

고속전철 동력객차 언더프레임에 대한 충돌특성 연구 (A Study on Crashworthiness for Underframe of Motorized Trailer of High Speed Train)

김 현 영* 김 상 범** 한 재 형**
Kim, Heon Young Kim, Sang Bum Han, Jae Hyung

ABSTRACT

Train crashes involve complex interaction between deformable bodies in multiple collisions. The purpose of this study is to suggest the effective analytical procedure using simple model for the crashworthiness of motorized trailer of high speed train. The simple model, with very short modeling time and reduced computation time was adopted to extract the global behaviour and to perform a pre-optimization of the considered structure. Firstly, various types of crash events are investigated and the conditions for numerical simulation are defined. The simple model, using the beam and non-linear spring element, and shell element model are used to evaluated energy absorption and deformation mechanism in analyses. And aluminum is applied to real model after verification with square tube analyses. Finally, loading path and energy absorption of main components are evaluated. The analyses are aimed to ensure the crashworthiness design of high speed train.

1. 서 론

21세기 산업 경제적 발전, 교통체제 완비와 더불어 교통수단의 경제성, 신속성, 안전성, 쾌적성 등 첨단 기술화가 매우 중요하게 부각될 전망이다. 우리나라에서도 낙후된 교통체제를 고도화하기 위하여 경부고속전철 건설사업을 진행하고 있으며, 동시에 이전되는 기술을 토대로 하여 350km/h 급 한국형 고속전철 기술 개발 사업을 추진중에 있다. 철도차량, 특히 고속전철의 경우, 향후 예상되는 철도차량의 수요증가와 더불어 고속화·경량화 추세를 감안하면 충돌시 승객의 안전을 제고하는 것은 대단히 중요한 일이다.

고속철도차량이 다른 철도차량이나 기타 장애물과 충돌할 경우 먼저 동력차에서 충돌에너지의 70~80%를 흡수하고, 동력객차에서 15% 정도를, 그리고 객차에서 나머지 충돌에너지를 흡수하는 것으로 분석된다. 각차량의 연결장치 및 에너지 흡수 구조를 합리적으로 설계함으로써 튀어오름(override)현상, 탈선(derailment) 및 전복(rollover)현상 등의 발생을 현저히 감소시킬 수 있고, 구조물의 압피로부터 승객의 생존공간을 확보하고 2차적인 승객과 차량내부 구성품과의 충돌을 완화할 수 있어서 충돌사고시 인명 피해를 최소화 할 수 있다.

* 강원대학교 교수, 정회원

** 강원대학교 대학원

철도차량 제작은 초기의 목재차에서 현재의 고속전철 차량에 이르기까지 강도와 안전성 위주로 개발되어 왔다. 그러나, 유지 보수비용의 증가로 인해 차량의 경량화문제가 대두되어 일부분의 교체로 시작하여 스틸 차체 구조물을 알루미늄합금으로 교체하는 소재교체 방법이 취해졌다. 따라서 향후 고속전철의 개발에는 상기 문제를 해결하고 안전성이 보장되는 경량 차체의 개발이 필수적이라 할 수 있겠다

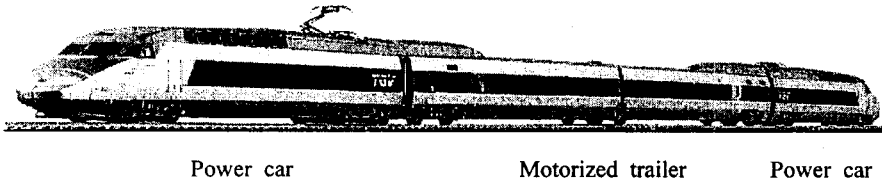


Fig. 1 Photograph of high speed train

Fig. 1은 고속전철을 나타낸다. 동력객차(motorized trailer)는 운전실 및 4개의 추진동력을 갖춘 동력차(power car)와 객차(trailer)의 역할을 동시에 하는 차량으로 2개의 구동모터와 객실을 구비한 부수 동력 차량이다.

