한국전산구조공학회
2003년도 봄 학술발표회 논문집

고차 Convex 근사화기법을 이용한 강상자형교의 최적설계
Optimum design of Steelbox Girder Bridges using Improved Higher-order Convex Approximation

조효남* 민대홍** 이광민*** 김성헌****
Cho, Hyo-Nam Min, Dae-Hong Lee, Kwang-Min Kim, Seong-Heon

ABSTRACT

Since the real steel box girder bridges have a large number of design variables and show complex structural behavior, it would be impractical to directly use the algorithm for its optimum design. Thus, in this study, for optimum design of real steel box girder bridge, approximated reanalysis using an higher-order Improved self-adjusted Convex Approximation (ISACA) which was newly proposed on a previous study by the author is applied for the numerical efficiency. To demonstrate the efficiency, robustness, and convergence of the approximated reanalysis technique using the ISACA, a real bridge having two continuous spans is used as an illustrative example. From the results of the numerical investigation, it may be positively stated that the efficiency, robustness, and convergence of the approximated reanalysis using an ISACA is superior compared with the previous approximated reanalysis techniques.

1. 서론

강상자형교량은 수천개의 부재가 연결된 복잡한 거동을 보이는 구조물로서, 실제 강상자형교량을 최적설계 하기 위해서는 일반적으로 구해야 할 설계변수와 제약조건의 수가 많기 때문에 상당히 많은 수치해석시간이 소요된다. 따라서, 지금까지 제안되어온 대부분의 최적설계 알고리즘에서는 수치해석시간의 효율성을 증대시키기 위해 설계변수 연결기법 (variable linking method), 제약조건소거기법(constraint deletion method), 구조재해석 기법(structural reanalysis technique)과 같은 다양한 근사화 기법 (approximation technique)과 다단계 최적설계 기법(multi-level optimization method) 등이 적용되어 왔다. 이상과 같은 최적설계의 효율성을 높이기 위한 다양한 기법들의 적용과 관련한 연구는 참고문헌 (이광민, 2001, 민대홍, 2003)에서 구체적으로 찾아볼 수 있다. 이와 같은 기법들 중에서 본 논문에서는 강상자형교량의 효율적인 설계를 위해 구조재해석의 정확도나 실용적인 활용측면에서 효율성을 극대화 할 수 있는 고차 Convex 근사화 기법을 이용하였다.

함수 근사화와 관련한 연구로는 Schmit와 Farshi (1974)가 Taylor 시리즈 1차항을 이용한 선형 근사화 기법 (Linear Approximation)을 제안한 바 있으며, 함수와 변수의 관계가 역 비례 관계인 문제에 대해 역수를 중간매개변수로 사용하는 역변수 근사화 기법 (Reciprocal Approximation)이 제안된 바 있다 (Storaasli와 Sobieszczanski

* 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수
** 정회원 · 안산공과대학 겸임전임강사
*** 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 박사과정
****한양대학교 토목환경공학과 석사과정

