

강상판교의 다단계 최적설계

Multi-level Optimization for Orthotropic Steel Deck Bridges

조 호 남* 정 지 승** 민 대 흥***
Cho, Hyo-Nam Chung, Jee-Seung Min, Dae-Hong
(논문접수일 : 2001년 2월 21일 ; 심사종료일 : 2001년 6월 9일)

요 지

강상판교는 부재수가 많고 구조적 거동이 복잡하여 재래적인 단일수준 (CSL) 알고리즘을 이용하여 최적화하는 것이 매우 어렵기 때문에 본 연구에서는 강상판교를 효율적으로 최적화하기 위해 다단계 최적설계 (MLDS) 알고리즘이 제안되었다. 강상판교를 주형과 강상판으로 나누기 위해 등위법이 사용되었고, 시스템 최적화를 위하여 설계 변수를 줄이는 분해법이 사용되었다. 효율적인 최적설계를 위해 다단계 최적설계 알고리즘은 제약조건 소거기법(Constraint Deletion)과 응력 재해석 같은 근사화 기법을 도입하였다. 변위해석을 위한 제약조건 소거기법은 교량의 최적화에 효율적인 것으로 검증되었고, 제안된 응력 재해석 기법 또한 설계민감도 해석을 필요로 하지 않으므로 매우 효율적이다. MLDS 알고리즘의 적용성과 강건성은 다양한 수치예제를 사용하여 기존의 단일수준 알고리즘과 비교하였다.

핵심용어 : 강상판교, 최적화, 다단계 설계, 근사화 기법

Abstract

A multi-level design synthesis(MLDS) algorithm for efficiently optimizing orthotropic steel deck bridges is proposed in the paper, because it is very difficult to optimize orthotropic steel deck bridges using a conventional single-level(CSL) algorithm since the bridges have a large number of members and show complex structural behaviors. In the proposed MLDS algorithm a coordination method is introduced to divide the bridges into main girders and orthotropic steel decks and decomposition method is also used to reduce the number of design variables of the decks for system level optimization. For efficient optimization of the bridges the MLDS algorithm incorporates the crucial approximation techniques such as constraints deletion and stress reanalysis. The constraint deletion technique for deflection is found to be very useful for the optimization problem of the bridges. The proposed efficient stress reanalysis technique is also found to be very effective for the complex system optimization problem, since it does not require expensive design sensitivity analysis. The applicability and robustness of the MLDS algorithm is demonstrated using various numerical examples and compared with other algorithm presently available.

Keywords : orthotropic steel deck bridge, optimization, approximation technique

1. 서 론

강상판교는 일반교량에 비해 내하력이 크고 자중이

적기 때문에 일반적으로 장경간 교량에 유리할 뿐만 아니라 도심지에서 신속한 공사와 미관에 대한 이점을 가지고 있다.

* 한양대학교 토목환경공학과, 교수
** (주)송현 알앤디, 이사, 공학박사
*** 한양대학교 토목환경공학과, 박사수료

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 9월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

그러나 강상판교는 수천개의 부재와 요소가 연결된 복잡한 구조물이기 때문에 설계가 난해하다는 단점을 가지고 있어 구조특성에 적합한 효율적인 최적화 알고리즘을 개발하는 것은 어려운 일이다. 따라서 강상판교에 효과적으로 적용할 수 있는 최적화 알고리즘의 개발은 필수적이다. 최근 강교량에 대한 최적설계의 연구는 Dhillon과 Kuo(1991)가 AASHTO시방서(1983)의 하중저항계수 설계법에 기초한 합성 I거더의 최적설계를 수행하였고 Memari(1991)은 하중의 영향면을 결정하기 위해 3차원 유한요소 모델을 이용하여 플레이트 거더교의 최적화를 수행하였다. AI-Shaleh(1994)는 AASHTO시방서(1993)에 기초한 강상자형교의 최적설계 기법을 연구하였다. 국내에서는 도로교설계기준(2000)에 기초한 강상자형교의 최적설계(조효남, 2000)가 수행된 바 있다. 이와 같은 최적설계(Conventional Single Level : CSL) 알고리즘은 플레이트 거더교나 강상자형교와 같이 바닥판이 콘크리트로 구성되어 있는 교량에 적합하게 개발되어 있어 강바닥판의 거동이 복잡하고 많은 부재와 제약조건들로 구성되어 있는 강상판교량의 설계조건에 매우 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 강상판교에 효과적으로 적용할 수 있는 다단계 최적설계(Multilevel Design Synthesis : MLDS) 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 문제의 정식화

2.1 설계변수

강상판 교량은 바닥판과 주형이 각기 다른 구조적인 특성을 가지고 있어 설계변수를 각기 바닥판과 주형에 대해서 결정하였다. 바닥판은 전 지간에 걸쳐 같은 설계 단면을 가지므로 많은 설계변수를 갖지 않지만 주형은 교량의 전 지간에 걸쳐 각기 다른 설계단면을 가지므로 많은 설계 변수를 갖는다. 따라서, 최적화 문제를 단순화하기 위해 주형의 설계변수를 줄이는 것이 유리하다. 강상판교 주형단면의 설계변수는 그림 1에 보인 바와 같이 하부플랜지 두께, 복부 두께, 거더의 높이로 구성하였다. 여기서, 주형의 설계변수를 줄이기 위해 두 가지 방법이 제안되었는데 하나는 설계변수 연결기법이고 다른 하나는 실용적으로 주형의 형상을 최적화할 수 있는 포물선 정식화이다. 이는 각 단면마다 다른 높이를 하나의 식으로 나타내어 설계변수를 효과적으

