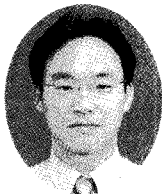


국내 최초 해저 도로터널(보령터널) 설계 사례 소개

- 선형 계획, 굴착과 차수그라우팅 중심으로 -



서영호
현대건설(주)
토목사업본부 부장



남하웅
현대건설(주)
토목사업본부 과장



주광수
현대건설(주)
토목사업본부 부장



장석부
(주)유신
터널부 상무



허도환
(주)유신
터널부 부장



이석천
(주)태조엔지니어링
지반부 이사

1. 서론

국내 최초의 해저도로터널인 보령터널이 보령(대전)에서 태안(원산도)간 천수만입구 해저에 계획되어 이 구간에서 단절된 77번 도로를 연결하게 될 예정이다. 보령터널은 설계속도가 70km/h인 2차선 쌍굴도로터널로써, 총연장은 6.927km이고 해저구간 연장만 5.1km에 달하며 해수면에서는 최대 약 80m, 해저면에서는 최대 약 60m 하부에 계획되고 있다.

본 과업은 2009년에 기본설계가 완료되어 현재는 실시설계 중에 있으며 2010년 말에 착공될 예정이다. 보령터널은 국내 최장의 해저터널이며 개착식이나 침매식이 아닌 굴착식 해저터널로써는 국내 최초이다. 해저터널은 육상부에 비해 다량의 지하수가 유입될 가능성이 높기 때문

에 지하수 유입량의 통제와 유입수의 처리가 매우 중요하다. 공사 중 다량의 유입수는 터널안정은 물론 시공성도 저하시키고 운영중 영구적 펌핑비용이 과다해지는 문제점이 있다. 반면에 차수그라우팅에 의한 유입량 저감은 공사비 증가요인이 되며 투입물량이 증가할수록 유입량 저감효과는 낮아지는 특징이 있다. 해저도로터널은 입출구부가 본선보다 높은 종단선형을 가지고 있기 때문에 터널전구간에 유입되는 지하수의 집수 및 펌핑계획이 매우 중요하다.

이에 적절한 종단선형 계획과 집수정 위치 선정으로 집수된 지하수의 배수거리를 단축하고 적절한 허용유입수량을 설정하여 최적의 차수그라우팅 계획에 대해서 보령~태안(제1공구) 도로개설공사 설계사례를 통하여 기술하고자 한다.

2. 현황

본 계획노선은 보령시 대천항과 태안군 안면도를 연결하는 구간 중 대천항과 원산도를 잇는 총 연장 7.985km의 국도77호선 연결구간으로서 관광자원 개발 및 도서주민의 생활환경개선과 교통소통 원활로 지역발전 촉진 및 관광교통수요에 효율적으로 대처하기위해 계획되었다. 본 노선은 해저터널 1개소(보령터널), 교량 1개소, 교차로 2개소로 구성되어 있으며 그 중 해저터널은 연장 6.927km의 2차로 병설터널로 계획되었다.

보령터널의 평면선형은 그림 1과 같이 시점부 대천측 및 종점 원산도측 공히 해안선상의 돌출부를 최대한 이용하여 해저구간을 최소화하였다. 지형적 특성은 양측 육상부가 소규모 산지지형을 이루고 해저부는 비교적 평탄하며 종점측 해저가 약간 깊은 특징을 가지고 있다. 육상부

의 과업 시종점부가 해안선과 근접하여 시종점부는 도로 최대종단경사 5%에 근접하여 계획되었다. 지형적 특징으로 인해 해저터널의 최소 토피고는 해저 중간부가 아닌 해저 양측의 경사구간에서 발생하며 약 24m 정도이다.

주요 주변현황으로는 시점부에는 갯구부에 국도 36선을 하부 근접통과하고 레이더기지를 43.5m이격하여 통과하며 종점부는 해저협곡과 저토피부를 통과하게 된다.

시점부에는 일부 화강암이 관입된 편마암 및 변성사질 암층이 분포하고 노선 중간부는 편마암층이 분포하며 노선후반부는 화강암으로 구성되어 있다. 편마암층과 화강암층의 암반조건은 매우 양호하나, 퇴적암층은 사암, 이암, 셰일, 함탄층 등의 다양하고 복잡한 지질구조를 보이고 있으며 암반조건이 상대적으로 불량한 것으로 분석되고 있다.

