부침식 가두리 계류용 말뚝의 최적설계

이나리* · 김현주* · 최학선* · 류연선
한국해양연구소 선박해양공학분소 해양개발시스템연구센터*, 부경대학교 해양공학과
(1999년 2월 19일 접수)

Optimal Design of Mooring Steel Pile for Submersible Fish Cage

Nary Lee*, Hyeon-Ju Kim*, Hak-Sun Choi* and Yeon-Sun Ryu
Ocean Development System Research Center, KRISO, KORDI*, Pukyong Nat' univ.
(Received February 19, 1999)

Abstract

To develop a new fish cage which is required for offshore or moving cage culturing system has been gradually increased against being closely dense of fish cage in shallow water. Though submersible fish cage culturing system is essential technology for converting from shallow water into the offshore, it was pointed out the serious problem about stability of which are sinking and floating state.

This study is presented conceptual design of submersible fish cage centered with a mooring steel pile to acquire stability and faculty. Design of mooring steel pile for submersible fish cage culturing system needs to carry out optimal design of mooring steel pile for which much efforts are required.

Formulation and optimal design process of submersible fish cage are organized into using Sequential Quadratic Programming method of numerical optimization. For submersible fish cage system centered with a mooring steel pile, process of the optimal design is proposed and the optimal solutions are obtained.

서 론

우리나라에서는 반폐쇄성 내만을 중심으로 양식장이 개발되어 왔으며, 천해양식은 우리나라 총 어업 생산량의 1/3을 점하면서 단백질원의 안정적 공급을 위한 주요 수산업으로 자리잡아 왔다. 그러나, 내만을 중심으로 한 천해 또는 반폐쇄성 양식장에서의 밀식에 따른 양식장 자가오염과 육상 오염물질의 유입에 따른 해양오염 악화로 양식어패류의 대량폐사가 빈발하고 있다. 따라서, 외해 양식장의 개발이 천해양식장의 환경개선과 양식업의 다각화를 위하여 절실히 요구되고 있다. 그러나, 시설물의 안전성이 확보되지 못하여 양식시설의 외해화가 기피되고 있는 실정이다[1].

외해 양식을 위한 양식시설은 내파성이 요구되며, ①내파성은 시설 자체 및 계류시스템에 의해 유연하게 안정성을 향상시켜 해상에서 견디게 하거나, ②황천시 양식시설을 파랑의 영향이 적은

저층으로 침강시키거나, ③천해역으로 도피시키는 방법으로 제안되고 있다.

본 연구는 황천시 양식시설을 저층으로 침강시켜 내파성을 확보하기 위한 부침식 가두리의 개발을 목표로 하며, 말뚝으로 계류되는 부침식 양식시스템의 구성 및 기초설계에 대해 검토하였다. 설계대상해역은 통영해역의 외해로 가정하고, 대상해역 및 인근해역의 해양외력환경을 조사 · 분석하여 설계외력조건을 설정하였다. 설정된 설계외력조건으로 강관 계류형 말뚝을 최적화 기법을 이용하여 해석함으로써, 설계단면을 결정하고자 한다. 종래의 시행착오법에 의한 단면결정은 설계조건의 복잡성으로 시간의 소모가 남용되므로 최적설계과정을 접목함으로써 수산구조물의 안정성뿐만 아니라 경제적이고 합리적인 설계를 할 수 있다.

본 연구에서는 안정성을 고려한 부침식 양식시설의 계류말뚝 설계문제에 최적화 과정을 적용하기 위해 설계식을 정식화한다. 정식화된 설계문제에 최적화 기법인 SQP(Sequential Quadratic Programming method)법을 이용하여 계류말뚝의 단면을 산정하도록 최적설계를 수행한다. 그리고, 가정된 설계외력조건에 대해서 부침식 가두리의 침강시와 부상시의 설계결과를 비교 · 검토한다.

설계조건 및 방법

가두리 양식시설의 밀식에 따른 양식장 자가오염과 과다시설로 인한 생산량 감소와 병해, 대량폐사로 인해 새로운 증양식 시설이 외해로 확장함에 따라 내파성 양식시설이 필요하게 되었다. 내파성 양식시설은 적조발생시 어류의 폐사를 감소시키고 태풍이나 급조발생시 시설물을 보호한다. 내파성 양식시설은 부이나 침자에 의해 지지되는 형식의 가두리 양식시설과 황천시 가두리를 수평으로 이동시키는 형식과 해수면속으로 침강시켜 시설물을 보호하는 형식으로 분류할수 있다. 본 연구에서는 이 형식들 중에서 부침식 양식시설의 새롭게 개발된 구조형식을 개념설계하고 기초설계하여 검토하고자 한다.

