TBM터널 궤도하부 채움재와 궤도진동과의 상관관계 분석

Analysis of Vibration of Slab Track in TBM Tunnel According to Bottom Filling Materials

박성범* · 이세희** · 김지환*** · 조국환****

Park, SungBum*, Lee, SeHee**, Kim, JiHwan***, and Cho, KookHwan****

Abstract

Due to the high speed of railway and the railway network passing through an urban area, the construction of tunnel using tunnel boring machine (TBM) has been increasing. During TBM tunneling, a deep filling section, about 3 m in depth, under the slab track is formed by the circular machine head. The research and the design standards for filling this section are currently insufficient. In addition, when the section is filled with lean concrete, it may negatively affect the propagation of train vibration. Therefore, it is necessary to analyze the dynamic behavior of filling materials and follow a suitable filling method. In this study, laboratory tests were conducted to determine the dynamic properties of bottom filling materials. Granular crushed stone with a cement content of 7-13% was selected as the filling material. Numerical analyses that reflect the results of the laboratory tests were also performed to analyze the dynamic behavior of the filling section under slab track. The results of these analyses showed that resonance occurred in the filling section depending on the critical and subcritical speeds of the vehicle.

Key words : TBM Tunnel, Bottom Filling Materials, Vibration of Slab Track, Resonance

요 지

최근 철도의 고속화로 인하여 선형의 직선화가 요구되고 도심지를 통과하는 철도망이 증가함에 따라 TBM터널 시공이 증가하고 있다. 철도터널에 TBM공법 적용시 기계의 원형헤드특성상 불가피하게 깊은 깊이의 궤도하부 채움구간이 발생하지만 이 구간의 채움방안에 대한 연구 및 설계기준은 현재 미흡한 실정이다. 또한 비용절감을 위해 콘크리트와 유사한 재료로 채움을 시행하고 있으나 채움구간을 불연속체로 시공할 경우 열차통과시 발생하는 진동의 전파에 영향이 발생할 수 있으므로 반드시 채움재료별 동적거동 분석을 수행하여 적절한 채움방안으로 시공하여야 한다. 본 논문에서는 시멘트 함유량 7~13%의 입도조정쇄석을 채움재료로 선정하고 각 재료의 동적물성치를 파악하고자 실내실험을 수행하였다. 또한 실내실험에서 얻어진 동적물성치를 수치해석에 적용하여 열차진동에 의한 채움구간의 동적거동을 분석하였다. 수치해석결과, 임계속도에서 공진현상이 발생하며, 일정 시멘트 함유량 이하일 경우 높은 진동가속도로 인해 채움구간의 불안정한 동적거동이 일어나므로 적절한 채움방안이 적용되어야 할 것으로 나타났다.

핵심용어 : TBM터널, 궤도하부 채움재료, 궤도진동, 공진현상

*정회원, 서울과학기술대학교 철도건설공학과 석사(E-mail: yan@seoultech.ac.kr)

Member, MS, Dept. of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science & Technology

**서울과학기술대학교 철도건설공학과 박사과정

Ph.D Candidate, Dept. of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science & Technology

***서울과학기술대학교 철도건설공학과 박사과정

Ph.D Candidate, Dept. of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science & Technology

****교신저자, 정회원, 서울과학기술대학교 철도건설공학과 교수(Tel: +82-2-970-6584, Fax: +82-2-973-5866, E-mail: khcho@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Railway Construction Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology

1. 서 론

철도의 고속화로 인하여 선형의 직선화가 요구되고 산지가 국토의 약 70% 차지하는 국내의 지형특성 및 도심지를 통과하는 철도망이 증가함에 따라 터널의 비율이 증가하는 것은 당연한 실정이다. 터널 굴착공법 중 TBM공법은 저소음, 저진동 기계화 공법이라는 특성으로 인해 그 필요성이 더욱 증대되고 있고 이미 미국·유럽 등에 도심지 터널 중 80% 이상은 TBM공법이 적용되고 있다. 이러한 세계적인 추세에 맞추어 국내에서도 TBM공법을 적용한 시공 빈도가 높아지고 있지만 국내 철도설계기준 및 시방서에서 궤도하부 채움에 대한 기준은 Table 1과 같이 단순 여굴부 두께 및 허용강도에 대해서만 명시되어 있다. 또한 TBM터널에서 열차진동에 의한 궤도하부의 동적거동과 관련된 기준 및 연구는 미비한 실정이며 국내 철도터널 하부의 동적거동에 대한 연구는 주로 NATM터널 단면의 여굴채움구간 거동분석이 이루어져 있다.

Bae (2017)는 여굴처리방법에 대한 안정성 검토를 수행하였고 물성치 가정에 의한 수치해석 및 버림콘크리트와 혼합골재 2가지 경우의 여굴부 처리방법에 대해서 연구를 진행하였다. 연구결과, 혼합골재 채움방법의 경우 열차의 임계속도(226 km/h) 대역에서 가속도는 약 4.5배 변위는 약 2.4배 크게 나타나므로 이 대역에서의 공진 영향 및 구조물 안정성 확보를 만족하는 열차속도제한 검토가 필요할 것으로 나타났다.

