

강성 및 연성 보강을 통한 콘크리트 중앙분리대 성능 향상 분석

김찬희¹, 김우석^{2*}, 이일근³, 이재하⁴

Concrete Median Barrier Performance Improvement using Stiffness and Flexibility Reinforcement

Chan-Hee Kim¹, Woo Seok Kim^{2*}, Ilkeun Lee³, Jaeha Lee⁴

Abstract: Recently, there was an collision accident of vehicle-concrete median barrier and unfortunately, passengers were killed by exceeded capacity of concrete median. Therefore, improving the capacity of concrete median barrier is need to reduce damage. Accordingly, in this study, appropriate collision model verified by using the FE analysis program LS-Dyna and recommend a concrete median barrier section. The improvement parameters such as wire mesh diameter, steel plate, rubber pad were selected for improved capacity of the median barrier. Finally, section of concrete median barrier improved wire mesh diameter decreased volume loss, section of concrete median barrier improved rubber pad accepted impact loading and increased elastic area.

Keywords: Concrete, Median barrier, Collision, FEM

1. 서 론

중앙분리대(concrete median barrier, CMB)의 주된 목적은 주행 중 정상적인 주행 경로를 벗어난 차량이 길 밖, 대향차로 또는 보도 등으로 이탈하는 것을 방지하는 동시에 탑승자의 상해 및 차량의 파손을 최소화하고 차량을 정상 진행 방향으로 복귀시키는 것을 주목적으로 한다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014). 이러한 중앙분리대 설치 목적을 달성하기 위해서 강도성능과 탑승자 보호 성능을 갖춰야 한다. 최근까지의 계속된 중앙분리대 개선에도 불구하고 차량의 대형화와 고속화로 인해 중앙분리대의 강도성능을 초과하는 중앙분리대 충돌사고가 빈번히 발생하고 있다.

중앙분리대의 경우 도로안전시설 설치 및 관리지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014)에서 제시하는 충돌 시험을 통한 강도 성능 및 탑승자 보호 성능을 만족해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 탑승자 보호 성능을 만족하는 기존

의 2015년형 단면(Kim et al., 2015)을 사용하였고, 현재 사용되는 강도보다 높은 충격도에 대해서 중앙분리대의 강도성능을 개선하기 위한 방안을 모색하였다. 이를 위해 상용 유한요소 프로그램을 활용하여 기존 중앙분리대 실험 결과를 활용하여 충돌 시뮬레이션에 적절한 모델을 선정하였고, 또한 성능개선을 적용한 단면에 예상되는 높은 충격도의 등급에 대한 강도 성능 만족 여부를 평가하였다.

2. 국내 중앙분리대 성능개선 및 사고 현황

국내 중앙분리대는 1970년대 경부 고속도로에서 중앙분리대가 처음 설치되어 현재까지 강도성능과 탑승자 보호 성능 향상을 위해 개선되어 왔다. 국내에 시공된 최초의 중앙분리대는 연석 토사 중앙분리대이다(Fig. 1(a)). 하지만 연석 토사 중앙분리대의 경우 차량 이탈 방지 기능이 없으므로 대형 사고로 이어질 위험이 있어 새로운 형태의 중앙분리대의 필요했다. 1980년에 남해고속도로에서 미국의 F형 중앙분리대를 도입하여 높이 810 mm에 방현망이 설치된 강성 방호벽 중앙분리대로 개선하였다(Fig. 1(b)). 그러나 개선된 중앙분리대 역시 차광용으로 설치된 방현망이 충돌 사고 발생 시 방현망에 의한 2차 피해를 유발하며, 낮은 중앙분리대의 높이로 인하여 대형차량의 승월 사고가 빈번하게 발생하는 문제가 발

¹학생회원, 충남대학교 토목공학과, 석사과정

²정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수, 공학박사, 교신저자

³정회원, 한국도로공사, 도로교통연구원, 수석연구원, 공학박사

⁴정회원, 한국해양대학교 건설공학과, 부교수, 공학박사

*Corresponding author: wooseok@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

생하였다. 이를 개선하기 위하여 방형망을 제거하고 높이 1270 mm로 증가시킨 SB5 등급 중앙분리대를 개발 후 시공하여 기존의 문제점을 해결하였다(Kim et al., 2009)(Fig. 1(c)). 최근 고속주행 여건이 지속적으로 개선되어오면서 탑승자 보호 성능을 향상시킨 고규격 중앙분리대가 Smart Highway 안전성 확보 기술 개발연구(Kim et al., 2015)를 통해 개발하여 2015년 이후 준공 고속도로에서 SB5-B등급의 중앙분리대(2015년형 단면)가 시공되고 있다(Fig. 1(d)).

