한국전산구조공학회
1998년도 봄학술발표회 논문집

LRFD에 의한 강상판형교의 시스템 최적설계

System Optimization of Orthotropic Steel-Deck Bridges by Load and Resistance Factor Design

조 효 남* 정 지 승** 민 대 홍*** 김 현 우****
Cho, Hyo-Nam Chung, Jee-Seung Min, Dae-Hong Kim, Hyun-Woo

ABSTRACT

Recently, more and more steel deck bridges are adopted for the design of long span bridges and the upgrading of existing concrete deck bridges, mainly because of reduced self weight, higher stiffness and efficient erection compared to concrete decks. The main objective of this study is to propose on formulation of the design optimizations to develop an optimal design program required for optimum design for orthotropic steel-deck bridges. The objective function of the optimization is formulated as a minimum initial cost design problem. The behavior and design constraints are formulated based on the ASD and LRFD criteria of the Korean Bridge Design Code(1996). The optimum design program developed in this study consists of two steps. In the first step the system optimization of the steel box girder bridges is carried out. And in the second step the program provided the optimum design of the orthotropic steel-deck with close ribs. In the optimal design program the analysis module for the deck optimization is based on the Pelican Esslinger method. The optimizer module of the program utilizes the ADS(Automated Design Synthesis) routines using the optimization techniques for constrained optimization. From the results of real application examples, The cost effectiveness of optimum orthotropic steel-deck bridges designs based on both ASD and LRFD methods is investigated by comparing the results with those of conventional designs, and it may be concluded that the design program developed in this study seems efficient and robust for the optimization of orthotropic steel-deck bridges

1. 서론

현재 강교량은 콘크리트 덱에 비하여 사하중의 부담이 적고 강도가 더 크며 가설이 효율적이기 때문에 장대교량의 설계와 기존의 콘크리트 바닥판교량의 보강에 점점 더 많이 사용되고 있다. 강상판 설계는 보강부재의 단면과 가로보의 단면 및 가로보 사이의 간격을 설계자의 경험에 의해 적절한 값을 가정한 상태에서 설계과정을 수행하고 있기 때문에 반복작업으로 이루어지고 있다. 따라서 비효율적일 뿐만 아니라 노동집약적이다. 또한 허용응력설계법(ASD)에서는 재료의 허용응력에 안전율의 개념을 도입하여 구조물의 안전성을 도모하고 있다 그러나, 최근에는 하중저항계수법(LRFD)이라 하여 안전율을 하중의 모형, 재료의 강도, 구조물의 중요도 등에 따라 확률론적으로 결정하는 신뢰성에 기초한 설계법이 제안되고 있다. 그러나 아직까지도 설계자의 경험 및 직관에 의하여 설계가 이루어지고 있으므로 일관성 있는 신뢰성 수준을 기대하기 어렵다. 그러므로 구조물의 안전성 확보를 위해 각 설계법에 대한 일관성있는 신뢰성 수준의 확보 및 적절한 신뢰성 수준을 만족하면서 실무설계에 부합하는 실용적인 최적설계의 연구가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 강상판형교의 최적설계를 위하여 각 설계법에 따른 정식화 제안과 및 효율적인

* 한양대학교 토목·환경공학과 교수
** (주)삼보기술단 과장, 구조기술사
*** 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정
**** 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

설계방법을 제시하고 이를 이용하여 적은 시간과 노력을 들이면서 사용자가 원하는 안전도를 만족하는 자동화 최적설계를 수행하여 예비설계단계에서 행하고 있는 재래적 시행착오법을 과학적인 방법으로 극복하므로서 실무설계에서 단면선정 절차를 최적화 하면서 모든 설계기준과 제작, 시공상의 제약조건을 만족하는 보다 합리적이고 효율적인 설계를 제공하고자 한다. 강상판형교의 리브해석방법은 간편하면서 역학적 거동을 잘 나타내기 때문에 일반적으로 실무에서 널리 사용하고 있는 Pelican-Esslinger방법을 적용하였다. 또한 실제 예를 통하여 허용응력설계법(ASD) 및 하중저항계수설계법(LRFD)에 의한 최적설계시 강상판형교에 대한 설계변수의 선정, 시방서 규준에 따른 공비가 최소가 되기 위한 제약조건의 결정 및 공비에 대한 목적함수를 취하여 최적설계를 실시하며 기존의 시방서 규준을 만족하면서 충분한 안전성을 확보하는지의 여부 및 일반적인 설계와 비교한 공비의 절감효과를 검토하고자 한다.

