

공학석사 학위논문

유전 알고리즘을 이용한 복합공간형
사각어초의 최적설계



2002 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

위 성 광

공학석사 학위논문

유전 알고리즘을 이용한 복합공간형 사각어초의 최적설계

지도교수 류 연 선

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2002년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

위 성 광

위성광의 공학석사 학위논문을 인준함

2001 년 12 월 26 일

주 심 공학박사 김 헌 태



위 원 공학박사 류 청 로



위 원 공학박사 류 연 선



목 차

List of Figures	iii
List of Tables	iv
List of Symbols	v
ABSTRACT	vii
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구목적 및 내용	1
2. 인공어초의 개요	4
2.1 인공어초의 정의와 기능	4
2.2 어류의 어초성 분류	4
2.3 인공어초 어장의 구성	5
3. 인공어초의 설계	7
3.1 설계과정	7
3.2 작용외력의 산정	8
3.2.1 유체력의 산정	8
3.2.2 마찰력 및 충격력의 산정	10
3.3 기능성의 검토	12
3.3.1 어초의 구조	12
3.3.2 단위어초의 시설량	13
3.3.3 단위어초의 시설면적	13
3.3.4 배치간격	14
3.3.5 어초의 높이	14
3.4 안정성의 검토	15
3.4.1 활동에 대한 안정성	15
3.4.2 전도에 대한 안정성	15
3.4.3 내구성	15

4. 최적설계화 과정	18
4.1 설계최적화 모형	18
4.2 마이크로 유전 알고리즘	19
4.3 최적설계 문제의 정식화	21
4.3.1 설계변수	21
4.3.2 목적함수	23
4.3.3 제약함수	23
5. 최적설계의 적용예	28
5.1 설계문제	28
5.2 설계예 1: 복합공간형 직사각어초	30
5.2.1 최적성 검토	32
5.2.2 사각어초와 복합공간형 직사각어초의 비교	33
5.2.3 시설량의 변화에 따른 목적함수의 변화	34
5.2.4 파고-주기의 변화에 따른 목적함수의 변화	36
5.3 설계예 2: 복합공간형 정사각어초	37
5.4 설계예 3: Shoe가 있는 복합공간형 정사각어초	39
6. 요약 및 결론	42
참고문헌	44
Appendix	46

List of Figures

Fig. 1.1 MCC-type artificial reef

Fig. 2.1 Deployment plan of fishing ground by artificial reefs

Fig. 3.1 Design and stability evaluation of artificial reef

Fig. 4.1 Design variable of MCC-type artificial reef

Fig. 4.2 Cross-section of members in MCC-type artificial reef

Fig. 4.3 Deployment of reef unit in a reef set (Checker board type)

Fig. 5.1 Design history of the artificial reef

Fig. 5.2 Variation of $C - M$ curve due to $H - T$ for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 60 \text{ m}$

Fig. 5.3 Variation of $C - M$ curve due to $H - T$ for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 40 \text{ m}$

Fig. 5.4 Variation of $C - M$ curve due to $H - T$ for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 20 \text{ m}$

Fig. 5.5 Variation of $C - H - T$ curve due to M for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 60 \text{ m}$

Fig. 5.6 Variation of $C - H - T$ curve due to M for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 40 \text{ m}$

Fig. 5.7 Variation of $C - H - T$ curve due to M for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 20 \text{ m}$

Fig. 5.8 Cost.-depth relation for 5m-10sec

Fig. 5.9 Cost.-depth relation for 8m-12sec

Fig. 5.10 Cost.-depth relation for 10m-13sec

Fig. 5.11 Cost.-depth relation for 12m-15sec

List of Tables

Table 3.1 Calculation of design wave

Table 5.1 Design variables and constraints for design cases

Table 5.2 Input data for external force and environment

Table 5.3 Input data for material property

Table 5.4 Design variables and substring lengths for design case 1

Table 5.5 Constraints for optimum design case 1

Table 5.6 Input data for total enclosed volume of reefs

Table 5.7 Effect of $h-H-T$ for design case 1

Table 5.8 Safety and costs of cube-type and MCC-type

Table 5.9 Design variables and substring lengths for design case 2 and design case 3

Table 5.10 Constraints for optimum design case 2

Table 5.11 Effect of $h-H-T$ for design case 2

Table 5.12 Effect of $h-H-T$ for design case 3

Table A.1.1 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M-H-T$ for $h = 60\text{ m}$

Table A.1.2 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M-H-T$ for $h = 50\text{ m}$

Table A.1.3 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M-H-T$ for $h = 40\text{ m}$

Table A.1.4 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M-H-T$ for $h = 30\text{ m}$

Table A.1.5 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M-H-T$ for $h = 20\text{ m}$

Table A.2.1 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 10000\text{ m}^2$

Table A.2.2 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 8100\text{ m}^2$

Table A.2.3 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 6400\text{ m}^2$

Table A.2.4 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 4900\text{ m}^2$

Table A.2.5 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 3600\text{ m}^2$

Table A.2.6 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 2500\text{ m}^2$

Table A.3.1 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 10000\text{ m}^2$

Table A.3.2 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 8100\text{ m}^2$

Table A.3.3 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 6400\text{ m}^2$

Table A.3.4 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 4900\text{ m}^2$

Table A.3.5 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 3600\text{ m}^2$

Table A.3.6 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h-H-T$ for $A = 2500\text{ m}^2$

List of symbols

A	setting area
A_b, A_f, A_t	transparent sectional area
A_g	area of column
A_s, A_{st}, A_v	area of reinforcement
B	width of structure
b_w	width of bar
C_D	drag force coefficient
C_M	inertia force coefficient
d	actual depth of the bar
D	height of structure
$e_{\min}$	eccentric
f	objective function
F	fitness function
F_0	wave force
F_D	drag force
F_M	inertia force
g	gravitational acceleration
$g(x)$	inequality constraint function
h	water depth
h_s	subsidence depth of structure
H	wave height
$h(x)$	equality constraint function
K	coefficient of subgrade reaction
$K-C$	Keulegan-Carpenter number
L	wave length
l_w	horizontal distance between weight and rotation axis
M	total enclosed volume of reefs
M_n	nominal bending strength
M_r	bending moment
N	population size

P_n	nominal axial strength
P_r	axial forces
R	subgrade reaction
s	stirrup interval
S_F	safety factor
t	time
T	wave period
u	mean horizontal velocity of flow
u_0	velocity of tide
u_m	maximum horizontal particle velocity of flow
u_2	velocity of flow on top of reef
u_1	horizontal particle velocity of wave
V	volume of structure
v_0	velocity at the time of landing on the bottom
V_c	nominal shear strength to burden concrete
V_n	nominal shear strength
V_r	shear forces
V_s	nominal shear strength to burden shear reinforcement
W	weight of structure
x_i	design variable
θ	angle between structure and flow direction
μ	friction coefficient between structure and sea bottom
ρ	fluid density
σ	density of structure
$\overline{\sigma}_G$	equivalent weight
w_0	unit weight of water
ε	porosity of structure
ϕ	diameter of reinforcement
ϕ_M, ϕ_V, ϕ_P	strength reduction factor
$\phi(x)$	transformed objective function

Optimum Design of MCC-type Artificial Reefs Using Genetic Algorithms

Wee Seong-Kwang

Department of Ocean Engineering, Graduate School.
Pukyong National University

ABSTRACT

A design optimization procedure for MCC-type artificial reefs is developed using micro genetic algorithm(μ GA). The design variables are the height and width of a reef, the thickness of columns and bars, and the number of the reefs to be settled in the area. The objective function is the total weight of the unit reef. The constraints related to the function of the reefs are the setting area, total enclosed volume of reefs, clear distance between the reefs; and the constraints related to the stability are sliding, overturing, bending moment, shear forces, and axial forces.

In the design procedure for an optimum solution, the convergence of objective function is studied. In order to verify the efficiency of the procedure, both MCC-type and cube-type artificial reefs are considered and the results are compared. Variation of cost function due to water depth, wave height, wave period and total enclosed volume of reefs are investigated. design results show that the sliding and overturing are the most important and dominant design constraints. Both function improvement and stability enhancement of the reefs are expected when larger reef is used.

From the study, it is shown that a design optimization procedure for MCC-type artificial reefs is effective and the proposed MCC-type artificial reefs are suitable for the composition of reef set. For the use in the design practice, typical MCC-type artificial reefs are presented which are optimized under the variable factors such as the depth, wave height, wave period, total enclosed volume of reefs, and setting area.

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

현재 우리나라에는 수산자원의 생산량 증대와 인위적인 산란장 및 서식장 등을 조성하는 인공어초사업이 진행되고 있다. 국내에서 개발되어 시설효과가 입증된 인공어초는 11종이며, 이들 중의 60%이상이 사각어초에 의하여 어초어장으로 조성되고 있다(국립수산진흥원, 2000). 단위어초의 구성형태는 16ha당 100개(800m³) 정도의 사각어초를 현수투하 또는 현수거치에 의하여 2~3단으로 상적·시설하고 있다. 조성된 단위어초는 해양파랑이나 흐름에 의한 어초의 유실, 부등침하로 인한 상적된 어초의 활동이나 전도 때문에 그 쌓여진 상태가 다소 불규칙하고, 조성 당시의 상태에 비하여 분산 정도가 심하게 나타난다(강원도, 1997). 이러한 문제점들은 사각어초가 해양외력에 대하여 안정성을 확보하지 못하여 발생하며, 단위어초의 기능성 감소의 주요 원인이 된다. 단위어초의 기능성은 어초단체가 해양외력환경에 대하여 안정하고, 어초에 의한 흐름변화가 표·중층에 미칠 수 있는 시설높이를 확보하면서, 어초를 시설면적 내에 분산·배치함으로써 증대시킬 수 있다. 그러므로 사각어초를 이용하여 단위어초를 구성할 경우 흐름변화가 표·중층에 영향을 미칠 수 있는 높이와 외력환경에 대하여 안정할 수 있는 넓이를 가지도록 어초를 일체식으로 설계하고, 단위어초의 시설면적 내에 어초단체를 분산·배치하는 것이 필요하다.

1.2 연구목적 및 내용

최초에 시설된 단위어초의 형태를 유지하면서 단위어초의 구성에 적합한 새로운 형태의 인공어초로서, 본 연구에서는 Fig. 1.1과 같이 여러 개의 사각어초가 조합된 효과를 나타낼 수 있는 복합공간형 사각어초(multi-cell cube-type artificial reef; MCC-type artificial reef)를 제안한다. 또 이러한 복합공간형 사각어초의 설계 최적화 과정을 개발한다. 그리고 다양한 외력환경을 고려한 복합공간형 사각어초의 설계자료

를 구축하여 인공어초 제작 및 설계 기술자가 직접적으로 사용할 수 있도록 한다.

제안된 복합공간형 사각어초는 직사각어초, 정사각어초 및 활동에 대한 저항성을 인위적으로 증가시키기 위해 Shoe를 장착한 정사각어초 등을 고려한다.

설계 최적화 과정은 최적설계문제 정식화와 최적화의 수치기법을 도입한 설계과정으로 구분된다. 정식화에서는 설계변수로 어초의 높이와 넓이, 어초부재의 넓이와 높이가 그리고 배치형태에 따라 단위어초에 사용되어지는 인공어초의 개수 등을 설계변수로 구성하고, 단위어초에 사용되어지는 인공어초의 총 중량을 목적함수로 하여 그 값이 최소가 되도록 최적화 과정을 수행한다. 단위어초의 기능성을 증대시키기 위하여 어초의 높이, 단위어초의 시설면적 및 시설량, 배치형태 그리고 배치간격 등을 기능성에 관련된 제약조건으로 구성하며, 안정성 확보를 위하여 설치 시 발생하는 착저충격력에 의한 어초 자체의 내구성, 그리고 설치 후 활동 및 전도 등을 제약조건으로 구성하여 최적설계문제를 푼다.

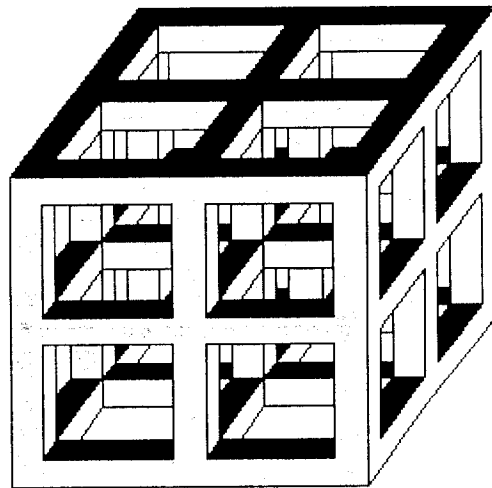


Fig. 1.1 MCC-type artificial reef

여기서, 일반적으로 사용되어지는 설계조건인 설치 후의 침하, 세굴이나 액상화 등을 고려할 경우 어초의 형상 변화에 따른 기능성에 영향을 미칠 수 있으며, 이러한

설계인자는 지질의 치환에 의한 투수성의 제고, 사석에 의한 상재하중의 증대로 지반 중의 유효응력을 증대시키는 방법 및 시설물의 기초지지부를 말뚝공법 등에 의해 액상화 가능 토심보다 깊게 설치하는 방법 등을 통하여 대체할 수 있으므로 제약조건에서 제외한다.

최적화에 필요한 알고리즘은 이산화변수의 최적설계에 적합한 마이크로 유전 알고리즘(micro genetic algorithm; μ GA)을 사용한다. 일반적으로 GA는 설계환경에 적합도가 큰 개체를 탐색하는 적합도함수의 최대화 문제이므로 재래의 수학적 계획문제를 정식화하는 것만으로는 GA에 적합하지 않다(김, 2001). 그러므로 수학적 계획문제의 제약조건을 정규화하여 위배량을 고려하고, GA에 적합한 비제약 최대화문제로 변환하기 위하여 적합도함수를 정의하여 최적화과정을 수행한다.

설계된 어초에 대하여 적합도함수의 수렴성을 검토하고, 안정성에 관련된 제약조건 of 안전율을 산정하여 그 최적성을 검토한다. 사각어초와 복합공간형 사각어초의 안정성과 목적함수를 비교하고, 수심, 파고-주기, 및 시설량 등의 변화에 따른 목적함수의 변화를 고찰하여 설계의 효율성을 검증한다. 그리고 복합공간형 사각어초의 설계자료 구축을 위해, 외력환경조건으로써 수심, 파고, 주기, 시설량, 시설면적 등의 변화를 주어 실제 해역에 필요한 인공어초의 기본제원을 결정한다.

2. 인공어초의 개요

2.1 인공어초의 정의와 기능

인공어초는 인공적으로 해저나 해중에 구조물을 설치하여, 수산생물을 보호, 육성하는 것을 목적으로 하는 어장 시설물이다. 인공어초 어장은 어류 등의 수산생물이 암초, 침몰선 등에 모이는 성질을 이용하여, 대상 수산생물의 어획증대, 조업의 효율화 및 보호 육성을 도모하기 위하여 인공어초를 계획적으로 배치하여 조성한 어장이다(한국자원재생공사, 2001).

인공어초 어장의 기능은 크게 휴식장, 먹이장, 산란장으로 나누어 볼 수 있다. 인공어초가 이러한 기능들을 갖추기 위하여 내부구조나 형태가 대상생물이 서식하기에 적합하고, 인공어초의 내·외부에서의 흐름을 제어할 수 있어야 한다.

현재까지 어초의 시설효과가 입증되어 어초사업의 대상어초로 선정된 인공어초는 11종이며, 그 중에서도 사각어초가 시설·개수·시설면적·시설비 등 모든 면에서 전체의 60%이상을 차지하고 있다(국립수산진흥원, 2000). 사각어초는 매몰 및 유실될 우려가 없고, 와류현상이 잘 일어나 집어효과가 좋으며, 자원 배양의 역할이 좋은 것으로 보고되고 있다(강원도, 1997). 따라서 사각어초를 이용하거나 응용하여 어장의 효율성을 증대시킬 수 있는 연구가 필요하다.

2.2 어류의 어초성 분류

어초성은 어초에 대한 정위의 형태에 의해 3가지형으로 분류할 수 있으며, I 형은 어초에 몸의 대부분 혹은 일부분을 접촉시키는 어종, II 형은 몸을 어초에 접촉시키지는 않지만 어초 저면 및 윗부분의 주변을 유영하는 어종, III 형은 어초로부터 떨어진 표·중층수역에 머무르는 어종으로 분류된다(국립수산진흥원, 2000). 어류의 유집효과 증대를 위한 주된 인자로 I 형 어종은 시설량, II 형 어종은 어초의 측면의 투영면적 또는 시설면적 그리고 III 형 어종은 어초의 시설높이 및 시설면적 등이다.

