도시철도 궤도구조별 궤도지지강성 평가를 위한 실험적 연구

A Study on the Evaluation of Track Support Stiffness
on the Various Track Type in Urban Transit이동욱[†] · 박용걸¹ · 최정열²

Dong-Wook Lee · Yong-Gul Park · Jung-Youl Choi

Abstract Track support stiffness which affected track maintenance and riding comfort had a big effect on the track and train. Also, track support stiffness of the track design which was based on theory differs from track support stiffness of the track generated on the field. Track support stiffness was generated by several factors such as dynamic wheel loads, vertical displacement of track, and stress at rail bottom on the field test. With the results of the field test was compared with theoretical value. This paper analyzed that track support stiffness of ballast depended on condition of ballast, and support stiffness of concrete track also depended on the characteristic of track structures such as, normal elastic fastening system, rail floating system and sleeper floating system. However, on the ballast and concrete track, the designed track support stiffness was underestimated less than the measured track support stiffness. When the track condition was estimated on service line, it would not consider the track condition on the field. Therefore, this study proposed the various track type and the range of track support stiffness based on the experimental test.

Keywords : Track type, Field test, Track support stiffness

초 록 궤도지지강성은 차량이 주행함에 있어 궤도와 차량에 매우 큰 영향을 미치며, 이는 궤도 파괴이론에 근거한 궤도유지관리와 승객의 승차감에 영향을 준다. 또한 궤도설계 시 고려되는 궤도지지강성은 이론에 근거한 계산치이며 이는 공용중인 궤도에서의 실제 궤도지지강성과는 상이하다. 따라서 본 연구에서는 현장측정을 통해 동적 윤종과 레일수직변위, 레일저부응력을 측정하여 궤도지지강성을 산출하였고 이를 이론 궤도지지강성과 비교 분석하였다. 현장측정결과 자갈도상궤도에서의 궤도지지강성은 자갈의 상태에 직접적인 영향을 받으며 콘크리트궤도의 경우 궤도구조별(일반적인 침목매입식, 레일폴로팅, 침목플로팅) 궤도구조특성에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러나 자갈 및 콘크리트궤도 모두 설계 시 적용되는 궤도지지강성이 측정된 궤도지지강성에 비해 과소평가되는 것으로 분석되었다. 이는 공용중인 궤도의 상태평가 시 현장의 궤도상태를 반영하지 못한 예측 및 평가가 될 소지가 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 궤도구조형식 및 궤도상태별 궤도지지강성의 범위를 실험적으로 제시하였다.

주요어 : 궤도구조, 현장측정, 궤도지지강성

1. 서 론

궤도지지강성은 주행열차 하중에 대한 궤도의 지지성능을 나타내는 궤도성능 및 품질평가의 지표로써 궤도시스템별 구조적 특성 및 탄성범위에 직접적인 영향을 받으며 궤도와 차량 모두에게 매우 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다[1]. 또한 궤도지지강성은 도상형식 및 궤도구조별(Elastic Fastening, Rail floating, Sleeper floating 등)로 각기 상이한 특성치를 갖게 되며 따라서 특정 궤도시스템의 고유특성이라고 볼 수 있다. 현재 국내 운행선 궤도구조에 대한 궤도지지강성과 관련한 연구는 주로 터널 및 교량·토공 접속부에서의 궤도

강성변화에 따른 궤도의 동적거동과 관련한 이론 및 실험적 연구가 진행되었으며 기존 연구결과 궤도지지강성은 동적윤종변동 및 레일과 침목처짐에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다[2,9,10]. 그러나 현재까지 국내 도시철도에서 사 용중인 다양한 형식의 궤도에 대한 궤도지지강성을 실험적으로 입증한 연구실적은 부족한 실정이며 이에 본 연구에서는 궤도설계 및 궤도상태평가 등에 활용 가능한 공용중인 다양한 궤도구조별 궤도지지강성을 실험적으로 입증하고자 도 상형식 및 궤도구조별 궤도지지강성에 대한 이론적 고찰을 수행하고 설계 시 고려되는 이론 궤도지지강성과 현장측정을 통해 획득한 측정 궤도지지강성을 비교하여 공용중인 운행선 궤도구조의 궤도지지강성을 평가하고자 한다.

