

## 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 고속철도 강교량의 신뢰성 최적설계

### Reliability-Based Optimum Design of High-Speed Railway Steel Bridges Considering Bridge/Rail Longitudinal Analysis and Bridge/Vehicle Dynamic Effect

이종순<sup>†</sup> · 임영록\*

Jongsoon Lee · Yeongrok Ihm

**Abstract** To improve the effectiveness and economics the bridge design methodology considering the bridge/rail longitudinal analysis and bridge/vehicle dynamic effect suggested in this study. The reliability-based Life-Cycle Costs(LCC) effective optimum design is applied to a 2-main steel girder bridge, 5×(1@50m) for comparison with conventional design, initial cost optimization and equivalent LCC optimization. As a result of the optimum design based on reliability, it may be stated that the design of High-Speed railway bridges considering the bridge/rail longitudinal analysis and bridge/vehicle dynamic effect are more efficient than typical existing bridges and LCC optimization without respect to bridge/rail longitudinal analysis and bridge/vehicle dynamic effect. The result of optimization design considering the interaction, design methodology suggested in this study, is higher than result of initial cost optimization design in initial cost, but that has the advantage than result of initial cost optimization design in expected LCC.

**Keywords** : Reliability-Based Optimum Design, CWR, Bridge/Rail Longitudinal Analysis, Bridge/Vehicle Dynamic Effect, ALM-BFGS

**요 지** 본 연구는 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 설계기법에 대한 효율성 및 경제성을 증명하기 위하여 수행하였다. 신뢰성에 기초한 생애주기비용 최적설계는 기존 설계기법에 의한 설계, 초기비용에 기초한 최적설계, 등가 생애주기비용 최적설계에 의한 최적설계와 비교하기 위하여 5×(1@50m) 경간 소수주형 교량을 대상으로 적용하였다. 신뢰성에 기초한 최적설계 결과 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 고속철도 교량 설계 단면이 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려하지 않은 설계 단면보다 훨씬 효율적임을 확인하였다.

**주요어** : 신뢰성 최적설계, 장대레일, 교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적영향, ALM-BFGS

## 1. 서론

국내외적으로 고속철도에 대한 건설이 증가하고 있는 현 상황에서 기존 고속철도 강교량 설계는 설계 제반기준만을 만족하면 되는 부분적으로 안전여유가 많은 구조물로 설계

가 이루어졌다. 따라서, 본 연구에서는 고속철도 강교량에서 중요한 기준인 교량/궤도 종방향 축응력 해석 및 교량/차량 동적영향을 동시에 반영하여 효율적인 단면을 결정하는 신뢰성에 기초한 최적설계 방법론을 제안하고자 한다.

Ang et al.(1997)과 Frangopol et al.(1997), 그리고 Lin (1995) Mori and Ellingwood(1994) 등은 LCC, 신뢰성, 그리고 최적화개념 및 방법에 기초한 LCC 효율적인 설계의 결정에 대해 연구를 하였다[1,4,7]. 그러나 이런 연구들의 경우 이론적인 측면이 강하여 실제 구조물의 적용에는 많

<sup>†</sup> 책임저자 : 정희원, (주)교량과고속철도 부설연구소 팀장  
E-mail : light726@hanmail.net

TEL : (02)565-4592 FAX : (02)557-4080

\* 정희원, 한국철도시설공단 수도권지역본부 건설1처장

은 한계를 가지고 있는 실정이다.

국내에서의 LCC 최적설계와 관련된 연구는 강교를 중심으로 진행되어 왔으며 조효남 등에 의해 실용적인 LCC 분석과 LCC 최적설계에 관한 연구가 활발하게 수행되어 왔다. 특히, 최근 Cho et al.(2004)은 다양한 형식의 강교에 대한 실제적인 LCC 효율적인 최적설계에 관한 연구를 수행한 바 있다[2].

고속철도의 장대레일에 대한 연구는 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 장대레일의 안전성 측면에서 가장 중요한 요소인 축력에 대한 연구는 대표적으로 Van(1992)에 의하여 정립되었으며, 장대레일의 축력계산 프로그램을 개발하였다[9]. 이 연구는 교량 구조물의 특징(설계변수에 따른 자동모델링 및 구조해석 수회 반복)을 반영하지 못하고 1회성 해석에 제한된 프로그램으로 자동화 최적설계시에 반영하기에는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 고속철도 강교량의 강성 및 처짐 등과 같은 구조안정성 및 진동에 따른 공진발생 등의 사용성 제약조건과 극한 한계상태 및 주행 안정성, 그리고 교량 구조물과 궤도간의 종방향 축응력 해석과 구조물의 동특성을 반영한 신뢰성 최적설계 방법을 제안하고자 한다. 특히, 교량 구조물과 궤도의 종방향 해석을 고려하기 위한 모델링 방법과 동적 특성을 반영한 최적설계 알고리즘을 개발하고, 개발한 알고리즘을 바탕으로 수치해석을 수행하여, 본 연구에서 제안한 설계방법이 효율적임을 검증하고자 한다. 설계변수로 강함성교의 거더높이 및 플랜지의 두께와 길이, 가로보의 간격을 바탕으로, 시스템 구조계에서의 신뢰성 최적설계를 수행하여 기존설계에 의한 교량의 초기비용 최적설계와 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 생애주기비용 최적설계의 결과를 비교/분석하여 본 연구에서 제안하는 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 최적설계 방법이 기존의 설계방법보다 훨씬 경제적이며 효율적인 설계방법임을 입증하고자 한다.

