

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.10.1063>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

도시철도차량 타고오름 평가를 위한 3 차원 충돌시뮬레이션 기법 연구[§]

진성주^{*,**} · 정현승^{*,**†} · 권태수^{*,**} · 김진성^{*,**}

* 한국철도기술연구원, ** 한국과학기술연합대학원대학교

Study on 3-D Simulation for Overriding Evaluation of Urban Train

Sung Zu Jin^{*,**}, Hyun Seung Jung^{*,**†}, Tae Soo Kwon^{*,**} and Jin Sung Kim^{*,**}

* Railroad Safety Research Division, Korea Railroad Research Institute,

** Dept. of Robotics & Virtual Engineering, Korea Univ. of Science and Technology.

(Received April 24, 2015 ; Revised July 16, 2015 ; Accepted July 21, 2015)

Key Words: Urban Train(도시철도), Simulation(시뮬레이션), Collision(충돌), Overriding(타고오름)

초록: 본 논문에서는 도시철도차량의 타고오름 평가를 위한 충돌시뮬레이션 기법을 제안하였다. 시뮬레이션모델은 대차의 동적 거동을 표현하는 대차 동역학 모델과 붕괴거동을 표현할 수 있는 차체 유한요소 모델로 구성된다. 유럽 및 국내 충돌안전규정의 타고오름 평가를 위해 40 mm 오프셋 정면충돌 사고 각본에 따른 시뮬레이션을 수행하여 충돌 후 차체의 구조적 거동과 차체와 연계된 대차 모델의 동적 거동을 확인하였으며 타고오름 판단기준인 윤축의 상승거리로 타고오름을 평가하였다. 최종적으로 본 연구에서 제안한 시뮬레이션 기법을 적용하면 도시철도차량 충돌안전규정에 따라 충돌사고 시 타고오름에 대하여 평가할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: In this paper, we propose a collision simulation technique the evaluation of urban trains. We perform simulation that include a dynamics bogie model which represents the dynamic behavior of bogies and a finite-element model that can model crash behavior. We perform simulation in accordance with the 40-mm vertical offset head-on scenario for overriding the evaluation of the EU and domestic crashworthiness regulations. We evaluate the overriding by the vertical displacement of the wheelset using the overriding evaluation standard. Finally, if proposed simulation technique is applied, we can evaluate the overriding for urban-train crashworthiness regulations.

1. 서 론

철도차량의 충돌사고 발생 시 차량의 피칭운동 및 차량간 무게중심 차이로 인해 타고오름 현상이 발생하며 이는 탈선으로 이어져 열차사고의 피해를 증가시키는 요인이 된다. 충돌사고 시 피해를 최소화 하기 위해 충돌안전규정이 도입되는 추세이며 이러한 규정에 따라 철도차량의 충돌안전성 검증이 요구되고 있다. 철도차량의 경우 충돌시험을 통한 충돌안전성 검증은 막대한 시간과 비용이 소요 되므로 시뮬레이션을 통해 충돌안전성을 평

가하고 있다.

철도차량 시뮬레이션은 초기 설계단계 또는 완성차량에 대하여 충돌안전성을 검증하는데 주로 이용된다. 3 차원 시뮬레이션 모델은 철도차량의 변형과 동적거동을 유사하게 표현 할 수 있지만 장시간의 해석시간이 소요 된다. 따라서 초기 설계단계에서 충돌안전을 평가하기 위해 다양한 시뮬레이션 기법들이 연구 되고 있다. 박민영 등⁽¹⁾은 3 차원 시뮬레이션 모델을 이용하여 단면 옵션을 사용한 구간별 하중-변형 특성으로 1 차원 등가모델을 개발하였고 김거영 등⁽²⁾은 변형구간을 고려한 2 차원 모델을 개발하고 충돌해석을 통해서 1 차원 및 3 차원 모델과 타고오름 거동을 비교하고 1 차원 모델보다 향상된 충돌 거동을 구현 하였다.

