

## 유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초의 최적설계(Ⅱ)

### - 실내모형실험결과의 비교 -

## Optimum Design of Piled Raft Foundations Using Genetic Algorithm(Ⅱ)

### - Comparison with Laboratory Model Test Results -

김홍택<sup>1)</sup>, Hong-Taek Kim, 강인규<sup>2)</sup>, In-Kyu Kang, 박순규<sup>3)</sup>, Soon-Kyu Park,

박정주<sup>3)</sup>, Jeong-Joo Park

<sup>1)</sup> 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Hong-Ik Univ.

<sup>2)</sup> (주)브니엘컨설턴트 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

<sup>3)</sup> 홍익대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Department. of Civil Eng., Hong-Ik Univ.

**SYNOPSIS** : Piled raft foundations are usually used to reduce total and differential settlements of superstructures. In the piled raft foundations, the raft is often on its own able to provide adequate bearing capacity and only few widely spaced piles are added to the foundation to keep settlements below a certain limit. In this paper, experimental studies on the load sharing ratio between piles and raft are carried out. Also, for evaluating the application of optimum design technique using a genetic algorithm, optimal locations of piles are compared with the results of laboratory model tests. From the results of laboratory model tests, there are found that the load sharing ratio between piles and raft is depended on the number of piles and stiffness of raft, and the optimal locations of piles became concentrated on the middle of rafts. From these results of laboratory model tests, the optimum technique using a genetic algorithm is acknowledged to the application in the piled raft.

**Key words** : Piled raft foundations, Laboratory model tests, Genetic algorithm, Optimum design

## 1. 서론

Piled raft 기초시스템은 말뚝과 raft를 강결로 일체화시킨 기초시스템으로 raft는 상부의 하중을 분산시키는 역할을 하며, 말뚝은 raft의 과도한 침하를 억제하는 상호 보완적인 역할을 한다. Piled raft 기초시스템의 설계는 상부구조물의 하중을 말뚝이 전부 부담하는 기존의 설계개념과는 달리, 말뚝과 raft가 상부구조물의 하중을 분담함으로써 설계개념도 하중개념의 설계방법보다는 구조물의 사용성 관점에서 변위개념의 설계방법으로 접근하여야 한다. Piled raft 기초시스템의 설계방식에 따라 달리 설계된 piled raft 기초시스템의 전형적인 하중-침하곡선은 그림 1과 같다. 그림 1은 기존의 설계방식(즉, 말뚝이 상부구조물의 하중을 전부 부담한다고 가정하여 지지력 관점에서 설계한 경우)으로 설계된 piled raft 기초시스템(곡선 ①과 ②)의 경우 말뚝과 raft가 각각 상부구조물의 하중을 부담하여 말뚝의 개수를 최적으로 줄여서 설계한 piled raft 기초시스템(곡선 ③)과 비교해 볼 때, 지나치게 과다하게 설계될 수 있음을 지적하고 있다. 이와 같이 piled raft 기초시스템의 설계에 있어서 구조물의 허용변위 내에서 발생하는 말뚝과 raft의 지지력을 정확히 예측하기 위해서는 말뚝-지반-raft 사이의 상호작용에 대한 규명이 필요하며, 구조물의 과도한 침하를 방지하기 위한 효과적인 말뚝의 설치위치를 결정할 수 있는 설계기법이 요

구되고 있는 실정이다. 이를 위해 본 연구에서는 실내모형실험을 통해 raft의 강성변화 및 말뚝의 설치 간격에 따른 말뚝과 raft의 하중분담 정도를 파악하고, 기 제시된바 있는 유전자 알고리즘을 이용한 piled raft 기초시스템의 최적설계기법(김홍택 등, 2000)의 적용성을 검증하기 위해 piled raft 기초시스템에서 말뚝의 설치위치 변화에 따른 하중-침하 양상이 최적(즉, 침하량이 가장 적게 발생하면서 지지력은 가장 큰 경우)인 말뚝의 설치위치를 유전자 알고리즘을 이용하여 해석한 결과와 비교·분석하였다.

