

터널 구조물의 유지관리 통합 시스템 개발

Development of A Tunnel Inspection and Maintenance System

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 윤효석²⁾, Hyo-Seok Yoon

¹⁾ 성균관대학교 토목공학과 부 교 수, Assoc. Prof., Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan University

²⁾ 성균관대학교 토목공학과 박사과정, Grad. Student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan University

SYNOPSIS : Due to several catastrophic collapses of structural systems in recent years, the maintenance of a structure system has become an important issue and new regulations for inspection and maintenance have been established for civil engineering structures. This paper describes general aspects regarding maintenance and repair of tunnel structures and the inspection and maintenance system for tunnel developed in this study. The tunnel inspection and maintenance system (TIMS) being developed in this study consists of several modules such as tunnel information module, inspection module, safety diagnosis module, health evaluation module, and repair/reinforcement method selection module. Each module can also be used as a database system for a given tunnel. A further study will implement an Artificial Intelligence (AI) method into the health evaluation and repair/reinforcement method selection modules. Details of the TIMS are discussed in this paper.

KEYWORDS : Tunnel, Maintenance and Repair, Tunnel Inspection and Maintenance System, Expert System

1. 서 론

성수대교, 삼풍백화점 구조물 붕괴사고 이후에 구조물의 안전 및 유지관리에 대한 사회적 관심이 고조되면서 그 후속조치로서 1995년에 “시설물의 안전관리에 관한 특별법”이 제정되었으며 이 법령에 근거하여 현재 대략 진단업체 149개사, 유지관리업체 117개사 정도가 등록되어 구조물에 대한 점검 및 진단업무를 수행하고 있다. 현행법상으로는, 구조물에 대한 점검 및 진단에 대한 규정이 강화되었으나 시설물 안전에 대한 문제 제기는 여전히 계속되고 있다. 현재 구조물의 유지관리를 위해 일상·정기점검 등의 안전점검을 정기적으로 수행하고 그 결과에 따라 정밀안전진단을 실시하여 필요에 따라서는 보수·보강을 수행하는 등 유지관리에 대한 체계적인 제도가 설치되어 있으나 터널 구조물의 구조적 안정성에 대한 문제가 빈번히 제기되고 있어, 유지관리 체계의 재정립이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 맥락에서 터널 유지관리의 체계화 및 효율성을 제고할 수 있는 터널 유지관리 통합 시스템의 개발을 시도하였다. 현재 개발중인 본 시스템은 터널의 사용연한동안 수행되는 각종 안전점검 및 안전진단 결과를 데이터베이스화하여 터널 손상이력 및 진전추이를 추적할 수 있는 기능을 갖추도록 하였으며 각종 안전점검 및 안전진단 시, 터널 상태등급 판정 및 보수·보강공법 선정시 인공지능(Artificial Intelligence: AI)기법의 적용을 시도하고 있다.

2. 국내 터널 구조물의 유지관리

2.1 국내 터널 유지관리 체계

그림 1은 우리 나라에서 시행되고 있는 터널의 유지관리 체계도를 보여주고 있다. 건설교통부 시설물 유지관리지침과 안전점검 및 정밀안전진단 지침 등에 따라 터널 구조물의 유지관리 세부지침이 마련되어 있는데 점검항목 및 방법 등을 크게 네 가지(일상점검, 정기점검, 긴급점검, 정밀안전진단)로 구분하여 시행하도록 되어 있다. 일상점검은 육안조사나 간단한 점검기구를 이용하여 터널 구조물의 손상을 조기에 발견할 목적으로 수행하는 것으로 순찰과 유사한 성격을 띠고 있으며 분기별로 1회 이상 실시하도록 규정하고 있다. 한편, 정기점검은 일정한 주기를 정하여 시설물의 기능 수행여부 및 상태를 점검하는 것으로서 콘크리트 라이닝의 연화나 철근부식 등 시간경과에 따른 재료열화에 의한 손상여부도 관찰하도록 규정하고 있으며 2년에 1회 이상 실시하도록 하고 있다. 긴급점검은 재해나 사고에 의해 비롯된 손상평가가 필요한 경우에 수행하는 추가적인 점검으로서 시설물의 기능 및 안전에 우려가 되는 경우에 시행하며 보수·보강 및 지속적인 사용여부를 판단하기 위해 수행한다.

