

철도 차량의 지반진동에 의한 주행안전성 평가

최준성^{1)*}, 조만섭²⁾, 이진무³⁾

Running Safety Analysis of Railway Vehicle Systems for Ground Vibration

Jun-Sung Choi, Man-Sup Jo and Jin-Moo Lee

Abstract In this study, dynamic behavior of the vehicles is analyzed, while the track is subjected to lateral vibrations due to earthquake and blasting load. A computer program (WERIA, Wheel Rail Interaction Analysis) is used, which can simulate dynamic responses of vehicles subjected to lateral vibrations. The analysis considers two types of vehicles: I.e. power cars of KTX and Busan subway train. It can also consider the interaction with sub-structures such as tracks and soil. The creep force module is considered, and the running safety of railway vehicles subjected to earthquake and blasting loading is studied. Based on the results of this study, the running safety of the vehicles can be confirmed against lateral vibration.

Key words Running safety, Derailment coefficient, WERIA

초 록 본 연구에서는 발파 및 지진발생으로 인한 횡방향 지반진동에 대하여 KTX 차량 및 부산지하철을 대상으로 주행안전성을 평가하였다. 이를 위하여 철/레일 상호작용 해석 프로그램인 WERIA 프로그램을 이용하여 철도 차량의 동적거동을 시뮬레이션 하였다. 또한, 횡방향 지반진동이 철도차량에 유발할 수 있는 차륜/레일간의 큰 상대변위를 고려하기 위하여 차륜/레일간 접촉면의 기하학적 형상과 크리프힘을 반영하였다. 입력하중은 국내의 내진규정 특성에 부합하는 인공지진과 공사중 발생하는 발파진동을 사용하였다. 해석 결과, 차륜/레일간의 상대 변위와 탈선계수를 산정하여 철도 차량의 주행안전성을 평가한 결과 탈선가능성은 없는 것으로 나타났다.

핵심어 주행안전성, 탈선계수, WERIA

1. 서 론

운행 중인 철도차량은 차량주행방향과 직각을 이루는 횡방향의 수평하중에 의해 주행안전성에 큰 영향을 받을 수 있다. 이와 같은 횡방향의 하중으로는 곡선부 주행 시의 원심력, 돌풍에 의한 풍하중, 지진 및 발파에 의한 지반진동 등을 들 수 있다. 돌풍과 원심력의 작용에 대한 연구는 궤도분야와 철도차량분야^(1,2,3)에서 활발한 연구가 진행되고 있으나, 지반진동 시 운행 중인 차량의 주행안전성 평가⁽⁴⁾는 철도공학과와의 상호 이해력 부족으로 관련된 연구가 다소 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 지반진동에 대한 운행 중인 철도차량의 주행안전성을 평가하기 위하여 그림 1과 같이 지반진동해석과 열차주행해석을 통합하는 새로운 평가 방법을 검토하였고, 지진 및 발파진동을 모사하기 위해 KIESSI Program과 ABAQUS Program을 사용하였으며⁽⁵⁾, 차량의 동적거동을 평가하기 위해 WERIA Program을 적용하였다. 열차주행 안정성 평가는 지하철차량과 고속철도차량(KTX)을 대상으로 수행하였고, 철도차량의 동력차는 객차보다 2.1배 이상 무겁기 때문에 횡방향의 진동하중이 가장 크며 차량의 안정성을 고려해 볼 때 여러 차량이 연결된 열차보다 단일열차의 경우가 더 위험하기 때문에 차량의 동력차만을 대상으로 선정하였다. 입력진동하중은 차량의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 차량주행방향과 직각을 이루는 횡방향 수평지진 및 발파진동을 대상으로 평가를 수행하였다.

¹⁾ 한국유지관리(주) 대표이사

²⁾ SK건설(주) 경부고속철도 14-3공구 설계팀장

³⁾ SK건설(주) Geotask 팀장

* 교신저자 : ceo@kmclab.co.kr

접수일 : 2006년 3월 27일

심사 완료일 : 2006년 8월 2일

2. 철도차량의 운동역학

차량의 진동을 방향과 성질에 의해 분류하면 그림 2와 같이 x, y, z-축 방향의 진동과 각각의 축을 중심으로 하는 회전운동이 있다. 차량동역학에서는 이와 같은 3가지 회전운동을 피칭(pitching, θ), 롤링(rolling, ψ), 요잉(yawing, ϕ)이라 하고, 임의의 한 물체의 진동은 3개의 병진운동과 3개의 회전운동으로 구성되어 있어 총 6개의 자유도를 가진다.

