터널시공에 따른 지하수위 변화의 모델링과 이를 고려한 완전방수 터널의 라이닝 설계 예

선경건설(주) 지하비축팀
남기천, 이형원*, 배정식, 나경웅

1. 서 론

터널의 방수형식은 배수형(Wet System)과 방수형(Dry System)으로 대별된다. 배수형은 터널의 아치부와 측벽부에만 방수막을 설치하고 이의 배면과 바닥으로부터 유입되는 지하수를 배수공을 통하여 배수처리하는 방식이며 경제성과 시공성이 우수하여 대부분의 도로 터널 및 지하철 등에 적용되어 왔다. 방수형은 터널의 주변장 전체를 방수시공하여 터널내로 유입되는 지하수를 완전히 차단하는 방법으로서, 이러한 방수형 터널은 경제성과 시공성은 불리하나, 지하수위 저하에 따른 압밀침하나 생태계 파괴 방지, 터널의 장기적 환경보전 및 운영유지비 감소 등의 이유로 최근 상당수의 도심지 지하철 터널에 계획되어 시공중에 있다.

일반적으로 배수형 터널의 경우 터널구조에 작용하는 수압은 무시되며 2차 라이닝의 역할은 장기적인 크립응력 지지와 열화방지 등에 있다. 그러나 방수형 터널의 경우 터널구조에 가해지는 전 수압을 2차 라이닝이 지지하는 구조가 되며 이때 작용수압의 결정과 이에따른 라이닝의 적정 두께 결정은 터널시공시의 시공성과 경제성에 큰 영향을 미친다.

방수형 터널구조에 작용하는 수압의 결정방법은 터널이 설치되는 지점의 지반조건에 따라 변할 수 있으며, 일반적으로 토사층일 경우 지하수위에 따른 정수압이 작용한다는 점이 널리 인정되고 있으나 암반층에 있어서 굴착작업중 수위저하, 완공 터널에 실제 작용하는 수압의 시간적 변화 및 이의 결정방법 등에 관한 보편적 기준에 관하여 이견이 많은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지하수위하부 30M와 50M 심도의 투수계수가 낮은 경암구간에 시공되는 폭 11M의 마제형 완전방수 터널을 가정하여 공사중 누수 및 수압의 변화와 방수시공후 지하수위의 상승과 작용수압 변화양상을 유한요소 모델링하여 해석하고 이로부터 결정된 작용수압에 따른 방수터널의 2차 라이닝 설계 예를 제시하고자 한다.

2. 지하수 모델링

자연상태로 형성되어 있는 지하수위 분포가 터널 굴착으로 인해 변화되는 양상을 예측하여 터널 설계시의 작용수압 및 지하수위 조절계획에 필요한 기초자료의 제공을 목적으로 지하수 거동에대한 모델링을 실시하였다.

2.1 해석모델의 설정

전산모델링에 적용한 해석조건을 요약하면 다음과 같다.

1) 사용 프로그램 : AQUA (2 차원 FEM 해석)

모델링에 사용된 프로그램은 Galerkin finite element method 를 이용하여 Groundwater flow 및 Transport equation 을 계산하는 프로그램으로서 1992 년 Iceland 의 " Vatnaskil Consulting Engineers" 가 개발한 것이다.

본 모델링에서는 Flow에 대한 해석만을 이용하였으며 프로그램에서 사용된 해석 방정식은 비정상류에 적용하는 식 (2.1) 이다.

$$\frac{\delta}{\delta x}\left(T_{xx}\frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y}\left(T_{yy}\frac{\delta h}{\delta y} \right) + Q = S\frac{\delta h}{\delta t} \qquad (2.1)$$

여기서,

- h : 지하수위
- T_{xx} : 기본축 방향의 투수량계수
- T_{yy} : 기본축에 수직한 방향의 투수량 계수
- Q : Pumping/injection
- S : 저류 계수

2) 지반조건

지반의 제특성은 시추조사 및 수리지질 시험 등 현장 지질조사를 통하여 파악되어야 한다. 본 모델링에서는 지하철 설계시에 적용되었던 실측자료와 일부 가정 및 추정치를 기준하여 다음과 같이 설정하였다.

해석지역의 투수계수는 풍화암 및 연암에 해당하는 상부 투수층(평균 두께 : 15 m)은 1.0E-07 (m/sec), 하부 암반층(터널 통과구간)은 1.0E-08 (m/sec) 로 설정하였으며 저류계수는 1.0E-5 로 추정하였다.

