

전차선 지지 구조물에 대한 전동차 차체의 충돌 해석연구

Collision Analysis of EMU Carbody against Overhead Line Structure

김진석* 구정서** 권석진***
Kim, Jin Seok Koo, Jeong Seo Kwon, Seok Jin

ABSTRACT

In this paper, crashworthiness of EMU carbody against overhead line structure is numerically evaluated. The material of the EMU carbody is made of stainless steel(SS301L). The material of the overhead line structure(a portal-type) is structure steel (SS400). The EMU carbody is numerically analyzed under collision conditions such as upright side-on impact scenario and angled impact scenario to collide against overhead line structure(a portal-type) at 64.6 kph, respectively.

1. 서론

철도차량의 충돌이나 탈선사고는 여러 가지 원인에 의해 발생되고 있다. 전형적인 철도차량의 충돌사고 유형을 살펴보면 정면충돌, 추돌사고, 측면 충돌사고, buffer stop 충돌사고, 건널목사고 및 객차 탈선사고 등[1-3]을 들 수 있다. 그 중에서 탈선에 의한 차량과 전차선 지지구조물의 2차 충돌에 의한 피해는 전철화가 많이 이루어진 영국, 프랑스 등 철도 선진국에서 발생한 사례가 있고, 이러한 사고유형의 피해를 저감하기 위한 연구[4]가 진행되고 있다. 그러나 최근에 급속히 전철화가 진행되고 있는 국내에서는 이러한 사고에 대비한 설계기준 또는 관련 연구를 수행한 사례를 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 충돌사고 발생시 차량과 전차선 지지구조물에 발생하는 피해 수준을 분석하기 위한 기초연구로서 국내 차량 중 현재 운행중인 인천 1호선 전동차량 중 객차를 선정하였고, 충돌 대상 구조물은 해당 노선에 설치되어 있는 전차선 지지구조물을 선정하였다. 해당객차는 전형적인 스테인레스 강재 차체인데 Hypermesh[5]를 이용하여 쉘요소로 모델링 하였고, 또한 선정된 전차선 지지구조물의 형식은 일반구조용 압연강재로 제작된 portal형인데 쉘요소를 이용하여 모델링 하였다. 본 연구에 이용된 외연적(explicit) 유한요소 해석용 code는 LS-DYNA[6]를 이용하였다.

본 연구에 사용한 충돌사고 시나리오는 국내 충돌사고 빈도통계에 근거하여 설정함이 타당하나, 국내에서는 관련 사고사례 자료가 부족하여 이러한 충돌사고에 대한 영국 RSSB의 연구자료(Upright Side-on Impact Scenario 와 Angled Impact Scenario)[4]를 근거로 탈선 후 64.6kph(40mph)의 속도로 전차선 지지구조물에 충돌하는 조건을 적용하였다.

본 연구는 국내에서 이러한 충돌사고에 대한 피해수준을 평가하는 정확한 기법과 안전기준이 마련되지 않은 관계로 승객 및 차량의 피해규모를 정확히 예측하기 어려운 한계가 있으나 본 연구를 시작으로 이에 대한 추후의 연구방향을 제시하는데 그 목적이 있다.

* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정

** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 교수

*** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 겸임교수

2. 도시철도 차량의 모델 선정

2.1 차량 및 차체의 기본 제원

도시철도 차량의 모델링을 위하여 인천광역시지하철공사 1호선 전동차 (도시철도 표준사양 기준 : 중형 전동차)를 선정하였으며 일반 사양[7,9]은 아래와 같다 .

