

내파성 가리비 연승식 양식시설에 관한 연구(I) - 케이블-부이-중량물 계류시스템의 3차원 비선형 정적해석 -

신 현 경* · 김 덕 수**

(95년 6월 15일 접수)

A Study on Offshore Longline Type Aquaculture Facilities, Part 1 :
3-D Nonlinear Static Analysis of Cable-Buoy-Weight Mooring System

H. Shin and D. Kim

Key Words : Longline Type Aquaculture Facilities(연승식 양식시설), Cable-Buoy-Weight Mooring system(케이블-부이-중량물 계류시스템), Static Configuration(정적모양), Nonlinear Static Equation(비선형정적방정식)

Abstract

Longline type aquaculture facilities are being used for scallop culture in 30 m of water 2.5 km off the coast of Joomoonjin, Kangwon-Do. In this paper, the facilities are modeled by the cable-buoy-weight system, subject to the nonlinear behaviors of the mooring lines and the effects of current. Its static configuration is shown as a solution of 3-D nonlinear static equation and the Runge-Kutta 4th method is employed.

1. 서 론

최근 동해 연안에서 고급패류인 가리비의 양식을 위해서 내파성 연승식 양식시설을 사용하고 있으며, 이에 따른 경험적인 시험과정에서 발생하는 재해에 대한 안전성 평가를 고려한 계류시스템 개발이 필요하게 되었다¹⁾.

내파성 연승식 양식시설은 케이블-부이-중량물 시스템(cable-buoy-weight system)으로 나타낼 수 있으며, 닳위치에서의 장력과 파, 해류 등의 영향으로 인한 부이나 중량물 연결부에서의 장력 및 거동의 변화를 해석하는 것은 최적설계를 위해서도 중요하다. 그러나 케이블의 비선형적인 거동, 해류 등의 영향으로 인한 3차원적인 형상은 정적

* 정회원, 울산대학교 공과대학 조선 및 해양공학과

** 울산대학교 대학원 조선 및 해양공학과

및 동적해석을 어렵게 한다²⁾.

본 논문에서는 해류가 작용하는 케이블의 3차원 비선형 상미분 정적방정식을 유도하고, Runge-Kutta 4차식³⁾을 이용하여 정적해석을 함으로써 케이블-부이-중량물 시스템의 정적모양을 표현하고, 또한 케이블 양 끝단의 탈위치와 케이블과 부이 접촉점에서의 정적장력을 구한다.

2. 좌 표 계

본 논문에서 사용한 좌표계는 직교 우수좌표계로 Fig. 1과 같다.

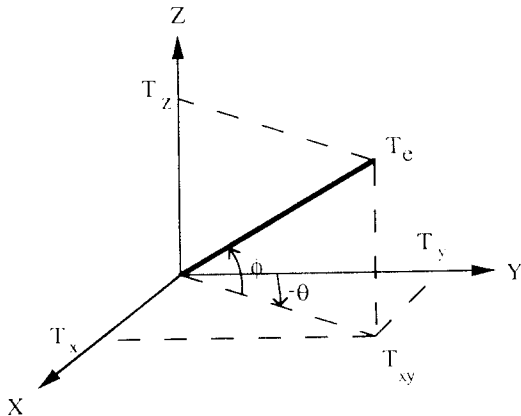


Fig. 1 Coordinate System

Fig. 1에서 T_e 는 케이블요소에 작용하는 장력이고, T_x 는 X축방향의 수평력이다. T_y 는 Y축방향의 수평력이고, T_z 는 Z축방향의 수직력이다. ϕ 는 수평면과 케이블에 작용하는 장력의 접선방향 성분과 이루는 각도이고, θ 는 Y축과 T_{xy} 와 이루는 각도이다.

3. 케이블 정역학

케이블 단위요소에 해류가 있을 때 작용하는 힘들은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 U는 해류의 속도, V는 케이블의 운동속도이다. 해류가 있을

때 케이블의 단위요소에는 F_d 의 유체항력이 작용한다. B는 부력이고, W는 케이블의 무게를 나타낸다. T_e 는 유효장력(effective tension)을 나타내는데 이는 케이블에 작용하는 장력과 케이블의 단면에 작용하는 압력에 의한 힘과의 합이다.