지하수위는 터널 상부 30 m(3 bar) 및 50 m(5 bar) 위에 위치하는 경우에 대하여 각각 해석하였다.

3) 해석영역

해석영역은 터널을 중심으로 좌우측 500m 거리, 깊이 160m(3 bar 터널) ~ 180 m(5 bar 터널)로 정하였으며 경계조건은 한쪽 경계에서만 지하수공급이 이루어지며 그 외 경계는 no-flow boundary 로 설정하였다.

4) 모델링 내용

본 모델링에서 실시한 해석내용은 다음과 같다.

- 공사중 지하수위 강하 및 터널내 누수량의 변화

- 터널 방수공사 및 내부 복공 콘크리트 공사후의 터널 주변 지하수위 회복

5) 해석 Mesh

해석영역의 Mesh 형상은 Fig.2.1 과 같다.

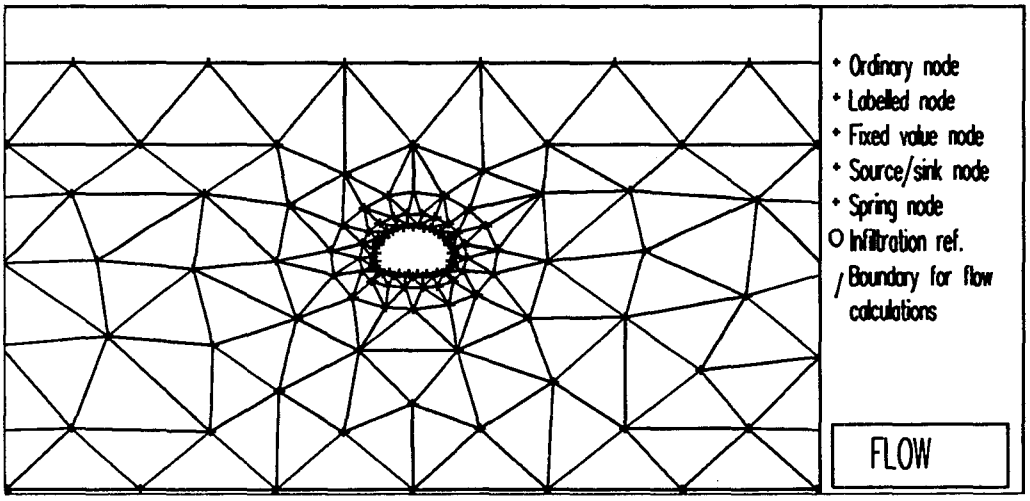


Fig.2.1 해석영역의 유한 요소망

2.2 모델링 결과 및 고찰

1) 터널 굴착으로 인한 지하수위 강하

방수공사 및 터널 복공 콘크리트공사 이전의 기간을 1년으로 예상하여 공사중의 수위강하를 모델링한 결과, 터널주변에 형성된 수두분포는 Fig.2.2 와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 등수두선은 터널을 중심으로 거의 동심원상으로 분포되며 터널에서 수평으로 50m 떨어진 지점을 기준했을 때, 지하수 아래 30m 에 굴착된 터널(이후 3 bar 터널)은 지하수위가 -21 로써 -30 인 터널과 9 m 차이를, 50 m 아래에 굴착된 터널 (5 bar 터널)의 경우는 약 20 m 의 차이를 보여 심도가 깊은 터널에서의 수리경사가 크게 나타난다.

365 일 지하수위 강하시의 수두분포는 방수 및 복공 콘크리트 공사후의 터널 주변 회복수위 해석의 초기 수두로써 입력되었다.

2) 굴착진행에 따른 터널내 누수량 변화

터널굴착시 터널내로의 누수량은 그 지점에 작용되는 수두 및 투수계수에 의해 좌우되므로 Fig.2.3 의 모델링 결과에서와 같이 시간경과에 따라 누수량도 점차 감소한다. 즉, 굴착초기 수일동안은 터널 연장 1m 당 1 일 동안 3 bar 터널, 5 bar 터널에서 120ℓ 및 220ℓ가 누수되나 1 년 후에는 각각 40ℓ, 70ℓ로 감소된다.

3) 방수 및 복공 콘크리트 공사후 수위 회복

방수 및 복공 콘크리트 공사후 터널내 지하수 유입이 없는 조건에서 지하수위의 회복 양상을 모델링한 결과중 회복기간 30일, 1 년, 10 년경과 후의 지하수두 분포를 Fig.2.4 에 나타내었다.