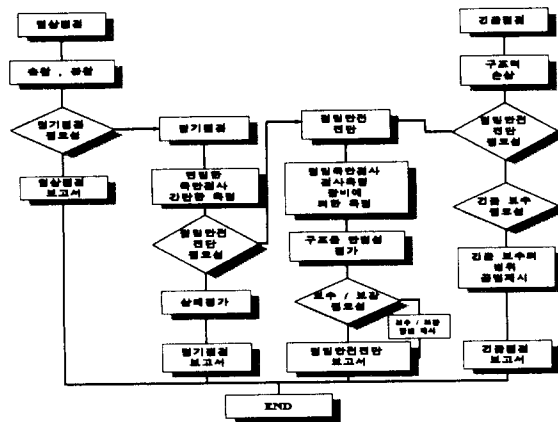


그림 1. 우리 나라 터널 유지관리 체계도

마지막으로 정밀안전진단은 터널 구조물의 구조적 안정성 및 결함의 원인을 비파괴시험 등의 적극적인 방법을 이용하여 조사·평가하고 그 결과를 토대로 보수·보강방법을 제시할 목적으로 수행하며 실시시기는 5년에 1회 이상으로 규정하고 있다. 한편 점검결과는 소정의 점검양식에 정확히 기재하여 기록·보관하도록 하고 있으며 점검결과의 판정은 균열상태, 누수, 백화, 터널의 변형정도에 따라 A~E 까지 5등급으로 구분하여 판정결과 등급E는 긴급한 보수 및 보강이 요구되는 상태로 규정하고 있다. 표 1은 건교부 제정 구조물 상태평가 기준을 나타내고 있다.

표 1. 상태 평가 기준(건교부, 시설안전기술공단 1996년 제정)

상태등급	상태
A	문제점이 없는 최상의 상태
B	경미한 손상의 양호한 상태
C	보조부재에 손상이 있는 보통의 상태
D	주요 부재에 진전된 노후화 (강재의 피로균열, 콘크리트의 전단균열, 침하 등)로 긴급한 보수·보강이 필요한 상태로 사용제한 여부를 판단
E	주요 부재에 심각한 노후화 또는 단면 손실이 발생하였거나 안전성에 위협이 있어 시설물을 즉각 사용 금지하고 개축이 필요한 상태

2.2 터널 구조물의 손상종류 및 보수·보강 대책

터널구조물의 손상원인은 크게 지압증가, 노후화, 누수, 동해 등으로 구분할 수 있다. 지압 증가는 소성압, 편압 또는 사면활동, 수압, 지반침하 등에 의해 발생하며, 배면주입, 강지보공 보강, 록볼트 보강, 인버트 콘크리트의 설치 등의 대책공법을 적용할 수 있다. 한편, 터널 라이닝의 노후화 현상은 염해, 중성화, 알카리 골재반응, 건조수축 등에 의해 발생하며, 이는 철근부식 및 균열, 박리 등의 현상으로 나타나므로 노후화 원인에 따라 적절한 대책을 마련하여야 한다.

터널 내부로의 누수현상은 동해 가능성, 방수기능의 저하방지 여부, 콘크리트 라이닝의 훼손 정도를 토대로 대책공법을 선정한다. 한편, 동해에 대한 대책은 단열 공법과 가열 공법으로 구분되며, 누수·동결상태 및 내공단면의 여유 여부에 따라 적절한 대책공법을 선정한다. 콘크리트 라이닝의 균열보수는 표면 처리공법, 충전공법, 도포공법으로 구분할 수 있으며, 균열의 원인, 폭, 깊이, 길이 등을 고려하여 적절한 대책공법을 선정한다. 표 2, 3 및 4는 각각 지압, 누수, 균열 대책공법을 제시하고 있다.

