

## 터널 균열 검출에 활용되는 터널스캐너의 성능검증 방법론

## Performance Evaluation Method of Tunnel Scanner for Lining Crack Detection

배성재<sup>1</sup> · 정 옥<sup>2</sup> · 짬릿 스레이와타나<sup>3</sup> · 김찬진<sup>4</sup> · 김영민<sup>5</sup> · 홍성호<sup>6</sup> · 김정곤<sup>7</sup> · 김정렬<sup>8\*</sup>Sung-Jae Bae<sup>1</sup>, Wook Jung<sup>2</sup>, Sereivatana Chamrith<sup>3</sup>, Chan-Jin Kim<sup>4</sup>, Young-Min Kim<sup>5</sup>, Sung-Ho Hong<sup>6</sup>, Jung-Gon Kim<sup>7</sup>, Jung-Yeol Kim<sup>8\*</sup><sup>1</sup>Undergraduate Student, Department of Architecture, Inha University, Incheon, Republic of Korea<sup>2</sup>Ph.D. Student, Department of Architecture, Inha University, Incheon, Republic of Korea<sup>3</sup>Graduate Student, Department of Architecture, Inha University, Incheon, Republic of Korea<sup>4</sup>Undergraduate Student, Department of Architecture, Inha University, Incheon, Republic of Korea<sup>5</sup>Principal Research Manager, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Jinju, Republic of Korea<sup>6</sup>Research Fellow, Korea Research Institute For Construction Policy, Seoul, Republic of Korea<sup>7</sup>Director, Department of Research Planning, Disaster Research Management Center, Seoul, Republic of Korea<sup>8</sup>Associate Professor, Department of Architecture, Inha University, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Jung-Yeol Kim, jungkim@inha.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** Recently, due to increasing usage of high-tech equipment for facility inspection, the need of verifying high-tech equipment is being emphasized. Therefore, the purpose of this paper is to develop performance evaluation methodology of tunnel scanners that inspect tunnel facilities. **Method:** This paper describes literature reviews regarding the performance evaluation methodology of high-tech based equipment for facility inspection. Based on these investigations and expert advisory meetings, this paper suggests a performance evaluation methodology of tunnel scanner. **Result:** First evaluation indicator states minimum performance standards of tunnel scanners. Second evaluation indicator is related to tunnel scanner quality. **Conclusion:** The performance evaluation methodology can provide reliable equipment performance catalogues, helping users to make a proper selection of equipment. Also, developers of equipment can get authorized verification of performances, preventing poor maintenance of facilities.

**Keywords:** Facility Management, Inspection Equipment, Tunnel Scanner, Performance Evaluation

## 요약

**연구목적:** 최근 시설물 점검 및 진단에 있어 활용되는 첨단장비들이 증가하여 첨단장비의 검·인증제도의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구는 시설물 점검 및 진단에 활용되는 터널스캐너의 성능검증 방법론을 제시하는 것을 목적으로 한다. **연구방법:** 시설물 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비의 성능검증 사례를 조사하고 전문가 자문회의를 통해 터널스캐너 성능검증 방법론을 제시하였다. **연구결과:** 본 연구에서 제안하는 터널스캐너 성능검증 방법론은 1차 평가와 2차 평가로 구성된다. 1차 평가지표는 최소요구성능을 기준으로 구성되고, 2차 평가지표는 터널스캐너의 품질에 관여된 지표들로 구성된다. **결론:** 본 연구에서 제시한 터널스캐너의 성능검증 방법론은 장비 사용자에게 공인된 성능 카탈로그를 제공할 수 있으며, 장비 개발자는 장비의 공인된 검증을 받을 수 있어 부실한 유지관리를 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 시설물 유지관리, 진단장비, 점검장비, 성능평가

Received | 10 November, 2020

Revised | 13 January, 2021

Accepted | 21 January, 2021

 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.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

우리나라는 1970년대부터 1990년대에 집중적으로 도로, 철도, 교량, 댐, 산업단지, 상하수도 등 주요 사회인프라 시설을 준공하였다. 최근, 해당 사회인프라 시설들의 사용 연수가 30년을 넘어서면서 노후시설물이 급증하는 동시에 세계적인 기후 변화와 이상기후로 인하여 발생하는 자연재해의 발생 빈도까지 높아져 노후시설물의 손상 및 붕괴 등이 국민의 안전을 위협하고 경제활동에 지장을 주는 일이 증가하고 있다(Construction & Economy Research Institute of Korea, 2016). 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」에 정의된 국내 1,2종 시설물 중에서 사용 연수가 30년 이상인 노후시설물은 ‘17년 10.3%로 나타났으며, 10년 후에는 21.4%, 20년 후에는 44.4%로 급격히 증가할 것이 예상되며, 이에 따라 4차 산업혁명 기술 등 시설물 안전 및 유지관리를 위한 첨단장비의 활용 및 시장도입이 확대되고 있다(Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, 2018). 시설물통합정보관리시스템(FMS)을 활용하여 최근 5년간 시설물 점검 및 진단에 활용된 첨단장비 및 기술 활용사례를 조사한 결과 드론, 화상계측기, 레이저변위계, 적외선 열화상카메라, GPR, 수중카메라, Side Scan Sonar, 상관식 누수탐사기, 청음식 누수탐사기, 터널스캐너의 장비들이 시설물 점검 및 진단에 활용되고 있으며, 시설물 점검 및 진단에 활용할 첨단장비 및 기술과 관련된 논문, 연구보고서, 특히는 2010년부터 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다(Lee et al., 2020).

이렇게 시설물 점검 및 진단에 있어 다양하고 새로운 첨단장비 및 기술이 개발/도입되고 있으나, 국내에는 이러한 첨단장비의 성능을 검증하는 공식적인 제도나 절차가 존재하지 않는다. 이는 시설물 점검 및 진단에 있어 부정확한 결과를 초래하여 결과적으로, 시설물의 부실한 점검 및 유지관리로 이어질 수 있다(Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, 2018). 따라서 시설물 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비 및 기술에 대한 성능검증을 통하여 시설물의 부실한 점검 및 유지관리를 예방할 필요가 있다(Lee et al., 2020). 이와 관련하여, 시설물 유지관리에 종사하는 실무자를 대상으로 진행한 설문조사에서는 시설물 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비 및 기술의 신뢰성 확보를 위한 성능검증제도의 도입이 필요한 것으로 조사되었으며, 성능검증 제도의 도입이 시급한 점검 및 진단 항목을 설문한 결과 ‘균열’, ‘변위/변형/피로’의 항목을 점검 및 진단하는 장비들에 대한 우선순위가 높은 것으로 나타났다. 특히 ‘균열’의 항목을 점검 및 진단하는 장비로 분류된 고해상도 라인카메라 장착차량(터널스캐너), 인공지능(AI)영상분석, 영상기반 3D모델링, 안전진단용 드론이 2~5순위로 성능검증 제도의 도입이 시급한 것으로 조사되었다(Hong et al., 2020; Lee et al., 2020).

