

## 궤도거동에 대한 H형 침목의 영향

윤경민<sup>1</sup>, 서동석<sup>2</sup>, 김해곤<sup>3</sup>, 황광하<sup>4</sup>, 임남형<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국철도공사 아산시설사업소, <sup>3</sup>한국철도공사 대전시설사업소,  
<sup>4</sup>삼표이엔씨 기술연구소

## Effects of H-type Sleeper on the Track Behavior

Kyung-Min Yun<sup>1</sup>, Dong-Seok Seo<sup>2</sup>, Hae-Gon Kim<sup>3</sup>,  
Kwang-Ha Hwang<sup>4</sup>, Nam-Hyoung Lim<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University

<sup>2</sup>Asan Railway Maintenance Office, KORAIL

<sup>3</sup>DaeJeon Railway Maintenance Office, KORAIL

<sup>4</sup>Railway R&D Dept, Sampyo E&C

**요약** 최근 철도의 고속화에 따라 철도수송의 안전성에 대한 요구는 증가되며, 기존 선로에 더 무거운 축중의 차량이 운행토록 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족하기 위하여 기존 선로의 레일의 중량을 증가시키고, 장대레일화를 진행해왔다. 최근 개발된 H형 침목은 기존의 일자형 PC침목에 비해 저항 특성이 높아 궤도 강성 증대와 궤도틀림 저감을 기대할 수 있으나, H형 침목 부설에 따른 궤도 특성 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 통하여 H형 침목이 부설된 궤도의 특성을 분석하였다.

**Abstract** The demand for improved rail transportation safety is growing due to the increased speeds of current railways. In addition, freight trains with heavier axle loads are required to run on conventional railways. In order to meet these requirements, increased rail weights and the application of a CWR system have been introduced on conventional railways. The H type sleeper, which has higher lateral resistance than the existing mono sleepers, has been recently developed to increase track stiffness and reduce track irregularities. In this paper, the effects of a H-type sleeper on track behavior were investigated by 3-Dimensional F.E. analysis.

**Key Words** : ballast pressure, F.E.Analysis, H type sleeper, load distribution ratio, sleeper

### 1. 서론

장대레일 궤도의 좌굴에 저항하는 도상자갈의 마찰저항력에는 한계가 있으며 시간이 지날수록 열차하중 등에 의해 자갈이 마모되고 침하되어 침목의 도상횡저항력과 종저항력이 약화된다. 이러한 취약구간은 잦은 유지보수가 필요하고 보수가 적기에 이루어지지 못할 경우에는 궤도의 좌굴로 이어지게 되어 열차 탈선사고로 연결될 수 있다. 충분한 저항력을 확보하기 위하여 실시하는 도

상자갈 더듬기를 통한 자갈보충 등의 방법은 자갈이 열차에 접촉하는 등 건축한계의 문제로 자갈더듬기 높이에 한계가 있다. 또한 자갈더듬기를 높게 할 경우 침목교환 시 어려움을 겪게 된다.

기존 PC침목 구간에서는 도상횡저항력 및 도상종저항력을 현재보다 획기적으로 증대시키는 것은 현실적으로 어려우므로 도상의 횡저항력 및 종저항력 증대를 위해 침목의 구조변경을 통한 새로운 침목의 개발이 필요하게 되었다. 이를 위해 기존 PC침목에 비해 침목의 횡

본 연구는 국토교통부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호14RTRP-B065581-02)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Nam-Hyoung Lim(Chungnam National Univ.)

