

# 인공신경망을 이용한 터널 건전도 평가시스템 개발

김현우<sup>1)</sup> · 김영근<sup>2)</sup> · 이희근<sup>3)</sup>

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

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

### 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 있는데, 현재 상황으로는 여러 안전진단보고서에서 볼 수 있는 바와 같이 터널에 발생한 일련의 변상현상을 분석하여 그 원인을 규명하고 적절한 보수보강대책을 마련함으로써 예상치 못한 변상에 대한 터널 안전성을 확보하는 작업에 초점이 맞추어지고 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 정성적이고 주관적일 수 있다. 따라서 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 변상원인과 현상간의 관계를 인공신경망(artificial neural network)을 도입하여 모사함으로써 변상현상을 이용해 원인을 찾는 기능과 기존 건전도 판정기준을 적용한 터널 건전도 평가기능, 공법의 특징 및 선정기준이 반영된 보수보강대책 제시기능을 갖춘 터널 건전도 평가시스템의 초기 시작품(prototype)을 개발하였다.

### 2. 터널 건전도 평가시스템의 개발

터널 건전도 평가시스템의 전체적 구성은 그림 1과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시스템은 크게 변상원인의 추론, 건전도 평가, 보수보강대책 제시과정으로 구분된다. 변상원인은 크게 외력(external force)의 작용, 재질 열화 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 입출력항목을 정하였다. 보수보강대책의 제시는 상기 과정이 수행된 후에 이루어지는데 가급적으로 변상원인 추론 및 건전도 평가결과, 실제 보수보강조건 등이 반영된 대책선정이 되도록 하였다.

#### 2.1 터널 변상원인의 추론-외력에 의한 변상

관련문헌<sup>1,2)</sup> 및 각종 터널의 안전진단보고서를 분석한 결과, 유사한 라이닝 및 노반 변상현상이 여러 원인에 의해

---

1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 석사 졸업  
2) 정회원, (주)대우 건설기술연구소 토목연구실 과장(공학박사)  
3) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

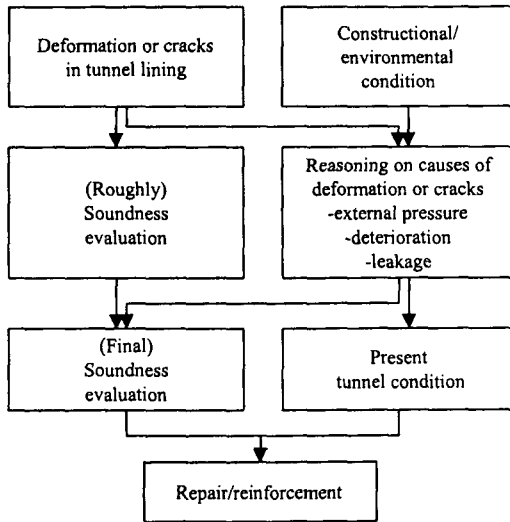


그림 1. 터널 건전도 평가시스템의 구성

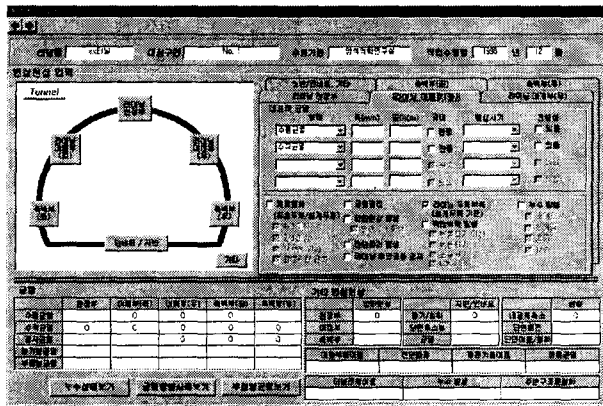


그림 2. 터널 라이닝의 변상현상 입력창

발생할 수 있으며 역으로 특정 외력이 작용하더라도 그와 관련된 변상이 모두 일어나지는 않음을 알 수 있었는데, 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 오차허용 특성을 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 원인추론이 가능해진다. 즉, 그림 2와 같은 화면에서 사용자가 관찰된 변상현상을 입력하면 원인별로 작용 가능성을 제시할 수 있다.

