

## 선운동량 보존의 법칙을 활용한 감충지주의 충돌거동

고만기<sup>1</sup>, 김기동<sup>1\*</sup>, 노민형<sup>1</sup>, 윤덕근<sup>2</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 건설환경공학부, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 도로연구소

### Impact Performance of Crashworthy Post Utilizing Conservation of Linear Momentum

Man-Gi Ko<sup>1</sup>, Kee-Dong Kim<sup>1\*</sup>, Min-Hyung No<sup>1</sup>, Duk-Geun Yun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

<sup>2</sup>Highway and Transportation Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**요약** 도로변에 노출된 지주는 충돌 시 탑승자 안전에 치명적인 위험물이다. 노출된 지주에 충돌하는 차량의 탑승자 안전을 도모하기 위하여 차량과 지주가 소성충돌로 일체화 되는동안 충돌차량의 선형운동량이 지주로 전달되어 충돌에너지의 일부가 1차적으로 소산되고 감소된 속도로 이동하는 지주의 베이스가 기초에 매입된 충격에너지 흡수용 모듈을 충격하여 변형시킴으로써 나머지 에너지가 소산되는 감충지주를 개발하였다. LS-DYNA 프로그램을 이용한 충돌 해석을 실시하여 강결된 지주의 문제점을 보이고 개발 단계별 감충지주와 차량의 거동을 분석하여 최종 설계된 감충지주가 노출상태에서 0.9ton-80km/h의 속도로 정면충돌하는 경우에 안전하게 대응할 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** Unshielded posts on roadside are a critical hazard to the safety of impact vehicle to the posts. A crashworthy post is developed. In the first phase, it dissipates the impact energy by the linear momentum conservation principle while the plastic impact between the post and vehicle takes place, then, the second phase dissipation follows by the deformation of the energy absorbing modules embedded in the guide trough of the foundation. Simulations of impacts to a rigidly connected post and crashworthy post were made using LS-DYNA program, which demonstrated the danger of unshielded rigidly connected post and the effectiveness of the proposed crashworthy post to the 0.9ton-80km/h impact.

**Keywords** : Crashworthy Post, Energy Dissipation, Impact, Momentum Conservation, Simulation

#### 1. 서론

1988년 이후 지속적으로 증가하던 교통사고 건 수가 국가적인 노력으로 2000년부터 감소하기 시작하였다. 사고건수 감소에 따라 국내 전체 교통사고 사망자 수는 2000년 10,000여명 수준에서 2006년 6,500명 수준으로 지속적으로 감소하고 있다. 전체 교통사고 사망자가 2000년 이후로 지속적으로 감소되고 있음에도 전주와

표지 등 지주로 인해 발생한 사망사고는 2002년 이후로 오히려 증가하여 2004년에 170명의 사망자가 발생하였다.

1988년부터 2004년까지 발생한 차량 단독 교통사고를 고려할 때 전신주, 표지, 중앙분리대, 교통섬 등 도로의 고정된 시설물과 충돌한 사고는 전체 사고의 약 33%를 차지하고 있으며, 그 중 전주와 표지지주와 충돌한 사고의 경우 치사율이 20%를 넘는 것으로 조사되었다. 안전시설의 개선, 차량 성능 개선 등 전반적인 도로 안전

본 논문은 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.(국토교통과학기술진흥원)

\*Corresponding Author : Kee-Dong Kim(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9306 email: [kkkim@kongju.ac.kr](mailto:kkkim@kongju.ac.kr)

Received November 23, 2015

Revised December 3, 2015

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

환경의 개선에 따라 전체적인 교통사고 치사율은 매년 지속적으로 감소하고 있으나, 도로변 지주와 충돌하는 경우 치사율은 오히려 증가하고 있는 것이다.[1]

도로변의 안전을 확보하는 방법은, 1) 모든 노변 시설물을 제거, 2) 노변 시설물을 부딪쳐도 안전하게 설계, 3) 시설물을 부딪칠 위험이 적은 곳으로 이전설치, 4) 지주에 특별한 장치를 설치하여 충돌 시 위험도를 경감, 5) 지주 주변에 종 방향 방호시설을 설치하는 방법 등이 있다. 모든 노변 시설물을 도로 노변 위험지역 밖에 설치하는 것이 노변 안전에 가장 확실한 해법이나 공간상 제약이 크고, 표지판, 신호등, 조명주 등의 시설물은 제 기능을 하기 위해서 도로변 가까이 위치해야 한다. 일반적으로 소형 지주는 과다한 변형으로 탑승자의 안전을 위협하고 중대형 지주는 강성체로서 차량 충격 시 충격량이 커 차량 및 탑승자에 치명적인 결과를 초래하게 된다.

노출된 도로변 지주의 충돌시 위험을 해소하기 위해서 미국은 AASHTO Roadside Design Guide[2]를 제정하여 도로변 지주의 충돌피해저감 대책을 상세히 제시하였으며 이미 1960년대 중반부터 Breakaway Sign Support 개념을 개발하여 대부분의 도로변 표지판 지주나 조명주에 사용하고 있다. Breakaway Sign Support는 지주와 기초의 연결부를 강결하는 대신 풍하중에 대한 구조적 안전성은 확보하면서 충격하중 작용 시 연결부가 분리되어 소형차의 충돌에 대한 충격력, 또는 속도변화를 최소화시킴으로써 탑승자의 위험요인을 제거하는 개념으로, 여러 가지 특별한 장치가 고안되어 1975년에는 AASHTO의 설계기준으로 채택되었다.

미국의 지주 충돌과 관련된 연구 및 대책은 Roadside Safety와 관련하여 각종 베리어의 설치에 준하는 중요도를 갖고 있다. 여기서 개발된 충돌대책은 호주[3], 캐나다[4], 유럽[5,6]에 그대로 적용되고 있다.