표 2. 지압 대책

변상원인 대책공법		소성압	편압·사면활동	지반이완에 의한 연직압	수압	지반침하	지반활동	지진	비고
보강판, 철망		△	△	○	△	△	△	○	
배면주입공		●	●	●	●	●	●	●	
라이닝 보강공	뿔어붙임 콘크리트	○	○	△	△	△	○	○	큰 변위가 예상될 때, 강섬유 보강된 스틱크리트(SFRC)사용
	현장타설 콘크리트	○	○	△	△	×	○	○	
강지보공 보강(Saddle)		○	○	○	△	●	○	○	
록볼트(Rock-Bolt)보강공		●	●	△	△	△	○	○	
다짐 콘크리트 공		×	○	×	×	×	△	△	
스트러트 공		○	○	×	△	△	○	△	
인버트 콘크리트 설치		○	○	×	△	○	○	○	
지반 주입공		×	△	△	△	△	×	○	
배수공 개량 또는 신설		△	△	△	●*	×	○	△	*도수공 개량·신설에 의한 배수 처리 개선
사면안정공			○				●	●	

(주) 표에서 대책공법은 각각의 변상 원인에 대해 적절한 공법들을 조합시켜 사용하는 일이 많다.

(주) ●최적의 공법, ○적합한 공법, △경우에 따라 유효한 공법, ×적합하지 않은 공법

표 3. 누수 대책

요인 분류	누수 상태	선상				면상				비고
	누수량	소량		다량		소량		다량		
	내공단면여유	유	무	유	무	유	무	유	무	
선상 대책 공법	도수공법	○	-	○	-	△	-	△	-	
	흙파기공법	-	○	○	○	-	○	-	○	<ul style="list-style-type: none"> • U,V커트 등 • 면상대책공법의 전처리로서도 시행
	지수공법	△	△	-	-	-	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • 누수량이 물방울 형성 정도이고 범위가 한정되는 경우 적용 가능
면상 대책 공법	뽐어붙임공법	-	-	-	-	○	-	○	-	<ul style="list-style-type: none"> • 철망, 앵커 및 도수공의 병용 필요
	도포공법	-	-	-	-	△	△	-	-	<ul style="list-style-type: none"> • 누수 정도가 경미할 때에만 적용
	방수판	-	-	-	-	-	-	○	-	
	방수시트	-	-	-	-	○	-	○	-	<ul style="list-style-type: none"> • 내부라이닝 개축 등을 행할 경우
배면주입공법		-	-	○	○	-	-	○	○	<ul style="list-style-type: none"> • 토피가 작고 지표수와 우수가 터널 배면 공동을 통하여 직접 터널내로 유입하는 경우
수위저하공법		-	-	○	○	-	-	○	○	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수위가 높은 상태에서 용수나 열차 하중의 반복하중에 의한 지반재료의 배출

주) ○ : 적용 가능한 공법 △ : 경우에 따라 적용할 수 있는 공법

표 4. 균열 대책 공법

보수 목적	균열현상·원인		균열폭 (mm)	보수공법				
				표 치 리 공 법	주 입 공 법	충 진 공 법	그 밖의 공법	
							침투성방수 제 도포공법	기 타
방수성	철근이 부식되지 않은 경우	균열폭의 변동이 적다	0.2이하 0.2~1.0	○ △	△ ○	○ ○	○	
		균열폭의 변동이 크다	0.2이하 0.2~1.0	△ △	△ ○	○ ○	○	
내구성	철근이 부식되지 않은 경우	균열폭의 변동이 적다	0.2 이하 0.2~1.0 1.0이상	○ △	△ ○ △	△ ○ ○		
		균열폭의 변동이 크다	0.2이하 0.2~1.0 1.0이상	△ △	△ ○ △	△ ○ ○		
	철근부식		-			○		
	염해		-					●
	반응성 골재		-					●

* 1. 균열폭 3.0mm 이상의 균열은 구조적인 결함을 수반하는 경우가 많으므로 상기표의 보수공법 뿐만 아니라 구조내력의 보강을 포함하여 실시하여야 한다.

