

트럭 공차중량, 중앙분리대 피복두께 및 열화수준에 따른 중앙분리대 충돌해석모델의 민감도 분석

이 재 하¹ · 이 일 근² · 정 유 석³ · 김 경 진⁴ · 김 우 석^{5*}

¹한국해양대학교 건설공학과, ²한국도로공사 도로교통연구원, ³충남대학교 건설방재연구소,
⁴한국해양대학교 토목환경공학과, ⁵충남대학교 토목공학과

Evaluation of Impact Resistance for Concrete Median Barrier Depending on Vehicle Curb Weight, Concrete Cover Depth and Level of Deterioration

Jaeha Lee¹, Ilkeun Lee², Yoseok Jeong³, Kyeongjin Kim⁴ and WooSeok Kim^{5*}

¹Department of Civil Engineering, Korean Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

²Expressway & Transportation Research Institute, Hwaseong, 18489, Korea

³Research Institute for Construction Disaster Prevention, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

⁴Department of Civil and Environmental Engineering, Korean Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

⁵Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

Abstract

The concrete median barrier used currently in South Korea was developed the impact level of SB5-B(270kJ). However, the impact level of SB6(420kJ) should be considered in many places with the increased accident of heavy vehicles. In order to increase the impact resistance of newly developed concrete median barrier, the computer simulation was conducted before real field test. For the accurate behavior of concrete, the parameter, such as impact vehicle, concrete cover depth and deterioration, was important. In this paper, a parametric study was conducted depending on vehicle curb weight, concrete cover depth and level of deterioration. The impact resistance of concrete median barrier was severely changed depending on vehicle curb weight and concrete cover depth. Furthermore, the impact resistance of concrete median barrier was also decreased due to deterioration of concrete, therefore the repair and rehabilitation should be conducted for damaged concrete depending on deterioration level. Therefore, vehicle curb weight, cover depth of concrete structures and deterioration level of concrete should be carefully considered for conducting analysis of concrete structure to vehicle collision.

Keywords : concrete median barrier, deterioration, vehicle curb weight, impact resistance, concrete cover depth

1. 서 론

국내 최초의 중앙분리대는 1970년 경부고속도로에 사용된 연석 토사 중앙분리대로 상행선과 하행선 구분을 위해 활용되었다. 그러나 이 토사 중앙분리대의 경우 차량 이탈방지 성능이 없어 대형사고로 이어질 수 있었으며 유지관리가 어려운 점들이 있어 1980년 남해고속도로에 최초로 높이 810mm의 방현망이 설치된 콘크리트 강성방호벽이 사용되었다. 그러나 방현망이

2차 사고를 유발하는 등의 이유로 SB5등급의 높이가 상향된 1270mm 콘크리트 중앙분리대(SB5 등급)가 개발되어 사용되었다(Fig. 1(a)). 이후 최근 도로교설계기준(2012)의 설계법 변경과 중 소형 차량의 탑승자 보호성능을 개선한 SB5-B등급(270kJ)의 중앙분리대(Fig. 1(b))가 2015년부터 국내에 고속도로에 적용되고 있는 중이다.

한편 중앙분리대의 2009년부터 2015년 5월까지의 충돌사고 사례자료(한국도로공사, 2015)를 분석해 본 결과 총 290건의

* Corresponding author:

Tel: +82-42-821-6584; E-mail: wooseok@cnu.ac.kr

Received June 19 2017; Revised July 26 2017;

Accepted August 2 2017

©2017 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.

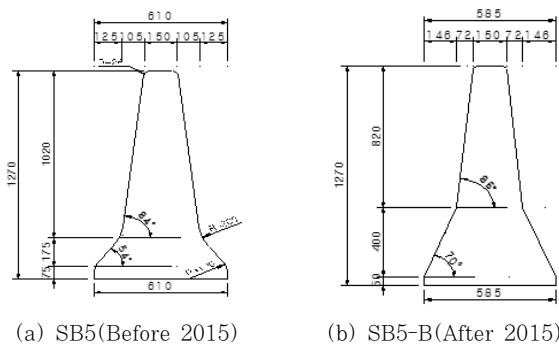


Fig. 1 Improvement of CMB design in Korea

사고가 발생하였는데 이중 승용차나 승합차는 전체 비율에 28.6%이며 대부분 트레일러나 화물차의 사고가 주를 이루었다. 이와 함께 국내 고속도로 차량의 통행량 증가 추이(한국도로공사, 2015)를 보면 2010년에 중차량 통행량이 125,610대에서 2014년 149,226대로 꾸준히 증가함을 확인할 수 있다(Fig. 2). 이처럼 중차량 통행량의 증가는 중앙분리대에 발생하는 충돌사고 확률이 높아지고 있음을 보여주는 객관적인 지표가 될 수 있다. 이러한 중차량 통행량의 꾸준한 증가에 사고확률이 높아지면 고속도로에서 발생하는 충돌사고로 인한 파편에 의하여 대항차로의 사고확률 또한 증가된다고 볼 수 있다. 이러한 2차 사고를 저감하기 위해서는 과거 시점에 제시된 중앙분리대의 충돌등급을 현 교통량 수준과 도로환경의 개선 등을 반영한 충돌저항 등급으로 상향할 필요가 있을 것으로 사료된다. 따라서 현 중앙분리대 충돌등급인 SB5-B등급(270kJ)에서 한 단계 상향시킨 SB6등급(420kJ)의 중앙분리대를 개발하기 위한 충돌해석 모델을 개발하였다. 과거 추락방지용 교량용 차량용 방호 울타리 개발 등의 연구(Kim *et al.*, 2011)가 수행되어 충돌저항성능에 대한 연구가 진행된 사례는 있으나 주로 복합소재 또는 강재에 대한 연구가 주류를 이루고 있으며 SB6 충돌등급에 저항할 수 있는 콘크리트 중앙분리대의 연구는 지금까지 미미했던 것으로 확인된다. 따라서 본 연구결과가 추후 콘크리트 중앙분리대의 설계 등을 수행할 때에 중요한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

먼저 모델을 개발하기 위한 다양한 변수 연구를 수행하여 해석결과에 민감한 영향을 주는 변수를 확인하기 위해 본 연구를 수행하였다.

