고무차륜 경량전철의 충돌안전도 연구
A Study on Crashworthiness of Rubber Tired AGT

구 정 서* 조 현 직** 이 현 순**
Koo, Jeong-Seo Cho, Hyun-Jik Lee, Hyun-Soon

ABSTRACT

In the standard specifications for the urban EMU(Electric Multiple Unit) train, there are several items to ensure safety against accidents. The 21th -23th items have much relation with the crashworthiness of the urban EMU train. In this study, the rubber tired AGT(Automated Guide-way Transit System) under development by KRRI is numerically evaluated in a crashworthy point of view by applying the above crashworthiness items. The numerical results show the detail design of the AGT satisfies the 22th and 23th items. But the design is recommended to adopt mechanical fuses to reduce the impact accelerations with respect to the 21th item.

1. 서론

경전철은 수송수요가 중간규모인 대도시 근교의 위성도시를 연결하는 교통수단으로 각광을 받고 있다. 경전철은 도로교통 수단에 비하여 정시성, 신속성, 환경친화성 등이 우수하고, 완전무인으로 운행되므로 기존의 지하철, 국철 등에 비하여 운영비가 저렴할 뿐만 아니라 건설비 또한 저렴하기 때문이다[1]. 본 연구는 (주)우진산전에서 설계중인 고무차륜형식 경전철의 차체가 도시철도 표준화 사양 중 연결 및 충돌안전도와 관련된 제21조-23조의 내용을 만족시키는지를 해석하고, 평가하여 설계 개선방안을 제안하기 위하여 수행되었다[2,3].

위에서 언급한 도시철도 표준화 사양중 연결 및 충돌안전도와 관련된 제21조-제23조의 내용은 다음과 같다.

제21조 (승객 및 운전자 보호) 운전실과 객실은 정상적인 운행조건에서 안전하여야 하며, 사고시에도 차체로부터 승객 및 운전자의 안전을 최대한 확보할 수 있어야 한다.

제22조 (충돌변형부의 제한) 구조체는 각 차량이 상대속도 20킬로미터에서 연결기를 통해 충돌할 때 연결기의 흡수능력 이상의 하중이 차체에 작용하는 경우 차체 다른 부위의 압괴변형이 발생하기 전에 차체의 끝단과 볼스터 사이에서 압괴변형에 의해 충돌에너지가 흡수될 수 있는 구조이어야 한다. 다만, 볼스터 방식이 아닌 도시철도 차량은 그러하지 아니하다.

* 한국기계연구원 신교통기술연구부 선임연구원, 정회원
** 한국기계연구원 신교통기술연구부 연구원, 정회원
** 한국기계연구원 신교통기술연구부 연구원, 정회원

제23조 (차체의 충돌안전성) 시속 5킬로미터의 속도로 주행하는 공차상태의 열차가 제동이 되어 있는 유사한 형태의 열차와 연결기를 통하여 충돌하였을 때 차체에는 손상이 발생하지 아니하여야 한다.

도시철도 차량의 표준화 사양 22조, 23조를 평가하기 위하여 2량 1편성에 대하여 3차원 쉘모델의 유한요소 충돌해석을 수행하였다[4]. 또 도시철도표준화 사양 제 21조의 승객안전도를 평가하기 위하여 선두 차량에 대해서는 3차원 쉘 모델을 사용하고 후방 차량은 1차원 스프링 및 막대요소로 모델링된 하이브리드 모델을 사용하여 36, 60 kph의 속도로 정지한 동일 차량과 충돌하는 사고에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다[5]. 구해진 해석결과를 이용하여 도시철도 차량의 표준화 사양 21조-23조의 만족 여부에 대한 평가와 설계 개선 방안을 제시한다.