2.3 인공어초 어장의 구성

Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 국내의 인공어초 어장은 어초단체(reef unit), 단위어초(reef set) 및 어초군(reef group)으로 구성한다. 어초단체는 어초어장 구성에 쓰이는 1개의 어초구조물이며, 단위어초는 어업생산의 단위로서 안정된 효과를 발휘하는 최소 규모의 어초어장이다. 어초군은 단위어초가 서로 관련되는 범위(어획의 유효범위, 어군의 이동 가능한 거리와 유형의 영향 범위 등)에 배치된 어초어장이다. 어초대(reef zone)는 단위어초와 어초군을 총괄 범위 내에 계획적으로 배치하고, 생산의 증대, 안정 및 조업의 효율화를 도모하기 위한 광역적인 어장이다. 어초대를 구성하는 어초군은 그 자체로서 독립된 어장으로서 기능을 한다(국립수산진흥원, 2000).

어초어장의 조성규모는 어선의 수용능력으로부터 면적을 산정하고, 대상생물의 행동, 생태특성, 대상 어법의 조업형태 등으로부터 단위면적당 어초 필요량을 검토하여 결정한다. 규모가 결정되면 어떤 형태로 시설할 것인가가 중요하다. 즉, 어초 시설높이, 중첩상태, 집중 혹은 산발시설 등 평면적 넓이 등은 어초어장에서의 생산성 향상에 중요한 요소이다.

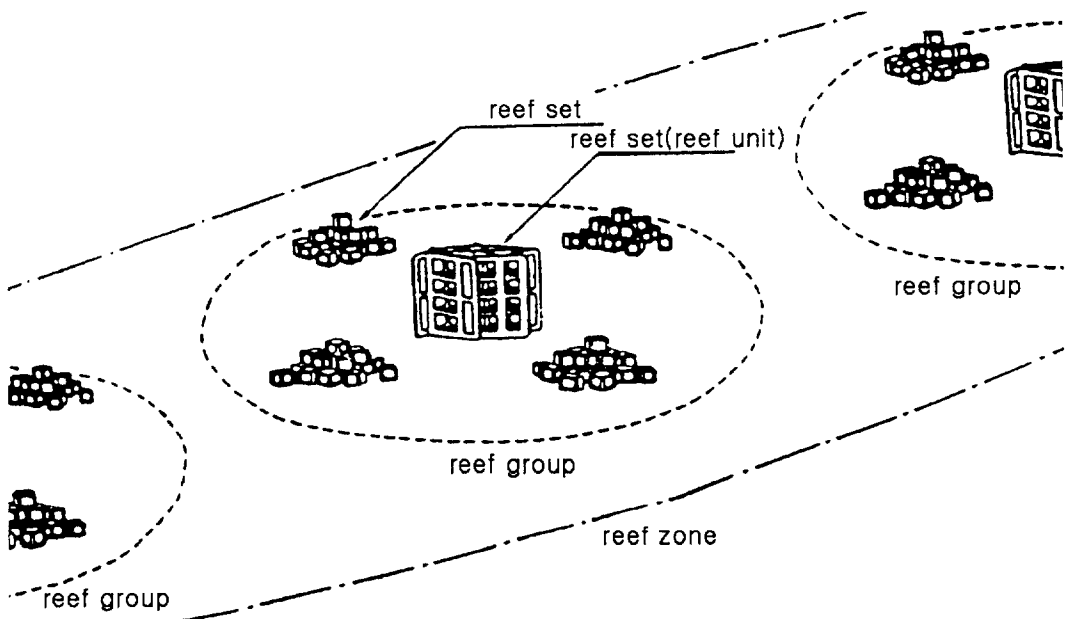


Fig. 2.1 Deployment plan of fishing ground by artificial reefs

어초단체의 선정은 대상생물에 대한 기능성, 내구성, 경제성, 조업성 등을 종합적으로 검토하여 결정하는데, 어초의 주변을 이용하는 어종에서는 어초부채간 거리가 1m 이하의 간격에서 $2 \times 2 \times 2\text{m}$ 의 간격까지 유효하지만 어종에 따라서는 2m의 간격에서는 효과가 없는 것도 있다. 일반적으로 어초부채간 최대간격은 1.5m, 최소부채 폭은 0.15m가 한계수치이고 자극면적이 크고 복잡한 구조, 그리고 높이가 있고, 표층 및 중층까지 유동환경에 변화를 주는 구조가 좋다.

단위어초는 1개의 어초단체로 구성되어 있는 것과 복수의 어초단체로 구성되어 있는 것이 있어 전자를 단체초, 후자를 군체초로 표현하는 경우도 있다. 단위어초의 구조는 어종에 따라서 길보기용적(공간 m^3), 측면에 대한 투영면적 또는 시설면적 그리고 높이 등이 각각 필요하다. 그러므로 측면 투영면적을 크게 하는 데는 분산하여 배치하는 것이 유리하며, 시설높이는 수심의 1할 이상이 좋다.(국립수산진흥원, 2000).

단위어초에 필요한 시설량은 위집효과를 고려하여 성어를 대상으로 하는 어획용 어초의 경우 필요한 증산량에 대하여 인공어초의 공 m^3 당 어획량을 나눈 값으로 결정할 수 있다.

단위어초의 시설면적은 평면적으로 분산시켜 시설하는 것을 의미하며, 어초의 평면적 유효공간의 형성에는 어초를 밀집시켜 시설할 경우 어초의 측면이 표면적의 증가에 영향을 주지 못할 뿐만 아니라 해수유동에 대한 벽면저항의 효과를 갖지 못하게 된다. 이는 결과적으로 생물에 대한 자극발생 기능을 현저히 떨어뜨리게 된다. 그러나 너무 분산하여 배치하면 환경자극도 분산되고, 효과도 감소하므로 해저면의 넓이를 투영면적의 20배 이내로 하는 것이 바람직하다(국립수산진흥원, 2000).

국내에서 시설되고 있는 단위어초의 배치형태는 현수투하에 의한 3~4단 상적, 현수거치에 의한 1~2단 상적 또는 1단배열 등이다. 조성된 단위어초는 해양파랑이나 흐름에 의한 어초의 유실, 부등침하로 인한 상적된 어초의 활동이나 전도 때문에 그 쌓여진 상태가 다소 불규칙하고, 조성 당시의 상태에 비하여 분산 정도가 심하게 나타난다(강원도, 1997). 이러한 문제점들은 어초단체가 안정성을 확보하지 못하여 발생하며, 어장조성에 필요한 기능성 확보에 어려움이 따른다. 이것은 단위어초의 조성목적에 적합하며, 안정성을 확보할 수 있도록 어초단체가 충분한 높이와 넓이를 가지고, 시설형태를 상적이 아닌 1단으로 배열하여 정밀 시공함으로써 해결 가능하다.

3. 인공어초의 설계

3.1 설계과정

인공어초의 일반적인 설계 및 안정성 평가의 흐름은 Fig. 3.1과 같다. 여기서, 인공어초의 설계에 필요한 인자들은 기능성과 안정성의 두 부분으로 분류할 수 있으며, 기능성으로는 인공어초의 구조 및 형상, 어초의 높이, 부재의 치수 및 부재간의 간격 등의 인자이며, 안정성으로는 어초단체의 활동, 전도, 침하, 세굴, 매몰, 액상화, 내구성 등의 인자들을 고려할 수 있다.

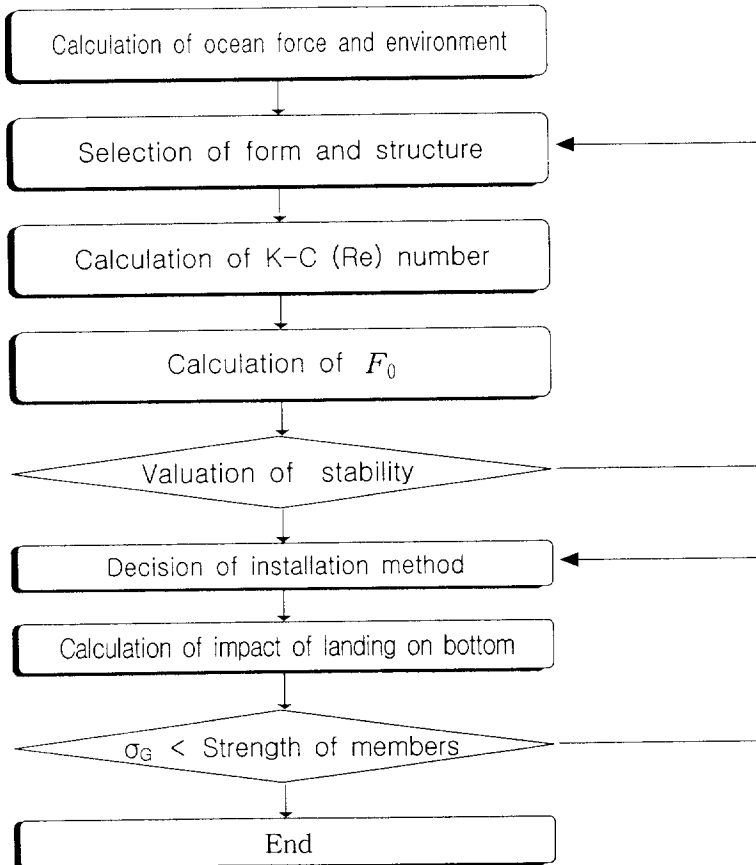


Fig. 3.1 Design and stability evaluation of artificial reef.

설계된 인공어초를 이용하여 단위어초를 구성함에 있어서 시설높이, 배치형태 및 배치간격 등을 조절하는 것은 어초어장의 효율성 증대에 중요한 요소로 작용한다.

사각어초의 경우 와류현상이 잘 일어나 집어효과가 좋으며, 자원 배양의 역할이 좋은 것으로 보고되고 있다. 하지만, 단위어초를 구성하기 위하여 수심이 깊은 곳에서는 기능성 확보를 위하여 2단 또는 3단 이상으로 상적하여야 하며, 필요로 하는 높이로 상적하여 시설할 경우 안정성을 확보하기 어려워 외력이 크게 작용하는 곳에서는 사용하기 곤란하다. 그러므로, 단위어초의 구성에 적합한 인공어초의 설계를 위하여 대상생물에 적합한 구조를 조합 가능한 형태로 선정하고, 높이 또는 크기를 조절하기 위하여 단위어초의 구성에 필요한 인자들인 시설량, 시설면적, 시설높이 그리고 배치형태 및 배치간격 등을 어초단체의 설계인자로 활용하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 기능성 확보를 위하여 단위어초의 구성인자들인 시설량, 시설면적, 시설높이, 그리고 배치형태 및 배치간격 등을 설계인자로 활용하고, 안정성 확보를 위하여 활동, 전도 그리고 내구성을 설계인자로 고려하여, Fig. 1.1과 같이 사각어초를 조합한 형태인 복합공간형 사각어초를 설계한다. 여기서, 일반적으로 사용되어지는 설계조건인 설치후의 침하, 세굴이나 액상화 등을 고려할 경우 어초의 형상 변화에 따른 기능성에 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 설계인자는 지질의 치환에 의한 투수성의 제고, 사석에 의한 상재하중의 증대로 지반중의 유효응력을 증대시키는 방법 및 시설물의 기초지지부를 말뚝공법 등에 의해 액상화 가능 토심보다 깊게 설치하는 방법 등을 통하여 대체할 수 있으므로 제약조건에서 제외한다.

3.2 작용외력의 산정

3.2.1 유체력의 산정

유체력의 산정에 필요한 요소는 파랑, 조류의 속도 등을 들 수 있다. 우리나라 동해안 및 외해에 접한 해역의 50년주기 설계파고는 1959년 내습한 태풍 Sarah의 기상조건으로부터 추산하는 것이 일반적이다. 이 태풍 Sarah의 조건하에서 Willson법으로 추산한 심해파에 대한 설계파고는 $H_{0.1/3} = 9m \pm 3m$, 설계파주기는 $T_{0.1/3} = 13sec \pm 2sec$ 의 범위로 계산된다(류, 1986). 본 연구에서는 인공어초가 시설된 해역의 특성 등을 고려하여 Table 3.1에서 주어진 심해파의 파고 및 주기를 설계자료로 활용한다.

Table 3.1 Calculation of design wave

Deep sea wave	
$H_{0\ 1/3}$ (m)	$T_{0\ 1/3}$ (sec)
5	10
8	12
10	13
12	15

심해파의 파고 및 주기는 천수변형만 고려하여 수심변화에 따른 파고, 파장변형을 고려하였으며, 식(3.1), 식(3.2)로부터 계산한다.

$$\frac{H}{H_0} = \left[\left\{ 1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right]^{-1/2} \quad (3.1)$$

$$\frac{L}{L_0} = \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (3.2)$$

여기서, H_0 는 심해파고, L_0 는 심해파장, H 는 파고, L 는 파장, h 는 수심이다.

조류의 속도는 실측에 의하여 구하거나, 표면유속으로부터 추산한다. 일반적으로 어초시설해역의 최대유속이 1m/sec 내외이므로, 설치수심에서의 유속은 0.5m/sec로 가정하여 설계자료로 활용한다.

어초에 작용하는 유체력(F_0)은 식(3.3)으로 나타낼 수 있다.

$$F_0 = F_D (\sin \theta + \alpha)^2 - F_M \cos \theta \quad (3.3)$$

식(3.3)에서 어초에 작용하는 유체력(F_0)을 최대로 하는 위상각 θ 를 구하고, 여기에 대응하는 F_D 를 계산한다. 그러나 근사적으로 항력에 대해서는 파랑의 속도(u_m)와 조류속도(u_0), 관성력에 대해서는 파랑로 취급하면 약간의 안전측 수치로서 식(3.4)와 같이 수정할 수 있다.

$$F_0 = F_D + \frac{F_M^2}{4F_D} \quad (3.4)$$

$$\text{여기서, } F_D = \frac{C_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot u^2}{2g}, \quad F_M = \frac{2\pi \cdot C_M \cdot V \cdot \rho \cdot u}{gT}$$

$$u_m = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{\cosh 2\pi \cdot D/L}{\sinh 2\pi h/L} = u - u_0$$

C_D : 항력계수, C_M : 겉보기 질량계수, A_f : 어초의 흐름방향의 투영면적,
 ρ : 해수비중, g : 중력가속도, T : 파랑주기, V : 어초의 실용적, H : 파고,
 L : 파장, h : 어초의 시설수심이다.

3.2.3 마찰력 및 충격력의 산정

해저지질과 관련된 성질은 마찰계수, 지반반력계수 등을 고려하며, 연약지반층 두께에 관해서는 보링조사에 의한 것도 바람직하다.

활동에 대한 안정계산에 사용되는 정지마찰계수는 일반적으로 0.5 ~ 0.8의 범위를 나타내며, 본 연구에서는 어초에 사용되어지는 재료가 콘크리트인 점을 감안하여 설계자료로 0.6을 사용한다. 지반반력계수는 사질에서 1600~5000t/m², 점토에서 2100~6300t/m²의 값을 가지며, 어초시설지역을 감안하여 5000t/m²를 설계자료로 활용한다.

인공어초를 시설높이에서 자유낙하시켰을 때의 낙하속도는 中村(1975)이 제안한 식(3.5), 식(3.6)을 사용한다.

종단속도를 v_c 라 하면

$$v_c = \sqrt{\frac{2gV}{C_D A_t} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right)} \quad (3.5)$$

여기서, A_t : 흐름에 대한 차영면적(m^2)

v_c : 중력과 저항이 같아 등속도운동일 때의 종단속도(m/sec)

V : 어초의 실용적(m^3)

g : 중력가속도(m/sec^2)

C_D : 항력계수, C_M : 겉보기 질량계수

C_{MA} : 부가질량계수($C_{MA} = C_M - 1$)

σ : 어초 재료의 밀도(t/m^3)

ρ : 해수의 밀도(t/m^3)이다.

