

Side Buffer가 적용된 차량의 설계 고찰

A design study of carbody with side-buffer

권승열*
Kwon, Seung Yeol

곽태호**
Kwak, Tae Ho

전시현***
Jeon, Si Heon

ABSTRACT

In this paper, we describe the design method of carbody structure with side-buffer. Recently railroad industry has a new interest with stability, fixed time, low environment pollution and mass transportation. Accidents have little on the railroad but railroad industry is trying to minimize carbody damage and passenger injury in case of accidents. So a side-buffer having anti-climber is applied to meet each special needs. Carbody with side-buffer is assembled with aluminum(6005A-T6) parts that are extruded. As the results of the study, it is showed that carbody with side-buffer has sufficient energy absorbtion about crashworthiness.

1. 서론

지구온난화 및 환경보호를 위해 2005년에 발효된 교토의정서로 오스트레일리아, 캐나다, 미국, 일본, 유럽연합(EU) 회원국 등 총 38개국이 의무이행국가로 지정되어있으며, 이에 우리나라도 저탄소 녹색성장이 라는 슬로건 아래 정부는 우선 에너지 저소비사회, 녹색사회로의 전환을 위해 그린카 및 경차 보급 확대, 자동차 연비향상, 고효율기기 기술개발·보급 등을 적극 추진해 국가에너지 효율을 2030년까지 2006년 대비 47% 향상시킬 계획임을 발표하였다. 이는 여객 및 화물의 수송수단으로 주를 이루고 있던 자동차나 항공기에서 철도차량이 정시성, 안정성, 대량 수송성, 에너지 절감성, 저공해성, 고속성과 아울러 쾌적한 대중교통수단으로서 새로운 관심을 끌게 되었다.

철도차량의 수요가 늘어남에 따라, 사고 빈도는 낮지만 시스템에 의해 완전히 통제하기 어려운 상황들에 기인해서 충돌, 추돌 등이 있을 경우 발생하는 승객과 승무원의 상해 및 차체 손상의 최소화가 요구되고 있다.

이러한 목적을 충족시키기 위해 충돌, 추돌 안전에 대한 종합적이며 집중적인 연구가 필요하게 되었고, 선진국들에서 안전도를 확보하기 위한 연구가 지난 수십 년 전부터 꾸준히 진행해오면서 선두 차량(운전 차량)에 Anti-Climber(타오름방지 장치) 및 Side-Buffer(완충기)의 적용이 대두되고 있다.

본 논문에서는 철도차량에 Anti-Climber의 기능을 함께하는 Side-Buffer를 적용하기 위한 설계에 대해서 기술하고자 하며, 대상 철도차량은 국내 운행 예정인 알루미늄(Aluminum) 소재를 이용한 차체로서 기본 구조는 Under Frame(바닥구조)와 Side Structure(측구조), Roof Structure(지붕구조), End Structure(단부구조), Cab. Structure(운전실 구조)에 알루미늄 압출소재(6005A-T6)를 이용한 더블스킨 구조로 도시 철도 안전 기준에 규정한 강도조건을 만족하고 있는 전기동차이다.

* 책임저자 : (주)현대로템 기술연구소 주임연구원

E-mail : asap@hyundai-rottem.co.kr TEL : (031) 596-9348 FAX : (031) 596-9756

** (주)현대로템 기술연구소 책임연구원

*** (주)현대로템 기술연구소 수석연구원

2. 본 론

2-1. Side Buffer with Anti-Climber

Anti-Climber(타오름 방지)가 적용된 Side Buffer는 차량 충돌 혹은 추돌 시에 발생하는 압축력을 흡수하고 차량 간의 타고오름을 방지하는 기능을 가지고 있다. 일반적으로 운전실이 있는 선두 차량에 적용이 되며, 구성은 그림.1과 같이 차체에 Bolt를 이용하여 체결할 수 있는 End Mount Flange와 충돌 에너지를 흡수하는 Deformation Tube, 차량 간 충돌이 발생해서 최대 에너지를 흡수한 뒤에 차량간 타고오름 현상을 방지해주는 Anti-Climber Head로 이루어져 있다.

