

# $\mu$ -GA에 의한 RC 중공슬래브교의 최적보강

## Optimal strengthening in RC Hollow Slab Bridges using $\mu$ -GA

최 세 휴<sup>1)</sup>

박 경 식<sup>2)\*</sup>

Choi, Se Hyu

Park, Kyung Sik

### Abstract

In this study, the optimal strengthening by micro genetic algorithm( $\mu$ -GA) method is proposed for improvement of load-carrying capacity of RC hollow slab bridges using external prestressing. The Queen-post type and King-post type are considered for the optimal strengthening. The type for optimal strengthening, deviator, areas of tendons and the number of anchor are calculated by  $\mu$ -GA. The objective function is constituted with dimensionless cost of tendon and steel for optimal strengthening. The constraints are formulated by design specification for bridges and anchors. The validity of this study is presented by analysis of the results after the optimal strengthening of the RC hollow slab bridge.

**Keywords** : External prestressing, Optimal strengthening, Micro-genetic algorithm, RC hollow slab bridges

### 1. 서론

RC 중공슬래브교는 슬래브교의 단면에 원형 중공을 설치함으로써 형고가 작은 슬래브교의 장점을 살리고 장경간일 수록 사하중이 증가하여 경제성이 떨어지는 슬래브교의 단점을 최소화한 교량 형식이다. 이러한 중공슬래브교는 국내에서 1990년대 중반까지 많이 가설되어 20여년이 지난 현재까지 이용되고 있지만 대부분이 안전성과 사용성이 약화되어 있어 이들을 보강하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

최근 공용중인 교량을 보강하기 위해 교량에 외부 긴장재를 설치하고 프리스트레싱을 주어 교량을 보강하는 방법이 많이 연구되고 있다. Saadatamanesh 등(1989a,b,c)은 외부 긴장재로 보강된 강합성보의 해석적 연구와 실험적 연구를 수행하고, 이를 통해 외부 프리스트레싱을 적용하기 위한 기준과 설계식을 제안하였으며, Troitsky 등(1989)은 외부 긴장력 도입에 의한 강합성보 지간의 응력분포 및 긴장력 증가량의 수치적인 해석 방법을 제시하고 실험을 통해 검증하였다. 양동석 등(2002)은 외부 긴장력을 도입한 H-beam의 거동을 이론적으로 연구하고 이에 대한 보강효과를 실험을 통해 검증하였으며, 최동호 등(2005)은 단경간 강합성교의 보강을 위해 외부 긴장재 배치에 따른 긴장재의 초기 긴장력과 긴장재 수를 결정하는 방법을 제시하였다.

하지만 기존의 외부 프리스트레싱을 통한 교량보강에 대한 연구는 주로 강교 또는 강합성 거더교에 대해 집중되어 있으며, 외부 프리스트레싱을 통한 중공슬래브교보강에 대한 연구는 미흡하다. 그리고 외부 프리스트레싱을 이용한 보강설계는 긴장재의 배치 형상 및 긴장력 등의 변수가 서로 밀접하게 관련되어 있어 합리적인 비용으로 효과적인 보강을 위해서는 많은 시행착오를 필요로 하게 된다. 따라서 보강시 비용과 안전을 합리적으로 고려하고 규격화된 값을 사용하는 실용적인 보강설계를 위해서는 이산화된 설계변수를 사용하는 이산최적화 기법의 적용이 필요하다.

이산최적화 기법 중 최근 유전알고리즘이 많이 사용되고 있다. 유전알고리즘은 다수의 개체들로 해 집단을 구성하고 다윈의 진화과정을 알고리즘 형태로 모델링하여 해를 탐색하는 방법으로, 구현이 쉽고 이산화된 설계변수를 표현하는데 적합하기 때문에 많은 연구자들에 의해 구조물의 이산최적설계에 적용되어 왔다(Pezeshk et al., 2000; Kameshki and Saka, 2001; 이말숙 등, 2004; 최세휴, 2008).

본 연구에서는 공용중인 RC 중공슬래브교의 외부 프리스트레싱을 이용한 보강을 위해 이산최적화 기법을 적용한 보강 방법을 제시하였다. 이산최적화 기법으로는 유전알고리즘 중에서 마이크로 유전알고리즘( $\mu$ -GA)을 사용하였으며 목적함수는 보강에 사용된 긴장재와 강재의 비

1) 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 부교수

2) 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 박사과정

\* Corresponding author : parkks@knu.ac.kr 053-950-7582

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

용을 무차원화한 값을 사용하였다. 보강설계된 결과를 검토하여 제안된 방법의 타당성을 나타내었다.

## 2. 마이크로 유전알고리즘( $\mu$ -GA)

일반적인 유전알고리즘은 다수의 개체들로 이루어진 초기 집단을 무작위로 만들어서 이를 바탕으로 진화 연산을 통해 최적의 해를 찾아간다. 이때 전역 최적해로 수렴 확률을 높이기 위해 한 세대의 집단크기를 크게 하면 전역해로의 수렴 확률이 높아지는 대신 수렴속도가 늦어지게 된다. 반대로 집단크기를 작게 하면 수렴 속도는 높아지는 대신 지역해로 조기 수렴할 확률이 높아져 전역해에 대한 효율성이 떨어지는 단점이 있다.

마이크로 유전알고리즘( $\mu$ -GA)는 이러한 유전알고리즘의 단점을 보완하기 위해 매우 작은 집단크기로 탐색을 수행하여 탐색시간을 줄이는 대신 유전정보의 다양성을 충분히 유지하기 위하여 집단이 어느 한 점 가까이 수렴하게 되면 집단을 재구성해서 다시 시동하게 된다. 일반적으로 일정 세대를 거친 후 집단내 최적 개체와 나머지 개체들의 염색체 비트끼리 비교하여 서로 다른 비트 수가 5% 미만이면 수렴 조건을 만족 한 것으로 판단하고 재초기화를 실시하게 된다. 그리고 만족스러운 해가 얻어질 때까지 수렴과 재초기화를 반복하고 종료 조건을 만족하면 프로그램이 종료하게 된다. 이러한 재초기화 과정을 통해 마이크로 유전알고리즘은 유전알고리즘이 필요로 하는 돌연변이 연산과정 없이도 최적해의 탐색이 가능하게 된다. 본 연구에서는 세대 당 집단크기를 7로 설정하고 세대수가 5000에 도달하면 연산을 끝내도록 종료 조건을 설정하였다.