이에 본 연구에서는 균열을 점검 및 진단하는 장비 중 성능평가 및 검·인증제도 도입의 시급성이 가장 높은 터널스캐너의 성능을 검증하기 위한 성능평가 방법론을 제시하고자 한다. 먼저 국내외 다양한 시설물의 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비의 성능평가와 관련된 동향을 조사하였으며, 터널스캐너의 기술 개발 동향을 조사하였다. 이후 선행연구, 전문가 자문회의와 인터뷰를 통해 터널스캐너 검증을 위한 성능평가 방법론의 기본 체계를 구축하였으며, 터널스캐너의 검증을 위한 성능을 평가하기 위한 성능지표를 도출하였다.

## 시설물 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비 성능검증 동향조사

본 절에서는 첨단 기술을 활용한 시설물 점검 및 진단장비의 성능검증 방법론과 성능지표 등을 파악하기 위하여 교량, 지하시설물 등 다양한 시설물을 대상으로 조사를 수행하였다. 또한 터널 균열 자동측정 장비와 관련된 첨단 기술의 공인 성능

검증 방법론은 국내외 적절한 사례가 존재하지 않아, 해당 기술의 세부 내용에 대한 조사를 수행하였다. 이는 조사된 해당 기술의 내용과 타 시설물 성능검증 방법론을 종합하여 터널 균열 측정 장비에 적합한 성능검증 방법론을 제시하기 위함이다.

### 일본의 교량 점검용 무인비행장치 성능검증 지침

일본의 독립행정법인인 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)에서는 교량 점검에 활용되는 무인비행장치의 성능검증을 위한 절차와 성능검증을 위한 테스트 시설을 구축하여 교량 점검용 무인비행장치의 성능검증 지침을 제시하였다(NEDO, 2018). 풍속, 조도, 거리 등 실제 현장 점검 상황에서 발생하는 변수들을 고려한 테스트 조건을 제시하고 있으며, 해당 조건을 모사하기 위해 송풍기, 조명, 테스트피스 등을 포함한 모의교량을 Fig. 1과 같이 구축하였다. 또한, 최근에는 프레임으로 구축된 모의교량이 아니라 Fig. 2와 같이 후쿠시마 로봇 테스트 필드에 철근콘크리트구조로 실제 시공된 모의교량에서 교량 점검용 무인비행장치의 성능검증을 진행하고 있다. 후쿠시마 로봇 테스트 필드의 모의교량은 2020년 3월부터 정상적으로 운영되고 있으며, 교량 외에도 터널, 시가지, 수조(담)와 같은 시설물의 테스트베드도 구축하여 시설물 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비들에 대한 성능검증을 다방면으로 실시할 수 있다(Lee et al., 2020).



Fig. 1. Simulated bridge(NEDO, 2018)



Fig. 2. Fukushima robot test field(NEDO, 2018)

교량 점검에 있어 무인비행장치가 수행하는 외관 조사와 타음 검사의 성능검증에 모의교량을 활용한다. 모의교량에는 Fig. 3과 같이 타음점이 표기된 테스트피스와 Fig. 4와 같은 근접 영상 촬영성능을 검증하기 위한 테스트피스가 부착되어 있으며, 실제 무인비행장치를 주행하여 각 성능에 대한 성능검증이 진행된다. 타음 검사성능검증의 경우 무인비행장치의 경로가 설정되어 있으며, 무인비행장치는 해당 경로를 정확히 주행하는 동시에 타음점을 가격하여 타음 검사를 수행하여야 한다. 또한, 풍속과 광도의 조건을 송풍기와 조명을 활용해 현장 조건과 유사한 환경을 구축하여 성능검증 테스트의 결과에 대한 신뢰도를 높였다. 근접 영상 촬영성능검증은 크게 영상 해상도, 미세균열 검출 여부(균열 폭), 촬영성능, 영상 왜곡 보정 등의 성능을 평가할 수 있다. 영상 해상도의 경우, Fig. 4의 상단에 보면 검은색과 흰색의 박스들이 교차로 나열되어 있는 부분에서 성능검증을 진행할 수 있다. 가운데에 표기된 빨간 점선원 부분을 확대하면 네 개의 박스가 교차되는 한 점의 부근에서 RGB 값이 0에서 255까지 큰 폭으로 변동하게 되는데, 이 구간의 길이 및 RGB 변동 폭을 통하여 영상의 해상도를 평가하게 된다. 미세균열 검출 성능은 테스트피스의 가운데 부근에 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm, 1.4mm의 폭을 가지는 균열이

모사되어 있으며, 다양한 각도의 균열도 모사함으로써 실제 현장에서 발생하는 사방향 균열에 대한 검출가능여부도 평가하게 된다. 촬영성능검증은 가장 아래에 위치된 30개의 다양한 색상을 가진 박스를 통하여 진행된다. 마지막으로, 영상 왜곡 보정성능검증은 좌측과 하단에 배치된 10mm 간격의 눈금을 통하여 진행된다. 운용성능에 있어서는 Table 1의 항목에 따라 평가표를 작성하도록 구성되어 있다.

