

## 초기계측치를 이용한 경암 지반내 터널의 최종변위량 예측

송승곤<sup>1)</sup> · 양형식<sup>2)</sup> · 임성식<sup>3)</sup> · 정소걸<sup>4)</sup>

### Estimation of Final Deformation of Hard Rock Tunnel Using Early Measured Deformation

Seung-Gon Song, Hyung-Sik Yang, Seong-Sik Lim and So-Keul Chung

**Abstract.** To use the early measured data of tunnel deformation in back analysis, the relationships between these values and final deformation data were studied. Panet's exponential and fraction equations successfully approximate the convergence of the hard rock tunnels. Measured deformation data of 1D location,  $U_{1D}$  showed that they can be fitted to linear equations but should not be used to estimate potential deformation before measurement,  $C_0$ . Early measured data  $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$ , and final deformation  $U_f$  showed linear correlations. It proved that estimated data of final deformation from early measured ones can be used as input parameters for back analysis.

**KeyWords:** Back Analysis, Convergence, Hard Rock Tunnel, Linear Regression

**초 록.** 터널의 초기 변형결과를 역해석에 적용하기 위하여 초기 값들과 최종변위의 상관관계를 연구하였다. Panet의 지수함수와 분수함수는 경암 터널의 내공변위 예측에 잘 맞았다. 1D 지점의 초기 계측변위는 선형적으로 적합시킬 수 있으나 계측 전 변형의 추정식으로는 부적합하였다. 초기 계측 결과들과 최종 변형결과를 선형적인 비례관계를 보였으며 이로써 초기 계측결과로부터 추정된 최종변형치를 이용한 역해석이 가능함을 보였다.

**핵심어:** 역해석, 내공변위, 경암 터널, 선형 회귀

## 1. 서 론

암반구조물의 해석에 사용되는 입력변수들은 제한된 현장 조사와 실내 시험 등으로 구한다. 그러나 수치해석 결과는 구조물의 실제 거동과 상이하게 나타나는 경우가 대부분이다. 따라서 시공중 계측 결과를 역해석하여 실제 상황에 맞는 응력조건이나 물성을 찾게 된다.

시공중의 계측치 일부로서 역해석한 사례도 있지만(이와 이, 1997) 역해석에는 통상 최종변형값을 사용하게 되는데(김과 박, 1993, 허 외, 1996), 최종변형값을 얻기 위해서는 많은 시간이 경과하여야 하며, 시공 막장은 해석 단면으로부터 멀리 떨어지게 되어 역해석의 의미가 상실된다. 정 등(1998)은 고속도로 터널 계측결과를 통계처리하여 최종변위를 막장거리 1D(여기서, D : 터널의 직경) 변형량의 직선 함수식으로 나타낸 바 있다.

본 연구에서는 몇몇 현장에서 계측한 변위를 이용하여 계측치와 추정치를 회귀분석하였으며, 초기 계측치로부터 추정된 각 파라메타들을 이용한 역해석 가능성을 고찰하였다.

## 2. 최종변위의 예측

### 2.1 터널 내공변위 예측 이론

역해석 방법들은 공통적으로 계측 자료의 정확성이 올바른 해석 결과를 얻기 위한 전제조건이 되고 있다. 암반의 역학적 성질이나 초기지압 등을 역산하기 위해서는 터널의 굴착시작부터 발생한 총변위가 필요하게 된다. 하지만 현장 조건 때문에 관심 지점으로부터 떨어진 거리에서, 어느 정도 변형이 이루어진 후에 변위 계측이 시작된다. 따라서 터널의 최종 변위량을 산정하기 위한 방법으로서 내공변위 곡선을 시간과 거리에 따른 여러 함수로 표현하여 최종변위를 예측하거나, 굴착개시 후 초기 변위량에서 최종 변위량을 통계적 방법을 통해 예측하게 된다. Panet(1979) 등은 지반의 거동을 Fig. 1과 같은 양상으로 가정하여 Table 1과 같은

<sup>1)</sup>전남대학교 대학원 자원공학과 졸업

<sup>2)</sup>전남대학교 건설지구환경공학부 교수

<sup>3)</sup>전남대학교 대학원 자원공학과 석사과정

<sup>4)</sup>한국지질자원연구원 탐사개발연구부 부장

접수일: 2002년 2월 18일

심사 완료일: 2002년 6월 14일

Table 1. Various functions for fitting convergence.

