



# 1. 서론

터널과 같은 선형 구조물의 경우, 시공과정의 진행에 따라 다양한 지반조건의 변화를 경험하게 되며 이러한 지반조건을 예측하기 위한 현장실험 또한 그 불확정성이 매우 큰 것이 사실이다. 따라서 터널이 위치한 지반의 상태를 설계단계에서 정확히 파악하기란 불가능하다. 이러한 어려움을 극복하고 시공의 안정성 증대 및 경제적인 시공을 위해서 지하공간의 건설시 각종 현장 계측을 수행하게 되며, 이 계측 결과를 분석하여 그 결과를 다음 시공과정에 반영하고 있다.

앞의 모델 제안에 대한 논문에서는 이러한 피드백(feed-back) 기법의 하나로서 터널 내공변위 계측자료를 이용하여 터널 주변의 지반정수를 파악하는 상대변위를 이용한 3차원 터널 역해석 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 설계단계에서 평가된 사전정보와 시공시 획득되어진 계측자료의 효과적인 조합이 가능한 확장 Bayesian 방법(Extended Bayesian Method, EBM)을 역해석의 목적함수로 사용하였으며(Honjo 등, 1994a; Honjo 등, 1994b), 기존의 2차원 터널 역해석 기법의 한계를 극복하고 터널 내공변위의 전체적인 발생 경향을 예측하기 위하여 3차원 수치해석을 적용하였다. 제안된 모델의 검증에 위해 두 곳의 터널 현장에서 계측된 터널 상대변위 계측자료를 활용하여 최적 지반정수를 평가함으로써, 모델의 검증을 수행하였다. 역해석 대상이 된 지반조건과 계측자료는 문헌조사(김동현, 1996; 장정범, 김문겸, 1998)를 통해 참고하였다. 또한 역해석 입력값의 개수와 시공과정 수치해석 모델링이 역해석 결과에 미치는 영향도 함께 고려되었다.

## 2. 현장 적용 사례 I

### 2.1 지반 조건과 터널 내공변위 계측

터널이 시공된 지반은 그림 1과 같이 매립층, 잔적토

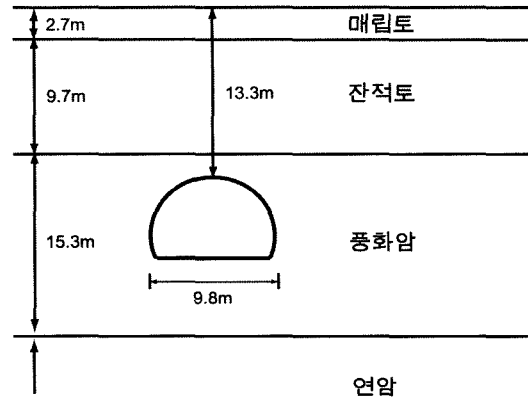


그림 1. 상대변위 특성 파악을 위한 예제해석 단면

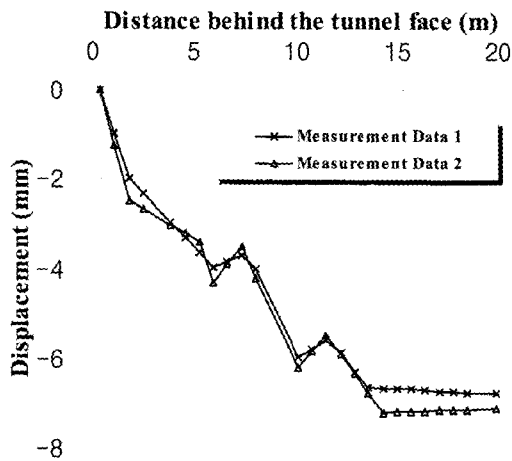
층, 풍화암층, 그리고 연암층으로 이루어져있다. 시공된 터널은 반경 4.9m의 말발굽형(horse-shoe)으로 풍화암층에 위치하고 있으며 숏벤치컷으로 굴착 시공되었다. 설계 당시 각 지층의 지반과 지보재의 물성치는 표 1과 같다. 터널의 내공변위 변화는 터널 천단과 측벽에서 테이프 익스텐소미터(tape extensometer)를 사용하여 터널 내에서 이루어졌으며 이를 그림 2에 나타내었다. 계측의 시작시점은 굴착직후에 계측기를 계측 기준단면에 설치하여 초기 계측 상실분이 없도록 하였다. 또한 인접한 두 단면에 대해서 각각 천단과 측벽에서 변위를 계측하여 총 두 단면에 대해서 터널 내공변위 변화를 계측하였다.

### 2.2 모델 지반정수의 선정

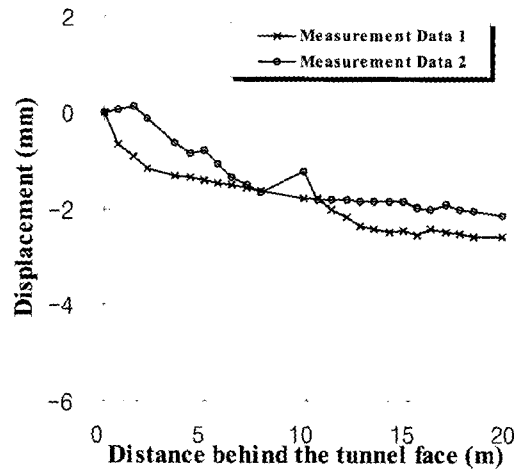
잔적토의 경우 불교란 시료의 채취가 거의 불가능하기 때문에 지반정수를 표준관입시험으로부터 추정하거나 딜라토미터(dilatometer)와 같은 현장 실험으로부터 구할 수밖에 없다. 표 1에 나타난 지반정수 값들은 위와 같은 방법으로 구하거나, 또는 경험적으로 사용하여 왔던 값들을 나타내고 있다. 본 연구에서는 이 값들을 사전정보의 평균으로 사용하였으며 각 지반정수의 공분산 행렬은 분산계수를 이용하여 산정하였다. 여기서 분

