

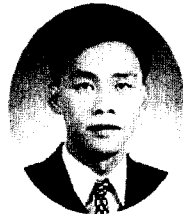
## 충돌해석을 이용한 도로 안전 시설물의 설계



최형연\*



이인혁\*\*



고순탁\*\*\*

### 1. 서론

도로안전시설에 대한 안전도 평가와 보행자 및 운전자들 충돌, 추돌 사고로부터 보호하고자 하는 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 도로안전시설이란 교통의 안전하고 원활한 소통을 확보하며, 도로의 미비한 구조상태를 보완하기 위해 설치하는 시설로서 방호울타리, 조명시설, 시선유도시설, 도로반사경, 충격흡수시설, 과속방지시설, 신체장애자를 위한 시설 등을 지칭하며, 이에 대한 정의는 미국의 'NCHRP(National Cooperative Highway Research Program) Report 350 Category 1~4', 유럽 'European Standard EN 1317 Part 1~6', 일본 '일본도로협회'에서 규정하고 있다. 국내에는 일본의 규정을 도입한 '도로안전시설 설치 및 관리지침'<sup>1)</sup>이 있다.

국외의 경우, 새로운 방호시설이 고안되면 그 시설을 실제로 사용하기 전에 실차 충돌 시험(Full-scale vehicle & barrier crash test), Pendulum Test, Computer simulation등을 거쳐서 기존 시설의 단

점이 보완된 것을 확인한 후에 채택하는 것이 보편화 되어있다. 국내의 경우에는 개념적으로 좋다고 생각되는 경우에는 아무런 검증 없이 설치하고 있으며, 또한 사후 평가도 하지 않고 그대로 놓아두는 경향이 있다. 한 예로 국내에서 방호울타리의 설치 기준에 관한 지침으로는 1980년 건설부(현 건설교통부)에서 발행한 '방호책 설치요령'이 있다. 이 지침은 일본의 1972년 판 '방호책 설치요령'을 주 내용으로 발간한 것으로, 비교적 상세한 내용을 담고 있다. 그리고 이를 근간으로 하여 주요 사항만을 발췌 기술한 기준으로서, 1989년에 건설부에서 발간한 '도로안전시설 설치편람'이 있다. 현재, '방호책 설치요령'은 거의 활용되지 않고 있으며, 비교적 최근에 발행한 '도로안전시설 설치편람'만이 실무에 활용되고 있다. 1989년 이후 기준의 개정 작업이나 심도 깊은 연구가 거의 이루어지지 못하였고 현재 이루어지고 있는 방호울타리의 설치 계획은 개괄적으로 이루어지고 있어, 설계는 기존의 전통적으로 내려오는 각종 설계 도면을 적용하거나 업체의 설계도면을 그대로 적용하고 있는 실정이다.

\* 정회원 · 홍익대학교 기계시스템디자인학과

\*\* 한국이에스아이(주)

\*\*\* 아이피에스아이(주)

반면, 1990년대 중반부터 한국도로공사와 포항제철 등이 주관되어 기존의 도로안전시설 중 충격완화 및 충격 방지 역할로 설계, 시공된 중앙분리대와 방호울타리 그리고 스타퍼(stopper)등에 대한 충격, 충돌 성능 평가와 이에 대한 개선 연구가 수행되고 있다. 이와 같은 연구를 위해서 실차 시험에 의한 시설물 특성 평가가 상당한 연구 예산과 시간 그리고 시험 장소의 확보 등의 문제점을 안고 있어 전산 시뮬레이션에 의한 거동 해석 및 변형 해석 등을 통한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 기사를 통하여 국내의 한국이에스아이(주)와 아이피에스아이(주)에서 수행한 몇 가지 연구 사례를 소개토록 하겠다.

## 2. 국도용 철재 중앙 분리대와 대형 및 소형 차량의 충돌 해석

국도용 중앙분리대의 충돌해석에 사용된 차량은 총중량 15.55톤의 대형 카고트럭과 총중량 1.4톤의 소형 승용차량이다. 차량모델은 국내에서 현재 사용되고 있는 차량을 기본 모델로 하여 제작하였으며 충돌해석에는 전용 프로그램인 PAM-CRASHTM<sup>2,3)</sup>를 사용하였다.

