

GUI를 이용한 철근콘크리트 연속보의 최적설계프로그램 개발

Development of Optimum Design Program for Reinforced Concrete Continuous Beam Using Graphic User Interface System

조 홍 동*
Cho, Hong-Dong

이 상 근*
Lee, Sang-Guen

박 중 열**
Park, Jung-Yeol

한 상 훈***
Han, Sang-Hoon

요 지

본 논문에서는 철근콘크리트 연속보의 최적설계 문제를 다루었으며, 설계실무에서 사용하기 위한 GUI 시스템을 개발하였다. 최적설계 문제형성을 위해 목적함수로 콘크리트, 철근 그리고 거푸집의 경비함수로 취하였고, 설계변수는 보의 폭과 유효높이 그리고 철근비이다. 제약조건으로 강도, 사용성, 내구성 그리고 기하학적인 조건을 고려하였다. 이렇게 형성된 비선형 최적설계문제는 축차선형계획기법과 축차불록계획기법을 사용하여 최적해를 구하였으며 그 효율성을 비교하였다. 또한 실제 설계실무에서 손쉽게 사용할 수 있도록 visual basic을 이용한 GUI 시스템을 개발하여 수치예를 통한 적용성을 보였다.

핵심용어 : 최적설계문제, 축차선형계획기법, 축차불록계획기법, GUI

Abstract

In this paper, optimum design problem of R.C. continuous beam is considered and GUI system is developed for using at the practical design. Objective function for formulation of optimum design problem is made up of the costs of concrete, reinforcing steel and formwork. Design variables are width, effective depth of the beam and steel ratio and design constraints are considered on the strength, serviceability, durability and geometrical conditions. The optimum design problem is solved by using sequential linear programming(SLP), sequential convex programming(SCP) and compared their effectiveness. Also this paper shows the application at practical design work according to the development of GUI system using visual basic.

Keywords : optimum design problem, R.C. continuous beam, SLP, SCP, GUI

1. 서 론

본 연구에서는 자중이 별도로 고려된 외부설계하중 하에서 강도, 사용성, 내구성 및 기하학적인 제

약 조건을 만족시키는 콘크리트, 철근 그리고 거푸집의 경비가 포함된 철근콘크리트보의 최적설계문제를 다루고 있다.

최적설계문제는 비선형계획문제로 정식화되며,

* 정희원 · 충북대학교 토목공학과, 박사과정 수료

** 충북대학교 토목공학과, 박사과정

*** 정희원 · 충북대학교 토목공학과, 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2000년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

범용 최적화 프로그램인 ADS¹⁾의 비선형계획기법인 축차선형계획법²⁾과 축차볼록계획법³⁾을 이용하여 그 해를 구하였다. 또한 해석 및 설계가 포함된 최적설계과정에서 강도설계법을 기초로 하는 철근콘크리트보의 휨 및 전단설계문제를 해결하였다. 사용된 최적화 알고리즘의 적용성을 보이기 위해서 철근콘크리트 단순보와 3경간 연속보에 대해 초기단면을 변화시켜가면서 최적화를 수행하였으며, 축차선형계획법과 축차볼록계획법에 의한 수치결과의 분석을 통해 이들 비선형계획기법의 효율성을 비교·입증하였다.

또한 철근콘크리트 연속보의 최적설계를 위해 개발된 그래픽 사용자 대화 시스템을 적용하여 설계실무에서 편의를 도모하고, 구조해석 결과와 최적설계과정을 그래픽으로 구현할 수 있도록 하는 소프트웨어를 개발하였다.

2. 철근콘크리트보 구조물의 최적설계문제 형성

2.1 철근콘크리트보의 최적설계문제 형성

2.1.1 목적함수

본 연구에서는 콘크리트비용, 철근비용 그리고 거푸집비용이 포함된 철근콘크리트보의 최소경비 문제를 식(1)과 같이 목적함수로 정식화하였다.

$$C = C_c V_c + C_s V_s + C_f A_f$$

$$= C_c (V_c + C_{sc} V_s + C_{fc} A_f) \quad (1)$$

여기서, C_c , C_f , C_s 는 각각 단위체적당 콘크리트 경비, 단위면적당 거푸집 경비, 단위체적당 철근 경비, 그리고 C_{fc} 와 C_{sc} 는 콘크리트 경비에 대한 거푸집과 철근의 상대경비를 나타낸다. 또한 A_f 는 거푸집 면적, V_c 는 콘크리트의 체적, V_s 는 철근의 체적을 나타낸다.

지지점의 폭이 w_j ($j=1, \dots, NS+1$)이고, 순경간이 L_m ($m=1, \dots, NS$)인 철근콘크리트 연속보의 전체적인 기하학적 형상은 그림 1과 같다. 여기서 NS 는 경간의 수를 나타낸다. 외부하중으로는 등분포 사하중과 등분포 활하중이 작용하며, 자중은

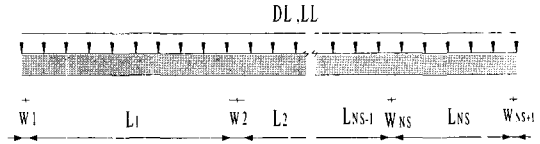


그림 1 등분포 사하중(DL)과 활하중(LL)을 받는 R.C. 연속보

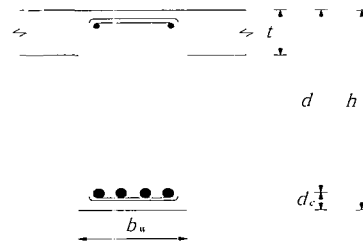


그림 2 R.C. 보의 단면형상

구조해석 과정에서 별도로 고려하였다.