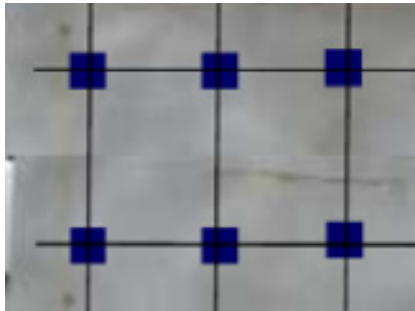


Fig. 3. Test piece for hammering test(NEDO, 2018)

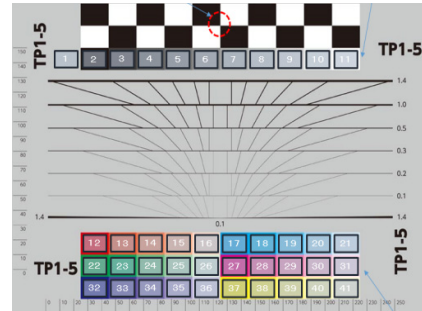


Fig. 4. Test piece for exterior survey(NEDO, 2018)

Table 1. Index for performance evaluation about hammering test and exterior survey(NEDO, 2018)

타음 검사		외관 조사	
풍속	- 풍속에 의한 성능 영향을 평가(환경조건)	풍속	- 풍속에 의한 성능 영향을 평가(환경조건)
광도	- 빛환경에 의한 성능 영향을 평가(환경조건)	광도	- 빛환경에 의한 성능 영향을 평가(환경조건)
위치, 각도 오류	- 타음을 실시한 위치의 오류를 평가	균열폭	- 0.1mm ~ 1.4mm 선의 촬영가능 여부 평가
장비 납품 시간	- 장비 납품에 소요된 시간을 측정	장비 납품 시간	- 장비 납품에 소요된 시간을 측정
장비 준비 시간	- 장비 준비에 소요된 시간을 측정	장비 준비 시간	- 장비 준비에 소요된 시간을 측정
비행 시간	- 실제 교량 점검을 위한 비행시간을 측정	비행 시간	- 실제 교량 점검을 위한 비행시간을 측정
배터리 교체 시간	- 무인비행장치의 배터리 교체 시간을 측정	배터리 교체 시간	- 무인비행장치의 배터리 교체 시간을 측정
장비 인출시간	- 장비 인출에 소요된 시간을 측정	장비 인출시간	- 장비 인출에 소요된 시간을 측정
전체 소요 시간	- 교량 점검 전체 과정에 소요된 시간을 측정	전체 소요 시간	- 교량 점검 전체 과정에 소요된 시간을 측정

일본의 교량 점검용 무인비행장치 성능검증 지침에서는 실제 현장과 유사한 조건에서 실시하는 성능검증 항목, 테스트 방법, 결과의 표시 등을 구체화함으로써 실제 현장에서 검증된 장비를 선정하여 시설물 점검 및 진단에 활용할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 또한, 후쿠시마 로봇 테스트 필드가 구축됨으로 인하여 첨단 장비들의 성능검증에 있어 해당 지침의 활용성이 더 높아질 것으로 판단된다.

### 미국 ANSI의 무인비행장치 시스템 표준화 로드맵

미국의 민간표준기구인 ANSI(American National Standards Institute)는 무인비행장치를 활용한 다양한 기술들이 개발되는 것에 대응하여, 무인비행장치 관련 전문가 및 업체로 구성된 UASSC(Unmanned Aircraft System for Standardization Collaborative)를 구성하였다. UASSC에서는 무인비행장치가 활용되는 산업들에 대하여 필요한 표준 및 가이드라인을 정

리하여 ANSI Standardization Roadmap for Unmanned Aircraft System(Version 1.0)을 발표하였다(Lee et al., 2020). 최근 2020년 6월에는 ANSI Standardization Roadmap for Unmanned Aircraft System(Version 2.0)을 발표하여 계속해서 무인 비행장치를 활용한 기술에 대한 표준화를 진행하고 있음을 보여주었다. 해당 로드맵에서는 시설물 점검 및 진단뿐만 아니라 물류, 비행, 안전관리 등 무인비행장치가 적용되는 다양한 분야의 표준들을 함께 제시하고 있다(American National Standards Institute, 2020). 이 중 시설물 점검과 관련된 분야는 Flight Operations Standards : Critical Infrastructure Inspections and Commercial Services에 기재되어 있으며, Vertical Infrastructure Inspections, Linear Infrastructure Inspections의 두 항목으로 분류하여 Table 2와 같이 기존에 존재하는 표준 및 가이드라인과 관련 내용을 연구하는 기관을 정리하고 있다.

**Table 2.** Standard or guideline for inspections using drone(American National Standards Institute, 2020)

대분류	중분류	관련 표준 및 가이드라인	연구/개발 기관
Vertical Infrastructure Inspections	Power Plants and Industrial Process Plants	-	ASME
	Cranes	ASME B30	ASME
	Building Facades	ASTM E1825-17, ASTM E2128-17, ASTM E2270-14, ASTM E2947-16a, ASTM E3036-15, ACI 562-16, ACI 201.1R-08, ASTM WK58243, ASTM WK43980	ASTM, ACI
	Low-Rise Residential and Commercial Buildings	ASTM WK58243	ASTM
	Communication Towers	ANSI/TIA-222-H, ANSI/TIA-322	ANSI/TIA
Linear Infrastructure Inspections	Bridges	ASTM WK58243	ASTM, AASHTO, state DOTs
	Railroads	-	SAE, OSHA, ASME, ASTM, APTA, AREMA
	Power Transmission Lines, Structures, and Environs	IEEE P2821	ASME, SAE, DOE, NERC, FERC, ORNL, ASTM
	Hydrocarbon Pipeline Inspections	ASTM F38	API, NACE, PRCI, ASME
	Airport Operations	CFR Part 14 Section, DOT/FAA/CT-94	Standards bodies publishing UAS standards and/or regulators

미국 ANSI의 무인비행장치 시스템 표준화 로드맵은 첨단장비 및 기술에 대하여 성능을 검증하기 위한 절차를 표준화하여 제시하고 있다. 국내에는 아직 시설물 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비를 대상으로 하는 표준이 존재하지 않으며, 미국과 같이 시설물별, 장비별로 사용되는 첨단장비 및 기술을 검증하는 제도적 차원의 방안도 개발되어야 할 것이다.

### 국내 시설물 점검장비 성능검증을 위한 테스트베드 구축 사례

한국지질자원연구원에서는 지하 시설물을 점검하는 장비인 GPR(Ground Penetrating Radar)의 성능을 검증하기 위하여 실제 지하 시설물들을 모사한 테스트베드를 지하에 매설한 실험장을 구축했다. 실제 실험장에서 GPR장비가 점검을 하는데 있어 영향을 미치는 환경인 매립토의 비율, 토성 등을 고려한 실험장을 설계하여 정확한 성능검증 환경을 구축하였으며, Fig.

5와 같이 상수관로와 공동을 모사한 테스트베드를 지하에 매설하였다. 이후 Table 3과 같이 다양한 조건에 따라 테스트를 진행해 장비의 성능을 검증하였다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2017).

