

# 설계변수에 의한 가아드레일의 동력학적 거동에 관한 연구

## A Study on Dynamic Behavior of Guardrail Associated with Design Variables

우	광	성*	고	만	기***
Woo,	K. S.		Ko,	M. G.	
조	승	현**	김		우****
Cho,	S. H.		Kim,	W.	

.....

### 요 약

본 연구는 국도및 고속도로상에 설치되어 있는 철제 오성방호책인 가아드레일의 동력학적 거동분석을 4개의 설계변수, 즉 보와 지주의 단면형상 충돌시의 차량속도, 충돌각도및 차량중량에 따라 BARRIER VII 프로그램을 사용하여 수행하였다. 컴퓨터 모의해석 프로그램인 BARRIER VII은 비교적 정교한 것으로 실제의 실물충돌시험 결과와 근접한 결과를 보여줄 뿐 아니라 경제적인 이유로 차량과 방호책의 상호작용을 해석하는데 실물충돌시험 대신에 많이 사용된다. 본 연구의 주된 관심은 구조적 적합성, 탑승자 위험도와 차량의 궤적이라 할 수 있다. 이 목적을 위해 최대치짐및 최대충격력이 계산되어 안전노면대 설계와 충격완화 효과를 분석하는데 사용된다. 본 연구의 결과로 부터 도로상의 대형참사를 예방하기 위해서는 가아드레일의 설계기준을 보다 강화할 필요가 있다고 판단된다.

### Abstract

The nonlinear dynamic behaviors of guardrail established on the local or high way have been investigated using BARRIER VII program with respect to four design variables such as section type of beams and posts, impact angle, impact velocity and vehicle weight. Computer simulation programs are sophisticated analytical models for analyzing dynamic vehicle /barrier interactions and provide a relatively inexpensive alternative to full scale crash testing. This study has been focused on the structural adequacy, occupant risk, and vehicle trajectory. For this purpose, the maximum deflection and impact force have been calculated to design the clear zone and to analyze effect of impact attenuation. Also, the acceleration of vehicle and exit angle after collision have been computed to estimate the occupant risk. From this study, it is suggested that we should strengthen the design criteria of guradrail to prevent from disastrous traffic accidents.

.....

\* 전남대학교 토목공학과 조교수  
 \*\* 전남대학교 토목공학과 석사과정  
 \*\*\* 삼환엔지니어링 구조부 차장  
 \*\*\*\* 전남대학교 토목공학과 부교수

이 논문에 대한 토론을 1994년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1995년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

최근에 도로 운송수단의 대형화, 중량화, 고속화 추세와 더불어 도로상에서 발생하는 급격한 차량사고의 증가는 많은 인적, 물적손실을 초래하고 있는 실정이다. '92년 한해 차량사고로 11,585명이 사망했고 312,286명이 부상했다는 사실이 이를 뒷받침해주고 있다. 물론, 운전자의 안전운전 불이행 및 운전미숙 등에 의한 과실인 경우도 많으나 상당 부분 도로의 안전시설 미비로 조그만 실수가 대형사고로 이어지는 경우를 쉽게 발견할 수 있다. 작년 한해만도 경부고속도로상에서 발생한 고속버스의 추락사고는 도로변의 철제 방호책과 관련된 사고였고 호남고속도로상에서 발생한 고속버스의 추락사고는 교량난간과 관련된 대형 참사였다[1]. 기타 도로에서 발생하는 도로 안전 구조물과 관련된 사고들을 종합해 보건데 더 이상 도로 안전시설 미비로 인한 인명 및 재산피해를 간과할 수 없는 시점에 이른 것이다. 그러므로 구조물 및 탑승자의 안전측면에서 도로시설의 확충에 따른 기존도로의 안전시설을 점검하고 설계시 안전기준을 높여야 할 필요성이 대두되고 있는 것이다.

도로 안전구조물의 종류로는 안전방호책(guard rail), 중앙분리대, 교량난간, 충격흡수장치 등이 있으며 각 구조물마다 다양한 형태가 개발되어 있거나 개발중에 있다. 지금까지의 국내실정은 이러한 도로 안전구조물의 독자적인 설계보다는 외국의 설계형식을 모방하는 수준에 있다고 할 수 있으며 설계 시방서도 건설부 제정 도로교 표준시방서등 극히 일부가 있으며 설계항목도 설계하중(design load), 구조물의 높이 등 매우 제한적으로 규정되어 있는 실정으로 파악된다[2]. 다른 일반 구조물과 달리 도로 안전구조물을 설계하는데 있어서는 각 구조물에 차량이 충돌했을 때 구조적거동에 따른 적합성(adequacy)뿐만 아니라 충돌후 차량의 운동 및 충돌차량과 탑승자간의 상호작용을 동시에 생각해야 한다는 것이 특이하다. 예를 들면, 각종 차량이 교량상에 설치되어 있는 교량난간을 넘어 추락하거나 고속도로 중앙분리대등을 넘어 반대 차선에서 진행되는 차량과의 충돌, 철제난간을

