



연속형 및 혼합이산형 최적설계법에 의한 농업용 수로교 교각 및 교대의 최적설계

Optimum Design of Reinforced Concrete Agricultural Aqueduct Abutment and Pier Using Continuous and Mixed-Discrete Optimization Methods

김종옥*† · 박찬기* · 차상선*

Kim, Jong Ok · Park, Chan Gi · Cha, Sang Sun

ABSTRACT

This study was conducted to find out the best optimum design method for the design of reinforced concrete agricultural aqueduct abutment and pier structures. The mixed-discrete optimization and continuous optimization method were applied to the design of reinforced concrete agricultural aqueduct abutment and pier and the results of these optimization methods were compared each other.

It is proved that mixed-discrete optimization method is more reliable, efficient and reasonable than continuous optimization method for the optimum design of the reinforced concrete agricultural aqueduct abutment and pier.

Keywords: Continuous optimization method; mixed-discrete optimization method; reinforced concrete agricultural aqueduct

I. 서 론

최적설계란 주어진 제약조건을 만족시키면서 목적함수의 값이 최대 또는 최소가 되도록 설계변수 값을 결정하는 과정이다.

구조물의 최적설계시 목적함수는 건설비용이나 구조물의 중량 등이 되며, 제약조건으로는 변위제약과 응력제약 등이 고려된다 (Jung 등, 1997). 철근콘크리트 구조물의 최적설계에서는 콘크리트의 강도, 구조물의 형상, 콘크리트 단면 치수, 콘크리트 단면내의 철근량 등이 설계변수로 적용된다. 일반적으로 철근콘크리트 구조물의 설계시 콘크리트 강도와 철근량 등은 미리 규격화된 값 (이산자료) 중에서 선택되며, 콘크리트 단면치수는 규격화된 값을 적용하는 것이 아니라 일반적으로 경험시 적용하는 단면을 선택하여 설계에 적용하고 있다 (Jung 등, 1997).

이산형 최적설계기법 연구로는 Jung 등 (1997)의 변수분리의 원리에 의한 철근콘크리트 평면 뼈대 구조물의 최적화기법, Cella 등 (1971)의 Combinatorial Algorithm에 의한 방법, Reinschmidt 등에 의한 목시적 열거법, Lai 등 (1973)에 의한 Hooke and Jeeves의 Pattern Search 등을 확장한 최적화기법이 있다. Choi

등 (1989)은 단면 데이터베이스를 이용하여 연속해 부근에서 직접탐색방법을 통하여 이산형 최적설계 값을 구하고, Thanedar 등 (1995)은 이산형 최적화에 관한 조사논문에서 분기한계알고리즘, Simulated Annealing, Genetic Algorithms 등에 의한 최적화기법을 제시하였다.

한편 농업용 철근콘크리트 구조물의 최적설계법의 적용은 Kim 등에 의하여 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 합리적인 최적설계, 농업용 수로터널의 최적설계, 최적화기법의 농공학에의 활용과 같은 연구를 실시하여 최적화기법이 농업용 철근콘크리트 구조물의 설계에 유용한 방법임을 제시하였다 (Kim, 1995, 1998, 2004). 또한 김 등은 혼합이산형 최적화기법과 연속형 최적화기법을 이용하여 농업용 철근콘크리트 수로교 상부구조물의 최적화설계에 대한 연구결과를 제시하였다 (Kim 등, 2010).

그러나 이와 같은 최적설계 연구에도 불구하고 아직까지도 농업용 철근콘크리트 구조물의 설계에 최적화기법을 적용한 사례는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 연속형 최적화 기법과 혼합이산형 최적화 기법을 적용하여 농업용 철근콘크리트 구조물 중 수로교의 교대 및 교각 구조물을 설계할 수 있는 프로그램을 개발하고, 연속형 최적화기법과 혼합이산형 최적화기법을 이용한 설계결과를 비교한 후 농업용 철근콘크리트 구조물의 설계에 적합한 최적화기법을 제안하고자 한다.

II. 연구계획

본 연구는 연속형 및 혼합이산형 최적화 설계기법을 이용한

* 공주대학교 산업과학대학 지역건설공학과
 † Corresponding author Tel.: +82-41-330-1262
 Fax: +82-41-330-1269
 E-mail: jokim@kongju.ac.kr

