재해석 기법을 이용한 강상자형교의 최적설계

민대홍 · 윤우현†* · 정지승** · 양성돈***
(주)다음기술단 · *경원대학교 토목환경공학과 · **동양대학교 철도토목학과 · ***(주)포스코건설 토목기술그룹
(2011. 5. 19. 접수 / 2011. 8. 4. 채택)

Optimization of Steel Box Girder Bridges using Approximate Reanalysis Technique

Dae-Hong Min · Woo-Hyun Yoon†* · Jee-Seung Chung · Sung-Don Yang*****
Daum Engineering Co. Ltd.
*Department of Civil Engineering, Kyungwon University
**Department of railroad Civil Engineering, Dongyang University
***Civil Engineering Group, POSCO Engineering & Construction Co., Ltd.
(Received May 19, 2011 / Accepted August 4, 2011)

Abstract : Structural optimization algorithm of steel box girder bridges using improved higher-order approximate reanalysis technique is proposed in this paper. The proposed approximation method is a generalization of the convex approximation method. The order of the approximate reanalysis for each function is analytically adjusted in the optimization process. This self-adjusted capability makes the approximate structural analysis values conservative enough to maintain the optimum design point of the approximate problem. The efficiency of proposed optimazation algorithm, compared with conventional algorithm, is successfully demonstrated in the steel box girder bridges. The efficiency and robustness of proposed algorithm is also demonstrated in practical steel box girder bridges.
Key Words : steel box girder bridges, optimization, reanalysis technique, approximation, convex

1. 서 론

실질적인 구조최적화 문제는 FEM 해석과 같은 구조해석을 많이 필요로 하기 때문에 상당히 많은 해석시간과 비용이 소요된다. 따라서 계산시간과 비용의 단축이 요구되었고, 이에 대해 많은 연구자들이 근사재해석기법을 사용하게 되었다. 근사재해석기법은 구조최적화 문제에 포함되어 있는 실제 구조해석을 근사적으로 해석함에 따라 그 계산시간을 줄이고자 하는 것이다.

근사화기법과 관련한 연구로는 Schmit와 Farshi가 Taylor 시리즈 1차항을 이용한 선형 근사화 기법(Linear Approximation)을 제안한 바 있으며[1], 구조최적화 문제에서 구조응답과 설계변수간의 관계가 역비례 관계인 문제에 대해 역수를 중간매개변수로 사용하는 역변수 근사화 기법(Reciprocal Approximation)이 제안된 바 있다[2]. 이후 Fluery와 Braibant는 선형 근사화와 역변수 근사화의 혼합형태인 Convex 근사화 기법(Convex Approximation)을 제안한 바 있으며[3], 이후에 Chung과 Chiou는 실수의 고차 중간매개변수를 이용하여 근사함수를 형성하고[4], 매 근사재해석 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 구조응답과 각각의 설계변수(혹은 독립변수)는 각기 다른 비례관계를 가지기 때문에 근사재해석기법을 사용함에 있어서 각각의 설계변수에 각기 다른 차수의 중간매개변수 적용한다면 더욱 구조응답에 비례한 근사재해석이 가능하므로 보다 정확한 구조재

† To whom correspondence should be addressed.
ywh@kyungwon.ac.kr

해석이 가능할 것으로 판단된다. 또한 자기보정 Convex 근사화 기법은 매개변수의 차수를 결정하는 과정에서 특정 증분치에 따른 반복적인 수치해석적 방법을 사용하기 때문에 증분치나 초기치 가정이 잘못 되었을 경우 계산이 많아지거나 값을 구하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 자기보정 Convex 근사화 기법을 개선하여 각각의 설계변수에 대응하는 서로 다른 차수의 중간매개변수를 사용한 개선된 근사재해석기법을 제안하고, 중간매개변수의 차수를 수치 해석적 방법이 아닌 정확하면서 단순화된 해석적 방법을 이용하여 구하도록 하였다. 또한 구조최적설계 문제에 있어서 제안한 기법의 적용성을 입증하기 위해 총 길이 90 m(45 m + 45 m, 2경간)를 가지는 2경간 연속 강상자형교에 개선된 근사재해석기법을 적용하였으며, 기존에 제안된 방법들과 신뢰성, 효율성, 수렴성에 대해 비교·검토를 수행하였다.