부수고 급경사를 이루는 성토단면에 전복되면서 발생하는 차량사고와 같은 대형사고를 미연에 방지할 수 있는 적합한 방호체계를 설계하기 위해서는 이들 도로 안전구조물에 대한 정확한 동력학적 구조해석을 하여 구조물의 저항능력 및 차량궤적(vehicle trajectory)을 파악해야 할 것이다. 또한, 도로 안전구조물의 중요한 설계개념이 되고 있는 충격력(impact force)의 흡수능력이 파악되어야 한다. 여기서, 충격력이란 차량과 도로 안전구조물과의 충돌시 발생하는 수직력(normal force)을 의미하며 충격력이 크면 클수록 탑승자의 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로, 충돌시 매우 짧은 시간에 발생하는 충격력을 구조물의 단면이나 지주(post)의 형상 및 간격의 조절, 또는 충격완화장치(crash cushions)의 설치등을 통해 충격에너지를 분산시키는 방법이 강구되어야 할 것이다. 또한, 충돌 후 구조물의 과다한 변위로 인해 도로변에 위치한 하천, 호수, 절벽, 늪지대, 수로 등의 위험지대(hazard)로의 추락 및 도로변에 설치되어 있는 위험구조물과 차량의 2차 충돌시 발생하는 대형사고를 사전에 방지할 수 있는 안전노변대(clear zone)의 설계가 필수적이 된다. 여기서, 안전노변대란 차도를 벗어난 차량이 안전하게 이용할 수 있는 차도 끝에서부터 시작한 노변공간을 말한다. 이 공간은 갓길, 성토면의 경사면등을 포함하며 그 넓이는 교통량, 차량속도, 노변의 지형등에 따라 결정된다. 이 연구를 수행하는 방법에는 실물충돌시험(full scale crash test)과 수치모형실험으로 나누어 볼 수 있다. 그러나, 실물충돌시험은 막대한 경제적인 재원이 있어야 가능하고 아울러 충돌시험을 위한 충돌시험장이 필수조건이 된다. 그러나, 우리나라의 여건상 이 방법은 어렵기 때문에 수치모형실험(computer simulation)이 모색되었다.

한편, 앞에서 언급된 바와 같이 도로 안전구조물에는 콘크리트로 된 강성방호벽(rigid barrier)과 철제로 된 요성방호벽(flexible barrier)이 있는데 주지하다시피 철제와 콘크리트거동은 별개의 이론적 배경을 요하며 해석할 수 있는 컴퓨터 프로그램도 달리하고 있다. 그러므로, 본 연구에서는 요성방호벽중에서도 국도 및 고속도로변에

설치되어 있는 안전방호책 즉, 가아드레일을 대상으로 구조물로 설정하고 충돌시의 차량속도, 충돌각도, 차량중량, 보와 지주의 단면형상을 설계변수(design variables)로 가정하였다. 즉, 차량속도는 60kn/h와 100kn/h로, 충돌각도는 15°와 25°로 설정하며 차량중량은 SONATA(1.08 ton), BUS(15.2 ton), 트럭(8-14 ton)로 보의 단면은 파형(W-형)단면, 단일박스 및 이중박스 단면으로, 지주단면은 H-형과 파이프형 단면으로 충격완화(impact attenuation)정도를 비교하고자 한다. 설계변수에 따른 동력학적 거동은 BARRIER VII 프로그램을 사용하여 분석하고자 하며 이를 통해 탑승자와 차량과의 상호작용을 정확히 이해하게 하고 현재 국내 시방서에 규정된 설계조건적 적합성을 검토해보고자 한다. 특히, 가아드레일의 최대 변위, 최대 충격력과 차량의 이탈속도 및 가속도 등을 계산하여 탑승자의 안전에 적합한지를 규명하고 차후 도로 안전구조물의 설계방향을 제시하고자 한다.

## 2. 방호책의 일반적사항

### 2.1 방호책의 기능과 종류

방호책은 주행중 진행 방향을 잘못 잡은 차량이 길 밖 또는 대향차선으로 이탈하는 것을 방지하는 동시에 탑승자의 상해 및 차량 파손을 최소화한 줄이고, 차량을 정상 진행 방향으로 복원시키는 것을 목적으로 하며, 부수적으로는 운전자 시선을 유도하는 등의 목적을 갖추고 있는 시설을 말한다. 한편, 방호책의 종류는 구조적 측면과 설치위치에 따라 아래와 같이 분류해 볼 수 있다. 구조적 측면에서는 철제 보(beam)형 방호책, 케이블형 방호책, 콘크리트 보형 방호책으로 분류해 볼 수 있으며 설치위치에 따라 노측용 방호책과 분리대형 방호책으로 나누어 볼 수 있다[3]. 본 연구에서는 노측용 철제 보형 방호책을 해석 모델로 선정하였다.

위의 각 형식은 전부 차량이 충돌할 때 다소의 변형이 수반되는 것으로 반강성형 및 소성형이라 불리어지는 것이다. 탑승자의 안전성에서 볼 때에는 변형하는 형이 바람직하지만, 설치 장소의 조

건에 따라서는 차량이 길 밖으로 벗어나는 것을 방지하고자 하는 목적 때문에 변형하지 않은 형을 필요로 할 때가 있는데 이 경우에는 강성 방호책을 사용할 수 있다.

### 2.2 방호책의 설치 개념

#### (1) 규정에 의한 설계방법

설계방법 또는 설계하중을 시방서의 규정에 따라 방호책 설계를 독자적으로 하는 방법.

#### (2) 표준화된 형식을 채택하는 방법

몇 개의 사용수준(service level)에 대하여 표준화된 방호책 형식 및 재료등을 규정하여 각각의 경우에 맞추어 채택하는 방법으로 국내에서는 1989년 건설부제정 도로안전시설 설치편람의 가아드레일 설치규정을 다음과 같이 제시하고 있다 [4]. 즉, “지주의 높이 60cm, 최대지주간격 4m, 설계하중 250kg/m의 수평력이 상단부에 작용시킨 것, 차량(3.5-14 ton)이 60km/h, 15°로 충돌시 지주를 매입했을 때 방호책의 최대처짐이 1.1m로 제한된다.” 일본 도로교 시방서도 동일한 규정을 두고 있다. 미국의 AASHTO 도로교 시방서에는 각각 경우별로 세밀하게 규정되어 있으나 근본적으로 방호책의 기둥 높이는 68.6cm 이상, 설계하중은 기둥 및 방호책보에 직각으로 10kips(4.5ton)을 사용하도록 되어 있다[5].

