

교량-궤도 종방향 상호작용 및 동적영향을 고려한 고속철도 교량의 최적설계

Optimum Design of High-Speed Railway Bridges Considering Bridge-Rail Longitudinal Interaction and Moving Load Effect

임영록* · 임석빈** · 박광영***

Ihm, Yeong Rok · Im, Seok Been · Park, Kwang Young

Abstract

Recently, high-speed railway systems have gained increased interest as a means of environmental friendly transportation, and numerous bridges for high-speed railways have been constructed accordingly. However, bridge design for high-speed railways requires more consideration than conventional railway design because fast-moving trains will lead to significant impact on bridge structures. Thus, this research proposes a revised design considering both bridge-rail longitudinal interaction and dynamic effect of trains to ensure stability of fast travelling trains. To validate the proposed design algorithm, numerical analyses are performed and compared using a constructed 250 m long bridge with 5 spans for a high-speed railway. From the numerical results, the proposed optimum design of high-speed railway bridges exhibits the most economic life-cycle-cost (LCC) when compared with several existing design approaches.

Key words : Optimum Design, CWR, Bridge-Rail Interaction, Bridge-Vehicle Interaction, LCC, ALM-BFGS, Heuristic Decision Method

요 지

최근 친환경 운송수단인 고속철도에 대한 관심이 증가하고 있으며, 그에 따른 고속철도 교량이 많이 건설되고 있다. 하지만 기존의 일반 철도 교량에 비해 고속철도 교량은 고속주행하는 열차의 동적 하중에 의한 영향이 증가하게 되므로, 이에 대한 고려가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고속주행하는 열차의 주행 안정성을 확보하기 위해 고속철도 교량의 구조물-궤도 상호작용 및 동적 안전성을 동시에 고려하여 설계하는 방법을 제안하였고, 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 기존의 재래식 설계에 의하여 설계, 시공되어진 단순 5경간 250 m 교량을 대상으로 수치해석을 수행하여 비교하였다. 수치해석 결과, 교량-궤도 상호작용 및 교량-차량 상호작용을 동시에 고려한 최적설계가 기존의 제안된 여러 설계 방법들과 비교했을 때, 최적화의 목적함수로 설정한 생애주기비용이 가장 경제적임을 확인하였다.

핵심어 : 최적설계, 장대레일, 교량-궤도 종방향 상호작용, 교량-차량 상호작용, 생애주기비용, ALM-BFGS, Heuristic Decision Method

1. 서 론

고속철도 교량에 있어서 최적화는 응력수준을 바탕으로 한 강도 위주의 최적화뿐만 아니라 고속주행하는 열차에 의한 동적인 특성 및 레일과 교량의 상호작용을 반영하여 주행 안정성에 중요한 관점을 두어야 한다. 현재 고속철도 교량 설계시 교량 구조물과 궤도간의 종방향 상호작용 및 차량과 구조물의 동적 영향이 설계단계에서 반영되지 않고, 단지 최종 단면이 기준을 만족하는지에 대한 검토만 이루어지고 있는

실정이다. 따라서 열차의 주행 안정성을 확보함과 동시에 기존 설계에 비하여 더 효율적이고 경제적인 단면 결정을 위하여, 고속철도 교량 설계시 교량-궤도 종방향 상호작용 및 교량-차량 동적 영향을 고려하는 과정이 필요하다고 판단된다.

교량 구조물의 강성 및 처짐 등과 같은 구조안정성, 진동에 따른 사용성 제약조건, 그리고 교량 구조물과 궤도간의 종방향 상호작용 및 차량의 동적 영향을 고려한 최적설계가 이루어지기 위해서는 다음과 같은 설계과정이 필요하다.

1) 교량과 궤도의 종방향 상호작용 및 차량의 동적 영향

*정회원 · 한국철도시설공단(E-mail : yr5803@hanmail.net)

**정회원 · Texas Transportation Institute

***정회원 · 경기대대학원 박사과정

등이 설계조건에 따라 잘 수립될수 있는 교량과 궤도에 대한 모델링 기법의 개발,

2) 동적 특성을 합리적으로 반영할 수 있는 최적설계 알고리즘의 개발,

3) 개발한 알고리즘을 이용한 효율적인 단면 설계와 유지관리비용을 포함한 구조물의 생애주기비용을 고려한 최적화 설계의 수행.

본 연구에서는 이러한 세가지의 설계 과정을 포함한 고속철도 강교량의 신뢰성 최적설계 방법을 제안하고자 한다. 특히 개발된 모델링 방법과 최적설계 알고리즘을 효율성을 평가하기 위해 실무에서 설계되어진 실제 교량에 대하여 수치 해석을 수행하여, 본 연구에서 제안한 설계방법을 검증하고자 한다. 설계변수로는 소수 주거터의 거더높이 및 플랜지의 두께와 폭, 가로보의 간격 등을 선택하였고, 이를 바탕으로 신뢰성 최적설계를 수행하여 제안한 방법이 훨씬 경제적이며 효율적인 설계임을 입증하고자 한다.

