

강관말뚝식 계류돌핀의 수치적 설계최적화

이나리* · 류연선** · 김정태** · 서경민*** · 조현만****
(98년 12월 4일 접수)

Numerical Design Optimization of Mooring Dolphin of Steel Pile Type

Nary Lee* · Yeon-Sun Ryu** · Jeong-Tae Kim** · Kyung-Min Seo*** · Hyun-Man Cho****

Key Words : Mooring Dolphin (계류돌핀), Numerical Design Optimization(수치적 설계 최적화), Design Variable Linking and Fixing (설계변수의 연계 및 고정)

Abstract

Optimum design of mooring dolphin is numerically investigated. Design optimization problem of mooring dolphin is first formulated. Geometry and cross sections of piles are used as design variables. Design objective is the total weight of steel piles of mooring dolphin, and the constraints of stress, penetration depth, lower and upper bounds on design variables are imposed. Based on the design variable linking and fixing, several class of design variations are sought. For the numerical optimization, both PLBA(Pshenichny - Lim - Belegundu - Arora) program and DNCONF subroutine code in IMSL library are used. For a dolphin structure with 20 steel piles, vertical and inclined, optimum designs for different cases are successfully obtained, which can be applied for the mooring of a very large floating structure.

1. 서 론

계류돌핀구조물은 평상시에는 대형 부유 구조물의 동요를 제어하여 선박의 접안을 가능하게 하고 대형 부유 구조물의 위치를 유지하며, 이상시에는 극한 외력에 대해 위치를 유지하여 충분히 안전한

계류를 하고 접안할 수 있도록 한다. 재현 주기 100년 이상의 태풍을 대상으로 하는 경우, 대형 해양 구조물에 작용하는 계류력이 과대하지 않고 파괴에 대해 안전성이 높은 돌핀링크방식이 적합하다. 1970년대에 일본 토목시공 설계위원회는 돌핀 링크방식 중에서 말뚝식 돌핀이 수평하중에 대

* 정희원, 한국해양연구소 선박해양공학분소

** 정희원, 부경대학교 해양공학과

*** 동해대학 토목과

**** 정희원, 부경대학교 해양공학과

해 충분한 강도를 가지며, 변위량을 작은 범위내에 제어할 수 있는 방식임을 입증한 바 있다. 최근, 우리나라에서도 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다¹⁾.

기존의 돌핀계류시스템의 설계과정에는 과대안정에 의한 비경제적 설계의 우려, 치수 결정의 어려움에 의한 과다한 시간낭비 등의 문제점이 있었다. 따라서, 이러한 비효율성을 해결하기 위해서는 돌핀계류시스템의 설계과정에 수치적 최적화기법을 도입하여야 한다.

말뚝식 계류돌핀구조물은 외력을 하부구조에 전달하는 상부구조와 이를 지지하는 수직말뚝 및 경사말뚝의 하부 강관말뚝으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 강관말뚝식 계류돌핀의 수치적 최적설계를 위해 하부 강관말뚝의 평균직경과 강관두께, 경사말뚝의 타입각 등을 설계변수로 설정한다. 목적함수는 강관말뚝에 대한 총 중량의 최소화이며, 제약조건으로는 응력, 전체좌굴, 인발 및 연직지지력, 설계변수의 상·하한 등을 고려한다.

본 연구의 목적은 강관말뚝식 계류돌핀의 설계예를 설정하여 설계문제를 정식화하고 수치적 최적화기법을 사용하여, 하중조건에 따른 최적설계를 도출함으로써 설계문제의 정식화와 설계최적화 과정의 유효성을 확인하는 것이다. 강관말뚝식 계류돌핀의 최적설계를 위한 수치적 최적화기법으로는 공학최적설계문제에서 많이 사용되고 있으며 효율성과 강건성이 입증된 순차이차계획법 (Sequential Quadratic Programming method ; SQP)을 사용한다. 최적설계프로그램은 수렴속도가 높고 계산량이 비교적 적은 PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora) 알고리즘²⁾과 대부분의 전자계산소에서 사용 가능한 IMSL 라이브러리에서 서브루틴을 호출하여 사용한다.

