

# 강상판교의 다목적 최적설계

## Multi-Objective Optimization for Orthotropic Steel Deck Bridges

조 호 남<sup>1)</sup> · 정 지 승<sup>2)</sup> · 민 대 홍<sup>3)</sup>  
Cho, Hyo Nam · Chung, Jee Seung · Min, Dae Hong

요 약 : 본 연구는 강상판교량의 합리적인 설계를 위한 다목적 최적설계 방법을 제안하였다. 다목적 최적설계 방법은 기존의 제작비용만을 목적함수로 사용하는 최적설계와는 달리 제작비용과 처짐을 동시에 고려함으로써 보다 합리적인 설계를 유도하고자 하였다. 강상판교량은 많은 부재를 가지고 있고 구조거동이 복잡한 이유로 기존의 최적설계 알고리즘을 이용하면 매우 비효율적이다. 따라서, 매우 효율적인 다단계 최적설계를 이용하였다. 강상판교량의 합리적이고 경제적인 설계를 위해 최적의 제작비용과 처짐과의 관계를 파레토 곡선으로 표현하고 이를 이용하여 합리적인 설계 수준을 정하는 척도로 사용하였다. 이러한 방법은 기존의 단일목적 최적설계에 비해 매우 합리적인 설계결과를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT : This study proposed a multi-objective optimum design method for rational optimizing of orthotropic steel deck bridges. This multi-objective optimum design method was found to be effective in optimizing multi-objective problems, considering cost and deflection functions. It may be difficult to optimize orthotropic steel deck bridges using a conventional optimization, since the bridges have several parts and show complex structural behaviors. Therefore, the Pareto curve can be obtained by performing the multi-objective optimization for real orthotropic steel deck bridges, using the multi-level technique with excellent efficiency. A reasonable and economical design can be attained using the Pareto curve in the cost and deflection functions of the bridge. Thus, more reasonable design values can be determined based on a comparison with those using a conventional design procedure.

핵심용어 : 다목적 최적설계, 강상판교량, 파레토 곡선

KEYWORDS : Multi-objective optimization, Orthotropic bridges, Pareto curve

### 1. 서론

강상판교량은 미관이 수려하고 빠른 시공성을 가지고 있어 도심에 가로지르는 고가도로에 이용될 뿐만 아니라 자중이 가벼워 장경간 교량을 건설하는데 매우 유리하다. 하지만 단가가 비싼 강재를 주재료로 하기 때문에 초기 건설비용이 매우 고가일 뿐만 아니라 장경간 교량에 주로 사용되기 때문에 처짐과 같은 사용성이 매우 중요한 교량형식이다. 또한 강상판교량은 수많은 부재로 구성된 복잡한 구조적 거동으로 인하여 경제적이고 합리적인 설계를 수행하기가 매우 어려웠다. 따라서 비용을 줄이면서 처짐과 같은 사용성을 확보하는 효과적인 다목적 최적설계 방법의 도입은 필수적이다. 다목적함수

를 이용한 최적설계의 동향을 살펴보면 1896년 Pareto에 의해 다목적 최적화가 수행된 이래 다목적 최적설계는 이론에 중점을 둔 연구(Osyczka, 1984; Eschenauer, 1990; Ringuest, 1992)가 대부분을 차지하고 있었으며 최근에 들어 구조최적화에 대한 다목적 최적화방법이 몇몇 연구자(Saravanos, 1992; Grandhi, 1993)에 의해서 연구된 바가 있다. 특히 가장 최근에는 Chen(1999)이 뼈대구조물에 대한 효과적인 다목적 최적설계를 위하여 다단계 최적화 기법을 사용하였다. 이러한 다목적 최적설계는 두 가지 이상의 목적함수를 효과적으로 최적화하기 위한 방법에 중점을 두고 있어 실질적인 대형구조물에 적용하기가 매우 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 실질적인 강상판교량에 대한 제작비용과 처짐

1) 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수  
2) 정회원, 동양대학교 토목환경공학과 전임강사  
3) 정회원, 안산공과대학 토목과 겸임전임강사

본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

을 효과적으로 최적화 할 수 있는 최적설계 방법의 개발과 이를 이용한 실 구조물의 적용성 및 기존 설계방법과의 차이를 분석하고자한다.

