



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

국부충돌을 고려한 콘크리트 중앙분리대 충돌저항성능 평가
및 개선에 관한 연구

A Study on Evaluation and Improvement
of Current Concrete Median Barrier under Local Impact

지도교수 이 재 하

2019년 8월

한국해양대학교 해사산업대학원

토목환경공학과

이 병 상

본 논문을 이병상의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 경 갑 수



위 원 손 동 우



위 원 이 재 하



2019년 08월 22일

한국해양대학교 해사산업대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
초 록	viii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목표	5
1.3 연구 범위 및 구성	6
제 2 장 문헌 조사	8
2.1 미국 중앙분리대 개발 현황	8
2.2 국내 중앙분리대 개발 현황	10
2.3 중앙분리대 개선을 위한 국내 연구	13
2.3.1 중앙분리대의 최적단면 개발 연구	13
2.3.2 탑승자 보호 성능	16
2.4 충돌저항성능에 우수한 재료	19
2.5 설계하중 추정식	21
2.5.1 Olson 이론	21
2.5.2 항복선 이론	23
제 3 장 이론적 배경	25
3.1 콘크리트 재료모델	25
3.2 강제 재료모델	27

제 4 장 해석 모델 개발	28
4.1 모델개발 및 검증	28
4.1.1 전체충돌해석모델 개발	29
4.1.2 국부충돌해석모델 개발	32
4.2 충돌저항성능 향상을 위한 중앙분리대 단면설계	39
4.2.1 콘크리트 중앙분리대 단면	39
4.3 전체충돌해석 결과	45
4.3.1 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 결과	46
4.3.2 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 결과	47
4.3.3 충돌저항성능에 우수한 재료의 전체충돌해석 결과	51
4.4 국부충돌해석 결과	54
4.4.1 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 결과	55
4.4.2 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 결과	57
4.4.3 충돌저항성능에 우수한 재료의 국부충돌해석 결과	61
4.5 단가 산정 및 적정단면 제안	64
제 5 장 결론 및 고찰	68
감사의 글	70
참고문헌	71

List of Tables

- Table 2-1 강도성능 평가를 위한 시험조건
(차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람 2015)
- Table 2-2 SB5-B(20A) 충돌조건
- Table 2-3 충돌해석 결과와 충돌시험 결과 비교 (한국도로공사, 2017)
- Table 2-4 모델검증에 사용된 재료모델 파라미터 (한국도로공사, 2017)
- Table 4-1 모델검증에 사용된 최종 파라미터 (한국도로공사, 2017)
- Table 4-2 충돌시험 결과와 해석결과 비교
- Table 4-3 충돌 등급에 따라 제안된 국부충돌 적용 외력
- Table 4-4 단면폭 및 강재량 증가 해석모델의 단면 변수
- Table 4-5 충돌저항성능에 우수한 재료의 해석모델 단면 변수
- Table 4-6 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 부피손실률
- Table 4-7 단면폭 및 내부강재량 변수에 따른 전체충돌해석 부피손실률
- Table 4-8 충돌저항성능에 우수한 재료의 전체충돌해석 부피손실률
- Table 4-9 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률
- Table 4-10 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률
- Table 4-11 충돌저항성능에 우수한 재료의 국부충돌해석 부피손실률
- Table 4-12 단면 변수에 따른 국부충돌해석결과 대표 단면 경제성 비교

List of Figures

- Fig. 1-1 연도별 고속도로 대형차 이용 대수 (한국도로공사, 2014)
- Fig. 1-2 남성주IC 사고 관련 사진
- Fig. 1-3 차량충돌에 의한 중앙분리대 파손 사례 (평택제천고속도로)
- Fig. 1-4 중앙분리대 실물충돌시험
- Fig. 1-5 연구흐름도
- Fig. 2-1 미국 중앙분리대 단면형상
- Fig. 2-2 국내 중앙분리대 단면형상
- Fig. 2-3 중앙분리대 사고 통계
- Fig. 2-4 국내의 중앙분리대 설계 요구 충격도
- Fig. 2-5 실물충돌시험 (1차, 2차, 3차 충돌)
- Fig. 2-6 1nd ex-Barrier의 콘크리트에 발생하는 Internal Energy와 Kinetic Energy
- Fig. 2-7 충돌단면에 대한 탑승자 보호성능 평가
- Fig. 2-8 탑승자 안전성능 평가 충돌 시 차량 거동
- Fig. 2-9 SFRC 혼합재료 단면
- Fig. 2-10 UHP-FRC Properties (Habel et al. 2006)
- Fig. 2-11 Crushable Concrete (Doyle et al. 2016)
- Fig. 2-12 충돌차량의 거동 개념도 (Olson, 1974)
- Fig. 2-13 강성방호벽의 항복선 형태 (Hirsch, 1978)
- Fig. 3-1 Continuous Surface Cap Model (LS-DYNA USER'S MANUAL Materials)
- Fig. 4-1 전체충돌해석 모델
- Fig. 4-2 충돌해석에 사용된 트럭모델
- Fig. 4-3 중앙분리대 단면 손상비교
- Fig. 4-4 국부충돌로 인한 중앙분리대 파손
- Fig. 4-5 국부충돌해석
- Fig. 4-6 국부충돌해석 결과
- Fig. 4-7 충돌형상 비교 (7.54ton)
- Fig. 4-8 GM, LM을 사용한 계산결과
- Fig. 4-9 비산저감을 위한 중앙분리대 단면안(1)
- Fig. 4-10 와이어메쉬 개선
- Fig. 4-11 비산저감을 위한 중앙분리대 단면안(2)
- Fig. 4-12 충돌 후 차량의 거동

Fig. 4-13 차량의 운동 (Pitching, Rolling, Yawing)

Fig. 4-14 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 부피손실률

Fig. 4-15 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 부피손실률

Fig. 4-16 충돌저항성능에 우수한 재료의 전체충돌해석 부피손실률

Fig. 4-17 파손형상 비교 ($\phi 3.2$ vs $\phi 9.5$)

Fig. 4-18 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률

Fig. 4-19 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률

Fig. 4-20 충돌저항성능에 우수한 재료의 국부충돌해석 부피손실률

Fig. 4-21 단면폭 및 내부강재 증가에 따른 적정단면 산정 그래프

Fig. 4-22 충돌저항성능에 우수한 재료의 적정단면 산정 그래프

A Study on Evaluation and Improvement of Current Concrete Median Barrier under Local Impact

Lee, Byungsang

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The speed of vehicles on highways has increased due to improved driving environments. However, this increased speed has become one of the main reasons for collisions between vehicles and road barriers such as a concrete median barrier. Several collision accidents along the Korean Expressway have been occurred recently as a result of flying concrete fragmentation from the locations of collision between concrete median barrier and heavy vehicle. The current impact level of a concrete median barrier (CMB) is SB5-B (270 kJ). However, it was found that new concrete median barrier designed based on a stricter impact severity such as SB6 (420 kJ) could resist against 85% of total truck collision accidents observed in S. Korea. Therefore, in this study new CMBs were developed under the SB6 impact loading condition. Several designs of CMBs have been presented and numerical analysis were conducted to evaluate the impact resistance of CMBs against vehicle impact loadings (SB6 impact severity). Developed numerical models were firstly verified with some field test results and some important key parameters were calibrated based on field test results. Every proposed designs of the new CMB were evaluated by both global and local numerical models. Firstly, commercially available wire-mesh reinforcements and an increase in width of cross section were considered as design modifications. Furthermore, in order to applying new impact severity from SB5-B to SB6, other types of concrete materials such as steel fiber reinforced concrete, crushable concrete and fiber reinforced-high strength concrete which have been known as excellent materials against impact loading were considered. Finally, two optimal designs under SB6

impact severity were proposed with considerations of the construction cost.

KEY WORDS: Concrete Median Barrier, Concrete Flying Fragmentation, Impact Resistance, Cross Sectional Design, Impact Analysis, Local Impact

국부충돌을 고려한 콘크리트 중앙분리대 충돌저항성능 평가 및 개선에 관한 연구

이 병 상

한국해양대학교 해사산업대학원

토목환경공학과

초 록

국내 고속도로에서는 차량의 대형화, 주행환경의 개선 등으로 인해 현재 설치된 중앙분리대의 방호성능을 초과하는 충돌사고가 빈번히 일어나고 있다. 특히 이러한 방호성능을 초과하는 사고는 주로 화물차량에 의해 발생하며, 충돌 후 비산물이 발생하기도 한다. 2015년 남성주IC에서는 화물차량이 중앙분리대에 충돌하여 발생한 중앙분리대 콘크리트 비산물이 반대차선에서 주행 중이던 차량에 충돌하는 2차사고가 발생하기도 하였다. 이러한 사고를 분석해보면 현 중앙분리대는 화물차량과 충돌 시 중앙분리대 상단부와 차량 화물칸 모서리의 국부충돌(2차 충돌)에 의해 대부분의 콘크리트 비산물이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 기존의 중앙분리대와 차량의 충돌해석 모델은 이러한 국부충돌을 명확하게 모사하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 중앙분리대와 차량의 기존 충돌해석방법인 전체충돌해석에 본 연구에서 새롭게 제안한 국부충돌해석을 수행하여 기존 전체충돌해석을 보완하였다. 보완한 해석방법을 이용하여 다양한 콘크리트 중앙분리대 단면에 대한 충돌저항성능 평가를 수행하였다. 충돌저항성능은 충돌로 발생하는 부피손실률을 비교함으로써 평가하였다. 충돌등급은 기존 SB5-B에서 SB6로 상향하여 조정하였다. 연구결과 기존 SB5-B 등급에서 SB6로 상향할 경우 통계적으로 확인된 전체 중앙분리대 충돌사고의 85%에 저항할 수 있을 것으로 기대된다. 상향된 충돌등급에 저항하기 위한 콘크리트 중앙분리대의 성능 향상을 위해 단면확대, 강재량을 증가시키는 방법과 충돌저항성능에 우수한 재

료(SFRC, Crushable Concrete, 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete))를 사용하는 방법을 고려하였다. 해석모델은 LS-DYNA를 이용하여 개발하였으며, 중앙분리대의 충돌저항성능은 먼저 전체충돌해석으로 구조물의 전체적인 손상 및 차량의 거동을 확인하고, 국부손상에 대해서는 국부충돌해석모델을 개발하여 파괴손실률을 예측하였다. 이후 SB6 충돌등급에 저항할 수 있는 최종 중앙분리대 단면을 제시하였으며 관련된 단면의 재료비를 고려하여 기존 중앙분리대와 시공단가를 비교하였다.

KEY WORDS: 콘크리트 중앙분리대, 콘크리트 비산물, 충돌저항성능, 단면설계, 국부충돌

제 1 장 서 론

본 장에서는 국내에서 공용중인 중앙분리대의 충돌저항성능 개선(국부충돌을 중심으로)을 위한 연구의 배경과 목적 그리고 구성에 대해서 기술하였다.

1.1 연구 배경

최근 국내 고속도로에서는 화물차량의 대형화와 통행량 증가 및 고속도로의 주행환경 개선 등으로 인하여 중앙분리대의 방호성능을 초과하는 사고가 발생하고 있다. 2010년부터 2014년까지 고속도로에서 대형차 이용 대수를 조사한 결과를 Fig. 1-1에 나타내었다. 2010년부터 2014년까지 고속도로를 이용하는 전체 통행량이 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 특히 대형차량 통행량 수가 꾸준히 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 통계로 볼 때, 고속도로 통행량은 현재는 물론 앞으로도 계속해서 증가할 것으로 예상되며 특히 차량의 대형화와 주행환경의 개선은 고속도로에서 대형차량과 중앙분리대의 충돌사고 발생 가능성을 더욱 증가시킬 것으로 예상된다. 하지만 현재까지 대형차량과 중앙분리대의 충돌 시 빈번히 일어나는 국부충돌로 인한 파괴를 대비한 설계와 연구는 이루어지지 못했다. 최근 고속도로의 사고유형을 보면 차량과 중앙분리대의 국부적 충돌로 인하여 발생한 비산파편에 의해 2차사고가 빈번히 발생하고 있고 이 사고로 인해 반대편 차선에서 주행 중인 차량에 파편이 전달되어 2차 인명피해가 발생하고 있는 실정이다. 이는 기존 중앙분리대의 방호성능을 초과하는 사고 발생을 초래하는 것으로 나타나 이에 본 연구에서는 국내 고속도로의 사고사례를 참고하여 국부충돌에 저항할 수 있도록 충돌저항성능을 개선한 중앙분리대를 개발하였다.

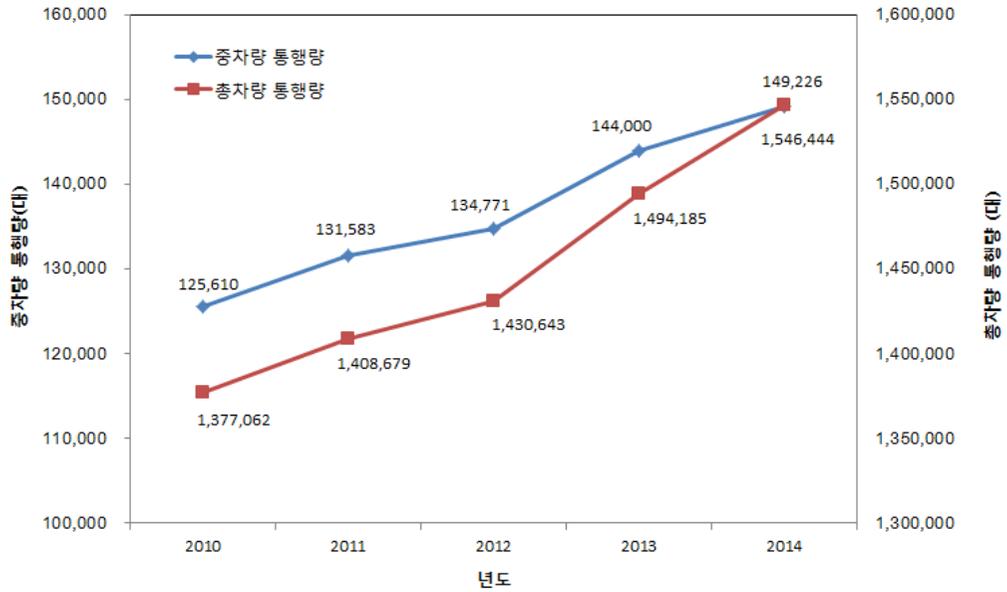


Fig. 1-1 연도별 고속도로 대형차 이용 대수 (한국도로공사, 2014)

Fig. 1-2에는 2015년 5월 7일 남성주IC에서 발생한 중앙분리대와 대형차량의 충돌 사고 사례를 나타냈다. 본 사고는 중부내륙선 양평방향 73.6km(남성주IC 본선)에서 발생한 사고로서, 대형화물차량과 중앙분리대의 충돌 후 발생한 콘크리트 파편이 반대편 1차로를 주행 중이던 승용차와 충돌하였다(연합뉴스, 2015). 이 사고로 반대편 차선을 주행 중이던 운전자와 동승자 모두 사망하는 인명피해가 발생하였다. 이는 전술한 바와 같이 현 중앙분리대(2015 type)의 방호성능을 초과하는 사고로서, 기존 고속도로에 설치된 중앙분리대를 파손시킬 사고는 충분히 발생할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 1-3에는 이 외에도 국내에서 충돌사고로 인한 중앙분리대의 파손 사례를 나타냈다. 중앙분리대의 파손형상을 살펴보면 중앙분리대 전체가 파손되는 형태가 아닌 대부분 상단 취약부가 파괴되는 경우가 대부분인 것으로 확인되었다.



(a) 중앙분리대 파편 비산



(b) 트럭 승월



(c) 트레일러 전도



(d) 승용차 파손

Fig. 1-2 남성주IC 사고 관련 사진



Fig. 1-3 차량충돌에 의한 중앙분리대 파손 사례(평택제천고속도로)

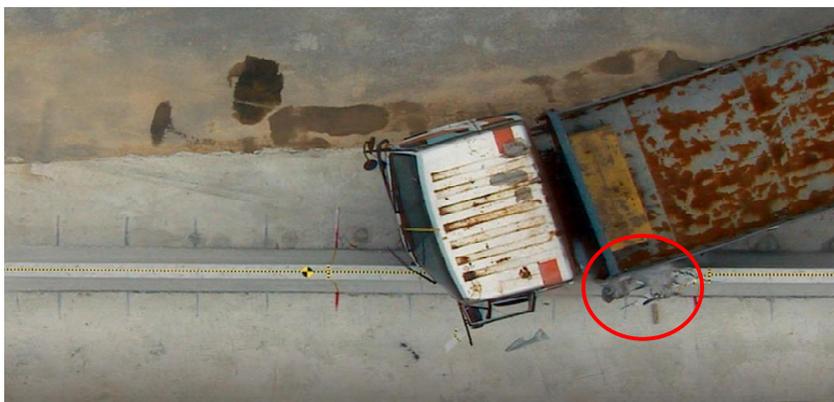
중앙분리대의 충돌저항성능 개선을 위해서는 일반적으로 해석 또는 개발된 수식을 통한 개선 단면을 사전에 확인하고 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람(2017)에 제시된 충돌시험을 수행하여 통과하여야 한다. 하지만 일반적으로 수행하는 해석에서는 실제 실물충돌시험에서 발생하는 국부충돌(Fig. 1-4)과 같은 정밀한 거동은 모사하지 못하는 것으로 나타났다. 해석에서는 차량의 전면부(범퍼)와 중앙분리대의 충돌해석을 수행하여 충돌저항성능을 평가하나 Fig. 1-4와 같이 트럭 화물 적재함 전면부 모서리의 국부적인 충돌로 대부분의 파손

이 발생하는 것으로 확인되었다(Lee et al. 2015). 그러나 기존의 연구에서는 이러한 국부충돌을 고려한 상세한 해석을 수행하지 않으므로 국부충돌에 대한 충돌저항성은 검증되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이러한 국부충돌에 대한 충돌저항성을 중점적으로 확인함은 물론 충돌 후 중앙분리대 및 차량의 거동도 분석하였다.

중앙분리대의 충돌저항성 개선을 위한 변수로는 단면확대, 강재량 증가 및 충돌저항성에 우수한 재료(SFRC, Crushable Concrete, 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)) 등을 사용하여 다양한 변수에 대한 충돌해석을 수행하였으며 차량모델과 중앙분리대의 충돌해석을 통해 충돌 후 차량 및 중앙분리대의 전반적인 거동을 확인하고 이후 국부충돌해석을 수행하여 국부충돌로 인한 파괴형상 및 충돌저항성을 확인하였다.



(a) Rear view



(b) Top view

Fig. 1-4 중앙분리대 실물충돌시험 (Lee et al. 2015)

1.2 연구 목표

본 연구는 충돌해석을 통해 중앙분리대 내부에 매입되는 강재량 변수 및 충돌저항성능에 우수한 재료에 따른 중앙분리대의 충돌저항성능을 확인하고, 경제성과 시공성을 고려하여 최적화 단면을 제시하였다.

전체충돌해석으로 구조물의 전체적인 손상 및 차량의 거동을 확인하고, 전체충돌해석으로 예측이 어려운 국부손상에 대해서는 국부충돌해석모델을 개발하여 예측하였다. 상세한 연구 목표는 아래와 같다.

- 중앙분리대의 손상을 모사할 수 있는 전체충돌해석모델 및 국부충돌해석 모델 개발 및 검증
- 전체충돌해석을 통한 차량 및 중앙분리대의 거동확인
- 국부충돌을 고려한 콘크리트 중앙분리대 단면 개발 및 평가
- 경제성과 시공성을 고려한 적정단면 제시

1.3 연구 범위 및 구성

본 연구는 국부충돌을 고려한 중앙분리대 개선단면을 제시하여 기존 중앙분리대의 성능개선을 위한 목표로 수행되었다. 따라서 이를 달성하기 위하여 다음의 연구 범위를 정하였다. 먼저 국외의 중앙분리대 개발현황, 설계등급 및 성능평가 방법을 검토하는 것이 필요할 것이다. 따라서 미국의 설계등급에 대해 검토를 수행하고 Olson 식(National Cooperative Highway Research Program(NCHRP) Report 350)을 통한 충돌하중력 산정 및 방호울타리(중앙분리대 포함)의 저항능력 산정식(항복선 이론)을 검토하였다. 또한 본 연구에서는 차량의 증가와 주행환경의 개선에 따른 상향된 중앙분리대 설계등급(SB6)을 제안하였다. 이러한 상향된 중앙분리대 설계등급에 대응하기 위해서 충돌저항성능이 우수한 재료들에 대해서 검토를 수행하였다.

이후 충돌해석모델을 개발하기 위한 주요변수연구를 수행하였다. 개발된 모델은 실제 트럭-중앙분리대 충돌실험을 수행한 이후 검증을 하였으며 이를 단면개발에 활용하였다. 국부손상에 대해서는 보다 유사하게 예측하기 위하여 국부해석 모델을 개발하였다.

국내 중앙분리대의 상향된 설계등급에 따라 제안한 단면의 단가산출을 통한 경제성 평가도 수행하였다. 이러한 연구의 범위는 다음과 같으며 연구 흐름도는 아래 Fig. 1-5에 요약하여 나타내었다.

