

초기계측 시점이 터널 내공변위 예측에 미치는 영향분석

김광염, 김호근, 서용석*

Influence of Zero Reading on Predicting Crown Displacement of Tunnel

Kwang-Yeom Kim, Ho-Geun Kim, Youg-Seok Seo*

Abstract Deformation behaviour of rock mass around an opening measured during tunnel excavation is very important in order to assess the stability of the tunnel. Unfortunately displacement measured only after the installation of displacement measuring device can be acquired, which results in inevitably excluding the pre-displacement occurred and accumulated before the displacement measuring devices are installed. So it is very important to consider the pre-displacement based on the elapsed time before zero reading after deformation behaviour started. In this study, the accuracy of total estimated displacement depending on the distance between face and measurement position is calculated by statistical non-linear fitting on measurable displacement data. Besides, the influence of the unavoidable measurement error is considered by using Monte-Carlo simulation. As a result, the faster the initial reading started and the smaller the measurement error is, the higher the accuracy of estimating total displacement is obtained.

Key words Tunnel, Zero reading, Pre-displacement, Measurement error

초 록 터널 굴착에 의해 발생하는 주변 지반의 변위는 터널의 안정성 평가를 위해 중요한 정보가 된다. 실제 시공중 계측에 의해 획득되어 지는 변위량은 불가피하게 계측전 발생한 변위를 포함하지 못하게 된다. 따라서, 계측이 이루어진 시점을 고려하여 계측전 발생한 변위량을 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 초기 계측이 이루어진 시점에 따라 계측전 변위 예측의 정확도를 굴착면과 계측지점의 이격거리만을 고려하여 통계적 기법으로 고찰하였다. 또한, 계측 오차가 변위 예측결과에 미치는 영향을 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 살펴 보았다. 연구결과 초기 계측이 이루어진 이격거리가 커질수록 전체 변위 이력곡선의 예측 정확도는 급격히 감소 하였으며, 계측오차가 커질수록 예측 정확도가 낮아지는 경향을 확인하였다.

핵심어 터널, 초기계측, 계측전 변위, 계측 오차

1. 서 론

터널 굴착에 의해 터널 주변의 응력은 재분배 되며, 터널 내부로의 변위를 발생시킨다. 내공변위의 양상은

굴착방법, 현지응력, 암반조건, 터널의 형상 및 방향에 따라 다르게 나타난다. 굴착에 의한 암반의 변형거동은 터널의 안정성과 지보방법의 결정 등에 가장 중요하게 고려되어야 한다. 터널 굴착에 의한 암반의 변형에 따른 지보의 결정은 주로 암반-지보 상호 반응곡선(rock-support interaction curve)에 의해 설명될 수 있다(Hoek 등, 1995). 즉, 지보재가 설치되어 암반과 일체화 되어 거동을 하게 되기 전까지는 암반의 자체 지보능력에 따른 응력 이완을 허용하며, 터널이 탄성적 거동에서 탄 소성 거동으로 넘어가는 적절한 시점에 지보재가 설치 되면 경제적이고 안정적인 시공이 가능하게 된다.

터널 굴착 후 슛크리트나 록볼트 등의 지보가 설치되기 전에 암반의 자체 지보능력을 통해 터널의 변형이

Received: Jun. 19, 2012

Revised: Jun. 27, 2012

Accepted: Jun. 27, 2012

*Corresponding Author: Youg-Seok Seo

Tel) +82432612765, Fax) +82432769645

E-Mail) ysseo@cju.ac.kr

Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, 52 Naesudong-go, Heungdeok-gu, cheongju Chungbuk 361-763, Korea

수렴 된다면 터널 내공변위는 터널 막장에서 이격거리가 증가할 수록 점점 증가하게 된다. 굴착전 발생하는 변위를 선행변위라 하며 다양한 연구자들(Panet과 Guenet, 1982; Hanafy와 Emery, 1980; Vassilev와 Hrisstov, 1988)에 의해 선행변위의 비율은 전체변위의 약 20-30% 내외 인 것으로 보고되고 있다. 선행변위의 중요성 때문에 터널 현장에서 수평경사계를 이용하여 선행변위를 계속하고자 하는 연구도 수행되어 왔다(김광염 2007; 김주화 등, 2008).

