

철도 차량의 연결기 시스템의 충돌시뮬레이션

맹희영^a, 김진성^a, 박영일^{a*}

Collision Simulation for the Coupler System of Rolling Stock

Heeyoung Maeng^a, Jin Seong Kim^a, Young Il Park^{a*}

^a Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	15	April	2013
Revised	23	May	2013
Accepted	27	May	2013

Keywords:

Collision simulation
Rolling stock
Coupler system
Car-body
Dynamic model

ABSTRACT

In this study, a collision simulator for rolling stock that considers the plastic deformation of the car body and the dynamic characteristics of a coupler system was developed using Matlab/Simulink. Normally, a coupler system has functions for both connecting the individual car bodies and absorbing the impact energy. A coupler system is composed of a rubber buffer, hydraulic buffer, and deformation tube elements. The coupler system should protect the car body and prevent damage when the shunt speed is less than 10 km/h, which is the regulation speed based on the safety rule for rolling stock. However, if the shunt speed is greater than 10 km/h, a car body is plastically deformed. Therefore, the modeling of the plastic deformation of a car body should be included in a simulator. This collision simulator can provide the design parameters for a coupler system and car body.

1. 서론

철도 차량은 일반적으로 여러 대의 차량이 연이어 연결되는 편성 열차로 구성되어 있다. 철도 차량의 편성 구성에 필요한 연결 장치를 연결기라고 한다. 연결기는 차량과 차량을 기계적으로 연결하는 역할을 하면서 동시에 편성운전 시 발생하는 전후방향의 충격하중을 흡수하는 역할을 한다. 현재 철도차량은 편성열차로 운행되므로 철도 차량의 운동에너지 양은 엄청나게 크며, 따라서 차량을 제작할 때에는 충돌사고가 발생하더라도 그 피해가 최소화 되게 충돌안전설계를 하도록 법규화 되어 있다. 철도안전법규에서는 도시철도 차량은 5 km/h, 일반철도차량은 10 km/h로 충돌하더라도 차체에 손상이 없어야 한다. 즉 일정한 속도 이내에서는 충돌이 발생하여

도 최대 충격력을 흡수할 수 있는 완충 구조가 반드시 적용되어야 한다는 것이다. 국내 연결기의 완충 기준 요건 강화에 따라 고무 완충기에 유압 완충기, 그리고 변형 튜브가 추가되어 적용되고 있다.

충돌안전설계에 적용된 구조 설비 중 연결기 완충장치는 고무 완충기, 유압 완충기, 변형 튜브 그리고 차체 변형 구조로 구성될 수 있으며, 고무 완충기는 Fig. 1의 A(1) 부분 면적에 상당하는 에너지를 흡수하며, 유압완충기는 B(2) 부분, 변형 튜브와 차체 변형 구조는 각각 C(4), C(5) 부분의 에너지를 흡수하게 된다.

본 연구에서는 편성 열차가 충돌할 때 연결기 및 차체에서의 충돌 현상을 구현하기 위한 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 연결기의 구성요소와 차체 변형에 대한 동적 모델링을 통해 성능 예측을 위한 Matlab/Simulink 기반으로 철도 차량의 충돌 모델을 구성

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6352

Fax: +82-2-948-1651

E-mail address: yipark@seoultech.ac.kr (Young Il Park).

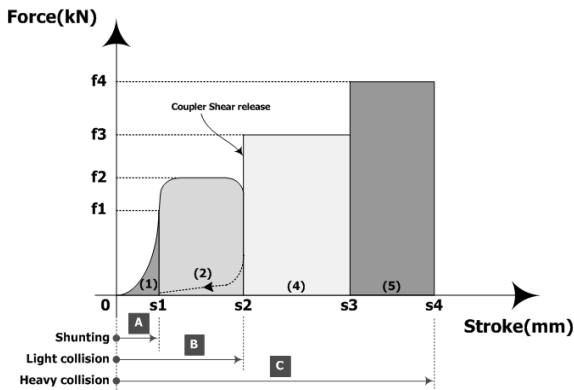


Fig. 1 Collision scenario of coupler system

하였다. 연결기의 완충기능이 상실되어 차체가 직접적인 충돌을 할 경우 차체의 소성 변형에 대한 해석 과정이 필요하며 그 해석 결과는 연결기의 완충 기준 요건 강화에 대비한 차체 안전 설계에 대한 방향을 제시할 것으로 기대된다.

