

터널 굴착에 따른 고원습지 영향 최소화 방안 연구

A Study for Minimizing Wetland's Influence by Tunnel Excavation

주광수* 박경호* 서영호* 고성일**
Jue, Kwang-Sue Park, Kyung-Ho Suh, Young-Ho Ko, Sung-II

ABSTRACT

In this paper, we have studied the expected problems when tunnel is excavated under the wetland, and described the measure to maintain the wetland's ecosystem environment. Firstly, we investigated the wetland's ecosystem such as plants and animals, and executed ground investigation including in-situ tests and geophysical survey. And we analyzed the foreign similar cases for tunnel excavation near the wetland.

We also evaluated the runoff and infiltration quantity of groundwater and hydraulic behaviour of rock mass and wetland by numerical analysis. Finally, we established the effective measure to minimize the ecosystem's influence by tunnel excavation.

1. 서론

습지란 담수, 기수 또는 염수가 영구적 또는 일시적으로 그 표면을 덮고 있는 지역으로서 내륙습지 및 연안습지를 말하며 내륙습지는 육지 또는 섬안에 있는 호 또는 소와 하구 등의 지역을 말한다. 또한 연안습지는 만조시에 수위선과 지면이 접하는 경계선으로부터 간조시에 수위선과 지면이 접하는 경계선까지의 지역을 말한다. US EPA에 의하면 내륙습지는 크게 Marshes, Swamps, Bogs, Fens의 네가지로 분류되며, 이중 Fens는 지하수 유동으로 인해 이탄층이 산 정상부에 형성되어 습지를 형성한 것으로 우리나라 내륙습지의 특성 및 본 과업구간의 특성과 유사하다.

우리나라의 습지는 지진이나 화산, 단층활동이 상대적으로 적고, 빙하지역이 아니므로 내륙습지의 발달은 미미하나, 백두산 천지 등은 세계 두 번째로 큰 고산습지이다. 국내에서는 이러한 습지를 효율적으로 보전, 관리하기 위하여 1997년에 세계적 규모의 환경협약중 하나인 랍사협약에 가입하였으며, 1999년에 습지보전법을 제정하여 양산 화염늪 등 6개 지역을 습지보호지역으로 선정하였다[1].

본 논문은 기존에 국내에서 설계 및 시공사례가 보고되지 않은 생태계 및 습지보전지구 하부에 터널굴착시 예상되는 제반 문제점을 검토하고, 시공 및 유지관리시 대책을 수립하기 위해 시도되었다. 먼저, 습지생태계에 대한 정밀조사를 수행하였고, 습지 및 주변구간에 대한 현장 및 물리탐사를 포함한 정밀조사를 실시하였다. 또한 해외의 유사시공사례를 분석하여 대책수립에 대한 설계방향을 제시하였다. 또한 수치해석을 이용하여 수지문분석, 포화 및 불포화 수리거동특성을 보이는 암반 및 습지에 대한 수리거동해석을 수행하여 터널굴착에 의한 습지의 영향을 평가하였다. 이상의 결과를 종합하여 터널굴착시 습지생태계 파괴를 최소화하기 위한 대책을 수립하였다.

* (주)현대건설 토목사업본부, 정회원
** (주)삼보기술단 지반공학부, 비회원

2. 과업구간 지질개요 및 습지현황

과업구간은 경부고속철도 제○○공구 구간으로 경상남도 양산시 웅상읍 소주리와 평산리에 걸쳐 펼쳐진 원효산 및 천성산 일대이며, 경상분지의 동남부중 양산단층과 동래단층 사이에 위치한다. 기반암은 불국사 화강암류와 화산암류로 구성되며, 불국사 화강암류는 흑운모 화강암, 화강섬록암이 주를 이루며, 화산암류는 안산암, 유문암질 응회암, 안산암질 응회암이 주종을 이룬다.

