

경부고속철도차량의 El Centro 지진에 대한 지진응답해석 Earthquake Response Analysis of K-TGV against El Centro Earthquake

김준희* 윤정방** 양신추***
Kim, Jun-Hee Yun, Chung-Bang Yang, Shin-Chu

ABSTRACT

In this thesis, the dynamic behavior of the vehicles is analyzed, while the track is subjected to lateral vibration due to earthquakes. A computer program is developed, which can simulate dynamic responses of vehicles subjected to earthquake loading. The analysis considers two types of vehicles: i.e. a 2-axle vehicle with 13 DOF's and a power car of K-TGV with 38 DOF's. It can also consider the interaction with substructures such as tracks and bridges. El Centro record is considered as earthquake loading. The creep force module developed in this study is verified, and the results of this study are compared with those of others. Furthermore the running safety of high-speed railway vehicles(K-TGV) subjected to earthquake loading is studied. Based on the results of this study, the running safety of the K-TGV can be confirmed against El Centro earthquake.

1. 서론

지진시발생시 차량은 일반적인 주행에 비해 매우 큰 변위의 운동을 한다. 이로 인하여 차량의 휠은 레일과의 플랜지 접촉뿐만 아니라 플랜지가 레일을 올라타는 매우 불안정한 상태에 이를 수 있으며, 이는 종국적으로 탈선으로 이어질 수 있다. 이와 같은 지진시의 열차 탈선사고에는 최근 1999년 11월 미국 L.A근교의 열차탈선사고를 비롯하여, 1995년 일본 효고현남부지진으로 인한 탈선사고 등이 있다. 지진시의 철도차량의 주행안전성에 관한 연구는 철도선진국인 일본에서 1980년도에 16자유도 차량의 횡방향지진에 대한 주행해석이 이루어졌으며, 최근에는 횡방향지진과 수직지진이 동시에 고려된 연구결과가 발표되고 있다. 나아가 이와 같은 연구결과는 지진시의 승객의 안전을 위한 조기지진경보와 같은 안전시스템 구축 등 여러 가지 대책과 기술로 이어지고 있다. 하지만 국내에서는 경부고속철도가 도입되고있는 상황에서 고속철도차량, 주행차량과 교량과의 상호작용, 진동 및 소음 전파 등 여러 분야의 연구가 수행되고 있으나, 지진시의 차량의 주행안전성문제는 전

* (주) 다산컨설턴트 구조부 사원, 정회원

** 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원

*** 한국철도기술연구원 궤도시스템연구팀 책임연구원

혀 연구된 바가 없는 생소한 분야이다. 시속300km대의 초고속주행을 하는 경부고속철도차량의 경우 지진시의 주행안전성 문제는 승객의 안전과 사회적 측면을 고려해 볼 때 매우 심각한 문제가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지진발생시의 K-TGV차량의 동적거동을 시뮬레이션할 수 있는 전산프로그램을 개발하여, 다양한 조건에서의 차량의 지진응답을 살펴보고 주행안전성 분석을 하였다. 모델링된 주행차량은 지진시의 차량의 운동이 잘 반영되도록 모든 K-TGV차량 구성강체의 자유도를 포함시켰으며, 엄밀한 월/레일간의 접촉해석 및 크리프함 산정을 하였다. 또한 하부구조물로 경부고속철도에 시공된 지간40m의 PSC 박스거더 단순교를 고려하여 차량-구조물의 상호작용효과를 고려하였다.

2. 연구 범위 및 가정

지진 발생시 운행중인 차량의 거동을 해석하는 것은 차량운동의 복잡성과 지진시의 다양한 지반거동, 레일을 포함한 하부구조물의 거동 등으로 인하여 매우 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 연구 범위의 한정과 많은 가정을 도입했다. 해석차량은 경부고속철도의 동력차만을 대상으로 모델링하였다. 이는 동력차의 무게가 객차의 2.1배에 달하여 지진력이 가장 크게 작용하고, 차량의 주행안전성 측면에서 단일차량의 주행이 다련열차의 주행보다 위험하기 때문이다. 또한 입력지진으로는 차량의 주행안전성에 가장 큰 영향을 미치는 차량진행방향과 직각을 이루는 횡방향의 수평지진이 고려됐다. 따라서 지진하중은 관성력으로 차량과 하부구조물에 각각 작용하게 된다. 하부구조물은 횡방향의 병진운동만을 고려했고, 레일의 불규칙성은 고려하지 않았다. 월/레일간의 상호작용 해석시 휠세트의 양쪽 휠 모두에서 레일에 접하는 양륜 접지상태의 가정했으며, 차륜 답면(tread)과 플랜지(flange)가 동시에 레일에 접하는 2점접촉의 상태는 고려하지 않았다.

