

LS/DYNA-3D 프로그램을 이용한 도로안전시설물 해석사례



우 광 성 | 영남대학교 건설시스템공학과 정교수
이 동 우 | 영남대학교 건설시스템공학과 박사과정

1. 서론

최근 차량, 선박, 항공기의 충돌 시물레이션에 LS/DYNA-3D 프로그램이 많이 활용되고 있다. 지난 천암합 폭침사건 때도 이 프로그램을 사용하여 폭발상황을 재연한 바도 있다. 특히, 가드레일, 교량난간, 콘크리트 중앙분리대 및 충격완화장치(crash cushion)에 차량충돌 시 동역학적 성능평가를 위해 많은 연구가 국내외적으로 이루어지고 있다. 도로안전시설물의 설계는 기존의 토목 및 건축구조물에 비해 차량 내에 탑승자가 타고 있기 때문에 차량과 방호시스템의 안전성도 중요하지만 탑승자의 충격에 의한 상해가 큰 문제로 대두된다. 통상 건설분야의 구조물은 외력에 의해 구조물의 파괴 즉, 항복, 좌굴 및 균열과 피로에 안전하게 설계하면 된다. 그러나 도로안전시설물의 경우 차량의 충돌에 저항할 수 있는 강도성능(load carrying capacity)이 우선적으로 확보되어 차량의 이탈을 막아야 한다. 또한 차량충돌 후 차량의 급작스런 감·가속운동에 의해 탑승자와 차량내부의 충격으로부터 탑승자가 안전해야 하는 탑승자 보호성

능이 확보되어야 한다. 여기에 충돌 후 차량이탈에 따라 인접차선으로 진입하여 2차 추돌사고의 방지와 차량의 전복 및 승월현상이 예방되어야 하는 기준을 만족시켜 주기위한 차량의 궤적을 추정하여야 한다. 그러므로 도로안전시설물을 위한 설계자체가 단순한 경험식만으로 해결하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 동적비선형(dynamic nonlinear) 유한요소법에 기반을 둔 구조해석이 수행되어야 하는데 가장 범용으로 많이 추천되는 프로그램이 LS/DYNA-3D 프로그램이다.

한편, LS/DYNA-3D는 1976년부터 저속충돌 문제를 해석하기 위해 L.L.N.L(Lawrence Livemore National Laboratory)에서 John O. Hallquist 박사에 의해 최초로 개발되기 시작하여, 1988년에 LSTC사의 설립과 함께 다양한 접촉문제의 해결과 충돌해석분야의 광범위한 적용이 이루어졌다.

LS/DYNA-3D는 3차원 비탄성 구조물의 비선형 동적 반응을 해석하는 유한요소 프로그램으로 적용분야로는 차량 충돌해석을 시물레이션하고, 충돌 시 승객의 안전성을 증가시키기 위해 그 결과를 분석하

고 설계를 수정하는 데에도 사용되고 있다. 또한 충돌 후 차량 궤적의 예측과 도로안전구조물과 차량의 변형 및 응력상태를 산정하는데 유용한 프로그램이다. 충돌거동을 평가하기 위해 먼저 충돌차량과 방호울타리에 대해 HYPER-MESH와 LS/DYNA-3D의 전처리기(pre-processor)를 이용하여 유한요소모델을 구축하였다. 이 기사에서는 이 프로그램을 사용하여 다양한 도로안전시설물에 적용한 사례를 보이고자 한다.

2. 차량모델

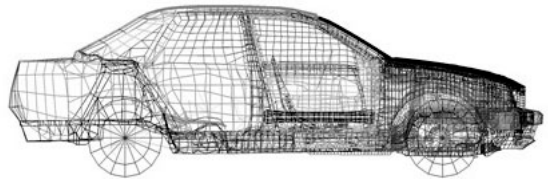
LS/DYNA-3D 해석에 사용된 컴퓨터는 XEON 2.4GHz CPU가 2개 장착된 Work-Station으로서 1.3톤 차량의 해석시간은 약 6시간 정도 소요되었다. 동적 비선형 해석을 위해 사용된 최대 충돌시간은 0.5초, 시간증분 $\Delta t=0.001$ 초 단위로 나누어 Newmark Method에 의한 시간적분을 수행하였다. 재료적 비선형은 증분소성이론에 근거를 두고, 항복 기준으로 von-Mises 항복기준을 사용하였다.