본 과업구간내 고원습지는 그림 1과 같이 터널상부에 2개 지역이 존재하고 있다. 습지 2의 경우 2002년에 습지보전지역으로 지정된 상태이며, 습지 1은 환경단체에 의해 습지보전지역으로 추진 중이다. 터널로부터의 이격거리는 습지 1의 경우 수평으로 130m, 습지 2의 경우 2,660m 이격되어 있다. 검토결과 습지 2의 경우 노선과 2km 이상 이격되어 수계형성이 다르므로 터널굴착에 의한 영향은 없는 것으로 판단되었다.

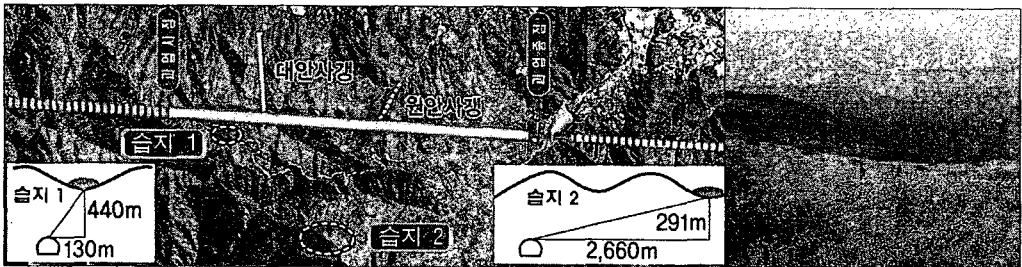


그림 1. 과업구간 습지분포 현황

습지에 대한 생태계조사는 과거 조사자료를 바탕으로 문제점을 분석하여 세부계획을 수립하였으며, 이를 바탕으로 정밀조사를 수행하여 습지구간의 동식물상을 파악하였다[2, 3]. 표 1은 습지구간에 분포하는 식물상 조사결과이다. 동물상 조사결과 조사지역에서 서식이 확인된 종은 7과 14종이며, 법적보호종은 발견되지 않았으나 조류는 총 18과 20종 314개체중 법적보호종인 말뚝가리 및 황조롱이가 발견되었다.

표 1. 식물상 조사결과

구분	습지 1	습지 2	
조사결과	<ul style="list-style-type: none"> 대표적 군락 : 진퍼리새 특이식물-이삭귀개(식115호) 끈끈이주걱(식75호) 미치광이풀(식109호) 	<ul style="list-style-type: none"> 대표적 군락 : 억새군락 특이식물-이삭귀개(식115호) 끈끈이주걱(식75호) 	

3. 주요 지반조사 현황 및 분석결과

3.1 습지구간

터널굴착에 의한 습지영향을 평가하기 위해 본 과업구간 상부에 존재하는 습지 1에 대하여 정밀지반조사를 수행하였다. 표 2는 터널 상부 습지 1에서 수행한 지반조사 항목을 나타낸다.

핸드오거에 의한 조사결과 습지의 이탄층 두께는 습지식생대는 30cm, 습지퇴적물은 약 1~2m 퇴적되어 있는 것으로 나타났다(그림 2). 지하수위 측정결과 갈수기인 11월에 MAB-2에서 최대 GL.-80cm의 수위를 보였으며, 투수시험결과 습지내 이탄층 투수계수는 $1.3 \sim 1.34 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 비교적 낮은 투수특성을 보인다. 또한 습지 고밀도 전기비저항 탐사결과 습지내 기반암 심도는 GL.-15~20m에 분포하는 것으로 나타났다.

