음 식으로 부터 구하고, 이로 부터 중량을 산정하여 밀도를 계산하였다.

$$W_s = -0.14321L_s^4 + 4.4494L_s^3 + 44.0635L_s^2 + 2175L_s - 198.2885 \quad (4)$$

여기서 W_s는 가리비 1미의 중량, L_s는 각장을 나타낸다. 부착생물의 밀도는 가리비와 동일한 것으로 가정하고, 채룡을 포함한 수하연 밀도를 1.60으로 가정하였다. 가리비의 성장 및 생물부착에 따라 작용항력은 변화하며 이는 채룡의 투영면적의 변화에 의한 유체 저항의 변화로 고려할 수 있다.

3) 닻줄에 대한 유체력 특성

닻줄에 작용하는 유체력은 계류부 전체에 작용하는 항력의 합으로서 식(5)와 같이 산정할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho d l U^2 \quad (5)$$

여기서, d는 닻줄 직경, l은 닻줄 길이(m)를 나타낸다.

2. 양식시설 단위간승당 유체력의 산정 및 특성

부이식 연승식 양식시설의 안정설계에서는 파·흐름에 의한 정상장력의 변화가 중요하며, Fig. 5에 나타난 바와 같이 연승식 양식시설 1열에 대한 유체력을 시간의 경과에 따른 양식물의 성장 및 부착생물의 증가를 고려하여 산정하고, 이를 기초로 계류시스템 및 계류기초를 설계한다. 또한, 동요 특성을 검토하여 설계제원 변경 또는 동요저감대책을 통하여 기능 최

적화를 위한 기능설계를 행하게 되며 시설 1열에 대한 유체력은 각 요소에 대한 유체력을 합성하여 산정할 수 있다.

$$\Sigma F = D_1 + D_2 + D_3 \quad (6)$$

여기서, D₁은 전 부이에 대한 항력, D₂는 전 수하연에 대한 항력, D₃은 전 로프에 대한 항력을 나타낸다.

한편, 시설의 단위 간승당 채룡수의 수중중량을 환산하여 증설해야할 부이(인여부력 12.2 kg)의 수를 계산하였고, 이에 따른 유체력 변화를 입사파, 채룡간격, 간승 설치수심, 단위간승 길이 등에 대해 산정하였다. 그 결과를 Fig. 6에 본양성 개시후 시간경과에 따른 유체력 변화로 나타내었다.

Fig. 6(a)에 현 시설 기준을 대상으로 입사파에 따른 전 유체력의 변화를 시간경과에 대해 나타내었다. 그림으로 부터 유체항력은 입사파의 증대에 따라 증가하며, 시간의 증가에 따라 2차함수적으로 증가함을 볼 수 있다. 또한, 이는 재현주기 10년의 파랑(H_{1/3}=6.7 m, T_{1/3}=12 sec)을 대상으로 할 때 안정성을 보장할 수 없음을 유추할 수 있다. 그림에 나타내지는 않았으나 정상류(U=0.3 m/sec)에 대한 유체력은 100~400 kg으로서 비교적 안정함을 알 수 있었다. 현시설에 대한 10년 주기 파랑의 경우를 Fig. 6(b)에 채룡 간격(dn)을 달리 했을 경우와 함께 나타내었다. 현시설의 경우와 같이 채룡간격이 1 m일 경우 수확기의 유체항력은 20 t에 가까우며, 간격을 2 m 이하로 할 경우 10 t 이하로 감소함을 알 수 있다. 한편, 이러한 유체항력 및 동요의 저감대책의 하나로 생각할 수 있는 것이 시설의 설치수심(dm)이며 간승의 수심을 기준으로 그 수심을 25 m에서 20 m, 15 m, 10 m, 5 m로 낮추었을 경우를 검토하였고, 그 결과는 Fig. 6(c)에 나타난 바와 같다. 그림으로 부터 설치수심에 따른 유체력의 변화를 볼 수 있으며, 하층으로 내려갈수록 수립자속도의 감소로 항력도 감소하였다. 또