2. 교량-궤도 종방향 상호작용 및 교량-차량 상호작용

2.1 교량-궤도 종방향 상호작용

교량-궤도 종방향 상호작용 해석을 위한 장대 레일 응력 검토는 교량의 안전도를 확보하고 특히 레일의 좌굴안전도를 확인하여 열차 운행시 열차 운행의 안전도를 확보할 수 있도록 하는 것이다. 물론 장대레일의 응력 발생 구조는 장대 레일-구조물간의 상호작용에 의한 것이므로 레일-구조물간의 응력발생에 영향을 끼치는 교량의 상부구조 및 하부구조의 구조적 특성과 기초 및 지반의 특성 등에 따라 장대 레일의 종방향 축응력의 크기가 상당히 변화할 수 있다. 또한, 온도 변형에서도 상당한 차이가 있을 수 있으므로 그 변화 크기가 실제로 레일-구조물간의 응력발생에 미치는 영향이 어느 정도인지 확인할 필요가 있다. 궤도구조가 연속되는 장대 레일 구조를 적용하므로 온도하중 및 시동, 제동하중이 작용하게 될 때에 레일에 과도한 축력이 작용하게 될 수도 있어 레일이 파단하게 되거나 좌굴할 위험이 존재하게 된다. 따라서 레일에 작용하는 축력을 가능한 정확하게 계산하는 것이 고속열차의 주행 안정성 측면에서 매우 중요하다 할 수 있다. 레일 축력에 크게 영향을 미치는 요소는 종방향 온도 차이에

의한 교량의 신축길이와 시·제동하중 그리고 휨 변위이다. 이러한 레일-구조물간의 상호작용에는 도상의 비선형적 거동이 매개로 작용하게 된다. 따라서 레일의 축력 계산 등에 대한 해석의 정확도 및 신뢰성을 높이기 위해서는 도상의 비선형적 특성, 교량 구조물의 강성 및 지반의 강성을 고려하여 해석을 수행하여야 한다.

본 연구에서는 열차의 고속 주행(350 km/h)시 고속철도 교량의 장대 레일 궤도 구조에 있어서 레일-구조물간의 상호작용을 고려한 레일 축력 검토를 위해 위의 고려사항인 도상의 비선형적 재료 특성과 교량 하부구조의 강성 및 지반의 강성을 고려한 모델링을 통하여 해석을 수행하고자 한다.

2.2 교량-차량 상호작용

열차 하중에 의한 교량의 동적 거동은 교량 구조의 동적 특성과 차량의 동적 운동에 의해 결정되어진다. 즉, 교량의 고유진동수, 차량의 속도와 유효타격간격(effective beating interval)에 의해 교량의 공진현상을 예측할 수 있다.

$$\Omega = V/S_{eff} \quad (1)$$

여기서, Ω 는 열차의 크로싱 진동수(crossing frequency), V 는 차량의 속도이며, S_{eff} 는 차량의 유효타격간격이다.

교량의 고유진동수와 열차의 크로싱 진동수가 일치할 경우 ($\Omega = \omega_n$; 교량의 1차 휨고유진동수) 공진현상이 발생하게 되므로 공진현상을 발생시키는 열차의 임계속도 (critical velocity)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{cr} = \omega_n \times S_{eff} \text{ (m/sec)} \quad (2)$$

본 해석에서 사용된 KTX 열차하중의 경우, 유효타격간격은 18.7m로 산정할 수 있으므로 공진이 일어나는 차량의 임계속도는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{cr} = \omega_n \times 18.7 \text{ (m/sec)} = \omega_n \times 67.32 \text{ (km/h)} \quad (3)$$

2.3 교량-궤도 종방향 상호작용 및 교량-차량 상호작용에서의 설계기준

정·동적 해석을 통한 구조물의 안전성과 교량-궤도 종방향 상호작용 및 교량-차량 상호작용 해석을 고려하여 위한 검토기준은 다음과 같다.

표 1. 동적해석 및 교량-궤도 상호작용 검토 기준

항 목	발생 요인 및 영향	기 준 치	기 준
장대레일 축력	장대레일 좌굴 및 파단	압축부기응력 - 92 MPa 인장부기응력 - 92 MPa	호남고속철도 설계지침
처짐	승차감 열차 주행 안정성	1/L ≤ 1/1700 정적 1/L ≤ 1/600	호남고속철도 설계지침
단부회전각	열차 주행 안정성 상향력	18-21.5 kN	BRDM
수직가속도	승차감 열차 주행 안정성	콘크리트도상 - 0.5 g	DS804(독일)
상부 비틀림	열차 주행 안정성	0.4 mm/m (1.2 mm/3 m)	호남고속철도 설계지침
구조물-궤도 상대변위	열차 주행 안정성	4 mm	BRDM

2.4 상호작용 해석 모델링

유럽에서의 여러 실측 결과에 의해 최근 제공된 UIC(2001) Leaflet 774-3R 규정에서는 변위-저항력 관계를 bi-linear로 규정하고 다음의 그림 1과 같은 관계곡선을 제시하고 있다. 이 곡선에서 궤도의 종 저항력은 도상의 다짐상태와 열차하중의 재하 여부에 따라 다른 값을 보임을 알 수 있다. 레일 축력 및 좌굴 검토를 위한 유한요소 해석 결과는 궤도에 작용하는 압축력에 대한 횡방향 변위, 즉 좌굴 영향을 고려하여 그에 따른 축력의 변화를 검토하도록 하고, 시동/제동 하중에 대한 해석시 차량에 의한 수직하중이 작용한다고 가정하여 일정 비율로 도상 저항력이 증가하도록 한다. 또한 교량 하부구조의 강성이 레일 축력에 큰 영향을 미친다는 관점에서 받침 강성, 교각 강성 및 지반 강성을 뼈대 요소로 직접 모델링하도록 한다.