2. 계류돌핀의 설계

2.1 설계외력의 산정

계류돌핀 구조물에 작용하는 하중으로서는 풍압력, 파력, 조류력, 지진력, 정수압, 선박의 접안력이나 계류력 등을 생각할 수 있다. 그리고, 구조물 자체 중량은 계류되어야 할 부유 구조물의 자중 및

상재하중 등의 장기간 고정되는 설비의 중량으로 고려한다. 풍압력은 재현기간 100년의 최대풍속 (50m/s)을 사용하여 ABS 규준에 따라 식(1)에 의해 계산한다³⁾.

$$F_w = 0.0623 C_s C_h U^2 A \quad (1)$$

여기서, C_s 는 형상계수, C_h 는 고도계수, U 는 설계풍속, A 는 풍속방향 투영면적을 나타낸다.

파력은 항력과 관성력의 합으로 Morison식에 의해 계산된다³⁾.

$$F_p = F_I + F_D = \rho C_m V \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} \rho C_d A u |u| \quad (2)$$

여기서, F_I 는 관성력, F_D 는 항력, ρ 는 해수의 밀도, C_m 은 관성력계수, C_d 는 항력계수, V 는 부재의 체적, u 는 수립자 속도, du/dt 는 수립자의 가속도이다.

조류력은 관측치로부터 얻은 최대조류속도를 사용하여 식(3)과 같이 산정한다¹⁾.

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_{dc} A V_c |V_c| \quad (3)$$

여기서, C_{dc} 는 조류에 의한 항력계수, V_c 는 조류의 유속이다.

실제 부유 구조물은 탄성체이지만 탄성처짐을 고려하면 계류력이 불균일하게 되므로, 본 연구에서는 부유 구조물을 강체로 보고 계류력이 균일하게 분포하도록 가정한다. 계류돌핀에 작용하는 계류력의 계산은 대형 부유 구조물의 크기와 대형구조물에 연결되는 계류돌핀의 갯수에 따라 달라진다. 접안시 또는 계류시 선박에 의한 작용 외력은 식(4)로 계산되며 단위는 $t \cdot m$ 가 된다⁴⁾.

$$F_M = C_e C_{vm} C_l C_c \left(\frac{W_s V_s^2}{2g} \right) \quad (4)$$

여기서, C_e 는 편심계수, C_{vm} 은 가상질량계수, C_l 는 유연성계수, C_c 는 선박의 형상계수, W_s 는 선박의 배수량, V_s 는 선박의 접안속도를 나타낸다.

2.2 상부구조부

계류돌핀구조물의 상부구조부는 대형부유구조물의 크기에 따라서 치수를 결정하기 때문에 돌핀의 하부 강관말뚝만 설계하면 된다. 상부구조는 대형 부유 구조물과 링크로 연결되어 하부 강관말뚝에 수평력을 전달하는 기능을 한다. 강관말뚝의 설계 외력을 산정할 때는 상부 구조물 자체의 자중과 적재하중, 활하중 등을 고려하여 연직력을 계산한다.

2.3 하부강관말뚝

계류돌핀의 하부 강관말뚝을 설계할 때 고려해야 하는 하중은 상부구조에서 전달되는 축압축력, 축인장력, 수평력 및 휨모멘트 등이다. 본 연구의 설계기준인 허용응력설계법에서 압축력은 허용지지력을 넘지 않아야 하며, 장기간 지속하중에 대해 각각의 말뚝이 균등한 하중을 받도록 말뚝을 배치하는 것으로 한다. 말뚝의 좌굴 계산시, 지표면에서 어떤 깊이까지의 가상고정점을 설정하여 모멘트, 축방향력 등을 계산한다. 말뚝에 작용하는 수평반력(F_{ih})은 식(5)로 계산된다⁵⁾.

$$F_{ih} = F_{iw} + F_{ip} + F_{ic} + \frac{1}{n} F_M \quad (5)$$

여기서, F_{iw}는 i번째 말뚝의 풍압력, F_{ip}는 i번째 말뚝의 파력, F_{ic}는 i번째 말뚝의 조류력, F_M은 계류력, n은 말뚝의 본수이다. 강관 말뚝의 설계에 고려되는 인자는 다음과 같다.

(1) 축방향 압축력

강관말뚝에 작용하는 설계외력으로 축방향 압축력이 작용할 때 말뚝단면에 응력 σ_c이 발생한다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A_e} \quad (6)$$

여기서, P는 축방향력, A_e는 유효단면적이다.