- 국외의 중앙분리대 개발현황 및 설계등급(국내, 미국) 등 검토
- 성능평가방법 검토(충돌하중 산정방법, 방호울타리 저항능력 산정방법)
- 상향된 중앙분리대 설계등급(SB6)을 적용(주행환경 개선, 차량 증가 등을 고려)
- 충돌저항성능에 우수한 재료 검토(SFRC, Crushable Concrete, 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete))
- 충돌해석모델(전체충돌해석모델)을 개발하기 위한 주요 변수연구를 수행
- 충돌실험을 통해 개발모델 검증
- 국부손상 예측을 위한 국부충돌해석모델 개발
- 적정단면 제시를 위한 단가 산정

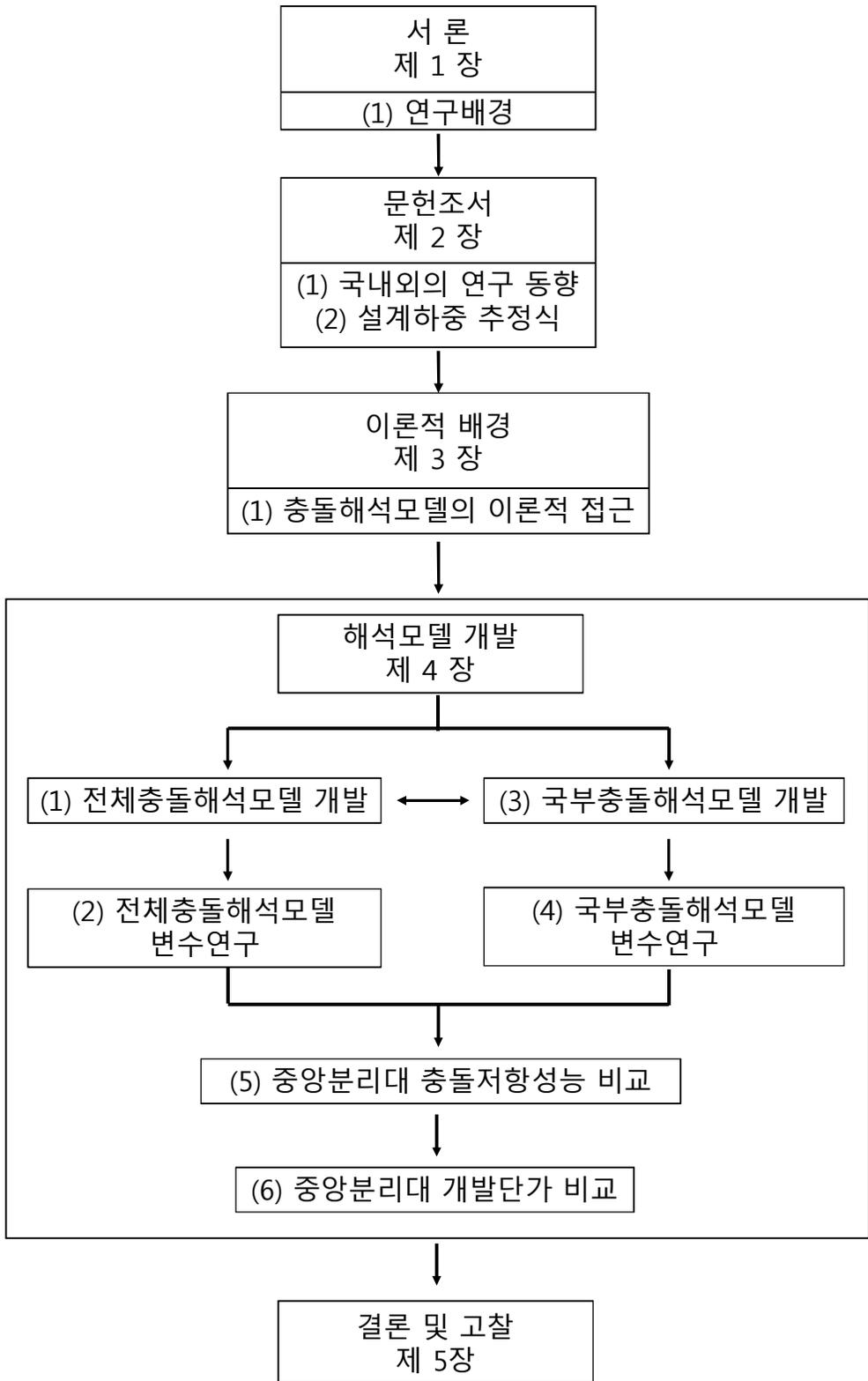


Fig. 1-5 연구흐름도

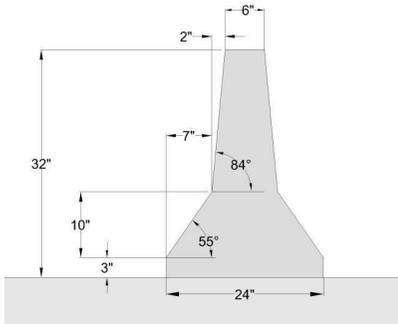
제 2 장 문헌 조사

본 장에서는 연구 범위에서 언급한 국내외 중앙분리대 개발현황 및 설계기준 문헌을 중심으로 정리하였다. 이러한 국내외의 중앙분리대 관련 문헌을 바탕으로 설계 개념, 방법 및 설치기준, 탑승자 보호 성능 등을 분석하였다. 중앙분리대 충돌저항성능 평가를 위한 관련 식(충돌하중 예측식(Olson, 1974))과 방호울타리 저항능력 평가식(Hirsch, 1978)은 2.5장에 정리하였다.

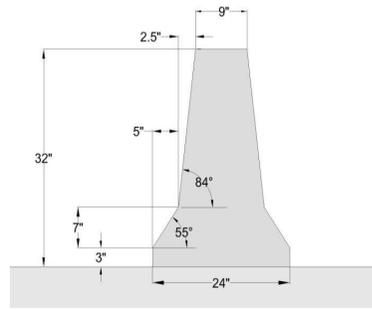
2.1 미국 중앙분리대 개발 현황

미국은 Fig. 2-1과 같이 다양한 형태의 중앙분리대를 사용하고 있다. 각 주마다 다른 형태의 중앙분리대를 사용하는 것이 특징이다. Fig. 2-1(a)는 New Jersey형으로 국내 중앙분리대도 이를 기준으로 개발이 되었다. 충돌 시 차량의 손상 저감이나 탑승자 보호성능이 우수한 것이 특징이나 승월 및 전도사고가 발생하는 단점이 있는 것으로 나와 있다. Fig. 2-1(b)의 F형은 기존의 New Jersey 형에 비해 승월 및 전도 사고를 감소시키는 효과가 있으며 Fig. 2-1(c)의 Vertical slope는 수직형태가 특징이며 충돌 후 차량을 주행차선으로 유도하는 성능이 우수하나 차량 손상이 많고 탑승자 보호성능은 낮다는 단점이 있다(Rosenbaugh et al., 2007).

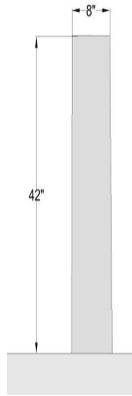
Fig. 2-1(d)의 Single slope는 Vertical slope에서 일정한 경사를 준 형태이고 미국 캘리포니아 지역 등에서 활용도가 높다. Fig. 2-1(e)의 Ontario tall wall은 New Jersey와 같은 경사각을 가지고 있으나 폭을 305mm로 늘린 형태이다. Fig. 2-1(f)의 중앙분리대는 탑승자의 머리가 밖으로 돌출되는 경우 운전자의 머리가 중앙분리대에 충돌하여 사망하게 될 수 있는 상황을 고려하여 개발한 점이 특징이다. 형태는 다양하나 공통적으로는 중앙분리대 내부에 와이어메쉬를 사용하지 않고 철근을 매입하여 국내 중앙분리대보다 높은 충돌저항성능을 가지고 있는 것으로 평가된다.



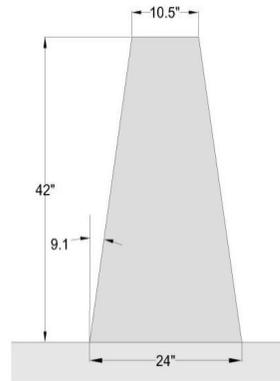
(a) New Jersey



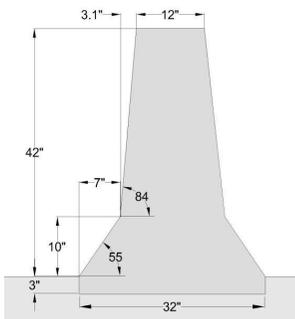
(b) F-shape



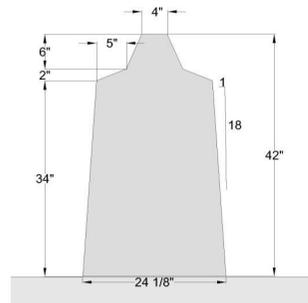
(c) Vertical Slope



(d) Single Slope



(e) Ontario Tall Wall

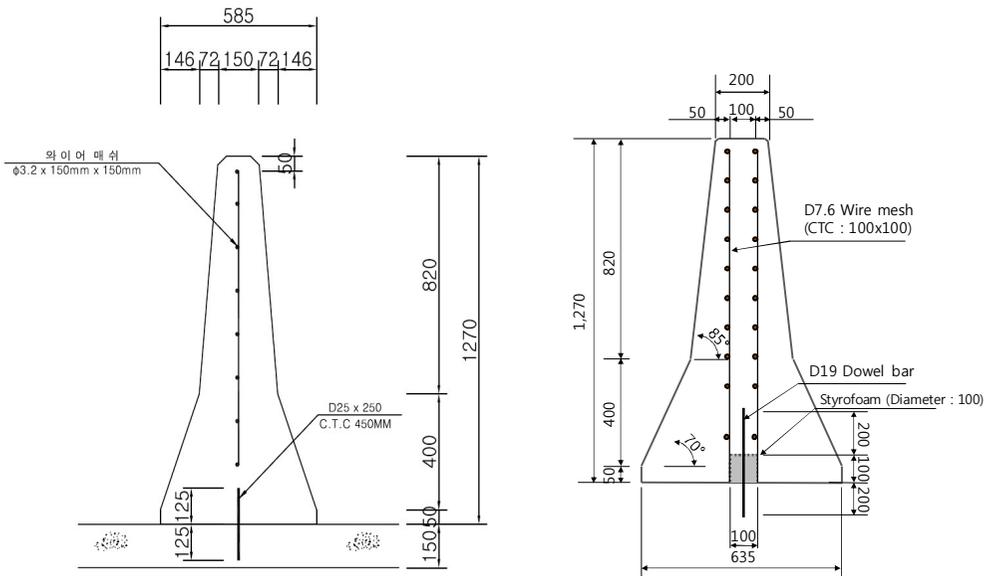


(f) Vertical Faced Concrete

Fig. 2-1 미국 중앙분리대 단면형상 (Rosenbaugh et al., 2007)

2.2 국내 중앙분리대 개발현황

현재 국내 고속도로에 공용중인 중앙분리대는 다양한 개발과정을 거쳐 차량 승월을 최소화하고 야간 주행 시 반대편 차선의 차량으로부터 시야를 방해받지 않기 위한 단면으로 Fig. 2-2(a)와 같다. 이 단면은 SB5-B등급으로서 270kJ의 충돌에 대비한 저항성능을 보유하고 있다. 그러나 현재 공용중인 단면은 보유한 충돌저항성능을 초과하는 충돌이 발생할 경우 비산물이 발생하여 2차사고를 발생시키는 것으로 확인된다(Lee et al. 2017). 이러한 비산물을 저감하기 위한 연구가 국내에서 수행되었는데 Kim et al. (2018)의 연구에서는 충격흡수장치를 포함한 중앙분리대를 개발하여 충돌 후 중앙분리대가 횡방향으로 변위 발생을 유도하여 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 중앙분리대에 인위적인 변위를 발생시켜 흡수함과 동시에 콘크리트의 넓은 면에 손상이 분산되도록 하여 국부적으로 충돌에너지가 집중되는 것을 방지한 설계가 특징이다(Fig. 2-2(b)).



(a) 현재 공용중인 국내 중앙분리대 단면

(b) 충격흡수장치를 포함한 중앙분리대
(Kim et al. 2018)

Fig. 2-2 국내 중앙분리대 단면 형상

현재 국내 중앙분리대의 설치기준은 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람(2015)에 의해 아래 Table 2-1의 표에 나타난 9가지의 등급으로 나누어져 있다. 등급을 나눈 기준은 설계속도 및 적용구간에 의해 구분 되었고 강도성능 평가는 충돌속도, 차량중량, 충돌각도를 이용한 충격도를 기준으로 하고 있다. 또한 비산저감을 위한 고성능 중앙분리대 개발 보고서 (2016)에서는 Table 2-2와 같이 기존의 SB5-B 등급에서 충돌각도만을 5° 증가한 SB5-B(20A) 충돌 등급을 제안하였다.

Table 2-1 강도성능 평가를 위한 시험조건
(차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람 2015)

등 급	충돌 속도 (km/시)	차량 중량 (kg)	충돌 각도 (°)	기준 충격도 (kJ)
SB1	55	8,000	15	60
SB2	65			90
SB3	80			130
SB3-B	85			150
SB4	65	14,000		160
SB5	80			230
SB5-B	85			270
SB6	80	25,000		420
SB7		36,000		600

주) SB : Safety Barrier

Table 2-2 SB5-B(20A) 충돌조건

등 급	충돌 속도 (km/시)	차량 중량 (kg)	충돌 각도 (°)	기준 충격도 (kJ)
SB5-B	85	14,000	15	270
SB6	80	25,000	15	420
SB5-B(20A)	85	14,000	20	456

Fig. 2-3에는 2009년부터 2015년까지 발생한 중앙분리대와 차량의 충돌사고 기록을 정리하였다. 현 중앙분리대(2015 type)는 해당기간 발생한 중앙분리대와 차량의 충돌사고 중 55%만 중앙분리대의 손상을 막을 수 있는 수준으로 평가된다. 만약 이를 SB6등급 이상으로 설계 한다면 전체사고의 85%의 사고에 대하여 중앙분리대의 손상을 유발시키지 않을 것이다. 이는 현재 국내 도로의 중앙분리대(SB5-B) 1.56배에 해당되는 성능이 향상됨으로서 2차 파편에 의한 사고도 줄어들 것으로 판단된다. (고성능 콘크리트 중앙분리대 개발, 2017)

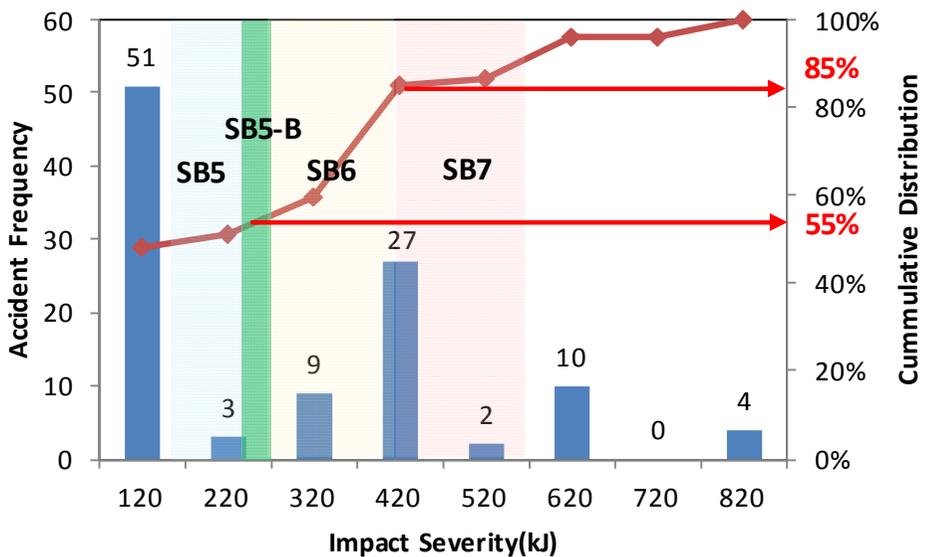


Fig. 2-3 중앙분리대 사고 통계

Fig. 2-4에는 미국의 중앙분리대 설치기준을 비교하여 나타내었다. 국내의 경우 해외 선진국의 중앙분리대 최고 설치 기준과 유사한 등급(SB-7)이 존재하기는 하나 실제 고속도로에 설치된 최고 등급은 SB5-B(270kJ) 등급이다. 이는 해외 선진국과 비교하여 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 미국의 경우 충돌조건, 성능기준을 포괄적으로 규정하고 충돌조건도 탑승자의 안전을 기준으로 발주처가 도로조건에 맞는 경제적인 충돌조건을 선정하고 있다. 유럽 또한 탑승자의 위험도 평가를 하여 만족되는 기준을 사용하고 있다. 국내도 대형차량의 통행량과 운전속도가 지속적으로 증가할 것이며 통계자료에 따라 충돌 후 비산에 의

한 2차사고 피해를 최소화하고 탑승자의 안전을 위해서는 현 국내 중앙분리대의 설계등급 상향과 지속적 개발, 설치가 필요할 것으로 사료된다.

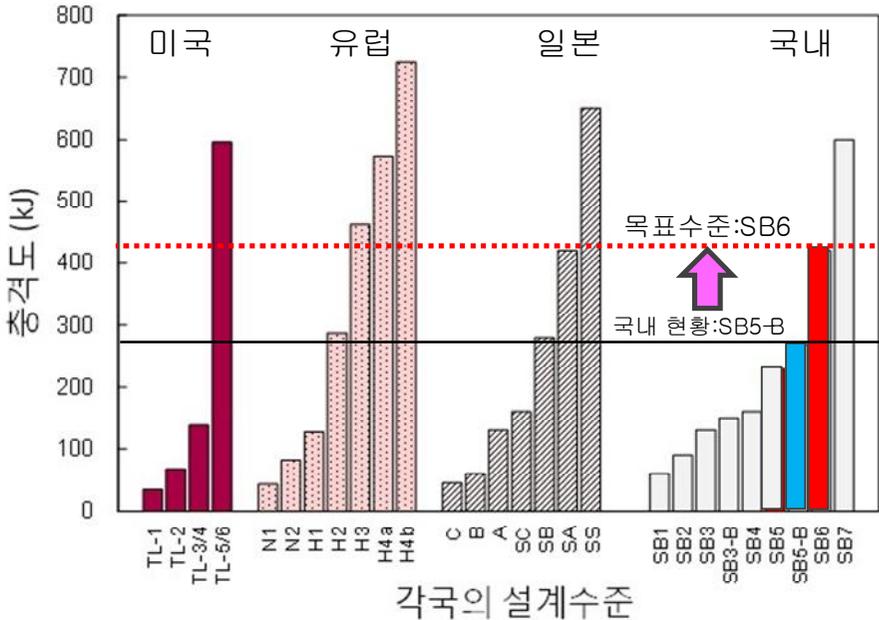


Fig. 2-4 국내외 중앙분리대 설계 요구 충격도

2.3 중앙분리대 개선을 위한 국내 연구

2.3.1 중앙분리대의 최적단면 개발 연구

Kim et al. (2018)의 콘크리트 중앙분리대(SB6등급) 최적단면 개발 연구에서는 SB6등급의 충돌저항성능을 보유하고 있는 중앙분리대 개발을 위해 충돌해석 시뮬레이션과 실물충돌을 수행하였으며 그 결과를 정리하여 Fig. 2-5와 Table 2-3에 나타내었다. 해석결과 중앙분리대의 파손량과 차량의 거동 등이 충돌시험 결과와 유사한 값으로 나타났다. 특히 해당 연구에서는 중앙분리대 타설 시 충격흡수장치를 설치하여 비산저감 성능에 효과적인 것을 확인하였다 (Kim et al. 2018). Fig. 2-5에서와 같이 실물충돌실험에서 2차충돌(국부충돌)에서 가장 많은 파편과 비산량을 발생시키는 것으로 확인되었으며, 매입된 충격흡수장치는 3차충돌에서 그 효과를 보이는 것으로 확인되었다. 국부충돌 시 발생된 비산물에 의한 2차 충돌피해를 최소화하기 위해 상세한 국부충돌해석과 다양한 변수를

고려하여 현 중앙분리대(2015 type) 대비 개선된 성능을 보유한 단면을 제시할 필요가 있다. 해당 연구에서 충돌해석(LS-DYNA)에 사용된 변수는 Table 2-4에 나타난 것과 같으며 본 연구에서도 이 변수를 참고로 하였다.



(a) 1차 충돌(op view)



(b) 1차 충돌(rear view)



(c) 2차 충돌(top view)



(d) 2차 충돌(rear view)



(e) 3차 충돌(top view)



(f) 3차 충돌(rear view)

Fig. 2-5 실물충돌시험 (1차, 2차, 3차 충돌) (한국도로공사, 2017)

Table 2-3 충돌해석 결과와 충돌시험 결과 비교 (한국도로공사, 2017)

	Volume Loss (%)						Lateral Displacement
	현 중앙분리대(2015 type)			ex-CMB			ex-CMB
	%	cm ³	cm	%	cm ³	cm	mm
충돌시험	8.4	32534.6	30.0	3.2	14605.1	23.0	20
충돌해석	10.0	38613.6	33.8	0.6	2663.0	13.9	1938

Table 2-4 모델검증에 사용된 재료모델 파라미터 (한국도로공사, 2017)

Erode	B (compression shape softening parameter)	Fracture Energy Equation (FE Eq.)	Repow	Overstress	
				Compression	Tension
1.1	10	Experimental Test (ACI 446)	3	30	30

아래의 Fig. 2-6은 해석에서 콘크리트에 발생하는 Kinetic Energy와 Internal Energy를 확인한 결과이다. 차량의 전면부와 충돌하는 1차 충돌과 측면이 충돌하는 3차 충돌에서만 에너지가 증가하는 것으로 확인되어 콘크리트 파편과 비산을 발생시킬 수 있는 2차 충돌에 의한 국부손상은 전체충돌해석에서는 모사하지 못하는 것으로 보인다. 따라서 국부손상을 모사하기 위한 상세한 해석이 추가적으로 필요하다.

