

# 열차 충돌하중에 대한 콘크리트 일탈방호시설물(DCP)의 해석적 거동 검토

이나현\*, 김지환, 강윤석  
한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부

## Analytical Behavior of Concrete Derailment Containment Provision(DCP) according to Train Impact Loading

Na-Hyun Yi\*, Ji-Hwan Kim, Yun-Suk Kang

Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

**요약** 전 세계적으로 철도의 노후화 및 고속화 등으로 인한 열차탈선사고가 증가하고 있으며, 그로인한 인적·물적 피해가 증가하고 있는 실정이다. 특히 철도교량의 경우에는 가드레일 또는 방호벽 등을 설치하고 있으나, 이는 탈선열차차량(train body level)이 방호벽과 충돌함으로써 열차의 탈선운동을 억제하여 정지시키는데 목적이 있다. 이와 같은 차량에 의한 탈선방호는 인명피해 위험성 및 2차 피해발생 가능성이 높다. 그러므로 본 연구에서는 주행레일 사이에 일탈방호시설물(DCP, Derailment Containment Provision)을 설치하여, 차륜 또는 차축(wheel/bogie level)에서 탈선열차를 방호할 수 있는 시설물을 개발하였다. 또한, 기존 철도교량의 일탈방호성능을 확보할 수 있도록 DCP의 급속시공이 가능하도록 설계하였으며, 방호벽에 작용하는 충돌하중과 급곡선부에서의 관성력을 감소시킴으로써 일탈된 열차가 교량 밖으로의 전도·낙하방지 및 반대편 선로의 침입하는 것을 최소화 하고자 하였다. 본 논문에서는 LS-Dyna를 이용하여, 설계한 DCP의 열차 충돌위치 및 콘크리트 궤도 접합조건에 따른 거동에 대하여 해석적으로 변수연구를 수행하였다. 특히 접합조건은 접합재료의 물성치에 따라 끊어짐을 모사하는 Tiebreak contact과 완전 부착되었다고 가정하는 Perfect bond contact으로 나눠 해석적으로 검토하였다. DCP의 변위, 앵커 및 콘크리트의 응력, 변형률을 확인한 결과 Tiebreak contact이 실제 충돌하중에 대한 거동을 보다 유사하게 모사하는 것으로 판단하였다. 또한, 충돌위치에 따른 변위는 접합구간에서 가장 큰 변형이 발생하였으며, DCP 블록의 중앙에 충돌이 가해질 경우, 충돌하중이 가해지는 DCP 배면에서 휨 파괴가 발생하였다. 본 연구에서 수행한 충돌해석은 실제 충돌 실험의 어려움에 의해 사전적으로 해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 DCP 앵커 설계변경은 필요할 것으로 판단된다.

**Abstract** In recent years, numerous train derailment accidents caused by deterioration and high speed technology of railways have increased. Guardrails or barriers of railway bridges are installed to restrain and prevent the derailment of the train body level. On the other hand, it can result in a high casualties and secondary damage. Therefore, a Derailment Containment Provision (DCP) within the track at the wheel/bogie level was developed. DCP is designed for rapid installation because it reduces the impact load on the barrier and inertia force on the steep curve to minimize turnover, fall, and trespass on the other side track of the bridge. In this paper, DCP was analyzed using LS-Dyna with a parameter study as the impact loading location and interface contact condition. The contact conditions were analyzed using the Tiebreak contact simulating breakage of material properties and Perfect bond contact assuming fully attached. As a result, the Tiebreak contact behaved similarly with the actual behavior. In addition, the maximum displacement and flexural failure was generated on the interface and DCP center, respectively. The impact analysis was carried out in advance to confirm the DCP design due to the difficulties of performing the actual impact test, and it could change the DCP anchor design as the analysis results.

**Keywords** : Train Impact Loading, Concrete Derailment Containment Provision, LS-Dyna, Parameter Study, DCP anchor design

본 논문은 국토교통부의 철도기술연구사업(18RTRP-B122288-03)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

\*Corresponding Author : Na-Hyun Yi(Korea Railroad Research Institute.)

Tel: +82-31-460-5462 email: nahyunyi@krti.re.kr

Received August 29, 2018

Revised (1st September 20, 2018, 2nd October 5, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

## 1. 서론

전 세계 철도사고 자료에 의하면, 2010년부터 2018년 상반기까지 발생된 열차 탈선에 의한 사고는 총 232건으로, 2010년에 비해 2015년에는 탈선사고가 70% 증가하였다[1]. 특히 2018년 오스트리아에서 통근열차가 탈선하여 28여명이 부상당하였으며, 2017년 인도 북부에서는 24명 사망, 200여명이 부상당한 대규모 열차 탈선 사고가 있었으며, 2017년 미국 시애틀에서는 탈선에 의해 열차가 고속도로로 추락하며 6명 사망, 77명이 부상당하였다. 국내의 경우에는 2016년 울촌역 무궁화호 열차탈선사고로 인해 1명 사망, 8명 부상이 발생하는 등, 국내외적으로 인명 및 재산 피해가 지속적으로 발생하고 있는 실정이다. 이는 전 세계적으로 철도 인프라 및 차량의 노후화 발생과 더불어 속도 경쟁에 따른 철도 고속화가 이뤄짐에 따라, 열차 탈선사고가 증가하고 있는 추세이다[2-3]. 또한, 국내 탈선사고는 2011년부터 2016년까지 연평균 4.7건씩 지속적으로 사고가 발생하고 있어, 철도탈선사고 및 철도사고에 대한 사회적 불안감이 높아지고 있는 실정이다[4-7].