표 1. 예제 해석 단면의 지반정수

	탄성계수 (MPa)	포아손비	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	측압계수	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (degree)
매립토	19.62	0.35	9.81	0.5	0	35
잔적토	29.43	0.33	18.64	0.5	49.05	35
풍화암	196.2	0.23	21.58	0.5	98.1	35
연암	981	0.2	23.54	0.5	196.2	40
연성 숏크리트	4,905	0.2	2.4	-	-	-
경화 숏크리트	14,715	0.2	2.4	-	-	-



(a) 터널 천단 변형



(b) 터널 측벽 변형

그림 2. 내공변위 현장 계측자료

산계수란 표준편차를 평균으로 나눈 불확실성의 정도를 나타내는 지표라 할 수 있다. 표준관입시험의 경우 분산계수의 값이 0.26으로 알려져 있으며(Harr, 1987), 본 연구에서 초기 입력치로 사용된 지반계수들은 표준관입시험 값과의 상관관계 및 경험적인 방법에 의존하여 산정하였으므로 표준관입시험의 변동계수보다 큰 0.3을 사용하였다.

표 1에 나타난 지반정수와 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하여 수치해석을 수행한 결과 터널 막장면을 제외한 대부분의 영역이 탄성영역에서 거동하는 것으로 나타났으므로, 지반정수 벡터는 탄성계수와 축압계수로 구성되며, 터널의 거동에 영향을 미치는 잔적토층과 풍

화암층을 고려하면 식 (1)과 같이 정의된다. 그러나 잔적토층의 축압계수  $\widehat{K}_{0w}$ 를 고려한 해석결과 터널의 내공변위 발생에 크게 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있었으며, 이에 따라 역해석 대상 지반정수에서 제외하였다. 최종적으로 지반정수 벡터는 식 (2)와 같이 선정하였다. 여기서 아래첨자 r과 w는 각각 잔적토층과 풍화암층을 나타낸다.

$$\hat{\theta} = \begin{pmatrix} \widehat{E}_r \\ \widehat{K}_{0r} \\ \widehat{E}_w \\ \widehat{K}_{0w} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\hat{\theta} = \begin{pmatrix} \widehat{E}_r \\ \widehat{E}_w \\ \widehat{K}_{0w} \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 2.3 AIC에 의한 최적모델의 선정

역해석 대상 지반정수의 적절한 선정뿐만 아니라 시공과정의 적절한 수치해석적 모사 또한 역해석 결과에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 따라서 본 논문에서는 시공과정을 간략화하여 터널 굴착을 전단면 굴착으로 모사한 경우인 Case 1)과 시공과정을 충분히 반영하여 상하반 쏘벤치컷으로 시공과정을 모사한 경우인 Case 2)로 나누어 각각 역해석을 수행하였다. 또한 역해석에 적절한 모델을 설정하기 위하여 Case 1)과 2) 모두에 대하여 3가지 모델을 가정하였다. 모델-I은 현장조사에 근거한 그림 1의 원지반 상태로 하였으며, 모델-II에서는 잔적토층의 탄성계수 값이 작게 평가되어 있으므로 98.1MPa로 증가시켰으며, 모델-III은 풍화암층과 잔적토층을 하나의 풍화대로 가정하여 지반정수값은 풍화암층의 값을 사용하였다.

AIC에 의한 최적모델 평가결과를 표 2와 3에 정리하였다. 표 2의 Case 1)의 결과에 나타난 바와 같이, 모델-II가 가장 적은 AIC값과 목적함수값을 나타내어 최적의 모델로 평가되었다. 그러나 표 3의 Case 2)의 경우, 모델-III가 최적의 모델로 평가되었다. 이와 같은 차이는 시공 과정의 수치해석적 모사의 차이에 기인한다. 그림 3과 4에 나타난 바와 같이, 사전 지반정수값(prior estimated value)에 의한 터널의 내공변위가 Case 1)과 2)에 따라서 크게 다르다. 그림 4에서 보듯이 Case 2)에 의한 터널 내공변위의 발생경향이 Case 1)에 비하여 계측자료와 보다 더 잘 부합함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 시공과정의 수치해석적 모사가 역해석 결

표 2. Case 1)의 목적함수 값과 AIC값

	목적함수 값		AIC값	
	계측자료 1	계측자료 2	계측자료 1	계측자료 2
모델-I	0.00028130	0.00023039	-325.043445	-299.526586
모델-II	0.00007746	0.00005939	-376.628696	-348.330581
모델-III	0.00008063	0.00007062	-375.023164	-342.093576

표 3. Case 2)의 목적함수 값과 AIC값

	목적함수 값		AIC값	
	계측자료 1	계측자료 2	계측자료 1	계측자료 2
모델-I	0.00040471	0.00034864	-310.493724	-284.612469
모델-II	0.00006852	0.00005050	-381.537297	-354.164326
모델-III	0.00003909	0.00003274	-403.990643	-369.772416

