

# 전차선 지지 구조물 형태에 따른 전동차 차체의 충돌안전도 특성 연구

## A Study on Crashworthy Characteristics of EMU Carbody for Overhead Line Structure Types

김진석\* · 이현철\* · 조현직\* · 구정서†

Jin-Seok Kim · Hyun-Cheol Lee · Hyun-Jik Cho · Jeong-Seo Koo

### Abstract

In this paper, crashworthiness of the EMU carbody of Incheon Metro is numerically evaluated against two types of overhead line structures (headspan and portal-type). The material of the EMU carbody is stainless steel (SUS301L), and that of the overhead line structures is the structural steel (SS400). The EMU carbody is analyzed under collision conditions, such as upright side-on impact, side-on roof impact and angled roof impact scenarios, to be collided against the headspan type or the portal type at the speed of 64.4km/h, respectively. It is concluded from the numerical results that the overhead line structures will not do so much harm to the EMU carbody of Incheon Metro for various collisions caused by derailment. Furthermore, the overhead line structure of the portal type is superior to that of the headspan type in the crashworthy point of view.

**Keywords** : Crashworthiness, Overhead line structure, EMU, Side-on collision, Derailment  
충돌안전도, 전차선구조물, 전동차, 측면충돌, 탈선

### 1. 서론

국내 도시철도 차량은 도시교통체계 등 주변 여건으로 인하여 충돌사고 위험이 상대적으로 높다. 철도차량의 사고유형을 살펴보면 충돌, 탈선, 화재, 건널목 사고, 공중사상, 직무사상 등을 들 수 있다. 철도차량 사고유형 중에서 인명 및 차량에 심각한 피해를 주는 사고는 충돌과 탈선사고[1]이며, 충돌사고는 충돌 후 객차간 타고 오름, 측면 회전력에 의한 측방좌굴 및 탈선, 전복사고 등 상당히 복잡한 양상을 나타낸다[2-4].

충돌이나 탈선사고는 여러 가지 원인으로 발생하고 있는데, 첫째는 차량 또는 선로시설의 구조적 결함, 안전장치 미흡, 운행상 부주의 등과 같이 인위적으로 예방 가능한 원인, 둘째는 천재지변으로 인한 지반침하, 노선유실, 낙석 및 교량유실 등의 원인, 마지막으로 의도적인 사고를 유발시키기 위하여 장애물을 설치하는 원인 등을 들 수 있다[1]. 따라서

선진국에서는 충돌사고 피해저감을 위하여 여러 가지 안전 규정을 두고 있다[5-7].

최근 영국에서는 탈선한 차량이 전차선 지지구조물과 충돌(이하, 전차선 구조물 충돌사고)하여 심각한 피해가 발생한 두 건의 대형 충돌사고(Southall rail accident & Hatfield rail accident)가 있었으며, 이에 대한 피해 저감 대책을 마련하기 위하여 영국 RSSB (Rail Safety & Standards Board, UK)에서는 전차선 구조물 충돌사고에 관한 연구를 수행한 바[8] 있다. 국내에서도 전차선 구조물 충돌사고가 발생한 사례가 있으나, 사고 발생 시 인명 및 차량피해 발생 메커니즘을 규명하기 위한 연구사례는 없다.

본 연구에서는 철도차량이 충돌 또는 탈선사고 후 발생할 수 있는 차량과 전차선 구조물의 충돌을 해석하여 차량에 발생할 수 있는 피해 수준을 예측 평가하고 충돌 사고 시 인명 및 차량의 손실을 줄이는데 필요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

현재 국내 전차선 지지구조물은 장치의 지지 역할만 수행하고 있을 뿐 탈선 차량과의 상호작용을 고려한 전복억제, 충돌특성, 탈선차량에 미치는 영향 등에 대한 고려는 하지 않고 있으며, 관련 규정도 없다.

