

인공신경망을 이용한 터널 건전도 평가시스템 개발

김현우¹⁾ · 김영근²⁾ · 이희근³⁾

A Study on the Development of Tunnel Soundness Evaluation System Using Artificial Neural Network

Hyun-Woo Kim, Young-Geun Kim and Hi-Keun Lee

ABSTRACT One of the major roles of concrete lining is the supplementary support of ground load. Therefore, if there are cracks or deformation found in the lining, the causes should be carefully examined. Tunnel Soundness Evaluation System (DW-TSES) was developed to meet such requirements. Main facility of the system was intended to find the probable causes on the basis of the apparent changes in lining and the environmental conditions. It also includes facilities for evaluating the soundness of a tunnel and indicating the method for repair or reinforcement. The characteristic feature of damages is used for reasoning in case of deterioration and leakage, and artificial neural network is used in external pressure. This process depends on the results of the case analyses and FDM, which have a collection of the typical features of different types of damages as well as the unusual changes caused by the external pressure. The comparison of the outputs of this system with those of expert's diagnoses draws the following conclusions. 1) Artificial neural network was a suitable tool to find the causes of damages by external pressure. 2) The environmental conditions improved the accuracy in reasoning. 3) The result of finding causes and evaluating soundness was helpful to suggest effective methods concerning tunnel maintenance.

Key words : tunnel lining, artificial neural network, deformation or crack, soundness evaluation, repair and reinforcement

초 록 터널에서 콘크리트 라이닝은 미관상의 개선과 지하수 침투방지 목적 이외에 하중지지를 분담하는 보조적 역할을 수행하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 터널 라이닝에 발생한 균열이나 변형이 단순하게 사용재료나 시공상의 결함에 기인하는 것인지, 혹은 구조적으로 외력 등이 작용하여 생겨난 현상인지 규명하는 작업은 터널 안전성 확보 측면에서 매우 중요하다. 또한 원인 규명결과와 그 외 관찰 가능한 현상을 기초로 하여 터널의 건전도를 평가하고, 최종적으로 보수보강이 요구되는 경우 적절한 대책을 제시할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 필요성에 따라 라이닝과 노반의 주요 변상현상 및 주변 환경조건에 근거한 변상원인의 추론, 터널 건전도 평가, 보수보강대책 제시 등의 기능을 갖춘 터널 건전도 평가시스템을 개발하였다. 이 시스템은 라이닝의 변상을 크게 외력에 의한 변상, 재질열화, 누수로 분류하는데, 외력이 작용한 경우 인공신경망을 도입해 원인을 추론하며 재질열화 및 누수는 균열의 형태와 특징을 이용해 원인을 규명하였다. 그리고 실제 적용되고 있는 기준들을 조사하여 시스템에 반영함으로써 사용자가 입력한 내용과 추론결과에 따라 터널에 대한 건전도를 평가하고 적절한 보수보강대책을 제시하는 과정을 추가하였다. 개발된 시스템에 터널 변상사례를 입력하여 얻은 결과와 동일 사례에 대한 전문가의 판정을 비교함으로써 외력에 의한 변상의 경우 인공신경망을 이용한 원인추론이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 라이닝 및 노반의 변상현상 뿐만 아니라 터널 시공조건 및 주변 환경조건이 함께 주어졌을때 더욱 정확한 결론을 얻을 수 있었으며, 원인추론 및 건전도 평가결과를 기초로 구체적이고 효율적인 보수보강대책을 제시할 수 있었다.

주요어 : 터널 라이닝, 인공신경망, 터널의 변상, 건전도 평가, 보수보강대책

1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 석사 졸업
2) 정회원, (주)대우 건설기술연구소 토목연구실 과장 (공학박사)
3) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
원고 접수일 : 1999년 2월 18일
원고 심사 완료일 : 1999년 3월 13일

1. 서 론

터널은 일종의 지하구조물로서 지형, 지질, 기후 및 기상 등과 같이 영향을 미칠 수 있는 주변환경이 매우 다양할 뿐만 아니라 예기치 못한 외력이 작용하여 구조물에 중대한 문제를 유발할 수도 있다. 따라서 시공 이전에 중요한 영향요소들을 정확히 분석·평가하여 터널 설계에 미리 반영하는 것이 바람직하지만, 현재의 기술 수준으로 시공 후 일어날 터널 주변의 지반거동과 그로 인하여 발생할 수 있는 구조물의 복잡적 변상(變狀)까지 예측하기는 어렵다. 이에 차선책으로 여러 안전진단보고서에서 볼 수 있는 바와 같이 터널에 발생한 일련의 변상현상을 분석하여 그 원인을 규명하고 적절한 보수보강대책을 마련함으로써 예상치 못한 변상에 대하여 터널 안전성을 확보하는 작업이 이루어지고 있다.

