

## 철도선하역사 접속교량의 진동전달 특성 분석

최상현<sup>1</sup>, 김진호<sup>2\*</sup>, 유용<sup>1</sup>, 권세곤<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국교통대 철도시설공학과, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 스마트역사연구팀, <sup>3</sup>한국철도공사 연구원

### Analysis of Vibration Transfer Characteristics of Approach Bridges for an Elevated Railroad Station

Sanghyun Choi<sup>1</sup>, Jin-Ho Kim<sup>2\*</sup>, Yong Yoo<sup>1</sup>, Se-Gon Kwon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Railroad Facility Eng., Korea University of Transportation

<sup>2</sup>Smart Station Research Tram, Korea Railroad Research Institute

<sup>3</sup>Research Institute, Korail

**요약** 선하역사는 구조물 상부에 열차가 운행하는 구조로서 타 역사 구조물에 비하여 역사 내의 소음·진동에 취약한 구조이다. 선하역사의 진동 특성을 보다 정확히 파악하기 위해서는 접속교량에서 전달되는 진동에 대한 분석이 필요하다. 이 논문에서는 실험 및 해석을 통하여 접속교량에서 선하역사로 전달되는 진동의 특성을 분석하였다. 대상 구조물은 경춘선 금곡역으로 ABAQUS 3차원 수치해석 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 받침 변화에 따른 접속교량과 역사의 전달 특성 변화를 분석하기 위하여, 철도교량에 적용되어온 다양한 받침의 역학적 성질을 고려하여 해석을 수행하였다. 현장 진동 계측은 열차 진행 방향에 따라 접속 교량 및 역사 구조물에 대하여 가속도계를 이용하여 수행하였다.

**Abstract** The elevated railway station, above which a train is passing, is vulnerable to noise and vibration compared to other station types. To better identify the vibration characteristics of the elevated railway station, the transferred vibration from approach bridges should be analyzed. In this paper, through experiments and simulations, the transfer characteristics of the vibration from approach bridges is analyzed. The study structure is Geomgok station and the analyses are conducted using ABAQUS three dimensional numerical model. To identify the change in the transfer characteristics for various bearing types, the analyses are performed considering mechanical properties of bearing for railway bridges. The measurement is performed using the accelerometers attached to the approach bridges and the station structure along the passing path of trains.

**Key Words** : Approach bridge, Bearing, Elevated railway station, Vibration transfer

### 1. 서론

선하역사는 일반적으로 노반이 고가구조물로 건설되는 구간에 선로 하부의 유휴공간을 활용하여 건설하는 방식으로 부지면적을 최소화하고 여객동선을 단축할 수 있어 경제적이거나, 구조물 상부로 통과하는 열차 하중으로 인한 진동이 역사 내부로 직접 전달되므로 다른 역사

형식에 비하여 소음 및 진동에 취약한 특성이 있다[1].

현재까지 선하역사의 진동과 관련한 연구는 플로팅 슬래브레드 또는 진동저감장치 적용에 따른 저감 성능에 대한 비교·검토나[3-5], 열차 통과로 인한 역사 구조물 주요 부재의 진동 특성에 대한 검토[6-9]가 대부분이며, 접속교량에서 전달되는 진동에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 최근 Choi et al.[2]이 접속교량의 받침 형식

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(14RTRP-B072484-02)에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Jin-Ho Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5774 email: ziminpa@krii.re.kr

Received March 25, 2015

Revised April 7, 2015

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

변화에 따른 진동특성 변화에 대한 연구를 수행하였으나, 접속교량에서 전달되는 진동 특성에 대한 검토는 수행하지 않았다.

이 연구에서는 수치 해석 및 실험을 통하여 접속교량에서 선하역사에 전달되는 진동의 특성을 분석하였다. 실제 진동 전달 특성 분석을 위하여 경춘선 금곡역사에 대하여 접속교량 및 역사 구조물의 가속도를 측정하였다. 수치 해석은 금곡역사에 대한 3차원 해석 모델을 이용하여 수행하였다. 해석 프로그램은 ABAQUS를 이용하였으며, 다양한 접속 형식에 따른 진동 특성 변화를 접속 교량, 교량-역사 연결부 및 역사 구조물의 주요 부분에서 비교 검토하였다.