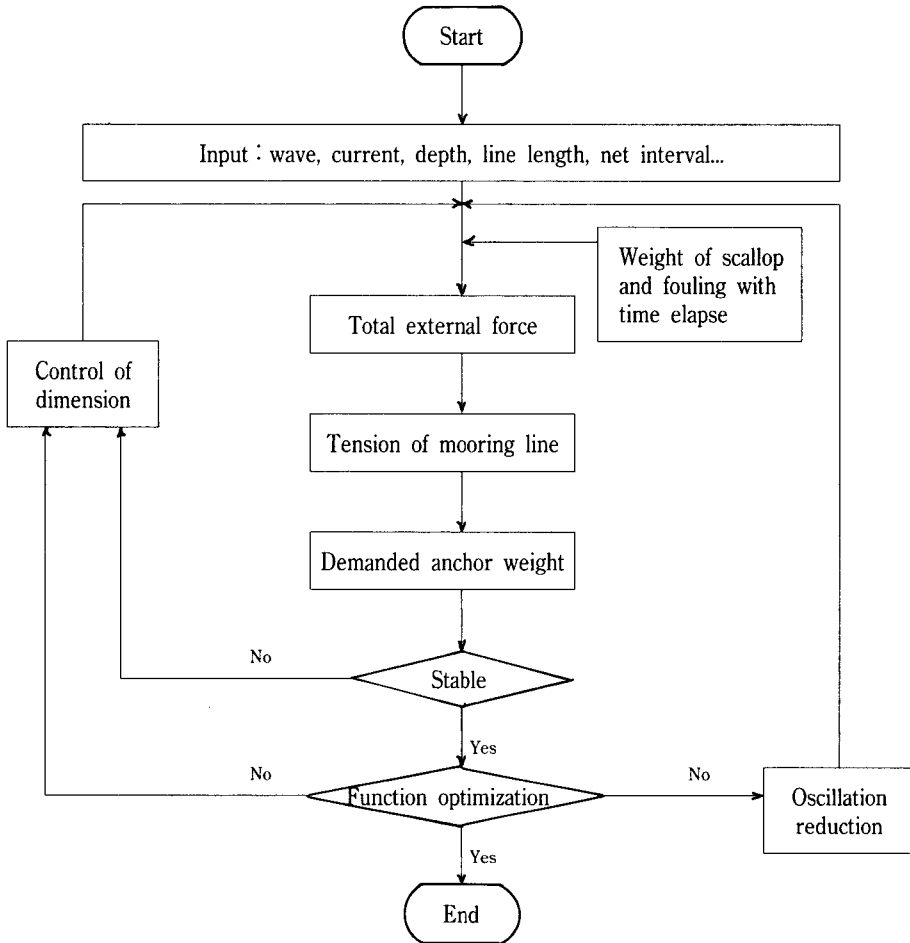


Fig. 5. Design of scallop culturing facilities considering stability and function optimization.

한, 이로 부터 시설의 파랑동요도 수심이 깊어짐에 따라 감소하며, 15 m층의 성장속도가 양호한 일부 결과(Yoo, 1979) 등을 미루어 시설의 설치수심을 가리비의 성장단계 및 파랑재해의 위험도에 따라 조절이 용이한 시설설계가 필요하다. 한편, 경제성 향상을 위해 시설길이(1m)를 200 m로의 연장이 고려되고 있으며, 이에 대한 기초적 검토를 위해 시설길이에 따른 유체력 변화를 검토하였다. 그 결과가 Fig. 6(d)에 나타나 있으며, 그림으로부터 200 m로 연장시 거의 2배에 가까운 유체력이 작용함을 알 수 있다. 그러나, 파향과 평행한 방향으로 시설된 경우에는 Fig. 4에서도 보았듯이 파랑의 위상에 따라 수립자의 운동방향이 달라지므로 시설 전체에 대한 유체력은 일부 상쇄되

기도 하므로 이에 대한 검토가 추후 필요하다. 이에 대한 효과를 입사파와 시설물의 공진적인 개념에서 다음과 같이 실험적으로 검토하였다.

수리실험 결과를 이용하여 입사파와 시설 제원에 따른 시설 양단의 계류력의 변화를 검토하였다. 입사파에 따른 시설 전체의 동요 및 이에 의한 해안측 및 외양측의 장력 변화는 Fig. 4에서 보았듯이 파장(주기)과 밀접한 양상을 나타내었다. 그 결과를 Fig. 7에 정리하여 나타내었고, T_w 는 외해측 계류사에 대한 장력, T_l 은 해안측 계류사에 대한 장력을 나타낸다. 그림으로부터 파장에 대한 시설길이의 비가 중요한 파라미터임을 알 수 있다. 즉, 파장이 시설길이와 같을 때는 양단의 장력이 동시에 증가하며, 이 경우 로프