### 2.1 재생산

재생산은 이전 세대의 개체가 그 적합도에 따라 다음 세대에서 새로운 개체로 선택되는 과정이다. 본 연구에서는 부모 개체들 중에서 임의로 개체를 선택하여 그 중에서 최고의 적합도를 가지는 개체를 다음 세대에 남기는 방법인 토너먼트 선택방법을 사용하였다.

### 2.2 교배

교배는 집단내 개체들 사이의 정보교환을 통해 집단에 새로운 개체를 도입하는 유전 연산자이다. 본 논문에서는 부모 염색체에서 임의의 교배점 하나를 발생시켜 서로 유전자를 교환하여 두 자손유전자를 생성하는 일점교배를 적용하여 새로운 개체를 형성하도록 하였다. 교배 확률을 1로 하여 항상 교배가 일어나도록 하였다.

## 2.3 엘리트 전략

엘리트 전략은 각 세대에서의 최적 개체가 재생산 과정 동안 선택되지 않거나 교배 등으로 소멸되는 것을 방지하기 위하여 최적의 개체를 강제로 유지시키기 위한 알고리즘이다. 본 논문에서는 이전 세대의 최적개체를 저장하고 있다가 이전 세대의 최적개체가 소멸된 것이 확인되면 현재 세대의 가장 약한 개체를 이전 세대의 최적개체와 교환하도록 하였다.

## 3. 최적화 문제 형성

### 3.1 설계변수

본 연구에서는 중공슬래브교의 보강 유형을 Fig. 1과 같이 편향재의 배치 수에 따라 편향재가 2개 있는 경우(Queen-post), 편향재가 1개 있는 경우(King-post) 그리고 편향재가 없는 경우로 구분하여 이산화 최적보강 설계를 수행하였다. 보강 유형에 따른 이산화 설계변수를 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에 나타난 정착 위치( $X_1$ )와 편향재 위치( $X_6$ )는

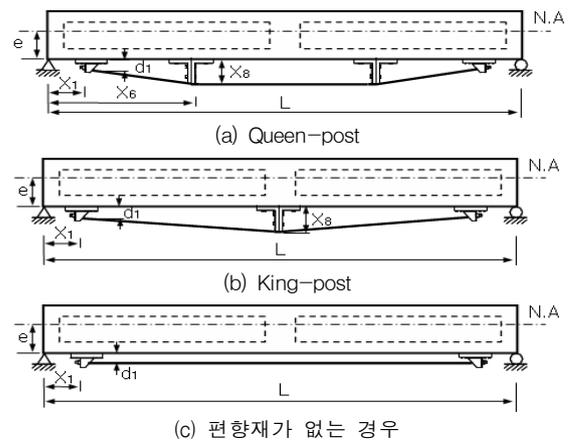


Fig. 1 중공슬래브교 보강 유형

Table 1 보강 유형에 따른 이산화 설계변수

구분	설계변수	변수 설명
Queen-post	$X_1, X_2$	$X_1$ : 정착 위치 $X_2$ : 긴장재 단면적
	$X_3, X_4$	
King-post	$X_1, X_2$	$X_3$ : 한 행에 속하는 앵커 개수 $X_4$ : 정착부 수직판두께 $X_5$ : 등변 $\gamma$ 형강
	$X_3, X_4$	
편향재가 없는 경우	$X_1, X_2$ $X_3, X_4$	$X_6$ : 편향재 위치

50mm부터 지간의 중앙에서 50mm를 뺀 위치까지를 50mm단위로 이산화 하여 각각 8개의 비트로 구성하였다. 긴장재 단면적( $X_2$ )의 경우 PS강선(SWPC 1AN) 1개에서 128개 사이의 면적이 선택되도록 7개의 비트로 구성하였다.

베이스플레이트에서의 앵커의 배열과 정착부를 Fig. 2에서 나타내었으며 설계변수인 슬래브 폭 방향으로 한 행당 앵커 수( $X_3$ )는 1개에서 64개 사이 범위에서 결정되도록 6개의 비트로 구성하였다. 정착부의 수직판 두께( $X_4$ )는 5mm에서 100mm까지를 5mm단위로 이산화 하여 5개의 비트로 구성하였다.

편향재는 Fig. 3과 같이 등변  $\Gamma$ 형강을 맞댄 것으로 고려하였다. 등변  $\Gamma$ 형강( $X_5$ )은 형하공간을 고려하여 높이가 60mm부터 250mm까지 30개의 등변  $\Gamma$ 형강 중에서 하나가 선택되도록 5개의 비트로 구성하였으며 등변  $\Gamma$ 형강 30개의 제원 및 이진코드를 Table 2에 나타내었다.

이를 통해 각 보강 유형별 개체의 검색체는 Queen-post에서는 39개, King-post에서는 31개, 편향재가 없

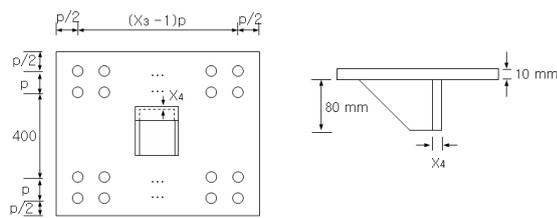


Fig. 2 베이스플레이트의 앵커배치 및 정착부 상세도

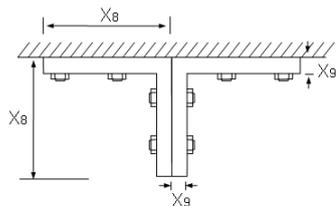


Fig. 3 편향재 형상

는 경우는 26개의 비트로 구성된다. 보강 유형별 개체와 설계변수의 관계를 Fig 4에 나타내었다.

보강설계에 사용되는 값으로 Fig. 1에서  $L$ 은 교량의 지간,  $e$ 는 슬래브 바닥면에서 중립축까지 거리를 나타낸다.  $d_1$ 은 정착 높이로서 50mm로 가정하였다. Fig. 2에서 앵커는 긴장력이 가해지는 방향으로 4행이 배열되며,  $p$ 는 앵커 간격을 나타낸다. 베이스플레이트의 두께는 10mm로 하였으며, 수직판의 높이는 80mm 폭은 150mm로 설정하였다. Fig. 3에 나타난 편향재의 폭은 100mm로 가정하였다. 또한 등변  $\Gamma$ 형강이 선택되면 등변  $\Gamma$ 형강의 면적( $X_7$ ), 높이( $X_8$ ), 두께( $X_9$ )에 대한 값이 보강설계에 적용되도록 하였다.