2. MC-car 2량 편성의 충돌 해석

일반적으로 차량충돌 해석에서는 차체 1량만을 모델링하여 열차의 충돌안전도를 평가하는 경우도 많다. 그러나 실제 시나리오와 같은 조건에서 충돌해석 결과를 얻기 위해서는 실제 차량 편성과 같이 2량 편성에 대하여 해석하는 것이 좋다. 본 해석에서는 2량 편성 3차원 쉘 모델을 이용하여 도시철도 표준화 규정 제 22조의 충돌 안전도와 제 23조의 연결 안전도 분석에 적용하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 유한요소 모델인데, 크기가 30-40mm 정도인 175,846 개의 쉘 요소와 3개의 BAR 요소로 구성되어 있다. 여기서 연결기는 유진기공에서 개발된 도너스 타입의 연결기를 적용하였다. Fig. 2는 도너스 타입의 연결기의 완충 특성을 나타낸다.

Fig. 1 F.E. Model of MC-car

도시철도 표준화 규정 23조의 연결 안전도와 22조의 충돌 안전도를 평가하기 위하여 정지한 동일 차량과 5 kph, 20 kph의 속도로 충돌하는 조건에서 해석을 수행하였다. Fig. 3은 5 kph에서 충돌 후 연결기에 발생하는 충격력을 나타낸 그래프인데, Fig. 2에 나타낸 도너스 타입 연결기의 충격 특성 곡선과 비교하면 충격 에너지 흡수 능력 범위내에서 작동됨을 알 수 있다. 따라서 연결기의 에너지 흡수 능력은 도시철도 표준화 규정 제 23조를 충분히 만족시킴과 동시에 차체에는 손상이 발생하지 않는다. 최대 충격력은 220 kN 정도이며 연결기 취부에 발생하는 최대응력(Fig. 4)도 3.0 kgf/mm^2 정도로 항복응력 이하이다. Fig. 5는 선두 차량중앙부의 충돌 가속도를 나타낸 것인데, 최대 충돌 가속도가 1.6 g 정도로 충돌 안전도 측면에서는 문제가 없다고 판단된다. 결론적으로 유진기공의 도너스 타입의 연결기와 우진산전의 경량전철 차체는 5 kph 의 2량 편성 충돌해석 조건에서 제 23조의 연결 안전도를 만족시킨다.

Fig. 6은 각 차량이 20 kph의 상대속도로 충돌하는 사고 시나리오에서 충돌 후 연결기와 차체에 발생하는 충격력을 나타낸 것인데, 연결기의 최대 충격력 한계인 1,000 kN(전체모델)을 초과한다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 연결기는 1,000 kN 이상의 충격력에서 파손되며, 연결기 파손 이후의 충격력은 모두 차체에 흡수된다. 차체에 발생하는 충격력의 수준은 약 1,900 kN(전체모델) 정

도이며, 차량의 전두부가 35 mm정도 압괴된다. Fig. 7-Fig. 9는 충돌 후 전두부 변형과 연결기 취부에 발생하는 최대 응력을 나타낸 것이다. 차체 전두부에는 충돌에 의하여 35mm 정도의 압괴가 발생한다. 그러나 전방 연결기는 충돌에 의하여 탈착되므로 취부에서 발생되는 최대응력이 약 14.0 kgf/mm^2 정도로 낮은 수준을 유지하고 있다. 전방차량과 후방차량을 연결하는 연결기의 취부에서 발생하는 최대 응력은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 항복수준에 가까운 22.0 kgf/mm^{2}이다.

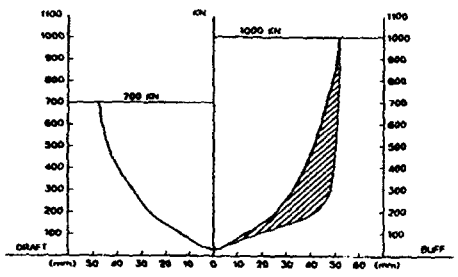

Fig. 2 Cushion behavior of the draftgear

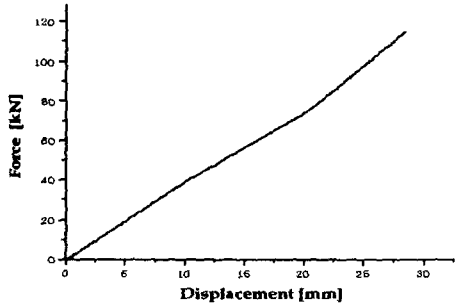

Fig. 3 Coupler force at 5 kph (half model)

