

고무차륜 경량전철의 충돌안전도 연구

A Study on Crashworthiness of Rubber Tired AGT

구정서¹, 한형석², 조현직¹

Jeong-Seo Koo, Hyung-Suk Han and Hyun-Jik Cho

Keywords : Crashworthiness(충돌안전도), Collision accidents(충돌사고), Safety(안전성)**Abstract**

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

1. 서 론

경전철은 철도 선진국들에서 도시내 및 대도시 근교의 위성도시를 연결하는 교통수단으로 많이 이용되고 있다. 경전철은 도로교통 수단에 비하여 정시성, 신속성, 환경친화성 등이 우수하고, 완전무인으로 운행되므로 기존의 지하철, 국철 등에 비하여 운영비뿐만 아니라 건설비 또한 저렴하다는 장점을 가지기 때문이다. 현재 국내에서도 여러 지자체에서 도입을 검토하고 있어 국산 경전철의 개발 및 제작이 이루어지고 있다. 철도차량은 도로차량에 비하여 안전을 확보하기 위하여 설계 및 제작에 있어서 국제규정을 엄격히 만족하여야 한다. 유럽을 비롯한 국외에서는 충돌안전도에 대한 규정을 적용할 것을 강제화 하고있어 관련 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 국내에서도 경전철의 적용을 위하여 관련된 표준화 사양을 제정하여 적용하고 있다[3]. 그러나 국내에서는 G7 고속전철기술개발사

업을 통하여 충돌안전도에 대한 연구가 본격적으로 수행되었고 국내용 경전철의 개발이 없었기 때문에 경전철의 충돌안전도에 대한 연구가 이루어지지 않았다.[4-7] 본 연구는 (주)우진산전에서 개발중인 고무차륜형식 경전철의 차체가 '도시철도차량 안전기준에 관한 규칙' 중 연결 및 충돌안전도와 관련된 제21조-23조의 내용을 만족시키는지 해석적으로 평가하고 설계 개선방안을 제안하기 위하여 수행되었다.

위에서 언급한 '도시철도차량 안전기준에 관한 규칙' 중 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 압괴 변형이 발생하기 전에 차체의 끝단과 볼스

1. 정회원, 한국철도기술연구원

2. 정회원, 한국기체연구원

터 사이에서 압괴 변형에 의해 충돌에너지가 흡수될 수 있는 구조이어야 한다. 다만, 볼스터 방식이 아닌 도시철도 차량은 그러하지 아니하다.

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

본 논문에서는 '도시철도차량 안전기준에 관한 규칙' 제22조, 23조를 평가하기 위하여 2량 1편성에 대하여 3차원 셀모델의 유한요소 충돌해석을 수행하였다. 또 동규칙 제 21조의 승객안전도를 평가하기 위하여 선두 차량에 대해서는 3차원 셀 모델을 사용하고 후방 차량은 1차원 스프링 및 막대 요소로 모델링된 하이브리드 모델을 사용하였다. 충돌분야에서 널리 사용되고 있는 상용 S/W인 PAMCRASH를 이용하여 정지한 동일 차량과 36, 60 kph의 속도로 충돌하는 사고에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과를 이용하여 동규칙 제 21조-23조의 만족 여부에 대한 평가와 설계 개선 방안을 제시한다.

2. MC-car 2량 편성의 충돌 해석

일반적으로 철도차량의 충돌 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 타당하다. 본 해석에서는 2량 편성 3차원 셀 모델을 이용하여 '도시철도차량 안전기준에 관한 규칙' 제 22조의 충돌 안전도와 제 23조의 연결 안전도 분석에 적용하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 유한요소 모델인데, 크기가 30-40 mm 정도인 175,846 개의 셀 요소와 3개의 BAR 요소로 구성되어 있다. 여기서 연결기는 (주)유진기공에서 개발한 도너스 타입의 완충기가 장착된 연결기를 적용하였다. Fig. 2는 도너스 타입 완충기의 충격 특성을 나타내는데, 비금속 부분은 충격 에너지를 흡수하는 고무의 히스테리시스 특성을 나타낸 것이다.