**Table 3.** Index for Performance Evaluation about GPR

검증 항목	세부 내용
모형의 직경에 따른 탐사 성능 비교	- 직경 50cm, 직경 100cm,
탐사 속도별 탐사 데이터 비교	- 10km/h, 15km/h, 20km/h, 25km/h
안테나의 공간적 배열 구성에 따른 비교	- HH 및 VV 안테나에 따른 모사공동에 대한 GPR 반응 신호특성 및 공동탐지 가능 수평해상도 분석

하지만 이는 임시적으로 구축한 시설일 뿐 지속적으로 운영되고 있는 시설이 아니다. 따라서 시설물 점검에 활용되는 첨단 장비에 대한 성능검증이 체계적으로 이루어지기 위해서 일본의 후쿠시마 로봇 테스트 필드와 같은 시설이 국내에도 필요하다. 이에 한국건설기술연구원에서는 연천SOC실증센터를 현재 구축하고 있으며, 일부 완성된 시설에 대해서는 2019년부터 정상적으로 운영하고 있다(Fig. 6). 연천SOC실증연구센터는 현재 국토교통R&D 분산공유시설인 기상재현도로실증센터를 포함하고 있으며 복층터널 연구, 극한지 자원이용망 연구, 태양열 집열/축열 연구 등 다양한 실험이 진행되고 있다. 연천SOC실증연구센터는 건설기술 연구, 실증 등이 가능한 공개실험시설으로 관련 연구기관, 기업, 대학 등에서 활용할 수 있다(Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, 2013). 해당 시설의 설립목적과 보유한 시설을 고려해 보았을 때, 시설물 첨단장비의 성능검증을 위한 테스트베드로 해당 시설을 활용할 수 있을 것으로 기대된다.



**Fig. 5.** Pipe and cavity for test



**Fig. 6.** Yeoncheon SOC demonstration research center

### 터널스캐너를 활용한 터널 점검

터널스캐너의 성능검증 방법론을 제시하기에 앞서, 터널스캐너의 기술 개발 동향 분석과 터널스캐너가 터널을 점검하는 과정에 대한 이해는 필수적이다. 따라서 본 절에서는, 국내외 터널스캐너 장비들의 기술 개발 동향을 분석하고 터널스캐너를 활용한 터널 점검 및 진단의 과정을 분석하고자 한다. 이후 분석한 내용을 토대로 터널스캐너 검인증을 위한 성능검증 체계와 성능검증 방법론을 제시하고자 한다.

## 터널스캐너를 활용한 터널 점검기술 개발 동향

구조체의 외관조사를 위한 자동화 기술은 이미 오래전부터 개발되어 연구되고 있었으며, 특히 일본의 경우 선진적으로 영상처리를 통한 외관조사 자동화 기술에 대한 개발이 이루어졌다(Ji et al., 2014). 기술 개발의 순서로 볼 때, 최초에는 레이저 방식이 도입되었으며, 이후 Line Type의 방식이 도입되었다. 최근에는 Line Type의 방식보다 더 효과적인 Area Type의 방식이 도입된 터널스캐너가 활용되고 있다.

### 1) 레이저 방식

최초로 터널스캐너에 도입된 기술은 레이저 방식이다. 레이저 빔을 대상에 고속으로 주사하고 반사되는 광선의 양을 고속 광센서로 검출하는 방법으로 대상의 외관을 조사할 수 있다. 평면에 대한 외관조사 뿐만 아니라 굴곡이 심한 면에서도 외관 조사를 수행할 수 있으며 스캐닝 각도는 최대 160°까지 조정할 수 있다. 그러나 정확한 외관조사를 위한 장비의 검사속도가 5km/h로 느리며, 정속주행을 해야만 정확한 외관조사를 진행할 수 있어서 적용할 수 있는 대상이 제한적이며, 레이저 빔의 간섭률이 높아 오차율도 높다는 단점이 있다. 또한, 검출해내는 균열 폭의 검출 성능은 1.0mm이기 때문에 0.1mm의 균열까지 점검 대상으로 제시하는 현재의 터널 안전점검 기준에는 해당 방식은 적합하지 못하다(Table 4). 레이저 방식을 이용한 터널스캐너에는 일본의 Tunnel Catcher, 스위스의 TS360 및 프랑스의 ATLAS-70 등이 있다(Jee et al., 2014).

**Table 4.** Crack grade classification standard of tunnel in korea(Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, 2019)

구분		평가기준				
		a	b	c	d	e
콘크리트 라이닝	무균(균열)	0.1mm 이하	0.1mm 초과 0.3mm 이하	0.3mm 초과 1.0mm 이하	1.0mm 초과 3.0mm 이하	3.0mm 초과
	철근(균열)	0.1mm 이하	0.1mm 초과 0.3mm 이하	0.3mm 초과 0.5mm 이하	0.5mm 초과 1.0mm 이하	1.0mm 초과
개착터널	BOX(균열)	0.1mm 이하	0.1mm 초과 0.3mm 이하	0.3mm 초과 0.5mm 이하	0.5mm 초과 1.0mm 이하	1.0mm 초과
조적식 라이닝	줄눈균열	없음	아주 경미한 줄눈깨짐	벽돌 2개소 이하	벽돌 2개소 초과~ 5개소 미만	벽돌 5개소 이상

### 2) Line Type 방식

Line Type 방식은 CCD 라인센서 카메라를 사용하는 방식을 말한다. 고해상도의 CCD 라인센서 카메라가 부착된 터널스캐너가 터널을 주행하며 터널 외관을 스캔하여 고해상도의 터널 외관 영상을 촬영하게 된다. 이후 얻어진 터널의 외관 영상을 영상 프로세싱 기술로 분석하여 균열과 같은 손상정보를 표시하고 외관망도 작성, 손상물량 도출 등의 작업을 수행하게 된다. 이를 위하여 Line Type 에는 투영장치, 화상기록장치, 조명장치가 반드시 구축되어 있어야 한다. 하지만 레이저 방식과 마찬가지로 정속 주행을 해야만 정확한 외관조사를 진행할 수 있다는 단점이 여전히 존재하며, 피사체와의 거리에 따른 영상보정의 오차한계가 존재하여 장비의 활용성에 있어 제약적이다. 또한, 카메라의 해상도가 4K를 넘지 못하여 1pixel의 크기가 0.1mm보다 커지게 되며, 결과적으로는 0.1mm의 미세균열을 검출하지 못하여 Table 4에 제시된 국내 균열 평가등급 기준을 만족하는 터널 점검을 수행할 수 없다. Line Type 방식을 이용한 터널스캐너에는 일본 영단 지하철의 Tunnel

Inspection System, 일본 JR동해의 Tunnelas 등이 있다(Jee et al., 2014; Kim et al., 2018).