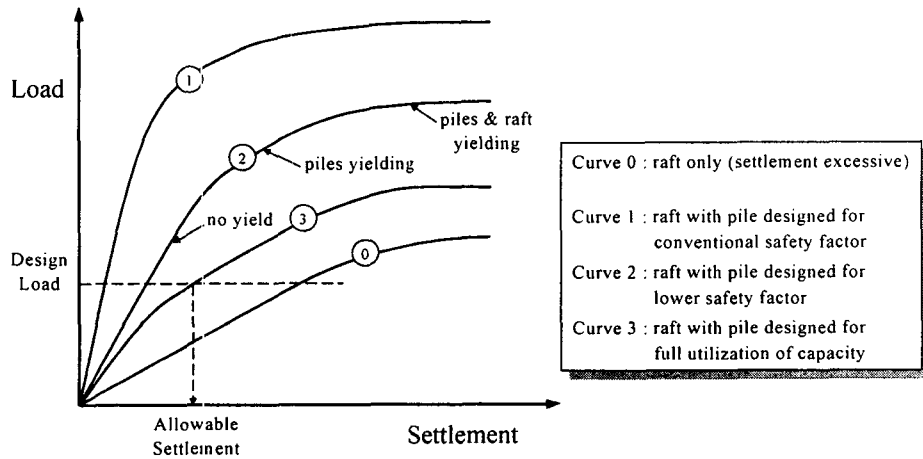


그림 1. Piled raft 기초시스템에 대한 전형적인 하중-침하 곡선(Poulos 등, 1997)

## 2. 실내모형실험

### 2.1 개요

실내모형실험은 piled raft 기초시스템에 있어서 raft의 강성 및 말뚝의 설치간격에 따라 말뚝과 raft가 각각 부담하는 하중분담 정도와 유전자 알고리즘의 적용성을 검증하기 위한 실험이 실시되었다. 실내모형실험에 사용한 토조(600mm×600mm×1300mm) 및 장치개요는 그림 2와 같으며, 실내 모형지반은 강사장치를 이용하여 주문진 표준사를 강사높이 700mm를 유지하면서 상대밀도 68.3%정도로 일정하게 조성하였다.

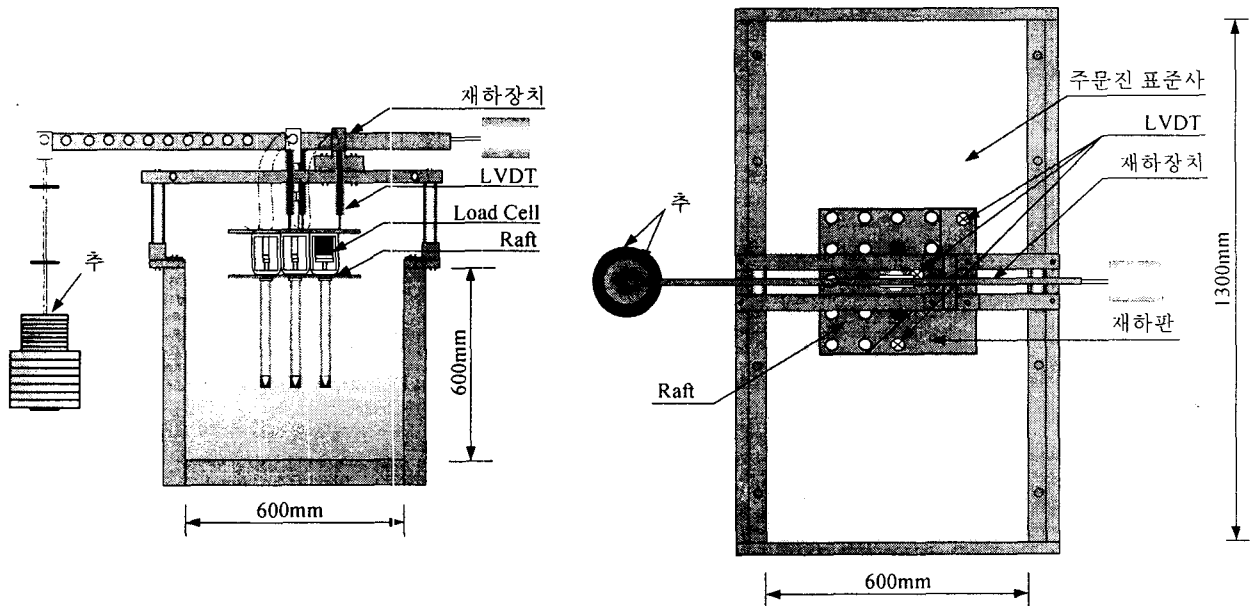


그림 2. 실내모형실험 장치개요

실내 모형지반의 특성치 및 입도분포곡선은 표 1 및 그림 3과 같다. 또한 실험에 사용한 모형말뚝은 길이 300mm, 직경 30mm, 두께 3mm의 알루미늄 파이프를 사용하였으며, raft는 두께 3mm, 6mm 및 8mm의 철판을 각각 150mm×150mm~360mm×360mm의 크기로 제작하여 사용하였다.