Tel: +82-42-821-7005 email: nhrim@cnu.ac.kr

Received April 30, 2015

Revised May 14, 2015

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

저항력을 획기적으로 증대시키고 유지보수가 용이하며, 비용을 절감할 수 있는 H형 침목(Fig. 1)이 개발되었다.[1] H형 침목은 Fig. 1과 같이 기존일자형 침목과 유사한 Tie 1, Tie 2 횡침목을 Conn으로 명명된 연결부재로 결합시킨 형상이다. 기존의 H형 침목 개발연구에서는 침목 설계를 위한 구조해석 및 현장부설을 통한 성능 검증연구가 수행되었으나[1], 다양한 현장조건을 고려한 H형 침목 궤도의 거동특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

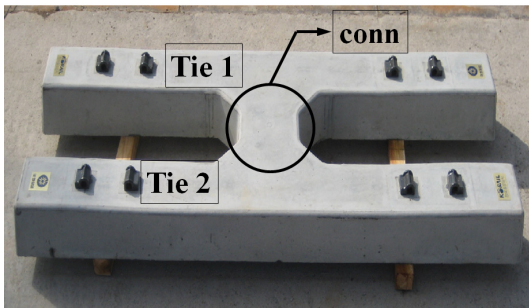


Fig. 1. H-type sleeper

본 연구에서는 H형 침목 부설 시 궤도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 범용구조해석프로그램 Abaqus 6.13[2]을 이용한 3차원 수치해석을 하였으며, 도상의 지지조건이 균일한 경우 기존 침목 부설궤도와 비교하여 하중분배를 변화, 도상압력 크기 및 분포 변화, 레일의 처짐을 분석하였다.

## 2. 해석모델

유한요소해석을 통하여 기존 일자형 침목과 H형 침목 부설 시 거동차이를 분석하기 위하여 3차원 수치해석 모델을 적용하였다.

### 2.1 유한요소 해석모델

수행된 해석 모델 제원은 Fig. 2와 같다. 레일은 UIC 60Rail이며, Beam element(B31)를 사용하여 모델링하였다. 체결장치는 spring element와 동일한 기능을 갖는 connection element를 사용하였으며 종방향, 횡방향, 수직방향 그리고 각 방향에 대한 회전자유도를 고려하였다. 체결장치의 물성치는 실제 부설 시 사용된 e-clip 물

성치를 사용하였으며, 한상운 외[3]에서 실험을 통해 제시한 강성을 사용하였다. 침목은 Solid element(C3D8)를 사용하였으며 시험 부설된 침목의 크기와 동일하게 고려하였다. Fig. 1과 같이 Conn부재와 횡침목연결부의 라운딩 처리는 전체적인 거동에 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여 고려하지 않았다. 일자형 침목(Mono sleeper)의 크기는 동일한 조건에서 침목 형상에 따른 거동을 살펴보기 위한 것이므로 H형 침목에서 Conn부분을 제외한 횡침목 Tie 1의 크기로 모사하였다. 도상의 경우 응력 분포를 살펴보기 위하여 Solid element(C3D8)를 이용하였으며 두께는 0.35m로 하였다. 해석 시 사용된 물성치는 Table 1, 2와 같으며, Fig. 3은 유한요소 3차원해석 모델 전경이다.

