

고속 철도와 도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동을 산정 연구

Calculation of the Normal Operation Rate of Monitoring Hardware in the Long Tunnels of High-Speed and Urban Railways

우종태*

Jong-Tae Woo*

Professor, Department of Civil Engineering using Drone, Kyungbuk University, Namyangju, Republic of Korea

*Corresponding author: Jong-Tae Woo, jtwoo@kbu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The objective of this study was to improve smart monitoring and monitoring management technology in long tunnels by investigating and analyzing the normal operation rates of monitoring hardware in the long tunnels of high-speed and urban railways. **Method:** This study evaluated, analyzed, and compared the normal operation rate of 6-8 types of monitoring hardware for each long tunnel, targeting three high-speed railway lines with a long tunnel (i.e., Suseo-Pyeongtaek Line, Gyeongbu Line, and Honam Line) and two urban railway groups with a long tunnel (i.e., Seoul Metro Lines 5, 6, and 7, and 9). **Result:** The rank of the normal operation rate of monitoring hardware was in the order of Suseo-Pyeongtaek High-Speed Railway (92.1%), Seoul Metro Lines 5, 6, and 7 (85.8%), Seoul Metro Line 9 (85.2%), Gyeongbu High-speed Railway (80.5%), and Honam High-speed Railway (46.7%). **Conclusion:** The mean normal operation rate of the monitoring hardware in the three high-speed railway long tunnels was 83.4%, and that of the two urban railway long tunnels was 85.5%, indicating that the deviation between them was small. The mean normal operation rate of the monitoring hardware in the long tunnels of the five high-speed and urban railway lines was 84.2%.

Keywords: High-Speed Railway, Urban Railway, Long Tunnels, Monitoring Hardware, Normal Operation Rate, Smart Monitoring, Monitoring Management

요약

연구목적: 본 연구는 고속철도와 도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 현황을 조사하고 분석하여 장대터널에서 스마트계측과 계측관리 기술을 향상시키고자 한다. **연구방법:** 고속철도 장대터널 3개 노선인 수서평택선, 경부선, 호남선과 도시철도 장대터널 2개 노선인 서울도시철도 5,6,7호선과 9호선을 대상으로 장대터널별 6~8종류의 계측기기에 대하여 정상 작동율을 조사하고 분석하여 상호 비교를 실시한다. **연구결과:** 계측기기의 정상 작동이 높은 순서는 수서평택고속철도 92.1%, 서울도시철도 5,6,7호선 85.8%, 서울도시철도 9호선 85.2%, 경부고속철도 80.5%, 호남고속철도 46.7%로 나타났다. **결론:** 3개 고속철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 83.4%이며, 2개 도시철도 장대터널 평균은 85.5%를 보여 편차는 크지 않은 것으로 나타났으며, 고속철도와 도시철도 5개 노선의 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 84.2%를 보였다.

핵심용어: 고속철도, 도시철도, 장대터널, 계측기기, 정상 작동율, 스마트계측, 계측관리

Received | 13 December, 2021

Revised | 10 January, 2022

Accepted | 26 January, 2022

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

터널의 광의의 정의는 지반 중에 어떤 목적이나 용도에 따라 만들어 놓은 공간을 갖는 구조물로 정의하며, 협의의 정의는 입구와 출구를 갖는 지하통로 역할을 하는 연속적인 공간으로 정의하고 있다.

국토교통부의 터널시방서에서 터널길이가 1Km이상인 터널을 장대터널이라 하며, 터널의 분류는 재래식 터널(ASSM, American Steel Support Method), NATM터널(New Austrian Tunnelling Method), 기계화 시공 터널공법인 Shield & TBM터널(Tunnel Boring Machine), 개착식터널(Cut and Cover)로 구분하고 있다(Woo et al., 2017).

건설계측에서 정상 작동을 용어는 국어사전에는 없는 용어이나, 취급부주의나 기기적인 결함으로 인해 손상이나 망실이 되지 않고 정상적인 상태를 의미하는 용어로 광범위하게 사용되고 있으며(Woo, 2013), 정상 작동 수량=총 설치 수량-고장(손망실) 수량으로 간단하게 정의할 수 있다.