- □ 전동차 형식 : 중형 전동차
- □ 전동차 편성단위 : 8량 1편성 (TC1-M-M(h1)-T1-T1'-M(h2)-M-TC2)
- □ 차체 재질 : 스테인레스 강재
- □ 최고속도 및 운행 최고속도 : 100km/h / 80km/h
- □ 표정속도 : 34km/h 이상
- □ 가속도 및 감속도 : 3.0km/h/s / 상용 3.5km/h/s 이상, 비상 4.5km/h/s 이상
- □ 기타사항 : 도시철도 표준사양 기준

Table 1은 전동차 차체의 기본 제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Basic Specifications of the EMU Carbody of I.R.T.C LINE No. 1

항목	제원	항목	제원
연결면간 거리	18,000 mm	구조체 하중	7 ton
차체 길이	17,500 mm	승객 하중	23 ton
차체 최대폭	2,750 mm	만차 하중	52.8 ton
대차중심간거리	12,400 mm	완성차 하중	36 ton
지붕 높이	3,600 mm	진동 가속도	1.2 g

Fig 2.1과 Fig 2.2는 본 스테인레스 강재(Stainless Steel) 전동차의 외관 형상 및 단면 형상을 나타낸 것이다. 인천광역시지하철공사 1호선 전동차 차체의 재질은 301L 계열 스테인레스 강재로 구성되어 있다. Table 2는 차체 모델링에 적용된 스테인레스 강재 301L 계열의 기계적 물성치를 나타낸 것이다.



Fig 2.1 스테인레스 강재 전동차 외관 형상

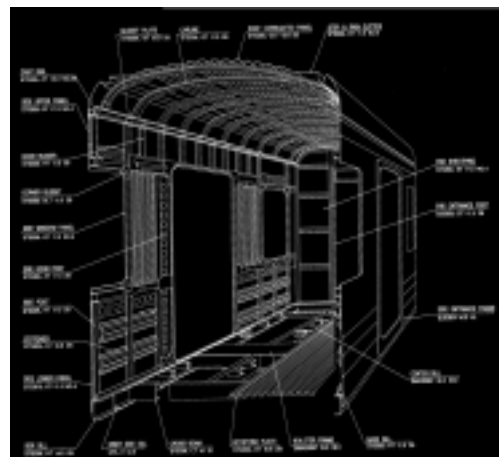


Fig 2.2 스테인레스 강재 차체 단면 형상

Table 2 Mechanical Properties of the Stainless-Steel EMU Carbody

Material	Tensile strength (Pa=N/m ²)	Yield strength (Pa=N/m ²)	Elastic modulus (Pa=N/m ²)	Poisson's ratio	Density (g/cm ³)
301L Stainless Steel	550 MPa	220 MPa	200 GPa	0.29	7.93

2.2 스테인레스강재(Stainless-Steel) 차체의 모델링

본 연구에서는 1량의 T1차량을 선택하여 모델링 하였으며, Fig. 2.3은 T1차량의 전체모델(Full Model)로써 103,386개의 선형 쉘(shell) 요소와 92,389개의 절점이 사용되었다.

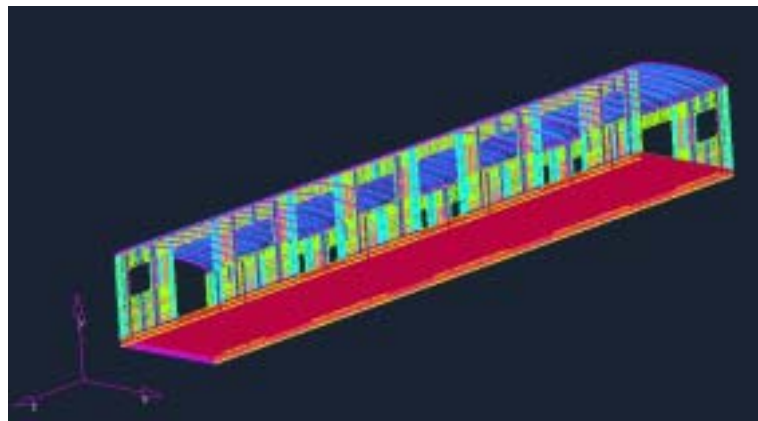


Fig. 2.3 T1차량의 유한요소 전체모델

3. 전차선 지지구조물의 모델 선정

본 연구에서는 「산업자원부 고시 제2005-1호, “전기설비 기술기준”에 의거[8], 인천광역시지하철 공사 1호선 굴현역 구간 지상선로 전차선 지지구조물인 Portal형을 선정하였다.