## 2. 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적해석

### 2.1 교량/궤도 종방향 해석

교량/궤도 종방향 해석을 통한 장대레일 축응력 검토는 레일의 좌굴 및 파단에 대한 안전도를 확인하여 열차 운행의 안전도를 확보하기 위함이다. 레일-구조물간의 축응력 발생에 영향을 끼치는 교량의 상부구조 및 하부구조의 구조적 특성과 기초 및 지반의 특성 등에 따라 장대레일의 종방향 축 응력의 크기가 상당히 변화할 수 있다. 또한, 온도 변형에서도 상당한 차이가 있으므로 그 변화 크기(부가응

력)가 실제로 레일- 구조물간의 응력발생에 미치는 영향 분석이 필요하다.

연장의 궤도구조가 연속되는 장대레일 구조를 적용하므로 온도하중 및 시동, 제동하중이 작용하게 될 때에 레일에 과도한 축력이 작용하게 되어 레일이 파단하게 되거나 좌굴할 위험이 존재하므로, 레일축력을 가능한 한 정확하게 계산하는 것이 주행열차(예상 최대속력 350km/h)의 주행 안정성 측면에서 매우 중요하다.

레일 축력에 크게 영향을 미치는 요소는 교량의 신축길이에 따른 종방향 온도차이, 시-제동하중, 그리고 재하중에 의한 휨 변위이다. 이러한 레일-구조물간의 종방향 축응력 변화는 도상의 비선형적 거동이 매개로 작용하게 된다. 따라서, 레일의 축력계산 등의 정확도 및 신뢰성을 높이기 위해서는 도상의 비선형적 특성, 교량 구조물의 강성 및 지반의 강성을 고려하여 해석을 수행하여야 한다.

### 2.2 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적해석에서의 설계기준

정-동적 해석을 통한 구조물의 안전성과 구조물-궤도 종방향 해석 및 구조물-차량의 동적영향에서의 고려해야 하는 기준은 Table 1과 같다.

Table 1. 교량/차량 동적해석 및 교량/궤도 종방향 해석 검토 기준

항목	발생 요인 및 영향	기준
장대레일 축력	장대레일 좌굴 및 파단	압축부가응력 - 92MPa 인장부가응력 - 92MPa
처짐	승차감 열차 주행 안전성	$1/L \leq 1/1700$ 정적 $1/L \leq 1/600$
레일체결구	열차 주행 안전성 상향력(Up-Lift)	18-21.5kN
수직가속도	승차감 열차 주행 안전성	콘크리트도상 - $5.0m/s^2$
상부 비틀림	열차 주행 안전성	0.4mm/m (1.2mm/3m)
구조물-궤도 상대변위	열차 주행 안전성	4mm

※ 호남고속철도 설계지침 : 장대레일 축력, 처짐, 수직가속도, 상부 비틀림

※ BRDM : 단부회전각, 구조물-궤도 상대변위

※ DS804(독일) : 레일체결구 상향력

### 2.3 교량/차량 동적해석

열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 동적특성과 차량의 동적운동에 의해 결정되어진다. 즉, 교량의 고유진동수, 차량의 속도와 유효타격간격(effective beating interval)에 의해 교량의 공진현상을 예측할 수 있다.

$$\Omega = V/S_{eff} \tag{1}$$

$\Omega$ 는 열차의 크로싱 진동수(crossing frequency),  $V$ 는 차량의 속도이며,  $S_{eff}$ 는 차량의 유효타격간격이다. 또한, 교량의 고유진동수와 열차의 크로싱 진동수가 일치할 경우 ( $\Omega = \omega_n$ ) 공진현상이 발생하게 되므로 공진현상을 발생시키는 열차의 임계속도(critical speed)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

본 해석에서 사용된 KTX 열차하중의 경우, 유효타격간격은 18.7m로 산정할 수 있으므로 공진이 일어나는 차량의 임계속도는 식 (3)과 같이 계산할 수 있으며, 임계속도에 대한 열차의 시간이력함수를 구성하여 동적해석을 수행한다.

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

**2.4 구조해석 모델링**

유럽에서의 여러 실측 결과에 의해 최근 제공된 UIC Leaflet 774-3R을 비롯한 대부분의 시방규정 또는 문헌에서는 변위-저항력 관계를 bi-linear로 규정하고 다음의 Fig. 1과 같은 관계곡선을 제시하고 있다[8]. 이 곡선에서 궤도의 종저항력은 도상의 종류와 열차하중의 재하 여부에 따라 다른 값을 보임을 찾을 수 있다.

레일 축력 및 좌굴 검토를 위한 유한요소 해석 결과는 궤도 축력에 대한 횡방향 변위, 즉 좌굴 영향을 고려하여 그에 따른 축력의 변화를 검토하도록 하고 시동/제동하중에 대한 해석시 차량에 의한 수직하중이 작용한다고 가정하여 일정비율로 도상 저항력이 증가하도록 한다. 또한 교량 하부구조의 강성이 레일 축력에 큰 영향을 미친다는 관점에서 받침 강성, 교각 강성 및 지반강성을 뼈대요소로 직접 모델링하도록 한다.