건설계측(Construction Monitoring)은 건설공사의 조사, 설계 및 시공, 유지관리 시 발생하는 오차나 설계, 시공, 유지관리 시의 오류를 보완하기 위하여 계측기기를 활용하여 구조물과 지반 등의 거동을 측정하는 행위를 말하며(Seoul Metropolitan City Urban Infrastructure Headquarters, 2014), 건설계측에서 센서(Sensor) 또는 게이지(Gauge)란 대상의 상태에 관한 측정량을 신호로 변화하는 계의 최초의 요소로서 계측기기(Monitoring hardware)에 포함된다(Woo, 2018).

본 연구에서는 주로 NATM터널에 설치되는 일반적인 계측기기로 전단면내공변위계, 라이닝응력계, 간극수압계, 철근응력계, 토압계, 종단면침하계, 3D균열측정계, 부등침하계 등을 대상으로 정상 작동율을 산정하였다(Woo, 2021).

계측관리는 토목구조물 시공 시 지반 및 구조물의 거동을 관찰하여 계측한 결과를 계측관리치와 비교하여 지반 및 구조물의 장·단기적 안전을 예측·평가하고, 지반보강 및 설계·시공법의 타당성을 확보하기 위한 수단으로 정의할 수 있다(Seoul Metropolitan City Urban Infrastructure Headquarters, 2015).

스마트계측이란 데이터 수집 편의성 및 안정성을 향상시키기 위해 혁신적인 기술인 빅데이터, 사물인터넷, 무선센서 네트워크 등을 융합한 스마트 기술로서 센싱 기능 이외에 통신, 데이터 처리, 의사결정기능 등 두 가지 이상의 기능을 통합한 계측관리 기법을 말한다(Seoul Institute of Technology, 2020).

본 논문은 고속철도와 도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 산정을 위해 고속철도 장대터널 3개 노선인 수서평택고속철도, 경부고속철도, 호남고속철도와 도시철도 장대터널 2개 노선인 서울도시철도 5,6,7호선, 서울도시철도 9호선을 대상으로 터널별 계측기기의 정상 작동율을 분석하여 장대터널에서 스마트계측을 통한 구조물 안전 관리기술 향상과 건설계측관리 기술 발전에 기여하고자 한다.

고속철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 분석

수서평택고속철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 분석

수도권 고속철도의 최초노선인 수서평택고속철도는 수서에서 동탄을 거쳐 평택까지 총연장 61.1km의 구간이며, 율현 장대터널은 경기도 성남시 분당구 삼정동에서 평택시 평생읍 객사리까지의 연장 32.1Km 터널이며, 통복 장대터널은 경기도 평택시 평생읍 객사리에서 추팔리까지의 연장 4.5Km 터널로 이 구간 터널은 계획단계에서 지반조건이 불규칙한 신갈 단층대구간 21.2Km를 통과하므로 안전시공 및 효율적인 유지관리를 위해 유지관리계측이 적용되어 시공 시 계측기기를 설치하

였다(Korea Railroad Corporation Osong High-speed Railroad Facility Office, 2019).

수서평택고속철도 율현 장대터널 계측기기의 정상 작동율 기초자료는 Table 1과 같고, 2015년부터 2016년까지 총 1,435개의 계측기기가 설치되었으며, 2019년 12월 조사시점을 기준하여 계측기 설치 경과연수는 약 3년에서 4년이며, 정상 작동 수량은 1,317개, 정상 작동율은 91.8%로 나타났다. 정상 작동율이 큰 순서는 부등침하계, 종단면침하계, 3D균열측정계가 100%, 간극수압계 96.2%, 라이닝응력계 92.0%, 토압계 91.7%, 철근응력계 91.2%, 전단면 내공변위계 89.1%로 나타났다.