한편, 기하학적 비선형은 von-Karman의 이론에 의해 변위와 변형을 관계가 정식화 되었다. 서로 다른 쉘요소, 프레임요소, 고체요소가 만나는 연결점에서는 서로 다른 자유도를 갖고 있기 때문에 연결 시에는 MERGE Option을 사용하여 변위의 적합성을 만족하도록 하였다. 쉘요소의 경우 감차적분(reduced integration)을 적용한 선형 Belytscho-Tsay 요소가 사용되었다. 해석 시 사용한 각각의 차량은 미국차량충돌연구센터(NCAC : National Crash Analysis Center at George Washington University)에서 제공되는 유한요소 모델을 사용하였으며 그림 1과 같다.

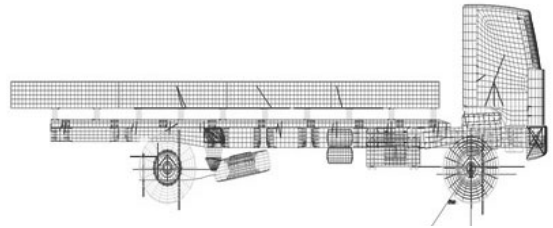
이 연구에서 사용된 1.3톤 및 25톤 차량모델의 Node수와 Element수는 표 1과 같으며, 방호울타리의 1/3지점을 충돌점(impact point)로 가정하여 해석을 수행하였다.

표 1. 차량의 제원

차량종류 \ 제원	Node	Element
1.3 ton	26,450 개	28,321 개
25 ton	34,101 개	33,446 개



(a) 1.3톤 차량



(b) 25톤 차량

그림 1. 차량별 유한요소 모델

3. SB-6 콘크리트 방호벽의 해석

3.1 재료 모델(Material Model)

해석 시 입력되는 철근과 콘크리트의 재료 물성은 실제 실험을 통하여 값을 얻어야 하지만, 정확한 재료의 특성을 얻어내기 위하여 반복 실험을 할 수 없다. 따라서 일반적인 재료 물성 값들과 충격하중 하의 변형률효과(Strain Rate Effect)를 고려하여 물성 값을 입력하였다. 사용된 물성 값은 철근의 경우 SD400 철근을 기준으로 입력하였고, 콘크리트의 경우 도로교설계기준을 참고하여 입력하였다. 입력된 물성 값들은 다음의 표에 나타난 바와 같다.

표 2. 철근의 재료 물성치

Mass density		Modulus of elasticity		Poisson's Ratio		Yield stress	
7.83		210		0.3		0.307	
EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.000	0.0221	0.0375	0.0571	0.114	0.176	0.209	0.314
ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0.307	0.327	0.371	0.402	0.464	0.507	0.525	0.770

- EPS : Effective plastic strain values
- ES : Effective plastic stress values

표 3. 콘크리트의 재료 물성치

Mass density		Modulus of elasticity		Poisson's Ratio		UCS	UTS
2.32		27		0.19		27	3
EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
0.000	0.0221	0.0375	0.0571	0.114	0.176	0.209	0.314
ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
0	27	30	35	40	50	60	70

- UCS : Uniaxial compressive strength
- UTS : Uniaxial tensile strength

3.2 기하형상 모델(Geometric Model)

방호울타리는 충돌해석을 위하여 총 40m를 모델링하였다. 방호울타리 단면과 교량의 캔틸레버 부, 도로의 아스팔트의 3개 파트로 구성되어 있으며, 방호울타리 내부에는 철근을 모델링하였다. 철근과 콘크리트는 Constrained_Lagrange_In_Solid 옵션을 이용하여 콘크리트 내부에서 콘크리트와 일체 거동을 하도록 구속을 주었다. 방호울타리는 총 요소 수 429,776개, 총 절점 수 605,262개로 유한요소 모델링을 하였다. 만들어진 유한요소 모델은 그림 2에 도시 하였다.

방호울타리의 성능 평가를 위하여 국내·외 설치규정에 의한 구조적 적합성, 차량의 궤적, 탑승자 위

험도에 대한 평가를 수행하였다.

