

# 투수 및 암반거동 파악을 위한 터널 라이닝의 역해석

## Tunnel-Lining Back Analysis for Characterizing Seepage and Rock Motion

최준우\* · 이인모\*\* · 공정식\*\*\*

Choi, Joon-Woo, Lee, In-Mo, Kong, Jung-Sik

### ABSTRACT

Among a variety of influencing components, time-variant seepage and long-term underground motion are important to understand the abnormal behavior of tunnels. Excessiveness of these two components could be the direct cause of severe damage on tunnels, however, it is not easy to quantify the effect of these on the behavior of tunnels. These parameters can be estimated by using inverse methods once the appropriate relationship between inputs and results are clarified. Various inverse methods or parameter estimation techniques such as artificial neural network and least square method can be used depending on the characteristics of given problems. Numerical analyses, experiments, or monitoring results are frequently used to prepare a set of inputs and results to establish the back analysis models. In this study, a back analysis method has been developed to estimate geotechnically hard-to-known parameters such as permeability of tunnel filter, underground water table, long-term rock mass load, size of damaged zone associated with seepage and long-term underground motion. The artificial neural network technique is adopted and the numerical models developed in the firstpart are used to prepare a set of data for learning process. Tunnel behavior especially the displacements of the lining has been exclusively investigated for the back analysis.

**Keywords:** Seepage, Rock mass load, Long-term behavior, Artificial neural network, Tunnel-lining

### 1. 서론

일반적으로 터널은 지중에 위치하고 있기 때문에 여러 가지 원인에 의해 터널의 안정성이 위협 받거나 혹은 터널의 사용성에 문제가 발생하기도 한다. 그러므로 터널의 건전도 평가와 터널의 안전성 확보 및 유지를 위해 터널 주변 지반의 투수상태 및 암반거동 상태를 파악하는 것이 매우 중요한 과제이다. 그러나 현재까지 라이닝 배면에 위치한 지반의 투수상태나 암반거동을 측정하는 뚜렷한 방법도 제시되어 있지 않으며, 측정한다 하더라도 결과의 신뢰도에 문제가 제기되고 있다. 지반응력을 간접적으로 측정하는 한국시설안전기술공단(2003)의 연구와 내공변위에 의한 콘크리트라이닝의 건전도를 파악하는 이준석(2002)의 연구가 진행되어 있으나, 지하수와 소성영역등에 의한 영향이 고려되지 않았다는 단점이 있다. 따라서 지반의 투수상태와 암반거동 상태를 파악 할 수 있는 구체적이고 신뢰할 수 있는 방법의 제시가 필요하다.

\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사 졸업 E-mail: joonw79@korea.ac.kr

\*\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 E-mail: inmolee@korea.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 E-mail: jskong@korea.ac.kr

따라서, 본 연구는 터널 라이닝의 거동으로부터 지반의 투수상태와 하중상태를 예측하고, 이로부터 변상유발 주요 요인들의 진행 정도를 파악할 수 있는 방법을 제시하는데 중점을 두었다. 터널 라이닝의 거동경향(공정 식외,2006)을 이용하여, 변상 발생 터널 및 시공후 공용중인 터널 주변 지반의 투수상태와 하중상태를 예측 할 수 있는 역해석(인공신경망 이용)기법을 제시하였다.

## 2. 매개변수 분석

### 2.1 개요

투수해석 인자들에 대한 매개변수 분석을 위한 해석 단면과 물성치는 그림 1에 나타 내었다. 매개변수 분석을 실시한 인자들은 식(1)에 나열하였다.

$$Parameters = \{H_{int}, E_{gnd}, \nu_{gnd}, C_{gnd}, \phi_{gnd}, K_{o, gnd}, K_f^{int}/K_{gnd}\} \quad (1)$$

여기서,  $H_{int}$ =지하수위,  $E_{gnd}$ =지반의 탄성계수,  $\nu_{gnd}$ =지반의 포아송비,  $C_{gnd}$ =지반의 점착력,  $\phi_{gnd}$ =지반의 내부 마찰각,  $K_{o, gnd}$ =지반의 축압계수,  $K_f^{int}/K_{gnd}$ =설치전 부직포-지반의 투수계수 비율이다.