표 2. 습지 구간 지반조사 현황

구분	수량	시험목적	구분	수량	시험목적
Hand Auger	5공	이탄층 분포 파악	현장 투수시험	2회	이탄층 투수계수 파악
습지 물 연대측정	1식	습지 메커니즘 분석	실내 투수시험	3회	
지하수위 계측	5공	지하수 관리기준 제시	실내 암석시험	1식	기반암 투수계수 파악
수질분석	3회		고밀도 전기비저항	0.84km	습지 지층분포 파악

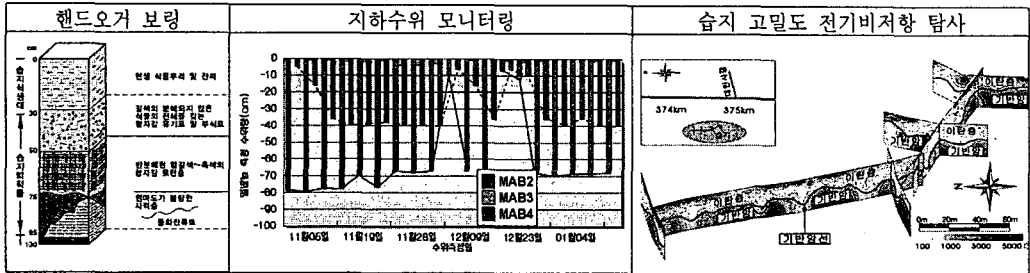


그림 2. 습지구간 지반조사 결과

3.2 본선터널구간

대상구간에 대하여 선구조 분석, 정밀 지표지질조사, 물리탐사 및 암석 연대측정결과를 수행하였다. 조사결과 파업구간은 그림 3과 같이 총 7개의 구조선이 발견되었으며 이중 F1(N37W/78SW)과 F2(N71E/84SE)의 단층파쇄대(추정폭 2m)가 습지 1에 근접하여 통과하는 것으로 나타났다.

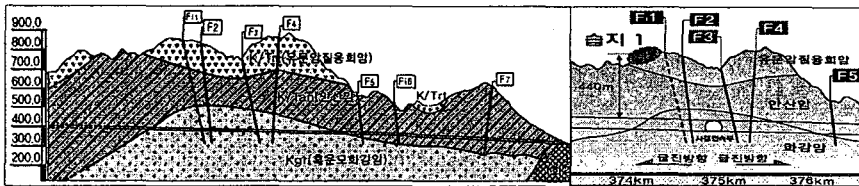


그림 3. 파업구간 구조선 분석결과

4. 국외 유사 사례분석

4.1 후쿠시마현 요코미치 터널

일본 후쿠시마현 조일 국립공원내에 시공된 요코미치 터널은 터널상부에 750m² 규모의 다엔습지가 인접하여 위치하고 있다. 터널구간의 지반은 화산쇄설물 지반으로 터널 시공중 관측공 2개소를 설치하여 지하수위를 계측하였으며, 시공중 습지와 인접한 위치에 단층파쇄대가 존재하는 것으로 나타났다(그림 4 참조). 시공중 계측결과에 의하면 터널굴착에 의한 지하수위 저하는 미미하였으나, 단층대 통과시 파쇄대 주변 누수로 인하여 급격한 지하수위 저하가 발생하였다. 지반의 지하수위 저하량은 터널계획고(GL.-20m)까지, 습지수위는 25cm 저하하여 습지 및 지반수위의 이원화가 발생하였다. 이에 대한 대책공법으로 시멘트밀크 그라우팅을 실시하여 지하수 저하를 방지하였다.

4.2 나고야 세토터널

일본 나고야 세토터널은 터널상부에 30,000m² 규모의 댐프습지가 존재하고 있어 터널굴착으로 인한 지하수위 변화 및 생태계에 미치는 영향을 검토하였다(그림 5 참조). 지질조건은 화산암으로 대상

지역과 유사한 지질특성을 보였으며 습지와 터널의 이격거리는 200m이다. 세토터널은 습지에서 터널 굴착시 습지수위와 지반수위의 이원화가 발생하였다. 포화-불포화 메커니즘에 입각한 수치해석결과 습지 지하수위 저하는 1m 이내로 나타나는 것으로 예측되었다.

