

2층도로용 강구조 텍 시스템의 최적설계

Optimum Design of Steel-Deck System for Two-Story Roads

조 효 남¹⁾ · 민 대 홍²⁾ · 김 현 우³⁾

Cho, Hyo Nam Min, Dae Hong Kim, Hyun Woo

요 약 : 최근 도심지의 극심한 교통체증의 해소를 위한 방안으로 2층도로 강구조 텍 시스템의 채택이 증가하고 있다. 그 주된 이유는 신속한 시공과 콘크리트텍에 비하여 자중의 감소효과가 크고 보다 큰 강도와 효율적인 가설이 가능하기 때문이다. 본 연구의 목적은 강구조 텍 시스템의 최적설계프로그램을 이용한 2층도로용 강구조 텍 시스템의 가장 합리적인 형식 결정에 관한 연구이다. 최적화의 목적함수는 최소 초기비용으로 정식화하였다. 설계 제약조건은 도로교시방서의 ASD설계기준에 맞추어 정식화하였으며 최적설계과정은 두 단계로 이루어져 있다. 첫 번째 단계는 박스 또는 플레이트주형에 대한 강구조 텍 시스템의 최적설계가 수행된다. 그리고 두 번째 단계에서 개단면 또는 폐단면리브를 갖는 강상판에 대하여 최적설계를 한다. 최적설계 프로그램의 구조해석은 주형에 대하여 격자해석 모델링을 이용하였고 강상판에 대해서는 Pelican-Esslinger법을 사용하였다. 최적화 기법은 SQP를 이용하였다. 적용 예의 각 형식별 강구조 텍 시스템의 최적설계 결과의 비교를 통하여 비용의 효율성을 검토하였고 폐단면리브를 가지는 직선 형상의 박스거더 형식이 가장 효율적이고 경제적으로 판단된다.

ABSTRACT : Recently, more and more steel-deck structural system for two story roads has been adopted as a solution against traffic congestion in urban area, mainly because of fast construction, reduced self-weight, higher stiffness and efficient erection compared to that of concrete decks. The main objective is to study on the unit-elective optimal type and proportioning of a rational steel-deck system for two story roads using an optimum design program specifically developed for steel-deck systems. The objective function for the optimization is formulated as a minimum cost design problem. The behavior and design constraints are formulated based on the ASD(Allowable Stress Design) criteria of the Korean Bridge Design Code. The optimum design program developed in this study consists of two steps - the first step for the optimization of the steel box or plate girder viaducts, and the second step for the optimum design of the steel-decks with closed or open ribs.

1) 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 교수
2) 한양대학교 토목환경공학과 박사과정
3) 한양대학교 토목환경공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 1999년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

A grid model is used as a structural analysis model for the optimization of the main girder system, while the analysis of the deck system is based on the Pelican-Esslinger method. The SQP(Sequential Quadratic Programming) is used as the optimization technique for the constrained optimization problem. By using a set of application examples, the rational type related to the optimized steel-deck system designs is investigated by comparing the cost effectiveness of each type. Based on the results of the investigation it may be concluded that the optimal linear box girder and deck system with closed ribs may be utilized as one of the most rational and economical viaducts in the construction of two-story roads.

핵심용어 : 최적설계 시스템, 2층도로 강구조 덱 시스템

KEYWORDS : Structural Optimization System, Steel-Deck Structural System for two-story roads

1. 서론

많은 교통량 수용을 위한 도로확충 방안을 구상할 때 강구조 덱 시스템은 기존도로의 확장과 신축하는 2층도로에 매우 우수한 구조형식으로 도심지의 교통체증을 최소화할 수 있고 공용수명이 길며 신속한 시공을 가능하게 하는 효율적인 구조시스템으로 잘 알려져 있다. 그러므로 날로 늘어나는 교통량의 수용을 위한 도시고가도로 형식에 적합한 2층도로 강구조 덱 시스템의 설계 및 시공에 최적의 형식 결정이 필요하다.

대표적으로 주거더의 형식에는 박스거더와 플레이트거더가 있다. 박스거더는 비틀림에 대한 저항이 크고 곡선부가 많은 도심지에 적합하고 세로리브 바닥판의 채택이 유리하여 대블록 가설이 용이하며 신속한 시공을 가능하게 하고, 플레이트거더는 소블럭의 제작이 용이하고 비틀림에 대한 저항은 작지만 응력상태가 명확하여 해석과정이 분명한 장점이 있다. 강상판의 덱형식은 대표적으로 개단면리브와 폐단면리브로 구분할 수 있는데, 이 두 가지 세로리브 형식사이의 강구조 덱 시스템의 거동을 비교, 고찰함으로써 국내 도로사

정 및 시공성을 고려한 최적의 형식에 대한 연구가 필요하다.