개발된 모델에 대한 다양한 변수값과 해석결과와의 차이를 분석하여 최종적으로 해석결과에 민감한 영향을 주는 몇 가지 주요변수(key parameters)를 제안하였다. 예를 들어 콘크리트의 압축강도의 경우 부피손실율에 기여하는 정도가 미약한 것으로 확인되었으나 내부 매입강재(와이어메쉬)의 양은 중앙분리대의 충격저항성능(부피손실율 감소)에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2017). 그러나 이러한 변수의

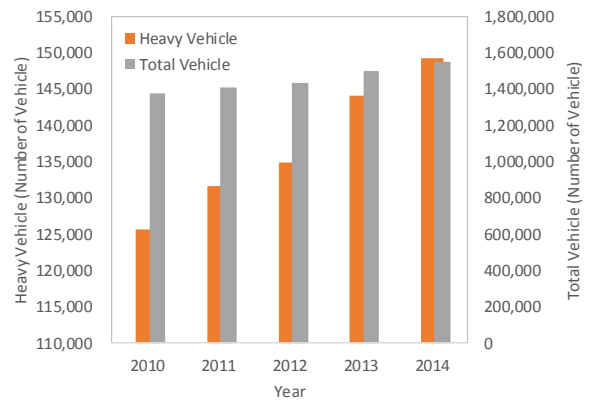


Fig. 2 Traffic volume trends from 2010 to 2014

영향은 설계자가 쉽게 예상할 수 있는 내용이나 본 연구에서 제시하는 공차중량 및 피복두께의 영향은 주요변수로서 인식하기 쉽지 않은 것이 사실이다.

충돌해석 변수연구 중 중앙분리대 충돌저항 성능 결과에 민감한 영향을 주는 것으로 확인된 주요변수는 트럭 차량의 공차중량 비율과 콘크리트 피복두께이다. 또한 2015년 이전까지 사용되어 온 국내용 중앙분리대 중 설치비용이 가장 높은 중앙분리대(SB5 등급, Fig. 1(b)) 충돌해석 모델을 SB6 충돌등급 단면과 동일한 방법으로 개발하여 단면열화에 따른 충돌저항성능 저감도 예측하여 열화에 따른 중앙분리대의 성능저하가 높음을 해석적으로 확인하였다. 이 결과는 추후 중앙분리대의 교체시점을 예측하는데 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 단면 설계 및 모델 개발

이 장에서는 SB5-B등급 중앙분리대를 SB6등급으로 향상시키기 위한 단면 설계 및 충돌저항성능/파편발생 정도를 유추할 수 있는 해석모델을 상용해석프로그램 LS-DYNA를 이용하여 개발한 과정을 소개하고자 한다.

2.1 단면 설계

SB6 충돌등급에 저항할 수 있는 중앙분리대의 단면을 설계하기 위해서는 먼저 중앙분리대의 형상(높이, 격인점의 위치 등)과 내부 보강재와 배치 등을 설계하여야 하며 내구성 설계를 위한 피복두께 등이 고려된다. 본 연구에서 사용될 SB6 등급 단면 형상의 경우 SB5-B 충돌등급에 사용되었던 중앙분리대의 형상을 그대로 활용하였다. 이는 SB5-B 단면이 충돌저항성능뿐만이 아닌 소형차 충돌시 운전자 보호성능을 만족시킬 수 있도록 이미 개발된 단면이므로 단면의 형상을 수정하는

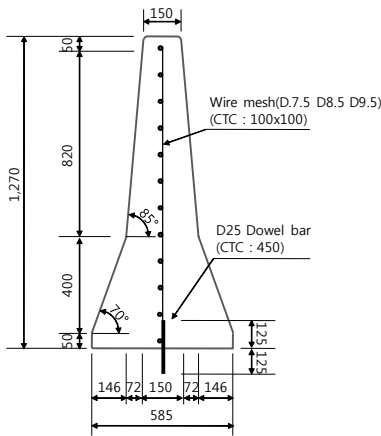


Fig. 3 Cross section design of concrete median barrier

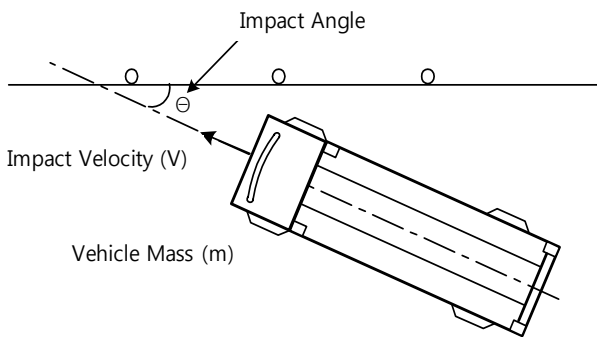


Fig. 4 Parameters for determining Impact severity (MOLIT 2015)

것은 본 과업에 적합하지 않다고 판단하였다. 따라서 단면 변화 없이 상향된 충돌등급에 저항하기 위해서는 기존 내부 강재(와이어메쉬 D3.2, 간격: 150mm) 내부 강재를 보강하는 방법(7.5mm, 8.5mm, 9.5mm)으로 설계를 수행하였다. 국내 SB5-B 중앙분리대의 경우 와이어메쉬(D3.2)가 내부 강재로 활용된다. 메쉬의 간격은 150mm로 수직 및 수평방향 모두 동일하다. 또한 철근과는 다르게 수직철근과 수평철근이 만나는 지점은 용접처리되어 있다.

충격도(impact severity)은 Fig. 4와 같은 상태에서 차량 각도에 따른 중앙분리대 방향 운동에너지로 결정되는데 충돌 등급 SB5-B는 270kJ이며 SB6는 420kJ의 운동에너지에 해당된다. SB5-B의 충돌조건은 14톤의 차량이 15도 각으로 85km/h의 속도로 충돌하였을 경우에 해당되는 등급이며 SB6 등급은 차량중량이 25톤으로 상향된 차량의 총중량으로 15도 각으로 80 km/h의 속도로 충돌하는 조건을 뜻한다.

이처럼 운동에너지로 비교해 보았을 때 SB5-B와 한단계 상향 등급인 SB6의 충돌등급은 차량의 중량(25톤) 증가로 인해 약 55%이상 증가한다. 이처럼 증가된 운동에너지 즉 충격도에 저항하기 위해 150mm 간격을 100mm로 조밀하게 수정하고 3.2mm 지름의 와이어 메쉬를 증대시킴으로써 중앙

분리대의 충돌저항 성능을 평가하였다. 메쉬망의 간격의 경우 조밀할수록 파편이 저감되고 충돌성능이 우수할 것으로 예상되나 기계식 슬립폼 방식으로 시공되는 국내 중앙분리대의 시공방법상 조밀한 메쉬는 충분한 다짐이 보장되지 못하는 조건에서는 분리막으로 단면에 작용할 수 있어 시공전문가의 의견을 참고하여 본 변수연구에서는 100mm를 최소 제한간격으로 고려하였다.

