

수위가 변동하는 횡댐의 안정성 해석(I)

— 침투류 해석을 중심으로 —

Seepage Analysis of Rock-fill Dam Subjected to Water Level Fluctuation

이 대 수*

Lee, Dae-Soo

Abstract

The Chungpyung Dam is a 16 years old rock-fill dam for a pumped storage hydro-power plant, located in the middle of the Korean Peninsula. Since the dam is subjected to the daily water level fluctuation, such as rapid drawdown and refill, thus inducing a structural impact on the behavior of dam body, it draws attention of many engineering concerns. Traditionally, steady-state analysis was employed to investigate the seepage in the dam body, but in this study the seepage analysis was numerically performed by 2-D FEM transient analysis. As a boundary condition for an analysis, the water level fluctuation was incorporated to simulate the daily change. As a result, the various seepage phenomena such as hydraulic gradient, seepage vector, and pore water pressure distribution were quantified at the corresponding time of interest as the water level rises and recedes. The seepage flux was also estimated and compared with the measured data which were both acceptable considering design criteria. The result proves that there is no sign of hazardous sources contributing to the possibility of piping, internal erosion and excess leakage through the dam body.

요 지

한반도 중부지역에 위치한 청평양수발전소의 상부저수지는 준공후 16년이 경과한 사력댐으로 매일 수위 상승 및 저하를 경험하므로써, 제체의 거동이 일반 댐과는 달리 여러 가지 지반공학적인 관심을 불러 일으키고 있다. 침투류에 대한 안정성을 판단하기 위하여 종래에는 심벽만을 대상으로 하여 저수지의 수위변동을 고수위 및 저수위의 두 경우로 고정시킨 정상상태의 해석을 주로 사용함에 따라 임의의 시간에서의 전체적인 침투현상 규명이 어려웠으나, 본 연구에서는 수위변동을 경계조건에 반영한 2차원 비정상류 유한요소해석을 댐 전체단면을 대상으로 수행하여 정상상태의 해석과 비교하였으며, 수위 변동에 따라 해당시간에서의 동수 경사, 침투력 벡터, 간극수압 등을 정량적으로 규명하였고, 산정된 침투수량을 계측치와 비교하였다. 그 결과 본 댐은 파이프, 내부 침식 또는 제체 내부로의 투수 등에 대하여 안전하다고 판단된다.

Keywords : Rock-fill dam, Core, Seepage analysis, Transient-flow

* 정희원, 한국전력공사 전력연구원 과장

1. 서 론

청평 양수발전소 상부댐은 건설후 현재까지 약 16년이 경과한 댐으로써, 1970년대 들어 급격한 경제성장으로 전력수요가 급증함에 따라 대응량의 화력 및 원자력 발전소가 활발하게 건설되어, 침투부하(peak load) 조절 및 대응량 발전소의 부하 급변에 즉시 대응할 수 있는 양수 발전소의 필요성이 요구됨에 따라 건설되었으며, 이는 우리나라 양수식 발전소 개발의 효시란 점에서 커다란 의의를 가진다고 볼 수 있다.

양수발전이란 보통 전력수요가 급증하는 낮 시간에 발전하기 위하여 저수지의 물을 소비하여 수위하강을 일으키고, 전력이 비교적 여유있는 심야에 하부 저수지에서 물을 양수(pumping)하여 이후의 발전에 대비하는 방식으로, 전력의 안정적 공급에 대단히 중요한 역할을 담당하고 있다.

청평 양수발전소 상부댐은 사력댐으로서 제체의 내부, 기초지반, 댐의 양안부 등을 통하여 물의 이동이 있을 수 있으며, 이러한 침투류는 사력댐의 안정에 있어서 여러 가지 문제를 야기할 수 있는 데, 간극 수압이나 침투력의 발생 등에 따른 전단저항의 감소는 댐의 안정성 평가에 대단히 중요하다.

특히 본 댐은 만 하루동안에 수십 미터의 수위 하강 및 상승이 반복되어 지고 있어, 이러한 수위변동은 제체의 거동(변위, 침투, 응력상태)에 상당한 영향을 미치리라 예상되어 많은 지반공학적 흥미를 불러 일으킨다. 따라서 본 댐의 침투에 대한 안정성을 검토하기 위해서는 시간별로 수위변동에 따른 침투류의 자유수면, 수두, 침투유량, 동수경사 등에 대하여 검토하는 것이 반드시 필요하나, 종래에는 심벽만을 해석대상으로 하여 저수지의 수위변동을 고수위 및 저수위의 두 경우로 고정시킨 정상상태(steady-state)의 유한요소해석을 주로 사용하여 왔다.

이러한 해석은 실제 댐에서 발생하는 침투현

상을 임의의 시간별로 규명하는 데에는 부족함이 많고, 심벽 이외의 지역에서의 침투 현상에 대해서 정보를 제공하여 주지 못하는 결점이 있다. 또한 심벽만을 해석하기 때문에 투수계수가 상당히 차이가 나는 재료(filter, rock)가 해석에 포함되었을 때와는 해석 결과의 차이가 예상될 수 있다.

본 연구의 목적은 이와 같은 문제점을 극복하고자, 댐 전체 단면을 해석 대상으로 한 2차원 비정상류(transient flow) 유한요소해석을 수행하여, 정상상태의 해석 및 실측치와 대비를 통하여 해석의 정밀도를 향상시키고, 관심 시간에서의 여러 가지 침투 현상(동수경사, 침투력 벡터, 간극수압 분포, 침투수량)을 규명하여 침투류에 대한 댐의 안정성을 평가하는 데에 있다.