통영해역의 바다목장화를 위한 강관말뚝 계류형 부침식 가두리 양식시설을 기초설계한다[2].

부침식 가두리를 계류시키기 위한 강관은 Fig. 1에서 나타난 것처럼 해수면상에 $2m$가 나오게 하고, 그 위에 $100kg$ 정도의 자동급이기를 시설하는 것으로 가정한다. 대상 가두리는 망사 직경 $3.2mm$, 망목의 크기 $37mm$로 형성된 철망 또는 테트론 플라스틱 와이어망으로 원관형 가두리를 형성하고 상부에 직경 $10cm$의 원형 파이프 2열을 시설하고, 하부에는 1열을 시설한다. 상 · 하부의 원형테두리는 4등분하여 스테인레스 와이어로 井자형을 형성하여 중심에 강관이 위치하게 한다. 황천시에는 가두리 시설을 해저면으로 침강시키고, 평상시에만 해상으로 끌어올려 관리작업을 하는 것으로 한다. 가두리 하단에 공기주머니를 달아서 공기를 공급함으로써 부상시키고 방출시킴으로써 침강하게 한다. 그리고, 지면아래 강관길이 l_o는 설계변수의 종속변수로서 가상고정점까지

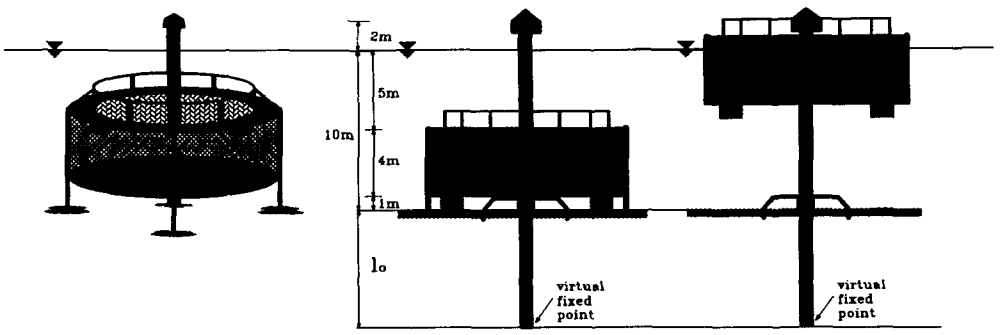

Fig. 1. Conceptual drawing of pile supported submersible fish cage.

Table 1. Design environmental conditions at Tongyoung marine ranching area

Return period(*yr*)	5	10	20	30	50	75	100	S.D	D.CF
Maximum wind speed (*m/sec*)	23.5	25.8	28.0	29.3	30.8	32.1	33.0	0.23	0.98
Instantaneous maximum wind speed (*m/sec*)	36.9	40.4	43.8	45.7	48.2	50.1	51.4	0.13	0.99
Significant wave height (*m*)	7.9	8.7	9.1	9.6	9.9	10.2			
Significant wave period (*sec*)	12.0	12.0	13.0	13.0	14.0	14.0			
Extreme high water level (*m*)	3.11	3.16	3.21	3.23	3.27	3.29	3.32	0.07	0.97
Extreme low water level (*m*)	−0.21	−0.31	−0.40	−0.46	−0.52	−0.58	−0.61	0.11	0.95
Strongest current speed & direction	50*cm/sec* N, 50*cm/sec* S								
Soil condition	clay(0~3*m*), weathered soil(3~7*m*), weathered rock(7~10*m*), soft rock(10*m*~)								

의 길이를 나타낸다.

이러한 말뚝계류형 가두리 양식시설 설계에서 가장 중요한 것은 말뚝의 설계이며, 안전하고 경제적인 설계가 요구된다. 실제 예를 들어 부침식 가두리의 계류말뚝을 설계한다면, 설계조건은 대상해역을 통영해역의 외해로 가정하고, 대상해역의 해양외력환경을 조사하여 Table 1과 같이 정리하였다[2].