열차의 충돌해석을 위한 유한요소 모델에는 자동차 충돌해석에서 개발되어진 셸요소, Solid요소, 보요소, 비선형 스프링 요소가 사용되며, 특히 열차 개발 초기단계, 또는 여러 가지 차체 부재에 대한 충돌특성 연구등을 수행하기 위하여는 정확도는 다소 떨어지나 빠른 시간내에 간단한 형태의 모델링만으로 충돌성향을 파악하여야 한다. Culière, P.^[1]는 3가지 간소화한 모델인 실험 모델, 국부적 유한요소 모델, 간소화한 운동학적인 모델을 사용하여 변형 모형과 수치적 해석 시간을 줄이는 연구 방법을 제시하였다. Sutton, A.^[2] 등은 열차를 수평 자유도만을 사용한 질량/스프링/댐퍼 시스템으로 모델화하여 충돌시에 다양한 변수들의 효과를 분석하였다. Markiewicz, E.^[3] 등은 셸요소 모델과 하이브리드 모델과의 비교를 통해 하이브리드 모델링 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 고속전철 철도차량의 사고유형 분석과 해석조건 제시를 통해 충돌해석 기술을 확보하고 고속전철 동력객차의 전반부 언더프레임을 보요소^[8]와 셸요소로 각각 모델링하여 충돌해석을 수행함으로써 에너지 흡수 경로와 변형 메카니즘을 규명했다. 또한, 차량 경량화의 요구로 인한 알루미늄소재로의 교체를 단순모델인 사각튜브를 통해 검증한후 실제 모델인 언더프레임에 적용을 하여 정량적으로 경량화를 입증하였다. 결과적으로 주요 단품의 에너지 흡수 분석 및 충돌 안전도 설계 기술 지원을 최종 목표로 제시하고자 한다.

2. 충돌하중 제시 및 모델링

2. 1 사고유형정의 및 충돌하중 제시

열차 충돌 사고는 매년 여러 나라에서 일어나고 있으며, 최근까지 열차사고의 전체 30%는 추돌사고(end-on collisions)에 의해 발생하고, 교차로 사고(level crossing collision)로 30%, 탈선사고로 20%, 화재로 15%의 사고를 기록하고 있다.^[4] 그 중 추돌사고는 후방충돌(rear-end collision)과 전방충돌(head-on collision)로 분류가 되며, 1978년부터 1991년까지의 미국을 예로 들면 후방충돌사고와 전방충돌사고의 경우 각각 770건, 340건으로 후방충돌사고가 더 빈번하게 나타났고 사망자는 40mph (64.4km/h)아래에서 발생했으며, 몇번의 전방충돌사고는 40mph (64.4km/h)보다 큰 속력에서 발생 되었다.^[5] 영국에서도 1983년부터 1992년까지 약 10년에 걸쳐 367건의 추돌사고가 발생하여 64명의 사상자와 227명의 부상자를 유발했다. 이러한 추돌사고는 튀어오름과 밀접한 관련이 있다. 92건의 추돌사고 중 15건이 튀어오름과 관련이 있고 51명의 사상자를 낼만큼 튀어오름의 제어가 중요함을 인식하게 해준다.^[6] 교차로 사고는 철도상의 장애물과의 충돌로 인해 빈번하게 발생하며

대형 트럭이나 버스들은 열차에 손상을 주는 가장 위험한 장애물이다.^[7] 교차로 상의 충돌은 다른 열차 충돌보다는 오래 지속되지는 않지만 열차의 충돌 속도를 줄이기 위해 충돌하기 전 브레이크 시스템을 가동시킴으로 인해 2차 충돌(승객과 차량내부 구성품과의 충돌)이 발생하여 승객에게 심한 부상을 유발한다. 사망사고와 심한 부상사고는 차량충돌, 튀어오름, 열차 좌굴에 의해 유발된 탈선의 결과로서 생존공간의 감소에 의해 발생된다.

2. 2 언더프레임의 유한요소모델링

동력객차에 있어서 전반부의 언더프레임 부분은 충돌에너지의 대부분을 흡수하는 곳으로, 여기에 대한 충돌해석을 수행하여 에너지 흡수 경로 등에 대한 정보를 제공하여 설계단계에서 충돌특성에 대한 효율적인 설계가 이루어지게 하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 에너지 흡수 전달경로와 변형양상등에 중심을 두어 동력객차의 전반부 언더프레임 부분을 셀요소로 모델링 하였다. 이들의 특성은 각부재와 상당하는 반력과 변형양상을 보이도록 하기위해 버퍼부분을 셀요소로 모델링하여 최대압축변위 200mm까지 1,000kN(1/2모델)의 충돌력을 흡수하도록 모델링 하였다. [Fig. 2] Fig. 3은 동력객차 전반부 언더프레임을 나타낸다. Fig. 4는 언더프레임의 셀모델을 나타내고, Fig. 5는 버퍼와 Cross beam위의 판재, Cross beam 및 주요부재, 사이드실(Side sill)부분으로 모델의 구성을 나타낸다. 모델에 사용된 절점수와 요소수는 각각 7120 , 6996개이다.

