한국전산구조공학회
2002년도 가을 학술발표회 논문집

사용성을 고려한 RC뼈대 구조물의 최적설계
Optimum Design of Reinforced Concrete Frames Considering Serviceability

김 기 대* 박 성 규**
Kim, Kee-Dae Park Seong-Kyoo

Abstract
This study is concerned with the practical optimum design of concrete framed structures considering serviceability - deflection, crack, fatigue. The optimizing problems of framed structure are formulated with the objective function and the constraints which take the section properties as the design variables. The objective functions are formulated as the total cost of the structures and the constraints are derived by using the criteria with respect to safety and serviceability based on the part of concrete bridge in the Korea standard code of road bridge. The SLP method is introduced to solve the formulated nonlinear programming problems in this study and tested out through the numerical examples. This developed optimizing algorithm is tested out and examined through the numerical examples for the practical use of design on the concrete framed structures. And their results are compared and analyzed to examine the possibility of optimization, the applicability and the convergency of this algorithm.

1. 서 론
구조물을 경제적으로 설계하려는 시도는 구조역학개념이 도입된 이래 공학자들의 끊임없는 관심의 대상이 되어 왔다. 그러나 완전한 최적설계는 설계과정이 복잡하고 해석에 많은 시간이 소요되므로 20세기 중반까지도 불가능하다고 생각해 왔다.

최소중량설계의 형태로 선형최적화이론 중심으로 발전된 초기의 이론적 태동시기인 1950년대, 각종 비선형 최적화이론의 발전과 더불어 최적설계이론이 체계화된 시기인 구조최적화 이론의 성장기에 해당하는 60년대, 최적설계가 이론적으로 고도화되고 실제 구조시스템의 설계에 적용되기 시작한 초기응용시기에 해당하는 70년대, PC 및 슈퍼컴퓨터시대의 고성능 컴퓨터에 맞는 더욱더 세련화된 최적화 이론 및 응용 S/W가 발전한 80년대 및 90년대를 거치면서 최적설계는 더욱더 고도화 되었다.

철근콘크리트 구조물에 관한 최적화 문제는 강구조물에 비해 늦게 연구되었는데 이는 철근콘크리트 구조물이 강구조물보다 단면의 구성이 복잡하고 설계변수가 많기 때문이다. 지금까지의 철근콘크리트 구조물의 최적화 문제는 최적 단면력 결정에 관한 것이 대부분 이었다.(1) 다시 말하면 주어진 하중과 구조형태에 따라 발생하는 하중에 대해 안정성이 보장되고 소요의 기능을 발휘하는 구조물이 되도록 부재를 배치하고, 이에 따른 모든 부재의 재료와 치수를 합리적이고 경제적으로 결정하는 것을 설계최적화의 주된 목표로 삼았다.(3)

* 정회원 · 대구대학교 토목공학과 교수
** 대구대학교 토목공학과 박사수료

구조물 또는 부재는 설계공용기간 중 충분한 기능과 성능을 유지하기 위하여, 사용하중하에서 사용목적에 적합한 기능을 유지하여야 한다. 이때 필요한 기능에는 소요안전성 이외에 사용상의 쾌적성, 수밀성, 미관 등에 관련된 사용성을 대표로 들 수 있다. 강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조물 또는 부재에 있어서 사용성에는 균열, 변형, 변위, 피로, 손상 등의 여러 가지가 있으나 균열, 처짐, 피로에 대한 사용성을 고려하는 것이 일반적이다.[2] 이에 착안하여 본 연구에서는 사용성을 고려한 철근콘크리트 뼈대구조의 최적화 알고리즘을 개발하고자 하는 것이다.

철근콘크리트 뼈대구조는 구조해석상의 부정정성 외에 설계변수가 많고, 재료적인 비선형성으로 인하여 제약조건식의 형성이 매우 복잡한 특성을 가지고 있다. 단면결정 및 사용성 검토에 사용되는 인자는 서로 다르지 않는 역학적인 성질을 가지고 있으므로 다수의 제약조건식이 발생한다.