1. 설계외력 산정

가두리시설에 작용하는 유체력은 침강시에는 상부프레임과 가두리망에 대한 파랑 및 유체력에 대해 고려하며, 부상시에는 상부프레임에는 풍력이 작용하고 가두리망과 하부프레임에는 파력 및 조류력이 작용하는 것으로 산정한다.

계류말뚝에 작용하는 주 외력은 풍압력, 파력, 조류력이 대표적이다. 유체력은 Morison식을 사용하고, 가두리에 작용하는 유체력은 中村(1991)의 방법을 사용하여 다음과 같이 산정한다[3]. 그리고, 원형가두리에 작용하는 유체력은 계류되어 있는 강관말뚝에 계류력으로 작용한다.

(1) 풍압력

$$F_{wind} = 1/2 \times C_D \times \rho_a \times A_s \times V_w^2 \qquad (1)$$

여기서, C_D는 항력계수, ρ_a는 공기의 밀도, A_s는 해면 상부구조물의 투영면적, V_w는 풍속을 나타낸다[4].

(2) 조류력

$$F_{current} = 1/2 \times C_D \times \rho_w \times A_c \times V_c^2 \qquad (2)$$

여기서, ρ_w는 물의 밀도, A_c는 해면하 구조물의 투영면적, V_c는 유속을 나타낸다.

(3) 강관에 작용하는 파력(D<0.2L)

$$F_{wave} = 1/2 \times C_D \times \rho_w \times A_c \times u \mid u \mid + 1/2 \times C_M \times \rho_w \times Q_c \times a \qquad (3)$$

여기서, C_M은 관성계수, Q_c는 해면하 구조물의 체적, u는 상류측 유속 또는 수립자속도를 나타내며 수심 2*m* 간격으로 속도의 제곱값을 평균한 값을 사용한다. a는 수립자가속도로서 수심 2*m*마다의 값을 평균한 값으로 사용한다.

(4) 원형가두리에 작용하는 유체력

원형가두리에 작용하는 유체력은 계류말뚝에 작용하는 계류력으로 계산된다. 즉, 원형가두리에 작용하는 전체유체력은 가두리 상부끝단과 하부끝지점에 수평력으로 작용하는 것으로 가정한다.

$$F = \frac{C_D w_0 d R D_h}{2sg}\left[\alpha(u^2 + u'^2) + \frac{\pi R u^2}{D_h}\right] \qquad (4)$$

$$u' = \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{\alpha C_D d}{4s}}\right)u \qquad (5)$$

여기서, w_0는 해수의 비중량, R은 원관형 가두리의 반경, D_h는 가두리의 높이, u′은 가두리 내부의 유속 또는 수립자속도, g는 중력가속도, d는 망사의 직경, s는 망목의 크기, α는 5.403이다.

망에 작용하는 유체력 산정에서 망사나 로프의 직경이 파고에 비해 충분히 작은 경우에는 가상질량력은 무시하며 항력이 지배적이 된다. 위의 식

(5)에서 u와 u′의 관계는 항력과 유속분포가 일정하다는 中村(1991)의 연구결과를 이용한다[3][5].

2. 설계방법

부침식 양식시설의 계류말뚝을 설계시 고려되는 요구조건은 부침식 양식시설물의 구조적 안정성과 기초지반의 적합성을 들수 있다. 앞 장에서 주어진 설계조건과 허용응력설계법으로 외력에 의해 발생하는 응력과 지반지지력에 대한 설계식을 사용하여 설계문제를 정식화한다. 계류말뚝 설계문제의 정식화에 고려할 설계요건은 말뚝에 작용하는 압축력에 대한 설계와 수평외력 등에 의한 굽힘모멘트에 대한 설계, 압축력과 굽힘모멘트가 동시에 작용할때의 설계, 대상 해역의 지반 조건에 따른 지지력에 대한 설계를 고려한다[7][8].

(1) 축응력에 대한 설계

계류말뚝에 축방향 압축력이 작용할 때 말뚝 단면은 다음 식(6)과 같이 응력이 발생한다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{6}$$

여기서, σ_c는 축방향 압축응력, P는 말뚝에 작용하는 축하중, A는 말뚝의 단면적이다.