### 3.2 적합도 함수

적합도 함수는 각 세대마다 완성되는 개체들이 주어진 조건하에서 얼마나 적합한지를 측정하는 함수로 정의되며 적합도가 큰 개체일수록 다음 세대에서 선택될 확률이 높아진다. 진화과정을 통해 새로운 개체가 선택될 때 적합도가 큰 개체가 선택되기 위해서 적합도 함수는 최대화 문제로 기술되어야 한다. 그리고 최적의 설계변수를 찾기 위해 적합도 함수만이 적용되므로 적합도 함수는 최소화 문제로 기술되는 목적함수와 제약조건의 위반여부에 관한 정보를 포함해야 한다.

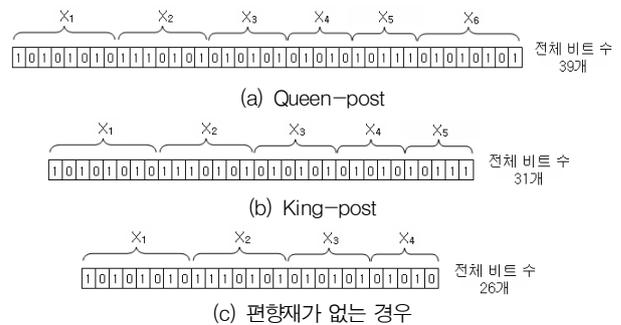


Fig. 4 보강 유형별 개체와 설계변수

Table 2 등변  $\Gamma$ 형강 제원

연번	이진코드	치수(mm)	면적(mm <sup>2</sup> )	연번	이진코드	치수(mm)	면적(mm <sup>2</sup> )	연번	이진코드	치수(mm)	면적(mm <sup>2</sup> )
1	00000	60×4	4.690×10 <sup>2</sup>	11	01010	90×7	1.2220×10 <sup>3</sup>	21	10100	150×12	3.4770×10 <sup>3</sup>
2	00001	60×5	5.8020×10 <sup>2</sup>	12	01011	90×10	1.7000×10 <sup>3</sup>	22	10101	150×15	4.2740×10 <sup>3</sup>
3	00010	65×6	7.5270×10 <sup>2</sup>	13	01100	90×13	2.1710×10 <sup>3</sup>	23	10110	150×19	5.3380×10 <sup>3</sup>
4	00011	65×8	9.7610×10 <sup>2</sup>	14	01101	100×7	1.3620×10 <sup>3</sup>	24	10111	175×12	4.0520×10 <sup>3</sup>
5	00100	70×6	8.1270×10 <sup>2</sup>	15	01110	100×10	1.9000×10 <sup>3</sup>	25	11000	175×15	5.0210×10 <sup>3</sup>
6	00101	75×6	8.7270×10 <sup>2</sup>	16	01111	100×13	2.4310×10 <sup>3</sup>	26	11001	200×15	5.7750×10 <sup>3</sup>
7	00110	75×9	1.2690×10 <sup>3</sup>	17	10000	120×8	1.8760×10 <sup>3</sup>	27	11010	200×20	7.6000×10 <sup>3</sup>
8	00111	75×12	1.6560×10 <sup>3</sup>	18	10001	130×9	2.2740×10 <sup>3</sup>	28	11011	200×25	9.3750×10 <sup>3</sup>
9	01000	80×6	9.3270×10 <sup>2</sup>	19	10010	130×12	2.9760×10 <sup>3</sup>	29	11100	250×25	1.1940×10 <sup>4</sup>
10	01001	90×6	1.0550×10 <sup>3</sup>	20	10011	130×15	3.6750×10 <sup>3</sup>	30	11101	250×35	1.6260×10 <sup>4</sup>

본 연구에서는 Kameshki and Saka(2001)가 제안한 비제약함수를 이용해 식(1)과 같이 최대화 문제로 기술되는 적합도 함수를 형성하였다.

$$F(X) = K - OBJ(X) \left( 1 + C \sum_{i=1}^m v_i \right) \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 제약조건 개수,  $K$ 는 최소화 문제로 기술되는 비제약함수를 최대화 문제로 나타내기 위한 충분히 큰 수로서 계산되는 적합도 함수가 0보다 크도록 하기 위해  $1 \times 10^{13}$ 으로 정하였다.  $OBJ(X)$ 는 최적보강을 위한 무차원의 비용을 나타내는 목적함수이며,  $C$ 는 별점함수에 곱해주는 상수 값으로서 목적함수의 변화에 의한 적합도 함수의 변화보다 별점함수에 의한 적합도 함수의 변화가 더 클 수 있도록 50으로 하였다.  $v_i$ 는 Pezeshk 등(2000)이 제안한 별점함수로서 식(2)와 같다.

$$v_i = \begin{cases} 0 & \text{if } g(t) \leq 0 \\ g(t) & \text{if } 0 < g(t) \leq 1.0 \\ g(t)^2 & \text{if } g(t) > 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $g(t)$ 는 제약조건식을 나타낸다.

### 3.3 목적함수

본 연구에서는 중공슬래브교의 보강 유형에 따른 보강 효과를 비교하기 위해서 보강을 위한 긴장재 비용과 편향재, 정착부의 베이스플레이트 및 수직판에 사용된 강재의 비용을 단위부피당 가격비( $C_r$ )를 이용해 무차원화한 값으로 변환하여 목적함수로 설정하였다. 이때 각 보강 유형에 따른 목적함수는 Table 3에 나타내었다.

