

강상자형교의 자동화 최적설계 프로그램

Automated Optimum Design Program for Steel Box Girder Bridges

조 호 남¹⁾ · 정 지 승²⁾ · 민 대 홍³⁾

Cho, Hyo-Nam Chung, Jee-Sung Min, Dae-Hong

요 약 : 본 연구에서는 시공성을 고려한 변단면을 갖는 합성형 강상자형교의 최소비용을 구하기 위한 자동화 최적설계 프로그램을 개발하였다. 강상자형교 설계에 필요한 설계 제약조건은 도로교 표준 시방서를 비롯한 각종 설계기준과 실무자의 경험을 바탕으로 정식화하였다. 최적화의 효율성을 위해 강상자형교의 특성을 고려한 제약조건 소거기법, 설계 변수 연결기법, 응력 재해석 기법을 적용하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 구조해석 모듈, 최적설계모듈, 사용자의 입력 편의를 위한 전처리모듈, 설계 업무자동화를 위한 후처리모듈로 구성되어 있으며, 구조해석은 신뢰성이 입증된 상업용 구조해석 프로그램인 RM-SPACEFRAME을 이용하여 격자모델에 대해 실시하도록 하였다. 또한 개발된 최적설계 프로그램의 효율성과 실용성을 확인하기 위하여 몇 가지의 수치예제를 적용하였다. 본 연구에서 개발된 최적설계 시스템은 향후 타 형식의 교량에 최적설계 프로그램의 모형으로 활용될 수 있으리라 사료된다.

ABSTRACT : In this study, an automated optimum design program for steel box girder bridges has been developed for the optimum design of composite steel box girder bridges. The design constraints required for the optimum design of steel box girder bridges are based on the Korean standard bridge specification. Considering characteristics of steel box girder bridges, several approximation techniques, such as artificial constraint deletion, variable linking and stress reanalysis technique etc. are also introduced to enhance the efficiency of optimization. The developed program is mainly composed of major sub-system modules including structural analysis module using commercial structural analysis program such as RM-SPACEFRAME, optimum design module, pre-process module for friendly user input, and post-processor module for office automation. In addition, in order to demonstrate the efficiency and applicability of the developed optimum design program for steel box girder bridges, a few numerical examples are applied. Based on the results of the application, it may be stated that the automatic optimum design program developed in this study can be a prototype model for the development of optimum design program for other type of bridge.

1) 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수
2) 정회원, (주)삼보기술단 차장, 공학박사
3) 학생회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정, 구조
기술사

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

핵심용어 : 강상자형교, 자동화 최적설계, 제약조건소거기법, 설계변수연결기법, 응력재 해석기법

KEYWORDS : Steel box girder bridges, Automated optimum design, Artificial constraint deletion technique, Variable linking technique, Stress reanalysis technique

1. 서론

지금까지 실무에서 행해지고 있는 재래적인 설계에서는 기술자의 경험에 의해 가정된 구조형식 및 부재치수를 기초로 하여 설계조건과 시방서의 설계허용한계를 만족하는 몇 개의 구조를 설계한 후 그 중에서 비용이 가장 적게 드는 것을 골라 최종설계로 채택하고 있었으나, 설계조건을 만족하는 허용설계의 종류는 무수히 많이 존재하기 때문에 그 중에서 비용이 싼 것을 선택한다는 것은 기술자의 경험에 따를 수밖에 없고 이렇게 결정된 결과가 최적이라는 보장이 없다. 최근 국내에서도 최적설계에 대한 인식이 활성화되고 있으나 아직까지 자동화설계를 위한 프로그램개발에 국한하고 있어 최적화 기법을 이용한 실 구조물의 최적설계는 미진한 실정이다. 국외에서도 최근에 와서 몇몇 연구자에 의해 복잡한 강교에 대한 최적화 방법이 연구되었다. Sahin(1985)과 AI-Gahtain(1986)은 AASHTO(1983) 시방서에 근거하여 플레이트거더 교량의 최적설계 알고리즘을 개발하였고, Memari(1991)는 3차원 유한요소 모델을 이용하여 플레이트거더 교량의 최적화를 수행하였다. 강상자형교의 최적설계에 대한 최근의 연구는 Al-Shaleh(1994)의 연구로서 AASHTO-LRFD시방서에 따른 U형 타입의 강상자형교의 최적설계 알고리즘을 개발하였다. 이러한 최적설계 알고리즘의 대부분은 해석적 또는 유한차분법에 의한 설계민감도해석을 바탕으로 하는 재해석 기법을 사용하여 효율성을 높이려는 노력을 하였으나, 이동하중과 같은 복잡한 하중을 효과적으로 다룰 수가 없고, 또한 모든 제약조건을 한번에 고려하는 일반적인 최적설계 알고리즘을 사용함으

