

확장 Bayesian 방법과 상대변위를 이용한 터널 역해석 기법

Back-analysis Technique in Tunnelling Using Extended Bayesian Method and Relative Convergence Measurement

이 인 모¹ Lee, In-Mo 최 민 광² Choi, Min-Kwang
조 국 환³ Cho, Kook-Hwan 이 근 하⁴ Lee, Geun-Ha
최 충 식⁵ Choi, Chung-Sik

Abstract

One of the most important and difficult tasks in designing underground structure is the estimation of engineering properties of the ground. The main purpose of this study is to propose a new back-analysis technique in tunnelling to estimate geotechnical parameters around a tunnel. In this study, the Extended Bayesian Method, which appropriately combines objective information with subjective one, is adopted to optimize engineering parameters. By using only relative convergence data measured during tunnelling as input values in back-analysis, inevitable errors in absolute convergence estimation are excluded and 3-dimensional numerical analysis is applied to consider a trend of relative convergence occurrence. Finally, 3-dimensional back-analysis technique using relative convergence is proposed and evaluated using a hypothetical site.

요 지

지하 구조물을 설계하는데 있어서 가장 중요하면서도 어려운 일은 대상 지반의 정확한 공학적 특성을 파악하는 것이다. 본 논문의 주된 목적은 터널 주변지반의 지반정수 평가를 위한 새로운 터널 역해석 기법의 제안에 있다. 이를 위하여, 초기 예측치와 계측치로부터 예측된 값을 합리적으로 조합할 수 있는 확장 Bayesian 방법(Extended Bayesian Method, EBM)을 적용하였다. 또한 터널 내에서 계측된 터널 상대변위만을 역해석 입력값으로 사용함으로써 터널 절대변위 예측을 위한 수학적 연산 과정에서 발생하는 오차를 제거하였으며, 터널 상대변위 발생 경향을 역해석에 충분히 반영하기 위하여 3차원 수치해석을 적용하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 터널 상대변위를 이용한 3차원 터널 역해석 기법을 제안하였으며, 가상의 단면에 대한 예제해석을 통해 그 적용성을 검증하였다.

Keywords : Back-analysis, Numerical analysis, Parameter estimation, Relative convergence

1. 서 론

최근 지하공간 건설의 기술력 향상에도 불구하고 설

계와 시공기술은 아직도 경험적인 방법에 의존하므로 그 불확정성을 피할 수 없다. 지반정수 추정을 위한 실내시험의 경우 원천적으로 불확정성을 내포하게 되며,

1 정희원, 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr)

2 용마 엔지니어링 기술연구소 (Research Dept., Yongma Engrg.)

3 정희원, 서울산업대학교 건설대학 구조공학과 전임강사 (Member, Assistant Prof., Dept. of Structural Engrg., Co. Ltd., Seoul National Univ. of Technology)

4 (주) 포스코 건설 토목기술팀 부장 (POSCO Engrg. & Construction Co. Ltd.)

5 (주) 포스코 건설 토목기술팀 대리 (POSCO Engrg. & Construction Co. Ltd.)

이를 극복하기 위하여 시행되는 현장 실험 또한 불확정성이 매우 큰 것이 사실이다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 지하공간의 건설시 각종 현장 계측을 시행하게 되며, 계측치로부터 지반 정수를 역산하는 과정에서도 계측 오차에 따른 불확정성이 따르게 된다. 특히 시공시 계측된 내공변위를 역해석을 위한 기본 자료로 이용하는 경우, 계측시작 이전에 발생하는 초기변위를 예측할 수밖에 없다. 따라서 절대 내공변위를 이용한 역해석 기법은 필연적 불확정성을 갖게 된다. 본 논문에서는 절대 내공변위 계측치의 불확정성을 극복할 수 있도록, 계측이 시작된 후에 발생하는 상대변위만을 이용하여 역해석을 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 본 논문에서는 터널 설계와 시공의 유기적인 결합을 도모하고 최적의 지반정수를 평가하기 위하여 초기 예측치와 계측치를 합리적으로 조합할 수 있는 확장 Bayesian 방법(Extended Bayesian Method, EBM)을 적용하였다. 또한 지반거동 예측을 위하여 3차원 수치해석을 적용함으로써 터널 상대변위의 전체적인 발생 경향을 역해석에 충분히 반영하도록 하였다.

2. 역해석 이론

2.1 확장 Bayesian 방법

확장 Bayesian 방법은 계측모델(observational model)과 사전 정보모델(prior information model)로 구성되어 있으며, 예측값과 계측값의 관계를 설정하는 계측모델은 식 (1)의 형태로 나타낼 수 있다(Honjo 등, 1994a; Honjo 등, 1994b).

$$u^{*k} = u^k(x|\theta) + \varepsilon^k \quad (1)$$

여기서, u^{*k} 와 u^k 는 각각 k번째 단계에서의 관측값과 수학적 모델에 의한 예측값을 나타내며, x 는 알고 있는 입력값, ε^k 는 k번째 단계에서의 오차벡터 θ 는 분석하고자 하는 지반정수 벡터이다.

ε^k 가 정규분포를 따른다고 가정하면, 계측값들의 분포는 식 (2)와 같은 다변수 정규분포를 갖게 된다. (Honjo 등, 1994a; Honjo 등, 1994b)

$$g(u^*|\theta) = (2\pi)^{-NK/2} |V_u|^{-K/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}^T V_u^{-1} \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}\right\} \quad (2)$$

여기서, V_u 는 오차벡터 ε^k 의 공분산 행렬, K 는 측정구간의 총 개수, N 은 계측점의 총 개수이다.

사전 정보모델은 다음의 식 (3)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\theta = p + \delta \quad (3)$$

여기서, p 는 초기 예측된 지반정수의 평균값, δ 는 사전정보의 불확정성이다.

사전정보의 분포도 정규분포로 가정하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f'(\theta|\beta) = (2\pi)^{-M/2} \beta^M |V_p|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} \beta(\theta-p)^T V_p^{-1}(\theta-p)\right\} \quad (4)$$

여기서, V_p 는 지반정수 θ 의 공분산 행렬, M 은 지반정수의 개수, β 는 불확실성의 크기를 나타내는 스칼라양이다.