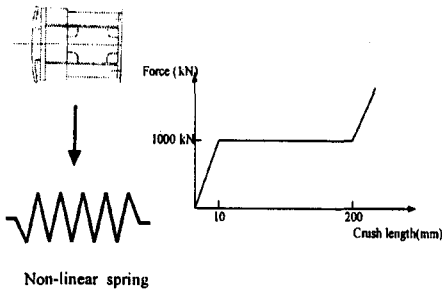


Fig. 2 Modeling of buffer

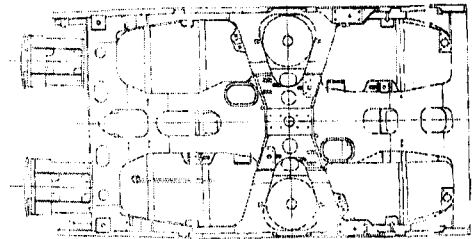


Fig. 3 Bottom view of front part underframe

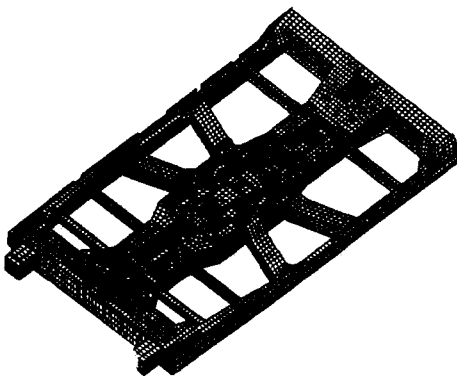


Fig. 4 Shell model of underframe (Oblique view)

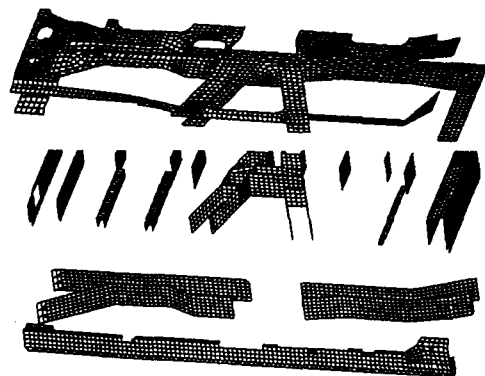


Fig. 5 Components of underframe

3. 셸모델을 이용한 언더프레임 충돌해석

철도 회사들은 연비절감 및 차체의 경량화를 다각적으로 노력하고 있다. 이러한 방법의 하나로 차량의 각 부재들을 알루미늄 등의 경량화 재료들로 대체하고자 하는 노력을 하고 있으며, 경량화와 동시에 구조강도 및 안전도를 유지하기 위한 연구도 병행하고 있다.

철도차량의 재료들을 살펴보면, 스테인레스 스틸은 상당히 오래 전부터 철도 차량에 이용되어 왔고 현재 제작되는 철도 차량 차체의 주류를 이룰 만큼 보편적으로 활용되고 있다. 알루미늄 합금은 최근에 와서 대형 압출형재의 생산이 용이하게 됨에 따라 철도 차량 차체에의 적용이 증가하고 있다. 현재 시점에서 알루미늄 합금은 차체 경량화를 주도하고 있는 소재이며 앞으로도 상당 기간 철도 차량의 경량화를 주도하는 소재로 남을 가능성이 크다. 현재 고속전철에는 동력궤차 부분에 있어서는 일반적으로 스틸을 사용해왔으나, 앞으로 제작되어질 한국형 고속전철에는 알루미늄으로의 소재대체가 이루어짐에 따라 소재 개발을 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 현재 사용하고 있는 스틸과 한국형 고속전철에 적용될 알루미늄재(A6005A-T6)를 사각튜브에 적용하여 소재 대체시 등가의 에너지흡수성을 갖는 알루미늄의 상당두께를 파악하고, 언더프레임 모델에 적용하여 충돌해석을 수행하였다.

