

고속철도 강교량의 다목적 최적설계

Multi-objective Optimization of High Speed Railway Steel Bridges

조 효 남* 민 대 홍** 정 기 영***
Cho, Hyo-Nam Min, Dae-Hong Chung, Ki-Young

ABSTRACT

This study proposes a multi-objective optimum design method for a rational optimization of high-speed railway bridges. This multi-objective optimization is found to be effective in optimizing multi-objective problems that incorporate cost and dynamic responses such as vertical acceleration and displacement. These design factors are so important in the high-speed railway bridges. And the trade off method which is one of the most typical multi-objective optimization methods is used in this study, since the dynamic factors are formulated as objective function and also considered as constraints. And the Pareto curve can be obtained by performing the multi-objective optimization for real high-speed railway bridges. Thus, it is found that more reasonable design can be obtained when compared with those using conventional design procedure.

1. 서 론

고속철도 강교량은 열차의 고속주행 특성으로 인하여 일반 교량과는 달리 동적인 응답치에 대한 검토가 매우 중요하다. 본 연구에서는 고속철도 강교량의 건설비용을 최소화하며, 이 비용항목과 더불어 주요 동적 거동 응답치인 처짐과 가속도를 동시에 고려하여 최적설계를 수행함으로써 보다 합리적인 고속철도 강교량의 설계 방향을 제시하고자 한다. 따라서 이를 구현하기 위해서는 다목적 최적설계 방법이 필수적으로 요구된다. 다목적 최적설계의 동향을 살펴보면 1896년 Pareto에 의해 연구가 수행된 이래 이론에 중점을 둔 연구(Osyczka, 1984; Eschenauer, 1990; Ringu-est, 1992)가 대부분을 차지하고 있었으며 최근에 들어 구조최적화에 대한 다목적 최적화방법이 몇몇 연구자(Saravanos, 1992; Grandhi, 1993)에 의해서 연구된 바가 있었고,

* 정희원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수
** 정희원 · 안산공과대학 토목과 겸임전임강사
*** 학생회원 · 한양대학교 토목환경공학과 석사과정

최근에는 뼈대구조물에 대한 효과적인 다목적 최적설계를 위하여 다단계 최적화 기법을 사용하였다(Chen, 1999). 또한 국내에서는 강상판교량에 대하여 비용과 처짐에 대하여 다목적 최적설계 연구가 있었다(조효남, 2002). 본 논문에서는 동적인 특성의 교찰이 보다 중요시되는 고속철도 강교량에 대하여 비용, 처짐, 가속도의 3가지 요소에 대하여 3차원 파레토 곡선을 적용하였고, 이로부터 경제적이고 성능이 뛰어난 고속철도 강교량의 효율적인 설계 방안을 제시하였다.

2. 고속철도 강교의 다목적 최적설계 문제의 정식화

2.1 설계변수

고속철도 강교의 구조요소에는 주형, 바닥판, 가로보 등이 있다. 이 중에서 바닥판과 가로보는 국부적인 하중에 지배적이며, 주형은 시스템해석을 통해서 설계되어지고 상부구조 공비에 지배적인 요소이다. 따라서, 본 연구에서는 가장 지배적인 구조요소인 주형에 대해서 설계변수를 취하였으며 기타 부재는 설계 상수로 정하였다. 주형의 설계변수는 그림 1과 같이 최대 정모멘트부와 최대 부모멘트 부를 고려한 고속철도 강교의 상부구조 건설공비에 직접영향을 주는 플랜지와웨브의 두께, 폭 및 높이를 설계변수로 정하였다.

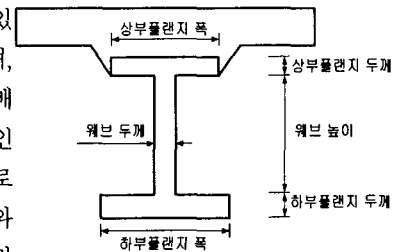


그림 1. 주형의 설계변수

2.2 목적함수

본 논문에서는 열차의 고속주행에 따른 구조물의 응답을 통하여 구조물을 효과적으로 설계하는 것이 주 목적이다. 따라서 주행의 안전성과 승객의 안락성을 정성적으로 판단할 수 있는 주요 동적 인자로서 교량의 수직가속도와 처짐을 목적함수에 포함하였으며, 이를 식 (1)과 같은 다목적함수 식으로 정식화하였다.

$$\text{Minimize } \{f(x)_c, f(x)_a, f(x)_d\} \quad (1)$$

여기서, $f(x)_c$ = 비용목적함수, $f(x)_a$ = 주형의 수직가속도, $f(x)_d$ = 주형의 처짐

2.3 제약조건

고속철도 강교의 최적설계에서는 거동에 대하여 실무에서 주로 사용하는 허용응력설계법(ASD)과 고속철도 건설공단에서 제안하는 BRDM(Bridge Design Manual)의 규정사항을 이용하여 제약조건을 정식화하였으며, 표 1과 같이 나타내었다. 또한 설계 하중에 대한 조합은 표 2와 같이 적용하여 각각의 하중조합에 대해 변단면마다 고려하였다.

