

열차하중, 속도변화에 따른 토공상 콘크리트 슬래브궤도의 거동특성연구

전희광^{*}, 강윤석², 박용걸¹

¹서울과학기술대학교 철도전문대학원,

²한국철도기술연구원 고속철도 인프라시스템 연구단

Study of the Behavior of Concrete Slab Track on Earthwork According to the Variation of Train Axle Load and Speed

Hee-Kwang Chun^{1*}, Yun-Suk Kang², Yong-Gul Park¹

¹Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology,

²High-Speed Railroad Infrastructure System Research Team, KRRI

요약 최근 고속철도에서는 열차의 운영속도가 향상되고 동력분산형 차량의 도입이 증가하고 있다. 또한 콘크리트 슬래브 궤도의 수요가 증가하고 설계단면감소 추세가 예상되면서 설계하중 및 속도변화로 인한 콘크리트 슬래브궤도의 보다 명확한 내부거동평가가 요구된다. 본 연구의 목적은 열차하중과 열차속도 변화에 대하여 콘크리트궤도구조와 노반의 역학적인 거동을 평가하고 규명하는 것이다. 이를 위하여 도상콘크리트층과 콘크리트기층의 속도, 하중 변화에 따른 거동을 해석하여 평가하였다. 또한 호남고속철도 토노반 콘크리트 궤도에 부설 중에 매립된 도상콘크리트 변형율계로 HEMU-430X 열차와 KTX-호남의 170km/h에서 최대 402km/h까지 측정된 측정결과와 해석결과를 비교분석하였다. 분석결과, 속도향상에 따른 증가경향을 확인하고 선형회귀선을 도출하였으며 슬래브 층의 결합상태와 비결합 상태의 가정상태의 해석응력과 현장의 콘크리트 슬래브 내부응력을 비교할 수 있었다. 그 결과 축중이 작은 동력분산식 HEMU 430-X 열차의 402km/h주행 시 발생응력과 KTX-호남의 발생응력이 유사하게 발생함을 알 수 있었고 속도증속에 따라 발생응력의 표준편차 값이 크게 증가하는 것을 확인하였다.

Abstract In recent high speed rail way, the operating speed of train is enhanced and the introduction of EMU train vehicles is increased. In addition, as expected the demand of the concrete slab track and the trend of design cross-section reduction, the clear behavior of evaluation of internal slab layer is demanded about the variation of design load and speed. The purpose of this study is to evaluate and identify the mechanical behavior pattern of concrete slab track and track-road bed with the variation of axle load and train speed. To this end, the behavior of TCL and HSB was evaluated in according to the variation of axle load and speed. And the analysis results and the data measured TCL strain sensor, which was embedded in TCL slab under installation on Honam high speed railway, was analyzed. The analysis result shows that the strain are increasing in according to the speed-up of train, and line regression was obtained from measured data. Analysis data of the state of bonding condition of slab layer and measured data was analyzed. It is conducted that the TCL layer stress of HEMU 430X, which of axle load, is lighter was similar to the stress of KTX-Honam, the standard deviation of measured stress is dramatically increased.

Keywords : Concrete Slab Track, TCL, HSB, HEMU 430X, Speed, Axle load, Stress, Ling Regression, Standard Deviation

본 논문은 “고속선 증속을 고려한 설계기준 및 성능평가 핵심연구”과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hee-Kwang Chun(Seoul National University of Science and Technology)

Tel: +82-42-607-3761 email: obchun@kr.or.kr

Received August 27, 2015

Revised October 5, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

1. 서론

최근 철도 선진국의 고속철도 기술개발 경쟁가속화로 고속철도의 영업노선 운행속도 향상되고 있다. 열차의 운영속도도 프랑스(TGV EST), 일본(도호쿠 신간선), 스페인에서 320km/h 이상 운행을 하고 있다. 시험차량의 최고속도도 증가되는 추세인데 프랑스(574km/h), 중국(487km/h), 일본(443km/h)에 이어 국내에서도 자체 개발된 HEMU 430-X가 경부고속선에서 증속시험시 421.4km/h를 달성한 바 있다.[1] 차량의 축중도 점차 감소하는 추세이다. 축중이 다소 무거운 동력집중식 차량에서 축중이 가벼운 동력분산형 차량의 도입이 증가하는 추세인데 유지보수비 절감에 기여할 것으로 예상된다.[2]

콘크리트 슬래브케도도 수요도 증가하고 있으며 층단면이 감소되면서 최적화가 이루어지고 있다. 최초의 슬래브케도인 레다(Rheda) 케도도 노반기준면인 시공기면(F.L: Formation level)과 레일상면의 레일면고(R.L: Rail Level)의 차이가 최소 950mm에서 현재 772mm까지 줄이는 등 단면감소로 인한 시공비 절감 등 효율성을 높이고 있는 실정이다. 향후 운행속도 증가와 콘크리트 슬래브케도에 대한 수요증가 및 설계단면 감소 추세 등 관련 기술환경변화로 인하여 설계하중 및 속도변화로 인한 콘크리트 슬래브케도의 보다 명확한 내부거동평가가 필요하다.[2]

기존에도 케도구조의 거동규명을 위하여 열차 속도상승으로 하중증가와 레일의 거동연구에 대한 해석연구가 이루어졌고 실내 실험을 통해 슬래브의 거동을 고찰하려는 연구가 시도되었다.[2, 3] 하지만 실제 고속철도 현장에서의 열차주행시 케도슬래브의 내부거동분석을 위한 실험연구는 그 사례가 없다.

본 연구에서는 열차증속에 따라 동적으로 증가하는 하중에 따라 슬래브케도의 속도민감 파라미터인 열차하중과 열차속도에 대하여 케도구조와 노반의 역학적인 거동양상을 평가하고 규명하고자 하였다. 이를 위하여 도상콘크리트층과 콘크리트기층의 속도, 하중변화에 따른 거동을 독일의 아인젠만(Eisenmann)식과 철도설계지침 및 편람(KR-CODE)에 제시된 방법에 의한 해석을 수행하였다.[4,5] 또한 호남고속철도 케도슬래브에 매립변형율계를 시공중 설치운영하여 HEMU-430X 열차와 KTX-호남의 170km/h에서 최대 402km/h까지 증속시 변형율과 해석결과에 대한 비교분석을 수행하였다.

