

## 필(흙)댐체의 하부 성토법면의 붕괴에 따른 안정성 확보에 대하여 The Lower Part Landsliding of Embankment Dam According to a Heavy Rainfall and the Reinforced Design for Their Protection

황성춘<sup>1)</sup>, Seong-Chun Hwang, 오병현<sup>2)</sup>, Byung-Hyun Oh

<sup>1)</sup> 경주대학교 건설환경공학부 조교수, Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Kyongju University

<sup>2)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원, Head Researcher, Korea Institute of Water & Environment, Korea Water Resources Corporation

**SYNOPSIS** : In a oo dam at oo city of Gyeongbuk, severe damages have been occurred on lower part of dam due to heavy rainfall for several years. This caused significant impediment for maintaining its original function. This is considered as an excellent case for overall improvement of stability of dam system through successful investigation and construction work. This paper present comprehensive specifications that are generalized and used for securing stability of dams by quoting this example.

**Keywords** : Sliding of dam Embankment, Reinforcement method of dam, Grouting of dam, Stability analysis, Ground investigation

### 1. 서 론

OO시에 위치한 OO댐은 높이 32.5m, 댐길이 223m인 흙(필)댐(Earthfill Dam)으로 국제대담회(ICOLD)가 분류한 댐규모에서 15m 이상으로 대담에 속하며, 1960~1970년대에 건설되어진 우리나라의 대표적인 형태를 갖는 댐으로서 중앙심벽형 흙댐 형식을 취하고 있다. 또한, 이 댐은 1971년 준공 이래 즉, 댐 완공 14년 후인 1985년 6월에 하류법면 2개소에서 누수현상을 발견한 이후 2003년까지 4~5차례 걸쳐 커고 작은 보수보강을 실시해왔다. 우리나라의 경우, ICOLD가 규정한 대규모 댐이 수백 개에 이르고 있고 또한, 대부분의 댐이 흙댐의 형식을 빌고 있으며 특히, 댐의 구조가 중앙심벽형이 대부분이다. 그리고 이 형식들의 댐은 대부분이 건설후 작게는 수년에서 많게는 수십 년이 경과된 즉, 노후화된 것이 많아 어떤 의미로든지 댐의 항구적인 안정성 확보를 위해 댐의 보수 및 보강에 대한 체계적이고 종합적인 접근이 필요하다고 할 수 있다. 특히, 최근의 국지성 호우에 의해 일부 댐들에서 이와 같은 현상들이 발생하고 있는바, 이 분야의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않고 할 수 없을 정도라 할 수 있겠다. 마침, 위에서 언급한 댐이 우리나라에서 문제를 야기하고 있는 대부분의 댐의 대표적 사례로 자리매김하는데 덜함이 없기에 댐의 안정성 확보를 위한 일련의 과정 즉, 댐의 조사에서 공법의 선정, 설계, 시공 및 계측까지를 본 논문에서 인용하여 재정리하였고 또한, 이와 같은 피해 패턴이 한국의 흙댐 피해 사례로서 보고된 것으로는 최초의 경우로 댐체체의 일련의 피해조사에 의해 원인의 제시 및 그에 따른 대책안의 수립과 성공적인 시공에 의한 복구까지의 과정은 댐 체체의 안정성의 제고차원에서 매우 뛰어난 사례로 간주되어지고 있다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이 사례를 인용하여 우리나라에 산재해 있는 여러 흙댐의 호우 등에 의한 외부 및 내부인자에 의한 댐의 안정성 확보를 위하여 일반화할 수 있는 객관적이고 종합적인 시방을 제시하고자 한다.

## 2. 흙댐의 보수 및 보강공법 일반

본 논문에서 인용된 댐(그림 1.)의 경우, 서론부에서도 인용한 바와 같이 약32년 동안의 유지관리기간 중에 수차례의 보수 공사를 실시하였으며, 2003년 현재 댐 상류측 사면의 우안측 물갯선 변형이 발생된 상태이며, 댐 하류측 사면 소단부에 습윤구간 및 국부적인 침식과 세굴이 발생한 상태로 부분적인 손상에 대해 보수 및 보강이 필요한 즉 안전진단에 따른 결과가 C등급의 댐으로서 댐체의 하류사면의 습윤부를 통한 누수에 의해 호우 등에 의한 추가 인자가 부여될 경우 댐체 하부에 심대한 위험을 부여할 수 있으며, 따라서, 즉시, 보수 및 보강이 필요한 상태라고 진단되었다. 일반적으로 이와 같은 중심코어형 흙댐의 과다 누수현상은 대부분 심벽(코어) 재료가 부적합하거나 시공상태가 부적절한 경우에 흔히 발생하는 것으로서, 대상 댐체의 내부상태를 정확히 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있겠다. 인용댐의 경우, 이런 일련의 엄정한 절차에 따라 보수 및 보강 공법으로 댐체중심의 심벽 즉 코어에 지중연속벽 공법과 그라우팅 공법이 적용되었는데 그 적용 근거는 ① 댐체의 상류 및 하류 사면의 기울기가 매우 완만한 토사층으로 형성된 중심코어형 흙댐, ② 댐체가 EL. 31m부근을 중심으로 재료적인 불균질 접촉면이 존재하고 있으며, ③ 하류측의 필터 존(Zone)이 EL. 31.5m 까지만 축조되어 다른 댐에 비해 상대적으로 필터층의 높이가 낮게 설계 시공되었으며, ④ 좌안의 일부구간만을 제외하고 전단면에 걸쳐 몇 차례의 그라우팅공사를 실시하였고, ⑤ 진단 결과에 따르면 심벽(코어)의 우안 및 중앙부의 일부구간은 액성상태의 포화대가 존재하며, 특히 중앙부는 코어 회수가 어려울 정도의 곤죽 상태임을 확인하여 판단한 것이 위에서 언급한 두 가지 공법을 병행하여 시공하는 것으로 하였다.