표 1 주형의 제약조건

	제약조건	비고
상부 휨응력	$g_1 = f_{upper} - f_{sa} \leq 0$	f_{upper} = 상부플랜지 응력
하부 휨응력	$g_2 = f_{lower} - f_{sa} \leq 0$	f_{lower} = 하부플랜지 응력
전단 응력	$g_3 = \tau_s - \tau_{sa} \leq 0$	f_{sa} = 허용응력
상부 합성응력	$g_4 = \left(\frac{f_{upper}}{f_{sa}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sa}}\right)^2 \leq 1.2$	τ_{sa} = 허용전단응력
하부 합성응력	$g_5 = \left(\frac{f_{lower}}{f_{sa}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sa}}\right)^2 \leq 1.2$	τ_s = 복부전단응력
처짐	$g_6 = \frac{\delta}{L} - \frac{1}{1,700} \leq 0$	δ = 처짐
가속도	$g_7 = a_{max} / 3.4335 - 1 \leq 0$	a = 수직 가속도

표 2 하중재하 형태

하중조합 Case	고려되는 재하 하중
1	합성전 사하중
2	합성전 사하중 + 합성후 사·활하중
3	합성전 사하중 + 합성후 사·활하중 + 크리이프하중
4	합성전 사하중 + 합성후 사·활하중 + 크리이프하중 + 건조수축하중
5	합성전 사하중 + 합성후 사·활하중 + 크리이프하중 + 온도차하중
6	합성전 사하중 + 합성후 사·활하중 + 크리이프하중 - 온도차하중

3. 최적화 방법

3.1 최적화 기법

최적설계에 사용된 최적화 방법은 ALMM(Augmented Lagrange Multiplier Method)과, BFGS(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno)방법을 사용하였으며 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 최적화에 사용된 프로그램은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis) [G. N. Vanderplaats, 1985]를 이용하여 수행하였다.

3.2 다목적 최적화 방법

다목적 최적설계는 변량의 단위가 서로 다른 두 개 이상의 목적함수 관계를 파레토 곡선을 이용하여 각각의 목적함수에 대한 영향을 표현하는데 고속철도 강교량의 다목적 최적설계에서는 주형의 처짐과 수직가속도가 목적함수뿐만 아니라 제약조건으로도 사용되고 있어 합리적인 방법인 trade-off방법을 사용하였다. 즉, 처짐이 지배적인 제약조건이 되는 설계공간과 가속도가 지배적인 제약조건이 되는 설계공간에서 처짐과 수직가

속도의 변화에 따라 각각 제작비용에 대한 최적설계를 수행하였고, 제작비용과 처짐 및 가속도의 관계를 3차 파레토 곡선으로 표현하여 제작비용과 처짐과의 관계를 나타내었다. 본 연구에서는 우선 비선형 수리계획법을 이용하여 제작비용에 대한 단일 목적함수를 가지는 최적설계를 수행한다. 이때 구한 처짐을 최대치의 범위로 사용한다. 그리고 처짐을 목적함수로 하는 최적설계를 수행하여 최대 제작비용을 산정하고 이때의 처짐을 최소 처짐의 한계치로 사용하며, 같은 방법으로 수직가속도에 대해서 최소 처짐의 한계치를 결정한다. 이러한 처짐의 상한치와 하한치를 근거로 한계범위 안의 처짐량과 가속도를 제약조건으로 설정하고 제작공비에 대한 최적설계를 수행함으로써 처짐과 수직가속도에 대한 제작공비간의 파레토 곡선을 얻는다. 이러한 파레토 곡선은 공학적인 판단에 기초한 다목적 최적설계의 최적치를 결정할 수 있는 판단자료로 이용한다.