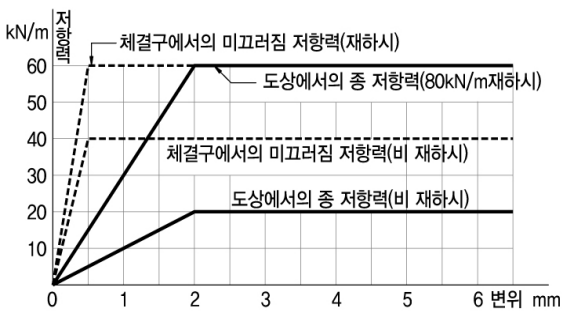


Fig. 1. 궤도의 종방향력-변위관계(UIC Leaflet 774-3R의 규정)

장대레일 축응력 해석을 위한 모델링 방법은 “장대레일 부가 축력 및 변위 검토를 위한 설계차트 개발(I, II)”(최일윤, 2009.8)에 따라 적용하였다[14,15].

해석 알고리즘은 도상의 비선형 거동과 좌굴 거동을 동시에 해석할 수 있도록 하기 위하여 Newton-Raphson 방법을 이용한 기하 비선형 해석 알고리즘을 적용한다.

도상은 일정한 변형수준까지는 탄성적으로 거동하다가 임의의 한계수준(항복변위)을 넘게되면 외력에 대해서 더 이상 저항하지 못하고 일정한 크기의 저항력만을 갖는 bi-linear 스프링 요소로 모델링한다.

도상에 의한 종방향 저항력은 침목간격으로 분산되어 작용하지만 일반적으로 레일과 교량 사이에 bi-linear 스프링 요소가 일정한 간격으로 등분포되어 있는 것으로 가정한다.

또한 시동 및 제동하중이 작용하는 경우에는 차량의 수직하중에 의하여 도상의 저항력이 증가할 수 있으므로 비재하시의 도상저항력에 대한 재하시의 도상저항력의 비를 입력함으로써 필요에 따라 수직하중에 의한 도상저항력의 증가를 고려할 수 있다.

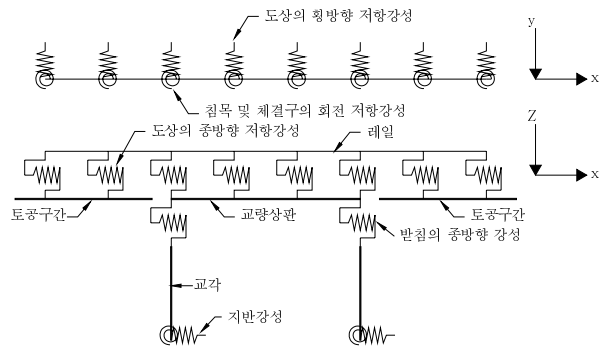


Fig. 2. 레일축력 해석을 위한 유한요소 모델의 구성 예

레일 및 교량 상판부재는 절점당 6자유도를 갖는 뼈대요소(프레임 요소)로 모델링한다. 교각은 일반적으로 스프링 요소로 치환이 가능하지만 휨 거동을 반영하고자 하여 뼈대 요소로 모델링한다. 받침 및 지반의 강성에 대하여도 그 종방향 강성만을 고려한 선형 스프링 요소로 치환하도록 하였다.

레일축력 해석을 위한 해석모형의 예는 Fig. 2와 같다. 본 검토에서는 도상의 비선형 거동 및 레일의 횡 방향 좌굴 거동을 해석하기 위한 알고리즘으로서 하중제어 비선형 증분해석(Load-controlled Nonlinear Incremental Solver)이 사용되었다. 이 해석 알고리즘에서는 작용하중을 여러 개의 하중단계로 분할하고, 각 하중단계의 시점에서 현재의 기하좌표와 그에 대한 내력을 이용하여 변형된 구조시

시스템의 기하강도 매트릭스를 구성하여 반복수렴 과정에서 강성도 매트릭스 및 하중벡터를 재구성하면서 구조계의 평형을 만족하는 변위 벡터를 결정한다.

즉, 각 하중단계에 대해서 강성도 매트릭스와 하중벡터를 제어함으로서 구조시스템을 선형해석 모델로 치환하며, 전체 계가 평형을 이룰 때까지 반복계산을 수행하여 해석한다.

### 3. 신뢰성에 기초한 고속철도 강교량의 최적설계 정식화

생애주기 동안의 총 기대 비용은 식 (4)와 같이 정식화할 수 있다.

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

$E[C_T(\bar{X}, T_{life})]$  = 설계변수벡터  $\bar{X}$ 와 생애주기  $T_{life}$ 의 함수인 총 기대 LCC,  $C_I(\bar{X})$  = 초기비용,  $E[C_{M_j}(\bar{X}), t]$  = 소수주형교 구성요소  $j$ 에 대한 기대 유지관리비용,  $E[C_{F_k}(\bar{X})]$  = 한계상태  $k$ 에 대한 기대복구비용,  $r$  = 할인율이다.

식 (4)에서 나타난 바와 같이, 고속철도 강합성 소수주형교의 총 기대 LCC는 초기비용 뿐 아니라 구조물의 생애주기 동안의 기대유지관리 비용과 휨 및 전단 피로 등에 의한 사용성 및 안정성 등과 관련하여 발생할 수 있는 구조물의 한계상태를 고려한 기대복구비용이 고려되어야 한다.