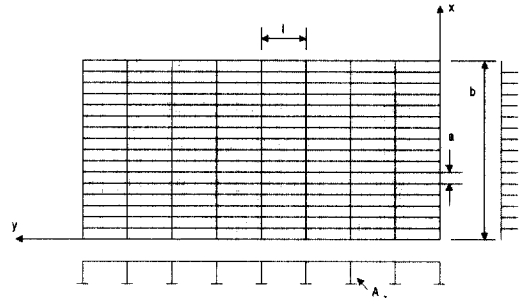
본 연구에서는 2층도로 강구조 덱 시스템의 형식결정을 위한 최적화를 위하여 각 형식에 따른 최적설계에 대한 정식화 방법을 제안하고 효율적인 설계방법을 제시하였다. 이를 이용하여 적은 시간과 노력을 들이면서 사용자가 원하는 안전도를 만족하는 자동화 최적설계를 수행하여 예비설계단계에서 행하고 있는 재래적 시행착오법을 합리적이며 과학적인 설계방법으로 전환시키고자 한다. 이에 따라 실무설계에서 형식결정과 단면선정 절차를 효율적이고 경제적으로 최적화하면서, 동시에 제반설계기준과 제작, 시공상의 모든 제약조건을 만족하는 보다 합리적이고 효율적인 설계를 제공하고자 한다. 그리고 실제적인 2층도로 강구조 덱 형식의 설계 예를 통하여, 주형은 박스거더와 플레이트거더에 대하여 강상판은 폐단면리브와 개단면리브에 대한 각 형식에 따라 설계변수를 선정하고 도로교시방서에 의한 허용응력설계법(ASD) 기준을 만족하면서 초기건설공비를 최소로 하는 2층도로 강구조 덱 시스템에 대한 형식별 경제성을 검토하고자 한다.

2. 최적화문제의 정식화

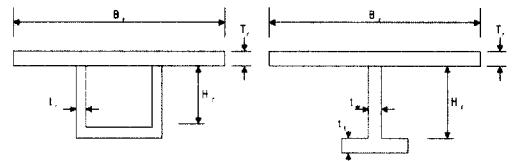
2층도로 강구조 텍 시스템에 대한 최적화문제를 위한 일반적인 정식화 과정의 구조형식에 관련된 보편적이고 일반적인 사항은 기본적으로 방대한 내용이므로 여기에서는 기술하지 않았다. 그러나 기존설계와 문헌⁽¹⁰⁾에 근거하여 외국에서도 최근에 가장 많이 시공되고 있는 구조형식중에 2층도로 강구조 텍에 가장 적합하다고 판단되는 박스거더와 플레이트거더의 주형 형식과 개단면리브와 폐단면리브를 갖는 강상판을 선정하여 정식화하였다.

2.1 설계변수

본 연구에서 2층도로 강구조 텍 시스템의 최적 설계 과정은 2단계로 수행한다. 1단계는 그림 1과 같은 박스형과 플레이트형의 주형시스템에 대하여 설계변수를 부재별 각주형의 높이(h), 하부 플랜지 및 웨브의 두께(t_r) 그리고 플레이트거더에 대해서는 하플랜지의 폭(B_f)이 추가되어 최적화함으로써 균일한 안전여유를 갖는 변단면의 형성이 가능하게 하였고, 2단계는 그림 2와 같은 개단면과 폐단면리브를 갖는 강상판에 대하여 국부적인 하중효과와 주형전체의 하중효과를 고려한 가로보의 간격(ℓ)과 웨브와 플랜지의 두께(T_r)

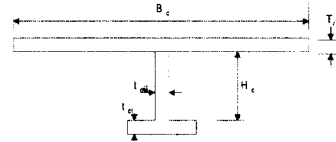


(a) 강상판 시스템



(b) 폐단면리브

(c) 개단면리브



(d) 가로보

그림 2. 강상판의 최적화를 위한 설계변수

그리고 종방향리브의 간격(a)과 웨브의 높이(H_r) 및 두께(t_w) 그리고 플랜지의 두께(t_r)를 최적화한다. 각 단계와 형식별 설계변수를 그림 1과 2에 나타내었다.

2.2 목적함수

2층도로 강구조 텍 시스템의 최적설계에 대한 문제의 정식화 과정에서 가장 중요한 단계중의 하나는 단위비용과 설계변수의 함수로 유도한 비용함수로 된 목적함수의 정식화이다. 비용함수는 시공방법과 제작방법 등에 따라 다양하여 정확한 비용추정은 간단하지 않을 뿐만 아니라 비효율적이므로 실무에서 사용하는 공비추정방법을 수정하여 '97년도 실시설계기준'[한국도로공사, 1997]을 바탕으로 실무경험에 기초한 실질적인 2층도로

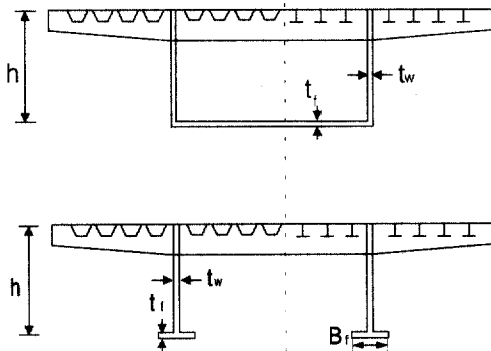


그림 1. 주형의 최적화를 위한 설계변수

강구조 텍 시스템의 상부공사비용에 대한 목적함수를 정식화하였다. 또한, 형식별 제작의 난이도와 실제재료의 비용을 형상에 따라 공비계수로 나타내었다. 2층도로 강구조 텍 시스템의 최적설계를 위한 주형과 강상판에 대한 비용에 대한 목적함수는 식 (1)과 (2)와 같다.

