열차의 타고오름 해석을 위한 2차원 충돌동역학 모델링 기법 연구

Study on a 2-Dimensional Dynamic Modeling Technique to Analyze the Overriding Phenomena of Rollingstock

김거영¹ · 구정서[†] · 권태수²

Geo Young Kim · Jeong Seo Koo · Tae Soo Kwon

Abstract This paper proposed a new 2-D multi-body dynamic modeling technique to analyze overriding behaviors taking place during train collision. This dynamic model is composed of nonlinear springs, dampers and masses by considering the deformable characteristics of carbody as well as energy absorbing structures and components. By solving this dynamic model for rollingstock, energy absorbing capacities of collision elements, accelerations of passenger sections, impact forces applied to interconnecting devices, and overriding displacements can be well estimated. For a case study, we chose KHST (Korean High Speed Train), obtained crush characteristic data of each carbody section from 3-D finite element analysis, and established a 2-D multi-body dynamic model. This 2-D dynamic model was simulated under the train-to-train collision scenarios, and evaluated with 3-D virtual testing model. It was founded from the simulation results that this 2-D dynamic model could well predict overriding behaviors, and the modeling technique of carbody deformation was very important in overriding estimation.

Keywords : Multibody Dynamic Model, Crashworthiness, Overriding Behavior, KHST, Finite Element Analysis

초 록 본 논문은 열차의 타고오름 해석을 위한 새로운 2차원 다물체 동역학 모델링 방법을 제안하였다. 본 동역학 모델은 에너지 흡수구조/부품뿐만 아니라 차체의 변형도 고려하여 비선형 스프링, 댐퍼, 질량으로 구성되어 철도차량의 충돌에너지흡수량, 승객구간의 가속도, 연결 장치의 충격력, 차량간 타고오름 변위 등을 잘 예측할 수 있다. 제안된 방법으로 한국형고속열차를 차체 각 부분의 압괴 특성을 구하고 2차원 다물체 충돌동역학 모델을 구성하였다. 열차 대 열차 충돌 시나리오조건으로 2차원 동역학 모델을 시뮬레이션하고 3차원 가상시험 모델로 평가하였다. 그 결과 2차원 동역학 모델은 타고오름 거동을 잘 예측하였으며 차체변형을 고려한 모델링 기법이 타고오름 평가에 중요함을 확인하였다.

주요어 : 다물체 동역학모델, 충돌안전도, 타고오름 거동, 한국형고속열차, 유한요소해석

1. 서 론

신호 통신과 열차 제어 시스템의 발전으로 열차 대 열차 충돌사고의 발생은 현저히 줄어들고 있지만 선로 장애물, 선로결함, 탈선 및 전복 등 비정상적인 요인에 의한 충돌사고는 줄어들지 않고 있으며, 최근 차량의 고속화/경량화로 인하여 충돌사고가 일단 발생하면 큰 피해를 수반한다. 따라서 사고 피해저감을 목표로 하는 Passive safety 측면에서 미국과 유럽의 전문가들은 열차충돌로부터 초래되는 손실을 최소화할 방법들을 연구하고 있다.[1-4] 열차의 안전도를 향상시키기 위해 제안되었던 방법들에는 선두차량 전두부/후방과 후속차량의 비탑승 영역에 에너지 흡수장치 및 구조를 설계하고, 횡좌굴과 타고오름 을 감소시키는 장치들을 장착하도록 하고 있다.[5-8]

철도차량의 충돌안전도 성능을 평가하기 위한 모델링 기법은 여러 가지가 있는데, 실제차량과 가장 근사하게 모델링한 3차원 유한요소해석모델과 이를 단순화한 동역학적 모델링 방법이 있다[1,4,9]. 3차원 유한요소해석은 전체차량의 모델링과 해석에 따른 시간과 비용이 많이 들어가는 반면 동역학적 모델링 방법은 이를 단순화한 스프링, 댐퍼, 질량의 조합으로 전체차량의 거동을 예측할 수 있으므로 기본설계 단계에서 많이 쓰이고 있다[1,3,10].