본 시스템에서는 기존자료의 분석 및 검토를 통해 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. 여기서 입력노드는 균열 형태 및 위치, 인버트의 이

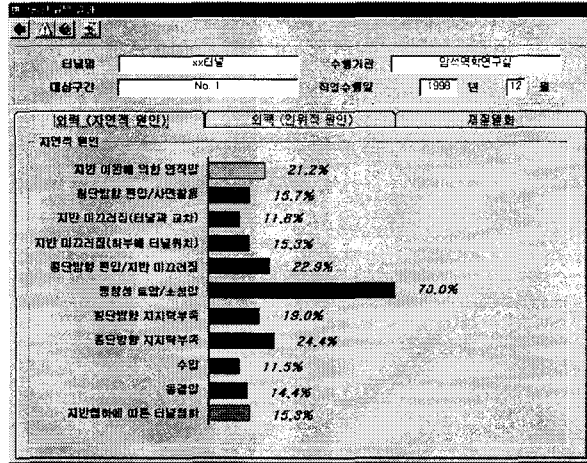


그림 3. 추론결과 제시항-외력 (자연적 원인)

상, 변형, 기울어짐 등과 같이 외력의 작용에 의해 터널에 나타나는 대표적 변상현상 42개를 의미하며 출력노드는 11개 변상원인이다.<sup>3)</sup> 참고로 인공신경망 및 시스템 구축에 사용된 언어는 MS Visual Basic 5.0이며, 역전파 학습 알고리즘(back-propagation learning algorithm)의 구성은 기존 문헌<sup>4)</sup>을 참고하였다.

문헌조사 및 수치해석 결과 지형, 지질, 기후·기상, 설계 및 시공조건, 근접공사 여부 등 터널 시공조건 및 주변 환경조건도 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·사면활동, 지반 미끄러짐 등을 추정할 가능성이 커진다.

최종적으로 상기 두 과정을 거쳐 나온 결과를  $\alpha \times A + \beta \times B$  ( $\alpha, \beta$ : 가중치, A: 터널 변상현상에 기초한 추론결과, B: 터널 시공조건 및 주변환경조건에 기초한 추론결과)와 같은 방식으로 가중치를 곱한 후 합하여 평가를 내린다. 두 결과의 정확성 및 신뢰도에 따라 가중치가 바뀔 수 있으나 현재는 초기 시스템 개발단계이므로 각각 0.5의 가중치를 택해 단순함으로 비교하였으며 그 결과는 그림 3과 같은 형태로 제시된다.

## 2.2 터널 변상원인의 추론-재질열화 및 누수

변상이 발생한 시기가 터널수명에 비해 짧거나 변상형태가 특징적이지 않고 규모가 작은 경우 외력에 의한 변상 가능성과는 별도로 재질열화의 가능성을 고려할 필요가 있다. 본 시스템은 터널을 포함하는 일반적 콘크리트 구조물의 균열에 대한 판정기준<sup>5)</sup>에 따라 균열의 발생시기, 라이닝 관통 여부, 특징을 이용해 원인을 찾는다. 재질열화의 경우 다른 기준과 비교할 때 발생형태에서 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 그림 4와 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 구조물에 비해 건전도 판정기준도 정성적일 수 밖에 없으며, 이러한 점을 보충할 목적으로 세부항목이 제시되지만 아직 면밀한 연구를 통해 개선되어야 할 여지가 많다. 그러나 여기에서는 이미 널리 사용되고 있는 평가기준을 이용해 세부항목 및 터널 전반에 대한 건전도를 평가할 목적으로 일본 도로협회와 철도총합기술연구소의 평가기준을 도입하였다. 본 시스템에서는 우선 사용자로부터 세부평가에 이용할 수 있는 정보를 입력받아 대략적인 평가를 내린 뒤 각 기준

