

레일이음매의 동적거동에 대한 연구

A Study on the dynamic behavior of rail due to dipped joints

。 강 윤 석* · 양 신 추**

Kang Yun-Suk · Yang Shin-Chu,

Key Words : Wheel/Rail contact, dipped joint, fishplate(차륜/ 궤도접촉, 딥조인트, 이음매판)

ABSTRACT

When vehicle travelling along the track which has irregularity such as vertical profile, dynamic forces arise at the Wheel/Rail contact patch by wheel/rail interaction. In particular short wavelength irregularities on dipped joint and small stiffness of connecting rail bring about intense wheel/rail dynamic effects at higher speed.

In the paper, a new model for dipped joint rail is developed to study dynamic behavior of track . A cusp behavior on dipped joint was defined by its amplitude and decay factor, which was presented by FRA track classes. The result of case study are presented, which show wheel rail contact force in each track classes, train operation speed and bending flexible rigidity ratio of fishplates which are connecting the rail.

기호설명

EI : 레일의 굴곡강성
 ρ : 레일의 밀도
 A : 레일의 단면적
 $R_k(t)$: 제 k 체결구의 레일지점반력
 $P(t)$: 차륜동하중
 $\delta(x)$: 드랙델타함수
 x_k : 제 k 체결의 x 좌표
 x_w : 차륜위치의 x 좌표 $= x - x_o - vt$
 x_o : 차륜의 초기위치
 v : 열차속도
 y_{ik} : 제 k 체결에서 제 i 층 도상의 상하변위
 m_{ik} : 제 k 체결에서 제 i 층도상의 질량(레일편측당)
 k_{ik} : 제 k 체결에서 제 $i-1$ 층도상과 제 i 층도상 사
 i 강성계수
 c_{ik} : 제 k 체결에서 감쇠계수

m_s : 1/2 차체질량
 c_s : 2차 현수장치의 감쇠계수
 k_s : 2차 현수장치의 스프링계수
 P_o : 1/2 차체 무게
 y_o : 대차의 상하변위
 Θ_o : 대차의 회전변위
 m_b : 대차질량
 I_b : 대차의 회전관성모멘트
 c_p : 1차 현수장치의 감쇠계수
 k_p : 1차 현수장치의 스프링계수
 c_s : 2차 현수장치의 감쇠계수
 k_s : 2차 현수장치의 스프링계수
 P_b : 대차 무게

1. 서 론

일반적으로 선로에 부설되는 레일은 정척레일을 이음매판으로 연결하여 레일과 레일을 접속하는 데 이를 레일이음매(dipped joint)라고 한다. 레일이음매부는 레일이음매 연결판의 휨 강성이 작아서 열차주행시 모재레일에 비해 급격한 처짐이 발

* 한국철도기술연구원 궤도·노반 연구팀
 E-main : yskang@krrri.re.kr
 Tel : (031)461-8531(167)
 ** 한국철도기술연구원 궤도·노반 연구팀
 E-main : sevana@krrri.re.kr

틀림을 이음매 처짐(low joint, depression at rail joint)이라고 하며, 이음매부 중심으로 전후 2~5m 범위에서 큰 침하가 발생한다. 이음매 처짐에 의해 급격한 윤중변동이 생기며 동적거동이 커져서 열차주행안전성과 승차감이 저하되고 빈번한 유지보수를 필요로 한다. 그러므로 기존선의 열차의 속도향상을 고려할 경우 레일이음매부는 그 거동을 검토해야 할 궤도취약개소이다.

이 연구에서는 이음매부의 수치해석모델을 개발하고 열차가 이음매부를 통과할 때 발생하는 동적거동을 분석하였다. 이음매부분에 발생하는 딥조인트(Deep Joint)의 기하형상변화, 열차속도에 대한 윤중변화, 이음매 연결판의 강성비 변화에 따른 매개변수 연구를 수행하였다.