Fig. 3.1은 전차선 지지구조물(Portal형)의 외관 형상을 나타내고 있다. 또한 Fig. 3.2는 Portal형의 전체모델(Full Model)로써 17,246개의 선형 쉘(shell) 요소와 19,972개의 절점을 사용하여 모델링하였다. 경계조건으로는 구조물 하단을 완전 구속하여 구조물은 최대한 변형을 하되 기초바닥에서 이탈하지 않도록 하였다.



Fig. 3.1 Portal형 구조물

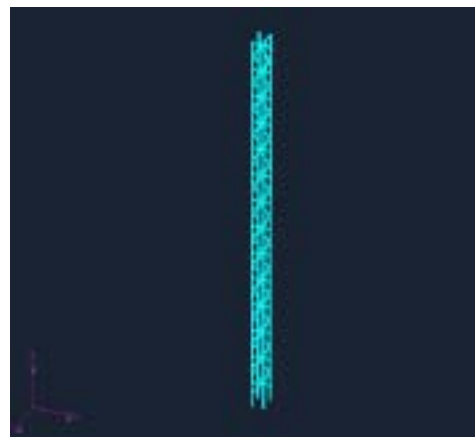


Fig. 3.2 Portal형의 유한요소 전체모델

Table 3은 전차선 지지구조물 모델링을 위한 기계적 물성치를 나타낸 것이다.

Table 3 Mechanical Properties of Overhead line Structure

Material	Tensile strength (Pa=N/m ²)	Yield strength (Pa=N/m ²)	Shear modulus (Pa=N/m ²)	Poisson's ratio	Density (g/cm ³)
SS400	495 MPa	230 MPa	80 GPa	0.25	7.85

4. 사고 시나리오에 따른 충돌 해석

4.1 사고 시나리오 선정

현재 도시철도 차량의 충돌안전기준과 설계 가이드라인은 건설교통부령 제231호 「도시철도차량안전기준 제4절 충돌 안전기준」과 한국철도기술연구원 「도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구」 등 [10,11]에서 제시하고 있다. 그러나 본 연구에서 수행하고자 하는 차량과 전차선 지지구조물간의 충돌에 관련된 규정은 아직 제정되어 있지 않으므로 국외의 연구사례를 원용하였다. 본 연구에서 적용한 사고 시나리오의 출처는 영국의 연구 자료 중 「Rail Safety & Standards Board "Overhead line structure design to cater for collision"」이며, 본 충돌해석에 사용된 충돌조건은 다음과 같다.

□ Accident Scenario I : Upright Side-on Impact Scenario

-스테인레스 강재 차체의 측면중심부 64.4kph의 속도로 전차선 지지구조물에 충돌

□ Accident Scenario II : Angled Impact Scenario

-15° 각도상태로 기울어진 스테인레스 강재 차체가 64.4kph의 속도로 전차선 지지구조물에 충돌

4.2 Upright Side-on Impact Scenario 충돌 해석

본 사고 시나리오는 차체의 중심부가 전차선 지지구조물과 충돌하였을 때 차체가 탑승객의 안전을 충분히 확보할 수 있도록 설계되었는지를 평가하는 조건이다. 전차선 지지구조물의 횡방향 강성 및 횡강도가 높을 경우 차체의 충돌부에 과도한 변형을 일으키고 심한 경우에는 전차선구조물이 침투하여 탑승객에 직접적인 피해를 야기할 수 있다.