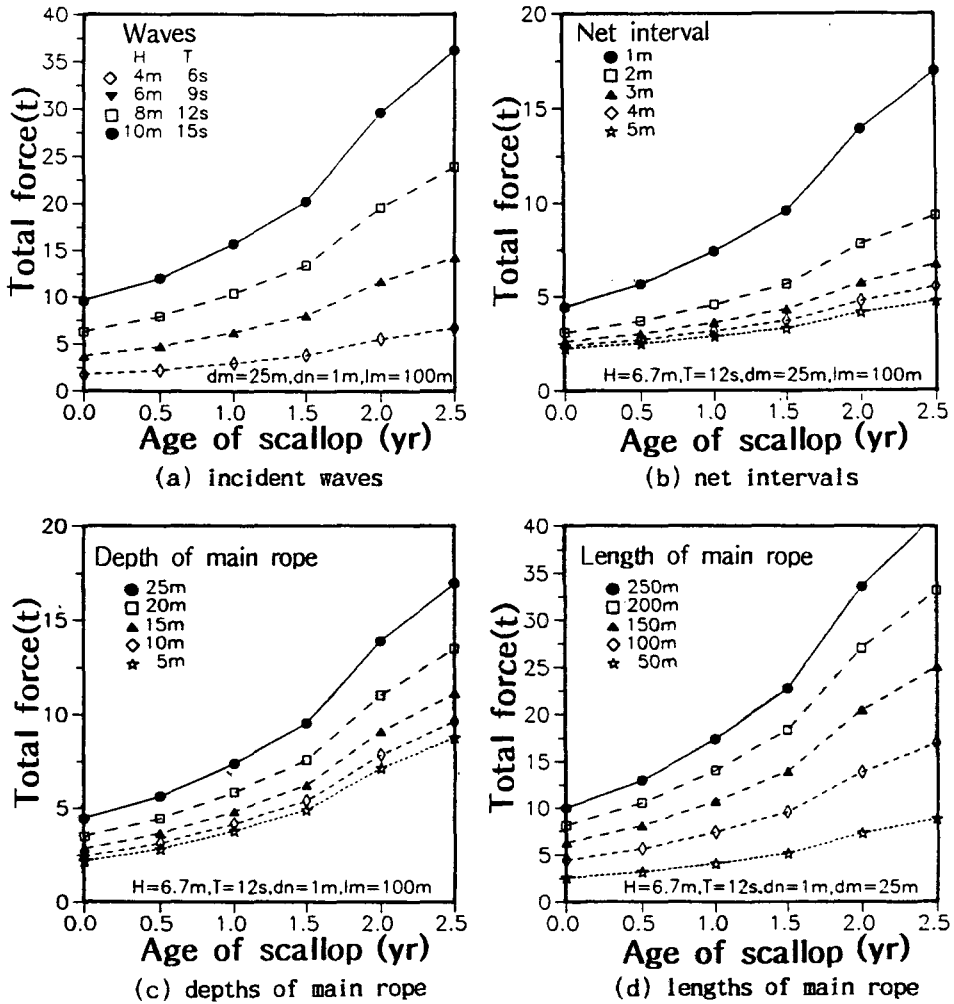


Fig. 6. Variation of extreme hydrodynamics with the time elapse according to (a) incident waves, (b) net intervals, (c) depths of main rope and (d) lengths of main rope.

중양에 큰 장력이 작용할 것으로 예상된다. 길이가 $(n+1/2)$ 배일 경우는 양단의 장력이 교호하여 증가하였다. 이로부터 파장과 시설길이는 중요한 설계인자이며 대상해역의 파랑 특성을 잘 파악하여 설계기준을 결정해야 함이 강조될 수 있다.

3. 양식시설의 계류력 특성 및 적정계류 구조

1) 양식시설 단위간승당 계류력 특성

시설의 유지 관리를 위해서는 시설 초기 및 양식물의 성장에 따른 부이의 보강이 필요하며, 수하연의 중량 변화에 따라 적절한 보강이 필요하다. 부이식

의 경우 부이에 수하시킨 수하연의 중량과 파의 연직력을 지지할 수 있는 부력을 가지는 부이 규모가 필요하다.

파랑이 강할 때에도 시설을 소정의 해역에 유지시키기 위해서는 계류초를 합리적으로 시설해야 하며, 이를 위해서는 계류삭에 대한 양식시설의 장력에 대해 안정할 수 있는 고정력을 가지는 것으로 한다. 이를 위해서는 시설 1조에 대한 작용력을 산정하고 이의 수평력 성분을 견딜 수 있는 계류삭의 설계 및 계류구조가 필요하다. 시설의 계류시스템에 따라 장력은 달라지며, 2점 계류 및 4점 계류방식에 대해 살펴보면 다음과 같다.

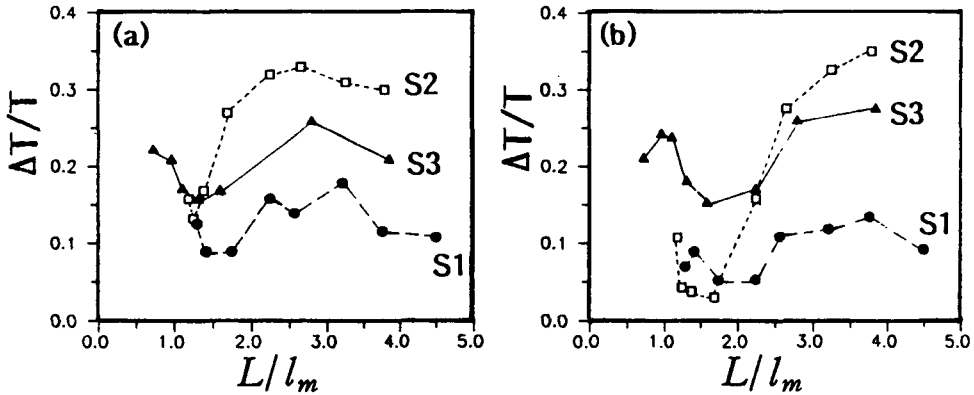


Fig. 7. Variation of dynamic tension with respect to relative length of main rope (l_m) to wave length (L). (a) lee side, (b) weather side. S1, S2, S3 refer to table 1.

2점계류의 경우, 계류삭에 걸리는 장력 T 는 식(8)로부터 산정할 수 있다.

$$T = \Sigma F \cdot \frac{L_u}{\sqrt{L_u^2 - h^2}} \cos \theta \quad (8)$$

여기서, L_u 는 계류삭 길이, h 는 수심, θ 는 계류삭 방향과 조류 또는 파향이 이루는 각을 나타낸다.

4점계류의 경우, 계류삭에 걸리는 장력은 다음 식과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \Sigma F \cdot \frac{L_u}{\sqrt{L_u^2 - h^2}} \cos \alpha \cdot \cos \theta \quad (9)$$

여기서, α 는 계류삭 방향과 시설 길이 방향이 이루는 각도이다.