#### 3.1 초기비용

초기비용은 식 (5)와 같이 정식화 할 수 있다.

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

$C_{DB}$  = 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 LCC최적설계에 대한 연구들 중에서 Wen과 Kang(1997)의 연구에 의하면 비록 생애 주기 동안의 LCC에서 유지관리비용이 차지하는 비중은 크지만, 설계변수에

대한 유지관리비용과의 상관관계는 일반적으로 미약하다. 그러나 본 연구에서는 유지관리비용을 설계변수의 열화에 따라 산정되는 보수보강 및 교체비용과 정기적인 교량관리로부터 발생하는 비용으로 구분하여 고려하였다. 본 연구에서는 고속철도 강합성 소수주형교의 유지관리 이력이나 보수 보강을 시행한 자료가 국내에는 없는 관계로 신뢰성에 기초한 파손확률을 구하여 기대복구비용을 추론하였으며 설계변수에 대한 상관관계가 적고 LCC 최적설계 결과에 미치는 영향이 적은 정기적인 교량관리 비용은 철도 교량의 정기관리 대가기준을 근간으로 하여 분석을 수행하였다. 신뢰성 분석에 의한 파손확률에 따른 기대 유지관리비용의 정식화는 식 (6)과 같다.

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

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

#### 3.3 기대 복구비용

기대 복구비용은 고속철도 강합성 소수주형교의 생애주기 동안 일어날 수 있는 다양한 한계상태에 대한 파손확률로부터 산정할 수 있다. 비록 이러한 파손확률은 일반적인 교량의 사용 환경에서는 발생하지 않을 수 있지만, 기대 복구비용을 고려한다는 것은 보험비용의 개념으로 비용분석 측면에서 고려될 필요가 있다(Melchers, 1987). 이러한 기대복구비용은 고려된 한계상태  $k$ 에 대한 파손확률과 직접 복구비용을 이용하여 식 (7)과 같이 산정하였다.

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

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

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

$$C_{F_k}(\bar{X}) = C_{DR_k}(\bar{X}) + C_{IR_k}(\bar{X}) = C_{DR_k}(\bar{X}) + [C_H r_{r_k}(\bar{X}) + C_U(t_{r_k}(\bar{X})) + C_E(t_{r_k}(\bar{X}))] \quad (8)$$

$C_{DR}$  = 직접 복구비용,  $C_{IR}$  = 간접 복구비용,  $C_H$  = 인적 혹은 물질적 손실비용,  $C_U$  = 고속철도이용자비용,  $C_E$  = 사회경제 손실비용,  $r_{r_k}$  = 복구 공사기간동안의 사고율,  $t_{r_k}$  = 복

구공사기간이다.

### 3.4 철도 이용자비용

본 연구에서는 철도 이용자 비용모델은 사고로 인한 시간지연 비용, 즉 시간지연으로 인한 이용자의 경제적 손실 비용만을 고려하였다[3].

$$C_U = C_{TDC} \tag{9}$$

$C_U$  = 철도 이용자 비용, 열차 지연 손실 비용  $C_{TDC} = \sum \alpha_{i,j}^* T_{i,j}^* P_{i,j}$ 로  $\alpha_{i,j}$  = 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.

## 4. 고속철도 강교량의 생애주기비용 최적설계를 위한 최적화 알고리즘

다음 Fig. 3은 설계단계에서의 신뢰성에 기초한 최적설계 알고리즘을 나타낸 것이다. 최적화 모듈에서 구조해석 부분은 일반적인 구조응답을 얻기 위한 일반적인 구조물 동적해석과 교량-궤도 종방향 해석을 고려한 시간이력해석 부분을 설계 변수와 연동시켜 별도로 따로 분리하여 해석하도록 하였다. 이는 최적화 과정 중에 구조해석을 다수 수행하여야 하는데, 구조해석 시간이 상당히 소요되므로 이에 대한 효율성을 고려하고자 별도로 구조해석을 수행하도록 고려하였다. 신뢰성 해석은 RSM을 이용하였으며, 기존의 최적설계에서 적용한 사용성한계상태와 강도한계상태의 제약조건들과 본 연구에서 제안하는 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 궤도의 안전성 및 열차 주행의 안전성을 포함할 수 있는 제약조건들을 만족하도록 구성하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 본 연구에서 적용한 최적화 기법은 ALM-BFGS기법을 적용하였다. 이 기법은 기존의 여러 연구문헌에서 수렴성이 잘 보장된 알고리즘으로 알려져 있다. 이 기법의 특징은 최적해 탐색시 효율성을 향상시키기 위하여 1방향 탐색을 하지 않는 것으로 알려져 있다 [13]. 즉, ALM-BFGS기법에서 방향탐색시 가장 큰 영향을 미치는 Push-Off Factor값은 0.1~0.2일 때 가장 잘 수렴하는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 일반적으로 Push-Off Factor값이 잘 수렴하는 것으로 알려진 0.1~0.2일 때 수렴하지 않는 문제점이 발생하였다. 일반적으로 이론적 배경에 근거하여 수렴이 보장된 알고리즘도 경우에 따라서 수렴이 되지 않는 경우가 있으므로 본 연구에서는 경험적으로 결정된 이 값을 변경하면서 알고리즘의 수렴성을

