

철도교량형식의 경간에 따른 효율성 비교연구

Comparison of Efficiency by Span in Various Railway Bridge Types

이태규

우송대학교 철도건설시스템학과

Tae-Gyu Lee(tglee@wsu.ac.kr)

요약

일반철도 및 고속철도를 포함한 철도교량의 상부구조로 현재 우리나라에서 주로 사용되고 있는 교량형식은 크게 박스 거더교와 I형 거더교로 구분된다. 박스 거더교는 동적 거동에 대한 안전성이 우수하기 때문에 주로 고속철도 교량으로 많이 사용된다. I형 거더교는 일반철도 교량으로 주로 사용되며, 일반 PSC 거더교 형태와 철골철근콘크리트로 합성화된 구조인 프리플렉스 거더교의 형태로 크게 구분되고 또한 새로운 형식도 지속적으로 개발되고 있는 추세에 있다. 본 연구에서는 현행 철도교설계기준에 의거하여 각 형식별로 경간장에 따라 거더 설계를 실시하여 적절한 형고를 분석하여 경간장에 따른 구조적 및 경제적 효율성을 비교분석하였다. 비교분석을 수행한 결과, 구조적 효율성의 측면에서는 프리플렉스 거더교 형태의 교량이 경간장에 따른 형고가 가장 낮은 것으로 나타났으며, 경제적 효율성의 측면에서는 일반 PSC 거더교 형태의 교량이 가장 효과적인 것으로 평가되었다.

■ 중심어 : | 거더교 | 형고 | 경간 | 효율성 | 철도교량 |

Abstract

The superstructure type of the railway bridge in our country, is mainly classified into the box girder and the I-type girder. The box girder is widely used in the high speed railway bridge because of the safety due to dynamic behavior. The I-type girder is used in the conventional railway bridge, and is also divided into the general type and the composite type, and the newly modified types have been developed. According to the current railway bridge design code, the girder design by the span length in various railway bridge types are performed in this study. The suitable girder height by the span length are analyzed, and the comparative analysis of the structural efficiency and the economical efficiency is carried out. From this study, the composite type girder is appeared the good result in respect of the structural efficiency. However, in the economical aspect, the general I-type girder is required less cost than the other types.

■ keyword : | Girder Bridge | Girder Height | Span | Efficiency | Railway Bridge |

1. 서론

1. 연구의 배경

현재 우리나라에서 사용되고 있는 철도노반 중 교량은 승객의 편리하고 안전한 운행을 위하여 차량의 안전성, 승차감, 유지관리 등의 면에서 엄격한 조건들을 만

접수일자 : 2014년 04월 17일

수정일자 : 2014년 06월 05일

심사완료일 : 2014년 06월 23일

교신저자 : 이태규, e-mail : tglee@wsu.ac.kr

족하여야 한다. 또한 고속철도교량은 일반철도교량에 비하여 더욱 엄격한 설계조건 및 에 인터페이스 조건에 대하여 만족하여야 한다.

지금까지의 철도차량은 모두 동력집중형(Push pull type) 차량이었기 때문에 그동안 철도교량은 동력집중형 차량하중을 기본으로 하여 교량형식이 선정되어 왔다. 일반철도의 경우에는 경제성에 비중을 높게 두고 경간 25m의 I형 거더교가 주로 사용되어 왔으며, 고속철도의 경우에는 동적 안정성 및 승차감을 엄격하게 관리하여 경간 40m의 Box 거더교가 주류를 이루어 왔다 [1][2].

하지만 현재 개발되고 있는 차세대 고속철도는 모두 동력분산형(Electric multiple unit) 차량[3][4]으로 개발되고 있어 열차속도, 차축간격, 수직하중 및 차량하중감소 등 많은 부분이 기존의 동력집중형 차량과는 다르게 나타나고 있다. 이에 따라 차세대 고속철도가 실용화되기 위해서는 동력분산형 차량하중을 기본으로 하는 교량형식에 대한 전면적인 재검토를 통한 성능평가가 절실히 필요한 실정이다.