3. K-TGV차량의 운동방정식 유도 및 하부구조물의 고려

본 연구에서는 K-TGV동력차의 운동방정식 유도시 다음과 같은 비보존계의 Lagrange's 운동방정식을 사용하였다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

여기서, T, V, D는 각각 시스템의 운동에너지, 위치에너지, 소산에너지이다. 또한 q는 일반화된 좌표, Q_i는 각각의 자유도에 해당하는 외력이다.

K-TGV동력차는 보기(bogie)차량으로 휠세트 4개, 대차 2대, 차체 1대 등 총 7개의 물체로 이루어졌다. 한 물체의 진동은 병진운동 3개, 회전운동 3개 등 총 6자유도를 가지므로 차량 1량 당 총 자유도는 42자유도가 된다. 휠세트는 동력이 가해져서 인위적으로 회전하므로, 이에 해당하는 자유도, 즉 피칭이 제거된다. 따라서 차량 1량당 자유도는 38자유도가 된다. Lagrange's 운동방정식을 이용하여 차량의 운동방정식을 유도하는 과정을 효율적으로 수행하기 위해 본 연구에서는 심볼릭(symbolic)연산이 가능한 Mathematica[®]를 사용했다. 차량의 운동방정식 유도시 사용된 K-TGV차량의 상세도와 물성치를 각각 그림 1, 2, 3과 표 1, 2, 3, 4에 나타내었다. 특히 표 4에 나타난 횡방향 고무스토퍼는 45mm의 유간을 가지는 경화스프링(hardening spring)으로서 비선형성을 가진다. 본 연구에서는 이를 Newton-Raphson법을 적용하여 비선형성을 고려하였다.

지진에 의한 차량의 동적거동은 차량자체의 거동뿐만 아니라 하부구조물과의 상호작용효과에 의해 크게 좌우된다. 총 412km의 경부고속철도 구간 중 교량연장은 112km로 약 27% 달하는 매우 긴 구간이며, 랜덤한 지진하중이 가해질 때 일반적으로 노반구간에서의 차량의 거동보다는 교량구간에서의 차량의 응답이 크게 나타난다. 따라서 본 연구는 교량을 중심으로 하부구조물의 영향을 고려하기 위해 하부구조물의 횡방향 자유도를

추가했다. 이를 도식적으로 그림 4에 나타내었다. 시스템 외부의 고정축(fixed reference axis)이 아닌 지표축(ground reference axis)을 좌표기준으로 설정함으로써, 고정축으로부터 지표축간의 변위(y_g)를 소거하여 하부구조물의 변위(y_s)와 휠의 변위(y_w)를 정의하였다. 이와 같은 변위는 지표축으로부터의 상대변위에 해당한다. 따라서 횡방향 지진이 발생하였을 경우의 지진하중은 지반가속도와 질량의 곱으로 차량과 하부구조물에 작용하게 되어 지진하중의 고려가 용이해진다. 또한 휠과 하부구조물의 상대변위는 $y_w - w_s$ 로 정의되어 휠/레일간의 접촉해석과 크리프힘 산정이 가능해진다. 경부고속철도에 시공된 PSC박스거터교량과 참고문헌 7에 나와 있는 교량의 기간에 따른 교축 직각방향의 대략적인 고유진동수를 고려하여, 하부구조물의 질량, 횡방향 댐핑값과 스프링 상수값을 각각 $178\text{ton} \cdot \text{sec}^2/\text{m}$, $63244\text{ton}/\text{m}$, $537\text{ton} \cdot \text{sec}/\text{m}$ 으로 취했다.