그림 1(a)의 대형차량은 총길이 9.74m, 폭 2.49m, 축간거리 5.7m의 8톤 카고트럭이며 총 16,339개의 NODE와 166개의 SOLID Element, 17,380개의 SHELL Element, 68개의 BEAM Element 그리고 8개의 BAR Element로 구성되어 있다. 실제 차량의 거동을 정확하게 해석하기 위하여, 선정된 기준 차량의

캡과 바디, 카고, 차축 등의 Geometry를 그대로 반영하였다. 또한 차량의 동적해석에 중요 변수인 무게중심을 실제위치에 놓기 위하여 엔진, 연료탱크 등 질량계산에 필요한 모든 부품들을 적용하였다. 또한 충돌 시 중앙분리대에 직접 접촉하게 되는 타이어나는 실제 타이어의 탄성값을 수치로 환산하여 분산시켜 만들었으며 타이어의 복원력을 구성하기 위하여 내부에 공기압을 도입하였다. 특히 중앙분리대와 충돌이 강하게 발생하는 앞 타이어나는 16개의 SHELL Element로 구성되어져 있다. 실제 차량에서와 같이 카고에 Pay Load(8톤)을 적용하기 위하여 Solid Element로 화물을 만들었다. 그림 1(b)의 소형차량은 총길이 3.9m, 폭 1.6m, 축간거리 2.4m의 소형 승용차량이며 총 14,591개의 NODE와 15,316개의 SHELL Element, 88개의 BEAM Element로 구성되어져 있다. 승용차량은 실제 충돌 시 거동을 정확하게 해석하기 위하여 차량의 엔진, 서스펜션, 배터리 등 질량계산에 필요한 모든 부품을 MESH로 형성하였으며 차량의 BODY FRAME과 그 밖의 모든 샤시 등을 기준 차량과 동일한 Geometry를 같도록 모델링 하였다.

특히 탑승자와 충돌이 예상되는 부분은 정확하게 모델링 하였으며 중앙분리대와 충돌하는 충돌면의 범퍼, 도어, 도어 임팩트 바 등도 실제와 같도록 만들었다. 중앙분리대와 충돌하게 되는 타이어나는 카고트럭 모델링에서와 같이 조밀한 MESH로 되어 있으며 타이어의 탄성복원력을 위하여 내압이 작용하도록 하였다.

승용 소형차량의 경우 중앙분리대와의 충돌 시

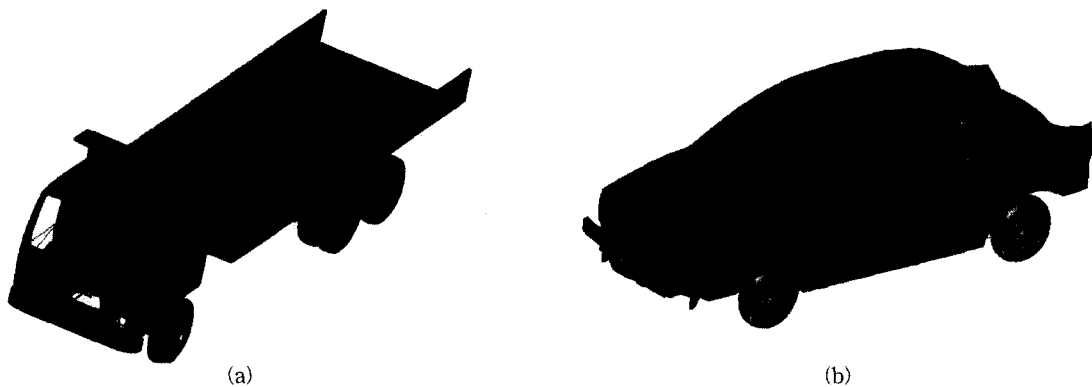


그림 1 (a) 카고트럭 모델 (b) 승용 소형차량 모델

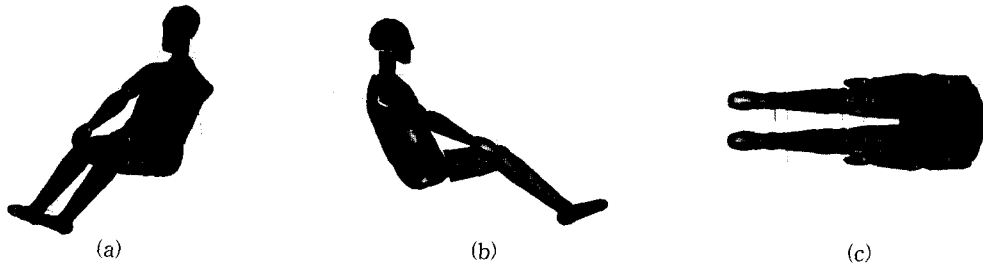


그림 2 충돌용 인체 모형(Crash dummy) 모델

탑승자의 안전이 중요시된다. 탑승자의 안전도를 확인하기 위하여 인체 더미를 직접 탑승 시켜 충돌해석을 하게 되는데 소형승용차량의 충돌해석에 사용된 인체 모형은 그림 2의 Hybrid 모형을 사용하였다. 이 인체모형은 차량에 만들어진 의자에 앉히게 되고 안전벨트 등의 안전장치를 하게 된다. 인체모형의 관절은 충돌 시 실제 사람의 움직임과 유사하도록 JOINT Element들로 구성되어져 있다.

