

계측에 의한 지하철터널 교차부의 안정성 검토

김치환^{1)*}

Stability Analysis on the Intersection Area of Subway Tunnels by Observational Method

Chee-Hwan, Kim

Abstract The stability of the intersection area of two tunnels is analyzed by observational method. The depth from ground surface to the intersected area is shallow and the geology around the area consists of soil and/or weathered rock. The tunnel is supported by reinforced protective umbrella method with 12 m long 3-layer steel-pipes and the intersected area is additionally reinforced with 6 m long rockbolts. The measured displacements are converged and mechanical stability of the intersected area of two tunnels is confirmed; tunnel arch settles to 6-7 mm at the crown and the sidewalls converges to about 5 mm. So based on the displacement measurements, the supporting system for the tunnel intersection proves to be effective to not only reduce the deformation of tunnels but also maintain the stability of tunnels.

KeyWords intersection of two tunnels, reinforced protective umbrella method, observational method, converged displacement, stability of tunnels

초 록 지표로부터 터널까지의 토피가 얇고 지반이 풍화토 혹은 풍화암으로 연약한 곳에서 두 터널이 교차되도록 굴착할 때 교차부의 역학적 안정성을 계측으로 확인하였다. 터널의 시공방법은 주로 12 m의 강관 다단그라우팅 3열로 막장전방을 선보강한 후 터널상반부를 굴착하였고 두 터널의 교차부는 자천공 록볼트로 추가 보강하였다. 터널 굴착 후 교차부 주변 지반의 변위가 수렴되어 역학적인 안정을 확인 할 수 있었다. 최종적으로 수렴된 변위는 천단침하와 내공변위가 각각 약 6-7 mm, 약 5 mm로 터널의 심도와 연약한 지반조건을 고려할 때 작은 값이었다. 따라서 길이 12 m의 강관 다단그라우팅 3열로 막장전방을 보강한 후 터널 교차부 주변을 굴착한 것은 변위를 억제하고 터널의 안정화에 효과적인 것으로 분석되었다.

핵심어 터널교차부, 강관다단 그라우팅, 계측, 수렴변위, 터널 안정성

1. 서 론

서울과 같은 대도시의 번잡한 곳에서 지하철을 건설하는 경우 지하철 본선 터널을 굴착하기 위해서는 수직 환기구를 먼저 굴착하고 이 수직구로부터 지하철 본선 터널로 접근하는 연결터널을 시공하게 된다. 따라서 횡갱인 연결터널과 지하철 본선터널은 T자로 교차된다. 두 개의 터널이 교차되면 교차부는 기하학적 형상이 단순하지 않으므로 교차부 주변의 지반에 재분포되는 응력도 복잡해지고 응력의 재분포에 따라 터널 주변 지반에서 발생하는 변위도 복잡하게 변하게 된다.

한편 지하철 터널은 완공 후 사용자의 편의를 위하여 지표면에 가깝도록 시공하는 것이 일반적이다. 그런데 터널이 역학적으로 안정되기 위해서는 터널주변에 터널을 감싸는 모양의 압축응력대가 형성되어야 한다. 만약 지표로부터 터널까지의 토피가 얇으면 터널 아치부에서는 압축응력대가 형성될 토피두께가 확보되지 못하여 터널 굴착에 어려움이 따를 수 있다. 또 지표 가까운 곳은 지반의 강도가 약한 흙이거나 암반일지라도 풍화되어 연약한 상태일 경우 강도가 약한 지반은 터널 굴착으로 인하여 증가한 응력을 감당하지 못하므로 터널의 안정이 유지되지 못하는 경우도 있다.

그러므로 지표로부터 터널까지의 토피가 얇고 지반이 연약한 곳에서 터널을 시공하기 위해서는 터널을 굴착하기 전에 지반을 미리 보강해 놓고 터널을 굴착하는 시공방법을 적용할 수 있다. 이와 같은 개념으로

¹⁾ 우석대학교 토목공학과 교수

* 교신저자 : kimcheen@korea.com

접수일: 2005년 2월 11일

심사 완료일: 2005년 2월 21일

터널에서 굴진해 나갈 막장전방을 선 보강한 후 터널을 굴착하는 여러 가지 시공법이 있으며[1] 최근 서울 지하철 터널시공에서 주로 사용하는 있는 공사방법으로 강관다단 그라우팅 공법이 있다[2]. 이 공법은 터널 막장에서 전방으로 굴진할 터널 주변을 천공하여 강관을 삽입하고 다단계로 그라우팅하여 강관주변의 지반을 개량함으로써 결과적으로 터널 주변 지반의 강도를 높이는 공법이다. 지반보강 효과를 더 높이기 위하여 강관다단 그라우팅을 2열 또는 3열로 중첩 반복 시공하기도 한다.

그런데 연결터널과 지하철 본선터널이 교차하는 곳은 그라우팅용 강관축 방향에서 보면 아치모양의 곡면이므로 강관을 설치하는 것이 원활하지 못하다. 즉 연결터널은 지하철 본선 터널의 측벽에 접촉하고 지하철 본선 터널의 횡단면 아치를 따라 강관을 설치해야 하는데 곡선의 아치와 직선의 그라우팅용 강관 사이의 거리가 멀어지게 되므로 터널 아치부 주변에 인접하여 그라우팅 하는 것이 어렵게 된다. 연결터널이 지하철 본선터널과 교차하는 곳에서 지하철 본선터널을 향하여 강관을 설치하기 위해서는 지하철 본선 터널의 아치를 따라 강관설치 각도가 변해야 하기 때문이다. 또 교차부에서는 지하철 본선터널 측벽으로부터 본선터널을 횡단하여 굴착하는데 지하철 본선 터널의 아치정점까지는 상향의 경사이므로 강관을 상향으로 경사지게 설치할 수 있으나 아치정점을 지난 하향의 아치부에서는 강관의 각도를 하향으로 조절 할 수 없으므로 강관과 아치굴착면 사이의 거리가 더 멀어지게 되어 그라우팅 보강효과가 떨어지게 된다. 따라서 연결터널과 지하철 본선 터널이 교차하는 곳은 강관다단그라우팅 보강 외에 별도의 추가 보강이 필요하다.

