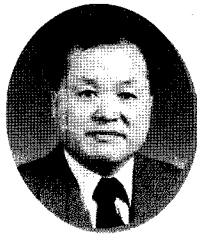


# 석회암 공동지역에서의 가물막이기초 설계사례



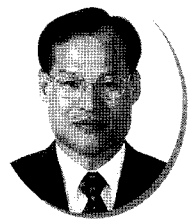
김경태  
한국종합기술 지반부 부장  
(kkt@kecc.co.kr)



김동민  
한국종합기술 지반부 전문



여규권  
삼부토건(주) 기술연구실 실장



이용재  
삼부토건(주) 기획실 실장

## 1. 서론

최근 4대강 사업과 관련하여 수중보 및 댐을 건설하기 위하여 가물막이공법이 적용되었으나 시공 중 공법특성 및 기초지반상태에 따라 누수 및 나아가 국부적인 붕괴발생 사례가 발생되어 가물막이 공법선정시 시설규모, 수리적 특성 및 지반 지층특성이 충분히 고려된 가물막이공법 선정이 필요하다

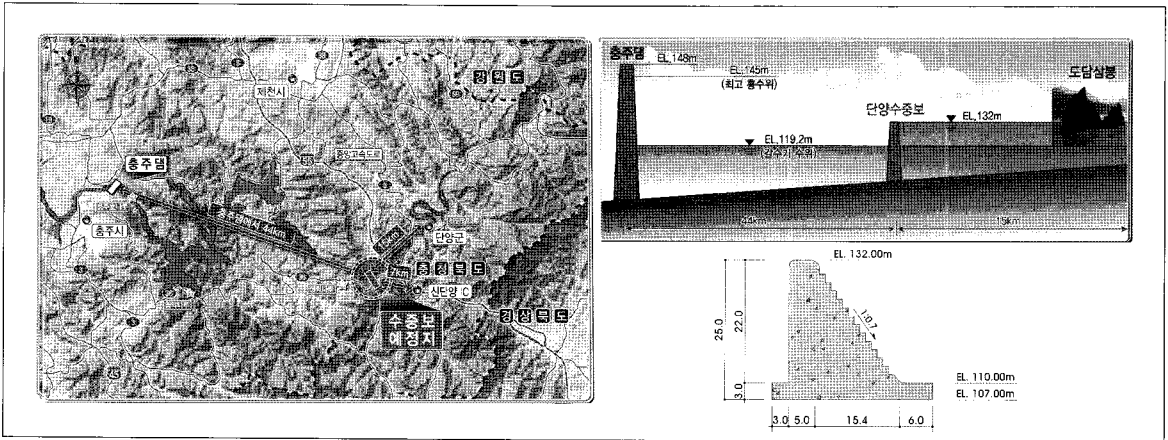
따라서, 본 고찰에서는 최근 대안공사로 발주된 단양수중보건설 가물막이공사에 대한 설계사례를 통하여 가물막이 설계시 주요 고려 및 검토사항에 대하여 고찰하고자 한다. 가물막이 설계의 주요절차는 우수전환 분할방식선정, 가물막이정고 결정, 가물막이공법 선정, 기초처리 및 시공법결정 순으로 수행되며 분할방식 및 정고결정은 주

로 최대 홍수위 및 빈도 등 수리적 특성에 의하여 결정되나, 본 사례에서는 과업지역이 기반암이 석회암으로 석회공동이 폭넓게 분포하여 무엇보다 차수 및 기초처리대책이 중요한 설계 인자이므로, 지반공학측면에서 제체 및 기초안정성과 기초처리 시공법에 대하여 주안점을 두어 고찰하고자 한다.

## 2. 사례현장 및 지반특성

### 2.1 현장위치 및 과업개요

본 수중보는 충북 단양군내에서 충주댐으로 상류로 41km, 단양읍에서 12km하류에 위치하며, 적정수위 유지로 인하여 호반여건을 조성하고자 계획되었으며, 수중보