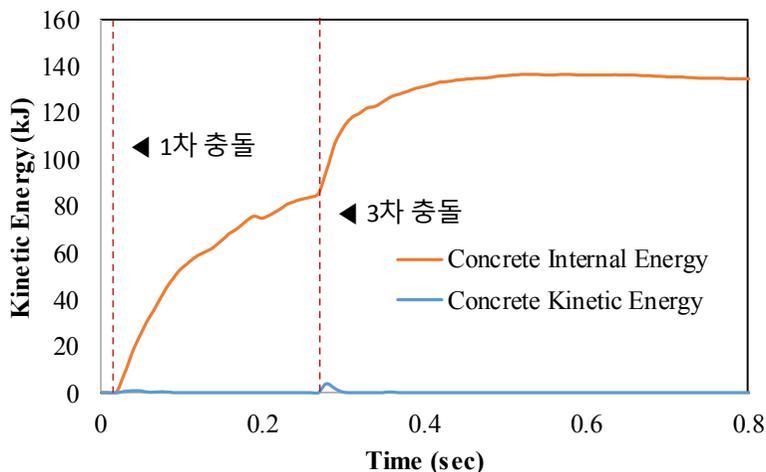
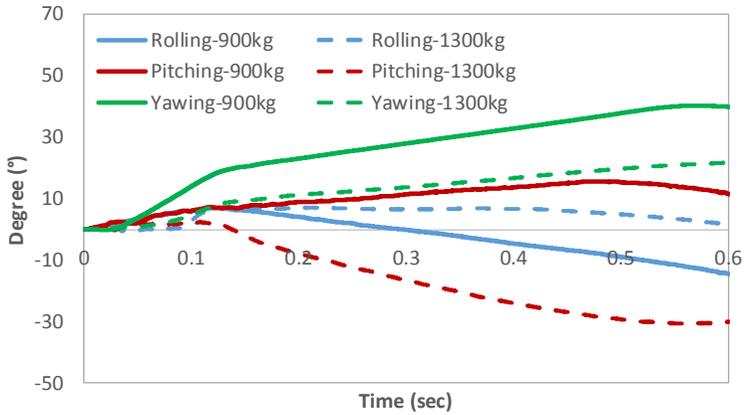


Fig. 2-6 1nd ex-Barrier의 콘크리트에 발생하는 Internal Energy와 Kinetic Energy

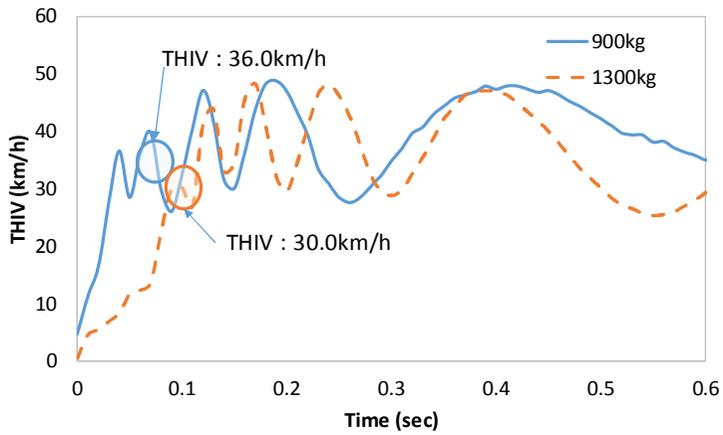
2.3.2 탑승자 보호 성능 평가

차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람(2015)에서는 개발된 중앙분리대의 성능평가를 위해 앞에서 설명한 바와 같이 실물충돌시험을 통해 중앙분리대의 강성을 검토(중대형 차량 이용)하고 있으며, 이와 함께 탑승자 보호성능(승용차(sedan) 이용)도 함께 평가하도록 하고 있다. Lee et al. (2017)의 충돌해석을 통한 SB6등급 단면개발 연구에서는 개발된 단면에 대한 탑승자 보호성능 평가를 해석을 통해 검토하였다. 해석의 조건은 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람(2015)에 제시되어 있는 탑승자 보호성능 SB6의 조건에 해당하는 속도 100km/h와 충돌각 20° 를 기준으로 수행하였다. 탑승자보호성능 평가에서 차량은 900kg과 1300kg 두 종류의 차량을 제시하고 있으며 보수적으로 900kg 차량을 권장하고 있다. 이러한 조건에서 수행된 탑승자 보호성능 해석결과를 Fig. 2-7에 나타냈다.

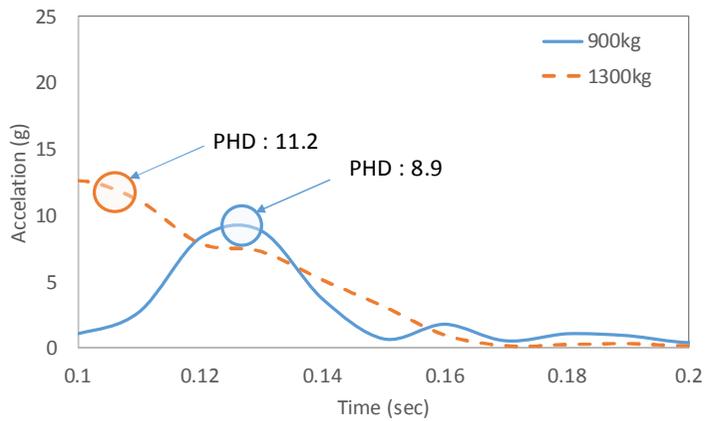
두 차량모델의 거동을 비교하면 Rolling, Pitching, Yawing 모두 900kg 차량에서 변동이 상대적으로 크게 나타난다. 이는 Fig. 2-8에서도 확인할 수 있는데 상대적으로 하중이 작은 900kg 차량모델이 충돌 후 중력반대 방향으로의 변위가 커져 체공시간이 증가하여 차량의 거동이 상대적으로 불안정하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 THIV 비교 시 900kg 차량모델에서 기준(33km/h)을 충족시키지 못하는 것으로 나타났다. 충돌 후 1300kg 차량보다 900kg 차량의 속도가 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 하지만 PHD의 경우 두 차량 모델 모두 기준(20g)을 충족(8.9g, 11.2g)시키는 것으로 나타났으며 1300kg 차량이 900kg 차량보다 상대적으로 높게 나타났다. PHD는 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람(2015)에 따르면 THIV 산정 시점 이후 발생하는 최대 가속도를 의미한다. 1300kg 차량의 PHD 산정은 THIV산정 시점(0.11s)에 즉시 최대값이 발생하여 그 값으로 계산되었으며 900kg 차량모델은 THIV 산정 시점(0.07s) 0.06초 이후 최대값을 보여 그 시점에서의 값으로 고려하였다. 본 연구에서는 Lee et al. (2017)의 탑승자 보호 성능 평가의 연구결과를 참고하여 해석모델을 개발, 수행하였다.



(a) 차량 거동

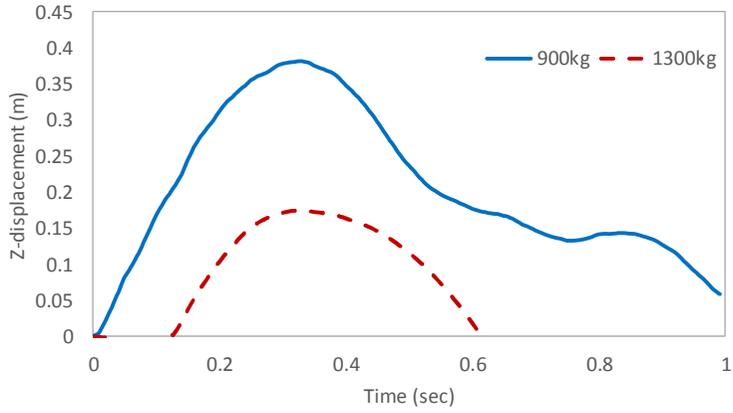


(b) THIV

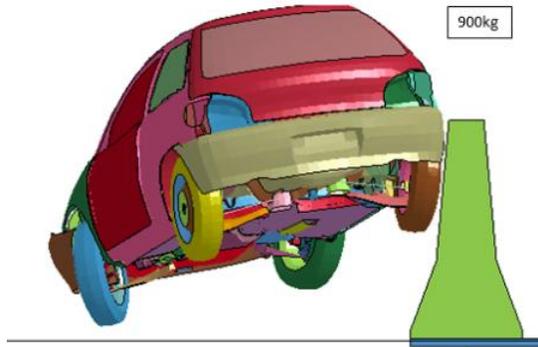


(c) PHD

Fig. 2-7 충돌단면에 대한 탑승자 보호성능 평가



(a) 중력방향 변위



(b) 900kg



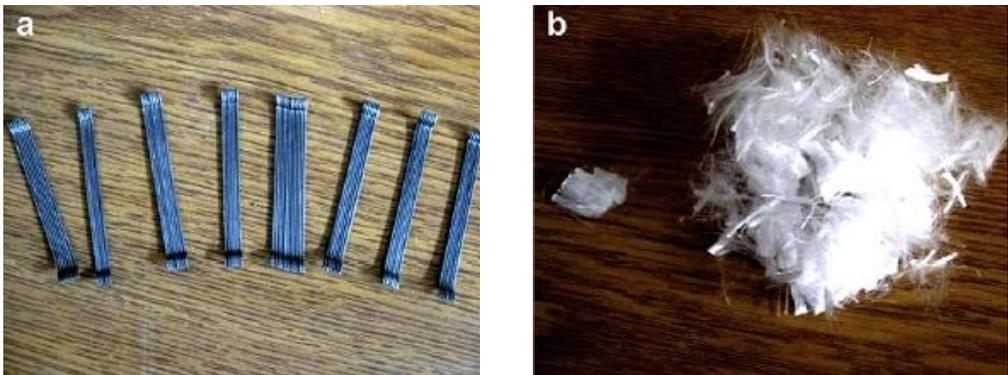
(c) 1300kg

Fig. 2-8 탑승자 안전성능 평가 충돌 시 차량 거동

2.4 충돌저항성능에 우수한 재료

콘크리트 중앙분리대에 충돌저항성능을 개선하기 위한 재료를 검토하였다. 충돌저항성능에 우수한 재료를 살펴보면 SFRC, UHP-FRC, Crushable Concrete 등이 있으며 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다.

SFRC는 Steel Fiber-Reinforced Concrete로 배합 단계에서 강섬유(Steel fiber)를 혼합하여 기존 콘크리트보다 파괴에너지가 크게 개선되어 충돌저항성능에 우수한 것으로 판단된다. Barros and Sena-Cruz (2001)는 강섬유 혼합비율에 SFRC의 재료적 성능을 확인하는 연구를 수행하였다. 아래 Fig. 2-7을 보면 이 연구에서 사용된 혼합물로 Fig. 2-7(a)의 강섬유를 혼합하였을 때보다 Fig. 2-8(b)의 폴리프로필렌 섬유를 혼합하였을 때 콘크리트의 충격저항성능이 더 개선되었다. Barros and Sena-Cruz (2001)의 실험결과를 참고하여 SFRC를 활용한 중앙분리대의 충돌해석에 파괴에너지 값을 적용하였다.



(a) 강섬유

(b) 폴리프로필렌 섬유

Fig. 2-9 SFRC 혼합재료 단면

UHP-FRC (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete)는 초고성능 섬유 보강 콘크리트라 말하며 기존 보편적 콘크리트에 비해 고강도 콘크리트에 강섬유 혼입함으로써 초고강도, 우수한 내구성, 연성거동 특성 등을 띄고 있다. Habel et al. (2006)은 이러한 UHP-FRC의 양생기간에 따른 다양한 기계적 성질을 분석하는 연구를 수행하였고 본 연구에서는 일정 압축강도(85MPa) 이상은 CSCM의 해석적 한계로 인하여 구현되지 않아 UHP-FRC가 아닌 85MPa 강도의 고강도 콘크리트와 FRC를 혼합한 경우로 적용하였으며 재료명은 섬유보강고강

도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)로 하였다.

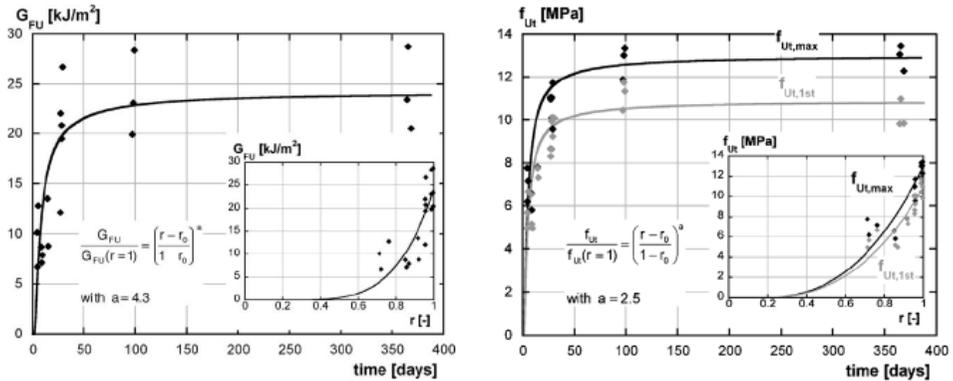


Fig. 2-10 UHP-FRC properties (Habel et al. 2006)

Doyle et al. (2017)은 혼합비에 따른 Crushable Concrete의 성능 확인을 위한 연구를 수행하였다. Crushable Concrete는 충격흡수 콘크리트로서 충돌 발생 시 변형이 발생하여 충돌로 발생하는 에너지를 내부 공간의 변형으로 흡수할 수 있어 충돌에 유리하다. 또한 차량에 전달되는 에너지와 부하를 줄일 수 있어 충격으로부터 가해지는 최고 하중 적용 시간을 연장할 수가 있으므로 항공기 피뢰침, 공항 활주로 등에 적합하다. 다만 내부 공극의 증가로 인장강도나 인장 파괴에너지는 개선되지 못하며 압축파괴 시 최대 변형량이 증가되어 경계 조건이 구속된 상황에서 압축을 받는 경우 충돌저항에 유리할 것으로 판단된다.



Fig. 2-11 Crushable Concrete (Doyle et al. 2016)

2.5 설계하중 추정식

2.5.1 Olson (1974) 이론

다양한 설계 충돌하중 추정식 중 Olson(1974)이 제시한 식이 가장 광범위하게 충돌하중 추정을 위해 사용되고 있다. 간단한 형태의 식을 이용하여 충돌하중을 산출할 수 있다. Olson Model을 이용한 Texas Transportation Institute 연구 보고서(NCHRP Report (1986))에는 실제 차량충돌시험과 오차율 $\pm 20\%$ 로 차량의 움직임을 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 아래 Fig. 2-12은 중앙분리대와 충돌하는 차량의 충돌하중을 산정하기 위해서 고속카메라를 통한 차량의 충돌 후 움직임을 분석하여 충돌각도와 충돌속도를 알기 쉽게 표현한 개념도이다.

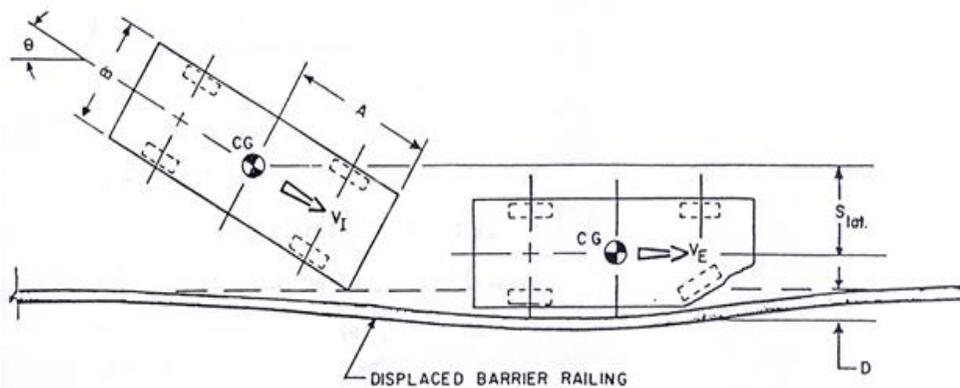


Fig. 2-12 충돌차량의 거동 개념도 (Olson, 1974)

이 개념도에 따라 Olson Model의 충돌하중 산정을 위해 필요한 가정은 다음과 같다. 다음의 내용은 Olson(1974)식을 기반으로 비산저감을 위한 고성능 중앙분리대 개발 보고서 (2016)를 참고하여 정리하였다.

- (1) 차량이 충돌하는 순간 운전자는 충돌 차량을 조정하지 않는다.
- (2) 차량의 종횡방향 가속도는 충돌 순간으로부터 차량이 평행하게 될 때까지 일정한 것으로 가정한다.
- (3) 차량의 수직 및 회전 가속도, 타이어와 지면의 마찰력은 무시한다.

(4) 차량의 전체 질량은 차량 무게중심점에 집중하여 이동한다.

이 모델을 사용하여 충돌 시 충돌하중을 구하는 과정은 아래 식 2.1~2.3과 같으며 차량의 횡방향 가속도로부터 뉴턴의 법칙을 적용하여 식 (2.4)와 같이 충돌하중을 구할 수 있다.

$$\Delta S_{lat.} = AL\sin\theta - B(1 - \cos\theta) + D \quad (2.1)$$

$\Delta S_{lat.}$: 차량의 횡방향 이동거리

AL : 차량 앞면으로부터 차량중심까지의 거리

$2B$: 차량폭

θ : 충돌각도

D : 베리어의 횡방향 변위

$$\Delta t = \frac{\Delta S_{lat.}}{V_{avg}}$$

$$V_{avg} = \frac{1}{2}(V_1\sin\theta + 0)$$

$$\Delta t = \frac{AL\sin\theta + B(1 - \cos\theta) + D}{1/2V_1\sin\theta} \quad (2.2)$$

Δt : 차량이 횡방향으로 이동하는 동안 시간 간격

V_{avg} : 횡방향 평균 속도

V_1 : 충돌속도

$$\Delta t = V_1\sin\theta - 0$$

$$G_{lat.} = \frac{V_1\sin\theta}{g(\Delta t)}$$

$$G_{lat.} = \frac{V_1^2 \sin^2\theta}{2gAL\sin\theta - B(1 - \cos\theta) + D} \quad (2.3)$$

$G_{lat.}$: 횡방향 가속도

$$F_{lat.} = m(a_{lat.}) = W(G_{lat.}) \quad (2.4)$$

$a_{lat.}$: 차량의 가속도

m : 차량의 질량

W : 차량의 중량

2.5.2 항복선 이론

중양분리대의 저항능력을 산정하는 방법은 [AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2017)]에 나타나 있는 항복선 이론으로 계산할 수 있다. 이러한 강성방호벽의 항복선 이론은 최초 Hirsch(1978)에 의해 제안되었다. 항복선 이론에 대한 설명은 도로공사에서 수행한 비산저감을 위한 고성능 중양분리대 개발 보고서 (2016)를 참고하였다.

Fig. 2-13은 항복선 이론을 설명하기 위하여 가상의 파괴면을 나타낸 것이다. 항복선 이론은 Fig. 2-13에 나타난 항복면을 따라 소성힌지가 형성되며 외력과 내력의 합이 영(zero)이 된다고 가정하여 중양분리대의 저항하중과 파괴길이를 구하는 것이다. 이전 방호벽의 강도를 알기위해 개발된 이 식은 극한 상태에서 항복선의 형성을 기초로 하고 있다.

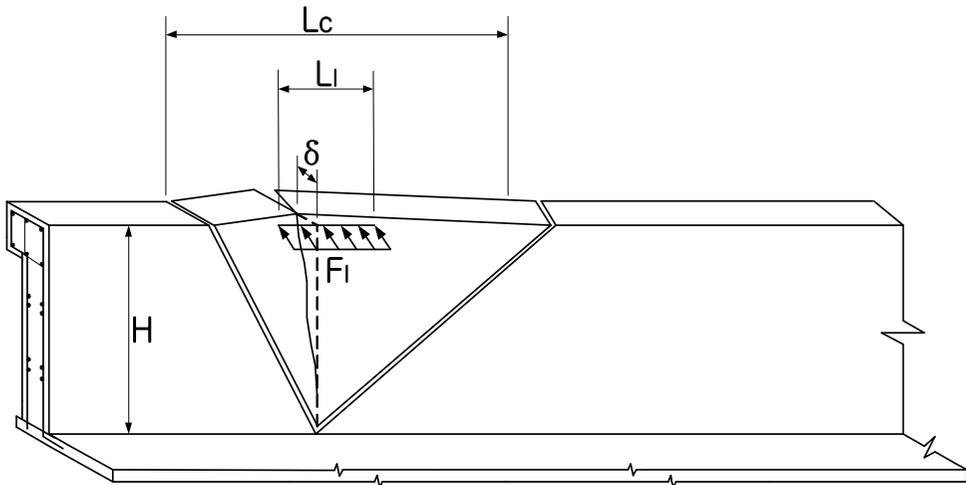


Fig. 2-13 강성방호벽의 항복선 형태 (Hirsch, 1978)

즉, 항복선에 따른 내적 일은 이 일이 작용하는데 따른 항복 모멘트와 회전의 곱에 의한 합계다. 파괴되어진 중양분리대의 파편들이 모두 항복선에 집중되기 위한 것으로 가정된다.

중양분리대의 벽면 부분은 일반적으로 수평과 수직의 두 방향으로 철근이 배근될 것이다. 수평 배근 된 철근은 수직축에 대하여 단위길이당 저항모멘트 M_w 가 될 것이고 수직 배근 된 철근은 수평축에 대하여 단위길이당 캔틸레버

저항모멘트 M_c 가 될 것이다. 이러한 조건을 기준으로 중앙분리대의 저항능력 R_w 는 아래 2.5의 식으로 풀이하였다.

$$R_w = \frac{2}{2L_c - L_t} (8M_b + 8M_w H + \frac{M_c L_c^2}{H}) \quad (2.5)$$

여기서 : H : 중앙분리대의 높이

L_c : 중앙분리대의 파괴길이

L_t : 충돌하중의 재하길이

M_b : 보 거동을 하는 중앙분리대 상단의 저항모멘트

M_w : 중앙분리대 벽체의 단위높이당 저항모멘트

M_c : 중앙분리대와 도로 바닥과의 캔틸레버 거동에 의한 단위길이당 저항모멘트

제 3 장 이론적 배경

본 장에서는 중앙분리대 충돌해석 모델 개발을 위한 충돌 시 중앙분리대에 발생할 수 있는 주요 재료모델에 대해서 서술하였다. 본 장에서 설명한 모델에서 사용되는 주요 변수 중 해석결과에 영향을 미치는 민감한 변수는 이후 4장의 모델검증을 위한 주요변수로 이용하였다.

