

유한요소해석을 통한 철도선로용 안전펜스의 횡 방향 거동 분석 Analysis of lateral behaviour of the safety fence for railway track using the FEM

이창호*, 김준영**, 성덕용**†, 박성현***

Chang-Ho Lee*, Jun-Yeong Kim**, Deok-Yong Sung**†, Seong-Hyeon Park***

Abstract It is necessary to check whether the safety fence for railway track is interfered with when driving a train. In this study, the load condition of railway wind pressure on the safety fence for railway track was calculated for each type of train in order to check whether the safety fence for the railway track was obstructed. In order to analyze the safety of the railway track safety fence, the numerical analysis was performed. As a result, the proper spacing of the safety fence for the railway track was 2.5 m on the basis of the lateral displacement of 10 mm.

Keywords : Safety fence for railway track, Lateral displacement, Field measurement, Train wind pressure

초 록 철도선로용 안전펜스는 열차주행 시 안전펜스의 간섭여부를 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 철도선로용 안전펜스의 열차주행 시 지장여부를 확인하기 위하여 국내 열차종류별 열차 풍압에 대한 하중조건을 산정하였고, 철도선로용 안전펜스의 설치간격에 따른 안전성을 분석하기 위해 안전펜스 설치간격에 따른 수치해석을 수행하였다. 그 결과, 철도선로용 안전펜스 설치 적정간격은 횡 방향변위 10mm 기준으로 2.5m 이었다.

주요어 : 철도선로용 안전펜스, 횡 방향 변위, 현장측정, 열차풍압

1. 서 론

2004~2013년 연도별 철도교통사고 사망자수 및 부상자수는 계속적으로 감소하고 있으나, 교통사상사고 원인 중 선로근접 및 무단통행으로 인한 사고가 열차에 뛰어드는 자살사고 다음으로 많이 발생하고 있다[4]. 국외(유럽, 호주 등)의 경우 운행선 근접공사 시 열차주행에 지장을 주지 않고, 작업자의 안전확보 및 작업효율을 높이기 위해 철도용 안전펜스 적용을 통해 확실한 경계를 설정하고 있다[5,6]. 하지만 국내에서는 철심과 노끈을 이용한 경계선 설정으로 작업자 및 시민의 통행이 자유롭기 때문에 운행선 인접공사 시 사고위험을 항시 가지고 있다. 따라서 운행선 인접공사 시 안전한 작업과 인부들의 안전을 확보하기 위해 철도선로용 안전펜스를 현장에 속히 투입하는 것이 필요하고, 이를 위해 철도선로용 안전펜스가 열차주행에 지장을 초래하지 않는다는 것을 확인할 필요가 있다.

† 교신저자: 대원대학교 철도건설공학과(dysung@mail.daewon.ac.kr)

* 광주도시철도공사 ** 대원대학교 철도건설공학과 *** (주)서현기술단 기술연구소

운행선 근접공사 시 작업자 및 일반시민의 무단통행을 원천적으로 제어하고, 철도공사 특성상 가지고 있는 안전상 문제점을 제거하기 위해 국내에서 개발한 철도선로용 안전펜스[3]를 개발하였다. 본 연구에서는 국내에서 운행되고 있는 열차들과 철도선로용 안전펜스와의 이격거리를 검토하였고, 철도선로용 안전펜스에 작용하는 열차풍압을 산정하여 수치해석모델에 적용함으로써 철도선로용 안전펜스의 횡 방향 변위를 분석하였다.

2. 국내 열차종류, 건축 및 차량한계와의 이격거리 검토

철도선로용 안전펜스의 열차운행 시 지장여부를 확인하기 위하여 국내에서 운행되고 있는 열차들(KTX, KTX-II, 디젤열차, EMU, 구형전동차, 신형전동차) 및 레일종류(60E1, 60kg/m, 50kg/m)와 철도선로용 안전펜스의 이격거리를 검토하였고, 건축한계 및 차량한계와의 이격거리를 검토하였다. 그 결과는 Fig.1, Fig.2, Table 1, Table 2 와 같다.

