

저심도 터널의 천단침하 및 내공변위의 초기변위속도와 최종변위의 관계

김치환*

Relations between Initial Displacement Rate and Final Displacement of Arch Settlement and Convergence of a Shallow Tunnel

Kim Cheehwan*

Abstract It is generalized to measure the arch settlement and convergence during tunnel construction for monitoring its mechanical stability. The initial convergence rate a day is defined from the first convergence measurement and the final convergence defined as the convergence measured lastly. The initial and the final tunnel arch settlement are defined like the preceding convergence. In the study, the relations between the initial and final displacements of a shallow tunnel are analyzed. The measurements were performed in the tunnel of subway 906 construction site in Seoul. The overburden is 10-20 m and the tunnel goes through weathered soil/rock. The width and height of the tunnel are about 11.5 m, 10m, respectively. So this is a shallow tunnel in weak rock. The length of tunnel is about 1,820 m and the tunnel was constructed in 2 stages, dividing upper and lower half. The numbers of measurement locations of arch settlement and convergence are 184 and 258, respectively. As a result, the initial displacement rate and the final displacement are comparatively larger in the section of weathered soil.

Key words Initial tunnel arch settlement rate, Initial tunnel convergence rate, Final tunnel arch settlement, Final tunnel convergence

초 록 터널 시공 중 천단침하와 내공변위를 측정하는 것이 일반화되어 있다. 터널 시공 중 계측기를 설치한 후 첫 번째로 측정한 천단침하와 내공변위의 1일간 변위량을 각각 초기천단침하속도와 초기내공변위속도로 또 마지막으로 측정한 천단침하와 내공변위를 각각 최종천단침하와 최종내공변위로 정의하고 측정한 최종변위와 초기변위속도의 관계를 분석하였다. 이를 위한 분석용 자료는 서울지하철 906공구에서 터널 시공 중 측정한 것이다. 이 터널의 폭과 높이는 각각 약 11.5 m, 10 m이며 지표에서 터널천단까지의 깊이는 약 10-20 m의 저심도 터널이다. 또 터널이 시공된 지층은 풍화토 또는 풍화암으로 연약한 지반이다. 터널은 상하반으로 나누어 시공되었고 길이는 1,820 m이다. 이번 분석에 이용한 계측치는 터널 상하반 시공 중에 얻은 것으로 천단침하계측 결과가 184개, 내공변위계측 결과는 258개이다. 분석결과 풍화토의 터널에서 초기변위속도와 최종변위가 상대적으로 큰 경향이 있었다.

핵심어 초기천단침하속도, 초기내공변위속도, 최종천단침하, 최종내공변위

Received: Mar. 22, 2013

Revised: Apr. 17, 2013

Accepted: Apr. 22, 2013

*Corresponding Author: Kim Cheehwan

Tel) +82632901468, Fax) +82632901465

E-Mail) kimcheen@korea.com

Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, 443 Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do 565-701, Korea

1. 서론

서울지하철 906공구의 터널을 시공하면서 터널의 역학적 안정성을 확인하기 위하여 터널의 변형을 계측하였다. 터널을 시공할 때 사용하는 계측기기는 여러 가지가 있으나 천단침하계와 내공변위계는 설치하기 간편하고 신속하며 경제적이므로 터널계측에 필수적으로 사용하고 있다. 지하철 906공구에서도 천단침하계와 내

공변위계를 기본 계측기기로 사용하여 터널 시공 중 발생하는 터널의 변형을 계측하였다. 터널 시공 중 계측한 정보를 이용하여 계측 시작 후 초기에 최종변위를 정확히 예측하는 것이 중요하다. 이는 터널 완공 후의 터널의 최종적인 구조적 안정성을 시공 중에 미리 평가하기 위한 것이다.

터널이 완성되었을 때 발생할 터널의 변형을 미리 예측하기 위한 방법으로는 계측의 추세를 회귀분석한 후 외삽하는 방법과 여러 지점의 계측치를 모아 통계적인 처리를 하는 방법 등이 있다. 터널의 천단침하와 내공변위 계측결과로부터 최종변위를 예측한 여러 연구 사례는 다음과 같다. 첫째는 계측한 내공변위와 천단침하를 지수함수, 로그함수, 분수함수를 이용하여 시간경과 혹은 막장과 계측점 사이의 거리변화에 따라 회귀분석(Kim, 1990)하였다. 또 계측한 내공변위를 지수함수로 회귀분석한 연구(Kim, 2010), 계측한 내공변위를 지수함수와 분수함수로 회귀분석한 연구(Kim et al., 1993; Moon et al., 2001; Song et al., 2002), 계측한 내공변위를 지수함수와 로그함수로 회귀분석한 연구(Kim, 2003), 수치해석으로 초기 계측치의 측정 시점이 최종변위에 미치는 영향을 분수함수로 검토한 연구(Kim et al., 2012), 3차원 내공변위 분석으로 터널 막장 전방의 파쇄대를 예측한 연구(Kim et al., 2003)가 있다. 통계적인 방법으로 초기의 변위속도와 최종변위의 관계를 거듭제곱함수로 회귀분석한 연구(Kim, 1990), 계측한 내공변위를 최대변위속도의 관계식으로 또 첫 번째와 두 번째

계측 변위차를 초기변위속도로 정의하고 이를 내공변위와의 관계식으로 나타낸 연구(Kim, 2003)도 있다. 그 외 내공변위 계측기기를 개선하기 위하여 계측된 대신 광섬유 내공변위센서를 이용한 연구(심현진 등, 2007)와 수동계측을 개선한 내공변위 자동화 방법을 분석한 연구(Chung, 2005)가 있다.