-Sobieski, 1974; Noor와 Lowder, 1975). 이후 Fluery와 Braibant (1986)는 선형 근사화와 역변수 근사화의 혼합형태인 Convex 근사화 기법(Convex Approximation)을 제안한 바 있으며, 최근에 Chung과 Chiou(2001)는 실수의 고차 중간매개변수를 이용하여 근사함수를 형성하고, 매 근사함수 형성단계에서 수치해석적인 방법을 이용하여 중간매개변수의 차수를 조정하므로서 Convexity를 향상시키면서 최적해의 수렴속도를 증가시키는 자기보정 Convex 근사화 (Self-adjusted Convex Approximation) 기법을 제안하였다. 이러한 자기보정 Convex 근사화 기법은 중간매개변수의 차수를 결정하는 과정에서 모든 설계변수에 대하여 동일한 차수의 중간매개변수가 적용된다. 하지만 일반적으로 함수와 각각의 설계변수 (혹은 독립변수)는 각기 다른 비례관계를 가지기 때문에 함수를 근사화 함에 있어서 각각의 설계변수에 각기 다른 차수의 중간매개변수 적용한다면 더욱 Convex한 함수근사화가 가능하므로 보다 정확한 구조재해석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 자기보정 Convex 근사화 기법은 매개변수의 차수를 결정하는 과정에서 특정 증분치에 따른 반복적인 수치 해석적 방법을 사용하기 때문에 증분치나 초기치 가정이 잘못 되었을 경우 계산이 많아지거나 값을 구하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이에 앞선 연구에서는 자기보정 Convex 근사화 기법을 개선하여 각각의 설계변수에 대응하는 서로 다른 차수의 중간매개변수를 사용한 개선된 함수 근사화 기법을 제안한 바 있으며, 중간매개변수의 차수를 구하는 과정에서 수치 해석적 방법이 아닌 정확하면서 단순화된 해석적 방법을 제안하였다 (조효남 등, 2002). 또한, 이와 같은 함수 근사화 기법은 Chung과 Chiou(2001)의 연구에서 사용한 동일한 트러스 구조물에 적용하여 제안된 방법의 신뢰도와 효율성이 검토된 바 있다 (조효남 등, 2002).

본 연구에서는 실제 강상자형교의 최적설계 문제에 적용성을 입증하기 위해 총 길이 90m (45m+45m, 2경간)를 가지는 2경간 연속 강상자형교에 개선된 함수근사화를 이용한 근사 재해석 기법을 적용하였으며, 기존에 제안된 방법들과 신뢰성, 효율성, 수렴성에 대해 비교·검토를 수행하였다.

2. 개선된 자기-조정 Convex 근사화기법

2.1 자기-조정 Convex 근사화 (Self-adjusted Convex Approximation; SACA) 기법

앞서 언급한 선형 근사화와 역변수 근사화의 혼합형태인 Convex 근사화 기법(Convex Approximation)은 중간매개변수의 차수를 '1'과 '-1'만을 사용하므로 구조재해석의 정확도 측면에서 한계를 가지고 있다. Chung과 Chiou(2001)은 중간매개변수의 차수를 실수로 확장함으로써 이러한 문제를 개선하였고, 중간매개변수의 차수가 고차로 될수록 Convexity가 높아진다는 수학적 증명을 하였다. Chung과 Chiou(2001)가 제안한 함수근사화 기법의 기본 개념은 실수 r차에 대한 고차의 중간매개변수를 이용한 Convex 근사화 기법과 동일하다. 이러한 SACA의 기본형태는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_a(x,r) = h(x_0) + \sum_i^{(+)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0}\left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r-1} x_i - x_{i0}\right], \qquad \text{for } \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0} \geq 0 \tag{1-1}$$

$$h_a(x,r) = h(x_0) + \sum_i^{(-)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0}\left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r-1} x_i - x_{i0}\right]\left(\frac{x_{i0}}{x_i}\right)^{r}, \qquad \text{for } \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0} < 0 \tag{1-2}$$

여기서, $h_a(x,r)$은 함수 $h(x)$의 SACA 이며, $\partial h/\partial x_i$ 는 $h(x)$의 설계 민감도 값이다. $(k-1)$번째 구조최적화과정에서, r_{k-1}의 값은 SACA의 중간매개변수의 차수이며, 설계변수 x_{k-1}의 근사화를 수행한다. $(k-1)$번째 최적화 과정에서 형성된 근사 함수를 이용하여 최적해 x_k 를 얻게 되고 이에 대한 실제 함수값을 구하게 된다. 이때 근사함수에 의한 함수 값과 실제 함수에 의한 함수 값이 같아지면 근사 함수를 이용한 최적화 과정이 종료된다. 여기서 중요한 것은 매 반복단계에서 형성된 근사 함수로부터 중간매개변수에 대한 설계민감도와 차수 r값이 결정되