시설높이에서부터 수심 h 까지 낙하할 때의 속도 v_k 는

$$v_k = v_c \left[1 - \exp \left\{ - \frac{2gh(\sigma/\rho - 1)}{(\sigma/\rho + C_{MA})v_c^2} \right\} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

이 된다. 설치방법에 따라서 낙하 높이는 달라진다. 우리나라의 일반적인 시설방법은 현수거치에 의하며, 우리나라 근해의 연중 유의파고는 1m 전후이므로, 낙하높이를 1m로 가정하여 낙하속도를 결정한다.

착저시의 충격력은 어초의 무게, 충돌시의 속도, 착저기반의 반력계수 및 충돌면의 형상에 의해 결정된다.

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{gK_R}{(n+1)w_0 V} \\ M &= g \left(\frac{\sigma_G}{w_0} - 1 \right) - \frac{C_D A}{4V} v_0^2 \\ N &= \left(\frac{\sigma_G}{w_0} + C_{MA} \right) \frac{v_0^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

이라 놓으면

$$L\epsilon_0^{n+1} - M\epsilon_0 - N = 0 \quad (3.8)$$

ϵ_0 의 제 r 근사치를 ϵ_r 이라 쓰면

$$\epsilon_1 = \left(\frac{N}{L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_{r+1} = \epsilon_r - \frac{L\epsilon_0^{n+1} - M\epsilon_r - N}{(n+1)L\epsilon_0^{n+1} - M} \quad (3.10)$$

으로써 ϵ_r 의 수속치 ϵ_0 를 구할 수 있다.

착저 충격시 어초의 응력계산을 행하는 경우에는 어초의 단위체적중량을 증가시키므로써 계산할 수 있다. 이 단위용적 중량을 정환산중량이라고 부르고 $\bar{\sigma}_G$ 로 나타내면 식(3.11)에서

$$R_0 = K_R \epsilon_0^n = \bar{\sigma}_G V \quad (3.11)$$

라고 쓸 수 있기 때문에(ϵ_0 에 대응하는 기반반력을 R_0 라고 쓴다)

$$\bar{\sigma}_G = \frac{K_R \epsilon_0^n}{V} \quad (3.12)$$

이 된다.

기반반력을 나타내는 식(3.13)은 토질역학의 문제이지만, 사각어초의 공중낙하실험에서 K_R 의 값은 대략 다음 식을 취한다. 지반면에 착지할 때 $n = 2$ 가 되고

$$R_0 = K_R \epsilon_0^2 \quad (3.13)$$

여기서, K : 기반의 반력계수(t/m^2), w_0 : 해수의 단위체적중량(t/m^3)

v_0 : 충돌직전의 낙하속도(m/sec), C_{MA} : 부가질량계수,

R : 기반의 충돌시의 반력(ton), ϵ : 기반의 충격시의 변위(m)이다.

인공어초가 해저에 착저한 경우의 정환산 단위 체적중량 σ_G 가 구해지면, 이것을 자중으로 한 응력계산을 행하게 된다. 외력이 정해지면 응력계산은 특수한 것이 아니고, 일반적인 구조역학에 의하면 된다.

사각어초가 해저에 착지한 경우에 대한 어초부재에 작용하는 등분포하중은 식(3.14)으로 나타낼 수 있다.

$$q = a \bar{\sigma}_G \quad (3.14)$$

여기서, a 는 어초부재의 단면적이다.

3.3 기능성의 검토

3.3.1 어초의 구조

어초의 구조는 대상생물의 행동특성에 적합한 기능을 가져야 한다. 어초단체의 선정은 대상생물에 대한 기능성, 내구성, 경제성, 조업성 등을 종합적으로 검토하여 결

정하는데, 어초의 주변을 이용하는 어종에서는 어초부재간 거리가 1m 이하의 간격에서 $2 \times 2 \times 2\text{m}$ 의 간격까지 유효하지만 어종에 따라서는 2m의 간격에서는 효과가 없는 것도 있다. 일반적으로 어초부재간 최대간격 1.5m, 최소부재 폭 0.15m가 한계수치이고 자극면적이 크고 복잡한 구조 그리고 높이가 있고, 표층 및 중층까지 유동환경에 변화를 주는 구조가 좋다.

3.3.2 단위어초의 시설량

어초어장을 조성함에 있어서, 주 대상어종을 I형으로 생각할 경우, 단위어초에 필요한 시설량을 결정한 상태에서 어초어장을 구성할 수 있다. 이 경우, 어초단체를 주 대상어종에 대한 어초성의 특성인자를 고려하여 조합 가능한 형태나 구조를 선정할 수 있으며, 기능성 증대를 위하여 II·III형 어종에 대한 특성인자 중 어초단체의 크기와 관련된 인자들을 추가하고, 안정성을 고려함으로써 어초단체를 설계할 수 있다. 예를 들어 어장조성을 I·II·III형을 모두 고려한 어장을 조성할 때, I형은 시설량, II형은 시설면적 그리고 III형은 어초의 높이만을 고려한다고 가정하면, 어초의 높이와 안정성을 고려하여 어초단체의 크기를 결정할 수 있고, 설계된 어초의 배치형태를 결정하고, 간격을 충분히 이격시킴으로써 어장의 효율을 증대시킬 수 있다. 하지만, 시설량을 결정한 상태에서 어초를 설계하는 것은 어초단체의 크기를 제한하게 되며, 일반적으로 어초단체는 부재의 치수를 늘리기보다는 어초단체의 크기를 크게 하는 것이 기능성 및 안정성의 확보에 유리하며, 어초단체가 커질 경우 시설량은 늘어나므로, 계획된 시설량을 최소시설량으로 설계인자화하여 단위어초를 설계하는 것이 필요하다. 이것을 식(3.15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{설계된 시설량}(M') \geq \text{계획된 시설량}(M) \quad (3.15)$$

3.3.3 단위어초의 시설면적

단위어초의 구조는 I형 어류에 있어서는 곁용적, II형 어류에 대해서는 포락면적, III형 어류는 높이가 각각 필요하다. I, II형 어류에 대하여 포락면적을 크게 하기 위해서는 분산하여 배치하는 것이 유리하다. 지나치게 분산하여 시설하게 되면 어초에서 유발되는 환경자극도 분산되어 효과가 감소되기 때문에 평면적 시설면적은 해저에 시설된 어초 투영면적의 20배 이내가 바람직하다고 할 수 있으며 식 (3.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$20 \times \text{어초의 투영면적} \geq \text{시설면적}(A) \quad (3.16)$$

3.3.4 배치간격

어초단체간의 간격은 어초 배후의 후류와동특성과 어초의 유집기구를 충분히 고려하여 어초 기능상 가장 효율적인 어초배치를 계획하는 것이 바람직하다.

일반적으로 배치간격은 어초의 크기와 비례하는 값을 가지며, 시설면적을 크게 하기 위해서는 분산하여 배치하는 것이 유리하나, 지나치게 분산하여 시설하면 어초에서 유발되는 환경자극도 분산되기 때문에 어류의 특성과 해양외력환경 등을 충분히 고려하여 배치간격을 정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 어초의 높이에 4 ~ 5배 정도가 적절한 것으로 보고 설계자료로 이용하며, 이것을 수식으로 표현하면 식(3.17)과 같다.

$$4D \leq \text{어초단체간 배치간격} \leq 5D \quad (3.17)$$

여기서, D 는 어초의 높이이다.

3.3.5 어초의 높이

착저식어초 높이는 대상해역과 대상생물에 따라 다르다. 柿元(1968)에 의하면 저서성 어류의 경우, 어초의 높이는 어류의 위집에 중요한 요소가 되지 못하며, 평면적으로 가능한 한 넓게 시설하여 어느 정도의 면적을 확보하는 것이 유리하다. 회유성 어류의 경우 어초의 시설규모, 넓이, 높이 등 모든 면에 있어서 큰 편이 집어효과가 높다고 보고하고 있다. 또한 三好(1964)는 어류를 집어시키기 위해서는 수심에 대하여 어초의 높이가 수심의 1할 정도가 바람직하다고 하였다. 회유성 어류는 저서성 어류보다 내유 어군량이 많지만, 체류시간이 짧기 때문에 어군을 유치하여, 체류시간을 연장시키기 위해서는 어느 정도 어초를 높게 시설하는 것이 중요하며 식(3.18)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D \geq 0.1 h \quad (3.18)$$

3.4 안정성의 검토

3.4.1 활동에 대한 안정성

어초단체가 활동하지 않는 조건은 어초에 작용하는 유체력(F_0) 보다도 해저와 어초의 마찰저항이 크면 안전하다고 할 수 있으므로 식(3.19)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W > \frac{F_0}{\mu \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} \times S_{F1} \quad (3.19)$$

여기서, W : 어초의 공중중량, μ : 어초와 해저와의 마찰계수,
 σ : 어초에 사용된 재료의 밀도, S_{F1} : 활동에 대한 안전율이다.

3.4.2 전도에 대한 안정성

어초가 전도하지 않을 조건은 전도에 대한 저항모멘트가 모멘트보다 크거나, 수중에서 어초의 자중 및 작용하는 유체력(F_0)의 작용선이 저면에 있으면 안전하다고 할 수 있다. 이것을 수식으로 나타내면 식(3.20)과 같다.

$$W > \frac{l_A \cdot F_0}{l_w \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} \times S_{F2} \quad (3.20)$$

여기서, l_A : 정사영면의 도심까지의 높이,
 l_w : 어초단체의 회전중심으로부터 중심까지의 수평거리,
 S_{F2} : 전도에 대한 안전율이다.

3.4.3 내구성

(1) 휨강도(M_n)

사각어초의 경우, 강도설계법에 의한 부재의 해석에서 어초의 부재가 인장철근과 압축철근의 단면적이 같은($A_s = A_s'$) 복철근 직사각형 단면의 보이므로 단철근 직

사각형보와 같이 응력을 계산할 수 있으며, 어초 부재의 단면이 발휘하는 휨강도를 공칭 휨강도를 M_n 로 나타낸다. 공칭휨강도 M_n 에 감소계수 ϕ_M 를 곱한 값 $\phi_M M_n$ 을 설계강도라고 한다. 따라서 부재가 휨에 대하여 안전하기 위해서는 다음 식이 만족되어야 한다.

$$M_r \leq \phi_M M_n \quad (3.21)$$

여기서, M_r : 휨모멘트,

$$M_n = 0.85 f_s A_s \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad a = \frac{f_y A_s}{0.85 f_{ck} b},$$

$\phi_M = 0.85$: 휨에 대한 감소 계수, f_y : 철근의 항복강도,

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도, b : 부재단면의 폭,

A_s : 주철근의 단면적, d : 단면의 유효높이이다.

(2) 전단강도(V_n)

어초 부재의 단면이 발휘하는 전단강도를 공칭 전단강도를 V_n 로 나타낸다. 공칭 전단강도 V_n 에 감소계수 ϕ_V 를 곱한 값 $\phi_V V_n$ 을 설계강도라고 한다. 따라서 부재가 전단에 대하여 안전하기 위해서는 다음 식이 만족되어야 한다.

$$V_r \leq \phi_V V_n \quad (3.22)$$

여기서, V_r : 전단력, $\phi_V = 0.8$: 전단에 대한 감소계수이다.

단면의 공칭전단강도는 다음식으로 계산된다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.23)$$

여기서, V_c : 콘크리트가 부담하는 공칭 전단강도

V_s : 전단 철근이 부담하는 공칭 전단강도이다.

콘크리트가 부담하는 전단강도를 시방서에서는 다음 식으로 하고 있다.

$$V_c = 0.53\sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (3.24)$$

여기서 b_w = 단면의 복부폭, d = 단면의 유효높이이다.

또한, 어초의 부재에서 전단철근을 수직스트립으로 전단보강하였을 경우 전단철근이 부담하는 공칭전단강도는 아래와 같다.

$$V_s = \frac{f_y A_v d}{s} \quad (3.25)$$

여기서, s : 스트립의 간격

A_v : 전단철근의 단면적이다.

(3) 축하중 강도

어초단체의 수직부재를 중심축하중을 받는 단주로 가정할 경우 극한 상태에서 최대 축하중강도 P_n 는 다음과 같다.

$$P_n = 0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (3.26)$$

여기서, $A_g = b^2$ = 기둥의 단면적

A_{st} = 기둥의 축방향 총철근량이다.

그러나 이론상으로는 중심축하중만을 받는 기둥이라도 여러 가지 원인에 의하여 예상하지 못한 모멘트가 작용하는 경우가 있으므로 모든 기둥은 최소 편심 e_{min} 을 가지고 설계한다. 이에 대하여 시방서에서는 최소 편심을 취하는 대신 위의 극한하중을 띠철근 단주에서는 80% 정도로 낮추어 계산한다.

$$P_n = 0.8[0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (3.27)$$

축하중에 대하여 안전하기 위하여 다음식을 만족하여야 한다.

$$P_r \leq \phi_P P_n \quad (3.28)$$

여기서, P_r : 축하중, ϕ_P : 축하중강도의 감소계수이다.

4. 최적설계화 과정

4.1 설계최적화 모형

일반적인 설계최적화 모형은 등호제약조건과 부등호제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 설계변수벡터를 찾는 것이다. 이를 표준화된 설계최적화의 모형으로 정의하면 최적설계문제는 다음의 식(4.1)과 같이 정식화할 수 있다.

Find

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (4.1)$$

to minimize

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.2)$$

subject to

$$h_i(x) = h_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, p \quad (4.3)$$

$$g_j(x) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i \leq 1, m \quad (4.4)$$

여기서 x 는 n 차원 설계변수벡터이고, $f(x)$ 는 목적함수, $h_i(x)$ 는 등호제약함수, $g_j(x)$ 는 부등호제약함수, p 는 등호제약함수의 개수, m 은 부등호제약조건의 개수가 된다.

4.2 마이크로 유전 알고리즘

GA를 이용한 최적설계에는 식(4.1)과 같은 제약 최소화문제를 직접적으로 사용할 수 없다. GA는 비제약 최적화문제에 적합한 알고리즘이기 때문이다. 그러나 현재의 문제는 제약 최적화문제이므로 이를 풀기 위해 비제약문제로 변환할 필요가 있다. 그 구성의 기본원리는 목적함수와 제약조건함수를 사용하여 복합함수의 형태를 구성하는 것인데 제약조건의 위배에 대하여 복합함수를 제재하므로 위배가 많으면 벌칙도 크게 된다. 그러나 GA는 탐색공간에서 집단적 탐색을 행하므로 벌칙함수법이나 장애함수법과 같은 전통적인 변환법은 GA에 충분하지 않다(Rajeev & Krishnamoorthy, 1992). 그러므로 본 연구에서는 정규화된 제약조건의 위배를 근거로 식(4.1)으로부터 다음식과 같은 변환된 목적함수를 적용한다.

$$\phi(x) = f(x) \times (1 + rC) \quad (4.5)$$

여기서, $f(x)$ 는 목적함수, r 은 벌칙함수의 증가계수이고, C 는 위배계수로 식(4.6)과 같다.

$$C = \sum_{j=0}^m \max(0, g_j^+(x)) \quad (4.6)$$

여기서, $g_j^+(x)$ 는 정규화된 제약조건으로 양의 값을 가지는 j 번째 제약함수의 값이다.

식(4.2)으로부터 GA에 적합한 수학적 정식화는 식(4.7)과 같이 정의한다.

$$\text{maximize } F(x) = K - \phi(x) \quad (4.7)$$

여기서, $F(x)$ 는 적합도함수이고, K 는 제약최소화문제를 비제약 최대화문제로 변환하기에 충분히 큰 수이다.

GA가 기존의 알고리즘과 구분 짓는 몇 가지 특징들은 문제의 파라미터를 직접 이용하기보다는 이를 적절히 기호표현(symbolic representation)하여 이용하며, 하나의 해를 다루기보다는 집단을 취급한다. 최적해를 찾기 위하여 이득함수(payoff function) 또는 목적함수(objective function)값만을 필요로 하고, 연속성(continuity), 미분가능성(differentiability), 단봉성(unimodality) 등과 같은 다른 보조정보를 요구하지 않는다. 유전 연산자들을 사용하며, 얻어진 결과는 결정적이기 보다는 확률적이다.

SGA는 해를 찾는 능력이 강건하여 아직도 GA를 이용한 최적설계에 가장 많이 사용되고 있는 기법이다. 그러나 SGA는 연산시간을 줄이기 위해 집단의 크기를 작게 유지하면 유전적 부동에 의해 개체들의 특정 비트가 어느 한 대립인자로 고정될 가능성이 높아 만족스러운 탐색성능을 얻기가 힘들다. 이 때문에 작은 집단을 효율적으로 다루기 위해서는 적절한 연산자나 탐색전략이 필요하다(진, 2000). 이 때문에 본 연구에서는 초기에 설계가 수렴되는 것을 피하게 하고 최적설계에 근접한 설계로 빨리 수렴시키게 하는 특징을 가진 μ GA를 사용한다.