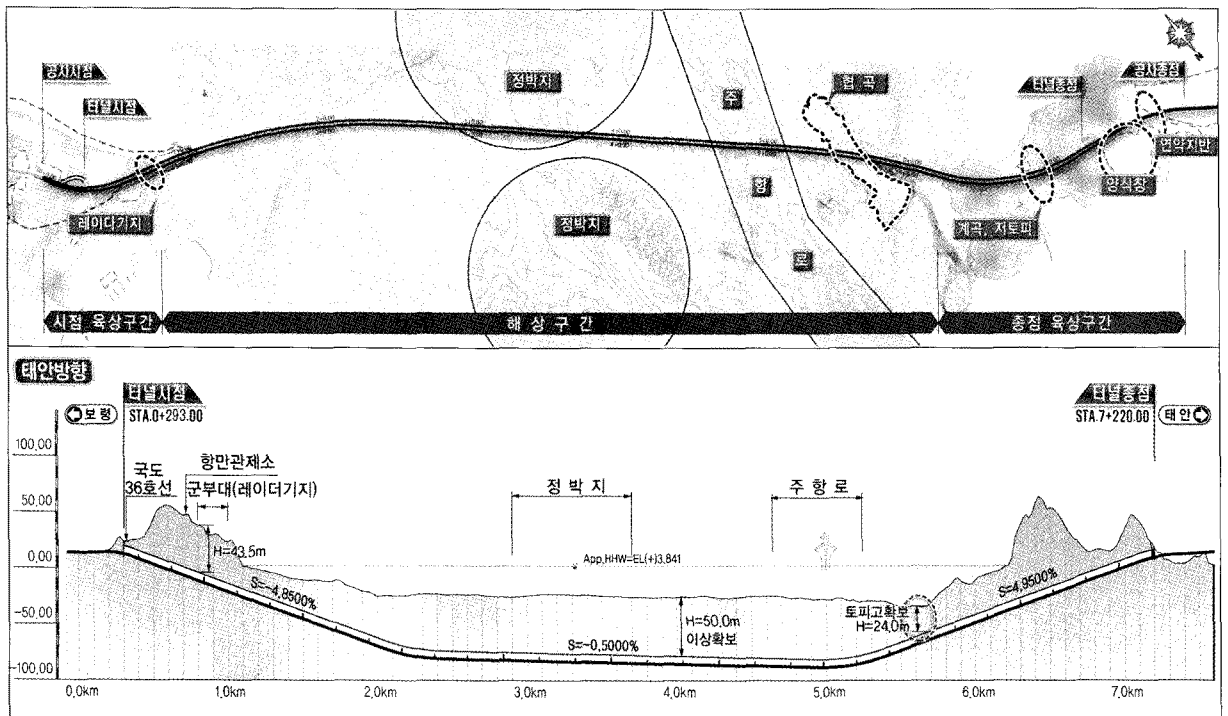


그림 1. 해저터널 구간의 현황

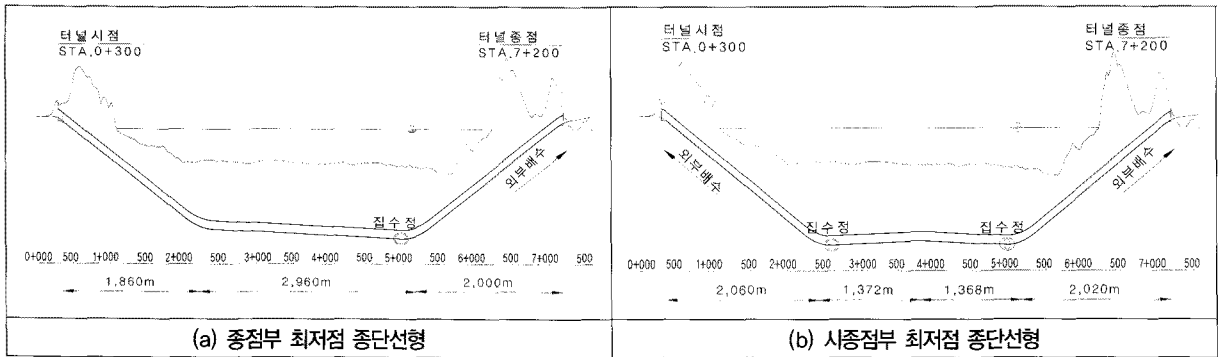


그림 4. 최저점 위치에 대한 종단선형

지반조건에 집수정을 설치할 수 있으며 주변여건상 갱외에서 배수여건이 유리한 잇점이 있는 중점부 최저점 종단선형(그림 4(a))으로 계획하게 되었다.