방호울타리의 탑승자 보호성능 평가를 위해서 1.3톤 차량모델을 사용하였으며, 충돌점은 방호울타리의 1/3지점에 충돌속도 100km/h, 충돌각도를 20°로 적용을 하여 해석하였다. 그리고 방호울타리의 구조적 적합성을 평가하기 위해서 25톤 차량모델과 방호울타리의 1/3지점 충돌속도 80km/h, 충돌각도 15°(SB6 등급)로 적용을 하여 해석하였다. 그림 3

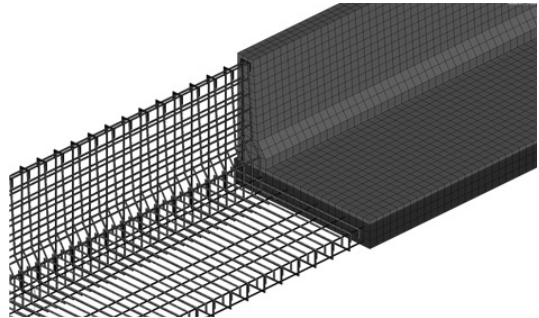


그림 2. SB6 콘크리트 방호벽의 유한요소 모델

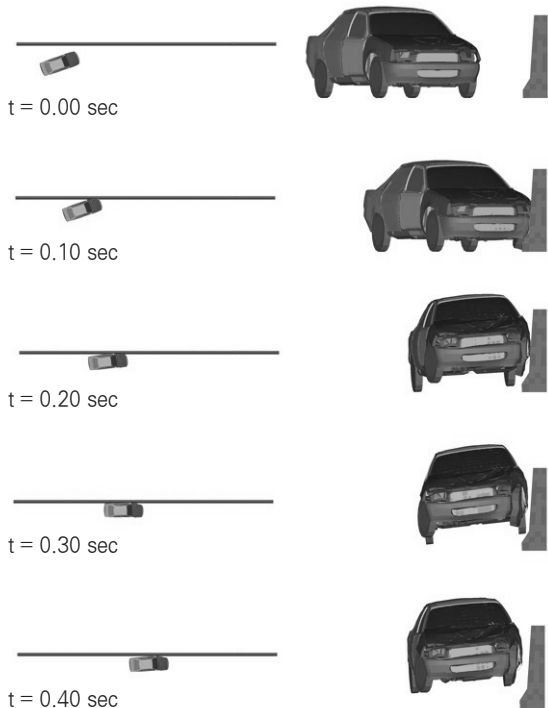


그림 3. SB6 방호울타리의 1.3톤 차량에 대한 시간대별 궤적

에는 1.3톤 차량의 시간대별 거동을 나타내었고, 그림 4에는 25톤 차량에 대한 유한요소해석 결과를 도시하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 상에서 파쇄물의 비산은 확인하기 힘들었고, von-Mises 응력분포를 확인하여 최

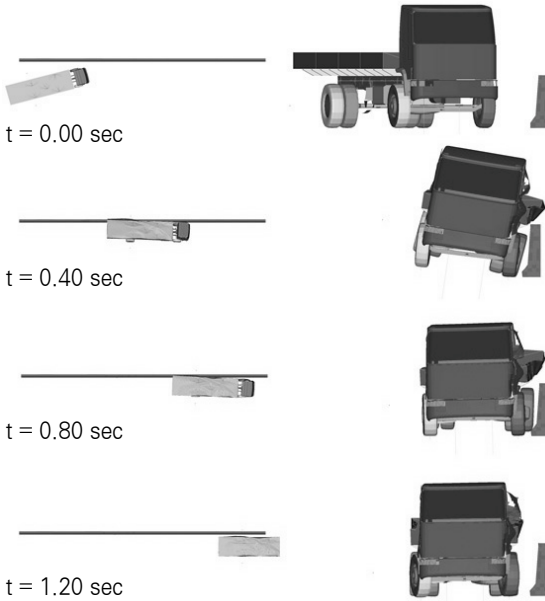


그림 4. SB6 방호울타리의 25톤 차량에 대한 시간대별 궤적

대응력 이상의 응력이 분포하는 부분은 균열 혹은 파쇄로 간주하였다. 그림 5에서 보듯이 최대응력 값은 콘크리트의 압축강도 보다 대체로 낮은 값을 가진다. 응력분포형태에 따라 균열이 발생할 가능성은 있으나, 콘크리트가 파쇄되어 비산할 가능성은 낮은 것으로 생각된다. 또한 방호울타리의 최대변위는 방호울타리의 최상단 부분에 나타났다. 충돌 시 종방향 변위의 값이 약 16.5mm로 매우 낮은 편이며 균열이 발생할 가능성도 있다.