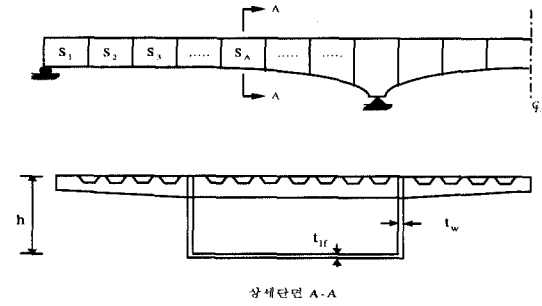


그림 1 주형의 설계변수

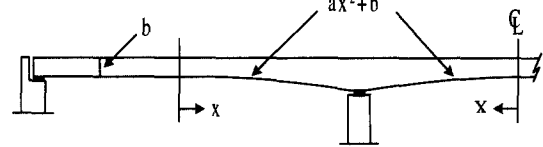


그림 2 포물선의 주형높이

로 줄일 수 있을 뿐 아니라, 시공성도 보장되는 매우 효율적인 방법이다. 강상판교의 높이를 그림 2에서와 같이 포물선 ($ax^2 + b$)으로 표현하였는데 이것은 일반적인 설계에서 주로 사용되는 방식이다. 강상판의 설계변수는 그림 3에서와 같이 바닥판두께, U-리브치수, 그리고 가로보의 높이, 플랜지의 폭과 두께로 선정하였다.

2.2 목적함수

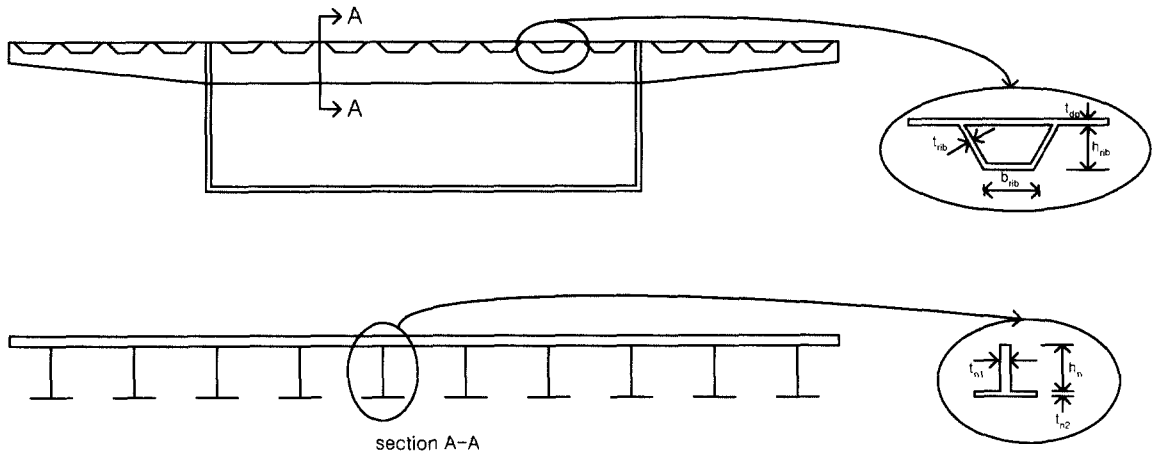
강상판교량의 총 건설비용은 재료비, 제작비, 가설 비용으로 나뉘어 진다. 여기서 가설비용은 계약자, 건설장비, 시공방법, 교통, 노동력 등과 같이 많은 외부 조건에 따라 다르게 결정된다. 따라서 본 연구에서는 설계변수와 직접적으로 관련있는 재료비와 제작비만을 고려하였다. 비용목적함수는 재료비와 제작비의 합으로 나타낼 수 있는데 바닥판과 주형의 주된 비용항목에 의해 다음과 같이 정식화하였다.

$$\text{Minimize } F(X) = p \cdot \{ (C_g^m + C_g^f) \sum W_{gi} + (C_d^m + C_d^f) \sum W_d \} \quad (1)$$

여기서,

W_{gi} : i 번째 주형의 중량

W_d : 바닥판 중량 $[A_y(D) \cdot L \cdot n + A_x b \cdot (L/l - 1)]$



section A-A

그림 3 강상판의 설계변수

- C_g^m, C_g^f : 주형 재료비와 제작단가
- C_d^m, C_d^f : 바닥판 재료비와 제작단가
- p : 강제할증계수
- L : 교량길이
- l : U-리브 간격
- n : U-리브 개수
- b : 바닥판폭