지속적인 성능향상에도 불구하고 고속도로의 2009년부터 2015년 5월까지의 중앙분리대 충돌사고 현황(Fig. 2)을 보면

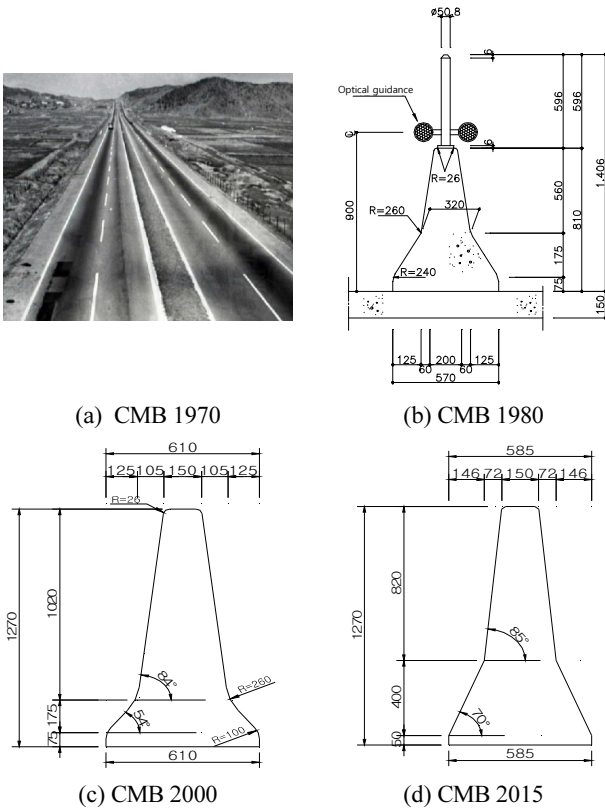


Fig. 1 Concrete Median Barrier in Korea

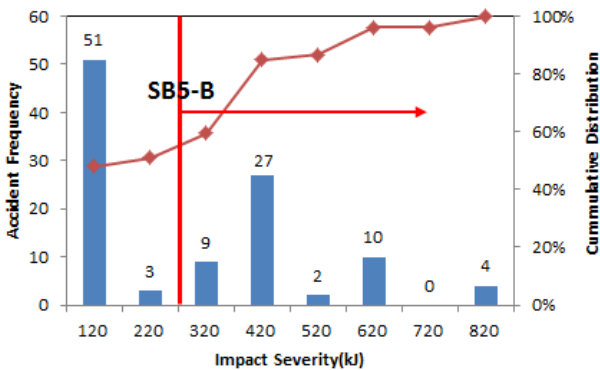


Fig. 2 Impact severity and frequency of CMB collision accidents

현재 중앙분리대의 강도성능 SB5-B(충격도 270 kJ)를 초과하는 충돌사고가 과반수임을 알 수 있다. 이는 여러 원인이 있을 수 있지만, 차량 운행속도 및 중량 증가가 주요 요인으로 추정된다. 특히, 시공 예정인 서울-세종 고속도로의 설계속도는 140 km/h를 고려하고 있으므로 현재보다 높은 수준의 중앙분리대 강도성능이 요구될 것이나, 현재의 사고기록에 근거한 요구수준은 충격도 420 kJ 또는 SB6 등급 이상의 강도 성능이 필요할 것으로 예상된다.

3. 국내 중앙분리대 강도성능 기준

중앙분리대의 성능 확인은 등급에 따른 충격도를 실물차량 충돌 시험을 통해 도로안전 시설 관리 지침(2014)의 평가 기준인 강도성능 및 탑승자 보호성능 평가 기준에 따라 평가한다. 대상 중앙분리대의 성능 등급은 Table 1과 같이 성능 평가 조건에 따른 충격도(Impact Severity, IS)로 구분된다. 각 등급별 충격도는 차량의 중량 m (ton), 차량의 충돌 각도 θ (degree), 차량의 충돌 속도 V (km/h)를 식 (1)에 대입하여 충격도를 산출할 수 있다.

$$IS = \frac{1}{2} m \left(\frac{V}{3.6} \cdot \sin\theta \right)^2 \quad (1)$$

강도 성능 평가는 구조물의 파손이나 변형의 저항성을 평가한다. Table 1과 같이 차량 속도는 설계 속도의 80%를 적용하였고, 설계속도 120 km/h 구간의 경우에는 기술 개발의 어려움을 고려하여 설계속도의 70%를 적용하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014). 차량 중량의 경우 8,000 kg의 대형차를 표준으로 하며 상위등급 시험에는 14,000 kg 트럭을, 특수한 경우 25,000 kg 또는 36,000 kg의 트럭을 사용

Table 1 Korean test levels for structural capacity

Test level	Impact velocity(km/h)	Vehicle weight(kg)	Impact angle(°)	Impact severity(kJ)
SB1	55			60
SB2	65			90
SB3	80	8,000		130
SB3-B	85			150
SB4	65		15	160
SB5	80	14,000		230
SB5-B	85			270
SB6		25,000		420
SB7	80	36,000		600

한다. 차량 충돌 각도의 경우 직선부와 곡선부 구별없이 15°를 사용하고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014).

4. 충돌 시뮬레이션 모델 개발 및 검증

4.1 차량 모델

충돌 시뮬레이션에 사용된 차량모델은 실물 충돌 시험에 사용된 차량과 유사한 형태인 미국 NCAC(National Crash Analysis Center)에서 개발된 16 ton cargo truck 모델을 활용하였다. 차량 중량의 경우 국내 실물 충돌 시험 기준과 달라 절점 질량을 수정하여 사용하였다. 또한 Fig. 3와 같이 국내 실물 충돌 시험 차량과는 달리 화물칸이 횡방향으로 과도하게 돌출되어 있어 국내 차량과 비슷한 형태로 차량 전면부와 화물칸의 폭이 같도록 모델을 개선하여 시뮬레이션에 적용하였다. 충돌 시 중앙분리대와 충돌하는 차량 전면부의 shell 요소를 제공 모델의 1/4면적으로 나누어 콘크리트 중앙분리대의 요소크기와 유사하도록 하여 해석 결과의 정확성을 높일 수 있도록 하였다. 적절한 요소크기는 효율적이고 정확한 결과 확인을 위해 중요한 변수로 본 연구에서는 충돌 시뮬레이션 검증에서 요소의 크기를 변수로 설정하여 적절한 요소크기를 검토하였다.

