

강바닥판교의 개선된 다단계 최적설계 알고리즘

An Improved Multi-level Optimization Algorithm for Orthotropic Steel Deck Bridges

조 호 남† 이 광 민* 최 영 민** 김 정 호***
Cho, Hyo Nam Lee, Kwang Min Choi, Young min Kim, Jung ho
(논문접수일 : 2002년 12월 26일 ; 심사종료일 : 2003년 8월 28일)

요 지

강바닥판교는 수 천개의 부재가 연결된 복잡한 구조물이기 때문에 설계와 해석이 난해하다는 단점을 가지고 있어 구조특성에 적합한 효율적인 최적화 알고리즘을 개발하는 것은 실용적인 최적화이론의 활용차원에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 강바닥판교의 최적설계를 효과적으로 수행하기 위한 개선된 다단계 최적설계 알고리즘을 제안하였다. 강바닥판교의 구조적인 특성을 반영하면서 전체 시스템을 주형과 강바닥판으로 나누기 위해 다단계 최적설계 방법 중에 하나인 등위법 (Coordination Method)을 사용하였고, 효율적인 최적설계를 위한 치점제약조건 소거기법, 구조해석의 효율성을 높이기 위한 자동미분기법이 사용되었으며, 완화중에 의한 응력은 기존연구에서 제안된 응력재해석 기법을 사용하였다. 강바닥판은 폐단면리브의 형식과 같은 이산형 설계변수와 바닥판의 두께, 가로보의 치수와 같은 연속형 설계변수가 혼합되어 있는 형태로 구성되어 있다. 이에 본 연구에서는 강바닥판의 최적화를 위해 수정된 유전자 알고리즘을 사용하였다. 수치예제를 사용하여 제안된 알고리즘의 효율성과 수렴성을 입증하였다.

핵심용어 : 강바닥판교, 다단계 최적설계, 자동미분기법, 유전자 알고리즘

Abstract

Since an orthotropic steel deck bridge has large number of design variables and shows complex structural behavior, it would be very difficult and impractical to directly use a Conventional Single Level (CSL) optimization algorithm for its optimum design. Thus, in this paper, an Improved Multi Level Design Synthesis (IMLDS) optimization algorithm is proposed to improve the computational efficiency. In the proposed IMLDS algorithm, a coordination method is introduced to divide the bridge into main girders and orthotropic steel deck with preserving the characteristics of the structural behavior. For an efficient optimization of the bridge, the IMLDS algorithm incorporates the various crucial approximation techniques such as constraints deletion, Automatic Differentiation (AD), stress reanalysis, and etc. In the case of orthotropic steel deck system, optimum design problems are characterized by mixed continuous discrete variables and discontinuous design space. Thus, a modified Genetic Algorithm (GA) is also applied to optimize discrete member design for orthotropic steel deck. From the numerical example, the efficiency and convergency of the IMLDS algorithm proposed in this paper is investigated. It may be positively stated that the IMLDS algorithm will lead to more effective and practical design compared with previous algorithms.

Keywords : orthotropic steel desk bridge, multilevel optimization, automatic differentiation method, Genetic Algorithm

1. 서 론

강바닥판교는 일반교량에 비해 내하력이 크고 자중이 적

게 나가기 때문에 일반적으로 장경간 교량에 유리할 뿐 아니라 도심지에서 신속한 공사와 미관에 대한 이점을 가지고 있다. 하지만 강바닥판교는 수 천개의 부재가 연결된 복

† 책임저자, 정회원 · 한양대학교 토목·환경공학과 교수
전화: 031-400-4027 ; Fax: 031-406-5660
E-mail: kmlee1973@ihanyang.ac.kr

* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원 · 한양대학교 토목 · 환경공학과 BK21 계약교수

*** 정회원 · 건설기술연구원, 선임연구원

• 이 논문에 대한 토본을 2003년 12월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2004년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

잡한 구조물이기 때문에 설계와 해석이 난해하다는 단점을 가지고 있어 구조특성에 적합한 효율적인 최적화 알고리즘을 개발하는 것은 실용적인 최적화이론의 활용차원에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 최근 강교량에 대한 최적설계의 연구는 Dhillon과 Kuo⁵⁾가 AASHTO시방서의 하중저항 계수 설계법에 기초한 합성 I거더의 최적설계를 수행하였고, Memari⁹⁾ 등은 하중의 영향면을 결정하기 위해 3차원 유한요소 모델을 이용하여 플레이트거더교의 최적화를 수행하였다. AI-Shaleh¹⁾는 AASHTO시방서에 기초한 강상자형교의 최적설계 기법을 연구하였다. 국내에서는 도로교 설계기준¹⁴⁾에 기초한 강상자형 교량의 최적설계²¹⁾와 강바닥판교에 효과적으로 적용할 수 있는 다단계 최적설계 알고리즘을 제안²⁰⁾ 한 바 있다. 본 연구에서는 강바닥판교를 효율적으로 최적화하기 위해 제안된 기존연구²⁰⁾를 바탕으로 하되 좀더 효과적으로 강바닥판교를 최적화 할 수 있는 개선된 다단계 최적설계 알고리즘을 제안하였다. 기존연구와 마찬가지로 강바닥판교의 구조적 특징을 반영하면서 전체시스템을 주형과 강 바닥판으로 나누기 위해 등위법^{7),11)}을 사용하였고, 효율적인 최적설계를 위한 제약조건 소거 기법과 응력재해석기법이 사용되었다. 응력재해석기법은 강바닥판교량의 최적설계에 효과적으로 적용될 수 있다. 하지만 이러한 응력재해석기법은 설계변수의 변화에 따른 단면력과 단면상수에 모두 영향을 미치는 사하중의 경우보다 활하중과 같이 하중보다는 단면상수의 영향이 큰 경우에 효과적으로 적용될 수 있다. 이에 본 연구에서는 활하중에 의한 응력 산정에 대해서만 응력재해석기법을 적용하였으며, 사하중에 대해서는 설계변수에 대한 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 이용한 근사 재해석기법(Approximated Reanalysis Technique)을 적용하였다. 이러한 민감도 분석은 적은 노력으로도 높은 정도를 얻을 수 있는 자동미분기법⁶⁾이 사용되었다.

한편 강바닥판교의 강바닥판은 폐단면리브(혹은 U리브)의 형식과 같은 이산형 설계변수와 바닥판의 두께, 가로보의 치수와 같은 연속형 설계변수가 혼합되어 있는 형태로 구성되어 있다. 만일 기존연구²⁰⁾에서 사용된 국부 최적화 알고리즘(Local Optimization Algorithm)이 이런 형태의 문제에 쓰여진다면 이산변수에 대해서 고정시킨 후 각각에 대해 최적화를 수행해야 하기 때문에 비효율적이다. 이에 본 연구에서는 강바닥판의 최적화를 위해 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용하였다. 하지만 일반적으로 유전자 알고리즘은 설계변수의 단면치수나 제원을 직접 사용하는 경우 유전자 알고리즘의 설계 공간 내에 발생할 수 있는 설계변수의 경우의 수가 매우 많아지고, 이에 따라 적합도 함수의 계산도 많이 수행되어 지며 많은 계산시간을 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 실무에서 사용되고 있는 제원들을 데이터베이스화하고, 각각에 인덱스를 부여하여 설계변수로 사용함으로써 효율적으로 최적단면을 찾을 수 있는 방법이 제안되었다.