### 3.4 제약조건

#### 3.4.1 편향재 압축력에 대한 제약조건

압축력을 받는 편향재에 대하여 식(3)과 같은 제약조건식을 형성하였다.

$$g(1) = \frac{P}{P_a} - 1 \quad (3)$$

여기서,  $P_a$ 는 도로교설계기준(2005)의 허용압축응력을 이용해 산정된 허용압축력이고  $P$ 는 긴장재의 긴장력으로 인해 편향재에 작용하는 압축력이다. 긴장력은 긴장재 인장강도의 70%로 작용하는 것으로 가정하였으며 보

Table 3 보강 유형에 따른 목적함수

구분	목적함수	사용된 변수
Queen-post	$OBJ(X) = X_2(2\sqrt{(X_6 - X_1)^2 + (X_8 - d_1)^2} + L - 2X_6) + 2C_r(2X_7)L_d + 2C_r p X_3(3p + 400)t_b + 2C_r A_v X_4$	$X_1$ : 정착 위치 $X_2$ : 긴장재 단면적 $X_3$ : 앵커 한 열의 개수 $X_4$ : 정착부 수직판 두께 $X_6$ : 편향재 위치 $X_7$ : 등변 ㄱ형강의 면적 $X_8$ : 등변 ㄱ형강의 높이 $C_r$ : 강재와 긴장재의 단위부피당 가격비 $d_1$ : 정착 높이 $p$ : 앵커 간격 $L_d$ : 편향재의 폭(= 100mm) $t_b$ : 정착부의 베이스플레이트 두께(= 10mm) $A_v$ : 정착부 수직판 면적(= 150×80mm <sup>2</sup> )
King-post	$OBJ(X) = X_2(2\sqrt{(\frac{L}{2} - X_1)^2 + (X_8 - d_1)^2}) + 2C_r(2X_7)L_d + 2C_r p X_3(3p + 400)t_b + 2C_r A_v X_4$	
편향재가 없는 경우	$OBJ(X) = X_2(L - 2X_1) + 2C_r p X_3(3p + 400)t_b + 2C_r A_v X_4$	

Table 4 편향재 압축력과 허용압축력

구분	편향재 압축력( $P$ )과 허용압축력( $P_a$ )	사용된 변수
Queen-post	$P = \frac{0.7f_{pu}X_2(X_8 - d_1)}{\sqrt{(X_6 - X_1)^2 + (X_8 - d_1)^2}}, P_a = f_a(2X_9L_d)$	$X_1$ : 정착 위치 $X_2$ : 긴장재 단면적 $X_6$ : 편향재 위치 $X_8$ : 등변 ㄱ형강의 높이 $X_9$ : 등변 ㄱ형강의 두께 $f_{pu}$ : 긴장재 인장강도 $f_a$ : 허용압축응력 $L_d$ : 편향재 폭 $d_1$ : 정착 높이
King-post	$P = \frac{2(0.7f_{pu}X_2)(X_8 - d_1)}{\sqrt{(\frac{L}{2} - X_1)^2 + (X_8 - d_1)^2}}, P_a = f_a(2X_9L_d)$	

강이 이루어질 때 보강 유형에 따른 편향재 압축력과 허용압축력을 Table 4에 나타내었다.

### 3.4.2 보강후 내하율에 대한 제약조건

교량 내하력 평가 매뉴얼에 따른 철근콘크리트 교량에서 공용내하율은 식(4)와 같다.(한국시설안전기술공단, 2006)

$$RF = \frac{\phi M_n - 1.3M_D}{2.15M_L(1+i)} \times K \quad (4)$$

여기서  $\phi M_n$ 는 극한저항모멘트,  $M_D$ 는 사하중모멘트,  $M_L$ 는 설계활하중모멘트,  $i$ 는 충격계수,  $K$ 는 내하율 보정계수를 나타낸다.

본 연구에서는 외부 프리스트레싱을 통해 교량이 보강될 때 Saadatamanesh 등(1989c)이 제시한 보강후 기본 내하율을 바탕으로 사하중에 의한 정모멘트가 외부 프리스트레싱에 의한 부모멘트만큼 감소되는 것을 고려하여 보강후 교량의 각 지점의 공용내하율을 식(5)를 통해 평가하였다.

$$RF_{strengthened} = \frac{\phi M_{nj} - 1.3(M_{Dj} - M_{Tj})}{2.15M_{Lj}(1+i)} \times K \quad (5)$$

여기서,  $\phi M_{nj}$ 는 j번 지점에서 극한저항모멘트,  $M_{Dj}$ 는 j번 지점에서 사하중에 의한 모멘트,  $M_{Lj}$ 는 j번 지점에서 활하중에 의한 모멘트,  $M_{Tj}$ 는 j번 지점에서 프리스트레싱에 의한 부모멘트를 나타낸다. 그리고 보강 유형에 따른

각 지점의 부모멘트를 Table 5에 나타내었다

교량지간을 20등분하였을 때 대칭되는 10개지점 및 정착위치, 정착위치+50mm, 최대설계모멘트 위치, 최대활하중 위치의 14개 지점에 대해 보강후 공용내하율을 고려하여 제약조건 식(6)을 형성하였다.

$$g(2)_j = \frac{RF_{target}}{RF_{strengthened}} - 1.0 \quad (6)$$

여기서,  $RF_{target}$ 은 목표로 하는 내하율이며,  $RF_{strengthened}$ 는 외부 프리스트레싱을 통해 보강이 이루어진 후 각 지점에 대한 공용내하율로서 식(5)와 같다.

### 3.4.3 정착부 앵커설계에 대한 제약조건

외부 긴장재에 긴장력이 제공되면 정착부에는 인장력과 전단력이 발생하고 그 힘은 정착부에 설치된 앵커가 지지하게 된다. 콘크리트구조설계기준(2007)에서 제시한 앵커에 작용하는 계수인장력에 대해 앵커강재강도, 콘크리트파괴강도, 앵커뿔힘강도를 고려하여 앵커의 인장력에 대한 제약조건을 식(7)~(9)와 같이 형성하였다.