4. 적용에 및 고찰

4.1 대상구조물의 일반사항 및 단위경비

본 연구에서 제안한 목적함수와 시방기준 및 BRDM에 의해 정식화된 제약조건을 이용하여 고속철도 강교의 다목적 최적설계를 수행하였다. 이를 위하여 실제적인 2경간 연속 고속철도 강교를 선정하였으며 지점부는 영향선을 고려하여 2개의 변단면을 갖도록 설계하였다. 대상교량의 일반사항과 사용재료는 표 1, 2에 나타내었고 대표적인 횡단면도와 종단면도를 각각 그림 2, 3에 제시하였다. 상부구조의 초기비용은 물가산출기준(1999)을 참고로 주형의 제작·운반·가설비용을 비롯한 강교도장, 콘크리트슬라브, 주요재료비 등을 고려하여 산정하였다.

표 3. 대상구조물의 일반사항

교량 형식	형식	2경간 연속 합성판형교(복선형)
	지간	40m+40m
	폭	14.0m
	차축간격	5.0m
설계하중		HL 표준열차하중

표 4. 대상구조물의 사용재료

강재 (주부재)	사용강재	SM520
	항복응력(kg/cm ²)	3,500
	허용인장응력(kg/cm ²)	2,000
	허용전단응력(kg/cm ²)	1,200
	탄성계수(kg/cm ²)	2.1×10 ⁹

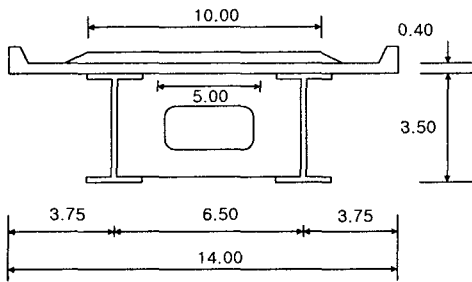


그림 2 횡단면도

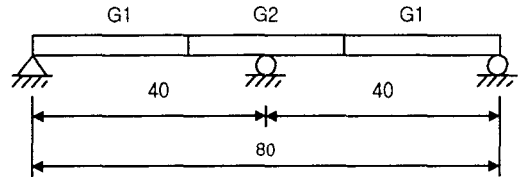


그림 3 종단면도

4.2 결과 및 고찰

그림 4, 5, 6에서는 기존설계 A와 초기비용만을 고려한 비용 단일목적 최적설계 B 그리고 제작비용과 수직가속도 및 처짐을 함께 고려한 다목적 최적설계 C의 수치결과를 파레토 곡선으로 비교하여 나타내었다. 그림 4-a는 기존설계점을 포함한 전체 파레토 그래프이며, 그림 4-b는 기존설계점을 배제하고 다만 다목적 최적설계를 수행한 해의 구간에서만 확대하여 본 파레토 형상으로써, 이 그래프를 통하여 처짐 및 수직가속도의 관계를 보다 명확히 이해할 수 있다. 공간상의 최적설계점은 분산되어 표현이 되나 세가지 요소의 상관성을 이해할 수 있는 경향은 충분히 나타나고 있다. 그림 5는 비용과 가속도 축으로 구성된 면상에 최적설계 포인트들을 투영한 그래프로써 두 요소 사이의 상관관계를 명확히 파악할 수 있다. 즉, 가속도가 증가함에 따라 비용이 증가하는 일반적인 특성이 유지되고 있으며, 그림 6에서는 처짐의 경우에 비용과의 관계를 살펴볼 수 있는 그래프로써 가속도의 증가에 따른 비용의 증가 관계를 나타내고 있다. 두 그래프를 통하여 고속철도

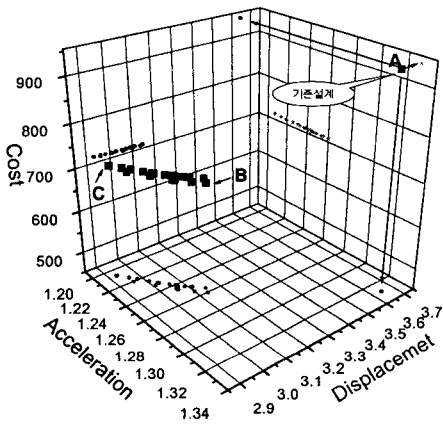


그림 4-a. 파레토 곡선

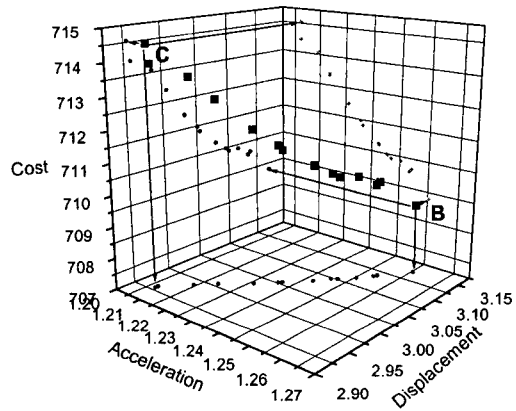


그림 4-b. 파레토 곡선(국부영역)