해석 알고리즘은 도상의 비선형 거동과 좌굴 거동을 동시에 해석 할 수 있도록 하기 위하여 Newton-Raphson 방법을 이용한 기하 비선형 해석 알고리즘을 적용한다. 도상은 일정한 변형 수준까지는 탄성적으로 거동하다가 임의의 한계수준(항복변위)을 넘게 되면 외력에 대해서 더 이상 저항하지 못하고 일정한 크기의 저항력만을 갖는 bi-linear 스프링 요소로 모델링한다. 도상에 의한 종방향 저항력은 침목 간격으로 분산되어 작용하지만 일반적으로 레일과 교량 사이에 bi-linear 스프링 요소가 일정한 간격으로 등분포 되어 있는 것으로 가정한다. 또한 시동 및 제동하중이 작용하는 경우에는 차량의 수직하중에 의하여 도상의 저항력이 증가할 수 있으므로 비재하시에 대한 재하시의 도상 저항력의 비를 입력함으로써 필요에 따라 수직하중에 의한 도상 저항력의 증가를 고려할 수 있다. 레일 및 교량 상판의 부재는 절점당 6자유

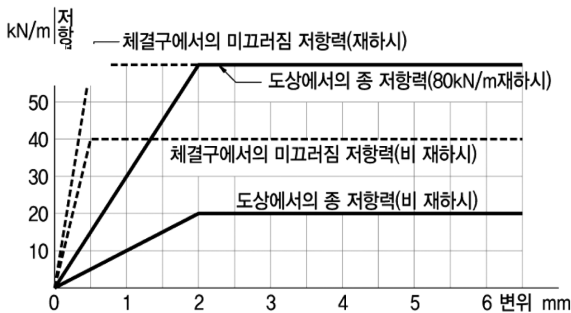


그림 1. 궤도의 종방향력-변위관계 (UIC Leaflet 774-3R 의 규정)

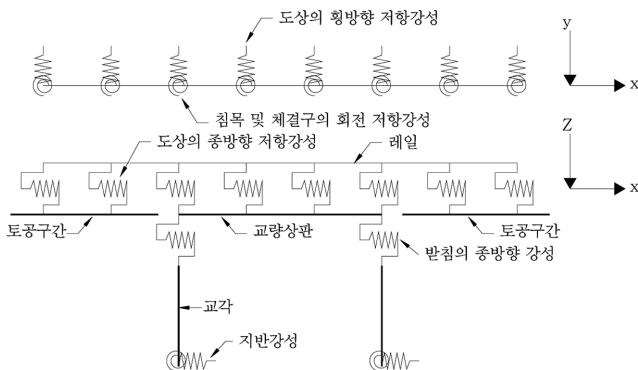


그림 2. 레일축력 해석을 위한 유한요소 모델의 구성 예

도를 갖는 뼈대 요소(프레임 요소)로 모델링한다. 교각은 일반적으로 스프링 요소로 치환이 가능하지만 본 해석에서는 휨 거동을 반영하고자 하여 뼈대 요소로 모델링한다. 받침 및 지반의 강성에 대하여도 그 종방향 강성만을 고려한 선형 스프링 요소로 치환하도록 한다.

레일 축력 해석을 위한 해석모형의 예는 그림 2와 같다.

본 검토에서는 도상의 비선형 거동 및 레일의 횡방향 좌굴 거동을 해석하기 위한 알고리즘으로써 하중제어 비선형 증분 해석(Load-controlled Nonlinear Incremental Solver)이 사용되었다. 이 해석 알고리즘에서는 작용 하중을 여러 개의 하중단계로 분할하고, 각 하중단계의 시점에서 현재의 기하 좌표와 그에 대한 내력을 이용하여 변형된 구조 시스템의 기하강도 매트릭스를 구성한다. 또한, 반복 수렴 과정에서 강성도 매트릭스 및 하중벡터를 재구성하면서 구조계의 평형을 만족하는 변위 벡터를 결정한다. 즉, 각 하중 단계에 대해서 강성도 매트릭스와 하중 벡터를 제어함으로써 구조 시스템을 선형해석 모델로 치환하며, 전체 계가 평형을 이룰 때까지 반복계산을 수행하여 해석한다.

3. 고속철도 교량의 최적설계 정식화

생애 주기 동안의 총 기대비용은 식 (4)와 같이 정식화 할 수 있다.

$$E[C_T(\bar{X}, T_{life})] = C_I(\bar{X}) + \sum_{t=1}^{T_{life}} \left[\frac{\sum_{j=1}^J E[C_{Mj}(\bar{X}, t) + \sum_{k=1}^K E[C_{Fk}(\bar{X})]]}{(1+r)^t} \right] \quad (4)$$

여기서, $E[C_T(\bar{X}, T_{life})]$ = 설계변수벡터 \bar{X} 와 생애주기 T_{life} 의 함수인 총 기대 LCC, $C_I(\bar{X})$ = 초기비용, $E[C_{Mj}(\bar{X}), t]$ = 소수 주형교 구성요소 j 에 대한 기대 유지관리비용, $E[C_{Fk}(\bar{X})]$ = 한계상태 k 에 대한 기대복구비용, r = 할인율이다. 식 (4)에서 나타난 바와 같이, 고속철도 강합성 소수 주형교의 총 기대 LCC는 초기비용 뿐 아니라 구조물의 생애 주기 동안의 기대 유지관리비용과 휨 및 전단 피로 등에 의한 사용성 및 안정성 등과 관련하여 발생할 수 있는 구조물의 한계상태를 고려한 기대 복구비용이 고려되어야 한다.

