타워크레인의 파일기초 최적설계 알고리즘 개발

An Optimal Design Algorithm of Pile Supported Foundations of Tower Cranes

유 상 연* 서 덕 석** 김 선 국***
Ryu, Sang-Yeon Seo, Deok-Seok Kim, Sun-Kuk

Abstract

As buildings increase in height, lifting plans are becoming increasingly important on construction sites. As a critical piece of load-lifting equipment, the tower crane deserves a well thought-out stability review, since it has a significant impact and is very vulnerable to structural safety disaster. To ensure the structural stability of a tower crane, its lateral support or pile supported foundation designs must include consideration for stability, and pile foundation must beused if site conditions prevent soil from providing the required bearing capacity, or prevent the foundation from being increased to the required extent. Pile supported foundation design requires thorough andsystematic review, as more stability parameters need to be considered than with an independent foundation.

This paper intends to develop an optimal design algorithm that can minimize associated costs while ensuring thefundamental stability of pile supported foundation design, limiting the scope of research to fixed-type trolley tower cranes using pile supported foundations. The findings herein on pile foundation stability review parameters, process and optimal design are expected to improve the operational efficiency of staff concerned, and reduce the time and efforts required for pile foundation design.

Keywords : Pile Supported Foundation, Tower Crane, Optimal Design, Algorithm

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 건축물이 높이가 증가함에 따라 자재와 인력을 양중하기 위한 장비의 중요성이 증대되고 있다. 타워크레인은 건설현장의 주요한 양중장비로서 사용되어지고 있는 반면 한국의 경우, 건설현장의 안전재해 중 타워크레인 관련 재해가 32%를 차지하고 있다.(2007년 7월,통계청) 자연재해에 따른 안전사고는 제외하더라도 기본적인 설치 및 해체상의 안정성 검토는 철저하게 이루어져야 한다. 그러나 타워크레인의 설치 및 해체 작업에 대한 기준은 한국산업안전공단에서 제시하고 있지만 일반적인 안전수칙 강조에 지나지 않는 문제점을 가지고 있다. 아울러 한국의 경우, 타워크레인의 설치 관련 업무가 장비 임대업체가 제시한 도면을 토대로 시공업체 담당자의 간단한 검토만을 통해 이루어지고 있다고 판단된다.

타워크레인은 횡지지 보강, 독립기초, 파일기초 등의 설계를 철저히 하여 구조적 안정성을 반드시 확보해야한다. 그 중 현장의 특수한 상황으로 인해 지내력 확보가 어렵거나 더 이상 기초판 사이즈를 증가시킬 수 없을 경우 파일을 보강한 기초를 사용하는데, 파일기초에 대한 안정성검토는 독립기초 설계시 보다 더 많은 항목이 존재하므로 체계적이고 철저한 검증이 필요하다.

타워크레인 기초의 안정성검토에 관련된 연구로서 호종관(2006)은 타워크레인 기초의 안정성검토를 위한 도구(tool)을 개발하였으며, 한갑규 외 2인(2007)은 그 도구를 이용하여 기종 선정 후 기초의 안정성검토 방법을 소개하였다. 이들의 경우, 최적화의 개념 없이 적정한 범위 내에서 기초의 안정성 검토가 이루어지는 한계점을 지니고 있음을 알 수 있다. 반면 김선국 외 2인(2009)의 연구에서는 타워크레인 기초의 최적설계 알고리즘을 제안하였으나 그 범위가 독립기초에 한정되어 파일기초를 사용하는 경우의 최적설계 연구 또한 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구는 타워크레인의 파일기초 설계는 물론 파일기초 최적설계 알고리즘 개발을 목적으로 한다. 본 연구 결과물은

* 경희대학교 대학원 석사과정(ryu3004@hotmail.com)
** 한라대학교 건축학부 교수, 공학박사(seodk@halla.ac.kr)
*** 경희대학교 건축공학과 교수, 공학박사, 교신저자, (kimskuk@khu.ac.kr)
이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(NO. R11 - 2008 - 098 - 00000 - 0)

차후에 진행될 파일기초 최적설계 프로그램 개발 연구의 기초자료로서 사용될 수 있을 뿐 아니라, 업무담당자의 타워크레인 설치 및 해체 관련 기초지식 전달에 활용되어 전문지식 함양에 도움 될 수 있으리라 사료된다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구의 범위 아래의 〈그림 1〉과 같이 파일기초를 사용하는 고정식 트롤리 형(trolley type)의 타워크레인으로 제한하여 진행한다. 또한, 현장의 특수한 여건으로 인해(지반의 지내력이 부족) 기초 사이즈 증가가 불가능하여 파일기초를 사용하는 타워크레인으로 그 범위를 제한하였다.