이러한 동역학적 모델링 방법은 크게 1차원과 2차원 충돌동역학해석 모델링 방법으로 나눌 수 있다[10-13]. 열차의 1차원 충돌 동역학해석을 하면 각 차체구조의 에너지 흡수능력, 생존공간 확보 및 충격가속도 크기 등을 평가할 수 있다. 그러나 1차원 충돌 동역학해석은 전체적인 관점에서 차체구조의 충돌 에너지 흡수량 및 충격 감속도를 예측하는 데는 유용하지만, 실제 충돌 시 발생하는 각 단위 차량간의 타고오름 현상과 각 차량의 차간연결기 부품 및 지지 브라켓 구조에서 발생하는 충격력의 크기 등은 예측할 수 없다. 이러한 물리량들을 분석하려면 전체차량 편성에 대하여 2차원

[†]교신저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원
E-mail : koojs@seoultech.ac.kr

¹서울과학기술대학교 철도전문대학원

²한국철도기술연구원

모델을 구성하여 해석하여야 한다. 그러나 여러 개의 단위 차량으로 편성되는 철도차량에 대하여 2차원 동역학 모델을 구성하는 것은 매우 복잡하고 많은 양의 동적 물성 자료를 필요로 한다.

본 연구에서는 모델링의 복잡성을 줄이면서도 2차원 충돌 동역학해석에서 얻을 수 있는 기계적 거동을 해석하기 위하여 2차원 모델과 1차원 모델을 혼합한 하이브리드 모델을 사용하였다. 국내외에서 주요 사고 각본으로 사용하고 있는 EN15227, TSI, 국내 철도차량안전기준에 관한 지침 제16조 등 충돌사고각본들은 충돌 시 전방에 위치한 몇몇 차량에 큰 충격력이 발생하지만 후방의 차량은 충돌 영향을 덜 받음을 감안하여 전방의 동력차, 동력객차, 후속 객차 3량은 2차원 모델로 구성하고 나머지 차량들은 1차원 모델로 구성하였다. 에너지 흡수구조 및 장치를 제외한 대차 스프링과 댐퍼는 선형특성을 적용하였으며, 에너지 흡수구조 및 장치 부분에는 3D FE 모델 해석 결과를 적용한 비선형스프링을 사용하였다. 또 본 논문에서 개발된 동역학적 모델은 기존 2차원 충돌해석 모델에서 고려할 수 없었던 차체구조의 변형을 반영하기 위하여 단부나 출입문 영역은 비선형 스프링요소로 모델링하고 압괴가 거의 발생하지 않는 탑승공간만 강체로 모델링 하였다. 도출된 모델링 방법을 검증하기 위하여 한국형고속전철 (이하, KHST라 함) 차량을 대상으로 1, 2차원 동역학 모델을 구성하여 동일한 조건으로 충돌해석을 수행하고 그 결과의 타당성을 평가하였다[9,14].

2. 충돌동역학 모델링 개요

2.1 기존 충돌동역학 모델

실제 충돌사고를 모사하기 위해 지금까지 다물체 동역학을 이용하여 차량 운동을 예측하여 왔다. 이러한 다물체 동역학모델은 구축에 의해 연결된 강체와 유연체의 조합으로 정의되며 외부의 힘으로부터 모델이 실제와 동일하게 운동하도록 하는 것이 중요하다. Fig. 1~3은 기존에 개발된 열차 모델링의 개념도이다. 이들 모델링의 공통점은 승객탑승과 전장품 배치 구간인 구체를 강체로 하고, 차량 끝단과 연결구간을 스프링과 댐퍼 요소로 모델링 하여 차량간 타고오름과 지지 브라켓의 충격력 등을 예측할 수 있다.