그러나 국내의 경우 이러한 진단 및 원인 규명에 활용할 수 있는 이론과 방법이 충분히 마련되어 있지 않은 실정이며, 전문가별로 적지 않은 개인차가 내재되어 판정결과가 일정적이고 주관적일 수 있다. 실제 최근 몇몇 터널에서 다수의 균열과 누수가 관찰되어 터널 안전에 대한 사용자의 불안감을 가중시킨 사례가 있었으나 명확하고 객관적인 원인진단 및 보수보강대책 제시가 이루어지지 않고 있다. 그러므로 터널에 발생한 변상현상을 조사하여 합리적으로 원인을 규명하고 터널의 건전도(soundness)를 객관적으로 평가할 수 있는 시스템 개발이 절실히 요구되고 있으며, 나아가 이러한 원인 규명 및 건전도 판정결과에 기초하여 적절하고 효율적인 보수보강대책을 제시할 수 있는 기능에 대한 필요성도 높아지고 있다.

본 연구에서는 시스템 개발에 앞서 변상원인별로 터널 라이닝 및 노반 등에 발생할 수 있는 현상에 대해 자료를 수집·분석하였으며, 기존 사례의 검토 및 수치해석을 통해 이를 확인하였다. 수치해석적 검토는 FDM(Finite Difference Method)에 기반을 둔 FLAC 3.3을 이용하였으며, 사면지형, 터널 주변의 비대칭 지반 등과 같이 변상과 관련된 지형을 모사하여 원인별로 터널에 발생하는 현상을 살펴보았다. 그리고 그러한 결과를 바탕으로 변상원인과 현상간의 관계를 인공신경망(artificial neural network)을 도입하여 모사함으로써 변상현상을 이용해 원인을 찾는 시스템을 마련하였다. 또한, 변상이 사용자, 구조물, 유지관리에 미치는 영향을 나타내는 터널 건전도를 객관적으로 평가하기 위해 기존 건전도 판정

기준을 이용한 평가시스템을 구축하였다. 아울러 현재 보수보강대책으로 이용되고 있는 공법의 특징과 선정기준을 조사하여 시스템에 반영함으로써 필요에 따라 적절한 대책을 제시할 수 있는 기능을 추가하였으며, 입력된 터널 변상자료는 데이터베이스로 구축되어 향후 활용할 수 있도록 하였다. 끝으로 이러한 시스템들을 조합하고 GUI 기법(Graphic User Interface)을 도입함으로써 터널 관련 기술자들이 손쉽게 활용할 수 있는 터널 건전도 평가시스템의 초기 시작품(prototype)을 개발하였다.

2. 터널 건전도 평가시스템의 개발

터널 건전도 평가시스템의 전체적 구성은 Fig. 1과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시스템은 크게 변상원인의 추론, 건전도 평가, 보수보강대책 제시과정으로 구분된다. 변상원인은 크게 외력(external force)의 작용, 재질열화 및 누수로 나뉘며 각 원인별 규명기준에 따라 추론에 필요한 입력항목과 결과로 제시할 출력항목을 선정하였다. 터널의 건전도를 평가하는 과정도 이와 유사하게 우선 평가기준을 마련한 뒤 그에 따라 입력항목을 정하였다. 보수보강대책의 제시는 상기 과정이 수행된 후에 이루어지는데 가급적으로 변상원인 추론 및 건전도 평가결과, 실제 보수보강조건 등이 반영된 대책선정이 되도록 하였다.