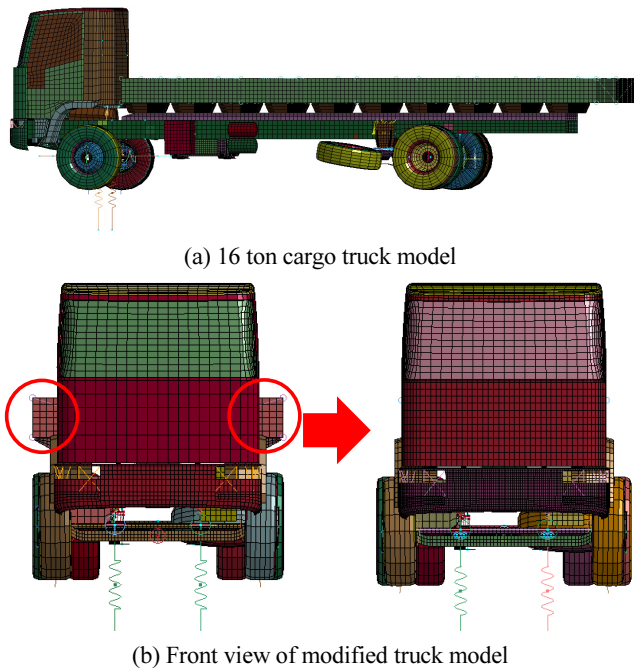


Fig. 3 Truck model used in the analysis

4.2 콘크리트 중앙분리대 모델

중앙분리대 모델은 Fig. 4와 같이 기존의 2015년형 단면을 사용하여 탑승자 보호성능은 만족하는 것은 가정하여 강도성능 평가만 실시하였다. 실제 중앙분리대는 연속적으로 시공되며, 하부의 경우에는 다웰바를 통한 구속이 되어 있으므로, 중앙분리대 모델의 경계조건으로 양 끝단과 바닥면의 모든 자유도를 구속시키며, 콘크리트와 와이어 메쉬는 완전 부착되어 있는 것으로 가정하였다.

중앙분리대의 재료모델은 LS-Dyna에서 제공하는 MAT_159 (CSCM) 모델을 사용하였다. 이 콘크리트 모델은 미국의 FHWA에서 2007년 고속도로의 콘크리트 방호벽과 차량 충돌을 위해 개발된 모델이다. CSCM(Continuous surface cap model)은 3축 압축 조건에서 cap 형태(Fig. 5)로 충돌 후 강성을 잃은 요소에 대한 제거 기능이 있어 충돌 후의 구조물 파손을 파악하기에 적절한 재료모델이다. CSCM 내의 Erode 옵션은 요소가 항복면을 지나 소성영역에 도달한 시점을 기준으로 정적하중에서 1.0을 적용하지만 동적하중에 대하여 하중 속도, 구조물의 크기 등의 영향을 받아 저항값이 증가하는 경향이 있어 동적하중에 대한 영향을 고려하여 저항값을 높여 적용할 수 있다. Murry et al.(2007)의 연구와 Thai et al.(2014) 등 많은 연구에서 1.0보다 큰 값을 사용하였으며 해석의 종류, 목적에 따라 적절한 값이 다르므로 충돌 시뮬레이션 모델 검증 시 변수로 적용하여 다양한 값을 충돌실험 결과와 비교하여 검토하였다.

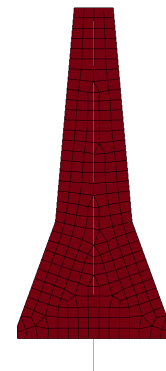


Fig. 4 Section of CMB FE model

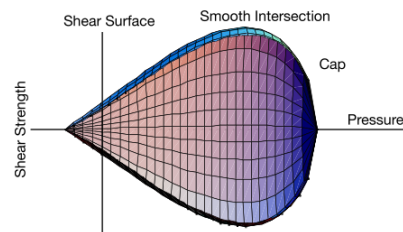


Fig. 5 CSCM model yield surface in two dimensions

CSCM 모델을 구성하는 상수값으로 파괴에너지를 2가지의 방법을 고려하였다. LS-Dyna에서 자체적으로 산출하는 값은 CEB-FIP(1990)의 식을 사용하고 있으나, 이후 개정된 CEB-FIP(2010)가 존재한다. 실물 충돌 시험에 사용된 콘크리트 압축강도 27 MPa를 기준으로 이들 두 방법을 비교하였을 때 약 2배 차이가 있는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구에서는 CEB-FIP(2010)에 따른 식 (2)를 활용하여 콘크리트의 파괴에너지를 산출하여 사용하였다.

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f$$

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

f_{cm} ; mean value of compressive strength
 $\Delta f = 8 \text{ MPa}$
 G_F : fracture energy of concrete

다른 널리 사용되는 방법으로는 Bažant et al.(2002)가 제안한 식 (3)이 있다. 이는 누적된 실험결과를 정리한 경험식으로써 파괴에너지를 산출 시 이 식도 함께 고려하였다.

$$G_F = 2.5\alpha_0 \left(\frac{f'_c}{0.051} \right)^{0.46} \left(1 + \frac{d_a}{11.27} \right)^{0.22} \left(\frac{c}{w} \right)^{-0.30} \quad (3)$$

$\alpha_0 = 1.44$ for crushed or angular aggregates
 f'_c ; compression strength of concrete
 d_a ; the maximum aggregate size
 $\frac{c}{w}$; water - cement ratio

CEB-FIP(2010)와 Bažant et al.(2002)의 식으로 파괴에너지를 계산한 결과 각각 147.7 N/m, 138.4 N/m를 적용하여 실물 충돌 시험 결과와 비교 검토하였다.

본 연구에서는 해석시간의 단축을 위해 reduced integration을 실시하여 비물리적 형태의 변형인 hourglass mode가 발생할 수 있다. 따라서, hourglass mode 발생 시 이를 저항하기 위한 hourglass 에너지가 생성되며 이는 시스템 상에서 물리적 에너지로 계산되며 결과적으로 해석값의 정확도를 위해 hourglass energy를 최소화 할 필요가 있다. 본 연구에서는 모델 개발자가 추천하는 hourglass control type 4, hourglass 계수 0.03(LSTC, 2012)을 활용하여 hourglass 에너지를 제어하였다.