이와 같이 터널의 안정성 평가를 위해 내공변위를 고려하는 경우 선행변위는 굴착 전 암반의 거동을 파악할 수 있는 중요한 정보가 된다. 하지만 터널 시공 중 내공변위 계측은 굴착이 종료된 이후 초기 계측이 시작되기 때문에 선행변위의 직접적인 측정은 쉽지 않다. 이러한 이유로 굴착 후 변위 계측을 통해 선행변위를 포함한 계측전 변위 및 전체 변위의 양상을 파악하려는 노력이 진행되어 왔다.

Hanafy와 Emery(1980)에 의하면 크립(creep)을 고려한 경우에는 내공변위의 크기와 함께 굴착이 암반에 미치는 영향거리(influence region)가 증가한다. 따라서 터널 주위 암반의 변위 해석시 암반의 탄소성 또는 점탄성적인 변형거동의 필요성을 주장하였다. Kaiser(1980)에 의하면 시간의존적 변형거동을 보이는 암반에서의 터널의 변형은 점진적 파괴(progressive failure)-암반의 시간의존적 강도특성 변화에 기인, 시간의존적 변형-암반의 시간의존적 강성도 변화에 기인, 과지압 암반에서 소성영역의 발생 양상과 내공변위의 형태-하중 이력에 따라 결정-의 세가지 경우로 나타난다고 하였다. 앞의 두 가지 문제는 점성을 고려할 해석의 필요성을 나타내며 세번째 문제는 소성을 고려할 필요가 있음을 의미한다. Lombardi(1979)는 층리가 심한 세일 층에 굴착된 Gothard 도로 터널에서 125일 동안의 계측 결과를 두개의 Bingham 모델과 한 개의 탄성요소를 직렬로 결합한 점소성 모델로써 해석하였으며 본 모델이 점진적 파괴를 나타내는 터널에서의 계측결과에 잘 부합한다고 하였다.

Sulem 등(1987)은 굴착면 영향거리와 시간의존적 변위를 결합한 내공변위 함수를 제안하였으며, 이 함수식을 Frejus 터널과 Las Planas 터널의 계측결과에 적용하여 좋은 결과를 얻었다. Sellner(2000)는 변위함수의 주요 상수를 결정하기 위한 방법론으로 외삽예측법(extrapolation prediction method)과 순수예측법(Pure prediction method)을 제안하기도 하였다. 김창용 등(2003)은 3차원 유한요소해석을 통해 이방성 암반과 비균질 암반에서의 변위함수 회귀식 상수의 변화양상을

파악하였으며 결과적으로 변위 함수 회귀식 상수가 전방의 암반 특성과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 김치환(2010)은 터널에서 실제로 계측된 변위를 내공변위 함수 회귀를 통해 최종변위를 예측하기도 하였다.

이와 같이 내공변위 계측 및 분석에 관한 많은 연구가 지금까지 진행되어 왔지만, 내공변위의 측정시점에 따른 내공변위 예측의 정확도에 대한 연구는 아직까지 이루어지지 못한 실정이다. 굴착 후 급격하게 내공변위의 증가가 발생하기 때문에 초기 계측치의 측정 시점에 따라 전체 내공 이력곡선 예측이 달라질 가능성이 높다. 본 연구에서는 초기 계측의 시점 중 시간 의존적 거동 특성을 배제하고 굴착 영향거리 관련 인자만을 고려하여 계측 시점에 따른 선행변위 예측 결과를 통계적 기법을 이용하여 고찰하였다.