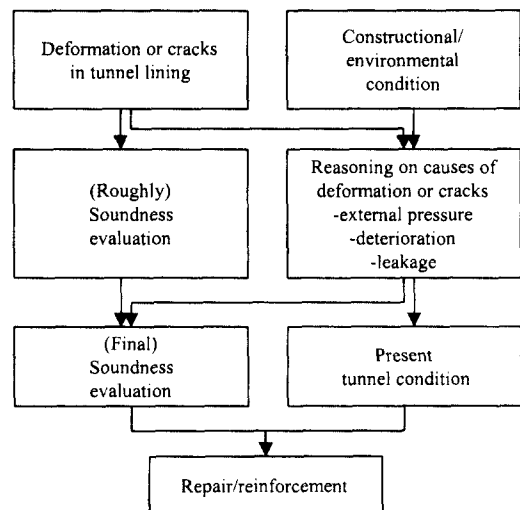


Fig. 1. Schematic flowchart of tunnel soundness evaluation system

2.1 터널 변상원인의 추론-외력에 의한 변상

관련문헌^{1,2)} 및 각종 터널의 안전진단보고서를 분석한 결과, 유사한 라이닝 및 노반 변상현상이 여러 원인에 의해 발생할 수 있으며 역으로 특정 외력이 작용하더라도 그와 관련된 변상이 모두 일어나지는 않음을 알 수 있었다. Table 1에 11개 변상원인과 관련된 현상 및 발생위치를 부분적으로 제시하였는데, 이러한 변상현상 및 원인의 복잡한 관계를 효율적으로 모사할 수 있는 시스템으로 인공신경망을 선정하였다. 그 이유는 인공신경망이 이런 종류의 비선형적 관계를 잘 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 입출력 모사기능을 이용한 패턴매칭(pattern matching)이 변상원인 규명과정과 유사하기 때문이다. 또한 터널 라이닝에서 특정 원인의 작용에 따라 모든 변상현상이 일어나지는 않는 점과 인공신경망의 오차허용특성을 같은 맥락으로 볼 수 있기 때문이다. 그러므로 터널 라이닝 및 노반에서 관찰할 수 있는 변상현상을 입력항목으로, 편압이나 소성압과 같이 터널에 작용할 수 있는 외력들을 출력항목으로 하는 인공신경망을 구성하고 기존자료를 이용한 인공신경망의 학습이 충분히 수행된다면 변상현상을 근거로 한 원인 추론이 가능해진다. 즉, Fig. 2와 같은 화면에서 사용자가 관찰된 변상현상을 입력하면 원인별로 작용 가능성을 제시할 수 있다.

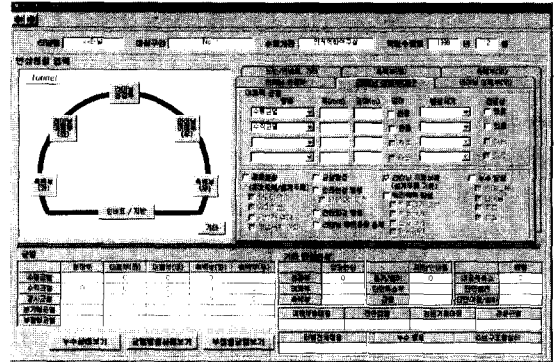


Fig. 2. Input module for deformation or cracks in tunnel lining

본 시스템에서는 기존자료의 분석 및 검토를 통해 Table 2, 3에 제시된 입출력항목을 선정하였으며, 문헌 및 기존 사례의 검토, FLAC 3.3을 이용한 수치해석 결과에 따라 사례 129개를 구성하여 학습을 수행하였다. 인공신경망은 두 개의 은닉층(hidden layer)을 가진 구조로서 입력층 및 은닉층은 각각 42개 노드(node)를, 출력층은 11개의 노드를 가지며 학습율 0.3, 관성율 0.7, 시스템 오차한계 0.01을 적용하였다. 입력노드는 Table 2의 균열 형태 및 위치, 인버트의 이상, 변형, 기울어짐 등과 같이 외력의 작용에 의해 터널에 나타나는 대표적

Table 1. Appearance for each cause of deformation (partial)

	Horizontal crack				Diagonal crack			
	Arch Vault	Arch Shoulder (Left)	Arch Shoulder (Right)	Side Wall (Left) / Side Wall (Right)	Arch Vault	Arch Shoulder (Left)	Arch Shoulder (Right)	Side Wall (Left) / Side Wall (Right)
Earth pressure loosening	○	○	○			○	○	
Cross sectional unsymmetric earth pressure		○	○		○	○	○	
Cross sectional land sliding (tunnel crossing sliding plane)		○	○	○	○		○	○
Cross sectional land sliding (tunnel beneath sliding plane)		○	○	○	○		○	○
Longitudinal unsymmetric earth pressure · land sliding								
Plastic earth pressure (Cross sectional) Poor supporting capacity of ground (Longitudinal) Poor supporting capacity of ground		○	○	○				
Water pressure		○	○	○	○	○	○	○
Frozen earth pressure		○	○	○				
Tunnel settlement caused by ground surface settlement					○	○	○	○