본 연구에서는 연직외력은 작용하지 않고 계류말뚝의 끝단에 설치되는 자동급이기의 무게 100*kg* 자중만이 작용하여 허용압축응력을 초과하지 않도록 설계한다.

(2) 굽힘응력에 대한 설계

계류 말뚝에 작용하는 수평력으로 발생하는 굽힘응력은 식(7)과 같이 나타낸다.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \tag{7}$$

여기서, σ_b는 휨응력, M은 수평외력에 의해 발생하는 설계 휨모멘트, Z는 단면계수이다.

(3) 합성응력에 대한 설계

계류말뚝에는 압축응력과 굽힘응력이 동시에 작용하는 경우가 일반적이므로 다음 식(8)과 같이 합성응력에 대해서 설계가 고려되어야 한다.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} \le 1.0 \tag{8}$$

여기서, σ_c는 축하중에 의한 압축응력, σ_b는 휨모멘트에 의한 압축응력, σ_{ca}는 축하중에 의한 허용압축응력, σ_{ba}는 휨모멘트에 의한 허용압축응력이다.

(4) 지지력에 대한 설계

지반의 상태에 따라 달라지는 연직 지지력에 대해서는 다음 식(9)와 같이 설계된다.

$$\frac{Q_a}{Q_u} \le \frac{1}{F_s} \tag{9}$$

여기서, Q_u는 극한 하중이고, Q_a는 설계 하중으로 말뚝의 축방향력을 나타내고, F_s는 안전계수(safety factor)이다[7].

수치 최적화

최적설계(optimal design)란 설계자의 경험과 통찰력으로 인한 비경제적, 비효율적인 설계를 과학적이며 합리적으로 시스템을 설계하는 방법이다. 최적설계이론 및 방법론은 이미 고도화로 발달되어 있으며, 실제로도 설계문제는 우주항공, 기계, 선박, 건설, 구조분야에서 널리 적용되고 있으며, 그 신뢰성 또한 높이 평가되고 있다. 그러므로, 수산시설물을 설계할 때, 최적설계기법을 적용 및 응용하여 경제적 설계를 해야 할 필요성이 점차 증가될 것이라고 사료된다.

최적설계를 위해서, 설계조건들을 고려한 설계문제를 설계되어야 할 변수들의 함수로 정식화하고, 최적화기법을 사용하여 이미 개발된 상용프로그램을 이용하여 최적설계를 수행한다. 유한차원의 공학적 설계문제는 일반적으로 다음과 같이 정식화할 수 있고, 이와 같은 과정으로 최적화 되어야 한다.

Find $x \in Rn$

To minimize

$f(x)$

Subject to

$$h_i(x)=0,\ i=1,\cdots,p$$
$$g_j(x)\le 0,\ j=1,\cdots,m$$

여기서, x는 n차원 설계변수벡터, f(x)는 목적함수, $h_i(x)$는 등호 제약함수, $g_j(x)$는 부등호 제약함수, p는 등호 제약조건의 개수, m은 부등호 제약조건의 개수가 된다[10].

1. 최적설계문제의 정식화

부침식 가두리시설의 계류말뚝 설계시 구조적 안정성과 경제성은 중요한 문제이다. 이러한 특성을 만족하는 계류말뚝의 단면을 설계하기 위해서 설계변수를 결정하고 설계요인들을 설계변수의 함수로 정식화한다.

계류말뚝의 최적설계문제에서 설계변수(design variable)는 강관말뚝의 평균직경(mean diameter)과 두께(thickness)로 설정한다. 또한, 최소화할 목적함수(cost function)를 계류말뚝의 중량으로 설정하여 설계변수의 함수로 정식화하고, 설계의 기준이 되는 제약조건(constraint function)은 설계방법에서 제시된 설계요인을 고려하여 설계변수의 함수로 정식화한다. 앞에서 고려된 제약조건은 축응력에 대한 제약, 굽힘응력에 대한 제약, 전체 좌굴에 대한 합성응력에 대한 제약, 연직지지력에 대한 제약, 부가적 설계조건인 설계변수의 상·하한에 대한 제약조건을 고려하여 다음과 같은 과정으로 정식화한다[11].

