

하모니서치 알고리즘을 이용한 헬리컬 파일의 형상 및 재료비 최적 설계기법에 대한 연구

나경욱* · 이동섭** · 이현지*** · 최항석****

Na, Kyunguk*, Lee, Dongseop**, Lee, Hyungi***, Choi, Hangseok****

Optimization for Configuration and Material Cost of Helical Pile Using Harmony Search Algorithm

ABSTRACT

The helical pile is a manufactured steel pile consisting of one or more helix-shaped bearing plates affixed to a central shaft. This pile is installed by rotating the shaft into the ground to support structural loads. Advantages of the helical pile are no need for boring or grout process, and ability to install a pile foundation with relatively light devices. In this study, an optimized design method for helical piles is proposed to minimize the material cost with consideration of the load bearing capacity obtained by the cylindrical shear method. The harmony search meta-heuristic algorithm was adopted for optimization process. The optimized design was verified by comparing with the 2009 International building code. It is noted that the optimization for the configuration of helical piles along with material cost proves to be an out-performed tool in designing helical pile foundation with economic feasibility.

Key words : Helical pile, Cylindrical shear method, Harmony search algorithm, 2009 International Building Code

초록

헬리컬 파일은 한 개 이상의 나선형 원판을 중공형 강재 축에 부착한 후 지반에 회전 관입시켜 지지력을 발현하게 하는 말뚝기초의 한 종류로서 별도로 천공작업 및 그라우팅을 필요로 하지 않고, 시공의 편의성과 말뚝 향타 등에 의한 소음이 없다는 장점이 있어 그 이용이 점차 증가되고 있는 추세이다. 본 연구에서는 Cylindrical shear method로 산정된 헬리컬 파일의 요구 지지력을 최소의 자재비용과 최적의 헬리컬 파일의 형상으로 발현할 수 있도록 하모니서치 알고리즘(Harmony search algorithm)을 적용하여 최적화된 설계법을 제안 하였다. 또한 헬리컬 파일의 최적 설계 결과를 2009 International building code (이하, 2009 IBC)를 참고하여 규격화시킨 설계 결과와 비교·검토하여 두 설계법의 경제성을 분석하였다. 본 논문의 재료비 최소화를 위한 헬리컬 파일 형상의 최적 설계 기법은 헬리컬 파일의 경제성을 향상하여 헬리컬 파일 시장 활성화에 기여할 수 있다.

검색어 : 헬리컬 파일, Cylindrical shear method, 하모니서치 알고리즘, 2009 International Building code

* 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Korea University · magicnapal@korea.ac.kr)

** 정희원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 석박사통합과정 (Korea University · steallady@korea.ac.kr)

*** 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Korea University · unin216@korea.ac.kr)

**** 정희원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수·공학박사 (Corresponding Author · Korea University · hchoi2@korea.ac.kr)

Received October 2, 2014/ revised December 19, 2014/ accepted March 3, 2015

1. 서론

헬리컬 파일(helical pile)은 한 개 이상의 나선형 원판을 중공형 강재 축에 부착한 밀푼기초로서, 지반에 회전시켜 관입하는 방법으로 시공 하고 있다. 이 회전을 통한 관입 방법은 항타와 굴착의 공정을 필요로 하지 않는 시공 상의 이점이 있다. 헬리컬 파일은 1836년에 지반보강의 용도로 Alexander Mitchell에 의해 처음으로 쓰이기 시작하였으며, 2009년도에 International Building code (이하, IBC)에 등록되기 시작하면서 해외에서 널리 쓰이기 시작하였다. 최근 들어 국내에서도 소개가 되기 시작하면서, 그 관심과 이용이 점차 증가되고 있는 추세이다.

헬리컬 파일의 지지력 예측은 Terzaghi(1943)나 Meyerhof (1951)의 제안식에 의해서 정립이 되어왔으며, 헬리컬 파일의 지지력 예측식은 Perko(2009)에 의해 Individual bearing method, Cylindrical shear method, Torque correlation method의 세 가지 방법으로 분류되었다. 세 가지 방법은 모두 지지력을 예측하는 방식에 의해 분류된다. 이 중 Torque correlation method는 사공이 완료된 시점에서 측정된 최종 Torque를 통해 지지력을 예측하는 방법으로, 다양한 변수 중 최적의 해를 찾는 하모니서치 알고리즘의 적용에는 한계가 있다. Individual bearing method는 각각의 나선형 원판에 작용하는 지지력의 합과 중공형 강재 축의 주면마찰력을 통하여 헬리컬 파일의 지지력이 발현된다는 가정으로 유도되고, Cylindrical shear method는 선단의 지지력 및 나선형 원판 사이에 작용하는 원통형 전단력 그리고 중공형 강재 축의 주면마찰력으로 그 지지력을 산정하는 방법이다. Cylindrical shear method는 나선형 원판이 1개인 경우 원판과 원판사이의 원통형 전단력이 발휘가 되지 않으므로, Individual bearing method와 동일한 지지력이 산정된다. 즉, Cylindrical shear method는 Individual bearing method와 달리 나선형 원판의 개수가 2개 이상인 형상일 때 내부마찰각을 통해 원통형 전단력이 발현된다. 본 연구에서는 이 세 가지 방법 중 나선형 원판 사이의 지반 전체가 동일하게 저항하여 원통형으로 전단력을 발생시킨다는 가정 하에 지지력을 산정하는 Cylindrical shear method를 적용하여, 재료비 측면에서 헬리컬 파일을 최적 설계하는 방법에 대해 연구하였다.