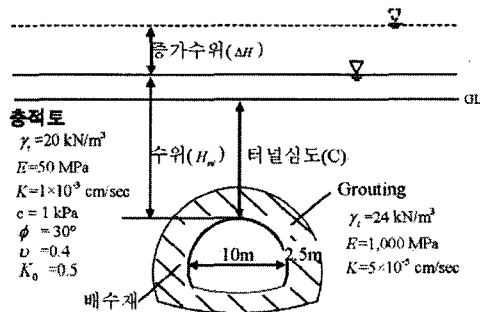


그림 1. 투수해석 매개변수분석을 위한 해석단면

그림 2는 터널 주변의 수위가 터널 직경의 2.5배, 3배, 4배일 경우, 시공후 부직포 투수계수 저하에 따른 콘크리트 라이닝의 변위를 나타낸 것이다. 그림 3은 지반의 투수계수 변화에 따른 매개변수 분석의 결과이다. 지반의 투수계수가 클수록, 즉 지반 투수계수와 초기 부직포투수계수의 비율( $K_f^{int}/K_{gnd}$ )이 작을수록, 콘크리트라이닝의 내공변위가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 지반 투수계수와 지하수위 이외의 지반 물성치에 대한 매개변수 분석결과, 각 물성치가 다를 경우 변위가 다르게 발생하였으나 그 차이가 지반투수계수나 수위에 의한 차이보다 상대적으로 작았다. 따라서, 인공신경망을 통한 투수계수 및 수위상승량 예측에는 콘크리트라이닝의 천단과 측벽 변위와 함께 식(2)의 지하수위 및 설치전 부직포-지반의 투수계수 비율을 활용하였다.

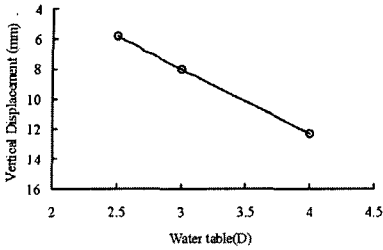


그림 2. 수위에 따른 매개변수 분석 결과

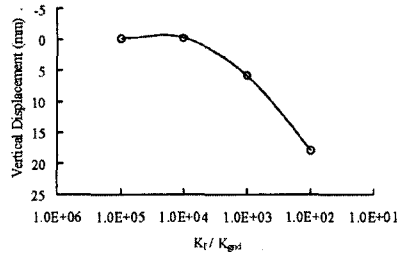


그림 3. 지반투수계수에 따른 매개변수 분석결과

$$Parameters = \left\{ \begin{matrix} H_{ini} \\ K_f^{ini} / K_{gd} \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

### 2.3 지반의 장기 거동에 대한 매개변수 분석

지반의 장기거동인자들에 대한 매개변수 분석을 위한 해석 단면과 물성치는 그림 4와 표 1에 나타내었다. 손상범위에 대한 매개변수 분석을 제외한 나머지 해석에서는 과발파 손상범위를 3m로 가정하였으며, 발파손상정도를  $D=0.6$ 으로 가정하였다. 시공후 발생하는 이완하중은 콘크리트 라이닝에 재하되는 것으로 해석하였다. 매개변수분석을 실시한 인자들은 식(3)에 나타내었다.

$$Parameters = \{ C, E_{gnd}, \nu_{gnd}, c_{gnd}, \phi_{gnd}, K_{o,gnd}, E_D, \phi_D, c_D \} \quad (3)$$

여기서,  $C$  = 터널의 심도,  $E_{gnd}$  = 지반의 탄성계수,  $\nu_{gnd}$  = 지반의 포아송비,  $c_{gnd}$  = 지반의 점착력,  $\phi_{gnd}$  = 지반의 내부마찰각,  $K_{o(gnd)}$  = 지반의 축압계수,  $E_D$  = 손상된 지반의 탄성계수,  $\phi_D$  = 손상된 지반의 내부마찰각,  $c_D$  = 손상된 지반의 점착력이다.