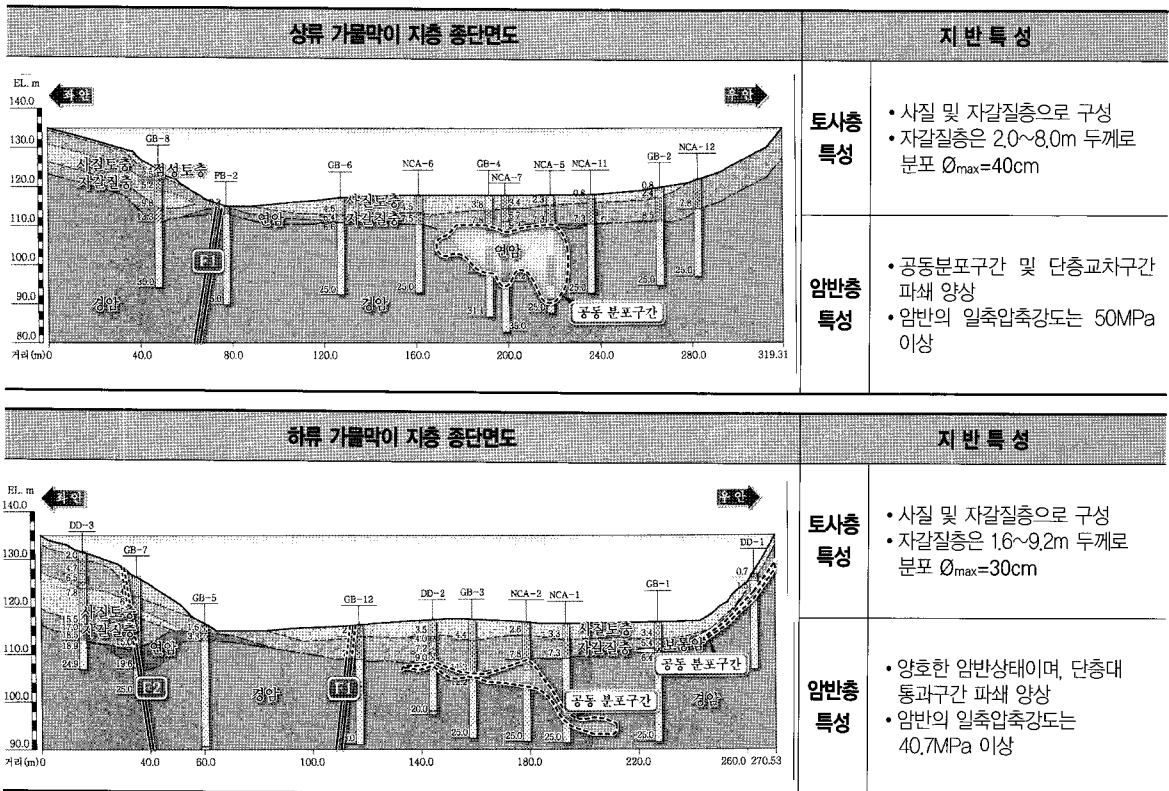


는 CGD(Concrete Gravity Dam)형식으로 저면폭 29.4m, 높이가 25m의 대규모 콘크리트 구조물로 계획되었음. 본 과업은 이상과 같이 수중보건설 중 건조한 작업상태

유지를 위한 차수 물막이 공법이 필요하며, 특히 석회공동이 분포하여, 이에 대한 정확한 분포특성파악에 의한 확실한 차수대책의 수립이 필요한 실정이다.

## 2.2 지반특성분석

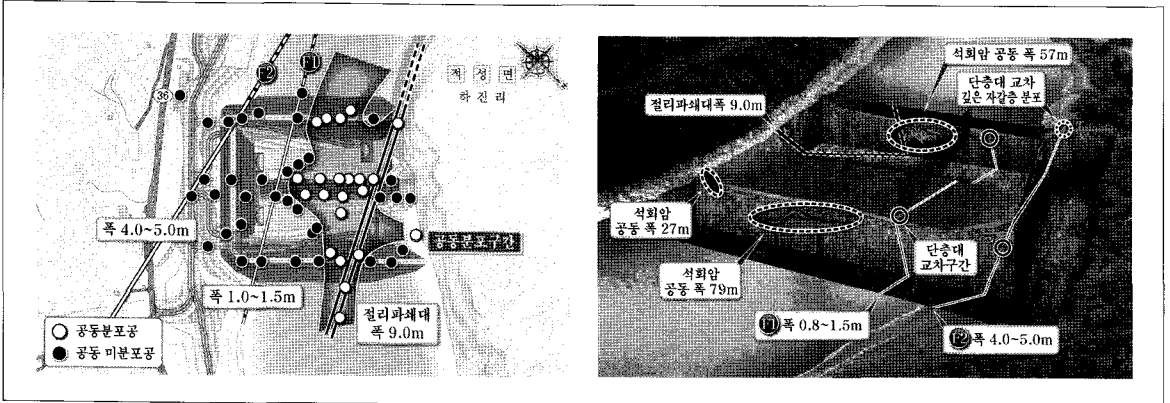
### 2.2.1 과업구간 지층분포특성



### 2.2.2 석회암 공동 및 단층대 분포현황

시추조사와 고출력전기비저항 토모그래피, 3D전기비

저항탐사등 물리탐사를 수행하여 입체적분석을 수행한 결과 우안에서 다수의 공동이 확인되었으며, 좌안으로는 2개의 단층대가 분포하는 것으로 나타났다.