현재까지 최적화를 위해 다양한 분야에서 많은 알고리즘 기법들이 개발되어 왔다. 이 알고리즘들은 자연을 모방하였다고 하여 메타휴리스틱(Meta-Heuristic) 알고리즘이라고 불린다. 메타휴리스틱 알고리즘은 한정된 시간 안에 가장 좋은 해를 제시하는 것을 목적으로 하며, 목적함수를 만족하는 최적 값을 한정된 시간 안에서 랜덤함수와 알고리즘이 제공하는 연산자를 사용해 찾는다. 대표적인 메타 휴리스틱 알고리즘으로 유전자 알고리즘(Genetic algorithm, GA), 개미군집화 알고리즘(Ant Colony Optimization, ACO),

입자군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO), 하모니서치 알고리즘(Harmony search algorithm, HS) (Geem et al., 2001) 등이 있다. 이 중 하모니서치 알고리즘은 음악가가 음악의 구성요소들을 통하여 보다 최적의 하모니를 창출해 나가는 음악적인 개념을 도입시킨 최적화 기법으로써 최적화의 과정에서 함수의 연속성 및 미분을 요구하지 않고 오직 확률적인 측면에서 접근하여 최적화를 한다는 특징이 있다. 하모니서치 알고리즘은 단순한 수학적 조건을 요구하며, 다양한 유형의 변수가 존재하는 최적화 문제에 보다 쉽게 이용할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점들로 인하여 구조나 수자원 등의 분야에서는 하모니서치 알고리즘의 많이 적용되고 있다. 하지만, 지반공학 분야에서 하모니서치 알고리즘이 적용된 사례는 아직 찾아 볼 수 없었다. 이에 따라 본 논문에서는 지반공학 분야에서는 처음으로 메타휴리스틱 알고리즘 중 하모니서치 알고리즘을 통해 헬리컬 파일 제작비용(재료비)의 최소화를 위한 헬리컬 파일 형상의 최적화 연구를 수행하였다.

하모니서치 알고리즘은 크게 초기 값 설정, 하모니 메모리(Harmony memory) 초기화, 새로운 하모니의 구성(Improvisation), 하모니 메모리(Harmony memory) 업데이트, 새로운 하모니의 구성 및 업데이트의 반복으로 크게 5가지 과정으로 분류가 된다. 이에 대한 자세한 설명은 3.2절에 명시하였다.

본 연구에서는 벌칙함수(Penalty function)를 이용한 하모니서치 알고리즘을 통하여 헬리컬 파일이 여러 가지 제약 조건하에 Cylindrical shear method로 산정된 하중(지지력)을 발현하며, 최소한의 재료비로 제작 될 수 있도록 헬리컬 파일의 형상을 설계하였다. 또한, 각 하중에 대한 헬리컬 파일의 지지력에 영향을 미치는 영향인자의 변화양상을 분석하였다. 마지막으로 그 결과를 2009 IBC에서 제시한 규격화된 설계 결과와 비교·분석하여 두 설계법의 경제성을 분석하였다. 연구과정에서 헬리컬 파일 설계 최적화에 적용된 지반 조건은 경기도 김포시 통진읍 일대에서 헬리컬 파일의 극한 지지력 시험시공 과정에서 수행한 표준관입시험 자료이다. 헬리컬 파일의 관입이 예상되는 깊이는 모두 사질토로 구성되어 있고 이에 따른 지반의 지지력을 2.1절에서 산정하였다.

2. 설계함수

2.1 헬리컬 파일의 극한지지력

Cylindrical shear method에 근거한 헬리컬파일의 극한지지력은 Eq. (1)과 같다. 이는 실린더 주변의 전단력과, 축을 따라 발생하는 지반과 축 사이에 작용하는 부착력, 그리고 바닥면 나선형 원판(helix)이 발현하는 선단지지력의 합으로 산정된다(Mooney et al., 1985).

$$P_u = q_{ult}A_1 + T(n-1)s\pi D_{avg} + \alpha H(\pi d) \quad (1)$$

- 여기서, q_{ult} : 극한지지응력
 A_1 : 최하부 나선형 원판의 면적
 T : 원통형 지반의 전단강도
 n : 원판의 개수
 s : 원판과 원판 사이 간격
 α : 지반과 축 사이의 부착력
 H : 최상부 나선형 원판까지의 축 길이
 D_{avg} : 나선형 원판의 평균 직경
 d : 축의 직경

Individual bearing method에 근거한 헬리컬 파일의 극한지지력은 Cylindrical shear method에서 적용된 원통형 전단력을 사용하는 대신, 각각의 나선형 원판에 작용하는 선단지지력과 중공형 강재 축을 따라 발생하는 지반과 축 사이에 작용하는 부착력의 합으로 Eq. (2)와 같이 산정된다(Mooney et al., 1985).

$$P_u = \sum_{i=1}^n q_{ult,i}A_i + \alpha H(\pi d) \quad (2)$$

- 여기서, $q_{ult,i}$: i번째 나선형 원판의 극한지지응력
 A_i : i번째 나선형 원판의 면적

본 연구에서는 두 가지 극한지지력 산정 방법 중 Cylindrical shear method (Eq. (1))를 적용하여 헬리컬 파일 형식의 최적화를 수행하였다. 헬리컬 파일의 지지력 발현에 대한 이해를 돕고자 헬리컬 파일 내에서 지지력이 발현 모식도를 Fig. 1에 나타냈다.

본 논문에서는 나선형 원판의 개수가 전체 지지력 산정에 주는 영향력을 객관적으로 분석하기 위하여 나선형 원판의 개수에는 변화를 주었으나, 각각의 원판의 직경은 동일한 크기로 설계하였다. 극한지지응력(q_{ult})은 Terzaghi(1943)의 제안식이나 Meyerhof (1951)의 제안식 이외에도 표준관입시험(SPT)으로 예측하는 경험식 등이 다양하게 제시되었다(Perko, 2009). 이중 가장 보편적으로 사용되는 Meyerhof의 제안식은 다음 Eq. (3)와 같다.