2010년 8월 16일 투고
 2010년 9월 28일 심사완료
 2010년 10월 26일 게재확정

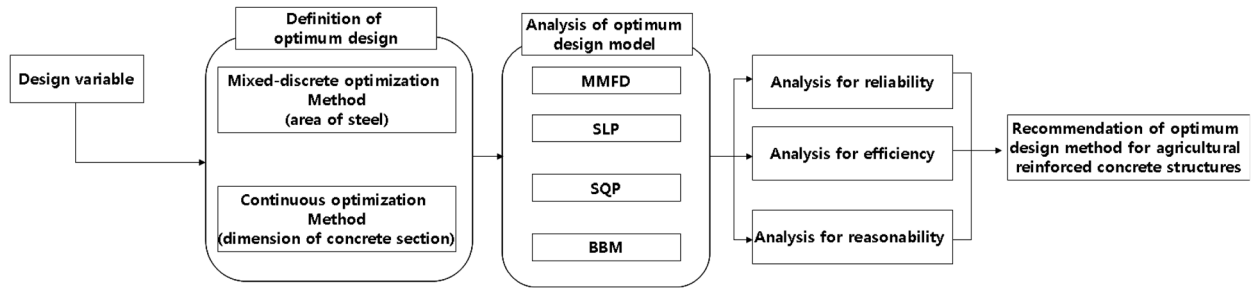


Fig. 1 Overall procedure to optimize agricultural reinforced concrete structure

농업용 철근콘크리트 구조물의 최적설계를 실시하고 최적설계 결과를 비교분석하여 농업용 철근콘크리트 구조물의 합리적인 최적화 기법을 제안하고자 하였다. Kim 등 (2010)은 농업용 철근콘크리트 수로교 구조물 중 상부구조물의 최적설계를 실시하였다. 본 연구는 2010년 Kim 등에 의해서 실시한 수로교 상부구조물의 결과를 이용하여 수로교 하부구조물인 교각 및 교대의 최적설계를 실시하고자 한다. 최적화 설계는 연속형 및 혼합이산형 최적설계기법을 적용하여 실시하였다. Fig. 1은 본 연구에서 실시하고자 하는 농업용 철근콘크리트 구조물의 최적화 설계과정을 나타낸다.

첫번째로 본 연구에서는 농업용 철근 콘크리트 구조물의 최적화를 위하여 설계변수로 구조물의 형상과 크기, 철근의 단면적을 고려하였다. 두번째로 콘크리트 단면과 철근 단면적을 모두 연속형 설계변수로 적용하는 연속형 최적설계기법과 콘크리트 단면은 연속형 설계변수로 고려하고, 철근단면적은 이산형 설계변수로 적용하는 혼합이산형 최적설계기법으로 정식화 하였다. 세번째로는 모델을 검증하기 위하여 농업용 철근콘크리트 구조물 중 교각 및 교대를 2007년 국토해양부 제정 콘크리트 구조설계기준의 교각, 교대의 설계기준을 적용하여 제약조건식을 유도하였다. 마지막으로 연속형 최적설계기법과 혼합이산형 최적화 설계기법의 결과를 비교하여 농업용 철근콘크리트 구조물에 적용할 수 있는 보다 합리적인 최적설계방법을 제안하였다.

1. 최적설계기법

최적화 모형은 제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화 하는 설계변수를 결정하는 것으로 식 (1)으로 표현된다 (Vanderplaats, 1984, 2008).

$$\text{Minimize } Y (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

Subject to

$$f_i (X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0, i= 1, 2, \dots, L$$

본 연구에서는 농업용 철근콘크리트 구조물의 최적설계기법을 제안하기 위하여 연속형 최적화기법과 혼합이산형 최적화기법을 비교검토 하였으며 적용한 최적화기법은 다음과 같다.

가. 연속형 최적화기법

연속형 최적화 기법으로는 수정유용방향법 (Modified Method of Feasible Directions, MMFD), 순차선형계획법 (Sequential Linear Programming, SLP), 순차2차계획법 (Sequential Quadratic Programming, SQP)등을 적용하였다.

수정유용방향법은 설계변수 X의 초기치 X⁰와 목적함수 그리고 제약조건식이 주어지면 식 (2)에 의하여 목적함수를 최소화 하는 방향으로 X값이 최적설계 값을 찾아가는다.

$$X^q = X^{q-1} + \alpha^* S^q \quad (2)$$

여기서 q는 반복 횟수, S^q는 탐색방향, α*는 설계변수를 바꾸어 나가는 양을 조절하는 계수이며 장점은 효율성과 정확성이 우수하다.

순차선형계획법은 비선형계획문제를 선형화하여 근사해를 구하고 이점에서 다시 선형화하여 최적화 하는 과정을 정확한 해를 구할 때까지 반복한다.

순차2차계획법 (Sequential Quadratic Programming, SQP)은 먼저 탐색방향을 결정하고 그 방향으로 가능한 한 많이 설계가 개선 되도록 일차원 탐색을 수행한다. 이와 같이 탐색방향을 결정하여 순차적으로 최적해를 구하는 방법을 순차 2차 계획법이라 한다.