Seo and Cho (2017)는 버림콘크리트 이외의 다른 여굴채움재의 사용 가능성을 검토하기 위해 다양한 배합비로 공시체를 제작하고 일축압축강도시험, 공진주시험을 통해 그 결과를 분석하였다. 또한 수치해석을 통한 정적 및 동적 안정성 검토를 수행하고 터널내 궤도에 현장계측을 수행하였다. 이를 통해 여굴구간에서의 공진현상을 분석하여 콘크리트 대비 동등하게 동적거동을 하는 여굴 채움방안(시멘트 함유량 16% 이상)을 제시하였다.

Kim and Jang (2006)은 궤도 형식에 따른 궤도와 차량의 진동특성을 분석하기 위해 경부고속철도 터널 내 자갈 및 콘크리트 궤도와 차체의 진동가속도를 측정하여 주파수

해석을 수행하였다. 터널 내에서 80Hz 대역의 주파수에서 레일과 차량의 진동이 크게 발생하였고 콘크리트 슬래브궤도에서 레일의 진동이 더 큰 것으로 나타났다. 이를 통해 레일지지 스프링의 동적특성 변화에 따라 전체 시스템의 진동특성이 달라질 수 있다고 분석하였다.

철도 TBM터널은 기계헤드 특성 및 노선계획으로 NATM터널보다 깊은 하부구간이 발생할 수 있다. 이러한 궤도하부에 단순히 허용강도만을 만족하는 혼합골재를 병행한 채움재로 시공할 경우, 열차주행 중 발생하는 반복진동의 전파 및 반사과정에서 연속체와는 다른 영향을 미치게 되며 반사파의 중첩에 의한 공진현상이 발생할 수 있다. 이는 열차의 안전운행에 위험요소로 작용할 수 있으며 궤도균열 및 손상이 발생하게 된다. 따라서 열차하중을 직접적으로 작용받는 궤도하부는 허용강도와 같은 정적안정성을 만족할 뿐만 아니라 진동에 의한 동적안정성 검토가 필수적이라 할 수 있다.

본 논문에서는 TBM터널에서 열차운행시 하부 채움구간의 동적거동 특성을 파악하려 한다. 불연속체의 재료별 동적 안정성을 검토하기 위해 시멘트 함유량에 따라 채움재료를 선정하고 실내실험을 통해 재료의 동적물성치를 파악하였다. 이를 수치해석에 적용하여 각 채움방식별 동적거동에 대해 분석하였다. 정적안정성은 사전 일축압축시험을 통해 분석한 결과 시멘트 함유량 11% 이상 배합시 만족하는 것으로 나타난 바 있다.

2. 동적물성치 평가를 위한 실내실험

2.1 실험개요

2.1.1 회복탄성계수 정의

터널시공 시 기초 바닥부 여굴재료의 지지력과 같은 정적 특성은 기존 연구에서 분석된 바 있다. Han (2017)은 버림골재를 이용한 채움재에 대해 여러 조건에서의 평판재하시험을 수행하여 지지력계수를 산정하였다. 채움재 두께가 작을수록 지지력계수가 증가하고 이는 채움재 하부의 원지반이 채움재에 비해 강성이 큰 암반이기 때문으로 분석된 바 있다.

시공 후 철도터널에서의 궤도하부는 열차운행으로 주기

Table 1. Design Criteria of Bottom Filling Materials

Division	Contents
Railway Design Guidelines (KR C-12070, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> Tunnel bottom overbreak thickness is not considered in the ballast track, but is applied only to the concrete track and the invert that fills the concrete by removing the bottom refuse. The bottom part is filled with 18MPa and the invert is determined according to the rock quality and site conditions. Bottom overbreak thickness: 15cm
Railway Construction Specification: Roadbed (KR, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> In case of overbreak due to over-excavation at the bottom of tunnel, it should be cleaned with high pressure water and filled with lean concrete or equivalent material.

적인 반복 윤하중을 받는다. 특히 열차 통과 시 철도노반에는 반복적인 재하(load)와 제하(unload) 과정에 의한 일정한 응력이 발생하게 되며 회복변형과 동시에 미소한 영구변형이 축적되게 된다.

Fig. 1은 반복하중의 영향을 받는 변형 곡선을 나타낸다. 탄성계수 시험 시작 직후 높은 소성 변형이 발생하지만 하중재하가 반복될수록 소성 변형률은 감소하고 회복변형률이 지배적으로 나타난다. 약 100~200회의 반복하중을 재하 후 변형률은 대부분 일정하게 회복되는데 이를 회복변형률 ϵ_r 이라 한다. 제하시 회복되는 변형률은 제하시 입자에 저장되었던 탄성에너지에 의해 일어나는 것이다.

