

# 손상된 흙댐 코어의 보수·보강을 위한 CGS 공법의 적용성

## Applicability of CGS for Remediation and Reinforcement of Damaged Earth Dam Core

천 병 식\*<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik

최 중 근\*<sup>2</sup> Choi, Joong-Keun

### Abstract

It is very difficult to rehabilitate the damaged earth dam core to manage it stably against development of flow path and increase of leakage by hydraulic fracture. In this study, application of CGS (Compaction Grouting System) to damaged earth dam core was noticed by analyzing and comparing the results of the in-situ data and FEM. Results of in-situ data showed that according as progress of rehabilitation works tip pressures increased and volume of injection decreased, voids of damaged dam core were filled with materials similar to origin dam core. Rehabilitations caused turbidity and volume of leakage to decrease at the same water level. Also, results of FEM analysis indicated that permeability decreased by rehabilitation. Through this study, it is proved that CGS is able to decrease permeability coefficient, volume of leakage and turbidity on damaged earth dam core.

### 요 지

댐체 코어부에 발생한 수압파쇄와 이로 인한 유로의 발달 및 누수량 증대 등의 문제점을 구조적으로 차단하여 댐의 안정성을 확보하고, 장기적으로 댐을 유지관리 운영하는 데에 문제점이 없도록 댐 코어부를 보수·보강한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 본 연구에서는 손상된 흙댐 코어의 보수·보강을 위한 CGS 공법(Compaction Grouting System)의 적용성을 천공과 주입과정에 대한 고찰과 그 결과에 대하여 검토하고, 현장에서의 계측치와 FEM 해석 결과의 비교·검토를 통하여 확인하였다. 현장 계측 결과, 공정이 진행되면서 선단 압력은 증가하고 주입량은 감소됨에 따라 느슨한 댐 코어의 공극이 채워진 것으로 나타났으며 동일 수위에 대하여 누수량 및 탁도는 보강 후의 누수량과 탁도가 모두 감소하였으며, FEM 해석 결과 역시 보강으로 인하여 투수계수가 감소하였다. 본 연구에서 CGS 공법을 통하여 기존 댐 코어재료 특성의 변화를 최소화 하면서 느슨한 공극을 채워 투수계수와 누수량을 감소시켜서 댐 코어의 차수성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

**Keywords :** CGS, Damaged earth dam core, FEM analysis, Permeability, Rehabilitation

### 1. 서 론

댐은 여러 가지 원인으로 균열, 누수, 침하 등 다양한 형태의 손상을 입게 되며 이와 같은 손상은 재료의 불

량 및 구조적 결함 뿐만 아니라 외력조건의 변화를 비롯한 다양한 형태의 손상영향 요인에 기인된다고 볼 수 있다. 이러한 제손상에 대처하기 위해서는 각각의 손상 현상에 대한 최적의 보수·보강 공법을 선정하여

\*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr)

\*2 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. Civil Engrg., Hanyang Univ.)

적용하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재 국내의 경우 각 댐 마다 매년 반복되는 손상이 발생되고 있음에도 불구하고 근본적인 대책 즉 적절한 보수·보강 공법의 적용에 의한 항구적인 보수효과와는 거리가 먼 일시적인 보수·보강에 머무르는 경우가 대부분이다(시설안전기술공단, 1997). 과거 구조물의 보수공사에 국한되었던 CGS 공법(Compaction Grouting System)이 오늘날에는 광범위한 적합성과 활용성이 입증되면서 지반개량, 구조요소(말뚝), 충전, 구조물 복원 등의 여러 분야에 이용되고 있다. 특히 주입기술의 발달로 코어재료와 유사한 재료를 시공할 수 있게 되면서 손상된 흙댐 코어의 보수·보강에 CGS 공법의 적용이 대두되었다.

본 연구에서 검토하는 손상된 흙댐 코어에 대한 CGS 공법의 적용은 국내에서는 시공 사례가 없으며 외국에서도 베네트 댐 등 몇몇 경우에만 한정되었던 공법이다. 이에 CGS 공법의 손상된 흙댐 코어부에 대한 적용성 여부를 현장의 계측결과와 FEM 해석을 통해 확인하였다. 현장계측은 모니터링에 의한 주입압과 주입량의 변화, 누수량과 탁도, 현장 코어의 샘플링을 통한 역학시험 등의 결과를 통해 공법 적용 전·후의 변화를 검토하였다. FEM 해석은 우선 현장에서 계측된 누수량으로 해석을 수행하여 댐 코어부의 보강 전·후의 투수계수를 각각 산정해서 이 투수계수로 다른 수위에서의 침투유량을 구하여 실측치와의 비교를 통해 확인하였다. 그리고 이를 현장 실험실에서의 변수위 투수시험을 통해 얻은 투수계수와 비교·분석하였고 이를 통해 CGS 공법으로 인한 댐의 투수계수 감소와 이로 인한 누수량 저하효과를 확인하였다.

## 2. 연구대상 흙댐의 현황

현재 운영중인 ○○댐은 점토코어, 필터와 Sandy Gravel Shell을 가지고 있는 수문이 없는 월류식 중심코어형 사력댐으로서 처음으로 댐이 만수 되어진 후, 댐의 가장자리 1개소와 중심부 2개소에서 싱크홀이 발견되었다. 이 3개소의 싱크홀은 굴착하여 자갈로 채웠으나 댐 표면 침하는 계속 진행되었다. 댐마루 Sta.○+○의 함몰원인에 대해서는 만수위를 초과하는 홍수위의 반복으로 Shell zone의 일부가 유실되어 Rip rap공에 메워져 발생한 코어의 일부가 유실된 것으로 추정하였다. 또한 댐마루 Sta.○지점 하류의 함몰원인으로는 댐 축조완료후 매설계기 재설치를 위해 천공을 실시하고 되메우기 불량