3.2 집수정 및 펌핑계획

해저터널의 집수정에 집수된 물은 펌핑을 통해 외부로 배출되어 다시 바다로 방류된다. 일반적으로 집수정에는 수중펌프를 설치하여 일정 수위가 되면 자동으로 펌프가 가동되는 방식이 사용되고 있다. 해저터널의 펌핑은 환기 및 조명 비용과 함께 운영중 발생하는 전력비용의 주원인이 된다. 조명과 환기는 기본적인 설계조건에 따라 소요 전력량의 차이가 적으나, 펌핑비용은 충분한 집수정용량을 확보하는 경우 펌핑시간을 선택적으로 운영하여 전력비용을 절감할 수 있다.

우리나라는 전력수요의 일일시간대별 편차를 고려하여 차등전력요금제를 적용하고 있다. 최대부하시간대는 동절기에는 오후 6시에서 11시, 그 외 기간은 오전 11시에서 12시와 오후 1시에서 5시사이로 설정되어 있다. 최대부하시간은 일일 24시간 중 5시간이며 이 때의 전력요금은 다른 시간대에 비해 봄 가을철 최소 1.4배에서 여름철 최대 3.7배에 이른다.

펌핑가동시간에 따른 집수정 공사비와 연간 펌핑비용

표 1. 펌핑가동시간에 따른 집수정 공사비와 유지관리비 비교

구분	펌핑가동 시간	집수정용량	펌핑비용 (연원천)
case 1	24시간 연속가동	296m ³	3.04
case 2	경부하시간만 가동(10시간)	8,280m ³	2.31
case 3	최대부하시간 제외(19시간)	2,958m ³	2.25

의 분석은 표 1과 같다. 펌핑비용 감소효과 대비 집수정 용량 증가 측면을 고려한 결과, case 1은 펌핑비용이 과다하고 case 2는 집수정용량이 과다한 것으로 평가되었다. Case 3은 집수정규모는 case 2에 비해 상당히 작으나 펌핑비용의 차이가 미소하여 최적안으로 선정되었다.

집수정은 운영 중 비상사태에 대비하기위해 펌핑시설은 방향별로 각각 설치하고 집수정은 통합하여 건설하여 비상시 모든 펌핑시설 또는 예비시설을 가동하여 유입된 지하수를 배출할 수 있도록 하였다. 그리고, 경제적인 건설과 운영을 위해 표 1과 같이 최대 5시간을 집수 후 배수 하도록 하였으나 유사시 펌핑시설의 고장이나 부득이한 과다 유입수에 대비할 수 있도록 본선터널 하부 집수정 연결부까지 집수시에는 최대 10시간 이상 집수할 수 있도록 하여 해저터널의 지하수 유입 대처능력을 확보하도록 계획하였다(그림 5).