2.2 충돌해석모델 개발

충돌해석모델을 개발하기 위하여 먼저 충돌해석연구에 많이 사용되고 있는 LS-DYNA를 활용하였다. LS-DYNA에는 다양한 콘크리트에 적용할 수 있는 재료모델이 있는데 콘크리트의 재료모델에는 차량방호시설과 차량간 충돌해석을 목적으로 미국 FHWA에서 개발한 Continuous Surface Cap Model(CSCM) 콘크리트모델을 사용하였다.

CSCM(Fig. 5)은 압축조건에서 Cap의 형태로 한계항복면이 줄어들도록 하여 콘크리트 내부에 존재하는 공극이 압축되는 거동까지 표현하는 정밀한 재료모델이다. 또한 한계항복면 설정에 있어 다음과 같은 수식을 이용한다.

$$F_m(I_1) = a_1 - a_3 \exp^{-a_2 I_1} + a_4 I_1 \quad (1)$$

$F_m(I_1)$: 응력불변량 I_1 최대항복면

a_1, a_2, a_3, a_4 : 계수

I_1 : 응력불변량(정수응력)

CSCM 재료모델을 사용할 경우 요소에서 손상이 최대로 발생하고 소성변형률이 일정한 값(erode)에 도달할 때 요소를 제거(erosion)하여 해석을 수행할 수 있는 기능을 활용할 수 있다. 중앙분리대 해석 시 요소의 제거로 인하여 파편의 비산 정도를 확인할 수 있으며 또한 중앙분리대의 충돌저항성을 제거된 요소의 총량으로 가늠해 볼 수 있어 중앙분리대의 충돌 해석에 사용되는 콘크리트 재료모델로 CSCM이 적합하다.

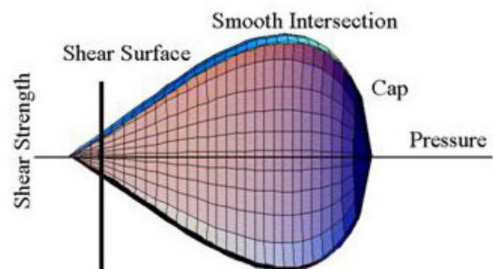


Fig. 5 Yield surface of continuous surface cap model (CSCM)

또한 동적증가계수의 영향이 해석의 정확도에 영향을 주는데 인장과 압축에 특화된 변형률 식을 사용하여 해석의 정밀도를 높인 점도 CSCM의 장점이라고 할 수 있다(LSTC, 2007).

개발된 해석모델을 이용하여 중앙분리대의 충격저항성능을 평가해 본 결과 재료모델의 입력변수로 Erode와 동적증가계수의 영향을 고려할 수 있게 해주는 repow에 의해 매우 민감한 것으로 확인되었다. 또한 파괴에너지값에도 그 영향이 큰 것으로 확인된다. 파괴에너지의 경우 CEB-FIP(1990, 2010) 등의 산정기준식 (2)이 있어 이를 활용할 수 있다.

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

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (3)$$

f_{dm} : 콘크리트 예측 인장강도(MPa)

f_{ck} : 콘크리트 압축강도(MPa)

G_F : 콘크리트 예측파괴에너지(N/m)

f_{cm} : 콘크리트 평균실험압축강도(MPa)

CSCM에서 파괴에너지의 산정은 CEB-FIP(1990)에서 제시하는 파괴에너지 추정식을 이용하고 있다. 그러나 이는 개정된 CEB-FIP(2010)에서 제시하는 파괴에너지식과 비교해서 그 값을 약 50% 정도로 과소평가하는 식이다. 따라서 Fig. 6과 같이 Bazant 등(2002)의 연구에서 제시한 식을 추가하여 다양한 파괴에너지 추정식에 따른 변수연구를 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 변수해석 결과 CEB-FIP(1990)의 파괴에너지 산정값을 적용한 중앙분리대의 부피손실률은 222.3% 발생하여 CEB-FIP(2010)(125.5%)과 Bazant 등(2002)(118.3%) 산정식 대비 1.77배 1.88배 높은 부피손실량을 보인다. 본 연구에서는 설계시 콘크리트의

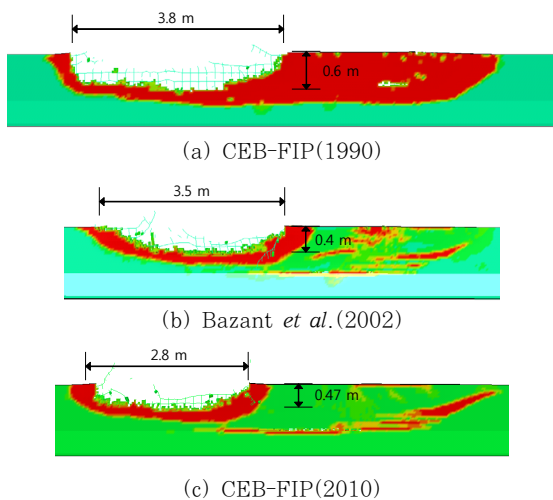


Fig. 6 Damaged area of CMB after collision depending on equations used for fracture energy

파괴에너지를 유추하기 위하여 가장 높은 신뢰성을 가진다고 판단되는 CEB-FIP(2010)의 파괴에너지 추정식을 적용하였다.

그러나 Erode와 repow의 적정 값을 산정하기 위한 이론적 배경은 있지 않으므로 다양한 변수해석(76개의 변수조합)을 수행하고 이를 최근 2번의 충돌실험 결과와 비교하여 오차율을 최소화한 가장 적절한 재료모델 변수를 선정하였다. 2번의 충돌시험은 첫 번째가 SB5-B등급의 중앙분리대 충돌시험(부피손실율: 7.0%)이며 2번째는 SB5-B등급에 각도를 5도 상향한 충돌각 20도의 SB5-B(20A) 실험조건(부피손실율: 2.7%)에서 설계된 단면에 대한 충돌실험 결과이다. 여기서 부피손실율은 중앙분리대 1.2m 길이의 부피를 100%로 보고 손실된 부피를 %로 나타낸 것이다. 상세한 충돌실험 내용은 도로공사 보고서 : 비산저감을 위한 고성능 중앙분리대 개발(2016) 및 Lee 등(2017)에 제시되어 있다.