Table 1. Normal operation rate of Suseo-Pyeongtaek High-speed Railway Yulhyeon long tunnel monitoring hardware

터널명 (연장)	단면수	계측기기명	수량				정상 작동 순위
			계(개)	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	
율현 장대터널 (연장 32,101m)	47	전단면내공변위계	863	94	769	89.1	8
		라이닝응력계	163	13	150	92.0	5
		간극수압계	52	2	50	96.2	4
		철근응력계	80	7	73	91.2	7
		토압계	24	2	22	91.7	6
		종단면침하계	81	0	81	100.0	1
		3D균열측정계	12	0	12	100.0	1
		부등침하계	160	0	160	100.0	1
		계	1,435	118	1,317	91.8	-

수서평택고속철도 통북 장대터널 계측기기의 정상 작동율 기초자료는 Table 2와 같고, 2015년부터 2016년까지 총 90개의 계측기기가 설치되었으며, 2019년 12월 조사시점을 기준하여 계측기 설치 경과연수는 약 3년에서 4년이며, 정상 작동 수량은 88개, 정상 작동율은 97.8%로 나타났다. 정상 작동율이 큰 순서는 라이닝응력계, 철근응력계, 간극수압계는 100%, 전단면내공변위계 95.7%로 나타났다.

Table 2. Normal operation rate of Suseo-Pyeongtaek High-speed Railway Tongbuk long tunnel monitoring hardware

터널명 (연장)	단면수	계측기기명	수량				정상작동 순위
			계(개)	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	
통북 장대터널 (연장 4,519m)	4	전단면내공변위계	46	2	44	95.7	4
		라이닝응력계	20	0	20	100.0	1
		간극수압계	8	0	8	100.0	1
		철근응력계	16	0	16	100.0	1
		계	90	2	88	97.8	-

수서평택고속철도 장대터널 계측기기별 정상 작동율 기초자료는 Table 3과 같고, 2개 장대터널인 율현터널과 통북터널에 설치된 계측기기는 총 8종으로 전단면내공변위계, 라이닝응력계, 간극수압계, 철근응력계, 토압계, 종단면침하계, 3D균

열측정계, 부등침하계이며, 총 1,525개 계측기기중 정상 작동 수량은 1,405개로 정상 작동율은 92.1%로 나타났다.

수서평택고속철도 율현 및 통북 장대터널 유지관리 계측기기의 정상 작동율은 92.1%이며, 장대터널별 정상 작동율이 높은 순서는 통북터널 97.8%, 율현터널 91.8% 순서로 나타났다. 설치된 계측기기 8종류에서 정상 작동율이 큰 순서는 부등침하계, 종단면침하계, 3D균열측정계가 100%, 간극수압계 96.7%, 라이닝응력계와 철근응력계 92.7%, 토압계 91.7%, 전단면 내공변위계 89.4% 로 나타났다.

Table 3. Overall status of normal operation rate of Suseo-Pyeongtaek High-speed Railway long tunnel monitoring hardware

계측기기명	터널명	수량				정상 작동 순위
		계(개)	손망실(개)	정상 작동(개)	정상 작동율(%)	
전단면 내공변위계	율현터널	863	94	769	89.1	8
	통북터널	46	2	44	95.7	
	소계	909	96	813	89.4	
라이닝응력계	율현터널	163	13	150	92.0	5
	통북터널	20	0	20	100.0	
	소계	183	13	170	92.7	
간극수압계	율현터널	52	2	50	96.2	4
	통북터널	8	0	8	100.0	
	소계	60	2	58	96.7	
철근응력계	율현터널	80	7	73	91.2	5
	통북터널	16	0	16	100.0	
	소계	96	7	89	92.7	
토압계	율현터널	24	2	22	91.7	7
종단면침하계	율현터널	81	0	81	100.0	1
3D균열측정계	율현터널	12	0	12	100.0	1
부등침하계	율현터널	160	0	160	100.0	1
계(8종류)	율현터널	1,435	118	1,317	91.8	2
	통북터널	90	2	88	97.8	1
	계	1,525	120	1405	92.1	-

경부고속철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 분석

경부고속철도 동대구에서 부산까지 연장 124km에 있는 37개 터널 중 장대터널인 연장 3.2Km의 복안 장대터널, 연장 13.3Km의 원효 장대터널, 연장 20.5Km의 금정 장대터널에만 건설공사 시 유지관리 계측기기가 설치되었으며, 이중 복안 장대터널은 양산단층대에 속하여 공사 중 상부 경부고속국도에 침하가 발생하여 시공단계에서 신규 반영하였고, 원효 장대터널과 금정 장대터널은 설계시공일괄입찰인 턴키공사로 설계단계에서부터 터널 내에 유지관리계측이 적용되어 시공 시 설치되었다(Korea Railroad Corporation Gyeongju High-Speed Rail Facility Office, 2018; 2019).