어야 한다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Chung과 Chiou(2001)는 식 (2)에 나타난 바와 같이 $(k-1)$번째 구조최적화과정에서 근사 함수와 그 결과로 얻어진 최적해 x_k에 대한 함수 값이 같아지는 r_k를 구하기 위해 증분치에 따른 반복적인 수치 해석방법을 제안하였다.

$$\begin{aligned} h(x_{k-1}) &+ \sum_i^{(+)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_{k-1}}\left[\left(\frac{x_{ik}}{x_{i(k-1)}}\right)^{r-1} x_{ik} - x_{i(k-1)}\right] \\ &+ \sum_i^{(-)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_{k-1}}\left[\left(\frac{x_{ik}}{x_{i(k-1)}}\right)^{r-1} x_{ik} - x_{i(k-1)}\right]\left(\frac{x_{i(k-1)}}{x_{ik}}\right)^{r} = h(x_k) \end{aligned} \tag{2}$$

2.2. 개선된 자기-조정 Convex 근사화 (Improved Self-adjusted Convex Approximation; ISACA) 기법

SACA는 각 단계에서 근사 함수를 형성 할 때 모든 설계변수에 대해 동일한 실수형 고차중간매개변수를 사용하게 되는데, 이는 모든 설계변수에 대표적인 r을 반영하는 효과를 가지고 있다. 하지만 일반적으로 함수와 각각의 설계변수 (혹은 독립변수)는 각기 다른 비례관계를 가지기 때문에 함수를 근사화함에 있어서 각각의 설계변수에 각기 다른 차수의 중간매개변수 적용한다면 더욱 Convex한 함수근사화가 가능하다. 즉, 식(3)과 같이 모든 설계변수 각각에 대응하는 중간매개변수의 차수를 사용함으로써 보다 적극적인 Convexity를 보장받을 수 있다. 이와 같은 근사 함수식은 식 (4)과 같다.

$$y_i = x_i^{r_i} \tag{3}$$

$$h_e(x, r) = h(x_0) + \sum_i^{(+)} \frac{1}{r_i}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0}\left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r_i-1} x_i - x_{i0}\right], \quad \text{for } \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0} \geq 0 \tag{4-1}$$

$$h_e(x, r) = h(x_0) + \sum_i^{(-)} \frac{1}{r_i}\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0}\left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r_i-1} x_i - x_{i0}\right]\left(\frac{x_{i0}}{x_i}\right)^{r_i}, \quad \text{for } \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0} < 0 \tag{4-2}$$

앞서 언급한 바와 같이 SCAC에서는 $(k-1)$번째 최적화과정에서의 근사화를 통해 구해진 $h_e(x_k, r_{k-1})$의 값과 실제 해석을 통해 구한 $h(x_k)$를 등치하여 반복적인 수치해석을 수행한 뒤 중간매개변수의 차수를 결정하였다. 하지만 매개변수의 차수를 결정하는 과정에서 r증분에 따른 반복적인 수치 해석적 방법을 사용하기 때문에 r값을 구하는 과정에서 초기치 가정이 잘못 되었을 경우 계산이 많아지거나 값을 구하지 못하는 경우가 발생한다. 이에 본 연구에서는 식(4)를 각각의 설계변수영역으로 분리하여 해석적으로 구할 수 있는 식을 제안하였다. 이와 같은 해석적인 방법을 통하여 각각의 설계변수에 대한 중간매개변수의 차수를 보다 정확하고 신속하게 구할 수 있다.

$$r_i = \ln\left\{\left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)_{x_{ik}} \Big/ \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)_{x_{i(k-1)}}\right\} \Big/ \ln\left(\frac{x_{ik}}{x_{i(k-1)}}\right) + 1, \quad \text{for } \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0} \geq 0 \tag{5-1}$$

$$r_i = \ln\left\{\left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)_{x_{ik}} \Big/ \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)_{x_{i(k-1)}}\right\} \Big/ \ln\left(\frac{x_{i(k-1)}}{x_{ik}}\right) - 1, \quad \text{for } \left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0} < 0 \tag{5-2}$$