내부 매입 강재 및 다월바에 사용된 재료모델은 Elastoplastic 거동과 Strain-rate효과를 모사할 수 있는 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY를 사용하였다. 이 재료모델의 주요 변수는 Chung 등(2011)의 연구를 바탕으로 1.05E+7과 8.3을 D와 p의 값으로 사용하였다. 수직보강근과 수평보강근은 용접이 되어 있으므로 절점을 공유하도록 함으로써 용접 효과를 발휘하도록 하였다. 용접 유무에 따른 해석결과의 차이는 Lee 등(2017)의 연구에서 확인할 수 있으며 해석결과 용접효과가 중앙분리대 충돌저항성능을 개선시키는 것으로 확인되었다. 본 연구를 위해 최종 선정된 재료모델 변수는 Table 1과 같다.

콘크리트 내 보요소(beam element)로 구성되어 있는 보강근(와이어메쉬)의 매입은 Lagrange in Solid 옵션을 사용하였다. 파트와 파트간 접촉(contact)에는 접촉면의 주종 관계를 미리 선정하기 어려우므로 충돌면을 자동으로 인식하여 Penalty 접촉알고리즘 기반으로 하중을 전달하는 AUTO

Table 1 Selected parameter and results

Parameter			
	Field test	Numerical analysis	
Erode		1.2	
Repow		3.0	
B (compression shape softening parameter)		10	
Fracture energy equation	-	CEB-FIP (2010)	
Hourglass Control		Flanagan-Belytschko stiffness form	
Truck-CMB friction coefficients (dynamic/static)		0.08 / 0.05	
Results			
SB5-B	Volume loss(%)	7.0	8.3
Hi-CMB	Volume loss(%)	2.7	0.5

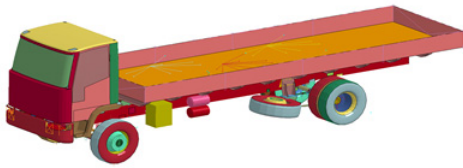


Fig. 7 Selected truck model from NCAC

MATIC_SINGLE_SURFACE를 사용하였다. 동적마찰계수와 정적마찰계수는 Chung 등(2011)의 연구를 참고로 하여 각각 0.08과 0.05를 사용하였다. 차량은 National Crash Analysis Center(NCAC)에서 제공하는 16톤 트럭(Fig. 7)을 활용하였다. 16톤 트럭은 32,907개 요소(element)와 160개 파트가 각각 고유의 질량과 형상으로 되어 있는 등 차량을 정밀하게 표현하여 충돌하중 산정에 신뢰성을 높인 것으로 판단된다.

3. 해석 결과

이 장에서는 전술한 변수 조합에 의한 모델의 부피손실을 예측 결과에 민감한 영향을 주는 것으로 확인된 공차중량, 콘크리트 피복두께에 대해서 분석하였다. 이러한 변수의 영향은 주요변수로서 인식하기 쉽지 않은 것이 사실이다. 예를 들어 차량의 총중량이 동일할 경우 해석결과의 차이가 없을 것으로 예상되지만 차량의 화물무게와 공차중량의 비율이 변할 경우 중앙분리대 부피손실율에 미치는 영향이 높음을 확인하였다. 내구성을 위하여 일정한 피복두께도 시공시 유지가 되어야 하나 두꺼운 피복두께일수록 차량의 충돌시 부피손실율을 높여 2차 사고의 위험을 높일 수 있음을 확인하였다. 추가적으로 열화수준(깊이와 높이)에 따른 중앙분리대의 충돌저항성능(부피손실율) 변화도 유의미함을 확인하고 이에 대한 상세한 분석 내용을 다음과 같이 제시하였다.

3.1 공차중량에 따른 중앙분리대의 비산저감성능

16톤 트럭모델에 설계되어 있는 공차중량(curb weight)은 7.5톤이며 화물 무게는 8.5톤이다. SB6 등급의 중앙분리대를 개발하기 위해서는 25톤 트럭이 충돌하는 외력 조건(80km/h, 15도 충돌각)이 필요하므로 1차적으로 화물 무게를 8.5톤에서 17.5톤으로 상향 조정하였다. 그러나 실제 충돌시험에 사용되는 국내 차량의 총 중량(gross vehicle weight) 25톤에 해당될 수 있는 트럭의 실제 중량을 자동차 등록증 등을 통해 검토해보면 최대 적재량 19톤, 총중량 35.3톤인 공차중량 16.3톤의 차량과 최대적재량 10톤 조건에서 총중량이 21.7톤이 될 수 있는 공차중량이 11.7톤이 되는 차량 등이 SB6 등급에 활용될 수 있는 차량으로 검토가 된다. 이러한 차량의 공차중량은

차량마다 1톤 내외로 차이가 있을 수 있다. 이처럼 실제 실험에 사용되는 차량의 공차중량과 개발된 충돌차량 모델의 차이를 최소화하기 위하여 모델 공차중량을 실제 차량의 공차중량인 16.3톤으로 수정하는 등 트럭 공차중량의 수정에 따른 충돌저항성능 결과의 민감도(차이)를 분석하였다. Fig. 7과 같이 공차중량의 무게가 7.5톤인 경우(7.5-Model) 적재함에 매스 요소로 구성되어 있는 화물의 무게가 17.5톤이며 공차중량 무게가 16.3톤인 경우(16.3-Model) 적재함 매스요소의 화물 무게는 8.7톤으로 수정을 하였다. 따라서 차량의 총중량은 25톤으로 동일하다. 공차중량을 증가시키기 위해서는 재료의 밀도(density)값을 수정하였다.