2. 철도 차량 및 연결기 모델

철도 차량의 충돌 해석을 위해서 철도 차량과 연결기의 모델들이 필요하다. 연결기의 모델은 연결기의 구성요소인 고무 완충기 모델, 유압 완충기 모델, 변형 튜브 모델, 그리고 차체 변형 모델을 포함하고 있다. 이 절에서는 철도 차량의 동역학적 모델과 완충 성

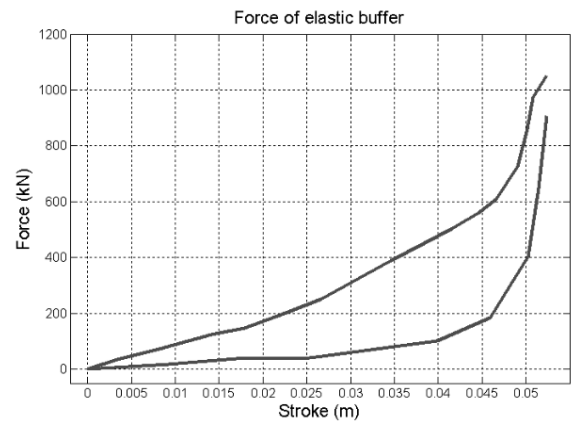


Fig. 3 Performance curve of rubber buffer

능 곡선으로 이루어진 연결기의 구성요소들과 차체의 변형 모델에 대해 설명한다.

2.1 철도 차량 모델

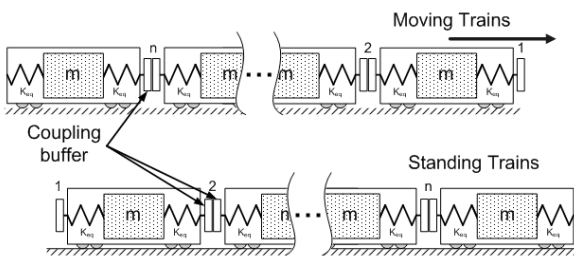
철도 차량 모델은 기존의 연구를 통해 얻어진 단순히 질량과 강성을 가진 모델로 구성되었다. 충돌 해석을 위해 특정 속도로 움직이는 철도 차량과 제동에 의해 정지된 철도 차량이 충돌하는 상황을 설정하였다. 마찰은 마찰면의 속도에 따라 마찰계수가 변화하는 마찰모델을 적용하였다. 충돌 시 차량 좌우에서 변형이 발생하는 현상을 고려하여 철도 차량을 Fig. 2(a)와 같이 모델링 하였고 Fig. 2(b)는 Matlab/Simulink로 구현된 철도 차량 모델이다.

2.2 고무 완충기 모델

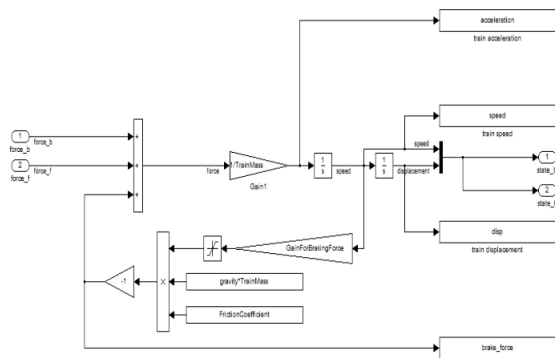
고무 완충기 모델은 연결기 시스템의 가장 기본적인 구성요소 중 하나로서 각 객차의 양쪽 끝의 연결부에 설치되어 있어 연결기 하나에 여러 개의 고무 링이 들어가게 된다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 고무 완충기의 성능 곡선을 가진 완충기 모델을 적용하였다. 가로축은 변위, 세로축은 변위에 대한 하중을 나타낸다. 고무의 일반적인 특성상 상승-압축 선도와 하강-인장 선도가 주어진다. 두 선도 사이의 히스테리시스는 충돌 시 완충기에서 소산되는 에너지를 의미한다. 그림에서 일정 변형이후 기울기가 급격하게 변하는 이유는 고무 완충기의 특성상 전단력에 의한 완충에서 압축력이 동시에 작용하는 완충 특성으로 바뀌어 나타나는 현상이다.

2.3 유압 완충기 모델

고무 완충기의 성능은 변위에 대한 하중으로 나타내어지나 유압 완충기의 경우 변위, 작동 속도에 따라 완충 특성이 변화하기 때문에 성능곡선이 변위, 속도와 완충력의 3차원 선도로 구성되어 있다. 유압 완충기 성능은 충격실험을 통하여 추출되며 실험 해석 결과를 통해 유압 완충기의 변위, 속도, 그리고 힘의 관계로 나타나는