현시설은 2점 계류에 모서리 등의 중요부를 4점 계류와 같이 보강하고 있으며, 현 시설의 2점 계류 1렬에 대한 계류삭 장력을 산정하였고, 그 결과는 Fig. 6과 유사한 경향을 나타내었다.

2) 시설안정을 위한 고정력 산정 및 적정 구조

계류구조는 정상 표류력 및 변동장력을 고려한 최대 계류장력이 작용하는 상태에서 소정의 안전율을 가지도록 설계하여야 하며, 계류구조의 안정성은 지지반면과의 마찰력으로 저항하는 것으로서 검토하는 것을 표준으로 한다. 수산시설물 계류구조의 대표적인 중력식은 구조 자체의 중량과 해저지반과의 마찰력에

의해 계류삭을 지지하는 것으로 활동이 일어나지 않기 위한 조건은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu(W_A - T_A \sin \theta) \geq S_F T_A \cos \theta \quad (10)$$

여기서, W_A 는 닻구조의 중량, μ 는 구조체와 해저간의 마찰계수, T_A 는 구조체에 작용하는 계류삭 장력, θ 는 계류삭과 수평면이 이루는 각, S_F 는 안전율을 나타낸다. 해류와 설계파에 대한 계산결과로부터 소요 닻중량을 산정하였으며, Fig. 6과 유사한 경향을 보이며, 중량은 약 2배 내외로 나타났다. 따라서, 10년 재현주기의 고파가 시설에 직각으로 내습할 시의 소요 닻중량은 현 시설 닻중량을 초과하며, 설치수심이 얕고 채움간격이 좁을수록 큰 닻이 필요함을 알 수 있었고 시설을 연장할 경우와 설계외력의 선택을 몇년으로 할 것인가의 문제는 경제성을 고려한 시설종류별 내구년수의 평가방법에 따라 신중히 고려하여야 한다.

한편, 중력식은 연직력은 강하나 수평력이 약하고, 파주력식은 수평력은 강하나 연직력이 약한 결점이 있으므로 중력·파주력 복합식이 고려되고 있다. 계류구조는 저질 특성을 고려하여 적절한 구조로 선택되어야 하고, 사질이나 니질의 경우 파주력식 또는 복합식이 유용하나, 암반의 경우 고정식 또는 저면 마찰력을 증대시킨 중력식을 사용할 필요가 있다. 또한 수평력에 대한 지지력의 향상을 위해 콘크리트 블록 하부에 말뚝을 보완하는 구조나 마찰력의 증대 방

안으로서 콘크리트 블럭 저면의 조도를 변화시키는 방안과 블럭 주위에 모래주머니나 자갈 망태를 쌓는 방안 등으로 고려할 필요가 있다. 또한, 피해 원인의 하나로 고려되는 계류삭의 계류기초에 대한 마모 방지를 위한 대책으로서 체인 또는 ring형 연결고리의 보강 등을 고려할 수 있으며, 이에 대한 역학적 검토가 요망된다.

내파성 연승식 양식시설의 동요 특성 및 기능 최적화

1. 양식대상 패류 성장에 대한 동요의 영향

연승식 양식시설은 전술한 유체력 특성을 기초로 한 안정성 뿐 아니라 기능의 최적화를 위한 생태환경의 조성이 필요하다. 가리비 양식기술과 관련한 해양 생물·물리환경조사 및 이에 의한 생태환경정보의 해석 및 예보체제 등에 대해서는 KFRDA(1992)의 연구결과가 있고, 여기에서는 연승식 양식시설의 동요 특성과 대책을 실험적으로 검토하고자 한다. 연승식 양식시설의 동요가 참가리비의 성장에 어떤 영향을 주는가에 대한 검토는 이루어진 바 없으나, Matsubara et al. (1993)에 의해 유사한 양식패류인 국가가리비에 대해 이루어진 바 있고, 그 개요를 소개하면 다음과 같다.

실해역에서의 채롱의 동요와 양식패류의 성장을 측정하는 것은 쉽지 않으므로 육상의 해수조에서 동일종의 패류를 넣은 채롱을 정지 및 주기를 달리한 강제진동하에서 시간의 경과와 함께 각장의 변화를 측정하였다. 대상패의 중형패(각장 4.6 cm), 소형패(2.4 cm)를 넣은 원통형 채롱 및 4각채롱(pearl net)을 개방시험지 및 침전조에 설치하여 주기 15.6초 및 70초의 진동장치로 진동하는 경우와 정지 경우의 각장을 시간의 경과와 함께 측정하여 성장율을 비교하였고, 그 결과는 Fig. 8에 소개된 바와 같다. 그림으로부터 1991년 10월부터 11월까지의 60일간의 성장속도는 평균 0.48 cm로 비교적 빠르고, 후반 420일간의 성장속도는 급감하여 평균 0.4 cm의 성장을 보였다. 또한, 작은 주기의 진동(풍파주기에 상당)에서는 성장속도가 저하됨을 볼 수 있다. 또한, 관측을 통해 대상패류의 생존 및 성장율은 수온과 밀접하며 침전조에서의

생존율이 매우 저조한 것으로 부터 실트의 혼입이 중요한 영향을 미침을 강조하였다. 따라서 효율적인 양식을 위한 연승식 양식시설의 기능최적화를 위해서는 시설의 동요를 저감시키는 대책이 필요함을 강조할 수 있다.