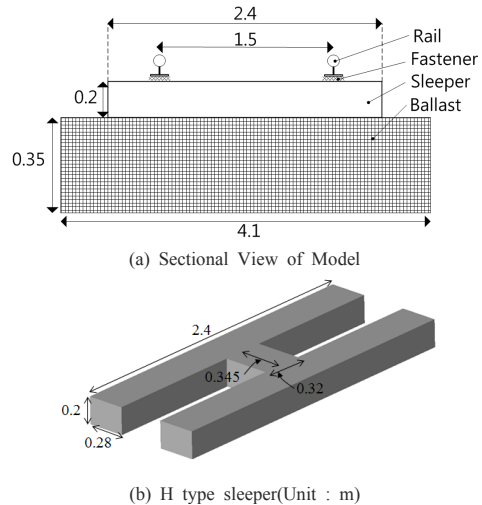


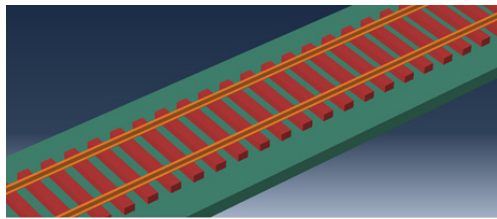
Fig. 2. Modeling for H type sleeper

Table 1. Material property

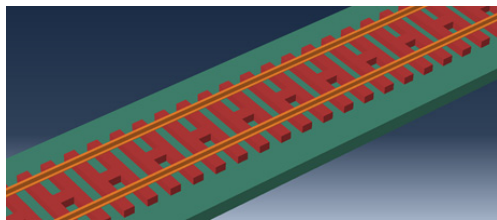
Material Property	Track Component		
	Rail	sleeper	Ballast
Modulus of elasticity, $E$ ( $N/m^2$ )	$2.1 \times 10^{11}$	$3.5 \times 10^{10}$	$1.8 \times 10^8$
Poisson's ratio, $\nu$	0.3	0.22	0.27
Unit weight, $\gamma$ ( $kg/m^3$ )	7,830	2,600	1,650

Table 2. Property of fastener[3]

Stiffness of Pad-Fastener System	Value(unit)
Longitudinal Translation/ Longitudinal Rotation	$6.0 \times 10^6 \text{N/m}$ $6.0 \times 10^4 \text{Nm/rad}$
Vertical Translation/ Vertical Rotation	$3.5 \times 10^7 \text{N/m}$ $6.0 \times 10^4 \text{Nm/rad}$
Lateral Translation/ Lateral Rotation	$2.6 \times 10^7 \text{N/m}$ $6.0 \times 10^4 \text{Nm/rad}$



(a) Mono sleeper



(b) H-type sleeper

Fig. 3. 3D model of track in Abaqus

하중은 동적할증계수를 고려하지 않았으며, 다음과 같이 유효윤중[4]을 고려하였다.

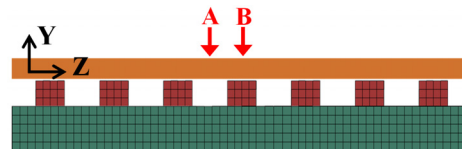
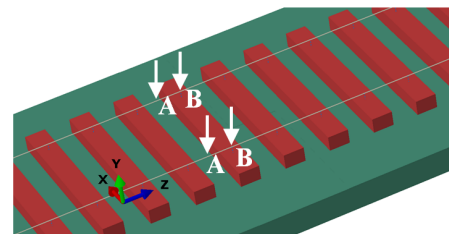
$$\text{축중 } (P) = 220 \text{ kN}$$

$$\text{유효윤중 } (Q_{eff}) = \frac{P}{2} \times 1.3 = 132 \text{ kN}$$

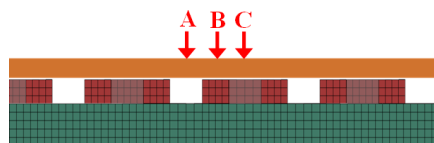
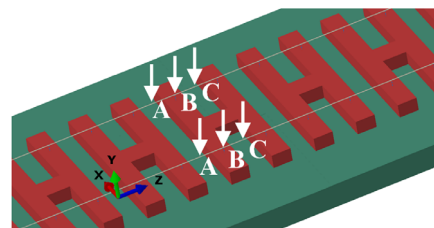
하중은 Fig. 4와 같이 레일에 연직방향으로 재하하였으며 다양한 위치를 고려하였다. 일자형침목의 경우 침목과 침목 사이(Fig. 4, (a)의 A), 침목 상면(Fig. 4, (a)의 B)에 재하하였으며, H형 침목의 경우 H형 침목과 H형 침목 사이(Fig. 4, (b)의 A), H형 침목의 횡침목 상면(Fig. 4, (b)의 B), H형 침목의 횡침목 Tie 1과 Tie 2 사이(Fig. 4, (b)의 C)에 재하하였다.

경계조건은 레일의 양 끝단 및 도상의 하부를 종방향, 수직방향, 수평 방향의 병진을 구속하였다. 기존의 일반적인 탄성 해석 시 침목과 도상은 node를 공유하여 상하 방향으로 일체 거동하는 것으로 해석한다. 그러나 본 연

구에서는 침목과 도상상면을 분리시켜 contact조건을 고려하였다. contact 조건은 일반적으로 node-to-surface와 비교하여 접촉응력의 정확도가 높은 Surface to surface을 사용하였다. 수직방향으로 수치적 softening으로 인한 수렴성이 좋은 Penalty method를 사용하였으며, 상대적인 미끄러짐 현상은 대부분의 문제에 일반적으로 적용이 가능한 Finite-sliding을 적용 하였다. 수렴도 해석을 통하여 해석 모델 길이는 20m로 하였으며, mesh의 크기는 0.075m(75mm)로 결정하였다.



