

동경만 해저터널의 시공전·후 지반조사결과 비교분석



김형목
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
선임연구원



류동우
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
선임연구원



박의섭
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
선임연구원



신희순
한국지질자원연구원
지구환경연구본부
책임연구원

1. 서론

해저 및 하저터널은 환경 친화적이고 태풍 등과 같은 악천후 기후환경에서도 안정적으로 도서지역 및 인접국가간 교통 및 물류수송을 가능케 하는 장점으로 관심과 수요가 최근 급증하고 있다. 국내에는 서해안 대천항~원산도 구간의 총 연장 6.9km의 해저터널 공사가 2010년부터 시공에 들어갈 예정이다. 해저터널은 연장이 5.1km, 최대 수심은 37m, 최대 토피고 65m에 달한다(서영호 외, 2010). 또한, 서울의 강변북로 원효대교~망원동(5.1km) 구간은 한강 하저를 굴착하여 도로터널을 건설하는 공사로 2010년 착공하여 2016년 완공계획에 있다.

이와 같은 해저 및 하저지반의 경우 기반암이 직접 노출되지 않고 상부에 토사 퇴적층으로 피복되어 있는 경우가 대부분이고 육상터널과 달리 접근성이 떨어져 조사 및 현장시험에 많은 제약이 따른다. 이로 인해 굴착 전 사전

지질조사를 통해 얻어지는 기반암 심도, 함수파쇄대의 위치 및 범위 등과 같은 터널 설계 및 시공과정에서의 영향 인자들은 많은 불확실성을 내재하게 된다.

해저터널 시공과정에서 예상치 못한 함수파쇄대 및 연약구조대와 교차하게 될 경우 막대한 양의 해수 유입으로 건설공사의 지속 가능여부에 까지 영향을 미칠 수 있다. 실제로 노르웨이 Oslofjord 해저터널 및 한강 하저 지하철터널 시공과정에서도 당초 예상과는 상이한 연약대 구조 및 단층 파쇄대로 인하여 시공과정에서의 어려움이 보고된 바 있다[Blindheim et al., 2005; 송근백외 1996].

본 고에서는 국내외적으로 전례를 찾아보기 힘든 굴착 전 해저지반 조사 예측과 실제 해저터널 시공을 통해 확인된 지질결과를 비교한 국외 사례(富所達哉외, 2006)를 소개함으로써 국내 해저 및 하저터널 건설을 위한 해저지반 조사 및 분석과정에 참고가 되었으면 한다.

2. 동경만 해저터널 공사 및 지질 개요

2.1 공사개요

본 해저터널은 동경만을 횡단하는 총연장 20km(해저통과구간 18km)의 파이프라인 건설공사로 내경 3.0m의 쉴드 터널 내부에 700A의 동관을 설치하는 작업이다(그림 1). 이는 동경만을 접하고 있는 카나가와현(神奈川県)과 치바현(千葉県)의 LNG 기지를 파이프라인을 통해 연결하고 동경만 주변 화력발전소에의 LNG 공급의 탄력성을 제고할 목적으로 계획되었다.

쉴드공사는 1997년도부터 운영중인 동경만 횡단 아쿠아라인 해저터널과 약 10km 떨어진 위치에 건설되었고, 동서 방향 양끝단 연직갱으로부터 동시에 굴진하기 시작하여 동경만 해저에서 합류하는 계획으로 1대의 쉴드TBM에 의한 굴진연장 9.0km는 세계 최장급에 해당하고 최대작용수압은 0.67MPa에 달한다. 표 1에 본 공사개요를 정리하였다.

2.2 지질개요

본 해저터널 공사를 위한 굴착전 사전 지질조사는 동경

만을 통한 빈번한 선박 운행으로 시추 조사가 불가능하여 기존 지질조사 자료와 터널 시공구간에서의 음파탐사 결과를 바탕으로 예측되었다. 기존 지질조사 자료로는 해저 터널 노선에서 북동방향으로 약 10km 떨어진 동경만 아쿠아라인 시공과정에서 얻어진 지질정보를 이용하였고, 동경만의 지질구조 형성과정으로부터 본 공사노선의 해저지질은 기존 아쿠아라인 노선의 퇴적환경과 연속성이 있다고 가정하였다.

동경만의 해저지질은 하부 홍적층(洪積層)과 상부 충적층(沖積層)으로 구성된다. 하부 홍적층은 약 50~100만년 전 해수면 상승기에 퇴적된 이후 10~2만년 전까지 용기와 침식 과정을 거치면서 계곡, 하안단구 등의 지형이 형성되었다. 약 2만년 전 빙하기 이후에 관입한 지층에 의해 하부 홍적층이 용기되고 그 상부에 충적층이 퇴적되어 형성된 것으로 알려져 있다.