$$g(3) = \frac{N_{ua}}{\phi N_{sa}} - 1.0 \quad (7)$$

$$g(4) = \frac{N_{ua}}{\phi N_{cbg}} - 1.0 \quad (8)$$

$$g(5) = \frac{N_{ua}}{\phi N_{pmg}} - 1.0 \quad (9)$$

Table 5 보강 유형에 따른 부모멘트

구분	부모멘트	사용된 변수
Queen-post	$0 \leq x_j < X_1$ 일 경우 $M_{Tj} = 0$ $X_1 \leq x_j < X_8$ 일 경우 $M_{Tj} = \frac{0.7f_{pr}X_2(X_6 - X_1)}{\sqrt{(X_6 - X_1)^2 + (X_8 - d_1)^2}} \left( \left( \frac{X_8 - d_1}{X_6 - X_1} \right) (x_j - X_1) + (e + d_1) \right)$ $X_8 \leq x_j \leq \frac{L}{2}$ 일 경우 $M_{Tj} = 0.7f_{pr}X_2(e + X_6)$	$X_1$ : 정착 위치 $X_2$ : 긴장재 단면적 $X_6$ : 편향재 위치 $X_8$ : 등변 $\gamma$ 형강의 높이 $f_{pr}$ : 긴장재 인장강도 $L$ : 편향재 폭 $e$ : 중립축에서 교량하부까지 거리 $d_1$ : 정착 높이
King-post	$0 \leq x_j < X_1$ 일 경우 $M_{Tj} = 0$ $X_1 \leq x_j \leq \frac{L}{2}$ 일 경우 $M_{Tj} = \frac{0.7f_{pr}X_2(X_6 - X_1)}{\sqrt{(X_6 - X_1)^2 + (X_8 - d_1)^2}} \left( \left( \frac{X_8 - d_1}{\frac{L}{2} - X_1} \right) (x_j - X_1) + (e + d_1) \right)$	
편향재 없는 경우	$0 \leq x_j < X_1$ 일 경우 $M_{Tj} = 0$ $X_1 \leq x_j \leq \frac{L}{2}$ 일 경우 $M_{Tj} = 0.7f_{pr}X_2(e + d_1)$	

여기서,  $N_{ua}$ 는 앵커에 작용하는 계수인장력,  $\phi N_{sa}$ 는 앵커 강재강도,  $\phi N_{crg}$ 는 콘크리트 파괴강도,  $\phi N_{mg}$ 는 앵커뿔 힘강도를 나타낸다.

콘크리트구조설계기준(2007)에서 제시한 앵커에 작용하는 계수전단력에 대해 앵커강재강도, 콘크리트 프라이아웃강도를 고려하여 제약조건을 식(10) 및 식(11)과 같이 형성하였다.

$$g(6) = \frac{V_{ua}}{\phi V_{sa}} - 1.0 \quad (10)$$

$$g(7) = \frac{V_{ua}}{\phi V_{crg}} - 1.0 \quad (11)$$

여기서,  $V_{ua}$ 는 앵커에 작용하는 계수전단력이고,  $\phi V_{sa}$ 는 앵커 강재강도,  $\phi V_{crg}$ 는 콘크리트 프라이아웃강도를 나타낸다.

그리고 앵커에 작용하는 계수인장력과 계수전단력의 조합력에 대한 강도검토식을 통해 제약조건 식(12)를 형성하였다.

$$g(8) = \begin{cases} \frac{N_{ua}}{\phi N_n} - 1 & \text{if } V_{ua} \leq 0.2\phi V_n \\ \frac{V_{ua}}{\phi V_n} - 1 & \text{if } N_{ua} \leq 0.2\phi N_n \\ \frac{\frac{N_{ua}}{\phi N_n} + \frac{V_{ua}}{\phi V_n}}{1.2} - 1 & \text{if } (V_{ua} > 0.2\phi V_n) \\ & \text{and } (N_{ua} > 0.2\phi N_n) \end{cases} \quad (12)$$

여기서,  $\phi N_n$ 은 지배인장강도로서 앵커강재강도, 콘크리트파괴강도, 앵커뿔힘강도 중 최소값을 나타내고,  $\phi V_n$ 은 지배전단강도로서 앵커강재강도, 콘크리트 프라이아웃강도 중 최소값을 나타낸다.  $\frac{N_{ua}}{\phi N_n} + \frac{V_{ua}}{\phi V_n}$ 은 앵커에 작용하는 조합력에 대한 강도검토식을 나타낸다.

#### 3.4.4 정착부 수직판에 대한 제약조건

본 연구에서는 긴장재가 거치되는 정착부 수직판의 면이 보강판으로 보강된 것으로 가정하고 수직판의 휨응력에 대한 제약조건 식(13)과 전단응력에 대한 제약조건 식(14)를 형성하였다.

$$g(9) = \frac{\sigma}{\sigma_a} - 1 \quad (13)$$

$$g(10) = \frac{\tau}{\tau_a} - 1 \quad (14)$$

여기서,  $\sigma$ 와  $\tau$ 는 정착부에서 긴장재의 긴장력으로 인해 수직판에 형성되는 휨응력과 전단응력이고  $\sigma_a$ 와  $\tau_a$ 는 도

료교설계기준(2005)에서 제시한 허용휨응력과 허용전단응력이다.

#### 3.4.5 위치 선정을 위한 제약조건

편향재 위치와 정착 위치의 합리적인 선정을 위해 편향재 위치가 정착 위치에서 150mm 정도 떨어져 위치할 수 있도록 제약조건을 식(15)와 같이 형성하였다.

$$g(11) = \frac{X_1 + 150}{X_6} - 1 \quad (15)$$

여기서,  $X_1$ 은 정착 위치,  $X_6$ 는 편향재 위치를 나타낸다.

### 4. 예제 및 결과 분석

#### 4.1 RC 중공슬래브교의 최적보강

본 연구의 내용을 검증하기 위하여 지간 길이가 16m인 보강 대상인 RC 중공슬래브교를 선정하여 Fig. 5에 나타내었다. 보강을 위한 일반 조건을 Table 6에 나타내고,

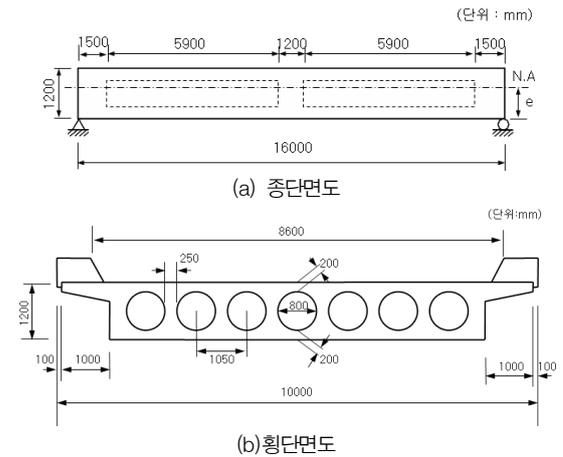


Fig. 5 RC 중공슬래브교

Table 6 RC 중공슬래브교 보강설계 조건

구분	설계조건	
재료	콘크리트	$f_{ck} = 21 \text{ MPa}$ $E_c = 21538 \text{ MPa}$
	철근	$f_y = 400 \text{ MPa}$ $E_s = 200000 \text{ MPa}$
	긴장재 (SWPC 1AN)	인장강도 = 1922MPa
	편향재 (SS400)	항복응력 = 235MPa 탄성계수 = 206000MPa
	강재와 긴장재의 가격비 $C_r = 0.01$	
철근량	$A_s = 39829 \text{ mm}^2$ , $A_s' = 12848 \text{ mm}^2$	
하중	단위폭당 사하중 : 23.48kN/m, 유효폭을 고려한 단위폭당 DB24하중 $P_f = 13.91\text{kN}$ $P_r = 55.65\text{kN}$	

