



단자유도계를 이용한 충격흡수시설의 설계법 개발

Study on the Design Method Development of Crash Cushion Using Single Degree of Freedom

주재웅* 금기정** 장대영*** 손승녀****
Joo, Jae Woong Kum, Ki Jung Jang, Dae Young Son, Seung Neo

Abstract

The most important thing for driver's safety on the road is equipment of crash cushion as a vehicle protection safety facility. But development of crash cushion is defective because there's no rational and reality way of design. And also without an alternative plan, it rely on crash test hereby it suffers a great economic loss and wastes time.

This study that uses data of cash test proves the suitability of single degree of freedom which considers the safety of passengers about three-dimensional complicated Crash Analysis. As the study analyzes the conduct of crash cushion, it want to develop the effective method of design on Single Degree of Freedom Crash Cushion. And it presents the way of crash cushion design through making a crash analysis model with single degree of freedom. To verify the validness of the crash cushion plan, with single degree of freedom plan, we make the level CC2 crash cushion and execute the crash test. A performance test brings satisfied result and a plan of single degree of freedom crash cushion is proven as an one of the way to be a good system which can design crash cushion.

Keywords : *single degree of freedom, crash cushion, impact acceleration, crush distance, crash test*

요 지

도로를 이용하는 운전자들의 안전을 위해서 없어서는 안될 차량방호안전시설이 충격흡수시설이다. 그러나 충격흡수시설의 합리적이고 현실적인 설계방법이 미비한 상태임으로 대안없이 충돌시험에만 의존하고 있고 이것으로 인해 시간적, 물리적 손실이 큰 실정이다. 본 연구에서는 실차 충돌시험 데이터를 이용하여 삼차원의 복잡한 충돌거동에 대해 탑승자의 안전을 고려한 단자유도계 적용의 적합성을 증명하고 충격흡수시설의 거동을 분석함으로써 효과적인 단자유도계 충격흡수시설 설계법을 개발하고자 했다. 그리하여 단자유도계를 이용한 충돌해석 모델을 정립하고 충격흡수시설 설계법을 제시하였다. 충격흡수시설 설계법의 유효성을 검증하기 위해 단자유도계 설계법으로 CC2등급 충격흡수시설을 설계 제작하여 실차 충돌시험을 실시하였다. 성능시험 결과, 매우 만족스러운 결과가 도출되었고 이로써 단자유도계 충격흡수시설 설계법은 충격흡수시설을 설계하는데 있어 유용한 방법중의 하나임이 증명되었다.

핵심용어 : 단자유도계, 충격흡수시설, 충돌가속도, 유효변형거리, 충돌시험

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 도로시험팀 전임연구원

** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수

*** 비회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 도로시험팀 연구원

**** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 박사과정

1. 서론

1.1 연구배경

충격흡수시설이란 도로를 주행하는 차량이 차로를 벗어나 도로의 구조물 등과 직접 충돌하기 전에 차량의 충격에너지를 흡수하여 정지토록 하거나, 차량의 방향을 유도하여 본래의 주행차로로 복원시켜주는 도로안전시설물이다. 1960년대 후반부터 미국에서 개발되어 사용된 충격흡수시설은 1995년 국내 최초로 한국도로공사에서 개발되어 사용된 이후 국내에서 여러 종류의 다양한 충격흡수시설이 개발되었다. 현재 충격흡수시설은 차량의 충돌이 예상되는 교각, 교대, 연결로 출구 분기점, 고속도로 틀게이트, 터널 및 지하차도 입구 등에 설치되고 있다. 특히 충격흡수시설은 대형충돌사고의 가능성이 크고 교통량이 많으며 자동차가 고속으로 주행하는 도로에 사용하면 매우 효과적인 것으로 알려져 있다.

국내 충격흡수시설의 설치기준인 “도로안전시설 설치 및 관리지침(차량방호안전시설편, 2001, 건설교통부)”에 의하면 현장에 설치되는 충격흡수시설의 경우, 실차 충돌시험을 통한 성능평가기준에 만족한 제품만을 설치하도록 규정하고 있다. 따라서 충격흡수시설 개발을 위해서는 최종적으로 실차 충돌시험을 통한 성능평가를 받아야만 한다.

하지만 탑승자의 안전을 고려한 충격흡수시설의 합리적이고 현실적인 설계방법이 미비한 상태임으로 대안없이 충돌시험에만 의존하고 있고 이것으로 인해 시간적, 물질적 손실이 큰 실정이다. 최근에는 다양하고 정밀한 수치해석 프로그램이 사용되고 있지만 일반적으로 충격흡수시설의 구조가 복잡할 뿐만 아니라 차량의 구조 또한 모델링하기가 쉽지 않아 많은 시간과 비용이 소요되는데 반해 신뢰도는 높지 않다. 따라서 충격흡수시설의 충돌거동을 분석하고 이를 바탕으로 체계적인 설계법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

1.2 연구목적

현재 충격흡수시설은 도로를 이용하는 운전자들의 안전을 위해서는 없어서는 안되는 필수 도로안전시설물이 되었다. 모든 도로에 충격흡수시설을 설치하고 관리하는데에는 많은 비용이 소요된다. 특히 충격흡수시설은 교통사고 예방효과가 뛰어나지만 대부분의 시설이 고가임으로 도로관리자들은 설치하기를 꺼리는 경우가 많다.