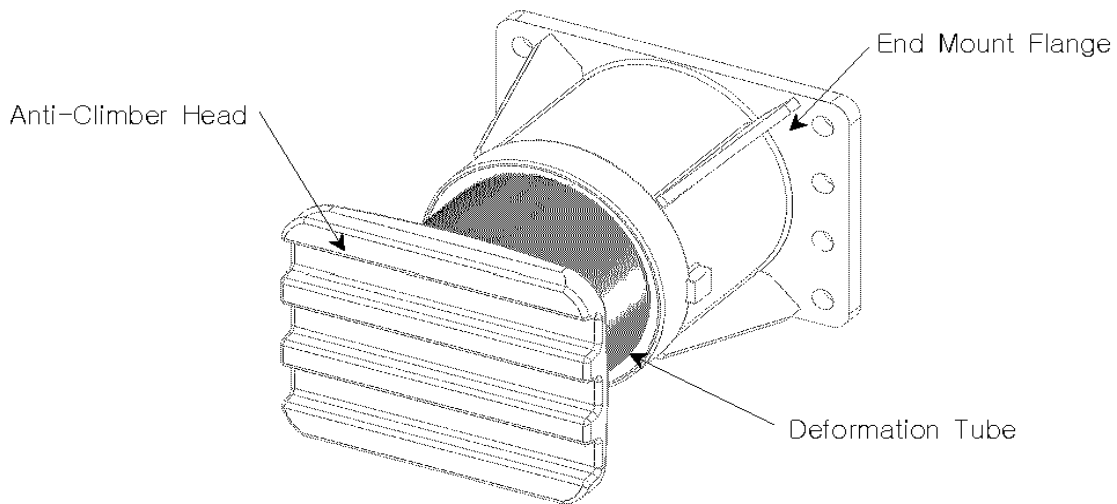


그림.1 Side Buffer의 구성

Anti-Climber의 구조는 수직하중에 견딜 수 있게 일반적으로 플레이트 형상에 수평방향으로 여러 개의 요철 형상이 수직방향 힘을 분산하여 타고오름 방지 기능을 한다. 만약 한 개의 요철로 수직하중을 억제하는 Anti-Climber의 경우에는 단일 요철 부위에 응력 집중이 발생됨으로 일정 하중 이상 초과 시 요철 부분이 파손되어 안전상 문제가 발생될 수 있다. 또한 크기가 상대적으로 확대됨으로 설치 공간이 협소한 부위에 적용하기 어려우며, 요철의 형상 및 방향성으로 인하여 타 차종과 호환성이 떨어지게 된다. 따라서 Anti-Climber의 요철 형상은 선두 차량의 경우에는 다수의 요철 형상으로 적용되며, 중간 차량에는 주로 하나의 요철로 이루어진 Anti-Climber가 적용되어 차량 구원 및 차량 편성 시 문제가 없는 곳에서만 일부 사용되어지며, 관련 규격으로는 영국의 철도규격인 GM/RT 2100에 언급되어있다.

Side-Buffer의 성능을 결정하기 위해서 도시철도법을 기준으로 충돌안전성에 대해 동일한 차량이 만차 하중 상태에서 상대속도 20km/h로 충돌하는 경우로서 볼스터와 볼스터 사이에 영구변형이 발생하면 안 된다. 이와 함께 선두 차량의 연결기를 통한 안전기준도 도시철도법을 기준으로 시속 5킬로미터의 속도로 주행하는 공차상태의 열차가 제동이 되어있는 유사한 형태의 열차와 연결기를 통하여 충돌하였을 때 차체에 손상이 발생되면 안된다. 따라서 상기 2가지 도시철도법을 기준으로 충돌안전성을 만족하는 Side-Buffer의 성능을 결정하기 위한 충돌 시나리오는 5km/h 속도 이상에서의 하중에서는 선두 차량의 연결기에서 충돌에너지를 일정 부분 흡수하고, 이후 10km/h 속도의 하중에서 발생하는 충돌에너지는 Side-Buffer에서 흡수하여 선두 차량의 볼스터 사이에 영구변형의 발생을 방지해야 한다.