3. 설계민감도 해석 및 최적설계 알고리즘

식 (4)에 나타난 바와 같이 개선된 자기조정 Convex 근사화는 설계변수에 대한 함수의 1차 민감도 해석 (Design Sensitivity Analysis)을 필요로 한다. 이와 같은 설계변수 민감도 해석을 위한 방법으로는 수 계산 (Hand cording), 유한차분법 (finite difference Method), 문자식에 의한 미분방법 (Symbolic Differentiation Method)이 사용될 수 있으나 이는 많은 계산 시간과 계산 오차의 축적, 실제 구조물의 적용성이 떨어지기 때문에 사용하기에

적절치 못하다. 이에 본 연구에서는 적은 노력으로 정확하고 효율적인 도함수 계산을 할 수 있는 자동미분(Automatic Differentiation)기법을 사용하였다. 자동미분기법은 초등연산(가 · 감 · 승 · 제)과 기본적인 함수(sine, consine, log 등)를 이용하여 순차적으로 미분하기 때문에 함수의 형태가 아무리 복잡하다 하더라도 식(6)과 같은 연쇄법칙을 이용하여 미분이 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial x} f(g(x)) \mid_{x=x_0} = \left(\frac{\partial}{\partial y} f(y) \mid_{y=g(x_0)}\right)\left(\frac{\partial}{\partial x} f(g(x)) \mid_{x=x_0}\right) \tag{6}$$

이와 같은 초등연산의 조합을 반복함으로서 미분법을 정확하고 기계적으로 계산 할 수 있다. 일반적으로 자동미분의 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 & Croliss(1991) 그리고 Berz 등(1996)에 의해 수행된 바 있다. 현재는 여러 가지 자동미분도구들이 사용가능하며, 이러한 프로그램에는 FORTRAN 코드로 된 ADIFOR, ODYSSEE 그리고 ADOL-F와 C언어로 된 ADOL-C 등이 있다. 본 논문에서는 ADIFOR 2.0 (Bichof 등, 1998)을 사용하였다.

본 연구에서 강상자형교 최적설계를 위한 함수근사화를 이용한 최적설계 알고리즘은 그림 1과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 가정된 중간매개변수의 차수로부터 민감도해석을 수행하여 근사함수를 형성시키고 최적화를 수행한다. 이는 최적설계 결과와 실제 함수값을 비교하여 허용오차를 만족할 때까지 반복하게 된다. 한편 본 연구에서는 최적화 방법으로 신뢰성 면에서 우수한 ALMM(Augmented Largrange Multiplier Method)과 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldforb-Shanno)방법을 사용하였다. 또한 선탐색은 황금분할법(Gonden Section Method)을 사용하였다. 이와 같은 최적화 기법은 국부 최적화 기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS (Automated Design Synthesis) (G. N. Vanderplaats, 1985)를 이용하여 수행하였다.

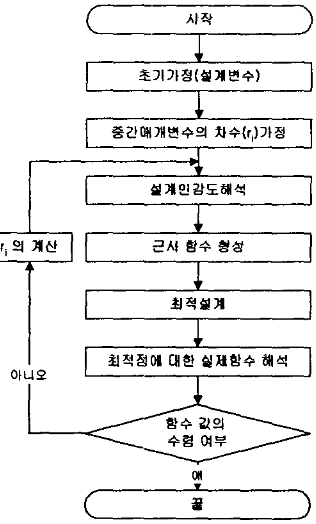


그림 1 최적설계 알고리즘

4. 수치예제

본 연구에서는 실제 강상자형교의 최적설계 문제에 적용성을 입증하기 위해 총 길이 90m (45m+45m, 2경간)를 가지는 2경간 연속 강상자형교에 ISACA를 적용하였으며, 기존에 제안된 근사화 방법들 (Convex Approximation과 SACA)과 신뢰성, 효율성, 수렴성에 대해 비교 · 검토를 수행하였다.