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교, 철도전문대학원

E-mail : koojs@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6878 FAX : (02)970-6088

\* 서울산업대학교 철도전문대학원

따라서 본 연구에서는 영국 RSSB의 전차선 구조물 충돌 연구 사례에 근거하여 충돌 속도 40 mph (64.4 km/h)로 3가지 충돌사고 시나리오(upright side-on impact scenario, side-on roof impact scenario, angled roof impact scenario)를 적용하여 충돌해석을 수행하였다. 본 충돌속도는 영국에서 발생 한 두 건의 대형 전차선 구조물 충돌사고를 모델링 한 것이다. 전차선 구조물 충돌사고에 사용된 차량 모델은 스테인레스 강재 301L (SUS301L) 재질의 도시형 전동차 차체이며, 전차선 지지구조물 모델은 일반 구조용 압연 강재(SS400) 재질로 만들어진 headspan 형태, portal 형태 등 2 가지이다.

## 2. EMU 차체 모델링

본 충돌해석에서는 SUS 차체인 인천광역시지하철공사 1호선 전동차(이하 EMU) (도시철도 표준사양 기준: 중형 전동차)를 선정하였다. Table 1은 전동차의 기본 제원 및 차체의 기본 제원을 나타낸 것이다. Fig. 1은 EMU 차체의 단면 모습을 나타내고 있다.

EMU의 T차량을 선정하여 상용 프로그램인 HyperMesh [9]를 이용하여 모델링 하였는데, 전차선의 충돌해석을 하는데 직접적인 영향을 주지 않는 차체의 끝단부, 차체 내부 요소들, 창문 등은 세부적으로 모델링을 하지 않았으나 차체중량은 완성차 하중인 36 ton을 적용하였다. 차체 모델링에는 125,381개의 선형 쉘(shell) 요소를 사용하였다. Fig. 2부터 Fig. 4는 수치해석 시간의 경과에 따른 전체 에너지 량을 비교하여 최대 2.7% 이내 수렴된 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 EMU 차체 모델을 나타낸 것으로, 좌표계는 공간에 고정된 것인데 초기상태에서 차체 길이 방향이 z, 차체의 측면 방향이 x, 차체 지붕 방향이 y로 정의 되어 있다. 해석시간의 단축을 위하여 차체길이(17.5 m)에서 충돌부위인 가운데 70%를 제외하고 나머지 전두부와 후두부 각각 15%를 강체(rigid body)로 모델링 하였다.

충돌조건은 차체가 충돌방향(x방향)으로 초기 속도 64.4 km/h로 전차선지지구조물과 충돌하는 것이다.

Table 1. The basic specifications of EMU

Items	Dimensions	Items	Weight
Couplers distance	18,000 mm	Carbody	7 ton
Carbody length	17,500 mm	Passenger	23 ton
Carbody width	2,750 mm	Full payload car	52.8 ton
Bogies distance	12,400 mm	Empty car	36 ton
Roof height	3,600 mm	Acceleration	1.2 G

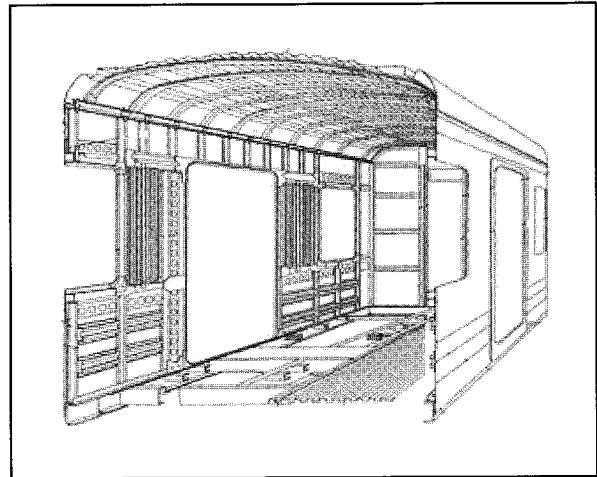
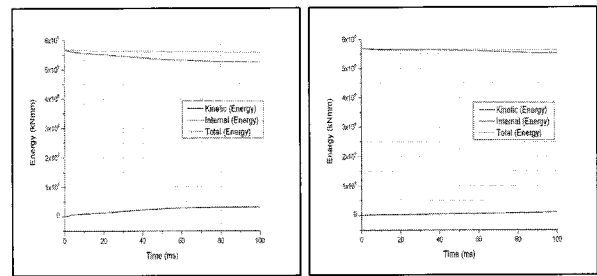
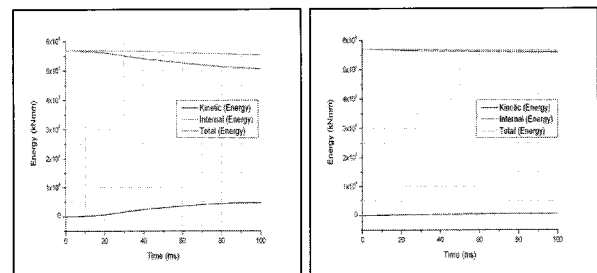