3. 1 사각튜브 압괴해석

스틸에서 알루미늄으로의 소재 대체 시 등가의 에너지흡수성을 가지는 두께를 파악하기 위해 스틸의 두께는 1mm로 정하고 알루미늄의 두께를 1.2 ~1.5mm로 다양하게 변화하여 해석을 수행하였다. Fig. 6은 알루미늄의 두께가 변함에 따라 에너지 흡수성과 중량이 커짐을 정량적으로 나타낸다. Table 1은 기존 스틸 차체와 등가의 에너지흡수성을 확보하기 위한 알루미늄 소재의 두께를 나타내는 것으로, 약 20~50%정도의 두께 증가가 필요하고, 알루미늄으로의 소재교체가 기존 스틸 차체보다 약 40~60%정도의 경량화가 가능하다는 결론이 나왔다

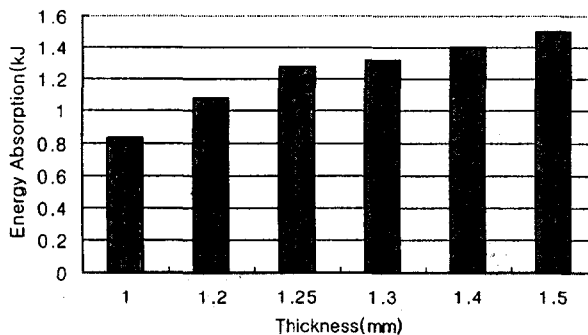


Fig. 6 Comparison of energy absorption according to thickness

Table 1 Thickness of Aluminium equivalent to steel in aspect of energy absorption

Material (Steel)	NF E24	NF E36	A42 FP
Energy Absorption	1.15 kJ	1.64 kJ	1.19 kJ
Equivalent Thickness for Aluminum	1.2 mm	1.5 mm	1.2 mm
Weight reduction	63%	56%	54%

Fig. 7에서는 사각튜브의 실험형상과 스틸($t=1\text{mm}$), 또한 스틸과 동일한 에너지흡수성을 가지는 알루미늄($t=1.2\text{mm}$)의 변형양상을 비교하였다. 그림에서 보는바와 같이 실험형상과 스틸은 같은 변형모드를 가지나 알루미늄은 변형모드에 약간의 차이가 있다.

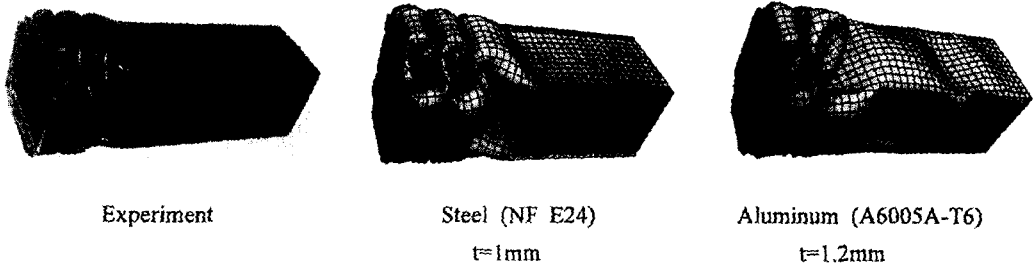


Fig. 7 Comparison of experiment and simulation

3. 2 언더프레임의 셀모델 해석

사각튜브에서의 해석결과를 셀모델에 적용하여 에너지흡수성 면에서 일반 스틸과 두께를 증가시킨 알루미늄의 에너지 흡수성을 측정하였다. 일반적으로 두께의 과다한 증가를 막기 위해 동력 객차 동력실부의 구조를 중점적으로 검토하여 동력객차 및 객차의 차체 구조가 같이 적용 될 수 있도록 설계하고 기존 스틸 차체보다 약 20~30%정도의 경량화가 가능하고 강도 및 강성적으로 더욱 우수하며 제작 공수도 대폭적으로 절감 할 수 있는 합리적인 형상 설계가 되도록 한다.