2. 강상판형교의 시스템최적설계

본 연구에서 사용되는 강상판형교의 최적설계는 2단계로 나누어 수행된다. 1단계에서 우선 초기 단면치를 이용하여 사하중과 설계활하중에 대하여 연속보로 모델링된 구조해석을 수행하고 단면력의 포락선을 구한다. 이를 이용하여 설계자가 원하는 범위의 극히 제한된 제약조건을 가지는 하부플랜지 및 웨브의 두께를 설계변수로 하고 주형높이에 대한 최적화를 실시한다. 여기에서 나온 내·외측지간의 지점 및 중앙부 주형의 높이를 이용하여 포물선형상의 주형을 형성한다. 그리고 주형의 높이를 설계상수로 하여 하부플랜지 및 웨브의 두께를 최적화한다. 다음은 2단계로 주형의 단면력중 강상판에 가장 불리하게 작용하는 위치의 단면력을 선정하고 강상판에 대하여 Pelikan-Esslinger법에 의한 국부해석에서 나온 단면력을 조합하여 강상판 가로보와 리브의 간격 및 크기를 최적화 한다. 이때 강상판의 강성은 주형최적화에서 가정된 강상판의 강성보다 커야 주형최적화에서 나온 결과가 제약조건을 위배하지 않는다. 따라서 강상판강성에 대한 제약조건이 필요하다. 그리고 초기 가정한 구조시스템과 새로이 형성된 구조시스템은 구조강성이 다르므로 단면력의 재분배가 일어난다. 그러므로 재구조해석을 실시하여야 하며 위와 같은 과정은 수렴할 때까지 반복적으로 수행한다. 각단계의 최적화 과정과 이에 따른 각각의 구조해석방법을 그림 1에 나타내었다.

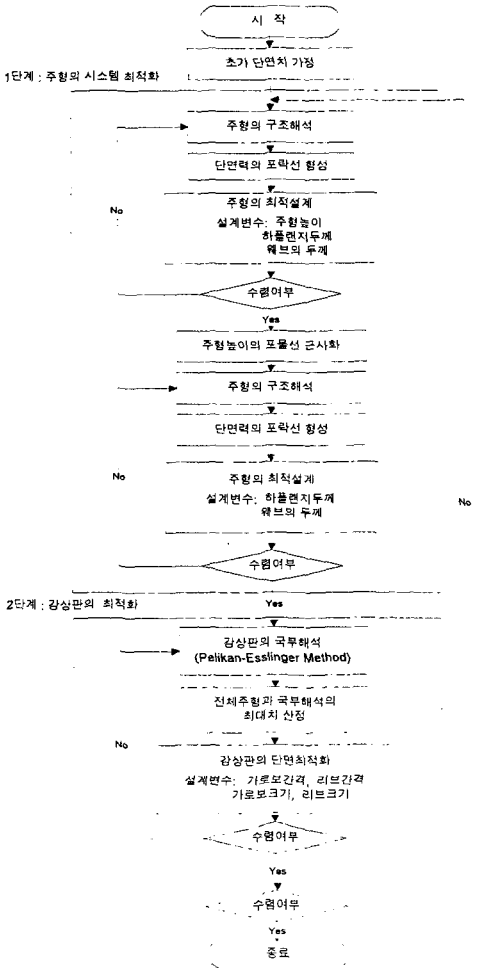
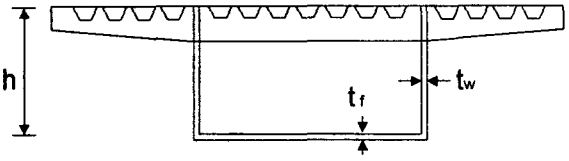


그림 1 강상판형교의 시스템최적설계

3. 강상판형교에 대한 최적화 문제의 정식화

3.1 설계변수

본 연구에서 강상판형교의 최적설계 과정을 2단계로 수행한다. 1단계는 그림 2와 같은 주형시스템에 대하여 설계변수를 각주형의 높이 하부플랜지 및 웨브의 크기를 최적화하여 균일한 안전율을 유도하는 변단면을 형성하게 하였고 2단계는 그림 3과 같은 형태의 강상판에 대하여 국부적인 하중효과와 주형전체의 하중효과를 고려한 가로보와 종방향리브의 크기 및 간격을 최적화한다.



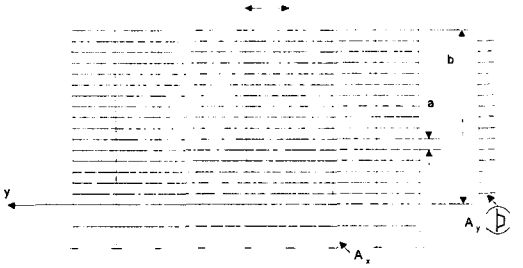


그림 2 주형의 시스템 최적화를 위한 설계변수 그림 3 강상판의 최적화를 위한 설계변수

3.2 목적함수

강상판형교의 최적설계에 대한 문제의 정식화 과정에서 가장 중요한 단계중의 하나는 단위 비용과 설계변수로 유도한 비용함수로된 목적함수의 모델링이다. 비용함수는 시공방법과 제작방법 등에 따라 다양하여 정확한 추정은 간단하지 않지만 인건비와 제작비가 재료비에 따라서 비례한다는 통계적 자료에 기초를 두고 목적함수를 재료비에 근거하여 모델링 하였다. 본 연구에서는 문제형성이 주형시스템과 강상판을 각각 따로 정식화하고 있으므로 이에 따른 비용함수도 식 (1)은 주형의 최적화에, 식 (2)는 강상판의 최적화를 위한 비용함수로 각각 정식화하였다.