Modelling function	Parameter	Remarks
$C(x) = a\{1 - \exp(-bx)\}$ or $C(t) = a\{1 - \exp(-bt)\}$	a, b	Elastic
$C(t) = a \log(1 + bt)$	a, b	Visco-plastic
$C(x) = C_x \left\{ 1 - \left( \frac{X}{X+x} \right)^2 \right\}$	Cx, X	Elasto-plastic
$C(x, t) = a\{1 - \exp(-bx)\} + c\{1 - \exp(-dt)\}$	a, b, c, d	Visco-elastic (Kelvin-Voigt)
$C(x, t) = C_x \left\{ 1 - \left( \frac{X}{X+x} \right)^2 \right\} \left[ 1 + m \left\{ 1 - \left( \frac{T}{T+t} \right)^{0.3} \right\} \right]$	Cx, X, T, m	Elasto-plastic with time-dependent closure

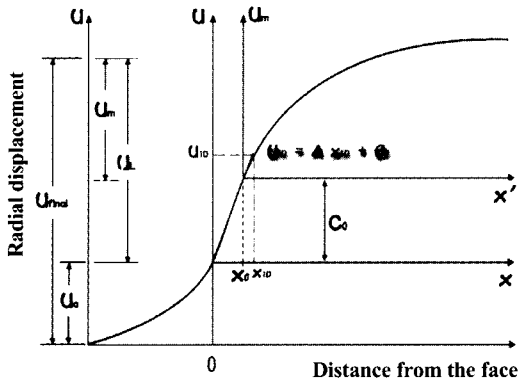


Fig. 1. Generalized form of tunnel convergence.

지수함수 및 분수함수식을 제안하였다.

본 연구에서는 연구 대상 터널의 암반이 경암지역인 것을 감안하여 탄성 또는 탄소성 암반인 것으로 가정하고 Table 1에서 제시한 내공변위 예측식 중에서 탄성 암반에 대한 회귀식인 지수함수식과 탄소성 암반에 대한 회귀식인 분수함수식을 사용하여 회귀분석하였다.

2.2 선형 회귀분석

본 연구에서는 역해석에 사용될 입력 변위값으로서 초기 단계에서의 변위량의 적합성을 규명하고자 하므로 초기 계측시부터 막장거리 1D까지의 변위 변화 양상을 선형 회귀분석하여 타당성을 확인하고 상호간의 상관관계를 유도하였다.

또한 선형 회귀 분석에 의해 얻어진 미계측 구간 변위 C<sub>0</sub>값과 지수함수 및 분수함수식에 의해 회귀분석된 C<sub>0</sub>값을 비교하고 고찰하였다.

2.3 회귀분석의 적용

본 연구에서는 전남 화순-용포간 도로 확포장공사의 일부구간인 운농터널과 구암터널에서 총 44개 지점 132세트의 변위 데이터를 획득하였다. 이들 터널에서는 굴착막장으로부터 10~20 m 떨어졌을 때부터, 즉 굴착 후 약 4~5일 정도가 지난 후부터 계측이 이루어졌다. 계측 데이터 중에서 굴착시간의 진행에 따른 내공변위를 좌대각(L-C), 우대각(R-C), 수평변위(H-C)로 나누어 지수함수로 회귀분석하였고, 이로부터 터널에서의 지수함수 회귀식의 타당성을 검토하였다. 또 경인고속철도 건설구간인 충남 연기군의 운주터널 및 고등터널에서는 총 38지점 152세트의 내공변위 및 천단변위 계측치를 획득하였으며, 굴착시점으로부터 0.6 m 이상 떨어진 지점으로부터 계측이 시작되었고 이것은 대략 1일~수일 정도의 시간이 경과된 후부터이다. 본 연구에서는 자료의 정확도를 위하여 가장 정밀하게 계측된 운주터널과 고등터널에서 10 m 미만의 거리때부터 계측이 시작된 자료만을 선정하여 회귀분석하였다.

수평변위와 천단변위에 대해 굴착시간 및 막장 진행거리의 변화에 따른 지수함수 및 분수함수식을 적용하여 회귀분석하고 변위를 추정하였으며, 또 선형회귀분석에 의해 계측된 변위를 추정하였다.

분석 결과 얻어진 파라메타들 즉, C<sub>0</sub>, U<sub>a</sub>, U<sub>1D</sub>, U<sub>2D</sub>, U<sub>m</sub>, U<sub>L</sub>, U<sub>final</sub> 사이의 상관성을 고찰하였다. 특히 빠른 역해석을 위하여 U<sub>1D</sub> 값과 다른 파라메타 값들 간의 관계를 고찰하였다.