충돌해석결과 Fig 4.1과 같이 차체의 강성과 강도가 전차선 지지구조물보다 상대적으로 높아서 심한 변형을 일으키는 수준이 아니었으며, 오히려 차체가 전차선 지지구조물을 과도하게 변형시키는 현상이 발생하였다. 또한 차체의 무게가 전차선 지지구조물의 무게보다 상당히 커서 충돌시 발생하는 충격력이 전차선 지지구조물이 지탱할 수 있는 하중을 초과하는 현상을 보였다. 즉 Fig 4.2의 변위결과 곡선을 분석하면, 전차선 지지구조물의 변형이 계속 증가하여 차체가 계속 운동방향으로 진행하고 있음을 알 수 있다. 차체의 변형은 하부에서 국부적인 수준으로 발생하였으며 승객에 직접적인 피해를 주는 수준은 아니었다.

차체충돌 후 승객의 거동을 분석하기 위해 해석한 차체 앞·뒤 승객탑승공간의 가속도결과는 최대 1g 이하로 승객이 중상을 입을 수 있는 수준(통상 5g 수준)은 아니라고 판단된다. 또한 차체에 발생하는 최대 충격력은 충돌방향으로 최대 약 650 kN 발생하였다.

본 충돌해석결과 전차선 지지구조물의 강성 및 강도가 낮은 편이어서 차량이 충돌이후 계속 운동방향으로 진행을 하므로 인해 이후 추락 전복과 같은 2차 사고를 방지하는데는 미흡한 것으로 판단된다. 따라서 전차선 지지구조물은 차량이 일정구간 이상 밖으로 이탈되지 않도록 하는 수준의 강도설계가 필요한지에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