2. 균질 등방 암반의 굴착에 따른 천단 변위 양상

일반적으로 굴착에 따른 터널의 거동 양상은 단기 거동(short-term behavior)과 장기 거동(long-term behavior)으로 나눌 수 있다. 단기 거동은 굴착 직후 주변 지반의 응력 상태변화에 따른 변위 발생을 의미하며, 장기 거동은 시간 의존적 거동 특성 및 소성 변형에 의한 굴착 영향 범위가 커짐으로서 발생하는 거동을 의미하게 된다. Fig. 1과 같이 굴착 전 평형 상태에 있던 굴착면 주변의 응력 상태가 굴착면에서의 응력해방에 따라 평형 상태가 깨지면서 변형이 일어나게 되는 것이다. 이러한 변형은 완전 탄성 상태의 변형(안정상태)과 탄소성 상태에서의 단기적 안정성만 확보된 채 지보 등의 방법이 필요한 단기 안정 상태 변형 및 급격한 변위 발생으로 인한 소성 거동으로 붕괴 등이 야기 되는 불안정 상태

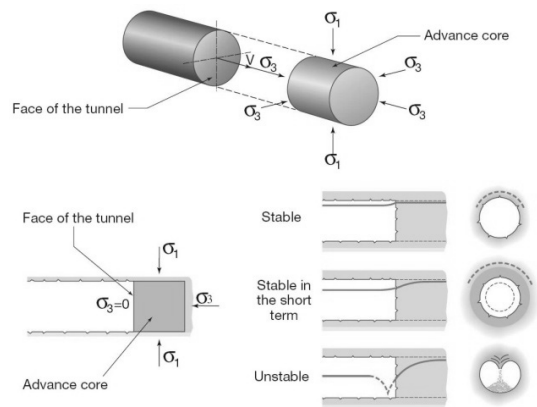


Fig. 1. Definitions of deformation and behaviour of tunnel (modified after Lunardi, 2000).

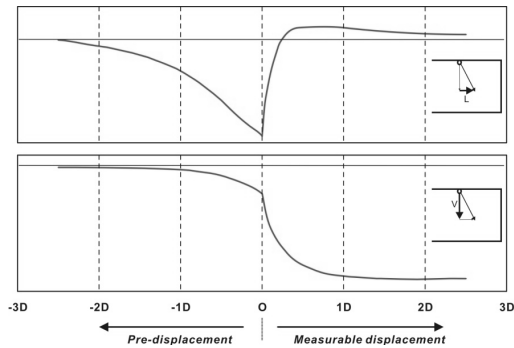


Fig. 2. Typical crown displacement (upper : longitudinal, lower : vertical)

의 변형으로 나뉘게 된다.

굴착 거리의 점진적 증가에 따른 터널 천단에서의 변형거동을 자세히 확인하기 위하여 1회 굴진장을 터널 직경의 1/20의 크기로 하여 3차원 FEM 탄성해석을 수행하였다. Fig. 2는 천단에서 발생하는 변위벡터의 크기와 방향을 나타내고 있다. 터널 시공 중 신속하게 타격을 설치하고 변위를 계측한다 하더라도 굴착면으로부터 일정 거리를 이격하여 설치할 수 밖에 없기 때문에 굴착면 부근에서의 변위벡터 방향성의 변화 양상은 아주 중요하다. 굴착 직후 굴착면 천단에서의 변위 방향은 굴착방향 반대방향으로 발생하며 굴진면으로부터 약 0.3D 지점에서부터 변위 방향성이 굴착방향으로 변하게 된다. 굴착 초기의 이러한 변위 벡터의 급격한 방향성 변화 때문에, 변위 벡터의 방향성을 분석할 경우 계측지점과 굴착면 까지의 거리 정보는 중요하게 된다.

현장에서 실제 계측시 천단변위의 벡터 방향성(수직, 수평성분)을 고려하기가 쉽지 않으므로 합벡터 성분만을 고려하는 경우가 많다. Fig. 3은 천단에서의 굴착 진행에 따른 변위 벡터에 대한 상세한 변화를 도시한 것이다. 1회 굴진에 의해서 발생하는 변위의 크기는 계속해서 줄어들고 있으며, 방향 역시 계속 변화함을 알 수 있다. 처음 변위가 발생하기 시작하는 것은 굴진면에서 약 2D 정도에 위치한 P_0 지점이다. 그후 $P_1 - P_3$ 까지 굴착면이 점차 가까워지면서 변위는 굴착 반대 방향으로 변위 증가 속도가 증가하게 된다. 이때까지 발생한 변위를 통상적으로 굴착전 변위 또는 선행변위(pre-displacement)라고 말한다. 선행변위 중 수직 성분(침하량)만을 고려하였을 경우 전체 변위의 약 25% 정도로 나타났다. 계측지점까지 굴착이 이루어진 후 변위는 방향 및 크기에 있어 급격한 변화를 보인다. P_3 에서 P_4 까지 변위가 발생하는 동안 굴착면은 0.05D 만큼 추가 굴착이 이루어졌을 뿐이다. 하지만, 이 짧은 구간에서의 수직 침하량은

