Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 52, No. 5, pp. 19~26, September, 2010
DOI: 10.5389/KSAE.2010.52.5.019

농업용 철근콘크리트 구조물의 합리적인 최적설계 -수로교 상부구조물-

Reasonable Optimum Design of Agricultural Reinforced Concrete Structure - Superstructures of Aqueduct -

김종옥*,† · 박찬기* · 차상선*
Kim, Jong Ok · Park, Chan Gi · Cha, Sang Sun

ABSTRACT

This study was conducted to find out the reasonable optimum design method of agricultural reinforced concrete structures. Selected design variables are the dimension of concrete section, reinforced steel area, and objective function is formulated by cost fuction. To test the reliability, efficiency, possibility of application and reasonability of optimum design method, both continuous optimization method and mixed-discrete optimization method were applied to the design of reinforced concrete superstructure of aqueduct and application results were discussed. It is proved that mixed-discrete optimization method is more reliable, efficient and reasonable than continuous optimization method for the optimum design of reinforced concrete agricultural structures.

Keywords: constraint; continuous optimization method; design variable; mixed-discrete optimization method; objective function; reinforced concrete aqueduct

I. 서 론

구조물의 최적설계에 관한 연구는 1960년 Schmit 등이 최적화의 개념을 체계적으로 제시하면서부터 급진적으로 발전하기 시작하였다 (Schmit, 1960). 그 후 약 50년 동안 각종 최적화 기법의 이론과 최적설계 프로그램 개발에 관한 연구가 수행되어 이제는 최적설계법이 실제 구조물의 설계에 이용되고 있다. 그러나 지금까지 최적설계법이 실제 구조물의 설계에 적용된 것은 항공, 우주, 선박, 기계, 자동차, 플랜트 부분에 집중되어 왔고 토목, 건축 분야에서 널리 사용되는 철근콘크리트 구조물의 설계에 적용한 사례는 많지 않다(Vanderplaats, 1982, 1993). 최적설계법이 콘크리트 구조물의 설계에서 적용되지 못한 주원인은 그동안 이 분야의 연구가 알고리즘 위주의 이론 연구에 집중되어 왔기 때문이다. 또한 최적화 연구에서 개발된 많은 알고리즘의 효율성, 신뢰성, 적용가능성 등을 확인하기 위하여 도입된 구조물은 대부분이 트러스 구조물이었고, 철근콘크리트 구조물에 적용한 경우는 4 %에 불과하였다 (Chon et al., 1994). Cohn은 만약 설계에서 하중과 제약조건이 그대로 고려된 철근콘크리트구조물에 최적설계를 적용하기 위한 연구가 활발히 수행된다면 최적화기법은 아주 매력적인 설계기법이 될 것이라고 하였다 (Chon et al., 1993; Chon et al., 1994).

Adamu et al. (1995)은 철근콘크리트 뼈대구조물의 최적설계를 각각 COC (Continuum-type Optimality Critrria) 방법, DCOC (Discritized Continuum-type Optimality Criteria) 방법에 의하여 수행하였으며, Lourenco와 Figueriras (1995)는 철근콘크리트 판, 슬랩 그리고 쉘구조물을 비선형 해석과 연계해서 최적설계를 수행하여 실험결과와 비교, 분석한 결과 신뢰성이 있다고 보고하였다. Al-Harthy와 Frangopol (1995)은 프리스트레스트 콘크리트 보를 설계하기 위한 신뢰성에 기초를 둔 최적설계과정을 제안하였다. Moharrami and Grierson (1993)은 철근콘크리트 건물 뼈대구조의 최적설계를 위한 방법을 제안하였고, 그 결과 최적성 규준법은 효과적인 최적화 방법이라고 하였다. Cohn and Louis (1993)는 프리스트레스트 연속보를 ULS (Ultimate Limit State)와 SLS (Serviceability Limit State)의 요구조건에 따른 최적설계 연구와 철근콘크리트 교량시스템에 관한 최적설계 연구 (Chon and Lounis,1994)를 수행하였다. Fang et al. (1994)은 다단계 다목적 함수 최적화 방법을 사용하여 프리캐스트 콘크리트 벽 패널의 최적설

* 공주대학교 산업과학대학 지역건설공학과
† Corresponding author Tel.: +82-41-330-1262
Fax: +82-41-330-1269
E-mail: jokim@kongju.ac.kr
2010년 6월 9일 투고
2010년 8월 9일 심사완료
2010년 8월 10일 게재확정

계 모델을 개발하였다. 그러나 지금까지 콘크리트 개거, 수로교, 암거 및 수로터널과 같은 농업용 철근콘크리트 구조물 설계에 최적 설계법을 도입한 예는 극히 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 농업용 철근콘크리트 구조물의 설계에 활용할 수 있는 합리적인 최적설계 모델을 제안하고자 하며 다음과 같은 방법과 순서로 연구를 수행하고자 한다.