지하수위의 회복이 시작되면서 터널주위에 등수두선이 밀집되어 수리경사가 매우 급해짐을 알 수 있다. 방수포 내부의 복공 콘크리트에 작용하는 수압은 이러한 수리경사에 의해 결정되며 회복시간별로 수압의 증가추세는 Fig.2.5 에 나타냈으며, 초기 지하수압으로 회복되는 것을 100 %로 하여 증가되는 지하수두를 백분율로 나타내면 Fig.2.6 과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 주어진 지반조건 및 해석조건에서 지하수위의 회복양상은 초기 수두 (터널심도와 상부 대수층과의 거리)에 따라 변화를 보인다. 즉, 5 bar 터널은 3 bar 터널에 비해 회복되는 속도가 빠르며 터널 천정부보다 바닥부가 다소 빨리 수두가 상승한다.

초기 수두와 대수층과의 거리에 따라 다소 차이를 보이나, 주어진 암반조건이 일반적인 지층상태라고 볼 때, 심도 30 ~ 50 m 의 터널은 1 년의 누수기간 후 방수공사를 실시하는 경우 약 10년을 전후하여 초기 지하수압 (굴착전의 수위)의 90% 가량이 회복됨을 알 수 있다.

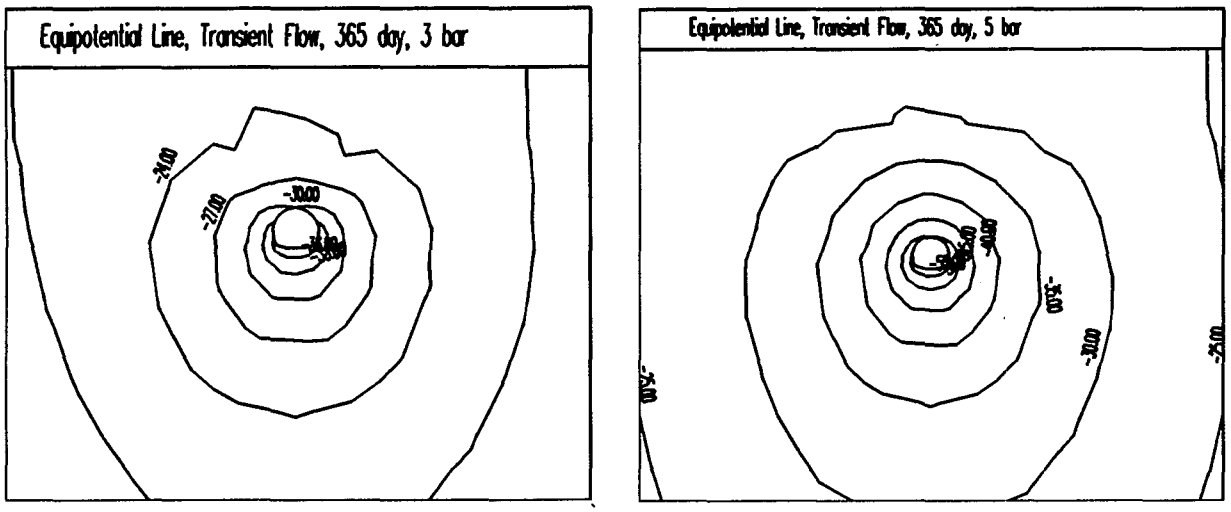


Fig.2.2 터널 굴착으로 인한 지하수두 분포 (굴착후 365 일 경과)