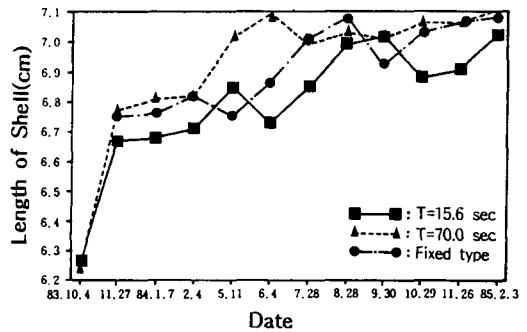


Fig. 8. Growth of scallop according to the net oscillations (after Matsubara et al., 1993).

2. 연승식 양식시설의 파랑동요 특성

연승식 양식시설의 파랑에 대한 응답특성에 대한 수치해석 연구는 Nakamura and Uekita (1977), Matsubara et al. (1985, 1987, 1989)에 의해 수행된 바 있으나, 전자는 수하연 1연의 파랑응답에 대한 것이고, 후자는 간승 양단의 고정경계 가정, 채롱을 구체로 상사한 것 등 현장에 직접 적용하기에는 약간의 문제가 있는 것으로 고려된다. 이에 본 연구에서는 연승식 양식시설의 파랑 동요 및 저감대책에 대한 수치실험을 실시하였다. 수치실험은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 입사파랑의 측정과 함께 비디오 카메라와 동화상해석 장치를 이용한 채롱의 동요를 동시에 촬영하고 해석하였다. 실험은 파고 2.05 cm에서 7.11 cm, 주기 0.64 sec에서 2.19 sec에 대한 8 case의 실험파랑을 대상으로 하였으며, 동일 case에 대한 파고 및 주기가 일정하지는 않아 후술하는 동요 특성의 논의에서는 이들 동요량을 입사파고로 무차원화시켜 정리하였다. 여기서 해석은 외양측 1번 채롱(No. 1) 및 중앙부의 채롱(No. 2)을 대상으로 하였으며, 외양측 1번 채롱에 대한 예를 Fig. 9에 나타내었다. 동요측정은 채롱의 최하단부를 대상으로 한 것이다. Fig. 9에서 우측 하단이 동요 궤적이며, 좌측 상단에 수평 및 연직성분을 분해하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 입사파랑 및

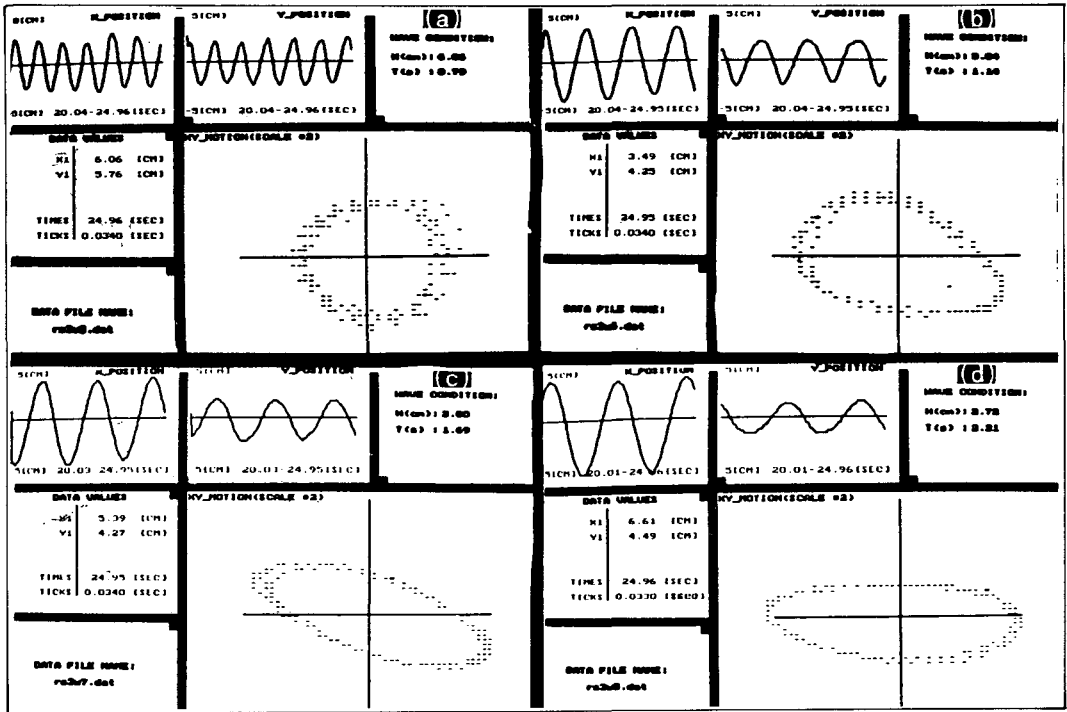


Fig. 9. Oscillations of the facilities according to incident wave condition.