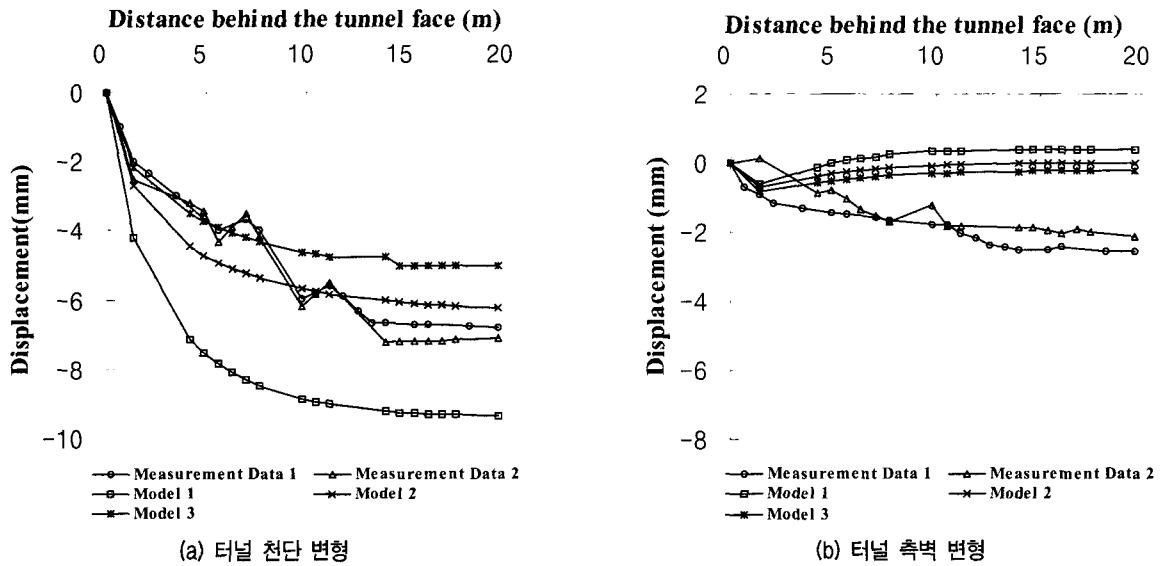


그림 3. Case 1에서 사전 지반정수를 이용한 터널 내공변위 예측

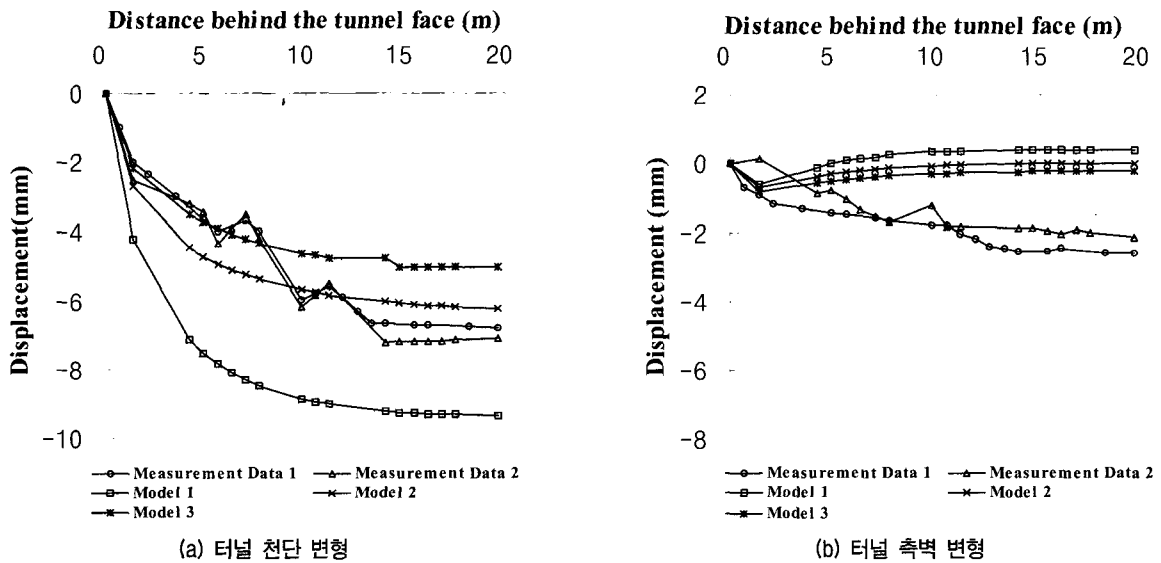


그림 4. Case 2에서 사전 지반정수를 이용한 터널 내공변위 예측

과에 큰 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 2.4 $K_0$ 에 따른 내공변위 발생경향

역해석의 수행에 앞서, 주어진 단면에 대하여 터널이 위치한 풍화암층의  $K_0$ 값에 따른 터널 내공변위의 변화 양상을 관찰하였다. 터널 천단과 측벽의 종단변형 곡선은 그림 5와 같으며 이를 터널 막장 후방으로의 상대변위 만으로 나타낸 것은 그림 6과 같다.