충격흡수시설의 가격을 낮추기 위해서는 개발단계에서부터 시설물의 연구개발비가 적게 소요되어야 한다. 연구개발비의 많은 부분을 성능시험비가 차지한다. 충격흡수시설의 개발에 있어 성능시험비를 줄이기 위해 본 연구에서는 단자유도계를 이용한 충격흡수시설 설계법을 개발하였다. 이 설계법은 충격흡수시설 개발 시 성능시험의 횟수를 최소화하여 연구개발비의 절약을 가져올 뿐만아니라 손쉽게도 편리하게 사용가능해 개발시간을 크게 단축시킬 수 있다.

충격흡수시설은 탑승자의 안전을 확보하는 범위에서 충돌차량의 충격에너지를 분산하여 효과적으로 흡수하는 것이 중요하다. 따라서 충격흡수시설은 유효 변형거리(Crush Distance)를 반드시 확보하여야 하며 충돌하는 동안의 충격하중을 효과적으로 분산하여 소산시켜야 한다.

충격흡수시설의 단자유도계 설계법을 이용하여 안전한 충격흡수시설을 설계하기 위해서는 충격흡수시설에 대한 모의충돌시험을 통한 충돌데이터를 사용하기보다는 실물차량 충돌시험의 충돌데이터를 사용해야 한다. 본 연구에서는 개발 완료된 CC1등급 충격흡수시설에 대한 충돌시험데이터를 단자유도계 설계법에 적용하여 CC2 & CC3등급의 충격흡수시설을 설계하였다. 기 검증된 CC1등급 충격흡수시설의 충돌시험데이터를 사용하여 CC2, 3등급의 충격흡수시설 설계를 수행하였으므로 안전하고 신뢰성 있는 설계가 가능하였다. 단자유도계 설계법의 검증을 위해 설계법에 의해 설계된 CC2등급 충격흡수시설에 대해 충돌시험을 수행하여 성능을 평가하였다. 본 연

구에서 사용된 각 등급의 충격흡수시설은 부재 혹은 중요한 구조적 특성이 동일하고 유효변형거리를 고려한 제품의 길이만 차이가 있다.

본 연구에서는 실차 충돌시험데이터를 근거로 삼차원의 복잡한 충돌거동에 대해 탑승자의 안전을 고려한 단자유도계 적용의 적합성을 증명하고 충격흡수시설의 충돌거동을 분석함으로써 효과적인 충격흡수시설의 설계법 개발을 수행하고자 했다.

2. 이론적 배경

충격흡수시설에 차량이 충돌할 때 차량이 변형되지 않은 부분을 강체로 가정한다면 충돌 전에 차량이 가지고 있던 운동에너지는 차량 충돌 후 차량과 충격흡수시설의 손상된 부분 즉 변형된 부분에 흡수된다. 차량과 충격흡수시설의 처짐에 대한 저항력인 스프링상수가 파악된다면 차량과 충격흡수시설의 충돌을 차량의 질량 M 과 차량과 충격흡수시설의 충돌에 의해 발생하는 저항력인 스프링상수 k 를 이용하여 그림 1과 같이 단자유도 시스템으로 나타낼 수 있다.

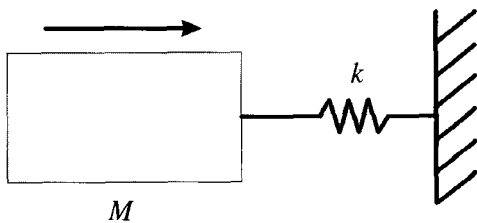


그림 1. 충격흡수시설 충돌의 단자유도 시스템 모형도

충돌 시 차량과 충격흡수시설의 충돌특성은 비선형이고, 그 특성은 충돌시 저항력과 차량(구조물) 변위 사이의 관계를 그래프로 나타냄으로써 쉽게 알 수 있다. 저항력은 차량이 변형되지 않은 부위에서 계측한 차량의 가속도와 차량의 질량을 곱함으로써 구할 수 있고 충돌중에 생기는 변위의 시간 이력은 계측된 가속도를 시간에 대하여 두 번 적분함으로써 구할 수 있다.

충돌차량의 질량을 M , 차량의 변형되지 않은 부위

에서 측정된 가속도를 a , 충돌 중 타이어의 마찰과 같은 외부힘을 0이라 하면 다음과 같은 운동방정식이 성립된다.

$$f = Ma = 0 \quad (1)$$

식 1은 외부힘이 0일 때 어떤 모드의 운동에도 적용되고 강제로 나타낼 수 있는 파손되지 않은 차체의 속도 및 변위는 다음과 같다.

$$v = v_0 + \int_0^t a \, dt \quad (2)$$

$$x = v_0 t + \int_0^t \int_0^t a \, dt \, dt' \quad (3)$$

이때 변위 x 는 차체와 구조물의 변위, v_0 는 초기 속도, t, t' 는 가속도와 속도에 대한 시간을 나타내며, 차량 변위를 무시할 경우 변위 x 는 구조물의 변위를 나타낸다. 위의 절차를 시험치 혹은 시뮬레이션 결과치에 적용하여 단위질량당 저항력인 가속도와 변위 (a vs. x)의 그래프를 그릴 수 있다.