3. 열차의 탈선계수

3.1 Nadal 공식의 유도

탈선에 대한 안전성을 정량적으로 평가하는 식으로서 나달(Nadal)이 제안한식이 널리 이용되고 있다. 타오르기탈선의 경우 좌차륜플랜지가 레일에 접하는 경우의 상태를 그림 3에 나타냈다. 접촉점에서 접평면이 수평면과 이루는 각을 접촉각(α)이라 한다.

이 접촉점에서 차륜이 레일로부터 받는 수직력(N)과 횡방향크리프힘(T)의 합력이 작용력(F)이다. 이 힘을 수직방향과 수평방향으로 나누어 각각 윤중(P), 횡력(Q)이라 한다. 윤중과 횡력은 정역학적 평형관계를 사용하여 다음과 같이 결정된다.

$$Q = N \times \sin \alpha - T \times \cos \alpha$$

$$P = N \times \cos \alpha + T \times \sin \alpha$$

그리고 윤중과 횡력의 비, 즉 Q/P를 탈선계수라고 한다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - (T/N)}{1 + (T/N) \tan \alpha}$$

3.2 탈선안전성 평가 방법

일반적으로 널리 사용되어지는 탈선안전성 평가지표에는 탈선계수, 윤중감소, 차륜의 횡력, 차륜/레일간의 횡방향 충돌속도, 좌우방향 진동가속도 등이 있다. 이와 같은 여러 지표들의 허용한계를 정해 차량의 탈선안전성을 평가한다. 이 중 특히 중요한 것이 탈선계수의 한계값이다. 이 값은 1965년 ‘탈선에 대한 안전기준연구 Group’이 일본철도기술연구원(RTRI)에 구성되어 2년간의 연구 결과 결정되었다. 타오르기탈선에 대해 당시 국철에서 사용되던 표준형차륜플랜지각도(60°)에, 마찰계수는 당시 일반적으로 최대치라고 생각되던 0.3을 Nadal식에 대입하고, 안전율 1.2로 나누어 0.8을 탈선계수의 한계치로 정했다. 날아오르기탈선에 대해서는