2. ○적당 ● 연구단계 △ 조건에 따라 적당

3. 터널 구조물의 유지관리 시스템

3.1 개요

일반적으로 철도 터널 시설물 관리는 터널 카드 및 보수현황철로 이루어지는 터널대장과 구조물 변상 검사보고대장, 소요예산관리부, 점검기록부 등을 통해서 이루어지고 있다. 따라서 각 터널의 유지관리를 위해서는 다량의 정보를 체계적으로 관리할 필요성이 있으며, 시설물 노후화에 따른 각종 점검 및 관리자료의 증가로 인해 전산화를 이용한 체계적 자료관리가 요구된다.

이러한 맥락에서 본 연구에서는 터널 구조물의 유지관리 체계화 및 효율성 제고를 위해 터널 유지관리 통합 시스템(Tunnel Inspection and Maintenance System: TIMS)의 개발을 시도하였다. 본 TIMS에서는 기존의 유지관리 체계에 전산 정보화 개념을 도입하여, 대상 터널의 점검 및 진단자료, 손상 진단상황 및 보수·보강 이력 등을 데이터 베이스화하여 검색 기능을 갖추도록 하였다. 한편, 개발된 TIMS는 지속적 연구를 통해 점검 및 진단자료를 이용한 터널 구조물의 상태 평가(health evaluation) 및 보수·보강 공법 선정의 정보화 및 객관성 확보를 위해 인공지능(Artificial Intelligence: AI) 기법을 접목시켜 유지관리 전문가 시스템(expert system)으로의 발전 방향을 모색하고 있다.

TIMS는 현재 터널 구조물의 유지관리 체계에 정보화 기술을 접목시켜 현재 점검 및 진단 체계를 데이터 베이스화 할 수 있는 기능을 갖추는데 초점을 맞추었으며, 기본적인 특징 및 기능은 다음과 같다.

- 터널 위치도, 지질도, 설계 및 시공사 등 터널 정보 관리 기능
- 일상/정기점검 및 안전진단 자료의 관리 및 검색 기능
- 손상진전 및 보수이력 상황 관리 검색 기능
- 상태평가 및 보수·보강 공법 선정 자동화 기능

3.2 시스템 개발환경

터널 유지관리 시스템에서는 많은 양의 자료를 효율적으로 관리하여야 하므로 정보의 일관성 유지 및 관리의 용이성 확보를 위한 시스템 환경설정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 시스템 개발을 위해서 Windows 95 운영체계를 기반으로 객체지향 Visual C++ 언어를 기본 개발 도구로 사용하였으며 터널 구조물 유지관리에 필요한 설계도, 점검 및 진단자료 등의 관리자료 조사를 통해 자료 수집 및 축적이 가능한 항목을 형태별로 구분하고 Microsoft Access를 이용하여 데이터베이스 시스템을 구축하였다.

한편, 시스템 구축에 있어서 관리 자료의 효율적 운영을 위해 데이터베이스 언어인 Query를 사용하여 관리자가 각종 상황에 따른 조건별 분석을 할 수 있도록 프로그래밍 하였으며 특히, 터널 구조물의 관리자료의 입력 및 상황별 조건 분석 및 검색 기능을 추가하여 현장에서 터널의 유지관리 업무수행의 효율성을 제고하였다. 시스템 구축에 사용된 하드웨어 및 소프트웨어의 사양은 다음과 같다.