모형 종류별 연직 및 수평방향의 동요 특성은 파동장에서서의 수립사 궤적과 밀접하며 여기에 시설 전체의 동요가 영향을 주는 것으로 추정할 수 있다. 즉, 일정수심에서 입사파장에 비해 수심이 얕아질수록 파형의 비선형성이 강해지며, 이로부터 동요 궤적은 0.6~0.7 sec의 단주기에서는 거의 원운동을 하나 주기가 커질수록 동요의 궤적은 타원형으로 변하며, 연직축에 대한 수평축의 길이가 증가함을 볼 수 있다. 또한 동요량은 중앙부에 비해 양단에서 크게 나타났고, 그림에 나타내지는 않았지만 해안측에서 비교적 크게 나타났다.

이러한 패턴은 계류시스템이나 저장관에 따라 다소 달라지기도 하지만 거의 일정하게 나타난다. 양식물의 성장을 제고를 위한 기능 최적화의 일환으로 동요저감 대책이 계류시스템의 개선 및 저장관을 이용한 방법으로 고려되었고, 이에 대해 실험결과를 기초로 적용성의 검토가 이루어 졌다.

3. 계류시스템에 의한 파랑동요 저감 대책

연승식 양식시설의 파랑동요 저감대책으로서의 계류시스템의 개선은 다음과 같은 3가지에 대해 검토되었다. 계류시스템의 개선 방법은 기본 2점 계류방식(M0)를 기준으로 하여 ① 기본 2점 계류방식에 연직맞출을 설치한 4점계류법(MV), ② 기본 계류방식과 동일방식으로 양단에서 분기시켜 4점 계류시키는 4점계류법(M2), ③ 기본 계류시스템의 맞출 중앙부에 수중 완충부이를 부착하는 방법(MA)에 대해 검토되었다. 그 결과를 Fig. 10에 시설길이에 대한 입사파장비에 따른 무차원 연직(Z/H) 및 수평동요(X/H)로 나타내었다. 그림으로부터 연직 동요는 입사파고의 0.2에서 0.8배에 까지 달하며, 외양측(No. 1)이 중앙부(No. 2)에 비해 동요량이 크게 나타났다. 또한 시설길이와 입사파장의 비와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있고, 시설길이와 입사파장이 일치할 때 동요량은 최소가 되는 양상을 보였다. 그러나, 수평동요의 경우 파장(주기)의 증대에 따라 거의 선형적으로 증가하는 양상을 보였다.

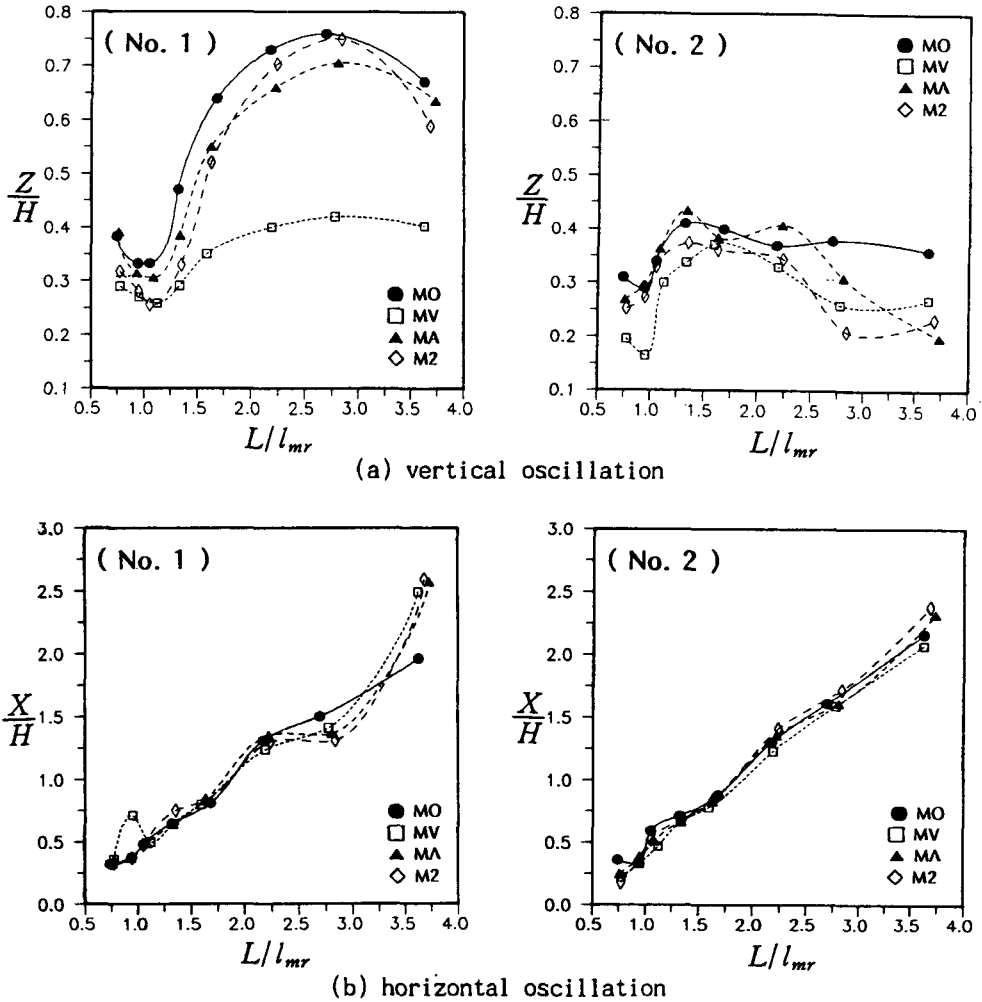


Fig. 10. Variation of net oscillation by the development of mooring systems. (a) vertical oscillation, (b) horizontal Oscillation.