2. 강바닥판 교량 최적설계 문제의 정식화

2.1 설계 변수

강바닥판 교량은 주형과 강 바닥판이 각기 다른 구조적인 특성을 가지고 있으므로 설계변수를 각각 주형과 강 바닥판에 대해서 결정하였다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 주형의 설계 변수는 복부판의 높이(h), 복부판의 두께(t_w), 그리고 하부 플랜지의 두께(t_{fb})이고, 강바닥판의 설계 변수는 바닥판의 두께(t_{dp}), U리브의 타입(r_u) 가로보의 치수($b_{fb}, h_{fb}, t_{fb1}, t_{fb2}$)로 하였다. 그림 1에서 가로보의 간격(l_f)과 U리브의 간격(l_r)의 변화는 강바닥판의 최적설계에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 하지만 가로보의 간격과

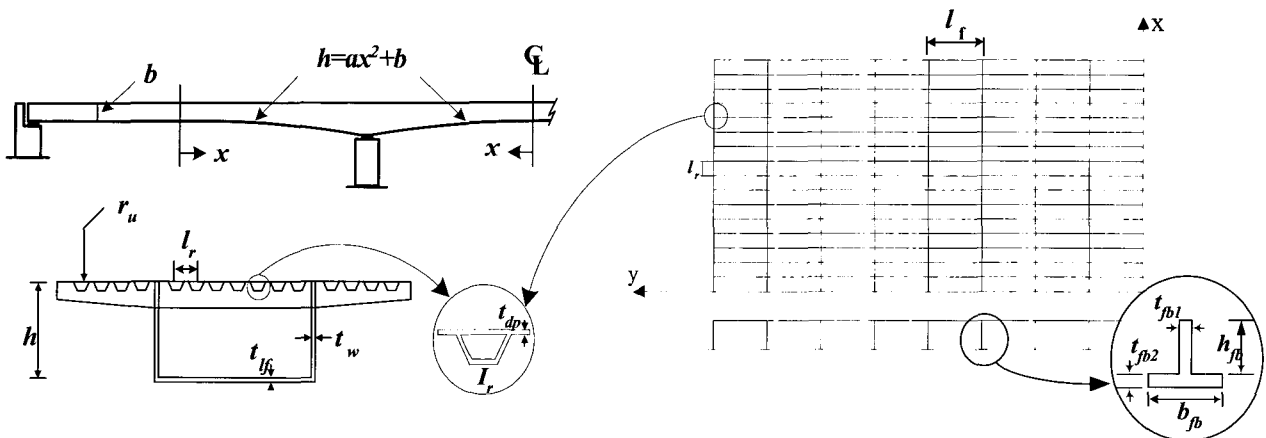


그림 1 강바닥판 교량의 최적설계를 위한 설계 변수

U리브의 간격은 시방규정이나 시공성 측면을 고려한다면 가능한 치수가 제한되어 있어 본 논문에서는 설계상수로 적용하도록 하였다.

이와같은 가로보의 간격과 U리브의 간격에 따른 최적설계 효과는 참고문헌²²⁾에서 찾아볼 수 있다.

정의된 주형과 강 바닥판의 설계변수들을 비교하면, 강 바닥판은 전 시간에 걸쳐 동일한 설계 단면을 가지므로 많은 설계변수를 갖지 않지만 주형은 교량의 전 시간에 걸쳐 각기 다른 설계단면을 가지므로 많은 설계 변수를 갖는다. 구조물 최적설계에 있어서 설계변수의 수가 많아지면, 계산시간은 설계변수에 대해 기하급수적으로 증가하므로,¹⁰⁾ 효과적인 최적설계를 수행하기 위해 주형의 설계변수를 줄이는 것이 유리하다. 본 연구에서는 주형의 설계변수를 줄이기 위해 두 가지 방법이 사용되었는데 하나는 설계변수 연결기법이고 다른 하나는 실용적으로 주형의 형상을 최적화할 수 있는 포물선 정식화이다. 이는 각 단면마다 다른 높이를 하나의 식으로 나타내어 설계변수를 효과적으로 줄일 수 있을 뿐 아니라, 시공성도 보장되는 매우 효율적인 방법이다. 강바닥판교의 높이를 그림 1과 같이 포물선 ($h = ax^2 + b$)으로 표현하였는데, 이것은 실무에서 일반적으로 사용되는 방식이다. 따라서 최적설계를 수행하는 과정에서는 복부의 높이 h 대신 a, b 를 설계변수로 사용하였다.

2.2 비용 함수

강바닥판교량의 총 건설비용은 재료비, 제작비, 가설비용으로 나뉘어 진다. 여기서 가설비용은 계약자, 건설장비, 시공방법, 교통, 노동력 등과 같이 많은 외부조건에 따라 다르게 결정된다. 따라서 본 연구에서는 설계변수와 직접적으로 관련 있는 재료비와 제작비만을 고려하였다. 비용 목적함수는 재료비와 제작비의 합으로 나타낼 수 있는데 바닥판과 주형의 주된 비용항목에 대해 다음과 같이 정식화하였다.

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

여기서, W_{gi} = i 번째 주형의 중량; W_d = 바닥판 중량; C_g^m, C_g^f = 주형 재료비와 제작단가; C_d^m, C_d^f = 바닥판 재료비와 제작단가; p = 강제할증계수

2.3 제약조건

2.3.1 주형의 제약 조건

주형의 최적화를 위해 도로교 설계기준⁴⁾에 기초하여 휨 · 전단응력, 합성응력, 피로응력, 처짐 등과 같은 거동제

표 1 주형의 제약조건

| | 제 약 조 건 | 기 호 설 명 |
|---------|--|---|
| 휨응력 | $g_{1-1} = \frac{f_s^t}{f_{sa}^t} - 1.0 \leq 0$ $g_{1-2} = \frac{f_s^c}{f_{sa}^c} - 1.0 \leq 0$ | f_s^t = 강재의 휨인장응력 f_s^c = 강재의 휨압축응력 f_{sa}^t = 강재의 허용휨인장응력 f_{sa}^c = 강재의 허용휨압축응력 |
| 전단응력 | $g_2 = \frac{\tau_s}{\tau_{sa}} - 1.0 \leq 0$ | τ_s = 강재의 전단응력; τ_{sa} = 강재의 허용전단응력 |
| 조합응력 | $g_{3-1} = \left(\frac{f_s^t}{f_{sa}^t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sa}}\right)^2 - 1.2 \leq 0$ $g_{3-2} = \left(\frac{f_s^c}{f_{sa}^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sa}}\right)^2 - 1.2 \leq 0$ | f_s^t = 강재의 휨인장응력; f_{sa}^t = 강재의 허용휨인장응력 f_s^c = 강재의 휨압축응력; f_{sa}^c = 강재의 허용휨압축응력 τ_s = 강재의 전단응력; τ_{sa} = 강재의 허용전단응력 |
| 국부좌굴 | $g_4 = \frac{f_s^c}{f_{bld}} - 1.0 \leq 0$ | f_s^c = 강재의 휨압축응력 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 |
| 처짐 | $g_6 = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_a} - 1.0 \leq 0$ | Δ_{\max} = 활하중에 의한 최대처짐 Δ_a = 허용처짐(L/500) |
| 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 |
| 최대두께 규정 | $g_{10} = \frac{t}{t_{\max}} - 1.0 \leq 0$ | t = 부재 두께, t_{\max} = 부재 최대두께 |

