

도시형 자기부상열차에 대한 철도안전법과 도시철도안전법의 충돌안전기준 적용의 비교 연구

Comparative Study on Application of Korean Railway Safety Law and Urban Transit Safety Law to Urban Maglev Vehicle in Crashworthiness Regulations

이현철*
Lee, Hyun-Cheol

구정서**
Koo, Jeong-Seo

ABSTRACT

This paper studied on the application of Korean Railway Safety Law and Urban Transit Safety Law in Crashworthiness Regulations to the urban maglev vehicle of KIMM. The crashworthiness regulations for urban transit vehicle should be satisfied to the urban maglev vehicles according to crash analysis results using the explicit finite element method. However, according to its numerical results, the crashworthiness regulations of Korean Railway Safety Law were partially satisfied except the coupling and shunting condition. When a commercial urban maglev vehicle is developed in the near future, the crashworthiness regulations of Korean Railway Safety Law should be considered and satisfied during its structural design stage in some details

1. 서론

본 연구대상 차종인 도시형 자기부상열차는 기본적으로 2000년에 제정 고시된 ‘도시철도차량 안전기준’에 적용받을 받는데, 도시철도차량 안전기준의 미비점을 보완하여 2007년 고시된 철도안전법의 철도차량안전기준 제 35조 하위 시행지침 16조 (이하, 철도차량안전기준 세칙 16조)에도 해당 차량형식에 대한 충돌안전기준이 고시되어 있다. 따라서 발주기관에 따라서는 도시철도차량 안전기준에서 세부지침이 없는 규정에 대하여 철도차량안전기준 세칙 16조를 원용할 가능성이 매우 높다. 그런데 언급한 두 가지 조건을 만족시키기 위한 설계는 차량제작사의 관점에서는 어려움이 있을 여지가 있다. 이에 본 논문에서는 기존에 설계 및 제작되어 시운행 중인 도시형 자기부상열차를 대상으로 도시철도차량 안전기준과 철도차량안전기준 세칙16조에 대한 평가를 시뮬레이션을 통해 수행하고 이에 대한 평가결과를 통해 충돌안전도 설계상 차이점을 간접적으로 살펴보았다.

도시철도차량 안전기준과 철도차량안전기준 세칙16조에 명시된 각 조건에 대한 평가 중 일부는 3차원 유한요소모델을 통해 수행된 바¹⁾ 있으므로 인해 본 논문에서는 기존연구에 이어 승객안전도와 관련된 충돌가속도 평가 항목에 대한 시뮬레이션을 수행하고 평가하였다. 본 연구에서 충돌가속도 평가는 보편적으로 사용되는 기법인 1차원 충돌동역학 모델을 이용하여 수행하였으며, 적용된 충돌특성데이터는 3차원 유한요소모델로부터 획득하였다.

2. 국내 철도차량 충돌안전기준

2.1 철도차량안전기준 세칙 16조/안전기준 36조

도시형자기부상열차는 철도차량안전기준의 운행조건에서 도시철도차량 중 전용 노선에서만 운행되는 조건이므로 차량분류의 ‘제3종’에 해당된다. 표 1은 철도차량안전기준 세칙16조/안전기준 36조의 내용과 판정기준을 정리한 것이다. 세칙 16조의 판정 기준에서 충돌 가속도를 제외한 평가는 이미 완료¹⁾

* 서울산업대학교, 철도전문대학원, 학생회원

**서울산업대학교, 철도전문대학원, 정회원

E-mail: koojs@snut.ac.kr

TEL: (02)970-6878, FAX: (02)970-6011

되어 있어서 충돌가속도의 평가항목인 상대속도 25kph 열차 대 열차 충돌사고시나리오를 R1, 상대속도 40kph로 연결기에 통해 15ton 표준 변형체 대형장애물과 충돌하는 충돌사고시나리오를 R2라는 약어로 정의하고 충돌해석을 수행하였다.²⁾