μ GA는 Krishnakumar에 의해 제안된 방법으로 단순유전알고리즘(simple GA; SGA)과 거의 유사하나 다음과 같이 구별되는 특징이 있다. μ GA에서는 재생산 연산자로 토너먼트 선택을 사용한다. 교배 연산자는 1점교배와 균일교배를 채용하고 있으며, 전자의 경우는 교배확률이 1.0으로 후자의 경우 교배확률이 0.5로 고정된다. 교배 후 새로이 생성된 모집단에 대해 수렴되었는지를 검토하는데, 그 수렴기준은 최적 개체와 나머지 개체들의 염색체 비트끼리 비교하여 서로 다른 비트 수가 전체 비트 수의 5%미만인 경우 수렴하였다고 한다. 또한 돌연변이 과정이 생략되고 엘리트 선택을 사용하여 집단 내 하나의 염색체를 최적개체로 관리하며, 그 나머지 염색체들은 최적 개체와 임의의 그룹을 형성하여 토너먼트 선택으로 경쟁을 통해 적합도가 큰 것이 선택되도록 함으로써 모집단의 나머지 부분을 채운다. 이러한 유전 연산자와 엘리트 선택을 통해 집단은 계속적으로 진화해 가는데 어느 한 점 가까이로 진화하게 되면 새로운 연산자를 산출하기 위해 재시동 된다. 이 재시동의 원리를 응용하여 초기설계를 모두 무작위 선택이 아니라 적어도 하나의 개체를 유용영역내의 설계로써 가정할 수도 있다.

4.3 최적설계 문제의 정식화

4.3.1 설계변수

본 연구에서는, 현재까지 연구되어진 결과들을 토대로, Fig. 4.1 및 Fig. 4.2에서 보는 바와 같이 복합공간형 사각어초에 대하여 어초의 높이(x_1), 어초의 넓이(x_2), 수평부재의 높이(x_3), 수직부재의 부재의 넓이(x_4) 그리고 Fig. 4.3과 같이 바둑판형으로 배치하였을 경우, 한 변 방향으로 시설되는 어초의 개수(x_5)를 설계변수로 설정한다. 복합공간형 사각어초는 철근콘크리트로 구성하며, 사각어초에서 사용되어지는 철근과 동일한 철근을 사용한다고 가정하여, 주철근 및 전단철근의 직경(ϕ)은 1.03cm를 사용한다. 그리고 전단철근은 수직스트립으로 사용하며, 간격은 40cm으로 한다.

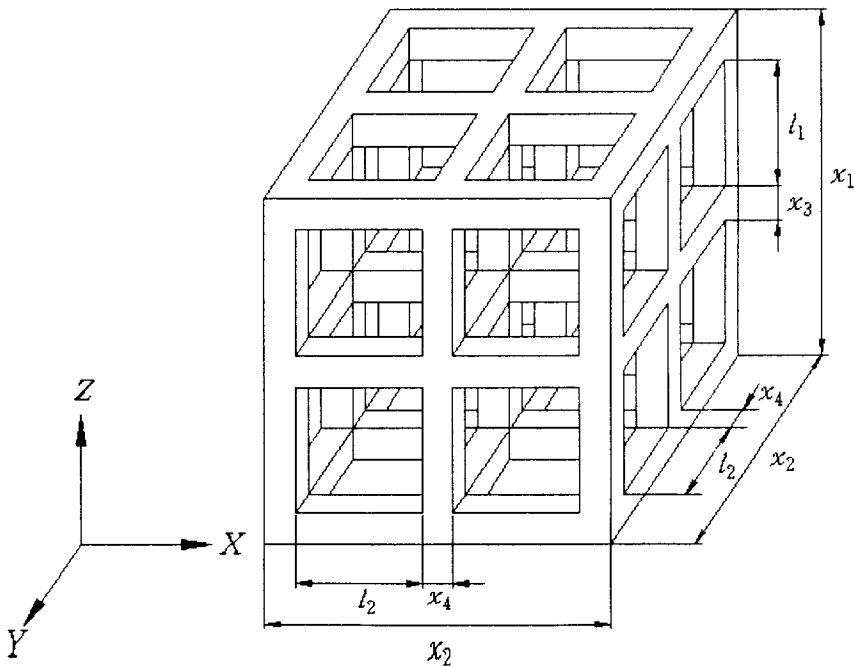


Fig. 4.1 Design variable of MCC-type artificial reef.

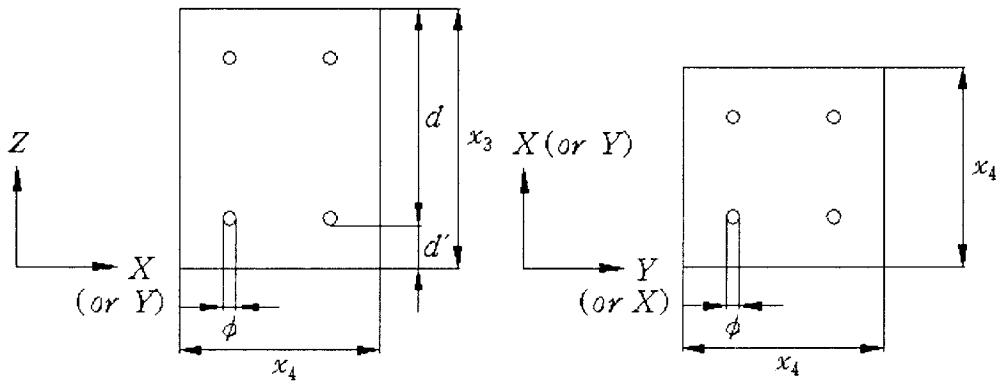


Fig. 4.2 Cross-section of members in MCC-type artificial reef.

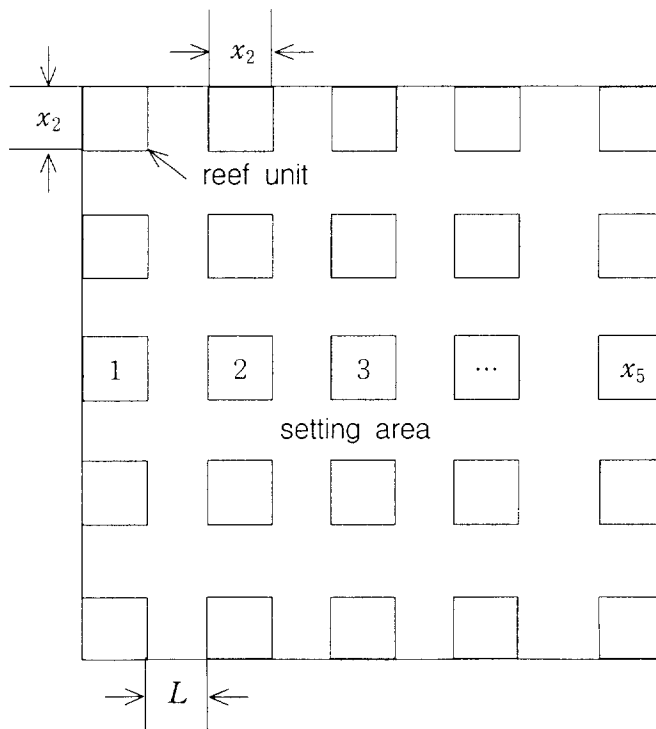


Fig. 4.3 Deployment of reef unit in a reef set (Checker board type).

4.3.2 목적함수

어초단체를 제작할 때 사용되어지는 재료의 량이 어장조성에 필요한 비용과 직접 비례한다고 가정할 경우, 최소비용으로 안정성과 기능성을 갖춘 단위어초를 구성하기 위하여 단위어초에 사용된 재료의 총 중량을 목적함수로 두어, 그 중량이 최소가 되도록 최적설계를 수행한다. 목적함수 $f(x)$ 를 설계변수의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$f(x) = x_5^2 [(n_2 + 1)^2 x_1 x_4^2 + 2(n_1 + 1)(n_2 + 1)x_2 x_3 x_4 - 2(n_1 + 1)(n_2 + 1)^2 x_3 x_4^2] \quad (4.8)$$

여기서, n_1 , n_2 는 어초의 수직부재와 수평부재의 등간격 수이다.

4.3.3 제약함수

제약함수는 어초의 기능성에 관한 제약조건과 안정성에 관한 제약조건으로 분류할 수 있으며, 기능성에 관한 제약조건으로는 어초의 구조, 단위어초의 시설량 및 시설면적, 어초의 배치간격, 어초의 높이 그리고 어초부재의 두께 및 간격 등이며, 안정성에 관한 제약조건은 어초의 활동, 전도 그리고 내구성 등이다.

(1) 기능성

i) 단위어초의 시설량(M)

어초어장의 시설량은 해역의 성어를 대상으로 하는 어획용 어초의 경우 필요한 증산량÷인공어초어장의 공용적(m^3)당 어획량의 형태로 시설량을 결정할 수 있으며, 시설량을 설계변수의 함수로 표현하면 식(4.9)와 같다.

$$g_1(x) = \frac{M}{x_1 x_2^2 x_5^2} - 1 \leq 0 \quad (4.9)$$

ii) 단위어초의 시설면적(A)

평면적 시설면적은 20배의 투영면적의 개념을 사용한 단위조성면적으로부터 식(4.10)과 같이 정식화한다.

$$g_2(x) = \frac{A}{20x_2^2x_5^2} - 1 \leq 0 \quad (4.10)$$

iii) 어초의 배치간격(L)

배치간격은 상한값과 하한값을 어초의 높이의 4 ~ 5배가 단위어초의 효율성이 가장 높다고 가정하여 식(4.11) 및 식(4.12)과 같이 정식화한다.

$$g_3(x) = \frac{4x_1(x_5 - 1)}{(\sqrt{A} - x_2x_5)} - 1 \leq 0 \quad (4.11)$$

$$g_4(x) = \frac{(\sqrt{A} - x_2x_5)}{5x_1(x_5 - 1)} - 1 \leq 0 \quad (4.12)$$

iv) 어초의 높이

어초의 높이는 III형어류에 대하여 수심의 1할 이상일 때 가장 좋은 효과를 보이므로 최소한계값을 수심의 1/10으로 두며, 상한값은 수심의 1/2로 두고 정식화한다.

$$g_5(x) = \frac{h/10}{x_1} - 1 \leq 0 \quad (4.13)$$

$$g_6(x) = \frac{x_1}{h/2} - 1 \leq 0 \quad (4.14)$$

v) 어초부재의 두께

어초의 부재 두께의 한계수치인 $0.15m$ 를 하한값으로 두며, 상한값은 시공성 등을 고려하여 $0.46m$ 를 상한값으로 두어 정식화한다.

$$g_7(x) = \frac{0.15}{x_3} - 1 \leq 0 \quad (4.15)$$

$$g_8(x) = \frac{x_3}{0.46} - 1 \leq 0 \quad (4.16)$$

vi) 단위어초 한변방향의 어초의 최소개수

단위어초를 바둑판형으로 배치할 경우, 단위어초내에 필요한 한변방향의 어초의 개수는 2 ~ 9로 두어 식(4.17) 및 식(4.18)과 같이 정식화한다.

$$g_9(x) = \frac{2}{x_5} - 1 \leq 0 \quad (4.17)$$

$$g_{10}(x) = \frac{x_5}{9} - 1 \leq 0 \quad (4.18)$$

vii) 어초단체의 부재간격

어초주변을 이용하는 어종에서는 어초 부재간 거리가 1m이하의 간격에서 2m까지 유효하지만, 일반적으로 최대간격은 1.5m으로 두며, 어초의 효율성을 고려하여 최소값은 1.0m로 두어 식(4.19) ~ 식(4.22)과 같이 정식화한다.

$$g_{11}(x) = \frac{x_1 - x_3(n_1 + 1)}{1.5 n_1} - 1 \leq 0 \quad (4.19)$$

$$g_{12}(x) = \frac{1.0 n_1}{x_1 - x_3(n_1 + 1)} - 1 \leq 0 \quad (4.20)$$

$$g_{13}(x) = \frac{x_2 - x_4(n_2 + 1)}{1.5 n_2} - 1 \leq 0 \quad (4.21)$$

$$g_{14}(x) = \frac{1.0 n_2}{x_2 - x_4(n_2 + 1)} - 1 \leq 0 \quad (4.22)$$

(2) 안정성

i) 활동

어초단체가 파력 및 조류력에 대하여 안정하기 위해서는, 활동에 대한 안전계수는 1.2보다 작지 않아야 한다. 이것을 정식화하면 식(4.23)과 같다.

$$g_{15}(x) = \frac{1.2F_0}{\mu W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} - 1 \leq 0 \quad (4.23)$$

$$\text{여기서, } F_0 = F_D + \frac{F_M^2}{4F_D},$$

$$F_D = \frac{C_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot u^2}{2g}, \quad F_M = \frac{2\pi \cdot C_M \cdot V \cdot \rho \cdot u}{gT}$$

$$A_f = (n_2 + 1)((n_2 + 1)x_1x_4 + (n_1 + 1)x_2x_3) - (n_1 + 1)(n_2 + 1)^2x_3x_4 + (n_1 + 1)(n_2 + 1)x_3x_4$$

$$V = (n_2 + 1)x_1x_4^2 + 2(n_1 + 1)(n_2 + 1)x_2x_3x_4 - (n_1 + 1)(n_2 + 1)^2x_3x_4^2$$

$$W = \sigma V \text{ 이다.}$$

ii) 전도

활동과 마찬가지로 전도에 대하여서도 전도에 안전율 1.2를 곱한 값보다 작지 않아야 한다. 이것을 정식화하면 식(4.24)과 같다.

$$g_{16}(x) = \frac{1.2F_0}{W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} \cdot \frac{l_A}{l_W} - 1 \leq 0 \quad (4.24)$$

$$\text{여기서, } l_A: \frac{x_1}{2}, \quad l_W: \frac{x_2}{2} \text{ 이다.}$$

iii) 휨모멘트

휨모멘트를 받는 부재는 환산단위 체적중량 σ_G 가 구해지면, 착지면에 접하고 있는 부재에 대한 휨모멘트의 경우에 대하여 고려할 수 있다. 이 경우에 대하여 공칭 휨모멘트강도가 저항모멘트강도보다 크도록 식(4.25)과 같이 정식화한다.

$$g_{17}(x) = \frac{M_r}{\phi_M M_n} - 1 \leq 0 \quad (4.25)$$

$$\text{여기서, } M_r = \frac{q l_2^2}{8}$$

$$q = \frac{\bar{\sigma}_G}{A_b} \cdot x_4: \text{착지면에 접하는 부재의 단위길이당 전달되는 하중}$$

$$A_b(x) = 2x_2 x_4 (n_2 + 1) - x_4^2 n_2^2: \text{어초의 착지면의 면적이다.}$$

iv) 전단력

전단력에 대해서도 휨모멘트와 마찬가지로 지면에 접한 부재의 전단력의 경우에 대하여 식(4.26)과 같이 정식화한다.

$$g_{18}(x) = \frac{V_r}{\phi_V V_n} - 1 \leq 0 \quad (4.26)$$

$$\text{여기서, } V_r = \frac{q l_2}{2}$$

v) 축하중

복합공간형 사각어초에서 축하중강도는 수직부재의 자중과 그 수직부재에 연결된 수평부재의 개수의 자중을 더한 값을 환산단위 체적중량으로 환산하여 식(4.27)과 같이 정식화한다.

$$g_{19}(x) = \frac{P_r}{\phi_P P_n} - 1 \leq 0 \quad (4.27)$$

$$\text{여기서, } P_r = q x_1 + 2 n_1 q l_2 \text{ 이다.}$$

5. 최적설계의 적용예

5.1 설계문제

설계예에 대한 설계변수와 제약조건은 Table 5.1에 나타내었다. 설계예 1은 Fig. 4.1~Fig. 4.3에서와 같이 어초의 높이와 넓이, 어초부재의 넓이와 높이 그리고 단위어초의 배치형태를 바둑판형으로 하였을 경우 한 변 방향으로 시설되는 어초의 개수를 모두 설계변수로 설정하고, 제약함수는 식(4.9)~식(4.27)을 모두 고려하여 복합공간형 직사각어초의 최적설계를 수행한다. 설계예 2는 시공성을 고려하여 설계변수 중 어초의 높이와 넓이, 어초부재의 넓이와 높이를 각각 같이 묶으므로써 설계변수연계(design variable linking)하며, 제약조건은 설계예 1과 같이 고려하여 복합공간형 정사각어초의 최적설계를 수행한다. 설계예 3에서 설계변수는 설계예 2와 같이 고려하고, 제약조건은 복합공간형 사각어초에서 가장 지배적인 제약조건인 활동을 완화시키기 위하여 어초의 착지면에 해저 마찰력이 충분히 커지도록 Shoe를 장치한 복합공간형 사각어초에 대하여 최적설계를 수행한다.

