

연성 방호구조물의 입력변수에 대한 동적 퍼포먼스 민감도 분석

Performance Sensitivity of Flexible Barriers to Input Parameters

이규세*

Yi, Gyu Sei

Abstract

To evaluate the performance of safety apparatus without the full scale crash test, the computer simulation is inevitable. But, to improve the accuracy of computer simulation, it is important to reasonably determine the input parameters in which the interaction of vehicle-guardrail-soil should be accounted for. This study is focused on how to enhance the reliance of the dynamic performance of guardrail obtained by computer simulation. Analyses were done on the sensitivity of output variables to the change of input parameters by using BARRIER VII of which the usefulness was proved on the barrier-vehicle impact analysis. Through the analyses important input parameters, which give sensitive effects to output of computer simulation, are found out, and methods to determine such parameters are suggested to improve the accuracy of simulation.

Key words : Flexible Barrier, Guardrail, Impact, Safety Apparatus

요 지

실물 충돌 실험을 실시하지 않고 하는 안전구조물의 성능 평가는 컴퓨터 해석에 의한 검토가 불가피하다. 그러나 이러한 컴퓨터 시뮬레이션의 정확도를 높이기 위해서는 연성방호구조물의 차량-가드레일시스템-지반의 상호작용을 고려한 특정 입력변수의 올바른 결정이 중요하게 된다. 본 연구에서는 가드레일로 대표되는 연성방호구조물의 동적 퍼포먼스를 컴퓨터 시뮬레이션으로 측정하되, 시뮬레이션의 정확도를 높이기 위한 방안을 도출하기 위하여 구조물·차량의 충돌 해석에 유용성이 입증된 Barrier VII 프로그램을 이용하여 입력변수에 대한 출력변수의 변화 양상을 분석함으로써 안전성검토에 있어서 중요한 입력변수를 도출하고 정확한 입력변수를 결정하기 위한 방안을 제시하였다.

핵심용어 : 연성 방호구조물, 가드레일, 충격, 도로 안전 시설

1. 서 론

안전구조물은 고속도로, 국도 등에 설치된 가드레일, 중앙분리대 같은 종방향 구조물로 차선을 이탈한 차량의 운동 에너지를 효과적으로 흡수하여 탑승자의 안전을 도모하고 충돌차량이 과도하게 다른 차선을 침범하여 후속사고를 유발하지 않도록 하는데 설치목적이 있다.

이러한 목적을 위한 연구에는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 방법과 실물충돌실험이 병용되는데, 시뮬레이션은 고가의 실물충돌 실험횟수를 줄이기 위한 예비설계나 예비 성능검토에 사용하며 최종적인 결론은, 충돌메카니즘의 복잡성과 시뮬레이션의 한계 때문에 실물충돌실험에 의존한다. 국내의 경우가 분야의 연구가 초보적인 단계로, 시뮬레이션을 이용한 제한적인 수준에 머물러 있다.

국내의 기존연구사례로는 시뮬레이션을 통한 강성 교량간간의 연구 외에(오민수, 1994), 한강 상에 있는 교량의 추락

방지용 교량간간을 검토한 바 있고(장승필, 1990), 국내에 설치된 연성 방호구조물의 성능 검토를 한 적이 있으나(우광성 등, 1994), 시뮬레이션 프로그램을 효과적으로 이용하는데 많은 경험과 가정이 필요한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 가드레일로 대표되는 연성방호구조물의 동적 퍼포먼스를 컴퓨터 시뮬레이션으로 측정하되, 시뮬레이션의 정확도를 높이기 위한 방안을 도출하기 위하여 구조물·차량충돌 해석에 유용성이 입증된 Barrier 프로그램을 이용하여 입력변수에 대한 출력변수의 변화 양상을 분석함으로써 안전성검토에 있어서 중요한 입력변수를 도출하고 정확한 입력변수를 결정하기 위한 방안을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. Barrier VII 프로그램

BARRIER VII은 일반적인 형상의 연성 방호구조물에 차량

*정회원 · 선문대학교 토목공학과 교수(E-mail : gyusyi@sunmoon.ac.kr)

이 충돌하는 것을 분석하는 프로그램으로 차량은 비탄성의 스프링으로 둘러싸인 임의의 평면 형상으로 모델링하고 방호 시설은 보요소, 케이블요소, 지주, 스프링, 링크 및 Damping 요소의 평면 결합으로 모델링하여 동적, 소성, 대변위 거동을 예측할 수 있는 프로그램이다. 충돌 시 차량은 방호벽을 따라 미끄러지는데 이때 차량과 방호벽이 서로 주고받는 힘과 타이어와 포장면과의 힘을 고려할 수 있어서 방호 시설의 설계 및 평가에 효용성이 입증되었다. 그럼에도 불구하고 해석 과정이 복잡하고 입력 자료의 작성에 많은 경험과 실험이 필요하며 출력 결과의 해석에도 많은 경험과 실험결과 비교 결과와의 비교 검토가 필요하다. BARRIER VII이 방호벽과 차량을 평면 2차원으로 모델링하고 있기 때문에 지표에서 수직 방향의 고려, 특히, 가드레일 지주의 입력 자료에 3차원적인 고려를 하여야 하는데 이는 가드레일 지주와 지반과의 충격력에 대한 상호작용을 정확히 이해한 후에 가능하다. 이 프로그램에서 지주 요소에 관한 중요한 세 가지의 Parameter는 탄성처짐에 대한 주축과 비주축의 강성도값과 지주의 파괴를 규정하고 있는 양방향의 최대 허용 변위량 그리고 양방향에 대한 지주의 항복모멘트이다. 이들 값들은 충격실험을 통해서만 정확히 결정할 수 있다.

3. BARRIER VII 시뮬레이션과 실물충돌실험 결과의 비교

Barrier VII 프로그램의 효용성을 입증하기 위하여 1985년 미국 SWRI (South West Reserch Institute)에서 실시한 실험 번호 SPI-1의 실물 충돌 실험(SWRI, 1987)을 Barrier을 이용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 비교해 보았다. 이 실험은 가드레일의 거동에 영향을 미치는 흙의 중요한 인자를 결정하기 위해 시행되었다. 실물 실험에 사용된 방호구조물은 미국 내 가장 널리 사용되고 있는 G4(1S)형의 연성 방호구조물을 사용하였다. W형 보의 선단 사이의 거리는 27 inch(68.58 cm)이고, 흙의 조건은 NCHRP 230 의 S1 토양 조건인 110%의 다짐 조건이었다. 충돌 속도와 각도는 각각 60 mph (96.5 km/h)와 25도 였다. 가드레일의 제원 및 물성치는 표 1과 같고 지주는 W6×8.5형강을 사용하였다.

