이중주입방식을 적용하는 콘크리트궤도 침하복원공법의 충전성능 평가

Grouting Performance Evaluation of the Double Injection Method for Settlement Restoration of Concrete Rail Tracks

고효석* · 최병정**

Koh, Hyo Seog*, and Choi, Byong Jeong**

Abstract

For the construction of concrete tracks, strict settling control standards are applied. However, settlement inevitably occurs owing to the construction conditions, climate, and geographical conditions. When settlement occurs beyond the limited value, recovery work is performed by using a restoration method. During restoration processes, the concrete track must maintain its support stiffness and not develop non-uniform stress to ensure proper functioning of interface systems between the track and roadbed and geometric settlement recovery. To satisfy these conditions, the track must be tightly filled to prevent voids from occurring at the bottom. This paper proposes a double-injection-type method for cement grouting to secure filling, considering the injection material, pressure, and interval. In this study, the filling performance was evaluated through field tests using visual inspection and the impact echo technique, which are non-destructive investigation methods.

Key words : Concrete Track Settlement, Cement Grouting, Track Support Stiffness, Double Injection Type

요 지

콘크리트궤도 건설 시에는 엄격한 침하억제기준을 적용하지만, 시공조건, 기후·지형조건 등으로 인해 불가피하게 침하가 발생한다. 침하가 기준치 이상으로 발생하면 복원공법을 이용하여 복원을 수행한다. 복원은 기하학적 변위의 보상과 궤도/노반의 인터페이스 구조 및 기능을 정상적인 상태로 복구해 궤도지지강성을 유지하고 불균일한 응력 발생을 방지하여야 한다. 이를 만족하기 위해서는 궤도하면에 공극이 발생하지 않고 밀실하게 충전하여야 한다. 본 논문에서는 충전성 확보를 위해 주입재료, 주입압력 및 간격 등을 고려하여 이중주입방식의 시멘트그라우팅 복원공법을 제안하였고, 현장시험부설 후 육안조사 및 비파괴조사방법인 충격반향기법을 이용해 충전성능을 평가하였다.

핵심용어 : 콘크리트궤도 침하, 시멘트그라우팅, 궤도지지강성, 이중주입방식

1. 서 론

콘크리트궤도 침하복원의 의미는 원지반의 지지력 부족 등으로 침하된 궤도를 원위치 시키는 것을 포함하여 궤도를 침하 전의 정상적인 응력상태로 복구한다는 것이다. 즉 기하학적 변위의 보상과 궤도/노반의 인터페이스 구조 및 기능을

정상적인 상태로 복구하여 궤도지지강성을 유지하고 불균일한 응력발생을 방지하는 것이다. 이러한 목적을 만족하기 위해서는 우선 정밀한 복원성과 충전성이 확보되어야 한다. 복원성 측면에서는 선형기준을 만족할 수 있도록 정밀한 제어가 요구되고, 충전성 측면에서는 미세한 공극까지 빈틈 없이 충전하여 응력전달의 불균형이 발생하지 않아야 함에

*정회원, 경기대학교 건설안전학과 박사과정(E-mail: ggkhs3@nate.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Construction Safety, Kyonggi University

**교신저자, 정회원, 경기대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-31-249-9843, Fax: +82-31-249-9702, E-mail: bjchoi@kyonggi.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University

도 기존의 콘크리트케도 침하대책과 관련하여 케도하부 복원주입 방법과 충전율에 대한 직접적인 연구는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 복원성 및 충전성 조건을 충족하기 위해 복원과 충전 목표를 이원화하고, 재료와 공정을 분리하여 복원하는 이중주입방식의 시멘트그라우팅공법을 제안하였다. 또한, 복원공법의 성능요구조건을 수립하여 각 단계별 공정 및 재료를 제안하고, 현장시험부설을 통하여 성능을 검증하였다. 성능검증에서는 복원 정밀도와 육안조사 및 충격반향기법을 통한 충전성을 검토하였다.

