

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'소 대형차 분리 대응 교통사고 안전을 최대화 장경간 반강성 배리어 개발'(연구개발 기간 : 2016. 10. 24 ~ 2018. 06. 26) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2018. 09. 18.

주관연구기관명 : 공주대학교 산학협력단 (대표자) 서 창 호 (인)
공동연구기관명 : 다스코(주) (대표자) 한 상 원 (인)
위탁연구기관명 : (주)디에스글로벌이씨엠 (대표자) 박 경 룡 (인)

주관연구기관책임자: 김 기 동

공동연구기관책임자: 남 민 균

위탁연구기관책임자: 박 경 룡

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C1166 88-02	해당 단계 연구 기간	2016.10.24 ~ 2018.06.26	단계구분	-
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	소·대형차 분리 대응 교통사고 안전을 최대화 장경간 반강성 배리어 개발			
연구책임자	김기동	해당단계 참여 연구원 수	총: 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 19명 내부: 19명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 531,000천원 기업: 188,000천원 정부 외: 천원 계: 719,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	공주대학교 산학협력단			참여기업명 : 다스코(주)	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: (주)디에스글로벌이씨엠			연구책임자: 박경룡	
▪ 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 SB5-B와 H2 등급의 반강성 배리어 개발 - 세계최고수준 반강성 배리어(SB5-B등급, H2등급) 대비 소형차 충돌속도 최대 60% 상향 - 도로설계속도 110 km/h 도로에서 발생할 수 있는 사고충돌속도 94% 포함 - 도로에서 예기치 않게 발생할 수 있는 거의 모든 소형차 충돌 사고에 대하여 탑승자 안전 확보 가능				보고서 면수 : 136 page	

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 SB5-B와 H2 등급의 반강성 배리어 개발				
연구개발성과	소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 SB5-B와 H2 등급의 반강성 배리어				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	사망 : 5.8명 감소, 부상 : 77.9명 감소, 인적/물적/사회적 피해 비용 : 31.2억원 절감 (100km당 연간 기대효과)				
핵심어 (5개 이내)	반강성 배리어	소형차 충돌속도 160km/h	SB5-B 성능등급	H2 성능등급	충격도

5. 영문 요약문

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Development of Semi-rigid barriers for SB5-B and H2 performance levels satisfying the small car impact velocity of 160km/h				
Results	Semi-rigid barriers for SB5-B and H2 performance levels satisfying the small car impact velocity of 160km/h				
Expected Contribution	Deaths: reduction of 5.8 persons, Casualties: reduction of 77.9 persons, Amount of damage: reduction of 3.12 billion won (per 100km in a year)				
Keywords	semi-rigid barriers	the small car impact velocity of 160km/h	SB5-B performance level	H2 performance level	impact severity

6. 영문 목차

< Contents >

1. Summary of Development Research	5
2. Internal and External Development Technology State	8
3. Research performance contents and Results	10
4. Purpose Achievement and Contribution of Related Field	119
5. Utilize plans of Development Research Results	122
6. Collected External Science Technology in Research Progress	123
7. Security Grade of Development Research Results	124
8. Registered Research installation and equipment in NTIS	125
9. Safeguard Results in Research Progress	126
10. Typical Results of Development Research	127
11. Etc.	128
12. Reference	129

7. 본문 목차

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
2. 국내외 기술 개발 현황	8
3. 연구 수행 내용 및 성과	10
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	116
5. 연구개발성과의 활용 계획	122
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	123
7. 연구개발성과의 보안등급	124
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	125
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	126
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	127
11. 기타 사항	128
12. 참고 문헌	129

8. 본문

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 차량의 급속한 발전과 개선된 도로환경으로 인해 증가된 교통량과 시속 110km/h 이상의 고속주행이 일반화 된 현재의 교통상황에 적합한 도로안전시설의 개발이 필요한 실정.
 - 현재 국내 도로에 설치된 대부분의 노측용 배리어는 반강성 배리어임. 총연장 5,909km의 반강성 배리어 중에서 89%가 현 지침을 만족하지 못하고 있음. 또한 상당히 많은 반강성 배리어 구간에 대하여 배리어의 최대 횡변위 이내에 지장물이 위치하고 있어 지장물에 대한 2차 충돌로 인한 인명피해가 우려되고 있음(감사원, 2011)
 - 따라서 대형차 충돌에 대한 배리어의 최대 횡변위를 줄이면서 110km/h 이상의 고속충돌에서도 탑승자의 안전을 확보할 수 있는 고규격 반강성 배리어의 개발이 요구되고 있음
- 소형차 충돌속도 160km/h는 도로설계속도 110km/h 도로에서 발생할 수 있는 사고충돌속도 94%를 포함하는 것으로 도로에서 발생할 수 있는 예기치 않게 발생할 수 있는 거의 모든 소형차 충돌사고에 대하여 탑승자 안전을 확보하는데 그 목적이 있음.
 - 도로설계속도 110 km/h 도로에서 발생할 수 있는 사고충돌속도 포함율(TTI, 2007)
 - 소형차 충돌속도 100 km/h : 60%
 - 소형차 충돌속도 160 km/h : 94%
 - 기존 대비 사고충돌속도 포함율 34% 증가시 사망 : 5.8명 감소, 부상 : 77.9명 감소, 인적/물적/사회적 피해 비용 : 31.8억원 절감효과(100km 당)가 있음

2. 연구개발의 필요성

- 차량 배리어는 대형차 충돌에 대한 구조적 강도와 소형차 충돌에 대한 탑승자의 안전을 동시에 만족하도록 설계되어야 함. 따라서 차량 배리어는 대형차 충돌에 대해서 차량의 이탈을 방지할 수 있도록 충분한 강성과 강도를 확보해야 하고, 소형차 충돌에 대해서는 탑승자의 안전을 확보할 수 있도록 유연한 거동을 보여야함.
- 차량 배리어는 구조적 유연도에 따라 연성(flexible), 반강성(semi-rigid), 그리고 강성(rigid) 배리어로 분류됨(AASHTO, 2011).
 - 연성 배리어 : 약한 지주(weak posts)를 사용하는 연성 배리어는 대형차 충돌에 약 4 m까지의 횡방향 변위를 허용하며 낮은 방호등급(low containment level) 충돌에 효과적임(N. M. Villwock et al., 2011; M. H. Ray et al., 2009). 대형차 충돌에 대해서 매우 큰 차량점유폭(vehicle working width)을 발생시키는 연성 배리어의 단점이기도 한 특성 때문에 높은 방호등급 연성 배리어는 소형차 충돌에 대하여 낮은 방호등급 연성 배리어에 비하여 크게 나쁘지 않은 탑승자의 안전을 제공한다(M. Borovinsek et al., 2010; A. O. Atahan et al., 2014).
 - 강성 배리어 : 횡 방향 변위를 허용하지 않으며 높은 방호등급의 충돌에 효과적임(M. E. Bronstad et al., 1976; W. L. Beason et al., 1991). 강성 배리어는 연성과 반강성 배리어에 비하여 소형차 충돌에 대하여 탑승자의 안전이 좋지 않게 나타나지만 매우 제한된 차량 점유폭이 필요한 경우에는 효과적인 방안임.
 - 반강성 배리어(국내 연성배리어) : 대형차 충돌에 약 1 m까지의 횡 방향 변위를 허용하며 중간 범위 방호등급의 충돌에 효과적임(O. F. Cansiz and A. O. Atahan, 2006). 중간 방호등급용 반강성 배리어는 유사한 차량 점유폭을 발생시키는 높은 방호등급용 반강성 배리어에 비하여 강성이 작기 때문에 같은 충돌조건의 소형차 충돌에 대하여 탑승자 안전이 보다 좋게 나타남(G. Bonin et al., 2009).
- 국내 · 외 설계기준의 방호등급은 방호등급이 증가함에 따라 대형차의 충돌에너지는 증가하는 반면

에 소형차의 충돌속도는 일정한 값으로 변화가 없음. 그 이유는 방호등급이 증가하여도 대형차의 차량점유폭이 변화하지 않기 위하여 배리어의 강성과 강도가 증가해야하기 때문에 방호등급이 증가할수록 소형차의 충돌속도가 일정하더라도 소형차 충돌에 대하여 탑승자의 안전이 악화되기 때문이다. 따라서 대형차의 충돌에너지가 커질수록 대형차 충돌의 차량 점유폭을 일정하게 유지하면서 소형차 충돌에 효과적인 배리어를 개발하는 것은 점점 더 어려워짐.

○ 기존 배리어의 한계

- 연성 배리어 : 연성 배리어로 분류되는 케이블 배리어는 약한 지주와 긴장력이 도입된 케이블로 구성됨(B. Winkelbauer, 2014). 현재 개발된 케이블 배리어 중에서 가장 높은 방호등급은 TL4(J. Medina and R. Benekohal, 2006; S. A. Cooner et al., 2009)이고 대형차 충돌에너지는 209 kJ 임. 이러한 방호등급의 케이블 배리어에 도입되는 최대 긴장력은 약 40 kN 이고 케이블 앵커 시스템은 약 3 ton 정도의 중력식 콘크리트 기둥으로 구성되어 있음. TL4 케이블 배리어는 높은 속도의 소형차 충돌에 대하여도 매우 좋은 탑승자 안전을 제공하지만 대형차 충돌에 대해서 횡 변위가 약 4 m 정도로 크게 나타나기 때문에 급격한 경사의 성토부나 절벽 구간에 설치되는 노측용 배리어로 적용되기에 어려움이 있음.
- 강성 배리어 : 287 kJ의 대형차 충돌 에너지를 만족하는 강성 배리어에 적용된 최고수준의 소형차 충돌조건은 0.9 - ton - 120 km/h - 20° (MLIT, 2013)임. 강성 배리어는 배리어 단면의 기울기에 따라서 탑승자 안전과 충돌 후 차량 거동이 다르게 나타남. 실물 충돌시험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 강성 배리어는 대형차 충돌에 대하여 횡 변위를 발생시키지 않는 장점이 있지만 단면의 기울기를 보다 더 효율적으로 조절하더라도 소형차 충돌 속도를 120 km/h 보다 크게 상향시키는 것은 어려운 것으로 파악되었음(MLIT, 2013).
- 반강성 배리어 : 287 kJ의 대형차 충돌 에너지를 만족하는 반강성 배리어에 적용된 최고수준의 소형차 충돌조건은 각각 0.9 - ton 승용차 - 130 km/h - 20° (K. Kim et al., 2016; K. Han et al., 2017)임. 반강성 레일형 배리어는 제한된 횡 방향 변위를 만족하기 위해서 일반적으로 일정한 간격으로 설치되는 강한 지주(strong posts)와 레일(rails)로 구성됨. 강한 지주에 소형차가 직접 충돌하는 스내깅(snagging) 현상을 효과적으로 방지할 수 있는 비대칭 슬립 블록아웃을 반강성 레일형 배리어에 적용하더라도 소형차 충돌 속도를 130 km/h 보다 크게 상향시키는 것은 어려운 것으로 조사되었음(K. Han et al., 2017).

○ 반강성 케이블 배리어

- 연성 케이블 배리어에 매우 큰 긴장력을 도입한다면 케이블 앵커 시스템의 크기가 급격히 증가되어야 하는 단점이 있지만 높은 대형차 충돌에너지에 대하여 약 1 m의 횡 변위를 낮게 할 수 있음. 연성 케이블 배리어에 긴장력을 크게 도입하고 케이블 앵커 시스템을 효율적으로 설계한다면 높은 방호등급의 반강성 케이블 배리어가 개발될 수 있음. 이러한 반강성 케이블 배리어는 유연한 거동을 보이는 케이블 배리어의 특성 때문에 높은 속도의 소형차 충돌에 대하여 낮은 등급의 연성 케이블 배리어에 비하여 크게 나쁘지 않은 탑승자 안전을 제공할 수 있을 것으로 예상됨. 따라서 본 연구에서는 소형차 충돌속도 160 km/h를 만족하는 반강성 케이블 배리어를 개발하고자 하였음.

○ 기존 국·내외 제품과의 차별성

- 기존 반강성 배리어에 대한 소형차 충돌로 인한 탑승자의 위험을 감소시키기 위해서는 그림 1.1(a)와 같이 2~3m의 간격으로 배치된 배리어 지주에 대한 소형차의 심각한 충돌을 최소화하는 것이 필요함.
- 그림 1.1(b)와 같이 지주간격을 장경간(30~60m)으로 사용한다면 소형차와 배리어 지주와의 심각한 충돌을 최소화하여 탑승자의 위험을 감소시킬 수 있음. 지주간격의 장경간화로 부족해진 배리어의 횡방향 강성은 스트레스리본 Deck과 유사한 프리스트레스 케이블이 설치된 개방형 레일의 사용으로 보완될 수 있음.
- 지주배치를 최소화하고 개방형 레일을 이용하여 개방감이 좋고 미관이 뛰어남. 또한 충돌사고발생 시 케이블은 탄성적으로 거동함. 과다한 변형을 겪은 일부 rail만 교체되기 때문에 유지보수에 매우

유리하고 재료비를 절감할 수 있음. 따라서 유사한 대형차 충격도를 저항하는 기존 반강성 배리어에 비하여 소형차 충돌속도 관점으로 성능이 최대 60% 증가할 수 있고 유사한 경제성도 확보할 수 있음.

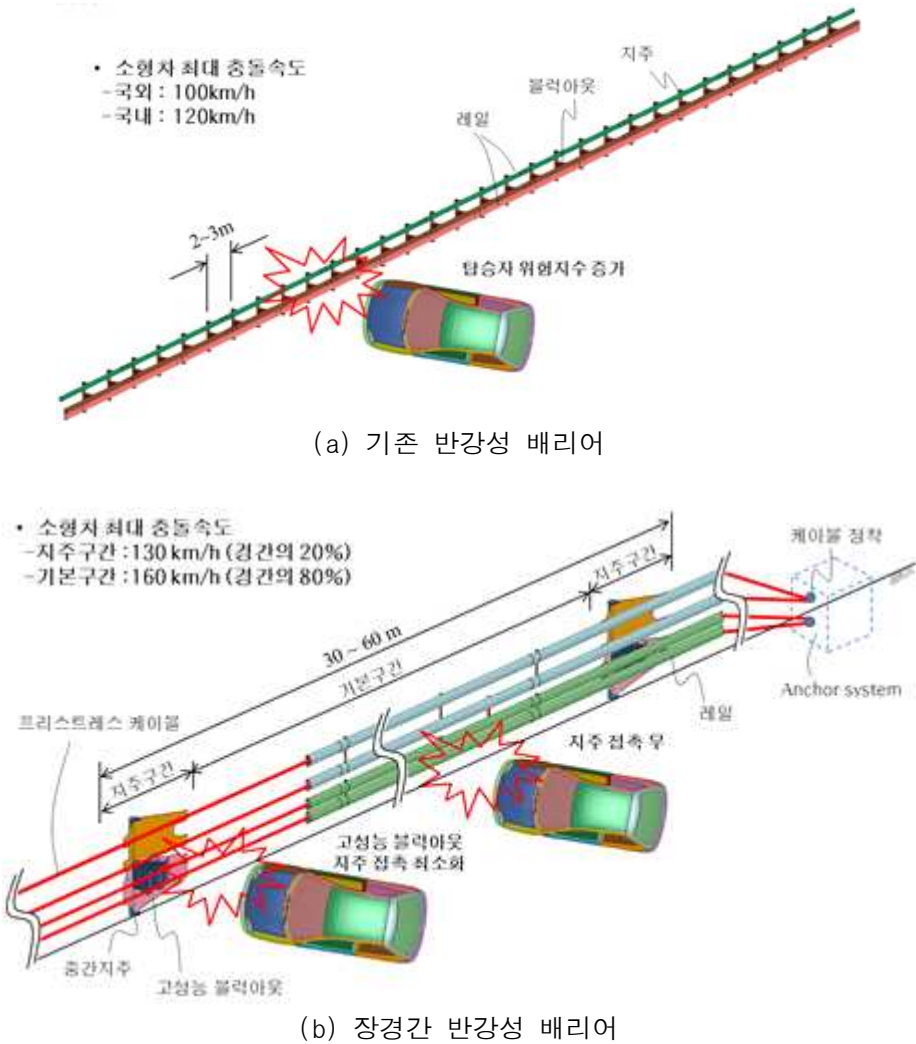


그림 1.1 기존 기술과의 차별성

3. 연구개발 범위

구분(년도)	연구 범위	세부 연구 목표
1차 년도	소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 270kJ(SB5-B) 충격도의 반강성 배리어 개발	- 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 270kJ(SB5-B) 충격도의 반강성 배리어 개발 - 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 270kJ(SB5-B) 충격도의 반강성 배리어 제작 및 시공기술 정립 - 장경간 반강성 배리어 케이블 시공 및 긴장력 도입 기술 정립
2차 년도	소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 287.5kJ(H2) 충격도의 반강성 배리어 개발	- 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 287.5kJ(H2) 충격도의 반강성 배리어 개발 - 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 287.5kJ(H2) 충격도의 반강성 배리어 제작 및 시공기술 정립 - 장경간 반강성 배리어 케이블 시공 및 긴장력 도입 기술 정립

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

- 국내 모든 노측용 배리어는 최대 횡변위 1m 이내의 반-강성(Semi-rigid) 배리어임
- 성능등급이 높아질수록 대형차 충돌조건(충격도)은 증가되지만 소형차 충돌조건은 일정함
- 다양한 등급(국토교통부, 2014)의 반강성 배리어 제품이 개발되어 있음

등급	SB1	SB2	SB3	SB3-B	SB4	SB5	SB5-B	SB6	SB7
소형차 충돌속도(km/h)	60	80	100	120	80	100	120	100	100
대형차 충격도 (kJ)	60	90	130	150	160	230	270	420	600

- 반강성 배리어에 대한 국내 최대 성능등급 SB5-B의 대형차 충격도는 270 kJ임

2. 국외 현황

- 국외에서도 가장 많이 사용되는 노측용 배리어는 반-강성 배리어임
- 미국과 유럽의 경우에도 성능등급이 높아질수록 대형차 충돌조건(충격도)은 증가되지만 소형차 충돌조건은 일정함

① 미국: 다양한 등급(MASH, AASHTO, 2009)의 제품이 개발되어 있음

등급	TL1	TL2	TL3	TL4	TL5	TL6
소형차 충돌속도(km/h)	50	70	100	100	100	100
대형차 충격도 (kJ)	39	77	156	209	595	595

- 반강성 배리어에 대한 미국 최대 성능등급 TL4의 대형차 충격도는 209 kJ임

② 유럽: 다양한 등급(EN1317, CEN, 2010)의 제품이 개발되어 있음

등급	T1	T2	T3	N1	N2	H1	H2	H3	H4a	H4b
소형차 충돌속도(km/h)	80	80	80	80	110	100	100	100	100	100
대형차 충격도 (kJ)	-	-	37	-	-	127	287	462	572	725

- 반강성 배리어에 대한 유럽 최대 성능등급 H2의 대형차 충격도는 287 kJ임

3. 국·내외 현황 분석

- 국·내외 설계기준/지침에 규정된 실물충돌시험 조건은 그림 2.1과 같이 성능등급이 높아질수록 대형차 충돌조건(충격도)은 증가되지만 소형차 충돌조건은 일정함
 - 성능등급이 올라갈수록 대형차 충돌에 의한 최대 횡변위를 만족하기 위해서는 배리어의 강성이 증진(지주간격 감소, 강한 지주 사용)되어야함
 - 배리어의 강성이 증진된 경우에 소형차 충돌조건이 증가한다면 탑승자의 안전이 급격하게 위협해져 평가기준을 만족시킬 수 없음. 따라서 성능등급이 높아질수록 대형차 충돌조건은 증가하나 소형차 충돌조건은 일정하게 규정됨

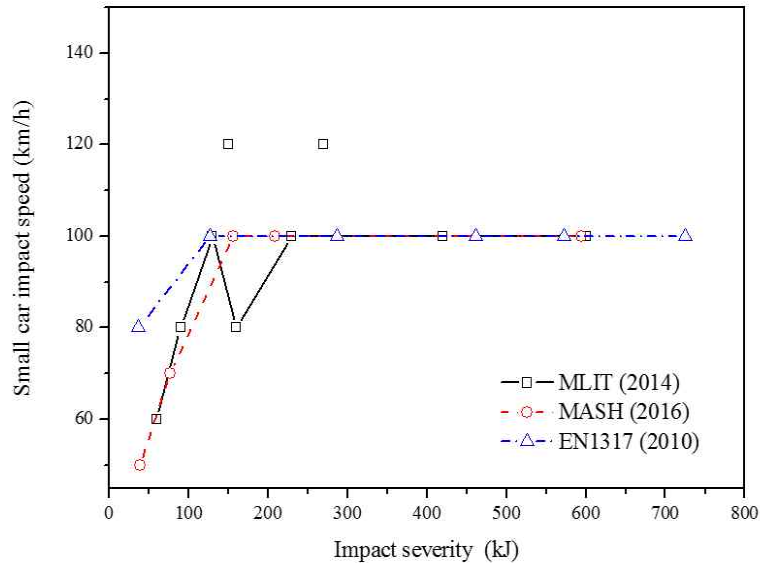


그림 2.1 방호등급 변화에 대한 대형차 충돌에너지와 소형차 충돌속도의 상관관계

- 차량의 급속한 발전과 개선된 도로환경으로 인해 증가된 교통량과 시속 110km/h 이상의 고속주행이 일반화 된 현재의 교통상황에 적합한 도로안전시설의 개발이 필요한 실정임
 - 현재 국내 도로에 설치된 대부분의 노측용 배리어는 반강성 배리어임. 총연장 5,909km의 반강성 배리어 중에서 89%가 현 지침을 만족하지 못하고 있음. 또한 상당히 많은 반강성 배리어 구간에 대하여 배리어의 최대 횡변위 이내에 지장물이 위치하고 있어 지장물에 대한 2차 충돌로 인한 인명피해가 우려되고 있음(감사원, 2011)
 - 따라서 대형차 충돌에 대한 배리어의 최대 횡변위를 줄이면서 110km/h 이상의 고속충돌에서도 탑승자의 안전을 확보할 수 있는 고규격 반강성 배리어의 개발이 요구되고 있음
- 국·내외 관련 분야의 환경 변화
 - 국·내외 설계기준/지침에 규정된 실물충돌시험 조건은 성능등급이 높아질수록 대형차 충돌조건(충격도)은 증가되지만 소형차 충돌조건은 일정함(변화 없음)
 - 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 SB5-B(270kJ)와 H2(287.5kJ) 등급의 반강성 배리어 개발은 세계최초임

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구 수행 내용

가. 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 270kJ(SB5-B) 충격도의 반강성 배리어 개발

(1) 반강성 케이블 배리어 예비설계

(가) Long-span strong-post system

① 구성요소

- 장경간 반강성 케이블 배리어는 그림 3.1에 나타나있는 것처럼 프리스트레스트 케이블(pre-stressed cables), 레일(rails), 중간지주(intermediate posts), 블록아웃(block-outs), 단부지주(end posts), 그리고 케이블 앵커 시스템(cable anchor system)으로 구성됨.

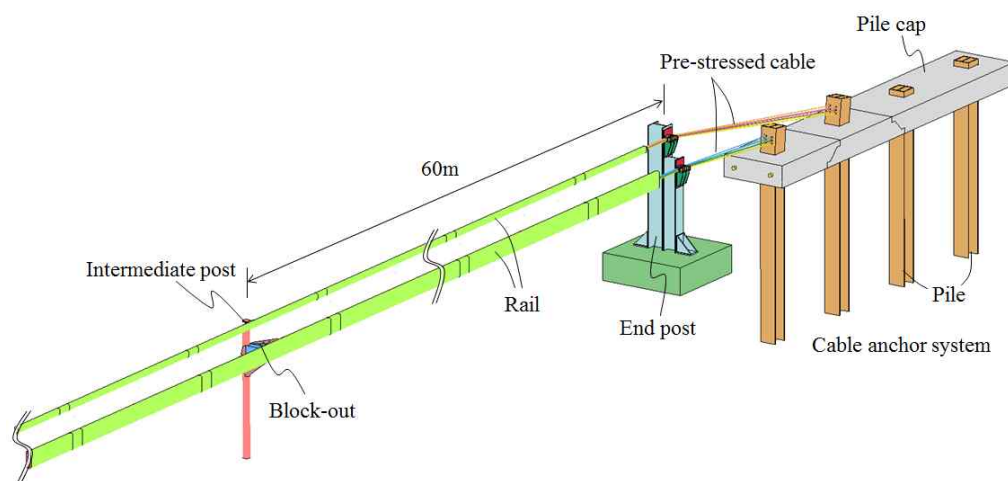


그림 3.1 Long-span strong-post semi-rigid cable barrier

② 예비설계

㉠ 프리스트레스트 케이블

- 프리스트레스트 케이블에는 대형차 충돌에 대하여 케이블이 반강성적으로 탄성 거동할 수 있게 하는데 필요한 긴장력이 도입됨. 본 연구에서는 충돌 후의 유지관리 비용을 최소화할 수 있도록 대형차 충돌에 대하여 케이블이 탄성적으로 거동하도록 설계됨.
- 프리스트레스트 케이블에는 대형차 충돌에 대하여 케이블이 반강성적으로 탄성 거동할 수 있게 하는데 필요한 긴장력이 도입됨. 본 연구에서는 충돌 후의 유지관리 비용을 최소화할 수 있도록 대형차 충돌에 대하여 케이블이 탄성적으로 거동하도록 설계되었음. 대형차 충돌에 대한 케이블 배리어의 횡 변위를 특정한 값으로 제한하는데 필요한 긴장력은 다음과 같이 결정될 수 있음; 1) Olson Model(R. Olson and E. R. Post, 1970)을 이용하여 대형차 충돌조건과 제한된 횡 변위에 상응하는 충돌하중을 결정한다. 2) 대형차 충돌하중에 대하여 제한된 탄성 횡 변위가 나타날 때까지 케이블 긴장력을 변화시키면서 RM Bridge(H. Pircher, 2004)와 같은 Cable 해석 프로그램 혹은 케이블 이론(J. Strasky, 2005)을 이용하는 반복적인 해석을 통하여 최대 장력을 결정한다.
- 14 - ton - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건과 1 m의 횡 변위에 대하여 결정된 충격하중은 194 kN이고 60 m 길이의 케이블 배리어에 대하여 1 m의 탄성 횡 변위를 만족하는 최대 장력은 1,900 kN으로 결정되었음. 결정된 1,900 kN의 최대 장력을 케이블 초기 긴장력으로 가정하였음.
- 케이블에 도입된 긴장력은 온도변화에 따라 변화를 겪음(S. Cooner, 2008). 따라서 설치위치

에서 발생 가능한 가장 높은 온도에서도 케이블 배리어에 대형차가 충돌할 때 1 m 이하의 제한된 횡 변위를 낳을 수 있도록 케이블의 초기 긴장력은 설치 시기의 온도에 따라 조정되어야 함. 케이블 배리어를 그림 3.2에 보이는 것처럼 온도변화 ΔT 를 받는 1차 부정정 구조물(an indeterminate structure of 1 degree)로 모델링하고 변위일치 방법(the method of consistent displacements)을 적용하면 설치시기의 케이블 초기 긴장력 T_c 는 식 1.1과 같이 결정됨. 단부지주와 중간지주에서 케이블에 대한 축 방향 구속은 없는 것으로 가정되었음.

$$T_c = T_r - \alpha \cdot \Delta T \cdot l \cdot \frac{k_c k_a}{2k_c + k_a} \quad (1.1a)$$

$$k_a = \frac{k_h k_v}{k_v \cos^2 \theta + k_h \sin^2 \theta} \quad (1.1b)$$

- 여기서 T_r 은 현장 최대온도 상태의 초기 긴장력, k_c 는 케이블의 탄성 축 방향 강성(elastic axial stiffness), k_a 는 앵커 시스템의 경사 케이블 방향 강성, k_h 는 앵커 시스템의 수평방향 강성(horizontal stiffness), k_v 는 앵커 시스템의 수직방향 강성(vertical stiffness), 그리고 α 는 온도팽창계수임. 앵커 시스템의 경사 케이블 방향 강성 k_a 를 무한대로 가정한다면 설치시기의 케이블 소요 긴장력이 보다 안전 측으로 결정될 수 있음. 식 1.1a에 $k_a = \infty$ 를 적용하면 식 1.1a는 식 1.2와 같이 변환됨.

$$T_c = T_r - \alpha \cdot \Delta T \cdot l \cdot k_c = T_r - \alpha \cdot \Delta T \cdot EA \quad (1.2)$$

- 여기서 l 은 케이블 전체 길이, 그리고 EA 는 케이블의 elastic axial rigidity임. 설치 현장의 년 간 온도변화가 -20°C 에서 $+40^\circ\text{C}$ 까지 발생하는 경우에 $+40^\circ\text{C}$ 의 현장 초기 긴장력 T_r 은 60 m의 지주간격에 대하여 1,900 kN이고 ΔT 는 -60°C 임. 식 1.2에 이러한 값을 대입하면 케이블 길이에 상관없이 -20°C 에서 설치되는 케이블의 초기 긴장력 T_c 는 2,167 kN으로 나타남. T_c 의 계산에 사용된 α 와 EA 의 값은 각각 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 와 444,480 kN임.

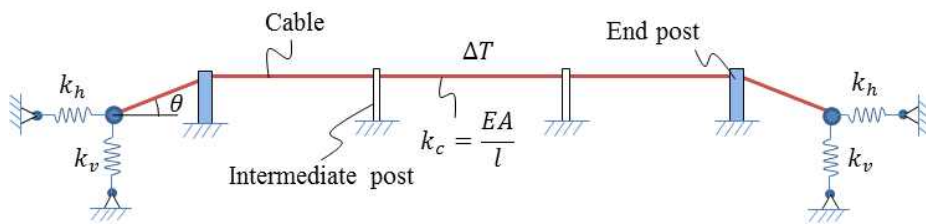


그림 3.2 온도변화를 겪는 케이블 배리어 모델

- 케이블은 케이블의 초기 긴장력 T_c 에 대형차 충돌로 인하여 발생하는 긴장력의 증가분을 더하여 결정되는 최대 긴장력 $T_{\max}$ 에 대하여 탄성 거동할 수 있도록 설계됨. 대형차 충돌로 인한 긴장력 증가분은 안전율을 고려하여 초기 긴장력의 10%로 가정하였음. 케이블의 개수는 특정한 단면적을 갖는 임의 강종의 케이블을 선정한 후에 최대 긴장력 $T_{\max}$ 을 케이블 단면적과 케이블의 허용응력으로 나누어 결정됨. 일반적으로 케이블의 허용응력 f_a 는 케이블 극한강도 f_{pu} 의 70%(K. Han et al., 2016)로 간주됨. 2,430 kN의 $T_{\max}$ 에 대하여 138.7 mm^2 의 케이블 단면적 (직경 15.2 mm)과 1,880 MPa의 케이블 극한 강도 f_{pu} , 그리고 $0.6 f_{pu}$ 의 허용응력을 적용할 경우에 필요한 케이블의 개수는 16개로 결정되었음.

- 지주의 높이와 케이블의 배치는 다양한 종류의 차량이 방호되도록 결정되었음. 최상단 케이블은 대형차의 전도를 방지할 수 있도록 배치되어야 하고 하단 케이블은 소형차의 침투를 방지할 수 있도록 배치되어야함. 14 - ton - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 Hirsch Model(T. Hirsch, 1985)에 적용함으로써 대형차의 전도를 방지하기 위한 배리어의 유효높이가 0.8 m로 결정되었음. 안전율을 고려하여 최상단 8개 케이블의 높이는 1 m, 그리고 중단 4개 케이블과 하단 4개 케이블의 높이는 각각 0.58 m와 0.42 m로 결정되었음.

㉞ 레일

- 본 연구에서 사용되는 레일은 충돌하중을 저항하기 위한 구조 부재의 기능 보다는 운전자의 불안을 감소시킬 수 있는 차폐 효과(screening effects)를 제공하고 케이블의 차량 침투 현상을 방지하기 위한 용도로 배치되었음. 케이블만 사용되는 경우에는 케이블의 작은 직경 때문에 케이블이 차량에 침투하는 현상이 발생하게 됨. 이러한 케이블 침투 현상은 그림 3.3과 같이 차량이 배리어를 이탈하지 못하게 하고 차로에 복귀하지 못하도록 함(R. Albin et al., 2001; B. Winkelbauer, 2014). 성토부 구간에서는 차량이 차로로 복귀하지 못할 경우에 차량이 경사면 아래로 추락할 가능성이 매우 높음.



그림 3.3 소형차 충돌 후 케이블 침투 현상

- 케이블 침투 현상을 방지하기 위하여 상부레일의 단면은 그림 3.4(a)와 같이 8개의 케이블을 용이하게 감쌀 수 있는 150 mm의 높이, 100 mm의 폭, 그리고 1.6 mm의 두께를 갖는 사각 중공 단면으로 이루어져 있음. 하부레일은 그림 3.4(b)와 같이 중단과 하단에 4개씩 따로 배치된 케이블을 함께 감쌀 수 있도록 300 mm의 높이, 100 mm의 폭, 그리고 1.6 mm의 두께를 갖는 사각 중공 단면으로 구성되었음. 하단레일의 단면은 두께 4.0 mm의 W형 레일(the W-shape rails)에 비하여 단면적은 0.57배 작고 단면 2차 모멘트는 2.2배 크게 나타났음.

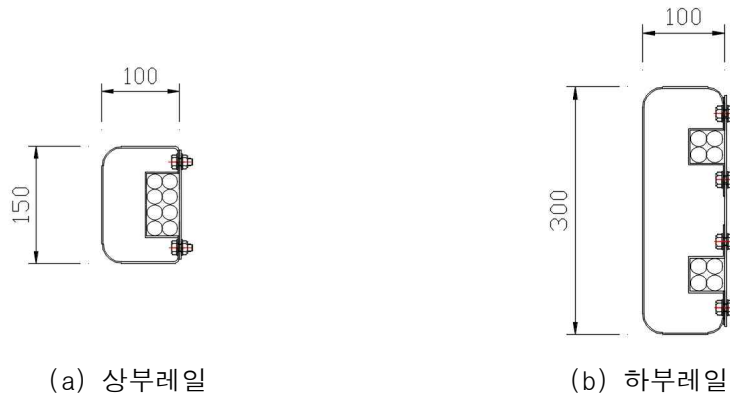
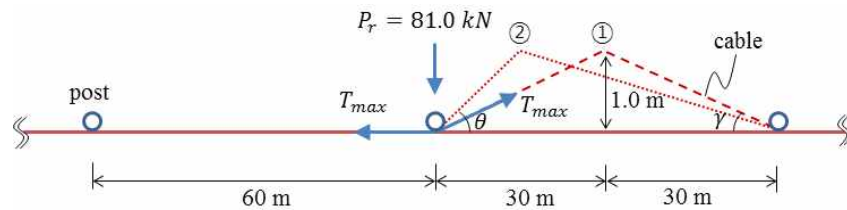


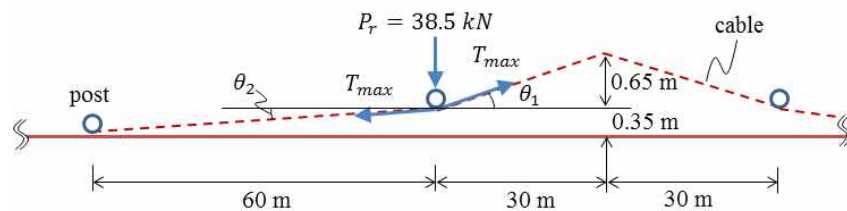
그림 3.4 레일 단면 형상

㉔ 중간지주

- 60 m 길이의 간격으로 배치되는 중간지주는 대형차 충돌에 대하여 1.0 m의 제한된 횡 변위를 만족할 수 있는 횡 방향 지지력을 확보하여야함. 일반적으로 그림 3.5(a)에 보이는 충돌 후 반기에 나타나는 케이블의 변형각도 θ 가 충돌 전반기에 나타나는 변형각도 γ 보다 큰 경우(형상 ②)에 pocketing이 발생되기 때문에 대형차가 케이블로부터 빠져 나오는 각도의 최대치는 전반기 변형각도로 가정될 수 있음. 따라서 그림 3.5(a)에 보이는 대칭 변형 형상(형상 ①)이 pocketing 현상을 방지하면서 가장 큰 케이블 변형 길이를 낳고, 대형차 충돌에 대하여 가장 큰 긴장력을 발생시키는 것으로 간주될 수 있음. 그림 3.5(a)와 같이 중간지주의 횡 변위를 방지하기 위해서는 대형차 충돌로 발생하는 케이블의 최대 긴장력 $T_{max}(=2,430 \text{ kN})$ 의 횡 방향 분력 81 kN에 대하여 횡 변위가 발생하지 않도록 중간지주는 매우 큰 횡 방향 강성을 가져야 할 것임.
- 그림 3.5(b)에는 0.35 m의 지주의 횡 변위가 발생한 경우의 케이블 변형 형상이 나타나 있음. 지주의 횡 방향 저항력 P_r 과 T_{max} 의 횡 방향 분력에 대한 평형으로부터 지주의 횡 방향 저항력 P_r 은 38.5 kN으로 결정되었음. 중간지주의 횡 변위가 커질수록 지주가 지지해야 하는 횡 방향 저항력 P_r 은 감소하는 경향을 보임. 따라서 중간지주의 횡 방향 변위를 허용하는 것이 탑승자의 안전을 증진시키고 지주의 크기를 감소시킬 수 있기 때문에 보다 효율적인 설계가 가능함. 그림 3.6에는 중간지주의 횡 방향 변위를 허용하도록 설계된 중간지주가 나타나 있음. 상세설계 과정에서 중간지주의 강성과 강도가 소형차와 대형차의 충돌 거동에 미치는 영향이 보다 자세히 조사되었음.



(a) Without the lateral movement of posts



(b) With the lateral movement of posts

그림 3.5 대형차 충돌에 대한 중간지주의 저항력

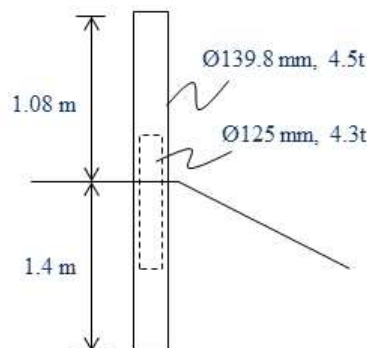
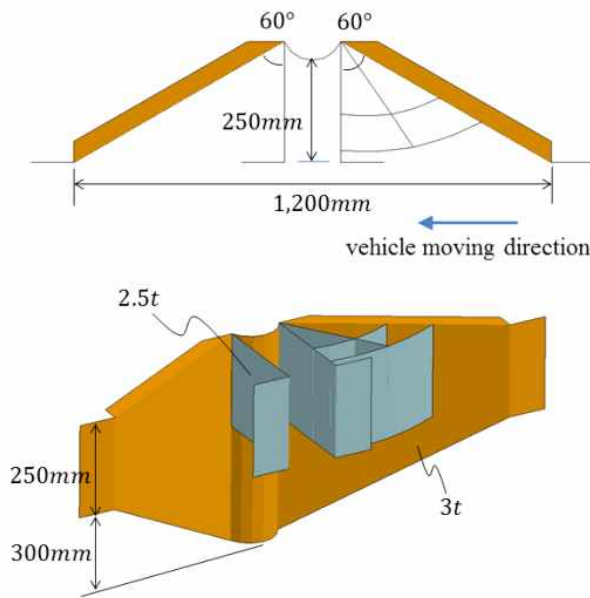


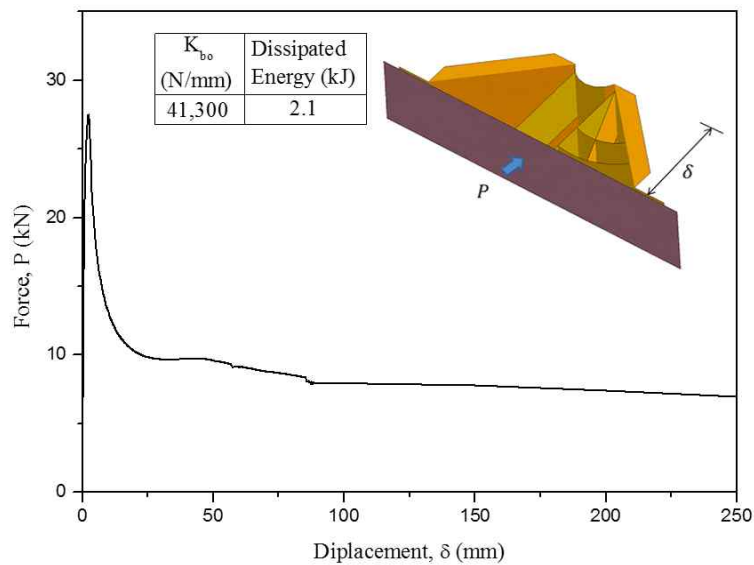
그림 3.6 중간지주 단면 형상

㉔ 블록아웃

- 강한 지주에 소형차가 매우 높은 속도로 충돌할 때 탑승자 안전 요건을 만족시키기 위한 가장 결정적인 요소는 THIV를 감소시키는 것임. 강한 지주에 긴 길이의 블록아웃을 사용할 경우에 차량 바퀴의 스내깅(wheel snagging)이 최소화되어 THIV를 감소시키는데 효과적인 것으로 조사되었음(K. Han et al., 2017).
- 본 연구에서는 그림 3.7(a)에 보이는 250 mm 길이를 갖는 block-out이 하단 레일에 사용되었음. 이 블록아웃은 60 m 길이의 레일과 케이블의 자중을 지지할 수 있게 충분한 수직방향 강성을 갖도록 설계되었고, 차량 횡 방향 속도-시간 이력 곡선의 기울기(gradient)가 충돌 초기에 증가하다가 THIV 발생시간 근처에서 감소하도록 차량 진행 방향 쪽 블록아웃 날개에 격벽이 설치되었음. FEA를 통하여 결정된 그림 3.7(a)에 보이는 블록아웃의 축 방향 강성과 에너지 소산 능력은 그림 3.7(b)에 나타나 있음,



(a) dimensions



(b) Axial stiffness and dissipated energy

그림 3.7 Block-out for the bottom rail

㉞ 단부지주

- 단부 지주는 장경간 반강성 케이블 배리어의 기하학적 형상을 유지해주는 중요한 역할을 담당함. 따라서 단부 지주의 강성은 케이블의 소요 초기 긴장력을 경험할 때나 대형차가 배리어에 충돌할 때에도 변형이 거의 발생하지 않도록 커야 함. 차량 충돌이 없는 경우에는 단부 지주에 그림 3.8(a)와 같이 케이블 초기 긴장력(T_c)으로 인한 수직방향 분력과 종 방향 분력이 작용함. 대형차가 충돌할 때에는 그림 3.8(b)와 같이 케이블의 최대 긴장력(T_{max})으로 인한 횡 방향 분력이 횡 방향 하중으로 작용하게 됨.
- 그림 3.9에는 위의 횡 방향 분력에 대하여 단부 지주 최상단의 횡 방향 변위가 2 mm 이하로 나타나도록 설계된 단부 지주가 나타나있음. 소형차가 지주에 심하게 충돌하는 현상을 방지하기 위해서 250 mm 길이의 블록아웃이 하단 레일에 적용되었기 때문에 하단 레일은 지주에 직접 연결된 상단 레일 보다 250 mm 더 도로방향으로 튀어 나왔음. 이러한 형상을 유지하기 위하여 1.1 m 길이의 H300x300x15x15 형강과 0.6 m 길이의 H250x250x14x14 형강을 연결하여 250 mm의 간격을 유지하도록 설계되었음. 케이블은 단부 지주에서 상당히 큰 각도 변화를 겪음. 따라서 케이블의 각도 변화가 단부 지주에서 원활하게 이루어 질 수 있도록 그림 3.9에 보이는 것처럼 단부 지주에 케이블 안착장치(saddle)가 설치되었음.

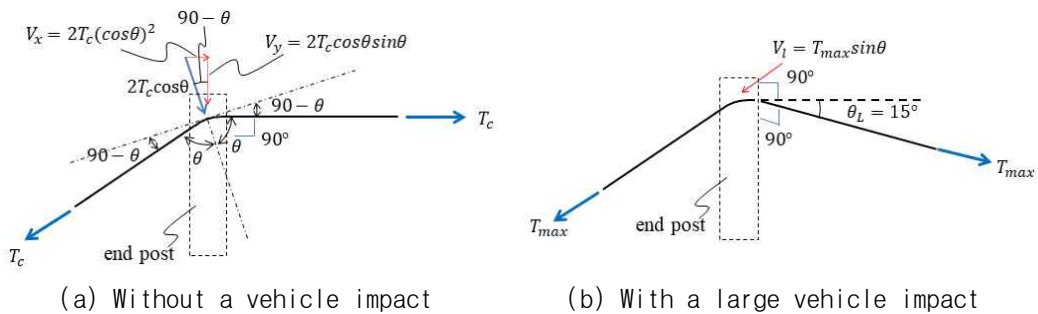


그림 3.8 단부 지주에 작용하는 하중

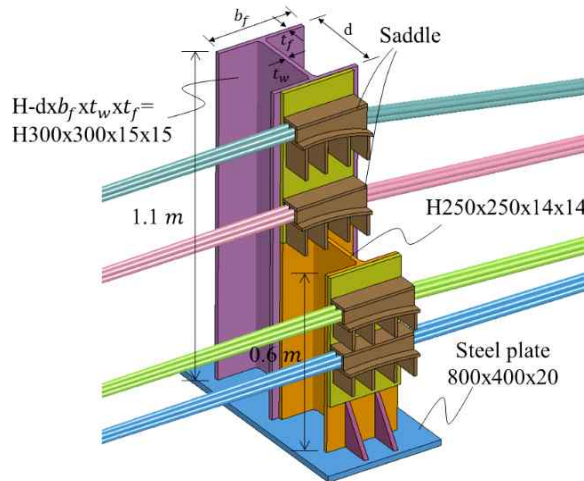


그림 3.9 단부지주

㉞ 케이블 앵커 시스템

- Cable anchor system은 케이블의 초기 긴장력과 대형차의 충돌로 인하여 케이블이 겪는 긴장력 증가분을 더한 T_{max} 을 지지할 수 있도록 설계되어야 함. 그림 3.10에는 2,430 kN의 케이블 긴장력을 지지할 수 있도록 설계된 cable anchor system이 나타나있음. 도로의 표준 지반 상태(AASHTO, 2016)에 설치되는 케이블 앵커 시스템은 케이블 최대 긴장력 T_{max} 을 겪을 때 활동, 인발, 전도 관련 변위가 극히 제한적으로 발생하도록 설계가 이루어졌음. 도로 성토부의 제한된 공간 내에서 2,430 kN의 매우 큰 케이블 긴장력을 정착해야 하기 때문에 케이블

연성 배리어에 사용된 중력식 콘크리트 기둥 형식 대신에 ground anchor type과 pile group type이 보다 효율이 좋은 것으로 조사되었음. 그림 3.10(a)의 ground anchor type에서는 그라운드앵커가 케이블 긴장력 방향의 반대방향으로 작용하도록 설치됨. 그라운드앵커에 도입된 긴장력의 수평과 수직 분력이 케이블 최대 긴장력 T_{max} 의 수평과 수직 분력보다 큰 경우에 anchor system의 변위가 발생하지 않음. Ground anchor type은 그라운드 앵커의 길이가 길어질수록 시공비와 공사기간이 증가하기 때문에 지반이 약한 곳에서는 경제성이 떨어지지만 낮은 깊이에 암반이 존재하거나 지반이 견고한 경우에는 효과적인 방안임.

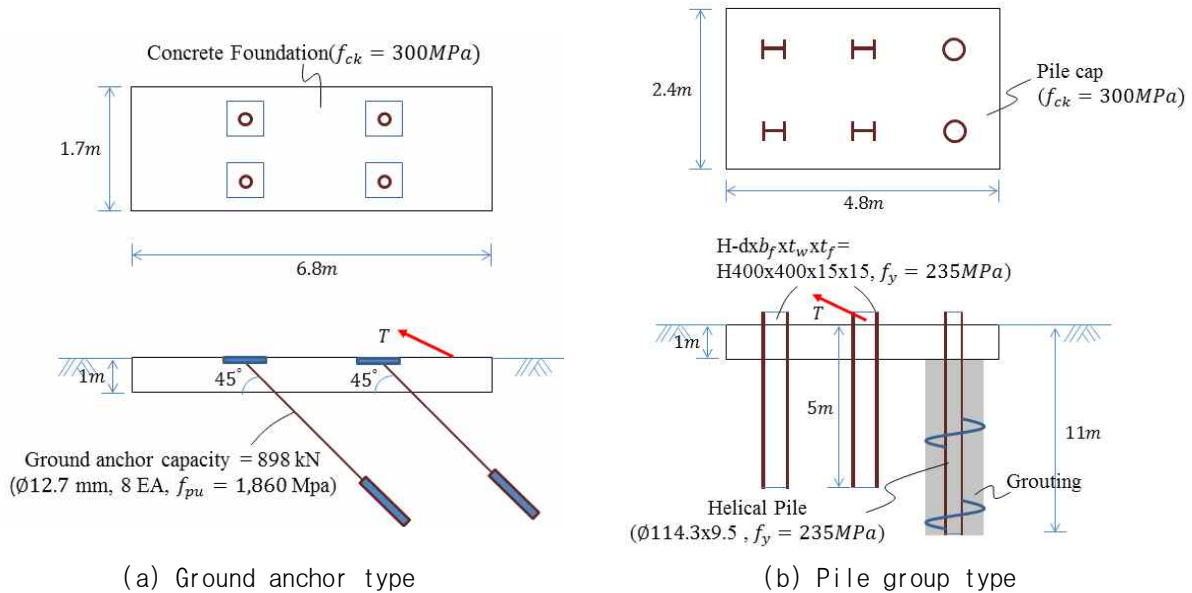
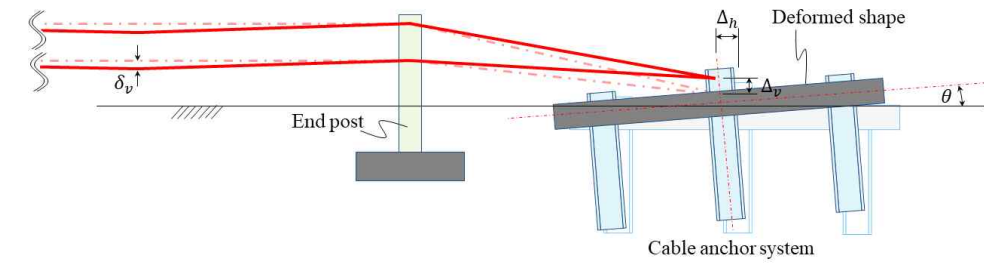


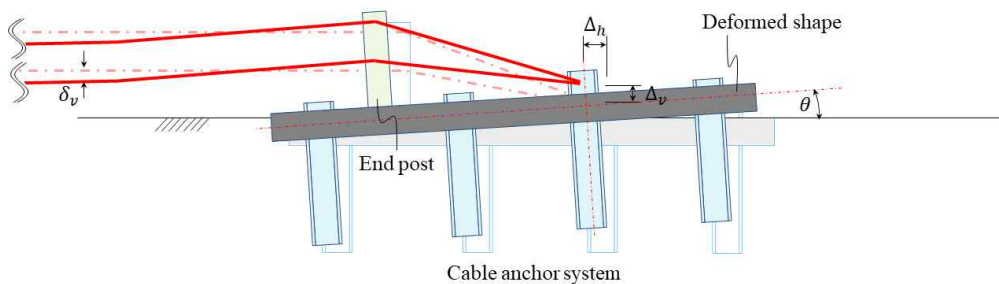
그림 3.10 Cable anchor systems

- 그림 3.10(b)의 pile group type은 수평저항력이 좋은 H형강 pile과 인발 저항력이 좋은 헬리컬 파일(Helical pile)의 조합으로 이루어져 있음. Pile group type은 ground anchor type에 비하여 일반적으로 공사기간이 짧고 경제성이 좋은 반면에 대형차 충돌에 대하여 anchor system의 변위가 완전하게 방지되지 않을 수도 있기 때문에 안전율을 상당히 크게 적용하거나 전단 키(shear keys) 등을 설치해야 하는 단점이 있음. 대형차 충돌에 대하여 anchor system의 변위가 완전하게 방지되지 않는 경우에 대형차 충돌에 대한 케이블의 처짐 외에 anchor system의 변위로 인한 케이블의 처짐이 추가적으로 발생될 수 있음. 처짐으로 인하여 케이블의 높이가 낮아질 경우에 대형차 바퀴가 케이블을 밟고 넘어갈 확률이 높아지기 때문에 케이블의 처짐은 대형차 충돌 후 거동에 매우 치명적으로 작용될 수 있음.
- Anchor system의 변위로 인하여 발생하는 케이블의 처짐은 그림 3.11과 같이 두 가지 형태로 나타남. 그림 3.11(a)는 단부지주가 anchor system과 분리되어 독립적으로 설치된 경우를 나타냄. 이 경우에 anchor system에 변위가 발생하게 되면 이 변위로 인하여 단부지주와 중간지주 사이의 케이블 길이가 증가되어 케이블의 처짐 δ_v 가 발생됨. 그림 3.11(b)는 단부지주가 anchor system 위에 설치된 경우를 나타냄. 이 경우에 anchor system의 변위가 발생하게 되면 단부지주가 함께 움직이기 때문에 단부지주와 중간지주 사이의 간격 감소와 단부지주의 회전으로 인하여 단부지주와 중간지주 사이에서 케이블의 처짐 δ_v 가 발생하게 됨. 그림 3.11(b)는 설치 공간의 제약으로 anchor system의 크기를 배리어 바깥쪽으로 더 이상 키울 수 없는 경우에 배리어 안쪽으로 anchor system의 크기를 키울 수 있기 때문에 그림 3.11(a)에 비하여 anchor system의 변위를 감소시킬 수 있는 장점이 있음. 하지만 anchor system에 변위가 발생될 때 단부지주도 같이 움직이기 때문에 anchor system의 변위가 감소함에도 불구하고 전체 시스템의 기하학적 형상의 변화로 인하여 케이블의 처짐 δ_v 가 더 크게 발생될 가능성도 있음. 따라서 케이블 최대 긴장력 T_{max} 을 겪을 때 anchor system에 활동, 인발,

전도 관련 변위가 발생하는 경우에는 상세해석을 통하여 전체 시스템의 거동을 검토할 필요가 있음. 설치장소의 환경과 경제성 등을 고려하여 위의 두 형식 중에서 보다 적절한 cable anchor system을 선정할 필요가 있음.