$$F_{SYS}(\mathbf{X}) = C_s \sum_{j=1}^{m} W_j(X)_{steel} \tag{1}$$

$$F_{DECK}(\mathbf{X}) = C_c \cdot b\left(\frac{L}{\ell}+1\right)A_x + C_\ell \cdot L\left(\frac{b}{a}+1\right)A_y - C_p \cdot (Lb + \ell b + aL)t \tag{2}$$

여기서, $F_{SYS}(\mathbf{X})$=주형의 비용함수, C_s=강재의 단위중량당 비용, W_j=구조요소의 중량, $F_{DECK}(\mathbf{X})$=강상판의 비용함수, C_c=가로보의 단위비용, C_ℓ=세로보의 단위비용, C_p=덱플레이트의 단위비용, L=교량의 전장, l=가로리브의 간격, a=세로리브의 간격, b=상판의 폭, A_x=가로리브의 단면적, A_y=세로리브의 단면적, t=덱플레이트의 두께

3.3 주형의 시스템최적화에 대한 제약조건

ASD와 LRFD설계법에 의한 강상판형교의 최적설계에 대한 제약조건은 설계변수의 비선형 함수로 표시되는데 본 연구에서는 비교의 목적으로 도로교시방서의 ASD와 LRFD 설계기준을 제약조건으로 정식화하였다.

3.3.1 허용응력설계법에 의한 제약조건

1) 휨응력 : $g_1 \equiv \sigma_s - \sigma_{sa} \le 0$ (3)

여기서, σ_s=강재 휨응력, σ_{sa}=강재 허용응력

2) 전단응력 : $g_2 \equiv \tau_s - \tau_{sa} \le 0$ (4)

여기서, τ_s=강재의 전단응력, τ_{sa}=강재의 허용 전단응력

3) 합성응력 : $g_3 \equiv \left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 - 1.2 \le 0$ (5)

4) 국부좌굴 : $\frac{b_w}{24f_n} \le t_w$, $\frac{b_f}{24f_n} \le t_{lf}$ 인 경우, $\sigma_{bld} = \sigma_{sa}$ (6)

$\frac{b_w}{48f_n} \le t_w < \frac{b_w}{24f_n}$, $\frac{b_{tf}}{48f_n} \le t_{tf} < \frac{b_{tf}}{24f_n}$ 인 경우, $\sigma_{bld} = \sigma_{sa} - 39\left(\frac{b}{tf_n} - 24\right)$ (7)

여기서, σ_{bld}=국부좌굴에 대한 강재의 허용응력, $f = 0.65\left(\frac{\phi}{n}\right)^2 + 0.13\left(\frac{\phi}{n}\right) + 1.0$, $\phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1}$

σ_1, σ_2=각각 보강된 판의 양연의 응력, n=보강재에 의해서 나누어지는 패널의 수

5) 항복에 대한 안전도 검사 : $g_4 \equiv \sum\sigma - \sigma_y \le 0$ (8)

여기서, $\sum\sigma = 1.3(\sigma_{DB}+\sigma_{DA})+2.0\sigma_{LA}$, σ_{DB}, σ_{DA}= 1, 2차 사하중에 대한 응력

σ_{LA}= 합성후 활하중에 대한 응력, σ_y=강재의 항복응력

6) 설계변수의 한계

$$g_5 \equiv \frac{b_w}{220} - t_w \le 0 \ (9), \quad g_6 \equiv \frac{b_f}{48fn} - t_{cf} \le 0 \ (10), \quad g_7 \equiv \frac{b_f}{80n} - t_{tf} \le 0 \ (11)$$

3.3.2 하중저항계수설계법에 의한 제약조건

1) 설계 휨강도 : $g_1 \equiv \eta\sum\gamma_i M_i - \phi_f M_n \le 0$ (12), or $g_2 \equiv \eta\sum\gamma_i\sigma_i - \phi_f\sigma_n \le 0$ (13)

여기서, ϕ_f=휨에 대한 강도계수, M_n=공칭 휨 강도, σ_n=응력으로 표현된 공칭 휨 강도, γ_i=하중계수, $\eta = \eta_D\eta_R\eta_I > 0.95$, ϕ=강도감소계수, η=구조물의 중요도에 관련된 계수

i) 정모멘트 구간

a. 조밀단면으로된 연속보의 공칭 휨 강도 : $M_n = M_p$ (14)

b. 내측지간이 비조밀단면인 연속보의 정모멘트를 받는 조밀단면의 공칭 휨강도 : $M_n = 1.3R_hM_y$ (15)

c. 단상자 상부플랜지의 경우 : $\sigma_n = R_bR_h\sigma_{yf}$ (16)

d. 단상자 하부플랜지의 경우 : $\sigma_n = R_bR_h\sigma_{yt}\sqrt{1-3\left(\frac{\sigma_v}{\sigma_{yt}}\right)}$ (17)

