

# 차량과 콘크리트 교각의 직접충돌해석법과 충돌하중이력곡선을 이용한 간접충돌해석법 비교연구

김 우 석<sup>1</sup> · 김 경 진<sup>2</sup> · 이 재 하<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국해양대학교 건설공학과

## A Comparison Study of Direct Impact Analysis of Vehicle to Concrete Pier and In-Direct Impact Analysis using Load-Time History Functions

WooSeok Kim<sup>1</sup>, Kyeongjin Kim<sup>2</sup> and Jaeha Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea  
<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Korean Maritime and Ocean University, Busan, 606-791, Korea

### Abstract

In design standards such as AASHTO LRFD and Korea Highway Bridge Design, the dynamic behaviors under the impact loading has not been considered and it recommends of using a static force for designing bridge column against vehicle collisions. Accordingly, in this study, models of vehicle collisions to concrete bridge column were developed with various boundary conditions in order to take into account dynamic behaviour of the column. Cargo trucks of 10tons, 16tons and 38tons were selected and a typical type of concrete bridge pier column along the Kyungbu highway in Korea was selected for this study. Results from this study indicate that the static load specified in the design standards are too small compared to results obtained in this study. It was also found that a consideration of the bridge superstructure allowed smaller damages of concrete bridge pier column under truck impact loadings. Furthermore, a comparison study of direct impact analysis of vehicle to bridge-column with in-direct impact analysis using load-time history functions was performed. The in-direct impact analysis shows that the use of load-time history graph improves the computational cost up to 92% and predict the behaviors of the bridge column under the impact loadings well. The obtained load-time history graph could be easily applied to several existing models.

**Keywords** : concrete bridge, bridge column-vehicle collision, impact analysis, load-time history graph

### 1. 서 론

차량과 교각의 충돌은 차량 내 인명피해와 함께 교각의 구조적 손상을 가할 수 있고, 이는 교각을 통과하는 차량에 직접적인 영향을 줌으로서 2차 인명피해를 키울 수 있는 매우 위험한 사고의 유형이라 할 수 있다(Sharma *et al.* 2008). 충돌사고로 인하여 발생하는 교각의 구조적 손상은 차량의 속도, 차량의 질량, 차량의 형태, 교각의 형태 및 사용재료 등에 따라 상이한 결과를 초래할 수 있다. 또한 차량이 충돌

하는 위치 및 충돌면적에 따라 그 영향은 매우 상이하다. 교각과 차량의 충돌 유형으로는 트럭과 같이 높은 구조의 차량이 교각의 상부구조에 충돌하는 유형(Sharma *et al.*, 2008), 공용중인 현수교 주케이블에 차량의 충돌유형(Na *et al.*, 2013) 그리고 교각에 직접 충돌(El-Tawil *et al.*, 2005) 하는 경우 등으로 나뉜다. 특히 교각에 직접충돌하는 유형의 경우 교각의 전단 파괴나 콘크리트의 피복박리 등을 일으켜 상부구조에 영향을 주어 교각 붕괴로도 이어질 수 있는 사고의 유형이다. 이러한 사고유형의 가장 대표적인 예는 미국

\* Corresponding author:

Tel: +82-51-410-4466; E-mail: jaeha@kmou.ac.kr  
Received October 31 2014; Revised November 17 2014  
Accepted November 18 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1 Bridge collapse due to a truck collision(NDOR)

네브라스카 주 I-80 고속도로에서 발생하였던 교량붕괴사건(2003)이다(Fig. 1).

이러한 차량충돌에 의한 교량붕괴의 가능성은 현재 구조물의 노후화와 차량하중의 증가 그리고 교량붕괴를 일으킬 수 있는 트럭의 빈도수 증가 등에 따라 상승하고 있다고 해도 과언이 아니다. Hartick 등(1990)에 따르면 1951년에서 1988년 사이 114번의 교량붕괴중 차량(트럭)충돌에 의한 교량의 붕괴는 약 15%인 것으로 확인되었으며, Wardhana 와 Hadipriono(2003)에 따르면 1989년부터 2001년 사이 총 14건의 교량붕괴가 차량충돌로 인하여 발생한 것으로 확인되었다. Sharma 등(2012)에 따르면 1966년에서 2005년 사이 미국에서 발생한 교량붕괴 사건중 차량충돌에 따른 교량붕괴는 전체 요인 중 홍수로 인한 붕괴에 이어 두 번째 인 것으로 확인되었다. 이처럼 차량 충돌이 교량붕괴에 큰 영향을 주는 가장 큰 요인으로는 교량이 차량충돌에 저항할 수 있도록 설계되지 못한데 있으며, 이는 현재 설계기준에서 이러한 충돌하중을 적절히 고려하고 있지 못하기 때문이라고 할 수 있다. 교각의 전단설계 시 요구되는 전단강도는 실제 차량의 충돌로 인하여 발생하는 다양한 동적거동을 포함하기에는 부족하며 동적인 영향으로 인한 충돌하중이 교각의 설계강도를 초과할 경우 교량의 붕괴를 초래한 것이다. El-Tawil 등(2005)에 따르면 미국의 도로교설계기준인 AASHTO LRFD에서도 차량충돌에 대한 적절한 설계기준을 제시하고 있지 못하다고 설명한다. 미국 AASHTO LRFD(2012)에서는 약 2,669kN의 정적인 하중을 노면으로부터 1.5m 높이에서 적용하도록 하고 있다. 국내의 경우 도로교설계기준(2010)에서는 1.8m의 높이에 1,000kN의 정적하중을 적용토록 하고 있으며, 한계상태설계법에 기반한 도로교설계기준(2012)에 따르면 1,800kN의 정적 하중을 1.2m 높이에 적용토록 규정하고 있다. 정적인 하중을 부여함으로써 충돌시 발생가능한 동적인 영향을 고려하지 못하고 있는 것을 확인할 수 있다. 한편 교량의 충돌시 동적인 거동을 쉽게 고려하지 못하는 이유로는 충돌해석시 발생하는 높은 해석의 시간적 비용일 것이다. 외연적 해석법에 기초해서 해석을 수행한다고

하더라도 높은 요소수와 재료의 비탄성을 충분히 벗어나 Eroding까지 고려해야 하는 충돌해석은 짧은 0.3초의 거동을 해석하는데 약 20시간 이상의 해석시간을 필요로 하며 이러한 점은 설계에서 충돌거동에 대한 연구결과를 쉽게 적용하지 못하는 장애물로 작용한다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 다양한 경계조건에서의 차량-교각 직접충돌해석(direct impact analysis)을 통해 동적인 영향이 실제 정적 해석결과와 비교하여 어떤 차이를 발생시키는지 해석적 방법으로 규명하고 충돌해석의 해석효율성을 향상시키기 위하여 차량-강체 충돌해석으로부터 얻어지는 충돌하중시간이력곡선을 교각의 충돌부위에 적용하는 간접충돌해석을 수행하여 본 해석방법의 장단점을 비교하고 해석의 효율성을 논하였다.