표 1. 철도차량안전기준 세척16조/안전기준 36조

구분	사고 시나리오	내용	판정기준
세척 16조	시나리오 R1	상대속도 25kph로 연결기를 통해 동일 열차와 충돌	1)타고오름 방지 및 생존공간 확보(운전실 생존공간 원래의 80% 이상 또는 0.75m 길이와 폭유지,객실 생존공간 객실길이의 1%이하로 변형, 출입문(승하차구역)은 원래길이의 30% 또는 300mm이상의 통로공간 확보) 2)충돌에너지는 차량의 모든 에너지 흡수 구조 및 장치에서 순차적이고 체계적으로 흡수 3)승객 탑승공간의 평균충격감속도 5g, 최대 충격감속도 7.5g 이하 등 요구
	시나리오 R2	상대속도 40kph로 연결기를 통해 15ton 표준변형체 대형 장애물과 충돌	
	-	배장기의 중심선(a type)과 중심선에서 750mm 벗어난 지점(b type)에 대하여 하단에서 0.5m 높이에 0.5m x 0.5m면적으로 정적하중 작용	a-type에 60kN 하중부하 조건과 b-type 50kN 하중부하 조건에서 소성변형이 발생하지 않아야 하고, 그 이상의 하중에서는 각각 7kJ, 6kJ의 에너지 흡수
안전기준 36조	-	상대속도 10kph로 연결기를 통해 공차상태인 동일 열차와 충돌	차체에 영구변형이 발생하지 않아야 함

2.2 도시철도안전법의 도시철도차량안전기준 22조/23조

표 2는 본 연구에 사용된 도시철도차량안전기준 22조와 23조의 충돌조건과 판정기준을 정리한 것이다.³⁾

표 2. 도시철도차량안전기준 22조/23조

구분	내용	판정기준
22조	상대속도 20kph로 연결기를 통해 동일 열차와 충돌	차체의 끝부분과 볼스터 사이의 차체부에서 압괴변형하면서 충돌에너지를 흡수하여야 함
23조	상대속도 5kph로 연결기를 통해 공차상태인 동일 열차와 충돌	차체에 영구변형이 발생하지 않아야 함

3. 충돌가속도 평가를 위한 충돌동역학 모델

3.1 도시형자기부상열차의 구간별 압괴특성 (하중-변형 특성곡선) 해석

도시형자기부상열차의 소재는 알루미늄 합금체인 AL6005이며 차량 제원과 소재의 기계적물성치는 표 3, 4에 나타내었으며, 도시형자기부상열차는 2량 1편성으로 되어 있다.

표 3. 도시형자기부상열차의 제원

항목	제원	비고	항목	제원	비고
차체 길이	13,500[mm]	차체 전두부 끝단 ~차체후미	공차하중	22,000 [kg _f]	
지붕높이	2,930[mm]	차체 최하단 ~최상단	대차하중	9,000 [kg _f]	3,000 kg _f /set X 3set/량
차체 폭	2,816[mm]		최대 승객하중	9,050 [kg _f]	(입석정원 X 3배+좌석인원) X 62 kg _f /인

표 4. 알루미늄 AL6005의 기계적 물성치

적용재료	밀도 [kg/mm ³]	탄성계수 [kg _f /mm ²]	포아송비	항복응력 [kg _f /mm ²]
AL6005-T6	2.7E-06	7000	0.29	21.9

차량의 구간별 압피특성을 해석하기 위하여 도시형자기부상열차를 운전실(Section A), 출입문(Section B, D), 승객탑승부(Section C), 차체 후미 부분(Section E)으로 구간을 나누었으며, 그림 1은 차량별 압피 구간을 나타낸다.

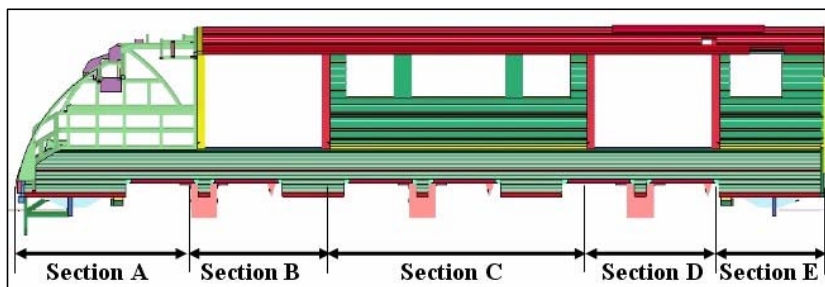


그림 1. 도시형자기부상열차의 차량별 압피 구간 정의

구간별 압피 특성해석은 정의된 구간에서 압피변형이 잘 표현될 수 있도록 100 ton의 강체를 빠른속도로 충돌시켜 각각의 구간별 하중-변형 특성곡선을 추출하였다. 그림 2는 구간별 압피해석 중 운전실에 대한 예이며 마찬가지로 이외의 구간에 대한 해석도 수행하였다. 그림 3 ~ 그림 7은 압피해석을 통해 획득한 하중-변형 특성곡선을 나타낸 것이고, 본 특성곡선은 1차원 충돌동역학 모델생성에 사용하였다.

