

소규모 NATM 통신구의 완전방수 Waterproof of small NATM Telecommunication Tunnels

황덕일¹⁾, Hwang, Deok-Il, 김정윤²⁾, Kim, Jung-Yun,
강호경³⁾, Kang, Ho-Kyoung, 이종용⁴⁾, Lee, Jong-Yong

- 1) KT 건설사업단 토목구조부 과장
- 2) KT 건설사업단 토목구조부장
- 3) KT 고객센터본부 인프라시설부장
- 4) (주)리뉴시스템 대표이사

SYNOPSIS : 배수식 방수방식으로 지하 30m에 건설된 NATM터널 통신구를 준공 7년후 완전방수식 방식으로 변경하였다. 터널 라이닝에 30m의 수압을 작용할 경우 발생하는 단면력을 구조검토하고 배근상태가 안전한가 분석하였다. 또한 라이닝의 시공단면을 확인하기 위하여 충격반향기법(Impact-Echo Method)탐사와 GPR탐사, 배근상태를 파악하기 위하여 철근탐지기를 사용하였다. 그 결과 30m 수압에 안전할 것이라는 판단하에 배면주입 방수공법을 적용 통신구를 완전방수 하였다. 그리고 배수식 통신구를 운용하는 비용과 완전방수공사비를 분석한 결과 배출되는 지하수량이 많은 경우 완전방수시공이 경제성이 있다고 분석되었다.

Key words : 통신구, NATM, 배수식방수, 비배수식방수, 완전방수

1. 서론

NATM 터널의 방수공법은 배수형 방수공법과 비배수형 방수공법이 있다. 현재 국내에 건설된 모든 NATM 터널은 배수형 방수공법으로 건설되었으나 지하수의 과다한 유출과 최근 서울시에서 하수도사용료를 부과함으로써 예기치 않은 부담금이 매년 발생하여 공공시설물을 관리하는 KT, 한국전력, 지하철공사, 한국철도공사 등의 기관들은 지하수 처리방안에 고심하고 있다.

그동안 NATM 통신구는 완전방수가 불가능한 것으로 판단하였으나 최근 준공된 터널 라이닝 배면에 신재료의 방수재를 주입하여 새로운 방수층을 형성한 결과 30m의 수압을 받는 NATM 터널을 완전 방수하는 성과를 얻었다. 다음과 같이 통신구 터널의 완전방수를 위한 설계도서 검토, 구조해석, 터널 시공상태 분석, 방수공법 등에 대하여 논술하여 NATM 터널의 완전방수를 고려하는 많은 기술자에게 도움이 되고자 한다.

2. ○○지점 통신구의 완전방수 개요

2.1 ○○지점 통신구 현황

- 구조형식 : NATM공법
- 준공년도 : 1997년
- 통신구 규모 : 352m, (개착식 58m, NATM 터널식 294 m)
- 수직구 : 2개소 (깊이 약 30m)

2.2 통신구내 지하수 처리 필요성

○○지점 통신구는 배수형 방수공법으로 건설되었으며, 통신구 주변의 지하수는 라이닝 하부에 설치된 유공관을 통하여 수직구 하단에 건설된 집수정으로 유도하였다.

통신구내 집수정에는 1일 약 600 톤의 지하수가 유입되었으며 수직구별로 2대씩 설치된 양수기가 교대로 인근 하수도에 지하수를 배출하였다. 이에 따라 매년 막대한 양수비용이 소요되었으며 양질의 지하수가 활용없이 하수도로 배출되고 있어 통신구 운영비용의 절감 및 지하 수자원의 보호를 위하여 통신구 완전방수가 필요하였다.

2.3 통신구 완전방수 추진시 검토사항

통신구내 지하수 유입을 차단하기 위하여는 집수정내 유공관 밸브를 잠그고 구조물의 누수 부위를 방수하여야 한다. 이 때 주의 하여야 할 사항은 현재 유공관을 통한 지하수 배출로 저하된 지하수위가 방수공사 후 올라가게 되며 라이닝에 수압이 추가 작용하게 된다는 점으로, 통신구 구조물이 수압을 견디지 못하면 터널 라이닝이 파손되는 등 큰 사고로 이어질 수 있다.