Table 2. Input data for deformation or cracks in tunnel-external pressure

Appearance		
Vault Arch Side wall	① Characteristic cracks - Phenomena : horizontal crack (cross sectional crack), vertical crack(longitudinal crack), diagonal crack, irregular crack	
	- Width of crack(mm), length of crack(m)	
	② Compressive failure ③ Shear failure	
Side wall	Convergence	
Pavement /Invert	① Raising or settlement ② Cracks ③ Discrepancy between side wall and invert	
	Tunnel cross section	Rotation, slide, or settlement of lining
	Etc	① Opening cracks at construction joint ② Tilt of or cracks of adit ③ Settlement of structure near tunnel ④ Movement of tunnel

Table 3. Output of reasoning on causes of deformation or cracks-external pressure

External pressure	
Natural causes	Earth pressure loosening
	Corss sectional unsymmetric earth pressure
	Cross sectional land sliding (tunnel crossing sliding plane)
	Cross sectional land sliding (tunnel beneath sliding plane)
	Longitudinal unsymmetric earth pressure · land sliding
	Plastic earth pressure (Corss sectional) Poor supporting capacity of ground (Longitudinal) Poor supporting capacity of ground
	Water pressure
	Frozen earth pressure
	Tunnel settlement caused by ground surface settlement

변상현상 42개를 의미하며 출력노드는 Table 3에 제시된 11개의 변상원인이다.³⁾ 참고로 인공지능망 및 시스템 구축에 사용된 언어는 MS Visual Basic 5.0이며, 역전파 학습 알고리즘(back-propagation learning algorithm)

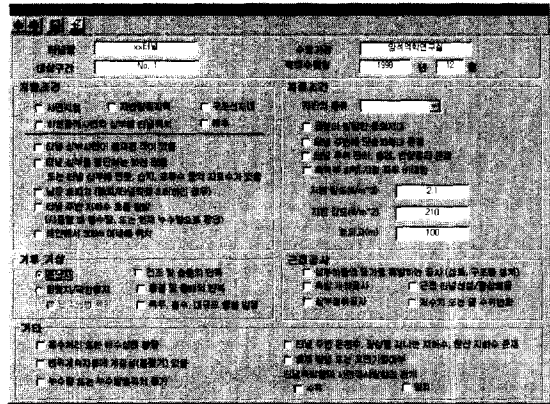


Fig. 3. Input module for construction control and environmental condition

의 구성은 기존 문헌⁴⁾을 참고하였다.

문헌조사 및 수치해석 결과 지형, 지질, 기후·기상, 설계 및 시공조건, 근접공사 여부 등 터널 시공조건 및 주변 환경조건(Fig. 3)도 터널 변상에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 이를 반영하기 위해 원인별로 변상과 깊은 관련이 있는 조건들을 찾아 분류한 뒤 사용자가 입력한 자료 가운데 해당사항이 있을 경우 작용 가능성을 부여하는 방식을 취하였다. 예를 들어 터널이 사면지형에 위치하고 있다면 변상원인으로 편압·사면 활동, 지반 미끄러짐 등을 추정할 가능성이 커진다. 참고로 Table 4에 터널 변상과 관련된 터널 시공조건 및

Table 4. Construction control and environmental conditions-external pressure (partial)

Construction control and environmental condition	
Terrain	① Terrain near tunnel
	② History of failure in the slope above tunnel
	③ Presence of water above tunnel
	④ Thickness of ground surface above tunnel
	⑤ Ground water near tunnel
Geology	① Kind of ground
	② Presence of fault or fracture zone near tunnel
	③ Schistosity or stratification near tunnel
	④ Ground strength ratio - thickness of ground surface above tunnel, density of ground, strength of ground
	⑤ Different kind of ground under each side wall

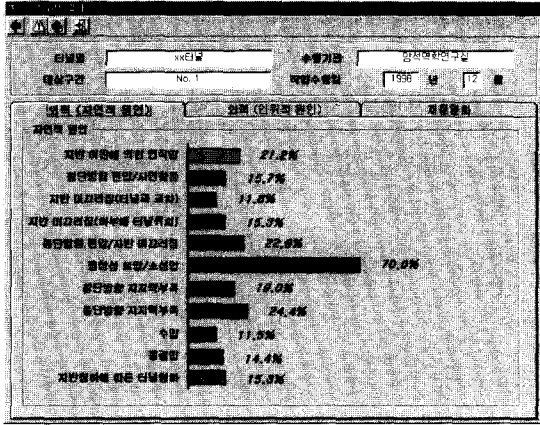


Fig. 4. Module for showing result of reasoning-external pressure (natural causes)

주변 환경조건³⁾ 중에서 지형 및 지질 부분이 제시되어 있다.