충돌 속도 5km/h 및 10km/h에서의 선두 차량의 압축하중을 산출하기 위해서 8량 1편성 기본편성을 기준으로 그림.2와 같이 1차원 충돌해석을 실시하였으며, 이때 선두 차량의 연결기는 항복하중 60ton 이상의 강도를 가지고 있는 Shear-Off Type(전단식) 연결기로서 60ton이상의 충돌 하중이 발생하였을 때 전단(Shear-Off)되어 연결기를 통한 충돌하중의 전달이 없어 차체의 손상을 방지한다. 그림.3은 연결기의 동적

특성 곡선을 나타내며, 표.1은 1차원 해석결과로서 5km/h 속도에서 약 79톤, 10km/h 속도에서 약 129톤의 압축력이 산출되었다. 따라서 Side-Buffer는 약 129톤의 압축력에 따른 충돌에너지를 흡수하여야 한다. 본 논문에 적용한 Side-Buffer는 710kN의 용량에 150mm의 스트로크를 갖고 있으며, 선두 차량에 2개를 구성하였다. 그림.4는 Side-Buffer의 특성곡선을 나타내었다.

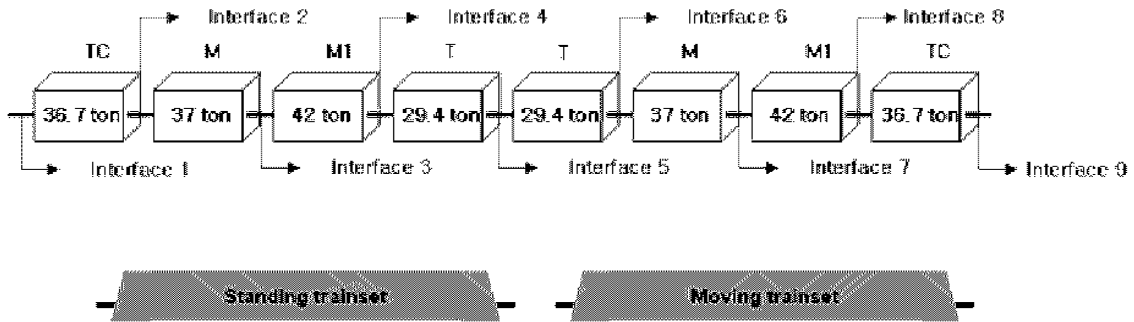


그림.2 1차원 충돌해석의 구성(8량 1편성)