Bayesian 이론에 의하면 사후분포(posterior distribution)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f''(\theta|u^*, \beta) \propto f'(\theta|\beta)g(u^*|\theta) = (2\pi)^{-(NK+M)/2} \beta^M |V_u|^{-K/2} |V_p|^{-1/2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}^T V_u^{-1} \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\} - \frac{1}{2} \beta(\theta-p)^T V_p^{-1}(\theta-p)\right\} \quad (5)$$

$\hat{\theta}$ 의 최적값은 식 (5)를 최대로 하는 값으로 이는 식 (6)을 최소로 하는 값과 동일하다.

$$J(\theta|\beta) = \sum_{k=1}^K \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}^T V_u^{-1} \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\} + \beta(\theta-p)^T V_p^{-1}(\theta-p) \quad (6)$$

여기서, K 는 측정구간의 총 개수, p 는 정규분포를 따를 경우 지반정수 θ 의 평균값, V_p 는 지반정수 θ 의 공분산 행렬, V_u 는 오차벡터 ε^k 의 공분산 행렬, β 는 불확실성의 크기를 나타내는 스칼라양이다.

식 (6)을 객관적 정보항 J_o 와 주관적 정보항 J_p 으로 정리하면, 식 (7)과 같다.

$$S_{EBM} = J_o + B J_p \quad (7)$$

$$J_o(\theta) = \sum_{k=1}^K \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}^T V_u^{-1} \{u^{*k} - u^k(x|\theta)\}$$

$$J_o(\theta) = (\theta - p)^T V_p^{-1} (\theta - p)$$

식 (6)과 (7)에서 알 수 있듯이 확장 Bayesian 방법과 Bayesian 방법과의 근본적인 차이점은 스칼라 양 β 를 새로 도입하는 것이다. 즉, 부조화스러운 두 가지 정보, 객관적 정보 J_o 와 주관적 정보 J_p 간의 상대적인 가중치를 스칼라 양 β 를 통하여 조절함으로써 두 정보의 적절한 조합이 가능하게 된다.

2.2 Akaike Information Criterion(AIC)에 의한 최적모델의 선정

최적의 지반정수를 평가하기 위해서는 해석에 적절한 모델의 선정이 매우 중요하다. 복잡한 모델의 경우 모델오차는 적으나 상대적으로 많은 지반정수를 사용해야 하는 단점이 있으며, 단순한 모델의 경우 지반정수의 수는 적으나 모델오차가 큰 단점이 있다. 따라서 적절한 모델의 선정은 계측치와 각종 사전정보를 이용하여 설정하여야 한다. 그러나 지반정수 추정을 위해 사용되는 역해석 기법들은 일반적으로 주어진 모델에 의한 최적화는 가능하나 다른 모델간의 비교가 불가능한 면이 있다. 그러나 확장 Bayesian 방법에서는 AIC를 이용하여 최적의 모델 선정이 가능하며, AIC 값은 다음의 식 (8)로 나타내어지는 라이클리후드(likelihood) 함수를 최대화하는 값으로부터 선정할 수 있다(Honjo 등, 1994a; Honjo 등, 1994b).

$$L(\beta|u^*, p) = \int f'(\theta|\beta)g(u^*|\theta)d\theta \quad (8)$$

식 (8)을 적분하는데 있어서 u^* 와 θ 간의 비선형성으로 계산의 어려움이 발생하게 되므로, Taylor expansion을 이용하여 u^* 를 식 (9)와 같이 선형화시킨 후 식 (5)를 정리하면 식 (10)과 같다.

$$u^{*k} \cong \Phi^k + X^k\theta + \varepsilon \quad (9)$$

$$\begin{aligned} L(\beta|u^*, p) &\cong \int_{-\infty}^{+\infty} (2\pi)^{-(NK+M)/2} \beta^M |V_u|^{-K/2} |V_p|^{-1/2} \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (u^{*k} - \Phi^k - X^k\theta)^T V_u^{-1} (u^{*k} - \Phi^k - X^k\theta) - \frac{1}{2} \beta(\theta - p)^T V_p^{-1} (\theta - p)\right\} d\theta \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, X 는 변위에 대한 지반정수의 민감도 행렬이다.

식 (10)의 로그-라이클리후드(log-likelihood)는 식 (11)과 같이 주어지며, 이로부터 AIC 값은 (12)와 같이 정의된다(Honjo 등, 1994a; Honjo 등, 1994b).

$$\begin{aligned} l(\beta|u^*, p) &= \ln\{\beta|u^*, p\} \\ &\cong -\frac{1}{2} NK \ln\{J_o(\hat{\theta}) + \beta J_p(\hat{\theta})\} \\ &+ \frac{1}{2} \ln\left\{\frac{\beta^M |V_p^{-1}|}{\sum_{k=1}^K X^{(k)T} V_u^{-1} X^{(k)} + \beta V_p^{-1}}\right\} + const. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} AIC &= -2 \ln\{L(\beta|u^*, p)\} \\ &+ 2(\text{number of hyper-parameters model}) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 첫 번째 항은 모델에 대한 계측값의 적합성을 의미하며, 두 번째 항은 hyper-parameter의 개수를 의미한다. Bayesian 접근법을 이용하여 지반정수를 평가할 경우, 최적모델 선정은 식 (12)에서 AIC 값이 최소화 될 때로부터 선정할 수 있다.

이 때 β 는 식 (12)가 최소값을 갖게하는 값으로부터 구할 수 있으며 β 의 최적값을 구한 후 식 (6)에 의해 정의된 목적함수를 최소화시킴으로써 최적의 지반정수를 평가할 수 있다. 식 (6)으로 정의된 목적함수를 최소화시키기 위한 최적화 기법으로는 Gauss-Newton 방법을 수정한 수정된 Box-Kanemasu 방법(Beck and Arnold, 1977)을 적용하였다. 이 방법은 Taylor expansion을 이용한 선형화를 통해 비선형 문제를 극복하여 반복계산을 통하여 최적의 값까지 접근해가는 방법이다.

