EU의 TSI 규정 및 국내 철도차량안전기준의 대형장애물 유한요소모델 개발과 분산형 고속열차의 충돌성능평가에 적용

Development of FE Models of the Heavy Obstacle for the EU-TSI and Domestic Rolling Stock Safety Regulations and Application to Collision Evaluation of the Korean High-speed EMU

김거영¹ · 구정서[†]

Geo Young Kim · Jeong Seo Koo

Abstract The purpose of this paper is to develop two kinds of finite element models for the heavy deformable obstacle defined in grade crossing collision scenario of the Europe TSI and the Korean rolling stock safety regulations and to apply the crashworthiness evaluation for the Korean high-speed EMU with the FE model. The numerical models of the heavy obstacle were changed from a past rigid one to a current deformable one whose stiffness requirement should be verified by a collision simulation defined in the regulations. Through several trial simulations, two types of numerical models for the heavy obstacle were developed, which satisfied physical properties specifies in the regulations. One is a solid-type obstacle with uniform density and the other is a shell-type. With the obstacles developed in this study, the grade crossing collision scenario for Korean high-speed EMU was simulated and evaluated for the two-type obstacle models. From the simulation results, the shell and solid-type obstacles showed quite different behaviors after collision, and the shell type model gave more severe results.

Keywords : Korean rolling stock safety regulations, Collision scenario, Heavy obstacle, Finite element model, High-speed EMU

초 록 본 논문은 유럽 TSI와 국내철도차량안전기준에 정의된 건널목 충돌사고시나리오에서 요구하는 성능의 대형 변형체 장애물의 유한요소 모델에 대하여 2가지 종류의 모델을 개발하여 한국형 분산형 고속철도 차량에 적용하고 평가하였다. 규정에서 요구하는 대형 장애물은 기존 강체모델에서 현재의 변형체모델로 변경되었으며 규정에 정의된 방법으로 변형체 강성 값이 검증되어야 한다. 여러 번의 시뮬레이션을 통해 기준을 만족하는 균일한 밀도와 강성의 솔리드 형 장애물 모델과 균일하지 않은 쉘 형 장애물 모델 등 2가지를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 대형장애물을 사용하여 분산형 고속열차를 대상으로 규정의 대형장애물 충돌시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 평가하였다. 쉘 형과 솔리드 형 장애물은 열차와 충돌 후 거동에 상당한 차이가 있었고, 쉘 모델이 더 가혹한 결과를 나타내었다.

주요어 : 국내철도차량안전기준, 충돌사고시나리오, 대형장애물, 유한요소모델, 분산형 고속열차

1. 서 론

안전은 사고를 미연에 방지하기 위한 active safety와 사고 후 피해저감을 위한 passive safety로 구분된다. 특히 철도차량은 사고 후 많은 인명 피해가 발생하므로 피해저감을 위해 충돌안전기준이 필요하여 철도 선진국에서는 1990년대 후반부터 충돌사고시나리오를 만들고 충돌안전설계를 위한 기준 및 규정을 제정하였다.

충돌 사고시나리오는 각 나라에서 빈번히 발생하는 사고 사례를 바탕으로 만들어지며 대표적으로 열차 대 열차 충돌

사고와 철도 건널목 충돌사고시나리오가 있다. 이러한 충돌 사고시나리오에 대한 실제 차량시험이 현실적으로 어려우므로 규정에서는 최종 검증된 시뮬레이션 모델을 통하여 편성 열차의 충돌 안전도를 평가하게 된다.

철도 건널목에서 발생하는 사고는 열차와 대형 차량이 고속으로 충돌하여 열차 전두부에 심한 손상을 가져오며 최악에는 탈선사고로 이어질 수 있다. 철도 건널목 사고 시뮬레이션을 위해 충돌안전규정에는 철도 건널목 사고의 피 충돌 자동차들을 대표하는 표준 대형 장애물을 정의하고 있으며 이에 따라 장애물의 수치모델을 개발하여 충돌 시뮬레이션을 수행하는 연구가 이루어지고 있다[1].