R. I. Emori의 연구결과에 의하면, 차량과 강체벽의 충돌과정에서 생기는 저항력과 변위 사이의 관계가 여러 가지 모드의 복잡한 진동 때문에 심한 굴곡을 보이지만 일정한 기울기의 선형관계로 근사화시킬 수 있음이 밝혀졌다. 즉, Emori는 충돌시험 데이터를 분석하여 단위질량당 한방향 스프링상수 (k/M)가 충돌 속도와는 무관하게 일정한 값을 갖는다는 결론에 도달하였다. 즉, 계측된 가속도와 가속도로부터 구한 변위의 비 a/x 가 일정함을 확인한 것이다. 이렇게 근사화시킨 가속도 - 변위 관계를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.(Emori, 1968)

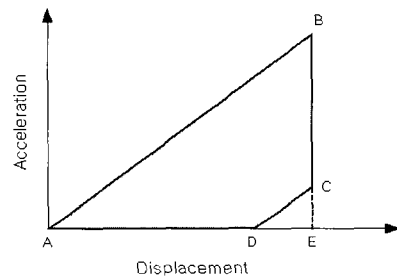


그림 2. 단자유도계의 이상화된 스프링

여기서 충돌차량의 탄성회복을 표시하는 부분이 그림의 CD부분이다. 실용적인 목적으로 단자유도계 모델 스프링은 그림의 A-B-E 경로를 따르는 한방향 스프링으로 더 간략화 한다하더라도 실제 충돌차량의 반발계수가 극히 작은 수치임을 감안한다면 문제 되지는 않는다.

그림에서 색칠된 부분의 면적은 비선형 스프링이 흡수한 충돌전 차량의 단위질량당 운동에너지를 나타낸다. 차량의 충돌특성을 나타내는 스프링의 변위가 x 일 때 저항력 f 는 kx 이고 뉴우톤의 운동법칙에 의하여 $f = kx = Ma$ 로 쓸 수 있다. 이 관계로부터 $k/M = a/x$ 가 성립하기 때문에, a/x 가 일정하다는 것은 단위질량당 한방향 스프링의 스프링상수 k/M 가 일정하다고 말하는 것과 같다. 한편 단자유도계 시스템의 k/M 는 그 시스템의 고유진동수 ω 의 제곱과 같기 때문에 단자유도계로 모델된 차량의 충돌시 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.(고만기, 2003)

$$\frac{a}{x} = \frac{-\ddot{x}}{x} = \frac{k}{M} = -\omega^2 \quad (4)$$

$$M\ddot{x} = kx = 0 \quad (5)$$

여기서 초기속도를 v_0 로 하고 초기변위를 0으로 하면 변위, 속도 및 가속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{변위: } x = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t \quad (0 < \omega t \leq \frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

$$x = 0 \quad (\frac{\pi}{2} \leq \omega t)$$

$$\text{속도: } \dot{x} = v_0 \cos \omega t \quad (7)$$

$$\text{가속도: } \ddot{x} = -v_0 \omega \sin \omega t \quad (8)$$

따라서 최대변위 및 최대가속도를 다음과 같이 초기속도 v_0 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$|\ddot{x}_{\max}| = \omega v_0 \quad (9)$$

$$x_{\max} = \frac{v_0}{\omega} \quad (10)$$

차량 - 강체벽 충돌에서의 이러한 특성이 차량-충격흡수시설의 충돌에서 확인될 수 있다면 충격흡수시설 설계의 중요한 제한사항인 탑승자의 안전성을 고려한 합리적인 충격흡수시설 설계가 가능해진다.

차량 - 충격흡수시설의 충돌에서 예측된 가속도와 그 가속도로부터 구한 변위의 비 a/x 가 충돌속도에 관계없이 일정하다는 것이 확인되면, 어떤 특정한 충격흡수시설에 차량이 충돌할 때, 충격흡수시설의 최대 변형량 및 차량이 받는 최대가속도를 충돌속도의 함수로 나타냄으로써 충돌속도별로 구조물의 최대변형량과 차량이 받는 최대가속도를 시스템강성 $k/M = a/x$ 값에 대한 스펙트럼 값으로 나타낼 수 있다. 이 스펙트럼을 이용하면 설계 제약조건인 최대변형량 및 최대가속도에 상당하는 충격흡수시설의 시스템강성 범위가 결정되기 때문에 합리적인 설계가 가능해진다. 최대변형량은 충격흡수시설의 최대변위량을 의미하고 차량의 변형량은 충격흡수시설의 변형량에 비해 매우 작으므로 무시한다. 그리고 본장의 최대가속도는 차량의 충돌방향인 X축 최대충돌가속도를 의미한다.(장대영, 2006)

3. 충격흡수시설의 성능평가 기준

세계적으로 충격흡수시설에 대한 충돌시험 조건 및 성능평가 기준은 각국의 도로여건을 고려하여 적용하고 있으며 미국의 NCHRP Report 350과 유럽연합의 European Standard(CEN)로 크게 구분되고 국내기준은 유럽의 기준을 주로 차용하여 개편한 것이며 국내의 충돌시험 조건은 그림 3과 표 1에 나타내었다.