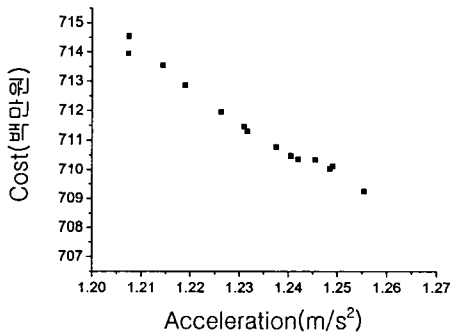


그림 5. 비용과 가속도의 관계

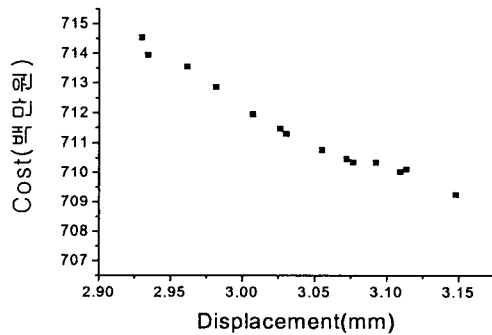


그림 6. 비용과 처짐의 관계

표 5. 각 설계 방법에 따른 결과

설계변수		기존설계(A)	비용 단일목적 최적설계(B)	trade-off 다목적 최적설계(C)	
시간 중앙	상부 플랜지	폭(mm)	700	616	663
		두께(mm)	40	10	10
	하부 플랜지	폭(mm)	1,100	911	926
		두께(mm)	72	49	45
	웹	폭(mm)	3,300	3,641	3,645
		두께(mm)	30	10	10
내부 지점	상부 플랜지	폭(mm)	1,100	867	949
		두께(mm)	100	79	86
	하부 플랜지	폭(mm)	1,150	1,045	1203
		두께(mm)	100	92	45
	웹	폭(mm)	3,300	3,529	3,645
		두께(mm)	30	26	11
처짐(mm)		3.645	3.115	2.930	
수직가속도(m/sec ²)		1.329	1.270	1.207	
초기비용 (백만원)		940.86	665.60	714.54	

강교량의 주요 동적응답치인 처짐과 수직가속도를 제어하기 위해서는 비용의 증가가 반드시 수반됨을 알 수 있고 이를 효과적으로 판단하기 위해서는 앞서 제시한 3차 파레토 커브와 같은 다목적 설계의 관점에서의 고찰이 필수적임을 알 수 있다.

표 5의 결과로부터 설계변수의 단면치수를 고찰하면 다음의 특징을 확인할 수 있다. 기존설계 A와 비교하여 볼 때 다목적 최적설계 C에서는 시간 중앙부나 내부 지점의 플랜지, 웹 모두에서 폭보다 두께의 변동 범위가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 즉, 폭 변화는 플랜지의 경우 5.3%~15.8%의 감소 범위를 보이며, 웹의 경우 10.5%의 증가치를 나타내는데, 두께 변화는 플랜지에서는 37.5%~75%, 웹에서는 66.7%의 감소 변화 범위를 각각 나타낸다. 따라서 기존의 설계는 다목적 최적설계의 관점에서 판단할 경우 단면의 두께가 폭에 비하여 과다하게 산정 되었음을 알 수 있다. 그리고, 공학적인 판단을 위해서는 기존의 설계점과 최적설계점들을 비교해야하는데 본 연구 결과에서 나타난 비용의 변화와 동적응답치의 변화는 미소하므로 대표적인 경우로 최적설계점 가운데 최대비용 설계점과 최소비용 설계점을 선택적으로 적용하여 비교하여 보았다. 기존설계 A와 비용에 대한 단일목적 최적설계 B 및 trade-off 방법을 사용한 다목적 최적설계 C의 비용 결과를 각각 비교하였을 경우, 기존설계에서는 약 9억4천만원이 소요되었으나 단일목적 최적설계에서는 약 6억7천만원, 다목적 최적설계 C의 경우에는 약 7억1천만원으로 기존설계에 비하여 각각 대략 29.25%, 24.1%의 비용감소 효과가 나타났다. 또한 주요 동적응답치인 처짐에 대하여 기존설계에서 1.329m/s²인 값이 단일목적 최적설계에서는 1.270m/s²으로, 다목적 최적설계에서는 1.207m/s²으로 각각 14.5%, 19.6%으로 감소되었으며, 수직가속도의 경우 기존설계의 3.645m에서 3.115mm, 2.930mm으로 단일목적 최적설계와 다목적