속 도(km/h)	압축력(ton)	발생 위치
5	79.56	선두 차량의 연결기 체결 부위
10	129.5	선두 차량의 연결기 체결 부위

표.1 1차원 해석 결과에 따른 압축력

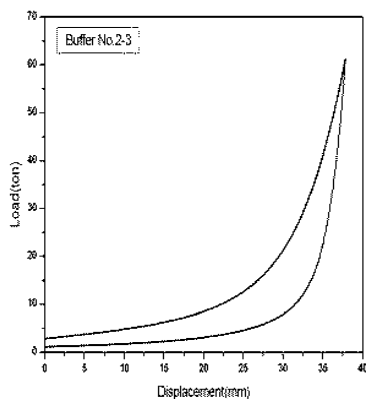


그림.3 선두 연결기의 특성 곡선

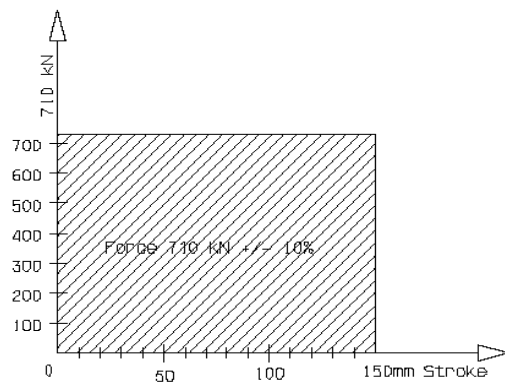


그림.4 Side-Buffer의 특성 곡선

2-2. Side-Buffer의 설치 검토

선두 차량에 Side-Buffer를 설치하기 위해 기본적으로 Jumper 및 MR Hose, 선두 연결기, 비상도어의 개폐 여부, 타 전동차량의 Side-Buffer 호환성 등을 고려하여야 하고 Side-Buffer의 특성 상, 차체에 설치가 되어야 하기 때문에 레일 상면에서 Under Frame(바닥구조) 상면을 기준으로 충돌이나 추돌 시에 Side-Buffer에 발생하는 모멘트(Moment)를 최소화하여 그림.5과 같이 Side Buffer의 높이와 폭을 결정하였다.

동일한 Side-Buffer가 적용된 선두 차량의 상호 연결을 가정하였을 때, 그림.3에서 나타낸 선두 연결기

의 특성 곡선에서 최대 압축치수인 약 38mm에 오차 $\pm 10\%$ 를 감안하여 Side-Buffer간의 거리가 선두 차량의 길이와 관계없이 최소 90mm이상 공간이 확보되어야하며, 이는 측선에서 곡선 반경 R120 선로 상에서 Side-Buffer 간의 간섭이 발생되어서는 않된다. 이에 준하여 직선 및 곡선 선로에 길이 20,000mm의 Side-Buffer 설치 차량을 그림.6 및 그림.7과 같이 설계적으로 검토한 결과 선두 차량의 연결면과 Side-Buffer의 Anti-Climber Head면은 120mm 이상, Cab Mask 끝단과는 250mm의 공간 확보가 필요하다는 것을 알 수 있다. 차량의 충돌 혹은 추돌 시에 전두 연결기 및 Side-Buffer의 특성 곡선을 기준으로 각 메카니즘의 성능 구동 프로세스는 앞서 서술한 Side-Buffer의 설치 가능 위치 및 전두 연결기와 Side-Buffer의 특성 곡선에 의해 그림.8과 같이 시속 10km에서 1차원 충돌해석을 통해서 변위와 그에 따른 반력으로 충돌에너지 흡수 특성 곡선을 정의하였다.

