

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.2.355

JCCT 2019-5-44

고무보판 패널 철도건널목 시스템의 고속열차 풍하중에 대한 구조 안정성 분석

Evaluation on Structural Stability of Railway Level Crossing System using Rubber Panel by High Speed Train Gust

최정열*, 김상진**, 신태형**, 정지승*

Jung-Youl Choi*, Sang-Jin Kim**, Tae-Hyoung Shin**, Jee-Seung Chung*

요약 본 연구에서는 고속열차 주행 중 발생하는 풍하중 안정성 검토조건을 준용하여, 열차속도 300km/h와 360km/h에 대한 고속선로용 고무보판 패널 구조의 열차 풍하중에 대한 구조적 안정성을 검토하였다. 이를 위해 고무보판 패널 시스템이 가장 복잡한 구성으로 설치될 수 있는 현장조건을 적용하여 3차원 해석모델링을 이용한 정밀 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 고속열차 풍하중에 대한 고무보판 패널 시스템의 구조적 안정성을 해석적으로 입증하였다.

주요어 : 구조 안정성, 철도건널목 시스템, 고속열차, 풍하중, 유한요소해석

Abstract In this study, the structural stability of the railway level crossing system using rubber panel for high speed lines was investigated by applying the specification for wind load conditions (Train gust) of high speed train (300km/h and 360km/h). A finite element analysis using three-dimensional modeling was carried out by applying the field conditions that was installed with the complicated configuration of the rubber plate panel system. As a result of this study, the structural stability of the rubber plate panel system for high speed train gust was analytically verified.

Key words : Structural stability, Railway level crossing system, High speed, train gust, Finite element analysis

1. 서 론

철도건널목(Railway level crossing system)이란 철도와 도로 및 보행로가 평면교차 하는 곳에 설치하며, 일반적으로 통행자의 안전을 고려하여 입체교차 하는 것이 바람직하나 시공성, 경제성 및 유지보수성을 고려하여 적절한 교통안전시설을 설치하여 운영되어 지고 있다. 종래의 철도건널목의 경우 노후화에 대한 문제점

들로 인해 건널목 개량을 실시하고 있으며, 개량 시 건널목을 통과하는 도로 교통량, 열차 통과횟수, 도로 포장의 특수성 및 포장의 철거와 복구의 용이성 등을 고려하여 부설되어야 한다. 현재 국내에서 부설된 철도건널목의 종류로는 보판식, 포장식, 조립식, 철재보판식 등을 사용하고 있으나 그림 1과 같이 사용성 및 유지관리 측면에서 철도건널목 구성품의 열화손상으로 인한 다양한 사용성 및 유지관리성 측면의 문제점이 발생하

*정회원, 동양대학교 철도건설안전공학과

**정회원, 서울교통공사 궤도1사업소

접수일: 2019년 1월 21일, 수정완료일: 2019년 3월 6일

게재확정일: 2019년 4월 14일

Received: January 21, 2019 / Revised: March 6, 2019

Accepted: April 14, 2019

**Corresponding Author: sss2486@naver.com

Dept. of Track Engineering office 1, Seoul Metro, Korea

고 있다. 보판식의 경우 레일 표면 요철이 발생할 수 있으며, 부설된 목침목의 부식으로 인해 주기적이 보수 또는 교체가 필요하다. 또한 포장식의 경우 궤도틀림에 대한 보수가 곤란하며 충격 및 진동으로 인한 균열이 발생할 수 있다. 조립식과 철재보판식의 경우 비교적 고가이므로 통행량이 적은 건널목에서는 사용성이 불리하다.