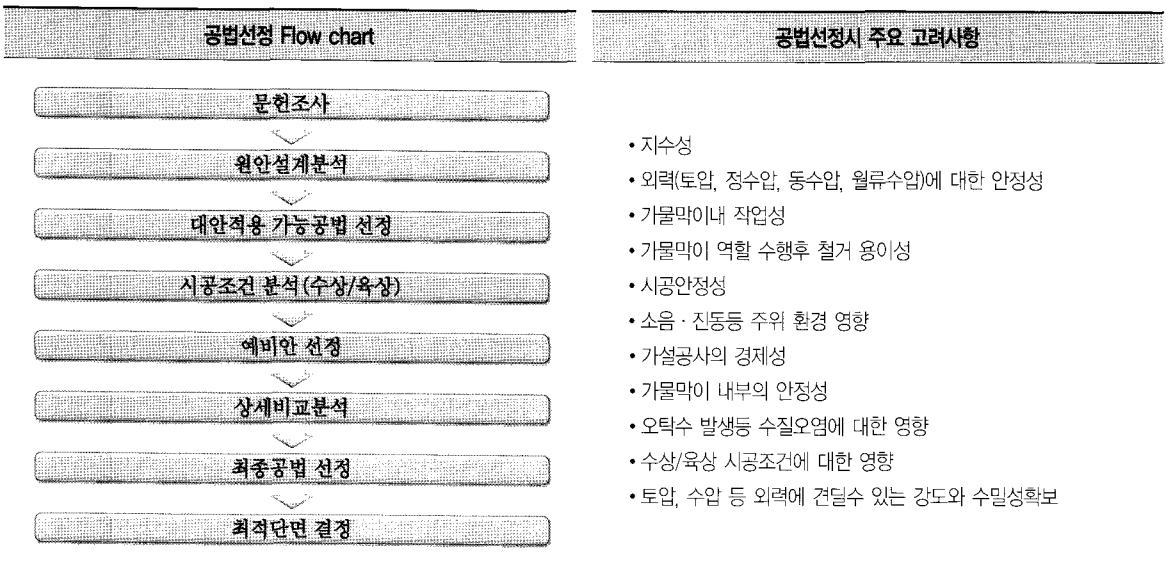


구 분	석회암 공동	
	1차 가물막이	2차 가물막이
교차구간	약 163m	공동구간 배제
분포심도	최대G.L(-)27m	공동구간 배제

구 분	단층대	
	F1	F2
교차구조물	1, 2차 가물막이	공사용 가교
단층대폭	0.1~1.5m	4.0~5.0m

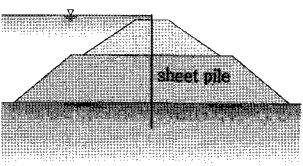
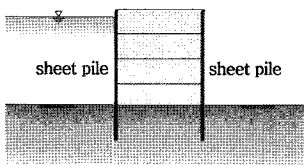
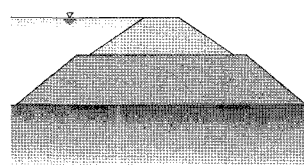
## 3. 가물막이 공법검토

### 3.1 가물막이 공법선정 흐름도 및 공법선정시 주요 고려사항

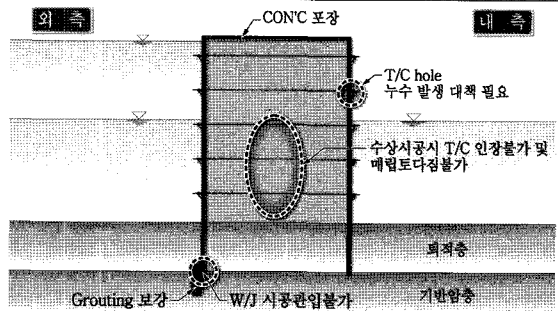


### 3.2 설계사례 및 문제점 분석

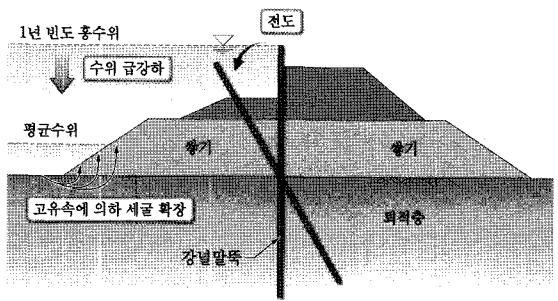
#### ① 4대강 설계시 적용된 기물막이 사례조사

공법	제체+1열강널말뚝	2열강널말뚝+타이캐이블	토사제방
개요도			
적용사례	한강 3공구(이포보) 한강 4공구(여주보) 낙동강 22공구(달성보) 낙동강 23공구(강정보) 낙동강 32공구(낙안보) 영산강 2공구(죽산보) 영산강 6공구(승촌보)	낙동강 18공구(함안보) 낙동강 20공구(함천보) 낙동강 24공구(칠곡보) 낙동강 30공구(구미보) 낙동강 33공구(상주보) 금강 6공구(부여보) 금강 7공구(금강보)	한강 6공구(강천보) 금강 1공구(금남보)
총적용개소	7개소 적용	7개소 적용	2개소 적용

#### ② 시공중 발생된 문제점 및 설계변경사례 분석

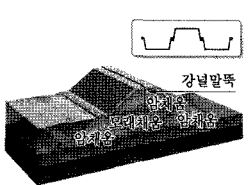
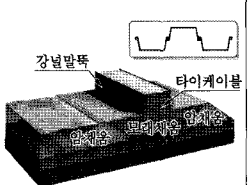
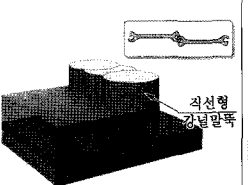
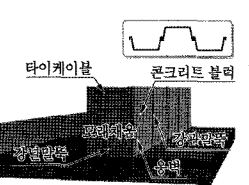
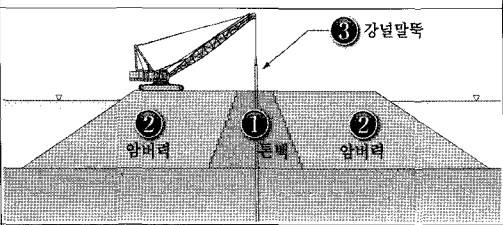
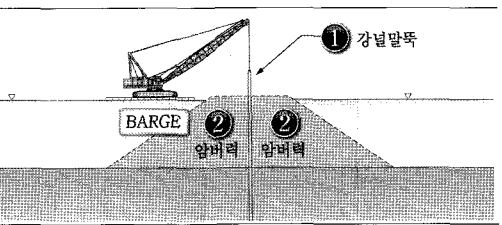
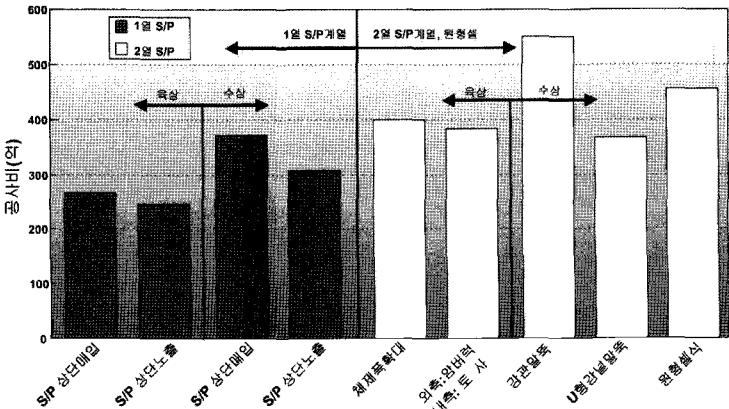
2열 기물막이	발생 문제점 및 착안사항
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2열 S/P의 경우 수상시공조건은 T/C인장 및 채움재 다짐 불가, 편도압 발생등 안정성 측면에서 불리 ➔ 육상시공조건계획</li> <li>• W/J 계획시 퇴적층깊이 및 기반암 강도를 고려하여 적용성 판단 ➔ T4천공</li> <li>• T/C와 S/P접합부의 누수 방지책 필요(FILL재의 선별사용 및 Hole 차단시설반영) ➔ 1열형식검토</li> <li>• 지반특성에 따른 그라우팅 보강방안검토</li> </ul>