2. 근사재해석기법

2.1. Convex 선형근사재해석(Convex Linearization Approximate Reanalysis: COLAR)

Convex 근사화 기법은 일반적으로 Convex 선형화라고 하며, 선형 근사화와 역변수 근사화의 혼합된 형태로 식 (1)과 같이 나타난다.

$$f_c(x) = f(x_0) + \sum_{i=1}^{(+)} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} (x_i - x_{i0}) + \sum_{i=1}^{(-)} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} (x_i - x_{i0}) \left(\frac{x_{i0}}{x_i}\right) \tag{1}$$

여기서 $f_c(x)$는 $f(x)$의 보전적 근사화이며,

만약$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} \geq 0$이라면,

$f_c(x) = f(x_0) + \sum_{i=1}^{(+)} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} (x_i - x_{i0})$이고,

만약 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} < 0$이라면,

$f_c(x) = f(x_0) + \sum_{i=1}^{(-)} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} (x_i - x_{i0}) \left(\frac{x_{i0}}{x_i}\right)$이다.

COLAR의 장점은 선형 또는 역변수 근사화의 조합들 중에서 가장 보전적(conservative) 근사화라는 점이다. 또한 초기점보다 나은 해가 나오면 최적화 과정을 설계자가 멈출 수 있는 장점이 있다. 그러나 근사값이 실제값과 관련해서 보전적인 것을 확신할 수 없다. 다시 말해 선형근사화나 역변수 근사화에 비해서 보전적이라는 말이며, 결정되는 해의 값이 선형근사화 또는 역변수 근사화에 비해서 덜 정밀하다고 나타나고 있다. 이와 같은 특성 때문에 비록 안정적인 값을 얻었다 할지라도 값이 상당히 보전적일 경우 최적화에 많은 시간이 소요되며, 값이 충분히 보전적이지 못할 경우 진동하게 된다. 그러나, 구조최적설계에서는 구조물의 응답이 설계변수에 역비례하는 경우가 많아 비교적 효율적인 방법으로 알려져 있다.

2.2. 자기-조정 Convex 근사재해석(Self-adjusted Convex Approximate Reanalysis; SACAR) 기법

함수 근사화의 가장 기본적인 형태인 COLAR은 중간매개변수의 차수를 1과 -1만을 사용하여 Convexity와 수렴속도에 한계를 가지고 있어서 Chung과 Chiou은 중간매개변수의 차수를 실수로 확장함으로써 이러한 문제를 개선하였다[4]. 여기서 중간매개변수의 차수가 고차로 될수록 Convexity가 높아진다는 수학적 증명을 하였다. 따라서 Chung과 Chiou가 제안한 근사화 기법의 기본 개념은 실수 r차에 대한 고차의 중간매개변수를 이용한 Convex 근사화 기법과 동일하다[4]. 또한 매 근사함수 형성과정에서 중간매개변수의 차수인 r값을 자동으로 결정해 주어야 하며 이러한 SACAR의 기본형태는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

만약 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} \geq 0$이라면

$$f_s(x,r) = f(x_0) + \sum_{i}^{(+)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} \left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r-1} x_i - x_{i0}\right] \tag{2a}$$

만약 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} < 0$이라면

$$f_s(x,r) = f(x_0) + \sum_{i}^{(-)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} \left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r-1} x_i - x_{i0}\right]\left(\frac{x_{i0}}{x_i}\right)^{r} \tag{2b}$$