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c + q'N_q s_q d_q + 0.5\gamma BN_r s_r d_r \quad (3)$$

- 여기서, c : 점착력
 q' : 유효응력
 B, L : 기초의 길이와 폭(나선형 원판 직경으로 동일)
 γ : 지반의 단위중량
 N_c, N_q, N_r : 지지력계수
 s_c, s_q, s_r : 형상계수
 d_c, d_q, d_r : 깊이계수

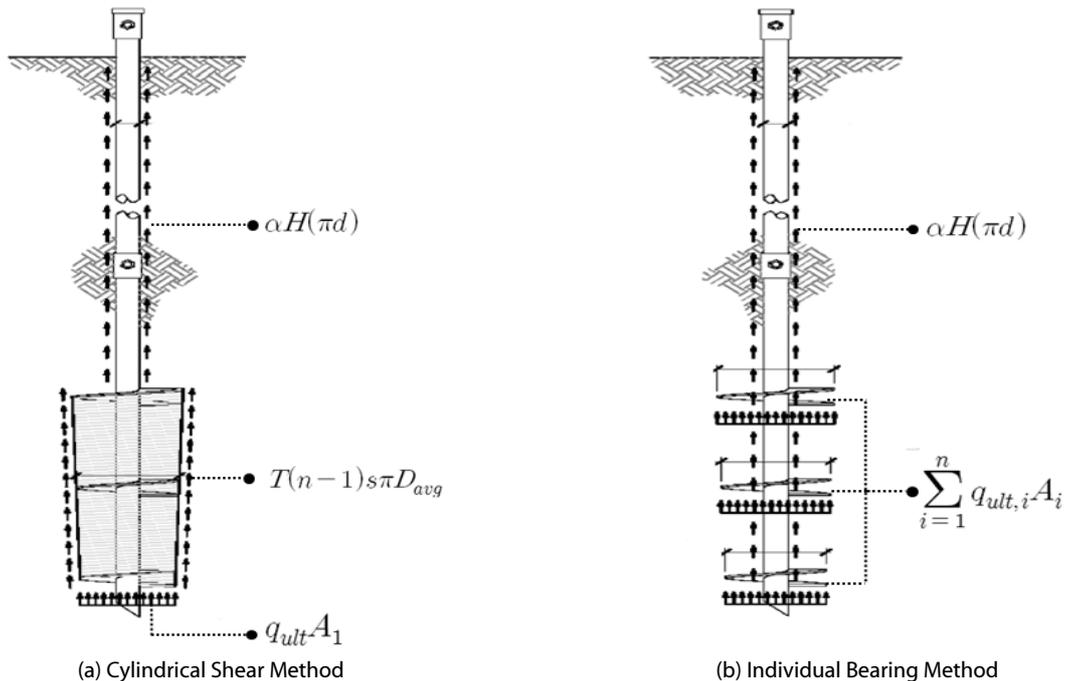


Fig. 1. Bearing Capacity of Helical Pile

하지만, 본 논문의 최적화 알고리즘에는 일반적으로 지반조사에서 수행되는 표준관입시험 결과를 적용하여 헬리컬 파일의 극한지지력을 간편하게 예측하는 Parry(1977)의 경험식을 모태로 사질토 지반에 대해 Perko(2009)가 수정한 Eq. (4)를 적용하였다.

$$q_{ult} = 11\lambda_{spt}N \quad (4)$$

여기서, λ_{spt} : 0.065 tsf
 N : 표준관입시험 타격횟수

Ghaly and Clemence(1998)는 헬리컬 파일에서 축과 지반 사이에 발생하는 부착력을 지반의 전단강도와 관련하여 Eq. (5)과 같이 제시하였다. 여기서 T 는 Eq. (1)에서 제시한 원통형 지반의 전단강도에 해당한다.

$$\alpha = 2/3T \quad (5)$$

원통형 지반의 전단강도 T 는 조립토(coars grain)와 세립토(fine grain)에 따라 적용을 달리 하며, 본 논문에서는 사질토인 대상지반을 고려하여 전단강도 T 를 Mitsch and Clemence(1985)가 조립토에 대해 제안한 Eq. (6)로 적용하였다.

$$T = (0.09e^{0.08\Phi})(\gamma_z - \gamma_w h_w) \tan \Phi \quad (6)$$

여기서, Φ : 흙의 내부 마찰각
 γ_z : 흙의 단위중량
 γ_w : 물의 단위중량
 h_w : 지하수위

또한, 본 논문에서는 사질토 지반에서 표준관입시험 결과를 통해 흙의 내부 마찰각을 예측하는 많은 경험식들 중 Peck et al.(1974)이 제시한 Eq. (7)을 적용하였다.

$$\Phi = 0.3N + 27 \quad (7)$$

대상 현장의 사질토 지반에 대해서 Eqs. (1)~(7)을 적용한

Cylindrical shear method를 통한 지반에 관입된 헬리컬 파일의 극한지지력을 산정할 수 있고, 이 극한지지력은 헬리컬 파일의 재료비를 최소화시키는 과정에서 주어진 설계하중 이상으로 발현되어야 하는 제약함수로 설정하였다.

2.2 헬리컬 파일의 재료비 산정

지지력을 계산하는 설계함수를 근거로 헬리컬 파일을 설계할 때, 헬리컬 파일의 제작비용을 자재(강재)의 단위중량을 이용하여 Eq. (8)에 나타냈다. 일반적으로 헬리컬 파일 제작에 사용되는 강재의 가격과 지지력 발현 메커니즘을 고려하여 헬리컬 파일 축은 1100(원/kg)의 강재를 사용하였으며, 나선형 원관은 900(원/kg)으로 상대적으로 약한 강재를 사용하였다. 헬리컬 파일 조립 시 사용되는 접합부(Coupler)는 재료비에서 고려하지 않았다. 본 연구에서 헬리컬 파일 제작비용은 김포시 현장 시험에 실제로 사용된 강재에 대한 제작비용으로서 특정한 구매조건과 재료특성에 한정된 경우이다.

$$Cost(won) = \pi[(0.5d)^2 - (0.5d - t_1)^2] \times z \times 7.84 \times 1100/1000 + \pi[(0.5D_{avg})^2 - (0.5d)^2] \times n \times t_2 \times 7.84 \times 900/1000 \quad (8)$$

여기서, t_1 : 중공축의 두께
 t_2 : 나선형 원관의 두께
 n : 나선형 원관의 개수
 z : 관입깊이

2.3 제약조건

Cylindrical shear method를 통한 지지력 산정 식에 현장의 관입조건을 만족시키기 위한 제약조건들을 고려하였다. 첫 번째 제약 조건으로 토크 적합조건(Hoyt and Clemence, 1989)이 있다. 이는 직접적으로 Cylindrical shear method를 이용한 극한 지지력 산정에는 영향을 주지 않으나, 시공 시 토크 값 산정에 중요한 요소이므로 이중 몇 가지 고려사항들을 Table 1과 같이 제약조건에 포함시켰다.