철도차량의 충돌안전 검증을 위한 시뮬레이션모

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2015.4.15.-18., 휘닉스아일랜드) 발표 논문임

† Corresponding Author, jhs@krii.re.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

델은 차체의 구조적 거동과 대차 모델의 동적거동이 표현되어야 하므로 3 차원 시뮬레이션을 통하여 충돌안전을 평가한다. 김거영 등⁽³⁾은 3 차원 모델과 1 차원 모델을 결합한 하이브리드 모델을 이용하여 유럽 TSI 규정의 충돌 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하고 철도안전규정의 평가기준으로 충돌안전성을 평가 하였다. 또한 조현직 등⁽⁴⁾은 철도차량 3 차원 가상테스팅모델을 이용하여 충돌 해석을 수행하고 충돌 시 차량의 탈선 거동을 평가하기 위한 이론모델을 도출하였고 Kash⁽⁵⁾은 기관차와 호퍼카의 충돌시험에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하고 충돌시험과 동일한 조건의 시뮬레이션을 수행하여 시험과 시뮬레이션의 충돌 거동과 결과 데이터를 비교, 평가 하였다. Zhou 등⁽⁶⁾은 철도차량의 중량, 피칭운동으로 인한 수직 위치 차이, 무게중심 차이의 세 요인을 타고오름 발생 요인으로 선정하여 다물체 동역학 시뮬레이션을 수행하고 발생 요인들의 민감도를 평가하였다.

위의 연구사례에서 1 차원 및 2 차원 등가모델은 국내 및 유럽 충돌안전기준에 따른 철도차량의 충돌안전성 평가를 위한 시뮬레이션 모델로써 적합하지 않고 3 차원 시뮬레이션 연구의 경우 표준충돌사고 각본에 따르지 않거나 고속철도 및 개발차량에 관한 충돌 안전성 연구를 수행한 반면 도시철도차량에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 과거에는 도시철도차량에 대한 타고오름 평가기준이 없었지만 2014 년도에 철도차량기술기준⁽⁷⁾이 고시되면서 2016 년 3 월 이후에 발주되는 도시철도차량은 3 차원 시뮬레이션 평가모델을 이용하여 타고오름을 평가해야 한다.

본 연구에서는 도시철도차량의 타고오름 거동을 표현하기 위하여 동역학 대차 모델이 포함된 도시철도차량 시뮬레이션 모델을 생성하였고 상용소프트웨어인 LS-DYNA⁽⁸⁾를 사용하여 충돌 후 타고오름 현상을 3 차원 시뮬레이션을 통하여 평가하였

다. 유럽충돌안전규정 EN 15227⁽⁹⁾ 및 국내 철도차량기술기준의 충돌시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하고 타고오름의 판단기준인 윤축의 상승변위로 타고오름을 평가하였다.

2. 충돌안전규정 및 시뮬레이션 모델

2.1 충돌사고각본 및 타고오름 판단기준

유럽 및 국내 충돌안전규정에서는 운행조건에 따라 철도차량을 4 종류로 분류하고 있다. (Table 1) 이 중 도시철도차량은 제 2 종에 속하며 다른 도로교통수단과 혼합되지 않고 전용노선에만 운행되는 철도차량이다. 충돌안전규정의 충돌사고각본 (Table 2)은 정면충돌, 이종차량과 충돌, 대형장애물 충돌, 소형장애물 충돌로 이루어져있다. 제 2 종차량의 경우 정면충돌사고각본으로 충돌안전성을 평가하도록 하고 있다. 정면충돌사고각본은 직선 평탄선로에서 제동이 미체결된 동일한 편성열차와 25 km/h의 속도로 정면충돌하는 조건이다.

Table 2 Collision scenario

표준충돌사고각본	피충돌체	운행환경에 따른 적용 여부	충돌속도 (km/h)			
			제 1 종	제 2 종	제 3 종	제 4 종
정면충돌	충돌열차와 동일	모두 적용	36	25	25	15
이종차량	80 톤 차량	사이드버퍼가 있는 이종차량과 혼합 운행	36	x	25	x
	129 톤 차량	중앙연결기가 있는 이종차량과 혼합 운행	x	x	10	x
대형장애물	15 톤 변형장애물	건널목이 있는 경우	주 1)	x	25	x
	3 톤 강체장애물	도로교통수단과 혼합 운행	x	x	x	25
소형장애물	소형장애물	장애물제거기 정하중 조건	라향 참조	x	라향 참조	x

Table 1 Vehicle classification according to the operating conditions

차량분류	운행조건
제 1 종	도시철도차량 중 일반철도노선과 혼합 운행되는 경우
제 2 종	도시철도차량 중 전용노선에서만 운행되는 경우
제 3 종	도시철도차량 중 도로교통수단 및 일반철도노선과 혼합 운행되는 경우
제 4 종	도시철도차량 중 도로교통수단과 혼합 운행되는 경우