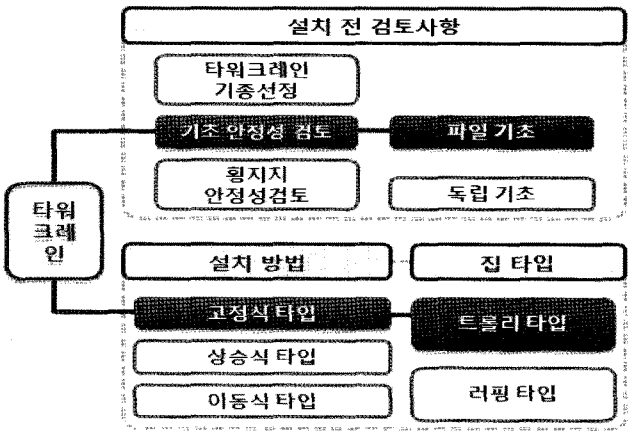

그림 1. 연구의 범위 및 방법

아울러 본 연구는 아래의 〈그림 2〉와 같은 방법으로 진행한다.

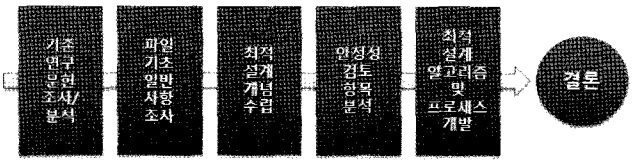

그림 2. 연구의 방법

우선 기존 연구 문헌을 조사하여 현재까지 진행된 타워크레인의 안정성 관련 기초 자료를 수집한다. 파일기초에 관한 일반적인 안정성 검토사항을 조사한 후 최적설계의 개념을 수립함과 동시에 파일기초의 안정성 검토 항목을 분석한다. 분석된 결과로서 각 안정성 검토 항목간의 상호연관성을 토대로 최적설계 알고리즘과 프로세스의 개념을 설정한다. 또한 제안된 프로세스를 기반으로 설계된 파일기초 시공에 투입되는 물량을 산출한다. 마지막으로 진행된 연구결과를 요약 및 정리하여 파일기초 최적설계 알고리즘 개발 연구의 결론을 도출한다.

2. 이론적 고찰

2.1 기존 연구문헌 조사 및 분석

현재까지 진행되었던 타워크레인의 안정성 관련 연구는 다음 〈표 1〉과 같다. 우선 기존의 연구는 일반적인 기초설계 및 안정성 검토에 대한 것이거나 재해사례 분석 또는 독립기초에 한정된 최적설계에 그쳤다는 한계점이 있다.

표 1. 기존 연구문헌 조사

연구자	제목	내용
김선국, 김장영, 유상연 (2009)	A Basic Study on the Optimal Algorithm for Designing the Foundation of Tower Cranes	독립기초를 사용하는 타워크레인으로 제한하여, 최적설계를 위한 알고리즘 및 물량산출을 제안
Colin Gray, James Little (1985)	A systematic approach to the selection of an appropriate crane for a construction site	설계단계에서 해당 프로젝트의 설계 내용 및 현장조건을 반영한 선정방식 제안
Shuzo Furusaka, Colin Gray (1984)	A model for the selection of the optimum crane for construction sites	타워크레인의 최적 위치선정 관련하여 트럭크레인, 크롤러 크레인, 트래블링 크레인의 임대료와 비교한 연구 진행
이명구, 노민래 (2001)	타워크레인 붕괴 사고의 구조적 분석	타워크레인이 붕괴된 사례를 제시하여 붕괴원인과 총 16가지의 하중조건에 따라 구조해석을 실시하고 발생된 부재력을 이용하여 각 부재의 강도검토를 수행하여 보완책을 제시
호종관, 한갑규, 김선국 (2007)	타워크레인 기초설계 및 안정성 검토 모델	타워크레인 기종선정 후 안정성검토 업무 효율 향상을 위한 타워크레인 안정성 시뮬레이션 프로그램 제안
이병구, 설종협 (2002)	Tower Crane 설치계획 및 구조 보강 방법 소개	크레인 설치계획 및 구조보강 방법을 자립식 형태의 기초방법, 중간지지식 형태의 횡방향 보강방법을 통해 설명
호종관 (2006)	타워크레인 선정과 안정성 검토 "TOOL" 개발	국내 타워크레인 운영실태를 조사 후 타워크레인 안정성 검토 툴 개발의 필요성과 개발 프로그램 소개

본 연구의 목적인 타워크레인 파일기초의 최적설계에 관한 연구는 이루어지지 않았음을 알 수 있으며 무엇보다 타워크레인과 관련해 양적인 연구의 결과가 절대적으로 부족하다고 판단된다.

2.2 파일기초 설계 및 시공의 일반적 절차

본 연구는 현장의 특수한 상황으로 인해 지반의 지내력이 확보되지 않을 경우 사용하는 파일기초를 전제로 한다.

일반적으로 타워크레인의 안정성 검토 및 설치작업은 아래 〈그림 3〉와 같다.