최종적으로 상기 두 과정을 거쳐 나온 결과를 $\alpha \times A + \beta \times B$ (α, β : 가중치, A: 터널 라이닝의 변상현상에 기초한 추론결과, B: 터널 시공조건 및 주변 환경조건에 기초한 추론결과)와 같은 방식으로 가중치를 곱한 후 합하여 평가를 내린다. 두 결과의 정확성 및 신뢰도에 따라 가중치가 바뀔 수 있으나 현재 초기 시스템 개발 단계이므로 각각 0.5의 가중치를 택해 단순함으로 비교하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같은 형태로 제시된다.

2.2 터널 변상원인의 추론-재질열화 및 누수

변상이 발생한 시기가 터널수명에 비해 짧거나 변상 형태가 특징적이지 않고 규모가 작은 경우 외력에 의한 변상 가능성과는 별도로 재질열화의 가능성을 고려할 필요가 있다. 본 시스템은 터널을 포함하는 일반적 콘크리트 구조물의 균열에 대한 판정기준⁵⁾에 따라 균열의 발생시기, 라이닝 관통 여부, 특징을 이용해 원인을 찾는다. 재질열화의 경우 다른 기준과 비교할 때 발생 형태에서 가장 뚜렷한 원인별 차이를 보이므로 변상의 대표적 형상을 적절하게 이용할 필요가 있다. 따라서 사용자로부터 균열 발생시기 및 관통 여부를 입력받은 뒤 균열의 특징 및 대략적 형상을 Fig. 5와 같은 방식으로 제시하고 선택하도록 하여 원인을 찾았다.

2.3 터널의 건전도 평가

이미 언급한 대로 터널은 지반 내에 위치한 구조물로서 복잡한 지압현상의 영향을 받기 때문에 다른 구조물

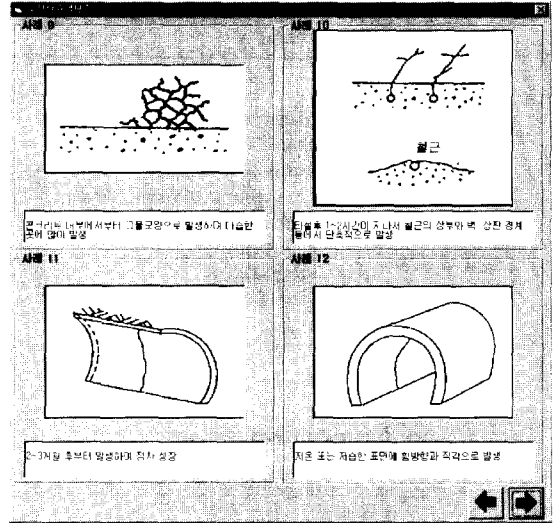


Fig. 5. Module for selecting the kind of irregular crack

에 비해 건전도 판정기준도 정성적일 수밖에 없으며, 이러한 점을 보충할 목적으로 세부항목이 제시되지만 아직 먼밀한 연구를 통해 개선되어야 할 여지가 많다. 그러나 새로운 기준의 마련은 본 연구의 범위를 벗어나므로 여기에서는 이미 널리 사용되고 있는 평가기준을 이용해 세부항목 및 터널 전반에 대한 건전도를 평가할 목적으로 일본 도로협회와 철도종합기술연구소의 평가기준을 도입하였다. 본 시스템에서는 우선 사용자로부터 세부평가에 이용할 수 있는 정보를 입력받아 대략적인 평가를 내린 뒤 각 기준별로 정성적 판정기준을 제

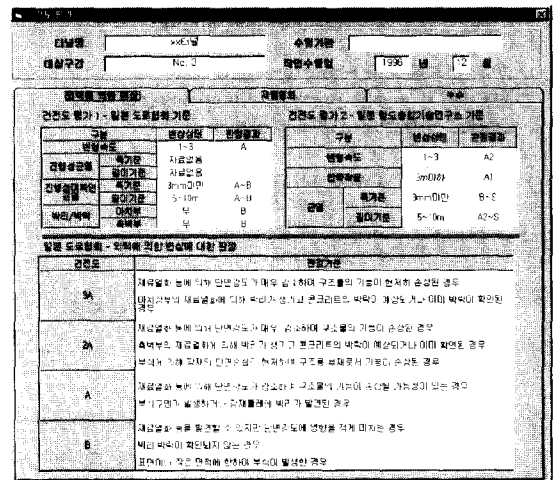


Fig. 6. Module for showing the result of tunnel soundness evaluation

Fig. 7. Module for showing the methods of repair and reinforcement

시하여 사용자가 최종 선택하는 방식을 취하였는데, 이는 정량적 기준이 없는 상황에서 어느 정도 타당한 차 선택으로 판단된다.