- A_x : 바닥판을 제외한 가로보 면적
- $A_y(I)$: 바닥판을 제외한 U-리브면적

2.3 주형의 제약조건

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

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	$g_2 = \frac{\tau_s}{\tau_{sa}} - 1.0 \leq 0$	τ_s : 강재의 전단응력 τ_{sa} : 강재의 허용전단응력
조합응력	$g_3 = \left(\frac{f_s}{f_{sa}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sa}}\right)^2 - 1.2 \leq 0$	f_s : 강재의 휨응력 f_{sa} : 강재의 허용휨응력 τ_s : 강재의 전단응력 τ_{sa} : 강재의 허용전단응력
국부좌굴	$g_4 = \frac{f_s}{f_{bid}} - 1.0 \leq 0$	f_{bid} : 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
처짐	$g_6 = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_a} - 1.0 \leq 0$	Δ_{max} : 활하중에 의한 최대처짐, Δ_a : 허용처짐(L/500)
강재의 최소두께 규정	$g_7 = \frac{b_w}{220} - t_w \leq 0$ $g_8 = \frac{b_f}{48f_n} - t_{cf} \leq 0$ $g_9 = \frac{b_f}{80n} - t_{tf} \leq 0$	b_w, t_w : 복부폭과 두께 b_f : 플랜지폭 t_{cf}, t_{tf} : 인장, 압축플랜지 두께 f : 응력구배계수 n : 종방향보강재에 의해서 구분되는 패널의 수 ($n \geq 2$)
강재의 최대두께 규정	$g_{10} = \frac{t}{t_{max}} - 1.0 \leq 0$	t : 부재 두께

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 $g_{13} = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{fa}} - 1.0 \leq 0$	f_{max}, f_{min} : 최대응력과 최소응력
바닥판 가로보의 휨응력 $g_{14} = \frac{f_{cross}}{f_{bid}} - 1.0 \leq 0$	f_{cross} : 가로보 휨응력 f_{bid} : 국부좌굴을 고려한 가로보 허용응력
최소두께 $g_{15} = \frac{t_{mb}}{t_{fb}} - 1.0 \leq 0$ $g_{16} = \frac{t_{mdp}}{t_{dp}} - 1.0 \leq 0$	t_{fb}, t_{mb} : 가로보와 바닥판 최소두께 t_{dp}, t_{mdp} : 가로보와 바닥판의 최소두께

2.4 강상판의 제약조건

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

3. 최적설계 알고리즘

3.1 기존의 최적설계 알고리즘

강상자형교나 플레이트거더교와 같이 바닥판이 콘크리트로 구성되어 있을 경우 격자모델에 의한 구조해석을 통하여 주형을 설계하고 바닥판은 윤택중에 의한 국부적인 효과를 고려하여 해석과 설계를 수행한다. 따라서 그림 4와 같은 기존의 최적설계 알고리즘은 바닥판과 주형의 구조거동을 분리하여 주형을 설계할 때 적합하였다. 그러나 강상판교와 같이 바닥판과 주형이 구조적으로 상호연관 관계를 가지고 있는 교량에는 이러한 단일수준의 최적화 방법은 매우 비효율적이다.

3.2 제안한 다단계 최적설계 알고리즘

3.2.1 다단계 최적설계

강상판의 설계에서 주로 사용되는 해석에는 격자해석과 Pelikan-Esslinger 방법이 있는데 기존연구(조효남, 1999)에 의하면 자동화 최적설계에 적합한 방법

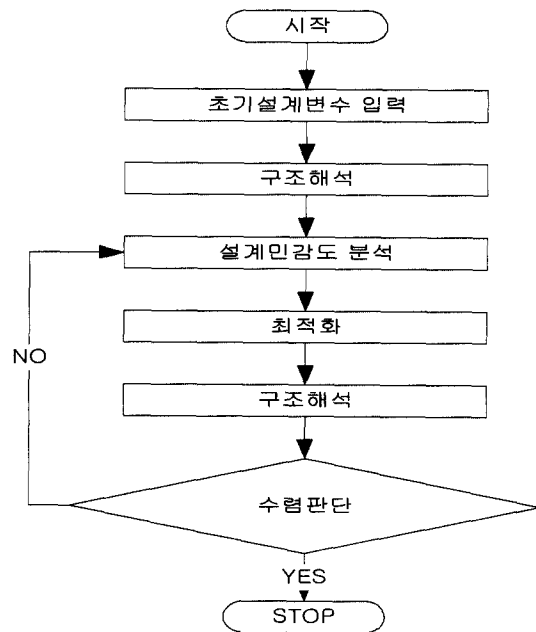


그림 4 단일수준의 최적설계 알고리즘

이 격자해석방법으로 알려져 있다. 이와 같은 격자해석 방법은 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 해

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	$A=245.899-(3.339 \times 10^{-2} \times I) + (1.833 \times 10^{-6} \times I^2)$	$13927.83 \leq I < 19668.59$	