4.3 차량 충돌 시험

모델의 검증에 위해 실물 충돌 시험의 결과를 활용하였다. 실물 충돌 시험은 SB5-B등급으로 2015년형 단면에 대해 수

행되었던 시험으로 시험 조건으로 Fig. 6에 나타내었다. 실물 충돌 시험의 결과를 활용하여 중앙분리대의 변형, 파괴 형태, 차량의 거동 등을 비교하여 시뮬레이션의 정확도를 높일 수 있는 모델을 결정할 수 있도록 하였다.

4.4 충돌 시뮬레이션 모델 검증

모델 검증을 위해 앞서 선정된 변수를 조합하여 Table 2와 같이 36개의 모델을 해석해 중앙분리대 충돌 시험을 가장 유사하고 효율적으로 구현할 수 있는 모델을 선정하였다. 해석결과 Erode 값 1.25, hourglass control type 4, hourglass coefficient 0.03, 요소크기 40, Bažant et al.(2002)의 파괴에너지 경험식의 조합에 따른 해석 모델이 해석의 효율성, 유사한 파괴형상, 실제 거동에 가장 적합한 것으로 선정하였다.

Table 3은 SB5-B 성능 등급 충돌 시험의 결과값으로 탈출 속도, 탈출 각도, 손상 깊이, 손상 너비, 부피손실을 비교한 것이다. 차량의 거동은 실제 충돌 시험과 비슷한 거동을 나타냈

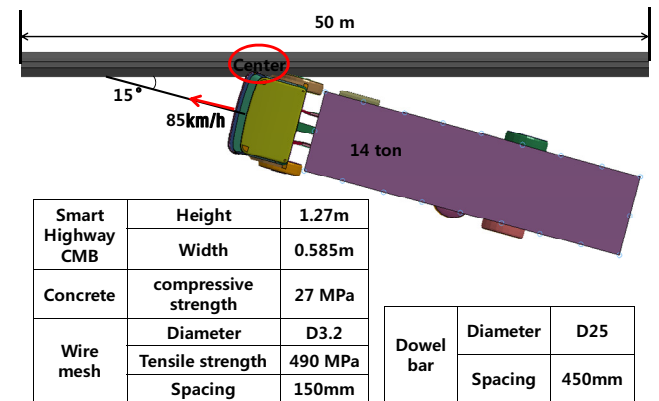


Fig. 6 Smart Highway CMB capacity test for collision

Table 2 Parameters considered in model verification

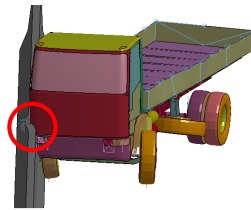
Parameter	Range
Concrete erode	1.1
	1.25
	1.4
Fully integrated solid	
Hourglass control option	Type
	Coefficient
Hourglass control	0.03
	0.07
Mesh size(mm)	40
	60
Fracture energy computation approach	CEB-FIP(2010)
	Bažant et al.(2002)

Table 3 Comparison of collision test and analysis result

	Collision test result	Collision analysis result	Error(%)
Exit Velocity(km/h)	73.5	76.2	3.7
Exit Angle(°)	7.13	6.89	3.4
Damage length(m)	1.7	2.5	47
Damage depth(cm)	28	24	14
$\sqrt[3]{\text{Volume loss (cm)}}$	40	56	40



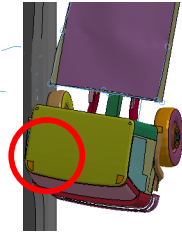
(a) SB5-B collision test (First collision, front view)



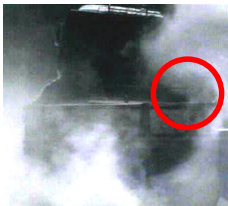
(b) LS-Dyna simulation (First collision, front view)



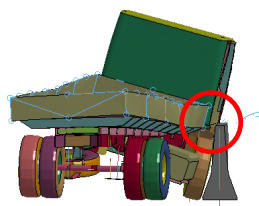
(c) SB5-B collision test (First collision top view)



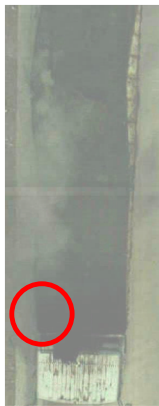
(d) Simulation (First collision, top view)



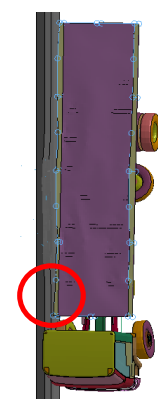
(e) SB5-B collision test (Rear view)



(f) Simulation (Rear view)



(g) SB5-B collision test (Second collision top view)



(h) Simulation (Second collision top view)

Fig. 7 Comparison collision test with analysis result

으나, 콘크리트 중앙분리대의 파손형상은 차이를 나타냈다. 즉, 트럭의 탈출 속도와 탈출 각도의 오차율은 각각 3.7%, 3.4%로 비교적 유사하게 예측할 수 있었으나, 파손된 중앙분리대의 길이, 깊이, 부피 손실량에서 다소 차이가 발생하였다. 파손된 중앙분리대의 깊이는 해석에 사용된 요소의 크기에 의해 발생한 오차로 판단되며 단일 요소 크기보다 작은 오차로 해석 모델에 적정한 것으로 판단된다. 또한 중앙분리대의 파손 길이에 대한 오차가 부피 손실의 오차로 이어진다. 이는 시뮬레이션에 사용된 차량의 강성이 실제 차량의 강성보다 크게 모델링 되어 있어 차량 변형으로 인한 에너지 흡수가 미미하였고 차량이 흡수하지 못한 에너지가 중앙분리대에 전달 되어 파손이 증가한 것으로 추정된다. 또한 보수적인 해석을 위하여 차량과 중앙분리대 사이의 마찰계수, 타이어와 중앙분리대 사이의 마찰계수, 중앙분리대 하부의 고정 조건 등을 선정하였으므로 파손 증가는 이미 예상되고 있었다.