Fig. 6은 터널 건전도 평가결과의 한 예를 보여준다.

2.4 보수보강대책의 제시

보수보강대책의 제시는 외력의 작용, 재질열화, 누수 및 동해, 균열처리 부분으로 나뉘어 수행된다. 각 부분 별로 대략적 선정기준에 따라 3~4가지 공법을 선택한 뒤 각 공법의 적용목적 및 기대효과를 제시하여 적절한 대책을 수립할 수 있도록 하였다. 실제 현장에서는 상황에 따라 여러 대책이 병용되기도 하는데 본 시스템의 경우 대책의 조합은 불가능하며 합리적 선택을 보조하는 수준에 머문다.

Fig. 7은 보수보강대책이 제시된 사례를 보여준다.

3. 시스템 적용결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 시스템의 현장터널에 대한 활용성을 검증하기 위하여 과거의 사례를 적용하였다. 시스템 수행결과와 타당성을 알아보기 위해서는 터널의 변상 관련자료와 함께 전문가가 제시한 변상원인 및 대책이 요구되므로 부득이하게 국외자료^{2,6)}에 제시된 7개 사례를 이용하였다. 자료의 제한으로 인해 건전도 평가 부분은 검증되지 못했으며 전체적으로 외력에 의한 변상원인 규명에 초점을 맞추었다.

3.1 소성압에 의한 터널 변상사례

터널명은 육십리월(六十里越)터널이며 연장 6,359 m로서 1970년 준공되었다. 단선 2호형으로 콘크리트 구조물이며 일부 구간에만 인버트가 설치되어 있다. 지형 및 지질조건을 살펴보면 변상이 발생한 구간 부근에 응회암과 유문암이 있으며 상부지반은 대체로 평평한 형태이고 변상이 일어난 구간의 토피고는 300 m이다. 라이닝 두께는 23~45 cm로 일부구간에서 설계보다 작게 시공된 것으로 조사되었다.

터널에 일어난 변상을 알아보면 건설 초기에 지반이 부풀어 오르고 측벽이 압출된 이력이 있으며 현재까지 계속 단면의 축소가 발생하고 있다. 내공변위량 측정 결과 최대 진행속도가 약 15 mm/year이며 1977년 터널 아치부에 압좌현상이 발생하였다. 그리고 지반이 부풀어 오르는 현상의 영향으로 노반이 어느 정도 융기하였으며 터널 양쪽의 배수구도 변형을 일으켰다. 변상구간의 균열 등을 나타낸 변상전개도는 Fig. 8과 같다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 대표적 균열은 아치 어깨부 양쪽의 수평균열과 왼쪽 측벽부의 수평균열, 천단부 및 어깨부, 측벽부 전반에 걸친 수직균열, 오른쪽 어깨부의 경사균열, 양쪽 측벽부의 경사균열 등이다(편의상 변상전개도 중심선의 왼쪽 부분을 좌측으로 본다). 최종적으로 시스템에 입력된 내용은 Table 5와 같다.

변상현상만을 입력하였을 때 시스템에 의해 제시된 원인별 가능성은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 소성압(66%), 동결압(45%), 터널 종단방향 지지력 부족(45%), 지반이완에 의한 연직압(32%), 지반 미끄러짐(30%) 순서이다(그림에서 기호 GL은 지반이완에 의한 연직압, US1은 터널 횡단방향 편압·사면활동, LS1은 지반 미끄러짐(터널과 교차), LS2는 지반 미끄러짐(하부에 위치), US/LS은 종단방향 편압·지반 미끄러짐, PGS는 소성압, PG1은 지지력 부족(횡단방향), PG2는 지지력 부족(종단방향), WP는 수압, FP은 동결압, SUB은 지

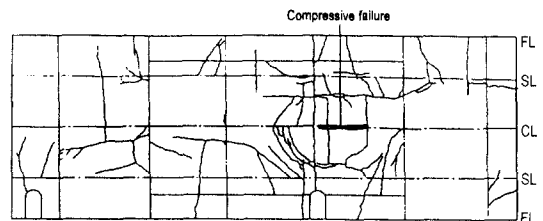


Fig. 8. A view of tunnel lining deformation or cracks-plastic earth pressure

Table 5. Input data of tunnel deformation or cracks

Position and Phenomena	
Crack	Horizontal crack-arch shoulder(L, R), side wall(L)
	Vertical crack-vault, arch shoulder(L, R), side wall(L, R)
	Diagonal crack-arch shoulder(R), side wall(L, R)
Compressive failure	Vault (length 7 m)
Pavement/ Invert	Raising caused by ground expansion
Deformation	Convergence (maximum displacement 15 mm/year)
Environmental condition	Ground expansion Non-invert Thin lining