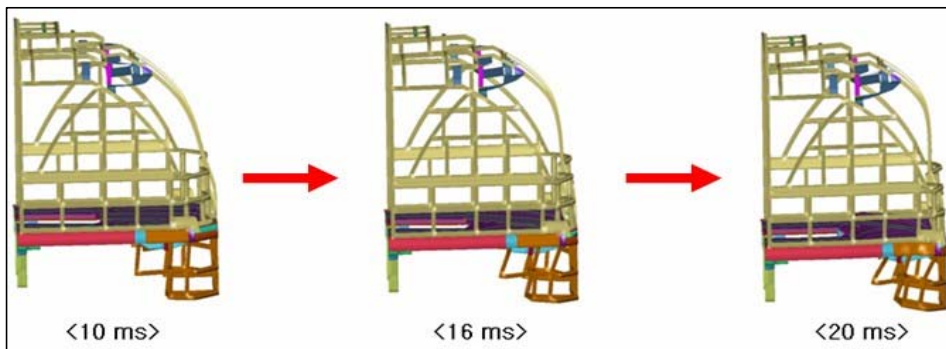


그림 2. Rigid wall의 충돌시 운전실의 변형모습

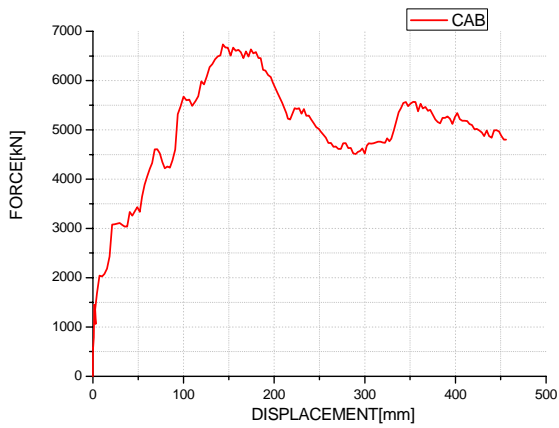


그림 3. 운전실(A)의 하중-변형 특성곡선

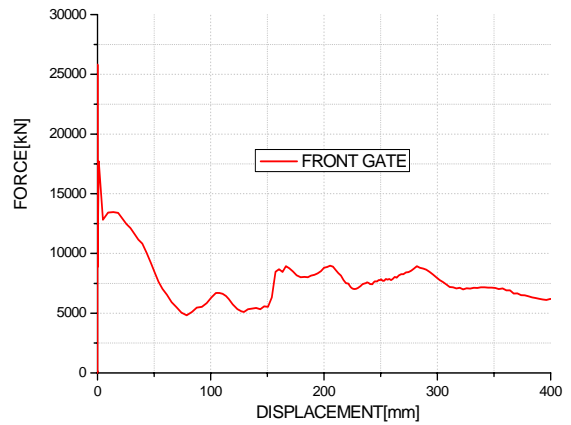


그림 4. 출입문(B)의 하중-변형 특성곡선

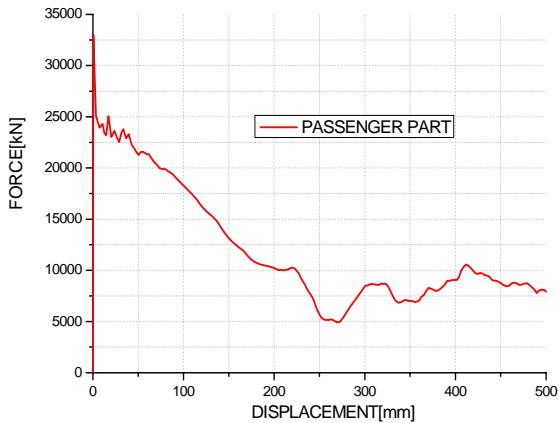


그림 5. 승객탑승부(C)의 하중-변형 특성곡선

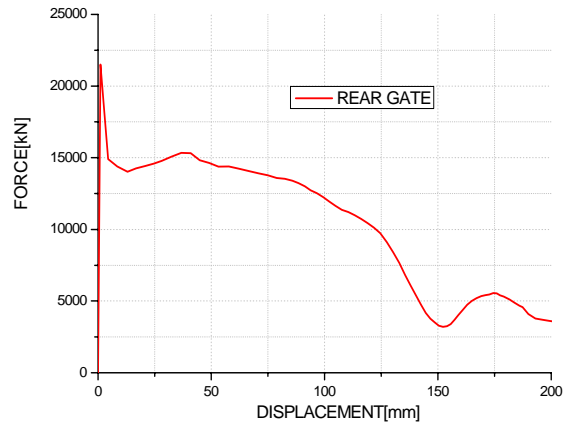


그림 6. 출입문(D)의 하중-변형 특성곡선

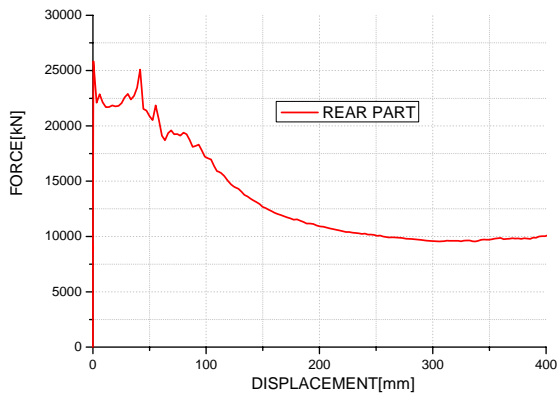


그림 7. 차체 후미부(E)의 하중-변형 특성곡선

3.2 도시형자기부상열차의 1차원 모델링

도시형자기부상열차의 운전실(Section A), 출입문(Section B, D), 승객 탑승부(Section C), 차체 후미 부분(Section E) 등은 탄소성 특성의 막대요소로 모델링을 하고, 구간별 압괴특성(하중-변형 특성)을 입력하였다. 대차의 무거운 구조물들은 집중질량으로 표현하여 전체차량의 1차원 모델을 구성하였다.