3. 상대변위를 이용한 역해석 기법

3.1 기존의 터널 역해석 기법

터널의 굴착으로 인해 발생하는 지반의 거동은 막장 도달 전에 이미 영향범위가 형성된다. 따라서, 절대변위 측정은 막장 도달 전 지표에서 보어홀 익스텐소미터(borehole extensometer)를 설치하여 터널 내공변위를 계측하여야 하나, 대심도 터널이나 도심지와 같은 곳에서는 그 설치와 운용이 곤란하다. 이러한 문제들로 인하여 터널 내공변위의 계측은 일반적으로 터널 내부에서 시행되고 있는 관계로 막장 도달 전 발생한 변위의 계측이 불가능한 실정이다.

그림 1에서 나타낸 바와 같이, 터널의 절대변위 U_{final} 은 크게 터널 내 계측변위 U_m , 계측 손실변위 C_0 , 막장

도달 전 선행변위 U_a 로 나눌 수 있다. 즉, 터널 내 계측 자료로부터 적절한 변형특성 곡선을 산정한 뒤 계측변위 U_m 을 평가하고, 산정된 변형특성 곡선으로부터 계측손실변위 C_0 를 평가한 뒤, 하중 분배율이나 지반조건 등을 고려하여 U_a 를 예측함으로써 최종적으로 U_{final} 을 평가하게 된다.

기존의 터널 역해석 기법에서는 역해석 입력값으로서 터널의 절대변위 U_{final} 을 역해석 입력값으로 사용하고 터널 절대변위 예측을 위해 2차원 수치해석을 적용함으로써 지반정수를 평가하였다(이인모 등, 1996; 이인모 등, 1997; 김문겸 등, 1995a; 김문겸 등, 1995b). 이러한 터널 역해석 기법에서는 하중 분배율의 불확실성 등으로 인해 절대 변위평가를 위한 수학적 평가과정에서 나오는 오차를 고려하기 어려우며, 변위 계측 시점이 늦어질 경우 손실변위 C_0 가 증가함에 따라 그 오차가 매우 커질 수 있다는 단점이 있다. 또한 2차원 수치해석을 이용하여 터널 절대변위만을 예측값으로 사용하게 되므로 터널 내공변위의 전체적인 발생 경향을 고려하는 것이 불가능하며, 특히 2차원 수치해석에 필수적인 하중분배율의 적절한 결정에도 어려움이 발생하였다.

따라서 본 논문에서는 터널 내에서 각각 계측된 상대변위 U_m 만을 역해석 입력값으로 사용하였으며 역해석

수행에 앞서 터널 상대변위 특성 파악을 위한 예제해석을 수행하였다.

3.2 터널 상대변위 특성파악을 위한 예제해석

예제 해석을 위한 지반 조건은 그림 2와 같으며, 각 지층의 대표적 지반 물성치는 표 1과 같다. 상용 유한요소 해석 프로그램인 PENTAGON 3D를 이용하여 터널이 위치한 잔적토층의 K_0 의 변화에 따른 터널 내공변위의 변화양상을 관찰하였다. 막장의 전진에 따른 터널 천단과 측벽의 종단변형 곡선은 그림 3과 같으며 이를 터널 막장 후방으로의 상대변위만으로 나타낸 것은 그림 4와 같다.

그림 3과 4에서 나타낸 바와 같이, 터널이 위치한 지반의 측압계수 K_0 의 변화에 따라 터널 내공변위 발생양상이 매우 민감하게 변화함을 확인할 수 있었다. 천단과 측벽변위 발생양상을 개략적으로 요약하여 보면 K_0 가 증가할수록 천단변위는 터널 중심방향에서 반대방향(radially outward direction)으로, 측벽변위는 터널 중심방향(radially inward direction)으로 각각 증가함을 알 수 있다. K_0 에 따른 터널 내공변위의 이러한 발생경향은 지

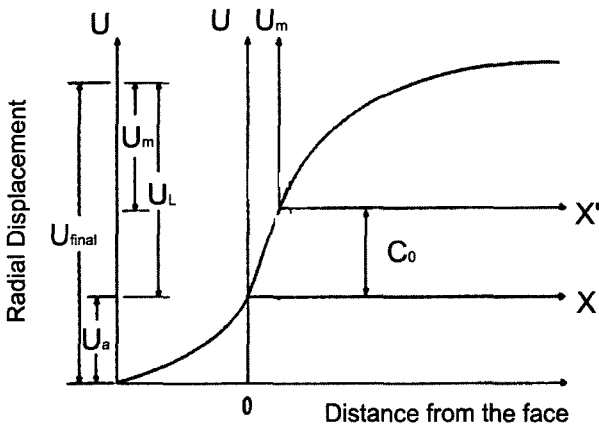


그림 1. 변형 특성 곡선

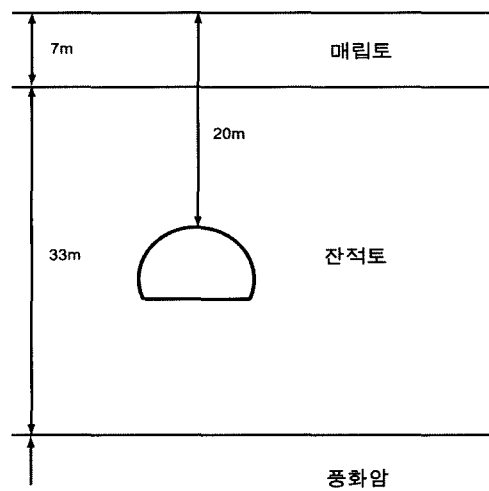


그림 2. 예제 해석 단면

표 1. 예제 해석 단면의 지반정수

	탄성계수 (MPa)	포아손비	단위중량 (kN/m ³)	측압계수	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (degree)
매립토	19.62	0.35	9.81	0.5	9.81	30
잔적토	29.43	0.33	18.64	0.5	29.43	30
풍화암	196.2	0.23	21.58	0.5	49.05	35
연성 슛크리트	4,905	0.2	2.4	-	-	-
경화 슛크리트	14,715	0.2	2.4	-	-	-