3. 해저지반 층서구조 파악을 위한 음파탐사

동경만 아쿠아라인 지질단면과 비교하고 본 공사단면에서의 지층경계 및 층서구조를 예측함으로써 해저쉴드

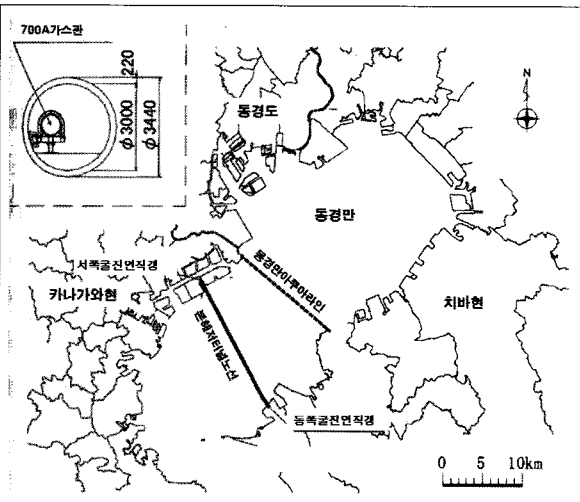


그림 1. 공사위치 및 터널 사양

표 1. 공사개요

공사명	가스도관 신설공사		
공사장소	카나가와현(神奈川県) 카와사키시(川崎市)와 치바현(千葉県) 후쓰시(富津市) 간		
공사기간	2003년 4월 ~ 2006년 3월		
공사내용	터널 내경	3.0m	
	굴착 공법	이수식 쉴드공법	
	동쪽 연직갱	내공	B7.0m x L38.0m
		심도	18.3m
		흙막이 공법	주열식 지하연속벽공법
	서쪽 연직갱	내공	직경 14.0m
심도		45.3m	
흙막이 공법		Pneumatic Caisson 공법	

터널의 설계, 시공 상의 위험요소인 연약지반, 함몰지형, 고결점토층 등의 지질리스크 요인들의 위치를 파악할 목적으로 음파탐사를 통한 조사를 실시하였다.

3.1 조사방법

조사측선은 그림 2와 같이 해저터널 종단노선을 따라 100m 간격의 3개의 평행한 측선(측선 1~3), 동경만 아쿠아라인 상의 일부(측선 9) 및 두 노선 사이를 연결하는 측선을 포함한 총 13개의 측선으로 이루어졌다.

음파탐사에 이용한 음원장치는 2종류로 소노프로브(sonoprobe)는 해저면 이하 20~30m의 천심도에서 최소 10cm의 고분해능 기록을 얻을 수 있고, 스파커(sparker)는 해저면 이하 100m까지 최소 100cm의 분해능을 가진다.

3.2 해석방법

지층구분 및 층서구조 해석과정에서는 연속성이 확인되는 명확한 반사면을 다음과 같은 방식으로 층경계로 판단하였다.

- 1) 동경만 아쿠아라인 단면 주상도의 지층경계와 동일한 심도에 대응하는 것
- 2) abutment면과 내부반사면이 부정합을 이루는 것 (퇴적부정합면으로 해석)
- 3) 해당 반사면을 경계로 내부 반사패턴의 차이가 현저한 경우(성상 변화 경계로 해석)

또한 내부반사면에 있어서는 현저한 층서구조 패턴은 전치(前置)구조의 사질층, 강한 반사를 보이는 부분은 조립쇄설물 퇴적층의 견고한 지질, 반사가 하얗게 보이는