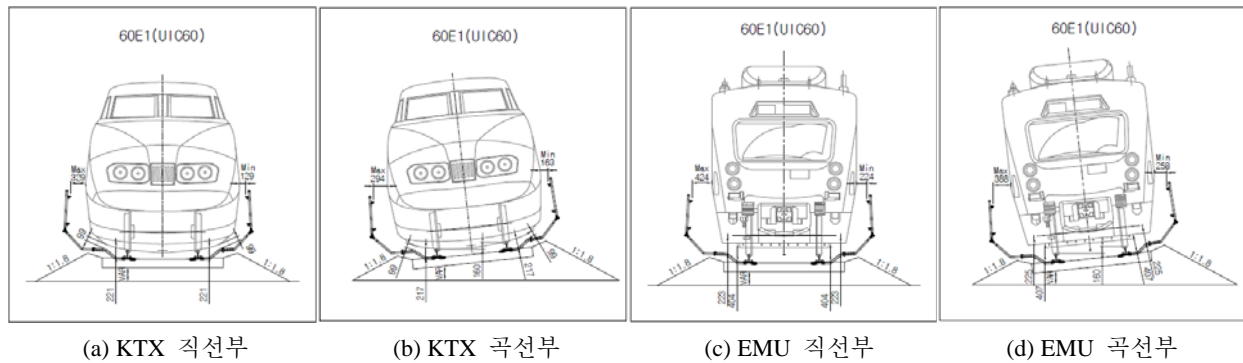


Fig.1 국내 운행열차들과 철도선로용 안전펜스의 이격거리 검토 예시

철도선로용 안전펜스와 국내 열차종류별 이격거리를 검토한 결과, KTX 열차의 경우 안전펜스를 최소폭으로 적용 시 129mm 가 이격되며, KTX-II 열차의 경우 안전펜스를 최대폭으로 적용 시 604mm 가 이격되는 것으로 검토되었다. 디젤열차, EMU, 구형 및 신형 전동차의 경우에도 안전펜스를 최소폭으로 적용 시 160mm 이상 이격되고, 최대폭으로 적용 시 290mm 이상 이격되는 것으로 검토되었다.

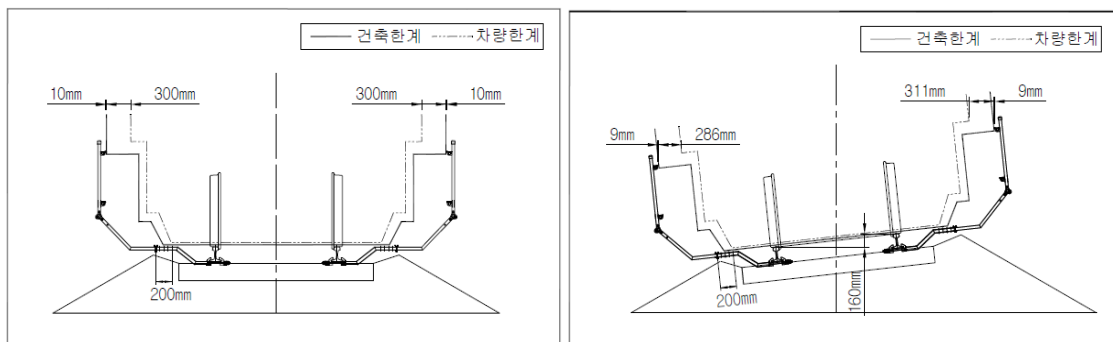


Fig. 2 건축한계 및 차량한계와 철도선로용 안전펜스의 이격거리 검토결과

Table 1 열차종류별 철도선로용 안전펜스의 이격거리 검토결과 종합(단위:mm)