로써 효율적인 최적설계를 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 상용 구조해석 프로그램인 RM-SPACEFRAME을 이용하여 결과의 신뢰성을 확보하고 엄청난 계산시간을 줄일 수 있는 효율적인 재해석 기법과 강상자형교의 특성을 고려한 제약조건 소거기법 및 다양한 최적화 기법을 도입한 최적화 알고리즘을 사용하여 강상자형교의 최적설계 프로그램을 개발하였다. 또한 자동화 설계를 위하여 단면제원과 정보를 입력하는 전처리 시스템, 최적설계 후 결과를 처리하는 후처리 시스템을 이용하여 설계 초심자도 설계에 쉽게 접근할 수 있도록하여 비록 설계에 참여하지 않은 기술자라 할 지라도 상호의견교환이 쉽도록 GUI(Graphic User Interface)를 구축하였으며 구조계산서 작성 모듈에 의한 전 설계과정을 문서화함으로써 설계 보고서에 이용될 수 있도록 하였다.

2. 최적화 문제의 정식화

일반적인 강상자형교의 설계흐름은 콘크리트 바닥판의 설계가 주형의 설계에 앞서 수행되며 가로보와 세로보의 치수도 주형의 설계 수행에 필요한 설계상수로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 바닥판, 가로보, 세로보, 주형을 분리하여 최적설계 문제를 정식화하였다.

2.1 설계변수

그림 1~3에 나타낸 바와 같이 콘크리트 바닥판의 설계변수는 바닥판의 높이와 바닥판의 단위 폭당 철근량을 설계변수로 선정하였고, 가로보와

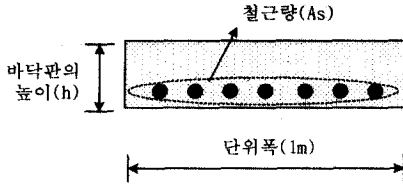


그림 1. 바닥판 설계변수

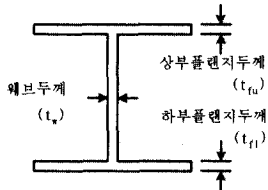


그림 2. 가로보 및 세로보 설계변수

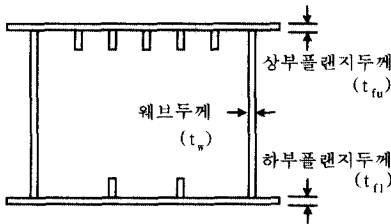


그림 3. 주형 설계변수

세로보의 설계변수는 취약단면에 대해서 상·하부 플랜지두께와 웨브의 두께로 선정하였으며, 주형의 설계변수는 각각의 변단면에 대해 상·하부 플랜지두께와 웨브의 높이 및 두께로 선정하였다.

구조최적설계에 있어 설계변수의 수가 많아지면, 계산시간이 설계변수 수에 대해 기하급수적으로 증가한다[Lust:1985]. 따라서 구조물의 대칭성, 설계변수의 그룹화 그리고 능숙한 설계 기술자의 경험을 바탕으로 설계변수의 수를 최대한 줄인다면 더욱 효율적인 최적설계를 수행할 수 있다는 점에 착안을 두고 주형단면의 그룹화 및 설계변수 연결이 사용자의 의도에 따라서 실시될 수 있도록 하였다.

2.2 목적함수

본 연구에서는 강상자형교 상부구조물의 제작비

용을 목적함수로 정하였다. 제작비용의 정확한 이론적인 추정은 간단하지 않지만 제작비용이 구조물의 중량에 비례한다는 설계실무의 관행을 바탕으로 바닥판, 가로보 및 세로보와 주형의 목적함수를 식 (1)~(4)에 각각 제작비용의 함수로 정식화하였다.

$$F_D(X) = C_C V_C + C_R W_R \quad (1)$$

$$F_C(X) = C_{SC} \sum W_S \quad (2)$$

$$F_S(X) = C_{SS} \sum W_S \quad (3)$$

$$F_G(X) = C_{SG} \sum W_S \quad (4)$$

여기서,

$F_D(X)$: 바닥판의 비용함수

$F_C(X)$: 가로보의 비용함수

$F_S(X)$: 세로보의 비용함수

$F_G(X)$: 주형의 비용함수

C_C : 콘크리트의 단위체적당 비용(만원/m³)

V_C : 콘크리트의 체적(m³)

C_R : 철근의 단위중량당 비용(만원/ton)

W_R : 철근의 중량(ton)

C_{SC} : 가로보강재의 단위중량당 비용(만원/ton)

C_{SS} : 세로보강재의 단위중량당 비용(만원/ton)

C_{SG} : 주형강재의 단위중량당 비용(만원/ton)

W_S : 주형강재의 중량(ton)

2.3 제약조건

강상자형교의 부재설계에 사용되는 제약조건은 도로교 표준 시방서[건설교통부:1996]와 도로설계요령[도로공사:1992]을 기준으로 표 1과 같이 정식화하였다.