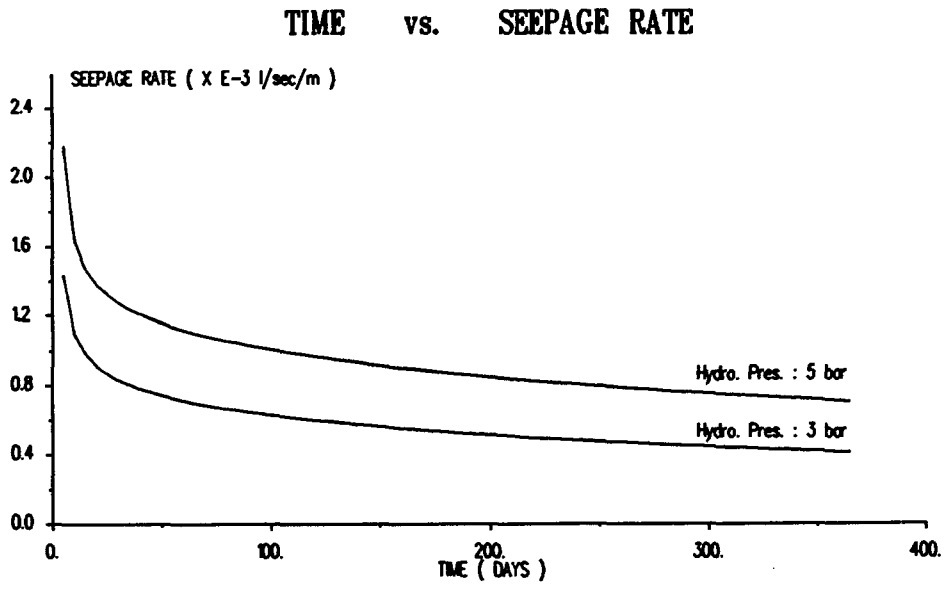


Fig.2.3 굴착진행에 따른 터널내 누수량 변화

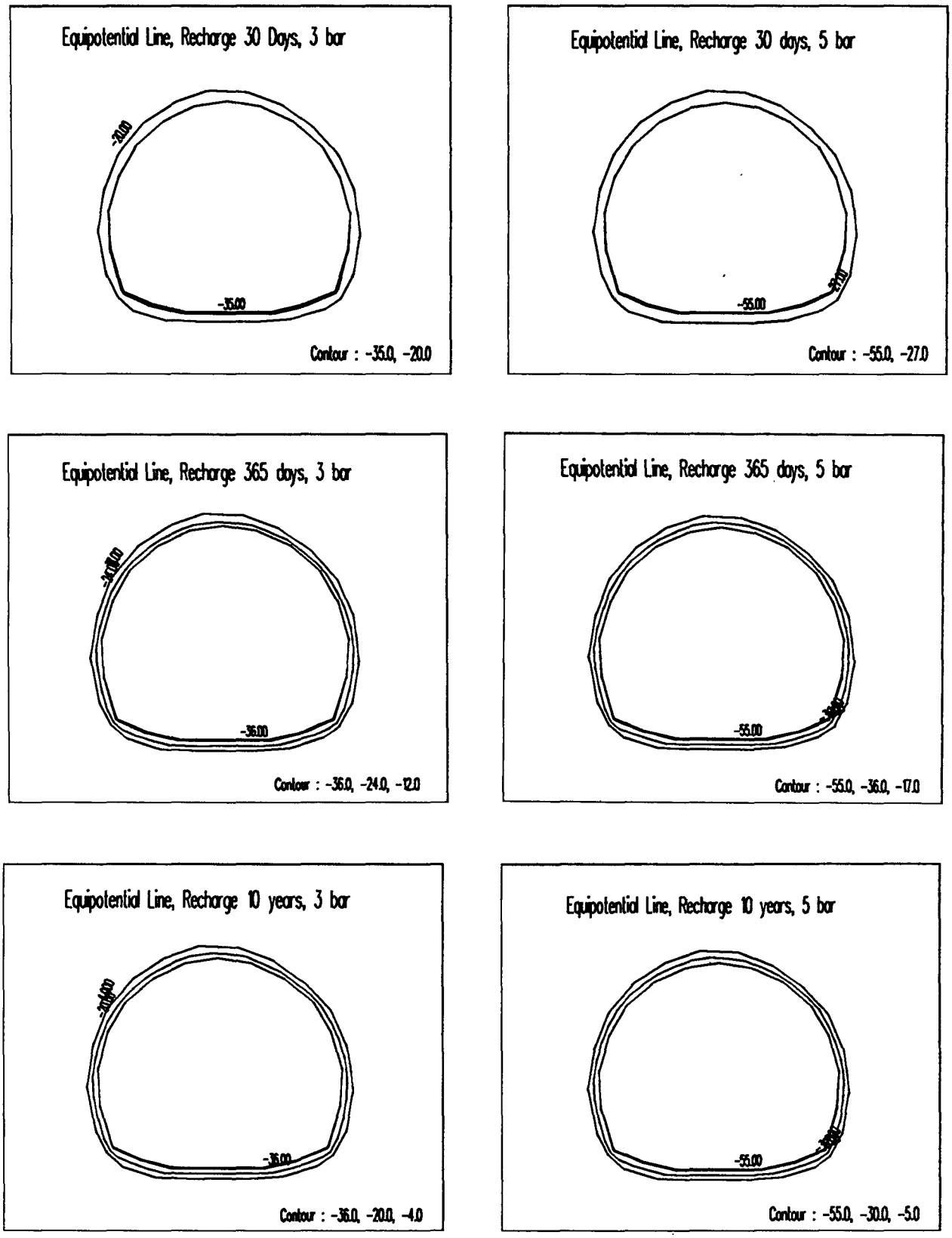


Fig. 2.4 방수 및 복공 콘크리트 공사후 지하수두 회복(30일, 1년, 10년 경과)