과거 NATM 통신구 건설시 수압을 받지않는 설계개념에 따라 설계되어 라이닝에 철근이 없이 건설된 통신구도 상당 개소 있는 것으로 조사되었으므로, 방수공사 이전에 필히 통신구 구조검토를 실시하여야 한다.

또한 지하 20~30m에 설치되어 많은 수압을 받게 되므로 방수자재 및 공법도 현장여건에 적합하게 선정하여야 한다.

3. 통신구 구조검토

3.1 수압을 받는 라이닝의 구조해석

라이닝의 두께는 30cm이며, 스프링라인부터 인버트 하부까지 철근이 배근되었다. 30m의 수압을 받는 NATM 터널의 라이닝은하부 우각부와 바닥면에 큰 모멘트와 전단력이 발생하여 철근의 배근이 필요하다. ○○지점 통신구의 라이닝에는 스프링라인 아래로 2단 배열의 철근이 배근되어 설계 모멘트를 견디는 구조로 시공되었으므로 안전하다고 판단된다.

그러나 시공시 곡면시공 등의 문제점으로 일부 구간에 대해 단면이 부족한 부분도 있을수 있으므로 완전방수시 지속적인 계측이 필요하다.

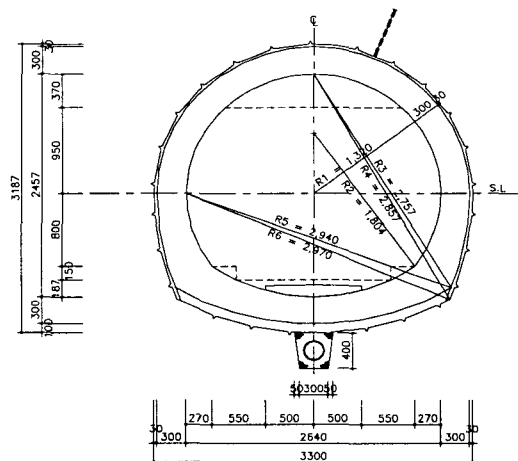


그림 1.통신구 라이닝 단면도

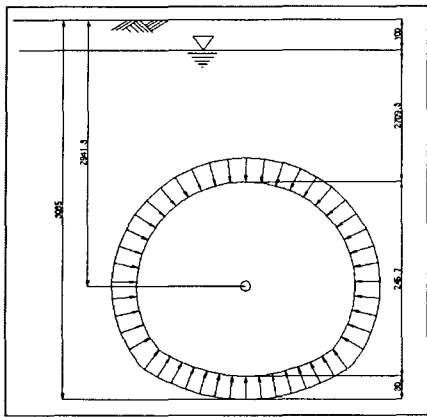


그림 2. 라이닝 수압도

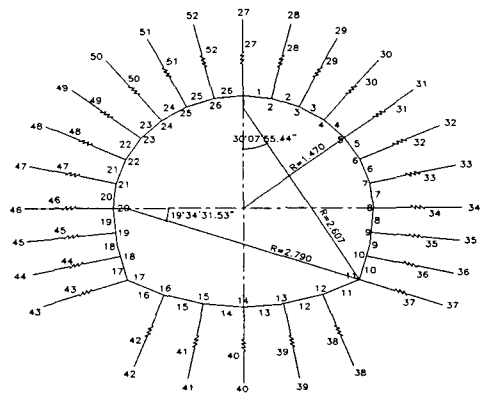


그림 3. 라이닝 모델링

표 1. 라이닝 설계단면력 (지반조건, 토피별)

구 분	모멘트 (t-m)	전단력 (ton)	축방향력 (ton)	면적 (m ²)	단면계수 (m ³)
천정부	0.762	6.709	58.124	0.300	0.015
아치부	0.579	7.926	60.193	0.300	0.015
우각부	12.342	31.100	64.788	0.419	0.029
인버트	5.981	14.137	58.554	0.307	0.016

(수압 28.35m)

구 분	모멘트 (t-m)	전단력 (ton)	축방향력 (ton)	면적 (m ²)	단면계수 (m ³)
천정부	1.219	6.877	57.941	0.300	0.015
아치부	1.193	7.792	60.761	0.300	0.015
우각부	12.390	31.888	65.178	0.419	0.029
인버트	6.496	14.380	58.102	0.307	0.016

(수압 28.65m)