(a) 단부지주와 anchor system이 분리되어 설치된 경우



(b) 단부지주가 anchor system 위에 설치된 경우

그림 3.11 Anchor system의 변위로 인하여 발생하는 케이블의 처짐

(나) Short-span weak-post system

① 구성요소

- 단경간 반강성 케이블 배리어는 그림 3.12에 나타나있는 것처럼 프리스트레스트 케이블(pre-stressed cables), 레일(rails), 중간지주(intermediate posts), 단부지주(end posts), 그리고 케이블 앵커 시스템(cable anchor system)으로 구성됨. 구성요소는 블록아웃을 제외하고 장경간 반강성 케이블 배리어와 동일함. 단경간 반강성 케이블 배리어는 중간지주로 횡방향 강성과 비틀림 강성이 매우 작은 약한 지주를 사용하기 때문에 소형차 충돌에 대하여 차량 바퀴의 스네깅이 거의 발생하지 않음. 따라서 스네깅을 방지하기 위하여 설치되는 블록아웃은 단경간 반강성 케이블 배리어의 구성요소에서 제외되었음.

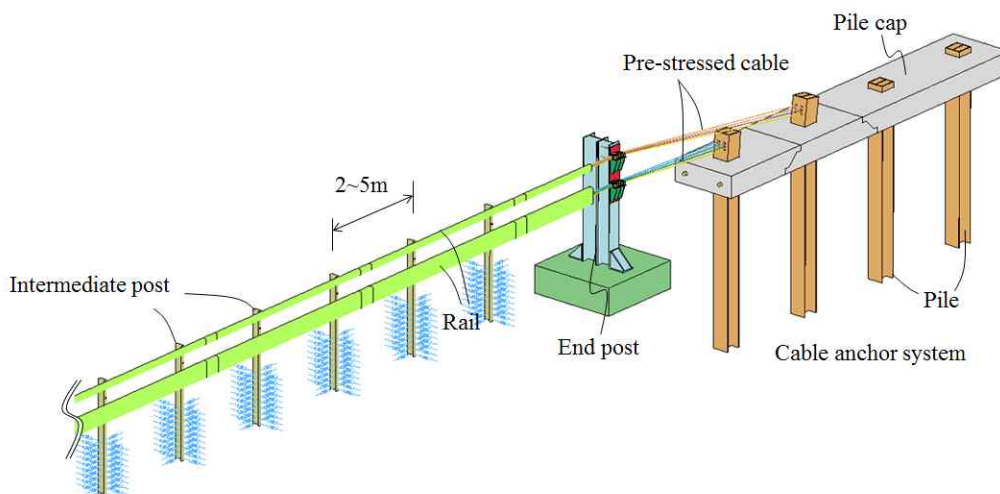


그림 3.12 Short-span weak-post semi-rigid cable barrier

② 예비설계

㉞ 중간지주

- 단경간 반강성 케이블 배리어의 레일, 단부지주, 그리고 케이블 앵커 시스템의 예비설계는 장경간 반강성 케이블 배리어와 동일함. 단경간 반강성 케이블 배리어의 중간지주에는 높은 속도의 소형차 충돌에 좋은 탑승자 안전을 제공하기 위하여 연성 배리어에 사용되는 약한 지주가 사용되어야 함. 중간지주가 약할수록 소형차 충돌 시에 탑승자 안전이 점점 더 좋게 나타나지만 지주의 강성에 상관없이 동일한 차량 점유폭을 넣기 위해서는 지주가 약해질수록 케이블의 장력을 더 증가시켜야 함. 중간지주가 약해지고 케이블의 장력이 상응하여 증가될 때 특정한 값 이상의 케이블 장력에 대해서는 중간지주의 강성이 작아짐에도 불구하고 케이블의 강성과 관성력 저항이 보다 크게 나타나서 오히려 탑승자의 안전이 좋지 않게 나타날 수도 있음. 따라서 중간지주의 강성은 연성 배리어에 사용되는 지주의 강성 보다 너무 작지 않게 설계되어야 함.
- 연성 배리어의 약한 지주는 차량과 지주와의 직접적인 충돌에 대하여 탑승자의 안전이 좋게 나타날 수 있도록 휨 강성과 비틀림 강성이 매우 작게 설계됨. 그리고 차량의 거동을 원활하게 유도할 수 있도록 레일과 지주의 연결은 레일과 지주가 쉽게 분리될 수 있도록 설계됨. 지주가 레일과 분리되지 않을 경우에 차량이 지주를 밟을 때 레일도 함께 지표면으로 따라 내려오게 되어서 차량의 바퀴가 레일을 타고 넘어가게 됨. 연성 배리어에서 지주와 레일이 쉽게 분리될 수 있도록 지주와 레일을 연결하는 볼트 구멍이 일반 볼트 구멍보다 크게 만들어짐.
- 그림 3.13과 표 3.1에는 단면적 A 와 비틀림 상수 J 가 동일한 다양한 단면에 대한 단면 특성이 나타나있음. 소형차 충돌에 대하여 탑승자 안전이 좋게 나타나기 위해서는 I_x , I_y , 그리고 J 가 작을수록 효과적이고 대형차 충돌에 대하여 횡 방향 변위를 감소를 감소시키기 위해서는 I_x 가 클수록 효과적임. 그림 3.13에 제시된 5개 단면이 중간지주로 모두 사용될 수 있지만 5개 단면 중에서 I_y 가 거의 제일 작으면서 I_x 가 중간정도의 값을 갖는 C-type 2를 중간지주로 결정하였음. 레일과 지주가 쉽게 분리될 수 있도록 그림 3.14와 같이 지주에 20 mm 직경의 볼트구멍 뚫고 12 mm 직경의 볼트를 사용하여 지주와 레일을 연결하였음.

표 3.1 약한 지주의 단면 특성

	$A \text{ (mm}^2 \text{)}$	$I_x \text{ (mm}^4 \text{)}$	$I_y \text{ (mm}^4 \text{)}$	$J \text{ (mm}^4 \text{)}$
W-type 1	6.1×10^2	13.5×10^5	3.3×10^5	0.82×10^3
C-type 1	6.1×10^2	10.3×10^5	7.4×10^5	0.82×10^3
C-type 2	6.1×10^2	20.2×10^5	3.4×10^5	0.82×10^3
L-type 1	6.1×10^2	23.4×10^5	5.8×10^5	0.82×10^3
L-type 2	6.1×10^2	30.6×10^5	3.1×10^5	0.82×10^3

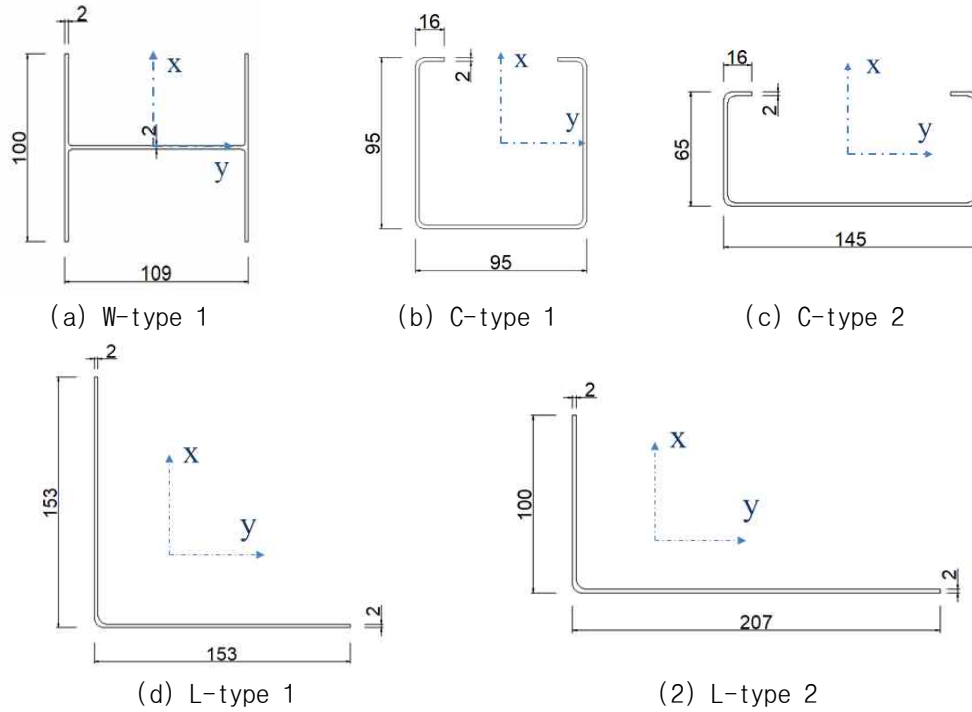


그림 3.13 약한 지주의 다양한 단면

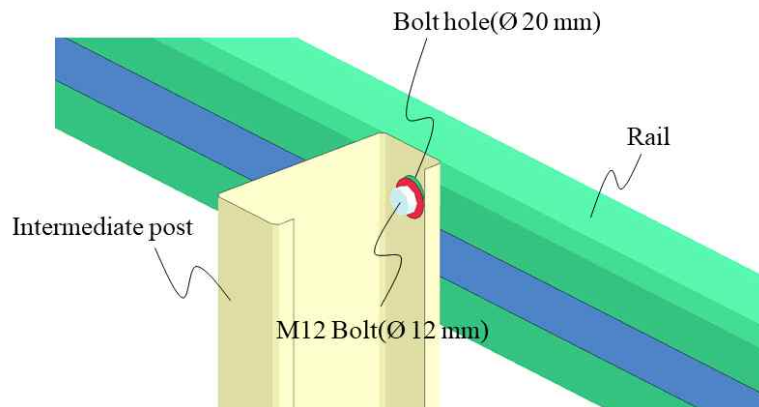


그림 3.14 약한 지주와 레일의 연결

㉔ 프리스트레스트 케이블

- Strong-post system과 마찬가지로 weak-post system의 프리스트레스트 케이블에도 대형차 충돌에 대하여 케이블이 반강성적으로 탄성 거동할 수 있게 하는데 필요한 긴장력이 도입되어야 함.
- Weak-post system은 동일한 케이블의 긴장력에 대하여 약한 지주의 횡 방향 강성, 비틀림 강성, 그리고 약한 지주와 레일의 연결에 따라 대형차 충돌에 대한 배리어의 횡 변위가 다르게 나타날 수 있음. 본 연구에서는 그림 3.13(c)의 C-type 2와 그림 3.14의 약한 지주와 레일의 연결 방법을 적용한 2 m 경간의 단경간 반강성 케이블 배리어에 대하여 LS-DYNA 프로그램을 이용한 반복적인 3차원 FEA를 통해 케이블의 초기 긴장력을 변화시키면서 1 m의 탄성 횡 변위를 만족하는 최대 장력이 결정되었음.
- 해석모델의 상단과 중단에 각각 2개씩 배치된 케이블의 높이는 1 m와 0.8 m임. 그리고 하단에 각각 2개씩 배치된 케이블의 높이는 0.58 m와 0.42 m임.
- 2 m 간격의 약한 중간지주를 갖는 120 m 길이의 반강성 케이블 배리어에 14-ton - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용할 때 1 m의 탄성 횡 변위를 만족하기 위한 초기 긴장력은

852 kN으로 결정되었고 최대 장력은 932 kN으로 나타났음. 설치 현장의 년 간 온도변화가 -20 ℃에서 +40 ℃까지 발생하는 경우에 +40℃의 현장 초기 긴장력 T_r 은 2 m의 지주간격에 대하여 852 kN이고 ΔT 는 -60℃임. 식 1.2에 이러한 값을 대입하면 케이블 길이에 상관없이 -20℃에서 설치되는 케이블의 초기 긴장력 T_c 은 985 kN으로 나타남. T_c 의 계산에 사용된 α 와 EA 의 값은 각각 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 와 222,240 kN임.

- 케이블은 케이블의 초기 긴장력 T_c (= 985 kN)에 대형차 충돌로 인하여 발생하는 긴장력의 증가분(= 80 kN)을 더하여 결정되는 최대 긴장력 $T_{\max}$ 에 대하여 탄성 거동할 수 있도록 설계됨. 1,065 kN의 $T_{\max}$ 에 대하여 138.7 mm²의 케이블 단면적 (직경 15.2 mm)과 1,880 MPa의 케이블 극한 강도 f_{pu} , 그리고 0.6 f_{pu} 의 허용응력을 적용할 경우에 필요한 케이블의 개수는 8개로 결정되었음.

(2) 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 입력변수의 보정

(가) 해석모델

① 차량

- 미국의 National Crash Analysis Center (NCAC)에서 공개한 Dodge Neon 모델(NCAC, 2007)이 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 모델로 사용되었음. Dodge Neon 모델의 무게 중심은 지표면에서 0.51 m 높이 그리고 앞 범퍼에서 종 방향으로 1.85 m 거리에 위치하고 있음. 그림 3.15(a)에 나타나 있는 Dodge Neon 모델과 시험차량의 축간 거리와 무게중심 종 방향 거리의 차이는 각각 1.3 %와 2.5 %로 나타났음.
- 대형차 모델은 EN-1317(CEN, 2010)의 시험차량에 대하여 TC226/CM-E Work Group에서 개발한 16 ton 트럭 모델(G. Bonin et al., 2009)을 무게중심이 변화하지 않도록 집중질량을 감소시켜서 구성되었음. 대형차 모델의 무게 중심은 지표면에서 1.13 m 높이 그리고 앞 범퍼에서 종 방향으로 4.33 m 거리에 위치하고 있음. 그림 3.15(b)에 나타나 있는 대형차 모델과 시험차량의 축간 거리와 무게중심 종 방향 거리의 차이는 각각 0.4 %와 6.4 %로 나타났음.
- 버스 모델은 EN-1317의 시험차량에 대하여 TC226/CM-E Work Group에서 개발한 Bus 모델이 사용되었음. 버스 모델의 무게 중심은 지표면에서 1.19 m 높이 그리고 앞 범퍼에서 종 방향으로 6.07 m 거리에 위치하고 있음. 그림 3.15(c)에 나타나 있는 버스 모델과 시험차량의 축간 거리와 무게중심 종 방향 거리의 차이는 각각 1.2 %와 5.1 %로 나타났음.
- 차량 모델의 Massive Part(Engine, Wheel Hub)는 Solid 요소, Spring 및 Damper는 Discrete 요소로 모델링 되었고 그 외의 부재는 Shell 요소로 모델링되었음. Part 간의 연결은 Merging Coincident nodes, Spot-Weld 요소, Joint Constraints (cylindrical, spherical, revolute 및 translational type) 및 Nodal Rigid bodies를 사용하여 이루어졌음. 강재로 이루어진 차량부재는 450 MPa 및 610 MPa의 항복응력을 갖는 두 종류의 강재재료모델이 적용되었음. 타이어에는 Elastic 재료모델, Engine 및 Wheel Hub 등에는 Rigid 재료모델이 적용되었음.

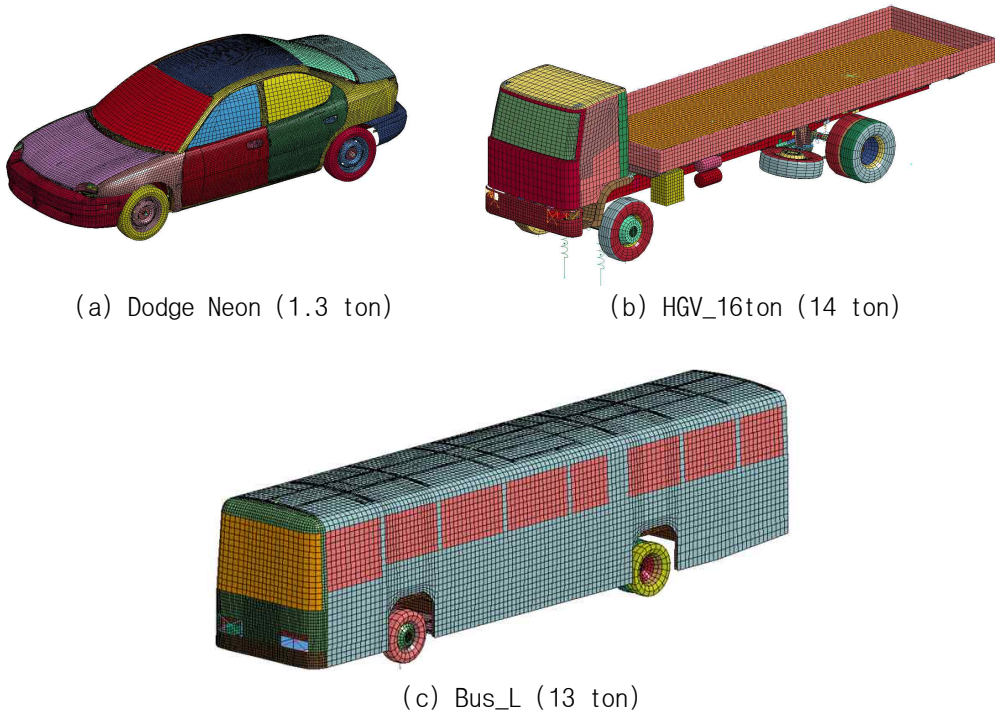


그림 3.15 차량 모델

② 반강성 케이블 배리어 구성요소

- 그림 3.16에 보이는 FEA 모델의 지주, 레일, 블록아웃, 그리고 레일 연결 부재는 재료 비선형과 기하학적 비선형을 고려할 수 있는 완전 적분 쉘 요소(fully integrated shell elements)를 사용하여 모델링되었음. 레일과 블록아웃, 레일과 연결 부재, 그리고 지주와 블록아웃 사이의 볼트 연결은 볼트의 축 방향 변형 효과를 고려할 수 있는 보 요소를 사용하여 모델링되었음.
- 배리어 구성요소 사이의 접촉면에 automatic-general 접촉 모델이 사용되었고 타이어와 지표면 사이의 접촉면과 차량과 배리어 사이의 접촉면에는 surface-to-surface 접촉 모델이 사용되었음(Q. Wan et al., 2013). 차량의 구성요소에 적용된 것과 같은 0.2의 마찰계수가 배리어 구성요소의 접촉을 고려하기 위하여 사용되었음. 타이어와 노후화된 콘크리트 포장의 횡미끄럼 마찰계수는 0.5에서 0.65 사이의 값이고 속도가 증가함에 따라 감소함(L. B. Fricke, 1990). 본 연구에서는 160 km/h의 높은 충돌속도를 고려하여 0.5의 마찰계수가 적용되었음.

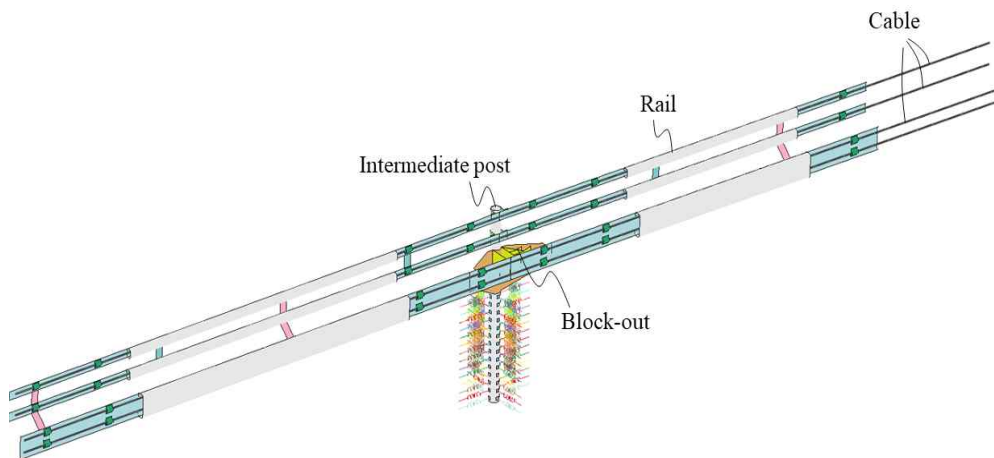
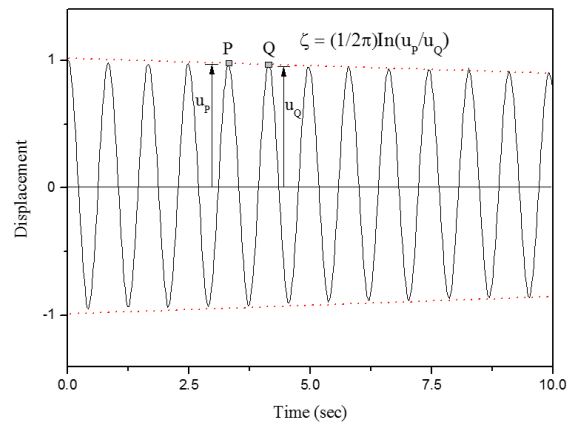


그림 3.16 반강성 케이블 배리어 FEA 모델

- 비탄성 대 변형을 겪는 경우에 감쇠가 에너지 소산에 미치는 영향이 미미하기 때문에 비탄성 변형을 겪는 레일, 블록아웃, 지주, 레일 연결부재에 대해서는 감쇠가 적용되지 않았음. 레일과 블록아웃의 큰 변형으로 인하여 소형차가 지주에 충돌할 때 가장 큰 THIV가 발생하기 때문에 안전 측으로 THIV를 결정하기 위하여 변형을 경화와 변형률 속도 효과가 무시되었음. 탄성-완전 소성 응력-변형률 관계와 250 MPa의 예측된 항복강도가 케이블을 제외한 모든 구성요소의 재료모델에 적용되었음.
- 케이블은 차량 충돌로 인한 케이블의 동적 거동을 적절하게 묘사할 수 있고 축 방향 변형을 고려할 수 있는 보 요소(C. Stolle and J. Reid, 2010)를 사용하여 모델링 되었음. 케이블이 대형차 충돌에 대하여 탄성 거동을 하도록 설계되었기 때문에 탄성 재료모델이 케이블에 적용되었음. 탄성 대 변형을 겪는 경우에 감쇠가 에너지 소산에 일부 영향을 미치기 때문에 탄성 변형을 겪는 케이블에 대해서는 감쇠의 영향이 고려되었음.
- 일반적으로 사장교 등에 사용되는 케이블의 Damping ratio는 1 % 이내로 매우 작음(H. Bosch and J. Pagenkopf, 2014). 반강성 케이블 배리어에 설치되는 케이블의 Damping ratio를 조사하기 위하여 120 m 길이의 케이블에 대하여 그림 3.17(a)와 같이 자유진동실험이 수행되었음.
- 자유진동실험은 케이블에 약 20 cm의 초기 수직방향 변위를 가하여 3회 수행되었음. 케이블 수직방향 변위의 변화는 고속카메라를 이용하여 계측되었고 변위-시간 관계는 그림 3.17(b)에 나타나있음. 변위-시간 관계로부터 계측된 케이블의 Damping ratio는 0.7 %로 나타났음. 긴 길이의 케이블은 강성이 매우 작기 때문에 케이블의 해석에 적용될 때 mass-proportional damping과 Rayleigh damping은 비슷한 결과를 냄. 본 연구에서는 첫 번째 모드에 0.7 %의 Damping ratio를 적용한 mass-proportional damping이 케이블 해석모델에 사용되었음.



(a) 케이블 자유진동 실험



(b) 케이블의 변위-시간 관계

그림 3.17 케이블의 Damping ratio

③ 지주-지반 상호작용

- 지주와 지반의 동적과 정적 상호작용을 정의하기 위한 해석 모델은 그림 3.18에 보이는 것과 같은 지주에 대한 동적과 정적 횡 하중 실험에 의하여 결정된 지주 횡 하중-변위 관계를 이용하는 보정 과정을 통하여 결정되었음.
- 지주에 동적 하중이 가해지면 흙의 동적 저항으로 인하여 지주의 정적 저항에 비하여 지주 동적 저항의 강도는 약 1.6배, 강성은 약 15배 정도 크게 나타나게 됨(AASHTO, 2016; Wu, Weijia, and Robert Thomson, 2007). 그림 3.19에는 33.7°의 경사를 갖는 성토부에 설치된 지주에 대하여 수행된 지주 동적과 정적 횡 하중 실험의 횡 하중-변위 관계가 나타나 있음. 지주 동적 실험은 25 km/h의 속도로 충돌하는 bogie car를 이용하여 수행되었음. 충돌 하중과 변위는 각각 load cell과 고속카메라를 이용하여 계측되었음. Load cell을 이용하여 계측

된 자료는 CFC 60 필터를 사용하여 여과되었음.

- 유사한 지반상태를 갖는 동일한 장소에서 수행된 지주 정적 실험과 동적 실험의 최대 횡 하중은 그림 3.19와 같이 각각 약 22 kN과 34 kN로 나타났음. 지주 동적 실험이 정적 실험에 비하여 강도와 강성을 각각 약 1.5배와 19배 더 크게 발현하였음.



(a) Static test



(b) Dynamic test

그림 3.18 Static and dynamic tests for posts

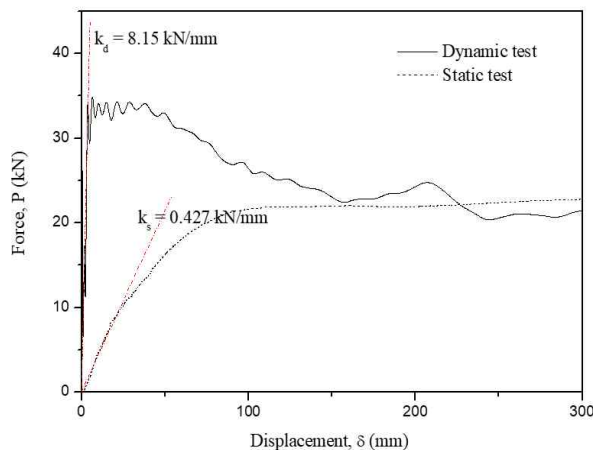
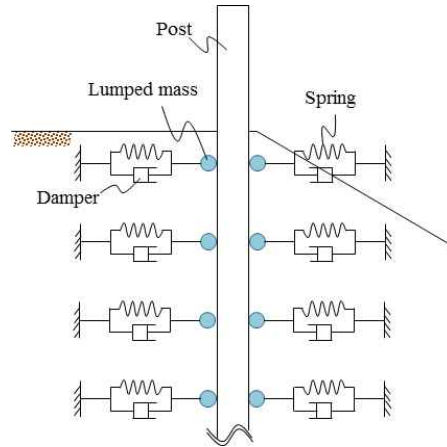


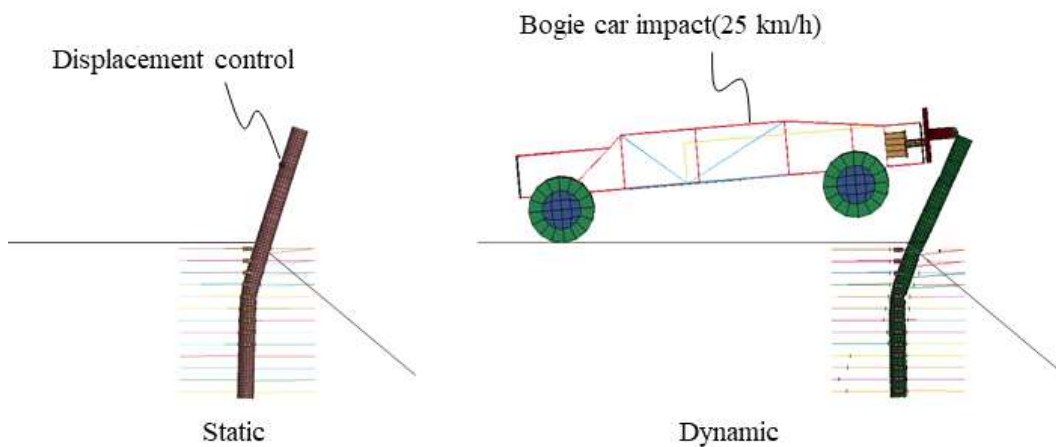
그림 3.19 Lateral load-displacement relations of posts

- 흙의 동적 저항을 정의하기 위하여 1 자유도를 갖는 집중질량, 댐퍼, 그리고 스프링으로 구성된 M-D-S 요소(A. Sassi, 2011)가 컴퓨터 시뮬레이션에 사용되었음. 지주 원주 둘레를 따라 등 간격으로 4개의 M-D-S 요소가 1.4 m의 매입 깊이를 따라 0.1 m의 간격으로 배치되었음.
- M-D-S 요소에 사용되는 집중 질량은 지주를 중심으로 둘러싼 도립 원뿔대(inverted truncated cone)의 흙 체적이 흙의 동적 저항에 참여하는 것으로 가정하여 결정되었음. 도립 원뿔대는 지주 직경 5배의 상부 반지름, 지주 직경의 하부 반지름, 그리고 지주 매입 깊이의 높이를 갖고 있음. 또한 12 %의 감쇠비, 460 kN/m의 스프링 강성, 그리고 지반 깊이의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 0.5-11.5 kN의 스프링 항복강도가 M-D-S 요소에 적용되었음.
- 그림 3.20(a)에 보이는 M-D-S 요소를 이용하는 지주-지반 해석모델에 대한 정적 해석은 그림 3.20(b)와 같이 변위 제어방법을 통하여 이루어졌고 동적 해석은 bogie car를 지주에 충돌시켜서 이루어졌음.
- 각각 그림 3.21에 보이는 것 같이 약 22 kN의 최대 정적 저항을 보이는 횡 하중-변위 관계와 약 34 kN의 최대 동적 저항을 보이는 횡 하중-변위 관계를 적절히 정의할 수 있었음.
- M-D-S 요소를 이용하는 지주-지반 해석모델에 0.5-11.5 kN 대신에 4.2-80 kN의 스프링 항복강도를 적용하고 정적으로 변위를 증가시키는 정적 해석은 그림 3.21에 보이는 것 같이 약 43 kN의 최대 정적 저항을 보이는 대상 배리어(CM3 모델)의 지주 횡 하중-변위 관계를 적절히 정의할 수 있었음. 위의 지주-지반 해석모델이 대상 배리어 (CM3 모델)에 대한 소형차 충돌해석에 적용될 때 이 모델은 그림 3.21과 같이 약 57 kN의 최대 동적 저항을 보이는 횡 하

중-변위 관계를 나타낼 것임.



(a) Post-soil analytical model



(b) Static and dynamic FEA for posts

그림 3.20 Dynamic models of intermediate posts

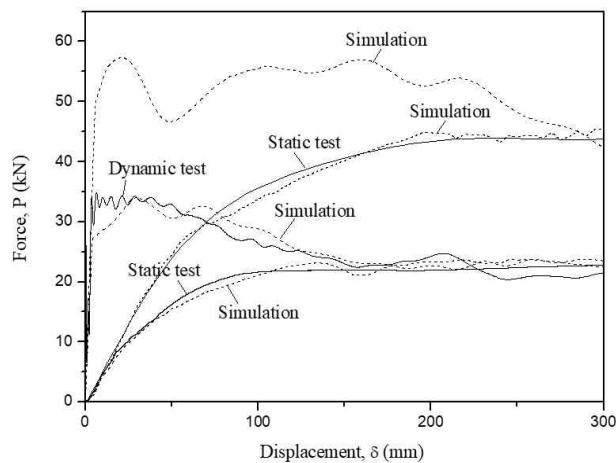


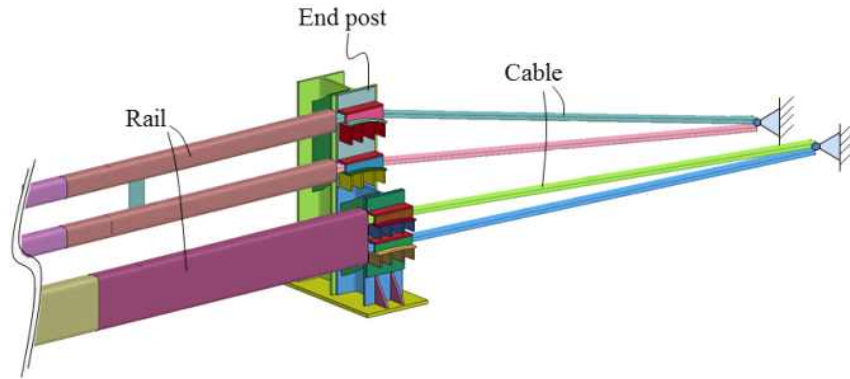
그림 3.21 Lateral load-displacement relations of intermediate posts

④ Anchor system

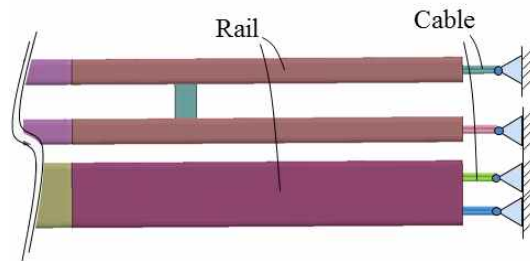
- 그림 3.22에는 ground anchor 형식의 cable anchor system에 대한 해석모델이 나타나있음. Ground anchor 형식의 cable anchor system은 케이블 최대 긴장력에 대해서 변위를 발생시키지 않는 힌지 지점(hinge support)과 같은 역할을 함. 따라서 cable anchor system이 그림

3.22(a)와 같이 모델링 될 수 있음. 그리고 단부 지주가 거의 강체와 같은 거동을 하고 단부 지주와 케이블 정착부 사이의 케이블 길이가 매우 짧기 때문에 케이블의 단부는 그림 3.22(b)와 같이 보다 간단하게 모델링 될 수도 있음.

- 케이블 단부의 구속조건이 해석결과의 경향에 큰 영향을 미치지 않는 변수 조사에서는 그림 3.22(b)와 같은 간이모델이 사용되었고, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 최종 설계에 대한 성능 검증은 그림 3.22(a)의 상세모델이 사용되었음.



(a) Detailed model

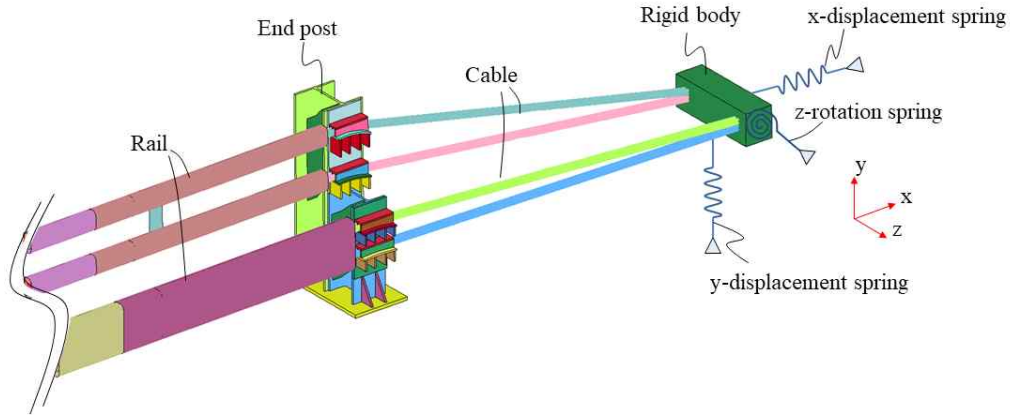


(b) Simplified model

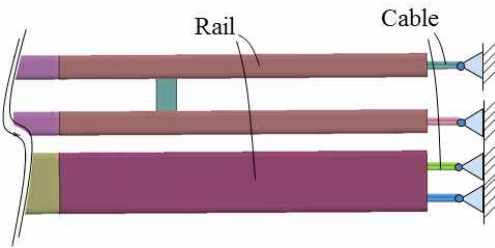
그림 3.22 FEA Models of ground anchor type

- 그림 3.23에는 pile group type의 cable anchor system에 대한 해석모델이 나타나있음. Pile group type의 cable anchor system의 경우에 대형차 충돌로 인하여 전도, 활동, 그리고 인발과 관련된 시스템의 변위가 약간 발생할 수도 있음.
- 케이블 앵커 시스템의 변위가 발생하는 경우에는 cable anchor system이 그림 3.23(a)와 같이 스프링으로 모델링되어야 함. 그림 3.23(c), (d), (e)에는 지반과 케이블 앵커 시스템에 대한 3차원 해석모델에 케이블 장력을 증가시키면서 결정된 케이블 앵커 시스템 수평 변위와 장력의 수평분력 관계, 케이블 앵커 시스템 수직 변위와 장력의 수직분력 관계, 그리고 케이블 앵커 시스템 회전각과 파일 캡 도심 모멘트 사이 관계가 나타나 있음.
- 그림 3.23(a)의 수평과 수직 스프링 요소 그리고 회전 스프링에 적용되는 다직선 힘-변위 관계와 모멘트-회전각 관계는 그림 3.23(c), (d), (e)에 보이는 것 같이 3차원 해석모델의 결과를 적절하게 정의하도록 결정되었음.
- 차량 충돌로 인하여 발생하는 cable anchor 시스템의 변위만을 정확하게 예측하면 되기 때문에 소요긴장력 T_c 가 작용할 때 스프링 요소의 변위와 회전이 발생하지 않도록 스프링 요소의 힘-변위 관계와 모멘트-회전각 관계의 초기 기울기는 무한대로 결정되었음. 소요긴장력 T_c 에 의한 수평분력, 수직분력, 그리고 모멘트는 각각 2,100 kN, 524 kN, 433 kN·m 임.
- 대형차 충돌로 인한 전도, 활동, 그리고 인발과 관련된 시스템의 변위가 매우 작은 경우에 케이블의 단부는 그림 3.23(b)와 같이 보다 간단하게 모델링될 수도 있음. 변수 연구에 대해서는 그림 3.23(b)와 같은 간이모델이 사용될 수 있고, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 최종 설

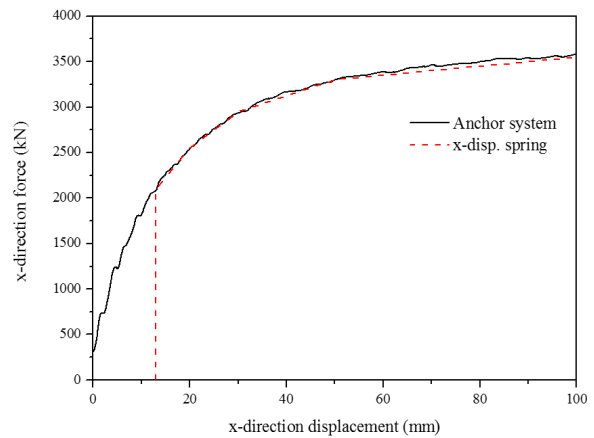
계에 대한 성능 검증은 그림 3.23(a)의 상세모델이 사용될 수 있음.



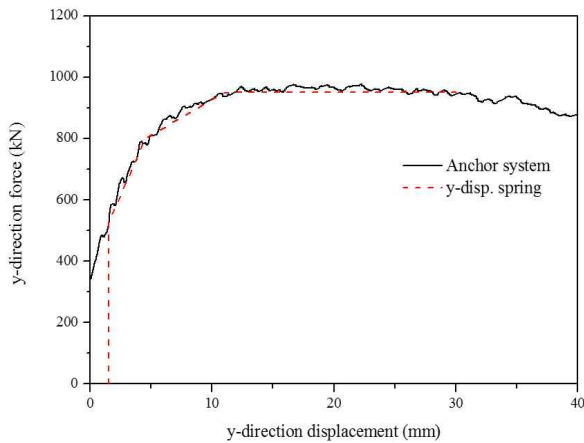
(a) Detailed model



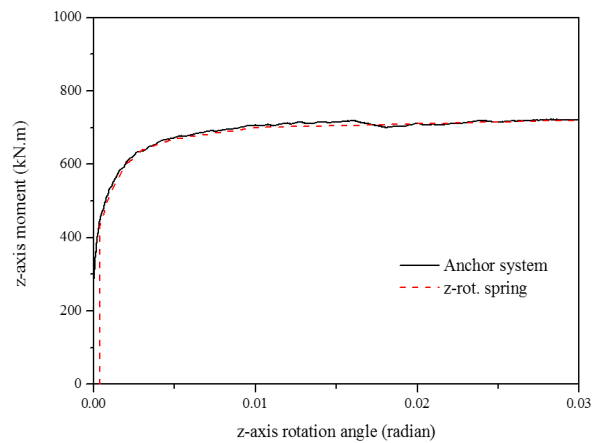
(b) Simplified model



(c) 스프링 요소의 x 방향 힘-변위 관계



(d) 스프링 요소의 y 방향 힘-변위 관계



(e) 스프링 요소의 z 축 모멘트-회전각 관계

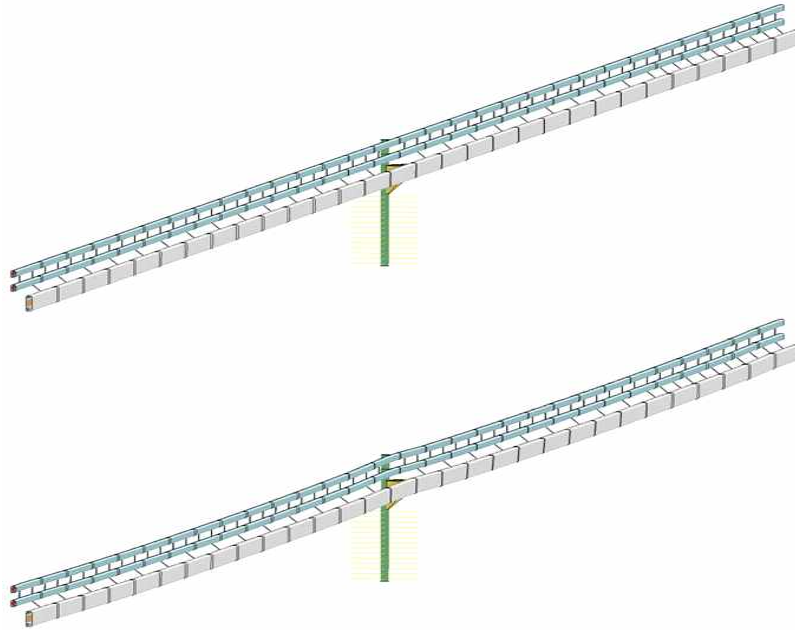
그림 3.23 FEA Models of pile group type

⑤ 단계 해석

- 장경간 반강성 케이블 배리어는 지주간격이 매우 크기 때문에 레일과 케이블 자중으로 인한 케이블의 수직 처짐이 상당히 크게 발생함. 따라서 충돌위치에 따라 차량과 접촉하는 레일의 높이가 다르게 나타나기 때문에 탑승자 안전과 충돌 후 차량 거동이 충돌 위치에 따라 다르게 나타날 수 있음.
- 또한 처짐으로 인하여 케이블의 높이가 낮아질 경우에 대형차 바퀴가 케이블을 밟고 넘어갈 확률이 높아지기 때문에 자중으로 인한 케이블의 수직 처짐은 대형차 충돌 후 거동에 매우

위험하게 작용될 수 있음. 따라서 레일과 케이블의 자중으로 인한 케이블과 레일의 초기 변형 형상을 차량 충돌해석에 반영해야만 탑승자의 안전과 차량의 충돌 후 거동을 합리적으로 예측할 수 있을 것임.

- 본 연구에서는 레일과 케이블의 자중으로 인한 케이블과 레일의 초기 변형 형상을 고려하기 위하여 2단계로 구성된 차량 충돌해석이 수행되었음. 첫 번째 단계에서는 그림 3.24(a)와 같이 초기 긴장력 $T_c (=2,167 \text{ kN})$ 을 도입한 후에 자중만을 고려한 해석을 통하여 구성요소의 변형 형상이 결정됨. 두 번째 단계에서는 그림 3.24(b)와 같이 첫 번째 단계에서 결정된 배리어의 변형 형상과 응력을 이용하여 구성된 해석모델에 대하여 차량 충돌 해석이 수행됨.



(a) Step 1



(b) Step 2

그림 3.24 단계 해석

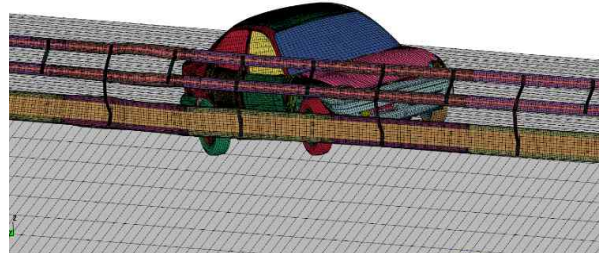
(나) 입력변수의 보정

① Long-span strong-post system

- 장경간 반강성 케이블 배리어의 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 입력 변수의 보정은 그림 3.25에 보이는 60 m 지주간격을 갖는 반강성 케이블 배리어(CM3 모델)에 1.3 tons - 143.7 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 실물차량 충돌시험 결과를 이용하여 이루어졌음. 차량 충돌위치는 120 m 길이 배리어의 시점에서 32 m 떨어진 곳이었음. CM3 모델에 경우에 레일은 중간지주에서 양 방향으로 각각 36 m씩 설치되었고, cable anchor system으로 ground anchor 형식이 사용되었음. 정적 횡 하중 실험으로 결정된 중간지주의 최대 횡 지지력은 약 43 kN으로 나타났음.
- 차량과 배리어 사이의 마찰 계수로 어느 값이 적절한지 조사하기 위하여 마찰계수를 변화시키면서 유한요소해석이 수행되었음. 그림 3.26(a)와 3.26(b)에는 실물차량 충돌시험과 FEA에 의해 결정된 차량 속도-시간이력과 THIV의 비교가 나타나 있음. 차량의 종 방향 속도-시간이력의 기울기는 마찰계수가 증가함에 따라 차량 yaw 각도가 보다 느리게 변화하기 때문에 증가되었고 횡 방향 속도-시간 이력의 기울기는 마찰계수에 상관없이 변화가 거의 없었음. 차량과 배리어 사이의 접촉에 0.15의 마찰계수를 적용한 FEA의 차량 속도-시간 이력이 실물 차량 충돌시험의 이력과 유사하게 나타났음. 표 3.2는 FEA의 수치 안정에 대한 결과를 보여 주고 있음. 시뮬레이션 모델은 어떠한 수치 불안정도 보이지 않았음.
- PIRT (phenomena important ranking table)(M. H. Ray et al., 2010)을 이용하여 실물충돌시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하고 차이를 평가하였음. PIRT에서 허용하는 실물충돌시험과 시뮬레이션 결과의 최대 차이는 20% 미만임. 보정 과정에서 결정된 THIV에 대한 시험과 시뮬레이션의 차이는 4.9 %로 나타났고 ASI에 대한 차이는 16.5 %로 나타났음.
- 시뮬레이션 결과는 PIRT 기준을 만족시하면서 실물충돌 시험에 상당히 좋은 상관관계를 보였음. 그림 3.27에는 실물충돌시험과 차량과 배리어 사이의 접촉에 0.15의 마찰계수를 적용한 시뮬레이션의 충돌 후 차량거동이 나타나있음. 시뮬레이션의 충돌 후 차량거동은 실물충돌시험과 유사하게 나타났음.



(a) Full-scale crash test

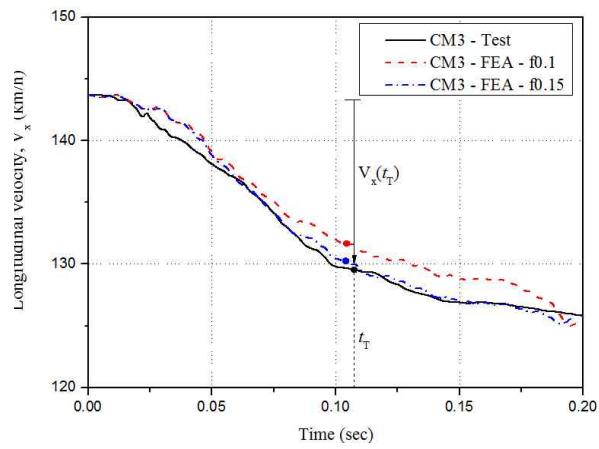


(b) FEA Model

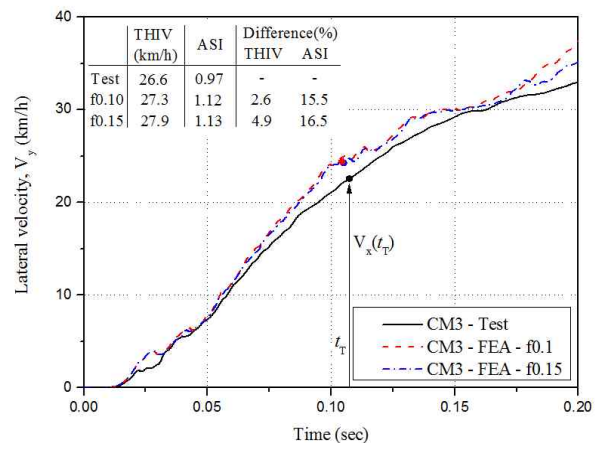
그림 3.25 Target cable barrier (CM3) for calibration

표 3.2 Energy balance of FEA model

	Model entity	Stage of simulation	Verification criteria	Quantity value	Pass? (Y/N)
Total energy	Global	Throughout	$\leq 10\%$ total init. energy @ $t = 0$	0.3%	Y
Hourglass energy	Global	Termination	$\leq 5\%$ total init. energy @ $t = 0$	0%	Y
		Termination	$\leq 10\%$ total internal energy @ end	0%	Y

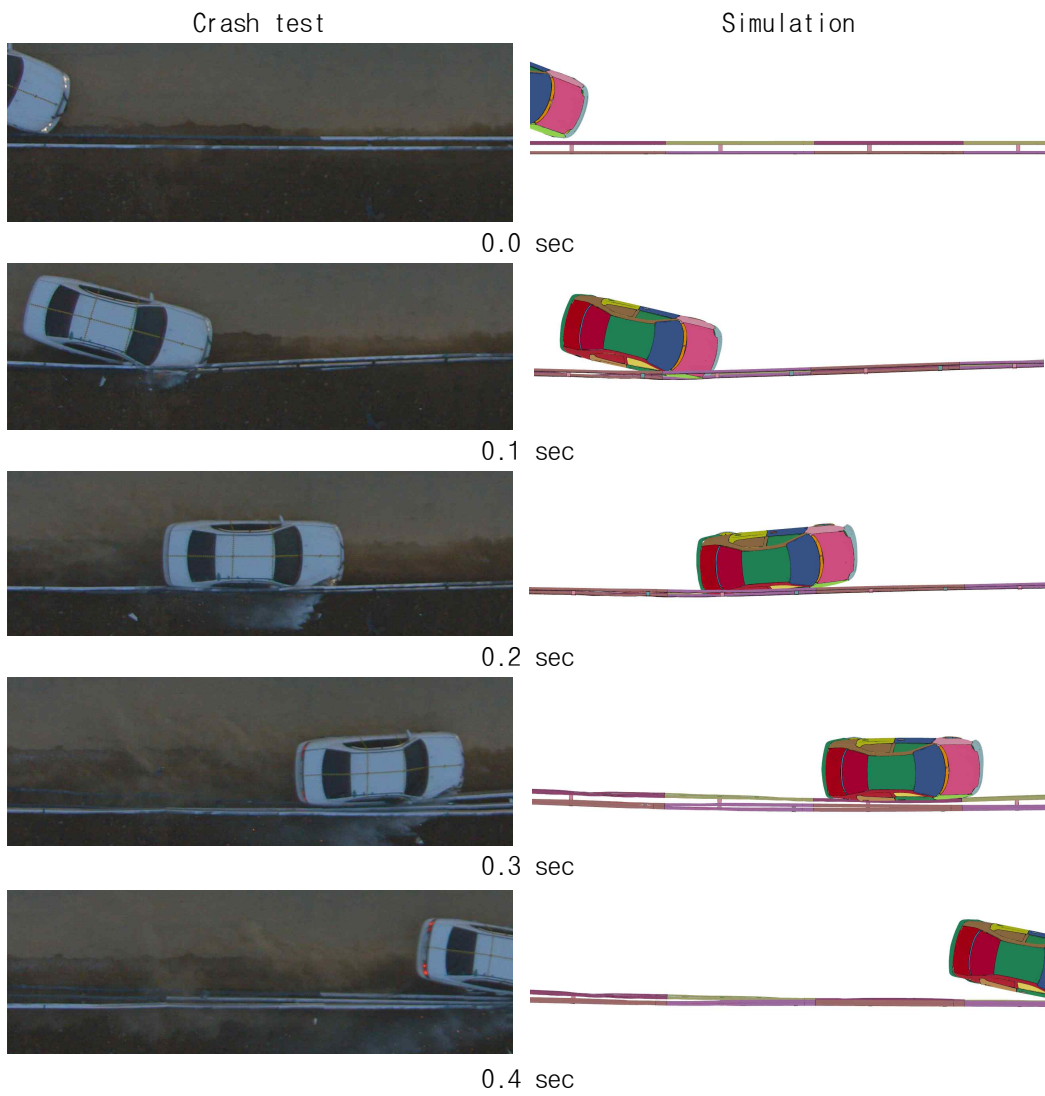


(a) Longitudinal velocity-time history

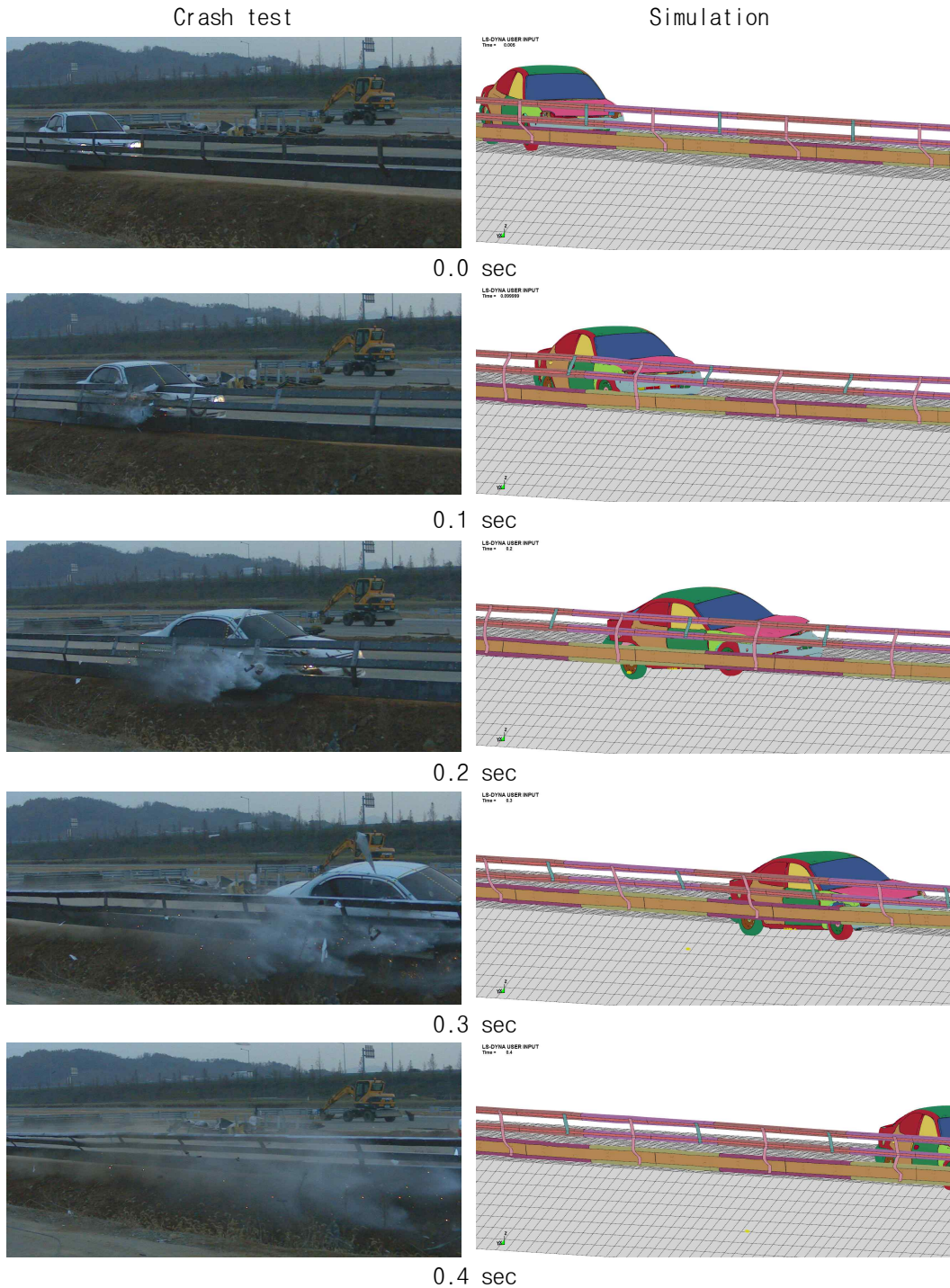


(b) Lateral velocity-time history

그림 3.26 Comparison of full-scale crash test results and FEA results



(a) Top view



(b) Side view

그림 3.27 실물 차량 충돌시험과 컴퓨터 시뮬레이션의 충돌 후 차량 거동

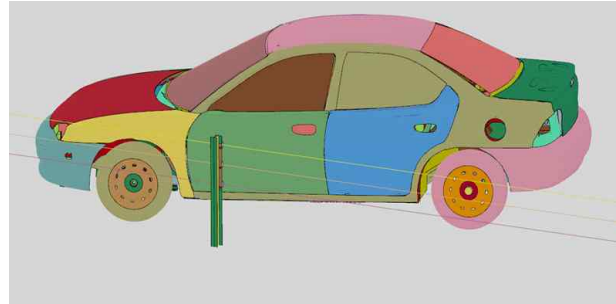
② Short-span weak-post system

- 단경간 반강성 케이블 배리어의 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 입력 변수의 보정은 그림 3.28에 보이는 4.9 m 지주간격을 갖는 케이블 배리어(Winkelbauer, 2014)에 1.48 tons - 100.9 km/h - 25.3°의 소형차 충돌조건을 적용하는 실물 차량 충돌시험 결과를 이용하여 이루어졌음.
- 차량 충돌위치는 167 m 길이 배리어의 시점으로부터 17번째 지주에서 1.62 m(총 65 m) 떨어진 곳이었음. 지주의 높이는 813 mm이고 17.7 ton의 최소 인장강도를 갖는 직경 19 mm의 케이블은 지표면으로부터 436 mm, 588 mm, 그리고 740 mm 높이에 각 1개씩 설치되었음.
- Cable anchor system으로 약 3.78 ton의 중력식 콘크리트 기초가 사용되었고 케이블의 초기

긴장력은 도입되지 않았음. 지주는 S76x8.5($d=76$ mm, $b_f=59$ mm, $t_w=4.3$ mm, $t_f=6.6$ mm)가 사용되었음. 차량 모델은 그림 3.15(a)의 Dodge Neon 모델이 사용되었고 1.48 톤의 질량을 맞추기 위하여 무게중심이 변화하지 않게 Dodge Neon 모델의 집중질량이 증가되었음.