최근에 구미에서는 사용수준별 채택방법(Multiple Service Level Approach ; MSLA)에 의하여 방호책을 채택하는 연구가 많이 되고 있다. 그 이유는 제한된 몇 개의 표준형식을 결정하여 이에 대하여 세밀한 충돌시험 또는 컴퓨터 시뮬레이션을 함으로써 안전성을 충분히 검토할 수 있고, 규격화된 방호책은 대량 생산에 의하여 그 비용을 절감시킬 수 있고, 설계과정을 간단히 할 수 있기 때문이다. 사용수준별 채택방법에서는 방호책의 안전도를 위험도(degree of risk)와 허용위험도(acceptability of risk)에 의하여 확률적으로 계산한다. 위험도는 충돌사고의 발생확률, 심도확률, 도로의 사용수준, 한계충격에 의하여 결정되며, 허용 위험도는 시간, 지역, 환경에 따라 변하는 주관적인 판단으로서 일정기간동안 방호책의

단위 길이에 대해서 허용되는 한계충격의 최대수를 나타낸다. 위험도와 허용위험도로부터 방호책의 사용수준을 결정하고 이에 맞는 방호책의 높이를 설계한다. MSLA의 규정을 위하여 실모델에 대한 많은 실험과 실제 사고 및 붕괴에 대한 자료, 가능성에 대한 컴퓨터 시뮬레이션이 뒷받침되어야 한다[6].

### 3. 프로그램 BAAIER VII

#### 3.1 일반 및 적용범위

BARRIER VII은 1973년 U.C. Berkely의 Powell 교수팀[7]에 의해 개발된 자동차 방호시설의 전산구조해석 프로그램으로 차량이 요성 방호책과 충돌하였을 때 2차원 평면에서 차량과 방호책간의 상호작용 및 동력학적인 거동 즉 방호책의 최대변위, 충격력, 가속도, 이탈각도, 이탈속도 등을 분석할 수 있는 프로그램으로 현재 널리 사용되고 있는 이유는 실물실험의 결과와 잘 일치한다는 것이 확인되었기 때문이다[8, 9]. 방호책의 거동은 비선형 거동(nonlinear behavior)을 하며 재료적 비선형에 대해서는 비탄성 해석(inelastic analysis)이 수행되며 대변형 이론(large deflection theory)에 기초를 둔 기하학적 비선형해석이 고려되어 실질적으로 비선형 동적해석(nonlinear dynamic analysis)이 고려되고 있다.

#### 3.2 방호책모델(Barrer Model)

방호책은 비선형 거동을 규정하고, 하중이력(hysteresis)효과를 고려하였으며, 인장과(extensionally) 휨에(flexurally) 대해 양방선형(bilinear) 탄성-완전소성 항복을 가정하였다. 가아드레일은 1차원 뼈대 구조물로 이상화하였으며, 가아드레일과 충돌하는 곳에 절점을 가정하여 자동차의 경계를 결정하고 자동차와 충돌할 접촉면을 설정하였다. 여기에 범선력과 접선력이 작용한다. 그리고 7개의 부재 유형을 사용할 수 있는데 즉, 보(beam), 케이블(cables), 지주(posts), 기둥(columns), 용수철(springs), 쿨롱마찰 감쇄부재(Coulomb friction dampers), 점성 감쇄 부재(viscous dampers)이다. 본 연구에서는 보와 지

주부재를 사용하였는데, 보부재는 일양한 단면적이고 전단변형을 무시하였다. 인장에 대해 보부재는 축방향력이 항복값을 넘었을 때 전길이에 걸쳐 항복이 발생한다고 가정하며, 휨에 대해 부재의 단부에 국부적인 소성현상이 발생하게 되면 항복한다고 가정한다.

한편, 방호책은 비선형 동적해석을 수행하여야 하는데 이에 대한 이론적 배경을 살펴보면 다음과 같다. 임의의 하중에 대해 비탄성상태(inelastic)의 구조적 거동을 결정하기 위해서는 2차 단계적 절차(step-by-step procedures)를 사용하며, 접선강성도 매트릭스(tangent stiffness matrix)인  $\{K_T\}$ 은 부재에 연결된 절점의 미소변위  $\{\Delta d\}$ 과의 관계를 정식화 하면 식(1)와 같다. 즉,

$$\{dF\} = [K_T] \{\Delta d\} \quad (1)$$

여기서,  $[K_T] =$  접선강성도 매트릭스

접선 강성도매트릭스는 탄성 매트릭스,  $[K_E]$ , 와 기하학적 강성도,  $[K_G]$ 의 합이다. 그러므로, 구조물의 접선방향의 강성도는 탄성적, 기하학적 강성도를 결합함으로써 얻어진다. 또한, 비선형 구조물의 동적해석을 위한 동적 평형 방정식(equation of dynamic equilibrium)은 식 (2)와 같이 정의된다 즉,

$$[M] \{\ddot{r}\} + [C] \{\dot{r}\} + [K] \{r\} = \{P(t)\} \quad (2)$$

여기서

$[M]$ =질량 행렬(diagonal mass matrix) ;

$[C]$ =감쇄 행렬(damping matrix) ;

$[K]$ =강성도 행렬(stiffness matrix) ;

$\{\ddot{r}\}$ =절점 가속도 행렬(matrix of joint acceleration) ;

$\{\dot{r}\}$ =절점 속도 행렬(matrix of joint velocity) ;

$\{r\}$ =절점 변위 행렬(matrix of joint displacements) ;

$\{P(t)\}$ =하중 행렬(load matrix).

#### 3.3 차량 모델(Vehicle Model)

차량은 질량과 회전관성을 갖는 임의 형상의 2

차원 강체(rigid body)로 이상화하며 강체 주위에는 전방향으로 독립된 비탄성 스프링(inelastic spring)을 설치하여 방호책과의 충돌시 접촉점을 규정할 수 있게 하였다. 즉, 차량의 경계는 가아드 레일과 접촉을 하게 될 몇 개의 절점으로 정의하였으며, 이 때 용수철은 질량이 없고 점성감쇄효과(viscous damping)가 없는 것으로 가정된다. 스프링계수는 실험에 의해 차종별로 얻어진다. 바퀴 위치는 해석시에 브레이크를 작동(on) 또는 미작동(off) 함으로써 정의된다. 차량의 접촉점과 바퀴의 위치는 각각 자동차 진행방향(r방향) 자동차 진행의 직각방향(s방향) 좌표설정으로 그림 1과 같이 정의된다.