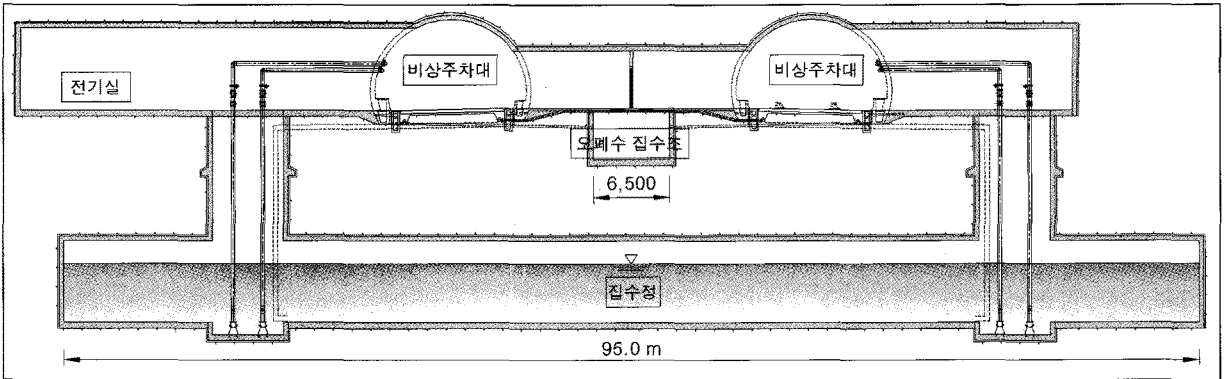


그림 5. 집수정 계획단면도

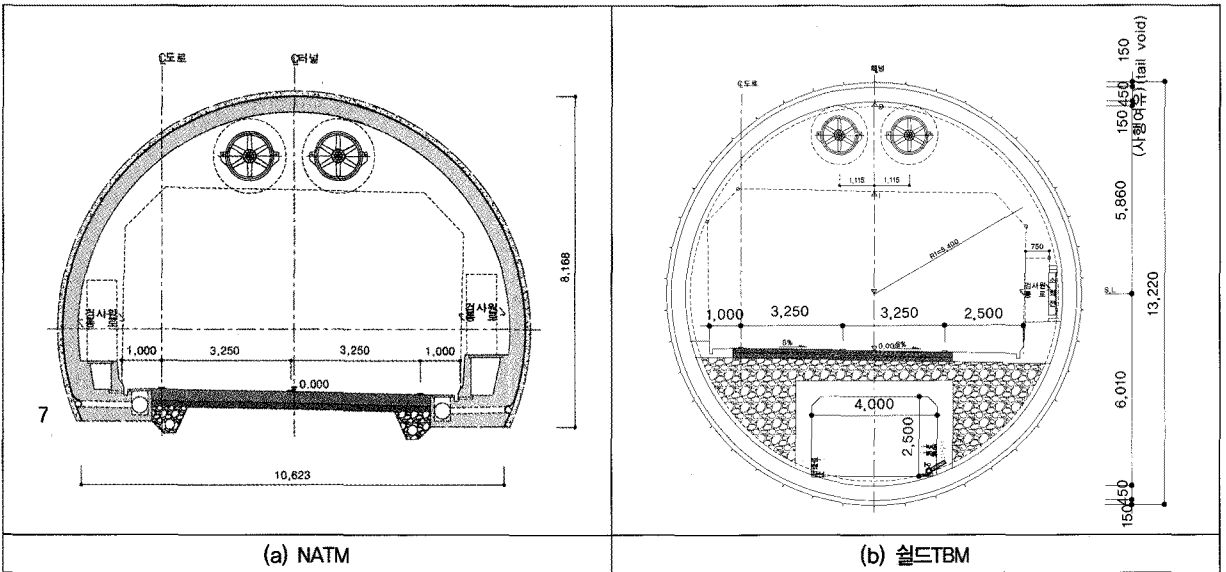


그림 6. 해저터널 굴착방법에 따른 단면도

4. 굴착 및 차수그라우팅 계획

4.1 굴착 및 표준단면 계획

보령터널은 국내 최초의 굴착식 해저터널이므로 굴착 방법에 대해 기본설계 단계부터 신중히 검토하였다. 특히, 기존 해저터널 건설방법으로 침매터널이 있으나 본 과업구간의 지형적 조건과 주변현황 조건상 굴착식 건설

방법이 적절하다고 판단되었고, 이에 NATM과 실드TBM에 의한 굴착방법을 더 심도깊게 검토하였다. 실드TBM에 의한 굴착방법은 그림 6(b)와 같이 측방여유폭과 부대시설 설치공간을 충분히 확보해야하므로 단면이 NATM(그림 6(a))에 비해 과대해져 경제성이 부족한 단점이 있다. 이에 심도를 낮춰 양호한 암반조건과 충분한 토피를 확보하여 NATM으로 굴착하는 것이 적절하다고 판단하였다.