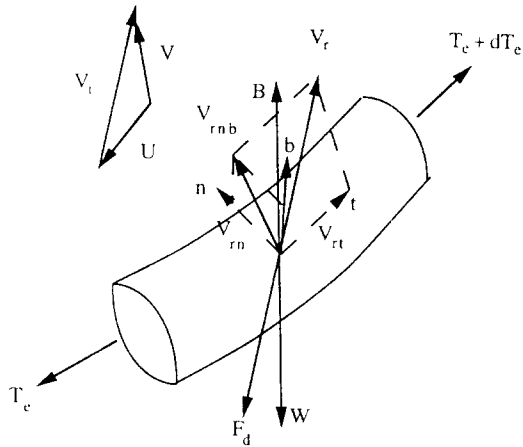


Fig. 2 Static forces acting on a unit element of cable

위의 그림으로부터 다음과 같은 케이블 정역학 방정식을 유도할 수 있다⁴⁾.

$$\frac{dT_{eo}}{ds} = (W_o - B_o) \sin \phi_o - F_{to} (1 + e_o)$$

$$\frac{d\phi_o}{ds} = \frac{[(W_o - B_o) \cos \phi_o \cos \psi_o - F_{no} (1 + e_o)] \cos \psi_o}{T_{eo}}$$

$$0 = (W_o - B_o) \cos \phi_o \sin \psi_o + F_{to} (1 + e_o)$$

$$\frac{d\theta_o}{ds} = - \frac{(W_o - B_o) \cos \phi_o \cos \psi_o \sin \psi_o}{T_{eo} \cos \phi_o}$$

$$+ \frac{F_{no} (1 + e_o) \sin \phi_o}{T_{eo} \cos \phi_o}$$

$$\frac{dx}{ds} = - \cos \phi_o \sin \theta_o (1 + e_o)$$

$$\frac{dy}{ds} = \cos \phi_o \cos \theta_o (1 + e_o)$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin \phi_o (1 + e_o)$$

(1)

$$F_{to} = -0.5 \rho_w C_t \pi D V_{rt} |V_{rt}|$$

$$F_{no} = -0.5 \rho_w C_n D V_{rn} \sqrt{V_{rn}^2 + V_{rb}^2}$$

$$F_{bo} = -0.5 \rho_w C_b D V_{rb} \sqrt{V_{rn}^2 + V_{rb}^2}$$

여기서, 아래첨자 o는 정적물리량을 표시하며, ρ_w 는 물의 밀도, C_t , C_n 및 C_b 는 각각 접선방향, 법선방향 및 종법선방향의 항력계수이다. V_{rt} 는 계류선 단위요소의 접선방향 속도, V_{rn} 은 법선방향, V_{rb} 는 종법선방향의 속도다. W_o 와 B_o 는 각각 케이블의 단위요소가 갖는 무게와 부력이다. e_o 는 $\frac{T_{eo}}{EA}$ 이다.

4. 케이블-부이 정역학

케이블과 부이가 Fig. 3과 같이 힌지(hinge) 연결되어 평형 상태를 이룰 때, 케이블과 부이의 접촉점에서 다음의 연속조건을 얻을 수 있다^(5,6).

$$T_{eo}^- \cos \phi_o^- \cos \theta_o^- = T_{eo}^+ \cos \phi_o^+ \cos \theta_o^+ + D_x$$

$$T_{eo}^- \cos \phi_o^- \sin \theta_o^- = T_{eo}^+ \cos \phi_o^+ \sin \theta_o^+ + D_y$$

$$T_{eo}^- \sin \phi_o^- = T_{eo}^+ \sin \phi_o^+ + B_b - W_b + D_z$$

$$x^+ = x^- \tag{2}$$

$$y^+ = y^-$$

$$z^+ = z^-$$

여기서 B_b 와 W_b 는 각각 부이의 부력과 물속에서의 무게를 나타낸다. D_x , D_y 와 D_z 는 부이에 가해지는 X, Y와 Z 방향으로의 유체항력을 나타낸다.