#### ③ 1열기물막이 시공 중 발생된 문제점 및 설계변경사례 분석

1열기물막이	발생 문제점 및 착안사항
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비대칭형의 경우 시트파일 근입이 부족할 경우 수위 급강하시 전도발생 ➔ 기반암 근입유도</li> <li>• 1열 S/P의 경우 이음부에서 누수발생 ➔ 내구성이 강한 팽창지수재 선정,유공관 집중성계획</li> <li>• 1열 S/P의 경우 팽창지수의 역할이 중요하나 강널말뚝 항타시 연소되어 역할이 저조 ➔ 모래채움검토</li> <li>• 월류시 부유물등의 충격하중에 S/P상단부가 훼손 ➔ 노출상단 보호방안 수립</li> <li>• 제체 하단부 유속에 의한 세굴발생 ➔ 세굴방지대책 수립</li> </ul>

### 3.3 가물막이 형식선정

#### ① 예비안선정

구분	1열가물막이계열	2열가물막이계열	원형셀식	블럭케이슨식
개요도				
소 반 류	시공조건	• 육상/수상	• 수상	• 수상
	제체형성	• 상단노출/상단매입 지오투브, 레이커	• 널말뚝종류(U, Z, 강관형)	• Flat type(일자형)널말뚝
	조합형	• 1+2열(석회암동 등 수리특성반영)		• Steel 블록con'c 블럭
시 공 조 건 분 석	육상조건		수상조건	
				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시트파일 관입시공성 우수</li> <li>• 수상조건보다 제체폭 과다</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시트파일 관입시공성불리</li> <li>• 하부제체축조시 S/P안정성불리</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수상시공조건인 경우 불리한 시공성을 극복하기위하여 공사비가 증가되고, 시공중 안정성에서도 불리</li> <li>• 육상조건인 1열, 2열 가물막이 형식 선정</li> </ul>			
적용성	• 석회암동 등 지반특성에 적용성 유리		• 모래/자갈퇴적층 존재로 적용성 불리	
공사비분석				
선정	예비안			

② 예비안 상세분석을 통한 최종안 선정

구분	제체축조+1열시트파일(S/P)	2열시트파일(S/P)+타이캐이블(T/C)	
개요도			
시공성	• 공정이 단순하여 시공성양호	• T/C설치+내부채움시 철저한 품질관리필요	
시공공기	• 공기 단축가능	• 공기 단축불가	
안정성	단면	• 지중매입으로 구조적안정	• 폭, 전도, 활동 및 침투경도 필요
	치수	• S/P와 그라우팅으로 차수성 양호	• 차수성 양호하나 T/C와 S/P접합부 누수발생
환경성	• 암벽력 제체축조로 토사의 오탕수 발생 억제	• 토사량 증대로 오탕수 발생 우려	
경제성	• 공사비 절감	• 공사비 증대	
민원	• 민원 발생요인 제거	• 장기적 공사에 따른 민원발생우려	
선정	⊙		
검토결과	• 2열 시트파일의 경우 제체폭의 과다에 따른 공기·환경성 불리 • 공기단축이 가능하고, 오탕수 발생을 최소화 할 수 있는 1열 시트파일 선정		

③ 암벽력 제체축조+1열 시트파일의 최적단면선정

구분	상단노출조건		상단매립조건	
	대칭형-1열시트파일	비대칭형-1열시트파일	균일형-1열시트파일	균일형-2열 시트파일
시공 개요도				
장점	• 대칭매립 안정	• 토공량 감소에 따른 공기단축	• 지중매입으로 안정	• 2열 시트파일로 차수성 우수
단점	• 노출상단에 부유물 충돌 및 적체우려	• 수위 급강하시 전도에 취약	• 토공량 증가에 따른 공사비 및 공기증가	• 2열로 공사비 및 공기증가로 사채움 시공성 불리
선정			⊙	
검토결과	• 상단 노출단면은 토공량 감소에 따른 경제성 측면에서 유리하나 전도에 의한 안정성 측면이나 부유물 충돌 및 적체가 우려되는바 차수성, 구조적 안정성에서 유리한 상단 매립단면 선정 • 상단매립조건중 1, 2열에 대하여 침투해석결과 침투유량은 $6.38 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ 와 $6.34 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$ 로 유사한 차수효과를 보이므로 경제성, 시공성을 고려 1열 시트파일 선정			

#### 4. S/P차수벽에 추가적인 차수 보강설계 검토

이상과 같이 가물막이로 암버력제체+1열 시트파일공법으로 결정하여 차수벽을 이루었으나, 본 과업지역의 지층특성, 즉 자갈/모래퇴적층 하부에 바로 일축압축강도가 50MPa이상인 기반암이 출현하는 지층특성과, 석회공동이 분포하는 특성을 고려 추가적인 차수보강이 필요한 것으로 판단되어, 별도의 추가적인 보강대책을 수립하였다.