철근콘크리트보의 단면형상은 그림 2와 같다. 그리고 목적함수 구성을 위한 콘크리트량, 철근량 그리고 거푸집량은 (식(2))와 같으며, 이 경우 콘크리트량과 거푸집량의 계산에서 슬래브는 고려하지 않았다.

$$V_c = b_w (h - t) \left(\sum_{m=1}^{NS} L_m + \sum_{j=1}^{NS+1} w_j \right) \quad (2a)$$

$$V_s = \sum_{k=1}^{NB} A_{st,k} \cdot l_k + A_{st,s} \cdot l_s \quad (2b)$$

$$A_f = 2(h - t) \left(\sum_{m=1}^{NS} L_m + \sum_{j=1}^{NS+1} w_j \right) + b_w \sum_{m=1}^{NS} L_m \quad (2c)$$

여기서 $A_{st,k}$ 와 $A_{st,s}$ 는 주철근과 스테럽의 단면적이고, l_k 와 l_s 는 주철근의 길이와 전체 스테럽의 등가길이이다. 그리고 NB 는 주철근의 수를 나타낸다.

2.1.2 제약조건

철근콘크리트보의 최적설계를 위한 제약조건으로는 콘크리트 표준시방서⁴⁾의 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(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_f M_n \geq |M_u| \quad (3)$$

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

보와 슬래브는 일체로 만들어 졌으며, 다른 지간의 보에 걸쳐있다고 가정하면, 슬래브의 일부는 휨모멘트에 대해 보와 함께 거동하므로 부모멘트를 받는 지점부분의 단면은 직사각형 단면, 정모멘트를 받는 지간의 중앙부분은 T형 단면으로 취급될 수 있다. 정모멘트와 부모멘트를 받는 부분에서 설계변수로 표현되는 휨강도 제약조건은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_f p_i^+ \bar{b}_i \sigma_y \left(1 - \frac{p_i^+ \bar{b}_i \sigma_y}{1.7 \sigma_{ck}}\right) b_{ef,i} d^2 \geq |M_i^*| \quad (4a)$$

$(i = 1, \dots, NS)$

$$\phi_f p_j^- \sigma_y \left(1 - \frac{p_j^- \sigma_y}{1.7 \sigma_{ck}}\right) b_w d^2 \geq |M_j^*| \quad (4b)$$

$(j = 1, \dots, NS+1)$

여기서, $b_{ef,i}$ 는 i 번째 경간의 유효플랜지 폭, d 는 압축연단에서 인장철근 도심까지의 거리, p_i^+ 는 i 번째 경간의 정모멘트에 대한 인장철근비, p_j^- 는 j 번째 지지점의 부모멘트에 대한 인장철근비를 나타내고, σ_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도, σ_y 는 철근의 항복강도를 나타낸다. $\bar{b}_i = b_w / b_{ef,i}$, $d = h - d_c$ 이고, M_i^* 와 M_j^* 는 각각 지간 중앙부와 지지점에서 극한 휨강도이다.

만약 보가 슬래브와 일체로 만들어지지 않는다면, 보는 전 길이에 걸쳐 일정한 직사각형단면으로 설계할 수 있다. 즉, $b_{ef,i}$ 는 b_w 로 변환되고, $\bar{b} = 1$ 이 되는 직사각형 단면으로 설계가 가능하다.

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(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_v S_n \geq |S_u| \quad (5)$$

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

사인장파괴에 대해 콘크리트가 부담하는 최대 공칭전단강도(S_c)와 보의 축에 대해서 직각으로 배근되는 스티럽이 부담할 수 있는 최대 공칭전단강도(S_s)는 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} S_n &= S_c + S_s \\ &= 0.93 \sqrt{\sigma_{ck}} b_w d + 2.1 \sqrt{\sigma_{ck}} b_w d \end{aligned} \quad (6)$$

3) 처짐 제약

휨을 받는 철근콘크리트 구조물은 처짐 발생 시 강도, 사용성 그리고 내구성에 손상을 입지 않도록 충분한 강성을 가져야 한다. 사용하중하의 철근콘크리트보의 처짐에는 하중 작용시 순간적으로 발생하는 단기처짐과 크리프와 건조수축의 영향에 의한 장기처짐으로 구분된다. 이들 처짐은 각각 허용처짐 범위 내에 들어야 한다. 즉, 등분포 하중을 받는 연속보의 경우, 각 지간내에서 발생하는 최대처짐($\Delta_{max,m}$)은 허용처짐(Δ_a)보다 작아야 하며, 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{max,m} \leq \Delta_a \quad (m = 1, \dots, NS) \quad (7)$$

철근콘크리트보의 실제 처짐계산에서는 휨모멘트도의 형상과 균열에 의한 강성의 저하를 고려하여 식(8)과 같은 유효단면 2차모멘트를 사용한다.

$$I_{ef} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left\{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right\} I_{cr} \leq I_g \quad (8)$$

여기서, I_{cr} 은 콘크리트로 환산된 균열단면 2차 모멘트, I_g 는 철근을 무시한 중립축에 대한 콘크리트의 총단면 2차모멘트, M_a 는 처짐이 계산되는 단계에서 사용하중에 의해 일어나는 최대 휨모멘트, M_{cr} 은 균열모멘트 그리고 σ_{rn} 는 콘크리트의 휨인장강도를 나타낸다.

