

# AGS를 이용한 비상여수로 월류웨어의 그라우팅 설계사례



김진춘  
한국지오텍 대표이사  
(kig-2000@hanmail.net)



김창현  
한국종합기술 이사  
지반공학부



사공명  
한국철도기술연구원  
선임연구원  
궤도토목연구실

## 1. 서론

### 1.1 개요

댐 암반기초처리의 차수 및 보강공법으로서 주입공법 (grouting)이 가장 기본적인 기술로 적용되고 있는데 최근 댐 건설현장의 지형적 약조건과 갈수록 까다로워진 설계, 시공여건 때문에 주입공법의 중요성이 더욱 강조되고 있는 실정이다.

최근 국내기술로 주입공법 시공관리 기술의 정밀화로 주입공법 효과를 향상시키고자 컴퓨터를 이용한 시공관리 기법(computer aided grouting evaluation system)이 도입되고 있으며, 안동댐 비상여수로 건설공사 T/K 설계의 월류웨어 기초처리에 적용된 AGS(All-in-one Automatic

Grouting System) 주입공법의설계사례를 통해서 그 활용성을 제시하고자 한다.

### 1.2 AGS 적용범위

AGS는 기존 그라우팅 시스템의 주입펌프와 주입관 사이에 있는 적산유량계 부분을 간단하게 AGS로 교체함으로써 현재 국내에서 적용되고 있는 LW, SGR 및 MSG 등 약액그라우팅은 물론이고, 강관다단보강그라우팅 및 FRP다단보강그라우팅 등 거의 모든 그라우팅에 적용이 가능하다. 또한, 시스템 교체로 인한 비용 상승이 크지 않기 때문에 AGS는 모든 그라우팅에 필수적인 시공관리 기술로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 1.3 AGS를 이용한 grouting 시공관리 운영 체계

AGS(All-in-one Automatic Grouting System)를 적용함으로써 시공 전 대상지반 특성평가, 설계시양 검토 및 조정, 시공 중 주입현황 감시, 주입 중 변상계측, data 축적 및 주입시공보고서 작성 등을 통합적으로 관리 할 수 있다. AGS를 이용한 grouting 시공관리 운영체계 모식도는 그림 1과 같다.

협그라우팅은 시공상의 기술적인 세부사항을 평가하는데 도움을 주며, 지반조건이 복잡한 현장일수록 시험그라우팅 으로부터 얻어지는 정보에 의해서 합리적인 설계·시공을 도모할 수 있다. 본 그라우팅 시험시공은 경암으로 구성된 “안동댐 비상여수로 건설공사”의 기초보강에 대하여 보통 시멘트 주입재(OPC)와 초미립자 주입재(MC)을 적용하여 시험 그라우팅을 실시하고 대상지반에 대한 주입효과 및 그라우팅 자동관리 시스템인 AGS를 적용하여 발생된 p(주입압)~q(주입속도)~t(주입시간) chart 분석을 통하여 본 댐 그라우팅 차수 및 보강설계 자료를 도출하는데 목적이 있다.

## 2. AGS 시험시공

### 2.1 목적

댐 기초처리와 같은 대형공사에서 시험그라우팅은 본 공사의 정밀시공 및 예산을 계획하는데 매우 중요한 절차로서 최적 설계·시공을 위하여 필요한 사항이다. 일반적으로 시

### 2.2 현장개요

1976년에 중심 코아형 록필댐으로 축조된 안동다목적댐에 대해서 2005년에 강화된 댐 설계기준을 적용하여 비상시 가능최대 홍수량(PMF) 유입시 기존댐 안정성 확보를 위한 비상여수로 건설이 추진되고 있다. 본 시험시공의 현장은 경상북도 안동시 안동댐 휴게소 뒤편에 위치하며 현장전경 및

