

# 전철주기초 설계 자동화를 위한 최적화 알고리즘의 적용성 검토

## Applicability of Optimum Algorithm for Automated Design of Electric Railway Pole Foundation

이기열† 박용대\* 정원용\*\* 송규석\*\*\* 임선택\*\*\*\* 김종남\*\*\*\*\* 이수형\*\*\*\*\*  
Lee, Gi-Yeol Park, Yong-Dae Chung, Won-yong Song, Kyu-Seok Lim, Sun-Taek Kim, Jong-Nam Lee, Su-Hyung

### ABSTRACT

This paper examined an applicability of optimum algorithm to develop an electric railway pole foundation automated design system. Based on the optimization theory that considered subgrade and bearing capacity characteristics, decided an optimum section of electric railway pole foundation. In this research, Optimum algorithm used the feasible direction method in structural analysis and design efficiently. Design variables are considered geometric properties and anchor bolt area of the electric railway pole foundation as optimum construction cost. Constraints are considered settlement, overturning and activity of foundation. And, also composed flexural and shearing strength. According to optimum analysis result, optimization theory is available more economical design comparing with railway pole foundation that is constructed by current standard drawing, and applicability verified in automated design system development.

### 1. 서 론

현재 국내 철도의 전철화율이 지속적으로 증가되고 있으나, 전철주기초 설계시 적용되고 있는 일본 전기철도 설계기법의 적용, 국내 철도노반의 특성 및 현장 시공 여건의 미고려 등으로 인하여 전철주기초 설계에 대한 개선의 필요성이 크게 강조되고 있는 실정이다. 현재 전철주기초 설계에 적용하고 있는 설계기법은 지반의 강도나 변형특성에 대한 객관적인 설계정수를 이용하지 않고, 지형계수, 형상계수, 강도계수 등의 시공여건이나 국지적인 지반조건 등에 영향을 많이 받는 경험적인 계수들을 그대로 적용하고 있다. 이에 따라 최근 국내에 건설되고 있는 고속철도의 철도노반에 대한 품질기준 강화로 기초 지지기반의 강도 및 강성이 향상됨에 따라 이를 고려할 수 있는 설계기법의 개발이 시급하다. 또한 구조물 해석과 설계의 정확성만큼 안전성과 사용성의 조건을 동시에 만족시키면서 경제적인 설계가 가능하도록 최적단면을 결정하는 최적설계의 개념의 중요성도 최근들어 강조되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이와 같은 조건들을 반영할 수 있는 전철주기초 설계 자동화 프로그램 개발을 위한 기반연구의 일환으로 최적단면 설계를 위한 최적 알고리즘의 도입 가능성에 대해서 최적화 문제에 적용

† 책임저자 : 정회원, (주)삼안, 연구개발원, 과장  
E-mail : kylee@samaneng.com  
TEL : (031)478-0554 FAX : (02)503-1695

\* 비회원, (주)삼안, 연구개발원, 부사장

\*\* 비회원, (주)삼안, 연구개발원, 전무

\*\*\* 비회원, (주)삼안, 연구개발원, 상무

\*\*\*\* 비회원, (주)삼안, 철도구조부, 상무

\*\*\*\*\* 비회원, (주)삼안, 연구개발원, 과장

\*\*\*\*\* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원

효율성이 우수하다고 알려진 허용방향법을 적용하여 타당성을 검토하고 그 결과를 비교분석하였다.

## 2. 최적설계 정식화

### 2.1 설계변수

설계변수는 그림 1(a)에 보인 전철주기초 단면의 폭(너비)과 기초의 두께, 보강 및 전철주 지지에 사용되는 앵커볼트의 단면적을 선정하였다. 해석시에는 현행 전철주기초 설계 표준도와의 상관관계를 파악하기 위하여 그림 1(b)에 보인 것과 같은 H250-B1 단면( $b = 1\text{m}$ ,  $d = 1\text{m}$ ,  $h = 2.3\text{m}$ )을 기준으로 하여  $b(d)$  또는  $h$ 를 일정하게 유지하면서 단면 또는 두께의 변화와 그에 따른 앵커볼트 소요량을 분석하였다.

### 2.2 목적함수

최적화를 위한 목적함수로는 콘크리트와 앵커볼트의 재료경비를 포함시킨 경비함수를 사용하여 최소 경비설계문제를 형성하였으며, 최소경비 설계를 위한 목적함수  $F(x)$ 는 전철주기초 콘크리트 제작 비용, 앵커볼트 제작 비용, 거푸집 제작 비용, 터파기 비용의 합으로 다음과 같이 정식화하였다.

$$F(x) = F_0 + C_s \times W_s + C_c \times V_c + C_m \times A_m + C_e \times V_e \quad (1)$$

여기서, 식 (1)에 사용된 기호는 표 1에 정리한 것과 같다.