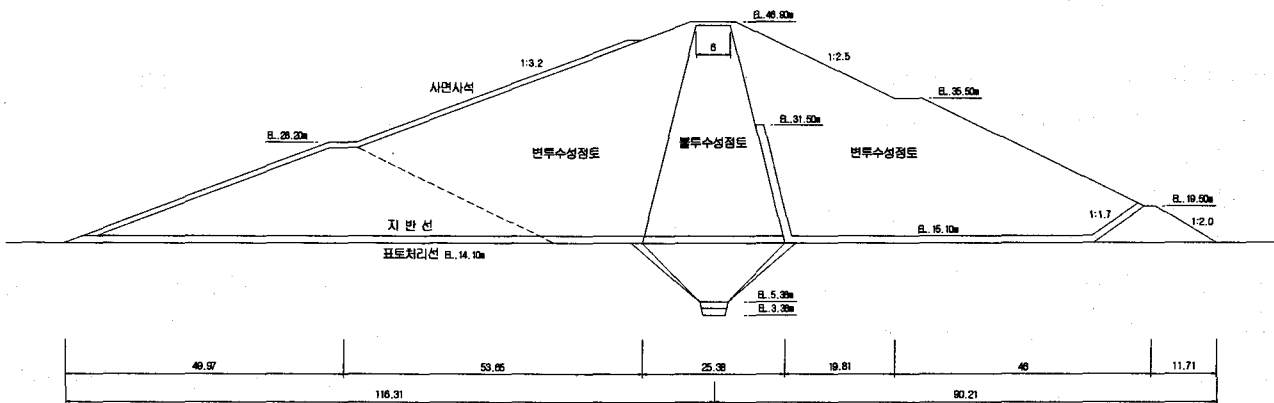


그림 1. 대상댐의 단면도

### 2.1 대상 흙댐의 정밀안전진단

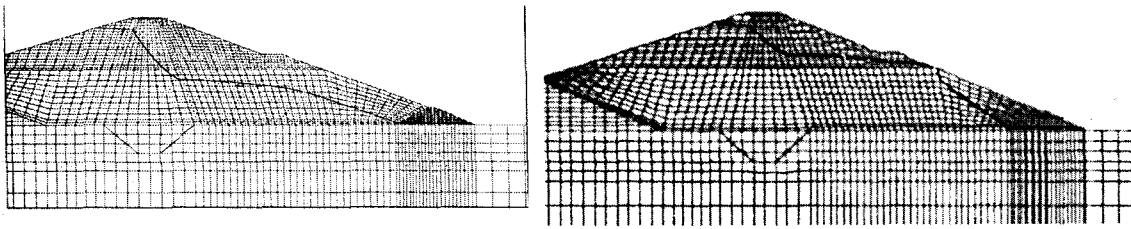
#### 2.1.1 개요

대상 댐의 물리적, 기능적 결함의 발견과 그에 대한 신속하고 적절한 조치(구조적인 안전성 및 결함원인 등을 조사, 측정, 평가하고 적절한 보수 및 보강공법의 제시 등)를 취하기 위해 수행되어졌는데, 먼저 외관조사에서는 댐마루, 상류 및 하류사면, 댐양안부 등으로 나누어 조사한 바, 상류사면의 우안부 일부구간에서의 물갯선의 변형을 제외하고는 특이점은 없었으며, 무수보링에 의한 시추조사 및 실내 토질 시험을 수행하여 그 결과를 나중에 나오는 침투류 및 응력 해석에 적용하였고, 또한 변위측량은 안정된 사면 경사를 확보하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, Rhodamine 및 브롬 이온(BR-)을 이용하여 습윤부를 포함하는 추적자 시험을 수행하였고 이 결과를 가지고 상태 평가를 한 결과 전체적인 상태등급은 보수를 요하는 C등급이었다.

### 2.1.2 침투류 해석 및 사면의 안정해석

만수위 상태의 댐체의 침투에 대한 안전성 및 댐체내의 지하수면의 형상을 파악하기 위하여 침투류 해석 FEM 패키지를 사용하여 실내투수 시험에 의한 해석과 취약구간을 고려한 해석을 수행하여 전자에서는 침윤선이 급강하하지 않고 하류사면에 도달하는 것을 알 수 있었고, 후자에서는 침윤선이 필터층의 상부를 통과하여 수위변화 없이 하류사면으로 연장되고 있었으며 이는 관측정을 통한 침윤선의 측정 결과와 잘 일치했다(그림 2).

또한, 댐 사면의 평상시 및 지진시의 안정성 검토를 위해 한계 평형 상태 이론에 따르는 범용 패키지를 이용하여 안정해석을 수행한 결과 모두 안정한 것으로 나타났으며, 이때의 지하수위의 설정은 침투류 해석 결과에 근거하며, 지진계수는 0.132g 를 부여하였다(표 1.).



(a) 실내 투수시험 결과를 이용한 해석결과

(b) 취약층을 고려한 해석결과

그림 2. 침투류 해석 결과

표 1. 안정성 검토결과

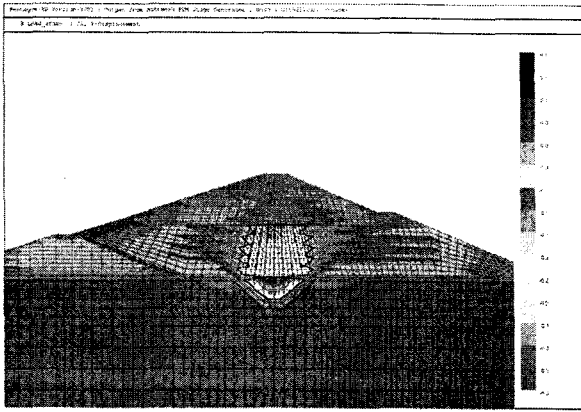
구 분			해석결과	기준안전율	검토결과
상 시 만수위	상 류 사 면	평상시	2.705	1.3 이상	안 정
		지진시	1.287	1.2 이상	안 정
	하 류 사 면	평상시	1.995	1.3 이상	안 정
		지진시	1.404	1.2 이상	안 정

### 2.1.3 대상 댐체 거동해석

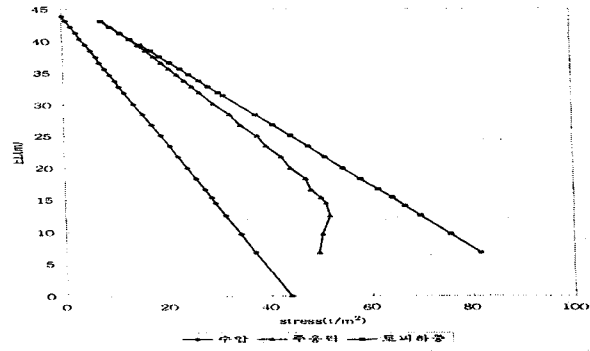
댐체 내부의 응력상태를 파악하기 위하여 시공단계를 고려한 FEM 해석을 수행하여 표 2. 와 같은 결과를 얻었다. 또한, 수압할렬 가능성에 대한 판단은 그림 3. 과 같이 나타났다.