2. 댐 시공 및 유지관리 현황

2.1 댐 현황

청평댐 지역은 행정구역상 경기도 가평군 가평읍에 속한다. 기초 지질조사시 보고된 바로는 상부저수지 지역은 산악지역으로 주위가 둘러 쌓인 분지형 지형이므로 저수지 건설지점으로는 적합한 곳으로서 결정질 석회석과 각섬질 편암으로 형성되어 있다.

본 지역의 지질구조는 현장부근의 지형지세로 보아 일반적 주향방향은 그 경사도가 큰 NNW-SSW로 추정된다. 물리탐사와 시추시험 결과로 지적된 바로는 이 지역에는 커다란 단층지역이나 파쇄대가 없는 것으로 나타났다. 암의 투수성은 10 lugeon(깊은 부위에서 1 lugeon 까지 감소) 미만이며 코아축조 기초암으로는 양호한 편이다.(한국전력공사, 1981)

주댐의 형식은 지질 및 지형으로 보아 rockfill과 콘크리트 중력식댐 양자가 다 적합하다고 보고되었으나 축조재료의 구입면에서 경제성이 있는 중앙심벽형 rockfill댐으로 결정되었다. 댐의 높이는 기초암에서 약 62m이

며 천단 길이는 290m, 천단폭이 10m이다. 댐의 심벽부와 저수지 주변은 기반암까지 굴착하고 커튼그라우트를 실시하여 누수를 방지토록 설계되었다.(한국전력공사, 1981)

저수지의 유역면적은 대단히 작기 때문에 여수로는 별도로 시설하지 않았고, 유입수는 순환도로변에 설치될 측구로 배수시키거나 H.W.L 보다 0.7m 높은 EL.535.7m까지 저수할 수 있도록 계획되었다. 댐 축조와 관련한 공사 현황은 표 1과 같다.

한편 댐의 기본 단면(최대 단면)은 그림 1과 같이 하류쪽으로 약 10° 정도 경사져 있고, 최대 단면은 댐축 중앙부에 위치하고 있으며, 댐의 일반적 재원은 표 2와 같다

표 1. 청평양수발전소 상부댐 공사현황

구분	기록	비고
실시설계	일본공영	댐기초굴착공사 : 1976. 8. 3 댐축조개시 : 1977. 9. 15 댐축조완료 : 1979. 7. 31 담수개시 : 1979. 10. 10
위 치	강기도 가평군 가평읍	
시설용량	40만KW(20만KW×2기)	
착 공 일	1975. 12	
준 공 일	1980. 4	
성격유효낙차(m)	473	
총저수량	2,677,000 m ³	
유효저수량	2,300,000 m ³	
만 수 위(m)	EL.535	
저 수 위(m)	EL.514	
이용수심(m)	21	

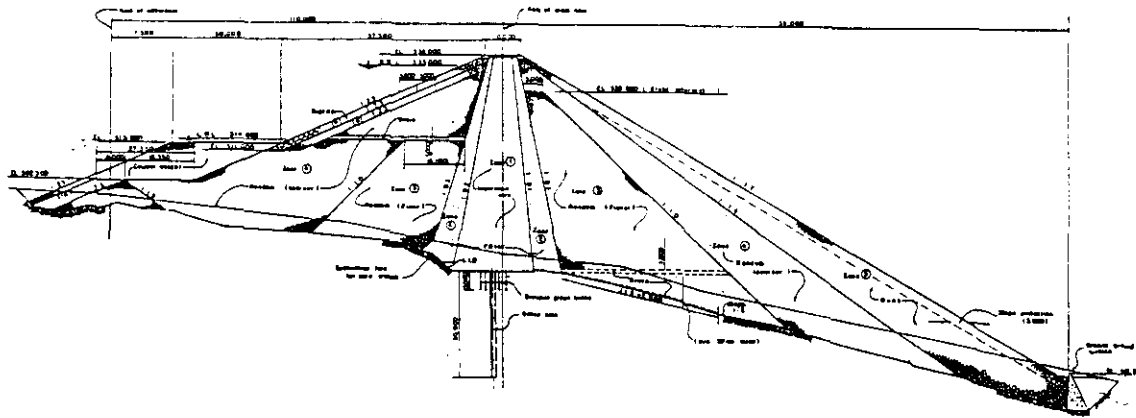


그림 1. 댐 단면도

표 2. 댐의 재원

항 목	재 원
형 식	중양차수벽형 사력댐
높 이	62M
천 단 길 이	290M
천 단 폭	10M
천 단 표 고	EL. 538.0M
상류측구배 : 표 면	1 : 2.3
코 아	1 : 0.2
Filter	1 : 0.3
하부측구배 : 표 면	1 : 1.7
코 아	1 : 0.1
Filter	1 : 0.2

본 댐의 축조재료는 코아, 윗타, 랜덤 및 암의 4종류로서 기본 설계시 코아와 윗타는 시험에 의하여 지반 특성치가 산출되었고, 랜덤과 암은 암질이 소양강 댐의 축조재와 거의 같아 그 불성치를 표 3과 같이 그대로 사용하였다. (한국전력공사, 1981)

2.2 댐 유지관리 현황

2.2.1 간극수압계 계측 현황

코아부의 성토 공사중 시공 속도 관리와 담

표 3. 댐 축조재료의 설계치

항 목	코 아	필 타	랜덤재료	암
비 중	2.72	2.65	2.65	2.65
함 수 비(%)	21.0	6.0	4.0	2.0
단위중량(t/m ³) : 건조	1.65	1.95	1.85	1.80
: 습윤	2.00	2.07	1.92	1.84
: 포화	2.04	2.21	2.15	2.12
: 침윤	1.04	1.21	1.15	1.12
투수계수(cm/sec)	5×10^{-6}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	-
접 착 력(t/m ²) : 건조	4.0	-	-	-
: 포화	1.0	-	-	-
내부마찰각(tanφ) :	0.4	0.65	0.60	0.9

수 또는 운전 개시 이후의 수위 상승에 의한 거동 파악과 rock부나 필터부의 수위 급강하 시, 잔류간극수압 계측을 위하여 간극수압 계기를 설치하도록 계획되었다.