## 2. 충돌해석 모델

교각과 차량(트럭)의 충돌해석을 수행하기 위하여 상용 해석프로그램 LS-DYNA r.7.0.0(2014)을 활용하였다. 3차원 모델을 구축하고 개발된 차량모델에 100km/h의 속도를 초기조건으로 부여하여 교각과 충돌하는 해석을 수행하였다. 강체와 차량의 충돌시에는 다양한 속도에 따른 충돌하중 및 역적(impulse)의 변화를 확인하였다. 사용된 교각의 제원은 국내 경부고속도로에 노출되는 교각의 일반적인 제원을 가지고 있는 교각을 선정하였다. 상세한 교각의 제원은 다음장에서 설명하도록 한다.

### 2.1 교각 모델(modeling of bridge column)

교각 모델링을 위하여 7,104mm의 높이와 1,200mm의 단면 지름, 그리고 D25 철근과 D13 띠철근이 사용된 국내의 대표적인 교각의 제원을 사용되었다. 해석을 위하여 사용된 재료값은 철근의 경우 400MPa의 항복강도가 고려되었으며 콘크리트의 설계기준압축강도 30MPa를 충돌해석시 콘크리트의 압축강도로 사용하였다. 충돌시 발생하는 균열은 콘크리트 구조물의 거동에 직접적인 영향을 미치므로 정확한 파괴에너지의 예측이 필요하다. 콘크리트의 파괴에너지는 아래 식과 같이 CEB-FIP(2010)에서 제시하는 파괴에너지 추정식을 사용하여 산정하였으며 산정된 값은 70N/m이다.

$$f_{dm} = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (1)$$

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (2)$$

여기서,  $f_{dm}$ 은 콘크리트 예측 인장강도(MPa),  $f_{ck}$ 는 콘크

리트 압축강도(MPa),  $G_p$ 는 콘크리트 예측파괴에너지(N/m),  $f_{cm}$ 는 콘크리트 평균실험압축강도(MPa)를 뜻한다.

본 연구에서 사용한 LS-DYNA r 7.0.0에서 사용할 수 있는 콘크리트 재료모델은 MAT072R3(KCC), MAT084(Winfrith), MAT159(CSCM)모델 등이 있다. 관련 모델들은 모두 콘크리트의 충돌해석에 활용될 수 있다. Winfrith 모델의 경우 PrePost에서 균열의 방향 및 길이 등을 확인할 수 있으나 압축에 대한 Softening 거동을 포함하지 않아 다른 모델에 비하여 변위가 과소평가되는 것으로 확인된 연구결과가 있다(Jeong *et al.*, 2011). 또한 KCC나 Winfrith에 비하여 CSCM 모델은 고속도로 중앙분리대 충돌해석용으로 비교적 최근에 개발되었으며 요소의 제거(erosion) 기능을 포함하고 있어 콘크리트의 박리된 표면의 요소나 파괴이후 강성을 잃은 요소를 적절히 제거할 수 있어 더 신뢰성 있는 거동을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상기 설명한 다양한 콘크리트 재료모델중 CSCM 모델을 선정하여 사용하였다. CSCM은 Continuos Surface Cap Model이며 다른 두 모델과는 다르게 콘크리트의 높은 3축 압축조건에서 Cap의 형태로 한계항복면이 줄어들도록 규정하고 있어 고압의 조건에서 콘크리트 안에 존재하는 공극이 닫히는 거동까지 구현되어 진다고 할 수 있다. CSCM의 한계항복면(limit yield surface)은 Affine-exponential Spline의 형태로 아래와 같은 수식을 이용하여 표현되어 진다.

$$F_m(I_1) = a_1 - a_3 \exp^{-a_2 I_1} + a_4 I_1 \quad (3)$$

여기서,  $F_m(I_1)$ 은 응력불변량  $I_1$ 의 함수인 최대항복면이며  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 는 계수,  $I_1$ 는 응력불변량(정수응력)이다. 4가지 계수는 콘크리트의 3축 압축시험을 통해 결정할 수 있다. 또한 변형률에 따른 동적증가계수 계산을 위하여 응력의 종류(인장 및 압축)와 변형률  $30s^{-1}$ 을 기준으로 4가지의 각각 다른 식을 적용하여 충돌하중에 보다 세밀하게 동적증가계수를 결정하게 된다. 보다 구체적인 재료모델의 설명은 LS-DYNA Theory manual 또는 Wu 등(2012)을 통해서 확인할 수 있다. 교각에 사용되는 철근의 경우 Piecewise\_Linear\_Plasticity 모델을 사용하였다. 이 재료모델에서는 변형률 속도를 고려하기 위하여 Cowper-Symonds의 식을 활용하며, 본 연구에서는 Jeong 등(2011)에서 사용했던  $1.05E+07 Sec^{-1}$ 과 8.3을  $D$ 와  $p$ 의 계수를 입력값으로 사용하였다. 그러나 추후 관련 계수의 민감도 해석 등을 통해 차량 충돌해석에 보다 적절한 값을 결정하는 추가연구가 필요할 것으로 판단된다. 각각 만들어진 콘크리트 교각과 철근

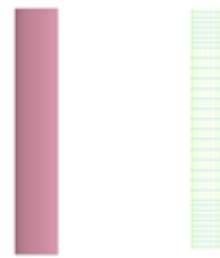


Fig. 2 Selected bridge column

을 Lagrange in Solid 기능을 사용하여 철근을 콘크리트에 매입시켰다(Fig. 2).

### 2.2 차량 모델(modeling of trucks)

해석에 사용될 차량 모델을 선정하기 위하여 미국 National Crash Analysis Center에서 제공하는 LS입력파일(input file)형태의 차량모델을 사용하였다. 다양한 차량모델 중 국내 트럭과 가장 유사하다고 판단되는 유럽 기준(EN-1317)의 3 종류의 트럭을 대상차량으로 선정하였으며 선정된 3개의 모델은 각각 10톤, 16톤 및 38톤의 카고(cargo) 트럭이다. 본 연구에서는 덤프(dump)형 트럭은 고려하지 않았다. 각각 26,990, 32,905 및 52,213개의 요소를 가지고 섬세하게 각 차량의 구조적인 부분을 고려하였으며 상세한 질량도 함께 모델링되었다. 강재로 만들어진 구조프레임과 차량의 타이어 및 서스펜션, 그리고 차량 전면 및 측면 유리의 재료까지 고려되었으며 부여된 짐(cargo)은 질량요소를 사용하여 고려되었다.