(2) 축방향 인발력

말뚝에 축방향 인장력이 작용할 때, 말뚝에 발생하는 최대인발력 R_{ut}을 넘지 않도록 설계한다¹⁾.

$$R_{ut} = \frac{\bar{N}A_s}{5} \quad (\text{사질토}) \quad (7)$$

$$R_{ut} = \bar{C}_a A_s \quad (\text{점성토}) \quad (8)$$

여기서, \bar{N} 는 말뚝의 전체 근입깊이에 대한 평균 N치, A_s는 말뚝의 전체주면면적, \bar{C}_a 는 말뚝의 전체 근입깊이에 대한 평균부착력을 나타낸다.

(3) 휨모멘트

휨모멘트에 의해 말뚝에 발생하는 휨응력 σ_b은 허용휨응력 1,400kg/cm² 을 초과하지 않도록 설계한다.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (9)$$

여기서, M은 설계 휨모멘트, Z는 단면계수이다.

(4) 축방향 압축력과 휨모멘트

압축력과 휨모멘트를 동시에 작용시키는 합성응력에 대해서 식(10)을 만족해야 한다¹⁾.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} \leq 1.0 \quad (10)$$

여기서, σ_{ca}는 축방향력에 의한 허용압축응력, σ_{ba}는 휨모멘트에 의한 허용압축응력을 나타낸다.

(5) 연직지지력

말뚝의 연직지지력은 식(11)을 만족하도록 설계한다. 강관말뚝의 폐단효과를 고려하여 선단지지력 Q_p은 80%만 고려한다⁵⁾.

$$\frac{Q_u}{Q_u} \leq \frac{1}{F_s} \quad (11)$$

$$Q_u = 0.8Q_p + Q_s = 0.8q_p A_p + f_s A_s \quad (12)$$

$$= 0.8(40N \frac{L_b}{D} A_p) + \frac{\bar{N}}{5} A_{ss} + \bar{C}_a A_{cs}$$

여기서, Q_u는 극한 하중, Q_a는 설계 허용하중으로 말뚝의 축방향력을 나타내고, F_s는 안전계수, Q_p는 선단지지력, Q_s는 주변마찰력, q_p는 선단의

단위저항, A_p 는 기초저면면적, f_s 는 주면의 단위저항, A_s 는 주면면적, L_b 는 지반층 말뚝의 근입깊이, D 는 말뚝의 외경, \bar{N} 는 사질토지반의 평균 N 치, A_{ss} 는 사질토에 근입한 말뚝의 주면면적, A_{cs} 는 점성토에 근입한 말뚝의 주면면적이다.

(6) 수평변위

말뚝머리부의 수평변위는 상부구조물의 사용상 요구되는 허용변위량 y_a 을 초과하지 않도록 설계된다. 수평하중을 지지하는 말뚝의 거동을 평가하는 방법들 중에서 Chang의 방법을 사용하여 공식화된 식(13)에 의해 지표면에서의 말뚝의 변위 y_o 가 계산된다⁵⁾.

$$y_o = \frac{1 + \beta h}{4EI\beta^3} T \quad (13)$$

여기서, T 는 수평하중, β 는 특성치, h 는 지반으로부터의 말뚝높이, EI 는 휨강성을 나타낸다.

3. 최적설계문제

3.1 정식화 과정

계류돌핀의 최적설계문제에서 설계변수는 하부 강관말뚝의 평균직경과 두께, 경사말뚝의 타입각 등이다. 최소화 할 목적함수는 강관 말뚝의 전체 중량, 혹은 계류돌핀의 전체중량 등으로 생각한다. 제약함수는 응력에 대한 제약조건과 지지력에 대한 제약조건, 수평변위에 대한 제약조건, 설계변수 제약조건 등으로 정의된다.

(1) 축방향 압축력에 대한 제약조건

$$\frac{P}{A_e \sigma_{ca}} \leq 1.0 \quad (14)$$

(2) 축방향 인발력에 대한 제약조건

$$\frac{P}{\frac{\bar{N}A_{as}}{5} + \bar{C}_a A_{2cs}} \leq 1.0 \quad (15)$$

(3) 휨모멘트에 대한 제약조건

$$\frac{M}{Z \sigma_{ba}} \leq 1.0 \quad (16)$$

(4) 조합응력에 대한 제약조건

$$\frac{P}{A_e \sigma_{ca}} + \frac{M}{Z \sigma_{ba}} \leq 1.0 \quad (17)$$

(5) 연직지지력에 대한 제약조건

$$\frac{P F_s}{\left[0.8(40N \frac{L_b}{D} A_p) + \frac{1}{5} \bar{N} A_{ss} + \bar{C}_a A_{cs} \right]} \leq 1.0 \quad (18)$$