3. 전산화 최적설계 시스템

강상자형교의 최적설계 시스템은 우선 설계자료를 전·후처리모듈을 통하여 입력되고 이 초기자

표 1. 콘크리트 바닥판, 가로보·세로보 및 주형의 제약조건

구분	설계제약조건		기호 설명
콘크리트 바닥판	휨모멘트	$G_1 = \gamma M_n / \phi M_u - 1 \leq 0$	M_n : 공칭모멘트, M_u : 계수모멘트 γ : 하중증가계수, ϕ : 강도감소계수
	최대철근비	$G_2 = \rho / \rho_{\max} - 1 \leq 0$	ρ : 사용 철근비 $\rho_{\max} = 0.85 \times 0.75 \times \beta_1 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{6000}{6000 + f_y} \right)$
	최소철근비	$G_3 = 1 - \rho / \rho_{\min} \leq 0$	ρ : 사용 철근비, $\rho_{\min} = \frac{0.8\sqrt{f_{ck}}}{f_y} \times b_w d \geq \frac{14}{f_y}$
	바닥판 최소두께	$G_4 = h_{\min} - h \leq 0$	h : 바닥판 사용높이, h_{\min} : 바닥판 최소두께
가로보 및 세로보	휨응력	$G_2 = f_{sl} / f_{sla} - 1 \leq 0$	f_{su}, f_{sl} : 가로보 및 세로보의 상·하단의 휨응력 f_{sua}, f_{sla} : 가로보 및 세로보의 상·하단의 허용휨응력
	전단응력	$G_3 = v / v_a - 1 \leq 0$	v : 설계단면의 전단응력, v_a : 허용전단응력
	합성응력	$G_4 = \left(\frac{f}{f_a} \right)^2 + \left(\frac{v}{v_a} \right)^2 - 1.2 \leq 0$	f : 설계 단면의 작용 휨응력, f_a : 설계 단면의 허용휨응력 v : 설계 단면의 작용 전단응력, v_a : 설계 단면의 허용전단응력
주 형	조합응력	$G_{3i-2} = f_{cu}^i / f_{ca}^i - 1 \leq 0$	f_{cu} : 콘크리트 바닥판 상단의 휨응력 f_{ca} : 콘크리트 바닥판 상단의 허용휨응력
		$G_{3i-1} = f_{su}^i / f_{sua}^i - 1 \leq 0$	f_{su}, f_{sl} : 강형 상·하단의 휨응력 f_{sua}, f_{sla} : 강형 상·하단의 허용휨응력
		$G_{3i-0} = f_{sl}^i / f_{sla}^i - 1 \leq 0$	i : 각각의 하중조합 단계(1~6) †
	전단응력	$G_{19} = f_v / f_{va} - 1 \leq 0$	f_v : 설계단면의 전단응력, f_{va} : 허용전단응력
	합성응력	$G_{20} = \left(\frac{f_b}{f_{ba}} \right)^2 + \left(\frac{f_v}{f_{va}} \right)^2 - 1.2 \leq 0$	f_b : 각 단면의 작용 휨응력, f_{ba} : 각 단면의 허용휨응력 f_v : 각 단면의 작용 전단응력, f_{va} : 각 단면의 허용전단응력
	피로 허용응력	$G_{21} = (f_{cmax} - f_{cmin}) / f_{fa} - 1 \leq 0$ $G_{22} = (f_{tmax} - f_{tmin}) / f_{fa} - 1 \leq 0$ $G_{23} = (v_{max} - v_{min}) / v_{fa} - 1 \leq 0$	f_{cmax}, f_{cmin} : 압축플랜지 최대·최소 휨응력 f_{tmax}, f_{tmin} : 인장플랜지 최대·최소 휨응력 v_{max}, v_{min} : 대수적 최대·최소 전단응력 f_{fa}, v_{fa} : 피로 허용응력범위
	항복 안전도	$G_{24} = \Sigma f / f_y - 1 \leq 0$	$\Sigma f = 1.3(f_{DB} + f_{DA}) + 2.0 f_{LA}$ f_{DB}, f_{DA} : 합성전·후 사하중에 대한 응력 f_{LA} : 합성후 활하중에 대한 응력, f_y : 강재의 항복응력
	활하중처짐	$G_{25} = \delta / \delta_a - 1 \leq 0$	δ : 활하중에 의한 처짐, δ_a : 허용처짐
최소두께	$G_{26} = t_{\min} - X_i \leq 0$	t_{\min} : 최소두께, X_i : 설계변수(상·하플랜지 및 웨브두께)	