## 2. 다목적 최적설계의 정식화

### 2.1 설계 변수

강상판교의 설계변수는 강상판교의 형고와 주형의 폭 등을 포함하는 전 구조요소의 크기를 사용 할 수 있으며 설계자의 판단에 따라 선택적으로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 강상형교의 건설공비와 구조적인 거동에 큰 영향을 주는 웨브의

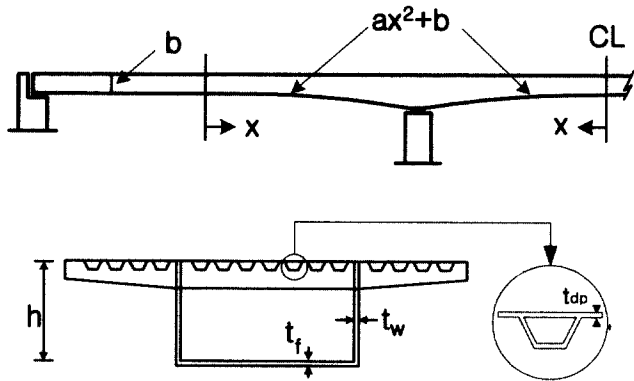


그림 1. 설계 변수

높이  $h(=ax^2 + b)$ , 웨브의 두께  $t_w$ , 하부 플랜지두께  $t_f$ , 상판 두께  $t_{dp}$ , 그리고 U리브의 타입을 설계변수로 하였다. 강바닥판의 설계변수는 전지간에 걸쳐 같은 설계단면을 가지므로 많은 설계변수를 갖지 않지만 주형은 교량의 전지간에 걸쳐 각기 다른 설계단면을 가지므로 많은 설계 변수를 갖는다. 최적화문제를 단순화하기 위해 주형의 설계변수를 줄이는 것이 유리하다. 주형의 설계변수를 줄이기 위해 두 가지 방법이 사용되었는데 하나는 설계변수 연결기법이고 다른 하나는 실용적으로 주형의 형상을 최적화 할 수 있는 포물선 정식화이다. 이는 각 단면마다 다른 높이를 하나의 식으로 나타내어 설계변수를 효과적으로 줄일 수 있을 뿐 아니라, 시공성도 보장되는 매우 효율적인 방법이다. 강상판교의 높이를 그림 1과 같이 포물선으로 표현하였는데 이것은 일반적인 설계에서 주로 사용되는 방식이다.

### 2.2 목적 함수

강상판교량은 강재를 사용함으로써 제작비용이 비쌀 뿐 아니라 장지간에 사용되는 구조물로서 치짐과 같은 사용성도 충분히 고려되어야 하는 설계특성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 최적설계에서 목적함수로 주로 사용되고 있는 제작비용뿐만 아니라 치짐도 고려하는 다목적 함수로 정하였으며 식 (1)은 이와 같은 다목적함수의 정식화를 나타낸 것이다.

표 1. 주형의 제약조건

	제약조건	기호설명
휨응력	$g_1 = \frac{f_s}{f_{sa}} - 1.0 \leq 0$	$f_s$ = 강재의 휨응력; $f_{sa}$ = 강재의 허용휨응력
전단응력	$g_2 = \frac{\tau_s}{\tau_{sa}} - 1.0 \leq 0$	$\tau_s$ = 강재의 전단응력; $\tau_{sa}$ = 강재의 허용전단응력
조합응력	$g_3 = \left(\frac{f_s}{f_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_a}\right)^2 - 1.2 \leq 0$	$f_s$ = 강재의 휨응력; $f_a$ = 강재의 허용휨응력 $\tau_s$ = 강재의 전단응력; $\tau_a$ = 강재의 허용전단응력
국부좌굴	$g_4 = \frac{f_s}{f_{bld}} - 1.0 \leq 0$	$f_{bld}$ = 허용국부좌굴응력
피로응력	$g_5 = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{fa}} - 1.0 \leq 0$	$f_{max}, f_{min}$ = 활하중에 의한 최대, 최소응력 $f_{fa}$ = 허용피로응력
치짐	$g_6 = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_a} - 1.0 \leq 0$	$\Delta_{max}$ = 활하중에 의한 최대치짐; $\Delta_a$ = 허용치짐(L/500)
강재의 최소두께 규정	$g_7 = \frac{b_w}{220} - t_w \leq 0, g_8 = \frac{b_f}{48fn} - t_{cf} \leq 0,$ $g_9 = \frac{b_f}{80n} - t_{tf} \leq 0$	$b_w, t_w$ = 복부폭과 두께 $b_f$ = 플랜지폭 $t_{cf}, t_{tf}$ = 인장, 압축플랜지 두께
강재의 최대두께 규정	$g_{10} = \frac{t}{t_{max}} - 1.0 \leq 0$	$t$ = 부재 두께