2. 이중주입 침하복원공법(PRCG)의 이론적 배경

Pressurized Rapid-hardening Cement Grouting (PRCG) 공법은 콘크리트케도 침하 시 열차운행에 지장 없이 정밀복원이 가능하도록 개발된 침하복원공법이다. 파스칼의 원리가 적용된 이 공법은 급결성 시멘트모르터를 주입압력으로 미세·순환·반복 주입하여 침하된 콘크리트케도를 mm 단위로 정밀하게 복원하는 것으로 동시에 100개소 이상의 다점주입이 가능하여 하중 및 면적이 큰 구조물에서도 불균등 응력을 발생시키지 않고 복원이 가능한 주입장비 및 시공공정을 시스템화한 것이다(Fig. 1).

Fig. 1. PRCG Method Applied to High-Speed Railway Site

2.1 파스칼의 원리

밀폐된 유체의 일부에 압력을 가하면 그 압력이 유체

(a) Principle of Fluid-Pressure Transmission

Fig. 2. Pascal's Principle

내의 모든 곳에 같은 크기로 전달된다.

Fig. 2(a)와 같이 A1의 면적을 갖는 가압판에 P1의 힘으로 유체에 압력을 가하면 A1의 x배의 면적을 갖는 A2의 가압판에 P1의 x배의 힘을 갖는 P2의 힘이 작용하게 된다.

이를 수식으로 표현하면 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{P1}{A1} = \frac{P2}{A2} \quad (1)$$

여기서, P1은 주입관을 통한 그라우트재 주입압력, P2는 구조물 자중, A1은 주입관 단면적, A2는 급결재의 확산면적을 나타낸다.

파스칼의 원리를 그라우팅공법에 응용하면, 주입압력(P1)을 키우거나 주입재의 확산면적(A2)을 확대시킴으로써 중량구조물에 상향변위를 유도할 수 있다.

2.2 이중주입방식 적용방안

이중주입방식은 복원용 급결재와 충전용 중결재를 이원화하여 주입하는 방식으로, 급결재를 이용하여 구조물을 일정 높이로 복원하는 동시에 중결재로 공동을 채우는 방식이다. 주입재는 상부 구조물의 하중에 따라 주입펌프를 통해 구조물 하부경계부에 주입되고, 2중관을 통하여 하부에 분사된 A액(분말형 재료)과 B액(액상형 경화제)은 서로 반응하여 겔화된다. 펌프의 주입압력에 의해 분사된 주입재료는 경화되며 구조물 하부에 얇은 점막을 생성함과 동시에 상향으로 압력을 발생시켜 구조물을 복원하게 된다. 복원용 급결재는 겔타임이 매우 빨라 유동성을 급격히 상실하면서 경화되기 때문에 적정 주입압력에 대한 지지력을 확보하며 복원이 진행된다.

이때 급결재가 주입되지 않은 구조물 하부 공극부위에는 겔타임이 늦은 고유동성의 중결재를 추가 주입한다. 구조물 하부면은 노반의 재료가 부착되어 표면이 불규칙한 상태이고 유동재료에 저항하는 성질이 있어 충격력 저압주입으로는 충전성을 확보할 수 없기 때문에 일정 수준 이상의 주입압력을 필요로 한다. 또한 이중주입방식 적용 시에는 과도한

(b) Grout Method Applied Pascal's Principle

응력이 발생하지 않도록 미세·반복·순환 주입해야 하며, 이를 위해 중앙제어장치를 통하여 각 재료의 주입압력, 주입량 및 주입순서를 조정한다. 미세·반복·순환의 이중주입 방식으로 복원하게 되면 충전층은 층상구조를 나타내게 되는데, 각 층의 두께는 약 0.5~2 mm이며 주입량에 따라 두께는 변화한다.

Table 1은 주행안정성과 궤도사용성 측면에서 선정한 침하복원공법의 적용기준(안)이다(Lee, 2020). 콘크리트궤도 침하복원 시에는 Table 1의 적용기준(안)을 만족하여야 한다.

2.3 충격반향(Impact Echo)기법

충격반향기법은 구조물의 동적응답을 분석하여 구조물의 결함을 탐지하거나 두께를 평가할 수 있는 기법으로, Fig. 3과 같이 충격에 의한 탄성파를 외부표면에서 매질 내에 발생시켜 내부로부터 반사된 파를 감지하고 그 반사파의 공진현상을 이용함으로써 매질의 물리적인 특성을 규명하는 것이다.