2008년에 개정된 유럽지역 국경을 횡단하는 열차의 상호 통합 운행을 위한 기술사양인 TSI (Technical Specifications for Interoperability)[2]에서는 대형차량에 대한 수치모델을 강

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

¹서울과학기술대학교 철도전문대학원

체 장애물에서 비선형 압괴 특성이 있는 변형체 장애물로 변경하여 그 형상 및 무게중심 등의 요구성능이 정의되어 있다. 철도건널목의 차량 충돌사고 중 가장 위험한 대형트럭과의 충돌을 간단한 형상과 강성조건으로 표준화된 장애물 형태로 정의하였다.

2005년 prEN15227[3] 이전 규정에 사용된 강체 장애물은 모델링이 간편하나 변형이 고려되지 않기 때문에 실제보다 열차 전두부에 큰 충격력이 발생하며 충돌 후 거동에도 큰 차이가 있다. 국내에 충돌안전기준이 도입되기 이전에 G7 연구과제에서 개발된 KHST는 유럽의 SNCF 기준을 참고하였기 때문에 철도 건널목 충돌 사고 시뮬레이션에서 강체 장애물을 사용하였다[4,5].

2007년 7월부터 시행된 국내 철도차량 안전기준 시행지침 16조(이하 ‘국내충돌안전기준’라 함)[7]의 표준충돌사고시나리오는 prEN15227을 근거로 제정되었다. 한편, 유럽에서는 prEN15227을 수정하여 EN15227[6]을 제정하고 동등하게 기준의 TSI[8]를 개정하였으므로 국내 철도차량안전기준 시행지침 16조는 유럽의 규정과 일부 달라졌다. 대표적으로 국내충돌안전기준에 정의된 열차의 충돌가속도 평가기준은 승객 구간이 최대 7.5g 이하, 평균 5g 이하이고 개정 TSI에서는 운전자 구간을 포함한 모든 승객 구간에서 평균 5g 이하로 다르다. 이 외에도 충돌사고 시나리오 및 생존공간 확보 영역 등 일부 평가기준 및 방법들이 차이가 있다. 그리고 기준에서 요구하는 건널목 시뮬레이션에 사용되는 대형 변형체 장애물의 수치모델특성에도 일부 차이가 있다. 즉, 국내충돌안전기준에서는 장애물의 밀도와 강성이 균일해야 하며 개정 TSI에서는 이에 대한 제한이 없다.

현재 진행 중인 차세대 고속전철기술개발사업에서는 충돌 안전설계를 위해 유럽의 개정 TSI와 국내충돌안전 기준을 만족하게 하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 철도 건널목 사고인 대형 변형체 장애물 충돌 시뮬레이션을 수행하기 위하여 변형체의 유한요소모델이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 유럽의 개정 TSI와 국내충돌안전기준에서 요구하는 대형 변형체 장애물의 유한요소모델에 대하여 2가지 모델을 개발하고, 차세대 분산형 고속열차를 대상으로 기준에서 정의하는 대형장애물과 110km/h 충돌 시뮬레이션을 수행한 결과를 비교 분석하였다.

2. 대형 장애물 유한요소 모델링

2.1 대형 장애물의 제원

국내충돌안전기준과 개정 TSI에서 대형 장애물은 Fig. 1의 기하학적 형상과 Table 1과 같은 물리적 특성을 준수하여야 한다. 충돌 특성은 반지름 3m, 질량 50톤의 강체구가 30m/s의 속도로 충돌할 때 발생한 하중이 Fig. 2와 같은 변위에 대한 충돌하중보다 커야 한다. Table 1은 2007년에 유럽의 prEN기준을 도입한 국내충돌안전기준과 개정 TSI에서 요구하는 대형장애물을 비교한 것이다. 국내충돌안전기준은 밀도와 강성이 균일해야 하고 개정 TSI에는 이에 대한 항목이 없다.