건설교통부의 “도로안전시설 설치 및 관리지침(차량방호안전시설편, 2001)”에 의하면 국내 충격흡수시설의 평가기준으로는 탑승자 보호성능, 충격흡수시설의 거동, 충돌 후 차량의 거동으로 크게 구분되



며 그 안에서 세부적인 사항으로 나누어진다. 본 논문에서는 탑승자 보호성능을 고려하여 충격흡수시설의 충돌거동을 분석하고자 한다. 탑승자 보호성능의 평가기준으로는 탑승자 충돌속도(THIV)와 탑승자 가속도(PHD)를 평가기준으로 하며, THIV의 경우 시험 ①, ②, ③은 44km/h 이하, 시험 ④, ⑤는 33km/h 이하여야 하고 PHD의 경우 20g 이하로 규정하고 있다. (건설교통부, 2001)

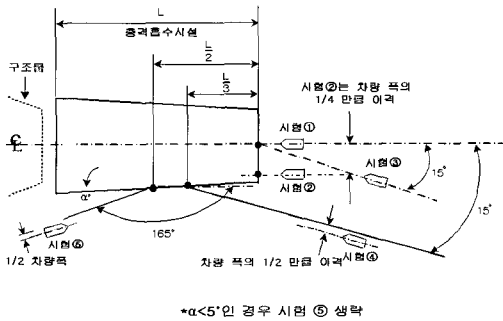


그림 3. 충돌 차량의 충돌 위치 및 충돌 방향

표 1. 충돌시험 조건

등급	충돌속도 (km/시)	차량중량 (kg)	충돌방법
CC1	60	900 1,300	시험 ① 시험 ④
CC2	80	900 1,300	시험 ①, ② 시험 ①, ③, ④, ⑤
CC3	100	900 1,300	시험 ①, ② 시험 ①, ③, ④, ⑤

4. 단자유도계를 이용한 충격흡수시설 설계

4.1 CC1등급 충격흡수시설 충돌시험

CC1등급 충격흡수시설의 성능평가를 위한 충돌시험 조건은 그림 3처럼 정면과 측면 충돌시험 2가지이다. 본 연구에서는 정면 충돌시험의 데이터만을 이용하여 설계했고 측면의 충돌데이터는 사용하지 않

았다. 그 이유는 측면 충돌시험의 경우 탑승자 안전도를 평가하기 위한 시험이기 보다는 차량과 충격흡수시설의 거동 및 비산성능 등을 평가하기 위한 시험 특성을 가지고 있으며 수차례 시험을 수행한 통계적 판단에 의하면 측면충돌의 탑승자 안전도는 매우 안전한 결과를 보였다.

다시 말해 탑승자의 안전을 고려한 충격흡수시설의 설계단계에서는 측면 충돌시험보다는 정면충돌시험에 주안점을 두고 설계해야하고 충돌시험 통계상 정면충돌시험을 통과한 충격흡수시설은 모두 측면시험을 통과하였다. 그리하여 본 연구에서는 정면 충돌 시험 데이터만을 고려해 설계했고 추후 검증 실차 충돌시험에서 이를 증명했다.

실물차량 충돌시험에 사용된 CC1등급 충격흡수시설은 주행복귀형 충격흡수시설로서 페타이어의 순간적 압축 공기압과 철재 Bar의 인발력을 이용한 것이다. 본 제품은 일반 콘크리트 포장면 위에 설치되는 충격흡수시설로서 길이/폭/높이는 2,380mm×890mm×890mm였다. 그림 4는 충격흡수시설의 전체 모습을 보여주고 있다.

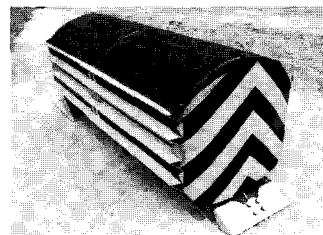
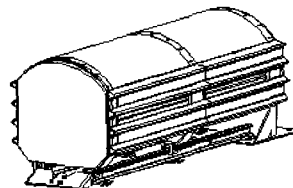
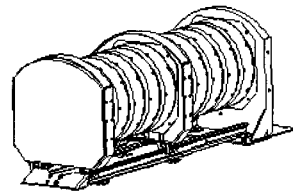


그림 4. CC1등급 충격흡수시설 전체 모습

표 2. 탑승자보호성능 결과

측정항목	기준	시험결과
탑승자 충돌속도(THIV)	≤ 44 km/h	38.0 km/h
탑승자 가속도(PHD)	≤ 20g (g = 9.8 m/s ²)	18.5 g

표 1의 시험 ①에 의해 수행된 실물차량 충돌시험의 탑승자보호성능 결과 탑승자충돌속도(THIV)와 충돌가속도(PHD)는 표 2와 같았다. 충돌 후 차량의 거동은 전복이나 전도없이 지면에 바로 서 있었고 차량이 보호구조물의 전면으로 진입하지도 않았다. 충격흡수시설의 거동 또한 시설물의 구성부재가 차량의 내부공간을 관통하지 않으며 구성부재의 비산 역시 없었다. 충돌시험의 결과는 모든 평가항목에서 만족할 만한 수준이었다. 성능이 검증된 CC1등급 충격흡수시설의 충돌시험데이터를 단자유도계 설계법에 대입하여 CC2, 3등급 충격흡수시설을 설계할 수 있었다.