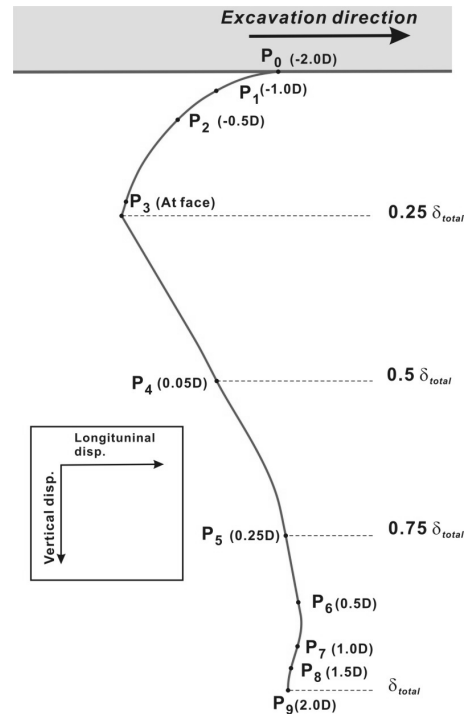


Fig. 3. Variation of displacement vector orientation on crown

전체 변위의 약 25%, P_0 로부터 누적변위로 계산하였을 경우 50%에 이르게 된다. 계측 지점이 굴착면 후방 0.25D에 도달하는 P_3 까지는 전체변위 중 약 75%가 발생하게 된다. 이러한 변위의 급격한 증가는 굴착면에서 0.5D 지점까지의 구간 내에서 뚜렷한 양상을 보인다.

본 연구에서와 같이 균질암반에서의 굴착 일 경우에도 하나의 측정에서의 변위의 양상은 매우 복잡한 양상으로 나타난다. 따라서, 초기 계측을 어느 시점에 수행하느냐가 변위 분석에 있어서 큰 영향을 미치게 된다. 또한, 이러한 총변위에 따른 상대변위량은 지반의 조건에 따라 달라질 수 있지만 굴착 직후 전체변위 중 상당한 양의 변위가 이미 발생한다는 것은 계측을 통해 계산된 변위량이 매우 적어 질 수 있음을 의미한다.

3. 초기 계측 시점에 따른 변위 예측 정확도 분석

3.1 일반적인 터널 변위 성분

일반적으로 터널의 거동양상은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있으며, 전변위는 U_{final} 이며, 굴착전변위는 U_a , 계측전변위는 C_0 , 계측변위는 C_m 이다. 실제로 우리가 계측을 통하여 얻을 수 있는 값은 계측기의 설치시기와 이격거리의 영향으로 C_m 에 불과하며, U_{final} , U_a , C_0 은

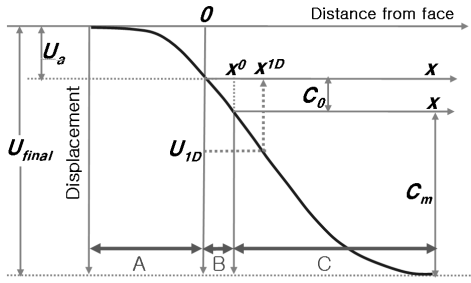


Fig. 4. Classification of displacement (Parnet and Guenet, 1982)