에 의한 것으로 추정하였다. 댐의 누수량에 대한 계측은 1998년 3월부터 댐 하류 끝 마루 차수벽을 통과하는 누수량을 부분적으로 계측하기 시작하였다. 댐의 당초 설계 누수량은 100m<sup>3</sup>/day으로 설계되었으나 보수·보강이 이루어지기 전의 댐 누수량은 평상시 1,900~2,100m<sup>3</sup>/day, 우천시 4,000~5,000m<sup>3</sup>/day로 계측되었다. 일반적으로 코어의 하단부와 기반암층과의 밀착이 양호하고 기반암층이 불투수층이라면 경계면에서 가장 높은 간극수압이 발생하며, 또한 코어재료가 균질한 댐은 상단부에서 하단부로 갈수록 간극수압이 커진다. 그러나 ○○댐의 경우 담수층의 간극수압을 살펴보면 기반암층보다 코어층의 하단부에서 더 큰 간극수압을 나타내어 담수 초기부터 경계면을 따른 누수가 발생한 것으로 추정하였다.

이 외에도 다양한 검토 조사를 통해 댐체의 안전성을 저해하는 가장 큰 요인은 수압파쇄에 의한 코어재의 손상인 것으로 분석되었다. 다음은 수압파쇄와 제체함몰에 주안점을 두고 댐의 손상원인을 분석한 내용이다(○○댐체 중간보고서, 2000).

- (1) 시공시 함수비가 엄격하게 관리되지 않아 코어의 상당 부분이 건조층과 습윤층으로 교차되어 다져짐으로서 많은 균열과 국부적인 아칭현상이 발생하고, 제체의 부적합한 Zoning과 축조재료 강성차이로 인한 응력전이 현상의 발생으로 코어부의 수압파쇄가 일어나 댐체의 손상이 유발되고 유로의 확대를 통하여 손상이 가속화된 것으로 판단된다(김상규, 1999).
- (2) 점토층용 재료의 소성지수 값은 균열이나 파이핑 현상 등을 최대한 억제할 수 있도록 시방기준에 15% 이상으로 시공하도록 정해져 있으나 실제로는 8% 이상의 낮은 값으로 시공되었다. 사력댐의 침하는 초기단계 동안은 부득이하게 발생하게 된다. 코어, 필터, Shell의 강성의 차이로 침하량은 각 부분마다 상이하게 발생한다. 이 부등침하는 코어에 작은 균열이나 전단대를 발생시킬 수 있다. 만약 코어가 소성지수가 낮은 흙이나 분산되는 흙으로 이루어졌다면 흙의 손실로 많은 균열이 발생하고 그 결과 공극과 싱크홀이 발생될 것이다(건설교통부, 1993).
- (3) 시추조사시 채취된 시료의 실내토질시험 결과 코어재의 대부분이 SC(Clayey Sand with Gravel)와 CL(Sandy Lean Clay with Gravel)로 나타났으며, 함수비가 16~30%로서 최적함수비 20.9% 보다 높으며

로 재료의 팽창으로 인한 간극의 증가가 발생한 것으로 판단된다.

- (4) 수압파쇄에 의해 물이 미소균열을 통과하면서 넓은 입도분포를 갖는 재료의 세립분이 분리되었으며, 분리된 세립자들은 집중된 유로를 통하여 코어와 필터의 접합부, 필터 내부지역으로 이동하였을 것이다.

### 3. 댐 코어 보수·보강을 위한 현장 시험(C.G.S 공법 적용)

#### 3.1 천공방법

현장에서 도입된 기본적인 천공방법은 오거 천공과 진동 또는 고주파 천공방법이다. 오거천공은 천공유체를 사용하지 않는 건식 천공방법으로써 저속으로 비트를 회전시키면서 절삭된 흙을 연속적으로 지표로 운반시킨다. 지표로 운반되어진 절삭물을 관찰함으로써 천공을 통하여 얻을 수 있는 재료의 일반적인 자료를 제공한다. 그러나 시료 채취시 함몰부위가 발생한다면 위와 같은 적당한 시료 채취를 할 수 없게 되는데, 이 경우 Hollow Stem Auger를 사용하여 가능한 불교란 시료를 채취하였다. 이 시스템은 외부에는 절삭날개가 장착되어 지반을 굴착하고 내부는 Sampler가 장착되어 가능한 불교란 시료를 채취하였다. 진동과 Sonic 천공방법은 Vibratory Pile Driving과 비슷한 방법으로 진동을 이용하여 지반을 천공한다. 양질의 샘플링이 가능하고 다른 방법보다 교란이 적으며 회수율도 높은 천공방법이나 현장에서는 지반의 특성상 천공이 매우 어려웠다.

#### 3.2 주입방법

본 현장에서는 Putzmeister Pump가 사용되었는데 Pumping Stroke 1회 마다 0.006m<sup>3</sup>의 주입재를 지반에 주입하였다. 그라우트 펌프는 저압부터 고압까지의 다양한

압력으로 주입되는 동안 저속으로 코어 물질과 유사한 저 유동성의 주입재를 펌핑할 수 있는 능력이 필요하다. 저속 주입은 주변 지반을 압밀시키는 동안 간극수압의 발생을 최소화 하기 위하여 필요하다. 주입재의 배합비는 내부마찰력이 큰 저유동성 재료이어야 한다. 이 현장에서 사용된 재료의 배합비는 잔자갈 20%, 모래 30%, 점토 50%로 구성되었다. 이 재료는 수용액 형태로 주입재가 댐의 필터층과 같이 다른 층으로 유입되는 것과 댐의 경사부에서 발생할 수 있는 용기현상을 최소화 한다.