연속보에서 지점부와 지간 중앙부의 유효단면 2차모멘트는 큰 차이가 있기 때문에 지점부와 지간 중앙부에 대한 평균 유효단면 2차모멘트^{5),6)}를 사용하였다.

R.C. 연속보의 지간 중앙에서의 최대처짐은 부재 양단이 단순 지지된 단순보로 보고 계산한 지간 중앙의 처짐에서 부재 단부의 부모멘트의 평균값을 양단에 작용시켜서 구한 반대 방향의 처짐을 뺀 값이다.

따라서 등분포 하중을 받는 철근콘크리트 연속보의 지간 중앙에서의 최대처짐은 근사적으로 식(9)와 같다.

$$\Delta_{max.m} = \frac{5wL_{ef}^4}{384E_cI_{ef}} - \frac{ML_{ef}}{8E_cI_{ef}} \quad (9)$$

여기서, E_c 는 콘크리트의 탄성계수, L_{ef} 는 보의 유효지간, M 은 지간 양단부의 부모멘트의 평균값을 나타낸다.

식(9)의 활하중 만에 의한 최대단기허용처짐은 $L_{ef}/360$ 보다 크지 않아야 한다. 그리고 크리프와 건조수축의 영향에 따른 최대장기허용처짐은 $L_{ef}/240$ 보다 크지 않아야 한다.

4) 연성 제약

콘크리트의 취성파괴를 피하고 철근의 연성파괴를 유도하기 위해 시방서에는 인장철근비의 상·하한치를 규정하고 있다. 각 지간의 중앙부와 지점부에서의 인장철근비에 대한 연성 제약조건은 각각 다음과 같다.

$$\rho_{min} \leq \rho_i^+ \leq \rho_{max} \quad (i = 1, \dots, NS) \quad (10a)$$

$$\rho_{min} \leq \rho_j^- \leq \rho_{max} \quad (j = 1, \dots, NS+1) \quad (10b)$$

여기서, ρ_{min} 은 최소철근비로서 식(11a)와 같

고, ρ_{max} 는 최대철근비로서 식(11b)와 같다.

$$\rho_{min} = \frac{14}{\sigma_y} \quad (11a)$$

$$\rho_{max} = 0.75 (\rho_b + \rho_f) \frac{b_w}{b_{ef,i}} \quad (11b)$$

여기서, ρ_b 는 평형철근비이고 ρ_f 는 플랜지의 등가철근비이다.

5) 기하학적 제약

건축적인 이유로 단면의 높이와 폭의 비에 대한 제한을 두는 경우가 있다. 단면의 높이-폭 비(K)를 매우 크게 할 수도 있지만 매우 얇거나 좁은 단면의 보가 되지 않도록 K 는 2보다 크지 않다고 가정하였다.

$$\frac{h}{b_w} < K \quad (12)$$

단면의 폭은 식(13)과 같이 표현할 수 있다.

$$b_w \geq N_s d_b + (N_s - 1) d_n + 2d_s + 2c \quad (13)$$

여기서, N_s 는 보강철근의 개수, d_b 는 길이방향 철근의 공칭지름, c 는 콘크리트 덮개, d_s 는 스티럽 직경 그리고 d_n 은 d_b 와 골재의 최대공칭지름 d_{ag} 중 큰 값을 나타낸다.

또한 내구성의 요구조건을 만족시키기 위해 시방서에서는 식(14)와 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.

$$c \geq c_{min} \quad (14)$$

2.2 휨철근의 정착

휨철근은 휨모멘트의 크기에 따라 단면적이 변할 수 있기 때문에, 휨을 저항하는데 더 이상 연장할 필요가 없을 경우에는 철근을 절단하거나 절곡시킬

수 있다. 그러나 절단 또는 절곡된 점에는 매우 큰 응력이 발생할 수 있기 때문에 정착길이 만큼 더 연장시켜야 한다. 따라서 본 논문에서는 콘크리트 표준시방서의 규정에 따라 정착길이를 고려하여 휨철근을 절단시켰다.

2.3 철근콘크리트보의 최소경비설계를 위한 최적화 알고리즘

본 연구에서 사용되는 철근콘크리트보의 경비최소화 문제를 위한 반복과정은 다음과 같다.

- 단계 1. 임의의 초기 설계 시작점을 가정하고, 반복회수 $i=1$ 에서의 자중 G_i 를 계산한다.
- 단계 2. 구조해석을 통해 보를 해석하여 최대 휨 모멘트, 최대전단력 등을 계산한다.
- 단계 3. 최소경비 설계를 위해 최소화문제를 정식화하고 풀이한다.
- 단계 4. 최적화된 후의 자중 G_{i+1} 을 계산한다.
- 단계 5. 알고리즘의 수렴여부 즉, $|G_{i+1} - G_i|/G_A \leq 0.01$ (G_A 는 G_i 와 G_{i+1} 중 작은 값)이 될 때까지 단계 2~4의 과정을 반복한다.