석하는 것이 최적설계 계산 비용면에서 매우 유리하다. (조효남, 1999) 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 최적화 할 때는 바닥판의 근사 최적점에서의 구조거동을 고려하고 마찬가지로 바닥판을 최적화 할 때는 주형의 근사 최적점에 대한 영향을 고려한다. 이는 수렴할 때까지 반복수행 된다. 이때 사용되는 수렴조건은 설계변수의 변화량이 상대오차 1/1000로 사용하였다. 분해법은 바닥판에 대하여 U-리브의 대표적인 구조특성치인 단면2차모멘트를 설계변수로 하여 구조시스템 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 단면2차모멘트로 되어 있어 단면적과 단면2차모멘트의 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 단면2차모멘트(I)의 관계를 회귀분석을 하였다. 이에 대한 회귀분석결과는 표 3에 나타내었다. 또한 본 최적설계에 사용된 최적화 방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM(Augmented Lagrange Multiplier) 방법과 BFGS(broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 방

법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis)를 이용하여 수행하였고 구조해석은 SAP90을 사용하였다. 다단계 최적화기법을 사용한 강상판교의 최적설계 알고리즘은 그림 5에 나타내었다.

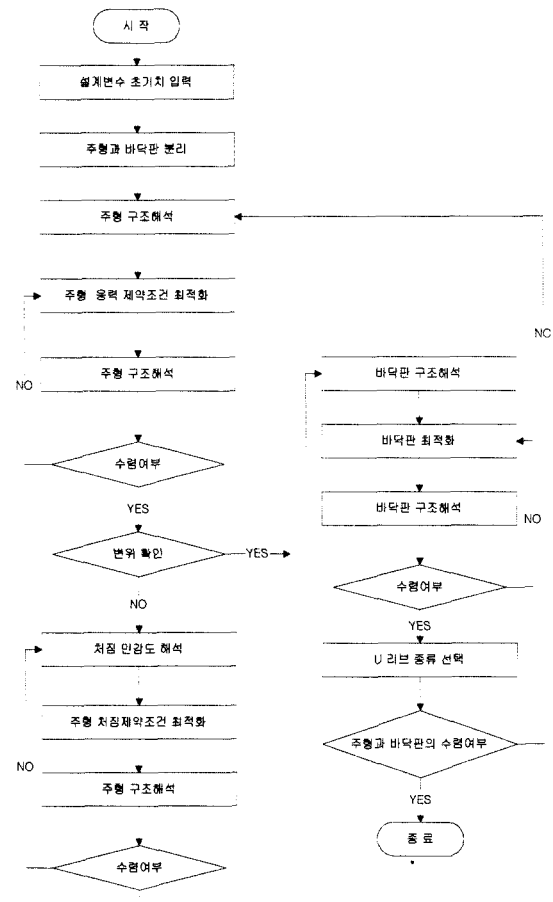


그림 5 강상판교의 다단계 최적설계 알고리즘

3.2.2 제약조건 소거기법(Constraint Deletion)

강상판교의 기존 설계자료에 의하면 활하중에 의한 처짐은 허용처짐(L/500)보다 작아 처짐 제약조건은 강상판교의 최적화에 있어서 비지배적이라 볼 수 있다. 따라서 최적설계의 효율성을 높이기 위하여 변위제약조건을 제외한 다른 모든 제약조건에 대해 최적화를 수행하고 최적설계 결과를 변위제약조건에 대해 검토하는 제약조건 소거기법을 사용하였다. 이때 변위제약조건이 만족되면 최적화는 종료되고 그렇지 않으면 변위 제약조건을 포함한 최적화를 다시 수행하는데 이는 비지배적인 처짐제약조건을 일시 소거하여 최적설계를 수행하고 만일 처짐이 지배적인 제약조건이라 할 지라도 상당히 근접한 최적점에서 최적설계를 재수행함으로써 효율성을 높일 수 있다.

3.2.3 응력 재해석 기법

본 연구에서는 강상판교의 해석이 격자모델에 기초하고 있어 각 설계단면의 응력은 다음과 같이 부재력과 단면상수의 함수로서 얻을 수 있다.

$$f = \frac{Q}{Z} \tag{2}$$

여기서,

- f : 부재의 응력
- Q : 부재력
- Z : 부재의 단면상수

부재의 응력변화는 식(2)에서와 같이 부재력의 변화와 단면상수의 변화에 따른다. 부재력은 설계변수에 대한 음함수형태이기 때문에 부재력 계산에 많은 계산 비용이 소요되지만 단면상수는 설계변수에 대한 양함수형태이기 때문에 추가적인 구조해석 없이 쉽게 계산되어진다. 또한 설계변수에 대한 단면상수의 민감도 ($\partial Z/\partial X$)가 부재력에 대한 민감도 ($\partial Q/\partial X$)보다 더욱 지배적이라서 설계변수의 변화에 따른 응력변화에 지배적인 영향을 준다. 따라서 식(3)을 이용한 근사화된 응력 재해석 기법을 사용할 수 있다.

$$f \cong f^* + \frac{Q^*(Z_x^* - Z_x)}{Z_x Z_x^*} \tag{3}$$

여기서,

- f : 다음 설계점에서의 응력
- f^* : 현재 설계점에서의 응력
- Q^* : k 번째 구조해석시 부재력
- Z_x : 다음 설계점에서의 단면상수
- Z_x^* : 현재 설계점에서의 단면상수