삼축압축시험에서 회복변형률(ϵ_r)에 대한 축차응력($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$)의 비를 회복탄성계수(M_R)라 하며 다음 Eq. (1)과 같다(Seed et al., 1962).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

여기서, M_R : 회복탄성계수(resilient modulus)
 σ_d : 반복 축차응력(deviatoric stress)
 ϵ_r : 회복변형률(recoverable strain)

Fig. 1. Definition of Resilient Modulus (Sağlık and Gungor, 2012)

본 연구에서는 혼합골재를 병행한 채움재료의 동적물성을 판단하기 위해 반복적인 축하중을 가할 수 있는 시험기를 이용하여 회복탄성계수를 측정하였다.

철도 노반재료의 회복탄성계수에 대한 기존 연구사례로

Park et al. (2009)은 입도조정쇄석, 화강풍화토, 암버럭-토사 혼합 재료에 대해 평균유효주응력과 축변형률의 함수로 표현되는 회복탄성계수 예측모델을 제시하였다.

Park et al. (2017)은 반복삼축압축시험을 통해 산정된 회복탄성계수와 중형공진주시험을 통해 산정된 전단탄성계수와와의 상관성을 분석하였다.

Lee et al. (2014)은 대형삼축압축시험을 이용하여 강화노반재료의 회복탄성계수를 측정하였고 회복탄성계수 예측모델의 상수값을 제시하였다.

노반재료의 회복탄성계수와 모델개발에 대한 연구가 다수 진행되고 있으나 작은 입자의 토사재료가 대부분이고 터널 궤도하부 채움구간에 적합한 입경이 크고 콘크리트와 유사한 재료의 동적물성 시험은 현재 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 터널 궤도하부 채움재료로써 기존 노반재료의 입도규정을 만족하는 혼합골재에 시멘트를 함유하여 강성을 높이고 각 시멘트 함유량에 따른 재료의 동적 물성치를 측정하였다.

2.1.2 공시체 제작

여굴 및 인버트구간의 채움재료는 버림콘크리트 또는 동등 이상의 재료를 사용하도록 규정하고 있다(철도건설공사 전문시방서 노반편, KR, 2017). 동등재료로써 정적강도를 충족시켜 시공될 수 있지만, 불연속체에 따른 동적거동의 고려사항은 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 콘크리트 대비 경제성을 고려하고 동적 안정성을 파악하고자 시멘트 함유량에 따라 케이스를 구분하여 공시체를 제작하였다. 공시체 제작시 고려사항으로 골재의 입도분포, 시멘트 함유량, 물/시멘트비(W/C), 시멘트/골재비(C/G)를 산정하여 제작하였다.

Table 2는 공시체의 Case별 시멘트 함유량을 나타낸다. 시멘트 함유량은 공시체에 반영되는 총 골재중량의 최소 7%부터 최대 13%까지 케이스별 2%씩 증가하여 산정하였다.

Table 2. Cases of Specimen

Case	Type
Case 1	7% cement content
Case 2	9% cement content
Case 3	11% cement content
Case 4	13% cement content

터널 여굴 및 인버트 채움재의 입도분포 규정이 없기 때문에 철도설계기준 노반편(Korea Rail Network Authority, 2017) 강화노반층 재료의 입도 규정을 참고하여 공시체를 제작하였다. 입도조정 부순골재 중 최대입도 25 mm인 M-25 체를 통과하는 재료의 질량 백분율 범위에서 Average를 적용하여 입도를 조정하였다. 공시체 배합시 사용된 입도분포는 Table 3과 같다.

Table 3. Mixing Ratio

Standard Sieve (mm)	Percent Passing (%)	Percent of mass retained on each sieve (%)	Case (g)
31.5	100		0
26.5	97.5	2.5	67.2
13.2	70	27.5	739.2
4.74	47.5	22.5	604.8
2.36	35	12.5	336
0.42	20	15	403.2
0.075	6	14	376.32
PAN	0	6	161.28
Sum			2688

Tables 4와 5는 각각 공시체 별로 반영된 시멘트/골재비(C/G)와 물/시멘트비(W/C)를 나타낸다. 물/시멘트비는 적절한 공시체 성형을 위해 사전 산정실험을 수행하여 공시체 성형에 필요한 최소 비율로 산정하였다. 실험의 오차를 고려하기 위해 공시체는 각 시멘트 함유량 Case별로 3개씩 제작하였다. 공시체는 Fig. 2와 같이 직경 100 mm, 높이 160 mm 크기의 몰드를 이용하여 제작하고 28일 양생하였다.

Table 4. Cases of C/G

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Gravel (g)	2688			
Cement (g)	188.16	241.92	295.68	349.44
C/G (%)	7	9	11	13

Table 5. Cases of W/C

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Cement (g)	188.16	241.92	295.68	349.44
Water (g)	244.608	241.92	206.976	244.608
W/C (%)	130	100	70	70

(a) Specimen mold

(b) Sorting aggregate

(c) Curing specimen

(d) Specimen

Fig. 2. Production Process of Specimen

2.1.3 실험조건

열차운행에 대한 채움재료의 동적거동을 파악하기 위해 Sine 파 형태의 반복하중을 재하하였다.

