

RC 연속보의 최적설계를 위한 GUI 프로그램 개발

The Development of Graphic User Interface Program for Optimum Design of RC Continuous Beam

한 상 훈^{*}

Han, Sang Hoon

조 홍 동^{**}

Cho, Hong Dong

박 중 열^{***}

Park, Jung Yeol

ABSTRACT

In this study, the development of graphic user interface(GUI) program for optimum design of RC continuous beam is dealt. Optimum design problem that satisfies strength, serviceability, durability and geometrical conditions is formulated as a non-linear programming problem(NLP) in which the objective function as well as the constraints are highly non-linear on design variables such as cross sectional dimensions and steel ratio. Optimum design problem is solved by NLP techniques namely, sequential linear programming(SLP), sequential convex programming(SCP). Numerical examples of R.C. continuous beam using GUI system are given to show usefulness of GUI system for practical design work and efficiency of algorithm for the NLP techniques.

1. 서론

최적설계가 구조물의 설계에 매우 유용하다는 사실의 입증에도 불구하고, 최적설계의 이해 부족과 실제 구조물의 최적화를 위한 문제의 도출 및 프로그램 사용의 미숙 등으로 실무 설계수단으로서 제대로 도입·정착되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트, 철근 그리고 거푸집의 경비가 포함된 철근콘크리트 연속보의 최소 경비설계문제에 개발된 그래픽 사용자 대화시스템(GUI)을 적용함으로써 실무 설계자들의 편의를 도모하고 선·후행 그래픽 처리를 통해서 설계도구로서 최적설계의 유용성을 제시하였다. 또한 강도, 사용성, 내구성 등의 콘크리트 시방서¹⁾ 상의 설계요구조건을 제약조건식으로 표현함으로써 보다 실제적인 설계를 가능하도록 하였다. 그리고 설계변수에 대해 비선형계획문제로 정식화되는 최적설계문제에 축차선형계획법²⁾과 축차블록계획법³⁾을 이용함으로써 이들 비선형계획기법의 효율성을 비교·입증하였다.

* 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정 수료

*** 충북대학교 토목공학과 박사과정

2. 철근콘크리트보의 최적설계 문제

2.1 철근콘크리트보의 최적설계문제 형성

2.1.1 목적함수

철근콘크리트보의 목적함수는 콘크리트비용, 철근비용 그리고 거푸집비용이 포함된 최소경비문제로 정식화된다. 최소경비문제의 정식화를 위한 철근콘크리트 연속보의 전체적인 기하학적 형상과 단면형상은 각각 다음과 같다.

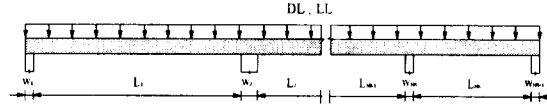


그림 1 등분포 사하중(DL)과 활하중(LL)을 받는 R.C. 연속보[자중 별도 고려]

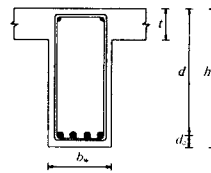


그림 2 R.C. 보의 단면형상

2.2.2 제약조건

철근콘크리트보의 최적설계를 위한 제약조건으로는 콘크리트 표준시방서의 설계요구조건을 기초로 한 휨강도, 전단강도, 처짐, 내구성 및 연성제약 등과 함께 단면의 높이와 폭에 대한 기하학적인 제약조건을 고려하였다.

1) 휨강도 제약

일정한 단면을 갖는 철근콘크리트보의 설계 휨강도는 지지점과 지간내의 최대휨모멘트 발생지점의 극한 휨강도 보다 작지 않아야 하며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_f M_n \geq |M_u| \quad (1)$$

여기서, M_n 과 M_u 는 각각 공칭 휨강도와 극한 휨강도를 나타내고, ϕ_f 는 휨강도 감소계수를 나타낸다.