2. 콘크리트 케도 해석이론 및 규정

2.1 해석이론 및 관련규정

토노반상에 철근콘크리트 슬래브 도상의 해석은 독일 철도 기준(AKFF) 및 Beton Kalender 2000(Eisenmann/Leykauf)을 기본으로 하며 도로 건설에 통상 적용하는 ZTVT-StB 95, ZTV Beton-StB 01등을 적용한다.[6] 위 규격서를 근거로 국내에서는 철도설계지침 및 편람(KR CODE)에서 제시한 바와 같이 슬래브 케도 노반상에 타설하는 도상콘크리트층(TCL층:Track concrete layer) 및 콘크리트 기층(HSB층:hydraulic Sub Base)이 설계하중에 의해 발생하는 휨인장응력이 허용응력 이내를 만족하도록 단면크기 및 재료특성을 설계한다. 도상콘크리트층 위에 거치된 레일을 누르는 열차하중이 도상콘크리트층과 콘크리트기층과 같은 지지슬래브(supporting slab) 휨응력(bending stress)을 발생시키는데 두 층은 역칭 결합체를 도포하여 결합한다. [4, 7, 8]

레일 아래에 지지슬래브(supporting slab)를 설치하고 횡축으로 하중을 충분히 전달하는 침목이 매립되어있어 열차하중이 레일을 거쳐 체결장치 하부로 전달되므로 지지점하중을 산정하고 이하중에 의해서 발생하는 지지슬래브(supporting slab)의 휨응력변형(bending strain)을 계산하기 위해 "탄성 기초 보" 연산 모델을 적용하여 계산하였다. 이 때 지지점 하중은 "탄성기초 설계법 (beam-on-elastic foundation)"을 적용한다. [4, 9, 10]

본 논문에서는 탄성기초보와 하부노반의 응력검토를 위해 유한요소방법에 의한 해석을 수행하였다.

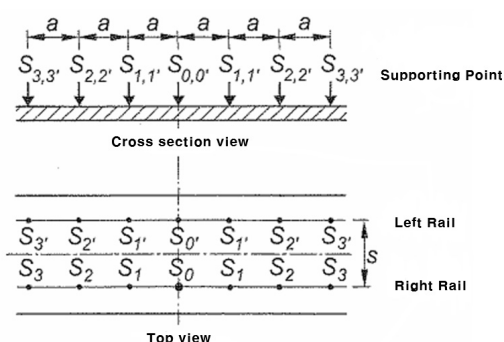


Fig. 1. Top view and cross sectional view of supporting slab applying supporting force

2.2 해석이론

2.2.1 탄성기초보(Beam)에서의 슬래브의

휨모멘트 산정

현장타설식 콘크리트 슬래브케도는 설계하중에 대해 케도슬래브와 기층의 응력이 허용응력을 초과하지 않도록 설계하는데 Odenmark의 등가깊이이론을 적용해 다층의 케도구조를 단일층의 슬래브로 환산하여 응력계산을 한다.[4, 11]

2층 지지 슬래브의 경우 콘크리트 도상층(TCL층)와 콘크리트 기층(HSB층)이 서로 “결합되지 않은” 시스템 I(System I)과 “결합된” 시스템 II(System II)을 구분한다. System I(TCL층과 HSB층 사이에 결합이 이루어지지 않음)에서는 슬래브층의 등가두께(h_x)를 고려하고 가상노반계수(k)를 산정하여 대체 시스템의 두께(h_l)를 산정한다. 이 때 흙노반의 지반스프링 정수는 Boussinesq이론과 Odenmark의 등가깊이이론에 따라 노반스프링계수를 산정한다.

Fig. 2는 “결합되지 않은” 시스템 I (System I)의 콘크리트 도상층(TCL층)과 콘크리트기층(HSB층)의 발생 응력을 나타낸다. E_1 과 E_2 는 각각 콘크리트 도상층과 콘크리트기층의 탄성계수(단위: MPa)를 의미하며 h_1 , h_2 는 콘크리트 도상층과 콘크리트 기층의 두께(단위 : mm)를 의미한다. 그리고 σ_1 은 도상콘크리트층(TCL층)의 상면에서 발생하는 휨응력, σ_2 는 콘크리트기층(HSB층)의 하면에서 발생하는 휨응력을 의미한다.

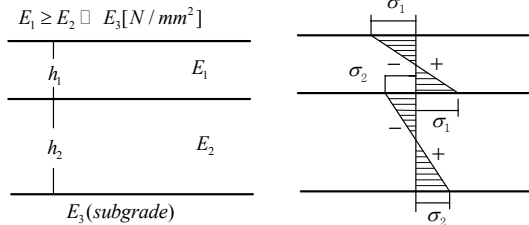


Fig. 2. Bending stress of System I (state of nonbonded layer)

웨스트가드(Westergaard) 이론에 근거하여 윗하중 작용시 각층의 인장응력(σ)을 산정할 수 있고 각 층에서 발생하는 휨응력(bending stress)은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot \beta_1 \cdot M_1}{B_1 \cdot h_1^2} [N / mm^2] \quad (\text{TCL층 하면}) \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{6 \cdot \beta_2 \cdot M_1}{B_2 \cdot h_2^2} [N / mm^2] \quad (\text{HSB층 하면}) \quad (2)$$

여기서,

M_1 : 각층이 동일한 강성을 가진 대체시스템의 비결합상태(System I)의 발생 휨모멘트

B_1 : 도상콘크리트층(TCL층)의 너비

B_2 : 콘크리트 기층(HSB층)의 너비

$$\beta_1 = \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$$

$$\beta_2 = (1 - \beta_1)$$

System II(TCL층과 HSB층 사이에 결합이 이루어짐)은 두 층이 결합되어 있는 상태로 Figure 3과 같은 응력 거동을 보인다. $E = E_1$ 일 때 동일한 강성을 가진 그림 대체 시스템의 두께(h_n)를 구하게 된다. Fig. 3에서의 σ_{1r}, σ_{1b} 은 각각 도상콘크리트층(TCL층)의 상면과 하면에서 발생하는 휨응력, σ_{2r}, σ_{2b} 는 콘크리트기층(HSB층)의 휨응력을 의미한다.