검토하게 되었다. 이에 따라 본 연구에서는 Push-Off Factor값이 상당히 큰 값인 90일 때 수렴하는 것을 확인하였다. 설계변수의 변화에 따라서 Push-Off Factor값이 90일 때 본 연구에서 제안한 알고리즘이 상당히 잘 수렴하고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 Push-Off factor 값이 크게 적용되는 것은 설계변수 중 제약조건과 목적함수에 가장 크게 영향을 미치는 주형의 높이에 좌우되는 설계변수가 1개인 경우에 해당하는 경우와 동일한 문제의 경우로 볼 수 있다. 이 경우에는 이 Push-Off factor값이 큰 값에서 수렴하는 것을 확인하였다. 특히, 기존의 ALM-BFGS기법을 사용할 경우 일방향 탐색을 하지 않지만, 본 연구에서는 큰 Push-Off Factor 값을 사용하여 일방향 탐색을 하는 황금분할법을 적용하는 것이 알고리즘이 잘 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 1-D 탐색을 병행하여 최적해를 찾는 것이 효율적임을 확인하였다. 경험적 근거에 바탕을 둔 의사결정의 경우 교육과 경험에 바탕을 둔 ‘experience method’와 배우거나 깨우치거나 들어서 알게 되는 ‘heuristic decision method’로 분류할 수 있는데, 기존 연구자의 조언에 의하여 수렴성을 확보할 수 있었으므로, 본 연구에서는 ‘heuristic method’를 포함한 신뢰성 최적설계 알고리즘을 개발하였다.

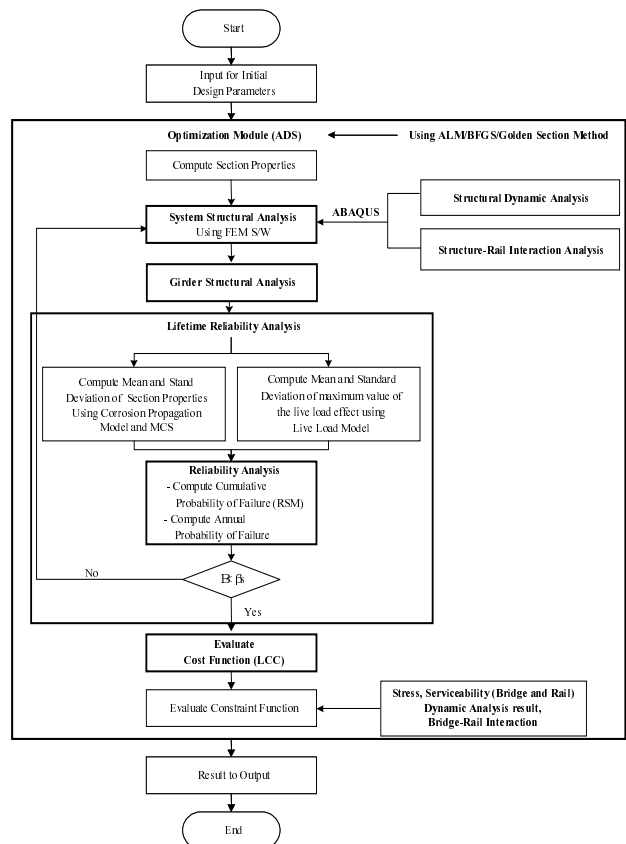


Fig. 3. 신뢰성에 기초한 최적설계 알고리즘

## 5. 적용 예 및 고찰

### 5.1 적용 대상구조물의 개요

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 고속철도 강합성 소수주형 교량 5경간 1@50m인 총 250m인 교량을 대상으로 선정하였다. 본 연구에서 고려하는 교량/궤도 종방향 해석에 영향을 주는 하부구조 등에 대한 변수는 추후 연구할 예정이며, 본 연구는 상부구조를 우선 대상으로 수행하였으며, 대상 교량의 일반사항은 Table 2에 나타내었으며, Fig. 5는 대상 교량의 단면도이다. 본 연구에서 적용한 대상교량은 호남 고속철도에 적용 예정인 50m 경간의 2주형 강교량이다.

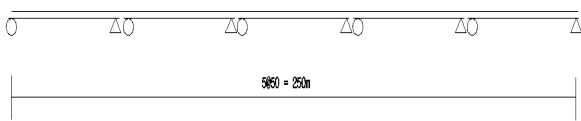


Fig. 4. 대상구조물의 경간 구성

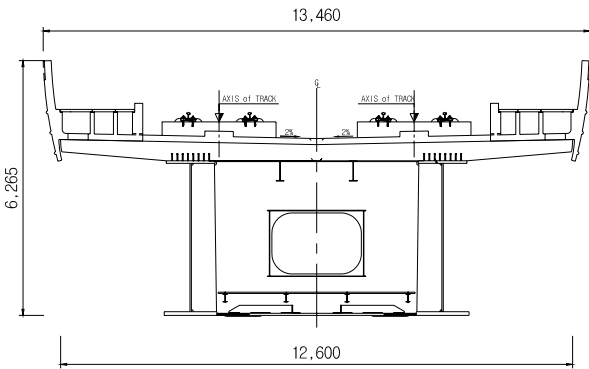


Fig. 5. 강합성 소수주형 교량의 단면

Table 2. 적용 대상 교량의 제원

교량형식	고속철도 강합성 소수주형교	
교량 연장(m)	50m	
교량 폭(m)	12.6m	
설계 궤도 수	복선형	
사각	90°	
도상	콘크리트도상	
수직보강재 설치 간격	1.7m	
횡방향 가로보의 설치간격	6.6m~6.8m	
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( $f_y$ )	$f_y = 400\text{MPa}$
	허용응력( $f_a$ )	$f_a = 190\text{MPa}$
	탄성계수( $E$ )	$E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$