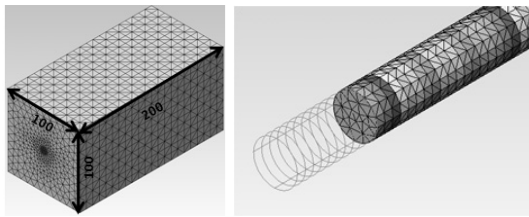


Fig. 5. Geometry of 3D FEM mesh

측정할 수 없다. 특히, 이격거리에 따라 계측을 통해 얻을 수 있는 변위의 양이 달라진다. 이격거리가 클 경우 계측전변위의 양이 크게 늘어나 계측변위의 양이 작으며, 이격거리가 짧을수록 계측전변위의 양이 작으며, 계측변위의 양은 커진다. 이는 계측변위를 사용하여 앞의 전변위, 굴착전변위, 계측전변위를 예측하기 때문에 굴착면에서 초기 계측시점까지의 이격거리는 매우 중요하다.

3.2 해석 모델

지반 및 터널 구조물 해석 시스템인 MIDAS/GTS를 이용하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 해석시 터널의 직경(D)은 10 m 원형터널로 탄소성해석을 실시하였고, 지반은 등방성으로 가정하였다. 지반은 터널 중심으로부터 상, 하부와 좌, 우측부는 터널직경의 5배인 가로 10D, 세로 10D, 길이 20D가 되도록 모델을 구성하여 모델 경계에 의한 영향을 최소화하였다. 경계조건은 측벽은 수평방향, 모델하부는 연직방향, 모델후면은 터널 축 변위를 구속하였다. 지반 물성은 탄성계수(10 GPa), 단위중량(2.55 ton/m³), 점착력(2.0 MPa), 포와송비(0.22), 내부마찰각(42°) 이다. 본 연구에서는 절대적인 변위량이 아닌 총 변위량과의 상대적인 변위비를 고려하여 분석을 수행하고자 하였다. 따라서, 지반 물성의 변화에 따른 영향은 고려하지 않았다.

3.3 초기계측시점에 따른 변위 예측 결과

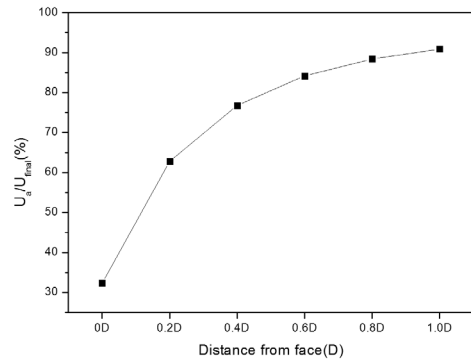


Fig. 6. The ratio of pre-displacement to final displacement under the condition of elasto-plastic state

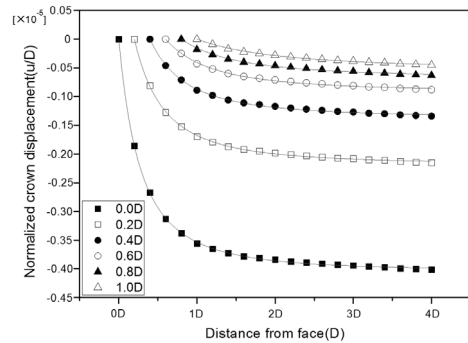


Fig. 7. Displacement history depending on zero reading location with non linear curve fitting result

김광염(2007)에 의하면 균질한 압반의 경우 강성이 달라질 경우 굴진면에서 거리에 따른 변위의 절대량은 차이가 있으나, 총 변위 대비 굴착 영향 거리는 동일한 것으로 나타났다. 이에 기초하여 본 수치해석을 통해 분석된 천단에서의 변위량에 대하여 계측시점(굴착면으로 부터의 이격거리)에 따른 전변위와 굴착전 변위비의 관계를 도출하였다(Fig. 6).

본 연구에서 변위 예측을 위해 사용한 변위 함수모델은 탄소성을 사용한 식 (1)과 같다. 시간 의존적 특성을 배제하고 거리에 의존하여 선형변위를 측정하였다. 실제 시공 중 계측하게 되는 변위에서 획득 가능한 정보는 굴착면으로부터 계측시점까지의 거리(이격거리), 측정시간, 초기계측 이후 발생한 변위량이 된다. 변위함수의 파라미터를 구하기 위해서는 초기계측 이전에 발생한 변위량에 대한 추정이 가장 중요하게 된다.