표 1. 주문진 표준사 특성치

구 분	특 성 치
비 중	2.62
단 위 중 량	1.52tf/m <sup>3</sup>
내부마찰각	41°
간 극 비	0.77
상 대 밀 도	68.3%

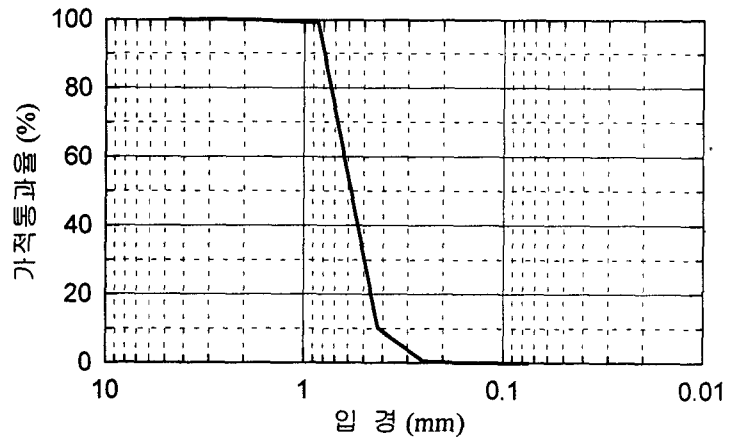


그림 3. 입도분포곡선(주문진 표준사)

## 2.2 실험방법

본 실내모형실험은 그림 2 및 사진 1과 같이 정적하중재하방식으로 실시됐으며, 재하하중은 무게 1, 2, 2.5, 5, 10kgf의 추에 의해 단계별로 재하하여 최대 1300kgf까지 재하하였다. 하중은 piled raft에 균등하게 작용할 수 있도록 하기 위해 추에서 전달되는 집중하중을 강성 재하판(steel plate, 360mm×360mm, t=12mm)에 전달시켜 piled raft에 하중이 등분포로 작용하도록 하였다.

또한 raft와 말뚝이 분담하는 각각의 하중을 측정하기 위해 사진 1 및 2와 같이 말뚝과 raft사이를 고정링에 의해 연결시키고 고정링 사이에 load cell을 설치하여 말뚝머리에 작용하는 하중을 직접적으로 측정하였으며, raft에 작용하는 하중은 추에 의해 piled raft에 작용하는 전체하중에서 load cell로 측정된 개개의 말뚝에 작용하는 하중의 합을 감하여 간접적으로 측정하였다. 침하하는 그림 2와 같이 raft에 총 3개의 LVDT를 설치하여 측정하였으며, LVDT의 위치는 raft의 중앙부와 좌측측면 중앙부 및 우측측단 모서리 부에 각각 설치하여 침하량을 측정하였다.