Fig. 3. Schematics of the Impact Echo Test

표면에 설치된 감진기에서 측정되는 시간영역에서의 기

록을 Fast Fourier Transform (FFT) 변환하면 다중반사에 의한 공진주파수를 얻게 된다. 충격반향기법을 적용할 경우, 첫 번째 모드의 파장과 두께 사이의 관계는 경계조건에 의해 결정되며 콘크리트궤도는 자유단-자유단 조건으로 간주할 수 있다. 콘크리트궤도에서 매질의 P파 속도를 알고 있을 경우, 이질 매질층까지의 두께를 구하는 식은 Eq. (2)와 같다.

$$h = \frac{V_p}{2f_1} \quad (2)$$

여기서, V_p 는 매질의 P파 속도, f_1 은 1차 모드에 의한 공진주파수를 나타낸다.

콘크리트궤도 복원 전·후 콘크리트궤도 표면에서 충격반향기법을 이용한 비파괴조사를 통하여 콘크리트와 주입재료의 두께를 측정할 수 있고, 궤도 하부 각 부위의 충전성능을 평가할 수 있다.

2.4 주입재료 선정

주입재료는 복원용 급결재와 충전용 중결재로 구분되며, 철도 특성상 보강공사 직후에 열차가 통행할 수 있는 초기강도와 충전성을 갖추어야 하며, 주입 후 체적변화나 강도변화가 없어야 한다.

급결재는 초기압축강도를 확보하기 위하여 마이크로시멘트(분말도 6,000~8,000 cm²/g)를 주재료로 선정하였고, Table 2와 같이 5종의 혼화재를 사용하였다. 급결재의 성능을 나타내는 젤 타임은 1~3초 범위가 유효하며, 1시간 압축강도는 0.5~0.8 MPa의 결과를 보였다. Fig. 4의 하부 그래프는 급결재의 양생시간별 압축강도를 나타낸 것으로, 1시간 압축강도는 0.6 MPa, 2일 압축강도는 4.5 MPa까지 증가하다

Table 1. Application Criteria (Draft) for Track Restoration

Evaluation Items		Criteria
Running Stability	Vertical Curve Gradient	- under 1 ‰
	Elastic Modulus of Material	- 80~20,000 MPa
	Track Vibration	- Wheel Load Fluctuation: under 0.37 g
Track Serviceability	Track Stress	- Bending Stress of Concrete Layer: under 1.17 MPa - Rail Stress: below 86.69 MPa (Welding Point)
	Filling Capacity	- Void Ratio exceed the Area 50.0 cm ² : under 15%
	Material Characteristics	- Strength: 0.5 MPa/hr above (Initial Strength) - Satisfy the Durability and Waste Discharge Test

Table 2. Compound of Rapid Hardening Material

[per 1.0 m³]

Liquid Type Material			Compound Type Material				
Hardener (L)	Water (L)	MS-β (L)	Cement (kg)	MS-A (kg)	MS-B (kg)	MS-P (kg)	Water (L)
150	350	35	300	9	25	25	500

Table 3. Compound of Middle Hardening Material

[per 1.0 m³]

Liquid Type Material		Compound Type Material			
Hardener (L)	Water (L)	Cement (kg)	MS-B (kg)	MS-P (kg)	Water (L)
150	350	300	25	25	500

가 수렴하는 경향을 보이고 28일 압축강도는 약 6.5 MPa의 결과를 보였다. 열차하중에 의해서 발생하는 콘크리트궤도 하부의 전달응력은 0.05 MPa 미만으로 충분한 강도를 확보하는 것으로 나타났다.

중결재는 유동성을 확보하기 위하여 일반시멘트를 주재료로 선정하였고, Table 3과 같이 3종의 혼화재를 사용하였다. 2중관을 통해 나누어 분사되는 분말형과 액상형 재료는 지반 내부에서 혼합되어 약 30~90초 후 경화를 시작하기 때문에 주입재의 채움 범위를 조절할 수 있다. Fig. 4의 상부 그래프는 중결재의 양생시간별 압축강도로 1시간 압축강도는 1.0 MPa, 2일 압축강도는 9.0 MPa, 28일 압축강도는 약 12.0 MPa로 나타났다.