국내에는 Roadside Safety의 범위가 가드레일, 중앙분리대, 교량난간, 충격흡수시설 정도로 제한되어있고 중요한 위험 요소인 도로변의 각종 지주에 대한 안전대책이 없다. 안전을 담당하는 전문가들이 대형지주인 전신주의 충돌사고에 대한 위험성을 거론하는 정도이고 지주와 관련된 사고에 대한 체계적인 데이터가 없을 뿐 아니라 가로등, 각종 표지판 지주들이 가드레일로 방호되어 있기 때문에 별도 조치가 필요 없다는 생각이 일반적이다. 그러나, 가드레일과 가드레일로 방호된 경우 지주와의 간섭, 방호를위한 최소의 길이확보, 단부처리등의

문제가 많을뿐 아니라 충돌에 노출된 중대형지주가 많다. 결국 지주의 구조를 개조함으로써 충돌위험을 해소시켜야 하는 경우가 많이 있다.

## 2. 감충형지주(Crashworthy Post)의 개발

본 논문에서는 표지판 지주로 많이 쓰이는 대표적인 원형지주(D=355.6mm)가 노출되는 경우에 대하여 직접 충돌시 탑승자의 안전을 확보할 수 있는 방법을 제시한다. 지금까지 국내의 도로안전시설 설치 및 관리지침[7]에는 지주의 충돌대책에 대한 내용이 전무하고 국토부 R&D로 중소형지주에 대한 Breakaway 단부고정장치 개발만이 이루어진 상태이다. 그러나 Breakaway형 지주는 충돌 후 2차피해에 대한 우려 때문에 공간이 협소한 도심지와 대형지주에 대한 적용성에 제한이 있으므로 충돌시 작동거리를 최소화하고 2차 충돌의 가능성을 줄일 필요가 있다.

충격흡수형 지주(Energy Absorbing Post(EAP))는 충돌 시 지주가 파손됨으로써 충돌차량과 탑승자의 피해를 최소화 시키는 방법인데 이 방법에는 명확한 한계가 있다. 우선 지주는 기본적으로 풍하중에 대하여 구조적으로 안전해야 한다. 충돌 시 지주가 쉽게 파괴되어 충돌 차량 탑승자의 안전을 확보하기 위해서는 지주의 구조적인 강도를 약화시키지 않을 수 없는데 EAP의 문제점이 있다. 재료를 복합소재로 사용하는 등의 시도가 있으나 아직 문제를 완전히 해소시킬 수준이 아니다.

다른 방법으로 지주 표면에 충격흡수용 재료나 충격흡수 모듈을 부착하는 경우가 있는데 이는 공간적인 제약 상 일정 크기 이상을 부착할 수 없을뿐더러 미관상의 문제가 있다. 부착형의 경우는 일정두께 이상이 확보되어야 소정의 충격흡수효과를 기대할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 기존의 문제점을 해결하기 위하여 지주의 Size에 관계없이 지주의 구조적 강도를 약화시키지 않고 충격을 흡수할 수 있는 Crashworthy Post의 mechanism을 개발하는 것이다. 이 방법은 초기에 지주 자체의 관성을 이용하여 충돌차량의 속도를 저감시킨 후 기초부에 매립된 충격흡수부재 (Energy Absorbing module : EAM)의 충격흡수능력을 이용하여 차량을 정지시키며 탑승자의 안전을 확보하는 것이다.

현재 지주설계에 대한 충돌기준이 없으므로, 각 설계 단계에서 개발된 안이 충격흡수시설의 CC2등급 (0.9ton-80km/h)의 정면 충돌시 성능을 만족하는지 LS-DYNA 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 실시하여 분석한다.

### 2.1 지주의 제원 및 충돌해석

국토교통부 도로표지통합관리센터[8]에 의하면 2015년 현재 국내에는 166,000여개의 표지판이 있다. 이 표지판의 지주는 단주식, 복주식, 편지식, 현수식, 문형식이 있는데 문형식의 경우 가드레일로 방호되고 있으므로 표지판지주 중 가장 큰 것은 편지식 및 현수식 지주로 많이 쓰이는 철제 원형지주로 지름(D)과 두께(t)가 355.6mm×9mm이다. 신호등지주나 전주등의 지름은 이보다 작다. 따라서 본 논문에서는 대표적으로 편지식지주를 선택하여 강결된 경우 충돌도를 분석하고 2차충돌의 위험을 낮추며 충돌 시 탑승자안전도를 향상시킬 수 있는 지주고정방법을 연구하는 것이다. Table 1은 편지식지주의 형상 및 치수를 보인 것이다.

Table 1. Dimension of Cantilever Type Road Sign Post

Description	Dimension
Height	7.2m
Horizontal Bar Length	5.55m
Sign	4450mm×2200mm
Horizontal Bar Size	∅ 216.3mm×4.5mm
Vertical Bar Length	1.4m
Vertical Bar Size	∅ 89.1mm×3.2mm
Post Size	∅ 355.6mm×9mm

우선 선정된 지주의 표지판은 지주만 기초에 강결된 것으로하여 LS-DYNA[9,10] 충돌해석프로그램을 사용하여 충돌 시 지주와 차량의 거동 및 탑승자안전도를 분석한다. 탑승자 위험도를 줄이기 위한 방안으로 운동량 보존의법칙을 이용한 감충베이스를 고안하고 매커니즘을 설명한다. LS-DYNA 시뮬레이션으로 감충베이스로 지지된 지주 충돌시 지주와 차량의 거동 및 탑승자안전도를 분석하고 감충베이스를 보완한다. 충돌차량은 도로 안전시설 설치 및 관리지침의 충격흡수시설편에서 제시된 소형차 0.9ton으로 하고 충돌속도는 80km/h에서 탑

승자를 보호하는 것을 목표로 한다. 탑승자의 안전도는 충돌 중 가속도로부터 도로안전시설지침의 THIV 및 PHD값을 계산하여 분석한다.

### 2.2 강결지주에 충돌하는 경우

2.1절에서 설명한 철제원형 지주(D=355.6mm, t=9mm)에 0.9ton 차량이 40km/h 에서 100 km/h 까지 20km/h 간격으로 정면충돌하는 것을 LS-DYNA 프로그램을 이용하여 분석하였다. 이때 지주는 기초에 강결된 것이다.