최적화기법으로는 다설계변수, 다제약조건을 갖는 비선형 최적화 문제해결에 효과적이라고 알려져 있는 축차선형계획법(SLP)를 적용하여 다른 최적화 기법과 최적해의 수렴과정을 비교 검토하였다. 최적화 문제의 형성에서는 철근콘크리트 뼈대구조의 최소경비설계를 위하여 부재단면의 치수와 철근량을 설계변수로 설정하였으며, 목적함수로는 경비함수를 취하고, 제약조건은 시방서 규정을 근거로 하여 부재의 휨, 전단 등의 강도와 균열, 처짐, 피로의 사용성을 고려하였다. 본 연구의 타당성과 실용성을 검토하기 위하여 1경간 RC라멘교를 대상으로 최적화문제를 형성하여 최적화를 시도하였다.

2. 최적화 기법

2.1 최적화 문제의 일반형식

구조물의 최적설계란 설계변수에 부과된 제약조건을 만족시키면서 목적함수를 최소로 하는 설계변수의 조합을 구하는 것으로서 구조물의 형상, 하중, 시방서, 공법 및 사용재료의 결정으로부터 시작된다.

일단 이러한 자료들이 결정되면 최적화문제형성이 가능하게 된다. 이 단계에서는 설계변수를 정의하고 설계에 적용할 제반 설계조건식을 최적기준에 의해 수식화하는 작업이 이루어진다. 이러한 문제가 형성되면 그 문제의 특성에 적합한 최적화 기법을 적용하여 최적해를 구하게 된다.

설계변수는 주로 절점의 좌표, 부재수, 지점의 종류, 단면의 치수 및 시공방법과 구조물에 작용하는 하중에 대해 응답을 표시하는 응력 및 변위가 대표적이다. 그러나 설계의 효율을 높이기 위해서는 중요한 변수들 만을 취하고 그밖의 변수들은 고려치 않는 것이 통례이다. 그리고 목적함수는 구조물의 최적설계시 허용영역내의 무수히 많은 설계점들을 비교할 수 있는 유일한 판단기준이 되는 함수로서 경비, 중량, 체적 및 변형에너지 등이 사용되고, 제약조건은 형태변수와 해석변수의 설계상의 제한 및 시방서 등에 의한 제약사항을 표시하는 함수로써 응력, 변위, 부재간격, 단면의 치수, 철근비, 진동수 및 좌굴 등이 될 수 있다.
전술한 구조물 최적설계의 문제형성은 일반적으로 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$\text{Mnimize} \quad f(\boldsymbol{X}) = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) \tag{2.1}$$

$$\text{Subject to} \quad h_i(\boldsymbol{X}) = h_i(x_1, x_2, \cdots, x_n) = 0\ ; \quad i=1, 2, \cdots, k\ (k \le n) \tag{2.2}$$

$$g_j(\boldsymbol{X}) = g_j(x_1, x_2, \cdots, x_n) \le 0\ ; \quad j=1, 2, \cdots, m$$

최적설계에서는 목적함수가 식 (2.1)로 등식의 제약조건 $h_i(\boldsymbol{X})$, 부등식의 $g_j(\boldsymbol{X})$의 제약조건이 식 (2.2)로 주어질 때 목적함수 $f(\boldsymbol{X})$가 최소로 되도록 설계변수 $\boldsymbol{X}$를 결정하는 것이다.

2.2 사용된 최적화 기법

1) SUM(Sequential Unconstrained Minimization Techniques)

SUMT법 중 Carrol.C.W.[4]이 처음 발표하고 Fiacco, A.V.와 McCormick, G.P.[6]가 발전시킨 Interior Penalty Function method을 기술하면 다음과 같다.