### 2.1.4 안정성 평가

이상의 여러 분석기법에 따른 결론으로서 대상 댐의 조절수위를 현재와 같이 EL. 41.0m 이하로 유지할 경우에는 구조적인 안정성 및 운영상의 문제점은 없을 것으로 판단되나 조절수위를 그 이상으로 운영하고자 할 때에는 댐체에 발생된 하류사면의 습윤부, 세굴, 코어의 부분적인 포화대층, 우안부의 기초암반 파쇄대를 통한 수위 저하 등의 결함에 대한 보수 및 보강이 필요하다고 보인다.



(a) 수치해석결과



(b) 수압할렬 가능성 판단

그림 3. 수치해석 결과

표 2. 해석결과

구분	유한요소해석결과
변위	· 시공 후 수직변위는 코어 중앙부에서 최대 값을 나타내며, 공용 중 만수위조건에서는 최대변위의 발생 위치가 침투수의 영향으로 하류측으로 변화되는 것으로 해석
주응력	· 심도에 따라 전형적인 양상을 보임
파괴율	· 전역역에서 탄성영역에 있는 것으로 분석되어 댐체의 안전성은 확보되어있는 것으로 평가
수압할렬	· 코어의 최대주응력이 수압보다 큰 값을 나타내므로 수압할렬은 발생치 않을 것으로 평가

## 2.2 보수 및 보강대책

### 2.2.1 차수공법에 대한 검토

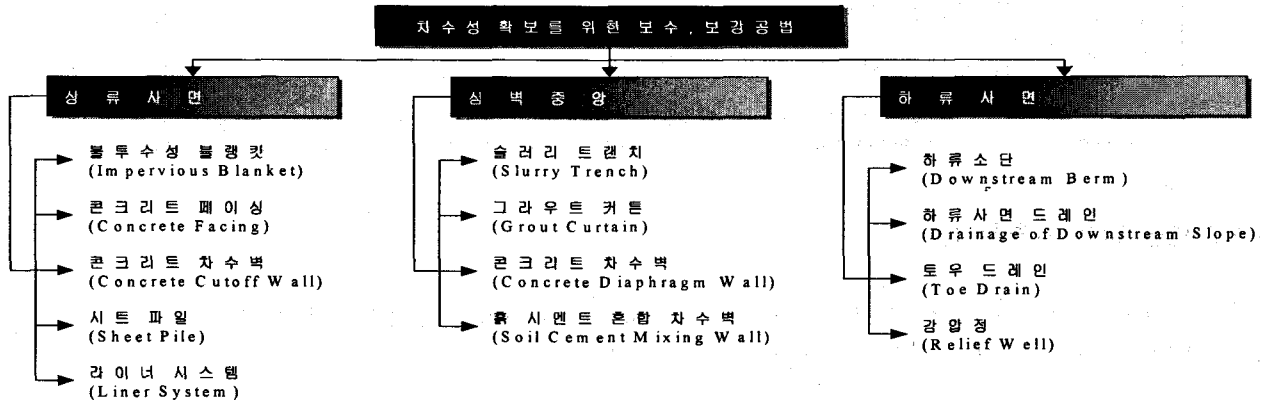


그림 4. 차수보강공법

댐체의 차수성 확보를 위해 국제대담회(ICOLD)에서 제안한 보수 및 보강공법은 임시공법인 저수위 제한공법과 영구공법인 침투조절공법으로 구분되며, 또한 차수를 위한 보강공법으로는 그림 4.에서 보는 바와 같이 보강위치에 따라서 상류사면제어공법, 심벽제어공법, 하류사면제어공법 등이 있으며 댐체의 누수상황 그리고, 보수 및 보강의 위치에 따라서 여러공법을 조합하여 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 따라서, 이 들 각각의 공법에 대하여 시공성, 사회적인 여건 및 경제성에 대한 검토결과 본 대상 댐의 보수 및 보강공법으로는 심벽제어공법이 가장 적합한 것으로 판단했으며, 대상 댐에서는 심벽

제어공법중에서도 특히 흙시멘트 혼합차수벽과 그라우팅공법이 안정성 및 시공 경제성에서 탁월한 것으로 나타났다. 또한, 그라우팅공법은 컴팩션, 제트, 침투 그라우팅 등으로 구분할 수 있으나 대상 댐 보수공사가 댐체의 심벽에 적용되는 것을 감안하면 그라우팅 공법중에서도 저압으로 시공되며, 주변지반과의 교란이 거의 발생하지 않는 침투그라우팅공법이 적합할 것으로 판단했다. 또한, 위에서 언급한 차수보강의 방법별, 공법별, 장단점을 살펴보면 표 3.~표 5.와 같다.

표 3. 상류사면제어공법

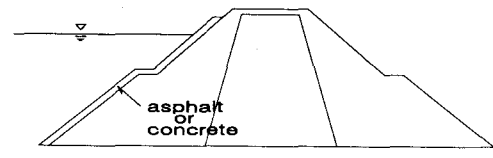
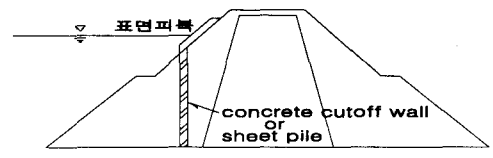
구분	Asphalt Facing	Concrete Facing	Concrete cutoff wall	Sheet pile
개요도				
공법개요	· 상류사면에 불투수층을 형성하여 댐체의 침투 및 침식작용에 저항함으로써 차수효과를 기대하는 공법	· 상류측 심벽에 인접하여 불투수층을 형성하여 댐체의 침투 및 침식작용에 저항함으로써 차수효과를 기대하는 공법	· 상류측 심벽에 인접하여 불투수층을 형성하여 댐체의 침투 및 침식작용에 저항함으로써 차수효과를 기대하는 공법	· 상류측 심벽에 인접하여 불투수층을 형성하여 댐체의 침투 및 침식작용에 저항함으로써 차수효과를 기대하는 공법
장점	· 불용성, 내알칼리성이므로 수질 오염방지 · 정착성이 크고 방수성이 풍부하며 내구성이 우수함	· 실용성이 크고 다른 재료에 비해 효과가 확실함 · 차수효과가 우수함	· 차수, 응력차단, 세굴방지 등의 효과 우수 · 기초지반의 누수방지, 주위 지하수위 변동에 따른 안정성 확보	· 차수, 응력차단, 세굴방지 등의 효과 우수 · 기초지반의 누수방지, 주위 지하수위 변동에 따른 안정성 확보
단점	· 고온이 되면 액체화되거나 부풀어오를 가능성이 있으며 일광이나 기타 노후화 현상을 받기 쉬우므로 보호층이 필요	· 사면과의 정착력이 부족하여 시공시 주의 · 재료 강성차이로 인해 댐체와 Facing의 상이한 거동 발생 가능 · 사면에 지지층 축조, 차수그라우팅 실시 등 시공상 문제점 내재	· 재료의 불균질성 등으로 인하여 저수위 변동에 따른 댐체의 침식 및 토립자의 이동가능성이 있어 사면부에 대한 피복 필요	· 시공시 진동함머 혹은 워터젯을 이용하므로 댐체의 안정과 시공요건에 대한 면밀한 검토 요구
적용실적	· Martin Gonzalo 댐 (스페인)	· Kingsley 댐 (미국)	· Balderhead 댐 (미국)	· Wister 댐 (미국)