2. 궤도지지강성 산정 이론

일반적인 궤도구조의 해석모델은 Fig. 1과 같이 각각의 궤

[†]교신저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과
E-mail : dwlee9@hanmail.net

¹서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과

²베를린공과대학교 철도·궤도공학과

Fig. 1 Elastic composition of various track type

도구성품이 특정 스프링강성을 갖는 스프링요소로 연결되어 있는 선형 스프링 모델이다. 이때 궤도구조별 탄성수준을 파악하기 위한 스프링계수 산정에는 레일 및 침목 등과 같은 궤도구성품의 강성은 배제되며 오로지 탄성재료만의 구성으로 산출되어진다. 본 연구에서는 검토대상 궤도구조의 구조적 특성을 고려하여 궤도구조별 레일지지점 탄성계수(궤도 종합스프링계수)를 산출하였으며 침목간격을 감안한 궤도지

지강성을 산출하여 Table 1에 나타내었다.

레일지지점 스프링계수 k 를 산정하는 접근법으로는 북미와 유럽의 여러 연구자들이 레일패드, 침목, 도상 및 노반으로 이루어져 있는 자갈도상궤도의 레일지지점 기초를 직렬로 배치된 각기 다른 스프링강성을 가진 선형스프링의 층으로 나타낼 수 있다고 가정하여 식(1)과 같이 나타내었다.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_s}} \quad (1)$$

여기서, k_p 는 레일패드 스프링계수이고, k_b 는 도상 층의 스프링계수이고, k_s 는 노반의 스프링계수이다.

식(1)을 이용하여 검토대상 궤도구조의 구조적 특성을 고려한 궤도구조별 레일지지점 탄성계수(궤도 종합스프링계수)와 궤도지지강성을 산출하여 Table 1에 나타내었다. 레일지지점 스프링계수 산정에 사용된 탄성재의 특성치는 해당 궤도구조의 설계 도서를 참조하여 설계당시에 고려된 수치를 적용하였다. 또한 이론 궤도지지강성의 경우 측정 궤도지지강성과의 비교를 위해 직접 현장에서 측정개소의 침목간격을 측정하여 해석에 적용하였다.

또한 레일지지점 스프링계수와 침목간격을 고려한 궤도지지강성에 직접적인 영향을 받는 레일의 특성길이는 침목과 침목 사이 레일 중앙부에 하중이 작용할 때 하중이 레일에 전달되어 영향을 미치는 길이를 의미하며 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L = 4\sqrt{\frac{4EI}{k}} \quad (2)$$

여기서, k 는 레일지지점 스프링계수이며, E 는 레일의 휨 강성이다. 탄성계수 E 는 일반적인 레일강의 탄성계수인 $E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ 를 적용하였고, 단면 2차 모멘트 I 는 60kg 레일의 단면 2차 모멘트인 $3,090 \text{cm}^4$ 를 사용하였다. Table 2는 궤도구조별 레일지지점 스프링계수를 이용한 이론적 레일특성길이(L)의 산출결과이다.

Table 1 Track support stiffness of track type

구 분		Ballast		Concrete				
				Elastic Fastening		Rail Floating	Sleeper Floating	
		Bad	Well	E Type	B Type		L Type	P Type
탄성재 물성치 (kN/mm) (정적/동적)	Wedge	-	-	-	-	4.2/6.3	-	-
	레일패드	400	600	600	-	400	450	
	방진패드	-	14.9/22.3	17.5/26.25	-	20/30	15/22.5	
	방진상자	-	-	-	-	2000	2000	
	도상	200	-	-	-	-	-	
레일지지점 스프링계수 (kN/mm), (정적/동적)		133.3	14.54/21.55	16.77/25.15	4.2/6.3	18.9/27.5	14.14/21.21	
침목간격(mm)		625	618	625	634	625	625	
이론 궤도지지강성 (kN/mm), (정적/동적)		213.28	23.53/34.87	26.83/40.24	6.63/9.94	30.2/44.0	22.62/33.94	