(a) Mono sleeper



(b) H-type sleeper

Fig. 4. Loading case

### 2.2 해석모델의 타당성

수치 해석모델의 타당성 검토를 위하여 KR C-14030[4]을 참고 하여 레일의 수직 처짐(Fig. 5, Theoretical analysis)을 산정하였으며(Appendix 1), 그 결과와 일자형침목에서 침목과 도상이 merge된 경우로 node를 공유하는 모델의 경우(Fig. 5, Mono sleeper(No

contact))와 Contact 조건이 삽입된 경우로 node를 분리한 경우(Fig. 5, Mono sleeper(Contact)), Contact 조건이 고려된 H형 침목해석결과(Fig. 5, H type sleeper(Contact))와 비교하였다.

해석 결과 최대 처짐량 비교시 최대 차이는 5% 이내로 이론해석 결과와 매우 유사하게 나타났다.

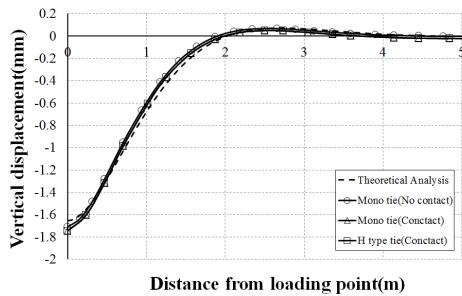


Fig. 5. Verification of analysis model

### 3. 궤도거동 특성

#### 3.1 레일처짐

침목 종류별 하중조건에 따른 레일 처짐을 분석하였다. 일자형침목 및 H형 침목의 하중위치에 따른 레일의 처짐은 Fig. 6과 같으며, 최대처짐은 Table 3과 같다.

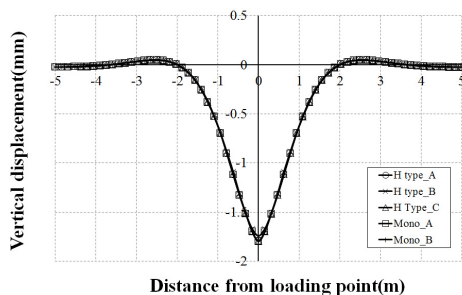


Fig. 6. Deflection of Rail(Mono sleeper, H type sleeper)

Table 3. Maximum deflection of rail

sleeper	Load	Value(mm)
Mono	A	-1.80
	B	-1.75
H	A	-1.79
	B	-1.74
	C	-1.79

하중 위치 및 침목종류에 따라 레일의 처짐 형상은 유사하게 나타났으나, 최대 처짐은 하중재하 위치에 따라 약 0.05mm의 차이가 나타났다. 하중이 침목 부재 사이에 재하된 경우인 Fig. 4, Mono sleeper의 A와 H type sleeper의 A, C가 유사하게 나타났으며, 침목 부재 직상부에 재하된 경우인 Fig. 4, Mono sleeper의 B와 H type sleeper의 B가 유사하게 나타났다.

전반적으로 레일 처짐에 대해서는 H형 침목과 기존 일자형 침목의 영향이 유사한 것으로 판단된다.

#### 3.2 윤증분배율

궤도상에 하중(윤증) 작용 시 침목의 종류에 따른 하중분배율을 분석하였다. 분배율을 산정하기 위하여 침목에 하중으로 재하되는 RSL(Rail Seat Load)인 체결장치를 모사한 connection element의 수직방향 단면력을 윤증으로 나누어 산정하였다.

일자형 침목, H형 침목의 하중 재하 시 RSL은 Table 4와 같다. 하중분배율 분석 결과는 Fig. 7과 같으며, 하중재하 위치에 따라 침목부재 사이에 재하된 경우(a), 침목 부재 직상부에 재하된 경우(b)를 분석하였다.