그림 5와 6은 충돌시험 결과 측정된 탑승자 충돌속도(THIV)와 충돌가속도(PHD) 그래프이고 그림

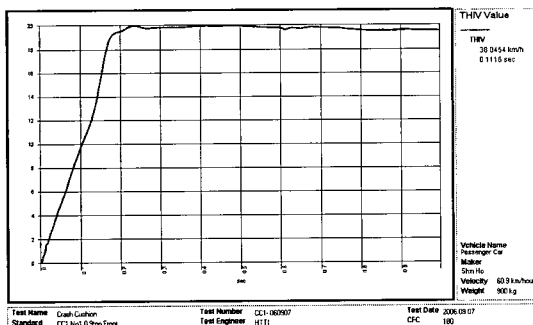


그림 5. 탑승자 충돌속도(THIV) 그래프

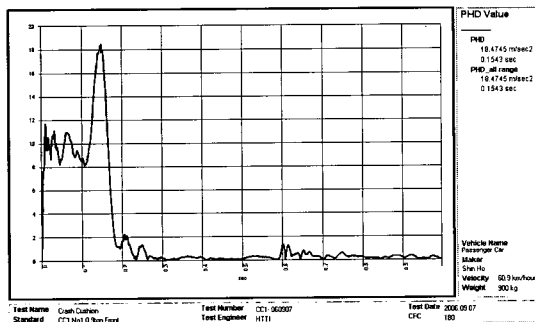


그림 6. 충돌가속도(PHD) 그래프

7과 8은 충격력과 충돌에너지에 대한 변형량 그래프와 충돌시험결과 데이터의 특성 그래프이다. 그리고 충돌시험 후 충격흡수시설의 상태는 그림 9와 같다.

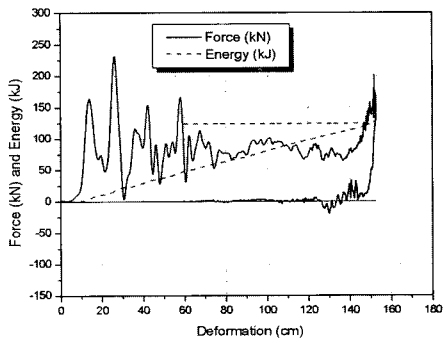


그림 7. 충격력과 충돌에너지에 대한 변형량

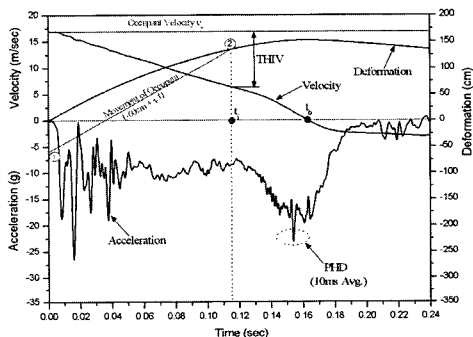


그림 8. 충돌시험결과 데이터의 특성 그래프

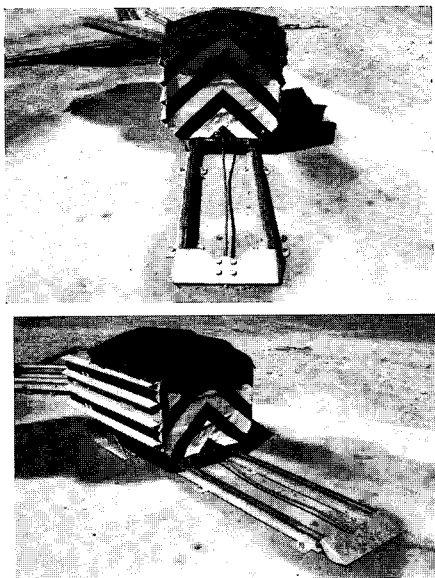


그림 9. 충돌 후 충격흡수시설의 모습



4.2 단자유도계를 이용한 CC2, 3등급 충격흡수 시설 설계

본 연구에서 제시한 설계법에는 충돌시험에 의해 검증된 CC1등급 충격흡수시설의 충돌시험 결과인 탑승자의 X축 충돌가속도가 이용되었다. 지금까지 발표된 충격흡수시설 설계법들은 시뮬레이션이나 정적시험 결과를 이용하여 신뢰성과 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있었다. 본 연구의 설계법은 실물 차량 충돌시험 데이터를 이용하여 신뢰성과 정확성을 향상시켰으나 CC1등급 충격흡수시설에 대한 충돌시험이 선행되어야 하며 설계되는 CC2, 3등급의 충격흡수시설의 구조와 물성치가 CC1등급과 같아야 하는 단서조항이 있다. 그래도 본 설계법은 실물차량 충돌시험의 데이터를 근거로 하여 설계를 하였기 때문에 정확한 설계 즉 CC2, 3등급 충격흡수시설에 대한 유효변형거리를 고려한 최적의 제품 길이를 설계할 수 있었다. 단자유도계를 이용하여 설계되는 CC2, 3등급 충격흡수시설은 CC1등급 충격흡수시설과 제품의 부재 및 구조시스템이 모두 같지만 충격력을 흡수해주는 충격흡수시설의 길이만 다르다.

충격흡수시설의 구조적 특성은 충돌시 저항력과 차량의 변위 사이의 관계를 그래프로 나타냄으로써 쉽게 알 수 있다. 저항력은 차량의 질량에 변형되지 않은 부위에서 계측한 차량의 가속도를 곱함으로써 구할 수 있고, 충돌 중에 생기는 변위의 시간이력은 계측된 가속도를 시간에 대하여 두 번 적분함으로써 구할 수 있다. 그림 10은 CC1등급 충격흡수시설에

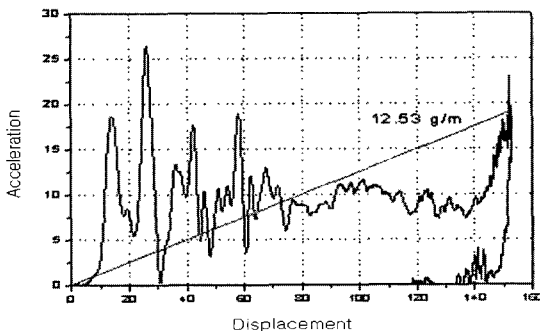


그림 10. 시간변화에 따른 가속도-변위

대한 충돌시험 후 계측된 X축 가속도와 변위량 곡선이다.