직곡선 및 데일종류 열차종류	직선부			곡선부			비고
	60E1 (UIC60)	60kg/m	50kg/m	60E1 (UIC60)	60kg/m	50kg/m	
KTX	129~329	156~356	155~355	163~294	192~318	189~318	<ul style="list-style-type: none"> • 최소값은 안전펜스를 가장 좁게 설치한 경우임 • 최대값은 안전펜스를 가장 넓게 설치한 경우임 • 최소값으로부터 50mm간격으로 이격거리를 증가시킬 수 있음(최대 200mm)
KTX-II	377~577	404~604	403~603	384~566	413~590	411~591	
디젤열차	164~364	190~390	188~388	162~362	187~389	187~387	
EMU	224~424	251~451	250~450	258~388	287~412	284~413	
구형전동차	219~419	246~446	244~444	187~344	216~368	213~369	
신형전동차	224~424	251~451	250~450	239~415	265~444	264~441	

Table 2 건축한계 및 차량한계와 철도선로용 안전펜스의 이격거리 검토결과 종합

	직선부		곡선부		비고
	안전펜스 최소폭 설치시 ¹⁾	안전펜스 최대폭 설치시 ²⁾	안전펜스 최소폭 설치시 ¹⁾	안전펜스 최대폭 설치시 ²⁾	
건축한계와 이격거리	-190mm	+10mm	-191mm	+9mm	(+) : 선로외방 (-) : 선로내방
차량한계와 이격거리	+110mm	+310mm	+95mm	+295mm	

1) 횡방향 연결 탭 : 선로내측에서부터 첫 번째 지점 위치

2) 횡방향 연결 탭 : 선로내측에서부터 다섯 번째 지점 위치

횡방향 연결 탭의 위치에 따라 선로 내·외측으로 최대 200mm까지 폭 조절 가능

건축한계와 철도선로용 안전펜스간 이격거리 검토결과, 건축한계 밖으로 철도선로용 안전펜스를 설치하고자 할 경우에는 안전펜스의 최대폭으로 설정해야하는 것을 알 수 있다. 반면, 차량한계와 철도선로용 안전펜스간 이격거리 검토결과, 안전펜스를 최소폭으로 설정 시에도 차량한계를 침범하지 않는 것을 알 수 있다.

철도건설규칙(해설)에서는 건축한계 예외조항을 두고 있으며, 선로보수 등의 작업상 필요한 일시적 시설로서 열차운행에 지장이 없을 경우 건축한계를 침범할 수 있다. 철도선로용 안전펜스는 운행선 근접공사 및 선로보수 시 사용되고, 운행선 근접공사가 보통 1~2 개월이내인 점을 고려한다면 건축한계 예외조항에 포함될 수 있을 것으로 판단되며, 열차운행 시 열차풍압 및 기타 위험요소를 고려하여 차량한계로부터 약 200mm 이상 이격되도록 설치하는 것이 적절하다고 판단된다.

따라서, 철도건설규칙에서 제시하고 있는 차량한계를 만족시키기 위해 안전펜스 최소폭으로부터 100mm 이격된 지점(안전펜스 횡방향 연결 탭 3 번째 포인트)이상에 횡방향 연결 탭을 설치하는 것이 적절하다. 하지만 열차가 저속으로 주행하는 구간의 경우, 차량폭이 작은 경우(KTX-II, EMU, 구형 및 신형 전동차), 궤도의 중심간격이 작은 경우(설계속도 $V < 150\text{km/h}$ 일 때, 4.0m) 등에 대해서는 관리자와 협의하여 선택적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 철도선로용 안전펜스에 작용하는 열차풍압 산정

궤도와 평행한 단순수직구조물[1]의 검토에서 궤도에 근접해있는 구조물들(간단한 방음막, 보호벽, 궤도근처 건물들의 외관상 차단물들)은 열차가 통과할 때 발생하는 압력-흡입파를 받게 되며, 이 파(wave)들은 열차를 따라 이동하게 된다[2]. 궤도와 평행한 면에 작용하는 압력 장은 다음과 같은 형태를 가지며 반대편도 이와 같은 형태이다.

