

지하철 대단면 터널의 설계와 시공관리 사례 Design and Construction of a Large Section Tunnel for a Subway Station

문상조¹⁾, Sang-Jo Moon, 장석부²⁾, Seok-Bue Chang, 정준화³⁾, Joon-Hwa Jeong

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 터널부 상무이사, Director, Yooshin Engineering Co.,

²⁾ (주)유신코퍼레이션 터널부 차장, Manager, Yooshin Engineering Co.,

³⁾ (주)유신코퍼레이션 전무이사, Executive Managing Director, Yooshin Engineering Co.,

SYNOPSIS : Recent development cases of transportation utilities using tunnelling method in metropolitan sites have been increased due to the heavily complex environments and restrictions of construction works. The progress of tunnel design and construction to be supported by the tunnel analysis and measurement techniques using computers have increased adoptions of large section tunnels. In this paper, many factors to be considered in designing large section tunnels are discussed and the case of the construction of the subway station tunnel which is recently completed is introduced. This tunnel has a width of 24 m, a height of 16 m, and a excavation section area of 366 m².

Key words : large section tunnel, tunnel design, tunnel construction, subway tunnel station

1. 서 론

80년대를 거쳐 90년대에 이르러 도심지 지하철 터널공사에 대한 경험이 축적됨에 따라 터널은 점차 대형화되는 경향을 띠게 되었다. 대단면 터널의 증가는 단면의 대형화에 수반되는 굴착장비 및 계측기술의 발전과 더불어 터널의 구조적 안정성을 비교적 상세하게 예측할 수 있는 터널 해석기법(수치해석)의 발전에 힘입은 바 크다. 또한, 터널보강 공법의 발전은 터널의 대형화를 불량한 지반에까지 확대 적용하는데 큰 도움이 되고 있다.

이제까지 적용되어 온 일반적인 터널정거장은 승객의 승하차 플랫폼 공간을 포함하는 폭 20m 내외, 높이 10m 정도 규모로써 단면 중간에 기둥이 위치하는 2-arch나 3-arch 형식이 적용되어 왔다. 이러한 기둥이 있는 터널은 시공상의 복잡성과 방수처리의 어려움 등이 주요 단점으로 지적되어 왔으나, 대단면 터널의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 불가피한 선택이었다.

최근 서울지하철 6호선 일부 구간의 암반구간에 건설되는 정거장은 승강장 뿐 아니라 대합실까지 포함하는 대단면 터널을 기둥이 없는 대단면 터널로 건설하고 있다. 이 중 공사진척이 가장 빠른 ○○○ 정거장 터널은 폭 24m, 높이 16m, 굴착 단면적 366 m² 의 1-arch 대단면 터널로써 도심지 저심도에서 건설되는 터널규모로는 국내는 물론 세계적으로도 흔치 않은 사례이다. 따라서, 시공과정에서는 이제까지 경험하지 못했던 새로운 문제점들이 대두되었으며, 이에 대한 대책이 요구되었다.

본 논문은 6호선 대단면 터널 정거장의 건설과정에서 발생했던 이러한 문제점과 대책 등을 정리하여 소개하였으며, 개선사항을 제안하였다.

2. 지하철 대단면 터널사례

지하철에서 대단면 터널은 플랫폼이 필요한 정거장 구간과 복선 이상의 선로공간이 필요한 유치선구간과 선형간격의 변화구간 등에서 적용된다.

터널정거장의 주류를 이루는 것은 그림 1(a)와 같은 2-arch 터널로써 서울지하철, 대구지하철, 분당선 등의 많은 정거장에 적용되고 있는 가장 일반적인 형태이다. 정거장 폭이 이보다 더 크거나 지반조건이 불량한 경우에는 그림 1(b)와 같은 3-arch 터널로 계획되는 경우가 많다. 그림 1(c)는 서울지하철 6호선 대단면 터널 정거장으로써 승강장과 대합실을 수용하며 기둥이 없는 1-arch 대단면 터널로 건설되고 있다.