가드레일의 가로보의 모델링의 경우에는 bilinear 탄-소성관계를 정의하기 위해 필요한 보의 항복 축력과 모멘트로 충돌 시 Strain Rate Effect를 고려하기 위해 보단면의 항복 축력과 항복 모멘트에 1.39배를 하여 사용하였다.(Parnell, 1992) (표 1)

그러나, 지반과의 상호작용으로 그 거동 특성을 해석적으로 구하기 어려운 지주의 입력자료는 실험을 통하여 결정하는 것이 타당하다. 지주의 입력자료를 취한 실험 데이터로는

표 1. 보의 제원 및 물성치

Beam	단면2차 모멘트 I_{xx} (in. ⁴)	단면적 A (in. ²)	탄성계수 E (ksi)	무게 W (lb/ft)	항복축력 F_y (k)	항복 모멘트 M_y (k·in)
12 ga. W	2.33	1.99	30000	6.77	95.5	68.5

SwRI의 Pendulum Test의 결과(SWRI, 1987)를 사용하기로 하였는데 이 실험이 6×8 크기의 튜브형 지주에 대한 것이어서 Pendulum 실험결과를 W6×8.5의 지주에 상당하는 값으로 수정할 필요가 있었다. Pendulum 실험결과 및 입력치 수정과정은 다음과 같다.

• 지주강성도

지주에 대한 Pendulum Test에서 얻은 황하중-황변위에서부터 탄성 영역의 기울기를 지주강성도로 사용하게 된다.(그림 1) 박스형과 W형 지주의 흙과의 상호작용이 같다고 가정하고, 지주를 흙의 어느 일정 깊이에서 고정단을 갖는 캔틸레버 보(cantilever)로 생각하여, 이의 기울기를 단면 2차모멘트의 비에 따라 수정하였다.(표 2)

• 지주 항복 모멘트

지주의 항복 모멘트는, Pendulum Test의 지주 황하중-황변위 관계를 탄성-완전소성 관계로 모델한 후 그로부터 항복 하중을 결정하고(그림 1), 그 하중과 지표면으로부터 하중 위치까지의 거리를 곱하여 결정할 수 있다. 하지만 Pendulum Test에 사용한 단면의 형상이 달라, 단면 2차 모멘트와 소성 단면계수의 차이가 크기 때문에, 충격 효과 및 지주-지반 상호작용이 고려되어 있지만, Pendulum 실험결과로부터 얻은 항복 모멘트를 바로 사용하기가 어렵다. 그리고, 이론적으로 지주-지반 상호작용 및 Strain Rate Effect를 고려하여 지주의 항복 모멘트를 구하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에, 지주의 황하중-황변위 관계의 기울기가 지반의 지주에 대한 지지력 상실보다는 지주 자체의 소성 힌지(Plastic Hinge) 형성에 크게 좌우되는 실물 충돌 실험결과에 근거하여(SWRI, 1987) 지주 단면의 소성 모멘트(Plastic Moment)를 지주의

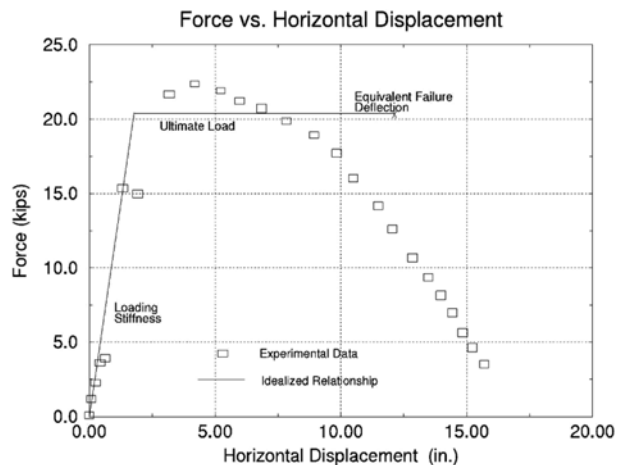


그림 1. 하중변위 관계 곡선

표 2. BARRIER VII 입력용 지주의 수정 물성치

축	항 목	강성 Stiffness (k/in)	항복모멘트 Yield Moment (k·in)	극한전단력 Ultimate Shear (k)	파괴시 변위 Δ_f (in.)
	Weak axis	3.82	201.8	100.0	10.63
	Strong axis	4.24	224.2	100.0	11.81

항복 모멘트로 사용하였다. 정적 하중 하에서는 모멘트-회전 각 관계를 탄성-완전 소성 관계로 모델할 때 단면의 소성 모멘트를 항복 모멘트로 사용하는 것이 타당하고, 충격 하중에서는 Strain Rate Effect를 고려하여 소성 모멘트보다 큰 모멘트를 지주의 항복 모멘트로 사용하여야 하는데, 지반의 지주에 대한 지지력 변화가 지주의 항복 모멘트를 감소시키는 경향이 있기 때문에 소성 모멘트를 지주의 항복 모멘트로 사용하여도 Strain Rate Effect를 어느 정도 반영하는 것이라 하겠다.

• 지주 파괴 시 변위

지주 파괴 시 변위는 Pendulum Test에서 얻은 하중-변위 곡선의 면적인 에너지와 탄성-완전소성으로 이상화된 형태의 면적으로 구한 에너지를 같다고 하여 구할 수 있다. 박스 형에 대한 실험값은 34 cm 였고, 이외의 실험자료에(Calcote, 1987; Bronstad, 1986; Jeyapalan, 1984) 근거하여 30 cm를 사용했다.

차량 모델링의 경우, 실물 충돌 실험에 사용된 차량은 1978년형 Plymouth Fury의 차체에 강판을 실어 4490lb(2039 kg)의 중량과 37370 in-lb-sec² (4218 kg-m²)의 Yaw에 대한 질량 관성 모멘트를 갖는 차량인데, 그 차량의 제원 및 강성이 제시되어 있지 않기 때문에 Parnell(NCHRP, 1993)의 연구에 사용한 동급의 Cadillac 승용차를 차량 모델로 사용하였다. BARRIER VII에 입력된 차량 자료는 표 3과 같다.