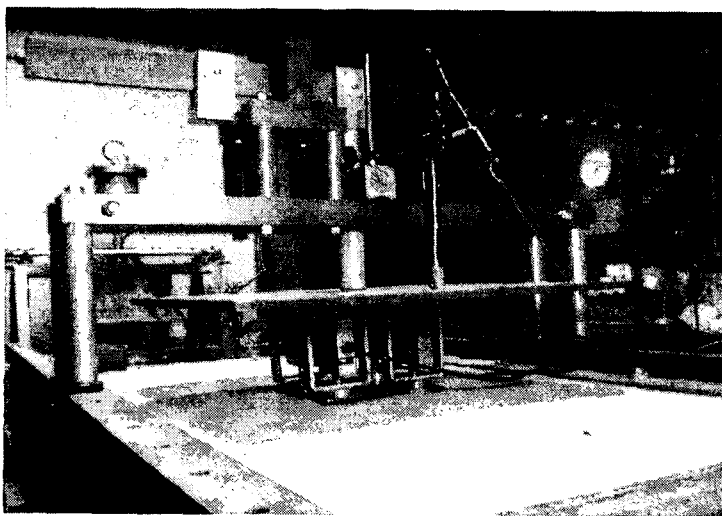


사진 1. 실내모형실험사진

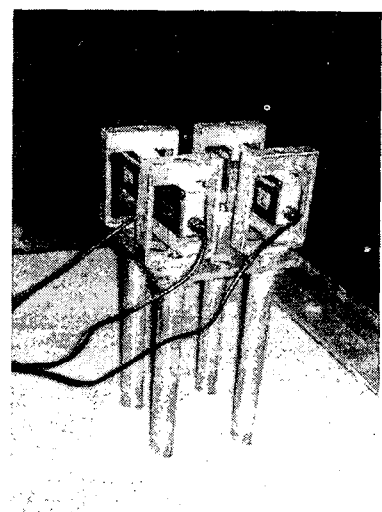


사진 2. Piled raft 설치과정

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 Raft의 강성에 의한 영향

본 분석은 piled raft 기초시스템에 있어서 raft의 강성변화에 따라 raft와 말뚝이 부담하는 하중분담 정도를 파악하기 위해 실시하였다. 본 실험에서는 raft의 강성변화를 위해 raft의 두께를 3mm와 8mm로 달리하여 사용하였으며, raft는 180mm×180mm의 크기를 사용하였고 말뚝은 길이 300mm의 단일말뚝으로 하였다. Raft의 강성변화에 따른 piled raft의 하중-침하곡선은 그림 4와 같이 나타났으며, 침하율(=침하량/말뚝의 길이(=300mm)×100(%))에 대한 말뚝과 raft에서의 하중분담률을 정리하면 표 2와 같다. 그림 4 및 표 2에서 알 수 있듯이 raft의 강성변화에 따른 말뚝의 하중-침하곡선은 일정한 경향을 나타냈으나, 하중분담률은 raft의 두께가 3mm로 raft의 강성이 상대적으로 작은 경우 초기침하에 대한 하중을 대부분 말뚝이 부담하는 경향으로 나타났으며, raft의 두께가 8mm로 raft의 강성이 상대적으로 큰 경우에는 초기침하에 대한 하중을 raft가 상당부분 부담하는 것으로 나타났다.

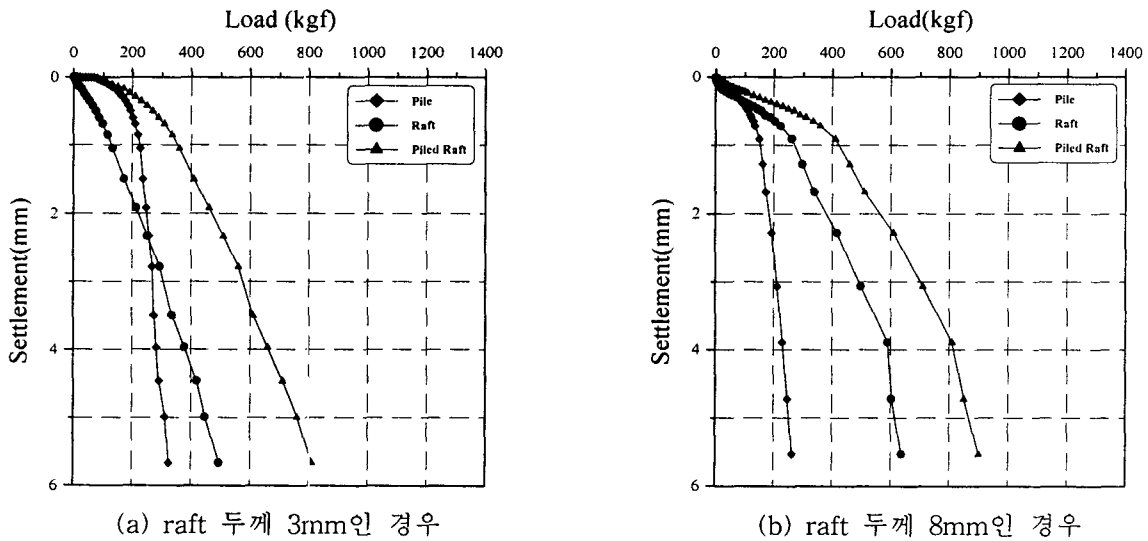


그림 4. raft의 강성변화에 따른 piled raft의 하중-침하곡선

표 2. Raft의 강성변화에 따른 piled raft의 하중분담률

침하율(%)	raft 두께 = 3mm		raft 두께 = 8mm	
	말뚝(%)	raft(%)	말뚝(%)	raft(%)
0.05	87	13	70	30
0.10	77	23	51	49
0.50	58	42	34	66
1.00	45	55	30	70
1.50	41	59	29	71

#### 3.2 말뚝의 설치간격에 따른 영향

본 분석에서는 raft의 강성을 고정시키고 말뚝의 설치간격을 변화시켜 말뚝과 raft의 하중분담률의 변화를 파악하였으며, 실내모형실험에 사용한 piled raft의 제원은 그림 5와 같다. 본 분석에서 raft의 두께는 3mm와 6mm로 하고 각 경우에 대한 하중-침하곡선에서 침하량이 말뚝길이의 1%에 해당하는 침

하량(=3mm)을 기준으로 하여 말뚝의 설치간격에 따른 말뚝과 raft의 하중분담률을 정리하면 그림 6과 같다. 그림 6에서 알 수 있듯이 말뚝의 설치간격에 의한 영향보다는 말뚝의 개수 및 raft의 강성에 의한 영향이 더 큰 것으로 평가되었다.