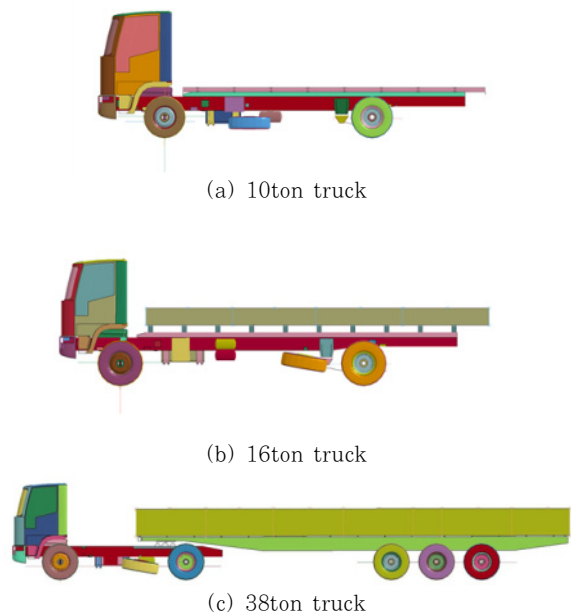


Fig. 3 Selected trucks

### 2.3 경계조건

교각의 경계조건은 다음 3가지로 고려하였다. 첫 번째 경계조건(Model I)은 교각의 밑면에 대해서는 고정하고 윗면에 대해서는 차량 진행방향에 대해서 구속하였다. 이는 충돌 해석에서 가장 쉽게 고려될 수 있는 단순화된 조건이다. 두 번째 경계조건(Model II)은 밑면에 대해서 고정된 상태에서 윗면에 대해서는 자유롭게 하였다. 또한 추가적으로 상부구조의 하중을 교각의 길이방향으로 직접 축하중을 적용하였다. 이는 교각 상부구조의 질량은 고려하지 않으면서 상부구조의 자중에 의해 발생하는 하중만 고려한 것이다. 세 번째 경계조건(Model III)에서는 교각 위 코핑을 보 요소를 이용하여 직접 모델링 한 후 상부구조의 자중에 대응하는 질량요소(mass element)를 보 요소에 부여하여 상부구조의 영향을 검토하고자 하였다.

경계조건 2와 3(Type II and III)에서는 동적인 충돌해석이 수행되기 이전에 상부구조의 하중이 교각에 정적으로 전달될 수 있도록 LS-DYNA의 dynamic relaxation 옵션을 사용하였다. 따라서 상부하중이 동적 영향없이 교각에 전달될 수 있도록 하였으며, 1차 정적인 해석이 진행된 이후

초기 응력값들을 기준으로 2차해석이 수행되었다. 충돌위치는 노면으로부터 0.8m로 고려하였다. 각 경계조건에 대한 상세한 사항은 Fig. 4에 나타내었다.

### 2.4 간접충돌해석법

본 연구에서는 차량의 직접충돌해석이 발생할 수 있는 해석 효율성 문제를 개선하기 위하여 간접충돌해석 방법을 수행하고 이를 서로 비교하였다. 간접충돌해석이란 직접충돌해석에서 사용된 차량이 같은 속도로 충돌대상체가 아닌 강체(rigid wall)에 충돌하였을 경우 강체에 발생하는 시간에 따른 반력의 함수, 즉 충돌하중시간이력곡선을 외력으로 입력하여 구조물의 거동을 파악하는 해석이다. 강체 충돌해석을 통해 얻어진 충돌하중시간이력곡선을 충돌면에 적용하여 구조물에서 발생하는 손상, 변형, 단면력 등의 거동을 예측하고 이를 직접충돌해석 결과와 비교해 보았다. 차량의 충돌면적은 원형교각 Fig. 5와 같이 원형 단면의 앞부분에 등분포로 전달된다고 보았으며 그 높이는 직접충돌이 가장 먼저 발생하는 범퍼에서의 높이를 최하점으로 하여 위로 1.1 m에 걸쳐서 작용한다고 가정하였다. 이는 범퍼 아랫면부터 차량 앞유리가 설치된 최하면 까지의 높이이다.

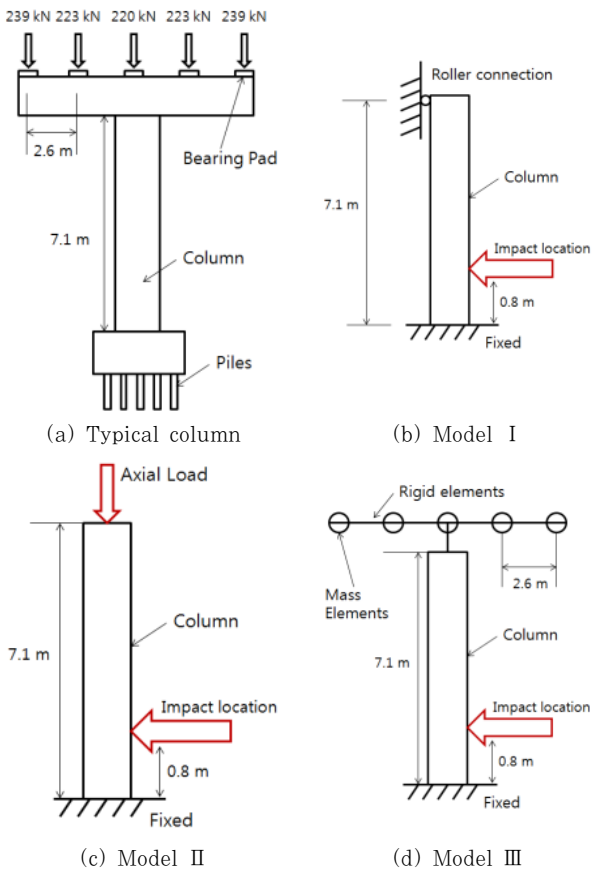


Fig. 4 Boundary conditions

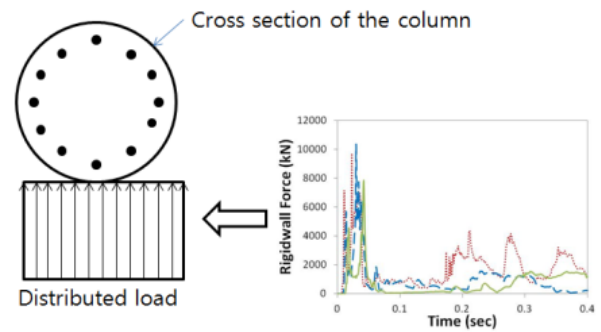


Fig. 5 Selected bridge column

항공기 충돌해석에서는 구조물과 충돌되는 항공기 동체의 충돌면적은 항공기 동체 면적의 2배(원형)로 제시하고 있다 (Riera 1968). Sugano 등(1993)이 실제 Phantom 기를 가지고 수행한 직접충돌실험에서도 접촉면적은 동체의 약 2배정도 발생되었다. 이는 항공기 충돌시 구조물의 크기가 항공기의 동체를 포함하는 경우이며 차량과 교각의 충돌에서는 대상 구조체의 크기가 충돌체(차량)보다 작은 경우가 대부분이므로 Fig. 5와 같이 교각의 전면부에 충돌이 영향을 준다고 가정하였다. 그러나 교각 이외의 차량충돌을 적용할 경우 항공기와 같이 차량 전면부의 2배를 적용할 수 있는 지는 추가 연구가 필요할 것이다.