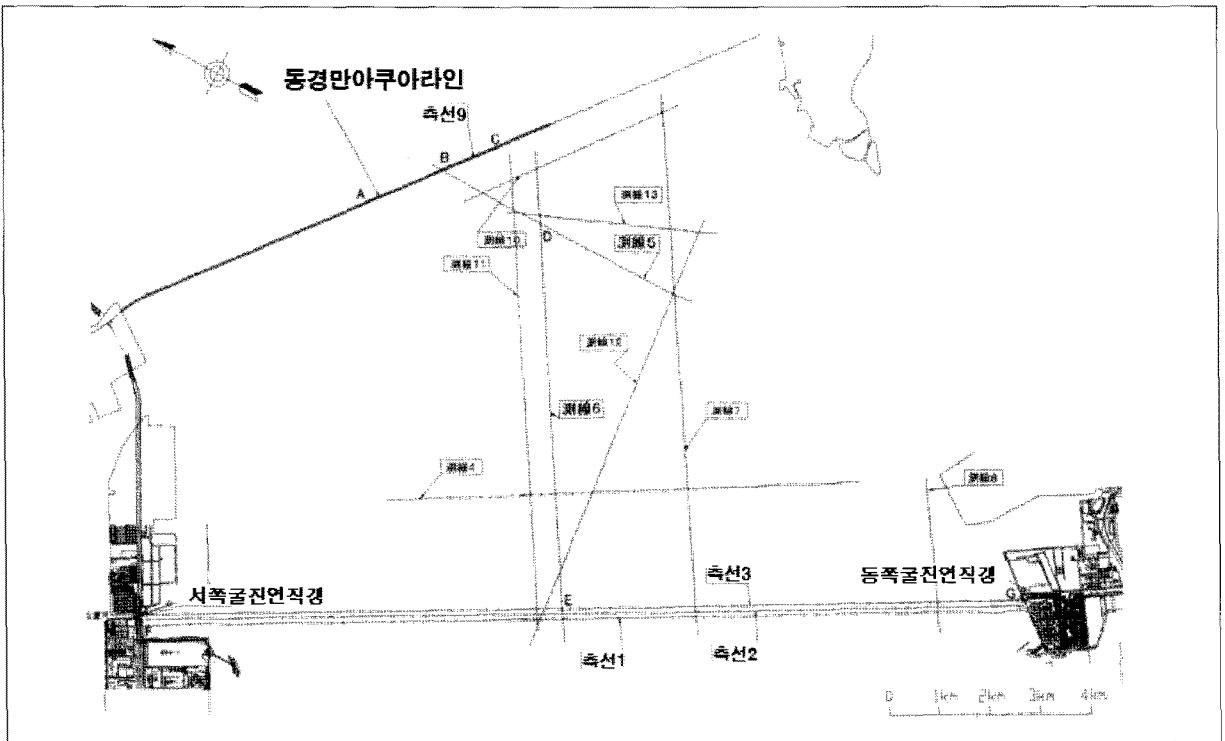


그림 2. 음파탐사에 이용된 측선

부분은 균질한 고결점성토층의 가능성이 높은 것으로 해석하였다.

3.3 해석결과

동경만 아쿠아라인 노선상의 축선 9에서 실시된 스파커 기록과 동일한 축선에 위치하는 기존 시추주상도와와의 비교 분석을 통해 3개의 반사면이 확인되었다.

- 1) 층적층기반으로 해석된 반사면
- 2) D3·D4층 경계로 해석된 반사면
- 3) D4·D5층 경계로 해석된 반사면

그림 3은 이들 반사면과 축선상에서 얻어진 정보를 중

합하여 본 해저터널 종단노선인 축선 2의 음파탐사 기록을 나타낸다. 동쪽구간 9km에서는 음파 산란구간이 없고 층적층기저면으로 파악되는 반사면의 연속성이 확인되었다(그림 3a). 한편, 서쪽 구간 9km는 음파 산란현상으로 인하여 층적층기저면의 연속성이 확인 곤란하여 동경만 아쿠아라인 지질단면(그림 4)을 기초로 예측하였다(그림 3b).

넓은 영역의 음파 산란구간 동쪽으로(서쪽 연직갱으로부터 3.9~4.6km 부근) -85m를 저면으로하는 계곡(谷) 지형의 반사면이 존재하고 아쿠아라인 지질단면에서의 기저심도와 일치한다.