연결터널과 지하철 본선터널이 교차하는 곳은 응력

과 변위의 발생이 복잡하고 또 두 개의 곡선아치가 교차하므로 강관다단 그라우팅 보강효과가 낮아 추가보강까지 하게 되므로 두 터널교차부와 교차부 주변을 굴착할 때에는 역학적 안정성을 확인하는 것이 필요하다. 따라서 터널 시공 중 계측기를 설치하고 지하철 본선 터널 굴착을 진행함에 따라 발생하는 교차부 및 터널의 변형을 계측하여 터널의 역학적 안정성을 확인하였다. 이에 따라 두 터널이 교차하는 부분의 중압과 교차부에 인접하여 지하철 본선 터널의 시점과 종점방향에 계측기를 설치하였다. 또 연결터널 굴진 중에는 지하철 본선터널의 측벽 가까운 곳에 계측기를 설치하고 교차부 등을 굴착할 때 발생하는 변위를 계측하였다. 계측의 종류는 변위를 위주로 하였고 측정의 간편성과 신속성을 목적으로 터널의 천단침하와 수평내공변위로 선택하였다. 계측 당시 터널을 시공하는 단계는 터널을 상부와 하부로 구분한 시공계획에 따라 터널상반부만을 굴진하였고 상반부 굴착이 종료된 후 하반부를 굴착할 예정이다.

터널 굴착 중 계측한 변위로부터 검토한 사항은 두 터널이 교차되는 부분에서 굴착 중 발생하는 변위의 특성과 수렴변위량 및 변위가 수렴되는데 소요되는 시간과 총굴진거리를 분석하였다. 또 터널의 역학적 안정성을 막장 전방으로 향한 강관다단 그라우팅의 길이와 강관의 열수를 고려하여 평가하였다. 또한 터널 교차부에 인접하여 지하철터널 본선의 시점과 종점방향에 설치한 계측기와 연결터널 굴착 중 설치한 계측기에서 측정된 변위도 같은 내용으로 분석하였다.

본 연구의 대상이 된 터널은 서울 지하철 9호선 6공구의 일부로 현재 시공 중에 있으며 2007년 전체 터널이 완공될 예정이다.

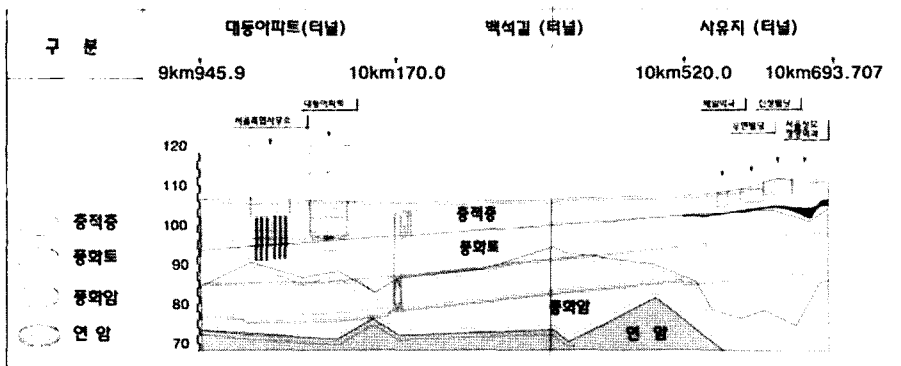


Fig. 1. Geology of the construction site

2. 지형 및 지질

터널 수직환기구는 Fig. 1과 같이 대동아파트 옆 공원 부지에 위치하고 있고 지하철 본선터널은 복개천 도로인 백석길 하부를 따라 시공하고 있다.

본 연구 지역은 한강유역 개발 이전 능선 계곡부의 하천지역으로 한강으로 유입되는 수계를 형성하는 지역이다. 이 지역은 매립층·충적층이 깊게 분포하고 있으며 기반암은 흑운모, 호상 편마암이고 부분적으로 파쇄 및 절리가 발달된 상태이다. 시공한 터널구간의 지형은 북서방향에서 발달된 완만한 능선과 남에서 북으로 발달된 능선이 서로 만나는 계곡부이다. 터널이 위치한 지층은 풍화토와 풍화암의 경계부(GL-20~27 m)로 터널 천단부는 풍화토이고 하부는 풍화암으로 형성되어 있다. Fig. 1과 Table1은 지층상태를 보인 것이다[3].

3. 터널의 시공방법

Fig. 2는 수직환기구와 횡행인 연결터널 및 지하철 본선터널의 평면도이고 화살표는 터널을 굴진해 나간 방향을 표시한 것이다. Fig. 2에서 10k180과 10k190의 중앙이 10k185지점이다. 이 지점으로부터 수직구방향으로 떨어져 있는 10k185횡행14m 지점은 수직구로부터 14 m 떨어진 곳을 나타낸다.