실험 결과는 실물충돌실험에 있어서 얻을 수 있는 자료 중 가장 재현성이 있는 자료라 할 수 있는 동적변위와 가속도 등을 비교하였다. 그 결과 방호 울타리의 변위, 차량의 가속도 등 실물 충돌실험결과와 비교할 때 입력 자료가 정확하다고 보면 모의실험이 실물실험에 상당히 근접한 결과를 줄 수 있다는 결론을 얻었다. 표 4의 결과에서, 실제 구조물의 강성은 A36 Steel의 최소항복 응력(36 ksi)을 사용하여 해석한 결과와, 보고되어 있는 평균항복응력(45 ksi)을 사용한 결과의 사이에 있다는 것을 보여주고 있다. 따라서, 정확한 실험에 의한 지주의 입력변수나 차량의 입력변수는 아니었지만, 실험

자료를 토대로 합리적으로 입력변수를 결정할 때에는 BARRIER VII에 의한 수치해석 결과는 실물충돌 실험의 결과를 타당하게 시뮬레이션 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 입력 변수에 대한 BARRIER VII 출력의 민감도 분석

앞장에서와 같이 해석적으로 결정하기 힘든 입력변수를 실험적으로 결정하여, 방호구조물의 거동을 시뮬레이션 하였을 경우에는 실물 충돌실험의 결과를 합리적으로 모사할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 우리나라에는 현장 지반 조건 하의 지주에 대한 입력 변수의 실험 자료가 전무한 실정이다. 따라서 이들 Parameter가 시뮬레이션 결과에 어떤 영향을 미치는가를 수치로 보이고 정확한 입력의 필요성을 입증하기 위해서 시뮬레이션 결과에 대한 정성적인 분석을 시도하였다.

방호구조물의 모델은 우리 나라 “A”형 연성 방호구조물인 가드레일을 사용하였고, 차량은 우리 나라의 “방호책설치요령”의 제시 기준인 3.5톤 및 14톤 차량을 모델로 사용하였다. 민감도 분석 시에 BARRIER VII 시뮬레이션에 필요한 기준 입력 변수의 결정에 대한 사항은 4.1절에 나타내었고, 그에 대한 민감도 분석결과는 4.2절에 나타내었다.

4.1 모델링 (Modeling)

가드레일의 형상은 지주 지중 매입 시에 대하여 모델링 되었다. 표준 “A”형 가드레일은 방호구조물의 단부가 충분히 구속되어 방호구조물의 길이가 구조물의 거동에 미치는 영향이 작은 이상적인 경우로 가정하고, 수치 해석적인 불안정을 피하도록 방호 구조물의 길이를 조정하여 120 m 길이의 방호구조물을 모델하였다.

지주간격은 설치요령에서의 최대 지주 간격으로 제시하고 있는 4m로 하였고, BARRIER VII의 보 요소가 요소의 단부에서만 항복을 고려하기 때문에 차량과의 접촉이 예상되는 지주 사이의 보를 여러개의 보 요소로 모델하여 접촉이 예상되는 보의 전 길이에 걸쳐 발생하는 소성거동을 모델하고자 했다.

표 3. BARRIER VII 입력용 차량 자료

무게 (Weight)	질량관성 모멘트 (Mass moment of inertia)	강 성(Stiffness)				
		Before Bottoming	After Bottoming	Unloading	Bottoming Distance	
4500 lb	47000 in·lb·sec ²	차 체	0.040/in ²	0.250 k/in ²	7.50 k/in ²	12 in.
		바퀴	1.440 k/in ²	9.000 k/in ²	11.88 k/in ²	1 in.

표 4. 충돌실험과 모의충돌실험의 결과

경 우 (F _y)	최대 변위 (cm)	50 msec 가속도(G)		Ridedown Acc.	탈출 각도
		종방향	횡방향	횡방향	
2533kg/cm ² (36 ksi)	96 cm	4.93	4.54	5.04	10.9
3167kg/cm ² (45 ksi)	81 cm	5.68	4.76	4.96	11.3
실물실험	90 cm	2.9 / 3.4*	5.2 / 5.5*	5.2 / 7.6*	18.2

* : film / transducer,

4.1.1 보(Beam) 모델

보 단면의 항복모멘트는 단면의 항복모멘트 대신 소성 모멘트를 사용하였다. 소성 모멘트에 대한 단면의 항복 모멘트의 비인 형상계수는 1.33이었다. 보의 강종은 KS 규격 SS 400 ($\sigma_y = 2500 \text{ kg/cm}^2$)을 사용하였고, 보의 자세한 구조제원은 설치요령에 제시되어 있는 노측용 방호구조물의 표준제원을 따랐다.(표 5) 설치 요령에 제시된 “A”형 가드레일의 보의 단면적은 실 제원을 사용하여 얻은 단면적의 82%인데 이는 단면적이 전부 효율적으로 외력에 저항하지 않는다는 것을 가정한 수치이다. 본 연구에서는 충격 하중하의 Strain Rate Effect가 항복강도를 증가시키는 것을 고려하여 실 제원을 사용하여 얻은 단면적(표 5)을 이용하여 보에 대한 항복 강도를 결정하였다. 입력변수로 사용한 보의 물성치는 표 6 과 같다.

4.1.2 지주(Post) 모델

시뮬레이션을 통하여 방호구조물의 거동을 평가함에 있어서 가장 문제가 되는 부분은 지주와 흙의 상호작용을 고려하여 모의 실험의 입력변수들을 결정하는 데 있다. 즉, BARRIER VII의 입력변수 중 지주의 횡방향 강성도와 지주 파괴시의 변위는 충격하중하의 지주-흙 상호작용을 고려하여 결정하여야만 한다. 그러므로, 합리적인 가정에 근거한 간략한 해석방법을 사용하여 입력변수를 결정하고, 그 값을 기준으로 그 입력변수에 대한 지주-지반 상호작용과 충격효과의 민감도를 분석하였다. 해석의 기준이 될 특정 입력변수의 간단한 해석적인 결정 절차는 다음과 같다.