(a) Full-scale crash test



(b) FEA Model

그림 3.28 Target cable barrier for calibration

- 차량과 배리어 사이의 마찰 계수를 조사하기 위하여 마찰계수를 변화시키면서 유한요소해석이 수행되었음. 표 3.3에 FEA에 의해 결정된 탑승자 위험지수의 비교가 나타나 있음. 차량과 배리어 사이의 접촉에 0.15의 마찰계수를 적용한 FEA의 탑승자 위험지수가 실물 차량 충돌시험의 탑승자 위험지수와 유사하게 나타났음.
- 표 3.4는 FEA의 수치 안정에 대한 결과를 보여주고 있음. 시뮬레이션 모델은 어떠한 수치 불안정도 보이지 않았음.
- 표 3.5에는 실물 차량 충돌시험과 FEA에 의해서 예측된 케이블의 최대 긴장력에 대한 비교가 나타나 있음. FEA와 실물 차량 충돌시험의 케이블의 최대 긴장력은 최대 10.4 % 차이 이하로 나타나서 해석모델에 대한 입력변수의 보정이 적절하였음을 알 수 있음.

표 3.3 Occupant risk indices of various FEA models.

Model	THIV (km/h)	OIV (km/h)		ORA (g)		PHD (g)	ASI
		Long.	Let.	Long.	Let.		
Crash test	17.96	17.53	13.72	6.84	10.91	9.08	0.53
FEA-f0.1	17.24	17.11	13.54	6.57	11.33	9.23	0.56
FEA-f0.15	18.36	18.13	13.92	7.25	11.87	9.88	0.57
FEA-f0.2	20.78	20.29	14.05	8.12	11.95	10.52	0.59

표 3.4 Energy balance of FEA model

	Model entity	Stage of simulation	Verification criteria	Quantity value	Pass? (Y/N)
Total energy	Global	Throughout	$\leq 10\%$ total init. energy @ $t = 0$	0.4%	Y
Hourglass energy	Global	Termination	$\leq 5\%$ total init. energy @ $t = 0$	0.1%	Y
		Termination	$\leq 10\%$ total internal energy @ end	0.1%	Y

표 3.5 Maximum cable load

	Maximum cable load (kN)		
	Top cable	Middle cable	Bottom cable
Crash test	36.74	45.99	82.87
FEA-f0.1	40.12	43.72	87.54
FEA-f0.15	40.57	44.15	87.98
FEA-f0.2	41.24	44.17	88.72

- PIRT을 이용하여 실물충돌시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하고 차이를 평가하였음. 보정 과정에서 결정된 THIV에 대한 실물충돌시험 결과와 시뮬레이션 결과의 차이는 2.2 %로 나타났고 ASI에 대한 차이는 7.5 %로 나타났음. 시뮬레이션 결과는 PIRT 기준을 만족하면서 실물 충돌 시험에 상당히 좋은 상관관계를 보였음. 그림 3.29에는 실물충돌시험과 차량과 배리어 사이의 접촉에 0.15의 마찰계수를 적용한 컴퓨터 시뮬레이션의 충돌 후 차량거동이 나타나있음. 컴퓨터 시뮬레이션의 충돌 후 차량거동은 실물충돌시험과 유사하게 나타났음.

Crash test



0.0 sec



0.07 sec



0.136 sec



0.210 sec



0.366 sec



0.586 sec

Simulation

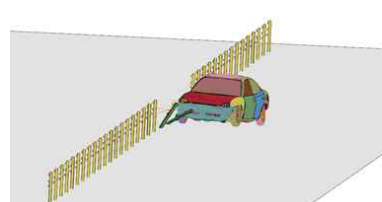
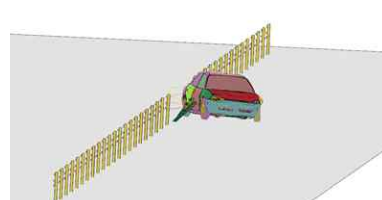
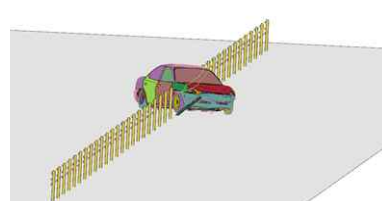
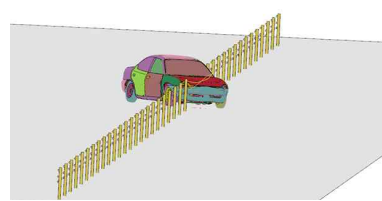
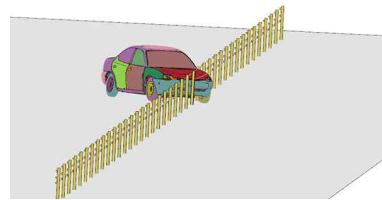
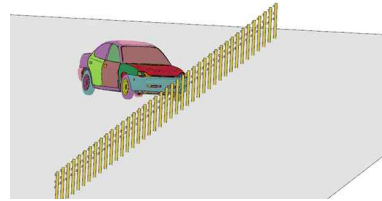


그림 3.29 실물 차량 충돌시험과 컴퓨터 시뮬레이션의 충돌 후 차량 거동

(3) 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 상세설계

- SB5-B등급 반강성 케이블 배리어의 상세설계는 소형차와 대형차 충돌에 대하여 성능평가 기준을 만족하도록 예비설계를 개선하면서 이루어졌음. Long-span strong-post system과 short-span weak-post system의 다양한 대안을 결정하고 LS-DYNA 프로그램(J. Hallquist, 2007)을 이용한 유한요소해석(finite element analyses)을 통하여 최적설계가 이루어졌음. 다양한 경간에 대하여 소형차 충돌 성능을 평가하였고 weak-post와 strong-post 형식의 반강성 케이블 배리어에 대하여 각각 효율이 좋은 경간이 결정되었음.

(가) Long-span strong-post system

① 상세설계

- 그림 3.30, 3.33, 3.36, 그리고 3.39에 강한 중간지주를 적용하는 장경간 반강성 케이블 배리어에 대한 4개의 해석모델이 나타나있음. 4개의 해석모델에 동일하게 사용된 구성요소는 중간지주와 중간지주 지지력, 케이블과 케이블 초기 긴장력, 그리고 블록아웃임. 그러나 케이블의 배치, 블록아웃의 위치, 레일의 크기는 해석모델에 따라 다르게 적용되었음.
- 중간지주의 단면은 140 mm의 바깥지름과 4.5 mm의 두께를 갖는 원형 중공 단면임. 그리고 125 mm의 바깥지름과 4.3 mm의 두께를 갖는 보강 지주가 바깥지주 안에 삽입되어 있음. 지반에 매입된 중간지주에 대한 해석모델은 35 kN의 최대 정적 횡 하중을 발현할 수 있도록 구성되었음.
- 138.7 mm²의 단면적과 1,880 MPa의 극한강도를 갖는 케이블이 16개 사용되었고 각 케이블에 135 kN의 초기 긴장력이 도입되었음. 소형차가 지주에 심하게 충돌하는 현상을 방지하기 위해서 예비설계에서 결정된 250 mm 길이의 블록아웃이 4개 모델의 하단 레일에 적용되었음. 따라서 하단 레일은 지주에 직접 연결된 중단과 상단 레일 보다 250 mm 더 도로방향으로 튀어나와 있음.

㉠ CM1

- 그림 3.30의 CM1 모델에서는 16개의 케이블이 상단과 하단에 각각 8개씩 배치되었음. 하단의 8개 케이블은 160 mm 간격을 갖고 4개씩 분리 배치되었음. 지표면으로부터 925 mm만큼 떨어져 있는 상단 레일은 상단에 배치된 8개의 케이블을 감싸고, 지표면으로부터 350 mm만큼 떨어져 있는 하단 레일은 하단에 배치된 8개의 케이블을 감싸도록 설계되었음. 레일의 간격을 유지하기 위한 수직 연결재는 CM2, CM3, 그리고 CM4 모델에 대해서만 적용되었음.

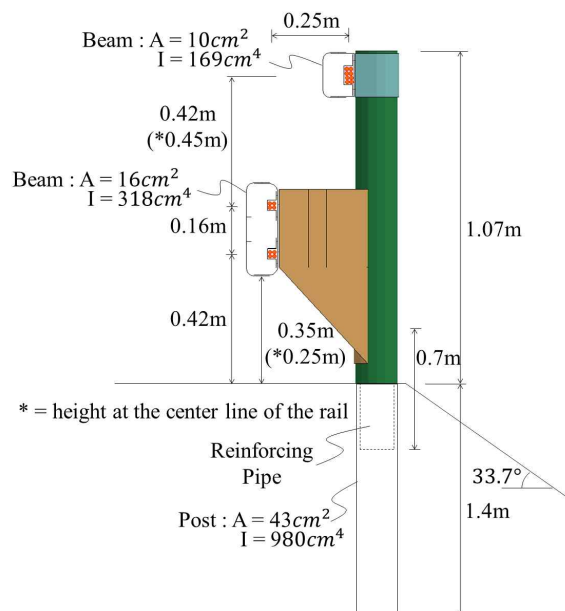


그림 3.30 CM1 모델의 단면과 제원

- 그림 3.31와 3.32에는 CM1 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 소형차와 대형차의 배리어에 대한 충돌위치는 60 m 경간의 중앙인 30 m임.
- 소형차 충돌 후 거동에 대한 관점에서 살펴보면 소형차는 충돌 초기에 적절하게 거동하였으나 충돌 후기에는 케이블로부터 빠져 나오지 못하고 경사면 아래로 추락하였음. 대형차의 경우에는 충돌 후기에 케이블로부터 빠져 나오긴 하였으나 거동이 불안정하게 나타났음. 레일 간격유지용 수직 연결재가 설치되지 않은 CM1 모델의 경우에는 상하 좌우로 심하게 움직이는 케이블의 진동현상 때문에 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 매우 나쁘게 나타났음.
- CM1 모델의 THIV는 27.5 km/h로 33 km/h의 한계치 보다 약 16.7 % 작게 나타났고 PHD는 12.3 g로 20 g의 한계치 보다 약 38.5 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.08로 나타났음. 대형차의 충돌로 인한 working width는 1.85 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 1.31 m와 0.1 m로 나타났음.

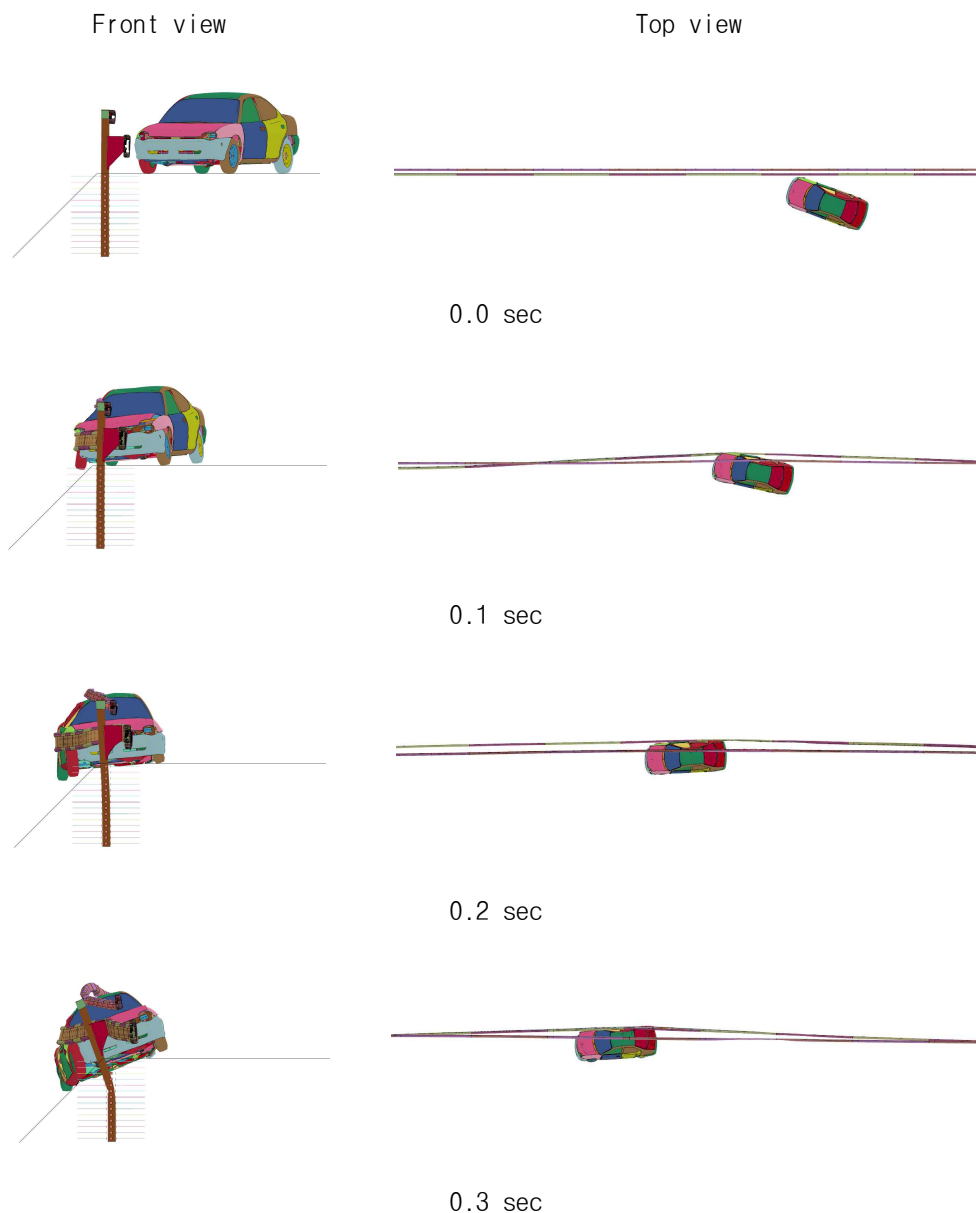


그림 3.31 CM1 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

Front view

Top view

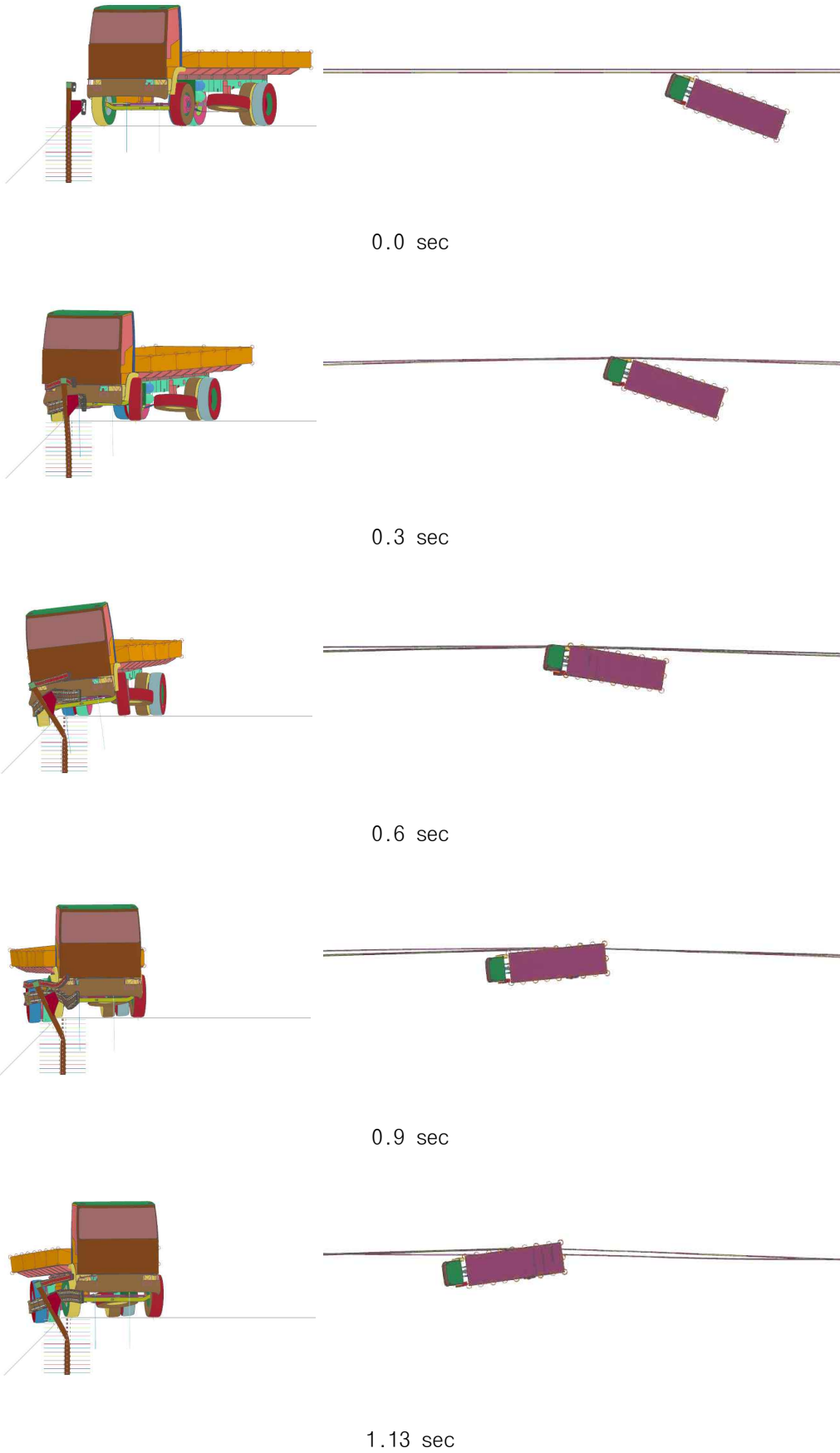


그림 3.32 CM1 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 대형차 충돌 후 거동

㉞ CM2

- 그림 3.33의 CM2 모델은 상단과 하단 레일만으로 구성된 CM1 모델에 중단 레일이 추가되고 CM1 모델의 상단에 배치된 8개의 케이블이 상단과 중단 레일에 각각 4개씩 분리 배치된 모델임.
- 지표면으로부터 935 mm와 735 mm만큼 각각 떨어져 있는 상단과 중단 레일은 4개의 케이블을 용이하게 감쌀 수 있도록 130 mm의 높이, 100 mm의 폭, 그리고 1.6 mm의 두께를 갖는 사각 중공 단면으로 이루어져 있음.
- 레일과 레일 사이의 간격을 유지하기 위하여 설치되는 수직 연결재는 3 cm²의 단면적을 갖는 강판으로 이루어져있음. 상단과 중단 레일을 연결하는 수직 연결재와 상단, 중단, 그리고 하단 레일을 연결하는 수직 연결재는 교대로 4 m 간격으로 배치되었음.

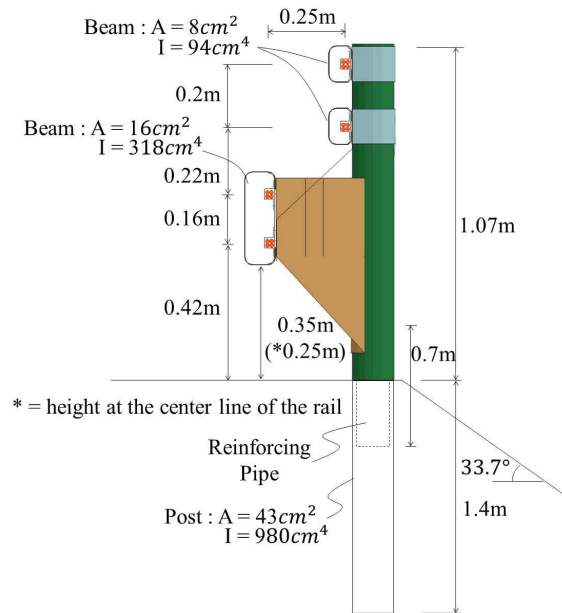
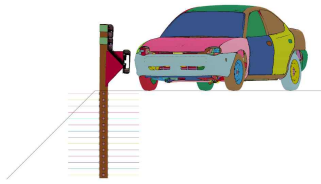


그림 3.33 CM2 모델의 단면과 제원

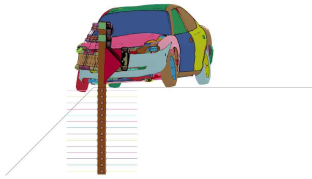
- 그림 3.34와 3.35에는 CM2 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 충돌위치는 CM1과 동일함.
- CM2 모델의 소형차의 충돌 후 거동은 CM1 모델과 같이 경사면 아래로 추락하지는 않았으나 하단 레일 밑으로 침투할 가능성을 보였음. 대형차의 경우에는 충돌 후 거동이 안정적으로 나타났음. 상단, 중단, 하단 총 3개의 레일이 사용되었고 레일의 간격을 유지하기 위한 수직 연결재가 설치되었기 때문에 상하 좌우로 심하게 움직이는 케이블의 진동현상이 감소되었고 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 CM1 모델에 비하여 안정적으로 나타났음.
- CM2 모델의 THIV는 30.1 km/h로 33 km/h의 한계치 보다 약 8.8 % 작게 나타났고 PHD는 11.0 g로 20 g의 한계치 보다 약 45 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.19로 나타났음.
- 대형차의 충돌로 인한 working width는 1.29 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 0.69 m와 0.1 m로 나타났음. 레일 간격유지용 수직 연결재가 설치되었기 때문에 CM1 모델보다 차량의 거동은 안정적으로 나타났고 대형차 충돌에 대한 횡 방향 변위가 감소되었으나 배리어와 차량이 접촉하는 면적의 증가로 인하여 소형차 충돌에 대한 탑승자 위험 지수는 증가되었음.

Front view

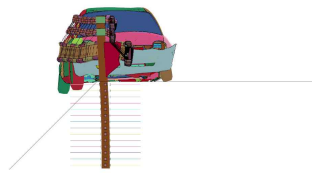
Top view



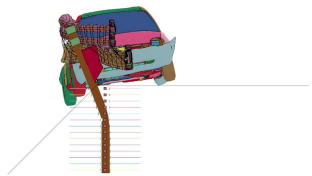
0.0 sec



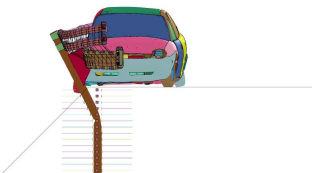
0.1 sec



0.2 sec



0.3 sec

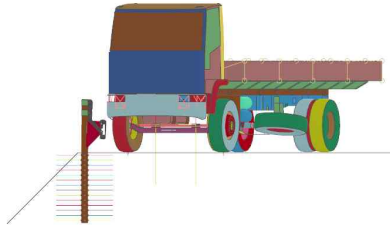


0.4 sec

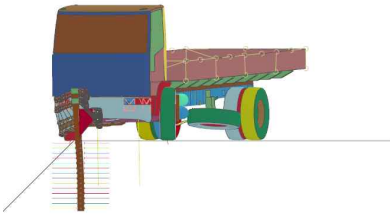
그림 3.34 CM2 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

Front view

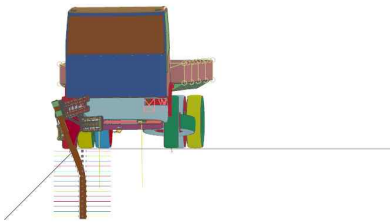
Top view



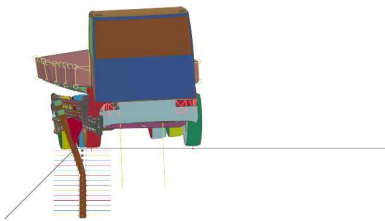
0.0 sec



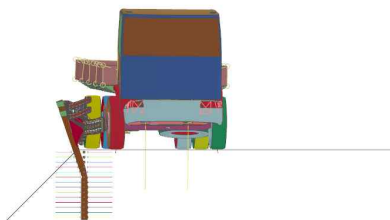
0.3 sec



0.6 sec



0.9 sec



1.2 sec

그림 3.35 CM2 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 대형차 충돌 후 거동

㉔ CM3

- 그림 3.36의 CM3 모델은 소형차가 하단 레일 밑으로 침투하려는 현상을 방지하기 위하여 CM2 모델의 중단과 하단 레일을 75 mm 하향시킨 모델임. 상단, 중단, 그리고 하단 레일의 제원, 수직 연결재의 제원과 배치는 CM2 모델과 동일하게 이루어져있음.

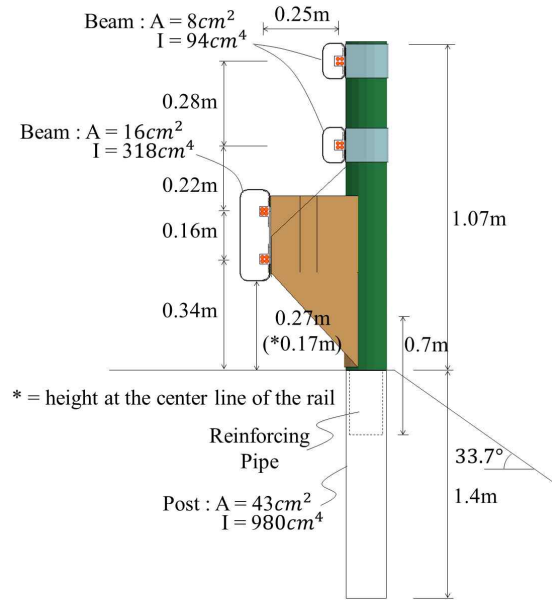


그림 3.36 CM3 모델의 단면과 제원

- 그림 3.37과 3.38에는 CM3 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 충돌위치는 CM1과 동일함. CM3 모델은 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 안정적으로 나타났음. 소형차가 하단 레일 밑으로 침투하려는 현상을 방지하기 위하여 CM2 모델의 중단과 하단 레일을 75 mm 하향시켰기 때문에 소형차 충돌 후 거동이 CM2 모델에 비하여 보다 안정적으로 나타났음.
- CM3 모델의 THIV는 31.1 km로 33 km/h의 한계치 보다 약 5.8 % 작게 나타났고 PHD는 11.9 g로 20 g의 한계치 보다 약 40.5 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.3으로 나타났음.
- 대형차의 충돌로 인한 working width는 1.30 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 0.70 m와 0.1 m로 나타났음. 중단과 하단 레일을 75 mm 하향시켰기 때문에 CM1 모델보다 차량의 거동은 안정적으로 나타났으나 배리어와 차량이 접촉하는 면적의 증가로 인하여 소형차 충돌에 대한 탑승자 위험 지수는 증가되었음.

Front view

Top view

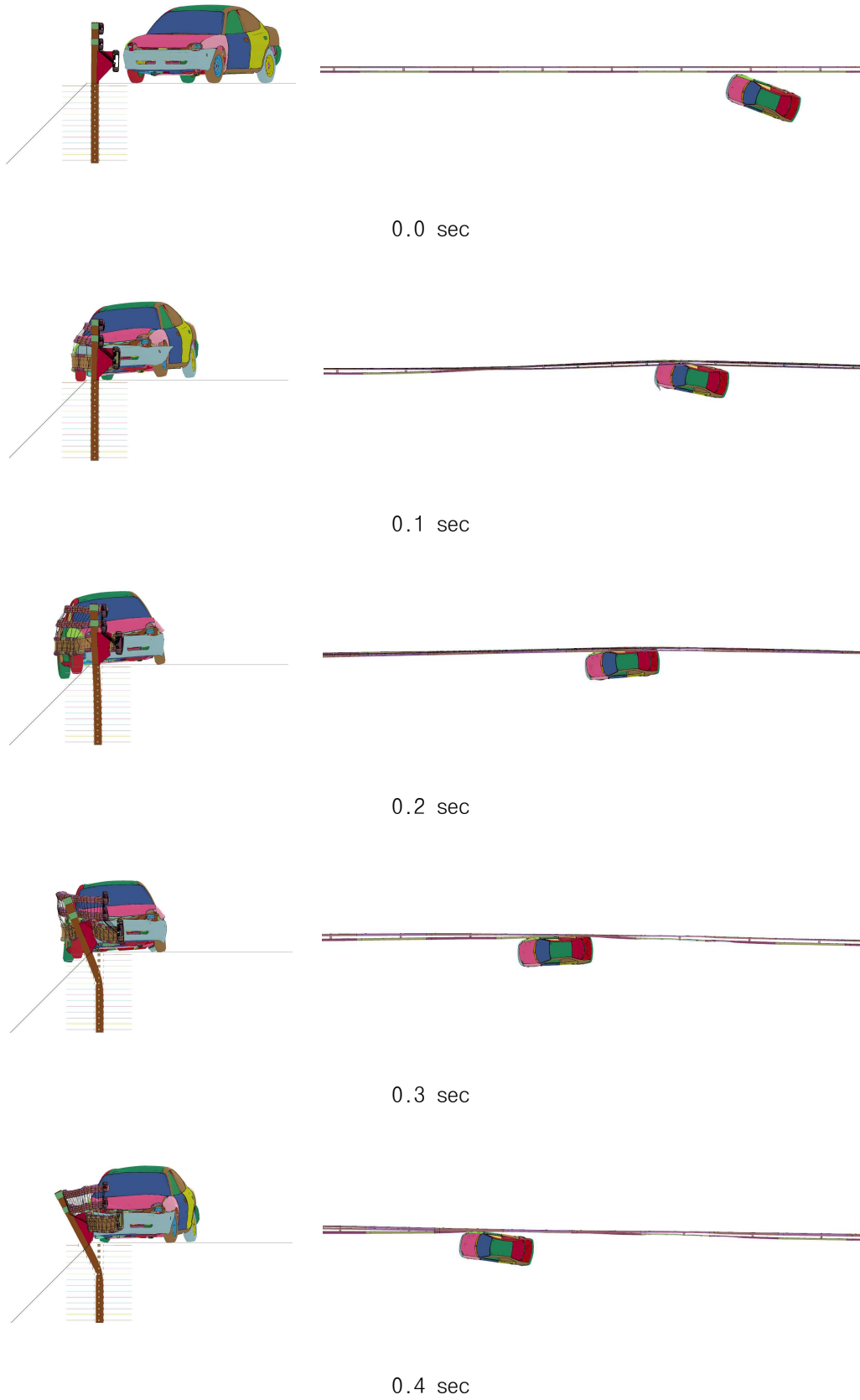


그림 3.37 CM3 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

Front view

Top view

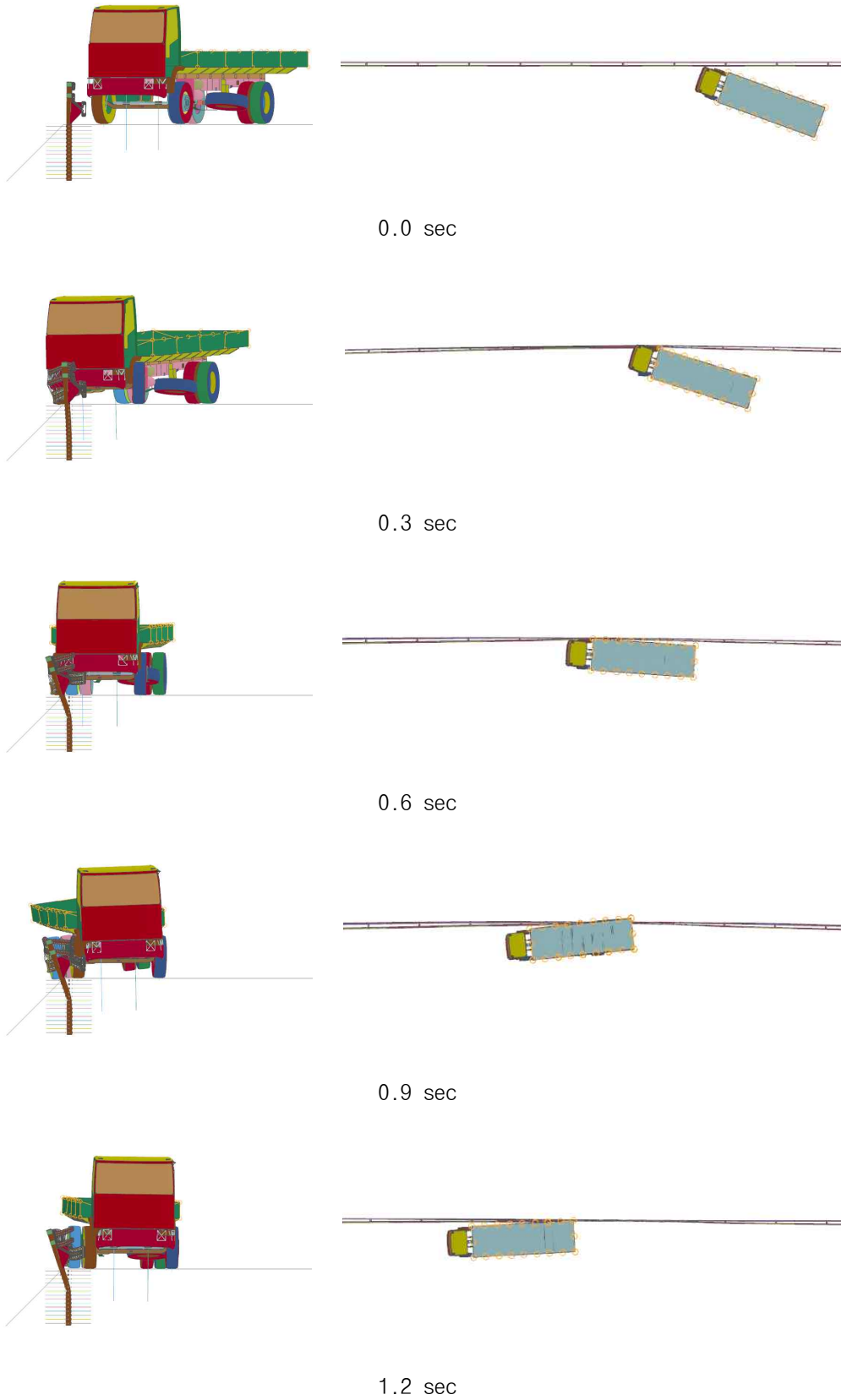


그림 3.38 CM3 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 대형차 충돌 후 거동

라) CM4

- 그림 3.39의 CM4 모델은 하단 레일을 보다 작은 2개의 레일로 분리하였을 때 소형차와 대형차 충돌 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 CM3 모델의 하단 레일을 2단으로 분리한 모델임. 이 모델에서는 2개로 분리된 하단 레일에 4개의 케이블이 각각 배치되었고 하단 레일의 단면은 상단과 중단 레일에 사용된 단면과 동일함. 수직 연결재의 제원과 배치는 CM2 모델과 동일하게 이루어져있음.

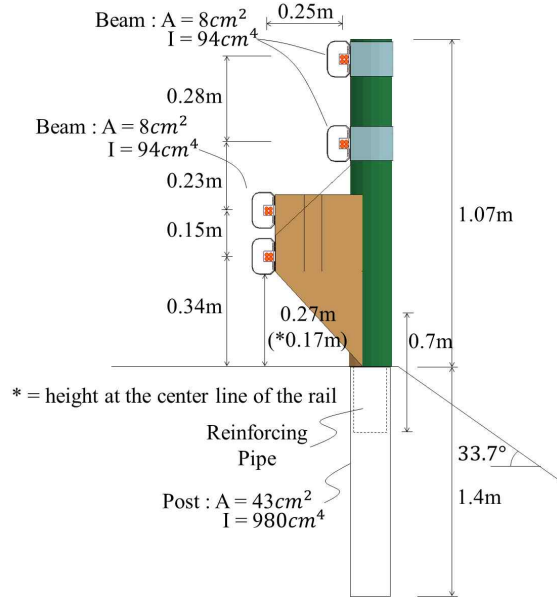


그림 3.39 CM4 모델의 단면과 제원

- 그림 3.40과 3.41에는 CM4 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 충돌위치는 CM1과 동일함.
- CM4 모델의 소형차와 대형차의 충돌 후 거동은 안정적으로 나타났음. CM3 모델의 하단 레일을 2단으로 분리하였으나 충돌 후 거동은 CM3 모델과 유사하게 나타났음.
- CM4 모델의 THIV는 31.7 km/h로 33 km/h의 한계치 보다 약 3.9 % 작게 나타났고 PHD는 16.0 g로 20 g의 한계치 보다 약 20 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.3으로 나타났음.
- 대형차의 충돌로 인한 working width는 1.29 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 0.73 m와 0.1 m로 나타났음. 하단레일을 2단으로 분리하였음에도 불구하고 대형차와 소형차의 충돌 후 거동은 CM3 모델과 유사하게 나타났음. 그러나 배리어와 차량이 접촉하는 면적의 증가로 인하여 소형차 충돌에 대한 탑승자 위험 지수는 오히려 증가되었음. 따라서 하단 레일을 2단으로 분리하는 것은 소형차 충돌에 적절하지 않는 것으로 판단되었음.

Front view

Top view

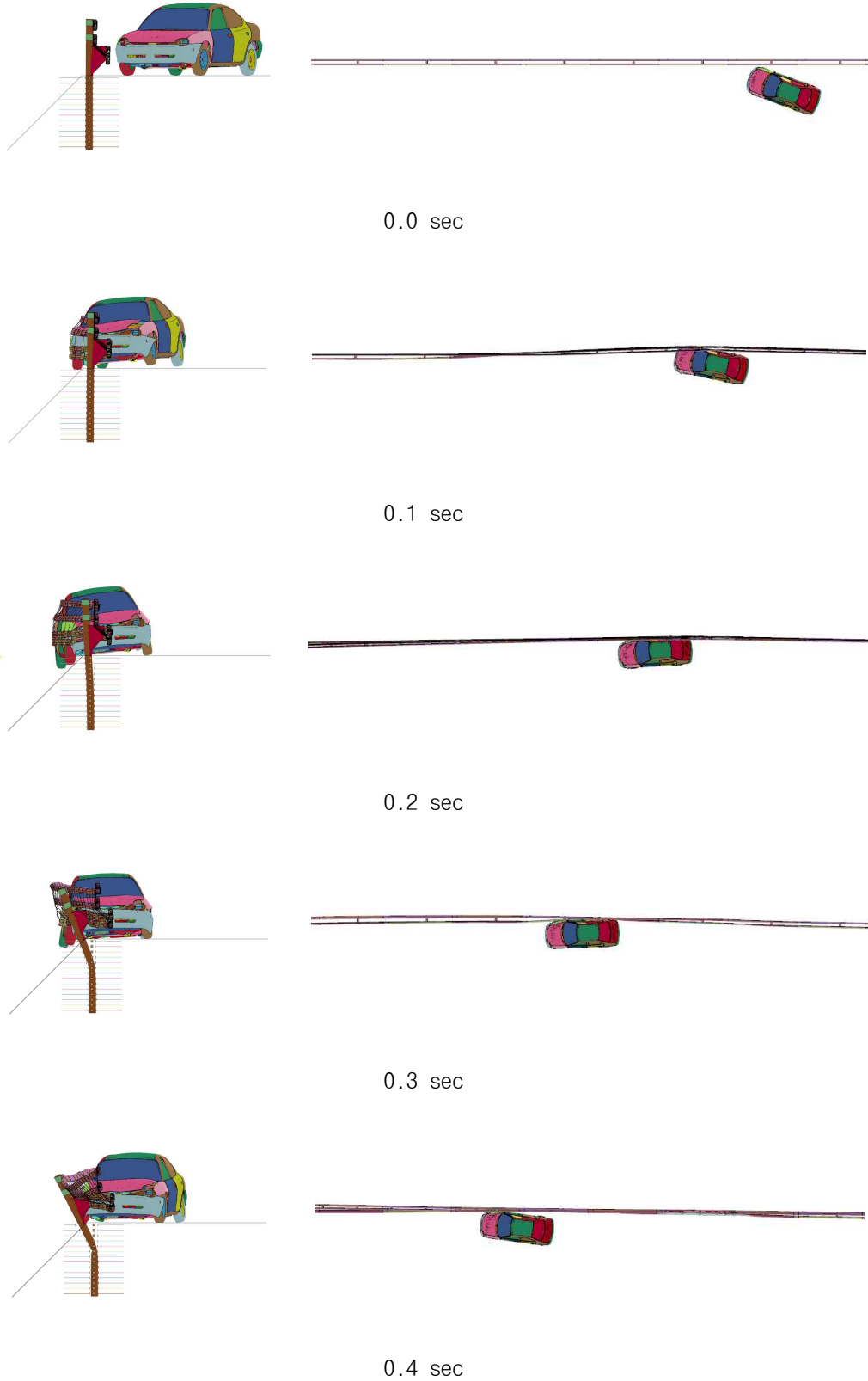
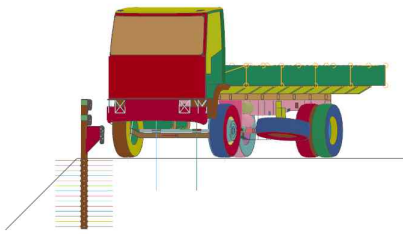


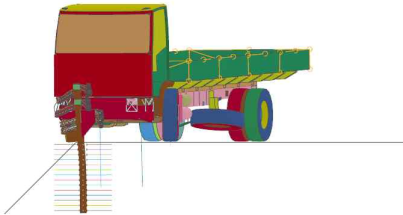
그림 3.40 CM4 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

Front view

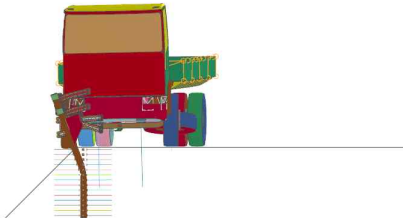
Top view



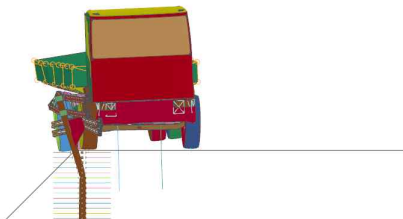
0.0 sec



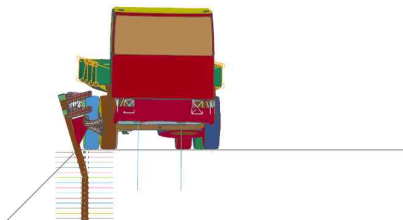
0.3 sec



0.6 sec



0.9 sec



1.2 sec

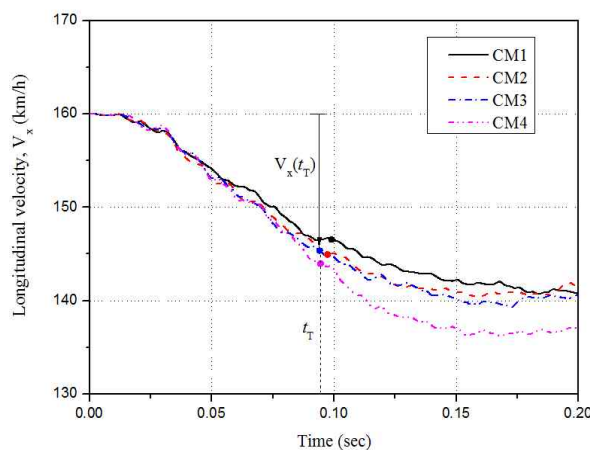
그림 3.41 CM4 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 대형차 충돌 후 거동

㉞ 최적안 결정

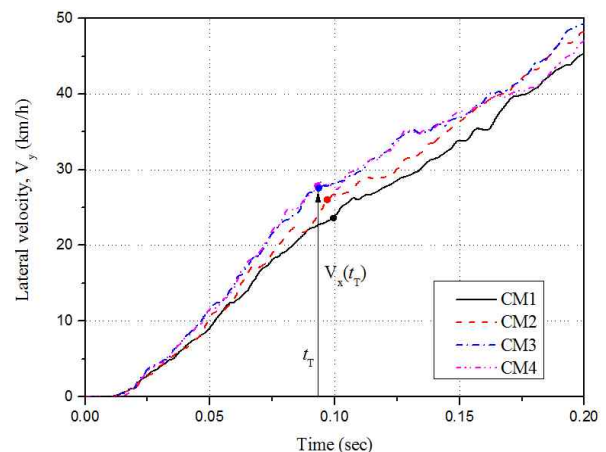
- 표 3.6과 그림 3.42에는 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 탑승자 위험 지수와 차량 속도-시간 이력이 나타나 있음.
- 소형차의 충돌 후 거동은 CM4, CM3, 그리고 CM2와 CM1 순으로 좋게 나타났음. 그러나 THIV와 ASI는 소형차의 충돌 후 거동에 대한 것과 역순으로 CM1와 CM2, CM3, 그리고 CM4 순으로 좋게 나타났음.
- 4개의 모델에 대한 THIV와 PHD는 각 지수의 한계치를 만족하였고 ASI는 모두 EN1317의 등급 B로 분류되었음.
- THIV와 ASI가 CM1와 CM2, CM3, 그리고 CM4 순으로 좋게 나타나는 이유는 소형차와 레일이 접촉하는 면적이 CM1와 CM2, CM3, 그리고 CM4 순으로 작게 나타나기 때문임.
- CM2, CM3, 그리고 CM4 모델에 대한 대형차의 Working Width는 약 1.3~1.4 m로 EN1317(CEN, 2010)의 W5 등급으로 분류되었음. 동적과 영구 횡 방향 처짐은 각각 0.7~ 0.8 m와 0.1 m 이하로 나타났음. 케이블의 탄성 거동 때문에 반강성 케이블 배리어의 소성 횡 방향 변위가 매우 작게 나타났음.
- CM2, CM3, 그리고 CM4 모델이 목표하는 반강성 케이블 배리어가 될 가능성이 클 것으로 평가 되었으며 CM3가 탑승자 위험 지수와 차량 충돌 후 거동을 함께 고려할 때 보다 합리적인 모델로 간주되었음.

표 3.6 다양한 FEA 모델의 탑승자 위험 지수

Model	THIV (km/h)	$V_x(t_T)$ (km/h)	$V_x(t_T)$ (km/h)	PHD (g)	ASI
CM1	27.5	13.5	23.7	12.3	1.08
CM2	30.1	15.0	25.6	11.0	1.19
CM3	31.1	14.4	27.5	11.9	1.30
CM4	31.7	16.0	27.9	16.0	1.30



(a) 종 방향 속도-시간 이력



(b) 횡 방향 속도-시간 이력

그림 3.42 다양한 FEA 모델의 차량 속도-시간 이력

㉞ CIP(Critical impact point) 검토

- 반강성 케이블 배리어의 CIP (critical impact point)를 조사하기 위하여 CM3 모델에 대하여 충돌위치를 변화시키면서 1.3 tons - 130 km/h - 20° 와 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건 조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA가 수

행되었음.

- 그림 3.43에는 130 km/h의 소형차 충돌속도에 대한 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 나타나있음. 지주와 가까운 곳에서 THIV가 급격히 커지는 경향을 보였으나 모든 길이에서 130 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 것으로 나타났음. 또한 그림 3.43에는 0.9 tons - 120 km/h - 20° 의 충돌조건을 만족하도록 설계된 SB5-B등급 반강성 레일형 배리어(K. Kim et al., 2016)에 대하여 130 km/h의 소형차 충돌속도를 적용시켜서 결정된 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 함께 나타나있음. SB5-B등급 반강성 레일형 배리어는 2.5 m의 경간에서 1.25 m (경간의 약 50%)가 130 km/h의 소형차 충돌 속도를 만족하지 못하는 것으로 나타났음.
- 60 m 경간의 반강성 케이블 배리어는 같은 대형차 충돌에너지를 만족하도록 개발된 반강성 레일형 배리어에 비하여 상당히 좋은 탑승자의 안전을 제공함을 알 수 있음. 반강성 케이블 배리어는 반강성 레일형 배리어보다 THIV가 평균적으로 약 17% 작게 발생하는 것으로 나타났음.
- 표 3.7에는 다양한 충돌위치에 대하여 130 km/h의 소형차 충돌속도를 적용하여 결정된 탑승자 위험 지수가 나타나 있음. THIV가 작게 발생하는 구간에서는 충돌위치를 5 m 간격으로 변화시키고 THIV가 크게 발생하는 지주와 인접한 구간에서는 충돌 위치를 0.3 m씩 변화시켰음. 표 3.7와 그림 3.43으로부터 130 km/h의 소형차 충돌속도에 대한 critical impact point (CIP)는 THIV 관점에서 중간지주로부터 상류 쪽으로 1.9 m 떨어진 곳에 위치한다는 것을 알 수 있음.
- CIP에 대해서 결정된 THIV는 33 km/h의 한계치 보다 약 5.5 % 작게 나타났고 PHD는 20g의 한계치 보다 약 53.5 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.39로 나타나 EN1317의 IS level B로 분류되었음.