Fig. 3은 연결터널과 지하철 본선터널 및 두 터널 교차부의 시공을 보인 것이다. Fig. 3과 같이 지하철 본선터널의 높이는 상반부가 약 4.5 m, 하반부가 약 4.58 m 이고 폭은 약 11.75 m이다. 연결터널의 상반 높이는 약 4.05 m, 하반높이는 약 2.66 m이며 폭은 약 7.6 m이다 [4].

두 터널 교차부의 시공 순서와 내용은 다음과 같다. 수직환기구로부터 연결터널 상부지반에 길이 약 30 m

의 FRP다단그라우팅으로 지하철 본선터널 교차부까지 선 보강하였다. 그라우팅공의 간격은 횡방향으로 1 m, 종방향으로 0.75 m이다. 연결터널 아치 상부를 터널 내부에서 외경 60 mm 두께 4.5 mm의 강관 다단그라우팅으로 보강하면서 굴진하는데 수직구에서 연결터널 상부에 수평방향으로 선 보강한 그라우팅 부분에 강관이 있으면 연결터널 시공 중 강관삽입을 위한 천공에 지장이 있으므로 FRP관을 사용하였다.

연결터널 굴착은 상부 반단면을 ring-cut공법으로 기계굴착 하였으며 연결터널 구간 17 m 중 하부 반단면 10 m도 굴착하였다.

연결터널 상부굴착 완료 후 지하철 본선터널과 접속되는 부분을 굴착하였다. 지하철 본선 터널의 아치높이가 연결터널보다 25 cm 높다. 따라서 연결터널로부터 지하철 본선 방향으로의 종단면은 아치모양의 변화단면이므로 아치곡면을 따라 강관다단그라우팅을 시공하는 것이 불가능하여 1단계로 PVC다단그라우팅으로 Fig. 3과 같이 터널주변을 먼저 보강한 후 지하철 본선터널 단면 아치의 최고점까지 굴착하였고, 아치 최고점에서 지하철 본선 아치를 따라 높이가 낮아져 축소되는 단면이 되는 길이 5.5 m구간은 우레탄 강관그라우팅으

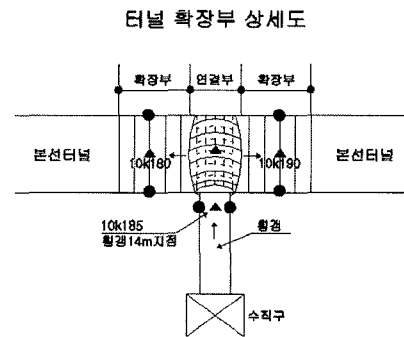


Fig. 2. Layout of tunnels

Table 1. Geotechnical investigation result

구 간	지 층 현 황	1조 사 결 과		
		구 분	분포심도 (GL.-m)	N 치 (TCR/RQD)
대동APT 및 백석길 (터널)	<ul style="list-style-type: none"> • 대동APT, 백석길 구간 지층현황은 매립층, 충적층, 풍화대, 기반암(연암, 보통암, 경암)분포 • 지하수위 분포현황은 GL(-)2.23~5.1 m로 충적층 구간에 분포 • 충적층과 풍화대가 깊게 분포하며 기반암은 흑운모 호상편마암으로 부분적으로 파쇄 및 절리가 발달하고 대동APT구간 GL(-)35~40.0 m구간과 한사랑 삼성APT구간 GL(-)34~34.8 m, 37 m구간에는 부분적으로 암반상태가 불량함 	매립층	1.7~5.6	6/30~8/30
		충적층	3.2~8.4	4/30~36/30
		풍화토	4.5~15.7	12/30~50/11
		풍화암	8.5~18.5	38/30~50/3
		연 암	25.5~30.0	(30~100/0~39)
		보통암	30.0~37.0	(100/63~88)
	경 암	37.0	(100/60~80)	

로 다시 보강하였다. 지하철 본선터널 내로 들어온 연결터널 아치의 반경방향 보강은 GRP(glassfibre reinforced plastics)중공볼트로 추가 보강하였고 주입재는 우레탄을 사용하여 지반을 고결시켰다. 이는 다음단계인 지하철 본선터널 방향으로 굴진 방향을 바꾸어 연결터널의 아치곡면을 지하철 본선 터널의 천정높이에 맞추어 확장 굴착할 때 절단이 쉬워 강관다단그라우팅을 위한 천공이 용이하도록 고려한 것이다. 연결터널이 지하철 본선 터널 내로 굴착해 들어온 부분은 높이가 변하는 변단면 아치이므로 높이가 다른 단면형상의 지보재로 보강하였다.

이어서 연결터널과 지하철 본선터널의 교차부에서 본선터널의 시중점 방향으로 굴진해 나갔다. 연결부 시공중에 설치된 강지보재는 절단해 가면서 0.8 m씩 굴진하였으며 2.4 m 굴진 후 상부에 길이 6 m의 강관우레탄을 반복 보강하면서 굴진하였다. 교차점의 중심에서 시중점 방향으로 약 10 m를 지나면서 강관의 길이를 12 m로 변경하였다.

4. 계측과 계측결과의 분석

4.1 계측종류와 계측위치

Fig. 2는 지하철 본선 터널의 시중점 굴진방향과 계측기 설치 위치 및 계측종류를 보이고 있다. Fig. 2에서 작은 원은 내공변위계를 삼각형은 천단침하계를 표시한 것이다. 연결터널과 지하철 본선 터널 및 두 터널의 교차부에 공통으로 설치한 계측기는 천단침하계이다. 두 터널의 교차부에는 내공변위계를 설치할 수 없었고 교차부와 인접한 연결터널과 지하철 본선 터널의 시중점 방향에 인접하여 내공변위계를 설치하였다. 두 터널의 교차부에 설치한 천단침하계의 계측점의 위치는 10k185로 표시하고 연결터널 내에 설치한 계측점의 위치

는 수직환기구로부터 14 m 떨어져 있으나 지하철 본선 터널의 선형위치가 10k185와 같으므로 10k185c14로 표시하였다. 터널 교차부에서 지하철 본선 터널의 시중점 방향에 설치한 계측점의 위치는 두 터널 교차부의 중심 10k185로부터 전후 약 5 m 떨어졌고 이를 각각 10k180과 10k190으로 표시하였다.