2. 연구의 목적

앞서 언급한 바와 같이 차세대 고속철도인 동력분산형 철도차량의 개발로 인하여 철도교량 구조물에 미치는 영향은 기존과는 많은 부분에서 다를 것으로 예상된다. 이에 따라 대상 교량형식별 정적 및 동적 성능평가를 통한 안전성 분석, 구조형식 및 최적단면 선정, 가설비용에 따른 경제성 분석, 향후 고강도콘크리트 활용에 대비한 초기가설시 재료적 시간의존성 분석 등을 통하여 차세대 고속철도 교량에 대한 개념적인 설계방안을 제시하는 전반적인 과정이 필요하며, 이 과정에서 가장 기본적으로 교량형식별 특성에 대한 면밀한 재 파악이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 과정을 위한 기반연구로서 현재 우리나라에서 주로 사용되고 있는 일반철도 및 고속철도를 포함하는 모든 교량형식에 대하여 현재의 설계기준[5,6]에 따른 정적(Static) 해석을 수행하여 경간에 따른 형고 비교분석으로 구조형식의 효율성과 경제성에 대한 기본적인 성능평가를 수행하고자 한다.

II. 교량형식 선정 및 설계조건

1. 교량형식 선정

현재 Box 거더교는 고속철도 및 일반철도에 모두 사용되고 있으며, I형 거더교는 모두 일반철도에서만 적용되고 있고 적용 경간장은 약 20~30m 전후에 이르고 있다. 교량의 상부구조를 결정하는 가장 큰 요인은 경간장(Span length)이며, 일반적인 경우에 있어서 경간장에 따른 상부구조형식은 [그림 1]과 같이 나타내고 있다. 여기서 보통 40m 경간을 전후하여 일반교량과 특수교량으로 구분되어지고 있다.

본 연구에서 고려하고자 하는 교량의 형태는 일반적인 설계절차에 의한 것이므로 특수교량을 제외한 일반교량의 형태로서, 경간장 40m를 기준으로 하여 그 이하의 경간장을 가지는 교량만을 대상으로 한다.

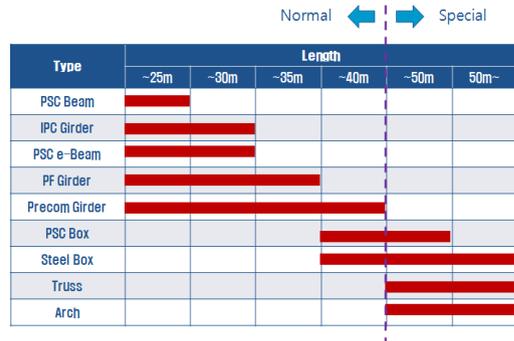


그림 1. 경간장별 상부구조

2. 설계조건

상부구조형식 중 보편적으로 많이 사용되는 일반교량과 신개념 교량형식들 중 적용성이 높은 구조를 선정하면 [표 1]과 같다. 이렇게 선정된 교량형식별로 경간에 따른 형고 분석을 위하여 현행 설계기준[5][6]에 의거하여 거더설계를 실시하였으며, 설계에 사용된 상세한 데이터는 [표 2] 및 [표 3]과 같다[7]. 이와 같은 설계조건에 대하여 MIDAS-CIVIL 프로그램을 사용한 구조설계를 수행하였다.

표 1. 적용된 구조형식

Division	Abbreviation	Description
Conventional	General	Box PSC-1 PSC-2 Prestressed concrete type Incremental type
	Composite	Com-1 Com-2 Preflex type Prestressed composite type
Modified	Mod-1 Mod-2	Eccentric type Prefabricated type

표 2. 설계 기본조건

Span length	Strength of concrete	Strength of steel
20 m 25 m 30 m 35 m 40 m	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$	$f_y = 400 \text{ MPa}$ $f_{py} = 1,600 \text{ MPa}$

III. 경간장별 비교분석

1. 형고 및 형고비 분석

1.1 기준형식

기존 교량형식들 중 대표적으로 [그림 2]와 같이 PSC 박스 거더교 및 I형 거더교의 5가지 형식에 대한 비교 분석을 수행하였다[8-10].