$$\text{Minimize} \{ f(x)_C, f(x)_D \} \quad (1)$$

여기서,

- $f(x)_C$  = 제작비용 목적함수 ( $f(x)_g + f(x)_d$ )
- $f(x)_D$  = 최대치짐 목적함수
- $f(x)_g$  = 주형의 비용함수 ( $p_g \cdot (C_g^m + C_g^w) \cdot \sum W_{gi}$ )
- $f(x)_d$  = 강상판의 비용함수 ( $p_d \cdot (C_d^m + C_d^w) \cdot W_d$ )
- $W_{gi}$  =  $i$  번째 주형의 부재 증량
- $W_d$  = 강상판의 증량
- $(A_y(D \cdot L \cdot n + A_x \cdot b \cdot (L/l - 1)))$
- $C_d^m, C_d^w$  = 강상판의 강재 및 제작 단가
- $C_g^m, C_g^w$  = 주형의 강재 및 제작 단가
- $p_g$  = 주형의 추가 강재 계수
- $p_d$  = 강상판의 추가 강재 계수
- $L$  = 교량 총 길이
- $l$  = 리브 간격
- $n$  = 리브 수
- $b$  = 바닥판의 폭
- $A_x$  = 가로보의 단면적(상판은 제외)
- $A_y$  = U형 리브의 단면적

### 2.3 제약 조건

#### 2.3.1 주형의 제약 조건

주형의 최적화를 위해 거동제약조건과 한계제약조건을 도로설계기준(2000)에 기초하여 표 1과 같이 정리하였다.

#### 2.3.2 강상판의 제약 조건

강상판의 제약조건은 국부적인 구조거동을 중심으로 거동 제약조건과 한계제약조건을 도로교설계기준(2000)에 기초하여 정식화하였다. 강상판의 설계제약조건은 표 2와 같이 정리하였다.

## 3. 최적설계 알고리즘

### 3.1 다단계 최적화 알고리즘

강상판의 설계에서 주로 사용되는 해석에는 격자해석과 Pelikan-Esslinger 방법이 있는데 기존연구(조효남, 1999)에 의하면 자동화 최적설계에 적합한 방법이 격자해석방법으로 알려져 있다. 이와 같은 격자해석방법은 주형의 전체적인 거동을 고려하는 주형에 대한 격자모델과 바닥판의 국부적인 거동을 해석하기 위한 바닥판 격자해석이 병행된다. 여기서 주형해석은 주형에 대한 격자에 이동하중조건을 이용하여 주형의 거동을 파악하고 바닥판해석은 바닥판에 가장 불리한 하중조건에 대하여 세밀한 격자해석을 수행하게 된다. 따라서 바닥판과 주형을 일체로 해석하지 않고 분리하여 해석하는 것이 최적설계 계산 비용면에서 매우 유리하다고 보여진다. 하지만 강상판교량은 바닥판과 주형이 구조적으로 분리되지 않고 상호작용을 하기 때문에 이를 적절히 반영할 수 있는 최적설계 알고리즘이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 격자해석에 근거한 강상판교의 효율적인 최적설계를 위해 다단계 최적화 기법인 등위법(coordination method)과 바닥판의 설계변수를 줄이고 기존의 상용 U-리브제품을 효과적으로 사용하기 위하여 분해법(decomposition method)을 적용하였다. 여기서 등위법은 주형과 바닥판을 각각 최적설계 하지만 주형을

표 2. 강상판의 제약조건

제약조건	기호설명	
U-리브 휨응력	$g_{11} = \frac{f_d}{f_{all}} + \frac{f_m}{f_{all}} - 1.0 \leq 0$	$f_d$ : 강상판 해석시 U-리브 응력 $f_m$ : 주형 해석시 U-리브 응력 $f_{all}$ : 강재의 허용응력
가로보 휨응력	$g_{12} = \frac{f_{cross}}{f_{cal}} - 1.0 \leq 0$	$f_{cross}$ : 가로보 휨응력 $f_{cal}$ : 국부좌굴을 고려한 가로보 허용응력
피로응력	$g_{13} = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_a} - 1.0 \leq 0$	$f_{max}, f_{min}$ : 최대응력과 최소응력
바닥판 가로보의 휨응력	$g_{14} = \frac{f_{cross}}{f_{bld}} - 1.0 \leq 0$	$f_{cross}$ : 가로보 휨응력 $f_{bld}$ : 국부좌굴을 고려한 가로보 허용응력
최소두께	$g_{15} = \frac{t_{mb}}{t_b} - 1.0 \leq 0, g_{16} = \frac{t_{mdp}}{t_{dp}} - 1.0 \leq 0$	$t_b, t_{mdp}$ : 가로보의 바닥판 최소두께 $t_b, t_{dp}$ : 가로보와 바닥판의 최소두께