Table 7 고하중용 앵커(HSL-3) 특성치

구분	M12	M16	M20
지름 (mm)	18	24	28
인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	800	800	830
유효단면적 (mm <sup>2</sup> )	84.3	157	245
앵커휨강도 (kN)	25.8	36.0	50.3
앵커 유효 길이 (mm)	80	100	125
앵커 간격 (mm)	80	100	125

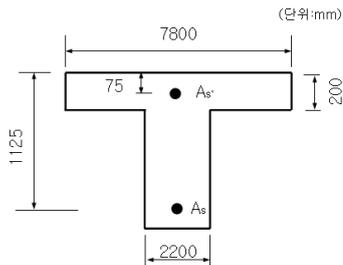


Fig. 6 RC 중공슬래브교의 가상 T형 환산단면

보강에 사용된 HILTI사의 고하중용 앵커(HSL-3) 특성치를 Table 7에 나타내었다. 중공슬래브교의 휨강도와 중립축의 위치를 계산하기 위해 Fig. 6과 같이 중공슬래브교의 단면을 가상 T형 단면으로 환산하여 계산하였다.

강도 감소를 고려한 단위폭당 휨강도는 1853.8 kNm, 중공슬래브 바닥면에서 중립축까지 거리( $e$ )는 1.0654m로 계산되었다. 또한, 사하중모멘트( $M_D$ )가 최대인 위치(8.0m)에서의 설계모멘트( $M_u$ )는 1943.9 kNm로 계산되었으며, 활하중모멘트( $M_L$ )가 최대인 위치(7.3m)에서의 설계모멘트( $M_u$ )는 1946.9 kNm로 계산되었다. 하지만, 설계모멘트( $M_u$ )의 최대값은 1950.0 kNm로서 지점으로 부터 7.592m 떨어진 곳에서 발생되었다. 재하시험을 통해 산정된 보정계수( $k=0.75$ )와 식(4)를 통해 최대설계모멘트가 발생하는 단면의 보강전 공용내하율은 0.676으로 계산되어 보강이 필요한 것으로 판명되었다.

본 연구에서는 보강 전 공용내하율이 0.676인 RC 중공슬래브교를 설계자가 요구하는 목표내하율을 만족하도록 보강 유형에 따라 최적화를 수행하였다. 설계자가 요구하는 목표내하율을 1.0으로 가정하여 보강 유형에 따른 적합도의 수렴양상을 Fig. 7에 나타내고, 목적함수의 수렴양상을 Fig. 8에 나타내었으며 이를 통해 최적해의 수렴성이 양호함을 알 수 있었다.

보강 유형에 따른 목적함수값과 설계변수를 Table 8에 나타내었다. Table 8에서 보는 바와 같이 Queen-post의 목적함수 값은 1,577,370으로서 King-post의 목적함수 값 보다는 1.6%, 편향재가 없는 경우의 목적함수 값 보다는 21.1% 더 작은 것을 알 수 있었다. 또한, Queen-post의 긴장재 단면은 184.94mm<sup>2</sup>로서 King-post에서의

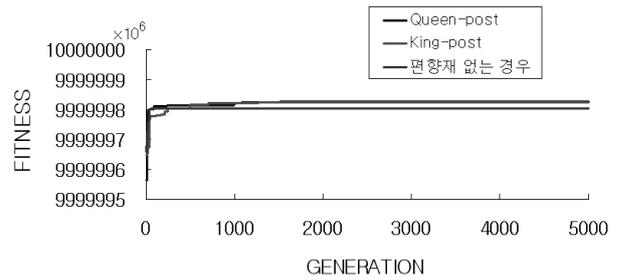


Fig. 7 보강 유형에 따른 적합도의 변화

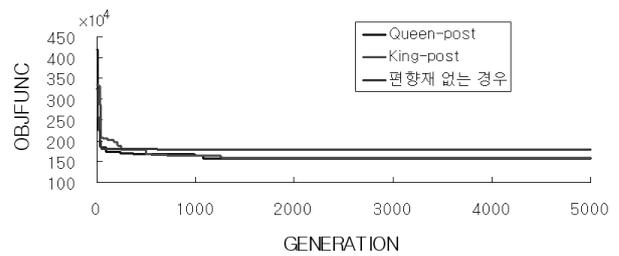


Fig. 8 보강 유형에 따른 목적함수의 변화

Table 8 중공슬래브교 설계변수의 최적값

설계변수	Queen-post	King-post	편향재가 없는 경우
정착 위치(mm)	4250	4250	4250
긴장재 개수 (긴장재면적mm <sup>2</sup> )	28 (184.94)	29 (191.545)	33 (217.965)
앵커(M16)개수	13	13	14
수직판두께(mm)	30	30	30
등변 T형강	250×25	250×25	-
편향재 위치(mm)	7550	8000	-
목적함수	1,577,370	1,602,829	1,785,297

단면 보다는 3.6%, 편향재가 없는 경우 보다는 17.9% 낮게 나왔다. 이는 긴장재에 작용하는 긴장력을 긴장재 인장강도의 70%로 고려할 때 Queen-post에서의 긴장력은 248.8kN으로 King-post에서의 257.7kN, 편향재가 없는 경우의 293.3kN보다 낮은 긴장력으로 최적보강을 할 수 있다는 것을 나타낸다. 따라서, Queen-post 방법이 가장 효과적인 보강 유형임을 알 수 있었다. 그리고 정착부에서 소요되는 앵커 수는 편향재가 없는 경우가 가장 많았으며 Queen-post와 King-post에서는 긴장력의 차이가 작아서 필요한 앵커 수가 같게 나타났다.