Table 2에서 스틸, 알루미늄, 상당두께를 갖는 알루미늄을 사용하여 에너지흡수성을 서로 비교한 결과, 스틸 소재의 언더프레임에서 에너지 흡수가 가장 많으며 다음으로 상당 두께를 사용한 언더프레임 부재의 에너지 흡수가 많음을 알 수 있다. 상당두께를 갖는 알루미늄에서는 기존 알루미늄 두께를 사용한 것 보다 540 KJ의 에너지흡수 증가를 보였다.

Fig. 8에서 강체벽에 발생하는 반력 비교를 통해 언더프레임 전체 구조의 강성특성을 살펴 보면, 처음 200mm의 변형까지는 비퍼로 인해 같은 강성을 갖고, 이후 에너지 흡수량이 큰 순서로 강성이 큰 것을 알 수 있다. 즉 알루미늄으로의 소재 변경시 전체적인 강성이 감소하며, 상당 두께를 사용할 시 기존 두께를 사용할 때 보다 강성은 증가하지만 여전히 스틸에 비하여 취약함을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of Energy Absorption

	기존 Steel (NF E24)	기존모델 알루미늄	수정모델
Energy Absorption	3160 KJ	1860 KJ	2400 KJ
Weight	820.6 Kg	292.9 Kg	394.7 Kg
Weight Reduction	0%	64%	52%

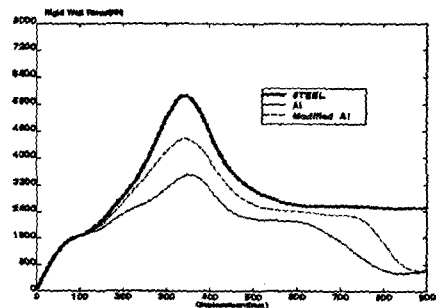


Fig. 8 Comparison of rigid-wall reaction force

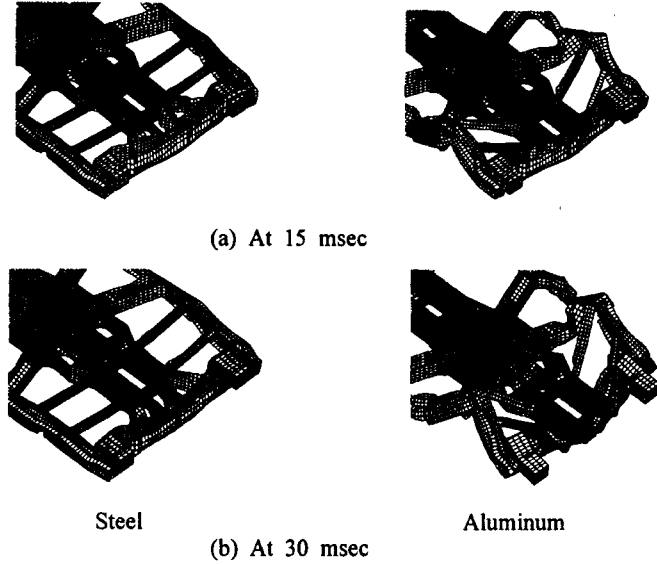


Fig. 9 Comparison of deformed shapes

Fig. 9는 기존 스틸 소재의 언더프레임과, 사각튜브를 사용해 도출된 동가의 두께를 갖는 알루미늄소재의 변형양상 비교를 나타낸다. 변형양상의 비교를 통해 알루미늄 소재의 언더프레임 모델에서 사이드 실 부분의 굽힘 변형이 스틸보다 많이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 사각튜브에서 압괴 변형만 고려하여 두께를 계산하였으므로 사이드 실의 굽힘변형에 대해 충분한 강성을 갖지 못하기 때문이다. 셀모델을 이용한 해석 결과를 통해 언더프레임 및 동력객차 전체의 프레임 구조의 설계시 각 부재의 두께변화 뿐 아니라 단면형상의 변경을 통한 굽힘강성에 대한 설계가 필요함을 알 수 있다. 셀모델에서는 단면형상 변경을 통한 변수연구시 모델링이 어렵기 때문에 이를 동가의 단면계수를 갖는 보요소와 셀요소를 함께 적용한 하이브리드 모델에 대한 연구가 진행되어야 한다. 본 연구단계에서는 보요소만을 이용하여 해석을 수행하여 셀요소와의 해석결과를 비교하였다.