서쪽 굴진 연직갱으로부터 4.6~7.2km에 걸쳐 -65~-70m 부근에 단구지형이 확인되었고 단구 서쪽부에서는 회절

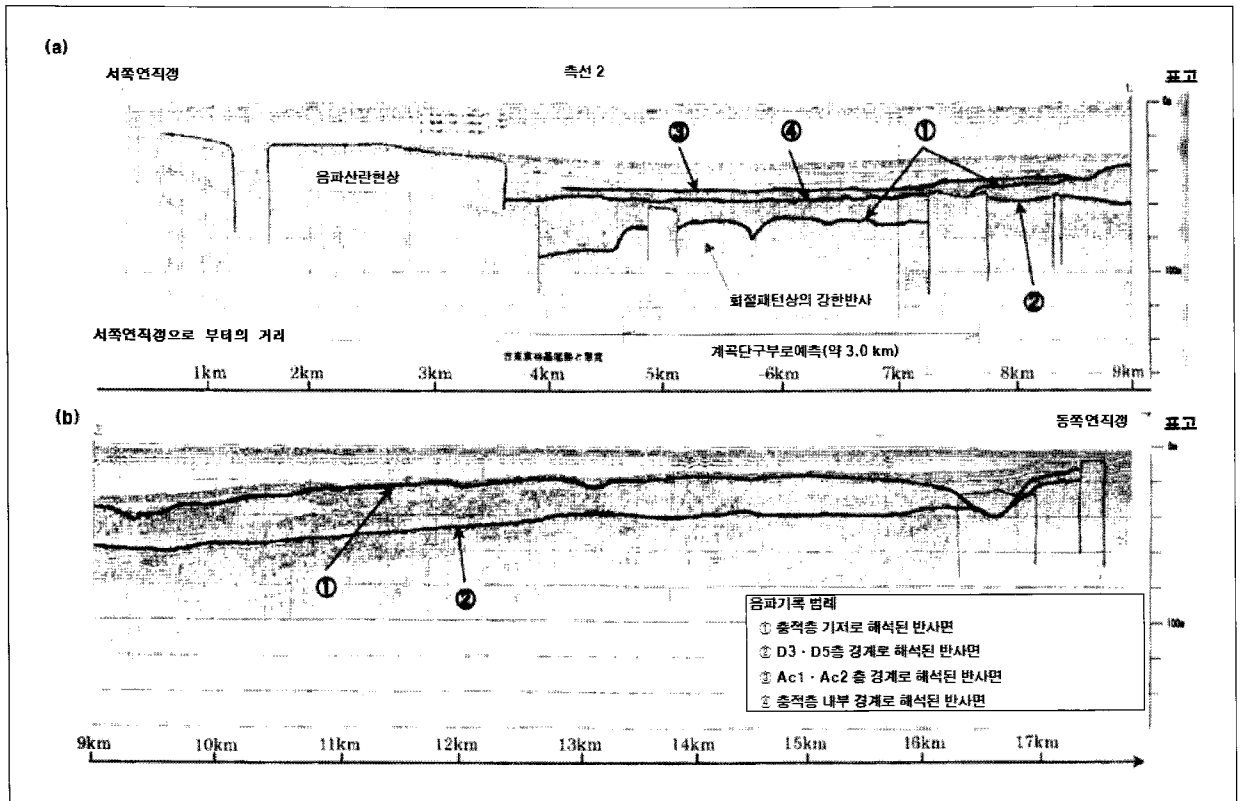


그림 3. 음파탐사 기록을 바탕으로 예측한 해저터널 종단노선에서의 지질단면(축선 2)

현상으로 보이는 강한 반사패턴이 관측되어 조립쇄설물 퇴적층의 분포가 예상된다. 단구부는 약 3.0km에 걸쳐 위치하고 7.6km 부근의 음파산란부에 단구절벽(岸)면이 예측되었다. 또한, -55m 부근(반사면④)를 경계로 내부 반사패턴의 차이가 관측되어 서로 다른 성상의 지층 경계

를 이루고 있는 것으로 예측되었다.

이상의 음파탐사 기록과 동경만 아쿠아라인 지질종단 정보를 이용하여 예측한 본 공사노선의 지질종단면 예측 결과를 그림 5에 표시하였다.