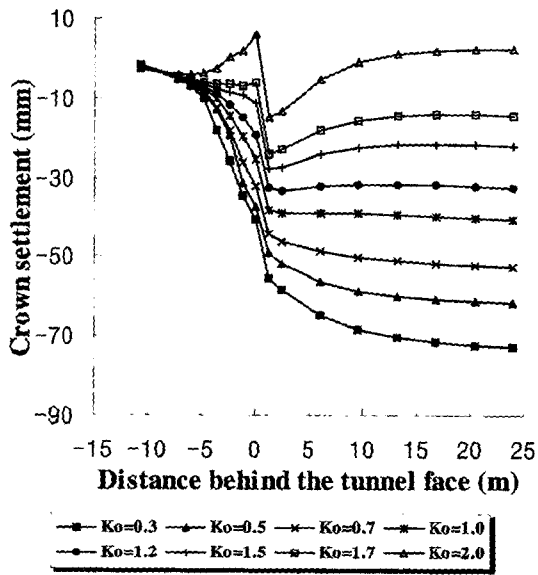
반의 아칭효과와 K_0 에 따른 지반의 거동특성에 기인한 것으로서, 초기 지중응력 상태를 좌우하는 K_0 에 따라 아칭효과와 발현 및 내압과 지압이 평형을 이루도록 지반이 거동하기 때문으로 판단된다.

실제 터널 시공 현장에서 내공변위 계측작업이 터널 굴착 직후에 신속하고 지속적으로 이루어진다면, 터널 내에서 계측되어지는 터널 상대변위가 터널 주변 지반을 이해하기 위한 유용한 도구가 될 수 있음을 본 예제 해석 결과로부터 확인하였다. 특히 그림 4에서 상대변위 분포를 관찰하여 보면 K_0 값이 약 1.0의 값을 갖게

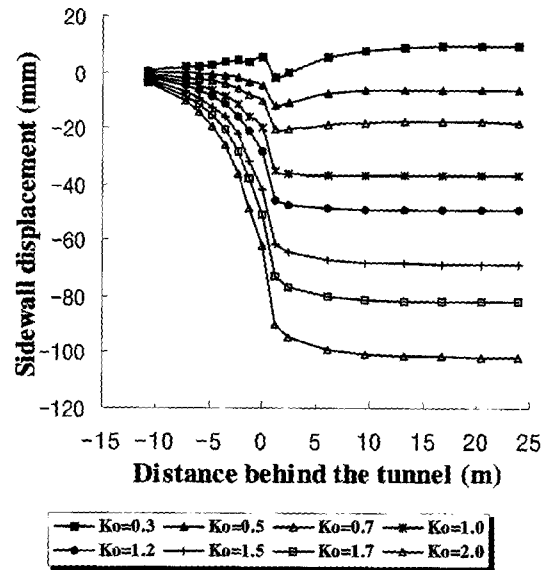
될 때 터널 천단과 측벽에서 수렴된 내공변위량이 터널 중심방향으로 약 15mm로 유사함을 관찰할 수 있는데, 이로부터 터널의 천단과 측벽변위 발생 양상을 분석함으로써 대략적인 지반의 K_0 의 예측이 가능함을 확인하였다.