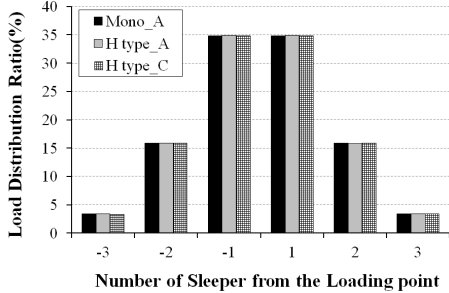
하중분배율은 하중이 침목 부재 사이에 재하된 경우(Fig. 4, Mono sleeper의 A, H type sleeper의 A, C) 하중재하 위치로부터 가장 근접한 침목부터 34.9%, 15.9%, 3.4%로 나타났으며, 침목 부재 직상부에 재하된 경우(Fig. 4, Mono sleeper의 B, H type sleeper의 B) 하

Table 4. RSL(Rail Seat Load)

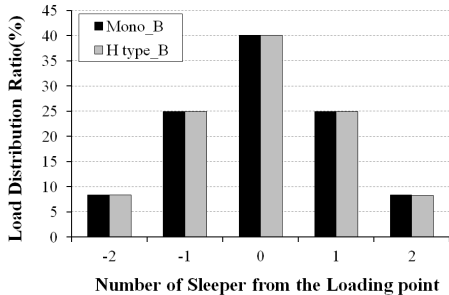
Number of sleeper from the loading point	Rail seat load(kN)				
	Mono sleeper		H type sleeper		
	Load A	Load B	Load A	Load B	Load C
-3	4.5	0.6	4.5	0.6	4.5
-2	21.0	11	20.9	11.0	21.0
-1	46.0	32.9	46.0	32.9	46.0
0	-	52.9	-	53.0	-
1	46.0	32.9	46.1	33.0	46.0
2	20.9	11	20.9	11.0	21.0
3	4.5	0.6	4.5	0.6	4.5

중재하위치로부터 40.1%, 24.9%, 8.3%로 나타났다.

H형 침목 및 일자형침목이 부설된 궤도에서 하중 조건에 따른 하중 분배율은 유사하게 나타났다.



(a) Loading between the sleeper element



(b) Loading on the sleeper element

Fig. 7. Load distribution ratio(Mono sleeper, H type sleeper)

### 3.3 도상압력분포

일자형침목이 부설된 궤도, H형 침목이 부설된 궤도에 하중 작용 시 도상압력크기 및 분포를 분석하였다. 분석을 위하여 최대 압력이 발생하는 일자형 침목과 H형 침목의 횡침목 직하부 도상단면을 기준으로 하였으며, H형 침목의 경우 Conn 부재의 직하부 도상단면을 추가 분석하였다(Fig. 8).

일자형침목의 하중 재하위치에 따른 도상압력분포는 Fig. 9와 같다. 일자형침목과 침목 사이에 하중 재하 시 침목 하면의 도상 최대 압력은 레일 직하부 도상에 발생하고 그 크기는 0.13MPa(Fig. 9, a)로 나타났으며, 침목 상에 하중 재하 시 최대 압력은 0.15MPa(Fig. 9, b)로 나타났다.