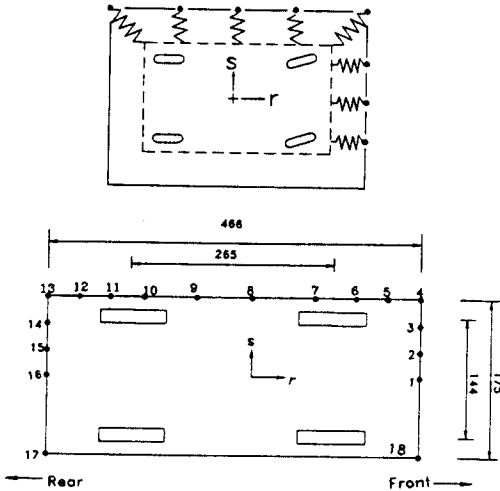


그림 1. 차량 모델

3.4 지주모델(Post Model)

방호책에 사용되는 지주는 통상 지반에 매입되어 있으므로 매입된 지주는 지반과의 상호작용을 유발하게 된다. 지반의 수평반력계수를 단단한 점토(N=29)로 가정하여 그림 2와 같이 매입된 지반에서 발생하는 지반의 수평반력의 영향을 스프링 모델로 치환한 후 독립말뚝의 지지력과 횡방향력의 상관관계로부터 지반의 수평반력계수  $K_s$ 는 Vesic[10]의 방정식으로 정의할 수 있다.

$$K_s B = 1.3^{12} \sqrt{\frac{E_s B^4}{E_p I_p}} \frac{E_s}{1 - \mu^2} \tag{3}$$

여기서,  $E_p I_p$  = 말뚝의 휨강성(flexural rigidity)

$B$  = 말뚝의 직경

여기서,  $E_s$ 는 여러 가지 방법으로 얻을 수 있는데 본 연구에서는 Yoshida의 Yoshida의 SPT Test[10]로부터 다음과 같이 정의한다. 이 때의 평균오차는 실험치와 비교하여  $\pm 20\%$ 이다.

$$E_s = 6N \quad (\text{kg/cm}^2) \tag{4}$$

여기서,  $N$  = 표준관입시험치

한편, 다음과 같은 상관조건이 만족되어야 비로소 지주의 탄-소성 거동이 시작된다고 본다[7].

$$\left(\frac{F_A}{F_{YA}}\right)^2 + \left(\frac{F_B}{F_{YB}}\right)^2 = 1 \tag{5}$$

여기서  $F_A, F_B$  : 주응력 방향으로 재하된 하중

$F_{YA}, F_{YB}$  : 주응력 방향으로의 항복강도

$F_A$ 와  $F_B$ 는 지주가 탄-소성 영역에 들어도 계속 바뀔 것이다. 그러나 항복조건을 만족시키기 위해서는 한 방향의 힘이 증가하면 다른 방향의 힘은 감소되어야 한다. 만일 지주가 다시 탄성영역내에 들어오면, 하중의 부재하(unloading)가 일어난다. 처짐이 다음 식을 만족시키면 지주가 완전히 파괴된다고 생각한다[7].

$$\left(\frac{\Delta_A}{\Delta_{UA}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_B}{\Delta_{UB}}\right)^2 = 1 \tag{6}$$

여기서  $\Delta_A, \Delta_B$  : 주응력 방향으로의 처짐

$\Delta_{UA}, \Delta_{UB}$  : 주응력 방향으로의 최대 허용 처짐

지주가 항복 파괴를 일으키면 잔여 구조물이 이 지주가 받던 하중을 받게 된다. 실제로 이 파괴가 순간적으로 발생하지는 않을 것이므로, 10개의 시간 단계 동안 파괴가 지속된다고 보아도 좋다. 따라서 지주의 힘이 동등하게 10개로 나뉘어져 전달된다. 파괴가 시작되면 이 지주는 더 이상 구조물

의 강성에 기여를 할 수 없지만 질량은 계속 고려되어야 한다. 지주는 매우 강성이 크고 강하다고 가정함으로써 강체에 연결된 것을 고려 하였다.

승용차, 중형 승용차, 시내 버스로 나누어 평가하도록 되어 있다. 또한, 충돌속도의 범위는 30km/h~100km/h로, 충돌시 입사각의 범위는 0°~25°로 규정하고 있다.

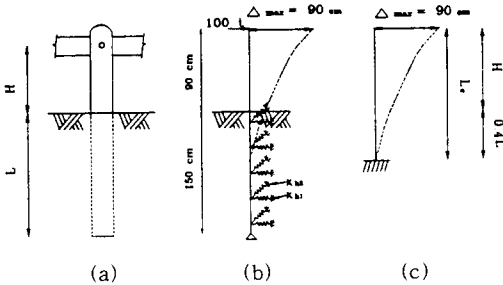


그림 2. 지주의 스프링 모델

### 3.5 탑승자의 안전도 기준

1981년 3월 미국 교통연구원(TRB ; Transportation Research Board)은 국립합동 고속도로 연구계획보고서 230(NCHRP ; National Cooperative Highway Research Program)을 통하여 방호시설을 포함한 고속도로 부속 시설물의 안전수행도 평가과정 추천안을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 탑승자의 안전도 평가를 위한 지침이 우선적으로 제시되어야 하겠으나 우리나라에서는 아직 이러한 지침이 세부적으로 확립되어 있지 않으므로 표 1과 같이 NCHRP 230을 참고하였으며 탑승자의 위험도 상한치를 결정하였다[11].