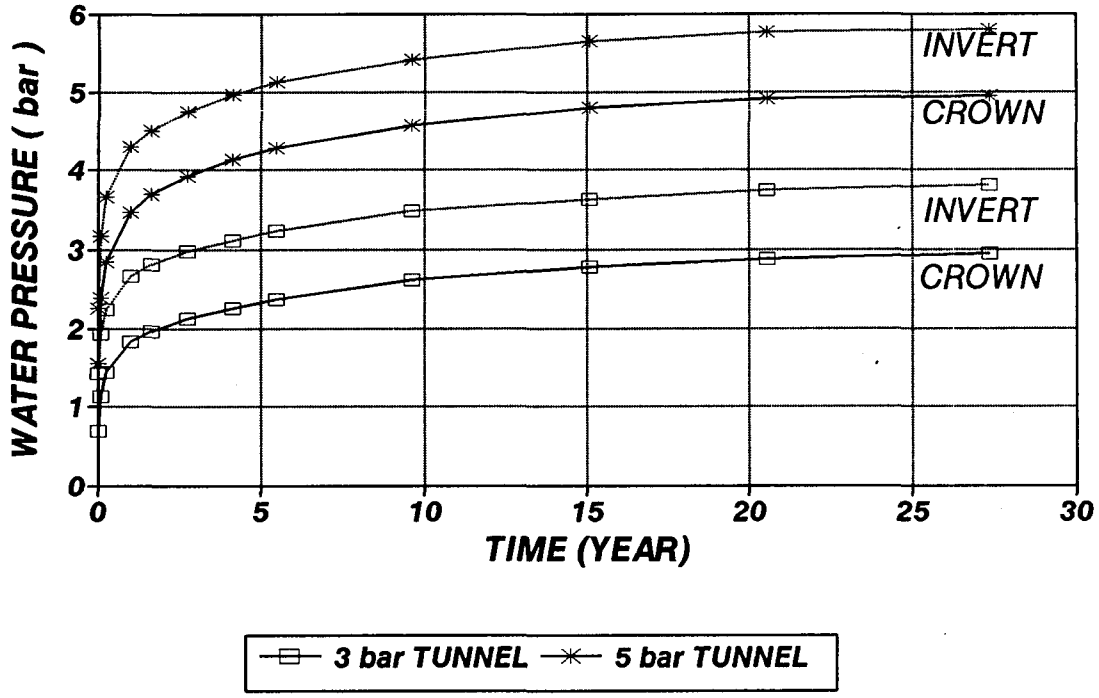


Fig.2.5 방수시공후 시간에 따른 수압의 회복추세

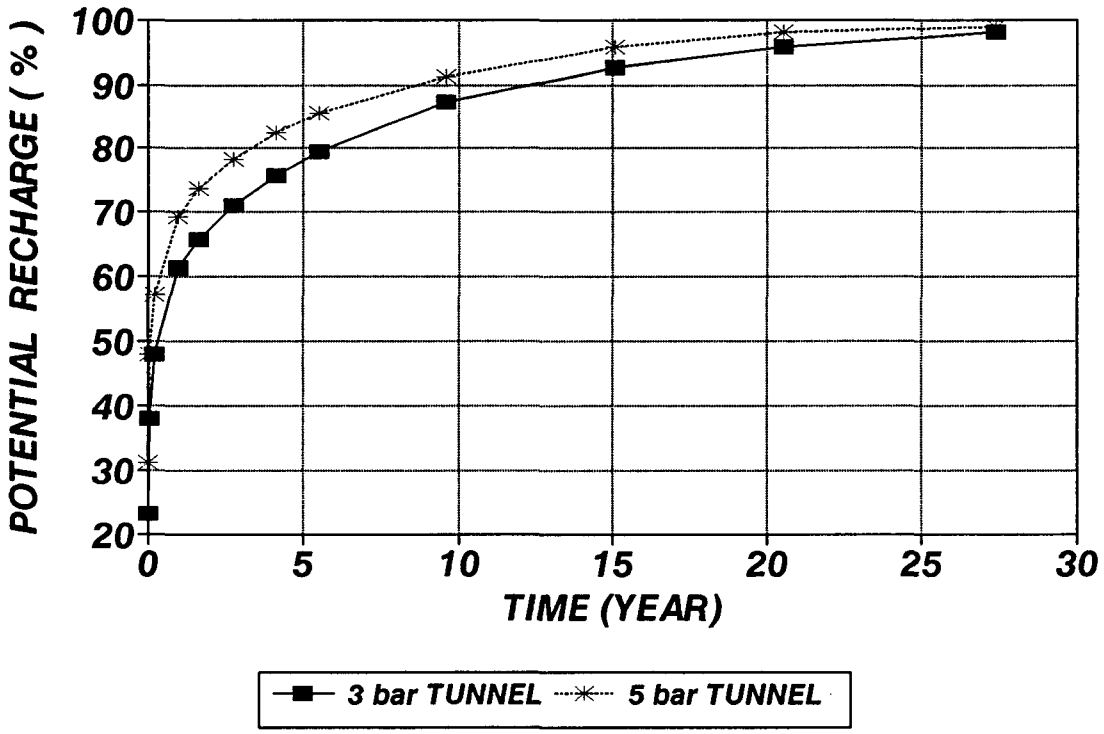


Fig.2.6 방수시공후 시간에 따른 지하수두 회복율

3. 라이닝 설계 예

3.1 해석 모형

라이닝의 구조해석은 상용 프로그램인 SAP90 을 사용하여 단위 길이를 갖는 아치로 해석하였다. 해석은 탄성지점을 갖는 구조요소로 모형화하여 해석하였으며, 하중에 의한 변형을 고려하여 반복법으로 최종 접촉조건을 찾도록 하였다. 해석 모형의 형상은 Fig.3.1과 같이 좌우대칭 조건을 사용하여 모형화하였다.

해석에 사용된 SAP90(Structural Analysis Program 90)은 구조해석용 프로그램으로 선형해석에 적합하며 미소변형이론을 사용한 메트릭스 구조해석과 유한요소법을 사용하고 있다. 해석 대상은 트러스요소, 보요소, 평판요소, 쉘요소, 3차원 고체 요소 등이 가능하며, 해석방법은 정적해석 및 동적해석이 가능하다.

하중 조건은 라이닝의 자중 및 천단부 작용수압이 3bar인 경우와 5bar인 경우에 대하여 해석하였다. 사용 재료는 철근 콘크리트에 대한 기준을 적용하여 콘크리트는 단위 중량 2.5 ton/m^3, 일축압축강도 σ_{ck}=210 kg/cm^2, 탄성계수 E_c=2.174E5 kg/cm^2를 사용하였고 철근은 SD30 인 것으로 하여 항복강도 σ_y=3000 kg/cm^2, 탄성계수 E_s=2.1E6 kg/cm^2를 사용하였다.