최적설계에서 각각 4.4%, 9.17% 감소되었다. 비용의 경우 단일목적 최적설계의 값이 다목적 최적설계의 값보다 크게 나왔지만, 동적응답값들의 변화율에 대한 비용의 증가율을 고려한다면 처짐과 수직가속도를 고려한 다목적 최적설계의 방법이 보다 합리적인 것을 알 수 있다. 즉, 비용만을 고려한 최적설계점 B의 경우, 기존설계점 A에 비교하여 비용변화 대비 처짐변화율은 0.19%를 보이며, 비용변화 대비 가속도 변화율은 0.03%를 나타낸다. 반면에 처짐과 비용 수직가속도를 모두 포함한 다목적 최적설계점 C의 경우에는 기존설계점 A에 대하여 비용변화 대비 처짐변화율은 0.32%를 보이며, 비용변화 대비 가속도 변화율은 0.05%를 나타낸다. 따라서 다목적 최적설계점 C가 기존설계는 물론이고 비용만을 고려한 최적설계 B에 비하여 상대적으로 적은 비용으로 두 가지 성능을 모두 더 크게 향상시킬 수 있는 다목적 최적설계 후보점이 될 수 있다. 실용적인 측면에서 보았을 경우에는, trade-off 방법의 다목적 설계 제약조건을 바탕으로 가속도의 경우에는 허용치의 2/5수준에, 수직가속도의 경우는 허용수직가속도의 1/7수준에서 적용하여 설계하면 매우 효율적으로 교량설계를 수행할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고속철도 강교량의 주형에 대하여 제한한 다목적 최적설계를 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 고속철도 강교량은 열차의 고속주행으로 인하여 구조물의 거동에 대한 설계조건이 반드시 고려되어야 하는데 본 연구에서는 이를 다목적 최적설계로써 구현하여 파레토 곡선을 이용하여, 기존의 일반적인 설계에 비하여 동일한 처짐과 수직 가속도 각각의 조건상에서 모두 더 적은 비용으로 설계하였다. 따라서 재래적인 설계 방법에 비교하여 다목적 최적설계 방법은 경제적인 설계를 유도하며 성능을 향상시킬 수 있는 합리적인 설계법이다.
- (2) 제작비용만을 목적함수로 사용한 최적설계 결과는 trade-off 방법을 이용한 파레토 곡선의 최소비용 그리고 상한처짐 및 상한 수직가속도의 경계에 해당한다. 이는 구조물의 제작비용과 성능간의 관계를 무시한 극단적인 최소 제작비용에 대한 설계결과로서 보다 합리적인 설계를 위하여 공학적 판단에 근거한 다목적 최적설계가 필요하다.
- (3) 고속철도 강교량은 동적인 인자의 고려가 중요시 되는 구조물로써 비용과 처짐 및 가속도를 3차원 파레토 곡선을 분석하면 기존설계점과 최적설계점 사이의 관계를 명확히 파악할 수 있는데, 고속철도 강교량에 대해서 비용최적설계를 수행하되 동적응답을 trade-off 방법의 다목적 설계 제약조건을 바탕으로 적용한다면 매우 효과적으로 성능을 향상시키면서도 경제성을 확보하는 최적설계를 수행할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 BK21의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 조효남, 정지승, 민대홍 “강상관교의 다목적 최적설계”, 강구조학회 논문집, 2002
2. 조효남, 민대홍, 조준석 “고속철도 강교량의 총기대비용 최적설계”, 토목학회 논문집, 2001
3. 조효남, “강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb)개발 1차년도 보고서”, 1998.
4. 철강엔지니어링센터, “고속철도 강합성교량의 적용성에 관한 연구”, 1998
5. 철강엔지니어링센터, “고속철도 합성형교량 설계요령”, 1998
6. 한국고속철도건설공단, “Bridge Design Manual (BRDM) Final Report”, 1995
7. 건설교통부, “도로교표준시방서,” 1996.
8. Yeong-Bin Yang, Jong-Dar Yau and Lin-Ching Hsu, “Vibration of simple beams due to trains moving at high speeds”, Engineering Structures, 1997
9. L. Fryba, “Dynamics of Railway Bridges”, 1996, Thomas Telford.. Roert D. Cook, “Concept and Application of Finite Element Analysis”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1981
10. Garret N. Vanderplaats, “ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis”, Engineering Design Optimization, INC, Santa Barbara, California, 1985.
11. Vanderplaats, Garret. N., “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”, McGraw-Hill, 1984.