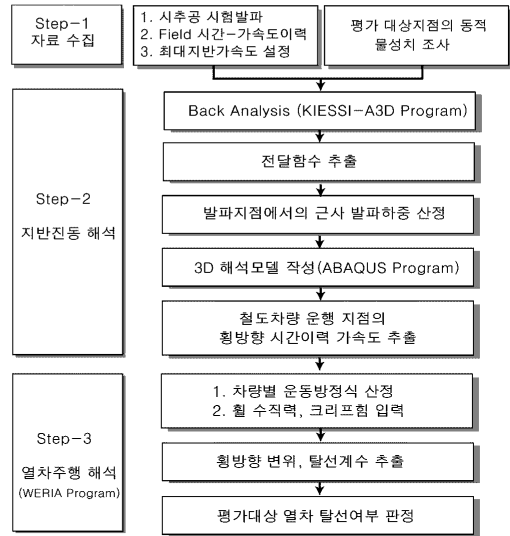


Fig. 1. Flow chart of running safety analysis for ground vibration

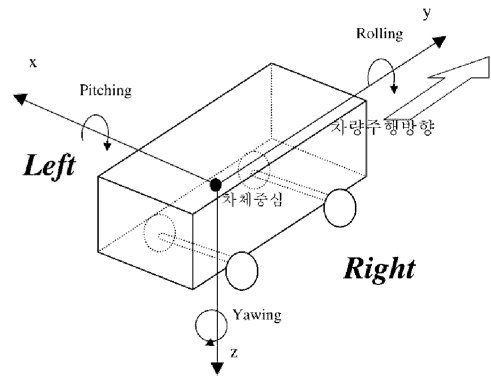


Fig. 2. Vibrations of vehicle system

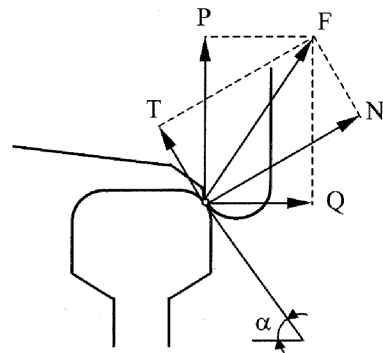


Fig. 3. Force of wheel and rail

차량운동의 시뮬레이션과 차량모형실험을 통하여 횡력의 작용시간이 0.05초 이하이고, 탈선계수의 한계는 0.04/t라고 정해졌다. 탈선계수의 최대치의 한계가 횡력의 작용시간에 따라 정해진다. 횡력의 작용시간이 0.05초보다 큰 경우 타오르기탈선에 해당하여 탈선계수가 0.8보다 클 경우 주의를 요한다. 반면에 횡력의 작용시간이 0.05초보다 작은 경우 작용시간에 반비례하여 탈선계수의 한계치가 결정된다.

하지만 이와 같은 탈선계수에 의한 안전성 평가는 일반적인 주행안전성 평가로는 미흡한 점이 있다. 실제 주행차량실험결과와 차량시뮬레이션 결과 단시간에 작용하는 횡력, 혹은 운중감소에 의해 탈선계수가 순간적으로 한계치를 넘는 경우가 있으나 실제로 차량의 상승량이 작고, 탈선의 위험성이 없는 경우가 대부분이다. 따라서 주행안전성평가기준을 채택하기 위해 일본을 비롯한 여러 철도 선진국들은 이에 대한 연구를 계속하고 있다. 본 연구에서는 이 중 일본에서 1995년 ‘철도기술연합심포지움(J-RAIL‘95)’에서 제안된 탈선계수가 0.8을 넘는 시간(작용시간)이 0.015초가 넘는지 여부로써 탈선을 판단하였다.

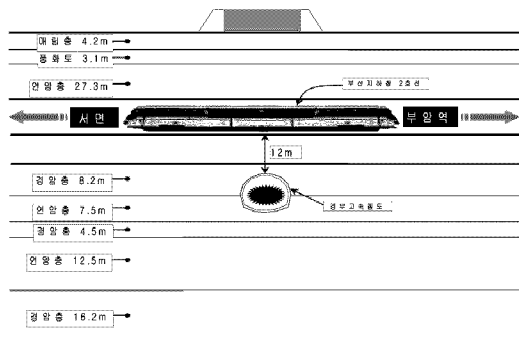


Fig. 4. Layout of model case-1

4. 지반진동에 의한 철도차량의 탈선안전성 해석

4.1 해석대상 모델 설정

본 연구에서는 지반진동에 의한 운행 중 철도차량의 탈선안전성을 평가하기 위해 그림 4, 5와 같이 경부고속철도 제○○○공구의 2개 지점을 대상으로 선정하였으며, Case-1은 부산지하철 2호선과 발파예상지점과의 이격거리가 12 m로 매우 근접한 경우이고, Case-2는 경부고속철도(KTX) 대구-부산간 일반철도 운행구간으로서 발파예상지점과의 이격거리가 45.85 m로 비교적 원거리 경우를 상호 비교하여 보았다.

본 해석대상 운행 차량의 최고속도는 120 km/hr의 속도로 주행하는 경우를 가정하였고, 지하철 및 KTX의 동력차는 객차보다 2.1배 이상 무겁기 때문에 횡방향의 진동하중이 가장 크므로 이를 해석대상으로 선정하였다. 표 1에는 해석대상 동력차량의 부분별 중량과 무게중심 높이를 나타내었다.

4.2 발파진동 및 지진 최대지반가속도 선정

입력 진동으로는 Case-1과 Case-2와 교차하는 지점의 표준발파패턴에 의한 발파진동(장약량 750 g)과 철도

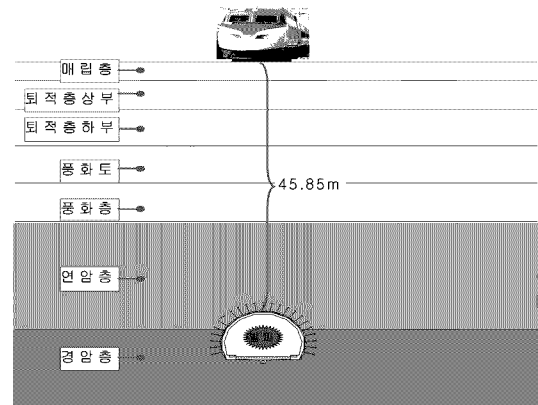


Fig. 5. Layout of model case-2

Table 1. KTX and subway train properties

해석대상	질량요소	질량(ts2/m)	무게중심 높이(m)
고속철도차량(KTX)	동력차차체	5.6	1.72
	동력차대차	0.24	0.56
	동력차대차 윤축장치	0.20	0.46
지하철차량	차체중중량(공차, ton)	28	1.8
	대차중량(ton, 1개)	3.8	0.45
	윤축중량(ton, 1개)	1.4	?