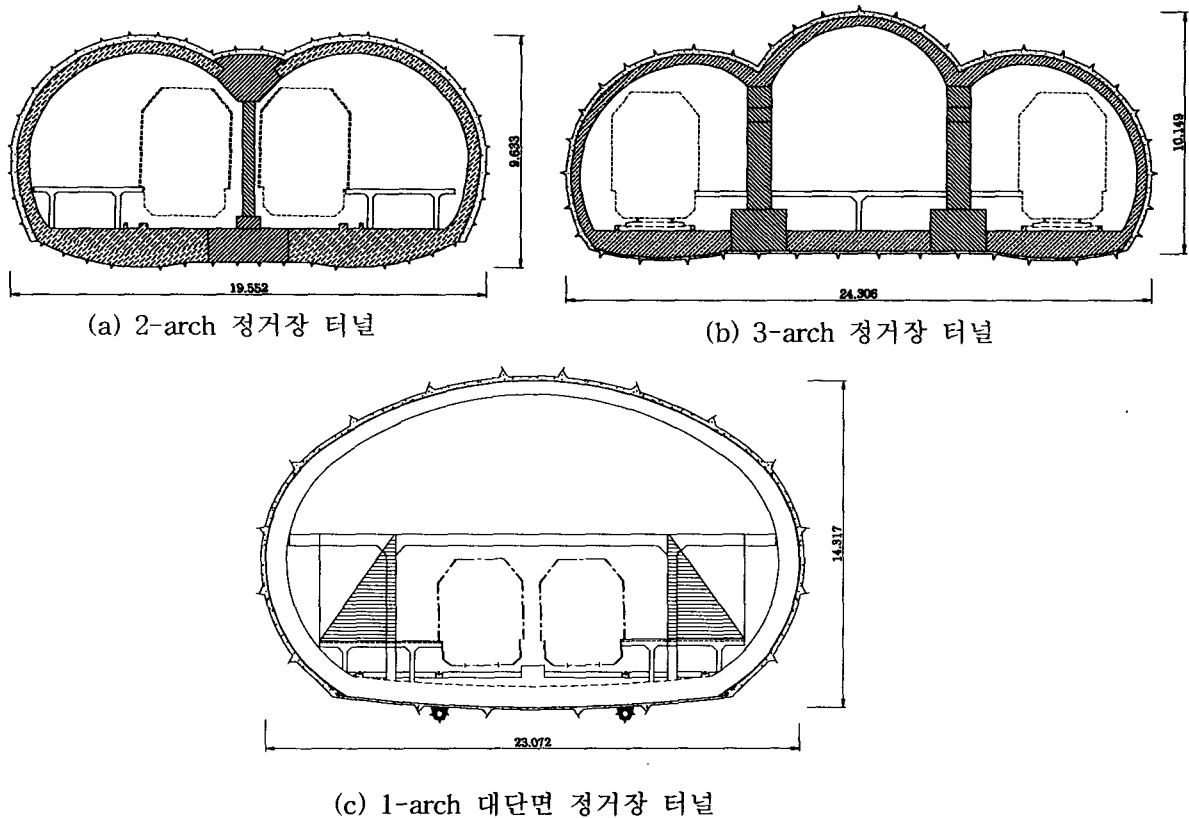


그림 1. 터널 정거장의 표준단면도에.

3. 대단면 터널의 특성

대단면 터널은 굴착단면의 규모로 인하여 지반교란 범위가 크기 때문에 터널 안정성 확보 및 효율적인 공사계획 수립 및 작업원의 안전확보 측면에서 세밀한 검토가 필요하다. Megaw와 Bartlett(1982)이 제시한 대단면 터널의 특성을 참조하면, 대단면 터널의 계획시에는 다음과 같은 사항에 대한 검토 및 대책이 필요하다.