이에 따라 간극수압계 (pore pressure meter) 20개가 중앙 단면지역에 코아 및 필타 지역을 중심으로 층별로 매설되었으며 그 매설 방법은 축조면에서 부터 깊이 1m를 굴착하여 가는 모래를 10cm 포설하고 설치하였다. 계측기 주위는 가는 모래로 10cm 덮고 물을 주어 다진 뒤 나머지 부분은 기존 축조재료로 충분히 다졌다. 이렇게 매설된 각각의 기기와 연결 cable은 한 곳으로 모아 댐 우안 EL.538m에 위치한 측정실까지 연결되어 이 곳에서 측정기에 의하여 측정되도록 하였다. 그러나 댐 공사 후 많은 시간이 흘러 간극수압계가 고장난 것이 많아 현재 계측자료를 전혀 활용할 수 없는 상황이다.

2.2.2 누수량 측정장치

댐 누수측정장치는 제체 및 기초지반과의 접촉부 등을 통과하는 유량을 주로 측정하는 것으로서, 하류사면 최저부에 위치한 chamber 내의 weir로 넘치는 물을 측정하여, chamber와 연결된 Cable을 댐 우안 EL.538m의 측정실까지 유도하여 이곳에서 측정치가 기록되도록 설계되었다.

현재는 누수량을 하류부 측정 chamber에서

직접 정기적으로 측정하고 있다. 연도별 누수량 평균치는 표 4와 같이 30~60 ℓ/min의 범위내에 있다. 이 수치는 허용치인 104 ℓ/min보다 작은 값으로서 국내의 다른 댐의 경우인 100~200 ℓ/min의 누수량(한국전력공사, 1993) 보다도 매우 작은 수치로서, 누수량에 대하여는 청평댐의 시공상태가 매우 훌륭했음을 말해 주고 있다. 여기서 허용치는 댐길이 100m 당 60 ℓ/min(건설부, 1993) 으로서 청평댐의 댐길이 290m와 단면감소계수 0.6을 감안한다면 $60 \text{ ℓ/min} \times 290 / 100 \times 0.6 = 104 \text{ ℓ/min}$ 으로 산출된 값이다. 이 누수량에는 물론 제체, 기초지반 및 양안 접속부를 통과하는 침투수량 이외의 강우나 강설에 의한 수량이 포함되었으므로, 계측시의 기상상태에 따라 수량의 차이가 발생할 수 있다.

표 4. 누수량 계측치

년도	누수량(ℓ/min)	비 고
'92	24.3	4년 평균 : 42.5 ℓ/min
'93	62.2	
'94	52.3	
'95	31.3	

2.2.3 저수지 수위 운영

청평 양수발전소 상부댐은 야간(보통 오후 10시에서 익일 오전 7시까지)에 pumping하여

고수위인 EL.535.0m까지 물을 채우고 주간(보통 오전 8시에서 오후 10시까지) 발전시 저수위 EL.514.0m까지 물을 낮추며 보통 여름철엔 EL.516.0m, 겨울철엔 EL.519.0m 정도까지 낮추어 운영하고 있다. 또한 2대의 발전기중 1기로 발전시 물이 저수위까지 저하되는 데에 소요되는 시간은 보통 12시간이며 2기로 발전시에는 6시간이 소요된다.

3. 침투류 해석

3.1 비정상류 해석 이론

3.1.1 배경

유한요소법을 이용하여 침투류를 해석하는 방법은 복잡한 해석영역의 초기조건 및 경계조건에서도 비교적 적용이 용이하여 지금까지 널리 이용되고 있으며 Taylor와 Brown(1967)에 의해 소개되었다. 이들이 사용한 방법은 자유수면 (phreatic surface)을 결정하기 위하여 상부 경계에 위치한 유한요소들을 압력수두가 0이 될 때까지 조정하여 계산하는 것이었다. 그러나 이 방법은 많은 계산 시간을 요구하고 수렴상의 문제를 야기시켰다.

Papagianakis 와 Fredlund(1984)는 Taylor와 Brown 방법의 많은 불편한 점들은 포화와 비포화 흐름을 동시에 고려함으로써 해결될 수 있음을 발표하였다. 그들은 자유수면의 위치를 고려하지 않고 전해석 단면을 유한요소로 만들어 압력수두가 0이 되는 부분이 지하수면임을 보여 주었고, 지하수면 상부는 (-)의 간극수압 지역이며 하부는 (+)의 간극수압지역임을 예시하였다.