표 1. 위험도 상한치

위험도 항목	충돌 방향	
	종방향	횡방향
탑승자 충돌속도 ( $\Delta V$ ) <sub>limit</sub> , m/s	12m/s	9m/s
탑승자 충돌후 차량미끄러짐 가속도 ( $\alpha$ ) <sub>limit</sub> , g	20g	20g

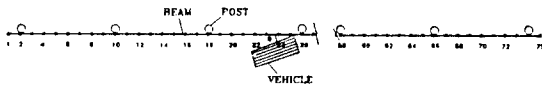
안전수행도 평가요인으로는 첫째, 구조적인 적합성(structural adequacy) 둘째, 탑승자의 안전(occupant risk) 셋째로 충돌후 차량궤적(vehicle trajectory)으로 분류하고 있다. 한편, 충돌조건은 차량의 증량, 차량의 속도, 차량의 충돌각도로, 차량유형은 차량증량에 따라 초소형 승용차, 중소형

## 4. 전산구조해석 결과

### 4.1 모델링 및 입력데이터

그림 3과 같이 보부재는 74개의 전단변형이 고려되지 않은 보요소를 50cm 등간격으로 분할하여 모델링 하였으며, 강종은 SWS 41( $\sigma_y=2500$  kg/cm<sup>2</sup>)를 사용하여 해석하였다. 지주는 그림 2와 같이 땅속에 매입되어 지주와 지반의 상호작용이 발생할 수 있도록 3차원 스프링으로 모델링하였으며 이 때의 수평방향 스프링상수  $k_s$ 는 Vesic의 이론식에 의해 계산하면 15kg/cm<sup>3</sup>을 얻을 수 있다. 한편, 스프링 모델의 구조해석은 SAP90 소프트웨어로 수행한 결과 지면으로부터 근입 길이의 40% 정도 즉, 유효길이  $L_e$ 는  $L_e=H+0.4L$ 로 나타낼 수 있다. 즉, 그림 2(b)의 모델을 고정단을 갖는 캔틸레버로 그림 2(c)와 같이 이상화할 수 있는데 이 때 캔틸레버의 전체길이를 지주의 유효길이라 정의하며 그림 2(b)를 SAP90으로 부터 구한 최대처짐  $\Delta_{max}$ 를 갖을 수 있는 캔틸레버의 길이를 말한다. 이 때 유효길이  $L_e$ 는 탄성해석의 처짐공식  $\Delta_{max}=PL_e^3/3EI$ 로 부터 결정하였다. 강종은 보부재와 마찬가지로 SWS 41사용하여 해석하였다.

또한, 차량모델은 그림 1과 같이 주변에 스프링으로 둘러싸인 강체모델로 이상화 하였으며 본 연구에서는 BUS와 SONATA를 기본 모델로 하여 그림 4와 같이 제원 및 절점번호를 정의하였다. 차량에 대한 입력자료는 서울대연구팀[12]의 실험 측정 데이터값을 사용하였다. 한편, 트럭(8t, 10t, 14t)과 같은 차량에 대해서는 BARRIER VII Manual에 제시된 것 같이 강성도 변화량은 해석하는데 별 영향을 주지 않기 때문에 무시하고 차량의 중량과 질량관성 모멘트, 건인력등만 고려하여 해석하였다.



BEAM POST VEHICLE

단면 형상	E (t/cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )	W (kg)
과 형	2100	50	2.5	13.2	10.37
단일 박스	2100	61.55	2.5	11.8	9.27
이중 박스	2100	59.84	2.5	13.44	10.56

그림 3. 방호책의 유한요소 모델

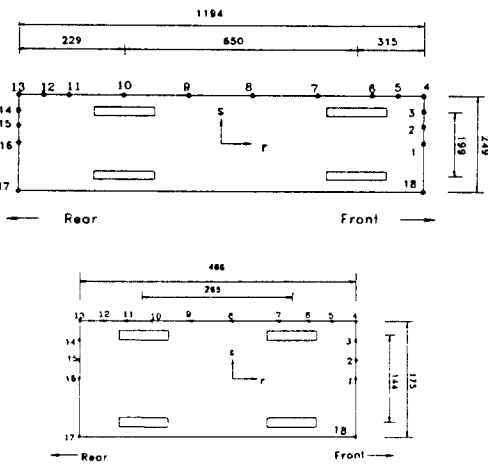


그림 4. BUS와 SONATA 차량의 강제 모델

4.2 설치편람 규정검토

건설부 1989년도 도로안전시설 설치편람에 의하면 차중량이 3.5ton~14ton의 범위내에서 속도 60km/h, 보형상 과형단면, 지주는 파이프형, 충돌각도 15°일 때 보부재의 최대변위 110cm를 넘지 않아야 하고 설계하중은 250kg/m로 규정되어 있

표 2. 설치편람의 규정에 대한 최대처짐 및 최대모멘트

차량중량 (ton)	최대 처짐 (cm)	최대모멘트 (t-cm)
8	71.5	41
10	106	40
14	161	42
설치편람 규정에 의한 허용치	110	66.6

다[3, 4, 13]. 그러므로, 본 연구에서는 현행 설계대로 차량충돌시 구조적 적합성을 만족시켜 주는 지에 대해 검토하여 보았다.

검토결과 최대처짐은 14ton일 때는 허용치를 초과하게 되므로 차중량은 3.4~10ton까지 조정되어야 하며, 나머지 항목 즉 설계최대 모멘트는 14ton에서도 허용치를 만족시킴을 알 수 있다.

여기서, 최대 모멘트 산정은 AASHTO의 시방서 규정 PL/6에 근거한 것이며 P는 보부재와 지주가 만나는 점에 작용하는 수평력을 나타내며 L은 지주간격을 말한다[5, 12].

4.3 설계변수에 의한 평가

앞에서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 설계변수로 보와 지주의 단면형상, 충돌각도, 충돌속도 및 차중량으로 나누어 각각의 경우 현행 표준설계에 따른 단면치수를 적용하여 동력학적 거동을 분석하였다.