두 번째 제약 조건으로 최소 관입깊이(Minimum embedment)

Table 1. Torque Correlation Conformance Criteria (Modified from CC-ES, 2007)

Criteria
Round shaft with outside diameters between 73mm and 89mm
Helical plate diameters between 203mm and 356mm
Helical plates spaced along the shaft between 2.4 to 3.6 times the helix diameter

Table 2. Minimum Helical Anchor Embedment (Ghaly and Hanna, 1992)

Soil condition	Normalized Embedment Depth (H/D_T)
Fine-grain	5
Coarse-grain (loose)	7
Coarse-grain (medium)	9
Coarse-grain (dense)	11

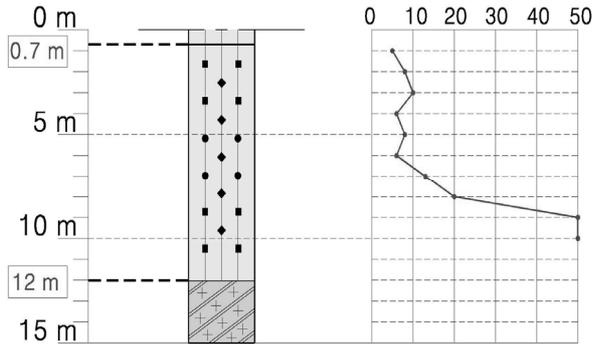


Fig. 2. Soil Profile (N Value) in Test Bed

를 만족시키는 조건을 적용하였다. 이는 얇은 기초에서 인발하중을 버틸 수 있는 최소한의 관입 깊이에 대한 제약식이다. Ghaly and Hanna(1992)는 사질토지반에서의 헬리컬 앵커 축소실험을 통해 지반조건에 따른 상대관입도(H/D_T)를 Table 2와 같이 나타냈다. 여기서 D_T 는 나선형 원판의 직경에 해당하고, H 는 지상으로부터 최상단 나선형 원판까지의 거리에 해당한다.

본 논문에서는 인발하중이 작용하는 사질토의 조건을 Table 2의 연약지반 조립토(loose coarse-grain)로 동일하였고 그에 따른 상대관입도($H/D_T = 7$)를 적용하였다.

2.4 입력 조건 함수

입력함수는 주로 지반조건과 관련된 값들로, 지지력 발현에 영향을 주는 요소로 구성하였다. 지반에서 N치 값은 입력 조건 중 최적화 설계에 가장 큰 영향을 미치는 조건으로써, 지반의 깊이에 따른 N치 분포를 설계에 반영하기 위해 경기도 김포시 통진읍

일대에서 수행된 표준관입시험(SPT) 결과로 얻어진 N치 분포를 적용하였다. 대상 지반은 지표에서 0.7m까지 퇴적층, 0.7m에서 12m까지 풍화토, 그 이후로는 풍화암으로 구성되어 있으며 지반조건은 Fig. 2에 나타났다. 본 논문에서는 지반의 물성치 중 심도에 따른 N치의 변화만 설계에 반영하였다.

추가적인 입력변수로 흙의 건조단위중량은 $1.76 t/m^3$, 지하수위는 지표에서 1m, 한계 관입 깊이는 최대 8.4m로 지정하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 해당 현장이 사질토지반으로 구성되어 있다고 가정하여 지지력을 산정하였다. 좌굴은 고려하지 않았으며, Eq. (8)에 제시된 축의 두께(t_1)를 1.1cm, 나선형 원판의 두께(t_2)를 2.2cm 로 동일하게 유지하였다.

2.5 2009 International Building Code를 통한 규격화

하모니서치 알고리즘을 이용하여 실무에서 규격화된 기준에 따라 헬리컬 파일의 최적화 설계를 수행하였다. 헬리컬 파일 규격은 2009년 International Building Code(이하, 2009 IBC)를 활용하였다. 2009 IBC에 명시되어 있는 헬리컬 파일 형상에 대한 규격을 Table 3에 정리하였다. 나선형 원판의 직경은 20.32cm, 25.40cm, 30.48cm, 35.56cm, 40.64cm로 총 5가지 종류로 구분하고, 축의 직경은 6.03cm, 7.30cm, 8.89cm, 11.43cm로 총 4가지로 분류된다. 2009 IBC를 참조하여 규격화한 헬리컬 파일 자체의 가격에서 나선형 원판의 두께(t_2)는 2.2cm로 하였으나, 축의 두께(t_1)는 Table 3과 같이 축의 직경에 따라 규격을 다르게 적용하였다.

본 논문에서는 전술한 바와 같이 현장조건과 시공성을 설계에 반영하기 위하여 2.3절에서 제시한 제약조건들을 고려하였다. 이 중 Table 1의 제약조건에 따라 나선형 원판의 직경은 20.32cm, 25.40cm, 30.48cm, 35.56cm와 같이 총 4가지 종류를 고려하였으며, 축의 직경은 7.30cm와 8.89cm에 대해서만 고려하였다.