Table 2 Rail characteristic length of track type

Track Type		Rail characteristic length(L)
Ballast		37.36cm
Elastic Fastening	E Type	58.91cm
	B Type	56.68cm
Rail Floating		80.12cm
Sleeper Floating	L Type	55.42cm
	P Type	59.15cm

3. 현장측정

3.1 현장측정 개요

본 연구의 대상선로는 현재 지하철 차량이 운행중인자갈레도 2개소(도상상태 양호 및 불량구간)와 콘크리트레도가 부설된 5개소로써 총 7개소를 선정하였으며 콘크리트레도는 레도시스템별로 구분하여 일반레도 구간, 레일 플로팅, 침목 플로팅구간을 측정하여 비교하였다. 측정구간은 모두 60kg 장대레일을 사용하는 직선 선로이며 현장 측정에서 궤간 및 캔트측정결과 궤간 및 캔트는 직선선로의 조건에 부합하는 것으로 나타나 내·외측 레일에 작용하는 윤중의 크기는 큰 차이가 없을 것으로 판단되었다. 또한 해당레도의 설계 당시의 탄성수준을 파악하기 위해 설계 도서를 참조하여 설계 당시에 고려된 레도구조별 레일지지점 스프링 계수를 정리하여 Table 3에 나타냈다. 측정구간의 제원 및 전경은 Table 3 및 Fig. 2와 같다.

3.2 레도 동적응답 측정

3.2.1 동적 윤중측정[6][7][8][11]

대상 구간에서 실운행 차량 통과 시 레도에 작용하는 동적 윤중의 특성을 파악하고자 침목간 레일 중앙부 레일 복부에 2축 스트레인게이지를 설치하여 윤중측정을 수행하였으며 측정신호를 MGC-Plus(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 이용하여 분석하였다. 현장에서 측정되어지는 동적 윤중은 운행열차의 윤중 및 횡압

Fig. 2 View of field test track

을 상호간섭 없이 안정적으로 측정하기 위해 Wheatstone Bridge를 구성하는 회로도를 이용하여 Fig. 3과 같이 침목간 중심에서 각각 100mm 떨어진 위치에 레일복부의 중립축에 45° 각도를 가지고 8방향으로 결선된 윤중게이지를 부착하여 측정하였다[7]. 윤중 게이지는 내·외측 레일(2개소)에 스트레인게이지를 부착하여 측정하였다. 현장계측 시 주행 열차하중에 의해 발생한 윤중을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생되지 않도록 1kHz 이상의 충분한 수집율(Sampling Rate)을 설정하였다.

레일에 부착한 스트레인게이지를 통하여 직접 측정할 수 없는 변형률 데이터로써 레일의 전단변형률과 비례하여 발생한다. 전단변형률은 역시 윤중과 비례하여 발생하므로 데이터 수집장비를 통하여 얻은 변형률을 실제 작용하는 윤중의 절대량으로 환산하기 위하여 윤중 검정(Calibration)을 수행하고

Table 3 Properties of field test site [4][5]

구 분	Ballast Track		Concrete Track				
			Elastic Fastening		Rail Floating	Sleeper Floating	
	Bad	Well	E Type	B Type		L Type	P Type
통과톤수(MGT)	3.5	6.6	0(시험선)	0.3	0(시험선)	2.5	3.1
곡선반경(R)	직선		직선	직선	직선	직선	직선
레 일	장대, 60kg		장대, 60kg	장대, 60kg	장대, 60kg	장대, 60kg	장대, 60kg
레일지지점 정적 스프링계수* (kN/mm)	133.3		14.54	16.77	4.2	18.9	14.14
침 목	PC침목		RC Block	Precast Slab Panel	-	RC Block	PC침목
침목간격(mm)	625		618	625	634	625	625