2. 차량과 궤도의 상호작용해석

2.1 궤도의 운동방정식유도

딥조인트부의 궤도와 차량의 상호작용해석을 위해 주행하중에 의한 레일변형의 방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + R_k(t) \delta(x - x_k) = P(t) \delta(x - x_w) \quad (1)$$

또한 i 층 k 번째 질량체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_{ik} \frac{d^2 y_{ik}}{dt^2} + (k_{(i+1)k} + c_{(i+1)}) \frac{d}{dt} (y_{ik} - y_{(i+1)k}) - (k_{2k} + c_{2k} \frac{d}{dt}) (y_{1k} - y_{2k}) = 0 \quad (2)$$

2.2 차량의 운동방정식

수직운동에 대한 차량/궤도 상호작용 시스템은 차체 반질량과 대차 및 스프링하질량으로 모델링할 수 있다. 이때 차체의 수직 운동방정식은 다음과 같으며,

$$m_c \ddot{y}_c + c_s (\dot{y}_c - \dot{y}_b) + k_s (y_c - y_b) = P_c \quad (3)$$

대차의 수직 및 회전운동 방정식은 다음과 같다.

$$m_b \ddot{y}_b + c_s (\dot{y}_b - \dot{y}_c) + c_p (2\dot{y}_b - \dot{y}_{w1} - \dot{y}_{w2}) + k_s (y_b - y_c) + k_s (2y_b - y_{w1} - y_{w2}) = P_b \quad (4)$$

$$+ k_p d(2d \theta_b + y_{w1} - y_{w2}) = 0 \quad (5)$$

또한 차륜 및 차축에 의한 두 개의 스프링하 질량에 의한 운동방정식은 각각 다음과 같다.

$$m_w \ddot{y}_{w1} + c_p \{\dot{y}_{w1} - (\dot{y}_b - d\dot{\theta})\} + k_p \{y_{w1} - (y_b - d\theta)\} + k_c \{y_{w1} - y(x_{w1})\} = P_{w1} + k_c y_{w/r}(x_{w1}) \quad (6)$$

$$m_w \ddot{y}_{w2} + c_p \{\dot{y}_{w2} - (\dot{y}_b + d\dot{\theta})\} + k_c \{y_{w2} - y(x_{w2})\} + k_p \{y_{w2} - (y_b + d\theta)\} = P_{w2} + k_c y_{w/r}(x_{w2}) \quad (7)$$

식(7)에서는 k_c 는 차륜과 레일의 접촉강성으로 서 차륜(y_w)과 레일변위(y_r)의 상대변위(Δ)의 함수로 비선형 방정식을 고려하여 Δ 를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta = y_w - y(x_w) - y_{w/r}(x_w) \quad (8)$$

레일을 유한요소로 모형화하여 궤도의 질량(M_{yy}), 감쇠(C_{yy}) 및 강성행렬(K_{yy})을 구성하고 주어진 열차속도 및 궤도틀림에 대하여 차량과 궤도의 동적응답은 상기의 시스템 방정식을 직접 적분법을 적용하여 풀 수 있다. 이 연구에서는 궤도의 동적거동을 해석할 수 있도록 개발된 GTAP (General Track Analysis Program)을 사용하여 해석을 수행하였다.

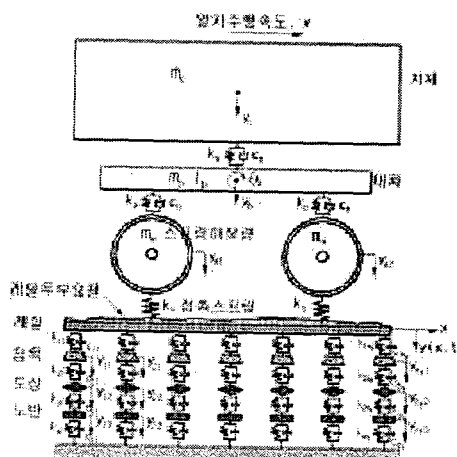


그림 1. 차량과 궤도의 상호작용 해석모형

3. 레일이음매부의 모형설정

레일이음매의 댕조인트의 거동을 분석하기 위해서 이음매부의 모형설정에 대한 연구는 주로 현장 실측에 의한 데이터 분석을 토대로 이루어져 왔다. 단과장 틀림자료를 분석하여 각 궤도등급별로 적합한 모델을 수립하였는데 특히 미국 FRA와 영국 BR에서 제시한 이음매부의 궤도형상 처짐모델이 대표적이다. 이 연구에서는 미국 FRA의 기준을 SI단위로 환산하여 이음매부의 모형을 가정한 다음 이를 궤도틀림의 입력치로 사용하였다. FRA에서 제시된 식은 6개의 등급선별로 댕조인트부의 파고와 곡률형상 감쇠계수를 구분하여 등급이 안 좋은 궤도일수록 댕조인트부의 파고가 크고 더 넓게 분포되어 있다.