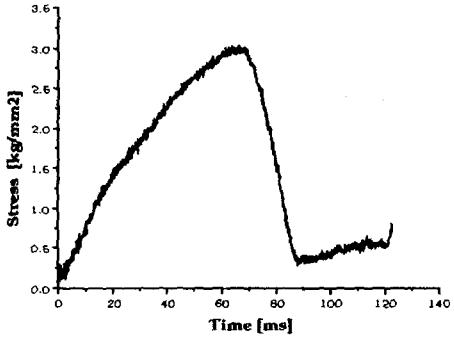

Fig. 4 Maximum stress at 5 kph

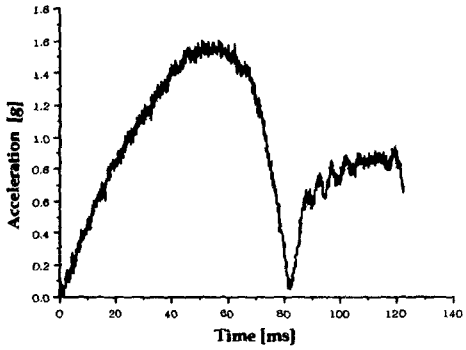

Fig. 5 Acceleration of front train at 5 kph

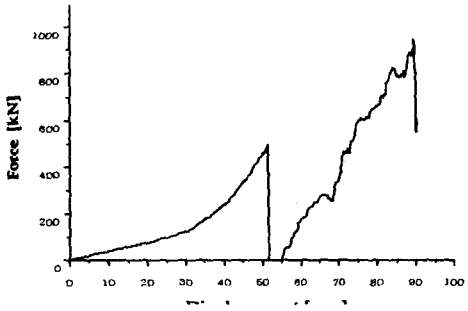

Fig. 6 Impact force at 20 kph (half model)

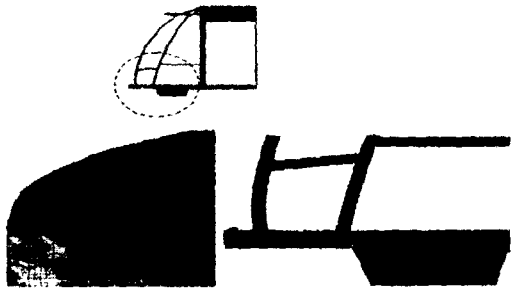

Fig. 7 Deformed shape of the front end

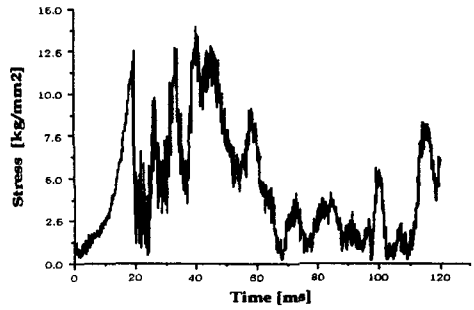

Fig. 8 Max. stress of the front coupler bracket

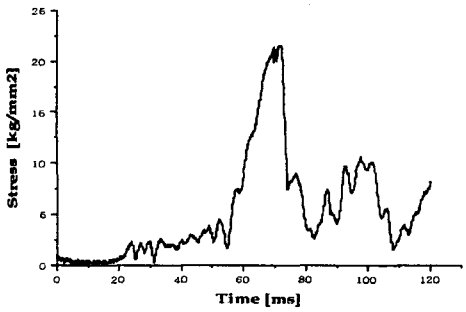

Fig. 9 Max. stress at the middle coupler bracket

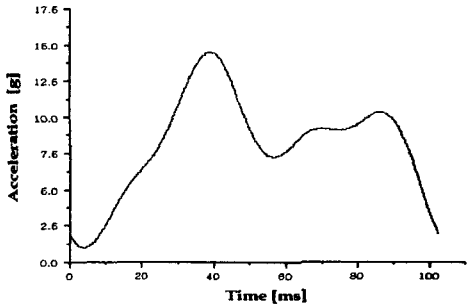

Fig. 10 Acceleration of the front car (20kph)