단계 3에서 비선형계획기법으로는 ADS의 축차선형계획기법(SLP)과 축차블록계획기법(SCP)을 사용하였다.

3. 그래픽 사용자 대화 시스템(GUI)의 개발

본 연구에서는 실무설계자들이 최적설계를 예비설계단계에서 쉽게 적용할 수 있도록 대화형의 그래픽 사용자 대화 시스템(graphic user interface, GUI)의 기능을 가진 윈도우용 응용프로그램(ODRCB, Optimum Design of Reinforced Concrete Beam)을 개발하였다.

화면에서 요구하는 데로 데이터를 입력함으로써 프로그램이 순차적으로 다음단계로 진행되며, 그 진행과정을 확인할 수 있도록 하였다.

구조물의 설계과정이 포함된 최적화의 전 과정은 Fortran으로 프로그래밍하였으며, 최적화된 구조물

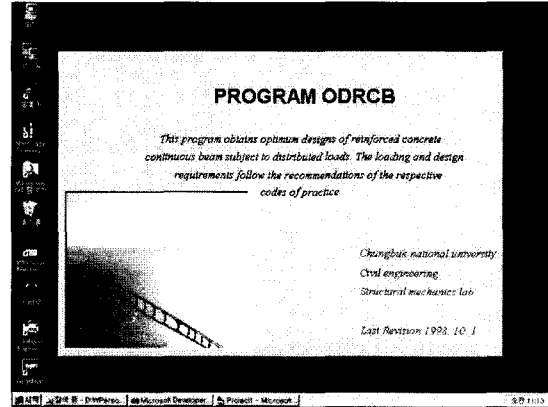


그림 3 그래픽 사용자 대화시스템의 초기화면

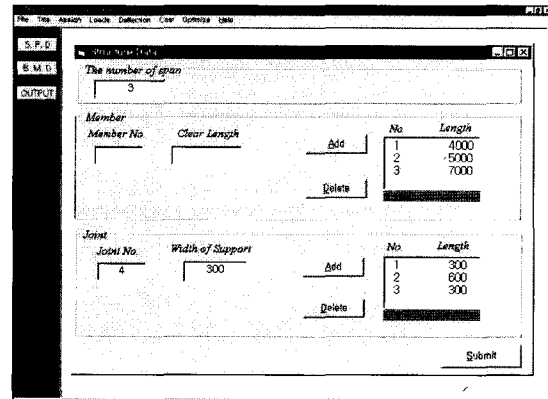


그림 4 구조물의 데이터 입력

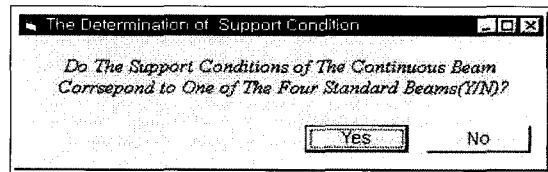


그림 5 지점조건(표준 또는 비표준)

의 최적단면 및 철근세목 등은 Visual basic 5.0⁷⁾을 이용하여 그래픽으로 구현하였다.

그래픽 사용자 대화시스템의 진행과정은 다음과 같다. 그림 3은 그래픽 사용자 대화 시스템의 초기화면이다. 화면을 클릭(click)하면 그림 4와 같이 R.C. 연속보의 경간수와 순경간의 길이 및 지지폭을 입력하는 화면이 나타나게 된다.

그림 5는 지점조건에 대해 표준화된 형태의 사용

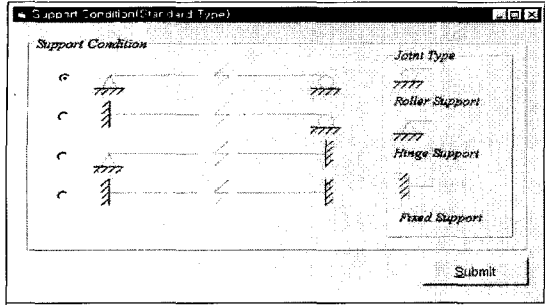


그림 6 지점조건(표준형태)

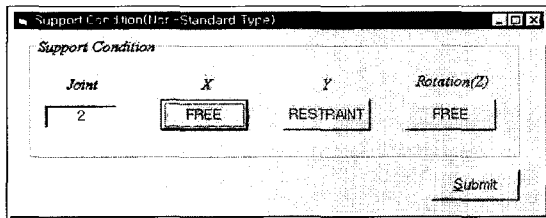


그림 7 지점조건(비표준형태)

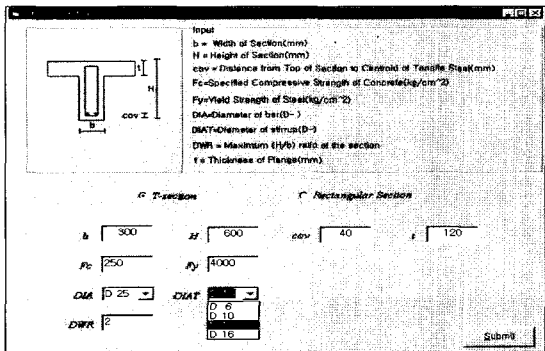


그림 8 단면데이터 입력

여부를 묻는 화면으로서 Yes를 클릭하면 그림 6과 같이 표준화된 형태의 지점조건 즉, 내부의 모든 지점은 롤러로 지지되고, 양끝 지점의 조건만을 선택하도록 하였으며, No를 클릭할 경우 그림 7과 같이 각 지점의 조건을 선택할 수 있도록 하였다.