실험에 앞서, 실제 열차하중 재하시 채움구간의 응력상태를 파악하기 위해 사전 수치해석을 수행하여 채움구간에 작용하는 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)을 분석하였다. 축차응력은 수직응력과 구속응력의 차로 산정하였으며 원지반해석을 통한 구속응력과 열차의 복선운행시 발생하는 채움구간의 최대 수직응력으로 산출하였다. 사전수치해석의 물성치는 본 논문의 동해석 물성치를 사용하였고 채움구간은 콘크리트 채움의 물성치를 적용하였다.

산출결과, Table 6과 같이 축차응력은 깊이별 최대 80 kPa 내외로 분석되었다. 따라서 본 실험에서 하중조건으로 Fig. 3(a)의 시험기기 특성을 고려하여 구속압력 없이 80 kPa의 단일 축하중을 재하 하였다.

Table 6. Deviator Stresses by Depth

Depth	Deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$)
	0.5 m	52.8 kPa
	1.5 m	71.3 kPa
	2.5 m	80.3 kPa

하중의 빈도수에 따라 회복되는 탄성변형률이 다를 것으로 가정하고 이에 대한 탄성계수의 상관성을 분석하고자 열차속도를 고려하여 하중의 빈도수를 0.5 Hz부터 5 Hz까지 0.5 Hz와 1 Hz씩 구별하여 진행하였다(Table 7). 하중빈도수는 Eq. (2)를 이용하여 산출하였다. 이 때 하중 타격거리는 표준 열차하중인 EL-18 하중의 유효타격거리 18 m를 사용하였다.

$$f = \frac{v}{d} \quad (2)$$

여기서, f : 하중 빈도수 (Hz)

v : 하중 재하속도 (m/s)

d : 하중 타격거리 (m)

Table 7. Vehicle Speed by Frequency

Frequency	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz
Vehicle Speed	32 km/h	65 km/h	130 km/h	194 km/h	260 km/h	324 km/h

하중 재하 사이클 수는 GTX-A노선의 하루 평균 열차 운행 대수를 고려한 유효타격횟수를 연속적으로 재하하는 500회로 설정하였다. 실험의 신뢰성을 확보하기 위해 각 Case 별로 3회씩 수행하였다. 실험조건에 대한 개요는 Table 8과 같다.

Table 8. Test Condition

Condition	Value					
Deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$)	80 kPa					
Cycle	500					
Load frequency	0.5Hz	1Hz	2Hz	3Hz	4Hz	5Hz

본 실험에서는 저변형률 영역에서의 변형률을 측정하기 위해 1축 변형률 게이지를 시편에 추가로 부착하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 1축 변형률 게이지는 $\mu m/m$ 범위의 변형률을 측정가능하며 분석시 수신된 신호를 FFT 분석으로 전기신호의 노이즈를 제거하여 정확한 변형률값을 산출하였다.

Fig. 3. Experimental Equipment

2.2 실험결과

Fig. 4는 시간에 따른 정현하중과 그에 대응되는 변형률을 나타낸다. 정현하중이 재하되므로 그에 따른 변형률도 정현파 형태로 나타난다.

Fig. 5는 실험결과를 응력-변형률 관계 그래프로 나타낸 것이다. 모든 Case의 응력-변형률 형태는 Fig. 5와 같은 형상으로 나타났으며, 흙의 거동과 다른 점은 하중재하 초기부터 소성영역에서의 변형은 거의 일어나지 않고 탄성영역에서

의 변형상태가 지배적이다. 흙은 입자의 재배열, 간극수압 등의 영향으로 초기 소성거동이 본 실험시편보다 크게 나타난다. 실험결과에서 나타난 탄성영역에서의 거동은 일정한 응력 범위 내에서 시멘트가 일정범위 이상 함유된 채움재 재료를 콘크리트와 유사한 탄성체로 볼 수 있으며, 이 탄성영역에서 반복되는 탄성변형률에 대한 응력의 기울기를 통해 회복탄성계수를 산정할 수 있다. 본 논문에서는 반복변형률에 대한 응력의 할선 기울기를 회복탄성계수로 산정하였다. 하중은 정현하중으로 일정하기 때문에 하중 재하시 변형률을 평형상태로 가정하고 하중 재하시 나타나는 변형률의 반복적인 진폭 중 미소하게 가장 큰 값을 산정하여 회복탄성계수를 결정하였다. 각 Case 별 회복탄성계수를 Table 9와 같이 정리하였다.

Fig. 4. Stress and Strain Graph **Fig. 5.** Stress-strain Graph**Table 9.** Resilient Modulus by Cement Content and Frequency (MPa)

Case	Frequency					
	0.5 Hz	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz
7%	5266	5268	5327	5397	5416	5445
9%	7737	7812	7851	7926	8094	8132
11%	10035	10163	10316	10472	10732	10823
13%	13081	13263	13424	13634	13850	14066

시멘트 함유량에 따른 회복탄성계수는 시멘트의 함유량이 높아질수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트 함유량이 높아질수록 공시체의 강도가 높아짐에 따라 동일한 응력 범위에 대한 변형률이 감소하여 나타난 것으로 판단된다.