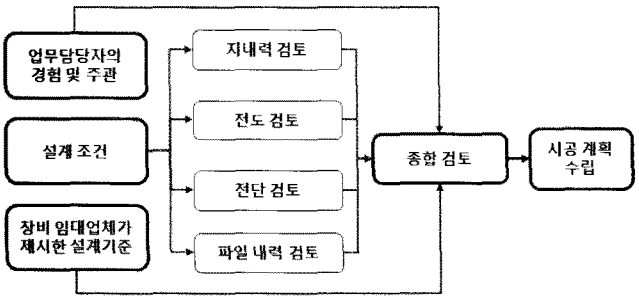

그림 3. 파일기초 설계의 일반적인 절차

기본적으로 주어지는 설계조건(현장조건, 선정 타워크레인의 특성)을 입력하고 각 안정성 검토 항목을 체크 후 구조식 계산에 의해 얻어진 결과를 재검토 후 설치한다. 그러나 대부분의 건설현장에서는 장비 임대업체가 제시한 설계기준을 검토하여 설치하거나 건설업체의 업무담당자의 경험 및 주관에 의해 검토되어 설치되고 있다고 사료된다. 따라서 미비한 안정성 검토로 인한 안전재해 시 책임소재의 문제가 발생 가능할 뿐 아니라 공기, 원가, 품질 등에 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

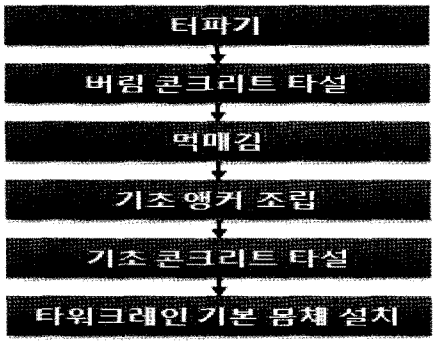

그림 4 파일기초 설치의 일반적 절차

또한, 본 연구에서 다루는 최적화의 문제와 안정성 검토 항목 간의 상호연관성에 대한 고려가 배제되었음을 알 수 있다.

본 연구의 결과물로서 얻어지는 최적화된 기초설계를 바탕으로, 시공계획에 따라 〈그림 4〉와 같이 진행된다.

타워크레인의 위치가 선정되면 터파기를 한 후에 버림 콘크리트를 타설한다. 기초 앵커가 설치될 자리에 정확히 먹매김을 한 후 조립을 하여 기초 콘크리트를 타설한다. 콘크리트 양생 기간이 지난 후에 타워크레인 기본 몸체 설치를 시작하여 텔레스코핑을 하는 절차를 가진다.

3. 최적 설계 알고리즘

3.1 파일기초 최적설계의 개념

본 연구에서 제시하는 파일기초 설계의 최적화 개념은 아래의 〈그림 5〉와 같다.

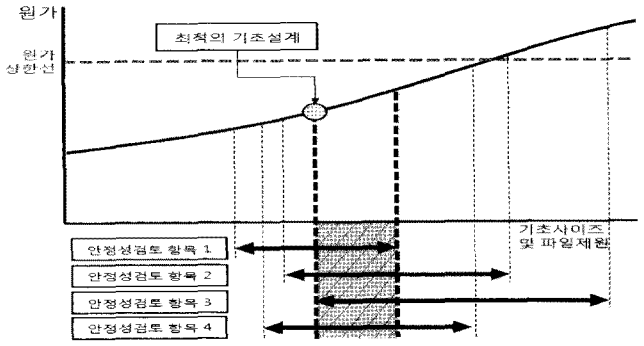

그림 5. 파일기초 최적설계의 개념

김선국 외 2인의 연구(2009)에서 독립기초의 최적설계 개념도로 표현한 것을 발췌하여 본 연구의 범위와 목적에 맞도록 수정 및 보완하였다. 김선국 외 2인의 연구(2009)에서 제시한 도해법의 개념을 도입하여 X축에 각 안정성 검토의 적정 범위를 표시하고, Y축에 원가, 즉 설계된 기초를 시공하는데 들어가는 원가를 표시한다.(여기서 원가는 재료비, 장비비, 작업비를 포함한다).

적정한 안정성을 발휘 가능한 영역, 즉 모든 항목이 겹치는 X축 범위와 원가의 한계선 안에 있는 부분을 '실행가능영역' 이라고 할 수 있다. 이 영역이 포함하는 모든 좌표는 '실행가능해' 이며, '실행가능 해' 중에서 목적함수 값을 가장 크게 해주는 점을 '최적 해' 라고 정의하며, 그때의 목적함수 값을 '최적 값' 으로 구할 수 있다. 즉 본 연구에서의 최적 값은 타워크레인이 설치, 운영, 해체의 임무가 가능한 안정성을 확보하는 범위 내에서, 최소의 원가를 소비하는 좌표를 구하여 설계하도록 하는 개념을 도입한다.

또한 파일기초 최적설계의 프로세스는 다음 〈그림 6〉과 같이 주어진 설계조건, 즉 제약사항을 입력하면 안정성의 확보와 최소비용이 발생 가능한 프로세스를 통해 사이즈, 제원, 물량이 산출되어 설계 및 시공 되는 개념을 갖는다.