Fig. 7과 같이 2015년형 단면에 대해 SB5-B등급 충돌 조건을 적용시킨 실물 충돌 시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 중앙분리대 충돌 시험결과를 기준으로 보면 차량과 중앙분리대의 충돌은 2번에 걸쳐서 일어나고 있다. 1차 충돌은 중앙분리대와 차량 전면부가 충돌하며, 2차 충돌은 중앙분리대와 차량의 화물칸의 충돌이 발생하였다. 시뮬레이션 결과, 1차 충격과 2차 충격 시 충격 부위가 일치하며 충돌 후 차량 거동이 Table 3과 같이 유사한 것을 확인 할 수 있었다.

5. 강성 및 연성 보강 단면 충돌 시뮬레이션

강성 및 연성 보강을 통한 개선단면에 대해서는 본 연구의 성능 향상 목표는 Fig. 2에서 나타난 것과 같이 SB6등급이다. 따라서, 충돌 시뮬레이션을 통해 개선요소 적용 시의 성능 향상 효과와 SB6등급 만족 여부를 평가하였다. 개선단면의 단면 치수는 현재 시공법과 도로와 중앙분리대 여유거리, 탑승자 보호 성능 평가 만족 여부 등을 고려하여 현재의 시공 단면인 2015년형 단면에 대해서 검토하였다. 즉, 중앙분리대의 형상, 높이, 폭을 동일한 것으로 가정하였다. 또한 개선단면 기본 가정 사항으로 기존 와이어 메쉬의 간격 150 mm를 100 mm로 줄여 좀 더 조밀한 망을 사용하였다. 이는 메쉬망목이 메쉬 철근량의 증가에 영향을 미치며, 파편 비산감소에도 도움을 줄 수가 있으나, 사용되는 최대골재치수를 고려한 시공성 측면을 고려하여 최소 메쉬망목은 100 mm로 선정하였다. 또한, 기존 단면이 시공 시 와이어 메쉬의 침하로 인해 중앙분리대의 상단부가 무근 콘크리트로 비산에 불리하게 적용되어 온 점을 고려하여 와이어 메쉬의 높이를 증가시켜 지면에 접하도록 수정하여 침하를 방지할 수 있는 상세를 적용하였다.

5.1 개선요소 선정

본 연구에서는 SB6등급을 만족할 수 있는 중앙분리대 개발을 위해 강성보강방법과 연성보강방법을 고려하였다. 첫 번째는 강성보강방법으로 와이어 메쉬의 직경을 증가시키는 방법을 적용하였다. Oh et al.(2013)의 연구 결과 와이어 메쉬의

직경 증가는 중앙분리대의 성능향상으로 이어지는 것으로 보고하고 있다. 두 번째 개선요소로는 중앙분리대의 상단에 철판을 매입하여 보강하는 방안을 고려하였다. 실험 결과 중앙분리대의 파손은 대부분 상단에서 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 보강시키기 위하여 매입 철판의 유무를 개선요소로 선정하였다. 세 번째 개선요소로는 연성보강방법을 선정하였다. 앞선 예비해석에서 콘크리트 강도증가의 효과가 미미하다는 점에서 중앙분리대의 강성이 아닌 변형능력을 향상 시키려는 목적으로 고무패드를 중앙분리대 하단에 적용하였다. Fig. 8은 2015년형 단면을 포함하여 개선요소가 적용된 단면을 나타내고 있다. Table 4는 개선요소를 적용한 변수해석의 종류를 나타내고 있다.

5.2 와이어 메쉬 직경 증가에 따른 모델 개선 효과

SB6 등급의 하중에 대하여 기존 단면과 개선단면의 부피손실량을 비교하였다. 여기서 부피손실량의 최대 허용값은 보수적인 판단을 위해 기존 SB5-B 등급의 충돌 시험을 통과한 2015년형 중앙분리대의 부피 손실량값(Table 3의 $\sqrt[3]{\text{Volume loss}} = 40 \text{ cm}$)의 50%를 한계값으로 설정하였다.

시뮬레이션 결과 Fig. 9에 나타나 있듯이 와이어 메쉬 직경 증가에 따른 부피 손실량 저감 효과를 확인할 수 있었다. 중앙분리대의 파손량은 부피 손실량으로, 중앙분리대의 콘크리트 파편량은 eroded concrete kinetic energy로 추정하였다. 해석 결과 메쉬의 직경이 커질수록 부피 손실량이 감소하는 추세를 나타내었다. 단위 길이당(1 m) 콘크리트 중앙분리대의 부피손실률의 경우는 2015년형 단면에서 부피손실률이 23.6%였으나, D7.5-PL0-R0인 경우 1.6%로 급격하게 감소했다. 즉, 기존 2015년형 단면 대비 D7.5-PL0-R0는 56.3% 부피손실량 감소, D9.5-PL0-R0는 85.2% 부피손실량 감소로 성능 개선에 효과가 있음이 확인되었다. Fig. 9(a)에서는 강재량에 따라 부피손실량의 감소를 확인할 수 있다. D7.5-PL0-R0의 경우에는 상단 모서리에 손상이 집중되었고, D9.5-PL0-R0의 경우에는