표 3. 강상판에 대한 단면2차모멘트(I)와 단면적(A)의 관계

리브 종류	공식	범위	비고
320×240×6-40 I	$A=269.705-(6.156 \times 10^{-2} \times I) + (4.592 \times 10^{-6} \times I^2)$	$9444.377 \leq I < 11111.68$	
320×260×6-40 II	$A=307.510-(5.868 \times 10^{-2} \times I) + (3.857 \times 10^{-6} \times I^2)$	$11111.68 \leq I < 11848.64$	
320×240×8-40 III	$A=226.396-(3.636 \times 10^{-2} \times I) + (2.478 \times 10^{-6} \times I^2)$	$11848.64 \leq I < 13927.83$	
320×260×8-40 IV	$A=245.899-(3.339 \times 10^{-2} \times I) + (1.833 \times 10^{-6} \times I^2)$	$13927.83 \leq I < 19668.59$	

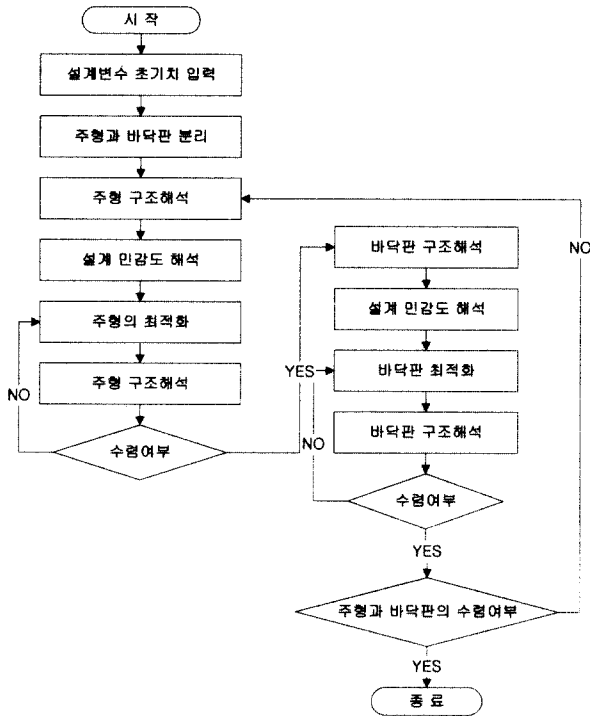


그림 2. 최적설계 알고리즘

최적화 할 때는 바닥판의 근사 최적점에서의 구조거동을 고려하고 마찬가지로 바닥판을 최적화 할 때는 주형의 근사 최적점에 대한 영향을 고려한다. 이는 수렴할 때까지 반복수행된다. 분해법은 바닥판에 대하여 U-리브의 대표적인 구조특성치인 단면2차모멘트를 설계변수로하여 구조 시스템 수준에서 최적설계를 수행하고 여기서 나온 결과를 이용하여 U-리브와 바닥판의 두께를 결정하는 요소수준의 최적설계를 수행한다. 이는 적은 설계변수를 가지고 바닥판 구조해석을 필요로 하는 시스템 수준의 최적설계를 수행한 후 설계변수는 많지만 구조해석이 필요 없는 요소수준의 최적설계를 수행함으로써 효율성을 높일 수 있게 하였다. 하지만 분해법에서는 목적함수를 계산하기 위한 단면적이 필요한데 설계변수가 단면 2차모멘트로 되어 있어 단면적과 단면 2차모멘트의 관계를 파악해야한다. 따라서 본 연구에서는 강상판교에 적용할 수 있는 U-리브의 시중제품의 종류가 제한되어 있다는 사항에 착안하여 현재 주로 사용되고 있는 형태인 폭 320mm U-리브에 대한 단면적(A)과 단면 2차모멘트(I)의 관계를 회귀분석을 통하여

결정하였다. 이에 대한 회귀분석결과는 표 3에 나타내었다. 또한 본 최적설계에 사용된 최적화 방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM (Augmented Lagrange Multiplier) 방법과 BFGS (Broydon-Fletcher-Goldforb-Shanno) 방법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS를 이용하여 수행하였고 구조해석은 SAP90을 사용하였다. 응력재해석은 무차 근사화기법으로 효율성을 높였으며, 처짐에 대해서는 선형근사화 방법(조효남, 2001)으로 설계민감도분석을 수행하였다. 다단계 최적화기법을 사용한 강상판교의 최적설계 알고리즘은 그림 2에 나타내었다.