표 4. 심벽제어공법

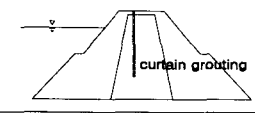

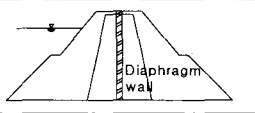
구분	그라우팅	흙 시멘트 혼합 차수벽	Concrete Diaphragm Wall
개요도			
공법개요	· 시멘트, 벤토나이트 등의 재료를 혼합하여 토입자 간극, 양반균열 등에 주입하는 공법	· 시멘트와 원지반 흙을 교반하여 코어 내부에 지중연속벽을 형성하는 공법	· 트렌치를 굴착한 후 지중에 연속적인 콘크리트벽체를 형성하는 공법
장점	· 시공실적이 많고 타 공법에 비해 간단하다. · 주입재의 구득, 취급, 조합 등이 용이	· 영구 보수보강 공법 · 굴착으로 인한 Weak zone의 함몰이나 Slurry의 유실이 없음	· 차수, 응력차단, 세굴방지 등의 효과 우수 · 기초지반의 누수방지, 주위 지하수위 변동에 따른 안정성 확보
단점	· 중력, 저압주입의 경우 숙련된 기술 요구 · 코어에 누수경로가 있을 경우 주입재 유입으로 필터층의 기능을 저하시킬 우려가 있음 · 용탈현상 발생	· 대형장비 사용으로 협소한 장소 시공곤란 · 설치심도가 깊어질수록 연속벽의 연속도 유지가 곤란함	· 대형장비 및 무대장비 사용으로 협소한 장소 시공곤란 · Slurry액에 의한 공벽유지를 위해 저수위 조절이 필요
적용실적	· Viddalsva (노르웨이) · El Isiro (베네수엘라) · Hills Creek 댐 (미국) · CUGA (이탈리아)	· Jackson Lake(미국) · Cushman (미국)	· Balderhead 댐 (미국)

표 5. 하류사면제어공법

구분	수직드레인에 의한 침윤세굴 방지공법
개요도	
공법개요	· 침윤세굴의 가능성이 있는 하류부에 구멍을 뚫어 필터재를 충전하는 방법
장점	· 누수로 인한 파이핑 방지 · 상, 하류간의 수두차 및 수평배수로로의 양면배수가 가능하므로 수평배수재의 부족한 배수능력을 보완하는 효과가 있음 · 침윤세굴에 의한 하류사면의 활동을 완화하는 효과가 있음
단점	· 현장여건에 따라 추가로 용지 매입이 요구됨
적용실적	· Arroyito 댐 (아르헨티나)

2.2.2 차수공법의 상세검토

<흙 시멘트 혼합 차수벽공법>

이 공법의 특징은 표 6.에서 상세히 설명되어 있는 것과 같이 시멘트 및 벤토나이트 등과 같은 재료를 원지반과 함께 혼합하여 지중연속벽을 만드는 공법으로 대상 댐에서는 Soil Cement Wall 공법이 채택되었다.

표 6. 흙 시멘트 혼합 차수벽 공법 비교

구분	Jet Grouting 계열	Soil Cement Wall 계열
공법개요	· 지반을 천공한 후 천공 Hole 내에서 고압의 제트분사장치를 이용하여 토입자를 파쇄시키면서 삭공한 뒤 대부분의 slime을 배출시키고, 시멘트 paste를 고압으로 분사, 지반내에 남은 토립자와 혼합시켜 원주형의 시멘트 고결체를 형성하는 고압분사 주입공법	· 다축 Auger를 이용하여 원지반을 천공한 후 선단으로부터 Cement Milk, Bentonite 등의 혼합액을 토출시켜 굴착도와 혼합하여 지중에 연속적인 벽체를 형성하는 공법
주입재료	· 시멘트 페이스트	· 시멘트 + 벤토나이트 + 혼화재
주입방식	· 초고압분사 방식의 노즐을 이용 · 주입재가 직접 공벽을 파쇄하도록 하여 시멘트 페이스트를 원지반과 교반, 혼합하는 방식	· 그라우팅 플랜트에서 혼합된 시멘트 용액을 Auger 선단에서 토출시켜 굴착과 병행하여 연속주입
사용목적	· 차수 및 지반보강	· 차수 및 지반보강
적용지반	· 시질토, 점성토	· 모든 토질
특징	· 소형장비 사용가능 · 개량 부위는 균질의 Soil Cement 기둥이 형성되어 강도가 크기 때문에 지반 보강 효과가 큼 · 차수용으로도 적용 할 수 있으며, 고강도 차수벽을 기대할 수 있어 내구성이 우수하고, 외력에 의한 충격 및 진동에 대해서도 저항력이 큼 · 시멘트 페이스트 주입 후 경화 시간이 필요하므로 유속 흐름이 빠른 자갈, 전석층에서는 주입재의 유실 발생 · 고압 분사로 인한 주변지반의 교란	· 개량심도에 따라 중형 및 대형장비가 필요함(50 ~ 70 tonf 크레인) · 높은 차수성을 나타내며, 점성토에서도 양질의 연속벽체 형성이 가능함 · 연속벽 자체를 토류벽으로 사용 가능할 정도로 강도가 우수하며, 목표강도 조절이 가능함 · 저소음, 저진동 공법이며, 시공속도가 빠름 · 다축 Auger를 이용하여 중첩시공되므로 연속벽체의 연직도 및 이음부의 불량률이 적음 · 저압 주입으로 원지반과 혼합, 교반하므로 주변지반의 교란이 거의 없음
추천안	-	○

<침투 그라우팅공법>

이 공법의 특징은 지반에 시멘트 혼화물을 주입하여 주입 대상지반을 균질하게 개량시켜서 차수벽을 만들거나 혹은 연약지반을 보강하는 공법으로 대상 댐에서는 마이크로 시멘트 계열의 공법이 채택되었다(표 7.).