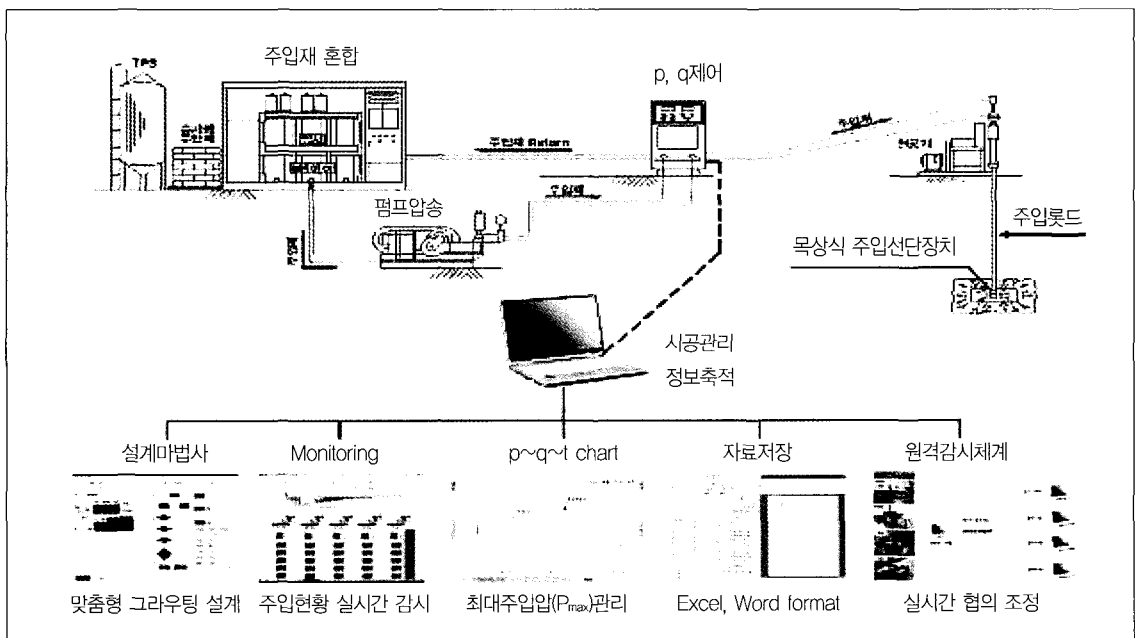


그림 1. AGS를 이용한 grouting 시공관리 운영체계 모식도

## AGS를 이용한 비상여수로 월류웨어의 그라우팅 설계사례

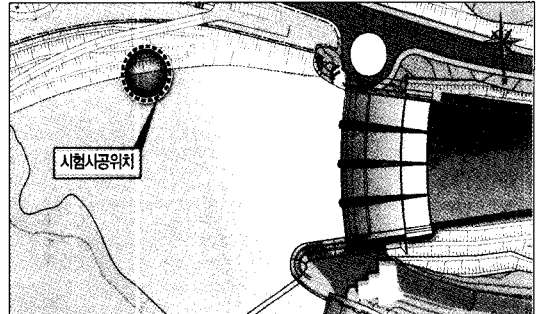


그림 2. AGS를 이용한 grouting 시공관리 운영체계 모식도

시험 위치도는 그림 2와 같다.

### 2.3 시험계획

#### 2.3.1 시험구간 선정

본 안동댐 비상여수로 건설지역의 기초지반에 대한 사전 시추조사 자료에 의하면 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암, 보통암, 경암의 층서를 이루고 있으며, 특히 기반암인 보통암과 경암류의 경계부에 협재된 균열 및 절리, 부분적인 파쇄대에 대한 지반보강이 주요사항이므로 pilot 지점의 시추조사 결과로부터 보통암과 경암부에서 시험구간을 선정하였다.

#### 2.3.2 주입재 표준배합비 및 시공조건

본 시험에 적용한 주입재 표준배합비와 주입 시공조건은 표 1, 2와 같다.

Lugeon값이 2.0이하의 저 투수성 지반이므로 W/C를 400~100% 사이에서 단계적으로 조정하면서 주입재가 충분히 침투되도록 주입을 계획하였다.

#### 2.3.3 주입공 배치계획

암반지반에서 시험주입에 필요한 주입공의 수와 배열 형태는 정해진 방법이 있는 것은 아니지만 일반적으로 주입공 간격에 따른 개량효과를 연속적으로 파악하기 위하여 단계별 주입공 배치를 원칙으로 한다. 본 시험시공의 경우 최소

표 1. 주입재 표준배합비

구분	W/C (%)	Water (L)	MC or OPC(kg)
1 단계	400	923	230
2 단계	200	859	429
3 단계	100	750	750