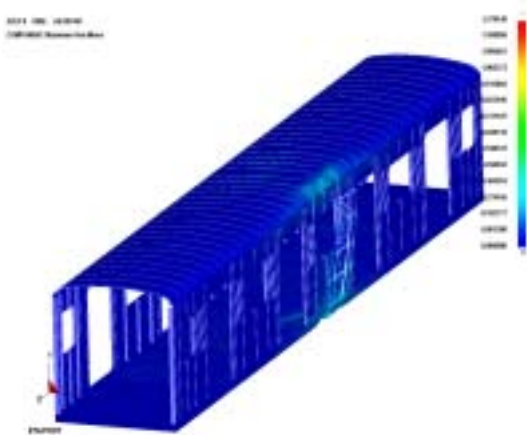


Fig. 4.1 차체의 압괴변형 형상결과

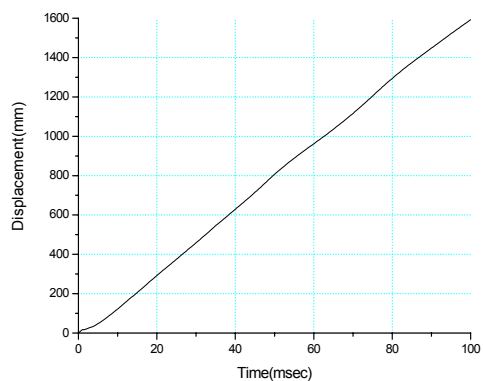


Fig. 4.2 차체 중앙부의 변위값

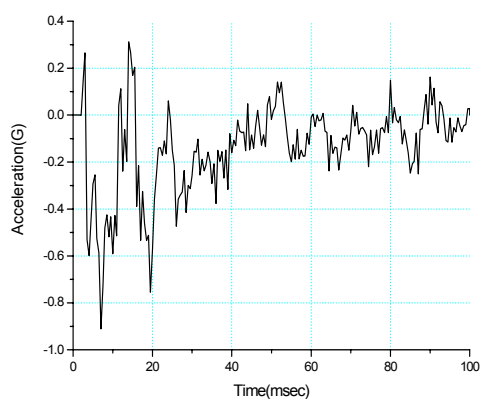


Fig. 4.3 차체 끝단의 가속도 곡선

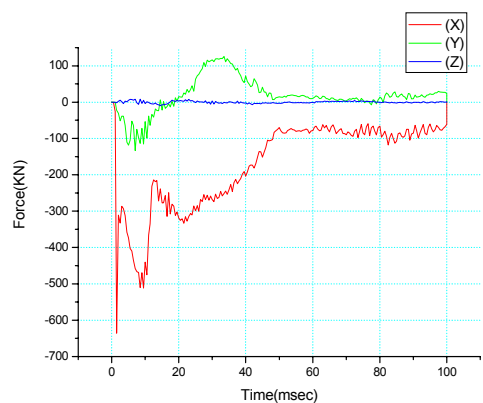


Fig. 4.4 충돌 시 차체에 발생하는 최대충격력

4.3 Angled Impact Scenario 충돌 해석

본 사고 시나리오는 차량이 주행 중 곡선구간에서 탈선하였을 때 차량측면의 운동방향이 전차선 지지구조물과 일정한 경사각도(15°)로 충돌하는 상황을 재연한 것이다. 역시 충돌부는 차체의 중심부로 설정하였으며, 주요 관심 대상은 차체가 탑승객의 안전을 충분히 확보할 수 있는 강도의 구조인지를 확인하기 위함이다. 충돌 해석조건은 앞 절과 마찬가지로 차체중심부가 전차선 지지구조물을 밀고 나가는 운동으로 하였다.

본 충돌해석 결과를 분석해보니 Upright Side-on Impact Scenario를 적용한 경우와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 차체 앞뒤 승객탑승영역에 발생하는 충돌가속도는 최대 0.8g 수준이었으며, 차체에 발생하는 최대 충격력은 약 700 kN 수준이었다.

향후 차량의 운동 방향이 측면뿐만 아니라 정면방향 운동도 동시에 존재하는 경우에 대한 충돌해석을 수행하여 전차선 지지구조물의 뾰족한 모서리부분에 의하여 차체구조가 찢어지는 현상이 발생하는지를 분석할 필요가 있다.

또한 위에서 언급한 본 연구의 충돌사고 시나리오에 대하여 차체가 탈선후 전복하는 과정에서 전차선 지지구조물과 충돌하는 경우를 해석하여 차체 지붕구조물의 압괴강도를 평가하는 것도 필요하다. 이러한 내용은 후속 연구에서 이루어질 것이다.