3. 하모니서치 알고리즘을 이용한 최적화 설계

많은 메타휴리스틱 알고리즘들은 자연현상을 모방하여 수학적 인 알고리즘을 생성한다. 개미군집화 알고리즘(Ant Colony Optimization, ACO)은 개미들이 먹이를 운반하는 최소경로를 찾아가

Table 3. Helical Pile Standard According to 2009 International Building Code

Plate Diameter (cm)	Shaft outside Diameter (cm)	Shaft inside Diameter (cm)	Shaft Thickness (cm)	Shaft Area (cm ²)
20.32	6.03	5.07	0.48	8.41
25.4	7.30	6.20	1.10	11.69
30.48	8.89	7.60	1.29	16.71
35.56	11.43	9.20	2.23	36.06
40.64				

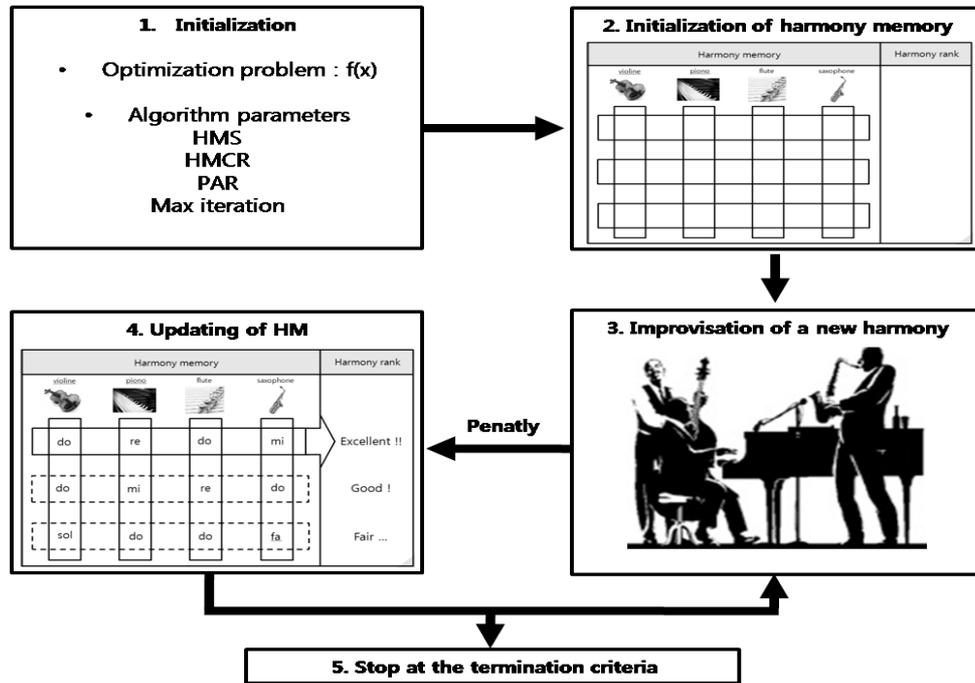


Fig. 3. Conceptual Diagram of Harmony Search Algorithm

는 과정을 모방해 만들어졌으며, 입자군집 최적화 알고리즘 (Particle Swarm Optimization, PSO)은 철새들이 이동하면서 무리를 짓는 패턴을 모방하여 생성된 알고리즘이다. 본 연구에서 적용한 하모니서치 알고리즘은 음악적인 하모니 즉, 각각의 음색이 조화를 이루어 최적의 화음을 만들어내는 과정을 모방한 최적화 알고리즘이라고 할 수 있다. 하모니서치 알고리즘은 다른 알고리즘에서와 같이 수학적 미분과정이 필요하지 않고, 각각의 변수가 갖는 해 즉, 하모니(Harmony) 값을 하모니 메모리(Harmony memory)에 저장하고 그 순위를 지속적으로 개선하여 최적의 하모니 값을 도출한다. 이 과정에서 대표적으로 적용되는 매개변수 중, 변형조정률(PAR)은 최적의 해가 국부 최적(Local optimum)이 아닌 전역 최적(Global optimum)으로 도달 할 수 있도록 해주며, 벌칙함수(Penalty function)는 제약조건에 근거하여 하모니 값의 순위를 산정하는데 중요한 역할을 하게 된다. 하모니서치 알고리즘이 작용하는 개념도를 Fig. 3에 나타냈다.

3.1 하모니서치 알고리즘의 매개변수

하모니서치 알고리즘의 적용에 사용되는 매개변수는 크게 4가지로 분류되며 아래와 같다.

- HMS (Harmony memory size) : Harmony memory에서 헤벡터의 수
- Maximum iteration : 알고리즘을 종료시키는 탐색 수

Table 4. Parameters Adopted in HS Algorithm

Parameters in HS algorithm	
HMS (Harmony memory size)	30
Max iteration	20000
HMCR (Harmony memory considering rate)	0.8
PAR (Pitch adjusting rate)	0.3

- HMCR (Harmony memory considering rate) : Harmony memory의 기여도
- PAR (Pitch adjusting rate) : 변형 조정률

Cylindrical shear method를 적용하여 산정하였을 때 소요지력을 확보 할 수 있는 헬리컬 파일 형상에 대한 최적화 설계를 진행하였다. 2.3절에서 제시한 제약조건에 따라 Eq. (1)의 극한지력이 최소의 강제 사용량(재료비)으로 발휘될 수 있도록 하모니서치 알고리즘을 통하여 헬리컬 파일 형상에 대한 설계를 수행하였고, 이 과정에서 적용한 매개변수 값들을 Table 4에 정리하였다.

헬리컬 파일의 최적설계 과정은 Table 4에 제시된 매개변수들을 하모니서치 알고리즘을 통하여, 지반의 물성치(Fig. 2)를 입력변수로 추가하고, 설계 시 필요한 제약조건을 고려하여 Cylindrical shear method로 산정한 지지력이 최소한의 강제 사용량(재료비)으로 발휘하도록 헬리컬 파일의 형상 및 관입심도를 결정하는 것이다.

헬리컬 파일에 전달되는 축 하중을 4ton부터 48ton까지 증가시킴에 따라 설계를 구성하는 헬리컬 파일의 형상이 변화되는 추이를 분석하였다.

3.2 하모니서치 알고리즘 흐름도

본 논문에서 수립한 하모니서치 알고리즘을 통한 최적화 과정을 Fig. 4에 정리하였으며, 각 최적화 단계를 다음과 같이 5단계로 구분하였다.