3.3 역해석 지반정수 선정

Mohr-Coulomb 파괴기준 적용 시 지반의 거동은 탄성 계수(E), 포아송 비(μ), 점착력(c), 내부 마찰각(ϕ), 축압

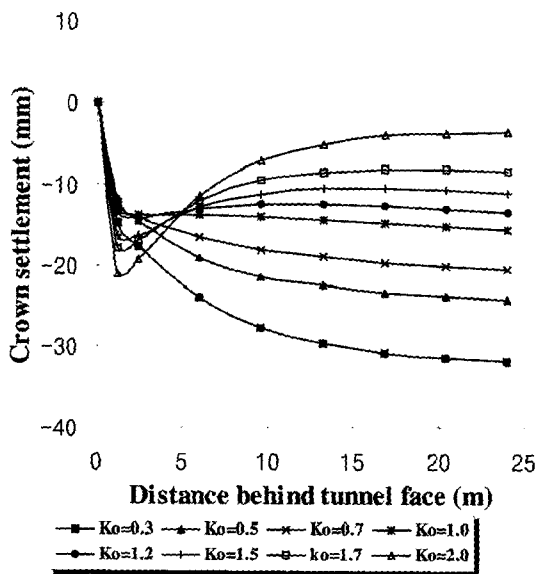


(a) 터널 천단 변형

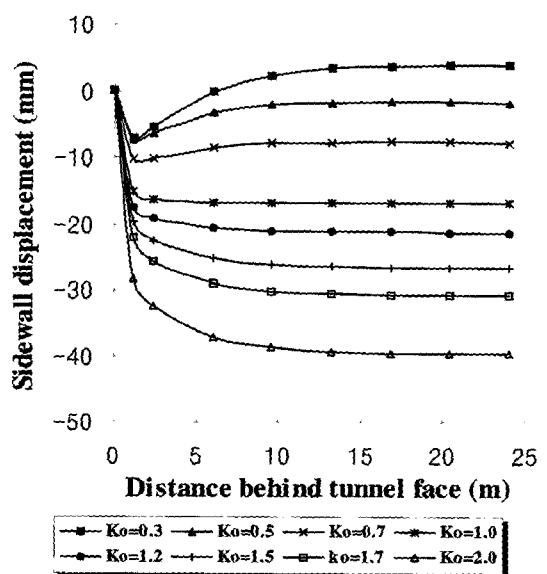


(b) 터널 측벽 변형

그림 3. 예제 해석 결과 - 종단변형곡선



(a) 터널 천단 변형



(b) 터널 측벽 변형

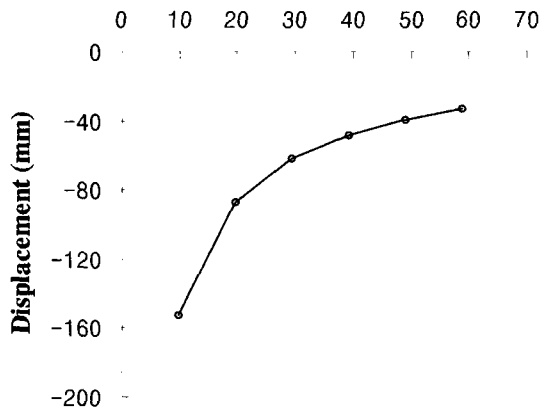
그림 4. 예제 해석 결과 - 막장 후방으로의 상대변위

계수(K_0)에 의해서 결정된다. 만약 Hoek-Brown 파괴기준이 적용되면, c 와 ϕ 는 각각 m 과 s 의 기준으로 바뀌어야 한다. 그러나 역해석 수행 시, 해석 대상 지반정수의 수가 증가할수록 해석에 필요한 시간이 증가하고 결과값이 수렴되지 않을 가능성이 높아진다. 따라서 효율적인 연구의 수행과 역해석 해의 불수렴성(non-convergence) 문제를 극복하기 위하여 민감도 분석(sensitivity analysis)에 의해 터널 내공변위에 보다 큰 영향을 주는 매개변수를 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 그림 2에 나타난 단면의 터널 천단과 측벽 변위에 대한 잔적토층의 탄성계수, 축압계수, 포아손비의 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석에 사용된 각 지층의 지반정수 값 및 지보재의 물성치는 표 1과 같으며 민감도 분석 결과는 그림 5~7에 나타내었다. 터널 내공변위 부호는 터널 중심방

향으로 변위가 발생하였을 때를 (-)로 정하였다.

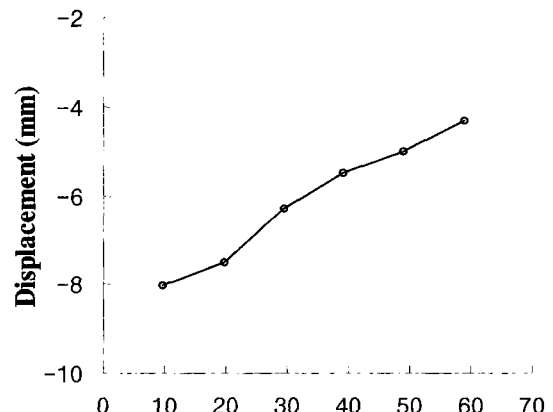
민감도 분석 결과 포아손비의 경우 탄성계수와 축압계수에 비해 터널 천단과 측벽변위에 대한 민감도가 매우 적음을 확인하여 불확정 요인에서 제외하였다. 따라서 역해석 대상 지반정수 벡터 $\hat{\theta}$, 평균 지반정수 벡터 p , 지반정수의 공분산 행렬 V_p 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \begin{Bmatrix} \hat{E} \\ \hat{K}_0 \\ \hat{\phi} \\ \hat{c} \end{Bmatrix} \quad (13)$$



Young's modulus E (MPa)

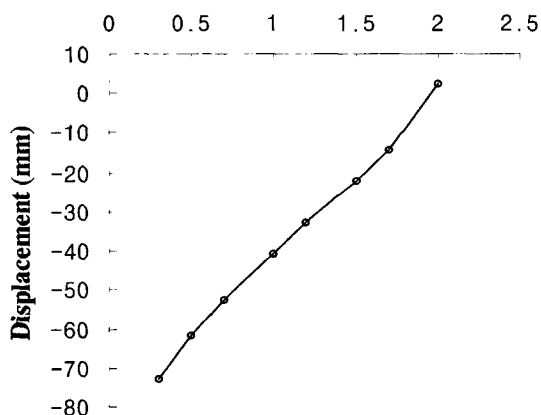
(a) 터널 천단 변형



Young's modulus E (MPa)

