

# 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 콘크리트 교량난간의 동적거동 분석

## Dynamic Analysis of Concrete Rigid Barriers by Computer Simulation

김재일\* 안재석\*\* 박진환\*\*\* 우광성\*\*\*\*  
Kim, Jae-Il Ahn, Jae-Seok Park, Jin-Hwan Woo, Kwang-Sung

### ABSTRACT

This paper proposed a new impact equation by analyzing the form of the proposal section 1 and section 2 proposed by Korea Highway Corporation, F-type, NJ-type and SS-type with HVOSM program. Because the impact equation proposed by Ministry Construction & Transportation(1992) considered an only impact velocity, the values of impact loads calculated by HVOSM program are 21.5~44 times as large as those using equation of MCT. The values of HVOSM program are 1.4 times as large as those of Olson's model because Olson's equation consider impact vehicle, impact velocity and impact angle. But, it does not consider geometric characters, while HVOSM program considers characters. Considering the shapes of sections and the conditions of colliding, HVOSM program can calculate impact load. As Multiple Regression Analysis is conducted with the calculated values, the  $R^2$  values of the proposed equations are 0.984 in SB1~SB3 and 0.958 in SB4~SB6. After all, the equation proposed in this study have better results than Olson's equation.

### 1. 서론

한국도로공사 도로교통기술원에서는 최근에 새로운 형식의 고규격 콘크리트 중앙분리대 및 난간(127cm; SB6등급)을 제안하였으며, 외국의 경우도 같은 추세에 있다. 즉, 기존 NJ-형과 F-형 단면(81cm)에서 높이를 상향 조정한 Ontario벽형(107cm), 일정경사형(SS-형; 107cm) 등이 제안되어 있다. 그러나 고규격 콘크리트 강성방호벽의 적용은 교량미학 측면에서 너무 육중하고, 탑승자의 시거를 막고 있으며, SB6 등급의 충돌조건(25톤, 80km, 15도충돌각)으로 난간 파라펫 벽면을 충돌할 경우 교량상판 쉐일레버부와 조인트와 쉐일레버부에 심대한 충격을 주기 때문에 교량난간부와 쉐일레버부에 대한 철근배근 등의 검토가 요구된다.

또한, 본 연구에서는 차량의 충돌시 발생하는 충돌하중을 현 국내 시방서에서는 서로 다르게 규정되어 있고 단지 충돌속도정도 고려하는 약산식이므로 새롭게 검토되어야 할 필요성이 제기된다. 교량난간 설계시 일반적으로 NCHRP 86에 제시되어있는 Olson Model을 사용하고 있는데, Olson Model에 의한 충돌하중 산정식도 몇 가지 점에서 문제점이 있다. 즉,

- (1) 제안되어 있는 NJ-형, SS-형, F-형 등 충돌하중에 직접 영향을 주는 콘크리트 방호벽의 형상이 반영되지 못하고 있다.
- (2) 충돌하중을 산정하기위한 차량의 제원이 표준화되어 있지 않다. 차량의 다양성에도 불구하고 SB5 등급의 충돌하중 예측시 Olson Model에 의한 충돌 하중식은 AASHTO HS20-44 Design Truck에 기초를 두고 있다.

\* 영남대학교 토목공학과 공학석사  
\*\* 영남대학교 토목공학과 연구원  
\*\*\* 영남대학교 토목공학과 연구원  
\*\*\*\* 정회원·영남대학교 토목공학과 · 교수

(3) 실제 차량의 충돌은 3차원 공간상의 동적거동인데 반해 Olson Model에 의한 충돌 하중식은 2차원 평면상에서의 해석으로 단순화되어 있다.