- 1단계: 최적화 문제와 알고리즘의 변수들을 초기화 하는 단계

목적함수 $f(x)$ 를 설정해주며, 3.1절에서 명시한 설계변수 및 하모니서치 알고리즘의 매개변수를 지정한다.

- 2단계: 하모니 메모리(Harmony memory)의 초기화 단계

3.1절에서 명시한 HMS(Harmony memory size)만큼 임의로 산출한 헤벡터를 채우는 단계이다.

- 3단계: 새로운 하모니의 산출(Improvisation) 단계

1단계에서 설정한 매개변수들 중 HMCR, PAR을 적용하여 새로운 하모니를 통한 헤벡터를 도출하는 단계이다. 이 과정에서 주어진 제약조건을 반영하지 않는 헤벡터에 대해서는 벌칙함수(Penalty function)가 추가로 적용되어 산출되며 이는 4단계에서 메모리 내에 순위를 재 정렬시키는 과정에서 불리하게 적용된다. 여기서 벌칙함수(Penalty function)는 알고리즘에서 지정한 제약 조건을 위반한 헤벡터에 한하여, 헤벡터를 찾아가는 과정에 불리한 값을 부과하여 최적의 해를 도출하는 후보순위에서 멀어지게 하는데 목적을 두는 함수를 의미한다.

- 4단계: 하모니 메모리(Harmony memory)의 개선 단계

3단계에서 새롭게 도출된 헤벡터를 하모니 메모리에 포함하여 목적함수에 적합하게 순위를 재 정렬시키는 단계이다. 이 중 새롭게 추가된 헤벡터를 포함하여 하모니 메모리 중 가장 질이 낮은 헤벡터는 배제 된다.

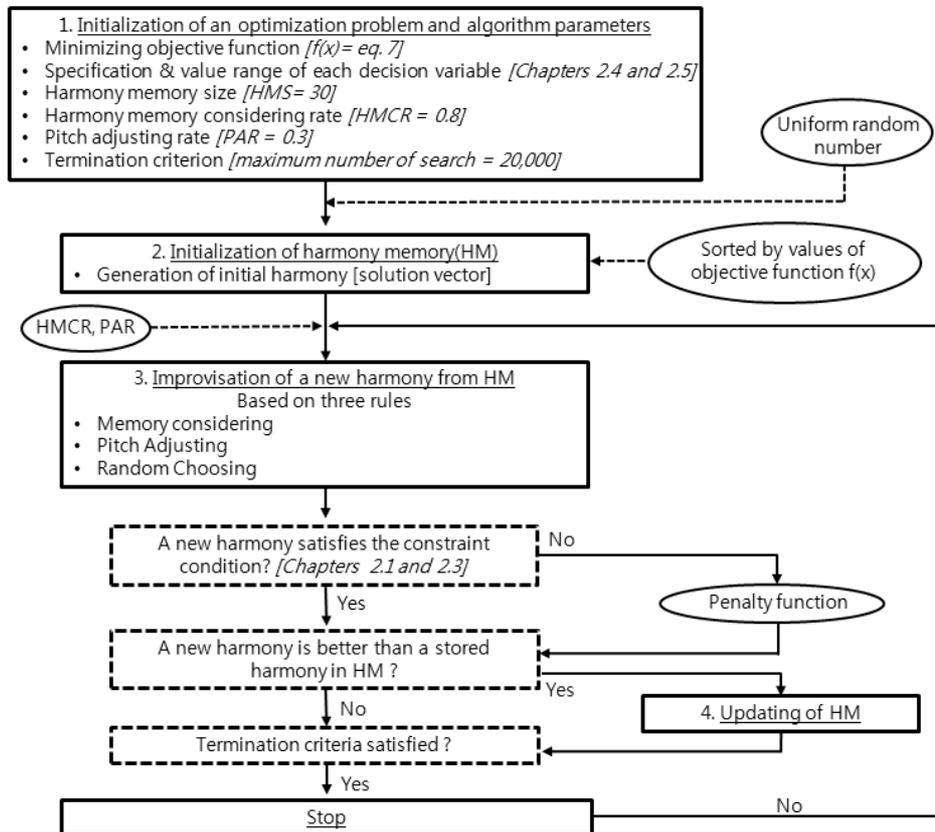


Fig. 4. Optimization flow Chart of Harmony Search Algorithm

- 5단계: 3단계와 4단계의 반복 단계

3.1절에서 명시한 최대 반복횟수(Max. iteration) 만큼 3~4의 단계를 반복하는 단계이다.

위에서 설명한 5 단계의 흐름을 Geem et al. (2001)이 제시한 하모니서치 알고리즘 흐름도를 수정하여 헬리컬 파일 형상의 최적화에 적합하게 Fig. 4에 나타냈다.

3.3 해석결과 분석

본 논문에서는 강제 사용량(재료비)을 최소화하는 최적화 조건 하에서 재하 하중이 증가함에 따라 헬리컬 파일의 지지력에 영향을 미치는 인자들의 변화양상을 분석하였다. 또한 2009 IBC의 규정을 기반으로 정규화 시킨 후 최적화 설계한 데이터를 분석하여 두 설계법의 경제성과 실용성을 비교·분석 하였다. 헬리컬 파일의 형상에 영향을 주는 요소들은 축의 직경, 나선형 원판의 직경,

나선형 원판사이의 간격, 관입깊이, 나선형 원판의 개수로 총 5가지 요소를 고려하였다. 축의 직경과 나선형 원판의 직경, 나선형 원판사이의 간격은 토크적합조건(Table 1)에서 권장한 규격범위로 설계하였고, 관입깊이는 지상으로부터 8.4m 까지, 나선형 원판의 개수는 1~5개로 그 범위를 설정하였다. 영향인자들을 정규화하지 않고 최적화 설계를 수행한 결과는 Table 5에 나타냈고, 변수들의 크기를 2009 IBC 규격을 참조하여 최적화한 결과는 Table 6에 나타냈다. 각 하중 당 30회의 반복해석을 실시하였으며, 그 중 가장 최적화된 값 즉, 최소의 비용으로 설계된 결과를 Tables 5 and 6에 각각 정리하였다.