이와 같은 근사 응력재해석은 정정구조물의 최적설계와 같이 우선 구조해석결과인 단면력을 상수로 고정하고 이에 따른 최적설계에 필요한 응력을 단면계수변화에 따른 근사화된 응력으로 근접 최적점을 구한다. 그리고 이점에서 구조해석을 다시 실시하여 응력의 수렴여부를 판단한다. 이때 수렴하지 않았다면 이 재해석에서 구한 단면력을 다시 상수로 고정하고 최적설계를 반복 수행한다. 이러한 응력 재해석방법은 설계민감도 해석이 필요 없고 설계변수에 대해 양함수인 단면계수의 계산만을 요구하므로 많은 하중조건을 적은 계산비용으로 해석을 수행할 수 있다.

3.2.4 변위 재해석 기법

변위가 지배적인 제약조건이 되면 최적설계를 위해 변위에 대한 재해석이 필요하다. 변위에 대한 제약조건은 처짐이 가장 크게 일어나는 절점에 가장 불리한 하중조건을 재하하여 수행하며 이를 위하여 설계 민감도 해석을 이용한 변위에 대한 재해석을 사용하였다. 변위 재해석기법은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$r \cong r^* + \nabla r^*_x (X - X^*) \tag{4}$$

여기서,

- r : 다음 설계점에서의 변위
- r^* : 현재 설계점에서의 변위
- ∇r^* : 현재 설계점의 변위 구배행렬

4. 수치예제

4.1 일반사항

제안한 알고리즘의 일반성과 효율성을 검증하기 위해 수치예제를 사용하였다. 수치예제에 사용된 교량에 대한 일반사항을 표 4에 나타냈고, 교량의 종단면과 횡단면을 그림 6과 그림 7에 나타냈다.

표 4 대상구조물 일반사항

예제 이름	경간	단면타입	교폭	지간(L)
SS-TB	1 경간	2 BOX	24.0m	L=60m
TS-SB	2 경간	1 BOX	10.0m	L=2@60=120.0m

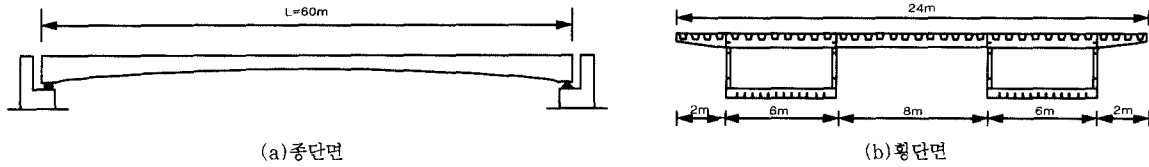


그림 6 SS-TB 교량의 형상

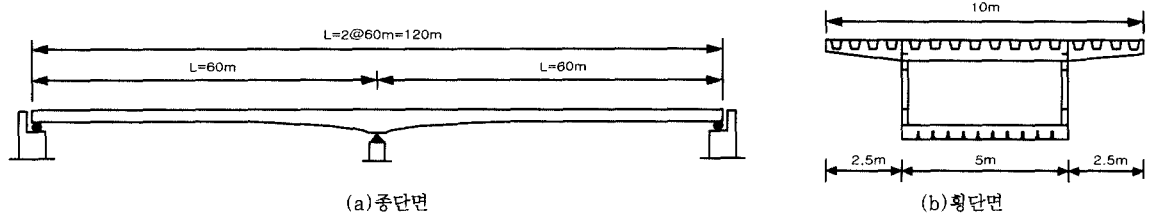


그림 7 TS-SB 교량의 형상

표 5 주형과 바닥판의 재료비와 제작비의 단위비용

	재료비 (×1,000원/ton)	제작비 (×1,000원/ton)	총비용 (×1,000원/ton)
주형	350	442	792
바닥판	350	513	863

비용합수를 산정하기 위한 단위 재료비와 제작비는 표 5에 나타내었으며 단위비용의 적용기준은 '중합물가정보'(2000년 11월)를 근거로 하였다.

4.2 최적설계 결과

수치예제는 기존의 단일수준 최적설계(CSL) 알고리즘과 제안한 다단계 최적설계(MLDS) 알고리즘을 이용하여 최적화 되었다. 최적설계에 사용된 구조해석 모델은 격자해석을 사용하였으며 설계에 사용된 컴퓨터의 사양은 펜티엄III 450을 사용하였다. 최적설계에 따른 설계결과, 해석횟수 그리고 계산시간을 표 6에 정리하였다.