본 연구에서는 LS/DYNA-3D 프로그램과 강성방호벽 전용 프로그램인 HVOSM을 사용하여 강성방호벽의 저항능력(load-carrying capacity), 차량의 안정성(vehicle stability), 탑승자 위험도(occupant risk)를 분석하여 차량의 동적거동과 방호벽의 구조적 적합성을 평가하고자 한다. 또한, 3차원 동적비선형 해석을 통해 강성방호벽에 작용되는 충돌하중 산정식을 제안하고자 한다

## 2. 충돌하중에 대한 국내 시방규정

설계차량과 충돌조건이 결정되면 충돌차량이 일정한 속도와 충돌각을 갖고 교량 난간에 가해지는 충돌하중(impact force)을 계산하여야 한다.

(1) 도로교표준시방서

$$H = \left(\frac{V}{60}\right)^2 \times 750 + 250 \text{ (kgf/m)}$$

여기서,  $H$  : 강성방호울타리 1m 높이에 직각으로 작용하는 교축 1m 당의 수평 충돌하중 (kgf/m)

$V$  : 설계속도 (km/h)

(2) 건설교통부의 [도로안전시설 설치 및 관리 지침 - 방호울타리편(1997)]

“ 강성 방호울타리의 설계 하중은 직선 구간에서 벽의 상단에 횡방향으로 1 t/m, 곡선 구간은 2 t/m 가 채택되어 있다 ”

(3) 도로안전시설 설치 및 관리지침(2001.7)

위의 두가지 국내 규정에는 충돌하중 산정시 차량이 가지는 차체 질량이나 충돌각에 대해서 특별한 언급이 없다. 이러한 점을 보완하기 위해서 [도로안전시설 설치 및 관리지침(2001.7)]에는 미국의 횡방향 충돌하중 계산식인 Olson Model을 제시하고 있다.

이 모델을 사용하여 충돌시 횡방향력을 구하는 산정식은 표 1과 같다.

표 1 차량충돌로 인한 횡방향 충돌하중 산정식

|  |   |
|--|---|
| $avgG_{lat} = \frac{V_T \sin \theta}{g(t_p - t_o)} = \frac{V_T^2 \sin^2 \theta}{2gS_{lat}}$ $= \frac{V_T^2 \sin^2 \theta}{2g[A \sin \theta - 0.5B(1 - \cos \theta) + D]}$ $avgF_{lat} = (avgG_{lat})W \quad \max F_{lat} = \frac{\pi}{2} (avgF_{lat})$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- A : 차량앞면으로부터 차량의 무게 중심까지의 거리</li> <li>- B : 차량폭</li> <li>- <math>\theta</math> : 충돌각도(15°)</li> <li>- D : 방호울타리의 횡방향 변위</li> <li>- <math>V_T</math> : 충돌전 차량의 속도(m/s)</li> </ul> |
|--|---|

## 3. 콘크리트 교량난간의 설계요소

### 3.1 항복선 이론에 의한 극한내하력

강성 방호벽의 저항능력을 산출하는 방법은 [AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (1998)] 규정에 의한 항복선 이론을 적용하는 것으로 되어있다. 강성방호벽의 저항능력은 철근콘크리트의 항복선이론(yield line theory)에 의하여 구할 수 있다. 즉 그림 1과 같이 파괴면을 따라 소성힌지가 형성된다는 가정하에 외력과 내력에 의해 행해진 일의 합은 영(zero)이 된다는 조건으로부터 강성방호벽의 저항하중과 파괴길이를 구하는 것이다. 그림 2는 두 가지 형상의 파괴기구를 나타내며 방호벽의 높이는 H, 파괴길이는  $L_c$ 로 나타내었다. 파괴 기구 1에 대한 파괴길이와 저항능력을 알아보면 다음과 같다.