### 3.2 다목적 최적화 방법

다목적 최적설계는 변량의 단위가 서로 다른 두 개이상의 목적함수 관계를 파레토 곡선을 이용하여 각각의 목적함수에 대한 영향을 표현하는데 기존에 주로 사용되던 방법은 가중계수(weighting factor) 방법이다. 하지만 강상판교의 다목적 최적설계에서는 처짐이 목적함수뿐만 아니라 제약조건으로도 사용되고 있어 보다 합리적인 방법인  $\epsilon$ -제약조건 방법을 사용하였다. 이 방법은 처짐이 지배적인 제약조건이 되는 설계공간에서 처짐의 변화에 따라 각각 제작비용에 대한 최적설계를 수행하여 제작비용과 처짐과의 관계를 파레토 곡선으로 표현함으로써 제작비용과 처짐과의 관계를 분명히 알 수 있다. 본 연구에서는 우선 비선형 수리계획법을 이용하여 제작비용에 대한 단일 목적함수를 가지는 최적설계를 수행한다. 이때 구한 처짐을 최대치의 범위로 사용한다. 그리고 처짐을 목적함수로 하는 최적설계를 수행하여 최대 제작비용을 산정하고 이때의 처짐을 최소처짐의 한계치를 사용한다. 이는 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 이러한 처짐의 상한치와 하한치를 근거로 한계범위 안의 처짐량을 제약조건으로 설정하고 제작공비에 대한 최적설계를 수행함으로써 처짐과 제작공비간의 파레토 곡선을 얻는다. 이러한 파레토 곡선은 공학적인 판단에 기초한 다목적 최적설계의 최적치를 결정할 수 있는 판단자료로 이용한다.

$$\delta_{\min} \leq \epsilon \leq \delta_{\max} \quad (2)$$

### 4.1 대상구조물의 일반사항

### 4. 적용에 및 고찰

본 연구에서 제안하는 강상판교의 다목적 최적설계 방법의 효과를 검증하기 위하여 기존의 최적화 방법인 제작비용만을 목적함수로 가지는 최적설계와 제작비용과 처짐을 동시에 고려하는 다목적 최적설계를 비교하였다. 실질적인 비교를 위하여 적용 대상구조물은 국내에서 최근에 설계된 실교량에 적용하였다.

대상구조물은 고금~마량간교, 정릉천교, 그리고 제 2 부산대교이다. 고금~마량간교는 3경간의 연속 강상판교량으로 1998년 10월에 설계되어 졌다. 정릉천교는 3경간 연속 강상판교량으로 서울 성동구에 위치해있으며 1994년 7월에 설계를 끝마쳤고 1997년 12월에 준공되었다. 제 2 부산대교는 4경간 연속 강상판교로써 부산 송도에 놓여있고 1997년 7월에 설계되었다. 이와 같은 대상구조물의 설계하중은 DL-24, DB-24이고 주부재의 강종은 SM490이며 설계그룹 및 단면도는 표 4에 제시하였다.

표 4. 대상구조물의 일반사항

	측면도 및 설계단면 그룹	대표 단면도
고금~마량교		
정릉천변교		
제 2 부산대교		

### 4.2 최적설계 결과 및 분석

대상구조물을 각각 제작비용만을 목적함수로 하는 최적설계 그리고 처짐과 제작비용을 동시에 고려하는 다목적 최적설계를 수행하고 기존의 설계결과와 비교함으로써 다목적 최적설계의 효과를 비교 분석하였다. 최적설계는 단단계 최적설계 알고리즘을 사용하였으며 실제적인 설계를 위하여 강판의 두께는 2mm 단위의 의사이산형 최적설계를 수행하였다.

#### 4.2.1 기존설계와 단일목적 최적설계

표 5는 각각의 대상구조물에 대한 일반적인 설계에 의한 기존설계 결과와 제작비용만을 목적함수로 하는 단일목적 최적설계의 결과를 나타낸 것이다. 여기서 최적설계를 위한 초기치는 기존설계결과를 이용하였다. 웨브의 높이는 2차 포물선 형상 ( $h = ax^2 + b$ )을 가지고 있어 각각의 계수를 설계 결과로 나타내었고 강판의 두께는 각각의 그룹별로 나타내었다.