구 분	모멘트 (t-m)	전단력 (ton)	축방향력 (ton)	면적 (m ²)	단면계수 (m ³)
천정부	0.554	7.181	63.507	0.300	0.015
아치부	0.519	7.562	64.811	0.300	0.015
우각부	13.222	33.024	70.112	0.419	0.029
인버트	6.123	15.120	64.169	0.307	0.016

(수압 30.45m)

구 분	모멘트 (t-m)	전단력 (ton)	축방향력 (ton)	면적 (m ²)	단면계수 (m ³)
천정부	0.555	7.722	68.166	0.300	0.015
아치부	0.598	7.822	69.056	0.300	0.015
우각부	14.153	35.356	75.009	0.419	0.029
인버트	6.555	10.626	68.586	0.307	0.016

(수압 32.50m)

라이닝은 강도설계법으로 검토하였으며 축력과 모멘트 및 전단력을 동시에 받는 구조물이므로 다음 식에 의하여 철근배근 유무를 판단하였다.

$$f_c = P/A \pm M/Z \quad \tau = V/A$$

$$f_{ca} = 525 \text{ tf/m}^2$$

$$f_{ta} = - 60.864 \text{ tf/m}^2$$

$$\tau_{ta} = 36.23 \text{ tf/m}^2$$

검토 결과 일반적으로 지하 28 ~ 33 m의 수압을 받는 통신구는 우각부와 인버트부에 모멘트와 전단력이 크게 발생하여 철근배근이 필요하다고 계산되어 우각부와 인버트에 철근을 배근하였음을 확인하였다.

3.2 수직구의 구조검토

수직구의 라이닝두께는 40cm이고, 철근배근 상태는 전단면 2단 배근이며 터널방향 7m까지는 전단면에 철근이 배근된 원형수직구로 수압 및 토압을 받으며 수직구의 원형 단면이 축력과 자중을 지지하는 구조형태이다.

원형 수직구에 발생하는 응력은 대부분 콘크리트의 압축력으로 지지되며 원형방향으로 설계된 철근량이 충분한 것으로 판단되었다. 또한 수직방향으로 발생하는 응력 또한 콘크리트의 압축력으로 충분하다고 판단되었다.

3.3 터널 종말단부 구조검토

라이닝두께는 30cm이고, 철근배근 상태는 터널방향 7m까지 전단면 및 종단면 철근배근된 구조이다. 차후 통신구 연장 시공을 위하여 종말단부 처리하였으며 수압을 지지하기 위하여 단말부에 철근을 배근하였다.

4. 물리적 탐사

4.1 충격반향기법에 의한 라이닝 두께 측정

○ 충격반향기법 (Impact-Echo Method)의 개요

본 방법은 시험체의 표면에 충격을 가하여 발생된 체적파(stress wave 또는 body wave)가 불연속면이나 이질 매질층 간의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아온 파형을 검토하여 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 균열 및 공동 탐사 등에 적용하는 방법이다. 표면과 균열, 공동과 같은 불연속체 사이, 또는 표면과 이질 매질층 사이의 다중 반사에 의한 공진 상태가 유발되는데 이때, 시험체의 압축파 전파 속도를 알고 있다면 반사파의 도달 시간을 측정하여 시험체 내부에 존재하는 불연속면의 위치를 알아낼 수 있다.

표 2. 통신구 터널 라이닝 두께 측정결과

측정위치	좌측 측벽부 (Left)	우측 측벽부 (Right)	천정부 (Crown)
통계값			
평균값 (cm)	32.447	32.969	31.854
표준편차 (cm)	4.323	4.639	4.250
최소값 (cm)	26.042	25.210	24.155
최대값 (cm)	46.012	44.248	40.431