### 3) Area Type 방식

최근에는 Line Type 방식의 단점인 정속 주행과 0.1mm의 미세균열을 검출하지 못한다는 점을 극복하기 위하여 Area Type의 방식을 적용하고 있다. Line Type에서는 데이터 전송이 선으로 된다면 Area Type은 면으로 데이터를 전송하는 것이 가장 큰 차이점이다. 기존보다 빠른 속도로 장비를 주행할 수 있으며, 최적의 조건에서는 0.1mm의 균열 폭도 검출이 가능하다. 하지만 여전히 거리에 따른 보정 오차한계가 존재한다는 단점이 있으며, 장비의 주행속도에 따라 결과물의 품질에 차이가 난다는 단점이 있다. 최근 터널 점검 및 진단에 활용되는 터널스캐너들은 대부분 Area Type으로 국내에서는 KMTL, SQ 엔지니어링, 딥인스펙션, 아워브레인 등 다양한 업체들이 Area Type 방식이 적용된 터널스캐너를 보유하고 있으며, 실제 현장에서 운용되고 있다(Jee et al., 2014; Kim et al., 2018).

### 터널스캐너의 터널 점검과정

터널스캐너를 통한 터널 점검과정은 일반적으로 Fig. 7과 같이 진행된다. 현장조사를 통해 터널의 정보, 주변 환경 등을 파악하여 터널스캐너의 활용 여부를 검토한다. 이후 터널스캐너의 활용이 결정되면 터널스캐너를 터널에 주행시켜 영상을 촬영한다. 일반적으로 높은 품질의 영상 데이터를 취득하기 위하여 촬영 각도를 설정한 후 여러번의 촬영을 진행한다. 해당 과정을 통해 얻어진 영상은 터널의 형상이 고려되어 있지 않음으로 터널 형상 데이터, 카메라 촬영 위치, 촬영대상과의 거리 등을 고려하여 보정처리되며, 보정된 영상들은 영상 접합처리를 통하여 터널 전체의 라이닝 평면 영상을 구성하게 된다. 이후 도출된 터널 라이닝 평면 영상을 손상 인식 프로그램을 통해 균열의 위치, 폭, 길이, 박리, 박락 등을 자동으로 계산하여 검출하고 영상 위에 손상정보를 표현하게 된다. 해당 정보를 토대로 작업자는 터널의 외관망도 및 손상물량을 계산할 수 있다. 최근에는 외관망도와 손상물량을 자동으로 도출해내는 기술도 개발되고 있다. 터널스캐너를 활용한 터널 점검과정을 기술군으로 정리해보면 영상촬영기술, 영상분석기술, 데이터처리기술로 기술분류가 가능하다(Yoon et al., 2008).



Fig. 7. Process of tunnel inspection using tunnel scanner

### 터널스캐너 성능검증 방법론

터널스캐너의 성능검증 방법론을 제시하기 위해 터널스캐너를 활용한 터널 점검기술 개발 동향을 분석하고 터널스캐너의 터널 점검과정을 분석하였다. 본 절에서는 앞서 분석한 내용을 토대로 터널스캐너 성능검증 기본 방향을 설정하였다. 또한, 터널스캐너 성능검증 기본 방향을 토대로 터널스캐너 성능검증 방법론 체계를 제안하고 터널스캐너의 평가를 위한 성능검증 지표를 도출하여 터널스캐너 검·인증을 위한 성능검증 방법론을 구성하였다.



## 터널스캐너 성능검증 기본 방향

### 1) 최소요구성능 기준 제시 방식과 공인 성능 카탈로그 제시 방식

본 연구에서 제시하고자 하는 터널스캐너 검·인증을 위한 성능검증 방법론의 목적은 장비 사용자로 하여금 신뢰할 수 있는 정보를 제공하고 성능이 검증되지 않은 장비의 활용을 방지하는 것이다. 이런 취지에서, 본 연구에서는 두 가지의 성능검증 방향을 검토하였다. 첫 번째는, 장비의 성능 지표들에 대한 최소 합격기준을 제시하는 ‘최소요구성능 기준 제시’ 방식이다. 두 번째는, 장비의 표준 성능 지표들의 성능값을 공인된 방법으로 확인하여 측정된 성능값을 제시하는 ‘공인 성능 카탈로그 제시’ 방식이다. 결론적으로, 본 연구에서는 최소요구성능 기준 제시 방식과 공인 성능 카탈로그 제시 방식을 복합적으로 고려한 최적안을 터널스캐너의 성능검증 기본 방향으로 도출하였다.

최소요구성능 기준 제시 방식의 경우 터널스캐너의 표준화된 성능검증 지표 항목에 대한 최소요구성능 기준을 설정하고 통일된 방법을 통해 대상 장비의 성능이 최소요구성능 기준을 만족하는지 판단하여 장비를 검·인증하는 방식이다. 장비의 성능이 최소요구성능 기준을 모두 만족해야 공인된 인증을 받을 수 있으며, 제도적 절차를 통해 인증을 받은 장비만 현장에서 활용할 수 있게 한다면 성능이 검증되지 않은 장비의 활용을 방지할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 최소요구 성능값만을 확인하므로 사용자 입장에서는 어느 장비가 더 우수한 지 확인하기 어렵다. 또한, 장비 개발자 입장에서는 최소요구성능 기준만 만족하면 똑같은 인증을 받는다는 점에서 다른 장비보다 성능이 우수하다는 내용은 검증받을 수 없어 기술개발의 동기부여가 낮아지게 된다. 따라서 이러한 최소요구성능 기준 제시 방법은 장비 사용자 입장에서는 장비 선택에 있어 장비들간의 성능 비교가 어렵고 장비 개발자 입장에서는 개발한 장비의 우수한 성능을 검증받을 수 없고 지속적인 기술개발의 동기부여가 낮다는 단점이 있다.