운행지역에서 발생 가능한 시뮬레이션된 인공지진이 고려됐다. 사용된 지진의 최대지반가속도(PGA)는 철도시방서에 근거하여 구조물의 붕괴방지수준인 0.154 g와 구조물의 기능수행수준인 0.11 g인 지진을 고려하였다.

본 해석에서는 일상적인 발파공사로 인한 이격거리별 열차의 주행안전성을 각각 Case-1a, Case-2a로 평가해보았고, 공사 중 가장 위험한 상태를 가정하여 발파진동과 시뮬레이션된 인공지진이 합성된 경우에 대하여 Case-1b, Case-2b를 평가하여 보았다. 표 2에는 본 해석의 Case에 대한 특성을 요약하였다.

4.3 해석 및 분석결과

운행 중 철도차량의 주행안전성 평가는 그림 1의 흐름도에서 설명한 바와 같이 크게 2개 부분의 해석을 조합하였는데, 해석대상의 궤도 위치에서 발생될 수 있는

진동을 산출하는 과정⁽⁶⁾과 이를 이용하여 탈선계수를 산출하는 과정⁽⁷⁾으로 구분할 수 있다. 전자의 경우는 참고문헌에 수록된 바와 같이 지표에서 실측된 시간-가속도이력을 이용하여 발파지점에서의 발파하중을 추출하고, 실제 검토대상 지점에 대한 모델링을 통해서 진동 발생 거리와 지층특성이 반영된 궤도에서의 시간-가속도이력을 역으로 추출하였다. 후자는 이상에서 구한 진동에 대해서 열차의 중량과 속도에 대한 차량 휠의 횡방향 변위와 탈선계수를 구하여 주행안전성을 평가할 수 있다.

본 논문에서는 철도차량의 탈선 안전성 해석을 위하여 해석구간은 발파진동 및 지진 시 많은 영향을 받을 것으로 판단되는 대표 교차구간(그림 4, 5 참조)에 대하여 해석을 수행하였으며, 이때 사용된 각 구간별 모델링 형상 및 물성치를 그림 6, 7과 표 3에 나타내었다.

Table 2. Summary of analysis cases for running safety analysis

	차량 종류	이격거리	진동종류
Case-1	지하철동력차량	12.00 m	발파진동(Case-1a) 발파진동 + 지진(Case-1b)
Case-2	KTX동력차량	45.85 m	발파진동(Case-2a) 발파진동 + 지진(Case-2b)

Table 3. Material property of soils

구 분	압축파속도(km/sec, Vp)	전단파속도(km/sec, Vs)	탄성계수(MPa, Ed)	포아송비(vd)
매립층	0.51	0.20	1,84	0.41
퇴적층	0.59	0.26	3,42	0.38
풍화토	0.65	0.29	4,48	0.38
풍화암	1.01	0.51	14,80	0.33
연암	1.66	0.89	48,59	0.31
경암	2.57	1.34	125,89	0.30

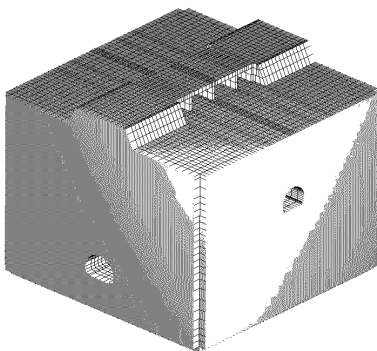


Fig. 6. Mesh refinement of case-1

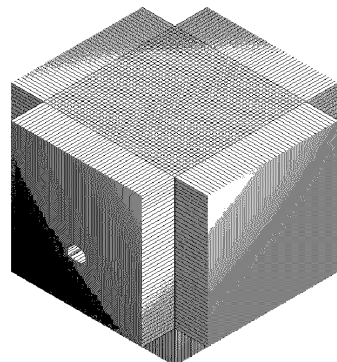


Fig. 7. Mesh refinement of case-2

(1) 레일부의 횡방향 지반가속도 응답 산정 결과
 레일부의 횡방향 지반가속도 응답을 추출하기 위하여 그림 8과 같이 KIESSI-A3D Program을 이용하여 시험 발파 시 계측한 지점에서의 전달함수를 산정하였고, 이 전달함수를 이용하여 발파하중을 산정하였다. 그림 9는 상기의 발파하중으로부터 ABAQUS Program을 이용한 유한요소해석을 통해 횡방향 시간이력 가속도로 나타낸 것으로서 각각 Case-1a, Case-2a의 지층조건과 발파지점까지의 거리에 따라 발생한 지하철 궤도부분에