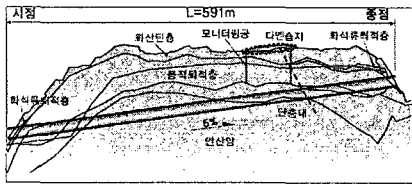


그림 4. 후쿠시마현 요코미치 터널

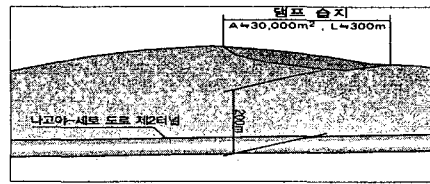


그림 5. 나고야 세토터널

5. 터널굴착에 따른 습지구간 지하수 유동분석

지반조사 결과에 따라 터널굴착에 따른 습지 영향을 분석하기 위해 시공사례분석 및 물연대 측정 결과에 따라 습지 생성·유지 메커니즘을 분석하고, 지반조사결과 추정된 단층과쇄대를 고려하여 지하수위 이원화에 따른 포화-불포화 메커니즘을 구현할 수 있는 프로그램(GW-USAF 3D)을 이용하여 지하수 유동해석을 수행하였다[4]. 지하수 유동해석의 입력변수는 현장 및 실내 투수시험, 물리탐사 및 수치분 분석 등을 통하여 도출하였다.

5.1 습지 생성·유지 메커니즘

습지 생성·유지 메커니즘은 그림 6과 같은 과정을 통하여 이루어지는 것으로 분석되었다. 수천년 전 산 정상부의 지형적 특성에 의한 Föhn현상으로 다습지역을 형성하여 점토물질의 이탄층이 형성되어 습지가 생성되고(Stage I), 강우지속으로 인해 습지 이탄층이 완전 포화된 상태로 습지상부까지 지하수위를 형성한다(Stage II). 건기시, 지반 지하수위는 습지 하부로 저하하여 포화상태에서 불포화상태로 전이되나, 물을 함유하고 있는 이탄층의 특성으로 습지생태계를 유지한다(Stage III). 우기시, 저하된 지하수위는 습지 표면부까지 재상승되어 불포화상태의 이탄층이 다시 포화된 상태로 전이된다(Stage IV). 이러한 건기시의 우기시의 순환과정의 반복으로 인해 습지생태계가 유지된다.



그림 6. 습지 생성·유지 메커니즘

5.2 습지구간 지하수 유동해석

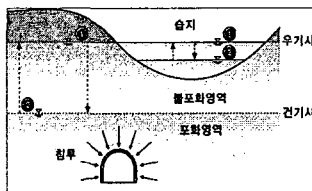


그림 7. 포화-불포화 메커니즘

습지 및 주변지반의 지하수 이원화에 따른 포화-불포화 메커니즘을 고려할 수 있는 프로그램(GW-USAF 3D)을 이용하여 터널굴착에 인한 습지영향 분석을 실시하였으며, 프로그램의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - q = \left(\beta S_s + \frac{d\theta}{dh} \right) \frac{\partial h}{\partial t}, \quad \beta=0 \text{ 포화}, \beta=1 : \text{불포화상태}$$

Kij=투수계수, h=압력 수두, θ=체적함수, Ss=비저류 계수

터널굴착으로 인한 습지영향을 평가하기 위해 지반조사 결과 나타난 단층대를 고려하여 단층대의 폭과 투수계수를 변화시키는 parameter study를 통한 수치해석을 수행하였다(표 3 참조).

표 3. Parameter Study 조건

단층대 폭	2m	5m	10m	20m
단층대 투수계수				
10^{-4} m/sec	-	Case 1	Case 4	Case 7
10^{-5} m/sec	Real Case	Case 2	Case 5	Case 8
10^{-6} m/sec	-	Case 3	Case 6	Case 9

실제상황(Real Case)에서 검토한 해석결과 터널굴착으로 인한 영향범위는 터널상부에서 GL.-233m까지이며 터널굴착으로 인한 습지수위변화는 없는 것으로 나타났다(그림 7). 단층대 폭이 10m 이하이고, 단층대의 투수계수가 10^{-5} m/sec 이하인 경우(Case 2, 3, 5, 6) 습지의 수위저하는 굴착 후 1년 이내에 발생하지 않았으며, 지반의 지하수위는 1m 미만으로 저하하였다(그림 8). Case 1, 4, 8, 9의 경우 그림 9와 같이 습지자체의 지하수위는 수위저하가 발생하지 않았으나, 지반의 지하수위 저하가 4.5~8m 발생하였다.