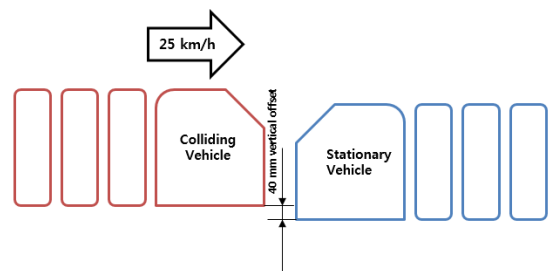


Fig. 1 40 mm vertical offset Head on collision scenario

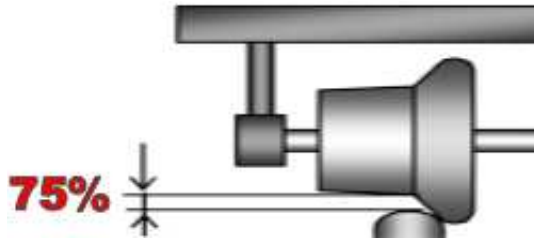


Fig. 2 Evaluation standard of override

충돌안전에 대한 판단기준은 수직방향 40 mm 오프셋 상태로 정면충돌사고각본(Fig. 1)에 따라 시뮬레이션을 수행하여 승객 및 승무원의 탑승구역에서 변형이 발생하지 않고(생존공간 유지조건) 각 차량의 평균감속도가 5g 이하(감속도제한, $g : 9.8m/s^2$)를 만족하며 다음과 같은 타고오름 판단기준을 만족해야 한다.

대차 당 적어도 하나의 윤축이 선로와 유효하게 접촉하고 있어야 하고 하나의 윤축에서 선로상 수직변위가 플렌지 높이의 75 %를 항상 넘지 않으면 타고오름 판단기준을 만족하는 것으로 간주한다. 타고오름 방지장치가 장착되어 있는 경우는 충돌 시뮬레이션 동안 타고오름 방지장치가 접촉 상태를 유지하고 충돌안전장치가 적절히 작동하는 동안 차량의 상승거리가 100 mm 이내이면 판단기준을 만족한다. 본 연구의 시뮬레이션 모델은 타고오름 방지장치가 장착되어 있지 않으므로 윤축의 상승거리가 플렌지 높이(25 mm)의 75 %(18.25 mm)를 비교하여 타고오름을 평가한다. (Fig. 2)

2.2 시뮬레이션 모델

철도차량의 충돌안전 성능평가는 편성열차 단위로 이루어지고 열차 질량은 운전정비상태의 질량과 50% 좌석승객의 질량을 합한 충돌질량을 기준으로 한다. 편성열차 전체를 유연체로 모델링 할 경우 해석시간의 상당히 소요되므로 구조체의 변형이 발생하는 선두차량 및 선두 두번째 차량까지 3 차원으로 모델링하고 나머지 부분은 집중질량과 스프링 시스템 등과 같은 단순모델이 사용 가능하다.⁽⁹⁾

타고오름 평가를 위한 충돌 시뮬레이션의 동역학적 대차 모델은 차체와 연계되어 충돌거동을 구현하며 타고오름을 판단하는 매우 중요한 역할을 한다.(Fig. 4) 본 연구의 시뮬레이션을 위한 동역학 대차 모델은 대차틀, 윤축, 센터블럭, 1차 및 2차 서스펜션과 센터러버(Center rubber), 센터피봇(Center pivot), 횡댐퍼, 횡버퍼 등으로 구성된다. 대차틀과 윤축 센터블럭은 쉘 요소로 모델링 하였

Table 3 Application of suspension characteristic

	Stiffness(MN/m)			Damping (MN sec/m)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Primary Suspension	O	O	O	O	O	O
2 nd Suspension	O	O	O	x	x	O
Lateral Damper	x	x	x	x	O	x
Center Rubber	O	O	O	O	x	x
Lateral Buffer	x	O	x	x	x	x
Center Pivot	O	O	O	x	x	x