표 2 강 바닥판의 제약조건

| 제 약 조 건 | | 기 호 실 명 |
|---------------|---|--|
| U-리브 휨응력 | $g_{11-1} = \frac{f_d^c}{f_{all}^c} + \frac{f_m^c}{f_{all}^c} - 1.0 \leq 0$ $g_{11-2} = \frac{f_d^t}{f_{all}^t} + \frac{f_m^t}{f_{all}^t} - 1.0 \leq 0$ | f_d^c, f_m^c = 강바닥판과 주형 해석시 U-리브 인장응력 f_d^t, f_m^t = 강바닥판과 주형 해석시 U-리브 압축응력 f_{all}^c = 강재의 허용인장응력 f_{all}^t = 강재의 허용압축응력 |
| 가로보 휨응력 | $g_{12} = \frac{f_{cross}^c}{f_{cat}^c} - 1.0 \leq 0$ | f_{cross}^c = 가로보 휨압축응력 f_{cat}^c = 국부좌굴을 고려한 가로보 허용압축응력 |
| U-리브 피로응력 | $g_{13-1} = \frac{f_{max}^{LD} - f_{min}^{LD}}{f_{fa}^{LD}} - 1.0 \leq 0$ $g_{13-2} = \frac{f_{max}^{LF} - f_{min}^{LF}}{f_{fa}^{LF}} - 1.0 \leq 0$ | $f_{max}^{LD}, f_{min}^{LD}$ = U리브 정모멘트부 최대응력과 최소응력 $f_{max}^{LF}, f_{min}^{LF}$ = U리브 부모멘트부 최대응력과 최소응력 f_{fa}^{LD} = U리브 정모멘트부 피로허용응력(용접상세 B) f_{fa}^{LF} = U리브 부모멘트부 피로허용응력(용접상세 C) |
| 바닥판 가로보의 휨응력 | $g_{14} = \frac{f_{fs}^c}{f_{fsa}^c} - 1.0 \leq 0$ | f_{fs}^c = 바닥판 가로보 휨압축응력 f_{fsa}^c = 국부좌굴을 고려한 바닥판 가로보 허용압축응력 |
| 바닥판 가로보의 전단응력 | $g_{15} = \frac{\tau_{fs}}{\tau_{fsa}} - 1.0 \leq 0$ | τ_{fs} = 바닥판 가로보의 전단응력 τ_{fsa} = 가로보 허용전단응력 |
| 합성응력 | $g_{16-1} = \left(\frac{f_{fs}^c}{f_{fsa}^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{fs}}{\tau_{fsa}}\right)^2 - 1.2 \leq 0$ $g_{16-2} = \left(\frac{f_{fs}^t}{f_{fsa}^t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{fs}}{\tau_{fsa}}\right)^2 - 1.2 \leq 0$ | f_{fs}^c, f_{fsa}^c = 바닥판 가로보 휨응력 및 허용인장응력 f_{fs}^t, f_{fsa}^t = 바닥판 가로보 휨압축 및 허용압축응력 τ_{fs}, τ_{fsa} = 바닥판 가로보 전단응력 및 허용전단응력 |
| 최소두께 | $g_{17} = \frac{t_{mb}}{t_{fb}} - 1.0 \leq 0$ $g_{18} = \frac{t_{mdp}}{t_{dp}} - 1.0 \leq 0$ | t_{mb}, t_{mdp} = 가로보와 강바닥판의 최소두께 t_{fb}, t_{dp} = 가로보와 강바닥판의 두께 |

약조건과 최소두께, 제작한계 등과 같은 한계제약조건이 사용되었으며 이를 표 1과 같이 정리하였다. 각각의 제약조건을 산정하기 위한 구체적인 방법은 일반적인 실무설계 계산서에서 찾아볼 수 있다.¹⁵⁾

2.3.2 강바닥판의 제약조건

강바닥판의 최적화에 사용된 제약조건은 국부적인 구조 거동을 중심으로 거동제약조건과 한계제약조건을 도로교설계기준¹¹⁾에 기초하여 정식화하였다. 이와같은 강바닥판의 제약조건은 표 2와 같이 정리하였다. 각각의 제약조건을 산정하기 위한 구체적인 방법은 일반적인 실무설계 계산서에서 찾아볼 수 있다.¹⁵⁾

3. 강바닥판교의 다단계 최적설계 알고리즘

강상자형교나 플레이트거더교와 같이 바닥판이 콘크리트로 구성되어 있을 경우 격자모델에 의한 구조해석을 통하여 주형을 설계하고 바닥판은 운하중에 의한 국부적인 효과를 고려하여 해석과 설계를 수행한다. 따라서 그림 2와 같은 재래적인 단일 수준(Conventional Single-Level: CSL) 최적설계 알고리즘²¹⁾은 바닥판과 주형의 구조거동을 분리하여 설계할 때 적합하였다. 하지만 강바닥판교와

같이 설계변수의 수가 많으며, 바닥판과 주형이 구조적으로 상호연관 관계를 가지고 있는 교량에는 이러한 단일수준의 최적화 방법은 매우 비효율적이다. 본 연구에서는 다단계 최적설계를 바탕으로 하며 제약조건 소거기법, 자동미분기법, 응력재해석 기법과 같은 근사화기법이 사용되었고, 강바닥판의 이산최적화를 위해 유전자 알고

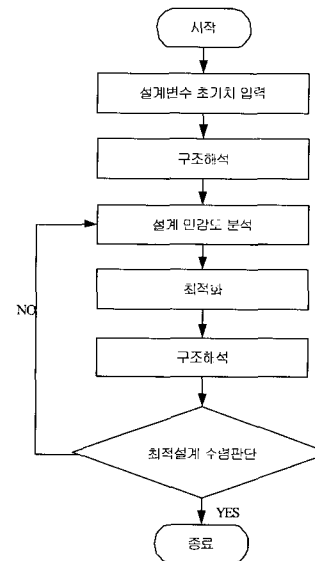


그림 2 단일수준의 최적설계 알고리즘

리즘을 적용한 개선된 다단계 최적설계(Improved Multi-Level Design Synthesis: IMLDS) 알고리즘을 제시하였다.

3.1 다단계 최적설계 알고리즘

앞서 언급한 바와 같이 강바닥판교는 강바닥판과 주형이 각기 다른 구조적인 특성을 가지고 있지만 구조적으로 분리되지 않고 서로 상호작용을 하기 때문에 이와같은 구조적인 특성을 합리적으로 반영할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 기존연구²⁰⁾에서 제안된 다단계 최적설계(Multi-Level Design Synthesis: MLDS)와 마찬가지로 강바닥판의 구조적인 특성을 반영하면서 효율적으로 최적화를 수행할 수 있도록 하기 위해 다단계 최적화 기법 중에 하나인 등위법(Coordination Method)이 도입되었다. 주형과 바닥판의 제약조건에서 나타나 있는 바와 같이 등위법은 주형과 강 바닥판을 각각 최적설계하지만 주형을 최적화할 때는 바닥판의 근사 최적점에서의 구조거동을 고려하고 마찬가지로 바닥판을 최적화할 때는 주형의 근사 최적점에 대한 영향을 고려한다. 이와 같은 방법으로 최적화를 수행한다면 강바닥판교의 구조적인 특성이 알고리즘에 반영될 수 있으면서, 주형과 강바닥판 각각의 설계변수의 수를 줄일 수 있기 때문에 최적화를 수행함에 있어 효율성 또한 기대할 수 있다.

등위법을 사용하여 강바닥판의 최적설계를 수행함에 있어, 주형의 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 Vanderplaat¹²⁾에 의해 개발된 ADS(Automated Design Synthesis)를 이용하여 수행하였다. 주형의 최적설계를 위해, 강바닥판을 포함하는 교량 시스템에 대한 구조해석은 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하였으며, 휨, 전단, 비틀림의 효과를 고려할 수 있는 Grid 요소를 사용하였다. 구조해석은 구조물의 설계변수 값이 바뀔 때마다 수행되어야 하며, 결국 많은 계산 비용을 초래하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 MLDS 알고리즘에서는 응력재해석기법이 사용되었다. 하지만 이러한 응력재해석기법은 설계변수의 변화에 따른 단면력과 단면상수에 모두 영향을 미치는 사하중의 경우보다 활하중과 같이 하중보다는 단면상수의 영향이 큰 경우에 효과적으로 적용될 수 있다. 이에 IMLDS 알고리즘에서는 활하중에 의한 응력 산정에 대해서만 응력재해석기법을 적용하

였으며, 사하중에 의한 제약조건의 산정은 설계변수의 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 이용한 구조재해석을 위해 자동미분기법을 사용하였다.

강바닥판교의 강바닥판은 폐단면리브의 형식과 같은 이산형 설계변수와 바닥판의 두께, 가로보의 치수와 같은 연속형 설계변수가 혼합되어 있는 형태로 구성되어 있다. 만일 기존연구에서 사용된 국부 최적화 알고리즘이 이런 형태의 문제에 쓰여진다면 이산변수에 대해서 고정시킨 후 각각에 대해 최적화를 수행해야 하기 때문에 비효율적이다. 이에 IMLDS 알고리즘에서는 강 바닥판의 최적화를 위해 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용하였다. 하지만 일반적으로 유전자 알고리즘은 설계변수의 단면치수나 제원을 직접 사용하는 경우 유전자 알고리즘의 설계 공간 내에 발생할 수 있는 설계변수의 경우의 수가 매우 많아지고 이에 따라 적합도함수(Fitness Function)의 계산도 많이 수행되어지며, 많은 계산시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 실무에서 사용되고 있는 제원들을 데이터베이스화하고, 각 각에 인덱스를 부여하여 설계변수로 사용함으로써 효율적으로 최적단면을 찾을 수 있는 방법이 제안되었다. 유전자 알고리즘을 이용한 강바닥판의 최적화를 위해 Carrol⁴⁾이 Fortran 버전으로 개발한 Genetic Algorithm Driver를 수정하여 사용하였으며, 일정 교배(uniform crossover), 일정 변이(uniform mutation), 토너먼트 선택 방법(tournament selection methods)이 사용되었다. 한편 강바닥판의 해석은 비교적 정확한 구조해석결과를 주면서 단순하게 수행할 수 있는 고전적인 Pelikan-Esslinger 방법을 사용하였다.