※주. 해당 레도설계 시 고려된 레일지지점 스프링계수를 의미함.(설계도서 참조)

Fig. 3 View of wheel load sensor installation

Fig. 4 View of the test of the load calibration

이때 얻어진 정적 윤중 데이터를 이용하여 선형회귀분석 (Linear Regression)을 통 해 환산 윤중을 도출함으로써 동적 윤중값(kN)을 구하였다. Fig. 3과 같이 윤중게이지를 레일에 부착하고, 유압잭을 이용하여 Fig. 4와 같이 0kN에서 40~50kN까지 정적하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생하는 계측값을 기록하였다. 이때 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복하였다

여기서 얻은 발생변형률과 작용하중과의 관계에 대한 선형관계식은 선형회귀분석법(Linear Regression)을 이용하여 도출하였다. Fig. 5는 10kN 부터 40kN까지 단계별 재하한 정적 작용하중을 동적으로 계측하여 입력으로 재하한 정적 하중이 일정해지는 구간의 변형률 데이터의 평균값을 하중-변형률 선도로 도시하였으며, 측정 변형률을 윤중(하중단위)으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과를 나타낸다.

Fig. 5 Linear regression of the measured Wheel load data

3.2.2 레일수직변위 측정

열차주행 시 발생하는 레일의 동적 수직변위를 측정함으로써 측정구간을 통과하는 열차에 따른 동적 하중의 영향을 평가할 수 있으며 레일에 작용한 윤중과 함께 측정 궤도지지강성 산출시 사용될 수 있다. 변위계 설치에 대한 지그는 자갈도상궤도의 경우 도상자갈의 변형에 간섭을 받지 않도록 터널 인버트 바닥면에 견고히 지지시켜 레일 자체의 변위만을 계측하였으며, 콘크리트궤도의 경우 열차하중에 의한 도상 슬래브층의 변위는 없는 것으로 감안하여 도상 슬래브 상면에 변위계 설치용 지그를 설치하여 레일변위 계측을 실시하였다. 레일변위 측정은 수직 및 횡방향 레일변위를 측정하였으나 본 연구에서는 레일 수직변위만을 이용하

(a) Ballast Track

(b) Concrete Track

Fig. 6 View of displacement transducer

여 궤도지지강성 산출에 이용하였다. 레일 변위계 설치전경은 Fig. 6과 같다.

3.2.3 레일수직변위 측정

레일저부응력의 측정은 침목간 중앙의 내·외측 레일 하부플랜지에 종방향으로 1축 변형률 게이지를 부착하여 측정하였으며, 변형률 게이지 설치전경 및 위치도는 Fig. 7과 같다. 레일저부응력의 측정은 침목간 중앙의 레일 하부플랜지 측면에 변형률 게이지를 부착하여 열차주행 시 레일저부에서 발생하는 동적 휨변형률을 측정하여 응력으로 환산하였다.

Fig. 7 View of strain gauges installation

4. 현장측정 결과 및 분석

4.1 윤중 측정결과

측정구간별 동적 윤중 측정결과와 예시 Fig. 8에 나타내었으며 측정구간별 측정데이터의 개수 및 열차 주행속도는 Table 4와 같다. 계측 시 측정구간을 주행한 모든 열차에 대한 측정응답 중 측정상의 오류나 이상신호가 계측된 경우를 제외하고 동적 윤중 및 레일변위 분석에 사용하였다.

4.2 레일수직변위 측정결과

측정구간별 실운영 열차 주행에 따른 레일수직변위 측정 결과의 예는 Fig. 9와 같다.