특히, 실제 열차 차량의 탈선 자체로의 사고에 비해, 탈선 후 열차가 일탈하면서 인근 구조물과의 충돌 및 철도차량의 추락·전도, 반대편 주행선로 침범에 의한 차량간 충돌 등에 의한 사고피해가 크기 때문에, 다른 사고에 비해 열차 탈선사고는 대형 재난사고로 발전할 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다[8-9]. 이와 같이 열차 탈선에 의한 사고가 발생되지 않도록, 원천적으로 탈선이 발생되지 않도록 예방하는 것이 가장 이상적이거나, 실제 완벽하게 예방하는 것은 어렵다고 판단된다. 그러므로, 본 연구에서는 인적 및 자연재해 등에 의한 예기치 못한 열차 탈선사고에 대비하고 피해를 최소화하기 위한 물리적 방호개념을 도입하였다[2-3,10-11].

특히, 철도교량의 경우에는 철도안전법 제 25조 철도시설의 기술기준에 근거하여 가드레일 또는 방호벽 등을 설치하여, 탈선열차에 의한 2차 피해를 최소화 하고 있으나, 이는 Fig.1(a)에서 보는 것과 같이 탈선열차차량(trail body level)이 궤도 외부에 설치된 방호벽과 충돌하여 열차차량의 탈선운동을 억제하여 정지시키는데 목적이 있다[2-3,10-13]. 그러나, 차량에 의한 탈선방호는 방호되는 과정에서 인명 및 재산피해 발생 가능성이 높아지므로, 본 연구에서는 탈선열차를 궤도영역 내로 위

치시켜 열차차량의 일탈에 의한 2차 피해를 방지할 수 있도록 차륜 또는 차축(wheel/bogie level)높이에서 탈선열차를 방호할 수 있는 시설물을 개발하였다.

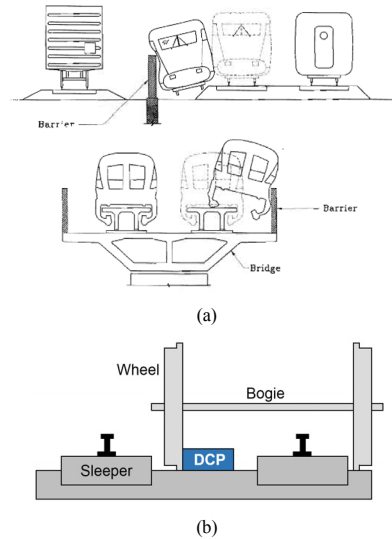


Fig. 1. Railway derailment protection (a)Barrier wall on protecting trail body level[13] (b)Developed DCP on protecting bogie level

홍콩의 West Kowloon with Tuen Mun에서는 선로 주변에 폭 400, 높이 770~980mm의 Derailment Upstand Wall을 설치하고 있으며, 독일 DB(Deutsche Bahn)은 선로에 가드레일을 적용하고 있고, 미국의 경우에도 방호벽으로 탈선을 방지하고 있다. 그러나, 이는 앞서 언급한 것과 같이, 탈선열차차량의 탈선운동을 억제함으로써, 2차 피해의 가능성이 높다. 일본 JR규수는 강재를 궤도 영역 내에 설치하여 일탈방호 성능을 높이고 있으나, 이는 km당 108억원의 설치비용이 들며, 네덜란드의 경우에는 벨기에를 잇는 고속철도라인 HSL-Zuid에 궤도 내에 Concrete plinth를 설치하여 탈선방지를 하고자 하였으나, 이는 Rheda track과 접목하여 설계하여 시공하였다[13,14]. 즉, 이는 기존 콘크리트 궤도가 부설된 곳에는 적용하지 못하는 단점이 있다. 그러므로, 본 연구에서는 Fig.1(b)에서 보는 것과 같이, 주행레일 사이에 일탈방호시설물(DCP, Derailment Containment Provision)의 개념을 개발하여, 기존 철도교량에 급속설치 가능하도록 하며, 국내의 철도차량 및 시공성, 지리적 조건 등에 맞게 설계하여 탈선 및 일탈에 의한 철도사고 발생

가능성을 줄이고, 기존 철도교량의 일탈방호 성능을 확보하고자 하였다.

본 연구에서는 개발된 DCP의 충돌저항성능을 검토하기 위하여, explicit해석이 가능한 LS-Dyna 유한요소해석프로그램을 이용하여 DCP를 설치하는 프리캐스트 콘크리트 궤도를 모델링 하여, 열차 충돌 위치 및 Contact조건에 따른 거동을 해석적으로 분석하였다.

## 2. 해석 개요

본 연구에서 설계한 DCP의 충돌저항성능을 해석적으로 검토하기 위하여, 호남고속철도 2공구 교량 직선구간에 적용된 Rheda 2000 7m구간의 콘크리트궤도를 검토하였다.

### 2.1 유한요소해석 모델 구축

DCP는 철근콘크리트 프리캐스트로 제작되며, 콘크리트 궤도와는 체결을 위해 DCP는 도상콘크리트층(TCL, Track Concrete Layer)의 앵커볼트로 체결하도록 설계하였다. Fig. 2와 같이 본 연구에서 개발된 DCP, hump와 래티스거더를 포함한 침목, TCL, Camplate, 보호콘크리트층(PCL, Protecting Concrete Layer)을 모델링하였으며, DCP-TCL 접촉면과 프리캐스트로 제작된 DCP-DCP간의 연결부를 각각 모델링 하였다.