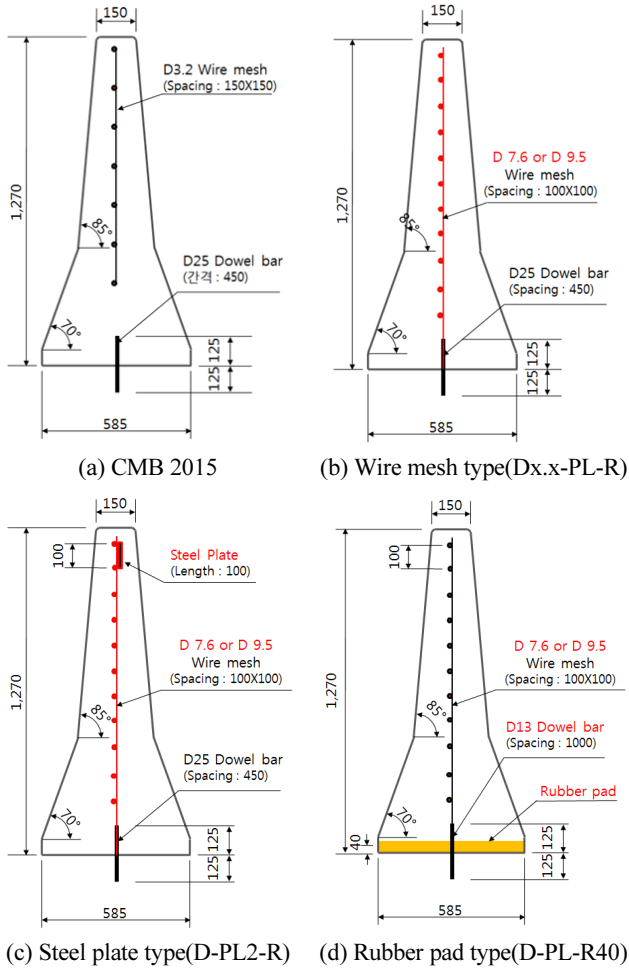
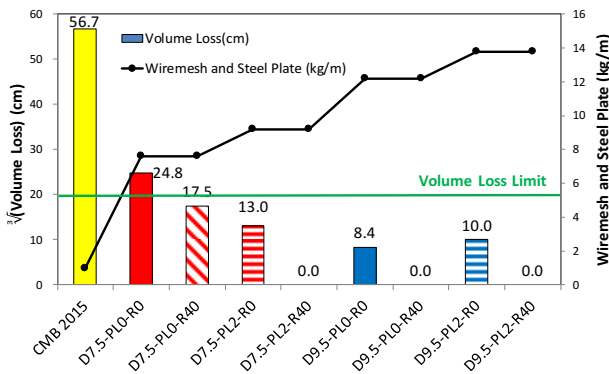


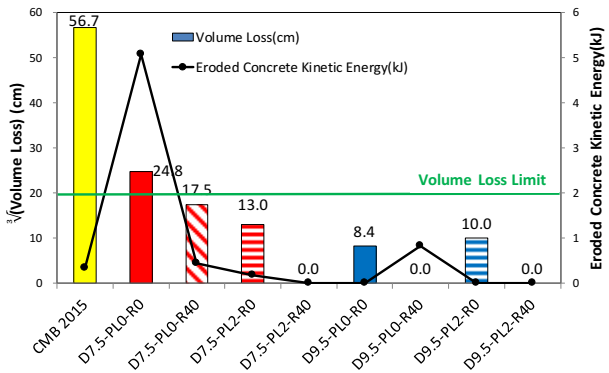
Fig. 8 Sections of improved CMB

Table 4 Case of parameters to improved CMB capacity

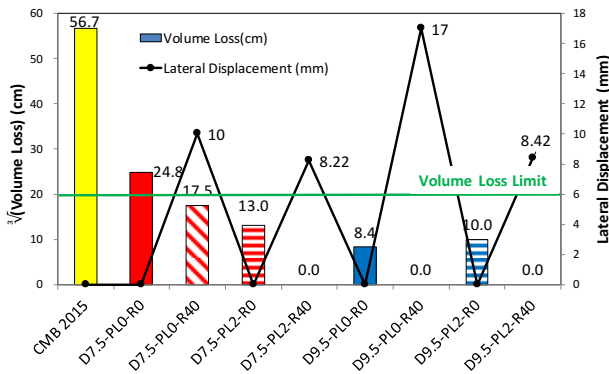
No.	Name	Diameter of wire mesh(mm)	Thickness of plate(mm)	Thickness of rubber pad(mm)	Wiremesh and Plate(kg/m)
1	CMB 2015	3.5(150×150 mm)	0	0	0.964
2	D7.5-PL0-R0	7.5(100×100 mm)	0	0	7.595
3	D7.5-PL0-R40		40	40	7.595
4	D7.5-PL2-R0		2	0	9.165
5	D7.5-PL2-R40		2	40	9.165
6	D9.5-PL0-R0	9.5(100×100 mm)	0	0	12.186
7	D9.5-PL0-R40		0	40	12.186
8	D9.5-PL2-R0		2	0	13.756
9	D9.5-PL2-R40		2	40	13.756



(a) Volume Loss with respect to Steel Area



(b) Volume Loss with respect Eroded Kinetic Energy



(c) Volume Loss with respect to Lateral Displacement

Fig 9 Parametric Study Results

손상이 많이 감소되었다.

하지만, Fig. 9(b)에 나타나듯이 콘크리트 파편의 비산량과 비례할 것으로 예상되는 eroded concrete kinetic energy의 경우에는 D7.5-PL0-R0 모델에서 증가하여 콘크리트 파편 비산이 있을 것으로 예상되는 반면, D9.5-PL0-R0의 경우에는 거의 없을 것으로 예상된다.