LS-DYNA는 도로안전시설과 차량의 부재를 모델링 할 수 있는 다양한 요소들을 갖추고 있으며, 이 요소들의 특성은 부재의 복잡한 비탄성 및 비선형 거동을 정의할 수 있다. 또한 차량과 도로안전시설을 3차원으로 모델링 할 수 있기 때문에 도로안전시설의 거동을 면밀하게 조사할 수 있고 차량의 움직임을 세밀히 검토할 수 있어 도로안전시설의 평가 및 주요 부재의 성능 검토에도 폭 넓게 활용되고 있다.

본 연구에서, 충돌 시뮬레이션에 사용한 차량 모델은 NCAC (National Crash Analysis Center at George Washington University)에서 개발한 Dodge Neon차량 [11,12] 이다. 지주모델에 사용한 Element 및 재료특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Input Data for LS-DYNA Simulation

Input	Value
Element	Shell
Node No.	15050
Element No.	15000
Density	$7.85 \times 10^{-9} \text{ T/mm}^3$
Young's Modulus	$2.04 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
Poisson's Ratio	0.28
Yield Stress	$280 \text{ N/mm}^2$
Tangent Modulus	$4.0 \times 10^3$

본 절의 연구에서는 지주의 표지판은 생략하고 지주만을 대상으로 하였다. 대표적인 충돌시(0.9ton-80km/h) 차량과 지주의 거동을 Fig.1에 보이고 충돌시간별 속도 변화를 Fig.2에 나타내었다. Table 3은 탑승자 안전지수 (THIV, PHD, ASI)를 충돌속도별로 정리한 것이다.

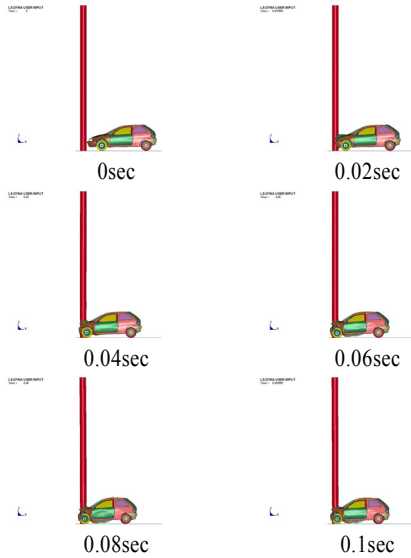


Fig. 1. Impact Vehicle and Post for 0.9ton-80km/h Impact

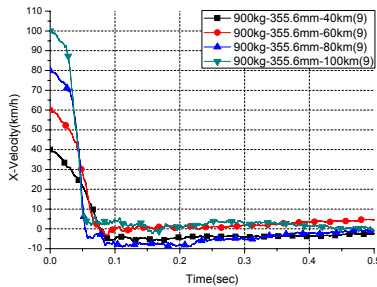


Fig. 2. Speed-Time History During the Impacts

Table 3. Safety Indices for the Impacts with Different Impact Speeds

Speed	THIV(<44km/h)	PHD(<20g's)	ASI
40km/h	45.3	7.3	1.55
60km/h	60.9	10.6	2.49
80km/h	81.2	16.5	4.26
100km/h	74.3	64.2	4.84

Fig.2로부터 충돌속도가 높을수록 충돌이 빨리 끝나며 반발도 적은 것을 알 수 있고, 대부분 충돌은 0.05-0.07sec 사이에 끝나는 것을 볼 수 있다. 노출된 지주의 충돌시 40km/h 이하의 충돌에서는 차량의 충격흡수

수능력으로 탑승자 안전이 문제가 되지 않으나 그 이상의 충돌속도는 차량의 변형으로 감당할 수 없음을 알 수 있다.

## 2.3 감충지주의 작동원리

### 2.3.1 감충베이스

노출된 지주는 충돌시 탑승자 안전도에 문제가 있는 것으로 나타남에 따라 감충 대책이 필요하다. 지주에 충격흡수용 모듈을 개발하여 부착하거나 충격흡수 시설을 설치 할 수도 있지만 일정 길이 이상이 필요하고 도심지에서 미관상 문제가 된다.

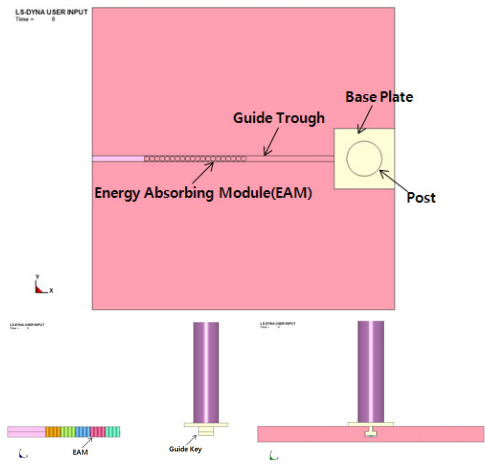


Fig. 3. Mechanism of Crashworthy Post Base

본 연구에서는 충돌의 1단계로 차량과 지주가 소성충돌로 일체화되어 감속이동 하다가 지주의 Base 하단부에 설치된 Key가 Guide에 매립된 Energy Absorbing module(EAM)을 충격하여 연쇄적으로 변형시켜 차량의 속도를 감소시켜 탑승자의 안전을 확보하는 것이다. 즉, 차량과 지주의 소성충돌 과정에서 생기는 선형운동량의 전달 및 EAM의 변형과정을 통하여 충돌에너지를 감소시키는 것이다. Fig.3은 위에 설명한 시스템을 보인 것이다. 지주의 베이스 바닥에는 역 T 자 모양의 키 (높이 120mm, 폭 150mm, 두께 200mm)가 있고 기초에는 이 Key가 움직일 수 있는 가이드가 있다. 가이드로부터 1.5m 떨어진 곳에 가이드가 통과하는 공간(Guide Trough)에 공간에 맞는 직경 55mm, 길이 140mm의 철재 파이프를 삽입하였다. 차량이 지주와 충돌하여 운동

량이 지주에 전달되어 지주와 차량이 같은 속도로 운동하게 되는 거리를 대략 1.5m로 가정하여 모듈은 지주와 차량의 속도가 같아지는 위치 이후에 설치한 것이다. 본 연구를 통하여 고안된 감충형 지주 베이스는 1차적으로 선형운동량보존의 원리를 이용하여 충돌차량의 속도를 감속시키고 차량과 기둥이 감속된 속도로 운동하게 되며, 완전소성충돌로 일체화된 차량과 지주의 잔존 운동에너지는 2차적으로 Guide Trough에 인입된 EAM이 변형되면서 소산되는 구조이다.