충돌시물레이션에 앞서 먼저 공차중량에 따라 중앙분리대에 전달되는 순간적인 하중의 증감을 검토하기 위해 차량을 강체평면(rigid-wall)에 충돌하여 발생하는 하중시간이력곡선을 확인하였다(7.5-Model, 16.3-Model). 또한 공차중량을 증가시킬 경우 순간적인 차량하중의 변화를 보수적으로 보기 위하여 차량 메인 프레임의 밀도만 수정함으로써 공차중량을 16.3톤(16.3 Model-F)에 맞춘 차량 모델에 대해서도 강체해석을 수행하여 해석결과를 7.5-Model 및 16.3-Model과 비교하였다. 해석결과는 과거 Olson(1970)이 제시한 식과 충돌하중 식과도 함께 비교하였다. Olson(1970)식은 국내외에서 방호울타리의 충돌하중을 예측하기 위하여 가장 많이 사용되어온 식으로서 방호벽의 변위를 가정하여 횡방향 충돌하중을 계산하는 식으로 아래와 같다.

$$avgG_{lat} = \frac{V_1^2 \sin^2 \theta}{2gS_{lat}} = \frac{V_1^2 \sin^2 \theta}{2g[A \sin \theta - 0.5B(1 - \cos \theta) + D]} \quad (4)$$

$$avgF_{lat} = (avgG_{lat}) W \quad (5)$$

$$\max F_{lat} = \frac{\pi}{2} (avgF_{lat}) \quad (6)$$

여기서,

W : 차량의 무게

B : 차량 폭

D : 방호벽의 횡방향 변위

S_{lat} : 횡방향 이동거리

g : 중력가속도

$avgG_{lat}$: 평균 횡방향 가속도

θ : 충돌각

V_1 : 충돌전 차량 속도

$avgF_{lat}$: 평균 횡방향 충돌하중

$\max F_{lat}$: 최대 횡방향 충돌하중

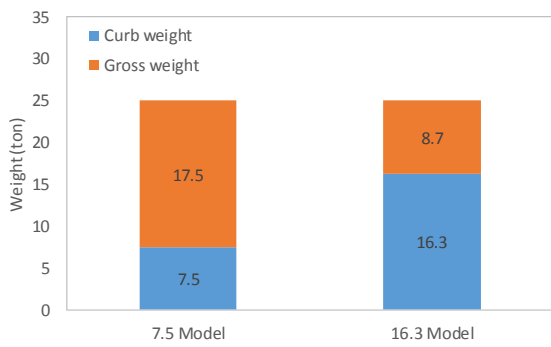


Fig. 8 Curb weight and gross weight of truck

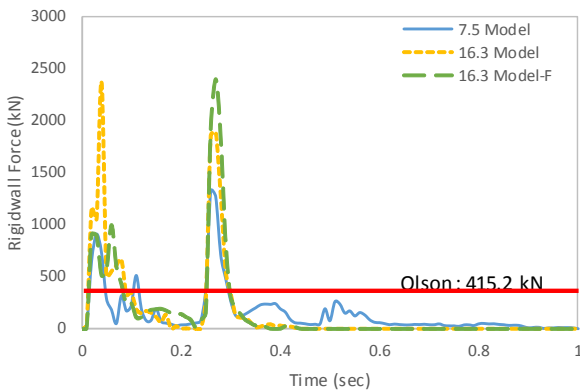


Fig. 9 Load-time history graph depending on vehicle curb weight

Fig. 9에서는 각 모델별 하중시간이력곡선을 나타냈다. 공차중량이 최저인 7.5톤 차량에서 낮은 충돌하중을 발생시켰으며 순간적인 최대값(peak value)도 타 모델에 비해 적게 발생하는 것으로 확인된다. 이는 화물요소로 구현되어 있는 요소(mass elements)의 질량이 커지면서 충돌 후 질량요소가 연결되어 있는 강판(셀요소로 구성된 집간 바닥면)에 과도한 소성 변형이 발생하면서 질량요소에 의한 충돌하중이 중앙분리대에 충분히 전달되지 않았던 것으로 확인된다. 공차중량을 실제 중량수준으로 조정한 모델(16.3 Model)과 프레임에 중량이 집중된 모델(16.3 Model-F)의 경우 최대 하중은 유사하게 발생하나 16.3 Model-F는 2차 충돌(화물충돌) 시점에서 최대 하중(2391kN)이 발생하고 16.3 Model은 1차 충돌에서 최대 하중(2371kN)이 발생한다. 이는 공차중량이 7.5톤에서 16.3톤으로 217% 상향조정되었을 때 최대하중이 182% 또는 181% 증가하였음을 보이는 해석결과이다. 이러한 결과를 종합해 보면 차량모델의 총중량(gross weight)은 동일하더라도 내부 파트의 질량분포가 상이할 경우 최대하중의 증감은 유의미한 수준이라는 결론에 도달할 수 있으며 따라서 고속도로 방호울타리의 충돌해석을 수행할 경우 차량모델의 차이가 최종결론에 중요한 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