표 2. 주입 시공조건

구분	Lu값	배합비 (W/C, %)	주입압 (p, MPa)	주입속도 (q, l /min)	단위주입량 (kg/m)
MC	5 이상	400 이상, 200 이하	1.0~1.5	5.0~10.0	25 이상
	5 이하	400 이상	1.5~2.0	3.0~5.0	10 이상
OPC	5 이상	400 이상	1.0~1.5	2.0~5.0	25 이상
	5 이하	400 이상	1.5~2.0	1.0~3.0	10 이상

단위의 시험으로 주입효과를 평가하기 위해서 C.T.C 3.0m의 정삼각형 배열을 선택하여 중앙에서 검사공을 천공하였으며, 마이크로시멘트(MC)와 보통시멘트(OPC)에 대한 시험위치는 10.0m 간격으로 위치함으로써 상호 간섭효과를 배제하도록 그림 3과 같이 배치하였다.

### 2.3.4 AGS 운영계획

그라우팅 자동관리 시스템인 AGS를 본 시험시공에 적용하여 수압시험, p~q~t chart 검출, 주입압, 주입속도, 단위 주입량 등 다양한 data를 도출하고자 하며, AGS를 이용한 그라우팅 시스템 및 현장시험 모식도는 그림 1과 같다.

### 2.3.5 주입효과 확인계획

주입 전 · 후의 지반특성을 평가하기 위해서 시추조사, 수압시험, 주입 시공 중 대상지반의 주입재 침투특성을 평가하기 위해서 p~q~t chart를 검출하여 주입압, 주입속도 등을 표 3과 같이 평가한다.

## 2.4 시험성과 및 분석

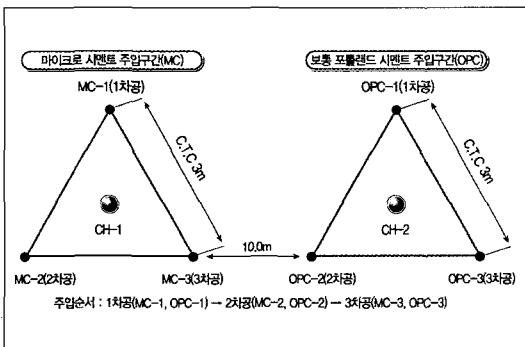


그림 3. 주입공 배치계획도

표 3. 주입효과 확인계획

구분	시험항목	비고
주입 전 · 후 지반특성	시추조사	· 주입심도까지 시추조사를 실시하여 지층분포상태 등을 파악하고 Lugeon시험, 시약반응 시험, 공내재하 시험 및 텔레뷰탐사를 실시함.
	Lugeon시험	· 주입시공을 위한 현장 암반의 투수성 분석
주입재 침투특성	p~q~t chart	· AGS를 이용하여 시간에 따른 주입압(p)과 주입속도(q)를 측정하여 대상지반의 p, q변화에 의해서 주입특성 분석 및 대응방안 도출.

## 2.4.1 주입 전 · 후 지반특성

초미립자 주입재(MC)와 보통시멘트 주입재(OPC)의 각각의 시험대상지반에서 pilot공 2공(MC-1, OPC-1)과 CH(check hole)공 2공(CH-1, CH-2)으로 시추조사를 통해서 Lugeon시험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

### (1) Lugeon시험 결과

MC의 경우 주입 전 · 후 주입유형의 변화가 없기 때문에 주입압에 의한 지층변상이 없었다는 것을 보여주는 반면 OPC의 경우 주입 전 · 후 주입유형에 확연한 변화가 발생한 것은 주입중 주입재의 침투저항으로 인해 과압이 발생하여 지층 열림 등 지층변상이 발생한 것으로 추정된다. 한편, 대상구간의 Lu값이 10이하의 저투수성 지반이므로 주입에 의한 개량폭이 크지 않지만 MC 주입부가 OPC 주입부에 비해서 1.5배 정도 투수성 저감효과가 크고, 주입 전 · 후 주수 흐름형태가 판단된다.

## 2.4.2 주입재 침투특성

주입시공 1차공에 대해서 AGS로 p~q~t chart 검측시험



## AGS를 이용한 비상여수로 월류웨어의 그라우팅 설계사례

을 시행하여 설계 주입압(p)~주입속도(q)를 제안하기 위해서 주입재 종류별 침투특성을 분석하였다.