여기서, $f_s(x,r)$은 함수$f(x)$의 SACAR이며, $\partial f/\partial x_i$는 $f(x)$의 설계 민감도 값이다. (k-1)번째 구조최적화과정에서, r_{k-1}의 값은 SACAR의 중간매개변수의 차수이며, 설계변수 x_{k-1}의 근사화를 수행한다. (k-1)번째 최적화 과정에서 형성된 근사재해석를 이용하여 최적해 x_k를 얻게 되고 이에 대한 실제 구조해석값을 구하게 된다. 이때 근사재해석에 의한 구조응답 값과 FEM해석을 통한 구조응답값이 같아지면 근사재해석을 이용한 최적화 과정이 종료된다. 여기서 중요한 것은 매 반복단계에서 형성된 근사재해석기부터 중간매개변수에 대한 설계민감도와 차수 r값이 결정되어야 한다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Chung과 Chiou는 식(3)에 나타난 바와 같이 (k-1)번째 구조최적화과정에서 근사재해석과 그 결과로 얻어진 최적해 x_k에 대한 구조응답이 같아지는 r_k를 구하기 위해 증분치에 따른 반복적인 수치 해석방법을 제안하였다[4].

$$f(x_{k-1}) + \sum_i^{(+)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_{k-1}} \left[\left(\frac{x_{ik}}{x_{i(k-1)}}\right)^{r-1} x_{ik} - x_{i(k-1)}\right] + \sum_i^{(-)} \frac{1}{r}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_{k-1}} \left[\left(\frac{x_{ik}}{x_{i(k-1)}}\right)^{r-1} x_{ik} - x_{i(k-1)}\right] \left(\frac{x_{i(k-1)}}{x_{ik}}\right)^{r} = f(x_k) \tag{3}$$

2.3. 개선된 자기-조정 Convex 근사재해석(Improved Self-adjusted Convex Approximate Reanalysis; ISACAR) 기법

SACAR는 각 단계에서 근사재해석을 수행 할 때 모든 설계변수에 대해 동일한 실수형 고차중간매개변수를 사용하게 되는데, 이는 모든 설계변수에 대표적인 r을 반영하는 효과를 가지고 있다. 하지만 일반적으로 구조응답과 각각의 설계변수는 각기 다른 비례관계를 가지기 때문에 구조응답을 근사화함에 있어서 각각의 설계변수에 각기 다른 차수의 중간매개변수를 적용한다면 더욱 효율적인 구조재해석이 가능하다. 즉, 식(4)와 같이 모든 설계변수 각각에 대응하는 중간매개변수의 차수를 사용함으로써 보다 적극적인 Convexity를 보장받을 수 있다. 이와 같은 근사재해석은 식 (5)와 같다.

$$f_i = x_i^{r_i} \tag{4}$$

만약 $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} \geqq 0$ 라면

$$f_e(x,r) = f(x_0) + \sum_i^{(+)} \frac{1}{r_i}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} \left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r_i-1} x_i - x_{i0}\right] \tag{5a}$$

만약 $\left(\frac{\partial h}{\partial x_i}\right)_{x_0} < 0$ 라면

$$f_e(x,r) = f(x_0) + \sum_i^{(-)} \frac{1}{r_i}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)_{x_0} \left[\left(\frac{x_i}{x_{i0}}\right)^{r_i-1} x_i - x_{i0}\right] \left(\frac{x_{i0}}{x_i}\right)^{r_i} \tag{5b}$$

앞서 언급한 바와 같이 SACAR에서는 (k-1)번째 재해석과정에서의 근사화를 통해 구해진 $f_e(x_k, r_{k-1})$의 값과 실제 해석을 통해 구한 $f(x_k)$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 각각의 매개변수에 대한 차수를 구하는 방법은 SACAR와 마찬가지로, (k-1)번째 구조최적화재해석과정에서의 근사화를 통해 구해진 $f_e(x_k, r^{(k-1)})$의 값과 실제 해석을 통해 구한 $f(x_k)$를 같다고 하여 중간매개변수의 차수를 구할 수 있다.