(1) 설계변수

설계문제의 시스템을 정식화하도록 모든 가능성 여부를 판단하여 적절한 독립변수를 설정한다.

$$(x_1, x_2)=(D,t) \tag{10}$$

여기서, D는 계류말뚝의 평균직경, t는 두께를 나타낸다.

(2) 목적함수

설계를 비교하기 위한 판단기준으로서 최소가격, 최대이익, 최소중량 등을 설정할수 있다. 본 연구에서는 강관의 단면, 길이에 따라 재료비나 시공비에 큰 차이가 있으므로 계류말뚝의 최소중량을 목적함수로 한다.

$$f(x_1, x_2)=\gamma\cdot\pi\cdot D\cdot t\cdot L \tag{11}$$

여기서, γ는 계류말뚝의 단위체적당중량, L은 말뚝의 전체길이로서 지반에서 가상고정점까지의 길이 l_o를 합한 값을 나타낸다. 가상고정점까지의 길이는 설계변수 값에 따라 달라진다.

(3) 제약함수

설계에 대한 제약을 설계변수의 함수로 직접 표현(explicit function)하지만 불가능할 경우 내재제약함수(implicit function)로도 표현한다. 본 연구에서는 설계방법에서 제시된 설계조건에 따라 식(12)~(15)의 제약함수는 식(6)~(9)로부터 유도된 부등호 제약조건만으로 구성된다.

• 축방향 압축응력에 대한 제약함수

$$g_1(x_1, x_2)=\frac{P}{A\cdot\sigma_{ca}}\le 1.0 \tag{12}$$

• 굽힘응력에 대한 제약함수

$$g_2(x_1, x_2)=\frac{M}{Z\cdot\sigma_{ba}}\le 1.0 \tag{13}$$

• 합성응력에 대한 제약함수

$$g_3(x_1, x_2)=\frac{P}{A\cdot\sigma_{ca}}+\frac{M}{Z\cdot\sigma_{ba}}\le 1.0 \tag{14}$$

• 연직지지력에 대한 제약함수

$$g_4(x_1, x_2)=\frac{P\cdot F_s}{\left[0.8\left(40N\frac{L_b}{D}A_p\right)+\frac{N}{5}A_{1S}+CA_{2S}\right]}\le 1.0 \tag{15}$$

• 설계변수 제약조건

$$g_5(x_1, x_2)=D_L\le D\le D_U \tag{16}$$
$$g_6(x_1, x_2)=t_L\le t\le t_U \tag{17}$$

여기서, P는 설계하중으로 연직축방향력, N는 말뚝선단주위의 평균표준관입시험치, L_b는 지지층내 말뚝의 근입깊이, A_p는 기초저면면적, N는 말뚝전체 근입깊이에 대한 평균 N치, C는 평균부착력, A_{1S}는 사질토층에 근입한 말뚝의 주면면적, A_{2S}는 점토층에 근입한 말뚝의 주면면적, F_s는 안전율을 나타낸다. 식(15)의 연직지지력에 대한 제약함수는 극한하중 산정시 강관말뚝의 폐단효과를 고려하여 선단지지력의 80%만을 고려한다.

D_L, D_U는 강관말뚝의 평균직경의 하한과 상한, t_L, t_U는 말뚝두께의 하한과 상한이다.

계류말뚝단면의 최적설계문제는 식(12)~(17)에 제시된 부등호 제약조건을 모두 만족하면서 목적함수 식(11)을 최소화하는 설계변수 식(10)을 결정하는 것으로 정식화할 수 있다[12][13][14].

2. 최적화기법

공학설계문제에 사용되는 지금까지의 수치최적화 기법은 크게 직접법(direct method)과 간접법(indirect method, search method)으로 구분한다. 간접법은 도함수를 구하는 과정에서 계산량이 증가하기 때문에 소수 특수형태의 설계문제를 제외하고는 잘 사용하지 않는다. 직접법은 설계공간을 탐색하여 최적해를 구하는 방법이다[15]. 직접법은 다시 원시법(primal method)과 변환법(transformation method)으로 구분하는데, 원시법 중에서 어떤 시작점에서 출발하여도 반드시 해에 수렴할 수 있다고 증명되었고 효율성이 입증된 순차이차계획법(Sequential Quadratic Programming method)을 사용하여 최적설계를 수행한다. 순차이차계획법은 1963년 Wilson에 의하여 개발되었고 1977년 Han이 전역적 수렴성(global convergence)을 증명하였다[16][17]. 순차이차계획법은 탐색방향과 이동거리를 구하는 문제로 구분된다. 본 연구에서는 SQP를 사용하여 코드화된 최적설계 서브루틴을 IMSL 라이브러리에서 호출하고 목적함수와 제약함수를 정의해주는 서브루틴을 작성하여 최적설계를 수행한다. IMSL 라이브러리에서 호출한 NCONF 서브루틴은 수정된 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 알고리즘을 이용하였고, 유한차분법(finite difference method)을 사용하여 경사도를 계산하였다. 설계입력자료로서는 설계변수의 개수, 등호 및 부등호제약조건 개수, 설계변수의 초기치, 설계변수의 상한치와 하한치, 최대실행 반복횟수 등이 있다[18].