(a) Dynamic model of car



(b) Simulink model

Fig. 2 Rolling stock model

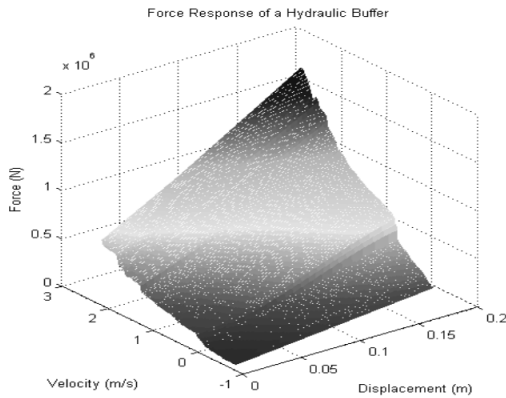


Fig. 4 Performance curve of hydraulic buffer

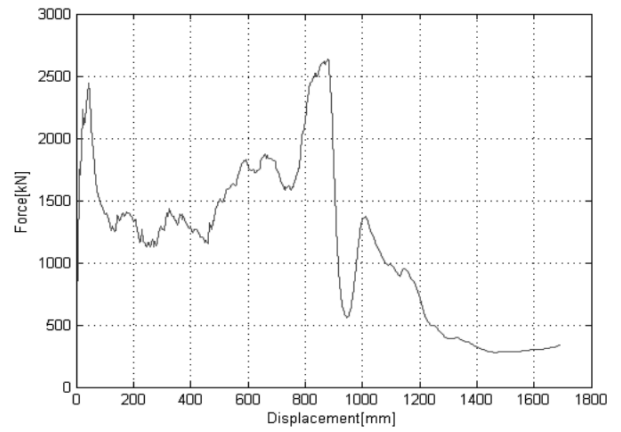


Fig. 6 Performance curve of car body

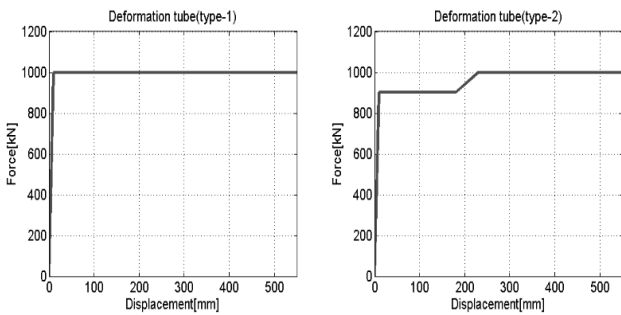


Fig. 5 Performance curve of deformation tube

Fig. 4와 같은 유압 완충기의 성능 곡선을 가진 유압 완충기 모델을 적용하였다. 고속에서 열차가 충돌 시 상당한 양의 충격 에너지를 흡수하도록 설계되어 있다.

2.4 변형 튜브 모델

변형 튜브는 강화된 국내의 철도차량 안전 기준 범규로 인해 연결기 시스템에 추가된 완충기 요소이다. 변형 튜브는 연결기 시스템에서 고무 완충기의 작동 이후 일정한 크기 이상의 힘이 작용할 때 변형 튜브가 변형하면서 에너지를 흡수하여 완충 작용을 한다. 일정 하중이 가해질 때까지는 변형이 발생하지 않다가 그 이후에는 튜브가 확장하면서 충돌에 의한 에너지를 완충시키게 된다. 그러므로 성능 선도는 일정한 크기까지는 변형이 발생하지 않다가 그 이상의 힘이 작용하면 일정한 크기의 완충력을 나타내게 된다. Fig. 5와 같은 전두부와 편성 열차 사이 적용된 변형튜브 두 종류의 성능 곡선을 사용하였다.

2.5 차체 변형 모델

차체의 변형 모델은 기존의 예상했던 시나리오를 벗어나 과도한 충돌 사고로 연결기의 모든 구성요소가 용량을 초과하여 기능이 상실되었을 때 차체의 직접적인 압괴 현상에 의해 작동되는 모델이

다. Fig. 6과 같은 차체의 전두부 압괴 성능 곡선을 포함하는 모델이다. 실제로 실험 또는 실차 형상의 유한요소 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 얻은 성능 곡선을 이용하여 시뮬레이터에 적용하게 된다.

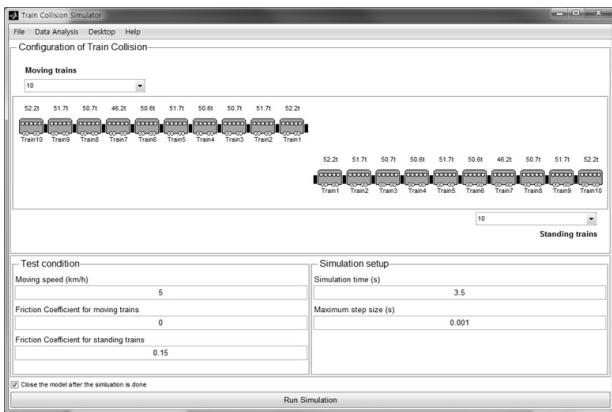
3. 충돌 시뮬레이션

편성열차 연결기의 충돌 시뮬레이션이 실제 충돌시험 결과를 적절하게 모사한다면 다수의 차량이 충돌할 경우 발생하는 충격력에 대한 예측이 시뮬레이션을 통해 가능하게 되어 충돌 시뮬레이션 프로그램은 설계결과에 대한 검증용으로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