Table 8에서 최적 결과로 나타난 정착 위치는 세 형상 모두 4.25m를 나타내고 있다. 이 위치는 Table 9를 통해 보강전 교량의 내하율이 1.0보다 작아지기 시작하는 구간 직전이 되는 것을 알 수 있다. 최대설계모멘트가 발생하는 위치인 7.592m 지점과 8.408m 지점에서 보강전 내하율이 0.676에서 보강후 1.0 이상으로 내하율이 향상됨을

Table 9 설계모멘트와 보강전·후 내하율

위치(m)	0.0	1.6	3.2	4.25	4.3	4.8	6.4	7.3	7.592	8.0	8.408	8.7	9.6	11.2	11.7	11.75	12.8	14.4	16.0	
$M_D$ (kNm)	0.0	270.5	480.9	586.3	590.6	631.1	721.3	745.6	749.4	751.4	749.4	745.6	721.3	631.1	590.6	586.3	480.9	270.5	0.0	
$M_L$ (kNm)	0.0	145.2	250.4	297.7	299.5	315.5	352.3	358.6	357.9	354.8	357.9	358.6	352.3	315.5	299.5	297.7	250.4	145.2	0.0	
$M_u$ (kNm)	0.0	747.6	1307.8	1573.7	1584.3	1680.7	1898.0	1946.9	1950.0	1943.9	1950	1946.9	1898.0	1680.7	1584.3	1573.7	1307.8	747.6	0.0	
내하율	보강전	-	2.845	1.350	1.009	0.998	0.901	0.715	0.679	0.676	0.680	0.676	0.679	0.715	0.901	0.998	1.009	1.350	2.845	-
	Queen-post	-	2.85	1.35	1.01	1.33	1.22	1.03	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.03	1.22	1.33	1.01	1.35	2.85	-
	King-post	-	2.85	1.35	1.01	1.34	1.23	1.04	1.01	1.01	1.02	1.01	1.01	1.04	1.23	1.34	1.01	1.35	2.85	-
	편향재없을때	-	2.85	1.35	1.01	1.39	1.27	1.05	1.01	1.00	1.01	1.00	1.01	1.05	1.27	1.39	1.01	1.35	2.85	-

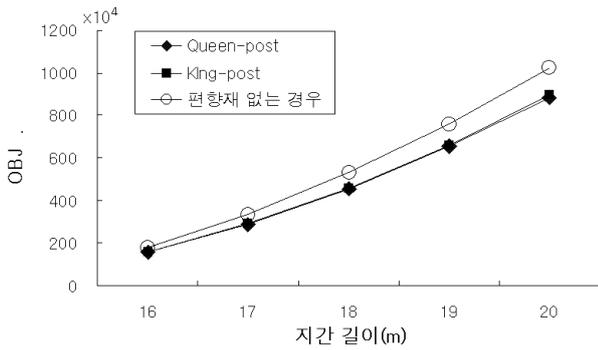


Fig. 9 지간 길이에 따른 목적함수 변화

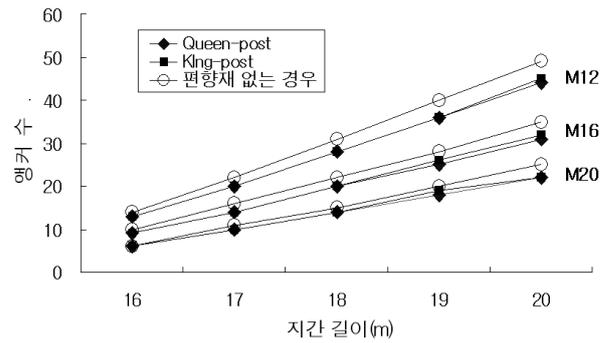


Fig. 11 앵커종류 및 지간 길이에 따른 앵커 수

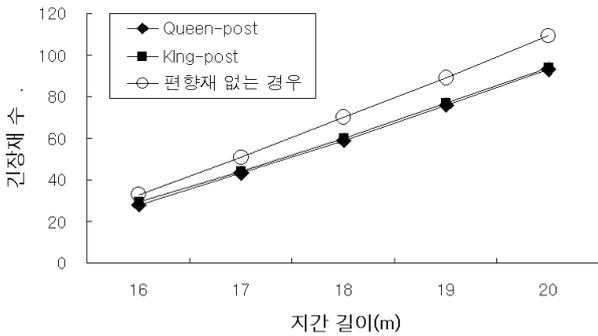


Fig. 10 지간 길이에 따른 긴장재 수

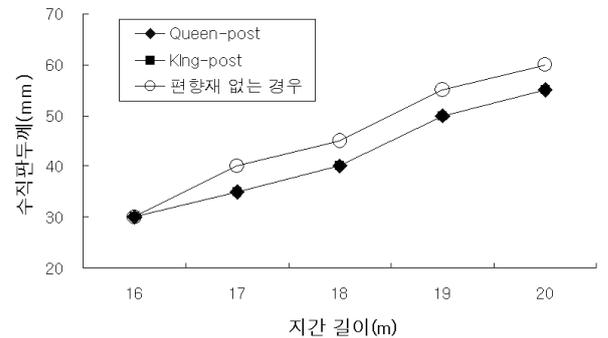


Fig. 12 지간 길이에 따른 수직판 두께

알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 방법은 보강이 필요한 구간에서만 보강효과가 있음을 알 수 있었다.

#### 4.2 지간 길이의 변화

중공슬래브보 보강 유형별 지간 길이의 변화에 따른 목적함수의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 편향재가 없는 경우 지간 길이가 증가할수록 목적함수 값의 증가속도가 더 크게 나타났으며 이를 통해 지간 길이가 길수록 Queen-post가 더 효과적인 형상이 되는 것을 알 수 있었다. 지간 길이에 따른 긴장재 수의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 편향재가 없는 경우 소요 긴장력이 더 커진다는 것을 알 수 있었다.