4.3 민감도 분석

주형의 설계변수 중 목적함수와 제약조건에 가장 지

배적인 설계변수를 알아보기 위해 대표적인 제약조건인 휨응력 제약조건과 목적함수에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 주형높이, 하부플랜지 두께, 복부 두께에 대해 최적설계 결과를 기준으로 70%에서 130%까지 변화를 주었을 때 제약조건과 목적함수의 변화를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 휨응력에 대해서는 각기 주형높이가 가장 민감한 것으로 나타났으며 목적함수에 대해서는 거의 비슷한 경향을 보이고 있어 제약조건을 만족하면서 최소비용의 설계를 위해서는 좌굴문제가 없는 수준까지 주형의 높이를 크게 하는 것이 유리하다고 할 수 있다. 일반적으로 운송 가능한 주형의 최대 높이는 3m(건설교통부, 1997)이지만 현장에서 제작되는 주형의 높이는 제한이 없다. 따라서 현장에서 세그먼트를 조립하는 것이 가능하다면 건축한계나 교통조건에 근거한 한계까지 주형의 높이를 증가시키는 것이 바람직하다.

4.4 알고리즘의 신뢰성 및 효율성 분석

제안한 알고리즘(MLDS)의 신뢰성을 증명하기 위해 최적화 결과는 많은 연구자들에 의해 증명된 기존의 알고리즘(CSL)의 결과와 비교하였다. 표 6에서 보는

표 6 최적설계 결과

구 분		SS-TB			TS-SB			
		초기치	CSL	MLDS	초기치	CSL	MLDS	
주 형	복부그룹 (mm)	1	14	10	10	14	10	10
		2	10	10	10	12	10	10
		3	-	-	-	12	10	10
		4	-	-	-	12	10	10
		5	-	-	-	16	12	12
	하부플랜지그룹 (mm)	1	10	10	10	12	10	10
		2	12	10	10	14	10	10
		3	14	10	10	12	10	10
		4	-	-	-	14	10	10
		5	-	-	-	16	12	12
	높이(m)	a	5.6×10^{-4}	0.00	0.00	1.40×10^{-4}	2.78×10^{-4}	2.78×10^{-4}
b		2.50	2.19	2.19	2.50	2.00	2.00	
바 닥 판	두께(mm)	15	14	14	14	14	14	
	U-리브 종류	3	1	1	3	1	1	
	가로보(mm)	h_{fb}	754	710	710	754	530	530
		t_{fl}	14	10	10	14	10	10
		t_{RE}	16	10	10	16	10	10
비용($\times 1,000$ 원)		483,720	427,850	427,850	386,758	359,421	359,421	
해석횟수	주형	-	11	6	-	10	6	
	바닥판	-	-	6	-	-	6	
계산시간		-	924분	1분 31초	-	883분	1분 56초	
단면그룹								

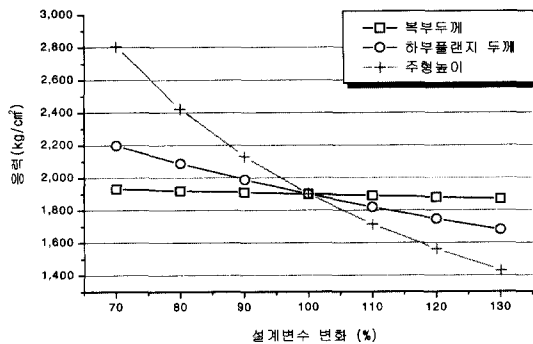


그림 8(a) 제약조건 민감도(SS-TB)

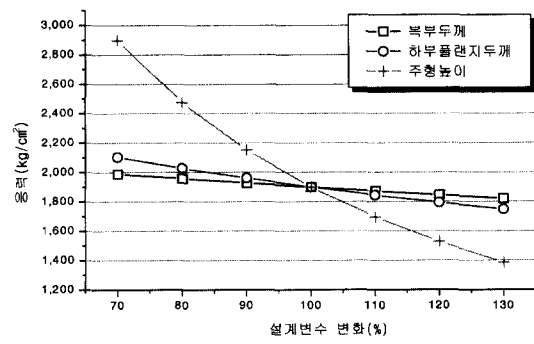


그림 8(b) 제약조건 민감도(TS-SB)

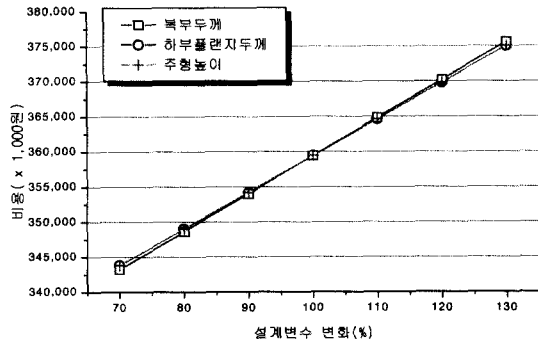


그림 9(a) 목적함수 민감도(SS-TB)

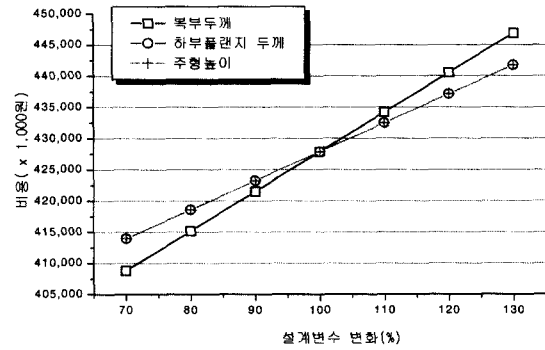


그림 9(b) 목적함수 민감도(TS-SB)