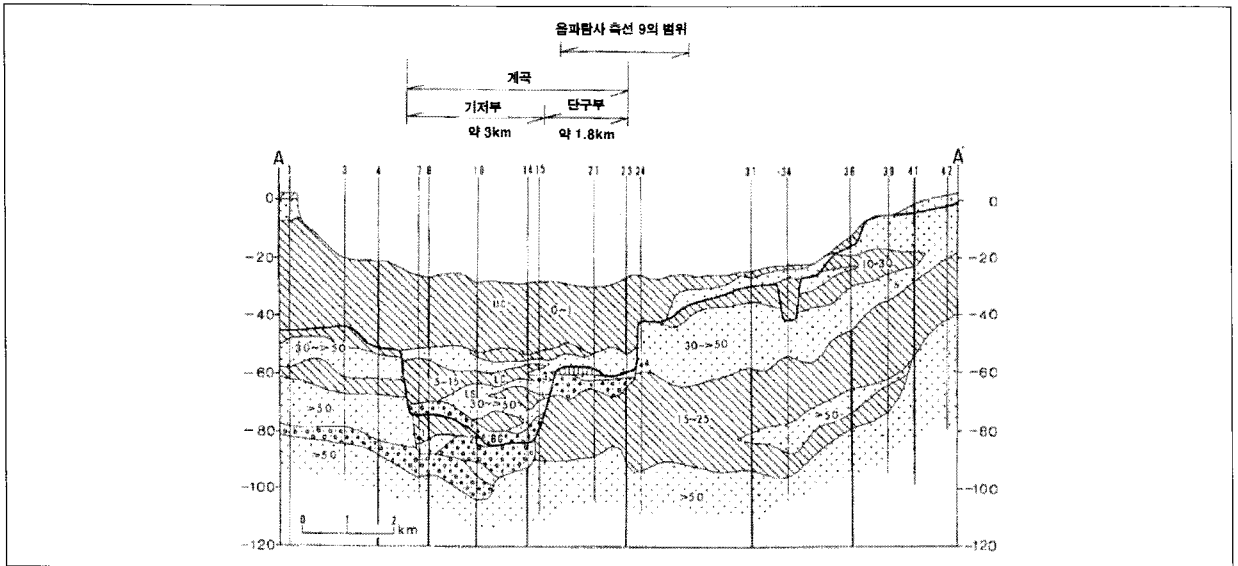


그림 4. 동경만 아쿠아라인 지질단면

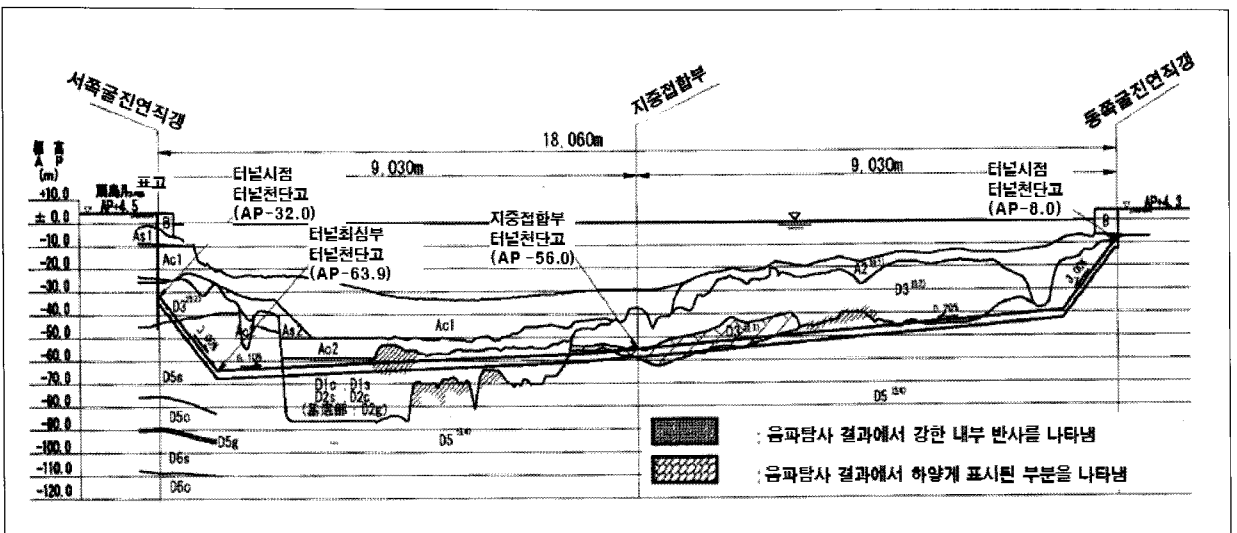


그림 5. 터널노선 지질종단 예측결과

4. 해저터널 시공 관련 지질위험요소 분석 및 선형계획

4.1 해저 쉘드터널 시공관련 지질위험 요소

쉘드터널 시공과 관련한 지질위험요소로는 N치가 0에 가까운 연약점성토에서의 장비제어곤란, 경질 점성토에서의 챔버 막힘, 토크 상승, 조립쇄설물에 의한 배관 막힘, 비트 마모 등이 예상되었다.

(1) N치가 0에 가까운 연약점성토

음파탐사 결과로부터 계곡부의 -55~-60m 심도부터는 점성토가 분포하고 이들 점성토의 N치는 0~1 정도로 확인되었다.

(2) 경질 점성토

음파탐사 기록의 하얗게 보이는 패턴으로부터 동쪽공구의 D3층 기저부에 경질 점성토가 발달하여 있을 것으로 예측되었다. 기타 홍적층 내부의 사암 및 이암 구분은 곤란하나 동경만 아쿠아라인 단면에서의 홍적층 층상구조로 볼 때 점성토의 출현 가능성도 있는 것으로 파악되었다. 홍적층 점성토의 평균 N치는 D3c가 18, D5c가 31로 높은 수치를 보였다(그림 5참조).

(3) 조립쇄설물

동경만 아쿠아라인 단면과 비교하여 계곡부 기저의 조립쇄설물 퇴적층, 왼쪽 하안단구 조립쇄설물 퇴적층의 분포가 예측되었다. 이 외에도 음파탐사 기록에서 다소 강한 반사를 나타낸 곳이 동쪽 홍적층 내 일부(-40m)에서 관측되어 국소적인 조립쇄설물 퇴적지역의 가능성이 있는 것으로 확인되었다.

4.2 터널선형

예측된 지질단면(그림 5)을 기준으로 터널 선형을 계획

하였다. 지진의 영향을 피하기 위해 연약한 점성토층(Ac1, Ac2층)을 피해 D1, D2층을 통과하는 선형을 계획하였다. 또한 시공 위험도를 고려하여, 계곡 왼쪽 단구부에 예상되는 조립쇄설물 퇴적층은 하부로 우회하였다.

동쪽 공구의 종단선형은 굴진 연직갱으로부터 1.5km 부근의 함몰계곡 하부를 통과하여 전 노선에 걸쳐 안정된 홍적층을 통과하도록 함으로써 메탄가스 및 사력층과 교차하는 위험을 저감함과 동시에 지진시의 터널 안정성을 확보하는 선형으로 계획하였다.