4. 휠/레일간의 상호작용해석

철도차량에 가해지는 힘의 대부분은 휠과 레일의 사이에 있는 직경 수mm의 접촉면을 통해서 전해진다. Hertz의 탄성접촉이론에 근거하여 접촉면은 타원을 이룬다. 매 순간마다 변하는 휠의 특정위치에서 레일과 접하는 접촉점의 위치를 찾아내고, 접촉면의 타원방정식을 구하는 과정인 휠/레일간의 접촉해석은 크리프힘을 구하는 기초 데이터가 될 뿐만 아니라, 휠세트 운동의 제약조건으로 작용하여 휠의 수직변위 및 톨링을 결정한다. 따라서 휠/레일간의 접촉해석은 차량동역학의 매우 중요한 부분으로, 이에 대해 국내외적으로 많은 연구가 수행된 바 있다. 본 연구에서는 접촉해석시 널리 사용되고 있는 WHRAILA프로그램을 사용하여 휠/레일간의 접촉해석을 수행하였다. 접촉평면 내의 힘은 접촉면의 법선방향의 수직력과 접선방향의 마찰력으로 이루어진다. 이와 같은 접선방향의 힘을 크리프힘이라 한다. 크리프힘은 휠과 레일의 상대속도비인 크리퍼지로부터 구해질 수 있으며, K-TGV차량의 운동방정식 유도시 사용된 좌표계에서는 다음과 같이 왼쪽과 오른쪽에 대해 차량진행방향(y)과 진행직각방향(x)으로 유도되어진다.

왼쪽휠

$$\xi'_{yL} = (1/V)\{V[1 - (r_L/r_0)] + a\psi\} \quad (2)$$

$$\xi'_{xL} = (1/V)[\dot{y} + r_L\dot{\phi} + V\psi]\cos(\delta_L + \phi) \quad (3)$$

오른쪽휠

$$\xi'_{yR} = (1/V)\{V[1 - (r_R/r_0)] - a\psi\} \quad (4)$$

$$\xi'_{xR} = (1/V)[\dot{y} + r_R\dot{\phi} + V\psi]\cos(\delta_R - \phi) \quad (5)$$

본 연구에서 사용된 크리프모델은 Kalker의 선형크리프이론에 의해 식 (6), (7)과 같이 계산된 크리프힘을 Johnson의 비선형 이론에 기초해서 식 (9)와 같은 보정을 하여 크리퍼지와 크리프힘의 비선형을 고려하는 Heuristic비선형 모델이다.

$$\text{차량진행방향크리프힘} : F_y = -f_{33}\xi_y \quad (6)$$

$$\text{진행직각방향크리프힘} : F_x = -f_{11}\xi_x - f_{12}\xi_{sp} \quad (7)$$

여기서, $f_{11}, f_{12}, f_{22}, f_{33}$ 는 선형크리프계수로서 Kalker에 의해 제안된 값을 매 계산단계마다 수정해서 사용했으며, 스프링크리퍼지 (ξ_{sp})는 무시하였다.

$$F'_y = \alpha F_y$$

$$F'_x = \alpha F_x$$

(9)

여기서,

$$\alpha = 1 - \frac{\beta^2}{3} + \frac{\beta^3}{27}, \beta \leq 3$$

$$= \frac{1}{\beta}, \beta > 3$$

$$\text{단, } \beta = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\mu N}$$

크리프힘은 접촉면에 작용하는 수직력의 함수이며, 휠세트의 병진가속도(\ddot{y})와 회전가속도($\ddot{\phi}$)에 의한 관성(inertia)이 충분히 작다고 가정하면, 수직력과 크리프힘은 휠의 수직방향(z) 및 롤링(ϕ) 평형조건을 만족해야 한다. 즉, 휠에 작용하는 크리프힘의 계산하기 위해서는 평형조건과 크리프이론을 반복적으로 적용하는 iteration과정이 필요하다. 본 연구에서는 유도된 차량의 운동방정식을 Newmark- β 법으로 직접적분을 수행했으며, 매 적분단계마다 위 계산과정을 반복적으로 수행함으로써 휠에 작용하는 수직력과 크리프힘을 구했다.