최종변위량 U<sub>final</sub>의 경우 회귀분석에 의하여 구해진 미계측 구간 변위인 C<sub>0</sub>, 실제측 변위값인 U<sub>m</sub>, 그리고 굴착전 선행변위 U<sub>a</sub>로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{final} = C_0 + U_m + U_a$$

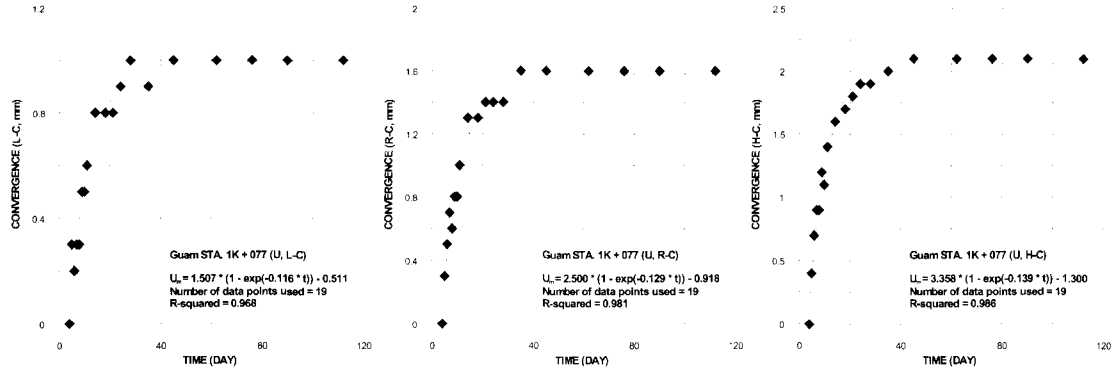


Fig. 2. Results of regression on the left-conv. and right-conv. and horizontal-conv. (Guam)

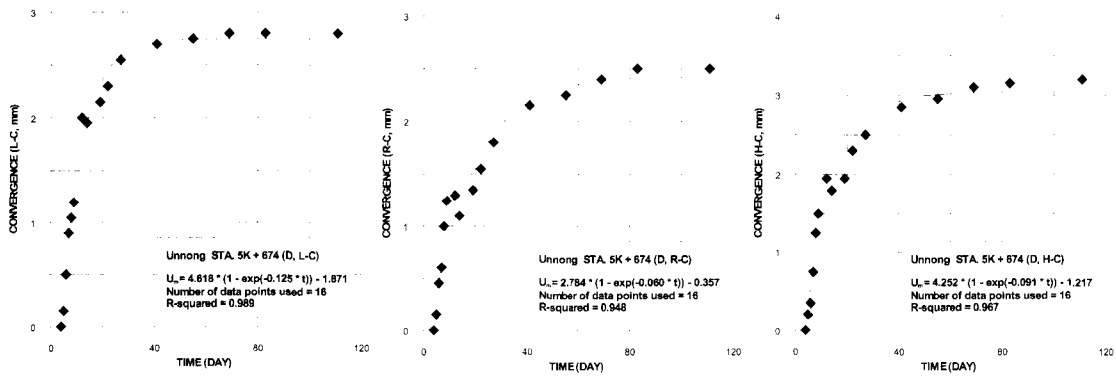


Fig. 3. Results of regression on the left-conv. and right-conv. and horizontal-conv. (Unnong)

여기서 굴착전 선행변위를 본 연구대상 암반이 탄성 및 탄소성 거동을 하는 것으로 가정하여 최종 변위량 ( $U_{final}$ )의 30%가 될 것으로 가정하면 식 (1)이 산출된다.

$$U_{final} = \frac{C_0 + U_m}{0.7} \quad (1)$$

### 3. 변위 예측

실제 측정된 내공변위를 지수함수에 대해 회귀분석을 할 때는 측정 전 내공변위( $C_0$ )가 고려되어야 하며 회귀 분석시 미지수가 되어 해석에 포함되어야 한다. 따라서 실제 측정된 내공변위  $U_m$ 은 최초 계측시점 전에 발생한 변위를 고려하여 내공변위에 대한 지수함수로 나타내면 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$U_m = C(x, t) - C_0 \quad (2)$$

여기서,  $U_m$  : 실제 측정된 내공변위

$C_0$  : 측정 전 내공변위

$x$  : 막장거리

$t$  : 막장거리 진행시까지의 시간

본 연구에서의 회귀분석은 우선 운농터널과 고등터널의 경우 굴착시간의 진행에 따른 좌대각(L-C), 우대각(R-C), 수평(H-C) 변위의 계측값들을 지수함수식을 적용하여 회귀분석을 실시하였고, 그 결과를 토대로 하여 지수함수식의 적합성을 고찰하였으며, 운주터널과 고등터널의 계측 자료 중에서는 내공변위 중 수평변위와 천단변위의 두 계측 자료를 통하여 회귀분석하였다. 이 두 터널에서는 굴착시간 및 막장면으로부터 거리에 대하여 지수함수식 및 분수함수식을 이용, 회귀분석하였고 그 결과를 이용하여 획득한 각 파라미터들 사이에 선형회귀분석을 실시하여 상관관계를 고찰하였다.