2) 전단강도 제약

전단강도에 대한 제약조건은 사인장 파괴를 방지하기 위해 부과된다. 철근콘크리트보의 설계전단강도는 지지점 전면에서 단면의 유효높이 d 만큼 떨어진 위험단면에서의 극한전단강도 보다 작지 않아야 하며, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_v S_n \geq |S_u| \quad (2)$$

여기서, S_n 과 S_u 는 각각 공칭 전단강도와 극한 전단강도, ϕ_v 는 전단강도 감소계수를 나타낸다.

3) 처짐 제약

사용하중하의 철근콘크리트보의 처짐은 단기처짐과 장기처짐으로 구분된다. 이들 처짐은 각각 허용 처짐 범위 내에 들어야 한다. 즉, 등분포 하중을 받는 연속보의 경우, 각 시간내에서 발생하는 최대처짐 ($\Delta_{max,m}$)은 허용처짐(Δ_u)보다 작아야 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{max,m} \leq \Delta_u \quad (m = 1, \dots, NS) \quad (3)$$

4) 연성 제약

콘크리트의 취성과파괴를 피하고 철근의 연성과파괴를 유도하기 위해 시방서에는 인장철근비의 상·하 한치를 규정하고 있다. 각 지간의 중앙부와 지점부에서의 인장철근비에 대한 연성 제약조건은 각각 다음과 같다.

$$p_{min} \leq p_i^+ \leq p_{max} \quad (i = 1, \dots, NS) \quad (4)$$

$$p_{min} \leq p_j^- \leq p_{max} \quad (i = 1, \dots, NS+1) \quad (5)$$

여기서, p_{min} 은 최소철근비, p_{max} 는 최대철근비를 나타낸다.

5) 기하학적 제약

건축적인 이유로 단면의 높이와 폭의 비에 대한 제한을 두는 경우가 있다. 단면의 높이-폭 비(K)는 매우 얇거나 좁은 단면의 보가 되지 않도록 하기 위해 K 가 2보다 크지 않다고 가정하였다.

$$\frac{h}{b_w} < K \quad (6)$$

또한 내구성의 요구조건을 만족시키기 위해 시방서에서는 식(7)과 같이 규정된 소정의 덮개를 보장함으로써 철근의 부식 방지와 함께 보다 내화적인 구조물을 만들 수 있다. 여기서 c_{min} 은 흙에 접하지 않는 철근콘크리트보의 최소덮개로서 4cm로 하였다.

$$c \geq c_{min} \quad (7)$$

3. 그래픽 사용자 대화 시스템 (GUI)의 개발

본 연구에서는 실무설계자들이 최적설계를 실무설계단계에서 쉽게 적용할 수 있도록 대화형의 그래픽 사용자 대화 시스템의 기능을 가진 윈도우용 응용프로그램을 개발하였다. 구조물의 설계과정이 포함된 최적화의 전 과정은 프로그램 상에서 요구하는 대로 데이터를 입력함으로써 순차적으로 진행된다.

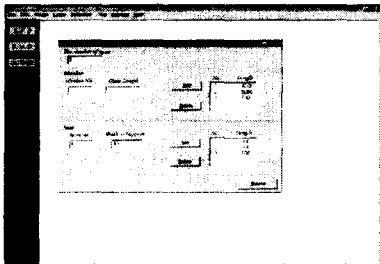


그림 3 구조물의 데이터 입력

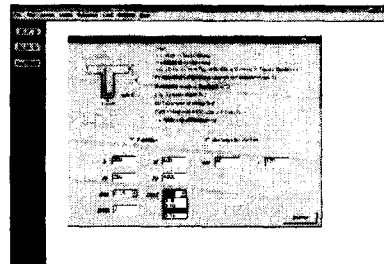


그림 4 단면데이터 입력

그림 3은 R.C. 연속보의 경간수와 순경간의 길이 및 지지폭을 입력하는 화면이고, 그림 4는 초기단면과 콘크리트의 설계기준강도, 철근의 항복강도 및 단면의 높이와 폭의 비를 입력하는 화면이다. 그리고 그림 5와 그림 6은 구조해석후의 전단력도와 모멘트도를 나타낸다.