아울러 Lam과 Fredlund(1984)는 종래의 정상류뿐만 아니라, 비정상류 상태를 해석에 포함시키므로써 침투류 해석의 활용도를 더욱 넓혔다. 여기서 정상상태란 흐름의 성질이 시간에 따라 변하지 않는 흐름으로서 해석이 단순하고 계산시간이 짧아 침투류 해석에 많이 사용되고 있으나, 수위가 급변하는 경우에서와

같이 시간별 침투 양상을 연속적으로 규명하는데에는 한계가 많다. 따라서 이런 경우에는 흐름의 성질이 시간에 대하여 변하는 비정상류 해석을 채택하는 것이 더 적절히 실제 조건을 반영하리라 믿어진다.

청평댐은 만 하루동안에 수십 미터의 수위하강 및 상승이 반복되어 지고 있으며, 이러한 수위변동은 제체의 침투현상에 상당한 영향을 미치리라 예상된다. 따라서 본 댐의 침투에 대한 안정성을 검토하기 위해서는 시간별로 수위변동에 따른 침투류의 자유수면, 수두, 침투유량, 동수경사 등에 대하여 검토하는 비정상류 해석의 적용이 적절하리라 판단된다.

3.1.2 흐름 방정식

정상상태에서의 포화 및 비포화토의 흐름방정식은 다음의 Darcy's law에 근거한다.

$$q = k i$$

여기서, q: 침투량

k: 투수계수

i: 동수경사 이다.

한편, 비포화 흐름 상태하에서 투수 계수는 상수가 아니라 포화의 정도에 따라 또는 수분의 함유 정도(체적함수비)에 따라 변화를 가지는 변수이다. 또 체적함수비는 간극수압의 함수이기 때문에 투수계수 역시 간극수압의 함수로 표현될 수 있다.

Lam과 Fredlund(1984)는 비정상류의 포화, 비포화 침투류를 나타내는 2차원 지배방정식을 전술한 흐름방정식을 기본으로 하고, 질량보존의 법칙과 체적함수비 및 불포화토의 응력상태 변화와의 관련성으로 부터 다음과 같이 유도하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \rho_w g m^2 \frac{\partial h}{\partial t}$$

여기서, k_{xx} , k_{yy} , k_{xy} , k_{yx} = 투수텐서

h = 전수두

m^2 = 저류 특성

g =중력가속도
 ρ_w =물의 밀도

3.1.3 유한요소 방정식

본 해석에 사용된 전산프로그램(SEEP/W)은 다음과 같은 유한요소 방정식에 바탕을 두어 침투류를 해석한다.

$$[C] \{h\} + [S] \{h_t\} = \{Q\}$$

여기서,

$[C]$ =the element characteristics matrix,

$[S]$ =the element storage matrix,

$$= \int_v \lambda [N] dv,$$

$\lambda = \rho_w g m^2$, $[N]$ =shape function matrix,

$\{h\}$ =the vector of nodal heads,

$\{h_t\}$ =the rate of change with time of the total nodal heads,

$\{Q\}$ =the nodal flow vector 이다.

한편, $[C]$ (element characteristics matrix)는 다음과 같이 표현된다.

$$[C] = \int_v [B]^T [K] [B] dv$$

여기서, $[K]$ =permeability matrix,

$[B]$ =유한요소 형상 matrix 이다.

예를 들자면, 정상상태의 경우 시간에 따른 전수두 변화율은 0이고 그 때 유한요소방정식

은 다음과 같이 간략화된다.

$$[C] \{h\} = \{Q\}$$

3.2 전산프로그램 소개

본 댐의 침투류 해석에 사용된 전산 프로그램의 특징은 다음과 같다.

· 프로그램명 : SEEP/W
 · 제작사 : Geo-Slope International Ltd., (Canada)

· 특 성

- 정상상태 및 비정상상태 침투류 해석
- 2차원, 축대칭, 평면해석 가능
- 초기 자유수면 가정 불필요 (포화토 및 불포화토의 특성을 동시에 반영하여 자유수면 결정)
- 침투유량 계산

3.3 비정상류 유한요소 해석

3.3.1 해석단면

유한요소 해석을 위한 기본단면으로는 그림 1의 댐 중앙부 최대단면을 그림 2와 같이 단순화시켜 사용하였으며, 지층은 실제 4종류이나 random층과 rock층은 물성치가 유사하다고 보아 동일한 지층(rock)으로 간주하여 모두 세