⁴⁻⁷⁾ 그림 8은 도시형자기부상열차의 1차원 동역학 모델의 개념도이고, 적용된 중량조건은 정상 운행상태이다. 이렇게 구성된 1차원 충돌동역학 모델을 이용한 충돌해석은 LS-DYNA 소프트웨어를 사용하여 해석하였다.⁸⁾

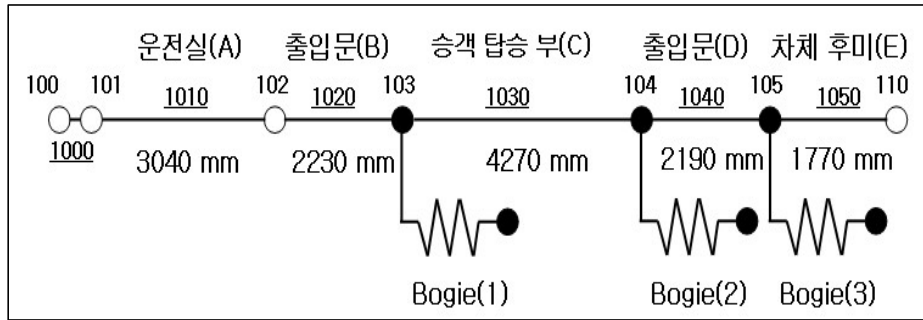


그림 8. 도시형자기부상열차의 1차원 충돌 동역학 모델(1량)

4. 도시형자기부상열차의 1차원 충돌해석

4.1 충돌사고 시나리오 R1에 의한 충돌해석 (세척 16조 관련)

철도차량안전기준 세척 16조의 충돌사고 시나리오 R1에서 동일 열차와 상대속도 25kph로 충돌하는 조건을 충돌특성의 증가성을 고려하여 열차가 상대속도 12.5kph(3.47mm/msec)로 강체 고정벽에 충돌하는 것으로 해석을 하였다. 그림 9는 충돌시 차체에 발생하는 충격력으로 최대 충격력 5,463 kN이었다. 그림 10은 충돌시 충격가속도를 40Hz로 low pass Fourier 필터링하여 나타내는 것이며, 승객탑승부(Section B)의 충돌가속도는 최대 12.9g가 발생되었다. 이는 세척 16조의 평가기준인 최대 충격감속도 7.5g를 초과 하므로 승객의 안전기준을 만족하지 못하였다.