3.1 교란되는 지반의 규모와 거동양상

터널단면의 크기가 증가하면, 굴착에 의한 지반교란의 영향범위가 증가할 뿐 아니라 터널 주변지반의 응력-변형의 거동양상 자체가 달라질 수 있다. 또한, 동일한 지반조건일지라도 터널단면이 대형화되면,

지보재 설치시간의 지연으로 시간요인 측면에서도 불리해지게 된다.

그림 2는 저심도 교통터널에서 발생하기 쉬운 예로써, 기준면고인 터널 바닥부는 종단선형상 고정되기 때문에 터널의 크기가 증가하면 토피와 천정부의 양호한 지층두께가 감소한다. 또한, 경우에 따라서는 천단부와 측벽부가 서로 다른 지층에 위치하기도 한다.

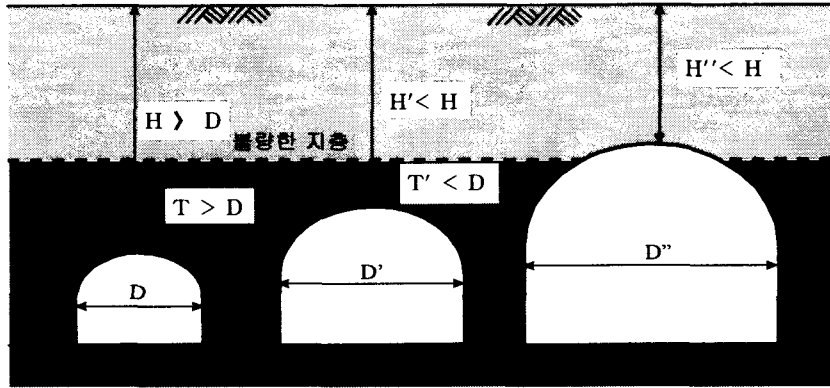


그림 2. 저심도 교통터널의 크기에 따른 토피 및 주변 지층 변화.

굴착높이가 증가하면 막장 전면 지반은 높은 사면과 유사한 위험성을 갖게 되어 절리면이 활동면을 제공할 가능성이 높아진다. 또한, 터널의 종방향 아치효과가 감소하여 가상 활동면이 느슨해져 마찰전단강도가 감소하여 막장의 안정성이 낮아진다.

3.2 굴착면의 천정부와 측벽부의 접근성

대단면 터널은 높이가 크기 때문에 작업원의 신장만으로는 굴착면에 접근할 수 없으므로 작업원이 접근할 수 없는 위치에는 장비가 제공되어야 한다. 경우에 따라서는 터널내 장비의 작업반경을 초과할 수도 있으므로, 벤치의 높이를 결정할 때는 갱내 굴착장비의 제원도 고려하여야 한다.

터널굴착이 완료된 후, 후속공정으로써 방수, 철근조립, 라이닝 타설 등의 작업시에도 별도의 대형 작업대차가 요구된다.

3.3 터널의 지지

터널지지에 필요한 지보압은 굴착면적, 아칭작용의 정도, 연직하중의 증가에 비례하나 터널크기에 선형적으로 증가하지 않는다. Terzaghi의 이완하중을 예로 검토하면, 이완하중고(H_p)는 양호한 암반에서는 터널폭(B)에 비례하고 불량한 지반에서는 폭과 높이(H)의 합($B+H$)에 비례한다. 따라서, 터널직경이 2배가 되면, 양호한 암반에서는 이완하중고가 2배, 불량한 지반에서는 4배까지 증가한다. 이완하중에 의한 지보재에 작용하는 사하중은 터널폭과 이완하중고의 곱으로 정의되므로 하중은 4배에서 8배까지 증가하게 된다.

또한, 곡률반경이 증가하기 때문에 터널지보재의 아칭효과가 저하되어 지보재의 지내력이 감소한다. 정수압 조건의 원형터널에 타설된 슛크리트의 경우, 약 0.5배의 강도감소효과가 발생한다.