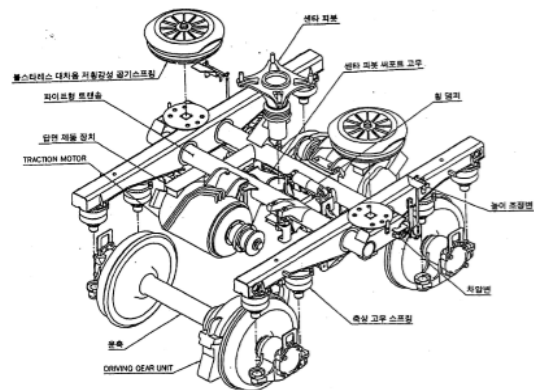


Fig. 3 Assembly view of bogie system

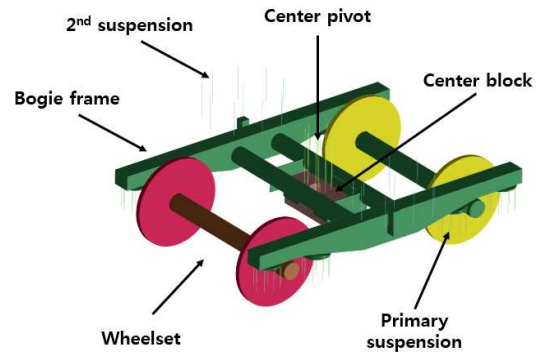


Fig. 4 Bogie system of simulation model

고 서스펜션 및 센터피봇은 Nonlinear discrete 6DOF beam 을 적용하였다. 대차틀과 차축, 센터블럭은 차체 구조물보다 상대적으로 높은 강성 지니기 때문에 효율적인 시뮬레이션 수행을 위하여 강체특성을 적용 하였고 휠의 경우 강체벽으로 설정된 레일과 접촉하기 때문에 높은 강성을 지닌 탄성체로 모델링 하였다.

1 차 및 2 차 서스펜션과 센터피봇의 경우 실제 서스펜션과 유사한 거동을 구현하기 위하여 각 서스펜션의 형태를 고려하여 지름넓이로 10 개로 나누어 원형으로 분배하여 모델링 하였다. 서스펜션의 특성은 관련 연구자료⁽¹⁰⁾를 참고하여 Table 3 과 같이 적용하였고 주요 서스펜션의 기계적 특성은

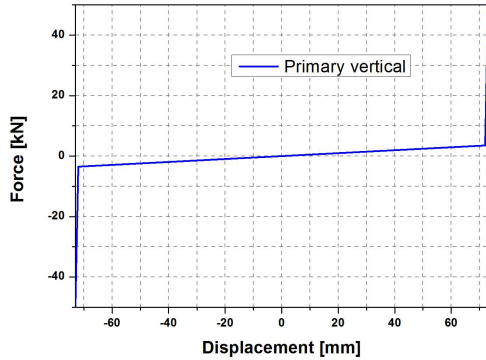


Fig. 5 Mechanical property of primary suspension

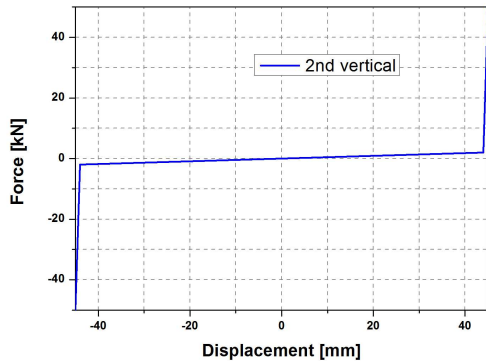


Fig. 6 Mechanical property of second suspension

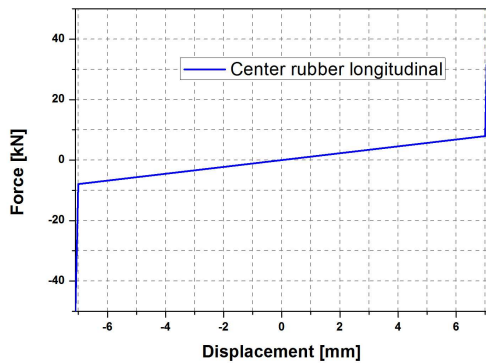


Fig. 7 Mechanical property of center rubber

Fig. 5~Fig. 7 과 같다. 1 차 및 2 차 서스펜션의 수직 강성과 센터러버의 종방향 강성은 0.49 kN/mm, 0.46 kN/mm, 1.27 kN/mm 이다. 대차 당 1 차 서스펜션은 8 개, 2 차 서스펜션은 2 개, 센터러버는 4 개가 존재한다. 따라서 대차 당 각 서스펜션의 총 강성은 3.92 kN/mm, 0.83 kN/mm, 5.06 kN/mm 이다. 실제 서스펜션의 구성 요소 중 스톱퍼(stopper)는 서스펜션이 과도한 변위가 발생하는 것을 방지하는 역할을 한다. 이와 같은 거동을 구현하기 위해서 서스펜션의 기계적 특성에 일정변위 이후 높은 강성을 부여하여 초과변위가 발생하지 않도록 하였다.