그림 1. 철도건널목 부설 전경
Figure 1. Photographs of railway level crossing system

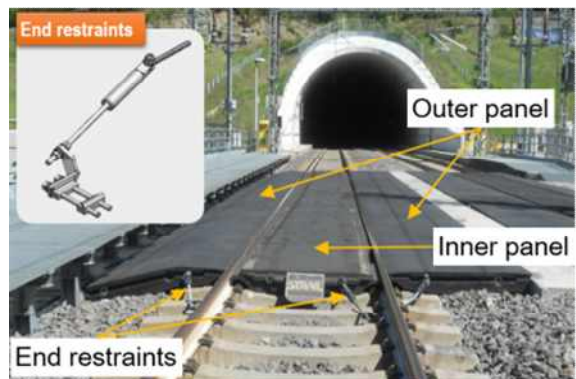
이에 국외에서는 새로운 건널목의 포장으로서 고무재 건널목 및 고무를 피복한 구조의 건널목의 유효성이 입증되어 부설되고 있다. 특히 고속열차 주행 선로에 적용되는 철도건널목의 경우 열차풍에 대한 구조적 안정성 검토가 필요하나 현재까지 관련 연구는 매우 부족한 실정이다[1,2,4-6]. 따라서 본 연구에서는 복잡한 형상을 갖는 고무보판 패널 시스템(Rubber panel level crossing system)을 대상으로 실제 현장 설치 조건을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하여 고속 열차풍에 의한 고무보판 철도건널목의 구조적 안정성을 해석적으로 검토하였다.

II. 고무보판 철도건널목 시스템 개요

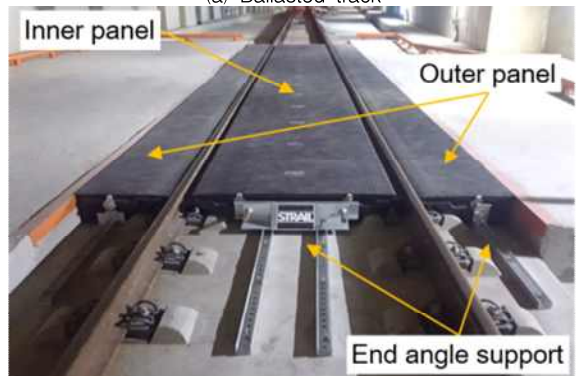
고무보판 패널 시스템은 철도 선로를 횡단하는 건널목 시스템을 구성하기 위한 고무보판 패널의 기본 소재

는 가황고무이며 치수는 표준궤간의 일반적인 궤도재료에 맞게 규격화 되어 있다[7]. 고무보판 패널 시스템으로 구성된 철도 건널목은 보행자부터 중하중용 차량까지 안전하게 횡단할 수 있으며 고무보판의 표면은 미끄럼 방지 처리가 되어 있어 보행자 및 횡단 차량의 안전사고를 사전에 방지할 수 있는 특징이 있다[7]. 고무보판 패널 시스템은 천연고무 및 재생고무로 제작되며, 철도 선로시스템 중 가장 복잡한 궤도시설인 분기기 구간의 경우에도 분기기 시중점부를 포함하여 분기기 전체를 고무보판 패널 시스템으로 덮을 수 있고 거의 대부분의 곡선반경에 적용이 가능하다[7]. 고무보판 패널 간의 조립은 간격재(Filler block)가 필요 없이 Tie rod (타이로드)시스템으로 구성된 체결시스템을 이용하여 현장여건에 맞게 패널을 견고하게 연결할 수 있다[7].

일반철도 자갈궤도용 고무보판 패널 시스템은 그림 2(a)와 같이 크게 내부패널, 외부패널 및 패널 고정장치(End restraints)로 구성되며 기존 자갈궤도의 훼손 또는 변형없이 클램프 형식의 패널 고정장치를 이용하여 레일 저부에 견고히 고정이 가능하다[7].



(a) Ballasted track



(b) Slab track

그림 2. 고무보판 패널 시스템 개요도
Figure 2. Photographs of rubber panel crossing system

고속철도 콘크리트궤도용 고무보판 패널 시스템은 그림 2(b)와 같이 크게 내부패널, 외부패널 및 패널 고정장치(End angle support)로 구성된다[7].

그림 2(b)는 콘크리트궤도에 설치된 고무보판 패널 시스템 전경으로써 기존 콘크리트궤도의 도상콘크리트층 상면에 채널단면의 지지보가 앵커링되어 지지되며 앵글형태의 서포트 지지구조를 통하여 고무보판 패널 시스템의 단부가 견고히 고정된다.

고무보판 패널 시스템의 국내 부설은 최초 2016년 사천역과 수서역을 시작으로 하여 최근 2018년 대구선 하양역 및 능곡역에 부설되어 현재 운영 중에 있다. 국내 다양한 선로에 부설된 고무보판 패널 시스템의 전경은 그림 3과 같다.