3.4 막장당 굴착량과 작업싸이클 시간

굴진장이 동일한 조건에서 굴착 단면적이 증가하면, 굴착 및 버력처리량이 증가하여 지보재 설치가 지연되게 되어 터널 주변 지반의 소성화 또는 이완이 상대적으로 크게 된다. 따라서, 막장의 안정성이

저하됨은 물론 지보재가 부담하여야 할 하중이 크게 증가한다.

대단면 터널의 굴착계획에는 2가지 접근방법이 있다. 즉, 보조공법을 이용한 지반보강을 통하여 굴착 단면의 규모를 늘리는 방법과 별도의 보조공법 없이 단면을 소규모로 분할하는 방법이다.

3.5 막장면이 복합지층에 위치

도심지 교통터널은 저심도에 위치하므로 대단면 터널막장은 천정부와 바닥부의 지층이 다를 가능성이 매우 크다. 막장이 암반층과 연약한 토사층으로 구성되는 경우에는 발파나 기계굴착과 같은 일관된 굴착공법의 적용이 어려워 시공성이 저하되기 쉽다. 또한, 두 지층의 경계부에서는 다량의 지하수가 유입되기 쉽고 이러한 유입수로 인해 막장자립성과 시공성이 저하될 수 있다.

3.6 낙하에 의한 안전사고

대단면 터널에서는 소규모 낙석도 높이에 의한 에너지로 인하여 작업원의 안전을 크게 위협한다. 또한, 노출된 막장면 상부에서의 암석블록의 활동은 사면 하부에서와 같은 위험성을 가지고 있다. 이외에도 작업대차의 사용으로 작업원의 추락 가능성이 상존하며, 작업도구의 낙하도 작업원의 안전을 위협하는 요소가 된다.

4. 대단면 터널정거장의 설계 및 시공

본 논문에서는 6호선 대단면 터널정거장 중에서 공사진척이 가장 빠른 ○○○ 정거장 터널에 대한 내용을 소개하였다.

4.1 개요

대단면 터널정거장은 그림 3의 일반도와 같이 1층은 열차통로와 승강장을 수용하고 2층은 대합실과 역무 관련 기능실을 포함하는 2층 구조로 되어 있다. 당초 계획시에는 개착식, 2-arch 터널(승강장)과 개착(역무실) 병용식, 대단면 터널방식의 3개안이 비교되었다. 최종안은 교통영향 및 지장물 처리 등이 유리하고 홍콩지하철에 유사 사례가 있다는 점에 착안하여 대단면 터널방식으로 결정되었다.

터널은 폭 24m, 높이 16m, 연장 200m, 굴착 단면적은 366 m² 규모로 일반 복선터널 규모와 비교하면 상당한 규모임을 알 수 있다. 실제로 터널굴착이 완료되었을 때의 터널내 분위기는 터널이라기보다는 지하비축용 대공동이나 지하발전소와 같은 대규모 캐번 안에 있는 느낌을 준다. 표 2는 연암반 조건에 적용되는 일반 지하철 복선터널과 대단면 터널정거장을 비교한 것이다.

터널 주변의 기반암은 호상 흑운모 편마암으로 암반의 RMR은 50내외를 보이고 최소 토피는 약 20m 정도이다.

4.2 주요 시공관리 사항

4.2.1 굴착계획 및 관리

당초 터널굴착은 1회 버력처리량과 막장 안정성을 위하여 3단 벤치 6분할 굴착으로 계획하였다. 그러나, 시공계획시 1단 측면터널의 공간이 협소하여 5m 이상의 록볼트를 시공하기가 곤란하고 측면부에서의 굴착장비 사용에 어려움이 예상되었다. 이에, 측면터널의 높이를 5m에서 6.4m로 하고 3m의 벤치 높이를 4m로 하여 3단 벤치를 2단으로 하여 그림 3과 같은 시공계획도로 조정하였다.