3.1 콘크리트 재료모델

콘크리트의 재료모델은 전술한 바와 같이 CSC 모델을 사용하였다. Fig. 3-1에는 CSC 모델의 한계항복면(Limit yield surface)을 나타냈다. CSC 모델의 한계항복면은 Affine-exponential spline의 형태로 아래와 같은 수식을 이용하여 표현된다.

$$F_m(I_1) = a_1 - a_3 \exp(-a_2 I_1) + a_4 I_1 \quad (3.1)$$

$F_m(I_1)$ 은 응력불변량 I_1 의 함수인 최대항복면이며 a_1, a_2, a_3, a_4 는 계수로 콘크리트의 3축 압축시험을 통해 결정되며, I_1 은 응력불변량(정수응력)이다.

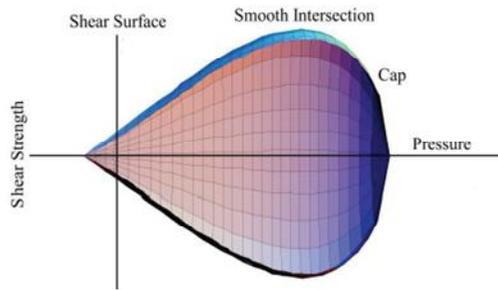


Fig. 3-1 Continuous Surface Cap Model (LS-DYNA USER'S MANUAL Materials)

CSC에서는 변형률에 따른 동적증가계수 산정을 위하여 응력의 종류(인장, 압축)와 변형률 $30s^{-1}$ 을 기준으로 4가지의 다른 식을 적용하여 보다 정밀한 해석이 가능하다. CSC에서 탄성계수(Young's Modulus)는 아래의 CEB-FIP(2010)에서 제시하는 식을 이용하여 유추되는 값을 사용한다.

$$E = E_c \left(\frac{f'_c}{10} \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

E_c 는 탄성계수, f'_c 는 콘크리트 일축압축강도이다.

CSC에 내장되어 있는 파괴에너지 예측식은 CEB-FIP(1990)에서 제시하는 식으로 계산되나 1990년에 사용된 식을 이용하여 현재 측정되는 파괴에너지와는 다소 차이가 있다. 따라서 콘크리트의 파괴에너지는 비교적 최근인 CEB-FIP(2010)에서 제시하는 파괴에너지 추정식을 이용하여 산정한다.

$$f_{ctm} = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (3.3)$$

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (3.4)$$

f_{ctm} : 콘크리트 예측 인장강도 (MPa)

f_{ck} : 콘크리트 압축강도 (MPa)

G_F : 콘크리트 예측파괴에너지 (N/m)

f_{cm} : 평균실험압축강도 (MPa)

본 연구는 동적해석이므로 속도에 따른 파괴에너지 증가를 모사하는 변형률 속도 효과가 중요하다. CSC 모델에서 변형률 속도효과는 $repow$ 값을 사용하며 추천 범위는 0.5~1.0 사이의 값이다(Murray et al. 2007). $repow$ 상관관계식은 다음과 같다.

$$G_f^{vp} = F_f \left[1 + \frac{E\dot{\epsilon}\eta}{r^5 \sqrt{E}} \right]^{repow} \quad (3.5)$$

여기서,

G_f^{vp} : rate effect에 의해 증가된 파괴에너지

G_f : 파괴에너지

E: 탄성계수

$\dot{\epsilon}$: Effective strain rate

η : rate effects 유동계수

r : 초기 데미지

repow : 에너지 증가 모사계수

또한 이러한 변형률 속도에 대한 제한이 없다면 요소의 강성은 무한하게 되며 이는 해석결과가 실제와는 다른 경향을 보이게 된다. 따라서 최대 변형률 속도를 제한하는 것이 필요하며 이러한 인자가 overstress 이다. overstress는 압축과 인장에서 정의할 수 있으며 아래와 같은 식으로 제한한다.

$$\text{if } E\dot{\epsilon}\eta > \text{over} \quad \text{then } \eta = \frac{\text{over}}{E\dot{\epsilon}} \quad (3.6)$$

여기서

over : overc, overt 압축거동과 인장거동에서 정의한 overstress

E : 탄성계수

$\dot{\epsilon}$: Effective strain rate

3.2 강재 재료모델

본 연구에서는 사용되는 강재(철근 및 와이어메쉬)의 재료모델은 다중선형 소성모델(Piecewise linear plasticity)을 사용하였다. 해당 재료모델은 재료의 항복 이후 경화(Hardening)을 모사하는 탄소성 거동은 물론 변형률속도(Strain-rate) 효과를 포함하고 있어 본 해석에 적합하다. 또한 파단 이후 요소의 제거(deletion)을 위해 파단 변형률을 요소 크기에 맞춰 입력하였다. Piecewise linear plasticity는 변형률 속도를 고려하기 위하여 Cowper-Symonds의 식을 활용하였다. 이 식에는 D와 p의 계수값을 결정하도록 구성되어 있으며 본 과업에서는 Chung et al.(2011)의 연구에서 제시된 $1.05E+7 \text{ sec}^{-1}$ 과 8.3을 각각 사용한다.

제 4 장 해석모델 개발

본 장에서는 3장에서 전술한 재료모델을 기반으로 중앙분리대-트럭의 충돌해석 모델개발에 대해 설명하였다. 개발된 해석모델의 검증을 위해 다양한 변수 조합에 따른 해석결과를 실제 충돌시험과 비교분석하였다. 이후 실물충돌시험 결과와 가장 유사한 결과를 보인 모델을 이용하여 강재량(와이어메쉬 및 철근) 증대, 단면폭 확대, 충돌저항성능에 우수한 콘크리트 재료의 활용 등에 대한 변수연구를 수행하고 최종 부피손실률 값을 비교분석 하였다. 여기서 부피손실률이란 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람(2015)을 기준으로 2kg 이상의 비산물이 구조물로부터 2m 이상 비산하지 않는 것을 기준으로 한다. 해석결과 많은 부피손실률이 발생하였다면 이는 위의 기준을 충족하지 못할 확률이 높은 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해석결과의 부피손실률을 평가함으로서 실물충돌시험 합격 여부를 사전에 판단하였다. 부피손실률의 산정 기준은 파손된 콘크리트 부피와 중앙분리대 1m 길이에 해당하는 부피에 대한 비율을 말한다. 즉 부피손실률이 100%라면 1m 길이의 중앙분리대가 모두 손상된 것을 의미한다. 전술한 바와 같이 차량 적재함 전면부 모서리와 중앙분리대 상단의 충돌에 따른 국부손상을 전체충돌해석 모델이 예측하지 못하므로 본 연구에서는 국부충돌해석 모델을 개발하고 변수해석을 수행하여 제안단면에 대한 충돌저항성능을 평가하였다.

4.1 모델개발 및 검증

본 장에서는 개발된 차량충돌 해석모델에 대해 설명하였다. 실제 차량모델과 중앙분리대의 충돌을 모사하는 전체충돌해석에서는 차량모델과 중앙분리대 콘크리트 모델에 대해 중점적으로 설명하였다. 전체충돌해석에서는 중앙분리대의 거동 그리고 차량의 운동(yawing, rolling, pitching), 월담 및 전복 등을 평가할 수 있으며 부피손실률도 확인이 가능하다. 다만 국부적인 충돌로 발생하는 비산물에 따른 부피손실률에 대해 전체충돌해석이 정확하게 모사하지 못하는 것으로 확인되어 국부충돌해석모델을 개발하여 국부충돌을 고려한 중앙분리대의 해석적 평가를 진행하였다.

4.1.1 전체충돌해석모델 개발

전체충돌해석은 차량과 중앙분리대 Fig. 4-1과 같이 차량모델과 중앙분리대 모델을 활용하여 직접적으로 충돌하는 해석으로서 차량 모델과 콘크리트 재료 모델의 선정이 매우 중요하다.

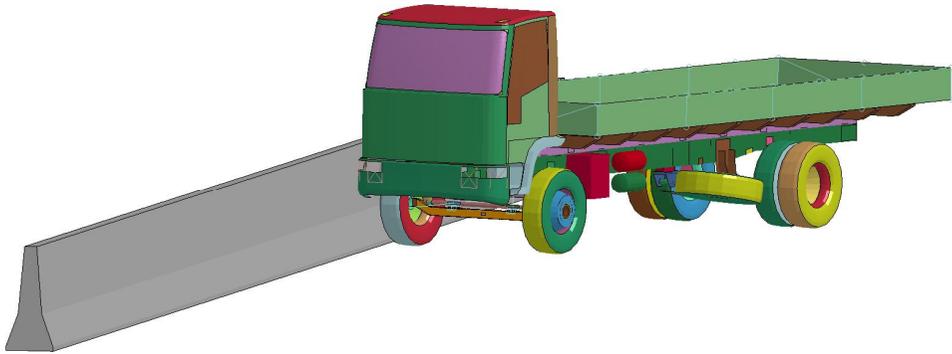


Fig. 4-1 전체충돌해석 모델

본 연구에서 사용된 차량모델은 National Crash Analysis Center의 16ton 트럭 모델을 SB6 충돌등급의 조건인 25ton 트럭모델로 수정하여 사용하였다. Fig. 4-2에 차량형상을 나타냈으며 화물칸의 mass를 국내 충돌기준에 맞도록 수정하였다. 해당 차량모델은 유럽의 기준 코드인 EN-1317을 만족하는 것으로 차량의 길이 폭 형상 등이 국내 트럭과 유사하여 해석에 적합한 것으로 판단된다. 32,000개 이상의 요소를 사용하였고 차량의 엔진, 타이어, 범퍼 등 차량의 각 파트를 상세하게 모델링 하였다. 추가적으로 중앙분리대와 차량의 충돌이 발생하는 파트(차량 손상이 많이 발생하는 파트)는 해석의 안정성 향상과 해석 효율성을 위한 감차적분(reduced integration) 요소의 사용으로 강성증가 방지를 위한 hourglass control을 적용하여 기존 모델을 개선하고 hourglass energy를 최소화하였다.

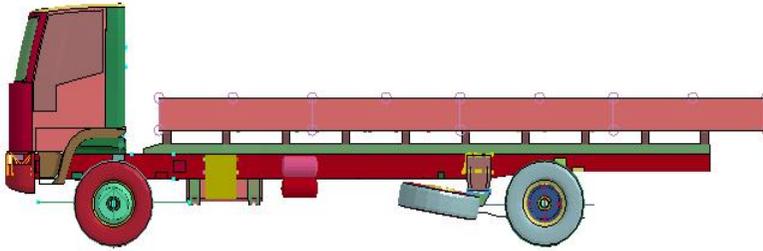


Fig. 4-2 충돌해석에 사용된 트럭모델

중양분리대의 충돌모델 개발을 수행하기 위하여 CSCM 재료모델의 주요변수 민감도 연구를 수행하였다. 2.3장에서 언급한 바와 같이 2017년 (콘크리트 중양분리대(SB6등급) 최적단면 개발, 2017)의 해석결과를 바탕으로 주요변수(Erode, Friction coefficient, B, Fracture Energy, Mesh size, Repow, Overstress)를 선정하였고 해석결과에 민감한 영향을 주는 Erode 값은 기타 유사한 연구결과(Lee et al. 2017)를 참고하여 사전해석을 통해 본 연구와 가장 적합한 값을 보이는 Erode값(1.1)을 선정하였다. 이에 대한 변수해석을 수행하고 실제 충돌시험 결과(현 중양분리대(2015 type)와 ex-CMB)를 비교하였다. 콘크리트 인장 파괴에너지는 CEB-FIP(1990)과 CEB-FIP(2010)에서 제시하는 식과 실제 파괴에너지 측정 시험을 통하여 얻은 결과 값을 변수로 하였다. 변수해석은 콘크리트 중양분리대(SB6등급) 최적단면 개발(2017) 연구를 참고로 하였으며 최종적으로 선정된 변수는 다음과 같다(Table 4-1).

Table 4-1 모델검증에 사용된 최종 파라미터 (한국도로공사, 2017)

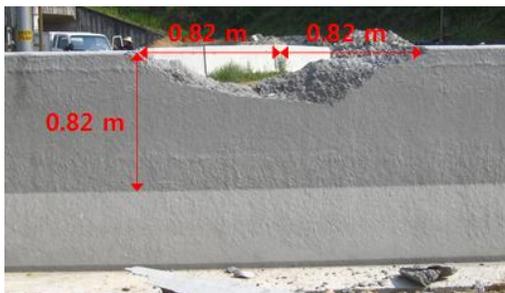
Erode	Tire-Asphalt friction coefficient	Truck-concrete friction coefficient (Static/dynamic)	B (compression shape softening parameter)	Fracture Energy Equation (FE Eq) (N/m)	Mesh size (mm)	Repow	Overstress	
							Compression	Tension
1.1	0.8	0.08 / 0.05	10	155	36	3	30	30

해당 변수를 활용한 해석결과와 실제 실물충돌시험의 파괴형상과 부피손실률 및 횡변위를 Table 4-2와 Fig. 4-3에 나타냈다. 해석 결과 충돌 후 발생한 파괴

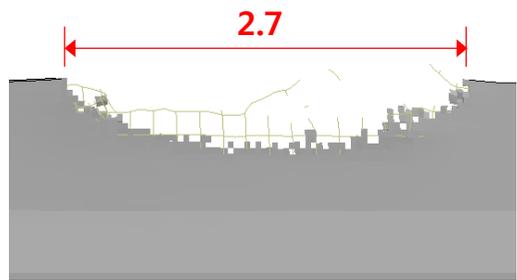
형상이나 부피손실률 및 횡변위 값이 ex-CMB (SB5-B(20A))에서는 비교적 유사하게 예측하였으나 현 중앙분리대(2015 type)에서는 다소 차이가 발생하였다. 현 중앙분리대(2015 type)의 경우 파라미터 조합에 관계없이 높은 값의 부피손실률을 보였으므로 검증 시 사용되었던 파라미터의 조합을 사용하는 것이 합리적일 수 있으나 해석모델의 일관성과 동일한 조건에서의 개선효과를 찾기 위하여 개발될 중앙분리대의 단면에 사용된 동일한 변수 조합을 현 중앙분리대에도 함께 고려하였다. 다만 Crushable Concrete와 같이 콘크리트의 강도는 일반 콘크리트보다 작으나 이후 압축파괴에너지 흡수 효과가 뛰어난 경우 변수를 이에 맞게 수정하여 해석을 수행하였다.

Table 4-2 충돌시험 결과와 해석결과 비교

	2015 type		ex-CMB	
	부피손실률 (%)	부피손실률 (%)	부피손실률 (%)	횡변위 (mm)
충돌시험 결과	8.4	3.2	3.2	20.0
해석 결과	33.7	3.0	3.0	20.3



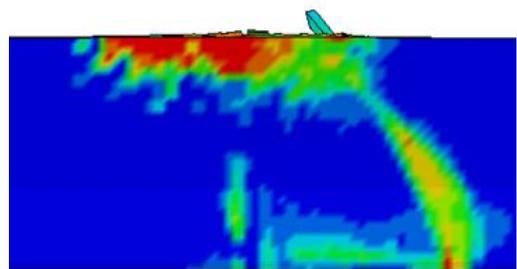
(a) 충돌시험 결과 (2015 type)



(b) 충돌해석 결과 (2015 type)



(c) 충돌시험 결과 (ex-CMB)



(d) 충돌해석 결과 (ex-CMB)

Fig. 4-3 중앙분리대 단면 손상비교

4.1.2 국부충돌해석모델 개발

2.3장에서 전술한 바와 같이 개발된 전체충돌해석모델은 실제 충돌시험에서 발생하는 국부충돌을 상세하게 모사하는 데 한계가 있는 것으로 확인되었다. 이는 전체충돌해석모델이 충돌 후 차량의 거동과 중앙분리대의 길이방향으로 발생하는 전체적인 접촉 해석에 중점을 둔 모델이기 때문이다. 충격흡수장치가 포함된 중앙분리대(kim et al. 2018)와 같이 중앙분리대의 변형길이, 횡변위 등의 확인에도 전체충돌해석모델이 필요하다.

그러나 전체충돌해석 모델은 국부충돌로 인한 국부손상을 정확하게 모사하기에는 한계가 있다. 실제 충돌시험(1st ex-Barrier)에서도 Fig. 4-4와 같이 2차 충돌에서 국부충돌 발생 시 대부분의 콘크리트 비산이 발생하여 중앙분리대의 충돌저항성능을 초과하였다(콘크리트 중앙분리대(SB6등급) 최적단면 개발, 2017). 이는 모델 개발 초기에 안전한 등급으로 평가한 전체충돌해석과 매우 상이한 결과를 보인 실험이었다. 따라서 본 장에서는 국부충돌에 대한 저항성능을 확인하기 위해 국부충돌해석모델에 대해 설명하였다.



(a) Front view



(b) Rear view



(c) Top view

Fig. 4-4 국부충돌(2차 충돌)로 인한 중앙분리대 파손

국부충돌해석 개념을 Fig. 4-5에 나타냈다. 콘크리트 및 강재의 재료모델은 전체충돌해석과 동일하게 적용을 하였으며 화물칸 모서리와의 충돌만을 예측할 수 있도록 모델을 개발하였다. 전체충돌해석모델이 차량의 거동과 전체적인 접촉(Contact) 해석에 중점을 둔 모델이기 때문에 국부충돌에 의한 파괴가 발생하는 2차충돌은 적절하게 모사하지 못하는 것으로 확인되어 본 연구에서는 차량 화물칸 전면부 모서리와 접촉이 발생하는 높이 113cm에서 충돌이 발생하도록 하였으며 차량 모서리는 차량의 손상형태를 분석하여 20cm x 20cm(두께 30mm)의 탄성모델로 모델링하였다. 충돌체의 충돌속도는 전체충돌해석을 통해 확인된 횡방향 속도인 20.7 km/h를 이용하였으며 충돌체의 질량을 변수로 하여 충돌 후 파괴형상을 비교, 실물충돌시험에 따른 손상형태와 가장 유사한 형상을 보인 질량(mass)을 선정하는 역해석 방법을 활용하였다. 이렇게 정의된 국부충돌하중을 개발된 단면 모델에 적용하여 국부충돌저항성능을 평가하였다.

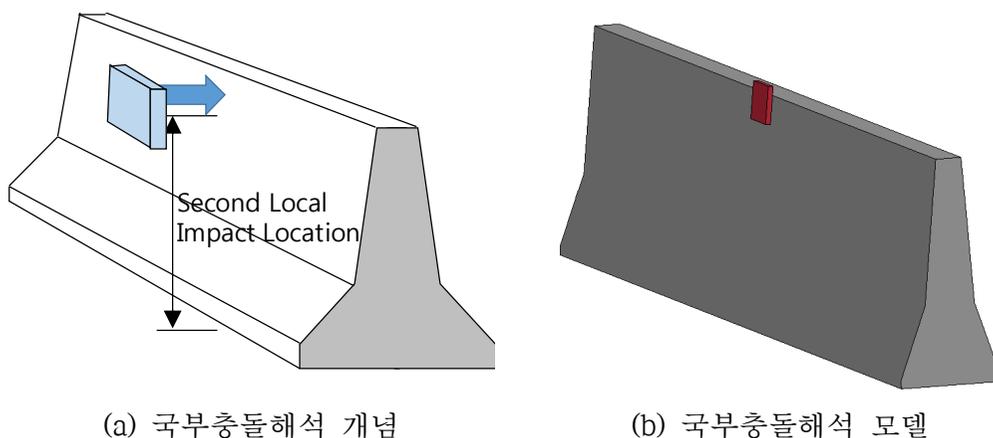


Fig. 4-5 국부충돌해석

국부충돌 해석결과를 Fig. 4-6에 나타냈다. 해석결과는 실물충돌시험을 통한 실제 확인된 파괴손실률을 점선으로, 해석결과를 막대그래프로 나타내어 비교하였다.

현 중앙분리대(2015 type)의 경우 상대적으로 내부강재가 적어 모든 경우에서 파괴가 많이 발생하는 것을 볼 수 있으며 부여된 질량에 관계없이 특정한 경향

을 찾아볼 수 없다. 따라서 현 중앙분리대의 해석결과는 적정 질량을 추정하는데 활용하지 않았다. 다만 5.3ton의 해석결과를 제외하면 전체적인 경향성은 확인할 수 있으며 성능개선에 대한 효과는 검토할 수 있다.

본 연구에서 중앙분리대 개선을 위해 선정한 충돌등급은 SB6 (420 kJ)이므로 SB6 충돌 조건에서 실물충돌 실험을 수행하였던 1st ex-Barrier와 2nd ex-Barrier의 실험결과와 국부충돌해석결과를 비교하여 가장 유사한 결과(파괴형상 및 부피손실률)를 보인 7.54ton을 적용 질량으로 선정하였다.

이외에 SB5-B(20A)(456 kJ) 충돌등급에서 실험이 수행되었던 ex-CMB의 경우는 8ton에서 실험결과와 가장 유사한 파괴형상을 나타내는 것으로 확인되었다. 현 SB5-B (270 kJ)등급인 중앙분리대(2015 type)는 6ton에서 가장 유사하게 발생하였다. 이러한 해석결과를 Table 4-3에 나타내었으며 Fig. 4-7에 파손길이, 파손깊이 등 실물충돌실험에 의해 발생한 파손형상과 해석결과를 비교하여 나타내었다.