경부고속철도 장대터널별 계측기기의 정상 작동율 기초자료는 Table 4와 같고 2006년부터 2008년까지 총 302개가 설치

되었으며, 2018년 12월 조사시점을 기준하여 계측기 설치 경과연수는 약 10년에서 12년이며, 정상 작동 수량은 243개, 정상 작동율은 80.5%로 나타났다.

Table 4. Current status of normal operation rate of Gyeongbu High-speed Railway long tunnels monitoring hardware

터널명 (연장)	단면수	계측기기명	수량				정상작동 순위
			계(개)	손망실(개)	정상(개)	정상 작동율(%)	
북안터널 (3,200m)	4	간극수압계	12	0	12	100.0	1
		철근응력계	20	1	19	95.0	3
		라이닝응력계	20	1	19	95.0	3
		전단면내공변위계	20	2	18	90.0	5
		진동계	2	2	0	0.0	6
		암반응력계	1	0	1	100.0	1
		소계	75	6	69	92.0	(1)
원효터널 (13,300m)	20	간극수압계	26	0	26	100.0	1
		라이닝응력계	56	8	48	85.7	2
		전단면내공변위계	10	10	0	0.0	3
		사면변위계	11	11	0	0.0	3
		소계	103	29	74	71.8	(3)
금정터널 (20,500m)	16	간극수압계	23	1	22	95.6	3
		라이닝응력계	71	18	53	74.7	5
		철근응력계	18	4	14	77.8	4
		전단면내공변위계	7	0	7	100.0	1
		진동계	1	1	0	0.0	6
		건물경사계	4	0	4	100.0	1
소계	124	24	100	80.6	(2)		
계 (3개 터널)	40	계	302	59	243	80.5	-

장대터널별 정상 작동율이 높은 순서는 북안터널 92.0%, 금정터널 80.6%, 원효터널 71.8% 순서로 나타났다.

경부고속철도 장대터널 계측기기별 정상 작동율 기초자료는 Table 5와 같고, 3개 장대터널에 설치된 계측기기는 총 8종으로 간극수압계, 철근응력계, 라이닝응력계, 전단면내공변위계, 진동계, 암반응력계, 사면변위계, 건물경사계이며, 총 302개 계측기기중 정상 작동 수량은 243개, 정상 작동율은 80.5%로 나타났다.

경부고속철도 3개의 장대터널 유지관리 계측기기의 정상 작동은 80.5%이며, 장대터널별 정상 작동율이 높은 순서는 북안터널 92.0%, 금정터널 80.6%, 원효터널 71.8% 순서로 나타났다.

설치된 계측기기 8종류에서 정상 작동율이 큰 순서는 암반응력계와 건물경사계 100%, 간극수압계 98.4%, 철근응력계 86.8%, 라이닝응력계 81.6%, 전단면내공변위계 69.6%, 진동계와 사면변위계 0%로 나타났다.

Table 5. Overall status of normal operation rate of Gyeongbu High-speed Railway long tunnel monitoring hardware

계측 기기명	터널명	수량				
		계(개)	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	정상작동순위
간극 수압계	복안터널	12	0	12	100.0	3
	원효터널	26	0	26	100.0	
	금정터널	23	1	22	95.6	
	소계	61	1	60	98.4	
철근 응력계	복안터널	20	1	19	95.0	4
	금정터널	18	4	14	77.8	
	소계	38	5	33	86.8	
라이닝 응력계	복안터널	20	1	19	95.0	5
	원효터널	56	8	48	85.7	
	금정터널	71	18	53	74.6	
	소계	141	27	120	81.6	
전단면 내공 변위계	복안터널	20	2	18	90.0	6
	원효터널	10	10	0	0.0	
	금정터널	7	0	7	100.0	
	소계	37	12	25	69.6	
진동계	복안터널	2	2	0	0.0	7
	금정터널	1	1	0	0.0	
	소계	3	3	0	0.0	
암반 응력계	복안터널	1	0	1	100.0	1
	소계	1	0	1	100.0	
사면 변위계	원효터널	11	11	0	0.0	7
	소계	11	11	0	0.0	
건물 경사계	금정터널	4	0	4	100.0	1
	소계	4	0	4	100.0	
계 (8종류)	계	302	59	243	80.5	-