경계 조건으로 지반 반력계수에 의한 탄성지점을 사용하였고, 변형에 의해서 분리가 발생하는 경우는 자유단으로 변경하여 재해석하였다. 지반과의 상호작용을 현실적으로 해석하기 위하여 접선방향의 강성은 무시하고, 법선방향의 강성만 존재하는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 법선방향의 지반반력계수 Kn=10,000kg/cm^2를 사용하였다. 여기서 kn은 부재의 법선 방향 강성이므로, 이를 전체 좌표계(global coordinate)상의 x, y 성분으로 나타내면 식 (3.1), (3.2)과 같다.

$$k_x = k_n \cos\theta \qquad (3.1)$$

$$k_y = k_n \sin\theta \quad (\text{단, } \theta \text{ 는 법선의 경사}) \qquad (3.2)$$

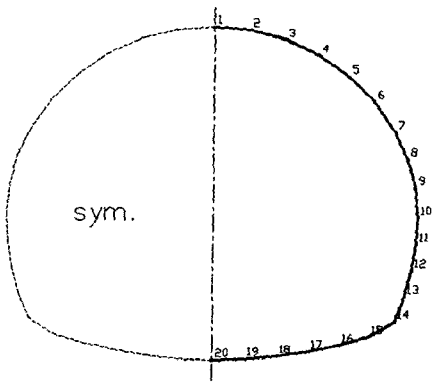


Fig.3.1 해석 모델의 형태와 요소번호

3.2 라이닝 설계 예

작용 수압 3 bar, 5 bar 인 경우에 대한 해석 결과, 천단과 바닥부 변위, 부재의 축력과 휨모멘트은 Fig.3.2 와 같다.