Fig. 1은 미국 FRA[14]에서 개발된 3차원 모델로서 차체

Fig. 1 Schematic of collision dynamic model [FRA]

Fig. 2 Topology description of a train car [SAFETRAIN]

Fig. 3 Configuration of the full rake KHST

Fig. 4 Dynamics model of the PC and MT of KHST

의 전두부와 연결구간을 스프링으로 모델링하여 충돌에 의한 변형을 고려하였으며, Fig. 2는 SAFETRAIN project[12]에서 개발된 2차원 모델로서 차체 중심을 회전 조인트로 연결하여 열차 충돌 시 차체 중간에서의 변형을 고려하였다.

Fig. 3, 4는 국내에서 개발된 KHST에 대한 기존의 타고오름 평가용 2차원 모델이다[14]. 승객구간을 강체로 하였으며 전두부와 차량 연결장치인 사이드버퍼의 길이방향 스프링과 대차의 수직방향 스프링을 사용하여 모델링 하였다. 전두부의 커플러, 헤드스톡, 하니콤 그리고 차량 연결 장치인 사이드버퍼에서 충돌 에너지가 흡수하도록 하였으며 대차의 1차, 2차 현가와 피봇 스프링을 차량별로 각각 다르게 모델링 하였다.

2.2 2차원 유연체 차체 모델 개발

Fig. 1, 2, 4와 같이 기존의 타고오름 예측을 위한 동역학 모델은 전두부를 제외한 전체 차체가 강체로 모델링되어 있는 강체 차체 모델(rigid carbody model)로서 충돌시 실제 차체의 변형을 고려하지 못한다. 실제와 가깝게 모델링하기 위해서 강체 끝단 영역, 즉 차체의 출입문과 단부 구간을 변형이 가능하도록 Fig. 5와 같이 유연체 차체 모델(flexible carbody model)을 개발하였다.

SAFETRAIN 연구[12]의 경우, 차체 중간이 1자유도 회전(rotational) 링크로 연결되어 있어 FRA[15]의 차체모델보다는

자세하지만 여전히 차체의 수직 변형을 고려하지 못한다. 하지만 본 논문에서 개발한 모델은 차체의 구간 끝단에 3개의 자유도(길이방향, 수직방향, 회전)를 가지는 2개의 상하부 스프링을 사용하여 열차의 압괴구간을 고려하였다. Fig.

Fig. 5 Deformation of a car body by two springs

(a) Concept of 2D nonlinear spring models used in flexible carbody

(b) 2D nonlinear spring models the for power car

(c) 2D nonlinear spring models the for motorized trailer

(d) 2D nonlinear spring models the for trailer of KHST

Fig. 6 2D spring models obtained from 3D sectional FE analyses of KHST

5와 같이 3자유도를 가지는 링크 2개로 연결된 차체는 3자유도 운동이 가능하여 차량의 충돌거동을 보다 자세히 모사할 수 있다. 해석모델에는 중력에 의한 동적 안정화를 위하여 중력 할당 값을 1차, 2차 현가장치에 적용하였고 차륜-레일 스프링의 경우 압축시에는 큰 강성을 주었으며 인장에 대해서는 자유롭도록 하였다.

Fig. 6은 KHST의 3차원 모델 및 해석조건으로 운전자 및 승객구간을 강체로 하고 나머지 출입문 및 단부구간을 변형구간으로 정의하였다.

차체의 압괴구간 특성을 나타내는 2차원 비선형 스프링요소특성은 Fig. 6과 같이 3차원 차체구조의 셀모델을 상하로 분리된 고정벽에 18km/h로 충돌(동일열차간 상대속도 36km/h 충돌)시켜 얻어지는 충격력-압괴변위로부터 Fig. 7과 같이

(a) The longitudinal deformed shapes of the MT end

(b) Upper MT-end

(c) Lower MT-end

Fig. 7 Longitudinal F-δ curves obtained from MT end section analyses for the 2D modeling

차체의 상부구조와 하부구조의 길이방향 압괴 특성을 구하였다. 또 수직방향 압괴 특성은 Fig. 8과 같이 차체 단면부의 수직변위를 강제로 상하 이동시켜 구하였다. 여기서 수직변위 이동속도도 열차 충돌 속도와 같은 18km/h를 사용하였다. 그 이유는 충돌시 수직운동속도는 경우에 따라 상이하겠지만 기본적으로 저속 충돌이어서 속도효과가 크지 않으므로 열차 충돌시 수평방향과 수직방향 변형이 동일한 속도로 발생한다고 가정하고 해석을 수행하였다.