#### 4.1 자갈/모래 퇴적층 하부에 바로 기반암이 출현하는 지층에 추가 차수보강 필요성 및 대책

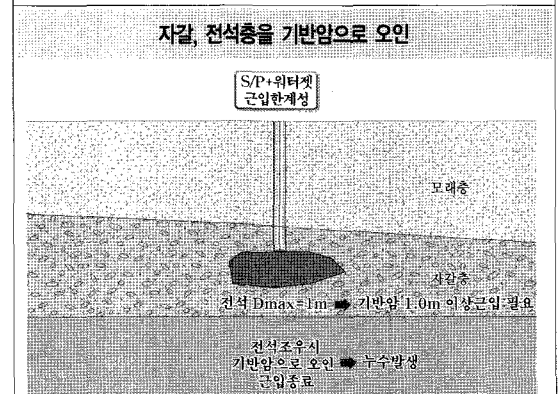
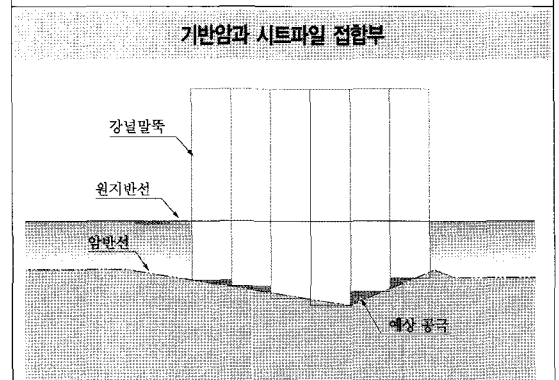
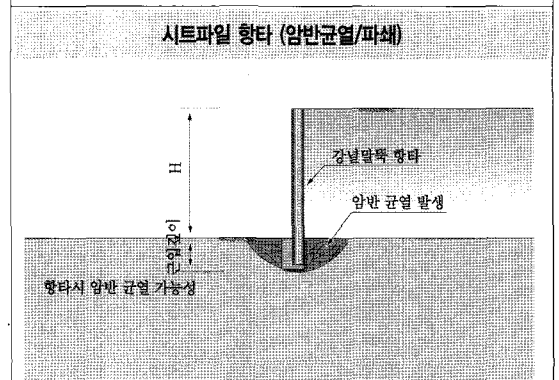
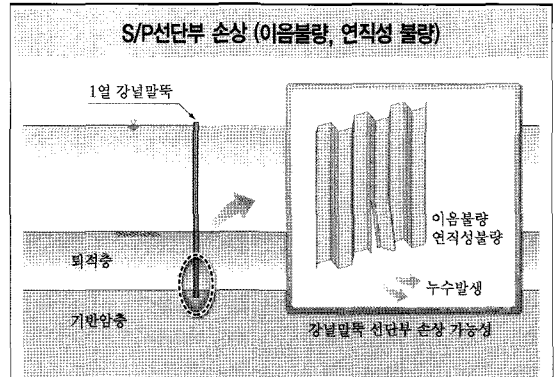
##### 4.1.1 기반암에 시트파일정착시의 누수발생 원인 분석

###### ① 누수발생 원인 분석

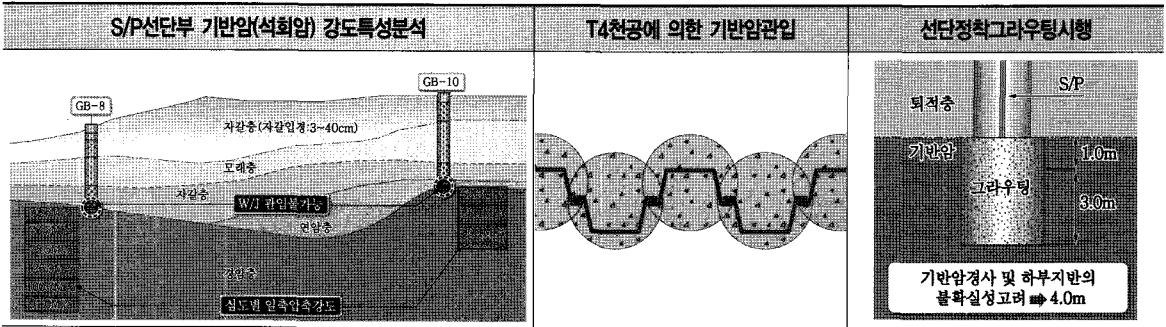
강널말뚝 공법은 항타시 두부손상 사례가 발생할 가능성이 높을 뿐만 아니라 하단부에 자갈 및 암괴 등이 존재할 경우, 파일이 암반에 근입되지 못하여 공극을 통한 누수 발생 가능성이 있으며, 실질적으로 강널말뚝을 적용한 타사업 가물막이 공사에서 유사한 사례가 발생하고 있는 실정이다. (대한토목학회지, 섬진강댐 비상여수로 건설공사 가물막이 공법에 대한 고찰, 2008)

###### ② S/P선단부 누수발생 대책방안

- 누수발생 원인을 극복하기 위해서는 W/J, T4 천공에 의해 기반암에 충분한 근입이 필요하며
- W/J 와 T4 의 선정은 퇴적지갈층의 입경, 층후 및 석회암의 강도특성을 분석하여 선정
- 또한 선단부는 균열/파쇄 영향을 고려 선단 정착 그라우팅 계획