또한 모든 시멘트 함유량 Case는 하중 주파수가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. Kim and Stokoe (1992)는 공진주실험을 통해 하중주파수에 대한 탄성계수의 변화는 하중주파수가 대수적인 증가에 따라 회복탄성계수가 선형적으로 증가하며 소성지수에 영향이 있다고 보고하였다. 하지만 건조 사질토의 경우 하중주파수의 영향이 거의 없는 것으로 보고되고 있다(Iwasaki et al., 1978; Bolton and Wilson, 1989). 이러한 연구에서는 대부분 작은 입자의 토사재료에 대한 연구가 대부분이며 하중 사이클 수가 제한적이다. 본 채움재 시편은 재료적인 측면에서 입도조정쇄석을 바탕으로 비교적 큰 골재를 사용하여 입도분포를 결정하였고 시멘트를 함유했다는 점에서 기존 연구와 차이점이 있다. Fig. 6에서 하중주파수에 따른 탄성계수 변화량이 시멘트 함유량에 비례하는 것으로 나타난다. 따라서 시멘트는 하중주파수 변화에 대한 주요영향인자 중 하나일 것으로 판단된다.

Fig. 6. Resilient Modulus by Load Frequency

본 실험결과를 통해 수치해석에 적용할 시멘트 함유량별 동탄성계수는 Table 10과 같다. 이는 보수적인 실험결과를 수치해석에 적용하는 것이 안정성검토의 안전측으로 판단되어 시멘트 함유량별로 가장 낮은 탄성계수값을 선정하였다.

Table 10. Estimation of Dynamic Elastic Modulus for Dynamic Stability Review

Case	Elastic modulus (MPa)
7% Cement content	5266
9% Cement content	7737
11% Cement content	10035
13% Cement content	13081

3. 수치해석을 통한 동적안정성 검토

3.1 수치해석 개요

TBM터널 하부 채움구간의 동적거동 특성을 파악하기

위해 TBM터널 단면을 모델링하고 실내실험으로 얻은 동탄성계수를 채움구간에 적용하여 수치해석을 실시하였다. 먼저 모델링 단면에 대한 고유치해석을 수행하여 각 채움방식별로 진동수와 진동모드 형상을 파악한 후 동해석을 수행하여 해당 구조물이 열차하중에 반응하는 동적거동을 분석하였다.

3.1.1 해석 모델링

채움구간의 진동에 대한 거동을 파악하기 위해 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS GTS NX를 이용하여 동적안정성을 검토하였다.

Fig. 7. Numerical Modeling

해석모델은 Fig. 7과 같으며 GTX-A노선의 TBM터널 구간 설계단면을 모델링하였다. 레일 및 도상은 실제 운행구간을 모사하여 Elastic으로 모델링하였으며 주변 암반층은 2등급 화강암으로 구성하였다.

본 연구에서는 터널 내부 궤도하부 채움구간에 대한 동적거동이 주요 분석대상이다. 궤도하부 채움구간은 약 3 m이며 이 구간을 지나 열차하중에 의해 발생한 진동이 터널 주변 암반으로 전파되는 영향을 고려하여 터널 외부 주변 암반층 범위를 4D까지 고려하여 모델링하였다. 수치해석에 사용된 지반 물성치는 Table 11과 같다.

궤도하부 채움재료는 앞서 동탄성계수 실험 시료의 시멘트 함유량 각 7%, 9%, 11%, 13%로 케이스를 나누어 재료의 물성치를 변화시켰다. 또한 주변암반 구간은 Mohr-columb 모델을 사용하여 모델링하였다. Table 12는 동적안정성 검토에 사용된 각 채움재 케이스별 물성치를 나타낸다.

3.2 임계속도 산정

고유치해석을 수행하여 질량참여율이 가장 높은 고유진동모드를 산정하고 각 모드별 주기를 도출할 수 있다. 주기를 역분하여 채움구간의 시멘트 함유량별 고유진동수를 구하고 열차반복하중 재하시 공진이 유발될 수 있는 임계속도를 산정하였다.

$$\Omega(Hz) = V / S_{eff} = \omega_1(Hz) \quad (3)$$

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff} \quad (4)$$

Table 11. Material Properties of Numerical Analysis

	Model type	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	C (kPa)	ϕ (°)
Level II rock	Mohr - Coulomb	26	14,000	0.22	1,500	42
Rail	Elastic	78	210,000	0.30	-	-
concrete	Elastic	24.0	25,000	0.20	-	-
Slab	Elastic	24.0	29,000	0.20	-	-
shotcrete	Elastic	24.0	23,000	0.20	-	-

Table 12. Properties of Filling Materials

Case	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν
7% Cement content	22.9	5266	0.30
9% Cement content	23.3	7737	0.29
11% Cement content	23.7	10035	0.26
13% Cement content	24.2	13081	0.22
Concrete	23.7	25000	0.20