### (1) p~q~t chart 검측 및 분석

보통압과 경압이 혼재되어 있는 15~20m 구간은 하부의 경압 지층에 비해서 투수성이 상대적으로 큰 5Lu 이상의 지층으로 MC를 주입할 경우 최고압력에 도달하면서 주입속도가 감소되는 유형으로 틈새가 채워지면서 주입 거부반응이 발생하는 전형적인 침투주입의 양호한 유형을 보이고 있다. 반면 OPC를 주입할 경우 유사한 투수성 지반임에도 불구하고 주입 초기부터 주입 거부반응이 일어나 MC 주입유형과 주입특성에 확연한 차이가 있음을 보여주고 있다. 하부의 20m 이하 경압 지층에서도 유사한 차이를 보이고 있지만 15~20m 구간에 비하면 주입특성 유형차이가 큰 편이 아님을 보여주고 있다. 즉, 1Lu 이하의 저투수성 지층에서는 주입재의 성능에 따른 투수성 개량에 한계가 있음을 보여준다.

### (2) 주입압(p)~주입속도(q) 분석

주입시공 1, 2, 3차공에 대해서 MC와 OPC를 주입한 경우 심도별 평균 주입압(p) 및 평균 주입속도(q)를 정리하면 표 4, 5와 같다.

표 4, 5로부터 MC와 OPC의 주입압(p)은 변화 차이가 거의 없었지만 원지반에 과도한 압력을 가하지 않은 범위의 동일한 주입압에서 MC의 평균 주입속도가 3~7ℓ /min 정도로 OPC의 평균 주입속도 2~4ℓ /min에 비해서 1.5배 이상 주입속도가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 시험시공 현장에서의 적정 수준의 주입압(p) 및 주입속도(q)를

표 6과 같이 제시한다.

### 2.4.3 분석결과

AGS를 이용하여 주입 전·후 지반특성 및 주입재의 침투 특성을 분석한 결과 5Lu 이하의 저투수성 암반 지층은 마이크로시멘트(MC)를 적용하는 것이 유리하고 5Lu 이상의 고투수성 암반지층은 보통시멘트(OPC)를 적용해도 개량 목표치를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

본 현장의 주입심도가 깊고 투수성이 낮은 암반 지층의 차수그라우팅(curtain grouting)은 침투성과 확산성이 우수한 MC를 적용하여 설계하고, 굴착으로 인해 교란되어 비교적 투수성이 클 것으로 예측되는 부력방지용 앵커링 지역의 보강을 위한 압밀그라우팅(consolidation grouting)은 OPC를 적용하기로 결정한다.

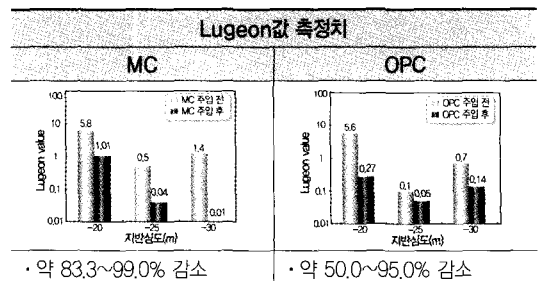
## 3. 그라우팅 설계

### 3.1 그라우팅 설계 흐름도

여수로 조절부의 암반내 간극을 통하여 하류로 유출되는 침투수 억제를 위한 차수그라우팅 설계와 기초부의 지지력 개량 및 균질성 확보를 위한 압밀그라우팅 설계를 위해서 MC와 OPC의 현장시험을 실시하였으며, 주입효과에 따른 차수 및 보강설계를 그림 4와 같이 적용하였다.

### 3.2 그라우팅 계획

구분	심도 (m)	Flow type		Lugeon 값	
		주입 전	주입 후	주입 전	주입 후
MC	15~20	난류	난류	5.8	1.01
	20~25	층류	층류	0.5	0.04
	25~30	난류	난류	1.4	0.14
OPC	15~20	난류	팽창	5.6	0.27
	20~25	층류	공극충전	0.1	0.05
	25~30	층류	난류	0.7	0.01