• 지주 강성도(Stiffness)

지주-지반의 상호작용을 고려하여 지주의 강성을 결정하기 위하여 그림 2와 같이 지반의 수평반력의 영향을 스프링으로 모델하였다. 단위 길이당 스프링의 강성(K_{spring})은 아래와 같은 Vesic이 제안한(Bowles, 1977) 식을 사용하여 결정하였다.

$$K_{spring} = k_s B = 1.3^{12} \frac{E_s B^4 E_s}{E_p I_p (1-\mu^2)} \quad (1)$$

여기에서,

k_s = 수평지반반력계수

$E_p I_p$ = 말뚝의 휨강성(flexural rigidity of pile)

B = 사각형파일의 경우 폭, 원형파일의 경우 직경

μ = 흙의 포아슨 비(Poisson's Ratio)

E_s = 흙의 탄성계수

표 6. 보의 물성치

종 별	단면2차 모멘트 I_{xx} (cm ⁴)	단면적 A (cm ²)	탄성계수 E (t/cm ²)	무게 W (kg/m)	항복 축력 F_y (kg)	항복 모멘트 (kg·cm)
A	196.8	22.87	2100	17.95	57175	151228

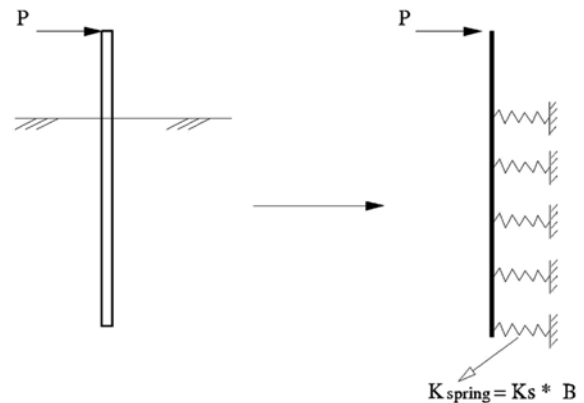


그림 2. 지주-스프링 모델

E_s 의 값은 표준관입시험(SPT)을 통해 Yoshida 와 Yoshinaka (Bowles, 1977)가 제안한 아래 공식으로 구했고, 이 공식은 $\pm 20\%$ 의 평균오차를 가지고 있다고 보고되어 있다.

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

여기에서,

N = 표준관입시험치

이렇게 모델링된 지주에 단위 하중을 가로보가 연결된 지주의 위치에 주고, 이 때 발생하는 하중 위치에서의 처짐 값의 역수를 취하여 지주의 강성 (stiffness)을 구하게 된다.

위의 절차로 구한 수평반력계수(k_s)값은 12.23 kg/cm^3 이었고, 단위 길이당 스프링 강성은 171 kg/cm 였다. 지표면 60cm의 높이에 하중이 작용하는 “A”형 가드레일의 지주를 그림 2에 보이는 것 같은 지주와 스프링으로 모델하여, SAP90으로 수치해석한 결과 지주의 강성(stiffness)은 1200 kg/cm (6.7 k/in) 으로 나타났다.

• 지주의 항복 모멘트 (Yield Moment)

지주의 강종은 KS 규격인 SS 400 ($\sigma_y = 2500 \text{ kg/cm}^2$)을 사용하였다. 지주의 항복 모멘트로 단면의 소성모멘트(plastic moment)를 사용하였으며 그 값은 $M_p = 199430 \text{ kg·cm}$ (172.9 k·in)이고, 형상계수는 1.27이었다.

표 5. 노측용 연성 방호구조물(가드레일)의 제원

종별	보				지주			브래킷트			보 중심 높이 (cm)	최대 지주 간격 (m)
	폭 (mm)	코루게이션 (mm)	두께 (mm)	단면적 (cm ²)	비갈지름 (mm)	두께 (mm)	매입깊이 (cm)	폭 (mm)	코루게이션 (mm)	두께 (mm)		
A	350	75	4.0	18.7	139.8	4.5	165 (40)	70	31	4.5	60	4.0 (2.0)

주 1) 괄호안의 수치는 교량, 옹벽, 암거 등의 콘크리트 중에 설치할 때이다.

주 2) 보의 중심높이는 노면에서의 높이를 말하며, 연석 등이 있을 때는 그 상단부터의 높이를 말한다.

• 극한 전단 강도(Ultimate Shear Strength)

본 연구에서는 충실한 시공을 가정하여, 흙의 전단 파괴보다는 보의 과도한 소성 변형에 의한 지주와 보의 분리나 지주 자체의 소성 힌지 발생에 의한 지주 파괴 현상을 모델하고자 하였다. 따라서, 흙의 전단 파괴를 모델하는 입력 변수인 지주의 극한 전단 강도 값을 상당히 크게 하여 지주가 상당한 소성 변형을 겪은 후 파괴되도록 모델하였다.

• 지주 파괴 시 변위 (Failure Distance)

이 입력변수는 탄성-완전소성으로 모델링 된 지주가 항복한 후 항복 강도를 유지하며 발현할 수 있는 최대 변위으로써, 지주의 완전한 파괴 조건을 모델하기 위한 인자이며, 외국의 실험 자료에 근거하여 30cm를 지주 파괴 시 기준 변위로 사용하였다.(Calcote, 1987; Bronstad, 1986; Jeyapalan, 1984)

이와 같이 구한 가드레일의 시뮬레이션에 사용되는 지주에 대한 기준 입력 변수는 표 7과 같고, 대칭성을 가지는 원형 중공단면이므로 이 기준 입력 변수들은 방호구조물 길이방향과 직각방향, 양 방향에 대하여 똑같이 적용된다 하겠다.

4.1.3 차량(Vehicle) 모델링

설계 차량에 대한 차량 충돌 실험 결과는 현실적으로 구하기가 어려워, 현재 보고되어 있는 실험 결과를 사용 할 수밖에 없다. 그러나, 보고되어 있는 차량 강성도 설치요령의 설계 차량인 3.5톤이나 14톤 차량과 동급의 차량에 대한 실험 결과가 아니기 때문에, 3.5톤과 14톤 설계 차량과 비슷한 중량의 차량에 대한 강성을 사용하였다.

• 3.5톤 차량 모델

설치요령의 설계 차량인 3.5톤의 차량에 대한 질량관성모멘트나 차체의 강성 등의 자료가 없으므로 정확한 모델을 한다는 것은 현 시점에서는 어려운 일이라 하겠다. 따라서, 차량 중량이 3.5톤인 트럭을 선정하여, 중량을 그 차량의 제원에 등분포시켜 질량관성모멘트를 구하였다. 본 연구에서는 3.5톤의 차량 강성으로 Parnell(Parnell, 1992)의 논문에 보고되어 있는 3.5톤과 가까운 차량 중량 2톤에 대한 차량 강성을 사용하였다. 차량에 대한 입력 변수는 표 8과 같다.