레일수직변위 측정결과, 레일 플로팅궤도와 침목 플로팅 궤도(P Type)의 경우 가장 큰 레일수직변위를 나타내었으며 자갈도상궤도가 가장 낮은 레일수직변위를 나타냈다. 레일 플로팅궤도의 경우 상대적으로 매우 소프트한 탄성고무재로 레일복부를 지지하고 있고 레일자체가 부유된 궤도구조로써 일반적인 침목직상부에서 레일이 지지되는 다른 궤도구조보다 상대적으로 과다한 레일침하량이 발생된 것으로 분석되었다. 그러나 레일 플로팅궤도의 과다한 레일수직변위는 레일자체의 휨변형에 의한 것이 아니므로 다음 절에 분석한 레일휨응력의 경우 가장 낮은 응력(변형)수준을 나타내었다.

Fig. 8 Example of the measured wheel load

Table 4 Occurrence of measurement & Vehicle Velocity

Track Type	Measured times (No.)	Vehicle speed (km/h)	
		Min	Max
Ballast track(Bad)	38	41	59
Ballast track(Well)	44	28	47
Elastic Fastening(E Type)	18	5	80
Elastic Fastening(B Type)	36	31	39
Rail floating	18	5	80
Sleeper Floating(L Type)	32	32	45
Sleeper Floating(P Type)	45	38	73

4.3 레일저부응력 측정결과

측정구간별 레일저부응력 측정결과, 상대적으로 가장 큰 레일수직변위가 나타난 레일플로팅궤도의 레일저부응력이 가장 낮은 수준으로 나타났으며 자갈도상궤도의 경우 가장 큰 레일저부응력을 발생시킨 것으로 나타났다. 또한 레일수직변위의 발생수준이 유사했던 E Type, B Type 및 L Type의 레일저부응력 발생경향이 다소 차이를 나타내었으며, 특히 L Type의 측정과정은 인장응력 뿐만 아니라 인장응력의 약 60%수준의 압축응력성분까지 측정되었으며 측정과정에 충격에 따른 노이즈 성분이 다른 구간보다 많이 포함된 것으로 나타났다. 궤도구조별 레일저부응력 측정결과와 예는 Fig. 10과 같다.

Fig. 9 Example of the measured vertical displacement of rail

5. 측정 궤도지지강성 산출

측정 대상선로 중 자갈도상 궤도의 경우 도상자갈의 상태에 따라 궤도의 동적응답의 수준이 상이하게 나타나므로 공용상태에 있는 도상자갈의 상태평가가 측정 궤도지지강성 평가에 앞서 시행되어야 할 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 해당 선로에서 채취한 도상자갈에 대한 입도분석 및 내마모 강도 약화 정도를 파악하기 위한 마모시험을 통해 도상자갈의 상태평가를 실시하였으며 그 결과를 바탕으로 불량과 양호로 구분하였다. 자갈도상의 상태평가를 위한 시험은 체가름 시험과 마모시험을 실시하였으며 이는 철도용품 표준규격 도상자갈규정(철도5610-1058가)에 근거하여 KS F 2502에 의한 방법으로 각 시료당 3회의 각 체별 통과중량을 평균하여 결과를 산출하였다. 마모시험은 KS F 2508에 따라 LA 마모시험기로 수행하였다. Table 5는 체가름 시험을 Table 6은 마모시험 결과를 각각 나타내고 있으며 Fig. 11은 체가름 시험결과를 바탕으로 분석한 구간별 입도분포 곡선을 표준 입도분포곡선과 비교하여 나타내었다.

체가름시험 결과, 측정구간의 시료 모두 22.4mm이하의 잔골재를 28~33%이상 포함하고 있었으며, 31.5mm, 40mm이하의 골재 또한 기준치를 상회하는 수준으로 포함되어 있어 현재 세립화가 어느 정도 진행되고 있는 것으로 분석되었다. 반면 마모시험 결과 Table 6과 같이 전체 시료 모두 기준치

Fig. 10 Example of the measured stress of rail

를 만족하는 것으로 나타나 현 궤도상태에서의 대상구간 도상 자갈의 내마모 강도 약화 수준은 심각한 수준이 아닌 것으로 분석되었다. 각 시료에 대한 입도분포곡선을 종합하여 Fig. 11에 나타내었다. 그래프의 실선은 표준 입도분포기준을 나타낸다.