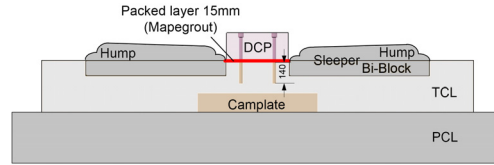


Fig. 2. Modelling outline

#### 2.1.1 시설물 제원

본 연구에서 적용된 철도교량 열차 일탈방호 시설은 Fig. 3에서 보는 것과 같이, Rheda 2000콘크리트 궤도의 교량구간 TCL 7m를 해석대상으로 선정하여 모델을 구성하였다. 개발된 DCP에는 셋트앵커 SS41, M24 250mm길이를 사용하였으며, 주철근은 H16을 120, 140mm간격으로, 전단철근은 H22를 125mm간격으로 배근하였다. Fig. 3에서 보는 것과 같이, DCP-DCP 연결부는 크게 두 가지 종류로 나뉘는데, TCL 연속부에서의 DCP-DCP 연결부의 경우에는 30mm의 두께로 연결재와 함께 마페그라우트로 접합된다. TCL 분리부에서는 DCP의 연성적 거동을 위하여, DCP-DCP 연결부에서는 100mm의 탄성폴리머로 접합하였다.

#### 2.1.2 유한요소해석 모델링 및 재료모델 구축

본 연구에서 사용되는 유한요소모델은 콘크리트 궤도 교량구간을 바탕으로 Fig. 4와 같이, 침목(Bi-block, hump),

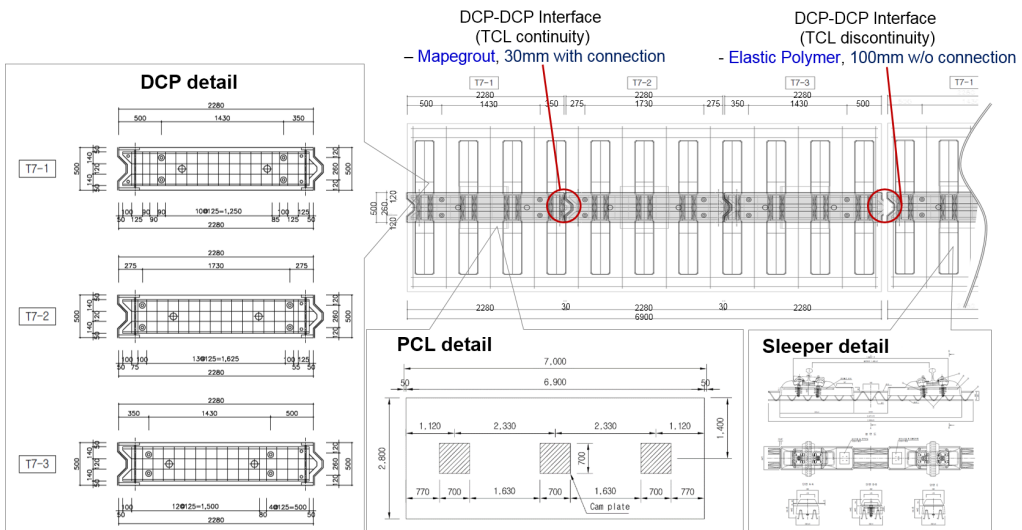


Fig. 3. Details of DCP on concrete track

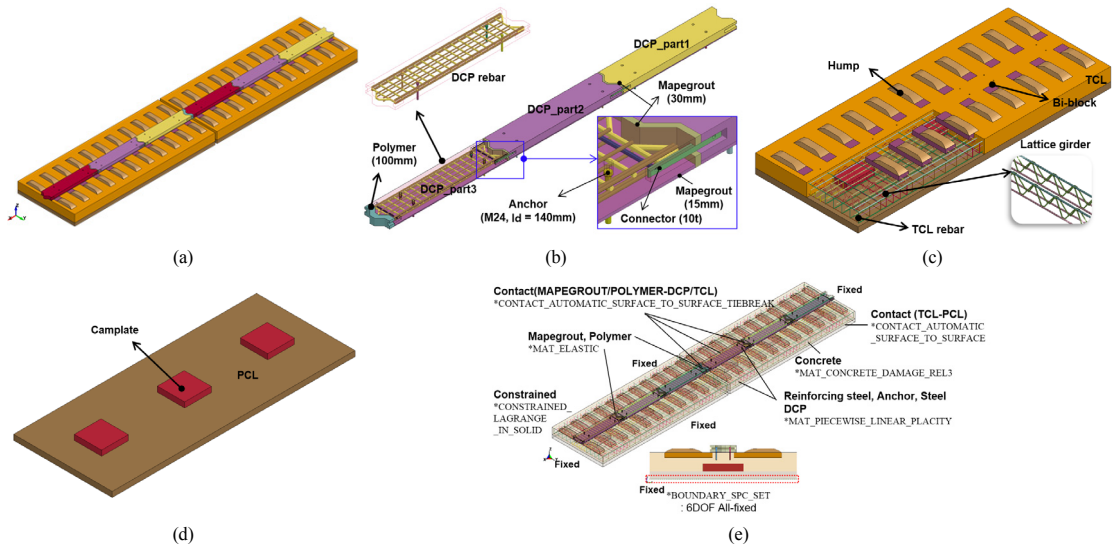


Fig. 4. Analysis modeling DCP on concrete track (a)Total (b)DCP (c)TCL (d)PCL (e)Material model and boundary condition

TCL, PCL, DCP, 앵커볼트, 연결재는 솔리드 요소로 모델을 구성하였으며, 철근 및 래티스 거더는 빔 요소로 유한요소모델을 구성하였다. 본 연구에서 사용된 콘크리트 재료모델은 \*MAT\_CONCRETE\_DAMAGE\_REL3을 사용하였으며, 충돌하중에 의한 거동을 보수적으로 판단하기 위하여 변형률 속도에 의한 DIF는 고려하지 않았다.