그림 3. 건널목 고무 보판 설치 현황
 Figure 3. Installation of rubber panel crossing system

III. 열차풍을 고려한 고무보판 패널의 수치해석

1. 수치해석 개요

본 연구에서는 고속열차 주행 중 발생하는 열차풍에 의한 고무보판 패널 시스템의 구조적 거동특성을 검토하고자 독일공업규격 상세보고서101(DIN Fachbericht 101)에서 제시한 고속선로 열차 풍하중 안정성 검토조건(Train gust)을 준용하여, 열차속도 300km/h에 대한 풍하중 2.5kN/m²과 360km/h에 대한 풍하중 3.75kN/m²를 적용하고, 공기역학적으로 설계된 차량에 의한 풍하중 감소계수(α) 0.6을 적용하여 각각의 속도에 대한 열차풍을 각각 1.5kN/m², 2.25kN/m²로 산정하여 고무보판 상면에 중력 반대방향으로 작용하도록 적용하였다[3,8].

본 연구는 고속열차 주행 중 발생하는 열차풍에 대한 고무보판 패널 시스템의 구조적 안정성(변위 및 응력, 앵커지지부의 반력)을 검토하는데 그 목적이 있다.

고무보판 패널 시스템은 레일 좌우 복부에 설치되며, 양끝단은 소정의 고정장치를 통해 콘크리트도상 또는 레일에 체결된다. 평상시에는 고무보판 패널 시스템의 자중에 의해 놓여 있으며, 열차의 풍하중과 같이 자중 반대 방향으로 하중이 발생하면 패널 시스템의 고정장치 및 레일과 접촉되는 부분에서 패널 시스템의 변위가 제한되며 이에 따라 패널 시스템이 지지되는 위치에서는 응력 및 변위가 발생된다.

본 연구에서는 고무보판 패널 시스템이 가장 복잡한 구성으로 설치될 수 있는 조건을 고려하여 국내 고속철도 건널목 현장조건을 적용한 수치해석을 수행하였다. 해당 개소의 한쪽 선로는 일반 패널 시스템이 적용될 수 있으며 반대쪽 선로의 경우 분기기가 설치되어 있어 복잡한 형상의 고무보판 패널 시스템이 설치될 수 있는 개소이다. 이에 본 연구에서는 패널 단면의 형상 및 배열이 일반구간에 비해 상대적으로 복잡하여 이론적으로 고찰이 어려운 현장을 대상으로 고속열차 주행시 발생하는 풍하중을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행함으로써 열차풍 작용 시 발생하는 고무패널의 응력 및 변위를 검토하여 고무보판 패널 시스템의 구조적 안정성을 검토하였다.

2. 수치모델링

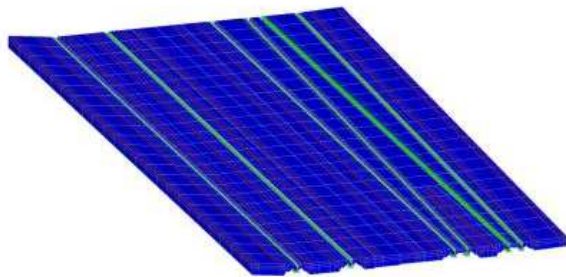
본 연구에서는 열차풍에 의한 고무보판의 구조적 거동특성을 검토하기 위해 경계비선형 해석을 수행하였다[9]. 경계비선형 해석은 구조물에 적용되는 경계조건의 변화를 반영하는 것으로 고무보판에 재하된 풍하중으로 인해 궤도와 고무보판의 접촉부에 발생하는 응력 결과를 확인할 수 있다[9].