$$y(x) = A e^{-k|x|} \quad (9)$$

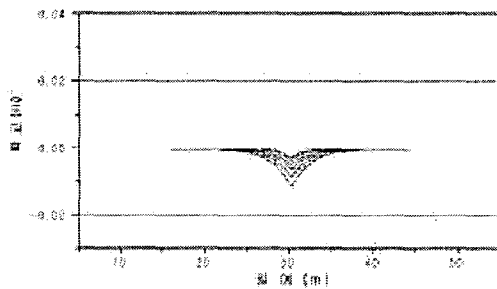


그림 2. FRA 조인트부 모델

여기서 x 는 궤도 종방향 길이, $y(x)$ 는 궤도면의 높이, A 는 댕조인트부의 파고(amplitude), k 는 조인트 곡률의 감쇠계수(decay factor)이다. 조인트부의 형상은 파고와 감쇠비에 의해 결정되며 댕조인트의 지속거리는 약 0.6m에서 5m 이상에 이른다. 이 연구에서는 국내궤도등급이 FRA의 등급과 유사하다는 가정을 토대로 하여 해석을 수행하였다.

4. 예제해석

이 해석에서는 기존선 고속화시 통과열차로 생각되는 KTX열차를 대상차량으로 하였다. 표 1은 해석에 사용된 궤도 및 차량의 제원과 물성치를 나타내고 있다. 차량은 차체의 1/2만을 모형화하여 1개 궤도에 하중을 재하하기 때문에 1/4차체

여러 층으로 구성되어 있는 이산지지 탄성체로 모형화 하였으며 도상, 노상, 암반의 물성치는 실제 기존선 구간의 실측치를 사용하였다. 댕조인트부의 궤도틀림을 FRA에서 제시한 각기 다른 6가지 유형의 댕조인트에 대해서 해석을 수행하였고 윤중변동에 미치는 영향을 분석하였다.

- (1) FRA등급선별 윤중분석
(시속 120Km/h, 시속 220Km/h)
- (2) 속도변화에 따른 윤중변동분석
(시속 60, 100, 140, 180, 220Km/h)
- (3) 이음매부 연결부 강성에 따른 윤중변동분석

표 1. 해석에 사용된 물성치 및 제원

물성치 구분	물성치	물성치 구분	물성치
동력차차체 1/4질량 (kg)	13729.0	궤도패드감쇠계수 (kN·s/m)	98.0
1차 현가장치스프링 (kN/m)	122.5	침목간격(m)	0.6
1차 감쇠계수 (kN·s/m)	1.0	침목 1/2 질량(kg)	130.0
대차 1/2 질량(kg)	1223.0	침목지지 도상강성 (kN/m)	1.78×10^6
2차 스프링계수 (kN/m)	126.8	침목지지 감쇠계수 (kN·s/m)	980.0
2차 감쇠계수 (kN·s/m)	2.0	도상질량(kg)	52.5
축간거리(m)	3.0	도상지지강성 (kN/m)	1.47×10^6
윤축의 질량(kg)	1024.0	도상감쇠계수 (kN·s/m)	980.0
레일표면반경(mm)	600	노상지지강성 (kN/m)	4.90×10^6
레일질량(kg/m)	60.8	노상감쇠계수 (kN·s/m)	980.0
레일 휨강성	6.34×10^7	하부층 지지강성 (kN/m)	2.45×10^6
궤도패드강성 (kN/m)	6.0×10^6	하부층 감쇠계수 (kN·s/m)	980.0