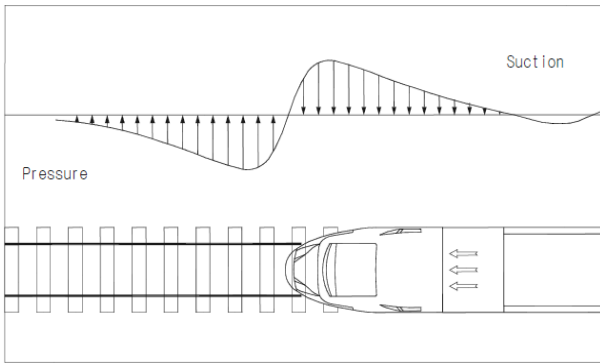


Fig. 3 궤도와 평행한 표면에 작용하는 압력 및 흡입파[1]

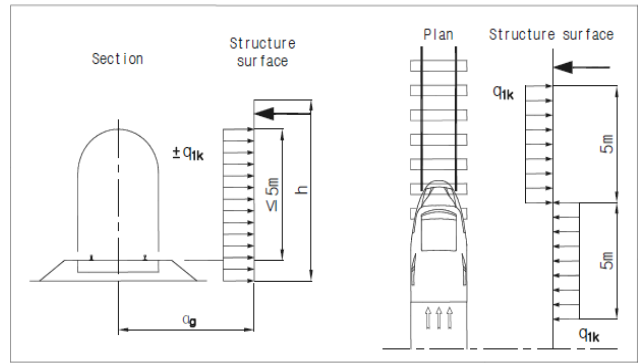


Fig. 4 방음벽에 미치는 하중선도 [2]

궤도와 평행한 단순 수직구조물에 작용하는 압력-흡입 파는 $\pm q_{1k}$ 의 이동하는 분포하중으로 대체된다. 이 분포하중은 길이 5m, 높이가 궤도의 레일 상부에서부터 5m 보다 높지 않은 구조물에 작용한다. 위 분포하중의 특성 값 q_{1k} 는 식(1)로부터 결정된다.

$$q_{1k} = k_1 \times C_p \times \left(\frac{v}{3.6} \right)^2 \times \frac{1}{1600} \quad (1)$$

여기서 C_p : 궤도 축으로부터의 길이(a_g)에 따른 공력계수(kN/m^2)

$$C_p = \frac{1.5}{(a_g - 0.3)^2} + 0.045 \quad (2)$$

V : 열차의 속도 (km/h)

k_1 : 열차의 형상계수

(1.00 : 화물열차, 0.85 : 공기역학적인 형상의 열차(220km/h 까지의 속도와 객차를 끄는 재래기관차), 0.60 : 매우 공기역학적인 형상으로 설계된 열차(KTX, ICE, TGV 등))

Fig. 5 는 열차속도, 궤도 측과 대상 면까지의 거리인 a_g 의 함수로서 q_{1k} 를 그래프로 나타낸 것이고, 공기역학적 형상이 아닌 열차($k_l=1.00$)일 때의 결과값이다.