1) 농업용 철근콘크리트 구조물의 형상과 크기를 결정짓는 단면치수들과 철근 단면적 등을 철근콘크리트 구조물의 설계이론과 재료의 특성 등을 고려하여 합리성이 있도록 설계변수를 선정한다.

2) 단면치수는 연속형 설계변수이고 철근의 단면적은 한국산업규격에 의하여 기 생산된 상품을 사용하게 되므로 이산형 설계변수로 취급한다. 따라서 최적설계를 연속형 최적설계와 혼합이산형 최적설계로 정식화 한다.

3) 본 연구에서 개발되는 최적설계 모델을 검증하기 위하여 적용할 농업용 철근콘크리트 구조물은 수로교로하며 본 논문에서는 상부구조물의 최적설계 모델을 제시하고자 한다.

4) 제약조건식은 철근콘크리트 수로교의 상부 구조물 설계에서 고려해야 되는 현행 철근콘크리트 구조물의 설계에 적용되고 있는 콘크리트 구조설계기준을 이용하여 유도한다.

5) 본 연구에서 개발된 최적설계 모델의 신뢰성, 효율성, 적용가능성, 합리성 등을 분석한다.

6) 연속형 최적설계법과 혼합이산형 최적설계법에 의한 결과를 비교 검토하여 농업용 철근콘크리트 구조물의 최적설계에 합리적인 최적설계 기법을 제안한다.

II. 최적화 문제의 정식화

본 연구에서는 수로교의 상부구조물 설계를 위한 구조해석 이론과 설계이론을 모두 정식화에 포함시켰다. 그러나 본 논문에서는 이들 구체적인 이론과 알고리즘, 그리고 제약조건식의 구체적인 유도과정은 생략하였고, 선택된 제약조건식 항목만 제시하였다.

수로교 최적설계의 정식화와 최적설계 프로그램의 개발은 수로교 상부구조, 교대 및 교각의 3개 부분구조로 나누어 각각 별도로 설계할 수 있도록 개발하였다. 왜냐하면 세부분을 동시에 설계하게 되면 대형 구조물이기 때문에 설계변수가 너무 많아지고 상부구조물과 하부구조물 사이에 하중관계 등의 관련 문제 때문에 최적해를 구하기가 어렵기 때문이다. 본 논문에서는 상부구조물을 중심으로 최적설계 결과를 제시하였다.

1. 설계조건

Fig. 1에 나타낸 수로교 상부구조의 내폭 (WD), 총깊이 (TH), 물의깊이 (WL), 헌치 저폭 (HW) 및 헌치고 (HH) 등은 수로교의 용수량과 지간을 고려하여 최적설계 프로그램에 상수로 입력함으로서 원하는 규모의 수로교 상부구조를 설계할 수 있도록 하였다.

2. 목적함수

목적함수는 단위길이의 수로교 상부구조를 설치하는데 소요되는 콘크리트, 철근 및 거푸집에 대한 재료비 및 노임을 포함하는 건설경비로 하였으며 식(1)과 같이 유도하였다.

$$C = C_C V_C + C_S V_S + C_F A_F \tag{1}$$

where, C : Cost of construction of superstructures,
C_C, C_S, C_F : Cost of unit concrete volume and wages, cost of unit weight steel and wages, cost of unit area form and wages, respectively (Table 1),
V_C, V_S, A_F : Concrete volume, steel weight and area of form, respectively

3. 설계변수 및 제약조건식

철근콘크리트 수로교의 상부구조에 대한 설계변수는 Fig. 1과 같이 단면의 각부 치수와 철근량으로 하였다. 연속형 최적화 기법을 적용할 경우에는 모든 설계변수를 연속형 설계변수로 취급하였고 혼합이산형 최적화 기법을 적용할 경우에는 철근단면적은 이산형 설계변수로 고려하였다.

상부구조의 설계변수는 Fig. 1과 같이 5개로 구성하였으며, X_1 : 측벽의 두께, X_2 : 슬래브의 두께, X_3 : 주보의 주철근량, X_4 : 슬래브에 배치해야 할 주철근량, X_5 : 측벽에 배치해야 할 주철근량을 나타낸다. 또한 수로교의 상부구조를 설계하기 위

Table 1 Cost of materials and construction wages

Notation	Type of materials	Cost of materials and construction wages
C_C	Concrete (won/m^3)	54,000/1m^3 (21MPa) + 0.24 people/1m^3 × 103,000 won + 0.36 people/1m^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)

한 제약조건식은 Table 2와 같다. 제약조건식은 2007년도 국토해양부 제정 콘크리트 구조설계 기준의 보, 슬래브, 벽체의 설계기준을 적용하였다.