(6) 말뚝머리의 수평변위에 대한 제약조건

$$\frac{(1 + \beta h)}{4EI\beta^3} \frac{T}{y_a} \leq 1.0 \quad (19)$$

(7) 설계변수 제약조건

$$D_L \leq D \leq D_U \quad (20)$$

$$\theta_L \leq \theta \leq \theta_U \quad (21)$$

$$t_L \leq t \leq t_U \quad (22)$$

$$t \leq \frac{D}{20} \quad (23)$$

여기서, D_L , D_U 는 평균직경의 하한과 상한, t_L , t_U 는 두께의 하한과 상한, θ_L , θ_U 는 타입각도의 하한과 상한이다. 계류돌핀의 최적설계문제는 식 (14)~(23)에서 제시한 부등호제약조건을 모두 만족하면서 목적함수를 최소화하는 설계변수를 결정하는 것으로 정식화된다.

3.2 최적화기법

구조최적설계는 구조해석, 설계민감도해석, 설계최적화의 세 과정으로 구분한다⁶⁾. 설계최적화 과정에서 이용되는 수치적 최적화 기법에서는 탐색방향(search direction)을 결정하기 위해 부문제를 구성한다. 결정된 탐색방향으로의 이동거리(step size)를 구하기 위해서는 주로 1차원 탐색을 하며 구조해석이 반복해서 수행된다. 수치적 최적화기법들 중에서 효율적이고 강력함이 입증된 SQP법을 사용한다.

본 연구에서는 수렴속도가 높으며 활성제약조건 식만을 사용하여 매 반복계산에서 계산량이 비교적 적은 PLBA 알고리즘⁷⁾과 대부분의 전자계산소에서 사용가능한 IMSL 라이브러리를 사용한다.

3.3 계류돌핀구조물의 설계최적화 과정

강관말뚝식 계류돌핀의 설계를 위한 설계최적화 과정을 단계별로 요약하면 Fig. 1과 같다.

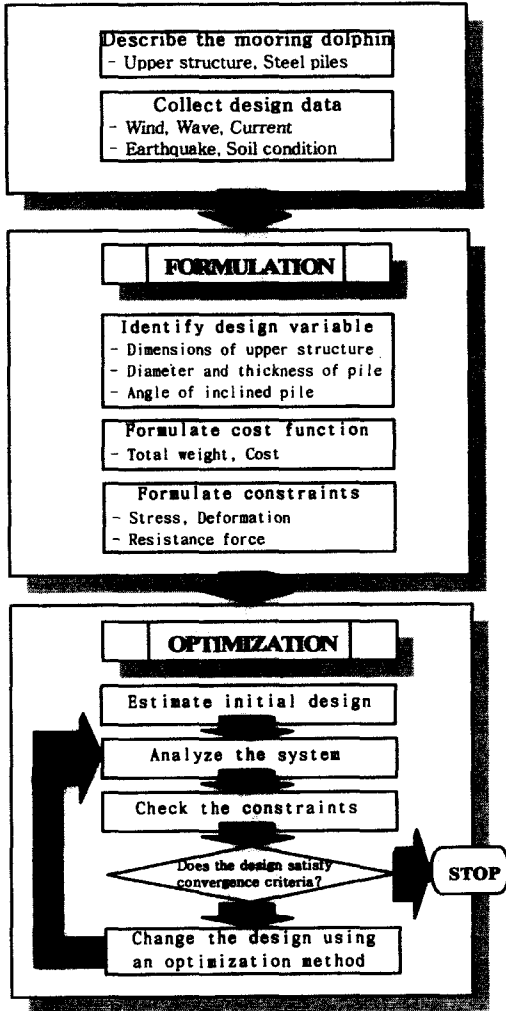


Fig. 1 Schematic flow diagram for design optimization of dolphin mooring system

4. 수치예제

4.1 20개의 말뚝을 가진 계류돌핀구조물

본 연구에서는 돌핀링크방식들 중에서 큰 수평 하중에 대해 충분한 강도를 가지고, 경제적이어서

현장에 적용되고 있는 20개의 수직 및 경사말뚝을 가진 강관말뚝식 계류돌핀구조물을 수치 예로 설정하였다. 상부구조의 재료는 무근콘크리트로 가정하고, 하부 강관말뚝은 KSD 3566 일반구조용 탄소강관 제 2종 SPS 41을 사용⁵⁾한다고 가정한다. 강관말뚝은 4개의 수직말뚝과 16개의 경사말뚝으로 구성되어 전체 20개의 말뚝이 상부콘크리트 구조의 하부에 X축과 Y축에 대해 대칭으로 배열되어 있다.