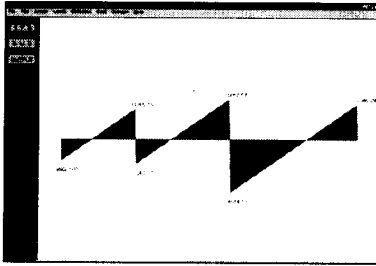


그림 5 전단력도

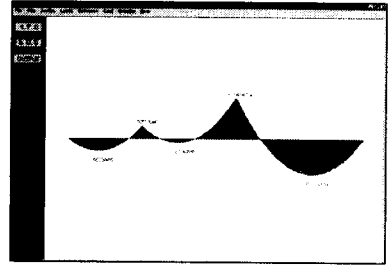


그림 6 휨모멘트도

4. 수치에 적용 및 결과분석

본 논문에서는 개발된 GUI의 유용성 및 제안된 최적화 알고리즘의 효율성을 보이기 위해 3경간 연속보에 대해서 초기단면을 변화시켜 가면서 최소화문제를 수행하였다. 그리고 최적화 수행후의 수치결과 분석을 통해 비선형계획기법의 효율성 및 설계실무에서의 적용성을 비교·입증하였다. 수치에 적용되는 재료의 특성치와 경비 데이터는 표 1과 같다.

표 1 재료 특성치 및 경비데이터

재료 특성치		실제경비*
콘크리트	철근	
$\sigma_{ck} = 250\text{kgf/cm}^2$	$\sigma_y = 4,000\text{kgf/cm}^2$	$C_c = 53,550\text{원/m}^3$
$E_c = 258,909\text{kgf/cm}^2$	$E_s = 2,040,000\text{kgf/cm}^2$	$C_f = 7,500\text{원/m}^2$
$w_c = 2.45\text{tf/m}^3$		$C_s = 2,844,991\text{원/m}^3$

* 1998년 9월 물가정보 기준

4.1 3경간 철근콘크리트 연속보

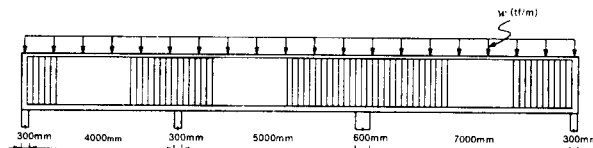


그림 7 등분포 사하중(DL)과 등분포 활하중(LL)을 받는 3경간 R.C. 연속보

등분포 사하중 1.8tf/m와 등분포 활하중 1.4tf/m를 받고 있는 3경간 연속보의 기하학적 형상은 그림 7과 같다. 휨 및 전단 검토를 수행하였으며, 지간과 지점부의 휨검토를 통해 더 이상 연장시킬 필요가 없는 곳에서 정착길이를 고려하여 주철근을 절단시켰다. 각 지간에 대한 최소경비설계의 단면형상과 주철근의 절단위치, 스테럽의 배근간격 및 구간은 GUI를 이용하여 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

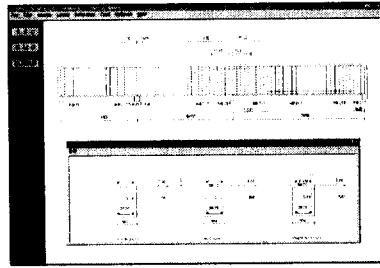
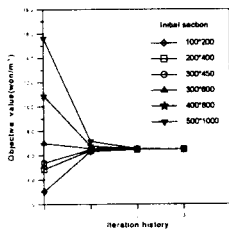
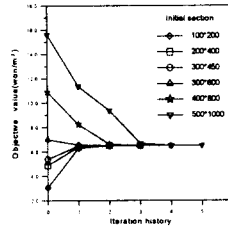


그림 8 3경간 연속보의 최적단면과 철근세목(시간2)

초기단면을 변화시켜 가면서 수행한 3경간 연속보의 최적해 수렴과정은 그림 9와 같다. 각각의 초기단면에 대해 최소경비는 단순보의 경우와 마찬가지로 일정한 값으로 수렴이 됨을 알 수 있다.