## 2. 선하역사 현황 및 교량받침

### 2.1 선하역사 현황

국내에는 약 98개의 선하역사가 있으며 대표적인 구조 형식으로는 TBS(Track on Building System)와 TPS(Train on Pier System)가 있다. TBS는 건물 형식의 역사구조물 위에 궤도가 부설된 형태이며, TPS는 교량 형식의 노반구조물 좌우로 역사구조물이 존재하는 형태이다. 참고로 국내 선하역사의 대부분은 TBS형식이다. 또한 역사의 층수로는 2층이 53%, 3층 및 4층이 각각 35%와 11%를 차지하고 있으며, 접속 교량은 콘크리트 거더교가 51%, 강합성교 및 토공이 각각 20%와 16%이다. 그 밖에 궤도 형식은 74%가 자갈, 26%가 콘크리트이며, 선하역사의 91%는 도시철도 역사이다[10].

### 2.2 철도교량의 받침

선하역사와 접속교량의 연결 형식은 Fig. 1과 같이 별도의 받침이 없이 역사구조물과 강결되어 있는 라멘식과 받침이 있는 교량식으로 분류할 수 있다. 과거 철도용 교량받침으로 가장 널리 사용되어 온 형식은 선받침과 고력항동받침이다. 최근에는 교량 상부구조의 자중이 무거워짐에 따라 내진받침 또는 면진받침 등이 적용되고 있다[11].

Fig. 2는 철도교량에 적용 가능한 받침의 종류이다. (a) 힌지받침; (b) PB(Plate Bearing, 고력항동받침); (c) FPB(Friction Port Bearing, 마찰형 포트받침); (d) EQS(EradiQuake System, 스프링복원형 디스크받침); (e) FDB(Friction Disk Bearing, 마찰형 디스크받침); (f)

SB(Spherical Bearing, 스페리컬받침); (g) LRB(Lead Rubber Bearing); (h) HDRB(High Damping Rubber Bearing).

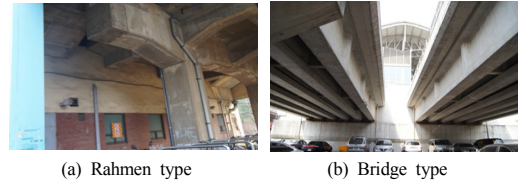


Fig. 1. Approach bridge-station connection types

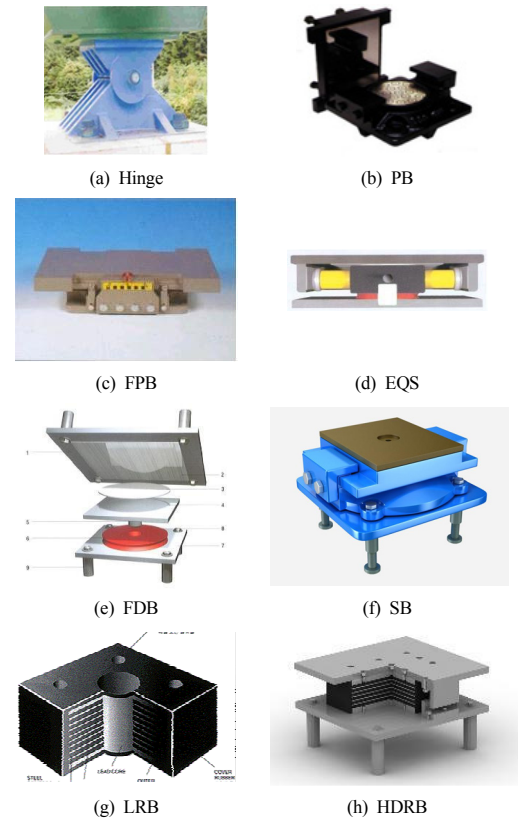


Fig. 2. Bearings applicable to a railroad bridge

## 3. 진동 측정 및 전달특성 검토

### 3.1 계측 대상 역사의 구조적 특징

계측이 수행된 금곡역사는 선로구조물 하부에 지상 4층, 지하 1층의 건축물로 구성된 TBS 구조의 선하역사

이다. 역사 구조물은 라멘 형식이며 승강장의 길이는 180m, 폭은 22.5m 이다. 접속 교량은 콘크리트거더교이며, 자갈궤도와 상대식 승강장이 설치되어 있다. Fig. 3은 금곡역의 전경이다.