가속도 - 변위 그래프를 살펴보면 충격흡수시설의 변형량에 따른 가속도를 탄성회복이 발생되기 전까지 적분한 면적과 동일한 면적을 갖는 삼각형의 기울기의 근사치는 속도에 관계없이 12.53m의 결과를 얻을 수 있었다. 이는 단위질량당 스프링계수 k/M 를 나타낸다. 이 값은 충돌시험을 통해 계측된 값으로 여러 차례의 충돌시험을 통해 정확한 값을 얻을 수도 있지만 이는 현실적으로 불가능하고 이 값의 유효성은 CC2, 3등급의 충돌시험 결과와 설계법의 결과가 잘 맞는 것으로 충분히 검증되었다.

만일, 충돌차량의 질량 M 과 구조물의 변형으로 인한 저항력을 나타내는 스프링 k 를 이용하여 차량과 충격흡수시설의 충돌을 단자유도계로 나타낸다면, a/x 가 속도에 관계없이 일정하다는 것은 단위질량당 일방향 스프링의 스프링상수 k/M 가 일정하다는 것과 같다.

달리 표현하면, 단자유도계 시스템으로 표시된 충돌모델의 고유진동수 ω^2 은 충격흡수시설의 시스템 특성(여기서는 충격흡수시설의 system stiffness)이 일정하게 정해지면 충돌속도에 관계없이 일정하다는 것을 의미한다. 이 단자유도계 시스템을 이용하면 충돌차량과 충격흡수시설의 복합적인 변위와 가속도의 해석적인 해를 구할 수 있음은 2장에서 설명한 바와 같다. 즉, 운동방정식은 식 5로, 변위, 속도 및 가속도의 해를 식 6, 7, 8과 같이 쓸 수 있으며, 이 식에서는 초기충돌속도를, ω 는 $\sqrt{k/M}$ 로 단자유도계 시스템의 고유진동수를 나타낸다. 또한 최대변위 및 최대가속도를 초기속도 v_0 의 함수로 식 9와 식 10과 같이 나타낼 수 있게 된다.

이미 언급했듯이, 충격흡수시설의 강성이 결정되면 k/M 의 값은 충돌속도에 따라 변하지 않는다. 따라서 $\omega(=\sqrt{k/M})$ 의 값은 충돌속도와 무관하게 11.087radians/sec가 된다. 또한, 가속도(\ddot{x})는 식 8에서 $\omega t = \pi/2$ 일 때 최대값 $v_0\omega$ 을 갖게 되므로 최대가속도를 갖게 되는 시간 $t_{\max} = 0.1\text{sec}$ 이고 그

때의 최대가속도는 식 11과 같다.(0.278m/sec/km/h 값은 단위환산 값임)

$$|\ddot{x}_{\max}| = v_0 \omega = 11.087 \text{ rad/sec} \times v_0 \text{ km/h} \times 0.278 \text{ m/sec/km/h} = 3.079 v_0 \text{ m/sec}^2 = 0.314 v_0 (g) \quad (11)$$

여기서 충돌속도 v_0 의 단위는 시속(km/h)이고 최대가속도 \ddot{x} 의 단위는 중력가속도(g)이다. 이 식으로부터 가속도의 최대값은 충돌속도에 비례하게 됨을 알 수 있다. 식 10으로부터 분석한 충격흡수시설의 ω^2 이 12.53g/m이므로 최대변위는 식 12와 같다.

$$|x_{\max}| = v_0 / \omega = \sqrt{1/(12.53 \times 9.81)} \text{ sec/rad} \times v_0 \text{ km/h} \times 27.78 \text{ cm/sec/km/h} = 2.505 v_0 \quad (12)$$

여기서 x_{\max} 의 단위는 cm이고 v_0 의 단위는 km/h이다. 위의 식 11과 식 12는 다음과 같은 점을 확인시켜 주었다. 즉, 차량과 충격흡수시설이 충돌할 때 차량의 파손된 부분과 충격흡수시설의 변형에 의해 표현되는 스프링상수 k 를 구할 수 있다면, 차량질량을 M 이라 할 때 충돌속도와 관계없는 단자유도시스템의 ω 를 구할 수 있고 시스템별 최대가속도와 최대변위를 식 9와 식 10에 의해 계산할 수 있게 됨을 의미하는 것이다.

CC1등급 충격흡수시설에 대한 충돌시험 계측 결과값을 본 연구에서 개발한 단자유도계 설계법에 적용한 결과, 최대가속도를 구할 수 있는 식(11)과 최대변위 즉 최대유효변형거리를 구할 수 있는 식(12)를 구했다. 이 식들을 사용하여 설계한 충돌속도 80km/h인 CC2, 충돌속도 100km/h인 CC3등급 충격흡수시설의 최대가속도와 최대유효변형거리는 다음 표와 같다.