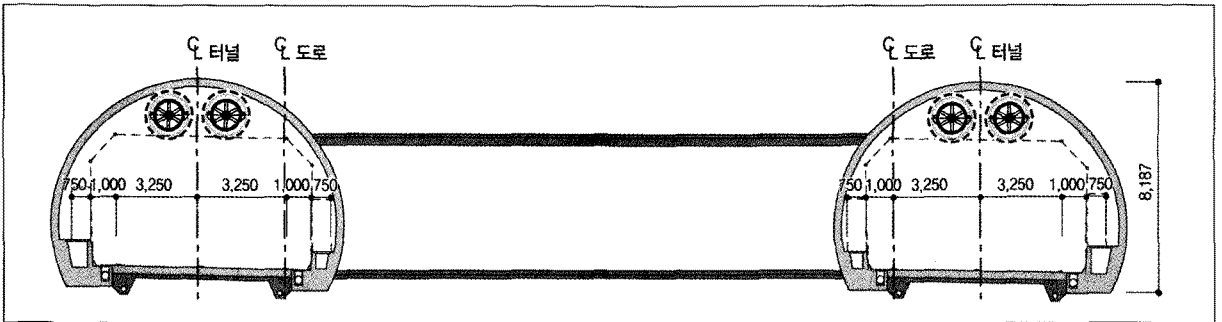


그림 7. 해저터널 표준단면도

보령터널의 표준단면은 그림 6(a) 및 7과 같이 노면폭 8.5m의 2차로이고 제트팬 종류식 환기방식의 일방향 2차로 쌍굴터널이며 굴착단면적은 약 80m² 정도이다. 일반적으로 산악터널의 라이닝 두께는 30cm 정도이나 수압을 많이 받는 해저터널의 특성을 고려하여 40cm를 표준으로 하였다. 슛크리트에는 실리카흙을 혼합하여 수밀성을 강화함으로써 해수침투에 의한 강섬유 부식을 최소화되도록 하였다. 피난연결통로는 230m 간격을 표준으로 하되 경사가 급한 시종점 구간은 연기이동특성을 고려하여 약 210m와 220m 정도로 계획하였다.

4.2 차수그라우팅 계획

4.2.1 지하수 허용유입량

해저터널의 지하수 허용유입량은 공사 중 차수그라우팅 공사비와 운영 중 펌핑비용을 고려하여 결정되어야 한다. 기존 해저터널 경험에 의하면 차수그라우팅공사비의 증가에 따라 유입수량의 감소효과는 점차 감소하는 경향을 가지고 있다. 즉, 초기 그라우팅 시에는 유입수량의 감소가 현저하나 일정 수준부터는 공사비의 증가에 비해 유입수량의 감소가 미미해지는 경향이 있다. 반면에 과도한 지하수 유입은 터널안정성과 공사에 지장을 초래하고 운영 중 펌핑비용이 과다해지는 문제점이 있다. 따라서, 적절한 허용유입수량의 선정과 차수그라우팅 시행이 필요

하다고 할 수 있다.

해저터널 실적이 풍부한 노르웨이는 이러한 실적을 토대로 허용유입수량을 0.3m³/min-km으로 설정하여 적용하고 있다. 최근 굴착이 완료된 중국의 Xiang-an 터널은 3차로 쌍굴 도로터널로써 목표유입량은 지반조건에 따라 0.069~0.694m³/min-km로 설정한 바 있다.

허용유입수량에 따른 펌핑비용은 대략 0.5m³/min-km 적용시 연간 2~3억원, 2.0m³/min-km 적용시 연간 7~8억원이 소요된다. 보령터널의 조명과 환기를 위한 전력 비용이 연간 2~3억원 정도임을 감안하면 허용유입수량을 최적화하여 연간 펌핑비용을 적정수준으로 유지하는 것이 바람직하다.

이에 보령터널의 목표 허용유입수량은 해외사례 보다 다소 여유를 확보하고 펌핑비용을 고려하여 0.5m³/min-km로 설정하였다. 단, 비상시 터널침수 방지를 위해 최대 펌핑용량은 2.0m³/min-km을 수용할 수 있도록 펌핑 시설을 계획하고 있다.

4.2.2 차수그라우팅계획

암반 차수그라우팅은 그림 8과 같이 감지공에 의한 지하수 유입량을 확인한 후 허용량을 초과할 경우에 차수그라우팅을 시행하도록 하였다. 이는 공사 중 과다유입수를 방지하고 굴착 전 안전성을 확인하며 상기에 기술한 바와 같이 과업구간 전체에 유입되는 지하수를 허용량 이하로