3. 수치설계예

지금까지 제시된 최적설계 과정으로 실제 대상해역의 설계조건을 고려하여 계류말뚝을 설계한다. 조사분석된 대상해역의 해양외력환경 Table 1의 재현주기 50년 설계파에 대해 대상해역까지의 파랑변형을 고려하고 파랑 주기의 결합분포특성을 고려하여 Table 2의 6가지 파랑조건을 가정한다.

위의 설계조건과 원관형 가두리의 크기별 두 경우를 대상으로 최적설계 문제를 정식화하고 수치최적설계를 수행한다. 원관형 가두리는 크기별로 다음과 같이 구분한다.

▶ Case 1 : 가두리의 직경 $15m$, 높이 $5m$

▶ Case 2 : 가두리의 직경 $10m$, 높이 $4m$

Table 2. Design conditions of environments and bottom soil

CASE		W1	W2	W3	W4	W5	W6
Wave	Height	$1m$	$2m$	$3m$	$4m$	5	$6m$
	Period	$4sec$	$5.6sec$	$7.2sec$	$8.8sec$	$10.4sec$	$12sec$
Current		$0.5m/sec$					
Wind		$30.8m/sec$					

Table 3. Optimal solutions (t=0.05m)

wave case	Case 1						Case 2					
	Sinking state			Floating state			Sinking state			Floating state		
	mean diameter (m)	length of pile (m)	weight (kg)	mean diameter (m)	length of pile (m)	weight (kg)	mean diameter (m)	length of pile (m)	weight (kg)	mean diameter (m)	length of pile (m)	weight (kg)
W1	0.54	14.97	10293	0.83	16.31	16749	0.39	14.92	7229	0.70	15.94	13794
W2	0.55	15.52	10447	0.84	16.34	16966	0.40	14.94	7350	0.71	15.97	13976
W3	0.56	15.57	10642	0.85	16.40	17224	0.41	14.97	7510	0.72	16.00	14197
W4	0.57	15.60	10859	0.87	16.42	17492	0.42	15.01	7700	0.73	16.03	14432
W5	0.58	15.64	11105	0.88	16.46	17782	0.43	15.05	7920	0.74	16.06	14692
W6	0.59	15.67	11382	0.89	16.49	18095	0.44	15.10	8175	0.75	16.09	14978

설계문제를 정식화하기 위해 앞장에서 제시된 과정으로 설계외력을 산정한다. 수치예제에 적용된 계류말뚝에 작용하는 연직력은 강관말뚝 끝단에 설치될 자동급이기의 무게 100*kg*만이 작용한다고 가정한다. 원관형 가두리 크기에 따른 Case 1과 Case 2에 대해서 Table 2의 파랑조건을 고려하여 계류말뚝에 작용하는 수평외력을 산정한다. 파력산정시 고려되는 항력계수 C_D는 0.5, 관성계수 C_M은 1.0, 안전율 F_s는 3으로 가정한다. 계류말뚝의 단면설계문제를 식(10)~식(17)에 제안된 과정으로 정식화하고, 최적설계프로그램을 작성하여 최적해를 얻는다.