그라우팅 보강의 목적은 손상된 부분을 가능한 원상태로 복구하는 것이다. 이를 위해 주입재료는 원 코어재료와 유사한 재료를 사용해야 한다. 그림 1은 댐 축조 당시의 재료와 댐의 보수·보강에 사용된 재료의 입도를 비교한 것이다.

그림 1의 입도분포곡선에서 D-2와 D-3는 댐 축조시의 재료이고, D2-1과 D2-2는 댐의 보수·보강에 사용된 재료를 의미하며 검정색 점선은 시방규정에 따른 각각 코어재의 설계입도의 상한선, 중간선, 하한선을 나타내는 것이다(건설교통부, 1995; ○○토건(주), 1994). CGS 보강공사시 주입재는 손상된 코어존을 가능한 한 원상태로 복구하기 위하여 당초 골재원 중의 한 곳인 D-2에

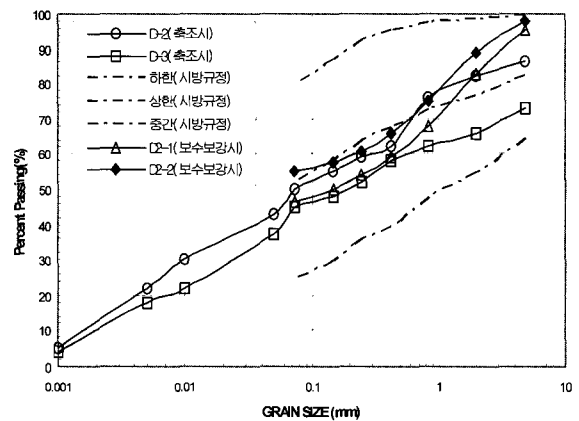


그림 1. 댐 축조와 보강에 사용된 재료의 입도분포곡선

표 1. 축조시와 보강에 사용된 재료원 비교

구 분	재 료 원	축조시 사용된 재료		보강에 사용된 재료	
		D-2	D2-1	D2-1	D2-2
	자연함수비(%)	20.0	18.8	18.8	20.6
	액성한계(%)	26.6	31	31	32
	소 성 지 수	7.5	11	11	14
	#4체 통과율(%)	86	95.2	95.2	97.8
	#200체 통과율(%)	50	46.5	46.5	54.9
	비 중	2.64	2.66	2.66	2.67

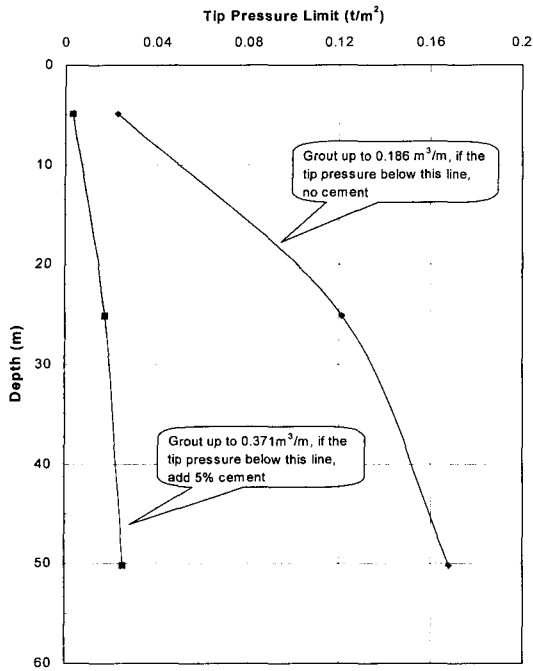


그림 2. 그라우트 한계 주입압

서 채취한 시료를 사용하였다. CGS 주입시 수압할렬의 가능성을 줄이기 위해 Polymer 섬유를 그라우트에 첨가하여 시공하였다.

다음의 표 1은 축조시와 보강에 사용된 재료원의 공학적 특성을 비교한 것이다.

그라우트 주입시 주입량은 다음 그림 2에 의해 결정되었다. 만약 주입시 선단 압력이 A Line을 초과하지 않는다면 0.371m<sup>3</sup>/m을 주입하고, B Line을 초과하지 않는다면 0.186m<sup>3</sup>/m을 주입한다. 그리고 B Line을 넘어서면 그 단계에서의 주입을 완료하고 주입관을 0.3m 올려 다음 단계의 주입을 실시하였다. 이 한계 주입압의 결정은 점착력이 있는 지반에서의 Rankine의 주동 토압론에 근거하였다(천병식, 1998a, b; Das, 1999).

### 3.3 모니터링 시스템

CGS의 핵심은 'CONTROL'에 있다. 정확한 주입량을 정확한 위치에 정확한 비율로 주입하는 것이다. 이를 위하여 현장에서는 모니터링 시스템을 구축하여 주입심도, 주입압, 펌핑 횟수와 주입량, 간극수압계와 경사계의 측정치를 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 하여 댐의 안정성을 확보하였다. 그림 3은 모니터링 시스템의 개략도이다.

그림 3에서 PT 1은 펌프에서 나갈 때의 압력을 나타내며 PT 2는 수평 주입관에서 수직으로 유입되기 전의 압력을 나타낸다. L1은 PT 1과 PT 2 사이의 수평거리

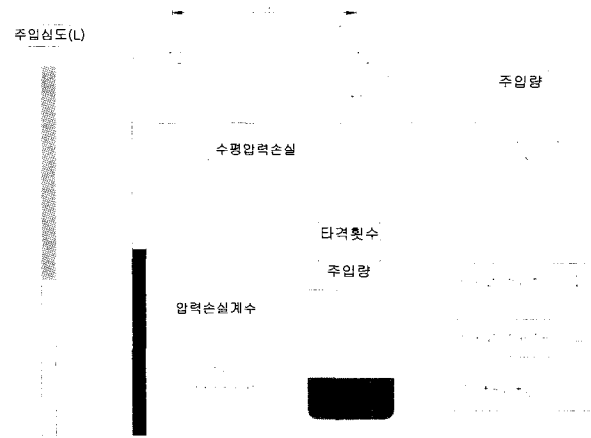


그림 3. 모니터링 시스템 개략도

의미하며, 주입심도(L)는 지표면에서 주입지점까지의 수직거리를 나타낸다.