식(2.1), 식(2.2)의 비선형계획문제를 최초에 어떤 스칼라량 $\alpha^{\gamma}=\alpha^{1}$과 $g_j(X^{\gamma}) \le 0$인 실행가능한 초기 설계점 $\boldsymbol{X}= \boldsymbol{X}^{\gamma}$가 주어지면 일련의 무제약함수의 최소치를 구하는 문제로 된다. 이를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize} \quad \phi(\boldsymbol{X}, \alpha^{\gamma}) \tag{2.3}$$

여기서, $$\phi(\boldsymbol{X}, \alpha^{\gamma}) = f(\boldsymbol{X})+\alpha^{\gamma} \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{g_j(\boldsymbol{X})} \tag{2.4}$$

α^{γ} : penalty paramete $(\alpha^{1} > \alpha^{2} \cdots \alpha^{\gamma} > \alpha^{\gamma+1})$

이 방법의 알고리즘은 다음과 같다.

① X 및 α의 초기치 X^0, α^1을 고려한다. 단, X^0는 제약조건을 만족시키지 않으면 안된다.

② α^{γ}에 대하여 $X^{\gamma-1}$을 출발점으로 하여 $\phi(X, \alpha^{\gamma})$를 최소로 하는 해를 구한다.

③ 수렴조건이 만족될 때는 계산을 종료한다.

④ 수렴되지 않을 때는 $\alpha^{\gamma+1} = \alpha^{\gamma} / \mathrm{c}$, $\mathrm{c} > 1, \gamma=\gamma+1$로 하여 α를 감소시켜 step 2)로 돌아 간다.

2) 승수법[3](Augmented Lagrange Multiplier Method)

SUMT법의 단점을 해소하기 위하여 개발된 변환법으로 조정매개변수 γ이 필요없어 변환 함수 ϕ는 특이점이 생기지 않는 좋은 상태가 된다. 이 방법도 SUMT가 수렴하듯이 수렴는데 어떤 점에서나 시작하여 국부최저점으로 수렴한다. 된다. 승수법에서 벌칙함수는 다음과 같다.

$$\phi(\boldsymbol{X}, \alpha^{\gamma}) = f(\boldsymbol{X})+P(h(\boldsymbol{X}), g(\boldsymbol{X}), \boldsymbol{r}, \boldsymbol{\theta}) \tag{2.5}$$

승수법의 원리는 어떠한 $\boldsymbol{r}$, $\boldsymbol{\theta}$에서 시작하여 식(2.4)의 변환함수를 최소화 하는 것이다. 매개변수 $\boldsymbol{r}$, $\boldsymbol{\theta}$는 적절한 규칙에 의하여 조정되고, 최적성조건을 만족할 때까지 전과정을 반복한다.

3) SLP(Sequential Linear Programming)법[9]

각 설계점에서 비선형의 제약조건식 및 목적함수를 $\boldsymbol{X}^{*}$ 점에 관해 Taylor급수로 전개하여 1차항까지 취하여 식(2.5) 및 식(2.6)과 같이 선형화하고, 이 변형된 선형계획(LP)문제에 선형계획 알고리즘을 적용함으로서 근사해를 구한후, 순차적으로 초기 설계점을 수정하여 최종적으로 만족할 만한 값이 구하여질 때까지 되풀이함으로서 최적해를 얻게 된다.

$$\text{Minimize} \quad f= f^{*} + \nabla f(\boldsymbol{X}^{*})(\boldsymbol{X}- \boldsymbol{X}^{*}) \tag{2.6}$$

$$\text{subject to} \quad h_i^{*} + J(\boldsymbol{X}^{*})(\boldsymbol{X}- \boldsymbol{X}^{*}) = 0 \tag{2.7}$$

$$g_j^{*} + J(\boldsymbol{X}^{*})(\boldsymbol{X}- \boldsymbol{X}^{*}) \le 0 \tag{2.8}$$

여기서 첨자 *는 초기가정해 또는 전단계해의 해당값을 뜻하고, $\nabla f(\boldsymbol{X})$는 Gradient vector, $J(\boldsymbol{X})$는 Jacobian matrix이다.