입력변수를 정규화 시키지 않고 강제 사용량(재료비)이 최소가 되도록 최적화한 결과를 분석하면 요구되는 지지력 증가에 따른 영향인자들의 변화양상을 알 수 있다. 축의 직경은 지지력의 증가와 상관없이 7.3cm로 수렴하려는 양상을 나타냈다. 관입깊이는 요구되는 지지력이 증가함에 따라 점차적으로 증가하였으며, 32ton에서

Table 5. HSA Output Without Input Data Normalization

Design Load (Kg)	Shaft dia (cm) [7.3 8.9]	Plate dia (cm) [20.3 35.56]	Plate space (cm) [48.72 236.16]	Depth (cm) [0 820]	Plate num [1-5]	Cost (won)
4000	7.30	27.80	68.98	212.32	1	48065
6000	7.30	33.02	84.70	238.78	1	56839
8000	7.30	32.75	87.17	328.95	2	85748
10000	7.30	33.69	121.28	498.68	2	118670
12000	7.30	35.08	109.08	488.14	3	133410
14000	7.30	33.43	84.44	731.44	1	148310
16000	7.30	34.39	120.84	752.34	1	152970
18000	7.30	34.29	116.53	785.89	1	159100
20000	7.30	32.11	94.09	814.31	1	162590
22000	7.30	34.54	85.06	812.78	1	164290
24000	7.30	33.36	95.84	827.44	1	166020
26000	7.30	33.98	94.56	833.28	1	167610
28000	7.30	29.74	107.08	837.61	2	175260
30000	7.30	31.52	113.48	834.55	2	177360
32000	7.30	31.92	114.64	840.00	2	178980
34000	7.30	33.10	119.16	840.00	2	180860
36000	7.30	34.26	122.95	840.00	2	182770
38000	7.30	33.17	119.42	840.00	3	193760
40000	7.30	34.19	123.09	840.00	3	196270
42000	7.30	35.21	126.07	840.00	3	198860
44000	7.30	34.70	124.91	840.00	4	211590
45000	7.30	35.17	126.30	840.00	4	213190
46000	7.55	35.56	128.02	840.00	4	220660
47000	7.30	35.44	115.41	840.00	5	228800
48000	8.90	35.38	122.24	840.00	5	952860000

Table 6. HSA Output with Input Data Normalization According to 2009 IBC

Design Load (Kg)	Shaft dia (cm) 2 cases	Plate dia (cm) 4 cases	Plate space (cm) interval : 5 cm	Depth (cm) interval : 10 cm	Plate num [1-5]	Cost (won)
4000	7.30	30.48	95.00	220.00	1	51393
6000	7.30	30.48	105.00	260.00	1	62889
8000	7.30	35.56	115.00	290.00	1	68439
10000	7.30	35.56	125.00	470.00	2	116530
12000	7.30	35.56	105.00	490.00	3	135010
14000	7.30	35.56	115.00	710.00	1	146140
16000	7.30	35.56	95.00	740.00	1	151690
18000	7.30	35.56	105.00	780.00	1	159090
20000	7.30	30.48	95.00	830.00	1	164250
22000	7.30	35.56	105.00	810.00	1	164640
24000	7.30	35.56	95.00	820.00	1	166490
26000	7.30	35.56	102.00	830.00	1	168340
28000	7.30	35.56	125.00	840.00	1	170190
30000	7.30	35.56	125.00	820.00	2	181280
32000	7.30	35.56	125.00	820.00	2	181280
34000	7.30	35.56	125.00	830.00	2	183130
36000	7.30	35.56	125.00	840.00	2	184980
38000	7.30	35.56	125.00	840.00	2	184980
40000	7.30	35.56	115.00	840.00	3	199770
42000	7.30	35.56	125.00	840.00	3	199770
44000	7.30	35.56	125.00	840.00	4	214550
45000	7.30	35.56	125.00	840.00	4	214550
46000	7.30	35.56	105.00	840.00	5	229340
47000	7.30	35.56	115.00	840.00	5	229340
48000	7.30	35.56	125.00	840.00	5	1374100000

관입깊이의 한계 값인 8.4m로 수렴하기 시작하였다. 관입깊이가 수렴하기 시작하면서 다른 영향인자들의 규칙적인 변화양상이 도출되었다. 먼저, 나선형 원판의 직경이 점차적으로 증가하기 시작하였으며, 원판의 직경이 한계 값에 도달하는 순간 소요 원판의 개수가 추가되었다. 원판이 추가됨에 따라 나선형 원판의 직경은 소폭 감소하였으며 다시 지지력에 따라 한계 값 까지 증가하는 과정을 반복하였다. 나선형 원판 사이의 간격은 강제 사용량에 직접적으로 영향을 주지 않기 때문에 2.3절에서 명시한 제약조건 중 최대값으로 수렴하는 경향을 보였다. 본 논문에서 제시한 제약 조건하에 헬리컬 파일은 48ton일 때 벌칙함수(penalty function)가 적용된 것으로 보아, 본 현장의 지반조건에 대해서는 허용 설계하중은 48ton 미만임을 유추할 수 있다.

2009 IBC를 적용하여 입력변수를 정규화 시켜 강제 사용량(재료비)이 최소가 되도록 최적화한 결과를 Table 6에 나타냈다. 전술했듯이, 축은 2가지 직경으로, 나선형 원판의 직경은 4가지로 규격

화하여 고려하였으며, 실제 실무에 적용될 수 있도록 편의성을 고려하여 나선형 원판 사이의 간격은 5cm 단위로, 관입깊이는 10cm 단위로 정규화 하였다. 전체적인 양상은 정규화 시키지 않은 결과 값(Table 5)과 유사하게 나타났지만, 그 규칙성이 명확하지 않았다. 이는 관입깊이의 간격이 10cm가 됨에 따라, 주어진 하중 이상의 지지력으로 설계가 되고, 그에 따라 남은 영향인자들이 지지력에 주는 영향력이 감소했기 때문일 것으로 사료된다. Tables 5 and 6을 비교한 결과, 정규화 시킨 규격으로 최적화 설계한 비용(Table 6)이 정규화 시키지 않은 최적화 설계비용(Table 5)보다 상대적으로 높은 재료비가 산정됨을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 헬리컬 파일의 극한지지력을 Cylindrical shear method에 기반을 두고 소요 지지력 증가에 따른 헬리컬 파일의

형상을 하모니서치 알고리즘을 통하여 최적화하였다. 이를 통해 축의 직경, 나선형 원판의 직경, 나선형 원판 사이의 간격, 나선형 원판의 개수 및 관입깊이가 분포하는 양상을 분석하였다.