$$F(X)_M = \gamma_M \cdot C_M \cdot P \cdot \sum W_{Mi} \quad (1)$$

$$F(X)_D = \gamma_D \cdot C_D \cdot P \cdot W_D \quad (2)$$

여기서,

$F(X)_M$ = 주형의 비용함수

$F(X)_D$ = 강상판의 비용함수

WM_i = 주형의 i 번째 부재의 중량

$$W_D = A_x \cdot b \left(\frac{L}{\ell} + 1 \right) + A_y \cdot L \left(\frac{b}{a} + 1 \right) - (Lb + \ell b + aL)t \quad (3)$$

C_M = 주형의 단위비용 (= $C_M^M + C_M^L + C_M^W$)

C_D = 강상판의 단위비용 (= $C_D^M + C_D^L + C_D^W$)

C^M, C^L, C^W = 단위 재료비, 인건비 및 제작비

γ_M = 주형제작의 공비계수

γ_D = 강상판제작의 공비계수

P = 교량의 단위면적당 중량에 대한 보정계수

L = 교량의 전장

ℓ = 가로리브의 간격

a = 세로리브의 간격

b = 텍플레이트의 폭

t = 텍플레이트의 두께

A_x = 가로리브의 단면적

A_y = 세로리브의 단면적

2.3 주형의 최적화에 대한 제약조건

본 연구에서는 비교의 목적으로 도로교시방서의 ASD설계기준을 제약조건으로 정식화하였다.

1) 휨응력

$$g_1 \equiv \sigma_s - \sigma_{sa} \leq 0 \quad (4)$$

여기서, σ_s = 강재 휨응력

σ_{sa} = 강재 허용응력

2) 전단응력

$$g_2 \equiv \tau_s - \tau_{sa} \leq 0 \quad (5)$$

여기서,

τ_s = 강재의 전단응력

τ_{sa} = 강재의 허용 전단응력

3) 합성응력

$$g_3 \equiv \left(\frac{\sigma}{\sigma_a} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^2 - 1.2 \leq 0 \quad (6)$$

4) 국부좌굴

$$\frac{b_w}{24fn} \leq t_w \cdot \frac{b_f}{24fn} \leq t_f \text{ 인 경우,}$$

$$\sigma_{bid} = \sigma_{sa} \quad (7)$$

$$\frac{b_w}{48fn} \leq t_w < \frac{b_w}{24fn} \cdot$$

$$\frac{b_{tf}}{48fn} \leq t_{tf} < \frac{b_{tf}}{24fn} \text{ 인 경우,}$$

$$\sigma_{bid} = \sigma_{sa} - 39 \left(\frac{b}{tfn} - 24 \right) \quad (8)$$

여기서,

σ_{bid} = 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 양면의 응력
 n = 보강재에 의해서 나누어지는 패널의 수

5) 처짐

$$g_4 \equiv \Delta_{\max} / \Delta_a - 1 \leq 0 \quad (9)$$

여기서,

Δ_{\max} = 활하중에 의한 최대처짐

Δ_a = 허용처짐 (=L/500)

L = 경간장

6) 강재의 최소두께 규정

$$g_5 \equiv \frac{b_w}{220} - t_w \leq 0 \quad (10)$$

$$g_6 \equiv \frac{b_f}{48 f_n} - t_{cf} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_7 \equiv \frac{b_f}{80 n} - t_f \leq 0 \quad (12)$$

2.4 강상판 최적화에 대한 제약조건

1) 리브의 휨응력에 대한 제약조건

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

$$g_i \equiv \frac{\sigma}{\sigma_{all}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{all}} - 1 \leq 0 \quad (13)$$

여기서,

σ = Pelikan-Esslinger방법에 의한 유효하중에 의한 리브의 응력 $\left(= \frac{(M_R + \Delta M_R) \cdot y_i}{I_R} \right)$ (14)

σ_m = 주형해석시 리브의 응력

$$\sigma_{all} = \text{강재의 허용응력} \quad (15)$$

$$M_R = Q_0 L \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \frac{8b}{(n\pi)^2} \frac{\eta_n}{L} \cdot \sin \frac{n\pi x}{H_L} \sin \frac{n\pi(a+e)}{2H_L}$$

$$\Delta M_R = \sum_{m=0}^{\infty} F_m \cdot \eta_{im} \quad (16)$$

$i: 1, 2$ = 가로보 사이의 리브상 · 하단

$i: 3, 4$ = 가로보지점에서 리브상 · 하단

y_i = 각각의 리브의 중립축에서 연단거리

M = 탄성 가로보 지지조건에서의 모멘트

H_L = 패널간격

Q_0 = 텍의 단위길이당 하중

η_n = 모멘트에 대한 영향선의 종거

ΔM = 강성 가로보 지지조건에서의 모멘트

P = 하중

F_m = 강지점상의 연속보가 하중 P 를 받을 때 지점 m 에 발생하는 반력

η_{im} = 지점 i 에 작용하는 휨 모멘트에 대한 탄성지점위에 놓인 연속보 m 지점에서 의 반력 영향선 종거

2) 가로보의 휨응력에 대한 제약조건

$$g_5 \equiv \frac{\sigma_{cross}}{\sigma_{c-all}} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