1) 단면형상에 따른 비교

차량은 중형 SONATA를 사용하고 충돌속도 100km/h, 충돌각도 15°, 지주는 H형 단면으로 고정시켜 놓고 첫째 보의 단면에 따라서, 둘째 지주의 단면에 따라서 비교하여 보았다.

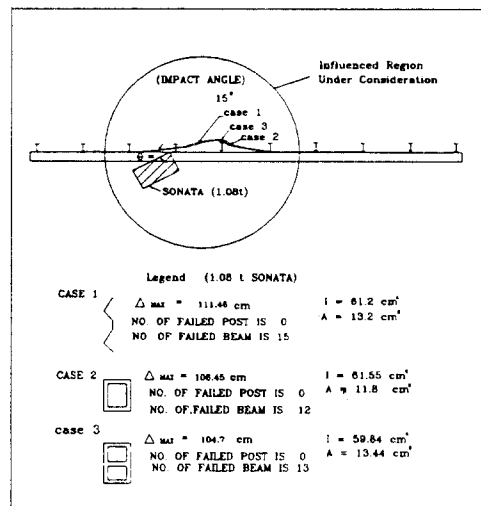


그림 5. 보단면형상에 따른 처짐변화

① 보의 단면

보의 단면형상은 그림 5에서 보는 바와 같이 파형(W형), 단일박스 및 이중박스형으로 분류하였다. 이 때 파형단면의 최대처짐은 111.46cm인 반면 단일 및 이중박스형 단면은 각각 106.45cm, 104.7cm가 발생하였다. 한편 충돌시 시간에 따른 충격력은 파형단면은 그림 6에서 보는 바와 같이 9ton인 반면 단일박스 및 이중박스의 경우 6.9ton로 24% 정도 충격력의 감소가 발생함을 알 수 있었다. 현재 보단면에 대한 우리나라 설계규정에는 박스형 단면이 채택되지 않고 있는데 본 연구에서 보는 바와 같이 충돌시간에 따른 에너지분산 효과가 뛰어난 것을 알 수 있는 까닭에 향후 설계시 고려함이 바람직할 것으로 사료된다. 또한, 탑승자의 안전측면중 이탈각은 충돌각의 60%를 넘게 되면 충돌후 본래의 진행방향으로 복귀하지 않고 인접 차선으로 진입하게 되어 충돌사고의 위험이 있다고 NCHRP 230에 규정되어 있다. 이에 따르면 모든 보단면이 위험상한선인 9도를 초과함을 알 수 있는데 이에 대한 중요한 이유는 뒤에서 설명되겠다.

표 3. 보단면에 따른 동력학적 거동비교

단면 형상	최대충격력 (ton)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
파형	9.1	18	-12.73
단일박스형	6.9	13	-9.8
이중박스형	6.9	12	-11.6
탑승자 위험도 상한치		20	-9

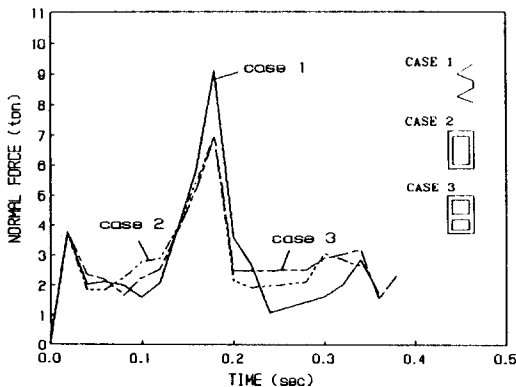


그림 6. 보단면형상에 따른 수직력변화

지만 지주의 형상이 H형 단면을 사용하기 때문이라고 밝혀졌다. 이에 대한 종합적인 결과는 표 3과 같다.

② 지주의 단면

지주의 단면형상은 SWS41 강재로 된 H형과 원형파이프단면에 따른 거동이 분석되었는데 보 단면은 우리나라 설계방식에 규정된 파형단면을 사용하였다. 최대처짐의 비교가 그림 7에 나타나 있는데 H형 단면은 111.46cm, 파이프형은 51cm가 산출됨을 보여 주고 있다. 파이프형의 최대처짐이 약 54% 정도 작은 이유는 충돌시 파이프 단면자체가 찌그러짐에 따라 에너지를 어느 정도 흡수 해주므로 전체 변형에너지는 보의 처짐에 따른 변형에너지와 파이프 단면의 찌그러짐에 따른 변형에너지(distortional energy)의 합으로 나타낼 수 있다. 그러므로, 에너지 흡수능력 즉, 충격완화(impact attenuation)는 H형 보다 우수함이 입증

표 4. 지주단면에 따른 동력학적 거동비교

단면 형상	최대충격력 (ton)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
H형	9.1	18	-12.7
파이프형	4.43	4.4	-5.3
탑승자 위험도 상한치		20	-9

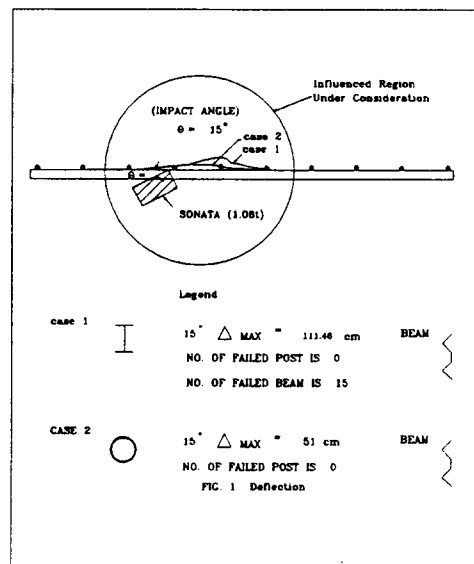


그림 7. 지주형상에 따른 처짐변화



되는 것이다. 이에 대한 검증은 그림 8에 잘 나타나 있다. 즉, H형 단면의 최대충격력이 9.1ton인데 비하여 파이프형은 4.43ton으로 무려 51% 정도의 충격완화 효과를 보여주고 있다. 아울러 탑승자의 위험(occupant risk)을 예측할 수 있는 가속도와 이탈각도 각각 4.4g와 5.3도로 위험상한치인 20g와 9도에 비해 탑승자 안전성 측면에서도 월등함이 입증된다. 여기서 탑승자 위험도 평가의 근거는 NCHRP 230에 제시된 횡방향, 종방향에 대하여 20g(g : 중력가속도)와 이탈각도가 충돌각의 60%까지를 근거로 하여 판명한 것으로 인체가 생존가능한 상한치를 의미한다. 이에 대한 종합적인 결과를 표 4와 같다.