5. 시공전·후 지질조사 결과 비교

본 공사는 이수식 쉘드공법이기 때문에 굴착토의 평가는 주로 vibrating screen으로부터 배출되는 토사 관측을 통해 실시하였다. 음파탐사를 통한 예측과 시공과정에서 관측된 지질 결과의 주요한 일치점과 차이점을 정리하면 표 2와 같다.

6. 동쪽 함몰 계곡 지질의 재평가

동쪽 공구에서는 굴진 연직갱으로부터 약 1.5km부근의 함몰계곡 하부를 통과하는 선형으로 계획하였으나 실제 굴착 결과 총적층(즉, 함몰 계곡 내부)을 통과했을 가능성이 높은 것으로 판단되었다. 총적층 통과 유무를 확인할 목적으로 굴착토의 연대측정 및 퇴적환경분석을 실시하였다.

6.1 연대측정결과(방사성탄소(¹⁴C) 연대측정)

그림 6에 음파탐사 기록(왼쪽이 동쪽 공구)과 시료 샘플링 위치와 연대측정 결과를 표시하였다.

표 2. 시공 전·후 지질조사 결과의 주요한 일치점과 차이점

	음파탐사 해석결과와의 일치점	음파탐사 해석결과와의 차이점
동쪽 공구	<p>-강한 내부 반사를 보인 조립쇄설물 퇴적층의 출현 4.1~5.6km 구간은 조립쇄설물 퇴적층과 교차하고 음파탐사 기록에서 강한 내부 반사를 나타내는 구간(4.5~5.8km)과 거의 일치하였다. 이 구간에서는 기계 막힘이 다발하여 굴진속도가 현저히 떨어졌다.</p> <p>-하안색 패턴을 보인 경질 점성토층의 분포 음파탐사결과로부터 하안색 패턴이 관측된 6.5km 이후 구간은 점성토가 우세하였다. 특히, 하안색이 현저한 8.1~9.0km구간은 전단면에 걸쳐 점성토 지반이 출현하였다.</p>	<p>-점성토층 우세 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 동쪽 굴진 연직갱으로부터 0~6.5km 구간은 층서구조 패턴이 현저하고, 동경만 아쿠아라인 단면에서 D3층은 사질이암, D5층은 사질토가 탁월하여 점성토가 우월한 D4층은 교차하지 않을 것으로 예상하였으나 시공 결과 점성토가 50% 이상을 보였다.(표 3)</p> <p>-예상외의 조립쇄설물의 출현 예상보다 많은 조립쇄설물 퇴적층과 교차하였다. 굴진 초기의 220~950m에서는 최대입경 200mm정도의 조립쇄설물 퇴적층이 단속적으로 출현하여 이수배관의 막힘 현상이 빈발하였다.</p> <p>-예상외의 계곡(충적층)의 통과 터널 노선은 굴진 연직갱으로부터 1.5km 부근에 예상된 함몰계곡 하부를 통과하게 설계되었으나, 실제 계곡 기저면은 예상보다 깊어 함몰계곡 내의 충적층을 관통하였다.</p>
서쪽 공구	<p>-계곡 왼쪽 절벽부의 단구지형의 출현 계곡 왼쪽 절벽부의 단구부로 예측한 구간에서 5.9~7.6km의 긴 구간에 걸쳐 최대직경 약 200mm를 보인 조립쇄설물 퇴적층과 단속적으로 교차하여 굴착단면에서 단구조립쇄설물 퇴적층이 출현한 것으로 판단된다.</p> <p>-계곡지형의 계곡쪽 계곡부 좌우 절벽(홍적층의 지층변화)을 확인할 목적으로 굴착토의 방사성탄소(14C) 연대측정 및 화분(花粉)화석분석을 실시한 결과, 오른쪽 절벽부는 2.6km 서쪽, 왼쪽 절벽부는 7.8km 동쪽으로 충적층의 출현이 확인되지 않는 점으로부터 계곡 통과 구간은 최대 5.2km로 예상결과와 거의 일치함을 확인하였다.</p>	

표 3. 터널통과지역의 지질 예측과 시공결과와의 비교

	음파탐사 예측(m)	시공결과(m)
사질토 우세구간	5,100(57%)	1,485(17%)
점성토 우세구간	2,630(29%)	5,250(58%)
조립쇄설물 퇴적층	1,300(14%)	2,295(25%)

- 시료 A~F까지는 9,840~10,180년 전으로 측정되어 충적층에 해당하는 것으로 판정되었다.
- 시료 G, H는 각각 3만년 전, 4만년 전으로 홍적층의 퇴적물로 판정되었다.
- 이상으로부터 점A(1,154m) 이전에 충적층에 돌입하여 점F(1,867m)와 G(1,876m) 사이에서 함몰계곡을 통과했음을 알 수 있다.