여기서,

σ_{cross} = 가로보의 휨응력

σ_{c-all} = 국부좌굴을 고려한 가로보의 허용응력

$$\left(= \sigma_{all} - 19 \left(k \frac{l}{b} - 8 \right) \right)$$

k = 좌굴계수, b = 유효폭, l = 유효길이

2.5 강상판의 휨강성에 대한 제약조건

1단계 주형최적화에서 이용한 강상판의 가정된 리브 및 강상판의 강성은 강상판 최적설계시 주형 최적설계보다 커야 주형 최적설계에서 수행한 휨 응력 및 휨강도 제약조건을 위배하지 않으므로 이에 대한 제약조건을 두었다.

$$g_1 = I_1 - I_2 \leq 0 \quad (18)$$

여기서,

I_1 = 주형 최적설계시 사용한 강상판의 휨강성

I_2 = 강상판 최적설계시 강상판의 휨강성

3. 최적화 기법 및 프로그램

2층도로 강구조 텍 시스템의 최적의 형식을 결정하거나 표준화된 형식을 결정하기 위해서 본 연구에서는 그림 3과 같은 최적설계 시스템 [조효남, 1998]⁽¹⁴⁾을 이용하였다. 2층도로 강구조 텍 시스템의 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)가 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 수렴속도가 빠르고 효율적인 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 사용하여 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)과 다항식 보간법(Polynomial Interpolation Method)을 함께 이용하였다. 최적화에 사용된 프로그램은 여

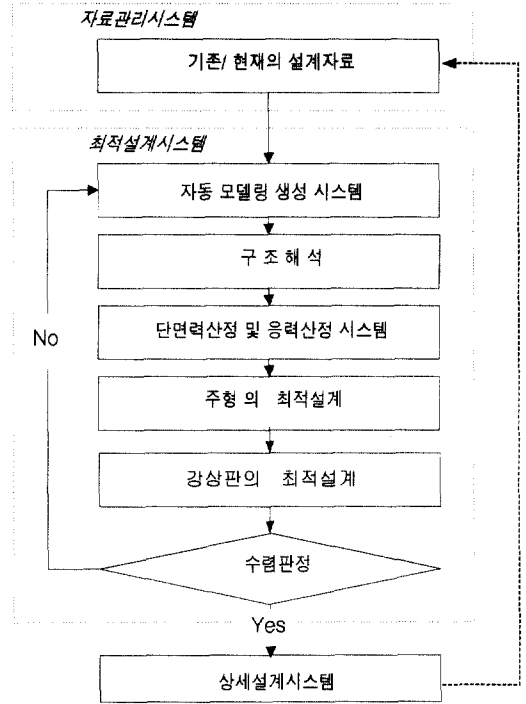


그림 3. 2층도로 강구조 텍의 설계시스템 기본 개념도

러 가지 최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis) [G. N. Vanderplaats :1985]를 이용하여 수행하였다. 주형의 최적설계를 위한 구조해석은 그 성능이 공인되어 설계실무에서 보편화되어 있는 SAP90-BRIDGE를 이용하였고 최적화 과정에서 변화되는 단면 특성치에 의한 새로운 SAP90-BRIDGE입력 데이터를 자동 생성하여 DB와 DL하중에 대한 포락선을 생성하고 여기에서 각 단면의 최대 단면력(모멘트, 전단력)을 자동 탐색하여 실제적인 최적설계를 수행할 수 있게 하였다.

4. 적용 예

본 연구에서 제안된 2층도로용 강구조 텍 시스템의 형식선정을 위한 최적설계문제의 타당성을 검증하기 위하여 실제적인 3경간 연속 2층도로

강구조 시스템을 선정하였다. 적용 예에 사용하게 된 교량은 설계차선은 3차선이고 1동교(DB-24, DL-24)에 해당하는 총연장 195m의 3경간 연속 강구조 텍 시스템으로 이루어져 있으며 그림 4와 5는 대상구조물의 종단면도와 횡단면도를 나타내었다. 주형형식은 박스형과 플레이트형식에 대하여 포물선형상과 직선형상에 대하여 최적설계를 수행하였다. 그리고 단면력이 크게 작용하는 내·외측지간의 지점부 및 중앙부에 대하여 개단면리브 또는 폐단면리브를 갖는 강상판의 최적설계를 수행하였다. 따라서 적용 예에 사용된 구조형식은 그림 5에 나타낸 경우를 포함하여 8가지가 된다.