표 3.7 130 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 탑승자 위험 지수

Impact point (m)	Impact velocity of small car (km/h)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI
0	130	28.3	9.5	1.20
1.0		29.2	9.8	1.21
1.3		29.4	9.7	1.23
1.6		30.1	9.2	1.29
1.9		31.2	9.3	1.39
2.2		30.5	12.9	1.34
2.5		30.1	13.5	1.31
5		26.2	12.4	1.09
10		24.8	9.7	0.96
15		25.1	10.8	0.98
20		25.8	7.9	1.02
25		27.0	11.2	1.05
30		27.3	11.8	1.06
35		26.4	12.1	1.05
40		26.1	13.0	1.03
45		25.4	12.1	1.00
50		25.0	10.8	0.97
55		25.9	11.1	1.01
58		26.8	11.4	1.12

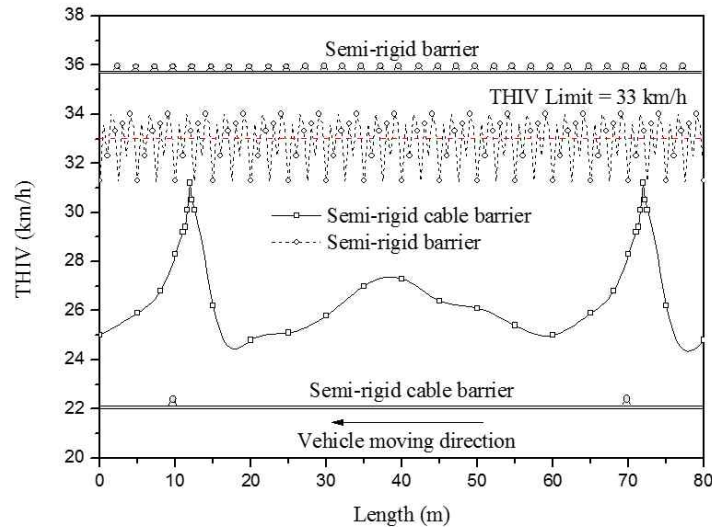


그림 3.43 130 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화

- 그림 3.44에는 160 km/h의 소형차 충돌속도에 대한 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 나타나있음. 33km/h의 THIV 한계치(국토교통부, 2014; CEN, 2010)를 적용하면 60 m의 경간에서 53.3 m (경간의 약 89%)가 160 km/h의 소형차 충돌 속도를 만족하는 것 (구간 A)으로 나타났음. 그리고 160 km/h의 소형차 충돌 속도를 만족하지 못하는 구간 (구간 B)의 길이는 6.7 m (경간의 약 11%)로 나타났음.
- MASH의 44 km/h의 OIV 한계치를 적용하는 경우에는 60 m의 전체 경간이 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족할 수 있는 것으로 나타났음. 또한 그림 3.44에는 0.9 tons - 120 km/h - 20°의 충돌조건을 만족하도록 설계된 SB5-B등급 반강성 레일형 배리어에 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 충돌조건을 적용시켜서 결정된 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 함께 나타나있음. SB5-B등급 반강성 레일형 배리어는 2.5 m의 경간의 전체 길이에 대하여 160 km/h의 소형차 충돌 속도를 만족하지 못하는 것으로 나타났음.
- 반강성 케이블 배리어는 반강성 레일형 배리어보다 THIV가 평균적으로 약 27% 작게 발생되는 것으로 나타났음. 따라서 반강성 케이블 배리어는 160 km/h의 소형차 충돌속도와 같은 예기치 않는 높은 속도의 차량 충돌에 대하여 기존의 반강성 레일형 배리어보다 훨씬 더 좋은 탑승자의 안전을 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
- 표 3.8에는 다양한 충돌위치에 대하여 160 km/h의 소형차 충돌속도를 적용하여 결정된 탑승자 위험 지수가 나타나있음. 표 3.7과 그림 3.44로부터 CIP는 THIV 관점에서 130 km/h의 충돌속도에 대한 CIP와 동일하게 중간지주로부터 상류 쪽으로 1.9 m 떨어진 곳에 위치한다는 것을 알 수 있음. 그리고 소형차 충돌 후 거동 관점에서 살펴본 CIP는 소형차가 케이블 하단으로 침투할 가능성이 높은 동적 최대 횡 변위가 나타나는 경간의 중앙(30 m)에 위치한다는 것을 알 수 있었음.
- 경간의 중앙에 대해서 결정된 THIV는 33 km/h의 한계치 보다 약 5.8 % 작게 나타났고 PHD는 20g의 한계치 보다 약 40.5 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.30으로 나타나 EN1317의 IS level B로 분류되었음.
- 표 3.10과 그림 3.45에는 CM3 모델에 대하여 충돌위치를 변화시키면서 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 충돌 위치에 변화에 따른 working width의 변화가 나타나있음. 대형차 충돌조건에 대한 CIP는 working width 관점에서 레일의 중앙에 위치함을 알 수 있음.
- CIP에 대한 대형차 충돌의 working width는 1.3 m로 EN1317의 W5 등급으로 분류되었고, 동적 과 영구 횡 방향 처짐은 각각 0.7 m와 0.1 m로 나타났음.

표 3.8 160 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 탑승자 위험 지수와 최대 횡 변위

Impact point (m)	Impact velocity of small vehicle (km/h)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Maximum lateral displacement (m)
0	160	32.4	11.2	1.51	0.81
1		35.0	10.7	1.62	0.78
2		40.5	13.7	1.90	0.74
3.5		37.0	18.0	1.72	0.76
5		35.8	16.7	1.59	0.81
8		30.7	17.6	1.33	0.84
10		28.8	16.3	1.23	0.87
15		28.9	10.7	1.30	0.93
20		29.6	15.1	1.28	0.97
25		31.0	10.7	1.31	1.03
30		31.1	11.9	1.30	1.13
35		30.2	11.9	1.32	1.07
40		29.8	10.1	1.28	0.95
45		29.4	11.6	1.32	0.89
50		28.7	13.3	1.22	0.86
55		31.0	14.1	1.30	0.85
58		32.6	12.0	1.43	0.83

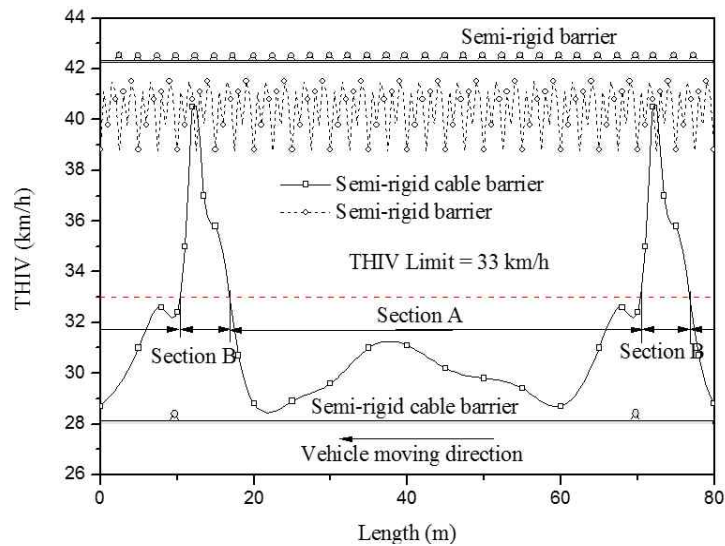


그림 3.44 160 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화

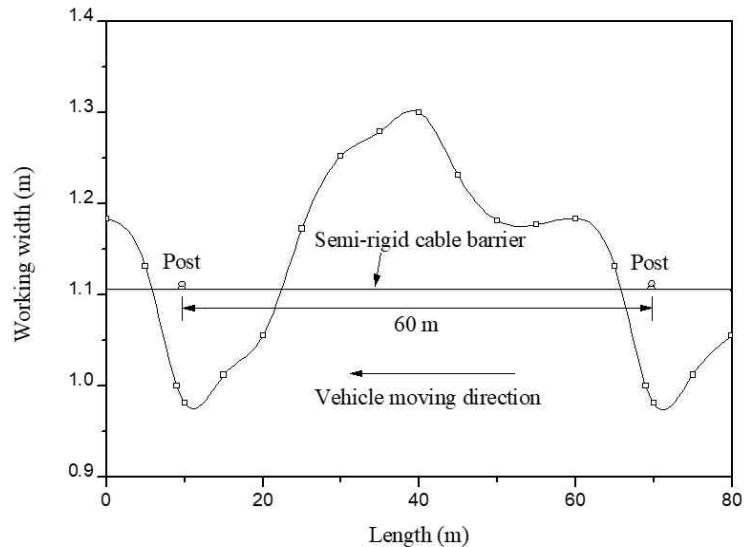


그림 3.45 대형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 working width의 변화

㉔ 온도변화에 따른 케이블 긴장력 변화 검토

- 40° C 온도에서 16개 케이블의 총 초기 긴장력이 1,900 kN으로 감소될 경우에 CM3 모델에 대한 소형차와 대형차의 거동을 조사하기 위하여 16개의 케이블에 각각 119 kN의 초기 긴장력을 도입한 후에 FEA가 수행되었음.
- 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 구간 A에 대한 CIP로 차량 충돌 후 거동 관점의 CIP가 사용되었고 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하지 못하는 구간 B의 CIP로 THIV 관점의 CIP가 사용되었음.
- 구간 A와 구간 B에 대한 FEA에 적용된 소형차 충돌속도는 각각 160 km/h와 130 km/h였음. 그리고 대형차의 충돌은 경간의 중앙 (CIP)에 위치하였음.
- 표 3.9에는 1,900 kN의 초기 긴장력에 대해서 결정된 탑승자 위험 지수가 2,167 kN의 초기 긴장력에 대해서 얻어진 결과와 함께 나타나 있음. 그리고 표 3.10에는 1,900 kN의 초기 긴장력에 대해서 결정된 대형차의 점유폭이 2,167 kN의 초기 긴장력에 대해서 얻어진 결과와 함께 나타나 있음.
- 약 267 kN의 케이블 초기 긴장력이 감소할 때 차량 점유폭은 약 2 % 증가하지만 구간 A에 대한 탑승자 위험 지수는 모두 약간 감소하였음. 그리고 구간 B에 대해서 THIV는 약간 감소하고 PHD는 증가하였으나 ASI는 변화가 없었음. 약 267 kN의 초기 긴장력의 변화는 탑승자 위험 지수와 working width에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었음.

표 3.9 케이블의 초기 긴장력 변화에 따른 탑승자 위험 지수의 변화

Impact point (m)	Impact velocity (km/h)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Initial pre-stressed force (kN)
1.9	130	31.2	9.3	1.39	2,167
1.9	130	31.0	10.6	1.39	1,900
30	160	31.1	11.9	1.30	2,167
30	160	30.9	9.2	1.28	1,900

표 3.10 충돌 위치 변화에 따른 Working width의 변화

Impact point (m)	Working width (m)	Dynamic deflection (m)	Permanent deflection (m)	Initial pre-stressed force (kN)
0	0.98	0.49	0.1	2,167
5	1.01	0.50	0.1	2,167
10	1.06	0.51	0.1	2,167
15	1.17	0.57	0.1	2,167
20	1.25	0.66	0.1	2,167
25	1.28	0.68	0.1	2,167
30	1.30	0.70	0.1	2,167
30	1.33	0.72	0.1	1,900
35	1.23	0.62	0.1	2,167
40	1.18	0.58	0.1	2,167
45	1.18	0.58	0.1	2,167
50	1.18	0.58	0.1	2,167
55	1.13	0.54	0.1	2,167

㉠ 중간지주 설계

- 중간지주의 최대 횡 지지력이 소형차와 대형차의 충돌 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 CM3 모델에 대하여 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA가 수행되었음. 소형차의 충돌은 중간지주로부터 차량진행방향 쪽으로 1.9 m 떨어진 곳에 위치하였음. 중간지주의 최대 정적 횡 지지력으로 20 kN, 35 kN, 그리고 52 kN이 적용되었음.
- 그림 3.46(a)와 3.46(b)에는 FEA에 의해 결정된 차량 속도-시간 이력과 탑승자 위험 지수가 나타나 있음. 20 kN과 35 kN의 최대 정적 횡 지지력에 대해서 THIV는 각각 29.9 km/h와 31.2 km/h로 나타나 33 km/h의 한계치 보다 각각 약 9.4%와 5.5% 작게 나타났음. 그러나 52 kN의 최대 정적 횡 지지력에 대해서는 THIV가 33.7km/h로 나타나 33km/h의 한계치를 초과하였음.
- 20 kN과 35 kN의 최대 정적 횡 지지력에 대한 차량 속도-시간 이력 곡선은 큰 차이 없이 비슷한 감속 경향을 보인 반면에 52 kN의 최대 정적 횡 지지력에 대한 차량 속도-시간 이력 곡선은 0.075 초부터 급격하게 감속되는 경향을 나타냈음.
- 중간지주의 최대 정적 횡 지지력은 소형차 충돌로 인한 탑승자 위험 지수와 대형차 충돌로 인한 배리어의 횡 방향 변위에 영향을 미침.
- 그림 3.46(c)에는 소형차 충돌의 THIV와 지주 최대 정적 횡 지지력의 관계가 대형차의 working width와 지주 최대 정적 횡 지지력의 관계와 함께 나타나 있음. 대형차의 충돌은 중간지주로부터 상류쪽으로 4.5 m 떨어진 곳에 위치하였음.
- 중간지주의 최대 정적 횡 지지력이 증가할수록 대형차의 working width는 작아지지만 소형차 충돌에 대한 THIV는 증가하였음. THIV는 지주의 횡 지지력이 증가할수록 증가하는 경향을 보였음. 32 km/h의 목표 THIV와 1.3 m (W5)의 목표 working width를 만족할 수 있는 중간지주의 최대 정적 횡 지지력은 27 kN에서 41 kN까지의 범위로 조사되었음.

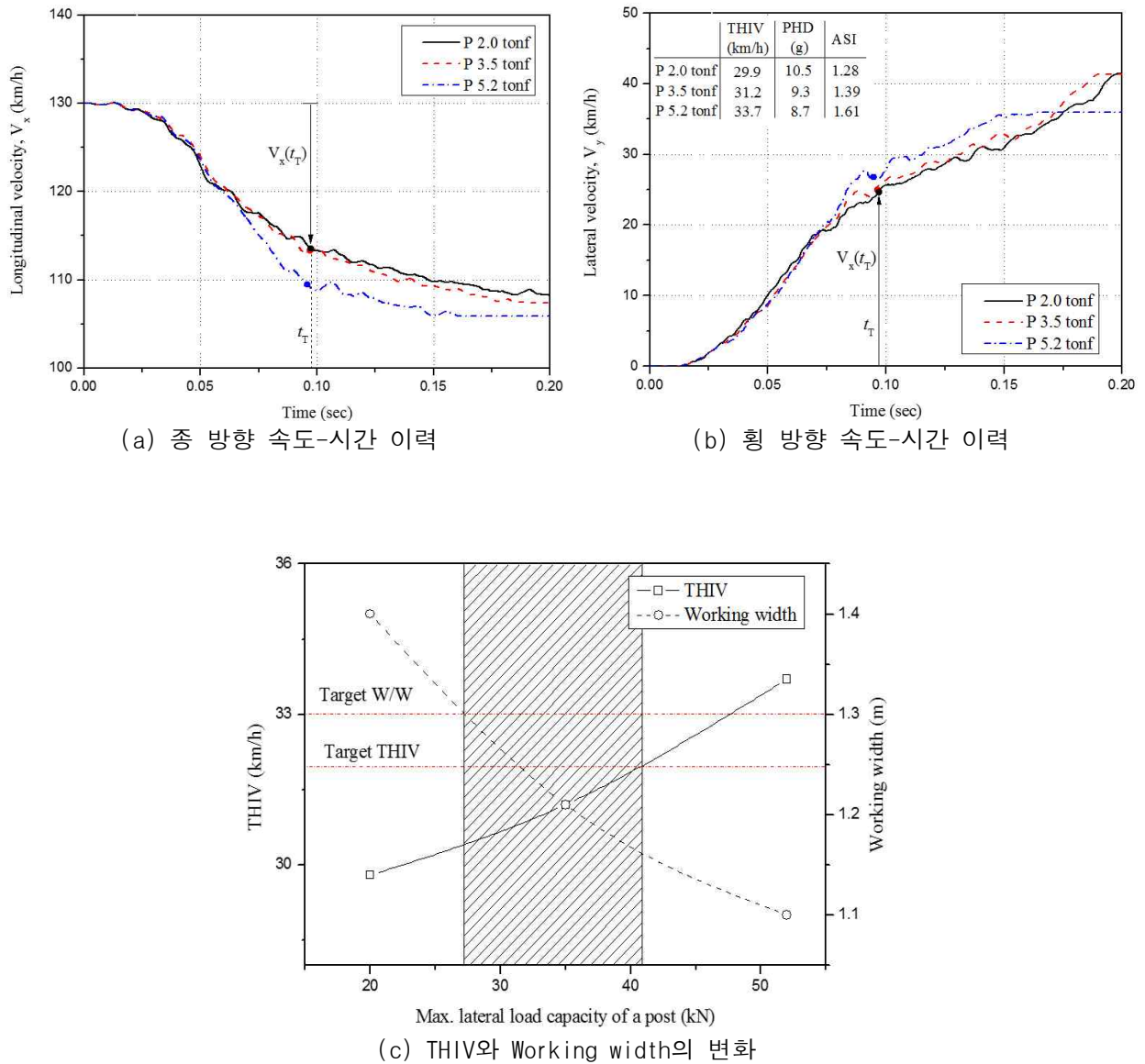


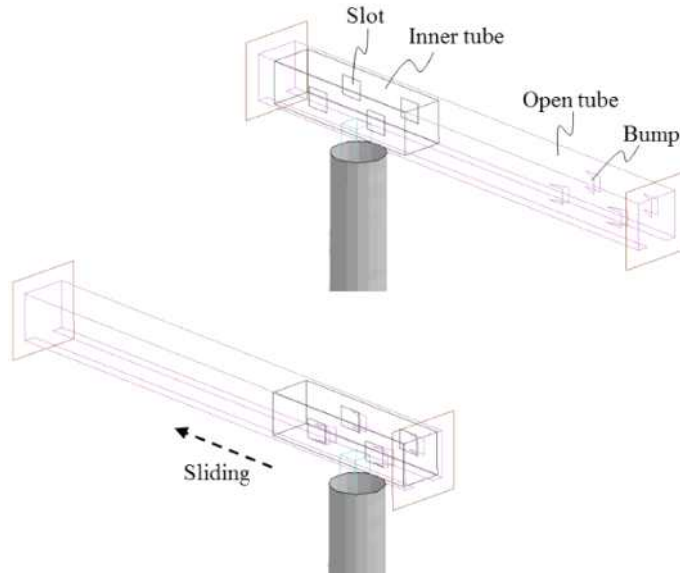
그림 3.46 중간지주의 최대 횡 지지력이 차량 충돌 거동에 미치는 영향

㉔ 케이블 반발력 저감 설계

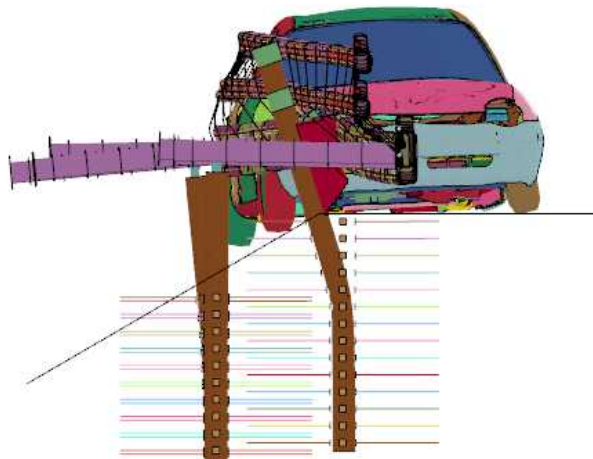
- 그림 3.48(a)에는 CM3 모델에 대한 소형차의 차량 궤적이 나타나있음. Long-span 반강성 케이블 배리어에서 소형차가 160 km/h의 충돌속도와 20°의 충돌각도로 케이블 경간의 중앙(CIP)에 충돌할 때 탄성변형을 겪는 케이블의 복원 특성으로 인하여 발생하는 반발력이 차량을 도로방향으로 밀어내는 현상이 발생함.
- 소형차가 그림 3.48(a)와 같이 이탈박스(exit box)의 B선을 침범하지 않고 이탈박스를 벗어 나지만 케이블로부터 분리되기 직전에 케이블 반발력이 소형차의 뒷부분을 밀어내는 현상이 발생하여서 소형차가 7.8 m 폭과 80 m 길이를 갖는 Y 구간에 걸쳐 360° yaw 회전을 겪게 되었음.
- 그림 3.47(a)에는 횡 방향으로 밀려난 케이블이 바로 복원되지 못하게 하여 반발력을 저감시키는 반발력 제어 장치가 나타나있음. 반발력 제어 장치는 충돌하중에 대하여 횡 방향의 저항이 무시될 정도로 작게 나타날 수 있도록 개 단면(open section) 튜브 형 외부 부재가 slot이 배치된 내부 튜브를 통과할 때 외부 부재의 안쪽에 배치된 돌기가 작은 압축력에 쉽게 움직일 수 있게 설계되었음. 그리고 반발력에 대해서 횡 방향의 저항이 나타날 수 있도록 역방향으로 외부 부재가 이동할 경우에 돌기가 튀어 나와 이동을 방해하도록 설계되었음.
- 그림 3.47(b)에는 반발력 제어 장치가 15 m 간격으로 하단 레일에 연결된 CM3-1 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건을 적용한 FEA에 의해 결정된 차량 충돌

후 거동이 나타나있음.

- 반발력 제어 장치로 인하여 하단 레일의 변형 형상이 기존 CM3 모델과 다르게 나타났고 케이블 복원이 시작되는 시간이 지체됨으로써 그림 3.48(b)와 같이 충돌 후 차량 궤적이 큰 각도의 Yaw 회전 없이 보다 안정적으로 나타났음. CM3-1 모델의 THIV는 31.8 km/h로 나타나 CM3 모델에 비하여 0.7 km/h 크게 나타났음.

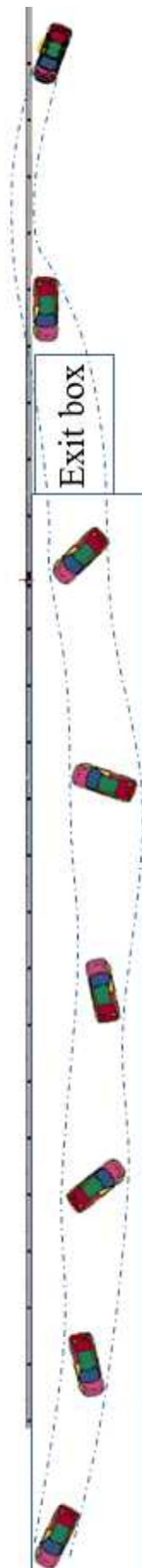


(a) 반발력 제어 장치

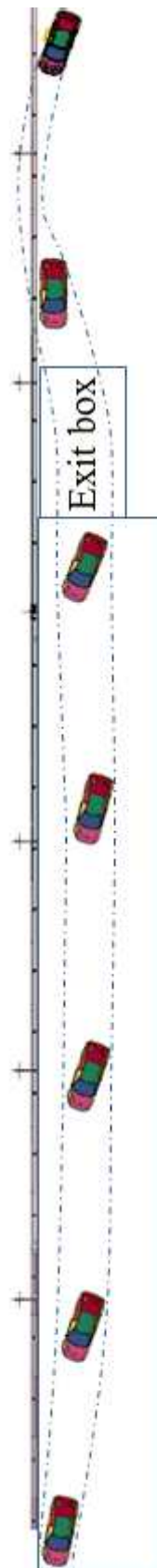


(b) 소형차의 충돌 후 거동

그림 3.47 반발력 제어 장치가 설치된 CM3-1 Model



Section Y



Section Y

(a) CM3 model

(b) CM3-1 model

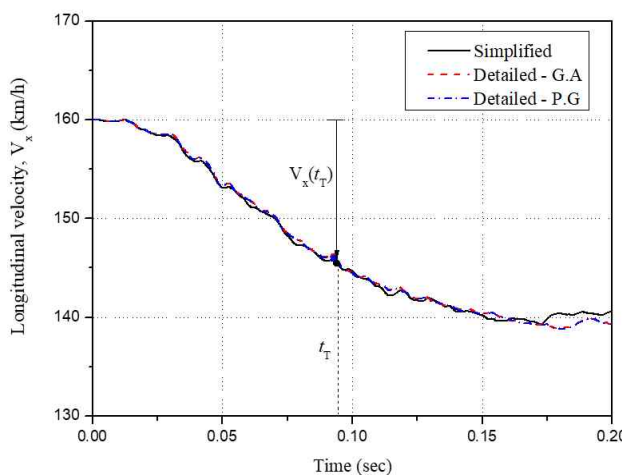
그림 3.48 CM3과 CM3-1 모델에 대한 소형차의 궤적

㉔ 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 최종 설계 성능 검증

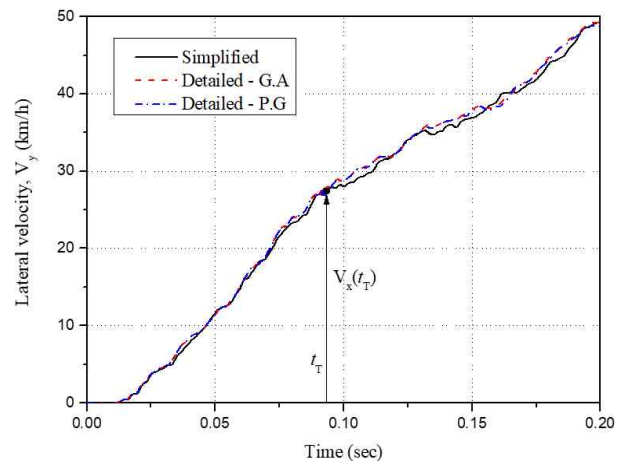
- Cable anchor system 상세 모델을 이용하여 CM3 모델에 대한 성능 평가가 수행되었음. Ground anchor type 상세모델과 pile group type 상세모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건 조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA가 수행되었음.
- 소형차와 대형차 충돌은 경간의 중앙 (CIP)에 위치하였음. Pile group type 상세모델의 스프링 요소에 대한 힘-변위 관계와 모멘트-회전각 관계는 그림 3.23(c), 3.23(d), 그리고 3.23(e)에 보이는 것과 같음.
- 그림 3.49과 표 3.11에는 FEA에 의해 결정된 차량 속도-시간 이력과 탑승자 위험 지수가 나타나 있음. Ground anchor type 상세모델의 경우에 간이모델에 비하여 THIV는 0.3 % 감소하고 PHD와 ASI는 각각 2.5 %와 1.5 % 증가되었음. Pile group type 상세모델의 경우에는 간이모델에 비하여 THIV와 PHD는 각각 0.6 %와 13.4 % 감소하고 ASI는 1.5 % 증가되었음.
- Pile group type 상세모델의 cable anchor system은 소형차 충돌에 대하여 종 방향으로 0.4 mm, 수직 방향으로 0.1 mm의 변위가 발생되었고 회전은 거의 발생되지 않았음. 두 상세모델에 대한 차량 속도-시간 이력 곡선은 간이모델과 비교하여 큰 차이 없이 비슷한 감속 경향을 보였음. 그림 3.50과 그림 3.51에는 두 상세모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차 충돌 후 거동이 나타나있음. 두 상세모델에 대한 소형차 충돌 후 거동은 간이 모델과 유사하게 나타났음.

표 3.11 Cable anchor system의 해석모델에 따른 탑승자 위험 지수

Model		THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Difference (%)		
					THIV	PHD	ASI
Simplified model		31.1	11.9	1.30	-	-	-
Detailed model	ground anchor type	31.0	12.2	1.32	-0.3	2.5	1.5
	pile group type	30.9	10.3	1.32	-0.6	-13.4	1.5



(a) Longitudinal velocity-time history



(b) Lateral velocity-time history

그림 3.49 Cable anchor system의 해석모델에 따른 차량 속도-시간 이력

Front view

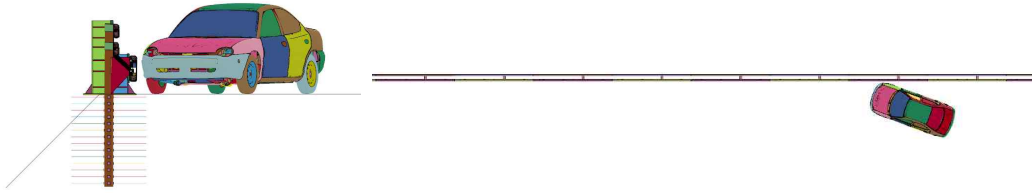
Top view



그림 3.50 Gound anchor type의 상세모델에 의한 소형차 충돌 후 거동

Front view

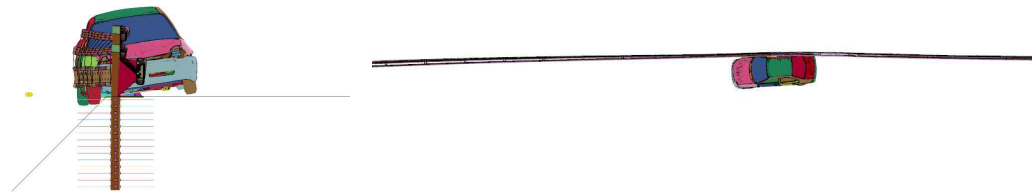
Top view



0.0 sec



0.1 sec



0.2 sec



0.3 sec



0.4 sec

그림 3.51 Pile group type의 상세모델에 의한 소형차 충돌 후 거동

- 표3.12에는 FEA에 의해 결정된 대형차의 횡 방향 변위가 나타나 있음. Ground anchor type 상세모델의 경우에 간이모델에 비하여 차량 점유폭과 동적변위가 각각 0.02 m와 0.01 m가 증가되었음.
- Pile group type 상세모델의 경우에 간이모델에 비하여 차량 점유폭과 동적변위가 각각 0.05 m와 0.03 m가 증가되었음. Pile group type 상세모델의 cable anchor system에서 대형차 충돌에 대하여 종 방향으로 1.7 mm, 수직 방향으로 0.5 mm의 변위가 발생되었고 0.002 radian의 회전이 발생되었음
- Cable anchor system의 변위가 발생되지 않는 ground anchor type에 비하여 변위가 발생하는 pile group type에 대하여 대형차 충돌로 인한 횡 방향 변위가 더 크게 발생됨을 알 수 있었음.
- 그림 3.52에는 시간변화에 따른 하단레일의 중앙과 지표면 사이의 거리 변화가 나타나 있음. 두 상세모델의 대형차 충돌로 인한 케이블의 수직 처짐은 간이모델에 비하여 각각 충돌 후반부에 0.01 m와 0.019 m 크게 발생되었으나 하단 레일의 중앙은 지표면과 접촉되지 않았음.
- 그림 3.53와 그림 3.54에는 두 상세모델에 대하여 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 대형차 충돌 후 거동이 나타나있음. 그림 3.53와 그림 3.54에 보이는 것처럼 종 방향으로 1.7 mm, 수직 방향으로 0.5 mm, 그리고 0.002 radian의 회전이 발생하는 케이블 앵커 시스템의 변위는 대형차 충돌 후 거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었음.

표 3.12 Cable anchor system의 해석모델에 따른 working width와 동적 변위

Model		Working width (m)	Dynamic deflection (m)	Difference (%)	
				Working width	Dynamic deflection
Simplified model		1.30	0.70	-	-
Detailed model	ground anchor type	1.32	0.71	1.5	1.4
	pile group type	1.35	0.73	3.9	4.3

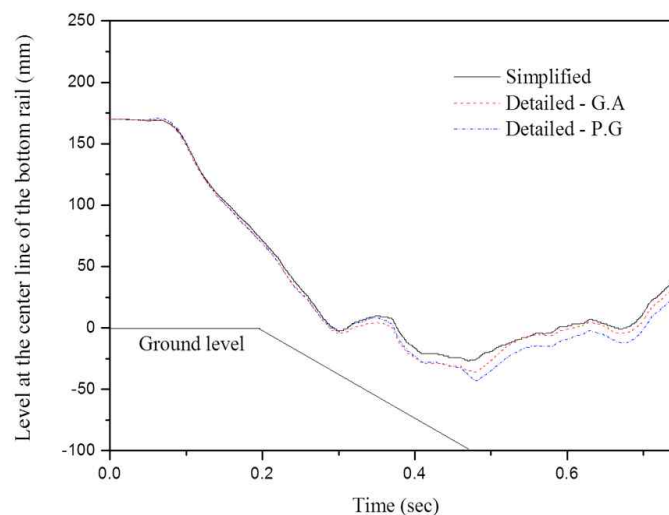
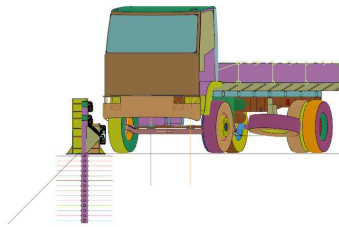


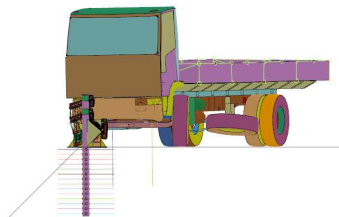
그림 3.52 시간 변화에 따른 하단레일의 중앙과 지표면 사이의 거리 변화

Front view

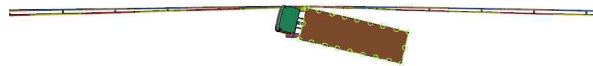
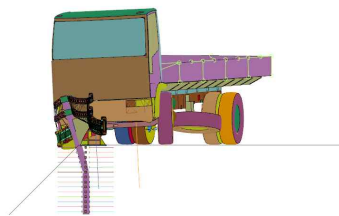
Top view



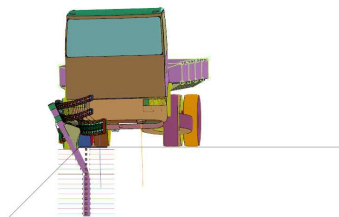
0.0 sec



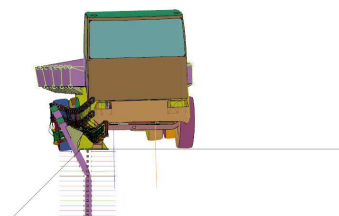
0.3 sec



0.6 sec



0.9 sec

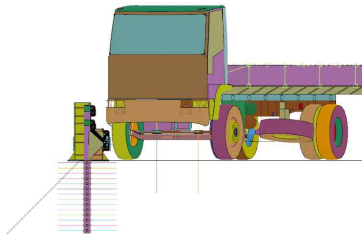


1.2 sec

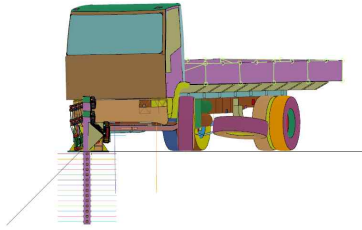
그림 3.53 Ground anchor type의 상세모델에 의한 대형차 충돌 후 거동

Front view

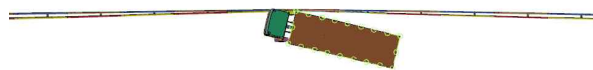
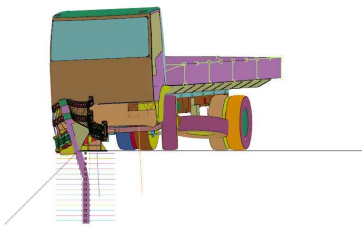
Top view



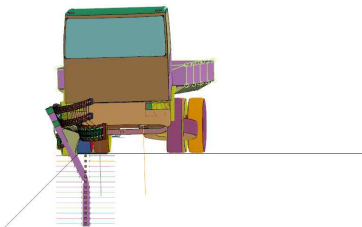
0.0 sec



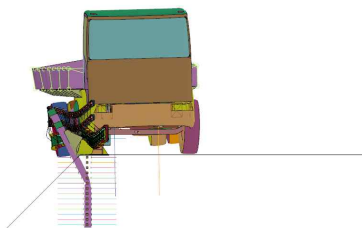
0.2 sec



0.4 sec



0.6 sec



0.8 sec

그림 3.54 Pile group type의 상세모델에 의한 대형차 충돌 후 거동

② 최적 경간

- 경간의 변화가 대형차와 소형차 충돌에 미치는 영향을 조사하기 위하여 경간을 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 그리고 100 m로 변화시키면서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용한 FEA가 CM3 모델에 대하여 수행되었음.
- 대형차 충돌조건에 대하여 1.3 m 정도의 차량 점유폭을 날게 하는 케이블의 소요 숫자와 초기 긴장력이 반복적인 FEA를 통하여 경간별로 결정되었음. 15.2 mm의 직경과 1,880 MPa의 극한강도를 갖는 케이블이 해석 모델에 사용되었음. 대형차의 충돌은 경간에 상관없이 가장 큰 working width를 발생시키는 경간 중앙에 위치하였음. 그리고 소형차 충돌해석은 경간 전체 길이에 걸쳐서 충돌위치를 변화시키면서 수행되었음.
- 표 3.13에는 다양한 경간에 대해서 경간 중앙의 충돌위치를 이용하여 결정된 탑승자 위험 지수와 working width, 그리고 케이블의 초기 긴장력과 케이블 소요 숫자가 나타나 있음. 경간이 증가할수록 배리어의 강성이 감소하기 때문에 대형차 충돌로 인한 working width를 비슷하게 유지하는데 필요한 케이블의 초기 긴장력과 케이블의 숫자는 증가하였음.
- 경간 30 m까지 경간이 증가할 때 THIV가 점점 더 감소하였고 30 m 이상의 경간에 대해서는 경간이 증가할 때 THIV가 다시 점점 더 증가하였음. 그리고 ASI는 경간 40 m까지 경간이 증가할 때 점점 더 감소하였고 40 m 이상의 경간에 대해서는 경간이 증가할 때 ASI가 다시 점점 더 증가하였음.

표 3.13 경간별 탑승자 위험 지수, working width, 케이블 초기 장력과 소요 숫자

Post spacing (m)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Working width (m)	Initial pre-stressed force (kN)	No. of cables
5	37.6	11.6	1.79	1.29	450	4
10	35.2	12.8	1.54	1.30	750	6
15	31.3	12.3	1.29	1.30	950	7
20	28.8	13.3	1.21	1.28	1,100	8
30	27.2	14.2	1.16	1.28	1,320	10
40	27.8	12.8	1.09	1.29	1,517	12
60	31.1	11.9	1.30	1.30	2,167	16
80	33.2	11.5	1.40	1.26	3,246	24
100	35.9	13.9	1.91	1.31	5,000	36

- 그림 3.55에는 표3.13에 제시된 THIV가 단일경간 배리어의 횡 방향 탄성강성 K_E^b 과 함께 다양한 경간에 대하여 나타나 있음. THIV는 경간 중앙의 충돌위치를 이용하여 결정되었음. 그리고 단일경간 배리어의 횡 방향 탄성강성 K_E^b 은 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 $K_E^c (= 8T_c/S)$ 과 단일경간 레일의 횡 방향 탄성강성 $K_E^r (= 48E_r \sum I_r/S)$ 의 합으로 구성됨. 여기서 S 는 경간이고 T_c 는 초기 긴장력, 그리고 $E_r I_r$ 는 레일의 flexural rigidity임.
- 표 3.13과 그림 3.55으로부터 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 충돌조건으로 소형차가 경간 중앙에 충돌하는 경우에 30 m의 경간이 가장 작은 THIV를 낳고, 33 km/h의 THIV 한계치를 만족할 수 있는 경간은 13 m에서 78 m까지의 범위로 나타났음.
- 경간이 증가할수록 K_E^b 가 감소하는 60 m까지 THIV가 점점 더 작게 나타날 것으로 예상되었으나 0에서 30 m까지의 경간에 대해서는 THIV가 점점 더 감소하다가 30 m에서 60 m까지의 범위에 대해서는 THIV가 다시 점점 더 증가하는 경향을 보였음. 그 이유는 30 m에서 60 m까지의 경간에 대하여 경간이 증가할수록 K_E^b 가 약간씩 점점 더 감소하지만 관성력에 의한 횡 방향 저항이 상대적으로 보다 더 크게 증가하기 때문인 것으로 판단되었음.

- 그림 3.56에는 THIV가 발생하는 시간에 계측된 소형차 충돌로 인한 경간 중앙의 동적 횡 변위 δ_d^T , 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 K_E^c , 그리고 단일경간 레일의 횡 방향 탄성강성 K_E^r 이 경간에 따라 함께 나타나 있음.
- 그림 3.56을 보면 경간이 증가될수록 레일의 횡 방향 강성은 급격하게 감소하고 케이블의 횡 방향 강성은 60 m까지 감소하다가 다시 증가한다는 것을 알 수 있음. 단일경간 레일의 횡 방향 탄성강성 K_E^r 이 15 m 이후부터 변화가 없이 일정하기 때문에 15 m 이후의 단일경간 배리어의 횡 방향 탄성강성 K_E^b 은 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 K_E^c 에 의해 좌우됨을 알 수 있음.
- 그림 3.56을 보면 경간이 커질수록 δ_d^T 가 증가하다가 30 m 이후부터 다시 감소하는 것을 알 수 있음. 경간이 커질수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 증가하지만 30 m 보다 작은 경간에 대해서는 레일과 케이블의 횡 방향 강성이 상대적으로 보다 더 감소하기 때문에 δ_d^T 가 증가하였음.
- 30 m에서 60 m까지의 경간에 대해서는 경간이 커질수록 레일과 케이블의 횡 방향 강성은 약간씩 점점 더 작아지지만 관성력에 의한 횡 방향 저항이 상대적으로 보다 더 증가하기 때문에 δ_d^T 가 감소되었음. 그리고 60 m 보다 큰 경간에서는 경간이 커질수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 점점 더 증가하고 케이블의 횡 방향 강성도 다시 증가되기 때문에 δ_d^T 가 더 크게 감소되는 것을 알 수 있음.

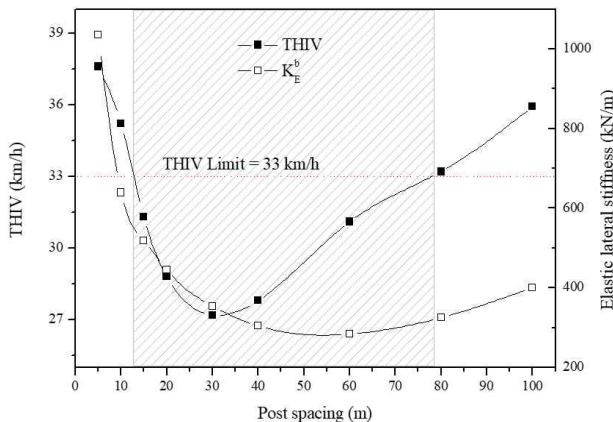


그림 3.55 경간 변화에 따른 THIV와 K_E^b 의 변화

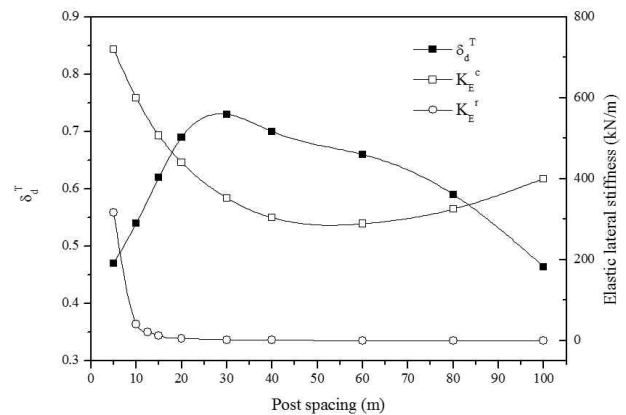


그림 3.56 경간 변화에 따른 δ_d^T , K_E^c , 그리고 K_E^r 의 변화

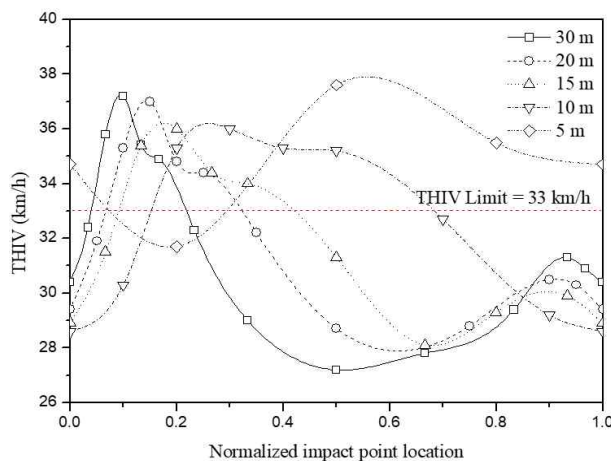
- 표 3.14에는 경간 변화에 따른 구간 A의 길이, 구간 B의 길이, 그리고 경간에 대한 구간 B의 비율이 나타나있고 그림 3.57에는 경간별 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 나타나있음.
- 그림 3.57(a)와 3.57(b)로부터 80 m 보다 작은 경간에 대해서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건을 만족하지 못하는 구간 B는 중간 지주에 가까운 위치에서만 나타났음. 그리고 80 m 이상의 경간에 대해서는 구간 B가 중간지주 근처와 경간 중앙 근처에서 나타났음.
- 80 m 미만의 경간에 대해서는 구간 B가 관성력으로 인한 횡 방향 저항이 크게 나타나지 않는 중간지주 근처에서만 나타나기 때문에 구간 B의 THIV는 주로 K_E^b 의 크기에 따라 좌우됨. 따라서 80 m 미만의 경간에 대해서는 경간이 감소할수록 K_E^b 가 점점 더 커지면서 경간에 대한 구간 B의 비율도 점점 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있음.
- 특히 일반적인 반강성 레일형 배리어에 적용되는 경간과 유사한 5 m의 경간에 대해서는 단일 경간 레일의 횡 방향 탄성강성 K_E^r 이 급격하게 증가하기 때문에 충돌위치에 따른 THIV의 변

화가 다른 경간에 대한 것과 다르게 나타나고 반강성 레일형 배리어에 대한 것과 유사하다는 것을 알 수 있음.

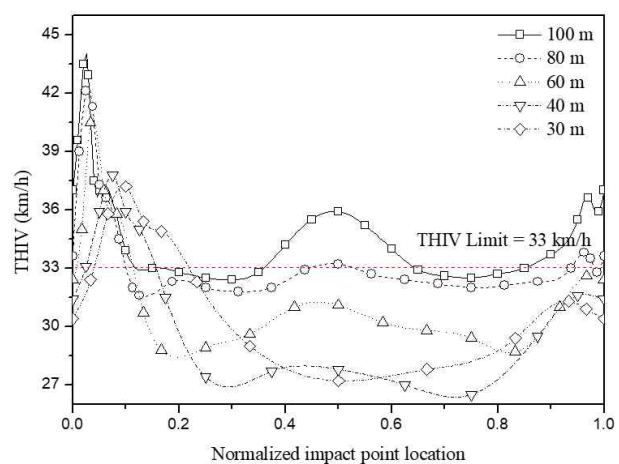
- 그림 3.57(a)와 3.57(b)를 자세히 살펴보면 10 m에서 30 m까지의 경간에 대해서 경간 중앙 근처의 THIV가 가장 작게 나타나고 40 m 이상의 경간에 대해서는 경간이 증가할수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 점점 더 증가하기 때문에 경간 중앙의 THIV가 점점 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있음. 그리고 80 m 이상의 경간부터 경간이 증가할수록 THIV가 33 km/h 보다 크게 나타나는 경간 중앙 근처의 구간이 점점 더 커지면서 60 m까지 점점 감소한 경간에 대한 구간 B의 비율이 다시 점점 더 크게 나타나는 경향을 보였음.

표 3.14 경간별 구간 A의 길이, 구간 B의 길이, 경간에 대한 구간 B의 비율

Post spacing (m)	Section A (m)	Section B (m)	Section B / Post spacing
5	1.04	3.96	0.79
10	4.44	5.56	0.56
15	9.95	5.05	0.34
20	14.8	5.20	0.26
30	24.6	5.40	0.18
40	34.5	5.50	0.14
60	53.3	6.70	0.11
80	66.9	13.1	0.16
100	42.9	57.1	0.57



(a) 5 m에서 30 m까지의 경간



(b) 30 m에서 100 m까지의 경간

그림 3.57 경간별 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화

- 그림 3.58에는 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도별 경간 변화에 따른 경간에 대한 구간 B의 비율이 나타나있음. 모든 경간에 대하여 소형차 충돌속도가 증가할수록 해당 충돌속도를 만족하지 못하는 경간에 대한 구간 B의 비율이 점점 더 증가하였음.
- 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건에 약 1.0 m의 동적 횡 변위를 날도록 설계된 반강성 케이블 배리어에 대한 최적 경간은 탑승자 위험지수의 관점에서 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 경간에 대한 구간 B의 비율이 각각 약 9, 11, 그리고 17 %로 가장 작게 나타나는 60 m로 파악되었음. 그리고 경간에 대한 구간 B의 비율이 20% 미만으로 나타나는 경간은 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도별로 각각 25 m에서 85 m, 30 m에서 80 m, 그리고 40 m에서 70 m까지의 범위로 조사되었음.

- 경간이 증가할 때 케이블의 초기 긴장력과 케이블 량이 상당히 크게 증가하기 때문에 탑승자 위험지수와 경제성을 함께 고려하면 최적 경간은 30 m로 밝혀졌음. 경간이 30 m에서 60 m로 증가할 때 160 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 경간에 대한 구간 B의 비율이 7 % 감소하지만 케이블 초기 긴장력과 케이블 량은 각각 약 64 %와 60 % 증가하였음.
- 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건에 약 1.0 m의 동적 횡 변위를 날도록 설계된 반강성 케이블 배리어가 60 m 경간을 가질 때 경간의 91 %, 89 %, 그리고 83 %가 각각 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 것으로 나타났음.
- 소형차 충돌속도가 증가할수록 경간에 대한 해당 충돌속도를 만족하는 구간의 비율이 감소하였고 소형차 충돌 후 거동도 점점 더 좋지 않게 나타났음. 특히 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대해서는 소형차가 충돌 후에 하단 레일 밑으로 침투할 것처럼 불안정하게 거동하다가 배리어로부터 분리되었음.
- 따라서 170 km/h 이상의 소형차 충돌속도에 대해서 차량 충돌 후 거동을 보다 안정적으로 만족시키기 위해서는 소형차가 하단 레일 밑으로 침투하는 현상을 보다 확실하게 방지할 수 있도록 반강성 케이블 배리어의 설계가 개선되어야 함.

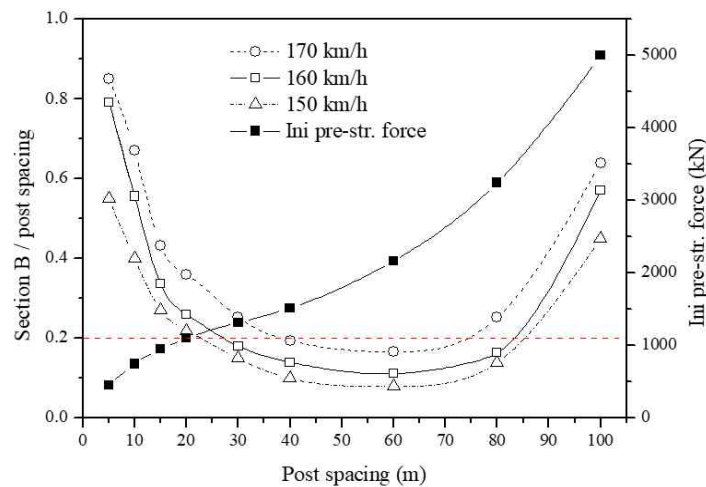


그림 3.58 소형차 충돌속도별 경간 변화에 따른 경간에 대한 구간 B의 비율

(나) Short-span weak-post system

① 상세설계

- 그림 3.59, 3.62, 그리고 3.65에 약한 중간지주를 적용하는 단경간 반강성 케이블 배리어에 대한 3개의 해석모델이 나타나있음. 3개의 해석모델에 동일하게 사용된 구성요소는 중간지주와 중간지주 지지력, 케이블과 케이블 초기 긴장력임. 그러나 케이블의 배치와 레일의 크기는 해석모델에 따라 다르게 적용되었음.
- 중간지주의 단면은 그림 3.13(c)의 C-type 2이고 145 mm의 길이, 65mm의 폭, 그리고 2.0 mm의 두께를 갖는 C형 단면임. 2.0 m의 경간이 3개의 해석모델에 적용되었음.
- 138.7 mm²의 단면적과 1,880 MPa의 극한강도를 갖는 케이블이 8개 사용되었고 각 케이블에 106.5 kN의 초기 긴장력이 도입되었음. 약한 중간지주가 사용되었기 때문에 소형차가 지주에 심하게 충돌하는 현상을 방지하기 위해서 설치되는 블록아웃은 제외되었음. 그리고 약한 중간지주는 콘크리트 기초에 매입되기 때문에 중간지주의 기초(supports)는 고정으로 모델링되었음.