'도시철도차량안전기준에 관한 규칙' 23조의 연결 안



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

전도와 22조의 충돌 안전도를 평가하기 위하여 정지한 동일 차량과 5 kph, 20 kph의 속도로 충돌하는 조건으로 해석을 수행하였다. Fig. 3은 5 kph에서 충돌 후 연결기에 발생하는 충격력을 나타낸 그래프인데, Fig. 2에 나타낸 도너스 타입 완충기의 충격 특성 곡선과 비교하면 충격 에너지 흡수 능력 범위 내에서 동작됨을 알 수 있다. 따라서 이 완충기의 에너지 흡수 능력은 '도시철도차량안전기준에 관한 규칙' 제 23조를 충분히 만족시키고 동시에 차체에는 손상이 발생하지 않는다. 최대 충격력은 220 kN 정도이며 연결기 브라켓트에 발생하는 최대응력(Fig. 4)도 3.0 kgf/mm² 정도로 항복응력 이하이다. Fig. 5는 선두 차량중양부의 충돌 가속도를 나타낸 것인데, 최대 충돌 가속도가 1.6 g 정도인데, 이것은 정상상태에서의 제한 충격가속도인 3g 이하이므로 충돌 안전도 측면에서는 문제가 없다고 판단된다. 결론적으로 (주)유진기공의 도너스 타입의 완충기가 장착된 연결기와 우진산전의 경량전철 차체는 5 kph의 2량 편성 충돌 해석 조건에서 제 23조의 연결 안전도를 만족시키는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 차량이 20 kph의 상대속도로 충돌하는 사고 시나리오에서 충돌 후 연결기와 차체에 발생하는 충격력을 나타낸 것인데, 연결기의 최대 충격력 한계인 1,000 kN을 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 정도이며, 차량의 전두부가 35 mm정도 압괴된다. Fig. 7은 충돌 후 변형형상을 나타낸 것인데 선두 끝단에서 35 mm 정도의 미미한 압괴가 발생한다. 또 Fig. 8, 9는 충돌 후 전두부 변형과 연결기 브라켓트에 발생하는 최대 응력을 나타낸 것이다. 전방 연결기는 충돌에 의하여 탈착되므로 브라켓트에서 발생하는 최대 응력이 약 14.0 kgf/mm² 정도로 낮은 수준을 유지하고 있다. 그러나 전방차량과 후방차량을 연결하는 연결기의 브라켓트에서 발생하는 최대 응력은 Fig. 9에 나타난 바와

같이 항복수준에 가까운 22.0 kgf/mm²이다.

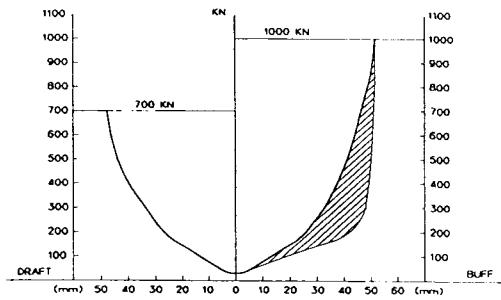


Fig. 2 Cushion behavior of the draftgear

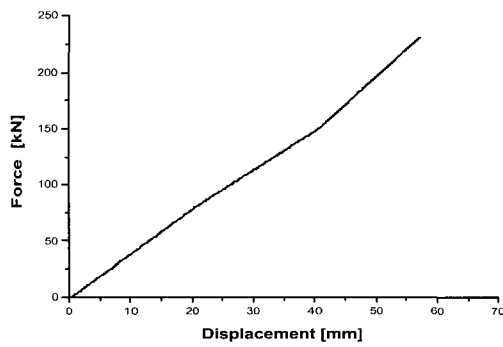


Fig. 3 Impact force of coupler (V=5 kph)

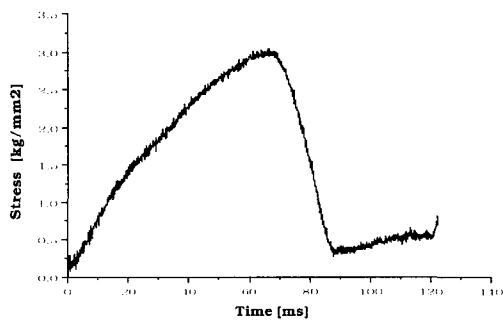


Fig. 4 Max. stress at the front coupler bracket (V = 5 kph)