Fig. 1 The figures of the a heavy obstacle

Table 1 Physical characteristics of a heavy obstacle

Standard	Korea regulation	TSI(Europe)
Mass	15 tons	
Height Center of gravity	1750 mm from the top of rail	
Density	uniform	none
Stiffness	uniform	none
Friction coefficient	none

Fig. 2 The physical standard on the stiffness of the obstacle obtained against a sphere

2.2 대형 장애물의 유한요소 모델 개발

국내충돌안전기준에서 요구하는 균일한 밀도(상하부 구조별로 균일함)와 강성을 고려하기 위해 솔리드 요소를 사용한 장애물(이하 ‘솔리드 형 장애물’라 함)과 균일하지 않은 셀 요소를 사용한 장애물(이하 ‘셀 형 장애물’라 함)을 개발하였다. 따라서, 본 연구에서 개발된 솔리드 형 장애물은 국내충돌안전기준뿐만 아니라 개정 TSI의 요구사항을 만족하고 셀 형 장애물은 개정 TSI의 요구사항만을 만족한다. 실제로 거의 모든 자동차는 셀 구조로 제작되기 때문에 셀 형 장애물로 하는 것이 실제 충돌현상을 모사할 수 있다고 판단되나 국내 규정에 정의된 균일한 밀도항목을 고려하여 솔리드 형 모델을 추가하여 두 가지 모델을 개발하고 열차와

의 충돌시뮬레이션을 수행하였다.

대형 장애물 유한요소모델은 Fig. 1의 형상 치수를 준수하여 Fig. 3과 같이 구성하였다. 솔리드 형 장애물은 기준에서 요구하는 무게중심을 고려하기 위해 상/하부로 나누어 다른 밀도 값을 입력하였다. 셸 형 장애물은 셸의 두께에 따라 부피가 변하므로 밀도를 셸 두께에 따라 변경하여 무게 중심점을 맞추어야 한다. Fig. 4는 솔리드 요소와 셸 요소 장애물을 반으로 절단한 모습이다.

본 충돌 시뮬레이션은 비선형 유한요소해석 프로그램인 LS-dyna를 사용하였다. Table 2와 Fig. 5는 규정에서 요구하는 장애물의 강성 값(Fig. 2)을 만족하게 하기 위해 여러 번의 시뮬레이션을 통하여 최종적으로 구한 셸 형 장애물과

Fig. 3 Collision condition for the definition of the stiffness of the obstacle

Fig. 4 2-types of Finite elements model for the huge obstacle

Table 2 Material data of LS-DYNA for 2-type FE models

Variable	Solid-type	Shell-type
Material card	MAT_HONEYCOMB	MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
Young's modulus(E)	Compacted: 10 GPa Uncompressed: 372 MPa	410 GPa
Poisson's ratio(PR)	0.29	0.3
Yield stress (SIGY)	Compacted: 215 MPa	416 MPa
Volume ratio(VF)	Fully compacted volume/ Initial volume: 0.1	.

솔리드 형 장애물에 사용된 요소의 기계적 특성치이다. 규정에서 요구하는 장애물의 강성에 영향을 미치는 주요 제어 인자로는 탄성계수와 응력-변형률 곡선이 있고 특히 솔리드 형 장애물은 허니콤 재료의 압축비율이 강성에 큰 영향을 미쳤고 셸형 장애물은 두께를 키울수록 충격력의 오실레이션이 줄어들어 규정에서 요구하는 강성조건을 만족할 수 있었다.

Fig. 6, 7은 여러 번의 수치시뮬레이션을 통해 최종적으로 검증된 솔리드 형과 셸 형 장애물의 충돌 후 변형형상이고

Fig. 5 Stress-strain curve for the materials of FE models

Fig. 6 The solid-type obstacle satisfying the requirement of the current TSI & Korea regulation

Fig. 7 The shell-type obstacle satisfying the requirement of the current TSI

Fig. 8 The simulation results on the stiffness of the obstacle collided with a sphere

Fig. 8은 규정의 강성곡선과 비교한 시뮬레이션 결과이다. 두 장애물 모델 모두 기준을 만족하므로 열차 모델과의 충돌 시뮬레이션을 통해 충돌 후 거동을 비교하였다.