그림 8은 초기단면과 콘크리트의 설계기준강도, 철근의 항복강도 및 단면의 높이와 폭의 비를 입력하는 화면이다. 그림 9는 절점하중과 등분포 하중형태의 부재하중을 입력하는 화면으로서 사하중과 활하중에 대해서 고려하였다. 그림 10은 최대 지간/처짐 비를 나타낸다.

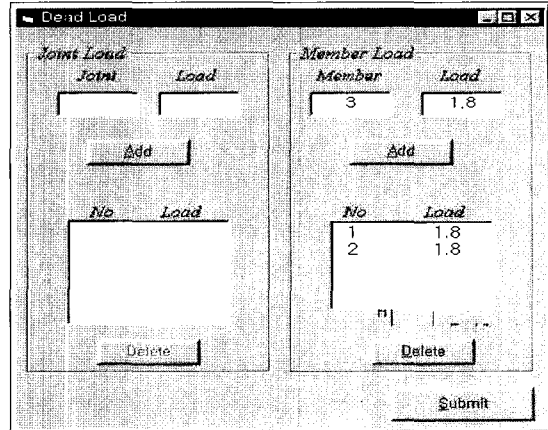


그림 9 하중입력

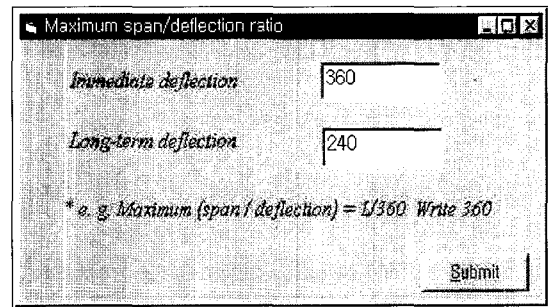


그림 10 최대 지간/처짐 비 입력

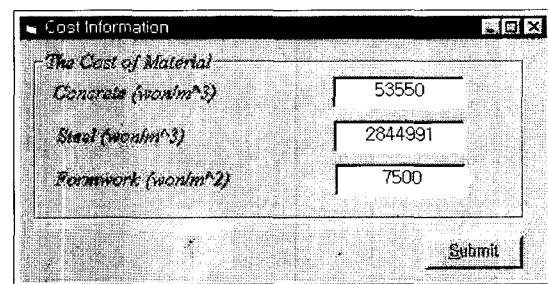


그림 11 경비데이터 입력

그림 11은 재료의 경비데이터 입력화면이고, 그림 12와 13은 구조해석후의 전단력도와 모멘트도를 나타낸다.

그림 14는 최적화된 후의 단면과 철근세목을 나타낸다. 원하는 지간의 최적단면과 철근량을 확인하기 위해서는, 마우스로 그 지간을 클릭하면 최적단면과 철근의 개수를 나타내는 품이 나타나게 된다.