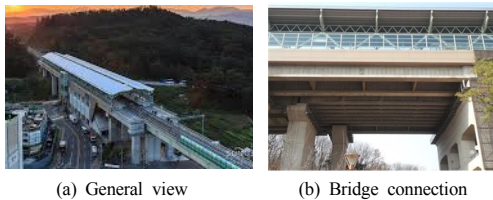


Fig. 3. Geomgok station

Table 1. Equipment and sensors

Equip./sensor	Specification	Image
Accelerometer	Manufacturer : Tokyo Sokki Sensitivity : 10g Range : ±1.02g Frequency : 200Hz Temp. Range : -10 ~ 50°C	
Data logger	Manufacturer : KYOWA Resoluiton : 0.031mV Channel : 32 Temp. range : -20 ~ 80°C	
Speed gun	Manufacturer : Bushnell Accuracy : ±2km/h	

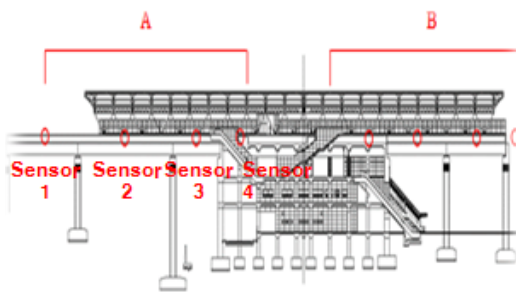


Fig. 4. Sensor arrangement

### 3.2 계측 장비 및 센서 배치

진동 측정을 위한 장비는 Table 1에 정리하였다. 접속 교량에서 전달되는 진동을 측정하기 위한 가속도 배치는 Fig. 4와 같이 열차의 진행 경로를 따라 배치하였다. 그림과 같이 총 4개의 가속도계를 이용하여 측정을 수행하

였으며, 응답 샘플링은 0.001초 간격으로 하였다. 참고로 Fig 4.의 Sensor 1, 2, 3은 교량부의 경간 중앙에 부착한 센서이며, Sensor 4는 교량과 역사의 접속부에서 가장 인접한 역사 구조물에 부착한 센서이다.

Table 2. RMS comparison results (stopping)

Sensor No.	1	2	3	4
1	○			
RMS (g)	2.84E-02	7.88E-03	1.86E-03	7.50E-04
RMS ratio	100%	28%	7%	3%
2		○		
RMS (g)	2.43E-02	1.94E-02	3.69E-03	7.70E-04
RMS ratio	126%	100%	19%	4%
3			○	
RMS (g)	2.76E-02	3.06E-02	1.84E-02	8.30E-04
RMS ratio	150%	166%	100%	5%

Table 3. RMS comparison results (passing)

Sensor No.	1	2	3	4
1	○			
RMS (g)	1.12E-01	3.33E-02	6.43E-03	8.20E-04
RMS ratio	100%	30%	6%	1%
2		○		
RMS (g)	2.16E-01	1.23E-01	1.66E-02	9.30E-04
RMS ratio	176%	100%	13%	1%
3			○	
RMS (g)	1.44E-01	2.09E-01	8.78E-02	1.88E-03
RMS ratio	164%	238%	100%	2%

### 3.3 계측 결과 분석

계측한 가속도는 열차 정차 시와 열차 통과 시로 구분하였으며, 측정된 가속도의 RMS(Root Mean Square) 값을 이용하여 크기 변화를 비교하였다.

비교 결과는 Table 2(열차 정차 시)와 3(열차 통과 시)에 제시하였다. 표에서 노란색으로 채색된 칸은 열차 선

두부의 위치를 나타낸다. 즉, Table 2의 2번째 행, 3번째 열은 열차의 선두부가 Fig. 4의 Sensor 1의 위치에 도달했다는 의미이며, 5번째 행, 3번째 열과 4번째 열의 선두부가 Sensor 2의 위치에 도달했다는 의미이다. 또한 각 Table은 열차가 Sensor 1에서 3으로 이동함에 따라 각 Sensor 위치에서 측정된 진동의 RMS값과 열차의 선두부가 위치한 Sensor의 RMS값과의 비율(RMS ratio)을 포함하고 있다.