여기서, R_b, R_h=플랜지 응력감소계수, σ_{yf}=플랜지의 설계 기준 최소 항복강도(MPa), σ_{yt}=인장 플랜지의 최소 항복강도, σ_v=플랜지의 최대 비틂전단응력(= $\frac{T}{2A_0t}$), T=설계하중에 의한 내부 비틂 모멘트(N-mm), A_0=상자형 단면의 내부 단면적(mm^2), t=판 두께(mm)

ii) 부모멘트 구간

a. 인장 플랜지의 공칭휨강도: $\sigma_n = R_bR_n\sigma_{yt}$ (18) 여기서, σ_{yt}=인장플랜지의 최소 항복강도 (MPa)

b. 압축플랜지의 공칭휨강도

$\frac{w}{t} \le 0.57\sqrt{\frac{kE}{\sigma_{yc}}}$ 이면 $\sigma_n = R_bR_h\sigma_{yc}$ (19), $\frac{w}{t} > 1.23\sqrt{\frac{kE}{\sigma_{yc}}}$ 이면 $\sigma_n = 26,200R_bR_hk\left(\frac{t}{w}\right)^2$ (20)

$0.57\sqrt{\frac{kE}{\sigma_{yc}}} < \frac{w}{t} \le 1.23\sqrt{\frac{kE}{\sigma_{yc}}}$ 이면 $\sigma_n = 0.592R_bR_h\sigma_{yc}(1+0.687\sin\frac{c\pi}{2})$ (21)

여기서, $c = \frac{1.23 - \frac{w}{t}\sqrt{\frac{\sigma_{yc}}{kE}}}{0.66}$, k=좌굴계수 (22)

n=1 일 경우: $k = \left(\frac{8I_s}{wt^3}\right)^{\frac{1}{3}} \le 4.0$ (23), n=2, 3, 4, 5 일 경우 : $k = \left(\frac{14.3I_s}{wt^3n^4}\right)^{\frac{1}{3}} \le 4.0$ (24)

σ_{yc}=압축플랜지의 최소항복강도(MPa), I_s=단부를 기준으로 수평보강재의 단면2차모멘트(mm^4)

w=수평보강재간의 압축 플랜지 폭과 복부로부터 가장 가까운 수평보강재까지의 거리 중 큰 값

t=압축플랜지의 두께(mm), n=등간격인 수평 보강재의 수

2) 설계 전단강도 : $g_3 \equiv \eta\sum y_i V_i - \phi_v V_n \le 0$ (25)

여기서, ϕ_v=전단에 대한 강도 감소계수, V_n=하나의 복부판에 대한 공칭전단강도(N)

i) 조밀단면을 갖는 복부 내부판 (보강된 복부판의 전단강도) (26),(27)

$M_u \le 0.5\phi_fM_p$이면 $V_n = V_p\left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1+\left(\frac{d_o}{D}\right)^2}}\right]$, $M_u > 0.5\phi_fM_p$이면 $V_n = RV_p\left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1+\left(\frac{d_o}{D}\right)^2}}\right] \ge CV_p$

여기서, $R = \left[0.6 + 0.4\left(\frac{M_r - M_u}{M_r - 0.75\phi_fM_y}\right)\right] \le 1.0$ (28), $V_p = 0.58\sigma_{yw}Dt_w$ (29)

M_u=설계하중에 의한 최대 패널모멘트(N-mm), V_n=공칭 전단강도(N), V_p=소성전단강도(N), M_r=설계 휨강도(N-mm), ϕ_f=휨에 대한 강도 감소계수, M_y=항복 휨모멘트(N-mm), D=복부높이, d_o=수직보강재의 간격(mm), C=전단좌굴응력대 전단항복강도의 비

$$\frac{D}{t_w} < \sqrt{\frac{Ek}{\sigma_{yw}}} \text{ 이면 } C=1.0 \quad (30), \quad 1.10\sqrt{\frac{Ek}{\sigma_{yw}}} \le \frac{D}{t_w} \le 1.38\sqrt{\frac{Ek}{\sigma_{yw}}} \text{ 이면 } C=\frac{1.10}{\left(\frac{D}{t_w}\right)}\sqrt{\frac{Ek}{\sigma_{yw}}} \quad (31)$$

$$\frac{D}{t_w} > 1.38\sqrt{\frac{Ek}{\sigma_{yw}}} \text{ 이면 } C=\frac{1.52}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2}\sqrt{\frac{Ek}{\sigma_{yw}}}, \quad k=5+\frac{5}{\left(\frac{d_o}{D}\right)^2} \quad (32)$$

3) 복부판 세장비 : $g_4 \equiv \frac{2D_c}{t_w} - 11.63\sqrt{\frac{E}{\sigma_c}} \le 0$ (33)

여기서, D_c=압축력을 받는 복부높이, t_w=복부판의 두께, σ_c=설계하중에 의한 압축플랜지 응력

3.4 강상판 최적화에 대한 제약조건

3.4.1 허용응력설계법에 의한 제약조건

1) 리브의 휨응력에 대한 제약조건

현행 도로교시방서에서 리브의 휨응력에 대한 기본식은 $\sigma+\sigma_m \le \sigma_{all}$이고, 이를 제약조건함수식으로 나타내었다.

$$g_i \equiv \frac{\sigma}{\sigma_{all}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{all}} - 1 \le 0 \quad (34)$$

여기서, σ =Pelikan-Esslinger방법에 의한 윤하중에 의한 리브의 응력 $\left(=\frac{(M_R+\Delta M_R)\cdot y_i}{I_R}\right)$ (35)