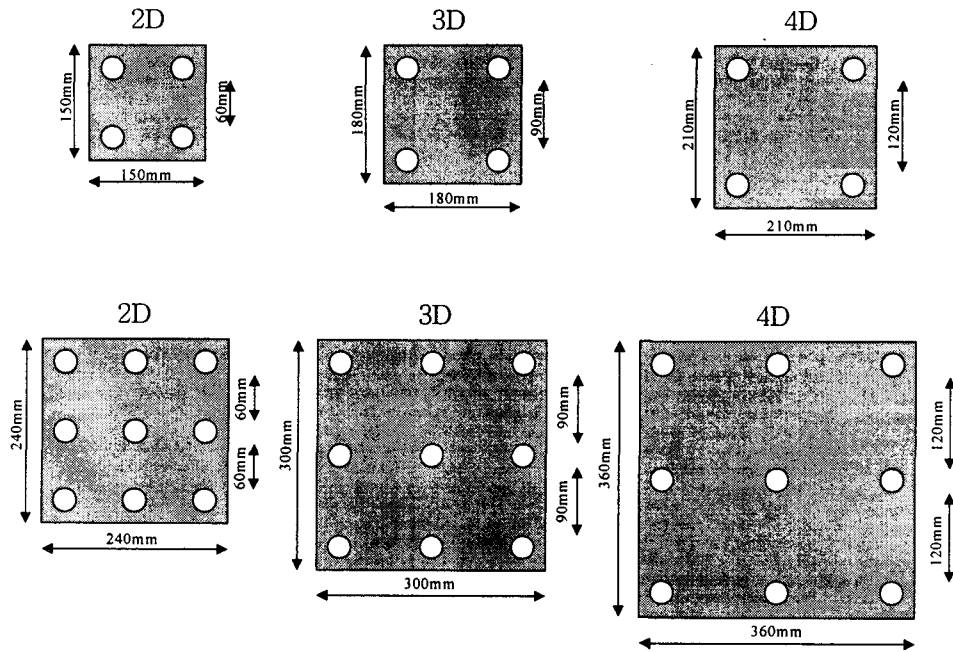


그림 5. 실내모형실험에 사용한 piled raft의 제원

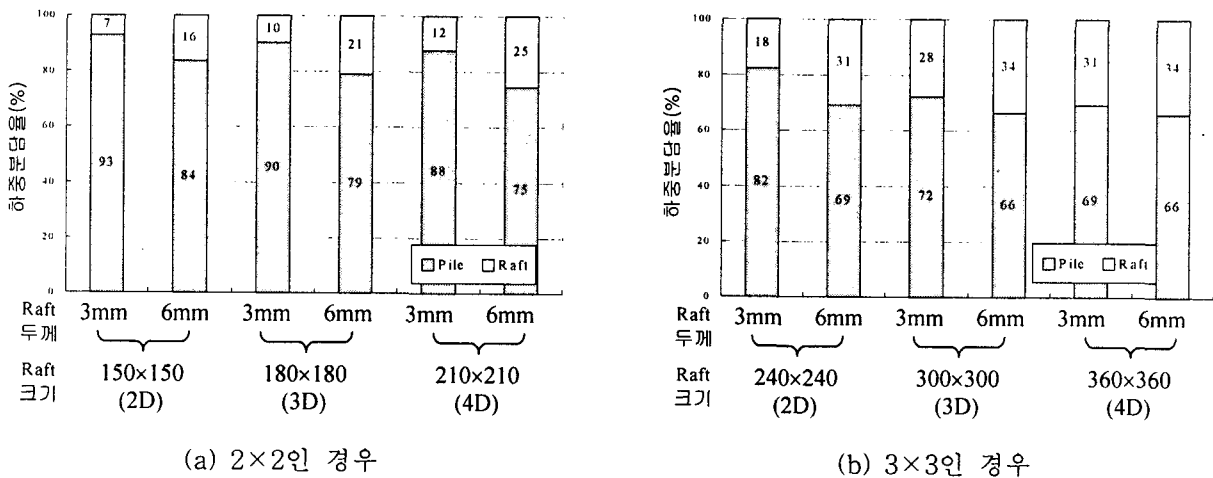


그림 6. 말뚝의 설치간격에 따른 말뚝과 raft의 하중분담률

### 3.3 말뚝의 최적 설치위치

본 분석에서는 piled raft의 하중-침하관계에 있어서 말뚝의 설치위치 변화에 따른 하중-침하 양상이 최적인 상태(즉, 침하량이 가장 적게 발생하면서 지지력은 가장 큰 경우)를 결정하기 위하여 실내모형실험을 통해 결정한 말뚝의 최적 설치위치와 유전자 알고리즘을 이용하여 결정된 말뚝의 최적 설치위치를 비교하였다. 실내모형실험에 사용한 말뚝의 설치위치는 그림 7과 같이 총 6가지 경우로 설정하였으며, 각 경우에 대한 하중-침하곡선은 그림 8과 같다.