이번 연구에서는 초기변위속도와 최종변위의 관계를 분석할 예정이다. 여기서 초기변위속도는 계측기 설치 후 첫 번째 계측한 변위의 1일간 변화량을 의미하고 최종변위는 시공현장에서 마지막으로 계측한 변위를 뜻한다. 이와 같이 초기변위속도는 첫 번째 계측한 변위로부터 구할 수 있으므로 첫 번째 계측을 끝내자마자 최종변위를 예측할 수 있게 된다. 이는 임의의 계측점에서 첫 번째 계측한 값으로부터 최대한 빠르게 터널의 최종적인 변형을 파악하고 터널의 역학적 안정성을 조기에 평가하기 위한 시도이다.

연구대상 터널은 계측과 관련하여 이미 연구 보고한(Kim, 2005; 2010) 서울지하철 906공구 터널로 연장이 1,820 m에 2개의 정거장이 있고 지표에서 터널까지의 심도는 약 10-20 m 내외의 저심도로 층적층과 풍화토 및 풍화암층을 통과하고 있다. 이 터널은 아파트 하부를 통과하여 도로 하부를 지나 사유지빌딩 하부를 통과하고 상반과 하반으로 분할하여 시공되었다. Fig. 1은 서울지하철 906공구 터널의 노선을 보인 것으로 왼쪽에 있는 908정거장 부근의 곡선구간이 아파트구역이고 가운데 909정거장 부근의 곡선구간이 사유지빌딩 구역



Fig. 1. Location and route of subway tunnel

이다. 지상에 아파트나 빌딩이 있는 구역에서는 터널상반 시공 중에 천단침하와 내공변위를 약 4 m 간격으로 계측하였고 하반 시공 중에는 약 8 m 간격으로 계측하였다. 도로 하부 구간에서는 계측간격이 약 20 m이었다. 그 결과 터널상반을 시공할 때 천단침하 계측점은 108개, 내공변위 계측점은 106개이었다. 터널하반을 시공할 때는 천단침하와 상반 내공변위 계측점이 각각 76개이었고 터널하반을 시공하면서 터널하반부 측벽에 추가로 설치한 내공변위계는 76개이었다(대림산업주식회사, 2006a, 2006b). 내공변위는 테이프 익스텐소미터로, 천단침하는 수준측량으로 계측하였다.

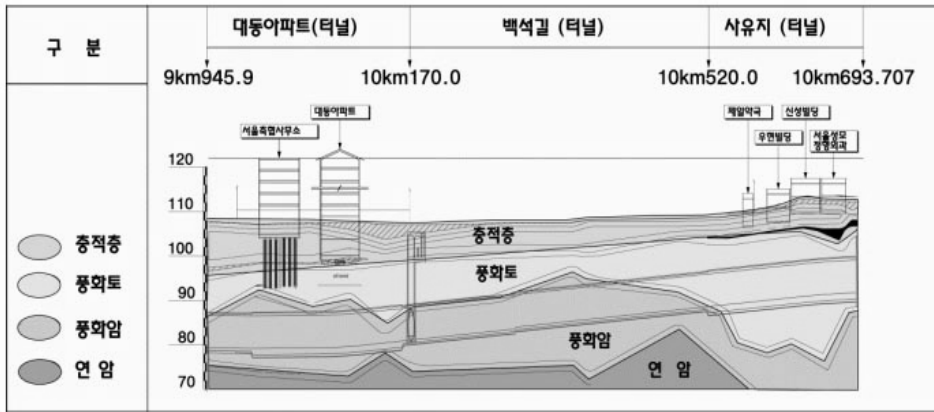
2. 지형 및 지질

본 지역은 서울시 지형의 특징인 노·장년기적 지형특성을 나타내고 있다. 완만한 지형특성으로 선구조는 뚜렷하지 않으나 산계와 수계가 유사한 방향으로 발달하고, 한강을 중심으로 충적 저지대가 넓게 분포한다. 특

히 이곳은 한강 하류지역으로서, 북안으로는 불광천, 남안으로는 안양천이 합류한다. 본 지역에서 한강으로 유입되는 하천이 현재 백석길과 일치한다.

본 지역의 지질은 선캠브리아기의 변성암류인 경기편마암 복합체, 중생대의 화성암류, 그리고 이들 기반암을 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층으로 구성되어 있으나 최소한 3회 이상 변성작용으로 지층이 매우 복잡하다. 암상은 주로 편암, 호상편마암, 규암과 이를 관입한 소규모의 화성암류로 구성되며, 상부는 매립층과 충적층으로 피복되어 있다.

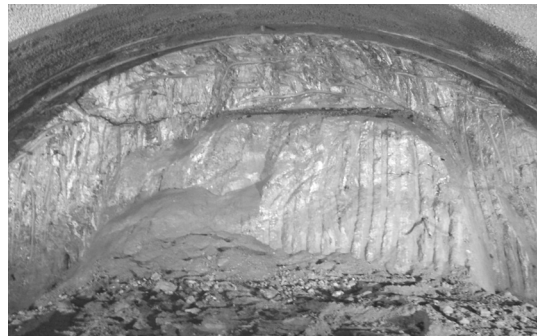
시추조사 결과에 의하면 본 지역의 지반은 생성기원 및 층상에 따라 매립층, 충적층, 풍화대층(잔류토 및 풍화암층) 및 기반암인 연암, 보통암, 경암층 등으로 구성되어 있으며, 현 지반고는 매립에 의해 형성된 것이다. Fig. 2는 터널이 시공된 부분의 지반상태를 보인 것이다(대림산업주식회사, 2003a; Kim, 2005; 2010). Fig. 2(a)의 왼쪽은 연구대상 터널의 시점으로 아파트 구역이며 백석길을 지나 오른쪽 끝은 사유지빌딩 구역이다. 사유



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. (a) Geological section of tunnel site, (b) Tunnel face of apartment area, (c) Tunnel face of private building area

지빌딩 구역은 주로 풍화토이고 그 외 구역은 풍화암이 지배하고 있다. Fig. 2(b)와 (c)는 각각 아파트 구역과 사유지빌딩 구역에서의 터널막장 지질을 보인 것이다.