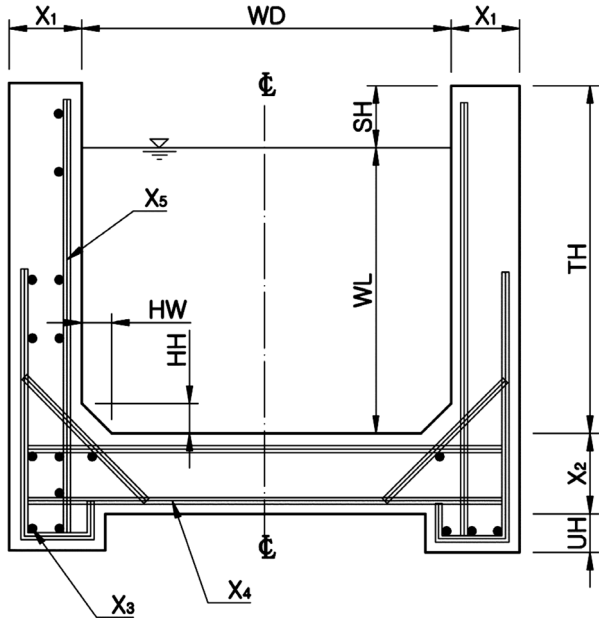

Fig. 1 Design variables of superstructure

III. 최적설계법

1. 일반적인 수학적 모형

최적화의 모형은 등호제약조건과 부등호제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화 하는 설계변수 $x = \{x_1, x_2, \ldots x_n\}$를 찾는 것으로써 식(2)로 표현되는 비선형계획법으로 표현된다 (Vanderplaats, 1984).

$$\text{Minimize } F(x) \tag{2}$$

subject to

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

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

$x_i^l \le \chi_i \le x_i^u$: $i = 1,\ n$

여기서, F는 목적함수이고 h와 g는 각각 등호제약조건과 부등호제약조건이며 x_i^l과 x_i^u는 각각 설계변수의 하한 값과 상한 값이다. 그리고 $m,\ l,\ n$은 각각 부등호제약조건식, 등호제약조건식 및 설계변수의 수이다.

최적설계에서 설계변수 χ_i를 유용영역 내의 임의의 수치를

Table 2 Constraints for the design(Standard of concrete structures design, Minister of land, transport, and maritime affairs)

Section	Design method	Constraints	Notation
Beam	Flexural design	$G\ (1) = M_{ug} - \Phi_f M_{ug}$	M_{ug} : Ultimate flexural moment of main beam M_{ng} : Nominal flexural moment of main beam Φ_f : Strength reduction factor of flexural design
	Minimum steel ratio	$G\ (2) = P_{\min} - P_g \le 0$	P_g : Steel ratio of main beam $P_{\min}$: Minimum steel ratio
	Maximum steel ratio	$G\ (3) = P_g - P_{\max} \le 0$	$P_{\max}$: Maximum steel ratio
	Shear design	$G\ (4) = V_{ug} - \Phi_v V_{ng} \le 0$	V_{ug} : Ultimate shear strength of main beam V_{ng} : Nominal shear strength of main beam Φ_v : Strength reduction factor of shear design
Slab	Flexural design	$G\ (5) = M_{us} - \Phi_f M_{ns} \le 0$	M_{us} : Ultimate flexural moment of slab M_{ns} : Nominal flexural moment of slab
	Minimum steel ratio	$G\ (6) = P_{\min} - P_S \le 0$	P_S : Steel ratio of slab $P_{\min}$: Minimum steel ratio of slab
	Maximum steel ratio	$G\ (7) = P_s - P_{\max} \le 0$	$P_{\max}$: Maximum steel ratio of slab
	Shear design	$G\ (8) = V_{us} - \Phi_v\ V_{ns} \le 0$	V_{us} : Ultimate shear strength of slab V_{ns} : Nominal shear strength of slab
Side wall	Flexural design	$G\ (9) = M_{uw} - \Phi_f M_{nw} \le 0$	M_{uw} : Ultimate flexural moment of side wall M_{nw} : Nominal flexural moment of side wall
	Minimum steel ratio	$G\ (10) = P_{\min} - P_w \le 0$	P_w : Steel ratio of side wall $P_{\min}$: Minimum steel ratio of side wall
	Maximum steel ratio	$G\ (11) = P_w - P_{\max} \le 0$	$P_{\max}$: Maximum steel ratio of side wall
	Shear design	$G\ (12) = V_{uw} - \Phi_v\ V_{nw} \le 0$	V_{uw} : Ultimate shear strength of side wall V_{nw} : Nominal shear strength of side wall