이때, σ_m=주형해석시 리브의 응력, σ_{all}=강재의 허용응력

$$M_R = Q_0 L \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \frac{8b}{(n\pi)^2}\frac{\eta_n}{L} \cdot \sin\frac{n\pi g}{H_L}\sin\frac{n\pi(a+e)}{2H_L} \quad (36), \quad \Delta M = \sum_{m=0}^{\infty} F_m \cdot \eta_{im} \quad (37)$$

i:1,2=가로보 사이의 중앙경간에서 리브상·하단, i:3,4=가로보지점에서 리브상·하단, y_i=각각의 리브의 중립축에서 연단거리, M=탄성 가로보 지지조건에서의 모멘트, H_L=패널간격, Q_0=덱의 단위길이당 하중, η_n= 모멘트에 대한 영향선의 종거, ΔM=강성 가로보 지지조건에서의 모멘트, P=하중, F_m=강지점상의 연속보가 하중 P를 받을 때 지점 m에 발생하는 반력, η_{im}=지점 i에 작용하는 휨 모멘트에 대한 탄성지점위에 놓인 연속보 m지점에서의 반력 영향선 종거

2) 가로보의 휨응력에 대한 제약조건

$$g_5 \equiv \frac{\sigma_{cross}}{\sigma_{c-all}} - 1 \le 0 \quad (38)$$

여기서, σ_{cross}=가로보의 휨응력, σ_{c-all}= 국부좌굴을 고려한 가로보의 허용응력(= $\sigma_{all} - 19(k\frac{1}{b}-8)$)

3.4.2 하중저항계수법에 의한 제약조건

1)전체 인장을 받는 강상판

$$g_1 \equiv \frac{P_u}{P_r} + \frac{M_{ur}}{M_{rr}} - 1.33 \le 0 \quad (39)$$

여기서, P_u=주형전체해석시 발생하는 바닥판의 축력(=$A_{d.eff}(\sigma_g^2+3\sigma_{vg}^2)^{0.5}$)

σ_g, σ_{vg}=바닥판의 전체 축방향 수직 및 전단응력, $A_{d.eff}$=종방향리브를 포함한 바닥판의 유효단면적(mm^2), P_r=바닥판의 유효폭을 고려한 바닥판의 공칭강도(N), M_{ur}=설계하중에 의한 종방향리브의 국부 휨 모멘트(N-mm), M_{rr}=연단의 항복도달을 기준으로 한 종방향 리브의 휨강도(N-mm)

2)전체 압축을 받는 강상판

$$g_2 \equiv P_u - P_{cr} \le 0 \qquad (40), \qquad g_3 \equiv M_{ur} - M_{rr} \le 0 \qquad (41)$$

여기서, P_{cr}= 양단 힌지로 지지된 기둥부재의 임계하중(= $\frac{\pi^2 EI}{4L^2}$)

3)폐단면 리브에 대한 단면 치수조건

$$g_4 \equiv \frac{t_r a^3}{t_{d,eff}^3 h'} - 400 \le 0 \qquad (42)$$

여기서, t_r=리브복부 두께(mm), $t_{d,eff}$=바닥판의 유효두께, a=리브복부 간격 중 큰 것(mm), h'=리브복부의 경사 길이(mm)

4)가로보와 상판의 설계 휨강도

$$g_5 \equiv \frac{M_{fb}}{M_{rb}} + \frac{M_{ft}}{M_{rt}} - 1.0 \le 0 \qquad (43)$$

여기서, M_{fb}=설계하중에 의한 가로보에 적용되는 모멘트, M_{rb}=가로보의 설계 휨강도, M_{ft}=인접리브로부터 전달되는 축하중에 의한 설계모멘트(N-mm), M_{rt}=강상판의 횡방향 설계휨강도(N-mm)

3.4.3 강상판의 휨강성에 대한 제약조건

1단계 주형최적화에서 이용한 강상판의 가정된 리브 및 강상판의 강성은 강상판 최적설계시 주형 최적설계보다 커야 주형 최적설계에서 수행한 휨응력 및 휨강도 제약조건을 위배하지 않으므로 ASD 및 LRFD에 의한 정식화에 공히 이에 대한 제약조건을 두었다.

$$g_1 \equiv I_1 - I_2 \le 0 \qquad (44)$$

여기서, I_1=주형 최적설계에서 사용한 강상판의 휨강성, I_2=강상판 최적설계시 강상판 휨강성

4. 최적화 기법 및 프로그램

강상판형교의 최적설계에서 목적함수와 제약조건들은 설계변수의 비선형함수로 표시되므로 비선형계획법이 된다. 비선형계획법에는 직접해법으로 설계가능방향(feasible direction)을 추적하며 해를 찾는 각종 가능방향탐사법(Feasible direction method)과 변환법으로 범칙함수(Penalty function)를 이용하여 무제약 최적화 문제로 변환하여 해를 구하는 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)이 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 허용응력설계문제에는 수렴속도가 빠르고 효율적인 SQP(Sequential Quadratic Programming)을 사용하였고 불연속적인 제약조건을 많이 포함하는 하중저항계수설계법에 의한 최적설계는 ALM(Augmented Lagrange Multiplier Method)와 변환된 무제약 최적화 문제를 Zero-order method에 해당하는 Powll의 방법으로 해를 구했다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 최적화에 사용된 프로그램은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis) [G. N. Vanderplaats:1985]를 이용하여 수행하였다.