거더설계 결과 경간장별 형고 및 형고비는 [그림 3] 및 [그림 4]와 같다. 경간장별 형고를 살펴보면 그림에서 보는 바와 같이 Box는 적용 경간장인 25, 40 m에 대하여 형고는 각각 2.4, 3.3m로 나타났다. PSC-1의 경우 경간 20, 25m에 대하여 형고 2.0, 2.5m로 나타났으며, 경간 30m 이상에서는 거더의 높이가 과도하게 증가하여 적용이 어려운 것으로 평가되었다. PSC-2의 경우에는 경간 20~35m에 대하여 형고는 1.6~2.7m까지 변화되는 것으로 나타났으며, 경간 40m 이상에서는 적용이 어려운 것으로 평가되었다.

Com-1 및 Com-2의 경우에는 두 가지 형태 모두 경간장에 따라 같은 결과를 보이는 것으로 나타나고 있으며, 적용 경간 20~40m까지 형고는 1.4~2.5m까지로 각기 변화되는 것으로 평가되었다.

표 3. 고려된 하중

Load	Type
Dead	
2nd Dead	
Live	
Sidewalk live	
Creep and shrinkage	Time-dependent analysis by CEB-FIP model
Longitudinal	
Start/break	
Lateral	
Wind	
Temperature	

이에 따라 위와 같은 결과를 각 교량형식별 형고비로 표현하면 [그림 4]와 같이 나타난다. 형고비는 상부구조의 높이를 단위 길이인 1로 설정하였을 경우 필요한 경간의 길이를 나타내는 것으로, 형고비가 클수록 교량의 구조적 효율성이 높다고 말할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 PSC-1의 경우 10, PSC-2는 12.5~14, Com-1 및 Com-2는 14.3~16, Box는 10.4~12 정도의 값을 가지는 것으로 나타나고 있다. 이에 따라 강함성 형상인 Com-1 및 Com-2가 경간장에 따른 형고가 가장 적게 나타나고 있어 유리한 효과를 보이고 있으며, PSC-1이 가장 불리한 형태인 것으로 분석되었다.

1.2 신개념 형식

새로이 개발된 교량형식들 중 대표적으로 [그림 5]와 같이 두 가지 형식을 선정하여 비교분석을 수행하였다 [11].