한편 표 3에서 보여주고 있는 바와 같이 강바닥판교의 기존 설계자료들에 의하면 활하중에 의한 처짐은 허용처짐(L/500)보다 작아 처짐 제약조건은 강바닥판교의 최적설계에 있어서 비지배적이라 볼 수 있다. 따라서 MLDS 알고리즘에서와 같이 최적설계의 효율성을 높이기 위하여 변위제약조건을 제외한 다른 모든 제약조건에 대해 최적화를 수행하고 최적설계 결과를 처짐제약조건에 대해 검토하는 제약조건 소거기법(Constraint Deletion Method)을 사용하였다. 이때 변위제약조건이 만족되면 최적화는 종료되고 그렇지 않으면 변위제약조건을 포함한 최적화를 다시 수행하는데 IMLDS 알고리즘에서는 사하중의 근사재해석을 위해 사용된 자동미분 기법을 사용한 처짐재해석을 수행함으로써 최적화의 효율성을 극대화하였다. 이상과 같은 IMLDS 알고리즘을 사용한 강바닥판 교량의 최적설계 알고리즘은 그림 3에 나타내었다.

표 3 국내 강바닥판교량의 활하중 처짐

| 교량명 | 지간구성 (m) | 지간 (m) | 허용처짐(mm) | 최대처짐(mm) | 허용처짐과 최대처짐 비 |
|----------|--------------------------------|--------|----------|----------|--------------|
| 고금~마량교 | 225(3@75) | 75 | 150 | 91 | 0.61 |
| 정릉천교 | 200(50+85+65) | 50 | 100 | 19 | 0.19 |
| | | 85 | 170 | 68 | 0.40 |
| | | 65 | 130 | 44 | 0.34 |
| 제 2 부산대교 | 380(4@95) | 95 | 190 | 123 | 0.65 |
| 완도대교 | 840(80+120+140+160+140+120+80) | 80 | 160 | 81 | 0.51 |
| | | 120 | 240 | 165 | 0.69 |
| | | 140 | 280 | 238 | 0.85 |
| | | 160 | 320 | 298 | 0.93 |

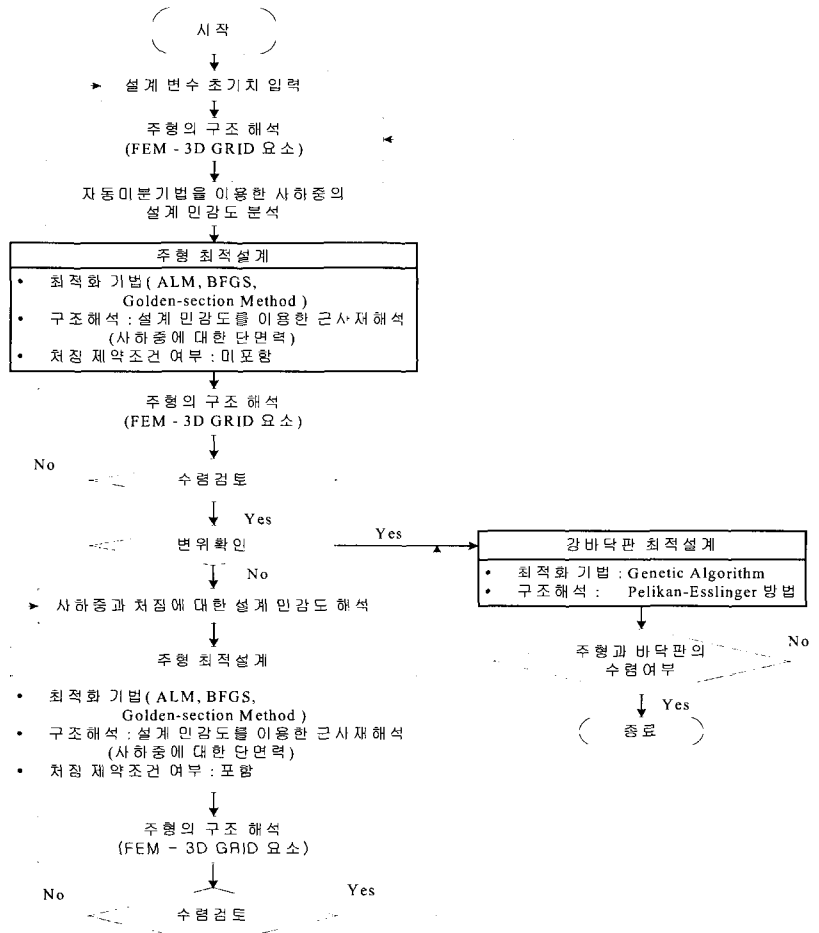


그림 3 제안된 다단계 알고리즘의 흐름도

3.2 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)

강바닥판교의 최적설계의 문제는 U리브의 형식과 같은 이산형 설계변수와 바닥판의 두께, 가로보의 치수와 같은 연속형 설계변수가 혼합되어 있는 형태로 구성되어 있다.

만일 국부 최적화 알고리즘이 이런 형태의 문제에 쓰여진다면 이산변수에 대해서 고정시킨 후 각각에 대해 최적

화를 수행해야 하기 때문에 비효율적이고, 해를 찾는다 하더라도 국부 최적해(Local Optimum Solution)일 것이다. 유전자 알고리즘은 이런 문제를 푸는데 적합하고, 대부분의 경우에 높은 신뢰성을 가지고 전역적 최적해(Global Optimum Solution)을 찾을 수 있다. 그러나 일반적으로 유전자 알고리즘은 설계변수의 단면치수나 재원을 직접 사용하는 경우 유전자 알고리즘의 설계 공간 내에 발생할 수

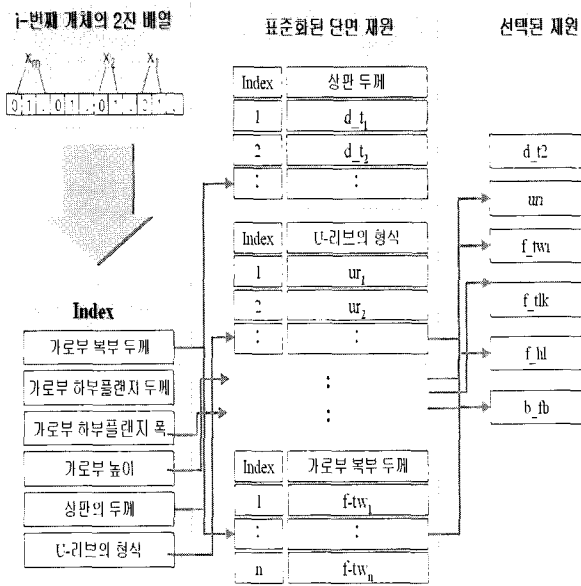


그림 4 Index 설계변수의 개념도

있는 설계변수의 경우의 수가 매우 많아지고 이에 따라 적합도 함수의 계산도 많이 수행되어 지며, 결국 많은 계산시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 이 문제를 극복하기 위해서 그림 4에서 보여주는 바와 같이 실무에서 사용되고 있는 설계변수의 재원을 데이터베이스화하고, 이에 각각 인덱스(Index)를 부여하여 설계변수로 사용함으로써 효율적으로 최적단면을 찾을 수 있는 방법을 사용하였다. 이는 기존의 표준화된 설계단면을 이용하는 장점 뿐만 아니라 설계공간을 표준단면 데이터베이스의 인덱스로 범위를 국한하여 효율적으로 개체를 발생시킬 수 있다는 장점을 가지게 된다. 이러한 인덱스를 부여하여 강바닥판의 최적설계를 수행하기 위해 본 연구에서는 Carrol⁴⁾이 Fortran 버전으로 개발한 Genetic Algorithm Driver를 본

연구의 목적에 적합하도록 수정하였으며, 이에 대한 흐름도는 그림 5에 나타내었다.