호남고속철도 장대터널 계측기기의 정상 작동을 분석

호남고속철도는 충북 오송에서 전남 광주까지 연장 182.3km이며, 이 구간에 있는 전체 32개 터널 중 18개 터널에 유지 관리계측이 적용되었으며, 18개 터널 중 연장이 1,000m 이상인 장대터널 10개를 대상으로 계측기기의 정상 작동을 분석을 실시하였다. 설계 시 143개 계측기기가 계획되어 실제 설치는 338개로 공사 중에 195개가 증가 하였는데 특히 공사 중 붕괴사고가 발생한 달성 장대터널은 48개가 설치되었다(Korea Railroad Research Institute of Science and Technology, 2017).

호남고속철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 기초자료는 Table 6과 같으며, 2011년부터 2013년까지 총 338개가 설치 되었으며, 2016년 12월 조사시점 기준하여 계측기 설치 경과연수는 약 3년에서 5년이나, 정상 작동 수량은 158개, 정상 작동율은 46.7%로 짧은 경과연수에 비해 정상 작동율이 상당히 낮게 나타났다.

장대터널별 정상 작동율이 높은 순서는 달성터널, 모암터널 100%, 노량터널 81.4%, 갈산터널 25.8%이며, 학천터널, 부용1터널, 영곡터널, 계룡터널, 와룡2터널, 마령터널은 0%로 장대터널별로 큰 차이를 보였다.

Table 6. Normal operation rate of Honam High-speed Railway long tunnel monitoring hardware

터널명	터널연장(m)	설계수량	설치수량				정상작동 순위
			계(개)	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	
학천터널	1,160	28	28	28	0	0.0	5
갈산터널	3,027	31	31	23	8	25.8	4
부용1터널	1,700	5	5	5	0	0.0	5
영곡터널	6,340	20	16	16	0	0.0	5
계룡터널	7,240	15	60	60	0	0.0	5
노량터널	4,300	24	86	16	70	81.4	3
달성터널	1,360	0	48	0	48	100.0	1
모암터널	2,625	20	32	0	32	100.0	1
와룡2터널	2,465	0	16	16	0	0.0	5
마령터널	1,315	0	16	16	0	0.0	5
계(10개 터널)	31,532	143	338	180	158	46.7	-

고속철도 장대터널 계측기기의 정상 작동율 비교 분석

수서평택고속철도 2개 장대터널, 경부고속철도 3개 장대터널, 호남고속철도 10개 장대터널의 계측기기 정상작동율 비교 현황 기초자료는 Table 7과 같으며, 가장 최근에 개통한 수서평택고속철도 장대터널이 가장 높은 92.1%로 나타났고, 호남고속철도 장대터널 이 가장 낮은 46.7%로 나타났는데 원인은 시공 시 계측기기 선정, 설치, 측정, 유지관리에 문제가 있었던 것으로 추정되며, 3개 고속철도 노선 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 83.4%를 보였다.

Table 7. Comparison of normal operation rate of High-speed Railway long tunnel monitoring hardware

구분	장대 터널수	계측기기 수량					정상작동 순위
		설치(개)	설치년도	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	
수서평택고속철도 (울현터널 32,101m, 통북터널 4,519m)	2	1,525	2015~ 2016	120	1,405	92.1	1
경부고속철도 (북안터널 3,200m, 원효터널 13,300m, 금정터널 20,500m)	3	302	2006~ 2008	59	243	80.5	2
호남고속철도 (학천터널 1,160m~ 계룡터널 7,240m)	10	338	2011~ 2013	180	158	46.7	3
계(3개 노선)	15	2,165	-	359	1,806	83.4	-