3.1 초기비용

초기 비용은 식 (5)와 같이 정식화 할 수 있다.

$$C_I(\bar{X}) = C_{ID}(\bar{X}) + C_{IC}(\bar{X}) + C_{IT}(\bar{X}) \quad (5)$$

C_{ID} = 계획 · 설계비용, C_{IC} = 시공 혹은 건설비용, C_{IT} = 감리비용이며, 본 연구에서 설계비용과 감리비용의 초기비용에 대한 비율은 De Brito and Branco(1995)의 연구결과에서 사용된 수치인 시공비용의 3%와 7%를 적용하였다.

3.2 기대 유지관리비용

기존의 LCC 최적설계에 대한 연구들 중에서 Wen과 Kang(1997)의 연구에 의하면, 비록 생애 주기 동안의 LCC 산정에서 유지관리비용이 차지하는 비중은 크지만, 설계 변수에 대한 유지 관리비용과의 상관 관계는 일반적으로 미약하고 판단하였다. 그러나 본 연구에서는 유지 관리 비용이 설계 변수에 따라 영향을 받는다고 가정하고, 구조물 열화에 의해 산정되는 보수·보강 및 교체비용과 정기적인 교량 관리로부터 발생하는 비용으로 구분하여 고려하였다. 본 연구에서는 고속철도 강합성 소수 주형교의 유지 관리 이력이나 보수 보강을 시행한 자료가 국내에는 없는 관계로 신뢰성에 기초한 파손 확률을 구하여 기대 복구비용을 추론하였으며 설계변수에 대한 상관 관계가 적고 LCC 최적설계 결과에 미치는 영향이 적은 정기적인 교량관리 비용은 철도교량의 정기관리 대기기준을 근간으로 하여 분석을 수행하였다. 신뢰성 분석에 의한 파손확률에 따른 기대 유지관리비용의 정식화는 식 (6)과 같다.

$$E[C_{Mj}(\bar{X}, t)] = C_{Mj}(\bar{X}) \cdot f_{Mj}(t) \quad (6)$$

$C_{Mj}(\bar{X})$ = 고속철도 강합성 소수 주형교 구성요소 j 에 대한 유지관리비용, $f_{Mj}(t)$ = 고속철도 강합성 소수 주형교 구성요소 j 에 대한 시간 t 에서의 유지관리 확률이다.

3.3 기대 복구비용

기대 복구비용은 고속철도 강합성 소수 주형교의 생애 주기 동안 일어날 수 있는 다양한 한계상태에 대한 파손 확률로부터 산정할 수 있다. 비록 이러한 파손 확률은 일반적인 교량의 사용 환경에서는 발생하지 않을 수 있지만, 기대 복구비용을 고려한다는 것은 보험비용의 개념으로 비용 분석 측면에서 고려될 필요가 있다 (Melchers, 1987). 이러한 기대 복구비용은 고려된 한계상태 k 에 대한 파손확률과 직·간접 복구비용을 이용하여 식 (7)과 같이 산정하였다.

$$E[C_{Fk}(\bar{X}, t)] = C_{Fk}(\bar{X}) \cdot p(\bar{X}, t|T) \quad (7)$$

k = 한계상태에 대한 인덱스, $C_{Fk}(\bar{X})$ = 한계상태 k 에 대한 복구비용, $p(\bar{X}, t|T)$ = 하중과 저항이력에 의존하는 누적 파손 확률로부터 산정되는 파손확률이다.

한편 식 (7)에서 복구비용 $C_{Fk}(\bar{X})$ 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{Fk}(\bar{X}) &= C_{DR}(\bar{X}) + C_{IR}(\bar{X}) \\ &= C_{DR}(\bar{X}) + [C_H \cdot r_{rk}(\bar{X}) + C_U(t_{rk}(\bar{X})) + C_E(t_{rk}(\bar{X}))] \end{aligned} \quad (8)$$

C_{DR} = 직접 복구비용, C_{IR} = 간접 복구비용, C_H = 인적 혹은 물질적 손실비용, C_U = 고속철도이용자비용, C_E = 사회·경제 손실비용, r_{rk} = 복구 공사기간동안의 사고율, t_{rk} = 복구공사기간이다.

3.4 철도 이용자비용

본 연구에서는 철도 이용자 비용 모델은 사고로 인한 시간 지연 비용, 즉 시간 지연으로 인한 이용자의 경제적 손실 비용만을 식 (9)와 같이 고려하였다.

$$C_U = C_{TDC} \quad (9)$$

C_U = 철도 이용자 비용, 열차 지연 손실 비용 $C_{TDC} = \sum \alpha_{i,j}^* T_{i,j}^* P_{i,j}$ 로 $T_{i,j}$ = 노선별 승차 인원, $T_{i,j}$ = 일일 평균 노선별 통행량, $P_{i,j}$ = 노선별 차량지연 발생 확률, i = 노선에 대한 인덱스, j = 차량종류에 대한 인덱스이다.