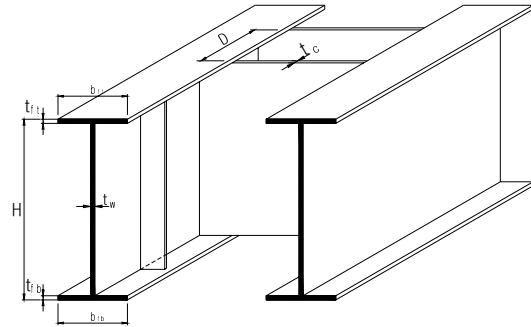


Fig. 6. 설계 변수

설계변수는 Fig. 6과 같이 거더의 플랜지 두께( $t_{ft}$ ,  $t_{fb}$ ) 및 폭( $b_{ft}$ ,  $b_{fb}$ ), 복부판의 높이( $H$ ) 및 두께( $t_w$ ), 그리고 가로보의 배치 간격( $D$ ) 및 가로보 플랜지 길이( $b_{fc}$ ), 가로보 플랜지 두께( $t_c$ ) 등을 설계변수로 고려하였다.

Table 3. 설계방법별 적용 케이스

Case ID	설계방법	설계근간
Case A-I	재래적 설계	기존설계
Case A-II	초기비용 최적설계	
Case A-III	교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적영향 미고려한 LCC 최적설계	
Case A-IV	교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적영향 고려한 LCC 최적설계	LCC Effective 최적설계
Case A-V	교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적영향 미고려한 등가 LCC최적설계	
Case A-VI	교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적영향 고려한 등가 LCC최적설계	

### 5.2 결과 및 고찰

Table 3에서 제시된 각 설계방법별 초기비용, 기대 유지관리비용, 기대복구비용(기대피로복구비용) 및 총 기대 LCC의 결과는 Table 4와 같다. Table 4에 나타난 바와 같이 교량/궤도 종방향 해석을 고려하지 않은 경우에 대한 초기비용 최적설계(Case A-II)와 LCC최적설계의 경우(Case A-III)를 살펴보자. 초기비용 최적설계인 Case A-II에 의한 대상교량의 초기비용은 28.8억원인 반면 LCC최적설계인 Case A-III의 경우는 34.4억원으로 나타났다. 즉 초기비용 최적설계는 LCC최적설계와 비교할 때 초기비용이 약 16.3%가 더 경제적임을 알 수 있다. 이는 초기비용 최적설계가 허용 응력설계에 기초하여 구조물의 성능/안전 및 신뢰성에 대한 여유없이 단지 시방서의 제 기준만을 만족하도록 설계되어지기 때문에 상대적으로 합리적이지 않은 단면이 결정되었다. 초기비용 최적설계는 구조물의 성능, 안전, 신뢰도를 확보하지 못하고 있기 때문에 기대유지관

Table 4. 최적설계 결과

CASE ID	설계 그룹 <sup>1)</sup>	단위	재래적설계 (Case A-I)	초기비용 최적설계 (Case A-II)	LCC최적설계		등가 LCC 최적설계		
					교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적 영향 미고려 (Case A-III)	교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적 영향 고려 (Case A-IV)	교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적 영향 미고려 (Case A-V)	교량/궤도 종방향 해석, 교량/차량 동적 영향 고려 (Case A-VI)	
거터 높이 ( $H$ )		m	3.8	3.3	3.5	3.6	3.5	3.6	
가로보 길이 ( $D$ )		m	6	6	6	6	6	6	
상부 플랜지	길이( $b_{ft}$ )	1/2	cm	100/120	100/120	100/130	100/130	100/120	100/120
	두께( $t_{ft}$ )	1/2	mm	50/60	46/62	53/63	49/65	53/63	52/64
복부판 두께 ( $t_w$ )		1/2	mm	35/35	30/30	40/40	42/42	39/39	42/42
하부 플랜지	길이( $b_{fb}$ )	1/2	cm	100/130/130	90/110	100/130	100/130	100/130	100/130
	두께( $t_{fb}$ )	1/2	mm	60/80/80	56/78	63/82	60/86	64/82	65/85
가로보	길이( $b_{fc}$ )	3/4	cm	160/35	152/28	164/37	168/34	162/36	165/35
	두께( $t_c$ )	3/4	mm	5.0/2.5	4.3/2.0	5.2/2.6	5.5/2.8	5.3/2.7	5.5/2.6
비용 (1,000원)	초기비용		3622311.1	2885059.4	3441457.9	3965200.4	3923596.3	3935701.9	
	기대 유지관리비용		1056839.5	1266897.8	918126.1	730431.7	945506.1	863258.2	
	기대 복구비용		1431660.2	1658622.3	889075.1	365215.8	719944.2	500359.0	
	기대 피로보강비용		116547.2	518161.5	77128.9	15652.1	85112.4	83746.0	
총기대 LCC(1,000원)			6227358.0	6328741.0	5325788.0	5217369.0	5674159.0	5583065.0	

1) 1 - 주형 단부, 2 - 주형 중앙부, 3- 단부 위치에서의 가로보, 4 - 중앙부 위치에서의 가로보

리비용과 기대복구비용 등은 오히려 LCC최적설계에 비하여 각각 27.8%, 46.4%가 더 증가하였다. 이에 따라 LCC비용이 초기비용 최적설계는 63.2억원이고 LCC최적설계의 총 기대 LCC비용은 53.2억원으로 LCC최적설계가 15.8% 경제적인임을 확인할 수 있다. 따라서 구조물의 성능 및 신뢰도를 확보할 수 있는 LCC최적설계로 수행되어야 한다.