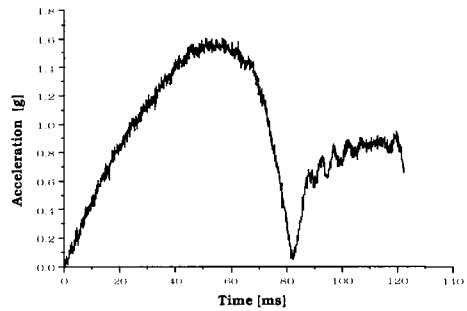


Fig. 5 Collision acceleration of the front train (V = 5 kph)

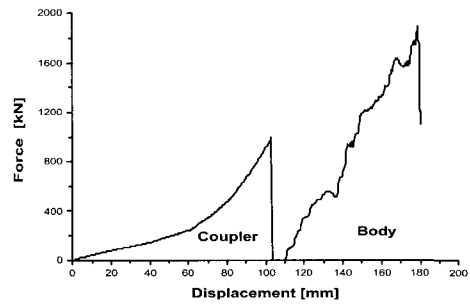


Fig. 6 Impact force of the front structure (V = 20 kph)

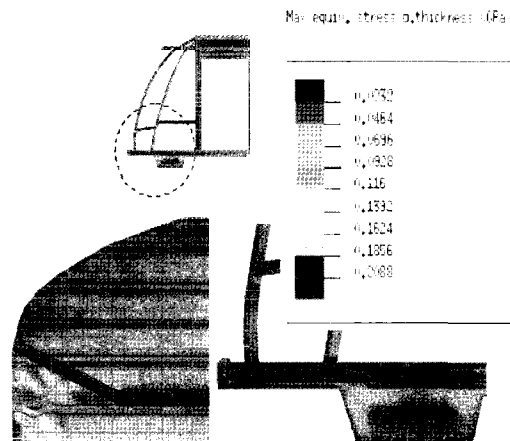


Fig. 7 Deformed shape of the front end

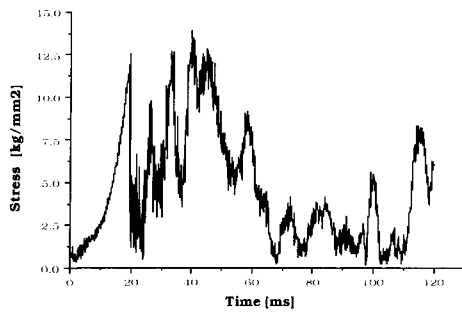


Fig. 8 Max. stress at the front coupler bracket

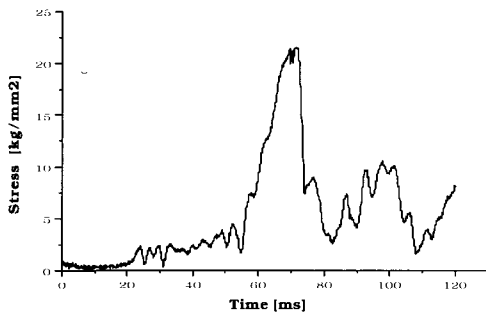


Fig. 9 Max. stress at the middle coupler bracket

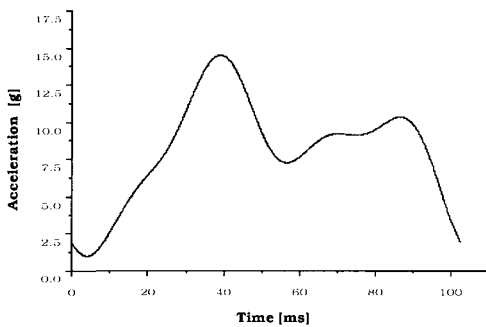


Fig. 10 Acceleration of the front car (20kph)