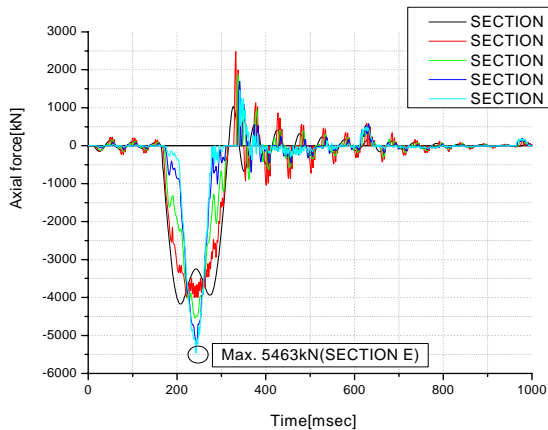


그림 9. 시나리오 R1에 의한 충격력

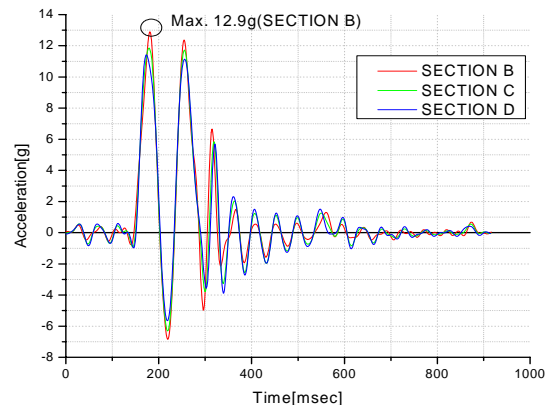


그림 10. 시나리오 R1에 의한 충돌가속도

4.2 충돌사고 시나리오 R2에 의한 충돌해석 (세척 16조 관련)

철도차량안전기준 세척 16조의 충돌사고 시나리오 R2에서 15ton 대형장애물과 상대속도 40kph로 충돌하는 조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석결과 충돌시 차체에 발생하는 최대 충격력은 5,296kN이고, 40Hz로 low pass Fourier 필터링한 승객탑승부(Section B)의 충돌가속도는 최대 17.6g 발생하였다. 이는 평가기준인 최대 충격감속도 7.5g를 초과 하므로 승객의 안전기준을 만족하지 못하였다.

표 5는 자기부상열차를 철도차량안전기준 세척 16조/차량안전기준 36조와 도시철도차량 안전기준 제 22조/23조의 기준에 대한 충돌해석 및 평가 결과를 종합해 놓은 것이다.