3. 대형장애물 충돌사고 시나리오 평가

3.1 평가항목 및 판단기준 요약

국내충돌안전기준 및 개정 TSI에서 요구하는 각 평가항목에 대한 허용기준은 Table 3과 같으며, 시뮬레이션 결과는 이에 근거하여 항목별 허용기준에 따라 평가하였다.

본 연구에서 개발한 장애물은 차세대 분산형 고속열차를 대상으로 충돌시뮬레이션을 수행하고 Table 3의 평가항목인 운전자 생존공간확보와 충돌감속도를 평가하였다. 특히 철도 건설목에서 열차와 대형장애물 충돌 시 열차 전두부 변형이 심하게 발생하므로 운전자 생존공간보호가 중요하다. 국내충돌안전기준에 제시하는 생존공간은 길이와 폭이 0.75m 이상이거나 운전실 원래 길이의 80% 이상이어야 하고 높이는 원래 길이의 80% 이상이어야 한다. 개정 TSI에서는 길이가 0.75m 이상이고 비상시 운전자 구조를 위해 문이나 통로로 접근할 수 있는 구조여야 한다고 규정되어 있다. 차세대 분산형 고속열차의 경우, 생존공간 기준만을 비교한다면 운전자 후방에 객실과 통하는 문과 연결되어 대피공간이 제공되기 때문에 길이 방향 공간 확보만을 요구하는 개정 TSI

는 길이, 폭, 높이까지 고려하는 국내충돌안전기준보다 허용기준이 간단하다.

3.2 분산형 고속열차 모델의 구성

충돌 시뮬레이션을 위한 열차의 구성은 Fig. 9와 같이 2TC-6M으로 구성된 총 8량 편성으로 축중은 13톤이다.

변형체 장애물은 열차와 충돌 시 열차의 전두부 형상에 따라 충돌 후 거동에 큰 차이가 발생하며 특히 고속전철의 long nose 형식의 전두부와 충돌 시 장애물 타고오름 현상이 발생하게 되고 객차와 같이 평평한 단부와 충돌하는 경우에는 단부의 변형이 심하게 발생한다.[1] 그러므로 변형체장애물과 충돌이 일어나는 열차의 전두부는 3D FE 모델로 고려하여 시뮬레이션하여야 한다.

Fig. 9 Configuration of the full rake High-speed EMU

가장 이상적인 열차의 최종 검증은 실제 차 충돌시험이겠지만 시간 및 비용 등의 문제로 법규인 충돌안전기준에서도 주요 에너지흡수구간만 시험으로 검증한 3D FE 모델을 적용하고 나머지는 1D 모델을 적용하여 시뮬레이션으로 하는 것을 허용하고 있다. 한편, 최종 평가검증 단계가 아닌 설계가 빈번히 수정 및 변경되는 초기설계단계에서는 장애물과 접촉이 발생하는 열차의 전두부만 3D FE 모델을 고려하고 나머지 구간과 후방차량은 등가 1D 충돌 동역학 모델을 사용하여 편성열차 시뮬레이션하는 방법을 사용하면 기존의 1D 충돌 동역학 모델을 사용하는 방법[10,11]에서 고려하지 못하는 타고오름 현상을 다룰 수 있다.

기존 동력집중식 KHST의 1D 등가모델링 기법[11]은 충돌 시 차체 단부구조에 압괴가 발생하므로 3D 충돌해석결과를 반영한 비선형 스프링으로 모델링해야 하지만, 차세대 분산형 고속열차의 단부구조에는 영구변형이 발생하지 않고 전두부와 차 간 연결기에서 모든 충돌에너지를 흡수하도록 설계되어 있으므로 중량과 차체 강성 정보만으로 1D 등가모델링이 가능하다.