3. 터널단면과 보강 및 계측기 설치

터널을 시공하면 터널내공이 축소되는 변형뿐만 아니라 지반이 연약한 경우에는 막장의 압출변위도 발생한다. 그러므로 풍화토와 같은 연약한 지반에 터널을 시공하는 경우 막장 전방의 선행변위와 압출변위를 억제한다면 터널의 내공변위 및 천단침하도 감소되면서 터널의 역학적 안정성을 높일 수 있다.

연약한 지반에 시공되어 터널의 변형이 클 것으로 예상되는 이번 연구대상 터널에서도 막장전방의 변위와 천단침하 및 내공변위 등이 최소화 되도록 시공하였다. 이를 위하여 여러 가지 막장 전방 보강방법(Nam et al., 2002; Nam, 2002) 중 강관다단그라우팅공법을 적용하였다. 적용한 대표적인 강관다단그라우팅 보강도와 터널단면도는 Fig. 3과 같다(대림산업주식회사, 2003b).

이 강관다단그라우팅공법은 터널을 굴진하기 전에 막장 전방 터널 주변에 강관을 적절한 간격으로 배열, 설치하고 그 강관의 내부에서 그라우트재를 다단계로 주입하는 방법이다. 강관다단그라우팅공법의 주요 효과는 터널막장의 안정성 향상, 굴착주변 지반의 이완 방지, 지표침하의 억제로 나타난다. 터널에서 빌딩지하층까지의 거리가 최소 약 7 m로 지반변위가 클 것으로 예상되는 사유지빌딩 구역 하부에서는 터널 아치부에 지름 114 mm, 길이 15 m의 강관을 4 m 굴진할 때 마다 설치하였으므로 결과적으로 Fig. 3과 같이 4점의 강관으로 터널 아치부를 보강한 것이다. 아파트 구역 하부

서는 터널 아치부에 길이 12 m의 강관을 4 m 굴진할 때 마다 설치하였으므로 결과적으로 3점의 강관으로 터널 아치부를 보강한 것이다. 또 백석길 하부를 통과하는 구간에서는 터널 아치부에 길이 12 m의 강관을 6 m 굴진할 때 마다 설치하였으므로 2점의 강관으로 터널 아치부를 보강한 것이다. Fig. 3(a)의 터널 횡단면도 중 번호는 굴착순서이고 1과 2는 터널상반부를, 3과 4는 약 30 m 후방에서 뒤따라오는 터널하반부를 표시한 것이다. 터널상반부와 하반부의 시공높이는 각각 약 5 m이고 터널 폭은 약 11.5 m이다.

강관다단그라우팅 보강작업이 끝나면 터널을 굴진하면서 4-20 m 간격으로 계측기를 설치하였다. 터널 굴진은 발파를 하지 않고 브레이커와 굴삭기를 이용하여 수행하였으므로 계측핀을 보호 관리하기가 비교적 용이하였고 계측핀을 터널 막장면에 최대한 가깝게 설치할 수 있었다. 계측핀 중 천단침하계는 터널의 천정꼭지점에, 내공변위계는 터널의 바닥으로부터 약 1.2 m 높이의 터널측벽 양쪽에 설치하였다. 설치된 계측핀에서 첫 번째 계측을 시작하기 위해서는 설치된 계측핀의 접촉제가 굳어 계측핀이 견고하게 고정되어야 한다. 계측기를 설치하기 위하여 천공하고 계측핀을 고정시키는 접촉제가 굳는데 수 시간이 필요하였다. 또 측정작업을 시작하려면 터널상반의 막장 안정을 위하여 남겨둔, Fig. 3(a)의 2번으로 표시된 코어부분이 제거되어야 측정용 테이프 익스텐소미터를 양쪽 측벽 계측핀 사이에 직선으로 걸 수 있었다. 굴진 후 버력을 처리하고 강지보와 숏크리트 등으로 보강작업을 하였다. 1회의 굴진 거리는 약 0.8-1 m이었고 하루에 1-2회 굴진하였다. 이와 같은 시공 작업과 계측기 설치 과정을 거쳐 계측은 굴진 후 12-24시간 지난 후에 시작할 수 있었다.

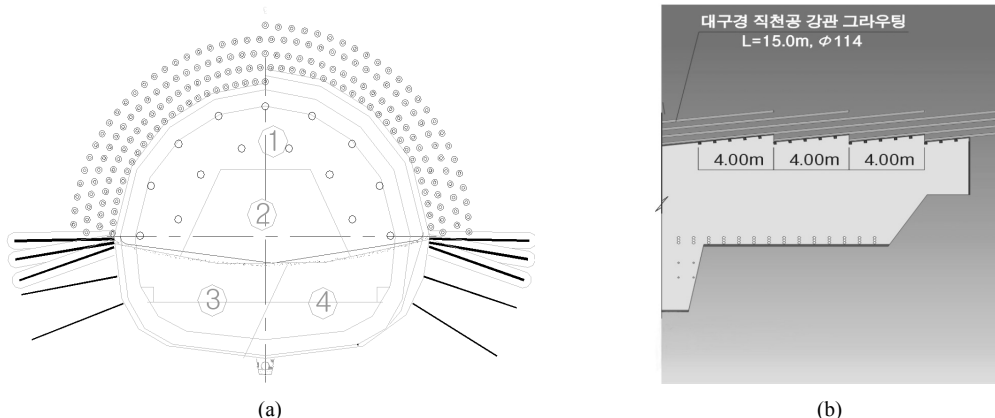


Fig. 3. Typical supporting pattern for tunnel (a) sectional view (b) longitudinal view

4. 계측변위의 특성 분석

분석을 위한 계측구간은 아파트 하부 통과구간과 백석길 구간 및 사유지빌딩 하부 통과구간의 3개 부분으로 나누었다. 즉 Fig. 1에서 공사시점인 9k950부터 고층아파트 하부를 통과하는 10k165까지의 아파트 하부 통과구간과 백석길을 따라 터널을 굴착하는 10k180부터 다음의 인접 구간인 사유지구간으로 부터 굴착해 오던 터널과 관통되는 10k518까지의 백석길 도로 하부 구간 및 주로 사유지빌딩 하부를 통과하는 10k526에서 공사종점인 10k693까지의 사유지빌딩 하부 통과구간이다.