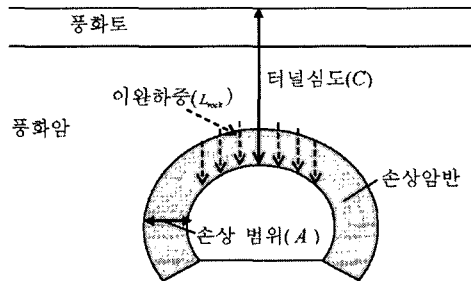


그림 4. 장기거동 매개변수분석을 위한 해석단면

그림 5는 지반의 탄성계수에 따른 매개변수 분석의 결과이다. 같은 크기의 이완하중이 발생할 경우 지반 탄성계수가 작을수록 콘크리트 라이닝의 변위가 크게 발생하고 있다. 그림 6은 터널 심도에 따른 매개변수 분석결과 인데, 터널 심도는 달라도 이완하중이 같다면, 콘크리트 라이닝의 변위는 크게 다르지 않음을 보여주고 있다. 실제 암반에서 암반의 이완하중이 발생하게 되면, 일반적으로 얇은 터널에서는 그림 7(a)와같이 지표면 근처까지 이완하중으로 작용할 가능성이 높으며, 깊은 터널에서는 그림 7(b)와 같이 이완하중이 터널 주변 손상영역까지만 분포하고 더 이상

전이되지 않을 가능성이 높다.

표 1. 장기거동 매개변수분석을 위한 물성치

구분	풍화도	풍화압 (D=0)	풍화압 (D=0.6)
단위중량 ( $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup> )	20	23	23
점착력 (c, kPa)	30	250	160
내부마찰각 ( $\phi$ , °)	30	35	24
탄성계수 (E, MPa)	20	500	350
포아송비 ( $\nu$ )	0.35	0.3	0.3
축압계수 ( $K_0$ )	0.5	0.5	0.5

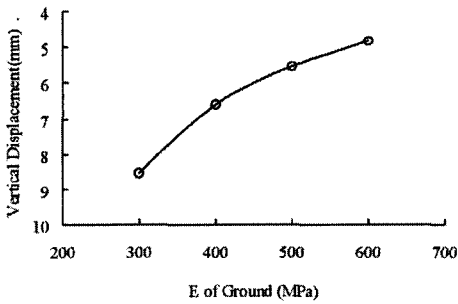


그림 5. 지반탄성계수에 대한 매개변수 분석결과

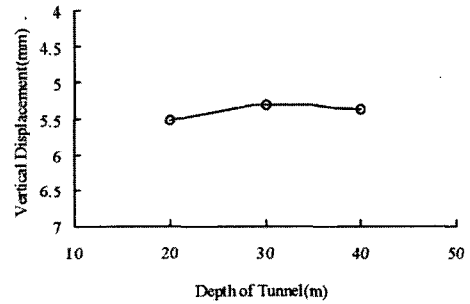


그림 6. 터널의 심도에 대한 매개변수 분석 결과

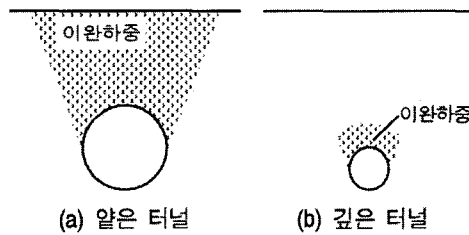


그림 7. 심도에 따른 이완하중의 발생 양상

### 3. 인공신경망 이론

#### 3.1 개요

인공신경망은 뉴런(neuron)으로 불리는 입출력과 관련된 단위처리개체(simple processing unit)로 이루어진 데이터 처리 방법이다(Kohonen,1988; Khanna,1989; Aleksander and Morton,1990; Hertz et al.,1991; Dowla and Rogers,1995; Hagan et al.,1996). 인공신경망에서 뉴런으로의 입력은 weight(w)와 bias(b)에 의해 가중 입력값이 되며, 이 값은 전달함수(transfer function)를 통해 출력된다. 실제 출력은 선택된 전달함수에 의존하게 된다. 일반적으로 전달함수는 사용자에게 의해 선택되며, 여기서 we

ight(w)와 bias(b)는 뉴런의 입력과 출력관계가 일정한 목표를 만족하도록 하는 학습(learning rule)에 의해 조정 가능한 스칼라 값이다.(이성진, 2002)

그림 8. 은 인공신경망의 예로서 입력층(input layer), 은닉층(hidden layer), 출력층(output layer)으로 구성된다. 여기서, 입력층의 뉴런들은 해석에서 고려되어야 하는 입력 설계변수이고, 반면에 출력층의 뉴런은 목표 출력값을 의미한다.