3.5 최적설계 알고리즘

다음 그림 3은 설계 단계에서의 신뢰성에 기초한 최적 설계 알고리즘을 나타낸 것이다. 최적화 모듈에서 구조해석 부분은 일반적인 구조 응답을 얻기 위한 구조물 동적 해석과 교량-궤도 상호작용을 고려한 시간 이력 해석부분을 설계 변수와 연동시켜 따로 분리하여 해석하도록 하였다. 이는 최적화 과정 중에 구조해석을 다수 수행하여야 하는데, 해석 시간이 상당히 소요되므로 이에 대한 효율성을 높이기 위해 별도의 구조해석을 수행하도록 하였다. 신뢰성 해석은 응답면 분석기법(RSM; Response Surface Method, Al-Harthy, A.S. 1987)을 이용하였으며, 기존의 최적 설계에서 적용한 사용성 및 강도 한계 상태의 제약 조건들과 본 연구에서 제안하는 교량-궤도 상호작용을 고려한 궤도의 열차 주행 안전성을 확보할 수 있는 조건들을 만족하도록 구성하였다. 최적화 알고리즘은 Augmented Lagrange Multiplier Method -

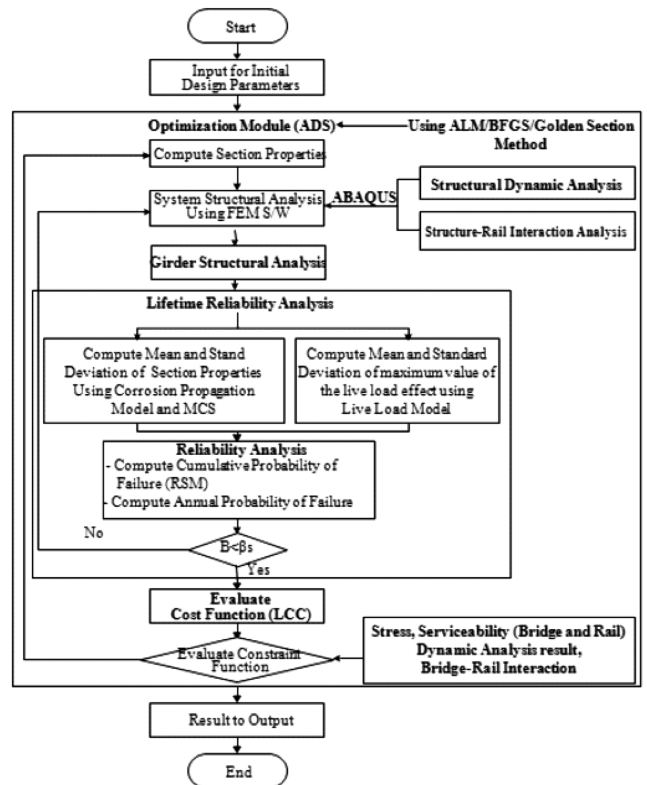


그림 3. 최적설계 알고리즘

Broydon Fletcher Goldfarb Shanno(ALM-BFGS, 류연선, 1992) 기법을 적용하였고 추가로 1방향 탐색을 수행하였다. 비록 이 기법이 일반적으로 1방향 탐색을 필요로 하지 않지만, 본 연구는 많은 제약 조건에 의한 타당한 영역이 상당히 좁은 경우에 해당하는 문제로, 최적화에서의 탐색시 큰 영향을 미치는 push-off factor 값이 일반적으로 잘 수렴하는 값으로 알려진 0.1~0.2보다 훨씬 큰 90에서 수렴하게 되므로, 이 큰 값에 의하여 1방향 탐색이 추가적으로 필요하게 되었다. push-off factor가 큰 값이 적용되는 경우는 설계변수 중 가장 크게 영향을 미치는 거더의 높이에 의하여 제약조건 및 목적함수가 변화될 때에 이 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 1방향 탐색 기법은 황금 분할법을 적용하였으며, 최적값 =0.35일 때 잘 수렴하였다.

4. 소수 주거더 교량의 최적설계

4.1 개요

본 연구에서는 앞에서 기술한 LCC 정식화에 의해 고속철도 소수 주거더 교량의 설계 단계 총 생애주기비용을 분석하기 위한 신뢰성 최적 설계를 수행하였다. 초기비용의 산정에서는 강재에 따른 단위 시공비용의 단가를 고려하여, 소수 주거더 교량의 실제 비용 및 최적설계시의 초기비용을 분석하였으며, 기대 유지관리비용, 그리고 기대 복구비용 분석을 위한 신뢰성 해석에 대해 기술하였다. 특히 간접비용의 산정에서는 피로 및 열화 등으로 인해 발생 가능한 구조물의 성능의 약화 및 파손 확률을 고려하여 분석을 수행하였다. 또한 철도 이용시 사고나 유지보수로 인한 차량 지연 및 이에 대한 손실비용을 분석하였다. 앞 절에서 개발한 알고리즘을 검증하기 위하여 실제 적용된 사례를 이용 다음과 같이 일반적인 형태의 Case-A와 형고 제약이 있는 Case-B에 대하여 수치해석을 수행하였다.

먼저, 생애주기비용에 기초한 최적설계를 수행하기 위하여 목적함수를 이용 목표치 설정에 필요한 변수들을 살펴보고, 이에 따른 유지관리비용 및 파손 확률에 의한 개축비용 등을 언급한 후 최종적으로 실제 적용 사례를 통하여 검증하고자 하였다. 사례 검증을 통하여 본 연구에서 제안한 교량-궤도 상호작용과 고속열차 주행에 따른 동적 거동을 동시에 고려한 설계의 효율성을 표 2와 표 3에 제시된 기존 설계들과 비교 분석 하였다.

4.2 적용 대상 구조물

본 연구에서는 그림 4와 같이 50 m 길이의 고속철도 소수 주거더 교량이 총 5경간(5@50 m = 250 m)에 걸쳐 연결된 교량을 선택, 해석 적용 대상으로 선정하였다. 대상 교량의 일반사항은 표 4에 나타내었으며, 그림 5는 대상교량의 단면도이다.