표 7. 기준 지주 물성치

항목 단위	강성 (Stiffness)	항복모멘트 (Yield Moment)	극한전단력 (Ultimate Shear)	파괴시 변위 Δ_f
SI 단위	1200 kg/cm	199430 kg·cm	45400 kg	30 cm
USCS 단위	6.7 k/in.	172.9 k·in	100.0 k	11.8 in.

표 8. 3.5톤, 14톤 차량의 입력자료

무게 (Weight)	질량관성모멘트 (Mass moment of inertia)	강성 (Stiffness)			
		Before Bottoming	After Bottoming	Unloading	Bottoming Distance
3500 kg (7709 lb)	15665 kg·cm ² (138410 in·lb·sec ²)	2.8 kg/cm ² (0.040 k/in ²)	17.6 kg/cm ² (0.250 k/in ²)	528 kg/cm ² (7.50 k/in ²)	4.72 cm (12 in.)
14000 kg (30837 lb)	174t·m ² (1532215 in·lb·sec ²)	5.0 kg/cm ² (0.071 k/in ²)	17.6 kg/cm ² (0.250 k/in ²)	528 kg/cm ² (7.50 k/in ²)	4.72 cm (12 in.)

• 14톤 차량 모델

14톤 차량의 모델링에 필요한 차량 입력 변수에 대한 실험 자료가 없어, 차량의 제원은 일반적인 버스의 제원(오민수, 1994)을 사용하였고, 차량 강성의 탄성 계수는 일본토목연구소(장승필, 1990)의 20톤 트럭에 대한 값을 사용하였다

4.2 지주 입력 변수에 대한 민감도 분석

4.1에서 결정한 가드레일 및 차량의 입력변수를 기본으로 하여 지주 입력 자료중 파괴시 변위, 횡방향 강성, 지주 항복 모멘트에 대해 BARRIER VII 프로그램 결과의 민감도 분석을 각각 실시 하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

4.2.1 지주 파괴시의 변위(Δ_f)에 대한 민감도

4.1절의 모델링에서 결정한 지주파괴 시의 변위 (Δ_f)에 대한 기준값은 30 cm였다. 이 값을 기준으로 지주파괴 시의 변위를 10 cm부터 60 cm까지 10 cm 씩 증가시켜가며 출력 결과에 대한 민감도를 분석하였다.

소성 거동을 하고 있는 지주는 항복 하중에 지속적으로 저항하다가, 지주 파괴시의 변위(Δ_f)에 도달하였을 때 저항 능력을 상실하게 된다. 이와 같이 지주의 파괴가 고려되면 파괴된 지주가 저항하던 힘은 인접 부재에서 나누어 부담하게 되므로 지주 파괴시의 변위(Δ_f)를 작게 잡으면 방호구조물의 강성의 약화가 빨리 일어나게 된다. 반면에, 지주 파괴시의 변위(Δ_f)가 커질수록 강성의 약화를 늦추어 표 9에서 볼 수 있는 것처럼, 일반적으로 충돌 시 종방향, 횡방향 가속도가 크게 나오며, 방호구조물의 최대 변위는 줄어들게 되는 것이다. 14톤 차량을 사용하여 해석하였을 경우, 지주 파괴시의 변위 (Failure Distance, Δ_f)가 20 cm에서 60 cm로 될 때 방호구조물의 최대처짐은 174cm에서 94cm로 46% 줄어들었다.(표 9) 그림 3에는 Δ_f 의 변화에 대한 방호구조물의 최대 변위 값들이 그래프로 나타나 있다. 이 그래프로부터 3.5톤 차량의 경우는 Δ_f 가 커짐에 따라 최대 변위가 줄어드는 경향을 보였으나, 14톤 차량의 경우에 비하여 변화폭이 매우 작다는 것을 알 수 있다.

이 관계를 지주 파괴시 변위(Δ_f)별 방호구조물의 횡하중-횡 변위 관계로 정성적으로 나타내 보면 그림 5와 같다. 이 그림에서 ①②③④⑤는 Δ_f 를 점진적으로 증대시켰을 때의 방호구조물의 P- δ 곡선을 정성적으로 보인 것이다. 이 그림에서 Δ_f 가 작을수록 작은 하중 하에서 지주 파괴가 일어나 방호구조물이 약화되어 P- δ 곡선이 완만해진다. 그림 5의 직선 AB는 소형차 충돌에서 Δ_f 의 변화에 대한 방호구조물의 최대 변위값($\delta_{b,max}$)의 변화폭이고 직선 CD는 대형 차량에 대한 변화폭이다. 직선 AB와 CD를 비교하여 볼 때 차량 중량이

표 9. 지주 파괴시 변위(Δ_f) 변화에 대한 방호구조물의 거동

Δ_f (cm)	14톤 차량이 충돌한 경우				3.5톤 차량이 충돌한 경우			
	종방향 가속도 (G)	횡방향 가속도 (G)	최대 변위 (cm)	파괴된 지주 수	종방향 가속도 (G)	횡방향 가속도 (G)	최대 변위 (cm)	파괴된 지주 수
10	0.33	0.59	174.35	11	0.79	1.36	52.45	2
20	0.35	0.72	139.24	9	0.85	1.68	46.48	1
30	0.34	0.83	122.23	5	0.87	1.73	40.16	1
40	0.34	0.84	123.60	5	0.87	2.13	36.20	0
50	0.44	0.97	98.02	3	0.87	2.13	36.20	0
60	0.44	0.98	94.06	2	0.87	2.13	36.20	0

· 지주강성 = 1200 kg/cm, 지주의 항복모멘트 = 199430 kg·cm, 극한 전단력 = 45.4 t

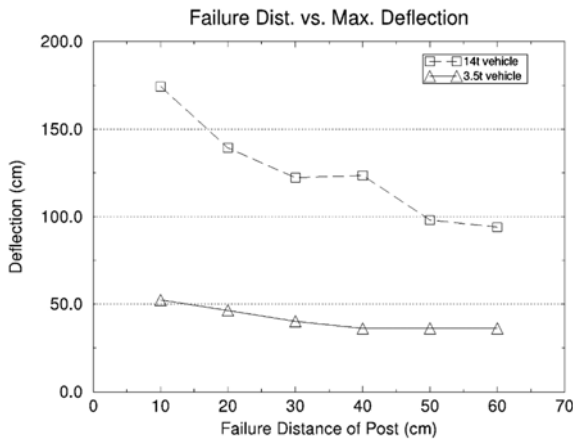


그림 3. 지주파괴시 변위 변화에 대한 방호구조물의 거동(최대 변위)