또한 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려하지 않은 경우의 LCC최적설계(Case A-III)와 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 경우의 LCC 최적설계(Case A-IV)에 대한 결과를 살펴보면, Case A-III의 초기비용은 34.4억원이고, Case A-IV의 초기비용은 39.6억원으로 나타났다. 즉 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려하지 않은 경우의 초기비용이 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 경우의 초기비용에 비하여 13%정도 더 경제적이나 기대 유지관리비용 및 기대복구비용이 각각 19%와 80%가 더 크게 산정되어 기대LCC 비용이 2.2% 더 크게 산정됨을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려하지 않은 설계의 경우는 궤도에서의 구조물에서의 기대유지관리비용 및 복구비용이 증가할 뿐만 아니라 구조물에서의 실제 거동에 의하여 궤도에서의 신뢰도가 크게 증가하여 궤도부분에 대한 추가적인

기대유지관리 및 기대복구비용이 발생한다. 그러므로 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 2.2% 더 경제적일 뿐만 아니라 궤도부분에 대한 추가적인 유지관리 및 복구비용을 절감시킬 수 있으므로, 설계단계에서부터 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 설계가 이루어져야 함을 확인할 수 있다.

Table 5에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 고려한 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 Case A-IV와 이 영향을 고려하지 않은 Case A-III의 주요 제약조건 결과를 살펴보면 모두 설계기준 상의 제약조건을 만족하고 있음을 알 수 있으나, 초기비용 측면에서 좀 더 경제적이지만 생애주기비용 측면에서 더 경제적이고 효율적인 단면을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

기존의 재래적인 설계방법과 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 LCC최적설계의 경우에 초기비용측면에서 재래적인 설계방법이 8.3% 더 경제적이지만 기대유지관리비용 및 기대복구비용이 각각 30%와 74%가 증가하여 기대 LCC가 16% 증가하는 등 기존의 재래적인 설계방법이 교량/궤도의 종방향 해석 및 교량/차량 동적영향을 고려한 설계에 비하여 주형의 강성이 상대적으로 클 뿐만 아니라 생애주기비용 측면에서도 불리한 비효율적인 단면임을 확인할 수 있다.

Table 5. 주요 제약조건 결과

Case ID	장대레일 축력 - 부가압축응력(MPa)	승차감(mm)	수직가속도(m/s <sup>2</sup> )
Case A-I	91.3 < fca=92 OK	4.73 < 22.72 OK	3.2 < 5.0 OK
Case A-II	103.2 > fca=92 NG	16.35 < 22.72 OK	6.2 > 5.0 NG
Case A-III	86.3 < fca=92 OK	7.25 < 22.72 OK	3.7 < 5.0 OK
Case A-IV	89.2 < fca=92 OK	7.99 < 22.72 OK	4.0 < 5.0 OK
Case A-V	87.1 < fca=92 OK	7.46 < 22.72 OK	3.8 < 5.0 OK
Case A-VI	88.5 < fca=92 OK	7.23 < 22.72 OK	3.6 < 5.0 OK

## 6. 결론

국내외적으로 고속철도에 대한 건설이 증가하고 있는 현 상황에서 기존 고속철도 강교량 설계는 설계 제반기준만을 만족하면 되는 부분적으로 안전여유가 많은 구조물로 설계가 이루어졌다. 따라서, 본 연구에서는 고속철도 강교량에서 중요한 기준인 교량/궤도 종방향 축응력 해석 및 교량/차량 동적영향을 동시에 반영하여 효율적인 단면을 결정하는 신뢰성에 기초한 최적설계 기법을 제안하였다. 본 연구에서는 설계단계에서 교량과 궤도간의 종방향 축응력과 고속주행 열차와 구조물간의 동적영향을 고려하고, 설계 및 시공에서의 불확실성을 고려한 시스템 신뢰성 최적설계 방법을 제안하고 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 재래적인 설계에 의하여 설계, 시공되어진 교량에 대하여 수치해석을 수행하였다.

1. 고속철도 교량 설계시 교량/궤도 종방향 해석과 교량/차량 동적영향을 동시에 고려한 신뢰성 최적설계 방법을 제안하였다. 제안 방법의 효율성을 입증하기 위한 알고리즘은 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적 영향에 의한 구조적 응답을 제약조건에 포함한 신뢰성 최적설계를 수행하도록 구현하였다. 신뢰성해석을 위하여 RSM기법을 적용하여 파손확률을 고려한 생애 주기비용을 고려하였다. 수치해석 고찰 결과, 고속철도 교량은 궤도의 안전성 및 열차의 주행안전성 향상을 위하여 구조적 안전성을 확보할 수 있도록 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적 영향을 고려한 설계로 수행되어야 함을 확인하였다.
2. 본 연구에서 개발한 “heuristic decision” 알고리즘이 설계변수의 변화에 대하여 잘 수렴하고 있으며, 최적화기법은 1방향 탐색을 요구하지 않는 ALM-BFGS기법을 적용하였는데, 본 연구의 설계변수인 주형의 높이가 가장 크게 영향을 미치는 단일 설계변수와 같은 문제에 대해서 ALM-BFGS기법은 기존에 잘 수렴하는 것으로 알려진 것보다 훨씬 큰 Push-Off factor값을 요구함으로써 1방향 탐색이 필요함을 확인하였다.