4) SQP(Sequential Quadratic Programming)법[8]

SLP법의 식(2.6) ~ 식(2.8)과 같은 LP 부문제가 아닌, 식(2.9) ~ 식(2.11)의 이차목적함수와 선형제약조건을 가진 이차계획(QP) 부문제로 하여 반복적으로 풀어 $f(\boldsymbol{X})$를 최소화 한다.

$$\text{Minimize} \quad q = \mathbf{C}^T \boldsymbol{X} + 0.5\, \boldsymbol{X}^T \mathbf{H} \boldsymbol{X} \tag{2.9}$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{N}^T \boldsymbol{X} = \mathbf{e} \tag{2.10}$$

$$\mathbf{A}^T \boldsymbol{X} \leq \mathbf{b} \tag{2.11}$$

여기서 $\mathbf{C} = n$ 차원의 주어진 상수벡터, $\boldsymbol{X} = n$차원으 미지수 벡터, $\mathbf{b} = m$차원의 주어진 제약조건 벡터, $\mathbf{e} = p$차원의 주어진 제약조건 벡터, $\mathbf{H} = n \times n$의 주어진 상수의 Hessian Matrix, $\mathbf{N} = n \times p$의 주어진 상수행렬이고 $\mathbf{A} = n \times m$의 주어진 상수행렬이다.

3. 최적화 문제의 형성

3.1 설계변수

유한요소계를 이용하는 뼈대구조물의 최적설계에서 설계변수는 요소관련 설계변수와 절점관련 설계변수로 구분할 수 있다. 요소관련 설계변수의 대표적인 예는 요소단면의 치수나 재료의 성질 등을 들 수 있다. 또 절점관련 설계변수로는 연결부의 위치 즉 절점의 좌표 또는 지점의 위치 등을 생각할 수 있다.

일반적으로 단면의 치수나 철근량과 같은 설계변수는 이산형으로 취급해야 함이 바람직하다. 그러나 최적화 알고리즘의 측면에서 보면 이산형변수에 대한 알고리즘이 비효율적인 경우가 대부분이다. 따라서 일단계단일 목적함수(single level single objective : SLSO) 최적화의 문제에서는 모든 설계변수를 연속형으로 간주하여 최적화를 수행한 다음 연속형 최적설계변수값에 가장 가까운 이산변수값을 사용할 수 있다.

본 연구에서는 요소관련 설계변수로 철근콘크리트 단면의 치수와 철근량으로 하였으며, 사용성에 관련해서는 연속형 설계변수인 철근량을 직접적으로 사용할 수 없기 때문에 철근량의 결정인자인 배근간격과 철근직경 중 배근간격을 고정시켜 알고리즘을 수행하였다.

뼈대구조물의 요소의 수(부재의 수)나 절점의 수가 많아 짐에 따라 최적화 알고리즘이 비효율적이 될 수 있으므로 연계설계변수(design variable linking)의 개념 및 시공성을 고려하여 설계변수의 수를 줄였다.

3.2 목적함수

목적함수는 어떤 설계가 다른 설계보다 더 좋은 것인지 아닌지를 구별하는 척도가 되는 함수로 구조물 제작에 소요되는 경비를 흔히 사용한다.

철근콘크리트 뼈대 구조의 최적화를 위한 목적함수를 설정함에 있어서 콘크리트는 강재와는 달리 중량이나 체적을 최적화는 것은 특별한 목적을 제외하고는 큰 뜻이 없으므로[7] 본 연구에서도 설계변수로 표시되는 경비함수를 목적함수로 취하여 최소경비 설계를 행한다.

철근콘크리트 뼈대구조를 건설하는 데는 콘크리트와 철근, 거푸집, 지보공 등의 경비가 포함되는데, 구조자체와 거푸집 비용이 큰 비중을 차지하는 것이 일반적이므로 최소경비를 위한 목적함수는 식 (3.1)과 같이 표시한다.

$$\text{Minimize} \quad f = C_c V_c + C_s V_s + C_f A_f \tag{3.1}$$

여기서 f 는 구조물의 총경비, C_c , C_s는 각각 콘크리트, 철근의 단위체적당 경비이고, V_c , V_s는 각각 콘크리트, 철근의 체적, C_f, A_f는 각각 거푸집의 단위면적당 경비, 거푸집의 면적이다.