국도용 철재 중앙분리대는 지주, 클램프, 연결대, 레일로 구성된다. 각 부재는 볼트로 연결되어있다. 충돌해석을 위한 철재 중앙분리대의 모델은 실제 중앙분리대의 Geometry를 그대로 사용하였다. 또한 강재의 재질을 입력하기 위하여 중앙분리대에 사용되는 재료의 인장시험을 하였고 이를 재료 특성 데이터에 입력하였다. 입력된 재료의 응력-변형률 곡선은 그림 3과 같다. 볼트연결부는 Rivet Card를 사용하여 모델 하였으며 KS규정에 제시된 각 볼트의 크기별 파단강도를 이용하여 Rivet Card를 작성하였다. Rivet Card는 연결된 두 개 혹은 다수 개의 NODE가 파단강도 이상이 되면 서로 이탈하도록 되어 있으며 인장 파단강도와 전단 파단강도를 입력하도록 되어있다. 전단 파단강도는 인장

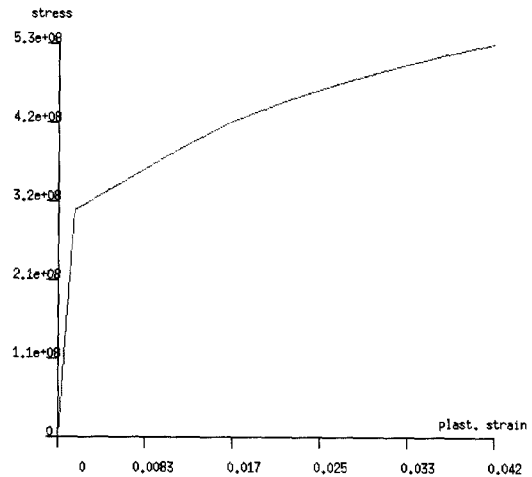


그림 3 중앙분리대 모델에 사용된 강재의 응력-변형률 곡선

파단강도의 1/2을 사용하였다. 그림 4는 중앙분리대의 각 요소를 나타내고 있다.

국도용 철재 중앙분리대의 대형트럭 충돌해석은 그림 5에서와 같이 트럭모델을 중앙분리대와 15도 각도로 시속 60km/h의 속도로 충돌 시켰다. 총 600ms 동안 충돌 해석이 수행되었으며 그림 6에서 이 중

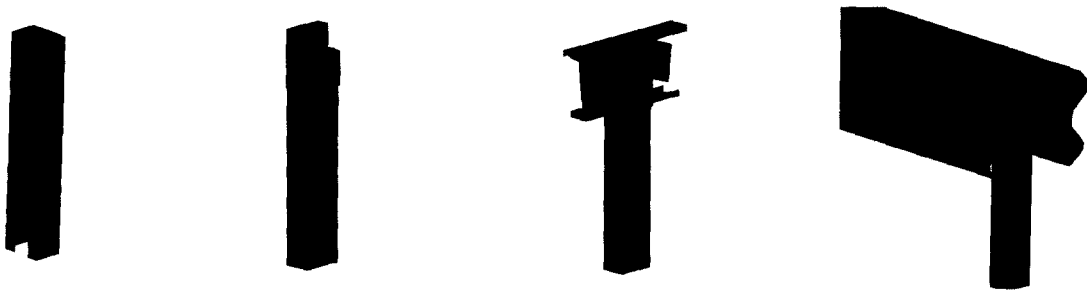


그림 4 중앙분리대 모델 구성 요소

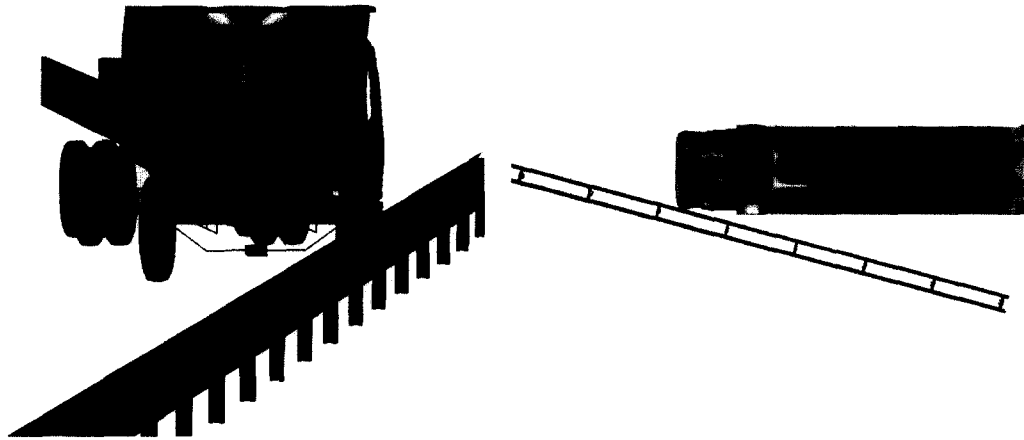


그림 5 중앙분리대와 대형차량의 충돌해석(충돌각도 15도)