5. 개발된 프로그램의 흐름도 및 검증

개발된 프로그램의 흐름도를 크리프힘의 산정을 중심으로 그림 5, 6과 같이 나타내었다. El Centro지진에 대한 2축화차의 거동은 1980년에 일본 철도기술연구원(RTRI)에서 연구된 바가 있다. 일본철도기술연구원의 연구는 휠/레일 기하해석을 간단히 처리했고, 사용한 크리프 이론도 본 연구와 조금은 다르다. 또한 감쇠를 히스테리시스댐핑으로 처리하는 등 다소 본 연구와는 차이가 있으나, 대체적인 비교 자료가 될 수 있을 것 같아 이와의 비교를 통하여 프로그램의 타당성 검증했다. 해석에 사용된 2축화차를 그림 7에 나타내었다. 하부 구조물을 고려하지 않고 지진을 직접 입력했으며, 속도 75km/hr로 주행하는 차량의 거동을 시뮬레이션했다. 또한 사용한 휠은 직경이 45cm이고, 휠의 단면 기하 데이터가 정확히 주어지지 않아 K-TGV 휠의 단면데이터를 사용하였다. El Centro지진 남북방향성분 중 초기 강진구간인 10초 동안의 차량전륜의 횡방향 거동을 그림 8에 일본연구결과와 함께 나타내었다. 그림에 보듯이 본 연구와 RTRI의 연구결과는 차륜의 단면, 감쇠 특성, 크리프이론 등이 다소 다름에도 불구하고, 시간이력의 경향이 유사함을 알 수 있다.

6. 지진발생시 운행중인 K-TGV차량의 거동해석 및 탈선안전성 해석

K-TGV차량의 동력차를 대상으로 지진시의 거동을 시뮬레이션하였다. 입력지진으로는 El centro지진이 고려됐다. 입력지진의 최대지반가속도(PGA)를 El Centro지진의 PGA값인 0.34g와 철도시방서에 근거하여 구조물의 붕괴방지구준인 0.154g와 구조물의 기능수행수준인 0.11g으로 스케일링하여 고려했다. 교량 상을 주행하는 고속철도차량을 대상으로 최고속도(300km/hr), 중속(150km/hr)으로 주행하는 경우와 정지상태와 유사한 1m/sec의 속도로 주행하는 경우를 비교함으로써, 차량속도에 따른 거동을 비교해 보았다. 이와 같은 다양한 매개변수해석을 통하여 지진시의 차량의 동적거동을 살펴보고, 이를 통하여 탈선에 대한 안전성평가를 하였다. 총 38자유도의 차량응답 중 PGA가 0.34g인 경우에 한해 첫 번째 휠의 횡변위를 그림 9, 10, 11에 나타내었다. 또한 차량의 탈선여부 판단하는 중요한 변수인 탈선계수의 시간이력을 그림 12, 13, 14에 나타내었다. 본 연구에서는 차량의 탈선을 휠세트에 레일을 이탈하는 매우 큰 횡변위가 발생하였을 경우와 휠에 작용하는 수직력과 횡력의 비인 탈선계수를 이용하여 판단했다. 일반적으로 탈선계수가 0.8을 넘으면 탈선위험 수준으로 판단한다. 하지만 이와 같은 탈선계수에 의한 탈선평가는 정력학적 평가로서 지진시의 순간적인 탈선발생여부를 평가하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 1995년 '철도기술연합심포지움(J-RAIL '95)'에서 제안된 탈선계수가 0.8을 넘는 시간(작용시간)이 0.015초가 넘는지 여부로써 탈선을 판단

했다. 다양한 조건에 따른 차량주행시뮬레이션 결과를 정리하여, 탈선 평가변수인 차륜/레일간의 상대변위와 탈선계수가 0.8을 넘는 시간(작용시간)을 표 5, 6에 나타내었다. K-TGV차량의 휠인 NF01-112와 UIC60레일의 경우 플랜지 접촉이 발생하는 변위(유간, clearance)는 7.5mm이다. 차륜의 횡변위를 살펴보면, 유간 7.5mm을 넘는 플랜지 접촉이 발생하고 있으나 레일이탈 정도의 큰 횡변위를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 작용 시간의 경우도 0.015초보다 모든 경우에서 작아 탈선은 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 이 두가지 평가 결과를 종합하여, K-TGV차량은 최고속도 300km/hr의 주행속도 전역에서 PGA가 0.34g인 El Centro지진에 대해 안전한 주행을 함을 확인할 수 있었다.