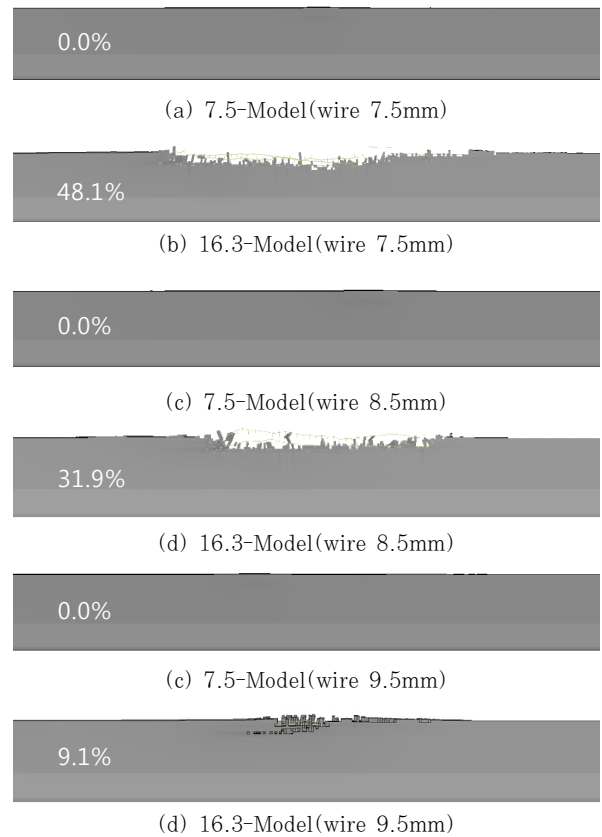


Fig. 10 CMB damage depending on various truck weight

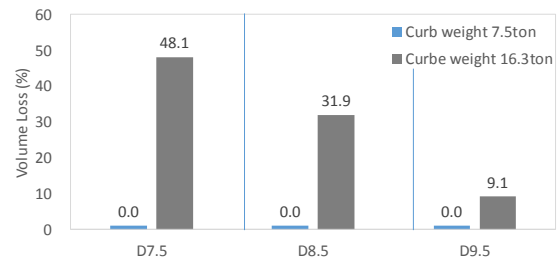


Fig. 11 Volume loss of concrete median barrier depending on wire-mesh

강체벽(rigid-wall)에 충돌해석을 수행하여 공차중량에 따른 외력이 상이함을 확인한 후 SB6 충돌등급 조건을 모사하여 트럭과 중앙분리대의 직접충돌해석을 수행하였으며 Fig. 10은 해석결과 확인된 중앙분리대의 파손된 형상을 비교한 그림이다. 중앙분리대는 최소 7.5mm 지름에서 최대 9.5mm 지름의 철근망(wire-mesh)을 고려하였으며 차량은 7.5-Model, 16.3-Model을 사용하였다. 또한 공차중량의 영향을 비교하기 위해 Fig. 11에 부피손실율(%)을 막대그래프로 비교하여 나타냈다. 동일한 충돌 조건(SB6)에서도 차량의 공차중량에 따라 중앙분리대의 파괴 유무가 상이한 것을 확인할 수 있으며 내부 와이어메쉬를 7.5mm 시공할 경우 공차중량 16.3톤에서는 1.2m 길이의 약 50%에 해당하는 0.6m 길이의 중앙분리

대가 완전 파손되는 것으로 나타났으나 공차중량 7.5-Model의 경우 파괴가 발생하지 않았다. 이러한 해석결과는 충돌체의 질량분포 예측의 중요성을 보여준다고 할 수 있다. 또한 차량의 질량분포는 차량의 형상과 관련이 있을 것으로 판단되며 차량의 중앙분리대의 충돌해석을 수행할 경우 이러한 변수(질량분포, 차량형상)를 고려하여 적절한 충돌체를 선정하는 것이 해석 결과의 정확도와 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 피복두께에 따른 중앙분리대의 비산저감성능

국내 중앙분리대 시공에 사용되는 슬립폼 공법은 강제배근 등 정밀한 작업을 위해서는 긴 시공기간과 많은 인력이 필요하다. 따라서 내부 보강재로 사용되는 와이어메쉬의 정확한 위치를 유지하면서 타설이 이루어지는 것이 매우 중요하다. 예를 들어 와이어메쉬를 거칠할 경우 지지대 사이의 고정되지 않은 와이어메쉬는 처짐이 발생할 수 있으며, 이에 따른 상부 콘크리트 피복 두께가 설계치 보다 두꺼워 질 수 있을 것이다. Oh 등 (2013)의 연구에 따르면 와이어메쉬를 상부에 배근하는 것이 충돌에 의한 중앙분리대의 손상부위를 감소시키는 것으로 나타났다. 내구성 측면에서는 두꺼운 피복이 문제될 것이 없으나 중앙분리대의 비산저감성능(부피손실율)은 피복두께가 증가함에 따라 감소할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 중앙분리대 상단의 피복두께에 따른 변수연구를 수행하여 비산저감성능을 확인하였다. 피복두께는 최적 시공이 이루어졌다고 가정할 경우인 기존 5cm를 최소두께로 하여 시공오차에 따른 최대 20cm에 대해 검토하였다. 중앙분리대 모델과 차량모델에 대해서는 전술한 중앙분리대의 동일한 재료모델과 변수 그리고 차량(공차중량 7.5-Model)을 이용하였다. 차량의 공차중량은 7.5톤(7.5-Model)으로 앞서 수행한 25톤 차량에 비해 상대적으로 중량(14톤)이 작아 질량요소의 영향이 상대적으로 작아 공차중량에 따른 해석결과 차이에 큰 영향이 없을 것으로 판단하고 공차중량 7.5-Model을 이용하였다. 충돌조건은 SB5-B 등급인 차량 14톤, 충돌각 15°, 충돌속도 85 km/h로 수행하였다.

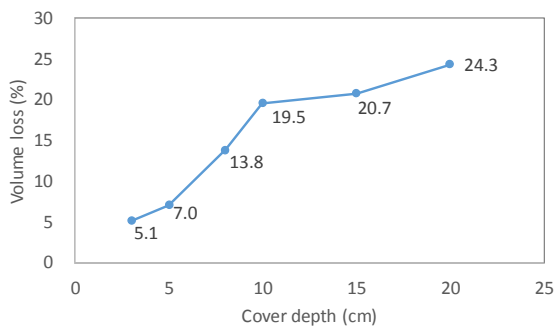


Fig. 12 Volume loss of concrete median barrier depending on cover depth

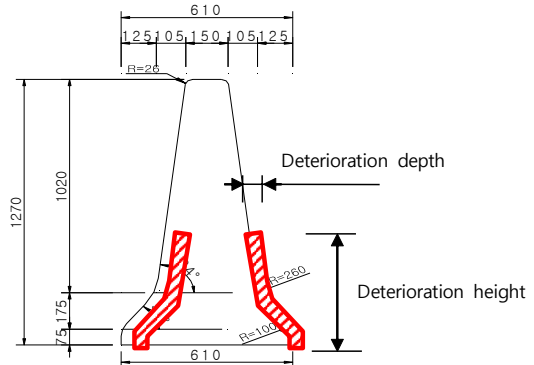
피복두께에 따른 중앙분리대의 파손량을 Fig. 12에 나타냈다. 피복두께가 증가할수록 중앙분리대의 파손량도 증가하는 것을 확인된다. 피복두께가 3cm에서 10cm로 증가하는 동안 부피손실량은 3.97배 증가하고 10cm에서 20cm까지 증가하는 동안 부피손실량이 1.2배 증가하여 피복두께가 10cm를 초과한다면 큰 폭의 충돌저항성능의 감소는 없는 것으로 판단된다. 반면 피복두께 10cm 이내에서는 피복두께에 따른 파손량이 민감한 것으로 확인된다. 추후 중앙분리대의 충돌저항성능 개선을 위해 중앙분리대 Slip foam 시공시 와이어메쉬의 정확한 위치 유지를 위한 시공품질관리가 중요할 것으로 판단된다.