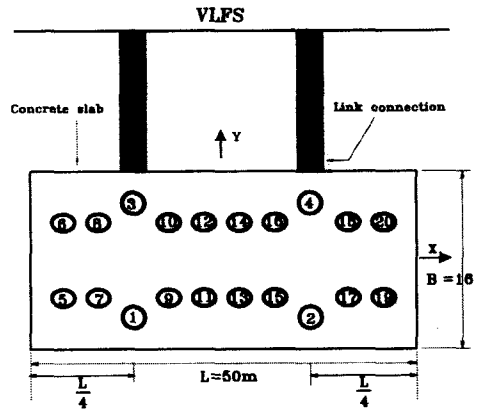


Fig. 2 Plan view and pile array in the upper deck

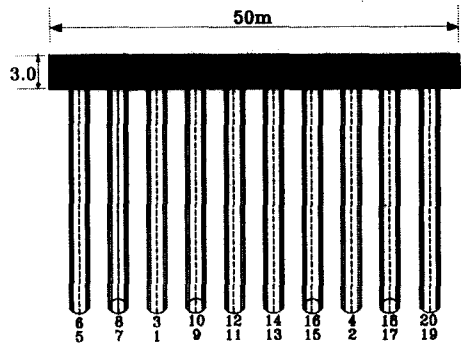


Fig. 3 Front view (Y-direction)

Fig. 2는 계류돌핀의 평면도로서 상부콘크리트 구조의 크기를 $50m \times 16m \times 3m$ 로 하였다. 상부콘크리트 구조물에 배열된 No. 1~4는 수직말뚝이고 나머지는 경사말뚝이다. Fig. 3은 계류돌핀의 정면도를 나타낸다. 대형 부유 구조물(Very Large Floating Structure ; VLFS)과 상부 콘크리트를

연결하는 링크가 두 지점에 각각 위치한다. Fig. 4는 대형 부유 구조물이 계류된 돌핀의 측면도이다

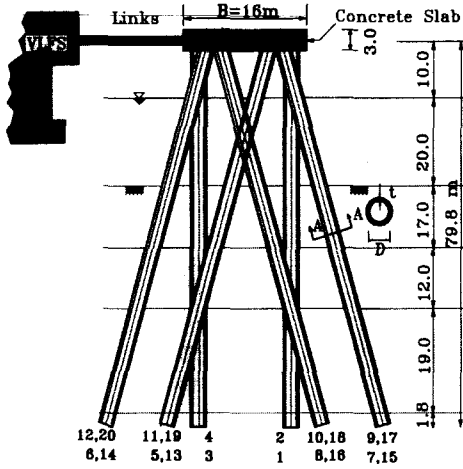


Fig. 4 Side view (X-direction)

4.2 설계변수 연계 및 고정

본 연구에서는 수직 및 경사말뚝의 직경, 두께 및 타입각 등을 설계변수로 설정하였다. 설계변수의 연계 및 고정(design variable linking and fixing) 등⁸⁾을 이용하는 4가지 경우에 따라서 설계 변수를 정의한 것이 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1 Definition of design variables

Design variable	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Mean diameter of vertical pile (D_1)	x_1	x_1	x_1	x_1
Thickness of vertical pile (t_1)	x_2	x_2	x_2	x_2
Mean diameter of inclined pile (D_2)	x_3	x_3	linking (= x_1)	linking (= x_1)
Thickness of inclined pile (t_2)	x_4	x_4	linking (= x_2)	linking (= x_2)
Angle of inclined pile (θ)	x_5	fixed (20°)	x_3	fixed (20°)

4.3 예제의 정식화

정식화하기 위해서 사용된 설계자료는 Table 2에 요약된 자연조건과 Table 3에 요약된 토질자료

를 이용하였다.