### 3. 충돌해석 결과

본 장에서는 전술한 바와 같이 직접충돌해석 결과, 강제 충돌해석 결과, 간접충돌해석 결과를 설명하고 각 해석 방법에 기초하여 발생한 단면력, 충돌하중, 구조물의 변형시간이력곡선 등을 비교분석하여 정리한 결론을 도출하였다.

#### 3.1 직접충돌해석 결과(direct impact analysis)

차량이 직접 교각에 충돌하는 직접충돌해석을 수행하였다. 각 차량(10ton, 16ton, 38ton) 및 전술한 경계조건에 따른 교각과 철근의 변형형상, 단면력시간이력곡선, 변형량시간이력 곡선을 서로 비교하였다.

##### 3.1.1 교각과 철근 및 차량의 변형형상

상기 조건으로 제시된 차량충돌에 대한 교각의 콘크리트 및 철근의 파괴형상을 Fig. 6에 나타내었다.

모든 차량하중에 대하여 교각은 저항하지 못하는 것으로 확인되었다. 철근과 콘크리트 밀단에 전단파괴가 발생하는 것을 확인하였다. 경계조건 1에서 가장 많은 파괴가 발생하는 것으로 확인되었으며 경계조건 3에서 가장 적은 파괴가 발생하였다. 경계조건 1은 상부와 하부 모두 차량진행 방향에 대해서 구속되어 있으므로 파괴면인 차량충돌 지점으로부터 아

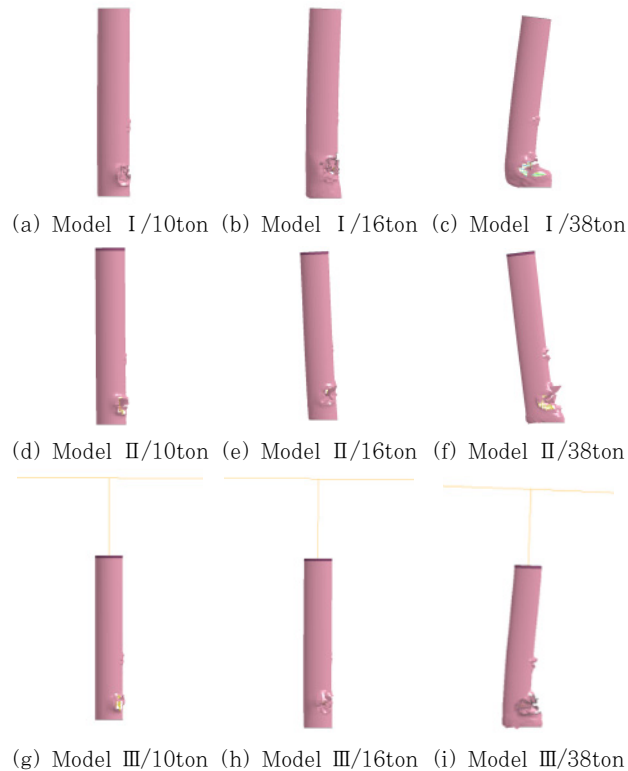


Fig. 6 Deformed shape of the column(Scale5)

래쪽 영역에 에너지가 집중되는 현상이 발생하면서 가장 큰 전단파괴의 형상을 나타내었다. 반면에 경계조건 2에서는 상부면이 구속되지 않았으므로 전단과 휨이 동시에 발생하면서 파괴정도(변형량)가 적게 나타났다. 이는 경계조건 2에서의 교각 변형형상을 참고하여도 잘 나타난다. 경계조건 3에서는 경계조건 1 및 2와 비교하여 상대적으로 작은 파괴가 발생하였다. 이는 경계조건 3에서는 상부구조의 질량요소(Mass element)를 함께 고려하였으므로 이러한 질량요소의 동적거동을 개시하는데 일정부분 충돌에너지가 소모되면서 교각 하부에 집중되는 파괴를 줄인 것으로 판단된다. 다만 상부구조의 질량요소의 관성영향으로 2차적인 흔들림이 변형이나 단면력에는 미소하게 영향을 주었으나 전체적인 교각의 충돌거동에는 본 연구에서 사용된 상부구조는 영향을 주지 못하는 것으로 확인되었다. 다만 추후 교각의 세장비와 코핑의 폭, 상부구조의 자중 또는 차량하중 적용시 2차적인 영향을 줄 수 있으므로 다양한 교각 형상 및 조건에 대한 연구가 필수적이라 하겠다. 본 해석에 사용된 교각과 형상이 비슷한 경우에는 따라서 차량충돌에 대한 교각의 저항성능을 평가하기 위해 보수적인 관점에서 해석을 수행할 경우 경계조건 1과 같이 상부와 하부 모두 차량진행 방향에 대해서 구속시킨 후 해석결과를 평가하여도 무방하다고 할 수 있다.

경계조건에 따른 차량의 변형 형상은 큰 차이를 보이지 못하였다. 일반적인 충돌후 차량 변형형상을 Fig.7에 나타내었다. 변형 형상을 보아도 충돌시 범퍼로부터 차량 전면 유리 및 부분까지 영역에 트럭의 주요 구조물(프레임)이 위치하고 있어 범퍼로부터 상부 1.1m까지 분포하중으로 간접해석을

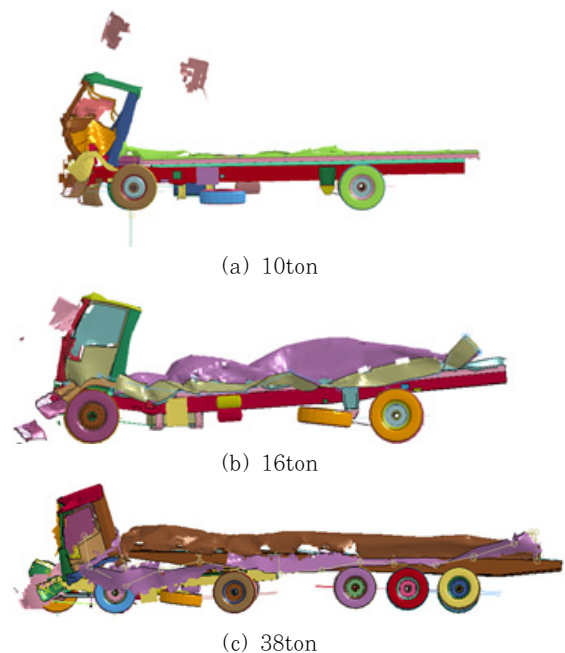


Fig. 7 Deformed shape of the trucks

수행할 수 있음을 확인할 수 있다. 범퍼 위의 운전석 주변의 요소에도 파괴가 많이 발생하였으나 상대적으로 작은 질량을 가지고 있어 충돌시 하중이 전체 하중에 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다.