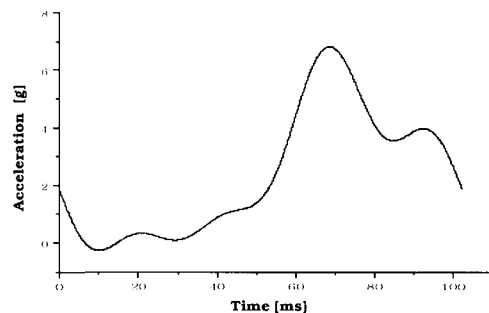


Fig. 11 Acceleration of the rear car (20kph)

Fig. 10과 Fig. 11은 각 차량 중앙부의 충돌 가속도를 40 Hz로 필터링하여 나타낸 것인데, 선두차량은 승객의 충돌안전 기준[7]인 5~8 g 수준을 상당히 초과하는 약 13.5 g 정도의 충돌가속도를 나타낸다. 그러나 후방 연결 차량의 충돌 가속도는 비교적 낮은 수준인 6.8 g 정도로 승객이 부상할 가능성은 크지 않다. 따라서, 20 kph의 2량 편성 충돌 해석 조건에서는 제 22조의 충돌안전도 규정을 만족시키지만 승객이 받는 충격가속도 면에서는 개선되어야 한다. 승객이 받는 충격 가속도를 저감시키려면 기계적 퓨즈(mechanical fuse)와 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 얻기 위한 충돌해석에서는 고정벽과 30 kph로 충돌하는 조건(본 연구의 60 kph로 정지한 동일한 차량과 충돌하는 조건이며, 저속 충돌인 경우 변형을 속도 효과가 크지 않음을 고려)을 사용하였다[8]. 운전실부의 평균압괴 하중은 약 3,000 kN, 승객 탑승부의 평균압괴 하중은 약 5,000 kN, 후방 차체부의 평균압괴 하중은 6,700 kN 이다.

4. 3차원 셸 모델 및 1차원 모델의 하이브리드 모델 충돌해석

3절에서 구한 MC-car의 단면 압괴 특성을 이용하여 Fig. 18과 같이 3차원 셸 모델 후방에 bar 요소로 된 1차원 모델을 연결한다. 본 하이브리드 모델은 정지한 차량과 36 kph(EU의 충돌 시나리오)와 60 kph(영국의 충돌시나리오)로 충돌하는 2가지 시나리오에 대하여 해석이 이루어지며, 각 충돌 사고 시나리오에 대하여 압괴 형상과 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. 여기서 130mm의 압괴가 발생하였을 때 발생하는 급격한 충격하중의 변동은 선두차가 고정벽에서 되튀기는 현상이 발생하는 도중에 후위차량이 다시 충격을 가해주기 때문이다. 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 상해치에 문제가 발생할 수 있다. 승객의 상해치는 dummy를 이용한 해석으로 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 본 해석에서는 기계식 퓨즈(fuse)[9, 10]와 같이 연결기의 완충기 외에 추가적인 에너지 흡수장치를 부착하여 차량의 충격 가속도를 완화하는 것을 추천한다.

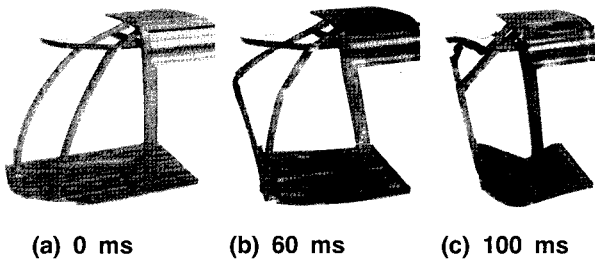


Fig. 12 Deformed shape of the front section

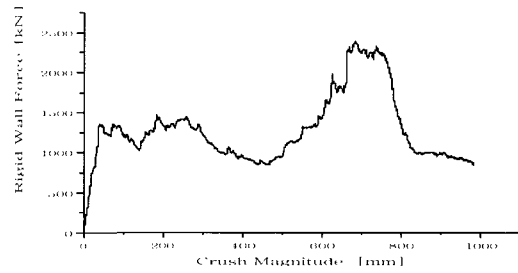
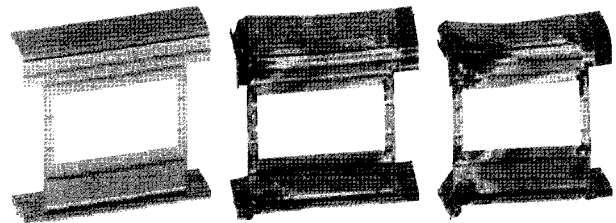