2.3.2 선운동량 보존의 법칙을 이용한 충돌해석

뉴턴의 2법칙은 다음과 같다.

$$\sum \mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \tag{1}$$

위 식을 시간에 대하여 적분하면

$$\int_{t_1}^{t_2} \Sigma \mathbf{f} dt = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1 \tag{2}$$

가 된다 여기서  $\mathbf{v}_1$  과  $\mathbf{v}_2$ 는 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에서 물체의 질량중심에서의 속도이고 식의 좌측 항이 Linear Impulse(선역적)이고 우측 항은 Linear momentum(선운동량,  $m\mathbf{v}$ )의 변화량이 된다.

식 2는 시간  $t_1$ 에서  $m\mathbf{v}_1$ 이라는 운동량을 갖고 운동하는 물체에  $\Sigma \mathbf{F}$ 라는 외부 힘을 시간  $t_2$ 까지 가하면 물체의 운동량은  $m\mathbf{v}_2$ 로 변하는 것을 의미한다. 이를 역적과 운동량의 법칙(Principle of impulse and momentum)이라고 한다. 이 원리는 평균 충격력을 구하는 데 유용하게 쓰인다.

물체에 짧은 시간에 가해지는 매우 큰 힘인 충격력은 짧은 시간 동안의 자세한 충격력의 이력보다는 평균 힘( $\Sigma \mathbf{F}_{av}$ )이 의미 있는 경우가 많은데

$$\Sigma \mathbf{F}_{av} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \Sigma \mathbf{F} dt$$

이므로 식 (2)로 부터

$$\Sigma \mathbf{F}_{av} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} (m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1)$$

이 되며, 따라서, 역적

과 운동량의 법칙은 momentum change로부터 충격력의 평균을 구할 수 있음을 의미하기도 한다.

충돌하는 두 물체가 주고받는 점점의 힘을  $\mathbf{F}_{AB}$ ,  $\mathbf{F}_{BA}$ 라 하자. 이 두 힘은 주고받는 두 힘으로 벡터 합이 0이다. 즉,  $\mathbf{F}_{AB} + \mathbf{F}_{BA} = 0$ 이다.

만일 물체 A, B에  $\mathbf{F}_{AB}$ ,  $\mathbf{F}_{BA}$  외에 다른 외적 힘이 작용

하지 않거나 무시할 정도로 적다면 각각의 물체에 임의의 시간  $t_1$ 과  $t_2$  사이의 역적과 운동량의 법칙을 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}_{AB} dt = m_A \mathbf{v}_{A2} - m_A \mathbf{v}_{A1} \tag{3}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}_{BA} dt = m_B \mathbf{v}_{B2} - m_B \mathbf{v}_{B1} \tag{4}$$

위 두 식을 합하면 두 힘의 벡터 합이 0이므로  $m_A \mathbf{v}_{A1} + m_B \mathbf{v}_{B1} = m_A \mathbf{v}_{A2} + m_B \mathbf{v}_{B2}$  가 되고 이는 두 물체 전체의 선운동량이 보존됨을 의미한다.

즉  $m_A \mathbf{v}_A + m_B \mathbf{v}_B = Constant$ . (5)

이 원리를 이용하여 충돌 후 두 물체의 속도를 구해보자. 물체 A와 B의 질량을  $m_A$ 와  $m_B$ , 충돌직전 속도를  $v_{Ai}$ 와  $v_{Bi}$ , 충돌 후의 속도를  $v_{Af}$ 와  $v_{Bf}$ 라 하자. 선운동량 보존의 법칙[13,14]으로부터

$$m_A v_{Ai} + m_B v_{Bi} = m_A v_{Af} + m_B v_{Bf} \tag{6}$$

이다.

충돌 후 속도  $v_{Af}$ 와  $v_{Bf}$ 를 구하기 위해서는 충돌과정을 두 물체가 변형되는 변형구간의 역적과 회복구간의 역적 비를 나타내는 반발계수(coefficient of restitution)의 다음 정의를 이용한다. 완전탄성충돌에서의  $e$  값은 1이고 완전소성충돌의  $e$  값은 0이다.

$$e = - \frac{(v_{Bf} - v_{Af})}{(v_{Bi} - v_{Ai})} \tag{7}$$

(6) 과 (7)로부터 충돌 후 속도  $v_{Af}$ 와  $v_{Bf}$ 를 구하게 된다. 본 논문에서는 A를 충돌차량으로 B를 지주로 본다. 지주가 정지해 있는 상태이므로  $v_{Bi}$ 를 0으로 하고 충돌 후 속도를 구한다. 지주에 차량이 충돌하는 경우는 소성충돌에 가까우나 완전 소성충돌은 아니므로  $e$  값을 고려하여 식 (6), (7)을 풀면,

$$v_{Af} = \frac{m_A - m_B e}{m_A + m_B} v_{Ai} \tag{8}$$

$$v_{Bf} = \left( \frac{m_A}{m_A + m_B} + e \right) v_{Ai} \tag{9}$$

(8),(9) 로부터 차량과 지주의 충돌이 완전 소성이라고 가정하면 충돌 후 차량과 지주는 동일한 속도로 운동하는데 그 속도는 차량의 초기속도의  $\frac{\text{차량질량}}{\text{차량질량} + \text{지주의질량}}$  배로 감속되는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 보이는 지주는 1단계로 이러한 선운동량보존의 원리를 이용하여 충돌차량의 속도를 낮추며 이

때 차량 자체의 변형을 통하여 충돌시간을 길게 하여 충격력을 낮추는 것이다. 따라서 본 논문에서 사용한 차량의 질량 0.9ton과 지주의 질량 1.2ton을 고려하면 운동량의 질량을 통하여 57%의 속도를 감소시킬수 있다고 보는 것이다.