도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동을 분석

서울도시철도 5,6,7호선 장대터널 계측기기의 정상 작동을 분석

서울도시철도 5,6,7호선 건설공사 도심지역 14개 장대터널 공사구간에 대한 계측기기의 정상 작동율 현황 기초자료는 Table 8과 같으며, 설치기간은 1995년부터 1996년에 설치되었으며, 계측기기는 총 591개가 설치되었고, 구성 비율을 보면 라이닝응력계 54.7%, 철근응력계 27.4%, 토압계 9.5%, 간극수압계 6.4%, 광섬유센서 2.0%이다.

전체 정상 작동율은 85.8%이며, 계측기기별 정상 작동율은 간극수압계 94.7%, 광섬유센서 91.7%, 토압계 89.3%, 철근응력계 87.7%, 라이닝응력계 83.0%의 순서로 나타났다.

Table 8. Normal operation rate of Seoul Metropolitan Railway Lines 5, 6 and 7 long tunnel monitoring hardware

구분	합계	비율(%)	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	정상작동순위
토압계	56	9.5	6	50	89.3	3
간극수압계	38	6.4	2	36	94.7	1
철근응력계	162	27.4	20	142	87.7	4
라이닝응력계	323	54.7	55	268	83.0	5
광섬유센서	12	2.0	1	11	91.7	2
계(5종류)	591	100.0	84	507	85.8	-

서울도시철도 9호선 장대터널 계측기기의 정상 작동을 분석

서울도시철도 9호선 건설공사 도심지역 14개 장대터널 공사구간에 대한 계측기기의 정상 작동율 현황 기초자료는 Table 9와 같으며, 설치기간은 2006년부터 2008년에 설치되었으며, 계측기기는 총 655개가 설치되었고, 구성 비율을 보면 라이닝응력계 44.9%, 철근응력계 22.6%, 쉘드터널의 세그먼트응력계 11.1%, 터널의 간극수압계 10.1%, 박스 구조물의 콘크리트응력계 8.6%, 토압계 2.7%이다(Woo, 2019).

전체 정상 작동율은 85.2%이며, 계측기기별 정상 작동율은 토압계 94.4%, 라이닝응력계 91.8%, 철근응력계 89.2%, 간극수압계 80.3%, 박스구조물의 콘크리트응력계 73.2%, 쉘드터널의 세그먼트응력계 61.6%의 순서로 나타났다.

Table 9. Normal operation rate of Seoul Metropolitan Railway Lines 9 long tunnel monitoring hardware

구분	합계	비율(%)	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	정상작동 순위
토압계	18	2.7	1	17	94.4	1
간극수압계	66	10.1	13	53	80.3	4
철근응력계	148	22.6	16	132	89.2	3
라이닝응력계	294	44.9	24	270	91.8	2
세그먼트응력계	73	11.1	28	45	61.6	6
콘크리트응력계	56	8.6	15	41	73.2	5
계(6종류)	655	100.0	97	558	85.2	-

서울도시철도 5,6,7,9호선 장대터널 계측기기의 정상 작동을 비교 분석

서울도시철도 5,6,7호선 14개 장대터널과 서울도시철도 9호선 14개 장대터널의 계측기기 정상 작동을 비교현황 기초자료는 Table 10과 같으며, 서울도시철도 5,6,7호선 장대터널이 85.8%, 서울도시철도 9호선 장대터널이 85.2%로 유사한 값을 보였으며, 2개 도시철도 노선 장대터널 계측기기의 정상 작동을 평균은 85.5%를 보였다.

Table 10. Comparison of normal operation rate of Seoul Metropolitan Railway long tunnel monitoring hardware

구분	장대 터널수	계측기기 수량					정상작동 순위
		설치(개)	설치년도	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)	
서울도시철도 5,6,7호선 (터널연장 1,500~2,500m)	14	591	1995~1996	84	507	85.8	1
서울도시철도 9호선 (터널연장 2,300~3,300m)	14	655	2006~2008	97	558	85.2	2
계(2개 노선)	28	1,246	-	181	1,065	85.5	-

고속철도 및 도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동을 비교분석

고속철도 및 도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동을 비교현황 기초자료는 Table 11과 같으며, 정상 작동율이 높은 순서는 수서평택고속철도 장대터널이 92.1%, 서울도시철도 5,6,7호선 장대터널이 85.8%, 서울도시철도 9호선 장대터널이 85.2%, 경부고속철도 장대터널이 80.5%, 호남고속철도 장대터널이 가장 낮은 46.7%로 나타났다.