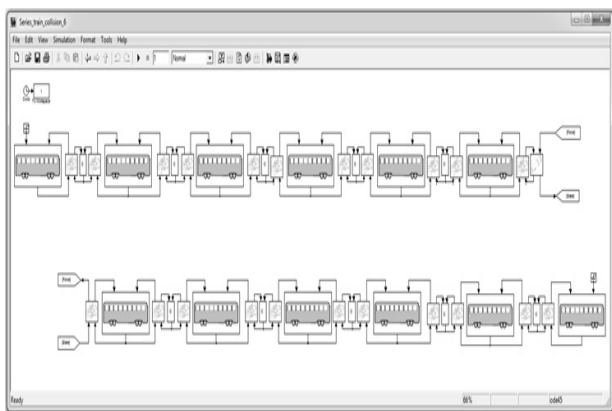
충돌 시뮬레이션에서는 편성차량의 정보, 충돌 속도, 그리고 차량의 충돌 조건에 따라 충돌 상황이 시뮬레이션되게 된다. 앞서 제시한 연결기 구성 요소들의 모델들을 이용하여 개발된 시뮬레이션 프로그램과 충돌 시뮬레이션 수행을 위해 적용된 조건에 대하여 소개한다.

3.1 충돌 시뮬레이션 프로그램

철도 차량 모델, 연결기 구성 요소 모델 및 차체 변형 모델을 기반으로 편성 열차 충돌 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 Matlab/GUI를 이용하여 필요한 매개변수 및 데이터를 입력하여 모델을 생성하는 전처리 과정, Matlab/Simulink를 이용하여 동역학 모델을 풀어나가며 시뮬레이션을 수행하는 과정, 그리고 Matlab/GUI를 이용하여 해석 결과를 확인할 수 있는 후처리 과정으로 구분되어 있다. Fig. 7(a)는 시뮬레이터에 각 매개변수 및 데이터를 입력할 수 있는 전처리 과정의 프로그램이다. 모든 매개변수와 데이터를 입력한 후 실행하면 Fig. 7(b)와 같은 Simulink 모델이 자동으로 생성되어 동역학 모델을 풀게 된다. 시뮬레이션



(a) Pre-processor



(b) Simulink model

Fig. 7 Collision Simulator for rolling stock

하는 동안에 각 구성 요소들의 모든 상태를 저장하고 결과 값들은 정형화된 형태의 보고서로 작성해준다. 시뮬레이션 중 발생하는 모든 요소의 동적 거동의 결과를 저장하고 있으므로 후처리 과정의 프로그램을 활용하여 시간에 따른 그래프들을 보거나 기존에 정의된 Train Speed, Coupler Force-Stroke, Energy Balance 등의 결과를 확인할 수 있다. 또한 모든 결과는 Excel 파일의 형태로 저장된 데이터를 제공한다. 본 시뮬레이션 프로그램은 편성 차량수에 관계없이 실행될 수 있도록 개발하여 다양한 충돌 환경에 대한 해석이 가능하다.

3.2 시뮬레이션 조건

실제 철도차량의 충돌시험을 수행하여 개발된 시뮬레이터를 검증이 우선되어야 하나 이와 같은 검증의 어려움으로 유럽의 대표적인 연결기 제조업체인 S사가 수행하여 제공받은 시뮬레이션 결과를 개발한 프로그램에 의해 동일한 조건에서 수행된 해석 결과를 비교함으로써 검증을 추진하였다. 이를 위하여 15 km/h로 달리는 10량 편성 차량에 접근하여 충돌하는 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 연결기가 수용할 수 있는 충돌속도보다 가혹

한 20 km/h의 충돌 시나리오로 차체 변형 모델을 포함한 시뮬레이션을 수행하였다. 접근하는 차량은 차륜과 레일 사이의 제동이 풀려있는 상태로 마찰을 무시하였고 제동에 의해 정지되어 있는 차량의 경우 차륜과 레일 사이의 마찰 계수 0.15를 사용하였다. 연결기 모델을 Fig. 3과 같은 고무 완충기와 Fig. 5와 같은 변형 튜브의 성능곡선을 입력하였다. 차체 변형 모델은 Fig. 6과 같은 차체의 전두부 압괴 특성 곡선을 사용하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

철도차량 충돌 시험을 실제 수행하여 그 결과를 이용한 프로그램의 검증 절차는 여러 여건상 어려움이 있어, 실제 차량 제작사에서 활용되고 있는 S사의 충돌 시뮬레이션 결과와의 비교를 통하여 개발된 시뮬레이터의 검증을 수행하였다.

4.1 개발 프로그램의 검증

개발된 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과와 S사의 시뮬레이션 결과를 비교하기 위하여 동일한 입력조건과 충돌속도 15 km/h에서의 충돌 시뮬레이션을 수행하였다.