### 4.1.2 기반암 강도특성분석을 통한 차수보강대책 적용현황



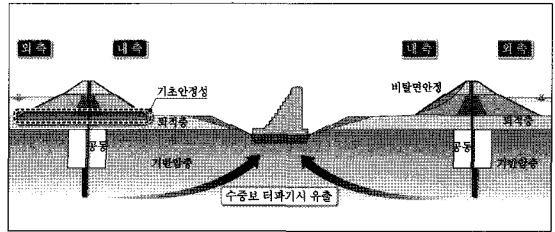
과업구간의 지층은 임경 3~40cm 의 모래,자갈이 5~8m로 분포하고, 그 하부에 50MPa 이상의 기반암이 분포하여 강널말뚝의 항타근입이 어려운 실정이고, 워터젯 병행시에도 모래자갈층후나 기반암의 강도를 고려할 때 관입이 어려울 것으로 판단되어 기반암 1.0m를 T4천공에 의하여 기반암에 관입시켰으며, 추가로 선단하부 균열/파쇄, 지반불확실성을 고려 선단정착 차수 그라우팅 4.0m를 수행하였음.

## 4.2 석회암 공동구간 추가 차수보강 필요성 및 대책

### 4.2.1 차수보강의 필요성 분석

석회공동의 분포특성은 매우 불규칙하여 정확한 분포 현황, 연속성, 규모등의 판단에 한계성이 있으므로 석회암공동이 분포하는 단양 지역에서의 S/P로 교량기초 가물막의 펌핑시와 기초터파기시에 종종 누수가 발생되어 추가적인 차수그라우팅 보강사례가 많이 발생하고 있다.

본 과업구간의 경우에도 가물막이 내·외측 수위차가

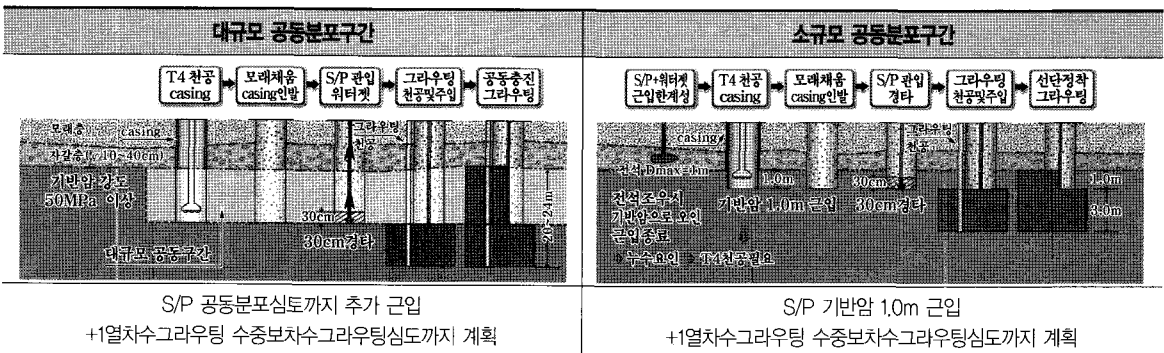


20m이상으로 수압차가 커 수중보 터파기시 기초하부 동공의 연속성에 의하여 누수 및 용출이 발생할 확률이 높으므로 추가적인 차수보강대책이 필요함.

### 4.2.2 석회공동분포 특성을 고려한 차수보강대책

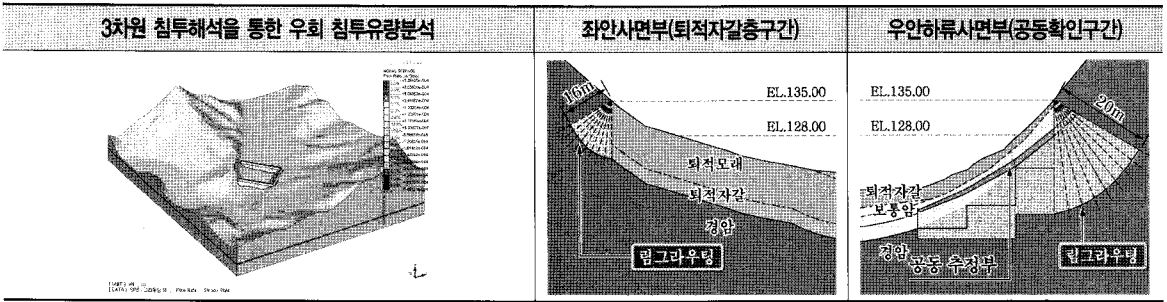
본 과업구간의 석회공동 분포특성은 크게 기반암상부 10.0m이하에서 대규모 공동이 다수 분포하여 파쇄층후

를 보이는 구간과 소수의 공동이 불규칙하게 확인되는 소규모공동구간으로 구분할 수 있으며, 이에 따른 차수보강 계획을 차등 적용하였음.