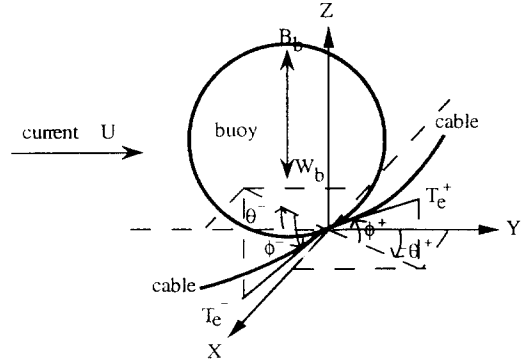


Fig. 3 Static forces at an attachment point

5. 케이블-부이-중량물 시스템의 정적해석

정적해석을 수행하는데 사용한 케이블(polypropylene, pp)의 특성치는 다음과 같다.

CABLE CHARACTERISTICS

TOTAL CABLE LENGTH	= 280.0000 M
MASS PER UNIT LENGTH	= 1.167000 KG/M
ADDED MASS PER UNIT LENGTH	= 0.725000 KG/M
WEIGHT PER UNIT LENGTH	= 4.336500 N/M
DIAMETER	= .30000E-01 M
EA	= .48490E+07 N
BREAKING TENSION	= .11270E+06 N

정적해석을 수행하는데 사용한 케이블의 특성치는 실제 케이블-부이-중량물 시스템에서 사용하고 있는 사양이다.

main rope와 anchor rope를 연결하는 부이 1과 5의 특성 및 중량물을 지지하는 작은 부이 2, 3과 4의 특성은 다음과 같다.

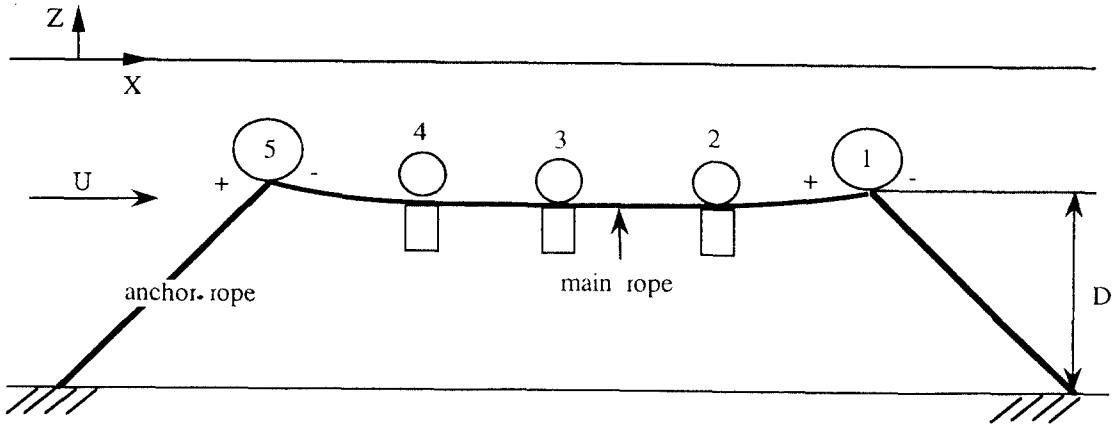


Fig. 4 Cable-Buoy-Weight system

Table 1 Characteristics of buoys and weights.

Buoy	BUOY (1, 5)	BUOY (2,3,4)	WEIGHT (2,3,4)
VISCOUS DRAG COEFF.	0.5	0.5	1.2
MASS	0.1E-05kg	0.1E-05kg	70.0 kg
ADDED MASS	57.962kg	29.667kg	72.453kg
DIAMETER	0.6m	0.48m	0.3m
BUOYANCY	1136.1N	581.66N	-490.0N

위의 Table 1에서 중량물의 부력이 음의 값인 것은 중량물의 힘의 작용방향이 음의 방향임을 의미한다.

해류가 없는 상태와 해류속도가 0.5 m/s와 1.0 m/s일 때, 케이블과 부이나 중량물 접촉점의 정적 장력을 살펴보면 다음과 같다.