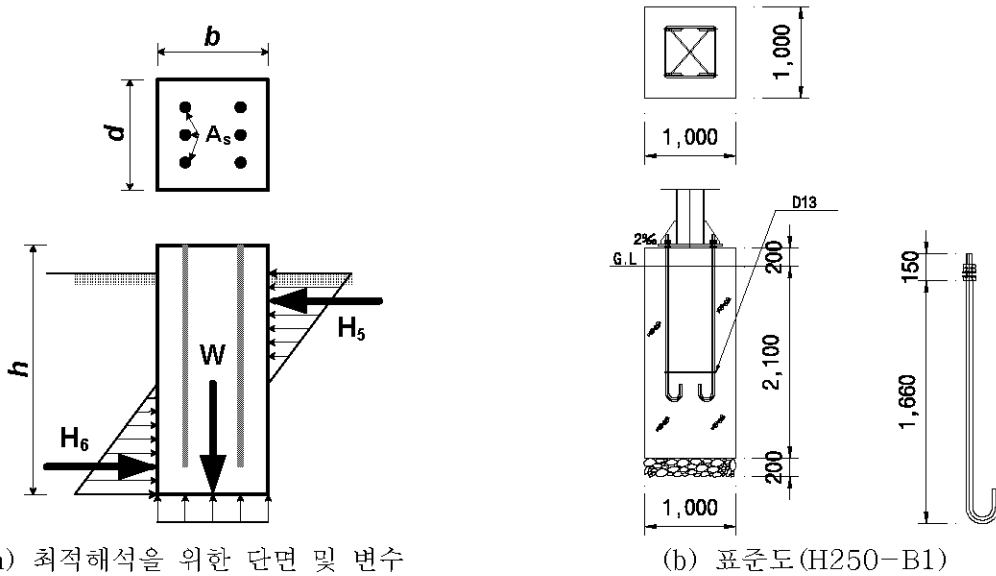


그림 1 전철주기초의 단면

표 1 제작비용 정식화 함수 기호

$F_0$ = 전철주기초 제작 공통 비용 (원)	
$C_c$ = 전철주기초 콘크리트 단가 (원/ $\text{m}^3$ )	$V_c$ = 전철주기초 콘크리트 체적 ( $\text{m}^3$ )
$C_s$ = 전철주기초 강재 단가(원/tonf)	$W_s$ = 전철주기초 강재 중량(tonf)
$C_m$ = 전철주기초의 거푸집 단가 (원/ $\text{m}^2$ )	$A_m$ = 전철주기초의 거푸집 설치 단면적( $\text{m}^2$ )
$C_e$ = 전철주기초의 터파기 단가(원/ $\text{m}^3$ )	$V_e$ = 전철주기초의 터파기 체적( $\text{m}^3$ )

## 2.3 제약조건

전철주기초 설계에 고려되는 제약조건은 콘크리트구조설계기준 및 철도설계기준-철도교면에서 규정하는 5가지의 제약사항들을 실제변수의 함수로하여 다음과 같이 정의하였다.

### 2.3.1 기초의 안정에 관한 제약조건식

1) 전철주기초의 전도에 관한 제약조건식

기초구조물의 전도에 대한 안전율(S.F)은 다음과 같이 정의되며, 콘크리트구조설계기준 및 철도설계기준에서 규정하는 안전율은 2.0이다.

$$S.F = \frac{\sum_{i=1}^n V \cdot x}{\sum_{i=1}^n H \cdot y} \geq 2.0 \quad (2)$$

여기서, H는 전철주에 작용하는 수평력 및 토압의 수평력, V는 전철주 및 토압의 수직력, x는 전도모멘트 회전중심 O에서 수직력 작용점까지의 거리, y는 전도모멘트 회전중심 O에서 수평력 작용점까지의 거리이다(그림 2 참조). 따라서, 전도에 대한 제약조건식 G1은 다음과 같이 정식화된다.

$$G_1 = 20 \sum H \cdot y - \sum V \cdot x \leq 0 \quad (3)$$

2) 전철주기초의 활동에 관한 제약조건식

기초구조물의 활동에 대한 안전율(S.F)은 다음과 같이 정의되며, 콘크리트구조설계기준 및 철도설계기준에서 규정하는 안전율은 1.5이다.

$$S.F = \frac{\mu \sum_{i=1}^n V}{\sum_{i=1}^n H} \geq 1.5 \quad (4)$$

여기서,  $\mu$ 는 마찰계수,  $\mu \sum V$ 는 기초 저면의 활동저항력,  $\sum H$ 는 기초를 활동시키려는 수평력이다. 따라서, 전도에 대한 제약조건식 G2은 다음과 같이 정식화된다.