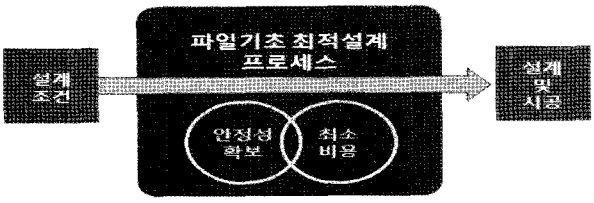

그림 6. 파일기초 최적설계 프로세스의 개념

아울러 본 연구에서 제안하는 최적화의 관계식을 선형함수(linear function)의 개념을 도입해서 수립하면, 다음과 같다.

$$\text{Minimize } Cost_{pile-foundation}$$

$$\text{subject to } \sigma_b \geq f_a \text{ (지내력)}$$

$$e \leq L_s/3 \text{ (전도)}$$

$$P_{max} \leq P_a \text{ (파일 내력)}$$

$$V_u \leq \phi V_c \text{ (전단)}$$

파일기초에 투입되는 원가(Costpile-foundation)를 최소화함이 목적함수이며 지내력, 전도, 파일내력, 전단에 대한 안정성이 확보되어야 함이 제한조건이다. 위의 4가지 제한조건을 만족시키면 파일 기초의 특성이 결정된다. 목적 함수 값에 대한 자세한 산출 방법은 3.3절에서 기술하며, 4가지 조건식의 산출은 3.2절에서 기술한다.

3.2 최적설계 알고리즘 프로세스

다음 〈그림 7〉은 본 연구에서 제안하는 파일기초의 최적설계 프로세스이다.

우선 안정성 검토를 위해 기본적으로 주어지는 타워크레인 기종, 현장 조건, 기초 사이즈, 파일 제원의 설계조건을 입력한다. 선정된 타워크레인에 따라 가동 유무에 따른 수직력, 수평력, 모멘트, 크레인 중량 등의 정보가 입력된다. 주어진 현장 조건에 따라 콘크리트 압축강도, 피복 두께, 철근 강도, 지내력, 안전율 등의 정보가 입력된다. 또한 초기 기초 사이즈의 설정으로 인해 장/단변의 길이와 높이, 자중 등이 입력되며, 파일 제원 설정을 통해 파일의 개수와 지름, 말뚝 지지력 등의 초기 값이 설정된다.

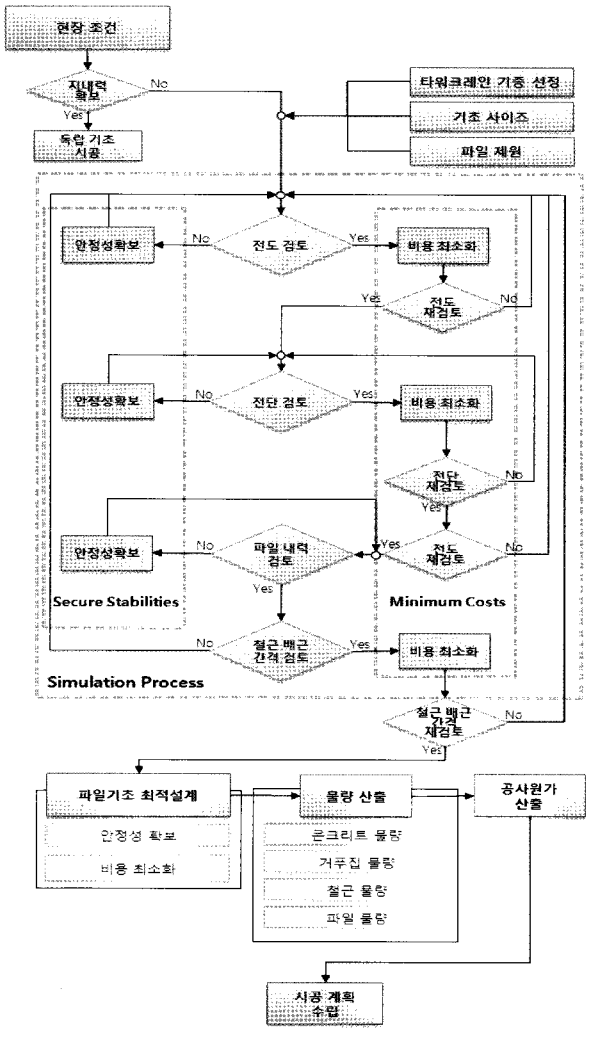

그림 7. 파일기초 최적설계 알고리즘 프로세스

안정성 검토 항목 간(전도, 전단)의 관계는 김선국 외 2인(2009)의 연구에서 직렬의 관계를 가지고 있음을 알 수 있는데, 본 연구에서 제시하는 프로세스의 핵심 내용은 각 안정성 검토가 순차적으로 이루어지며, 안정성이 확보되지 않으면 기초 사이즈와 파일제원의 수정이 이루어진다. 또한 다음 단계의 안정성 검토 항목이 확보되지 않으면 기초 사이즈와 파일제원의 수정을 하는데, 이때 이전 단계의 안정성 항목을 재검토하게 된다. 시뮬레이션의 마지막 단계로 철근 배근 간격의 검토가 이루어진다.