실제 측정된 내공변위를 모델함수에 의해 회귀분석을 할 경우 측정 전 내공변위  $C_0$ 를 고려하여야 한다.

즉 실제 측정된 내공변위를  $U_m$ 이라 한다면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_m(x) = A\{1 - \exp(-Bx)\} - C_0 \quad (3)$$

식 (3)에 의하여 구암터널 및 운봉터널의 좌, 우, 수평 내공변위를 회귀분석한 결과 Fig. 2, Fig. 3과 같이 나타났다.

회귀분석에서는 연구 대상 지역을 탄성암반으로 보고 탄성해석을 실시하였으며, 결과에서 보듯이 식 (3)의 지수함수식에 의한 회귀분석 결과 그 적합도가 0.90~0.99 사이로 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 터널이 굴착되고 있는 기반암이 대부분 경암을 통과하는 경우 시간에 따른 지수함수의 적용이 적합한 것으로 판단되며, 운주터널과 고등터널에서도 터널의 입구를 제외하고 대부분 구간에서 경암지역을 통과하므로 탄성암반 내지는 탄소성 암반으로 가정하여 굴착시간과 막장으로부터의 거리에 따른 지수함수와 거리에 따른 분

수함수를 함께 적용하여 비교, 고찰하였다.

Fig. 4~Fig. 5는 운주터널에서 실제측된 내공변위 중 수평변위와 천단변위의 시간 및 거리에 따른 변화를 지수함수와 분수함수로써 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다. 회귀분석 결과 지수함수와 분수함수를 적용한 운주터널의 대부분의 구간에서 그 적합도가 0.90~0.99를 보이는 것으로 확인되었다.

#### 4. 회귀분석 결과

##### 4.1 선형회귀분석

###### (I) $C_0$ 예측

$C_0$  값을 추정하기 위하여 내공변위와 막장거리(굴착 시간)의 관계에서 굴착 직후부터 최초 계측시점까지의 변위 증가경향이 최초 계측시부터 막장거리 1D까지의 변위 증가경향과 일치한다고 가정하 기존 연구에 의하면,  $U_{1D}$ 와  $C_0$  사이가 직선적인 관계라는 것을 의미하며, 이는 Fig. 1에서 보는 바와 같다.

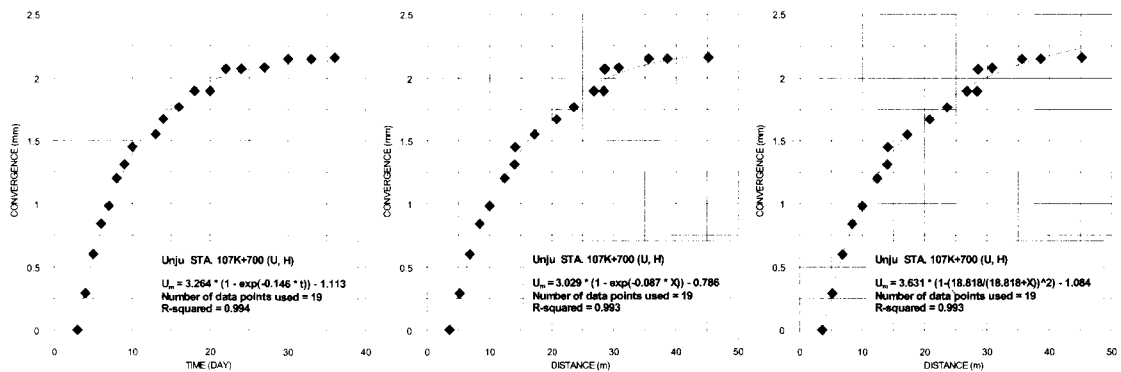


Fig. 4. Results of regression on the horizontal-convergence (Exponential & Fractional function).

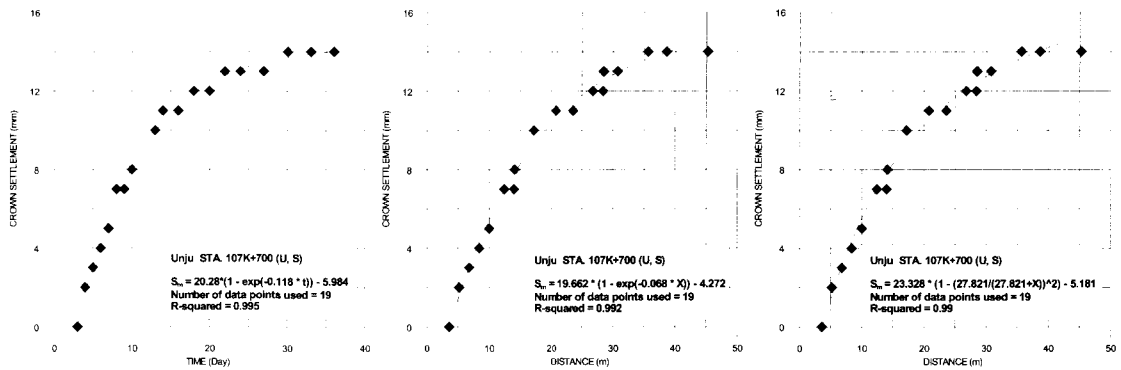


Fig. 5. Results of regression on the crown settlement (Exponential & Fractional function).