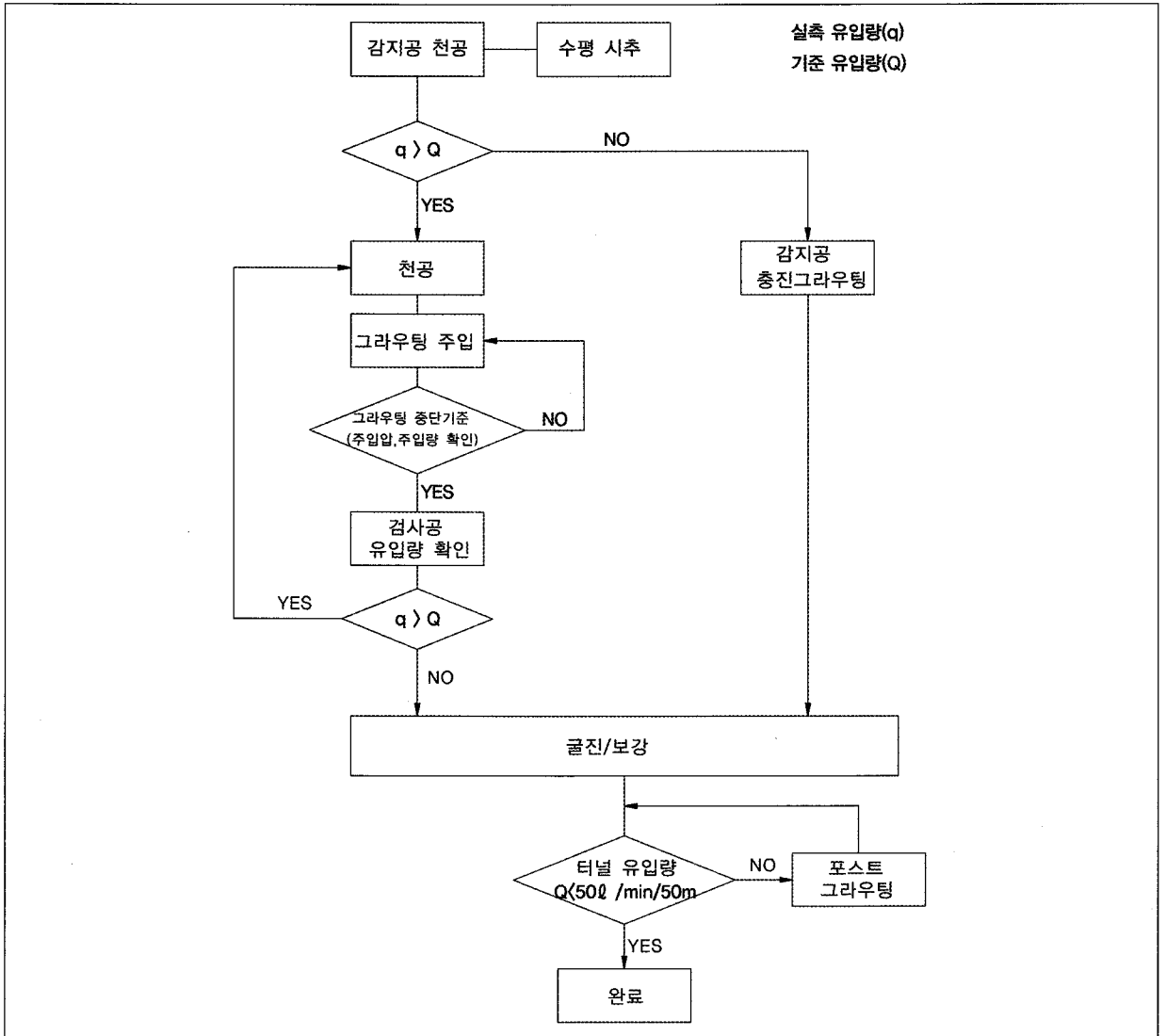


그림 8. 암반차수그라우팅 흐름도

유지하기 위함이다.

감지공은 암반 차수그라우팅의 시행여부를 결정하는 주요한 단계라고 할 수 있다. 막장전방의 상태와 지하수의 이동에 대해 정확한 정보가 없는 해저구간에서 막장전방의 암질과 유입량을 파악하는데 필연적인 조사라고 할 수 있다. 감지공을 통해 유입되는 유입량은 실제 유입

량에 대한 확률적 개념으로 감지공을 통한 유입량이 적더라도 실제 굴착시에는 유입량이 다소 과다하게 발생될 수 있는 가능성은 배제할 수 없다. 따라서, 감지공은 해저 구간에서 그림 9와 같이 연속적으로 시행하여 유입량을 판단하는 것이 바람직하다. 차수그라우팅을 판단하기 위한 감지공에서의 유입량 기준은 해외(노르웨이, 싱가포르