표 2. 지하철 복선터널과 대단면 터널 비교

| 구 분 | 복선터널(연암 대응 패턴) | 대단면 터널정거장 | 비 고 |
|---------|--|---|---|
| 단 면 크 기 | <ul style="list-style-type: none"> • 폭 : 약 11m • 높이 : 9m 이하 • 굴착단면적 : 약 80m² | <ul style="list-style-type: none"> • 폭 : 약 24m • 높이 : 약 16m • 굴착단면적 : 약 366m² | <ul style="list-style-type: none"> • 2.2 배 • 1.8 배 • 4.6 배 |
| 굴 착 방 법 | • 상, 하반 롱벤치 | • 측면 선진도갱, 다단벤치 | |
| 지 보 재 | <ul style="list-style-type: none"> • 숏크리트 : 15cm 이하(건식) • 록볼트 : 상반 시스템볼팅(L=3m) | <ul style="list-style-type: none"> • 숏크리트 : 20~25cm(습식강섬유) • 록볼트 : 천장(L=3m, 5m 병용) 및 측벽부(L=6m) | |
| 콘크리트라이닝 | <ul style="list-style-type: none"> • 두께 : 40cm • 콘크리트 강도 : 240 kg/cm² | <ul style="list-style-type: none"> • 두께 : 70cm • 콘크리트 강도 : 350 kg/cm² | |