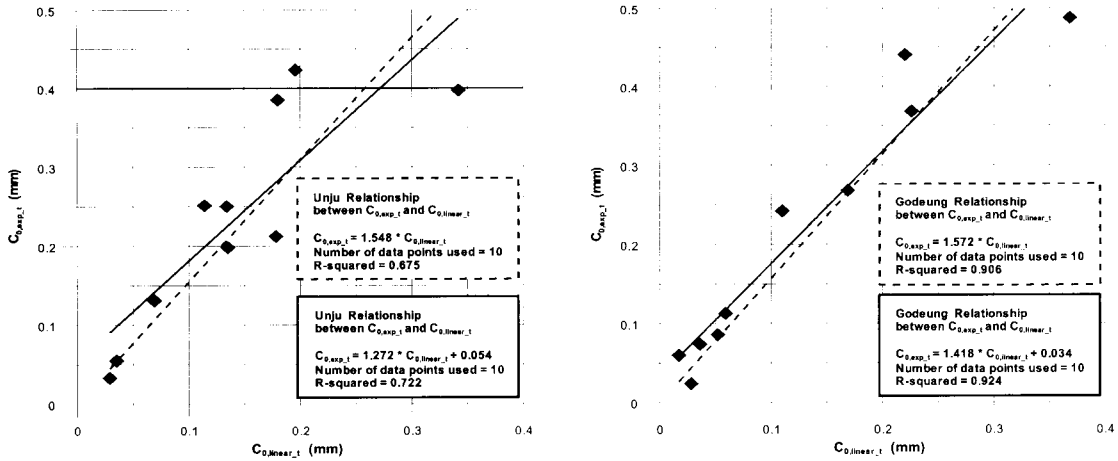


Fig. 6. The result of linear regression between  $C_{0,exp,t}$  and  $C_{0,linear,t}$

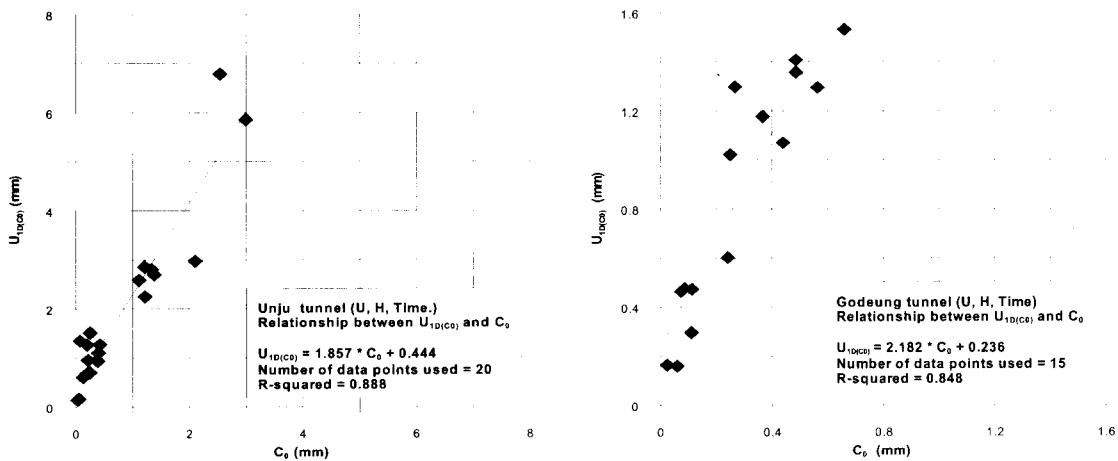


Fig. 7. The relationship between  $U_{1D(C_0)}$  and  $C_0$  on time (Exponential).

그러나 운주터널과 고등터널의 계측 자료 중 수평내 공변위(H-C)를 계측점으로부터 막장면까지 1D가 될때까지의 계측값을 굴착시간과 막장거리로 구분하여 선형회귀분석한 결과 추정된  $C_0$ 값은 부(-) 또는 양(+)의 값으로 나타났다.