Table 2 Input data for design formulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Current level(C_i)	± 2.0 m	Wave height(H_{max})	9.2 m
Wave period(T)	7 sec	Wind velocity(U_{max})	50 m/s
Elastic modulus(E)	2.1×10^6 kg/cm ²	Current velocity(V_{max})	2.0 kt
Unit weight of concrete(r_c)	2350 kg/m ³	Unit weight of pile(r_p)	7850 kg/m ³
Sea water density(ρ)	1.03 t/m ³	Safety factor(F_s)	3.0
Shape coefficient(C_s)	0.5	Drag coefficient(C_d)	0.5
Height coefficient(C_h)	1.0	Inertia coefficient(C_m)	2.0

Table 3 Soil condition of installation site

Depth (m)	Soil Type	Moisture (%)	Angle of friction (ϕ)	Adhesion (kN/m ²)	Internal Friction Angle (ϕ)	Compression Strength (kN/m ²)	Compression Strength (kN/m ²)
17.0	clay	0	-	-	1.5	1.39	2.78
12.0	sand	23	34°	0.4	2.0	-	-
19.0	clay	5	-	-	1.6	6.0	12.0
1.80	sand	50	37°	0.6	2.0	-	-

자연조건은 재현기간을 100년 태풍시로 가정한다. 계류돌핀구조물에 작용하는 설계 외력이 X방향으로 작용할 때와 Y방향으로 작용할 때를 모두 고려해야 하므로, 주어진 자연조건과 토질조건을 가지고 X방향과 Y방향으로 작용하는 설계 외력을 산정하였다. 상부콘크리트 구조부는 5640톤의 자중만을 고려하여 각 말뚝에 등분포로 작용하도록 하였다. 풍압력은 식(1)에서 제시된 식을 사용하여 계산하였다. 파력은 파장을 구한 다음 수심 5m 마다의 수립자 속도와 가속도를 구하여 평균한 값을 식(2)에 대입하여 구하였다. 조류력은 최강유속을 사용하여 식(3)에 의해 계산되었다. 계류력은 접안시 또는 계류시 선박의 용량이나 대형 부유 구조물의 규모를 고려하여 식(4)에 의해 계산되지만 본 연구에서는 X방향으로 300톤, Y방향으로 1000톤이 작용한다고 가정하고 산정하였다.

최소화할 목적함수는 하부 강관말뚝의 총 중량으로 하였으며, X 및 Y방향 모두 만족해야할 제약 조건은 축방향 압축력과 휨모멘트에 대한 제약, 축방향 인발력에 대한 제약, 연직지지력에 대한 제약, 설계변수의 상·하한 등을 고려하였다. 상부콘크리트구조의 크기를 고려하여 강관말뚝 평균직경의 하한은 0.5m, 상한은 5.0m로 하였다. 강관말뚝 두께의 하한은 0.0001m, 상한은 1.0m으로 하였고, 경사말뚝의 타입각에 대한 하한은 1° 이고 상한은 40° 로 하였다. 지금까지의 과정으로 수치예제의 최적화문제를 Case 1~4의 설계변수에 대해서 정식화하였다.

4.4 최적화 프로그램

정식화된 최적설계문제의 최적해를 얻기 위해 PLBA와 IMSL 라이브러리를 이용하여 최적설계를 수행하였다. PLBA는 4개의 서브루틴을 사용자가 작성하여야 한다^[4]. 즉, 목적함수를 정의하는 서브루틴과 제약함수를 정의하는 서브루틴, 목적함수의 도함수와 제약함수의 도함수를 정의하는 서브루틴을 작성한다. 본 연구의 수치예제에서는 PLBA의 초기입력자료인 벌칙매개변수 1.0, 활성화 제약조건식의 폭은 0.1, 최적해의 정확도는 1.0×10^{-2} , 선택식의 정확도는 1.0×10^{-3} 으로 선택하여 최적설계를 수행하였다. 그리고, IMSL 라이브러리의 DNCONF 서브루틴과 목적함수와 제약함수를 정의해주는 서브루틴을 작성하여 최적설계를 하였다.