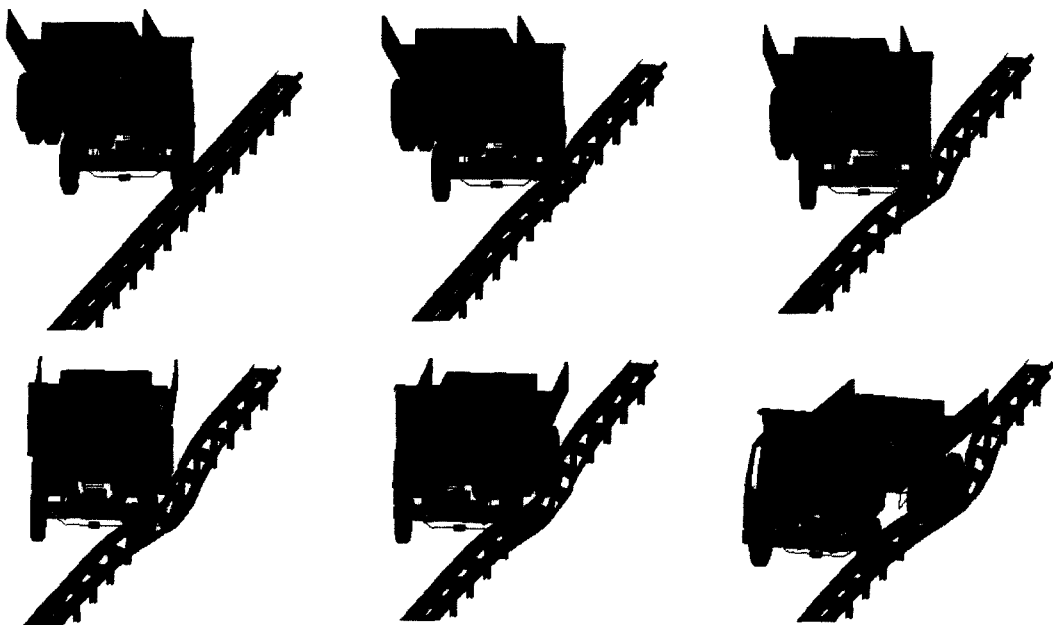


그림 6 국도용 철재 중앙분리대와 대형트럭의 충돌해석 결과

몇 개의 시간에 대한 변형양상을 보여주고 있다.

그림 7에서 보는 바와 같이 15도 각도로 충돌하기 시작한 트럭은 최종 해석이 끝난 시점에서 차량의 본 주행 방향으로 방향이 전환되었음을 알 수 있다. 이는 철재 중앙분리대가 충돌각도로 진입하는 차량을 중앙분리대의 변형 메커니즘에 의하여 주행방향으로 돌려놓기 때문이다. 충돌차량은 충돌 후 중앙분리대의 레일을 변형시키면서 충돌 방향으로 진입하게 된다. 이 때 레일은 종방향으로

연속적으로 연결되어 있으므로 충돌차량이 진입각도로 계속 진행하는 것을 막아주게 되고 이 때 지주와 연결대를 연결하는 클램프의 연결볼트가 떨어져지게 된다. 이로 인하여 지주와 연결대는 이탈하게 되며 충돌차량은 분리된 지주와 충돌하게 된다. 이탈한 지주는 충돌차량에 심한 충격을 가하지 않고 변형되며 이탈된 연결대에 연결되어 있는 양쪽 레일은 충돌차량의 속도를 줄임과 동시에 충돌차량의 진행방향을 본 차로의 주행방향으로 돌리게