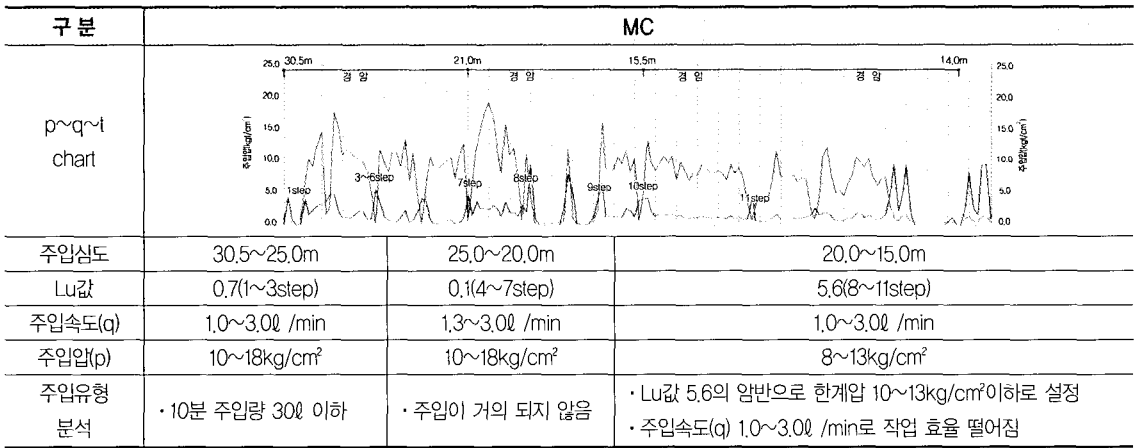
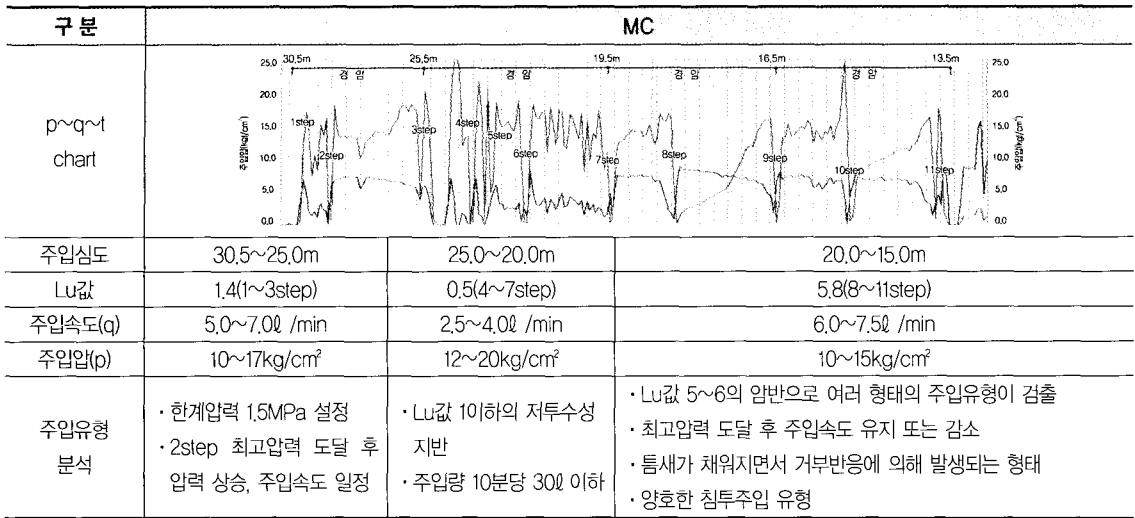


표 4. 심도별 주입압과 주입속도 측정결과

구분	심도 (m)	1차공		2차공		3차공	
		주입압 (kg/cm <sup>2</sup> )	주입속도 (ℓ /min)	주입압 (kg/cm <sup>2</sup> )	주입속도 (ℓ /min)	주입압 (kg/cm <sup>2</sup> )	주입속도 (ℓ /min)
MC	15~20	10~15(13)	6.0~7.5(7.0)	10~15(13)	0.3~0.5(0.4)	10~15(13)	0.2~0.5(0.4)
	20~25	12~20(14)	2.5~4.0(3.0)	13~23(18)	0.3~0.4(0.3)	12~19(17)	0.2~0.4(0.3)
	25~30	10~17(14)	5.0~7.0(6.0)	13~20(16)	0.3~0.6(0.4)	10~15(13)	0.1~0.2(0.2)
OPC	15~20	8~13(10)	1.0~3.0(2.0)	10~13(11)	0.3~0.6(0.3)	8~10(9)	0.3~0.5(0.4)
	20~25	10~18(14)	1.0~3.0(2.0)	10~18(14)	0.1~0.3(0.2)	10~14(11)	0.1~0.3(0.2)
	25~30	10~18(14)	1.0~3.0(2.0)	10~15(13)	0.1~0.3(0.2)	10~15(13)	0.3~0.4(0.3)