† : $i = 1$: 합성전사하중, $i = 2$: 합성전사하중 + 합성후사하중 + 활하중, $i = 3$: 합성전사하중 + 합성후사하중 + 활하중 + 크리프하중, $i = 4$: 합성전사하중 + 합성후사하중 + 활하중 + 크리프하중 + 건조수축하중, $i = 5$: 합성전사하중 + 합성후사하중 + 활하중 + 크리프하중 + 건조수축하중 + 온도차하중, $i = 6$: 합성전사하중 + 합성후사하중 + 활하중 + 크리프하중 + 건조수축하중 - 온도차하중

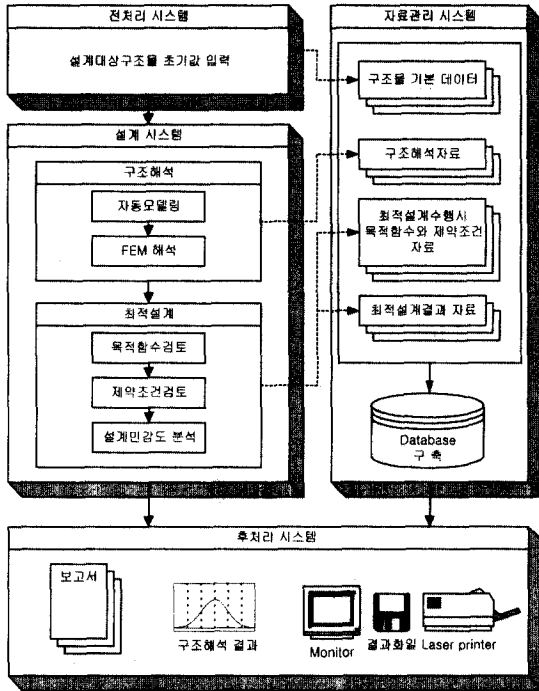


그림 4. 자동화 최적설계 시스템 구성도

료를 이용하여 구조해석이 수행되며 해석자료를 근거로 최적설계를 수행한다. 최적설계 과정 중 목적함수 및 제약조건은 물가자료 및 시방서 기준 등에서 얻을 수 있다. 제약조건을 구성하기 위하여 강상자형교의 도로교시방서 허용응력설계법으로 설계된 최근의 자료를 분석하였다. 그 결과 대부분의 설계에서 활하중 처짐에 대한 변위제약조건이 비지배적 제약조건이었다⁽¹¹⁾. 따라서 본 연구에서는 이러한 구조적 특성을 효과적으로 이용하기 위하여 응력제약조건과 변위제약조건을 분리하는 제약조건 소거기법을 사용하였다. 즉, 우선 응력제약조건만을 이용하는 최적설계를 수행하고 변위는 그 만족여부를 확인하여 만족하지 않으면 변위제약조건을 포함하는 최적설계를 수행하도록 하였다. 이와 같은 일련의 시스템 구성도와 최적설계 알고리즘을 각각 그림 4, 5에서 보여 주고 있다.

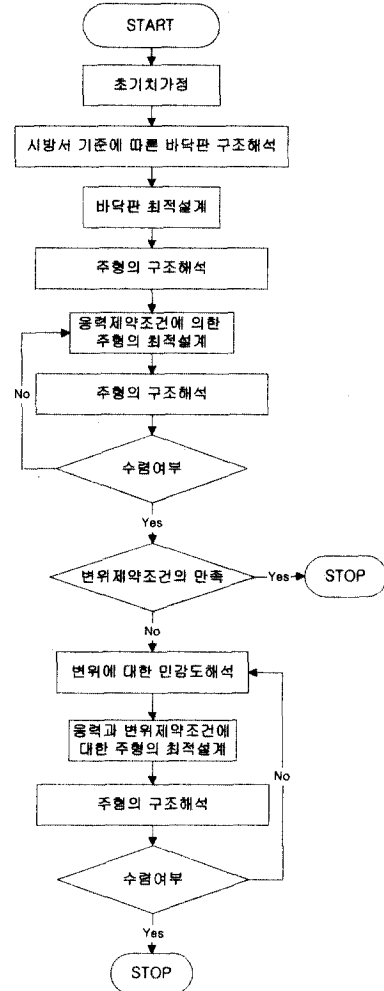


그림 5. 최적설계 알고리즘

3.1 구조해석 모듈

본 연구에서 개발된 강상자형교의 최적설계 프로그램은 해석결과의 신뢰성 확보를 위해 그 성능이 공인되어 설계실무에서 보편화되어 있는 RM-SPACEFRAME을 이용하였다. 상용 구조해석 프로그램을 실제적인 교량의 최적설계에 적용하여 최적화를 수행하면 많은 계산시간이 소요되므로 비효율적이다. 따라서 효율적이고 신속한 자료의 입출력이 가능하도록 주어진 하중과 제한

등의 정보를 이용하여 자동으로 구조해석 입력데이터를 생성하고 이를 통하여 이동하중해석 및 정적해석인 횡방향해석, 격자(Grid)모델해석을 수행하고 그 결과치인 단면력 및 응력을 자동으로 탐색하는 인터페이스 프로그램을 작성하였다.