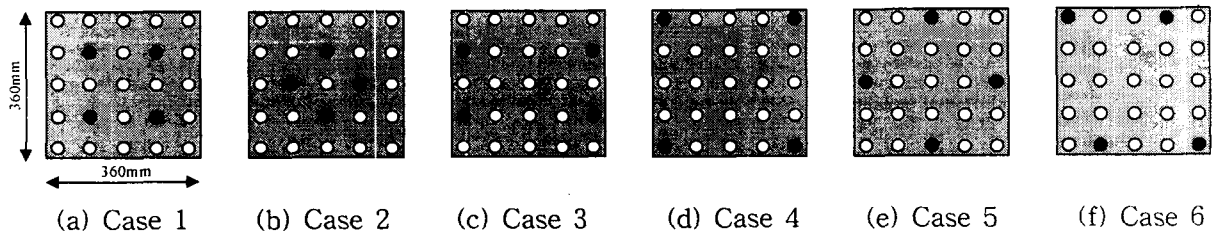


그림 7. 실내모형실험에 사용한 말뚝의 설치위치

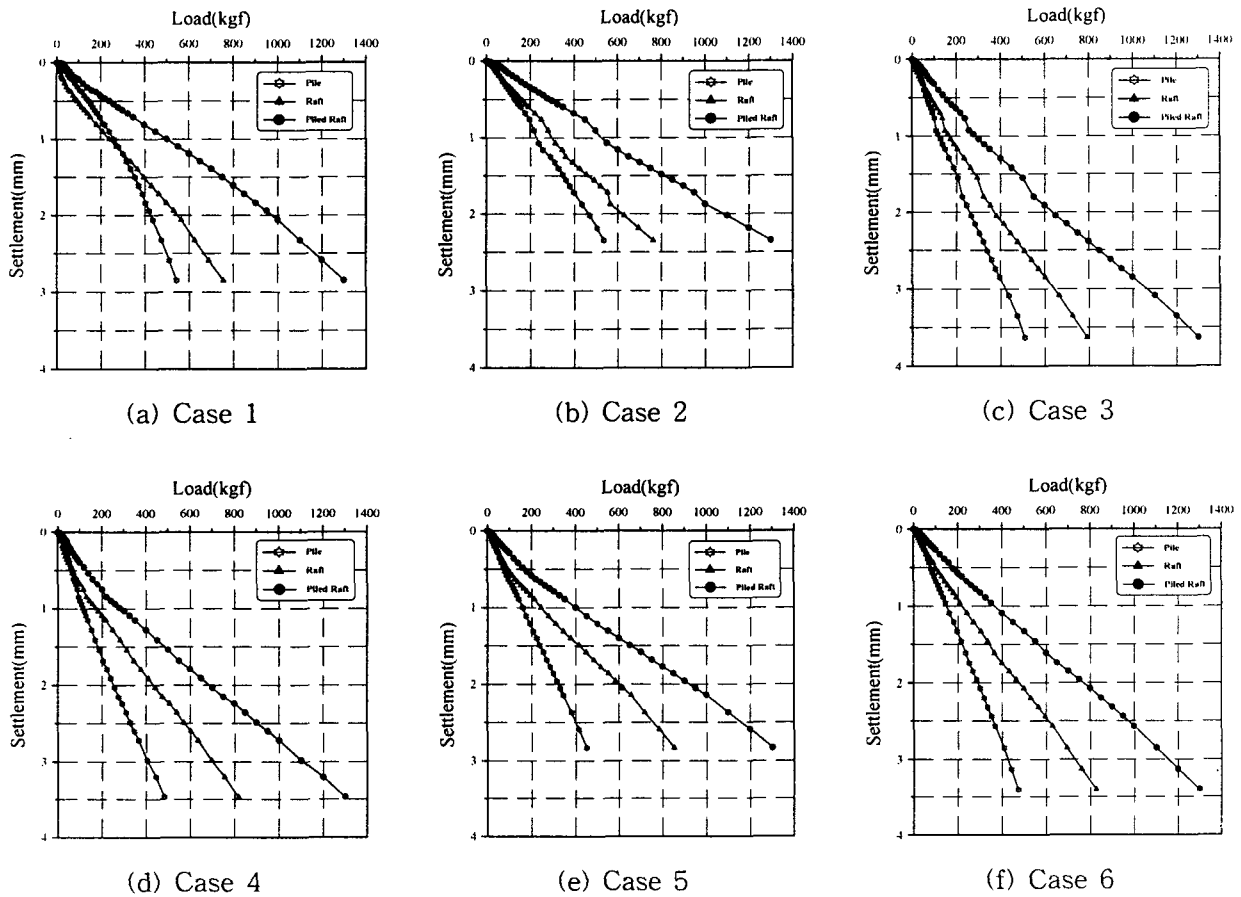


그림 8. 말뚝의 설치위치에 따른 piled raft의 하중-침하곡선

본 분석에서 유전자 알고리즘을 이용한 piled raft 기초시스템의 최적설계기법(김홍택 등, 2000)은 piled raft 기초시스템의 해석 방법으로 Clancy(1993)가 제안한 복합방법(hybrid method)을 사용하고 있으며, 말뚝의 최적 설치위치를 결정하기 위한 기법은 Goldberg(1989)가 제안한 단순 유전자 알고리즘을 사용하고 있다.

그림 7과 같이 말뚝의 설치위치 변화에 따른 말뚝의 최적 설치위치를 최적인 경우부터 나열하면 표 3과 같다. 우선, 실내모형실험결과는 Case 2 → Case 1 → Case 5 → Case 6 → Case 4 → Case 3의 순으로 하중-침하관계가 불량한 것으로 나타났으며, Clancy(1993)가 제안한 복합방법으로 그림 7의 piled raft에 대해 해석한 결과는 Case 1 → Case 2 → Case 5 → Case 3 → Case 6 → Case 4의 순으로 전체침하량이 증가하는 것으로 평가되었다. 또한 부등침하량을 기준으로 Clancy(1993)가 제안한 복합방법에 의해 그림 7의 piled raft를 해석한 결과, 말뚝의 설치위치 Case 2 → Case 1 → Case 5 → Case