또한 이를 지수함수, 분수함수로 추정한 값과 비교한 결과, 선형회귀분석으로부터 추정된  $C_0$ 값이 지수함수 및 분수함수를 통한 회귀분석에서 획득한  $C_0$ 값보다 약 1.5~3배 가량 적게 평가됨을 알 수 있었다. 따라서 계측된 변위 구간을 선형으로 가정하여  $C_0$ 값을 추정하는 방법은 반드시 적합한 방법은 아닌 것으로 결론지을 수 있다. Fig. 6은 선형함수로 가정하여 추정된  $C_0$ 값과 지수함수로 추정된  $C_0$ 값을 비교한 그래프이다.

(2)  $U_{1D}$ 와  $C_0$ 의 선형 회귀분석

운주터널과 고등터널에서 각각 20개 지점, 17개 지점에서 계측된 변위에 대하여 막장거리 1D에서 발생한 실측 변위  $U_{1D}$  값에 추정된  $C_0$  값을 포함시켜  $C_0$  값과 비교(Fig. 7)한 결과, 운주 터널의 경우 근접 지점에서 계측된 변위의 경우 서로 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 심한 변위를 보이는 갱구부 근처 자료를 제외하면 그 적합도가 향상하는 것으로 나타났다. 고등 터널의 경우도 같은 방법으로 막장거리 진행에 따른 지수함수식 및 분수함수식에 의해 추정된  $C_0$  값과  $U_{1D}$ 의 값을 비교한 결과, 비슷한 결과를 나타내고 있는 것으로 나타났으며, 그 적합도는 0.85~0.93로서 비교적 높게 나타났으며,  $U_{1D}$ 는  $C_0$ 값의 약 0.9~1.5 배

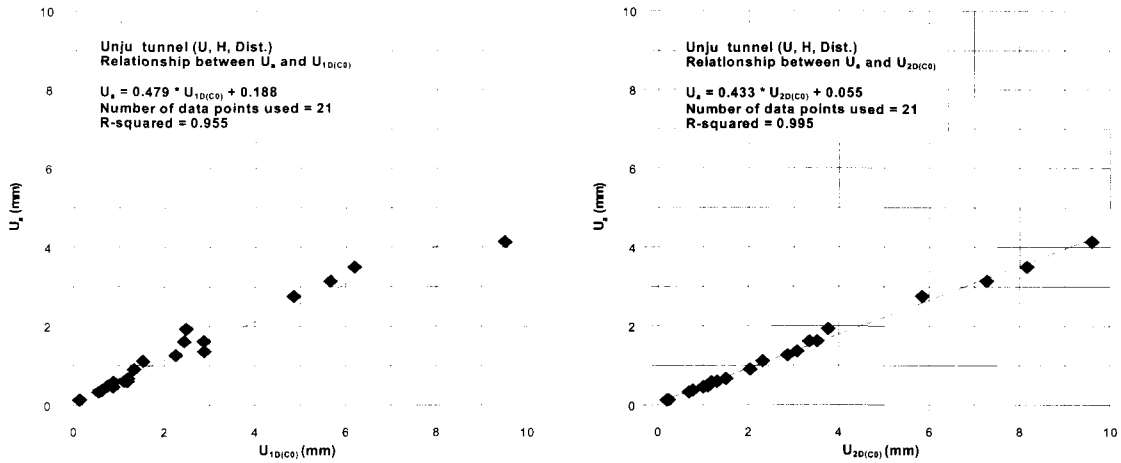


Fig. 8. The relationship between  $U_a$  and  $U_{1D(C0)}$  or  $U_{2D(C0)}$  (Expo. func.).

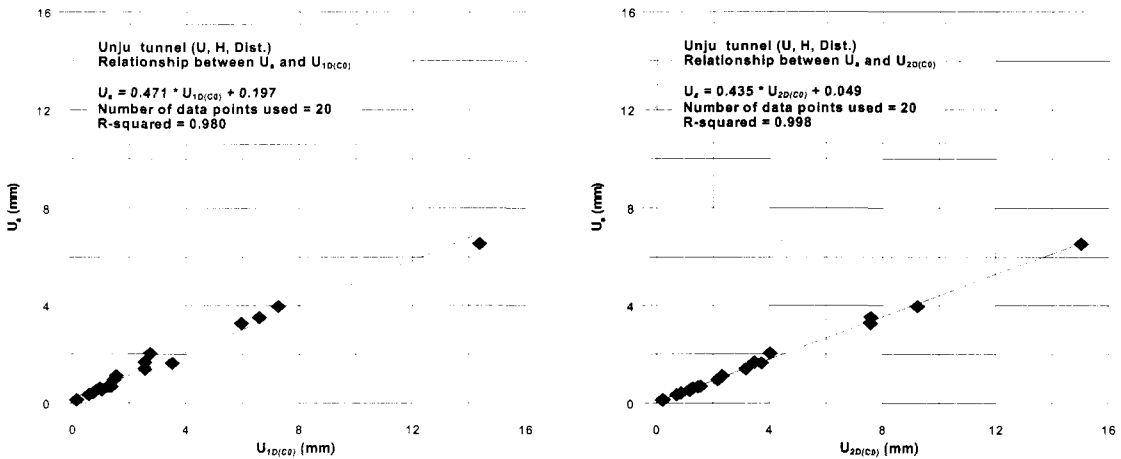


Fig. 9. The relationship between  $U_a$  and  $U_{1D(C0)}$  or  $U_{2D(C0)}$  (Frac. func.).