그림 5와 6에서 나타낸 바와 같이, 터널이 위치한 지

반의 측압계수  $K_0$ 의 변화에 따라 터널 내공변위 발생양상이 매우 민감하게 변화함을 확인할 수 있었다.  $K_0$ 에 따른 터널 내공변위의 이러한 발생경향은 지반의 아칭 효과와 지보재와 지반간의 상호작용에 따른 것으로, 초기 지중응력 상태를 좌우하는  $K_0$ 에 따라 아칭효과 발현으로 인한 내압과 지압이 평형을 이루는 시점이 변화하기 때문으로 풀이 된다. 즉, 터널의 천단과 측벽변위 발생 양상을 분석함으로써 대략적인 지반의  $K_0$ 의 예측이 가능함을 확인하였으며, 본 연구에서는 역해석 수행의 효율성을 위해 수렴된 천단과 측벽의 내공변위량을 분

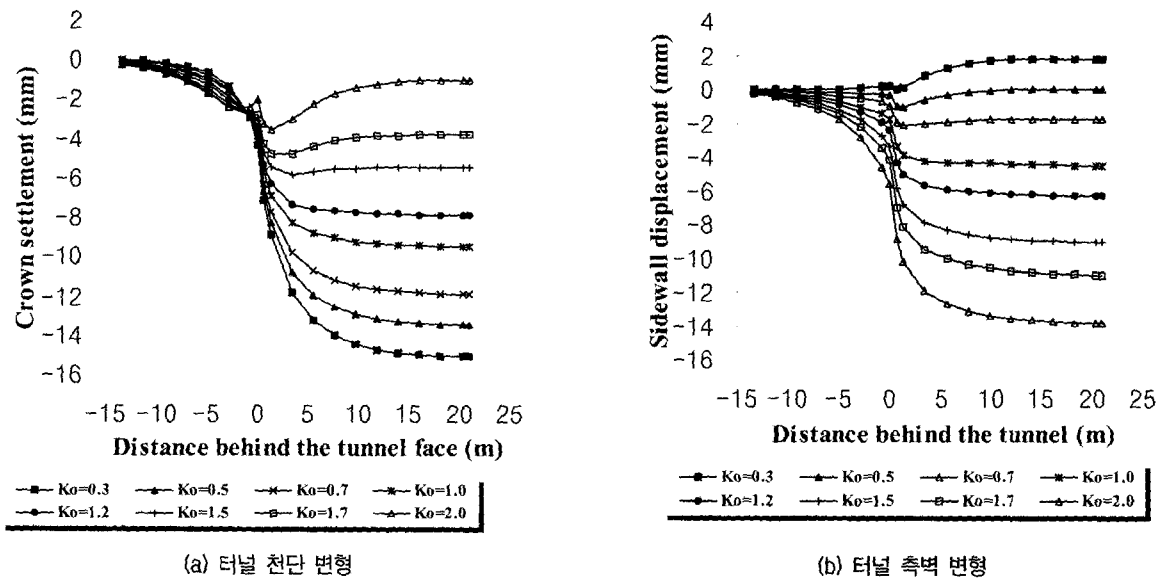


그림 5. 절대변위에 대한 종단변형곡선

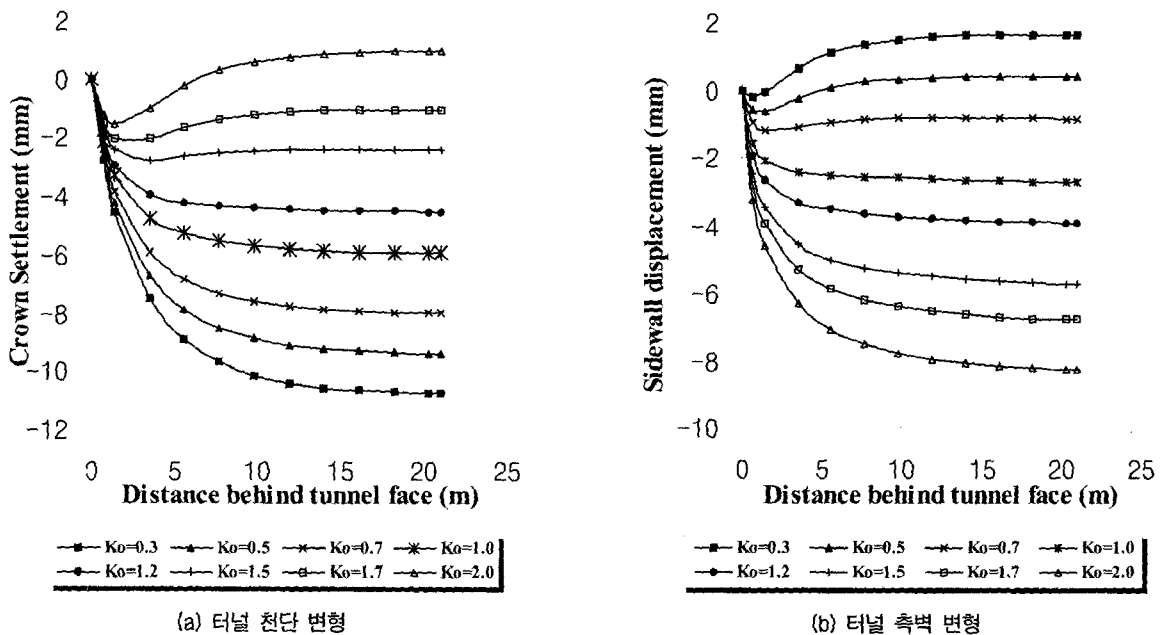


그림 6. 막장 후방으로의 상대변위

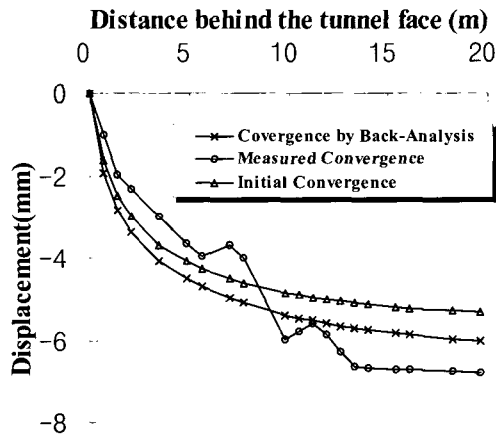
석하여 천단변위가 터널 중심방향으로 측벽변위보다 더 크게 발생하였을 경우에는 초기  $K_0$ 를 0.7로 설정하였으며, 반대의 경우에는  $K_0$ 를 1.5로 설정하였다.