### 2.3.3 설계단계 및 충돌해석

최종적인 시스템의 완성을 위하여 단계적으로 다음과 같은 베이스구조를 고안하여 충돌해석을 실시한다.

단계 1) 차량의 속도 변화량은 선운동량 보존의 법칙과 일치하는지 여부, 충돌이 완료되는 시점 등을 확인하기 위하여 Guide Trough의 길이에 한계를 두지 않는다. 즉 전체기초에 Guide Trough(길이 3m)가 설치된다고 본다. (Case 1)

단계 2) 단계 1에서 확인된 충돌의 완료 위치+ 1.0m 위치에 충격흡수 모듈을 설치한다. 최초의 모듈설치길이는 275mm(55mm×5EA)로 한다. (Case 2)

단계 3) 단계2에서 확인된 결과로부터 최적설계를 구현한다. (Case 3)

감충베이스 모델에 사용된 Element 모델은 Table 4와 같고 재료모델은 앞의 Table 2와 같다.

**Table 4.** Elements and material Properties of Crashworthy Post-Vehicle Simulation

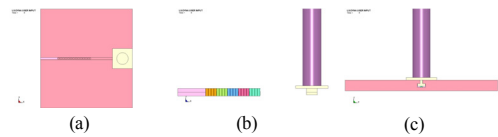
	Element	Node No.	Element No.	Material
Post	Shell	110501	109920	Plastic_Kinematic
Base Plate	Solid	21864	17680	Plastic_Kinematic
Foundation	Solid	41606	34300	Plastic_Kinematic
EAM	Shell	7957	7780	Plastic_Kinematic

## 3. LS-DYNA 시뮬레이션 결과

### 3.1 Case 1의 시뮬레이션 결과

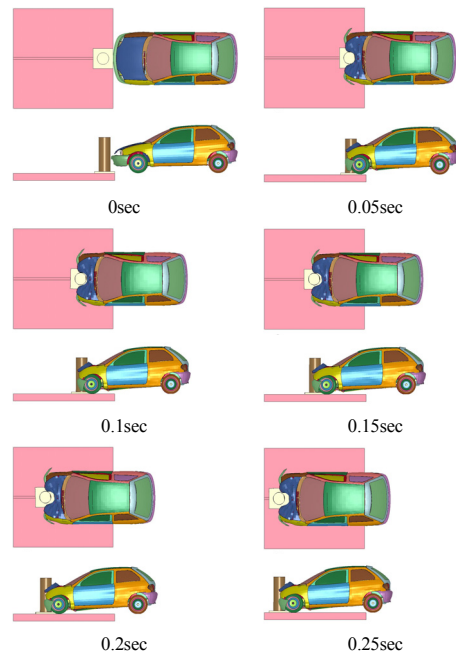
Fig.4-a는 지주Base의 평면을 보인 것이다. Guide 길이는 3m 로 충돌 후 차량의 운동량이 기둥에 전달되어 동일한 속도로 운동할 수 있는 충분한 여유를 본 것이다. Fig.4-b는 측면을 Fig.4-c는 후면에서 지주를 본 것으로 역 T형의 키가 지주의 전도를 막아주면서 가이드를 따라 이동할 수 있게 만든 것이다. 키의 두께는 50mm이고 길이는 200mm 이다. Base 플레이트는 600mm를 한 번

으로 하는 정사각형이며 충돌 시 변형이 일어나지 않도록 50mm두께로 모델링 하였다.



**Fig. 4.** Crashworthy Post Detail (Case 1)

Fig.5는 시간대 별 차량과 지주의 움직임을 보인 것이다. Fig.6은 차량이 충돌 중 받는 가속도의 시간이력이고 Fig.7은 차량의 시간대별 속도 변화를 보인 것이다. Fig.5와 Fig.7로부터 충돌차량은 0.05초 동안 충돌하면서 차체의 소성변형으로 일체가 되고 차량의 선형운동량 일부가 지주에 전달된 후 감속된 상태로 지주와 같이 35km/h의 속도로 진행하고있는 것을 볼 수 있다.



**Fig. 5.** Crashworthy Post-Vehicle Impact (0.9ton-80km/h, Case 1)

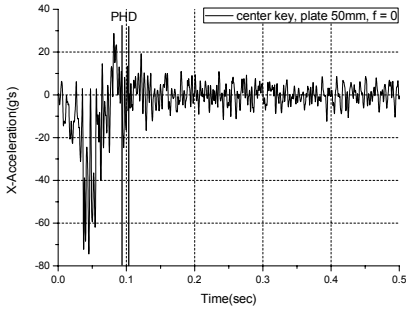


Fig. 6. Acceleration Trace (Case 1)

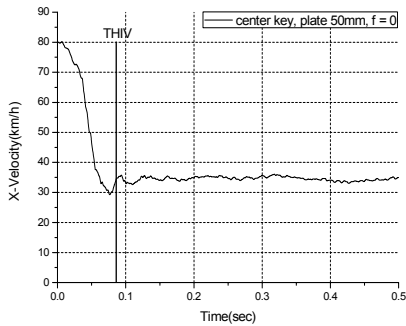


Fig. 7. Velocity Trace (Case 1)

0.05초에서 0.085초 사이에 속도가 급격히 30km/h대로 줄었다가 35km/h대로 회복되는 것을 볼 수 있는데 이는 가속도계를 부착한 차체 하부의 변형으로 인한 것이다. 가속도계는 NCAC모델에서 무게중심부(원점)에 가장 가까운 바닥판에 설치한 것을 그대로 사용하였으며 여기서 계속된 가속도를 적분하여 차량의 속도를 구하고 다시 적분하여 차량의 변위를 구하게 된다.