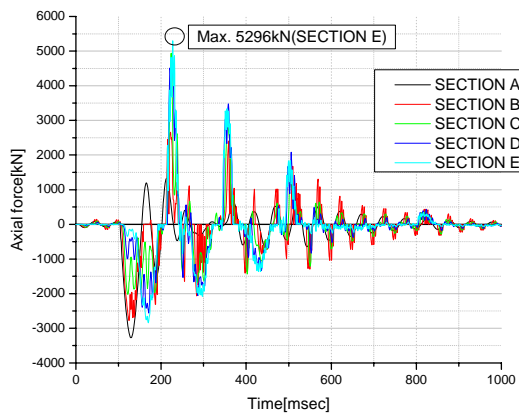


그림 11. 시나리오 R2에 의한 충격력

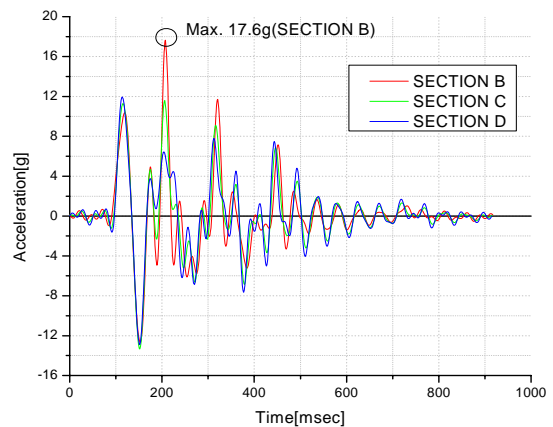


그림 12. 시나리오 R2에 의한 충돌가속도

표 5. 각 기준에 대한 충돌해석 결과 및 평가 종합

	철도차량안전기준			도시철도차량안전기준		수치 해석 방법	
	세척 16조	세척 16조	기준 36조	기준 22조	기준 23조		
	정면 충돌사고 (시나리오R1)	대형장애물 충돌사고 (시나리오R2)	차량의 연결안전성	충돌변형부의 제한	차량의 연결안전성		
충돌속도(kph)	25	40	10	20	5		
최대충격력(kN)	3,960	5,919	500이상	3,069	500이하	3D	
생존공간	운전석 변형 (mm)	높이 12 폭 4.3	높이 62.4 폭 17	평가 기준 없음	평가 기준 없음	평가 기준 없음	3D
	승객탑승부 (mm)	6.77	9.77		6.11		3D
충돌변형부 제한조건	순차적 압괴변형	순차적 압괴변형	차체 변형발생	순차적 압괴변형	차체 변형없음	3D	
변형 및 충격력 평가	만족	만족	불만족	만족	만족		
충돌가속도	평균(g)	9.9	15.8	평가 기준 없음	평가 기준 없음	평가 기준 없음	1D
	최대(g)	12.9	17.6				1D
충격가속도 평가	불만족	불만족	해당 없음	해당 없음	해당 없음		

6. 결론

본 ‘도시형 자기부상열차에 대한 철도안전법과 도시철도안전법의 충돌안전기준 적용의 비교연구’를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국내에서 현재 개발 시험 중인 도시형 자기부상 열차의 경우, 도시철도차량 충돌안전기준은 만족하였지만 추후 적용이 예상되는 **철도차량안전기준 세척 16조**에 명시된 승객의 2차 충돌 안전성 확보를 위한 충격가속도 조건은 만족시키지 못하였다.

- 2) 최대 충돌가속도의 경우, 정면 충돌조건에서는 12.9g로, 대형장애물 충돌조건에서는 17.6g로 평가기준인 7.5g를 초과하였다.
- 3) 평균 충돌가속도의 경우, 정면 충돌조건에서는 9.9g로, 또 대형장애물 충돌조건에서는 12.9g로 평가기준인 5g를 초과하였다.

따라서 현재 개발되어 시험 운행 중인 국내 도시형 자기부상열차의 경우, 승객의 안전도를 높이기 위하여 전두부에 연결완충기 외에도 에너지 흡수 튜브 등과 같은 보조적인 충격 완화 장치의 채용이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부에서 주관하는 ‘도시형 자기부상열차 실용화 사업’의 지원으로 수행된 연구실적입니다. 특히 각종 지원을 해주신 (주)동양강철 관계자 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 구정서, 조현직, 박민영, 이현철 (2007년), “자기부상열차에 대한 도시철도차량 충돌안전기준과 철도차량 충돌안전기준 적용의 비교연구,” 한국자동차공학회추계학술대회논문집, Volume IV, pp.2212-2220
2. 철도차량 안전기준에 관한 규칙 (2007), 건설교통부령 제 455호, 2007.7.8 공포
3. 도시철도차량안전기준에 관한 규칙 (2004), 건설교통부령 제 413호, 개정 2004.12.04 공포
4. 조현직, 구정서, 운영한 (2002년), “1차원 충돌 동역학 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가,” 한국철도학회추계학술대회논문집(1), pp.47-53
5. 구정서, 조현직, 김동성, 운영한 (2001년), “1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌 안전도 평가,” 한국철도학회추계학술대회논문집, pp.217-222
6. 구정서, 김동성, 조현직, 권태수, 최성규 (2000년), “한국형 표준전동차 전체차량의 충돌안전도 해석 연구,” 한국철도학회논문집, 제3권1호, pp.27-33
7. L. T. Kisilewx, and Ando(1993), "crashworthy Rolling Stocks," PUCA'93, pp. 82-87
8. LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual Version 970.