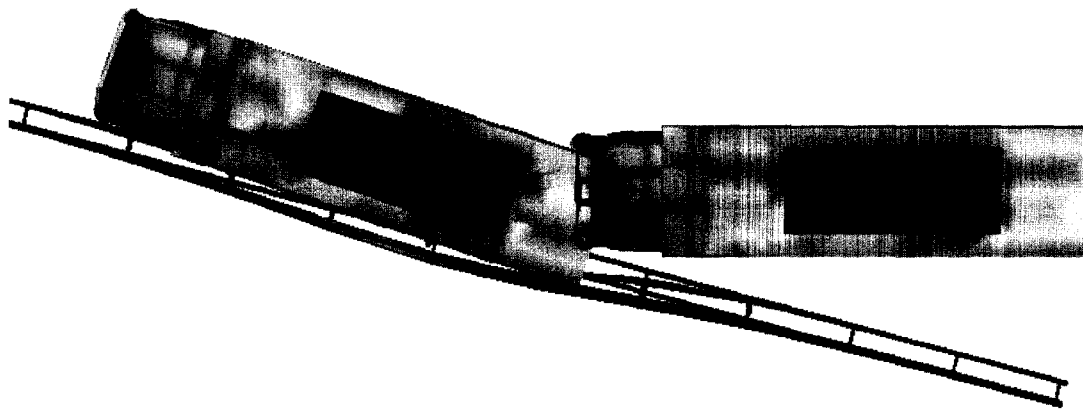


그림 7 충돌차량의 진행방향

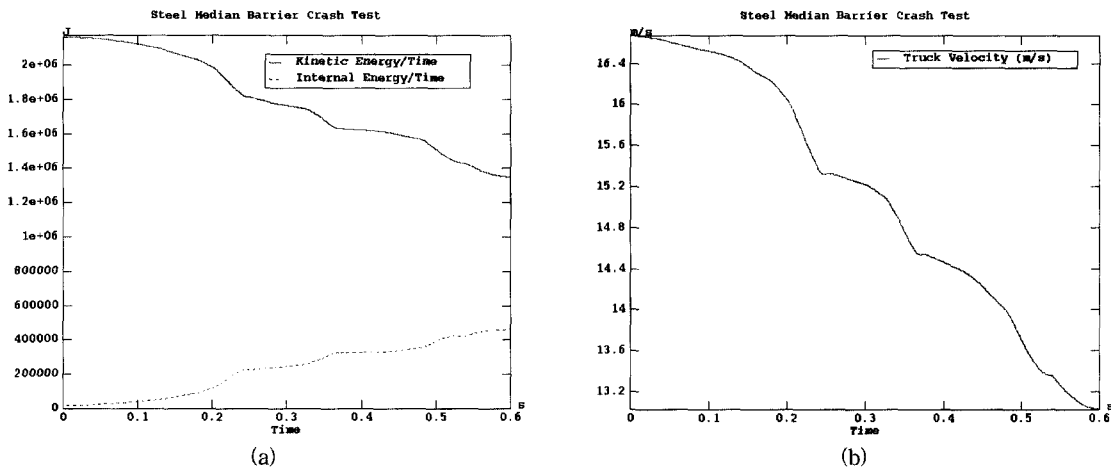


그림 8 (a) Kinetic Energy와 Internal Energy의 변화 (b) 트럭의 속도 변화

된다. 차량의 타이어는 지주와 충돌하여 변형된 지주위로 지나가게 되며 이때 지주는 소성변형을 일으키며 심한 변형을 보이게 된다.

그림 8(a)는 전체 충돌 시스템에서의 운동에너지와 변형에너지의 변형량을 보여주고 있다. 여기서 운동에너지는 충돌차량이 갖는 무게와 속도로 구성되어 있으며 그림에서 보는 바와 같이 충돌이 진행함에 따라 줄어들을 볼 수 있다. 충돌차량의 무게는 충돌 전과 충돌 후가 동일하므로 이는 충돌차량의 속도가 감소 되었음을 나타내고 있다. 변형에너지는 충돌로 인하여 발생하는 차량과 중앙분리대의 변형에 의하여 생기는 에너지로서 보는 바와 같이 충돌이 진행됨에 따라 증가함을 알 수 있다. 변형에너지와 운동에너지의 합은 항상 일정

하며 이는 전체 운동계의 에너지 손실이 없음을 나타내고 있다. 그림 8(b)은 중앙분리대와 충돌한 트럭의 속도 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 속도가 줄어들고 있으며 감속이 급하게 이루어지는 시간에서는 충돌차량의 타이어와 중앙분리대의 지주가 충돌하는 시간이다.

국도용 철재 중앙분리대의 소형차량 충돌해석은 소형차량 모델을 중앙분리대와 15도 각도로 시속 100km/h의 속도로 충돌 시켰다. 소형차량의 경우 탑승자의 안전도 측정을 위하여 인체더미 모델을 입력하였으며 안전벨트를 착용한 상태로 충돌하도록 입력하였다. 그림 9는 철재 중앙분리대와 소형차량의 충돌해석 결과를 보여주고 있다. 총 300ms동안 충돌해석이 이루어 졌으며 그림 10은 이 중 몇 개