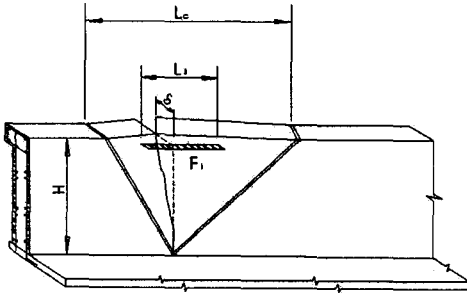


그림 1 강성방호벽의 항복선 형태

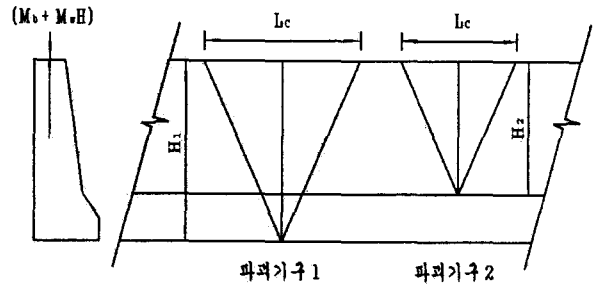


그림 2 강성방호벽의 파괴기구

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 + \frac{8H(M_b + M_w H)}{M_c}} \quad , \quad R_w = \left(\frac{1}{L_c - \frac{L_t}{2}}\right) \left[8(M_b + M_w H) + \frac{M_c L_c^2}{H}\right]$$

또한, 파괴기구 2에 대해서는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2 + 8H\left(\frac{M_b + M_w H}{M_c}\right)} \quad , \quad R_w = \left(\frac{1}{L_c - \frac{L_t}{2}}\right) \left[8(M_b + M_w H) + \frac{M_c L_c^2}{H}\right]$$

### 3.2 차량의 안정성

차량의 안정성은 임계전복속도와 임계승월속도로 평가되어진다. 각각의 정의를 알아보면 다음과 같다. 임계전복속도는 차량이 교량난간과 충돌후 진행차선의 노면으로 전복되는 거동을 말하며 임계승월속도는 차량이 교량난간과 충돌후 방호벽을 넘어서 전복되는 거동을 말한다.

### 3.3 탑승자 위험도 평가에 대한 시방규정 검토

미국의 실물충돌시험 기준은 'NCHRP Report 350 Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features'에 명시되어 있다. NCHRP 350은 기존의 NCHRP 230을 대체한 것으로서 미연방도로관리청(F.H.W.A - Federal Highway Administration)과 미국주정부 고속도로 전문 공무원 연합회(AASHTO-American Association of State Highway Transportation Officials)의 협동연구에 의해서 작성된 제반 안전시설의 성능평가에 관한 시험, 평가기준 등을 정한 지침서이다.

유럽연합의 경우도 유럽표준위원회(CEN, European Committee for Standardisation)에서 탑승자안전과 관련하여 ASI(Acceleration Severity Index), THIV(Theoretical Head Impact Velocity), PHD(Post-impact Head Deceleration)을 규정하고 있는데 THIV는 NCHRP Report 350의 OIV에, PHD는 RA에 해당된다.

## 4. 수치해석 모델

### 4.1 HVOSM 프로그램을 위한 차량모델

HVOSM은 콘크리트 강성방호벽을 해석하는데 사용되는 프로그램이다. 차량모델은 강제차축 또는 독립현가장치로 구동하는 4륜으로 구성되어 있으며, 핸들조정각(steer)과 캠버(camber)각의 현가장치 컴프라이언스(compliance)는 무시된다. 타이어들은 얇은 디스크로 모델링되고, 충격흡수장치 특성들은 압축과 인장에서 대칭된다고 가정한다. 즉, 비교적 정확한 현가장치와 타이어를 포함한 11개의 자유도를 갖는 차량모델을 이용한다. 본 연구에 사용된 차량 제원은 국내 안전시설 설치기준에는 시험차량에 대한 중량만 제시되어 있어 충돌하중 산정을 위한 차량 제원은 PASSENGER CAR, AASHTO HS-20-44 Design Truck을 사용하였다.