서의 가장 횡방향 시간이력 가속도이다. 발파지점이 12 m로 근접된 Case-1 지하철 교차지점에서의 가속도가 지표에 위치하는 Case-2 KTX 교차지점에 비해 약 10 배 이상 크게 나타났다.

또한, 지진하중과 발파진동을 합성하여 위와 동일한 방법으로 그림 10과 같이 각각 Case-1b, Case-2b의 횡방향 지반가속도 응답을 산정하였다. 지진하중과 발파진동의 조합에 의한 영향은 지진하중의 크기가 발파하중에 비해 크고, 지진파의 특성 상 지중구조물보다 지

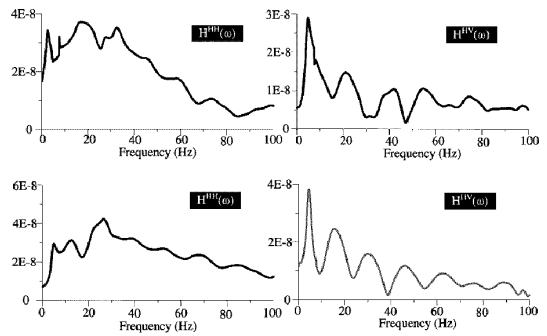
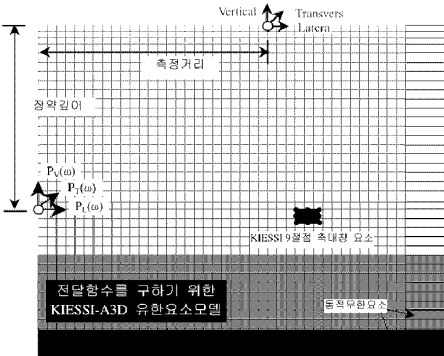
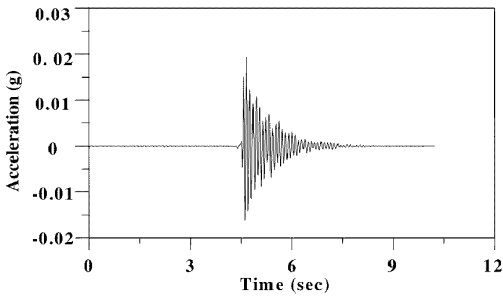
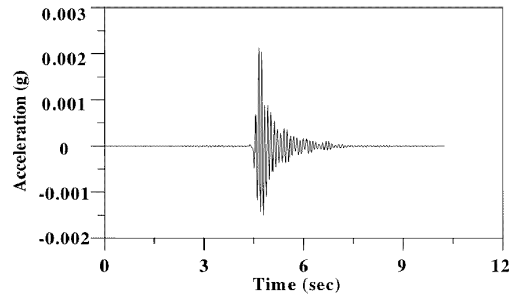


Fig. 8. Calculated amplification spectra for blasting load

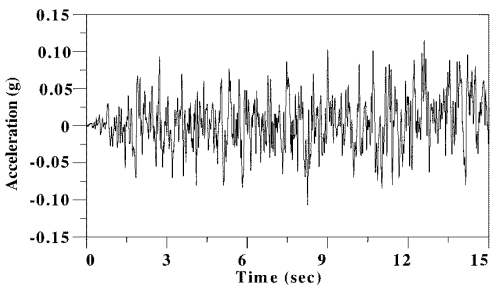


(a) Case-1a

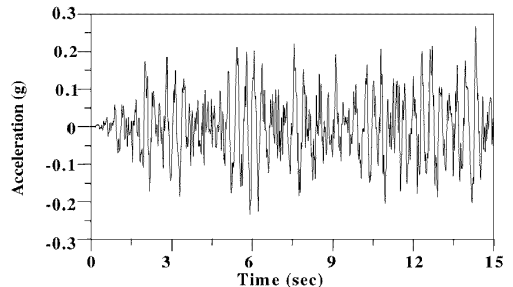


(b) Case-2a

Fig. 9. Lateral Accelerations in rails by blasting



(a) Case-1b



(b) Case-2b

Fig. 10. Lateral Accelerations in rails by composite of blasting and earthquake

표에서의 횡방향 진동이 크게 발생하는 특성에 기인하여 지표에 위치하는 Case-2 KTX 교차지점에서 Case-1에 비해 약 2배 이상 크게 나타났다.