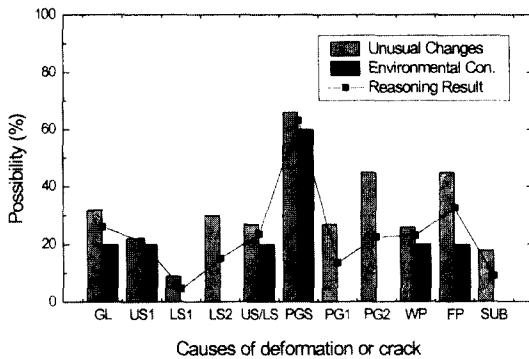


Fig. 9. Result of reasoning on causes of deformation or cracks-plastic earth pressure

반침하에 따른 터널침하를 의미한다). 동결압이 비교적 많은 가능성을 보인 것은 일반적으로 소성압의 경우와 유사한 변상현상을 보이기 때문이다. 그러나 수압의 경우 동결압과 비슷한 현상을 유발하는데도 불구하고 가능성이 작게 나타난 이유는 동결압과 달리 수압작용과 관련된 여러 특징적 현상이 있으며, 이들이 원인 추론에 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

환경조건을 살펴보면 지반팽창, 인버트 미설치, 라이닝 두께부족이 소성압 발생환경에 모두 해당되며 라이닝 두께부족이 지반이완에 의한 연직압과 편압·사면활동, 수압, 동결압에 해당된다. 결과적으로 소성압이 60%를, 그 외 해당원인이 20%의 가능성을 가지며 지반 미끄러짐과 지지력 부족, 지반침하에 따른 터널침하

의 경우 우호적인 환경조건이 없으므로 값을 가지지 않는다.

결과적으로 소성압(plastic earth pressure)의 작용 가능성이 가장 크며, 그 다음으로 동결압, 지반이완에 의한 연직압 등이 제시될 수 있으나 소성압에 비해 그 가능성이 매우 작다고 할 수 있다. 보수보강대책을 살펴보면 외력에 의한 변상대책에서 배면주입공법과 록볼트보강공법이 가장 우선적으로 제시되었다. 다음으로 슛크리트 또는 현장타설 콘크리트를 이용한 라이닝 보강, 새들보강공법, 스트러트공법, 인버트 콘크리트 설치가 제시되었는데, 라이닝 두께부족을 시공조건에 따른 변상원인으로 볼 수 있으므로 라이닝보강이 더 적절한 대책으로 제시되었다.

참고문헌²⁾에서 균열측정, 내공변위측정, 단면측정, 지반팽창조사 등을 거쳐 전문가가 제시한 변상원인은 1) 소성압의 작용, 2) 인버트 미설치에 따라 측압에 약한 구조, 3) 라이닝 두께부족이었으며, 이에 대한 대책 공법으로 세 가지를 제시하였는데 첫째, (측벽 록볼트+SFRC 슛크리트 설치+배면주입), 둘째, (측벽 록볼트+SFRC 슛크리트 설치+노반 스트러트 공법 적용+배면주입), 셋째는 (아치부 및 측벽부 록볼트 설치+SFRC 슛크리트 설치+배면주입)이다.

결론적으로 소성압이 외력으로 작용하여 발생한 변상이라는 것은 시스템 상에서 정확하게 진단되었으며, Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 터널 시공조건 및 주변 환경조건이 함께 고려되었을 때 더욱 정확한 추론에 이를 수 있었다. 적용된 보강공법도 시스템에서 제시한 공법들의 적절한 조합임을 알 수 있다.

3.2 기타 사례

7개 사례 가운데 소성압이 작용한 경우를 제외한 6개 터널의 시스템 적용결과는 아래와 같다. 5개 터널에서 시스템의 추론결과와 전문가의 의견이 일치하였으며 1개 터널에서 두 번째의 가능성으로 제시되었다.