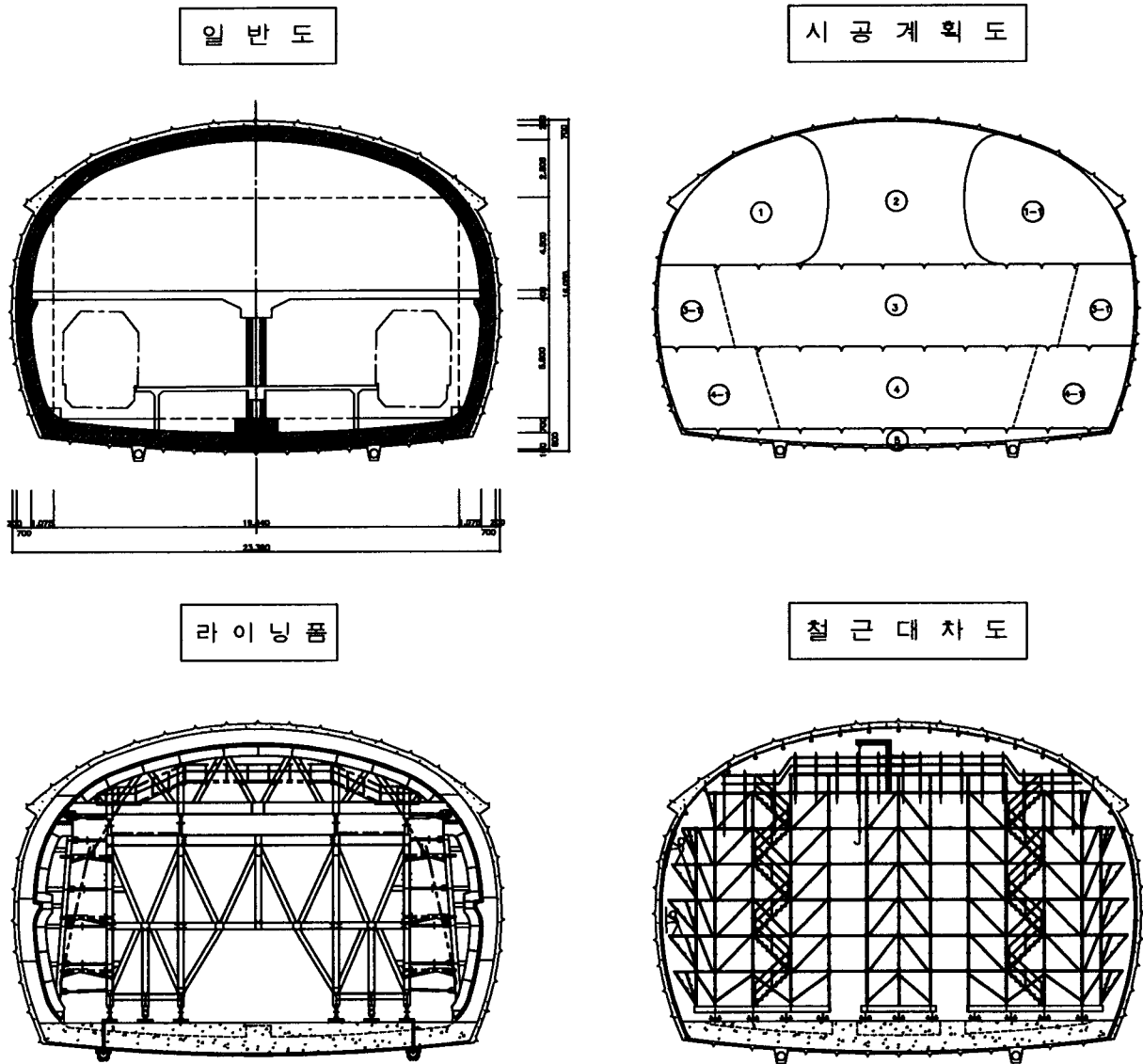


그림 3. 대단면 터널 정거장.

굴착은 천공/발파 공법을 적용하였고 도심지임을 감안하여 진동허용치는 0.5cm/sec로 하였다. 1회 굴진장은 막장 안정성과 발파진동을 고려하여 측면 선진굴착부 ①는 1.5m, 막장 안정성 유지에 가장 중요한 락필라부 ②는 0.75m로 하였다. 벤치의 1회굴진장은 3m정도로 하였고 중앙부 벤치는 연직천공을 통한 사면 벤치발파기법을 적용하여 진동감소 및 시공효율을 도모하였으며, 측벽부 벤치는 수평천공을 통하여 여굴방지 및 굴착면 형성을 도모하였다.

굴착계획의 변경에 의한 터널 안정성을 수치해석으로 검토한 결과 당초 굴착계획과의 차이는 미소하였다. 변경된 시공계획으로 시공한 결과, 선진도강 터널의 충분한 공간확보로 굴착장비 이용도 원활하였고 단면분할 수가 감소하여 공사기간을 단축할 수 있었다.

4.2.2 지보재 시공

터널지보재로는 슛크리트와 록볼트가 사용되었으며, 천정부에는 낙석방지 및 선형유지를 위하여 강지보공(H100)이 계획되었다. 슛크리트는 강섬유 슛크리트(steel fiber reinforced shotcrete, SFRS)가 사용되었으며, 두께는 터널 부위별로 천 정부는 25cm, 측벽부는 20cm로 하였다. 강섬유 슛크리트는 슛크리트 자체의 인장강도와 부착력을 향상시켜 주므로 철망을 생략할 수 있으므로 슛크리트 균열억제와 터널 시공 공정의 단순화를 도모할 수 있었다. 천정부에는 길이 3m와 5m의 록볼트가 굴착단계별로 적용되었고 어깨부와 측벽부에는 6m 길이의 록볼트가 적용되었다.

천정부 강지보재는 굴착면의 선형과 낙석방지용으로 계획되었으나, 설치시간이 길어 후속 공정이 지연되고, 양 측면 굴착후 중앙부 굴착시 강지보재의 연결이 원활치 않았다. 또한, 자체 처짐에 의하여 당초 강지보재 시공의도를 충족시키기가 어려웠다.

이에, 낙석방지를 위해서는 신속하게 설치할 수 있는 짧은 록볼트를 적용하고 선형유지를 위해서는 경량의 L형강(L50x50x4)을 사용하자는 의견이 국내외 전문가에 의하여 제시되었으나, 터널공사가 너무 많이 진척된 후에 결론이 도출되어 적용되지는 못하였다. 향후 공사에는 참고가 될 사항으로 생각된다.