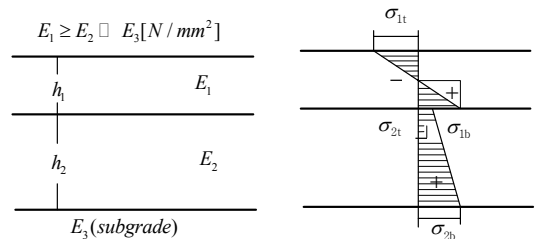


Fig 3. Bending stress of System II (state of bonded layer)

결합된 시스템 II(System II)을 각 층의 탄성계수가 다르므로 이를 등가 T형 환산단면으로 고려하여 구한 휨응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{1,b} = \frac{M_n}{I} \cdot (h_1 - e_0) [N / mm^2] \quad (3)$$

$$\sigma_{2,r} = x \cdot \frac{M_n}{I} \cdot (h_1 - e_0) [N / mm^2] \quad (4)$$

$$\sigma_{2,b} = x \cdot \frac{M_{II}}{I} \cdot e_u [N/mm^2] \quad (5)$$

여기서,

M_{II} : 각층이 동일한 강성을 가진 대체시스템의 결합상태(System II)의 발생 휨모멘트

$$e_0 = \frac{h}{2} \cdot \frac{E_2 \cdot h_2}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2} + \frac{h_1}{2} [mm]$$

$$e_u = h - e_0 [mm]$$

I : 환산단면의 단면2차모멘트 [$mm^2 \cdot mm^4$]

$$I = \frac{h_1^3}{12} + h_1 \left(e_0 - \frac{h_1}{2} \right)^2 + \frac{h_2^3}{12} + \left(h_1 + \frac{h_2}{2} - e_0 \right)^2$$

계산된 휨모멘트에서 식(1)~식(5)로 각 층의 결합상태에 따라 휨응력(flexural stress) σ_1 와 σ_2 를 계산하였다.

2.2.3 집중하중 재하시 모멘트의 영향고려

“탄성 기초 위에 놓인 판” 시스템에서는 하중이 두 개의 축으로 적용되기 때문에 웨스터가드 “판 중앙 재하 공식”에 따라 집중 하중이 재하될 경우 하중점(load point)을 기준으로 반경(radial)방향과 접선(tangential) 방향으로의 모멘트는 웨스터가드(Westergaard)의 “판 중앙 재하 공식”에 따른 집중하중 하의 모멘트의 영향선에서 계산한다.[4]

2.2.4 허용응력

본 해석에 적용된 궤도슬래브(TCL층)의 설계기준강도(f_{ck})는 30MPa, 콘크리트 탄성계수(E_c)는 31,900MPa, 콘크리트 설계 휨강도(f_r)는 5.8MPa이다. 적용된 궤도슬래브의 종방향 허용응력은 0.90MPa, 횡방향 허용응력은 1.70MPa이다. 검토된 슬래브와 기층의 응력(종방향 및 횡방향 각각)은 다음의 조건을 만족해야 한다.[6]

Table 1에서 슬래브의 응력은 허용응력을 초과하더라도 TCL층의 보강철근에 의해 충분한 하중전달이 이루어지므로 운영 중에 바로 큰 문제를 발생되지 않는다.

철도설계지침 및 편람(KR CODE)에서는 안전을 고려하여 탄성계수 설계값(E_{cd})과 동일할 때와 기층의 탄성계수(E_2)값의 50%만 고려하여 검토한다. 허용응력 초과를 통한 과도한 균열은 운영 중 유지관리시 문제를

초래하므로 적절한 제어가 필요한데, 독일의 슬래브궤도 운영경험에 따르면 0.8~0.9%의 철근량을 적용하는 경우 균열폭은 0.5mm를 넘지 않는 것으로 보고된다.[3] 다만 기층은 보강철근이 없기 때문에 층내 발생응력이 허용응력 이내로 하고 균열발생 상태를 가정하여 탄성계수를 50%로 감소시킨다.

Table 1. Criteria of allowable bending stress TCL and HSB layer(KR CODE)

Category	System I		System II	
	$E_2 = E_{cd}$	$E_2 = 0.5E_{cd}$	$E_2 = E_{cd}$	$E_2 = 0.5E_{cd}$
TCL	×	×	△	△
HSB	×	○	△	○

※ ○:within allowable stress(compulsory provision)
 △:within allowable stress (recommendation)
 ×: permission above allowable stress

2.2.5 설계하중 및 하중조합

설계하중은 유럽 열차에서 도입된 UIC 71의 하중분포도(loading diagram)를 적용하였다. UIC 71은 흰색 하중이 250kN인 4개의 축으로 구성된다. 각 축들은 1,600mm 간격으로 배치되며 균등 분배 하중(80kN/m)을 고려한다. 곡선부 주행 시 부족칸트(Cant deficiency)를 고려하여 원심력에 의한 외측레일부의 하중 증가분 20%(factor 1.2)를 고려한다. 속도증가에 의한 고려된 동적충격계수는 다음과 같다.

$$i = 1 + \beta n \left(1 + 0.5 \frac{V - 60}{190} \right) \quad (6)$$

여기서,

V : 열차최고속도

β : 신뢰도지수

n : 궤도품질지수

동적 충격률은 파괴확률(failure probability)가 0.15%로 할 때(통계 안전성 99.7%; $t=3$) 변동계수(variation coefficient) 16.7%에 상응한다.

토반의 최대 압축 응력을 계산시에는 여유도(redundancy)가 있으므로 동역학 요소를 1.17로 설정하며 이 때 파괴확률(failure probability)은 15.7%(통계 안

전성 68.7%; $t=1$)이다. 일반적으로 동적충격계수를 고려한 최대 휨인장응력은 다음과 같다. 각각의 하중을 이를 조합하여 계산하는데, 최대 휨인장응력은 다음과 같이 계산된다.

$$Max(\sigma_{l, long, trans}) = i \times (\sum \sigma_{l, long, trans}) \quad (7)$$

여기서,

$\sigma_{l, long}$: 한지점의 하중반력에 의해 발생하는
궤도층 종방향 응력

$\sigma_{l, trans}$: 한지점의 하중반력에 의해 발생하는
궤도층의 횡방향 응력

$l=1,2$ 인 경우 각각 $\sigma_1 \sigma_2$ 이다.