또한 최적화 과정에서 반복되는 재해석은 식 (5)와 같은 근사화 응력 재해석기법을 도입하였다. 근사화 응력 재해석기법은 관련문헌[조효남, 정지승:1999]에서 제안한 바와 같이 우선 구조해석의 단면력을 상수로 고정하고 최적설계에 필요한 응력을 단면계수변화에 따른 근사화된 응력으로 근접 최적점을 구한다. 그리고 이점에서 구조해석을 다시 실시하여 응력의 수렴여부를 판단한다. 이때 수렴하지 않았다면 구조해석에서 구한 단면력을 다시 상수로 고정하고 최적설계를 반복수행한다. 이러한 응력 재해석방법은 설계민감도해석이 필요 없고 설계변수에 양함수인 단면계수의 계산만을 요구한다.

$$f \approx \{f^*\} + \left\{ \frac{Q^k(Z_X^* - Z_X)}{Z_X Z_X^*} \right\} \quad (5)$$

여기서,

- f : 다음 설계점에서의 응력
- $\{f^*\}$: 현재 설계점에서의 응력
- Q^k : 상수화된 k번째 구조해석의 단면력
- Z_X : 다음 설계점에서의 단면계수
- Z_X^* : 현재 설계점에서의 단면계수

3.2 최적설계 모듈

최적설계 모듈은 입력이나 생성된 데이터를 자료관리 모듈에 저장되어 실질적인 최적설계 모듈인 바닥판, 가로보, 세로보와 주형의 최적설계 모듈, 그리고 재해석 모듈을 유기적으로 결합하여 가장 효율적이고 신속한 설계가 될 수 있는 통합 모듈로 구성되어 있다. 효율성을 증진시키기 위해

강상자형교의 특성을 고려한 제약조건 소거기법 및 설계변수연결 등과 같은 기법들도 함께 사용되었다. 본 연구에서 사용한 최적화 기법은 [조효남:1998]과 같은 유사연구를 참조하여 해의 신뢰성면에서 우수한 ALMM (Augmented Lagrange Multiplier Method) 방법과 BFGS (Broydon-Fletcher-Goldforb-Shanno) 방법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의 최적해 탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부 최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS (Automated Design Synthesis) [G. N. Vanderplaats :1985]를 이용하여 수행하였다.

3.3 부부재 설계 모듈

부부재의 설계 시스템은 주부재의 설계 시스템에서 얻어진 데이터와 사용자가 입력한 데이터, 기 제작된 교량의 데이터베이스를 이용하여 설계가 실시된다. 기 제작된 교량의 데이터 일부가 데이터베이스화되어 있으며 부부재의 설계는 보강재(중·횡방향보강재, 수직·수평보강재, 하중집중점 보강재)설계, 다이아프램 설계, 부재이음 설계, 전단연결재 설계로 이루어져 있다. 이는 시방서 기준, 강구조 편람, 도로교 실무편람과 기 제작된 교량의 계산서를 바탕으로 모듈을 구성하였다.

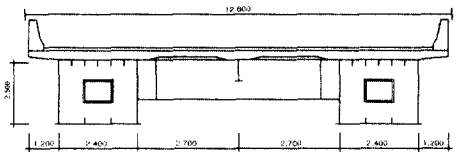
3.4 전·후처리 모듈

전처리 시스템은 사용자와의 원활한 인터페이스를 위해 해석 및 설계의 수행 시 필요한 하중의 입력, 초기치의 입력, 구조형식 및 제원 등의 입력 설계상수 및 기타 여러 가지 사항을 보다 효율적이고 쉽게 알아볼 수 있게 사용자가 편리하게 입력할 수 있도록 하였고, 후처리 시스템은 최적설계가 수행되어진 후에 구조계산과정, 구조해석 결과 및 최적설계결과 등을 보고서화 하고, 사용자의 의도에 따라서 부부재의 재설계가 원활하

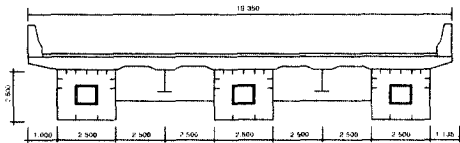
게 이루어 질 수 있도록 하였다. 이와 같은 전·후처리 시스템은 사용자와 친숙한 작업과 편의를 위한 모듈이 포함되어 있어야 하므로 사용자 중심의 GUI(Graphic User Interface)환경을 제공하고, 근래 사용이 보편화되어 있는 Windows 시리즈 운영체제에서 작업이 가능하도록 개발하였다.