나. 이산형 최적화기법

이산형 최적화기법으로 분기한계법 (Branch and Bound Method, BBM)이 가장 널리 사용되고 있으며 본 연구에서도 분기한계법을 적용하였다 (Huang and Arora, 1995; Sepulveda, 1995; Vanderplaats, 2008). 분기한계법은 연속형 설계변수 최적화를 수행하고, 그 결과에 의하여 출발점과 이산해에 대한 하한 값이 결정된다. 그 후 하나의 변수가 다음 이산값에 추가된

후 최적화가 수행된다. 만약 최적치가 전보다 커졌다면 그 변수는 그 다음 하한 값으로 되어 최적화가 반복된다. 본 연구에서는 연속형 설계변수 X_i 는 유용영역 내의 임의의 수치를 가질 수 있는 것으로 가정하고, 이산형 설계변수는 식 (3)를 적용하였다 (Lin, Chun and Wang, 1995). 즉 콘크리트 단면치수는 연속형 설계변수로 철근의 단면적은 이산형 설계변수로 고려하여 분기한계법을 적용하였다.

$$\text{Minimize } F(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

subject to

$$g_j(x) \leq 0 : j = 1, m,$$

$$h_k(x) = 0 : k = 1, l$$

$$x_i \in D_i, D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iq}\} ; i = 1, n$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u ; i = 1, n$$

여기서, D_i 는 i 번째 설계변수에 대한 이산값의 집합이며 d_{ij} 는 i 번째 설계변수에 대한 j 번째 이산값이고, q 는 i 번째 설계변수에 대한 이산값의 개수이다.

2. 설계변수

설계변수로 구조물의 치수, 철근의 단면적을 고려하였다. 먼저 구조물의 치수 및 철근의 단면적은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 농업용 철근콘크리트 구조물 중 본 연구에서는 수로교의 하부구조물인 교대의 높이 (HA), 교각의 높이 (HOP), 구체와 확대기초의 형상을 결정짓는 치수인 HBS, HOG, WBS, SL, HSF 등과 지반면의 높이 (HOS), 유수의 높이 (HOF) 등은 설계하고자 하는 수로교의 필요 용수량과 수로교를 설치하고자 하는 곳의 지형, 그리고 하상의 조건을 고려하여 상수로 입력할 수 있도록 하였다.

교대에 있어 설계변수는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 8개로 구성하였으며, 여기서, X_1 : 교좌의 폭, X_2 : 구체 바닥폭과 교좌폭과의 차이, X_3 : 교좌의 높이, X_4 : 기초의 두께, X_5 : 기초의 앞판과 뒷판의 길이, X_6 : 구체의 주철근량, X_7 : 기초의 상부철근량, X_8 : 기초의 하부 철근량이다. 교각의 설계변수는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 10개로 구성하였으며, X_1 : 교각의 교축 직각방향의 폭, X_2 : 교각의 교축 방향의 폭, X_3 : 교각 기초의 두께, X_4 : 교각기초의 교축 직각방향 폭의 절반, X_5 : 교각기초의 교축 방향 폭의 절반, X_6 : 교각의 주철근 단면적, X_7 : 교축에 직각 방향으로 배근하게 되는 기초의 상부철근 단면적, X_8 : 교축 방향으로 배근하게 되는 기초의 상부철근 단면적, X_9 : 교축 방향으로 배근하게 되는 기초의 하부철근

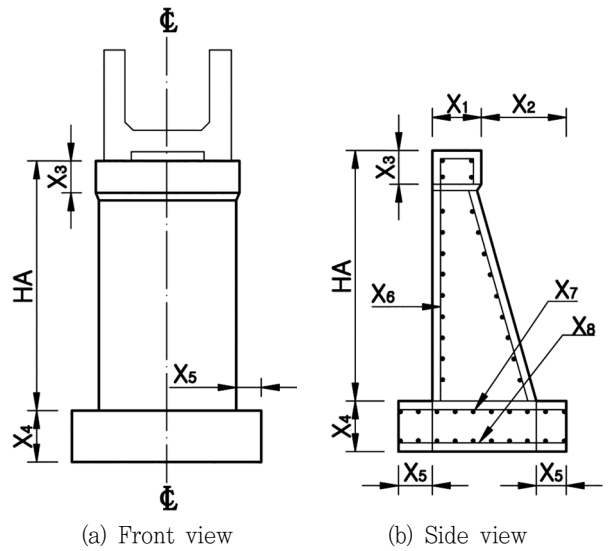


Fig. 2 Design variables of abutment

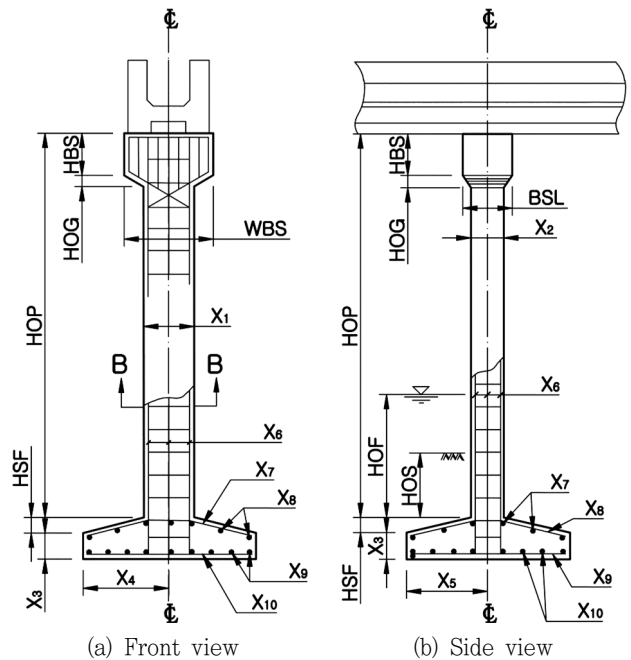


Fig. 3 Design variables of pier

단면적, X_{10} : 교축에 직각 방향으로 배근하게 되는 기초의 하부철근 단면적을 나타낸다.