Table 2 Depth and static tensile force at the attachment points and anchor points

	NO CURRENT		CURRENT VELOCITY 0.5 m/s				CURRENT VELOCITY 1.0 m/s			
			225°	270°	225°	270°	225°	270°	225°	270°
BUOYS	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5
DEPTH of BUOYS	30.25 m	30.25 m	28.01 m	29.26 m	25.32 m	25.32 m	17.49 m	19.33 m	11.10 m	11.10 m
TENSION (+)	2034 N	2222 N	2170 N	2301 N	2439 N	2600 N	3670 N	3375 N	5609 N	5692 N
TENSION (-)	2222 N	2034 N	2370 N	2145 N	2600 N	2439 N	3498 N	3435 N	5692 N	5609 N
ANGLE (+)	6.1°	24.4°	2.1°	23.6°	5.1°	20.7°	15.5°	5.0°	2.2°	9.3°
ANGLE (-)	-24.4°	-6.1°	-18.8°	-5.0°	-20.7°	-5.1°	-2.5°	-14.2°	-9.3°	-2.2°
RIGHT BOTTOM T.	2091.0 N		2277.8 N		2491.6 N		3497.9 N		5665.7 N	
LEFT BOTTOM T.	2091.0 N		2155.1 N		2491.6 N		3302.1 N		5665.7 N	

5. 1 Main rope에 부이나 중량물이 없는 경우

Main rope에 Fig. 4의 부이나 중량물 2, 3과 4가 없고, main rope 와 anchor rope를 연결하는 부분에만 부이 1과 5가 있는 경우의 수치해석 결과는 Table 2에 보여진다.

5. 2 Main rope에 부이나 중량물이 있는 경우

Main rope에 부이나 중량물이 매달려 있는 경우의 수치해석 결과는 Table 3에 보여진다. Table 3은 main rope의 부이와 중량물 접촉점의 결과를 생략하고 buoy 1 과 5 부분에서 결과만 나타냈다.

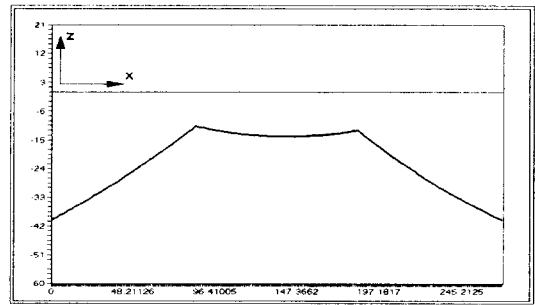
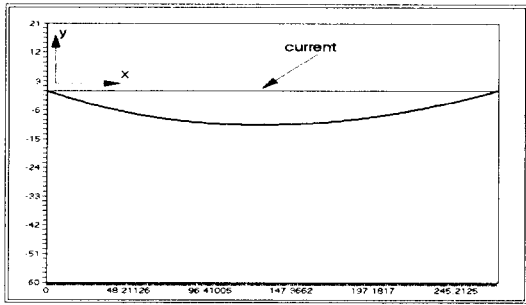


Fig. 5 Static configuration of cable-buoy system (3-D) : current velocity 0.5 m/s, current incident angle 225° with respect to X-axis without buoy-weights 2, 3 and 4 in Fig. 4

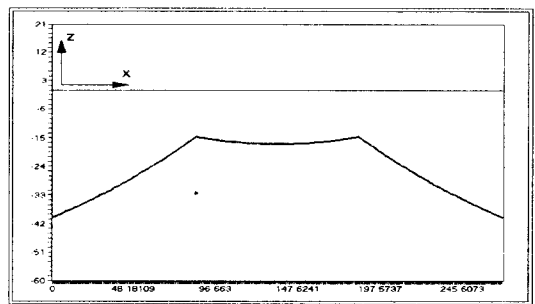
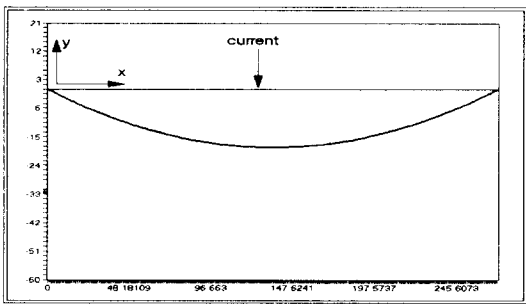


Fig. 6 Static configuration of cable-buoy system (3-D) : current velocity 0.5 m/s, current incident angle 270° with respect to X-axis without buoy-weights 2, 3 and 4 in Fig. 4