또한, 그림으로 부터 볼 수 있듯이 채롱의 동요저감은 연직계류 보강이 가장 탁월한 효과를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 외양측 채롱의 경우 명확하며, 중앙부의 경우 편차가 다소 보이나 미약하나 유사한 경향을 보였다. 이로부터 3가지 방식 중 연직계류의 보강이 시설의 동요를 최소화하는 대책임을 알 수 있다. 그러나, 수평동요에 대한 제어는 명백하지 않았으며, 계류시스템의 개선에 의한 저감량은 아주 작았다.

4. 저항판을 이용한 동요 저감 대책

연승식양식시설의 연직동요 저감을 위한 방법의 하나로서 저항판을 부착하는 방법을 검토하였다. 실험은 원관형 저항판의 직경을 채롱 직경의 0.5배(R1), 1배(R2), 1.5배(R3)에 대해 실시하였고 이를 저항판을 달지않은 경우(R0)와 비교하여 논의하였다. 실험은 저항판의 최대중량을 기준으로 부족분을 채롱 내에 남으로 보완하여 수하연의 중량이 일정해지도록 하였고, 저항판이 없는 경우도 그 중량을 채롱내에 보완하여 실시하였다. 또한 수중중량 증가분 만큼 부이를 보완하여 실험을 실시하였다. 실험결과를 정리하여 비교한 것이 Fig. 11이다. 그림으로 부터 볼 수 있는

것처럼 저항판의 직경이 증가함에 따라 연직동요량은 감소함을 알 수 있다. 그러나, 수평 동요의 경우 그 제어는 미약하며 증대하는 경우도 나타남을 볼 수 있다. 따라서 저항판을 이용한 동요저감 대책은 양식대상 패류의 성장율과 관련한 연직 또는 수평동요분의 기여를 고려하여 신중히 선택해야 할 필요가 있음을 강조할 수 있다.

결 론

연승식 양식시설의 안정설계 및 기능설계의 최적화를 위한 기초적 연구를 계산 및 수리실험을 통하여

검토하였다. 이로 부터 대상해역 환경특성에 적합한 내파성 연승식 양식시설의 설계기술 개발과 유지관리 기준의 정립이 이루어 질 수 있을 것이다.

1) 동해안을 대상으로 한 재현주기 10년의 설계과가 현지시설에 직각으로 입사할 때, 현 시설 1열에 대한 유체력 및 계류력은 패류의 성장단계에 따라 5 ton~20 ton으로 나타났다. 따라서, 2점 계류시 소요 닻 중량은 10 ton~40 ton으로 추정된다. 따라서, 정상해류(0.3 m/sec)에 대해서는 안정한 것으로 고려되나, 고파 내습시는 시설의 피해가 예상된다.

2) 연승식 양식시설에 대한 작용유체력, 계류력 및 소요 닻중량은 입사파, 유동, 체류수, 시설 길이 및 설치수심 등과 밀접한 관계가 있으며, 이를 고려한