표 5의 기존설계와 제작비용에 대한 단일목적 최적설계 결과를 제작비용과 처짐에 대해 각각 비교해 보면 기존설계에

비하여 최적설계를 수행하였을 때에 제작비용은 약 14%~19%정도 감소하는 효과가 있지만 처짐은 약 30%~66% 정도 증가함을 알 수 있다. 이러한 최적설계 결과는 모든 설계 시방서의 조건을 만족한 상태의 결과지만 일부 설계자는 이러한 처짐량 증가를 불만스럽게 여길 수도 있다. 그러나 이러한 처짐을 줄이기 위해 재 설계를 수행할 경우 처짐 감소량에 따른 제작비용의 증가량의 관계를 명확히 알 수 있어야 합리적인 설계를 유도할 수 있다.

#### 4.2.2 다목적 최적설계

본 연구에서는 처짐과 제작비용을 동시에 고려하는 다목적 최적설계를 위하여  $\epsilon$ -제약조건 방법을 사용하여 제작비용과 처짐에 대한 파레토 곡선을 얻었다.  $\epsilon$ -제약조건 방법을 수행하기 위하여 우선 각각의 대상구조물에 대한 제작비용과 처짐에 대한 단일목적 최적설계를 수행하여 의사결정 구간( $\epsilon$ )을 결정하였고 이점을 한계로 하여 처짐변화에 따른 제작비용의 최적설계를 수행하였다. 각각의 대상구조물에 대한 의사결정 구간과 추가적인 최적설계 결과는 표 6에 정리하였으며 이를

표 5. 기존 설계와 단일목적 최적설계 결과

구분			고금~마량교		정릉천변교		제 2 부산대교	
			기존설계	최적설계	기존설계	최적설계	기존설계	최적설계
주형	웨브그룹 (mm)	1	14	10	12	10	12	10
		2	12	10	12	10	14	10
		3	16	10	14	12	16	12
		4	12	10	12	10	14	10
		5	-	-	14	12	16	12
		6	-	-	12	10	-	-
		7	-	-	12	10	-	-
	하부플랜지 그룹(mm)	1	14	10	12	10	12	10
		2	18	10	16	10	18	10
		3	16	10	20	16	18	10
		4	18	10	16	10	26	12
		5	14	10	12	10	30	16
		6	18	10	14	10	26	12
		7	-	-	20	12	18	10
		8	-	-	14	10	24	12
		9	-	-	12	10	18	10
		10	-	-	-	-	26	16
	웨브높이(m)	a	$1.42 \times 10^{-3}$	$1.02 \times 10^{-3}$	$6.00 \times 10^{-4}$	$6.56 \times 10^{-4}$	$3.75 \times 10^{-4}$	$4.02 \times 10^{-4}$
		b	2.8	2.6	3.00	2.25	3.0	2.8
	강상판	두께(mm)	14	14	14	14	14	14
U형 리브형식		IV	I	III	I	III	I	
제작비용(×1,000원)			1,079,471	872,023	822,812	707,701	3,994,618	3,264,322
최대처짐(cm)			8.4	11.7	7.0	11.6	11.0	14.3

표 6. 다목적 최적설계 결과

교량	고금~마량교		정릉천변교		제 2 부산대교	
	처짐(cm)	비용(×1,000원)	처짐(cm)	비용(×1,000원)	처짐(cm)	비용(×1,000원)
No.1	6.3	1,257,457	4.9	908,659	7.5	5,104,662
No.2	6.9	1,040,996	6.0	832,390	8.9	3,995,614
No.3	8.2	950,581	6.9	773,120	10.0	3,427,172
No.4	10.0	888,034	8.9	718,631	11.9	3,303,662
No.5	11.7	872,023	11.6	707,701	14.3	3,264,322
$\epsilon$	$6.3\text{ cm} \leq \epsilon \leq 11.7\text{ cm}$		$4.9\text{ cm} \leq \epsilon \leq 11.6\text{ cm}$		$7.5\text{ cm} \leq \epsilon \leq 14.3\text{ cm}$	

근거로 파레토 곡선을 작성하여 그림 3~5에 나타내었다.