## AGS를 이용한 비상여수로 월류웨어의 그라우팅 설계사례

표 5. 주입압 및 주입속도 비교

구분	주입압(p)	주입속도(q)	분석의견
MC			<ul style="list-style-type: none"> <li>· 적정 주입압 10~13kg/cm<sup>2</sup></li> <li>· 1~3차공 순으로 주입속도 감소</li> <li>· 평균 주입속도 3~7ℓ /min</li> </ul>
OPC			<ul style="list-style-type: none"> <li>· 적정 주입압 10~13kg/cm<sup>2</sup></li> <li>· 1~3차공 순으로 주입속도 상승</li> <li>· 과압주입으로 열림현상 발생</li> <li>· 평균 주입속도 2~4ℓ /min</li> </ul>

표 6. 주입압(p)~주입속도(q) 제안값

심도 (m)	Lu값	주입압 (kg/cm <sup>2</sup> )	주입속도(ℓ /min)	
			MC	OPC
15~20	5.0 이상	10~13	5~7	3~4
20~25	1.0 이하	13~15	3~5	2~3
25~30	1.0 이하	13~15	3~5	2~3

표 7. 기존여수로 시공현황과 기본계획 그라우팅 설계 검토

구분	기존 여수로 시공 현황(공사지 분석)	기본 계획 보고서
차수 그라우팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상류측 1열 시공</li> <li>· 공간격 : 3.0m</li> <li>· 공심도 : D = 약 15.0m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상류측 2열 시공</li> <li>· 공간격 : 3.0m</li> <li>· 공심도 : D = 20.0~25.0m</li> </ul>
압밀 그라우팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 미시공</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 차수그라우팅부 상·하류에 1열씩 2열배열</li> <li>· 공간격 : 3.0m</li> <li>· 공심도 : D = 5.0m</li> </ul>

시험그라우팅 결과와 조절부 기초지반의 투수 특성을 기본설계 자료로 활용하여 조절부 및 비상여수로 구조물에 적용하는 양압력 저감 효과 증대를 위한 차수 그라우팅 (curtain grouting)과 발파 굴착 시 교란된 기초 암반의 치밀성 확보를 위해서 조절부 기초 부력방지 앵커공을 활용한 압밀그라우팅(consolidation grouting)을 계획하였다.

### 3.2.1 그라우팅 설계 검토

기존여수로의 시공현황을 살펴보면 차수그라우팅 적용

만으로 현재까지 큰 문제점이 발생되지 않은 것으로 판단되나 보강차원의 압밀그라우팅이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2.2 기초지반 분석

표 8과 같이 조절부 구조물 기초지반(경암)의 평균 Lugeon 값은 1Lu 정도로 불투수성 암반으로 구성되어 있으며, 시설물의 중요도와 암반절리의 불확실성을 감안하여 양압력감소 및 차수능력 증대를 위해 조절부 상류측과 접근수로 옹벽구간에 MC를 적용하여 차수 그라우팅을 계획하였다.

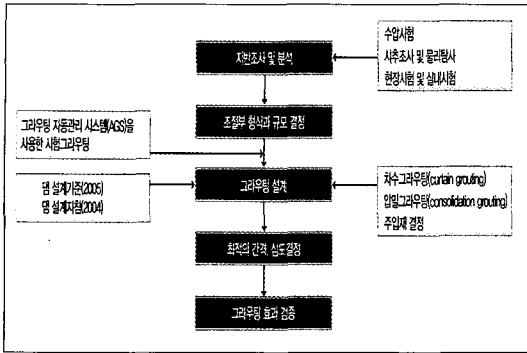


그림 4. 그라우팅 설계 흐름도

### 3.3 차수 그라우팅

#### 3.3.1 그라우팅 검토조건

차수그라우팅 설계는 표 9와 같은 조건에 근거해서 검토하였다.

#### 3.3.2 차수 그라우팅 심도 결정

일반적으로 차수그라우팅의 심도 결정은 표 10과 같이 검토하여 17m 이하로 평가된다. 본 지역의 조절부 지층은 투수성이 낮은 경암층이나 국부적으로 발달한 불연속면을 고려하여 차수그라우팅 심도를 20.0m로 적용하였다.