3.3 제약조건

철근콘크리트 뼈대구조물은 휨모멘트 또는 축방향력과 휨모멘트를 동시에 받게 되므로 현행 설계시방서의 강도설계법에서 규정한 축 및 전단, 휨의 단면강도 뿐만 아니라 처짐 및 균열, 피로의 사용성을 고려한 제약을 수식화 하면 다음과 같다.

1) 휨강도 제약조건식

$$M_{ui} - \phi M_{di} \le 0 \qquad (3.1)$$

여기서 첨자 i 는 i 번째 고려된 설계단면을 뜻하며, 보 또는 슬래브 및 기둥 또는 벽체에 적용된다.

2) 전단강도 제약조건식

$$V_{uj} - \phi V_{dj} \le 0 \qquad (3.2)$$

여기서 첨자 j 는 j 번째 고려된 설계단면을 뜻하며 보 또는 슬래브 및 기둥 또는 벽체의 단부에 적용된다.

3) 축강도 제약조건식

$$P_{uk} - \phi P_{dk} \le 0 \qquad (3.3)$$

여기서 첨자 k 는 k 번째 고려된 설계단면을 뜻하며 기둥 또는 벽체에 적용된다.

4) 최소 및 최대 철근량 제약조건식

① 보 또는 슬래브의 경우

최소 : $\min(14/fy,\ 0.80\cdot\sqrt{f_{ck}}/f_y)\cdot b\cdot d - As \le 0$ (3.4)

최대 : $As - Pmax\cdot b\cdot d \le 0$ (3.5)

② 기둥 또는 벽체의 경우

최소 : $0.01\cdot b\cdot d - Ast \le 0$ (3.6)

최대 : $Ast - 0.08\cdot b\cdot d \le 0$ (3.7)

5) 처짐 제약조건식

처짐계산에 의해 더 작은 두께를 사용할 수 있는 방법을 택하지 않고, 상부구조물 최소높이의 기준에 따르며 보 또는 슬래브에 적용한다.

$1.2\cdot(S+3)/3 - h \le 0$ (m) (3.8)

6) 균열 제약조건식

콘크리트의 휨균열을 조절하기 위해서 설계시 고려되는 단면요소의 단면력에 의해 휨균열폭이 허용균열폭 이하가 되도록 해야 한다. 이 때 철근배근간격을 가정하여 고정시킴으로서 철근량으로되어 있는 설계변수의 연속성을 기대할 수 있다.

$w(=1.08Rf_s\sqrt{d_cA}\times10^{-5}) - w_a \le 0$ (㎜) (3.10)

7) 피로 제약조건식

콘크리트 보 및 슬래브에 대한 피로검토는 활하중에 의한 모멘트변화가 큰 곳 즉, 주로 지간의 중앙점이 적용대상이 되는데 최대모멘트와 최소모멘트에 의한 응력을 어느 한계 이내에 들도록한다.

$\varDelta f(=f_{max}-f_{min}) - f_a \le 0$ (3.11)

4. 수치계산에 및 고찰

4.1 기본가정

본 연구에서 설계하고자 하는 대상 구조물은 그림 4.1과 같이 단경간 RC라멘교로서 강도설계법에 의하고

사용성을 고려한 최적화문제를 형성하여 최적화를 시도하였다. 이때 사용한 재료의 설계강도 및 각 재료의 경비상수는 다음과 같다.