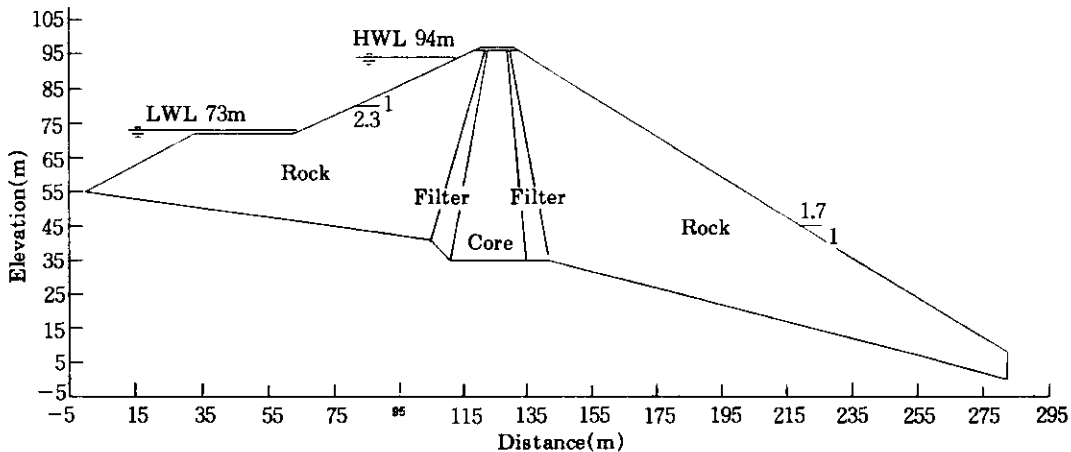


그림 2. 전산해석용 기본 단면

종류(core, filter, rock)로 구분하였다. 또한 고수위 및 저수위는 전산해석을 위하여 최저 지대인 하류사면부 toe의 기초지반을 기준으로 환산하였다. 한편, rock 및 filter는 투수계수가 core에 비해 상당히 커서, 종래의 경우(한국전력공사, 1993)에서와 같이 해석시 제외할 수도 있으나, 이 지역에서의 침투현상 규명도 관심사의 하나이며, 본 해석결과인 각 절첩에서의 수두 혹은 수압이 향후의 다른 안정해석(사면안정해석 및 응력해석)의 입력자료로 쓰일 수 있고, 해석시 사용한 유한요소망도 필요하다면 다른 해석시 사용될 수 있으므로 rock 및 filter도 침투류해석시 반영하였다.

3.3.2 수위 변동

종래의 침투류 해석에서는 수위를 일정하게 가정하여 정상류 상태의 해석이 주로 시도되어 왔으나, 본 해석은 비정상류 해석으로서 고수위 94.0m 일 때와 저수위 73.0m로 수위가 시간별로 변동하는 조건을 재현하였다. 즉 발전시에는 약 6시간후 물이 고수위에서 저수위로 급강하하며, 이후 비발전시에는 약 8시간동안 수위가 저수위에서 고수위로 상승하는 현상을 반영하였다. 따라서 아침 10시부터 오후 4시까지 6시간동안 수위가 고수위에서 저수위로 하강했다가, 그 이후로는 저수위를 8시간동안 유지하고 다시 자정부터 아침 8시까지 저수위에서 고수위로 수위가 증가하도록 수위변동을 단순화하였다.

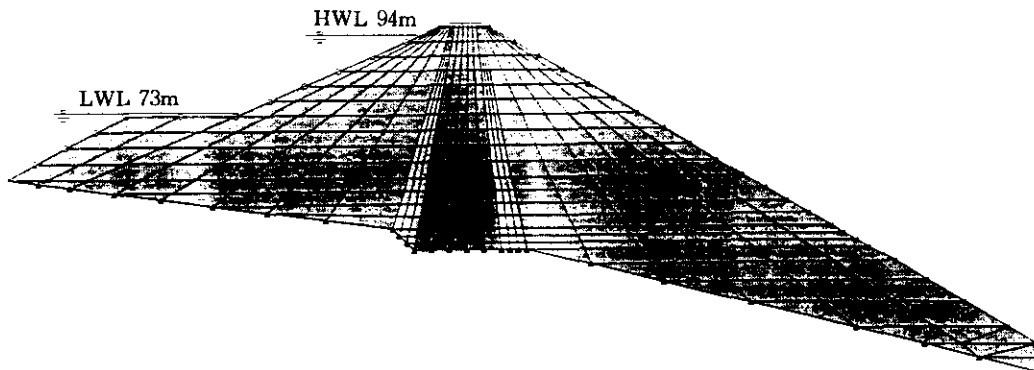


그림 3. 유한요소망

3.3.3 입력물성치

해석에 사용되는 지반 물성치로는 투수계수, 수평 수직투수계수비(k-ratio), 불포화토의 투수계수 특성, 불포화토의 함수비 특성 등이다. 그러나 현재 상태의 토질시험 자료가 확보되어 있지 않은 상태이므로 투수계수는 기본설계에서 사용되었던 자료(한국전력공사, 1981)를 준용하였으며, k-ratio는 1.0을 가정하였다. 또한 사용된 전산프로그램의 특성상 불포화토의 투수계수 및 체적 함수비를 정의하게 되어 있는 바, 프로그램의 매뉴얼에 예시된 유사한 투수계수를 가진 토질을 선택하여 기 정의된 특성 곡선을 변형하여 사용하였으며, 사용된 투수계수 및 기타특성은 표 5와 같다.

단, 여기서 체적함수비는 불포화토의 체적함수비 특성을 추정하기 위하여 계산된 최대값으로서, 최대 체적함수비는 공극비를 초과할 수 없으므로, 공극비=1-건조 단위중량/(물의 단위중량×흙의 비중)에서 산출된 공극비값을 사용하였다.

표 5. 댐 축조 재료의 투수 특성

댐 축조재료	투수계수 (m/hr)	k-Ratio	체적함수비 (%)
Filter	3.6×10^{-2}	1.0	0.26
Core	1.8×10^{-4}	1.0	0.39
Rock	3.6×10^{-1}	1.0	0.30

3.3.4 유한요소 해석

해석을 위한 유한요소 격자망은 그림 3과 같이 4절점 사각형 요소를 주로 사용하여 구성하였으며 절점수는 435개, 요소수는 398개이다. 경계조건은 그림상에 ●, ○, ▲로 표시되어 있으며 그 의미는 표 6과 같다.