#### 3.3.3 차수 그라우팅 설계

주입재료는 MC를 적용하고, 심도 20m, 공간격 3m, 열간격 1.5m로 표 11, 그림 5와 같이 설계하였다.

### 3.4 압밀 그라우팅

#### 3.4.1 부력방지 앵커공을 활용한 압밀그라우팅 계획

발파 굴착 시 기초압반이완에 따른 기초보강 및 구조물과

표 8. 기초지반의 투수성 분석

구분	심도 (GL.(-)m)	지층	암종	Lugeon Pattern	Lu값	투수계수 (cm/sec)	
조절부 및 접근수로	YB-1	20.0~25.0	경 암	화강암	Turbulent Flow	0.26	7.68E-06
		25.0~30.0	경 암	화강암	Turbulent Flow	0.30	7.23E-06
		30.0~35.0	경 암	화강암	Turbulent Flow	0.53	9.16E-06
	YB-2	40.0~45.0	경 암	화강암	Turbulent Flow	0.87	1.33E-05
		45.0~50.0	경 암	화강암	Void Filling	0.77	8.93E-06
		50.0~55.0	경 암	화강암	Turbulent Flow	0.87	1.23E-05
	55.0~60.0	경 암	화강암	Turbulent Flow	1.06	1.62E-05	

표 9. 검토조건

구분	최고수위(M.W.L)	기초저면고	수두차	비고
수위조건	EL.(+)163.9m	EL.(+)143.0m	20.9m	

표 10. 차수그라우팅 심도 결정 방법

구분	댐 설계기준(2005)				USBR	경험식
	일반적	치밀한 암반	보통암	불량한 암질		
산정방법	설계수두 2/3이내, (최소 15.0m이내)	해당수두 20~30%	해당수두 30~50%	해당수두 70% 이상	$L=H/3+C$ (C=5~25, C=10적용)	$L=\beta \times H$ ( $\beta=1/2 \sim 1/3$ )
산정결과	15.0m	4.18~6.27m	6.3~10.5m	14.6m 이상	17.0m	10.5m



## AGS를 이용한 비상여수로 월류웨어의 그라우팅 설계사례

표 11. 차수 그라우팅 설계 조건

구분	주입재료	위치(Sta.)	심도(m)	공간격(m)	열간격(m)	비고	
차수 그라우팅	조절부	마이크로	2+75.0 ~	20	3.0	1.5	지그재그로 시공
	접근수로 옹벽	시멘트	3+11.4		3.0	1.5	

표 12. 압밀 그라우팅 설계 조건

구분	주입재료	위치(Sta.)	심도(m)	공간격(m)	열간격(m)	비고
압밀 그라우팅	보통시멘트	3+06~3+36	3.0	2.0	2.0	격자배치

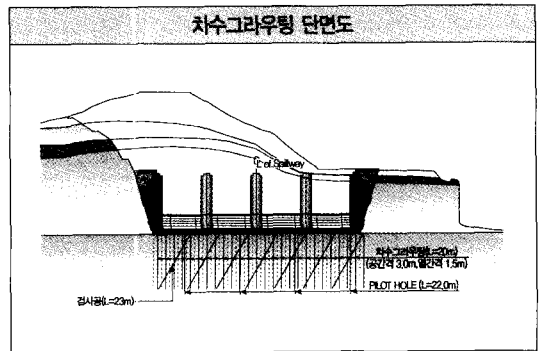
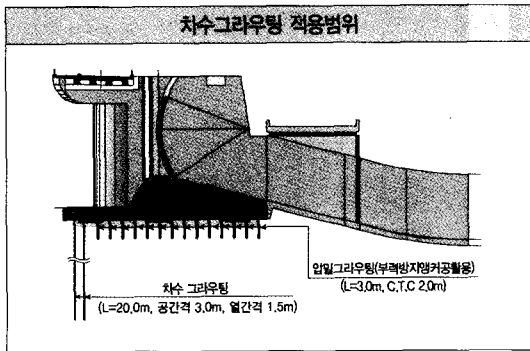