충돌이 발생하는 열차의 전두부 구간은 Fig. 10과 같이 3D 유한요소로 모델링 되었으며, TC1의 전두부를 제외한 나머지 차체와 연결기는 Fig. 11과 같이 1D 집중 질량/스프링 요

Table 3 Acceptance criteria of the current TSI & Korean rolling stock safety regulations

Assessment items	Acceptance criteria	
	Korea regulation	Current TSI
Survival space for driver's cab	-Minimum 0.75m or more than 80% of the initial length -More than 80% of the initial height	-Drivers' cabs at the ends of vehicles shall have a minimum of one door or a gangway allowing access for rescue staff in an emergency. -Minimum 0.75m
Limit deceleration	-Maximum 7.5g -Mean 5g (except driver's cab)	-Mean g (including driver's cab)

Fig. 10 Collision with the 15t standard obstacle at 110 km/h

Fig. 11 Schematic of the lumped mass model

소를 사용하였다. 열차 전두부의 에너지흡수장치와 에너지 흡수용 차량 연결기에는 차량 업체에서 최종적으로 제공된 하중-변위의 비선형 특성을 적용하였다.

차세대 분산형 고속열차의 1D 집중 질량/스프링 모델은 TC 차량과 M 차량으로 구분하여 모델링 하였고 TC 차량 전두부(AC)와 각 차량 사이에 장착된 연결기(SPC)에서 주요 충돌 에너지를 흡수하게 된다. 모든 차량은 전후방의 볼스터 위치를 기준으로 전두부(front), 중간(mid), 후미(end)의 세 구간으로 모델링 하였다. 주요 에너지 흡수구간인 전두부와 차 간 연결기에 최종적으로 제공된 하중-변위의 비선형 특성을 적용하였다. TC 차량 전두부 구간을 제외한 차체 단부 구간의 강성은 차체의 압축하중 선형해석을 통해 구한 값을 볼스터 중심부터 연결기 취부구간까지의 거리로 환산하면 약 1000kN/mm가 되고 본 해석모델(반쪽모델)에는 절반값인 500kN/mm인 탄성 스프링으로 모델링 하였으며 운전자와 승객 구간은 강체로 가정하였다.

중력가속도를 고려하였고 대차는 차체의 볼스터에 위치하는 스프링으로 모델링 하였다.

3.3 시뮬레이션 결과 및 평가

국내충돌안전기준과 개정 TSI의 요구성능을 만족하도록 개발된 솔리드 형 및 셸 형 장애물과 충돌이 일어나는 전두부와 운전자 구간 일부만 3D 유한요소로 구성된 3D/1D 하이브리드 모델을 사용하여 철도 건설목 사고시나리오인 장애물과의 110km/h 충돌시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 분석하였다.

Fig. 12는 솔리드 형 장애물의 충돌 후 거동으로 전두부 에너지흡수장치에서 충돌에너지가 흡수되지 않고 장애물이

(a) 100ms

(b) 300ms

Fig. 12 Side view of the solid-type obstacle simulation

(a) 100ms

(b) 300ms

Fig. 13 Side view of the shell-type obstacle simulation

열차 전두부를 미끄러져 타고 오르게 된다. 이때 장애물은 운전자 공간의 상부를 침투하게 되는데 충돌 전 운전자 공간 높이의 약 75% 정도만 남게 되어 국내충돌안전기준을 만족하지 못하였다. 그러나 개정 TSI에서는 운전자 공간의 높

이 방향 변형을 규제하고 있지 않으므로 기준을 만족한다.

Fig. 13은 셸 형 장애물의 충돌 후 거동으로 솔리드 형 장애물처럼 운전자 구간을 미끄러져 올라가지 않고 충돌 후 회전하여 운전자 허리 앞까지 침투하게 된다.

강성이 작고 밀도가 균일한 솔리드 형 장애물은 Fig. 12와 같이 충돌 후 전체적으로 변형되어 휘어지는 전체 변형 모드가 발생하여 전두부 모듈과 충돌 후 장애물의 무게중심점이 차체 충돌 면보다 위쪽으로 이동하여 열차 운전자 구간을 타고 오르며, 강성이 크고 속이 빈 셸 형 장애물은 Fig. 13과 같이 충돌 면에 국부적인 변형만 발생하고 장애물의 무게중심점이 차체 충돌 면보다 아래쪽에 있어 더는 전두부를 타고 오르지 못하고 회전하면서 운전자 전방구조만을 변형시킨다.