또한 접합재료로 사용된 마페그라우트와 탄성폴리머는 탄성 구간에 대한 재료적 특성을 고려하기 위하여 \*MAT\_ELASTIC을 사용하였다. 또한 철근과 래티스거더, 앵커는 \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY를 사용하였으며, 소성영역을 계산하기 위하여, 진응력 및 진변형률을 사용하였다. 해석에 사용된 재료 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties

	DCP	Sleeper	TCL,PCL	Mapegrout	Elastic polymer
$f_k$ (MPa)	35	50	30	40	15
E(GPa)	30	33	29	30	20
Pr	0.167	0.167	0.167	0.25	0.4
	Rebar	Lattice girder	Anchor		
Type	SD400	SWM-P	SS400		
$f_y$ (MPa)	400	365	215		
$f_t$ (MPa)	644	621	492		
Elongation	0.140	0.140	0.207		

### 2.1.3 Contact 및 구속조건

충격하중 하에서 구조물 간의 contact조건을 적용하기 위하여, TCL, camplate, PCL, 앵커, DCP구조물에 \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE를 사용하여 상호간의 접촉조건을 적용하였다. 또한, DCP와 TCL층과 DCP-DCP(TCL연속부)를 연결하는 마페그라우트와 DCP-DCP(TCL분리부)를 접합하는 탄성폴리머와의 거동을 확인하기 위하여, \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK를 적용하여, fail조건에 따라 거동하도록 설정하였다. 또한 Contact조건을 비교검토하기 위하여, \*CONTACT\_TIED\_NODES\_TO\_SURFACE를 이용하여 완전부착으로 각 부품간의 자유도를 구속하였다. 콘크리트 궤도 PCL 하부구간의 자유도가 변위 및 회전에 대해 모두 구속할 수 있도록 구속조건을 적용하였다.

### 2.1.4 하중조건

기존 철도교량에 대한 철도차량 일탈하중을 방호하기 위한 충격 하중조건은 기존 연구에 의해 Fig. 5와 같이 가해진다고 가정하였다[7,10]. Fig. 5(a)와 같이 실제 DCP에 가해지는 충돌하중을 moving average method를 이용하여 평균화 및 충돌하중계수를 곱하여 Fig. 5(b)와 같이 181kN을 설계하중으로 설정하였다. 본 연구에서

적용한 철도차량의 충돌하중은 반지름 480mm의 KTX 차륜에 의해 충돌되는 것으로 가정하였으며, 실제 철도차량의 일탈을 시뮬레이션 해 본 결과 DCP와 차륜이 1° 이내로 접촉되는 것으로 확인하였다. 이는 Fig. 6과 같이 차륜은 DCP에 면으로 충돌하중이 가해지는 것으로 판단할 수 있으며, DCP에 가해지는 충돌하중 면적은 55,408mm<sup>2</sup>으로 가정하였다.

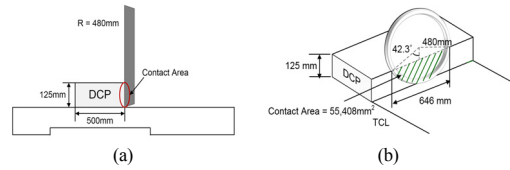


Fig. 6. DCP-wheel impact area (a)Side view (b)3D view

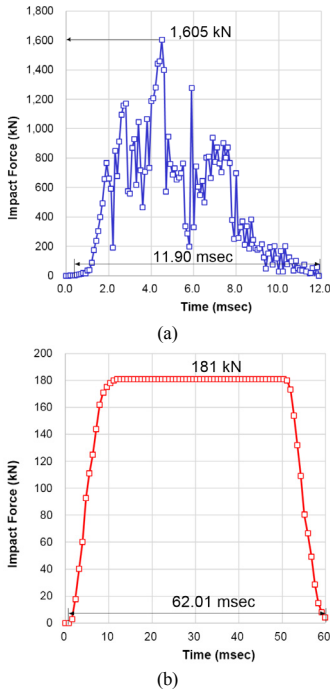


Fig. 5. Impact loading-time curve (a)Real applied loading (b)Design loading

Table 2. Analysis parameter condition

No.	Contact Condition		Impact loading point
	Tiebreak	Perfect bond	
1	DTC-A2-C	DTC-A2-P	T7-2 left anchor(275)
2	DTC-IC-C	DTC-IC-P	DCP-DCP Interface (TCL continuous part)
3	DTC-A3-C	DTC-A3-P	T7-3 left anchor(350)
4	DTC-DC-C	DTC-DC-P	DCP center part
5	DTD-A5-C	DTD-A5-P	T7-1 left anchor(500)
6	DTD-IC-C	DTD-IC-P	DCP-DCP Interface (TCL dis-continuous part)

## 2.2 충돌해석변수

본 연구에서는 프리캐스트로 제작된 철근 콘크리트 DCP의 거동을 검토하기 위하여, 열차 일탈충돌하중의 위치와 마페그라우트와 탄성폴리머의 Contact조건에 따라 변수해석을 수행하였다. Fig. 7에서 보는 것과 같이, 본 연구에서 해석 대상으로 하는 7m의 TCL층에서는 서로 다른 길이의 3개 DCP를 앵커와 마페그라우트, 탄성폴리머로 연결되어 있으므로, TCL 연속부에서의 앵커 및 마페그라우트 접합부, TCL 분리부의 앵커 및 탄성폴리머 접합부, 7m DCP의 중앙지점에 대해서 변수해석을 수행하였으며, Contact 조건에 따라 각 변수별로 추가해석을 수행하였다. 접합조건 및 충돌하중 위치에 따른 변수해석별 명칭은 Table 2와 같다.