## 2.5 최적 지반정수의 평가 및 내공변위 예측

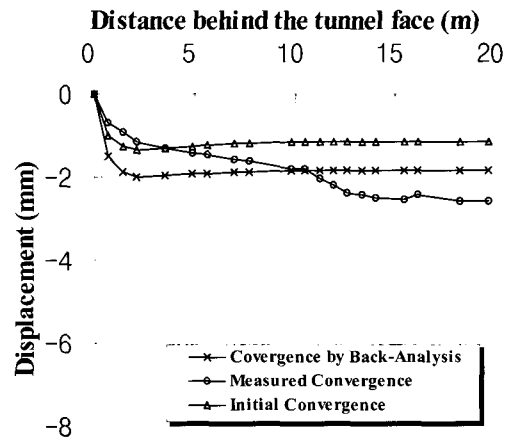
Case 1)과 2)의 모델-I, II, III에 대해서 모두 역해석을

표 4. 역해석에 의한 최적 지반정수 평가

		Er (MPa)		Ew (MPa)		K <sub>0</sub>	
		Data 1	Data 2	Data 1	Data 2	Data 1	Data 2
모델-I	Prior estimation	29.43		196.2		0.5	
	Case 1) 결과	51.5	58.96	195.12	181.98	0.853	0.767
	Case 2) 결과	87.26	79.10	200.9	218.8	0.779	0.739
모델-II	Prior estimation	98.1		196.2		0.5	
	Case 1) 결과	81.91	95.84	125.96	103	0.745	0.667
	Case 2) 결과	140.6	131.4	145.0	151.4	0.671	0.629
모델-III	Prior estimation	-		196.2		0.5	
	Case 1) 결과	-	-	119.29	118.41	0.706	0.661
	Case 2) 결과	-	-	163.5	163.3	0.672	0.616

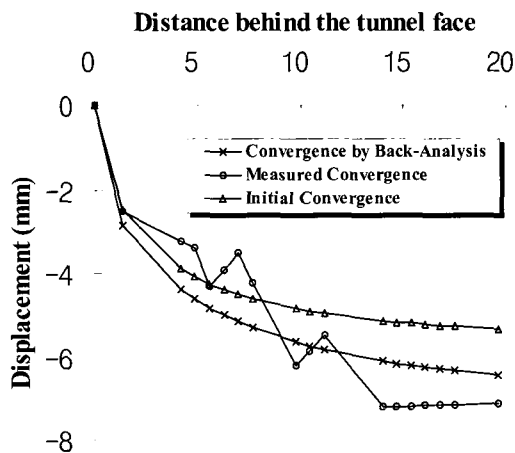


(a) 터널 천단 변형

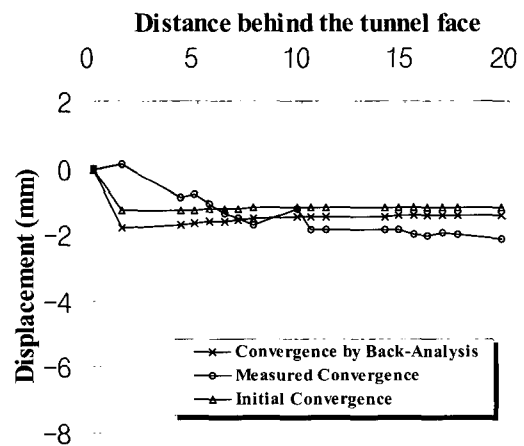


(b) 터널 측벽 변형

그림 7. 계측자료 1을 이용한 역해석에 의한 내공변위 예측-Case 1)

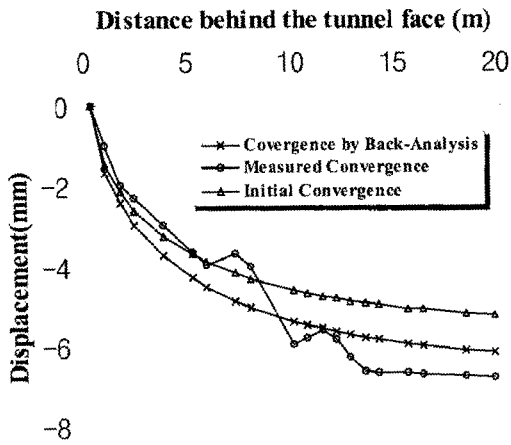


(a) 터널 천단 변형

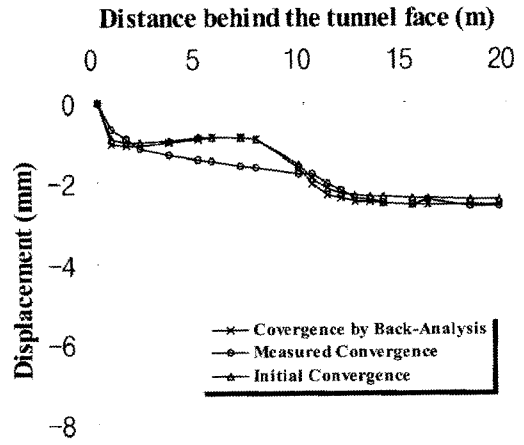


(b) 터널 측벽 변형

그림 8. 계측자료 2를 이용한 역해석에 의한 내공변위 예측-Case 1)