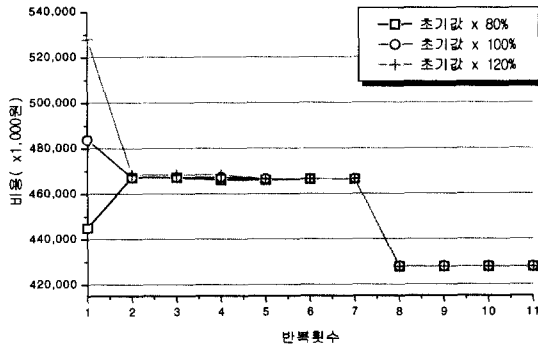


그림 10(a) 목적함수 수렴이력(SS-TB)

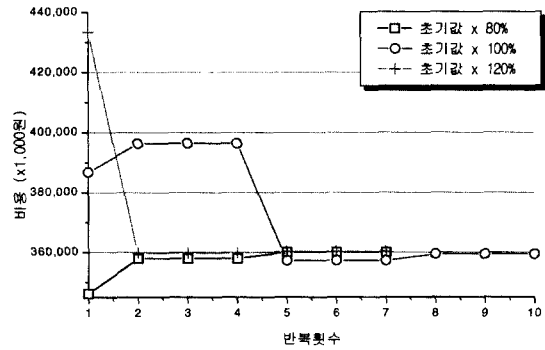


그림 10(b) 목적함수 수렴이력(TS-SB)

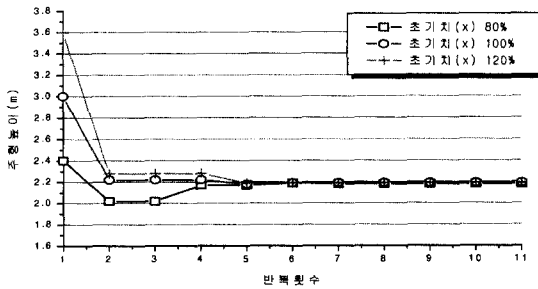


그림 11(a) 설계변수 수렴이력(SS-TB)

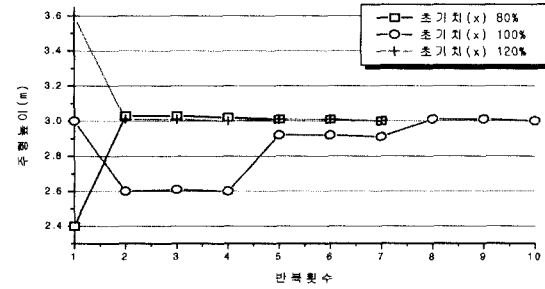


그림 11(b) 설계변수 수렴이력(TS-SB)

바와 같이 기존의 알고리즘을 이용한 최적설계와 제안한 알고리즘을 이용한 최적설계의 결과가 동일함을 알 수 있다. 따라서 제안한 알고리즘이 신뢰성을 확보했다고 판단할 수 있다. 또한 제안된 알고리즘의 안정성을 알아보기 위해 수렴성을 분석하여 보았다. 해의 수렴성은 알고리즘의 신뢰성에 있어서 매우 중요한 요소이다. 두 예제는 초기치의 80%, 100%, 120%가 제안한 알고리즘의 수렴성과 정확성을 평가하기 위해 적용되었으며 이에 대한 목적함수의 수렴이력은 그림 10에 나

타내었고 가장 지배적인 설계변수인 주형의 높이에 대한 수렴이력은 그림 11에 나타내었다. 그림 10과 11에서 보는 바와 같이 초기치가 다르다 할지라도 목적함수와 설계변수에 대한 수렴성과 정확성이 보장된다는 것을 알 수 있다. 따라서 제안한 알고리즘은 신뢰성이 보장되는 알고리즘임을 알 수 있다.

표 6에서 보는 바와 같이 제안한 알고리즘은 SS-TB의 경우 91초 TS-SB의 경우 116초의 계산시간이 소요되는 반면 기존의 알고리즘은 SS-TB의 경우 924분

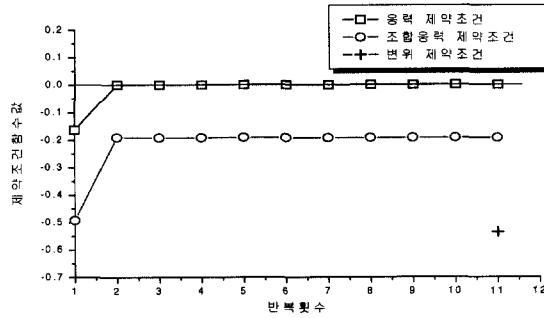


그림 12(a) 제약조건의 수렴이력(SS-TB)