4. 단순 모델을 이용한 동력객차 충돌해석

4. 1 언더프레임 단순모델 충돌해석

동력객차 전반부 언더프레임의 모델을 보요소로 모델링하였다. [Fig. 10] 각부재와 상당하는 반력과 변형양상을 보이도록 하기위해 버퍼부분을 비선형 스프링 요소로 모델링하여 최대압축변위 200mm까지 1,000KN(1/2모델)의 충돌력을 흡수하도록 모델링 하였다. 이때 보요소의 입력값으로는 각 부재의 단면에 대한 단면계수가 사용되었다.

충돌해석 수행시 하중경계조건으로 동력실내에서 모터 유닛과 전장품들의 하중조건은 부여하지 않고 단순 모델만의 충돌특성을 파악하기위해 동력객차의 전체 중량 24ton(1/2모델)중 자체중량 0.9ton, 버퍼중량 0.125ton을 제외한 약 23ton 중 언더프레임만의 충돌해석을 고려하여 10ton정도의 질량을 후반부에 집중 부과하였다. 초기속도는 SNCF의 사고 시나리오에 명시된 110km/h(30.56m/s)로 강제벽에 충돌시켜 에너지흡수 경로와 변형양상을 구하고자 한다.

해석 결과 강제벽의 반력값과 변형양상이 각각 Fig. 11과 12에 나타나 있듯이 셀모델 해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

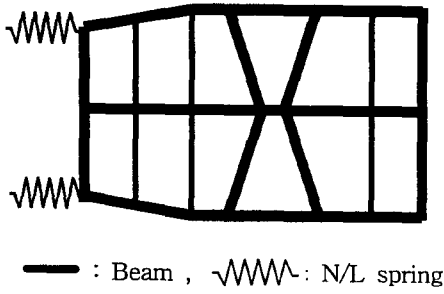


Fig. 10 Beam and non-linear spring model of underframe

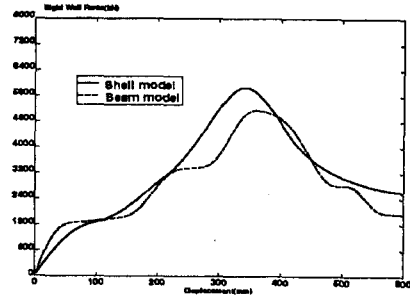


Fig. 11 Comparison of rigid-wall reaction force

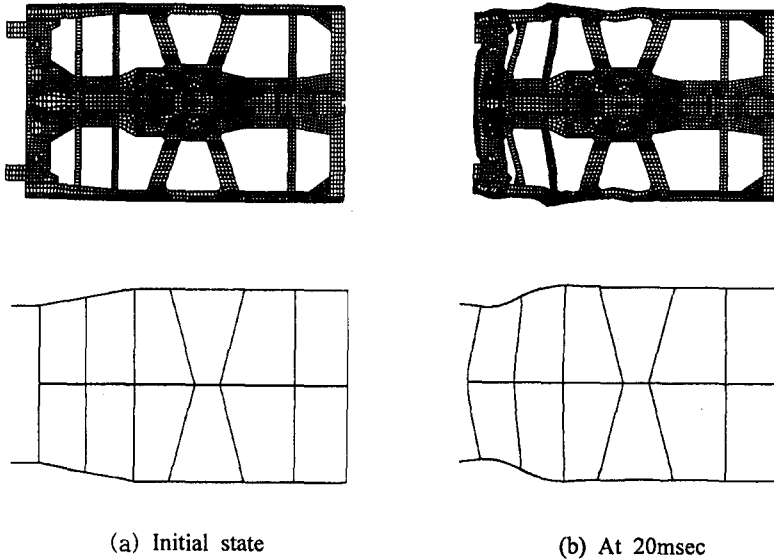


Fig. 12 Comparison of deformed shapes between shell and hybrid model

4. 2 튀어오름 및 전복 해석

튀어오름현상은 한 차량이 다른 차량의 상부구조로 올라타는 현상으로 충돌시 생기는 수직력에 의해 발생되며, 승객공간 확보를 위한 상부구조는 하부 구조에 비해 상대적으로 약하기 때문에 튀어오름된 차량은 상대차량에 심한 충돌이나 침투를 야기시킨다. Fig. 13은 두차량의 충돌시 야기되는 튀어오름해석을 나타낸다.