3. 설계민감도 해석 및 최적설계 알고리즘

식 (5)에 나타난 바와 같이 개선된 자기조정 Convex 근사재해석은 설계변수에 대한 구조응답에 대한 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.

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

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

이와 같은 초등연산의 조합을 반복함으로서 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. 현재는 여러 가지 자동미분도구들이 사용가능하며, 이러한 프로그램에는 FORTRAN 코드로 된 ADIFOR, ODYSSEE 그리고 ADOL-F와 C언어로 된 ADOL-C 등이 있다. 본 논문에서는 ADIFOR 2.0을 사용하였다.

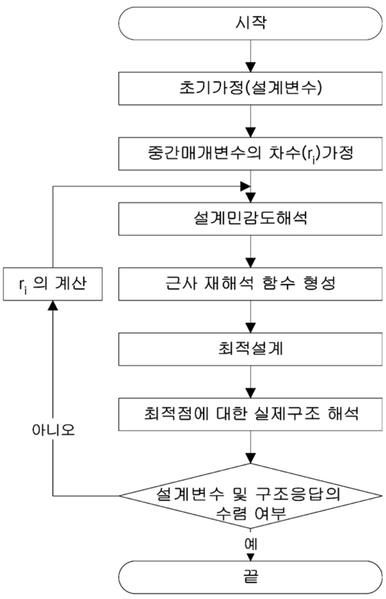


Fig. 1. Algorithm for optimum design.

본 연구에서 강상자형교 최적설계를 위한 근사재해석을 이용한 최적설계 알고리즘은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 가정된 중간매개변수의 차수로부터 민감도해석을 수행하여 근사재해석함수를 형성시키고 최적화를 수행한다. 이는 최적설계 결과와 실제 구조해석값을 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)를 이용하여 수행하였다[5].

4. 수치예제

본 연구에서는 구조최적설계 문제에 적용성을 입증하기 위해 총 길이 90 m(45 m + 45 m, 2경간)를 가지는 2경간 연속 강상자형교에 ISACAR를 적용하였으며, 기존에 제안된 근사재해석 방법들과 신뢰성, 효율성, 수렴성에 대해 비교・검토를 수행하였다.

4.1. 적용예의 일반사항 및 최적설계 문제의 정식화

대상교량의 일반사항은 Table 1에 나타내었으며, Fig. 2에는 대상 교량의 단면도와 평면도 및 설계그룹을 나타내었다. 설계변수로는 Fig. 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)과 같이 강상자형교의 초기비용으로 산정하였으며, 이때 단위초기비용은 tonf당 현시세로 가정하였다. 제약조건은 Table 2에서 나타낸 바와 같이 허용응력 설계법에 기초한 거동제약조건이 사용되었다.

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

여기서,

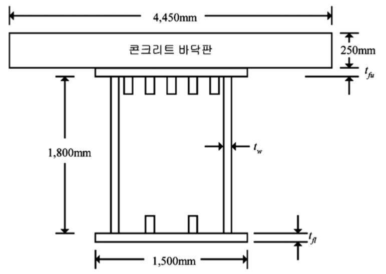
C_{ST}는 강박스거더의 단위초기비용(현시세/tonf)

W_{g_i}는 거더i번째 부재의 무게이다.