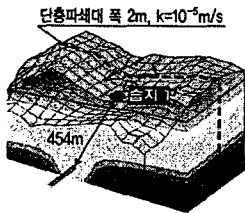


그림 7. 실제상황시(Real Case) 해석 결과

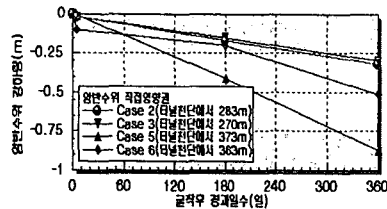


그림 8. Case 2, 3, 5, 6의 지하수위 변화

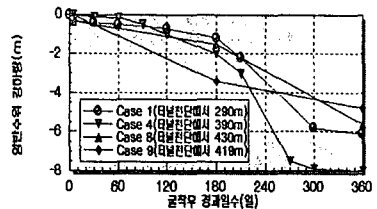


그림 9. Case 1, 4, 8, 9의 지하수위 변화

단층대 폭이 20m, 투수계수가 10^{-4} m/sec인 경우(Case 7), 그림 습지수위 저하가 10cm, 지반수위가 65m 발생하였다. 습지수위는 굴착후 약 20일 까지는 지하수위 저하가 발생하지 않았으나, 20일 경과 후부터 100일까지 지하수위가 저하하여 이에 대한 대책이 필요하다(그림 10).

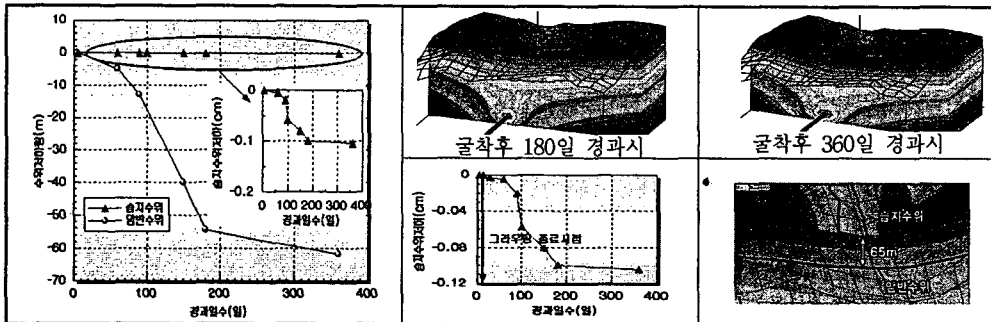


그림 10. Case 9의 해석결과(단층대 폭 20m, 투수계수 10^{-4} m/sec)

5.3 지하수위 저감대책

Parameter Study 결과 습지수위가 최대 10cm 저하하는 것으로 나타나, 습지보존을 위해 유사시공 사례를 참조하여 습지수위저하가 예상되는 구간에 대하여 Pilot 터널을 계획하였다. Pilot 터널 적용은 막장 및 막장 전장지질상태를 확인하고, 본선굴착 외곽까지 차수그라우팅을 실시하는데 그 목적이 있다. Pilot 터널의 단면 및 위치는 차수그라우팅시 상향천공작업의 난이도, 상반 그라우팅 효율성, 해외

시공사례 분석 등을 통하여 본선굴착 단면적(140.1m²)의 약 1/8인 Pilot 터널(굴착단면적 16.73m², 4.5m(W)x4.2m(H))을 선정하였다(그림 11). 계획된 Pilot 터널단면선정시 Case9의 최악의 조건에 대하여 지하수 유동해석을 수행하였다. 수치해석시 그라우팅 모델로 적용된 그라우팅 주입 연장은 단층대 폭과 동일한 20m, 그라우팅 폭은 시공사례 분석 및 현장조건을 감안하여 3m로 선정하였다(그림 12).