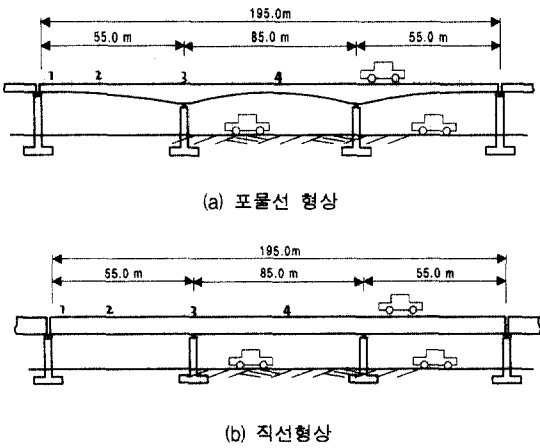


그림 4. 대상구조물 종단면도

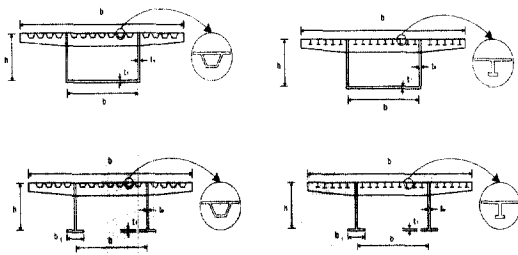


그림 5. 대상구조물 횡단면도

4.1 설계변수 및 단위경비

본 적용 예에서 사용한 2층도로 강구조 텍 시스템은 각 형식별 최적설계결과를 비교하기 위하

여 주형의 경우 설계변수는 높이, 하부플랜지·웨브두께로 정하였고, 포물선 형상일 경우 주형의 높이는 포물선 형상의 값을 갖는 설계상수가 된다. 강상판의 경우 설계변수는 가로보와 종방향리브의 간격 및 가로보의 웨브두께 가로보의 플랜지 두께 그리고 종방향리브의 웨브높이와 두께, 플랜지의 두께로 선정하였고 설계상수는 주형의 폭, 보강재의 크기와 강상판의 폭으로 선정하였다.

두께에 대한 최소치는 설계자가 원하는 범위를 정할 수 있고 여기에서는 상호비교의 목적으로 주형에 대해서는 시방서의 최소기준인 10mm와 강상판에 대해서는 8mm를 선정하였다. 또한 격자 모델에 의한 주형해석은 교축방향으로 5m 간격으로 나누어 거더당 39개의 부재로 나누어 변단면의 영향을 최대한으로 반영하는 구조해석 모델을 사용하였다. 또한 주형과 강상판의 단위비용 책정은 '97년도 실시설계기준'[한국도로공사, 1997]⁽¹⁶⁾과 설계실무자의 공비책정 경험에 바탕을 두고 주형과 강상판의 강재중량과 면적의 합수로 단위비용을 산정하였다. 그리고 교량의 설계변수로 이루어져있는 중량합수로 이루어진 단위비용과 설계실무자의 의견을 수렴하여 본 예제에 적합하다고 판단되는 공비계수를 주형이 포물선일 경우 1.1, 직선일 경우 1.0 그리고 강상판이 폐단면리브를 가질 때는 1.1, 개단면리브를 가질 때는 1.0을 사용하였고 교량의 단위면적당 중량에 대한 보정계수를 산정하여 비용합수를 형성하였다.

4.2 최적해의 수렴성

적용 예에 주어진 2층도로 강구조 텍 시스템의 최적화과정에서 최적해의 수렴성과 그 결과의 신뢰도를 알아보기 위하여 목적함수의 변화를 알아보았다. 초기치의 변화에 대한 합리적인 수렴성의 변화를 그림 6과 7에 나타내고 있다.

일반적인 설계치에 대해 80~150%까지 여러 단계의 초기치 변화에도 불구하고 각 경우에 대해 비용의 변화가 없는 거의 동일한 근접 최적해를

주고 있다. 그러므로 제안된 최적화 기법에 대하여 얻어진 최적설계 결과는 해의 신뢰도가 확보됨을 알 수 있다.

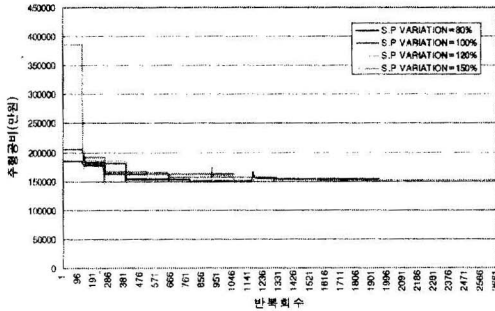


그림 6. 주형의 최적비용 변화

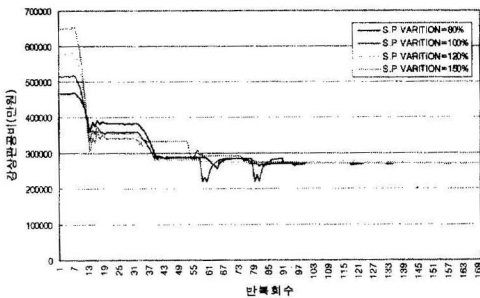


그림 7. 강상판의 최적비용 변화

4.3 수치 최적화 결과 및 고찰

최적설계 시스템 프로그램 [조효남, 1998]⁽¹⁴⁾을 사용하여 2층도로 강구조 텍 시스템의 형식별로 최적설계를 수행하였다. 주형의 높이를 결정하는 최적화 과정에서 구한 주형의 높이를 구조물의 대칭성을 고려하여 절점 1~20까지만 그림 8과 그림 9 그리고 표 1에 나타내었다. 또 이와 같이 구한 내·외측지간의 지점부 및 중앙부의 주형높이를 이용한 포틀선 주형의 하부플랜지 및 두께의 최적설계 결과를 표 1에 나타내었다. 그리고 적용교량의 외측지간중앙부, 내측지간지점부 그리고

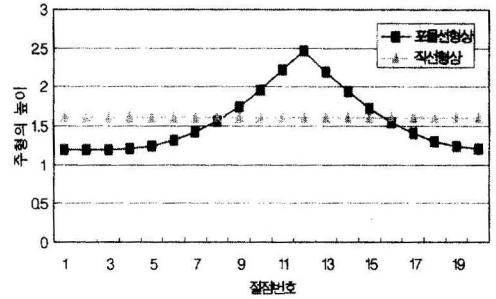


그림 8. 박스거더의 형상별 높이비교

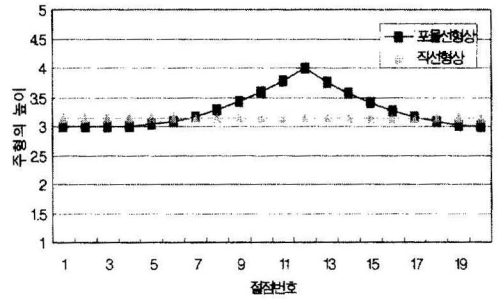


그림 9. 플레이트거더의 형상별 높이비교

내측지간중앙부에 대한 강상판(개단면리브, 폐단면리브)의 최적설계 결과를 표 2와 3에 나타내었다. 그리고 각 형식별 2층도로 강구조 텍 시스템의 상부공 공사비는 그림 10에 나타내었다.