4. 성토사면의 튜브형 W-Beam 가드레일 해석

컴퓨터 시뮬레이션을 위한 기본 가정은 다음과 같이 요약할 수 있다. 지반모델은 3-D 지반재료모델 (Soil Material Model)로 LS/DYNA-3D 프로그램에서 제공되는 모델을 사용하였다. 충돌등급은 13톤 버스(충돌속도 65km/h, 충돌각도 15°), 지반높이 및 비탈구배는 각각 40m, 1:1(45° 경사)가 사용되었다. 한편, 지반조건은 지반강도를 탄성계수 = 18MPa, 표준관입치 N=30의 조밀한 모래로 가정하였으며, 지주간격 및 지주위치는 4m의 지주간

3.388E+01
3.011E+01
2.635E+01
2.258E+01
1.882E+01
1.506E+01
1.129E+01
7.528E+00
3.764E+00
0.000E+00
NO RESULT
Max = 3.388E+01
ELEMENT_SOLID 5763
Min = 0.000E+00
ELEMENT_SOLID 6028

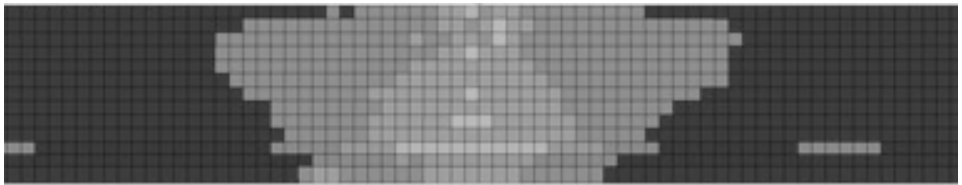


그림 5. 25톤 트럭 충돌시 최대응력

1.650E+01
1.466E+01
1.283E+01
1.100E+01
9.165E+00
7.332E+00
5.496E+00
3.666E+00
1.833E+00
0.000E+00
NO RESULT
Max = 1.650E+01
Node 7117
Min = 0.000E+00
Node 3627

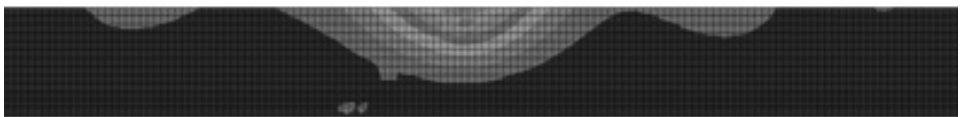


그림 6. 25톤 트럭 충돌 시 최대변위

격과 B.P(Break Point : 성토 경사가 시작되는 점)에서 원형지주의 중심점까지 40cm 떨어진 점에 지주설치를 설치하였다. 사용된 버스모델은 표 4 및 그림 7과 같다. 국내 설계기준에는 버스차량에 대한 충돌기준은 제시되어 있지 않다. 그러나 최근 버스의 교통사고 발생 시 사상자가 다수 발생되며 대형차량으로 가드레일이 충분히 방호성능을 발휘하는가에 대한 연구가 필요한 상황이다. 따라서 제안된 가드레일을 이용하여 버스의 충돌 시뮬레이션을 수행하였으며, 도로안전시설물 설치 및 관리지침의 충돌시험 기준 SB4 등급을 동일하게 적용하여 보았다.

표 4. 버스의 유한요소 모델 구성

Model	Node	Element	충중량
BUS	54,480 개	53,445 개	12.792톤

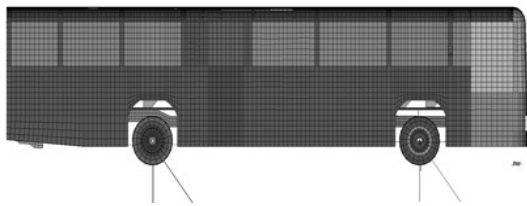
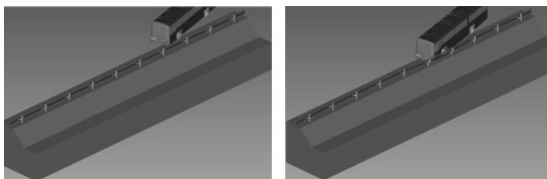