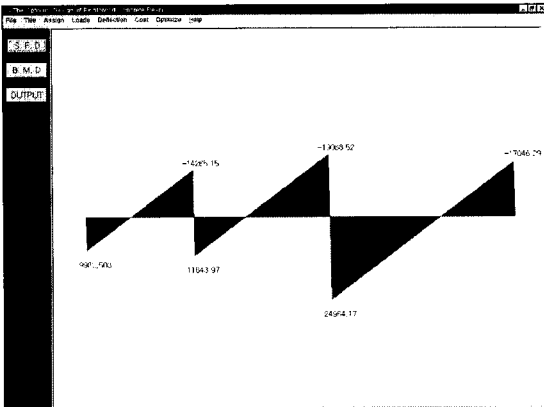


그림 12 전단력도

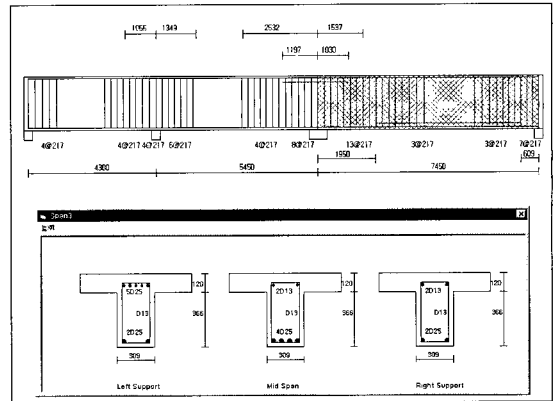


그림 14 최적단면과 철근세목

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

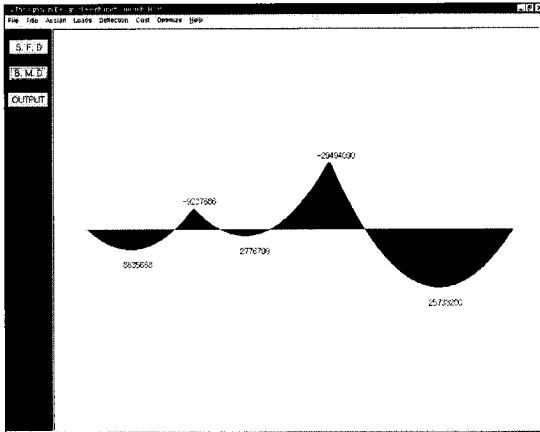


그림 13 휨모멘트도

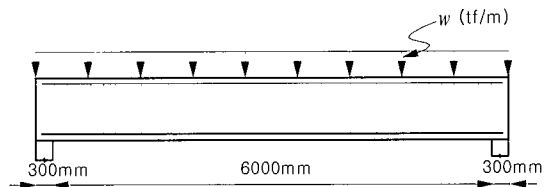


그림 15 등분포 사하중(DL)과 등분포 활하중(LL)을 받는 철근콘크리트 단순보

4. 수치에 적용 및 결과분석

본 논문에서는 제안된 최적화 알고리즘의 적용성 및 효율성을 보이기 위해 단순보와 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.

4.1 단순 지지된 철근콘크리트보

외부설계하중으로 등분포 사하중 1.6tf/m와 등분포 활하중 1.2tf/m를 받고 있는 단순보의 기하학적

형상은 그림 15와 같다.

T형 단면을 가지는 철근콘크리트보는 지간 중앙에서의 휨점토를 통해 휨철근을 절단함으로써 휨철근량이 지점쪽에서 줄어든다. 또한 지지폭 전면에서 유효높이 d만큼 떨어진 위험단면에서의 전단점토를 통해 스테럽의 배근간격 및 길이를 얻을 수 있다. 최소경비설계에 대한 단면형상과 주철근의 절단위치, 스테럽의 배근간격 및 배근길이는 그래픽 사용자 대화 시스템을 이용하여 그림 16과 같이 나타낼 수 있다.

단순보에서는 정철근의 15cm 이상을 받침부내에 연장하도록 하는 규정에 의해 D25철근 2개를 전구간에 걸쳐 배근하였고, 휨을 받는데 더 이상 필요하

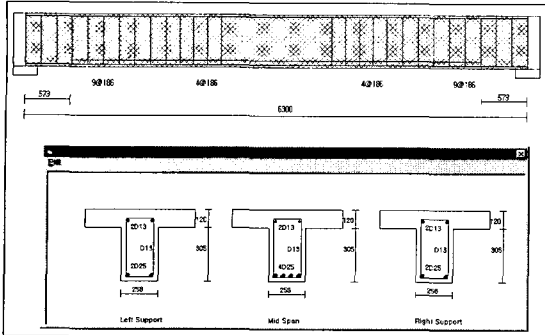
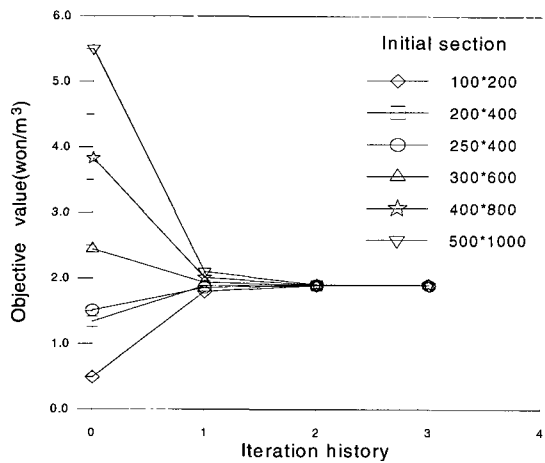
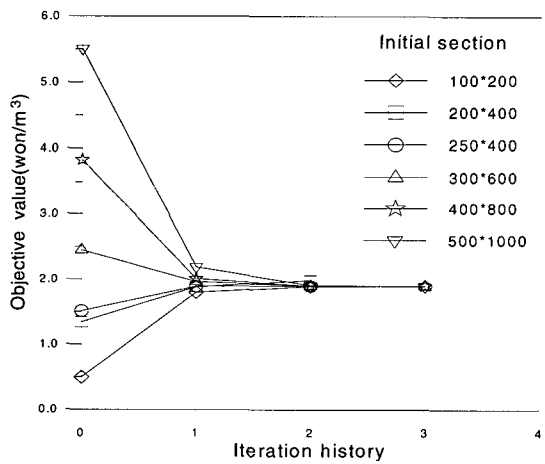


그림 16 철근콘크리트 단순보의 최적단면 및 철근세목



(a) SLP의 경우



(b) SCP의 경우

그림 17 단순보의 최적설계의 수렴과정

표 2 단순보의 최적설계 결과

초기단면 (mm)	최적단면(mm)		초기 경비 (원/m ³)	최소경비 (원/m ³)	
	SLP	SCP		SLP	SCP
100×200 NF	258×424	258×424	0.495	1.894	1.892
200×400 NF	258×425	258×424	1.340	1.895	1.892
250×400 NF	258×424	258×425	1.510	1.895	1.894
300×600 F	258×425	258×425	2.444	1.896	1.895
400×800 F	258×425	258×425	3.830	1.897	1.897
500×1000 F	258×425	258×424	5.502	1.895	1.893

지 않은 점에서는 정착길이를 고려하여 보의 지지폭 중앙으로부터 573mm떨어진 곳에서 D25철근 2개를 절단시켰다. 위험단면에서의 극한전단강도와 콘크리트 공칭전단강도의 비교를 통해 전단스터럽이 필요한 구간까지 0.5d (186mm) 이하로 배근하였다.