(2) 횡방향 변위 및 탈선계수 해석 결과

운행 중 철도차량의 주행안전성을 평가하기 위해서는 휠-레일 접촉해석이 필요하며, 휠-레일간의 접촉해석에는 휠세트의 수평변위만을 고려하는 2차원 해석과 요잉(yawing, θ)까지 고려하는 3차원 해석이 있다. 일반적으로 휠의 요잉은 곡선주행을 제외하고 매우 작은 값을 가지므로 두 해석간의 차이는 별로 없지만 엄밀한 해석이 필요한 경우에는 3차원 해석을 수행해야 한다.

본 연구에서는 선진G7프로젝트를 통해 개발된 WERIA 프로그램⁽⁸⁾을 이용하여 횡방향 지반진동으로 인한 철도차량의 휠-레일간 접촉면의 기하해석 및 탈선계수를 산출하였고 이를 이용하여 탈선계수의 허용한계 초과여부에 따라 그림 11~14와 같이 주행안전성을 평가해 보았다.

그림 11에는 발파진동(Case-1a) 및 합성진동(Case-1b)에 따른 지하철 차량 휠의 수평변위 값을 나타내었고, 수평변위량의 기준치 8 mm에 대해 (a)는 최대 0.097 mm로 매우 미미한 것으로 해석되었다. 그러나 (b)는 기준치에 매우 근접하는 7.5 mm로 나타나 지진하중에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다. 그림 12에는 Case-1a 및 Case-1b에 대해 120 km/h 속도로 운행 중에 있을 때 탈선 시뮬레이션 해석결과를 나타내었는데, (a)는 차륜-레일간의 상대변위에 의한 탈선계수가 0.8을 초과하는 시간이 존재하지 않아 매우 안정적인 상태를 나타내었다. 그리고 (b)는 탈선계수 0.8을 초과하는 시간이 0.0047초로서 탈선상태를 표시하는 0.015초보다 적은 값을 나타내어 지하철 차량의 주행안전성이 충분한 것으로 나타났다.

그림 13은 KTX차량의 탈선시뮬레이션 해석결과로서 Case-2a 및 Case-2b에서 보는 바와 같이 수평변위량의 기준치 8 mm에 대해 (a)는 최대 0.022 mm로 매우 미

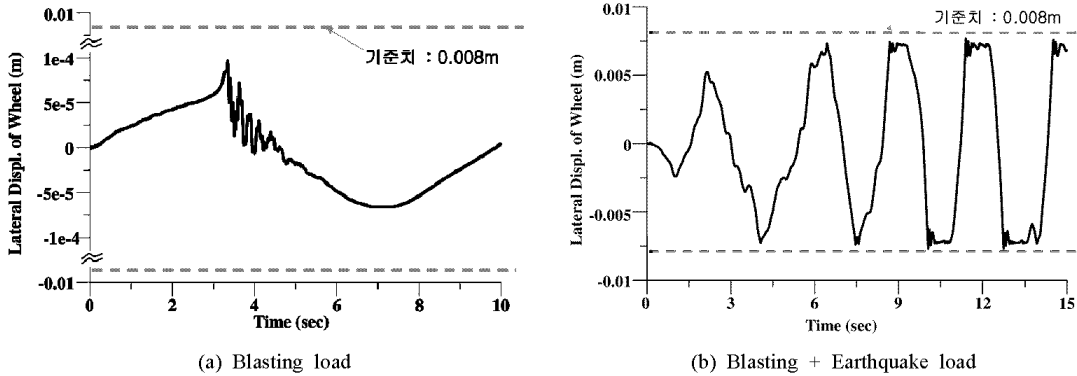


Fig. 11. Lateral displacement (subway train, Case-1)