이렇게 구해진 주요 변형구조 영역의 비선형 압괴 특성을 이용하여 Fig. 9와 같이 상하부 2개의 비선형 스프링 요소와 현가장치, 연결기, 사이드버퍼, 차체 및 대차에 대한 강체요소 등을 결합하여 2차원 충돌동역학 모델을 구성하였다.

Fig. 9와 같이 구성된 2차원 동역학 모델을 이용하여 충돌해석을 수행하면 대차와 차체의 상하운동, 연결장치나 지지구조에 부과되는 전후 상하방향의 충격력 등 1차원 해석에서 얻을 수 없었던 결과를 얻을 수 있고, Fig. 1, 2, 4와 같은 이전의 해석 모델과 달리 차체의 변형특성도 고려할 수 있다.

국내충돌안전규정은 충돌 해석에서 구해진 승객구간 가속도가 최대 7.5g, 평균 5g 이하가 되도록 제한하고 있으며 충돌시 발생된 하중도 5ms이하에서 발생된 고주파 과도 성분은 무시하도록 하고 있다. SAFETRAIN 연구에서도 충돌시험 결과의 하중-변위 데이터에서 5ms이내의 피크하중은 무시하였다. 이는 5ms이내에 발생한 순간 충격력이 승객 부

(a) The vertical deformed shapes of the MT end

(b) Upward upper MT-end

(c) Upward lower MT-end

(d) Downward upper MT-end

(e) Downward lower MT-end

Fig. 8 Vertical F- δ curves of MT end section analysis results for the 2D modeling

(a) Two dimensional model of the power car

(b) Two dimensional model of the motorized trailer

(c) Two dimensional model of trailers

Fig. 9 2D flexible carbody models of KHST

상에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보기 때문이다.

따라서 차체구간해석 결과를 그대로 2D 모델에 사용하지 않고 5ms사이 발생된 고주파 충격력을 무시한 샘플링 데이터를 사용하였다. 이 경우에도 에너지 변위 커브를 추출하여 변위에 대한 에너지 변화량은 일치시켰다.

3. 기존 1D모델과의 비교를 통한 2D모델 검증

본 연구에서 개발한 2차원 유연체 차체 모델 충돌 해석의 타당성을 객관적으로 검증하기 위해서는 편성열차의 충돌시

험을 실시해야 하지만, 비용과 시간적인 측면에서 제한이 있다. 동일한 편성에 대하여 별도로 Fig. 10과 같이 구성된 1D 모델과 본 연구에서 개발된 2D모델의 수직과 피칭거동을 구속한 모델 (2차원 1자유도 모델)에 동일한 충돌 조건을 적용하여 비교하였다.

Fig. 10과 같은 1D 모델은 차량의 구간별 탄소성 충돌 변형거동을 비선형 스프링을 사용하여 모델링 하는데 길이방향 운동만 가능한 모델이므로 승객구간의 가속도 평가와 열차 구간별 흡수에너지를 추정하는데 효과적이다. KHST 편성에 대하여 제안된 2D 모델과 부합되게 승객탑승구간을 강체와 비선형 스프링으로 모델링 하여 Fig. 10처럼 1D 모델을 만들었다. 1D와 2D 모델의 길이 방향의 충돌특성을 비교하기 위하여 열차 대 열차 36km/h 열차 충돌사고시나리오를 적용하여 해석하였다.