4.5 해석결과 및 고찰

Table 1의 Case 1~4에 관해서 PLBA를 수행한 결과를 Table 4와 Table 5에 요약하였다. 그리고, 동일조건에 대해서 IMSL을 이용하여 수행한 결과를 Table 6과 Table 7에 요약하였다. 같은 초기치와 입력자료를 가지고 수행하였지만 수렴성 있는 PLBA에서 Case 1과 Case 2는 결과를 얻지 못하였다. Table 4와 Table 5의 Case 1과 Case 2는 초기입력자료 중 최적해의 정확도를 1.0×10^{-1} 로 했을 때의 결과이다. Table 5는 Table 4에서 얻은 결과를 다시 초기치로 하고 수행했을 때 얻은 결과이다. 네 경우 모두 최적해에 수렴되었음을 알 수 있다. IMSL에서도 같은 과정으로 Table 6은 동일한

초기치를 주었을 때 얻은 결과이고, Table 7은 Table 6에서 얻은 결과를 초기치로 해서 얻은 최적해이다. 위의 결과 외에도 또 다른 초기치를 입력했을 때 얻은 결과들은 위 결과들과 비교하여 다른 결과를 산출하는 경우가 있었다. 따라서, 20개의 말뚝을 가진 계류돌핀의 설계문제는 초기치를 변경하면서 수행하여 얻은 결과들로부터 여러 개의 국부최소(local minimum)가 존재함을 알 수 있다. 즉, 다중해(multiple solution)를 갖는 설계문제가 된다.

일반적으로, 설계변수의 개수가 많아질수록 목적함수인 강관말뚝의 총 중량이 작아짐을 확인 할 수 있었다. Case 1과 Case 3은 경사말뚝의 타입각도가 하한값에 수렴하여 수직말뚝식 돌핀구조물로 설계되었다. 다른 경우(Case 2, Case 4)에서는 경사말뚝의 타입각도를 20° 로 고정시켰기 때문에 경사말뚝식 돌핀구조물로 최적설계되었다. Fig. 5는 Table 4, 5, 6, 7에서 네 경우의 목적함수값을 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 PLBA로부터 얻은 총중량이 최적값에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 그리고, Case 1과 Case 3은 IMSL에서 더 작은 중량을 산출하였고 Case 2와 Case 4는 PLBA에서 더 작은 중량을 산출하였다. 결과로부터 경사식 돌핀구조물은 PLBA를 사용하면 최소중량의 파일톤수를 구할수 있고, 수직말뚝식 돌핀구조물은 IMSL을 사용하여 최소중량의 파일톤수를 구할수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 설계문제를 PLBA와 IMSL만을 수행하여 결과를 얻었지만 다른 수치적 최적화 알고리즘을 사용하여도 유사한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 돌핀계류시스템의 하부지지기초 설계에 최적화 기법을 적용하기 위하여 20개의 강관말뚝을 가진 계류돌핀을 수치예제로 설정하였다. 하부 강관말뚝의 평균직경, 두께 및 경사말뚝의 타입각을 설계변수로 구성한다. 설계변수의 연계와 고정을 최적설계문제에 적용시켜 수직말뚝과 경사말뚝의 단면이 동일한 경우와 다른 경우, 경사말뚝의 타입각을 고정시킨 경우로 정의하여 설계변수에 관해서 정식화하고 최적설계를 수행하였다.

Table 4 Design optimization with PLBA

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x ₁	3.84	3.796	2.0	3.112	x ₁	2.0	3.834	2.0	3.805
x ₂	0.032	0.032	0.1	0.064	x ₂	0.1	0.032	0.1	0.033
x ₃	3.84	3.828	2.0	5.000	x ₃	20	1.386	20*	20*
x ₄	0.032	0.032	0.1	0.014					
x ₅	1	1.038	20*	20*					
N.I	2		7		N.I	13		8	
cost (ton)	4837	4771	8276	3943	cost (ton)	8276	4894	8276	5155

Table 5 Refinement of optimum values with PLBA

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x ₁	3.796	3.753	3.112	3.009	x ₁	3.834	3.834	3.805	3.804
x ₂	0.032	0.032	0.064	0.060	x ₂	0.032	0.032	0.033	0.033
x ₃	3.828	3.816	5.0	5.000	x ₃	1.386	1.386	20*	20*
x ₄	0.032	0.032	0.014	0.015					
x ₅	1.038	1.077	20*	20*					
N.I	2		2		N.I	2		19	
cost (ton)	4771	4749	3840	3881	cost (ton)	4916	4830	5196	5168

Table 6 Design optimization with DNCONF

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x ₁	2.0	4.759	2.0	4.708	x ₁	2.0	3.067	2.0	5.0
x ₂	0.1	0.019	0.1	0.020	x ₂	0.1	0.034	0.1	0.033
x ₃	2.0	4.832	2.0	5.0	x ₃	20	1	20*	20*
x ₄	0.1	0.020	0.1	0.033					
x ₅	20	1	20*	20*					
N.I	30		28		N.I	7		16	
cost (ton)	8276	3714	8276	6364	cost (ton)	8276	4114	8276	6875