3 → Case 6 → Case 4의 순으로 부등침하량이 증가하는 것으로 계산되었다. 이를 종합적으로 분석하면, raft의 중앙부에 말뚝을 집중적으로 배치한 경우가 전체침하 및 부등침하가 최소로 발생한 것으로 나타났다.

표 3. 실내모형실험에 사용한 piled raft에서의 말뚝의 최적 설치위치

구 분	말뚝의 최적위치
실내모형 실험결과 (평균침하량 기준)	
hybrid 방법에 의한 해석결과 (전체침하량 기준)	
hybrid 방법에 의한 해석결과 (부등침하량 기준)	

또한 유전자 알고리즘을 이용한 piled raft 기초시스템의 최적설계기법을 적용하여 실내모형실험에 사용한 piled raft에서의 말뚝의 최적위치를 결정한 결과는 그림 9와 같다. 그림 9(a)는 각 세대수별 적합도 함수값의 변화를 도시한 것으로 본 연구에서 사용한 적합도 함수는 부등침하량의 역수를 사용하였다. 따라서 적합도 함수값이 가장 큰 경우가 부등침하량이 최소가 되는 경우이며, 즉 말뚝의 설치위치가 최적인 상태를 의미한다. 그림 9(b)는 각 세대수에서의 말뚝의 설치위치를 나타낸 것으로 세대수 11이상부터 말뚝의 최적위치는 수렴하여 실내모형실험결과와 동일하게 Case 2의 배치형태가 최적인 말뚝의 설치위치로 평가되었다. 이상의 결과로부터 유전자 알고리즘을 이용한 piled raft 기초시스템의 최적설계기법은 적용성이 인정된다고 판단된다.