5. 적용예 및 고찰

강상판형교 최적설계의 적용예는 정릉천변 도시고속도로 건설공사구간내에 설계차선은 3차선이고 1등교(DB-24, DL-24)에 해당하는 총연장 195m의 3경간 연속 강상판형교로 선정하였으며 그림 4와 5는 대상구조물의 종단면도와 횡단면도를 나타내었다.

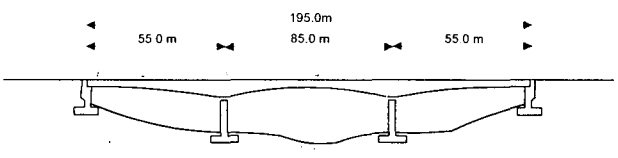


그림 4. 대상구조물 종단면도

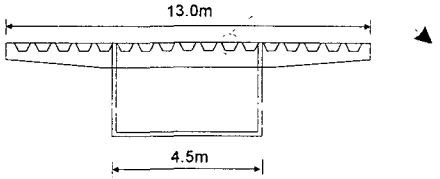


그림 5. 대상구조물 횡단면도

5.1 설계변수 및 단위경비

본 예제에서 사용한 강상판형교는 이미 일반적인 설계방법으로 설계된 구조물이므로 최적설계 결과와 비교하기 위하여 설계변수를 주형에 대하여 높이, 하부플랜지·웨브두께와 강상판에 대하여 가로보와 종방향리브의 간격 및 크기로 선정하였고 설계상수는 주형의 폭, 보강재의 크기 및 개수 그리고 강상판의 폭으로 선정하였다. 두께에 대한 최소치는 설계자가 원하는 범위를 정할 수 있고 여기에서는 상호비교의 목적으로 8mm를 선정하였다. 또한 연속보 모델의 주형해석은 5m 간격으로 절점을 나누어 총 40개의 절점을 가지는 구조해석 모델을 사용하였다. 또한 강재의 단위비용은 월간물가자료[1998년 1월호 No.278]를 참고하여 산정하였다.

5.2 수치해석 결과

본 연구에서 개발한 최적설계 프로그램을 사용하여 일반적 설계와 ASD와 LRFD설계법에 의한 최적설계를 수행하였으며 수치결과를 나타내었다. 주형의 높이를 결정하는 최적화과정에서 나온 주형의 높이를 구조물의 대칭성을 고려하여 절점 1~20까지만 그림 6과 표 1에 나타내었고 여기에서 나온 내·외측지간의 지점부 및 중앙부의 높이를 이용한 포물선 주형의 하부플랜지 및 두께를 최적화한 결과를 그림 7과 표 2에 나타내었다. 또한 강상판의 최적설계 결과를 표 3에 나타내었다. 시공성을 고려하여 수치는 의사이산형변수를 이용하였다.

표 1 주형높이에 대한 최적화 결과

설계법	위치 (단위:cm)	①외측지간지점부			②외측지간중앙부			③내측지간지점부			④내측지간중앙부			비용 (만원)
		하플랜지두께	웨브두께	주형높이	하플랜지두께	웨브두께	주형높이	하플랜지두께	웨브두께	주형높이	하플랜지두께	웨브두께	주형높이	
LRFD	계산치	0.8	0.8	158.3	0.8	0.8	209.0	0.8	0.83	415.2	0.8	0.8	326.6	5924
	설계치			210			210			420			330	
ASD	계산치	0.8	0.8	150.8	0.8	0.8	201.5	0.8	0.8	539.6	0.8	0.8	332.9	6045
	설계치			210			210			540			340	

표 2 포물선형상의 주형에서 최적설계 결과

설계법	위치 (단위:cm)	①외측지간지점부			②외측지간중앙부			③내측지간지점부			④내측지간중앙부			비용 (만원)
		하플랜지두께	웨브두께	주형높이	하플랜지두께	웨브두께	주형높이	하플랜지두께	웨브두께	주형높이	하플랜지두께	웨브두께	주형높이	
LRFD	계산치	0.8	0.8	210	0.8	0.8	210	0.89	0.88	420	0.82	0.8	330	6410
	설계치	***0.8***	***0.8***		***0.8***	***0.8***		***0.9***	***0.9***		***0.9***	***0.8***		***6957***
ASD	계산치	0.8	0.8	210	0.8	0.8	210	0.98	0.95	540	0.8	0.8	340	6767
	설계치	***0.8***	***0.8***		***0.8***	***0.8***		***1.0***	***1.0***		***0.8***	***0.8***		***7235***
일반적 설계		1.2	1.2	300	1.2	1.2	300	2.0	1.4	450	1.2	1.2	300	8264