표 3. CC2, CC3등급 충격흡수시설의 최대가속도와 최대유효 변형거리

구 분	CC2등급	CC3등급
최대가속도(g)	25.12	31.4
최대유효변형거리(cm)	200.4	250.5

5. 충돌시험을 통한 단자유도계 충격흡수시설 설계법 검증

단자유도계 충격흡수시설 설계법에 의해 도출된 표 3의 최대 유효변형거리를 적용하여 제작된 CC2등급 충격흡수시설을 대상으로 건교부 지침에 의해 실물차량 충돌시험을 수행하였다. CC2등급 충격흡수시설의 폭, 높이, 구조는 CC1등급 충격흡수시설과 변함이 없고 최대 유효변형거리를 적용하여 제품의 길이를 4,330mm로 결정하였다. 이는 단자유도계 충격흡수시설 설계법에 의해 구한 최대 유효변형 거리에 변형되어 압축되는 충격흡수재 페타이어의 길이와 최소한의 충격흡수시설 고정지대의 길이를 더한 것이다. 충격흡수시설의 길이는 설계법에 의해 구한 최대 유효변형거리를 비롯하여 제품 고유의 구조적 특징과 사용되는 충격흡수재의 두께 등을 고려하여 결정하여야 한다.

그림 11은 충돌시험을 위해 설치된 CC2등급 충격흡수시설이고 그림 12는 정면 충돌시험 후 시험체의 모습이다. 단자유도계 설계법을 적용하여 제작된 CC2

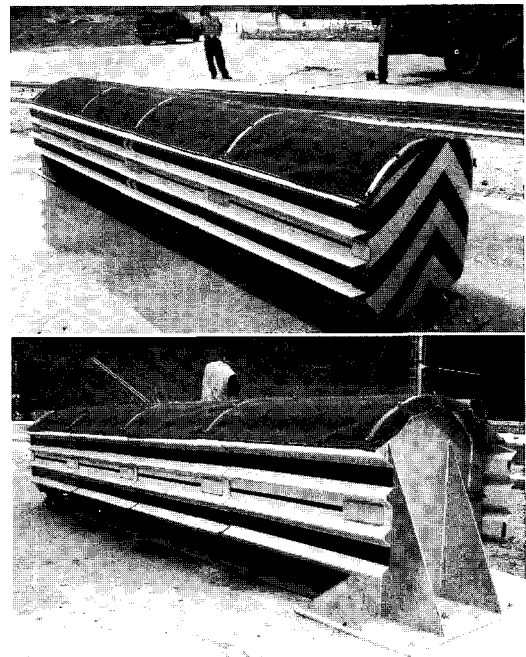


그림 11. CC2등급 충격흡수시설



그림 12. 정면 충돌시험 후 시험체의 모습

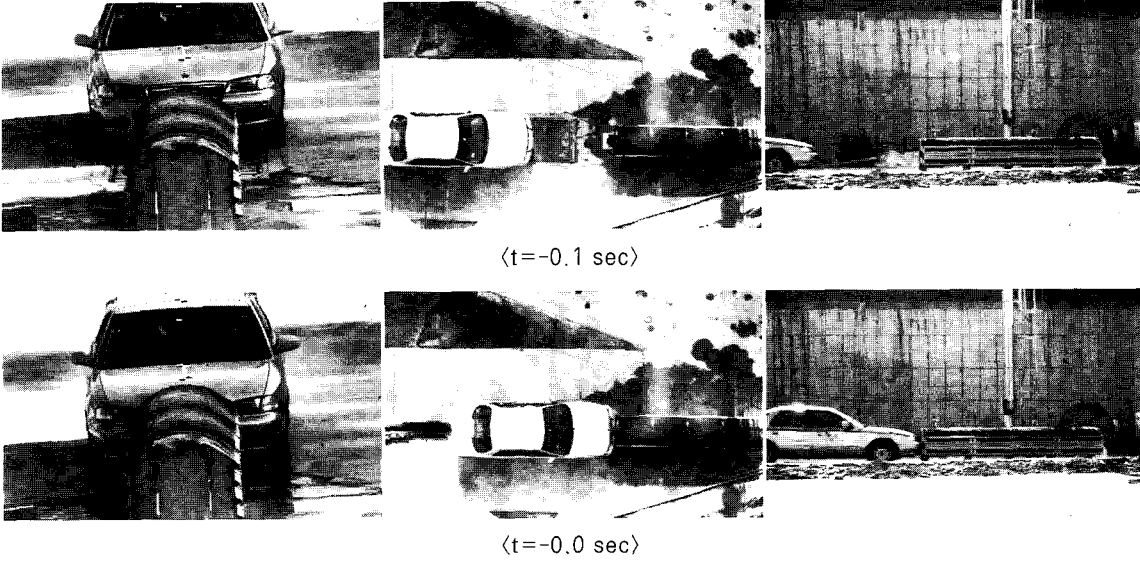
등급 충격흡수시설에 대한 실물차량 충돌시험 결과, 모든 성능시험 항목에서 만족스러운 결과를 나타내었고 지침에 의해 수행된 충돌시험 결과는 표4와 같다.

단자유도계 충격흡수시설 설계법을 적용한 CC2등급 충격흡수시설은 지침에 의해 수행된 6번의 충돌 시험 조건을 한번의 실패없이 만족스러운 결과를 보

여 단자유도계 설계법의 유효함이 증명되었다. 단자유도계 설계법으로 계산된 CC2등급 충격흡수시설의 최대가속도 값을 실차 충돌시험 결과값과 비교한 결과, 거의 유사한 값을 나타내 단자유도계 설계법은 충격흡수시설 개발 시 매우 적합한 방법인것으로 사료되었다.