4.1. 대상교량의 일반사항 및 최적설계 문제의 정식화

대상교량의 일반사항은 표 1에 나타내었으며, 그림 2에는 대상 교량의 단면도와 평면도 및 설계그룹을 나타내었다. 설계변수로는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 각 설계그룹에 대해 상 · 하부 플랜지의 두께(t_{fu}. t_{fl})와 복부판의 두께(t_w)로 하였다. 목적함수는 식(7)와 같이 강상자형교의 초기비용으로 하였으며, 제약조건은 표 2에서 나타낸 바와 같이 허용응력 설계법에 기초한 거동제약조건과 시공을 위한 한계 제약조건이 사용되었다.

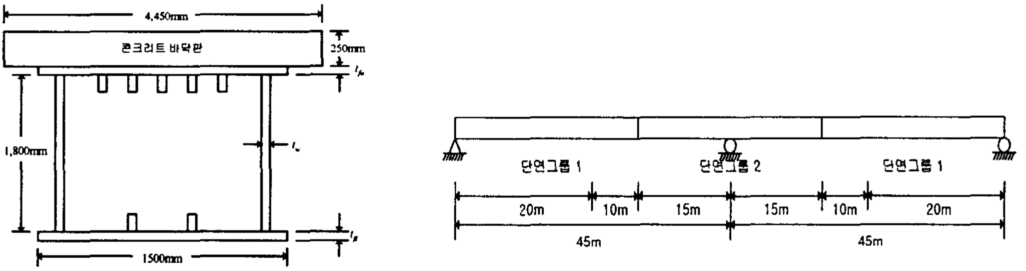
$$F(x) = C_{ST} \sum W_{g_i} \tag{7}$$

여기서, C_{ST}는 강박스거더의 단위초기비용(792,000원/tonf); W_{g_i} 는 거더 i번째 부재의 무게이다.

앞서 언급한 바와 같이 강상자형교는 수천개의 부재가 연결된 복잡한 거동을 보이는 구조물로서 일반적인 제약조건은 구조해석과 같은 설계변수의 음함수 (Implicit function)와 단면제원과 같은 설계변수의 양함수 (Explicit function)로 구성되어 있기 때문에 결국 매 단계마다 음함수 값인 구조해석이 수행되어야 한다. 이에 본 예제에서는 음함수인 구조해석값들에 대해 제안된 함수근사화기법을 적용하여 근사재해석을 수행하였다.

표1 강박스거더교의 일반 데이터

교량형식	2경간 연속 강상자거더교		
교량 연장(m)	45+45=90m	강 재원	SM490 (f_a=1,900kgf/cm^2)
교량 폭(m)	8.9m		
최대 반경	직교	콘크리트	강도: 270 kgf/cm^2 계수비 : 8 철근: SD40
차선수	2		
Box의 수	2		
설계 하중	DB/DL-24		



(가) 단면도

(나) 교량 종단면도와 설계 그룹

그림 2 대상 교량의 단면도와 평면도 및 설계그룹

표 2 강박스 거더교의 제약조건

설계 제약조건		비 고
휨응력	$g_1 = f_{su}/f_{sua} - 1.0 \le 0$ $g_2 = f_{sl}/f_{sla} - 1.0 \le 0$	f_{su}, f_{sl} = 구조용 강재의 휨 응력 f_{sua}, f_{sla} = 구조용 강재의 허용 휨 응력
전단응력	$g_3 = \frac{\tau_s}{\tau_{sa}} - 1.0 \le 0$	τ_s = 구조용 강재의 전단 응력 τ_{sa} = 구조용 강재의 허용 전단 응력
최소두께	$g_4 = \frac{t_{\min}}{t_i} - 1.0 \le 0$	t = 모든 구조부재의 두께 $t_{\min}$ = 구조 부재의 최소두께