또 현재 간극수압에 대한 계측자료가 전무한 형편이므로, 비정상류 해석을 위한 초기조건으로는 실제 시공상황(고수위로 담수후 양수발전 시작)과 부합되도록 수위가 고수위일 때를 택하였으며, 이를 정상류 해석하여 수두분포를 각 절점에서 구한 다음, 이 결과를 비정상

표 6. 침투류 해석을 위한 경계조건

표시	경계 조건	위치	비고
●	수두 = 0.0m	하류부 Toe	해석 단면의 최저점을 수두 0.0m 로 설정
○	수두 = $f_n(\text{time})$	상류사면	수두가 시간에 따라 변화함. 즉 수두가 6시간, 8시간마다 고수위 저수위를 반복
▲	유량 = 0.0 m ³ /hr	기초암반 및 하류사면	기초암반 및 하류사면 표면부는 물의 유출입이 없다고 봄.

류 해석의 초기 수두파일로 지정하여 시간별 해석을 실시하였다.

그러나 수두경계조건을 시간의 함수로 표현시, 발전소 준공후 지금까지의 수위변동을 그대로 구현하기에는 데이터 입력상 어려움도 있고, 해석결과가 크게 달라지지 않는다고 보아, 편의상 저수지 담수완료 후 약 한달동안 수위변동을 계속하다가 그 후로는 계속 현재까지 고수위를 유지했다고 가정하여 담수후 한달 경과후 시점에서의 수위 하강시, 저수위시, 상승시, 고수위시의 침투류 해석과 그후 약 15년이 경과한 시점 (1995년 6월)에서의 침투류 해석을 수행하였다.

한편 해석 결과를 검증하기 위해서는 간극수압 분포 자료가 우선적으로 확보되어야 하나,

현재 계측자료가 없는 관계로, 다른 댐의 해석 사례(삼랑진 양수발전소 댐, 소양강 댐)와 비교하여 간접적인 검증을 시도하였으며, 현장조사에 의한 실제 누수상황 조사 및 계측 누수량과 이론치의 비교를 통하여 침투류에 대한 안정성을 판단하였다.

그러나, 해석의 정밀도를 향상시키기 위해서는 향후 현장 시료의 채취 및 시험을 통하여 정확한 지반 물성치 및 간극수압 분포의 확보가 뒤따라야 할 것이다.

4. 해석결과

4.1 정상상태해석(초기조건 생성용)

비정상류 해석을 위한 초기수두파일을 생성

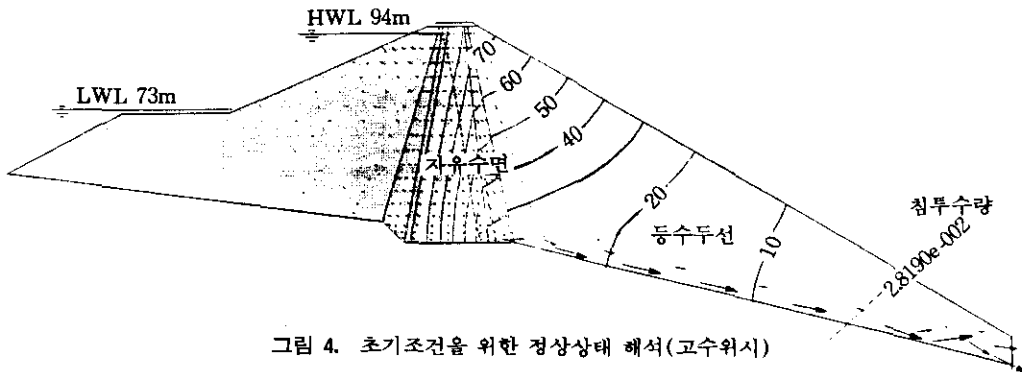


그림 4. 초기조건을 위한 정상상태 해석(고수위시)

하기 위해 고수위일때의 정상상태 해석을 수행한 결과는 그림 4와 같다. 자유수면(seepage line, 그림에서 심벽내의 점선으로 표시)은 코아내에서 코아의 경사와 동일하게 감소하고 있으며, 전수두(total head, 단위 : meter)는 상류사면에서는 물로 포화되어 있어 고수위(EL 94m)와 같은 수두를 유지하고 있으며 하류로 갈수록 급격히 감소한다. 침투수 벡터를 보면 침투류는 하류부 필터를 따라 Rock층의 저부로 주로 흘러 나가며, 제체를 통과하는 침투수량은 $2.82 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}$ 이다.

4.2 수위상승시

수위상승시(저수위와 고수위의 중간 높이)의 등수두선 및 침투수 벡터는 정상상태의 경우와 유사하다(그림 5. 참조, 단, 그림에서 상류사면 및 심벽 중심부를 관통하는 점선과 화살표는 침투수량을 산정하기 위한 절단면을 의미). 심벽을 통과하는 침투수량은 $1.99 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}$ 이고 자유수면의 위치는 상류사면에서 저수위 수위와 일치하며, 심벽내에서는 급격히 감소한다.

또한 종래의 심벽만을 대상으로 한 정상상태의 유한요소 해석에서와 같이 자유수면의 수두 손실이 2~5m 의 범위로 과소평가되는 경우(한국전력공사, 1993)와 비교할 때, 커다란 수

두 손실을 보이고 있으나, 이는 filter 및 rock등 투수계수가 상대적으로 대단히 큰 토층이 해석에 반영되어 침투력이 크게 나타나는 filter층에서 심벽의 물을 빨아 내리는 현상과, 기초지반이 하류쪽으로 경사를 이뤄 커다란 수두차이(자유수면을 하강시킴)를 발생시키고 있는 것으로 추정된다. 한편 수직방향의 동수구배는 코아 및 하류사면에서 발생하고 최대치는 하류부 filter 중앙부 부근에서 0.8 정도의 값을 갖는다.