그림 7. 13톤 버스 차량의 유한요소모델

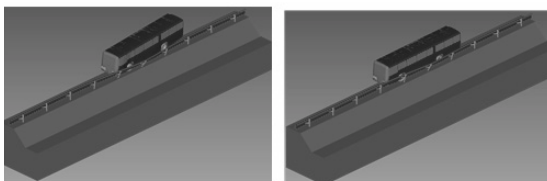
표 5. 버스의 강도성능평가 결과

최대변형(m)	이탈각(°)	이탈속도(km/h)
0.49	7.5	47.8



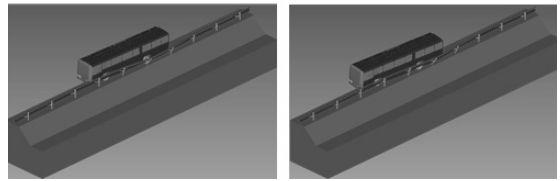
t = 0.0 sec

t = 0.30 sec



t = 0.60 sec

t = 0.75 sec



t = 0.9 sec

t = 1.05 sec

그림 8. 버스 차량의 충돌 후 시간대별 궤적

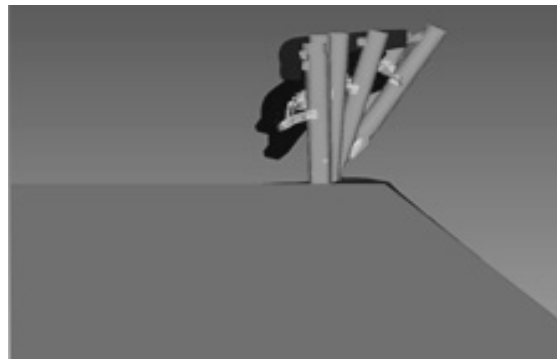


그림 9. 버스 충돌 시 최대 변형

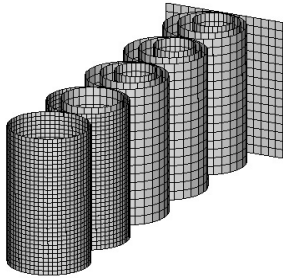
버스 모델의 충돌 이후 이탈 속도는 47.8km/h, 이탈 각도는 7.5° 정도로 확인되었다. 가드레일의 최대 변형은 49cm 정도로 나타났다. 이탈속도는 충돌 속도의 74%로 충돌속도의 60% 이상의 값을 가지며, 이탈각도는 충돌각도의 50%로 충돌각도의 60% 이하의 값을 가지는 것으로 확인되었다.

5. 강제 Nested Tube 충격완화장치

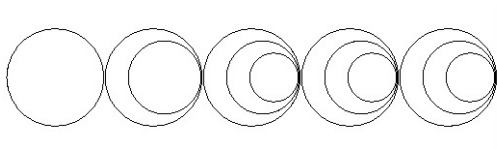
정면충돌 시 충격완화장치의 하단부에 차량 충돌 시 충격완화장치가 앞뒤로 밀릴 수 있도록 설치되어야 하므로 각 튜브의 종방향(X-방향)에 대한 구속력을 해제하여 전·후로 이동할 수 있도록 하였다. 또한 전체적인 실제 실험충돌실험때는 각 Tube의 고정을 위해 강제 레일을 이용하여 구속하게 된다. 이와 같은 효과를 위해 각 Tube의 중앙부에 횡방향(Y-방향)과 상하방향(Z-방향)에 대해서는 구속을 두어 이 방향으로의 이동은 방지되도록 하였으며, 충격흡수

표 6. 강제 Nested Tube 제한

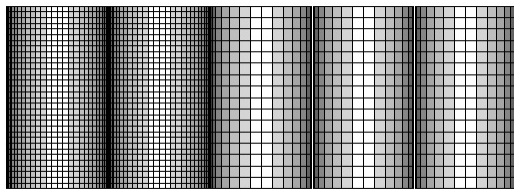
구 분	Node	Element
충격흡수장치	8,745개	8,344개



(a) 유한요소



(b) 상단 유한요소 모델



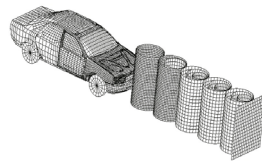
(c) 측면 유한요소 모델

그림 10. 강제 Nested Tube의 유한요소 모델

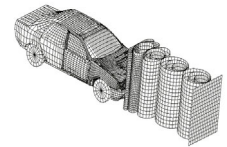
장치의 백업 장치 역할을 수행하기 위해 rigid판 요소를 그림 10과 같이 설치하였다.

한편, 강제 Nested Tube 충격흡수장치의 유한요소망은 Shell요소를 사용하였고 Material Property는 ISOTROPIC_LINEAR_PLASTIC를 사용하였다. 또한 각 Tube 간의 접합부는 Nodal Rigid로 연결하였다. 충돌에 관한 조건은 국내 지방서 설계등급 CC2등급에 따라 1.3톤 차량을 80km/h로 우선적으로 정면충돌만을 시행하였다. 강제 Nested Tube 충격완화장치의 단계별 거동은 다음과 같으며, 충돌 시뮬레이션 결과는 그림 11과 같다.