의 값을 보였다.

**(3)  $U_a$  와  $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$ 의 선형 회귀분석**

막장거리로부터 1D와 2D에서 계측된 변위  $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$ 와 굴착전 선형변위  $U_a$  사이의 상관관계를 각 회귀식(지수함수식, 분수함수식)으로부터 추정된  $U_a$  값과  $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$  값을 선형회귀분석하여 그 상관관계를 조사하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 운주터널의 계측자료를 이용한  $U_a$ 값과  $U_{1D(C0)}$ ,  $U_{2D(C0)}$ 사이의 선형회귀분석 결과이다. 그 결과 적합도가  $C_0$ 를 포함한  $U_{2D}$ 의 경우  $U_a$ 와 높은 상관관계( $R^2 = 0.95 \sim 0.99$ )를 보였다. 그리고  $U_{1D}$ 에서보다는  $U_{2D}$ 에서 계측된 내공변위를 통해  $U_a$  값을 추정하는 것이 더 바람직한 것으로 나타

났으나,  $U_{1D}$ 에서 실측된 변위로부터  $U_a$  값을 추정하는 것 역시 높은 상관관계를 보이므로 충분히 그 목적을 달성할 수 있으리라 판단된다.

**(4)  $U_{final}$  과  $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$ 의 선형 회귀분석**

역해석이 의미가 있기 위해서는 계측점으로부터 1D 정도의 굴착이 이루어지는 동안 발생된 내공변위로부터 최종 변위를 예측하는 것이 더욱 현실적이다. 본 연구에서는 시공된 터널에서 계측한 변위( $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$ )와 최종수렴변위( $U_m$ )를 지수함수식과 분수함수식으로 회귀분석함으로써 최종 변위( $U_{final}$ )를 예측하였고, 이 때의  $U_{1D}$  또는  $U_{2D}$ 와  $U_{final}$  사이를 선형회귀분석하여 이들 파라메타 간의 상관관계를 고찰하고 역해석에서

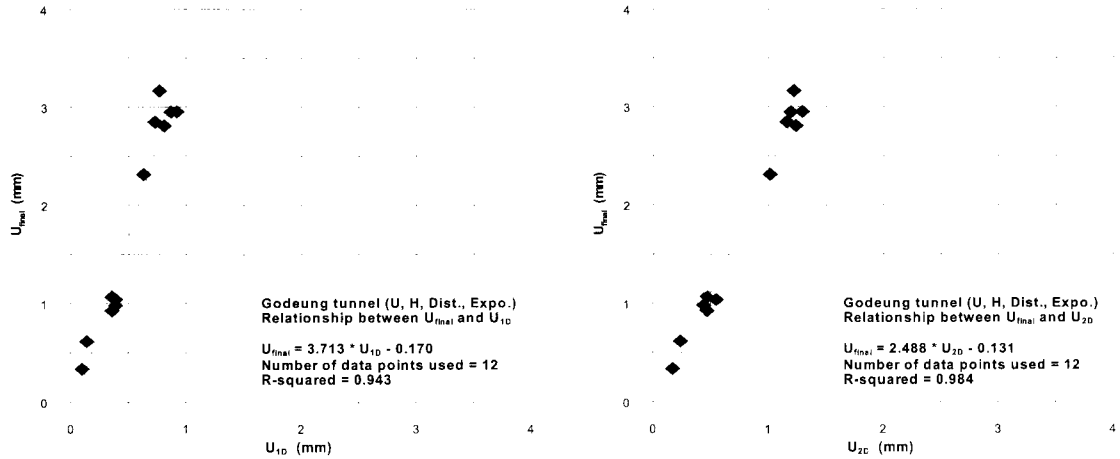


Fig. 10. The relationship between  $U_{final}$  and  $U_{1D}$  or  $U_{2D}$ .

의 적용성을 알아보았다.