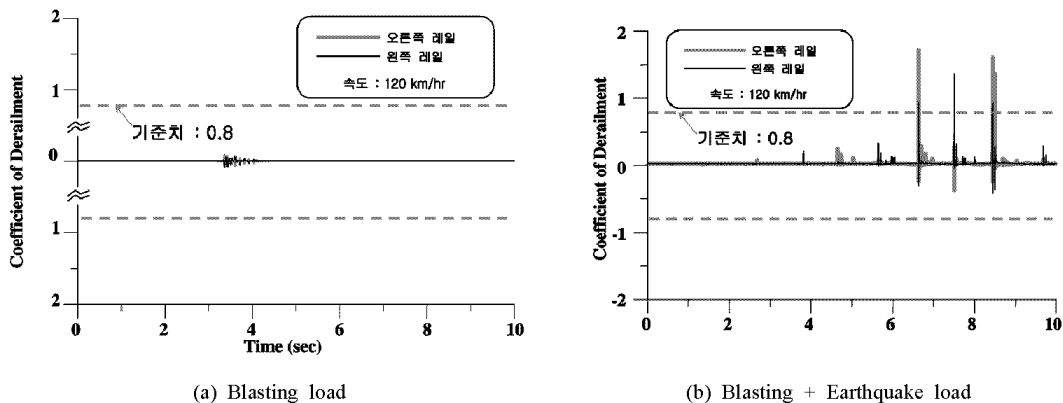


Fig. 12. Derailment coefficient (subway train, Case-1)

미한 것으로 해석되었다. 그러나 (b)는 기준치에 매우 근접하는 7.7 mm로 나타나 지하철차량보다 더 지진하중에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다. 그리고 그림 14에는 Case-2a 및 Case-2b에 대해 120 km/h 속도로 운행 중에 있을 때 탈선 시뮬레이션 해석결과를 나타내었는데, (a)는 차륜-레일간의 상대변위에 의한 탈선계수가 0.8을 초과하는 시간이 지하철차량과 같이 존재하지 않아 매우 안정적인 상태임을 나타내었다. 또한 (b)는 탈선계수 0.8을 초과하는 시간이 0.0049초로서 탈선상태를 표시하는 0.015초보다 적은 값을 나타내어 KTX차량도 주행안전성이 충분한 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 발파 및 지진발생 시 철도차량의 동적 거동을 시뮬레이션하여 횡하중이 철도차량에 유발할 수 있는 차륜-레일간의 큰 상대변위와 탈선계수를 산정

함으로써 주행 시 안전성 평가해석을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 발파지점과의 이격거리에 따라서 수평방향 진동속도가 근거리의 경우가 원거리의 경우보다 크게 나타났으나, 발파진동과 지진의 합성에 의한 경우는 지표부근에서 지중 구조물보다 다소 크게 나타남을 알 수 있었다.
2. 부산지하철 2호선 차량과 KTX차량의 탈선시뮬레이션 해석결과, 본 과업에서 사용된 차륜-레일간의 상대변위에 의한 탈선평가와 탈선계수가 0.8을 넘는 시간(작용시간 0.015초)을 이용한 탈선평가를 종합하여 차량의 탈선여부를 판단하는 탈선안전성 평가기준에 모두 작은 값을 보임으로써 주행열차의 안전성을 확인하였다.
3. 철도차량의 해석결과, 철도차량의 주행속도(120 km/hr)에 이르는 모든 속도범위에서 안전한 주행

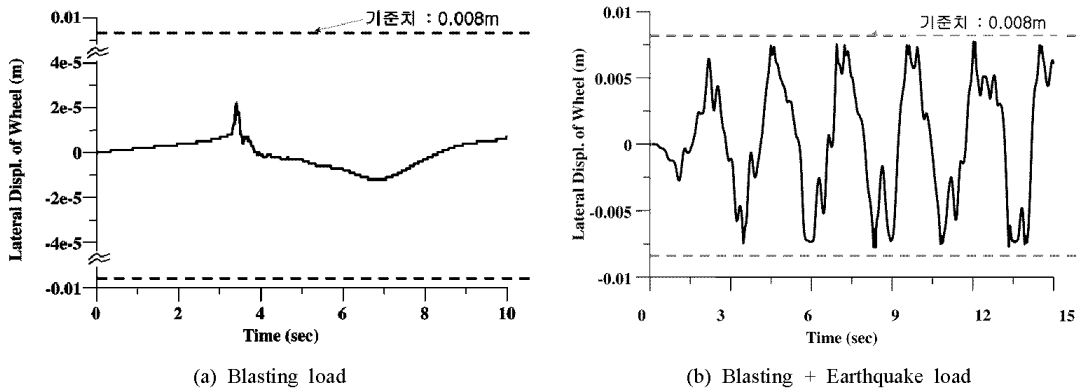


Fig. 13. Lateral displacement (KTX, Case-2)