3. 궤도구조 해석

3.1 대상구조 및 해석제원

3.1.1 콘크리트 슬래브궤도

콘크리트 슬래브궤도는 현장타설식 슬래브궤도와 공장제작식 슬래브궤도로 분류되는데, 본 연구의 검토대상은 현장타설식 슬래브궤도로서 호남고속철도에 시공되었다. 호남고속철도는 1단계(오송~광주(송정리))구간에 시공된 궤도구조는 레다 2000(Rheda 2000) 궤도구조로서 격자형철근 침목(Bi-block 침목)을 타설양생된 콘크리트기층(HSB)층위에 거치하고 콘크리트층(TCL층)을 시공한다. 단면은 Fig. 4, 주요제원은 Table 2와 같다.

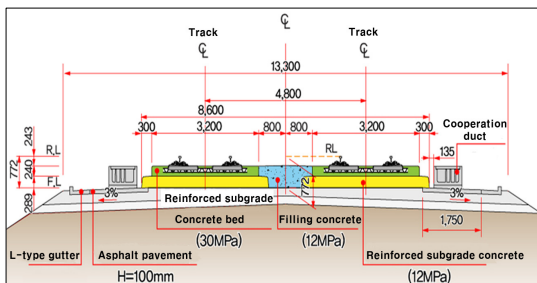


Fig. 4. Cross sectional view of concrete slab track (Honam - high Speed railway)

Table 2. Specification of concrete slab track

Category	Specification
HSB Layer (Hydraulic Stabilized Base)	• Thickness 289mm • Width 8,600mm • Concrete Strength:12MPa (No steel reinforcing bar)
TCL Layer (Track Concrete Layer)	• Thickness 240mm • Width 3,200mm • Concrete Strength:30MPa steel bar ratio 0.8~0.9%
Center Filling Concrete	• Thickness 240mm • Width1,600mm • Concrete Strength 12MPa (No steel reinforcing bar)
FL~RL	• FL~RL : 772mm

3.1.2 차량

열차하중을 위해 고려된 차량은 KTX 호남(KTX 산천 120000호대)으로 PC-8T-PC 편성에 최대축중은 17톤이며 현재 호남고속철도에서 운행 중이다. HEMU 430-X 열차(High-speed Electric Multiple Unit 430km/h eXperiment)는 국가연구개발사업으로 개발된 고속열차로서 최고속도 430km/h급의 동력분산식 차량이다. 운행 시험을 위한 시제편성은 5MIT 편성에 최대축중은 15톤 이하로 제작되었고 향후 상용화 운행편성은 최대축중 13톤 이하 제작예정이다. 최고속도 시험은 경부고속선 2단계구간에서 2013년 최고속도 421.4km/h를 기록하였고 호남고속철도에는 2014년 8월~2015년 3월까지 증속시험을 수행하여 최대 414km/h의 최고속도를 달성하였다.



Fig. 5. HEMU 430-X high speed train

3.1.3 해석제원

콘크리트 궤도의 해석을 위해 고려된 해석제원은 Table 3과 같다.

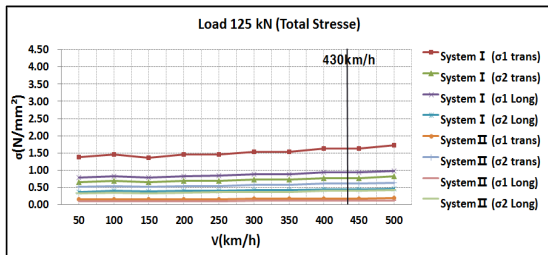
Table 3. Specification of Analysis

Track component		unit	value
Fastener	c_{dyn} dynamic spring coefficient	kN/mm	54.3
TCL Layer	$w \times h$ height \times width	mm	3200 \times 240
	f_{ck} design strength	N/mm^2	C30
	E_1 elasticity modulus	N/mm^2	32,000
	f_a allowable stress(long)	N/mm^2	0.9
HSB Layer	$w \times h$ height \times width	mm	3800 \times 289
	E_2 elasticity modulus	N/mm^2	26,000
	f_a allowable stress	N/mm^2	1.57
Reinforced Roadbed	t thickness	mm	400

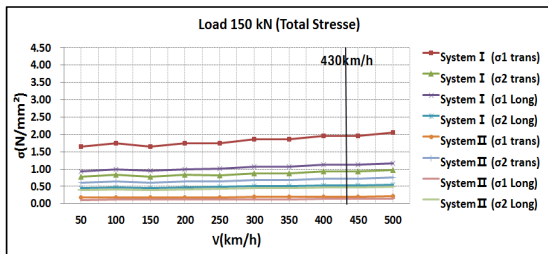
3.2 해석결과

3.2.1 도상콘크리트층 및 콘크리트기층

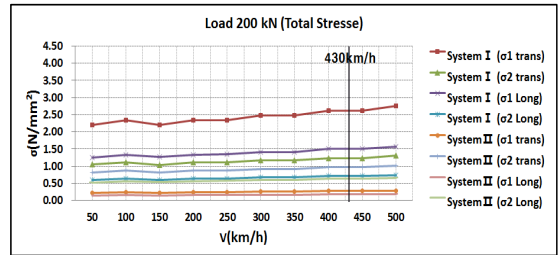
열차하중과 열차하중의 변화에 따른 궤도슬래브층의 응력해석 결과는 Fig. 6과 같다. 기존연구에서는 속도증가에 따라 응력의 변화를 검토한 바 있다.[12] 본 해석에서는 하중의 변화와 변화에 따른 노반의 거동도 추가적으로 수행하였다.