해석결과 Pilot 터널굴착과 내부 차수그라우팅을 실시할 경우 습지수위는 변화가 없었으며, 지반의 지하수위는 12m 저하하는 것으로 나타났다. 또한 Pilot 터널 및 내부 차수그라우팅이 완료된 후 본선을 굴착할 경우 습지수위 저하는 발생하지 않았으며, 지반 지하수위는 20m 저하하는 것으로 나타났다(그림 13). 이상의 결과를 볼 때 적용된 대책공법은 적절한 것으로 보이며, 그라우팅의 주입시기는 그림 10의 해석결과를 고려할 때 수위저하가 발생하는 시점인 굴착후 20일 이내에 시행되어야 할 것으로 판단된다. 그림 14는 습지구간 통과시 시공단계를 나타낸 것으로, 1단계 선진시추공에 의한 전방 지질 파악, 2단계 단층파쇄대 존재시 본선 예정 굴착선 외곽 차수그라우팅 실시, 3단계 Pilot 터널 굴착완료, 최종 4단계 본선터널 상반 확공 및 하반 굴착의 순서이다.

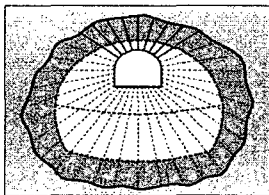


그림 11. Pilot 터널 위치도

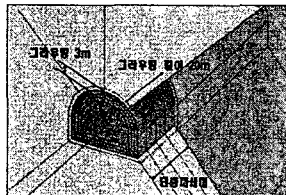


그림 12. 그라우팅 모델링도

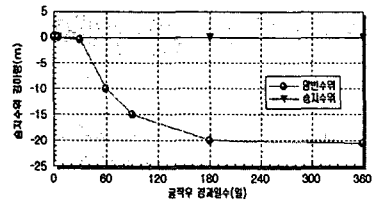
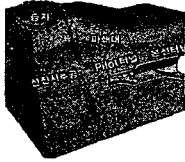
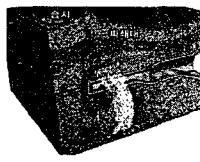


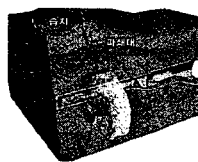
그림 13. 본선굴착후 수위변화



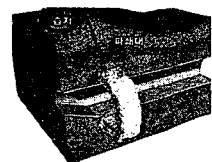
1단계



2단계



3단계



4단계

그림 14. 습지구간 통과시 시공순서도

7. 결론

습지에 대한 생태계 정밀조사 및 습지 및 터널주위 암반의 지반조사, 해외 유사시공 사례분석을 통하여 고속철도 터널공사로 인한 습지의 영향분석을 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) 터널굴착으로 인한 습지 영향을 평가하기 위하여 포화-불포화 메커니즘을 고려할 수 있는 지하수 유동해석을 수행한 결과 습지 1의 경우 최대 10cm의 수위저하가 발생하였다.
- (2) 이에 대한 대책으로 상부 습지통과구간에 대해 본선터널 굴착 단면적의 1/8인 Pilot터널을 굴착하여 프리그라우팅 실시 후 본선터널을 확대굴착하는 공법을 채택하였다. 대책공법을 적용하였을 경우 습지영향을 평가한 결과 터널굴착에 의한 습지수위의 변화가 없는 것으로 나타나 적용공법은 적절한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부 (1999), "습지보전법", pp.1~2.
2. 동아대학교 환경문제연구소, "경부고속철도 부산·경남권 건설사업 환경영향평가 최종보고서", pp.160~228.
3. 경남발전연구원 (2000), "양산시 고층습지 생태계 방안", pp.46~80.
4. Guymon, G, "Unsaturated Zone Hydrology", PTR Prentice Hall, New Jersey, pp.80~108.