Table 5.1 Design variables and constraints for design cases

Design case	Design variables	Constraints	Number of design variables	Remark
Rectangular MCC-type	x_1 : height of artificial reef x_2 : width of artificial reef x_3 : height of bar x_4 : width of bar x_5 : number of artificial reefs	setting area total enclosed volume of reefs clear distance between the reefs length of member sliding / overturing binding / shear / axial	5	
Square MCC-type	x_1 : height and width of artificial reef x_2 : height and height of bar x_3 : number of artificial reefs	setting area total enclosed volume of reefs clear distance between the reefs length of member sliding / overturing binding / shear / axial	3	
Square MCC-type with Shoes	x_1 : height and width of artificial reef x_2 : height and height of bar x_3 : number of artificial reefs	setting area total enclosed volume of reefs clear distance between the reefs length of member overturing binding / shear / axial	3	Shoe

해양외력환경은 인공어초의 설계에 큰 영향을 미치므로 설계영역에 대하여 세분화하여 최적설계에 적용할 필요가 있으며 그 범위와 간격은 Table 5.2와 같다. 사용재료와 재료특성치는 콘크리트표준시방서를 근거로하여 Table 5.3에 나타내었다.

Table 5.2 Input data for external force and environment

External force and environment	Values			
Depth of water of design (m)	20, 30, 40, 50, 60			
Height of design wave (m)	5	8	10	12
Period of design wave (sec)	10	12	13	15
Velocity of tide (m/sec)	0.5			
Coefficient of subgrade reaction (ton/m^2)	5000			
Friction factor	0.6			

Table 5.3 Input data for material property

Material property	Value
Concrete compressive strength	210 (kg/cm^2)
Yield strength of reinforcement	3500 (kg/cm^2)
Area of main reinforcement	2.53 (cm^2)
Area of Shear reinforcement	2.53 (cm^2)
Stirrups interval	40 (cm)
Unit weight of concrete	2.5 (ton/m^3)

복합공간형 사각어초의 최적설계를 위하여 집단의 크기는 5, 반복수(N)는 해양외력환경에 따라 1000세대에서 30000세대까지 변화를 주었다. 적합도함수의 정식화에서 고려되는 매개변수 K 와 r 값은 비제약 최대화문제에 적합하도록 각각 70,000과 10으로 두었다.

5.2 설계예 1: 복합공간형 직사각어초

설계에 필요한 자료로 최소화할 목적함수는 단위어초에 시설되어지는 어초의 재료의 총 중량으로 설정하였으며 식(4.8)과 같다. 설계변수는 어초의 높이와 넓이가 수심에 따라 상한치와 하한치가 변화하게 되며, 그 값은 Table 5.4에 나타내었다. 그리고, 제약조건은 식(4.9) ~ 식(4.27)에서와 같이 기능성에 대하여 단위어초의 시설량(M), 단위어초의 시설면적(A), 어초단체의 배치간격(L), 어초단체의 부재의 간격(l_1, l_2) 등이며, 안정성에 대하여 활동, 전도, 휨모멘트, 전단, 축하중 등이다. 제약조건에 대한 식은 Table 5.5에 나타내었다.

그리고, 시설량의 변화에 따른 목적함수 및 설계변수의 변화를 고찰하기 위하여 Table 5.6과 같이 각 수심별로 시설량에 변화를 주었으며, 복합공간형 직사각어초에서 시설면적은 $10000(100\text{ m} \times 100\text{ m})\text{ m}^2$ 로 고정하여 최적설계하였다.

Table 5.4 Design variables and substring lengths for design case 1

Design variable	Lower bound (m)	Upper bound (m)	Substring length
Height of artificial reef (x_1)	6	12.3	6
	5	11.3	
	4	10.3	
	3	9.3	
	2	8.3	
Width of artificial reef (x_2)	5	11.3	6
	4	10.3	
	3	9.3	
	2	8.3	
	2	8.3	
Thickness of vertical member (x_3)	0.15	0.46	5
Thickness of horizontal member (x_4)	0.15	0.46	5
Numbers of artificial reef (x_5)	2	9	3

Table 5.5 Constraints for optimum design case 1

Constraints	
Total enclosed volume of reefs	$g_1(x) = \frac{M}{x_1 x_2^2 x_5^2} - 1 \leq 0$
Setting area	$g_2(x) = \frac{A}{20 x_2^2 x_5^2} - 1 \leq 0$
Clear distance between reefs	$g_3(x) = \frac{4x_1(x_5 - 1)}{(\sqrt{A} - x_2 x_5)} - 1 \leq 0$
	$g_4(x) = \frac{(\sqrt{A} - x_2 x_5)}{5x_1(x_5 - 1)} - 1 \leq 0$
Length of member	$g_5(x) = \frac{x_1 - x_3(n_1 + 1)}{1.5 n_1} - 1 \leq 0$
	$g_6(x) = \frac{1.0 n_1}{x_1 - x_3(n_1 + 1)} - 1 \leq 0$
	$g_7(x) = \frac{x_2 - x_4(n_2 + 1)}{1.5 n_2} - 1 \leq 0$
	$g_8(x) = \frac{1.0 n_2}{x_2 - x_4(n_2 + 1)} - 1 \leq 0$
Sliding	$g_9(x) = \frac{1.2 F_0}{\mu W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} - 1 \leq 0$
Overturing	$g_{10}(x) = \frac{1.2 F_0}{W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} \cdot \frac{l_A}{l_w} - 1 \leq 0$
Flexural strength	$g_{11}(x) = \frac{M_r}{\phi M_n} - 1 \leq 0$
Shear strength	$g_{12}(x) = \frac{V_r}{\phi V_n} - 1 \leq 0$
Axial strength	$g_{13}(x) = \frac{P_r}{\phi P_n} - 1 \leq 0$

Table 5.6 Input data for total enclosed volume of reefs

Water depth (m)	Total enclosed volume of reefs (m ³)				
60	3000	3500	4000	4500	5000
50	2500	3000	3500	4000	4500
40	2000	2500	3000	3500	4000
30	1500	2000	2500	3000	3500
20	1000	1500	2000	2500	3000

5.2.1 최적성 검토

복합공간형 직사각어초는 복합공간형 사각어초의 일반적인 형태이며, 최적설계 결과는 Appendix A.1.1 ~ A.1.5에 나타내었다. 최적설계된 어초의 최적성을 검토하기 위하여 적합도함수의 이력상태를 확인하고, 수심 및 파고-주기의 변화에 따른 제약함수의 값을 비교하였다. 그리고 사각어초와 복합공간형 직사각어초를 비교하고, 시설량 및 파고-주기의 변화에 따른 목적함수의 변화를 고찰하여 설계된 어초의 효율성을 검토하였다.

목적함수가 최소값을 나타내는 세대수는 $N = 76 \sim 30,000$ 세대까지 진행된 후 최소값에 도달하였으며, 설계예(Appendix A.1.5, 시설량(M) $2500 m^3$, 파고5 m-주기10 sec)에서 적합도함수의 이력상태는 Fig. 5.1에서 보는 바와 같이 수렴하는 것을 확인할 수 있었으며, 설계예의 모든 경우에서 수렴하였다.

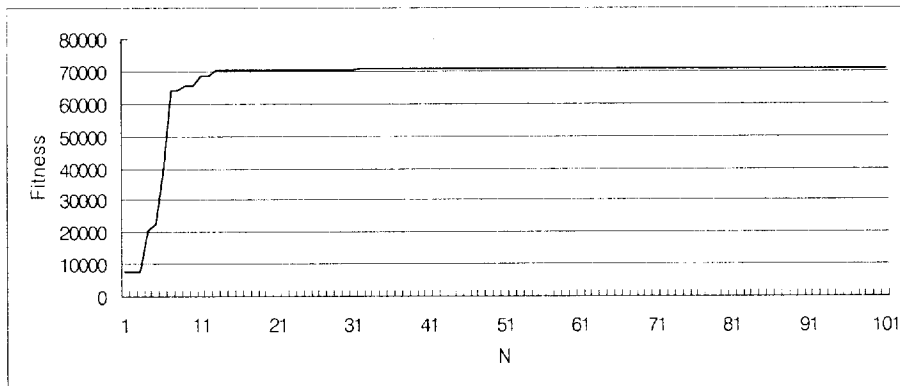


Fig. 5.3 Design history of the artificial reef.

Table. 5.7에서는 Appendix A.1.1, A.1.3 및 A.1.5에서 파고-주기의 변화에 따른 제약조건의 변화를 고찰하였다. 수심 60m에서 파랑5m-주기10sec 및 파랑8m-주기12sec인 경우에 대하여 활동, 전도 및 내구성에 대하여 별다른 영향을 미치지 않으며, 파랑 10m-주기13sec 이상인 경우 그리고 수심이 40m이하에서 활동이 안전율이 1에 가까운 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 목적함수값이 더 이상 감소하지 않고 수렴한다는 것을 의미하며, 다방향 직사각어초의 최적설계를 위한 제약조건의 주된 지배인자임을 확인할 수 있었다. 다른 제약조건들은 1.32 ~ 16.67의 안전율을 보였다.

Table 5.7 Effect of $h-H-T$ for Design case 1

Water depth (m)	Wave height-period (m - sec)	Stability				
		sliding	overturing	bending	shear	axial
60	5 - 10	2.94	4.55	1.32	1.72	8.33
	8 - 12	1.23	1.92	1.32	1.72	8.33
	10 - 13	1.01	1.56	1.96	2.27	6.25
	12 - 15	1.01	1.67	1.45	1.92	5.26
40	5 - 10	1.28	2.70	1.39	2.00	10.00
	8 - 12	1.00	1.79	2.04	2.50	8.33
	10 - 13	1.00	1.79	2.86	3.33	5.26
	12 - 15	1.01	1.92	1.89	2.63	11.11
20	5 - 10	1.01	2.08	3.85	3.85	14.29
	8 - 12	1.00	2.22	1.59	1.89	7.69
	10 - 13	1.00	3.03	2.33	3.13	16.67
	12 - 15	no solution				

5.2.2 사각어초와 복합공간형 직사각어초의 비교

사각어초의 안정성을 검토하기 위하여 어초단체에 대한 활동, 전도에 대해 식 (3.19) ~ 식(3.20)을 사용하여 안전율을 계산하였으며, 사각어초와 복합공간형 직사각어초의 기능성을 비교하기 위하여 계획된 시설량(M)을 시설하였을 경우에 대하여 사용되어진 재료의 총 중량, 그리고 설계된 시설량(M')을 비교하였으며, 그 결과는 Table. 5.8과 같다.

사각어초의 경우, 수심 40m에서는 파고5m-주기10sec, 수심 60m에서는 파고5m-주기10sec ~ 파고10m-주기13sec에서 설치가능함을 확인할 수 있었으며, 국내에서 사각어초는 20m~40m정도의 수심에서 시설되기 때문에, 수심 40m, 설계파고 5m 및 주기 10sec 이하에서 설치 가능하다.

복합공간형 직사각어초의 경우 설치수심 20m, 파고12m-주기15sec에서는 제약조건을 만족하는 설계가 되지 않았으며, 수심 40m 이상에서 재료의 량이나 시설규모에 대해서 사각어초에 비하여 개선된 결과를 얻었으나, 수심 20m에서 파고8m-주기12sec 이상에서 필요로 하는 시설규모를 만족하기 위하여 과다한 재료의 량이 필요한 것을 알 수 있다. 따라서 파고-주기가 크고, 수심이 얇은 곳에서는 일반적인 착저식 어초를

시설하는 것은 안정성을 확보하기 어려우며 이에 대한 개선 방법이 필요하다.

Table 5.8 Stability and costs of cube-type and MCC-type

Water depth (m)	Wave height-period (m-sec)	cube-type artificial reef				MCC-type artificial reef			
		stability		Cost. (m^3)	M (m^3)	stability		Cost. (m^3)	M' (m^3)
		sliding	overturing			sliding	overturing		
20	5 - 10	0.78	1.30	175	1000	1.01	2.08	175	1013
	8 - 12	0.32	0.53			1.00	2.22	450	1184
	10 - 13	0.20	0.33			1.00	3.03	918	2277
	12 - 15	0.13	0.22			no solution			
40	5 - 10	2.00	3.33	350	2000	1.28	2.70	108	2116
	8 - 12	0.83	1.38			1.00	1.79	192	2609
	10 - 13	0.53	0.88			1.00	1.79	300	2609
	12 - 15	0.33	0.55			1.01	1.92	478	2116
60	5 - 10	3.68	6.13	525	3000	2.94	4.55	141	3010
	8 - 12	1.58	2.63			1.23	1.92	141	3010
	10 - 13	1.01	1.68			1.01	1.56	182	3010
	12 - 15	0.60	1.00			1.01	1.67	303	3948

5.2.3 시설량의 변화에 따른 목적함수의 변화

수심, 파고-주기를 고정시키고 시설량에 변화를 경우에 대하여 최적설계결과는 Appendix A.1.1, A.1.3, 및 A.1.5에 나타내었으며, 목적함수의 최적치는 Fig. 5.2 ~ Fig. 5.4과 같다. 수심 60m에서 시설량이 1.67배 증가하여도 목적함수값이 파고-주기에 따라서 1.45 ~ 1.13배의 증가율을 보이며, 수심이 얕을수록 목적함수값의 증가율은 둔화되어 수심20m에서는 시설량이 3배로 증가하여도 목적함수값은 1.05 ~ 1.59배의 증가율을 보여 수심이 얕아질수록 시설량이 증가율이 커져도 목적함수의 증가율은

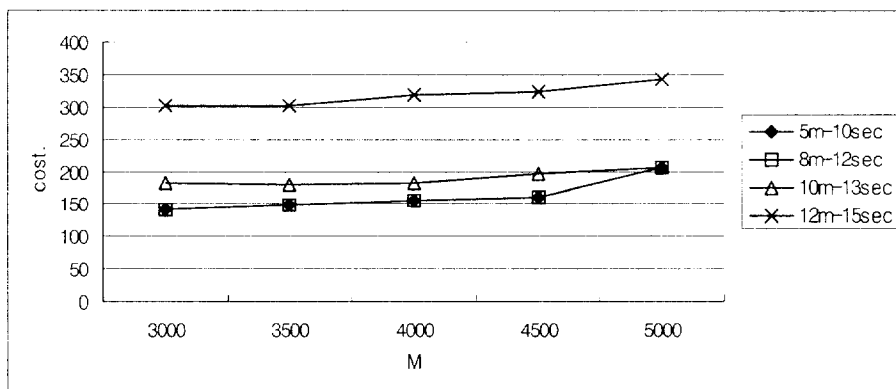


Fig. 5.2 Variation of $C - M$ curve due to $H - T$ for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 60 \text{ m}$

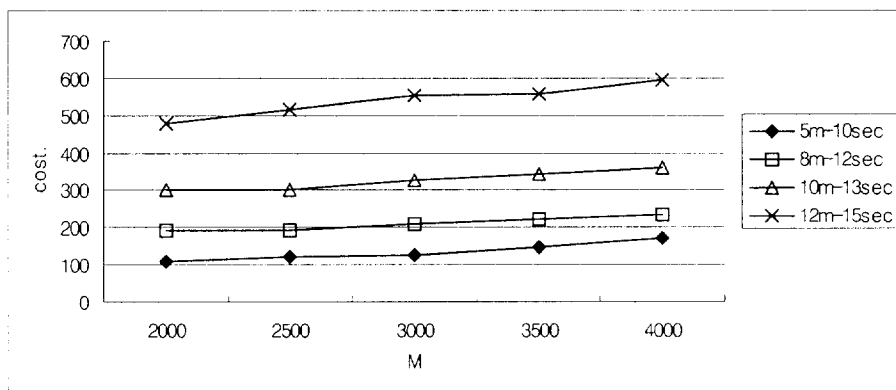


Fig. 5.3 Variation of $C - M$ curve due to $H - T$ for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 40 \text{ m}$

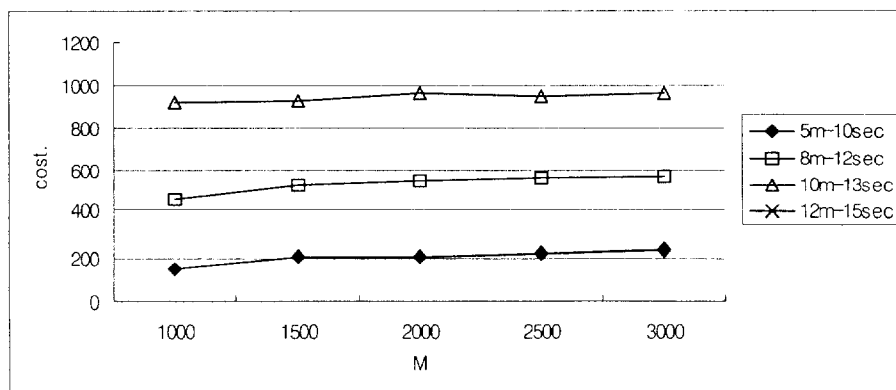


Fig. 5.4 Variation of $C - M$ curve due to $H - T$ for $A = 10000 \text{ m}^2$ and $h = 20 \text{ m}$

감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이 경우 시설량에 증가하면 어초의 높이(x_1)와 넓이(x_2)는 증가하는 경향을 보이며, 어초 부재의 두께(x_3 , x_4)는 감소하는 경향을 보인다. 즉, 시설량을 증가시키더라도 목적함수(비용)의 증가폭은 크지 않으며, 공용적내의 유효공간은 더욱 커지므로 효율성은 더욱 커진다. 그러므로 어초를 대형화시키는 것이 기능성면에서 유리하다.