설계변수는 그림 6과 같이 거더의 플랜지 두께(t_{fs} , t_{fb}) 및 폭(b_{fs} , b_{fb}), 복부판의 높이(H) 및 두께(t_w), 그리고 가로보의 배치 간격(D) 및 가로보 플랜지 길이(b_{fc}), 가로보 플랜지 두께(t_c) 등이 설계변수로 고려되었다.

표 2. LCC 최적설계에서 고려된 Case A

Case ID	설계방법	설계근간
Case A-I	재래식 설계	기존 실무적용 설계 (허용응력설계법)
Case A-II	초기비용 최적설계	(허용응력설계법)
Case A-III	교량-궤도 상호작용 및 교량 동적영향을 미 고려한 LCC 최적설계	Park's 연구 (한양대, 2007) (허용응력설계법)
Case A-IV	교량-궤도 상호작용을 고려하고 동적영향을 미 고려한 LCC 최적설계	Lee's 연구 (한양대, 2008) (허용응력설계법)
Case A-V	교량-궤도 종방향 상호작용 및 교량-차량 동적영향을 고려한 LCC 최적설계	본 연구 제안 최적설계 (허용응력설계법)

표 3. LCC 최적설계에서 고려된 Case B (거더높이 H=3.8 m)

Case ID	설계방법	설계근간
Case B-I	재래식 설계	기존 실무적용 설계 (허용응력설계법)
Case B-II	초기비용 최적설계	(허용응력설계법)
Case B-III	교량-궤도 상호작용 및 교량 동적영향을 미 고려한 LCC 최적설계	Park's 연구 (한양대, 2007) (허용응력설계법)
Case B-IV	교량-궤도 상호작용을 고려하고 동적영향을 미 고려한 LCC 최적설계	Lee's 연구 (한양대, 2008) (허용응력설계법)
Case B-V	교량-궤도 종방향 상호작용 및 교량-차량 동적영향을 고려한 LCC 최적설계	본 연구 제안 최적설계 (허용응력설계법)

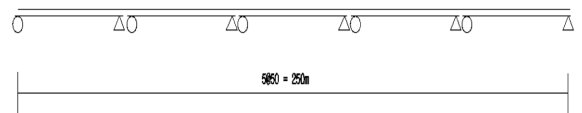


그림 4. 대상 교량의 경간 구성

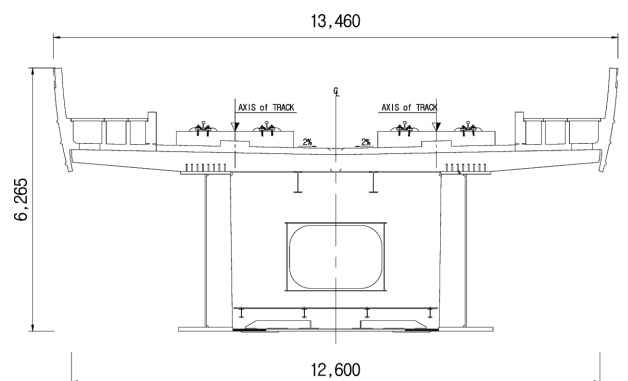


그림 5. 강합성 소수주행 교량의 단면

4.3 결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 교량과 궤도의 상호작용과 차량의 동적 영향을 동시에 고려한 최적설계 알고리즘을 검증하기 위하여 실제 교량을 대상으로 다양한 설계 방법에 대해 수치해석을 수행하였다. 제안된 최적설계 방법은 기존의 재래식 설계, 초기비용 최적 설계, 상호작용을 고려하지 않은 설계 및

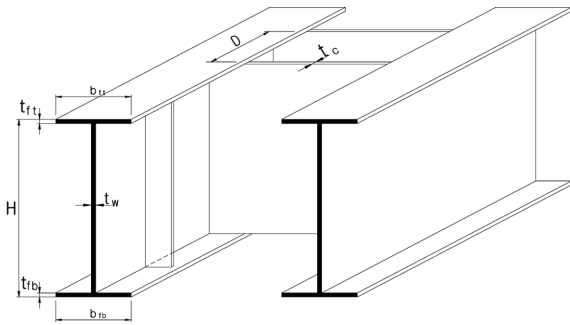


그림 6. 설계 변수

표 4. 적용 대상 교량의 제원

교량형식	고속철도 강합성 소수 주거터교량	
교량 연장(m)	50 m	
교량 폭(m)	12.6 m	
설계 궤도 수	복선형	
사각	90°	
도상	콘크리트도상	
수직보강재 설치 간격	1.7 m	
횡방향 가로보의 설치간격	6 m~8 m	
설계 하중	HL 표준 호남열차 하중	
설계방법	주형-WSD, 바닥판 슬래브-LRFD	
강재 제원	강 종	SM520 (주 부재) SM490 (중간 가로보),기타(SM400)
	인장강도(f_y)	$f_y = 400$ Mpa
	허용응력(f_a)	$f_a = 190$ Mpa
	탄성계수(E)	$E = 2.1 \times 10^5$ Mpa

동적 영향을 고려하지 않은 설계와 함께 비교 분석하였다. 교량의 신뢰성 해석을 이용하여 기대 복구비용을 고려한 생애주기비용 최적설계가 기존의 재래식 설계에 비하여 거더의 형고를 감소시키는 효과를 보였고, 반면에 상호작용을 고려하