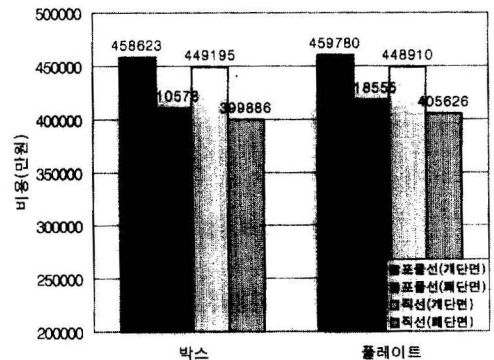


그림 10. 형식별 비용비교

표 1. 주형에 대한 최적설계 결과

주형형식	위치	설계변수 단위(cm)	주형형상	
			포물선	직선
박스	①외측지간지점부	하플랜지 두께	1.0	1.0
		웹브두께	1.0	1.0
		주형높이	120	160
	②외측지간중양부	하플랜지 두께	1.0	1.0
		웹브두께	1.0	1.0
		주형높이	142	160
	③내측지간지점부	하플랜지 두께	1.43	1.54
		웹브두께	1.15	1.59
		주형높이	219	160
	④내측지간중양부	하플랜지 두께	1.23	1.26
		웹브두께	1.0	1.0
		주형높이	121	160
플레이트	①외측지간지점부	하플랜지 폭	10.0	30.5
		하플랜지 두께	1.2	1.2
		주형높이	300	314
		웹브두께	1.2	1.2
	②외측지간중양부	하플랜지 폭	48.7	41.7
		하플랜지 두께	1.7	2.4
		주형높이	328	314
		웹브두께	1.2	1.2
	③내측지간지점부	하플랜지 폭	70.9	71.0
		하플랜지 두께	3.77	3.8
		주형높이	400	314
		웹브두께	1.2	1.8
	④내측지간중양부	하플랜지 폭	59.5	67.6
		하플랜지 두께	3.8	3.8
		주형높이	300	314
		웹브두께	1.2	1.2

표 2. 개단면리브를 갖는 강상판의 최적설계 결과

위치	설계변수		가로보(cm)			개단면리브(cm)				
	주형형식	간격	웹브두께	플랜지 두께	간격	웹브높이	웹브두께	하플랜지 폭	하플랜지 두께	
② 외측 지간중양	포물선	박스	447.7	1.0	1.0	96.1	16.0	0.96	4.6	1.5
		플레이트	450.2	1.0	1.0	96.0	16.0	0.95	4.7	1.5
	직선	박스	447.7	1.0	1.0	95.5	16.0	0.95	4.3	1.6
		플레이트	447.2	1.0	1.0	96.0	16.0	0.94	4.6	1.5
③ 내측 지간지점	포물선	박스	447.5	1.0	1.0	80.4	16.0	0.88	9.6	1.6
		플레이트	480.8	1.0	1.0	92.6	16.0	0.95	5.9	2.1
	직선	박스	447.3	1.0	1.0	80.1	16.0	0.89	9.5	1.6
		플레이트	480.6	1.0	1.0	95.9	16.0	0.95	6.0	2.3
④ 내측 지간중양	포물선	박스	441.3	1.0	1.0	91.1	16.0	0.95	4.1	2.2
		플레이트	444.2	1.0	1.0	92.6	16.0	0.92	5.9	1.7
	직선	박스	467.4	1.0	1.0	92.1	16.0	0.94	7.7	1.5
		플레이트	454.6	1.0	1.0	91.0	16.0	0.92	5.1	2.1

표 3. 페단면리브를 갖는 강상판의 최적설계 결과

위치	설계변수		가로보(cm)			페단면리브(cm)		
	주형	형식	간격	웹두께	플랜지두께	간격	웹높이	웹두께
② 외측 지간중앙	포물선	박스	572.0	1.0	1.0	110.0	16.2	0.8
		플레이트	570.9	1.0	1.0	129.8	17.2	0.8
	직선	박스	572.0	1.0	1.0	110.0	16.2	0.8
		플레이트	572.0	1.0	1.0	110.0	16.3	0.8
③ 내측 지간지점	포물선	박스	571.9	1.0	1.0	110.0	19.4	0.8
		플레이트	574.9	1.0	1.0	110.5	18.6	0.8
	직선	박스	572.0	1.0	1.0	110.0	19.3	0.8
		플레이트	573.5	1.0	1.0	110.3	18.7	0.8
④ 내측 지간중앙	포물선	박스	594.6	1.0	1.0	114.4	17.8	0.8
		플레이트	660.9	1.0	1.0	127.1	19.3	0.8
	직선	박스	589.1	1.0	1.0	113.3	19.3	0.8
		플레이트	580.5	1.0	1.0	111.6	18.2	0.8