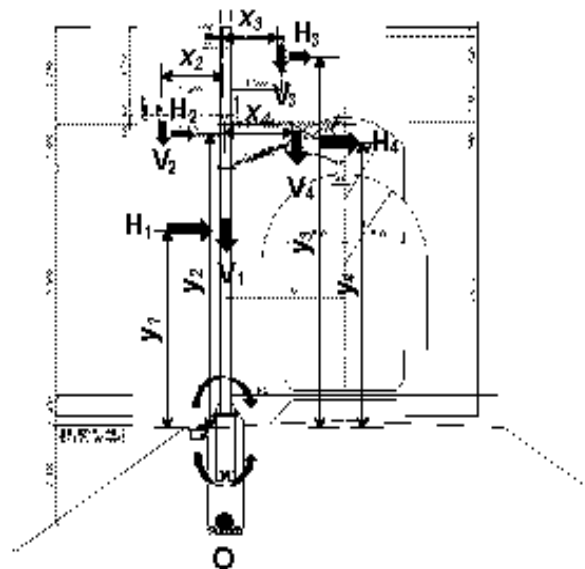


그림 2 전철주 작용 하중

$$G_2 = 1.5\Sigma H - \mu\Sigma V \leq 0 \quad (5)$$

### 3) 전철주기초의 지지력에 관한 제약조건식

콘크리트구조설계기준 및 철도설계기준에서는 기초지반에 작용하는 지반반력 qmax가 지반의 허용지력 qa보다 작아야한다고 규정하고 있다. 따라서 지지력에 대한 제약조건식 G3는 다음과 같다.

$$G_3 = q_{max} - q_a \leq 0 \quad (6)$$

### 2.3.2 전철주기초의 강도에 관한 제약조건식

현행 설계기준에서는 부재의 설계를 위하여 강도설계법(Ultimate Strength Design)을 채택하고 있기 때문에 본 연구에서도 이를 근거로 전철주기초의 휨 및 전단강도에 대한 제약조건식을 정식화하였다.

#### 1) 전철주기초의 휨강도에 관한 제약조건식

현행 설계기준의 강도설계법에 의한 휨 설계는 부재의 공칭휨강도 Mn에 강도감소계수  $\phi$ 를 곱한 공칭저항강도(설계강도) Md가 하중계수  $\gamma$ 에 의한 극한강도 Mu보다 크도록 다음과 같이 규정하고 있다.

$$M_d (= \phi M_n) \geq M_u (= \gamma_D M_D + \gamma_L M_L) \quad (7)$$

따라서, 제약조건식 G4는 다음과 같이 정식화된다.

$$G_4 = M_u - \phi M_n \left[ = \phi A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \right] \leq 0 \quad (8)$$

여기서, Mu는 2007년 개정 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 하중계수 ( $\gamma_D=1.2$ ,  $\gamma_L=1.6$ )가 고려된 최대휨강도, Md는 강도감소계수 ( $\phi=0.85$ )가 고려된 설계휨강도, As는 강재 단면적(mm<sup>2</sup>), fy는 강재의 항복강도(MPa), d는 유효깊이(mm), a는 등가응력블럭사각형 깊이(mm)이다.

#### 2) 전철주기초의 전단강도에 관한 제약조건식

현행 설계기준의 강도설계법에 의한 전단 설계는 부재의 공칭전단강도 Vn에 강도감소계수  $\phi$ 를 곱한 공칭저항강도(설계강도) Vd가 하중계수  $\gamma$ 에 의한 극한강도 Vu보다 크도록 다음과 같이 규정하고 있다.

$$V_d (= \phi V_n) = \phi (V_c + V_s) \geq V_u (= \gamma_D V_D + \gamma_L V_L) \quad (9)$$

여기서, Vc는 콘크리트가 부담하는 전단강도, Vs는 전단보강철근이 부담하는 전단강도이다. 그런데, 일반적인 전철주기초 구조물에서는 전단보강이 되지 않기 때문에 식 (9)에서 Vs는 0이 되고, 콘크리트가 저항하는 강도 Vc가 설계강도가 된다. 따라서, 제약조건식 G4는 다음과 같이 정식화된다.

$$G_5 = V_u - \phi V_n \left[ = \phi \frac{1}{6} \sqrt{f_c} b h \right] \leq 0 \quad (10)$$

여기서, Vu는 2007년 개정 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 하중계수 ( $\gamma_D=1.2$ ,  $\gamma_L=1.6$ )가 고려된 최대전단강도, Vd는 강도감소계수 ( $\phi=0.75$ )가 고려된 설계전단강도, fc는 콘크리트압축강도(MPa), b는 전철주기초 단면 폭(mm), h는 전철주기초 두께(mm)이다.