2) 충돌 각도별 비교

보단면은 파형으로 하고, 지주단면은 파이프형으로 고정시켰을 때 차량은 중형차 SONATA가 100km/h로 충돌하였을 때 충돌각에 따른 동력학적 거동을 비교하였다. 일반적으로 NCHRP 230 보고서에 의하면 충돌시 입사각은 0°-25°로 규정하고 있으므로 본 연구에서는 각각 15°, 25°로 나누어 분석하였다. 15°에서 25°로 증가함에 따라 최

대처짐, 가속도 및 이탈각도의 증가가 표 5에 나타나 있으며 최대충격력은 4.43ton에서 6.6ton으로 약 49%가 증가됨을 알 수 있었다. 그림 9에는 충돌각이 25°일 때의 차량의 속도변화를 보이고 있는데 대략 0.4초 이후에는 안정된 속도로 본래 진행방향으로 진입되어 달리고 있는 상황을 보여주고 있다.

3) 충돌 속도별 비교

보단면은 파형으로 하고, 지주단면은 파이프형으로 고정하고 차량은 SONATA가 각도 15도로 충돌하였을 때 속도에 따른 거동을 비교하였다. 충돌속도는 NCHRP 230 보고서에 규정되어 있는데로 충돌속도의 범위를 30kn/h-100km/h로 정하여 각각 60km/h와 100km/h에 대한 비교를 하였다. 최대충격력은 60km/h에서 100km/h으로 증가함에 따라 3.96ton에서 4.43ton으로 대략 12%정도 증가함을 알 수 있었고 최대처짐 및 가속도와 이탈각도에 따른 비교가 표 6에 나타나 있다. 그림 10에는 속도에 따른 종방향 가속도(r-acceleration)의 변화가 도시되어 있다. 대략 0.4초 이후에는 일정한 가속도를 갖는다는 것을 발견할 수

표 5. 충돌각도에 따른 동력학적 거동비교

충돌각도	최대 처짐 (cm)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
15°	51	9.1	-5.3
25°	111.4	10.2	-14.9
탑승자 위험도 상한치		20	-15

표 6. 충돌속도에 따른 동력학적 거동비교

충돌속도	최대 처짐 (cm)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
60	23.6	4.4	-3.42
100	51	9.1	-5.25
탑승자 위험도 상한치		20	-9

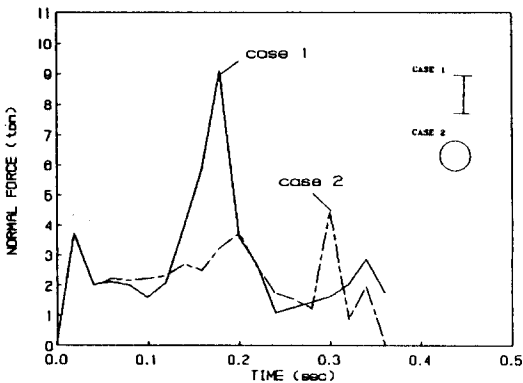


그림 8. 지주형상에 따른 수직력변화

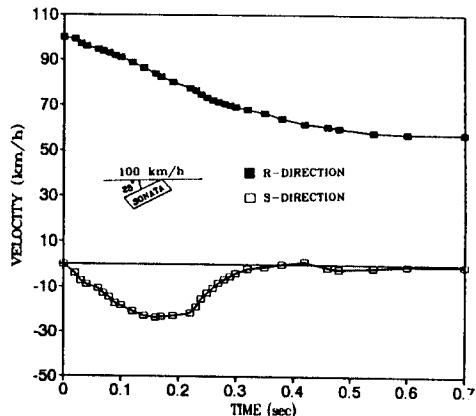


그림 9. 차량이 25도로 충돌했을 때 속도변화

있다. 한편, 차량이 60km/h로 충돌하였을 때 시간에 따른 충돌각의 변화가 그림 11에 도시되어 있다.

4) 차량 중량별 비교

보단면은 과형으로 하고, 지주는 파이프형으로 고정하고 충돌각 15°, 속도 100km/h로 충돌하였을 때 차량중량에 따른 거동을 비교하였다. 차종은 현재 국도 및 고속도로상에 많이 통행되는 중형 SONATA와 대형버스를 모델로 선정하였다. 중형차의 경우는 위험상한치내에 드는 반면 대형버스와 이에 준하는 대형 화물차의 경우는 최대처짐이 790cm로 안전노변대의 설치가 시급함을 알 수 있고 이탈각도도 27°로 상한치 9°를 훨씬 상회하여 인접차선으로 진입이 예측된다. 국도 및 고속도로상의 대형사고가 주로 대형화물차 및 대형버스로 부터 비롯되는 참사를 감안할 때 우리나라의 가아드레일의 설계기준을 보다 강화할 필요가 있으며 위험구조물이나 위험지대(hazard)와의 간격은 대략 8m 정도의 여유공간을 확보해야 할 것으로 판단된다.