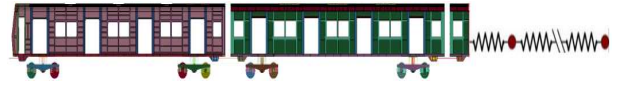


Fig. 8 Full model for simulation

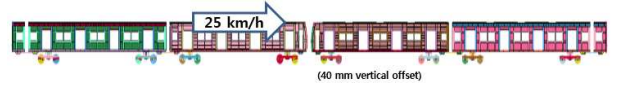


Fig. 9 40 mm vertical offset head-on collision simulation scenario

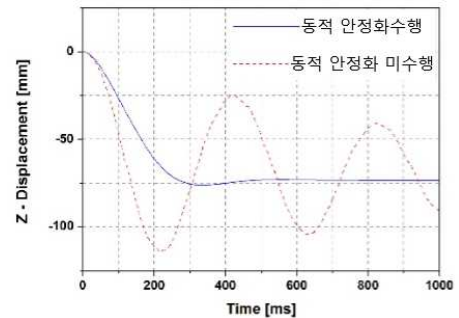


Fig. 10 Damping control of full model dynamic relaxation

전체 모델은 선두 및 선두 2 번째 차량과 3 번째 차량의 일부 단부가 3 차원으로 모델링 되었고 (Fig. 8) 그 외 차량은 집중질량과 1 차원 빔 요소로 이루어진다. 타고오름 평가를 위한 시뮬레이션 모델은 표준충돌사고각본에 따라 직선평탄선로의 정지된 충돌차량과 동일편성차량이 40 mm 수직 오프셋 조건에서 25 km/h 의 속도로 충돌하도록 설정하였다. (Fig. 9)

3. 시뮬레이션 결과

3.1 동적 안정화

시뮬레이션 특성상 순간적으로 가해지는 중력이 속도에 의해 서스펜션 및 차륜-레일에서 상하방향으로 지속적인 진동이 발생되고 이 현상을 안정화시키는 과정이 필요하다.

본 연구에서는 시뮬레이션 초기에 자중이 적용되었을 때 서스펜션 및 휠-레일에 의해 차체가 상하방향으로 진동이 발생하여 동적 안정화 과정을 수행하였다. 시뮬레이션 모델의 물리적 감쇠로는 정적 평형상태를 이루기까지 상당한 시간이 소요되므로 수치적 감쇠인 LS-DYNA 의 *GLOBAL_DAMPING 를 이용하여 시뮬레이션모델의 차체 중심에서 발생하는 상하방향 진동을 안정화 시켜 750 ms 에서 정적 평형상태를 이루었다. (Fig. 10)

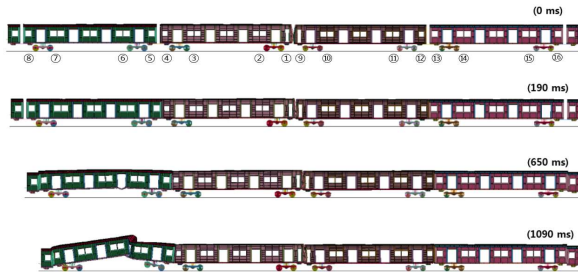


Fig. 11 Collision behavior of simulation model

3.2 충돌 시뮬레이션 결과

도시철도차량의 타고오름 평가를 위하여 40 mm 오프셋 정면충돌사고각본에 따라 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 11 의 그림은 시뮬레이션 모델의 시간에 따른 동적 거동을 확인 할 수 있다. 충돌차량과 정지차량의 안정화 과정 이후 충돌차량에 25 km/h의 충돌속도가 부여되어 충돌차량과 정지차량의 전부두 연결기의 접촉이 발생하였다. 정지차량의 연결기에서 최대압축 이상의 변위가 발생하여 탈락한 이후 충돌차량과 정지차량과의 차체가 충돌하며 차체에 변형이 발생하였다. 전두부 충돌 이후 선두차량과 선두 2 번째 차량간 연결기가 탈락되면서 선두차량과 선두 2 번째 차량의 충돌이 발생하였다. 선두 2 번째 차량의 2 번째 출입문에서 차체변형이 발생하며 차체가 상승함에 따라 2 번째 출입문에 가장 근접한 전위대차가 상승하였다. 각 윤축의 구분을 위하여 충돌차량 선두 윤축부터 1~8, 정지차량의 선두 윤축부터 9~16 번 순으로 정의하였다.