(a) SLP의 경우



(b) SCP의 경우

그림 9 3경간 R.C. 연속보의 최적설계의 수렴과정

단면의 크기에 대한 초기치를 가능영역(F)과 비가능영역(NF)으로 구분하여 변화시키면서 최적화를 수행한 결과는 표 2와 같으며, SLP와 SCP 기법 모두 비슷한 결과치를 갖는 것을 알 수 있다.

표 2 3경간 R.C. 연속보의 최소경비설계 결과

초기단면(mm)	최적단면(mm)		초기경비(원/m ³)	최소경비(원/m ³)	
	SLP	SCP		SLP	SCP
100×200(NF)	309×486	309×485	3.061	6.497	6.488
200×400(NF)	309×485	309×485	4.876	6.496	6.494
300×450(NF)	309×485	309×485	5.394	6.496	6.496
300×600(F)	309×486	309×486	6.992	6.497	6.505
400×800(F)	309×486	309×486	10.884	6.502	6.503
500×1000(F)	309×486	309×485	15.612	6.497	6.498

SLP와 SCP 기법의 수렴과정, function evaluation수와 CPU time의 비교는 표 3과 같다. SCP와 SLP 기법 모두 5회 이내에 수렴하였고, 초기단면이 300×600mm 이하인 경우에는 SCP 기법이 우수하지만 초기단면이 커지면서 SLP 기법이 우수함을 보이고 있다.

표 3 NLP 기법의 수렴성

초기단면(mm)	No. of Iteration		No. of Function Evaluation		CPU time(sec)	
	SLP	SCP	SLP	SCP	SLP	SCP
100×200	3	3	128	78	3.59	3.02
200×400	3	3	96	69	3.22	2.98
300×450	2	2	80	62	2.16	2.02
300×600	3	2	96	62	2.96	2.07
400×800	3	4	104	245	3.20	5.42
500×1000	3	5	168	341	3.70	5.82

5. 결 론

설계하중하에서 시방서의 설계 요구조건을 만족하면서 수행된 철근콘크리트보의 최적설계문제를 개발된 그래픽 사용자 대화시스템을 사용하여 얻은 수치결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 해석 및 설계가 포함된 철근콘크리트 연속보의 최적설계과정에 최적화 기법을 도입하여 시방서의 설계요구조건을 만족하면서 수행됨으로서 보다 실제적인 설계로의 가능성을 제시하였다.
- (2) 수치예를 들어 비선형계획기법의 효율성을 비교·분석한 결과 철근콘크리트보의 최소경비문제에서는 SCP 기법과 SLP 기법이 모두 비슷한 결과치를 나타내며, SCP 기법이 수렴성면에서 비교적 우수하다고 판단된다.
- (3) 개발된 사용자 대화시스템을 통해 실무설계자들이 쉽게 적용하여 사용할 수 있도록 사용자의 편의를 도모하고 설계의 전반적인 과정을 그래픽으로 구현함으로써 보다 시각적인 설계를 가능하게 하였다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, “콘크리트 표준시방서”, 대한토목학회, 1996.
2. Vanderplaats, G. N., “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”, McGraw-Hill Book Company, 1984, pp. 153~155.
3. Fleury, C., “Sequential Convex Programming for Structural Optimization Problems”, *Optimization of Large Structural Systems*, Vol. I, 1993, pp. 531~553.