또한, 보강 유형별 지간 길이 변화에 따른 소요되는 앵

커 수의 변화를 살펴보기 위해 HILTI사에서 제공되는 고하중용 앵커(HSL-3)의 지름이 다른 세가지 앵커에 대해 한 행에 소요되는 앵커 개수를 Fig. 11에 나타내었다. 지간 길이별 필요한 앵커 개수는 편향재가 없는 경우가 가장 많은 것으로 나타났으며 Queen-post와 King-post의 경우는 비록 긴장력의 차이가 나더라도 그 차이가 작아서 소요되는 앵커수가 거의 일치하는 것으로 나타났다.

지간 길이에 따른 수직판 두께는 Fig. 12에 나타내었다. 소요 앵커 수에 대한 결과와 마찬가지로 편향재가 없는 경우 수직판 두께가 가장 두꺼운 것으로 나타났으며 Queen-post와 King-post의 경우는 필요한 수직판 두께가 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 13에서는 Queen-post 보강 유형에서 지간 길이

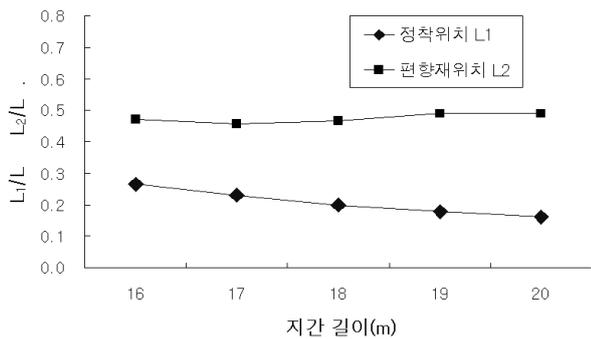


Fig. 13 Queen-post에서 시간 길이에 따른 위치 변화

에 따른 정착 위치 및 편향재 위치를 시간 길이에 대한 비율로 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 시간 길이가 증가할수록 정착 위치는 단부 쪽으로 이동하고 편향재 위치는 0.46L~0.49L 위치에서 형성되는 것을 알 수 있었다. 이는 시간 길이 증가에 따라 휨강도를 초과하는 설계모멘트의 영역이 증가함으로서 보강해야할 영역이 증가되기 때문인 것으로 파악된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 공용중인 RC 중공슬래브교의 외부 프리스트레싱을 이용한 보강을 위해 마이크로 유전알고리즘을 이용한 보강 방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 제안된 방법은 RC 중공슬래브교의 목표내하율을 만족하기 위해 외부 프리스트레싱을 이용하여 보강할 때 이산최적화 기법인 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 최적의 정착 위치, 편향재 위치 및 종류, 긴장재 단면적, 소요 앵커 수 및 정착부 수직판 두께를 산출할 수 있음을 알 수 있었다.

2) 동일한 목표 내하율로 보강함에 있어서 Queen-post 보강방법은 King-post 보강방법 보다 1.6%, 편향재가 없는 보강방법 보다 21.1% 정도 더 작은 목적함수 값으로 보강이 이루어졌으며, 또한 King-post 보강방법 보다 3.6%, 편향재가 없는 보강방법 보다 17.9% 정도 낮은 긴장력으로 보강할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 Queen-post 보강방법이 보다 효과적인 보강방법임을 알 수 있었다.

3) 제안된 방법은 보강전 공용내하율이 가장 낮은 지점을 기준으로 보강이 이루어지므로 합리적이고 효과적인 보강을 수행할 수 있다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, “도로교설계기준”, 2005.
2. 양동석, 임상훈, 박선규, “외부 긴장된 H형 보의 휨거동 특성”, 한국강구조학회논문집, 제14권, 제1호, 2002, pp.79-85.
3. 이말숙, 윤영목, 강문영, “개선소성인지해석과 유전자 알고리즘을 이용한 반강접 강골조의 이산최적설계”, 한국강구조학회 논문집, 제16권, 제2호, 2004, pp.79-85.
4. 최동호, 정상환, 유동민, “외부 긴장재로 보강된 강합성보의 내하율 산정식을 이용한 초기 긴장력 결정”, 한국강구조학회 논문집, 제17권, 제5호, 2005, pp.527-536.
5. 최세후, “고등해석과 유전자 알고리즘을 이용한 트러스 구조물의 최적설계”, 한국구조물진단학회지, 제12권 제4호, 2008, pp. 161-167.
6. 한국시설안전기술공단, “교량 내하력 평가 매뉴얼”, 2006.
7. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준”, 2007.
8. Kameshki, E. S., and Saka, M. P., “Genetic algorithm based optimum bracing design of non-swaying tall plane frames”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.57, No.10, 2001, pp. 1081-1097.
9. Pezeshk, S., Camp, C. V., and Chen, D., “Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization”, Journal of Structural Engineering, Vol.126, No.3, 2000, pp.382-388.
10. Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B.M., “Analytical Study of Prestressed Composite Beams”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.9, 1989a, pp. 2364-2381.
11. Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B.M., “Experimental Study of Prestressed Composite Beams”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.9, 1989b, pp. 2348-2363.
12. Saadatmanesh, H., Albrecht, P., and Ayyub, B.M., “Guidelines for Flexural Design of Prestressed Composite Beams”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.11, 1989c, pp. 2944-2961.
13. Troitsky, M. S., Zielinski, Z. A., and Nouraeyan, A., “Pre-Tensioned and Post-Tensioned Composite Girders”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.115, No.12, 1989, pp.3142-3153.

(접수일자 : 2010년 5월 10일)  
(심사완료일자 : 2010년 6월 23일)

---

## 요 지

본 연구에서는 RC 중공슬래브교의 내하력을 향상시키기 위한 외부 프리스트레싱을 이용한 보강에 있어서 마이크로 유전알고리즘( $\mu$ -GA)을 이용한 최적보강방법을 제시하였다. 최적보강을 위한 보강 유형으로 Queen-post 유형과 King-post 유형이 고려되었다. 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 RC 중공슬래브교의 최적보강을 위한 보강 유형과 편향재, 긴장재 면적, 필요한 앵커 개수 등을 산정하였다. 목적함수는 보강에 사용된 긴장재와 강재비용을 무차원화하여 구성하였으며, 제약조건은 교량과 앵커설계를 위한 시방서 내용을 고려하여 형성하였다. RC 중공슬래브교의 보강설계를 실시한 후 그 결과를 분석하여 제안된 방법의 타당성을 제시하였다.

**핵심 용어** : 외부 프리스트레싱, 최적 보강, 마이크로 유전알고리즘, RC 중공슬래브교

---