표 7. 침투 그라우팅 공법 비교

구분	물 유리 계열	마이크로시멘트 계열
공법 개요	· 시멘트, 규산소다, 벤토나이트, 그리고 혼화재 등을 혼합한 현탁액을 지반에 주입시키는 공법으로 지중에 큰 공극은 시멘트로 채우고 작은 공극은 규산소다로 침투시켜 gel화 시키는 공법	· 기존의 시멘트계열 재료를 개량한 마이크로시멘트계열과 혼화재 등을 혼합한 현탁액을 이용하여 1.5 shot 또는 2.0 shot으로 지반에 균일하게 침투주입시키는 저압공법
재료	· 시멘트 + 물 유리 + 혼화재	· 마이크로시멘트계열 + 혼화재
기대 효과	· 차수효과 : $k = 10^{-3} \sim 10^{-6}$ cm/sec · 개량범위 : 직경 = 0.8 ~ 1.0 m	· 차수효과 : $k = 10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/sec · 개량범위 : 직경 = 0.8 ~ 1.2 m
장점	· 모든 토질에 적용 가능 · 저압 주입으로 지반교란 없이 원지반 상태에서 시공하므로 안정성 우수 · Gel time 조절로 대수층에서 차수효과 양호 · 대공극 지층 및 지하수 유속이 빠른 지층에서 gel time 조절에 의한 시공효과 양호	· 모든 토질에 적용 가능 · 마이크로 시멘트를 이용하므로 세사층에서도 침투주입효과 및 차수효과 양호 · 마이크로 시멘트를 이용하므로 강도가 조기 발현되며, 차수효과 양호 · Gel time 조절이 용이하여 유속이 빠른 자갈, 전석층에서도 주입재 유실 없이 주입 가능 · 시간경과에 따른 내구성 저하가 거의 없음
단점	· 물유리(규산소다)의 용탈현상에 의해 시간경과에 따라 내구성이 저하됨 · 저압주입으로 주입시간이 다소 느림 · 심도 40m 이상의 경우 사력층에서는 주입효과가 떨어지며, 양생시 수축현상이 발생 · 점토층에서 맥상주입의 가능성이 있음	· 심도 40m 이상의 경우 사력층에서는 주입효과가 떨어짐 · 점토층에서 맥상주입의 가능성이 있음
추천안	-	○

2.2.3 차수공법의 상세검토 결과

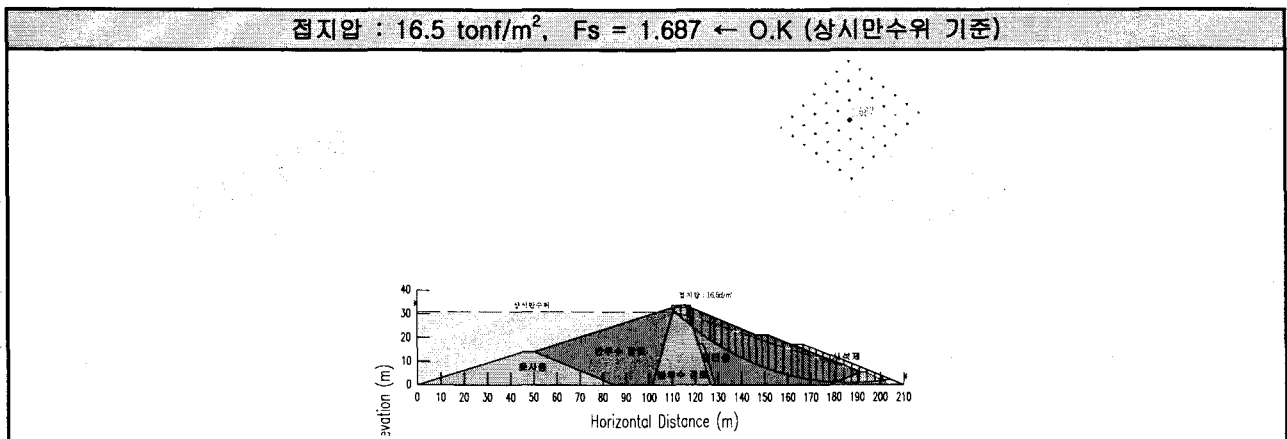


그림 5. 시공 장비에 대한 체체의 안정성 검토 결과

대상 댐체의 차수벽 공법으로 선택된 SCW공법은 다축 오거를 사용하여 연속벽체의 형성이 유리하고, 또한, 오거를 이용해 원지반과의 시멘트 용액을 혼합하여 교반함으로써 주변지반과의 교란을 최소화할 수 있으므로 적용성이 우수한 공법으로 판단되나, 70 Ton이상의 크레인을 사용해야 됨으로서 안정성 확보를 위

해 그림 5.와 같이 안정해석을 수행한 결과 특이점은 발견되지 않았으며 안전측에 있는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 침투 그라우팅공법에서는 장비의 특성상 소형인 관계로 안정해석은 필요 없었으며 침투성과 내구성 및 저압 주입으로 주변지반의 교란을 최소화하는 것이 가능하다는 것으로부터 마이크로 시멘트 계열의 공법이 가장 적합한 것으로 사료되었다.

### 2.3 보강 범위의 검토 및 대책

#### 2.3.1 조건별 침투류 해석

보강심도를 결정하기 위하여 그림 6.에서와 같이 기반암 상단 깊이까지 심벽 보강을 하는 경우와 EL. 30.50m 이상까지만의 경우에 대하여 범용 FEM 해석을 수행하여 보강심도 결정에 활용할 수 있도록 했다. 그 결과 전수두, 압력 수두 및 침윤선 공히 두 경우가 유사한 결과를 보이는 것을 알 수가 있었다(그림 7.).