## 3. 최적설계 시스템(기법 및 알고리즘)

콘크리트 구조물의 최적화 문제는 일반적인 경우 비선형 계획문제로 형성된다. 수학적계획법의 기본이

되는 선형계획문제의 최적화는 심플렉스 알고리즘을 이용하여 비교적 쉽게 구할 수 있으나, 비선형계획문제의 해를 구하는데는 많은 어려움이 있다. 따라서 비선형계획문제의 해법도 다양하며 구조 최적화문제에서 사용되는 기법으로는 직접해법인 허용방향법과 등가적인 문제로 변환시켜 해를 구하는 축차선형계획법과 축차무제약최적화기법을 대표적 해법으로 들 수 있다. 이상과 같은 여러 가지 형태의 알고리즘 중에 어느 경우에도 효율적인 방법은 없으며 문제의 특성에 적합한 알고리즘을 사용해야 효율적이다. 이에 본 연구에서는 그림 3과 같은 알고리즘을 갖는 직접해법인 허용방향법(feasible direct method)을 이용하여 최적화 문제의 해를 구하였다.

본 연구에서 사용하는 허용방향법에 의해 전철주기초를 최적화할 경우 q번째 반복시행에서 설계변수의 값은 다음과 같이 주어진다.

$$\{X\}_q = \{X\}_{q-1} + \alpha \{S\}_q \quad (11)$$

여기서,  $\{X\}_q$ 는 반복회수 q번째 반복시행에서의 설계변수의 값,  $\{X\}_{q-1}$ 은 반복회수 q-1번째 반복시행에서의 설계변수의 값,  $\{S\}_q$ 는 반복회수 q번째 반복시행에서의 탐사방향,  $\alpha$ 는 s방향의 최대 이동거리이다. 탐사방향  $\{S\}$ 는 다음의 최적화 문제로 얻을 수 있다.

Minimize :  $\{\nabla M\}^T \{S\}$

Subject to :  $\{\nabla G_k\}^T \{S\} \leq 0$  여기서,  $k = 1, 2, \dots, j$

$$\{S\}\{S\}^T \leq 1$$

여기서, j = 임계제약조건식(Critical constraint)의 수

$$\{\nabla M\} = (\partial M / \partial X_1, \partial M / \partial X_2, \dots, \partial M / \partial X_n)^T$$

$$\partial M / \partial X_i = \rho \cdot 1L_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\{\nabla G_k\} = (\partial G_k / \partial X_1, \partial M / \partial X_2, \dots, \partial G_k / \partial X_n)^T$$

#### 4. 결과 및 적용성 검토

최적화이론의 적용성 검토를 위하여 그림 1(a)에 보인 전철주기초의 단면에서 각각의 변수(b, d, h)를 고정시킨 3가지 경우에 대해서 최적해석을 수행하여 그 결과를 표 2에 정리하고 표준도와 비교를 통하여 설계자동화 프로그램의 적용성을 검토하였다.

전철주기초 단면의 폭 또는 너비를 표준도와 같은 1m로 일정하게 고정하고, 최적해석을 수행한 Case 1과 Case 2의 결과에 따르면, 현행 표준도에 의한 기초의 두께는 적정한 것으로 나타났지만, 단면의 폭 또는 너비가 비교적 크게 적용되고 있음을 알 수 있으며, 사용 앵커볼트량에 대해서도 표준도의 값과 비교하였을 때 약 35% 정도 감소됨을 확인할 수 있다.

이와같은 결과는 전철주기초의 단면 및 사용 앵커볼트량이 비교적 과다하게 설계되고 있음을 의미하며, 향후 개발되는 전철주기초 설계 자동화 시스템에 최적화 알고리즘의 적용 가능성이 충분하다는 것을 보여주는 결과라고 판단된다.