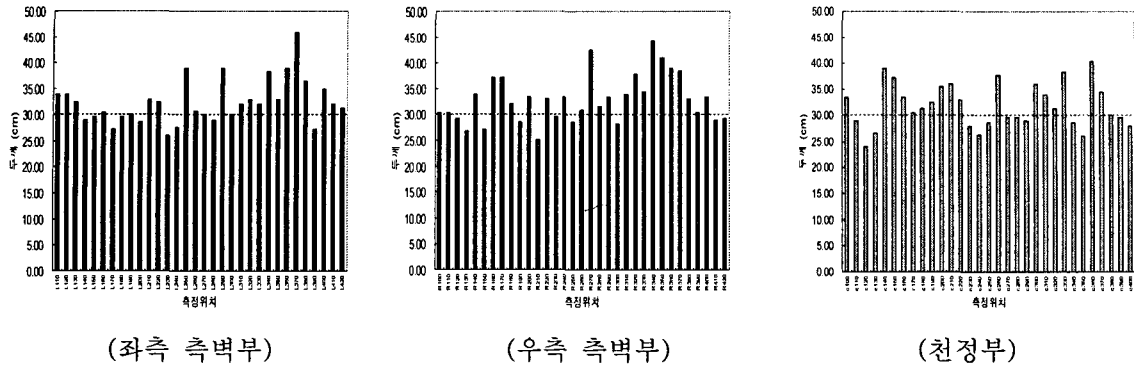


그림 4. 충격반향기법에 의한 라이닝 두께 측정 결과

○ 탐사 결과 분석

충격반향기법에 의한 통신구 터널 라이닝 두께 측정 결과는, 좌측 측벽부와 우측 측벽부의 라이닝 두께 평균값은 각각 32.447cm와 32.969cm로서 설계 두께 30cm 이상이었으며, 천정부의 경우도 평균값이 31.854cm로서 설계 값을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

4.2 GPR조사에 의한 라이닝 두께 측정

○ GPR(Ground Penetrating Rader)의 개요

GPR 은 10 ~ 1500 MHz 대역의 전자파를 지하로 방사하고 그 반사파를 수신하여 해석하는 기술로써 터널라이닝의 두께, 터널의 배면공동, 지하의 지층 구조를 파악하거나 오염 범위를 탐사하고, 콘크리트 비파괴 진단, 지하 매설물 탐사, 매장 유물 조사등에 폭 넓게 사용된다. 본 탐사에 사용한 GPR 은 라트비아산 Zond 12c 제품이다.

○ 탐사결과 분석

GPR조사 결과 라이닝 두께가 30cm 정도로 일정하였다. 크라운부, 45도 상부부위, 스프링라인부, 우각부 하단부, 보도부에 대하여 전구간 GPR조사를 시행하였다.

GPR조사 결과 라이닝의 단면은 대체적으로 30cm 이상의 경향을 보이며 하단부는 설계도와 같이 다소 두껍게(40cm 이상) 조사되었다.

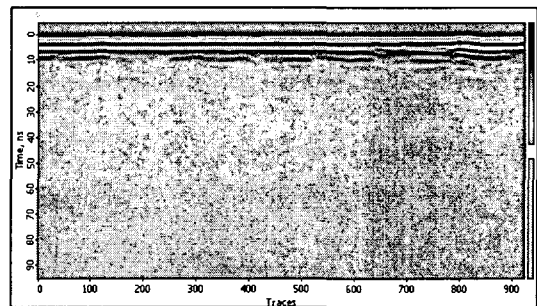


그림 5. ○○지점 통신구 GPR 결과

4.3 철근탐사기를 통한 철근배근 상태분석

철근탐사기로 라이닝 스프링라인 하부의 철근 배근 상태를 설계도면과 비교하였다. 일부 구간 하부 철근이 파악되지 않았으나 이는 철근탐사기의 투과성능상 깊이가 깊은 철근이 파악되지 않은 것으로 추정된다.

동일한 위치에 좌측과 우측 양쪽으로 철근 배근을 탐사한 결과 준공 도면과 같이 철근이 일정하게 배근되었음을 확인할 수 있었다.