표 3 강상판의 최적설계 결과

위치	설계변수 / 설계방법		가로보(cm)			종방향리브(cm)			비용 (천원/m)
			간격	웨브두께	플랜지두께	간격	높이	두께	
② 외측 지간중앙	최적설계	LRFD	761.7	0.8	2.7	255.7	42.3	0.8	554
		ASD	434.1	0.8	0.8	137.5	32.5	0.8	699
③ 내측 지간지점	최적설계	LRFD	826.7	0.8	3.3	276.7	38.1	0.8	547
		ASD	497.9	0.8	0.8	113.2	16.1	0.8	605
④ 내측 지간중앙	최적설계	LRFD	753.8	0.8	2.7	256.4	42.8	0.8	555
		ASD	430.6	0.8	0.8	137.5	32.9	0.8	718
설계치	***LRFD***		***500***	***0.8***	***2.6***	***200***	***44.0***	***0.8***	***723***
	ASD		***250***	***0.8***	***0.8***	***100***	***34.0***	***0.8***	***818***
일반적 설계			250	1.0	1.0	50.0	24.0	1.0	1076

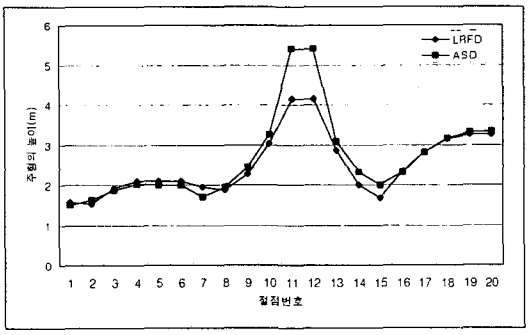


그림 6 주형의 높이의 최적화

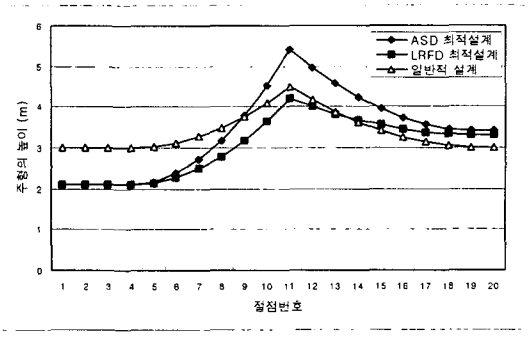


그림 7 포물선형상의 주형높이

5.3 최적해의 수렴성

강상판형교 최적설계에서 초기치의 변화에 대한 근접해로의 합리적인 수렴여부를 그림 8, 9, 10에서 나타내고 있다. 일반적인 설계치에 대해 80~150%까지 여러단계의 초기치 변화에도 불구하고 각 경우에 대해 비용의 변화가 없는 거의 동일한 근접 최적해를 주고 있다. 그러므로 제안된 최적화 기법에 대하여 얻어진 최적해는 신뢰도가 높고 효율적임을 알 수 있다.

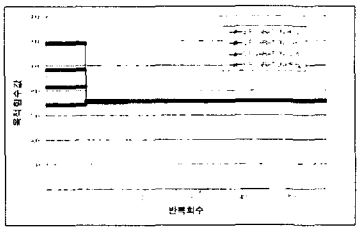


그림8 최적비용의 변화(ASD)

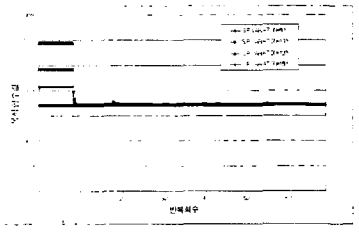


그림9 최적비용의 변화(LRFD)

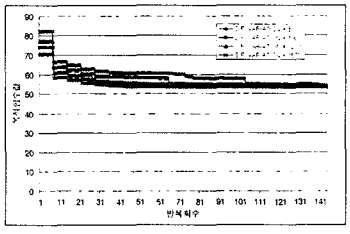


그림10 최적비용의 변화(강상판)

5.4 고찰

강상판형교 최적설계 프로그램을 이용하여 설계예를 통한 수치해석결과를 가지고 분석 및 고찰을 하여 보면 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ▶ 최적설계가 일반적인 설계보다 LRFD의 경우 18.8%, ASD의 경우 14.2%정도로 초기건설 재료비의 감소를 보이고 있어 시공방법이 동일하다면 매우 경제적인 설계를 유도하고 있음을 알 수 있다. 본 예제에서는 강재의 최소두께를 8mm로 산정하여 나온 결과이므로 실제설계에서는 이를 유동적으로 변화할 수 있으며 이에 따라 강재비용 감소효과가 다소 변화를 보일 수 있다.
- ▶ LRFD와 ASD에 의한 최적설계결과를 총강재의 재료비로 비교하여 보면 계산치의 경우 5.6%, 실제 설계치의 경우 약 4%정도 LRFD에 의한 최적설계가 경제적인 설계값을 주고 있다. 이는 LRFD가 하중과 저항의 관계를 신뢰성에 근거하여 일정한 구조신뢰도를 반영하려는 취지를 보여주고 있는 것으로 판단되며 향후 설계방법이 ASD에서 LRFD로 전환해야 할 것으로 보여진다.
- ▶ 주형의 높이는 내측지간지점부에서 일반적설계는 450cm, ASD최적설계에서는 540cm, LRFD최적설계에서는 420cm로 ASD최적설계가 다소 높이 나오고 있으나, 본 프로그램은 주형의 높이를 결정하는 최적화 과정에서 주형의 하부플랜지 및 웨브의 두께를 설계자가 원하는 두께의 범위로 정할 수 있으므로 주형의 최대높이를 설계자가 원하는 최적높이로 조절이 가능하다.
- ▶ 시공성을 고려하기 위하여 동일한 크기와 간격으로 강상판을 설계한다면 바닥판에 국부좌굴효과와 주형전체의 하중효과가 조합하여 가장 큰 단면력을 나타내고 있는 내측지간 중앙부에 대하여 전체 강상판을 설계하는 것이 바람직하다고 보여진다. 따라서 본 프로그램에서도 주형전체

최적설계시 내측지간 중앙부에 대한 강상판 가로보와 종방향리브의 단면적 및 간격을 이용하여 최적설계를 수행하고 있으므로 시공성을 고려한 안전한 설계라고 보여진다.