7. 결론

본 연구에서는 지진 발생시 차량의 동적거동을 시뮬레이션 할 수 있는 전산프로그램 개발되어, 이를 이용하여 다양한 조건에 따른 차량의 주행시뮬레이션을 하였으며, 이에 다음의 결론을 얻었다. K-TGV차량의 탈선시뮬레이션 해석결과, 본 연구에서 사용된 휠/레일간의 상대변위에 의한 탈선평가와 탈선계수가 0.8을 넘는 시간(작용시간)을 이용한 탈선평가를 종합하여 차량의 탈선여부를 판단하는 탈선안전성 평가기준이 타당함을 알 수 있었다. El Centro지진에 대한 K-TGV차량의 해석결과, 고속철도차량의 최고주행속도(300km/hr)에 이르는 모든 속도범위에서 안전한 주행이 확인되었다. 또한 차량의 주행속도 저감에 따라 안전성이 더욱 증대됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 G7과제인 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행된 것으로, 연구비를 지원해준 한국철도기술연구원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김준희, 고속철도차량의 지진하중에 대한 동적응답해석, 한국과학기술원 석사학위논문, 2000.2
2. 박홍석, 개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구, 연세대학교 박사학위논문, 1999.2
3. V.K. Garg, and R.V. Dukkipati, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press, 1984
4. R.V. Dukkipati, and J.R. Amyot, Computer-Aided Simulation in Railway Dynamics, Marcel Dekker, Inc., 1988
5. 동역학적 설계 및 해석기술 개발 (2차년도 보고서), 한국과학기술연구원, 1998.10
6. T. Miyamoto, H. Ishida, and M. Matsuo, Running Safety of Railway Vehicle as Earthquake Occurs, QR of RTRI, Vol.38, No.3, September, 1997
7. T.D. Nishioka, and S. Hashimoto, Running Stability of Two-Axle Freight Car on Bridges at Lateral Earthquake Shock, 일본토목학회논문집, 제 296호, 1980.4, pp. 61~72 (In Japanese)
8. M. Miyamoto, Running Safety of Railway Vehicle, 鐵道技術聯合Symposium(J-RAIL' 95), 1995, pp. 15~20 (In Japanese)

표 1. 경부고속철도차량의 질량요소별 특성값

질량요소	질량 ($t \cdot s^2/m$)	무게중심 높이 (m)	회전관성 ($t \cdot s^2 \cdot m$)		
			I_x	I_y	I_z
동력차차체	5.6	1.72	1131.9	59.4	1112.0
동력차대차	0.24	0.56	2.593	1.645	3.068
동력차대차 윤축장치	0.20	0.46	0.11	1.03	1.03

표 2. 경부고속철도차량의 1차 현가장치 특성값

대차종류	스프링계수 (t/m)			감쇠계수 ($t \cdot s/m$)		
	K_{px}	K_{py}	K_{pz}	D_{px}	D_{py}	D_{pz}
동력차대차	917.43	4077.47	124.87	1.02	2.24	1.02

표 3. 경부고속철도차량의 2차 현가장치 특성값

대차종류	스프링계수 (t/m)		감쇠계수 ($t \cdot s/m$)	
	동력차대차	코일 및 탄성베어링	$K_{sx} = 30.78$	수직오일댐퍼
$K_{sy} = 30.78$			좌우오일댐퍼	
견인링크		$K_{sey} = 1048.93$	요댐퍼	$D_{yaw} = 431.19$

표 4. 횡방향 고무스토퍼 스프링특성 (K_{bsx})

동력차대차	변위(mm)	45.0	55.0	60.0	65.0	70.0
	힘(t)	0.0	0.204	0.510	1.325	4.587

표 5. 차륜의 횡변위에 의한 탈선평가

	300km/hr		150km/hr	
	차륜의 횡변위 (mm)	차륜의 수직변위 (mm)	차륜의 횡변위 (mm)	차륜의 수직변위 (mm)
0.34g (El Centro)	8.635	5.308	8.009	4.342
0.154g (붕괴방지수준)	7.959	4.562	7.895	3.473
0.11g (기능수행수준)	7.811	3.319	7.757	3.064