Fig. 1. Section shape of stainless-steel EMU carbody



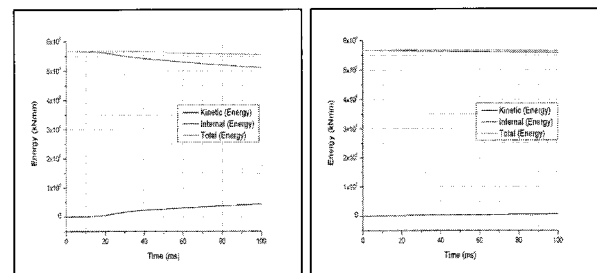
(a) headspan type (b) portal type

Fig. 2. Energy changes at the upright side-on impact



(a) headspan type (b) portal type

Fig. 3. Energy changes at the side-on roof impact



(a) headspan type (b) portal type

Fig. 4. Energy changes at the angled roof impact

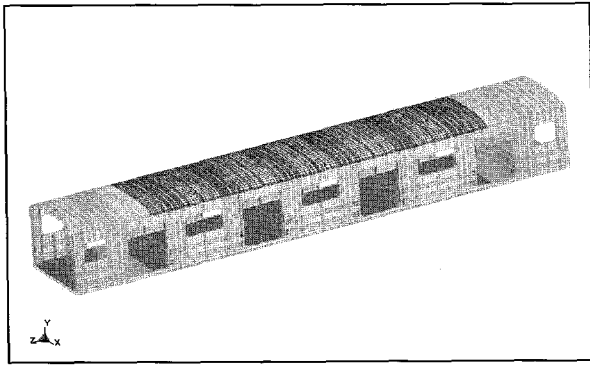


Fig. 5. FEM model of the full car

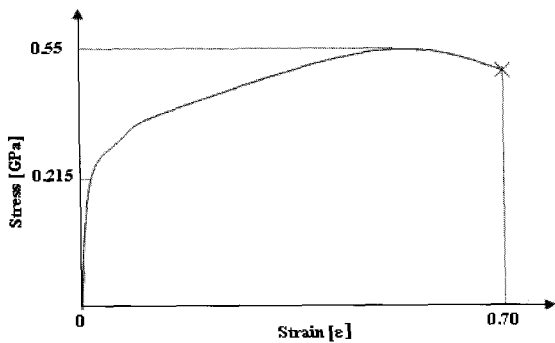


Fig. 6. Stress-strain curve of the stainless-steel material

Table 2. Mechanical properties of SUS301L

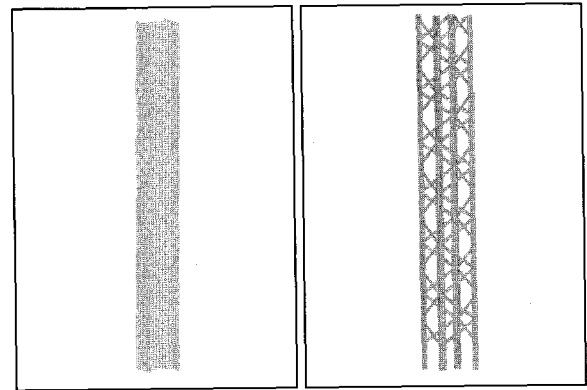
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elongation at Break
550	215	221.8	0.29	8000	70 %

Table 2는 SUS301L 계열(KS D3698)의 기계적 물성치이다. 재료의 응력-변형률 관계는 Fig. 6과 같이 항복강도까지 탄성변형으로 진행하고 그 이후는 소형변형으로 진행하다가 인장강도를 지나서 총 변형률의 70 % 되는 지점에서 파단이 일어나도록 입력 값을 주었다.

### 3. 전차선 지지구조물의 모델링

Table 3은 본 연구에 적용한 전차선 지지구조물 중 headspan 형태와 portal 형태의 기본제원을 나타낸 것이다.