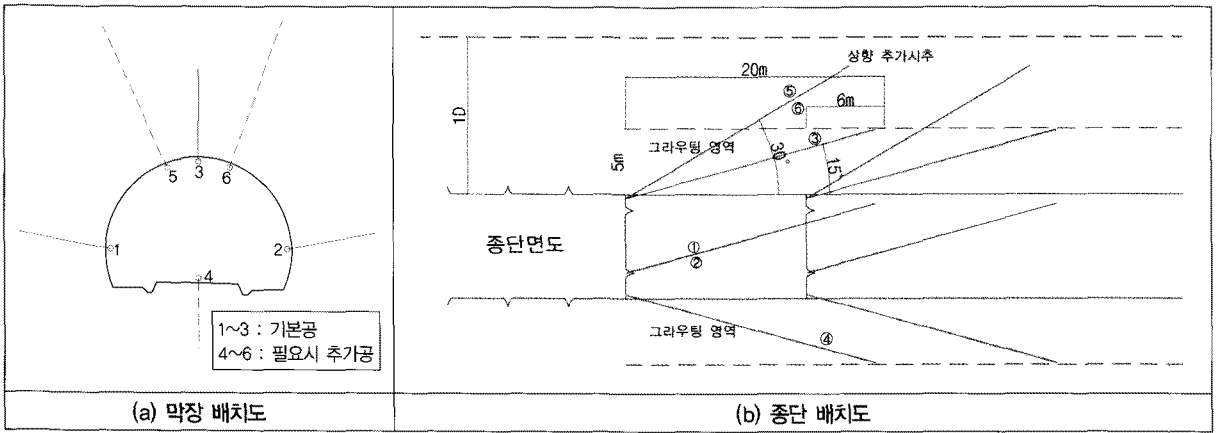


그림 9. 감지공 배치도

표 2. 차수그라우팅 등급분류

차수 그라우팅 등급	절리상태			루전	암반상태
	절리 간격(m)	틈새 크기(mm)	충진물		
TYPE A	0.2 이상	1.0 이하	없음	5 이하	<ul style="list-style-type: none"> 암반 양호 함수절리 적음
TYPE B	0.06 ~ 0.2	1.0 ~ 2.5	없음	5 ~ 10	<ul style="list-style-type: none"> 암반 보통 함수절리 일부 발달
TYPE C	0.06 이하	2.5 ~ 10	일부 점토질	10 ~ 20	<ul style="list-style-type: none"> 암반 불량 함수절리 발달
TYPE D	0.06 이하	10 이상	일부 점토 및 탄층 충전	20 이상	<ul style="list-style-type: none"> 암반 매우 불량 함수절리 다수 발달
참고	지반조사결과	ISRM 분류	조사 결과	수압시험	-

등)와 국내(비축기지 등) 사례 등을 참고하여 감지공 1개 공에서는 4ℓ/min 이상이거나 3개공에서 총 8ℓ/min 이상 유입될 때 차수그라우팅을 시행하도록 하였다. 이는 국부적으로는 다소 여유 있고 전체적으로는 보수적으로 유입량을 판단하고자 한 의도인 것이다.

제한된 지반조사 결과로 연속적인 절리특성을 파악하기 어려우므로 지반조사 결과와 절리에 대한 ISRM분류를 참고하여 암반내 절리상태를 추정 한 후 표 2와 같이 암반차수그라우팅 등급을 분류하여 주입패턴을 계획하였다. 그러나, 본 과업구간에서는 편의상 Type A는 암반 1~3등급에서 필요시, Type B는 암반 4등급, Type C는

암반 5등급, Type D는 단층 및 파쇄대 등 지반불량구간에 적용하도록 계획하였다.

차수그라우팅의 등급별 주입패턴은 그림 10과 같다. 차수그라우팅은 종방향으로 최소 6m 이상 중첩되도록 하였으며 주입장은 Type A, B는 20m, Type C와 D는 18m로 계획하였다. 그리고, 천공속도 단축을 위해 암반조건에 따라 점보드릴로 천공이 가능하도록 하였고, 주입압과 주입량을 자동제어가 가능하도록 계획하였다. 또한, 주입재는 환경친화적이고 용탈 가능성이 낮으며 내염해성이 있는 재료를 사용토록 하였다.