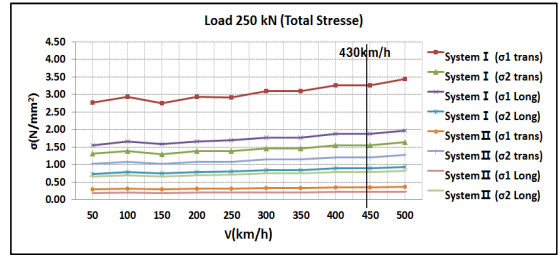
(a) Axle load (50% of UIC load)



(b) Axle load (60% of UIC load)



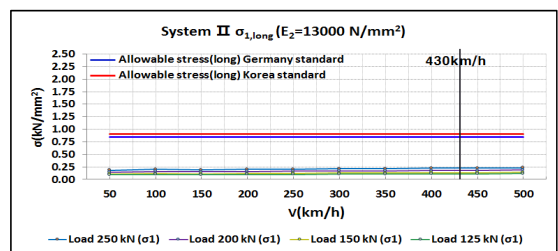
(c) Axle load (80% of UIC load)



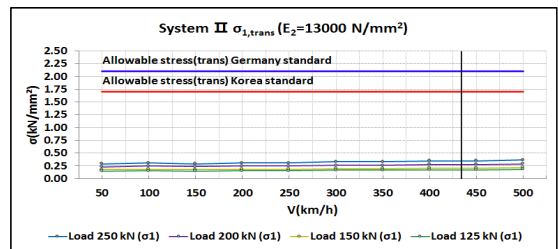
(d) Axle load (100% of UIC load)

Fig. 6. Maximum bending stress according to the variation of axle load and velocity

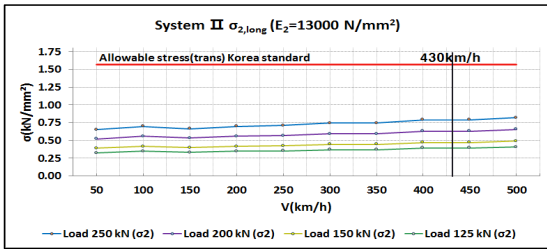
해석결과 최대 250kN의 하중 재하, 속도 400km/h 주행시의 도상콘크리트층 응력은 125kN의 하중 재하와 대비하여 201% 크다. 도상콘크리트층(TCL층)의 응력($\sigma_{1,trans, long}$)은 콘크리트기층(HSB층)의 응력($\sigma_{2,trans, long}$)보다 더 크게 발생한다.



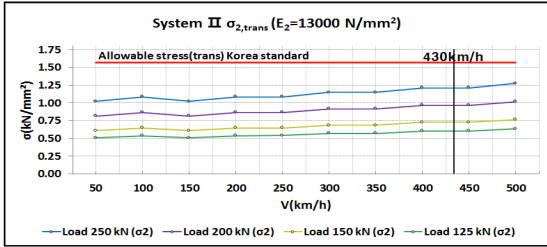
(a) Longitudinal stress of TCL layer (System II)



(b) Transversal stress of TCL layer (System II)



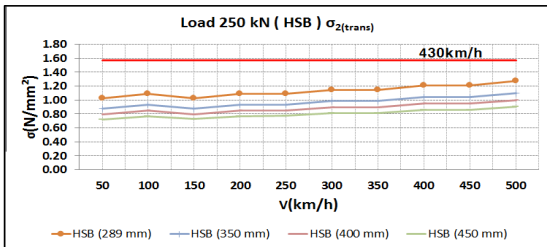
(c) Longitudinal stress of HSB layer(System II)



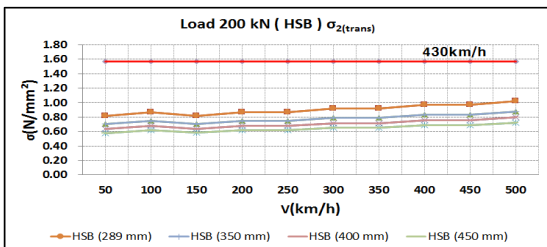
(d) Transversal stress of HSB layer(System II)

Fig. 7. Maximum bending stress of slab layer according to the variation of axle load and velocity

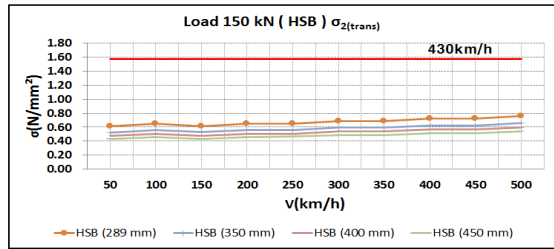
최대 250kN의 하중 재하, 속도 400km/h시를 기준으로 하여 횡방향 인장응력은 종방향 인장응력에 대비하여 173% 수준이며 발생하는 최대인장응력은 비결합시스템 (System I)의 횡방향 응력($\sigma_{1,trans}$)이다.



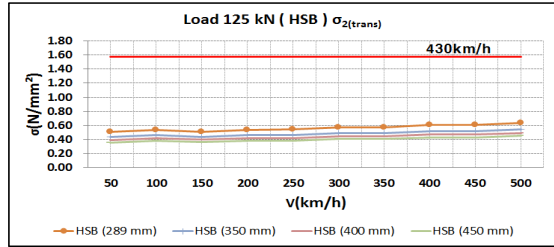
(a) Axle load (250kN)



(b) Axle load (200kN)



(c) Axle load(150kN)



(d) Axle load(125kN)

Fig. 8. Variation of bending stress of HSB layer according to axle load, thickness of HSB layer and train speed

결합된 시스템(system II)에서는 도상콘크리트층의 응력($\sigma_{1,long}$, $\sigma_{1,trans}$)과 콘크리트기층의 응력($\sigma_{2,long}$, $\sigma_{2,trans}$)을 비교한 것이 Fig. 7이며 기저콘크리트층의 해석결과는 Fig. 8이다.

해석결과, 기저콘크리트층의 횡방향응력($\sigma_{2,trans}$)이 가장 크게 발생하며 콘크리트기층 종방향응력($\sigma_{2,long}$), 도상콘크리트층의 횡방향응력($\sigma_{1,trans}$), 종방향응력($\sigma_{1,long}$) 순의 크기로 응력이 발생한다. 최대 250kN의 하중 재하, 속도 400km/h주행시를 기준으로 하여 각각 도상콘크리트 층의 횡방향응력, 콘크리트기층의 종방향응력, 콘크리트기층의 횡방향응력은 154%, 353%, 543% 순으로 나타났다. 전체적으로는 속도증가에 따른 아인젠만(Eisenmann) 충격계수를 고려한 시 증가경향을 나타낸다.