▶ 내측지간 중앙부에 대한 강상판의 설계치를 비교하여 보면 LRFD에서는 가로보의 간격이 넓고 단면적이 크게 유도되는 반면에 ASD에서는 가로보의 간격이 좁고 단면적이 작아지는 설계를 유도하고 있어 설계법간의 차이라고 볼 수 있다.

▶ 강상판의 종방향리브에 대한 최적설계치와 일반적인 설계치를 비교하여 보면 높이는 LRFD의 경우 44cm, ASD의 경우 34cm로 일반적인 설계치 24cm보다 다소 크게 나타나고 있으나 두께는 최적설계치 8mm, 일반적인 설계치 10mm로 최적설계치가 적게 나타나고 있으므로 향후 실제적인 설계에서는 리브의 국부좌굴을 고려하면서 높이는 크고 두께는 작은 설계가 바람직하다고 보여진다.

▶ 강상판형교의 최적설계의 경우 강상판은 위치에 따라 다양한 설계치를 제공하고 있어 시공성을 고려한다면 최대하중효과 부분에 대하여 설계를 수행하여야 하고 주형부재의 경우 구조해석과 최적설계에 많은 시간이 요구된다. 따라서 본 연구에서 제안하는 2단계 최적설계는 주형의 시스템최적설계의 경우 설계변수를 주형의 높이, 웨브 및 하부플랜지의 두께만을 선정하여 설계변수를 줄이면서 최적설계를 수행하여 효율성을 높이고 여기서 나온 정·부모멘트 최대위치에 대하여 강상판 최적설계를 수행한다. 따라서 강상판의 경우 주형의 정·부모멘트 최대부분에 대하여만 단면최적설계를 수행하고 이 중 가장 지배적인 단면을 설계치로 이용하므로 효율과 시공성 및 안전성을 고려한 최적설계라고 보여진다.

6. 결론

본 연구에서 개발한 강상판형교의 실용적 최적설계 프로그램을 실교량의 설계예에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 강상판형교를 최적설계로 수행하면 일반적인 ASD설계와 비교할 때 전체비용에 매우 큰 절감효과를 나타내므로 합리적이고 경제적인 설계를 제공한다.
2) 신뢰성에 기초한 합리적인 설계법인 LRFD에 의해 수행된 강상판형교의 최적화는 ASD 설계법과 비교하여 볼 때 비용절감효과를 나타내며 가까운 장래에는 LRFD 설계법으로 대체되어야 함을 알 수 있다.
3) 경제적이고 과학적인 전산화 설계가 요구되는 상황에서 해석이 까다롭고 설계자의 직관에 의해 오류를 발생하기 쉬운 강상판형교 단면형상 및 크기선정 단계에서 모든 설계기준, 제작, 시공상의 제약조건을 만족하면서 단면선정 과정의 최적화를 가능하게 하는 자동화 설계 시스템을 이용한다면 매우 효율적인 설계를 할 수 있다.

7. 감사의 글

본 연구는 (주)삼보기술단의 연구용역과제 '강상형교의 최적설계 프로그램 개발'의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

8. 참고문헌

1. AASHTO(1994), "AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS".
2. Garret N. Vanderplaats(1984), "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw-Hill.
3. Garret N. Vanderplaats(1985), "ASD: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis," Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.
4. HDR Engineering, Inc.(1996), "Four LRFD Design Examples of Steel Highway Bridges".
5. Haftka, R.T.(1992), "Elements of Structural Optimization," Kluwer Academic Publishers.
6. Jasbir S. Arora(1994), "Introduction to Optimum Design" McGRAW-HILL Book Co.

7. M.S. Troisky, D.Sc. "Orthotropic Bridges Theory and Design"
8. Pierre, D. A., and M. J. Lowe(1975), "Mathematical Programming via Augmented Lagrangians,' Applied Mathematics and Computation Series, Addison-Wesley, Reading, Mass.
9. Powell, M. j. D.(1981), "Optimization Algorithms in 1979," Committee on Algorithms Newsletter No. 5, Mathematical Programming Society, pp.2-16.
10. 건설교통부(1996), "도로교표준시방서".
11. 동부건설주식회사(1994), "정릉천변도시고속 도로 건설공사 구조계산서"
12. 小西一郎(1975), "鋼橋" 도서출판 건설도서
13. 조효남, 박문호, 류연선(1991), "구조물의 최적설계," 한국전산구조공학회.
14. 한국강구조공학회(1995), "강구조편람".