선단 주입압을 추정하기 위한 압력손실 시험은 시공 1단계에서 실시되었으며 이 시험을 통해 주입관을 통해 압송되는 주입재가 주입재와 주입관의 마찰력으로 인해 높은 압력손실이 발생되어지는 것을 알았다. 수차례의 시험결과 압력손실 계수( $\alpha$  : Line Loss Rate)는 주입재의 슬럼프치에 매우 민감하다는 것을 알았다. 수평 압력손실은 슬럼프치 0.64cm~5cm 일 때 4.6~18.5t/m<sup>2</sup>/m로 나타났다. 적절한 슬럼프치 범위에서의 압력손실 계수( $\alpha$ )는 다음과 같이 구하여 사용하였다.

$$\alpha = \frac{(PT\ 1 - PT\ 2)}{L\ 1} \quad (1)$$

개략적인 그라우트 선단 압력은 주입관 상부 압력(PT 2)에서 수직으로 천공된 주입관의 길이(L)에 주입재 구근의 중력오차(수직높이 0.3m당 0.703t/m<sup>2</sup>)와 압력손실 계수( $\alpha$ )를 빼서 산정하였다. 이를 간략히 식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Tip\ Pressure = PT\ 2 - (\alpha - 1) \times L \quad (2)$$

또한 주입이 이루어지는 동안 댐의 상류 경사면과 하류경사면에 각각 설치된 경사계와 2개소의 Piezometer에 대한 측정을 실시간으로 하여 주입중 댐의 안정성을 확보하였다.

### 3.4 보수·보강 단면

댐에 대한 보수·보강은 댐의 가장 위험 단면이라고

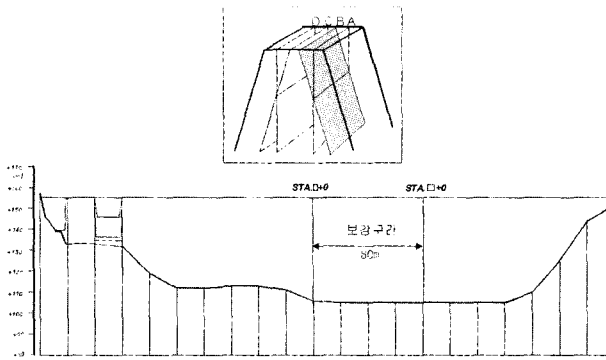


그림 4. 보강구간과 보강공에 대한 주입열의 단면

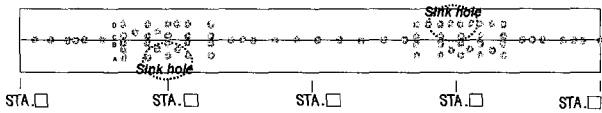
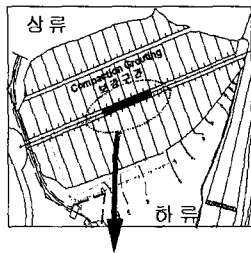


그림 5. 보강구간별 공별 시공현황

예상되는 중앙부 80m에 대해 모두 3단계에 걸쳐 75공이 시행되었다(그림 4, 그림 5 참조).

#### (1) 1단계 천공 및 주입

1A단계는 Sta. ○+○과 Sta. ○에 2개의 간극수압계 설치 위한 공과 4개의 조사/주입공을 천공하였다. 이 단계에서 Sonic 천공기는 대상 지반이 점착력 있는 붕괴성 토질과 크기가 큰 호박돌이 존재하여 천공이 매우 어렵다는 것을 알았다. 1B단계에서는 Sta. ○+○과 Sta. ○의 싱크홀이 발달된 주변에 각각 19공과 22공의 조사/보강공을 실시하였다. 공의 2열(B열과 C열)은 코어 부분을 보수·보강 효과를 높이기 위해 수직으로 약 10°의 각도를 주었으며 모든 그라우트 공은 기반암이나 천공 가능한 심도까지 주입하였다. 1B단계의 모든 그라우팅 공들은 Auger를 이용하여 천공하였다.

#### (2) 2단계 천공 및 주입

2단계에서는 80m구간에서 중심선을 따라 18개의 조사/보강공을 실시하였다. 모든 공들은 Solid Stem Auger와 Hollow Stem Auger를 이용해 수직으로 천공하였다. Hollow Stem Auger 공은 연속적으로 샘플링을 실시하

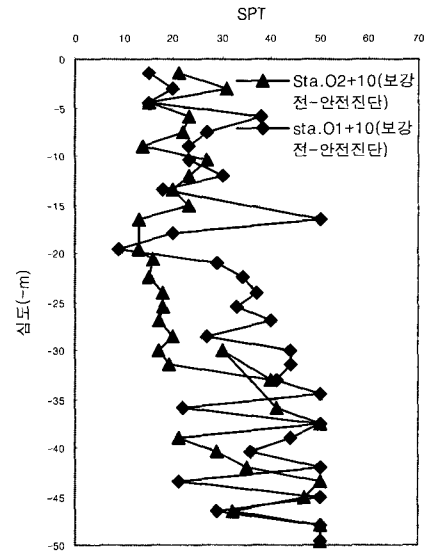


그림 6. 보강전 코어재의 N치

였으며 4공에 대해서는 연속시료채취와 SPT를 실시하였다.

#### (3) 3단계 천공 및 주입

1단계와 2단계의 63개 공에 대한 천공 및 주입을 완료한 후 주입압과 주입량에 대한 검토를 실시하여 느슨하다고 추정되는 지점에 대해 추가적으로 12개공을 주입하였다.