표 4. CC2등급 충격흡수시설 충돌시험 결과

충돌시험 조건	평가항목		
	탑승자 충돌속도 (THIV)	탑승자 가속도 (PHD)	충격흡수시설 및 차량의 거동
정면충돌 (시설중앙) 1.3톤 차량	40.5km/h	11.6g	구성부재 비산없음 기준에 만족함
정면충돌 (시설중앙) 0.9톤 차량	43.8km/h	13.0g	시설물의 구성부재 분리가 없음 기준에 만족함
정면충돌 (중앙에서 차량 폭의 1/4)	43.2km/h	15.3g	차량은 시험 후 지면에 바로 섭 기준에 만족함
정면(단부) 15충돌	39.7km/h	13.0g	차량 내부공간의 변형 이 없었음 기준에 만족함
측면 15충돌	18.5km/h	7.7g	기준에 만족함
측면 165충돌	27.2km/h	4.9g	기준에 만족함



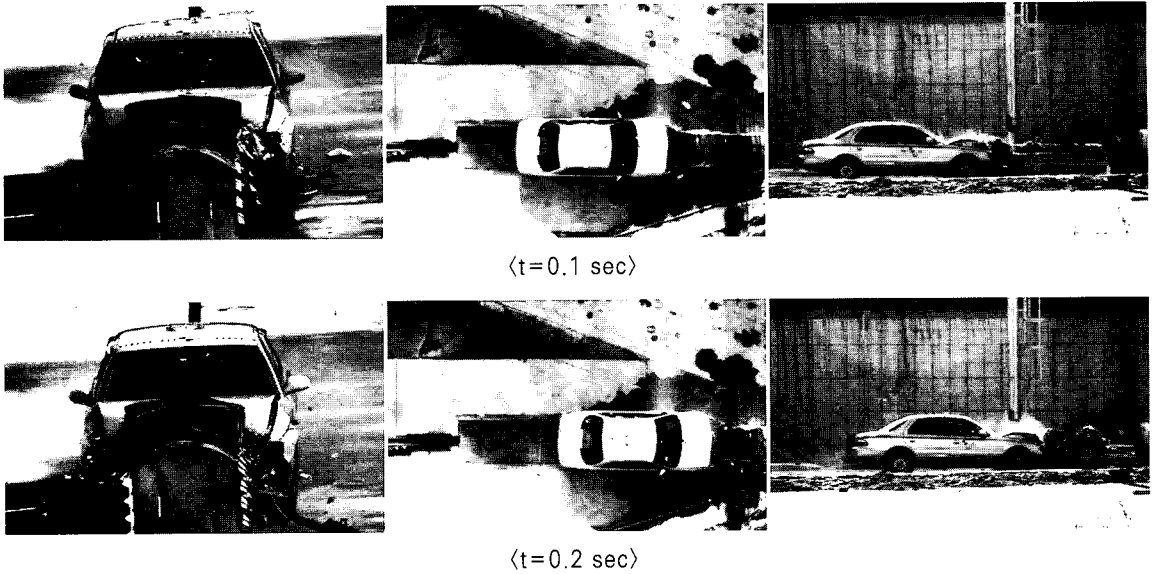


그림 13. CC2등급 충격흡수시설의 충돌시험 장면

6. 결론

CC1등급 충격흡수시설은 국내지침의 충돌시험 조건에 따라 2번의 성능시험을 수행해야 성능이 검증되지만 CC2, 3등급 충격흡수시설은 6번의 성능 충돌시험을 수행해야 한다. CC1등급 충격흡수시설은 상대적으로 성능시험 합격률이 높은 반면에 CC2, 3등급 충격흡수시설은 합격률이 낮은 편이다. CC1등급 충격흡수시설은 개발이 쉬운 반면에 CC2, 3등급 충격흡수시설의 개발이 어렵다. 개발이 쉬운 CC1등급 충격흡수시설을 이용하여 CC2, 3등급 충격흡수시설을 빠른 시간내에, 적은비용으로 개발하는데 도움이 되고자 본 연구에서는 단자유도계 충격흡수시설 설계법을 제안하였다.

단자유도계 충격흡수시설 설계법을 적용하여 CC2등급 충격흡수시설을 제작하고 실물차량 충돌시험을 통한 성능평가를 실시한 결과, 매우 만족스러운 결과를 도출하였다. 이로써 단자유도계 설계법은 충격흡수시설을 설계하는데 적절한 방법 중의 하나임이 증명되었고 충격흡수시설을 개발하고자 하는 업체나 개인에게 유용한 설계법으로 판단되었다. 향후 CC3등급 충격흡수시설에 대한 성능평가를 실시하여 단

자유도계 충격흡수시설의 설계법을 검증하고 보완하여 더 실용적인 설계법으로 개선하고자 한다.

참고문헌

- 건설교통부(2001), “도로안전시설 설치 및 관리지침-차량방호 안전시설 편,”
- 고만기, 김기동, 장대영(2003) “단자유도 시스템을 이용한 충돌해석과 베리어 설계” 대한토목학회논문집, Vol.23, No.6A, pp.1193-1204; .
- 장대영, 주재웅(2006) “탑승자의 안전을 고려한 충격흡수시설의 충돌거동분석 연구” 대한토목학회학술대회 논문집 Vol.D, 대한토목학회
- Emori, I.E(1968) “Analytical Approach to Automobile Collisions” SAE Paper 680016
- H. E. Ross, Jr., D. L. Sicking, and R. A. Zimmer(1993) “Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features,” NCHRP Report 350, Transportation Research Board, Washington, D. C.

접 수 일: 2007. 5. 31

심 사 일: 2007. 5. 31

심사완료일: 2007. 6. 19