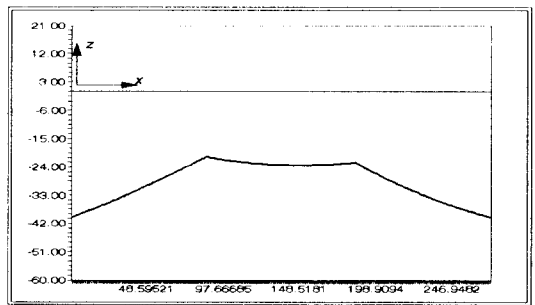
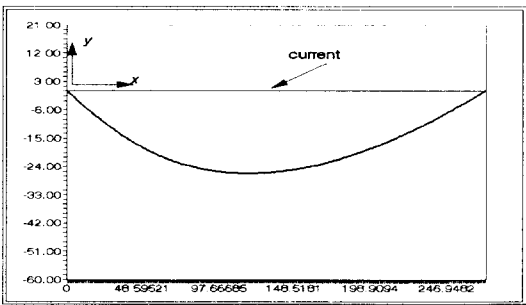


Fig. 7 Static configuration of cable-buoy system (3-D) : current velocity 1.0 m/s, current incident angle 225° with respect to X-axis without buoy-weights 2, 3 and 4 in Fig. 4

Table 3 Depth and static tensile force at the attachment points and anchor points

	NO CURRENT		CURRENT VELOCITY 0.5 m/s				CURRENT VELOCITY 1.0 m/s			
			225 °	270 °	225 °	270 °	225 °	270 °	225 °	270 °
BUOYS	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5	BUOY 1	BUOY 5
DEPTH OF BUOYS	30.25 m	30.25 m	27.01 m	29.15 m	25.25 m	25.25 m	17.19 m	19.14 m	11.04 m	11.04 m
TENSION (+)	2410 N	2630 N	2619 N	2692 N	2908 N	3095 N	4381 N	3974 N	6777 N	6872 N
TENSION (-)	2630 N	2410 N	2847 N	2504 N	3095 N	2908 N	4567 N	3892 N	6872 N	6777 N
ANGLE (+)	1.9 °	23.7 °	1.0 °	22.2 °	1.6 °	20.0 °	-0.3 °	14.0 °	0.7 °	8.8 °
ANGLE (-)	-23.7 °	-1.9 °	-22.6 °	-2.7 °	-20.0 °	-1.6 °	-14.4 °	-2.6 °	-8.8 °	-0.7 °
RIGHT BOTTOM T.	2498.9 N		2277.8 N		2491.6 N		4644.2 N		6845.7 N	
LEFT BOTTOM T.	2498.9 N		2155.1 N		2491.6 N		3841.9 N		6845.7 N	

Table 3에서 생략된 부분(main rope의 부이와 중량물의 접촉점)에서의 장력 및 부이접촉점의 각도를 아래에 나타냈다.

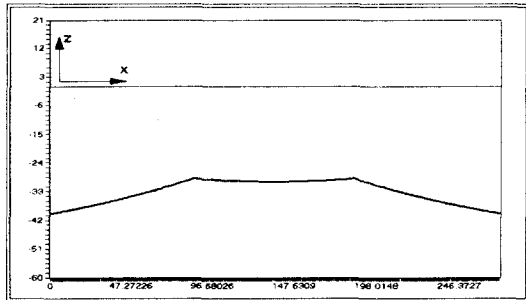
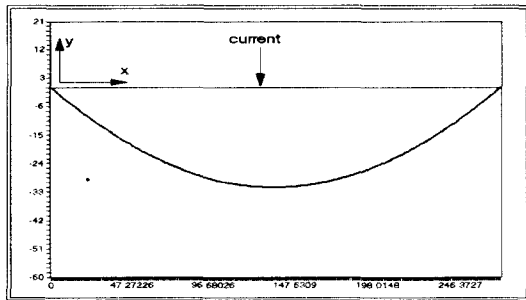


Fig. 8 Static configuration of cable-buoy system (3-D) : current velocity 1.0 m/s, current incident angle 270° with respect to X-axis without buoy-weights 2, 3 and 4 in Fig. 4

해류가 없는 경우

No. of buoy	Tension (+)	Tension (-)	Angle (+)	Angle (-)
Buoy 1	2410 N	2630 N	1.9 °	-23.7 °
Buoy 2	2409 N	2409 N	1.5 °	-0.7 °
Buoy 3	2409 N	2409 N	1.1 °	-1.1 °
Buoy 4	2409 N	2409 N	0.7 °	-1.5 °
Buoy 5	2630 N	2410 N	23.7 °	-1.9 °