#### 4.2 LS/DYNA-3D 프로그램을 위한 차량모델

LS/DYNA-3D는 3차원 비탄성 구조물의 비선형 동적 반응을 해석하는 유한요소 프로그램으로 적용분야로는 차량 충돌해석을 시뮬레이션하고, 충돌시 승객의 안전성을 증가시키기 위해 그 결과를 분석하고 설계를 수정하는 데에도 사용되고 있다. 또한 충돌후 차량의 궤적예측과 도로안전구조물과 차량의 변형 및 응력 상태를 산정하는데 유용한 프로그램이다. 1톤 차량은 4674개의 절점과 4248개의 요소, 8톤차량은 24915개의 절점과 21725개의 요소로 모델링을 하였다.

#### 4.3 콘크리트 교량난간 모델

본 연구에서 사용되는 콘크리트 교량난간은 그림 3에 나타내었으며 5가지 모델을 고려하였다. F-형, NJ-형, 도로공사 I, II 단면은 형상이 여러 개의 경사면의 구성되어 있는 반면, SS-형은 단일 경사면으로 구성되어 있다. SS-형 경사각의 변화에 따른 차량의 안정성과 충돌위험도는 10°내외에서 가장 최적의 경사라는 연구결과가 있으므로 본 연구에서는 이를 고려하지 않는다. 콘크리트 교량난간 충돌시 단면 형상은 차량의 거동 및 손상에 많은 영향을 미치므로 단면의 기하학적인 형상을 비교하면 표 2와 같다.

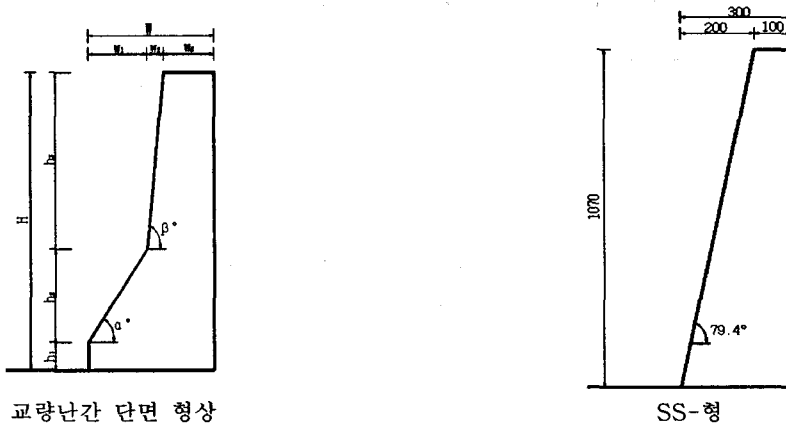


그림 3 교량난간 형상 및 제원

표 2 교량난간 단면 형상 비교

|         | W<br>(mm) | W <sub>1</sub><br>(mm) | W <sub>2</sub><br>(mm) | W <sub>3</sub><br>(mm) | H<br>(mm) | h <sub>1</sub><br>(mm) | h <sub>2</sub><br>(mm) | h <sub>3</sub><br>(mm) | α<br>(°) | β<br>(°) |
|---------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|----------|
| F-형     | 373       | 124                    | 58                     | 191                    | 813       | 76                     | 178                    | 559                    | 55       | 84       |
| NJ-형    | 381       | 178                    | 51                     | 152                    | 813       | 76                     | 254                    | 483                    | 55       | 84       |
| SS-형    | 300       | 200                    | 100                    | -                      | 1070      | -                      | -                      | -                      | 79.4     | -        |
| 도로공사 I  | 420       | 120                    | 70                     | 230                    | 1000      | 125                    | 175                    | 700                    | 56       | 84       |
| 도로공사 II | 420       | 120                    | 70                     | 230                    | 1270      | 125                    | 175                    | 970                    | 56       | 86       |

## 5. 컴퓨터 모의실험에 의한 성능평가

### 5.1 차량안정성 평가

앞에서 규정된 임계 전복속도와 임계 승월속도는 강성방호벽의 형상이 고려되지 않고 단지 에너지원리를 사용하여 개략적으로 차량의 안정성을 예측하는 식으로 전복 및 승월의 가능성이 있는 경우에 대해서는 보다 정확한 동적해석이 요구된다. 도로공사 Report와 HVOSM 프로그램의 결과를 표 3에 나타내었다.