4. 적용예

본 연구에서 개발된 강상자형교 최적설계 프로그램의 효율성과 실용성을 입증하기 위하여 그림 6, 7과 같이 이미 설계가 완료된 금강3교(4경간 200m)와 연화철육교(3경간 110m)에 적용하였다. 두 예제를 적용함에 있어서 설계조건 및 초기치는 각 대상교량의 구조계산서를 바탕으로 입력하였다. 본 연구에서 개발된 강상자형교 최적설계 프로그램은 사용자의 요구를 반영하는 설계가 될 수 있도록 하기 위하여 주형의 각 단면의 최적설계에 있어서 허용응력 감소율을 적용할 수 있다. 대상교량에 적용된 허용응력 감소율은 부모멘트 지점(금강3교-4번, 8번 그룹, 연화 철육교-3번 그룹)에는 부모멘트 재분배를 고려하여 90%의 허용응력 수준에서 설계가 되도록 하였으며, 부모멘트 이외의 단면에서는 80%의 허용응력 수준에서 설계가 되도록 적용하였다.



a) 금강3교

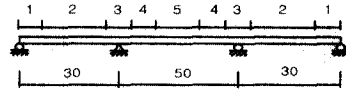


b) 연화철육교

그림 6. 적용예제 횡단면도



a) 금강3교



b) 연화철육교

그림 7. 적용예제 종단면도 및 단면그룹

4.1 프로그램 실행의 일반사항

그림 8에서 11은 전처리기의 입력과 후처리기의 출력의 일부를 나타낸 것이다. 이와 같은 전후처리기의 구성은 설계 및 구조해석을 위한 주 화면과 트리메뉴로 되어 있다. 트리메뉴에서 각 해당 항목을 클릭하여 사용자가 새로 설계하게 될 교량의 데이터를 직접 입력하거나 기존의 데이터

그림 10. 부부재 재설계 기능

를 읽어서 이미 수행된 데이터를 이용할 수도 있다. 그림 8은 전처리기를 이용하여 각각의 해당 설계항목의 입력 예를 보여주고 있다. 초기값을 입력함에 있어서 사용자의 편의를 위하여 설계된 자료를 분석하여 실무에서 자주 사용되는 치수나 부부재의 종류를 풀다운 메뉴를 이용하여 입력하거나 사용자가 직접 입력할 수 있도록 하였다. 프로그램을 실행하기 위한 데이터가 모두 입력되면 구조해석을 위한 파일만을 생성하거나 사용자가 원하는 다양한 옵션에 의한 최적설계를 수행할 수 있다. 실행버튼을 누르면 최적설계가 수행이 되고, 모든 최적설계가 끝나면 그림 9와 같이 각 단계별·부재별 구조해석 결과를 그래프나 텍스트로 볼 수 있다. 또한 그림 10과 같이 부부재의 체크리스트를 리스트 박스를 통해 간단히 검토한 후 부부재 설계에 오류가 있거나 사용자가 추가적인 요구사항이 있을 경우 해당 항목을 클릭하여 재설계를 수행할 수 있다. 사용자가 모든 설계 과정에 만족을 하면 단순히 보고서 작성 버튼을

그림 11. 보고서 작성기능

클릭 함으로써 그림 11과 같은 보고서를 작성할 수 있다.

4.2 프로그램 실행결과 및 분석

프로그램의 실행결과는 시공이 용이한 단면의 치수로 표현되어야 보다 실질적인 최적설계가 될 수 있으므로, 바닥판의 철근량 산출에 있어 이형 철근의 개수와 철근 단면적이 정리되어있는 데이터베이스를 바탕으로 실제적으로 시공 가능한 사용철근의 종류와 배근간격을 결정하였다. 이와 같은 최적설계 결과는 시간장에 상관없이 바닥판의 횡방향 해석만으로 최적설계를 수행할 수 있다. 본 프로그램을 이용한 바닥판의 최적설계결과와 기 설계된 캔틸레버부 바닥판의 결과를 표 2에 제시하였다. 표 2에 나타난 바와 같이 최적설계 후의 바닥판 캔틸레버부 높이는 교축 직각방향을 기준으로 금강 3교의 경우 29.09cm, 연화철육교의 경우 24.26cm로 나타났으며, 이는 시공성

표 2. 바닥판 캔틸레버부 최적설계 결과

구분		설계된 데이터	최적설계 결과(이산화 전)	최적설계 결과(이산화 후)
바닥판 높이(cm)	금강3교	30	29.09	30
	연화철육교	30	24.26	25
단위 폭당 철근량(cm ²)	금강3교	22.92	14.84	15.89
	연화철육교	15.89	9.35	9.93
철근배근 간격	금강3교	H19@125	-	H16@125
	연화철육교	H16@125	-	H16@200