4.2.3 계측관리

수치해석결과에 의하면, 지표침하는 3mm, 천단침하는 5mm 정도가 발생할 것으로 예상되었다. 현장 계측결과에 의하면, 지표침하는 최대 15mm가 발생하였고 동일위치에서의 지중침하량도 15mm 내외로 발생하여 해석값보다 큰 값이 측정되었다. 다만, 슛크리트 균열 등의 이상거동은 없었으며 천단변위와 내공변위는 경시변화율이 완만하게 수렴된 것으로 보아 터널은 안정을 이룬 것으로 판단되었다. 그러나, 계측결과에 비추어 실제 터널 주변 암반 조건은 해석조건보다 더 불리하였던 것으로 판단된다.

따라서, 계측결과를 토대로 정밀한 재해석이 실시된다면 대단면 터널 건설후 정거장 부대시설 건설을 위하여 터널주변에서 시공되는 다른 구조물에 의한 영향을 보다 정밀하게 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2.4 콘크리트 라이닝 시공

당초에는 비배수 터널로 계획되었으나, 시공과정에서 배수터널로 변경되어 그림 3의 일반도와 같은 인버트가 생략된 단면으로 시공되었다. 콘크리트 라이닝은 측벽부와 천 정부는 70cm, 바닥부는 80cm 로 하였다. 콘크리트의 일축압축강도는 350 kg/cm² 이고 1회 타설 연장은 6.3m로 1회 타설량은 306m³ 이다. 도심저 지심도에서 건설되는 대단면 정거장 터널임을 감안하여 콘크리트라이닝에는 철근보강을 하여 이완하중과 잔류수압에 대응하도록 하였다.

1-arch 대단면 터널의 콘크리트 라이닝을 타설한 경험이 전무하여, 콘크리트 라이닝 타설방안에 대한 논의가 많았다. 일반 터널과 같이 강재거푸집으로 하는 경우, 과연 콘크리트 자중과 자체 중량을 감당할 수 있는 라이닝 폼(강재거푸집)의 제작이 가능할 것인가에 대한 문제가 대두되어 국내외 여러 기술자들의 의견들이 있었다. 검토 결과, 현장에서는 그림 3의 라이닝 폼을 제작하여 현재 콘크리트 라이닝

타설작업을 하였다. 터널의 크기로 인하여 철근조립과 방수작업을 위한 작업원의 접근이 용이하지 않아 그림 3의 철근대차를 제작하여 사용하였다.

본 터널은 지간이 크고 천정부 곡률 반경이 커서 콘크리트 라이닝 보강을 위한 철근의 처짐이 크게 우려되었다. 인접공구의 유치선 확폭 단면에서 ㄷ-형강을 이용하여 철근의 처짐을 어느 정도는 억제하였으나 완전하지는 않다는 판단 하에 고정볼트를 사용하여 철근을 고정하는 신공법을 도입하였다. 철근 조립용 고정 볼트는 방수막을 관통하여 슛크리트에 고정되므로 방수앵커를 사용한 후 방수시험을 통하여 누수여부를 조사하였다.

대단면 터널의 경우에는 라이닝 자중에 의한 부직포의 압착과 배면수 유동경로가 길어짐에 따른 라이닝 배면수압이 발생할 가능성이 높다. 이를 고려하여 인접공구의 대단면 터널 정거장에서는 일반 부직포보다 큰 규격의 부직포를 적용하여 라이닝 배면수의 지연배출에 의한 수압발생 가능성을 감소시켰다.