Fig. 10은 고등터널에서 거리에 따른 지수함수식을 적용한  $U_{final}$ 과  $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$ 사이의 관계를 나타내고 있다. 회귀분석 결과 막장거리 1D 또는 2D에서 계측된 내공변위와 최종변위 사이에는 각각 0.88~0.94 와 0.92~0.97로 상당히 높은 상관관계를 보이고 있다. 이러한 관계는 정 등(1998)의 결과와도 유사하다. 그러므로 어느 현장에서 몇몇 구간에 대하여 1D 또는 2D에서의 계측 변위와 최종변위가 구해지면 이로부터 초기 계측치와 최종변위의 관계식을 도출할 수 있고 이를 이용하여 인접 구간의 초기 계측치로서 최종변위를 예측할 수 있으며, 따라서 이를 이용한 역해석 적용이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

오늘날 터널 등 암반구조물의 역해석에서 입력변수로 사용하는 총변위를 구하기 위해서는 너무 긴 시간이 필요하게 되므로 이를 각종 모델함수로 추정하였으나, 이 역시 현장에서의 적용하기에는 상당한 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 먼저 이 함수들의 적합성을 고찰하고 초기에 계측된 변위를 통하여 총변위를 추정하는 방법을 모색하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 계측된 내공변위 및 천단변위를 시간 및 거리에 따른 지수함수와 막장거리 진행에 따른 분수함수로 회귀분석한 결과 그 상관계수가 각각 0.90~0.99와 0.84~0.99로 대상 터널지역과 같은 경암 지대는 지수함수 및 분수함수를 사용한 회귀분석이 적합한 것

으로 판단하였다.

- 2) 막장거리가 1D인 지점까지의 계측 변위를 이용하여 시간 및 거리에 따른 선형회귀분석한 결과 상관계수는 0.87~1.00이고 대부분 0.95 이상으로 나타났다. 그러나 이 선형회귀분석을 통하여 추정된  $C_0$  값은 지수함수 및 분수함수에 의하여 추정된  $C_0$  값보다 1.5배~3배 정도 작은 크기를 나타내므로 선형회귀분석을 통하여  $C_0$  값을 추정하는 기존 연구의 가치는 불합리한 것으로 고찰되었다.
- 3) 지수함수와 분수함수로부터 추정된 변위들과 실제 현장에서 계측된 변위들 간에는 대체로 높은 상관성을 보이고 있고, 특히  $U_{1D}$ ,  $U_{2D}$  와  $U_{final}$  사이에도 높은 상관관계를 보이므로, 변위가 수렴하기 전인 1D 또는 2D 지점까지의 변위량으로 최종변위량을 추정할 수 있었다. 따라서 현장 터널에서 미굴착 구간의 발생 변위에 대하여  $U_{1D}$  또는  $U_{2D}$ 로부터 최종변위량을 산정하고 이를 역해석의 입력변수로 하여 해석하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김호영, 박의섭, 1993, 터널 내공변위의 이론과 계측결과 분석, 터널과 지하공간 3, 80-95.
2. 이연규, 이정인, 1997, 단단계 터널굴착시 계측된 증분변위를 이용한 역해석 기법의 개발, 한국지반공학회지 13.1, 123-136.
3. 정형식, 김성환, 이상돈, 김낙영, 1998, 통계적 방법에 의한 터널 최종변위량 예측에 관한 연구, 한국지반공학회 98년 춘계 학술발표논문집, 347-356.
4. 허중석, 이정인, 조태진, 이연규, 1996, 연암에 굴착되는

터널의 계측변위를 이용한 역해석, 한국자원공학회지 33, 438-447.

5. Panet M. & A. Guenot, 1982, Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunnelling 82, IMM, Brighton, 197-204.
6. Panet, M., 1979, Time-dependent deformations in underground works, 4th Int. Cong. on Rock Mechanics, ISRM,

Montreux, Vol. 3, 279-289.

7. Sulem, J., M. Panet & A. Guenot, 1987, Closure analysis in deep tunnels, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 24.3, 145-154.
8. Sulem, J., M. Panet. & A. Guenot, 1987, An analysis solution for time-dependent displacements in a circular tunnel, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 24.3, 155-164.

### 송 승 곤



2000년 전남대학교 공과대학 자원공학과 졸업  
재미

Tel:  
E-mail: kkkevinj@hotmail.com  
현재 전남대학교 대학원 자원공학과 졸업

### 양 형 식



1979년 서울대학교 자원공학과, 공학사  
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@chonnam.ac.kr  
현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

### 임 성 식



2001년 전남대학교 공과대학 자원공학과, 학사

Tel: 062-530-0824  
E-mail: 1773ss@hanmir.com  
현재 전남대학교 대학원 자원공학과 석사과정

### 정 소 걸



1975년 서울대학교 자원공학과, 공학사  
1982년 Nancy Ecole Des Mines(in France), 공학석사  
1984년 Orleans 대학 (in France), 공학박사

Tel: 042-868-3231  
E-mail: skchung@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 탐사개발연구부 부장