이 같은 과정을 통해 안정성 확보의 프로세스가 이루어진다. 또한 각각의 항목의 안정성이 입증되면, 주어진 기초 사이즈와 파일 제원의 투입 물량을 최소화하는 단계를 거쳐 해당 안정성검토 항목을 재검토한다. 이 과정이 곧 비용을 최소화시키는 시뮬레이션 과정이다. 이와 같이 안정성 확보와 비용 최소화의 프로세스를 거쳐 파일기초의 최적 설계가 이루어지며 그에 따라 투입되는 물량을 산출하고 재료별 단가를 산정하여 공사원가산출을 통해 시공 계획을 수립한다.

3.3 안정성 검토 항목 분석

3.3.1 지내력 검토

최대 지반력이 허용지내력을 초과하게 되면, 기초판의 침하가 일어나 타워크레인이 전도될 수 있어 이에 대한 위험 여부를 검토한다. 가동 시와 비 가동 시의 차이에 따라 달라지는 타워크레인의 수직력(P)과 편심(e)에 의해 지내력 검토를 구분한다. 지내력 검토에 필요한 식은 아래의 〈표 2〉와 같다. 즉 최대 지반력(σ_b) 산출식의 결과가 허용지내력(f_a)이하가 될 때($\sigma_b \le f_a$) 지내력에 대한 안정성이 있다고 판단한다.

그러나 현장의 특수한 상황으로 인해 지내력을 확보할 수 없거나 파일기초 사이즈를 더 이상 증가시킬 수 없을 때($\sigma_b \ge f_a$) 파일기초를 사용한다.

표 2. 지내력 검토 산출식

검토 항목		산출식
지내력 검토	1) 가동 시 검토	$\sigma_b=2*(P_{on}+G)/(3*L_L*L_S/2-e)$
	2) 비 가동 시 검토	$\sigma_b=2*(P_{off}+G)/(3*L_L*L_S/2-e)$

σ_b:최대 지반력 P_{on}:가동시 수직력 P_{off}:비가동시 수직력
G:기초판 자중 L_L:기초판의 장변길이 L_S:기초판의 단변길이
f_a:허용 지내력

3.3.2 전도 검토

'전도' 란 타워크레인이 엎어져 넘어지는 것을 의미하며 전도에 대한 검토는 다음 〈표 3〉의 산출식을 이용한다.

즉, 하중 편심에 의해 타워크레인이 전도될 수 있는 위험의 여

부를 검토한다. 전도 검토는 가동 시와 비 가동 시로 구분하며 다음 구조식으로 검토한다. 가동시와 비 가동시의 구조식 중 모멘트(M)와 수평력(H), 수직력(P)는 선정된 타워크레인의 가동시와 비 가동시에 따라 변화되는 값을 입력한다. 아울러 '$L_s/3$' 는 편심거리(e)가 벗어날 수 없는 기초판 한변의 최소길이(m)를 의미한다. 산출식에 필요한 요소는 초기에 설정된 설계조건에 의해 계산이 가능하며, 전도 또한 본 연구에서 제시하는 최적설계 프로세스의 시뮬레이션 과정을 통해 수정된다.

즉, 전도에 대한 안정성은 편심(e)를 〈표 3〉의 산출식을 이용하여 계산한 값이 앞서 언급한 편심(e)가 벗어날 수 없는 기초판 한변의 최소길이($L_s/3$) 이하가 될 때($e \le L_s/3$) 입증할 수 있다.

표 3. 전도 검토 산출식

검토 항목		산출식
전도 검토	1) 가동 시 검토	$e=(M_{on}+H_{on}\times h)/(P_{on}+G)$
	2) 비 가동 시 검토	$e=(M_{off}+H_{off}\times h)/(P_{off}+G)$

e:편심 M_{on}:가동시 모멘트 M_{off}:비가동시 모멘트
h:기초판의 높이 G:기초판의 자중 Ls:기초판의 단변길이
H_{on}:가동시 수평력 H_{off}:비가동시 수평력
P_{on}:가동시 수직력 P_{off}:비가동시 수직력

3.3.3 파일 내력 검토

파일내력은 최대 지반력에 대하여 파일 1본당 받아야하는 파일내력을 의미하며, 허용파일 내력은 초기에 파일제원에서 입력한 파일강도이다. 이때, 최대 지반력에 대하여 파일 1본에 대한 허용내력을 검토한다.(표 4 참조)

표 4. 파일내력 검토 산출식

검토 항목		산출식
파일 내력 검토	1) 가동시	$P_{LL}=\{(H_{on}+G)/n\}+[\{M_{on}+(P_{on}\times h)\}/Z_{LL}]\}$ 와 $P_{Ls}=\{(H_{on}+G)/n\}+[\{M_{on}+(P_{on}\times h)\}/Z_{Ls}]\}$ 중 큰 값
	2) 비가동시	$P_{LL}=\{(H_{off}+G)/n\}+[\{M_{off}+(P\times h)\}/Z_{LL}]\}$ 와 $P_{Ls}=\{(H_{off}+G)/n\}+[\{M_{off}+(P\times h)\}/Z_{Ls}]\}$ 중 큰 값

P_a:파일내력 P_{max}:파일반력 최대값 G:기초판의 자중
n:기초 단면적 H_{on}:가동시 수평력 H_{off}:비가동시 수평력
h:기초판의 높이 M_{on}:가동시 모멘트 M_{off}:비가동시 모멘트
Z_{LL}:기초판 장변 등가단면계수
P_{on}:가동시 수직력 P_{off}:비가동시 수직력
Z_{Ls}:기초판 단변 등가단면계수

또한 파일내력 역시 본 연구에서 제시하는 최적설계 프로세스의 시뮬레이션 과정을 통해 초기 설정된 허용파일내력을 수정된다.