사유지빌딩 통과구간은 지반의 상태가 풍화토로 주로 풍화암으로 구성된 다른 두 구간보다 더 연약하여 터널을 시공하기 위해서는 더 많은 보강이 필요한 것으로 설계되었고 시공 중에는 추가 보강도 하였다.

분석은 터널상반과 하반 시공 중의 계측결과로 구분하였고 또 천단침하와 내공변위로 나누었다. 동일한 계측단면에 2조의 내공변위계를 터널상반과 하반 시공 중 각각 설치하였고 여기서 분석한 내공변위는 수평측선에서 계측한 것이다.

4.1 상반시공 중 계측변위의 특성

4.1.1 상반시공 중 천단침하

Fig. 4는 터널상반 시공 중 발생한 초기의 천단침하속도와 최종천단침하량을 막대그래프로 보인 것이다. 천단침하는 백석길 구간인 Fig. 4의 가운데 부분에서 작은 값을 보이면서 오른쪽 부분인 사유지빌딩 하부 통과구간과 왼쪽 부분인 아파트 통과구간으로 나누고 있다.

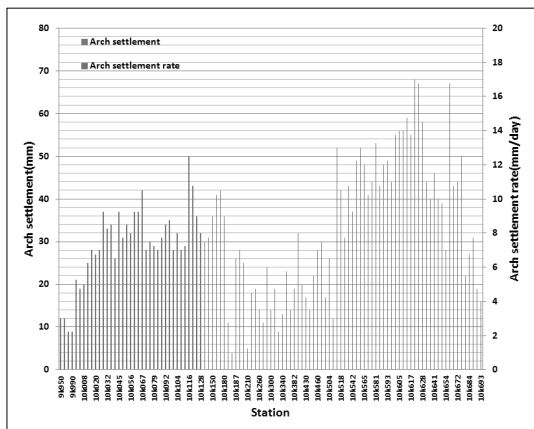


Fig. 4. Final arch settlement and initial arch settlement rate in constructing upper part of tunnel

3개 구간에서 초기천단침하속도와 최대천단침하량의 평균값을 비교하면 사유지빌딩 하부 통과구간에서 가장 크고 백석길 구간에서 가장 작았다. 사유지빌딩 하부 통과구간에서 평균 초기천단침하속도는 약 3.8 mm/day 이고 평균 최종천단침하량은 약 44.7 mm이었으며, 백석길 구간에서 평균 초기천단침하속도는 약 1.6 mm/day 이고 평균 최종천단침하량은 약 19.8 mm이었다. 또 아파트 하부 통과구간에서 평균 초기천단침하속도는 약 2.7 mm/day이고 평균 최종천단침하량은 약 30.0 mm이었다. 전체 구간 중 최대값은 사유지빌딩 하부 통과구간에서 나타났다. 초기의 천단침하속도 중 최대값은 약 8 mm/day이었고 최종천단침하량 중 최대값은 약 68 mm이었다.

지표로부터 터널까지의 심도가 거의 비슷한 상태이나 풍화토 지반인 사유지빌딩 하부 통과구간에서 풍화암 지반인 다른 구간 보다 초기천단침하속도가 크고 최종천단침하도 크게 발생한 것이다.

Fig. 5는 터널상반 시공 중 발생한 초기천단침하속도와 최종천단침하의 관계를 3개 구간으로 구별하여 보인 것이다. 초기의 변위속도가 크면 최종변위도 큰 것으로 보고되어 있으므로 초기의 변위속도로부터 최종변위의 크기를 예측할 수 있다(Kim, 1990).

앞에서 나눈 3개 구간 중 백석길 구간에서 터널상반 시공 중 계측한 천단침하의 초기변위속도와 최종천단침하량이 가장 작아 Fig. 5의 좌하부분에 분포되어 있는 반면 사유지빌딩 하부 통과구간에서의 천단침하는 초기변위속도가 크고 최종천단침하도 크게 나타났다. 최종변위와 초기변위속도의 관계를 여러 가지 수학적 함수 중 거듭제곱함수 형태로 표시할 수 있다(Kim, 1990).

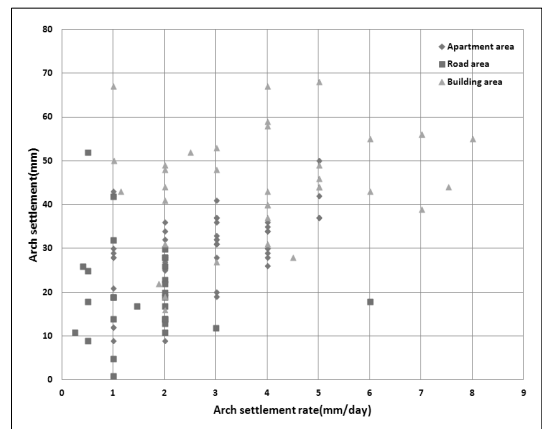


Fig. 5. Final arch settlement vs. initial arch settlement rate in constructing upper part of tunnel

Fig. 5의 전체 천단침하값에 대해 최적의 거듭제곱함수를 구하였으나 초기천단침하속도와 천단침하량의 분포가 넓어 결정계수가 크지 않았다. 즉 초기천단침하속도와 최종천단침하량의 관계를 나타내는 거듭제곱함수는 $y = 20.52x^{0.39}$ 이고 결정계수는 $R^2 = 0.21$ 이었다. 여기서 y 는 최종천단침하량, x 는 초기천단침하속도이다.