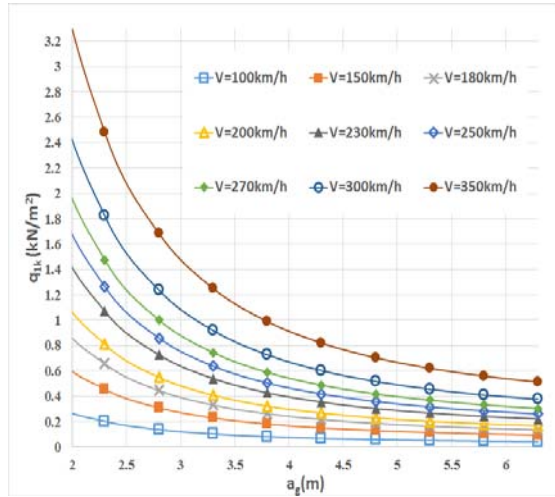


Fig. 5 궤도에 수직하고 평행한 구조물 표면에 미치는 q_{1k} 의 특성곡선($k_l=1.00$ 일 때)

Fig. 5의 결과를 바탕으로 열차의 형상계수를 고려한 보간을 통해 열차 풍압(q_{1k})을 계산할 수 있다. 이론식[1]을 이용한 계산결과가 현장시험결과[2]와 약 2.5배의 차이를 가지는 것으로 나타났으며(이론식>현장시험결과), 본 연구에서는 열차의 형상, 속도, 열차주행 시 작업자의 안전 확보 등 안전적인 측면을 고려하여 이론식에 의한 풍압을 하중조건으로 선정하였다. Table 3은 국내 열차종류별 풍압 계산결과를 나타내며, 본 해석에서는 열차풍압이 가장 큰 KTX열차에 대한 풍압($q_{1k} = 1,800Pa$)을 재하하는 것으로 구조적 안전성을 검토하였다. UIC 779-1 수식에 따른 철도선로용 안전펜스의 a_g 를 적용하여 열차풍압을 계산하였다. 궤도중심에서 시공기면 폭 끝단까지의 거리(a_g)는 2.13m이며, 열차종류별 열차속도를 고려하여 열차풍압을 계산하면 Table 3과 같다.

Table 3 열차종류별 풍압 계산결과

Train type	Train Velocity (km/h)	a_g (m)	q_{1k} (kN/m^2) ($k_l=1.00$)	k_l	q_{1k} (Pa)
EMU	250	2.13	1.53	0.85	1,300
KTX	350	2.13	3.00	0.60	1,800

4. 수치해석을 통한 횡 방향 변위분석

4.1 구조해석 모델링

범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS CIVIL을 이용하여 총 연장 50m구간에 철도선로용 안전펜스를 모델링하였다. 철도선로용 안전펜스의 설치간격에 따른 안전성을 분석하기 위해 안전펜스 설치간격을 침목간격을 고려하여 625mm, 1,250mm, 1,875mm, 2,500mm, 3,125mm, 3,750mm, 4,375mm, 5,000mm로 설정하였으며, 각각의 경우에 열차풍압에 의한 횡 방향 변위를 확인하여 건축한계 침범여부, 열차운행 지장여부를 확인하고자 하였다.

4.1.1 입력 및 경계조건

궤도는 직선부 자갈도상궤도, 침목간격 625mm, 도상깊이 300mm, 궤도연장 50m를 모델링하였다. 레일과 안전펜스를 연결하는 레일고정클램프는 침목과 침목 사이 레일에 설치하는 것으로 하였으며, 레일하부에 Beam요소로 모델링하고 Rigid기능을 이용하여 레일과 고정시켜 일체거동 하도록 모델링하였다.

Table 4 철도선로용 안전펜스 구조해석 Input data

	Input Data	Element		Input Data	Element
Rail	KS 60	Beam	Rail fastening (rail pad)	400kN/mm	spring
Sleeper	PCT Sleeper	Beam	Ballast	200kN/mm	spring
Safety Fence (Rail fastening clamp)	MC Nylon (tensile strength 79 MPa)	Beam	Safety Fence (Vertical Beam)	SPP Steel tube (tensile strength 420 MPa)	Beam
	$E = 2.4 \times 10^3$ MPa			$E = 2.1 \times 10^5$ MPa	
	$\nu = 0.25$			$\nu = 0.3$	

4.1.2 하중조건

철도선로용 안전펜스의 구조적 안전성을 확인하기 위한 수치해석 모델의 하중조건은 열차운행 시 발생하는 열차풍압을 적용하였다. 열차풍압이 가장 크게 발생하는 EMU열차 250km/h 주행 시 열차풍압(1,300Pa)과 KTX열차 350km/h 주행 시 열차풍압(1,800Pa)을 안전펜스에 하중으로 재하하였으며, 그 크기는 Table 5와 같다.