#### 4. 현장 계측 결과

3단계 천공 및 주입 과정에서의 그라우팅 작업에 대

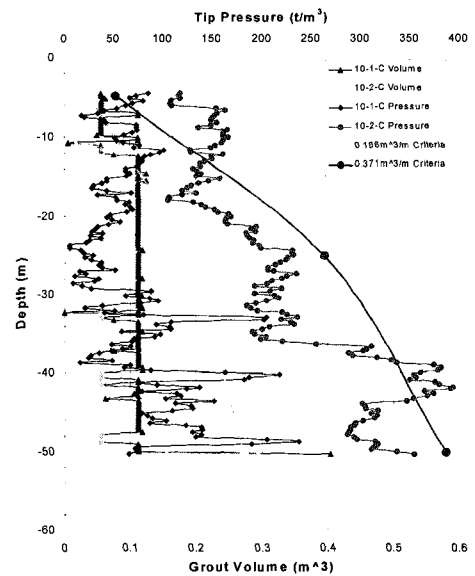


그림 7. 주입량과 주입압에 의한 지반개량 효과 확인

한 검토를 통하여 주입시 선단 압력이 증가한 것을 알 수 있다. 이를 그림 7에 도시하였다.

10-1-C(2000. 7. 19)는 심도 21.4~30.5m와 36.6~39.7m에서 느슨한 부분이 존재하고 있다고 추정할 수 있다. 이는 동일 심도에서 선단 압력은 낮고 주입량은 많음을 통해 알 수 있다. 인접한 10-2-C(2000. 7. 29)는 주입 후 선단압력이 증가하고 주입량이 감소하였는데 이는 CGS 공법으로 인하여 느슨한 부분의 공극을 채워 지반이 개량되었다는 것을 의미한다.

댐의 누수량에 대한 계측은 1998년 3월부터 시작하였으며 그림 8은 2000년 1월 1일부터 8월 8일 까지의 일별 수위 - 누수량 - 강우량의 계측 자료이다.

보수·보강의 효과는 동일한 수위에 대한 누수량의 변화를 통하여 확인할 수 있을 것이며, 표 2는 동일한 수위에 대한 보수·보강 전·후의 누수량과 탁도의 변화를 비교한 것이다.

아래 표에 의하면 보강후의 누수량은 24.8~54.2% 정도 수준으로 감소하였으며 탁도 또한 50% 정도 감소한 것으로 나타났는데 이는 손상된 댐 코어에 대하여 CGS 공법이 적절하여 댐의 저수능력이 개선되었다는 것이 확인되었다.

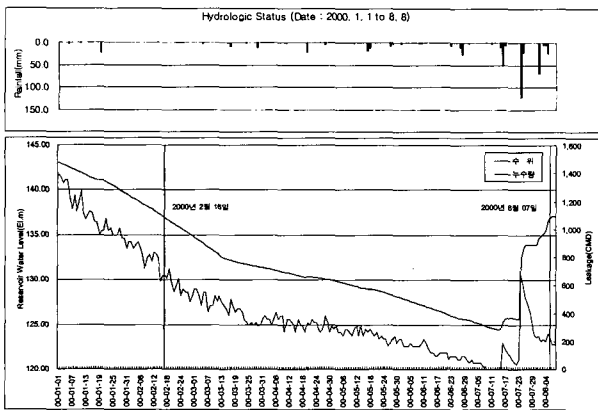


그림 8. 일별 수위 - 누수량 - 강우량 관측 결과

## 5. FEM 해석(SEEP/W)

### 5.1 해석단면

유한요소 해석을 위한 기본단면은 보수·보강 대상 구간의 단면이 댐의 표준 단면도와 유사하므로 댐의 표준단면을 해석 단면으로 결정하였다. 실제 단면은 Core, Sand Filter, Sand & Gravel, Rip Rap으로 구성되어있다.

그러나 저수위와 누수량의 관계(그림 8 참조)를 보면 누수량이 코퍼 댐 코어 상부보다 수위가 낮은 저수위일 때에는 누수량에 거의 영향을 주지 않았다. 7월 9일부터 7월 15일 사이에 누수량은 0으로 떨어졌으며, 이때 저수위는 대략 EL. 125m 정도였다. 이것은 측정된 누수의 대부분은 손상된 주댐의 코어를 통해 발생하며 코퍼댐이나 기초 기반암을 통한 누수량은 거의 없다는 것을 의미하므로 실제 해석에서는 코어에 비해 투수계수가 상당히 커서 자유 배수층으로 간주하여 Rip Rap과 상류 경사측의 Sand Filter층과 Sand & Gravel층을 제외하였으며 기반암은 불투수층으로 보았다.

이를 고려한 해석단면의 유한요소망은 다음 그림 9와 같다.

본 해석은 수위가 일정하지 않은 비정상류 해석으로서 댐 준공 후 지금까지의 수위변동을 그대로 구현하기에는 데이터 입력상 어려움도 있고, 해석결과가 크게 달라지지 않는다는 가정 하에 편의상 보강 전 수위변동은

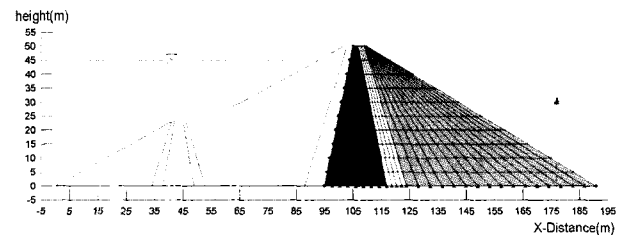


그림 9. 해석단면의 유한요소망

표 2. 보수 전·후 누수량 비교

누수량 : m<sup>3</sup>/day, 탁도 : NTU

보수 전				보수 후				비 고 (B/A)
일 자	수 위 (EL. m)	누수량 (A)	탁 도	일 자	수 위 (EL. m)	누수량 (B)	탁 도	
2. 15	137.05	672	3.7	8. 08	137.10	167	1.4	24.8%
2. 16	137.03	672	3.4	8. 07	137.03	178	1.4	26.4%
2. 18	136.71	648	3.6	8. 05	136.65	187	1.4	28.8%
3. 04	134.20	456	3.0	7. 31	134.19	237	1.7	52.0%
3. 05	134.02	552	2.8	7. 29	133.96	299	2.6	54.2%