전차선 지지구조물 형식은 단독구조물과 빔 형식 구조물 중에서 단독 구조물로 선정하였으며, 충돌해석 결과에 큰 영향을 주지 않는 브래킷, 전주 기초, 완철, 및 지선은 제외시키고 전주(pole)만 모델링을 하였다. Fig. 7는 headspan 형태와 portal 형태의 유한요소 모델로서 전주와 EMU차량과의 충돌할 높이의 일부분만 모델링을 하였다.



(a) headspan type (b) portal type

Fig. 7. FEM models of overhead line structures

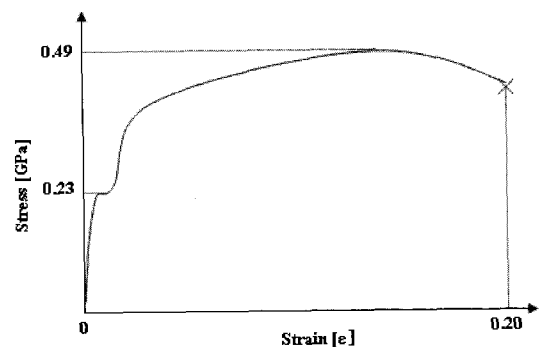


Fig. 8. Stress-strain curve of the SS400 material

Table 3. Specifications of overhead line structures

Description	Type & Size	Q'TY	Material	
Headspan	H300×300×10t×15t×8000	1	SS400	
Portal	Angle	L75×75×9t×8000	4	SS400
	Flat Bar	FB 50×9t×456	66	
	Flat Bar	FB 50×9t×386	66	

Table 4. Mechanical properties of SS400

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elongation at Break
495	230	200	0.25	7850	20 %

Table 4는 전차선 지지구조물에 사용되는 SS400 (KS D3503)의 기계적 물성치를 나타낸 것이다[10]. 재료의 응력-변형률 관계는 Fig. 8과 같이 항복강도까지 탄성변형으로 진행하고 그 이후는 소형변형으로 진행하다가 인장강도를 지나서 총 변형률의 약 20 %에서 지점에서 파단 되게 입력 값을 주었다.

### 4. 충돌사고 시나리오에 따른 충돌해석

#### 4.1 충돌사고 시나리오

본 연구에서 해석하려는 도시철도 차량과 전차선 지지구조물 간의 충돌 관련 국내 규정이 없으므로, 충돌사고 시나리오는 영국 RSSB의 ‘Overhead Line Structure Design to Cater for Collision’ [8]을 준용하였다.

영국 RSSB의 충돌사고 시나리오는 upright side-on impact scenario, side-on roof impact scenario, angled roof impact scenario 등 3가지이며, 이 사고 시나리오에 의하여 충돌해석을 수행하고 ‘차량 손상 정량화 기준’에 맞추어 평가하였다. Fig. 9와 Table 5는 3가지 충돌사고 시나리오에 대한 차량과 전차선 지지구조물의 충돌 유형을 설명하고 있다.

#### 4.2 차량 손상 정량화등급 기준

전차선 구조물 충돌사고 해석 결과로 구해진 손상을 정량적으로 평가하는 방법이 국내에는 아직 규정되어 있지 않으므로 영국 RSSB의 ‘차량 손상 정량화등급 기준’을 적용하였다. Fig. 10은 영국 RSSB의 ‘차량 손상 수준’을 나타낸 것이다.

#### 4.3 충돌사고 시나리오에 따른 충돌해석

충돌사고에 따른 인명과 차량의 피해를 평가하기 위하여 Fig. 9의 3가지 사고 시나리오에 대하여 headspan 형태, portal 형태 등 2 종류 전차선 지지구조물을 적용하여 충돌해석을 수행하고 차체 침투량과 충격가속도 값을 구하였다. 차체 침투량은 충돌부위가 충돌 전에 비하여 변형된 상대 변위량으로 정의하였고, 충격가속도 값은 Fig. 11과 같이 강체로 모델링된 차체끝단 부위(절점 41025)의 가속도로 정의하였는데, 시뮬레이션에 필요한 충돌진행시간을 100 ms로 정의하였는데, 전차선 구조물 충돌사고 현상을 분석하는데 충분하였다.