표 3 도로공사 Report와 HVOSM 프로그램 비교

| 교량등급 | 해석 조건<br>(ton, km/h, °) | 교량난간 형상    | PAM-CRASH<br>최대 ROLL각(°) | HVOSM<br>최대 ROLL각(°) |
|------|-------------------------|------------|--------------------------|----------------------|
| SB5  | 14,80,15                | 일정경사형      | 5.4                      | 3.69                 |
|      |                         | 도로공사 단면 I  | -                        | 5.35                 |
|      |                         | 도로공사 단면 II | 12.3                     | 5.74                 |
| SB6  | 25,80,15                | 일정경사형      | 9.1                      | 3.94                 |
|      |                         | 도로공사 단면 I  | -                        | 5.34                 |
|      |                         | 도로공사 단면 II | 10.8                     | 5.92                 |

### 5.2 탑승자 위험도 평가

유럽 CEN의 ASI를 살펴보면 국내시방규정인 충돌속도 60km/h, 충돌각도 20°에서는 모든 단면에서 A급 수준을 만족하고 있다. 그러나, 그림 4에서 보는 바와 같이 충돌속도 100km/h에서는 충돌각도 15°에서 A급 수준을 만족하지 못하며, 충돌각도 20°에서 모든 단면이 B급 수준을 간신히 유지하고 있는 수준이다.

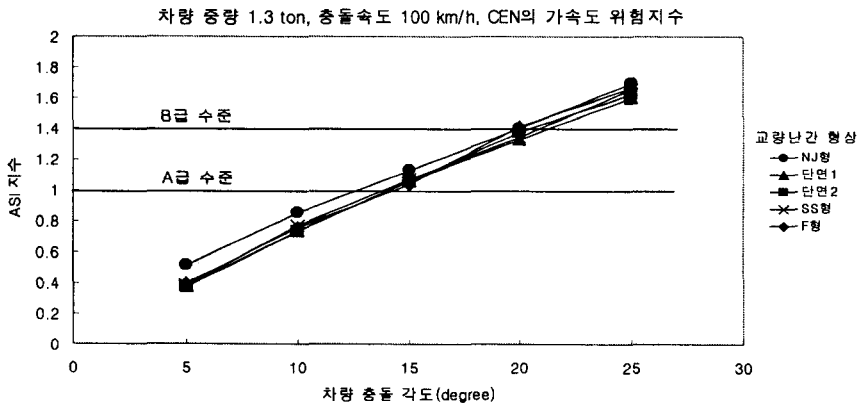


그림 4 충돌속도 100km/h일 경우 ASI가속도 비교

탑승자 상대속도에 관한 규정은 미국의 NCHRP Report 350의 경우 OIV(Occupant Impact Velocity)에 중·횡방향 9m/s로 제안하고 있으며, 유럽 CEN은 THIV(Theoretical Head Impact Velocity)로 9.2m/s를 제안하고 있다.