기본적으로 유전자 알고리즘은 무제약조건, 최대화 문제를 위해 사용될 수 있다. 따라서 강바닥판의 최적화 문제와 같은 제약조건의 형태를 가진 문제를 풀기 위해서는 다음과 같은 두 가지의 변환이 필요하다. 첫 번째 변환은 다음

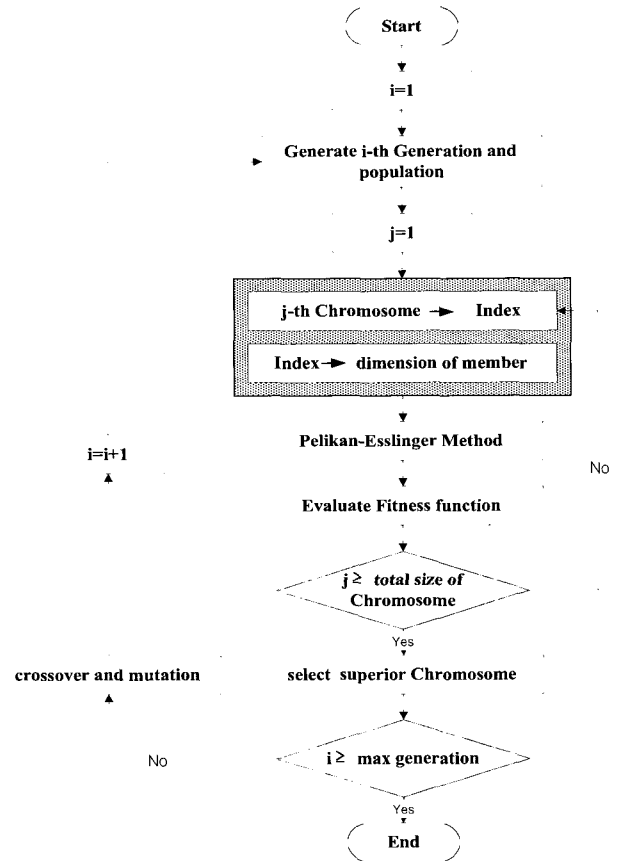


그림 5 수정된 유전자 알고리즘의 흐름도

표 4 파라미터 분석결과(U-리브 형식: 1형식)

| 구 분 | | | 바닥판 두께 (m) | 가로보의 치수(m) | | | | 비용 (×1,000원) |
|-----------------------|--------|----------|------------|------------|----------|-----------|-----------|--------------|
| | | | | h_{fb} | b_{fb} | t_{fb1} | t_{fb2} | |
| 국부 최적화 | | | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,137 |
| $N_p=30$ $\eta=6$ | R | 10000 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |
| | | 100000 | 0.014 | 1.10 | 0.28 | 0.01 | 0.01 | 1,114,186 |
| | | 1000000 | 0.014 | 1.10 | 0.28 | 0.01 | 0.01 | 1,114,186 |
| | | 10000000 | 0.014 | 1.10 | 0.28 | 0.01 | 0.012 | 1,115,044 |
| $R=10000$ $\eta=6$ | N_p | 30 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |
| | | 60 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |
| | | 100 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |
| | | 200 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |
| $N_p=30$ $R=10000$ | η | 3 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.01 | violated |
| | | 4 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |
| | | 5 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |
| | | 6 | 0.014 | 1.00 | 0.30 | 0.01 | 0.012 | 1,110,115 |

의 벌칙함수(Penalty Function)의 개념을 이용하여 본래의 제약조건 문제를 무제약조건 문제로 바꾸는 것이다.

$$f'(X) = f(X) + \begin{cases} R \sum_{j=1}^m \Phi(g_j(X))^\eta & \text{for } g_j(X) > 0 \\ 0 & \text{for } g_j(X) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, Φ = 벌칙 함수, R, η = 벌칙 파라미터이다. 두 번째 변환은 식(2)의 $f'(X)$ 를 최소화하기 위해 적합도 함수 $F(X)$ 를 최대화하는 것인데 적합도 함수 $F(X)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$F(X) = \frac{C}{f'(X)} \quad (3)$$

여기서, $F(X)$ = 적합도 함수, C = 적합도 함수의 파라미터이다. 적합도 함수를 최대로 하기 위해서는 벌칙 파라미터(R, η)와 세대수(N_p) 각각을 결정하는 것이 중요하다. 이와 같은 R, η, N_p 를 찾기 위해 설계변수 중에서 이

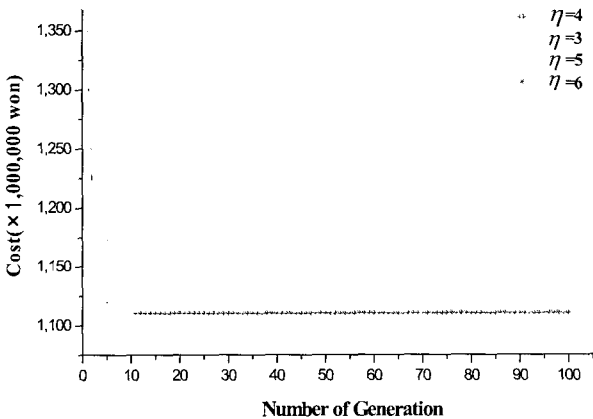


그림 6 η 변화에 따른 비용함수의 수렴이력

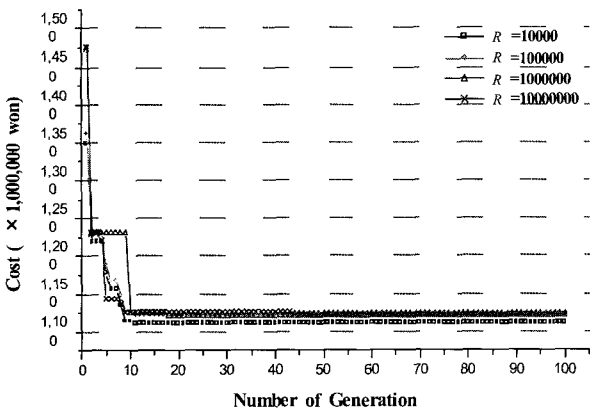


그림 7 R 변화에 따른 비용함수의 수렴이력

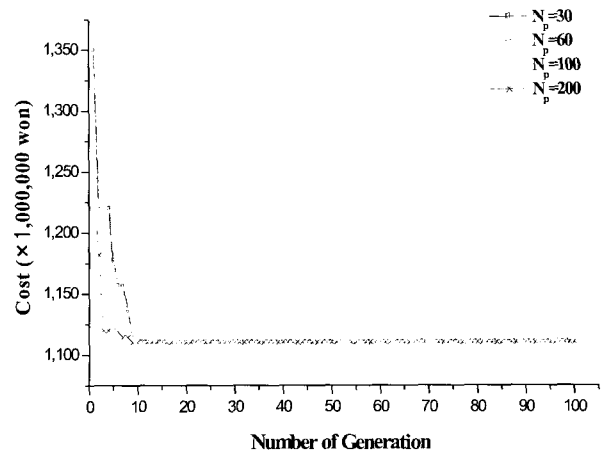


그림 8 N_p 변화에 따른 비용함수의 수렴이력

산변수의 값을 고정시킨 상태에서 국부최적화를 수행한 최적설계 결과 비교하였다. 표 4는 폐단면 리브의 형식 1에 대한 파라미터 분석결과이며, 그림 6~8은 각각의 파라미터 변화에 따른 비용함수의 수렴이력이다. 표 4와 그림 6~8에서 나타난 바와 같이 R, η, N_p 가 각각 10000, 6, 30인 경우에 가장 효율적으로 최적화가 수행됨을 알 수 있으며, 이와 같은 결과는 다른 종류의 폐단면리브형식에 대해서도 동일하게 나타났다.