측정 궤도지지강성은 측정 최대 윤중과 최대 레일수직변위의 비로써 측정대상 궤도구조의 현재 궤도상태에서의 궤도지지강성을 산출할 수 있다. 현장측정에서 측정된 윤중 및 레일수직변위 데이터를 분석하여 각 측정구간의 궤도형식별로 궤도지지강성을 산출하여 Fig. 12에 나타내었다.

측정데이터의 분석은 측정시 발생한 측정오류나 이상신호(노이즈 성분)에 해당하는 데이터와 최대치와 최소치를 제외한 데이터를 이용하여 선형회귀분석을 수행하였다. 측정데이터와 선형회귀분석결과 도출된 회귀식과의 상관계수는 측정개소별로 약 0.89~0.92수준으로 나타나 선형회귀식의 신뢰성을 확보하였다. 또한 측정개소별 측정궤도지지강성은 선형회귀식의 기울기에 해당하는 계수 값을 사용하여 분석을 수행하였다.

궤도구조별 측정 궤도지지강성 분석결과, Fig. 12(a), (b)와 같이 자갈도상궤도의 경우 도상자갈의 상태가 운행선 궤도의 궤도지지강성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며 콘크리트궤도에 비해 윤중-레일변위 선도의 기울기가 상당히 큰 것으로 나타났다. 이는 도상자갈의 세립화 및 노후화에 의해 자갈궤도의 유일한 탄성재료인 도상자갈의 탄

Table 5 Results of the screen classification test

체의 호칭(mm)	체별 통과증량의 백분율(%)		기준치
	Ballast (Bad)	Ballast (Well)	
22.4	33	28	0~5
31.5	60	55	5~35
40	82	72	30~65
50	96	94	60~100
63	100	100	100

Table 6 Test results of abrasion ratio

시료구분	Ballast (Bad)	Ballast (Well)	기준치
마모율(%)	15.2	8.2	25 이하

Fig. 11 Results of the screen classification test

성수준이 저하되어 동적 열차하중에 대해 자갈궤도가 유연한 탄성 거동을 하지 못하는 것에서 기인한 것으로 분석되었다.

측정 궤도지지강성은 자갈궤도의 경우 도상 불량구간이 도상 양호구간에 비해 약 30% 정도 큰 것으로 나타났으며, 콘크리트궤도의 경우 일반적인 침목매립식 궤도에 비해 침목 플로팅궤도는 약 28% 정도 크게 나타났고, 레일 플로팅 궤도는 약 4배 정도 작은 것으로 나타났다.

실 주행 차량하중과 운행선 궤도조건을 반영한 현장계측을 통해 산출된 측정 궤도지지강성을 설계 시 고려된 해당 궤도의 탄성재의 물성치를 이용한 이론 궤도지지강성과 비교하여 Table 7에 나타내었다. 이론 궤도지지강성은 궤도구조별 레일지지점 동적 스프링계수를 현장에서 조사한 침목 간격을 고려하여 탄성재료의 동적효과가 감안된 이론적 궤도지지강성으로 환산하여 나타내었다.

Table 7에 탄성재료의 동적효과를 고려한 이론식에 의해서 산출된 궤도지지강성(Table 1의 궤도지지강성(동적)) 참조)과 현장측정 궤도지지강성을 비교하여 이론치와 측정치의 차이를 궤도구조별로 나타내었다. 자갈상태가 불량한 자갈궤도의 경우 측정치가 이론치 보다 29% 크게 나타났으며 콘크리트궤도 중 침목 플로팅 궤도(L-Type, P-Type)의 경우 측

Fig. 12 Measured track support stiffness

Fig. 13 Total measured track support stiffness

정치가 이론치 보다 32% 크게 나타났다. 반면 자갈상태가 양호한 자갈궤도와 레일 플로팅 궤도의 경우 이론치와 측정치가 거의 유사한 것으로 나타났다.