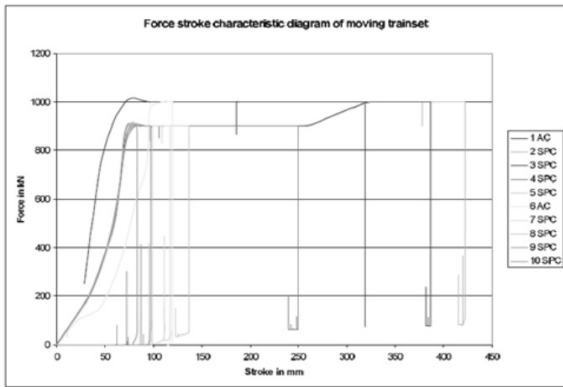
Table 1에서 편성 차량이 충돌하는 동안에 변형 에너지와 완충기 요소별 흡수된 에너지 변화를 비교하였고 Fig. 8에서 각 차량에서의 완충기 구성요소에 작용한 변위에 대한 작용력을 비교하였다.

Table 1 결과를 살펴보면, S사 시뮬레이션은 차체 변형에 의한 에너지 흡수과정은 고려하지 않아 개발 프로그램에서 고려된 차체 변형에 의한 흡수 에너지의 차이가 발생하였다. 그러나 충돌속도 15 km/h는 차체변형이 많지 않은 속도이기 때문에 전체 에너지에 비해서 매우 작은 차이를 보였고 두 해석 결과는 상당히 수준에서 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 충돌 프로그램에서 가장 중요한 에너지 변환 현상이 잘 구현되고 있어 두 프로그램의 충돌 현상에 대한 해석 과정이 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

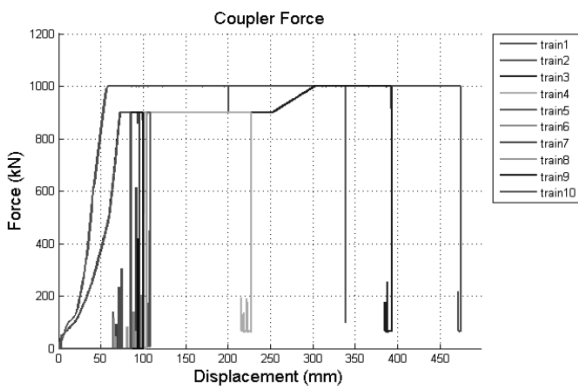
각 연결기 시스템에 작용하는 하중 해석 결과를 살펴보면 최대 작용력을 가지는 연결기는 두 해석 결과 모두 1,000 kN의 작용력을 가지며 S사의 해석에서는 충돌에 의하여 발생된 최대 변위가

Table 1 Comparison of energy balance during collision

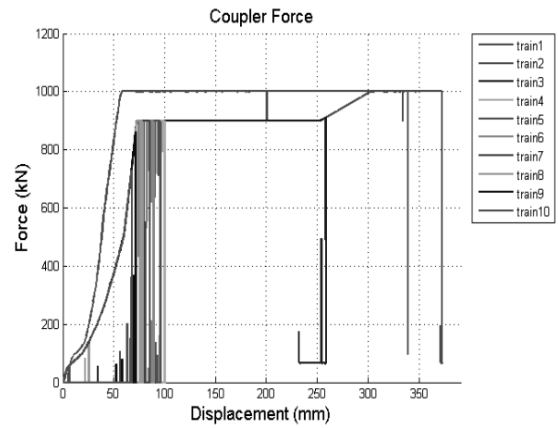
Energy	S company	Developed
Initial energy	4411.0 kJ	4411.8 kJ
Final energy	36.0 kJ	4.3 kJ
Absorbed energy, buffer	2412.0 kJ	2443.5 kJ
Absorbed energy, carbody	0.0 kJ	18.0 kJ
Energy dissipation, brake	1961.0 kJ	1946.0 kJ
Energy balance mistake	0.04%	0.00%



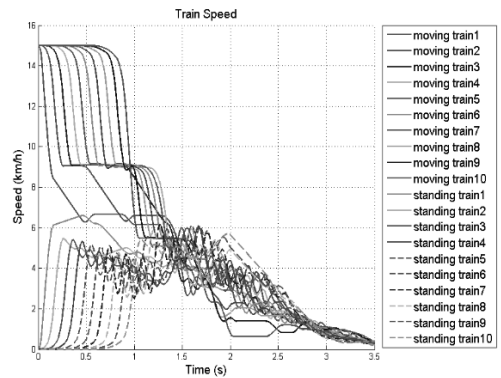
(a) Simulation from S-company



(b) Simulation from developed simulator



(a) Force of standing coupler



(b) Train speed

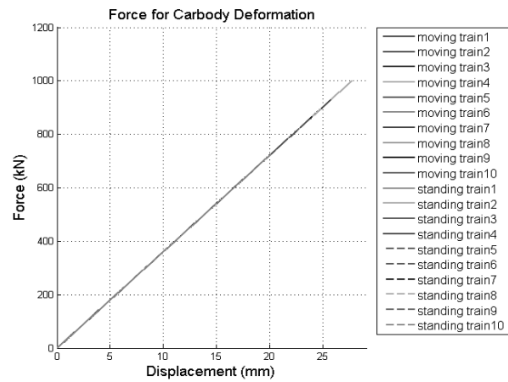
Fig. 8 Comparison of reaction force curve