Table 4-3 충돌 등급에 따라 제안된 국부충돌 적용 외력

충돌 등급	SB6	SB5-B(20A)
기준 충격도(kJ)	420	456
적용 외력(Ton)	7.54	8.00

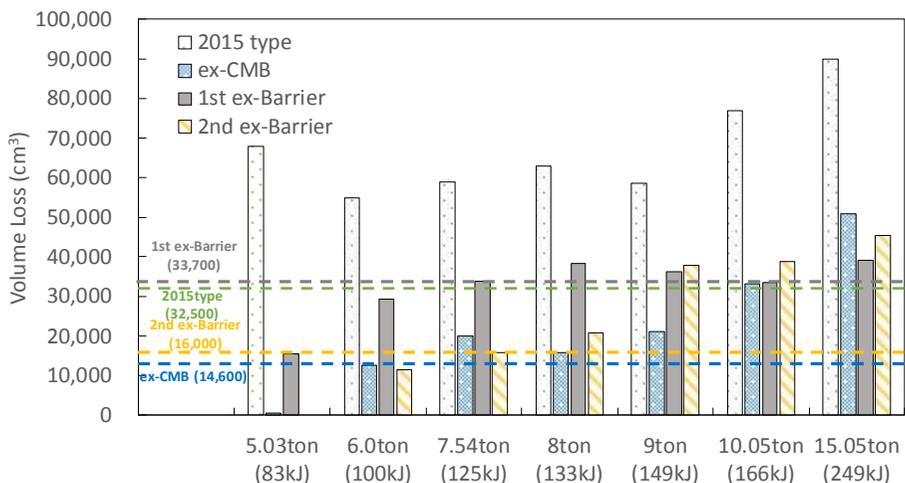
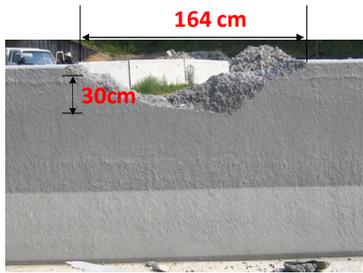
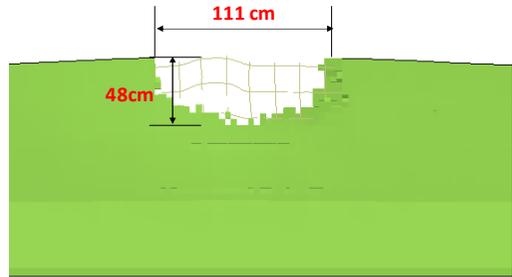


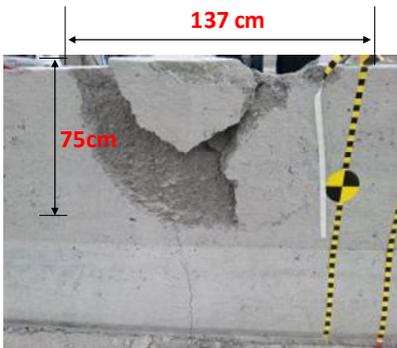
Fig. 4-6 국부충돌해석 결과



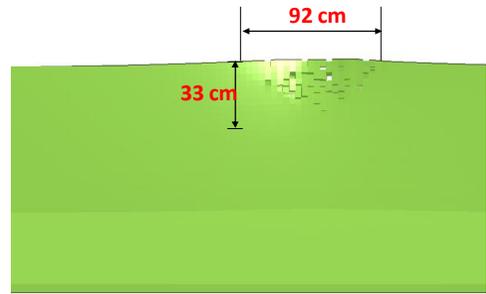
(a) 현 중앙분리대 field test



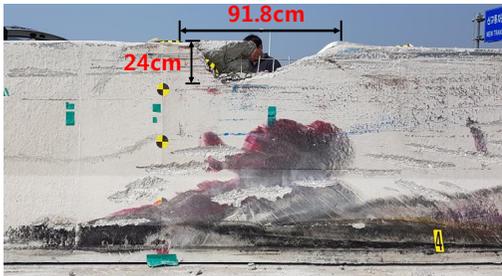
(b) 현 중앙분리대 analysis



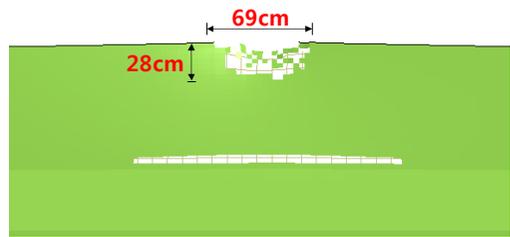
(c) ex-CMB field test



(d) ex-CMB analysis



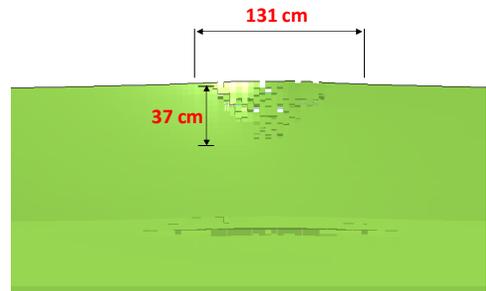
(e) 1st ex-Barrier field test



(f) 1st ex-Barrier analysis



(g) 2nd ex-Barrier field test



(h) 2nd ex-Barrier analysis

Fig. 4-7 충돌형상 비교 (7.54ton)

국부충돌해석모델과 전체충돌해석모델을 함께 활용하여 중앙분리대의 측정된 부피손실률 정확도를 개선하기 위해 Eq. 1과 같은 식을 제안하였다. 본 식은 전체충돌해석모델에서 구현하지 못하는 국부충돌에 의한 부피손실률을 보다 정확히 예측하기 위한 식으로 전체충돌해석모델과 국부충돌해석모델의 중첩되는 부피손실률을 제외한 총 부피손실률을 제안한 식이다.

$$GM + LM - GMLM = \text{Total Volume Loss (\% or cm}^3\text{)} \quad (\text{Eq. 1})$$

GM : 전체충돌해석모델 부피손실

LM : 국부충돌해석모델 부피손실

GMLM : 전체충돌해석모델과 국부충돌해석모델의 중복부피손실

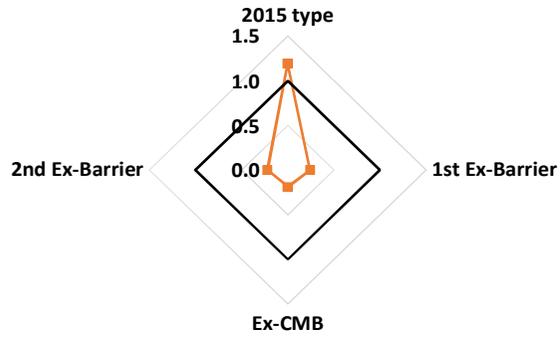
FT : 실물충돌시험 부피손실

제안된 식을 사용한 결과를 Fig. 4-8에 나타냈다. Fig. 4-8의 (a),(b),(c)는 1에 해당하는 값이 실제 충돌시험결과이며, 해석결과가 1에 가까울수록 실제 충돌 시험과 유사한 값이다.

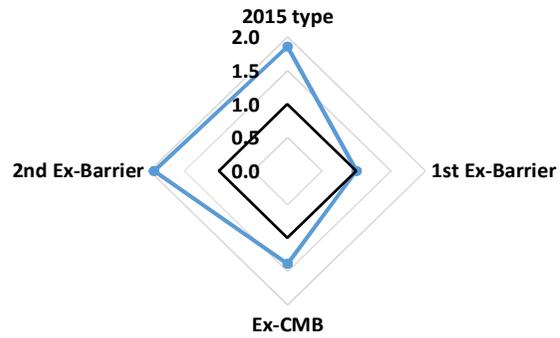
전체충돌해석 결과(GM)와 실물충돌시험 결과(FT)를 비교하는 GM/FT의 값 (Fig. 4-8 (a))은 전반적으로 1보다 작아 국부충돌로 인한 부피손실률을 과소평가하는 것으로 확인된다. 반면에 국부충돌해석 결과(LM)와 실물충돌시험 결과 (FT)를 비교하는 LM/FT 값(Fig. 4-8 (b))은 상대적으로 높게 나타났다.

최종적으로 전체충돌해석과 국부충돌해석 결과를 모두 활용하는 Eq.1을 이용하여 부피손실률을 재산정한 경우(Fig. 4-8 (c)) 전체충돌해석모델과 국부충돌모델에서 중첩되는 파손부(GMLM)를 제외함에 따라 부피손실률을 비교적 유사하게 예측하는 것으로 확인되었다. 다만 최종 단면 선정을 위해 부피손실률을 비교할 경우 고려되는 단면에서 전체충돌해석으로 인한 부피손실률이 무시할만한 수준으로 발생하여 국부충돌해석결과만을 활용하였다.

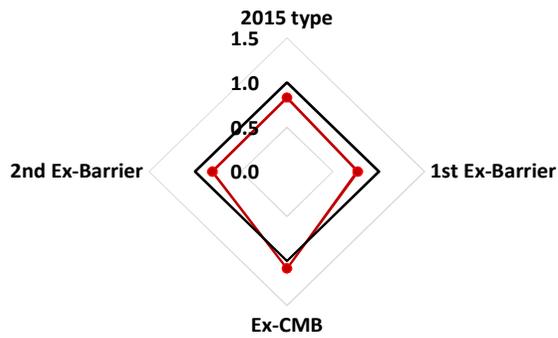
이처럼 전체충돌해석과 국부충돌해석을 모두 고려하는 방법을 추천하며 본 연구에서는 먼저 전체충돌해석 결과를 분석하고, 이후 국부충돌해석 결과를 분석하는 순서대로 나타냈다.



(a) GM/FT



(b) LM/FT



(c) (GM+LM-GMLM)/FT

Fig. 4-8 GM, LM을 사용한 계산결과

4.2 충돌저항성능 향상을 위한 중앙분리대 단면설계

4.1장에서 개발된 모델을 이용하여 충돌저항성능 향상을 위한 다양한 단면을 제시하고 해석을 수행하였다. 중앙분리대의 충돌저항성능을 향상시키기 위해서는 중앙분리대 자체의 강성을 상향시킬 수 있는 강재량 보강, 단면폭 확대, 중앙분리대 상단보강 등을 고려해 볼 수 있다. 또한 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete) 등의 충돌저항성능에 우수한 재료를 활용하는 방법도 가능하다. 본 연구에서는 내부 강재량 상향, 단면폭 확대, 충돌저항성능이 우수한 재료 등을 고려하여 개선 단면을 제시하였다.

4.2.1 콘크리트 중앙분리대 단면

현재 공용중인 중앙분리대의 단면 형상은 충돌 후 차량의 전복 및 승월을 방지하고 충돌 시 운전자 보호를 위하여 사전에 결정된 형상으로서 본 연구에서 단면을 개선하는 과정에서 형상은 수정하지 않는 방향으로 본 연구를 수행하였다.

먼저 내부 강재량을 상향하는 방법과 단면폭을 확대하는 방법에 대한 설계 단면을 Fig. 4-9와 Fig. 4-10에 나타냈으며 해석모델의 단면 변수는 Table 4-4에 나타냈다. 해석모델은 다음과 같이 명명하였다.

상단폭_ ϕ 와이어메쉬 직경_와이어메쉬면 수_w와이어메쉬 간격_상부철근 수@상부철근 직경

먼저 현 중앙분리대(2015 type) (Fig. 4-9 (a))에서 와이어메쉬의 직경만을 증가(Fig. 4-9 (b))시켜 성능을 확인하고 이후 시공성을 고려하여 2면 매입을 위한 단면폭을 확대(Fig. 4-9 (c))하였으며 확대된 단면폭에 와이어메쉬를 2면으로 매입(Fig. 4-9 (d))하여 충돌저항성능을 확인하였다. 특히 강재보강을 위해 Fig. 4-10에서와 같이 2면 매입에서는 와이어메쉬 간격을 기존 가로 150mm x 세로 150mm(Fig. 4-10 (a))에서 가로 150mm x 세로 100mm(Fig. 4-10 (b))로 하여 차량진행방향 모멘트에 대한 저항성능이 향상되도록 하였다. 또한 상부의 국부충돌저항성능을 향상시키기 위하여 와이어메쉬 최상단의 가로방향 강재는 상부보강을 위하여 1열을 75 mm 간격으로 배치하였다. (Fig. 4-10 (b)) 본 연구에서의 해석 순서는 먼저 전체충돌해석을 수행하여

차량과 중앙분리대의 충돌에 따른 전체적인 거동과 부피손실률을 확인하고 이후 국부충돌해석모델을 이용하여 상세한 부피손실률을 점검하였다.

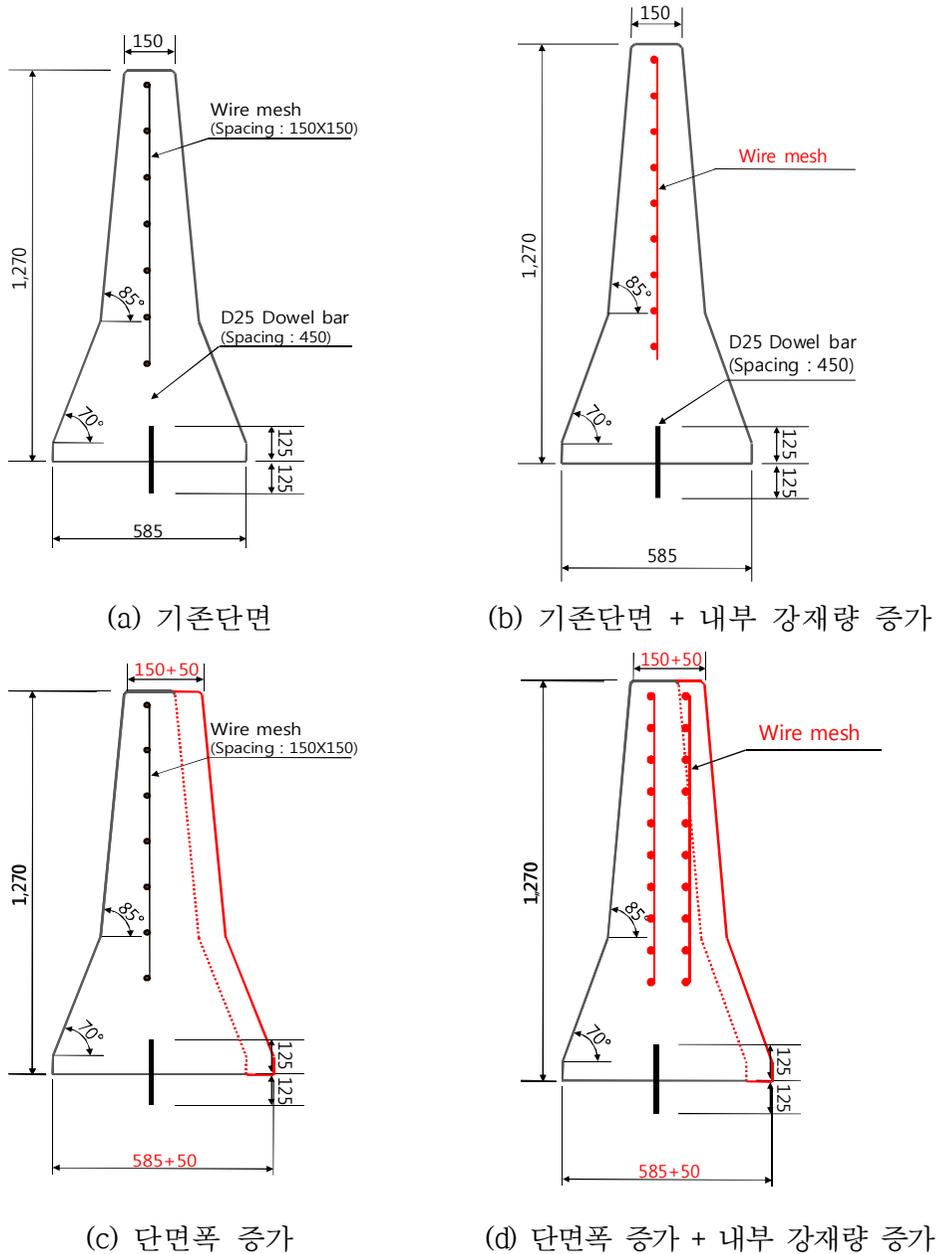
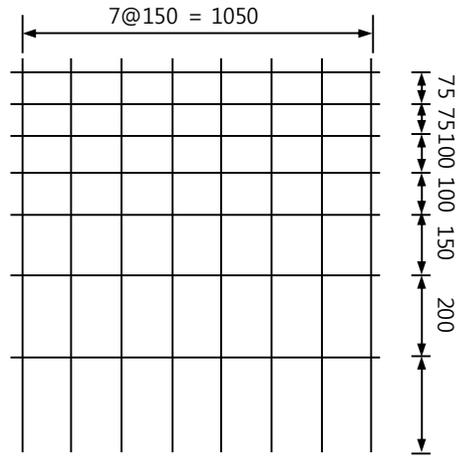
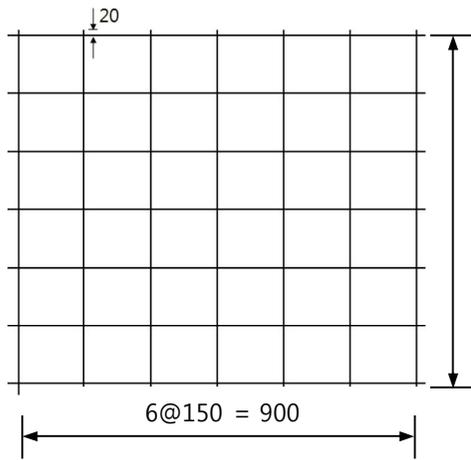


Fig. 4-9 비산저감을 위한 중앙분리대 단면안(1)



(a) 와이어메쉬 (150mm x 150mm) (b) 와이어메쉬 (150mm x 100mm)

Fig. 4-10 와이어메쉬 개선

Table 4-4 단면폭 및 강재량 증가 해석모델의 단면 변수

모델명	와이어 메쉬 면 수 (EA)	상단폭 (mm)	와이어메쉬 직경 (mm)	상부 철근 (mm)	와이어메쉬 간격 (mm)	상부 철근 간격 (mm)			
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	1	150	D3.2	N.A.	150 x 150	N.A.			
150_φ5.8_S_w150			D5.8						
150_φ7.6_S_w150			D7.6						
150_φ9.5_S_w150			D9.5						
200_φ3.2_S_w150			D3.2						
200_φ5.8_S_w150			D5.8						
200_φ7.6_S_w150			D7.6						
200_φ9.5_S_w150			D9.5						
200_φ3.2_S_w100		200	200		D3.2		150 x 100	75	
200_φ5.8_S_w100					D5.8			75	
200_φ7.6_S_w100					D7.6			75	
200_φ9.5_S_w100					D9.5			75	
200_φ3.2_D_w150					D3.2			150 x 150	N.A.
200_φ5.8_D_w150					D5.8				
200_φ7.6_D_w150					D7.6				
200_φ3.2_D_w100					D3.2				
200_φ5.8_D_w100	D5.8								
200_φ7.6_D_w100	D7.6								
200_φ3.2_D_w100_1@D10	D3.2	1@D10	75						
200_φ5.8_D_w100_1@D10	D5.8	1@D10	75						
200_φ7.6_D_w100_1@D10	D7.6	1@D10	75						
200_φ3.2_D_w100_1@D13	D3.2	1@D13	75						
200_φ5.8_D_w100_1@D13	D5.8	1@D13	75						
200_φ7.6_D_w100_1@D13	D7.6	1@D13	75						
200_φ3.2_D_w100_1@D16	D3.2	1@D16	75						
200_φ5.8_D_w100_1@D16	D5.8	1@D16	75						
200_φ7.6_D_w100_1@D16	D7.6	1@D16	75						
200_φ3.2_D_w100_1@D19	D3.2	1@D19	75						
200_φ5.8_D_w100_1@D19	D5.8	1@D19	75						
200_φ7.6_D_w100_1@D19	D7.6	1@D19	75						

다음으로 충돌저항성능이 우수한 재료를 적용한 단면에 대해서는 Fig. 4-11에 나타냈으며 해석모델의 단면 변수는 Table 4-5에 나타냈다. 해석모델은 다음과 같이 명명하였다.

충돌저항성능에 우수한 재료_와이어메쉬_φ와이어메쉬 직경

충돌저항성능에 우수한 재료는 SFRC, crushable concrete, 그리고 Fiber reinforced-high strength concrete로 선정하였다. 우수한 재료를 활용한 경우이므로 강제보강의 필요성이 낮아져 기존 단면(현 중앙분리대 형상)을 그대로 유지하였으며 내부 와이어메쉬가 없는 경우에 대해서도 검토를 하였다.