지 않은 LCC 최적설계에 비하여 형고를 약간 증가시켜 파손 확률을 감소시키는 것을 확인하였다. 이는 설계 민감도 분석에서 거더의 높이가 설계 변수 중 가장 민감하다는 내용과 일맥 상통한다고 볼 수 있다. 일반적인 경우의 Case A에 대하여, 교량-궤도의 상호작용만을 고려하고 차량의 동적 영향을 고려하지 않은 경우의 LCC 최적설계(Case A-IV)와 교량-궤도 상호작용과 동적 영향을 동시에 고려한 경우의 LCC 최적설계(Case A-V)에 대한 결과를 살펴보면, Case A-IV의 초기비용은 34.4 억원이고, Case A-V의 초기비용은 39.6 억원으로 나타났다. 즉 차량의 동적 작용을 고려하지 않은 경우의 초기비용이 동적 작용을 고려한 경우의 초기비용에 비하여 13%정도 더 경제적이나 기대 유지관리비용 및 기대 복구비용이 각각 20%와 59%가 더 크게 산정되어 기대 LCC 비용이 2.2% 더 크게 산정됨을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 교량-궤도의 상호작용만을 고려하고 동적 영향을 고려하지 않은 경우는 교량의 기대 유지관리비용 및 복구비용이 증가할 뿐만 아니라 교량의 실제 거동에 의하여 파손 확률이 증가하기 때문에 궤도부분에 대한 추가적인 기대 유지관리 및 기대 복구비용이 발생하게 된다. 그러므로 교량-궤도 상호작용과 동적 영향을 동시에 고려한 경우가 동적 영향을 고려하지 않은 경우보다 더 경제적인 뿐만 아니라, 교량에 대한 추가적인 유지관리 및 복구비용을 절감시킬 수 있으므로, 설계 단계에서부터 교량-궤도 상호작용과 동적 영향을 동시에 고려한 설계가 필요함을 확인할 수 있다. 형고 제약이 있는 Case B에 대하여, 교량-궤도의 상호작용만을 고려하고 동적 영향을 고려하지 않은 경우의 LCC 최적설계(Case B-IV)와 교량-궤도 상호작용과 동적 영향을 동시에 고려한 경우의 LCC 최적설계(Case B-V)에 대한 결과를 살펴보면, Case B-IV의 초기비용은 34.4억원이고, Case B-V의 초기비용은 36.1억원으로 나타났다. 즉 상호작용만 고려한 경우의 초기비용이 상호작용 및 동적 영향을 고려한 경우의 초기비용에 비하여 5%정도 더 경제적이나 기대 유지관리비용 및 기대 복

표 5. Case A별 최적설계 결과

CASE ID	설계 그룹	단위	Case A-I	Case A-II	Case A-III	Case A-IV	Case A-V
거더 높이 (H)		m	3.8	3.4	3.6	3.5	3.6
가로보 길이 (D)		m	6	6	6	6	6
상부플랜지	길이(b_{ft})	1/2/3 cm	100/120/100	100/120/100	100/120/100	100/130/100	100/130/100
	두께(t_t)	1/2/3 mm	50/60/50	46/62/46	52/64/52	53/63/53	49/65/49
복부판 두께 (t_w)	1/2/3	mm	35/35/35	30/30/30	42/42/42	40/40/40	42/42/42
하부플랜지	길이(b_{fb})	1/2/3 cm	100/130/100	90/110/90	100/130/100	100/130/100	100/130/100
	두께(t_b)	1/2/3 mm	60/80/60	56/78/56	65/85/65	63/82/63	60/86/60
가로보	길이(b_{fc})	4/5 cm	160/35	152/28	165/35	164/37	168/34
	두께(t_c)	4/5 mm	5.0/2.5	4.3/2.0	5.5/2.6	5.2/2.6	5.5/2.8
비용 (백만원)	초기비용		3,622.3	2,885.1	3,935.7	3,441.5	3,965.2
	기대 유지관리비용		1,056.8	1,266.9	863.3	918.1	730.4
	기대 복구비용		1,431.7	1,658.6	500.4	889.1	365.2
	기대 피로보강비용		116.5	518.2	83.7	77.1	15.7
총기대 LCC(백만원)			6,227.3	6,328.8	5,583.1	5,325.8	5,217.5

표 6. Case B별 최적설계 결과

CASE ID	설계 그룹	단위	Case B-I	Case B-II	Case B-III	Case B-IV	Case B-V	
거더 높이 (H)		m	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	
가로보 길이 (D)		m	6	6	6	6	6	
상부플랜지	길이(b_{fR})	1/2/3	cm	100/120/100	100/120/100	100/120/100	100/130/100	100/130/100
	두께(t_f)	1/2/3	mm	50/60/50	46/62/46	53/58/53	49/60/49	53/59/53
복부판 두께 (t_w)	1/2/3	mm	35/35/35	32/32/32	34/34/34	34/34/34	34/34/34	
하부플랜지	길이(b_{fB})	1/2/3	cm	100/130/100	90/120/90	100/130/100	100/130/100	100/130/100
	두께(t_b)	1/2/3	mm	60/80/60	56/83/56	60/79/60	60/78/60	60/79/60
가로보 가로보	길이(b_{fC})	4/5	cm	160/35	152/28	162/35	158/34	164/35
	두께(t_c)	4/5	mm	5.0/2.5	4.3/2.0	5.0/2.2	4.8/2.5	5.0/2.1
비용 (백만원)	초기비용			3,622.3	3,285.1	3,596.1	3,441.6	3,608.7
	기대 유지관리비용			1,056.8	1,614.9	1,238.1	1,247.9	1,147.8
	기대 복구비용			1,431.7	2,018.6	995.9	1,139.4	730.4
	기대 피로보강비용			116.5	740.2	646.0	596.8	521.7
총기대 LCC(백만원)				6227.3	7,658.8	6,476.1	6,425.8	6,008.6

구비용이 각각 9%와 56%가 더 크게 산정되어 기대 LCC 비용이 7% 더 크게 산정됨을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 교량-궤도의 상호작용만을 고려하고 동적 영향을 고려하지 않은 경우는 교량의 기대 유지관리비용 및 복구비용이 증가할 뿐만 아니라 교량의 실제 거동에 의하여 궤도의 판손 확률이 증가하기 때문에 궤도부분에 대한 추가적인 기대 유지관리 및 기대 복구비용이 발생한다.