3.3 자동미분법(Automatic Differentiation: AD)을 이용한 구조 재해석

최적화를 위한 대부분의 구조기동제약조건은 음함수(Implicit Function)의 형태를 가진다. 따라서 구조해석은 구조물의 설계변수 값이 바뀔 때마다 수행되어야 한다. 이러한 작업은 많은 계산비용이 소요되지만 설계변수의 민감도 분석을 이용한 구조재해석(Structural Reanalysis)은 구조해석의 수를 줄이기 위한 좋은 도구로 이용될 수 있다.⁸⁾ 앞서 언급한바와 같이 IMLDS 알고리즘에서는 사하중에 대한 단면력과 활하중에 의한 처짐의 해석을 효율적으로 수행하기 위해 설계변수의 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 이용한 구조재해석을 이용한다. 이와 같은 설계변수의 민감도 분석을 이용한 구조 재해석은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S \cong S^* + \nabla S^*_X (X - X^*) \quad (4)$$

$$M \cong M^* + \nabla M^*_X (X - X^*) \quad (5)$$

$$r \cong r^* + \nabla r^*_X (X - X^*) \quad (6)$$

여기서, r^*, r = 활하중에 의한 현재와 다음 설계 점의 수직처짐; M^*, M = 사하중에 의한 현재와 다음 설계점의 단면 모멘트; S^*, S = 현재와 다음 설계점의 전단력; X, X^* = 현재와 다음 설계점의 설계변수값; $\nabla r^*, \nabla M^*, \nabla S^*$ = 현재 설계점의 처짐, 모멘트, 전단의 기울기 행렬이다.

도함수를 이용한 설계변수 민감도 해석은 강바닥판 교량과 같은 대형 구조물의 시스템 최적화에서 일반적으로 방대한 작업이다. 이와 같은 설계변수 민감도 해석을 위한 방법으로는 수 계산(Hand cording), 유한차분법(finite difference Method), 문자식에 의한 미분방법(Symbolic Differentiation Method)이 사용될 수 있다. 이러한 방법은 많은 계산 시간과 계산 오차의 축적, 실제 구조물의 적용성이 떨어지기 때문에 거의 불가능하거나 사용할 수 없는 방법이다. 하지만 자동미분 기법은 적은 노력으로 정확하고 효율적인 도함수 계산을 할 수 있다는 장점을 가지는 방법이다. 자동미분기법은 초등연산(가·감·승·제)과 기본적인함수(sine, cosine, log 등)를 이용하여 순차적으로 미분하기 때문에 함수의 형태가 아무리 복잡하다 하더라도 식(7)과 같은 연쇄법칙을 이용하여 미분이 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial x} f(g(x)) \Big|_{x=x_0} = \left(\frac{\partial}{\partial y} f(y) \Big|_{y=g(x_0)} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} g(x) \Big|_{x=x_0} \right) \tag{7}$$

이와 같은 초등연산의 조합을 반복함으로써 미분법을 정확하고 기계적으로 계산 할 수 있다. 일반적으로 자동 미분의 방법은 전방모드(Forward Mode)와 후방모드(Backward Mode)의 두 가지 방법이 개발되었다. 전방모드는 독립변수에 대한 도함수를 유지하며 미분하는 방법이며, 후방모드는 최종결과에 대한 매개변수가 도함수 값을 유지하는 방법이다. 이러한 연구는 Griewank & Croliss⁶⁾ 그리고 Berz 등²⁾에 의해 수행된 바 있다. 현재는 여러 가지 자동미분도구들이 사용가능하며, 이러한 프로그램에는 FORTRAN 코드로 된 ADIFOR, ODYSSEE 그리고 ADOL-F와 C

언어로 된 ADOL-C 등이 있다. 본 논문에서는 ADIFOR³⁾를 사용하였다. 식(4)~(6)에서 나타난 바와 같이 본 연구에서는 1차도함수를 이용한 선형 근사구조해석기법이 사용되었으며, 중간매개변수가 민감도 분석에 적용되지 않았기 때문에 미분방법으로는 전방모드방법이 사용되었다.

4. 적용 예제

4.1 적용예제 일반사항

제안된 IMLDS 알고리즘의 효율성과 신뢰성(혹은 수렴성)을 증명하기 위해 총 길이 400m(80m+120m+120m+80m, 4경간)를 가지는 강바닥판 교량에 적용하였고, 많은 연구자들에 의해 증명된 CSL 알고리즘과 기존연구²⁰⁾에서 제안된 MLDS 알고리즘의 결과와 비교하였다. CSL 알고리즘과 MLDS 알고리즘은 국부최적화 기법을 사용하므로 폐단면리브와 같은 이산형변수를 최적화 할 수 없어 현재 실무에서 많이 사용되고 있는 4가지형식의 폐단면리브에 대해 각각 최적화를 수행하였다. 적용예제에 사용된 교량에 대한 일반사항은 표 5에 나타내었고, 교량의 종단면 설계그룹과 횡단면을 그림 9와 그림 10에 각각 나타냈다.

각각의 방법을 사용하여 최적설계를 수행하기 위해서는 구조해석을 필요로 한다. 앞서 언급된 바와 같이 주형의 구조해석은 강바닥판을 포함한 교량 시스템을 단일 Grid 요소로 모델링 하였고, 활하중 재하에 따른 등가의 비틀림 하중을 고려하여 구조해석을 수행하였다. 강바닥판의 구조해석은 알고리즘에서 언급된 Pelikan-Esslinger 방법을 사

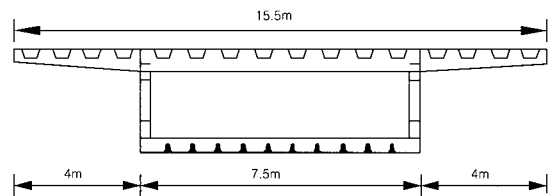


그림 10 횡 단면

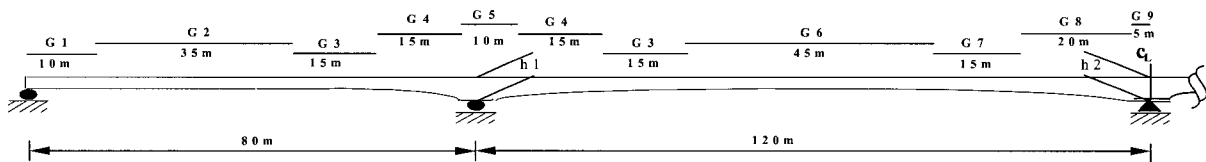


그림 9 종단면 설계 그룹

표 5 대상교량의 일반사항

| | | | |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------------------------|
| 교량 형식 | 4경간 연속 강바닥판 교량 | 리브의 수(EA) | 20-22 |
| 교량의 길이(m) | 80+120+120+80=400 | 리브의 형태 | 폐단면 리브 |
| 교량의 폭(m) | 15.5 | 설계 하중 | DB/DL-24 |
| 차로 수 | 4 | 강재의 종류 | SM490 ($f_a=1900\text{kgf/cm}^2$) |
| 주형 수 | 1 | | |

표 6 강바닥판교의 재료 및 제작비용

(×1,000원/ton)

| | 재료비 | 제작비 | 총비용 |
|-----|-----|-----|-----|
| 주형 | 350 | 442 | 792 |
| 바닥판 | 350 | 513 | 863 |

용하였다. 한편 비용함수를 산정하기 위한 단위 재료비와 제작비는 표 6에 나타내었으며 단위비용의 적용기준은 '중합물가정보'(2002년 11월)를 근거로 하였다.

각각의 최적설계 알고리즘에 의해 대상교량의 최적설계를 수행함에 있어서 설계변수는 시공이 가능한 치수로 표현되어야 하므로 최종적인 연속형 설계변수의 결과들은 의사산형 기법을 이용하여 두께는 2mm단위, 높이는 5cm 단위로 할증하였다.