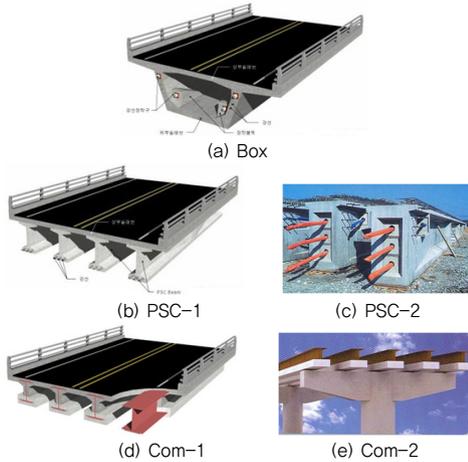


그림 2. 기존형식

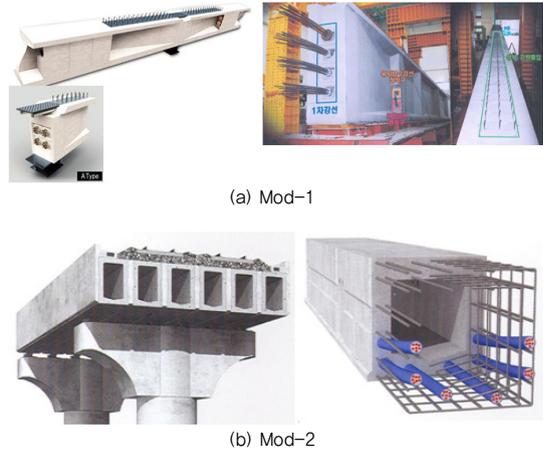


그림 5. 신개념 형식

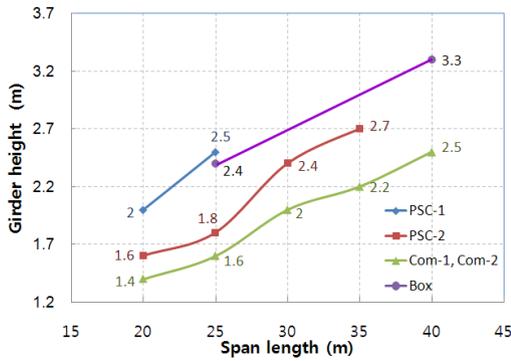


그림 3. 경간장별 형고(기존형식)

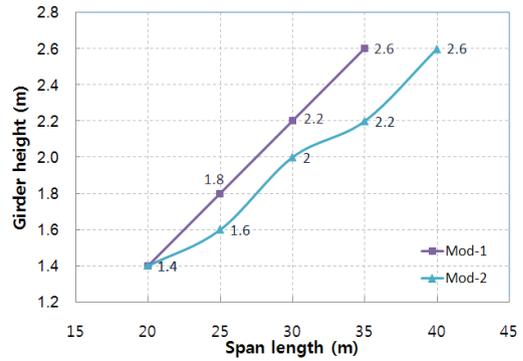


그림 6. 경간장별 형고(신개념 형식)

Type	Height Ratio					
	-8	-10	-12	-14	-16	-18
PSC-1			■ 10			
PSC-2				■ 12.5~14		
Com-1					■ 14.3~16	
Com-2					■ 14.3~16	
Box			■ 10.4~12			

그림 4. 형고비(기존형식)

Type	Height Ratio					
	-8	-10	-12	-14	-16	-18
Mod-1				■ 13.5~14.3		
Mod-2					■ 14.3~16	

그림 7. 형고비(신개념 형식)

Mod-1의 일반적인 특징은 일반 PSC 형식대비 장경간 형식으로 확장이 가능하며 형고를 낮추어 다리밑 공간 확보에 유리하고 거더 거치 후 2차 긴장 및 유지관리용 강선정착의 공정을 추가할 수 있으나, 열차진동에 의한 강관매입부의 균열 발생에 대한 검토가 필요한 구

조이다. Mod-2의 특징은 형고가 낮아 다리밑 공간의 확보가 유리하며 박스 형태로 구조적 안전성이 우수하고 바닥 타설공정이 필요 없어 시공성이 양호한 구조이지만, 상부 고정하중이 커서 구조단면이 다소 증가되며 유지관리를 위한 공법이 필요한 구조이다.

거더설계에 따른 결과 경간장에 따른 형고 및 형고비의 비교는 [그림 6] 및 [그림 7]과 같다. 경간장별 형고를 살펴보면 그림에서 보는 바와 같이 Mod-1의 경우 경간 20~35m에 대하여 형고는 1.4~2.6m까지 변화되는 것으로 나타났으며, 경간 40m 이상에서는 적용이 어려운 것으로 평가되었다. Mod-2의 경우에는 경간 20~40m까지 형고는 1.4~2.6m까지 각각 변화되는 것으로 평가되었다.

이에 따라 이러한 결과를 형고비로 표현하면 [그림 7]과 같이 나타난다. Mod-1의 경우 13.5~14.3, Mod-2의 경우 14.3~16 정도의 값을 가지는 것으로 나타나고 있어 큰 차이를 보이지는 않고 있지만 Mod-2가 장경간에의 적용에 따른 구조적 효율성의 측면에서 다소 효과적인 것으로 나타나고 있다.