초기단면을 변화시켜 가면서 수행한 최적해의 수렴과정은 그림 17과 같으며, 초기단면과 관계없이 최소경비는 일정한 값으로 수렴됨을 알 수 있다.

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

표에 나타난 초기경비와 최소경비는 콘크리트 경비에 대한 상대경비로서 실제경비는 이 경비에 콘크리트경비를 곱하여 얻을 수 있다. 예를 들어 최소경비가 1.8951원/m³인 경우 실제경비는 표 1의 콘크리트 실제경비 53,550원/m³을 곱하여 101,483원/m³이 된다.

사용된 비선형계획기법들의 반복횟수, function evaluation 수 및 CPU time은 표 3과 같다. SLP와 SCP 기법 모두 3회 이내에 수렴하였으나, 목적함수와 제약조건식의 계산수를 나타내는 function evaluation 수와 CPU time이 적은 SCP기법이 SLP 기법에 비해 비교적 우수한 것으로 나타났다.

표 3 NLP 기법의 수렴성(단순보)

초기단면 (mm)	No. of Iterations		No. of Function Evaluations		CPU time (sec)	
	SLP	SCP	SLP	SCP	SLP	SCP
100×200	3	3	80	65	2.62	2.07
200×400	2	2	48	39	1.64	1.17
250×400	3	2	80	36	2.49	1.08
300×600	3	3	52	34	1.92	1.76
400×800	3	3	68	47	2.03	1.79
500×1000	3	3	84	73	2.20	1.93

4.2 3경간 철근콘크리트 연속보

등분포 사하중 1.8tf/m와 등분포 활하중 1.4tf/m를 받고 있는 3경간 연속보의 기하학적 형상은 그림 18과 같다.

휨설계시에는 최대 정모멘트 발생단면과 지지점의 단면에 대해서 검토하였다. 보와 슬래브가 일체로 거동하기 때문에 정의 휨모멘트를 받는 지간의 중앙부분은 T형단면, 부의 휨모멘트를 받는 지지부분은 직사각형 단면으로 취급할 수 있다. 전단설계는 단순보의 경우와 동일하다.

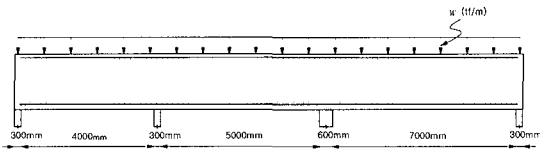


그림 18 등분포 사하중(DL)과 등분포 활하중(LL)을 받는 3경간 R.C. 연속보

각 지간에 대한 최소경비설계의 단면형상과 주철근의 절단위치, 스테럽의 배근간격 및 구간은 GUI를 이용하여 그림 19~21과 같이 나타낼 수 있다.

단면은 시공성을 고려하여 전구간에 걸쳐 309×486mm의 균일단면으로 설계되었다. 보의 전구간에 걸쳐 배근되는 연속철근의 경우 정철근량의 1/4 이상을 지점을 넘어 15cm이상 받침부에 연장시켰고, 지간과 지점부의 휨검토를 통해 더 이상 연장시킬 필요가 없는 곳에서 정착길이를 고려하여 절단시켰다. 전단설계는 단순보의 경우와 마찬가지로 위험

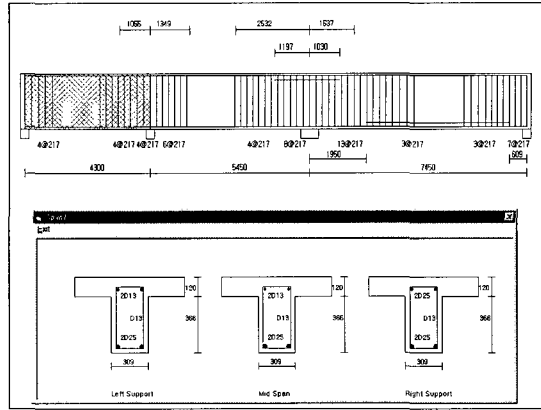


그림 19 3경간 연속보의 최적단면과 철근세목(지간1)

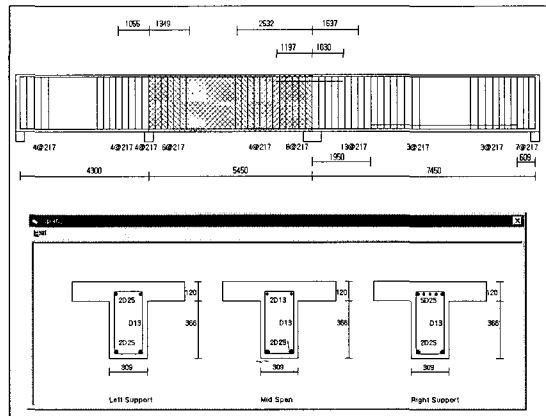


그림 20 3경간 연속보의 최적단면과 철근세목(지간2)