이와 같이 터널 천단침하와 후술하는 내공변위처럼 터널변형을 측정한 값의 분산이 크게 나타나는 것은 첫 번째로 시공현장의 여러 가지 상황에 의해 발생하는 측정 시의 오차 때문이다. 두 번째로 또 여기서 정의한 최종변위는 마지막으로 측정한 변위인데 터널의 변형이 종료된 수렴변위와 일치하지 않을 수 있다. 수렴한 변위와 초기변위속도의 관계를 나타내는 거듭제곱함수는 결정계수가 더 클 것으로 추정된다. 세 번째로 터널의 직경에 비하여 터널의 심도가 얇기 때문에 터널의 천단침하가 커지고 지속되는 경향을 보인다. 이는 터널을 역학적으로 안정하게 유지하기 위해서는 터널주변에 압축응력대가 형성되어야 하나 지표에서 터널까지의 심도가 얇으면 압축응력대의 형성에 필요한 영역보다 토피가 부족하기 때문이다(Kim, 2010; 김상수, 1992). 이 경우 터널아치부의 변위는 터널의 중심을 향하고 터널을 수축시키는 방향이기 보다 연직하향에 가깝다. 이 변위는 터널시공 중 보강수준과 효과에 따라 다르게 나타난다. 또 터널천단에서의 변위 양상에 따라 후술하는 내공변위도 영향을 받게 된다.

4.1.2 상반시공 중 내공변위

Fig. 6은 터널상반 시공 중 발생한 초기의 내공변위속도와 최종내공변위를 막대그래프로 보인 것이다. 상반

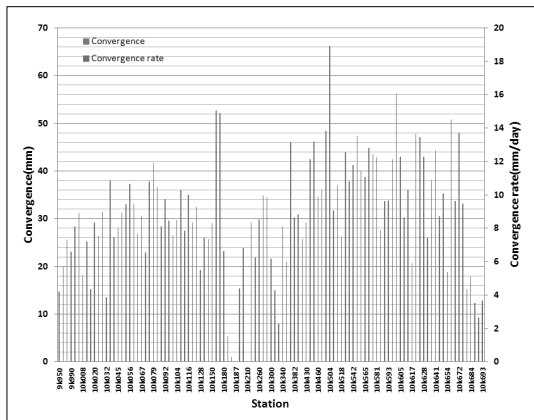


Fig. 6. Final convergence and initial convergence rate in constructing upper part of tunnel

굴착 중 천단침하의 변위특성을 분석한 것과 같은 방법으로 초기내공변위속도와 최종내공변위의 평균값을 비교하면 사유지빌딩 하부 통과구간에서 가장 크고 백석길 구간에서 가장 작았다. 사유지빌딩 하부 통과구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 4.1 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 34.8 mm이었으며, 백석길 구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 2.8 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 29.5 mm이었다. 또 아파트 하부 통과구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 1.9 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 29.2 mm이었다. 전체 구간 중 최대 내공변위속도와 최종내공변위는 사유지빌딩 하부 통과구간에서 나타났다. 초기의 내공변위속도 중 최대값은 약 9 mm/day이었고 최대 최종내공변위는 약 56.3 mm이었다.

지표로부터 터널까지의 심도가 거의 비슷한 상태에서 풍화암 지반인 다른 구간 보다 풍화토 지반인 사유지빌딩 하부 통과구간에서 초기내공변위속도가 크고 최종내공변위도 크게 발생한 것이다. 이는 터널상반 굴착 중의 천단침하 특성과 같은 것이다.

Fig. 7은 터널상반 시공 중 발생한 초기내공변위속도와 최종내공변위의 관계를 3개 구간으로 구별하여 보인 것이다. 천단침하 특성과 유사하게 3개 구간 중 사유지빌딩 하부 통과구간에서의 내공변위는 초기변위속도가 크고 최종내공변위도 크게 나타났다. 아파트 하부 통과구간과 백석길 구간에서의 내공변위는 거의 동일한 분포를 보였다.

Fig. 7의 전체 내공변위 측량자료에 대해 최적의 거듭제곱함수를 구하였으나 천단침하 자료와 마찬가지로 분산이 컸으므로 이 함수의 결정계수는 작았다. 초기내공

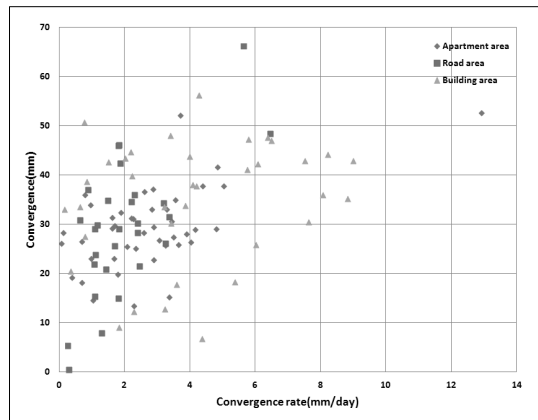


Fig. 7. Final convergence vs. initial convergence rate in constructing upper part of tunnel

변위속도와 최종내공변위의 관계를 나타내는 거듭제곱 함수는 $y = 23.34x^{0.24}$ 이고 결정계수는 $R^2 = 0.14$ 이었다. 여기서 y 는 최종내공변위, x 는 초기내공변위속도이다.