3. 목적함수 및 제약조건

본 연구에서 목적함수는 경제성으로 수로교 교각 및 교대를 설치하는데 소요되는 콘크리트, 철근 및 거푸집에 대한 재료비 및 노임을 포함하는 건설경비이며 식 (4)와 같다.

$$C = C_C V_C + C_S V_S + C_F A_F \quad (4)$$

where, C : Cost of construction of abutment or pier.

C_C, C_S, C_F : Cost of unit concrete volume and wages, cost of steel weight/unit concrete volume and wages, cost of form/unit concrete volume and wages, respectively (Table 1).

V_C, V_S, A_F : Concrete volume, steel weight and area of form, respectively.

본 연구에서는 수로교의 교각 및 교대의 최적화설계를 위하여 2007년 국토해양부 제공 콘크리트 구조설계 기준의 설계규정을 이용하여 제약조건식을 유도하였다 (Table 2 및 Table 3). 다만 설계 규정 중 최소 철근간격에 대한 제약조건은 목적함수의 최적치를 결정하는데 제외하였다. 그러나 실제로 농업용 철근 콘크리트 수로교 구조물의 최적설계 시에는 철근간격에 대한 제약 조건을 고려하여 실시하는 것이 바람직 하다. 또한 본 연구에서는 수로교의 교각 및 교대의 최적설계를 수행할 때 Kim 등 (2010)에 의해서 실시되었던 수로교 상부구조

Table 1 Cost of materials and construction wages

Notation	Type of materials	Cost of materials and construction wages
C_C	Concrete (won/m ³)	54,000/1 m ³ (21 MPa) + 0.24 people/1 m ³ × 103,000 won + 0.36 people/1 m ³ × 69,000 won = 81,960 won/m ³
C_S	Steel (won/kg)	790 won/kg (D22) + 0.00276 people/kg × 110,000 + 0.00104 people/kg × 69,000 won = 1,165.36 won/kg
C_F	Form (won/m ²)	16,000 won/m ² (included wood board + wages)

Table 2 Constraints for the abutment design

Section	Design method	Constraints	Notation
Stability of abutment	Overtuning stability	$G(1) = FS_0 - \frac{M_r}{M_0} \leq 0$	FS_0 : Safe factor of overturning M_r : Resisting moment M_0 : Overturning moment
	Sliding stability	$G(2) = FS_S - \frac{\mu P_v}{P_h} \leq 0$	FS_S : Safe factor of sliding μ : Coefficient of friction P_v : Total vertical force P_h : Total horizontal force
	Soil bearing capacity	$G(3) = q_{max} - q_a \leq 0$	q_{max} : Maximum contact pressure of acting in the ground of abutment base q_a : Soil bearing capacity
	$e < B/6$	$G(4) = e - \frac{B}{6} \leq 0$	e : Eccentricity distance that acting point of external force and resultant force from the middle of foundation B : Length of foundation slab
Concrete stem and parapet wall design	Flexural design	$G(5) = M_{abi} - \Phi_f M_{nbi} \leq 0$	M_{abi} : Flexural moment of stem and parapet wall in i section M_{nbi} : Nominal flexural moment of stem and parapet wall in i section
	Shear design	$G(6) = V_{abi} - \Phi_v V_{nbi} \leq 0$	V_{abi} : Shear strength of stem and parapet wall in i section V_{nbi} : Nominal shear strength of stem and parapet wall in i section
	Maximum steel ratio	$G(7) = P_{bi} - P_{max} \leq 0$	P_{bi} : Steel ratio of stem and parapet wall in i section
	Minimum steel ratio	$G(8) = P_{min} - P_{bi} \leq 0$	P_{bi} : Steel ratio of stem and parapet wall in i section
Spread foundation design	Flexural design of heel	$G(9) = M_{ah} - \Phi_f M_{nh} \leq 0$	M_{ah} : Flexural moment of heel M_{nh} : Nominal flexural strength of heel
	Shearing design of heel	$G(10) = V_{ah} - \Phi_v V_{nh} \leq 0$	V_{ah} : Shear strength of heel V_{nh} : Norminal shear strength of heel
	Flexural design of toe	$G(11) = M_{at} - \Phi_f M_{nt} \leq 0$	M_{at} : Flexural moment of toe M_{nt} : Nominal flexural moment of toe
	Shearing design of toe	$G(12) = V_{at} - \Phi_v V_{nt} \leq 0$	V_{at} : Shear strength of toe V_{nt} : Norminal shear strength of toe
	Minimum steel ratio of heel and toe	$G(13) = P_{min} - P_h \leq 0$	P_h : Steel ratio of heel
		$G(14) = P_{min} - P_t \leq 0$	P_t : Steel ratio of toe
Maximum steel ratio of heel and toe	$G(15) = P_h - P_{max} \leq 0$		
	$G(16) = P_t - P_{max} \leq 0$		