고무보판과 레일 사이의 경계조건을 해석에 반영하기 위해 LUSAS Slideline의 No Friction 기능을 사용하였다[2,9]. No Friction 기능은 두 구조물 사이에 접촉이 발생하는 경우에만 응력을 전달하며, 이때 둘 사이의 마찰은 고려하지 않는다[2,9]. 두 구조물 사이의 접촉을 해석에 반영하고, 접촉면에 발생하는 응력을 확인할 수 있도록 구조해석 요소로 Stress요소를 사용하여 3차원 Solid 모델을 구성하였다. 종방향으로 패널간의 결속을 위해 설치되는 Tie rod는 Bar 요소를 사용하여 모델링

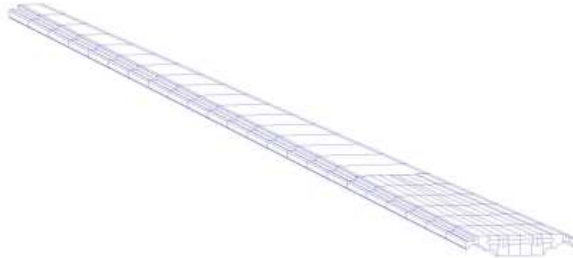
하였으며 열차 풍하중에 의해 발생하는 단부 고정지점 부에 발생하는 반력을 검토하였다.

열차 풍하중에 따른 고무보판 패널 시스템의 거동특성(발생 응력 및 변위)을 검토하기 위해 레일과 고무보판 패널의 접촉부 및 고무보판 패널 시스템의 복잡한 형상을 가급적 실제 형상과 동일하게 구현하고자 그림 4와 같이 3차원 모델을 이용하여 해석모델링을 구성하였으며 해석에 사용된 레일, 고무보판 및 Tie rod의 재료특성은 표 1.과 같다.

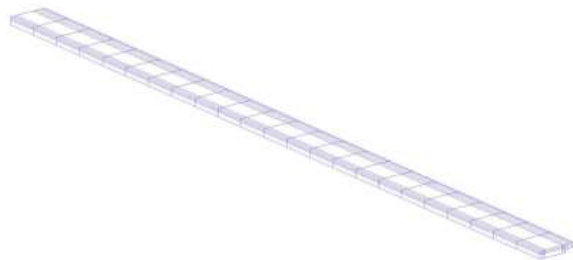
■ Bolt (MS Steel) (Steel - Structural)
■ Rail (MS Steel) (Steel - Structural)
■ Rubber Panel (RMS460) (Polysulfone)



(a) Full model



(b) Inner panel



(c) Outer Panel

그림 4. 고무보판 해석모델링

Figure 4. FE Model of rubber panel crossing system

표 1. 고무보판 유한요소해석 적용제원

Table 1. Parameters of rubber panel crossing system analysis

Properties	Rail	Rubber panel	Tie rod
Young's Modulus(kN/mm ²)	209	1.4	209
Poisson's Ratio	0.3	0.3	0.3
Density (kN/mm ³)	7.8e-12	0.67e-12	7.8e-12

보다 안전측의 검토를 위해 고무보판은 중력방향으로 작용하는 힘에 대해서는 저항하되, 중력 반대방향으로 작용하는 힘에 대해서는 저항하지 않도록 설정하였다. 열차풍에 의해 레일의 부상은 발생되지 않으므로 고무보판 패널이 거치되는 레일은 수직방향 및 수평방향으로 구속을 설정하였으며, Tie rod는 양 끝단을 수직, 수평방향으로 구속을 설정하였다. 고무보판과 레일의 접촉부는 압축에는 저항하고 인장에는 저항하지 않도록 Slideline의 No friction을 적용하였다[2,9].

3. 수치해석 결과

수치해석 결과, 고무보판 패널과 Tie rod에 발생하는 응력 해석결과를 정리하여 표 2.와 같이 나타내었으며, 수치해석 결과에 따른 형상은 그림 5.와 같다.

표 2. 응력해석결과

Table 3. Results of stress analysis

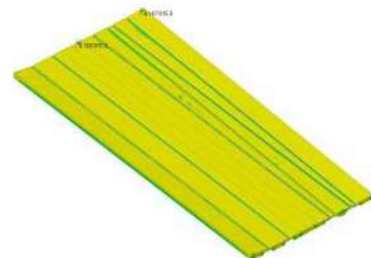
	Max S _x (MPa)		Max S _y (MPa)	
	300km/h	360km/h	300km/h	360km/h
Rubber panel	33.861e-3	68.885e-3	28.088e-3	0.128
Tie rod	84.052e-3	0.441	-	-