두 장애물은 열차와 충돌 후 거동에는 차이가 있으나 두 경우 모두 운전자 공간을 침투한다. 또한, 운전자 앞에 배치되는 조종 계기판 등의 장치들을 고려한다면 운전자가 더 위험해질 가능성이 크므로 운전자 공간의 확보를 위한 대책이 필요하다.

Fig. 14는 에너지 이력 선도로서 대부분의 초기 운동에너지가 충돌 후 열차의 운동에너지로 남았고 일부 에너지만 열차 구조와 장애물에서 흡수되었다. 솔리드 형 장애물 충돌에서는 총 4MJ이 흡수되었으며 셸 형 장애물 충돌에서는 총 5.6MJ이 흡수되었다. 그 이유로는 Fig. 15와 같이 셸 형 장

(a) Solid-type obstacle

(b) Shell-type obstacle

Fig. 14 Energy history curves

애물 충돌에서 주요 에너지흡수 장치의 변위가 크게 발생했기 때문이다. 특히, Front lower tube가 800mm로 완전히 압괴 되었는데 이는 솔리드 형과 셸 형 장애물의 강성 차이로서 강성이 작은 솔리드 형 장애물은 front lower tube와 접촉 후 탄력적인 국부변형 때문에 아래로 밀어내지만, 강성이 큰 셸 형 장애물은 완전히 압축될 때까지 접촉을 계속 유지하였기 때문이다. Front lower tube가 800mm 한계

(a) Solid-type obstacle

(b) Shell-type obstacle

Fig. 15 Displacement of the main energy absorption devices

Fig. 16 Contact force between the obstacle and the train set

Fig. 17 Longitudinal accelerations of the service sections

변위까지 완전히 압괴된 직후 큰 충격력을 받은 셸 형 장애물은 Fig. 13과 같이 회전 거동이 발생하였다.

Fig. 16은 대형 장애물과 열차 사이에 발생한 충격력이다. 강성이 작고 균일한 솔리드 형 장애물은 충돌 후 미끄러지는 거동을 보이고 표면 강성이 큰 셸 형 장애물은 2배 정도 큰 충격력이 발생하였다.

Fig. 17은 운전석과 승객 구간의 충돌가속도이다. 충돌가속도는 유럽에서 일반적으로 사용하는 FFT low pass filter 40Hz를 사용하여 필터링한 결과이다. Fig. 17 (a)는 운전석의 충돌가속도인데 장애물의 충격이 직접 전달되므로 승객 구간에 비해 최댓값이 크고 오실레이션이 심하다. 국내 규정에는 운전자 구간에 대한 가속도 기준이 없으나 개정 TSI에는 운전자 구간을 포함한 모든 승객 구간에 대하여 평균 5 g이하로 제한하고 있다. TSI 규정의 평균가속도는 충격력 0kN이 될 때까지의 가속도에 대한 평균값을 의미한다. Fig. 17 (b)의 운전석 가속도를 누적 적분한 것으로 충격력이 0 kN이 되는 시점에서의 평균가속도를 확인한 결과 평균 5 g 이하로 개정 TSI 충돌가속도 기준을 만족한다.

Fig. 17 (c)는 TC1 차량의 승객 구간 충돌가속도 결과이다. 셸 형 장애물 충돌은 평균가속도 기준은 만족하나 최대 가속도 7.5g를 초과하여 국내충돌안전기준을 벗어난다. 이

는 충돌 후 front lower tube가 완전히 압괴된 후에 발생한 최대 충격력 때문이다.