Table 5 철도선로용 안전펜스에 작용하는 열차유형별 풍압산정

Train type	Train velocity (km/h)	q_{ik} (Pa)	Vertical beam working load (kN/m)	Horizontal beam working load (kN/m)
EMU train	250	1,300	0.052	0.039
KTX train	350	1,800	0.072	0.054

4.1.3 구조해석 모델링

철도선로용 안전펜스의 설치간격에 따른 안전성을 분석하기 위해 침목간격을 고려하여 625mm, 1,250mm, 1,875mm, 2,500mm, 3,125mm, 3,750mm, 4,375mm, 5,000mm로 안전펜스 설치간격을 설정하였고, 해석모델 예시는 다음과 같다.

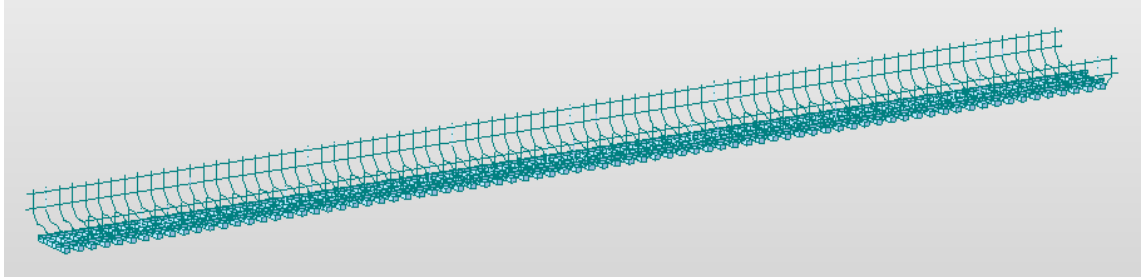


Fig. 6 철도선로용 안전펜스의 구조해석 모델링 예시(설치간격: 625mm)

4.2 구조해석 결과 및 분석

Table 6은 열차풍압에 의한 안전펜스의 횡 방향 최대 변위 값을 정리한 결과이며, Fig. 7은 안전펜스 설치간격과 열차풍압에 따른 횡 방향 최대 변위 값을 나타낸 결과그래프이다.

Table 6 열차풍압에 의한 횡 방향 최대 변위 값

Installation interval (mm)	Load Case		Maximum lateral displacement ¹⁾ (mm)	Remark ²⁾	Remark ³⁾
625	LC 1	EMU 250km/h	0.09	OK	OK
	LC 2	KTX 350km/h	0.12	OK	OK
1,250	LC 1	EMU 250km/h	0.29	OK	OK
	LC 2	KTX 350km/h	0.37	OK	OK
1,875	LC 1	EMU 250km/h	1.35	OK	OK
	LC 2	KTX 350km/h	1.87	OK	OK
2,500	LC 1	EMU 250km/h	4.26	OK	OK
	LC 2	KTX 350km/h	5.90	OK	OK
3,125	LC 1	EMU 250km/h	10.39	OK	NG
	LC 2	KTX 350km/h	14.39	OK	NG
3,750	LC 1	EMU 250km/h	21.54	OK	NG
	LC 2	KTX 350km/h	29.82	OK	NG
4,375	LC 1	EMU 250km/h	39.90	OK	NG
	LC 2	KTX 350km/h	55.24	OK	NG
5,000	LC 1	EMU 250km/h	68.05	OK	NG
	LC 2	KTX 350km/h	94.22	OK	NG