Table 13. Natural Frequency and Critical Speed by Cement Content

Case	Natural frequency	Critical speed	1 st Subcritical speed	2 nd Subcritical speed
7% Cement content	5.80 Hz	375 km/h	188 km/h	125 km/h
9% Cement content	6.00 Hz	389 km/h	195 km/h	130 km/h
11% Cement content	6.10 Hz	395 km/h	198 km/h	132 km/h
13% Cement content	6.24 Hz	404 km/h	202 km/h	135 km/h
Concrete	6.35 Hz	412 km/h	206 km/h	137 km/h

여기서, Ω : 열차 운행진동수

V_{cr} : 열차 임계속도

S_{eff} : 유효타격간격

w_1 : 1차 모드 고유진동수

또한 임계속도를 정수비로 나누어 부임계속도(Subcritical speed)를 산정할 수 있으며 식은 Eq. (5)와 같다.

$$V_{scr} = \frac{w_1}{i} \times S_{eff} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

유효타격간격은 EL-18하중의 객차 간 중심간격(18m)을 적용하였다. 열차의 부임계속도(Subcritical speed)는 열차의 주행속도에 대하여 교량의 진동주기가 n배로 반응하는 경향을 나타낸다(Kim et al., 2005). Eqs. (4) and (5)를 통해 Case 별 임계 및 부임계속도를 구하여 Table 13에 나타내었다.

3.3 동해석

이동하중 해석시 해석시간 간격을 열차 하중재하 시간에

맞게 산정하여 해석하였으며 정확한 해석을 위해 비선형 시간이력해석법을 이용하였다. 각 채움재에 대한 동적물성치는 앞서 수행한 고유치해석과 같이 실내실험 결과를 바탕으로 산정하였고 기존 여굴채움방안인 콘크리트를 추가로 해석하여 혼합골재를 병행한 채움방안의 안정성을 비교분석하였다. 또한 경계조건으로 인한 진동영향을 배제하기 위해 점성경계를 사용하여 모델링 하였다.

3.3.1 감쇠 및 하중조건

동적해석 수행 시 경계면에서의 진동 흡수와 달리 해석영역 내에서 지반운동의 형상에 따른 기하학적인 감쇠(Geometric Damping), 매질의 역학적 특성에 의한 재료감쇠(Material Damping)에 의해 열차운행으로 발생한 진동의 진폭이 감소하는 현상을 적절히 고려할 필요가 있다.

기하학적인 감쇠는 응력파가 구형으로 전파되어 생기는 진폭 감소현상으로 일반적으로 해석프로그램 내에서 감쇠 효과가 별도의 설정을 하지 않아도 반영 된다. 그러나 매질의 역학적 특성에 의한 재료의 감쇠 현상의 경우, 진동이 전파되면서 열 또는 마찰 등에 따라 발생하는 에너지 손실현상을 고려하지 않으면 매질 내에서 자유진동(Free Vibration)이

발생하게 되어 진동의 전파거리에 따른 감쇠 현상을 고려할 수 없기 때문에 합리적인 해석결과를 얻을 수 없다. 전파거리에 대한 감쇠현상은 매질의 공학적 특성에 따라 그 크기가 달라지는데, 일반적으로 강성이 큰 암반 매질을 통과하는 경우 연약한 지반을 통과하는 경우보다 감쇠가 작다. 또한 매질이 같은 경우에도 지반운동의 주파수에 따라 감쇠의 정도가 달라진다.

따라서 연속체역학에 근거한 동적해석 수행 시 시스템의 자유진동을 감쇠시키고 거리에 따른 감쇠현상을 고려하기 위해 일반적으로 레일리 감쇠비(Layleigh Damping Ratio)가 사용되며, 본 해석에서는 콘크리트와 지반에서 가장 일반적으로 사용되는 값인 레일리 감쇠비 2%, 5%를 적용하여 수치해석을 수행하였다(Psarropoulos et al., 2005; Kim et al., 2011).

터널 하부지반에 가해지는 진동의 가진원은 열차하중이므로 각 레일에 바퀴 하나를 모사하여 유효타격거리의 주파수로 하중을 재하하였다. 해석에 사용한 하중종류는 GTX차량의 EL-18 표준열차하중이며 8량으로 구성하였다. EL-18의 정적윤중과 동적할증계수(DAF)를 고려하여 속도별 동적윤중과 그에 따른 가진 주파수를 산정하였고 Table 14에 나타내었다. EL-18 표준열차하중의 재하도는 Fig. 8과 같다.

본 해석에서는 열차속도를 고유치해석을 통해 산정한 임계속도를 포함하여 60 km/h부터 430 km/h까지 40 km/h씩 증가시켜 각 Case의 공진대역을 검토하였다.

Table 14. Load Condition

Vehicle	Static wheel load (kN)	Speed (km/h)	DAF	Dynamic wheel load (kN)	Excitation frequency (Hz)
EL-18	90	100	1.22	132	1.5
		200	1.27	138	3.1
		300	1.33	143	4.6

Fig. 8. EL Standard Vehicle Load (Unit: kN/m) (KR C-08010, 2014)

3.4 해석 결과

Fig. 9는 동해석을 통해 얻어진 각 Case별 진동가속도 및 변위를 비교한 것이다.