1) 사례 1 (야중터널)

시스템 적용결과 터널 횡단방향으로 작용하는 편압·사면활동이 52%, 터널 종단방향으로 작용하는 편압·지반 미끄러짐이 32%, 소성압이 27%로 나타났다. 터널 관련 전문가들은 터널 변상원인으로 편압대책의 부적절을 지적하였다.

2) 사례 2 (귀암터널)

시스템 적용결과 터널 횡단방향으로 작용하는 편압

· 사면활동이 32%, 지반 미끄러짐(미끄러짐면 아래 터널위치)이 24%, 소성압이 20%로 나타났다. 전문가의 경우 편압의 작용과 사면활동, 라이닝 아치부 재질열화, 라이닝 배면공동을 원인으로 보았다.

3) 사례 3 (대월터널)

시스템 적용결과 터널 종단방향으로 작용하는 편압·지반 미끄러짐이 54%, 터널 종단방향으로 지지력 부족이 50%, 소성압이 31%로 나타났다. 전문가의 경우 터널 전체의 이동과 터널 종단방향 지반 미끄러짐, 편압의 작용을 변상원인으로 지적하였다.

4) 사례 4 (중산터널)

시스템 적용결과 지반이완에 의한 연직압이 31%, 터널 횡단방향으로 작용하는 편압·사면활동이 17%, 지반 미끄러짐(미끄러짐면과 터널 교차)이 16%로 나타났다. 이 터널에 대하여 전문가들은 상부지반 이완에 따른 하중 증가, 터널 주변의 근접공사를 원인으로 들었다.

5) 사례 5 (소산야터널)

시스템 적용결과 지반이완에 의한 연직압이 45%, 소성압이 26%, 터널 종단방향으로 작용하는 편압·지반 미끄러짐이 24%인 것으로 나타났다. 이 터널의 경우 열악한 암반 및 지질조건으로 인하여 터널 천단부에 공동이 생기고 누수가 발생해 하중이 작용하고 있는 점과 라이닝 재질열화가 원인으로 제시되었다.

5) 사례 6

시스템 적용결과 소성압이 45%, 수압이 40%, 터널 횡단방향으로 작용하는 편압·사면활동이 35%로 나타났다. 그러나 전문가들은 터널 변상원인으로 수압이 측압으로 작용하고 있는 점과 주변지반의 소성압 작용, 라이닝 배면공동 및 두께부족을 들었다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널에 발생한 변상현상과 시공조건, 주변 환경조건을 파악해서 변상원인을 규명하고 건전도를 평가하여 그에 따른 적절한 보수보강대책을 제시할 수 있는 터널 건전도 평가시스템을 개발하였으며, 특별히 외력에 의한 변상의 경우 역전과 학습 알고리즘

을 도입하여 학습된 인공신경망을 이용해 변상원인별 가능성을 평가하였다.

시스템 개발 및 기존 변상사례의 시스템 적용과정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 터널 라이닝에 발생하는 변상현상과 원인간의 복잡한 관계를 규정하기 위해서 인공신경망을 이용하였다. 인공신경망을 기존의 현장자료나 관련 이론으로 학습시킴으로써 패턴매칭을 통한 관계 모사가 가능하였으며 학습에 사용되지 않은 자료에 대해서도 추론할 수 있었다.

2) 기존 변상사례를 개발된 시스템에 적용한 결과 대체적으로 전문가의 판단과 유사함을 알 수 있었다. 터널 라이닝에 발생한 변상현상만으로 원인을 추론한 경우에도 비교적 유사한 결과를 보였으나 시공조건 및 주변 환경조건을 함께 고려할 때 전문가의 판단에 더 근접함을 알 수 있었다.

3) 시스템으로부터 규명된 터널 변상원인과 건전도 평가결과를 기초로 하여 보다 효율적인 보수보강대책을 세울 수 있었다.

사 사

본 연구는 (주)대우 건설기술연구소의 지원 아래 1997년 10월부터 1998년 10월까지 이루어졌으며, 연구수행과정에서 많은 도움을 주신 관계자 여러분께 깊이 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. (社)日本道路協會, 1993, 道路トンネル維持管理便覽.
2. (財)鐵道總合技術研究所, 1990, トンネル補強・補修マニュアル.
3. 김현우, 1999, 인공신경망을 이용한 터널 건전도 평가 시스템 개발, 서울대학교 자원공학과 석사학위 논문.
4. Pao Y.H., 1989, Adaptive pattern recognition and neural networks, Addison-Wesley.
5. 대한건축학회, 1997, 콘크리트 구조물의 보수보강.
6. (財)鐵道總合技術研究所, 1998, 變狀トンネル對策工設計マニュアル.