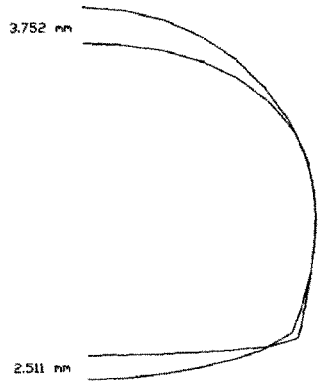
축력은 대체로 일정한 분포를 나타내며 작용수압 3 bar인 경우 209.65 ton, 5 bar인 경우 334.22 ton이 최대치로서 측벽부에서 발생하였다. 휨모멘트는 인버트에서 최대로 나타났으며 작용수압 3 bar에서 94.86 ton-m, 5 bar에서 151.73 ton-m로 나타났다. 주요 요소번호별로 축하중, 휨모멘트, 변위를 Table 3.1 에 나타내었다.

라이닝 부재의 단면산정은 허용응력법을 적용하였으며 압축력과 휨을 동시에 받는 부재로 설계하였다. 단면은 무근인 경우와 철근 콘크리트인 경우에 대하여 검토하였으며, 무근의 경우에는 콘크리트의 인장강도를 무시하고 압축력에 대해서만 저항하도록 하여 설계하였고 철근 콘크리트의 경우는 시방서 기준에 따라 설계하였다.

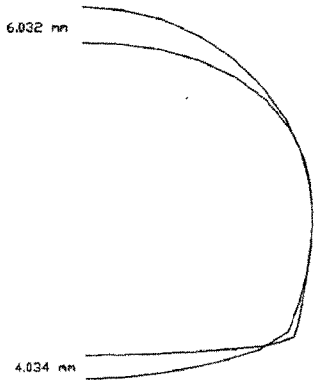
설계된 라이닝의 두께 및 소요철근량은 Table 3.2 에 나타냈으며, 천단 작용수압이 3 bar인 경우 라이닝 두께 40 cm에 D16 철근을 배근하였고 5 bar 에서는 라이닝 두께 55 cm에 역시 D16 철근을 배근하였다. 이렇게 설계된 마제형 완전 방수터널의 라이닝 구조도를 Fig.3.3 에 도시하였다.

Table 3.1 라이닝에 작용하는 하중과 변위

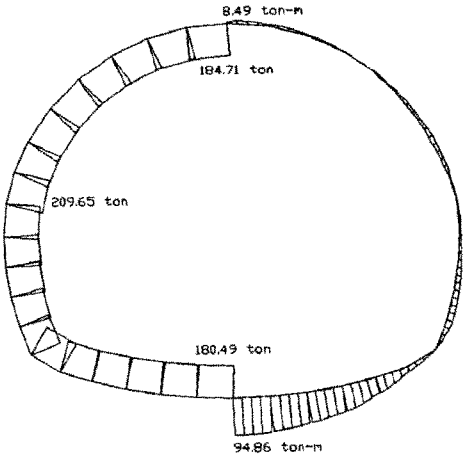
작용 수압	요소 번호	축하중 (ton)	모멘트 (ton-m)	변위 (mm)
3 bar	1	184.71	8.49	+ 3.752
	8	209.65	9.22	
	14	182.63	11.72	
	19	180.49	94.86	- 2.511
5 bar	1	298.91	13.90	+ 6.032
	8	334.22	14.80	
	14	289.33	18.59	
	19	283.98	151.73	- 4.034