㉔ CM5 모델

- 그림 3.59의 CM5 모델에 대한 상단, 중단, 하단 레일에 배치된 케이블의 높이, 레일의 크기, 수직 연결재, 그리고 수직연결재의 배치는 CM2 모델과 동일함.
- 8개의 케이블은 상단과 중단에 각각 2개씩 그리고 하단에 4개 분리되어 배치되었음. 그림 3.60과 3.61에는 CM5 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 소형차와 대형차의 배리어에 대한 충돌은 2 m 경간의 중앙인 1 m에 위치하였음.
- CM5 모델에 대하여 소형차가 충돌 후에 하단 레일 밑으로 침투할 것처럼 불안정하게 거동하다가 배리어로부터 분리되었음. 소형차 충돌 후 거동은 약간 불안정하게 나타났음. 대형차의 경우에는 차량 충돌 후 거동이 안정적으로 나타났음. 레일의 간격을 유지하기 위한 수직 연결재가 설치되었기 때문에 상하 좌우로 심하게 움직이는 케이블의 진동현상은 크게 나타나지 않았음.
- CM5 모델의 THIV는 29.5 km/h로 33 km/h의 한계치 보다 약 10.6 % 작게 나타났고 PHD는 18.4 g로 20 g의 한계치 보다 약 8 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.18으로 나타났음.
- 대형차의 충돌로 인한 working width는 1.31 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 0.74 m와 0.1 m로 나타났음.

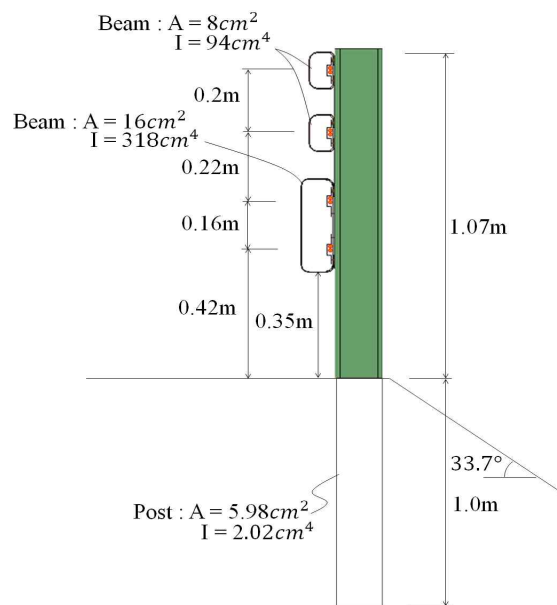


그림 3.59 CM5 모델의 단면과 제원

Front view

Top view



0.0 sec



0.1 sec



0.2 sec



0.3 sec

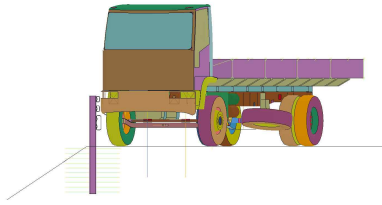


0.4 sec

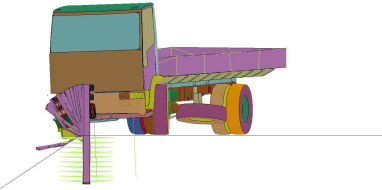
그림 3.60 CM5 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

Front view

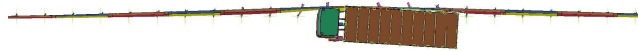
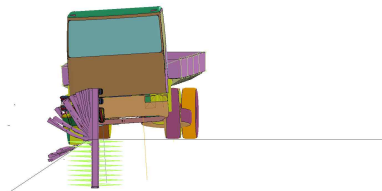
Top view



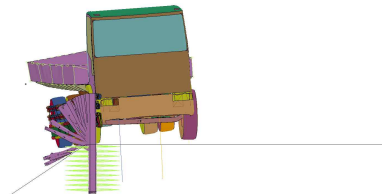
0.0 sec



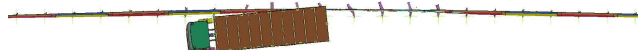
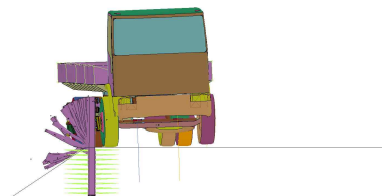
0.3 sec



0.6 sec



0.9 sec



1.2 sec

그림 3.61 CM5 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 대형차 충돌 후 거동

㉔ CM6

- 그림 3.62의 CM6 모델은 CM5 모델의 중단과 하단 레일을 75 mm씩 하향시켜서 CM5 모델을 수정한 모델임.
- 그림 3.63와 3.64에는 CM6 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 소형차와 대형차의 배리어에 대한 충돌은 2 m 경간의 중앙인 1 m에 위치하였음.
- CM6 모델에 대하여 소형차가 하단 레일 밑으로 침투하는 현상이 나타나지 않았음. 소형차의 충돌 후 거동은 CM5에 비하여 보다 안정적으로 나타났고 대형차의 경우에도 차량 충돌 후 거동이 안정적으로 나타났음.

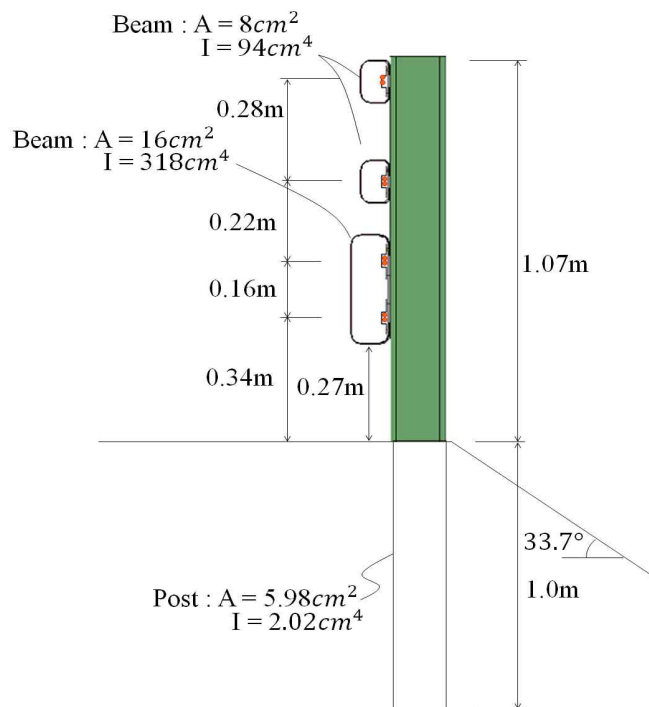
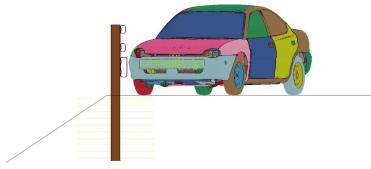


그림 3.62 CM6 모델의 단면과 제원

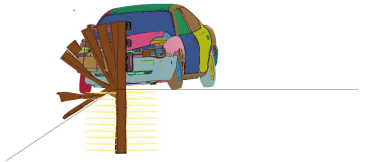
- CM6 모델의 THIV는 30.0 km/h로 33 km/h의 한계치 보다 약 9.1 % 작게 나타났고 PHD는 16.0 g로 20 g의 한계치 보다 약 20 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.19으로 나타났음.
- 대형차 충돌로 인한 working width는 1.30 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 0.74 m와 0.1 m로 나타났음. 중단과 하단 레일을 75 mm씩 하향시켰기 때문에 CM5 모델보다 차량 충돌 후 거동은 안정적으로 나타났으나 배리어와 차량의 접촉 면적 증가로 인하여 소형차 충돌에 대한 탑승자 위험 지수는 증가되었음.

Front view

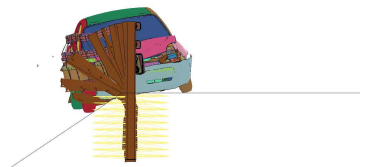
Top view



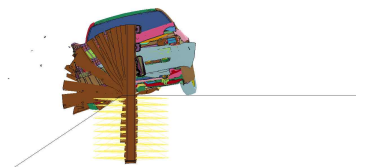
0.0 sec



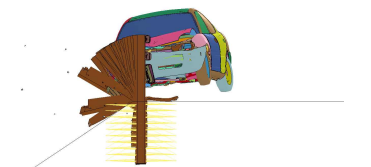
0.1 sec



0.2 sec



0.3 sec

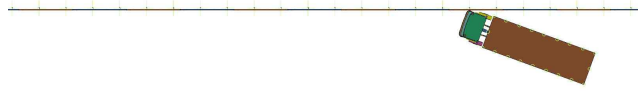
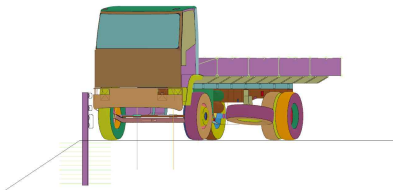


0.4 sec

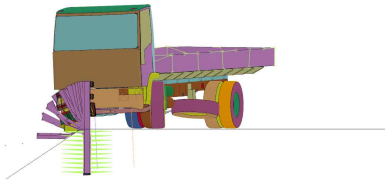
그림 3.63 CM6 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

Front view

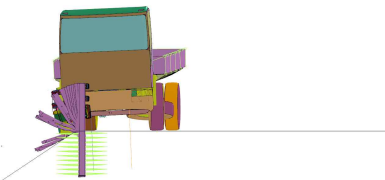
Top view



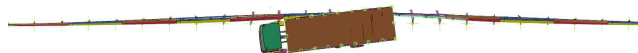
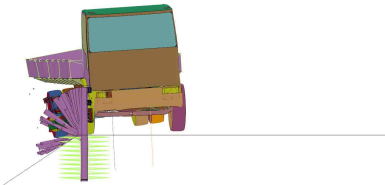
0.0 sec



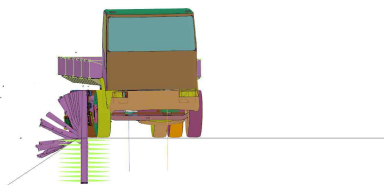
0.3 sec



0.6 sec



0.9 sec



1.2 sec

그림 3.64 CM6 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 대형차 충돌 후 거동

㉔ CM7

- 그림 3.65의 CM7 모델은 하단 레일을 보다 작은 2개의 레일로 분리하였을 때 소형차와 대형차 충돌 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 CM6 모델의 하단 레일을 2단으로 분리한 모델임.
- 그림 3.66과 3.67에는 CM7 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 소형차와 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 소형차와 대형차의 배리어에 대한 충돌은 2 m 경간의 중앙인 1 m에 위치하였임.
- CM7 모델에 대한 소형차와 대형차의 충돌 후 거동은 안정적으로 나타났음. 하단 레일이 2개로 분리되었지만 차량 충돌 후 거동은 CM6 모델과 유사하게 나타났음.

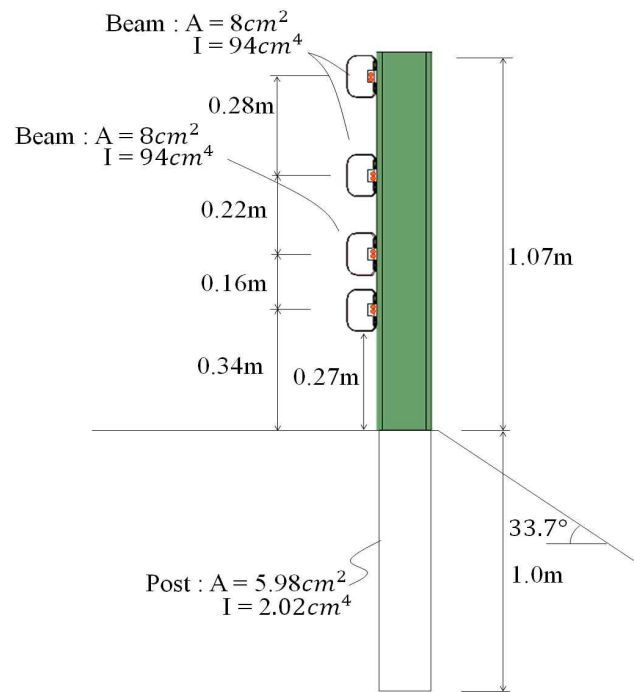
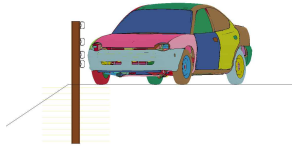


그림 3.65 CM7 모델의 단면과 제원

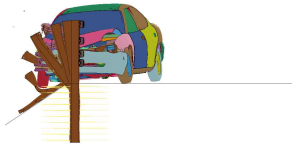
- CM7 모델의 THIV는 31.6 km/h로 33 km/h의 한계치 보다 약 4.2 % 작게 나타났고 PHD는 17.4 g로 20 g의 한계치 보다 약 13 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.23으로 나타났음.
- 대형차 충돌로 인한 working width는 1.32 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 0.75 m와 0.1 m로 나타났음. 하단레일을 2단으로 분리한 CM7 모델이 CM6 모델에 비하여 상당히 큰 탑승자 위험 지수를 낳았기 때문에 하단 레일을 2단으로 분리하는 것은 적절하지 않는 것으로 판단되었음.

Front view

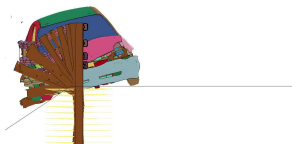
Top view



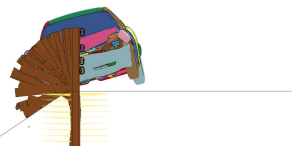
0.0 sec



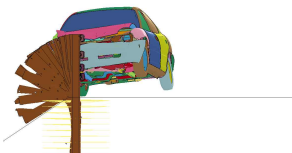
0.1 sec



0.2 sec



0.3 sec

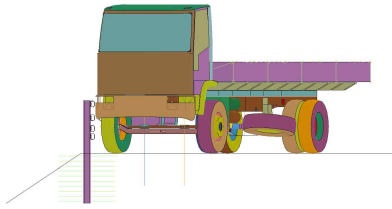


0.4 sec

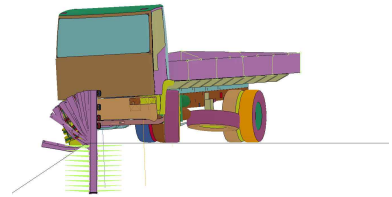
그림 3.66 CM7 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

Front view

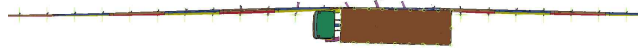
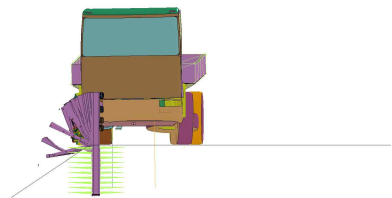
Top view



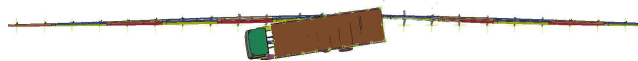
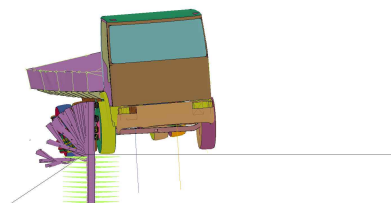
0.0 sec



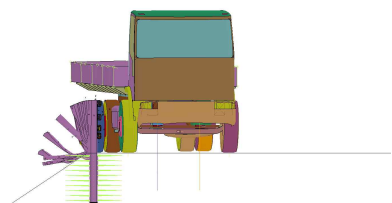
0.3 sec



0.6 sec



0.9 sec



1.2 sec

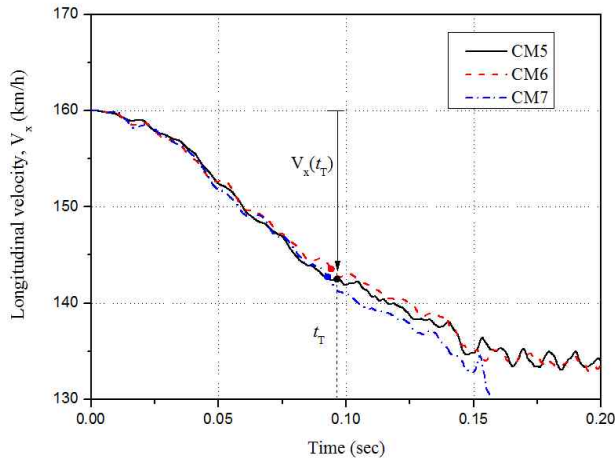
그림 3.67 CM7 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 대형차 충돌 후 거동

㉠ 최적안 결정

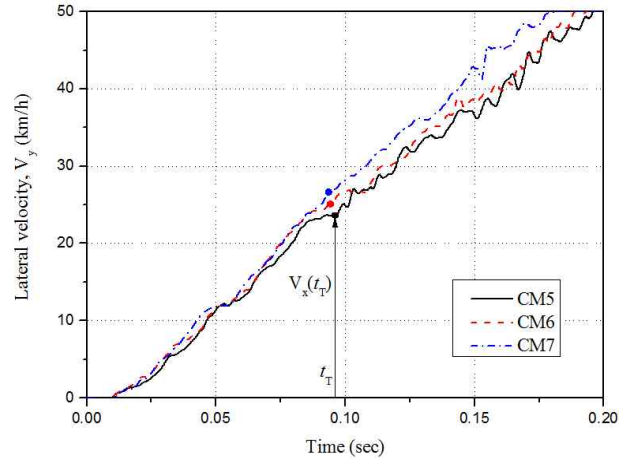
- 표 3.15와 그림 3.68에는 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 탑승자 위험 지수와 차량 속도-시간 이력이 나타나 있음.
- 소형차의 충돌 후 거동은 CM7, CM6, 그리고 CM5 순으로 좋게 나타났음. 그러나 THIV와 ASI는 소형차의 충돌 후 거동에 대한 것과 역순으로 CM5, CM6, 그리고 CM7 순으로 좋게 나타났음.
- 3개의 모델에 대한 THIV와 PHD는 각 지수의 한계치를 만족하였고 ASI는 모두 EN1317의 등급 B로 분류되었음. THIV와 ASI가 CM5, CM6, 그리고 CM7 순으로 좋게 나타나는 이유는 소형차와 레일이 접촉하는 면적이 CM5, CM6, 그리고 CM7 순으로 작게 나타나기 때문임.
- CM5, CM6, 그리고 CM7 모델에 대한 대형차의 working width는 각각 1.31 m, 1.30 m, 그리고 1.32 m로 EN1317(CEN, 2010)의 W5 등급으로 분류되었음. 또한 동적 횡 방향 변위는 각각 0.74 m, 0.74 m, 그리고 0.75 m로 나타났고 영구 횡 방향 처짐은 0.1 m 이하로 나타났음. 케이블의 탄성 거동 때문에 반강성 케이블 배리어의 소성 횡 방향 변위가 매우 작게 나타났다.
- CM6이 탑승자 위험 지수와 차량 충돌 후 거동을 함께 고려할 때 가장 합리적인 모델인 것으로 평가되었음.

표 3.15 다양한 FEA 모델의 탑승자 위험 지수

Model	THIV (km/h)	$V_x(t_T)$ (km/h)	$V_x(t_T)$ (km/h)	PHD (g)	ASI
CM5	29.5	23.8	17.5	18.4	1.18
CM6	30.0	25.1	16.5	16.0	1.19
CM7	31.6	26.6	17.4	17.4	1.23



(a) 횡 방향 속도-시간 이력



(b) 종 방향 속도-시간 이력

그림 3.68 다양한 FEA 모델의 차량 속도-시간 이력

㉡ 최적 경간

- 경간의 변화가 소형차와 대형차의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 경간을 1, 2, 4, 6, 8, 그리고 10 m로 변화시키면서 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용한 FEA가 CM6 모델에 대하여 수행되었음.
- 대형차 충돌조건에 대하여 1.3 m 정도의 차량 점유폭을 날게 하는 케이블의 소요 숫자와 초기 긴장력이 반복적인 FEA를 통하여 경간별로 결정되었음. 15.2 mm의 직경과 1,880 MPa의 극한강도를 갖는 케이블이 해석 모델에 사용되었음.
- 대형차의 충돌은 경간에 상관없이 가장 큰 working width를 발생시키는 경간 중앙에 위치하

였음. 그리고 소형차 충돌해석은 경간 전체길이에 걸쳐서 충돌위치를 변화시키면서 수행되었음.

- 표 3.16에는 다양한 경간에 대해서 경간 중앙의 충돌위치를 이용하여 결정된 탑승자 위험 지수와 working width, 그리고 케이블의 초기 긴장력과 케이블 소요 숫자가 나타나 있음. 경간이 증가할수록 배리어의 강성이 감소하기 때문에 대형차 충돌로 인한 working width를 비슷하게 유지하는데 필요한 케이블의 초기 긴장력과 케이블의 숫자는 증가하였음.
- 경간 2 m까지 경간이 증가할 때 THIV와 ASI가 점점 더 감소하였고 2 m 이상의 경간에 대해서는 경간이 증가할 때 THIV와 ASI가 다시 점점 더 증가하였음.

표 3.16 경간별 탑승자 위험 지수, working width, 케이블의 초기 긴장력과 소요 숫자

Post spacing (m)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Working width (m)	Initial pre-stressed force (kN)	No. of cables
1	31.4	17.9	1.63	1.31	600	5
2	30.0	16.0	1.19	1.30	852	8
4	32.0	17.4	1.42	1.30	1,598	12
6	32.7	18.5	1.47	1.32	2,130	16
8	33.9	15.4	1.55	1.29	2,600	20
10	39.3	17.2	1.99	1.29	3,100	23

- 그림 3.69에는 표3.16에 제시된 THIV가 단일경간 배리어의 횡 방향 탄성강성 K_E^b 과 함께 다양한 경간에 대하여 나타나 있다. THIV는 경간 중앙의 충돌위치를 이용하여 결정되었음. 표 3.16과 그림 3.69로부터 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 충돌조건으로 소형차가 경간 중앙에 충돌하는 경우에 2 m의 경간이 가장 작은 THIV를 낳고, 33 km/h의 THIV 한계치를 만족할 수 있는 경간은 1 m에서 7 m까지의 범위로 나타났음.
- 경간이 증가할수록 K_E^b 가 감소하는 10 m까지 THIV가 점점 더 작게 나타날 것으로 예상되었으나 0에서 2 m까지의 경간에 대해서는 THIV가 점점 더 감소하다가 2 m에서 10 m까지의 범위에 대해서는 THIV가 다시 점점 더 증가하는 경향을 보였음. 그 이유는 2 m에서 10 m까지의 경간에 대하여 경간이 증가할수록 K_E^b 가 약간씩 점점 더 감소하지만 관성력에 의한 횡 방향 저항이 상대적으로 보다 더 크게 증가하기 때문인 것으로 판단되었음.
- 그림 3.70에는 THIV가 발생하는 시간에 예측된 소형차 충돌로 인한 경간 중앙의 동적 횡 변위 δ_d^T , 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 K_E^c , 그리고 단일경간 레일의 횡 방향 탄성강성 K_E^r 이 경간에 따라 함께 나타나 있음. 그림 3.70을 보면 경간이 증가될수록 레일과 케이블의 횡 방향 강성은 4 m까지 급격하게 감소하고 4 m이후부터 점진적으로 조금씩 감소한다는 것을 알 수 있음.
- 단일경간 레일의 횡 방향 탄성강성 K_E^r 이 4 m 이후부터 변화가 크지 않고 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 K_E^c 에 비하여 상당히 작기 때문에 4 m 이후의 단일경간 배리어의 횡 방향 탄성강성 K_E^b 은 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 K_E^c 에 의해 좌우됨을 알 수 있음.
- 그림 3.70을 살펴보면 경간이 커질수록 δ_d^T 가 증가하다가 경간이 2 m 보다 큰 경우에는 다시 감소하는 것을 알 수 있음. 경간이 커질수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 증가하지만 2 m 보다 작은 경간에 대해서는 레일과 케이블의 횡 방향 강성이 상대적으로 보다 더 감소하기 때문에 δ_d^T 가 증가하였음. 2 m에서 10 m까지의 경간에 대해서는 경간이 커질수록 레일과 케이블의 횡 방향 강성은 약간씩 점점 더 작아지지만 관성력에 의한 횡 방향 저항이 상대적으로 보다 더 증가하기 때문에 δ_d^T 가 감소되었음.

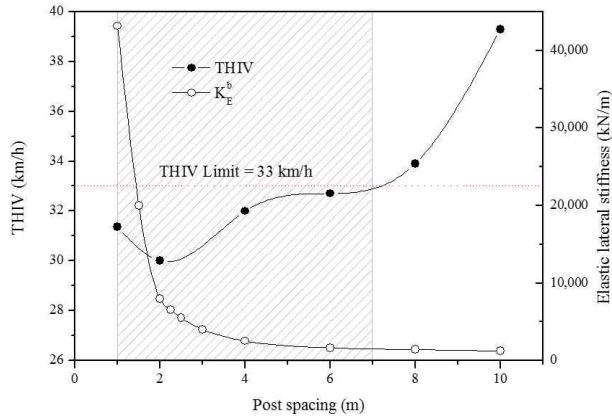


그림 3.69 경간 변화에 따른 THIV와 K_E^b 의 변화

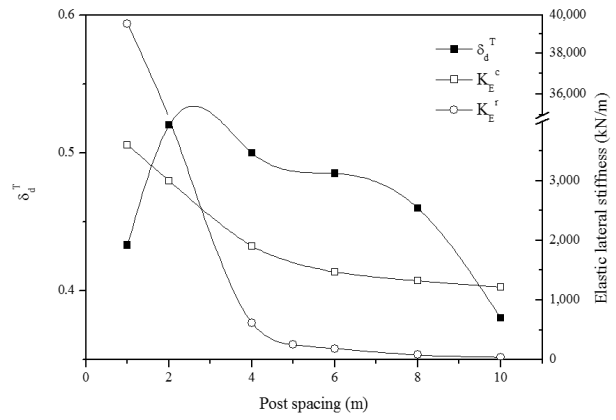


그림 3.70 경간 변화에 따른 δ_d^T , K_E^c , K_E^r 의 변화

- 표 3.17에는 경간 변화에 따른 구간 A의 길이, 구간 B의 길이, 그리고 경간에 대한 구간 B의 비율이 나타나있고 그림 3.71에는 경간별 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 나타나있음.
- 약한 중간지주를 갖는 단경간 반강성 케이블 배리어는 약한 지주를 사용하기 때문에 바퀴가 지주를 밟을 때 THIV가 일부 증가하였으나 강한 지주를 사용하는 반강성 케이블 배리어처럼 지주 근처에서 THIV가 급격하게 증가하는 경향을 보이지는 않았음.
- 그림 3.71과 표 3.17를 자세히 살펴보면 2 m까지의 경간에 대해서 경간 전체가 160 km/h의 충돌속도를 만족하는 반면에 2 m 보다 큰 경간에 대해서는 경간이 증가할수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 점점 더 증가하기 때문에 160 km/h의 충돌속도를 만족하는 구간이 점점 감소하고 8 m 이상의 경간에 대해서는 경간 전체가 160 km/h의 충돌속도를 만족하지 못한다는 것을 알 수 있음.

표 3.17 경간별 구간 A의 길이, 구간 B의 길이, 경간에 대한 구간 B의 비율

Post spacing (m)	Section A (m)	Section B (m)	Section B / Post spacing
1	1.0	0.0	0.0
2	2.0	0.0	0.0
4	2.51	1.49	0.37
6	3.25	2.75	0.46
8	0.0	8.0	1.0
10	0.0	10.0	1.0

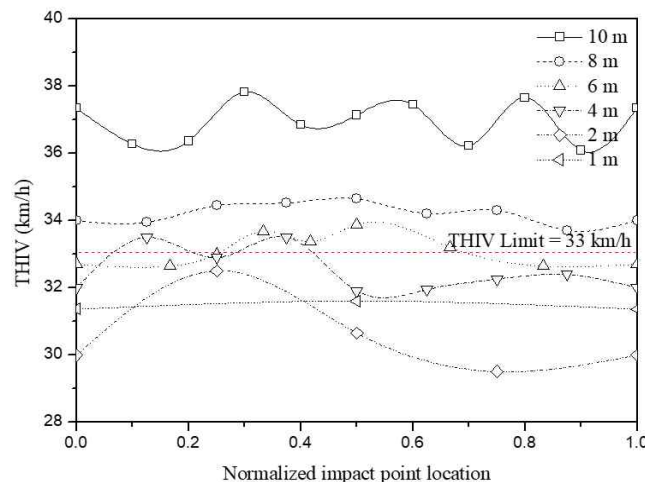


그림 3.71 다양한 경간에 대한 충돌 위치 변화에 따른 THIV 변화

- 그림 3.72에는 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도별 경간 변화에 따른 경간에 대한 구간 B의 비율이 나타나있음. 모든 경간에 대하여 소형차 충돌속도가 증가할수록 해당 충돌속도를 만족하지 못하는 경간에 대한 구간 B의 비율이 급격하게 증가하였음.
- 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건에 약 1.0 m의 동적 횡 변위를 날도록 설계된 약한 지주를 갖는 반강성 케이블 배리어에 대한 최적 경간은 탑승자 위험지수의 관점에서 150 km/h 소형차 충돌속도에 대해서는 경간 전체가 해당 충돌속도를 만족하는 1 m에서 4 m까지의 범위, 그리고 160 km/h와 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대해서는 1 m에서 2 m까지의 범위로 파악되었음.
- 경간이 증가할 때 케이블의 초기 긴장력과 케이블 량은 증가하고 중간지주용 콘크리트 기초의 양은 감소하기 때문에 경제성까지 고려하는 최적 경간은 배리어 설치길이에 따라 좌우됨.
- 경간이 1 m에서 2 m로 증가할 때 160 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 케이블 초기 긴장력과 케이블 량은 각각 약 42 %와 60 % 증가하지만 중간지주용 콘크리트 기초의 양은 50 % 감소함. 따라서 배리어 설치길이가 상당히 긴 경우에는 중간지주용 콘크리트 기초의 감소가 크기 때문에 2 m가 유리하고 배리어 설치길이가 길지 않은 경우에는 1 m가 유리할 것임.
- 그리고 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건에 약 1.0 m의 동적 횡 변위를 날도록 설계된 약한 지주를 갖는 반강성 케이블 배리어가 4 m 경간을 가질 때 경간의 100 %, 63 %, 그리고 17 %가 각각 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 것으로 나타났음.
- 소형차 충돌속도가 증가할수록 경간에 대한 해당 충돌속도를 만족하는 구간의 비율이 감소하였고 소형차 충돌 후 거동도 점점 더 좋지 않게 나타났음. 특히 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대해서는 소형차가 충돌 후에 하단 레일 밑으로 침투할 것처럼 불안정하게 거동하다가 배리어로부터 분리되었음.
- 따라서 170 km/h 이상의 소형차 충돌속도에 대해서 차량 충돌 후 거동을 보다 안정적으로 만족시키기 위해서는 소형차가 하단 레일 밑으로 침투하는 현상을 보다 확실하게 방지할 수 있도록 반강성 케이블 배리어의 설계가 개선되어야 함.

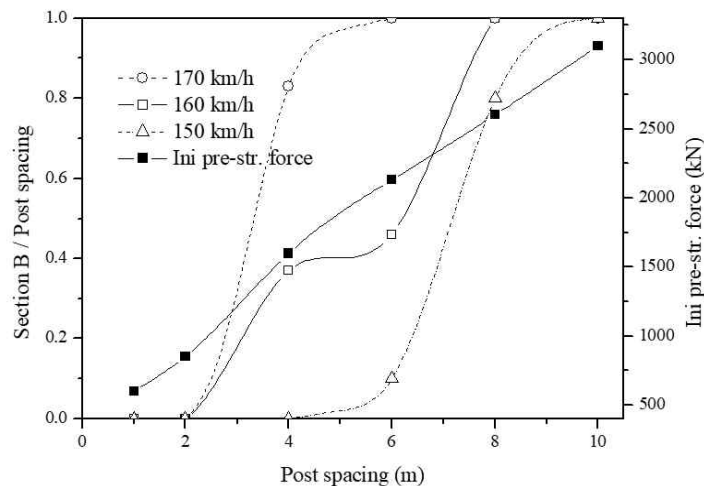


그림 3.72 소형차 충돌속도별 경간 변화에 따른 경간에 대한 구간 B의 비율

(다) 강한 지주와 약한 지주 반강성 케이블 배리어의 비교

- 강한 지주와 약한 지주를 사용하는 반강성 케이블 배리어에 대하여 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용할 때 1.3 m 정도의 차량 점유폭을 날을 수 있는 케이블의 초기 긴장력과 케이블 량이 최적 경간별로 표 3.18에 나타나있음.
- 또한 표 3.18에는 위의 대형차 충돌조건에 대하여 1.3 m 정도의 차량 점유폭을 날도록 설계

된 반강성 케이블 배리어가 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 만족하는 구간
의 비율이 함께 나타나있음.

- 표 3.18을 살펴보면 경간 전체가 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족할 수 있기 때문에 약한
지주 형식이 경간의 82 - 89 % 정도가 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 강한 지주 형
식 보다 더 좋은 탑승자의 안전을 제공한다는 것을 알 수 있음.
- 또한 2 m 경간의 약한 지주 형식은 대형차 충돌조건에 대하여 약 1 m의 횡 변위를 발생시키
는데 30 m 경간의 강한 지주 형식에 비하여 55 % 작은 케이블 초기 긴장력이 소요되었음. 따
라서 탑승자 위험지수와 경제성(초기 설치비용)을 함께 고려할 때 길지 않은 배리어 설치길
이에 대해서는 약한 지주 형식이 강한 지주 형식 보다 더 합리적인 반강성 케이블 배리어로
판단되었음.

표 3.18 최적 경간에 대한 케이블의 초기 긴장력과 소요 숫자, 경간에 대한 구간 A의 비율

System	Post spacing (m)	Initial pre-stressed force (kN)	No. of cables	Section A / Post spacing
Strong-post	30	1,320	10	0.82
	60	2,167	16	0.89
Weak-post	1	600	5	1.0
	2	852	8	1.0

- 그림 3.73에는 경간 2 m의 약한 지주 형식 반강성 케이블 배리어에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용
하는 FEA를 통하여 결정된 배리어의 변형 형상이 나타나있음.
- 소형차의 경우에 교체되어야 하는 구성요소는 상/중/하단 레일 각각 20 m, 중간지주 36개,
그리고 수직 연결재 6개로 파악되었음. 대형차의 경우에는 교체되어야 하는 구성요소가 상/
중/하단 레일 각각 28 m, 중간지주 33개, 그리고 수직 연결재 8개로 파악되었음.
- 대형차 충돌이 소형차 충돌에 비하여 보다 많은 손상된 지주를 발생시킬 것으로 예상되었으
나 반대로 소형차 충돌이 보다 많은 지주 손상을 야기하였음. 그 이유는 다른 레일에 비하여
도로 쪽으로 약간 더 튀어나온 하단 레일이 소형차 충돌에 먼저 저항할 때 상단과 중단 레일
은 지주와 분리되면서 보다 긴 길이에 걸쳐서 설치된 지주가 충돌하중을 저항해야하지만 대
형차 충돌에 대해서는 상단, 중단, 그리고 하단 레일이 모두 동시에 저항하기 때문에 소형차
충돌에 비하여 보다 짧은 길이에 걸쳐서 배치된 지주가 충돌하중을 저항하기 때문으로 판단
되었음.
- 레일이 손상된 20 m 길이 보다 더 큰 길이 70 m에 걸쳐서 손상된 지주가 나타나는 이유는 차
량 충돌 후에 케이블이 상하 좌우로 움직이는 케이블의 진동현상으로 인하여 횡 방향 강성이
매우 작은 약한 지주의 특성 때문에 차량의 충돌에 직접 저항하지 않는 지주에도 변형이 쉽
게 발생되기 때문임.

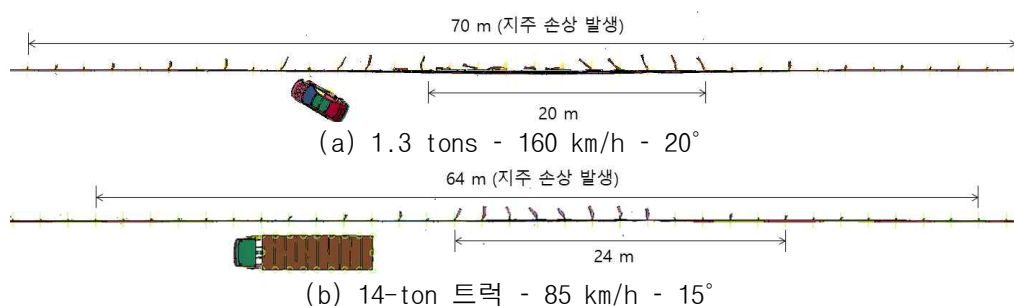


그림 3.73 Weak-post system의 변형 형상

- 그림 3.74에는 경간 60 m의 강한 지주 형식 반강성 케이블 배리어에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 배리어의 변형 형상이 나타나있음.
- 소형차의 경우에 교체되어야 하는 구성요소는 상/중/하단 레일 각각 20 m, 중간지주 2개, 상/중/하단 블록아웃 2개, 그리고 수직 연결재 6개로 파악되었음. 대형차의 경우에 교체되어야 하는 구성요소는 상/중/하단 레일 28 m, 중간지주 2개, 상/중/하단 블록아웃 2개, 그리고 수직 연결재 6개로 파악되었음.
- 경간 60 m의 강한 지주 형식이 경간 2 m의 약한 지주 형식에 비하여 소형차와 대형차 충돌에 대한 레일의 손상된 길이는 유사하지만 손상된 지주의 개수가 매우 작다는 것을 알 수 있음. 따라서 유지관리 측면에서 약한 지주 형식의 경우에 강한 지주 형식에 비하여 복구 비용과 복구 기간이 보다 더 많이 소요될 것으로 판단되었음.

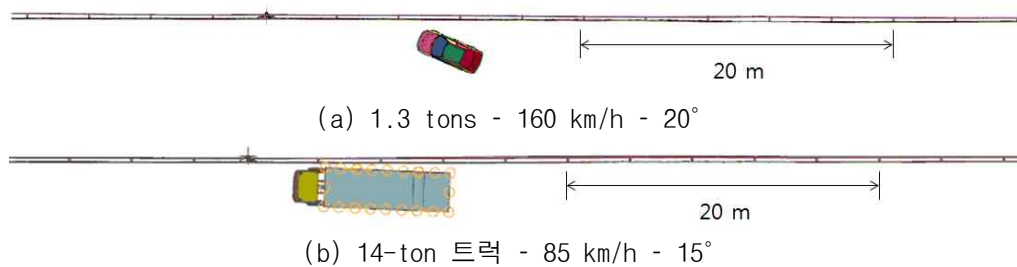


그림 3.74 Strong-post system의 변형 형상

- 경간 60 m의 강한 지주 형식은 경간 2 m의 약한 지주 형식에 비하여 중간지주가 1/30로 줄어들어서 중간지주용 콘크리트 기초의 설치비용이 감소되지만 약 2.5배의 케이블의 초기 긴장력으로 인하여 증가되는 케이블 량과 케이블 앵커 시스템 때문에 짧은 배리어 설치 길이에 대해서는 초기 설치비용이 보다 더 클 것으로 예상됨.
- 그러나 배리어 설치 길이가 길어질수록 강한 지주 형식의 약한 지주 형식에 대한 중간 지주 감소량은 증가하지만 약한 지주 형식의 강한 지주 형식에 대한 케이블 량과 케이블 앵커 시스템의 감소량은 변화하지 않기 때문에 특정 배리어 설치길이 이상부터는 강한 지주 형식이 약한 지주 형식에 비하여 보다 더 경제적임.
- 또한 차량 충돌로 인하여 손상된 구성요소를 교체하는 비용과 교체기간이 보다 작을 것으로 예상되기 때문에 유지관리 측면에서 강한 지주 형식이 약한 지주 형식에 비하여 보다 더 경제적이고 효율적임. 그리고 강한 지주 형식은 약한 지주 형식에 비하여 경간이 30배 증가하기 때문에 약한 지주 형식에 비하여 시공성과 개방감이 좋은 장점이 있음.

(라) 요약

- SB5-B등급 반강성 케이블 배리어의 상세설계는 소형차와 대형차 충돌에 대하여 성능평가 기준을 만족하도록 예비설계를 개선하면서 이루어졌음. Long-span strong-post system과 short-span weak-post system의 다양한 대안을 결정하고 LS-DYNA 프로그램을 이용한 유한요소해석을 통하여 최적설계가 이루어졌음. 다양한 경간에 대하여 소형차 충돌 성능을 평가하였고 약한 지주와 강한 지주 형식의 반강성 케이블 배리어에 대하여 각각 효율이 좋은 경간이 결정되었음.
- 60 m 경간을 갖는 강한 지주 형식의 장경간 반강성 케이블 배리어가 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건에 대하여 약 1m의 횡 변위를 발생시키도록 설계되었음. 강한 지주 반강성 케이블 배리어는 전체 경간에 걸쳐서 1.3 tons - 130 km/h - 20°의 소형차 충돌조건 조건을 만족할 수 있었지만 동일한 대형차 충돌에너지용 반강성 레일형 배리어는 경간의 50%에 대해서만 위의 소형차 충돌조건을 만족할 수 있었음. 1.3 tons - 130 km/h - 20°의 소

형차 충돌조건에 대한 반강성 케이블 배리어의 THIV는 반강성 레일형 배리어에 비하여 평균적으로 약 17% 작게 발생되는 것으로 나타났음. 또한 반강성 케이블 배리어는 경간의 약 89% (구간 A)에 대해서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건을 만족할 수 있었지만 동일한 대형차 충돌에너지용 반강성 레일형 배리어는 경간 전체에 대해서 위의 소형차 충돌조건을 만족할 수 없었음. MASH의 44 km/h의 OIV 한계치를 적용하는 경우에는 반강성 케이블 배리어가 경간 전체에 대해서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건을 만족할 수 있는 것으로 나타났음. 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건에 대한 반강성 케이블 배리어의 THIV는 반강성 레일형 배리어에 비하여 평균적으로 약 27% 작게 발생되는 것으로 나타났음. 따라서 반강성 케이블 배리어는 160 km/h의 소형차 충돌속도와 같은 예기치 않는 높은 속도의 차량 충돌에 대하여 기존의 반강성 레일형 배리어보다 훨씬 더 좋은 탑승자의 안전을 제공할 수 있을 것으로 기대됨.

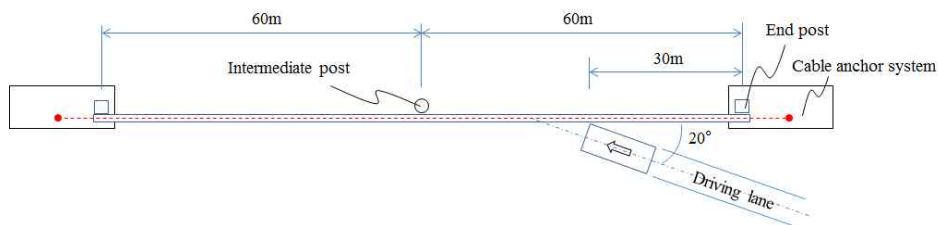
- 강한 지주 형식의 반강성 케이블 배리어는 경간이 증가할수록 소형차 충돌에 대한 탑승자의 안전이 좋아지지만 대형차 충돌에 대한 동일한 working width를 유지하기 위해서는 케이블 배리어의 초기 긴장력과 케이블 앵커 시스템이 증가되어야만 했음. 탑승자 위험지수의 관점에서 최적 경간은 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 해당 충돌속도를 만족하는 구간의 비율이 가장 크게 나타나는 60 m로 조사되었음. 그리고 탑승자 위험지수와 경제성을 함께 고려할 때의 최적 경간은 30 m로 조사되었음. 경간이 30 m에서 60 m로 증가할 때 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하지 못하는 구간의 비율이 7 % 감소되지만 케이블 초기 긴장력과 케이블량은 각각 약 64 %와 60 % 증가하기 때문임.
- 약한 지주 형식의 단경간 반강성 케이블 배리어가 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15°의 대형차 충돌조건에 대하여 약 1m의 횡 변위를 발생시키도록 설계되었음. 2 m 이하의 경간을 갖는 약한 지주 반강성 케이블 배리어는 경간 전체에 대해서 1.3 tons - 170 km/h - 20°의 소형차 충돌조건 조건을 만족하였고 4 m의 경간을 갖는 약한 지주 반강성 케이블 배리어는 경간 전체에 대해서 1.3 tons - 150 km/h - 20°의 소형차 충돌조건 조건을 만족하였음. 약한 지주 형식의 단경간 반강성 케이블 배리어는 경간이 감소할수록 소형차 충돌에 대한 탑승자의 안전이 더 좋아졌고 대형차 충돌에 대한 동일한 working width를 유지하기 위한 케이블의 초기 긴장력과 케이블 앵커 시스템이 감소되었으나 중간지주용 콘크리트 기초의 양은 증가되어야만 했음. 탑승자 위험지수와 경제성을 함께 고려할 때 배리어 설치길이가 상당히 긴 경우에는 2 m가 유리하고 배리어 설치길이가 길지 않은 경우에는 1 m가 유리할 것으로 조사되었음. 경간이 1 m에서 2 m로 증가할 때 160 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 케이블 초기 긴장력과 케이블량은 각각 약 42 %와 60 % 증가하지만 중간지주용 콘크리트 기초의 양은 50 % 감소하기 때문임.
- 약한 지주 형식은 경간 전체가 170 km/h의 소형차 충돌속도를 만족할 수 있기 때문에 경간의 83 % 정도가 170 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 강한 지주 형식 보다 더 좋은 탑승자의 안전을 제공한다는 것을 알 수 있음. 강한 지주 형식은 약한 지주 형식에 비하여 중간지주가 많이 줄어들기 때문에 특정 배리어 설치길이 이상부터는 강한 지주 형식이 약한 지주 형식에 비하여 보다 더 경제적임. 또한 차량 충돌로 인하여 손상된 구성요소를 교체하는 비용과 교체기간이 보다 작을 것으로 예상되기 때문에 유지관리 측면에서 강한 지주 형식이 약한 지주 형식에 비하여 보다 더 경제적이고 효율적임. 그리고 강한 지주 형식은 약한 지주 형식에 비하여 경간이 매우 크기 때문에 약한 지주 형식에 비하여 시공성과 개방감이 더 좋은 것으로 나타났음.

(4) 실물 충돌시험을 통한 성능 평가

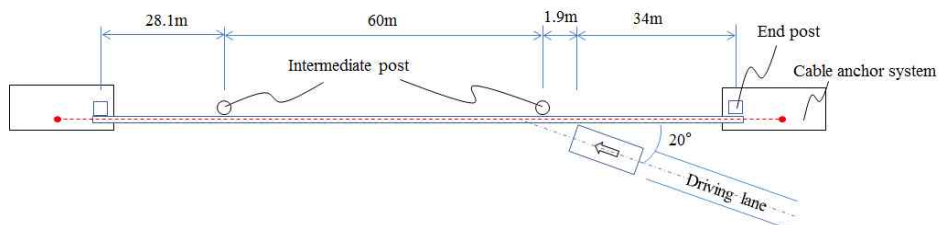
- 약한 지주 형식에 비하여 유지관리가 용이하고 시공성과 개방감이 좋은 강한 지주 형식이 반강성 케이블 배리어의 최종 설계로 선정되었음. 그리고 탑승자 위험지수 관점에서 가장 좋은 탑승자 안전을 제공할 수 있을 것으로 평가된 60 m 경간의 반강성 케이블 배리어에 대하여

실물차량 충돌시험이 수행되었음.

- 그림 3.75에는 소형차와 대형차 충돌시험을 위하여 설치되는 강한 지주 형식의 반강성 케이블 배리어에 대한 경간이 CIP와 함께 나타나있음. 케이블 앵커 시스템과 탄성변형을 겪는 케이블을 총 5회의 충돌시험에 계속 이용하기 위하여 충돌시험의 종류에 따라 경간이 그림 3.75와 같이 변경되었음. 또한 대형차 충돌조건도 14-ton 트럭 - 85 km/h - 15° (261.4 kJ)에서 유사한 운동 에너지를 갖는 14-ton 트럭 - 65 km/h - 20° (267 kJ)으로 수정되었음. 변경된 대형차 충돌조건은 충돌 에너지는 유사하지만 충돌각도가 5° 증가되었기 때문에 보다 엄격한 충돌조건으로 판단되었음.
- 그림 3.75(a)에는 차량 충돌 후 거동 관점의 CIP와 실물 충돌시험용 배리어에 대한 경간 배치가 나타나있음. 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 14-ton 트럭 - 65 km/h - 20° 의 대형차 충돌조건을 적용한 실물충돌시험이 그림 3.75(a)와 같이 수행되었음.
- 그림 3.75(b)에는 탑승자 위험 지수 관점의 CIP와 실물 충돌시험용 배리어에 대한 경간 배치가 나타나있음. 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용한 실물충돌시험이 그림 3.75(b)와 같이 수행되었음.
- 그림 3.75(a)에 설치되는 중간지주는 38kN의 최대 정적 횡 지지력이 나타나도록 다짐이 이루어졌고, 그림 3.75(b)에 설치되는 중간 지주는 충돌시험 별로 52 kN과 20 kN의 최대 정적 횡 지지력이 각각 나타나도록 다짐이 이루어졌음. 레일은 중간지주에서 양 방향으로 각각 52 m씩 설치되었고, cable anchor system으로 ground anchor 형식이 사용되었음.



(a) 차량 충돌 후 거동 관점의 CIP 위치와 배리어 경간 배치



(b) 탑승자 위험지수 관점의 CIP 위치와 배리어 경간 배치

그림 3.75 실물 충돌시험용 배리어에 대한 CIP 위치와 경간 배치

(가) 소형차 실물 충돌시험

① 차량 충돌 후 거동 관점의 CIP

- 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건에 대한 THIV는 27.3 km/h로 THIV 한계치 보다 약 17 % 작게 나타났음. ASI는 1.0으로 나타나 유럽기준 IS 성능등급의 A 등급으로 분류되었음.
- 시험 차량의 충돌 후 차량 거동은 전복이나 급정지 없이 원활하게 나타났음. 소형차는 -5.9° (충돌각도 20° 의 29.5%) 각도와 132.2 km/h(156 km/h의 예측된 충돌속도의 84.7%)의 속도로 이탈박스(exit box)를 통과하였음. 탈출 후 차량의 궤적은 FEA에 의해 결정된 그림 3.48(a)에 보이는 것과 비슷하게 7.2 m 폭과 84 m 길이로 정의되는 구간에 걸쳐 360° yaw 회전을 겪었음. 차량 조종석 변형 지수(vehicle cockpit deformation index, VCDI)는 RS0000000로 나타났고 차량 조종석의 감소는 3% 미만이었음. 소형차 충돌에 대한 탑승자 위

험 지수와 충돌 후 차량거동과 관련된 성능평가 기준을 만족하였음. 그림 3.76에는 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 실물 충돌시험을 통하여 결정된 소형차의 충돌 후 거동이 나타나있음.