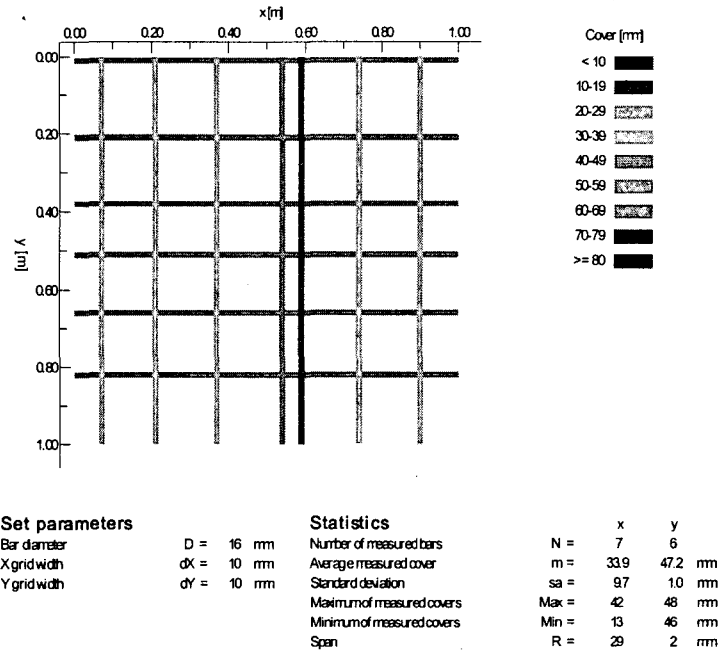


그림 6. 철근탐사기로 조사한 철근배근 상태

4.4 콘크리트 압축강도 조사

본 조사에서는 내구성 시험법인 반발경도 시험법을 이용하여 압축강도를 추정하였다.

슈미트해머에 입력 가능한 타격방향, 재령 등을 입력하여 계산토록 하였으며 재령에 따른 보정계수는 일본재료학회 추정강도식 ($F_c = 13 \cdot R_o - 184$)을 참고하였다.

표 3. 부재별 콘크리트 압축강도 시험결과 종합

구 분	측정개소	강도범위 (kg/cm ²)	평균강도 (kg/cm ²)	설계강도 (kg/cm ²)
터널형통신구	14	236~279	256	240

슈미트 해머를 사용하여 콘크리트 압축강도를 추정한 결과 평균압축강도는 256Kg/cm²로 설계기준 강도 보다 크게 측정되어 콘크리트 압축강도는 문제가 없는 것으로 판단된다.

5. 구조물 완전방수 공사

5.1 완전방수공법 소개

방수셀을 이용한 누수 보수 공법에는 직접적으로 누수되는 균열부위에 주입 팩커를 설치하여 방수셀을 충전하는 충전 방수공법(선상(線狀) 보수)과 누수되는 균열부위에서 일정간격 떨어진 구조체 면부위에 주입 파이프를 매설하여 방수셀을 구조체 배면까지 충전하는 배면 방수 공법(면상(面狀) 보수) 등의 2가지공법이 사용되고 있다.

충전 방수 공법(선상(線狀) 보수)은 누수 부위가 명확하고 부분적인 누수일 경우에 사용하는 것이 유리한 공법이며, 배면방수 공법(면상(面狀) 보수)은 누수부위가 산발적 이고 전체적이어서 누수부위가 불명확한 경우에 사용하는 것이 유리한 공법이다.

본 통신구 방수공법에는 배면방수공법을 주로 적용하고 일부 균열부에 충전방수공법을 사용하였다.

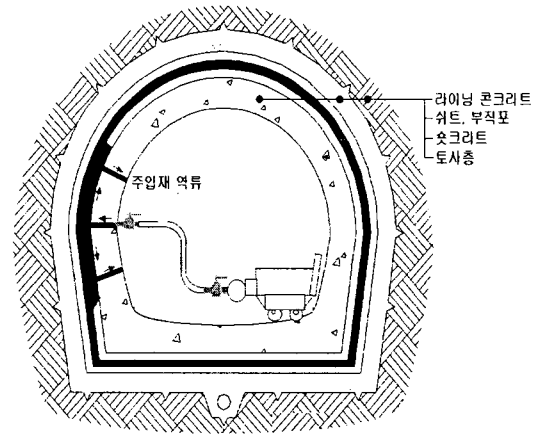


그림 7. 통신구 배면방수 공법 개념도

5.2 완전방수 설계

○○지점 통신구는 NATM 공법으로 건설되어 터널 깊이가 약 30m되고 누수 개소도 15개소 있는 것으로 조사되었다.

NATM 통신구의 구조물 및 방수의 특성을 감안하여 배면주입식 방수공법을 채택하였으며 설계는 누수가 심한 부분부터 폭 1m의 방수격벽을 만들어 순차적으로 방수하는 방식을 선택하였다.