Table 2와 3에서 열차가 역사 구조물에 접근할수록 전달되는 진동량이 점차 증가하는 경향을 보이나, 최대값은 정차시 5%, 통과시 2%로 매우 작음을 알 수 있다. 또한 열차 정차 시보다 통과 시의 가속도 응답이 크게 나타나, 열차의 속도가 진동 가속도에 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 수치해석을 통한 전달 특성 검토

##### 4.1 수치해석 모델

다양한 받침에 대한 진동 전달 특성의 변동성은 수치 해석을 통하여 검토하였다. 수치해석 프로그램은 ABAQUS를 이용하였다. 수치해석은 금속역사를 대상으로 수행하였으며, 유한요소해석 모델은 보(beam)와 판(plate)요소를 이용하여 Fig. 5(a)와 같이 구성하였다. 궤도부의 경우 레일은 보요소, 레일 하부 체결구, 패드 및 자갈도상은 등가선형스프링으로 모델링하였다. 등가선형스프링값은 Cho et al.[12]의 계산값을 참고하여 산정하였다(Table 4). 역사 구조물은 기둥과 보를 보요소, 슬래브와 벽체를 판요소로 모델링하였다. 수치해석에 적용한 열차하중 및 속도는 실제 금곡역사의 상황과 측정 결과를 고려하여 ITX-청춘열차가 100km/h의 속도로 통과하는 경우만을 고려하였다.

Table 4. Properties used for the FE model (N/m)

Direction	Stiffness per one rail	Damping coefficient per one rail
Axial	$95.8 \times 10^6$	$99.4 \times 10^3$
Lateral	$0.9 \times 10^6$	$30.4 \times 10^3$
Vertical	$10.0 \times 10^6$	$32.1 \times 10^3$

Fig 5(b)는 가상의 센서 위치를 나타낸다. 참고로 Table 2와 3에 나타난 바와 같이 교량에서 전달되는 진동의 최대값은 열차가 Fig. 4의 Sensor 3에 위치할 때

므로 이 때의 진동값 만을 비교에 고려하였다. 참고로 Sensor A는 Fig. 4의 Sensor 3, Sensor B는 Fig. 4의 Sensor 4의 위치와 일치한다.