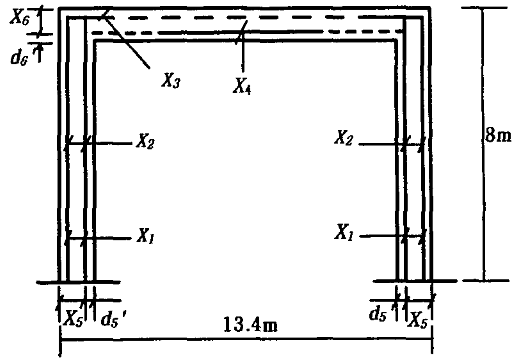

그림 4.1 단경간 RC라멘교

콘크리트의 설계기준강도	: f_{ck} = 270 kgf/㎠
철근의 항복강도	: f_y = 4000 kgf/㎠
콘크리트의 탄성계수	: Ec = 2.46×10^5 kgf/㎠
철근의 탄성계수	: Es = 2.0×10^6 kgf/㎠
콘크리트의 경비	: Cc = 44,440 ₩/㎥
철근의 경비	: Cs = 1.82×10^6 ₩/㎥
거푸집의 경비	: Cf = 3,298 ₩/㎡
적용하중	: 설계기준에 따라 활하중(DB-24, DL-24), 온도하중, 지점침하 등의 하중재하 및 하중경우를 조합하여 적용.

4.2 설계과정

설계과정은 구조물의 해석과 거기에서 얻어진 각 부재의 단면력에 대해 철근콘크리트 구조의 단면을 최적화 한다. 구조해석에서 얻어진 단면력을 이용하여 단면을 최적화하는 것이므로, 구조해석은 기존의 해석방법과 범용 구조해석 Package를 활용하면 된다. 각 부재의 최적화는 최적화 방법을 2장에서 언급한 최적화 방법을 이용하였다. 사용성을 고려한 철근콘크리트 뼈대구조의 단면을 최소 건설경비로 최적화하는 기본 알고리즘은 다음과 같으며 종합적인 Flow Chart는 그림 4.2와 같다.

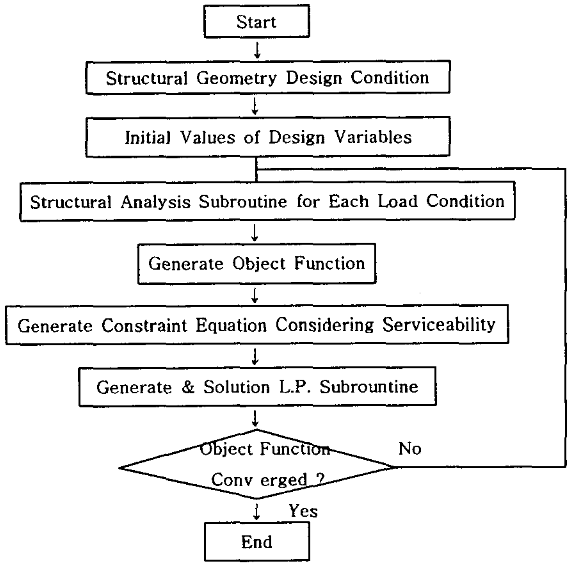

그림 4.2 flow chart

1) 구조물 Layout, 부재단면, 작용하중(강도설계법 및 허용응력설계법에 의한 하중조합) 등을 부여하여 구조물을 해석하고, 설계를 지배하는 단면력을 선택하며, 기타 필요한 값을 계산한다.
2) 설계변수로 나타나는 비선형의 목적함수, 강도 및 사용성을 고려한 제약조건식으로 정식화 한다.
3) 목적함수와 제약조건함수들의 경사도를 계산하여 LP(Linear Programming)부문제를 정의하고 문제를 해결한다.
4) 단계 1) 과 단계 3)을 되풀이하여 설계값이 수렴되면 그것이 최적해가 된다.

4.3 계산결과 및 분석

설계대상 구조물인 사용성을 고려한 RC라멘교에 대하여 최적화 결과의 타당성을 검토하기 위하여 재래적 설계방법에 의한 문헌의 결과와, 사용성을 고려하지 않은 경우에 대해 표 4.1에 표시하였다.

최적화 기법에 따른 최적해의 차이는 미소함을 알 수 있다. 기존의 설계법에 비해 최적설계의 경우 사용성을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 모두 경비를 상대적으로 줄일 수 있는 결과를 얻어 보다 작은 설계값을 취할 수 있음을 알 수 있다.