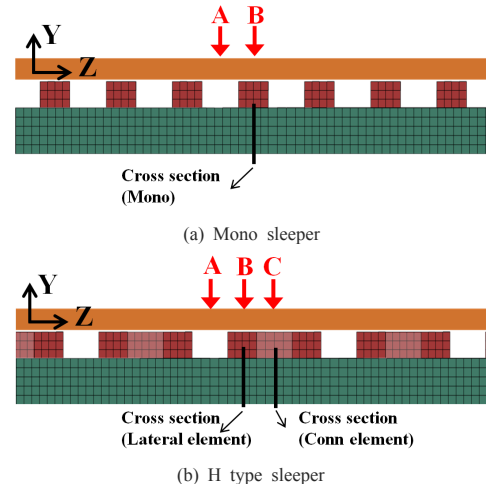


Fig. 8. Cross section according to sleeper type

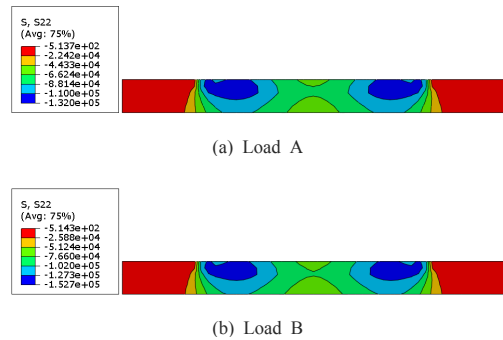


Fig. 9. Ballast pressure contour(mono sleeper)

H형 침목의 횡침목 직하부에서 하중 재하위치에 따른 도상압력분포는 Fig. 10과 같다. H형 침목과 침목 사이에 하중 재하 시 침목 하면의 도상 최대 압력은 0.14MPa(Fig.10, a)로 나타났으며, H형 침목의 횡침목 상부에 하중 재하 시 최대압력은 0.16MPa(Fig. 10, b)로 나타났고, H형 침목의 횡침목 사이에 하중 재하시 최대 압력은 0.13MPa(Fig. 10, c)로 나타났다.

H형 침목의 Conn 부재의 직하부에서 하중 재하위치에 따른 도상압력분포는 Fig. 11 같다. Fig. 11과 같이 H형 침목과 침목사이에 하중 재하 시 Conn 부재 하면에서 최대 도상압력은 0.06MPa(Fig. 11, a)로 나타났으며, H형 침목의 횡침목 상부에 하중 재하시 최대 도상압력은 0.07MPa(Fig. 11, b)로 나타났고, H형 침목의횡침목 사이에 하중 재하시 Conn 부재 하면에서 최대 도상압력은 0.06MPa(Fig. 11, c)로 나타났다.

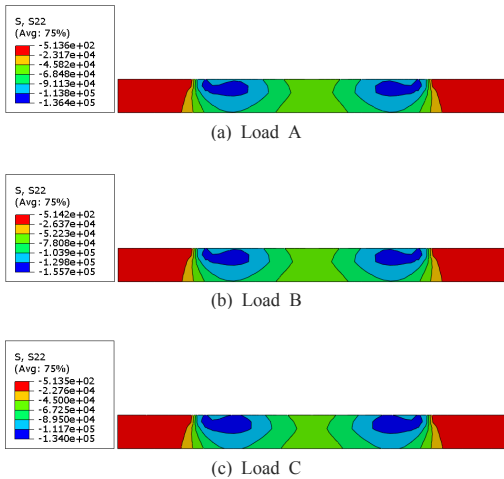


Fig. 10. Ballast pressure contour(H type sleeper(lateral element))

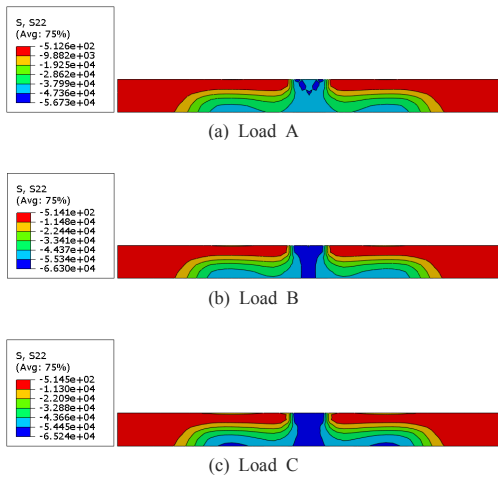


Fig. 11. Ballast pressure contour(H type sleeper(Conn element))

따라서 Conn부재 하면에서 도상압력은 매우 작게 발생하며, 실제 현장에서 중앙부 다짐을 하지 않을 시 압력은 더욱 작을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 H형 침목이 자갈궤도의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위한 기초연구로써, 유한요소해석을 통하여 기존 일자형침목과 H형 침목이 부설된 궤도의 거동

을 비교하였다.