변위함수의 파라미터를 구하기 위하여 이격거리별 천단침하량을 Fig. 7과 같이 도시하고, 도시한 결과를 Levenberg-Marquardt 방법을 이용한 비선형 곡선 근사(non-linear

Table 1. Calculated total displacement function elements and accuracy of estimation

	Distance between face and zero reading point					
	0.0D	0.2D	0.4D	0.6D	0.8D	1.0D
Cx	-0.405	-0.219	-0.137	-0.092	-0.068	-0.053
X	5.524	7.449	9.143	11.817	14.530	21.247
C _m	0.405	0.219	0.137	0.092	0.067	0.053
C ₀	0.000	0.190	0.296	0.287	0.268	0.136
U _a	0.193	0.195	0.207	0.181	0.160	0.090
C ₀ + U _a	0.193	0.385	0.503	0.468	0.428	0.227
U _{final}	0.598	0.604	0.640	0.560	0.495	0.280
Accuracy(%)	99.317	99.795	93.721	93.091	82.248	46.450

curve fitting)를 실시하여 파라미터 Cx와 X를 구하였다.

Table 1은 이격거리별 선형변위 및 전변위를 예측한 것이다. 이격거리와 1회 굴착장은 모두 0.2D로 설정하였으며, 매 0.2D 굴착후 발생한 변위량을 구하였다. 식 (1)의 Cx는 변위곡선이 수렴하는 값을 나타내는 것으로 최종변위를 의미한다. 계측전 변위는 아래의 식 (1)에 비선형 곡선 근사를 통해 구한 파라미터를 적용하여 값을 구하였으며, 굴착전 변위(U_a)는 아래의 식 (2)를 이용하여 구하였다. 식 (2)는 앞서 Fig. 4의 전변위에 대한 굴착변위 비를 이용하여 나타낸 식이다. 선형변위의 경우 굴착전 변위와 계측전 변위의 합으로 사용하였으며, 전변위는 각각 구해진 값들의 총합으로 구하였다. 또한, 식을 이용하여 계산된 전변위를 해석결과 얻어진 전변위 값과 비교하여 정확도를 구하고 얼마나 정확한 값을 측정할 수 있는지를 확인하였다. Table 1에서 나타난 바와 같이 초기 계측 시점이 굴착면과 가까울수록 변위 예측 정확도가 높고 0.8D부터 급격히 감소함을 알 수 있다.

$$C(x) = Cx \left[1 - \left(\frac{X}{X+x} \right) \right]^2 \quad (1)$$

$$U_a = \frac{(C_0 + C_m) \times (U_a / U_{final})}{1 - (U_a / U_{final})} \quad (2)$$

3.4 계측오차와 초기계측 시점을 고려한 변위 예측 결과

현장 계측시에는 기계적 오차나 계측자에 의한 오차 등이 발생하며, 이러한 경우에 변위 예측에 미치는 결과를 분석해 보았다. 몬테카를로(Monte-Carlo, 이하 MC) 방법을 통해 앞서 수치해석으로 구한 천단변위 데이터를 재생성시켜 현장에서 발생하는 계측 오차를 재현하였으며 이를 통하여 해석 결과를 검증하였다. MC 기법

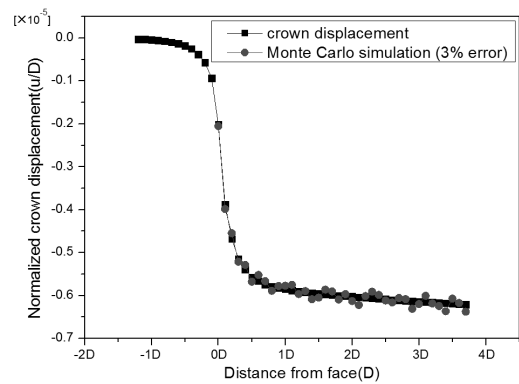


Fig. 8. Reconstruction of crown displacement data with 3% of measurement error : randomly simulated by the Monte-Carlo method

을 이용하기 위해서는 계측오차에 대한 확률분포함수를 정의하여야 하는데, 계측오차의 표준편차를 가지는 가우시안 분포를 가정하여 데이터를 생성시켰다. 계측 오차는 3%, 5%, 7%, 10%, 15%를 각각 가정하여 적용하였으며, 10개의 데이터를 무작위로 추출하였다. Fig. 8은 계측오차 3% 가정하여 생성된 굴착후 천단변위 데이터를 나타내고 있다.