322 mm 이고 개발된 프로그램의 해석에서는 차체 변형량이 추가 되어 최대 변위는 343 mm로 다소 크게 나타났다. 두 해석 결과를 비교하면, 개발 프로그램이 차체변형이 고려되어 이에 대한 차이를 고려하더라도 각 차량에서의 작용력이 잘 일치하고 있다. S사의 시뮬레이션 결과에서 각 거동이 성능곡선을 추종하지 않는 것을 살펴보면 동적 거동이 각 모델에 포함된 것으로 예측된다. 전반적인 충격에 의한 거동에는 영향이 적으나 실제 거동에는 접근할 것으로 예상되어 추후 개발 프로그램에 보완해야 될 것으로 생각된다.

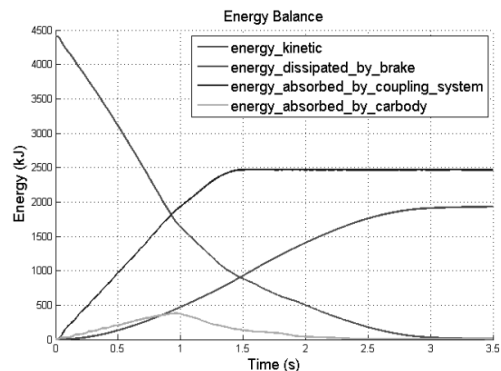
Fig. 9는 개발한 프로그램으로 시뮬레이션을 수행한 충돌해석 결과들이다.

Fig. 9(a)는 제동상태인 정지차량에 부착되어 있는 연결기의 작용력.변위 선도이다. 각 차량들이 제동상태에서 충돌력이 작용되어 큰 변위의 발생없이 큰 작용력이 작용하고 있다.

Fig. 9(b)를 살펴보면 충돌 직후 모든 차량이 인접 차량들의 영향에 의해 맥동하며 결국 모든 차량이 정지하게 됨을 확인할 수 있다. 충돌열차는 충돌직후 선두 차량이 먼저 충돌반력에 감속하여 충돌반력에 의해 맥동을 하며 서서히 감속하고 각 차량 간의 충돌이 전파되어가는 것을 알 수 있다. 정지하고 있는 열차는 충돌직후 충돌이 직접 발생하는 선두 차량의 속도가 급격히 높아졌다가 맥동



(c) Force of car-body



(d) Energy balance

Fig. 9 Simulation results (Train speed : 15 km/h)

을 하며 속도가 낮아져 정지하는 것으로 나타났다. 두 열차의 충돌 현상 전파시간이 다르게 나타나며 그 원인은 제동상태인 정지열차의 경우 차륜과 레일사이의 마찰력을 극복하고 완충기 변위만큼 밀려 충격력이 전달되므로 충돌차량보다 늦게 전파되는 것으로 판단된다.

차체에 작용된 힘을 나타낸 Fig. 9(c)를 살펴보면 완충기의 완충 효과에 의하여 직접 차체 변형이 발생하기 전까지의 결과이기 때문에 차체의 선형 탄성 변형만으로 차체의 거동이 나타나고 있다.

Fig. 9(d)는 에너지 평형을 나타내는 선도이다. 차량의 총 운동 에너지가 충돌과 함께 완충기, 제동, 차체에 의하여 소산 에너지로 흡수되어 최종에는 전체가 정지하는 것을 보여주고 있다. 완충기에 의한 에너지 흡수는 일정시간 동안에 흡수되고 제동에 의한 흡수 에너지는 차량이 정지할 때까지 계속된다. 차체에 의한 흡수 에너지는 초기 변형이 클 때에 소산되다가 전체 작용력이 감소하게 되면 사라지게 된다.

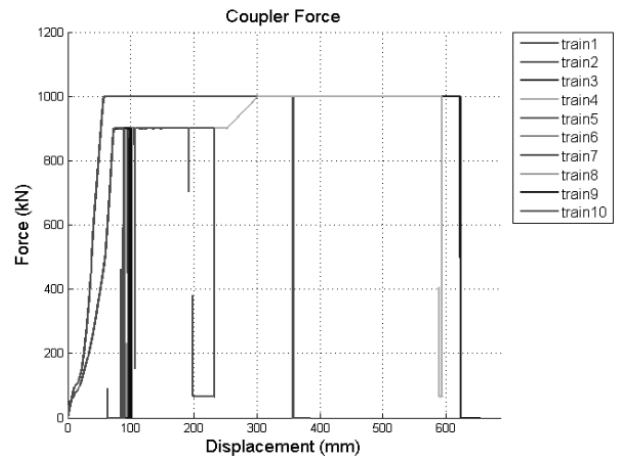
4.2 차체 변형을 동반하는 시뮬레이션 결과

20 km/h 충돌 시나리오는 국내 안전 규정이 10 km/h로 충돌시 차체에 손상이 없어야한다는 점을 고려하면 굉장히 가혹한 설정이다. 이 시나리오에서는 연결기의 완충 기능이 소실된 후에 차체의 압괴가 일어날 것으로 예상되며 차체의 변형 모델을 사용하여 차체 거동에 대한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서, 차체의 변형 모델은 연결기의 완충 성능이 소실되기 전까지는 탄성영역이고 그 이후는 소성영역으로 처리되었다. 본 시뮬레이션 해석 결과는 차체 설계에 활용될 수 있다.