표 1에 나타난 주형에 대한 최적설계결과에서 플랜지두께와 웹두께는 최소두께 하한치(1.0cm)로 수렴하여 최소공비를 갖도록 최적화되었고, 주형의 높이는 박스거더와 플레이트거더일 경우 모두 구조해석결과인 모멘트에 대한 포락선의 영향으로 내측지간지점부에서 최대높이(박스: 219cm, 플레이트: 400cm)를 나타낸다. 그리고 표 2와 3에 나타난 강상판에 대한 최적설계결과로부터 구조적으로 가장 취약한 부분인 내측지간지점부에서 휨에 대한 강성을 높이기 위하여 세로리브의 간격(개단면리브일 경우: 80.1cm 페단면리브일 경우: 110.0cm)이 좁아지는 것을 알 수 있다. 그리고 개단면리브를 갖는 강상판보다 페단면리브를 갖는 강상판에서 가로보의 간격(개단면리브일 경우: 447.3cm, 페단면리브일 경우: 571.9cm)이 더 넓어짐을 알 수 있다.

그림 8에 나타난 박스거더의 최적주형의 높이 결과를 보면 1.2m~2.5m높이 사이의 포물선 형상과 1.6m높이의 직선형상의 박스가 최적의 주형구조임을 알 수 있었고 그림 9에 나타난 플레이트거더의 경우는, 웹높이 3m~4m사이의 포

물선 형상과 3.16m높이의 직선형상의 판형이 최적 주형구조임을 알 수 있었다. 따라서, 박스주형이 플레이트주형보다 주형의 높이가 낮아 형고를 제한받는 2층도로 강구조 텍 시스템에 유리한 형식이라 판단된다.

형식별 비용비교를 나타내고 있는 그림 10으로부터 포물선형상의 박스거더주형에 강상판이 페단면리브일 경우는 410578만원으로 포물선의 플레이트거더주형에 개단면리브로 구성된 강상판을 갖는 경우인 459780만원 보다 약 15% 비용절감이 이루어졌다. 따라서 본 예제와 같은 설계조건과 공비산정기준에서는 직선의 박스주형에 페단면리브를 가지는 강상판형식이 형고 및 경제성측면에서 유리한 형식이라고 판단된다. 하지만 이러한 결과는 제작공정의 난이도 및 제작설비의 고도화에 따른 공비계수와 설계여건에 따라 다르게 나타날 수 있다.

그림 11은 본 예제에서 최적의 형식이라고 판단되는 직선 박스주형에 페단면리브를 가지는 2층도로 강구조 텍 형식을 기준으로 주형과 강상판의 형식이 바뀔으로써 추가되는 전체공비의 비율

을 나타낸 것이다. 강상판이 폐단면에서 개단면으로 바뀔으로써 11%의 추가비용이 발생하고 직선을 포물선으로 바꿀 때 8% 추가비용이 발생한다. 이는 강상판형식이 전체비용에 가장 큰 영향을 주는 요소로써 2층도로 강구조 텍의 형식을 결정할 때 경제성측면에서 가장 중요한 요소라고 보여진다. 따라서, 교량의 시공환경에 따라 변동은 있을 수 있지만 예비설계 단계에서 2층도로 강구조 텍 시스템의 형식결정을 할 때 그림 11과 같은 결과의 순서대로 비중을 두고 검토한다면 합리적인 형식결정을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

그리고 최적설계 수행결과 활성제약조건은 주형의 휨응력에 대한 제약조건으로 나타났다. 그러므로 강구조 텍 시스템의 설계시 휨응력에 대한 검토에 주의를 두어야 한다고 판단된다.