3. 본 연구에서 제안한 교량/궤도 종방향 해석과 교량/차량 동적영향을 고려한 최적설계가 기존의 재래적인 설계방법에 의한 설계와 교량구조물과 궤도간의 종방향 해석 및 교량/차량의 동적영향을 고려하지 않은 경우, 초기비용 최적설계에 의한 경우와 비교하였을 때 유지관리 및 구조물 보수보강 주기 등을 고려한 생애주기비용 측면에서 경제적임을 입증하였다. 허용응력에 기초한 시방서 상의 제약조건만을 바탕으로 수행한 초기비용 최적설계의 경우는 최소중량 차원의 설계에 불과하여 초기비용은 경제적이었으나, 신뢰성이 부족하여 기대복구비용이 크게 증가하는 불합리한 설계이므로 구조물계의 신뢰성을 충분히 확보할 수 있는 생애주기비용 최적설계가 수행되어야 함을 확인할 수 있었다.
4. 본 연구에서 가장 중점을 둔 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적 영향을 고려한 LCC최적설계가 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적 영향을 고려하지 않은 LCC 최적설계보다 단면의 증가로 초기비용은 약간 증가하나 구조물계의 신뢰성 확보에 의하여 기대유지관리비용과 복구비용의 경제성으로 생애주기비용 측면에서 종방향 해석 및 동적 영향을 고려한 경우가 더 경제적임을 확인하였다. 이를 바탕으로 고속철도 교량 설계시는 교량/궤도 종방향 해석 및 교량/차량 동적 영향을 고려한 LCC최적설계가 수행되어야 함을 확인하였다.
5. 고속철도 교량은 주기적인 차량이동하중, 즉 열차의 유효타격간격(대차간격)과 고유진동수에 의하여 산출한 임계속도에서 공진이 발생하는 것을 확인하였다. 그러므로 설계속도 이내의 임계속도에서 공진이 발생하였을 때에 대한 구조적 거동을 반드시 체크하여야 함을 확인할 수 있었다. 특히 공진이 발생하였을 때의 동적 거동 및 응답이 가장 큰 것을 확인하였다.

## 참고 문헌

1. A. H.-S. Ang and C. A. Cornell(1974), “Reliability-based structural safety and design,” J. of the Struct. Div., ASCE, Vol. 100,



- No. ST9, Sep., pp.1755-1769.
2. H. N. Cho, K. M. Lee, and Y. M. Choi(2004), "Life-cycle cost effective optimum design of steel bridges," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, No. 11, pp.1585-1613.
  3. J. de Brito and F. A. Branco(1995), "Bridge Management Policy using cost analysis," *Proc. Instn Civil Engrs Structs and Bldges*, Vol. 104, Nov., pp.431-439.
  4. D. M. Frangopol and K. Imai(2000), "Geometrically nonlinear Finite element reliability analysis of structural systems. II: applications," *Computers & Structures*, Vol. 77, pp.693-709.
  5. J. M. Goicolea, J. Dominguez, J. A. Navarro, and F. Gabaldon (2002), "New dynamic analysis methods for railway bridges in codes and EUROCODE 1," *Railway Bridges*, IABMAS, June, 2002, pp.1-43.
  6. KHRC(1994), *Bridge Design Manual*.
  7. Y. Mori and B. R. Ellingwood(1994), "Maintaining reliability of concrete structures. I: Role of inspection/repair," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 3, pp.824-845.
  8. UIC(2001), *Track/bridge interaction recommendation for calculations*. 774-3 R.
  9. M. A. Van(1998), "Stability of continuous welded rail track," *Delft Geotechnics*.
  10. G. N. Vanderplaats(1986). "ADS: A FORTRAN Program for automated design synthesis. Engineering design optimization," INC, Santa Barbara, California.
  11. Y. K. Wen and Y. J. Kang(2000), "Minimum lifecycle cost structural design against natural hazards," *Structural Research Series No. 629*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
  12. 이종순(2008), "구조물-궤도 상호작용을 고려한 고속철도 교량의 신뢰성 최적설계," 박사학위 논문.
  13. 류연선(1992), "ALM-BFGS 알고리즘을 이용한 혼상방파제의 최적단면 설계에 관한 연구," *대한토목학회*, 제 12권, 제 1호, pp.197-205.
  14. 최일윤, 조현철, 양신추, 최진유, 유진영(2009), "장대레일 부가축력 및 변위 검토를 위한 설계차트 개발(I)," *한국철도학회 논문집*, 제 12권, 제 4호, pp.565-573.
  15. 최일윤, 임윤식, 양신추, 최진유(2009), "장대레일 부가축력 및 변위 검토를 위한 설계차트 개발(II)," *한국철도학회 논문집*, 제 12권, 제 4호, pp. 574-581.
- 접수일(2009년 8월 31일), 수정일(2009년 10월 1일),  
게재확정일(2009년 11월 24일)