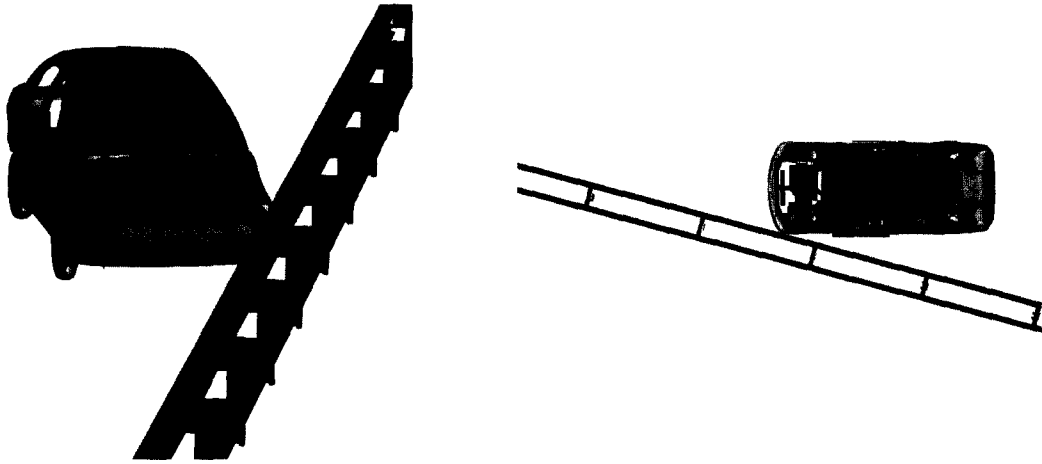


그림 9 중앙분리대와 승용 소형차량의 충돌해석(충돌각도 15도)

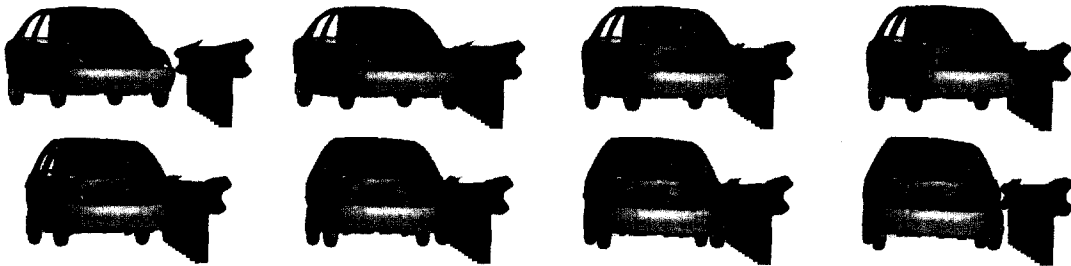


그림 10 국도용 철재 중앙분리대와 소형차량의 충돌해석 결과

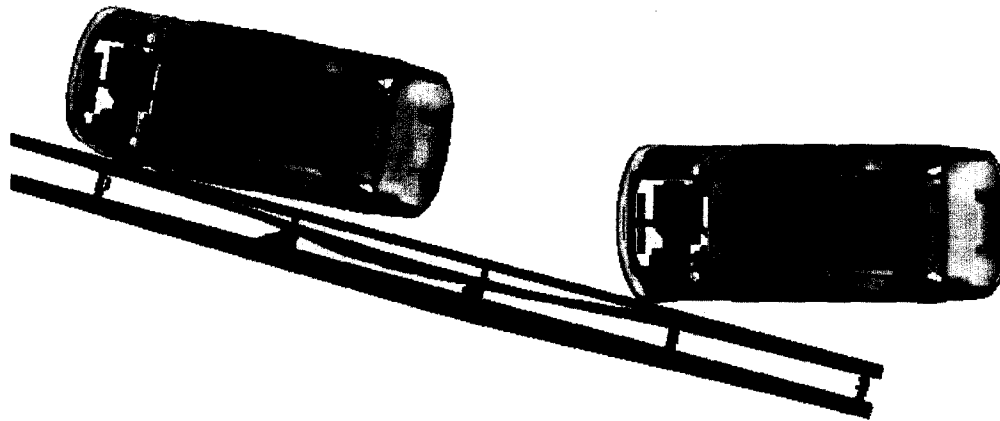


그림 11 충돌차량의 진행방향

의 시간에 대한 변형양상을 보여주고 있다.

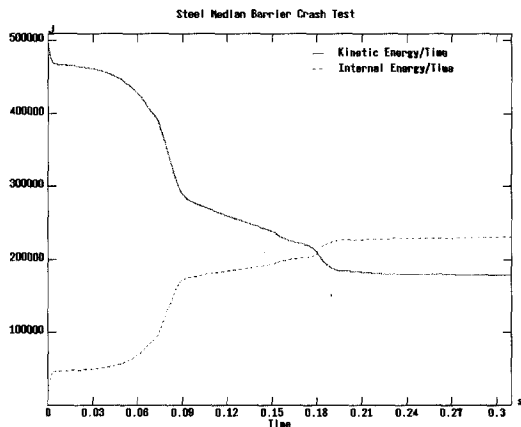
그림 11에서 보는 바와 같이 15도 각도로 충돌하기 시작한 트럭은 최종해석이 끝난 시점에서 차량의 본 주행방향으로 방향이 전환되었음을 알 수 있다. 이는 철재 중앙분리대가 충돌각도로 진입하는 차량의 중앙분리대의 변형 메커니즘에 의하여

주행방향으로 돌려놓기 때문이다. 충돌차량은 충돌 후 중앙분리대의 레일을 변형시키면서 충돌방향으로 진입하게 된다. 이 때 레일은 종방향으로 연속적으로 연결되어 있으므로 충돌차량이 진입각도로 계속 진행하는 것을 막아주게 되고 이 때 지주와 연결대를 연결하는 클램프의 연결볼트가