공인 성능 카탈로그 제시 방식의 경우 터널 점검에 있어 요구되는 터널스캐너의 표준화된 성능검증 지표 항목에 대하여 장비 개발자가 먼저 장비의 성능값을 측정하고 검증기관에서는 표준화된 방법으로 장비 개발자가 측정한 성능값을 실험을 통하여 검증한다. 장비 개발자가 제시한 성능값과 실제 측정한 값이 다를 경우 장비의 성능값을 검증단계에서 측정된 값으로 수정하여 최종적인 장비의 공인 성능 카탈로그를 작성하게 된다. 이를 통하여 장비 사용자는 공인된 성능 카탈로그를 통해 원하는 성능을 보유한 장비를 활용할 수 있으며, 장비들간의 성능을 비교하여 우수한 장비를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 장비사용자가 전문가가 아니라면 장비 선택에 어려움이 존재하는 단점이 있다(Table 5).

**Table 5.** Comparison of Minimum Performance Standard Method and Catalog Method

구분	최소요구성능 기준 제시	공인 성능 카탈로그 제시
개념	성능검증 지표에 대하여 최소 성능 기준을 제시하여 최소 성능 기준을 만족하는지 판단하여 장비를 인증	공인된 표준 성능지표에 대한 성능값을 확인하여 공인된 카탈로그를 제시
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기본 성능이 검증되지 않은 장비의 활용을 방지할 수 있음</li> <li>- 장비 사용자 입장에서 장비 선택에 있어 모든 장비를 신뢰할 수 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 장비의 성능을 공인 측정하여 제시할 수 있음</li> <li>- 장비 개발자 입장에서는 최소 성능과 아울러 우수한 기술을 강조할 수 있음</li> <li>- 장비 사용자는 장비의 성능을 비교하여 선택할 수 있음</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기술 발전에 따라 지표의 변경 및 수정이 필요함</li> <li>- 기존의 검·교정 제도와 유사함</li> <li>- 장비 선택에 있어 장비들간의 최적성능 비교에의한 활용 불가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기술 발전에 따라 지표의 변경 및 수정이 필요함</li> <li>- 장비개발자가 전문가가 아닌 경우 장비 선택에 어려움이 있음</li> </ul>

본 연구에서는 장비 개발자와 장비 사용자 측면의 입장과 의견을 고려하여 최적의 터널스캐너 성능검증 방법론을 구축하기 위하여 개발된 방법론에 대하여 전문가 자문을 수행하였다. 전문가 자문결과, 터널스캐너의 검·인증을 위한 성능검증의 기본 방향은 ‘공인 성능 카탈로그 제시’가 더 적합한 것으로 나타났다. 최소요구성능 기준 제시 방식과 비교해 보았을 때 원천적으로 성능이 검증되지 않은 장비의 활용을 방지할 수 없다는 단점을 보완한다면 최소요구성능 기준 제시 방식보다 장비 개발자 입장에서 부담을 덜 수 있으며, 장비 사용자 입장에서도 우수한 장비를 선정할 수 있다는 장점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 최소요구성능 기준 제시와 공인 성능 카탈로그 제시 방법의 장점을 결합하여, 터널스캐너의 성능 검증 방법을 제시하였으며, 이는 1차 평가(서면, 최소요구성능 검증)와 2차 평가(현장, 공인 카탈로그 성능값 측정)로 구성된다.

2) 1차 평가(최소요구성능 검증)

1차 평가는 서면 평가로 진행된다. 1차 평가의 목적은 터널 정밀안전진단에 있어 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단)\_터널편」에 따른 터널 점검을 수행하기 위한 최소조건을 만족하는지 서면을 통해 판단하는 것이다. 따라서 1차 평가의 기준을 최소요구성능 기준으로 두고 서면 심사를 진행하고 2차 평가를 통해 1차 평가지표의 최소요구성능 기준을 통과하는 것을 확인할 수 있어 원천적으로 성능이 검증되지 않은 장비의 활용을 방지할 수 있다. 또한, 2차 평가는 현장에서 진행되기 때문에 2차 평가를 위한 준비나 현장 구성에 있어 많은 비용과 시간이 소요된다는 점에서 1차 평가는 반드시 필요하다.

1차 평가의 과정은 Fig. 8과 같이 진행된다. 1차 평가에 활용되는 평가지표는 터널스캐너의 성능과 관련된 최소요구성능 항목들로 구성된다. Fig. 8의 1차 평가지표 A, B, C의 항목은 Table 6에 정리된 1차 평가지표이다. 장비 개발자는 신청서 제출에 있어 1차 평가지표들에 대한 성능값과 공인시험서, 자체평가 등의 1차 평가지표의 성능값을 증빙할 기타자료를 제출한다. 이후 서면 평가에서 검·인증기관에서는 장비 개발자가 제시한 1차 평가지표의 최소요구성능 기준을 만족하는지 판단하고 2차 평가 진행 여부를 판단한다.

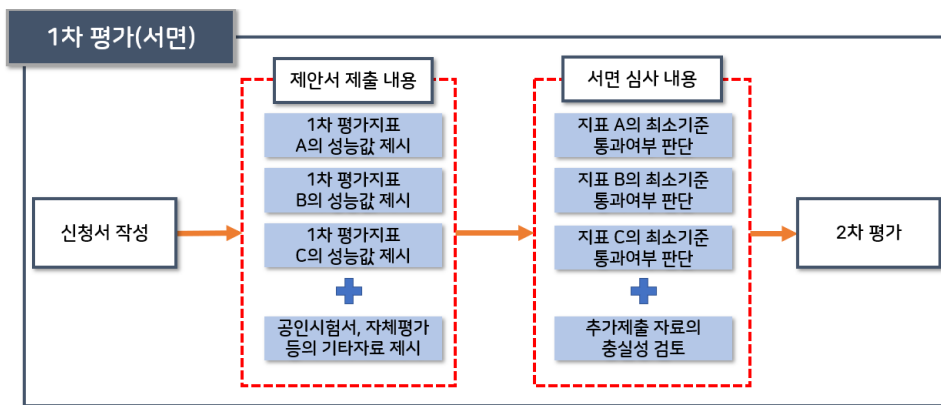


Fig. 8. First performance evaluation process

1차 평가지표는 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단)\_터널편」에 근거하여 터널스캐너에 반드시 요구되는 최소요구성능 기준을 제시하였다. 또한, 터널스캐너의 성능에 영향을 미치는 요인, 터널스캐너를 통한 점검 항목, 현장 운용성 영향 요인도 종합적으로 고려하여 1차 평가지표를 도출하였다(Table 6).