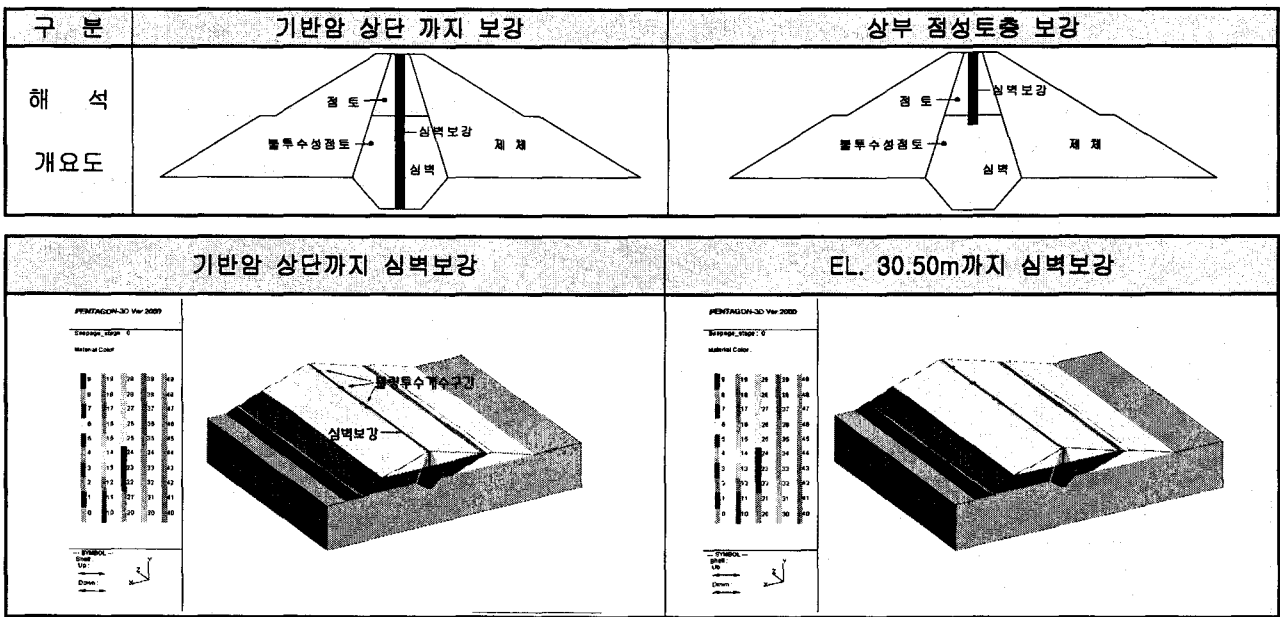


그림 6. 보강 심도 검토 범위

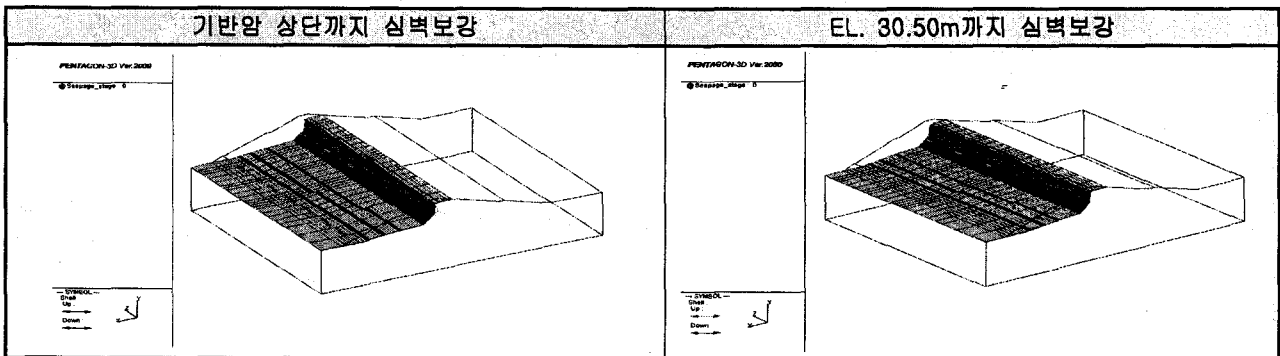


그림 7. 침윤선의 검토 결과

또한, 보강 폭을 결정하기 위하여 먼저 시행된 보수공사 이후에 수행되어진 현장투수계수 시험을 근거로 불량한 투수계수 구간을 모델링하여 심벽의 종방향 보강 폭을 매개변수로 하여 해석을 실시하였으며, 전단면을 차수하는 경우와 불량 투수계수 구간을 중심으로 부분 차수하는 방안에 대하여 그림 8.에서 나타낸 것과 같이 5 경우로 구분하였다.



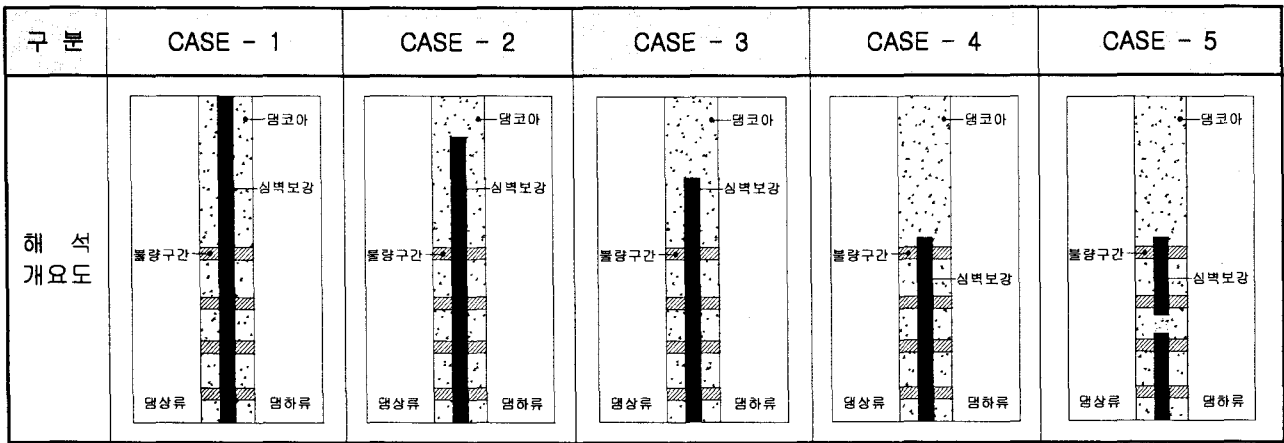


그림 8. 경우별 보강폭의 범위

### 2.3.2 검토 결과

보강심도를 매개변수로 한 침투류 해석결과는 보강심도를 상부 점토층(EL. 30.5m)까지만 하여도 댐의 안정성은 확보되어지는 것으로 나타났으나, 본 대상 댐은 시공 후 30여년이 지났고, 이미 수행되어진 시추조사결과 댐의 기초압반에 풍화가 진행되어져 보수공사에서는 기반암의 풍화대까지를 보강심도로 결정하였다.