측정 궤도지지강성 분석결과 방진상자 내부의 침목저부에 소프트한 방진패드와 매입된 침목 플로팅 궤도(L-Type, P-Type)의 경우 현장시공 이후 발생가능한 탄성재의 자연경화 현상으로 인해 전체적인 궤도의 궤도지지강성이 다소 크게 평가된 것으로 판단된다. 또한 이론적 궤도지지강성은 인접 레일의 강성이 고려되지 않은 수직방향의 궤도 탄성층의 강성만이 반영된 데에 반해 실제 운행선 궤도에서의 측정 궤도지지강성은 인접레일의 강성이 포함된 궤도지지강성인 것으로 분석되며 이에 따라 전체적으로 다소 크게 평가된 것으로 판단된다. 따라서 실제 운행선 궤도의 궤도지지강성은 중방향 레일 강성을 고려한 궤도지지강성으로 평가되어야 할 것으로 판단된다.

또한 현장에서 측정된 궤도구조별 궤도지지강성을 이론적 레일특성길이 산출식에 적용하여 현장조건이 반영된 궤도구조별 레일특성길이를 산출한 결과, Table 7 및 Fig. 14(b)와 같이 궤도지지강성에 직접적인 영향을 받는 레일의 특성길이 역시 이론과 측정치가 상이하게 나타났으며 이론치 보다

Table 7 Comparison of track support stiffness & rail characteristic length

궤도구조		궤도지지강성 (kN/mm)			레일특성길이(cm)		
		이론치(A)	측정치(B)	Relative deviation(%)	이론치(A)	측정치(B)	Relative deviation(%)
(a) Ballast Track	Bad	213.28	299.83	29	37.36	30.50	18
	Well		210.10	2		33.34	11
(b) Elastic Fastening - E Type		34.87	41.65	17	58.91	49.96	15
(c) Elastic Fastening - B Type		40.24	48.03	16	56.68	48.21	15
(d) Rail Floating		9.94	10.65	7	80.12	70.26	12
(e) Sleeper Floating - L Type		44.0	60.00	27	55.42	45.61	18
(f) Sleeper Floating - P Type		33.94	50.05	32	59.15	47.72	19

(a) Track support stiffness

(b) Rail characteristic length

Fig. 14 Comparison of track support stiffness & rail characteristic length

측정치가 약 11~19% 정도 작게 나타났다. 이러한 레일의 특성길이는 궤도침하 및 레일의 2차 처짐 예측에 기반을 둔 레일과상마모 예측에 직접적인 해석변수로 활용되므로 현장 여건을 반영한 레일의 동적 거동예측 시 이론적 레일특성길이에 본 연구에서 도출한 궤도구조별 측정 레일특성길이의 오차를 고려한 해석을 수행함으로써 보다 현실적인 이론해석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 공용중인 운행선 궤도구조의 궤도지지강성을 평가하고자 도상형식 및 궤도구조별 궤도지지강성과 레일특성길이에 대한 이론적 고찰을 수행하고 설계 시 고려되는 이론 궤도지지강성과 현장측정을 통해 획득한 측정 궤도지지강성을 비교하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 궤도구조별 측정 궤도지지강성 분석결과, 자갈도상궤도의 경우 도상자갈의 상태가 운행선 궤도의 궤도지지강성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며 콘크리트궤도에 비해 윤중-레일변위 선도의 기울기가 상당히 큰 것으로 나타났다. 이는 도상자갈의 세립화 및 노후화에 의해 자갈궤도의 유일한 탄성재료인 도상자갈의 탄성수준이 저하되어 동적 열차하중에 대해 자갈궤도가 유연한 탄성 거동을 하지 못하는 것에서 기인한 것으로 분석되었다.