Fig. 9에서 임계속도 부근에서 수직가속도 및 변위가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 각 Case의 임계속도는 375 km/h와 412 km/h 사이에 있으며 350 km/h와 430 km/h보다 임계속도에서 동적응답이 큰 것으로 보아 임계점에서 동적증폭이 크게 이루어지고 임계점을 지나면서 다시 줄어드는 경향이 나타났다.

또한 진동가속도 및 변위는 속도가 증가함에 따라 커지는 경향이 나타났으며 이는 속도에 따른 동적윤중이 증가하여 나타나는 결과로 판단된다. 속도 증가에 따른 가속도 및 변위 증가의 영향을 배제하고 공진으로 인한 동적증폭량을 Case별로 비교하기 위해 Fig. 10과 같이 속도에 따른 증가량의 추세선을 도출하였다. 추세선은 가속도 및 변위의 증가량이 선형적으로 증가하는 것으로 가정하여 60 km/h와 430 km/h의 차이를 기울기로 산정하였다.

공진으로 인한 동적증폭량을 분석하기 위해 Fig. 9의 임계 및 부임계속도 해석결과값을 Fig. 10의 해당속도 추세선값에 대한 비율로 나타내어 각 Case별로 비교하였다. 임계속도에서의 동적증폭량은 콘크리트의 경우 속도에 따른 진동가속도 증가량에 대해 약 1.3배(해석값/추세값)로 채움방식 중 가장 적게 나타났으며 특히 강성이 가장 작은 시멘트 함유량 7%에서 약 2배로 채움방식 중 가장 크게 증폭되었다. 또한 시멘트 함유량 9%와 11%

Fig. 9. Numerical Results According to Speed

(a) Vibration acceleration

(b) Displacement

Fig. 10. Trend Lines by Speed Increase

의 해석값/추세값 비율은 각각 1.8배, 1.4배로, 시멘트함유량 9%의 추세값이 11%보다 작게 나타났지만 오히려 Fig. 9(a)의 임계속도에서 해석값이 더 크기 때문에 동적증폭량은 더 큰 것을 알 수 있다.

이와 마찬가지로 부임계속도 대역에서도 주변 속도대역에 비해 가속도 및 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 정수비가 클수록 임계속도의 공진현상보다 공진의 크기 및 위험성은 낮지만 해석결과, 1차 및 2차 부임계속도에서 시멘트함유량 Case의 진동가속도는 속도에 따른 진동가속도 증가량에 대해 약 1.3~2배 증폭되므로 열차가 부임계속도로运行时 도상은 진동으로 인한 불안정한 동적거동이 일어날 수 있다.

공진현상이 발생하는 속도대역에서 Fig. 9(b)와 같이 변위가 증가하는 경향이 나타나며 Fig. 10(b)와 같이 회복탄성계수의 차이에 따라 채움구간에 발생하는 변위의 형성구간이 다른 것으로 나타났다. 재료의 강성이 작을수록 변위의 형성구간이 큰 것을 알 수 있으며 시멘트함유량 7%의 변위는 9%에 비해 약 1.8배 큰 것으로 나타났다. 하지만 변위량은 선로유지관리지침에 제시된 허용변위 2 mm 이하에 비해 미소한 값이므로 운행안정성 측면에서 열차진동에 따른 변위는 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

속도대역별 동해석을 수행한 결과, 채움재의 강성이 작을수록 공진영역에서 진동가속도의 동적증폭이 더 큰 것으로 나타나는 것은 채움구간 재료의 강성이 진동에너지 전파 크기의 주요 영향인자임을 알 수 있다. 채움재의 재료적 성질에 따라 동적증폭이 작아질 수 있으나 이는 진동가속도 제한 규정이 있는 교량분야뿐만 아니라 폐합된 터널에서도 공진현상에 대한 주의가 필요한 사항으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 TBM터널 궤도하부 채움구간과 열차진동에 대한 상관성을 분석하였다. 동적거동을 분석하기 위해 궤도 하부 채움재료에 대한 동적 물성치를 실내실험을 통해 산정하였고 실내실험 결과를 적용한 수치해석을 수행하여 동적안정성을 검토하였다. 시멘트 함유량(7~13%) 및 콘크리트채움에 따라 각 Case를 분류하였고 동적거동 분석에 대한 결과는 다음과 같다.