2. 교량형식별 경제성 분석

2.1 기존형식

공사비는 업무효율, 관리주기, 할인율 등의 세부 산정 방식에 따라 그 액수가 다소 달라질 수 있으므로 2010년도 상반기의 실적공사비 단가[12]를 기본단가로 적용하고, 표준품셈에 의거하여 국내 전문업체 2곳의 공사비 산정결과[13][14]의 평균을 취하였다. 공사비에 포함되는 항목은 [그림 8]과 같이 직접비만을 대상으로 산정하였으며, 그중 초기건설비용은 공사원가만을 포함하였다.

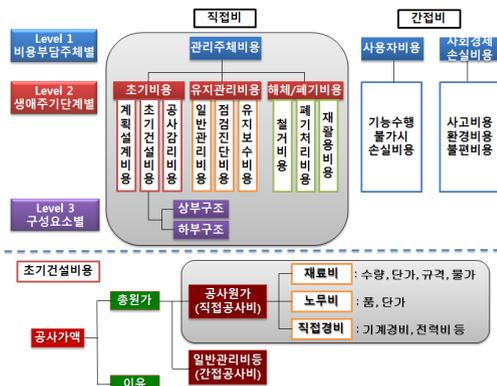


그림 8. 공사비 구성 현황

이에 따른 기존 교량형식별 단위 m²당 상부직접공사비의 비교는 [그림 9]에서와 같이 PSC-1이 가장 경제적인 형상으로 경간장에 따라 상부직접공사비가 약 48~56만원/m² 정도로 평가되었다. PSC-2는 경간장에 따라 다소 차이는 있지만 상부직접공사비가 약 67~78만원/m² 정도로 거의 일정한 수준의 값을 가지고 있으며, Com-2는 상부직접공사비가 약 67~114만원/m² 정도로 초기에는 PSC-2와 비슷하지만 경간장이 길어질수록 공사비의 차이가 더욱 더 커지는 것으로 나타나고 있다.

Com-1은 상부직접공사비가 약 128~184만원/m² 정도로 모든 경간장에 걸쳐 가장 공사비의 규모가 큰 것으로 나타나고 있다.

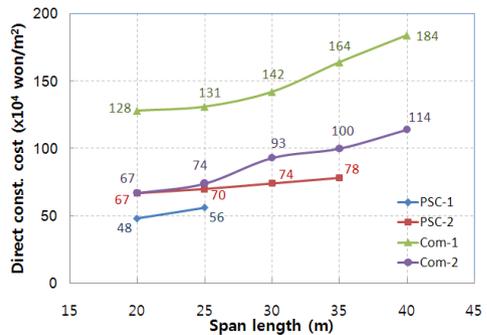


그림 9. 상부구조 경제성(기존형식)

한편 Box는 상부구조 자체의 제작에 소요되는 공사비보다도 가설방식(MSS, ILM, FCM 등)에 따른 가설 공사비가 훨씬 더 크게 발생되며, 또한 가설방식 선정에 따라라도 공사비가 크게 변화된다. 따라서 타 상부구조형식과의 직접적인 비교가 불가능하기 때문에 비교대상에서 제외하였다.

2.2 신개념 형식

신개념 교량형식별 단위 m²당 상부직접공사비의 비교는 [그림 10]과 같이 Mod-1이 다소 경제적인 형상으로 경간장에 따라 상부직접공사비가 약 63~74만원/m² 정도로 평가되었으며, 또한 경간장이 길어지는 것에 비하여 공사비의 증가는 거의 미미한 것을 보여주고 있

다. 반면 Mod-2는 경간장이 길어질수록 공사비 증가액의 비율이 다소 커지는 결과를 보이고 있으며, 상부직접공사비는 약 87~142 만원/m² 정도로 나타나고 있다.