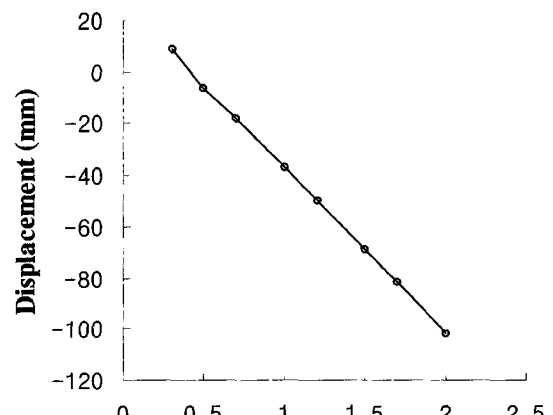
(b) 터널 측벽 변형

그림 5. 잔적토층 탄성계수의 민감도분석 결과



Earth Pressure Coefficient K_0

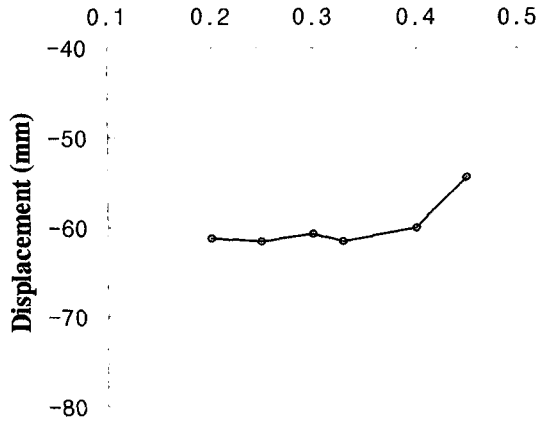
(a) 터널 천단 변형



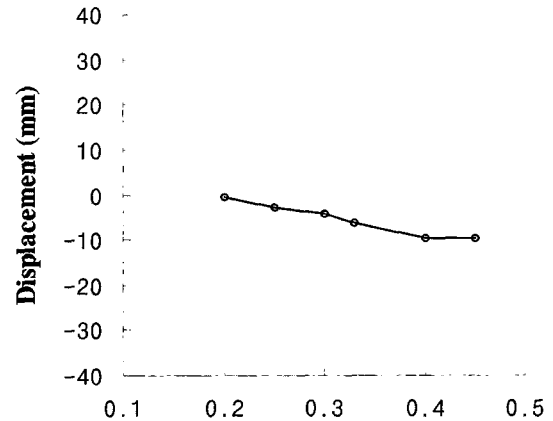
Earth Pressure Coefficient K_0

(b) 터널 측벽 변형

그림 6. 잔적토층 축압계수의 민감도분석 결과



(a) 터널 천단 변형



(b) 터널 측벽 변형

그림 7. 잔적토층 포아손비의 민감도분석 결과

$$p = \begin{Bmatrix} \overline{E} \\ \overline{K_0} \\ \phi \\ c \end{Bmatrix} \quad (14)$$

$$V_p = \begin{Bmatrix} \text{Var}(E) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Var}(K_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Var}(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{Var}(c) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

만약 소성영역의 발생이 매우 미약하여 대부분의 지반 거동이 탄성영역에서 발생한다면 다음과 같이 지반 정수를 선정할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \begin{Bmatrix} \hat{E} \\ \hat{K}_0 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$p = \begin{Bmatrix} \overline{E} \\ \overline{K_0} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

$$V_p = \begin{Bmatrix} \text{Var}(E) & 0 \\ 0 & \text{Var}(K_0) \end{Bmatrix} \quad (18)$$

터널 굴착으로 인해 발생한 변형량에 대한 현장 계측 값은 기본적으로 오차를 수반할 수밖에 없으며, 이러한 측정오차는 현장상황에 따라 크게 변화하게 된다. 그러나 본 논문에서는 β 에 의해 V_u 와 V_p 의 크기가 상대적으로 조절되므로 V_u 는 단위행렬로 가정하였다.

3.4 상대변위를 이용한 3차원 터널 역해석 프로그램

본 연구에서는 효율적인 역해석 수행을 위하여 3차원 수치해석과 연계된 터널 역해석 모듈을 개발하였다. 개발된 역해석 모듈은 국내에서 널리 사용되고 있는 3차원 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-3D와 연동이 가능하게 개발되었으며, 역해석을 위한 입력파일을 해

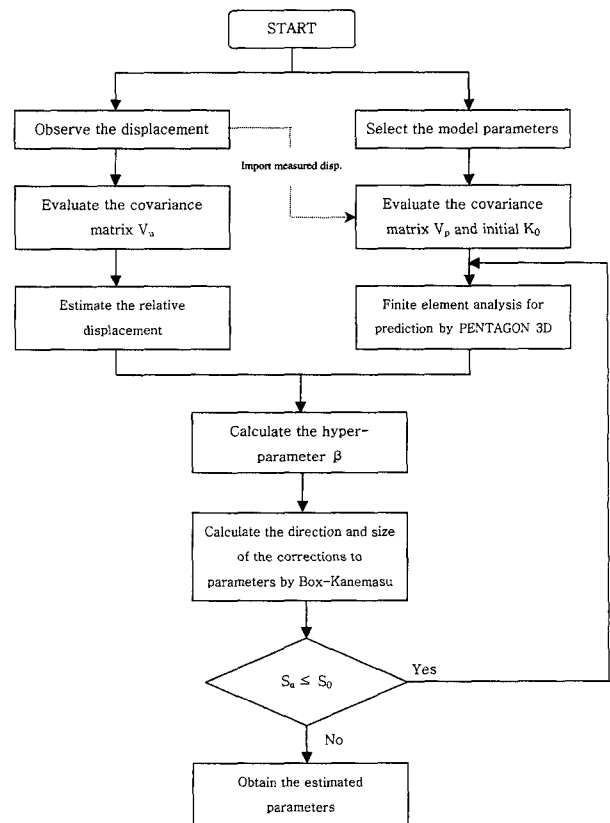


그림 8. 역해석 수행 흐름도

석자가 작성하여 입력하면 PENTAGON 3D의 유한요소 해석 결과를 이용하여 탄성계수, 축압계수, 점착력, 내부마찰각에 대하여 최적의 값을 얻을 때까지 반복하여 해석을 수행하게 하였다. 이를 위하여 터널 상대변위를 역해석 입력값으로 사용하였으며 EBM에 의한 목적함수를 역해석 목적함수로 적용하였다. 특히 역해석 수행의 효율성을 꾀하기 위하여 터널 내에서 계측된 상대변위 자료를 분석하여 역해석 초기의 K_0 를 임의로 부여였다. 즉, 수렴된 천단과 측벽의 계측 변위량을 분석하여 천단변위가 터널 중심방향으로 측벽변위보다 더 크게 발생하였을 경우에는 초기 K_0 를 0.7로 설정하였으며, 반대의 경우에는 K_0 를 1.5로 설정하였다. 그림 8은 본 연구에서 적용된 역해석 기법의 수행 흐름도를 보여주고 있다(김동현, 1996; Beck and Arnold, 1977).

4. 예제 해석

본 연구에서 제안한 터널 상대변위를 이용한 3차원 역해석 기법의 검증을 위하여 앞의 3절의 예제에서 사용되었던 그림 2의 단면에 대해서 역해석을 수행하였다. 표 1에 나타난 지반정수 값은 EBM의 사전 정보값(prior estimated value)으로 간주되었다. 그림 2의 지반과 터널은 모두 가상의 것이기 때문에 실제 계측자료가 존재하지 않는다. 따라서, 표 1에 나타난 지반정수 값을 사용하여 수치해석을 실시한 뒤, 이 때 발생한 변위를 실제 계측치로 가정하여 역해석을 실시하였다. 해석에 적용된 파괴기준은 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다. 정해석 결과 그림 9에서 나타난 바와 같이 터널 주변으로 소성영역이 발달하고 있음을 확인할 수 있으며, 따라서 주변 지반이 탄소성 영역내에서 거동할 것으로 판단되었다.