### 3.1.2 변형량-시간이력곡선

직접차량충돌해석 후 변형량-시간이력곡선을 그림과 같이 나타내었다. 변형량-시간이력곡선은 교각 충돌면의 변형량을 충돌이 진행되는 시간동안 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 8은 각 차량하중(10ton, 16ton, 38ton)에 대한 경계조건별(Model I, II and III) 변형량-시간이력곡선을 비교한 것이다.

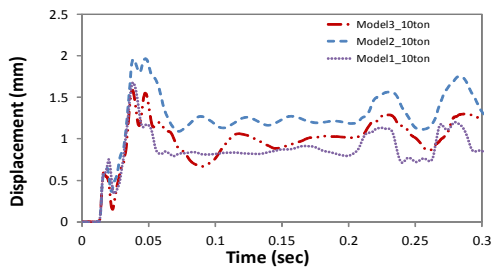
최대 변형은 Fig. 6 및 Fig. 8과 같이 높은 중량을 운반하는 차량과의 충돌시 발생하였다. 경계조건별로는 경계조건 1에서 가장 많은 변위가 발생하였으며 경계조건 3에서 가장 작은 변위가 발생하였다. 이는 전술한 바와 같이 충돌시 교각의 변위와 구조물 손상에 상부구조의 유무가 해석시 주요변수임을 보여준다. 경계조건 1의 16ton 차량과 경계조건 3의 16ton 차량은 해석이 0.4초까지 완료되지 못하였다. 이는 요소에 충돌에 의한 과도한 하중이 가해져 큰 변형이나 음의 체적이 발생하여 해석 모델 내 역행렬이 구해지지 않아 해석

이 완료되지 않는 현상으로 판단된다. 그러나 주요 충돌변형이 발생한 이후 해석이 중단되었으므로 함께 그래프에 나타내었다. 이러한 중단현상을 줄이기 위해서는 높은 변형률이 발생하는 요소의 강성을 높여주거나 hourglass 옵션 등을 바꿔주는 방법 등이 필요하다.

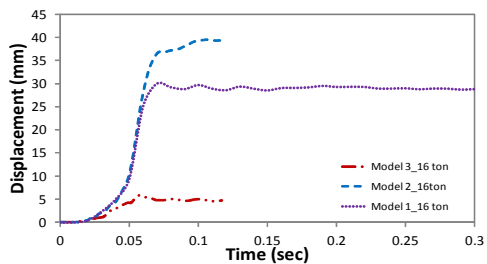
### 3.1.3 단면력-시간이력곡선

차량충돌에 대한 단면력-시간이력곡선을 그림과 같이 나타내었다. 단면력은 콘크리트 교각이 충돌시 받는 밀면 및 구속시 윗면까지의 차량진행방향에 대한 모든 반력의 합을 뜻한다. Fig. 9에는 각 차량하중(10ton, 16ton, 38ton)에 대한 경계조건별(Model I, II and III) 단면력-시간이력곡선을 비교하였다.

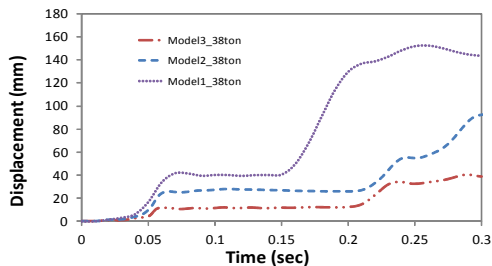
10ton 차량이 충돌할 경우 교각의 손상이나 철근의 항복 정도가 상대적으로 낮으며 발생한 최대 단면력은 모든 경계조건에서 약 5,600kN의 최대값을 보이므로 비교적 비슷한 경향을 나타내었다. 실제로 파괴정도 및 변형량 정도가 각 경계조건별로 다르게 확인되었음에도 최대 단면력은 경계조건별로 큰 차이가 없다. 이는 이미 10ton이상의 차량충돌시에 선택된 교각에 재료적 파괴가 발생하므로 최대 저항능력



(a) 10ton

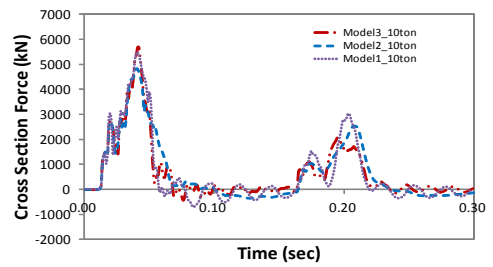


(b) 16ton

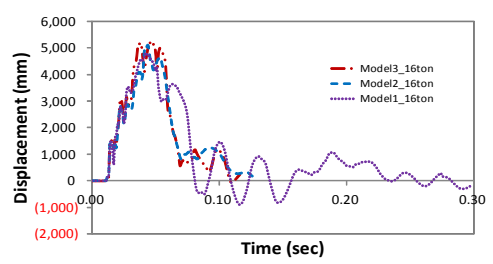


(c) 38ton

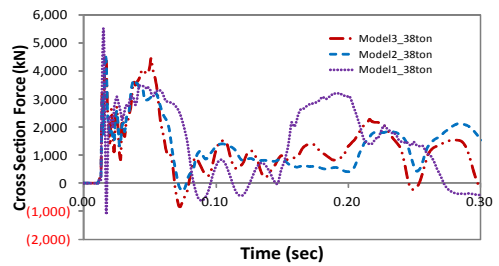
Fig. 8 Displacement-time history curves



(a) 10ton



(b) 16ton



(c) 38ton

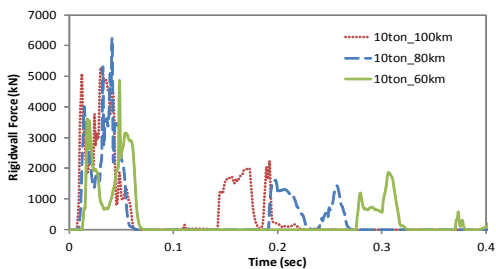
Fig. 9 Section force-time history curves

이상의 하중은 단면력에 나타나지 않기 때문이다. 단 본 해석에서 확인된 단면력은 추후 설명될 강체충돌해석시 강체에 발생하는 반력보다는 작은 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 충돌시 교각의 변형에너지가 교각 단면에 발생하는 단면력을 일정부분 감소시켰기 때문이다. 따라서 충돌시 파괴가 발생하는 교각의 전단력은 강체충돌시 발생하는 하중보다는 작다. 충돌시 최대 단면력 이후의 단면력의 변화는 차량 내부의 2차 충돌, 차량 요소간의 충돌, 질량요소의 충돌 시점의 차이 등의 영향으로 경계조건 별로 미소한 차이가 발생하였으나 전반적으로 비슷한 경향을 나타낸다.