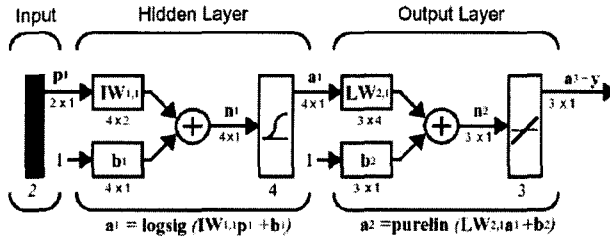


그림 8. 인공신경망의 Layer 구성

#### 4. 인공신경망을 이용한 역해석

##### 4.1 개요

인공신경망(Artificial Neural Networks)이론을 활용하여, 시공후 터널에 발생하는 변위를 계측하여 토사터널에서는 부직포 투수계수저하와 수위상승량, 암반 터널에서는 이완하중 및 점소성 거동의 진행정도가 각각 어느 정도인지 예측하였다. 인공신경망의 학습 자료로는 유한요소 해석 프로그램인 'PENTAGON-2D'의 해석 결과를 사용하였으며, 인공신경망의 학습 및 검증에는 'MATLAB' 프로그램을 활용하였다.

##### 4.2 수리조건예측을 위한 인공신경망의 적용

인공신경망을 이용하여 시공후 터널의 부직포 투수계수와 수위상승량을 예측하기 위한 학습 및 검증 데이터를 확보하기 위해 그림 9와 같은 단면에 대하여 수치해석을 실시하였다. 터널 굴착중에는 부직포 투수계수를 1cm/sec로 가정하였고, 시공이 완료된 후 부직포 투수계수를 저하시키고, 지하수위를 상승시켜 해석을 수행하였으며, 시공후 추가로 발생한 변위를 역해석에 활용하였다.

85개의 데이터에 Bayesian기법을 적용하여 수치해석 결과에 대한 학습을 수행하였으며, 인공신경망 모델 두가지(A-I, A-II)를 구성하였다. 부직포와 지반의 투수계수는 절대값이 아닌 부직포-지반 투수계수의 비율( $K_f / K_{gnd}$ )을 입력변수로 활용하였다. 모델 A-I은 그림 10(a)에 나타낸 바와 같이 입력 유닛 3개, 은닉 유닛 6개 그리고 출력 유닛 2개의 노드를 갖는 인공신경망구조(3x6x2)로 구성되어 있다. 입력변수는 초기수위( $H_{mi}$ ), 천단과 측벽의 내공변위( $D_r, D_x$ )이며, 출력변수는 시공후 콘크리트 라이닝에 추가적인 변위가 발생하였을 때의 부직포-투수계수 비율( $K_f / K_{gnd}$ )과 수위상승량( $\Delta H$ ), 이다. 모델 A-II는 그림 10(b)와 같이 A-I의 인공신경망 모델의 입력변수에 부직포 설치전의 부직포-지반의 투수계수비율( $K_f^m / K_{gnd}$ )를 추가하여 입력 유닛 4개, 은닉 유닛 6개 그리고 출력 유닛 2개의 노드를 갖는 인공신경망구조(4x6x2)로 구성되어 있다.