가질 수 있는 것으로 가정하는 경우를 연속형 최적화라 하며 가장 일반적인 방법이다. 그러나 구조물의 최적설계에서는 연속형 설계변수와 이산형 설계변수가 동시에 포함되는 경우도 있다. 철근콘크리트 수로교 상부구조물의 경우 콘크리트 단면치수는 연속형 설계변수, 철근단면적은 이산형 설계변수로 취급하는 것이 합리적이다. 이와 같이 연속형 설계변수와 이산형 설계변수가 공존하는 최적화설계를 혼합이산형 최적화설계라 하며 혼합이산형 최적화설계의 일반적인 형식은 식(3)과 같다 (Lin,Chun and Wang, 1995).

$$\text{Minimize } F(x) \tag{3}$$

subject to

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

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

$\chi_i \in D_i,\ D_i = \{d_{i1},\ d_{i2},\ \ldots\ d_{iq}\} : i = 1,\ n$

$x_i^l \le \chi_i \le x_i^u : \mathrm{i} = 1,\ \mathrm{n}$

여기서, D_i는 i번째 설계변수에 대한 이산 값의 집합이며 d_{ij}는 i번째 설계변수에 대한 j번째 이산 값이고 q는 i번째 설계변수에 대한 이산 값의 수이다.

2. 최적해법

구조물의 최적설계는 목적함수와 제약조건식이 설계변수에 대한 비선형 함수로 구성된다. 본 연구에서는 연속형 최적화 기법과 혼합이산형 최적화 기법을 적용하였으며, 이에 대한 내용은 다음과 같다 (Vanderplaats, 1984, 2008).

가. 연속형 최적화기법

1) 수정 유용 방향법 (Modified Method of Feasible Directions, MMFD)

설계변수 X의 초기치 X°와 목적함수 그리고 제약조건식이 결정되면 식(4)에 의하여 목적함수를 최소화하는 방향으로 X가 개선되어 간다.

$$X_q = X^{q-1} + \alpha^* S^q \tag{4}$$

여기서, q는 반복 횟수, S^q는 탐색방향 백터, α^*는 설계변수를 바꾸어 나가는 양을 조절하는 계수이다. 수정 유용 방향법의 장점은 효율성과 정확성이 우수하다는 것이다.

2) 순차선형 계획법 (Sequential Linear Programming, SLP)

대부분의 설계가 설계변수에 대한 비선형 계획문제이지만 선형계획문제로 근사화하여 선형계획법을 사용하여 설계변수를 결정할 수 있다. 먼저 비선형계획문제를 선형화하여 근사해를 구하고 이점에서 다시 선형화하여 문제를 결정하는 과정을 정확해의 결정까지 반복한다.

3) 순차 2차 계획법 (Sequential Quadratic Programming, SQP)

순차 2차계획법은 수정유용방향법, 유용방향법, 경사도강하법 등에서는 먼저 탐색방향을 만들고 그 방향으로 가능한 한 많이 설계가 개선되도록 일차원 탐색을 수행한다.

나. 이산형 최적화기법

이산형 최적화기법으로는 분기한계법 (Branch and Bound Method, BBM)이 가장 많이 사용되고 있다(Huang and Arora, 1995; Sepulveda, 1995; Vanderplaats R&D, 2008). 이산형 최적화기법에서는 우선 연속형 설계변수의 최적화를 수행한다. 그 결과에 의하여 출발점과 이산해에 대한 하한 값이 주어진다. 그리고 하나의 변수가 다음 이산 값에 추가된 후 최적화가 수행된다. 만약 최적치가 전보다 커졌다면 그 변수는 그 다음 하한 값으로 되어 최적화가 반복된다.

Ⅳ. 결과분석 및 고찰

1. 최적설계 값의 도출과정 및 최적설계 결과

최적설계는 다수의 설계변수와 제약조건식을 갖는 비선형 계획문제로 구성된다. 이와 같이 다수의 설계변수가 포함된 최적설계에서 전역적 최적설계 값 (Global Optimum Point)을 찾아내기란 매우 어렵다. 그러나 초기설계 값 (Starting Point)을 변화시켜 가면서 최적설계를 수행하여 목적함수와 설계변수가 동일한 수치에 수렴한다면 국부적 최적치 (Local Optimum Point)라도 최적치로 볼 수 있다. 본 연구에서는 수로교 상부구조물의 최적화 설계를 위해서 연속형 최적화 기법의 경우 MMFD, SLP, SQP법을 적용하고 혼합이산형 최적화 기법의 경우 BBM을 적용하여 각각의 기법에 대하여 초기치를 5가지씩 변화시키면서 최적설계를 수행하여 최적설계 값을 결정하였다. 본 연구에서 적용한 최적화 설계 순서는 Fig. 2와 같으며 최적화결과는 Table 3과 같다.