¹⁾ 철도선로용 안전펜스의 건축한계제어용 수직빔 끝단에서의 횡 방향 변위

²⁾ KTX 열차와의 이격거리: 129~329mm, EMU 열차와의 이격거리: 224~424mm

³⁾ 건축한계와 안전펜스간 이격거리 10mm

설계도면 비교로 국내 열차종류별 안전펜스와의 이격거리를 검토한 결과 KTX열차와 안전펜스의 이격거리는 129~329mm이었으며, EMU열차와의 이격거리는 224~424mm이었다. 건축한계와 안전펜스간 이격거리는 10mm이었다. 이를 근거로 하여 열차주행 시 철도선로용 안전펜스의 횡 방향 변위를 분석하였을 때, KTX열차가 350km/h로 주행 시 안전펜스의 횡 방향 변위를 KTX열차와의 이격거리 이내로 고려하면, 안전펜스의 설치간격은 5,000mm까지 허용되었고 안전펜스의 횡 방향 변위 한계를 건축한계와 안전펜스간 이격거리 10mm 이내로 고려하였을 때 안전펜스의 설치간격은 2,500mm까지 허용되었다.

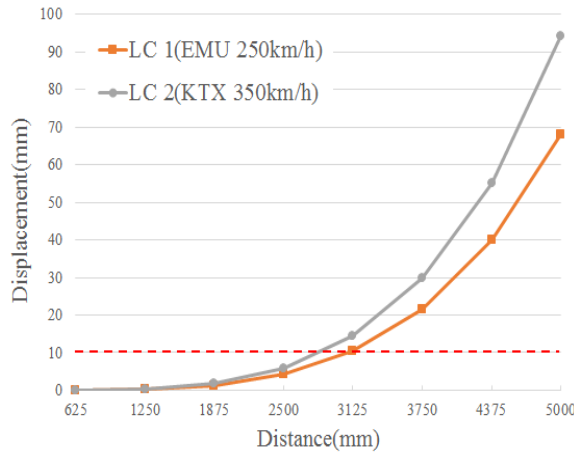


Fig. 7 열차 풍압에 따른 철도선로용 안전펜스 횡 방향 변위 분석 결과

따라서 본 연구에서 개발한 철도선로용 안전펜스가 건축한계를 침범하지 않도록 하기 위해서는 2,500mm 간격(침목 4정당 1개)으로 안전펜스를 설치하는 것이 적절하며, 본 연구에서 적용한 철도선로용 안전펜스의 구조적 강도를 높인다면 설치간격을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 철도선로용 안전펜스의 현장적용 시, 안전펜스 간격별, 열차종별(EMU 250km/h, KTX 350km/h) 풍하중을 적용하여 철도선로용 안전펜스의 횡 방향 변위분석과 현장측정을 통한 검증은 수행하였다. 그 결과 철도선로용 안전펜스 적정설치간격은 횡 방향 변위 10mm기준: 2,500mm으로 분석되었다. 또한, 현장측정을 통해 열차속도 40km/h, 펜스간격 1.25m에서 선로내측 최대변위 3.78mm, 펜스간격 2.5m인 경우 선로외측 최대변위가 6.55mm로 열차운행에 지장이 없음을 확인하였다. 향후 더 높은 열차속도에서 현장측정을 함으로써 현장 적용성을 높일 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 2015년 산학협력 기술개발사업(과제번호 : C0352530)의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] UIC 779-1, Effect of the slipstream of passing trains on structures adjacent to the track
- [2] Korea Railroad Research Institute, A study on the determination of rail center spacing and formation level width, 2007.6
- [3] J.Y.Kim, D.Y.Sung, S.H.Park, J.K.Kim (2016) Development of Railway Safety Barrier Fence, *Proceedings of the 2016 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, pp.1635-1641
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2014), Traffic safety annual report
- [5] <http://www.vortok.com>
- [6] <http://www.rss-rail.com>