표 4. 방수셀 품질 기준

시험항목	품질기준		시험방법
○ 투수 저항성	투수되지 않음		KS F 4919에 준함 (OUT PUT 시험방법)
○ 거동 대응성	구조체 거동후 투수되지 않음		KS F 4919에 준함 (OUT PUT 시험방법)
○ 점도 (cP) - spindle NO 7 - RPM 10	20 ℃	300,000이상	KS M 3825
○ 점조 (cP) - spindle NO 7 - RPM 10	50 ℃	150,000이상	KS M 3825
○ 비중	1 이상		KS M 3821
○ 부피 팽창률(%)	150 이상		24시간 수중 침적 후 메스실린더 측정

5.3 완전방수 시공

방수공사는 2003년 상반기 설계 및 발주되어 약 3개월간 시공되었다. 시공순서는 통신구내 지하수 유입을 막기 위한 집수정을 잠그는 것으로 시작하여 아래 순서로 실시 하였다.

- ① 누수가 발생하는 위치를 정확히 파악하기 위하여 지하수를 집수정으로 유도하는 유공관을 잠근다.

- ② 유공관을 잠근 후 현장 조사를 실시하여 누수가 발생하는 위치를 발생 순서대로 기록한다.
- ③ 누수가 가장 먼저 발생한 지역을 우선 방수 처리토록 한다. 방수 처리 시에는 방수셀을 라이닝 콘크리트와 방수시트 사이에 터널 단면의 원주 전체를 주입하여 방수 격벽층을 형성토록 한다. 단, 현장 여건 상 누수가 가장 먼저 발생한 지역을 확인할 수 없을 경우 누수가 최대로 발생하는 지점을 방수 처리토록 한다.
- ④ 3단계가 완료된 후 인근 지역에서 누수가 최대로 발생한 지점에 3단계와 마찬가지로 방수 격벽을 형성토록 한다.
- ⑤ 4단계 실시 후 일정 시간(약 2~3시간 정도)이 경과한 다음 누수의 진행 상황을 관찰하여, 다음의 방수 위치를 선정한다. 만약 방수 격벽층으로 격리가 이루어진 구간 내의 임의 지점에서 콘크리트의 시공 불량 등으로 누수가 발생할 경우에는 해당 부위만 방수셀을 주입하면 되며, 격벽을 시공할 필요는 없다.
- ⑥ 일정 구간의 방수가 완료되면 다른 구간의 방수를 1~5단계에 걸쳐 진행한다.
- ⑦ 수직구로 분리된 다른 터널로 지하수가 유입되어 누수가 발생하는 것을 방지할 수 있도록 하기 위해서는 수직구 벽체로부터 5m 정도 떨어진 위치에서 방수 시트와 암반 사이에 방수셀로 격벽을 설치토록 한다.

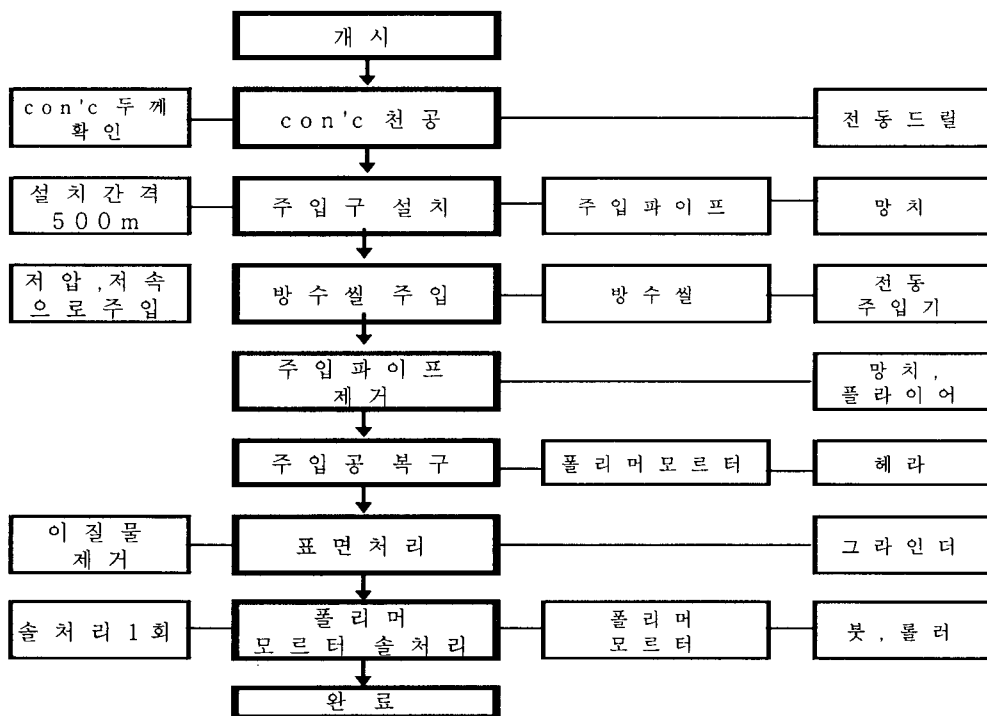
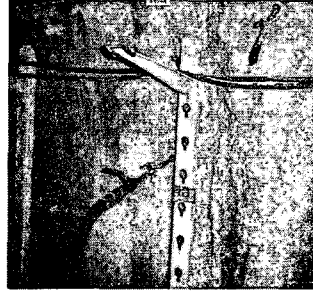