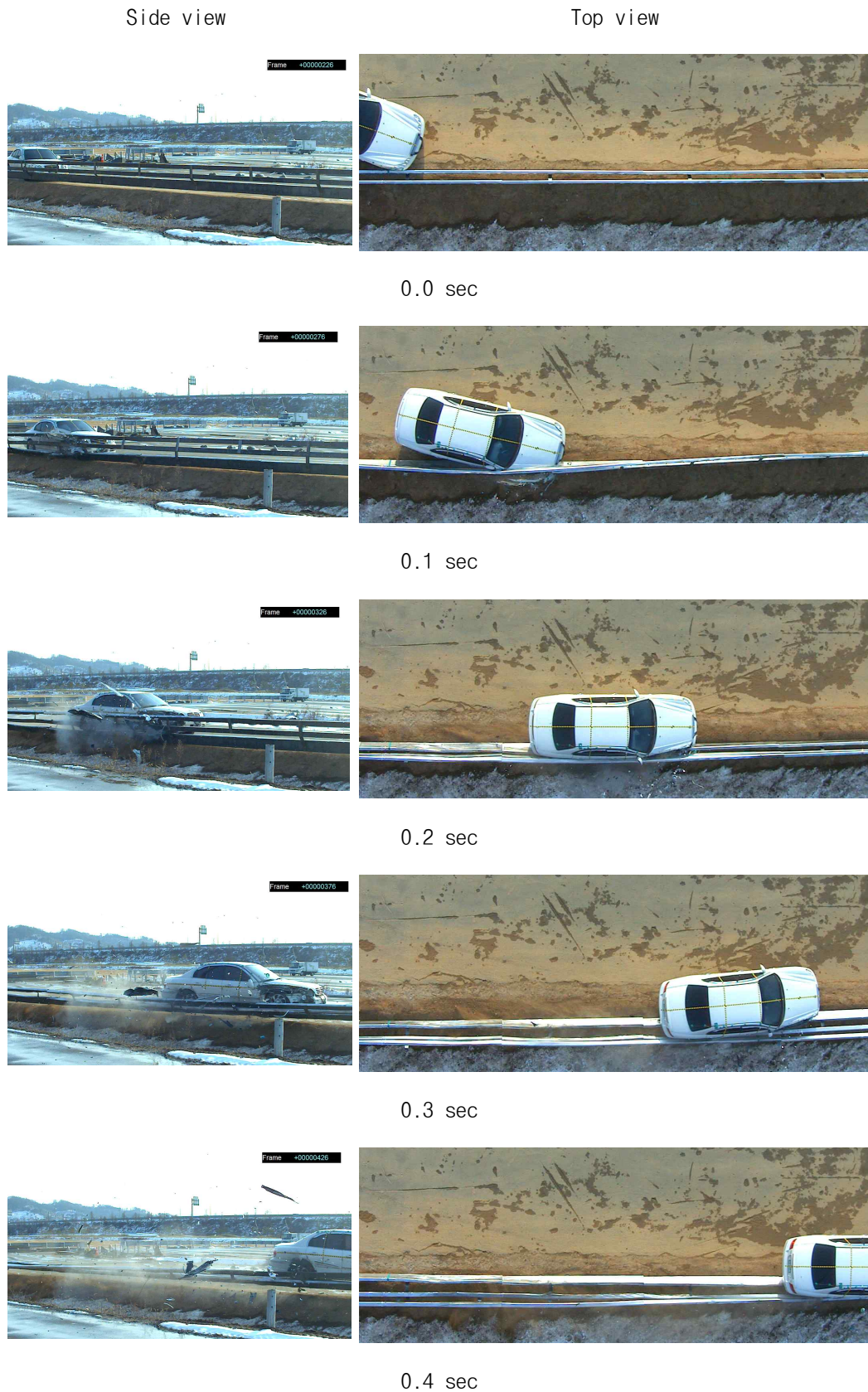


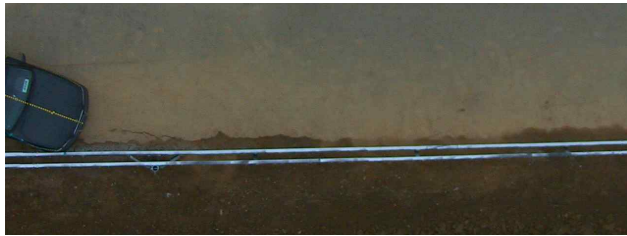
그림 3.76 소형차 충돌 후 거동

② 탑승자 위험지수 관점의 CIP

- 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건에 대한 THIV는 지주 정적 횡 지지력이 52 kN 인 경우에 34.3 km/h로 THIV 한계치 보다 약 3.9% 크게 나타났고 지주 정적 횡 지지력이 20 kN인 경우에는 28.0 km/h로 THIV 한계치 보다 약 15% 작게 나타났음. ASI는 지주 정적 횡 지지력이 52 kN인 경우에 1.6으로 나타나 C 등급으로 분류되었고 지주 정적 횡 지지력이 20 kN 인 경우에는 1.2로 나타나 B 등급으로 분류되었음.
 - 시험 차량의 충돌 후 차량 거동은 두 경우 모두 전복이나 급정지 없이 원활하게 나타났음. 소형차는 지주 정적 횡 지지력이 52 kN인 경우에 4.8° (충돌각도 20° 의 24%) 각도와 102.3 km/h (133 km/h의 예측된 충돌속도의 76.9 %)의 속도로 탈출박스(exit box)를 통과하였고 지주 정적 횡 지지력이 20 kN인 경우에 2.9° (충돌각도 20° 의 14.5%) 각도와 106.4 km/h (131.7 km/h의 예측된 충돌속도의 81.2 %)의 속도로 이탈박스(exit box)를 통과하였음. 충돌 후 차량의 궤적은 이탈박스를 통과한 후에 yaw 회전 없이 차선으로 안전하게 재 진입할 수 있게 안정적으로 나타났음.
 - 차량 조종석 변형 지수(VCDI)는 두 경우 모두 RS0000000로 나타났고 차량 조종석의 감소는 3% 미만이었음.
 - 52 kN의 지주 횡 지지력에 대한 THIV가 한계치 보다 약 3.9 % 크게 나타났다는 사실로부터 탑승자 위험지수가 성능평가기준을 만족하기 위해서는 40 kN 이하의 지주 횡 지지력이 적절 할 것으로 평가되었음. 그림 3.77에는 지주 정적 횡 지지력이 52 kN인 반강성 케이블 배리어 에 대하여 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 실물 충돌시험을 통하여 결정된 소형차의 충돌 후 거동이 나타나있고 그림 3.78에는 지주 정적 횡 지지력이 20 kN 인 반강성 케이블 배리어에 대하여 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 실물 충돌시험을 통하여 결정된 소형차의 충돌 후 거동이 나타나있음.
-

Side view

Top view



0.0 sec



0.1 sec



0.2 sec



0.3 sec



0.4 sec

그림 3.77 소형차 충돌 후 거동(지주 횡 지지력 52 kN)

Side view

Top view



0.0 sec



0.1 sec



0.2 sec



0.3 sec



0.4 sec

그림 3.78 소형차 충돌 후 거동(지주 횡 지지력 20 kN)

(나) 대형차 실물 충돌시험

- 14-ton 트럭 - 65 km/h - 20° 의 충돌조건으로 반강성 케이블 배리어에 충돌할 때 트럭은 배리어를 승월(climbing)하고 경사면 밑으로 추락하였음.
- 그림 3.79에는 대형차 충돌 전과 후의 하단 레일의 형상이 나타나있음. 충돌 전과 후의 하단 레일의 형상을 비교해 보면 충돌 후에 하단 레일이 지면과 빠르게 접촉하고 그림 3.79(b)에 보이는 것 같이 회전하게 되는 것을 알 수 있음. 회전한 하단 레일은 트럭 바퀴에 대하여 계단 역할을 하게 되기 때문에 트럭이 배리어를 올라타는 현상이 발생하게 되었음.
- 하단 레일이 지면과 접촉하게 된 원인은 그림 3.75(b)의 중간지주를 그림 3.75(a)의 중간지주로 교체하는 과정에서 배리어 후면의 지반이 배리어 전면의 지반 보다 3~5 cm 더 높게 조성되었기 때문으로 조사되었음.
- 매우 긴 경간을 갖는 케이블의 유연한 특성 때문에 반강성 케이블 배리어는 하단 레일의 설치 높이가 케이블의 처짐을 수용할 수 있을 만큼 충분하지 않을 때 대형차 충돌에 대하여 하단 레일이 회전할 수도 있는 취약성을 드러냈음. 지반 다짐공사의 시공 오차가 발생하더라도 배리어가 제 역할을 수행하기 위해서는 하단 레일의 높이가 약간 상향될 필요가 있는 것으로 평가되었음.
- 그림 3.80에는 14-ton 트럭 - 65 km/h - 20° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 실물 충돌시험을 통하여 결정된 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음.



(a) 충돌 전



(b) 충돌 후

그림 3.79 대형차 충돌 전/후의 배리어 형상

Side view



0.0 sec



0.2 sec



0.4 sec



0.6 sec



0.8 sec

그림 3.80 대형차 충돌 후 거동

- 대형차가 하단 레일을 밟고 배리어를 승월하는 문제를 해결하기 위하여 그림 3.81과 같이 케이블의 위치, 블록아웃, 수직 연결재가 변경되었음.
- 케이블의 높이가 전체적으로 75 mm 상향되었고 상단과 중단에 배치된 케이블도 하단에 배치된 케이블과 같이 도로방향으로 250 mm 튀어나오게 설치되었음. 상단 블록아웃은 상단과 중단의 케이블과 레일의 자중을 지지할 수 있게 충분한 수직방향 강성을 갖도록 설계되었고, 소형차 충돌시에 횡 방향 저항이 크지 않도록 날개의 각도는 60°로 결정되었음. 그리고 기존 모델의 하단 레일이 2단으로 분리되었음.
- 총 14개의 케이블이 상단에서부터 하단까지 각각 6개, 3개, 2개, 그리고 3개 배치되었고 각 케이블에 145 kN의 초기 긴장력이 도입되었음. 배리어에 사용된 케이블은 138.7 mm²의 단면적과 1,880 MPa의 극한강도를 갖고 있음.
- 판형 수직 연결재 대신에 34 mm의 직경과 2.4 mm 두께를 갖는 원형 강관이 수직 연결재로 사용되었음. 첫 번째와 두 번째 레일을 연결하는 수직 연결재와 세 번째와 네 번째를 연결하는 수직 연결재는 2 m 간격으로 배치되었고 두 번째와 세 번째를 연결하는 수직 연결재는 4 m 간격으로 배치되었음. 그리고 케이블의 처짐을 줄이기 위해 단면적을 감소시킨 레일이 상, 중, 하단에 동일하게 그림 3.81과 같이 적용되었다.

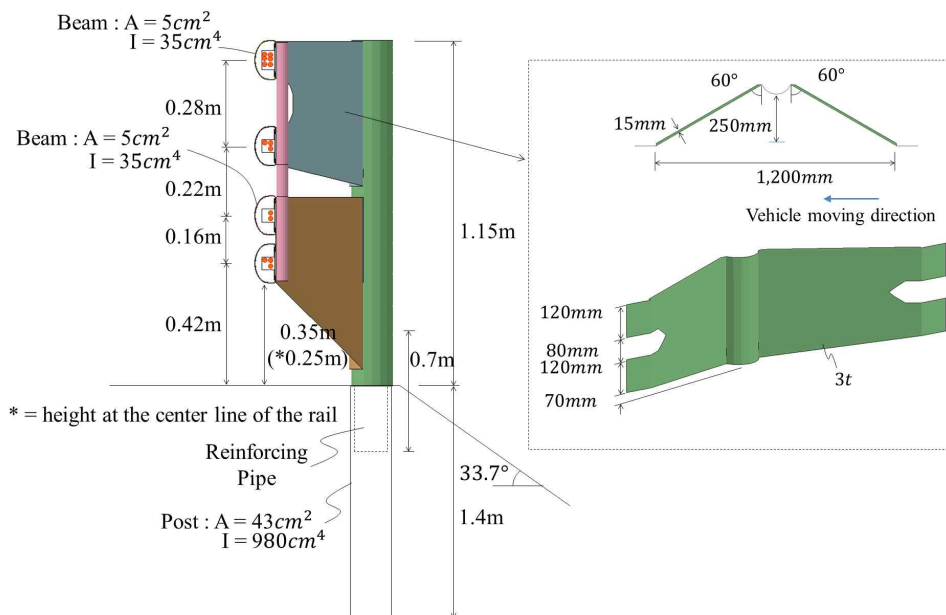


그림 3.81 개선된 반강성 케이블 배리어 단면과 제원

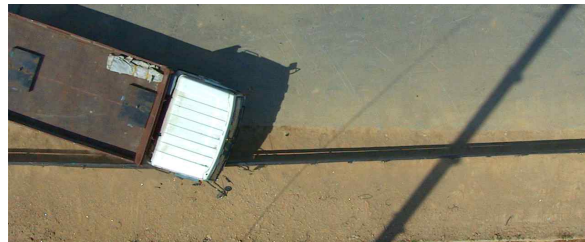
- 14-ton 트럭 - 65 km/h - 20°의 충돌조건으로 개선된 반강성 케이블 배리어에 충돌할 때 트럭은 승월, 전복, 그리고 급정지 없이 원활하게 거동하였음. 대형차 충돌로 인한 working width는 1.9 m로 나타나 유럽기준 IS 성능등급의 W6으로 분류되었고 동적과 영구 횡 방향 변위는 각각 1.01 m와 0.03 m로 나타났음.
- 차량 충돌시에 구성부재의 비산은 발생하지 않았고 트럭을 방호할 만큼의 강도를 유지하였음. 트럭은 탈출박스 B선을 침범하지 않고 탈출박스(A : 8.85 m, B : 20 m)를 통과하였음. 충돌 후 차량의 궤적은 이탈박스를 통과한 후에 yaw 회전 없이 차선으로 안전하게 재 진입할 수 있게 안정적으로 나타났음. 대형차 충돌에 대한 강도 성능과 충돌 후 차량거동과 관련된 성능평가 기준을 만족하였음. 그림 3.82에는 개선된 반강성 케이블 배리어에 대하여 14-ton 트럭 - 65 km/h - 20°의 대형차 충돌조건을 적용한 실물 충돌시험으로부터 결정된 트럭의 충돌 후 거동이 나타나있음.

Side view

Top view



0.0 sec



0.2 sec



0.4 sec



0.6 sec



0.8 sec

그림 3.82 개선된 반강성 케이블 배리어에 대한 트럭 충돌 후 거동

나. 소형차 충돌속도 160km/h를 만족하는 287.5kJ(H2) 충격도의 반강성 배리어 개발

- H2등급 반강성 케이블 배리어의 상세설계는 버스 충돌조건을 만족할 수 있도록 SB5-B등급 최적설계를 개선하면서 이루어졌음. SB5-B등급 반강성 케이블 배리어의 최적설계를 케이블의 위치, 블록아웃, 수직 연결재 등을 변경하여서 다양한 대안을 결정하고 LS-DYNA 프로그램을 이용한 유한요소해석을 통하여 최적설계가 이루어졌음. 다양한 경간에 대하여 소형차 충돌 성능을 평가하였고 강한 지주 형식의 반강성 케이블 배리어에 대하여 효율이 좋은 경간이 결정되었음. 최종 설계는 실물 충돌시험을 통하여 검증되었음.

(1) 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 상세설계

- 그림 3.85, 3.87, 그리고 3.89에 강한 중간지주를 적용하는 장경간 반강성 케이블 배리어에 대한 3개의 모델이 나타나있음. 3개의 모델에 동일하게 사용된 구성요소는 중간지주의 크기와 지지력, 케이블과 케이블의 초기 긴장력, 그리고 하단 블록아웃임. 그러나 케이블의 배치, 블록아웃의 위치, 상단 블록아웃의 크기, 레일의 크기는 모델에 따라 다르게 적용되었음.
- 중간지주의 단면은 140 mm의 바깥지름과 4.5 mm의 두께를 갖는 원형 중공 단면임. 그리고 125 mm의 바깥지름과 4.3 mm의 두께를 갖는 보강 지주가 바깥지주 안에 삽입되어 있음. 지반에 매입된 중간지주에 대한 해석모델은 35 kN의 최대 정적 횡 하중을 발현할 수 있도록 구성되었음.
- 138.7 mm²의 단면적과 1,880 MPa의 극한강도를 갖는 케이블이 16개 사용되었고 각 케이블에 135 kN의 초기 긴장력이 도입되었음. 소형차가 지주에 심하게 충돌하는 현상을 방지하기 위해서 예비설계에서 결정된 250 mm 길이의 블록아웃이 4개 모델의 하단 레일에 적용되었음.

(가) CM3

- 그림 3.84에는 SB5-B등급의 최적설계로 결정된 60 m 간격의 CM3 모델에 대하여 13-ton 버스 - 70 km/h - 20°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통해 결정된 대형차의 충돌 후 거동이 나타나있음. 대형차의 배리어에 대한 충돌위치는 60 m 경간의 중앙인 30 m임. 버스의 충돌 후 거동은 레일을 밟고 배리어를 승월하여 경사면 아래로 추락하였음.
- 버스의 앞바퀴 중심에서부터 앞범퍼까지의 거리는 약 2.6 m이고 트럭의 앞바퀴 중심에서부터 앞범퍼까지의 거리는 약 1.4 m임. 따라서 앞바퀴가 하단 레일과 접촉하는 시간이 버스가 훨씬 더 늦게 나타났음. 그림 3.83(a)와 같이 트럭은 충돌 후 바로 앞바퀴와 하단 레일이 접촉하는 반면에 버스는 그림 3.84(b)와 같이 앞범퍼와의 충돌로 인하여 하단 레일에 수직처짐과 회전이 발생한 후에 앞바퀴가 레일과 접촉하였음. 회전과 수직처짐이 크게 발생한 상태의 하단 레일과 앞바퀴가 접촉했기 때문에 앞바퀴가 하단 레일을 밟고 올라타는 현상이 발생한 것으로 파악되었음.
- H2등급 장경간 반강성 케이블 배리어의 상세설계에서는 하단 레일과 버스의 앞바퀴가 접촉하는 시점에서 하단 레일의 높이가 충분히 높게 나타날 수 있도록 케이블의 위치, 블록아웃, 수직 연결재 등을 변경하여서 대안을 선정하였음.

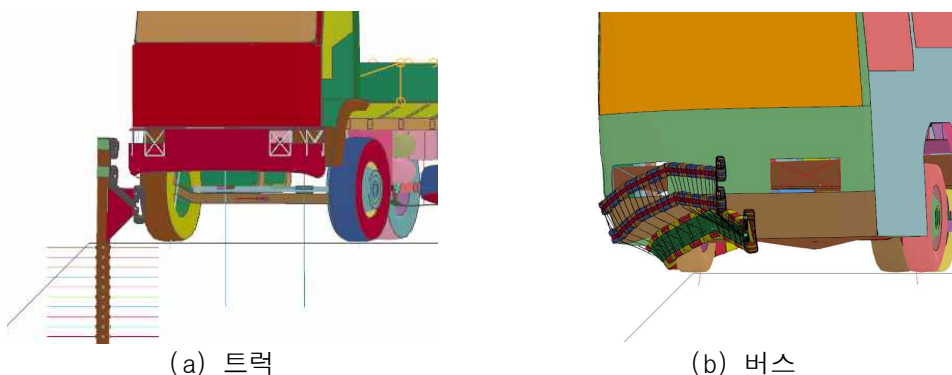
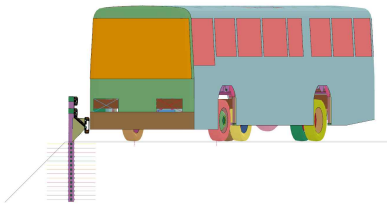


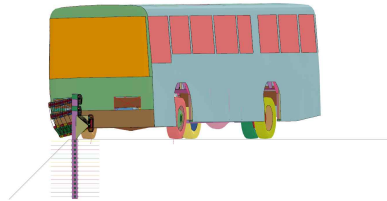
그림 3.83 대형차의 앞바퀴가 하단 레일과 접촉하는 시점

Front view

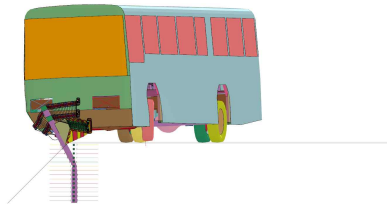
Top view



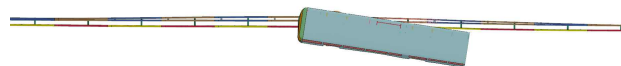
0.0 sec



0.2 sec



0.4 sec



0.6 sec

그림 3.84 CM3 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 버스 충돌 후 거동

(나) HCM1

- 그림 3.85의 HCM1 모델은 버스가 하단 레일을 밟고 승월하는 현상을 방지하기 위하여 CM3 모델의 상단, 중단, 그리고 하단의 케이블을 75 mm 상향시키고 상, 중단의 케이블이 도로방향으로 125 mm 이격시킨 모델임.
- 125 mm 이격된 기하학적 형상을 유지하기 위하여 그림 3.85에 보이는 블록아웃이 상단과 중단 레일에 적용되었음. 상단 블록아웃은 상단과 중단의 케이블과 레일의 자중을 지지할 수 있게 충분한 수직방향 강성을 갖도록 설계되었고, 소형차 충돌시에 횡 방향 저항이 크지 않도록 날개의 각도는 72° 로 결정되었음. 레일은 차량과의 접촉 면적을 감소시키기 위하여 절곡된 단면이 사용되었음. 수직 연결재의 단면과 배치는 CM3 모델과 동일함.

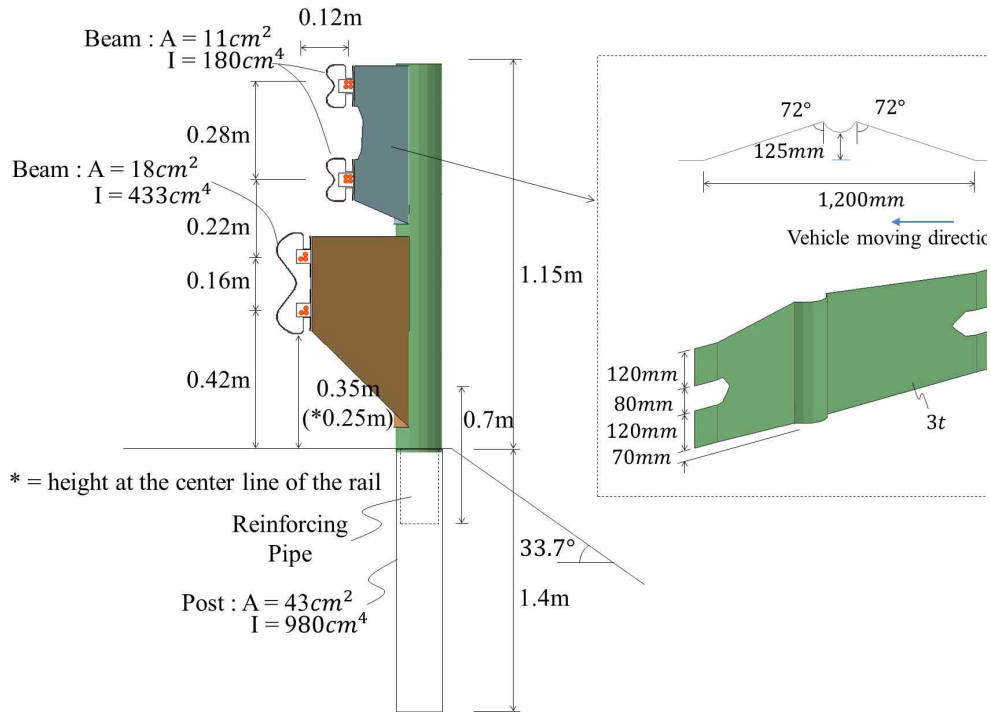
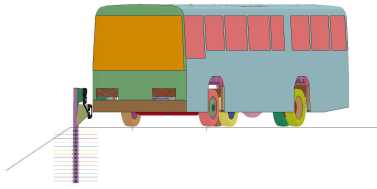


그림 3.85 HCM1 모델의 단면과 제원

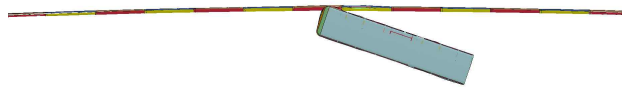
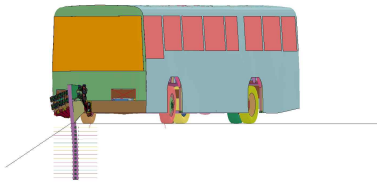
- 그림 3.86에는 HCM1 모델에 대하여 13-ton 버스 - 70 km/h - 20° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 버스의 충돌 후 거동이 나타나있음. 버스의 앞바퀴와 하단 레일이 접촉하는 시점에서 하단 레일의 높이는 CM3 모델에 비하여 높아졌음에도 불구하고 하단 레일의 처짐과 회전이 크게 발생되었기 때문에 레일을 밟고 배리어를 승월하여 경사면 아래로 추락하였음.

Front view

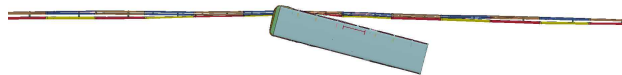
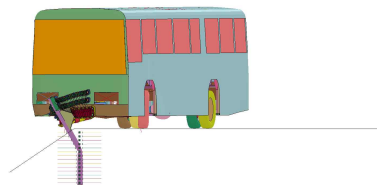
Top view



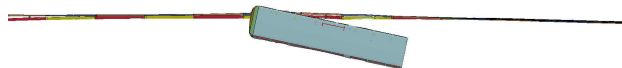
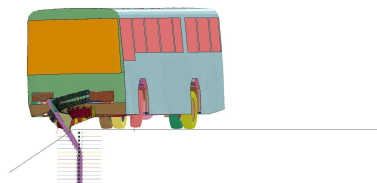
0.0 sec



0.2 sec



0.4 sec



0.5 sec

그림 3.86 HCM1 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 버스 충돌 후 거동

(다) HCM2

- 그림 3.87의 HCM2 모델은 HCM1 모델의 상단과 중단의 케이블을 도로방향으로 125 mm 이격시켜 상단, 중단, 그리고 하단의 케이블의 횡 방향 위치를 일치시킨 모델임.
- 125 mm 이격된 기하학적 형상을 유지하기 위하여 그림 3.87에 보이는 블록아웃이 상단과 중단 레일에 적용되었음. 상단 블록아웃은 상단과 중단의 케이블과 레일의 자중을 지지할 수 있게 충분한 수직방향 강성을 갖도록 설계되었고, 소형차 충돌시에 횡 방향 저항이 크지 않도록 날개의 각도는 60° 로 결정되었음.
- 하단 레일이 버스의 앞범퍼와 충돌하면서 회전하는 현상을 감소시키기 위하여 하단 레일은 2단으로 분리되었고 2개로 분리된 하단 레일에 4개의 케이블이 각각 배치되었음. 하단 레일의 단면은 상단과 중단 레일과 동일하고 수직 연결재의 단면과 배치는 HCM1 모델과 동일함.

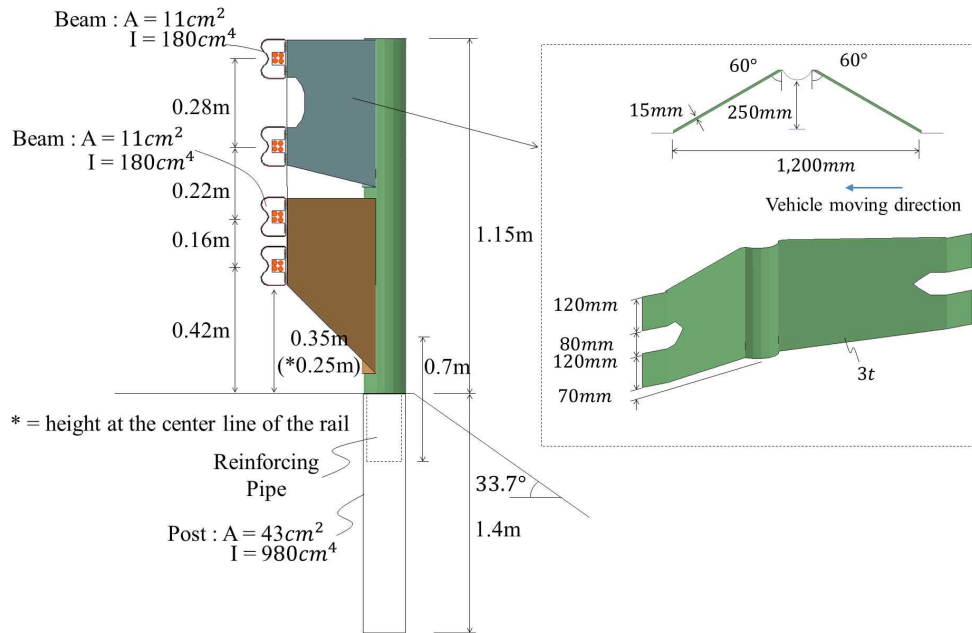


그림 3.87 HCM2 모델의 단면과 제원

- 그림 3.88에는 HCM2 모델에 대하여 13-ton 버스 - 70 km/h - 20° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 버스의 충돌 후 거동이 나타나있음. 버스의 앞바퀴와 하단 레일이 접촉하는 시점에서 하단 레일의 높이는 HCM1 모델에 비하여 더 높아졌고 하단 레일의 회전이 보다 작게 발생되었기 때문에 배리어를 승월하지 않고 안정적인 거동을 보였음. 대형차 충돌에 의한 working width는 1.69 m로 나타났고 동적과 영구 횡 방향 처짐은 각각 1.15 m와 0.1 m로 나타났음.

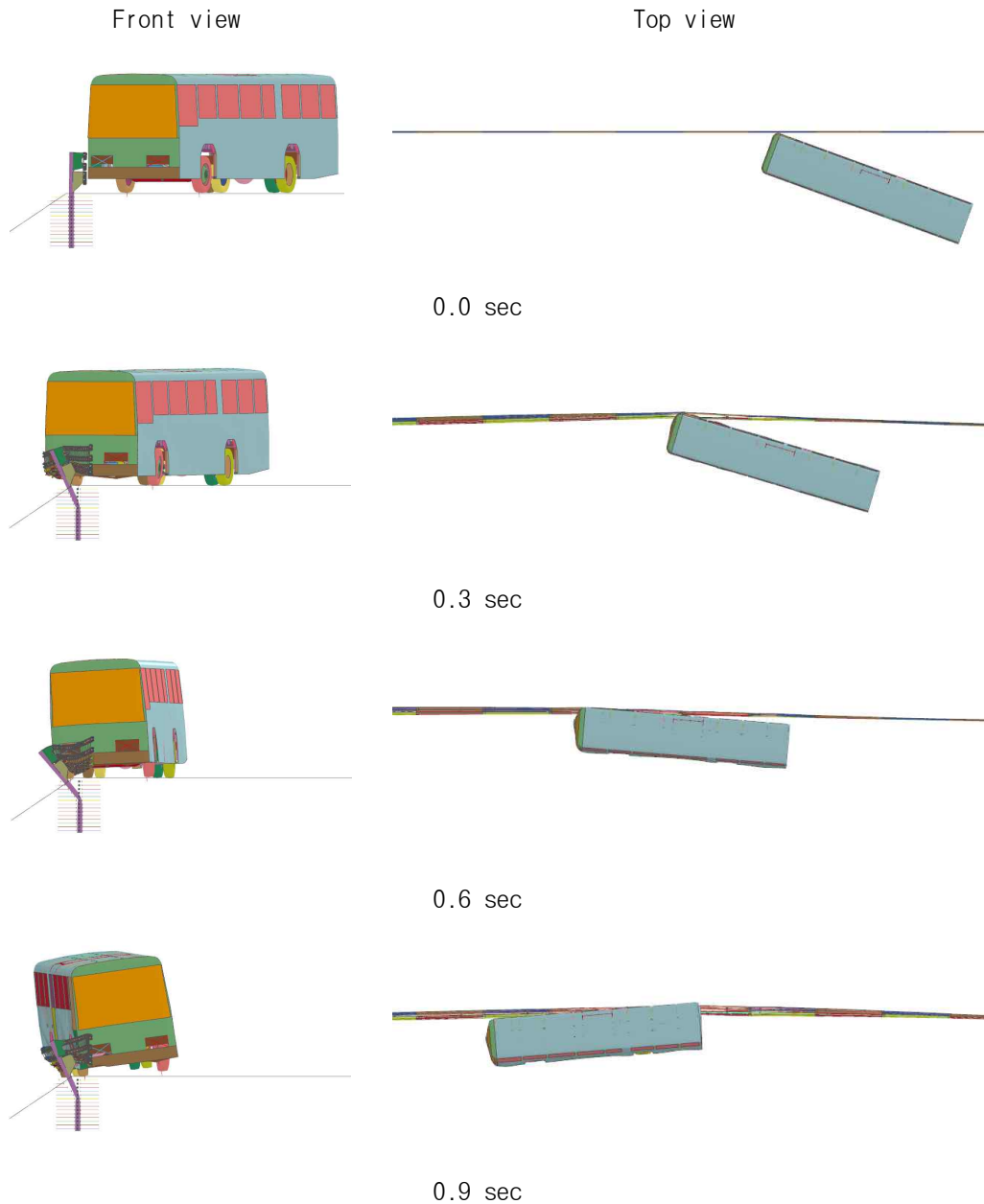


그림 3.88 HCM2 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 버스 충돌 후 거동

(라) HCM3

- 그림 3.89의 HCM3 모델은 버스 충돌에 대한 working width를 감소시키기 위하여 HCM2 모델의 4개의 레일에 동일하게 배치(4-4-4-4)되어 있던 케이블을 상단에 6개, 중단에 4개, 하단에 각각 3개씩 배치(6-4-3-3)시킨 모델임. 그리고 판형 수직연결재 대신에 34 mm의 직경과 2.4 mm 두께를 갖는 원형 강관이 수직연결재로 사용되었음.
- 4개의 레일을 동시에 연결하도록 설계된 수직연결재가 2 m 간격으로 배치되었음. 케이블의 처짐을 줄이기 위해 단면적을 감소시킨 레일이 상단, 중단, 그리고 하단에 동일하게 사용되었음.

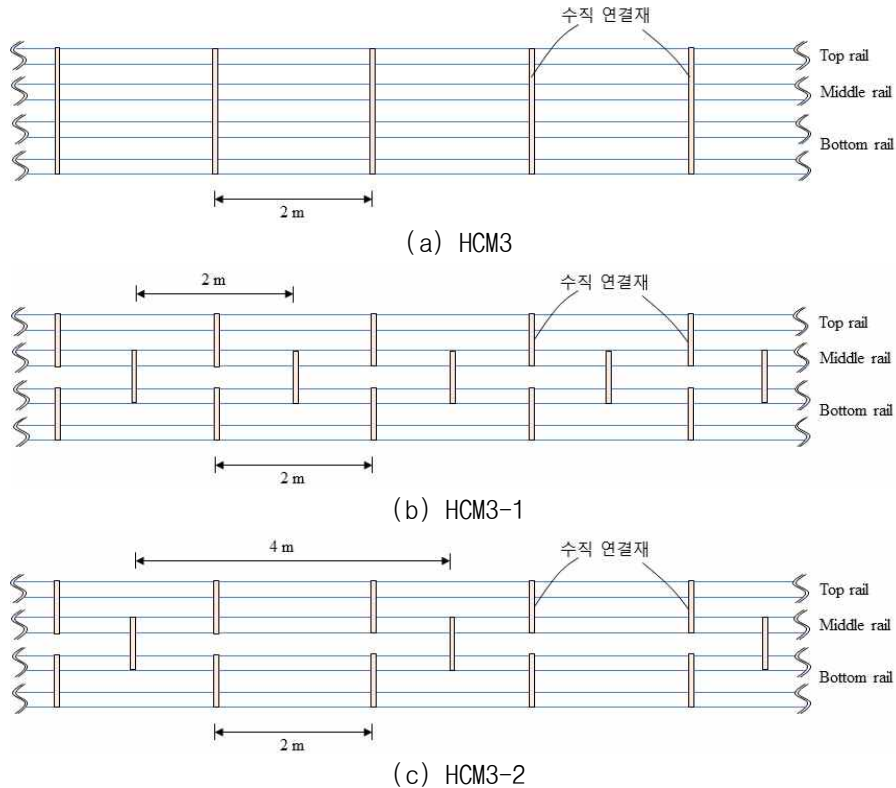
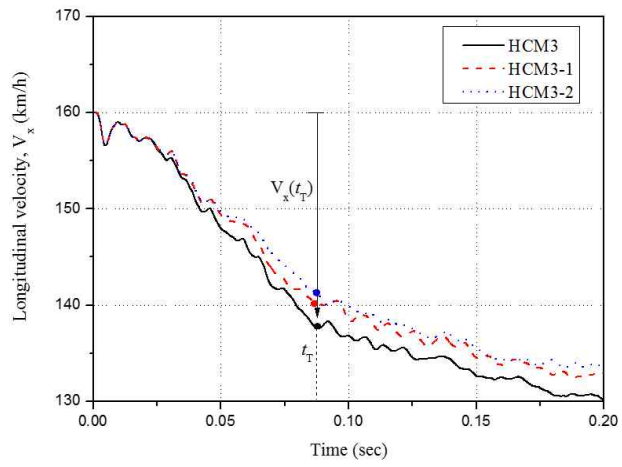


그림 3.90 다양한 FEA 모델의 수직 연결재 배치

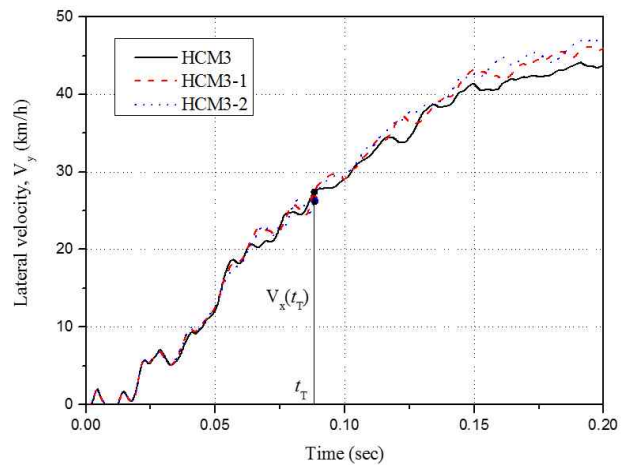
- 표 3.19와 그림 3.91에는 수직 연결재 배치에 따른 탑승자 위험지수와 working width, 그리고 차량 속도-시간 이력이 나타나 있음.
- 소형차 충돌 후 거동은 모두 유사하게 나타났고 탑승자 위험지수는 HCM3, HCM3-1, 그리고 HCM3-2 순으로 좋게 나타났음. THIV와 ASI가 HCM3, HCM3-1, 그리고 HCM3-2 순으로 좋게 나타나는 이유는 하단 레일과 연결되는 수직 연결재의 수가 HCM3, HCM3-1, 그리고 HCM3-2 순으로 작아져서 소형차 충돌에 대한 케이블의 거동이 HCM3, HCM3-1, 그리고 HCM3-2 순으로 유연하게 나타났기 때문임.
- 그림 3.91에 나타나있는 차량 속도-시간 이력을 보면 케이블의 거동이 유연하게 나타날수록 차량과 레일의 접촉 면적이 감소되었기 때문에 종 방향감속 기울기가 HCM3, HCM3-1, 그리고 HCM3-2 순으로 작게 나타나는 것을 알 수 있음.
- HCM3, HCM3-1, 그리고 HCM3-2 모델에 대한 대형차의 Working Width는 약 1.39 m로 유사하게 나타났고 EN1317의 W5 등급으로 분류되었음. 또한 동적과 영구 횡 방향 처짐도 각각 1.01 m와 0.1 m로 유사하게 나타났음.
- HCM3-1과 HCM3-2 모델이 목표하는 반강성 케이블 배리어가 될 가능성이 클 것으로 평가되었으며 HCM3-2 모델이 탑승자 위험지수와 차량 충돌 후 거동을 함께 고려할 때 보다 합리적인 모델로 간주되었음.

표 3.19 다양한 FEA 모델의 탑승자 위험 지수와 working width

Model	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Working width (m)
HCM3	33.7	15.0	1.45	1.39
HCM3-1	30.9	11.5	1.36	1.39
HCM3-2	29.6	9.2	1.22	1.39



(a) 종 방향 속도-시간 이력



(b) 횡 방향 속도-시간 이력

그림 3.91 다양한 FEA 모델의 차량 속도-시간 이력

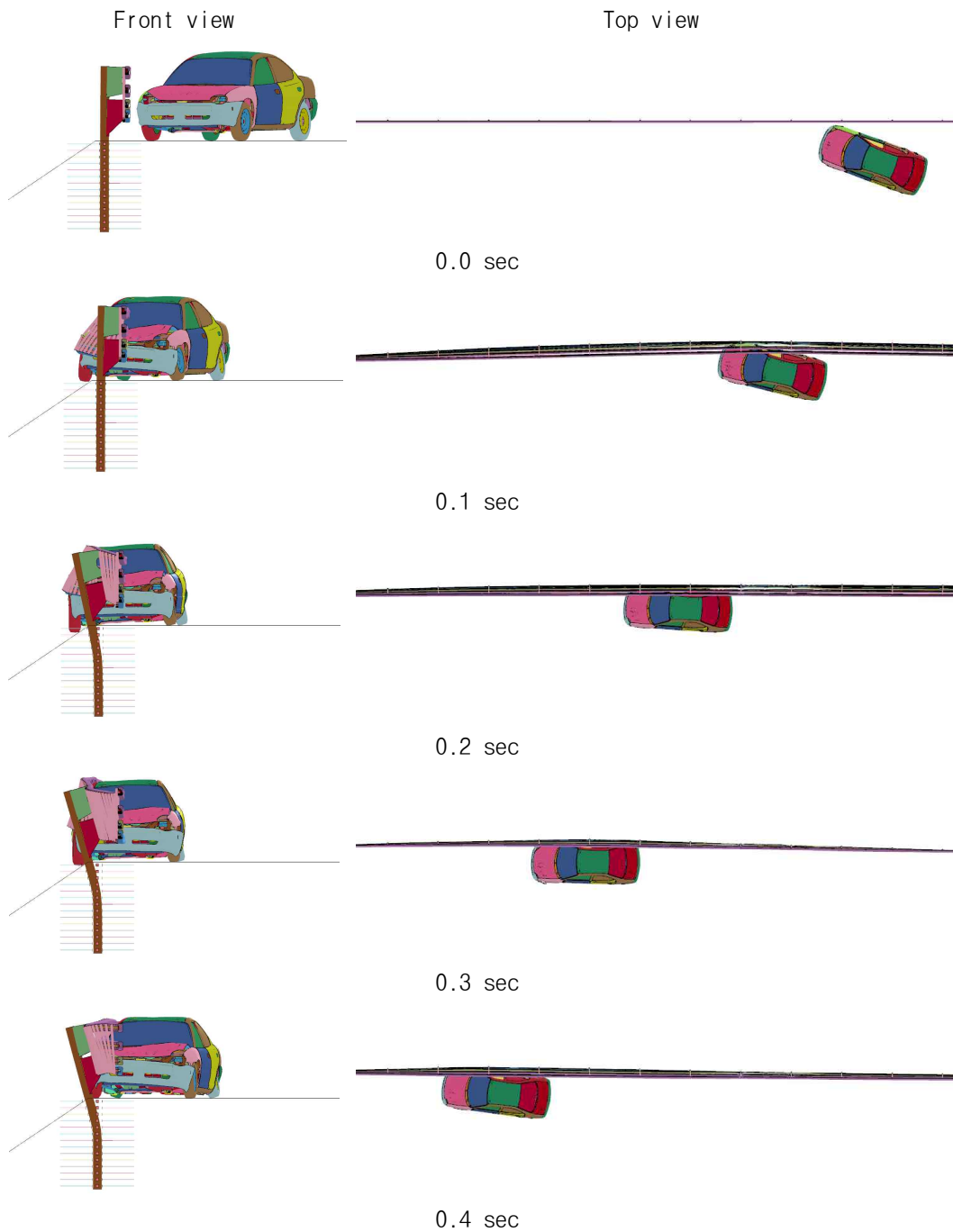


그림 3.92 HCM3 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 소형차 충돌 후 거동

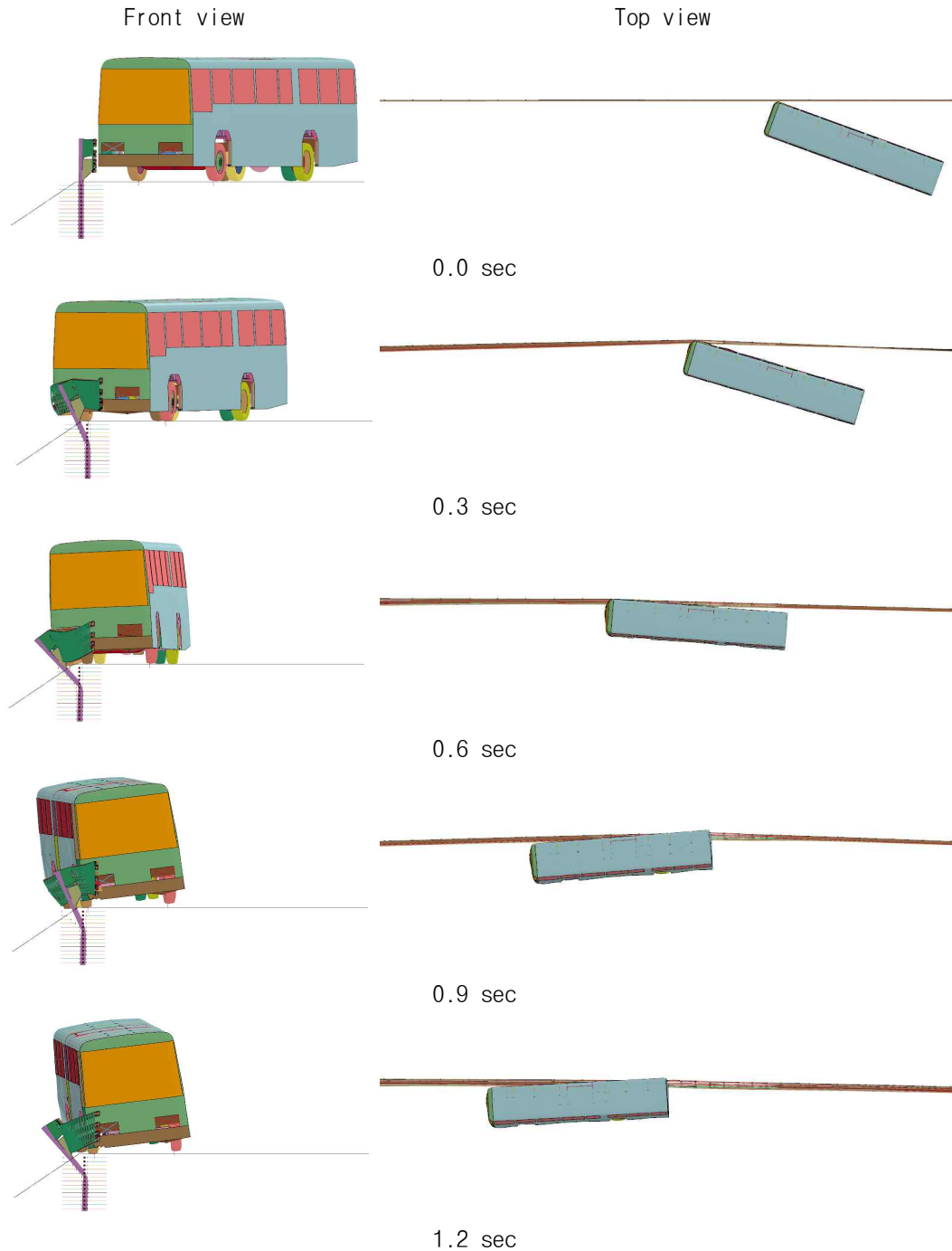


그림 3.93 HCM3 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 버스 충돌 후 거동

(라) CIP(Critical impact point) 검토

- 반강성 케이블 배리어의 CIP를 조사하기 위하여 HCM3-2 모델에 대하여 충돌위치를 변화시키면서 1.3 tons - 130 km/h - 20° 와 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건 조건과 13-ton 버스 - 70 km/h - 15° 의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA가 수행되었음.
- 그림 3.94에는 130 km/h의 소형차 충돌속도에 대한 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 나타나있음. 지주와 가까운 곳에서 THIV가 급격히 커지는 경향을 보였으나 모든 길이에서 130 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 것으로 나타났음. 또한 그림 3.94에는 0.9 tons - 120 km/h - 20° 의 충돌조건을 만족하도록 설계된 SB5-B등급 반강성 레일형 배리어에 대하여 130 km/h의 소형차 충돌속도를 적용시켜서 결정된 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 함께 나타나있음.
- SB5-B등급 반강성 레일형 배리어는 2.5 m의 경간에서 1.25 m (경간의 약 50%)가 130 km/h의

소형차 충돌 속도를 만족하지 못하는 것으로 나타났기 때문에 60 m 경간의 반강성 케이블 배리어는 같은 대형차 충돌에너지를 만족하도록 개발된 반강성 레일형 배리어에 비하여 상당히 좋은 탑승자의 안전을 제공함을 알 수 있음. 반강성 케이블 배리어는 반강성 레일형 배리어보다 THIV가 평균적으로 약 18% 작게 발생되는 것으로 나타났음.

- 표 3.20에는 다양한 충돌위치에 대하여 130 km/h의 소형차 충돌속도를 적용하여 결정된 탑승자 위험 지수가 나타나 있음. THIV가 작게 발생되는 구간에서는 충돌위치를 5 m 간격으로 변화시키고 THIV가 크게 발생되는 지주와 인접한 구간에서는 충돌 위치를 0.3 m씩 변화시켰음. 표 3.20와 그림 3.94로부터 130 km/h의 소형차 충돌속도에 대한 CIP는 THIV 관점에서 중간지주로부터 상류 쪽으로 1.9 m 떨어진 곳에 위치한다는 것을 알 수 있음.
- CIP에 대해서 결정된 THIV는 33 km/h의 한계치 보다 약 4.5 % 작게 나타났고 PHD는 20g의 한계치 보다 약 38 % 작게 나타났다. 그리고 ASI는 1.4로 나타나 EN1317의 IS level B로 분류되었음.

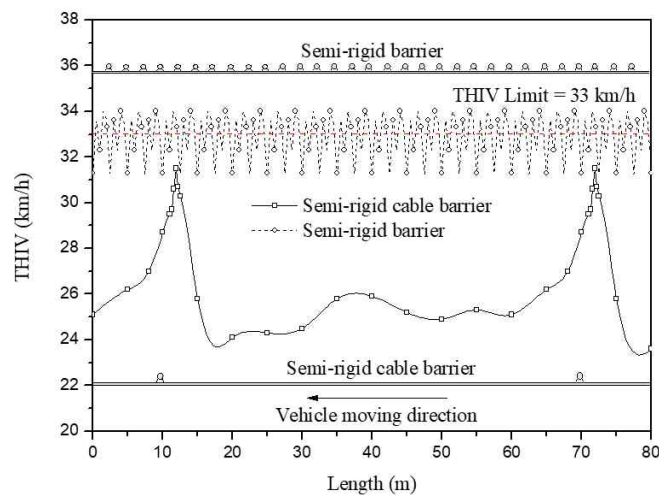


그림 3.94 130 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화

표 3.20 130 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 탑승자 위험 지수

Impact point (m)	Impact velocity of small car (km/h)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI
0	130	28.7	10.6	1.21
1.0		29.5	10.5	1.22
1.3		29.7	10.8	1.25
1.6		30.6	11.7	1.31
1.9		31.5	12.4	1.40
2.2		30.7	13.1	1.35
2.5		30.3	12.9	1.32
5		25.8	12.3	1.05
10		24.1	10.2	0.95
15		24.3	10.5	0.97
20		24.5	10.7	1.01
25		25.8	11.1	1.01
30		25.9	11.4	1.02
35		25.2	11.8	1.02
40		24.9	12.1	0.99
45		25.3	12.2	1.00
50		25.1	11.4	1.01
55		26.2	10.9	1.01
58		27	11.2	1.13

- 그림 3.95에는 160 km/h의 소형차 충돌속도에 대한 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 나타나있음. 33km/h의 THIV 한계치를 적용하면 60 m의 경간에서 53.2 m (경간의 약 89%)가 160 km/h의 소형차 충돌 속도를 만족하는 것 (구간 A)으로 나타났음. 그리고 160 km/h의 소형차 충돌 속도를 만족하지 못하는 구간 (구간 B)의 길이는 6.8 m (경간의 약 11%)로 나타났음.
- MASH의 44 km/h의 OIV 한계치를 적용하는 경우에는 60 m의 전체 경간이 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족할 수 있는 것으로 나타났음. 또한 그림 3.95에는 0.9 tons - 120 km/h - 20°의 충돌조건을 만족하도록 설계된 SB5-B등급 반강성 레일형 배리어에 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 충돌조건을 적용시켜서 결정된 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 함께 나타나있음.
- SB5-B등급 반강성 레일형 배리어는 2.5 m의 경간의 전체 길이에 대하여 160 km/h의 소형차 충돌 속도를 만족하지 못하는 것으로 나타났음. 반강성 케이블 배리어는 반강성 레일형 배리어보다 THIV가 평균적으로 약 28% 작게 발생하는 것으로 나타났음. 따라서 반강성 케이블 배리어는 160 km/h의 소형차 충돌속도와 같은 예기치 않는 높은 속도의 차량 충돌에 대하여 기존의 반강성 레일형 배리어보다 훨씬 더 좋은 탑승자의 안전을 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
- 표 3.21에는 다양한 충돌위치에 대하여 160 km/h의 소형차 충돌속도를 적용하여 결정된 탑승자 위험 지수가 나타나있음. 표 3.20과 그림 3.95로부터 CIP는 THIV 관점에서 130 km/h의 충돌속도에 대한 CIP와 동일하게 중간지주로부터 상류 쪽으로 1.9 m 떨어진 곳에 위치한다는 것을 알 수 있음. 그리고 소형차 충돌 후 거동 관점에서 살펴본 CIP는 소형차가 케이블 하단으로 침투할 가능성이 높은 동적 최대 횡 변위가 나타나는 경간의 중앙(30 m)에 위치한다는 것을 알 수 있었음.
- 경간의 중앙에 대해서 결정된 THIV는 33 km/h의 한계치 보다 약 10.3 % 작게 나타났고 PHD는 20g의 한계치 보다 약 54 % 작게 나타났음. 그리고 ASI는 1.22으로 나타나 EN1317의 IS level B로 분류되었음.
- 그림 3.96에는 HCM3-2 모델에 대하여 충돌위치를 변화시키면서 13-ton 버스 - 70 km/h - 20°의 대형차 충돌조건을 적용하는 FEA를 통하여 결정된 충돌 위치에 변화에 따른 working width의 변화가 나타나있음. 대형차 충돌조건에 대한 CIP는 working width 관점에서 레일의 중앙에 위치함을 알 수 있음. CIP에 대한 대형차 충돌의 working width는 1.39 m로 EN1317의 W5 등급으로 분류되었고, 동적과 영구 횡 방향 처짐은 각각 1.01 m와 0.1 m로 나타났음.