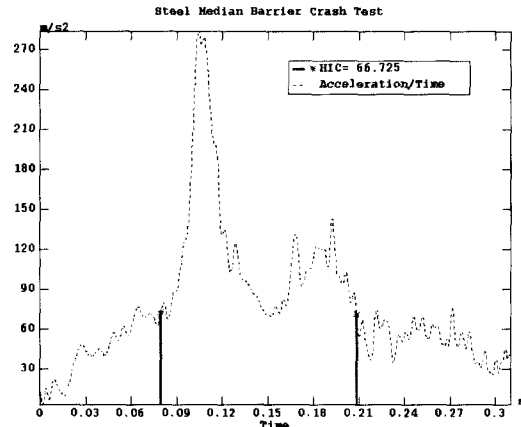
떨어지게 된다. 이로 인하여 지주와 연결대는 이탈하게 되며 충돌차량의 타이어와 지주가 충돌을 일으키게 된다. 이탈한 지주는 충돌차량에 심한 충격을 가하지 않고 변형되며 이탈된 연결대에 연결되어 있는 양쪽 레일은 충돌차량의 속도를 줄임과 동시에 충돌차량의 진행방향을 본 차로의 주행방향으로 돌리게 된다.

그림 12 (a)는 전체 충돌 시스템에서의 운동에너지와 변형에너지의 변형량을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 운동에너지는 충돌로 인하여

속도가 감소되므로 줄어드는 것을 볼 수 있고 변형에너지는 충돌로 인한 변형으로 증가되는 것을 볼 수 있다. 변형으로 인한 변형에너지의 값이 충돌 후 운동에너지보다 커지는 것이 나타나 있다. 변형에너지의 분포를 상세 분석한 결과, 차량의 무게와 속도로 구성되어 있던 운동에너지가 충돌로 인하여 변형에너지로 변환될 때 이 변환되는 충격량의 반 정도를 철재 중앙분리대가 담당함을 알 수 있었다. 차량에 탑승 시킨 인체 더미 모델은 충돌해석 시 전 과정에 걸쳐 인체에 미치는 가속도를



(a)



(b)

그림 12 (a) 운동에너지와 변형에너지의 변화 (b) 인체모델의 가속도 파형

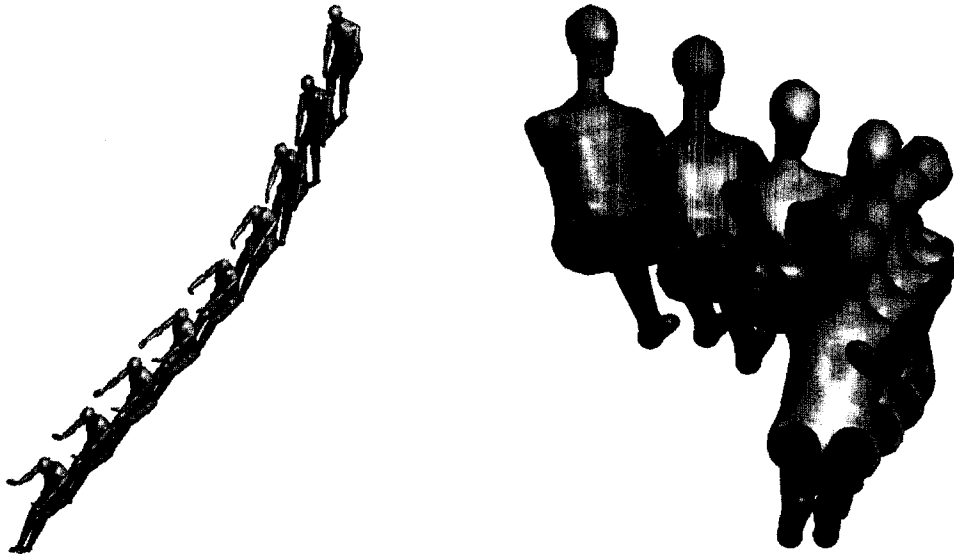


그림 13 소형차량에 탑재된 인체 모형의 거동

측정하게 되는데 이를 이용하여 인체에 미치는 충격치를 구할 수 있다. 인체 더미의 머리 부분에서 계산한 충격치인 HIC 값은 66.775이다. 그림 13은 충돌 과정에서 인체 모델의 거동을 보여주고 있다.

### 3. 고속도로 요금소용 Hydro충격완화시설의 설계해석

충돌 시 유체 즉 물의 분출을 유도 함으로서 충돌에너지를 분산시키는 개념의 고속도로 요금소용

Hydro충격완화시설의 설계해석을 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 기법<sup>4),5)</sup>을 이용하여 수행하였다.