5.2.4 파고-주기의 변화에 따른 목적함수의 변화

수심, 시설량을 고정시키고 파고-주기를 변화시킨 경우에 대하여 최적설계결과는 Appendix A.1.1, A.1.3, 및 A.1.5에 나타내었으며, 목적함수의 최적치는 Fig. 5.5 ~ Fig. 5.7에 나타내었다.

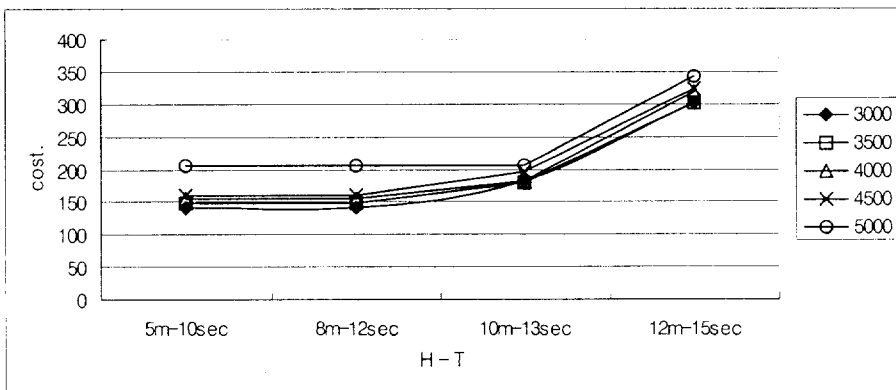


Fig. 5.5 Variation of $C-H-T$ curve due to M for $A = 10000 m^2$ and $h = 60 m$

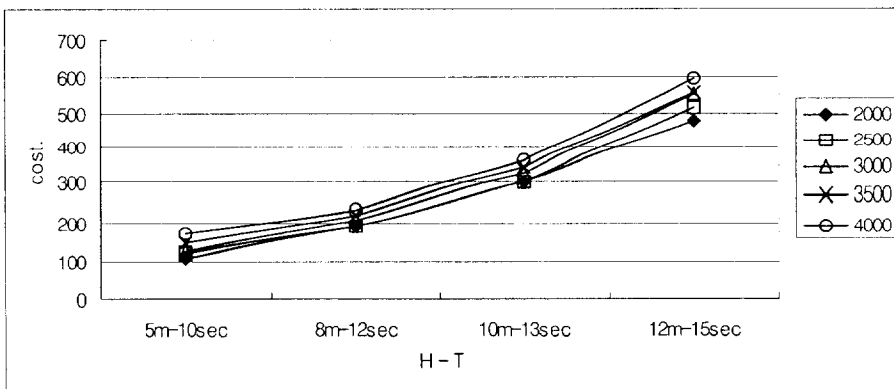


Fig. 5.6 Variation of $C-H-T$ curve due to M for $A = 10000 m^2$ and $h = 40 m$

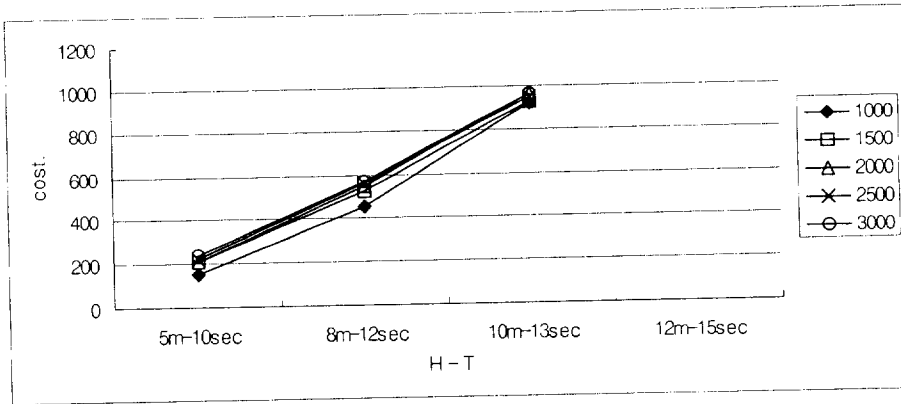


Fig. 5.7 Variation of $C-H-T$ curve due to M for $A = 10000 m^2$ and $h = 20 m$

목적함수값은 파고-주기가 커질수록 민감하게 반응하여, 수심 60m에서는 증가율이 2배 정도이며, 수심 20m에서는 4배 이상의 값을 나타낸다. 수심이 얕아질수록 그 증가율은 더욱 커짐을 알 수 있다. 그리고 수심 20m, 파고12m-주기15sec에서는 시설량에 상관없이 제약조건을 만족하는 결과값을 얻을 수 없었다. 이 경우에 대하여 설계 변수의 변화를 살펴보면, 어초의 높이와 넓이의 변화는 규칙적이지 않으며, 어초 부재의 단면적($x_3 \times x_4$)이 목적함수의 증가율에 비례하여 증가한다.

5.3 설계예 2: 복합공간형 정사각어초

설계에 필요한 자료로 목적함수는 식(5.1)과 같다.

$$f(x) = x_3^2 [3(n_1 + 1)^2 x_1 x_2^2 - 2(n_1 + 1)^3 x_2^3] \quad (5.1)$$

설계변수는 Table 5.9에 나타내었으며, 제약함수는 Table 5.10과 같다. 시설량에 대한 제약조건은 어초의 최소높이($h/10$)와 시설면적(A)에 대한 제약조건에 의해 결정되는 최소시설량만을 고려하였고, 단위어초의 시설면적을 $10000 m^2 (100 m \times 100 m)$, $8100 m^2 (90 m \times 90 m)$, $6400 m^2 (80 m \times 80 m)$, $4900 m^2 (70 m \times 70 m)$, $3600 m^2 (60 m \times 60 m)$, 그리고 $2500 m^2 (50 m \times 50 m)$ 의 여섯 가지 경우에 대하여 최적설계를 수행하였으며, 그 결과는 Appendix(A.2.1 ~ A.2.6)에 나타내었다.

Table 5.9 Design variables and substring lengths for design case 2 and design case 3

Design variable	Lower bound (m)	Upper bound (m)	Substring length
Height and width of artificial reef (x_1)	6	12.3	6
	5	11.3	
	4	10.3	
	3	9.3	
	2	8.3	
width and height of bar (x_2)	0.15	0.46	5
Numbers of artificial reef (x_3)	2	9	3

Table 5.10 Constraints for optimum design case 2

Constraints	
Total enclosed volume of reefs	$g_1(x) = \frac{M}{x_1^3 x_3^2} - 1 \leq 0$
Setting area	$g_2(x) = \frac{A}{20 x_1^2 x_3^2} - 1 \leq 0$
Clear distance between reefs	$g_3(x) = \frac{4 x_1 (x_3 - 1)}{(\sqrt{A} - x_1 x_3)} - 1 \leq 0$
	$g_4(x) = \frac{(\sqrt{A} - x_1 x_3)}{5 x_1 (x_3 - 1)} - 1 \leq 0$
Length of member	$g_5(x) = \frac{x_1 - x_2 (n_1 + 1)}{1.5 n_1} - 1 \leq 0$
	$g_6(x) = \frac{1.0 n_1}{x_1 - x_2 (n_1 + 1)} - 1 \leq 0$
Sliding	$g_7(x) = \frac{1.2 F_0}{\mu W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} - 1 \leq 0$
Overturing	$g_8(x) = \frac{1.2 F_0}{W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma}\right)} \cdot \frac{l_A}{l_w} - 1 \leq 0$
Flexural strength	$g_9(x) = \frac{M_r}{\phi M_n} - 1 \leq 0$
Shear strength	$g_{10}(x) = \frac{V_r}{\phi V_n} - 1 \leq 0$
Axial strength	$g_{11}(x) = \frac{P_r}{\phi P_n} - 1 \leq 0$

Table 5.11에서는 복합공간형 정사각어초에 대한 안정성을 검토하였으며, 복합공간형 직사각어초에서와 마찬가지로 설계의 주요 지배인자는 활동임을 알 수 있다. 그리고 어초의 횡강성이 수심 60m 및 40m에서의 파고12m-주기15sec, 그리고 수심 20m에서 파고8m-주기12sec에서 안전율이 1에 가까운 값을 나타내는데 이것은 부재의 두께(x_2)가 커질수록 안전율의 확보가 어려워짐을 알 수 있다.

Table 5.11 Effect of $h - H - T$ for design case 2

Water depth (m)	Wave height-period (m - sec)	Stability				
		sliding	overturing	bending	shear	axial
60	5 - 10	2.86	4.78	1.21	1.73	9.26
	8 - 12	1.21	2.02	1.21	1.73	8.26
	10 - 13	1.09	1.82	1.22	1.67	7.61
	12 - 15	1.06	1.77	1.07	1.52	6.51
40	5 - 10	1.62	2.7	1.35	2.21	8.47
	8 - 12	1.01	1.68	1.33	1.79	8.45
	10 - 13	1.02	1.70	1.39	1.75	7.65
	12 - 15	1.01	1.68	1.08	1.59	6.74
20	5 - 10	1.10	1.83	1.33	1.79	8.37
	8 - 12	1.01	1.68	1.09	1.62	6.86
	10 - 13	no solution				
	12 - 15					

5.4 설계예 3: Shoe가 있는 복합공간형 정사각어초

복합공간형 직사각어초와 복합공간형 정사각어초의 설계예에서 보는 바와 같이, 목적함수에 가장 큰 영향을 미치는 제약조건은 활동임을 알 수 있으며, 이를 해소하기 위하여 복합공간형 정사각어초의 저면에 Shoe를 부착하여 제약조건을 완화시켰을 경우에 대하여 최적설계를 수행하였다. 설계자료로 목적함수는 식(5.1)과 같으며, 설계변수는 Table 5.9와 같다. 제약함수는 Table 5.10에서 활동에 제약조건을 제외하였으며, 그 결과는 Appendix(A.3.1 ~ A.3.6)에 나타내었다.

Table 5.12에서 보는 바와 같이 활동에 대한 제약조건을 완화시켰을 경우, 안정성에 영향을 미치는 제약조건은 전도임을 확인 할 수 있다. 어초단체의 내구성에 관련된 제약조건은 파고-주기가 커져도 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

Table 5.12 Effect of $h-H-T$ for design case 3

Water depth (m)	Wave height-period ($m - sec$)	Stability			
		overturing	bending	shear	axial
60	5 - 10	4.76	1.20	1.72	8.33
	8 - 12	2.00	1.20	1.72	8.33
	10 - 13	1.28	1.20	1.72	8.33
	12 - 15	1.10	1.08	1.54	6.67
40	5 - 10	2.17	1.35	1.89	10.0
	8 - 12	1.12	1.35	1.59	9.09
	10 - 13	1.10	1.39	1.75	7.69
	12 - 15	1.08	1.39	1.75	7.69
20	5 - 10	1.04	1.30	1.82	9.09
	8 - 12	1.00	1.92	2.08	9.09
	10 - 13	1.03	1.35	1.82	8.33
	12 - 15	no solution			

복합공간형 직사각어초, 복합공간형 정사각어초 그리고 shoe가 있는 복합공간형 정사각어초의 설계예에서 변화를 비교하기 위하여 목적함수의 최적치를 Fig. 5.8 ~ Fig. 5.11에 나타내었다. 수심이 40m이상, 그리고 파고10m-주기13sec이하에서는 목적함수값이 차이를 보이지 않지만, 수심이 얕을수록, 그리고 해양외력환경이 커질수록 목적함수값은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

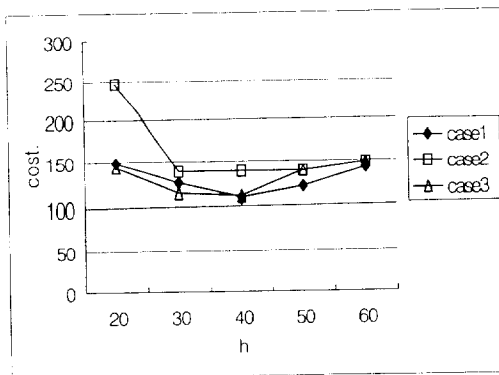


Fig. 5.8 Cost.-depth relation for 5m-10sec

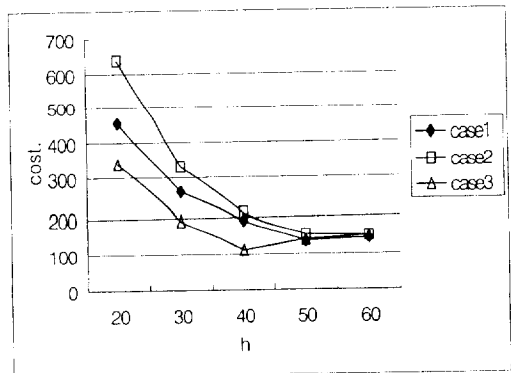


Fig. 5.9 Cost.-depth relation for 8m-12sec

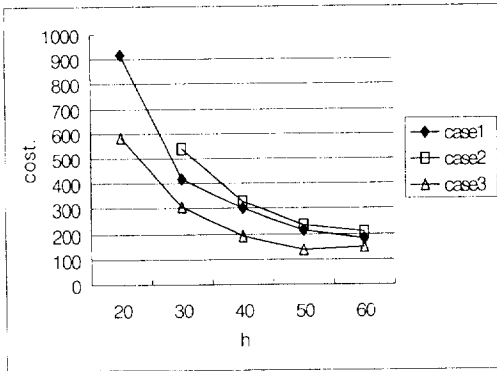


Fig. 5.10 Cost.-depth relation for 10m-13sec

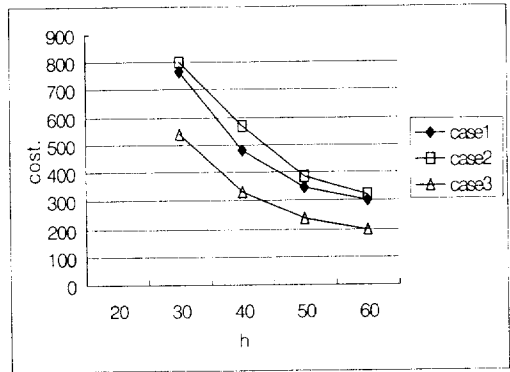


Fig. 5.11 Cost.-depth relation for 12m-15sec

각각의 설계예에서 목적함수값이 가장 크게 나타나는 경우는 복합공간형 정사각어초이며, 가장 작게 나타나는 경우는 Shoe가 있는 복합공간형 정사각어초이다. 이것은 해양외력환경이 열악할 경우, 활동 등에 대한 제약조건을 완화시킬 수 있는 어초의 설계가 유리하다고 판단된다. 그리고 수심이 20m이하이고, 파고12m-주기15sec이상인 경우 복합공간형 사각어초의 형태로는 조건을 만족하는 설계를 할 수 없다. 이 경우는 해양외력환경에 안정할 수 있는 구조 또는 형태의 어초설계가 필요하다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 현재 가장 많이 시설되는 사각어초의 단점을 보완한 새로운 복합공간형 어초로서 복합공간형 직사각어초, 복합공간형 정사각어초 및 Shoe를 장착한 복합공간형 정사각어초를 제안하였다. 그리고 복합공간형 사각어초의 설계를 위한 설계 최적화과정을 개발하였다.