Fig. 10 Dynamic model of one-dimensional KHST

2차원 1자유도 모델과 1차원 모델의 해석결과 충돌거동은 거의 일치함을 보였다. Fig. 11, 12는 두 모델의 에너지 선도로써 총 에너지와 경향이 거의 일치하고, 또 Fig. 13, 14는 구간별 에너지 흡수량으로서 Table 1과 같이 5% 이내의 차이로 거의 유사하였다. 운전자 및 승객구간의 충돌가속도 또한 거의 일치하고 있다.

Fig. 11 Energy history curves (1D)

Fig. 12 Energy history curves (2D)

Fig. 13 Absorbed energy in each part (1D)

Fig. 14 Absorbed energy in each part (2D)

4. 2차원모델과 VTM의 타고오름량 비교

본 연구에서 개발한 2D 유연체 차체 모델과 기존 2D 강체 차체 모델의 해석결과를 비교함으로써 차체 변형이 타고오름에 미치는 영향을 분석하였으며 최종적으로 VTM(가상 시험모델)의 해석결과와 비교하였다.

동력차와 동력객차 사이에 취부되어 있는 타고오름 방지

Table 1 1D vs. 2D 1DOF Simulation results

	Absorbed energy [MJ] (at 2000ms)		Difference
	1D model	2D_1DOF model	
Total kinetic energy	10.405	10.4052	0.002%
PC front end	6.5393 (62.848%)	6.5396 (62.849%)	0.005%
PC door	0.85052 (8.174%)	0.87379 (8.398%)	2.736%
Side buffer	0.50301 (4.834%)	0.51405 (4.940%)	2.195%
PC end	0.46041 (4.425%)	0.44449 (4.272%)	3.458%
The rest	2.05176 (19.719%)	2.03327 (19.541%)	0.901%
Crash peak acceleration [g] (40Hz low pass filtered-FFT)			
	1D model	2D_1DOF model	
Driver's area	9.59	10.12	5.527%
MT mid	10.98	11.38	3.643%
T mid	8.37	8.78	4.898%

장치인 사이드버퍼는 열차 길이방향으로 약 0.5MJ의 에너지를 흡수하며 수직방향 하중-변위 커브는 Fig. 15와 같이 85mm 수직변위가 발생한 이후에는 큰 강성값을 가져 더 이상의 타고오름을 방지한다.

Fig. 15 Vertical characteristic of side buffer

Fig. 16, 17은 국내규정의 열차 대 열차 36km/h 충돌 시 발생하는 동력차와 동력객차 사이에 위치한 사이드 버퍼의 열차길이방향 충격력과 차체 무게중심점의 상하운동이다. 사이드버퍼의 충격력은 강체 차체모델이 유연체 차체모델보다 약 3배정도의 최대 충격력이 발생하며, 차체의 상하운동 역시 약 2배 이상 크게 발생하였다.

Table 2는 기존의 강체 차체 모델의 충돌해석 결과로서 36km/h 충돌 시 국내충돌 규정에는 만족하나 48km/h 충돌 부터는 사이드버퍼의 수직하중이 990kN을 초과하는 등 과도한 충격하중이 발생하여 타고오름에 안전하지 못한 것으로 해석된다. 그러나 Table 3의 유연체 차체 모델의 경우

Fig. 16 Longitudinal force of side buffer

Fig. 17 Vertical displacement of center of gravity of each carbody

36km/h와 48km/h 충돌시 타고오름에 안전하며 55km/h 충돌부터 약 251.6kN의 수직하중이 발생하여 사이드버퍼의 수직하중 허용 한계인 150kN을 초과하므로 타고오름 위험이 있는 것으로 해석되었다. 즉 기존의 강체 차체 모델과 본 연구의 유연체 차체 모델 사이에는 충돌에 의한 타고오름 거동에 일정한 차이가 발생하였다.