Table 3 Constraints for the pier design

Section	Design method	Constraints	Notation
Stability of pier	Overturning stability	$G(1) = \frac{M_0}{V} - \frac{B}{6} \leq 0$	M_0 : Overturning moment V : Total vertical force acting in pier B : Width of footing foundation
	Sliding stability	$G(2) = H - H_a \leq 0$	H : Sliding force H_a : Frictional force
	Soil bearing capacity	$G(3) = Q - Q_a \leq 0$	Q : Maximum contact pressure acting in the ground of pier base Q_a : Soil bearing capacity
Column design	Axis direction	$G(4) = P_{pi} - \Phi_a P_{pn} \leq 0$	P_{pi} : Factor axial force of pier P_{pn} : Nominal axial force of pier Φ_a : Strength reduction factor
	Flexural design	$G(5) = M_{upi} - \Phi_j M_{npi} \leq 0$	M_{upi} : Flexural moment in i section M_{npi} : Nominal flexural moment in i section
Foundation design	Flexural design	$G(6) = M_{ufi} - \Phi_j M_{nfi} \leq 0$	M_{ufi} : Factor flexural strength in i section M_{nfi} : Nominal flexural strength in i section
	Shear design	$G(7) = V_{uf} - \Phi_s V_{nf} \leq 0$	V_{uf} : Shearing strength V_{nf} : Nominal shearing strength Φ_s : Strength reduction factor
Bearing Strength	Column	$G(8) = B_{uc} - B_{dc} \leq 0$	B_{uc} : Maximum bearing strength acting in the base of column B_{dc} : Design bearing strength of column
	Foundation	$G(9) = B_{uf} - B_{df} \leq 0$	B_{df} : Design strength of bearing strength
Minimum area of pier		$G(10) = AP_{min} - AP \leq 0$	AP_{min} : Minimum area of pier AP : Area of pier ($X_1 \cdot X_2$)
Maximum steel ratio		$G(11) = PP - P_{max} \leq 0$ $G(12) = P_{min} - PP \leq 0$	P_{min} : Minimum steel ratio of pier P_{max} : Maximum steel ratio of pier PP : Steel ratio of pier ($X_6 / (X_1 \cdot X_2)$)

의 최적설계 값을 상수로 입력하여 교각 및 교대에 하중으로 작용하는 상부구조의 자중이 계산되도록 한 후 교각 및 교대의 최적설계를 수행하였다.

4. 최적설계 값의 도출과정

본 연구에서 최적설계 값을 결정하기 위한 과정은 Fig. 4와 같다. 농업용 철근콘크리트 구조물 중 수로교의 교각과 교대 구조물의 최적화 설계를 위하여 콘크리트 단면치수, 철근 단면적을 변수로 하여 각 치수의 변화에 따른 최적값을 결정하는 방법을 반복하여 수행하였다. 이때 콘크리트 단면의 치수와 철근의 단면적을 결정할 때 각 변수는 제약조건인 콘크리트 구조 설계기준의 설계기준을 모두 만족하는 값으로 결정되며, 이때 최적설계방법으로는 연속형 최적설계기법에서는 MMFD, SLP, SQP를 적용하고 혼합이산형 최적설계기법에서는 BBM을 적용하였다. 상기에서 결정된 각 변수 값에 따라 결정되는 목적함수 (경제성)를 비교하여 최적의 해를 찾아가도록 하였다. 이때 최적의 해는 콘크리트의 단면치수, 철근의 단면적 및 경제성을 모두 만족하는 값으로 결정하며 이와 같은 값의 결정은 최대의 반복과정을 거치게 되는데 최대의 반복과정은 목적함수가 수렴

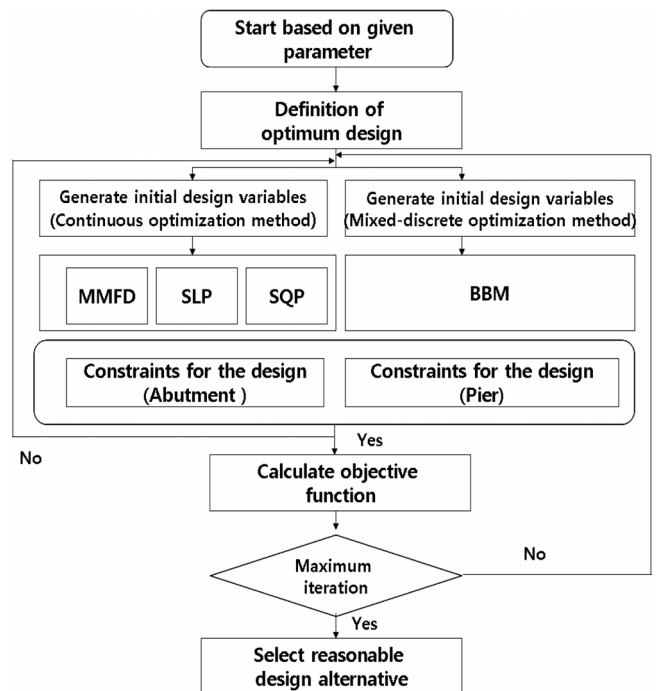


Fig. 4 Optimum design process of agricultural reinforced concrete structures

할 때로 하였다. 만약 목적함수가 수렴하지 않으면 수렴할 때까지 지속적으로 반복하였다.