- (1) 소요 지지력 증가에 따른 헬리컬 파일 영향인자들의 변화양상을 분석한 결과, 영향인자들의 규칙성은 관입깊이가 한계값으로 수렴하기 시작하면서 나타났으며, 최소 재료비로 헬리컬 파일 형상을 최적화하는 과정에서 지지력 발현에 영향을 주는 인자들의 영향력은 관입깊이, 나선형 원판의 직경, 원판의 개수, 원판 사이의 간격, 축의 직경 순으로 큰 것을 확인 할 수 있다.
- (2) 최적화 설계한 값 중 일부구간(단계하중 10~12ton)은 변화양상에서 벗어난 의외의 값들이 도출 되었다. 이는 Fig. 2에서 N치가 감소하는 구간(3~4m 구간과 5~6m 구간)이 헬리컬 파일의 설계 형상에 영향을 준 것으로 사료된다. 이를 통해 단계하중에 따른 재료비 최적화 과정에서 영향인자들의 변화양상은 규칙성을 갖지만, 이는 지반의 특성에 매우 의존적이고, 최적화 과정에서 예측할 수 없었던 결과 값들이 도출 된다는 점에서 하모니서치 알고리즘을 적용한 헬리컬 파일 형상의 최적화 설계가 갖는 적합성을 확인할 수 있다.
- (3) 2009 IBC의 규정을 참고하여 규격화된 설계의 재료비는 규격화하지 않고 설계된 재료비 보다 상대적으로 높게 산정되었다. 이는 주어진 하중에 대한 정밀한 설계의 한계성을 보여준다고 할 수 있으나, 실무자들의 이용에 대한 편의성과 공급되는 자재의 규격화를 고려한다면, 규격화된 조건에 대한 최적 설계도 중요하다.
- (4) 본 논문에서 제시한 재료비 최소화를 위한 헬리컬 파일 형상의 최적 설계 기법은 실제 실무에서 적용하는 설계 최적화에는 한계를 갖는다. 본 논문에서는 관입깊이에 따른 재료의 물량 증가만 고려하였으나, 실제 시공 시에는 관입 깊이가 깊어짐에 따라 소요되는 토크와 시공에 소요되는 유틸리티의 증가 및 시공 기간의 연장으로 인해 시공비가 증가할 수 있다. 따라서 본 논문의 후속연구로 현장 시공조건과 시공비를 추가적으로 고려하여 헬리컬 파일의 형상의 최적 설계를 도출할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 지원(No. 12CTAPE02)과 POSCO가 지원한 “원형강관을 이용한 소구경 파일의 설계 기준 정립 및 시공절차 개발” 연구의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Darin Willis, P. E. (2010). *How to design helical piles per the 2009 international building code.*, Available at : <http://www.foundation-repairnetwork.com/design-helical-piles.pdf> (Accessed: April 02, 2014).
- Ghaly, A. M. and Hanna, A. M. (1992). “Stresses and strains around helical screw anchors in sand.” *J. of Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 4, pp. 27-42.
- Ghaly, A. M. and Hanna, A. M. (1994b). “Ultimate pullout resistance of single vertical anchors.” *J. of Canadian Geotechnical*, Vol. 31, No. 5, pp. 661-672.
- Ghaly, A. M. and Clemence, S. P. (1998). “Pullout performance of inclined helical screw anchors in sand.” *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 7, pp. 617-627.
- Geem, Z. W., Kim, J. H. and Loganathan, G. V. (2001). “A new heuristic optimization algorithm: Harmony Search.” *J. of Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.
- Hoyt, R. M. and Clemence, S. P. (1989). “Uplift capacity of helical anchors in soil.” *Proc. of the 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 2, pp. 1019-1022.
- ICC-Evaluation Services (2007). *AC308 Acceptance criteria for helical pile foundations and devices*, Available at: www.icc-es.org.
- Lee, K. S. and Geem, Z. W. (2004). “A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization : Harmony Search Theory and Practice.” *J. of Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 194, No. 36, pp. 3902-3933.
- Lee, S. K., Ko, K. E. and Sim, K. B. (2011). “Study on improvement of convergence in harmony search algorithm.” *J. of Korea intelligent information system society*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-34.
- Mooney, J. S., Adamczak S. Jr. and Clemence, S. P. (1985). “Uplift capacity of helix anchors in clay and silt.” *Proc. of Conf. on Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil*, ASCE, Detroit, Michigan, pp. 48-72.
- Meyerhof, G. G. (1951). “The ultimate bearing capacity of foundations.” *J. of Geotechnique*, Vol. 2, No. 4, pp. 301-332.
- Mitsch, M. P. and Clemence, S. P. (1985). “The uplift capacity of helix anchors in sand.” *Proc. of Conf. on Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil*, ASCE, Detroit, Michigan, pp. 26-47.
- Peck, R. B., Hanson, W. E. and Thornburn, T. H. (1974). *Foundation engineering*, John Wiley & Sons, Inc, New York, N.Y.
- Perko, H. A. (2009). *Helical piles : A Practical Guide to Design and Installation*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey
- Parry, R. H. G. (1977). “Estimating bearing capacity of sand from SPT values.” *J. of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. 9, pp. 1014-1019.
- Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley and Sons, New York, N.Y.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York, N.Y.