Fig. 13 Crush behavior of the front section



(a) 0 ms (b) 60 ms (c) 100 ms

Fig. 14 Deformed shape of the center section

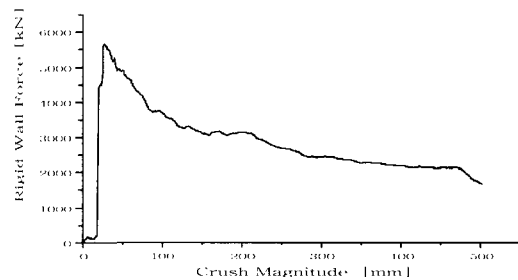
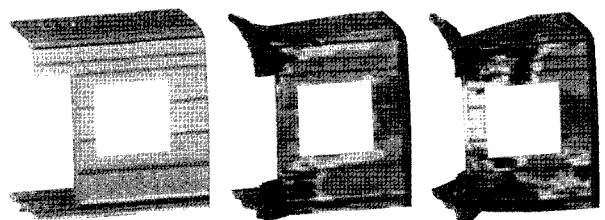


Fig. 15 Crush behavior of the center section



(a) 0 ms (b) 60 ms (c) 100 ms

Fig. 16 Deformed shape of the rear section

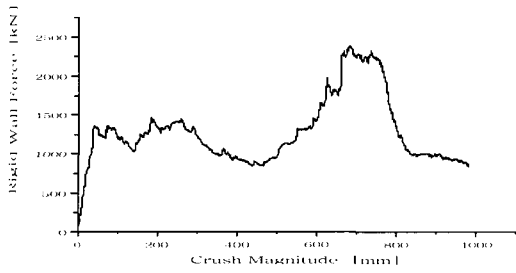


Fig. 17 Crush behavior of the rear section

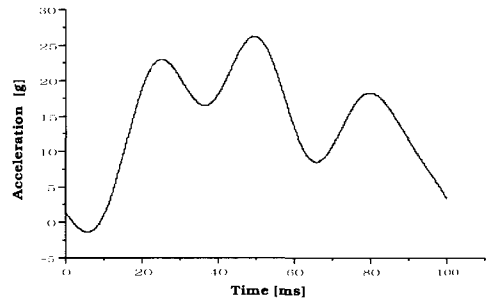


Fig. 20 Acceleration of the front car (36kph)

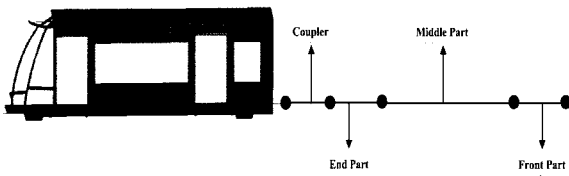


Fig. 18 Hybrid crash model of MC-car

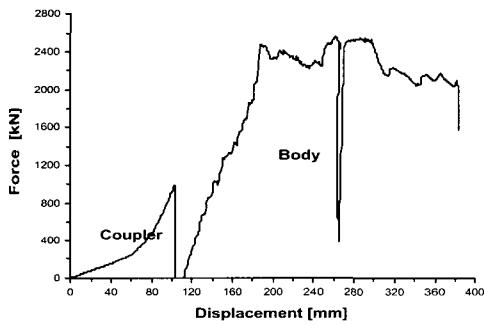


Fig. 19 Impact force of the front structure (V = 36 kph)

Fig. 21은 60 kph의 충돌조건에서 연결기와 차체에 발생하는 충격력과 압괴량의 변화를 나타낸 것이다. 충돌후 차체에 발생하는 충격력은 전체 모델에 대하여 최대 2,800 kN 정도이다. 60 kph 충돌조건에서는 130 mm 정도의 압괴변위에서 충격력에 급격한 변화가 일어나지 않는데, 이것은 고정벽에 대한 차량의 속도가 빠름으로써 전두차가 리바운딩 되기 전에 후위차량이 전두차량에 충돌하기 때문이다. 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 기계식 퓨즈를 채용하면 승객의 상해치를 상당히 저감시킬 수 있을 것이다.