운동량 보존의 법칙은 자동차의 초기속도와 충돌이 완성되어 지주와 차량이 일체가 되어 이동할 때의 속도 변화를 알 수 있을 뿐이고 충돌이 일어나는 동안의 가속도와 충돌이 일어나는 시간 등을 볼 수 없는 한계가 있다. LS-DYNA는 충돌이 일어나는 동안 지주와 차량의 변형과 속도, 가속도를 볼 수 있다. 이 결과로부터 특별한 충격흡수장치 없이 차량의 소성변형으로 인한 충돌 전후의 운동량이 보존된다는 원리로부터 차량의 속도는 80km/h에서 35 km/h로 약 56% 감소되며 충돌이 완료되는 시점 즉 차량과 지주가 일체로 움직이는 시점은 충돌 후 0.05초에서 0.07초로 되는 것이 확인된다.

이 충돌에서 THIV는 충돌 후 0.0866초에서 45.3km/h로 Crash Cushion의 성능 인정기준 44km/h를 약간 상회하는 수준이다. PHD는 THIV발생 시점 직후인 0.0936sec-0.1036sec 대에 7.4g로 허용치 20g에 크게 못미친다. 이 시물레이션으로부터 전반부에 차량전반부가 지주와 소성충돌 하여 차량의 운동량을 지주로 옮김으로써 차량의 속도를 낮추는 방법은 지주의 충돌대책의 유력한 방안이 될 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2 Case 2의 시물레이션 결과

Case 1에서는 차량이 완전히 멈추기 전 단계의 차량과 지주의 소성 충돌 후 속도 감속 효과를 보였다. 본 절은 Guide Trough의 시점으로부터 2.23m지점에 충격흡수형 모듈 (D=55mm, t=4.5 mm, l=140mm인 물성치 SS400 강관)을 5개 설치하고 단부를 막아서 차량이 완전히 멈추는 것을 가능하게 하는 경우이다.

Fig.8-a는 지주 Base의 평면을 보인 것이다. Guide Trough의 길이는 총 2.5m 로 충돌 후 차량의 운동량이 기둥에 전달되어 동일한 속도로 운동하다가 Energy Absorbing module(EAM)을 충격하면서 차량이 감속되어 정지하는 것이다. Fig.8-b는 측면을 보여준다. Guide Trough의 시점으로부터 2.23m 지점에 EAM을 5개 설치한 것이다. Fig.8-c는 후면에서 지주를 본 것으로 역 T형의 키와 베이스의 구조는 전과 동일하다.

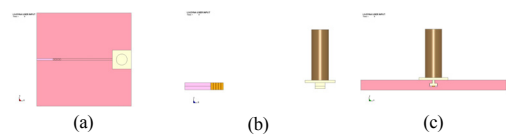


Fig. 8. Crashworthy Post Detail (Case 2)

Fig.9는 시간대 별 차량과 지주의 움직임을 보인 것이다. Fig.10은 차량이 충돌 중 받는 가속도의 시간이력이고 Fig.11은 차량의 시간대별 속도 변화를 보인 것이다. Fig.9와 Fig.11로부터 충돌차량은 0.05초 동안 충돌하면서 차체의 소성변형으로 일체가 되고 차량의 선형운동량 일부가 지주에 전달된 후 감속된 상태로 지주와 같이 35km/h의 속도로 진행하고 있는 것을 볼 수 있다.



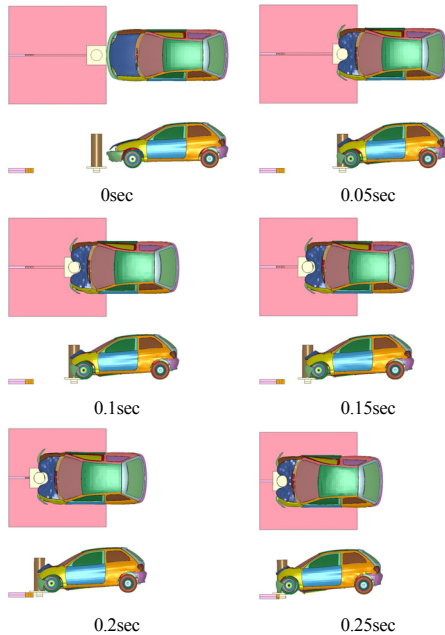


Fig. 9. Crashworthy Post-Vehicle Impact (0.9ton-80km/h, Case 2)

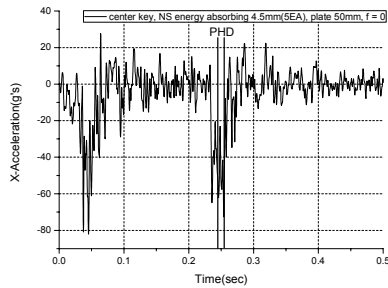


Fig. 10. Acceleration Trace (Case 2)

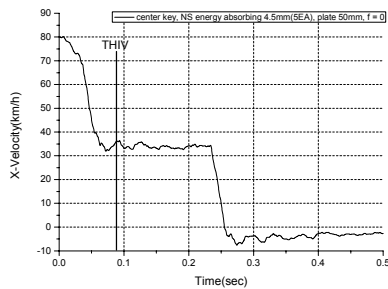


Fig. 11. Velocity Trace (Case 2)

0.05초에서 0.085초 사이에 속도가 급격히 30km/h대로 줄었다가 35km/h대로 회복되는 것을 볼 수 있는데 이때 Case 1과 마찬가지로 가속도계를 부착한 차체 하부의 변형으로 인한 것이다.

이 결과로부터 특별한 충격흡수장치 없이 차량의 소성변형으로 인한 충돌 전후의 운동량이 보존된다는 원리로부터 차량의 속도는 80km/h 에서 35 km/h로 약 56% 감소되며 충돌이 완료되는 시점 즉, 차량과 지주가 일체로 움직이는 시점은 충돌 후 0.05초에서 0.07초로 전과 동일하다. 이후 0.23sec 근처에서 베이스 키가 EAM 을 충격하고 0.25초에서 진행을 멈추고 차량이 반발되는 것을 볼 수 있다.