## 6. 충돌하중 산정식

### 6.1 HVOSM과 LS/DYNA-3D의 충돌하중 비교

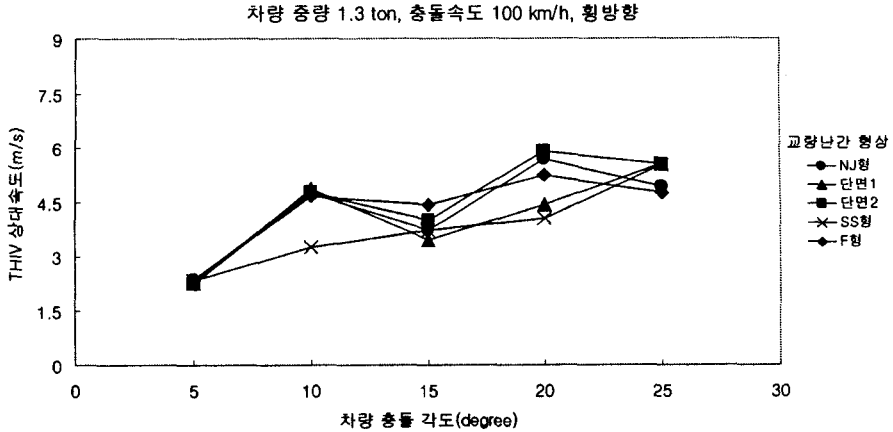


그림 5 충돌속도 100km/h일 경우 탑승자 횡방향 THIV 상대속도 비교

LS/DYNA-3D에 의한 1톤 차량과 8톤 차량의 충돌시 충돌하중과 HVOSM을 통해서 구한 충돌하중을 비교해보면 표 4와 같이 충돌하중의 차이가 5% 이내로 HVOSM 프로그램의 적정성을 잘 나타내어 주고 있다. 충돌하중의 비교는 규정에 따라 충돌속도 80km/h, 충돌각 15°도로 비교 평가하였다. 그리고, 8톤 차량의 충돌위치를 그림 6에 나타내었으며 8톤 차량의 시간대별 차량궤적을 그림 7에 나타내었다.

표 4 충돌하중의 비교

(단위:tonf)

| 차량종류  | 프로그램 | HVOSM | LS-DYNA3D |
|-------|------|-------|-----------|
| 1 ton |      | 12.56 | 12.86     |
| 8 ton |      | 37.91 | 40.00     |

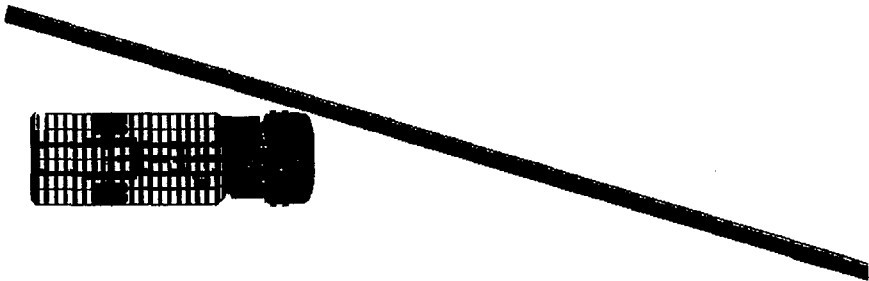


그림 6 8톤 차량의 충돌위치

### 6.2 수치해석에 의한 충돌하중식 제안

다중회귀 분석에 의해 새로 제안하는 횡방향 충돌하중식은 다음과 같다.

(1) SB1~SB3 설계등급

$$F_t = \frac{0.17\pi}{g} \left\{ 198 + \left[ W \cdot \sin^{1.65} \theta \cdot \left( \frac{v_0}{3.6} \right)^2 \right] \right\}$$

(2) SB4~SB6 설계등급

$$F_t = \frac{0.096\pi}{g} \left[ 535.5 + \left[ W \cdot \sin^{1.45} \theta \cdot \left( \frac{v_0}{3.6} \right)^2 \right] \right]$$

여기서,  $F_t$  : 충돌하중(tonf)                       $g$  : 중력가속도(%)  
 $W$  : 차량중량(ton)                               $\theta$  : 충돌각도(°)  
 $v_0$  : 충돌속도(km/h)