5. 맺음말

도심지 지하철에서 2-arch, 3-arch 형태로 선택적으로 적용되어 왔던 터널정거장이 서울지하철 6호선에는 저심도에서도 기둥이 없는 1-arch 형태의 터널정거장이 적용되어 향후 도심지 대단면 터널건설의 시급성이 되고 있다. 이러한 대단면 터널들은 국내실적이 일천한 상태에서 이루어져 설계자, 감리자, 시공자, 발주자 등의 많은 노력에도 불구하고 기술적으로 많은 보완이 필요할 것으로 판단되었다. 대단면 터널의 시공경험으로부터 얻은 개선사항을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 대단면 터널의 안정성에 이바지하는 슛크리트와 록볼트의 분담은 일반터널에 비하여 미소하므로 원지반의 자립성이 보다 중요한 것으로 판단되었다. 저심도 대단면 터널의 거동은 절리면의 기하학적 분포특성과 절리면 전단강도에 보다 큰 영향을 받을 것으로 예상되어 시공중에는 막장관찰 등을 통하여 이러한 사항을 중점적으로 관리하였다.
- 2) 콘크리트 라이닝 배면수의 유동경로가 길어지고 라이닝 자중에 의한 부직포의 압착으로 통수능력이 저하될 가능성을 고려하여 부직포의 통수능력을 향상시킬 수 있도록 보다 큰 규격을 적용하였다.
- 3) 콘크리트 라이닝의 시공관리
 - 천정부 철근의 처짐을 방지하기 위한 경량 강재나 고정볼트를 이용하는 등의 방안과 더불어 철근을 설계내용대로 정확한 위치에 놓이도록 하여 균열의 원인이 되는 과다 피복이 발생하지 않도록 주의하였다.
 - 국부적으로 과다한 여굴부위에서는 콘크리트 타설시 편압이 작용하므로 내공측량 등을 통하여 여굴상태를 검토하여 강재거푸집의 안정을 검토하였다.
 - 배면공극의 확인과 콘크리트 건조수축과 천장부와 같이 불가피한 배면공극을 충진하였다.
 - 대단면 터널은 인접된 일반 규모의 터널과 대형 접속 마감면을 형성하게 된다. 이러한 대형 접속부는 구조적 취약성과 방수공사 및 배면수 배수공사의 어려움 등이 예상되어 시공중 세밀한 시공방안을 강구하였다.
- 4) 향후 보완사항
 - 선진막장의 지질상태 예측 및 시험시공 기능의 선진도개를 도입하여 시공단계에서 대단면 굴착시 터널안정성을 재평가하는 방안을 적극 도입한다면 시공관리에 유리할 것으로 판단된다.
 - 대단면 터널의 주요 용도가 구조적 안전등급이 가장 높은 정거장 시설이며 저심도 대단면 터널의 장기 거동에 대한 자료가 부족한 실정이므로 영구계측 도입에 의한 피난계획 및 유지관리를 강화하도록 하여야 할 것이다.

이제까지 대단면 터널 정거장을 큰 문제없이 건설할 수 있었던 것은 우리의 기술수준보다는 다분히 운이 따르지 않았나 생각된다. 향후 이와 같은 대단면 터널의 건설에 있어서는 이러한 시공경험을 반영하여 계획단계에서부터 현실성 높은 결과예측을 하고 필요한 기술을 개발하여 적용할 수 있도록 하여야 할 것이다.

감사의 글

본 논문의 작성을 위하여 현장 자료 수집에 협조해 주신 (주)쌍용건설 관계자들에게 지면을 빌어 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김 병수(1997), "대단면 터널의 굴착사례", 유신기술회보, (주)유신코퍼레이션, pp.199~210.
2. 서울특별시 지하철건설본부(1994), 지하철6호선실시설계 6-4공구(토목) (시공공구 6-6) 실시설계보고서.
3. 한국건설기술연구원, (1997년), 국내 터널건설의 현황조사 및 교차터널의 설계법 개발연구.
4. Hoek, E. & Brown, E.T.(1980), Underground excavations in rock, The Institution of Mining & Metallurgy, London, p.157.
5. Megaw, T.M. & Bartlett, J.V.(1982), TUNNELS: Planning, Design, Construction Vol. 1, 鼎力圖書有限公司, p.119.
6. Meland, O.(1994), "Underground openings for public use-some results from the research programme for the Gjovik Olympic Mountain Hall", Tunnelling and Ground Conditions, Abdel Salam, pp.49~57.
7. Pelizza, S.(1991), "Pilot Bore Excavation with TBM for the Design and Construction of Larger Tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, pp.185~189.
8. Pelizza S., Oreste P.P, & Soldo L., (1995), "Design and Construction of Large Section Tunnels", Underground Space Technology For Sustainable Development, pp.87-1~87-18.