5. 결 론

국내외적으로 고속철도의 건설이 급증하고 있는 현실에서 소수 주거더 교량의 현행 설계방법은 교량구조물과 궤도의 상호작용 및 차량과 구조물의 상호작용을 별개의 것으로 고려하여 최적설계가 아닌 단순하게 기준을 만족하는 정도의 검토로 수행되어 왔다. 하지만, 본 연구에서는 교량-궤도 상호작용 및 동적 안전성을 동시에 고려하여 설계하는 방법을 통하여 궤도구조 안전성 및 동적 안전성 검토→단면 결정→정적 안전성 검토의 순으로 설계방법이 변경되어야 함을 제안하였으며, 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 재래식 설계에 의하여 설계, 시공되어진 단순 5경간 250 m 교량에 대하여 수치해석을 수행하였다. 해석된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 교량-궤도 상호작용 및 교량-차량 상호작용을 동시에 고려한 최적설계를 제안 하였고, 이 제안된 설계가 기존의 재래식 설계, 초기 비용을 최적화한 설계, 교량 구조물과 궤도간의 상호작용을 고려하지 않은 설계 및 동적 영향을 고려하지 않은 설계와 비교하였을 때 최적화의 목적함수로 설정한 생애주기비용이 가장 경제 적임을 확인하였다.
- 2) 허용 응력 설계법과 시방서 상의 제약조건만을 바탕으로 수행한 초기비용 최적설계의 경우는 초기비용은 경제적 이었으나, 신뢰성이 부족하여 기대 복구비용이 크게 증

가하는 불합리한 설계이므로, 구조물의 신뢰성을 충분히 확보할 수 있는 생애주기비용 최적설계가 수행되어야 함을 확인할 수 있었다.

- 3) 본 연구에서 제안한 교량구조물과 궤도의 상호작용과 동적 영향을 고려한 LCC 최적설계가 이를 고려하지 않은 경우의 LCC 최적설계보다 단면의 증가로 초기비용은 다소 증가할 수 있으나 구조물계의 신뢰성 확보에 의하여 기대 유지관리비용과 복구비용을 감안할 경우 생애주기비용에서 경제적임을 확인하였다.

참고문헌

한국철도시설공단 (2008) 호남고속철도 설계지침 : 노반편.
 류연선 (1992) ALM-BFGS 알고리즘을 이용한 혼상방파제의 최적 단면 설계에 관한 연구, 대한토목학회, 제12권, 제1호, pp. 197-205.
 박미연 (2007) 강건최적화 기법에 의한 고속철도 소수 주거더 교량의 LCC효율적인 최적설계, 박사학위논문, 한양대학교
 이종순 (2008) 구조물-궤도 상호작용을 고려한 고속철도 교량의 신뢰성 최적설계, 박사학위, 한양대학교, pp. 173
 Al-Harthy, A.S. and Bucher, C.G., Bourgund, U. (1987) Efficient Use of Response surface Methods, Report No.9-87, Institute of Engineering Mechanics, University of Innsbruck, Austria.
 Ang, A. H-S and Cornell, C.A. (1974) Reliability-based structural safety and design. J. of the Struct. Div., ASCE, Vol. 100, No. ST9, Sep., pp. 1755-1769.
 Cho, H.N., and Lee, K.M., Choi, Y.M. (2004) Life-Cycle Cost Effective Optimum Design of Steel Bridges, Journal of constructional Steel Research, Vol. 60, No. 11, 1585-1613.
 De Brito J. and Branco, F.A. (1995) Bridge Management Policy using cost analysis, Proc. Instn Civil Engrs Structs and Bldges, 104, Nov., pp. 431-439.
 Deutsche Bundesbahn (1993) DS804 - Vorschrift für Eisenbahnbrücken und Sonstige Ingenieurbauwerke.
 Frangopol, D.M., Imai K. (2000) Geometrically nonlinear finite element reliability analysis of structural systems. II: applications, Computers & Structures 77, pp 693-709.

- J.M. Goicolea, J. Dominguez, J.A. Navarro and F. Gabaldon, "New Dynamic Analysis Methods for Railway Bridges in Codes and EUROCODE 1", Railway Bridges, IABMAS, June, 2002, pp.1-43.
- Melchers, R.E. (1987) Structural Reliability Analysis and Prediction." Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England.
- Mori, Y., and Ellingwood, B.R. (1994) "Maintaining Reliability of Concrete Structures. I: Role of Inspection/Repair", Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 3, March 1994, pp. 824-845.
- UIC (2001) Track/bridge interaction recommendation for calculations. 774-3 R.
- Van, M.A. (1998) Stability of Continuous Welded Rail Track, Delft Geotechnics.
- Wen, Y.K. and Kang, Y.J. (2000) Minimum lifecycle cost structural design against natural hazards, Structural Research Series No. 629, University of Illinois at Urbana-Champaign.

◎ 논문접수일 : 10년 11월 10일
 ◎ 심사의뢰일 : 10년 11월 11일
 ◎ 심사완료일 : 10년 11월 29일