4.2 계측결과의 분석

계측한 결과를 계측점의 위치로 구분하여 다음과 같이 분석하였다. 계측결과인 Fig. 4-Fig. 7은 시간과 막장의 위치 변화에 따라 발생한 변위를 보인 것이다[5]. Fig. 4-Fig. 7에서 cs는 터널의 천단침하, cv는 터널의 내공변위를 나타낸 것이다. 막장의 위치 중 aface는 터널의 상반막장의 위치를, bface는 터널의 하반막장의 위치를 또 sface는 터널 시중점방향으로 상반 막장의 위치를, eface는 터널 중점방향으로 상반 막장의 위치를 표시한 것이다. 가로축은 시간을 보인 것이고 두 개의 세로축 중 오른쪽 세로축은 변위를, 왼쪽 세로축은 막장의 위치를 표시하되 앞의 문자 k를 생략한 것이다.

1) 연결터널 14 m 지점

Fig. 4는 지하철 본선터널 시공을 위한 수직환기구로부터 지하철 터널 본선 방향으로 연결하는 터널 중 수직구로부터 약 14 m 떨어진 곳인 10k185c14 지점에서 계측한 결과를 보인 것이다. Fig. 4에서 오른쪽 세로축은 수직구로부터 떨어진 막장의 위치를 표시한 것이다. 10k185c14 계측점은 지하철 본선 터널 측벽에서 수직구 방향으로 약 2 m 떨어진 곳이며 지하철 본선의 다른 쪽 측벽까지는 약 12.8 m를 더 굴착해야 한다. 이 지점에 설치한 계측기는 내공변위계와 천단침하계이고 계측기 설치 후 터널을 시공할 때 발생하는 수평방향과

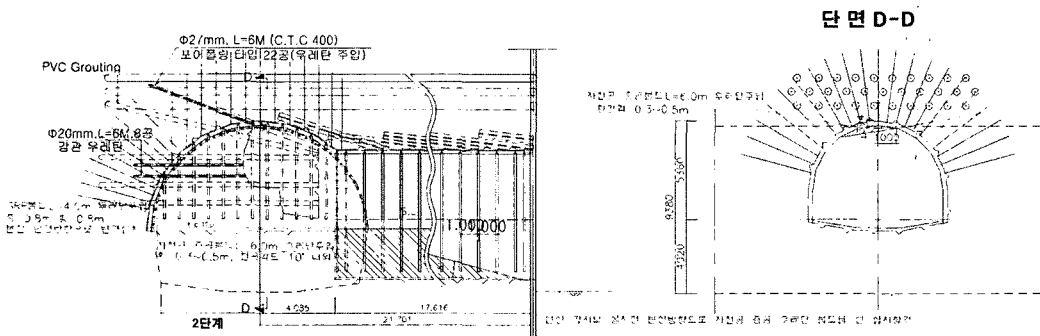


Fig. 3. Supporting method around the intersection area of tunnels

연직방향의 변위를 측정하였다.

계측기 설치점을 굴착 통과한 일자는 2004년 3월 12일이고 계측기를 설치하고 변위를 측정하기 시작한 일자는 2004년 3월 18일이었다. 계측기 설치 후 첫 번째 계측하였을 때 막장의 위치는 수직구로부터 약 17 m 떨어진 지점으로 계측기 설치점에서 약 3 m 더 굴진한 곳이었다. 계측기를 설치할 때는 터널의 상반을 굴착하던 중이었으나 계측기를 설치한 후 상반의 굴진을 일단 중단하였다. 그 후 2004년 3월 19일부터 2004년 3월 25일까지 연결터널 하반을 수직구로부터 약 10 m까지 굴착되 지하철 본선터널 방향으로 상향의 경사를 만들어 수직구바닥에서 본선터널의 상반부로 시공용 장비가 이동할 수 있도록 만들었다. 그 다음 연결터널의 하반굴착을 중단하고 다시 연결터널의 상반을 굴착하면서 지하철 본선터널 방향으로 진행하였다.

Fig.4를 보면 계측기를 설치한 직 후 상반 굴착을 정지하고 연결터널 하반을 굴착하는 동안인 2004년 3월 19일부터 2004년 3월 25일까지 발생한 변위는 천단침하가 상향으로 약 2 mm에서 하향으로 약 1 mm사이에서 변하였고 내공변위는 약 0.5 mm 발생하였다. 천단침하가 상향으로 계측된 것은 터널에서 계측을 시작한 초기 단계로 속련도가 높지 않아 발생할 수 있는 오차로 판단되고 내공변위가 매우 작은 것을 함께 고려할 때 하반 굴착 중 발생한 변위는 거의 없는 것으로 분석된다. 이어 지하철 본선터널을 직교하여 관통하고 지하철 본선터널 먼 쪽 측벽에 도달하도록 연결터널 상반부 약 12.8 m를 굴착할 때인 2004년 5월 17일 까지 본 계측점에서 계측된 천단침하는 하향으로 약 4 mm까지 증가하였고 내공변위도 약 1.3 mm까지 증가하였다. 연결터널과 지하철 본선터널의 교차부를 록볼트 등으로 추가 보강한 2004년 5월 23일까지 천단침하는 변화가 없었고 내공변위의 변화량도 크지 않았다. 따라서 수직환기구에서 연결터널을 굴착하기 전에 연결터널의 상부 지반과 지하철 본선 터널과 교차부까지 길이 약 30

m를 수평천공 후 그라우팅한 보강효과로 연결터널을 굴진하면서 발생한 내공변위는 매우 작은 것으로 판단된다.