### 4.3 좌·우안 사면접속부 차수보강 필요성 및 대책



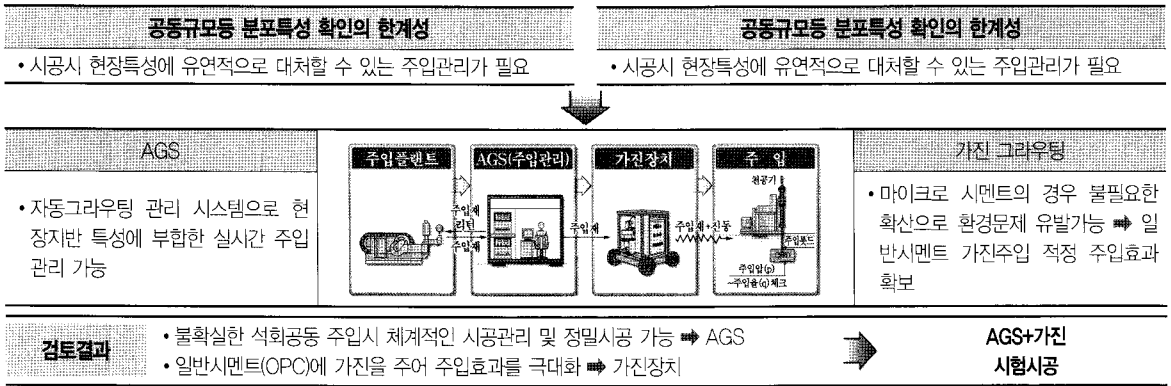
우안의 경우는 노출 암반사면으로 S/P파일과 암반 접속부에서 누수와, 암반내 공동 및 파쇄의 연속성에 의한 우회침투에 의한 누수가 발생될 수 있고, 또한 좌안사면의 경우 모래/자갈의 퇴적층으로 형성되어 우회침투수가 다량 유출될 수 있으므로 이에 대한 차수보강대책수립이 필요함. 우회침투유량에 대한 정량적인 분석을 위하여 3

차원침투해석을 수행한 결과 총 침투유량의 20%정도가 우회침투되는 것으로 나타났으며, 이는 집수정 및 펌핑 시스템으로도 가능하나 유출시 퇴적토의 유실은 대규모 유출 및 붕괴로 이어질 수 있으므로 사전 보강대책을 수립함이 적절할 것으로 판단하여 보강대책으로 림그라우팅을 시행 하였음.

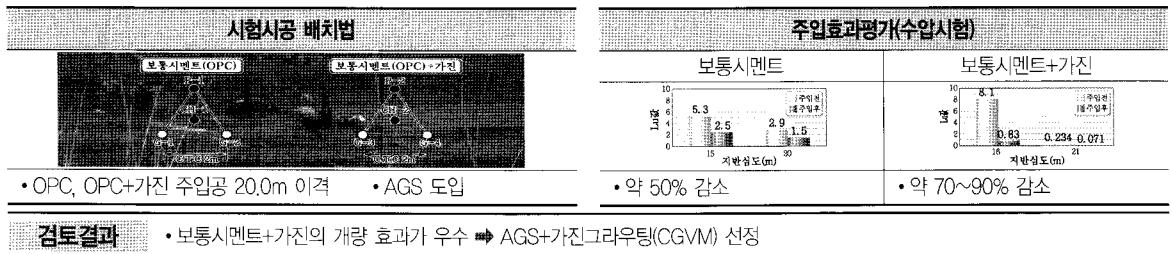
## 5. 차수그라우팅 시공법 및 시공중 관리방안

### 5.1 시험시공을 통한 차수그라우팅계획의 적정성

### ① 사전분석을 통한 시험시공 계획 방향 수립


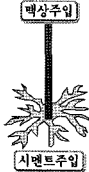
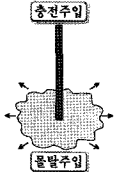


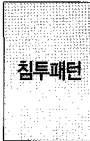
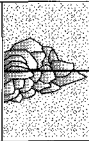

### ② 시험그라우팅 및 성과분석



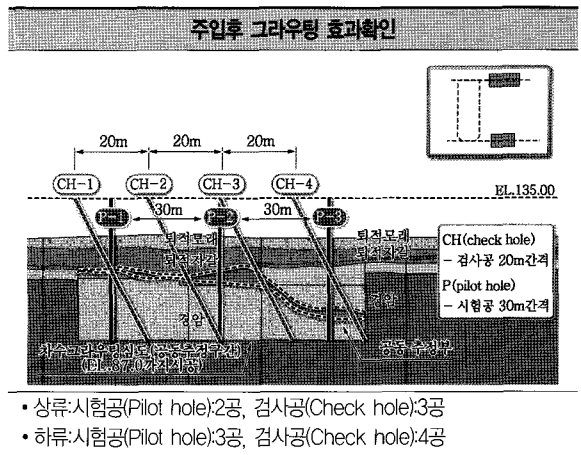
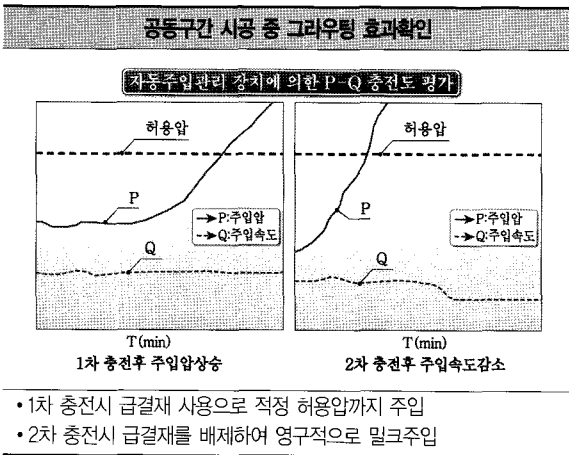
## 5.2 시공중 관리방안 수립

### ① 설계시와 상이한 지반조건 출현시 대처방안 수립

질리 및 공동규모에 따른 공법선정		
		
시멘트(에어)물말	cm급 폭이상의 공동 충전	유동성 확보
보통시멘트 시멘트	mm급 폭의 대공극 충전	빈배합 → 부배합
보통시멘트 시멘트+가진	µm급 폭의 미세공극 충전	