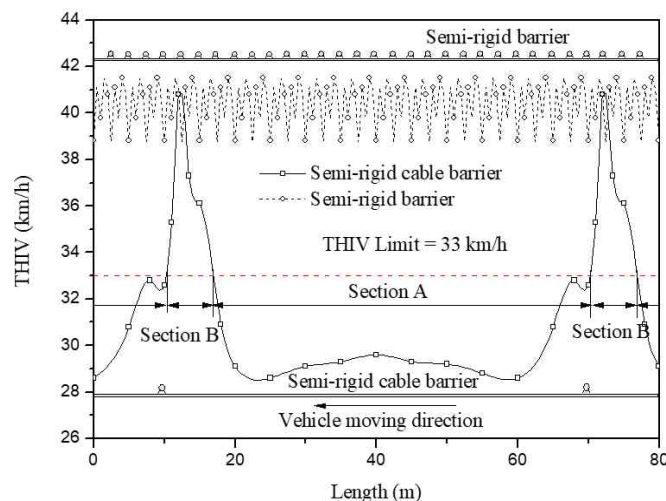


그림 3.95 160 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화

표 3.21 160 km/h 소형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 탑승자 위험 지수와 최대 횡 변위

Impact point (m)	Impact velocity of small vehicle (km/h)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Maximum lateral displacement (m)
0	160	32.6	11.5	1.53	0.81
1		35.3	11.0	1.63	0.77
2		40.8	13.8	1.91	0.73
3.5		37.3	18.2	1.73	0.75
5		36.1	16.8	1.60	0.80
8		30.9	17.4	1.30	0.84
10		29.1	16.2	1.17	0.88
15		28.6	10.5	1.25	0.93
20		29.1	14.3	1.23	0.98
25		29.3	10.3	1.24	1.05
30		29.6	9.2	1.22	1.14
35		29.3	10.9	1.25	1.08
40		29.2	10.1	1.21	0.95
45		28.8	11.2	1.26	0.89
50		28.6	13.4	1.16	0.85
55		30.8	14.2	1.30	0.84
58		32.8	13.2	1.49	0.82

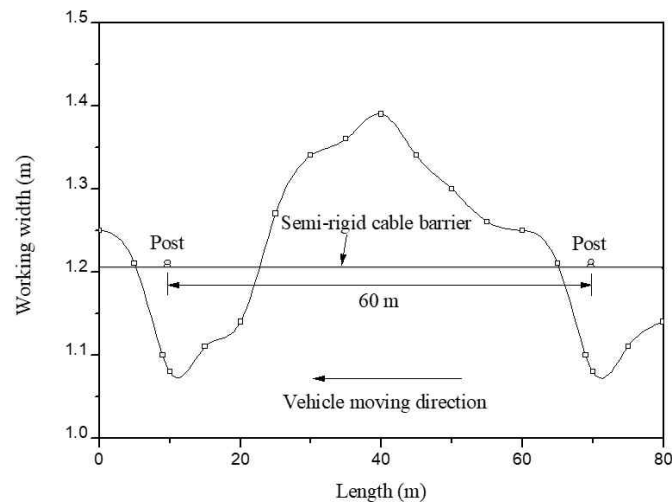


그림 3.96 대형차 충돌의 충돌 위치 변화에 따른 working width의 변화

(2) 최적 경간

- 경간의 변화가 대형차와 소형차 충돌에 미치는 영향을 조사하기 위하여 경간을 20, 30, 40, 60, 80, 그리고 100 m로 변화시키면서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건과 13-ton 버스 - 70 km/h - 20°의 대형차 충돌조건을 적용한 FEA가 HCM3-2 모델에 대하여 수행되었음.
- 대형차 충돌조건에 대하여 1.4 m 정도의 차량 점유폭을 날게 하는 케이블의 소요 숫자와 초기 긴장력이 반복적인 FEA를 통하여 경간별로 결정되었음. 15.2 mm의 직경과 1,880 MPa의 극한강도를 갖는 케이블이 해석 모델에 사용되었음. 대형차의 충돌은 경간에 상관없이 가장 큰 working width를 발생시키는 경간 중앙에 위치하였음. 그리고 소형차 충돌해석은 경간 전체

길이에 걸쳐서 충돌위치를 변화시키면서 수행되었음.

- 표 3.22에는 다양한 경간에 대해서 경간 중앙의 충돌위치를 이용하여 결정된 탑승자 위험 지수와 working width, 그리고 케이블의 초기 긴장력과 케이블 소요 숫자가 나타나 있음. 경간이 증가할수록 배리어의 강성이 감소하기 때문에 대형차 충돌로 인한 working width를 비슷하게 유지하는데 필요한 케이블의 초기 긴장력과 케이블의 숫자는 증가하였음.
- 경간 30 m까지 경간이 증가할 때 THIV가 감소하였고 30 m 이상의 경간에 대해서는 경간이 증가할 때 THIV가 다시 점점 더 증가하였음. 그리고 ASI는 경간 40 m까지 경간이 증가할 때 점점 더 감소하였고 40 m 이상의 경간에 대해서는 경간이 증가할 때 ASI가 다시 점점 더 증가하였음.

표 3.22 경간별 탑승자 위험 지수, working width, 케이블 초기 장력과 소요 숫자

Span length (m)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	Working width (m)	Initial pre-stressed force (kN)	No. of cables
20	28.0	12.4	1.14	1.38	1,100	8
30	26.3	13.8	1.09	1.38	1,320	10
40	26.9	12.6	1.01	1.39	1,517	12
60	29.6	10.8	1.22	1.39	2,167	16
80	32.1	11.4	1.37	1.40	3,246	24
100	34.6	12.7	1.86	1.40	5,000	36

- 그림 3.97에는 표 3.22에 제시된 THIV가 단일경간 배리어의 횡 방향 탄성강성 K_E^b 과 함께 다양한 경간에 대하여 나타나 있음. THIV는 경간 중앙의 충돌위치를 이용하여 결정되었음.
- 표 3.22와 그림 3.97로부터 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 충돌조건으로 소형차가 경간 중앙에 충돌하는 경우에 30 m의 경간이 가장 작은 THIV를 낳고, 33 km/h의 THIV 한계치를 만족할 수 있는 경간은 20 m에서 87 m까지의 범위로 나타났음.
- 경간이 증가할수록 K_E^b 가 감소하는 60 m까지 THIV가 점점 더 작게 나타날 것으로 예상되었으나 20에서 30 m까지의 경간에 대해서는 THIV가 감소하다가 30 m에서 60 m까지의 범위에 대해서는 THIV가 다시 점점 더 증가하는 경향을 보였음. 그 이유는 30 m에서 60 m까지의 경간에 대하여 경간이 증가할수록 K_E^b 가 약간씩 점점 더 감소하지만 관성력에 의한 횡 방향 저항이 상대적으로 보다 더 크게 증가하기 때문인 것으로 판단되었음.
- CM3 모델과 비교하여 같은 길이의 경간에서 경간 중앙의 THIV가 보다 작게 나타났음. 그 이유는 HCM3-2 모델의 레일 자중이 CM3 모델보다 37.5 % 감소되었고 그에 따라 관성력에 의한 횡 방향 저항이 감소되었기 때문인 것으로 판단되었음.
- 그림 3.98에는 THIV가 발생하는 시간에 예측된 소형차 충돌로 인한 경간 중앙의 동적 횡 변위 δ_d^T , 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 K_E^c , 그리고 단일경간 레일의 횡 방향 탄성강성 K_E^r 이 경간에 따라 함께 나타나 있음. 그림 3.98을 보면 경간이 증가될수록 레일의 횡 방향 강성은 변화가 없이 일정하고 케이블의 횡 방향 강성은 60 m까지 감소하다가 다시 증가한다는 것을 알 수 있음. 따라서 단일경간 배리어의 횡 방향 탄성강성 K_E^b 은 단일경간 케이블의 횡 방향 탄성강성 K_E^c 에 의해 좌우됨을 알 수 있음.
- 그림 3.98을 보면 경간이 커질수록 δ_d^T 가 증가하다가 30 m 이후부터 다시 감소하는 것을 알 수 있음. 경간이 커질수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 증가하지만 30 m 보다 작은 경간에 대해서는 레일과 케이블의 횡 방향 강성이 상대적으로 보다 더 감소하기 때문에 δ_d^T 가 증가하였음.
- 30 m에서 60 m까지의 경간에 대해서는 경간이 커질수록 레일과 케이블의 횡 방향 강성은 약

간씩 점점 더 작아지지만 관성력에 의한 횡 방향 저항이 상대적으로 보다 더 증가하기 때문에 δ_d^T 가 감소되었음. 그리고 60 m 보다 큰 경간에서는 경간이 커질수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 점점 더 증가하고 케이블의 횡 방향 강성도 다시 증가되기 때문에 δ_d^T 가 더 크게 감소되는 것을 알 수 있음.

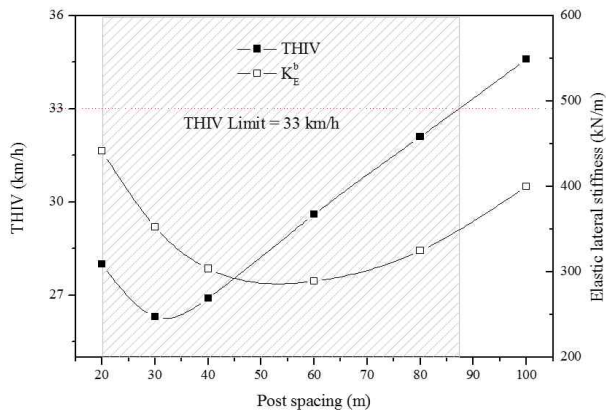


그림 3.97 경간 변화에 따른 THIV와 K_E^b 의 변화

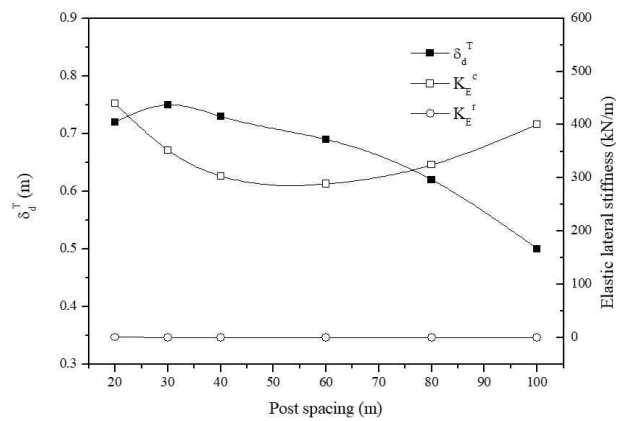


그림 3.98 경간 변화에 따른 δ_d^T , K_E^c , 그리고 K_E^r 의 변화

- 표 3.23에는 경간 변화에 따른 구간 A의 길이, 구간 B의 길이, 그리고 경간에 대한 구간 B의 비율이 나타나있고 그림 3.99에는 경간별 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화가 나타나있음. 그
- 림 3.99로부터 100 m 보다 작은 경간에 대해서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건을 만족하지 못하는 구간 B는 중간 지주에 가까운 위치에서만 나타났음. 그리고 100 m의 경간에 대해서는 구간 B가 중간지주 근처와 경간 중앙 근처에서 나타났음. 100 m 미만의 경간에 대해서는 구간 B가 관성력으로 인한 횡 방향 저항이 크게 나타나지 않는 중간지주 근처에서만 나타나기 때문에 구간 B의 THIV는 주로 K_E^b 의 크기에 따라 좌우되었음.
- 따라서 60 m까지의 경간에 대해서는 경간이 감소할수록 K_E^b 가 점점 작아지면서 경간에 대한 구간 B의 비율도 점점 작게 나타났고 60 m 미만의 경간에 대해서는 경간이 감소할수록 K_E^b 가 점점 더 커지면서 경간에 대한 구간 B의 비율도 점점 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있음.
- 그림 3.99를 자세히 살펴보면 20 m에서 30 m까지의 경간에 대해서 경간 중앙 근처의 THIV가 가장 작게 나타나고 40 m 이상의 경간에 대해서는 경간이 증가할수록 관성력에 의한 횡 방향 저항이 점점 더 증가하기 때문에 경간 중앙의 THIV가 점점 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있음.

표 3.23 경간별 구간 A의 길이, 구간 B의 길이, 경간에 대한 구간 B의 비율

Post spacing (m)	Section A (m)	Section B (m)	Section B / Post spacing
20	14.6	5.4	0.27
30	24.3	5.7	0.19
40	34.0	6.0	0.15
60	52.8	7.2	0.12
80	65.6	14.4	0.18
100	50.0	50.0	0.50

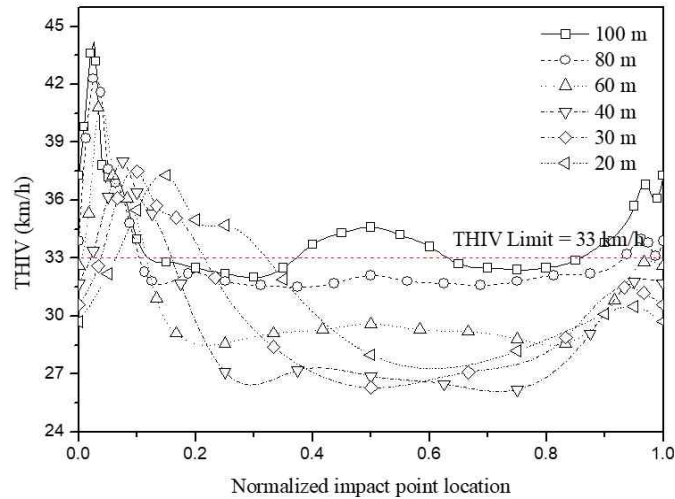


그림 3.99 경간별 충돌 위치 변화에 따른 THIV의 변화

- 그림 3.100에는 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도별 경간 변화에 따른 경간에 대한 구간 B의 비율이 나타나있음. 모든 경간에 대하여 소형차 충돌속도가 증가할수록 해당 충돌속도를 만족하지 못하는 경간에 대한 구간 B의 비율이 점점 더 증가하였음.
- 13-ton 버스 - 70 km/h - 20°의 대형차 충돌조건에 약 1.0 m의 동적 횡 변위를 날도록 설계된 반강성 케이블 배리어에 대한 최적 경간은 탑승자 위험지수의 관점에서 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 경간에 대한 구간 B의 비율이 각각 약 8, 12, 그리고 16 %로 가장 작게 나타나는 60 m로 파악되었음. 그리고 경간에 대한 구간 B의 비율이 20% 미만으로 나타나는 경간은 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도별로 각각 22 m에서 85 m, 28 m에서 82 m, 그리고 36 m에서 76 m까지의 범위로 조사되었음.
- 경간이 증가할 때 케이블의 초기 긴장력과 케이블 량이 상당히 크게 증가하기 때문에 탑승자 위험지수와 경제성을 함께 고려하면 최적 경간은 30 m로 밝혀졌음. 경간이 30 m에서 60 m로 증가할 때 160 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 경간에 대한 구간 B의 비율이 7 % 감소하지만 케이블 초기 긴장력과 케이블 량은 각각 약 64 %와 60 % 증가하였음.
- 13-ton 버스 - 70 km/h - 20°의 대형차 충돌조건에 약 1.0 m의 동적 횡 변위를 날도록 설계된 반강성 케이블 배리어가 60 m 경간을 가질 때 경간의 92 %, 88 %, 그리고 84 %가 각각 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 것으로 나타났음. 소형차 충돌속도가 증가할수록 경간에 대한 해당 충돌속도를 만족하는 구간의 비율이 감소하였고 소형차 충돌 후 거동도 점점 더 좋지 않게 나타났음.
- 특히 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대해서는 소형차가 충돌 후에 하단 레일 밑으로 침투할 것처럼 불안정하게 거동하다가 배리어로부터 분리되었음. 따라서 170 km/h 이상의 소형차 충돌속도에 대해서 차량 충돌 후 거동을 보다 안정적으로 만족시키기 위해서는 소형차가 하단 레일 밑으로 침투하는 현상을 보다 확실하게 방지할 수 있도록 반강성 케이블 배리어의 설계가 개선되어야 함.

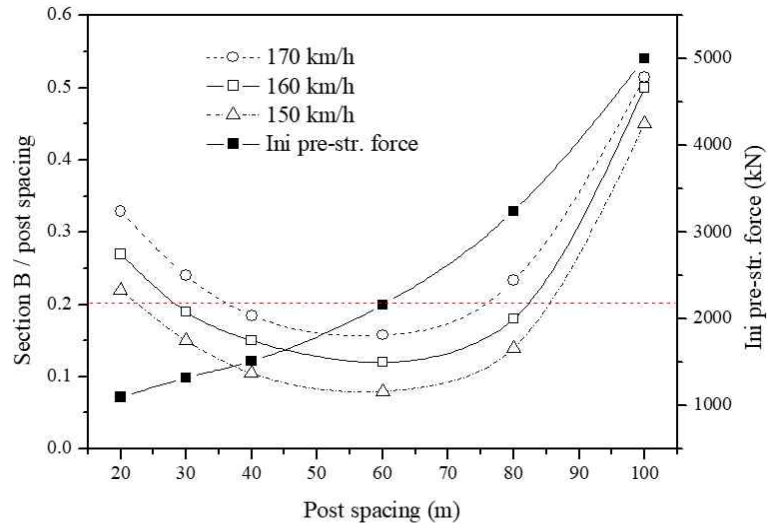


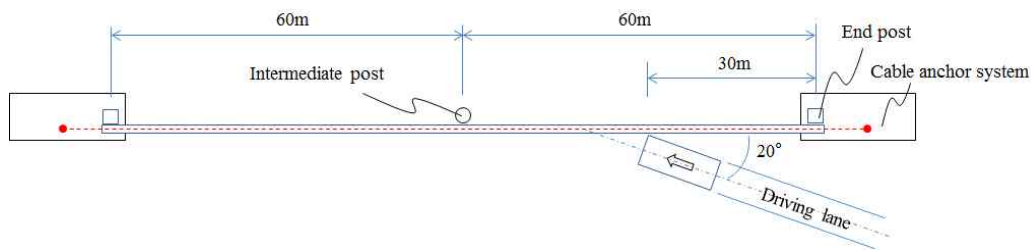
그림 3.100 소형차 충돌속도별 경간 변화에 따른 경간에 대한 구간 B의 비율

(3) 요약

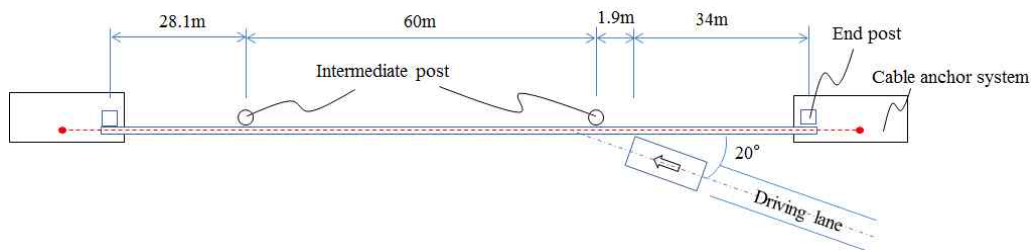
- H2등급 반강성 케이블 배리어의 상세설계는 버스 충돌조건을 만족할 수 있도록 SB5-B등급 최적설계를 개선하면서 이루어졌음. SB5-B등급 반강성 케이블 배리어의 최적설계를 케이블의 위치, 블록아웃, 수직 연결재 등을 변경하여서 다양한 대안을 결정하고 LS-DYNA 프로그램을 이용한 유한요소해석을 통하여 최적설계가 이루어졌음. 다양한 경간에 대하여 소형차 충돌 성능을 평가하였고 강한 지주 형식의 반강성 케이블 배리어에 대하여 효율이 좋은 경간이 결정되었음.
- 60 m 경간을 갖는 강한 지주 형식의 장경간 반강성 케이블 배리어가 14-ton 트럭 - 70 km/h - 20°의 대형차 충돌조건에 대하여 약 1m의 횡 변위를 발생시키도록 설계되었음. 강한 지주 반강성 케이블 배리어는 전체 경간에 걸쳐서 1.3 tons - 130 km/h - 20°의 소형차 충돌조건 조건을 만족할 수 있었지만 동일한 대형차 충돌에너지용 반강성 레일형 배리어는 경간의 50%에 대해서만 위의 소형차 충돌조건을 만족할 수 있었음. 1.3 tons - 130 km/h - 20°의 소형차 충돌조건에 대한 반강성 케이블 배리어의 THIV는 반강성 레일형 배리어에 비하여 평균적으로 약 18% 작게 발생되는 것으로 나타났음. 또한 반강성 케이블 배리어는 경간의 약 89% (구간 A)에 대해서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건을 만족할 수 있었지만 동일한 대형차 충돌에너지용 반강성 레일형 배리어는 경간 전체에 대해서 위의 소형차 충돌조건을 만족할 수 없었음. MASH의 44 km/h의 OIV 한계치를 적용하는 경우에는 반강성 케이블 배리어가 경간 전체에 대해서 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건을 만족할 수 있는 것으로 나타났음. 1.3 tons - 160 km/h - 20°의 소형차 충돌조건에 대한 반강성 케이블 배리어의 THIV는 반강성 레일형 배리어에 비하여 평균적으로 약 28% 작게 발생되는 것으로 나타났음. 따라서 반강성 케이블 배리어는 160 km/h의 소형차 충돌속도와 같은 예기치 않는 높은 속도의 차량 충돌에 대하여 기존의 반강성 레일형 배리어보다 훨씬 더 좋은 탑승자의 안전을 제공할 수 있을 것으로 기대됨.
- 강한 지주 형식의 반강성 케이블 배리어는 경간이 증가할수록 소형차 충돌에 대한 탑승자의 안전이 좋아지지만 대형차 충돌에 대한 동일한 working width를 유지하기 위해서는 케이블 배리어의 초기 긴장력과 케이블 앵커 시스템이 증가되어야만 했음. 탑승자 위험지수의 관점에서 최적 경간은 150 km/h, 160 km/h, 그리고 170 km/h의 소형차 충돌속도에 대하여 해당 충돌속도를 만족하는 구간의 비율이 가장 크게 나타나는 60 m로 조사되었음. 그리고 탑승자 위험지수와 경제성을 함께 고려할 때의 최적 경간은 30 m로 조사되었음. 경간이 30 m에서 60 m로 증가할 때 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하지 못하는 구간의 비율이 7 % 감소되지만 케이블 초기 긴장력과 케이블량은 각각 약 64 %와 60 % 증가하기 때문임.

(4) 실물 충돌시험을 통한 성능 평가

- 탑승자 위험지수 관점에서 가장 좋은 탑승자 안전을 제공할 수 있을 것으로 평가된 60 m의 경간에 대하여 실물차량 충돌시험이 수행되었음. 그림 3.101에는 소형차와 대형차 충돌시험을 위하여 설치되는 강한 지주 형식의 반강성 케이블 배리어에 대한 경간이 CIP와 함께 나타나 있음.
- 그림 3.101(a)에는 차량 충돌 후 거동 관점의 CIP와 실물 충돌시험용 배리어에 대한 경간 배치가 나타나 있음. 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건과 13-ton 버스 - 70 km/h - 20° 의 대형차 충돌조건을 적용한 실물충돌시험이 그림 3.101(a)와 같이 수행되었음.
- 그림 3.101(b)에는 탑승자 위험 지수 관점의 CIP와 실물 충돌시험용 배리어에 대한 경간 배치가 나타나 있음. 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용한 실물충돌시험이 그림 3.101(b)와 같이 수행되었음.
- 그림 3.101(a)에 설치되는 중간지주는 23 kN의 최대 정적 횡 지지력이 나타나도록 다짐이 이루어졌고, 그림 3.101(b)에 설치되는 중간 지주는 24 kN의 최대 정적 횡 지지력이 나타나도록 다짐이 이루어졌음. 레일은 중간지주에서 양 방향으로 각각 60 m씩 설치되었고, cable anchor system으로 ground anchor 형식이 사용되었음.



(a) 차량 충돌 후 거동 관점의 CIP 위치와 배리어 경간 배치



(b) 탑승자 위험지수 관점의 CIP 위치와 배리어 경간 배치

그림 3.101 실물 충돌시험용 배리어에 대한 CIP 위치와 경간 배치

(가) 소형차 실물 충돌시험

① 차량 충돌 후 거동 관점의 CIP

- 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건에 대한 THIV는 25.3 km/h로 THIV 한계치 보다 약 23 % 작게 나타났음. ASI는 1.0으로 나타나 유럽기준 IS 성능등급의 A 등급으로 분류되었음.
- 시험 차량의 충돌 후 차량 거동은 전복이나 급정지 없이 원활하게 나타났다. 소형차는 -4.3° (충돌각도 20° 의 21.5%) 각도와 134.5 km/h(158 km/h의 예측된 충돌속도의 85.1%)의 속도로 이탈박스(exit box)를 통과하였음. 탈출 후 차량의 궤적은 FEA에 의해 결정된 그림 3.48(a)에 보이는 것과 비슷하게 6.5 m 폭과 90 m 길이로 정의되는 구간에서 360° yaw 회전을 겪었음. 차량 조종석 변형 지수(vehicle cockpit deformation index, VCDI)는 RS0000000로 나타났고 차량 조종석의 감소는 3% 미만이었음. 소형차 충돌에 대한 탑승자 위험 지수와 충돌 후 차량거동과 관련된 성능평가 기준을 만족하였음.
- 그림 3.102에는 1.3 tons - 160 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 실물 충돌시험을 통하여 결정된 소형차의 충돌 후 거동이 나타나 있음.

② 탑승자 위험지수 관점의 CIP

- 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건에 대한 THIV는 24.7 km/h로 THIV 한계치 보다 약 25 % 작게 나타났음. ASI는 1.1으로 나타나 유럽기준 IS 성능등급의 B 등급으로 분류되었음. 시험 차량의 충돌 후 차량 거동은 전복이나 급정지 없이 원활하게 나타났음. 소형차는 4.5° (충돌각도 20° 의 22.5%) 각도와 101.9 km/h (132 km/h의 예측된 충돌속도의 77.2 %)의 속도로 탈출박스(exit box)를 통과하였음. 충돌 후 차량의 궤적은 이탈박스를 통과한 후에 yaw 회전 없이 차선으로 안전하게 재 진입할 수 있게 안정적으로 나타났음. 차량 조종석 변형 지수(vehicle cockpit deformation index, VCDI)는 RS0000000로 나타났고 차량 조종석의 감소는 3% 미만이었음. 소형차 충돌에 대한 탑승자 위험 지수와 충돌 후 차량거동과 관련된 성능평가 기준을 만족하였음. 그림 3.103에는 1.3 tons - 130 km/h - 20° 의 소형차 충돌조건을 적용하는 실물 충돌시험을 통하여 결정된 소형차의 충돌 후 거동이 나타나있음.

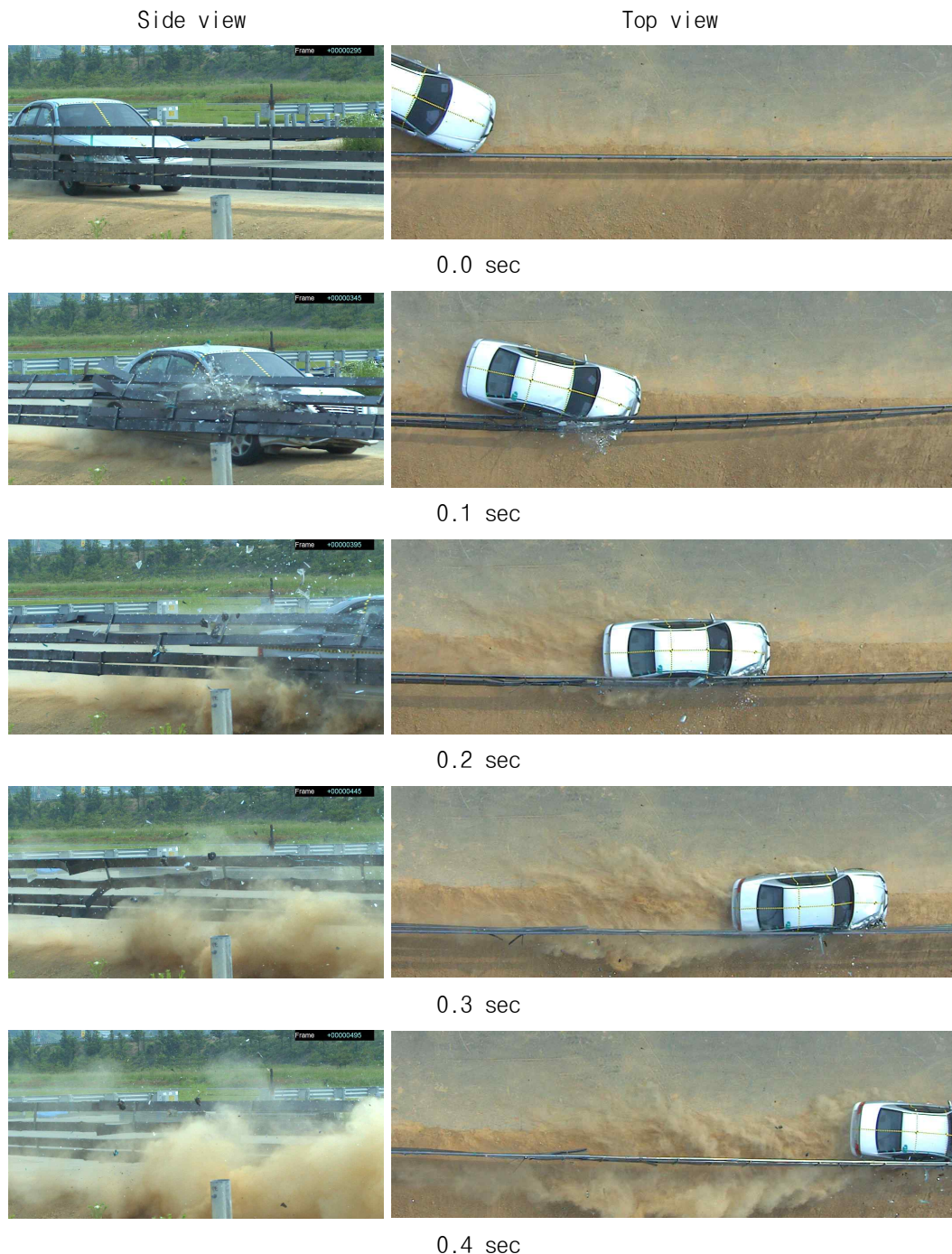


그림 3.102 소형차 충돌 후 거동

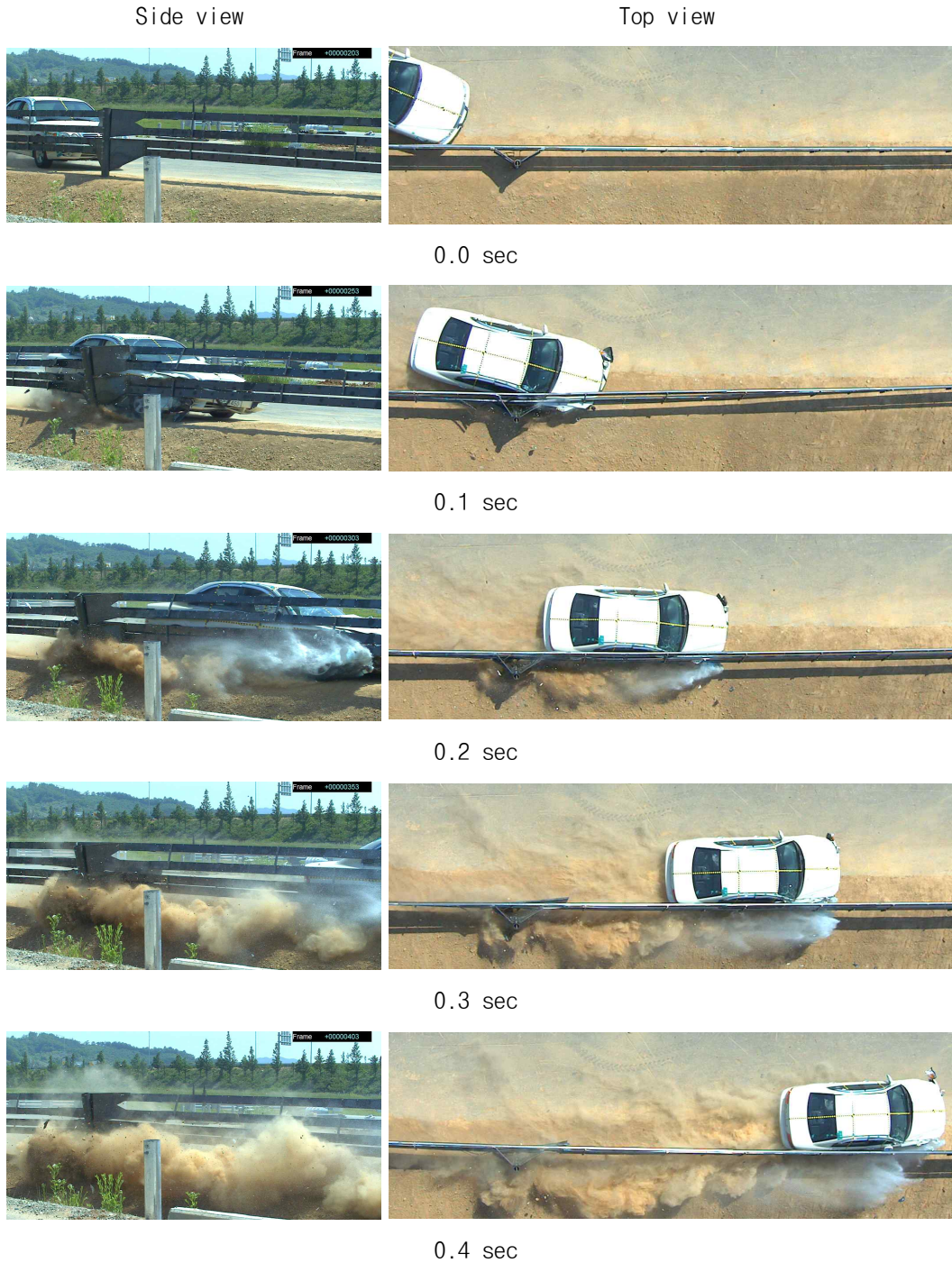


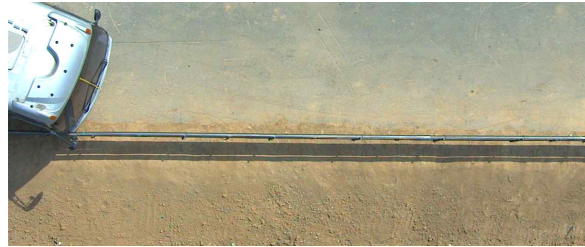
그림 3.103 소형차 충돌 후 거동

(나) 대형차 실물 충돌시험

- 13-ton 버스 - 70 km/h - 20° 의 충돌조건을 갖고 버스가 반강성 케이블 배리어에 충돌할 때 버스의 충돌 후 거동은 배리어를 승월하지 않고 전복이나 급정지 없이 원활하게 나타났음. Working width는 1.43 m로 나타나 유럽기준 IS 성능등급의 W5로 분류되었고 동적과 영구 횡방향 처짐은 각각 1.08 m와 0.02 m로 나타났음.
- 차량 충돌시에 구성부재의 비산은 발생하지 않았고 트럭을 방호할 만큼의 강도를 유지하였음. 버스는 탈출박스 B선을 침범하지 않고 탈출박스(A : 8.81 m, B : 20 m)를 통과하였음. 충돌 후 차량의 궤적은 이탈박스를 통과한 후에 yaw 회전 없이 차선으로 안전하게 재 진입할 수 있게 안정적으로 나타났음. 대형차 충돌에 대한 강도 성능과 충돌 후 차량거동과 관련된 성능평가 기준을 만족하였음. 그림 3.104에는 13-ton 버스 - 70 km/h - 20° 의 대형차 충돌 조건을 적용하는 실물 충돌시험을 통하여 결정된 버스의 충돌 후 거동이 나타나있음.

Side view

Top view



0.0 sec



0.2 sec



0.4 sec



0.6 sec



0.8 sec

그림 3.104 버스 충돌 후 거동

다. 반강성 케이블 배리어 곡선부 설치 검토

(1) 설계속도 120 km/h 도로 평면곡선반지름

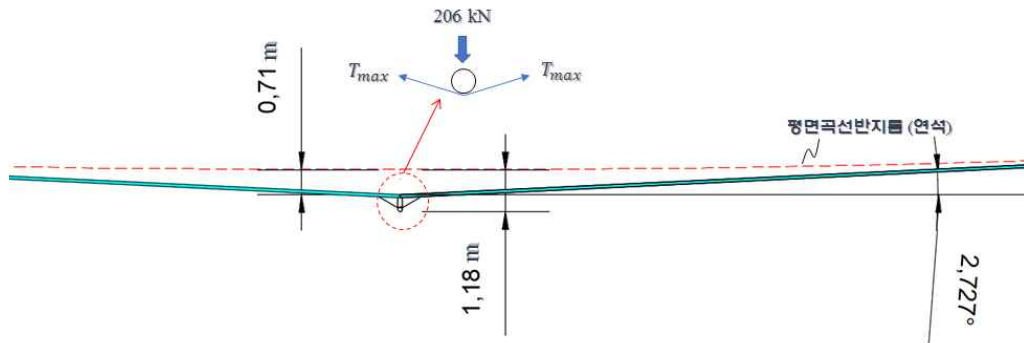
- ‘도로의 구조·시설기준에 관한 규칙(국토교통부, 2015)’에는 도로의 평면곡선반지름을 설계속도와 편경사에 따라 표 3.24와 같이 결정하도록 하고 있음.
- 도로 설계속도 120 km/h와 최대 편경사 8%를 적용한 평면곡선 반지름은 630 m로 결정됨.
- 160 km/h의 도로설계속도에 대한 평면곡선반지름이 120 km/h에 대한 것보다 크기 때문에 반강성 케이블 배리어를 설치하는데 보다 어려운 환경인 120 km/h의 도로설계속도에 대한 평면곡선반지름을 이용하여 곡선부 설치를 검토하였음

표 3.24 도로의 평면곡선반지름

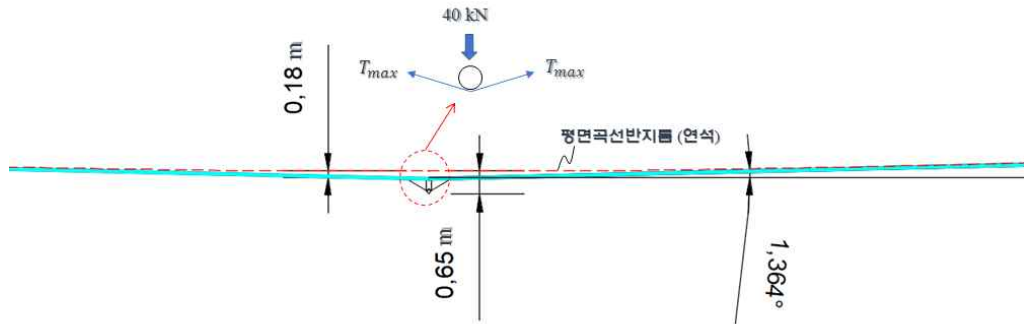
설계속도 (킬로미터/시간)	최소 평면곡선반지름(미터)		
	적용 최대 편경사		
	6%	7%	8%
160	1260	1185	1200
120	710	670	630
110	600	560	530
100	460	440	420
90	380	360	340
80	280	265	250
70	200	190	180
60	140	135	130
50	90	85	80
40	60	55	50
30	30	30	30
20	15	15	15

(2) 반강성 케이블 배리어 곡선부 설치 가능성 검토

- 그림 3.105에는 평면곡선 반지름 630 m에 대한 60 m와 30 m의 경간 길이를 갖는 반강성 케이블 배리어의 기하학적 형상이 각각 나타나 있음.
- 그림 3.105(a)를 살펴보면 경간 길이를 60 m로 적용한 경우에 연석과 중간지주 사이의 길이와 지주가 부담하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력은 각각 0.71 m와 206 kN으로 나타남. 그림 3.105(b)를 살펴보면 경간 길이를 30 m로 적용한 경우에는 연석과 중간지주 사이의 길이와 지주가 부담하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력은 각각 0.18 m와 40 kN으로 나타남.
- 그림 3.105로부터 경간 길이가 증가할수록 연석과 중간지주 사이의 간격과 중간지주가 부담하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력이 증가하는 것을 알 수 있음. 연석과 중간지주 사이의 간격이 증가할수록 중간지주가 경사면으로 이동하기 때문에 중간지주를 설치하기 위한 사면 보강 작업이 필요하고 중간지주가 부담하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력이 증가할수록 횡 방향 분력을 지지하기 위한 보강부재가 크게 설계되어야함. 따라서 경제성과 시공성을 고려할 때 경간 길이가 감소할수록 곡선부 설치가 용이할 것으로 판단됨.
- 경간 길이 60 m와 30 m의 반강성 케이블 배리어는 평면곡선 반지름 630 m를 갖는 곡선부에 설치가 가능하지만 연석과 중간지주 사이의 간격과 중간지주가 부담하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력을 고려할 때 경간 길이 30 m가 더 효율적인 것으로 판단됨.



(a) 경간 길이 60 m

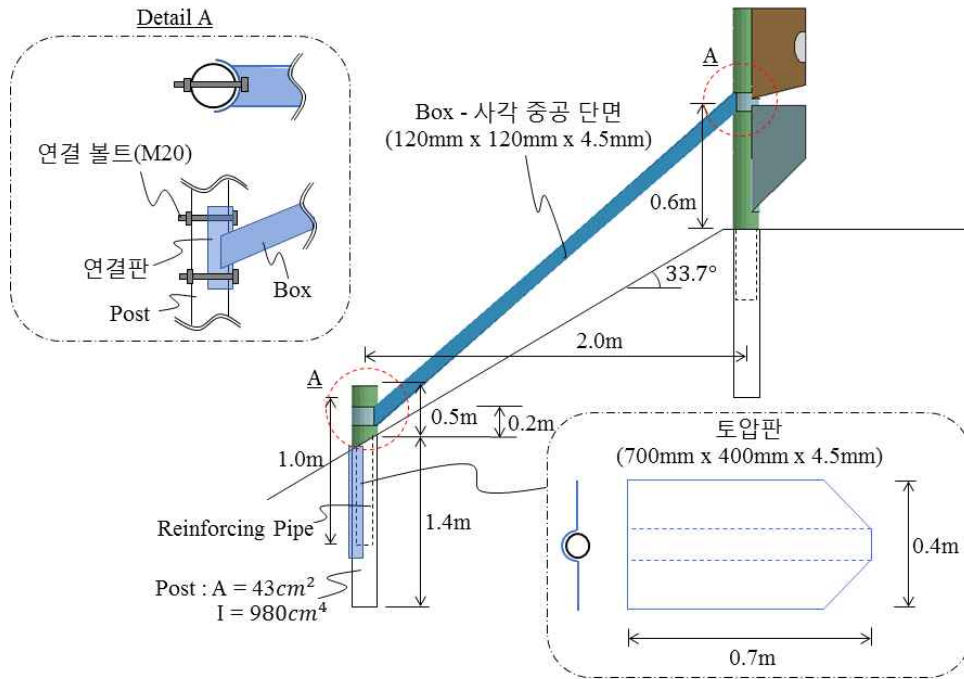


(b) 경간 길이 30 m

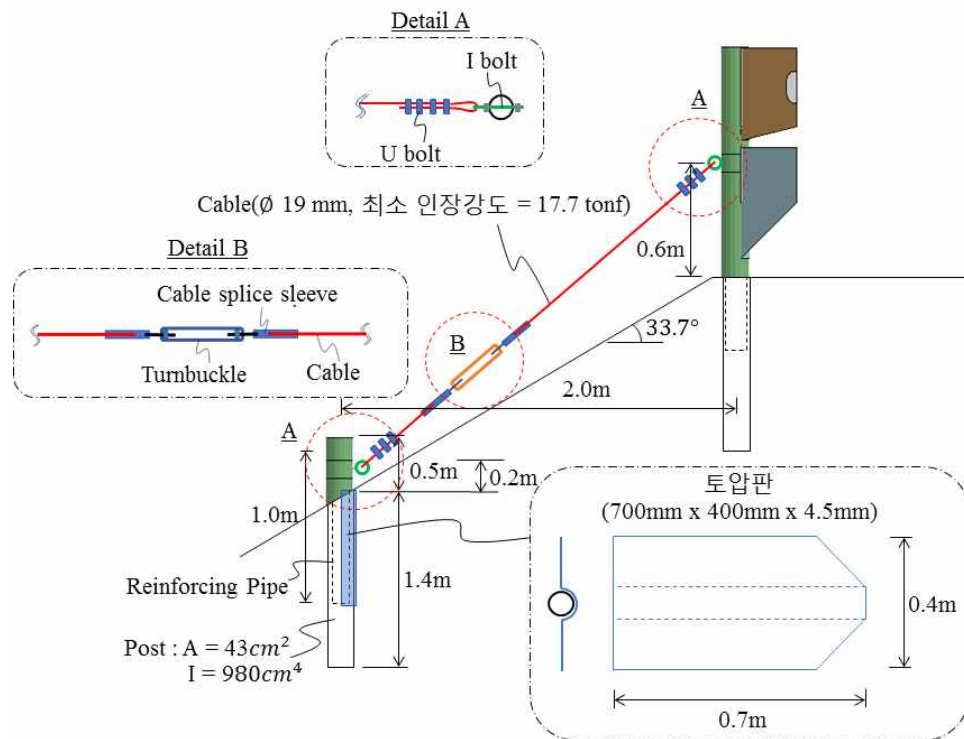
그림 3.105 곡선부에 설치된 반강성 케이블 배리어의 기하학적 형상

(3) 반강성 케이블 배리어 곡선부 설계

- 그림 3.106에는 경간 길이 30 m에 대한 지주가 부담하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력을 지지할 수 있도록 설계된 보강부재가 나타나 있음.
- 그림 3.106(a)에 보이는 중간지주 보강부재는 곡선부의 볼록 구간에 대하여 성토부 방향으로 발생하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력을 지지할 수 있도록 설계되었음. 40 kN의 횡 방향 분력을 지지할 수 있도록 1.4 m의 매입깊이를 갖는 보조지주가 설치됨. 보조지주의 단면은 140 mm의 바깥지름과 4.5 mm의 두께를 갖는 원형 중공 단면이고 125 mm의 바깥지름과 4.3 mm의 두께를 갖는 보강 지주가 바깥지주 안에 삽입되어 있음. 그리고 높이 700 mm, 폭 400 mm, 그리고 4.5 mm의 두께를 갖는 토압판을 설치하여 보조 지주의 횡 방향 지지력을 보강하였음. 높이 120 mm, 폭 120 mm, 두께 4.5 mm를 갖는 사각 중공 Box를 이용하여 보조 지주와 중간지주를 연결하였고 연결 상세는 그림 3.106(a)의 Detail A에 나타나 있음.
- 그림 3.106(b)에 보이는 중간지주 보강부재는 곡선부의 오목 구간에 대하여 도로 방향으로 발생하는 케이블 최대 긴장력의 횡 방향 분력을 지지할 수 있도록 설계되었음. 오목 구간의 경우에도 40 kN의 횡 방향 분력을 지지할 수 있도록 1.4 m의 매입깊이를 갖는 보조 지주가 설치됨. 보조지주의 단면은 140 mm의 바깥지름과 4.5 mm의 두께를 갖는 원형 중공 단면이고 125 mm의 바깥지름과 4.3 mm의 두께를 갖는 보강 지주가 바깥지주 안에 삽입되어 있음. 그리고 높이 700 mm, 폭 400 mm, 그리고 4.5 mm의 두께를 갖는 토압판을 설치하여 보조지주의 횡 방향 지지력을 보강하였음. 오목 구간의 경우에는 177 kN의 최소 인장강도를 갖는 직경 19 mm의 케이블을 이용하여 보조 지주와 중간 지주를 연결하였고 연결 상세는 그림 3.106(b)의 Detail A와 Detail B에 나타나 있음.



(a) 블록구간



(b) 오목구간

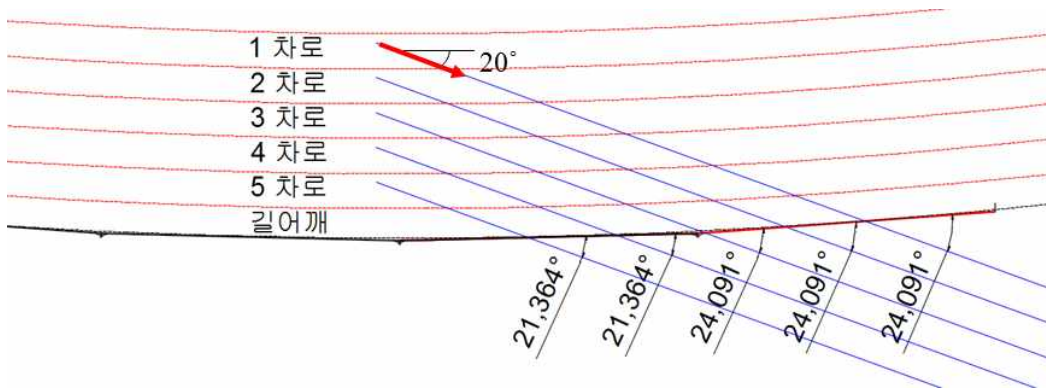
그림 3.106 중간지주 보강부재

(4) 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 성능평가

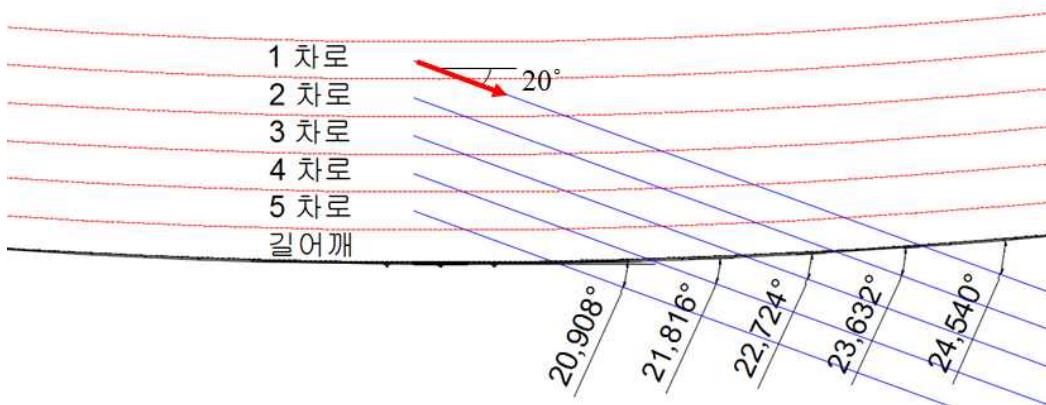
(가) 소형차 충돌조건

- 그림 3.107에는 30 m의 경간 길이를 갖는 반강성 케이블 배리어와 2.5 m의 경간 길이를 갖는 반강성 레일형 배리어를 630 m의 평면곡선 반지름을 갖는 곡선부에 설치할 때 발생 가능한 차량 충돌 각도가 나타나 있음. 편도 5차선의 도로에서 발생가능한 최대 충돌 각도는 30 m의

경간 길이를 갖는 반강성 케이블 배리어와 2.5 m의 경간 길이를 갖는 반강성 레일형 배리어가 각각 약 24.1° 와 약 24.5° 로 나타남. 따라서 소형차 충돌 각도는 25° 로 결정됨.



(a) 반강성 케이블 배리어(경간 길이 30 m)



(b) 기존 반강성 레일형 배리어(경간 길이 2.5 m)

그림 3.107 차량 충돌 각도

(나) 소형차 충돌 시뮬레이션

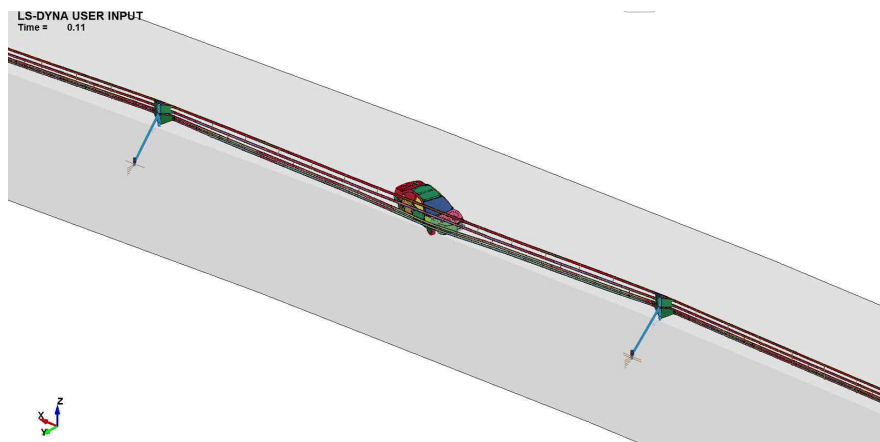
- 곡선부에 설치된 반강성 케이블 배리어의 성능을 평가하기 위하여 30 m의 경간 길이를 갖는 HCM3-2 모델에 대하여 1.3 tons - 160 km/h - 25° , 1.3 tons - 120 km/h - 25° , 그리고 1.3 tons - 100 km/h - 25° 의 소형차 충돌조건 조건을 적용하는 FEA가 수행되었음.
- 표 3.25와 3.26에는 곡선부의 오목구간과 곡선구간에 대한 탑승자 위험 지수가 나타나있음. 또한 표 3.25와 3.26에는 0.9 tons - 120 km/h - 20° 의 충돌조건을 만족하도록 설계된 SB5-B등급 반강성 레일형 배리어에 대한 탑승자 위험 지수가 함께 나타나있음.
- SB5-B등급 반강성 레일형 배리어는 25° 의 충돌각도를 곡선부의 볼록구간과 오목구간에 충돌할 때 160 km/h와 120 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하지 못하는 것으로 나타났음. 반면에 반강성 케이블 배리어는 25° 의 충돌각도를 곡선부의 볼록구간과 오목구간에 충돌할 때 160 km/h와 120 km/h의 소형차 충돌속도를 상당히 큰 안전율을 가지고 만족하는 것으로 나타났음. 반강성 케이블 배리어는 반강성 레일형 배리어보다 THIV가 소형차 충돌속도 160 km/h, 120 km/h, 그리고 100 km/h에 대하여 각각 26%, 25.4%, 그리고 21.1% 작게 발생하는 것으로 나타났음.
- 반강성 레일형 배리어는 소형차 충돌속도 120 km/h를 만족하도록 개발되었음에도 불구하고 곡선부 설치시에 소형차 충돌속도 120 km/h를 만족하지 못하는 것으로 나타났음. 따라서 반강성 케이블 배리어는 곡선부에서도 대형차 충돌에너지에 만족하도록 개발된 반강성 레일형 배리어에 비하여 상당히 좋은 탑승자의 안전을 제공할 수 있음.
- 160 km/h의 소형차 충돌속도와 같은 예기치 않는 높은 속도의 차량 충돌에 대하여 기존의 반강성 레일형 배리어보다 훨씬 더 좋은 탑승자의 안전을 제공할 수 있을 것으로 기대됨.