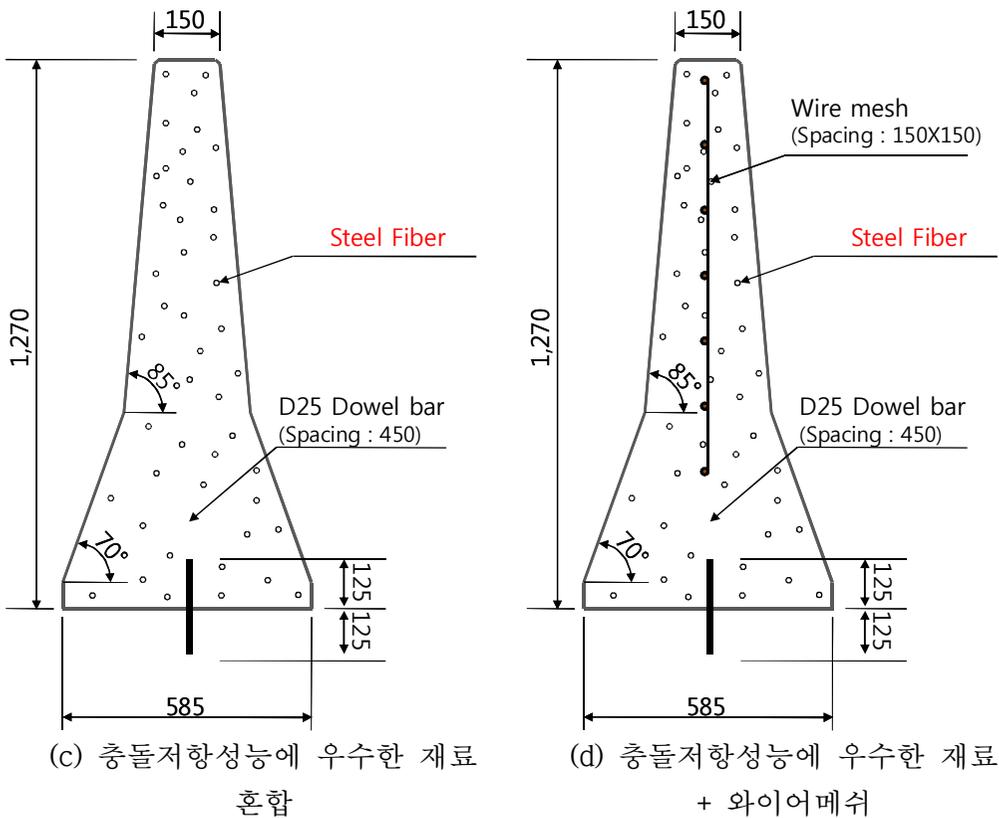


Fig. 4-11 비산저감을 위한 중앙분리대 단면안(2)

Table 4-5 충돌저항성능에 우수한 재료의 해석모델 단면 변수

모델명	와이어 메쉬 면 수 (EA)	상단폭 (mm)	와이어메쉬 직경 (mm)	상부 철근 (mm)	간격 (mm)	상부 철근 간격 (mm)	
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	1	150	D3.2	N.A.	150 x 150	N.A.	
SFRC1.25_W/O_wire	N.A.	150	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
SFRC2.50_W/O_wire							
SFRC3.75_W/O_wire							
SFRC1.25_W/_φ3.2wire	1		D3.2	N.A.	150 x 150	N.A.	
SFRC2.50_W/_φ3.2wire							
SFRC3.75_W/_φ3.2wire							
Crushable_W/O_wire	N.A.		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Crushable_W/_φ3.2wire	1						D3.2
Hi_SFRC1.25_W/O_wire	N.A.		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Hi_SFRC2.50_W/O_wire	N.A.						
Hi_SFRC3.75_W/O_wire							

4.3 전체충돌해석 결과

본 장에서는 4.2장에서 설계한 단면에 대하여 전체충돌해석을 수행하고 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150)의 충돌저항성능과 비교분석하였다. 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150)에서 강재량만 보강한 단면에 대한 전체충돌해석 결과를 4.3.1에 나타냈고 단면폭 확대와 강재량 증가를 동시에 고려한 전체충돌해석 결과를 4.3.2에 나타냈다. 그리고 SFRC, Crushable concrete, 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)의 전체충돌해석 결과를 4.3.3장에 나타냈다. 아래 Fig. 4-12는 충돌 후 차량의 거동을 나타낸 한 가지 해석결과이며 모든 단면 조건에서 차량의 전복, 월담 등이 없으며 주행 중인 차선으로 유도되는 것을 확인했다. 또한 Fig. 4-13에는 차량의 운동(Pitching, Rolling, Yawing)을 나타냈으며 실물충돌시험 결과와 비교하여 유사하게 발생함을 확인하였다.

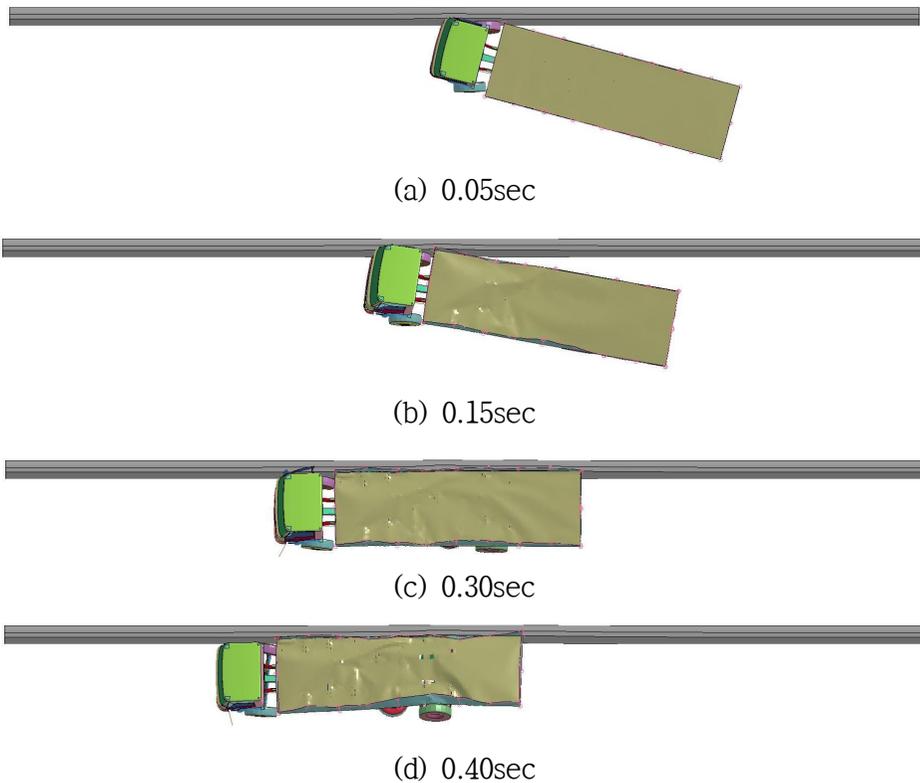


Fig. 4-12 충돌 후 차량의 거동

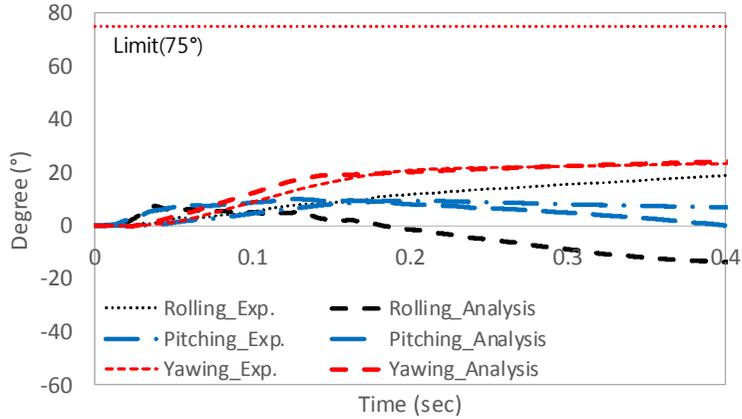


Fig. 4-13 차량의 운동 (Pitching, Rolling, Yawing)

4.3.1 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 결과

중양분리대의 충돌저항성능 개선방법 중 가장 용이한 방법이 내부에 매입되는 강재량을 증가시키는 방법이다. 따라서 현재 공용중인 중양분리대의 외형은 동일한 상태에서 내부에 매입되는 와이어메쉬 강재량을 증가하여 해석을 수행하였다. 와이어메쉬의 격자간격은 현재와 동일하게 150mm x 150mm에서 직경만 5.8mm, 7.6mm, 9.5mm로 증가하여 해석을 수행하고 그 결과를 Table 4-6과 Fig. 4-14에 나타냈다. 해석결과 현 중양분리대(150_φ3.2_S_w150)는 92.0%의 부피손실률이 발생한 반면 와이어메쉬 직경이 증가함에 따라 부피손실률이 감소하는 경향을 보였다. 와이어메쉬 직경이 φ3.2(150_φ3.2_S_w150)에서 φ9.5(150_φ9.5_S_w150)로 증가하는 동안 부피손실률이 1.1% 발생하여 98.8% 감소함을 보였다.

Table 4-6 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 부피손실률

모델명	상단폭 (mm)	와이어메쉬 직경 (mm)	와이어메쉬 간격 (mm)	상부 와이어메쉬 간격 (mm)	면 수 (EA)	철근량 (Kg/m)	부피 손실률 (%)
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	150	φ3.2	150 x 150	150	1	0.8	92.0
150_φ5.8_S_w150	150	φ5.8	150 x 150	150	1	2.6	6.3
150_φ7.6_S_w150	150	φ7.6	150 x 150	150	1	4.5	1.9
150_φ9.5_S_w150	150	φ9.5	150 x 150	150	1	7.0	1.1

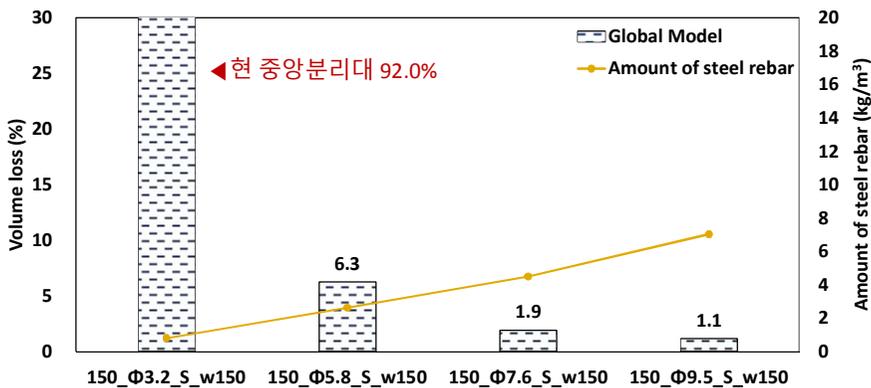


Fig.4-14 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 부피손실률

4.3.2 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 결과

중앙분리대에 매입되는 와이어메쉬의 직경이 D10 철근과 유사할 경우 현장에서 용접을 통하여 제작을 하므로 공기가 증가하여 시공성이 매우 떨어진다. 또한 시공 시 작업자가 운반할 경우 중량증가에 따른 작업성도 감소될 것이다. 따라서 강재량을 증가시키기 위해 1면 와이어메쉬로 고정한 상태에서 직경만 증가시키는 것은 효과적인 강재량의 증가방법이 아니다. 중앙분리대 내에 재료 분리나 시공성을 저해하지 않는 차원에서 2면 와이어메쉬를 매입하는 것이 적절할 것이며 와이어메쉬의 위치가 중립축으로부터 이격됨에 따라 휨강성 개선의 효과도 우수할 것이다.

기존 150mm의 상부 폭에 2면을 매입할 경우 와이어메쉬 면 간 간격이 줄어 재료분리를 발생시킬 수 있는 것으로 시공 시 확인되었다. 따라서 내부에 매입

되는 강제량 증가와 동시에 시공성을 유지하기 위해 와이어메쉬 사이에 일정한 간격(최소 100mm)이 필요하다. 따라서 와이어메쉬를 2면으로 설치하기 위해서는 현 중앙분리대의 단면폭이 증대되어야 한다. 본 연구에서는 중앙분리대의 단면폭을 50mm 증가하여 재료분리 없이 100mm 간격의 내부강재가 2면 매입 되도록 하였다. 또한 단면폭 50mm 증가에 따른 고속도로 내 중앙부의 여유 공간의 감소에 따른 차량 주행 안전성에 미치는 영향은 무시할만한 수준인 것으로 확인되었다.

단면폭 및 강제량에 따른 전체충돌 해석결과를 Table 4-7 및 Fig. 4-15에 나타냈다. 먼저 중앙분리대 단면폭 증대에 따른 비산 저감 효과를 확인하기 위하여 강제량 증가 없이 단면폭 증대만을 적용한 해석결과를 비교분석 하였다. 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150)와 비교하여 단면폭만 50mm 증대된 경우(200_φ3.2_S_w150)에도 98.4%의 부피손실률감소가 확인되어 전체충돌해석에서는 단면 증대만으로도 중앙분리대의 충돌저항성능이 향상되는 결과를 보였다.

해석결과 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150)에서는 92.0%의 부피손실률이 발생하였으나 단면폭 증대와 강제량이 증가함에 따라 부피손실률이 0% (200_φ5.8_D_w150_1@D10 이상) 발생하여 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150) 대비 최대 99.9%까지 개선될 수 있는 것으로 확인된다(Fig. 4-14). 다만 전체충돌해석모델의 경우 국부충돌이 모사되지 않아 강제량이 일정량(200_φ5.8_D_w100) 이상이 되면(200_φ5.8_D_w100 이상) 부피손실률이 0%에 수렴하면서 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 200_φ7.6_D_w100 이상의 모델은 부피손실률이 거의 발생하지 않아 전체충돌모델에서 고려하지 않았다. 전체충돌해석에서 모사되지 못한 국부충돌에 의한 부피손실률은 1장 및 4.1장에서 기술한 바와 같이 국부충돌해석을 통해 추가확인이 필요하다. 국부충돌에 대한 해석결과는 4.4장에 나타냈다. 전체충돌해석에서는 차량의 월담, 승월등 차량의 거동을 평가하는데 주로 활용 되었으며 모든 해석결과에서 충돌 후 월담 및 승월이 없으며 차량을 주행차선으로 안전하게 유도하는 것으로 확인되었다.

Table 4-7 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 부피손실률

모델명	상단폭 (mm)	와이어메쉬		상부 철근		면 수 (EA)	철근량 (Kg/m)	부피 손실률 (%)			
		직경 (mm)	간격 (mm)	직경 (mm)	간격 (mm)						
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	150	φ3.2	150	N.A	N.A	1	0.8	92.0			
200_φ3.2_S_w150		φ3.2					0.8	1.5			
200_φ5.8_S_w150		φ5.8					2.6	0.1			
200_φ7.6_S_w150		φ7.6					4.5	0.0			
200_φ9.5_S_w150		φ9.5					7.1	0.0			
200_φ3.2_S_w100	200	φ3.2	100	N.A	75	2	0.9	2.6			
200_φ5.8_S_w100		φ5.8					2.8	0.0			
200_φ7.6_S_w100		φ7.6					4.9	0.0			
200_φ9.5_S_w100		φ9.5					7.6	0.0			
200_φ3.2_D_w150		φ3.2	150		150		150	1.6	0.0		
200_φ5.8_D_w150		φ5.8						5.3	0.0		
200_φ7.6_D_w150		φ7.6						9.1	0.0		
200_φ3.2_D_w100		φ3.2	100		100		N.A	75	2	1.8	0.5
200_φ5.8_D_w100		φ5.8								6.1	0.3
200_φ7.6_D_w100		φ7.6								10.4	0.2
200_φ3.2_D_w100_1@D10	φ3.2	φ10		2.9		0.5					
200_φ5.8_D_w100_1@D10	φ5.8	φ10		6.8		0.0					
200_φ7.6_D_w100_1@D10	φ7.6	φ10		10.9		0.0					
200_φ3.2_D_w100_1@D13	φ3.2	φ13		3.7		0.0					
200_φ5.8_D_w100_1@D13	φ5.8	φ13		7.6		0.0					
200_φ7.6_D_w100_1@D13	φ7.6	φ13		11.7		0.0					
200_φ3.2_D_w100_1@D16	φ3.2	φ16		4.7		0.0					
200_φ5.8_D_w100_1@D16	φ5.8	φ16	8.6	0.0							
200_φ7.6_D_w100_1@D16	φ7.6	φ16	12.7	0.0							
200_φ3.2_D_w100_1@D19	φ3.2	φ19	5.9	0.0							
200_φ5.8_D_w100_1@D19	φ5.8	φ19	9.9	0.0							
200_φ7.6_D_w100_1@D19	φ7.6	φ19	13.9	0.0							

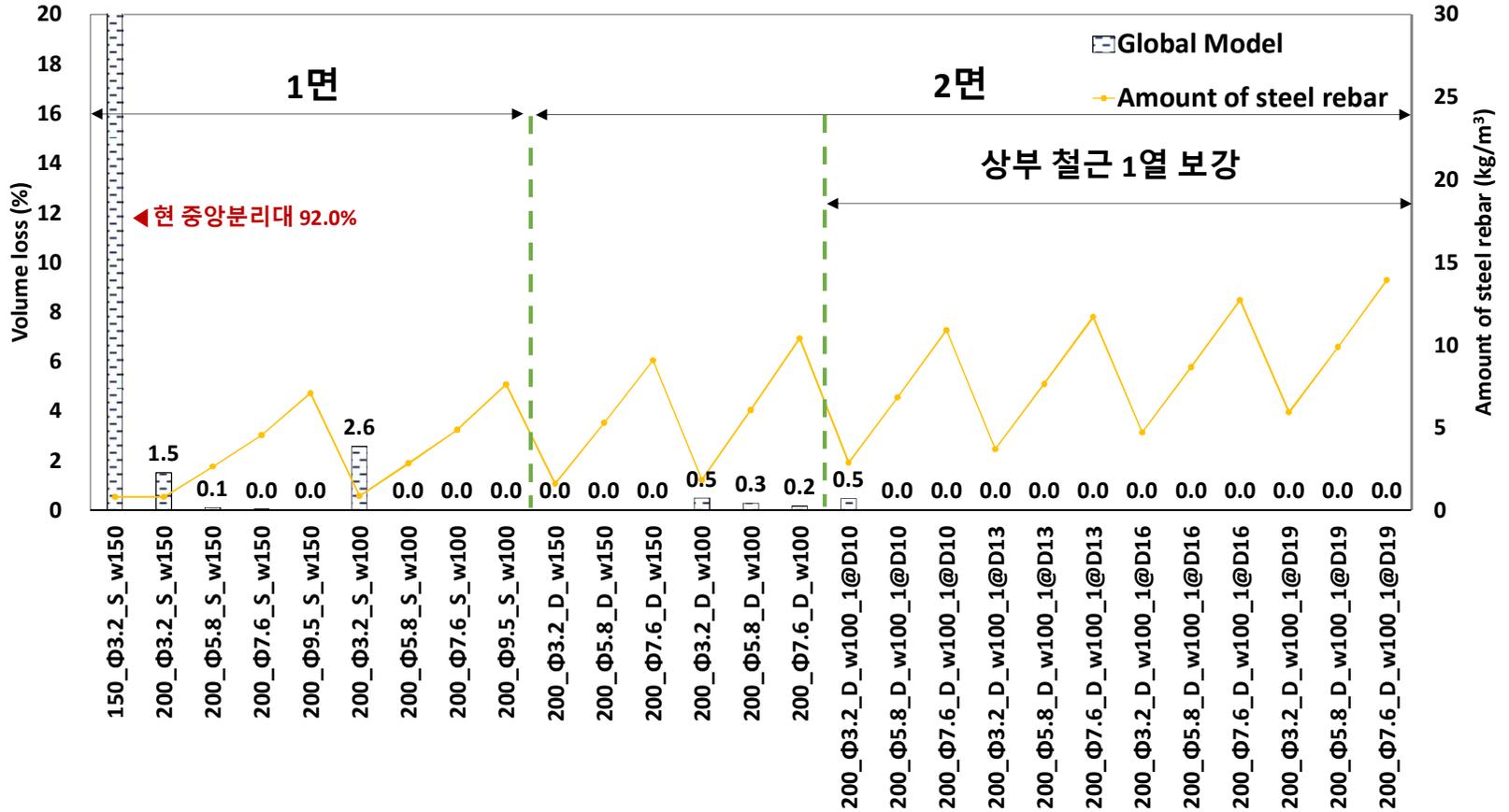


Fig. 4-15 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 전체충돌해석 부피손실률

4.3.3 충돌저항성능에 우수한 재료의 전체충돌해석 결과

2장에서 기술한 바와 같이 충돌저항성능에 우수한 재료로 확인된 SFRC, Crushable concrete, 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)와 같은 재료를 적용하여 해석을 수행하였다. SFRC와 Crushable concrete 그리고 UHP-FRC의 재료는 Barros and Sena-Cruz (2007)의 연구를 참고로 하여 적용을 하였으며 변수 및 해석결과를 Table 4-8에 나타냈다. 콘크리트 재료의 변경에 따라 해석모델에서도 기존 재료모델을 변경하여 고려하였다. SFRC의 경우 일반적인 콘크리트와 유사한 압축강도에도 강섬유량이 증가함에 따라 파괴에너지는 상당히 증가하는 것을 볼 수 있다. Crushable concrete의 재료물성치는 Doyle et al. (2016)의 연구를 참고로 하였으며 UHP-FRC는 Habel et al. (2006)의 연구를 참고로 하였다. UHP-FRC는 85MPa 이상의 압축강도는 구현이 되지 않는 CSCM의 해석적 한계로 인해 UHP-FRC가 아닌 85MPa의 강도를 가진 섬유보강고강도콘크리트(High strength steel fiber reinforced concrete)로 고려하여 적용하였다.

아래의 Table 4-8과 Fig.4-16에는 콘크리트 재료의 변경에 따른 부피손실률을 나타냈다. SFRC의 경우 내부에 최소 0.0%의 부피손실률(SFRC3.75_W/O_wire)이 발생하여 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150) 대비 최대 99.9%의 개선효과를 보여 섬유보강콘크리트를 사용한 중앙분리대의 충돌저항성능이 우수한 것으로 확인할 수 있다.

Crushable concrete도 내부에 강재의 유무와 상관없이 부피손실률이 0% 발생하여 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150) 대비 99.9%의 부피손실률 감소를 할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 Crushable concrete가 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 전체충돌과정에서 효과적으로 흡수할 수 있다는 것을 나타낸다.

섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)도 부피손실률이 0.0% 발생하여 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150) 대비 99.9%의 부피손실률 감소가 확인되어 차량충돌에 효과적인 것을 볼 수 있다.

다만 위의 모든 결과는 전체충돌해석모델을 기준으로 확인된 결과이므로 추가적인 국부충돌해석 결과를 검토할 필요가 있다.