충돌안전에 대한 판단기준 중 생존공간 유지 및 감속도 제한조건을 만족해야 한다. 시뮬레이션 결과 선두 2 번째 차량에 변형이 발생하며 승객탑승 구간을 침범하여 생존공간 유지조건을 만족하지 못하였다. Fig. 12 의 그림은 충돌차량과 정지차량의 선두 및 선두 2 번째 차량의 감속도 선도이며 SAE CFC 180(Butterworth, Low pass, Order 4, Cutoff Frequency 300 Hz)으로 필터링 하였다. 그림에서와 같이 차량중심에서 감속도가 평균 5g 를 넘지 않아 감속도 제한을 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 13~Fig. 15 는 선두 2 번째 차량 윤축의 충돌 거동과 수직변위를 나타낸 그림이다. 이를 통해 선두차량과 2 번째 차량이 충돌 후 차체의 변형에 의한 동역학 대차 모델의 동적 거동을 확인할 수 있다.

Fig. 15 는 각 윤축의 시뮬레이션 동안 수직방향 최대 변위를 나타낸다. 충돌차량의 2 번째차량에

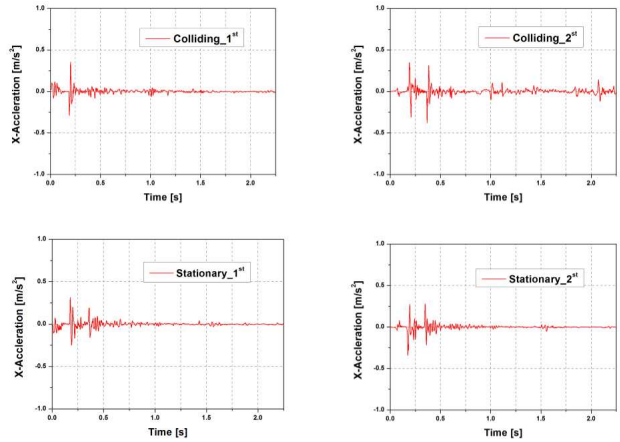


Fig. 12 Longitudinal acceleration of simulation model

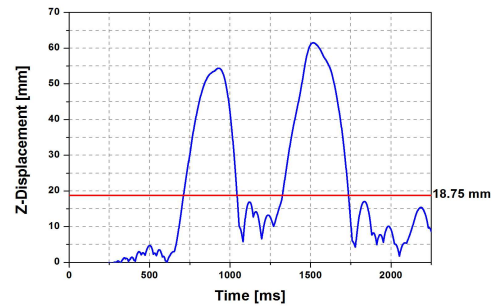


Fig. 13 Vertical Displacement of wheelset 5 after the collision

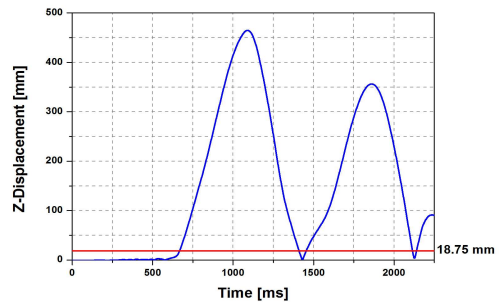


Fig. 14 Vertical Displacement of wheelset 6 after the collision

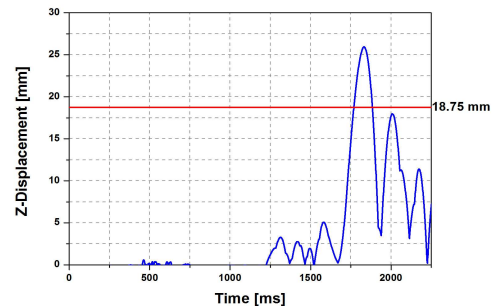


Fig. 15 Vertical Displacement of wheelset 7 after the collision

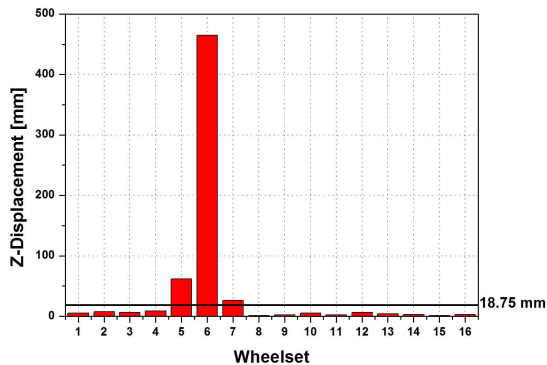


Fig. 16 Overriding evaluation by maximum vertical displacement of wheelset

포함된 5 번과 6 번, 7 번의 윤축에서 타고오름의 판단기준인 18.75 mm 를 초과하여 상승변위가 발생하였으며 각 윤축 최대 상승변위는 62.03 mm, 465.28 mm, 26.44 mm 로 나타났다. 충돌차량의 2 번째 차량 전위대차에서 최소한 하나의 윤축이 18.75mm 의 상승변위가 발생하지 않아야 하는 타고오름 판단기준을 만족하지 못하였다.

4. 결 론

도시철도차량의 충돌사고 시 도시철도차량의 타고오름을 평가하기 위해 대차 동역학 모델과 차체 유한요소모델을 결합한 전체모델의 충돌시물레이션 평가 기법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 40 mm 수직 오프셋 정면충돌 사고각본에 따라 시물레이션을 수행하여 차체의 구조적거동과 동역학 대차 모델의 동적거동을 확인할 수 있었다.

(2) 본 논문에서 제안된 모델이 시물레이션 결과와 같이 차체의 충돌거동에 따라 동역학 대차모델이 타고오름을 구현 할 수 있으므로 철도차량기술기준에 의한 타고오름 평가모델로 적합한 것을 확인하였다.

(3) 시물레이션을 수행한 결과 충돌차량의 두 번째 차량에서 변형이 발생한 것으로 보아 편성차량단위의 시물레이션 수행으로 각 차량 간의 충돌 안전성을 비교 평가 할 수 있음을 알 수 있다.

(4) 본 연구의 결과 현재 운행 중인 도시철도차량은 2016 년 적용 예정인 철도차량 기술기준의 충돌안전 요구조건을 만족하지 못하였으며 도시철도차량의 충돌안전도 향상을 위하여 차체 충돌안전설계, 에너지 흡수장치 등에 대한 추가적인 연