표 6. 작용시간에 의한 탈선평가

	300km/hr		150km/hr	
	작용시간 (초)	탈선계수의 최대값	작용시간 (초)	탈선계수의 최대값
0.34g (El Centro)	0.0125	2.1810	0.0080	2.6695
0.154g (붕괴방지수준)	0.0066	2.0744	0.0049	1.7267
0.11g (기능수행수준)	0.0049	2.0720	0.0050	1.8218

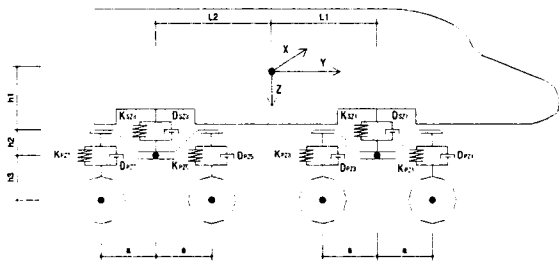


그림 1. K-TGV 동력차의 측면도

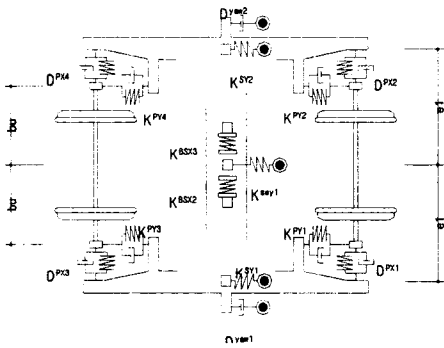


그림 2. 대차의 평면도

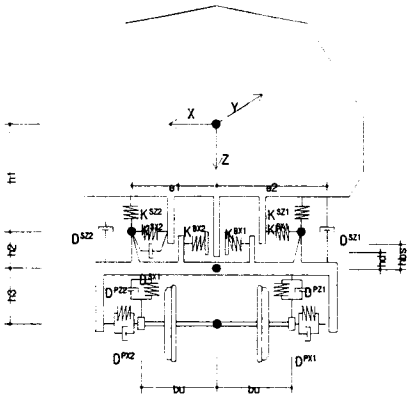


그림 3. K-TGV차량의 후면도

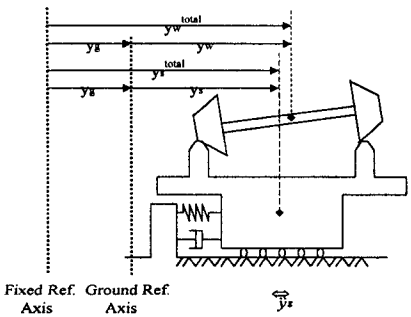


그림 4. 휠과 하부구조물의 변위

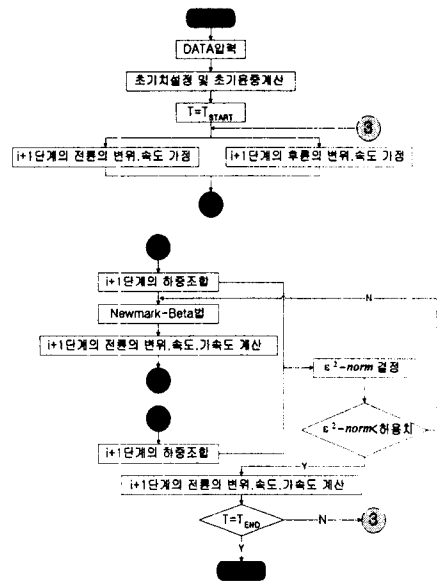


그림 5. 흐름도 I (main)

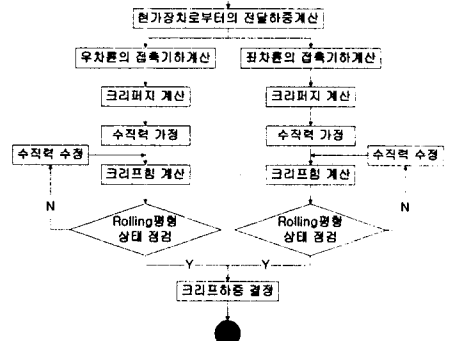


그림 6. 흐름도II(creep subroutine)