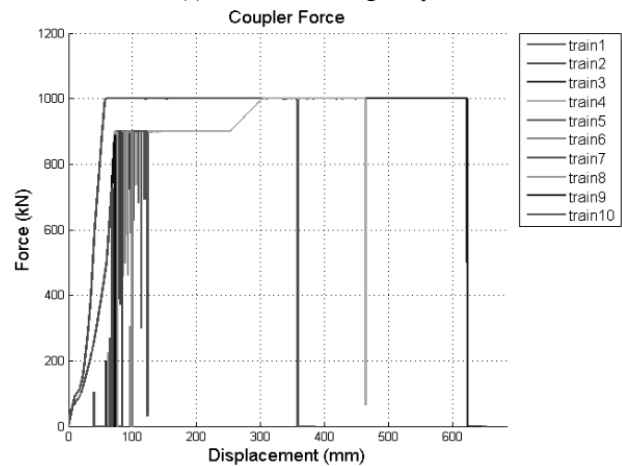
Fig. 10은 개발한 프로그램으로 속도 20 km/h에서 시뮬레이션한 충돌해석 결과들이다.

Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)의 각 완충기에 작용하는 반력 결과를 보면 선두 차량 앞단의 연결기가 변형 튜브의 한계 성능을 지나 반력이 0으로 떨어지면서 변위가 증가한 모습을 볼 수 있다. 이는 예상한대로 연결기의 완충 기능이 소실된 후 차체의 압괴가 발생하는 것으로 보여진다. Fig. 10(c)의 차량 속도를 보면 모든 차량의 속도가 맥동하며 점차 줄어가는 경향을 보이지만 결과적으로 완전

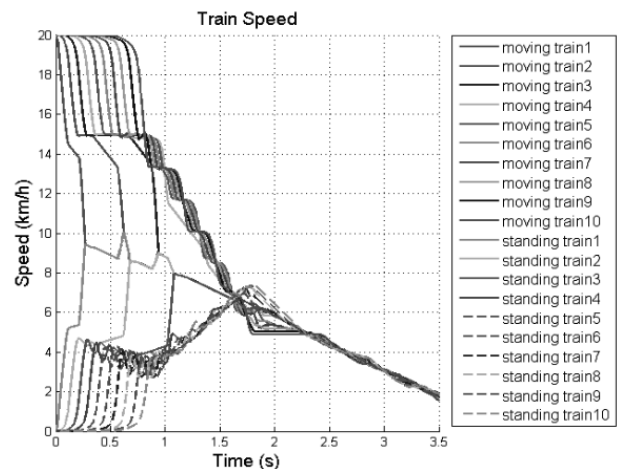
히 0이 되기 전에 시뮬레이션이 종료되므로 충돌이 완전히 끝났다고 보기는 어렵다. 하지만 이미 최대 충격력에 대한 응답은 모두 얻었으므로 굳이 이 후 시간에 대한 결과는 필요하지 않다. 충돌 차량과 정지 차량이 서로 각각 속도로 움직이다가 점차 차량간의



(a) Force of moving coupler



(b) Force of standing coupler

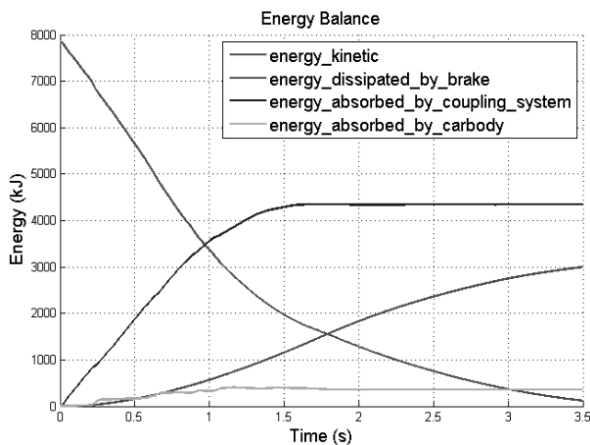


(c) Train speed

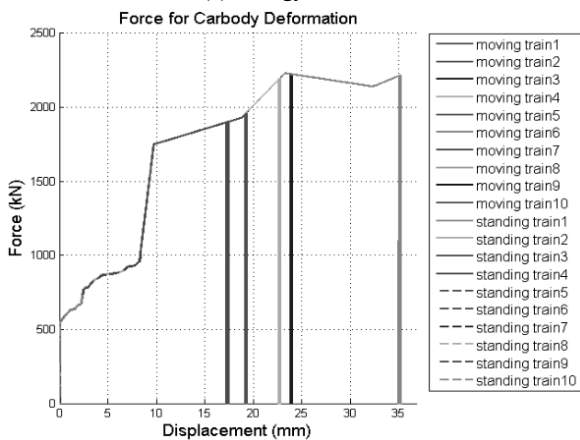
Table 2 Result of energy balance

Energy	Result
Initial energy	7843.1 kJ
Final energy	118.5 kJ
Absorbed energy, buffer	4345.6 kJ
Absorbed energy, carbody	334.4 kJ
Energy dissipation, brake	3016.8 kJ
Energy balance mistake	0.35%