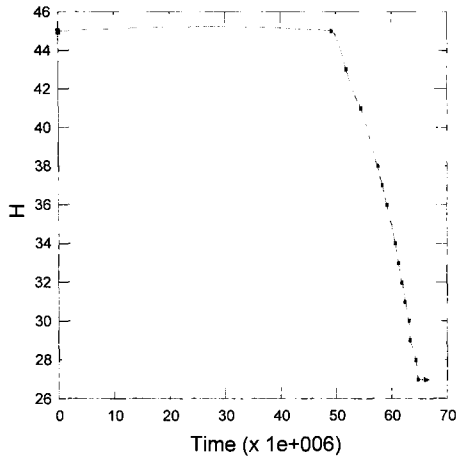


그림 10. 보수 전의 수위변동 조건

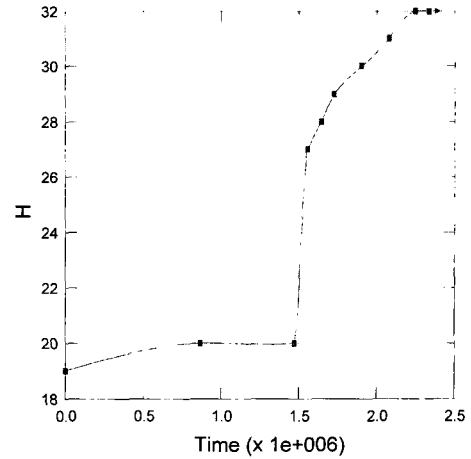


그림 11. 보수 후의 수위변동 조건

답수 후로부터 그라우팅 보강이 착수되기 전까지의 수위를 입력해서 재현하였다. 그러나 답수 후 약 20개월까지는 수위변동이 거의 없는 관계로 EL. 150m로 일정하게 유지하였고, 그 후 수위가 1m씩 변동하는 조건으로 재현하였다. 즉, 답수 후 20개월 정도는 EL. 150m로 일정하게 수위가 유지되다가 그 후 보강이 착수되기 전까지 1m 씩의 수위변동이 생길 때마다 시간-수위 조건을 입력하였다. 보강 후 수위변동은 보수·보강 작업의 착수시점으로부터 보강이 완료되기까지의 시간-수위를 보수전과 같은 방법으로 입력하였다.

그림 10과 그림 11은 해석에 사용된 보수 전·후의 수위변동 조건을 나타낸 것이다.

## 5.2 입력물성치

해석에 이용되는 지반 물성치는 투수계수, 불포화토의 투수계수 특성, 불포화토의 함수비 특성 등이다. 본 연구에서는 실측된 누수량으로 코어부의 보강 전·후의 투수계수를 추정하였다. Sand Filter와 Sand & Gravel 부분의 투수계수는 현재 상태의 토질시험 자료가 확보되어 있지 않은 상태이므로 건설당시의 건설지를 준용하였다.

사용된 수치프로그램의 특성상 불포화토의 투수계수

표 3. 댐 축조 재료의 투수특성

댐 축조재료	투수계수(m/sec)	체적함수비(%)
Core	-	0.36
Sand Filter	$1.0 \times 10^{-4}$	0.31
Sand & Gravel	$1.0 \times 10^{-2}$	0.26

및 체적함수비를 정의하게 되어 있으나, 현재 상태에서 불포화토의 투수계수 및 체적함수비를 산정할 수 없으므로 프로그램의 매뉴얼에 예시된 유사한 투수계수를 가진 토질을 선택하여 기 정의된 특성곡선을 변형하여 사용하였으며, 사용된 투수계수 및 기타 특성은 표 3과 같다.

단, 여기서 체적함수비는 불포화토의 체적함수비 특성을 추정하기 위하여 계산된 최대값으로써, 최대 체적함수비는 공극비를 초과할 수 없으므로 다음 식에 의해 산출된 공극비를 사용하였다.

$$e = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w \times G_s} \quad (3)$$

여기서, e : 흙의 공극비

$\gamma_d$  : 흙의 건조단위중량

$\gamma_w$  : 물의 단위중량

$G_s$  : 흙의 비중

## 5.3 해석결과

### 5.3.1 정상상태해석

비정상류 해석을 위한 초기수두파일을 생성을 하기 위해 댐의 최고 고수위인 EL. 150m(댐의 저부에서 45m) 일 때의 수위에 대한 정상상태 해석을 수행하였으며 그 결과는 그림 12와 같다.

해석결과에 의하면 자유수면은 코어 내에서 코어의 경사와 동일하게 감소하고 있으며 전수두는 상류사면에서는 물로 포화되어 있어 고수위(EL. 150m)와 같은 수두를 유지하고 있으며 하류로 갈수록 급격히 감소한

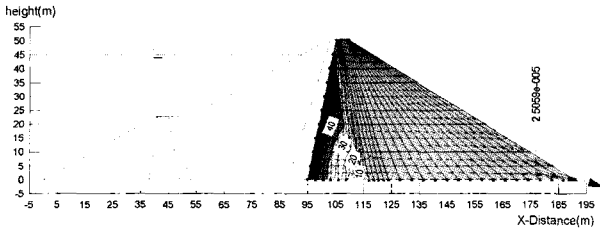


그림 12. 정상상태에서의 등수두선 및 침투수 벡터

다. 침투수 벡터를 보면 침투류는 하류부 필터를 따라 기반암층의 저부로 주로 흘러 나가며, 제체를 통과하는 침투수량은  $2.53 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 이다.