거동비교를 위하여 침목종류 및 지지조건에 따른 하중분배율, 레일의 처짐, 도상압력분포 및 크기를 분석하였으며 일자형침목의 경우와 비교 하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. H형 침목 및 일자형침목이 부설된 궤도에서 하중 조건에 따른 레일의 처짐, 하중 분배율, 도상의 압력 및 압력 분포는 매우 유사하게 나타났다.
2. 기존 일자형 침목이 부설된 궤도에 H형 침목을 대체 부설 시 유사한 궤도의 거동이 나타날 것으로 판단된다.
3. 운중작용에 따른 침목 중앙부의 도상압력이 일자형 침목에 비해 H형 침목에서 작게 발생하는 것으로 분석하여 침목 중앙부에 발생할 수 있는 부모멘트를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다. 단, H형 침목의 Conn부재에 발생하는 도상압력이 유효한 값을 나타내고 있으므로 이에 대한 설계가 고려되어야 한다.

#### References

- [1] H.G.Kim,, A study on Structural Analysis and Characteristics of the H-typed Railway Tie, Doctor's Thesis, Chungnam National University, 2014
- [2] ABAQUS/Standard User's Manual - Version 6.13, Dassault Systemes, 2013
- [3] S.Y.Han, N.H.Park, N.H.Lim, Y.J.Kang, Sensitivity of the continuous Welded Rail and the Fastener on the Track Stability, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 24, No. 4A, pp. 719-726, 2006
- [4] KR(KOREA RAIL NETWORK AUTHORITY), "KRC-14030 : Ballast Track Structure", January, 2014

#### Appendix 1

KR C-14030[4]에서 제시된 하중(운중)에 대한 레일의 처짐은 다음과 같이 산정하였다.

$$y = \frac{QL^3}{8EI} \eta(x) \dots \dots \dots [Eq.1]$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}} \dots\dots\dots [\text{Eq.2}]$$

$$K = \frac{K_T}{a} \dots\dots\dots [\text{Eq.3}]$$

$$\eta(x) = e^{\frac{-x}{L}} \left[ \cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right] \dots\dots\dots [\text{Eq.4}]$$

여기서,  $y$ : 레일처짐량(mm)  
 $x$ : 하중 작용점에서 이격거리(mm)  
 $Q$ : 윤중(mm)  
 $E, I$ : 레일의 탄성계수(N/m<sup>2</sup>),  
 단면2차모멘트(m<sup>4</sup>)  
 $L$ : 특성길이(mm),  
 $K$ : 궤도계수(kN/mm/mm)  
 $K_T$ : 지지점의 궤도 합성  
 스프링정수(kN/mm)  
 $a$ : 침목 간격(mm)

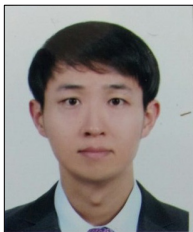
**윤 경 민(Kyung-Min Yun) [정회원]**



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>  
 구조공학, 궤도공학

**서 동 석(Dong-Seok Seo) [정회원]**



- 2015년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2009년 5월 ~ 현재 : 한국철도공사 근무

<관심분야>  
 구조공학, 궤도공학

**김 해 곤(Hae-Gon Kim) [정회원]**



- 2005년 8월 : 부산대학교 산업 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2012년 4월 : 철도공사 연구원 기술연구처장
- 2014년 6월 ~ 현재 : 한국철도공사 대전시설사업소장

<관심분야>  
 구조공학, 궤도공학

**황 광 하(Kwang-Ha Hwang) [정회원]**



- 2009년 2월 : 우송대학교 철도건설환경공학 대학원 (공학석사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 삼표이앤씨 기술연구소 근무
- 2015년 5월 ~ 현재 : 삼표이앤씨 기술연구소 연구소장

<관심분야>  
 구조공학, 궤도공학

**임 남 형(Nam-Hyoung Lim) [종신회원]**



- 1996년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2005년 3월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2005년 4월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>  
 구조공학, 강구조, 궤도공학