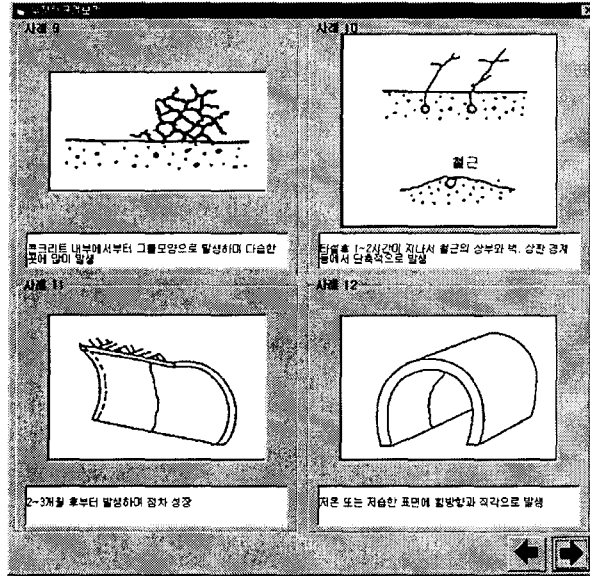


그림 4. 부정형균열의 종류 선택창

이름	xx티님	수령기준	
대상구간	No. 3	착입수행일	1990 년 12 월
면적별 균열, 크랙		재질종류	
건전도 평가 1 - 일관 도표형식 기준		건전도 평가 2 - 일관 출도형식기준(무수 기준)	
구분	발생형태	관형종류	구분
발생빈도	1-3	A	발생빈도
직접균열	특기점	자립균열	관형
간접균열	관입기준	자립균열	관형
균열심(직접)	특기점	3mm이하	A-B
균열	관입기준	5-10m	A-B
벽리/박리	대척부	무	B
	속해부	무	0
일관 도표형식 - 면적별 의한 면적에 대한 측정			
건전도	판정기준		
3A	재료열화 등에 의해 단면강도가 매우 감소하여 구조물의 기능이 현저히 손상될 경우 양척부의 재료열화에 의해 벽리가 생기고 콘크리트의 박리가 예상되거나 이미 박리가 확인된 경우		
2A	재료열화 등에 의해 단면강도가 매우 감소하여 구조물의 기능이 손상된 경우 속해부의 재료열화에 의해 벽리가 생기고 콘크리트의 박리가 예상되거나 이미 확인된 경우 부식에 의해 강재의 단면손실이 현저하여 구조물 부재로서 기능이 손상된 경우		
3	재료열화 등에 의해 단면강도가 감소하여 구조물의 기능이 손상될 가능성이 있는 경우 부식구멍이 발생하거나 강재열화에 벽리가 발생한 경우		
B	재료열화 등을 발견할 수 있지만 단면강도에 영향을 적게 미치는 경우 벽리 박리가 확인되지 않는 경우 표면이나 저온 면적에 한하여 부식이 발생한 경우		

그림 5. 터널 건전도 평가결과 제시창

별로 정성적 판정기준을 제시하여 사용자가 최종 선택하는 방식(그림 5)을 취하였는데, 이는 정량적 기준이 없는 상황에서 어느 정도 타당한 차선책으로 판단된다.

#### 2.4 보수보강대책의 제시

보수보강대책의 제시는 외력의 작용, 재질열화, 누수 및 동해, 균열처리 부분으로 나뉘어 수행된다. 각 부분별로 대략적 선정기준에 따라 3~4가지 공법을 선택한 뒤 각 공법의 적용목적 및 기대효과를 제시(그림 6)하여 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.



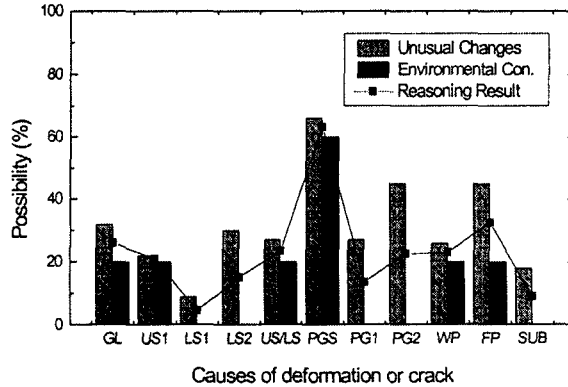


그림 7. 터널 변상원인 추론결과-소성압 작용사례

나, 수압의 경우 동결압과 비슷한 현상을 유발하는데도 불구하고 가능성이 작게 나타난 이유는 동결압과 달리 수압 작용과 관련된 여러 특징적 현상이 있으며 이들이 원인 추론에 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 환경 조건을 살펴보면 지반팽창, 인버트 미설치, 라이닝 두께부족이 소성압 발생환경에 모두 해당되며, 라이닝 두께부족 이 지반이완에 의한 연직압과 편압·사면활동, 수압, 동결압에 해당된다.

결과적으로 그림에서 알 수 있듯 소성압의 작용 가능성이 가장 크며, 그 다음으로 동결압, 지반이완에 의한 연직 압 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 라이닝 보강이 더 적절한 대책으로 제시되었다.

참고문헌<sup>2)</sup>에서 전문가가 제시한 변상원인은 ① 소성압의 작용, ② 인버트 미설치에 따라 축압에 약한 구조, ③ 라이닝 두께부족이었으며, 이에 대한 대책공법으로 세 가지를 제시하였는데 첫째, (축벽 록볼트 + SFRC 슛크리트 설치 + 배면주입), 둘째, (축벽 록볼트 + SFRC 슛크리트 설치 + 노반 스트러트 공법 적용 + 배면주입), 셋째는 (아치부 및 축벽부 록볼트 설치 + SFRC 슛크리트 설치 + 배면주입)이다.

결론적으로 소성압이 외력으로 작용하여 발생한 변상이라는 것은 시스템 상에서 정확하게 진단되었으며, 그림 7에서 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 적용결과, 5개 터널에서 시스템의 추론결과와 전문가의 의견이 일치하였으며 1개 터널에서 두 번째의 가능성으로 제시되었다.

## 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 알고리즘을 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.

## 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 평가시스템 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.