3.2.2 하부노반응력

열차하중, 속도변화와 상부노반 두께에 따른 응력(σ_z)의 변화를 나타낸 것이 Fig. 9이다. 축중, 속도충격 계수 및 상부노반 깊이에 따른 상관관계를 분석한 결과

노반두께가 300mm (D=300mm)인 경우가 가장 컸고 350mm, 400mm, 450mm순으로 나타났다. 열차하중의 변화에 따른 응력의 변화가 속도에 따른 응력변동보다 상대적으로 크게 나타났다.

경우 노반층의 발생응력은 각각 98%, 96%, 94%로 감소하였는데 두께변화에 따른 응력발생의 증가율은 상대적으로 크지 않았다.

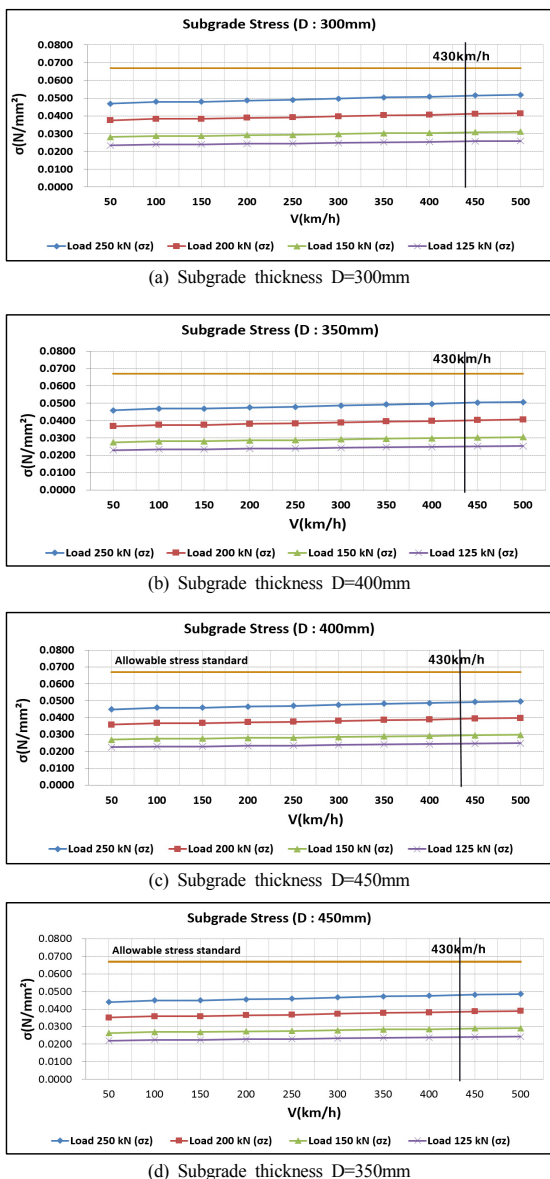


Fig. 9. Variation of stress of subgrade layer according to axle load, thickness of subgrade layer and train speed

최대 250kN의 하중 재하, 속도 400km/h 주행시 300mm를 기준으로 노반두께가 350mm, 400mm, 450mm

4. 현장시험

4.1 개요

본 연구에서는 고속철도 현장에 시공된 콘크리트 슬래브궤도에서의 열차 하중 및 속도변화에서 발생하는 거동을 평가하기 위하여 현장시험을 수행하였다. 이를 위하여 호남고속철도 3-4구간 익산-정읍구간 토공구간 오송기점 109km231지점에 궤도콘크리트층(TCL층) 내부에 궤도시공중 변형을 센서를 매립하여 응력변화를 측정하였다.

4.2 주요제원 및 설치

콘크리트 내부응력을 평가하기 위해 설치된 변형을 측정센서(KM-100BT)는 변형률과 온도 측정이 가능하며 10개의 센서를 매립 설치하였다.

매립된 변형률계는 케이블을 통해 데이터로거(DBK80)와 연결되어 있으며 시스템 설정에 따라 지정된 측정시간마다 데이터 기록이 가능하도록 슬래브 내부변형률 시스템을 구축하였다. 설치된 측정시험기의 도면은 Fig. 10과 같다.

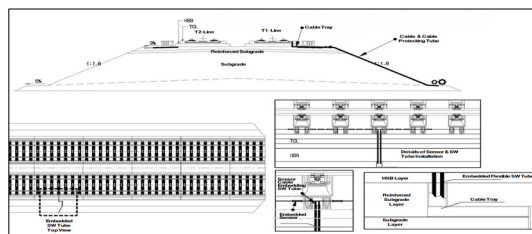
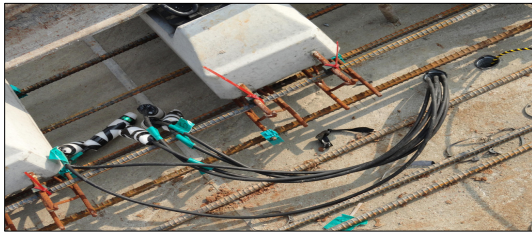
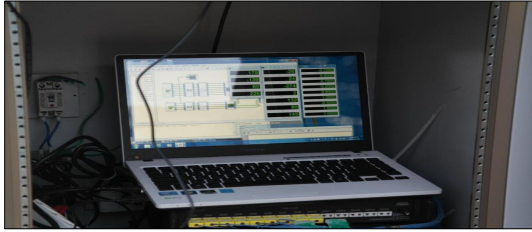


Fig. 10. Drawing of the installation TCL layer behavior evaluation system

시스템을 구축하기 위하여 노반공사를 마친 시점부터 현장조사를 수행하고 HSB층 콘크리트 타설 및 양생이 끝나고 철근과 레다침목을 거치한 이후 설치하였다. 실제 호남고속철도 현장 시험지점(오송기점 109km231)에 Fig. 11과 같이 설치를 하였다. 설치시 콘크리트층 내부에 센서를 매립하고 환경영향을 최소화하기 위하여 센서 설치 보호커버 및 케이블배선을 하였고 합체 내부의 데이터로거와 연결하고 구동프로그램을 설치하였다.