5.3 철판 보강에 따른 모델 개선 효과

철판에 의한 보강 효과를 확인하기 위하여 2 mm 두께의 철판을 가장 취약한 부위인 중앙분리대의 상단에 매입하여 충

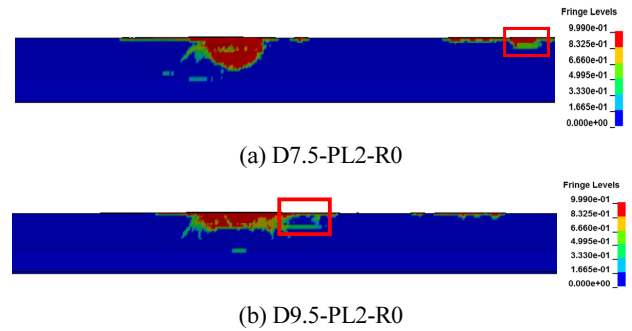


Fig. 10 Concrete plastic strain contour

돌 시뮬레이션 결과를 검토하였다. 직경 7.5 mm와 9.5 mm의 메쉬를 사용한 중앙분리대를 Fig. 9와 같이 비교하였다. 부피 손실량은 기존 2015년형 단면에 비해 D7.5-PL2-R0에서는 77.1% 부피손실량이 감소하였고, D9.5-PL2-R0에서는 82.4% 감소하였다. 하지만, $\sqrt[3]{\text{부피손실량}}$ 값으로 직경 9.5mm 메쉬를 사용한 중앙분리대의 경우 보강 철판이 없을 때 8.4 cm에서 철판보강을 하였을 때 10.0 cm로 오히려 부피손실량이 높았다. 이는 강성이 지나치게 증가하여 콘크리트 부피손실량이 상대적으로 16% 증가하였다고 추정된다. 하지만, 철판보강을 한 두 단면(D7.5-PL2-R0, D9.5-PL2-R0)에 대해서 $\sqrt[3]{\text{부피손실량}}$ 값을 기준으로 한계치 이내로 만족하였다. Fig. 10는 콘크리트 소성 변형률을 나타낸 것으로 철판보강에 따라 소성면적은 상당히 감소하였으나 여전히 한 부분으로 집중되는 경향을 나타내었다. 특히 네모로 표시된 부분은 철판보강에 따라 중앙분리대의 강성이 증가하여 상대적으로 콘크리트의 파손이 많이 발생한 부분이다. 따라서, 철판보강은 직경 7.5 mm를 사용한 중앙분리대의 경우에는 효과적이거나, 직경 9.5 mm를 사용한 중앙분리대에는 효과적이지 못하였다.

5.4 고무패드 보강에 따른 모델 개선 효과

연성보강된 효과를 구현하기 위하여 고무패드를 중앙분리대의 하단에 설치하였고 Fig. 9와 같이 비교하였다. 부피 손실량을 확인한 결과 D7.5-PL0-R40에서는 기존 2015년형 단면 대비 69.1% 감소하였고 D9.5-PL0-R40에서는 파손이 전혀 발생하지 않았다.

연성보강을 위해 사용된 고무패드는 중앙분리대의 거동을 이전의 강성보강 중앙분리대와 완전히 다르게 변화시켰다. 기존의 강성보강된 중앙분리대는 손상이 일부분으로 집중되었으나, 고무패드는 중앙분리대의 횡변위를 가능토록 하여 중앙분리대의 변형과 손상을 중방향을 길게 분포하도록 하였다. 기존 2015년형 단면의 경우에는 Fig. 11(a)와 같이 충돌지점 주변만 탄성영역으로 나타나고, 충돌지점은 전체가 소성영역에 속하여 상당한 파괴 및 변형을 나타내었다. 하지만, 연

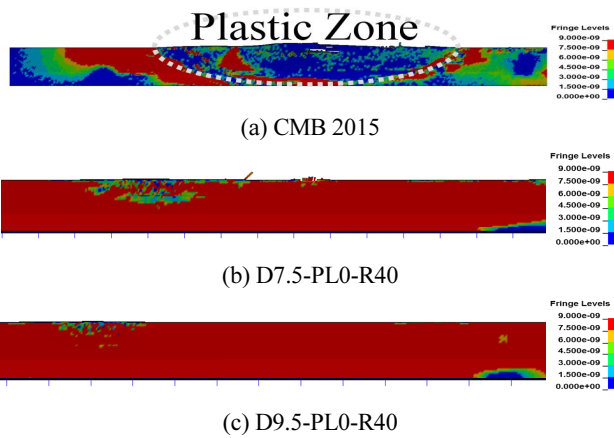


Fig. 11 Concrete elastic strain contour

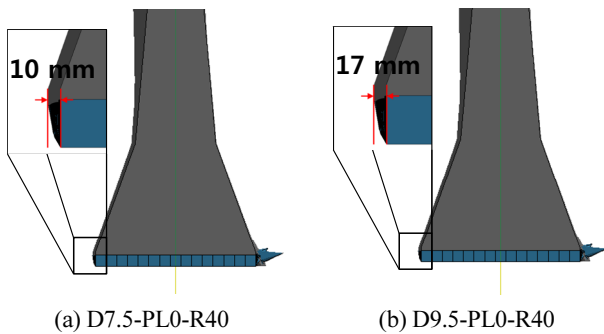


Fig. 12 Lateral displacement of improved rubber pad

성보강을 한 중앙분리대의 경우 Fig. 11(b)와 (c)에 나타나듯이 전체구간이 탄성영역으로 나타나고 있다. 즉, 연성보강된 중앙분리대는 충돌에너지를 넓은 부분의 중앙분리대의 변형에너지로 전환하여 많은 에너지를 상대적으로 흡수할 수 있도록 하였다. Fig. 9로부터 중앙분리대에 가해지는 충격에너지를 직경 9.5 mm의 메쉬를 사용했을 때 더욱 중방향을 잘 전달된다는 것을 알 수 있다. 또한, 변형량이 클수록 부피손실량은 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 9(b)를 보면 D9.5-PL0-R40의 경우 부피손실량은 거의 없으나, 콘크리트의 운동에너지는 다른 중앙분리대에 비해서 높은 것을 알 수 있다. 이는 중앙분리대에 가해지는 충격에너지가 횡변위를 통해서 잘 흡수된 것을 나타낸다.

중앙분리대 하단의 고무패드의 변형 모습은 Fig. 12에서 확인할 수 있다. D7.5-PL0-R40에서는 횡방향 변위가 10 mm 발생하였고, D9.5-PL0-R40에서는 횡방향 변위가 17 mm 발생하였고 이로 인해 D7.5-PL0-R40의 경우에는 10개, D9.5-PL0-R40는 11개의 다웰바가 절단되었다.