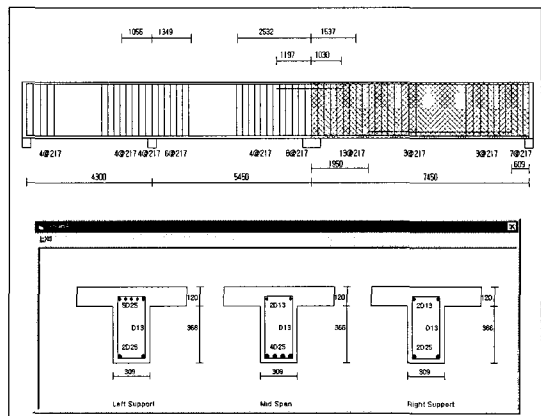


그림 21 3경간 연속보의 최적단면과 철근세목(지간3)

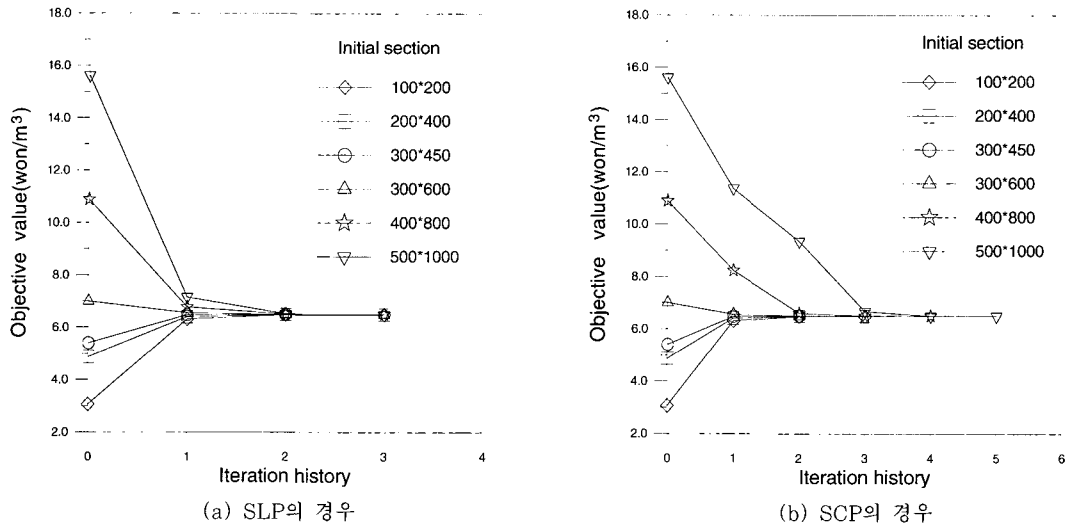


그림 22 3경간 R.C. 연속보의 최적설계의 수렴과정

표 4 3경간 R.C. 연속보의 최소경비설계 결과

초기단면 (mm)	최적단면(mm)		초기경비 (원/m³)	최소경비 (원/m³)	
	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

단면에서의 극한전단강도와 콘크리트의 공칭전단강도의 비교를 통해 전단스터럽이 필요한 구간까지 0.5d (217mm)이하로 배근하였다.

초기단면을 변화시켜 가면서 수행한 3경간 연속보의 최적해 수렴과정은 그림 22와 같다. 각각의 초기단면에 대해 최소경비는 단순보의 경우와 마찬가지로 일정한 값으로 수렴이 됨을 알 수 있다.

단면의 크기에 대한 초기치를 가능영역(F)과 비가능영역(NF)으로 구분하여 변화시키면서 최적화를 수행한 결과는 표 4와 같으며, SLP와 SCP 기

표 5 NLP 기법의 수렴성 (3경간 R.C. 연속보)

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

법 모두 비슷한 결과치를 갖는 것을 알 수 있다.

SLP와 SCP 기법의 수렴성, function evaluation수와 CPU time의 비교는 표 5와 같다. SCP와 SLP 기법 모두 5회 이내에 수렴하였고, 초기단면이 300×600mm 이하인 경우에는 SCP 기법이 우수하지만 초기단면이 커지면서 SLP 기법이 우수함을 보이고 있다. 이는 SLP에서 이동한계값의 범위(20%)가 주어진 설계점에서 매우 적절하여 SCP보다 효율적이었던 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 설계하중하에서 시방서의 설계 요

구조조건을 만족하면서 철근콘크리트보의 최적설계문제를 수행하였다. 그리고 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 최소경비 문제에서는 SCP 기법과 SLP 기법이 모두 비슷한 결과치를 나타내며, SCP 기법이 수렴성 면에서 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.

최적설계가 실제 규모 구조물에 대한 문제의 도출과 최적설계코드의 개발 형태로 발전되고, 사용자의 편의를 도모하기 위해 윈도우상의 대화방식을 통한 단면형상이나 하중 등의 입력, 그리고 선·후행 그래픽처리에 의해 출력된 결과 등은 실제적인 설계 도구로서 최적설계의 위상을 높이는 계기가 될 수

있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Vanderplaats, G. N. and Sugimoto, H., "A General Purpose Optimization Program for Engineering", *Computers and Structures* 24, 1986, pp.13~21
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
4. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서", 대한토목학회, 1996
5. Wang, C. K., Salmon, C. G., *Reinforced Concrete Design Sixth Edition*, Addison Wesley Educational Publishers Inc., 1998, pp.543~594
6. "ACI Manual of Concrete Practice Part 3", American Concrete Institute, 1996, 318/318R-93~318/318R-96
7. "Inside Secretes Programming VB Graphics", 삼각형, 1998

(접수일자 : 1999. 3. 10)