콘크리트 치수의 경우 연속형 및 혼합이산형 최적화기법 모두 규격화된 제품이 없이 설계 값이 바로 반영되기 때문에 큰 차이가 발생하지 않는다. 그러나 철근 단면적의 경우 규격화된 제품이 있어 혼합이산형 최적화기법의 경우 규격화된 제품의

치수를 찾아가지만 연속형 최적화기법에서는 규격화된 제품의 치수를 나타내는 것이 아니라 설계에 필요한 값을 찾아가기 때문에 최종적으로 최적설계 값이 결정된 후 규격화된 제품에 맞게 철근 단면적을 증가시키는 추가적인 작업이 필요하다. 따라서 철근 단면적 값은 혼합이산형 최적화 기법이 약간 크게 나타났다.

2. 최적해의 신뢰성

초기치와 최적화 방법을 변화시켜도 동일한 최적점에 수렴하게 된다면 최적설계 프로그램은 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 본 연구에서 사용된 각 최적화 방법별로 5가지의 초기치를 사용하여 최적해를 구해본 결과 동일한 최적화방법의 경우 거의 같은 최적점에 수렴하였다. 최적화방법을 달리할 경우 Table 3과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 3가지 연속형 최적화방법으로 구해진 최적설계 값 간의 최대차이의 평균값에 대한 백분율은 0.00 %에서 2.86 %까지 분포되었다. 그리고 연속형 최적화방법을 적용하였을 때와 혼합이산형 최적화 방법을 적용할 경우에도 큰 차이가 발생하지 않았다. 목적함수 (경제성)의 경우는 3가지 연속형 최적화방법을 적용할 경우 SLP 방법이 약간 크게 산정되었지만 다른 방법과 공사비의 차이가 0.01 % (0.00028 $\times 10^6$원)로 거의 차이가 없었다 (Fig. 4). 또한 연속형 최적설계방법과 혼합이산형 최적설계법을 비교해 보면 혼합이산형 최적설계법을 적용할 경우 경제성이 약간 악화되는 것을 알 수 있지만 큰 차이는 아니다. 혼합이산형 최적설계방법과 최적설계를 적용하지 않았을 때의 기존 공사비 (control: 33.417$\times 10^5$won)를 비교해보면 약 14 % 정도 최적설계를 적용한 것이