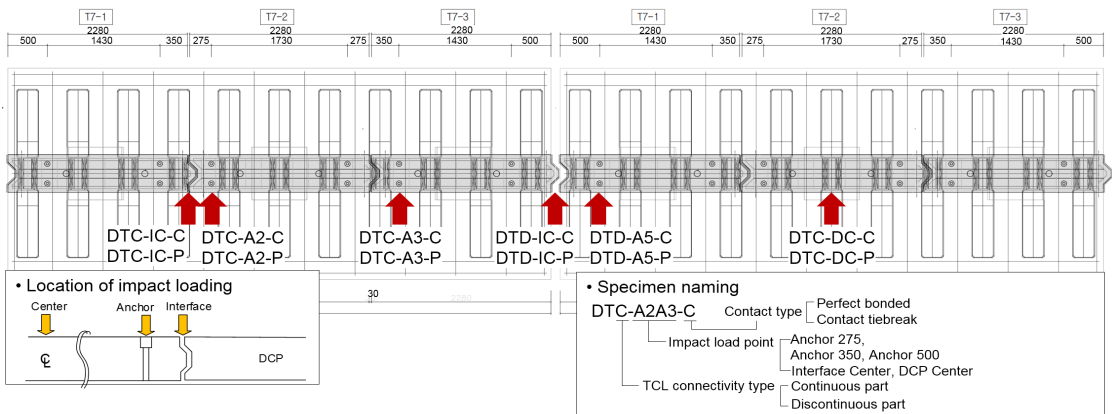


Fig. 7. Analysis parameter and location of impact loading

### 2.3 앵커볼트의 체결력 검토

본 연구에서는 앵커볼트에 의해 2.816kN의 체결력으로 DCP가 TCL에 고정하도록 설계하였으므로, \*INITIAL\_STRESS\_SECTION을 이용하여 동적 이완 해석기법으로 체결력이 반영된 상태에서의 DCP 충돌해석을 수행하고자 하였다. 또한 본 해석에서는 충돌 이후 앵커의 인장력은 풀리지 않는다고 가정하여 해석을 수행하였다.

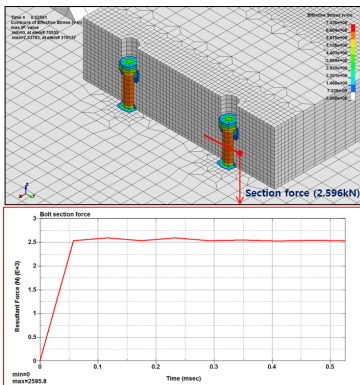


Fig. 8. Dynamic relaxation analysis of anchor

Fig. 8과 같이, 2.596kN의 하중이 앵커의 내력으로 작용하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 사용한 모델링의 단면적 차이에 의해 8.52% 낮은 앵커 체결력이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 동적이완 해석을 통해 발생한 앵커의 체결력을 반영하여, 앵커와 앵커 주위 부재에서 발생하는 응력 및 변형 데이터를 충돌해석의 초기 값으로 적용하여 해석을 진행하였다.

## 3. 콘크리트 DCP 충돌해석 결과

본 연구에서 개발한 차량일탈방호 성능을 해석적으로 검토하기 위하여, 충돌 위치 및 DCP접합부의 Contact 조건에 따라 해석을 수행하였으며, DCP의 변위, 앵커의 응력변화, 콘크리트의 소성변화를 검토하였다.

### 3.1 충돌위치에 따른 DCP의 변위

각 충돌하중 위치에 대한 DCP 배면에서의 변위-시간 이력곡선은 Fig. 9와 같다. Tiebreak contact을 사용한 경우에는 Perfect bond contact에 비하여 처짐이 3.28~

6.51배 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 최대 처짐이 발생한 DCP는 Tiebreak contact의 DTD-IC-C으로 TCL불연속 구간의 탄성폴리머 접합구간에서 가장 큰 변위인 2.17mm가 발생한 것으로 확인하였다. 한편 Perfect bond의 경우에는 DTD-IC-P가 가장 낮은 변위가 발생하여, 실제 충돌하중에 대한 DCP의 거동을 파악하기 위하여서는 Tiebreak contact을 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

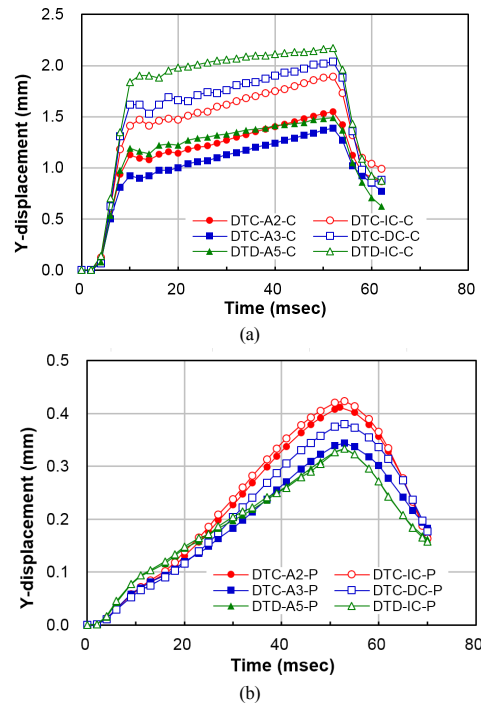


Fig. 9. DCP displacement-time history (a)Tiebreak contact (b)Perfect bond contact