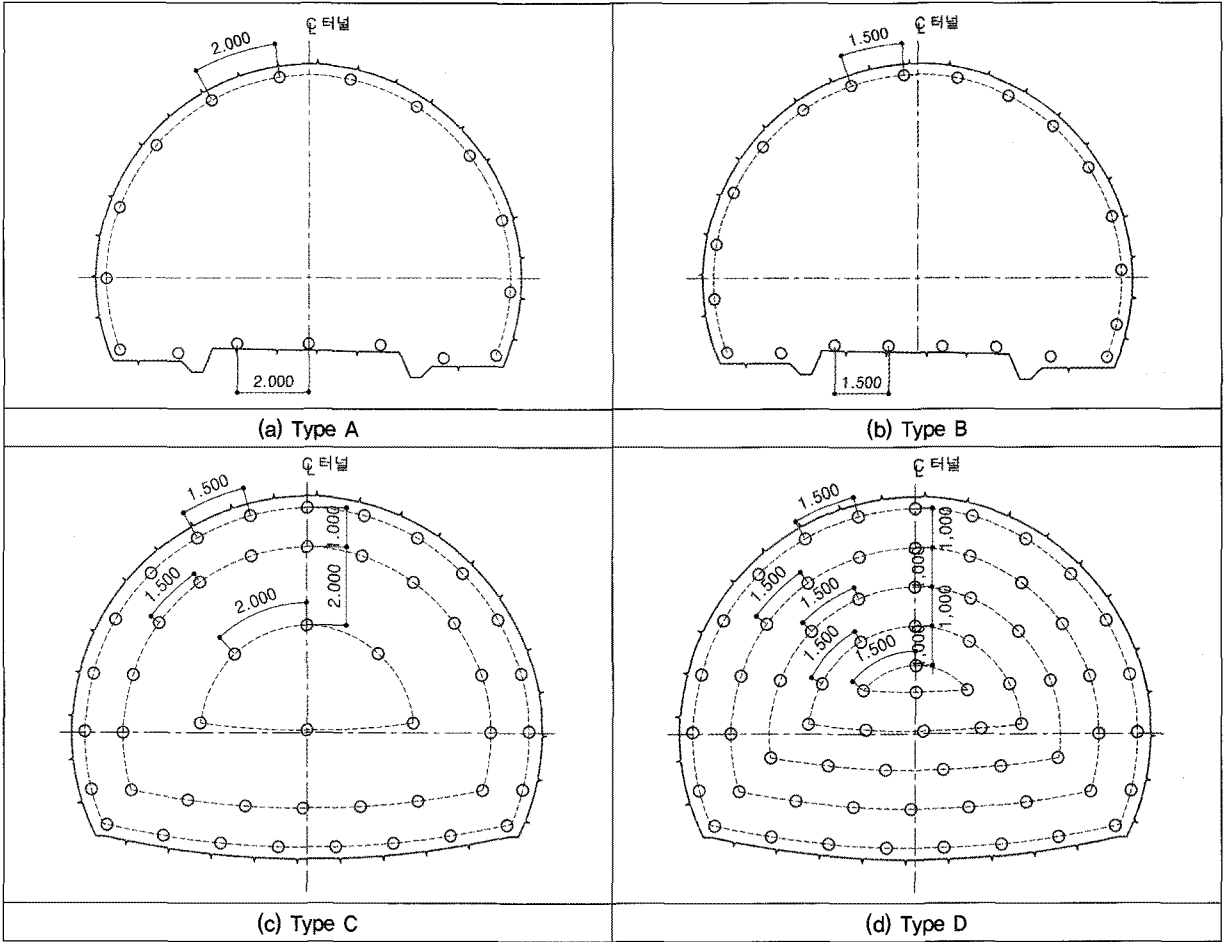


그림 10. 차수그라우팅 패턴도

5. 맺음말

국내 최초의 해저 도로터널인 보령터널은 2010년 연말 착공예정으로 현재 실시설계가 완료단계에 있으며 마무리 단계에 있다. 본 고에서는 국내 최초의 굴착식 해저터널의 계획 중에 가장 중요한 유입수 처리와 차수방법에 대해 소개하였다. 아직까지 설계가 완료되지 않은 상황이므로 본 고에서 소개한 내용이 다소 변동이 있을 수 있으나, 기본적인 계획은 변동되지 않으므로 이를 통해서 국

내 해저 또는 하저 굴착식 터널의 굴착 및 암반차수그라우팅 계획에 많은 도움이 되기를 바란다.

해저터널은 이제까지 우리나라에서 경험한 산악터널에 비해 지반조사가 어려운 점과 더불어 유입수량의 억제와 처리에 대한 새로운 과제가 제시되었던 바 본 보령터널을 시작으로 이제까지는 해상교량이 많이 건설되었으나, 친환경적이고 악천후에 영향을 받지 않는 해저터널이 앞으로 많이 건설되기를 기대한다.