4.2. 결과 및 분석

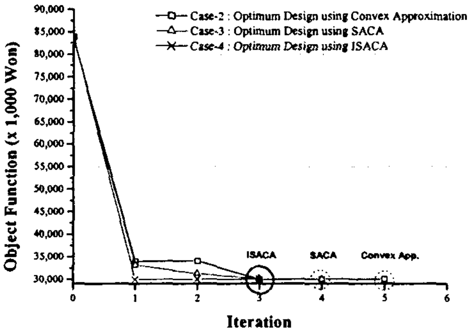
대상교량의 최적설계를 수행함에 있어서 각각의 근사화기법의 신뢰성과 효율성을 비교·고찰해보기 위해 다음의 4가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다: (1) 실 구조해석을 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 1); (2) Convex 근사화를 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 2); (3) SACA를 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 3); (4) ISACA를 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 4). 이상의 4 가지 경우에 대한 최적설계 결과는 표 3에 나타내었다.

표 3의 최적설계 결과에 나타난 바와 같이 각각의 근사화 방법에 따른 최적의 설계변수의 값과 목적함수 값은 실 구조해석을 적용한 경우와 동일하게 나타났다. 이는 각각의 근사화 방법을 이용한 구조최적화 방법이 정확도

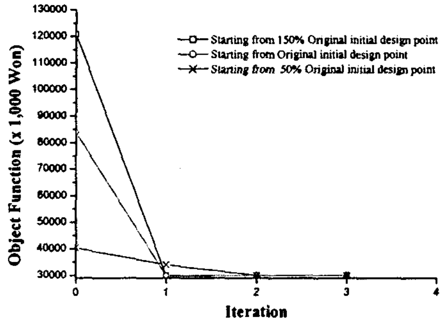
면에서 모두 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

표 3 각 Case별 대상교량의 최적설계 결과

		초기값	구조해석	Convex 근사화	SACA	ISACA
단면 그룹1	t_{fu} (mm)	25.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	t_w (mm)	25.00	19.15	19.11	19.11	19.11
	t_{fl} (mm)	25.00	3.123	3.123	3.123	3.123
단면 그룹2	t_{fu} (mm)	25.00	1.000	1.000	1.000	1.000
	t_w (mm)	25.00	42.26	42.29	42.28	42.28
	t_{fl} (mm)	25.00	5.704	5.699	5.700	5.700
목적함수(×1,000원)		83,932	30,069	30,046	30,046	30,046
반복횟수		-	438	5	4	3



(가) 함수근사화가 적용된 최적설계의 목적함수 수렴이력



(나) 초기치 변화에 따른 ISACA의 수렴이력

그림 3 목적함수 수렴이력

한편 그림 3은 함수근사화가 적용된 최적설계 방법인 Case 2~4에 대한 최적설계 과정동안의 목적함수 수렴이력과 설계변수 초기치에 변화에 따른 Case 4 (ISACA를 적용한 최적설계)의 수렴성을 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 Case 2~4는 실구조해석을 적용한 최적설계 결과 인 Case 1과 비교시 모두 동일하게 0.08%의 매우 미소한 차이를 보이고 있으므로, Convex 근사화, SACA, ISACA 모두 해의 신뢰성이 안정적임을 알 수 있다. 하지만 각각의 방법에 따른 최적화 반복횟수를 살펴보면 실구조해석을 적용한 최적설계의 경우는 최적해를 얻기까지 무려 438회의 구조해석을 필요로 하며, Convex 근사화 기법은 5회, SACA는 4회인데 반해 본 연구에서 제안한 ISACA는 3회의 반복횟수 (혹은 구조해석 횟수)를 나타냄으로써 기존의 기법에 비해 가장 효율적임을 알 수 있다 (여기서 중요한 것은 최적설계 대상 구조물이 좀더 복잡하거나 방대해 질수록 최적해를 얻기까지 수치해석시간에서 많은 차이가 있을 것임을 인지해야 한다). 이와 같은 효율성은 표 4에 나타난 최적화 반복과정동안의 중간매개변수 r의 차수 변화로부터 설명될 수 있다. 표 4에 나타난 바와 같이 대상교량에 대해 Convex 근사화의 경우는 역변수 근사화가 선택되었기 때문에 차수 r은 모두 -1값을 갖는 효과를 나타내어 수렴속도가 늦어지는 반면에 SACA는 대표적인 중간매개변수의 차수인 r값이 근사함수 형성단계에서 매번 계산되어 Convex 근사화 보다는 수렴속도를 증진시키는 효과를 가져왔다. 그러나 ISACA의 경우는 이미 설명된 바와 같이 각각의 설계변수에 따른 중간매개변수의 차수를 각각 구함으로써 SACA보다 더욱 적극적인 Convexity를 가지면서 수렴성과 효율성을 동시에 높여주는 효과를 준 것이다. 제안된 ISACA의 수렴성에 대한 성능은 그림 3의 (나)에 나타나 있다. 그림 3의