표 3 가로보, 세로보 및 주형의 최적설계 결과

구분	설계변 데이터						최적설계 결과						
	금강3교			연화철육교			금강3교			연화철육교			
	t_{fu}	t_w	t_{fl}	t_{fu}	t_w	t_{fl}	t_{fu}	t_w	t_{fl}	t_{fu}	t_w	t_{fl}	
가로보	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	10	10	
세로보	10	10	10	12	12	12	10	10	10	10	10	10	
주형	그룹 1	10	10	12	12	12	12	10	10	10	10	10	
	그룹 2	10	10	16	12	12	12	10	14	10	10	10	
	그룹 3	20	12	24	14	12	14	16	10	18	10	12	
	그룹 4	30	12	32	12	12	12	24	14	26	10	10	
	그룹 5	20	12	22	12	12	14	16	10	28	12	10	
	그룹 6	10	10	10	-	-	-	10	10	10	-	-	-
	그룹 7	14	12	14	-	-	-	10	10	10	-	-	-
	그룹 8	18	12	18	-	-	-	16	10	16	-	-	-
	정모멘트 최대 응력 (kg/cm^2)	1570.37			1237.01			1503.25			1065.80		
	부모멘트 최대 응력 (kg/cm^2)	1613.63			1408.22			1693.85			1706.19		
허용 처짐(cm)	10			10			10			10			
실제 처짐(cm)	3.01			1.17			3.39			2.54			
재해석수(회)	-			-			3			3			
제작비용(만원)	40510.58			32733.04			37681.3			28314			
설계 소요시간	-			-			7분44초			46분42초			

을 고려한 단면으로 환산하면 금강3교는 30, 연화철육교는 25cm가 된다. 최적설계 후의 철근량도 바닥판의 경우와 마찬가지로 금강3교의 경우 14.84cm², 연화철육교의 경우 9.35cm²로 나타났다. 이를 데이터베이스검색에 의한 이산형 결과로 나타내면 금강3교의 경우 H16@125, 연화철육교의 경우 H16@200이 된다. 이와 같은 결과는 주형의 최적설계에서 실질적인 사하중과 합성후 단면제원을 산출하는 근거가 되어 주형의 최적설계에서 보다 합리적인 최적설계를 수행할 수 있게 해준다.

가로보, 세로보, 주형의 설계변수도 바닥판의 경우와 같이 시공이 가능한 치수로 표현되어야 하므로 의사이산형 기법을 이용하여 각 부재의 두께가 2mm단위로 산출되게 하였다. 표 3은 이러한 조건하에서 수행된 가로보, 세로보, 주형의 최적설계 결과를 보여주고 있다. 최적설계 프로그램으로 설계를 실시한 결과 설계소요시간은 금강3교의 경우 7분44초, 연화철육교의 경우 46분

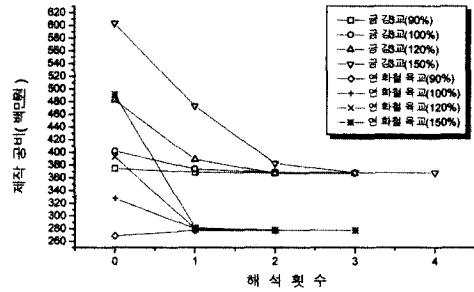


그림 12. 주형최적설계 모듈의 목적함수 수렴성

그림 13. 허용응력에 대한 단면의 응력의 비율

그림 14. 제작비용의 비교

42초로 실제 실무에서 행해지는 작업시간에 비해 상당히 빠른 시간 내에 설계가 이루어짐을 알 수 있다. 또한 활하중 허용치짐을 L/500로 적용하였을 때 최대치짐에 대한 지간장의 비율이 금강3교의 경우 1/1475이며 연화철육교의 경우 1/1968로 허용치짐에 비해 상당히 적은 치짐이 발생된 것을 알 수 있다. 응력제약조건이 지배적인 제약조건으로 나타나 최적설계는 응력제약조건 최적설계만으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 12는 본 자동화 최적설계 프로그램의 여러 모듈 중 주형의 최적설계 모듈에 대한 해의 수렴성을 나타내고 있다. 금강3교와 연화철육교 공히 최적설계에서 초기치를 90%~150%까지 변화시키에도 불구하고 안정적으로 3~4회의 해석만으로 최적해에 수렴함을 알 수 있다. 이는 전체 프로그램 중 가장 핵심이 되는 최적설계 모듈이 신뢰성을 확보한다는 의미이다. 따라서 본 프로그램을 이용한 최적설계 결과는 신뢰할 수 있다고 사료된다.