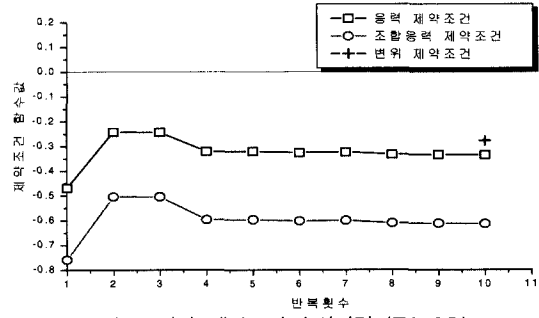


그림 12 (b) 제약조건 수렴이력 (TS-SB)

TS-SB의 경우 883분의 계산시간이 소요된다. 이는 격자해석에 근거한 강상판교량의 최적설계에서 구조거동의 특성을 고려한 제안한 다단계 최적설계 알고리즘이 기존의 알고리즘보다 매우 효율적이라는 것을 알 수 있고 제약조건의 수렴이력인 그림 12를 살펴보면 처짐에 대한 제약조건이 비지배적 제약조건이기 때문에 제약조건소거 기법은 매우 효과적인 방법임을 알 수 있다. 또한 설계 민감도 해석을 사용하지 않는 응력에 대한 근사 재해석방법은 실용 가능한 수준인 약 10여회의 구조해석을 요구하고 있어 제안한 알고리즘은 기존의 방법에 비해 매우 효율적인 방법임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 강상판교를 효율적으로 최적화하기 위한 다단계 최적설계 알고리즘을 개발하고 수치예제를 통하여 신뢰성 및 효율성을 평가하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 격자구조해석을 기초로 하는 강상판교량의 최적설계에는 주형과 바닥판의 구조적 특성을 고려하여 효과적으로 최적설계를 수행할 수 있는 다단계 최적설계가 매우 효율적이다.
- 2) 제안한 다단계 최적설계방법은 기존의 단일 수준의 최적설계 알고리즘과 비교하여 신뢰성을 확보하면서 효율성을 높인 합리적인 최적설계 알고리즘이다.
- 3) 강상판교량의 설계에서 주형의 높이는 제약조건에 가장 민감한 설계변수이므로 제약조건을 만족하면서 비용을 줄이기 위해서는 시공성을 고려한 범위에서 주형의 높이를 크게 할수록 유리하다.

4) 본 연구에서 제안하는 최적설계 알고리즘은 강상판교량의 자동화 최적설계를 위한 프로그램개발에 핵심이 되는 기술이며 기타 복잡한 장대교량의 최적설계 알고리즘을 개발하는데 유용할 것이다.

참 고 문 헌

1. Al-Gahtain, A., "Optimum design of welded I-beams subjected to highway bridge loads.", Ph.D. Dissertation, Univ. of Iowa, 1986
2. Al-Shaleh, K. S., "Optimum design of straight steel box girder bridges.", Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 1994
3. Dhillon, B. and Kuo, C., "Optimum design of composite hybrid plate girder.", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 7, 199, pp.2088~2098
4. Farkas, J., *Optimum design of welding bridges*, *Welding in the World*, 38, 1996, pp.295~306
5. Fox, R. L. and Miura, H., "An approximate analysis technique for design calculations.", *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 1, 1971, pp.177~179
6. Ito, M. and Honorary, T. V. G., "Minimum-weight design of continuous composite girders.", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 4, 1993, pp.1297~1311
7. Memari, A. M., West, H., and Belegundu, A., "Methodology for automation of continuous highway bridge design.", *Journal of Structural*

- Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 9, 1991, pp. 2584~2599
8. Sahin, M. A., "The specification and comparison of methodologies for the automated minimum cost design of horizontally curved girder bridge structures.", Ph.D. Dissertation, Univ. of Maryland, 1985
 9. Vanderplaats, G. N., *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill, 1984
 10. Vanderplaats, G. N., *ADS-A Fortran Program for Automated Design Synthesis, version 1.10*, Engineering Design Optimization Inc., Santa Barbara, California, 1985
 11. 건설교통부, 강도로교 상세부설제지침, 1997
 12. 사단법인 도로교통협회, 도로교설계기준, 2000
 13. 사단법인 한국물가정보, 종합물가정보, 2000
 14. 정지승, "강바닥판교의 다단계 다목적 최적설계.", 박사학위논문, 한양대학교, 1999
 15. 조효남, 이두화, 정지승, 민대홍, "신뢰성에 기초한 강상형교의 단면 최적설계.", 대한토목학회 논문집, Vol. 19, No. I-3, pp.397~406, 1999
 16. 조효남, 정지승, "효율적인 재해석기법에 의한 강상형교의 최적설계.", 한국강구조학회논문집, Vol. 11, No. 5, 1999, pp.539~548
 17. 조효남, 정지승, 민대홍, "자동화 설계를 위한 강상판교의 해석모델.", 한국강구조학회 논문집, Vol. 11, No. 4, 1999, pp.363~372
 18. 조효남, 정지승, 민대홍, "강상자형교의 자동화 최적설계 프로그램", 한국강구조학회 논문집, Vol. 12, No. 5, 2000, pp.475~485
 19. 조효남, 민대홍, 이광민, 정지승, "강바닥판교의 다단계 최적설계", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 2000