4.3 고수위시

고수위시 자유수면의 형상은 그림 6에서와 같이 앞의 경우들과 동일하게 심벽내에서 감소한다. 등수두선은 앞의 경우들과 유사하며, 침투력은 상류부 고수위 부근에서 하향으로 발생하여 물이 상류사면에서 유입되는 형상이며, 일부는 수평 및 상향으로 발생하여 천단지역의 불포화토층으로 이동함에 따라 유효응력이 감소될 가능성이 있다. 정상상태의 해석(그림 4)과 이것을 비교해 보면, 침투수량은 정상류 해석에서 약간 크며, 정상상태에서는 하류부 기초지반과 심벽 및 필터를 통하여 침투가 발생하나 비정상류 해석에서는 하류사면의 침투보다는 상류사면에서 상대적으로 훨씬 큰 침투가 발생하고 있음을 보여준다.

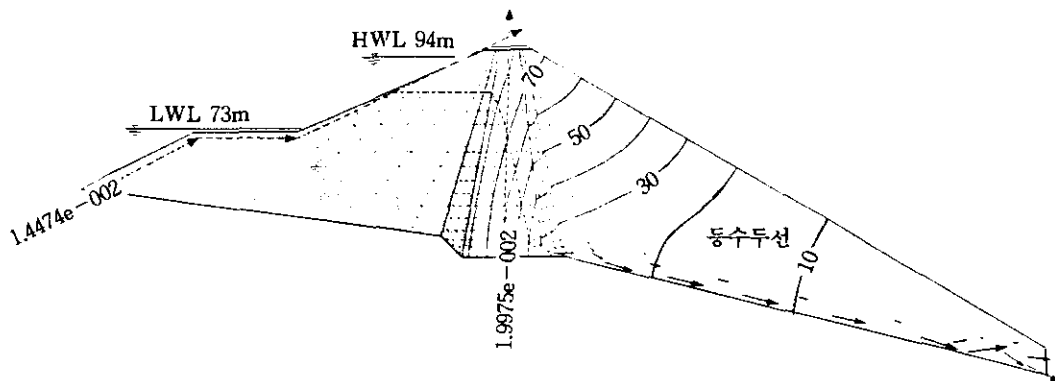


그림 5. 수위상승시 등수두선 및 침투수 벡터

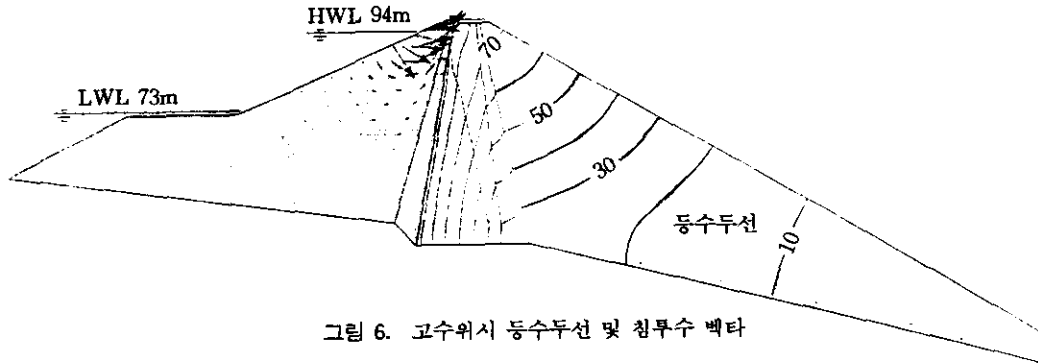


그림 6. 고수위시 동수두선 및 침투수 벡터

4.4 수위하강시

수위하강시 (고수위와 저수위의 중간 높이)의 동수두선은 그림 7과 같이 앞의 경우들과 유사하며, 침투수는 수위가 하강함에 따라 주로 상류사면에서 하향 및 저수지쪽으로 유출되는 양상을 보이고 있다. 심벽을 통과하는 침투 유량은 $2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}$ 로서 최대값을 보이며 동수구배는 앞의 경우들과 유사하게 하류부 필터 부근에서 0.8 정도의 최대값을 갖는다.

4.5 저수위시

그림 8은 저수위시의 침투류 해석결과이다. 상류사면에 포화되었던 침투수는 주로 상류사면에서 하향 및 수평방향으로 수위하강시의 경우보다 더 많은 양으로 유출됨에 따라, 불포화 지역이 존재하게 되어, 자유수면은 수위하강시보다 상류사면에서 더 낮아지며, 최대동수두선이 상류사면을 가로질러 존재하고 있다.