구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Park, M. Y., Park, Y. I. and Koo, J. S.. 2010. "Equivalent Modeling Technique for 1-D Collision Dynamics Using 3-D Finite Element Analysis of Rolling Stock," *The Korean Society for railway*, Vol. 13, No. 2, pp. 139~146.
- (2) Kim, G. Y., Koo, J. S., Kwon, T. S., 2011, "Study on a 2-Dimensional Dynamic Modeling Technique to Analyze the Overriding Phenomena of Rolling Stock," *The Korean Society for railway*, Vol. 14, No. 1, pp. 11~18.
- (3) Kim, G. Y., Koo, J. S., 2012. "Collision Analysis of Next Generation High-speed EMU Using 3D/1D Hybrid FE Model," *Transactions of KSAE*, Vol. 20, No. 3, pp.67~76.
- (4) Cho H. J., 2009, "Study on Wheel-Rail Models for Prediction of Derailment Behavior After Collision Using Virtual Testing Model," A Doctoral Thesis, *Seoul National University of Technology*, Korea.
- (5) Kash Kasturi., 2011, "Full-Scale Locomotive Dynamic Crash Testing and Correlations: C-39 Locomotive Colliding with a Loaded Hopper Car (Test 7)," *U.S Department of Transportation*, Report No. DFRA.040048.
- (6) Hechao Zhou, Wenbin Wang, and Markus Hecht, 2012, "Three-Dimensional Override Analysis of Crashed Railway Multiple Units," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 50, No. 4, pp. 663~674.
- (7) 2014, Ministry of land infrastructure and transport, "Technical Specifications for Railway Vehicles", *Notification of Ministry of Land Infrastructure and Transport*, 2014-434.
- (8) LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual Version 971.
- (9) EN 15227. 2007. "Railway Applications – Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies."
- (10) Korea Railroad Research Institute, 2011, "R&D Report of A Study for Urban Transit Standardization 2001."