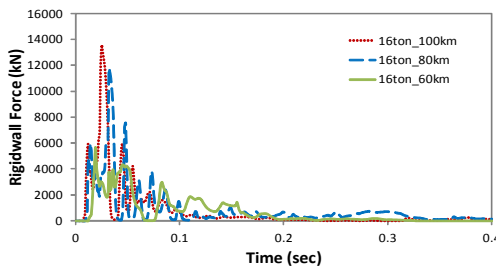
### 3.2 강체충돌해석 결과

본 연구에서는 선택된 3종류(10ton, 16ton, 38ton)의 차량에 100km/h, 80km/h, 60km/h의 속도로 강체에 충돌시키는 해석으로부터 얻어지는 충돌시 강체의 반력을 이용하여 충돌하중시간이력곡선을 나타내었다. 충돌하중시간이력곡선은 간접충돌해석에서 외력으로 작용하도록 하였다.

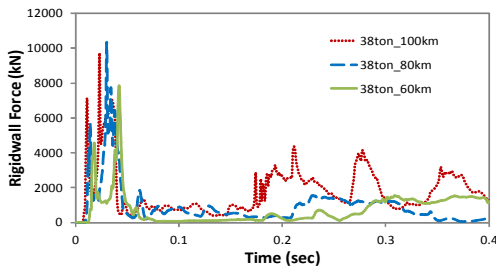
Fig. 10과 같이 강체충돌해석 결과 차량의 충돌하중은 설계기준(도로교설계기준, 2010; 2012; AASHTO LRFD,



(a) 10ton



(b) 16ton



(c) 38ton

Fig. 10 Impact load-time history curves

2012)에서 제시한 정적하중 조건(2669kN, 1800kN, 1000 kN)을 충분히 초과하는 것으로 확인되었다. 각 차량에 대해 20km/h의 속도 증가 시 최대하중 발생시점은 약 23% 앞당겨졌다. 그러나 차량의 충돌속도가 높을수록 순간 최대하중은 함께 증가하지는 않았다. 10ton차량의 경우 80km/h에서 최대 충돌하중 6180kN, 38ton 차량에서도 80km/h에서 10350 kN의 최대하중이 확인되었다. 16ton 차량은 100km/h에서 최대 13547kN으로 확인되었다. 이는 차량 충돌시 차량 내부의 요소들이 강체에 충돌되면서 다양한 충돌조합이 발생할 수 있으므로 경우에 따라서 상대적으로 낮은 속도에서 순간 최대하중은 더 높게 나타날 수 있기 때문에 판단된다. 16ton 차량의 경우 전반적으로 38ton차량 보다 높은 하중을 발생시켰으나 2차 충돌까지 고려한 역적(impulse)을 계산해 보면 38ton차량이 가장 높은 값을 나타낸다. 적재하중을 가지고 있는 38톤의 경우(Fig. 10(c)) 100km/h의 속력으로 충돌할 경우 적재하중에 의한 2차 충돌의 영향이 큰 것으로 확인되었다. 해석결과를 바탕으로 차량의 최대하중(peak load(P))과 역적(impulse(I))에 대한 P-I 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

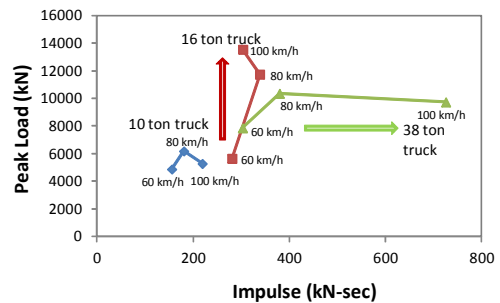


Fig. 11 P-I graph depending on vehicle types

차량의 충돌하중은 폭발하중과 같이 최대하중(P) 및 역적(I)의 관계가 명확하지는 않다. 10ton의 경우 속도에 따라 최대하중과 역적에 변화가 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 그러나 16ton에서는 충돌속도가 증가함에 따라 최대 하중이 증가하는 경향을 나타내었다. 38ton 차량에서는 충돌 속도의 증가에 따라 최대하중의 변화는 크지 않았으나 역적이 민감하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 16ton 차량의 경우 순간적으로 가장 높은 하중을 발생시키는 일체형의 차량구조를 가지고 있으나 38ton 차량의 경우 차량의 화물칸이 동력을 전달하는 부분과 핀으로 연결되어 있으므로 일체형 구조에 비하여 속도의 증가에 따라 최대하중에는 별다른 영향을 받지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 한편 38ton 차량의 경우 2차 충돌을 일으키는 적재하중이 역적에 영향을 주어 속도에 역적은 민감하게 영향을 받는 것으로 확인되었다. 이처럼 16ton 차량과 38ton 차량의 경향을 비교해 보면

차량의 자중 보다는 차량의 구조형태나 구성요소의 분포, 2차 충돌을 일으킬 수 있는 화물의 존재 등에 따라 최대하중이나 역적의 증가경향이 차종별로 매우 다를 수 있음을 확인할 수 있다.

### 3.3 간접충돌해석 결과

강체충돌해석 결과로 얻어진 충돌하중시간이력곡선을 교각의 전면부에 등분포로 적용한 해석결과를 경계조건 1의 직접충돌 해석결과와 비교하였다. 변형량과 단면력을 비교하고 간접충돌해석시 해석 효율성도 함께 비교하였다. 간접충돌해석시 하중을 각 요소 노드에 분포할 경우 하중을 받는 면에서 집중하중에 의한 파괴(erosion)가 발생하면서 전달되던 하중이 중단되는 현상이 발생할 수 있어 직접 교각 콘크리트 노드에 하중을 전달하지 않고 강체와 교각의 면을 접촉조건으로 설정하여 강체에 하중을 전달하는 방법을 사용하여 하중을 교각에 적용하였다. 간접충돌해석 결과 직접충돌해석에 비하여 해석시간을 약 92%이상 줄일 수 있는 것으로 확인되었다. 해석결과를 비교하기 위하여 변형량-시간이력곡선, 단면력시간이력곡선, 구조물의 파괴 형태 및 콘크리트의 파괴영역 등을 함께 비교하였다. 본 해석결과 간접충돌해석 방법은 직접충돌해석과 비교하여 매우 유사한 해석결과를 보여주는 것으로 확인되었다.

#### 3.3.1 변형량-시간이력곡선 비교

차량충돌에 대한 직접충돌해석과 간접충돌해석의 변형량-시간이력곡선을 Fig. 12에 함께 비교하였다.