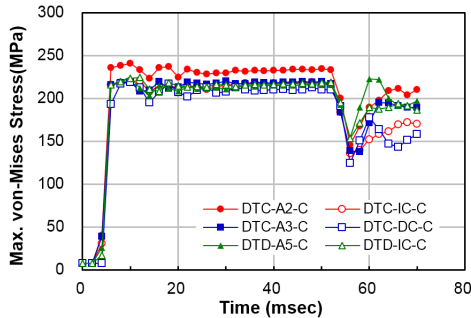
### 3.2 앵커 및 콘크리트의 응력변화

DCP는 각 블록마다 4개의 앵커로 TCL과 연결되어 있으며, 충돌하중 위치에 따른 앵커의 응력변화를 Fig. 10과 같이 contact 조건별로 비교하였다. Fig.10(a)와 같이, 마페그라우트와 탄성폴리머 접합부가 Tiebreak contact으로 접합된 경우에는 충돌위치에 상관없이, 항복응력 215MPa이상의 von-Mises응력을 나타내고 있으며, 이를 통해 앵커에 충돌하중이 가해질 경우 앵커가 항복하는 것을 확인할 수 있다. 특히, DTC-A2-C의 경우에는 최대 241MPa의 앵커응력이 발생한 것을 확인하였다.

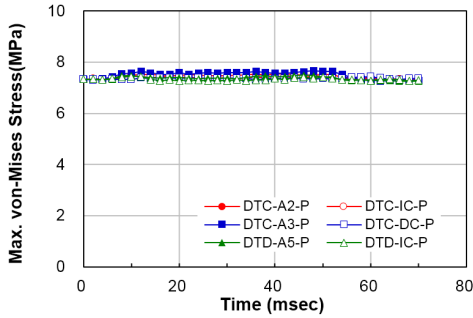
반면, Fig.10(b) Perfect bond contact의 경우에는 최

대앵커응력이 7.66MPa으로 Tiebreak contact조건외 최대앵커응력에 비해 96.8%가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 Perfect bond contact조건외의 경우, 접합부의 완전부착조건으로 인해 앵커에 전달되는 하중이 분산된 것으로 판단된다.

앵커에 의한 TCL 콘크리트에 가해지는 응력 및 소성 변형률을 검토하기 위해, Tiebreak contact의 DTC-A2-C 해석을 Fig. 11과 같이 검토하였다. 앵커 주위의 TCL 콘크리트에 국부적인 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있었으며, 소성 변형률을 통해 TCL 콘크리트에 전단파괴가 발생 가능한 것을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 10. DCP maximum von-Mises stress curve (a)Tiebreak contact (b)Perfect bond contact

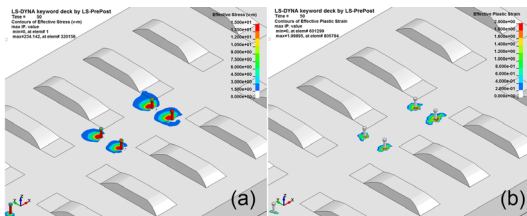


Fig. 11. TCL concrete contour on Anchor(DTC-A2-C) (a)von-Mises Stress (b)Effective plastic strain

PCL camplate와 DCP-TCL을 접합하고 있는 마페그 라우트 및 탄성폴리머의 접합면에서의 최대응력을 각 해석변수별로 Table 3과 같이 검토하였다. PCL camplate에 가해지는 응력은 Tiebreak contact과 Perfect bond contact 변수해석 간에 큰 차이가 발생하지는 않았으며, 이를 통해 DCP와 접합구간, TCL에서 일정부분의 충돌 에너지가 흡수되는 것으로 판단된다. 그러나, Perfect bond contact의 경우에는 충돌하중 위치에 따른 해석별로 최소 7.9%의 응력차이가 발생하였으나, Tiebreak contact의 경우에는 해석별로 최소 18.6%의 응력차이가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이를 검토하기 위하여, Fig. 12와 같이, Tiebreak contact에서 큰 응력을 보이는 DTC-A3-C와 작은 응력을 보인 DTD-IC-C의 응력 분포를 확인하였다. 그 결과, DTD-IC-C는 DTC-A3-C에 비하여, 충돌하중이 탄성폴리머에 가해진 이후에 PCL camplate에 골고루 하중이 분산되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 실제 PCL camplate의 측면부위에 부착되는 완충재가 없다고 가정하였으므로, 충돌하중에 대해 PCL camplate를 충분히 보호할 수 있는 완충재 선정 및 사용이 필요하다고 판단된다.

Table 3. Max. von-Mises stress of PCL camplate and interface

No.	Specimen	Max. Stress (MPa)			
		PCL camplate		Interface	
		Tiebreak (-C)	Perfect bond(-P)	Tiebreak (-C)	Perfect bond(-P)
1	DTC-A2	9.41	8.44	56.6	11.8
2	DTC-IC	9.86	8.85	60.3	11.9
3	DTC-A3	10.0	6.72	51.3	11.8
4	DTC-DC	9.34	7.69	36.4	11.2
5	DTD-A5	9.77	7.42	62.7	10.8
6	DTD-IC	7.60	7.30	80.2	11.4