(a) Strain sensor and connecting sensor and cable on the field test site



(b) Monitoring system of the behavior of TCL and rail

Fig. 11. Embedding strain sensor in TCL slab layer and measuring system on the Honam high speed line

4.3 열차운행 및 측정

측정당일에는 증속운행일차와 최대속도는 Table 4와 같고 증속구간은 오송기점 98km~120km구간에서 2014년 4월부터 2015년 3월까지 고속열차(KTX-호남, HEMU-430X)의 증속운행이 이루어졌다. 측정당시 기상상황, 노이즈 발생, 측정여건 등을 고려하여 TCL 변형을 측정을 실시하였다.

Table 4. Maximum stress of TCL slab layer on test site

Field Test Date	Train model	Maximum Train Speed
2014.04.16~17	KTX Honam	300 km/h
2014.04.23~24	KTX Honam	300 km/h
2014.08.28	HEMU 430X	305 km/h
2014.12.03	HEMU 430X	340 km/h
2014.12.12	HEMU 430X	357 km/h
2015.01.23	HEMU 430X	362 km/h
2015.02.01	HEMU 430X	393 km/h
2015.02.08	HEMU 430X	398 km/h
2015.03.08	HEMU 430X	402.4km/h
2015.03.15	HEMU 430X	403.7 km/h

4.4 시험결과분석

열차 운행시 TCL층 내부변형을 측정을 위한 궤도슬래브 층에 매립된 10개의 센서에서 열차속도 170km/h에서 최대 402km/h까지 열차의 운행에 따라 궤도슬래

브층 내부의 변화율을 분석하였다. 측정점의 휨변형율은 열차의 차륜이 열차진행방향으로 연속으로 거치된 레일을 통과하면서 체결장치와 체결장치 패드를 통해 분산되고 콘크리트 슬래브궤도의 침묵과 궤도슬래브층에 전달되면서 발생한다. 각 센서별로 발생된 궤도슬래브층의 하부의 종방향 최대응력($\sigma_{1,b}$)을 평가한 수치는 Table 5와 같으며 기해석을 수행했던 슬래브층의 비결합상태(System I)와 결합상태(System II), 유한요소해석으로 수행하였던 값들과 측정정보값, KR CODE에서 추천하는 허용응력값을 비교한 것이 Fig. 12이다.

분석결과, HEMU 430X의 측정결과는 열차의 속도증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 발생된 센서에서의 발생된 평균응력과 최대응력을 비교한 것이 Table 6이다. 평균응력과 최대응력은 402km/h 속도에서의 응력은 170km/h 응력과 대비하여 각각 176.4%, 284.2%로 나타났다.

Table 5. Maximum TCL layer stress($\sigma_{1,b}$) (MPa)

Category	170 km/h	270 km/h	300 km/h	354 km/h	370 km/h	402 km/h
No.1	0.274	0.246	0.376	0.456	0.364	0.978
No.2	0.317	0.295	0.345	0.653	0.685	0.901
No.3	0.344	-	-	0.658	0.697	0.384
No.4	0.319	0.452	0.577	0.304	0.522	0.259
No.5	0.138	0.287	0.399	0.373	0.678	0.197
No.6	0.225	0.281	0.485	0.637	0.687	0.398
No.7	-	0.347	0.532	0.59	0.408	-
No.8	0.186	0.354	0.538	0.585	0.186	0.209
No.9	0.265	0.417	0.503	0.651	0.155	0.414
No.10	0.236	0.251	0.439	0.355	0.526	0.307

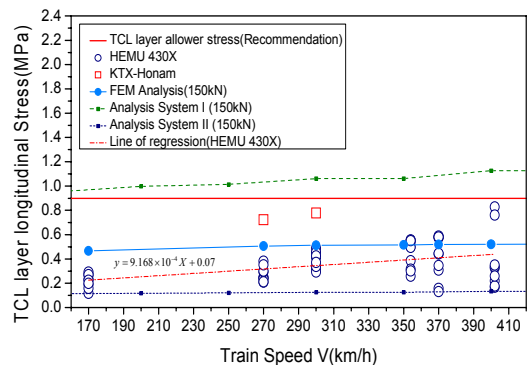


Fig. 12. Comparison of measured data, analysis data and TCL allowable stress

Table 6. Statics of evaluated TCL layer stress($\sigma_{1,b}$)

statics	V	170 km/h	270 km/h	300 km/h	354 km/h	370 km/h	402 km/h
Median value		0.216	0.275	0.394	0.445	0.42	0.381
Maximum value		0.291	0.382	0.488	0.557	0.589	0.827
Standard deviation		0.057	0.061	0.068	0.118	0.175	0.245
Median increasing ratio		1.000	1.273	1.824	2.060	1.944	1.764
Maximum value increasing ratio		1.000	1.313	1.677	1.914	2.024	2.842
Standard deviation increasing ratio		1.000	1.070	1.193	2.070	3.070	4.298

측정된 최대응력은 비결합상태(System I)의 400km/h 해석결과인 1.13MPa 이내(73.4%)에서 발생하였는데 철도설계지침 및 편람(KR-CODE)의 허용응력 추천값의 91.8% 수준으로 나타났다. KTX-호남 차량운행시 측정된 응력(KR-CODE 추천값)은 비결합상태 해석값의 69.1% 였고 허용응력값의 86.1%수준으로 나타났다. 시속 300km/h의 KTX-호남(축중 170kN)과 시속 402km/h의 HEMU 430X(축중 150kN)에서의 발생응력은 거의 유사한 값을 나타내었는데 후자가 6.2% 더 큰 것으로 측정되었다.

Fig. 12에 나타난 발생응력은 결합상태(System II)값 보다는 크고 비결합상태(System I) 보다는 작게 나타나 실제 슬래브 층의 결합상태는 비결합상태(System I)과 결합상태(System II)사이로 추정된다. 실제 발생응력은 속도증가에 따라 증가하는 경향을 보이며 속도와 케도슬래브응력을 변수로 하여 선형 회귀식을 도출하였다. 발생된 평균응력 중 300km/h에 평가된 값들은 유한요소해석으로 수행한 값들과 유사하게 나타났다.

속도가 증가하면서 발생응력의 표준편차는 점차 증가하는 것으로 나타났는데 402km/h 속도에서 발생응력의 표준편차는 170km/h와 비교했을 때 429.8% 큰 것으로 나타났다.