Fig. 13 Head-on collision with override

전복(횡전사고-가로로 구른다)사고는 한번에 다수의 사상자를 내는 위험성이 있고, 오스트레일리아나 유럽등 해외에서는 전복 시의 차량 변형량을 법적으로 규정하고 있다. 현재 열차에 대한 전복사고의 규정은 없지만 유럽에서 적용하고 있는 법규 ECE No.66 - 운전자를 포함한 16인 이상의 승객을 운반하기 위해 개발한 차량에 대하여 전복시험을 수행하여 잔여공간(또는 생존공간)의 확보를 인증 - 에 근거하여 열차의 전복사고를 규정하고자 한다.^[9~10] Fig. 14는 전복사고의 단계별해석을 나타낸다.

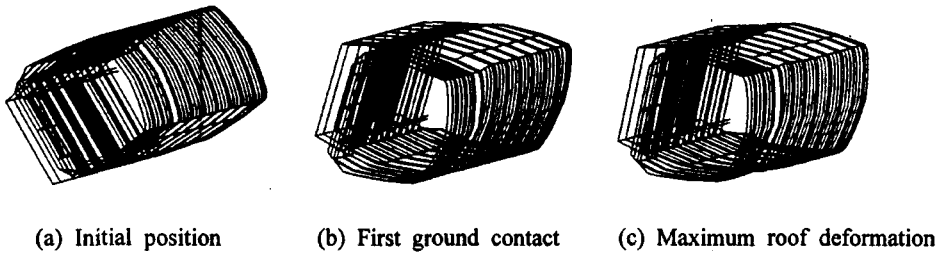


Fig. 14 Dynamics rollover simulation of a full scale

5. 결 론

- ① 전·후방충돌, 튀어오름, 교차로 사고, 전복사고를 정의하였다.
- ② 고속전철 동력객차의 차체 재질이 스틸에서 알루미늄으로의 소재대체에 따른 정량적인 알루미늄의 두께를 사각튜브를 통해 구하고, 전반부 언더프레임에 적용하였다.
- ③ 전반부 언더프레임에 대해서 단순모델을 완성하였으며, 셀모델과 비교하였다.
- ④ 향후 단순모델을 하이브리드 모델(보요소+셀요소)로 확대 적용하여 충돌해석을 수행하며, 주요 부품의 에너지 흡수 분석 및 충돌안전도 설계기술 지원을 최종목표로 한다.

REFERENCES

- [1] Culière, P. (1996), "PAM-CRASH Train Crashworthiness Applications", PUCA '96 PAM Users Conference, pp. 129~131.
- [2] Sutton, A. and Lewis, J. H. (1982) "Elastic/Plastic Interaction of Rakes of Rail Vehicles", Structural Impact and Crashworthiness Eds. J/Morton, pp. 783~797, Elsevier, London.
- [3] Markiewicz, E. , Milcent, G. and Drazetic, P. , Ravalard, Y. (1994) "Shock Behavior of Rolling Stock Vehicles - A Hybrid Approach", PUCA '96 PAM Users Conference, pp.115~122
- [4] Johnson, W. (1984) "Structural damage in airship and rolling stock collisions", -Ch.15 in Structural crashworthiness edited by Jones, N. and Wierzbicki, T., pp. 417~439
- [5] Tong, P.(1984) "Rail vehicle structural crashworthiness-Ch.15 in Structural crashworthiness edited by Jones, N. and Wierzbicki, T., Elsevier, London, pp. 397~416.
- [6] Lewis, J. H. (1994) "Development of Crashworthy Vehicle Structures for Railways", British Rail Research Structures Group.
- [7] Kisielewicz, L. T. and Ando, K. (1993) "Crashworthy Rolling Stocks", PUCA'93 PAM Users Conference, pp. 219~229.
- [8] 김현영, 한재형 (1997) "3차원 보모델을 이용한 고속전철 동력객차의 충돌특성 연구", 대한기계학회, '97 추계학술대회 논문집 A. pp.448~455.
- [9] Naoki, N., Hiroyuki K., Ken, N. and Massashi E. (1994) "Rollover Analysis Method of a Large-sized Bus", PUCA'94 PAM Users Conference, pp. 101~105
- [10] Sandor Vinceze-Pap (1996) "Occupant and Rollover Safety tests on Coashes", NATO-ASI, pp. 163~180.