그런데 2004년 5월 25일부터 내공변위가 증가하기 시작하였는데 Fig. 5에서 막장의 위치를 보면 이 때가 지하철 본선터널을 시점과 종점 양방향으로 굴착하기 시작한 때이었다. 최종적으로 내공변위는 약 4.7 mm, 천단침하는 약 6 mm에 수렴되었다. 연결터널이 지하철 본선터널을 관통하고 교차부를 보강하는 동안 발생한 변위를 제외하고 교차부에서 지하철 본선터널 시종점 방향으로 굴착하였을 때 발생한 변위의 증분은 내공변위가 약 4.2 mm, 천단침하가 약 2 mm이었다. 발생한 총 변위 중 천단침하는 약 33%, 내공변위는 약 89%가 교차부에서 본선터널을 굴착하기 시작하면서 발생한 것이다. 즉 연결터널은 지하철 본선 터널과 직교하여 T자로 분기되어 있지만 본선터널의 굴착에 따라 연결터널에서 변위가 증가하였다. 따라서 연결터널에서 발생하는 변위는 시간의 경과에 따라 증가하는 현상이기보다 굴진함에 따라 계측점과 막장 사이의 거리가 멀어지기 때문 증가한 것으로 분석되었다. 10k185c14 계측점에서 터널의 변위가 수렴되었을 때 계측점으로부터 굴진한 거리는 터널의 시종점 방향으로 굴착한 거리를 모두 합하여 약 121 m이었다. 터널의 변위가 수렴된 일자는 2004년 10월 6일로 계측점을 굴착한 날로부터 약 207일 경과한 시간이다.

2) 연결터널과 지하철 본선터널의 교차부

수직환기구로부터 굴착한 연결터널이 지하철 본선터널과 교차하는 교차부 중 본선터널의 중앙인 10k185에 천단침하계를 설치하였다. 두 터널이 만나는 교차부를 굴착한 일자는 2004년 4월 24일 이었다. 이 교차부에서 시종점 양방향으로 터널이 굴착되면 세 개의 터널이 교차된 응력중첩의 효과로 터널의 안정성이 약화될 수 있으므로 지하철 본선 시종점 방향으로 터널굴착을 시작하기 전에 교차부를 추가 보강하였다. 추가 보강으로는 교차부의 천정부를 자전공 중공록볼트로 보강하고 우레탄을 주입하였다. 이어서 강관다단 그라우팅을 지하철 본선 시종점 방향으로 보강한 후 교차부를 시종점 방향으로 확장하였다. 이러한 추가 보강작업에 많은 시간이 소요되었고 천단침하계를 설치한 일자는 2004년 6월 2일 이었다. 또 교차부에 천단침하계를 설치한 시점에 지하철 본선 터널은 시종점 방향으로 굴진된 상태였고 막장의 위치는 시점방향으로 10k177, 종점방향으로 10k193으로 계측기를 설치한 위치인 10k185로부

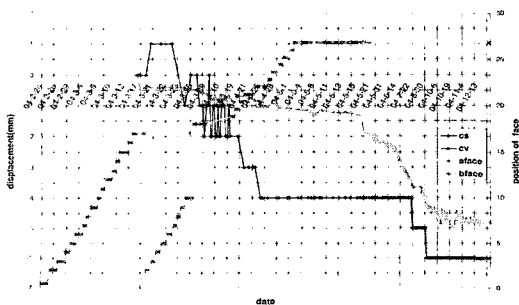


Fig. 4. Displacement measured during tunnel excavation at 10k185c14

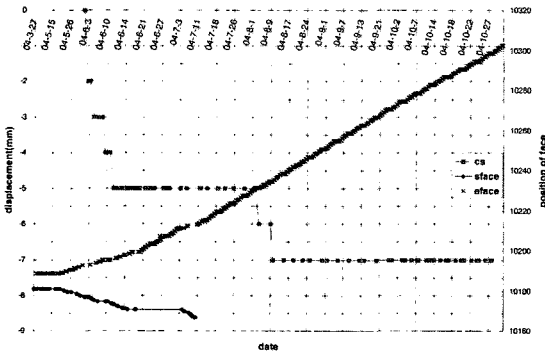


Fig. 5. Displacement measured during tunnel excavation at 10k185

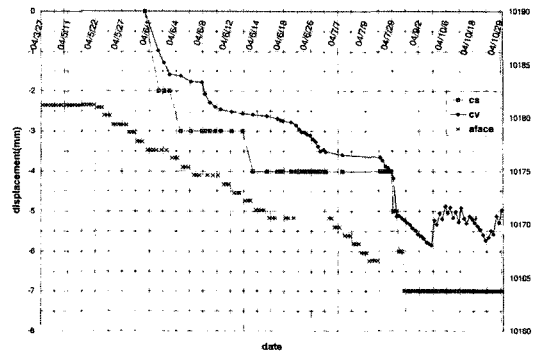


Fig. 6. Displacement measured during tunnel excavation at 10k180

터 각각 약 8 m 떨어진 곳이었다.