설계에 필요한 설계변수는 어초의 높이와 넓이, 어초부재의 넓이와 높이, 그리고 단위어초를 바둑판형으로 시설하였을 경우 시설되는 어초의 한변방향의 어초의 개수로 하였다. 단위어초에 시설되어지는 어초의 재료의 총 중량을 목적함수로 설정하였으며, 목적함수가 최소가 되도록 최적화과정을 수행하였다. 그리고 제약함수는 기능성에 대하여 단위어초에 시설되어지는 어초의 시설량, 단위어초의 시설면적, 배치간격, 어초의 부재의 간격, 부재의 두께 등을 고려하였고, 안정성에 대하여 활동, 전도, 어초의 내구성(휨모멘트, 전단, 축하중) 등을 고려하였다.

최적화에 필요한 알고리즘은 이산화변수의 최적설계에 적합한 GA를 사용하였다. GA는 비제약 최적화 문제에 적합한 기법이므로 일반적인 수학적 정식화만으로는 GA를 사용할 수 없기 때문에 적합도함수 정식화를 하였다. 적합도함수를 위한 매개변수인 K 및 r 값은 비제약 최대화문제에 적합하도록 각각 70,000과 10으로 두었으며, r 값은 1000세대마다 10배씩 증가하도록 하였다. 재생산 방법으로 초우량개체에 의한 조기 수렴을 방지할 수 있는 토너먼트 선택을 사용하였다. 교배방법으로는 균일교배를 사용하였으며, 돌연변이 연산을 생략하고 엘리트 선택과 무작위 선택을 혼용한 μ GA를 사용하였다.

복합공간형 사각어초의 일반적인 형태인 복합공간형 직사각어초의 설계에서, 최적성을 검토하기 위하여 적합도함수의 수렴성을 검토하고, 안정성에 관련된 제약조건의 안전율을 산정하였다. 모든 설계예에서 적합도함수값이 수렴하였으며, 수심 20m, 파고 12m-주기15sec의 경우를 제외하고, 복합공간형 사각어초에 대하여 제약조건을 만족하는 최적결과를 얻었다. 복합공간형 사각어초의 효율성을 검증하기 위하여, 사각어초와 복합공간형 직사각어초의 안정성과 목적함수를 비교하였다. 사각어초의 경우 수심 40m에서는 파고5m-주기10sec이하, 수심 60m에서는 파고10m-주기13sec이하의 해역에서 설치 가능하였으며, 복합공간형 직사각어초가 사각어초에 비하여 훨씬 넓은 해역조건에서 설치 가능함을 확인하였다. 설치가능해역에서의 목적함수값을 비교하여 사각어초가 파고-주기에 따라 3~3.5배정도 크게 나왔다. 그러므로 제안된 설계방법이

효율적임을 알 수 있었다. 수심, 파고-주기, 및 시설량 등에 변화에 따른 목적함수의 변화를 고찰하였으며, 인공어초의 설계의 주된 해양외력환경 인자는 파고-주기이며, 시설량을 늘려도 목적함수값은 증가율이 낮음을 확인하였다.

시공성 등을 고려한 복합공간형 정사각어초의 최적설계에서 안정성에 관련된 제약 조건의 안전율을 산정 하였으며, 복합공간형 정사각어초에서와 마찬가지로 설계의 가장 지배적인 제약조건은 활동임을 확인하였다.

어초단체의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 제약조건인 활동을 완화시킨 Shoe가 달린 복합공간형 정사각어초 최적설계에서 활동에 대한 제약조건이 없는 경우 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 제약조건을 전도임을 확인하였다.

복합공간형 직사각어초, 복합공간형 정사각어초 그리고 Shoe가 있는 복합공간형 정사각어초에 대한 목적함수를 비교하였다. 목적함수값이 가장 크게 나타나는 경우는 복합공간형 정사각어초이며, 가장 작게 나타나는 경우는 Shoe가 있는 복합공간형 정사각어초이다.

위의 결과들로부터, 제안된 복합공간형 사각어초는 단위어초를 구성하기에 적합하며, μGA 를 이용한 설계 최적화기법은 효율적임을 확인하였다. 그리고 개발된 최적화 과정을 이용하여, 다양한 해양외력환경조건에 대하여 복합공간형 사각어초의 최적설계를 수행하여 실제 해역에 필요한 인공어초의 기본제원을 결정하였다.

참 고 문 헌

Carroll, D. L.(1996), "Genetic Algorithms and Optimizing Chemical Oxygen-Iodine Lasers", Developments in Theoretical and Applied Mechanics, Vol 18.

Goldberg, D. E.(1989), Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Weseley.

Rajeev, S., Krishnamoorthy, C. S.(1992), "Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms" Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 5, P350-358.

강원도(1997), 인공어초 시설사업 효과조사 연구.

건설교통부(1996), 도로교 표준시방서.

국립수산진흥원(2000), 통영해역 바다 목장화 연구개발 용역사업 1차보고서 -인공어초에 의한 어장 조성 모델 개발.

국립수산진흥원(2000), 인공어초 시설사업 교육교재, P74.

국립수산진흥원(1992). 한국 연안인공어초의 자원조성효과에 관한 연구, 국립수산진흥원 사업보고서 95호, 1-34.

김제현(2001), 유전 알고리즘을 이용한 강상형교의 최적설계, 부경대학교 해양공학과 석사학위논문, P68.

김창길(1999), 우리나라 인공어초 기술개발 수준과 금후 개발 방향. 기르는 어업의 실현을 위한 인공어초 개발 방향에 관한 인공어초 국제세미나. 한국해양수산개발원, 2/1-19.

류연선, 임오강, 박경진 공역(1994), 최적설계입문, 반도출판사.

류청로, 김현주, 이한수, 신동일(1997), "생태계 제어 시설물의 설계 및 배치 최적화 (2) -호름장에서의 인공어초 침하 및 매물특성-". 한수지, 30(1), 139-147.

류청로, 류연선(1987), "연안시설물의 안정성 및 기능해석에 관한 연구". 부산수대연보, 27(1), 51-88.

류청로, 류연선, 임기봉(1986), 인공어초의 규모와 배치에 관한 연구. 수진연구보고, 38, 1-24.

부산수산대학교 해양산업개발연구소(1994), 해양목장화를 위한 적정어초 및 설계기술 개발.

서성호(2000), 강제어초의 효율성에 관한 연구. 여수대학교 해양토목공학과 석사학위 논문, P68.

서영갑, 안주옥 공역(1999), 철근 콘크리트 공학, 사이텍미디어.

윤상준(2001), 비정상 흐름장의 인공어초 침하특성에 관한 실험적 연구, 부경대학교 해양공학과 석사학위논문, P97.

진강규(2000), 유전알고리즘과 그 응용, 교우사.

한국자원재생공사(2001), 농업용 비닐을 이용한 인공어초 개발 연구용역, P202.

해양수산부(2000), 인공어초시설사업집행 및 관리규정, 4-33.

Appendix

A.1 Results of Design Optimization for the Design Case 1

Table A.1.1 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M-H-T$ for $h = 60\text{ m}$

M (m^3)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5	n_1	n_2	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
3000	5	10	6	5.6	0.15	0.15	4	4	4	141	3010	224
	8	12	6	5.6	0.15	0.15	4	4	4	141	3010	224
	10	13	6	5.6	0.22	0.15	4	4	4	182	3010	337
	12	15	7.8	7.5	0.27	0.19	3	5	5	302	3948	179
3500	5	10	6.1	6	0.15	0.15	4	4	4	149	3513	203
	8	12	6.1	6	0.15	0.15	4	4	4	149	3513	203
	10	13	7.8	7.5	0.19	0.15	3	5	5	178	3948	20229
	12	15	7.8	7.5	0.27	0.19	3	5	5	302	3948	2744
4000	5	10	7.8	7.6	0.15	0.15	3	5	5	154	4054	451
	8	12	7.8	7.6	0.15	0.15	3	5	5	154	4054	630
	10	13	7.7	7.7	0.19	0.15	3	5	5	181	4108	1221
	12	15	7.6	8.2	0.41	0.16	3	5	5	319	4599	3337
4500	5	10	7.9	8	0.15	0.15	3	5	5	161	4550	1912
	8	12	7.9	8	0.15	0.15	3	5	5	161	4550	1912
	10	13	7.9	8	0.2	0.15	3	5	5	195	4550	450
	12	15	7.9	8	0.23	0.21	3	5	5	323	4550	758
5000	5	10	7.4	8.8	0.15	0.15	3	5	6	205	5157	452
	8	12	7.4	8.8	0.15	0.15	3	5	6	205	5157	452
	10	13	7.4	8.8	0.15	0.15	3	5	6	205	5157	434
	12	15	7.6	8.8	0.25	0.17	3	5	6	341	5157	2006

Table A.1.2 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M - H - T$ for $h = 50\text{ m}$

M (m^3)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5	n_1	n_2	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
2500	5	10	5.1	5.9	0.15	0.15	4	3	4	120	2840	18903
	8	12	5.2	5.6	0.19	0.15	4	3	4	135	2609	6992
	10	13	5.2	5.6	0.16	0.21	4	3	4	214	2609	4485
	12	15	5.2	5.6	0.39	0.22	4	3	4	347	2609	4386
3000	5	10	7.8	7.5	0.15	0.15	3	5	5	153	3948	1903
	8	12	5.4	5.9	0.17	0.15	4	4	4	153	3007	9704
	10	13	5.1	6.1	0.2	0.21	4	3	4	225	3036	8855
	12	15	5.1	6.1	0.2	0.31	4	3	4	376	3036	2145
3500	5	10	7.8	7.5	0.15	0.15	3	5	5	153	3036	7775
	8	12	8.2	7.5	0.17	0.15	3	5	5	168	4151	3228
	10	13	5	6.8	0.27	0.18	4	3	4	248	3966	4199
	12	15	5	6.7	0.41	0.21	4	3	4	399	3591	4626
4000	5	10	8.2	7.5	0.15	0.15	3	5	5	156	4151	7035
	8	12	8.2	7.5	0.17	0.15	3	5	5	168	4151	4218
	10	13	5	7.1	0.22	0.17	4	3	5	257	4032	6140
	12	15	5	7.2	0.34	0.24	4	3	5	428	4147	712
4500	5	10	8.3	7.8	0.15	0.15	3	5	5	161	4544	1163
	8	12	7.9	8	0.16	0.15	3	5	5	168	4550	5041
	10	13	7.7	8.1	0.29	0.15	3	5	5	259	4546	5983
	12	15	8.2	8	0.27	0.25	3	5	5	450	4723	7212

Table A.1.3 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M - H - T$ for $h = 40\text{ m}$

M (m^3)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5	n_1	n_2	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
2000	5	10	4	4.6	0.15	0.15	5	3	3	108	2116	778
	8	12	5.2	5.6	0.23	0.18	4	4	4	191	2609	10730
	10	13	5.2	5.6	0.43	0.18	4	4	4	300	2609	12175
	12	15	4	4.6	0.42	0.35	5	3	3	478	2116	5205
2500	5	10	5.1	5.9	0.15	0.15	4	3	4	120	2840	7498
	8	12	5.2	5.6	0.23	0.18	4	3	4	191	2609	5747
	10	13	5.2	5.6	0.37	0.2	4	3	4	301	2609	8244
	12	15	4	5	0.36	0.38	5	3	3	516	2500	19980
3000	5	10	5.1	6.2	0.15	0.15	4	3	4	124	3136	2508
	8	12	5.1	6.2	0.17	0.21	4	3	4	207	3136	260
	10	13	5	6.3	0.23	0.26	4	3	4	326	3175	268
	12	15	7.8	7.5	0.46	0.26	3	5	5	554	3036	3666
3500	5	10	5.2	6.5	0.18	0.15	4	3	4	146	3515	7412
	8	12	7.8	7.5	0.21	0.17	3	5	5	222	3036	389
	10	13	4.8	7	0.35	0.2	4	3	5	345	3763	521
	12	15	4.8	7	0.31	0.33	4	3	5	559	3763	1174
4000	5	10	4.9	7.2	0.15	0.15	4	4	5	172	4064	120
	8	12	4.9	7.2	0.21	0.16	4	3	5	233	4064	8959
	10	13	4.8	7.3	0.29	0.19	4	3	5	360	4092	9096
	12	15	4.6	7.8	0.24	0.31	4	3	5	594	4477	747

Table A.1.4 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M - H - T$ for $h = 30\text{ m}$

M (m^3)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5	n_1	n_2	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
1500	5	10	5.1	5.9	0.16	0.15	4	3	4	125	2840	172
	8	12	3.1	3.8	0.23	0.26	6	2	3	263	1611	7002
	10	13	3.1	3.8	0.42	0.38	6	2	2	420	1611	6862
	12	15	4.3	4.5	0.43	0.45	5	3	3	766	2176	1397
2000	5	10	5.1	5.9	0.16	0.15	4	3	4	125	2840	29788
	8	12	4	4.5	0.24	0.26	5	3	3	280	2025	3052
	10	13	3	4.4	0.28	0.35	6	2	3	465	2096	3114
	12	15	5.1	6.2	0.42	0.41	4	3	4	800	3136	26986
2500	5	10	5.2	5.6	0.18	0.15	4	3	4	130	2609	690
	8	12	5.1	6	0.33	0.21	4	3	4	309	2937	4279
	10	13	3.7	5.2	0.28	0.39	5	2	3	472	2501	2599
	12	15	3	4.9	0.43	0.43	6	2	3	827	2593	15998
3000	5	10	5.1	6.1	0.16	0.15	4	3	4	128	3036	436
	8	12	5.4	5.9	0.23	0.26	4	3	4	322	3007	7727
	10	13	3.6	5.8	0.39	0.27	5	2	4	515	3027	121
	12	15	5.1	6.1	0.46	0.39	4	3	4	786	3036	8896
3500	5	10	6.3	5.9	0.16	0.15	4	4	4	155	3508	9906
	8	12	3.3	6.8	0.18	0.27	5	2	4	349	3814	5052
	10	13	3.5	6.4	0.43	0.25	5	2	4	551	3584	802
	12	15	4.9	6.8	0.34	0.45	4	3	4	842	5664	1186

Table A.1.5 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $M - H - T$ for $h = 20\text{ m}$

M (m^3)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5	n_1	n_2	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
1000	5	10	2	2.5	0.29	0.21	9	1	2	147	1012	5265
	8	12	2.2	2.9	0.24	0.45	8	2	2	449	1184	5978
	10	13	2.4	4.4	0.39	0.45	7	2	2	917	2276	9115
	12	15	no solution									
1500	5	10	5.2	5.6	0.35	0.15	4	4	4	209	2609	91
	8	12	3	4.4	0.19	0.44	6	2	3	525	2090	4355
	10	13	5	6.4	0.42	0.46	4	3	3	930	3276	9621
	12	15	no solution									
2000	5	10	5.2	5.6	0.35	0.15	4	3	4	209	2609	91
	8	12	2.4	4.2	0.39	0.28	7	2	3	543	2074	270
	10	13	4.9	6.8	0.43	0.45	4	3	4	960	3625	554
	12	15	no solution									
2500	5	10	5.1	6	0.22	0.2	4	3	4	222	2937	545
	8	12	4	5	0.39	0.39	5	2	3	557	2500	9482
	10	13	2.7	5.5	0.44	0.45	6	2	3	947	2940	4013
	12	15	no solution									
3000	5	10	2.7	5.6	0.23	0.15	6	2	4	235	3048	2718
	8	12	5.1	6.1	0.41	0.31	4	3	4	566	3036	4251
	10	13	2.7	5.6	0.44	0.45	6	2	3	965	3048	855
	12	15	no solution									