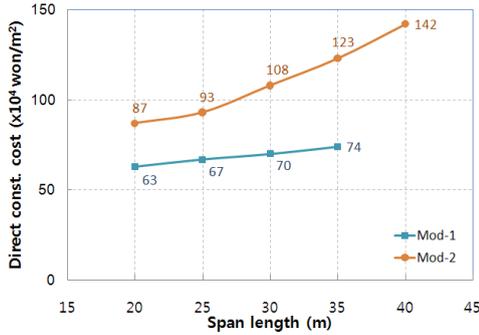


그림 10. 상부구조 경제성(신개념 형식)

3. 형고비와 공사비의 종합 비교분석

형고비에 따른 구조적 효율성이나 공사비에 따른 경제 효율성은 두 가지 모두 교량형식을 선정하고 가설하는 단계에 있어서 매우 중요한 요소로 작용된다. 현재의 일반적인 시공사례를 보면 일반철도에서 경간이 짧은 경우에는 경제성에 비중을 더 두는 경향이 있으며, 고속철도에서 경간이 긴 경우에는 구조적 효율성 및 동적 안전성에 비중을 더 두는 경향을 보이고 있다.

하지만 가중치를 어디에 두느냐 하는 것은 사회적 여건, 현장상황, 예산규모 등 여러 가지 요인에 따라 달라지기 때문에 본 연구에서는 형고비와 공사비의 두 가지 요인을 동일한 가중치(50:50)로 가정하여 분석을 수행하였다. 여기에서 Box교는 적용되는 가설공법별로 공사비가 크게 달라지며 동적 안정성 분석이 또한 동시에 이루어져야 하기 때문에 형고비와 공사비만으로 분석하는 것이 불가능하므로 본 장의 비교연구에서는 배제하였다.

각기의 교량형식에 대하여 형고비 및 공사비에 대한 최고값과 최저값을 각각 50점과 0점으로 환산하여 상대적인 비율로 나타내면 [표 4] 및 [표 5]와 같다.

형고비를 살펴보면 경간 40m의 Com-1 및 Com-2가 가장 긴 형고비를 나타내고 있어 최저치인 50으로 설정되었으며, 경간 20m 및 25m의 PSC-1이 가장 작은 형

고비를 나타내고 있어 최저치인 0으로 설정되었다. 이외의 다른 경간에서의 교량형식들은 형고비의 비율에 따라 각각 상대적인 수치들로 환산되었다.

공사비를 살펴보면 경간 20m의 PSC-1이 가장 적은 공사비를 나타내어 최저치인 50으로 설정되었으며, 경간 40m의 Com-1이 가장 많은 공사비를 나타내어 최저치인 0으로 설정되었고, 이외의 다른 경간에서의 교량형식들은 공사비의 비율에 따라 각각 상대적인 수치들로 환산되었다.

표 4. 형고비에 따른 상대비율

Type	Span length (m)				
	20	25	30	35	40
PSC-1	0	0	-	-	-
PSC-2	20.8	32.4	20.8	24.7	-
Com-1	35.7	46.9	41.7	49.2	50
Com-2	35.7	46.9	41.7	49.2	50
Mod-1	35.7	32.4	30.3	28.8	-
Mod-2	35.7	46.9	41.7	49.2	44.9

표 5. 공사비에 따른 상대비율

Type	Span length (m)				
	20	25	30	35	40
PSC-1	50	47.1	-	-	-
PSC-2	43.0	41.9	40.4	39.0	-
Com-1	20.6	19.5	15.4	7.4	0
Com-2	43.0	40.4	33.5	30.9	25.7
Mod-1	44.5	43.0	41.9	40.4	-
Mod-2	35.7	33.5	27.9	22.4	15.4

이들 두 가지의 수치들을 합산하여 종합적으로 상대적인 수치비교를 수행하면 [그림 11]과 같이 나타난다. 그림에서 보는 바와 같이 PSC-1과 Mod-1은 단경간에서는 효과적인 형식이지만 장경간으로 갈수록 그 효과가 저하되고 있음을 볼 수 있다. 그 외의 다른 교량형식들은 모두 비슷한 양상을 보이고 있는데 특이할 사항은 경간을 20, 30, 40m와 같이 단자리를 0으로 설정하는 것에 비하여 25, 35m와 같이 단자리를 5로 설정하는 것이 종합적인 결과가 높게 나타나고 있어 효과가 더 좋은 것으로 분석되고 있다.