또한, 보강 폭을 매개변수로 하여 5가지 경우로 구분하여 침투류해석을 실시한 결과, 댐 종방향 전체 연장에 대하여 보강을 실시한 결과와 불량투수계수구간만 보강한 결과는 큰 차이를 나타내지 않아 수치 해석 상으로는 불량투수계수 구간만 보강하여도 댐의 안정성은 확보될 것으로 판단된다. 그러나 이미 실시한 전기비저항탐사결과, 댐 심벽 전체에 걸쳐 낮은 비저항값을 나타내고 있으며, 좌안에 있는 양호한 투수계수구간도 낮은 비저항값을 나타내고 있다. 이는 이미 시행된 보수공사 때문인 것으로 판단되며 향후 시간의 경과에 따라 내구성이 저하될 것으로 예상되어지므로 영구적인 안정성 확보를 위해 본 보수공사는 댐 종방향 전체 연장에 대하여 보강을 실시하는 것이 적합할 것으로 판단했다.

그리고, 기반암 풍화대를 포함한 댐의 심벽보강을 위해 심벽주변의 교란을 최소화 할 수 있으며, 시공성이 우수한 침투그라우팅공법을 댐 종방향으로 만수위 EL.43.900m 이하의 전체 연장에 2열로 실시하며 불량투수계수구간으로 판단되는 구간(Sta.3+10~Sta.4+10, Sta.6+15~Sta.8+10)은 연약 포화대가 발달되어 침투그라우팅의 효과가 저하될 수 있으므로 이 구간에 대해서는 침투그라우팅과 병행하여 2열의 SC W1 계열 공법을 적용하는 것으로 계획하였다. 또한, Sta.No 4+10 ~ 6+15 구간은 Window 현상 발생을 배제하기위해 중앙에 침투그라우팅 1열을 추가하여 3열의 그라우팅을 실시하는 것으로 하였다(그림 9.참조).

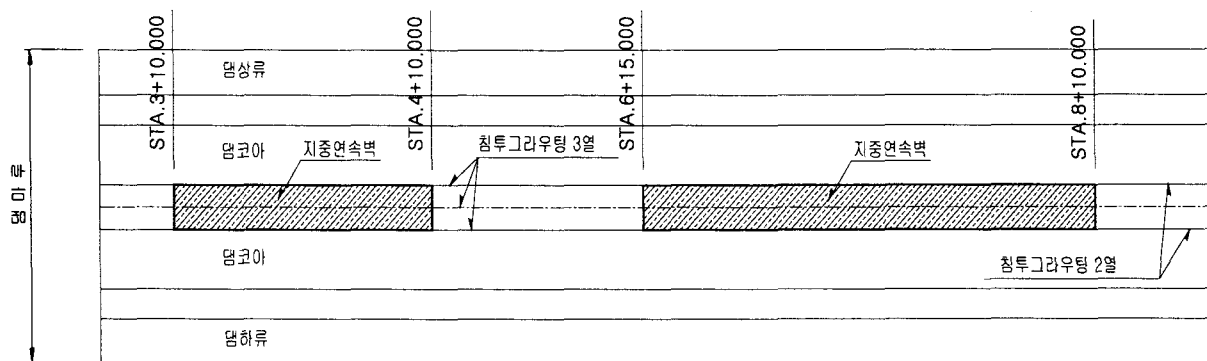


그림 9. 보강개요도

### 3. 실시 설계

#### 3.1 Soil Cement 지중 연속벽

대상 댐은 기존의 구조물에 대한 보수·보강공사로서 현장의 여건을 충분히 반영하여 시공 및 설치로 인한 제체의 훼손이나 변형이 최소화되도록 하여야 한다. 따라서 시공 및 설치를 위한 대형장비의 선정에 있어서 진출입이 가능하고 현지 적용성이 뛰어나야 하며, 댐체의 굴착, 변형이 없이 시공 가능한 것으로 운용하는 것이 무엇보다도 중요한 요인이라 할 수 있다. 그림 10. 과 그림 11.은 계획중단면도 및 표준단면도를 나타내고 있다.