### 5.3.2 보강 전의 해석 결과

시공당시의 자료에 의하면 축조시 댐 코어의 투수계수는  $1 \times 10^{-8} \text{ m}/\text{sec}$ 으로 설계되었으나 손상으로 인하여 보수·보강 전 코어의 투수계수는 당초에 비해 상당히 큰 차이를 보일 것이라 예상하였다. 이에 투수계수를 변화시키면서 기준이 된 EL. 137m에서의 실측 침투유량과 유사한 투수계수를 추정하였으며 그 결과는 투수계수는  $4.51 \times 10^{-7} \text{ m}/\text{sec}$ 로 나타났다.

그리고 이와 같이 산정된 투수계수의 정확성을 확인하기 위해 다시 이 투수계수로 EL. 134m 일 때의 침투유량을 구하여 실측치와 비교하였으며 그 결과 실측 침투유량과 근사함을 알 수 있었다. 산정된 투수계수에 의한 수위에 따른 보강전의 침투유량, 등수두선 및 침투수 벡터는 그림 13, 그림 14와 같다.

댐 전체를 통한 침투유량은 댐체의 길이가 380m(여수로 제외)이고 단면감소계수를 0.9로 가정하여 이론적

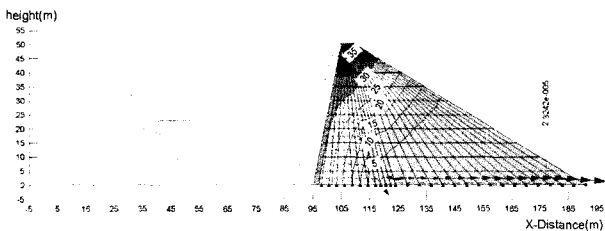


그림 13. 보강 전 침투유량, 등수두선 및 침투수 벡터(EL. 137m)

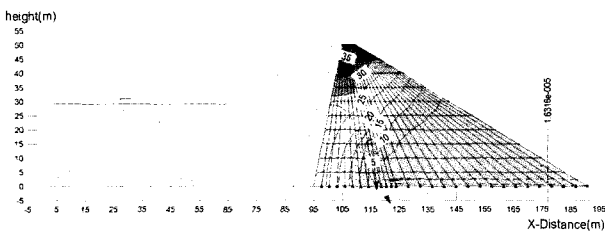


그림 14. 보강 전 침투유량, 등수두선 및 침투수 벡터(EL. 134m)

표 4. 보수·보강 전 해석결과

투수계수(k)	수위(EL)	침투유량(Q)	
		실측치(m <sup>3</sup> /day)	해석치(m <sup>3</sup> /day)
$4.52 \times 10^{-7} \text{ m}/\text{sec}$	137 m	672	687
	134 m	456	482

1일 최대 침투수량 Q는 다음과 같이 계산되었다.

$$Q = 2.3242 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m} \times 0.9 \times 380\text{m} = 687 \text{ m}^3/\text{day}$$

보수·보강 전 댐에 대한 해석결과에 의하면 댐 전체 단면에 대한 평균 투수계수는  $4.52 \times 10^{-7} \text{ m}/\text{sec}$ 로 댐 축조시의 투수계수인  $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}/\text{sec}$  보다 증가하여 댐 코어의 기능이 저하된 것으로 판단된다. 표 4는 보강 전 수치해석에 의해 산정된 투수계수에 의한 수위별 침투유량을 실측치와 비교한 것이다.

### 5.3.3 보강 후의 해석 결과

보강 후에 대한 해석방법은 보강전과 동일하게 실측 침투유량과 유사한 투수계수를 추정하였으며 그 결과는 투수계수는  $7.38 \times 10^{-9} \text{ m}/\text{sec}$ 로 나타났으며 그 결과는 다음의 그림 15, 그림 16과 같다.

보수·보강 후 댐에 대한 해석결과에 의하면 댐 전체 단면에 대한 평균 투수계수는  $7.38 \times 10^{-9} \text{ m}/\text{sec}$ 로 보강 전 해석단면에 대한 투수계수  $4.52 \times 10^{-7} \text{ m}/\text{sec}$  보다 현저한 감소를 보여 공법에 의해 댐 코어의 기능이 향상된 것으로 나타났다.

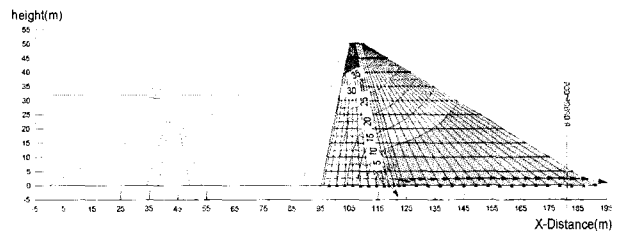


그림 15. 보강 후 침투유량, 등수두선 및 침투수 벡터(EL. 137m)

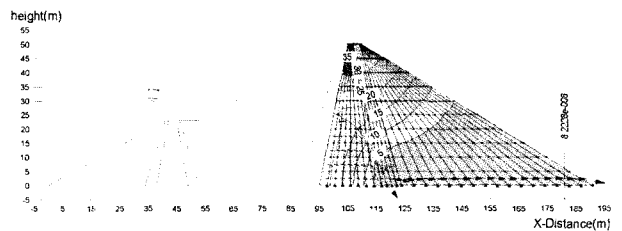


그림 16. 보강 후 침투유량, 등수두선 및 침투수 벡터(EL. 134m)