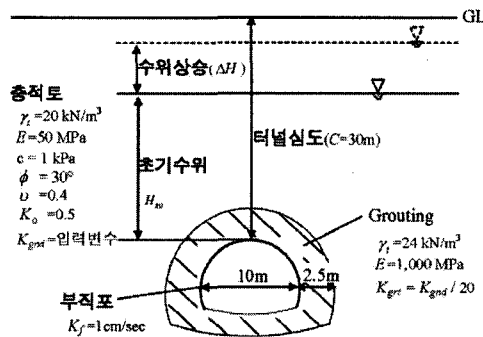


그림 9. 수리조건예측 해석을 위한 해석 단면

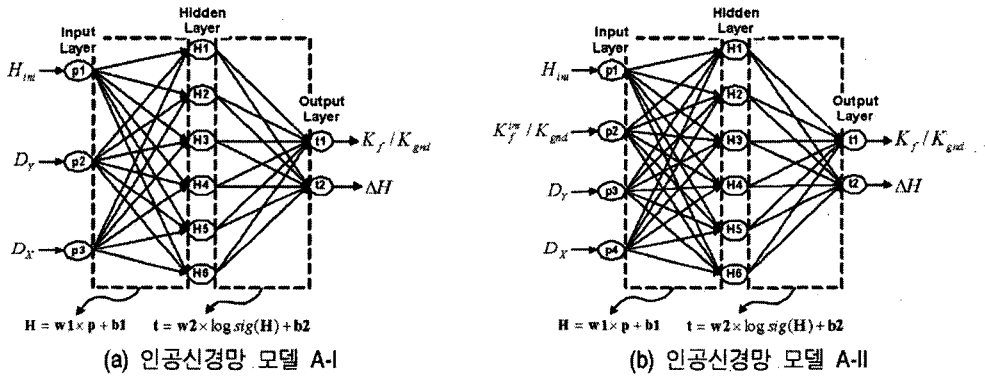


그림 10. 수리조건예측을 위한 인공신경망의 구성

부직포-지반투수계수 비율의 학습 및 검증 결과는 그림 11과 같으며, 수위상승량에 대한 학습 및 검증결과는 그림 12와 같다. 인공신경망의 검증에는 표 3의 데이터 15개를 사용하였다. 그림 11의 부직포-지반 투수계수비율에 대한 모델 A-I을 이용한 학습 및 검증의 상관 계수는 각각 0.946, 0.952이고, 모델 A-II를 이용한 학습 및 검증의 상관 계수는 0.924, 0.956으로 모델 A-I을 이용한 결과와 유사하게 나타났다. 그림 12의 수위상승에 대한 모델 A-I을 이용한 학습 및 검증의 상관 계수는 0.931, 0.965로 나타났으며, 모델 A-II을 이용한 학습 및 검증의 상관 계수는 0.923, 0.834로 나타나 모델 A-II보다 모델 A-I가 수위상승량 예측에 보다 적합한 것으로 나타났다.

지반의 점소성 거동, 이완하중에 의한 터널 라이닝의 거동경향 역시 투수계수 저하와 수위상승을 고려한 역해석 과정과 유사한 모델을 수립할 수 있다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 최준우 (2006)에서 찾을 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 터널변상의 주요 요인인 시공후 부직포의 투수계수 저하, 수위 증가 및 지반의 점소성 거동, 이완하중에 의한 터널 라이닝의 거동경향으로부터 시공후 부직포의 투수계수의 저하 및 지반의 이완하중 발생크기를 예측할 수 있는 역해석 방법을 제시하였다.

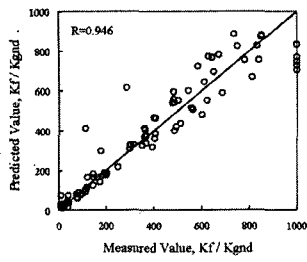
터널 주변의 시공후 부직포 투수계수 저하와 수위상승 및 터널에 작용하는 이완하중의 크기 및 손상범위를 예측하기 위해 수치해석을 통하여 해석결과를 확보하였으며, 인공신경망 모델을 통해 부직포 투수계수와 수위상승 및 이완하중의 크기와 손상범위를 예측해 보았다. 각 경우에 85가지 해석결과를 학습에 활용한 뒤, 학습결과를 이용하여 15가지 상황에 대하여 검증을 수행하여 각 상황에 적합한 인공신경망 모델을 선정하였다. 본 연구에서 선정된 인공신경망 모델은 주어진 해석 결과에 대하여 높은 학습률을 보였으며, 검증에서도 목표값(수치해석 적용값)과 유사한 출력값(인공신경망 예측값)을 산출하였다. 따라서 시공후 콘크리트라이닝에 발생하는 추가적인 내공변위의 계측을 통하여, 부직포 투수계수저하와 수위상승량 및 이완하중의 크기와 손상범위를 인공신경망을 통하여 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

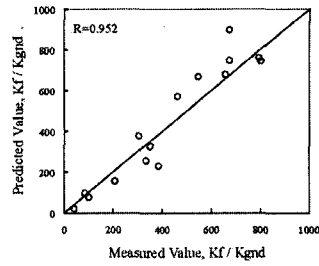
본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 하는 2004년도 건설핵심기술연구 개발사업, "04핵심기술 C01"에 의하여 연구비가 지원된 연구로서 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