터널 굴착 중 교차부 10k185에서 발생한 천단침하는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 천단침하 변화도에서 침하가 빠르게 증가한 원인을 먼저 분석하였다. 침하가 빠르게 증가한 2004년 6월 2일과 3일에는 터널굴착을 하지 않고 강관다단 그라우팅을 위하여 막장전방 터널상반부 주변에 천공을 하던 단계였다. 또 변위가 증가한 6월 4일과 5일, 6월 7일과 8일, 8월 4일과 5일 및 8월 10일과 11일도 그라우팅용 강관을 삽입하기 위한 천공단계였다. 강관삽입을 위한 천공은 4 m 굴진할 때마다 반복하였다. 또 약 4 m 굴진하면 변위속도가 증가하는 현상을 보였다. 즉 막장으로부터 보강한 강관 끝단까지의 거리가 약 8 m 이상으로 유지되면 천단침하 증가속도가 가속 되지 않았다. 따라서 터널상반부 주변에 길이 12 m의 강관을 설치하고 그라우팅을 한 후 막장으로부터 약 8 m 이상의 강관을 남기면서 다시 강관그라우팅 후 굴착하는 방법으로 터널상반부 주변에 3열의 강관 다단 그라우팅이 되도록 보강한 시공방법은 적절한 것으로 판단되었다.

Fig. 5에서 2004년 5월 23일부터 2004년 6월 19일까지는 두 터널의 교차점에서 시중점 양방향으로 병행 굴진하였다. 양방향으로 굴진하는 동안 발생한 천단침하는 약 5 mm이고 이 기간동안 굴진한 거리는 시점방향으로 약 4 m, 종점방향으로 약 3.2 m이었다. 시점방향으로 약 16.8 m 굴진한 2004년 7월 10일 이후에는 종점방향의 굴진만 계속하였는데 2004년 8월 2일 종점방향 막장의 위치가 10k231.4 지점에 도달할 때까지 천단침하는 변화가 없었으나 그 지점에서 10k235.4까지 약 4 m를 추가 굴진하는 동안 약 2 mm의 천단침하가 더 발생하였다. 그 후 종점방향으로의 굴진만 계속되고 있지만 더 이상의 천단침하는 발생하지 않고 수렴된 상태를 유지하고 있다. 최종적으로 발생한 천단침하는 약 7

mm이었다. 천단침하가 수렴된 때는 2004년 8월 12일로 계측점을 굴착한 후 경과한 시간은 약 110일 이었고 본선터널의 시중점 방향으로 굴진한 거리는 시점방향으로 약 16.8 m, 종점방향으로 약 50.4 m로 총굴진거리는 약 67.2 m이었다.

3) 터널 교차부 인접의 시중점 방향

연결터널과 지하철 본선터널과 교차하는 곳에서 지하철 본선터널 시중점 방향으로 굴착하면서 교차부와 인접한 본선터널에서 터널의 천단침하와 내공변위를 계측하였다. 연결터널의 폭이 약 7.2 m이고 교차부의 중앙 위치는 10k185인데 이 위치에서 약 5 m 떨어진 시점방향 10k180과 종점방향 10k190 지점에 계측기를 설치하였다. 계측기를 설치하고 첫 번째 계측을 시작한 일자는 2004년 6월 2일이었고, 이 때 막장위치는 시점방향으로 10k177, 종점방향으로 10k193으로 계측점의 위치로부터 각각 약 3 m 떨어진 곳이었다. 또 계측점을 굴착한 일자는 시점방향인 10k180지점은 2004년 5월 25일, 종점방향인 10k190지점은 2004년 5월 24일이었다.

계측결과는 시점방향인 10k180과 종점방향인 10k190으로 나누어 분석하였다. Fig. 6은 두 터널의 교차부에서 지하철 본선터널 시점 방향인 10k180 지점에서의 계측결과이다. Fig.6에서 내공변위가 급속하게 증가한 2004년 6월 2일, 6월 8일, 6월 15일에는 시점방향의 터널에서 강관설치를 위한 천공작업을 하던 때이다. 길이 12 m의 강관을 설치하고 다단 그라우팅 후 약 4 m 굴진하면 변위속도가 증가하는 현상을 보였다. 즉 막장전방으로 보강된 강관의 길이가 약 8 m 보다 짧아지면 내공변위속도가 증가하였다. 따라서 터널상반부 주변에 길이 12 m의 강관을 설치하고 그라우팅을 한 후 4 m 굴착하면 다시 강관그라우팅을 후 굴착하는 시공방법은 적절한 것으로 판단되었다. 시점방향으로는 2004년

7월 10일 10k166.8까지 굴착한 후 2005년 1월 현재 더 이상 굴진하지 않은 상태이다. 그런데 2004년 7월 13일 종점방향인 10k215에서 강관삽입용 천공을 할 때 10k180 지점의 내공변위 증가속도가 커졌다. 또 2004년 7월 26일 종점방향인 10k223.4에서 강관다단 그라우팅을 위하여 막장전방으로 터널상반부 주변에 천공을 하던 단계에 10k180 지점에서 내공변위 속도가 증가하였다. 시점방향의 계측점인 10k180에서 시점방향의 굴착을 10k166.8에서 멈추고 종점방향으로만 굴진하면서 증가한 내공변위는 약 1.5 mm이고 증가한 천단침하는 약 3 mm이다. 수렴된 최종변위는 내공변위가 약 5.3 mm이고 천단침하는 약 7 mm이다. 변위가 수렴할 때까지 굴진한 거리는 시점방향으로 18.6 m이고 종점방향으로 약 81.6 m로 총굴진길이는 약 100 m이며 변위가 수렴된 일자는 2004년 9월 20일 경으로 수렴에 소요된 시간은 약 119일이었다.