표 5. 보수·보강 후 해석결과

투수계수(k)	수위(EL)	침투유량(Q)	
		실측치(m <sup>3</sup> /day)	해석치(m <sup>3</sup> /day)
4.52×10 <sup>-7</sup> m/sec	137 m	178	180
	134 m	237	243

표 6. 수치해석과 현장실측치와의 비교

구 분			보 강 전		보 강 후	
			현장실측	수치해석	현장실측	수치해석
투수계수 (m/sec)	공번	○○-1C	1.0×10 <sup>-8</sup>	4.52×10 <sup>-7</sup>	2.5×10 <sup>-8</sup> ~4.3×10 <sup>-9</sup>	7.38×10 <sup>-9</sup>
		○○-1C			1.3×10 <sup>-8</sup> ~8.7×10 <sup>-9</sup>	
		○-7D			9.9×10 <sup>-9</sup> ~3.5×10 <sup>-9</sup>	
		○-1C			3.0×10 <sup>-8</sup> ~1.0×10 <sup>-9</sup>	
침투유량 (m <sup>3</sup> /day)	수 위 (EL)	137 m	672	687	178	180
		134 m	456	482	237	243

표 5는 보강 후 수치해석에 의해 산정된 투수계수에 의한 수위별 침투유량을 실측치와 비교한 것이다.

누수량과 투수계수에 대한 현장 실측 및 실내 투수시험 결과와 수치해석 결과를 요약하면 다음 표 6과 같다.

축조시 댐 코어의 투수계수(k)는 1.0×10<sup>-8</sup>m/sec 이었으나 수치해석 결과 댐 코어의 평균 투수계수는 4.52×10<sup>-7</sup>m/sec로 산정되었다. 이는 담수 후 댐 코어의 손상으로 인한 침투유로의 형성 및 토사의 유실에 의해 댐 코어의 공극이 확대되었음을 의미한다.

CGS 공법 적용으로 댐 보강 후의 실내 변수위 투수 시험 결과에 의한 투수계수는 대략 3.0×10<sup>-8</sup>~1.0×10<sup>-9</sup>m/sec로 측정되었고, 수치해석 결과는 7.38×10<sup>-9</sup>m/sec로 댐 축조시 투수계수보다 작게 산정되었다. 이것은 수치해석 결과는 댐 전체의 평균 투수계수이고 실측 투수계수는 CGS 보강 단면에서 국부적으로 측정되었기 때문인 것으로 판단된다.

현장실측 및 수치해석 결과로부터 손상된 흙댐 코어에 대한 보수·보강 공법으로서 적용된 CGS 공법에 의해 흙댐 코어의 기능이 회복되었음을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 손상된 댐 코어에 대하여 CGS 공법의 적용성을 천공과 주입과정에 대한 고찰과 현장에서의 계측치와 FEM 해석의 결과의 비교·검토를 통하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주입시기가 다른 인접한 지점에서 주입압과 주입량

에 대한 현장계측을 분석한 결과 선단압력이 증가하고 주입량이 감소하여 CGS 공법에 의해 느슨한 흙댐 코어의 공극이 채워져 지반이 개량되었음을 알 수 있었다.

(2) 현장에서 실측된 일별 누수량과 탁도를 통해 CGS 공법의 적용으로 인해 누수량이 약 70% 감소하여 누수허용범위(350m<sup>3</sup>/day) 이내이며 탁도 또한 상당히 감소되었다. 이를 통하여 CGS 공법의 적용으로 흙댐 코어의 차수성이 개량되어 흙댐 코어의 기능이 회복되었음을 확인할 수 있었다.

(3) 실측된 침투유량으로 수치해석을 수행하여 보강 전과 후의 투수계수를 산정한 결과 각각 4.52×10<sup>-7</sup>m/sec와 7.38×10<sup>-9</sup>m/sec로 산정되었다. 현장 실측치와 수치해석에 의한 CGS 보강 전·후의 결과는, 댐 축조시 투수계수는 1.0×10<sup>-8</sup>m/sec 이었으나 수치해석 결과 CGS 보강후 투수계수는 4.52×10<sup>-7</sup>m/sec로 산정되었다. 이것은 담수 후 댐 코어의 손상으로 인한 침투유로의 형성 및 토사의 유실에 의해 댐 코어의 공극이 확대되어 댐의 차수성이 저하되었음을 의미한다. 보강 후 댐 코어에 대한 변수위 투수시험 결과 투수계수는 대략 3.0×10<sup>-8</sup>~1.0×10<sup>-9</sup>m/sec로 측정되었고, 수치해석결과 댐 코어의 투수계수가 7.38×10<sup>-9</sup>m/sec로 산정되었는데 이는 CGS 보강으로 느슨했던 댐 코어의 공극이 매워져 댐의 차수성이 증대되었음을 알 수 있다.

(4) 현장실측 및 수치해석 결과 손상된 흙댐 코어에 대한 CGS 공법의 적용으로 댐의 투수계수가 감소하여 누수량 및 탁도가 감소하였다. 이것은 CGS 공법이 손상된 흙댐 코어에 대해 적용성이 양호함을 의미한다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(1993), 댐시설기준, pp.346-348.
2. 건설교통부(1995), 건설지, 부산지방국토관리청.
3. ○○토건(주)(1994), 품질관리자료.
4. 김상규(1999), 토질역학, 청문각, pp.202-206.
5. 시설안전기술공단(1997), 댐안전을 위한 보수대책의 체계화 연구, pp.22-27.
6. 천병식(1998a), 최신 지반주입, 원기술, pp.235-240.
7. 천병식(1998b), 지반공학, 구미서관, pp.242-245.
8. 한국수자원공사(2000), ○○댐체 중간보고서.
9. M. Das Braja(1999), 토질역학, 구미서관, pp.450-451.

(접수일자 2003. 9. 17, 심사완료일 2003. 11. 25)