##### 1) Upright side-on impact scenario의 경우

Fig. 12부터 Fig. 14는 upright side-on impact 충돌 시나리오를 적용하여 각각 headspan 형태와 portal 형태의 전차선 구조물에 대하여 LS-DYNA [11]로 해석한 결과이다.

Headspan 형태의 전차선 구조물과 충돌의 경우, 충돌 직후 1,602.7 kN의 충격력이 발생하였으며, 충돌부위는 차체 폭 2,750 mm중에서 최대 80.7 mm가 침투되어 차체 폭 대비 침투율이 3 %로 ‘차량 손상 정량화등급 기준’에 의하면 minor damage등급이었다. 충돌 후 약 10 ms에서 차체에 550 MPa의 Von-Mises 응력이 발생하였다.

Portal 형태의 전차선 구조물의 경우, 충돌 직후 633.3 kN의 충격력이 발생하였으며, 차체 중심부의 침투량은 최대

Table 5. Comments on each collision scenario

	Collision scenarios	Collision positions
Scenario I	upright side-on impact	collision against the center window which is the most weak structural part
Scenario II	side-on roof impact	collision against the center part of the roof in the tipping case
Scenario III	angled roof impact	collision against the center part of the roof at the inclined position of 15°

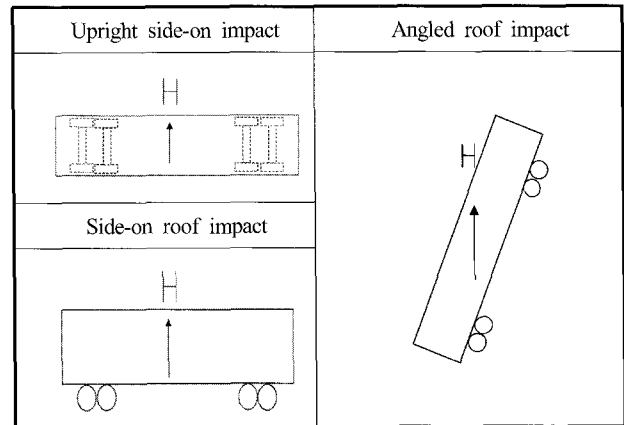
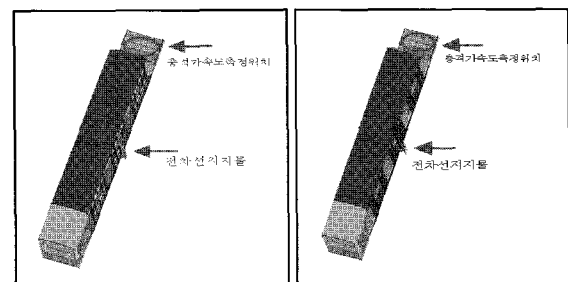


Fig. 9. Schematics of collision scenarios

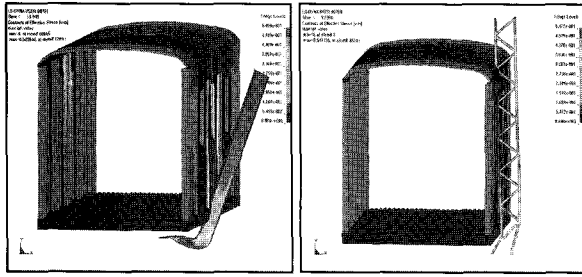
Severe damage		Serious damage	
Intrusion into the coach of greater than 67% of the height width of the coach to the impact direction		Intrusion into the coach of between 67% and 33% of the height width of the coach to the impact direction	
Moderate damage		Minor damage	
Intrusion into the coach of between 33% and 10% of the height width of the coach to the impact direction		Intrusion into the coach of less than 10% of the height width of the coach to the impact direction	

Fig. 10. Damage level classifications of RSSB



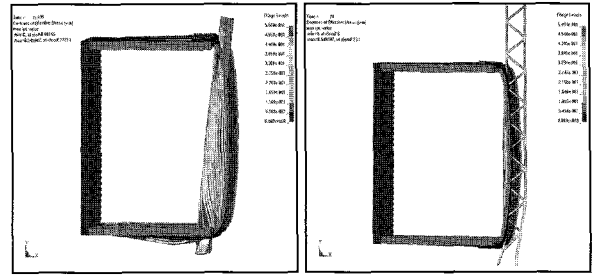
(a) headspan type (b) portal type

Fig. 11. Position of the acceleration data point (node 41025)