4.2 최적설계의 결과 및 각 알고리즘의 효율성 비교

표 7에서는 각각의 알고리즘에 의한 최적설계의 결과를 보여주고 있다. 앞서 언급된 바와 같이 주형의 높이를 최적설계 하기 위해 매개변수인 a, b가 설계변수로 사용되었지만 최적설계 결과는 첫 번째 교각부와 두 번째 교각부의 높이인 h1과 h2를 제시하여 놓았다. 표 7에서 보여주고 있는 바와 같이 CSL 알고리즘은 폐단면리브의 형식이 1인 경우에 대한 최적설계가 가장 경제적으로 나타났으며, 이러한 결과는 MLDS 알고리즘과 본 연구에서 제안된 IMLDS 알고리즘의 경우도 마찬가지로 나타났다. 또한 폐단면리브를 제외한 설계변수의 최적설계 결과는 하부플랜지 설계그룹 9를 제외하고는 최소두께이거나 설계최소두께 규정이 지배적인 제약조건(Active Constraint)으로 동일

표 7 최적설계 결과

| 구 분 | | 초기치 | CSL 알고리즘 | | | | MLDS 알고리즘 (조효남, 1999b) | | | | IMLDS 알고리즘 | | |
|------------------|-----------------|--------------|---------------------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|---------------|------|------|
| 주 형 | 복부 두께(mm) | 1 | 16 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 2 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 3 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 4 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 5 | 14 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | |
| | | 6 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 7 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 8 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 9 | 16 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | 하부플랜지 두께(mm) | 1 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 2 | 18 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 3 | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 4 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 5 | 26 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | |
| | | 6 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 7 | 16 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 8 | 22 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| | | 9 | 28 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | |
| | 높이(m) | b | 3.00 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | |
| | | h1 | 6.50 | 4.40 | 4.40 | 4.40 | 4.40 | 4.40 | 4.40 | 4.40 | 4.40 | 4.40 | |
| | | h2 | 7.50 | 6.30 | 6.30 | 6.30 | 6.30 | 6.30 | 6.30 | 6.30 | 6.30 | 6.30 | |
| | 바 닥 판 | 상부플랜지 두께(mm) | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | |
| | | 폐단면리브 형식 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | |
| | | 가로보 (mm) | b _{0b} (m) | 0.32 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| | | | h _{0b} (m) | 1.00 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 |
| | | | t ₀₁ | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | | t ₀₂ | 14 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 시스템 구조해석 횟수(회) | - | 1,123 | 1,281 | 1,378 | 1,344 | 6 | 6 | 6 | 6 | 4 | | | |
| 비용(×1,000,000 원) | 2,297 | 1,864 | 1,877 | 1,897 | 1,910 | 1,864 | 1,877 | 1,897 | 1,910 | 1,867 | | | |
| 계산시간 | - | 5'03" | 5'31" | 6'22" | 6'19" | 1'18" | 1'10" | 1'18" | 1'26" | 56" | | | |

하게 나타났다. 하지만 표 7에 나타난 바와 같이 CSL 알고리즘과 MLDS 알고리즘을 이용하여 강바닥판교를 최적 설계하기 위해 필요한 소요시간(펜티엄 IV 기준)은 각각 23'15"과 5'12"이며, 시스템의 구조해석 횟수는 각각 5000회와 24회이지만 본 연구에서 제안된 IMLDS 알고리즘의 경우는 최적설계결과를 얻기까지 소요되는 시간이 불과 56초의 시간이 소요되며, 교량 시스템의 구조해석은 4회로 CSL 알고리즘과 MLDS 알고리즘에 비해 엄청난 효율성을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 기존의 CSL 알고리즘과 MLDS 알고리즘의 경우 각각의 폐단면리브의 형식에 대해 반복적으로 최적설계를 수행해야 하기 때문에 생긴 당연한 결과이다. 이뿐 아니라, 특히 CSL 알고리즘은 직접적인 교량시스템의 구조해석을 통해 최적설계를 수행하였기 때문에 같은 최적설계 결과를 나타내는 다른 알고리즘들에 비해 최적설계 결과를 얻기까지 가장 많은 계산시간과 시스템의 구조해석이 필요하다. 한편 표 7에서 나타난 바와 같이 MLDS 알고리즘은 각 폐단면리브에 대해 6회의 구조해석이 수행된 후 최적설계 결과를 얻었는데, IMLDS는 불과 4번의 시스템 구조해석만에 최적설계가 완료되었음을 쉽게 알 수 있다. MLDS 알고리즘의 경우는 사하중과 활하중에 의한 응력산정시 모두 응력재해석 기법을 사용하기 때문에 최적설계 과정에서 설계변수의 변화에 따른 응력산정에 있어서 다소 정확성이 떨어지기 때문에 생긴 결과로 판단된다.

이상과 같은 결과로 볼 때, IMLDS 알고리즘은 정확성을 확보하면서도 효율성이 다른 알고리즘들에 비해 매우 우수하다고 할 수 있다.

4.3 알고리즘의 수렴성 (Convergency) 검토

본 연구에서 IMLDS 알고리즘의 수렴성을 검토하기 이전에 비용함수와 제약조건에 가장 지배적인 설계변수를 알아보기 위해 지배적인 제약조건 중에 하나인 휨응력 제약조건과 비용함수에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 주형높이, 하부플랜지 두께, 복부 두께에 대해 최적설계 결과를 기준으로 70%에서 130%까지 변화를 주었을 때 제약조건과 비용함수의 변화를 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 휨응력과 비용함수의 경우에 대해 동일하게 주형높이가 가장 민감한 것으로 나타났음을 쉽게 알 수 있다.

이와같은 결과로 볼 때 최소비용의 설계를 위해서는 좌굴문제가 없는 수준까지 주형의 높이를 크게 하는 것이 유리하다고 할 수 있다. 일반적으로 운송 가능한 주형의 최대 높이는 3m¹³⁾이지만 현장에서 제작되는 주형의 높이는 제

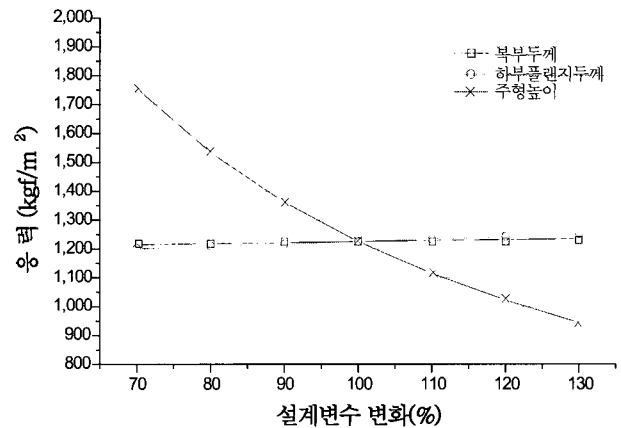


그림 11 제약조건 민감도

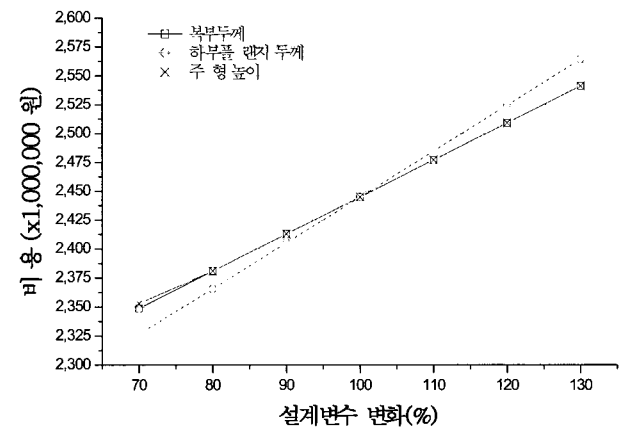


그림 12 비용함수 민감도

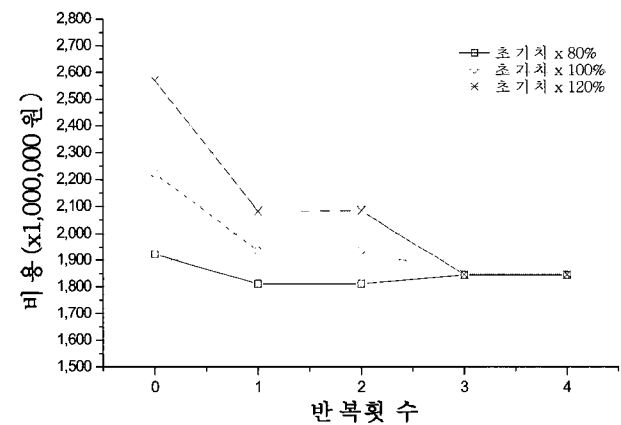


그림 13 비용함수 수렴이력

한이 없다. 따라서 현장에서 세그먼트를 조립하는 것이 가능하다면 건축한계나 교통조건에 근거한 한계까지 주형의 높이를 증가시키는 것이 바람직하다.