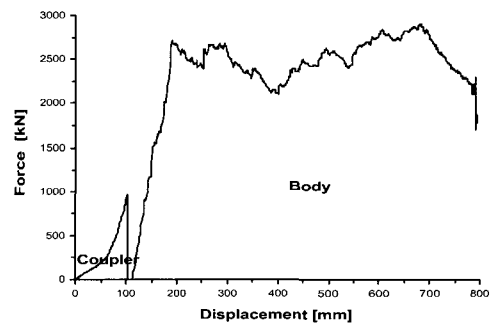


Fig. 21 Impact force of the front structure (V = 60 kph)

참 고 문 헌

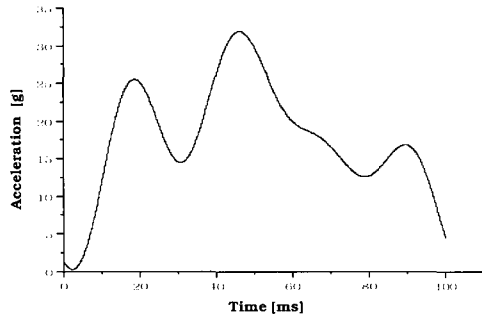


Fig. 22 Collision acceleration of the front car (V = 60kph)

5. 결 론

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

- 21조의 승객보호 검토 : 도출된 설계는 승객의 생존공간 확보측면에서 만족스러웠으나 충격가 속도면에서는 다소 미흡하다고 판단된다. 이것을 개선하려면 기계식 퓨즈를 장착하는 방법이 있다.
- 22조 충돌 변형부 제한조건 검토 : 충돌해석 결과에 의하면 상대속도 20 kph 충돌에서 전두부의 끝 부분만 35mm 정도의 압괴가 발생하였으므로 22조의 조건을 만족시킨다.
- 23조 차체의 충돌안전성 검토: (주)유진기공에서 개발한 도너스 타입의 완충기가 장착된 연결기를 채용하면 5 kph 연결에서 에너지 흡수 능력이 충분하고 ‘도시철도차량 안전기준에 관한 규칙’ 제 23조도 만족시킨다.

감사의 글

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

1. J. H. Lewis, "Development of crashworthy vehicle structures for railways", IMechE, Vol. 207, pp. 1-16, 1993
2. H. Rocholl(1985), "Energy absorption in automatic couplings and draw gear", IMechE, C288, pp. 137-145, 1985
3. 한석윤 외(2000. 5.), 경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서, 경량전철 차체 개념설계 및 구조해석, 한국철도기술연구원
4. 구정서, 송달호, "TGV-K 전체 차량의 충돌안전도 해석 연구", 한국철도학회 논문집, 제 1권 1호, pp. 1-9, 1998.
5. 조현직, 구정서, 김동성, 윤영한, "1차원 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가", 2001 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.217-222, 2001.
6. 김현용, 김상범, 박제승, 한동철, "고속전철 승객 탑승부의 충돌 안전도 평가에 관한 연구", 2001 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.198-204, 2001.
7. 구정서, 조현직, 윤영한, 김동성, "1차원 동역학 모델을 이용한 한국형 고속전철의 충돌안전도 평가", 한국철도학회 논문집, 제 4권 3호, pp.94-101, 2001.
8. N. John and T. Wierzbicki, Structural crashworthiness and failure, 1993
9. 구정서, 노규석, 박성하, "도시철도차량 충돌안전기준 제정에 관한 연구", 연구결과보고서, 한국철도기술연구원, 1999. 12
10. C. Oyan, "Dynamic simulation of Taipei EMU train", Vehicle System Dynamics, Vol. 30, pp, 143-167, 1998.