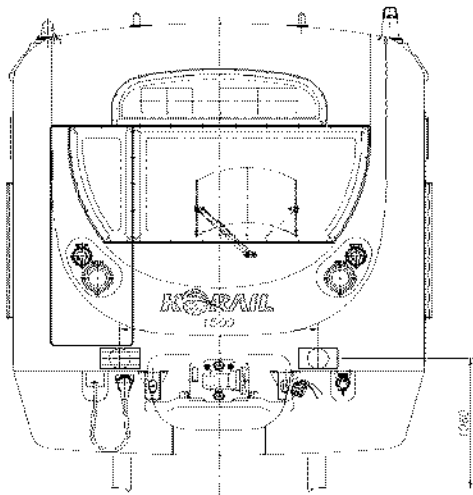


그림.5 선두 차량의 Side-Buffer 위치

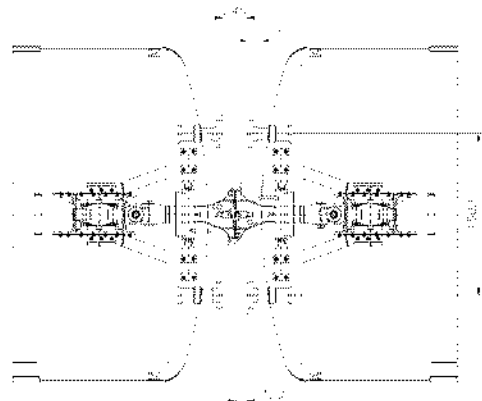


그림.6 직선 선로에서의 Side-Buffer 위치

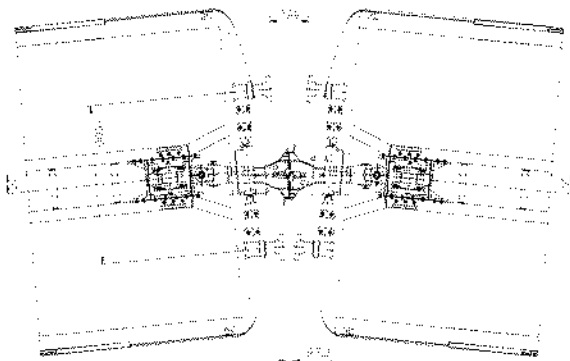


그림.7 곡선 선로(R120)에서의 Side-Buffer 위치

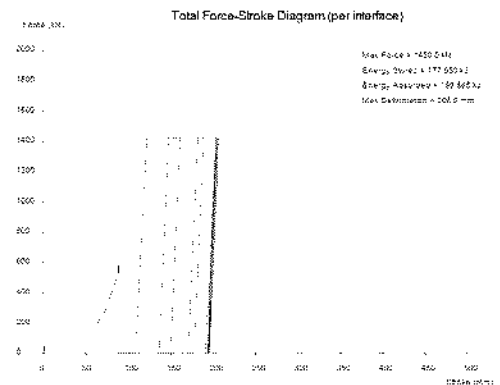


그림.8 연결기 및 Side-Buffer 특성 곡선

2-3. 설계 검증

Side-Buffer가 체결되는 선두 차량의 차체 설계에 대한 충돌 성능을 검증하기 위해서 수직하중, 압축하중, 3점지지, 비틀림하중에 대한 구조적 강도의 검증이 미리 검토되어야한다. 본 논문에서 Side-Buffer를 체결하는 차체에 대한 구조해석 결과는 각 하중조건별 처짐량에 있어 기준 강성(Stiffness)을 충족하며, 발생하는 응력(Stress)은 해당 재질의 항복강도 내에 분포되어 충분한 강도 및 강성을 확보하고 있다.

앞서 서술하였던 Side-Buffer의 특성 및 위치, 전두 연결기와의 상호관계 등을 고려한 차체의 구조적 성능의 기준은 도시철도법의 안전기준을 만족시켜야 하며, 이를 위해 3차원 충돌해석을 시행하였다. 상대속

도 20km/h의 충돌에 대하여 해석시간의 단축을 위하여 에너지 흡수가 없는 고정벽에 10km/h로 충돌하는 조건으로 치환하여 해석을 수행하였으며, 이는 동일한 차량이 마주오는 방향으로 서로 10km/h로 충돌하는 경우로서 상대속도 20km/h와 같은 조건이 된다. 또한 이 경우에 대한 차량의 하중은 만차조건을 적용하였다. 연결기 및 Side-Buffer는 1차원 빔으로 각각 모델링하였으며, 1차원 빔에는 그림.8의 에너지 흡수 특성곡선을 추가하였고 대차는 부가질량으로 센터 피봇 부위에 정의하여 해석 모델을 구성하였으며, 이에 따른 충돌해석에 사용된 해석모델은 그림.9와 같다. 3차원 충돌 해석 결과는 그림.10에 나타나듯이 약 158msec 후에 차량의 변형에너지가 최대가 되는 것을 알 수 있으며, 전체 에너지는 약 258kJ 이고 최대흡수에너지는 약 245kJ 이다. 처음 전두 연결기 이후 Side-Buffer까지 80msec에서 약 140kJ의 에너지를 흡수하고 있고, 이후 차체의 변형으로 약 105kJ의 에너지를 흡수하고 있다. 고정벽에서 발생하는 최대 반력은 그림.11과 같이 158msec에서 약 2,695.2kN이며 전두 연결기, Side-Buffer, 차체에서의 반력을 구간별로 보여주고 있다. 선두 차량에서 발생하는 최대 압피 길이는 그림.12와 같이 약 92.3mm로서 운전자의 안전공간이 충분히 확보되는 것을 알 수 있으며, 그림.13에서 알 수 있듯이 차체의 변형은 운전실 구조체(Cab. Structure)의 바닥(Floor) 전위측에서 대부분 발생하며 운전실의 출입문 및 볼스터와 볼스터 사이에서는 영구변형이 일어나지 않아 안전공간이 충분히 확보되는 것을 알 수 있다.