(나)에 나타난 바와 같이 초기설계변수를 원래의 초기치에 대해 각각 150% (Case A), 100% (Case B), 50% (Case C)의 값을 적용하여 최적설계를 수행한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 초기설계변수를 원래의 초기치에 대해 150%를 적용하여 최적설계를 수행한 경우인 Case A의 경우는 최적의 목적함수 값이 30,046,698원으로 나타났으며, 원래의 초기치에 대해 50%를 적용하여 최적설계를 수행한 경우인 Case C의 경우는 30,046,913원으로 나타났다. 이는 Case B와 비교할 때 불과 0.0004~0.001%의 아주 미소한 차이를 보이고 있음을 의미하며, 이는 본 연구에서 제안된 ISACA가 충분한 수렴성을 제공하는 방법임을 알 수 있다.

표 4 강박스 거더교의 중간매개변수의 차수 변화

반복횟수		1	2	3	4		1	2	3	4
SACA	r_{pm}	1.000	-0.497	5.171	2.001	r_{nm}	-1.000	1.394	-5.171	-2.001
	r_{ps}	1.000	-0.499	5.171	2.001	r_{ns}	-1.000	2.997	-5.171	-2.001
ISACA	r_{pm1}	1.000	0.902	12.36	-	r_{nm1}	-1.000	-0.901	-12.36	-
	r_{pm2}	1.000	-2.102	-0.397	-	r_{nm2}	-1.000	2.104	0.397	-
	r_{pm3}	1.000	0.635	-2.851	-	r_{nm3}	-1.000	-0.635	2.851	-
	r_{pm4}	-1.000	-0.769	19.41	-	r_{nm4}	1.000	0.768	-19.41	-
	r_{pm5}	-1.000	-0.596	0.099	-	r_{nm5}	1.000	0.596	-0.099	-
	r_{pm6}	-1.000	-1.066	2.406	-	r_{nm6}	1.000	1.066	-2.406	-
	r_{ps1}	1.000	0.902	12.36	-	r_{ns1}	-1.000	-0.901	-12.36	-
	r_{ps2}	1.000	-2.104	-0.397	-	r_{ns2}	-1.000	2.104	0.397	-
	r_{ps3}	1.000	0.635	-2.851	-	r_{ns3}	-1.000	-0.635	2.851	-
	r_{ps4}	-1.000	-0.768	19.41	-	r_{ns4}	1.000	0.768	-19.41	-
	r_{ps5}	-1.000	-0.596	0.099	-	r_{ns5}	1.000	0.596	-0.099	-
	r_{ps6}	-1.000	-1.066	2.406	-	r_{ns6}	1.000	1.066	-2.406	-

여기서, r_{pm} = 정모멘트 구간에서의 모멘트에 대한 중간매개변수의 차수; r_{ps} = 단면그룹 1에서의 전단력에 대한 중간매개변수의 차수; r_{nm} = 부모멘트 구간에서의 모멘트에 대한 중간매개변수의 차수; r_{ns} = 단면그룹 2에서의 전단력에 대한 중간매개변수의 차수; 1,2,...,6 = 설계변수