사용성을 고려한 경우는 고려하지 않은 경우에 비해 상대적으로 3~4%의 목적함수값이 증가하여 사용성 확보를 위해서도 단면의 치수 또는 철근비의 변동이 있음을 확인 할 수 있었다.

표 4.1 RC 라멘교의 부재단면 최적화 결과

Optimize Technic	Service ability	Object Value(×10^6)	Design Variables						Iteration No.
			X_1 (㎠)	X_2 (㎠)	X_3 (㎠)	X_4 (㎠)	X_5 (㎝)	X_6 (㎝)	
Initial Date		1.80564	40.00	40.00	40.00	40.00	80.00	80.00	-
SUMT	×	1.33911	24.50	22.75	25.57	28.93	63.07	63.40	9
	○	1.37977	24.50	22.75	25.72	37.59	63.15	63.72	10
ALMM	×	1.34843	27.11	22.75	25.53	28.88	63.20	63.08	3
	○	1.38825	24.50	22.75	25.54	39.59	63.42	63.57	4
SLP	×	1.33877	24.50	22.75	25.53	28.88	63.01	63.12	4
	○	1.37910	25.56	22.75	25.53	37.58	63.02	63.46	5
SQP	×	1.34013	24.55	22.83	25.58	28.90	63.06	63.06	12
	○	1.39466	25.22	23.05	26.52	37.54	63.35	63.67	10

최적해에 의한 대표적인 제약조건식의 계산결과를 나타내면 표 4.2와 같으며, 사용성을 고려한 경우에는 최적해의 주된 결정인자는 지점부 균열제약, 슬래브 중앙 휨강도 및 피로응력 순이었고, 사용성을 고려하지 않은 경우의 주된 결정인자는 슬래브 중앙에서 휨강도 입을 알 수 있다. 별로 영향을 미치지 않은 제약조건식은 슬래브와 벽체의 전단강도와 최대철근비로 나타났다.

표 4.2 제약조건식의 최적화 결과

Optimize Technic	Service -ability	Constraint Function										
		G1 (tf · m)	G2 (tf)	G3 (tf · m)	G4 (tf · m)	G5 (tf · m)	G6 (tf)	G7 (mm)	G8 (mm)	G9 (mm)	G10 (mm)	G11 (kgf/㎠)
SUMT	×	-0.091	-18.716	-0.096	-74.129	-37.939	-8.823	-	-	-	-	-
	○	-16.947	-18.716	-0.439	-74.129	-37.939	-8.823	-0.040	-0.005	-0.228	-0.174	-0.201
ALMM	×	0.002	-18.716	0.002	-74.141	-44.305	-8.826	-	-	-	-	-
	○	-20.768	-18.716	0.000	-74.135	-37.943	-8.825	-0.048	-0.003	-0.228	-0.174	-9.069
SLP	×	0.000	-18.717	-0.001	-74.147	-37.954	-8.828	-	-	-	-	-
	○	-16.936	-18.714	0.001	-74.184	-37.998	-8.840	-0.040	-0.003	-0.228	-0.174	-0.012
SQP	×	-0.077	-18.752	-0.163	-74.363	-38.224	-8.866	-	-	-	-	-
	○	-17.281	-19.156	-2.726	-76.496	-40.946	-9.102	-0.040	-0.013	-0.230	-0.180	-1.041

※ 슬래브 : G1, G2, G7, G8, G11 = 중앙점 휨강도, 지점 전단강도, 중앙점 균열, 지점균열, 중앙점 피로응력 제약
벽 체 : G3, G4, G5, G6, G9, G10 = 상단 휨강도, 중앙휨강도, 하단 휨강도, 하단 전단강도, 상단 균열, 하단 균열 제약

그림 4.3 및 그림 4.4는 각각 사용성을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 최적화 기법별 수렴곡선으로 변환법에서는 승수법이 직접탐색법에서는 SLP법이 최종 최적치에 잘 수렴함을 보이고 있으며, 이 중 본 적용례의 구조물에는 경험에 의한 개략치를 초기가정치로 택할 경우 SLP알고리즘이 상대적으로 안정적이며 우수함을 알 수 있었다.