가동/비가동 시에 관계없이 장/단변에 대한 파일 반력 (P_{LL}, P_{Ls})의 산출 값 중 최대 값이 파일허용 내력(P_a)보다 작아야한다.($P_{max} \le P_a$)

3.3.4 전단 검토

1방향 전단과 2방향 전단 모두 콘크리트가 부담하는 설계전단강도는 위험단면에서의 소요전단강도 이상 발휘되어야 한다. 아울러 기초판에 대한 파일 자체의 뚫림도 검토되어야 한다. 전단과 파일자체 뚫림에 의한 전단 검토 산출은 다음 〈표 5〉에 의한다.

1방향과 2방향, 파일 자체 뚫임에 대한 전단 검토 모두 위험단면에서의 소요전단 강도(V_u)가 콘크리트가 부담하는 공칭 전단강도(ϕV_c) 이하의 값으로 나오면($V_u \le \phi V_c$) 전단에 대한 안정성이 있다고 판단한다.

표 5. 전단 검토 산출식

검토 항목		산출식
전단 검토	1) 1방향	$V_u=1.7\times\sigma_b\times L_L\times L'$ $\phi V_c=0.85\times 0.53\times\sqrt{f_{ck}}\times L_L\times d$
	2) 2방향	$V_u=1.7\times\sigma_b\times(L_s\times L_L-(\ell+d)^2)$ $\phi V_c=0.85\times 1.06\times\sqrt{f_{ck}}\times B_o\times d$
	3)파일 자체 뚫림 전단 검토	$V_u=R_u\times n$ $\phi V_c=0.85\times 1.1\times\sqrt{f_{ck}}\times B_o\times d$

V_u:위험단면에서의 소요전단강도 G:기초판의 자중
f_{ck}:콘크리트강도 ϕV_c:콘크리트가 부담하는 공칭 전단강도
n:기초 단면적 σ_b:비가동시 최대지반력 m:mast의 크기,
L': Anchor Distance R_u:Ultimate Pile Stress
Ls:기초판의 단변길이 L_L:기초판의 장변길이
V_c:콘크리트가 부담하는 설계전단강도
B_o:기초판에서 위험단면의 둘레길이={(m×100+d)×4}
d: 압축연단으로부터 인장철근 중심까지의 거리

3.3.5 철근 배근 간격 검토

철근배근 간격 또한 기초 사이즈와 마찬가지로 초기에 적정한 휨 보강근을 산정하고 본 연구에서 제시하고자하는 프로세스에 따라 시뮬레이션 과정을 통해 수정이 이루어진다.

배근간격은 최대배근 간격 이하로 설정되어야하며, 그 관계를 도식화 하면 〈그림 8〉과 같다.

최대배근 간격은 '단위폭 당 철근단면적/최소철근량' 으로 산출한다. (김선국 외 2인,2009)

기초 철근 배근은 아래의 식으로 검토한다. 즉, X축 길이 a와 Y축 길이 b는 철근직경, 피복두께, 철근간격의 합보다 크거나 같아야함을 의미한다.

$$L_L \ge (d_{rebar}L_s\times n)+1.5d_{rebar}L_s(n-1)+2C\rightarrow ok,$$
$$L_s \ge (d_{rebar}L_L\times n)+1.5d_{rebar}L_L(n-1)+2C\rightarrow ok$$

(L_s:기초판의 단변길이 L_L:기초판의 장변길이 c: 피복두께)

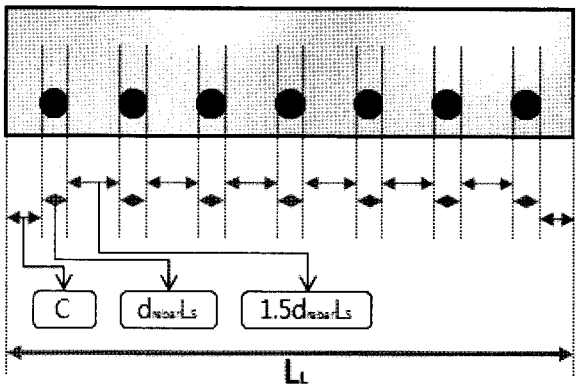

그림 8. 기초사이즈와 철근배근 간격과의 관계도

철근 배근 간격은 다음 〈표 6〉과 같이 계산한다. 장변측의 경우 소요 철근 량과 최소 철근 량 중 큰 값으로 장변의 배간간격을 계산하며, 단변 측의 경우도 이와 동일하다.