6.2 퇴적환경분석 결과(규조(珪藻)분석)

규조류는 해수-기수(汽水)*-담수(淡水)성으로 분류 가능하여 생식환경의 판별이 가능하기 때문에 이를 분석함으로써 퇴적환경을 추정하는 것이 가능하다 (*기수: 해수와 담수가 혼입되어 있는 곳의 염분농도가 낮은 물). 충적층으로 판단된 각 시료의 분석 결과로부터 확인된 사항

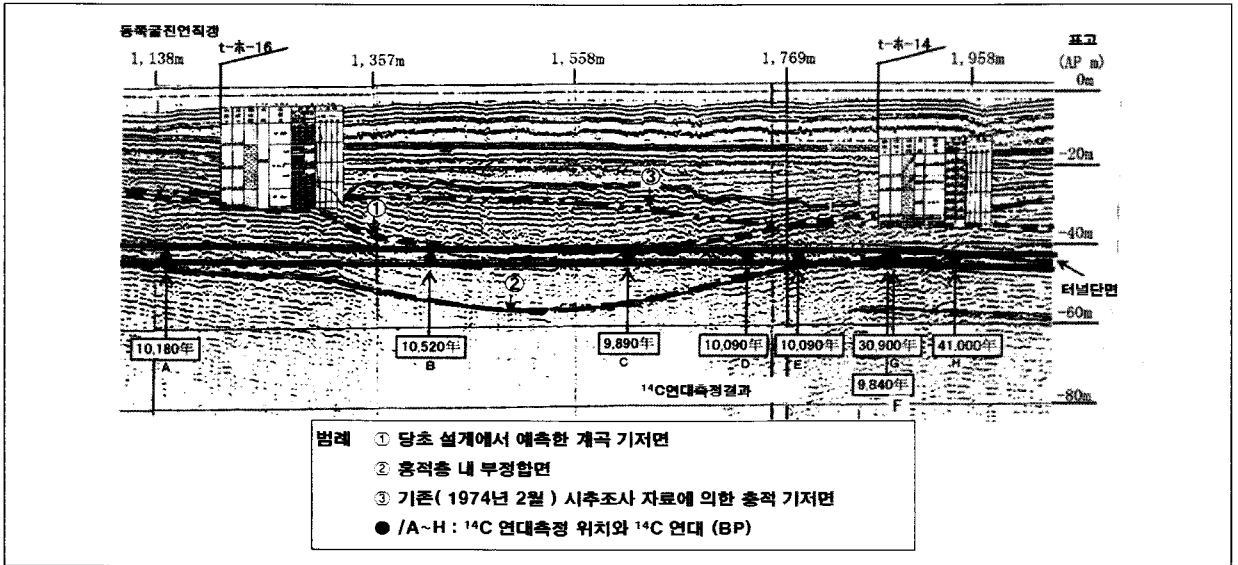


그림 6. 함몰 계곡 기저면의 평가 결과(스파커, 측선)

은 이하와 같다.

- 시료 A, B 및 E에서는 서로 다른 환경을 나타내는 혼합군집의 특징을 보여 퇴적메카니즘으로서 하천퇴적물이 해성층과 혼합되면서 퇴적된 삼각주성 퇴적물 혹은 담수성 퇴적물의 유입을 동반한 항만성 퇴적물로 판단된다.
- 시료 C, D는 대부분 항만지표군집이 우월하여 항만성~기수성 퇴적물로 판단된다.

이상으로부터 시료 A~F는 충적층으로 판정된다. 다만, 퇴적환경분석 결과로부터 육성층 혹은 해성층의 명확한 판별은 곤란하였기 때문에 충적점성토층의 세분류까지는 곤란하였다.

6.3 음파탐사기록의 재검토

당초 설계단계에 있어서는 최상부 부정합면을 충적층 기저면으로 예상하였다(그림 6의 반사면①). 반사면②는 당초 설계단계에서 명확한 부정합면 하부에 위치하기 때문에 충적층 기저면이 아니라 홍적층 내부의 부정합면으

로 해석하였다.

연대측정결과와 비교할 때, 부정합면②의 상부에서는 1만년 전후, 하부에서는 3~4만년 전을 나타내어, 반사면②는 충적층과 홍적층의 경계에 해당하는 것으로 판단되었다. 따라서, 함몰계곡의 실제 기저면은 확인이 어렵지만, 홍적층 내부의 부정합면②보다는 상부에 위치해야 한다고 할 때, 반사면②가 충적층기저면의 하한으로 예상된다.

이상으로부터 함몰 계곡지형의 재평가 결과로서 기저심도는 음파탐사결과에서의 반사면 ②로부터 깊게는 -55m, 계곡폭은 음파탐사결과에서는 확인이 곤란하지만 연대측정결과를 바탕으로 최소한 720m(A~G사이)로 추정되었다.

또한, 이상의 재평가로부터 반사면①은 함몰 계곡 충적층의 내부로 퇴적물의 성상이 다른 지층들의 경계로 해석된다.