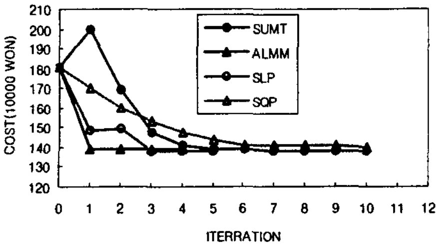

그림 4.3 경비에 대한 수렴곡선(사용성 미고려)

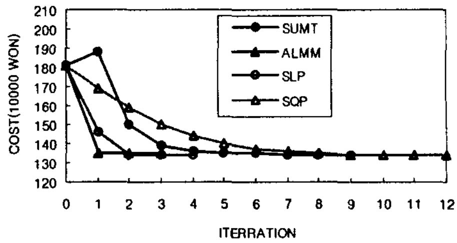

그림 4.4 경비에 대한 수렴곡선(사용성 고려)

5. 결 론

본 논문에서는 사용성을 고려한 RC뼈대구조물의 최적화 알고리즘을 제시하였고, 1경간 라멘교의 수치예를 통해 알고리즘의 효용성을 비교분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 반복작업에 의한 단면강도평가 후 사용성평가를 하는 순차적인 재래식 설계법에 비해 최적화 기법에 의한 단면강도 및 사용성을 동시 수행하는 설계법이 효율적이며 실무에 직접적인 적용이 가능함을 알 수 있었다.

2) 최적화 과정에 있어서 축차선형계획법(SLP)이 다른 최적화기법에 비해 최적해를 찾기 위한 반복횟 수가 4~5회에 지나지 않는 양호한 수렴성을 보였다.

3) 사용성을 고려한 경우든 고려하지 않은 경우든 재래적 설계법에 비해 경제적인 설계가 됨을 알 수 있었다. 또한 사용성을 고려한 경우가 상대적으로 3~4%의 목적함수값이 증하였는데, 사용성 확보를 위해서도 단면의 치수 또는 철근비의 변동이 있음을 확인 할 수 있었다.

4) 사용성을 고려한 뼈대 구조물에서는 기둥 또는 벽체에 비하여 슬래브부가 먼저 최적해에 접근하며, 슬래브의 주 제약조건은 지점부 균열, 중앙부 휨강도 및 피로응력 제약임이 규명되었다.

5) 별로 영향을 미치지 않은 제약조건식은 슬래브와 벽체의 전단강도 및 최대철근비이며, 이 제약조건이 없어도 반복 계산의 수렴회수나 최적해에는 전혀 영향이 없고, 최적해의 수렴속도가 현저하게 증가 되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1) 조효남, 박문호, 류연선, "구조물의 최적설계", 전산구조공학회 기술강습회교재, 1991
2) 건설교통부, 도로설계편람(교량), 2001.3, p.507-64
3) J. S. Arora, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, 1989
4) Carrol, C.W., "The Created Response Surface Technique for Optimizing Nonlinear Restrained System", *Operations Research*, Vol. 9, 1961, pp. 169-184.
5) James L. Kuester, Joe H. Mize, *Optimization Techiques with Fortran*, McGraw-Hill, 1973.
6) Fiacco, A.V.와 McCormick, G.P., *Nonlinear Programming : Sequential Unconstrained Minimization Techniques*, Jhon Wiley & Sons, 1968.
7) Hemp, W.S., *Optimum Structures*, Clarendon Press Oxford, 1973, pp.12~13
8) M. Fuknshima, "A Successive Quadratic Programming Algorithm with Global and Superlinear Convergence Properties", *Math. Programming*, Vol.35, 1986, PP.253~264.
9) Kirsch, U. *Optimum Structural Design*, Mc Graw-Hill, 1981
10) Vanderplants, G. N., "Structural Optimization Pas, Present, and Future", *AIAA Joural*, Vol.20, No.7, 1982, PP.992~1000.