이 충돌에서 THIV는 충돌 후 0.0883초에서 43.8km/h로 Crash Cushion의 성능 인정기준44km/h를 약간 밑도는 수준이다. PHD는 베이스 키가 EAM를 충격한 직후인 0.2448sec-0.2548sec 대에 51.3g로 허용치 20g에 크게 상회한다. 이는 차량의 속도-시간 이력곡선인 Fig.11의 지주베이스키와 EAM의 충돌이후 급격한 감속도와 Fig.10의 가속도-시간 이력으로부터 확인할 수 있다. 이 시뮬레이션으로부터 전반부에 차량전반부가 지주와 소성충돌 하여 차량의 운동량을 지주로 옮김으로써 차량의 속도를 낮추고 추가적인 EAM의 충돌로 차량을 완전히 정지 시킬 수 있으나 베이스키가 EAM을 충돌할 때 급격한 감속이 일어나지 않도록 EAM의 강도를 조절할 필요성이 제기된다.

### 3.3 Case 3의 시뮬레이션 결과

Case 2에서는 전반부에 차량전반부가 지주와 소성충돌 하여 차량의 운동량을 지주로 옮김으로써 차량의 속도를 낮추고 추가적인 EAM의 충돌로 차량을 완전히 정지 시킬 수 있음을 보였다. 그러나 베이스키가 EAM을 충돌할 때 급격한 감속이 일어나지 않도록 EAM의 강도를 조절하고 모듈의 수를 늘리는 것이 타당한 것으로 예측되었다.

본 절은 Guide Trough의 시점으로부터 1.5m지점에 충격흡수형모듈(D=55mm, t=2.5-4.5mm, l=140mm인 물성치 SS400 강관)을 20개 설치하여 전체 모듈의 설치길이를 확장하고 그 모듈의 강도를 조절하는 방안으로 모듈의 두께를 2.5mm에서 4.5mm로 다음과 같이 달리 한 것이다. 마지막 단부는 밀폐하여 EAM이 변형되어 차량의 속도를 감속시키면서 차량이 멈추도록 하였으며, 현



실적인 편주식 지주로 높이를 7.2m로하고 4.45m×2.2m의 표지판을 부착하였다.

Fig.12-a는 지주 Base의 평면을 보인 것이다. Guide 길이는 총 1.5m 로 충돌 후 차량의 운동량이 기둥에 전달되어 동일한 속도로 운동하다가 EAM을 충격하면서 차량이 감속되어 정지하는 것이다. Fig.12-b는 측면을 보여준다. Guide Trough의 시점으로부터 1.5m 지점에 EAM을 20개 설치한 것이다. Fig.12-c는 후면에서 지주를 본 것으로 역 T형의 키와 베이스의 구조는 전과 동일하다.

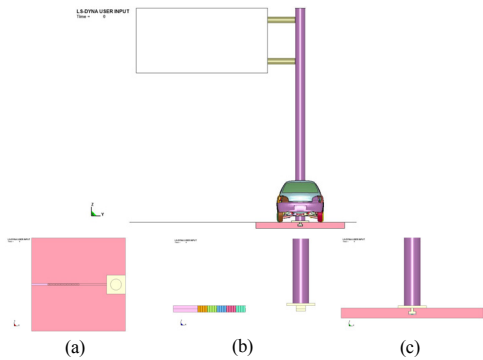


Fig. 12. Crashworthy Post Detail (Case 3)

Fig.13은 시간대 별 차량과 지주의 움직임을 보인 것이다. Fig.14는 차량이 충돌 중 받는 가속도의 시간이력이고 Fig.15는 차량의 시간대별 속도 변화를 보인 것이다. Fig.13과 Fig.15로부터 충돌차량은 0.05초 동안 충돌하면서 차량의 범퍼와 충격흡수구간 변형하여 감속된 상태로 지주와 같이 40km/h의 속도로 진행하다가 0.135~0.14초에서 베이스 키가 EAM을 충격하기 시작한다. 이후 속도가 서서히 감소하여 0.25초에 속도가 0으로 되고 이 후 약간의 반발이 일어나는 것을 볼 수 있다.

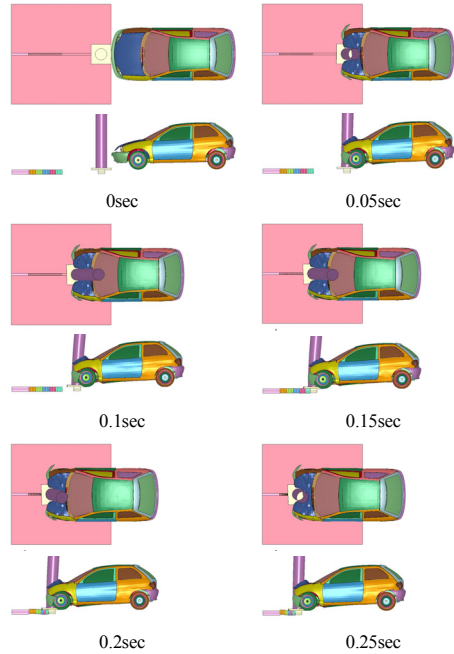


Fig. 13. Crashworthy Post-Vehicle Impact (0.9ton-80km/h, Case 3)

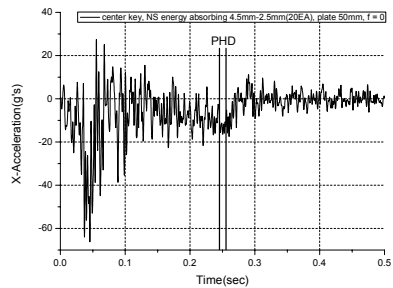


Fig. 14. Acceleration Trace (Case 3)

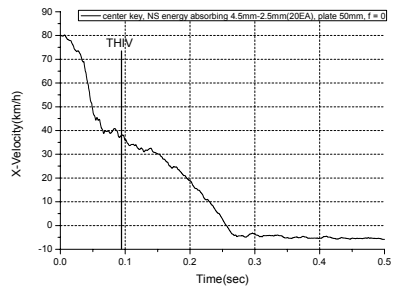


Fig. 15. Velocity Trace (Case 3)