그림 13은 최적설계 결과에 대한 응력의 수준을 평가하기 위하여 나타내었다. 최적설계 후 금강3교의 경우 주형의 정모멘트 최대 응력은 합성전사하중, 합성후사하중과 활하중 조합에 의하여 하부플랜지에서 1503.25 kg/cm^2 로 나타났으며 부모멘트부의 최대 위치의 응력은 정모멘트부와 같은 하중조합 조건에서 하부플랜지에서 1693.85 kg/cm^2 로 나타났다. 이때의 허용응력은 1900

kg/cm^2 이다. 연화철육교의 경우 주형의 정모멘트 최대 위치의 응력은 최대 응력은 합성전사하중, 합성후사하중, 활하중 건조수축, 크리프, 온도차 조합에 의하여 상부플랜지에서 1065.80 kg/cm^2 로 나타났고 이때, 허용응력은 1328 kg/cm^2 이며, 부모멘트부의 최대 위치의 응력은 합성전사하중, 합성후사하중과 활하중 조합에 의하여 상부플랜지에서 1706.19 kg/cm^2 이고 이때, 허용응력은 1900 kg/cm^2 로 나타났다. 이와 같이 허용응력 감소율에 따라서 금강3교는 정모멘트부와 부모멘트부 각각 허용응력의 79.11%, 89.15%, 연화철육교는 정모멘트부와 부모멘트부 각각 허용응력의 79.97%, 89.80%로서 초기에 의도한 바와 같이 원하는 응력 수준에서 설계가 이루어짐을 알 수 있다. 이와 같이 본 최적설계 프로그램에 의해 설계된 결과는 사용자의 의도에 따라 균일한 안전수준으로 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한 최적설계에 의한 제작비용은 강재량만을 고려했을 때 금강3교의 경우 19,214만원, 연화철육교의 경우 14,437.5만원으로 기 설계된 제작비용에 비해 각각 7%, 13.5%의 비용 절감효과를 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 14는 이러한 제작비용의 차이를 보여 주고 있다. 따라서 본 자동화 최적설계 프로그램은 균일한 안전율을 유도하면서 제작비용을 절감하는 설계를 유도하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 실질적인 강상자형교의 최적설계시 효과적인 최적설계를 수행하기 위해서 강상자형교의 특성을 고려한 제약조건 소거기법, 설계변수 연결기법, 응력 재해석 기법 등 다양한 기법을 바탕으로 하여 GUI를 이용한 강상자형교의 자동화 최적설계 프로그램을 개발하였고, 이 프로그램을 실제 설계된 교량에 적용하였다. 프로그램의 실행 결과는 시공이 용이한 단면의 치수로 표현되며

사용자의 요구를 반영하는 설계가 가능하고, 모든 설계를 위한 작업의 소요시간 면에서도 상당히 효율적임을 알 수 있었다. 본 연구에서 개발된 최적설계 프로그램은 향후 타 형식의 교량에 최적설계 프로그램의 모형으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설기술연구원의 99' 산·학·연 연구개발사업 과제 '강상자형교 설계종합 시스템 개발'의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Al-Gahtain, Ahmed(1986). Optimum Design of Welded I-Beams Subjected to Highway Bridge Loads. Ph.D dissertation, Univ. of Iowa
2. Al-Shaleh, Khaled Saad(1994). Optimum Design of Straight Steel Box Girder Bridges. Ph.D dissertation, Georgia Institute of Technology.
3. Garret N. Vanderplaats(1984), Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications, McGraw-Hill, Inc.
4. Garret N. Vanderplaats(1985), ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.
5. Lust, R.V. and L.A.Schmit (1985), Alternative Approximation Concepts for Space Frame Synthesis, AIAA/ASME /ASCE/AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp. 333-348, April
6. Sahin, Mehmet A.(1985). The Specification and Comparison of Methodologies for the Automated Minimum Cost Design of Horizontally Curved Girder Bridge Structures, Ph.D dissertation, Univ. of Maryland
7. TDV(1998), RM-SPACEFRAME manual
8. 조효남, 민대홍, 김현우(1998), "2층도로용 강구조터 시스템의 최적설계", 한국강구조학회 논문집 제10권 3호
9. 조효남, 이두화, 정지승, 민대홍(1999), "신뢰성에 기초한 강상형교의 단면 최적설계", 대한토목학회 논문집, 제19권 제I-3호
10. 조효남(1999), "강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb)개발 2차년도 보고서"
11. 조효남, 정지승(1999), "효율적인 재해석 기법에 의한 강상형교의 최적설계", 한국강구조학회 논문집 제11권 5호
12. 건설교통부(1997), 강도로교 상세부설계지침
13. 건설교통부(1996), 도로교표준시방서
14. 한국도로공사(1996), 금강3교 구조계산서
15. 한국도로공사(1997), 연화철육교 구조계산서
16. 한국도로공사(1996), 도로설계 실무편람
17. 한국도로공사(1992), 도로설계요령
18. 한국도로공사(1997), 실시설계기준

(접수일자 : 2000년 6월 21일)