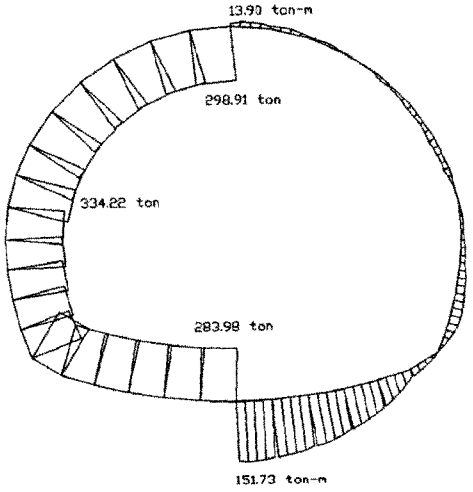
a) 3 bar 에서의 변위



b) 5 bar 에서의 변위

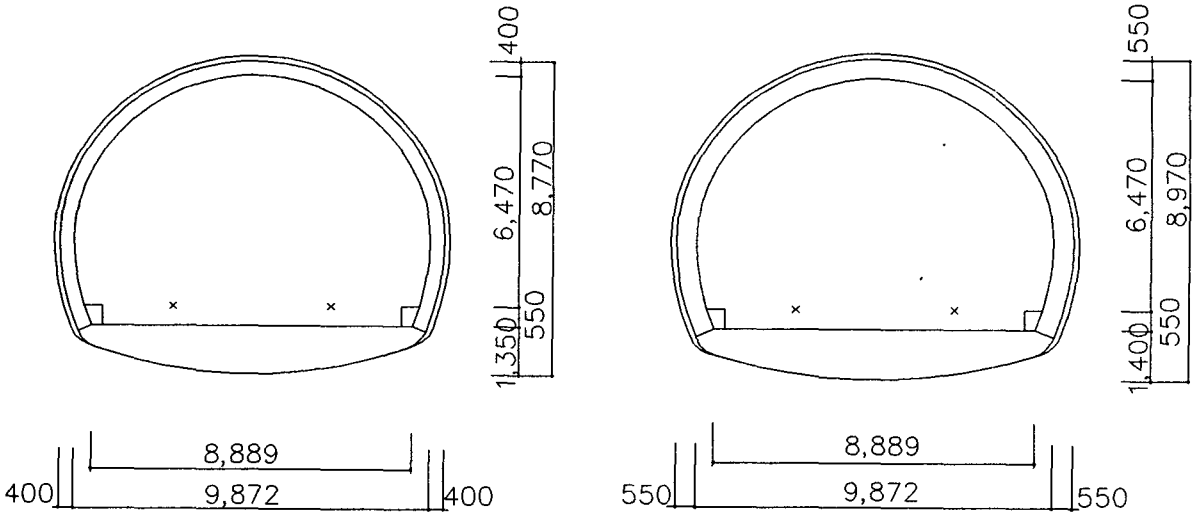


c) 3 bar 에서의 축하중 및 휨모멘트



d) 5 bar 에서의 축하중 및 휨모멘트

Fig.3.2 라이닝 구조 해석 결과



a) 3 bar에서의 라이닝 구조　　b) 5 bar에서의 라이닝 구조

Fig.3.3 완전 방수터널의 라이닝 구조도

Table 3.2 완전 방수터널의 라이닝 두께 및 소요 철근량

구 분		3 bar	5 bar
아치 및 측벽	두 께	40 cm	55 cm
	철 근	D16ⓐ250	D16ⓐ166
인버트	두 께	135	140
	철 근	D16ⓐ250	D16ⓐ125

4. 결론

1) 터널굴착지점의 초기 작용수압이 높을수록 터널굴착후 주변암반에서의 지하수위 저하가 빨리 발생하였다.

2) 터널굴착 초기 수일간 터널내로의 지하수 누수량은 3bar 터널에서 120ℓ/m/일, 5bar 터널에서 220 ℓ/m/일 이었고 시간이 경과할수록 감소하여 굴착 1년후 각각 40, 70 ℓ/m일 로서 감소하였으며, 초기작용수압이 클수록 누수량도 크게 나타났다.

3) 방수시공후 터널주변의 지하수위는 회복되며 초기에 회복속도가 빠르고 그후 점차 둔화되었고 지하수위가 높은 깊은 심도의 터널에서 회복속도가 다소 빠르게 나타났다. 이에따라 지하수위 하부 30~50M 에 시공된 완전 방수터널 주변 암반내 지하수위는 방수시공후 10년을 전후하여 원 수위의 약 90% 수준으로 회복되었으며 따라서 투수계수가 낮은 경암구간에 있어서도 지하수공급조건이 양호한 경우 완전 방수터널의 2 차 라이닝에 작용수압은 원지하수위에 따른 정수압을 고려하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

4) 원 지하수위에 따른 정수압과 자중을 고려하여 지반 반력계수법에 의한 반복적 유한요소 해석을 통하여 구조해석한 마제형 터널의 2차 라이닝에 있어서 축력은 대체로 균일한 분포를 보이며 측벽부에서 최대치가 나타났고, 휨모멘트는 요소별로 큰 차이를 보이며 곡률반경이 큰 인버트에서 최대를 나타냈다.

5) 이상과 같은 조건에서 휨과 압축을 동시에 받는 부재로서 2차 라이닝을 설계한 결과 천단부의 작용수압이 3bar인 경우 두께 40cm(D16@250 배근), 5bar인 경우 55cm(D16@166배근)로 설계되었고, 인버트는 각각 135cm(D16@250 배근), 140cm(D16@125 배근)로 설계되었다.

참고문헌

1. Sinha, R.S., 1989, "Underground Strucrures - Design and Instrumentation", Elsevier, p.90.
2. Laura Toran and Kenneth R.Bradbury, 1988, "Ground-Water Flow Model of Drawdown and Recovery Near an Underground Mine". Ground water, Vol.26, No.6, pp.724~733.