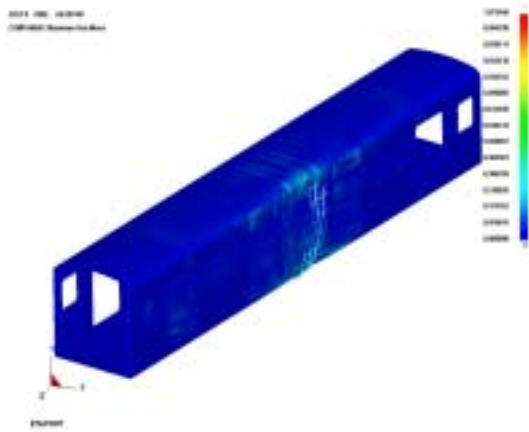


Fig. 4.5 차체의 압괴 변형 형상결과

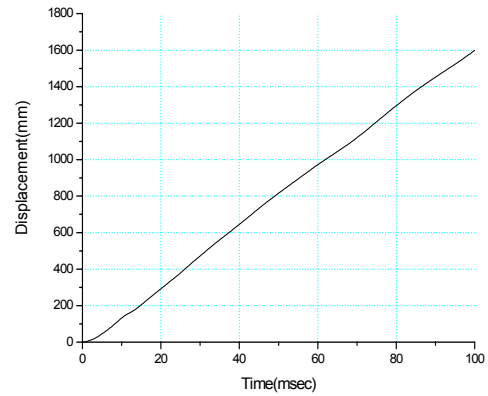


Fig. 4.6 차체 중심부 변위값

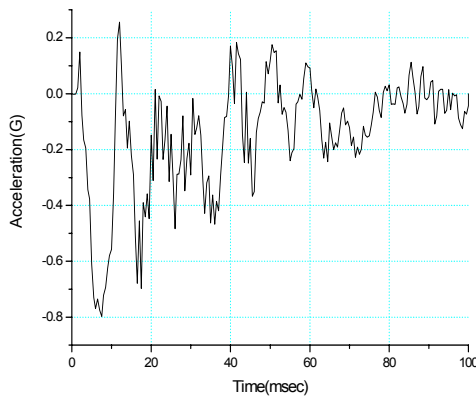


Fig. 4.7 차체 끝단의 가속도 곡선

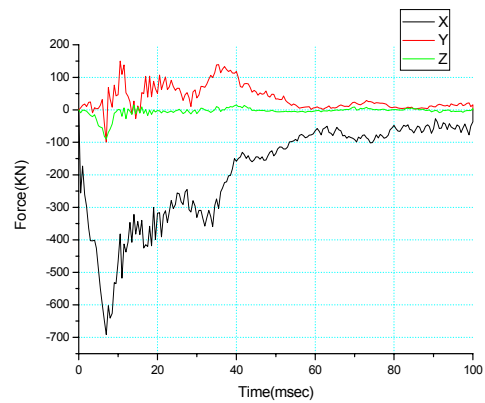


Fig. 4.8 충돌 시 차체에 발생하는 최대충격력

5. 결론

차량의 탈선 이후 전차선 지지구조물과 충돌하는 사고를 대상으로 한 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 최근 국내에서도 급속한 전철화가 이루어지고 있으므로 차량이 탈선후 전차선 지지구조물과 충돌할 때 피해를 최소화하기 위한 차량 및 전차선 지지구조물의 설계 연구가 필요하며 국내에서도 관련 안전기준을 마련할 필요가 있다.
- 2) 본 연구에서 분석된 차량이 전차선 지지구조물과 2가지 측면 충돌하는 사고의 충돌해석 결과, 전차선 지지구조물은 차량의 탈선 이후 충돌시 차체에 심한 변형을 유발할 수 있는 수준의 강성 및 강도를 가지고 있지 않아서 열차 승객에게 직접적인 피해를 미치지 않을 것으로 판단되나, 오히려 전차선 지지구조물의 강도가 낮아서 차체의 운동을 일정수준에서 제어하지 못하여, 차량의 추락 전복과 같은 2차사고 방지에 취약할 수 있다.
- 3) 2가지 충돌 해석결과에서 나타난 차체의 충돌가속도(1g 이하)와 압괴변형량은 승객의 안전에 심각한 영향을 미치는 수준은 아니었으나, 추후 전차선 지지구조물과의 측면충돌에 관한 다양한 시나리오에 대하여 계속적으로 연구하여 차체와 전차선 지지구조물 설계에 요구되는 기초데이터를 확보할 필요가 있다.

참고문헌

1. 김유일, 김동성, 송달호, 노규석, “고속 열차의 충돌 안전도 해석기술 현황,” 한국기계연구원 1997.
2. 구정서, 송달호, “TGV의 충돌 안전도 설계와 연구동향 분석,” 한국기계연구원 1998.
3. 구정서, 김동성, 조현직, 권태수, 최성규, “한국형 표준전동차 전차량의 충돌 안전도 해석 연구,” 철도학회논문집 2000.
4. Rail Safety & Standards Board, "Overhead line structure design to cater for collision", RSRP report 2004.
5. Altair, "Altair Hypermesh User's Manual Versio 6.0."
6. LSTC, "LS-DYNA Keyword User's Manual Version 960."
7. 인천지하철공사, “차체 기본설계 승인 자료,” 1997.
8. 산업자원부 고시 제2005-1호, “전기설비 기술기준.”
9. 건설교통부, “도시철도차량 표준사양,” 1998.
10. 건설교통부, “도시철도차량 안전기준에 관한 규칙,” 2000.
11. 한국철도기술연구원, “도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구” 1999.