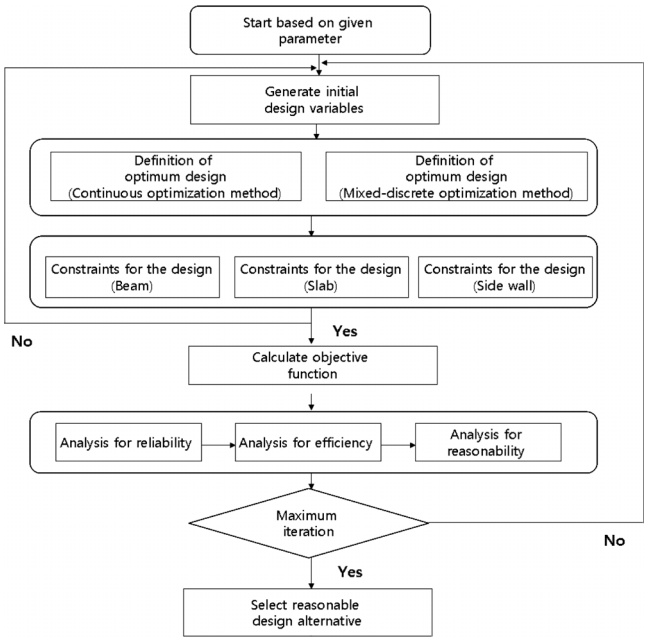

Fig. 2 Optimization process of superstructure

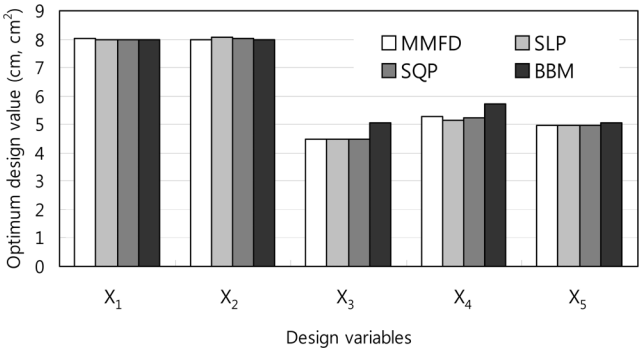

Fig. 3 Optimum design values with variables

Table 3 Results of optimum design

Structures	Design Variables	Dim.	Properties	Continuous Optimization Method						Mixed- Discrete Optimization Method
				Optimum Design Value			Mean	Max. Diff.	Percentage of max. Diff.	BBM
				MMFD	SLP	SQP				
Superstructure	X_1	㎝	con.	8.01	8.00	8.00	8.003	0.0100	0.12	8.00
	X_2	㎝	con.	8.00	8.07	8.00	8.023	0.0700	0.87	8.00
	X_3	㎠	dis.	4.48	4.48	4.48	4.480	0.0000	0.00	5.069
	X_4	㎠	dis.	5.29	5.14	5.29	5.240	0.1500	2.86	5.730
	X_5	㎠	dis.	4.95	4.96	4.95	4.953	0.0100	0.20	5.067
	Obj. function	10^4 Won		269.168	269.196	269.170	269.178	0.0280	0.01	287.254
	No. of iteration			5	9	7				8
	No. of function evaluation			36	59	50				84

* con. : continuous design variables
* dis. : discrete design variables

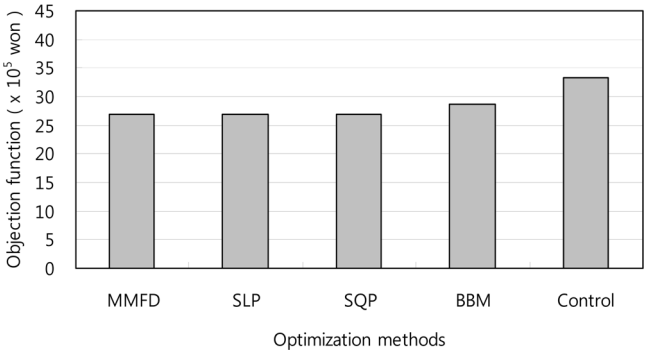

Fig. 4 Optimum objective functions with optimization method

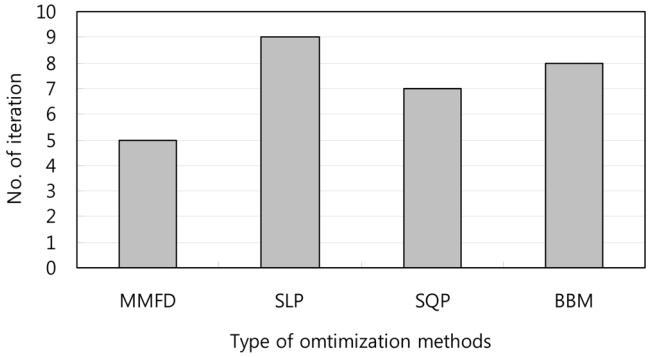

Fig. 5 Iteration number of optimization methods

효과적임을 알 수 있다. 따라서 최적설계 기법을 적용하면 경제성이 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 분석결과 3가지 연속형 방법과 1가지 혼합이산형 방법 사이에 큰 차이가 없었으므로 본 연구에서 정식화 된 최적설계 방법과 개발된 설계 프로그램은 신뢰성이 인정되는 것으로 판단된다.

3. 최적설계문제 및 프로그램의 효율성

최적화 설계 알고리즘의 효율성을 판단할 때는 최적설계의 해가 몇 회의 함수 및 도함수의 계산으로 구해지는가가 중요한 척도라고 하였다 (Jo, Park and Yoo, 1991). 또한, Kalihaloo, B.L (1993) 등은 최적설계 수행시 CPU time은 함수 계산 횟수에 직접적으로 비례한다고 하였다. 그런데 CPU time은 컴퓨터 기종에 따라 차이가 있으므로 실제로 함수 및 도함수의 계산 횟수가 최적화방법 및 최적설계문제 알고리즘의 효율성을 판단하는 중요한 척도가 된다. Table 3에서 보면 함수 및 도함수의 계산횟수는 MMFD, SLP, SQP 및 BBM기법간에 뚜렷한 차이는 없었다. 효율성을 판단하는 또한가지 중요한 척도는 최적설계문제의 수렴 특성이다. 4가지 최적화 기법에 대한 수렴 특성은 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타나있다. 연속형 최적화 기법의 경우 MMFD, SLP, SQP법이 각각 5회, 9회 및 7회에서 수렴하며, 혼합이산형 최적화 기법에서는 8회 내에 수렴하고 있는 것으로 나타나 수렴횟수로 보면 큰 차이가 없이 모두 9회내에 수렴하고 있다. Fig. 6은 최적설계의 수렴특성을 나타내고 있다. 4가지 기법 모두 큰 진동 없이 안정적으로 최적설계 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 또한 4가지 방법 모두 거의 동일한 값에 수렴하므로 본 연구에서 정식화된 최적설계기법과 개발된 프로그램은 효율적임을 알 수 있었다.