4. 설계결과 및 고찰

부침식 가두리 계류말뚝 최적설계의 수치예제에서 주어진 파랑조건과 가두리 크기에 따른 경우에 대해서 단면최적설계를 수행하였다. 그 결과, 강관말뚝의 두께에 따른 강관말뚝의 평균직경과 근입깊이에 따른 말뚝의 전체길이, 강관말뚝의 총중량을 산출하였다. 그 결과들 중 일부를 Table 3에 나타나 있고, 두께에 따른 전체 결과를 Fig. 2부터 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, 그림의 가로축은 W1~W6까지의 파랑조건을 나타내고 세로축은 최적설계된 말뚝의 중량을 말뚝의 두께에 따라 나타내었다. Fig. 2는 가두리 크기에 따른 분류 Case 1에서의 침강시 입사파에 따른 소요중량을 강관의 두께에 따라 나타낸 것이며, Fig. 3은 Case 1에서의 부상시 입사파에 따른 소요중량을 강관의 두께에 따라 나타낸 것이다. Fig. 4는 가두리 크기에 따른 분류 Case 2에서의 침강시 입사파에 따른 소

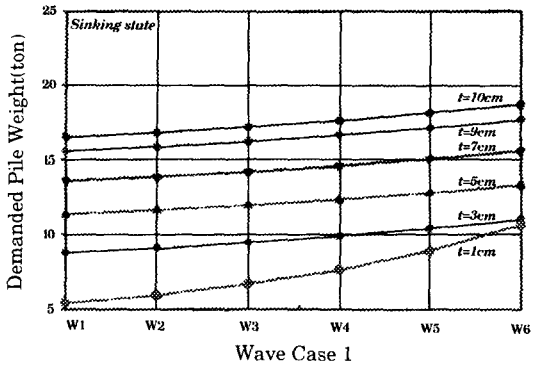

Fig. 2. Variation of demanded pile weight at sinking state (Case 1).

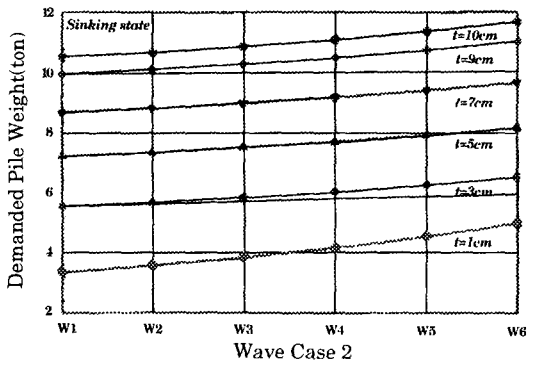

Fig. 4. Variation of demanded pile weight at sinking state (Case 2).

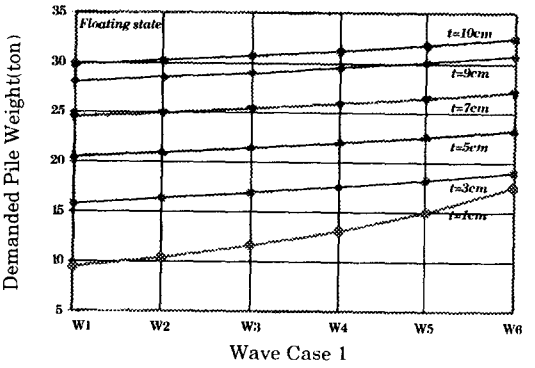

Fig. 3. Variation of demanded pile weight at floating state (Case 1).

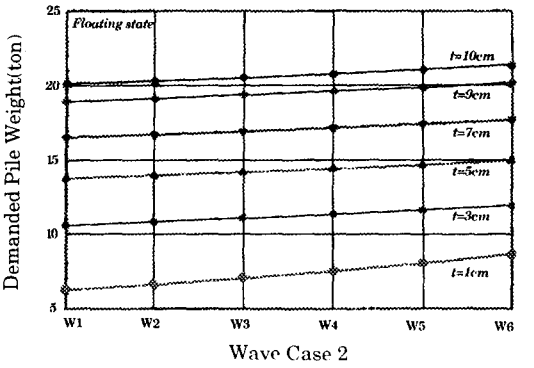

Fig. 5. Variation of demanded pile weight at floating state (Case 2).

요중량을 강관의 두께에 따라 나타낸 것이며, Fig. 5는 Case 2에서의 부상시 입사파에 따른 소요중량을 강관의 두께에 따라 나타낸 것이다. 그리고, 각 파랑조건에서 지반속으로 근입되는 말뚝의 근입깊이는 Case 1과 Case 2의 두 경우가 모두 침강시 $3m \sim 4m$ 정도이며, 부상시 $4m \sim 5m$ 정도로 산출되었다.