3개 고속철도 노선 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 83.4%이며, 2개 도시철도 노선 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 85.5%를 보여 편차는 크지 않는 것으로 나타났으며, 고속철도 3개 노선과 도시철도 2개 노선을 합한 5개 노선의 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 84.2%를 보였다.

Table 11. Comparison of normal operation rate of High-speed Railway and Seoul Metropolitan Railway long tunnels monitoring hardware

구분	장대 터널수	계측기기 수량					정상작동 순위	
		설치(개)	설치년도	손망실(개)	정상작동(개)	정상 작동율(%)		
고속 철도	수서평택선	2	1,525	2015~2016	120	1,405	92.1	1
	경부선	3	302	2006~2008	59	243	80.5	4
	호남선	10	338	2011~2013	180	158	46.7	5
소계(3개 노선)		15	2,165	-	359	1,806	83.4	-
도시 철도	서울도시철도 5,6,7호선	14	591	1995~1996	84	507	85.8	2
	서울도시철도 9호선	14	655	2006~2008	97	558	85.2	3
소계(2개 노선)		28	1,246	-	181	1,065	85.5	-
계(5개 노선)		43	3,411	-	540	2,871	84.2	-

결론

본 논문은 고속철도와 도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동을 산정을 위해 고속철도 장대터널 3개 노선인 수서평택 고속철도, 경부고속철도, 호남고속철도와 도시철도 장대터널 2개 노선인 서울도시철도 5,6,7호선, 서울도시철도 9호선을 대상으로 터널별 계측기기의 정상 작동을 분석하여 장대터널에서 스마트계측을 통한 구조물 안전 관리기술 향상과 건설 계측관리 기술 발전에 기여하고자 연구를 수행하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 수서평택고속철도 율현 및 통북 장대터널 계측기기의 정상 작동율은 92.1%이며, 장대터널별 정상 작동율이 높은 순서는 통북터널 97.8%, 율현터널 91.8% 순서로 나타났다. 설치된 계측기기 8종류에서 정상 작동율이 높은 순서는 부등침하계, 중단면침하계, 3D균열측정계가 100%, 간극수압계 96.7%, 라이닝응력계와 철근응력계 92.7%, 토압계 91.7%, 전단면 내공변위계 89.4% 로 나타났다.
- (2) 경부고속철도 3개 장대터널 계측기기의 정상 작동율은 80.5%이며, 장대터널별 정상 작동율이 높은 순서는 복안터널 92.0%, 금정터널 80.6%, 원효터널 71.8% 순서로 나타났다. 설치된 계측기기 8종류에서 정상 작동율이 높은 순서는 암반응력계와 건물경사계 100%, 간극수압계 98.4%, 철근응력계 86.8%, 라이닝응력계 81.6%, 전단면내공변위계 69.6%, 진동계와 사면변위계 0%로 나타났다.
- (3) 호남고속철도 10개 장대터널 계측기기의 정상 작동율은 46.7%로 짧은 경과연수에 비해 정상 작동율이 상당히 낮게 나타났다. 장대터널별 정상 작동율이 높은 순서는 달성터널, 모암터널 100%, 노량터널 81.4%, 갈산터널 25.8%이며, 학천터널, 부용1터널, 영곡터널, 계룡터널, 와룡2터널, 마령터널은 0%로 장대터널별로 큰 차이를 보였다.
- (4) 서울도시철도 5,6,7호선 건설공사 도심지역 14개 장대터널에 대한 계측기기의 정상 작동율은 85.8%이며, 설치된 계측기기 5종류에서 정상 작동율이 높은 순서는 간극수압계 94.7%, 광섬유센서 91.7%, 토압계 89.3%, 철근응력계 87.7%, 라이닝응력계 83.0%의 순서로 나타났다.
- (5) 서울도시철도 9호선 건설공사 도심지역 14개 장대터널에 대한 계측기기의 정상 작동율은 85.2%이며, 설치된 계측기기 6종류에서 정상 작동율이 높은 순서는 토압계 94.4%, 라이닝응력계 91.8%, 철근응력계 89.2%, 간극수압계 80.3%, 박스구조물의 콘크리트응력계 73.2%, 쉘드터널의 세그먼트응력계 61.6%의 순서로 나타났다.
- (6) 고속철도 및 도시철도 장대터널 계측기기의 정상 작동이 높은 순서는 수서평택고속철도 장대터널이 92.1%, 서울도시철도 5,6,7호선 장대터널이 85.8%, 서울도시철도 9호선 장대터널이 85.2%, 경부고속철도 장대터널이 80.5%, 호남고속철도 장대터널 이 가장 낮은 46.7%로 나타났다.
- (7) 3개 고속철도 노선 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 83.4%이며, 2개 도시철도 노선 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 85.5%를 보여 편차는 크지 않는 것으로 나타났으며, 고속철도 3개 노선과 도시철도 2개 노선을 합한 5개 노선의 장대터널 계측기기의 정상 작동율 평균은 84.2%를 보였다.