게 나타난 것은 교각의 설계변수가 많고 제약조건식이 복잡했기 때문으로 판단된다.

III. 결과분석 및 고찰

농업용 철근콘크리트 수로교중 교각 및 교대의 최적설계 결과는 Table 4 및 Fig. 5와 같다. 연속형 최적화기법을 적용한 경우 결과는 거의 같은 최적치에 수렴하였다. Table 4에서 보는 바와 같이 3가지 연속형 최적화기법으로 구해진 최적설계치간 최대차이의 평균값에 대한 백분율은 교대의 경우 0.00 %에서 0.29 %까지, 그리고 교각의 경우 0.06 %에서 18.78 %까지 분포되었다. 목적함수의 경우에는 교대는 0.05 %, 교각의 경우는 5.4 %로 나타났다. 교각의 경우 교대에 비해 약간 크

1. 최적설계기법에 따른 결과

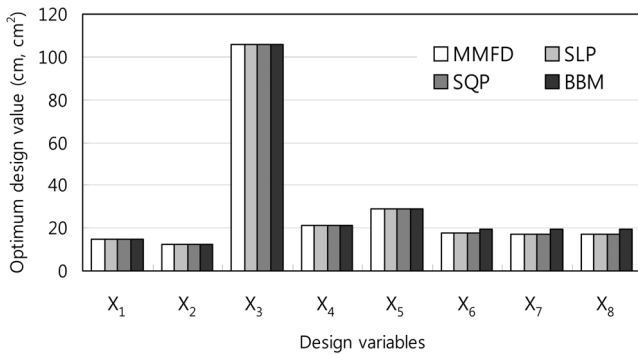
연속형 최적화기법과 혼합이산형 최적화기법을 비교해 보면 결과값의 차이가 발생하였다 (Fig. 6). 이와 같은 결과는 연속형 최적화기법과 혼합이산형 최적화기법의 설계변수 특성 때문으로 연속형 최적화기법에서 결정된 철근단면적을 실제 구조물에 적용할 때는 한 단계 큰 값을 사용하게 되며, 혼합이산형 최적화기법은 최적화 된 제품을 바로 적용할 수 있기 때문에 철근의 단면적에는 약간의 차이가 발생하였고, 이에 따라 목적함수에서도 혼합이산형 최적설계기법보다는 연속형 최적설계기법이 우수한 결과를 나타낸 것이다.

Table 4 Results of optimum design

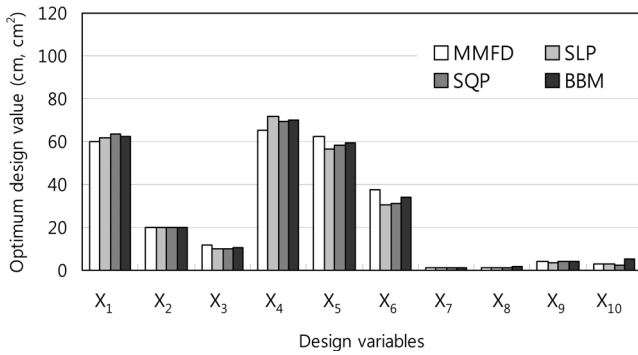
Structures	Design Variables	Dim	Properties	Continuous Optimization Method					Mixed-Discrete Optimization Method
				Optimum Design Value			Max. Diff.	Percentage of max. Diff.	BBM
				MMFD	SLP	SQP			
Abutment	X ₁	cm	con.	14.55	14.55	14.55	0.00	0.00	14.55
	X ₂	cm	con.	12.16	12.17	12.16	0.01	0.08	12.17
	X ₃	cm	con.	105.87	105.75	105.79	0.12	0.11	105.80
	X ₄	cm	con.	21.35	21.39	21.35	0.04	0.19	21.37
	X ₅	cm	con.	28.87	28.87	28.86	0.01	0.03	28.88
	X ₆	cm ²	dis.	17.74	17.75	17.74	0.01	0.06	19.272
	X ₇	cm ²	dis.	17.15	17.20	17.15	0.05	0.29	19.272
	X ₈	cm ²	dis.	17.15	17.20	17.15	0.05	0.29	19.272
	Obj. function	10 ⁶ Won		4.62604	4.62819	4.62600	0.00219	0.05	4.93725
	No. of iteration			7	4	3			7
	No. of function evaluation			89	37	30			92
Pier	X ₁	cm	con.	59.99	61.92	63.55	3.56	0.06	62.15
	X ₂	cm	con.	20.00	20.05	20.00	0.05	0.25	20.03
	X ₃	cm	con.	11.86	10.02	10.00	1.86	15.68	10.95
	X ₄	cm	con.	65.38	71.88	69.68	6.50	9.04	70.12
	X ₅	cm	con.	62.29	56.58	58.35	5.71	9.17	59.42
	X ₆	cm ²	dis.	37.48	30.44	31.08	7.04	18.78	34.20
	X ₇	cm ²	dis.	1.14	1.21	1.32	0.18	13.6	1.267
	X ₈	cm ²	dis.	1.27	1.13	1.22	0.14	11.02	1.986
	X ₉	cm ²	dis.	4.24	3.63	3.91	0.61	14.39	3.871
	X ₁₀	cm ²	dis.	2.81	2.79	2.39	0.42	14.95	5.067
	Obj. function	10 ⁶ Won		3.85140	3.64348	3.69513	0.20792	5.40	3.76265
No. of iteration			10	31	50			46	
No. of function evaluation			141	358	645			652	