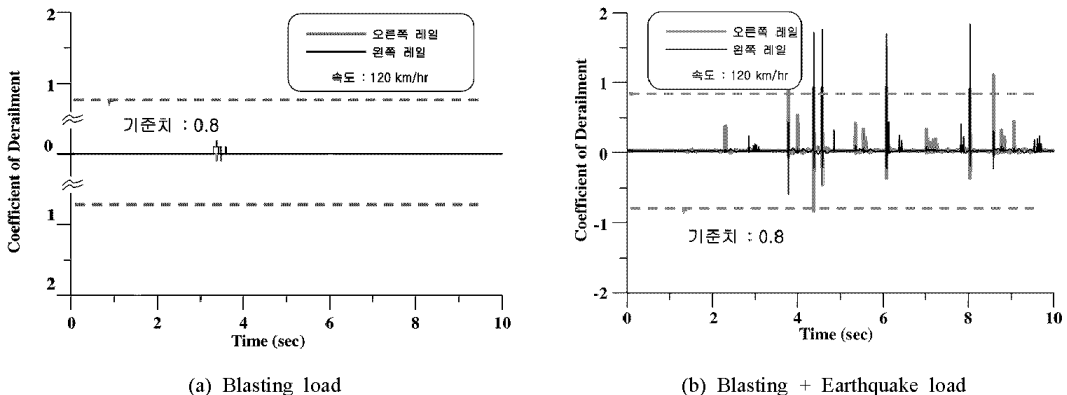


Fig. 14. Derailment coefficient (KTX, Case-2)

이 확인되었다. 또한 발파의 영향으로 인한 주행차량의 안전성에는 영향을 거의 주지 못하는 결과를 나타냈으며 지진의 영향이 상대적으로 차량안전성에 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

참고문헌

1. V.K. Garg, and R.V. Dukkipati, 1984, "Dynamics of Railway Vehicle Systems", Academic Press
2. R.V. Dukkipati, and J.R. Amyot, Computer-Aided, 1988, "Simulation in Railway Dynamics", Marcel Dekker, Inc.
3. Shah, M., Thirumalai, M., Cui, K., McGirt, P, and Haque, I. 1997, "Symbolic Methods for Modeling Rail Vehicle Systems", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 18, No. 5(Special issue), pp. 487-517
4. T. Miyamoto, H. Ishida, and M. Matsuo, 1997, "Running Safty of Railway Vechile as Earthquake Occurs", QR of RTRL, Vol. 38, No.3, September
5. (주)태조엔지니어링, 2004, "경부고속철도 제14-3공구 노반신설 기타공사 대안설계 진동 및 소음평가 용역 보고서", pp. 63-85
6. 최준성, 조만섭, 이진무, 2006, "역해석기법에 의한 발파하중 산정 및 수치해석을 이용한 구조물의 진동영향 평가", 한국암반공학회 논문집, 제16권, 제3호, pp. 232-240
7. 김준희, 2000, "고속철도 차량의 지진하중에 대한 동적응답해석", 한국과학기술원 석사학위 논문
8. 동역학적 설계 및 해석기술 개발(2차년도 보고서), 한국과학기술연구원, 1998.10



최준성

1992년 연세대학교 토목공학과, 공학사
1994년 한국과학기술원 토목공학과, 공학석사
1999년 한국과학기술원 토목공학과, 공학박사

Tel: 02-830-7071
E-Mail: ceo@kmclab.co.kr
현재 한국유지관리(주) 대표이사



조만섭

1991년 전북대학교 자원공학과, 공학사
1993년 전북대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2001년 전북대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel: 051-894-5970
E-Mail: mscho66@ericmail.net
현재 SK건설(주) 경부고속철도 14-3공구 설계팀장



이진무

1984년 연세대학교 지질학과, 이학사
1986년 연세대학교 대학원 지질학과, 이학석사

Tel: 02-3700-7483
E-Mail: jmlee-d@skcc.co.kr
현재 SK건설(주) Geotask 팀장