표 6. 철근배근간격 산출식

검토 항목		산출식
철근 배근 검토	1) 장변축 방향	$S_{LL}=(S_A\times100\times10)/{}_{min}A_{LL}$
	2) 단변축 당향	$S_{LS}=(S_A\times100\times10)/{}_{min}A_{LS}$
	$_{min}A_{LL}$ = $(M_{LL}\times10^5)/0.9\times f_y\times(d-a_{LL}/2)$ 와 $0.0018\times L_{LS}\times10^2\times D\times10^2/L_{LS}$ 중 큰 값 $_{min}A_{LS}$ = $(M_{LS}\times10^5)/0.9\times f_y\times(d-a_{LS}/2)$ 와 $0.0018\times L_{LL}\times10^2\times D\times10^2/L_{LL}$ 중 큰 값	

S_{LL}:장변축 배근간격 S_{LS}:장변축 배근간격
$_{min}A_{LL}$:장변축 최소 철근량 f_y:철근의 설계기준 항복강도
$_{min}A_{LS}$:단변축 최소 철근량 S_A:철근 단면적

3.4 물량 및 원가 산출

시뮬레이션 과정을 통해 기초 사이즈와 파일제원이 최종적으로 결정되고 나면, 콘크리트, 철근, 거푸집, 파일의 작업원가를 계산한다. 파일기초 타워크레인 기초의 최적설계의 목표는 안정성의 확보와 최소원가 발생을 목표로 함으로 본 프로세스의 타당성을 입증할 수 있다.

물량 산출의 기본적인 틀은 김선국 외 2인의 연구(2009)의 내용에서 발췌하여 정리하였다. 파일기초 시공에 투입되는 콘크리트, 거푸집, 철근, 파일의 물량의 산출과 각 재료의 단가를 곱하여 다음 〈표 7〉와 같이 산출가능하다.

표 7. 파일기초 물량산출

항 목	Cost	Quantity
①파일	Npile×UPpile	-
②콘크리트	$Q_{conc}\times UP_{conc}$	$L_L\times L_S\times h$ (m^3)
③거푸집	$Q_{form}\times UP_{form}$	$(L_L+L_S)\times2\times h$ (m^2)
④철근	$Q_{rebar}\times UP_{rebar}$	{($W_{rebarL_L}\times\sum L_{rebarL_L}$)+ ($W_{rebarL_S}\times\sum L_{rebarL_S}$)+ ($W_{rebarhoop}\times\sum L_{rebarhoop}$)} /1,000 (ton)

Ls:기초판의 단변길이 L_L:기초판의 장변길이, h : 기초의 높이
$Lrebar_{L_L}$: 장변 철근의 절단 길이 (m)
$LrebaL_S$: 단변 철근의 절단 길이 (m)
Lrebarhoop : 띠철근의 절단 길이 (m) Lp : 파일의 절단 길이 (m)
$Wrebar_{L_L}$: 장변 철근의 단위 중량 (kg/m)
$Wrebar_{L_S}$: 단변 철근의 단위 중량 (kg/m)
Wrebarhoop : 띠철근의 단위 중량 (kg/m)
Wp : 파일의 단위 중량 (kg/m)
Npile : 특정 길이별, 지름별 파일의 본 수

파일기초 시공에 투입되는 원가의 총합($Cost_{(pile-foundation)}$)은파일 시공원가와 기초판의 시공원가의 합으로 이루어지며, 이로서 안정성이 확보될 뿐 아니라 최소비용이 발생하는 파일기초의 설계가 진행 가능하다.

$$Cost_{(pile-foundation)}=Cost_{pile}+Cost_{foundation}$$

파일 시공원가는 특정 길이 및 특정 지름별 파일의 본 수와 파일단가의 곱으로 산출한다. 가령 지름 450㎜, 길이 10m인 파일을 6본 사용할 경우, 6본×(450㎜,10m의 파일 재료비, 장비비, 인건비의 합)으로 계산한다.

$$Cost_{pile}=N_{pile}\times UP_{pile}\ (\text{항목①})$$

또한 기초판의 시공원가는 콘크리트, 거푸집, 철근의 투입물량에 따른 각 단가의 합이며, 단가에는 재료비, 장비비, 인건비 등이 포함되어 있어 총 투입 원가의 계산이 가능하다.

$$Cost_{foundation}=Cost_{conc}+Cost_{form}+Cost_{rebar}\ (\text{항목②+③+④})$$

4. 요약 및 결론

본 연구는 특수한 현장의 여건으로 인해 충분한 지내력이 확보되지 않는 상황을 전제로 파일기초를 사용하는 고정식 트롤리타입의 타워크레인으로 범위를 제한하여 파일기초의 최적설계 개발 연구를 진행하였다.

본 연구의 목적은 충분한 안정성 확보와 최소비용의 투입이 이루어지는 타워크레인의 파일기초에 대한 최적설계 알고리즘 개발을 목표로 진행되었으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 파일기초를 사용하는 타워크레인의 최적설계 개념을 제시하였다. 모든 안정성검토 항목을 만족시키는 실행가능영역 내

에서, 목적함수인 최소의 비용이 발생하는 최적해를 찾는 개념을 최적설계 프로세스에 도입하였다.