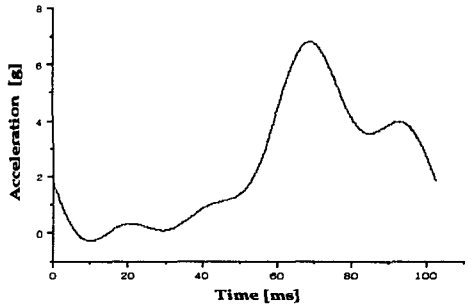

Fig. 11 Acceleration of the rear car (20kph)

Fig. 10과 Fig. 11은 각 차량 중앙부의 충돌 가속도를 40 Hz로 필터링하여 나타낸 것인데, 선두차량은 승객의 충돌안전 기준인 5~8 g 수준을 상당히 초과하는 약 13.5 g 정도의 충돌가속도를 나타낸다. 그러나 후방연결 차량의 충돌 가속도는 비교적 낮은 수준인 6.8 g 정도로 승객이 부상할 가능성은 크지 않다. 따라서, 20 kph 의 2량 편성 충돌 해석 조건에서는 제 22조의 충돌안전도 규정을 만족시키지만 승객이 받는 충격가속도 면에서는 개선되어야 한다. 승객이 받는 충격가속도를 저감시키려면 mechanical fuse와 같은 보조적인 충격에너지 흡수장치가 필요하다[2].

3. MC-car 단면의 압괴 특성 해석

전체 차량편성에 대하여 3차원 쉘해석을 수행하려면 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서 선두차량만 3차원 쉘요소로 모델링하고, 나머지 차량은 주요 단면의 압괴 특성을 해석하여 1차원 bar 요소로 모델링하는 하이브리드 모델을 사용하는 것이 일반적이다. MC-car는 운전실부, 중앙 객실부 그리고 후방 차체부로 구성되어 있는데, Fig. 12-Fig. 17과 같이 각 부분의 압괴 특성과 변형형상을 해석하였다. 압괴특성을 얻기위한 충돌해석에서는 고정벽과 30 kph로 충돌하는 조건을 사용하였다. 운전실부의 평균압괴 하중은 약 1,500 kN(1/2모델), 승객 탑승부의 평균압괴 하중은 약 2,500 kN(1/2모델), 후방 차체부의 평균압괴 하중은 3,350 kN(1/2모델) 이다.

4. 3차원 쉘 모델 및 1차원 모델의 하이브리드 모델 충돌해석

3절에서 구한 MC-car의 단면 압괴 특성을 이용하여 Fig. 18과 같이 3차원 쉘 모델 후방에 BAR 요소로 된 1차원 모델을 연결한다. 본 하이브리드 모델은 정지한 차량과 36kph와 60kph로 충돌하는 2가지 시나리오에 대하여 해석이 이루어지며, 각 충돌 사고 시나리오에 대하여 압괴형상과 승객의 충돌 가속도를 분석한다. Fig. 19는 36 kph 충돌시 연결기와 차체에 발생하는 충격력과 압괴량의 변화를 나타낸 그림이다. 차체에 발생하는 충격력은 전체 모델 기준으로 최대 2,500 kN 정도이다. 36 kph 충돌에서는 연결기의 충격 흡수능력이 상대적으로 큰 역할을 하지 못한다. Fig. 20은 선두차의 승객 탑승부에서 발생하는 충격 가속도의 변화를 나타내는데, 최대 23 g 정도의 높은 충격가속도가 발생하여 열차의 충돌안전도 설계에서 권장하는 5 g ~ 8 g를 상당히 초과하므로 승객이 내부 구조물과 2차로 충돌하는 상해치가 문제가 발생될 수 있다. 승객의 상해치는 dummy를 이용한 해석으로 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 본 해석에서는 mechanical fuse와 같이 연결기 외에 부가적인 에너지 흡수장치를 부착하여 차량의 충격 가속도를 완화하는 것을 추천한다.