4. 결 론

국내충돌안전기준 및 개정 TSI의 철도 건널목 충돌사고시 나리오에 정의된 대형 변형체 장애물에 대하여 솔리드 형 및 셸 형 장애물을 개발하고 차세대 분산형 고속열차를 대상으로 110km/h 충돌시물레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 밀도와 강성이 균일한 솔리드 형 장애물 모델(국내충돌안전기준과 개정 TSI 동시 만족)과 그렇지 않은 셸 형 장애물 모델(개정 TSI 만족)은 충돌해석 시 전두부의 변형과 충격가속도 발생에 다른 영향을 미친다.

(2) 강성이 작고 균일한 솔리드 형 장애물 모델은 충돌 시 장애물의 탄력적인 국부적인 변형으로 열차 전두부를 미끄러지듯이 타고 오르는 현상이 발생하며, 강성이 큰 셸 형 장애물은 전두부에 심한 손상을 가져오고 회전하면서 운전석을 압괴시킨다. 동일 형상의 장애물일 지라도 강성특성에 따라 열차 전두부에 미치는 영향에 큰 차이가 발생한다.

(3) 개발된 대형장애물(솔리드 형 및 셸 형)과 차세대 고

속열차의 충돌해석 결과, 충돌가속도와 운전실 변형이 개정 TSI의 요구기준을 만족하였다. 최대 충돌가속도와 운전실 수직변형을 고려하는 국내충돌안전기준은 TC1 차량에서 이 기준들을 초과하였다.

(4) 차세대 분산형 고속열차가 국내충돌안전기준을 만족하게 하려면 전두부의 보완설계가 필요하다.

강성이 큰 셀 형 장애물은 전두부에 큰 충격력이 발생하여 운전실 변형이 심하며 강성이 작은 솔리드 형 장애물은 전두부를 타고 올라 운전실 손상이 적고 충돌 가속도 수준도 만족할 만하다. 차량 설계자 측면에서 규정만족의 목표를 위한다면 솔리드 형 장애물을 사용하는 것이 유리하지만, 보수적인 설계를 위하여 셀 형 장애물 모델이 추천된다.

후 기

본 연구 내용의 일부분은 국토해양부에서 지원하고 한국철도기술연구원에서 진행 중인 차세대고속전철기술개발사업 연구결과 일부를 응용한 것으로서 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] P.G. Llana (2009) Structural Crashworthiness Standard Comparison: Grade-crossing Collision Scenarios, Proceeding of RTDF2009, ASME Rail Transportation Division Fall Technical Conference, October 20-21, Ft. Worth, Texas, USA, RTDF 2009-18030.
- [2] AEIF (2008) The technical specification for Interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system, TSI, March, 2008.
- [3] ANFOR (2005) Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies, prEN15227, September, 2005.
- [4] H.S. Han, J.S. Koo (2002) Simulation of Train Crashes in Three Dimension, *Journal of the Korean Society for Railway*, 5(3), pp. 187-195.
- [5] J.S. Koo, H.J. Cho, D.S. Kim, Y.H. Youn (2001) An Evaluation of Crashworthiness for the Full Rake KHST Using 1-D Dynamic Model, *Journal of the Korean Society for Railway*, 4(3), pp. 94-101.
- [6] ANFOR (2008) Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies, EN15227, March, 2008.
- [7] Ministry of construction and transportation (2007), Korean rolling stock safety regulation, MOCT notification No. 2007-278.
- [8] AEIF (2002) The technical specification for Interoperability relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system, TSI, May, 2002.
- [9] J.O. Hallquist (2007) LS-Dyna Keyword User's Manual Version 971, Livemore Software Technology Corporation.
- [10] G.Y. Kim, H.J. Cho, J.S. Koo, T.S. Kwon (2008) A Derivation of the Standard Design Guideline for Crashworthiness of High Speed Train with Power Cars, *Transactions of KSAE*, 16(6), pp. 157-167.
- [11] M.Y. Park, Y.I. Park, J.S. Koo (2010) Equivalent Modeling Technique for 1-D Collision Dynamics Using 3-D Finite Element Analysis of Rollingstock, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(2), pp. 139-146.

접수일(2011년 6월 1일), 수정일(2011년 7월 7일),
게재확정일(2011년 7월 18일)