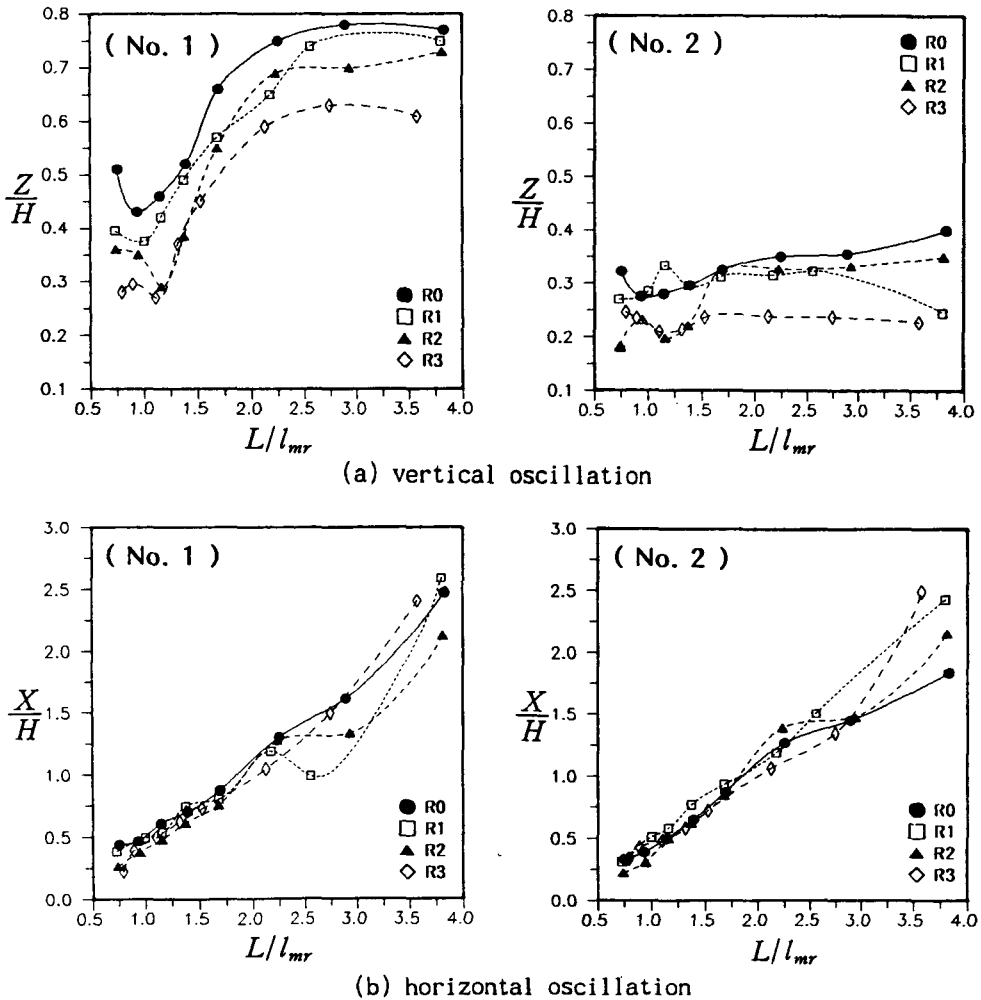


Fig. 11. Variation of net oscillation by the resistance discs. (a) vertical oscillation, (b) horizontal Oscillation.

최적설계가 이루어져야 한다. 이로부터 채롱 간격, 간승 설치수심의 조절 등에 대한 유체력 변화가 검토되었고, 채롱간격을 2배로 할 경우 유체력은 50%로, 간승을 5 m 내릴 경우 75%로 감소하므로 시설 밀도 및 수심에 따른 성장률 등의 생태환경을 참조하여 시설 기준을 최적화할 필요가 있다.

3) 연승식 양식시설의 동요는 자중 및 수립자운동 제적과 밀접하여, 파장에 대한 상대수심이 알아질수록 그 제적은 연직축이 짧아지는 타원운동을 보였고, 중앙에 비해 간승 양단에서 큰 양상을 보이며 특히 해안측에서 크게 나타났다.

4) 기능 최적화를 위한 동요저감대책이 검토되었고, 연직 닻줄을 보완하는 방법이 연직동요를 50% 정도로 저감시켜 가장 양호한 계류시스템 개선 방법으로 평가되었다. 침자의 형상을 개량한 저항판에 의한 동요저감은 저항판이 채롱지름의 1.5배일 때 70% 정도로 나타났으나, 수평동요에 대해서는 뚜렷한 영향을 보이지 않고 역영향이 나타나는 경우도 있으므로 성장률에 대한 수평동요의 효과 등과 함께 부차적인 검토가 필요하다.

5) 계류기초는 저질특성을 고려하여 적절한 구조로 선택되어야 하고, 계류식의 계류기초에 대한 마모방지 대책(체인 또는 ring형 고리 보강 등)을 통한 안정성 향상이 중요함을 강조할 수 있다.

사 사

이 연구는 부산수산대학교 해양산업개발연구소(RCOID 94-02-01-01) 및 수산청에서 시행한 수산특정연구개발사업 “내과성 양식시설 개발에 관한 연구”의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 또한 동화상해석 시스템을 지원해 준 해양산업개발연구소 산학협력실장 김상봉교수(부산수대 기계공학과)께 감사를 표한다.

참 고 문 헌

Iwata, K. and N. Mizutani. 1989. Wave force acting

on a submerged sphere under regular progressive wave. Proc. of the Japan Society of Civil Engineers, II-11, 215~224 (in Japanese).

Korea Fisheries Resesearch and Development Agency (KFRDA). 1992. Studies on the development of scallop culture. Research Report by Fisheries Administration of Korea, 69p (in Korean).

Matsubara, Y., H. Noda and H. Kawahara. 1987. Dynamic response of a submerged buoy-cable structure ot storm waves. Proc. of Coastal Engineering, JSCE, 34, 626~630 (in Japanese).

Matsubara, Y., H. Noda, and M. Takagi. 1989. Dynamic analysis of a submerged buoy-cable system for shell-fish farming. Proc. of Coastal Engineering, JSCE, 36, 774~778 (in Japanese).

Matsubara, Y., H. Noda, and F. Nishihira. 1990. Dynamic behavior of a semisubmerged fish farm structure in the ocean. Proc. of Coastal Engineering, JSCE, 37, 714~718 (in Japanese).

Matsubara, Y., H. Noda, and S. Kuroiwa. 1993. Dynamic response of submerged buoy-cable structures in the open sea. Proc. of Coastal Engineering, JSCE, 40, 916~920 (in Japanese).

Nakamura, M. and Y. Uekita. 1977. Forces acting on the rack-hanging rope of the raft for fish cultivation. Proc. of Coastal Engineering, JSCE, 24, 625~651 (in Japanese).

Yoo, S. K. 1979. Aquacultures in the coastal shallow waters. Saero Press, Pusan, 605p (in Korean).

1994년 11월 29일 접수

1994년 12월 28일 수리