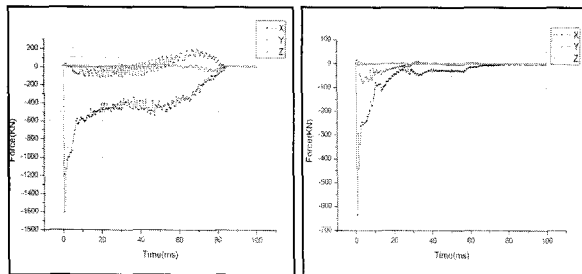
(a) headspan type (b) portal type

Fig. 12. Deformations by the upright side-on impact



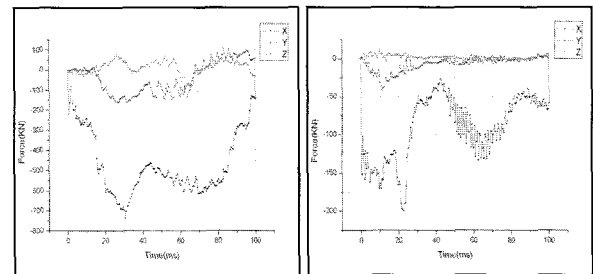
(a) headspan type (b) portal type

Fig. 15. Deformations by the side-on roof impact



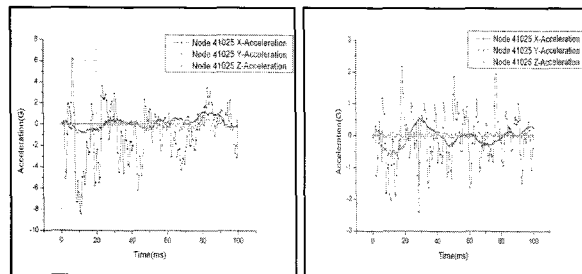
(a) headspan type (b) portal type

Fig. 13. Forces by the upright side-on impact



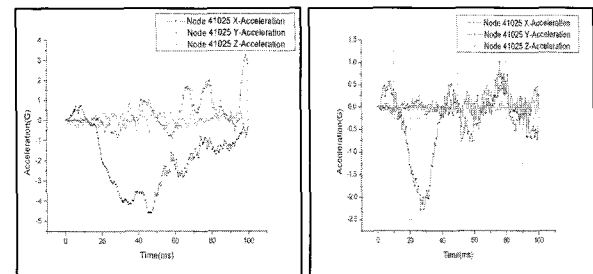
(a) headspan type (b) portal type

Fig. 16. Forces by the side-on roof impact



(a) headspan type (b) portal type

Fig. 14. Accelerations by the upright side-on impact



(a) headspan type (b) portal type

Fig. 17. Accelerations by the side-on roof impact

28.2 mm로 차체 폭 대비 침투율은 1 %이고 ‘차량 손상 정량화등급 기준’의 minor damage 등급이었다. 충돌 후 약 10 ms에서 차체에 547 MPa의 Von-Mises응력이 발생하였다.

2차 충돌의 척도가 될 수 있는 충격 가속도 값은 headspan 형태에서 최대 8.5 G가 발생하였으며, portal 형태에서 최대 2.4 G가 발생하였다.

## 2) Side-on roof impact scenario의 경우

Fig. 15부터 Fig. 17은 side-on roof impact 충돌 시나리오를 적용하여 각각 headspan 형태와 portal 형태의 전자선 구조물과의 충돌을 해석한 결과이다.

Headspan 형태 전자선 구조물과 충돌 시 roof 중심부는 최대 544.9 mm가 침투되었으며, ‘차량 손상 정량화등급 기준’

에 의하면 차체 높이(2640 mm 대차높이 제외) 대비 침투율이 20.6 %로 moderate damage 등급이다. Upright side-on impact에 비하여 roof부가 완전히 함몰되어 캔트레이까지 침투되었고, underframe부도 변형되었다. 충돌 후 약 30 ms에서 Von-Mises응력은 550 MPa, 충격력은 737 kN 이 발생하였다.