그림 14 및 15는 3단으로 구성된 요금소용 충격완화시설의 정면충돌해석 결과를 보여주고 있다. 해석결과로부터 25ms 정도에서 첫번째 통 내부의 물이 분출을 시작하며 약 100ms에서 차량이 정지됨을 알 수 있었다. 또한 충돌이 진행됨에 따라 차량의 앞 부분이 들리는 현상이 발생하며 이는 전륜 구동인 차량의 경우 구동력의 전달을 차단하는



그림 14 소형차량과 Hydro충격완화시설의 충돌해석

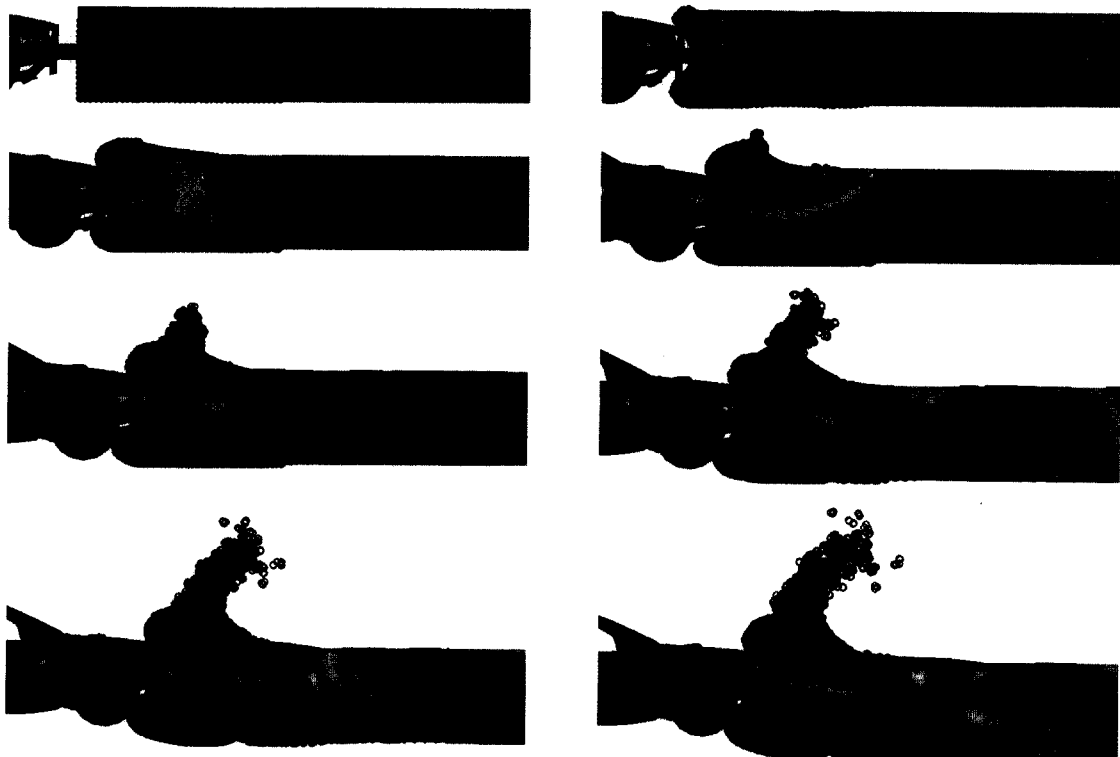


그림 15 소형차량과 Hydro충격완화시설의 충돌해석(측면)



장점이 있다. 차량모델의 무게중심점에서 계산된 감속도 파형으로부터 최대 감속도의 크기는 약 26G 정도임을 알 수 있었으며 차량이 강체로 모델링된 점을 감안할 때 본 충격완화시설이 충분히 보호 효과가 있음을 판단할 수 있다.

### 3. 결 론

본 글을 통하여 소개된 충돌해석을 통한 도로 안전 시설물의 설계해석은 설계과정의 효율성측면에서 그 효과가 매우 높다고 사료되며 현재 이러한 전산 해석이 관련 업계에 빠른 속도로 받아들여지고 있다. 이미 자동차 메이커들과 그 관련 산업체에 의하여 충돌해석의 신뢰도와 효율성이 검증 되었으며, 따라서 이러한 전산 해석 기법을 통하여 도로 안전 시설물 설계과정에서 경비 절감과 단기간내의 최적설계를 추구 할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 도로안전시설 설치 및 관리 지침, 행정 간행물 등록번호 42000-58710-67-9806, 건설교통부, 1998
2. PAM-CRASH™ solver notes user's manual, PSI, 2000
3. PAM-CRASH™ solver reference user's manual, PSI, 2000
4. Gingold, R.A. and Monaghan, J.J., "Kernel Estimates as a Basis for General Particle Methods in Hydrodynamics", J. Comput. Phys., 1982
5. E. Haug, P. Groenenboom, A. Kamoulakos, M. Przybylowicz and A. Tramecon, "Application of SPH Techniques in the PAM-SCLTM Code Family", PUCA 97, NIHON ESI KK. 1997 