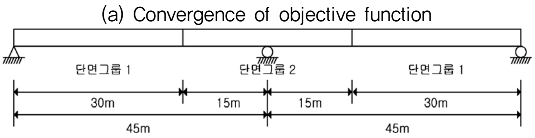
강상자형교는 수천개의 부재가 연결된 복잡한 거동을 보이는 구조물로서 일반적인 제약조건은 구조해석과 같은 설계변수의 음함수(Implicit function)와

Table 1. General data for steel box girder bridge

교량형식	2경간 연속 강상자거더교		
교량 연장(m)	45+45=90 m	강 재원	SM490(fa = 190 MPa)
교량 폭(m)	8.9 m		
최대 반경	직교	콘크리트	설계기준강도: 27 MPa 탄성계수비: 7 철근: SD40
차선수	2		
Box의 수	2		
설계 하중	DB/DL-24		



(a) Convergence of objective function



(b) Convergence history of ISACAR with different starting points

Fig. 2. Design variables of steel box girder bridge.

Table 2. Constraints of steel box girder bridge

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

단면제원과 같은 설계변수의 양함수(Explicit function)로 구성되어 있기 때문에 결국 매 단계마다 음함수값인 구조해석이 수행되어야 한다. 이에 본 예제에서는 음함수인 구조해석값들에 대해 제안된 근사재해석기법을 적용하여 해석을 수행하였다. 이때 강상자형교의 제약조건은 도로교설계기준을 준용하였다[6].

상기의 제약조건중 최소두께는 일반적인 강교설계에서는 10 mm이나, 본 연구에서는 휨응력과 전단응력의 제약조건을 분석하기 위해 최소두께를 1 mm로 결정하여 분석하였다.

4.2. 결과 및 분석

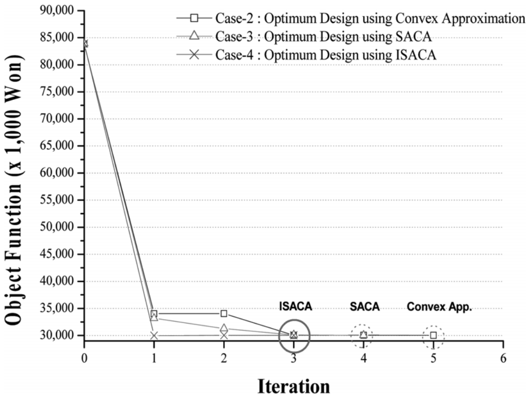
Table 3. Optimum results of steel box girder bridge

구분		초기값	Case1 (구조해석)	Case2 (COLAR)	Case3 (SACAR)	Case4 (ISACAR)
단면 그룹 1	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 그룹 2	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

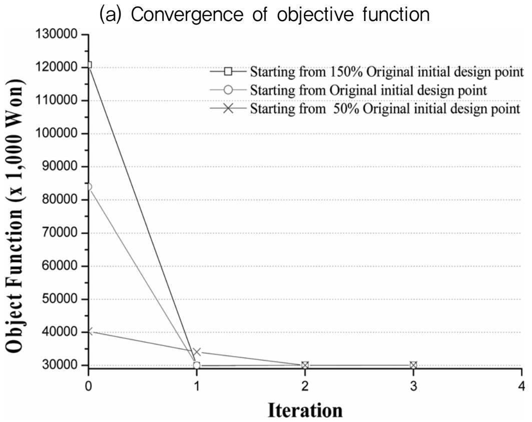
대상교량의 최적설계를 수행함에 있어서 각각의 근사재해석기법의 신뢰성과 효율성을 비교・고찰해 보기 위해 다음의 4가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다: (1) 실 구조해석을 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 1); (2) COLAR를 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 2); (3) SACAR를 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 3); (4) ISACAR를 적용한 대상교량의 최적설계 (Case 4). 이상의 4가지 경우에 대한 최적설계 결과는 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 최적설계 결과에 나타난 바와 같이 각각의 근사재해석 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.