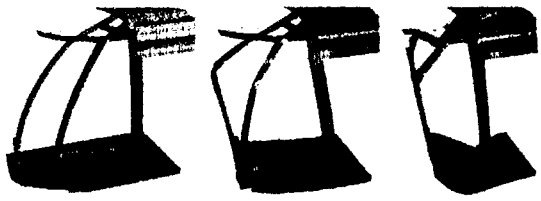

Fig. 12 Deformed shape of the front section

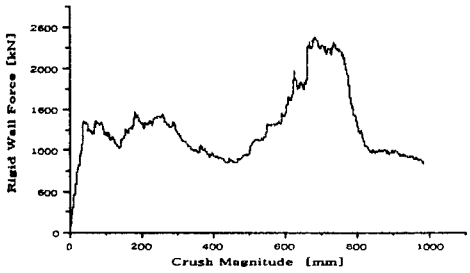

Fig. 13 Crush behavior of the front section

Fig. 14 Deformed shape of the center section

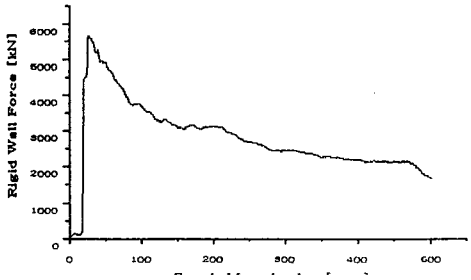

Fig. 15 Crush behavior of the center section

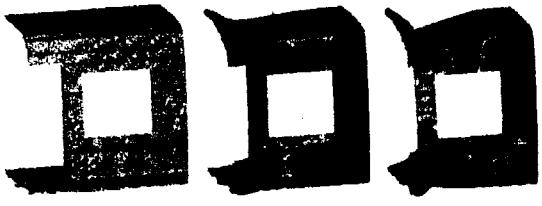

Fig. 16 Deformed shape of the rear section

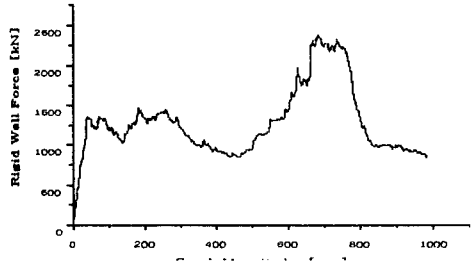

Fig. 17 Crush behavior of the rear section

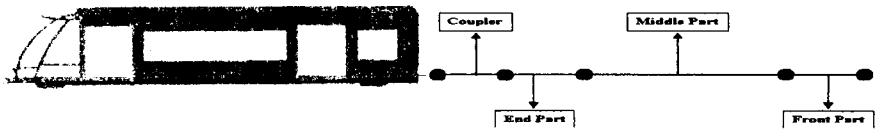

Fig. 18 Hybrid crash model of MC-car

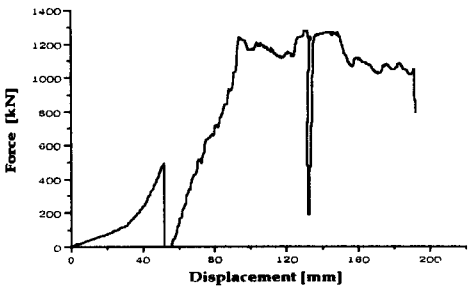

Fig. 19 Impact force at 36 kph (half model)