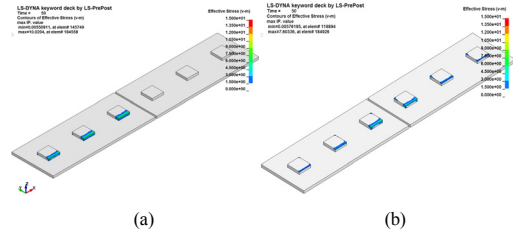


Fig. 12. PCL camplate von-Mises stress contour(50ms) (a)DTC-A3-C (b)DTD-IC-C

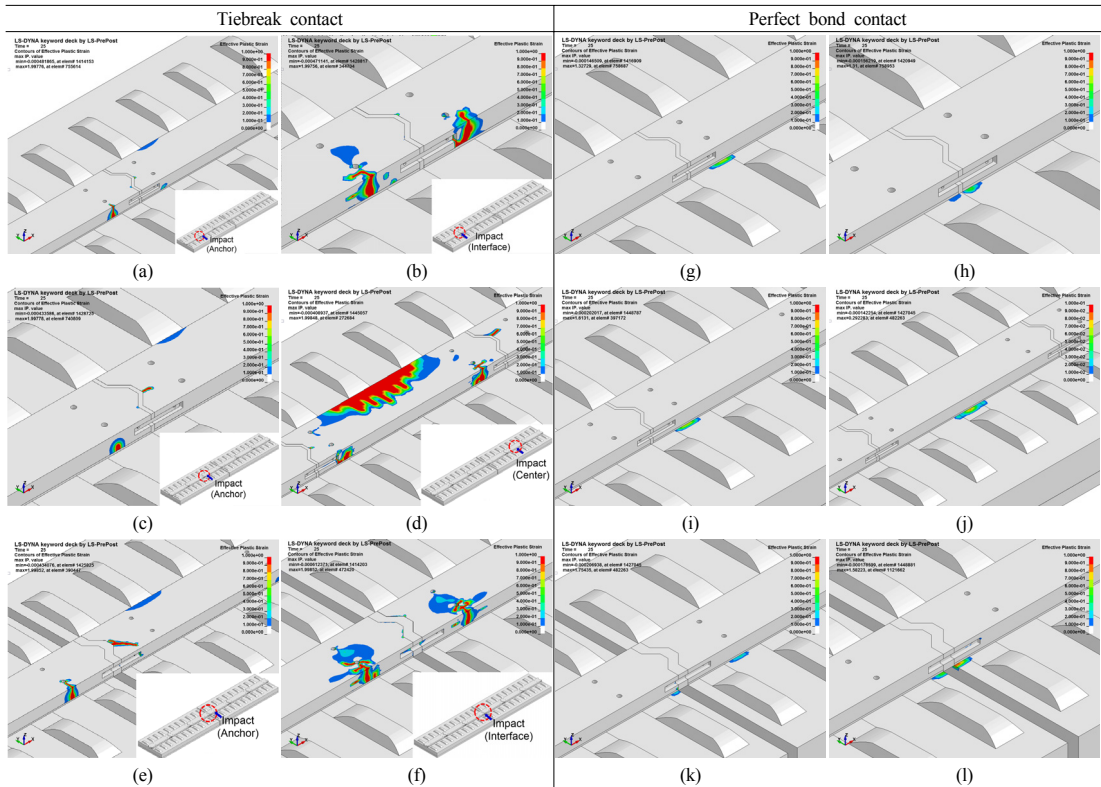


Fig. 13. Contour of concrete effective plastic strain(25ms) (a)DTC-A2-C (b)DTC-IC-C (c)DTC-A3-C (d)DTC-DC-C (e)DTD-A5-C (f)DTD-IC-C (g)DTC-A2-P (h)DTC-IC-P (i)DTC-A3-P (j)DTC-DC-P (k)DTD-A5-P (l)DTD-IC-P

Table 3에서 보는 것과 같이, 접합면에서의 최대응력은 Tiebreak contact의 경우에는 평균 57.9MPa이며 이는 마페그라우트 및 탄성폴리머의 압축강도의 1.45~3.86배로 접합면에서 파괴될 가능성이 높다고 판단된다. 반면 Perfect bond contact에 의한 접합면의 경우에는 평균 11.48MPa의 응력이 발생하여, 완전부착에 의해 접합면의 거동을 보수적으로 검토된 것으로 확인할 수 있다.

### 3.3 콘크리트의 소성변형

DCP에 가해지는 충돌하중의 위치 및 contact조건에 따른 콘크리트의 유효소성변형을 검토하면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 이는 각 충돌하중의 위치에서 최대 변형률을 나타내는 25msec일때의 소성변형을 나타내고 있다. 전반적으로 Tiebreak contact인 경우, Perfect bond contact에 비해 변형이 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며, Perfect bond contact의 경우에는 DCP와 TCL사이의 접합면 쪽에서 집중적으로 변형이 생기는 것을 확인할

수 있다. 반면, Tiebreak contact으로 접합된 해석 중에서 앵커에 충돌이 가해진 Fig. 13(a), (c), (e)의 경우에는 충돌하중이 가해진 앵커보다 좌측블럭의 충돌하중면의 앵커의 콘크리트가 변형되면서 파괴되는 것을 확인할 수 있다. 이는 충돌하중을 받는 앵커위치에서의 콘크리트에서는 압축하중을 받고, 좌측블럭의 앵커에서는 충돌하중에 의한 고정면지역할을 하게 되면서 인장하중에 의한 DCP 콘크리트 파괴가 나타나는 것을 확인 하였다. 한편 접합면에 충돌하중이 가해진 Tiebreak contact 해석인 Fig.13(b), (f)는 앵커 앞면의 콘크리트에서 집중하중이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, DCP 블록의 중앙에 충돌이 가해진 Fig. 13(d) DTC-DC-C의 경우에는 충돌하중이 가해진 콘크리트의 배면에서 휨 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 콘크리트의 소성변형을 통해, Tiebreak contact이 보다 실제 파괴 현상과 유사하게 모사 가능할 것이라고 판단된다.