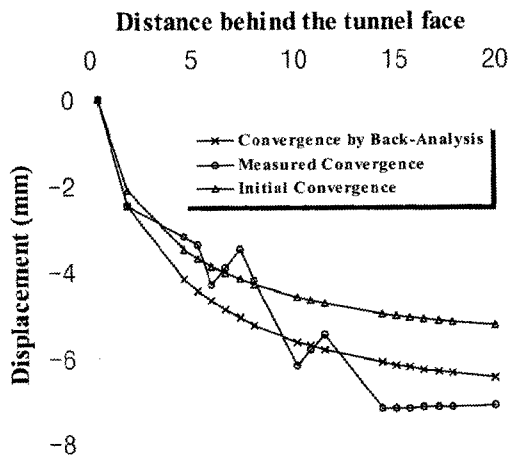


(a) 터널 천단 변형

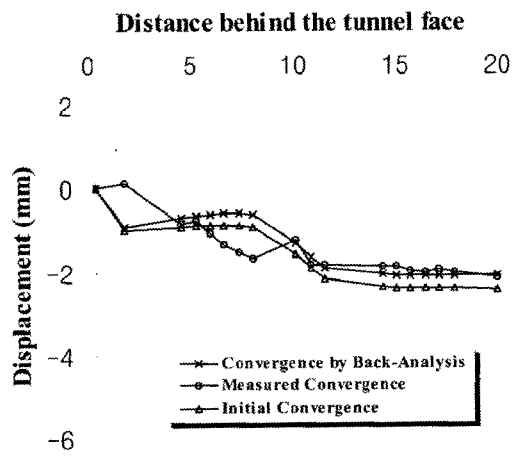


(b) 터널 측벽 변형

그림 9. 계측자료 1을 이용한 역해석에 의한 내공변위 예측-Case 2)



(a) 터널 천단 변형



(b) 터널 측벽 변형

그림 10. 계측자료 2를 이용한 역해석에 의한 내공변위 예측-Case 2)

수행하였으며 그 결과는 표 4에 요약한 바와 같다. 역해석 결과 Case 1)의 탄성계수가 Case 2)에 비하여 작게, 축압계수는 크게 평가되었다. 표 4의 최적 지반정수 값에 의한 내공변위 분포를 그림 7~10에 나타내었으며, 그림 7과 8은 Case 1)의 최적모델인 모델-II의 결과를 나타낸 것이며, 그림 9와 10은 Case 2)의 최적모델인 모델-III에 의한 결과를 나타낸 것이다. 시공과정을 충분히 모사한 Case 2)의 결과인 그림 9와 10에서 나타난 바와 같이 내공변위 예측이 그 값과 발생양상 모두 계측치와 보다 유사함을 알 수 있다.

### 3. 현장 적용사례 II

#### 3.1 지반 조건과 터널 내공변위 계측

터널이 시공된 현장은 그림 11과 같으며 터널 단면은

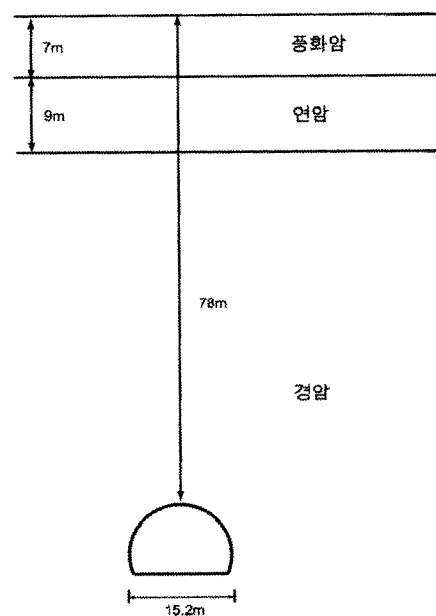


그림 11. 대상구간 단면도

표 5. 실내실험 결과

	최소값	최대값
비중	2.58	2.85
인장강도 (MPa)	5	15
일축압축강도 (MPa)	46	187
포아손비	0.11	0.28
탄성계수 (MPa)	24,900	106,000
점착력 (MPa)	10	28
내부 마찰각 (degree)	43	59

표 6. 현장실험 결과

	탄성계수 최소값 (MPa)	탄성계수 최대값 (MPa)
연 압	310	1,200
경 압	1,140	37,700

표 7. 사전 지반정수 값

	탄성계수 (MPa)	포아손비	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	측압 계수	점착력 (kPa)	내부 마찰각 (degree)
풍화암	196.2	0.23	21.58	1.0	98.1	35
연암	981	0.2	23.54	1.0	196.2	40
경암	2943	0.2	26.68	1.0	245.3	42

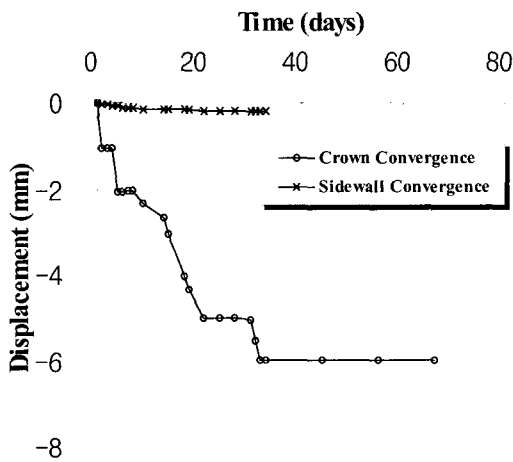


그림 12. 내공변위 현장 계측자료

반경 7.6m인 복선 터널로 NATM 공법으로 설계 시공되었다. 굴착공법은 상하반 분할 굴착 및 롱 벤치컷(long bench-cut) 공법이 적용되었다. 터널이 시공되는 지반의 물성치를 파악하기 위하여 시추조사, 실내시험 등이 시행되었으며 그 결과는 표 5와 6에 나타내었다. 표 5와 6의 실험결과로부터 사전 지반정수 값을 평가하였으며 이를 표 7에 나타내었다. 터널 내공변위 계측은 터널 천단과 측벽 두 곳에서 실시되었으며, 변위 계측 결과는 그림 12와 같다.