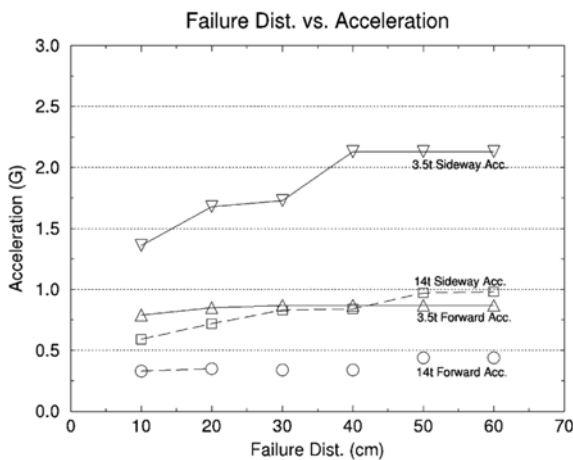


그림 4. 지주파괴시 변위에 대한 차량의 가속도 변화

커질수록 Δ_f 의 변화에 대하여 변화폭이 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서 중량이 무거운 차량에 대하여 지주 파괴시 변위(Δ_f)가 방호구조물의 최대 변위에 민감하게 영향을 주기 때문에 대형차에 대한 방호구조물의 컴퓨터 시뮬레이션에서 지주 파괴시 변위(Δ_f)의 입력에 특별한 주의를 하여야 할 것이다.

그림 4에서 차량 진행 방향의 최대 가속도(Max. of 50 msec Avg. Acc.)가 Δ_f 의 변화에 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타나고 있으며 이는 3.5톤, 14톤 차량에 공통된 현상이다. 반면에 3.5톤 차량의 최대 가속도가 14톤 차량의 최대 가속도에 비해 약 0.5G 크게 나타나고 있는데 이는 충분히 예견된 일이다.

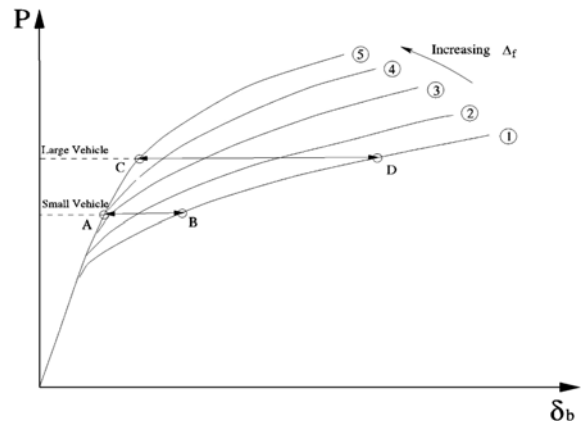


그림 5. 지주파괴시 변위별 방호구조물의 횡하중-횡변위 관계

반면에 차축 직각 방향의 최대 가속도의 경우 3.5톤 차량이 Δ_f 의 변화에 민감한 반응을 보였는데 ($\frac{G \text{ 변화량}}{\Delta_f \text{ 변화량}} = 0.7G$) 반해 14톤 차량의 변화율은 같은 차종의 차축 방향 변화율에 비해서는 컸지만 3.5톤 차량에 비해서는 완만한 ($\frac{G \text{ 변화량}}{\Delta_f \text{ 변화량}} = 0.3G$) 것으로 나타났다. 이는 방호구조물의 강성이 증가할수록 충돌 시 소형 차량의 회전운동이 대형 차량에 비해서 큰 때문인 것으로 보인다.

4.2.2 지주 횡방향 강성에 대한 민감도

SWRI 실물 실험에서의 102 cm의 매입 길이와 NCHRP 230의 S1토양 조건하의 지주에 대한 Pendulum Test로부터 얻은 지주의 횡방향 강성(K_c)이 지주가 지표면에 고정되었다고 가정할 때 얻어지는 강성(K_c)의 약 4%정도여서 지반이 지주를 구속하는 정도가 고정단에 비해 매우 작다는 것을 알 수 있었다. 컴퓨터 시뮬레이션 시에 입력 변수 중 지주 강성에 대한 출력의 민감도 분석을 하기 위하여 노측용 연성 방호구조물 중 우리 나라에서 가장 많이 사용되고 있는 A형 가드레일을 선택하였다. 매입 깊이가 165 cm이고 원형 단면을 갖는 지주의 강성을 캔틸레버보로 가정하여 얻은 강성(K_c)의 1.4%부터 18.2%까지 2.8%씩 변화시키면서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 간략한 해석식으로 구한 기준이 되는 지주 횡방향 강성은 1200 kg/cm로 K_c 의 9.4% 였다. 시뮬레이션 결과가 표 10, 그림 6, 그림 7과 그림 8에 나타나 있는데 그림 6으로부터 지주의 강성(K_p)이 K_c 의 7% 이하에서 변화할 때 방호구조물의 최대 변위에 민감하게 영향을 주

표 10. 지주 강성 변화에 대한 방호구조물의 거동

k (kg/cm)	14톤 차량이 충돌한 경우				3.5톤 차량이 충돌한 경우			
	종방향 가속도 (G)	횡방향 가속도 (G)	최대 변위 (cm)	파괴된 지주 수	종방향 가속도 (G)	횡방향 가속도 (G)	최대 변위 (cm)	파괴된 지주 수
180	0.33	0.68	186.87	7	0.77	1.21	81.99	2
540	0.35	0.86	141.25	5	0.80	1.69	53.85	1
890	0.34	0.86	127.58	5	0.84	1.61	41.30	1
1250	0.33	0.82	121.56	5	0.88	1.72	39.52	1
1610	0.35	0.80	118.26	5	0.93	1.84	37.36	0
1970	0.38	0.78	116.56	5	0.94	1.97	36.14	0
2320	0.39	0.75	115.27	5	0.96	2.03	36.64	0