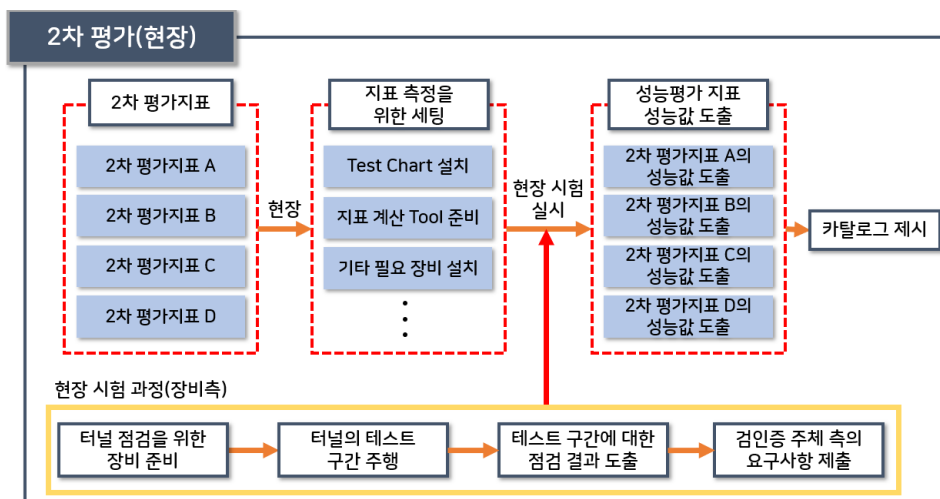
**Table 6.** First performance evaluation indicator of tunnel scanner

1차 평가지표	내용
균열 촬영 성능	- 장비가 주행하며 0.1mm의 균열을 촬영할 수 있는지 판단 - 0.1mm 균열 촬영을 위한 셔터속도, 조명, 속도 등의 항목들에 대한 세팅 조건 확인
균열 분석	- 장비가 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단_터널편)의 기준에 맞게 균열을 분류할 수 있는지 판단
주행 속도	- 터널 점검 시 장비의 최소, 최대 주행 속도 판단 - 도로터널 대상: 해당 도로의 최소 운행속도로 주행하며 점검할 수 있는지 판단 - 고속도로 터널 대상: 고속도로의 최소 운행속도인 50km/h로 주행하며 점검할 수 있는지 판단
현장 준비 시간	- 장비가 현장에서 도착한 이후, 터널 점검을 위한 준비 시간이 60분 이하인지 판단
터널 라이닝 이미지 도출	- 터널 주행 이후 손상(균열)정보가 표시된 터널 라이닝 이미지를 도출할 수 있는지 판단
외관망도 작성	- 터널 주행 이후 결과물로 외관망도를 작성할 수 있는지 판단(균열 중심)
손상물량 작성	- 터널 주행 이후 결과물로 손상물량을 도출할 수 있는지 판단(균열 중심)

3) 2차 평가(카탈로그 성능값 측정)

2차 평가는 현장 평가로 진행된다. 2차 평가의 목적은 1차 평가에서 장비 개발자가 표준 성능지표에 대하여 제시한 성능값이 실제로 정확한지를 측정을 통해 확인하고 2차 평가지표들에 대한 성능값 측정을 통해 최종적으로 공인된 카탈로그를 작성하는 것이다. 2차 평가를 통해 터널스캐너의 공인된 카탈로그를 작성할 수 있으며, 장비 사용자는 해당 카탈로그를 통해 장비를 선택할 수 있다. 또한, 장비 개발자는 보유한 장비의 성능을 공인된 카탈로그를 통해 장비 사용자에게 신뢰할 수 있는 정보를 제공할 수 있다.

2차 평가의 과정은 Fig. 9와 같이 진행된다. Fig. 9의 2차 평가지표 A, B, C, D의 항목들은 Table 7의 2차 평가지표들을 나타낸다. 1차 평가지표와 마찬가지로 2차 평가지표에 대한 성능값을 먼저 장비 개발자는 검·인증 기관에 제출한다. 이후 2차 평가를 위해 검·인증 기관에서는 2차 평가를 진행할 터널의 테스트 구간을 선정하고 지표 측정을 위한 준비를 한다. 2차 평가



**Fig. 9.** Second performance evaluation process

당일 터널스캐너를 실제 현장에서 터널 점검과정과 똑같이 수행하고 검·인증 기관에서는 2차 평가지표들에 대한 측정 및 평가를 동시에 진행한다.

2차 평가지표는 1차 평가지표를 기본적으로 포함하고 있다. 1차 평가지표가 터널스캐너에 요구되는 최소요구성능으로 구성되었다면, 2차 평가지표는 터널스캐너가 측정하는 결과물의 품질에 영향을 미치는 전반의 항목들로 구성하였다. 크게 계측 성능과 운용 성능으로 구분하였고, 계측 성능은 다시 촬영 품질과 영상 분석으로 분류하였다(Table 7).

**Table 7.** Second performance evaluation indicator of tunnel scanner

2차 평가지표		내용							
촬영 품질	색상 정확도	- 촬영한 영상의 색상의 정확도 측정							
	선명도	- 촬영한 영상의 선명도 측정							
	영상 왜곡 보정	- 촬영한 영상의 기울기 왜곡 측정 - 터널 형상에 따라 발생하는 가로, 세로 길이 왜곡 측정							
	영상 접합 성능	- 다수의 영상을 접합하는데 있어 발생하는 오차 측정							
계측 성능	균열 촬영 성능	- 주행하면서 0.1mm의 균열을 촬영할 수 있는지 판단 - 0.1mm의 균열 촬영을 위한 셔터속도, 조명, 속도 등의 세팅 조건 확인							
	영상 분석	<table border="0"> <tr> <td>균열 등급별 인식 정확도</td> <td>- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 인식 정확도 측정</td> </tr> <tr> <td>균열 길이</td> <td>- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 길이 정확도 측정</td> </tr> <tr> <td>균열 폭</td> <td>- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 폭의 정확도 측정</td> </tr> <tr> <td>균열 위치</td> <td>- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 위치 정확도 측정</td> </tr> </table>	균열 등급별 인식 정확도	- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 인식 정확도 측정	균열 길이	- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 길이 정확도 측정	균열 폭	- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 폭의 정확도 측정	균열 위치
균열 등급별 인식 정확도	- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 인식 정확도 측정								
균열 길이	- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 길이 정확도 측정								
균열 폭	- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 폭의 정확도 측정								
균열 위치	- 영상 분석을 통해 도출된 균열의 위치 정확도 측정								
운용 성능	주행 속도	- 0.1mm의 균열을 측정하기 위한 주행속도 측정 - 도로의 최소주행속도로 주행 가능한지 판단(고속도로 : 50km/h)							
	교통통제 용이성	- 교통 통제 필요 여부 판단							
	촬영 시야각도	- 1회 주행에 촬영해 낼 수 있는 시야각도 측정							
	현장 준비시간	- 터널 점검을 위한 현장에서의 준비 시간이 60분 이하인지 판단							
	점검 수행 소요시간	- 단위 면적당 촬영하는데 소요된 시간을 측정							
	외관망도 작성	- 외관망도 작성 가능여부 판단							
	손상물량 작성	- 손상물량 작성 가능여부 판단							