해의 수렴성은 알고리즘의 신뢰성에 있어서 매우 중요한 요소이다. 초기치의 80%, 100%, 120%가 제안한 알고리즘의 수렴성을 평가하기 위해 적용되었으며 이에 대한 비용함수의 수렴이력은 그림 13에 나타내었고 가장 지배적인

설계변수인 주형의 높이에 대한 수렴이력은 그림 14와 15에 나타내었다. 그림 13~15에서 나타난 바와 같이 초기치가 다르다 할지라도 제안된 다단계 최적설계 알고리즘은 목적함수와 설계변수에 대한 수렴성이 보장된다는 것을 알 수 있다. 따라서 제안된 다단계 최적설계 알고리즘은 수렴

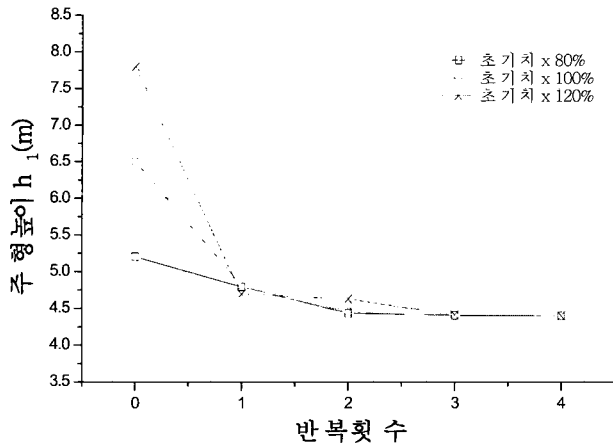


그림 14 설계변수 h1의 수렴이력

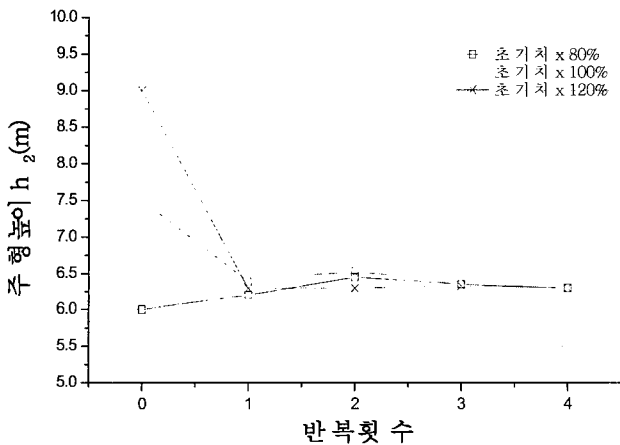


그림 15 설계변수 h2의 수렴이력

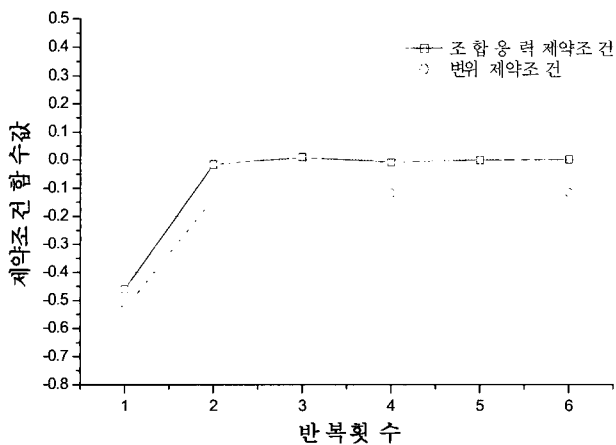


그림 16 제약조건의 수렴이력

성이 보장되는 알고리즘임을 알 수 있다.

한편 그림 16에서 보여주고 있는 바와 같이 설계그룹 9의 조합응력과 처짐 제약조건에 대한 수렴이력을 추가적으로 조사하여 보았다. 그림에서 나타난 바와 같이 설계그룹 9의 조합응력이 지배적인 제약조건이기 때문에 조합응력이 최적설계의 결과에 가장 지배적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 처짐제약조건 소거기법의 사용은 강바닥판교의 최적설계에 있어서 효과적으로 적용될 수 있는 방법임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 강바닥판교를 효율적으로 최적화하기 위한 효율적인 IMLDS 알고리즘을 개발하고, 수치예제를 통하여 효율성과 알고리즘의 수렴성을 검토하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제안된 최적설계 알고리즘은 CSL 알고리즘과 기존연구에서 제안된 MLDS 알고리즘 비교하여 수렴성을 확보하면서 효율성을 극대화한 최적설계 알고리즘이다.
- 2) 처짐 제약조건 소거기법과 구조해석의 효율성을 높이기 위한 자동미분기법, 그리고 응력해석기법은 강바닥판교의 최적설계에 있어서 효율성을 증대시킬 수 있는 효과적인 방법이다.
- 3) 이산형 설계변수와 연속형 설계변수가 혼합되어 있는 형태로 구성된 문제에 대해 유전자 알고리즘의 적용은 효율적이며, 결과의 신뢰성 또한 확보할 수 있다.
- 4) 본 연구에서 제안하는 최적설계 알고리즘은 강바닥판교량의 자동화 최적설계를 위한 프로그램개발에 핵심이 되는 기술이며, 타 형식 교량의 최적설계 알고리즘을 개발하는데 유용한 모델이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 BK21 사업 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Al-Shaleh, K. S. "Optimum design of straight steel box girder bridges", Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 1994
2. Berz, M., Bischof, C., Corliss, G., and Gri-

- wank, A., eds. "Computational differentiation-techniques, tools, and applications". *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, Pa, 1996
3. Bichof, C., Carle, A., Corliss, G., Griewank, A., and Hovland, P. "ADIFOR-generating derivative codes from FORTRAN 77 programs". *Scientific Programming*, Vol.1, No.1, 1992, pp. 11~29
 4. Carroll, D. F. FORTRAN Genetic Algorithm(GA) Driver Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, *University of Illinois at Urbana-Champaign*, Urbana, Illinois 61801, 1998
 5. Dhillon, B. and Kuo, C. "Optimum design of composite hybrid plate girder", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.117, No.7, 1991, pp.2088~2098
 6. Griewank, A., and Corliss, G. F., eds. Automatic differentiation of algorithms : theory, implementation, and application. *Society of Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia, Pa, 1991
 7. Haftka, R. T. "An improved computational approach for multi-level optimum design". *Journal of Structural Mechanics*, Vol.12, No.2, 1984, pp.245~261
 8. Kirsch, U. Structural Optimization. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 1993
 9. 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.
 10. Lust, R.V. and L.A.Schmit : "Alternative Approximation Concepts for Space Frame Synthesis, AIAA/ASME/ASCE/AHS 26th Structures", *Structural Dynamics and Materials Conference*, 1985, pp.333~348
 11. Rao, S. S. and Sunar, M. "Substructure decomposition method for the control design of large flexible structure". *AIAA Journal*, Vol.30, No.10, 1992, pp.2573~2575
 12. Vanderplaats, Garret, N., "ADS-A Fortran Program for Automated Design Synthesis, version 1.10", *Engineering Design Optimization Inc.*, Santa Barbara, California, 1985
 13. 강도로교 상세부설계지침, 건설교통부, 1997
 14. 도로교설계기준, 사단법인 도로교통협회, 2000
 15. 유신코아퍼레이션, "완도-신지도간 연육교 가설공사 구조 및 수리계산서", 건설교통부, 1997
 16. 이광민, "강상판교의 최적 Life-Cycle Cost설계.", 석사학위논문, 한양대학교, 2000
 17. 종합물가정보, 사단법인 한국물가정보, 2002
 18. 정지승, "강바닥판교의 단단계 다목적 최적설계.", 박사학위논문, 한양대학교, 1999
 19. 조효남, 정지승, "효율적인 재해석기법을 이용한 강상자형교의 최적설계", 토목학회 논문집, Vol.11, No.5, 1999a, pp.539~548
 20. 조효남, 정지승, 민대홍(1999b). "강바닥판교의 단단계 최적설계", 한국강구조학회 논문집, Vol.12, No.5, pp.475~485
 21. 조효남, 정지승, 민대홍(2000). "강상자형교의 자동화 최적설계 프로그램", 한국강구조학회 논문집, Vol. 12, No.5, pp.475~485
 22. 조효남, 민대홍, 이광민(2001). "강상판교의 생애주기 비용 최적설계", 한국강구조학회 논문집, Vol.13, No.4, pp.337-349