그림 8. 방수셀 주입 시공 순서도



(방수공사전 누수 발생)



(방수공사중 방수재 주입)



(방수공사후 마감처리)

그림 9. 통신구 라이닝 완전방수공사 모습

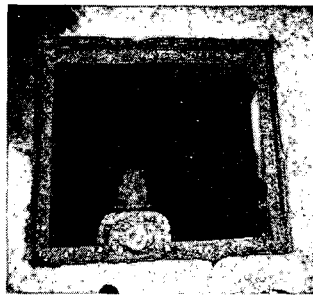
5.4 완전방수공사 결과

완전방수공사를 준공한지 3, 9, 12, 15개월이 경과한 시점에 ○○지점 통신구를 재방문하여 방수공사후 관리실태를 조사하였다.

조사결과 터널 라이닝의 방수상태는 양호하여 누수가 없었다. 방수전에는 통신구 집수정으로 유입되는 지하수를 배출하기 위하여 양수기가 하루에 최대 16시간 이상 가동하고 있었으나 방수공사 이후 집수정에 유입되는 지하수가 없어 양수기가 가동하지 않고 있는 것을 확인 할 수 있었다.



(방수공사전 지하수 유입)



(방수공사 후 유공관 잠금)



(집수정 내부 모습)

그림 10. 통신구 집수정내 완전방수 확인

6. 경제성 분석

다음은 서울지역에 위치한 □□지점 통신구의 경제성을 검토한 자료이다.

본 통신구는 연장 1,100m, 수직구 4개소의 NATM 공법으로 건설되어 유입된 지하수를 하수도에 배출함에 따라 2004년 10월부터 서울시에 하수도 사용료를 납부하고 있으며, 주변여건으로는 하천이 통신구와 87m 거리를 두고 흐르고 있어 지하수를 하천으로 배출시는 하수도 사용료가 면제될 수 있는 상황이다.

경제성 검토는 현재와 같이 지하수를 하수도로 배출하는 경우, 지하수를 통신구에서 하천으로 직접 방류하는 경우, 그리고 통신구를 완전방수 하는 경우를 설정하여 비교 하였다.

각각의 소요 비용은 하수도로 배출시는 하수도사용료와 환경개선 부담금, 지하수 배출에 필요한 양수기 및 배수관 유지비용과 전기사용료이며, 하천으로 배출시는 하수도 사용료가 제외되고 인근 하천까지 배관설비비가 추가 되며, 완전방수시는 방수공사비를 추정계약금액을 기준으로 시공비용을 산출하였다.

표 5. □□지점 통신구내 지하수 처리 경제성 비교표

(단위 : 천원)

구 분	하수도사용료 납부의 경우	하천 방류의 경우	완전 방수의 경우	비 고
2005년 비용	355,337	178,112	337,820	하수도사용료 120원/ton
2006년이후 매년	322,337	56,232	-	
2005년이후 5년간 총비용	1,644,685	403,040	337,820	