* con. : continuous design variables

* dis. : discrete design variables



(a) Abutment



(b) Pier

Fig. 5 Optimum design value of concrete dimension and steel area

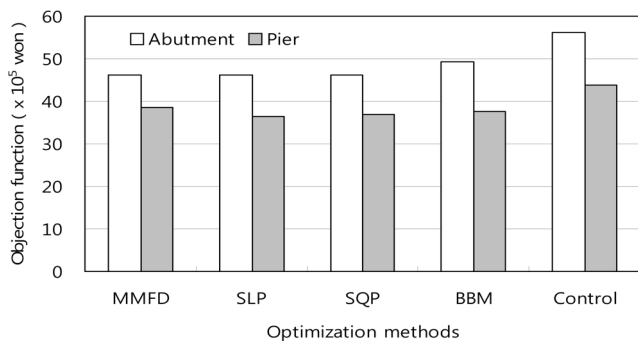


Fig. 6 Results of objection function

2. 최적설계기법에 따른 설계의 신뢰성, 효율성 및 합리성 분석

최적설계기법의 신뢰성 분석은 본 연구에서 적용한 연속형 및 혼합이산형 결과치의 수렴특성으로 평가하였다. 분석결과 Fig. 7에서 볼 수 있는 것과 같이 목적함수가 최적설계기법의 종류에 관계없이 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 수렴특성으로 평가할 때 본 연구에서 정식화 된 최적설계 문제와 개발된 설계프로그램은 신뢰성이 인정되는 것으로 판단된다.

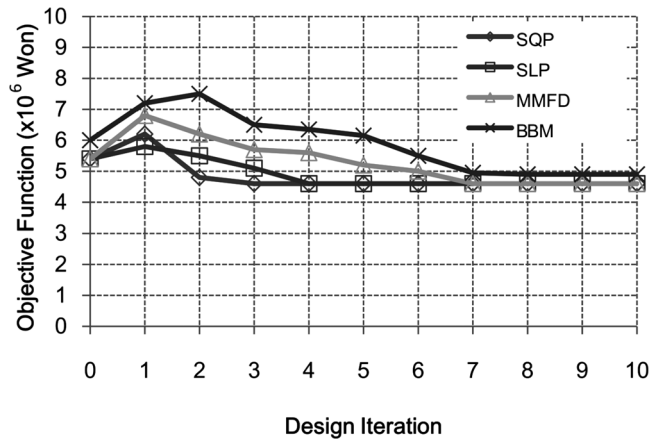


Fig. 7 Convergence history of objective functions

최적화설계의 효율성은 최적설계 값이 몇 회의 함수 및 도함수의 계산에 의하여 결정되어지는가로 판단할 수 있다 (Han, 1997; Jo 등, 2000). Table 4에서 보면 함수 및 도함수의 계산횟수는 MMFD, SLP, SQP 및 BBM기법에 따라서는 큰 차이가 나타나지 않았으며, 설계 구조물에 따라서는 교대 보다는 교각에서 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 교각의 경우 설계변수가 많기 때문이다. 최적화설계에서 효율성을 판단할 수 있는 또 다른 중요한 기준은 최적설계의 수렴 특성이다. Fig. 7은 교대의 수렴 특성을 보여주는 것으로 4가지 최적설계기법 모두 7회 반복 회수 내에 최적설계 값에 수렴하는 것으로 나타나 효율성이 있다고 할 수 있다.