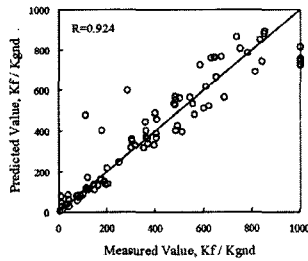
- 이성진, 이승래, 장범수 (2002), "인공신경망 모델을 이용한 불포화토 겔보기 점착력 추정에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol.22, No.3, pp. 331-344
- 이준석, 최일윤 (2002), "정적 내공변위를 이용한 터널 라이닝 손상 검출기법에 관한 연구", 한국지반공학회, Vol.18, No.6, pp153-160
- 최준우 (2006). "투수 및 이완하중 파악을 위한 터널 라이닝의 분석 및 역해석", 고려대학교 석사학위논문
- 한국시설안전기술공단 (2003), "공용중인 터널(산악터널)에 작용하는 지반응력 측정에 관한 연구", 한국시설안전기술공단
- Aleksander, I. and Morton, H. (1990), "An Introduction to Neural Computing", Chapman and Hall
- Barton, N.(2002), "Some New Q-value Correlations to Assist in Site Characterisation and Tunnel Design", Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, Vol. 39, No. 2, pp. 185~216
- Demuth, H. B. and Beale. M.(2000), "Neural Network Toolbox for use with Matlab", The MathWorks
- Dowla, F.U. and Rogers, L.L. (1995), "Solving Problems in Environmental Engineering and Geoscience with Artificial Neural Networks", MIT
- Forsee, F.D. and Hagan, M.T. (1997), "Gauss-Newton Aproximation to Bayesian Learning", Proceedings of the 1997 International Join Conference on Neural Networks, pp.1930-1935.
- Hagan, M.T., Demuth, H.B. and Beale, M.H. (1996), "Neural Network Design", PWS Pub.
- Hertz, J., Krogh, A. and Palmer, R. (1991), "Introduction to the Theory of Neural Computation", Addison-Wesley.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). "Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition", North American rock mechanics symposium, pp. 267-274.
- Khanna, T. (1989), "Foundations of Neural Networks", Addison-Wesley.
- Kohonen, T. (1988), "An Introduction to Neural Computing", Neural Networks, Vol. 1, No. 1, pp 3-16.
- Kurup, P.U. and Dudani, N.K. (2002), "Neural Networks for Profiling Stress History of Clays from PCPT Data.", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.128, No.7, pp.569-578



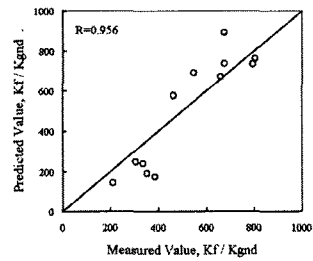
(a) 인공신경망 모델 A-I 학습결과



(b) 인공신경망 모델 A-I 검증결과

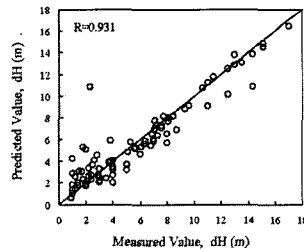


(c) 인공신경망 모델 A-II 학습결과

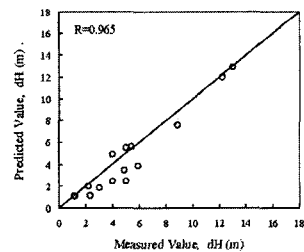


(d) 인공신경망 모델 A-II 검증결과

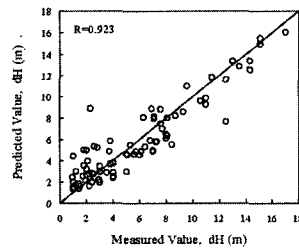
그림 11. 부직포-지반 투수계수비율에 대한 학습 및 검증결과



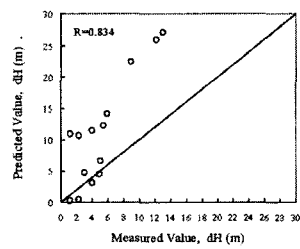
(a) 인공신경망 모델 A-I 학습결과



(b) 인공신경망 모델 A-I 검증결과



(c) 인공신경망 모델 A-II 학습결과



(d) 인공신경망 모델 A-II 검증결과

그림 12. 수위상승에 대한 학습 및 검증결과