표 7. 차량중량에 따른 동력학적 거동비교

차량 중량 (ton)	최대 처짐 (cm)	가속도 (g)	이탈각도 (degree)
SONATA (1.08ton)	47	8.8	-5.5
버스 (15.2ton)	790	1.44	-27
탑승자 위험도 상한치		20	-9

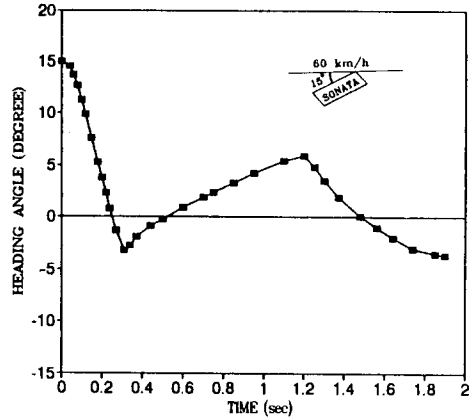


그림 11. 차량이 60km/h로 충돌했을 때 각도 변화

5. 결 론

본 연구는 국도 및 고속도로상에 설치되어 있는 철제 요성방호책인 가아드레일의 동력학적 거동 분석을 4개의 설계변수, 즉 보와 지주의 단면형상 충돌시의 차량속도, 충돌각도 및 차량중량에 따라 BARRIER VII 프로그램을 사용하여 수행하였다. 연구의 주된 관심은 충돌시 발생하는 최대처짐과 최대충격력을 분석하여 구조적인 적합성 및 충격 완화능력을 비교분석하는 것이고 또 다른 관심은 충돌시의 차량의 가속도변화, 이탈각 등을 산정하여 탑승자의 위험도 정도를 판정하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 주요한 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 건설부 도로안전시설 설치편람의 규정에 대한 검토를 해본 결과 설치편람 규정에 의한 허용치에 들 수 있는 차량중량이 3.5~14ton까지 되어 있는데 10ton을 넘게 되면 허용처짐 110cm를 넘게 되므로 차량중량을 3.5~10ton으로 제한하거나 허용처짐을 160cm로 상향 조정하는 것이 요구된다.

둘째, 단면 형상의 비교에서 보의 단면은 과형, 단일박스형, 이중박스형에서 단일박스형이 충격력 흡수능력면에서나 탑승자 위험도 상한치 측 가속도, 이탈각도 측면에서 가장 적합한 것으로 평가된다.

세째, 지주의 단면형상은 H형과 파이프형이 비

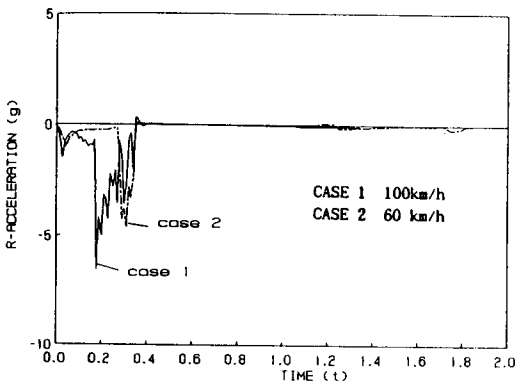


그림 10. 속도에 따른 종방향가속도 변화

교되었는데 파이프형을 사용하게 되면 최대처짐, 최대충격력, 가속도 및 이탈각도에 매우 큰 영향을 보임을 알 수 있었다. 즉, 최대처짐은 H형 단면에 비해 약 54% 정도 감소되었고 최대충격력도 약 51% 정도 감소되어 충격완화 효과가 매우 뛰어나움을 발견할 수 있었다. 아울러, 탑승자 안전성 측면에서도 파이프형을 사용하게 되면 위험도 상한치를 넘지 않음을 표 4로부터 알 수 있다. 그러므로, 향후 설치될 가아드레일에는 반드시 파이프형 단면을 사용할 것이 요구된다.

네째, 충돌각도 측면에서 15°에서 25°로 증가됨에 따라 최대처짐은 약 118% 증가되며, 최대충격력은 49% 정도 증가되었다. 한편, 충돌속도 측면에서 60km/h에서 100km/h로 증가시킴에 따라 최대처짐은 약 116% 증가되며, 최대충격력은 대략 12% 정도 증가됨을 알 수 있었다.

다섯째, 차량중량에 따른 동력학적 거동은 대형버스의 경우(15.2ton) 최대처짐이 790cm로 안전노변 공간의 설치가 시급함을 알 수 있다. 이탈각도도 27°로 위험 상한치 9°를 훨씬 상회하여 인접차선으로의 진입이 예측되어 대형사고가 우려된다. 그러므로, 국도 및 고속도로상의 대형참사가 주로 대형화물차나 대형버스에 기인하므로 우리나라 가아드레일의 설계기준을 보다 강화할 필요가 있다고 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었기에 귀 재단에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 경찰청 도로교통안전협회, 1993년판 교통사고통계 (1993)
2. 대한토목학회, 건설부제정 도로교표준시방서 (1992)
3. 한국도로공사, 도로설계요령 (1992)
4. 건설부, 도로안전시설 설치편람 (1989)
5. AASHTO, *Roadside Design Guide* (1992)
6. 황학주, "건설공사 안전성 확보제도의 활성화 방안 - 교량난간의 안전성에 관한 문제점 및 대책을 중심으로 -", 건설업재해 예방심포지움, 한국산업안전공단 (1990)
7. G. H. Powell, "BARRIER VII : A Computer Program for Evaluation of Automobile Barrier Systems", *Final Report*, U. C. Berkely, California (1973)
8. D. L. Sicking, "Applications of BARRIER VII in the Design of Flexible Barrier", *Texas A & M University* (1988)
9. C. B. Parnell, "Development of a Bridge Railing End Treatment at Intersecting Streets and Drives", *Master Thesis*, Texas A & M University (1990)
10. J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, Second Edition, McGraw-Hill (1977)
11. J. D. Michie, "Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Appurtenances", *National Cooperative Highway Research Report 230*, Transportation Research Board, Washington, D.C. (1981)
12. 장승필, 자동차 방호체계의 동력학적 거동에 관한 연구, 서울대학교 토목공학과 교량공학 연구실 (1990)
13. 栗本典彦 編著, 道路の 付屬施設, 日本 交通工學 研究會, 昭和 61年

(접수일자 : 1993. 12. 20)