4. 합리성

Table 3 및 Fig. 7에서 보는 바와 같이 함수 및 도함수의

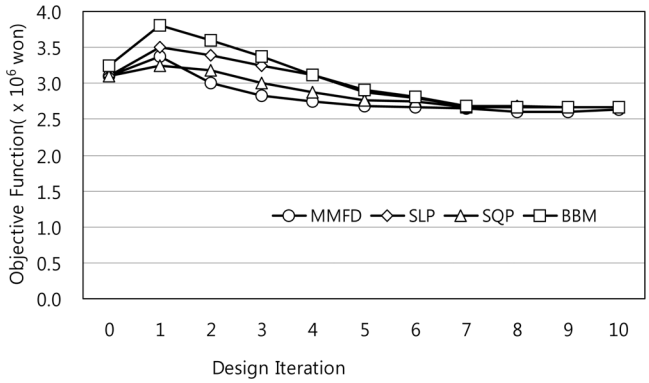

Fig. 6 Convergence history of objective functions

계산수는 혼합이산형 최적화 기법의 경우가 더 많게 나타났다. 이것은 혼합이산형 최적설계법의 경우가 더 큰 컴퓨터 계산능력을 요구함을 의미하며 이것은 김 (Kim,1997)의 결과와 일치한다. 그러나 컴퓨터의 성능이 크게 발전된 지금은 실제 설계에서 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 실제 설계에서 기존의 규격화된 상품규격을 설계변수로 사용한 경우 연속형 최적설계법을 적용하면 결정된 최적설계 값은 바로 적용하지 못하고 기존의 규격 상품에 맞게 상향조정하여 사용하여야 한다 (예: 철근 직경 D22 1.4개로 설계되면 2개로 설계 등). 그러나 이렇게 할 경우 설계변수의 조합에 따라서는 그것이 불용영역의 설계점이 될 수도 있다. 그러나 혼합이산형 최적화 기법에 의하여 구해진 최적설계치는 그 값을 전혀 수정하지 않고 직접 사용하여도 모든 제약조건의 유용영역 안에 있게 되는 것을 보장받으면서 경제적인 설계치를 얻을 수 있다. 이와 같은 이유는 혼합이산형 최적화 기법의 경우 계산하는 범위를 좁게 하여 많은 양의 계산을 하므로 해의 정밀도가 높기 때문이다. 본 연구의 결과에서 혼합이산형 최적설계의 결과가 연속형 최적설계의 결과와 비교해 볼 때 큰 차이가 없으므로 혼합이산형 최적설계가 실제 농업용 철근콘크리트 구조물을 설계하는데 더 합리적인 것으로 판단된다.

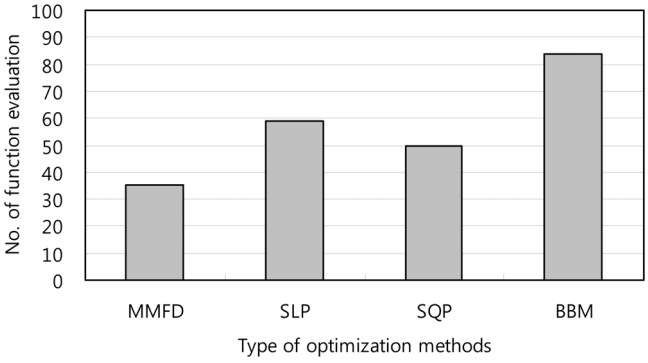

Fig. 7 No. of function evaluation with optimization methods

V. 결　론

본 연구에서는 농업용 철근콘크리트 구조물인 수로교의 상부구조물에 대한 최적설계에 연속형 최적화 기법과 혼합이산형 최적화 기법을 도입하여 최적설계치를 구한 후 최적설계 과정과 결과치에 대하여 각각 신뢰성, 효율성, 합리성을 검토하였으며 연속형 최적설계법과 혼합이산형 최적설계법에 의한 결과치를 비교하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 농업용 철근콘크리트 구조물인 수로교 상부구조물의 최적설계문제가 정식화 되었고 이를 수행할 수 있는 프로그램이 개발되었다.