Portal 형태의 경우, roof 중심부는 최대 192.5 mm가 침투되었으며, ‘차량 손상 정량화등급 기준’에 의하면 차체 높이 대비 침투비율이 7.3 %로서 minor damage 등급이다. 충돌 후 약 20 ms에서 Von-Mises응력은 549 MPa, 충격력은 199.8 kN이 발생하였다. 또 충격 가속도 값은 headspan 형태의 경우, 최대 4.7 G이었고, portal 형태의 경우 최대 2.3 G이었다.

3) Angled roof impact scenario의 경우

Fig. 18부터 Fig 20은 angled roof impact 충돌 시나리오를 적용하여 각각 headspan 형태와 portal 형태의 전차선 구조물과의 충돌을 해석한 것이다.

차량이 headspan 형태의 전차선 구조물과 충돌 시 roof 중심부는 최대 355.9 mm가 침투되었는데, ‘차량 손상 정량화등급 기준’에 의하면 차체 높이 대비 침투 비율이 13.5 %로 moderate damage등급이다. 충돌 후 약 20 ms에서 Von-Mises 응력은 550 MPa, 충격력은 838 kN이 발생하였다.

Portal 형태의 경우, roof 중심부는 최대 186.1 mm 침투되었으며, ‘차량 손상 정량화등급 기준’에 의하면 차체 높이 대비 침투 비율이 7 %로 minor damage등급이다. 약 20 ms에서 Von-Mises응력은 약 549 MPa, 충격력은 167.7 kN이 발생하였다.

한편 충격 가속도 값은 headspan 형태와의 충돌 시 최대 5.7 G가 발생하였으며, portal 형태와의 충돌 시에는 최대 2.0 G가 발생하였다.

4.4 충돌해석 결과 비교

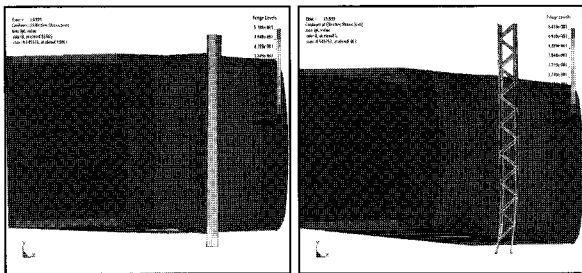
1) 충돌해석 결과

SUS 전동차 차체와 headspan 형태와 portal 형태 등 2가지 전차선 지지구조물에 대하여 3가지의 충돌사고 시나리오를 적용하여 충돌해석을 수행한 결과는 Table 6과 같다. 해석결과를 분석하면 headspan 형태의 경우 모든 사고 시나리오에 대하여 차체 침투량, 충격력, 충격가속도 값이 portal 형태보다 높다. 이는 headspan 형태가 portal 형태보다 높은 충격 강성과 강도를 가지기 때문인 것으로 판단된다.

2) 충돌해석 결과에 따른 차량의 손상 평가

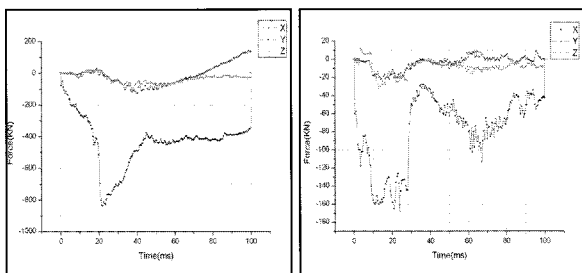
본 연구의 3가지 충돌 시나리오에 대한 충돌해석 결과를 분석하면, 상대적으로 headspan 형태가 portal 형태보다 전동차 차체에 더 손상을 주고 있으며, 전동차 차체 side부 충돌보다 roof부 충돌에서 더 심각한 손상을 받았다. 그러나 절대 수준으로는 전차선 지지구조물이 전동차 차량에 serious damage 이상의 심각한 손상을 발생시키지는 않음을 확인할 수 있다.

Table 6의 충돌해석 결과에 대하여 ‘차량 손상 정량화등급 기준’의 분류기준을 적용하면, Table 7과 같이 손상 수준이 분석된다.