대규모 공동출현시 급결재 선정			
• 주입확산범위 조정(어둡색 시험결과와 유해성 없는 재료로 확인)			
			
gel-time	20초	1분	4분
경화재	활성실리카계	내구성 → 반영구, 환경성 → 친환경	
	실리카졸	내구성 → 영구, 환경성 → 친환경	
주입재의 경화속도(gel-time)를 조정 주입재의 손실을 최소화			

### ② 시공중 그라우팅 계획의 적정성 평가



검토결과	평가
• 공동 출현시 유해성 없고 활성실리카계 경화재 사용으로 적정 허용압까지 1차 충전후 2차 영구 밀크 주입	• 시공중 자동주입관리에 의한 그라우팅 효과확인 및 주입전 Pilot hole, 주입후 Check hole계획수립
• 시공중 자동주입관리에 의한 그라우팅 효과확인 및 주입전 Pilot hole, 주입후 Check hole계획수립	

## 6. 결론 및 제언

석회공동 분포지역에서의 가물막이공법 및 기초처리 대책 설계사례를 통하여 설계시 고려 및 주위사항에 대한 고찰한 결과는 다음과 같다.

### 가물막이 공법선정

1) 가물막이 공법은 최근 4대강 사례를 분석한 결과 총 16개 현장 중 2개를 제외하고는 14개소가 S/P공법

을 적용하고 있으며, 이중 1열과 2열은 각각 7개소씩 동일한 비율로 적용되어 시공되고 있는 것으로 조사 되었으며, 또한 시공 중 S/P누수는 차수벽체에서 발생되기 보다는 선단부 및 Tie cable제결부 등 구조 결합부에서 대부분 발생하는 것으로 나타났다.

2) 원형설, 블록케이스 등 여러 가지 공법을 검토한 결과, 1,2열 가물막이 공법이 현장 적용성이 큰 것으로 나타났으며, 2열의 경우 차수기능은 1열과 유사하고, 공사비 및 시공성이 결여되는 것으로 나타났으며, 특히 과업구간과 같이 공동 등 파쇄대가 분포하

는 경우 제체침하 및 공동붕괴에 의하여 타이케이블 연결시스템의 파괴 및 체결부에서의 누수 등이 발생될 우려가 클것으로 판단하였음

- 3) 1열의 경우 경제성, 시공성에서 2열보다 유리하나, 월류시 제체세굴 및 침식, 과도한 토공에 의한 오타 수발생 등의 문제점이 있어 제한적인 토사 사용과 대부분 암벽력을 사용하여 극복하였음.

#### 차수보강공법 검토

본과업구간의 지층특성상, 즉 자갈퇴적층하부에 바로 기반암 출현, 석회공동분포 등의 지반조건에 의하여 시트파일 제체로는 확실한 차수성을 확보할 수 없으므로 추가적인 차수보강 대책이 필요할 것으로 판단하여, 크게 3가지 지반특성을 고려하여 차수보강 대책을 수립하였다.

- 1) 첫째, 퇴적층 하부에 바로 기반암의 출현하는 구간 (일반구간)  
이 경우 대부분 누수는 시트파일 선단부에서 발생되며, 누수원인으로는 향타시 파쇄/균열, 기반암 경사에 의한 공극, 전석층의 기반암 오인등에 기인하므로 T4로 기반암 1.0m전공 후 시트파일을 정착하고 선단정착 그라우팅을 수행하여 누수발생원인을 사전 제거하였다.
- 2) 둘째, 석회 공동분포구간으로 크게 대규모 파쇄공동 분포구간과 소규모 공동분포구간으로 구분하였다.  
대규모 파쇄공동분포구간의 경우에는 시트파일을 공동분포구간까지 추가관입 후 수중보 커튼그라우팅심도까지 차수그라우팅을 계획하였으며, 소규모

공동구간의 경우는 시트파일의 추가 근입없이 수중보 커튼 그라우팅 심도까지 차수그라우팅을 계획하여 석회공동분포의 불확실성에 대비하였다.

- 3) 셋째, 좌우안 사면접속부 구간  
우안의 경우에는 공동 및 파쇄 암반사면이 존재하고, 좌안의 경우에는 자갈퇴적층이 분포하여 시트파일과 사면접속부에서 다량의 우회침투유량이 발생될 수 있으므로 림그라우팅을 수행하여 우회침투유로를 차단하였다.

#### 차수 그라우팅설계

그라우팅공법은 현장시험시공을 통하여 일반시멘트에 미세진동을 가하여 침투성을 높일 수 있는 가진장치와 시공중 석회공동 등 현장특성에 유연적으로 대처할 수 있는 주입관리가 가능한 자동그라우팅주입시스템(AGS)을 도입하였으며, 시공 중 Pilot hole과 Check hole을 계획하여 검증계획을 수립하였다.

#### 참고 문헌

1. 단양수중보 건설공사 대안설계 보고서(2010), 수자원공사
2. 섬진강다목적댐 재개발사업 비상여수로 및 부대시설공사(가물막이 안정성 확보를 위한 세부 시행계획 실정보고)
3. 섬진강댐 비상여수로 건설공사 가물막이 공법에 대한 고찰, 2008, 대한토목공학회
4. 가물막이 공의 설계시공 노하우 2009.2 탐구문화사
5. 가물막이 설계예·계산예, 토목공법연구회, 건설정보사
6. 지질 및 암반공학, 한국지반공학회, p.53~211