Fig. 9에서 상단의 철판보강과 하단의 고무패드 보강이 동시에 이루어진 경우에는 중앙분리대의 강성이 증가하여 약 8 mm 정도의 횡변위를 일으켰으나, 부피손실량은 아주 적어

만족스러운 결과를 나타내었다. 경제적인 관점에서는 D7.5-PL0-R40 또는 D7.5-PL2-R0이 가장 적은 보강재량을 나타내었고, 부피손실량 기준으로는 D7.5-PL2-R40, D9.5-PL0-R40, D9.5-PL2-R40이 부피손실량이 거의 없었다. 유지관리 관점에서는 횡변위를 제한할 필요가 있으므로, D9.5-PL0-R40의 경우 설정된 횡변위량과 비교할 필요가 있을 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 기존 탑승자 보호 성능 평가를 만족하는 2015년형 단면을 사용하여 강도성능 개선을 위해 강성과 연성을 보장할 수 있는 개선요소를 적용하여 SB6등급을 만족시키는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 먼저 콘크리트 중앙분리대 시뮬레이션을 위한 모델을 확립하였다. 강성보강방법에는 와이어 메쉬 직경 증가, 철판보강을 사용하였고, 연성보강 방법에는 하단부의 고무패드 유무를 사용하였다.

- 1) 기존의 2015년형 단면에 대한 충돌 시험결과와의 비교를 통하여 해석 시 erode 계수 1.25, hourglass control type 4, hourglass coefficient 0.03, 요소크기 40 mm, Bazant et al. (2002)의 파괴에너지 경험식을 적용한 해석 모델이 가장 적절한 결과를 나타내었다.
- 2) 변수연구 결과 와이어 메쉬는 직경의 증가와 상단철판 보강은 중앙분리대의 성능향상에 도움이 되었다. 하지만, 9.5 mm 직경 메쉬를 사용한 중앙분리대의 경우 철판보강은 지나친 강성증가로 인해서 성능이 저감되는 효과가 나타날 수도 있다는 것을 확인하였다.
- 3) 중앙분리대의 하단에 사용된 고무 패드는 충돌에너지를 중앙분리대의 변형에너지로 전환시켜 중앙분리대의 성능을 향상시키는데 도움이 되었다. 하지만, 과도한 횡변위가 발생할 경우 다웰바의 절단과 절단 이후의 중앙분리대 성능을 고려해야 할 것이다.
- 4) 시뮬레이션 결과 SB6등급의 강도성능을 만족시키는 단면은 CMB 2015와 D7.5-PL0-R0를 제외한 모든 고려 단면이 성능을 만족하였다. 하지만, 시공 용이성 및 경제성을 고려시 D7.5-PL0-R40 단면이 가장 적절할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- Bala, S. and Jim, D. (2012), General guidelines for crash analysis in LS-DYNA, LSTC.
- Bazant, Z. P. and Becq-Giraudon, E. (2002), Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard. *Cement and Concrete Research*, 32(4), 529-556.
- Code, C. F. M. (2010), Fib model code for concrete structures 2010. Document Competence Center Siegmund Kästl eK, Germany.
- Kim, G. D., Go, M. K., Kim, D. S., Chang, D. Y., Mun, B. G., Han, K. C., Kim, Y. G., Cha, M. W., Ju, J. W., Kim, J. S., Kim, S. Y., Jeong, M. C., Sim, S. W., Lee, S. H., Lee, S. G., Bong, J. H., Jeon, S. M., Seong, M. E., Yang, M. E. (2015), A Study on Development of Smart Highway to Secure Safety Technology, 2015 Research Report, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.
- Kim, K. H., Choi, H. H., Lee, E. J., and Park, K. J. (2009), A Study on Traffic Accident Reduction by improving Expressway Median Barrier Height, 35th conference of KSCE, 46-49.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2014), A Guide for Installation of Road safety facility and Maintenance, Vehicle Protection Safety Facility, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2015), A work manual for Vehicle protection Safety Facility Collision Test, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.
- 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
- NCAC (2008), NCAC Models, <http://www.ncac.gwu.edu/>, NCAC.
- Oh, H. S., Kim, Y. H., Sim, J. W., and Oh, K. J. (2013), A Study on the Non-linear Analysis of Concrete Barrier Subjected by Vehicle Collision, *Journal of KOSHAM*, 13(5), 255-261.
- Thai, D., Kim, S., and Lee, H. (2014), Effects of reinforcement ratio and arrangement on the structural behavior of a nuclear building under aircraft impact, *Nuclear Engineering and Design*, 276, 228-240.

Received : 05/29/2017

Revised : 11/13/2017

Accepted : 11/17/2017

요 지 : 최근 사용 중인 중앙분리대의 성능 등급을 뛰어넘는 사고가 발생하고 있다. 그러므로 피해를 줄이기 위해 중앙분리대의 성능 등급을 현재의 SB5-B등급보다 상향된 기준에 맞춰 개선하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 중앙분리대 충돌시험결과를 활용하여 적절한 모델을 개발 및 검증하고 강도성능이 향상된 콘크리트 중앙분리대 개발을 목표로 하였다. 중앙분리대 성능은 SB6등급으로 목표성능등급을 설정하였고, 중앙분리대의 강도성능 개선 요소로 강성보강과 연성보강의 두 가지 형태를 고려하였다. 강성보강으로는 와이어 메쉬 직경 증가, 중앙분리대 상단 부위 철판보강을 고려하였고, 연성보강을 위해서는 중앙분리대 하단에 고무패드를 설치하여 성능향상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 와이어 메쉬 직경이 증가할 수록 중앙분리대의 파괴 손실은 감소하였으며, 고무패드 사용시 트럭의 충격에너지를 중앙분리대의 변형에너지로 전환하여 충격흡수에 효과적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 콘크리트, 중앙분리대, 충돌, 유한 요소