4.1 FRA등급선별 윤중분석(시속 100Km/h, 시속 220Km/h)

표 2. 파고, 감쇠비에 따른 윤증변동

FRA 구분	계수		윤증변동(KN)	
	A(m)	K(m ⁻¹)	V = 100	V = 220
6급선	0.002794	0.82020	117.10	155.57
5급선	0.003556	0.65616	123.78	165.21
4급선	0.004826	0.49212	134.75	180.06
3급선	0.006350	0.45312	150.18	206.26
2급선	0.008382	0.42650	167.81	262.42
1급선	0.011430	0.42650	204.34	325.46

표 3. 속도에 따른 윤증변동

속도 (km/h)	발생윤증(KN)				
	FRA6	FRA5	FRA4	FRA3	FRA2
60	115.64	123.37	135.91	157.60	181.51
100	117.10	123.78	134.75	150.18	167.81
140	125.14	131.22	143.03	161.00	184.04
180	141.94	149.55	161.48	182.33	226.35
220	155.57	165.21	180.06	206.26	262.42

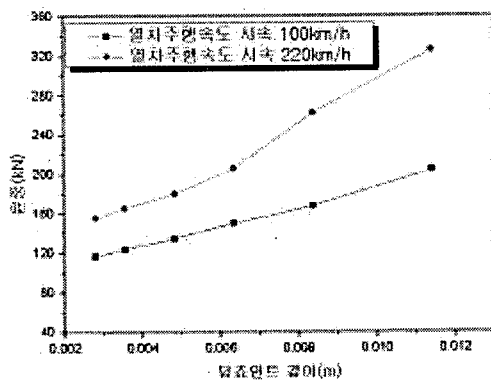


그림 3. 파고에 따른 윤증변동

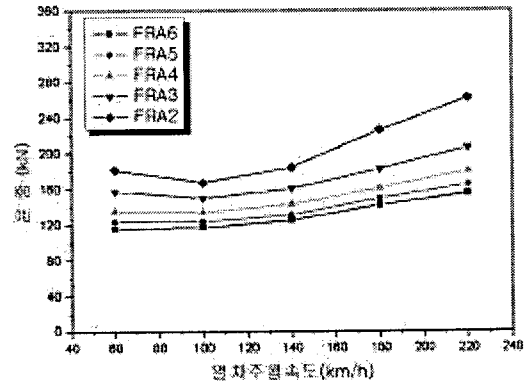


그림 4. 속도에 따른 윤증변동 분석

FRA에서 구분한 등급선별로 뒀조인트의 깊이 (dipped joint depth)와 형상감쇠계수 (Decay factor)가 표 2에 제시되어 있다. 여기에서 FRA 6급선이 가장 양호한 궤도상태로서 뒀조인트 깊이가 작고 형상감쇠계수가 크기 때문에 단파장틀림의 정도가 제일 작다. 반면 FRA 1급선의 궤도상태는 뒀조인트 깊이가 크고 형상감쇠계수가 작으므로 이음매부의 단파장 틀림의 정도가 크다.

각 급선별로 윤증변동을 해석한 결과 뒀조인트 깊이와 형상감쇠 계수(Decay factor)에 따라서 윤증이 크게 증가하는 것(표 2, 그림 3)을 알 수 있다. 등급상태가 불량하여 조인트 깊이가 깊어질수록 차륜과 레일의 접촉에 의한 윤증은 증가한다. 시속 100km/h로 열차의 주행하는 경우 뒀 조인트의 깊이가 4.091배 증가함에 따라서 윤증은 1.745배로 커진다.

그리고 속도증가에 영향이 생기는 지를 판단하기 위해서 기존선 고속화시 예상최고속도인 시속 220km/h까지 속도를 증속하면서 동해석을 수행하

중은 2.092배 증가하는 것을 알 수 있다.

뒀조인트부의 깊이가 커지면서 윤증과 충격하중도 같이 증가하여 이음매부의 파손, 궤도마모, 차륜마모가 빈번하게 발생할 것으로 생각한다. 그러므로 궤도이음매부의 유지관리를 통해 뒀조인트 깊이와 파장의 길이를 줄이는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

4.2 속도변화에 따른 윤증분석(시속 60, 100, 140, 180, 220Km/h)

국내 기존선의 궤도등급은 FRA 6급선에서 FRA 2급선까지의 상태와 유사하다. 6급선에서 2급선까지 열차주행으로 인하여 발생하는 윤증발생을 해석한 결과는 각각 표 3과 그림 4와 같다. 열차가 60km/h에서 220km/h로 증속하면서 이음매부의 충격하중도 커진다. 이음매부의 변형은 열차의 통과톤수가 누적되면서 더욱 커지게 되고 유지보수주기도 짧아진다.