다음으로 교차부에서 지하철 본선터널 종점방향에 설치한 계측결과를 분석하였다. Fig. 7은 두 터널의 교차부에서 지하철 본선 터널 종점 방향인 10k190 지점에서의 계측결과이다. 이 지점에서의 전체적인 변위양상은 시점방향의 계측점인 10k180과 유사하였다. Fig. 7을 보면 내공변위는 강관삽입을 위한 천공과정 중 나타나는 변위속도의 증가가 10k180 지점에서의 내공변위와 같이 뚜렷하지는 않지만 2004년 6월 3일, 6월 7일, 6월 18일, 6월 28일, 8월 9일의 천공 중 내공변위속도가 증가하였다. 수렴된 내공변위는 약 5 mm이고 수렴된 천단침하는 약 7 mm이다. 변위가 수렴할 때까지 굴진한 거리는 시점방향으로 18.6 m이고 종점방향으로 약 84 m로 총굴진길이는 약 102.6 m이며 변위가 수렴된 일자는 2004년 10월 5일 경으로 수렴에 소요된 시간은 약 133일이었다. 변위가 수렴할 때까지의 굴진거리를 종점방향만 고려한다면 계측점에서 지하철 본선 터널 폭 약 11 m의 약 7.7배로 일반적으로 계측점으로

부터 터널 직경의 2~0배를 굴진하면 변위가 수렴한다는 연구보고[7]와 유사한 현상을 보였다.

4.3 계측결과 종합 고찰

지하철 본선 터널을 굴착하기 위하여 진입용으로 굴착한 연결터널은 지하철 본선터널과 교차되고 그 교차부에서 지하철 본선 터널의 시점과 종점방향으로 굴착하였다. 따라서 교차부의 중앙과 교차부에 인접한 곳에 계측기를 설치하고 세 방향의 터널이 교차하는 부분의 안정성을 계측결과로부터 검토하였다.

교차부의 안정성을 유지하기 위하여 수직환기구에서 교차부까지의 연결터널 상부 지반을 그라우팅으로 보강하였고 연결터널을 굴착하면서 강관 다단그라우팅으로 다시 보강하였으며 교차부로부터 본선터널의 시점과 종점방향으로 굴착하기 전에 교차부를 자전공 중공 록볼트로 보강하고 우레탄을 주입하였다. 다시 시종점 방향으로 터널을 굴진하기 전에 교차부에 강관다단 그라우팅으로 또 보강하였다. 계측기를 설치할 때 막장과 계측기 설치점까지의 거리는 약 3 m이었다.

교차부인 10k185와 교차부와 인접하여 시점방향인 10k180, 종점방향인 10k190의 계측점과 연결터널의 계측점인 10k185c14에서 계측된 변위 중 천단침하는 약 6-7 mm이고 내공변위는 약 5 mm로 거의 같았다. 즉 교차부와 교차부 인접 주변의 터널에서 발생한 변위는 거의 동일하였다. 이와 같이 발생한 변위를 터널의 폭이나 높이를 기준으로 변형율로 나타내면 연직방향의 변형율은 약 0.15%, 수평방향의 변형율은 약 0.045%의 작은 값이고 보강 후 시공한 터널 교차부는 더 이상 변형되지 않은 안정된 상태에 도달한 것으로 확인되었다[6,7].

수직환기구로부터의 연결터널과 지하철 본선터널이 교차하는 곳에서 계측한 천단침하는 시종점 양방향으로 굴진한 거리의 합이 약 50.4 m를 넘었을 때 수렴되었고 시간으로는 계측기 설치점을 굴착한 후 약 110일이 경과한 후이었다. 그러나 터널 교차부에 가까운 시종점 방향의 10k180과 10k190에 설치한 내공변위가 수렴되었을 때 굴진거리의 합은 약 100~102.6 m이고 수렴도리 때까지 경과된 시간은 119~133일 이었다. 교차점인 10k185와 교차부에 인접한 시종점 방향에 설치한 계측기 10k180 및 10k190에서 변위가 수렴될 때까지의 굴진거리와 경과시간이 차이를 보이는 것은 계측기의 정밀도의 차이 때문이다. 천단침하는 측정오차가 약 1 mm인데 비하여 내공변위측정은 0.01 mm까지 측정이 가능하여 미세하게 변하는 변위도 측정이 가능하였다. 따라서 터널 교차부와 인접하여 시점과 종점방향인 10k180과 10k190에서 비록 천단침하가 변하지 않

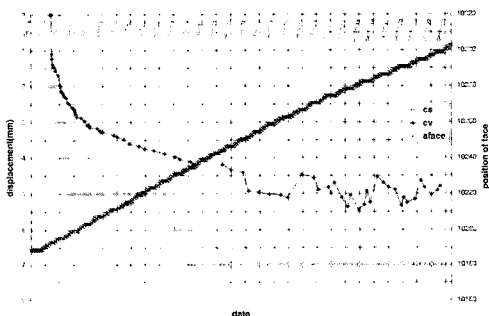


Fig. 7. Displacement measured during tunnel excavation at 10k190

있더라도 내공변위가 변하였기 때문에 내공변위를 기준으로 수렴여부를 판단하였다. 또 지하철 본선 터널의 시점방향과 종점방향의 두 측정간 거리는 약 10 m이고 두 측정 사이의 교차부에 천단침하계가 설치되어 있으므로 교차부에서 발생한 변위의 수렴시간과 굴진에 따른 수렴거리는 10k180과 10k190 지점에서의 결과와 거의 같을 것으로 추정된다. 이는 다음과 같이 연결터널에서 계측한 결과를 분석해 추정할 수 있었다. 수직환기기와 지하철 본선터널을 연결하는 터널의 10k185c14 지점에 설치한 계측기 중 내공변위 측정결과를 보면 변위가 수렴될 때까지 굴진한 거리는 지하철 본선터널의 시종점 방향까지 합하여 약 121 m이고 계측점을 굴착한 후 수렴 때까지 경과한 시간은 약 207일이다. 연결터널은 지하철 본선터널로부터 직각으로 꺾어진 방향이지만 지하철 본선터널 측벽으로부터 연결터널 내의 계측점인 10k185c14까지는 약 2 m로 가깝기 때문에 본선터널을 굴착할 때에 연결터널에서의 변위도 증가하였다.