3.3 단면열화에 따른 중앙분리대의 비산저감성능

중앙분리대는 폭설로 인한 제설제 등의 영향을 많이 받을 것으로 판단된다. 최근 잦은 폭설 등으로 제설제의 사용량이 증가하고 있는 추세이므로 중앙분리대에서는 제설제의 영향으로 염해에 의한 콘크리트의 자체열화와 콘크리트 중 철근 부식에 의한 열화가 발생할 것으로 예상된다. 한국도로공사 도로교통 연구원의 “제설환경 교량 구조물의 염해손상 사례(Kim et al., 2015)”자료에 따르면 교면 포장, 신축이음, 교량받침 및 하부 구조의 순으로 염해손상이 발생하고 있으며, 차량이 통과하면서 중앙분리대 측면으로 제설제를 전달하기 때문에 고속도로



(a) Deteriorated concrete median barrier



(b) Deterioration depth and height

Fig. 13 Picture of deteriorated concrete median barrier

중앙분리대는 교면 포장과 동일한 수준의 염해 피해를 받고 있을 것으로 예상된다. Fig. 13(a)과 같이 서해안 고속도로 일부 구간(184-210k)에서는 망상형 균열이 발생하였으며, 이는 알칼리골재반응에 의해 발생한 것으로 확인되었다(도로공사자료, 기술자문 검토서 2016.11). 따라서 이와 같이 환경적 요인에 따른 열화로 인한 단면손실이 발생한 경우, 중앙분리대의 충돌 저항성능이 저감될 것으로 예상되므로 이에 대한 구조성능의 변화를 검토하였다. 검토 시, 현 중앙분리대의 열화 높이(400mm, 600mm, 800mm) 및 깊이(30mm, 60mm, 100mm)를 Fig. 13(b)와 같이 고려하였으며, 열화에 의한 손상은 60%로 가정하였다. SB5(충돌각 15°, 차량 14톤, 충돌속도 80km/h, 230kJ)조건으로 해석을 수행하여 열화에 따른 충돌 후 충돌 저항성능이 감소되는 것을 확인하였다. 차량모델은 전술한 바와 같이 전체 중량이 상대적으로 작아 공차 중량 증가에 따른 콘크리트 부피손실량이 민감하지 않을 것으로 판단하고 공차 중량 7.5-Model을 이용하였다.

Fig. 14의 열화 깊이에 따른 부피손실량을 보면 열화가 없는 단면의 경우 부피손실량은 0.5%인 반면에 열화에 의한 단면 손실이 발생할 경우 최대 18.9%(깊이 10cm, 높이 80cm)의 단면손실이 발생하여 최대 36배 이상 부피손실량이 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 15는 가장 열화가 작게 발생한 경우(깊이 3cm, 높이 40cm)와 가장 열화가 많이 발생한 중앙분리대(열화깊이 10cm, 열화 높이: 80cm)의 파손 형태를 비교하였다. 그러나 이러한 결과는 전술한 바와 같이 열화가 발생한 콘크리트의 강도를 40%로 가정한 경우이므로 실제 중앙분리대의 비산저감성능을 예측하기 위한 참고자료일 뿐 실제 보유성능으로 보기는 어렵다. 설계강도의 40% 수준이라고 가정하였을 경우이며 실제 열화도가 이보다 낮은 단면에서는 더 높은 구조성능이 예상된다. 따라서 본 해석(열화에 따른 성능감소 예측)의 검증 을 위해서는 실제 열화중앙분리대의 충돌실험 및 재료실험을 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다. 열화된 콘크리트의 압축강도에 대해 본 연구에서는 60%로 감소하여 잔여강도 40%로 가정하였으나 기존 연구에서 ASR에 의한 팽창 0.62%에 대해

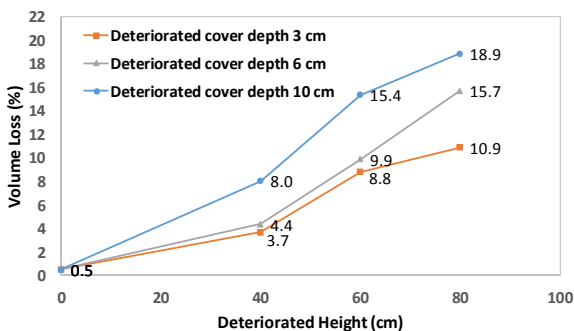
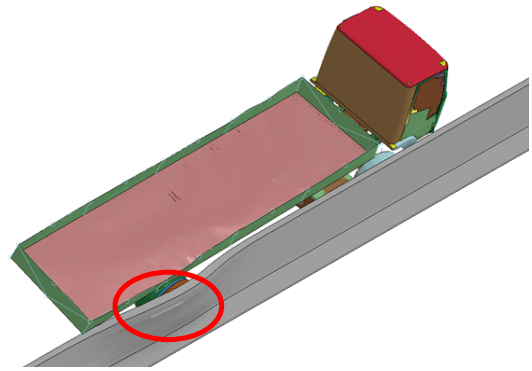
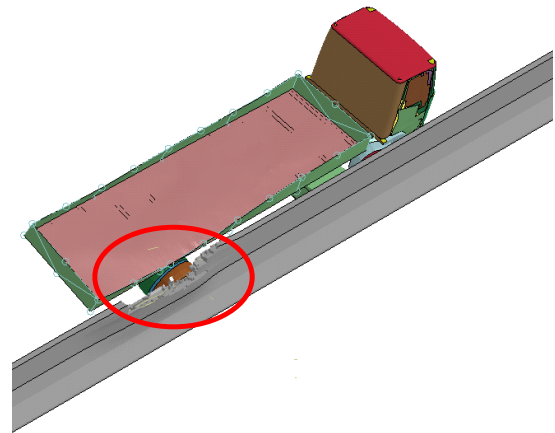


Fig. 14 Volume loss depending on deteriorated depth and height



(a) Condition: depth 3cm / height 40cm



(b) Condition: depth 10cm / height 80cm

Fig. 15 Volume loss of CMB depending on different level of deterioration

압축강도가 1년재령의 콘크리트의 경우 40% 감소하여 잔여 강도는 60%가 된다는 결과(Swamy and Al-Asali 1988)가 있어 본 연구에서 가정한 열화도는 다소 과한 것으로 볼 수 있다. 따라서 추후 실험을 통한 해석모델의 검증과 열화 콘크리트의 물성치를 검토하여 단면열화가 발생한 중앙분리대에 성능 보강여부가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 트럭의 공차중량과 중앙분리대의 피복두께 및 단면열화에 따른 중앙분리대의 충돌저항성능을 비교분석 하였으며 결론은 다음과 같다.