전반적으로 16ton 차량을 제외한 모든 차량에서 직접충돌 해석결과와 유사한 변형을 나타내었다. 10ton 차량의 경우 38ton 차량충돌해석 결과보다 더 일치하는 것으로 확인되었는데 이는 10톤의 경우 38ton 차량에 비하여 파괴의 정도가 적게 발생되었기 때문이다. 콘크리트의 완전한 전단파괴 이후의 해석결과는 파괴가 미소하게 발생한 경우보다 상대적으로 그 편차가 큰 것으로 확인되었다. 그러나 파괴이후 잔류 변형 및 충돌시간에 따른 교각의 거동은 직접충돌해석과 비교적 유사하게 거동되는 것으로 확인되었다. 10ton 차량충돌시 발생한 최대변위는 직접충돌해석에서 3.7mm이며 간접충돌해석 결과 4.1mm로 매우 유사하다. 반면 10ton이나 38ton 차량충돌과는 다르게 16ton 차량 충돌시에는 간접충돌과 직접충돌해석간 변형량에서 많은 차이를 나타내었다. 이는 강체충돌시 16ton 차량의 변형형상과 직접충돌시 16ton 차량의 변형형상이 상이하여 발생한 것으로 확인되었다. Fig. 13은 16ton 차량이 강체에 충돌할 경우 차량의 구조프

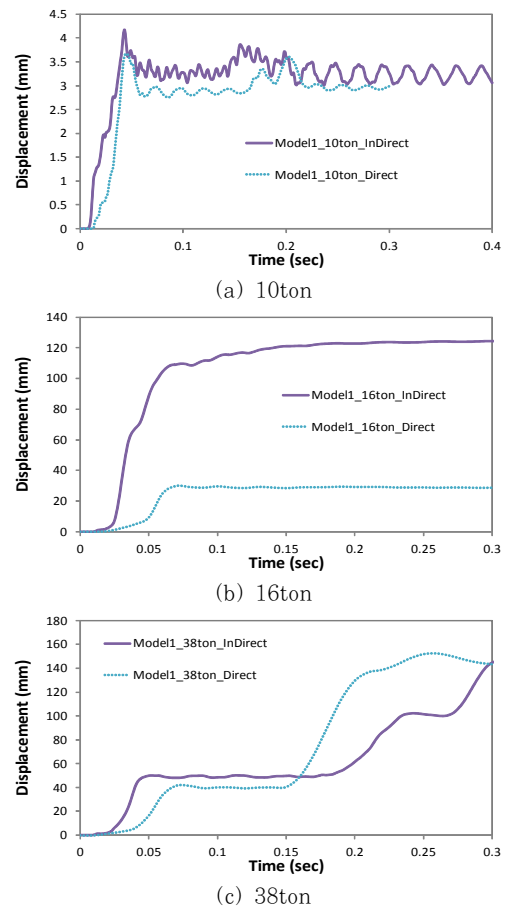
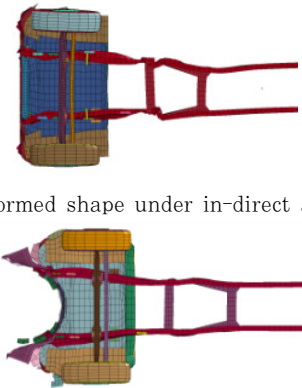


Fig. 12 Displacement-time history curves



(a) Deformed shape under in-direct analysis  
(b) Deformed shape under direct analysis  
Fig. 13 Deformed shapes of 16ton truck

레이미 위치한 차량 밑면의 변형형상과 교각에 직접충돌조건에서의 차량의 변형형상 해석결과를 비교한 것이다.

그림에서와 같이 강체충돌의 경우 차량의 주요 구조 프레임이 강체와 수직으로 충돌하면서 구조프레임이 좌굴될 정도의 순간 집중하중이 발생하며 이는 강체의 반력에 그대로 전달된다.

한편으로 교각과 충돌시에는 교각의 원형단면이 구조프레임을 횡방향으로 밀어내는데 충돌에너지가 일정부분 소모되



어 상대적으로 순간 최대하중을 줄인 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 강제충돌해석을 통한 충돌하중이력곡선은 실제 차량충돌시 발생하는 하중보다 높은 값을 나타낼 수 있다는 것을 보여준다. 그러나 실제 차량 충돌시 차량의 구조프레임 중앙부분에 충돌체가 정확히 위치하기 어렵다고 본다면 간접충돌해석 결과가 더 실제에 가까울 수 있다.

### 3.3.2 단면력-시간이력곡선 비교

직접충돌해석과 간접충돌해석 결과인 단면력-시간이력곡선을 Fig. 14에 서로 비교하였다. 전반적으로 최대하중이 발생하는 시점이 직접충돌해석과 비교하여 약 0.001초 앞당겨지는 것으로 확인되었다.

이는 간접충돌해석의 경우 사용되는 충돌하중시간이력 곡선이 강제충돌해석 결과로부터 얻어진 것이며 차량의 충돌에너지가 모두 차량 변형에 쓰였으므로 최대하중이나 하중의 작용 시점이 직접충돌해석보다 앞당겨 진다. 전체 시간대비 0.3% 미만의 매우 미소한 차이인 것으로 확인되었으나 강제와 충돌대상체간 강성 차에 의한 시간 지연에 대해서는 앞으로 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며 충돌체가 내부가 비어있는 연성의 장구조물(long hollow projectile)인

경우 이러한 시간지연 효과는 증가할 것이므로 이에 대한 고려가 필요하다.

간접충돌해석 결과 3종류의 차량 모두 시간에 따라 전달된 단면력은 직접충돌해석결과와 유사하게 발생하였다. 다만 16ton 차량의 변형량-시간이력곡선에서와 같이 강제충돌시 발생하는 높은 반력은 간접충돌해석 결과에 영향을 주어 변형량과 단면력을 모두 높게 발생시켰다. 차량 충돌시 충돌대상체의 크기가 차량폭 대비 좁으면서 충돌이 정확히 차량의 중앙부에 작용할 확률은 매우 작다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 경계조건에 따른 차량충돌해석 결과에 대해 비교분석하였다. 또한 해석의 효율성을 향상시킬 목적으로 간접충돌해석방법을 개발하고 이를 직접충돌해석 결과와 함께 비교하였다.

경계조건에 따라 구조물의 변형이나 단면력 등은 매우 민감하게 변하였다. 실제 상부와 하부를 구속한 조건에서 가장 많은 파괴가 발생하였으며 코핑 및 자중 등의 상부구조를 고려한 모델은 오히려 상대적으로 파괴가 적게 발생하는 것으로 확인되었다. 상부구조를 고려한 모델의 경우 충돌에너지는 상부구조의 운동에 일정부분 사용되면서 파괴면에 집중되는 것을 줄여 주었으며 이는 충돌대상체(교각)의 파괴를 줄이는 역할을 하는 것으로 확인되었다. 그러나 상부구조의 운동에 따른 관성력은 구조물의 단면력이나 충돌중 거동에 영향을 주는 것으로 나타났다. 추후 다양한 교각의 세장비와 코핑의 길이, 상부구조의 자중 또는 차량하중 적용시 2차적인 영향을 줄 수 있으므로 다양한 교각 형상 및 조건에 대한 연구가 수행될 필요가 있다.