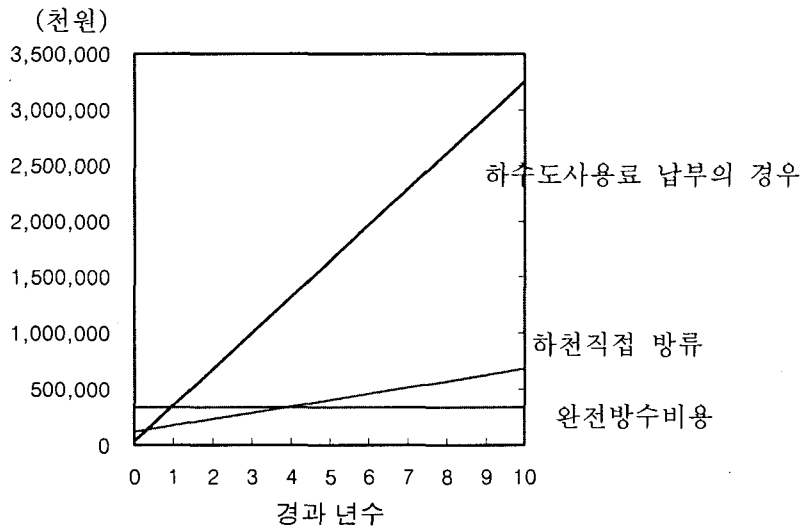


그림 11. 경과 년수에 따른 경제성 분석

경제성 비교결과 향후 5년간의 총비용을 검토시 통신구의 완전방수 공사를 채택할 경우가 하수도사용료 납부의 경우보다 약 1,306,865천원 정도 절감되며, 구조물 완전방수시 손익분기점은 1년 이내이며, 이후 매년 322,337천원/년의 예산절감이 예상된다. 그러나 하천에 직접 방류하는 경우와는 완전방수방식이 4년째부터 경제성이 있다고 판단된다. 결국 □□통신구도 배출수량이 많으므로 완전방수가 경제성이 우수한 것으로 판단된다.

7. 결론

배수식 방수방식의 소규모 NATM 터널인 ○○지점 통신구를 공사 준공후 7년이 경과한 다음 완전방수 통신구로 변경하였다.

먼저 완전방수시공이 가능한지를 판단하기 위하여 통신구 라이닝의 구조계산서와 도면 등을 검토하고, 충격방향기법(Impact-Echo Method) 탐사와 GPR탐사로 라이닝의 시공상태와 단면두께를 측정하였다. 또한 철근탐사기를 이용 설계배근도와 철근배근상태를 비교하였다. 그 결과 ○○지점의 통신구를 완전방수할 수 있다고 판단하여 배면방수공법을 적용, 완전방수방식 통신구로 변경 시공하였다.

이로서 과거 불가능하다고 판단된 배수식 방수법의 NATM 터널이 준공 후 방수재의 배면 주입공법으로 비배수식(완전방수식) 방수법으로 변경이 가능함을 확인하였다. 따라서 앞으로 신설되는 NATM 통신구도 완전방수가 가능하다고 판단되며, 터널 준공후 방수재 주입공을 천공, 방수재를 주입하는 준공후 완전방수공법보다 신설 NATM 통신구의 건설시 완전방수 하는 공법이 더 경제적이라고 사료된다.

또한 □□지점 통신구는 완전방수방식으로 변경시공함이 지하수 배출에 따른 하수도사용료, 환경개선부담금, 수중모터 교체비용, 전기료 등의 유지보수 비용을 절감하는 등 경제성이 우수한 것으로 분석되고 동시에 통신구의 내구성 향상과 통신구 주변 지하수자원의 보호에도 큰 효과가 있다고 사료된다. 이는 지하수 배출량이 많은 소규모 NATM 통신구는 구조적으로 라이닝의 완전방수가 가능한 경우 배수형 통신구로 운영하는 현행 유지방법 보다 완전방수로 변경 운용함이 더 경제성이 있다고 분석된다.

KT는 통신구의 운용유지보수비용을 절감하고 지하수 자원의 보호를 위하여 서울지역을 시작으로 완전방수가 가능한 전국 통신구를 완전방수할 계획으로 본 NATM 통신구의 완전방수 성공사례가 큰 힘이 될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 통신구 터널의 완전방수설계 기술 연구, (사)한국지반공학회(1998)
2. 터널표준시방서, 건설교통부(1999)
3. 콘크리트 구조설계기준, 건설교통부(2003)
4. ○○지점 통신구 설계자료 : 실시설계보고서, 구조계산서, 설계도면, 시방서