Analysis: Results 1
 Loadcase 1 Loadcase 1
 Results for: RMS_20_Analysis 1 Item
 Entity: Stress - Scalar
 Component: S1 (Units: MPa)



(a) S_x, 360km/h

Analysis: Results 1
 Loadcase 1 Loadcase 1
 Results for: RMS_20_Analysis 1 Item
 Entity: Stress - Scalar
 Component: S2 (Units: MPa)



(b) S_y, 360km/h

그림 5. 고무보판 응력 해석 결과

Figure 5. Analysed results of stress analysis

또한 열차풍에 의한 고정장치 및 레일과 접촉되는 부분에서 발생하는 고무보판 패널 시스템의 변위 해석 결과는 표 3.과 같으며, 수치해석 결과에 따른 변형 형상은 그림 6.과 같다.

표 3. 변위해석결과
 Table 3. Results of displacement analysis

	Outer panel, outside (Max D _y , mm)		Contact point with rail (Min D _y , mm)	
	300km/h	360km/h	300km/h	360km/h
Rubber panel	0.026	0.136	-0.56e-3	-3.72e-3
Tie rod	0.023	0.120	-0.53e-3	-3.54e-3

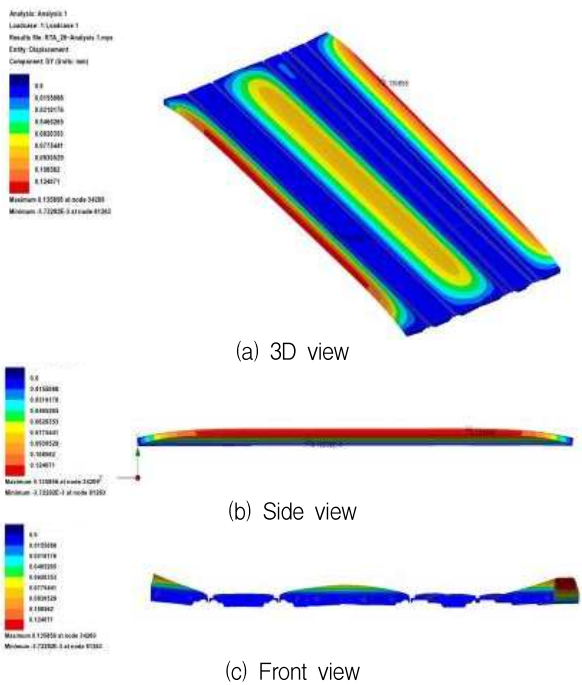


그림 6. 고무보판 변위 해석 결과 예(360km/h)
 Figure 6. Analysed results of displacement contour(360km/h)

최고속도 360km/h 주행 시 발생하는 열차 풍하중에 의한 고무보판 패널 시스템의 거동분석 결과, 레일 두부에 접촉되는 내부패널 및 외부 패널에서의 발생변위 및 응력수준이 모두 미소한 것으로 나타나 고속열차 풍하중에 대한 고무보판 패널 시스템의 거동은 구조적으로 안정적인 것으로 분석되었다.

중방향으로 패널간의 결속을 위해 설치되는 Tie rod의 경우 열차 풍하중에 의한 구조적 안정성을 검토하기 위해 단부 고정지점부에 발생하는 반력을 검토하였으며, 해석결과는 표 4. 및 그림 7.과 같다.

표 4. 패널 고정장치 반력 해석결과
 Table 4. Results of reaction force on tie rod support

speed (km/h)	Panel	FEA (kN)	V ≤ 360km/h	V ≤ 250km/h
			Anchor pulling force (kN)	Fracture force of support (kN)
300	Inner	0.236	16.9 ¹⁾	100 ²⁾
	Outer	0.489		
360	Inner	1.571	16.9 ¹⁾	100 ²⁾
	Outer	1.354		

¹⁾ 앵커 최대 인발력 : M12 기준

²⁾ 단부 조임부(End restraints) 파단시험 결과 : 단부조임부의 취약부에서의 최대 파단하중 100kN[7]