Acknowledgement

본 연구는 2017년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공학 개인기초연구 (기본)지원 사업(과제번호 2017R1D1A1B03028842)으로 “건설 및 터널 계측센서의 최적 내구연한 연구”의 일부 내용이며, 이에 감사를 드립니다.

References

- [1] Korea Railroad Corporation Gyeongju High-Speed Rail Facility Office (2018). Interim Report on Maintenance and Monitoring Analysis Service for Roadbed Structures in Dongdaegu-Busan of Gyeongbu Express Line, pp. 7-14 (in Korean).
- [2] Korea Railroad Corporation Gyeongju High-Speed Rail Facility Office (2019). Final Report on Maintenance and Monitoring Analysis Service for Roadbed Structures in Dongdaegu-Busan of Gyeongbu Express Line, pp. 1-13 (in Korean).
- [3] Korea Railroad Corporation Osong High-speed Railroad Facility Office (2019). Suseo Pyeongtaek High Speed Line Suseo-Cheonan Asan Roadbed Structure Monitoring Facility Maintenance Automated Monitoring Service Interim Report, pp. 1-214 (in Korean).
- [4] Korea Railroad Research Institute of Science and Technology (2017). A Study on the Optimization Plan of Maintenance Monitoring for High-Speed Railway Tunnels, pp. 30-45 (in Korean).
- [5] Seoul Institute of Technology (2020). A Study on the Smart Monitoring Management System and Policies for Securing Safety of Underground Construction Sit, pp. 109-113 (in Korean).
- [6] Seoul Metropolitan City Urban Infrastructure Headquarters, Facilities Bureau (2014). Guidelines for Analysis and Management of Monitoring Data for Temporary Facilities, pp. 1-5 (in Korean).
- [7] Seoul Metropolitan City Urban Infrastructure Headquarters, Railway Bureau (2015). Improvement Plan for Monitoring Management of Seoul Subway, pp. 80-90 (in Korean).
- [8] Woo, J.T. (2013). "A study on trends analysis of the loss and damage ratio of tunnel maintenance monitoring sensors." Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 1, pp. 25-31.
- [9] Woo, J.T. (2018). "A study on the loss and damage ratio of railroad tunnel maintenance monitoring sensor." Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol. 14, No. 3, pp. 262-270.
- [10] Woo, J.T. (2019). "A Study on the Cause and Improvement Plans of Construction Monitoring Sensors Decline in Durability." Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol. 15, No. 1, pp. 28-38.
- [11] Woo, J.T. (2021). "An Analytical Study on the Durability Standard of Ground Structures Monitoring Sensors." Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol. 17, No. 1, pp. 53-59.
- [12] Woo, J.T., Lee, R.C. (2017). Theory and Practice of Construction Monitoring-Underground Construction Facilities, CIR Publishing Co., pp. 92-94 (in Korean).