Fig. 3은 근사화가 적용된 최적설계 방법인 Case 2~4에 대한 최적설계 과정동안의 목적함수 수렴이력과 설계변수 초기치에 변화에 따른 Case 4(ISACAR를 적용한 최적설계)의 수렴성을 보여주고 있다. Case 2~4는 실구조해석을 적용한 최적설계 결과인 Case 1과 비교시 모두 동일하게 0.08%의 매우 미소한 차이를 보이고 있으므로, COLAR, SACAR, ISACAR 모두 해의 신뢰성이 안정적임을 알 수 있다. 하지만 각각의 방법에 따른 최적화 반복횟수를 살펴보면 실 구조해석을 적용한 최적설계의 경우는 최적해를 얻기까지 무려 438회의 구조해석을 필요로 하며, COLAR는 5회, SACAR는 4회인데 반해 본 연구에서 제안한 ISACAR는 3회의 반복횟수(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 Table 4에 나타난



(a) Convergence of objective function



(b) Convergence history of ISACAR with different starting points

Fig. 3. Convergence history of objective function for the application.

최적화 반복과정동안의 중간매개변수 r의 차수 변화로부터 설명될 수 있다. 제안된 ISACAR의 수렴성에 대한 성능은 Fig. 3의 (b)에 나타나 있다. Fig. 3의 (b)에 나타난 바와 같이 초기설계변수를 원래의 초기치에 대해 각각 150%, 100%, 50%의 값을 적용하여 최적설계를 수행한 결과이다. 초기설계변수를 원래의 초기치에 대해 150%를 적용하여 최적설계를 수행한 경우는 최적의 목적함수 값이 30,046,698원으로 나타났으며, 원래의 초기치에 대해 50%를 적용하여 최적설계를 수행한 경우는 30,046,913원으로 나타났다. 이는 100%와 비교할 때 불과 0.0004~0.001%의 아주 미소한 차이를 보이고 있음을 의미하며, 이는 본 연구에서 제안된 ISACAR가 충분한 수렴성을 제공하는 방법임을 알 수 있다.

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

5. 결 론

본 연구에서는 효율적인 강교량의 구조최적화를 위해 고차의 근사재해석 기법을 제안하였다. 최적

Table 4. The orders for steel box girder bridge

반복횟수		1	2	3	4		1	2	3	4
SACAR	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
ISACAR	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
$1, 2, \ldots, 6$=설계변수(t_{fu1}, t_{w1}, t_{fl1}, t_{fu2}, t_{w2}, t_{fl2})

설계 문제에 적용성을 입증하기 위해 총 길이 90 m (45 m + 45 m)를 가지는 2경간 연속 강상자형교에 적용하였고, 제안한 설계 알고리즘의 신뢰성, 수렴성, 효율성이 예제를 통하여 입증하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 개선된 근사재해석 방법인 ISACAR는 최적화 과정에서 각각의 설계변수에 따른 중간매개변수의 차수를 해석적인 방법으로 구함으로써 매우 적극적으로 수렴속도를 증가시키는 방법으로 기존의 근사화 방법을 사용한 구조최적설계와 비교하여 기존 방법의 신뢰도를 확보하면서 효율성 면에서 우수한 근사재해석 방법이다.

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

3) 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.

참고문헌

1) Schmit, L. and Farshi, B., “Some approximation concepts for structural synthesis”, AIAA, Vol. 12, No. 5, pp. 629~699, 1974.
2) Storaasli, O. and Sobieszczanski-Sobieski, J., “On the accuracy of the Taylor approximation for structure resizing”, AIAA, Vol. 1, pp. 231~233, 1974.
3) Fluery, C. and Braibant, V., “Structural optimization: a new dual method using mixed variable”, Internatinal Journal of Numerial Methods in Engineering, Vol. 23, pp. 409~428, 1986.
4) Chung, T. and Chiou, C., “Self-adjusted convex approximation method for structural optimization”, Computer & Structure, Vol. 79, pp. 665~672, 2001.
5) Vanderplaats, G., “ADS:A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis. Engineering Design Optimization”, Inc., Santa Barbara, California, pp. 71~151, 1985.
6) 대한토목학회 “도로교 설계기준”, pp. 107~375, 2008.