그림 3~5의 파레토 곡선을 이용하여 각각의 대상구조물의 일반적인 설계와 동일한 처짐에 대한 다목적합수 최적설계의 제작비용을 살펴보면 고금~마량교는 943,631천원, 정릉천변교는 770,369천원 그리고 제 2 부산대교는 3,362,167천원으로 일반적인 설계에 비해 각각 14%, 6% 그리고 16% 정도의 제작비용 감소효과를 기대할 수 있다. 또한 일반적인 설계에 소요된 제작비용을 가지고 다목적 최적설계를 수행하였을 경우 구조물의 최대처짐은 고금~마량교의 경우 6.8cm, 정릉천변교의 경우 6.1cm 그리고 제 2 부산대교의 경우 8.9cm로 각각 19%, 13% 그리고 11%의 처짐 감소효과를 가지는 구조물로 설계되었다. 이와 같은 결과는 기존의 일반적인 설계가 비효율적인 부재설계로 인하여 처짐은 크면서 제작비용이 비싼 비합리적인 설계라는 것을 보여준다. 따라서 보다 합리적인 설계점을 구하기 위해서는 그림 3~5와 같이 다목적 최적설계에서 구한 파레토 곡선상의 설계점으로 구조물을 설계하는 것이 필요하다.

일단 파레토 곡선상의 모든 점은 최적설계 후보점이 될 수 있으나 설계점 5번은 제작비용만을 목적함수로 하여 최적설계를 수행한 결과로 허용처짐 범위 안에서 과도한 처짐이 발생되더라도 제작비용의 감소효과만 있다면 나타나는 설계점으로 최대처짐이 발생하는 설계점이다. 따라서 제작비용과 처짐을 동시에 만족하는 설계점을 찾기 위해서는 파레토 곡선을 공학적으로 판단해야만 한다. 고금~마량교의 파레토 곡선에서 5번 설계점에 대한 4번 설계점의 제작비용 증가효과를 알아보면 16,011천원으로 1.8% 증가한 반면에 처짐은 10cm로 15% 감소효과를 나타내고 있다. 정릉천변교의 경우 파레토 곡선 상의 4번과 5번 설계점을 비교해 보면 4번의 설계점은 5번에 비해 제작비용은 1.5% 증가하지만 처짐은 23% 감소한 8.9cm를 나타낸다. 따라서 4번 설계점은 제작비용증가에 비해 처짐 감소 효과가 크므로 최적해로 고려할 수 있다. 제 2 부산대교의 경우 5번과 3번의 설계점을 비교해 보면 3번의 설계점은 5.0% 비용증가 효과가 있지만 처짐은 30% 감소한 10cm를 얻을 수 있다. 또한 4번 설계점을 5번 설계점과