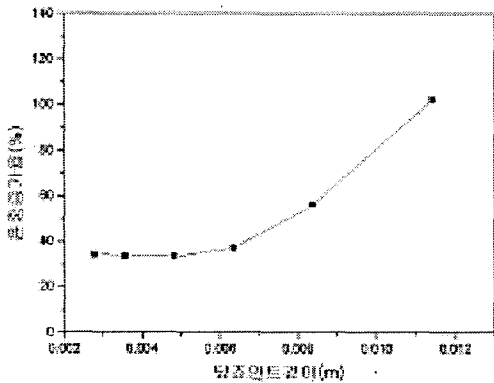


그림 5. 딥조인트 깊이에 따른 운중변동을 증가

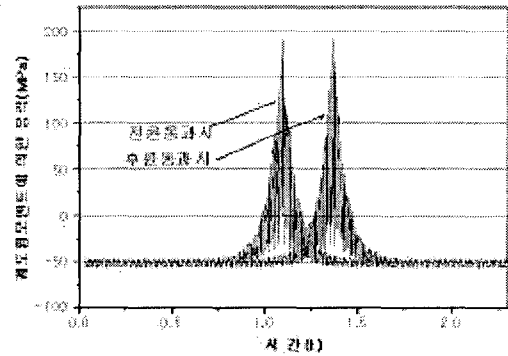


그림 6. FRA 5급선의 궤도힘응력

그림 4는 등급선과 열차속도에 따른 운중의 증가량을 나타내고 있다. 그림 5는 딥조인트 깊이(등급선 차이)에 따른 운중증가율을 비교한 것이다. 그림 5에 의하면 딥조인트의 깊이가 커지면서 최소운중에서 최대운중까지의 변화율을 나타낸 계수인 운중증가율이 급격히 증가한다. 이 결과는 운중의 증가와 이로 인한 충격효과는 궤도의 불규칙성이 크면 클수록 속도증가에 민감하다는 것을 나타낸다. FRA 6급선에서 3급선까지는 레일 이음매통과에 대한 속도효과가 크지는 않지만 FRA 1, 2급선과 같이 이음매부의 먼들림이 큰 경우에는 속도에 의한 운중증가량이 증가한다. 이러한 결과를 종합하면 열차주행에 따른 운중을 저감하기 위해서 이음매부의 딥조인트의 파고를 줄이는 것이 가장 효과가 있다. 그러므로 이음매가 생략된 궤도구조 형태, 즉 장대레일의 부설이 가장 효과가 있다고 생각한다.

그림 6은 열차주행시 FRA 5급선에서의 궤도수직침침과 궤도의 힘응력을 나타낸 것으로 운중증가와 함께 레일 모멘트가 증가하는 것을 알 수 있다. 실제 이음매판이 단면적과 강성이 적은 것을 고려한다면 힘응력이 증가할 것으로 보이며 이음매 강성보강, 궤도두부면 관리 및 적절한 침목배치 등으로 종합적인 이음매보강방안을 강구해야 할 것으로 생각한다.

4.3 이음매부 연결부 강성에 따른 운중변동

이음매부는 이음매판에 의해서 연결되어 있는데 단면적이 레일단면의 80~95% 정도이지만 휨강성은 일반궤도에 비해 20~30%밖에 되지 않는다. 그러므로 모재레일과 비교했을 경우 동일지지 상태에서의 침하는 매우 커지게 된다. 이러한 상태

표 4. 이음매판의 연결강성비와 열차속도에 따른 운중변동변화

구 분	시속 60km/h	시속 100km/h	시속 140km/h	시속 180km/h	시속 220km/h
0	151.992	203.168	225.695	225.239	242.075
25	121.964	122.426	131.201	149.683	166.296
50	122.818	123.336	130.946	149.592	165.526