지반이 탄소성 거동을 보일 것으로 예측되었으므로, 모델 지반정수 벡터 $\hat{\theta}$, 평균 지반정수 벡터 p , 지반정수

의 공분산 행렬 V_p 는 잔적토층에 대하여 각각 식 (13), (14), (15)와 같이 정의될 수 있다. 모델 지반정수 벡터의 공분산 행렬 V_p 는 큰 불확정성을 고려하여 분산계수 0.3을 가정하여 평가하였다(Harr, 1987). 역해석에 의한 최적 지반정수 예측 결과는 표 2와 같으며, AIC값과 hyper-parameter β 의 변화와 터널 내공변위 예측결과는 각각 그림 10과 11에 나타내었다.

표 2에 나타난 바와 같이, 본 논문에서 제안한 역해석 기법의 결과가 사전 정보값(prior estimated value)과 매우 유사한 값(약 5% 내외의 오차)을 나타내고 있으며 목적함수 값이 각각 0.0211에서 0.000711로 크게 감소하였다. 또한 그림 10으로부터, hyper-parameter β 가 0.00142에서 0.00059로 감소하여 가며 AIC값이 -152에서 -291로 감소하여 지반정수가 최적화 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 AIC값의 감소는 변위의 예측치와 계측치 간의 차이가 감소하는 것을 의미하는 것이며, β 가 초기값에 비하여 크게 감소한 것은 초기에 평가된 사전 정보에 비하여 계측자료가 점차 높은 가중치를 획득해 가는 것으로 풀이할 수 있다. 또한, 그림 11로부터 역해석에 의한 천단과 측벽의 내공변위 분포가 계측자료와 매우 유사한 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다.

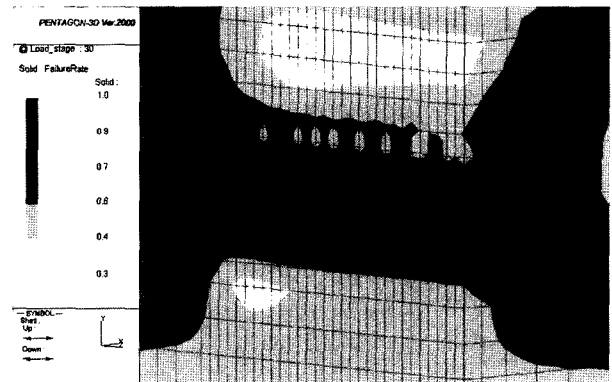
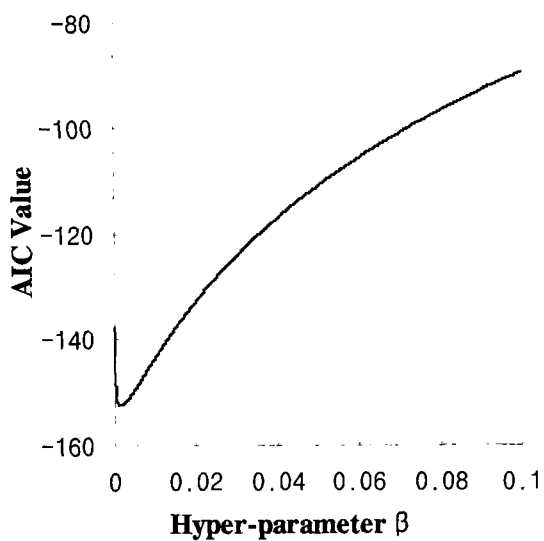


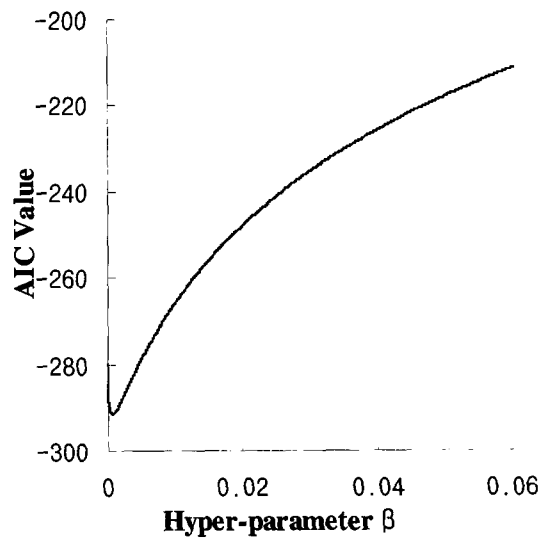
그림 9. 터널 주변 지반의 소성영역의 발달

표 2. 역해석에 의한 지반정수 평가

	탄성계수 (MPa)	축압계수	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (degree)	AIC 값	목적함수값
사전 정보 (prior estimated value)	29.43	0.5	29.43	30	-	-
초기값 (initial value)	29.43	0.7	29.43	30	-152	0.0211
역해석 결과 (optimum value)	30.90	0.523	31.03	31.08	-291	0.000711
오차 (%)	4.99	4.59	5.44	3.56	-	-

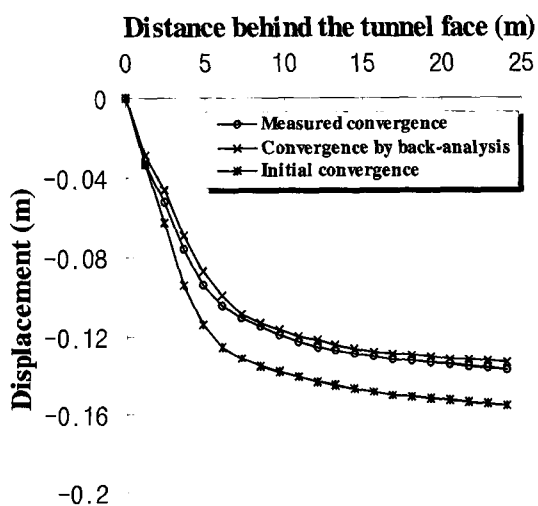


(a) 역해석 시작시 (with initial value)