이 충돌에서 THIV는 충돌 후 0.094초에서 41.9km/h로 Crash Cushion의 성능 인정기준44km/h를 밑도는 수준이다. PHD는 베이스 키가 EAM를 충격한 직후인 0.2456sec-0.2556sec 대에 13.2g로 허용치 20g에 크게 밑돈다. 이는 차량의 속도-시간 이력곡선인 Fig.15의 지주베이스 키와 EAM의 충돌이후 비교적 완만한 감속도와 Fig.14의 가속도-시간 이력으로부터 확인할 수 있다. 이 시뮬레이션으로부터 전반부에 차량전반부가 강체로 볼 수 있는 지주와 소성충돌 하여 차량의 운동량을 지주로 옮김으로써 차량의 속도를 낮추고 추가적인 EAM의 충돌로 차량을 완전히 정지 시킬 수 있으며 EAM의 강도 및 설치길이를 조절하여 탑승자의 안전도를 만족시킬 수 있음을 보여준다.

### 3. 결론

노출된 지주에 충돌하는 차량의 탑승자 안전을 도모하기 위하여 소성충돌로 차량과 지주가 일체로 되는 동안 충돌차량의 선형운동량이 지주로 전달되어 충돌에너지의 일부가 1차적으로 소산되고 감소된 속도로 이동하는 지주의 베이스가 기초에 매립된 Energy Absorption module (EAM) 을 충격하여 변형시킴으로써 나머지 에너지가 소산되는 감충지주(Crashworthy Post)를 개발하였다. 표지판용 지주 노출빈도가 많은 편지식 철제 원형 지주(D×t=355.6mm×9mm)에 0.9ton 차량이 정면충돌하는 경우에 대하여 LS-DYNA 충돌해석 프로그램을 이용하여 성능을 검증하였다. 요점은 다음과 같다.

- 별도 조치 없이 기초에 강결된 지주에 0.9ton 소형차가 40km/h 이하로 충돌하는 경우 차체의 충격흡수 능력으로 탑승자 안전이 문제가 되지 않으나 그 이상의 충돌속도에서는 탑승자 안전지수가 국내 허용치 기준을 상회한다. 감충 대책이 필요하다.
- 지주의 초기위치로부터 1.5m 떨어진 Guide Trough에 직경 55mm, 길이 140mm의 철재(SS400) 원형관 20개를 EAM으로 삽입하여 구성된 감충지주에 대한 0.9ton-80km/h 충돌 시뮬레이션을 실시하였다. 2차 충돌 초기의 급속한 감속을 제어하기 위하여 EAM의 두께를 2.5mm(4개)에서 4.5mm(4개)로 점증시켰다. 이 충돌에서 THIV는 41.9km/h로 Crash Cushion의 성능 인정기준 44km/h에 비하여

안전하고, PHD는 13.2g로 허용치 20g에 비하여 매우 안전한 것으로 확인되었다.

- 개발된 감충지주는 EAM의 강도 및 설치길이를 조절하여 다양한 충돌 조건에서 탑승자의 안전도를 만족시킬 수 있음을 보여준다.

### References

- [1] KOROD, "2005 Traffic Accident Statistics", 2005
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Roadside Design Guide", Washington, D.C., 2011
- [3] Department of Infrastructure, Energy and Resources, "Road Hazard Management Guide" RO-96-SC.204, Australia, Tasmania, 1996
- [4] "Roadside Design Guide" Alberta Infrastructure and Transportation, Edmonton, AB, 2013
- [5] RISER D07 - Summary of Maintenance and Operational Procedures for Roadside Infrastructure, European Community R&TD Project, 5th Framework Programme "Growth", Project "RISER" GRD2/2001/50088, 2006
- [6] EN12767 : 2007, "Passive Safety of Support Structure for Road Equipment-Requirements, Classification and Test Methods," CEN, 2007
- [7] MOLIT, "Roadside Design and Management", 2014
- [8] MOLIT, "Statistics, Integrated Management Center for Road Signs", 2015
- [9] Hallquist, J.O., "LS-DYNA Theoretical Manual", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 2001.
- [10] LSTC, "LS-DYNA Keyword User's Manual", Livermore Software Techonology Corporation, 2001
- [11] FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, "Finite Element Model of Dodge Neon", 1996
- [12] NCAC Public Finite Element Model Archive, "FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center website page(www.ncac.gwu.edu)", Washington, D.C., 2000
- [13] Engineering Mechanics-Dynamics, A. Bedford, W. Fowler, Addison-Wesley Company, Inc., pp186-208, 1995
- [14] Engineering Mechanics-Dynamics, W.F. Riley, L. D. Sturges, John Wiley & Sons, Inc., pp429-453, 1996

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 교통물류사업(15TLRP-C096228-01)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

**고 만 기(Man-Gi Ko)**

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 농공학과 (공학사)
- 1988년 8월 : 오클라호마 주립대 토목공학전공 (공학석사)
- 1992년 12월 : Texas A&M대 토목공학전공 (공학박사)
- 1998년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

교통안전, 교량공학

**윤 덕 근(Duk-Geun Yun)**

[정회원]



- 2001년 2월 : 명지대학교 교통공학과 (교통공학석사)
- 2009년 2월 : 명지대학교 교통공학과 (교통공학박사)
- 2001년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

도로교통, 교통안전, 도로설계

**김 기 동(Kee-Dong Kim)**

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 오클라호마 주립대 토목구조전공 (공학석사)
- 1995년 5월 : 텍사스주립대(오스틴) 토목구조전공 (공학박사)
- 1997년 10월 ~ 현재 : 공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

교통안전, 구조공학, 내진공학

**노 민 형(Min-Hyung No)**

[준회원]



- 2013년 2월 : 공주대학교 건설환경공학과 (공학사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 석사과정

<관심분야>

교통안전, 구조공학