Fig. 10 Simulation results (Train speed : 20 km/h)



(d) Energy balance



(e) Force of Car body

Fig. 10 Simulation results (Train speed : 20 km/h)

속도가 감소하고 정지하게 된다. Fig. 10(d)의 에너지 평형 결과를 보면, 총 운동에너지가 큰 상태로 충돌이 발생하고 일정 시간이 경과하면 연결기 시스템은 더 이상 에너지 흡수작용을 하지 않는 것으로 완충기능이 소실되었음을 확인할 수 있다. 차체의 흡수 에너지 또한 변하지 않는 것으로 미루어 보아 차체가 소성 영역에 진입했음을 알 수 있다. 최종 에너지가 남아 있는 것은 3.5초간의 시뮬레이션동안 충돌이 완료되지 않아 지속적으로 마찰에 의한 에너지는 소실되고 있다.

Fig. 10(e)는 차체의 변형 모델에서 나타난 결과이다. 초기의 일정 구간까지는 탄성 변형 구간으로 흡수한 에너지가 탄성에너지로서 다시 쓰여지고 이후 구간에서 소성 변형에 의한 흡수 에너지로 소멸되어 버린다. 차체의 소성변형에 의한 흡수에너지는 충돌의 잔향이 남아있더라도 일정 크기 이하에서는 소실 에너지가 없어지게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 차체의 변형까지 고려하여 철도 차량 충돌 시뮬레

이션 프로그램을 개발하고 완충기에 의해 연결된 편성차량의 충돌 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 해석 결과는 향후 안전 기준 강화 시 차체가 흡수하는 에너지를 대체할 수 있는 용량의 완충 요소를 연결기에 추가함으로써 안전 기준을 만족시킬 수 있도록 기존의 연결기를 보강 설계 하거나 차체의 전두부 혹은 후두부 강성 설계 하는데 방향을 제시할 수 있을 것이라 생각된다.

개발된 프로그램을 검증하기 위하여 검증이 완료되어 상업용으로 사용되는 시뮬레이션 결과를 이용하여 충돌속도 15 km/h로 충돌하는 편성열차의 시뮬레이션을 수행하여 비교 검증하였다. 검증된 프로그램을 이용하여 완충기의 한계를 넘어서는 충돌속도인 20 km/h로 충돌하는 편성열차의 거동을 해석하였다.

- (1) 완충기의 완충 능력을 초과한 충돌시에도 해석이 가능하도록 차체 모델을 포함하여 Matlab/Simulink를 이용한 편성 차량의 충돌 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다.
- (2) 개발된 프로그램의 검증을 위하여 상업용 프로그램 해석 결과를 사용하여 비교하였고 두 해석 결과는 충분한 수준으로 유사한 충돌 거동을 보여 주었다. 개발 프로그램은 차체 변형이 추가되었지만 탄성 영역 내에서는 동일한 결과를 나타내었다.
- (3) 완충기 구성요소, 마찰 요소, 차체의 에너지 흡수 거동과 충돌 차량들의 속도, 각 구성요소에 작용되는 힘에 대한 해석과 차체 압괴를 포함하는 충돌 거동에 대한 해석이 가능하였다.
- (4) 차체의 강성 특성 곡선을 입력하고 충돌 속도를 안전범규보다 가혹하게 설정하여 해석한 결과 연결기의 기능이 소실된 이후 차체의 변형에 대한 거동을 확인했다.

References

- [1] Park, M. Y., Kim, G. Y., Koo J. S., Park, Y. I., 2009, A Study on the Crash Multi-body Dynamic Model Using Three Dimensions Finite Element Model, Proceeding of the KSAE Conference, 3141-3145.
- [2] Kim, Y. H., Kim, K. N., Jang, H. M., Park, Y. I., 2004, Modeling of coupling device for crash analysis of an electric vehicle, Proceeding of the KSR Conference, 192-197.
- [3] Jang, H. M., Kim, N. W., Park, Y. I., 2010, Comparison of Simulation Models for Train Buffer Couplings, Transactions of KSAE, 18:4 107-114.
- [4] Jang, H. M., Kim, K. N., Park, Y. I., 2010, Impact simulation for rolling stock vehicle coupler system, Transaction of KSR, 13:3 251~256.