2. 정식화된 최적설계 문제와 개발된 프로그램으로 최적설계를 수행해본 결과 어떠한 초기치에서 출발하든 또한 어떠한 최적화 기법을 적용하든 유사한 최적치에 수렴하였다. 따라서 본 연구에서 정식화된 최적설계기법과 프로그램은 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

3. 최적설계 값의 수렴특성을 보면 큰 진동 없이 9회 안에 최적설계 값에 수렴하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 최적설계 기법과 프로그램은 농업용 철근콘크리트 구조물의 설계에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 본 연구의 결과로 얻어진 최적설계치는 구조공학적인 조건과 콘크리트구조설계기준을 모두 만족하였다. 또한 건설경비의 절감도 기대된다. 따라서 본 최적설계 문제는 실제 농업용 철근콘크리트 구조물의 설계에 적용 가능한 것으로 판단된다.

5. 최적화기법을 농업용 철근콘크리트 구조물 설계에 적용할 경우 연속형 최적화 기법에 의하면 최종적으로 구해진 최적설계치를 규격화된 제품의 치수에 맞도록 상향조정하여 사용해야 하나 혼합이산형 최적화 기법에 의한 최적설계치는 이러한 조정 없이 직접 사용 할 수 있으므로 혼합이산형 최적화 기법이 실제 농업용 철근콘크리트 구조물을 설계하는데는 더 합리적인 것으로 판단된다.

이 논문은 2009년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Adamu, A., and B. L. Kalihaloo, 1995a, Minimum cost design of RC beams with segmentation using continuum-type optimality criteria, *Structural Optimization* 9: 220-235.
2. Adamu, A., and B. L. Kalihaloo, 1995b, Minimum cost design of RC frames using the DCOC method, Part I: Columns under uniaxial bending action, *Structural Optimization* 10: 16-32.
3. Adamu, A., and B. L. Kalihaloo, 1995c, Minimum cost design of RC frames using the DCOC method, Part II: Columns under biaxial bending action, *Structural Optimization* 10: 33-39.
4. Al-Harthy, A. S., and D, M. Frangopol, 1994, Reliability-based design of prestressed concrete beams, *Journal of Structural Engineering, ASCE* 120(11): 3156-3177.
5. Chon, M. Z., and Dinovitzer, 1994, Application of structural optimization, *Journal of Structural Engineering, ASCE* 120(2): 617-650.
6. Chon, M. Z., and Lounis, Z., 1993, Optimum limit design of continuous prestressed concrete beams, *J. Struct. Eng., ASCE* 119(12) : 3551-3569.
7. Chon, M. Z. and Lounis, Z.,1994, Optimal design of structural concrete bridge systems, *Journal of Structural Engineering, ASCE* 120(9): 2653-2674.
8. Fang, H. Azarm, S. and Bernold, L., 1994, Multilevel multiobjective optimization in precast concrete well panel design, *Engineering Optimization* 22: 291-322.
9. Kalihaloo, B. L., 993, Most efficient NLP techniques in optimum structural frame design, *Engineering Optimization* 20(4): 261-272.
10. 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.
11. Lourenco, P. B. and Figueiras, J. A., 1995, Solution for the design of reinforced concrete plates and shells, *Journal of Structural Engineering, ASCE* 121(5): 815-

823.
12. Min-Wey Huang and Jasbir S. A., 1995, Engineering optimization with discrete variables, *Proceedings of the 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC*: 1475-1485.
13. Moharrami, H. and Grierson, D. E., 1993, Computer-automated design of reinforced concrete frameworks, *Journal of Structural Engineering, ASCE* 119(7): 2036-2058.
14. Schmit, L. A., 1960, Structural design by systematic synthesis, *Proc. 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE,* New York: 105-122.
15. Sepulveda A. E., 1995, Optimal material selection using branch and bound techniques, *A1AA Journal* 33(2): 340-347.
16. Shui-Shun Lin, Chun AZhang and Hsu-Pin Wang, 1995, On mixed-discrete nonlinear optimization problems,; A comparative study, *Engineering Optimization* 23: 287-300.
17. Vanderplaats R&D, 2008, *VisualDOC User's Manual*, Vanderplaats Research & Development, Inc.
18. Vanderplaats, G. N., 1982, Structural optimization, past, present and future, *AIAA Journal* 22(7): 992-1000.
19. Vanderplaats, G. N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGRAW-HILL, New York.
20. Vanderplaats, G. N., 1993, Thirty years of modern structural optimization, *Advanced in Engineering Software* 16: 81-88.