강제충돌해석에서는 속도의 영향보다는 차량의 형상, 주요 차량 구조체의 형상의 차이로 인하여 차중에 따라 최대충돌하중이 증가하기도 하고 역적(impulse)이 증가하기도 하였다. 이는 폭발하중과는 매우 상이한 결과로 차량 충돌하중은 충돌시 다양한 요소의 조합으로 인하여 예상치 못하게 높은 충돌하중 또는 높은 역적이 발생할 수 있다는 것을 뜻한다. 한편 충돌발생시 최대하중은 설계기준(도로교설계기준, AASHTO 등)에서 제시하는 정적인 하중을 충분히 초과하는 것으로도 확인되었다.

간접충돌해석에서는 강제충돌해석을 통해 계산된 충돌하중시간이력곡선을 교각에 직접 전달하여 구조물의 거동을 평가하였다. 변형량이나 단면력, 변형형상 등을 비교하였을 시 직접충돌해석 결과와 매우 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있었다. 다만 강제충돌해석을 통한 충돌하중이력곡선을 사용할

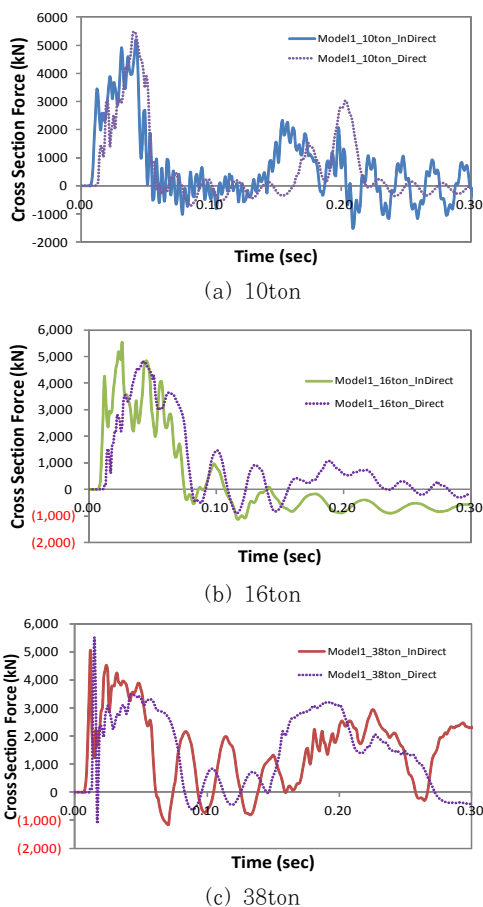


Fig. 14 Section force-time history curves

경우 차량의 형상과 충돌대상체(교각)의 형상간 조합에 따라 직접충돌해석보다 상대적으로 높은 파괴 및 변형을 발생시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나 본 연구에서는 확률이 낮은 직접충돌해석 조건보다는 간접충돌해석에 따른 결과가 더 높은 확률을 가지고 있는 것으로 판단된다. 간접충돌해석은 또한 차량의 해석 효율성을 향상시키는 것으로 확인되었다. 간접충돌해석결과 직접충돌해석 대비 약 92%이상 해석 시간을 감소시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 차량 충돌 시 외력에 대해서 미리 정의되어 있는 충돌하중시간이력곡선이 사용된다면 많은 구조물 해석에 외력개념으로 적용될 수 있을 것으로 판단되며 기타 상용프로그램으로 구축된 기존 모델에도 쉽게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 과제는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업과 기초연구사업(No. NRF-2012R1A1A1044378).

### References

- AASHTO (2012) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, AASHTO, Washington, D.C.
- Chung, C., Lee, J., Kim, S., Lee, J. (2011) Influencing Factors on Numerical Simulation of Crash between RC Slab and Soft Projectile, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(6), pp.591~599.
- El-Tawil, S., Severino, E., Fonseca, P. (2005) Vehicle Collision with Bridge Piers, *J. Bridge Eng.*, 10(3), pp.345~353.
- Hartik, I.E., Shaaban, A.M., Gesund, H., Valli, G.Y.S., Wang, S.T. (1990) United States Bridge Failures, 1951 - 1988, *J. Perform. Constr. Facil.*, 4(4), pp.272~277.
- Livermore Software Technology Corporation (2014) *LS-OPT User's Manual*, Livermore, CA.
- Ministry of Construction and Transportation (2012) *Korea Highway Bridge Design Code*, 2012
- Na, S., Cha, C., Cho, H. (2013) Maintenance and Examples for the Damage of Suspension Bridge Main Cable due to Car Collision, KISTEK, pp. 57~79.
- Riera, J.D. (1968) On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Forces, *Nucl. Eng. & Des.*, 8, pp.415~426.
- Sharma, H., Hurlbaas, S., Gardoni, P. (2012) Performance-based Response Evaluation of Reinforced Concrete Columns Subject to Vehicle Impact, *Int. J. Impact Eng.*, 43, pp.52~62.
- Sharma, H., Hurlbaas, S., Gardoni, P. (2008) Development of a Bridge Bumper to Protect Bridge Girders from Overheight Vehicle Impacts, *Comput. Aided Civ. & Infrastruct. Eng.*, 23, pp.415~426.
- Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Orui, S., Von Riesemann, W.A., Bickel, D.C., Parks, M.B. (1993) Full-scale Aircraft Impact Test for Evaluation of Impact Force, *Nucl. Eng. & Des.* 140, pp.373~385
- Wardhana, K., Hadipriono, F. C. (2003) Analysis of Recent Bridge Failures in the United States, *J. Perform. Constr. Facil.*, 17(3), pp.144~150.

### 요 지

본 연구에서는 차량과 교각의 직접충돌해석을 통하여 기존 설계기준(도로교설계기준, AASHTO LRFD)에서 아직 고려하고 있지 않은 동적영향을 고려한 실제 교각의 충돌 파괴 거동을 다양한 경계조건별로 검토하였다. 선정된 차량은 10톤, 16톤, 38톤의 Cargo 트럭이며 교각은 경부고속도로 상 일반적인 제원으로 선정하였다. 해석결과 가장 많은 파괴는 상부구조의 고려없이 교각의 상부면을 구축하였을 시에 발생하였으며 상부구조는 2차적인 영향을 교각에 전달하기 보다는 충돌에너지의 일부 흡수하는 역할을 하며 파괴를 감소시키는 것으로 확인되었다. 또한 해석의 효율성을 위해 차량과 강체간 충돌시 발생하는 충돌하중이력곡선을 교각에 외력으로 부여한 간접충돌해석을 수행하고, 이를 직접충돌해석 결과와 비교하였다. 해석결과 직접충돌해석 결과와 매우 유사하게 교각의 거동을 예측하는 것으로 확인되었으며 해석효율성 또한 높아져 해석시간은 약 92%정도 감소하였다. 이러한 간접충돌해석법은 다양한 기존 모델이나 다른 해석프로그램에도 쉽게 부여될 수 있어 그 활용범위가 증가할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 콘크리트교량, 교각-차량 충돌, 충돌해석법, 충돌하중이력곡선