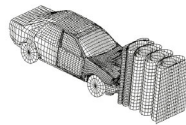
- ① STEP 1 : 차량이 강제 Nested Tube에 충돌하기 직전을 나타내고 있으며 속도는 80km/h이다.
- ② STEP 2 : 차량이 강제 Nested Tube에 단계적 충돌이 이루어져 차량의 속도가 단계적으로 줄고 있는 상태이다.
- ③ STEP 3 : 강제 Nested Tube의 충격흡수장치의 변형이 가장 큰 시점으로 차량의 속도는 0km/h이다.
- ④ STEP 4 : 차량이 어느 정도 되튀어 나간 상태이며 강제 Nested Tube 역시 진동이 줄어든 상태이다. 차량이 과장되게 되튀어 나가는 현상은 바닥판의 역할을 하는 Rigid Wall에 마찰계수가 없기 때문으로 사료된다.



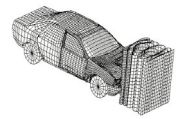
(a) 충돌직전 80km/h



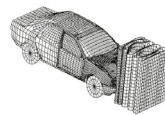
(b) 충돌 후 60km/h



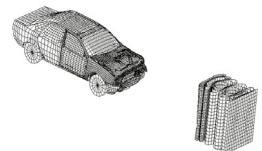
(c) 충돌 후 40km/h



(d) 충돌 후 20km/h



(e) 차량의 속도 0km/h



(f) Rebound 현상

그림 11. 정면충돌 시 차량의 단계별 충돌 양상

6. 결론

이 기사에서는 LS/DYNA-3D 프로그램을 사용하여 몇 가지 대표적인 해석사례를 보여주었다. 최근

에는 폭발, 화재, 파랑 등의 다양한 동적하중에 대한 구조해석도 요구된다. 보다 정교한 컴퓨터 시뮬레이션을 위해서는 차량의 안전성에 주안점을 주는 기계공학 분야에서도 차량동역학(Vehicle Dynamics) 이론에 대한 이해도를 높일 필요가 있으며, 토목교통 분야에서는 ALE(Arbitrary Lagrangian-Euler) 모델에 기초를 둔 서로 다른 재료모델의 상호작용을 분석할 수 있는 철근콘크리트, 복합재료 모델의 적용도 필요하다. 보다 정확한 구조해석을 위해서는 다양한 도로안전시설물의 부재에 대한 재료 및 구조실험을 통한 입력자료의 구축도 선행되어야 할 것이다.

참고 문헌

Carney, J.F., III and Dougan, C.E., "Summary of the Results of Crash Tests Performed on the Connecticut Impact-Attenuation System(CIAS)," FHWA-CT-RD-876-1-83-13, 1983.

Miller, P., "DYNA3D Modeling of the Narrow Connecticut Impact Attenuation System (NCIAS)," MS Thesis, Vanderbilt University, 1994.

Palit, S. "Energy Dissipation in Laterally Loaded Nested Tubular Systems", M.S. Thesis, Vanderbilt University, 1992.

Brian A. Coon, B.S.E.M., E.I.T., John D. Reid, Ph.d., John R. Rohde, Ph.D.,P.E., "Dynamic Impact Testing of Guardrail Posts Embedded", Midwest Rodside Safety Facility, 1999.

Woo, K.S., KO, M.G., Cho, S.H., Kim, W. "A Study on Dynamic Behavior of Guardrail Associated with Design Variables" , Computational Structural Engineering Institute of Korea, 1994.

Weijia Wu, Robert thomson, "A study of the interaction between a guardrail post and soil during quasi-static and dynamic loading" International Journal of Impact engineering, 2007.

HYPERMESH 11.0, Altair Engineering, Troy, MI, 2000.

LS-DYNA 971, Livermore Software Technology Corporation(LSTC), 2007.

회비 납입 안내

회원 여러분께서 납부하시는 회비는 학회 운영의 소중한 재원으로 쓰이고 있습니다.
회원 제위께서는 체납된 회비를 납부하시어 원활한 학회운영에 협조하여 주시기 바랍니다.

- 회비납부는 한국씨티은행 : 102-53510-243
(예금주(사)/한국도로학회)
- 지로번호 : 6970529

〈학회사무국〉