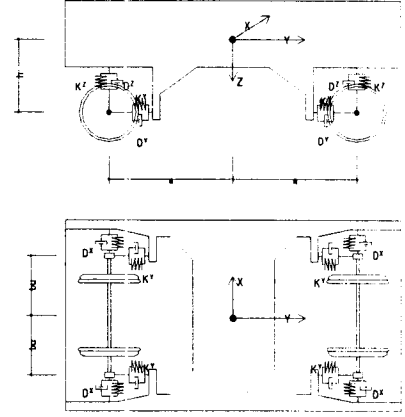


그림 7. 2축화차(측면도,평면도)

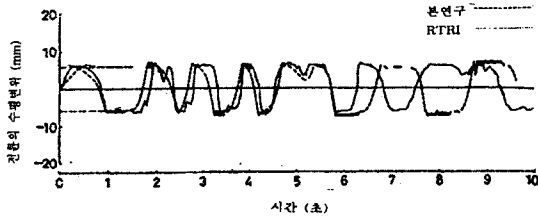


그림 8. 2축화차의 El Centro지진응답

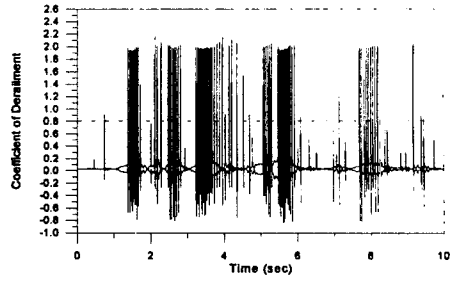


그림 12. 탈선계수
(진한선:오른쪽, 흐린선:왼쪽)
(PGA=0.34g, 속도=300km/hr)

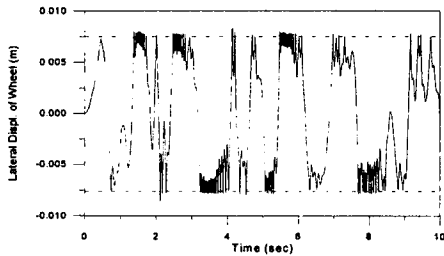


그림 9. 차륜의 횡변위
(PGA=0.34g, 속도=300km/hr)

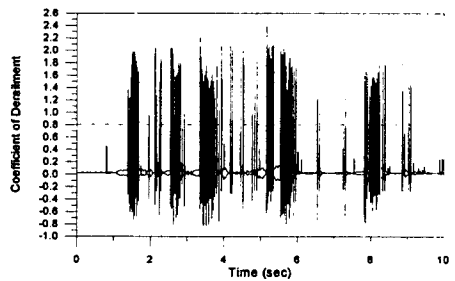


그림 13. 탈선계수
(진한선:오른쪽, 흐린선:왼쪽)
(PGA=0.34g, 속도=150km/hr)

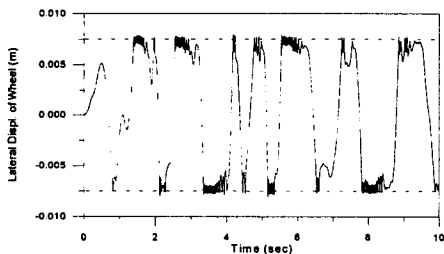


그림 10. 차륜의 횡변위
(PGA=0.34g, 속도=150km/hr)

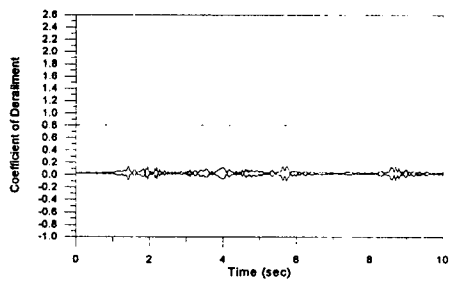


그림 14. 탈선계수
(진한선:오른쪽, 흐린선:왼쪽)
(PGA=0.34g, 속도=1m/s)

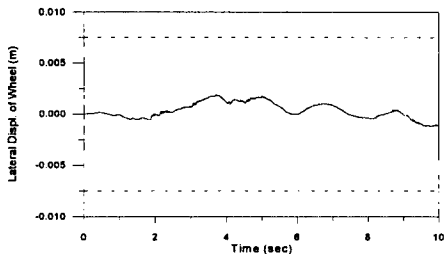


그림 11. 차륜의 횡변위
(PGA=0.34g, 속도=1m/s)