- Hardware: Micro Processor: 486 DX 이상 RAM: 32MB 이상
- Operating System: Window 95 이상
- 개발 환경: Visual C++, Microsoft Access

3.3 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 TIMS는 그림 2와 같이 4개의 기본 모듈과 각 모듈을 구성하는 하부항목으로 이루어져 있다. 한편, 터널 구조물의 유지관리 통합 시스템의 데이터베이스 설계를 위해서 현재 각종 관리대장과 우리 나라의 터널 점검/진단 체계를 토대로 데이터베이스 항목을 설정하였으며 AI 기법이 적용된 상태평가 및 보수보강공법 선정 모듈을 추가하여 점검/진단 결과를 토대로 터널의 건전성 평가 및 보수·보강 공법 선정시 객관성을 확보하도록 하였다. 각 모듈의 세부수행 내용은 다음과 같다.

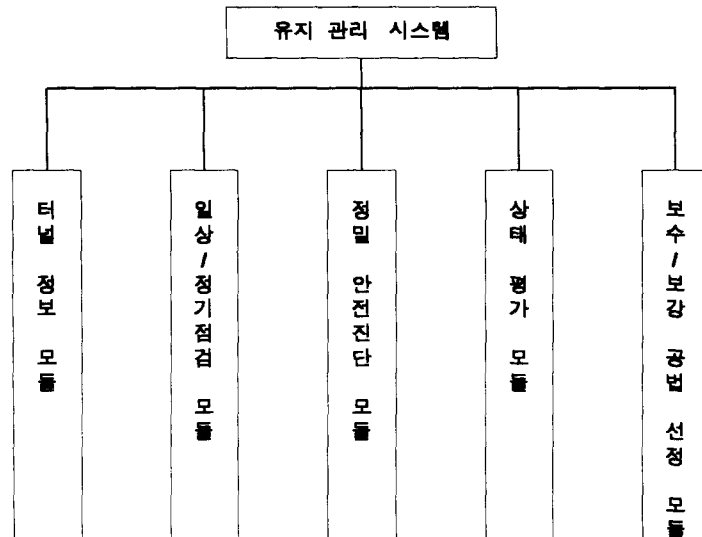


그림 2. 유지관리 시스템의 구성

(1) 터널정보 모듈

본 모듈은 그림 3(a)에서 보이는 바와 같이 터널의 제원 및 설계/시공 관련된 정보 즉, 터널 위치도 및 지질도, 터널구분, 터널형상, 설계사 및 시공사, 관리주체, 유지관리기관 등의 입·출력 및 검색기능을 부가하여 관리대상 터널의 종합적인 자료를 검색할 수 있는 기능과 점검/진단 현황, 보수보강이력에 대한 기본적 자료를 제시하는 기능을 부여하였다.

(2) 일상/정기점검 모듈

일상/정기점검 모듈은 관리대상 터널의 점검자료를 데이터 베이스화하는 중요한 모듈로서 기존의 점검형식을 spread sheet 형식으로 작성하여 점검자료의 입력과 수정이 가능하도록 하였다. 즉, 균열 및 누수상태, 백화여부, 박리·박락 여부, 라이닝 및 철근 부식 여부, 배수시설 상태 등 주요 점검항목을 토대로 입력 형식을 구축하였으며, 입력 결과를 토대로 터널의 등급평가가 자동적으로 수행될 수 있는 기능을 부여하였다. 그림 3(b)는 일상 및 정기점검 모듈의 실행 예를 보여주고 있다.