6.4 기존지질조사자료와의 비교

그림 6의 ③에 표시한 선은 해상시추조사를 바탕으로

해석한 층적층기저면을 표시한 것이다. 최대심도는 -37m로 A~G 구간에 있어 재평가한 층적층기저면(반사면②)보다 천심도에 위치하고 약 10~20m 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 시추 주상도 t-14 및 t-16의 위치는 반사면①(층적층 내부의 서로 다른 성상의 지층경계면)과 거의 일치한다. 따라서, 시추공 조사에서는 N치 30이상의 사질층 상부면을 홍적층 상부면으로 해석한 것으로 판단되나, 본 조사결과에서는 층적층 하부구조의 상부면에 해당하고 함몰 계곡부의 하부에서는 층적층이기는 하나 N치가 30이상의 매우 단단한 지반이 분포하는 것으로 해석된다.

기존의 주변 시추자료를 추가적으로 분석한 결과, N치 30이상의 사질층은(상부 최대심도 -35m) '해수의 영향이 있는 기수성 환경에서 퇴적된 하천퇴적물'로 판단되었다. 또한, 음파탐사결과에서의 동쪽 함몰계곡 층적층 내부의 경계면(-37m)은 하천퇴적물과 조석간만에 의한 퇴적물의 경계를 나타내는 것으로 판단되었다.

7. 결론

본 고에서는 음파탐사를 중심으로 한 굴착 전 해저지반 조사결과를 바탕으로 설계단계에서 사전 예측한 지질모델과 실제 해저터널 시공과정에서 파악된 지질결과를 비교한 국내외적으로도 전례를 찾아보기 힘든 자료를 소개하였다.

해저라는 특수한 환경으로 인하여 조사 항목 및 정밀도에 많은 제약이 따르는 해저지반 지질 예측과 실제 시공결과를 비교한 본 사례에서는 조사종류에 따라 해저지반의 지층경계 해석에 차이가 발생할 수 있으며 기반암심도 추정에 있어서는 약 10~20m 정도까지의 오차가 발생하였다. 또한, 음파탐사는 해저터널 설계 및 시공과정에서 요구되는 지질위험요소의 광역적이고 개략적인 파악에는 유용한 방법이나, 특히 지질이상대의 폭 등을 파

악하는데 한계가 있으며 음파의 산란현상이 발생할 경우 분해가 불가능한 경우도 발생하였다. 시추를 통한 해저지반의 직접적인 조사에 있어서도 현장시험이 충분히 이루어지지 않을 경우 지층경계 판별에 오류가 발생하는 사례를 볼 수 있었다. 또한, 방사성 탄소연대측정 및 퇴적층내 구조류 분석을 통한 퇴적환경추정 등의 다양하고 이질적인 조사 정보를 복합적으로 고려함으로써 보다 정확하고 상세한 해저지반 지층 및 지반물성에 대한 정보를 획득할 수 있음을 확인하였다.

육상터널에 비해 접근성이 떨어져 조사 및 현장시험 정보가 부족한 해저터널 시공에 있어서는 광역적인 음파탐사 결과와 1차원적인 시추조사 결과를 결합하여 미조사 구간에서의 지반물성의 정량적 평가가 가능한 지구통계학적 시뮬레이션 기법을 활용함으로써 시공 과정에서의 위험도 및 시공 비용의 객관적이고 정량적인 평가가 가능할 뿐만 아니라 제한된 조사 정보로부터 보다 신뢰성 있는 지질예측 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한, 시공과정에서는 막장면에서의 선진 수평 시추 및 TSP 탐사, 방향 제어시추를 이용한 터널종단노선의 사전 지질조사 등을 통해 해저터널 굴착예정 단면의 지질 구조 및 이상대를 사전에 파악하고 대응책을 강구함으로써 육상터널에 비해 상대적으로 높은 불확실성을 수반하는 해저터널 설계 및 시공과정에서의 지질학적 불확실성 요소를 극복하고 보다 신뢰성 있고 안전한 해저터널 건설이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 첨단도시개발사업(과제번호: 05 건설핵심D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술개발)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 서영호, 남하용, 장석부, 이재욱, 아석천, 권용완, 전영길 (2010), 국내 최초 굴착시 해저터널의 지반조사 및 위험도분석, 2010년 한국임반공학회 학술발표회 논문집, pp. 101-109.
2. 송근백, 우종태, 이용재(1996), 한강 하저터널 소규모 붕락(낙반) 복구 사례, 1996년 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 379-382.
3. Blindheim, O. T., Grov, E., Nilsen, B. (2005), Nordic subsea tunnel projects, Tunnelling and Underground Space Technology, 20(6), pp. 570-580.
4. 富所達哉, 高橋聡, 野口和博, 東京湾海底地質の想定と実際, トンネル地下, 37(7), pp. 475-485, 2006.