MC 기법에 의해 생성된 계측데이터에 대한 비선형 곡선 근사를 이용하여 정확도를 분석한 결과는 Fig. 9(a)와 같다. 전반적으로 이격거리가 멀어질수록 정확도가 떨어지는 경향이 나타난다. 3%, 5%, 7%의 오차 적용을 했을 경우 0.8D까지 80%의 정확도를 보인다. 10%의 오차를 적용 시 0.0D와 0.2D를 제외하고 편차가 크게 나타났으며, 15%는 0.4D까지는 높은 정확도를 갖는다. 오차범위가 클수록 이격거리 0.0D와 0.2D를 제외하고 모든 이격거리에서 정확도의 편차가 큰 것으로 나

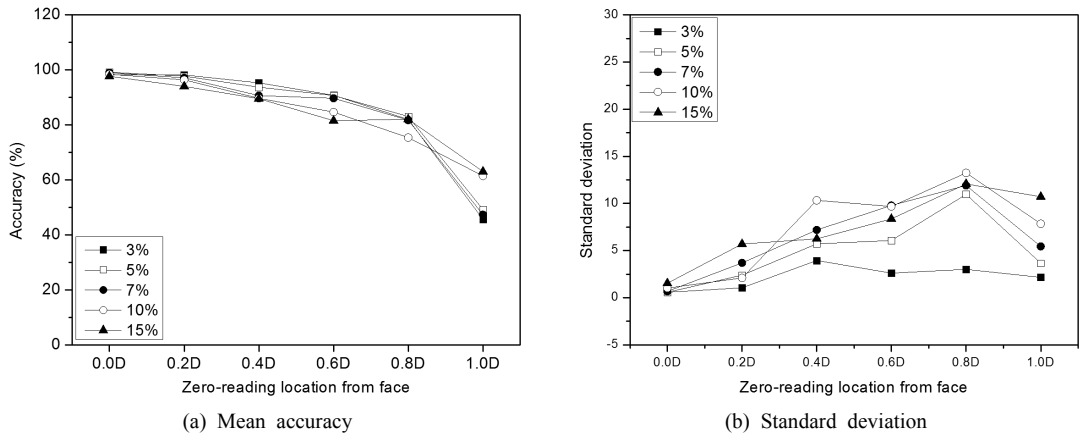


Fig. 9. Accuracy and standard deviation of displacement estimation in case of considering measurement error

타났다. 평균 정확도는 이격거리가 멀어지면 떨어지는 경향이 나타났으며, 표준편차는 오차범위가 클수록 높게 나타났다(Fig. 9(b)).

4. 결론

본 연구에서는 초기 계측의 시점 중 시간 의존적 거동 특성을 배제하고 굴착 영향거리 관련 인자만을 고려하여 계측 시점에 따른 계측전 변위와 전변위 예측 결과를 통계적 기법을 통하여 분석을 하였다. 계측 데이터는 수치해석을 통한 이상적인 경우를 가정하여 생성하였다. 또한, 실제 시공현장에서 발생하는 계측 오차를 고려하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 인위적인 계측오차를 갖는 변위 데이터를 생성하여 초기계측 시점에 따른 변위 예측 정확도도 분석하였으며 결과는 다음과 같이 나타났다.