## 결론

본 연구에서는 터널 균열 검출에 활용되는 터널스캐너의 검·인증을 위한 성능검증 방법론을 제시하기 위하여 시설물 점검 및 진단에 활용되는 첨단장비 성능검증 동향, 터널스캐너를 활용한 터널 점검기술 개발 동향, 터널스캐너의 터널 점검과정을 조사하였다. 조사된 내용을 토대로 터널스캐너 성능검증의 기본 방향을 논의하였으며, 최종적으로 최소요구성능 기준 제시 방식과 카탈로그 제시 방식으로 두 가지의 터널스캐너 성능검증 기본 방향을 도출하였다. 또한, 장비 사용자와 장비 개발자가 포함된 전문가 자문회의를 통하여 각 방식의 장단점을 논의하였고, 최종안으로 카탈로그 제시 방식에 서면 심사를 통한 최소요구성능 검증을 포함한 성능검증 방법론을 구성하였다.

본 연구에서 구성한 터널스캐너 성능검증 방법론은 1차 평가(서면)와 2차 평가(현장)으로 구성된다. 1차 평가는 터널스캐너의 최소요구성능을 제시하고 장비 개발자가 제시한 성능값이 최소요구성능을 만족하는지 서면을 통해 심사하고 2차 평가

진행 여부를 결정하게 된다. 1차 평가를 통하여 현장에서 활용될 터널스캐너의 최소요구성능을 보장할 수 있고, 2차 평가가 현장에서 진행되어 많은 비용과 시간이 소요된다는 점에서 1차 평가의 과정은 효율적이고 경제적인 검·인증 제도의 운영에 필수적이다. 2차 평가는 1차 평가에서 확인한 성능값과 터널스캐너의 품질에 관여하는 성능검증 항목들에 대하여 현장에서 측정하게 된다. 2차 평가를 통해 터널스캐너의 성능 카탈로그 지표들에 대한 성능값을 도출할 수 있으며 이를 대상 장비의 성능 카탈로그로 제시한다. 장비 사용자는 공인된 성능 카탈로그를 통해 장비의 성능을 비교하여 현장에 적합한 장비를 선정할 수 있으며, 장비 개발자는 장비의 성능을 공인된 카탈로그로 검증할 수 있으며, 개발한 장비의 우수한 성능에 대한 공인된 검증을 받을 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서 제시하는 터널스캐너의 검·인증을 위한 성능검증 방법은 검증되지 않은 장비의 활용을 방지할 수 있고, 장비 개발자와 장비 사용자 모두에게 긍정적인 방향으로 활용될 수 있다. 그러나 국내에는 아직 검·인증 체계에 대한 제도적 차원의 연구나 기준이 부족하다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 성능검증 방법론의 제도적 차원에서의 적용 방안에 대한 연구가 필요하며, 장비의 주기적인 유지관리 역시 중요하기 때문에 최초 검인증 이후 주기적인 성능검증 및 검교정에 관한 제도적 차원의 연구도 필요하다. 기술적 차원에서도 1차, 2차 평가지표에 대한 항목들을 측정하는 시험 방법론에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다. 향후에는 이러한 내용을 기반으로 1차, 2차 평가지표 측정을 위한 시험 방법론을 개발할 계획이며, 실제 현장에서 본 연구에서 개발한 성능검증 방법론을 적용하여 시범적으로 터널스캐너 개발 업체들에 대한 공인 성능 카탈로그를 만드는 과정을 수행할 계획이다. 아울러 터널스캐너의 점검항목들인 박리/박락, 누수 등의 탐지 성능에 대한 지표 개발 및 검증 방법론을 추가로 개발할 계획이다.

## Acknowledgement

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 19CTAP-C152144-01).

## References

- [1] American National Standards Institute (2020). Standardization Roadmap For Unmanned Aircraft Systems, Version 2.0. U.S.
- [2] Construction & Economy Research Institute of Korea (2016). Future changes in transportation infrastructure maintenance investment in Korea. Korea.
- [3] Hong, S.-H., Kim, J.-G., Cho, J.-Y., Kim, T.-H. (2020). “A Study on the necessity of verification and certification system of inspection and diagnostic equipment for infrastructure using advanced technologies.” Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 16, No. 1, pp. 163-177.
- [4] Kim, I., Lee, C. (2018). “Development of video shooting system and technique enabling detection of micro cracks in the tunnel lining while driving.” Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 18, No. 5, pp 217-229.
- [5] Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (2018). A Study on the Evaluation Method of Appropriateness in Field Performance of Diagnosis and maintenance technology (Equipment). Korea.
- [6] Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (2019). Detailed Guidelines for Safety and Maintenance of Facilities (Safety Inspection and Diagnosis)\_Tunnel. Korea.

- [7] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2013). Yeon Cheon SOC Demonstration Research Center-Road Test Track Construction Project( II). Korea.
- [8] Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2017). Development of Multi-channel 3-D GPR System for Roadbed Cavity Detection in the Urban Area. Korea.
- [9] Lee, Y.-H., Bae, S.-J., Jung, W., Cho, J.-Y., Hong, S.-H., Nam, W.-S., Kim, Y.-M., Kim, J.-Y. (2020). “Performance evaluation method for facility inspection and diagnostic technologies.” Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 16, No. 1, pp. 178-191.
- [10] New Energy and Industrial Technology (2018). Guidelines for Evaluating the Performance of Unmanned Aerial Vehicles for Bridge Inspection Ver.1.0. Japan.
- [11] Yoon, T.-G., Lee, S. (2008). “A study for tunnel management system development using a tunnel scanner.” Korea institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 12. No. 3, pp. 183-191.