표 5 교량난간의 설계등급별 충돌하중 값 비교

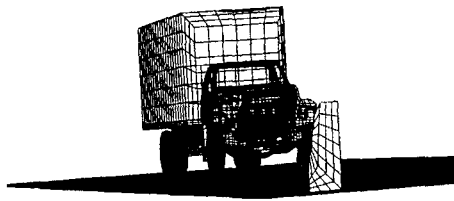
| 방법<br>등급 | 도로교 표준시방서<br>(건설교통부, 1992)<br>(단위 : tonf/m) | Olson<br>모델식<br>(단위 : tonf) | 다중회귀분석에 의한<br>제안식<br>(단위 : tonf) | 결정계수<br>(%) |
|----------|---|-----------------------------|----------------------------------|-------------|
| SB1      | 0.88  | 7.06                        | 13.27                            | 98.35       |
| SB2      | 1.13  | 9.86                        | 14.06                            |             |
| SB3      | 1.58  | 14.94                       | 15.21                            |             |
| SB4      | 1.13  | 22.68                       | 35.11                            | 95.84       |
| SB5      | 1.58  | 34.36                       | 43.29                            |             |
| SB6      | 1.58  | 61.36                       | 70.84                            |             |

7. 결론

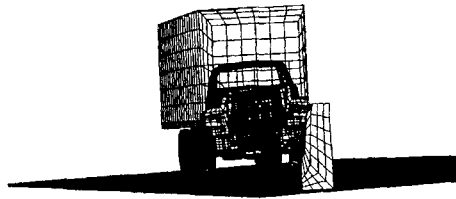
본 연구에서는 현재 한국도로공사에서 사용하고 있는 교량난간에 대하여 유한요소 해석프로그램인 LS/DYNA-3D를 이용하여 차량의 거동을 분석해 보았으며 또한 HVOSM프로그램을 이용하여 충돌하중을 산정해 보았다.

참고문헌

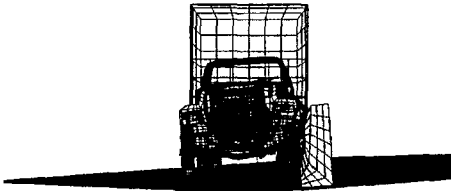
1. 이기덕, 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 연성 및 강성 시스템의 안정성 평가, 전남대학교 박사 학위논문, 1929.
2. 주재웅, 상용 프로그램을 이용한 콘크리트 중앙분리대 방호울타리의 구조적 안정성에 대한 비교 분석, 한국도로공사 도로연구소 연구원, 2002.
3. 한국도로공사 설계처, 교량용 콘크리트 방호울타리 설계방법 검토, 2002.
4. 고 만기, 충격흡수형 고규격 Thrie-Beam 가아드레일의 개발보고서, 공주대학교 방재연구센터, 텍사스 교통연구소(TTI), 1997.
5. 장 승필, 자동차 방호체계의 동력학적 거동에 관한 연구, 서울대학교 토목공학과 구조공학연구실, 1990.
6. D.J. Segal, Highway-Vehicle-Object-Simulation-Model--1976, 4Volumes, Reports FHWA -RD -75 -162-165, Federal Highway Administration, February 1976.
7. M.E. Bronstad, Performance of Longitudinal Traffic Barriers, NCHRP289, Transportation Research Board, 1987.
8. Roadside Design Guide, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1989.



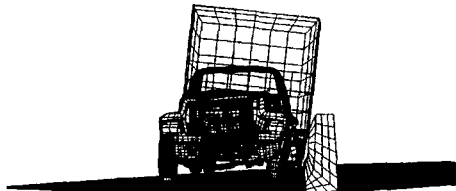
$t = 0.11 \text{ sec}$



$t = 0.2 \text{ sec}$



$t = 0.35 \text{ sec}$



$t = 0.5 \text{ sec}$

< Front View >



$t = 0 \text{ sec}$



$t = 0.12 \text{ sec}$



$t = 0.3 \text{ sec}$



$t = 0.6 \text{ sec}$

< Top View >

그림 7 8톤 차량의 시간대별 차량거동(80km/h)