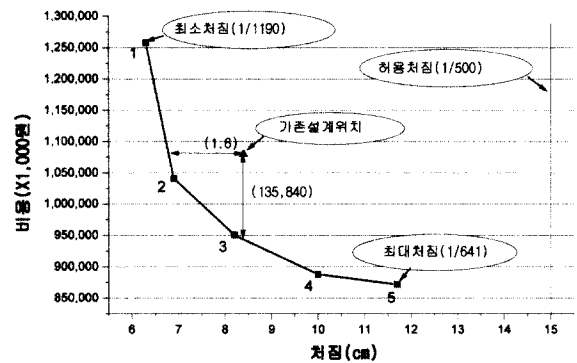


그림 3. 고금~마량교의 파레토 곡선

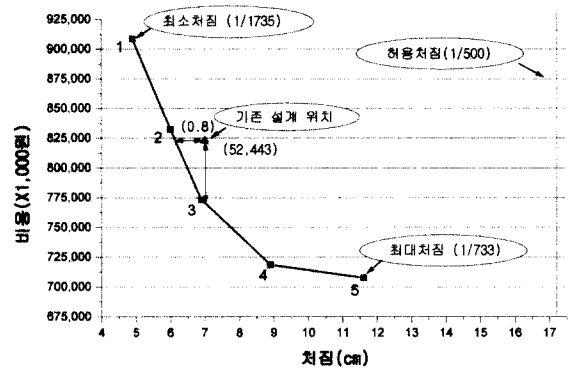


그림 4. 정릉천변교의 파레토 곡선

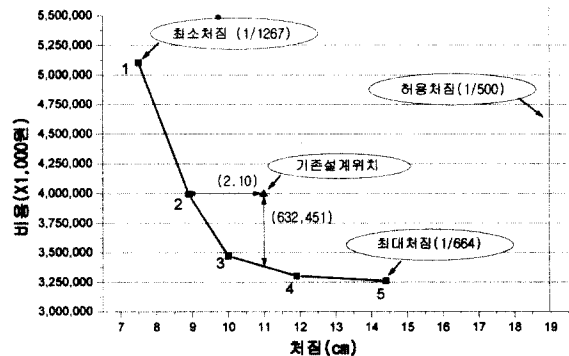


그림 5. 제 2 부산대교의 파레토 곡선

비교하여 보면 비용증가는 1.2%이지만 처짐은 17% 감소한 11.9cm이다. 따라서 3번과 4번 설계점은 제작비용 증가 효과에 비해 처짐 감소가 크므로 최적해로 고려할 수 있다. 이와 같이 제작비용 증가 효과에 비해 처짐감소가 큰 파레토 곡선상의 최적점을 설계점으로 선택함으로써 비용과 성능을 동시에 만족하는 설계를 얻을 수 있다. 또한 발주자의 요구 및 설계자의 의도에 따라 파레토 곡선상의 한 점을 최적설계점으로 결정할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 강상판교의 합리적인 최적설계를 위하여 제작비용과 처짐을 목적함수로 하는 다목적최적설계를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다목적 최적설계에서 구한 파레토 곡선과 기존의 일반적인 설계결과를 비교해볼 때 기존의 설계는 동일한 처짐 조건상에서 제작비용이 비싸거나 동일한 제작비용에 대해 처짐이 큰 구조물로 설계되고 있었다. 이는 구조부재의 비효율적인 배치로 인하여 발생하는 비합리적인 설계이다. 따라서 다목적 최적설계의 파레토 곡선상의 한 점을 설계점을 사용한다면 보다 합리적인 설계를 유도 할 수 있다.
- (2) 제작비용만을 목적함수로 사용한 최적설계 결과는  $\epsilon$ -제약조건 방법을 이용한 파레토 곡선의 최소비용 및 상한처짐 경계에 해당한다. 이는 구조물의 제작비용과 성능간의 관계를 무시한 극단적인 최소 제작비용에 대한 설계결과로서 보다 합리적인 설계를 위하여 공학적 판단에 근거한 다목적 최적설계가 필요하다.
- (3) 제작비용과 처짐을 동시에 고려하는 강상판교의 합리적인 최적설계는 발주자의 요구, 구조물의 성능 등을 설계자가 충분히 고려해서 설계를 수행하여야 한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 다목적 최적설계의 파레토 곡선을 공학적인 판단의 자료로 활용하여 최적설계를 수행한다면 경제적이고 구조물의 성능을 극대화 할 수 있는 합리적인 강상판교 최적설계를 수행 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 BK21 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Chen, W. F., Li, G., Zhou, R. G., and Duan, L. (1999). Multi-objective and Multi-level optimization for steel frames. *Engineering Structures*, 21, 519-529.
2. Eschenauer, H., Koski, J., and Osyczky, A. (1990). *Multi-criterion Design Optimization : Procedures and Applications*. Springer, New York, N.Y.
3. Grandhi, R. V. and Bharatram, G. (1993). Multiobjective optimization of large-scale structures. *AIAA Journal*, 31(7), 1329-1337.
4. Osyczka, A. (1984). *Multicriterion Optimization in Engineering with Fortran Programs*. Ellis Horwood Ltd.
5. Ringuest, J. L. (1992). *Multiobjective Optimization : Behavior and Computational Considerations*. Kluwer Academic, Norwell, MA.
6. Saravanos, D. A. and Chamis, C. C. (1992). Multi-objective shape and material optimization of composite structures including damping. *AIAA Journal*, 30(3), 805-813.
7. Vanderplaat, G. N. (1985). "ADS-A Fortran Program for Automated Design Synthesis, version 1.10.", Engineering Design Optimization Inc., Santa Barbara, California.
8. 건설교통부. 강도교 상세부설계지침(1997).
9. 사단법인 도로교통협회. 도로교설계기준(2000).
10. 사단법인 한국물가정보. 종합물가정보(2000).
11. 정지승(1999). "강바닥판교의 다단계 다목적 최적설계", 박사학위논문, 한양대학교.
12. 조효남, 정지승(1999). "효율적인 재해석기법에 의한 강상형교의 최적설계", 한국강구조학회논문집, 11(5), 539-548.
13. 조효남, 정지승, 민대홍(1999). "자동화 설계를 위한 강상판교의 해석모델", 한국강구조학회 논문집, 11(4), 363-372.
14. 조효남, 정지승, 민대홍(2000). "강상자형교의 자동화 최적설계 프로그램", 한국강구조학회 논문집, 12(5), 475-485.
15. 조효남, 정지승, 민대홍(2001). "강상판교의 다단계 최적설계", 한국전산구조공학회 논문집.

(접수일자 : 2001년 12월 20일)