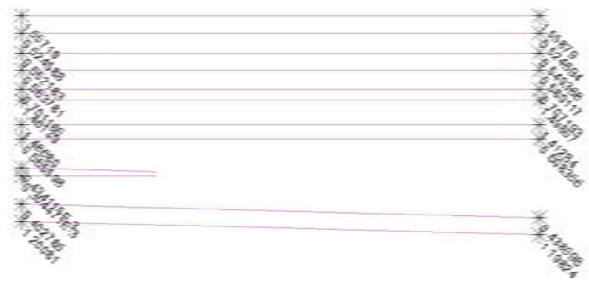


그림 7. 패널 고정지점부 반력 해석 결과(360km/h)
 Figure 7. Analysed result of reaction force on tie rod(360km/h)

해석결과, 고무보판 패널 고정 지점부의 발생 최대 반력이 일반철도용 고무보판 패널 시스템에 사용되는 고정 지점부(End restraints)의 최대 파단하중 및 고속철도용 앵커식 고정 지점부의 인발강도를 모두 만족하고 충분한 안전율을 확보하는 것으로 나타나 고속열차 주행에 따른 풍하중에 대한 고정 지점부의 구조적 문제는 없을 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 고속선로 열차 풍하중 안정성 검토 조건을 준용하여, 열차속도 300km/h와 360km/h에 대한 풍하중을 적용하여 고속선로용 고무보판 패널 구조의 열차 풍하중에 대한 구조 안정성을 해석적으로 검토하였다.

분기기가 있는 선로에 설치되는 복잡한 형상의 고무보판 패널 시스템의 실물 제작 치수를 적용한 정밀 수치모델을 바탕으로 고속열차 주행시 발생하는 풍하중을 고려한 레일과 고무보판 패널 시스템의 상호작용을 3차원 수치해석을 통해 분석하였다.

분석결과, 고속열차 풍하중 작용 시 발생하는 고무패

널의 응력 및 변위의 수준이 매우 미소하여 열차풍에 의한 변형 및 변위발생가능성은 매우 작은 것으로 분석되었으며, 패널 고정 지점부의 반력 또한 관련 기준을 모두 만족하여 고속 열차풍에 대한 고무보판 패널 시스템의 구조적 안정성을 해석적으로 입증하였다.

※ 본 연구는 (주)남양트랙엔지니어링의 지원을 받아 수행되었으며, 관계자 분들께 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] H.J. Lee, S.H. Kim, H.W. Song, D.J. Hur, "A Study on Structural Analysis of Greenhouse by Wind Load," 2016 Spring Conference of the Korean Society for Agricultural Machinery, 21(1):251-252, 2016
- [2] J.Y. Choi, P.S. Kim, J.S. Chung, "A Study on Optimum Spacing of Rail Joint for Personal Rapid Transit(PRT) Track System," The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 4, No. 3, p.213-220, August 31, 2018
- [3] S.Y. Park, H.G. Park, Y.S. Kim, "Experimental Study on the Aerodynamic Responses of Double-Deck Suspension Bridge and Railway Vehicles in the Bridge", Journal of the Wind Engineering Institute of Korea 6(2), 2002.12, 129-136, 2002
- [4] S.M. Moon, K.H. Lee, "A Numerical Study for Slipstream Effects Induced by the High-speed Train on Vertical Structures Parallel to the Track", Korean Society for Precision Engineering, 2018.5, 483-483, 2018
- [5] S.K. Kwon, G.J. Han, D.S. Han, S.W. Lee, "Analyzing the effect on a Structural Stability of a Container Crane according to an Increased Wind velocity", Korean Society Of Precision Engineering, 2006.5, 373-374, 2006
- [6] S.W. Lee, J.J. Shim, D.S. Han, J.S. Park, G.J. Han, K.S. Lee, T.H. Kim, "The Effect of Wind Load on the Stability of a Container Crane" Journal of the Korean Society for Precision Engineering 22(2), 2005.2, 148-155, 2005
- [7] STRAIL technical report(unpublished article), KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG, Tittmoning, Germany, 2003
- [8] DIN Fachbericht 101, Einwirkungen auf Brücken, Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten, 2003
- [9] LUSAS finite element analysis system user manual, version 13.8, FEA Ltd., Kingston upon Thames, Surrey, UK, 2005