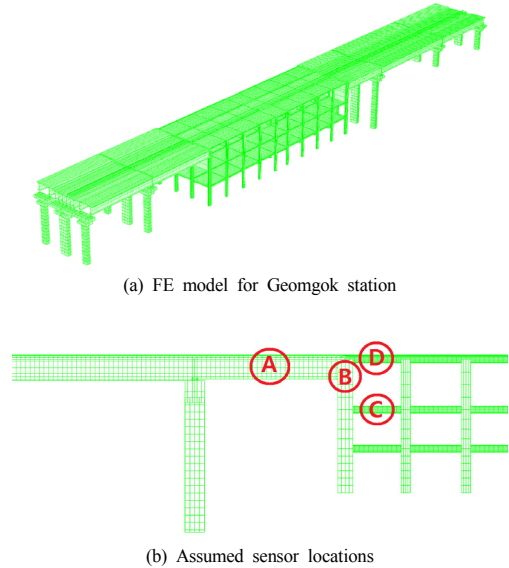


Fig. 5. FE model and assumed sensor locations

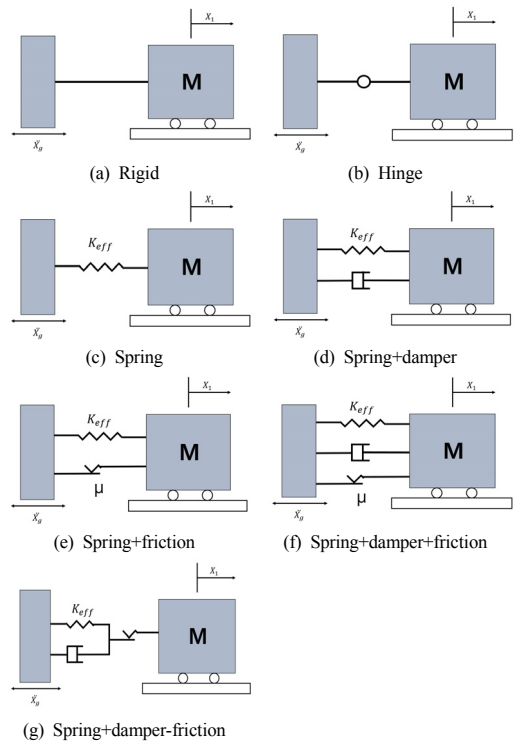


Fig. 6. Bridge bearing models

### 4.2 받침의 역학적 특성

열차 통과로 인하여 발생하는 교량의 진동은 받침을 통하여 역사 구조물로 전달되므로 받침의 역학적 특성 변화에 따라 전달되는 진동의 특성도 바뀔 수 있다. 이 논문에서는 강절형식과 함께 2.2절에 제시된 받침들의 역학적 특성을 모두 고려할 수 있도록 Fig. 6과 같이 7가지 받침모형을 해석에 적용하여 진동전달 특성을 비교하였다[12].

### 4.3 해석결과

수치해석 결과는 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 첫 번째 열은 Fig. 6의 받침 모델과 일치하며, 첫 번째 행은 Fig. 5(b)의 Sensor 위치를 나타낸다. 또한 노란색으로 채색된 칸은 열차 선두부의 위치를 나타낸다.

Table 5. FE analysis results

	Sensor location	A	B	C	D
a	Train location	○			
	RMS (g)	3.56E-02	2.10E-03	6.68E-04	5.38E-04
	RMS ratio	100%	6%	2%	2%
b	Train location	○			
	RMS (g)	3.49E-02	2.30E-03	6.71E-04	5.30E-04
	RMS ratio	100%	7%	2%	2%
c	Train location	○			
	RMS (g)	3.26E-02	1.20E-03	4.70E-04	5.03E-04
	RMS ratio	100%	4%	1%	2%
d	Train location	○			
	RMS (g)	3.25E-02	1.40E-03	3.95E-04	4.46E-04
	RMS ratio	100%	4%	1%	1%
e	Train location	○			
	RMS (g)	3.25E-02	1.30E-03	4.56E-04	4.91E-04
	RMS ratio	100%	4%	1%	2%
f	Train location	○			
	RMS (g)	3.24E-02	1.50E-03	3.84E-04	4.36E-04
	RMS ratio	100%	5%	1%	1%
g	Train location	○			
	RMS (g)	5.68E-02	7.87E-04	1.94E-04	3.47E-04
	RMS ratio	100%	1%	0%	1%

Table 5에서 전달되는 진동은 강절(a)과 힌지(b)의 경우가 가장 큰 것으로 나타났다. 가장 작은 경우는 스프링과 댐퍼를 병렬로 연결하고 마찰요소를 직렬로 연결한 받침(g)으로 나타났다. 모든 경우에서 접속교량으로부터 역사로 전해지는 진동의 크기는 상당히 작은 수준으로 확인하였다.

## 5. 결론

이 연구에서는 수치 해석 및 실험을 통하여 접속교량에서 선하역사에 전달되는 진동의 특성을 분석하였다. 수치 해석은 경춘선 금곡역사에 대한 3차원 해석 모델을 이용하여 수행하였다. 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 금곡역사와 접속 교량에서 측정된 진동값으로부터 전달 특성을 분석한 결과 역사 구조물에 전달되는 진동은 교량 진동 RMS값의 5%이하로 나타났다.
- 2) 여러 가지 접속형식을 고려하여 수치해석을 수행한 결과 강절과 힌지의 경우가 전달 진동이 가장 큰 것으로 나타났으며, 스프링과 댐퍼를 병렬로 연결하고 마찰요소를 직렬로 연결한 받침 모델에서 진동의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다.
- 3) 현장 측정 및 수치 해석 결과를 종합할 때 접속 교량에서 역사 구조물로 전달되는 진동의 크기는 어떠한 연결 형식에서도 10% 미만으로 나타나 크지 않은 것으로 나타났다.