그림 5. 차수 그라우팅 계획도

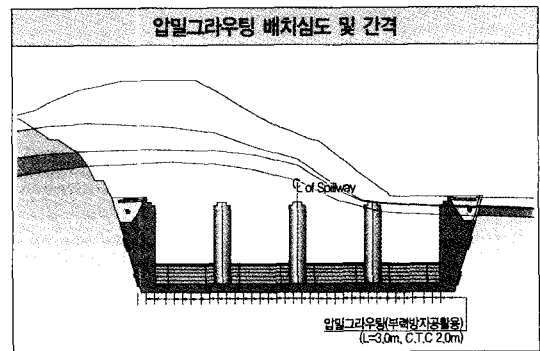
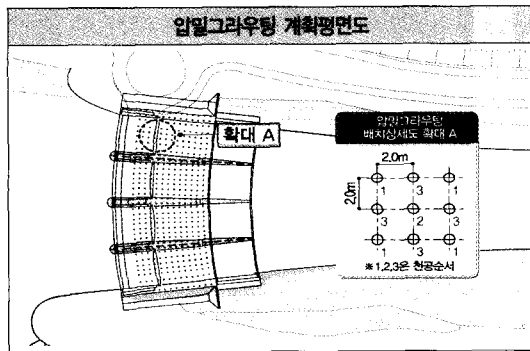


그림 6. 압밀 그라우팅 계획도

지반과의 일체화로 장기적인 품질 유지를 고려하여 부력방지 앵커공과 압밀 그라우팅을 그림 6과 같이 계획하였다.

### 3.4.2 압밀 그라우팅 설계

주입재료는 OPC를 적용하고, 설계 심도 3, 공간격 2m, 열간격 2m로 표 12와 같이 설계하였다.

## 4. 결론 및 제언

본 안동댐 비상여수로 그라우팅 설계에 AGS를 적용하여 적정 주입재료 선정, 주입 시공조건 평가 등 설계변수 도출을 시도하였다.

설계변수를 도출하기 위한 지반특성 평가에서 Lugeon

test, p~q~t chart 검출 시 AGS를 적용하여 주입재료 선정, 주입압 및 주입속도 등 객관적인 평가를 체계적으로 수행할 수 있었으며 향후 AGS를 이용한 그라우팅 시공 및 품질관리가 유력한 수단으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

AGS는 그라우팅 기술발전 단계에서 최근의 핵심기술이다. 흔히, 첨단기술은 사용성이 복잡하기 때문에 적용성이 떨어지는 경향이 있지만 본 AGS는 매우 간단하게 적용이 가능하다. 과도한 비용 상승도 없다. 오히려 과도한 주입재의 이탈을 방지하고 불필요한 확산을 방지할 수 있으므로 경제성을 높일 수도 있다. 따라서, 향후 정밀시공을 요구하는 많은 지하구조물의 차수보강 그라우팅에서 AGS의 적용은 필수적인 요소기술이다. 본 AGS가 도입된다면 그라우팅에 대한 기존의 타성과 불신을 벗어나는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 후기

본 AGS 적용시험은 안동댐 비상여수로 턴키 설계용역과 '건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업의 연구지원(05건설핵심 D10-01-해저시설물 차폐기술 연구단)'에 의해서 수행된 것으로 본 시험을 지원하여 주신 관계 기관에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 한국수자원공사(2005), "건설교통부 승인 댐설계기준", pp.59~363.
2. 농업기반공사(2001), "댐 주입 설계 및 시공 실무지침서", pp.123~184.
3. 가야ENG(2002), "한탄강댐 본댐 및 부대시설공사 지반보강시험시공보고서".
4. (주)한국지오택(2003), "마이크로시멘트 현장제조 및 실시간 시공모니터링을 이용한 최적그라우팅 시스템 개발연구".
5. 천병식(1998), "지반주입-이론과 실제", 원기술, pp.69~172.
6. 한국수자원공사(2000), "한탄강 다목적댐 기본설계보고서".
7. 김진춘(1999), "지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구", 한양대학교, 박사학위논문.
8. Mistry(1988), 암반에서의 p~q~t 주입유형.
9. 薬液注入工法 設計・施工指針(平成元年), (社)日本薬液注入協會.
10. 垂水尚志(1996), "p~q~t曲線及P~tチャートに基づく注入形態の検討", 薬液注入工法における注入効果の豫測確認手法に関するシンポジウム, pp.145-152.
11. 草野一人(1992), "薬液主入工法ハンドブック" p~q 管理, pp. 166~169.
12. Mitchel, J.K.(1970), "In Place Treatment of Foundation Soils", P. of ASCE, J. of SMFE, Vol. SMI, pp.73~110