해류가 0.5 m/s 일 때 (225도 각도)

No. of buoy	Tension (+)	Tension (-)	Angle (+)	Angle (-)
Buoy 1	2619 N	2847 N	1.0 °	-22.6 °
Buoy 2	2581 N	2611 N	0.6 °	-1.4 °
Buoy 3	2543 N	2574 N	0.2 °	-1.8 °
Buoy 4	2508 N	2538 N	-0.2 °	-2.3 °
Buoy 5	2692 N	2504 N	22.2 °	-2.7 °

해류가 0.5 m/s 일 때 (270도 각도)

No. of buoy	Tension (+)	Tension (-)	Angle (+)	Angle (-)
Buoy 1	2908 N	3095 N	1.6 °	-20.0 °
Buoy 2	2904 N	2907 N	1.2 °	-0.6 °
Buoy 3	2904 N	2904 N	0.9 °	-0.9 °
Buoy 4	2907 N	2904 N	0.6 °	-1.2 °
Buoy 5	3095 N	2908 N	20.0 °	-1.6 °

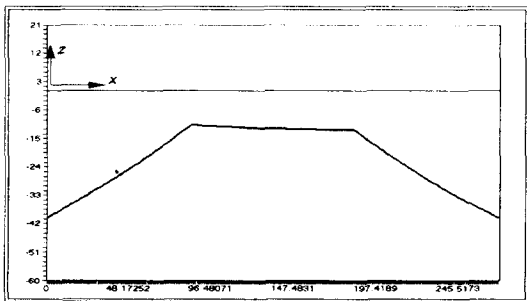
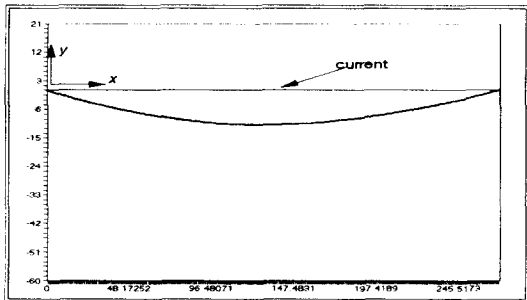


Fig. 9 Static configuration of cable-buoy- weight system (3-D) : current velocity 0.5 m/s, current incident angle 225° with respect to X-axis, three buoy-weights

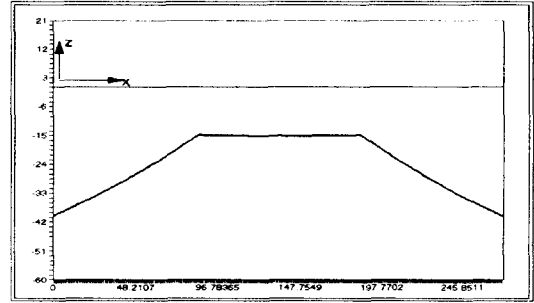
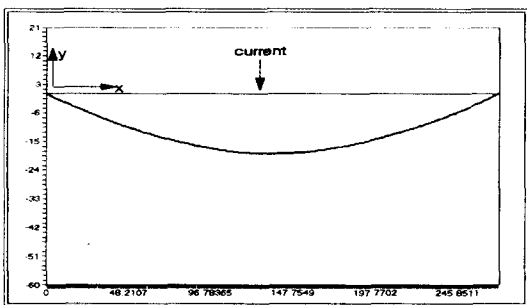


Fig. 10 Static configuration of cable-buoy-weight system (3-D) : current velocity 0.5 m/s, current incident angle 270° with respect to X-axis, three buoy-weights

해류가 없을 때 케이블 양 끝단의 닻위치에서의 장력은 2498.9 N 이었는데 비해서 0.5 m/s 해류의 입사각도가 증가함에 따라 장력은 상당한 증가를 보였고, 부이 1과 5의 수심은 해류가 없을 때 30.25 m 였는데 비해 해류의 입사각도가 증가함에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다.