열차속도가 증가에 비례하여 표준편차는 점차 증가하는 것으로 나타났다. 케도틀립, 레일,차륜 의 불규칙도(irregularity), 케도지지강성의 불균일성에 의해 차륜-레일의 상호작용력은 증가하며 장대하고 연속적인 레일구조의 특성상 확률적인 특성을 보이는 것으로 보고된다.[2] 레일에 전달된 충격하중은 레일을 이산지지(discretely support)하는 체결장치와 체결장치 패드를 통해 분산되고 콘크리트 슬래브케도 침목과 케도슬래브층에 전달되어 Table 6과 같은 시험결과 값을 나타낸다고 추정된다. 속도증가에 따른 선로구조의 편차의 증가현상은 향후 추가적인 시험과 분석 및 고찰을 통해 보다

명확히 규명될 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 열차의 축중 및 속도변화에 따른 고속철도 슬래브 케도구조의 거동분석을 수행하였다. 해석을 수행하기 위해서는 독일철도 기준과 KR-CODE에 제시된 해석방법을 적용하여 열차속도와 하중을 주요 매개변수로 하여 해석을 수행하였다. 해석결과를 열차하중과 속도에 따라 케도슬래브의 응력은 증가하는 경향을 나타낸다. 케도의 최대응력은 비결합상태(System I)의 케도슬래브의 횡방향 응력($\sigma_{1,trans}$)에서 발생한다. 도상콘크리트층(TCL)의 응력($\sigma_{1,trans,long}$)이 케도슬래브(HSB)의 응력($\sigma_{2,trans,long}$)보다 크게 발생하는데 케도슬래브(TCL층)의 응력은 허용응력(권고값)을 다소 초과하지만 콘크리트기층(HSB층)의 응력은 횡방향,종방향의 허용응력(의무값)을 만족한다.열차하중, 속도변화와 상부노반 두께에 따른 응력변화 분석한 결과 노반두께가 300mm에서 증가할수록 하부노반응력은 감소하였지만 450mm까지 층두께가 증가하더라도 94%정도로 감소하여 층응력 감소효과는 크지 않은 것으로 나타났다.

호남고속철도 슬래브케도에서의 열차 축중 및 속도변화에서 발생되는 거동을 평가하기 위해 수행하여 HEMU 430X와 호남 KTX의 열차속도변화에 따른 내부 변형율을 측정하였고 이를 비결합상태(System I)와 결합상태(System II), 유한요소해석으로 수행하였던 값들과 측정정보정값, KR CODE에서 추천하는 허용응력값을 비교분석을 수행하였다. 케도슬래브층의 하부의 종방향 최대응력($\sigma_{1,b}$)을 평가결과는 170km/h ~ 402km/h의 속도증가에 따라 평균응력, 최대응력은 점차상승하였는데

402km/h 속도에서 발생응력은 170km/h 응력과 대비하여 각각 1.76배, 2.84배 정도로 증가하였다. 종방향에서 발생된 최대응력은 HEMU(시속 402km/h)와 호남-KTX(시속 300km/h)은 각각 KR 코드의 허용응력(KR-CODE 추천값)값의 91.8%, 86.1% 수준으로 나타나 KTX-호남이 HEMU보다 다소 크지만 서로 유사한 수준으로 모두 기준값이내의 거동을 나타냈다.

열차속도가 증가에 비례하여 표준편차는 점차 증가하는 것으로 나타났는데 향후 추가적인 시험과 분석 및 고찰을 통해 보다 명확히 규명될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 열차속도 및 축중변화에 따른 콘크리트 슬래브의 내부거동을 해석과 현장시험으로 규명하여 그동안 예측하지 못했던 속도증가와 축중저감의 영향을 규명하여 향후 궤도설계에 기반자료에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Railroad Research Institute, System Performance Evaluation of Next High Speed Train, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport., Study on design standards of track systems for the high-speed railway at 400km/h, KAIA, 2015.
- [3] Kang Y.S. et al, Study on the Behavior of Curved Track in Honam High-Speed Line considering the Running Performance for HEMU 430-X, KAIS, Vol.14 No.8 4068-4076, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.8.4068>
- [4] Eisenmann,J, Leykauf,G, Feste Fahrbahn für Schienenbahnen, Beton Kalender 2000, 291-326 (2000)
- [5] Korea Railway Network Authority, KR CODE 2012, KR C-14(Track), Korea Railway Network Authority, 2012.
- [6] Korea Rail Network Authority, Report of practical application design for Honam high Speed line(2nd section of track work) 2012.
- [7] DB Systemtechnik, Requirements Catalog for the Construction of the Permaent way(AKFF) 2002.
- [8] DIN 1045-1(2001), Plain, reinforced and prestressed concrete structures 2001.
- [9] Bernhaed Lichtberger, Track Compendium, Eurail press(Hamburg,Germany), 309-345, 2005.
- [10] Coenradd Esveld, Modern Railway Track 2nd Edition, MRT-Production(Netherlands), 71-108, 2001.
- [11] Kim J.I, Ahn S.J., Kwon J.W., Kim J.I., Analysis of the Behavior of Concrete Track on Earthwork, KSR conference 2011, 3214-3219, 2011.
- [12] Kwon J.W., Ahn S.J., Hwang H.S., Choi W.I., Analysis

of the Behavior of Section thickness Slab Track Considering the Increase in Train Speed, KSR conference 2014, 384-389, 2014.

전 희 광(Hee-Kwang Chun)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울과학기술대학교 토목공학과 (공학사)
- 2009년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 (공학석사)
- 2013년 8월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 (박사수료)
- 1987년 12월 ~ 현재 : 한국철도시설공단 (시설본부 처장)

<관심분야>

고속철도 시설관리, 철도교량, 콘크리트궤도

강 윤 석(Yun-Suk Kang)

[정회원]



- 1996년 6월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과(석사)
- 2006년 2월 : 고려대학교 대학원 구조대학원(박사)
- 2008년 1월 ~ 2011년 3월 : 국토해양부 철도기술 전문위원회 위원
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

고속철도 선로구축물 속도향상, 궤도구조

박 용 곁(Yong-Gul Park)

[정회원]



- 1980년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (공학사)
- 1988년 8월 : 한양대학교 대학원 (공학석,박사)
- 2011년 5월 : 한국철도건설협회(회장)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수

<관심분야>

손상 및 피로, 철도구조, 궤도