1. 탄소성 변위함수식을 사용하여 선행변위 및 전변위를 예측한 결과, 이격거리가 클수록 전변위의 정확도가 낮게 나타났다. 특히, 0.8D 이후에서는 변위 예측 정확도가 50%수준까지 급격히 떨어졌다.
2. 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 계측 오차범위 3%, 5%, 7%, 10%, 15%를 적용하여 변위 예측 정확도를 검토한 결과 계측 오차를 고려하지 않았을 경우에 비해 다소 낮은 정확도를 나타냈다. 이 경우에도 0.8D 이후에 계측 정확도가 급격히 떨어지는 동일한 경향을 보였다.

본 연구에서는 등방이고 균질한 암반에서의 굴착시 수치해석을 통해 계산된 천단변위를 통해 분석을 수행

하였기 때문에 실제 현장에서 나타나는 암반의 불균질성, 이방성, 시간의존적 변형거동 등을 고려한다면 변위 예측의 정확도는 더욱 낮아질 수 밖에 없다. 특히, 초기 계측 시점이 굴착면으로부터 1D 이상 떨어진 지점에서 이루어질 경우 실제 계측 전 변위를 정확히 예측할 가능성은 매우 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 보다 신뢰도 있는 터널 내공변위 분석을 위해서는 초기계측 지점을 굴착면에서 가급적 가까운 곳(0.8D 이하)에서 수행하는 것이 중요하리라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Kim, K. Y., 2007, Measurement and analysis of 3-D absolute displacement for prediction of fault zone ahead of tunnel face, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea.
2. Kim, C., Chae, Y., Park, Y., 2008, Prediction of preceding displacement of a soil-tunnel by displacement monitoring using horizontal inclinometer, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 18, No. 5, pp. 355-365.
3. Kim, C. Y., Bae, G. J., Hong, S. W., Seo, Y. S., Kim, K. Y., Schubert, W., 2003, Interpretation of displacement monitoring results for tunnels in heterogeneous rock mass, Proc. Conference of Korea Society for Rock Mechanics, pp. 81-102.
4. Kim, C., 2010, Forecasting final displacement with displacement functions using deformation measurements while constructing a tunnel, Journal of Korea Society for

- Rock Mechanics, Vol. 20, No. 6, pp. 408-420.
5. Hanafy, E. A. and Emery J. J., 1980, Advancing face simulation of tunnel excavations and lining placement, Proc. 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, pp. 119-125.
 6. Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F., 1995, Support of underground excavations in hard rock, Balkema, Canberra.
 7. Kaiser, P. K. 1980, Effect of stress-history on the deformation behavior of underground openings, Proc. 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, pp. 133-140.
 8. Lombardi, G., 1979, On the choice of rock mechanics tests (in English and French), Proc. 4th Congress International Society for Rock Mechanics, Montreux, Vol. 3, pp. 187-191.
 9. Lunardi, P., 2000, Design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils, Tunnels & Tunnelling, Int. Special Suppl., pp. 3-30.
 10. Panet, M. and Guenet, A., 1982, Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunnelling 82, Brighton, United Kingdom, pp. 197-204.
 11. Sellner, P., 2000, Prediction of Displacements in Tunnelling, Ph.D. Thesis, Graz University of Technology, Austria.
 12. Sulem, J., Panet, M. and Guenet, A., 1987, An analytical solution for time-dependent displacement in a circular tunnel, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, No. 3, pp. 155-164.
 13. Vassilev, V. H. and Hrisstov, T. N., 1988, Influence of the heading face and a two-dimensional calculation model of tunnel linings, Proc. 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomech., Innsbruck, Vol. 3, pp. 1551-1555.

김 광 영



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 박사

Tel: 031-910-0225
E-mail: kimky@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 SOC성능연
구소 Geo-인프라연구실 수석연구원

김 호 근



2009년 충북대학교 자연대학 지구환경
과학과 이학사
2011년 충북대학교 자연대학 지구환경
과학과 이학석사

Tel: 031-910-0776
E-mail: nojang007@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 SOC성능연
구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

서 용 석



1991년 경북대학교 지질학과 이학사
1993년 경북대학교 지질학과 이학석사
1999년 일본 나고야대학 지권환경공학과
공학박사

Tel: 043-261-2765
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr
현재 충북대학교 지구환경과학과 교수