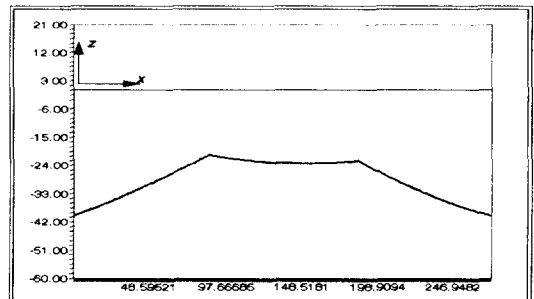
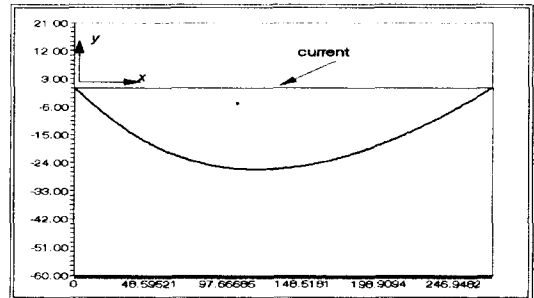


Fig. 11 Static configuration of cable-buoy-weight system (3-D) : current velocity 1.0 m/s, current incident angle 225° with respect to X-axis, three buoy-weights

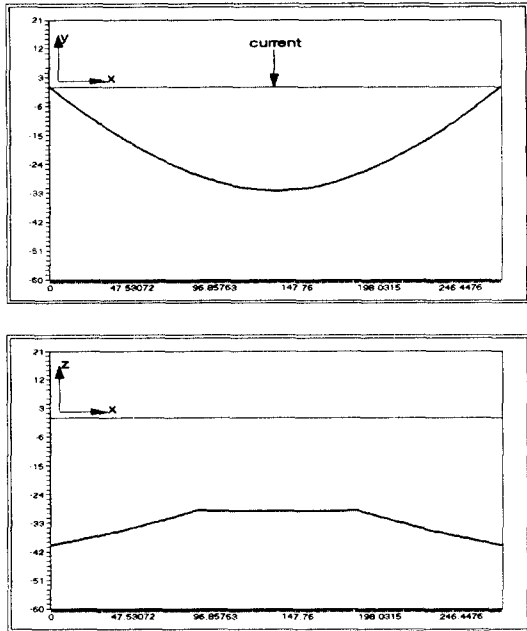


Fig. 12 Static configuration of cable-buoy-weight system (3-D) : current velocity 1.0 m/s, current incident angle 270° with respect to X-axis, three buoy-weights

이상의 계산 예에서 알 수 있는 것은 케이블-부이-중량물 시스템에 작용하는 해류의 방향이 시설물에 직각으로 작용할수록 시스템 양 끝단의 닻위치에서 작용하는 장력은 점점 증가하는 반면, 부이의 위치는 점점 감소함(해저 bottom에 가까워짐)을 알 수 있었다.

6. 결 론

해류가 작용하는 케이블-부이-중량물 시스템의 3차원 비선형 상미분 정적방정식을 유도했고, Runge-Kutta 4차식을 이용하여 케이블-부이-중량물 시스템에 대한 3차원 정적해석을 수행했다.

또한 해류가 작용할 때 케이블과 부이나 중량물 연결부에서 정적장력 및 부이위치의 변화를 정확히 예측할 수 있게 되어 케이블-부이-중량물 시스템의 최적설계가 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 국립수산진흥원 및 해양개발연구소(RCOID)의 지원에 의해 국립부산수산대학교와 공동으로 수행한 연구의 일부이며, 강릉 수산종묘배양장장 박영제, 주문진 가리비양식 관계 제위께 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 1) Ryu, C., etc. , "Studies on the development of offshore aquaculture facilities (I)", National Fisheries Research and Development Agency, 1994
- 2) Shin, H., "Nonlinear Cable Dynamics.", PhD. Thesis, MIT, 1987
- 3) Press, H. W. , Brian, P. Flannery , Saul, A. Teukolsky and William, T. Vetterling, "Numerical Recipes in C", Cambridge University Press. 1990
- 4) Shin, H., etc. , "Study on Nonlinear Cable Dynamics", Co-research report, University of Ulsan and Hyundai Maritime Institute, 1992
- 5) Shin, H., "Dynamic Analysis of Cable with Intermediate Submerged Buoys for Offshore Applications", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 3, No. 1, KCORE, 1989
- 6) Shin, H., "Cable Dynamics for the Application to Floating Breakwaters", RCOID report, National Fisheries University of Pusan, 1990