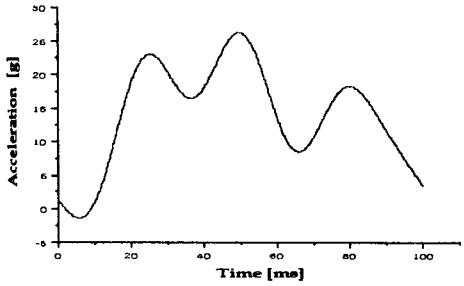

Fig. 20 Acceleration of the front car (36kph)

Fig. 21은 60 kph의 충돌조건에서 연결기와 차체에 발생하는 충격력과 압괴량의 변화를 나타낸 것이다. 충돌후 차체에 발생되는 충격력은 전체 모델에 대하여 최대 2,800 kN 정도이다. Fig. 22는 충돌시 객실 중앙부에 발생하는 충격가속도의 변화를 나타낸 것이다. 전방차량에 약 32.5 g 정도의 충격가속도가 발생하며, 이것은 승객에게 치명적인 상해를 입힐 수도 있는 수준이라 평가된다. 그러나 이 경우에도 36 kph 충돌 사고의 경우와 마찬가지로 mechanical fuse를 채용하면 승객의 상해치를 상당히 저감시킬 수 있을 것이다.

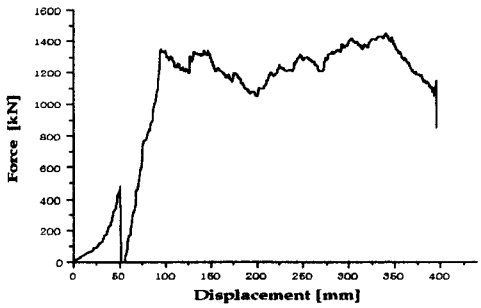

Fig. 21 Impact force at 60 kph (half model)

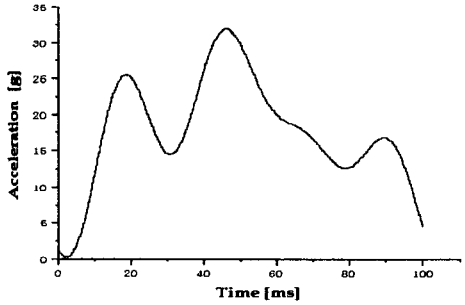

Fig. 22 Acceleration of the front car (60kph)

5. 결 론

본 연구를 통하여 경전철의 연결 및 충돌안전도 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 21조의 승객보호 검토 : 도출된 설계는 승객의 생존공간 확보측면에서 만족스러웠으나 충격가속도면에서는 다소 미흡하다고 판단된다. 이것을 개선하려면 mechanical fuse를 장착하는 방법이 있다.
- 22조 충돌 변형부 제한조건 검토 : 충돌해석 결과가 매우 만족스러웠다.
- 23조 차체의 충돌안전성 검토: 유진기공에서 개발한 도너스 타입의 연결기를 채용하면 5 kph 연결에서 에너지 흡수 능력이 충분하고 도시철도 표준화 규정 제 23조도 만족시킨다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원에서 수행하는 '경량전철기술개발사업'의 일부분으로 이루어졌으며, 차체개발연구를 담당하는 (주)우진산전 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한석윤 외(2000. 5.), 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서, 경량전철 차체 개념설계 및 구조해석, 한국철도기술연구원
2. J. H. Lewis, "Development of crashworthy vehicle structures for railways ", WCCR '94, pp. 893-900.
3. H. Rocholl(1985), "Energy absorption in automatic couplings and draw gear ", IMechE
4. ESI(1999), "PAM-System Manual"
5. 송달호, 구정서 외(2000, 10), 고속전철기반기술 개발 연구, 한국기계연구원 보고서
6. 구정서, 노규석, 박성하(1999. 12), 도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구, 한국기계연구원 보고서