(3) 정밀안전진단 모듈

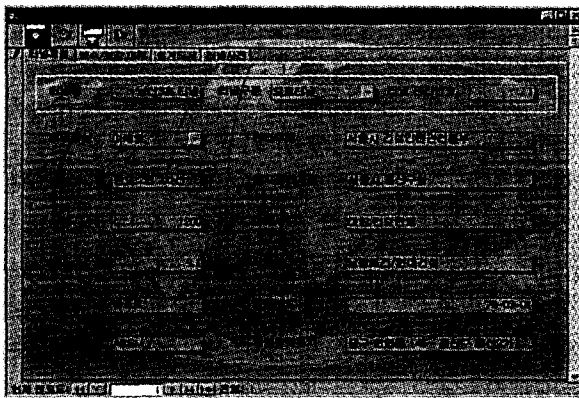
그림 3(c)는 정밀안전진단 모듈의 실행 예를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 본 모듈에서는 외관 조사 및 라이닝 품질 평가로 구분되는 정밀안전진단 항목을 토대로 진단자료의 입력 및 수정이 가능한 spread sheet 형태로 작성하였으며, 각 구간 및 총괄 현황의 자료 입력이 가능하게 하였다. 아울러서 일상/정기점검 모듈과 마찬가지로 진단 결과를 토대로 터널의 등급이 자동적으로 평가되는 기능을 부여하였다.

(4) 상태평가 모듈

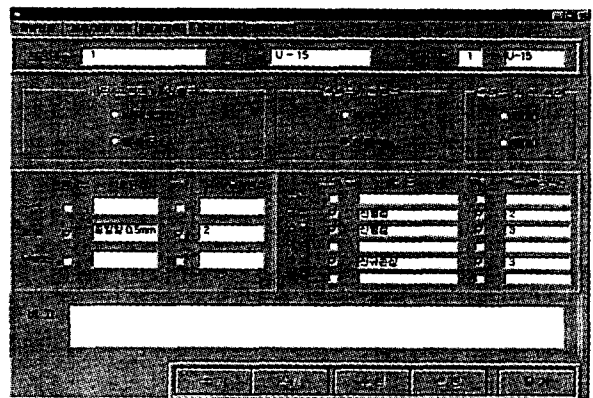
본 모듈은 점검 및 진단자료를 토대로 터널의 구조적 상태를 평가하는 모듈로서, 보다 객관적 평가를 위해 인공지능의 접목을 시도하고 있다. 즉 점검 및 진단 모듈에서 획득한 정보를 토대로 터널의 시간대별 상태변화 추이를 분석하고 그 결과를 구조적 건전성 평가 기준과 접목시켜 터널의 현재 상태 평가 및 보수·보강의 필요성 여부를 결정하는 기능을 확보할 예정이다. 그림 3(d)는 상태평가 모듈의 기본 창을 보여주고 있다.

(5) 보수/보강 공법 선정 모듈

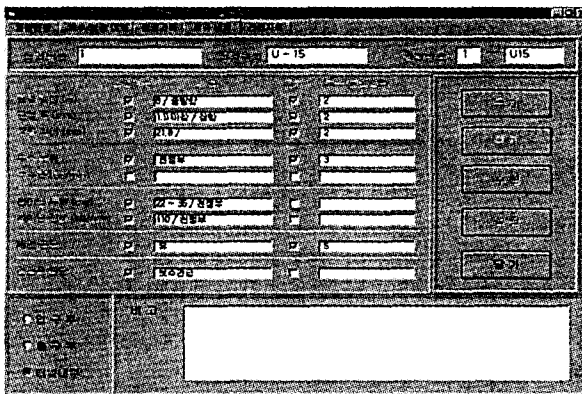
보수/보강공법 선정 모듈에서는 점검/진단 자료 및 상태평가자료를 토대로 최적의 보수/보강공법을 선정하는 기능을 갖추도록 하였다. 즉 관리대상 터널의 손상종류 및 진전상황, 보수·보강 이력사항 등을 데이터 베이스화하여 검색이 가능하도록 하였으며, 앞서 언급한 손상종류 및 대책공법을 데이터 베이스화 하여 점검/진단 내용을 토대로 최적의 보수/보강 공법의 선정이 가능하도록 구성하였다.