Fig. 4. Strength Properties of Injection Material by Curing Time

2.5 주입압력 및 간격의 결정

주입압력과 간격은 요구되는 복원정확도와 허용휨응력을 고려하여 결정하여야 한다. 복원정확도 측면에서는 선형기준인 종방향 선로기울기 1 %을 구현할 수 있어야 하며, 허용휨응력 측면에서는 고속열차의 주행속도(300 km/h)를 고려한 콘크리트궤도의 설계요건인 1.17 MPa를 만족하여야 한다. 이는 온도변화와 동적충격계수를 고려한 콘크리트궤도의 종방향 허용휨응력이므로 복원 시에는 정확도를 만족하기 위하여 mm 단위의 제어가 필요하고 발생 휨응력을 기준값 이내로 제어하여야 한다.

주입압력과 간격의 영향을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 충전시험을 실시하였다. 급결재 주입압력을 2.0~2.5 MPa, 중결재 주입압력을 1.5~2.0 MPa로 주입한 결과, 급결재 주입에 따라 주입공을 중심으로 복원이 진행되고 휨응력은

0.6 MPa 이내로 나타났다. 주입 간격을 변화시키며 주입범위를 검토한 결과, 유효주입반경은 약 1.2 m, 최대주입범위는 약 2 m인 것으로 나타났다.

Fig. 5. Injection Diffusion Range (unit: mm)

2.6 이중주입방식의 시공공정

이중주입방식은 급결성 재료를 주입해 침하된 콘크리트 궤도를 복원한 후, 복원된 궤도와 노반 사이의 공극에 중결성 재료를 주입하여 충전하는 방식으로 주요 시공공정은 Fig. 6과 같다.

- 2중관으로 제작된 주입관을 설치한다. 주입관은 이중관으로 25 cm 두께의 Track Concrete Layer (T.C.L.)와 30 cm 두께의 Hydraulically Stabilized Base-course (H.S.B.) 층 55 cm의 콘크리트층을 관통하여 주입관 끝이 노반층 상면에 위치하도록 한다.
- 복원량을 결정하고 주입관을 통하여 급결재를 주입한다. 복원은 급결재의 주입압력을 이용하며, 별도의 검측장비를 이용하여 복원량을 측정한다. 이때 과도한 복원이 발생하지 않도록 미세주입을 반복한다.
- 목표 복원량에 도달하면 중결재를 주입하여 급결재 주입 시 발생한 주입관 주변의 공극을 채운다.

Fig. 6. Construction Procedure of Double Injection Method

3. 현장복원 시험

이중주입방식 침하복원공법의 복원성 및 충전성을 검증하기 위해 현장시험부설을 실시하였다. 복원성은 복원 시 수준측량을 통하여 검증하였고, 충전성은 복원 후 육안조사와 비파괴조사를 통하여 검증하였다.

3.1 시험재료의 선정 계획

3.1.1 주입재료 선정

주입재료는 겔타임 1~3초 내외의 급결재를 주입하여 구조물을 복원하고, 겔타임 30~50초 내외의 중결재를 주입하여 복원 시 발생할 수 있는 공극충진용으로 선정하였다.

3.1.2 압력 및 간격

복원재 주입압력은 구조물 하중을 고려하여 2 MPa 내외로 하고, 구조물 복원현황에 따라 부위별로 복원압력을 조절하는 방식을 채택하였으며, 주입관 간격은 고속철도 침목 4개소 당 1개의 주입관을 설치하는 거리($0.65 \text{ m} \times 4 \text{ ea} = 2.6 \text{ m}$)를 고려하여 2.5~2.7 m로 선정하였다.

3.2 공시체 제작

공시체는 콘크리트궤도 건설 시와 유사한 조건과 재료,

형상을 적용하였다. 표면다짐을 실시한 노반위에 $8.8 \text{ m} \times 10.0 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 의 철근콘크리트 슬래브(설계기준강도 24 MPa)를 제작하였다.

3.3 복원 공정

공시체 슬래브의 주입공수를 고려하여 Fig. 7과 같이 주입관을 배치하였다. 총 주입공 수 48공, 복원 목표는 30 mm로 하였다. 주입구간은 2개 구간으로 구분하여 각각 시험을 실시하였다.