- (1) 실내실험 결과 시멘트함유량이 높아질수록 회복탄성계수가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트 함유량이 높아질수록 공시체의 강도가 높아짐에 따라 동일한 응력범위에 대한 변형률이 감소하여 나타난 것으로 판단된다. 또한 회복탄성계수는 각 Case 별로 하중주파수가 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며 탄성계수의 증가폭이 시멘트 함유량에 비례하는 것으로 보아 하중주파수의 주요영향인자는 시멘트일 것으로 판단된다.
- (2) 실내실험에서 얻어진 동적물성치를 수치해석에 적용하여 채움방식별로 채움구간의 동적거동을 분석한 결과, 모든 Case는 터널 궤도하부 채움구간에서 임계속도 및 부임계속도에 따른 공진현상이 발생하는 것으로 나타났다. 특히 시멘트 함유량이 가장 적은 7%의 경우 임계 및 부임계속도에서 동적 증폭이 가장 컸으며, 시멘트 함유량이 가장 큰 13%의 경우 콘크리트 채움과 유사한 동적거동 경향이 나타났다. 이는 하부구간 채움재료의 시멘트 함유량이 증가할수록 공진현상에 의한 동적응답이 작아지는 것으로 분석되었다.

- (3) TBM터널은 궤도하부에 큰 채움구간이 필연적으로 존재한다. 따라서 재료의 충분한 강성을 보유하고 연속체 매질에 가까운 채움방안이 필수적이다. 본 연구결과는 터널 궤도하부 채움구간에 대해 공진현상과 같은 동적거동의 면밀한 분석이 중요하다는 것을 보여준다.
- 만약 재료의 강성이 낮아 동적응답이 큰 공진현상이 지속 반복된다면 하부구간의 소성변형으로 인해 도상의 균열, 궤도틀림 등이 발생할 수 있음을 밝혀내었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업(19CTAP-C152137-01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bae, S.M. (2017). *Stability analysis of remedy measure for the overbreaks in railway tunnel bottom*. Master's thesis, Seoul National University of Science & Technology.
- Bolton, M.D., and Wilson, J.M.R. (1989). An experimental and theoretical comparison between static and dynamic torsional soil tests. *Géotechnique*, Vol. 39, No. 4, pp. 585-599.
- Han, S.M. (2017). *A case study on properties of the over-break filling materials at tunnel abutment foundation*. Master's thesis, Hanyang University.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Takagi, Y. (1978). Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading. *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-56.
- Kim, D., and Stokoe II, K.H. (1992). Characterization of resilient modulus of compacted subgrade soils using resonant column and torsional shear tests. *Proceedings of Transportation Research Board 71st Annual Meeting*, Washington D.C.
- Kim, M.C., and Jang, S.Y. (2006). Characteristics of vibration of track and vehicle body according to type of track in tunnel of high-speed railway lines. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 1D, pp. 125-132.
- Kim, S.I., Chung, W.S., and Choi, E.S. (2005). A study on the optimal span length selection of conventional railway bridges considering resonance suppression. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 8, No. 2, pp. 137-144.
- Kim, Y.M., Jeong, S.S., Kim, K.Y., and Lee, Y.H. (2011). A study on the dynamic behavior of vertical shaft in multi-layered soil. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 4C, pp. 109-116.
- KR C-08010. (2014). *Bridge design general*. Railway Design Guidelines, Korea Rail Network Authority. (한국철도시설공단. (2014). 철도설계 지침 및 편람 KRC-08010 교량 설계일반.)
- Korea Rail Network Authority (KR). (2017). *Railway construction specification: Roadbed*. (한국철도시설공단. (2017). 철도건설공사 전문시방서 노반 편.)
- KR C-12070. (2017). *Excavation*. Railway Design Guidelines, Korea Rail Network Authority. (한국철도시설공단. (2017) 철도설계 지침 및 편람 KRC-12070 굴착.)
- Lee, S.J., Lee, J.W., Lee, S.H., and Sagong, M. (2014). Evaluation of resilient modulus for reinforced trackbed using large triaxial tests. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 17, No. 6, pp. 415-422.
- Park, C.S., Hwang, S.K., Choi, C.Y., and Mok, Y.J. (2009). Development and assessment for resilient modulus prediction model of railroad trackbeds based on modulus reduction curve. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2C, pp. 71-79.
- Park, J.B., Choi, C.Y., Lim, S.J., and Lim, Y.J. (2017). A possible test method proposed for resilient modulus (M_R) and analysis of correlation between resilient modulus and shear modulus of track subgrade soil. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 20, No. 1, pp. 85-98.
- Park, S.B. (2019). *Analysis in vibration of slab track in TBM tunnel according to bottom filling materials*. Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology.
- Psarropoulos, P.N., Klonaris, G., and Gazetas, G. (2005). Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, No. 7-10, pp. 795-809.
- Sağlik, A., and Gungor, A.G. (2012). Resilient modulus of unbound and bituminous bound road materials. *Proceedings of 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 13-15th June 2012, Istanbul.
- Seed, H.B., Chan, C.K., and Lee, C.E. (1962). Resilience characteristics of subgrade soils and their relation

to fatigue failures in asphalt pavements. *Proceedings of 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Michigan, USA.

Seo, J.W., and Cho, K.H. (2017). Static and dynamic analysis for railway tunnel according to filling materials for overbroken tunnel bottom. *Journal of*

the Korean Society for Railway, Vol. 20, No. 5, pp. 668-682.

Received	■	November 1, 2019
-----------------	---	------------------

Revised	■	November 1, 2019
----------------	---	------------------

Accepted	■	November 21, 2019
-----------------	---	-------------------