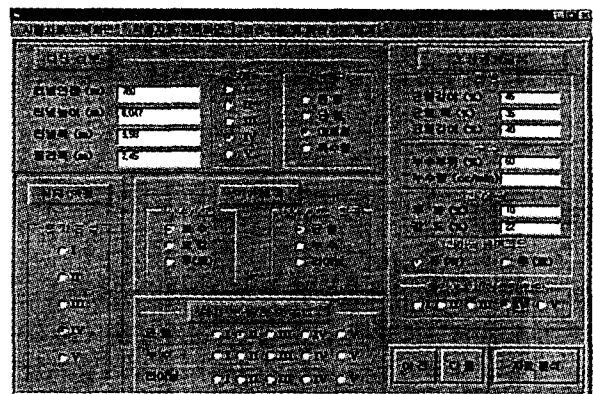
(a) 터널 정보



(b) 일상/정기 점검



(c) 정밀안전진단



(d) 상태평가

그림 3. 터널 유지관리 시스템 (TIMS)

3.4 기대 효과

본 터널 유지관리 시스템(TIMs) 개발은 기존의 시설물 유지관리 체계에 전산 정보화 기술을 접목시켜 터널의 유지관리의 전산화 및 체계화를 시도하였다는 측면에서 그 의미를 찾을 수 있다고 하겠다. 현재 개발중인 본 시스템의 최종 목표는 터널 유지관리의 정보화에 있으며, 전문가 시스템 및 유지관리 자동화 계측 시스템과의 접목을 통해 명실상부한 터널 구조물 유지관리 통합 시스템의 구축을 시도하고 있다.

본 유지관리 시스템을 현장 터널 유지관리에 적용할 경우 점검/진단자료의 데이터 베이스화를 통해 체계적이고 지속적인 터널 구조물의 유지관리가 가능할 것으로 판단되며, 건전성 평가 및 보수·보강 공법 선정시 객관성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현행 터널 구조물의 유지관리 체계 및 터널 구조물의 손상종류와 보수보강 대책에 대하여 알아보았으며, 터널 유지관리의 체계화 및 효율성 제고를 위해 기존의 유지관리 체계에 전산 정보화 기술을 접목시킨 터널 구조물 유지관리 통합 시스템(TIMs)의 개발에 관한 내용을 다루었다. 현재 개발중인 본 시스템은 터널 제원 및 각종 정보를 데이터 베이스화 할 수 있는 기능을 보유하고 있으며, 사용연한 동안에 수행되는 각종 점검/진단 자료의 입·출력 및 관리기능, 검색 기능 등을 부여하여 터널 손상이력 및 진전추이, 보수·보강 이력에 대한 검색 및 추적이 가능하게 하였다. 한편 향후 연구를 통해 점검/진단 자료를 이용한 건전성 평가 및 보수/보강 공법 선정 과정에 인공지능기법을 토대로한 전문가 시스템을 접목시켜 터널 구조물 유지관리 전문가 시스템으로의 발전을 모색하고 있다.

본 연구에서 개발중인 유지관리 자동화 시스템의 현장 적용을 통해 터널 구조물 유지관리 분야의 정보화를 꾀할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 터널 유지관리의 체계화 및 효율성의 극대화를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 G7 고속전철 터널기술개발 사업의 2차년도 연구인 “터널 영구 계측 자동화 시스템 개발 연구”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

• 참고문헌

- (1) 건설교통부, “시설물유지관리지침”, 1997
- (2) 철도총합기술연구소(일본), “터널보수·보강매뉴얼”, 1990
- (3) 시설안전기술공단, “터널보수·보강기술편람”, 1996
- (4) 시설안전기술공단, “광교터널 정밀안전진단 보고서”, 1996
- (5) 시설안전기술공단, “남산3호터널 정밀안전진단 보고서”, 1996
- (6) 시설안전기술공단, “남산2호터널 정밀안전진단 보고서”, 1996
- (7) Haack, A., Maintenance and repair of underground structures and tunnels, Proceedings. of the World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metrosopies, Brazil, 459~475, 1998.
- (8) Richards, J.A., General Report: Maintenance and repair of underground structures, Proceedings. of the World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metrosopies, Brazil, 477~488, 1998.