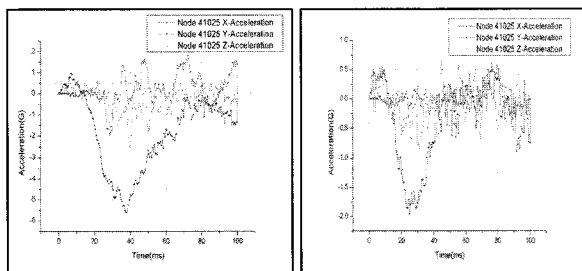
(a) headspan type (b) portal type

Fig. 18. Deformations by the angled roof impact



(a) headspan type (b) portal type

Fig. 19. Forces by the angled roof impact



(a) headspan type (b) portal type

Fig. 20. Accelerations by the angled roof impact

Table 6. Numerical results for the 3-collision scenarios

Collision scenarios	Intrusion (mm)		Max. impact force (kN)		Max. acceleration (G)	
	headspan type	portal type	headspan type	portal type	headspan type	portal type
Scenario I	80.7	28.2	1,602.7	633.3	8.5	2.4
Scenario II	544.9	192.5	737	199.8	4.7	2.3
Scenario III	355.9	186.1	838.0	167.7	5.7	2.0

Table 7. Damage level classifications for the 3-collision scenarios

Collision scenarios	Headspan type	Portal type
Scenario I	minor damage	minor damage
Scenario II	moderate damage	minor damage
Scenario III	moderate damage	minor damage

## 5. 결론

국내 SUS 전동차 차체와 전차선 지지구조물(headspan 형태와 portal 형태)을 영국 RSSB의 3가지 충돌사고 시나리오를 적용하여 충돌 해석 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, headspan 형태 전차선 지지구조물이 portal 형태보다 상대적으로 차량에 2배 이상의 손상을 발생시키고 moderate damage 수준의 손상을 발생시켰다. 반면에 portal 형태의 전차선지지 구조물은 모든 사고 시나리오에 대하여 minor damage 수준의 안전도를 나타내었다. 따라서 portal 형태의 전차선지지 구조물이 탈선 차량과 충돌 시 승객에게 피해를 덜 준다.

둘째, 전동차 차체의 side 부 충돌과 roof 부 충돌의 침투량을 비교하여 보면, headspan 형태와 portal 형태 모두 roof 부 충돌이 side 부 충돌보다 약 6.8배 정도 침투량이 많았다. 이로부터 roof 부 충돌이 side 부 충돌보다 상대적으로 더 많은 인명 피해를 유발할 것으로 예상된다.

셋째, 차체에 발생하는 충격력과 가속도 값을 비교하면, headspan 형태가 portal 형태보다 2배 이상 더 높았으므로 정성적으로 headspan 형태가 더 큰 부상을 유발할 개연성이 있다. 그러나 이 수치들이 승객의 부상에 미치는 정량적인 영향은 추가적인 연구가 필요하다.

최근 국내에서도 급속한 전철화가 이루어지고 있으므로 앞으로 철도차량과 전차선 지지구조물과의 충돌사고에 대한 시험 연구를 포함한 지속적인 연구가 필요하며 국내 실정에 적합한 표준사고 시나리오와 충돌안전기준을 개발하여야 한다.

## 참고 문헌

1. ADT/SOR(2001), Train Crashworthiness for Europe, SAFETRAIN /final report.
2. D. C. Tyrell, K. J. Severson and B. J. Marquis (1995), "Train Crashworthiness Design for Occupant Survivability", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, AMD-Vol 210, pp.59-74.
3. D. C. Tyrell, K. J. Severson and B. J. Marquis (1995), "Analysis of Occupant Protection Strategies in Train Collisions", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, AMD-Vol 210, pp.539-557.
4. J. S. Koo, D. S. Kim, H. J. Cho, T. S. Kwon and S. K. Choi (2000) "Analysis on the Crashworthiness of the Full Rake Korean Electric Multiple Unit Train", Korean Society for Railway, Vol. 3, No. 1, pp.27-33.
5. FCD(2005), Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies, prEN15227.
6. AEIF(2002), The technical specification for Interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system, TSI.
7. American Public Transportation Association, Member Services Department(2000), APTA SS-C&S-034-99 Standard for the Design and Construction of Passenger Railroad Rolling Stock.
8. Rail Safety & Standards Board(2003), Overhead line structure design to cater for collision, RSRP report.
9. Altair(2005), Altair Hypermesh User's Manual Version 6.0.
10. www.matweb.com.
11. LSTC(2005), LS-DYNA Keyword User's Manual Version 960.

(2007년 3월 5일 논문접수, 2007년 8월 20일 심사완료)