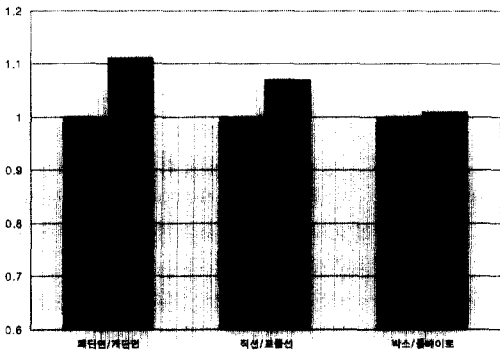


그림 11. 형식변화에 따른 전체비용의 변화율

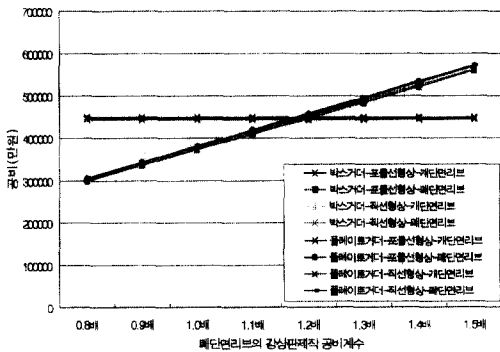


그림 12. 폐단면리브의 강상판제작 공비계수변화에 대한 전체비용의 변화

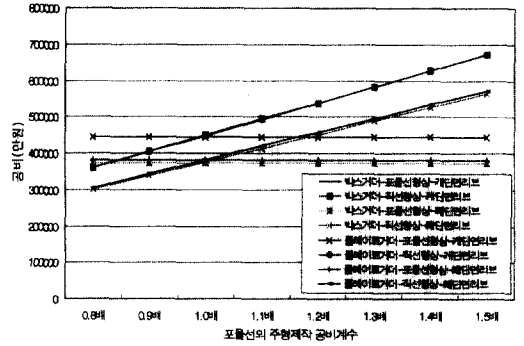


그림 13. 포물선의 주형제작 공비계수변화에 대한 전체비용의 변화

그림 12는 폐단면리브의 강상판제작 공비계수 변화에 대한 전체비용의 변화를 나타내는 것으로 개단면리브의 제작공비계수를 1.0이라고 하고 폐단면제작 공비계수를 0.8에서 1.5까지 변화시킴으로서 강상판제작 공비계수의 민감도를 나타내고 있다. 본 예제와 같이 강상판제작 공비계수를 개단면 일때 1.0, 폐단면 일때를 1.1이라고 하면 폐단면리브가 경제적이다. 하지만 제작작업여건상 폐단면리브제작 공비계수가 1.2가 되면 개단면리브와 폐단면리브의 공비가 같게된다. 마찬가지로 그림 13은 포물선의 주형제작 공비계수변화에 대한 전체비용의 변화를 나타내는 것으로 직선형상을 1.0이라고 보고 상대적으로 포물선형상의 제작 난이도를 고려하여 공비계수를 산정하는데 본 예제에서 사용한 직선 1.0, 포물선 1.1에 대해서는 직선형상이 경제적이지만 포물선형상의 제작공비계수가 각각 1.0이라면 비슷한 비용이 소모됨을 알 수 있다. 따라서 강상판형식과 주형의 형식을 결정하는데 있어서 제작 및 가설작업여건에 따른 상대공비를 제대로 고려하는 설계자의 판단이 중요한 요소임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 강구조 텍 시스템의 실용적 최적

설계 프로그램을 이용하여 여러 형식별 2층도로 강구조 텍구조의 설계에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1) 본 연구에서 사용한 예제를 통하여 각 형식별 초기공비를 검토한 결과 최적의 2층도로 강구조 텍 시스템의 형식은 형고가 낮고 경제적인 폐단면리브를 갖는 직선형상의 박스거더라고 판단된다.

2) 전체비용에 영향을 미치는 요인 중에는 가장 큰 요소는 강상판의 형식을 결정하는데 있으며 제작 및 가설작업여건과 난이도에 따른 상대공비에 따라 최적의 형식이 결정된다는 것을 알 수 있다.

3) 축적된 자료를 근거로 설계실무자의 판단과 실무경험을 바탕으로 한 교량의 제작환경에 적합한 공비계수를 Database화 하고 설계실무자가 직접 고려할 수 있는 사용자 중심(User Interactive)의 최적설계시스템을 이용하면 예비설계단계에서 2층도로 강구조 텍 시스템의 경제적인 형식을 결정하는데 효율적인 판단 기준을 제시하며 합리적인 설계결과를 얻을 수 있다.

감사의 말

본 연구는 포항제철 1996년 대학 철강분야 지원사업 관리번호(96025) "기존도로의 효율적인 확충방안으로서 2층도로 강구조 텍 시스템의 설계 및 시공에 관한 연구"의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

(1) Garret N.Vanderplaats(1984), Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill, pp. 1~203

(2) Garret N. Vanderplaats(1985), "ASD: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis", Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.

(3) Haftka, R.T.(1992), "Elements of Structural Optimization," Kluwer Academic Publishers, pp. 161~204, pp. 242~248

(4) Jasbir S. Arora(1994), "Introduction to Optimum Design" McGRAW-HILL Book Co, pp. 347~411

(5) M.S. Troisky, D.Sc. "Orthotropic Bridges Theory and Design", pp. 9-1~16-9

(6) 건설교통부(1996), "도로교표준시방서", 강교편

(7) 동부건설주식회사(1994), "정릉천변도시고속도로 건설공사 구조제안서"

(8) 小西一郎(1975), "鋼橋" 도서출판 건설도서, pp. 12~182, pp. 244~284

(9) 조효남(1997), "기존도로의 확충방안으로서 2층도로 강구조 텍 시스템의 설계 및 시공에 관한 연구", 포항제철 대학철강분야 지원 연구보고서, pp. 28~47, pp. 85~116

(10) 조효남(1997), "기존도로의 확충방안으로서 2층도로 강구조 텍 시스템의 설계 및 시공에 관한 연구", 강건재 학술발표회 논문집 6권

(11) 조효남, 민대홍, 김현우(1998), "강상판교의 폐단면리브의 단면 최적설계", 한양대학교 건설공학논문집, pp. 73~82

(12) 조효남, 박문호, 류연선(1991), "구조물의 최적설계", 한국전산구조공학회, pp. II-1~IV-48

(13) 조효남, 임종권, 민대홍(1997), "2층도로 강구조 텍 시스템의 설계 및 시공에 관한 연구", 토목학회 학술발표회 논문집(I), pp. 157~160

(14) 조효남, 정지승, 민대홍, 김현우(1998), "LRFD에 의한 강상판형교의 시스템 최적설계", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집 제11권 제1집, pp.262~271

(15) 한국강구조공학회(1995), "강구조편람", pp. 116~163

(16) 한국도로공사(1997), "97년도 실시설계기준"

(접수일자 : 1998년 7월 11일)