4.2 하반시공 중 계측변위 특성

여기서는 터널하반을 시공할 때 증가한 변위만을 분석하도록 한다. 즉 터널 시공을 완료하였을 때 발생한 변위 중 터널상반을 시공할 때 발생한 변위를 제외하고 터널하반을 시공할 때 발생한 변위의 특성을 분석하도록 한다. 한편 터널상반을 시공하면서 지반이 연약하고 토피가 얇기 때문에 터널상부 주변을 강관다단그라우팅으로 보강하였다. 특히 사유지빌딩 하부 통과구간은 길이 15 m 강관을 4열로 보강하였다. 아파트 하부 통과구간은 3열의 강관으로 백석길은 2열의 강관으로 보강하였다.

4.2.1 하반시공 중 천단침하

Fig. 8은 터널하반 시공 중 발생한 초기의 천단침하속도와 최종천단침하량을 막대그래프로 보인 것이다. 터널하반 시공 중에 발생한 천단침하는 백석길 구간인 Fig. 8의 가운데 부분과 오른쪽 부분인 사유지빌딩 하부 통과구간에서 약간 큰 값을 보이면서 왼쪽 부분인 아파트 하부 통과구간에서는 약간 작은 값을 보이고 있다. 아파트 하부 통과구간, 백석길 및 사유지빌딩 하부 통과구간의 순서로 평균 초기천단침하속도를 나열하면 각각 약 0.81 mm/day, 약 0.83 mm/day 및 약 0.63 mm/day이고 평균 최종천단침하는 각각 약 7.75 mm, 약 10.75 mm 및 약 10.38 mm이었다. 터널상반을 시공할 때의 평균 초기천단침하 속도 1.64-3.84 mm/day와

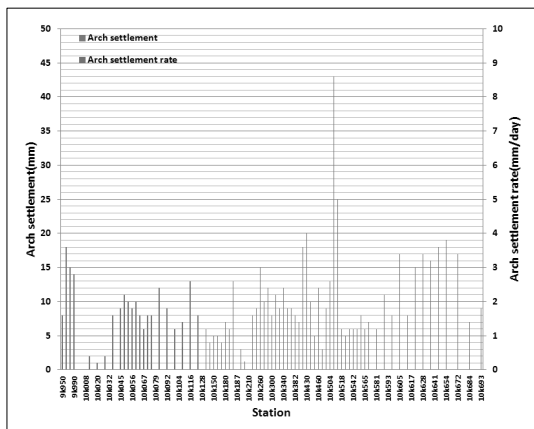


Fig. 8. Final arch settlement and initial arch settlement rate in constructing lower part of tunnel

비교할 때 터널하반 시공 중에 초기변위속도는 크게 감소하였고 최종천단침하량도 터널상반 시공 중의 평균 값 범위 19.77-40.7 mm 보다 매우 작았다. 터널상반을 시공할 때는 3개 구간 중 사유지빌딩 통과구간에서 가장 큰 천단침하가 발생하였으나 터널하반을 시공할 때는 백석길 구간에서 가장 큰 천단침하가 발생하였다. 이는 터널상반 주변을 보강한 효과에 의한 것이다. 사유지 하부 통과구간이 풍화토이지만 터널상반 주변을 4열의 강관다단그라우팅으로 중첩하여 보강한 결과 2열의 강관다단그라우팅으로 보강한 백석길 구간보다 천단침하가 크게 억제되었다. 또 3열의 강관다단그라우팅으로 보강한 아파트 하부 통과구간에서의 보강효과도 잘 나타나 터널하반 시공 중 천단침하가 3개 구간 중 가장 작았다.

Fig. 9는 터널하반 시공 중 발생한 초기천단침하속도와 최종천단침하의 관계를 3개 구간으로 구별하여 보인 것이다.

3개 구간 중 아파트 하부 통과구간에서 터널하반 시공 중 계측한 천단침하의 초기변위속도와 최종천단침하가 가장 작고 백석길 구간과 사유지빌딩 하부 통과구간에서의 초기천단침하속도와 최종천단침하량이 거의 비슷하였다. 최종변위와 초기변위속도의 관계를 하반 시공 때 계측한 천단침하 전체자료에 대해 최적의 거듭제곱함수로 구하면 $y = 9.08x^{0.17}$ 이고 결정계수는 $R^2 = 0.09$ 이었다. 여기서 y 는 최종천단침하량, x 는 초기천단침하 속도이다.

4.2.2 하반시공 중 상반내공변위

Fig. 10은 터널하반 시공 중 터널상반부에 설치된 내

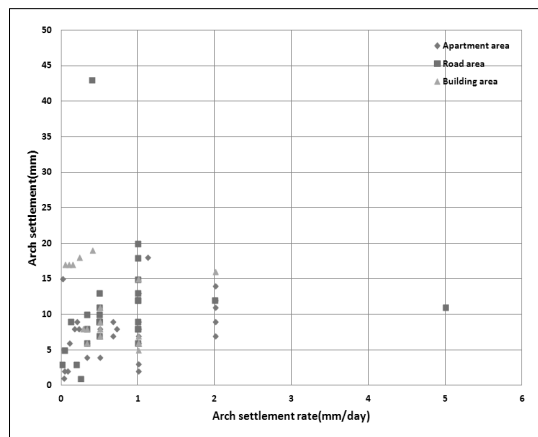


Fig. 9. Final arch settlement vs. initial arch settlement rate in constructing lower part of tunnel

공변위핀에서 발생한 초기의 내공변위속도와 최종내공변위를 막대그래프로 보인 것이다. 터널상반 굴착 중 천단침하의 변위특성을 분석한 것과 같은 방법으로 초기내공변위속도와 최종내공변위의 평균값을 비교하면 사유지빌딩 하부 통과구간에서 가장 크고 아파트 하부 통과구간에서 가장 작았다. 사유지빌딩 하부 통과구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 1.7 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 14.7 mm이었고, 아파트 하부 통과구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 0.55 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 5.96 mm이었다. 또 백석길 구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 0.9 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 9.23 mm이었다. 천단침하 특성과 동일하게 터널하반을 시공할 때 발생한 내공변위는 터널상반을 시공할 때 보다 작아졌다.