Table 4-8 충돌저항성능에 우수한 재료의 전체충돌해석 파괴손실률

모델명	콘크리트 재료	상단폭 (mm)	와이어메쉬		콘크리트 압축 강도 (MPa)	단위 강섬유량 (%)	파괴 에너지 (N/m)	파괴 손실률 (%)
			직경 (mm)	간격 (mm)				
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	N.A	150	φ3.2	150 x 150	30.0	N.A	155.0	92.0
SFRC1.25_W/O_wire	SFRC		N.A	N.A	33.9	1.25	241.9	0.9
SFRC2.50_W/O_wire			N.A	N.A	34.4	2.50	448.1	0.4
SFRC3.75_W/O_wire			N.A	N.A	33.5	3.75	647.3	0.0
SFRC1.25_W/_φ3.2wire			φ3.2	150 x 150	33.9	1.25	241.9	1.0
SFRC2.50_W/_φ3.2wire			φ3.2		34.4	2.50	448.1	0.7
SFRC3.75_W/_φ3.2wire			φ3.2		33.5	3.75	647.3	0.3
Crushable_W/O_wire			Crushable Concrete	φ3.2	150 x 150	-	N.A.	241.9
Crushable_W/_φ3.2wire	N.A.			N.A.	-	N.A.	241.9	0.0
Hi_SFRC1.25_W/O_wire	High strength concrete-FRC		N.A.	N.A.	85	1.25	241.9	0.0
Hi_SFRC2.50_W/O_wire			N.A.	N.A.	85	2.50	448.1	0.0
Hi_SFRC3.75_W/O_wire			N.A.	N.A.	85	3.75	647.3	0.0

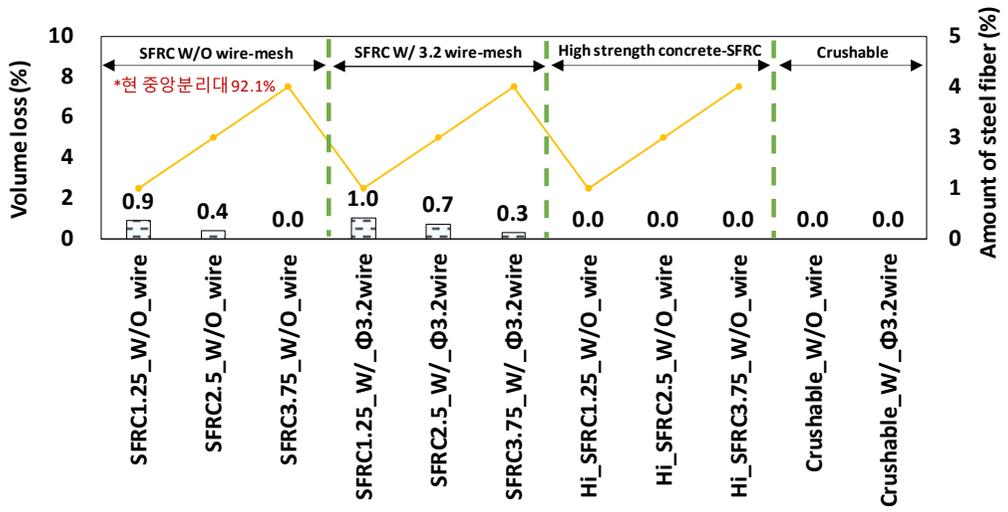


Fig.4-16 충돌저항성능에 우수한 재료의 전체충돌해석 파괴손실률

4.4 국부충돌해석 결과

4.2장에서 제시한 강재량 보강, 단면폭 확대, 와이어메쉬 2면 매입과 단면폭 확대를 동시에 적용한 모든 단면에 대해서 SB6에 해당하는 국부충돌해석을 추가로 수행하였다. 이전 장에서 제시한 전체충돌해석결과 순서와 동일하게 내부 강재량 증가에 따른 국부충돌해석 결과(4.4.1장), 단면폭 확대와 강재량 증가를 함께 고려한 국부충돌해석결과(4.4.2장), 그리고 충돌저항성능에 우수한 재료(SFRC, Crushable concrete, 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete))(4.4.3장)의 국부충돌해석 결과 순으로 해석결과를 정리하였다. 아래 Fig. 4-17은 와이어메쉬 직경변화($\phi 3.2$, $\phi 9.5$)에 따른 국부충돌파손 형상을 비교한 결과이다.

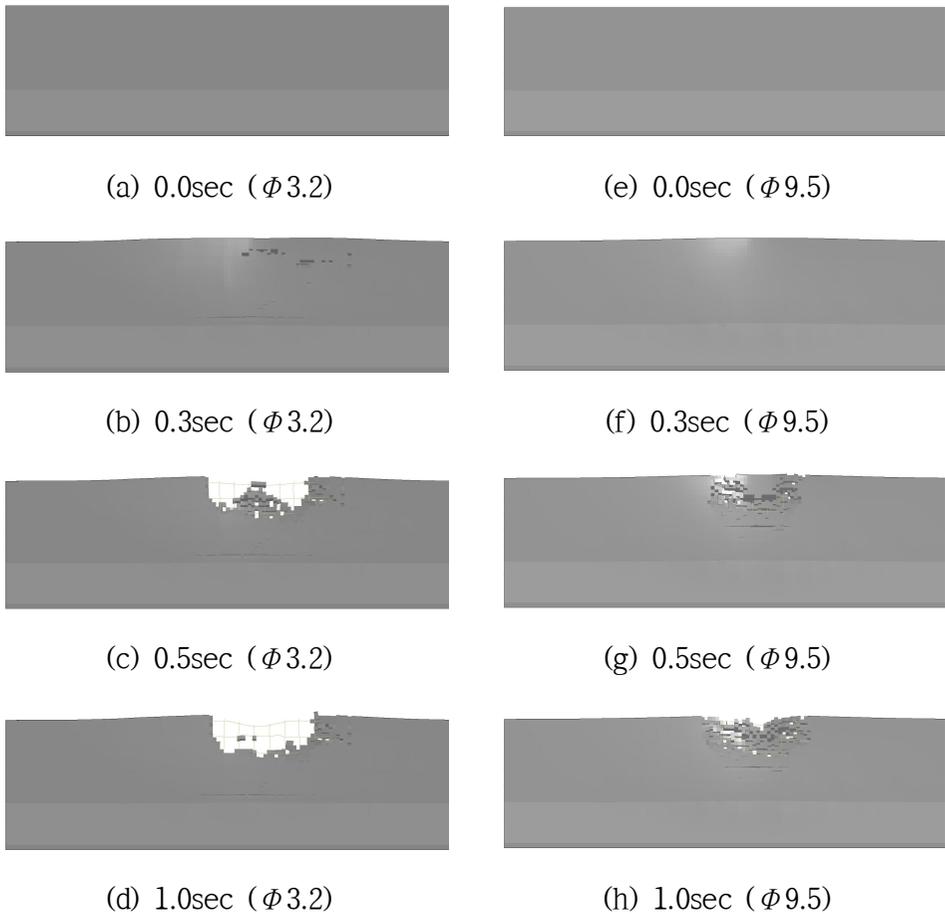


Fig. 4-17 파손형상 비교 ($\phi 3.2$ vs $\phi 9.5$)

4.4.1 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 결과

본 장에서는 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 결과를 Table 4-9와 Fig. 4-18에 나타냈다. 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150)와 와이어메쉬 직경을 φ5.8로 증가시킨 모델(150_φ5.8_S_w150)을 비교하였을 때 직경이 181% 증가함에 따라 부피손실률은 21.8%에서 14.1%로 35.3% 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 φ9.5(150_φ9.5_S_w150)에서는 부피손실률이 오히려 φ7.6(150_φ7.6_S_w150) 대비 24.1% 증가하여 직경만을 증대하여 강재량을 개선하는 방법은 효과적이지 않은 것으로 확인되었다. 또한 단면폭 증가와 내부 강재량을 동시에 증가시킨 해석결과(4.4.2장) 및 충돌저항성능에 우수한 재료모델에 따른 해석결과(4.4.3장)와 비교를 해 보아도 강재량만을 증가시킨 경우 상대적으로 많은 부피손실률을 발생시켜 국부충돌에는 취약한 것으로 평가된다. 따라서 단면폭을 증대함과 동시에 2면 와이어메쉬를 사용함으로써 강재량을 상향시킬 수 있는 변수연구를 수행하여 국부충돌에도 저항할 수 있는 단면 선정이 필요하다. 따라서 그 결과를 다음 장에 나타내었다.

Table 4-9 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률

모델명	상단폭 (mm)	와이어메쉬 직경 (mm)	와이어메쉬 간격 (mm)	상부 와이어메쉬 간격 (mm)	면 수 (EA)	철근량 (Kg/m)	부피 손실률 (%)
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	150	φ3.2	150 x 150	150	1	0.8	21.8
150_φ5.8_S_w150	150	φ5.8	150 x 150	150	1	2.6	14.1
150_φ7.6_S_w150	150	φ7.6	150 x 150	150	1	4.5	13.7
150_φ9.5_S_w150	150	φ9.5	150 x 150	150	1	7.0	17.0

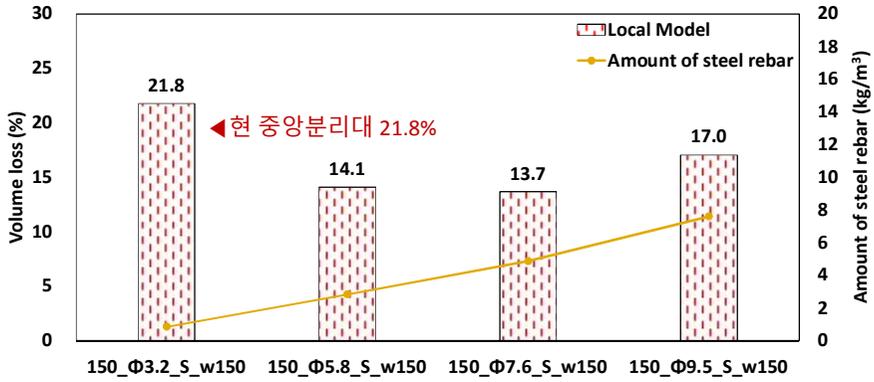


Fig. 4-18 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률

4.4.2 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 결과

단면폭 및 내부강재 변수에 따른 국부충돌해석 결과를 Table 4-10 및 Fig. 4-19에 나타냈다. 단면폭만 기존 단면 대비 50mm 증대시킨 모델(200_φ3.2_S_w150)을 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150)의 부피손실률 21.8%와 비교했을 때 부피손실률이 11.1% 발생하여 49.1%의 개선효과가 확인되었다.

다음으로 단면폭이 증대(200_φ3.2_S_w150)된 경우 부피손실률이 11.1% 발생하였으며 와이어메쉬를 2면(200_φ3.2_D_w150)으로 증가시켰을 때 부피손실률이 6.8% 발생하여 면 증가에 따라 38.7%의 개선효과를 확인하였다. 또한 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150) 대비 모든 2면 단면에서 2.3%에서 6.8%의 부피손실률을 보여 최소 68.8% 이상의 부피손실률 개선효과를 확인할 수 있었다.

또한 200_φ5.8_S_w100(2.8kg/m)모델과 200_φ3.2_D_w100(1.8kg/m)모델을 비교할 경우 부피손실률이 각각 9.1%와 6.5%로 발생하여 강재량이 감소하였음에도 2면 와이어메쉬를 사용함에 따라 충돌저항성능은 향상되는 것을 볼 수 있다. 따라서 직경을 증가시켜 강재량을 개선하기보다는 와이어메쉬의 면수를 늘려 강재량을 개선하는 것이 더욱 효과적인 것으로 확인된다. 이러한 결과는 200_φ5.8_S_w100 모델(2.8kg/m)과 200_φ3.2_D_w150 모델(1.6kg/m)을 비교할 경우에도 확인할 수 있다.

단면폭과 와이어메쉬는 2면으로 하면서 와이어메쉬의 간격을 150mm x 150mm에서 150mm x 100mm로 증가하였을 경우 φ3.2에서 기존의 부피손실률 6.8%(200_φ3.2_D_w150)에서 부피손실률이 6.5%(200_φ3.2_D_w100) 발생하여 4.4% 개선됨을 보였으며, φ5.8에서 기존 부피손실률 5.1%(200_φ5.8_D_w150)에서 부피손실률이 4.6%(200_φ5.8_D_w100)로 발생하여 9.8% 개선되는 것으로 나타났다. φ7.6에서는 기존 부피손실률이 2.3%(200_φ7.6_D_w150)에서 부피손실률 1.4%(200_φ7.6_D_w100)가 발생하여 증가하는 것으로 나타나 해석결과에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 다만 전체충돌해석에서는 차량진행방향에 대한 모멘트 저항성능이 개선됨에 따라 충돌저항성능이 개선된 것을 확인할 수 있었다.

국부충돌에 취약한 중앙분리대 상부의 충돌저항성능을 향상시키기 위하여 150mm x 100mm 와이어메쉬 상부에 철근을 추가적으로 보강하여 그 결과를

확인해 보았다. 상부철근을 보강한 모델에서도 부피손실률이 6% 이내로 발생하여 현 중앙분리대의 부피손실률(21.8%) 대비 부피손실률이 최소 72.5% 개선되는 것으로 나타나 충돌저항성능에 우수한 효과를 보였다.

Table 4-10 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률

모델명	상단폭 (mm)	와이어메쉬		상부 철근		면 수 (EA)	철근량 (Kg/m)	부피 손실률 (%)	
		직경 (mm)	간격 (mm)	직경 (mm)	간격 (mm)				
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	150	φ3.2	150	N.A	N.A	1	0.8	21.8	
200_φ3.2_S_w150		φ3.2					0.8	11.1	
200_φ5.8_S_w150		φ5.8					2.6	4.9	
200_φ7.6_S_w150		φ7.6					4.5	3.8	
200_φ9.5_S_w150		φ9.5					7.1	3.3	
200_φ3.2_S_w100	200	φ3.2	100	N.A	75	1	0.9	11.4	
200_φ5.8_S_w100		φ5.8					2.8	9.1	
200_φ7.6_S_w100		φ7.6					4.9	4.8	
200_φ9.5_S_w100		φ9.5					7.6	3.7	
200_φ3.2_D_w150		φ3.2					150	150	150
200_φ5.8_D_w150	φ5.8	5.3	5.1						
200_φ7.6_D_w150	φ7.6	9.1	2.3						
200_φ3.2_D_w100	200	φ3.2	100	N.A	75	2	1.8	6.5	
200_φ5.8_D_w100		φ5.8					6.1	4.6	
200_φ7.6_D_w100		φ7.6					10.4	3.7	
200_φ3.2_D_w100_1@D10		φ3.2					φ10	2.9	5.3
200_φ5.8_D_w100_1@D10		φ5.8					φ10	6.8	4.0
200_φ7.6_D_w100_1@D10		φ7.6					φ10	10.9	4.2
200_φ3.2_D_w100_1@D13		φ3.2					φ13	3.7	4.1
200_φ5.8_D_w100_1@D13		φ5.8					φ13	7.6	3.9
200_φ7.6_D_w100_1@D13		φ7.6					φ13	11.7	4.4
200_φ3.2_D_w100_1@D16		φ3.2					φ16	4.7	6.0
200_φ5.8_D_w100_1@D16	φ5.8	φ16	8.6	3.2					
200_φ7.6_D_w100_1@D16	φ7.6	φ16	12.7	3.1					
200_φ3.2_D_w100_1@D19	φ3.2	φ19	5.9	4.1					
200_φ5.8_D_w100_1@D19	φ5.8	φ19	9.9	3.0					
200_φ7.6_D_w100_1@D19	φ7.6	φ19	13.9	3.5					

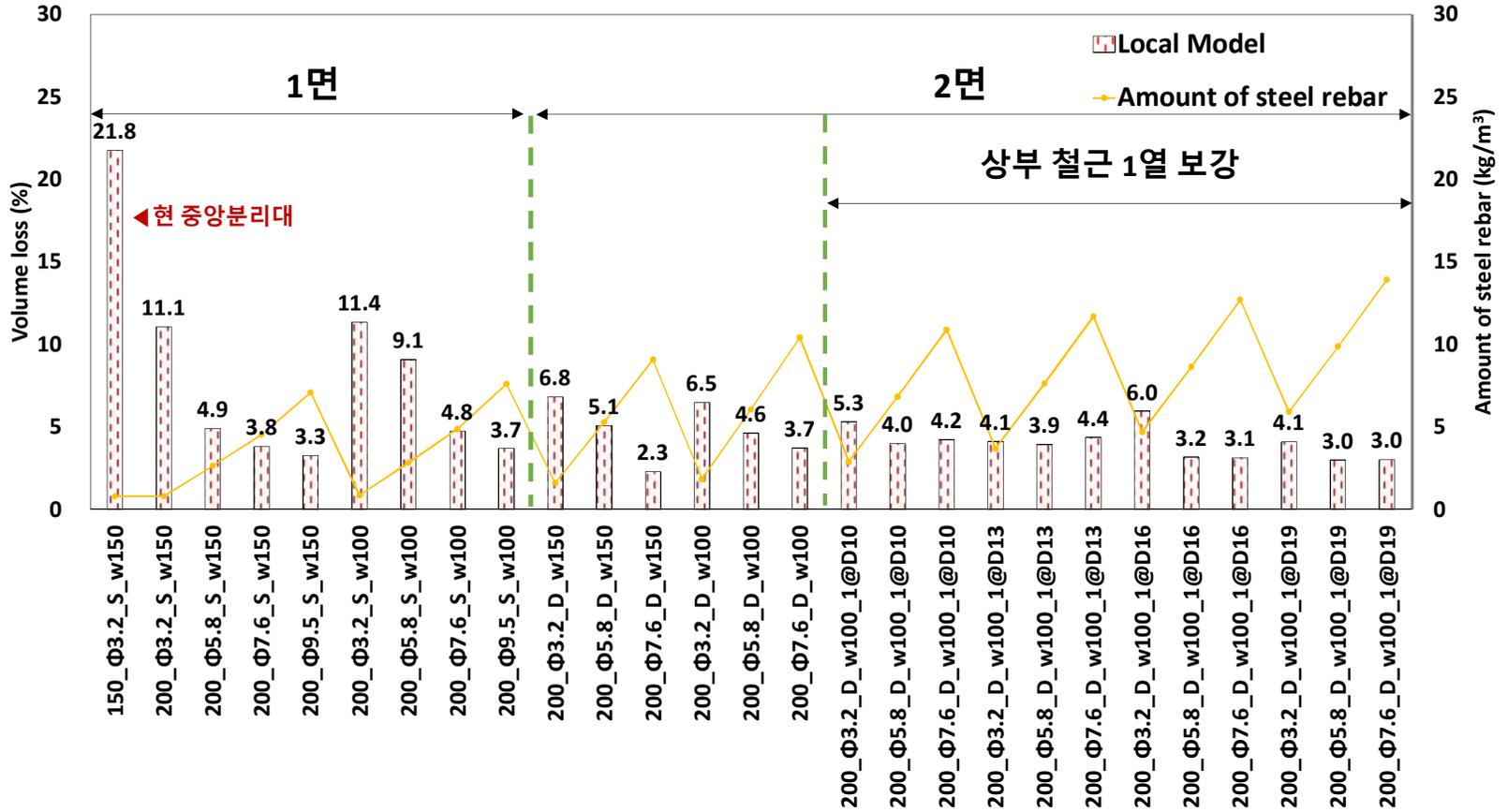


Fig. 4-19 단면폭 및 내부강재량 증가에 따른 국부충돌해석 부피손실률

4.4.3 충돌저항성능에 우수한 재료의 국부충돌해석 결과

본 장에서는 충돌저항성능에 우수한 재료를 사용한 단면의 국부충돌 해석결과를 Table 4-11과 Fig. 4-20에 나타냈다. 와이어메쉬 없이 강섬유가 1.25%만 매입된 경우(SFRC1.25_W/O_wire)를 현 중앙분리대(150_φ3.2_S_w150)의 부피손실률 21.8%와 비교하였을 때 부피손실률이 15.7% 발생하여 28.0%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 강섬유의 양이 1.25%에서 2.5%, 3.75%로 증가하는 동안 부피손실률은 각각 14.2%, 7.4% 발생하여 9.6%, 52.9%의 개선효과를 보였다.

SFRC의 경우 와이어메쉬의 유무에 따라 부피손실률의 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으나 2.5%의 강섬유를 사용할 경우 와이어메쉬를 매입(SFRC2.5_W/wire)하는 경우(8.7%)가 와이어메쉬를 매입하지 않는 경우(SFRC2.5_W/O_wire, 14.2%)에 비해 더 효과적인 것으로 나타났다.

다만 SFRC를 사용한 모든 경우에서 현 중앙분리대 대비 개선된 효과를 보였으나 7.4%에서 15.7%까지 비교적 높은 부피손실률을 보여 기존 단면에 강섬유만 보강하는 형태는 실물충돌실험에 통과하지 못할 확률이 높다.

따라서 SFRC의 콘크리트 강도를 높인 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)의 해석결과를 확인하였다. 고강도 콘크리트와 강섬유(Steel Fiber)를 함께 이용하는 경우 부피손실률은 2.3%에서 5.7% 발생하여 현 중앙분리대의 부피손실률(21.8%) 대비 최대 89.4% 개선효과를 보여 비산저감성능에 매우 효과적인 것으로 나타났다.

다만 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)의 경우 Slip foam 시공 시 콘크리트 배합과 타설 과정에서 재료의 다짐과 분리 등의 시공상 문제가 발생할 수 있으며 이에 따른 시공단가 증가가 예상되므로 시공 상황 변화에 따른 성능과 단가에 대한 최적화 연구는 추가로 진행될 필요가 있다.

Crushable concrete의 경우 전체충돌해석과 국부충돌해석에서 매우 상이한 결과가 도출되었다. 전체충돌해석에서는 전술한 바와 같이 파괴가 발생하지 않았으나 국부충돌해석에서는 상대적으로 높은 비율의 파괴(43.4%~46.6%)가 발생하여 국부충돌 저항성능을 확보하지 못하는 것으로 나타났다.