### 3.2 모델 지반정수의 선정

표 7에 나타난 사전 지반정수 값과 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하여 수치해석을 실시한 결과 소성영역의 발달이 매우 미약하게 나타났으며 지반 거동이 주로 탄성영역에서 발생할 것으로 예측되었다. 따라서 본 예제의 경우도 이전 예제의 경우와 동일하게 모델 지반정수 벡터는 탄성계수와 측압계수로 구성되며, 탄성계수와 측압계수의 분산계수는 앞의 예제와 동일하게 큰 불확정성을 고려하여 0.3으로 가정하였다. 따라서 평균 지반정수 벡터와 공분산 행렬은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\bar{P} = \begin{Bmatrix} \bar{E} \\ \bar{K}_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2943 \\ 1.0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$V_p = \begin{Bmatrix} 779,510 & 0 \\ 0 & 0.09 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

### 3.3 최적 지반정수의 평가 및 내공변위 예측

본 예제의 경우 터널의 거동에 영향을 미치는 지층이 경암층으로 일정하므로 AIC에 의한 최적모델 선정은 이루어지지 않았다. 그림 12의 내공변위 계측 결과에 나타난 바와 같이, 계측된 측벽변위의 값이 매우 적은 것을 볼 수 있다. 계측된 측벽변위가 매우 적은 값을 나타내는 것은 계측기의 오작동으로 인한 계측오차이거나, 실제 지반거동이 미미한 것으로도 풀이될 수 있다. 따라서 위와 같은 두 가지 경우를 고려하여 역해석을 실시하였다. 즉, Case 3)은 천단 변위만을 계측자료로 인정하여 역해석을 수행하였고 Case 4)는 천단과 측벽변위 모두를 계측자료로 간주하여 역해석을 수행하였다.

표 8과 9는 Case 3)과 Case 4)에 대한 최적 지반정수의 평가 결과를 나타낸 것이며, 그림 13은 역해석 결과를 이용하여 터널 내공변위 예측을 나타낸 것이다. 역해석 입력값으로 터널 천단 변위만을 사용한 Case 3)의 결과에서 탄성계수는 더 작게, 측압계수는 더 크게 평가되었다. 이 결과로부터 입력자료로 사용되는 계측자료의 수의 차이에 의한 역해석 결과 차이를 확인할 수 있다.



표 8. Case 3)의 역해석 결과

	탄성계수 (MPa)	측압 계수	AIC 값	$\beta$	목적함수값
사전 정보값	2943	1.0	-	-	-
초기값	2943	0.7	-223.66	0.00000040	0.00001653
최적값	2790	0.803	-225.00	0.00000110	0.00001625

표 9. Case 4)의 역해석 결과

	탄성계수 (MPa)	측압 계수	AIC 값	$\beta$	목적함수값
사전 정보값	2943	1.0	-	-	-
초기값	2943	0.7	-362.40	0.00000025	0.00000835
최적값	3106	0.747	-366.43	0.00000035	0.00000753