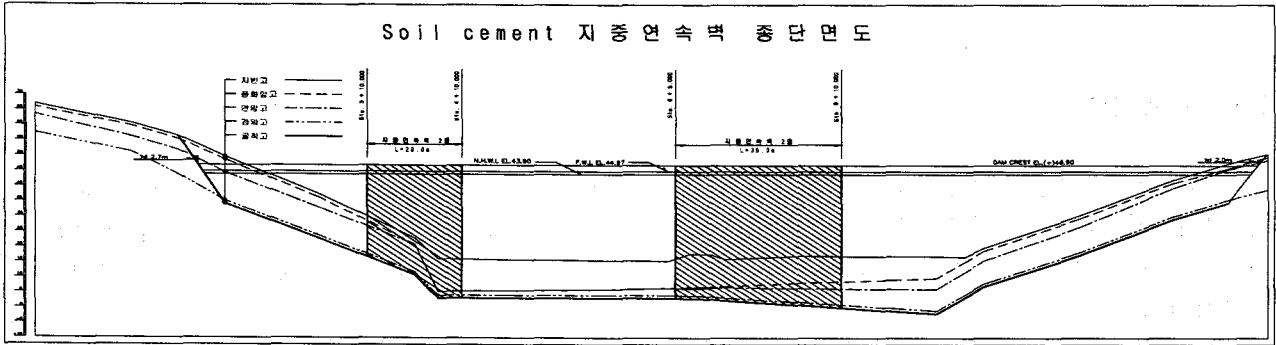


그림 10. Soil Cement 지중연속벽의 중단면도

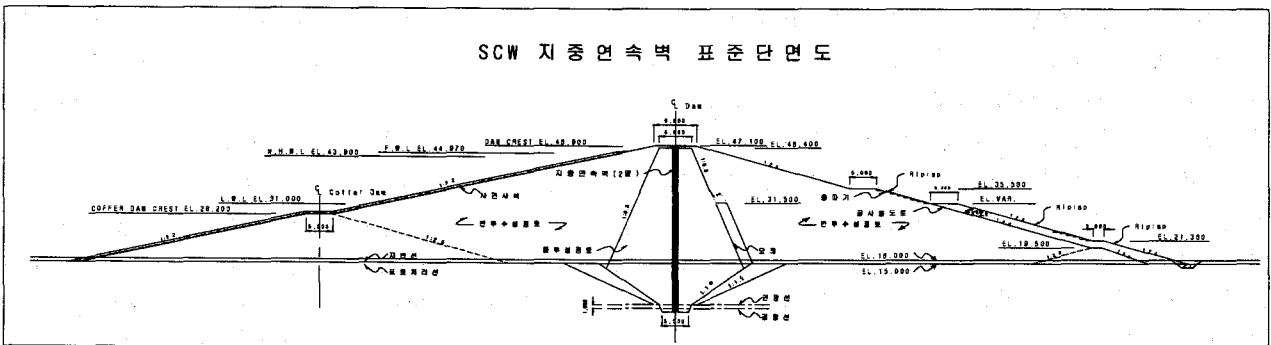


그림 11. Soil Cement 지중연속벽의 표준 단면도

#### 3.2 침투 그라우팅

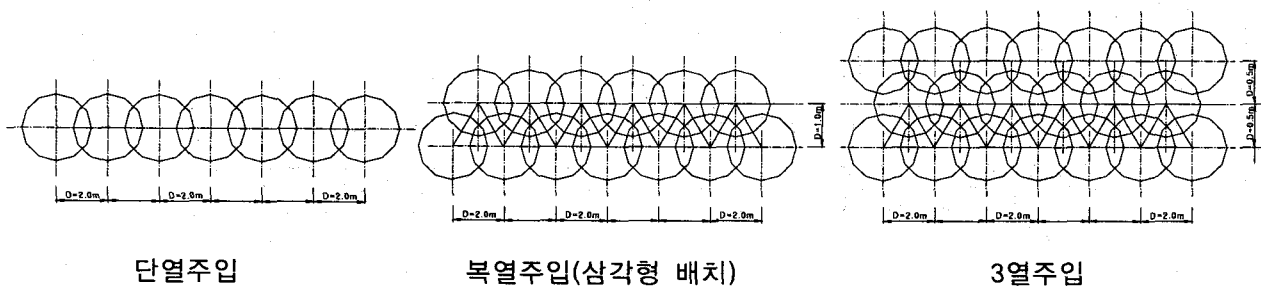


그림 12. 침투그라우팅의 주입공 배치도

대상 댐에서의 침투그라우팅의 범위는 상시만수위를 기준으로 하여 기준선 이하의 전면에 대하여 시행



현재 운용중인 대상 댐은 중심코아형 흙댐으로서 상류사면은 1:3.2의 사면경사에 전면은 콘크리트 블록으로 처리되었고, 하류사면은 1:2.5의 경사사면으로 EL.35.50m와 EL.19.00m에 5.0m의 소단과 2.0m의 Toe소단을 두었다. 또한, 상세 외관조사의 결과 하류사면은 동물에 의한 구멍, 우수에 의한 댐체 주변의 침식 및 세굴로 인한 외관 및 유지관리상의 어려움이 발생하는 것으로 조사되어 이에 대한 보수·보강방안으로 하류 사면에 돌붙임을 계획하고 아울러 우수배제 계획도 수립하였다. 또한, 그림 14.는 하류 사면보강의 표준단면도를 나타내고 있고 그림 15.는 이 도면에 따라 시공 중인 전경을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

Teton댐은 미국 아이다호에 위치한 높이 405피트의 중앙심벽형 록필댐으로 1972년에 착공하여 1975년에 완공된 후에 1976년 파괴되어 많은 인명과 재산상의 피해를 가져온 악명 높은 댐으로 이 붕괴 사고가 댐 건설공학자 혹은 유지 및 운영 관계자들에게 반면교사로서 현재까지도 확실하게 자리매김하고 있는 것은 주지의 사실이다. 다행히도 우리나라는 지층의 구조상, 혹은 양질의 댐체체의 재료의 획득의 용이성 등에 의해 위에서 언급한 것과 같은 초대형의 참사는 지금까지 발생한 적이 없는 것으로 알고 있다. 그러나, 예단할 수 없는 것은 국지성 호우의 증가와 댐의 노후화 등에 의한 위험인자가 증가하는 것도 주지의 사실이다. 따라서, 본 논문에서는 우리나라에서 좀처럼 획득하기 어려운 누수가 발생하는 대댐의 예를 인용하여 조사부터 시공까지의 모든 과정을 사실적이고 또한 학문적인 접근을 통해 성공적으로 수행한 예를 소개하여 앞으로 유사 사고가 발생할 경우에 대비토록 하는데 그 의의를 두었다.

또한, 댐의 수명은 타구조물에 비하여 매우 긴 편이고, 시간이 지남에 따라 노후화한다는 사실을 감안한다면 최소한도 현재의 안정상태가 확보될 수 있도록 지속적인 안정성의 확인과 보강이 필요하며 또한, 본 논문에서도 알 수 있는 바와 같이 설계와 시공에 있어서 부실한 부분이 많았다면 아무리 많은 경비를 들여 보강한다고 하여도 A급 수준의 댐으로 유지시키는 것은 절대로 불가능하다. 따라서 댐의 본래의 기능 및 안전이 유지되도록 하기 위해서는

- 1) 일정한 수위를 유지하기 위한 면밀한 관찰이 필요하며,
- 2) 여러 종류의 매설 계측기에 의한 주기적인 계측 데이터의 비교분석이 절대적으로 중요하며, 특히, 노후화된 댐의 경우에는 매설계기들이 작동하지 않거나 오동작할 우려가 많은 만큼 이 상황에 대한 능동적이고 적극적인 대응이 요구된다고 할 수 있다.
- 3) 또한, 분석결과 우려할 만한 상황의 발견시는 즉시 운영 수위를 낮추고 현상황을 숨김없이 공개함과 동시에 본 논문에서 인용한 것과 같은 절차에 따라서 국지적인 혹은 전체적으로 보수 및 보강공사를 수행하는 것이 무엇보다도 중요하다 하겠다.

#### 참고문헌

1. Alberro, A. J. (1977a), "Effects of Interaction in Earth-Rockfill Dams" presented at Specialty Session 8, Deformation of Earth-Rockfill Dams, Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, pp. 1-18.
2. Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure(1976), "Report of Failure of Teton Dam", U.S. Government Printing Office, Washington, D.C..
3. Kulhawy, F. H., and Gurtowski, T. M.(1976), "Load Transfer and Hydraulic Fracturing in Zoned Dams", Jour. of the Geotechnical Eng. Div., ASCE, Vol. 102, No. GT9., pp. 963-974
4. Terzaghi, K.(1943), "Theoretical Soil mechanics", J. Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y..
5. Sherard, J. L.(1985), "Hydraulic Fracturing in Embankment Dams", Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, Proceedings, ASCE National Convention, Denver, Colorado, pp. 115-141.