#### 4. 결론

본 연구에서는 열차의 탈선에 의한 일탈을 방지하기 위한 일탈방호시설물(DCP, Derailment Containment Provision)을 개발하여, 기존 철도교량에 개발된 DCP를 적용하여 일탈방호 성능을 확보가능한지 해석적으로 검토하였다. 충돌해석모델은 2개의 TCL층으로 제한하였으며, 이때의 각 DCP는 마페그라우트 및 탄성폴리머로 접합하여 총 6개의 DCP 블록으로 해석을 수행하였다. 충돌해석변수는 충돌하중의 위치 및 접합면의 contact조건을 접합재료 물성치에 따라 끊어짐을 모사하는 Tiebreak contact과 완전부착 되었다고 가정하는 Perfect bond contact으로 나눠 검토하였으며, 전반적으로 DCP 변위, 앵커 및 콘크리트의 응력, 변형률을 확인한 결과 Tiebreak contact이 실제 충돌하중에 대한 거동을 보다 유사하게 거동할 것이라고 판단된다. 그러나, Tiebreak contact의 경우, 앵커에 의한 파괴가 발생하며, TCL 콘크리트 전단파괴가 발생 가능한 것을 확인할 수 있으므로, DCP 연결 앵커에 대한 재설계 및 검토가 필요하다고 판단된다.

또한, 충돌위치에 따라, Tiebreak contact으로 접합된 DCP의 변위는 TCL 불연속 구간에서 탄성폴리머로 접합된 구간인 DTD-IC-C에서 제일 큰 변위가 발생하였으며, Perfect bond contact의 경우에는 마페그라우트로 이루어진 DCP 앵커 주변의 접합부인 DTC-IC-P에서 가장 큰 변위가 발생하였다. 콘크리트의 소성변형을 통해 앵커에 충돌하중이 가해질 경우에는 인접한 앵커가 고정힌지의 역할을 하게 되면서 인장하중을 받아 콘크리트 파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 DCP블록의 중앙에 충돌이 가해질 경우, 콘크리트 배면에서 휨 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 일탈방호시설물 DCP는 기존 철도교량에 설치됨에 따라, 탈선에 의한 충돌하중이 가해질 경우, 기존 케도시스템인 TCL, PCL에 영향을 최소화하도록 DCP설계가 이뤄져야 한다. 본 연구에서 수행한 충돌해석은 실제 충돌실험의 어려움으로 인해 사전적으로 해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 DCP의 앵커 설계변경은 필요할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] List of rail accidents (2010-present), Available From: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_rail\\_accidents\\_\(2010%E2%80%93present\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_rail_accidents_(2010%E2%80%93present))
- [2] L. Guo, K. Wang, J. Lin, B. Zhang, Z. Chen, X. Song, G. Du, "Study of the Post-derailment Safety Measures on Low-speed Derailment Tests", *Vehicle System Dynamics*, Vol.54, No.7, pp.943-962, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/00423114.2016.1175646>
- [3] H. U. Bea, J. H. Moon, J. J. Kim, N. H. Lim, "Concept of Derailment Containment Provisions for Minimizing Expansion of Damage by Train Derailment", *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, Vol.27, No.2, pp.42-46, April, 2015.
- [4] J. H. Lim, Y. J. Choi, K. Y. Lee, Y. I. Jang, N. H. Lim, J. S. Kong, "A Study on Cause Analysis of Derailment Accident Using Failure Tree Analysis", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.18, No.2, pp.19-26, 2018.
- [5] Railroad Accident & Safety Performance Report, Korea Transportation Safety Authority, 2016.
- [6] Status & Statistical Analysis of Railway Accidents in 2016, Korea Transportation Safety Authority, 2016.
- [7] H. U. Bae, "Advanced Design Concept of Derailment Containment Provisions using Collision Simulation after Train Derailment", pp.1-205, A Dissertation for the Degree for Doctor of Philosophy, Chungnam National University, 2015.
- [8] L. Ling, M. Dhanasekar, D. P. Thambiratnam, Y. Q. Sun, "Lateral Impact Derailment Mechanisms, Simulation and Analysis", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.94, pp.36-49, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.04.001>
- [9] N. H. Yi, J. H. Kim, Y. S. Kang, H. T. Yoon, "Analysis on the Impact Simulation of Railway Derailment Containment Provision(DCP) according to Material Shape", *2018 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, KSR2018S049, May, 2018.
- [10] Optimization of Derailment Protection System and Establishment of Installation Standard, Final Report, pp.6-236, Korea Rail Network Authority, 2014.
- [11] Y. S. Kang, Y. J. Lim, J. J. Kim, H. T. Yoon, N. H. Yi, J. H. Kim, "Conceptual Design and Technical Specifications of Derailment Containment Provisions", *The Magazine of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.65, No.8, pp.24-31, 2017.
- [12] Railway Safety Act, Ministry of Land, Infrastructures and Transport, Railway Safety Policy Division, 2015.
- [13] P. D. Moyer, R. W. James, C. H. Bechara, K. L. Chamberlain, Safety of High Speed Guided Ground Transportation Systems, pp.2.2-2.13, US Department of Transportation Federal Railroad Administration Office of Research and Development, Washington DC, 1994.
- [14] H. U. Bae, B. J. Park, H. S. Back, N. H. Lim, "Consideration on the Concept of DCP by Foreign Case Study", *2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, KSR2014A382, pp.1155-1159, Oct. 2014.

**이 나 현(Na-Hyun Yi)**

[정회원]



- 2013년 2월 : 연세대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2013년 8월 ~ 2015년 5월 : 싱가포르 NTU Post-Doc.
- 2015년 8월 ~ 2015년 10월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2015년 10월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

콘크리트 구조 및 재료, 철도인프라 안전·방재

**김 지 환(Ji-Hwan Kim)**

[정회원]



- 2013년 8월 : 고려대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2014년 2월 ~ 2016년 7월 : 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign Post-Doc.
- 2016년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

콘크리트 구조 및 재료, 철도인프라 안전·방재

**강 윤 석(Yun-Suk Kang)**

[정회원]



- 2006년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 1997년 12월 : 한국고속철도건설공단 4급연구원
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도구조, 인프라 안전·방재