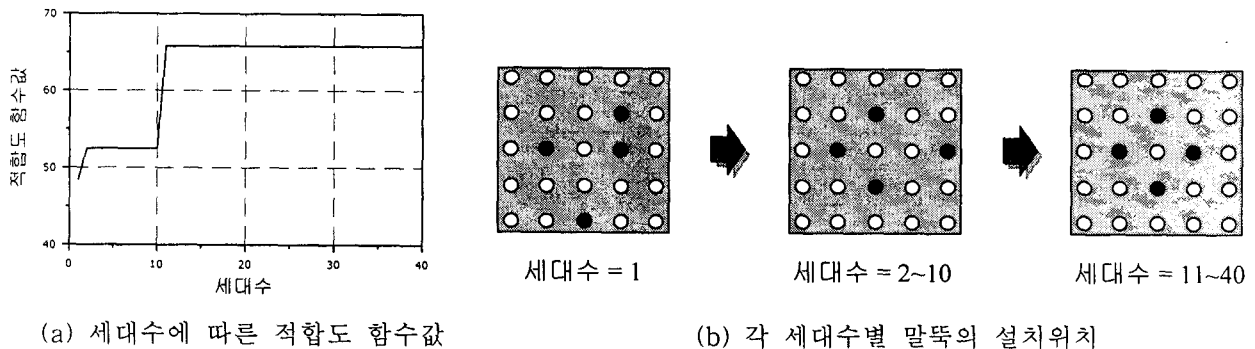


그림 9. 유전자 알고리즘을 이용한 말뚝의 최적위치 해석결과

## 4. 결론

본 연구에서는 실내모형실험을 통해 raft의 강성변화 및 말뚝의 설치간격에 따른 말뚝과 raft의 하중분담 정도를 파악하고, 기 제시된바 있는 유전자 알고리즘을 이용한 piled raft 기초시스템의 최적설계기법(김홍택 등, 2000)의 적용성을 실내모형실험을 통해 이에 대한 검증은 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Raft의 강성변화에 따른 piled raft의 하중-침하곡선은 일정한 경향으로 나타났으나, 하중분담률은 raft의 두께가 3mm로 raft의 강성이 상대적으로 작은 경우에는 초기침하에 대한 하중을 대부분 말뚝이 부담하는 경향으로 나타났으며, raft의 두께가 8mm로 raft의 강성이 상대적으로 큰 경우에는 초기침하에 대한 하중을 raft가 상당부분 부담하는 것으로 나타났다.
- (2) 말뚝의 설치간격에 따른 piled raft의 하중분담률은 말뚝의 개수 및 raft의 강성에 의한 영향에 비해 적은 것으로 평가되었다.
- (3) 실내모형실험결과 및 Clancy(1993)가 제안한 복합방법(hybrid method)으로 piled raft를 해석한 결과, piled raft에서의 말뚝의 최적 설치위치는 raft의 중앙부에 말뚝을 집중적으로 배치할 경우 전체침하 및 부등침하가 최소화됨을 알 수 있었다. 또한 유전자 알고리즘을 이용한 piled raft 기초시스템의 최적설계기법을 적용하여 말뚝의 최적위치를 결정한 결과, 세대수 11이상부터 말뚝의 최적위치는 수렴하였으며 실내모형실험결과와 동일하게 Case 2의 배치형태에서 최적으로 평가되었다. 이상의 결과로부터 유전자 알고리즘을 이용한 piled raft 기초시스템의 최적설계기법은 적용성이 인정된다고 판단되었다.
- (4) 향후 연구과제로 포화지반 등의 다양한 조건 하에서 실내모형실험을 통한 piled raft 기초시스템의 거동분석과 말뚝-지반-raft 간의 상호작용에 관한 실험적인 연구가 수행될 예정이다.

## 참고문헌

1. 김경남, 이수형, 정충기, 이해성 (1999), "Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치", 대한토목학회논문집, 19(III-4), pp. 831~839.
2. 김홍택, 강인규, 황정순, 전용진, 고용일 (1999), "유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초의 최적설계", 한국지반공학회 '99 가을 학술발표회 논문집, pp. 415~422.
3. 김홍택, 강인규, 황정순, 전용진 (2000), "Optimum Design of Piled Raft Foundations Using A Genetic Algorithm", 한국지반공학회 논문집, Vol. 16, No. 3, pp. 47~55.
4. 이종구 (1998), "모형실험을 통한 Piled Raft의 지지거동 분석", 서울대학교 공학석사 학위논문.
5. Clancy, P. (1993), "Numerical Analysis of Piled Raft Foundations", Ph.D thesis, University of Western Australia.
6. Goldberg, D.E.(1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., New York.
7. Horikoshi, K., and Randolph, M. F. (1998), "A Contribution to Optimum Design of Piled Rafts", *Geotechnique*, 48(3), pp. 301~317.
8. Poulos, H. G., Small, J. C. Ta, L. D., Sinha, J. and Chen, L. (1997), "Comparion of Some Methods for Analysis of Piled Rafts", *Proc. of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg*, Vol. 2, pp. 1119-1124.