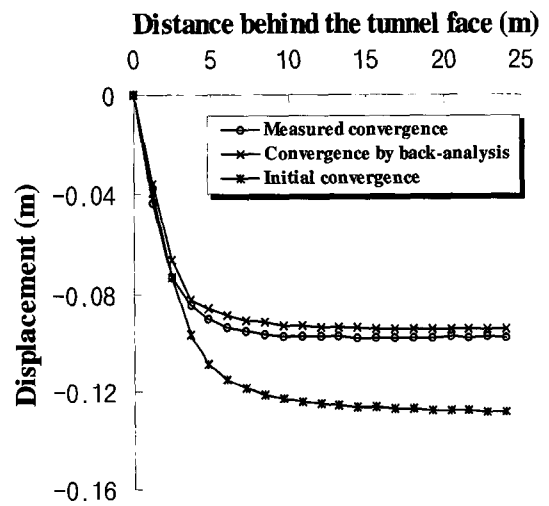


(b) 역해석 완료후 (with optimum value)

그림 10. 예제 해석 결과 - hyper-parameter β VS AIC value



(a) 터널 천단 변형



(b) 터널 측벽 변형

그림 11. 예제 해석 결과 - 터널 상대변위 예측

5. 결론

본 연구에서는 기존의 터널 역해석 기법의 어려움을 극복하고자 터널 상대변위를 이용한 새로운 터널 역해석 기법을 제안하였다. 이를 위하여 확장된 Bayesian 방법과 Akaike Information Criterion(AIC)을 최적 지반정수 산정과 최적 모델 산정에 적용하였으며, 지반 거동의 예측을 위해서는 3차원 수치해석을 적용하였다. 또한 터널 상대변위를 역해석 입력값으로 적용하였다.

K_0 값에 따른 터널 상대변위 예제 해석을 통하여 터널 내에서 예측되어지는 상대변위가 터널 주변 지반을 이해하기 위한 유용한 도구가 될 수 있음을 확인하였으며,

각 지반정수에 대한 민감도 분석을 통하여 역해석 대상 지반정수를 선정하였다. 이를 바탕으로 터널 시공 시에 측정되는 터널 상대변위를 이용하여 지반의 물성을 파악하는 역해석 기법을 제안하였으며, 가상의 지반에 제안된 역해석 기법을 적용함으로써 그 적용성을 검증하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

K_0 에 따른 터널 상대변위 예제 해석을 통하여 터널 내에서 예측되어지는 상대변위가 지반과 지보재의 상호 작용을 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 터널 시공 현장에서 내공변위 측정작업이 터널 굴착 직후에 신속하고 지속적으로 이루어진다면, 터널 내에서 예측되어지는 터널 상대변위가 터널 주변 지반을 이해하기 위한

유용한 도구가 될 수 있음을 본 예제 해석 결과로부터 확인하였다.

민감도 분석을 통하여 지반이 탄소성 거동을 보일 때는 포아손비를 제외한 탄성계수, 측압계수, 점착력, 내부마찰각 등을 역해석 대상 지반정수를 선정하였으며, 탄성 거동을 나타낼 때는 탄성계수와 측압계수를 역해석 대상 지반정수로 선정하였다. 즉, 사전 지반정수 값을 사용하여 수치해석을 실시함으로써 개략적인 터널의 거동을 파악함으로써 역해석 대상 지반정수를 효율적으로 선정할 수 있음을 확인하였다.

이러한 결과로부터 터널 상대변위를 이용한 새로운 터널 역해석 기법을 제안하였으며, 탄소성 거동을 보이는 지반에 건설된 터널 예제해석을 통하여 그 적용성을 검토하였다. 역해석 결과, 본 연구에서 제안한 터널 역해석 기법이 지반 정수를 비교적 정확히 평가하고 있음을 확인하였으며, 터널 내공변위 또한 계측치와 매우 유사하게 예측함을 확인하였다. 단 본 연구에서 수행한 역해석 결과가 가상의 지반과 터널 계측자료를 이용하였으므로, 현장 적용성 검증을 위해서 실제 현장 계측자료를 이용한 역해석을 수행하였으며 이를 두 번째 논문에 수록하였다.

감사의 글

본 연구는 (주) 포스코 건설의 연구지원에 의하여 수행된 결과의 일부로서 관계당국에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 김동현 (1996), “통계적 접근을 통한 지하구조물의 지반계수 추정 연구”, 고려대학교 박사학위 논문.
2. 김문걸, 장정범, 박태균 (1995a), “탄소성 지반내 터널굴착에 따른 역해석”, 대한토목학회 논문집, Vol.15, No.2, pp.483-490.
3. 김문걸, 장정범 (1995b), “유한요소-경계요소 조합에 의한 터널 계측결과의 역해석”, 터널과 지하공간, Vol.5, pp.205-213.
4. 이인모, 김동현, Lo, K.Y. (1996), “지하공간 설계와 시공의 지반공학 적 접근과 실무적용”, 한국지반공학회지, Vol.12, No.2, pp.43-57.
5. 이인모, 김동현, 이우진 (1997), “지하공간 설계시 탄소성 모델에 의한 지반계수 추정”, 한국지반공학회지, Vol.13, No.4, pp.85-94.
6. Beck, J.V. and Arnold, K.J. (1977), *Parameter estimation in engineering and science*, John Wiley & Sons, Inc.
7. Harr, M.E. (1987), *Reliability-Based Design in Civil Engineering*, McGraw-Hill Book Company.
8. Honjo, Y., Wen-Tsung, L. and Guha, S. (1994a), “Inverse analysis of an embankment on soft caly by Extended Bayesian Method”, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, Vol.18, pp.709-734.
9. Honjo, Y., Wen-Tsung, L. and Guha, S. (1994b), “Application of Akaike information criterion statistics to geotechnical inverse analysis: the Extended Bayesian Method”, *Structural Safety*, Vol.13, pp.5-29.

(접수일자 2004. 10. 29, 심사완료일 2005. 4. 2)