둘째, 최적화의 제한조건인 안정성 검토 항목을 분석하였다. 전도검토, 전단검토, 파일내력검토 그리고 철근간격 검토의 방법과 구조식을 정리하였다. 이는 차후의 연구에서 최적설계 프로그램을 개발하는데 활용될 것이다.

셋째, 안정성 검토 항목간의 상호연관성을 토대로 최적설계 알고리즘 구축과 프로세스의 개념을 제안하였다. 안정성 확보와 최소비용을 발생 가능한 프로세스를 제안함으로서 초기에 설정한 목적에 부합되었다고 사료된다.

넷째, 본 연구에서 제안한 파일기초 설계 알고리즘에 따라 시공에 투입되는 물량과 총 시공 원가를 산출하는 개념과 식을 보충 설명하였다.

그러나 연구범위에서 언급했듯이 파일기초 설계로만 제한하였기 때문에, 기초 형태 설정 시 파일기초 사용이 확정되었을 경우만이 해당되므로 그에 따른 한계점이 발생한다.

차후의 연구에서는 본 연구에서 다루지 못한 타워크레인 기종에 따른 속성 데이터베이스와 유저인터페이스 구축에 관한 연구 및 독립기초와 파일기초 선택 방법에 관한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

본 연구의 결과는 차후에 진행될 타워크레인의 파일기초 최적설계 프로그램 개발에 적용될 알고리즘으로 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. 김선국, 김장영, 유상연, Optimal Design Algorithm of the Foundation of Tower Cranes, ICCEM&ICCPM, 제1권, pp.1047~1052, 2009.5
2. 김홍현, 이강. FMEA 기법을 활용한 크레인 관련 중대 재해의 정량적 분석에 관한 연구. 한국건축시공학회 논문집, 제7권 제3호, pp.115~123, 2007
3. 이명구, 노민래. 기초앵커 불량시공에 따른 타워크레인 사고의 원인분석. 한국산업안전학회 추계학술발표회 논문집, pp.411~416, 2000
4. 이명구, 노민래. 타워크레인 붕괴사고의 구조적 분석. 한국산업안전학회 논문집, 제16권 제4호, pp.147~152, 2001
5. 이병구, 설종협. Tower Crane 설치계획 및 구조보강 방법 소개. 건설기술, 쌍용건설 기술연구소, 제23권, pp.33~37, 2002
6. 한갑규, 김아영, 김선국, OptiCRANE-TC를 이용한 타워크레인의 기초 안정성 검토, 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집, 통권13호, pp.139~142, 2007
7. 호종관, 김아영, 김선국, 상승식 타워크레인 지지구조의 안정성 검토 모델, 한국건설관리학회 논문집, 제9권 제2호, pp.190~198, 2008
8. 호종관, 한갑규, 김선국, 타워크레인 기초설계 및 안정성 검토 모델, 한국생태환경건축학회 논문집, 제7권 제6호, pp.99~106, 2007
9. Colin Gray, James Littel, A systematic approach to the selection of an appropriate crane for a construction site, Construction Management and Economics, 3;2, pp.121~144, 1985
10. Shuzo Furusaka, Colin Gray. A Model for the Selection of the Optimum Crane for Construction Sites. Construction Management and Economics, Vol.2, pp.157~176, 1984

(접수 2009. 8. 10, 심사 2009. 9. 21, 게재확정 2009. 9. 28)

요 약

최근 건축물의 고층화에 따라 양중 계획의 중요성이 증대되고 있다. 타워크레인은 중요한 양중 장비로서의 역할을 수행하고 있으나, 구조적 안전사고 발생 시 그 피해가 매우 크므로 철저한 안정성검토가 선행되어야 한다. 타워크레인은 구조적 안정성을 확보하기 위해 횡지지 보강과 독립기초 및 파일기초 설계 등 안정성확보에 대한 고려가 매우 중요하며, 그 중 현장의 특수한 상황으로 인해 지내력 확보가 곤란하거나 더 이상 기초 사이즈를 증가시킬 수 없을 때 파일기초를 사용한다. 파일기초를 사용할 경우 독립기초 사용 시 보다 더 많은 안정성 검토 항목을 고려해야하므로 체계적이고 철저한 검토가 필요하다.

본 연구는 파일기초 설계 시 파일기초의 기본적인 안정성 확보 뿐 만 아니라 최소의 비용 발생을 위한 최적설계 알고리즘 개발이 목적이며, 파일기초를 사용하는 고정식 트롤리타입의 타워크레인으로 연구 범위를 제한하여 진행한다. 타워크레인 파일기초의 안정성 검토 항목과 절차, 최적설계에 관한 연구 결과물을 토대로 관련 업무 담당자의 업무 효율성을 향상 시킬 수 있을 뿐 아니라 파일 기초 설계에 투입되는 시간 및 비용의 절감효과를 기대 할 수 있다.

키워드 : 파일기초, 타워크레인, 최적설계, 알고리즘