Fig. 7. Injection Tube Layout (unit: mm)

공시체의 복원은 조성된 공시체의 슬래브 하부까지 천공($\phi 18 \text{ mm}$)한 후 주입관을 설치하고 복원량을 확인하기 위한 레벨(광파기 등)을 설치한다. 주입모르터를 배합한 후 Fig. 8(b)의 중앙제어장치를 통해 미세하게 조정·복원하며, 중앙제어장치는 각 주입관과 연결되어 주입순서, 주입량, 주입압력을 제어한다. 모르터는 겔타임 2초대의 급결성 재료와 겔타임 30초대의 중결성 재료가 반복적으로 주입되며, 복원공정은 다음과 같다.

- ① 급결재 주입을 통한 1차 복원(14~16 mm)
- ② 중결재 주입을 통한 공극 채움 및 2차 복원(24~26 mm)
- ③ 급결재 주입을 통한 3차 복원(29~30 mm)
- ④ 중결재 주입을 통한 공극 채움, 4차 복원 및 마무리

(a) Installation of Double Injection Pipe ($\phi 18$)

(b) Mixing Plant

(c) Control Device

(d) Injection of Grouting Material

Fig. 8. Restoration Process

4. 시험결과 및 분석

4.1 복원량 평가

공시체의 복원목표량을 허용잔류침하량 기준인 30 mm (MOLIT, 2015)로 하여 공정에 따라 급결재와 중결재를 반복적으로 주입하며 복원량을 계측하였다. Fig. 9는 공시체의 24개 지점에 대한 복원량을 나타낸 것이다. 레벨 및 광파기를 이용한 복원량 계측 결과, 전 구간에서 1 mm 이내의 오차범위에서 균등한 비율로 복원된 것으로 나타났다.

4.2 충전성 평가

4.2.1 공시체 단면조사

공시체 슬래브 하부의 충전상태를 확인하기 위하여 슬래브를 절단한 후, 단면의 측면 및 슬래브 하면의 충전상태를

검토하였다. 절단 단면의 측면을 검토한 결과, Fig. 10(b)와 같이 슬래브 하면과 노반 사이에 주입재가 주입된 것으로 나타났다. 또한 슬래브 하면을 확인한 결과, Fig. 10(c)와 같이 슬래브 하부 전면에 균등하게 주입재료가 분포하는 것으로 나타났다. 육안조사 결과, 주입재를 슬래브 하부 전면에 순차적으로 균등하게 주입하는 것이 가능하고 반복 · 순환주입의 효과로 약 0.5~2.0 mm 두께의 층상구조를 갖는 것을 확인하였다.

4.2.2 충격반향기법을 이용한 충전성 평가

공시체는 폭 8.8 m, 연장 20 m의 슬래브를 제작하여 복원 전과 후의 지배주파수 변화를 비교해 충전성을 평가하였다. 측정지점은 Fig. 11과 같이 종방향은 1 m 씩 21개, 횡방향은 1.1 m 씩 9개로 나누어 총 189개 지점에서 충전재 주입 전과 후의 값을 비교하였다.

(a) Measurement of Restoration Amount

(b) Restoration Amount by Point

Fig. 9. Assessment of Restoration Amount

(a) Cutting the Concrete Slab

(b) Injection State at the Slab Bottom

(c) Injection State at the Slab Bottom Side

Fig. 10. Visual Inspection

Fig. 11. Experimental Measurement Points on the Slab

먼저 Fig. 12와 같이 감진기를 슬래브 표면에 표시된 측정점에 고정하고 반경 15~20 cm 내외의 구간에서 Echo Hammer로 충격을 가하여 슬래브 내측으로 탄성파를 발생시킨다. 이때 발생한 공진주파수는 자료획득 시스템으로 전달

되어 저장되며, 표면파 스펙트럼 분석을 통하여 P파의 속도를 측정하였다.

Fig. 12. Measurement Method

시험에 사용된 슬래브 두께는 30 cm이고 공진주파수의 평균값은 4,718 Hz로 콘크리트 슬래브의 P파 속도를 역으로 구하면 약 2,830 m/s로 계산된다.

Fig. 13은 각 위치에서 측정한 대표적인 파워스펙트럼으로써, 충격에 의해 발생된 탄성파는 콘크리트 내부를 통과하여 콘크리트 하부와 흙의 경계에서 반사되어 측정된 값을 FFT 변환하면 공진주파수를 계산할 수 있다.