Table 2, 3의 결과를 분석해 보면 기존 강체 차체 모델보다 유연체 차체 모델이 타고오름에 더 안전하게 해석되었다. 특히 강체 차체 모델의 48km/h 충돌보다 유연체 차체 모델의

Table 2 Overriding results with respect to collision velocity (rigid carbody model)

Collision velocity	Korea (36km/h)	FRA (48km/h)	SAFETRAIN (55km/h)	GMRT (60km/h)
Overriding [mm]	66.59	86.64	88.01	89.55
Overriding force [kN]	15.87	992.6	1672	2630

Table 3 Overriding results with respect to collision velocity (flexible carbody model)

Collision velocity	Korea (36km/h)	FRA (48km/h)	SAFETRAIN (55km/h)	GMRT (60km/h)
Overriding [mm]	28.72	23.81	84.63	85.01
Overriding force [kN]	7.09	5.78	251.6	365.8

60km/h 충돌에서 오히려 타고오름이 적게 발생하였다. 이것은 강체차체 모델이 열차 차체를 강체로 가정하였기 때문에 운동에너지의 흡수가 부족하여 과도한 타고오름이 발생하게 되지만, 유연체차체 모델의 경우 차체의 수평/수직압력을 고려하여 모델링하였기 때문에 실제 충돌조건에 가깝게 타고오름 양이 해석되었다고 분석된다.

국내의 충돌안전규정에는 최종적으로 3차원 가상시험모델을 구성하여 평가하도록 하고 있다. 2차원 모델의 타고오름 거동을 최종적으로 3차원 VTM의 충돌시뮬레이션을 통하여 비교하였다. Fig. 18은 2차원 모델과 동일한 편성으로 구성된 VTM으로 전방 3량까지 3차원 유한요소로 모델링되었으

Fig. 18 Side view of virtual testing model

Fig. 19 Vertical force of side buffer

며 충돌영향이 적은 후방 차량등은 1차원 동역학 모델로 구성하였다. 2차원 모델 및 VTM의 열차 대 열차 36km/h 충돌해석결과 사이드버퍼의 타고오름 수직하중은 Fig. 19와 같다. 강체 차체 모델이 다른 모델보다 2배 이상의 타고오름 수직하중이 발생하였으며 VTM과 유연체 차체모델에서는 거의 동일한 최대하중이 발생하였다. 다만, 최대하중의 발생 시간이 다소 차이가 발생하나 이는 모델링 특성상 일부 강체 차체를 적용한 2차원 동역학 모델이 변형특성의 유한요소로 구성된 VTM보다 충격과 전달이 빠르기 때문이다.

따라서 타고오름 양을 정확하게 해석하기 위해서는 차체의 모든 압괴 가능영역을 유연체로 고려하여 모델링하는 것이 유리하며, 높은 속도의 충돌에서 타고오름 현상을 완화하기 위해서는 차체가 충돌에너지를 충분히 흡수할 수 있도록 설계하는 것이 중요하다.

5. 결 론

열차 충돌시 차량간 타고오름의 거동을 예측하기 위해 편성열차를 모두 유한요소모델을 만들어 해석하기에는 설계측면에서 시간과 비용이 상당히 소요되므로 이를 최소화하는 방법으로 다물체 동역학모델을 이용하여 편성열차 해석을 수행하게 된다. 본 연구에서는 열차의 타고오름 해석을 위한 2차원 모델링 기법에서 기존 강체 차체에 변형구간을 추가하여 유연체 차체 모델링 기법을 제안하였다. 변형구간을 고려한 2차원 모델의 열차 대 열차 충돌사고 각본을 적용한 해석을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 차체 변형구간의 상부와 하부에 2개의 비선형 스프링 요소를 사용한 유연체 차체 모델링 기법을 사용하면 열차의 2차원 충돌 거동을 잘 표현할 수 있고 차량간 충돌에서 발생하는 타고오름 현상을 보다 실제에 가깝게 예측할 수 있었다.