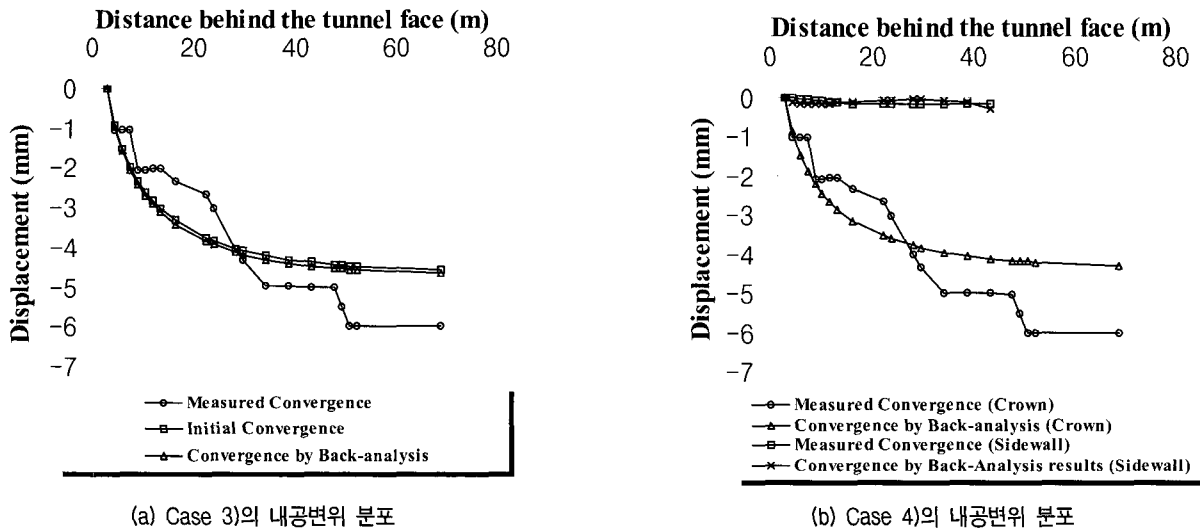


그림 13. 역해석 결과에 의한 터널 내공변위 예측

#### 4. 결론

본 연구에서는 터널 시공시에 측정되는 터널 상대변위를 이용하여 지반의 물성을 파악하는 새로운 터널 역해석 기법을 제안하였다. 즉, 기존의 2차원 터널 역해석 기법에서는 반영할 수 없었던 터널 내공변위 발생경향을 3차원 수치해석을 통해 역해석에 직접적으로 적용하여 내공변위 발생과 그 수렴과정 전체를 각각의 계측값과 비교함으로써 최적의 지반정수를 평가하였다. 최적 지반정수를 예측하기 위하여 확장된 Bayesian 방법과 AIC방법을 적용하였으며, 지반 거동의 예측을 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 역해석 입력값으로는 시공 현장에서 계측된 터널 상대변위를 이용하였다. 본 연구에 적용한 확장된 Bayesian 방법의 가장 큰 장점은 지반정수를 예측함에 있어서 설계당시에 수행된 실험 혹은 경험을 바탕으로 초기 예측치와 시공 중에 계측된 값을 합리적으로 묶어서 최적의 지반정수 값을 예측할

수 있다는 점이다. 초기 예측치와 계측치는  $\beta$ 에 의해 조화되며, 만약  $\beta$ 값이 감소하게 되면 초기 추정치보다 계측치의 비중이 증가함을 의미하고 반대로  $\beta$ 값이 증가하게 되면 초기 추정치의 비중이 증가함을 의미한다. 따라서  $\beta$ 값의 변화를 관찰함으로써 초기 추정치와 계측치간의 상대적인 중요도를 판단할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 역해석 기법에 실제 현장 계측자료를 사용하여 앞의 모델제안 논문에서 제시한 방법의 적용성과 효용성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 두 예제에 대한 역해석 결과, 역해석에 의해 예측된 내공변위값과 계측값간의 약간의 차이가 발생하였다. 이는 본 연구에서 제시한 역해석 기법이 터널에서 최종 수렴된 내공변위 값만을 역해석 입력값으로 사용하지 않고, 계측된 내공변위값 전체를 역해석에 활용했기 때문으로 판단된다. 그러나 그 차이

가 그림 9, 10, 13에서 보듯이 약 1~2mm로 나타났으며, 이러한 차이는 계측기 설치 과정에서의 오차 및 계측 과정에서의 오차 등을 고려한다면 미미한 것으로 판단된다. 또한 그림 9, 10, 13에서 보듯이 역해석에 의해 예측된 내공변위 분포가 계측값과 전체적으로 유사하게 나타났으며, 이는 역해석에 의해 평가된 지반정수가 터널 주변지반의 상태를 비교적 잘 묘사하고 있다고 판단된다.

- (2) 현장 계측자료를 활용한 첫 번째 예제를 통해, 적절한 역해석 대상 지반정수를 선정하는 것 못지않게 시공과정의 수치해석적 묘사의 중요성을 확인하였다. 시공과정의 지나친 간략화는 역해석 결과에 큰 영향을 줄 수 있으므로 시공과정의 모델링시 이에 대한 고려가 충분히 되어야 한다. 또한 최적 모델을 선정하기 위하여 3개의 모델을 가정하였다. 최적 모델 평가 결과 지반조사 결과에 근거한 모델-I이 상당히 큰 목적함수 값과 AIC 값을 나타내었으며, 오히려 간편화된 모델-III가 상대적으로 적은 목적함수 값과 AIC 값을 나타내어 최적의 모델임을 알 수 있었다. 이를 통하여 초기 지반정수의 추정이 역해석에서 매우 중요한 요소이며, 정확한 해석을 위해서 반드시 복잡한 모델을 사용할 필요는 없음을 알 수 있었다.
- (3) 현장 계측자료를 활용한 두 번째 예제를 통해, 역해석 입력값의 개수에 따라 역해석 결과값이 영향 받을 수 있음을 확인하였다. 따라서 단순히 계측된 변위의 값이 매우 작다는 이유만으로 계측작업의 오차로 간주하여 역해석의 입력값에서 제외되는 일은 지양되어야 한다. 오히려, 계측된 내공변위가 매우 적은 것은 실제 발생한 내공변위의 발생량이 매우

적어 이 값이 계측치에 반영되었을 가능성이 매우 높으므로, 역해석시 이에 대한 충분한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

앞의 두 예제를 통하여 본 연구에서 제시한 터널 역해석 기법의 적용성 및 결과의 신뢰도를 검증하였으나, 예제에 사용된 지반 모두가 대체적으로 탄성 영역에서 거동을 나타내는 지반조건이었으므로 본 역해석 기법의 폭 넓은 검증을 위해서는 탄소성 거동을 보이는 지반에서의 시공 계측자료를 활용한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. 김동현 (1996), "통계적 접근을 통한 지하구조물의 지반계수 추정 연구", 고려대학교 박사학위 논문.
2. 장정범, 김문겸 (1998), "역해석에 의한 지하구조체의 거동예측에 관한 연구", 터널과 지하공간, Vol.8, pp.139-14.
3. Harr, M.E. (1987), *Reliability-Based Design in Civil Engineering*, McGraw-Hill Book Company
4. 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.
5. 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)