(a) #L2-01

(b) #L9-01

Fig. 13. Frequency Response at a Good Station

콘크리트 공시체를 타설한 상태에서 주입 전 1차 시험을 실시하고, 그라우트 주입 후 2차 시험을 실시하였다. Fig. 14는 2차 주입 시험 구간의 주입 전과 후에 측정된 공진주파수를 변환하여 두께를 환산한 값이다. 콘크리트 두께가 30 cm로 계획된 본 시험의 공시체는 P파속도가 2,830 m/s 일 때 공진주파수가 약 4,718 Hz가 된다.

Fig. 14. Contour of Resonance Frequency

Fig. 14(a)는 주입 전 공진주파수의 분포도를 나타낸 것이고, Fig. 14(b)는 주입 후 공진주파수의 분포도를 나타낸 것이다. 주입 전 측정된 공진주파수는 3,860~5,480 Hz 사이에 분포하며 공진주파수로부터 계산한 슬래브의 두께는 260~370 mm의 범위이다. 주입 후의 공진주파수 상태는 주입전보다 변화량이 작아졌고 3,500~5,500 Hz의 분포를 나타내며, 공진주파수로부터 계산한 슬래브의 두께는 260~400 mm이다. 복원 후 260 mm 두께로 나타난 구간은 일부 충전재와 콘크리트면이 밀착되지 않아 나타난 수치인 것으로 추정된다.

전체적으로 슬래브의 두께는 복원 목표치인 30 mm 가량 증가한 것으로 측정되어 충전성능을 확보한 것으로 판단 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트레도 침하복원 시 복원성 및 충전성을 확보하기 위하여 복원용 급결재와 충전용 중결재를 이원화하여 사용하는 이중주입방식을 개발하였다. 성능평가를 위하여 재료 및 현장시험부설을 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 마이크로시멘트(분말도 6,000~8,000 cm²/g)를 사용하는 급결재의 겔타입은 1~3초 범위이며 1시간 압축강도는 0.5~0.8 MPa, 28일 압축강도는 약 6.5 MPa로 나타났다. 또한 일반시멘트를 사용하는 중결재의 겔타입은 20~90초 범위이며 1시간 압축강도는 1.0 MPa, 28일 압축강도는 12.0 MPa로 나타났다. 따라서 공사 후 열차하중을 충분히 지지할 수 있는 초기강도 확보가 가능한 것으로 나타났다.
- (2) 복원용 급결재의 유효 주입반경은 약 1.2 m, 최대 주입범위는 약 2 m인 것으로 나타났다. 복원 시 주입압력은 구조물의 허용휨응력을 고려하여 급결재는 2.0~2.5 MPa, 중결재는 1.5~2.0 MPa이 적정한 것으로 나타났다.
- (3) 현장시험부설을 통하여 침하복원공법의 성능을 평가한 결과, 슬래브 침하 시 전 구간에 걸쳐 1 mm 이내의 오차로 복원이 가능한 것으로 나타났다. 또한 육안조사를 통해 충전성을 검토한 결과, 슬래브 하면과 노반 사이에 반복·순환 주입으로 인하여 급결성 재료와 중결성 재료가 층상구조를 나타냈고 전체 바닥면에 균등하게 주입되는 것으로 나타났다.
- (4) 슬래브에 충격을 가하고 반사되는 탄성파를 측정하여 공진주파수를 산정한 결과, 충전이 양호한 지점에서는 탁월주파수를 대역을 충분히 확인할 수 있었으나, 충전이 불량한 지점에서는 반사면이 2개 이상 발생하였고 탁월주파수의 대역을 확인하기 어려웠다. 주입 전·후의 슬래브 두께를 검토한 결과, 전반적인 두께의 증가를 확인할 수 있으므로 복원작업 완료 후 현장에서 충전성능 검증방법으로의 적용이 가능할 것으로 판단 된다.

References

- Lee, I.W. (2020). Suggestion of requirement for settlement restoration method considering running stability and track serviceability. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 23, No 5, pp. 395-406.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2015). *Railway design standards: Roadbed*. pp. 4-22.

Received	September 17, 2020
Revised	September 18, 2020
Accepted	September 24, 2020