(2) 측정 궤도지지강성은 자갈도상궤도의 경우 도상 불량 구간이 양호구간에 비해 약 30% 정도 큰 것으로 나타났으며, 콘크리트궤도의 경우 일반적인 침목매립식 궤도에 비해 침목 플로팅궤도는 약 30% 정도 크게 나타났고, 레일플로팅궤도는 약 4배 정도 작은 것으로 나타났다.

(3) 자갈상태가 양호한 자갈궤도와 레일플로팅궤도는이론치와 측정치가 유사하게 나타났으며 침목 플로팅 궤도의 경우 측정 대상궤도 중 이론치와 측정치의 차이가 가장 크게 나타났다. 또한 이론적 궤도지지강성은 인접 레일의 강성이 고려되지 않은 수직방향의 궤도 탄성층의 강성만이 반영된 데에 반해 실제 운행선 궤도에서의 측정 궤도지지강성은 인접레일의 강성이 포함된 궤도지지강성인 것으로 분석되며 이에 따라 전체적으로 다소 크게 평가된 것으로 판단된다. 따라서 실제 운행선 궤도의 궤도지지강성은 중방향 레일 강성을 고려한 궤도지지강성으로 평가되어야 할 것으로 판단된다.

(4) 또한 측정 궤도지지강성을 이용한 궤도구조별 레일특성길이 검토결과, 궤도지지강성에 직접적인 영향을 받는 레일의 특성길이 역시 이론과 측정치가 상이하게 나타났으며 이론치보다 측정치가 약 11~19% 정도 작게 나타났다. 이러한 레일의 특성길이는 궤도침하 및 레일의 2차 처짐 예측에 기반을 둔 레일과상마모 예측에 직접적인 해석변수로 활

용되므로 현장여건을 반영한 레일의 동적 거동예측 시 이론적 레일특성길이에 본 연구에서 도출한 궤도구조별 측정 레일특성길이의 오차를 고려한 해석을 수행함으로써 보다 현실적인 이론해석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Arnold D. Kerr (2003) Fundamental of Track Dynamics.
- [2] O.S. Kweon, J.Y. Choi, M.S. Kang, H.U. Lee, Y.g. Park (2007) An Estimate of Ballast Track Condition on Dynamic Behavior of Railway Bridge, *Journal of the Korean Society for Railway*, 2007 Autumn Conference of Korean Society for railway, pp. 476-489.
- [3] Graduate School of Railway (2009) A Study on the Maintenance and Estimate of Fatigue Life for Used Rail, Seoul Metro.
- [4] Track Design Technical Report (2006) Structural Technical Report(Track division), Seoul city Metro Line 9.
- [5] Track Design Technical Report (2005) Structural Technical Report(Track division), Shinbundang Line.
- [6] S.J. Lee, J.T. Oh, O.J. Park (2003) Parametric study about Measuring Train Loads.
- [7] Sato, New railway Track engineering Mechanics.
- [8] RTRI (1997) Design Standard and manual for Railway Structure, Track Structure (Ballasted Track), Japan.
- [9] S.H. Na, S.B. Suh, K.J. Son, J.H. Kim (2007) Experimental study on the variation of track stiffness between earthwork and bridge, *Journal of the Korean Society for Railway*, 2007 Autumn Conference of Korean Society for railway, pp. 281-288.
- [10] K.S. Lee, J.N. Cheon, S.C. Kim, S.S. Kweon (2007) Rail pressure on the changing point of track modulus, *Journal of the Korean Society for Railway*, 2007 Autumn Conference of Korean Society for railway, pp. 228-233.
- [11] J.Y. Choi, K.D. Kang, Y.G. Park (2006) Evaluation of Track Impact Factor on Ballast Track in Subway using field Test, *Journal of the Korean Society for Railway*, 9(6), pp. 784-791.

접수일(2010년 12월 20일), 수정일(2011년 4월 2일),
게재확정일(2011년 4월 10일)