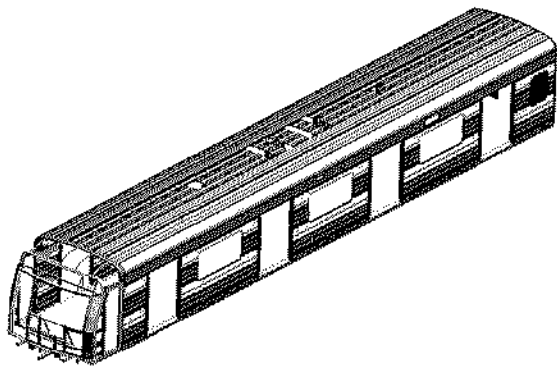


그림.9 충돌해석을 위한 선두차량의 유한요소 해석모델

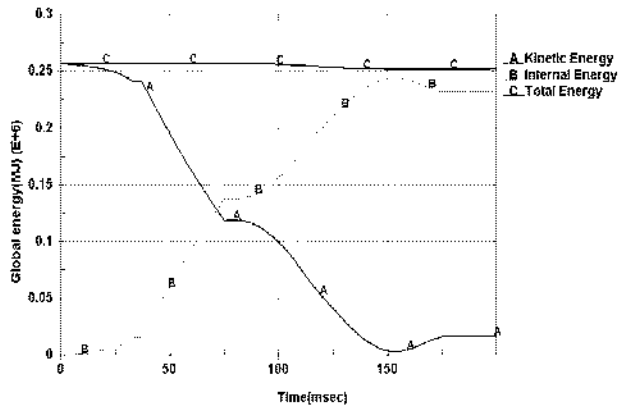


그림10. 3차원 충돌에너지 흡수 곡선

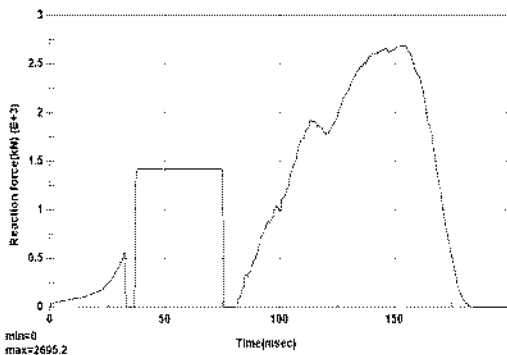


그림.11 3차원 충돌 시 고정벽에서 발생하는 반력

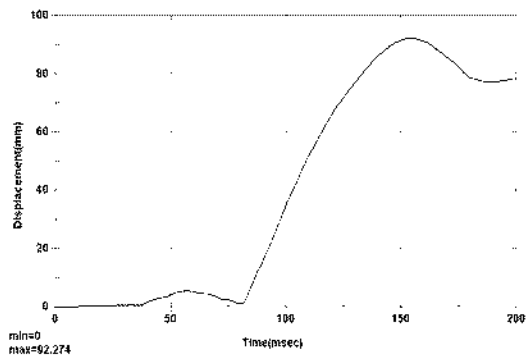


그림.12 선두차량의 전두부 압피 변형 곡선

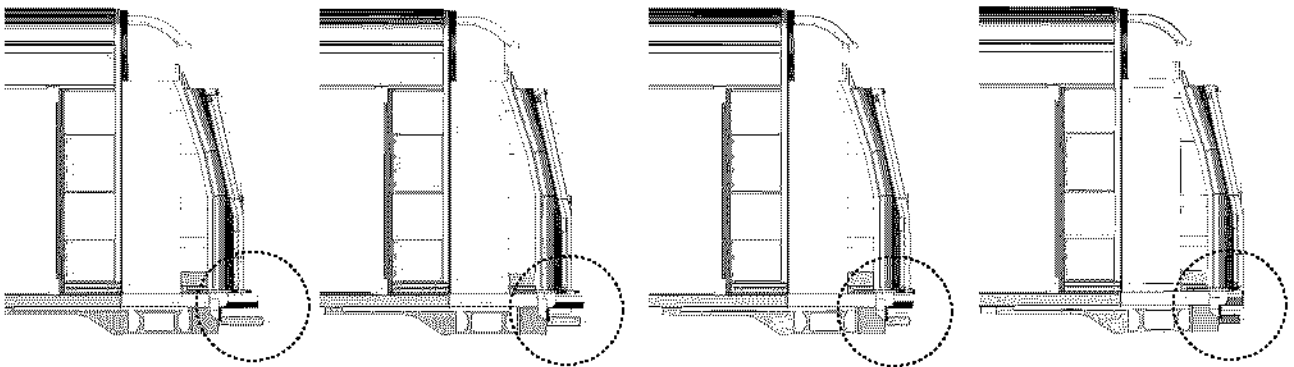


그림.13 초기 상태와 충돌 후 단계별 변형 형상

3. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 국내 전동차에서 처음으로 선두 차량에 Side-Buffer를 적용하기 위한 선두 연결기 및 Side-Buffer의 용량 선정, Side-Buffer의 설치 위치, 작동 프로세스 등의 설계 인자를 선정하고 검토 방법을 제시 하였으며, 이에 따른 선두부 차체의 구조적 성능을 구조해석 및 충돌해석으로 입증하였다. 그 결과 선두 차량에 Side-Buffer를 적용함으로써 도시철도법의 안전기준을 충분히 만족시킬 수 있었으며, Side-Buffer를 설치하기위한 선두 차량의 설계기법을 확보할 수 있었다.

본 논문에서 Side-Buffer를 적용한 선두 차량의 차체는 알루미늄 압출 프로파일을 차량의 길이 방향으로 구성하였기 때문에 충돌에 대한 압축력에 있어서 일반 스테인리스 스틸(Stainless Still). 혹은 일반 강재(Mild) 재질의 차체 구조 대비 단면계수가 높아 이와 비례하여 휨(좌굴)에 대한 구조적 강도가 높다. 