· 지주 파괴시 거리 $\Delta_f = 30$ cm, 지주의 항복모멘트 = 199430 kg/cm, 극한 전단력 = 45.4 t

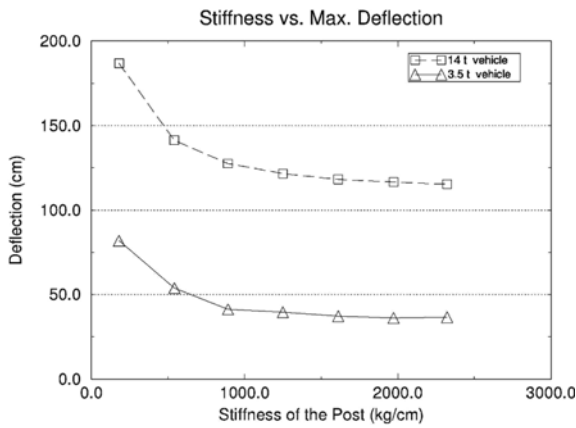


그림 6. 지주강성 변화에 대한 방호구조물의 거동(최대변위)

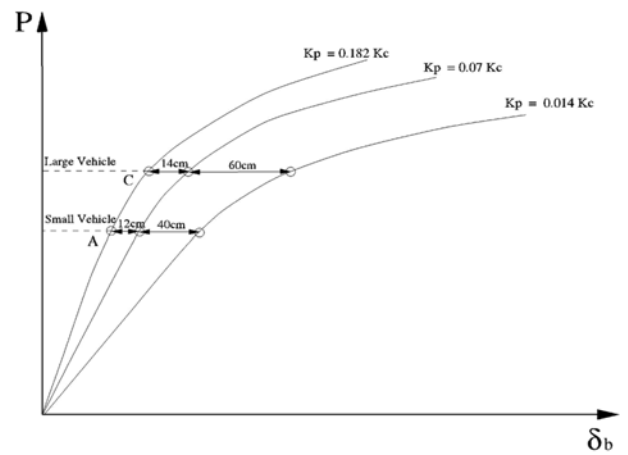


그림 8. 지주의 강성 (K_p) 별 방호구조물의 횡하중-횡변위 관계

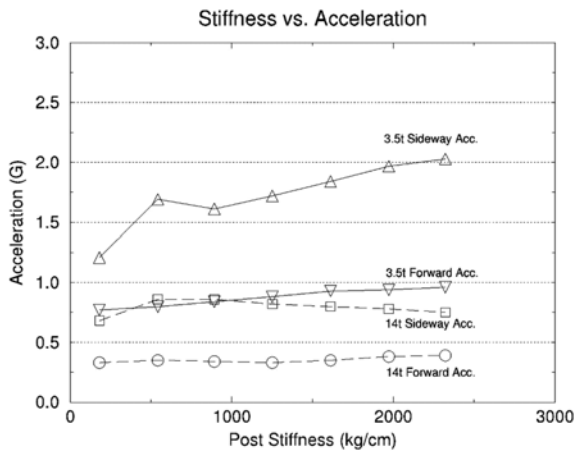


그림 7. 지주강성 변화에 대한 차량의 가속도 변화

고 7% 이상에서는 크게 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었는데 이는 3.5톤, 14톤 차량에 공통된 현상이다.

이를 수치로 나타내 보면 14톤 차량에 대해서 K_p 가 K_c 의 1.4%에서 7%로 변화할 때 방호구조물의 최대 변위 값 ($\delta_{b,max}$)의 변화폭이 약 60 cm였고 3.5톤 차량에 대해서는 약 40 cm였다. 그리고 7%에서 18.2%로 변화할 때는 14톤 차량에 대해서 약 12 cm였고 3.5톤 차량에 대해서는 약 5 cm였다.

이 관계를 지주 강성별 방호구조물의 횡하중-횡변위 관계로 정성적으로 나타내 보면 그림 8과 같다. 이 그림은 지주강성 (K_p)을 점진적으로 증대시켰을 때의 방호구조물의 P- δ_b 곡선을 정성적으로 보인 것이다. 이 그림으로부터 지주 파괴시 변

위 (Δ_f)에 대한 민감도 분석에서처럼 소형차보다 대형차에 대하여 지주 강성의 변화가 방호구조물의 최대 변위에 민감하게 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

그림 7에서 차량 진행 방향의 최대 가속도가 K_p 의 변화에 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타나고 있으며 이는 3.5톤, 14톤 차량에 공통된 현상이다. 반면에 차축 직각 방향의 최대 가속도의 경우 3.5톤 차량이 K_p 의 변화에 민감한 반응을 보였는데 반해 14톤 차량의 변화율은 완만한 것으로 나타났다. 이는 지주 파괴시 변위에 대한 민감도 분석에서처럼 방호구조물의 강성이 증가할수록 충돌 시 소형차량의 회전운동이 대형 차량에 비해서 큰 때문인 것으로 보인다.

4.2.3 지주의 항복 모멘트에 대한 민감도

실물 실험에 대한 검증 과정에서 밝힌 바와 같이, 지반-지주 상호 작용과 Strain Rate Effect를 고려하여 이론적으로 지주의 항복 모멘트($M_{y,post}$)를 결정하는 것이 매우 어렵다. 본 절에서는 $M_{y,post}$ 의 변화가 컴퓨터 시뮬레이션 출력에 어떤 영향을 미치는가를 보고자 했다. 구조강 SS 400의 최소 항복응력 2.5 t/cm² (36 ksi)에 대한 단면의 항복 모멘트 (M_y)와 소성 모멘트(M_p) 그리고 평균 항복응력 3.2 t/cm² (45 ksi)에 대한 소성 모멘트(M_p)를 $M_{y,post}$ 로 사용하여 14톤 차량에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

위에서 가정한 $M_{y,post}$ 값들은 BARRIER VII 사용자들이

표 11. 지주의 항복 모멘트 변화에 대한 방호구조물의 거동

모멘트 (t·cm)	종방향 가속도 (G)	횡방향 가속도 (G)	최대 변위 (cm)	파괴된 지주 수
156.8	0.32	0.80	148.13	5
199.4	0.34	0.83	122.23	5
252.5	0.38	1.01	109.32	4

· 지주강성 = 1200 kg/cm, $\Delta_f = 30$ cm, 극한 전단력 = 45.5 t

흔히 이용할 수 있는 값들이다. 시뮬레이션 결과가 표 11에 나타나 있는데, 지주의 항복 모멘트($M_{y,post}$)가 작아질수록 방호구조물의 최대변위값($\delta_{b,max}$)이 크게 나타났다. 이는 $M_{y,post}$ 가 작은 값일수록 작은 하중 하에서 지주가 항복에 도달하여 방호구조물이 약화되어 작은 하중 변화에도 변위 변화폭이 크기 때문이다.