따라서 중앙분리대의 충돌저항성능을 개선하기 위해서는 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)를 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

Table 4-11 충돌저항성능에 우수한 재료의 국부충돌해석 파괴손실률

모델명	콘크리트 재료	상단폭 (mm)	와이어메쉬		콘크리트 압축 강도 (MPa)	단위 강섬유량 (%)	파괴 에너지 (N/m)	부피 손실률 (%)
			직경 (mm)	간격 (mm)				
150_φ3.2_S_w150 (현 중앙분리대)	N.A	150	φ3.2	150 x 150	30.0	N.A	150.0	21.8
SFRC1.25_W/O_wire	SFRC		N.A	N.A	33.9	1.25	241.9	15.7
SFRC2.5_W/O_wire			N.A	N.A	34.4	2.50	448.1	14.2
SFRC3.75_W/O_wire			N.A	N.A	33.5	3.75	647.3	7.4
SFRC1.25_W/_φ3.2wire			φ3.2	150 x 150	33.9	1.25	241.9	13.7
SFRC2.50_W/_φ3.2wire			φ3.2		34.4	2.50	448.1	8.7
SFRC3.75_W/_φ3.2wire			φ3.2		33.5	3.75	647.3	8.3
Crushable_W/O_wire			Crushable Concrete	φ3.2	150 x 150	-	N.A.	241.9
Crushable_W/_φ3.2wire	N.A.			N.A.	-	N.A.	241.9	43.3
Hi_SFRC1.25_W/O_wire	High strength concrete-FRC		N.A.	N.A.	85	1.25	241.9	5.7
Hi_SFRC2.5_W/O_wire			N.A.	N.A.	85	2.50	448.1	2.9
Hi_SFRC3.75_W/O_wire			N.A.	N.A.	85	3.75	647.3	2.3

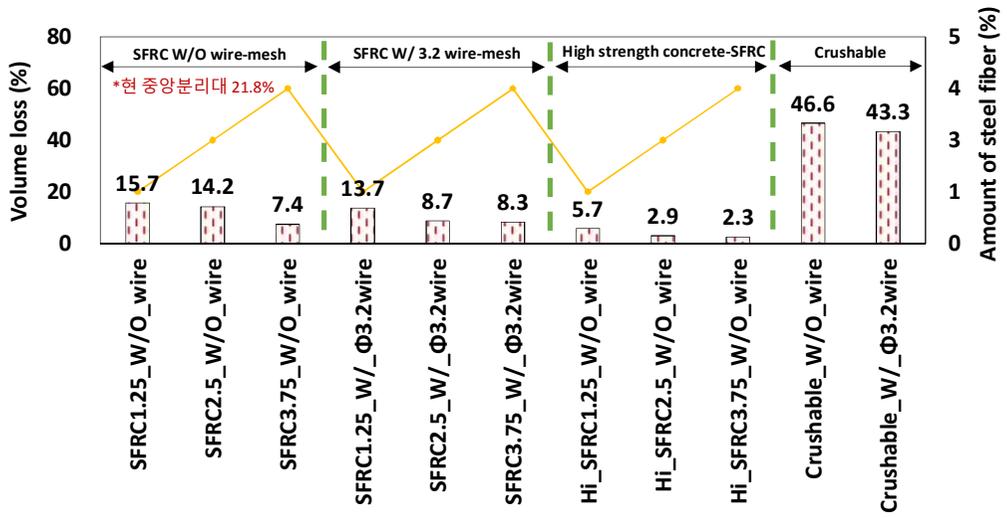


Fig. 4-20 충돌저항성능에 우수한 재료의 국부충돌해석 부피손실률

4.6 단가 산정 및 적정단면 제안

중양분리대의 충돌저항성능을 향상시키기 위해서는 강재량을 적정수준 이상으로 보강할 경우 효과적인 것으로 나타났으며, 강섬유고강도콘크리트(SFRC) 역시 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 이러한 중양분리대의 경우 경제성을 고려한 적절한 시공단가가 필요하다.

단면선정시 부피손실률에 대한 기준은 현 중양분리대(150_φ3.2_S_w150)(비산저감을 위한 고성능 중양분리대 개발, 2016)의 실물충돌시험에서 발생하였던 파편의 무게를 부피손실률로 산정하였을 때 7.0% 발생하였던 점을 기준으로 판단하여 이의 50%에 해당하는 3.5%를 허용 가능한 부피손실률로 가정하고 이에 대한 적정 철근량을 검토하였다. 다만 SFRC의 경우 고강도콘크리트를 고려할 경우 기준에 부합되나, 일반 SFRC는 단면의 변화 없이 기준에 부합되는 결과를 나타내지 못하여 효율성을 고려하여 선정하였다.

기존 단면의 경우(2015 type) 시공단가는 적절하나 충돌등급을 SB5-B에서 SB6등급으로 상향할 경우 충분한 저항성능을 보유하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 단면의 경제성과 시공성을 모두 고려한 최적화 설계를 수행하였다. 먼저 강재를 보강한 형태의 중양분리대 최적 단면을 제시하기 위해 부피손실률과 철근량, 강섬유량의 곡선을 각각 그래프로 나타내고 각 단면을 Fig.4-21, Fig.4-22에 나타내었다.

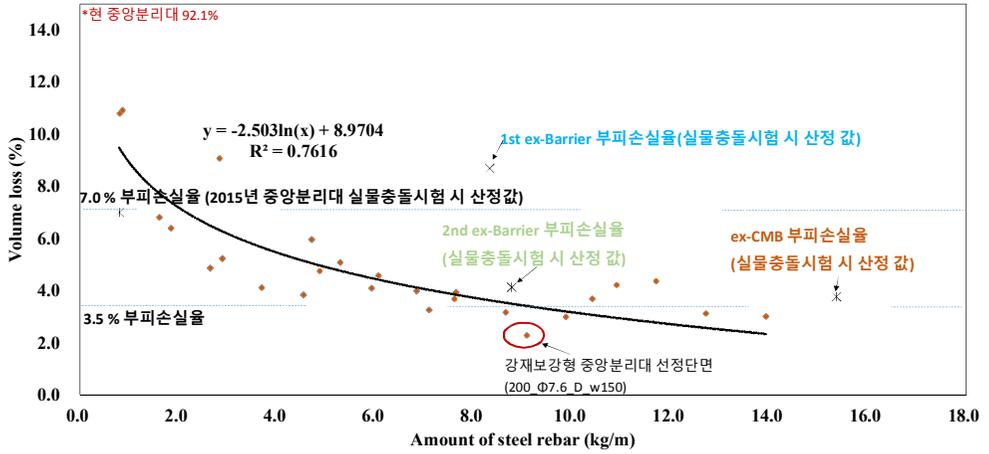


Fig. 4-21 단면폭 및 내부강재 증가에 따른 적정단면 산정 그래프

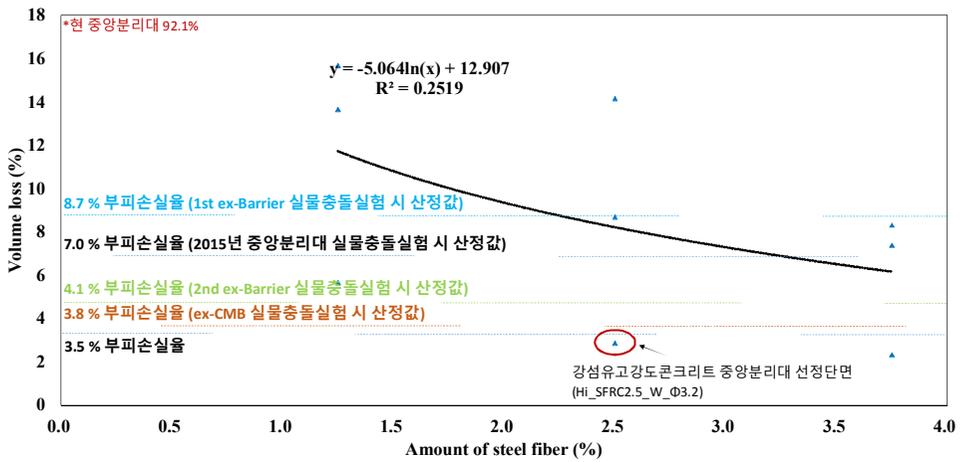


Fig. 4-22 충돌저항성능에 우수한 재료의 적정단면 산정 그래프

해석과 실험값에 대한 추세선을 자연로그의 형태로 분석하였고 적정단면을 선정하여 단가를 산정하였다. 그러나 충돌저항성능에 우수한 재료의 시공사례가 없으므로 재료의 단가만을 산정하여 분석을 하였다. 아래 Table 4-12에는 시공성과 경제성을 고려한 적정단면의 비교를 나타내었다. 현 중앙분리대(150_Φ3.2_S_w150)의 1m 시공 시 재료비가 28,843원이 산정되었다. 단면폭 및 강재량을 증가시킨 적정단면(200_Φ7.6_D_w150)의 재료비는 39,965원이며 현 중앙분리대 대비 단면폭 증가로 인한 콘크리트의 물량증가와 와이어메쉬의 직경증가 및 2면 매입으로 39% 단가상승이 예상된다. 현 중앙분리대의 개선단면이지만 시공의 보편화와 부피손실률이 2.3%로 충돌저항성능에 매우 우수하여 2차비산에 의한 사고를 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 충돌저항성능에 우수한 재료의 적정단면(Hi_SFRC2.5_W/O_wire)은 재료비가 65,326원이 필요할 것으로 산정되었고 현 중앙분리대 대비 126%의 단가상승이 예상된다. 이러한 단가상승은 고강도콘크리트가 일반 콘크리트 대비 200% 이상의 고가 재료이며 강섬유 또한 단가상승에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 개선된 단면은 SB6등급의 충돌저항성능을 보유한 단면이므로, SB5-B등급의 기준 충격도가 270kJ에서 SB6등급의 기준 충격도 420kJ로 55% 상승하는 동안 선정된 단면의 재료비는 각각 39%(200_Φ7.6_D_w150), 126%(Hi_SFRC2.5_W/O_wire) 상승하는 것으로 나타났다.

Table 4-12 변수에 따른 국부충돌해석결과 대표 단면 경제성 비교

구분	현 중앙분리대 (150_φ3.2_S_w150)	개선 단면	
		단면폭 및 강재량증가 (200_φ7.6_D_w150)	섬유보강고강도콘크리트 (Fiber reinforced-high strength concrete) (Hi_SFRC2.5_W/O_wire)
특징			
특징	<ul style="list-style-type: none"> •국내 고속도로건설공사의 표준 형식으로 일반적 시공사례가 많아 초기공사비 및 유지관리 용이 	<ul style="list-style-type: none"> •국내 고속도로의 표준형식의 개선단면으로 시공에 유리하며 현 중앙분리대 대비 강도가 매우 우수 	<ul style="list-style-type: none"> •전단면 3차원 보강으로 파괴에너지가 증대되면서 하중분산능력이 증대되어 충돌 시 2차 비산으로 인한 사고 방지에 우수 •공사기간 단축으로 인한 관리비용이 절감되며 마모저항성 및 충돌저항성능 증가로 인해 시공 하자 발생을 감소
시공성	<ul style="list-style-type: none"> •시공성 우수 •국내 시공사례 多 	<ul style="list-style-type: none"> •시공성 우수 •강도 우수 •비산저감효과 우수 	<ul style="list-style-type: none"> •시공성 우수 •강도 적정 •비산저감효과 우수
경제성	<ul style="list-style-type: none"> •공사비 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> •공사비 보통 	<ul style="list-style-type: none"> •신규 개발로 인한 시공 사례가 없으므로 초기 공사비 상승
재료비	28,843원/m	39,965원/m	65,326원/m
검토의견	<ul style="list-style-type: none"> • 시공성과 강도를 고려하였을 경우 개선단면 중 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete)의 단면이 적합하나 국내 시공사례가 없으므로 초기 공사비가 상승할 것으로 판단됨. • 경제성으로는 현 중앙분리대가 가장 우수하지만 국부충돌에 의한 2차비산 사고피해가 계속해서 일어나고 있음. • 시공성, 경제성을 모두 고려하여 강도를 충족시키며 시공비가 저렴한 개선단면(200_φ7.6_D_w150)이 현 국내여건에 가장 유용할 것으로 판단 됨. 		

제 5 장 결 론

본 연구에서는 기존 중앙분리대의 충돌등급이 SB5-B에서 SB6로 상향될 경우 상향된 등급에 필요한 중앙분리대 적정 단면을 제시하였다. 기존 전체충돌해석 방법으로 중앙분리대와 차량 화물칸 모서리의 국부충돌을 정확하게 모사할 수 없어 추가적으로 국부충돌해석을 수행하였다. 콘크리트 중앙분리대의 단면보강을 위해 강재량 및 단면폭을 증가시키는 방법과 충돌저항성능이 우수한 재료(SFRC, Crushable Concrete, 섬유보강고강도콘크리트(Fiber reinforced-high strength concrete))를 사용하는 방법을 고려하여 다양한 단면에 대한 해석적 평가를 수행하였다. 다만 본 연구에서 제시한 단면의 경우 대부분 전체충돌해석에서 무시할만한 부피손실률이 발생하여 최종 단면선정시에는 국부충돌해석결과를 활용하였다. 최종적으로 적정단면을 제시하고 기존 중앙분리대와 단가를 비교하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 중앙분리대와 차량 충돌시 중앙분리대의 파괴와 차량의 거동을 모사할 수 있는 해석모델을 개발하였으며, 전체충돌해석에서는 차량의 거동, 중앙분리대의 전체적인 손상 등을 고려할 수 있으나 국부적인 충돌에 의한 파괴를 모사하지 못하여 국부충돌해석 모델을 개발하여 기존 모델을 보완하였다.
- 개발된 해석모델은 실제 실물충돌시험과 비교하고 일부 주요 입력변수(key parameters)를 조정하여 최종적으로 유사한 거동을 하는 것을 확인하였다.
- 전체충돌해석결과 모든 중앙분리대 단면에서 차량의 승월, 월담 등이 없으며 전반적인 차량의 운동(rolling, pitching, yawing)이 실제의 충돌거동과 비교적 일치하는 것을 확인하였다.
- 국부 충돌로 인한 콘크리트의 손상을 모사할 수 있는 모델을 개발하였으며 SB6등급 조건으로 충돌이 발생할 경우 7.54ton의 mass가 20.7km/h의 속도로 국부적으로 중앙분리대 상단에 영향을 준 것으로 확인되었다. 이러한 조건을 활용하여 SB6에 해당하는 국부충돌해석 모델을 개발하였다.

- 전체충돌해석결과와 국부충돌해석결과를 함께 고려하였을 경우 실물충돌시험에서 발생한 부피손실률과 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.
- 국부충돌해석에서 기존단면에서 단면폭만 50mm 증대시킨 경우 부피손실률이 11.1% 발생하여 현 중앙분리대의 부피손실률 21.8%와 비교했을 때 부피손실률이 49.1%의 개선효과가 확인되었다.
- 국부충돌해석 결과 단면폭(50mm) 및 강재량을 증가시킨 중앙분리대는 부피손실률이 최대 2.3% 발생하여 현 중앙분리대의 부피손실률(21.8%) 대비 최대 89.4%의 개선효과를 나타냈다.
- SB6 충돌등급에 저항할 수 있도록 개발된 최종 선정 단면(단면폭 및 와이어메쉬 2면사용 단면, 강섬유보강 고강도 콘크리트)은 기존 270kJ(SB5-B)에서 420kJ(SB6)로 충격도가 55% 상승하는 성능개선을 달성했으며 선정된 단면의 재료비는 각각 39% 및 126% 상승하는 것으로 나타났다.

감사의 글

제 자신에 대한 자신감을 찾고 주변의 모든 지인들에 대한 감사함을 깨닫게 해준 기간이었으며 노력 없이 쉽게 얻어지는 성과는 없다는 것을 절실히 깨닫는 과정이었습니다. 준비가 되지 않은 시점에서 석사과정에 입학을 하여 졸업 논문을 완성시키기까지 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사드립니다.

준비가 되지 않은 저를 시작할 수 있도록 밀어주시고 마무리를 짓기까지 끌어주신 존경하는 이재하 지도교수님께 진심을 다해 감사드립니다. 학문적 부족함과 직장생활과 병행하며 수행해야 했던 저를 때로는 따끔한 충고와 진심어린 조언으로 논문 지도해주셔서 마지막까지 올 수 있었습니다. 바쁘신 중에도 시간을 내주시어 세심하게 논문심사를 해주신 경갑수 교수님, 손동우 교수님께 깊이 감사드립니다. 그리고 본인의 연구도 바쁜 와중에 저의 논문 검토에 많은 시간을 할애하여 끝까지 진행할 수 있도록 용기를 주신 김경진 박사과정에게도 감사드립니다.

직장에서 본 과정을 입학하게 배려해주시고 응원해주신 대보건설 부산명지현장의 배성민 소장님, 김수 차장님, 최종현 차장님, 김태훈 차장님께 감사함을 전합니다. 저에게 대학원이란 길을 열어주시고 추천해주신 학교의 선배이자 직장 선배이신 류기홍 대리님께 감사드립니다.

마지막으로 남편을 믿고 묵묵히 옆에서 지속적인 응원을 해준 사랑스런 아내 신지혜와 최고의 보물인 이수빈과 이수호 그리고 항상 자식 걱정으로 마음 편할 날 없으신 아버지, 어머니와 사위를 위해 격려와 위로를 해주시는 장인어른, 장모님께 이 논문을 드립니다.

2019년 08월

이 병 상

참고문헌

국토교통부 (2015), 차량방호 안전시설 실물충돌시험 업무편람, 국토교통부

국토해양부 (2012), 도로안전시설 설치 및 관리지침 차량 방호 안전시설 편

연합뉴스 (2015), “고속도로 중앙분리대 파편에 맞아 운전자 사망”, (<http://www.yo-nhapnews.co.kr/bulletin/2015/05/08/0200000000AKR20150508000800053.HTML?input=1195m>), 2016년 7월 20일 검색, 2015

통계청 (2016), 도로종류별 1당사자 차종별 교통사고, (http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=132&tblId=DT_V_MOTA_044&conn_path=I3), 2017년 4월 21일 검색.

한국도로공사 2015, 고속도로 교통량 통계, 한국도로공사

한국도로공사, 비산저감을 위한 고성능 중앙분리대 개발 최종보고서, 한국도로공사, 2016

ACI Committee 446 (2009), Fracture Toughness Testing of Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, USA, 200

AASHTO (2012), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units, 6th Edition, Washington, D.C.

CEB-FIP Model Code (2010), International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland

Chung, C., Lee, J., Kim, S. and Lee, J. (2011), “Influencing Factors on numerical Simulation of Crash between RC Slab and Soft Projectile”, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 24, No. 6, pp. 591-600

European Committee for Normalization (2012), EN 1317 European Standard for Road Restraint Systems, European Committee for Normalization

Hirsch, T. J. (1978), Analytical evaluation of Texas bridge rails to contain

buses and trucks, Research Report 230-2, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX.

Jeong, Y., Lee, J., Min, G. and Kim, W. (2018), “Optimizing High-Performance Concrete Median Barrier” , 2018 spring convention of Korea Concrete Institute, pp.63-64

Kim, W., Lee, I., Kim, K., Jeong, Y., and Lee, J. (2019), “Evaluation of concrete barriers with novel shock absorbers subjected to impact loading” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol.19, No.3, pp.657-671.

Kim, W., Kim, K. and Lee, J. (2017) “A Comparison Study on Impact Resistance of Concrete Median Barrier with Shock Absorbers depending on Impact Locations” , 2017 spring convention of Korea Concrete Institute, Vol.29, No.1, pp.731-732

Kim, W., Lee, I., Jeong, J. and Zi, G. (2018), “Design Approach for Improving Current Concrete Median Barriers on Highways in South Korea” , *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 32, No. 3, pp.

Lee, J., Lee, I., Jeong, Y., Kim, K. and Kim, W. (2017) “Evaluation of Impact Resistance for Concrete Median Barrier Depending on Vehicle Curb Weight, Concrete Cover Depth and Level of Deterioration” , *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.30, No.4, pp.297-306

Lee, J., Kim, W., Lee, I., Jeong, Y., Ryu, S. and Kim, K. (2017) “Impact Resistance of Overlay Concrete Median Barrier depending on Location of a Rebar and Shear Keys” , 2017 Spring Convention of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection,

Lee, J., Zi, G., Lee, I., Jeong, Y., Kim, K. and Kim, W. (2017), “Numerical Simulation on Concrete Median Barrier for Reducing Concrete Fragment Under Harsh Impact Loading of a 25-ton Truck” , *Journal of Engineering Materials and Technology, ASME*, Vol.139, No.2, pp.02015-1~021015-9

LSTC (2011), “Review of Solid Element Formulations in LS-DYNA” , LS-DYNA Forum, October

LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (2007), LS-DYNA KEYWORD USER’S MANUAL VOLUME I, LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (LSTC), Livermore, California

Lee, J., Zi, G., Kim, W., Lee, I. and Kim, K. (2016), “Evaluation of Impact Resistance for Concrete Median Barrier with Increased Cross Section and Steel Ratio” , 2016 Fall Convention of the Korea Concrete Institute, Korea Concrete Institute, pp.79-80

Lee, J., Kim, W., Lee, I., Kim, K. and Ryu, S. (2017), “A Study on Impact Resistance for Concrete Median Barrier with Shock Absorber” , 2017 Spring Convention of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, pp.61-62

Lee, J., Kim, K., Lee, I. and Kim, W. (2017), “A Comparison Study on Impact Resistance of Concrete Median Barrier depending on Cover Depth” , 2017 Conference of Computational Structural Engineering Institute of Korea, pp.1-2

Lee, J., Kim, W., Lee, I., Kim, K. and Ryu, S. (2017), “A study on Impact Resistance for Concrete Median Barrier with Shock Absorber” , 2017 Spring Convention of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, pp.61-62

Murray, D.Y. (2007), USERS MANUAL FOR LS-DYNA CONCRETE MATERIAL MODEL 159, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, FHWA-HRT-05-062

Murray, D.Y., Abu-Odeh, A. and Bligh, R. (2007), Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, FHWA-HRT-05-063

Scott K. Rosenbaugh, Dean L. Sicking and Ronald K. Faller (2007), Development of a TL-5 Vertical Faced Concrete Median Barrier Incorporating Head Ejection Criteria, MWRSF Research Report No. TRP-03-194-07

Olson, R.M., Post, E.R. and Mcfarland, W.F., (1970), “13 Tentative Service Requirements for Bridge Rail Systems,” NCHRP Report 86, Highway Research Council, Washington, D.C.

Yi, K., Hedrick, K. and Lee, S. (1999), “Estimation of Tire-Road Friction Using Observer Based Identifiers” , *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vehicle System Dynamics*, Vol. 31, No. 4