결 론

최근 우리나라 양식시설은 천해의 밀식에 따른 외해로의 확장이 요구되고 있으며, 이에 따른 내파성 양식시스템의 개발에 대한 중요성이 강조되고 있다. 외해에서 요구되는 내파성 양식시설은 구조물 자체의 안정성과 경제성을 고려하여 설계하여야 한다. 본 연구는 황천시 해수면하 저층으로 침강시키는 부침식 내파성 가두리를 개발하기 위한 기초적 연구로서 중앙 말뚝식 계류방법 및 말뚝설계에 대해 다각적으로 검토하였다. 이로부터, 양식가두리 중앙부를 1개 말뚝으로 계류되는 부침식 양식시스템을 구성하여, 개념설계를 실시하였다. 계류용 강관말뚝을 주어진 설계파랑조건과 가두리 크기별로 수치최적화 기법인 순차이차계획법을 적용한 서브루틴을 사용하여 최적설계를 수행하였다.

최적설계과정 및 결과로부터 대상 부침식 가두리는 침강시에 대한 말뚝의 소요중량은 부상시의 소요중량에 비하여 절반 정도가 됨을 알 수 있었다. 또한, 침강시를 대상으로 설계된 말뚝 계류형 가두리에서 입식, 관찰, 관리 및 수확을 위한 가두리의 부상 및 작업은 입사파 $W1$(파고 $1m$, 주기 $4sec$) 이하의 해상상태에서 가능함을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 해양수산부 바다목장화사업의 일환으로 수행되고 있는 "신소재를 이용한 유동제어구조물 및 해상 중간육성시설 설계기술 개발"을 위한 연구결과의 일부이며, '98한국과학재단 인턴연구원지원사업의 지원을 받아 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1) 유성규(1995) : 천해양식. 신흥출판사, pp. 1-49.
2) 김종만 등(1997) : 해양목장화를 위한 기반연구, 한국해양연구소, BSPE97602-00-1073-3.
3) 中村充(1992) : 水産土木學, 工業時事通信社, p. 561.
4) 이재신(1989) : 海洋構造物 設計概要, 원광출판사.
5) 土木施工設計計算例委員會 : 港灣 海洋構造物の設計計算例, 山海堂, pp. 123~172.
6) C.R. Ryu, and H.J. Kim (1995) : A design concept of artificial habitat considering the function of wave control and coastal defence, COSU 95, pp. 347~356.
7) 이명섭 등(1994) : 鋼管 말뚝의 設計와 施工, *POSCO 강재이용 기술집(I).*
8) 김철용 등(1993) : 港灣施設物 設計基準書(上下), 海運港灣廳 pp. 379-450
9) 大網幸雄 等(1995) : 人工浮海底システム開發, ECOSET' 95論文集, pp. 312~317.
10) Arora, J. S.(1989) : Introduction to optimum design, McGraw-Hill pp. 408~410.
11) 이나리(1998) : 강관말뚝식 계류돌핀의 설계 최적화 부경대학교 공학석사 학위논문 p. 50.
12) Belegundu, A. D., Arora, J. S.(1985) : A study of mathematical programming methods for structural optimization. PART I : Theory, IJNME, Vol. 21, pp. 1583~1599.
13) Belegundu, A. D. and Arora, J. S.(1985) : A study of mathematical programming methods for structural optimization. PART II : Numerical Results, IJNME, Vol. 21, pp. 1601~1623.
14) Vanderplaats, G. N.(1984) : Numerical optimization techniques for engineering design, McGraw-Hill Book Company.
15) Haug, E.J. and Arora, J.S.(1979) : Applied Optimum Design, John Wiley & Sons.
16) Belegundu, A. D. and Arora, J. S.(1984) : A recursive quadratic programming method with active set strategy for optimal design, IJNME, Vol. 20, pp. 803~816.
17) Thanedar, P. B., Arora, J. S., Tseng, C. H., Lim, O. K., and Park, G. J.(1986) : Performance of some SQP algorithms on structural design problems, IJNME, Vol. 23, pp. 2187~2203.
18) IMSL, Inc.(1989) : IMSL math/library user's manual Vol 2-2, pp. 925~932.