Table 7 Refinement of optimum values with DNCONF

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x ₁	4.759	4.759	4.708	4.708	x ₁	3.067	3.067	4.5	5.0
x ₂	0.019	0.019	0.020	0.020	x ₂	0.034	0.034	0.033	0.033
x ₃	4.832	4.832	5.0	5.0	x ₃	1	1	20*	20*
x ₄	0.020	0.020	0.033	0.033					
x ₅	1	1	20*	20*					
N.I	11		12		N.I	5		9	
cost (ton)	3755	3714	6233	6364	cost (ton)	4105	4114	6145	6875

※ - '*' : fixed design variable - D.V : design variable - I.V : initial value
 - N.I : number of iteration - O.V : optimum value

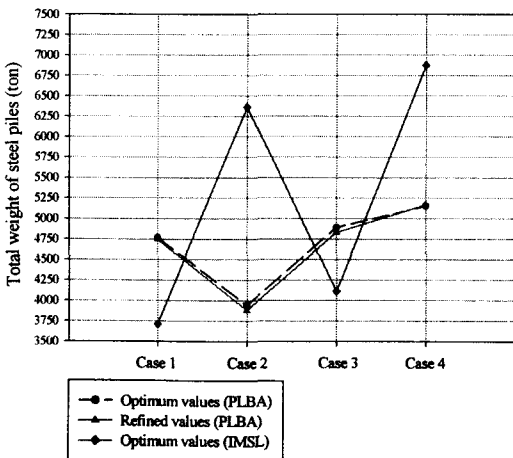


Fig. 5 Total weight of steel piles(Cost function)

최적화 프로그램은 순차이차계획법(SQP)을 이용한 PLBA 프로그램과 IMSL을 사용하였다. 설계 변수의 네 가지 경우 중에서 경사말뚝의 타입각을 설계변수로 한 두 경우(Case 1, Case 3)는 수직말뚝식 계류돌핀으로 최적해가 산출되었고, 다른 두 경우(Case 2, Case 4)는 경사말뚝의 타입각도를 2°로 고정시키고 최적해를 산출하였다. 그 결과, 수치 예로 선정된 20개의 말뚝을 가진 계류돌핀의 설계문제는 여러 개의 국부최소가 존재함을 확인하였다. 이와 같은 과정으로 자연 조건이나 외력 조건이 다른 설치 해역에서도 수직말뚝식 혹은 경사말뚝식 계류돌핀구조물을 정식화하고 수치최적화기법을 도입하면 최적설계를 산출할 수가 있다.

후 기

본 연구는 99년도 부경학술진흥재단 연구 과제의 일환으로 수행되고 있는 “해양구조물 계류용 돌핀의 최적설계에 관한 연구”에 의하여 수행된 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 신현경 외, “부유식 해양구조물에 관한 연구”, 울산대학교, pp.300-339, 1996
- 2) Thanedar, P. B., J. S. Arora, C. H. Tseng, O. K. Lim and G. J. Park, “Performance of Some SQP Algorithms on Structural Design Problems”, IJNME, Vol. 23, pp.2187-2203, 1986
- 3) 이재신, “海洋構造物 設計概要”, 원광사, pp. 1-47, 1989
- 4) 김철용 외, “港灣施設物設計 基準書(上·下)”, 海運港灣廳, pp.295-473(上), 99-239(下), 1993
- 5) 이명섭 외, “강관말뚝의 설계와 시공”, POSCO 강재이용 기술집(I), 삼양문화사, 1994
- 6) 류연선, “기존 소프트웨어를 이용한 구조최적설계시스템의 구성”, 대한토목학회논문집, 제12권, 제4-1호, pp.53-66, 1992
- 7) 임오강, 이병우, 변준석, “최적구조물 설계를 위한 RQP 알고리즘의 매개변수 성능평가”, 전산구조공학, 제3권 제1호, pp.83-95, 1990
- 8) Haug, E.J. and J.S. Arora, “Applied Optimum Design”, John Wiley & Sons, 1979
- 9) 이나리, “강관말뚝식 계류돌핀의 설계최적화”, 부경대학교 공학석사 학위논문, 1998