A.2 Results of Design Optimization for the Design Case 2

Table A.2.1 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 10000 \text{ m}^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
60	5	10	6	0.15	4	4	148	3456	353
	8	12	6	0.15	4	4	148	3456	353
	10	13	6	0.18	4	4	209	3456	269
	12	15	7.7	0.22	3	5	320	4108	575
50	5	10	5.6	0.15	4	4	137	2809	110
	8	12	5.6	0.16	4	4	155	2809	157
	10	13	5.6	0.2	4	4	236	2809	731
	12	15	5.6	0.26	4	4	383	2809	265
40	5	10	5.6	0.15	4	4	137	2809	47
	8	12	4.5	0.21	5	3	208	2278	479
	10	13	5.6	0.24	4	4	331	2809	301
	12	15	7.7	0.3	3	5	568	4108	787
30	5	10	5.6	0.15	4	4	137	3456	427
	8	12	5.6	0.24	4	4	331	3456	285
	10	13	4.6	0.35	5	3	539	2433	857
	12	15	8	0.39	3	5	952	4608	15
20	5	10	4.5	0.23	5	3	246	2278	861
	8	12	7.7	0.32	3	5	639	4108	481
	10	13	no solution						
	12	15							

Table A.2.2 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 8100 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	7	0.15	3	5	139	3087	89
	8	12	7	0.15	3	5	139	3087	89
	10	13	7	0.16	3	5	158	3087	62
	12	15	7.2	0.21	3	5	272	3359	382
50	5	10	5.1	0.15	4	3	81	2122	124
	8	12	5.2	0.15	4	4	126	2249	101
	10	13	5.1	0.24	4	3	197	2122	300
	12	15	5.1	0.31	4	3	315	2122	39
40	5	10	5.1	0.16	4	3	91	2122	683
	8	12	5.1	0.23	4	3	182	2122	714
	10	13	4.1	0.26	5	3	276	1723	76
	12	15	5.1	0.37	4	3	432	2122	33
30	5	10	5.1	0.18	4	3	114	2122	60
	8	12	5.6	0.24	4	3	331	2809	25
	10	13	3.4	0.41	6	2	421	1414	60
	12	15	no solution						
20	5	10	2.9	0.24	7	2	184	1195	22
	8	12	2.9	0.41	7	2	462	1195	44
	10	13	no solution						
	12	15							

Table A.2.3 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 6400 \text{ m}^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
60	5	10	6.2	0.15	3	4	86	2144	101
	8	12	6.2	0.15	3	4	86	2144	101
	10	13	6.2	0.18	3	4	122	2144	396
	12	15	6.2	0.24	3	4	209	2144	232
50	5	10	5	0.15	4	3	79	2000	339
	8	12	6.2	0.17	3	4	109	2144	45
	10	13	6.2	0.21	3	4	163	2144	173
	12	15	5	0.31	4	3	308	2000	498
40	5	10	4.5	0.15	4	3	70	1458	130
	8	12	6.2	0.2	3	4	149	2144	180
	10	13	6.2	0.25	3	4	226	2144	355
	12	15	6.2	0.33	3	4	374	2144	390
30	5	10	3.6	0.15	5	3	86	1166	988
	8	12	4.6	0.27	4	3	217	1557	885
	10	13	3.6	0.42	5	2	328	1166	581
	12	15	6.2	0.42	3	4	571	2144	578
20	5	10	4.5	0.23	4	3	157	1458	29
	8	12	4.5	0.37	4	3	369	1458	277
	10	13	no solution						
	12	15							

Table A.2.4 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 4900 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	6	0.15	3	4	83	1944	150
	8	12	6	0.15	3	4	83	1944	150
	10	13	6	0.19	3	4	130	1944	599
	12	15	6	0.23	3	4	186	1944	187
50	5	10	5.4	0.15	3	4	74	1417	140
	8	12	5.4	0.16	3	4	84	1417	229
	10	13	5.4	0.2	3	4	127	1417	46
	12	15	5.6	0.27	3	4	231	1580	888
40	5	10	4	0.15	4	3	62	1024	59
	8	12	5.4	0.19	3	4	116	1417	476
	10	13	5.5	0.24	3	4	182	1497	279
	12	15	4.1	0.34	4	3	283	1102	533
30	5	10	3.2	0.18	5	2	62	819	627
	8	12	3.2	0.31	5	2	167	819	784
	10	13	4	0.33	4	3	260	1024	143
	12	15	no solution						
20	5	10	3.2	0.25	5	2	113	819	334
	8	12	3.2	0.43	5	2	292	819	64
	10	13	no solution						
	12	15							

Table A.2.5 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 3600 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	8.6	0.15	2	6	104	2544	182
	8	12	8.6	0.15	2	6	104	2544	182
	10	13	8.6	0.15	2	6	104	2544	324
	12	15	9.2	0.2	2	6	194	3114	289
50	5	10	5	0.15	3	3	44	1125	106
	8	12	5	0.19	3	3	70	1125	147
	10	13	5	0.24	3	3	108	1125	919
	12	15	5	0.31	3	3	173	1125	48
40	5	10	4.7	0.15	3	3	41	934	108
	8	12	4.8	0.23	3	3	95	995	38
	10	13	4.7	0.28	3	3	133	934	564
	12	15	4.8	0.36	3	3	247	995	40
30	5	10	3.4	0.18	4	2	42	628	261
	8	12	3.4	0.31	4	2	115	628	63
	10	13	3.4	0.41	4	2	187	628	18
	12	15	4.7	0.46	3	3	317	934	392
20	5	10	2.8	0.24	5	2	90	548	525
	8	12	no solution						
	10	13							
	12	15							

Table A.2.6 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 25 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	7.2	0.15	2	5	64	1372	82
	8	12	7.2	0.15	2	5	64	1372	82
	10	13	7.2	0.16	2	5	72	1372	28
	12	15	7.2	0.21	2	5	121	1372	190
50	5	10	7.2	0.15	2	5	64	1372	104
	8	12	7.2	0.15	2	5	64	1372	104
	10	13	7.2	0.19	2	5	100	1372	556
	12	15	7.4	0.25	2	5	172	1620	237
40	5	10	4	0.15	3	3	34	576	61
	8	12	4	0.2	3	3	59	576	285
	10	13	4	0.26	3	3	96	576	423
	12	15	4.1	0.34	3	3	159	620	145
30	5	10	3.9	0.16	3	3	38	533	112
	8	12	3.9	0.25	3	3	87	533	478
	10	13	3	0.39	4	2	145	432	481
	12	15	4.4	0.45	3	3	279	766	50
20	5	10	2.8	0.24	4	2	57	351	74
	8	12	no solution						
	10	13							
	12	15							

A.3 Results of Design Optimization for the Design Case 3

Table A.3.1 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 10000 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	6	0.15	4	4	148	3456	353
	8	12	6	0.15	4	4	148	3456	353
	10	13	6	0.15	4	4	148	3456	353
	12	15	7.7	0.17	3	5	197	4108	90
50	5	10	5.6	0.15	4	4	137	2809	110
	8	12	5.6	0.15	4	4	137	2809	110
	10	13	5.6	0.15	4	4	137	2809	160
	12	15	5.6	0.2	4	4	236	2809	391
40	5	10	4.5	0.15	5	3	110	2278	410
	8	12	4.5	0.15	5	3	110	2278	410
	10	13	5.6	0.18	4	4	194	2809	836
	12	15	5.6	0.24	4	4	331	2809	314
30	5	10	4.6	0.15	5	3	113	2433	111
	8	12	3.2	0.23	7	2	191	1605	223
	10	13	5.6	0.23	4	4	306	2809	156
	12	15	4.6	0.35	5	3	539	2433	668
20	5	10	4.6	0.17	5	3	143	2433	485
	8	12	3.8	0.25	6	3	338	1975	632
	10	13	5.8	0.32	4	4	581	3121	35
	12	15	8.2	0.41	3	5	1071	4962	558

Table A.3.2 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 8100 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	7	0.15	3	5	139	3087	89
	8	12	7	0.15	3	5	139	3087	89
	10	13	7	0.15	3	5	139	3087	89
	12	15	7	0.15	3	5	158	3087	62
50	5	10	5.1	0.15	4	3	81	2122	124
	8	12	5.1	0.15	4	3	81	2122	124
	10	13	5.1	0.18	4	3	114	2122	447
	12	15	5.1	0.24	4	3	197	2122	218
40	5	10	5.1	0.15	4	3	81	2122	151
	8	12	5.1	0.17	4	3	103	2122	736
	10	13	7	0.17	3	5	177	3087	68
	12	15	7.1	0.22	3	5	292	3221	68
30	5	10	4.1	0.15	5	3	99	1723	51
	8	12	5.1	0.22	4	3	167	2122	469
	10	13	3.4	0.31	6	2	259	1414	159
	12	15	4.2	0.32	5	3	411	1852	39
20	5	10	5.2	0.18	4	3	117	2249	824
	8	12	2.9	0.31	7	2	289	1195	30
	10	13	2.9	0.39	7	2	426	1195	19
	12	15	8.1	0.41	3	5	1055	4782	941

Table A.3.3 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 6400 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
60	5	10	6.2	0.15	3	4	86	2144	101
	8	12	6.2	0.15	3	4	86	2144	101
	10	13	6.2	0.15	3	4	86	2144	101
	12	15	6.2	0.18	3	4	122	2144	396
50	5	10	5	0.15	4	3	79	2000	339
	8	12	5	0.15	4	3	79	2000	339
	10	13	6.2	0.16	3	4	97	2144	235
	12	15	6.2	0.21	3	4	163	2144	177
40	5	10	4.5	0.15	4	3	70	1458	130
	8	12	4.5	0.16	4	3	80	1458	268
	10	13	6.2	0.19	3	4	135	2144	150
	12	15	6.2	0.25	3	4	226	2144	445
30	5	10	3	0.15	6	2	59	972	184
	8	12	3	0.23	6	2	130	972	44
	10	13	4.6	0.26	4	3	202	1557	62
	12	15	3	0.37	6	2	300	972	920
20	5	10	3	0.18	6	2	83	972	816
	8	12	3.6	0.33	5	2	216	1166	267
	10	13	4.5	0.35	4	3	335	1458	52
	12	15	6.3	0.43	3	4	607	2250	238

Table A.3.4 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 4900 \text{ m}^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m^3)	M' (m^3)	N
60	5	10	6	0.15	3	4	83	1944	150
	8	12	6	0.15	3	4	83	1944	150
	10	13	6	0.15	3	4	83	1944	150
	12	15	6	0.18	3	4	118	1944	739
50	5	10	5.4	0.15	3	4	74	1471	140
	8	12	5.4	0.15	3	4	74	1471	140
	10	13	5.4	0.15	3	4	74	1471	168
	12	15	5.4	0.19	3	4	116	1471	71
40	5	10	4	1.5	4	3	62	1024	59
	8	12	4	1.5	4	3	62	1024	491
	10	13	4	0.2	4	3	106	1024	342
	12	15	4	0.25	4	3	160	1024	95
30	5	10	3.2	0.15	5	2	44	819	178
	8	12	5.4	0.18	3	3	104	1417	127
	10	13	3.2	0.31	5	2	169	819	95
	12	15	4	0.32	4	3	247	1024	80
20	5	10	4	0.16	4	3	70	1024	118
	8	12	4	0.26	4	3	171	1024	198
	10	13	4.1	0.34	4	3	283	1102	846
	12	15	no solution						

Table A.3.5 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 3600 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	8.6	0.15	2	6	104	2544	182
	8	12	8.6	0.15	2	6	104	2544	182
	10	13	8.6	0.15	2	6	104	2544	182
	12	15	8.6	0.15	2	6	104	2544	203
50	5	10	5	0.15	3	3	44	1125	106
	8	12	5	0.15	3	3	44	1125	106
	10	13	5	0.18	3	3	63	1125	582
	12	15	5	0.23	3	3	100	1125	132
40	5	10	4.7	0.15	3	3	41	934	108
	8	12	4.8	0.17	3	3	54	995	212
	10	13	4.7	0.21	3	3	78	934	813
	12	15	4.7	0.27	3	3	125	934	420
30	5	10	3.4	0.15	4	2	30	628	36
	8	12	3.4	0.24	4	2	72	628	700
	10	13	3.4	0.31	4	2	115	628	78
	12	15	4.7	0.35	3	3	199	934	70
20	5	10	3.6	0.2	4	2	55	746	840
	8	12	3.4	0.32	4	2	122	628	474
	10	13	2.8	0.39	5	2	207	548	377
	12	15	no solution						

Table A.3.6 Variation of $x_i - f(x) - M'$ due to $h - H - T$ for $A = 2500 m^2$

h (m)	H (m)	T (sec)	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3	n_1	$f(x)$ (m ³)	M' (m ³)	N
60	5	10	7.2	0.15	2	5	64	1372	82
	8	12	7.2	0.15	2	5	64	1372	82
	10	13	7.2	0.15	2	5	64	1372	82
	12	15	7.2	0.16	2	5	72	1372	28
50	5	10	7.2	0.15	2	5	64	1372	104
	8	12	7.2	0.15	2	5	64	1372	104
	10	13	7.2	0.15	2	5	64	1372	104
	12	15	7.2	0.19	2	5	100	1372	261
40	5	10	4	0.15	3	3	34	576	61
	8	12	4	0.15	3	3	34	576	61
	10	13	4	0.2	3	3	59	576	165
	12	15	4	0.25	3	3	90	576	237
30	5	10	3	0.15	4	2	26	432	678
	8	12	3.9	0.19	3	3	52	533	204
	10	13	3.9	0.25	3	3	87	533	216
	12	15	4	0.32	3	3	139	576	159
20	5	10	3.9	0.16	3	3	39	533	195
	8	12	2.8	0.31	4	2	90	533	78
	10	13	2.8	0.39	4	2	132	351	765
	12	15	no solution						

감사의 글

10년이라는 시간동안, 참으로 많은 것을 배웠으면서도 이 줄고에 담은 것이 너무도 미약하여 부끄러운 마음 감출 길 없지만, 모자란 저를 아껴주시고 사랑해주신 모든 분들에게 작지만 변치 않을 고마운 마음을 전하고자 합니다.

오랜 시간을 믿고 기다려주신, 그리고 논문이 완성되도록 아낌없는 관심과 지도를 하여주신 지도교수 류연선 교수님께 이 지면을 빌어 진심으로 감사를 드립니다. 이 줄고의 심사를 맡아주시고, 해양이라는 꿈을 잊지 않게 해주셨던 류청로 교수님과 김헌태 교수님, 그리고 항상 당근과 채찍으로 가르침에 소홀함이 없으셨던 윤길수 교수님과 김헌태 교수님에게도 감사 드립니다.

논문자료를 구하기 힘들어할 때, 많은 자료를 제공해 주시고 조언해 주신 수산진흥원의 김호상 선배님, 후배들의 모자람을 항상 일깨우고, 가르쳐주셨던 김종인 선배님과 김종규 선배님, 그리고 인공어초를 알게 해준 (주)해중의 김진갑 사장님에게도 감사 드립니다.

이 줄고가 만들어지도록 많은 자료와 시간을 할애해준 김제헌과 윤상준 그리고 하현철에게도 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 박사학위를 취득하게 된 주귀홍 선배님과 조현만, 같이 졸업하는 김일섭, 조현민, 박효봉, 윤화진에게도 축하와 감사의 뜻을 전합니다.

지금은 졸업을 해서 곁에 없지만 많은 아낌없는 격려와 질책을 해주셨던 서경민 선배님, 정태만 선배님, 장기욱 선배님, 천가원 선배님 그리고 많은 선·후배님들, 같이 생활하면서 못난 선배의 주책을 다 받아주었던 연구실 후배님들, 그리고 해양공학과에서 동거동락했던 선·후배님에게 감사합니다.

아낌없는 사랑을 주었던 나원배와 박희영, 항상 외롭고 힘들 때 곁에 있어주었던 한나리 친구들과 스케이트보드 동아리 선·후배님들과 동기들, 그리고 좋은 친구인 김경태, 김소환에게도 감사의 뜻을 전합니다.

마지막으로 아직도 병환으로 거동이 불편하신 아버지, 늙도록 고생만 하신 어머니, 훈이형, 철희형에게 철없는 자식이자 동생이 죄스런 마음으로 이 논문을 바칩니다.

2002년 1월 10일

위 성 광 드림