터널 굴착 중 발생한 총변위가 비교적 크지 않기 때문에 약 0.8 m씩 굴진해 나갈 때 발생하는 변위의 증가는 매우 작았다. 또 길이 12 m의 강관을 막장전방에 삽입하고 다단그라우팅으로 선보강을 3회 반복하였기 때문에 터널 굴진 중 발생한 변위가 작은 것으로 분석된다. 그렇지만 변위속도가 증가되는 경우는 약 4 m를 굴진하고 다시 강관삽입을 하기 위하여 천공하는 과정에서 나타났다. 따라서 막장 전방으로 강관 다단그라우팅을 보강하고 약 4 m 굴진하면 다시 강관 다단그라우팅을 보강한 시공방법은 터널의 변형을 억제하는데 적절한 공법으로 분석되었다.

수직환기기와 지하철 본선 터널을 연결하는 터널에서 약 10 m 구간에서는 터널하반도 굴착하였다. 연결터널의 하반을 굴착하는 동안 10k185c14에 설치한 계측기에서 발생한 변위는 거의 없는 것으로 분석되었다.

연결터널을 교차부까지 굴진한 후 굴진을 일단 멈춘 상태에서 교차부 아치를 추가 보강하였다. 그 동안 연결터널 10k185c14 지점에 설치한 계측기의 변화는 크지 않았다. 그러나 다시 굴진을 재개하여 막장의 위치가 지하철 본선 터널 시종점 방향으로 멀어짐에 따라 10k185c14 지점에서의 변위는 크게 증가하였다. 즉 터널의 변위는 굴착 후 시간의 경과에 따라 증가하는 것보다 계측점과 막장사이의 거리가 멀어지면 나타나는 막장지지효과의 감소 때문에 주로 발생하는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

수직환기기로부터 굴착한 연결터널과 지하철 본선 터널이 교차하는 주변에서 터널상반부를 굴착할 때 발생하는 변위를 계측하였고 이를 분석하여 터널 교차부의 안정성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 연결터널과 지하철 본선 터널이 교차하는 부분은 지표로부터 터널아치까지의 심도가 약 20 m로 작고 지반이 풍화토 혹은 풍화암으로 연약한 상태였으나 굴착 후 교차부 주변에서 계측한 변위가 수렴되었으므로 두 터널의 교차부는 역학적으로 안정된 것을 확인하였다.
- 2) 두 터널 교차부에서 굴착 중 막장에서 약 3 m 이격된 곳에 설치한 계측기에서 수렴된 변위는 천단침하가 약 6-7 mm이고 내공변위는 약 5 mm로 지표로부터 터널까지의 심도와 지반조건을 고려할 때 작은 변위였으며 이는 터널을 길이 12 m의 강관 다단그라우팅 3열로 막장전방에 선보강하고 두 터널의 교차부는 길이 6 m의 록볼트로 추가 보강한 것이 적절한 보강으로 판단되었다.
- 3) 터널 시공 중 변위속도가 증가하는 시기는 막장 전방에 강관을 삽입하고 약 4 m 굴진하였을 때이다. 따라서 4 m 굴진 할 때마다 강관다단 그라우팅을 중첩 보강한 것은 터널의 변위를 억제하는데 효과적인 것으로 분석되었다.
- 4) 내공변위를 기준으로 터널 굴착 중 발생한 변위가 수렴되는 시간은 계측점을 굴착한 후 약 117-207일이었다. 또 내공변위가 수렴되었을 때 계측점으로부터 막장까지의 거리는 약 100-121 m이었다.

감사의 글

지하철 터널 설계 자료와 시공 정보를 제공해 주신 대림산업주식회사 관계자의 협조에 감사드립니다.

참고문헌

1. 남기천, 2002, 저심도 터널의 굴진면 압출변형제어를 위한 보강연구, 수원대학교 박사학위논문, 57-71.
2. 남기천, 허 영, 김치환, 유광호, 2002, RPUM과 유리섬유 파이프로 막장을 보강한 토사터널의 변형거동, 터널기술, 한국터널공학회는문집, 제4권, 제3호, 185-193.
3. 대림산업주식회사, 2003, 지하철 9호선 6공구 지질조사보고서.
4. 대림산업주식회사, 2003, 지하철 9호선 6공구 설계보고서.
5. 대림산업주식회사, 2004, 지하철 9호선 6공구 계측분석보

고서.

6. S. Sakurai, 1988, Back analysis of measured displacements in a shallow tunnel excavated in sandy material, International Symposium on Underground Engineering, New Delhi, India, 33-42.
7. Chikaosa Tanimoto, Kazutoshi Michihiro, 1988, determination of rock mass strength through convergence measurements in tunnelling, International Symposium of Field Measurements in Geomechanics, Kobe, 1069-1078.



김치환

1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사

1985년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

1990년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 062-290-1468

E-mail: kimcheen@korea.com

현재 우석대학교 토목공학과 교수