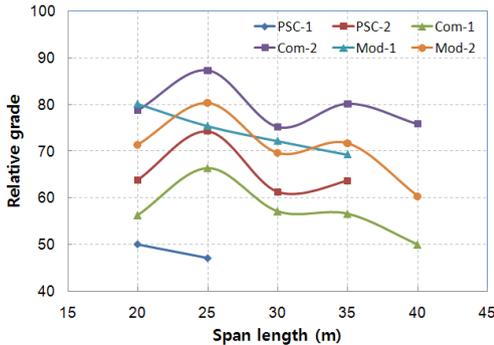


그림 11. 경간장별 종합비율

IV. 결론

철도교량의 경간에 따른 구조적 및 경제적 효율성 비교연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 형고비에 따른 분석으로 구조적 효율성이 높은 교량형식일수록 상부 직접공사비의 개념으로 본 경제성은 낮은 것으로 나타나고 있어 구조적 효율성과 경제적 효율성은 상호 완전 반비례하는 관계를 가지고 있는 것으로 평가되었다.
- (2) PSC-1은 경제성의 측면에서 볼 때 가장 좋은 구조형식이지만 구조적 효율성이 낮아 장경간의 활용은 매우 어려울 것으로 평가되었다. 반면에 Com-1은 구조적 효율성은 높게 나타나지만 경제적 효율성이 저하되어 실제 적용에는 매우 신중하게 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- (3) 형고비와 공사비를 동일한 가중치로 가정한 상대 비교연구결과로 볼 때 경간의 선택에 있어서 25, 35m와 같이 단자리를 5로 설정하는 것이 보다 더 효과적인 결과를 보이는 것으로 평가되었다.
- (4) 향후 동적 구조성능평가를 통하여 안전성에 대한 정밀분석을 추가로 실시한 후 상대적인 비교연구 결과를 보완하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 한국건설기술연구원, 고속전철 구조물 안전성 기

술 개발, 2000.

[2] 김성일, “이동하중해석 및 철도교량 주행안전성/승차감기준”, 한국전산구조공학회 논문집, 제22권, 제2호, pp.16-21, 2009.

[3] 신건훈, 송영준, 유영갑, “교량구간의 결빙예측 및 감지시스템”, 한국콘크리트학회논문지, 제11권, 제11호, pp.42-48, 2011.

[4] 박덕규, 윤병식, 김준식, “LTE를 기반으로 하는 차세대 철도 통합무선망 및 표준화기술 연구”, 한국콘크리트학회 춘계학술대회 논문집, 제11권, 제1호, pp.279-280, 2013.

[5] 한국철도시설공단, 철도설계기준(노반편), 2011.

[6] 한국콘크리트학회, 콘크리트구조기준, 2012.

[7] 이원걸, 철도 PSC거터교의 하중횡분배에 관한 연구, 우송대학교, 석사학위논문, 2008.

[8] 동양대학교, 철도교 PSC e-Beam의 4개교 VE/LCC 분석, 우경건설, 2007.

[9] <http://www.interconstech.com/>

[10] <http://www.precom.co.kr/>

[11] <http://www.wkcos.com/>

[12] 건설연구사, 2010년 상반기 실적공사비, 2010.

[13] 김성환, 표준열차하중 변경에 따른 철도교량의 비용효과 분석, 서울과학기술대학교, 석사학위논문, 2013.

[14] 국토교통부, 고속철도 교량형식에 따른 교량건설비용 저감방안 연구, 2010.

저자 소개

이 태 규(Tae-Gyu Lee)

정회원



- 1989년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도건설시스템학과 교수

<관심분야> : 건설시스템, 알고리즘, OOP, 멀티미디어