## References

- [1] J.H. Kim, S.H. Youn. "The Review of Floating Slab Tracks for Vibration Reduction of Railway Station." Korean Journal of Environmental Engineers, Vol. 30, No. 6, pp. 581 - 586. 2008.
- [2] S. Choi, S. Kwon. "Vibration Analysis of an Elevated Railroad Station Considering Station-Bridge Connection Characteristics." Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol.10, No.2, pp. 274-281. 2014.
- [3] Y.-C. Kweon, "Noise and Vibration Solutions Considering Satbility Effects for High-Speed rail Chonan Station in Korea." *Proceedings of Korea Society for Railway*,2005.
- [4] S.Y. Jang, H.-H. Cho, S.C. Yang. "Vibration Analysis of Station under Railway Lines with Floating Slab Track." *Proceedings of 2010 Spring Conference, Korean Society for Railway*, pp. 1719-1724, 2010
- [5] T.-H. Park, H.-S. Park, H.-B. Kim, J.-H. Choi. "A Study on the Characteristics of Vibration Reduction Type Disk Bearing in Station of Rapid Transit Railway." *Proceedings of Korea Society for Railway*,2011
- [6] Ju, S.H., Lin, H.T., Huang, J.Y.. "Dominant frequencies

of train-induced vibrations.” Journal of Sound and Vibration, Vol.319, pp.247-259, 2009.

- [7] Wang, T., Wei, Q. “Vibration characteristics of the platform in high-speed railway elevated station.” *Telkomnika*, Vol.11, No.3, pp.1383-1392, 2013.
- [8] Yang, N., Guo, T., Sun G. “Train-induced vibration on elevated railway station.” *Journal of Central South University*, Vol.20, pp.3745-3753, 2013.
- [9] Zhang, N., Xia, H. “Comfort analysis of the new Guangzhou Railway Station.” *Proceedings of the Second International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement*, pp.1434-1440, 2007.
- [10] S. Choi, Y. Yoo, J.H. Kim, S.-G. Kwon “Experimental Analysis of Vibration Transfer Characteristics of an Elevated Railroad Station.” *Journal of Korea Society of Disaster Information*, In Press, 2015.
- [11] J. Lee , *Improvement of Vibration mitigation Efficiency for an Elevated Railroad Station Considering Transfer Characteristics*. Master’s Thesis, Korea National University of Transportation, 2015.
- [12] J.-R. Cho, D.-S. Kim, Y. J. Kim, J.-W. Kwark, S. Y. Jang, “Three Dimensional Model for Dynamic Moving Load Analysis of a PSC-I Girder Railway Bridge.” *Journal of the Korean Society for Railway*, 16(4), pp. 286-297, 2013.
- [13] K.-S. Park, H.-J. Jung, I.-W. Lee “A Comparative Body on Aseismic Performance of Base Isolation Systems for Multi-Span Continuous Bridge. *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1001-1013, 2002.

**최 상 현(Sanghyun Choi)**

[정회원]



- 1992년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 1999년 5월 : Texas A&M 토목공학과 (공학박사)
- 2002년 12월 ~ 2006년 7월 : 한국원자력안전기술원 선임연구원
- 2006년 8월 ~ 현재 : 철도대/교통대 철도시설공학과 교수

<관심분야>  
구조공학

**김 진 호(Jin-Ho Kim)**

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울시립대학교 대학원 구조공학 (공학석사)
- 2003년 9월 : UC Davis 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 5월 ~ 2003년 2월 : California D.O.T. 연구원
- 2003년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>  
철도토목, 소음·진동

**유 용(Yong Yoo)**

[정회원]



- 2012년 2월 : 한국철도대학 철도시설토목과 전문학사
- 2012년 9월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도시설공학과 (공학석사)

<관심분야>  
철도토목, 구조공학

**권 세 곤(Se-Gon Kwon)**

[정회원]



- 2007년 8월 : 군산대학교 대학원 구조공학(공학석사)
- 2013년 8월 : 군산대학교 대학원 구조공학(공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 한국철도공사 연구원

<관심분야>  
철도토목, 구조공학