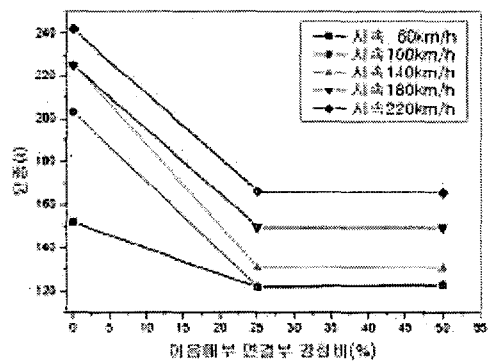


그림 7. 이음매판 연결부 강성변화에 따른 운중변화(FRA 5급선 기준)

피로파괴에 의하여 절손이 되기도 한다. 이 때에는 이음매궤도에 운중은 급격히 증가한다. 이 연구에서는 이음매판의 연결부의 휨강성비가 0(절손), 25, 50%로 변화하는 경우에 대하여 이음매부의 동적거동을 분석하였다.

그림 7과 표 4는 이음매판 연결부의 강성변화를 각 속도별로 나타낸 것이다. 해석결과 이음매판이 절손된 경우 이음매부의 운중은 175.4%까지 증가한다.

이음매부는 열차통과톤수를 받으면서 점차 휨강성이 약해진다. 휨강성이 감소하면서 이음매부의 진동가속도는 점차 증가하는데, 이에 따라 이음매판의 볼트이완, 레일 단부 마모가 심하게 발생하고 궤광 하부의 자갈도상의 세립화가 진전하여 유지보수가 급증한다. 만약 적절한 유지보수가 이루어지지 않을 경우는 이음매판이 절손하여 운중이 급증하므로 적절한 강성보강이나 장대레일부설을 통하여 충분한 휨강성을 확보하는 것이 중요하다고 생각한다.

5. 결 론

이 연구에서는 각 등급선별의 이음매부의 궤도 상태에 따른 동적거동을 알기 위해서 이음매부의 해석모형을 수립하고 열차가 통과하는 경우에 동적거동을 분석하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) FRA등급선별 운중 분석을 한 결과, 댕조인트 깊이가 커지고 형상감쇠 계수(Decay factor)가 감소함에 따라 차륜과 레일의 접촉에 의한 운중은 커지며 이로 인한 이음매부의 충격도 증가한다.

2) 이음매부는 저급선 일수록 속도증가로 인한 운중에 민감하다. 즉 궤도의 불규칙성이 크면 클수록 속도증가에 따른 운중증가율이 커진다. 따라서 열차주행에 따른 운중을 저감하기 위해서는 이음매부의 궤도 불규칙도를 줄이는 것이 가장 효과가 있다고 생각한다.

3) 실제 이음매판이 단면적과 강성이 작기 때문에 운중증가와 함께 레일 휨모멘트가 더욱 커진다. 따라서 이음매 강성보강 및 적절한 침목배치, 지접법등의 사용으로 이음매 보강방안을 강구해야 한다.

4) 휨강성비가 0(절손), 25, 50% 로 변화함에 따라서 운중은 변화한다. 특히 이음매부가 일정통과톤수를 받은 후에 절손될 경우에는 매우 큰 충격하중이 발생하므로 적절한 강성보강과 장대레일설치를 통해서 급격한 운중증가를 방지해야 할 것으로 생각한다.

6. 참고문헌

(1) 양신추, 강윤석(1999) 레일용접부의 국부궤도

연구, 1999년도 학술발표회 논문집(IV), 대한토목학회, pp 293-296.

(2) 강기동, 박대근, 이지하(1999) 댕조인트 및 궤도틀림 에 의한 운중변동연구, 1999년도 학술발표회논문집(IV), 대한토목학회, pp 301-304.

(3) 이종득(1998), 레일용접부 굴곡피로가 궤도지장성에 미치는 영향, 철도시설, No.68

(4) 이진욱, 양신추(1998),“차량고속주행시 차량 및 궤도거동에 미치는 궤도틀림의 영향”, 1998년도 학술발표회 논문집, 한국철도학회, pp 307-314.

(5) 삼포중(1995) 궤도구조의 동특성의 구축 RTRI Report Vol 9. No. 12, Japan

(6) Coenraad Esveld(1989) Modern railway track, MRT-Productions

(7) Garg and Dukkipati(1984) Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press