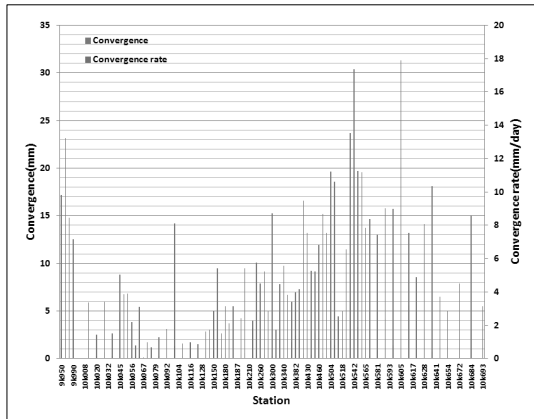


Fig. 10. Final convergence and initial convergence rate at upper pins in constructing lower part of tunnel

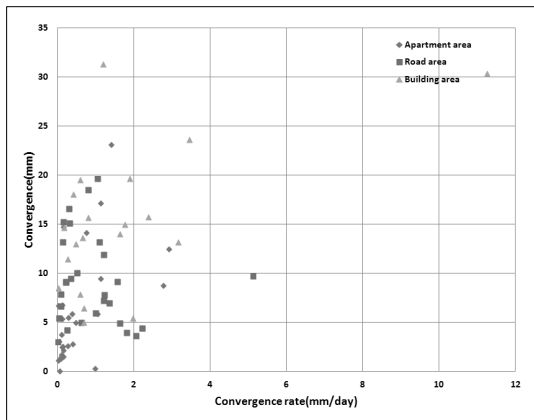


Fig. 11. Final convergence vs. initial convergence rate at upper pins in constructing lower part of tunnel

Fig. 11은 터널하반 시공 중 상반에 설치한 내공변위핀에서 발생한 초기내공변위속도와 최종내공변위의 관계를 3개 구간으로 구별하여 보인 것이다. 3개 구간 중 사유지빌딩 하부 통과구간에서의 초기내공변위속도가 크고 최종내공변위도 크게 나타났다. 그 다음 백석길 통과 구간, 아파트 하부 통과구간의 순서로 분포되어 있다.

Fig. 11의 전체 내공변위 계측자료도 분산이 컸고 초기내공변위속도와 최종내공변위의 관계를 나타내는 거듭제곱함수는 $y = 8.92x^{0.31}$ 이고 결정계수는 $R^2 = 0.21$ 이었다. 여기서 y 는 최종내공변위, x 는 초기내공변위속도이다.

4.2.3 하반시공 중 하반내공변위

Fig. 12는 터널하반 시공 중 터널하반부에 설치한 내공변위핀에서 발생한 초기의 내공변위속도와 최종내공변위를 막대그래프로 보인 것이다. 초기내공변위속도와 최종내공변위의 평균값을 비교하면 사유지빌딩 하부 통과구간에서 가장 크고 아파트 하부 통과구간에서 가장 작았다. 사유지빌딩 하부 통과구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 1.18 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 22.9 mm이었고, 아파트 하부 통과구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 0.6 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 7.7 mm이었다. 또 백석길 구간에서 평균 초기내공변위속도는 약 1.38 mm/day이고 평균 최종내공변위는 약 14.1 mm이었다. 터널하반 시공 중 터널상반부에 설치한 내공변위핀에서 계측한 내공변위보다 하반부의 내공변위가 약간 크게 발생하였다. 터널하반을 시공할 때 터널측벽은 주로 숏크리트와 록볼트로 보

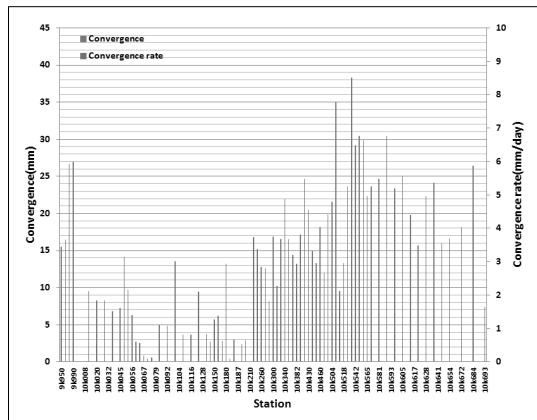


Fig. 12. Final convergence and initial convergence rate at lower pins in constructing lower part of tunnel

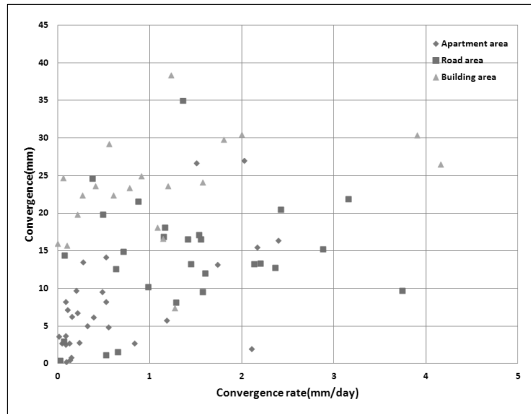


Fig. 13. Final convergence vs. initial convergence rate at lower pins in constructing lower part of tunnel

강하였다.

Fig. 13은 터널하반 시공 중 터널하반부에 설치한 내공변위핀에서 발생한 초기내공변위속도와 최종내공변위의 관계를 3개 구간으로 구별하여 보인 것이다. 3개 구간 중 사유지빌딩 하부 통과구간에서의 초기내공변위속도가 크고 최종내공변위도 크게 나타났다. 그 다음 백석길 통과 구간, 아파트 하부 통과구간의 순서로 분포되어 있다.