연속형 최적설계와 혼합이산형 최적설계에 대한 결과를 비교해 보면 콘크리트 치수의 최적화 값은 큰 차이는 없으나 철근의 단면적과 목적함수는 약간의 차이가 있다. 또한 연속형 최적설계와 혼합이산형 최적설계 방법에서도 반복횟수와 함수의 계산횟수의 편차도 발생하였다. 이와 같은 차이는 연속형 최적설계방법인 MMFD, SLP, SQP에 따라서도 발생하는 것을 볼 수 있다. 함수 및 도함수의 증가는 사용하는 계산능력의 증가를 의미하나 실제적으로 컴퓨터의 성능이 크게 발전되고 있는 최근에는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 혼합이산형 최적화기법과 연속형 최적화기법의 가장 큰 차이점이며 실제 설계에서 중요한 사항은 최적화설계 프로그램으로 결정된 값을 구조물의 설계에 직접 적용하는 문제라고 할 수 있다. 따라서 이와 같은 점을 고려할 때 혼합이산형 최적화 설계법이 보다 합리적이라 할 수 있다. 또한 최적화설계 결과값의 큰 차이가 발생하지 않기 때문에 최적화 설계 후 설계조정이 필요한 연속형 최적화 설계보다는 혼합이산형 최적화 설계방법이 농업용 철근콘크리트 수로교 구조물을 설계하는데 보다 합리적이라 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 연속형 최적화기법과 혼합이산형 최적화기법을 도입하여 농업용 철근콘크리트 구조물인 수로교 교각과 교대의 최적설계를 실시하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 본 연구에서 3가지의 연속형 최적화기법과 1가지의 혼합이산형 최적화기법으로 최적설계를 수행한 결과 연속형 설계변수를 적용한 콘크리트 단면의 치수는 거의 동일한 결과를 나타내었으나 혼합이산형 설계변수를 적용한 철근의 단면적은 차이가 발생하였다. 이와 같은 결과는 연속형 최적화기법은 최적화된 값을 바로 적용하지 못하고 철근과 같이 규격화된 제품의 경우 설계시 철근의 단면적으로 보정하여야 하기 때문이며 혼합이산형 최적화기법은 설계 값을 바로 적용하기 때문이다.

2. 목적함수인 경제성의 경우도 연속형 최적화기법보다는 혼합이산형 최적화기법이 증가하는 경향을 보여주었는데 이는 이산형 변수인 철근의 단면적 때문이며 연속형 최적화기법에서 얻은 철근의 결과치를 보정하게 되면 큰 차이는 없을 것으로 판단된다.

3. 농업용 콘크리트 구조물의 최적설계기법으로는 최적화 수행 후 최적 설계치를 규격화된 제품의 치수에 맞추도록 상향조정해야 하는 연속형 최적화 기법에 비하여 최적설계치의 조정 없이 직접 사용 할 수 있는 혼합이산형 최적화 기법이 보다 합리적인 것으로 판단된다.

REFERENCES

- Choi C. G., and H. K. Gwak, 1989. Optimum RC Member Design with Predetermined Discrete Sections. *Computational Structural Engineering* 2(1): 79-86 (in Korean).
- Cell, A., and R. Logcher, 1971. Automated optimum design form discrete components. *Journal of the Structural Division, ASCE* 97(ST1): 175-185.
- Han, S. H., D. H. Jo, and S. G. Lee, 1997. Development of optimum design program for PPC structures using DCOC. *Computational Structural Engineering* 10(4): 315-325 (in Korean).
- Jo, D. H., and S. H. Han, 2000. Minimum cost design of reinforced concrete beam using DCOC. *Computational Structural Engineering* 13(4): 417-425 (in Korean).
- Jung, Y. S., and B. I. Kim, 1997. Optimization of RC plane foams based on the principle of divided parameters. *Magazine of the Korea Concrete Institute* 9(1): 133-141 (in Korean).
- Kim, J. O., C. G. Park., and S. S. Cha, 2010. Reasonable Optimum Design of Agricultural Reinforced Concrete Structure : Superstructures of Aqueduct. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 52(5): 19-26 (in Korean).
- Kim, J. O., 2004. Reasonable Optimum Design of Prestressed Concrete Structures. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 46(2): 77-89 (in Korean).
- Kim, J. O., Y. T. Hwang, G. N. Vanderplaats, 1995. Minimum Weight Design for Bridge Girder using Approximation based Optimization Method. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 37(E): 31-39.
- Kim, J. O., 1997. Efficient optimum design of reinforced concrete structures using mixed-discrete optimization method. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 39(2) : 32-43.
- Lai. Y. S., and J. D. Achenbach, 1973, Direct search optimization method. *Journal of the Structural Division, ASCE* 98(ST1): 119-131.
- Min-Wey Huang and Jasbir S. A., 1995. Engineering optimization with discrete variables, Proceedings of the 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 1475-1485.
- Reinschmidt, K. F., 1971. Discrete structural optimization. *Journal of the structural Division, ASCE*, 97(ST1): 133-156.
- Sepulveda, A. E., 1995. Optimal material selection using branch and bound techniques. *AIAA Journal* 33(2): 340-347.
- Shui-Shun Lin, Chun AZhang and Hsu-Pin Wang, 1995. On mixed-discrete nonlinear optimization problems ; A comparative study. *Engineering Optimization* 23: 287-300.
- Thanedar, P. B., and G. N., Vanderplaats, 1995. Survey of discrete variable optimization for sturctural design. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 121(2): 301-306.
- Vanderplaats R&D, 2008. *VisualDOC User's Manual*. Vanderplaats Research & Development, Inc.
- Vanderplaats, G. N., 1984. *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGRAW-HILL, New York.