(2) 열차의 2차원 충돌동역학 모델링 시 차체의 변형을 고려하면 기존의 1차원 모델 해석에 얻을 수 있었던 각 차량 차체구조의 압괴량, 흡수에너지, 승객구간의 가속도 등을 잘 예측할 수 있을 뿐만 아니라 대차와 차체의 상하운동, 연결장치나 지지구조에 부과되는 충격력 등도 잘 예측할 수 있다.

(3) 열차의 2차원 충돌 동역학 모델의 타고오름 거동에서 유연체 차체 모델링 기법을 사용한 것은 VTM 결과와 유사하게 구해졌으나, 강체 차체 모델링 기법을 사용한 타고오름 양은 상당히 크게 구해졌다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 지원하고 한국철도기술연구원에서 진행중인 철도종합안전기술개발사업의 연구결과의 일부를 응용한 것으로서 관계자들에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] J.P. Dias, M.S. Pereira (2004) Optimization methods for crash-

worthiness design using multibody models, *Computers and Structures*, 82, pp. 1371-1380.

- [2] K. Jacobsen, D. Tyrell, B. Perlman (2004) Impact tests of crash energy management passenger rail cars: Analysis and structural measurements, *ASME International Mechanical Engineering Congress*, November 13-19.
- [3] J.F. Milho, J.A.C. Ambrosio, M.F.O.S. Pereira, I.J. Crash (2003) Validated multibody model for train crash analysis, 8(4), pp. 339-352.
- [4] K.J. Severson, D.C. Tyrell, A.B. Perlman (2003) Collision safety comparison of conventional and crash energy management passenger rail car designs, *ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, April 22-24.
- [5] D. Tyrell, K. Jacobsen, D. Parent, A.B. Perlman (2005) Preparations for a Train-to-Train Impact Test of Crash-Energy Management Passenger Rail Equipment, *American Society of Mechanical Engineers*, pp. IMECE2005-70045.
- [6] D. Tyrell, K. Severson, A.B. Perlman, R. Rancatore (2002) Train-to-Train Impact Tests: Analysis of Structural Measurements, *Proceedings of IMECE, the 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress, and Exposition*, November 17-22, New Orleans, Louisiana
- [7] National Transportation Safety Board (2003) Head-On Collision Between BNSF and Metrolink Trains, and Subsequent Derailment, in Placentia, California on April 23, 2002: Factual Report, Survival Factors Issues. DCA-02-MR-004, 2/20/2003
- [8] National Transportation Safety Board (2002) Collision of Burlington Northern Santa Fe Freight Train with Metrolink Passenger Train Placentia, California, Railroad Accident Report NTSB/RAR-03/04. Washington, DC. April 23.
- [9] H.S. Han and J.S. Koo (2003) Simulation of train crashes, *Vehicle System Dynamics*, 40(6), pp. 435-450.
- [10] Jorge Ambrósio (2005) Crash analysis and dynamical behavior of light road and rail vehicles, *Vehicle System Dynamics*, 43(6), pp. 385-411.
- [11] C. Oyan (1998) Dynamic simulation of Taipei EMU train, *Vehicle System Dynamics*, 30, pp. 143-167.
- [12] Brite/Euram III (2001) Train Crashworthiness for Europe: BE-3092, SAFETRAIN Final Report, 10/30/2001
- [13] G.Y. Kim, H.J. Cho, J.S. Koo(2008) A Study on Conceptual Design for Crashworthiness of the Next Generation High-speed EMU, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(3), pp. 300-310.
- [14] J.S. Koo, S.H. Park, Y.H. Youn, D.S. Kim (1999) Crashworthiness on the full rake of KHST, *Journal of the Korean Society for Railway*, Autumn Conference, Korea, pp. 526-533.
- [15] D. Tyrell, E. Martinez, K. Jacobsen (2007) Passenger Cab Car Grade Crossing Impact Test Report, U. S. Department of Transportation, DOT/FRA/ORD-07/24.I, October

접수일(2010년 11월 16일), 수정일(2011년 1월 7일),
게재확정일(2011년 1월 12일)