Fig. 13의 전체 내공변위 계측자료는 분산이 컸고 초기내공변위속도와 최종내공변위의 관계를 나타내는 거듭제곱함수는 $y = 12.13x^{0.34}$ 이고 결정계수는 $R^2 = 0.22$ 이었다. 여기서 y 는 최종내공변위, x 는 초기내공변위속도이다.

5. 결론

터널 시공 중 계측한 천단침하와 내공변위를 이용하여 초기변위속도와 최종변위를 정의하고 이 둘 사이의 관계를 분석하였다.

터널은 풍화도와 풍화암을 지나는 구역으로 나눌 수 있었다. 풍화암 구간과 비교할 때 풍화토 터널구간에서 초기변위속도와 최종변위가 상대적으로 큰 경향을 보였다. 그러나 풍화토의 터널을 4점의 강관다단그라우팅으로 보강한 결과 터널하반 시공 중에 터널의 변형이 2-3점의 강관다단그라우팅으로 보강한 풍화암 터널 수준으로 억제되었다.

초기변위속도와 최종변위의 관계를 정량적으로 파악하기 위하여 거듭제곱함수로 회귀분석하였으나 측정치의 분산이 커서 결정계수는 작았다. 터널상반 시공 중

108 지점의 천단침하에 대해 회귀분석한 결과 초기천단침하속도와 최종천단침하량의 관계를 나타내는 거듭제곱함수는 $y = 20.52x^{0.39}$ 이었고 결정계수는 $R^2 = 0.21$ 이었다. 여기서 y 는 최종천단침하량, x 는 초기천단침하속도이다. 터널상반 시공 중 106 지점의 내공변위에 대해 회귀분석한 결과 초기내공변위속도와 최종내공변위의 관계를 나타내는 거듭제곱함수는 $y = 23.34x^{0.24}$ 이었고 결정계수는 $R^2 = 0.14$ 이었다. 여기서 y 는 최종내공변위, x 는 초기내공변위속도이다.

이와 같이 계측치의 분산이 크게 나타나는 것은 첫 번째로 여러 가지 시공현장 상황에 의해 발생하는 측정치의 오차 때문이다. 두 번째로 또 여기서 정의한 최종변위는 마지막으로 계측한 변위인데 터널의 변형이 종료된 수렴변위와 일치하지 않을 수 있다. 세 번째로 터널의 직경에 비하여 터널의 심도가 얇기 때문에 터널의 천단침하가 커지고 지속되는 경향을 보임에 따라 내공변위도 영향을 받게 되고 터널시공 중 보강수준에 따라 이 현상이 다르기 때문으로 추정된다.

사 사

이 논문은 우석대학교 산학협력선도대학(LINC) 사업단의 지원을 받은 논문임.

참고문헌

1. 김상수 역, 1992, 도시터널의 NATM공법, 창우출판.
2. 대림산업주식회사, 2003a, 지하철 9호선 6공구 지질조사 보고서.
3. 대림산업주식회사, 2003b, 지하철 9호선 6공구 설계보고서.
4. 대림산업주식회사, 2006a, 지하철 9호선 6공구 계측분석 보고서.
5. 대림산업주식회사, 2006b, 지상건물 하부통과 터널구간의 계측치 추세예측 및 역해석.
6. 심현진, 한일영, 김경태, 장기태, 2007, 분포형 광섬유센서를 이용한 터널 내공변위 측정에 관한 연구, 한국암반공학회 특별 심포지엄, pp. 174-187.
7. Chung So Keul, 2005, Convergence monitoring technologies for traffic tunnels-state of the art. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 15, No. 1, pp. 1-8.
8. Kim Cheehwan, 1990, Stress analysis and deformation behaviour of rock around underground cavern by back analysis of field measurements. Ph.D Thesis, Seoul National University.
9. Kim Cheehwan, 2005, Stability analysis on the intersection area of subway tunnels by observational method. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 15, No. 1, pp. 71-79.
10. Kim Cheehwan, 2010, Forecasting final displacement with

- displacement function using deformation measurements while constructing a tunnel. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 20, No. 6, pp. 408-420.
11. Kim Ho Yeong, Park Eui Seob, 1993, Theory and analysis method of tunnel convergence. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 3, pp. 80-95.
 12. Kim Jong Woo, 2003, Estimation of tunnel convergence using statistical analysis. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 13, No. 2, pp. 108-116.
 13. Kim Ki Sun, Kim Young Sub, You Kwang Ho, Park Yoen Jun, Lee Dae Hyuck, 2003, Prediction of change in ground condition ahead of tunnel face using three-dimensional convergence analysis. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 13, No. 6, pp. 476-485.
 14. Kim Kwang Yeom, Kim Ho Geun, Seo Young Seok, 2012, Influence of zero reading on predicting crown displacement of tunnel. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 22, No. 3, pp. 214-220.
 15. Moon Seung Beak, Song Seoung Gon, Yang Hyung Sik, Jeon Yang Soo, Han Gong Chang, 2001, A numerical analysis study for the prediction of convergence and characteristics of subsidence behavior in shallow, wide tunnel excavation. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 11, No. 1, pp. 20-29.
 16. Nam Kee Chun, Heo Young, Kim Chi Whan, You Kwang Ho, 2002, The behavior of soil tunnels reinforced with RPUM and fiber glass. Tunnel Technology, Korean Tunnelling Association, Vol. 4, No. 3, pp. 185-193.
 17. Nam Kee Chun, 2002, A study on the reinforced protection to control extrusion at the face of shallow tunnels. Ph.D Thesis, Suwon University, pp. 57-71.
 18. Song Seung Gon, Yang Hyung Sik, Lim Seoung Sik, Chung So Keul, 2002, Estimation of final deformation of hard rock tunnel using early measured deformation. Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 12, No. 2, pp. 99-106.



김치환

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 063-290-1468

E-mail: kimcheen@korea.com

현재 우석대학교 토목공학과 교수