이는 충돌 시 Side-Buffer가 가지고 있는 충돌에너지흡수 성능의 작동에 있어서 차체가 충분한 강도 및 강성으로 지지하고 있다는 의미이며, Side-Buffer를 적용하기 위해 일반 스테인리스 스틸 혹은 일반 강재 재질의 차체 구조가 잘못 설계되면 Side-Buffer가 제 기능을 동작하기 전에 차체에 큰 변형을 가져올 수 있으며, Side-Buffer를 적용하지 않는 것보다 더 큰 위험을 초래할 수 있다.

향후 연구과제로는 본 논문의 설계기법을 기초로 Side-Buffer를 적용하는 스테인리스 스틸 혹은 일반 강재 재질의 차체 구조에 대한 연구가 필요하다고 판단되며, 이와 함께 알루미늄 재질의 차체 구조에서는 이종 재질인 일반 강재 재질의 Side-Buffer를 체결하기 위해 개선된 설계 및 접합으로 설계 다양화에 따른 체결 방법도 다양성을 가져야 할 것이며, 보다 효율성을 추구해야 할 것이다.

참고문헌

1. Railway Group Standard, GM/RT 2100, (2000), "Structural Requirements for Railway Vehicles"
2. International Union of Railways, UIC 526-1 OR, "Wagons, Buffers with a stroke of 105mm"
3. International Union of Railway, UIC 566 OR, "Loadings of Coach Bodies and their Components"
4. Livermore Software Technology Corporation, "LS-Dyna Application v970"
5. 국토해양부, (2008), "도시철도차량 안전기준에 관한 규칙"
6. (주)현대로템, (2007), "경의선 전동차"
7. (주)현대로템 "연구 개발 기술 세미나 발표 자료집"