- 파괴에너지의 차이에 따라 파손되는 부피손실량의 차이가 현저함이 확인되어 정확한 파괴에너지 예측이 필요할 것으로 보이며 LS-DYNA CSCM모델의 파괴에너지 추정식은 CEB-FIP(2010) 등의 최근의 연구결과를 반영한 추정식으로 개선이 필요할 것으로 보인다.
- 동일한 충돌체(차량)의 중량(gross weight)에서도 내부

파트의 질량분포에 따라 충돌 시 발생하는 최대하중이 민감하게 변할 수 있음을 확인하였다. 따라서 고속도로 방호울타리의 충돌해석 수행시 차량 모델의 질량분포를 최대한 해석모델에 반영하여 충돌저항성능 예측을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

- 피복두께에 따른 중앙분리대의 충돌저항성능 비교 시 피복 두께 10cm 이내에서 피복두께에 따른 중앙분리대의 충돌 저항성능 결과에 민감한 것으로 확인되었다. 피복두께 10cm 이상에서는 비교적 피복두께에 따른 충돌저항성능 감소가 정도가 미미하다. 따라서 중앙분리대의 충돌저항성능 개선을 위해 Slip foam 방법을 통한 중앙분리대 시공시 와이어메쉬의 정확한 위치 유지를 위한 시공품질 관리가 중요할 것으로 판단된다.
- 중앙분리대 콘크리트 단면 열화가 증가함에 따라 충돌에 의한 콘크리트의 부피손실량의 증가가 유의미한 수준임이 확인되었다. 다만 본 연구에서는 열화콘크리트의 강도를 가정하였으므로 열화단면의 강도를 예측하기 위한 재료 시험 및 열화모델 검증을 위한 충돌시험을 추후 수행하여 신뢰성 있는 중앙분리대 보강시점을 제시할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2017년 한국도로공사 도로교통연구원(과제명: 콘크리트 중앙분리대(SB6등급) 최적단면 개발)과 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No.2015R1C1A1A02036617)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Bazant, Z.P., Becq-Giraudon, E.** (2002) Statistical Prediction of Fracture Parameters of Concrete and Implications for Choice of Testing Standard, *Cement & Concr. Res.*, 32, pp.529~556.
- CEB-FIP Model Code** (1990) International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland.
- CEB-FIP Model Code** (2010) International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland.
- Chung, C.H, Lee, J.W, Kim, S.Y., Lee, J.H.** (2011) Influencing Factors on Numerical Simulation of Crash between RC Slab and Soft Projectile, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(6), pp.591~600.
- Korea Expressway Corporation Research Institute** (2016) Development of a New High-Functioning Concrete Median Barrier with Low Fragmentation in Impact Event: Final, Korea Expressway Corporation Research Institute Report, Korea Expressway Corporation, Korea.
- Korea Expressway Corporation Research Institute** (2016) Technology Review Report - The Cause Analysis of Damage and Method for Maintenance of Concrete Median Barrier of the West Coast Highway in South Korea, Korea Expressway Corporation Research Institute Report, Korea Expressway Corporation, Korea.
- Kim, H., Kim, J., Kim, K.** (2015) A Case Study of Deterioration of Bridge Structures by De-icing Salts Attack, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Fall Conference 2015, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Fall, pp.593~594.
- Kim, S., Jeon, S., Hong, K., Lee, M.** (2011) Performance Evaluation of Composite Safety Barrier for Bridge by Vehicle Impact Simulation, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, pp.499~506.
- Korea Expressway Corporation** (2015) 2014 Highway Traffic Volume Statistics, Korea Expressway Corporation.
- Korea Road Traffic Authority** (2015) Traffic Accident Analysis System, <http://taas.koroad.or.kr/>
- Lee, J., Zi, G., Lee, I., Jeong, Y., Kim, K., Kim, W.** (2017) Numerical Simulation on Concrete Median Barrier for Reducing Concrete Fragment Under Harsh Impact Loading of a 25-ton Truck, *J. Eng. Mater. & Technol., ASME*, 139(2), pp.021015-1~021015-9.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC)** (2007) LS-DYNA Keyword User's Manual Volume I, Livermore Software Technology Corporation, California, U.S.A.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport** (2015) Real Impact Test Guideline for Road Safety Guard 2015, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- 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., Bligh, R.** (2007) Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model

- 159, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, FHWA-HRT-05-063.
- Oh, H., Kim, Y., Sim, J., Oh, K.** (2013) A Study on the Non-linear Analysis of Concrete Barrier Subjected by Vehicle Collision, *J. KOSHAM*, 13(5), pp.255~261.
- Olson, R.M., Post, E.R., Mcfarland, W.F.** (1970) 13 Tentative Service Requirements for Bridge Rail Systems, NCHRPReport 86, Highway Research Board/National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., U.S.A.
- Swamy, R.N., Al-Asali, M.M.** (1988) Engineering Properties fo Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, *J. Mater. American Concr. Inst.*, 85(5), pp.367~374.

요 지

국내 고속도로 콘크리트 중앙분리대는 SB5-B(270kJ)의 충돌등급에 저항하도록 설계되어 있다. 그러나 최근 대형 화물차량의 충돌사고가 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있어 SB6(420kJ) 등급으로의 상향이 필요하다. 충돌등급 상향을 위한 새로운 중앙분리대 단면을 제시하기 위해서는 실제 충돌시험을 수행하여 기준 통과여부를 결정하며, 충돌시험 수행을 위한 적정 단면을 제시하기 위해서는 충돌해석을 통해 선정한다. 이러한 충돌해석의 정확도 향상을 위해서는 차량 모델, 콘크리트 단면 열화상태, 콘크리트 피복 두께 등 다양한 변수에 대한 정확한 변수 선정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 공차 중량, 단면 열화, 콘크리트 피복 두께에 대한 변수연구를 수행하여 충돌저항성능 저감을 확인하였다. 전체 중량뿐만 아닌 공차 중량에 따라 중앙분리대의 충돌저항성능에 차이가 있는 것으로 확인되었으며, 10cm 이하의 콘크리트 피복 두께에서는 충돌저항성능이 민감하게 증가 또는 감소한다. 단면 열화가 발생할 경우 중앙분리대의 충돌저항성능의 감소가 발생하여 열화정도에 따른 보수 및 보강이 이루어져야 하는 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트 구조물과 차량의 충돌해석을 수행할 경우 트럭의 공차중량 비율, 콘크리트의 피복두께 및 열화에 대한 영향이 상세하게 고려될 필요가 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 콘크리트 중앙분리대, 충돌저항성능, 공차중량, 단면열화, 피복두께