최소 항복응력을 사용하여 얻은 M_y 와 M_p 에 대한 $\delta_{b,max}$ 의 차이는 약 17%였고 최소 항복응력의 M_y 와 평균 항복응력의 M_p 에 대한 $\delta_{b,max}$ 의 차이는 약 26%였다. 이와 같이 BARRIER VII 사용자들이 쉽게 $M_{y,post}$ 로 가정하여 사용하는 값들에 대해서 방호구조물의 최대 변위값이 크게 변화하기 때문에 지주의 항복 모멘트 결정 시 많은 주의를 기울여야 할 것이다.

차량 가속도의 경우 지주 파괴시 변위 (Δ_f)나 지주 강성 (K_p)의 변화에 대한 민감도 분석에서처럼 차량 진행 방향의 최대 가속도는 $M_{y,post}$ 의 변화에 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났고 차축 직각 방향의 최대 가속도는 보다 민감한 반응을 보였다.

5. 결 론

연성방호구조물의 개발이나 성능평가에는 충돌실험전에 수 치해석적인 방법을 이용하는 것이 좋다. 시뮬레이션을 통해 적절한 예비 설계를 함으로써 실물 충돌 실험으로 최종 검증 되어야 할 목적 방호구조물 개발의 시행착오를 줄일 수 있기 때문이다. 이 경우, 입력변수가 비교적 간단한 BARRIER VII 이 효과적으로 사용될 수 있음을 SWRI의 실물충돌실험을 시뮬레이션함으로써 보여 주었다, 이때 흙과 지주의 상호작용으로 지주 입력 자료를 간단히 구하기가 힘들기 때문에 동적 시험 결과를 이용하였다. 이 시뮬레이션 결과가 충돌실험결과와 유사하기 때문에 지주 입력 자료가 정확하다면 BARRIER의 출력 결과는 믿을만하다는 결론을 내릴 수 있다.

한편, 시뮬레이션 프로그램의 입력 변수 중 흙-구조물-차량의 상호작용이 심해 간단한 해석적 방법으로는 정확한 값을 얻기가 어려운 변수인 지주 파괴시 변위(Δ_f), 지주의 강성(K_p), 그리고 지주의 항복 모멘트($M_{y,post}$)들이 시뮬레이션 결과에 어떤 영향을 미치는가를 심층분석 하였는데, 지주에 대한 입력 변수 Δ_f , K_p , $M_{y,post}$ 모두 방호구조물의 최대 변위($\delta_{b,max}$)와 차축 직각 방향의 최대 가속도에 민감한 영향을 주었다. 대형차 충돌 시 이 입력변수들이 방호 구조물의 최대 변위에 소형차 충돌시 보다 큰 영향을 주었고 차축 직각 방

향 최대 가속도는 소형차 충돌 시 보다 민감하게 이 변수들에 영향을 받았다.

따라서 이상화된 상황이 아닌, 특정 지역의 방호구조물의 거동을 예측하거나 새로운 방호구조물의 개발을 위한 예비 설계 시에 실제 상황을 고려한 입력 변수를 결정하지 못하였을 경우에는 BARRIER 시뮬레이션 결과의 신뢰도가 크게 떨어진다는 것을 시사한다. 결국, 실물충돌실험을 제한적으로나마 대체 할 수 있도록 시뮬레이션의 정확도를 높이기 위해서는 Pendulum Test 등의 간략화된 충격실험을 통한 지주에 대한 입력 변수의 결정이 필수적이라고 판단된다.

이상의 연구 결과로부터 BARRIER VII 프로그램은 예비 설계나 설계 기준 검토 등에 유용하게 사용될 수 있으나 정확한 입력 변수의 결정이 선행되어야 하며, 나아가 차량-구조의 2차원 거동만을 해석할 수 있는 프로그램의 한계를 고려할 때 기존 구조물의 검토나 새로 개발된 안전 시설의 최종 평가는 반드시 실물충돌실험을 통하여 검증이 되어야 함을 알 수 있다.

참고문헌

건설교통부 (1996) 도로교 표준시방서, 대한토목학회.
 건설교통부 (1980) 방호책설치요령.
 건설부 (1989) 도로안전시설편람
 건설성토목연구소, 도로부교통안전연구실, 일본도로공단, 강제방호
 책협회 (1993) 고규격 간선도로용 강제 방호책에 관한 연구
 오민수 (1994) 충돌 하중을 받는 교량의 동적 거동에 관한 연구, 박사학위논문, 고려대학교.
 장승필 (1990) 자동차 방호체계의 동력학적 거동에 관한 연구, 서울대학교 토목공학과 교량공학 연구실.
 우광성, 조승현, 고만기, 김우 (1994) 설계변수에 의한 가드레일의 동력학적 거동에 관한 연구, 전산구조공학 제 7권 2호
 NCHRP Report 350 (1993) Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features.
 Powell, G.H. (1973) A Computer Program for Evaluation of Automobile Barrier Systems, Final Report, University of California, Berkely, CA.
 Parnell, C.B. (1992) Development of a Bridge Railing End Treatment at Intersection Streets and Drives, Master Thesis, Texas A&M
 Bowles, J.E. (1977) *Foundation Analysis and Design*, Second Ed., McGraw-Hill.
 SWRI (1987) The Effect of Soil Strength on Longitudinal Barrier Performance, FHWA, VA.
 Roger Bligh, Dean Sicking (1989) Application of BARRIER VII in the Design of Flexible Barriers, TRR 1233, TTI.
 Calcote, L.R. (1987) Development of a Cost-Effectiveness Model for Guardrail Selection, Southwest Research Institute Report 03-4309.
 Bronstad, H.E., Calcote, L.R., Ray, M.H., Mayer, J.B. (1986) Guardrail-Bridge Rail Transition Designs, Report No., FHWA/RD-86/178.
 Jeyapalan, Jey K. et al. (1984) Soil-Foundation Interaction of Highway Guardrail Posts", TRR 970, TRB.

◎ 논문접수일 : 10년 04월 29일
 ◎ 심사의뢰일 : 10년 04월 30일
 ◎ 심사완료일 : 10년 05월 12일