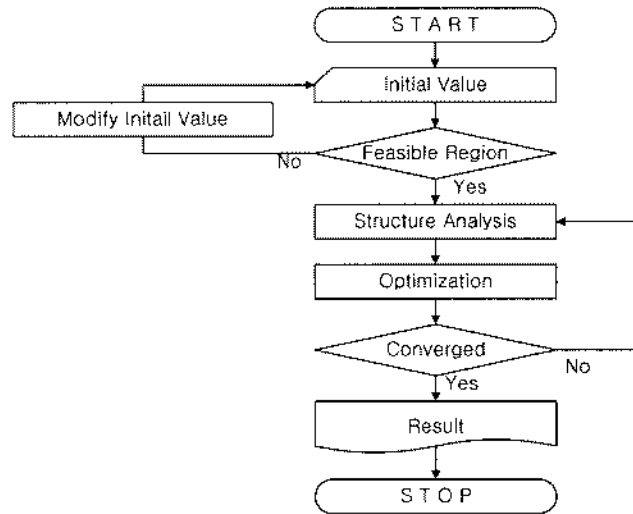


그림 3 허용방향법 알고리즘  
표 2 최적해석 결과 및 비교

Variable	Standard Value	Optimum analysis results					
		Case 1 (b = constant)		Case 2 (d = constant)		Case 3 (h = constant)	
		Value	Anal./Std.	Value	Anal./Std.	Value	Anal./Std.
b	1 m	/	/	0.69 m	0.690	0.65 m	0.650
d	1 m	0.69 m	0.690	/	/	0.69 m	0.690
h	2.3 m	2.34 m	1.017	2.39 m	1.039	/	/
A <sub>s</sub>	30.54 cm <sup>2</sup>	20 cm <sup>2</sup>	0.655	24.5 cm <sup>2</sup>	0.802	24.5 cm <sup>2</sup>	0.802

직사각형 단면 형태의 결과가 산출되는 Case 1 및 Case 2와는 다르게 기초의 두께를 일정하게 유지한 상태로 최적해석을 수행한 Case 3의 결과를 살펴보면, 표준도와 유사하게 정사각형 단면 형태를 유지하고 있으며, 그 값에서는 Case 1 및 Case 2와 비슷하게 표준도에 비하여 상대적으로 작게 산출되고 있음을 알 수 있다. 이와 함께 사용 앵커볼트량에 있어서도 동일한 결과를 나타내고 있다.

이상의 해석 결과를 종합하면, 표준도에서 제시하는 적정 기초두께 h가 확보되었을 때 최적의 단면 체원 및 사용 앵커볼트량을 결정할 수 있으며, 현행 표준도에 의해 시공되는 전철주기초는 상대적으로 높은 안전율을 확보할 수는 있는 반면에 안전측 설계에 따른 과다 공사비 지출이 예상된다고 할 수 있다. 향후, 전철주에 작용하는 하중 및 하중조합에 대한 최적화와 기초 지반 특성을 적절히 반영한 저항 모멘트 산정 공식이 개발되고, 본 연구에서 검토한 최적화 알고리즘을 도입하여 전철주기초 설계 자동화 시스템을 구축하게 되면 보다 경제적이고 효율적인 전철주기초 설계가 가능할 것이라 판단된다.

## 5. 결 론

전철주기초 설계 자동화 프로그램 개발을 위한 기반연구 단계로서 최적단면 설계를 위한 최적 알고리즘의 도입 가능성에 대해서 최적화 문제에 적용 효율성이 우수하다고 알려진 허용방향법을 적용하여 타당성을 검토하고 그 결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 현행 표준도에 의해 시공되는 전철주기초는 비교적 높은 안전율을 확보하고 있는 반면에, 과다설계의 가능성이 있다고 할 수 있다.

(2) 전철주기초 설계 자동화 시스템에 최적화 알고리즘의 적용하게 되면, 안전성과 경제성을 확보할 수 있는 최적단면설계가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국철도시설공단의 “전철주기초 설계를 위한 저항모멘트 산정 연구 용역” 지원에 의해 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 조선규, 이종민, 서동주, 이태균, 이종선 (2005), “프리스트레스트 콘크리트 거더 철도교의 최적 설계”, 한국철도학회논문집, 제8권, 제3호, pp. 267-275.
2. 한국콘크리트학회 (2007), “콘크리트구조설계기준 해설”, 한국콘크리트학회
3. 국토해양부 (2004), “철도설계기준 - 철도교편”, 한국철도학회
4. 임희채 (2003), “철근콘크리트 박스거더교의 최적화에 관한 연구”, 전북대학교 석사학위 논문
5. Garret N. Vanderplaats (1984), “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications”, McGraw-Hill, Inc.