이상의 결과에서 나타난 수치적인 결과들을 종합해 볼 때, 기존연구에서 제안된 함수근사화 방법인 ISACA는 신뢰성, 효율성, 수렴성을 모두 갖춘 방법으로 판단된다. 또한, 본 예제의 결과가 가지는 의미는 단순한 이론적인 문제를 해결하기보다는 실제 구조물의 최적설계에서도 ISACA방법이 우수하게 적용될 수 있으리라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 강상자형교의 효율적인 최적화를 위해 재해석 기법에 기초한 고차의 Convex 근사화 기법을 사용하였다. 실제 강상자형교의 최적설계 문제에 적용성을 입증하기 위해 총 길이 90m (45m+45m)를 가지는 2경간 연속 강상자형교에 적용하였고, 제안한 설계 알고리즘의 신뢰성, 수렴성, 효율성이 예제를 통하여 입증하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 함수근사화 방법인 ISACA는 최적화 과정에서 각각의 설계변수에 따른 중간매개변수의 차수를 해석적인 방법으로 구함으로써 매우 적극적인 Convexity와 수렴속도를 동시에 증가시키는 방법으로 기존의 근사화 방법을 사용한 구조최적설계와 비교하여 기존방법의 신뢰도를 확보하면서 효율성 면에서 우수한 근사화 방법이다.

1) 본 연구에서 제안한 재해석기법에 기초한 ISACA는 단순한 이론적인 문제 뿐 아니라 실제 구조물의 최적설계에서도 우수하게 적용될 수 있는 방법으로 향후에 실제적인 구조최적화 문제에 실용적으로 적용될 수 있는 방법으로 판단된다.

2) 본 연구에서 제안하는 최적설계 알고리즘은 구조물의 자동화 최적설계를 위한 실용 프로그램개발에 핵심이 되는 기술로 적용이 가능한 방법이며, 타 형식 교량의 최적설계 알고리즘을 개발하는데 유용한 모델이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 BK21의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Berz, M., Bischof, C., Corliss, G., and Griewank, A., eds., "Computational differentiation-techniques, tools, and applications," Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa. 1996.

2. Bichof, c., Carle, A., Khademi, P., Andrew, M., and Hovland, P., "ADIFOR2.0 Users' Guide" Mathematics and Computer Science Division Technical Memorandom No.192 and Center for Research on Parallel Computation Technical Report CRPc-95516-s, June 1998

3. Fluery C, Braibant V. "Structural optimization: a new dual method using mixed variable", Int J Num Meth engng, Vol.23, 1986, pp.409-28

4. Griewank, A., and Corliss, G.F., Automatic differentiation of algorithms : theory, implementation, and application. Society of Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa, 1991.

5. Noor AK, Lowder HE. "Structural reanalysis via mixed method", Comput Struct, Vol.5, 1975, pp.9-12

6. Storaasli OO, Sobieszczanski-Sobieski J. "On the accuracy of the Taylor approximation for structure resizing", AIAA, Vol.1, 1974, pp.231-3

7. Tien-Tung Chung, Chyon-Huey Chiou. "Self-adjusted convex approximation method for structural optimization",Comput Struct, Vol.79, 2001, pp.665-672

8. Schmit LA, Farshi B. "Some approximation concepts for structural synthesis", AIAA, Vol.12, No.5, 1974, pp.629-9.

9. Vanderplaats, G.N., ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis. Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California, 1985.

10. 건설교통부, "도로교 설계기준", 2000.

11. 민대홍 "강상자형 교량의 개념적 설계를 위한 협동최적화 기법" 한양대학교 박사학위 논문, 2003

12. 이광민 "강상판교의 최적 Life Cycle Cost 설계" 한양대학교 석사학위 논문, 2001.

13. 조효남, 민대홍, 김성헌 "개선된 고차 Convex 근사화를 이용한 구조최적설계" 전산구조공학회 학술발표 논문집, 2002