표 3.25 블록구간 탑승자 위험 지수

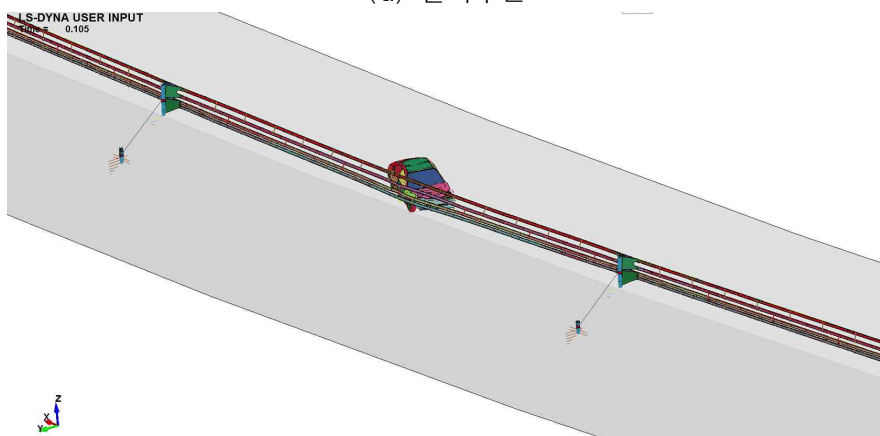
구분	충돌 위치	충돌각도 (°)	충돌속도 (km/h)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	THIV 33 km/h 기준 안전율 (%)
반강성 케이블 배리어	CIP	25	160	29.6	11.8	1.18	10.3
			120	25.6	11.3	0.98	22.4
			100	21.3	12.1	0.91	35.5
반강성 레일형 배리어	CIP	25	160	40.0	25.3	1.95	-21.2
			120	34.3	17.1	1.32	-3.9
			100	27.0	19.0	1.08	18.2

표 3.26 오목구간 탑승자 위험 지수

구분	충돌 위치	충돌각도 (°)	충돌속도 (km/h)	THIV (km/h)	PHD (g)	ASI	THIV 33 km/h 기준 안전율 (%)
반강성 케이블 배리어	CIP	25	160	29.7	11.5	1.18	10.0
			120	25.6	11.1	0.99	22.4
			100	21.5	11.9	0.92	34.8
반강성 레일형 배리어	CIP	25	160	40.2	26.9	1.96	-21.8
			120	34.7	17.2	1.33	-5.2
			100	27.2	18.7	1.09	17.6

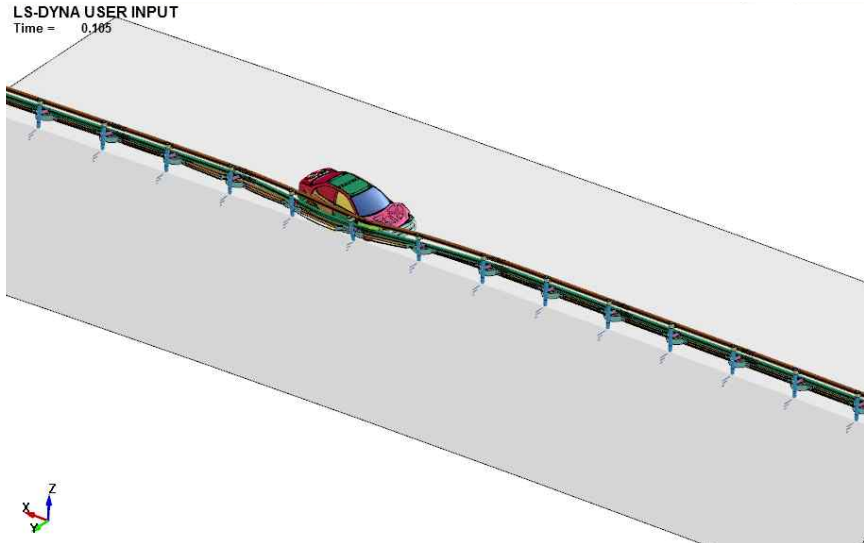


(a) 블록구간

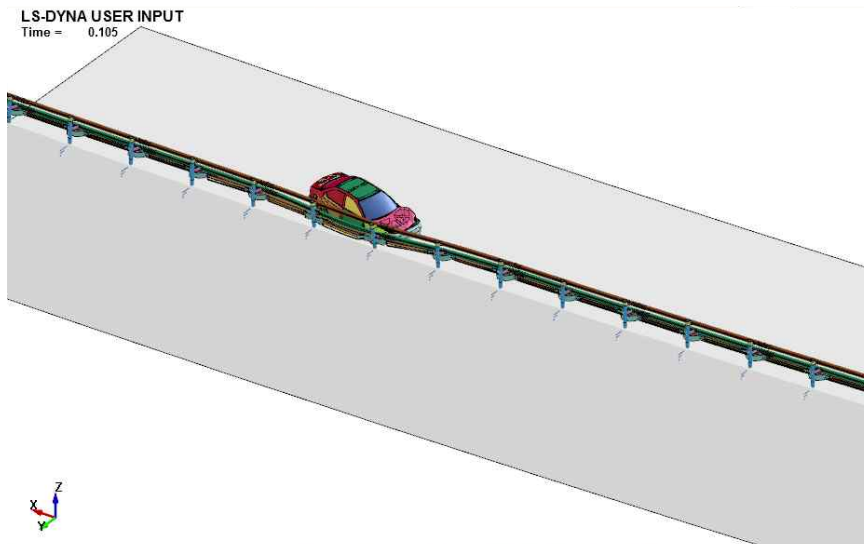


(b) 오목구간

그림 3.108 반강성 케이블 배리어 충돌 후 차량 거동



(a) 블록구간



(b) 오목구간

그림 3.109 기존 반강성 레일형 배리어 충돌 후 차량 거동

라. 유지관리

(1) 반강성 케이블 배리어 유지관리 개요

- 반강성 케이블 배리어는 일반적인 배리어와 다르게 긴장력이 도입된 케이블이 배치되기 때문에 주기적인 점검과 유지관리가 필요함.

(2) 설치단계 점검

- 케이블에 도입된 긴장력은 온도변화에 따라 변화를 겪음. 따라서 설치위치에서 발생 가능한 가장 높은 온도에서도 케이블 배리어에 대형차가 충돌할 때 1 m 이하의 제한된 횡 변위를 낼 수 있도록 케이블의 초기 긴장력은 설치 시기의 온도에 따라 조정되어야 함.
- 설치 시기의 온도에 따른 케이블 긴장력의 변화는 식(1)을 이용하여 결정할 수 있음.

$$T_c = T_r - \alpha \cdot \Delta T \cdot EA \quad (1)$$

여기서, T_c : 케이블 초기 긴장력

T_r : 현장 최대온도 상태의 케이블 초기 긴장력

α : 온도팽창계수

ΔT : 온도변화

EA : 케이블의 elastic axial rigidity

- 케이블 초기 긴장력이 1,900 kN인 경우에 현장 초기 긴장력 보정 예
 - ΔT : -60°C (최저 -20°C , 최고 $+40^{\circ}\text{C}$), α : $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, EA : 444,480 kN
 - $T_c = 1,900 \text{ kN} - (10 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}) \times (-60^{\circ}\text{C}) \times 444,480 \text{ kN} = 2,167 \text{ kN}$
- SB5-B등급과 H2등급 반강성 케이블 배리어의 온도 변화에 따른 케이블 초기 긴장력 변화

구분	설치 현장 온도 ($^{\circ}\text{C}$)	케이블 초기 긴장력 (kN)	구분	설치 현장 온도 ($^{\circ}\text{C}$)	케이블 초기 긴장력 (kN)
SB5-B	+40	1,900	H2	+40	1,950
	+30	1,944		+30	1,994
	+20	1,989		+20	2,039
	+10	2,033		+10	2,083
	0	2,078		0	2,128
	-10	2,122		-10	2,172
	-20	2,167		-20	2,217

- 케이블의 수직 처짐은 대형차 충돌에 치명적으로 작용할 수 있기 때문에 반강성 케이블 배리어 설치 완료 후에 케이블의 수직 처짐량을 검토하여야 함. 케이블의 수직 처짐량은 식(2)로부터 결정할 수 있으며 계산된 수직 처짐량보다 실제 수직 처짐량이 5 % 이상 크게 발생하는 경우에는 케이블의 긴장력을 재검토하여야 함.

$$h = \frac{wl^2}{8H} \quad (2)$$

여기서, h : 경간 중앙에서의 케이블 수직 처짐량 (m)

w : 레일과 케이블의 자중 (kN/m)

l : 경간 길이 (m)

H : 케이블 긴장력의 수평분력

(3) 차량 충돌로 인한 손상 발생시 점검

- 차량 충돌시에 케이블의 긴장력이 변화할 수 있으므로 차량 충돌로 인한 손상 발생시에는 케이블의 긴장력을 측정하고 부족한 경우에는 재긴장하여야 함.
- 케이블의 긴장력과 처짐량은 점검시의 온도, 단계(2)에 제시된 표, 식(2)를 이용하여 검토.
- 또한 차량 충돌시에 케이블이 손상될 수 있으므로 케이블의 손상과 방청 및 도장 상태를 확인하고 적절한 보강 작업을 실시하여야 함.
 - 케이블 손상이 심한 경우 : 케이블 교체
 - 케이블의 방청과 도장 상태가 손상을 입을 경우 : 적절한 방청 및 도장 작업 실시
- 케이블 이외에도 손상이 발생한 레일, 중간지주, 블록아웃, 수직 연결재 등의 구성요소는 교체 작업을 실시하여야 함.

(4) 정기 점검

- 케이블 및 소켓은 아연도금 제품으로 약 10년 이상 부식에 저항할 수 있다고 예측하고 있으나, 주기적인 관찰을 통해 부식이 진행되는 경우에 케이블 및 정착구에 적절한 방청과 도장 작업을 실시하여야 함.
- 별도의 영구계측기(로드셀, 지점 변위계)등의 설치는 요구되지 않지만 2년 주기로 케이블의

긴장력 변화를 확인하기 위해 긴장력 계측이 요구됨.

- 반강성 케이블 배리어에 사용되는 프리스트레싱 긴장재의 릴랙세이션에 의한 긴장력 손실은 10년에 대하여 약 5.1% 발생됨(‘도로교설계기준(2012)’ 5.3.3.2 참조)
- 단계(2)에 제시된 표의 최저 긴장력은 약 10%의 안전율을 적용하여 결정된 값이기 때문에 10년 동안 발생하는 5.1%의 릴랙세이션에 의한 긴장력 손실은 반강성 케이블 배리어의 성능에 영향을 미치지 않음
- 그러나 릴랙세이션에 의한 긴장력 손실 이외에도 크리프에 의한 긴장력 손실, 건조수축에 의한 긴장력 손실, 케이블 앵커 시스템의 변위 발생으로 인한 긴장력 손실 등 예상치 못한 긴장력 손실이 추가적으로 발생할 수 있으므로 케이블의 긴장력은 2년 주기로 계측하는 것이 필요함
- 장경간 케이블 배리어의 케이블은 레일이 감싸고 있는 구조이기 때문에 육안으로 검사가 어려움. 100 m 당 1개의 레일을 분리하여 케이블의 상태를 육안으로 검사하는 것을 권장함.
- 주의해서 관찰하여야 할 항목은 아래와 같으며 점검 주기는 2년이 권장됨.
 - 케이블 정착구 손상 및 부식상태
 - 케이블의 손상 및 부식상태
 - 케이블의 긴장력
 - 케이블의 처짐량
- 케이블의 긴장력과 처짐량은 점검시의 온도, 단계(2)에 제시된 표, 식(2)를 이용하여 검토.

2. 연구 성과

연구 성과 목표	비중 (%)	달성도 (%)	비고
▪ 다음의 충돌조건을 만족하는 장경간 반강성 배리어 제품 개발 - 소형차(900kg 혹은 1300kg) · 기본구간(배리어 길이의 80%) - 충돌속도 160km/h, 충돌각도 20° (세계 최초) · 지주구간(배리어 길이의 20%) - 충돌속도 130km/h, 충돌각도 20° (세계 최초) - 대형차 · 전 구간 - 14ton 트럭, 충돌속도 85km/h, 충돌각도 15° (국내 SB5-B, 270kJ)	50	100	▪ 실물 충돌시험을 통하여 성능 검증 완료
▪ 다음의 충돌조건을 만족하는 장경간 반강성 배리어 제품 개발 - 소형차(900kg 혹은 1300kg) · 기본구간(배리어 길이의 80%) - 충돌속도 160km/h, 충돌각도 20° (세계 최초) · 지주구간(배리어 길이의 20%) - 충돌속도 130km/h, 충돌각도 20° (세계 최초) - 대형차 · 전 구간 - 13ton 버스, 충돌속도 70km/h, 충돌각도 20° (유럽 H2, 287.5kJ)	50	100	▪ 실물 충돌시험을 통하여 성능 검증 완료
합계	100	100	

3. 향후 연구방향

- 약한 지주 형식은 경간 전체가 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족할 수 있기 때문에 경간의 89 % 정도가 160 km/h의 소형차 충돌속도를 만족하는 강한 지주 형식 보다 더 좋은 탑승자의 안전을 제공할 가능성이 있음. 또한 소요 케이블 긴장력이 강한 지주 형식보다 작기 때문에 Anchor system을 감소시킬 가능성이 있음. 약한 지주 형식에 대한 추가적인 연구와 실물충돌 시험을 통한 성능평가가 필요함
- 기존 도로변 구조물(절토옹벽, 노측용 강성배리어, 방음벽기초 등)을 이용한 cable anchor system 개발
- 반강성 케이블 배리어의 특성을 이용하여 낮은 등급(SB2, SB4 등)의 반강성 케이블 배리어 개발

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 성과점검기준표

- 목표 성과를 모두 달성하였음.

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성 치	측정방 법	검증 방법	기준 치	
주관, 공동, 위탁	1	270kJ 대형차 충격도와 소 형차 충돌속 도 160km/h 를 만족하는 반강성 배리 어	1-1	270kJ 대형차 충 격도와 소형차 충 돌 속 도 160km/h를 만족 하는 반강성 배 리어	① 기본구간(소형 차) - 충돌속 도 160km/h, 충돌각도 20°	충 돌 속 도 160km/h, 충 돌 각 도 20°	100	실물충돌 시험 합격기준	성능 시험	30	특허: 출원 2건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 2건 SW: 1건
					② 지주구간(소형 차) - 충돌속 도 130km/h, 충돌각도 20°	충 돌 속 도 130km/h, 충 돌 각 도 20°	100	실물충돌 시험 합격기준	성능 시험	30	
					③ 위험구간(대형 차) - 충돌속 도 85km/h, 충돌각도 15°	충 돌 속 도 85km/h, 충 돌 각 도 15°	100	실물충돌 시험 합격기준	성능 시험	40	
주관, 공동, 위탁	2	287.5kJ 대형 차 충격도와 소형차 충돌 속 도 160km/h를 만족하는 반 강성 배리어	2-1	287.5kJ 대형차 충격도와 소형차 충 돌 속 도 160km/h를 만족 하는 반강성 배 리어	① 기본구간(소형 차) - 충돌속 도 160km/h, 충돌각도 20°	충 돌 속 도 160km/h, 충 돌 각 도 20°	100	실물충돌 시험 합격기준	성능 시험	30	특허: 출원 1건 등록 2건 논문: 1건 시제품: 2건 SW: 1건
					② 지주구간(소형 차) - 충돌속 도 130km/h, 충돌각도 20°	충 돌 속 도 130km/h, 충 돌 각 도 20°	100	실물충돌 시험 합격기준	성능 시험	30	
					③ 위험구간(대형 차) - 충돌속 도 70km/h, 충돌각도 20°	충 돌 속 도 70km/h, 충 돌 각 도 20°	100	실물충돌 시험 합격기준	성능 시험	40	
계							100			100	특허: 출원 3건 등록 2건 논문: 2건 시제품: 4건 SW: 1건

○ 양적 성과 달성 현황

- 성과 목표 이외에 인력양성(박사)와 국제 학술발표를 추가 달성하였음. 또한 추가적으로 SCI 2건 게재, 국내·외 학술발표 2건을 계획중에 있음.

성과지표	성과 목표	성과 목표 달성 현황	비고
SCI(E)급 학술지게재	1 건	1 건	심사중
일반학술지게재	1 건	1 건	
특허출원	3 건	5 건	
특허등록	2 건	2 건	1건 등록중
시제품	4 건	4 건	
인력양성(박사)		1 건	8월 졸업 예정
국제 학술발표		1 건	
소계(점수)	11 건	16 건	

2. 관련 분야 기여도

○ 학술적 측면

- 개발된 장경간 반강성 배리어의 소형차 충돌속도는 160km/h로 미국, 유럽, 일본 등 선진국의 배리어 성능평가를 위한 소형차 충돌속도 보다 약 45~60% 상향된 것임
 - 미국(MASH) : 소형차 충돌속도 100km/h, 최대 충격도 209.3kJ
 - 유럽(EN 1317) : 소형차 충돌속도 110km/h, 최대 충격도 126.6kJ
 - 국내(도로안전시설 설치 및 관리지침) : 소형차 충돌속도 120km/h, 최대 충격도 270kJ
- 소형차 충돌속도 160 km/h를 만족하는 배리어 개발과 성능평가는 세계최초로 이루어졌으며 본 연구를 통하여 도출된 결과는 향후 진행될 도로 안전시설 연구의 선진화에 기여할 것으로 기대됨

○ 기술적 측면

- 제한속도 110km/h인 고속도로에 적용가능 제품은 현재 스마트하이웨이 제품 이외에 전무한 실정임. 스마트하이웨이 제품에 비하여 충돌속도를 33% 증가시킴에도 불구하고 경제성은 우수하기 때문에 국내시장에서 우위를 확보할 수 있음
- 세계 최초로 충돌속도 160km/h를 만족하는 고성능 도로안전시설을 개발하였기 때문에 충분한 국제 경쟁력을 가지고 해외시장에 진출할 수 있을 것임
- 현재 시장성
 - 지침의 시행계획에 따라 현 최고속도 110km/h인 고속도로 11개 구간 약 1,387km(경찰청고시, 2013년)를 교체시 약2,744억원의 시장규모가 발생될 것으로 예측됨
 - ※ 산출방법 : 1,387km × 약 2.0억원 = 약 2,774억원
- 미래 시장성
 - 최고속도 110km/h인 고속도로는 2002년 기준 4개 구간 약 518km에서 2013년 기준 11개 구간 약 1,387km로 약 2.7배 증가됨. 증가되는 추세로 볼 때 2030년에는 3,000km까지 증가될 것으로 판단됨. 따라서 2030년까지 6,000억원으로 시장규모 확대가 예측됨
 - ※ 산출방법 : 3,000km × 약2.0억원 = 6,000억원

구 분	현재의 시장규모(2016년)	예상 시장규모(2030년)
국내 시장규모	약 2,774 억원	약 6,000 억원
세계 시장규모	유럽(CEN 19개국) : 130,378 억원 미국 : 169,214 억원	유럽(CEN 19개국) : 282,000 억원 미국 : 366,000 억원
산출 근거	※ 최고속도 110km/h인 고속도로 지정 고시(경찰청, 2013)	

※ 최고속도 110km/h인 고속도로 지정 고시(경찰청, 2002)
 ※ 세계시장 : 공식적인 시장규모는 파악하기가 어려움.
 OECD 국가의 도로연장과 국내 도로연장을 비교하여 산출
 · 국내 도로연장 : 105,931 km
 · 미국 : 6,562,512 km, 유럽(CEN 19개국) : 5,017,438 km

○ 경제적·산업적 측면

- 도로설계속도 100km/h에서 160km/h로 상향시 사고충돌속도 포함율 34% 증가
 - 사망 : 5.8명/100km 감소, 부상 : 77.9명/100km 감소

· 2017년 차량단독사고 - 사망 : 840명, 부상 : 11,331명
 · 노측용 배리어 관련사고 = 차량단독사고의 15% - 사망 : 126명, 부상 : 1,700명
 · 도로연장 : 18,543km (국도=13,843km, 고속도로=4,700km)
 · 사고충돌속도 포함율 60%인 경우 - 사망 : 6.8명/100km, 부상 : 91.7명/100km
 · 사고충돌속도 포함율 94%인 경우 - 사망 : 1.0명/100km, 부상 : 13.8명/100km
 * 2017년 도로교통공단 교통사고 자료 통계(TAAS)

- 인적/물적/사회적 피해 비용 : 31.8억원 절감 / 100km - 년 기대효과

· 사망자 1명당 약 4.3억원, 부상자 1명당 약 0.08억원
 · 사망 : 5.8명(24.94억원)/100km , 부상 : 77.9명(6.23억원)/100km
 * '도로교통 사고비용의 추계와 평가(도로교통공단, 2017)'

- 기존 개발된 SB5-B 배리어에 비하여 충돌속도를 33% 증가시킴에도 불구하고 경제성은 우수
 - 도로안전시설 설치 및 관리 지침에 의하면 방호울타리 최소 설치길이는 100m이고 일반적인 설치구간은 2~3km임. 따라서 200m에 대하여 SB5-B보다 경제성이 우수하다고 판정되기 때문에 설치길이 가 길수록 제안기술의 설치단가는 보다 절감될 것으로 예상됨

(180m 설치 시)

구분	제안기술	기존기술(SB5-B)
레일	9,316,757 원	46,656,000 원
지주	393,000 원 (2개)	13,363,200 원 (73개)
블럭아웃	219,240 원 (4개)	12,395,520 원 (219개)
케이블	9,396,000 원	-
단부지주와 Anchor system	46,000,000원	-
합계	65,324,997 원	72,141,720 원

- 노측용 배리어에 대한 기술력 증가는 교통안전의 증진에 지속적인 투자가 이루어지는 선진국에 수출 가능성을 높일 것이며, 경제발전 속도에 발맞추어 도로안전시설의 수요가 증가하고 있는 서남과 동남 아시아와 같은 해외 시장에서 경쟁력 확보가 기대됨

○ 사회적 측면

- 세계최고수준의 반강성 배리어 대비 최소 33%~60%의 소형차 충돌속도를 증진시킨 장경간 반강성 배리어는 차량 단독사고에 대한 인명피해 최소화 그리고 안전시설 선진화에 기여할 것으로 기대됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 기술수요처

- 본 연구를 통해 개발된 장경간 반강성 케이블 배리어 국토교통부, 지자체, 공공기관, 관련업체 등에서 활용될 수 있음.

○ 현장적용 방안(계획)

- 국내·외 기존 반강성 배리어에 비하여 우수한 장점(소형차 충돌속도 관점 성능이 최대 60% 증가, 유사한 경제성 확보)을 가지고 국내·외 시장에 진출할 계획.
 - ‘도로안전시설 설치 및 관리 지침’의 시행계획에 따라 현 최고속도 110km/h인 고속도로 11개 구간 약 1,387km(경찰청고시, 2013년)에 상위등급 반강성 배리어 설치가 필요함
 - 제한속도 110km/h 이상의 공용중 도로와 신설 도로(서울~세종 고속도로 등) 설치 기대
 - 도로환경이 국내와 유사한 유럽 등과 같은 국외 시장에 진출 가능성이 있음

○ 실용화·제품화 방안

- 제한속도 110km/h인 고속도로에 ‘도로안전시설 설치 및 관리지침(국토교통부, 2014)’에 따라 2015년부터 소형차 충돌속도 120km/h 이상을 적용한 실물충돌시험을 통하여 성능이 검증된 제품을 사용하여야 함. 현재 소형차 충돌속도 120km/h를 만족하는 배리어는 SMART Highway Project를 통하여 개발된 1개의 SB5-B등급 배리어 외에 개발된 사례가 없음.
 - 기존 개발된 SB5-B 배리어에 비하여 충돌속도를 33% 증가시킴에도 불구하고 경제성은 유사하거나 보다 좋을 것으로 예상되므로 제한속도 110km/h 이상의 공용중 도로와 신설도로에 수요가 많을 것으로 기대.
 - 참여기업과의 기술이전을 통하여 적극적인 사업화를 추진할 계획.
-

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

□ 공주대학교(주관연구기관)

○ 연구실 안전점검

- 일상점검: 매 실험 전 또는 매일 연구활동종사자가 체크리스트 또는 모바일 기기를 활용하여 점검하고 기록
- 정기점검 (짜수해)
 - 매 1년마다 일정자격과 장비를 갖춘 전문가들이 점검하는 것으로 전문 점검기관에 위탁하여 실시
 - 정밀안전진단을 실시한 경우는 정기점검을 실시한 것으로 인정
- 정밀안전진단 (홀수해)
 - 시약 또는 실험 장비를 사용하여 실험을 하는 실은 매 2년 일정자격을 갖춘 전문가들이 점검하는 것으로 전문 점검기관에 위탁하여 실시
- 점검 후 조치
 - 정기 또는 정밀점검 완료후 각 실별 등급사항 및 지적사항에 대하여 학교홈페이지 등에 공지
 - 점검 지적사항 중 간단한 보수 또는 구매는 연구실 안전관리비 내에서 보완 및 개선하도록 하고, 단과대에서 처리가 어려운 사항은 시설과로 요청하여 보완

□ 동아에스텍(공동연구기관)

- 연구활동 종사자 교육·훈련

- 정기교육 : 모든 연구활동 종사자는 반기 3시간 이상(년 6시간)을 받아야 하며 온라인 및 오프라인 교육으로 시행
- 행정사항 : 교육 시 교육내용 및 참석인원을 반드시 기록 관리

- 연구실 안전점검 실시

- 일상점검: 매 실험 전 연구활동 종사자가 체크리스트 활용하여 점검하고 기록

- 사고발생 대리 보험가입

- 연구활동종사자에 대한 상해보험 가입
- 보험 가입 시 보상액 등이 반드시 법적금액 이상을 반영(보험금액: 사망-7천만원, 상해-5천만원)

□ 디에스글로벌이씨엠(위탁연구기관)

- 연구활동 종사자 교육·훈련

- 정기교육 : 모든 연구활동 종사자는 반기 3시간 이상(년 6시간)을 받아야 하며 온라인 및 오프라인 교육으로 시행
- 행정사항 : 교육 시 교육내용 및 참석인원을 반드시 기록 관리

- 연구실 안전점검

- 일상점검: 매 실험 전 연구활동 종사자가 체크리스트 활용하여 점검하고 기록

- 사고발생 대리 보험가입

- 연구활동종사자에 대한 상해보험 가입
 - 보험 가입 시 보상액 등이 반드시 법적금액 이상을 반영(보험금액: 사망-7천만원, 상해-5천만원)
-

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

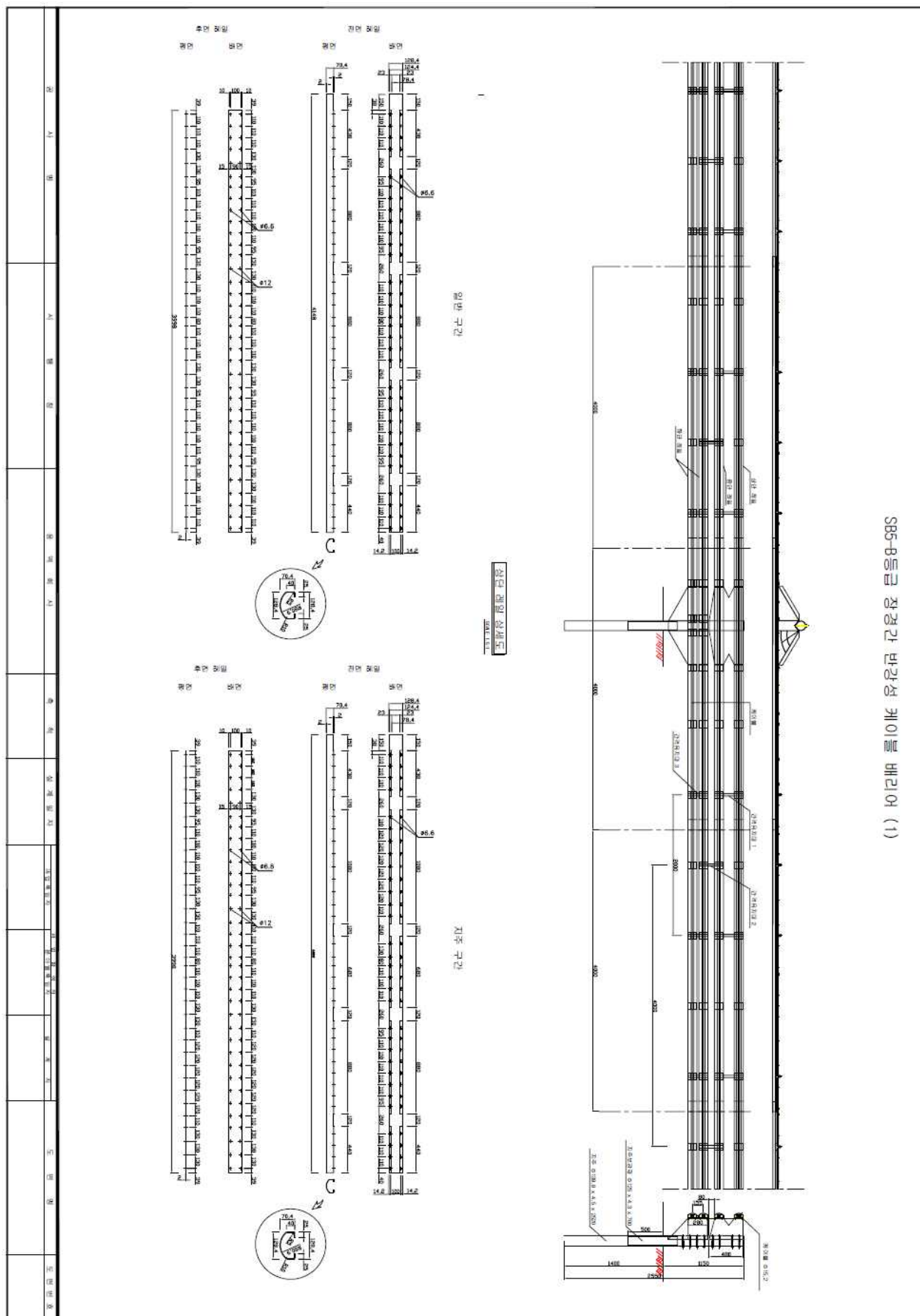
번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	130 km/h의 소형차 충돌속도와 272 kJ의 고 충돌에너지를 만족시키는 반강성 방호울타리의 개발	공주대 학교	주저 자	한국방재 학 회 논문집		2017.07.30	단독	비SCI
2	논문	Long-Span Semi-Rigid Cable Barriers Designed for High Impact Severity Satisfying the Small Car Impact Speed of 160 km/h	공주대 학교	주저 자	International Journal of Crashworthi ness		심사중	단독	비SCI
3	특허	연결 너트 보강형 턴버클 및 이를 이용한 긴장력 도입 방법	공주대 학교	발명 자	대한민국		2018.02.27	단독	
4	특허	급속시공 파일 캡을 이용한 고정단부	공주대 학교	발명 자	대한민국		등록중	단독	
5	학술 발표	Numerical Study on Static Behavior of Guardrail Supporting Piles Subjected to Horizontal Load	공주대 학교	주저 자	International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE 2018)		2018.06.11	단독	국제 학술발표

○ International Journal of Crashworthiness 2017.04.07. 투고, 현재 논문 심사중

○ 급속시공 파일 캡을 이용한 고정단부 2018.07.02. 등록결정, 현재 등록중

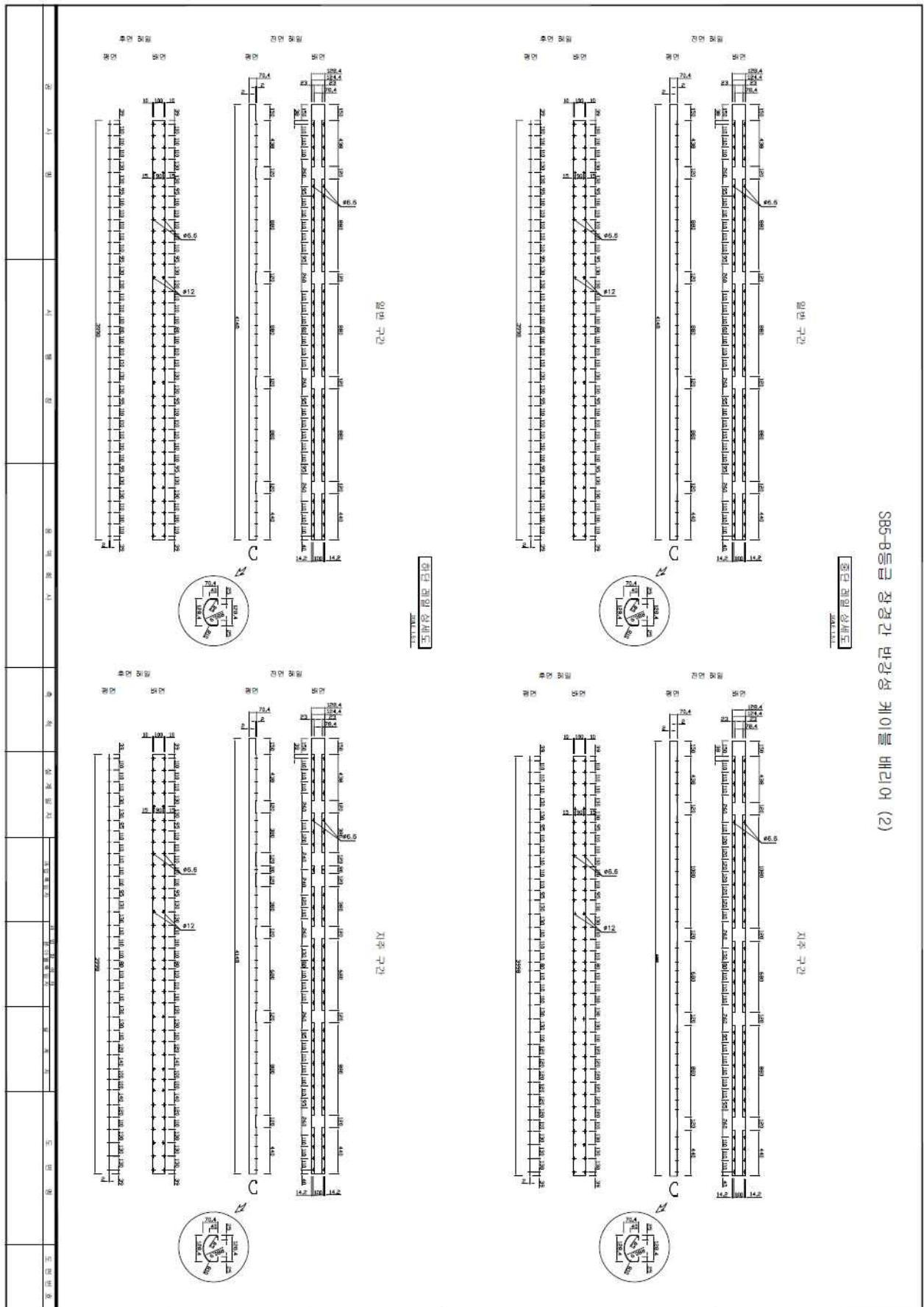
제11장. 기타 사항

□ SB5-B등급 장경간 반강성 케이블 배리어 도면(1/3)

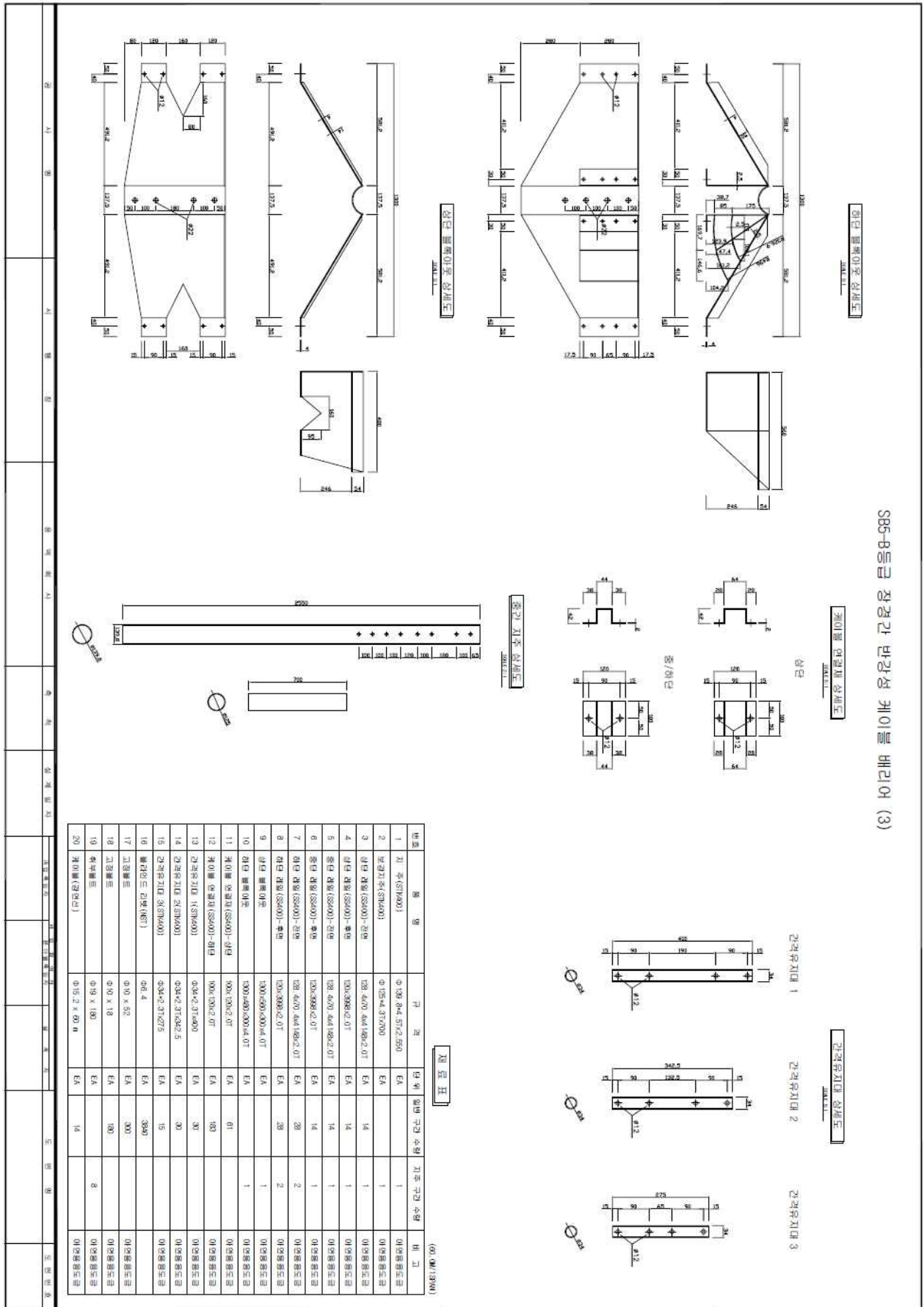


□ SB5-B등급 장경간 반강성 케이블 배리어 도면(2/3)

SB5-B등급 장경간 반강성 케이블 배리어 (2)

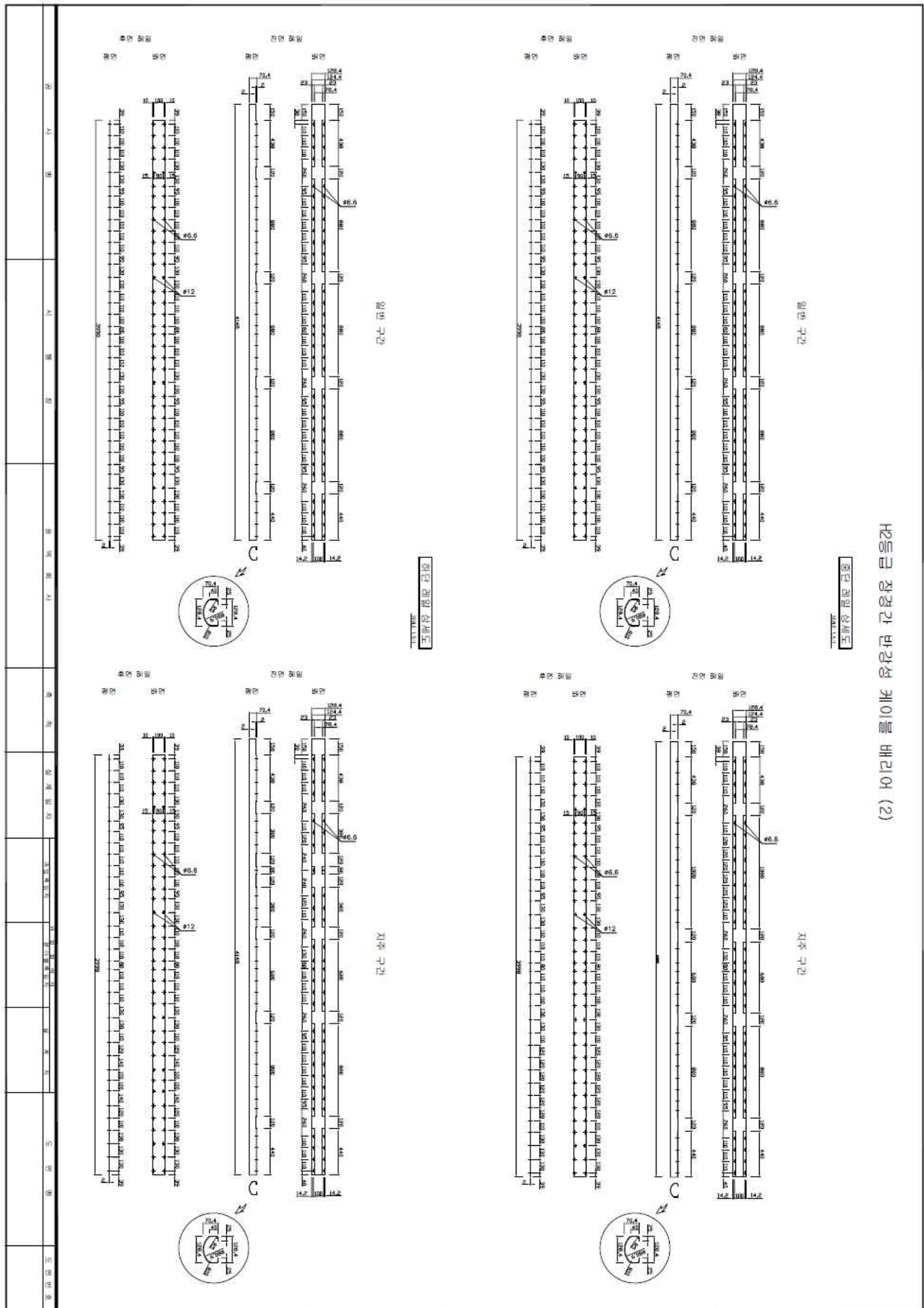


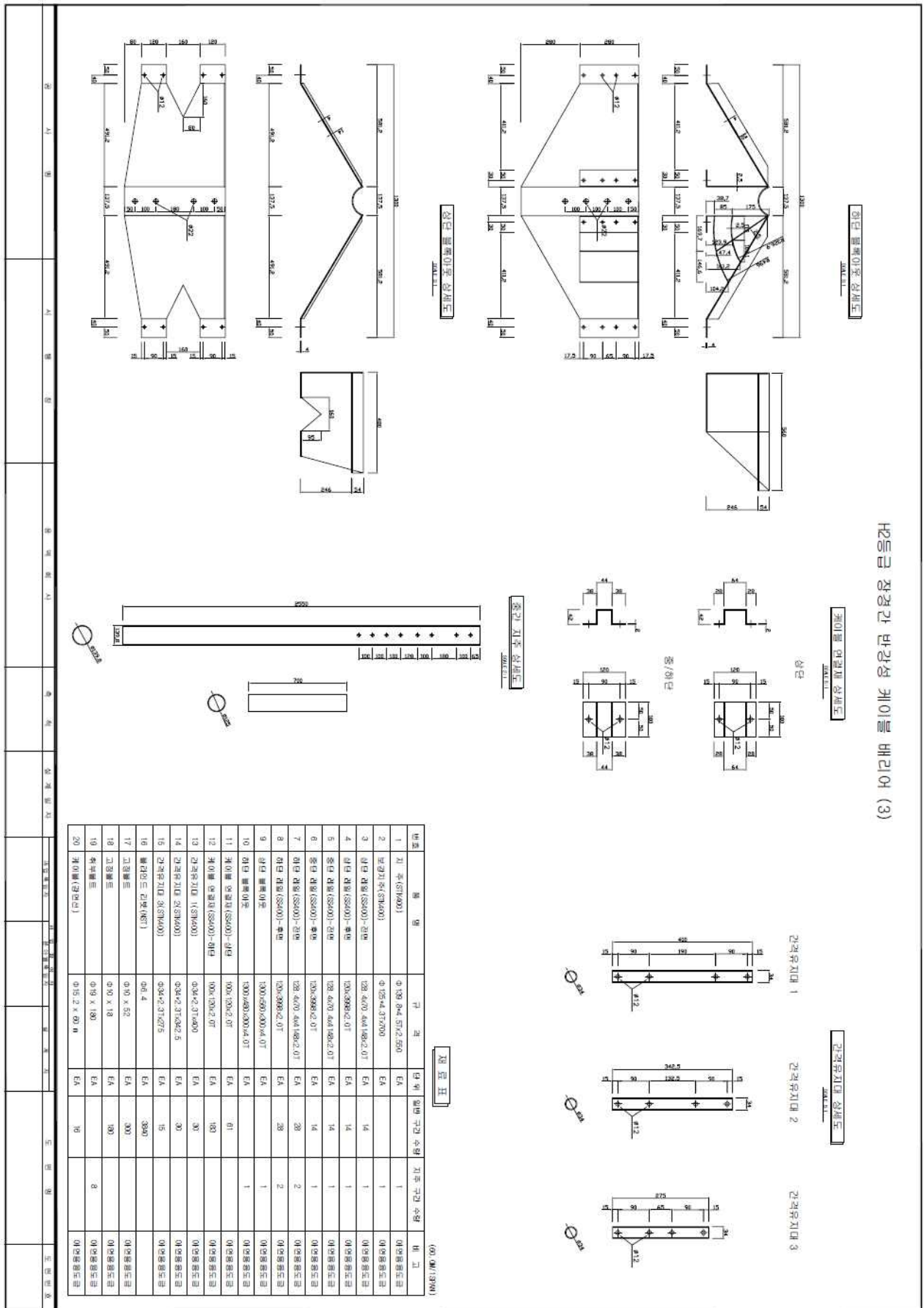
□ SB5-B등급 장경간 반강성 케이블 배리어 도면(3/3)



보행길 장경간 반강성 케이블 배리어 (1)

□ H2등급 장경간 반강성 케이블 배리어 도면(2/3)





제12장. 참고 문헌

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, Roadside design guide. 4th ed, AASHTO, Washington DC, 2011.
2. N. M. Villwock, N. Blond, and A. P. Tarko, Cable Barriers and Traffic Safety on Rural Interstates, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137, No. 4, April 1 (2011).
3. M. H. Ray, C. Silvestri, C. E. Conron, and M. Mongiardini, Experience with Cable Median Barriers in the United States: Design Standards, Policies, and Performance, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 135, No. 10, October 1 (2009).
4. M. Borovinsek, M. Vesenjsek, M. Ulbin, and Z. Ren, Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers, *Journal of Engineering Failure Analysis*, Vol. 14 (2010), pp. 1711-1718.
5. A. O. Atahan, A. Ö. Yücel., and M. M. Erdem, Crash testing and evaluation of a new generation L1 containment level guardrail, *Journal of Engineering Failure Analysis*, Vol. 38 (2014), pp. 25-37.
6. M. E. Bronstad, L. R. Calcote, and C. E. Kimball, Concrete Median Barrier Research Volume I Executive Summary, FHWA-RD-77-3, Southwest Research Institute, 1976.
7. W. L. Beason, H. E. Ross Jr, H. S. Perera, and M. Marek, Single-Slope Concrete Median Barrier, *Transportation Research Record* 1302, TRB, National Research Council, 1991.
8. O. F. Cansiz and A. O. Atahan, Crash test simulation of a modified three-beam high containment level guardrail under NCHRP Report 350 TL 4-12 conditions, *International journal of heavy vehicle systems*, Vol. 13, NO. 1/2 (2006), pp. 2-18.
9. G. Bonin, G. Cantisani, A. Ranzo, G. Loprencipe, and A. O. Atahan, Retrofit of an existing Italian bridge rail for H4a containment level using simulation. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, Vol. 16, No. 1/2 (2009), pp. 258-270.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Guide for the installation and maintenance of roadside safety features - Vehicle protection systems, Korea, 2014.
12. American Association of State Highway and Transportation Officials, Manual for assessing safety hardware, Washington DC, 2016.
12. Committee for European Norms (CEN), Road restraint systems Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets (EN 1317-2), European Committee for Standardization, Brussels, 2010.
13. K. Kim, M. Ko, D. Kim, J. Joo, and D. Jang, Strategy to increase the speed of a small car impact to a semi-rigid barrier designed for high impact severity. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 21, Issue 4 (2016), pp. 310-322.
14. K. Han, M. Ko, and K. Kim, Development of a Semi-rigid Barrier Satisfying a Small Car Impact Speed of 130 km/h and a High Impact Severity of 272 kJ, *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 4 (2017), pp.29-39.
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Development of Road Safety Technologies for SMART Highway, Construction & Transportation R&D Report, Seoul, 2013.
16. B. Winkelbauer, Cable Guardrail with Strong J-bolts. Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 2014.
17. J. Medina and R. Benekohal, High Tension Cable Median Barrier: A Scanning Tour Report, 2006.
18. S. A. Cooner, Y. K. Rathod, D. C. Alberson, R. P. Bligh, S.E. Ranft and D. Sun, Performance evaluation of cable median barrier systems in Texas(No. FHWA/TX-09/0-5609-1), Report FHWA/TX-09/0-5609-1, Texas A&M Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, 2009.

-
19. D. J. Segal, Highway-vehicle-object Simulation Model-1976, Reports FHWA-RD-75-162-15, Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1976.
 20. K. D. Schrum, K. A. Lechtenberg, R. W. Bielenberg, S. K. Rosenbaugh, R. K. Faller, J. D. Reid, and D. L. Sicking, Safety performance evaluation of the non-blocked midwest guardrail system (MGS) (No. TRP-03-262-12), 2013
 21. C. E. Hampton, and H. C. Gabler, Crash performance of strong-post W-beam guardrail with missing blockouts. *International journal of crashworthiness*, Vol. 17, No. 1 (2012), pp. 93-103.
 22. J. Reid, R. Bielenberg, R. Faller, and K. Lechtenberg, Midwest guardrail system without blockouts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2013), 2377: 1-13.
 23. D. Sicking, J. Reid, and J. Rohde, Development of the midwest guardrail system. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2002), 1797: 44-52.
 24. R. P. Bligh, and W. L. Menges, Testing and Evaluation of Modified Steel Post W-Beam Guardrail with Recycled Polyethylene Blockouts. 1997.
 25. A. O. Atahan, A. O. Yücel, and M. M. Erdem, Crash testing and evaluation of a new generation L1 containment level guardrail, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 38 (2014), pp. 25-37.
 26. J. D. Reid, B. D. Kuipers, D. L. Sicking, and R. K. Faller, Impact performance of W-beam guardrail installed at various flare rates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 3 (2009), pp. 476-485.
 27. M. Ray, K. Engstrand, C. Plaxico, and R. McGinnis, Improvements to the weak-post W-beam guardrail. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2001), 1743: 88-96.
 28. M. Hassan, C. Rogers, J. Edgington, M. Damberger, C. Morison, B. Ngo, and R. McGregor, . Construction of High Tension Median Median Cable Barrier on Alberta Highway 2: A Case Study of Cost-Effective Innovation. 2011 CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA. TRANSPORTATION SUCCESSES: LET'S BUILD ON THEM. 2011 Congress et Exhibition de l'Association des Transports du Canada. Les Succes en Transports: Une Tremplin vers l'AvenirTransportation Association of Canada. 2011.
 29. R. Albin, D. Bullard Jr, and W. Menges, Washington State cable median barrier, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1743 (2001), pp. 71-79.
 30. R. Olson and E. R. Post. Tentative service requirements for bridge rail systems, NCHRP Report 86, Highway Research Board, 1970.
 31. H. Pircher. User Guide for RM2004 and GP2004, TDV Ges. mbH, Austria, 2004.
 32. J. Strasky. Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges. Thomas Telford, 2005.
 33. T. Hirsch, Longitudinal barriers for buses and trucks state of the art, Report FHWA-TX-86-32C416-2F, Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, TX, 1985.
 34. J. Hallquist. LS-DYNA keyword user' s manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
 35. S. Cooner, Y. Rathod, D. Sun, S. Ranft, Cable Barrier Maintenance Manual, Texas A&M Transportation Institute, 2008.
 36. K. Han, N. Lim, M. Ko, and k. Kim, Efficient assumption of design variables for stress ribbon footbridges. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 1 (2016), pp. 250-260.
-

-
37. National Crash Analysis Center. Finite element model archive, The National Crash Analysis Center, The George Washington University, Loudoun, VA, 2007.
 38. Q. Wang, H. Fang, N. Li, D. C. Weggel, and G. Wen, An efficient FE model of slender members for crash analysis of cable barriers, *Engineering Structures*, Vol. 52 (2013), pp. 240-256.
 39. L. B. Fricke, Traffic accident reconstruction, Traffic Institute Report, Northwestern University, 1990.
 40. H. Bosch and J. Pagenkopf. Dynamic Properties of Stay Cables on the Penobscot Narrows Bridge, No. FHWA-HRT-14-067, 2014.
 41. W. Wu, and R. Thomson, A study of the interaction between a guardrail post and soil during quasi-static and dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 5 (2007), pp. 883-898.
-