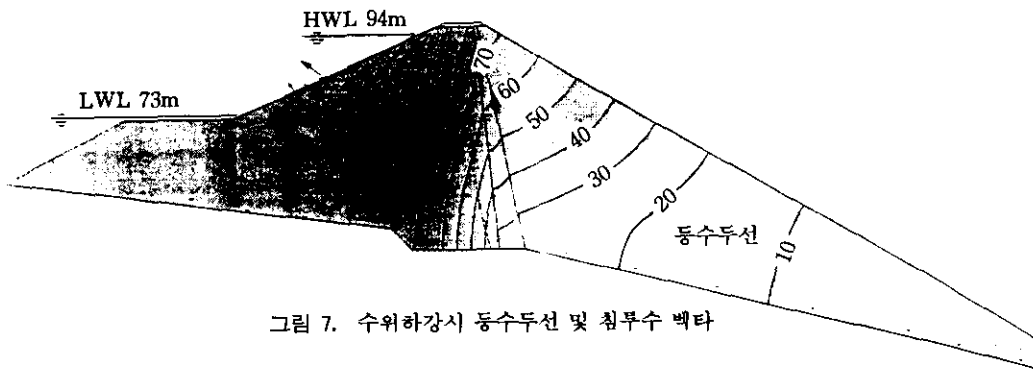


그림 7. 수위하강시 동수두선 및 침투수 벡터

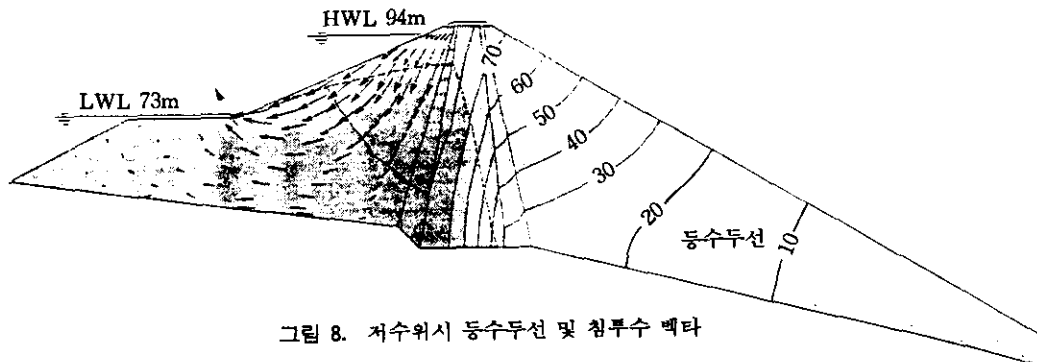


그림 8. 저수위시 동수두선 및 침투수 벡터

4.6 고수위 유지시 (현재상태)

그림 9는 수위가 저수지 담수완료후 한달동안 변동을 계속하다가 고수위로 고정된 후 약 15년이 경과한 시점('95년 6월)에서의 해석결과이다. 침투는 심벽 및 필터를 통하여 하류부의 기초저부에서 주로 발생하며 정상상태의 해석(그림 4) 결과와 아주 유사하다.

이때에 심벽을 통한 침투수량은 $2.73 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}$ 이며 수직방향 동수구배는 앞의 경우에서와 같이 최대 0.8의 값을 하류부 filter 중앙부에서 갖는다(그림 10 참조). 그림 11에서는 이 경우 자유수면과 평행한 간극수압의 등고선을 나타내며, 심벽에서 최대 수두가 작용하는 곳은 심벽 상류부로서 정수압과 같은 크기로 작용하고 있음을 알 수 있다.

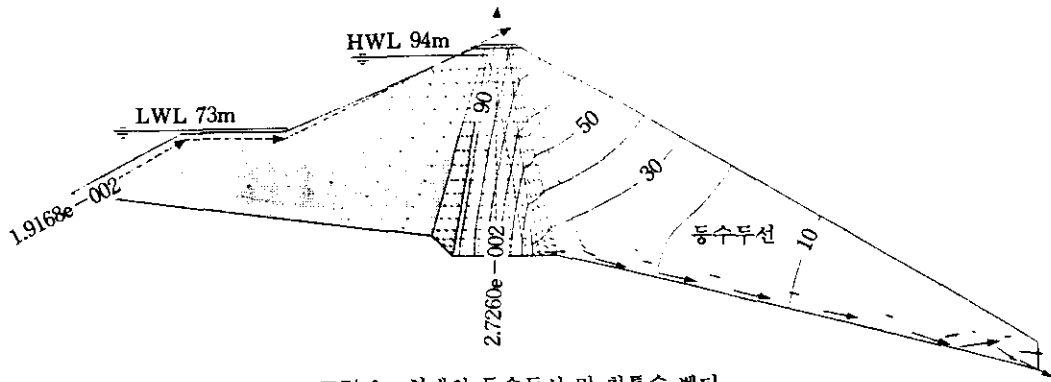


그림 9. 현재의 동수두선 및 침투수 벡터

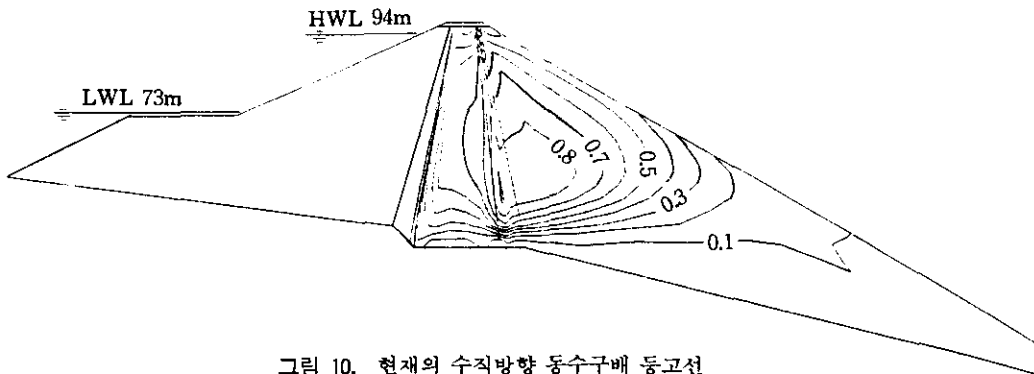


그림 10. 현재의 수직방향 동수구배 등고선

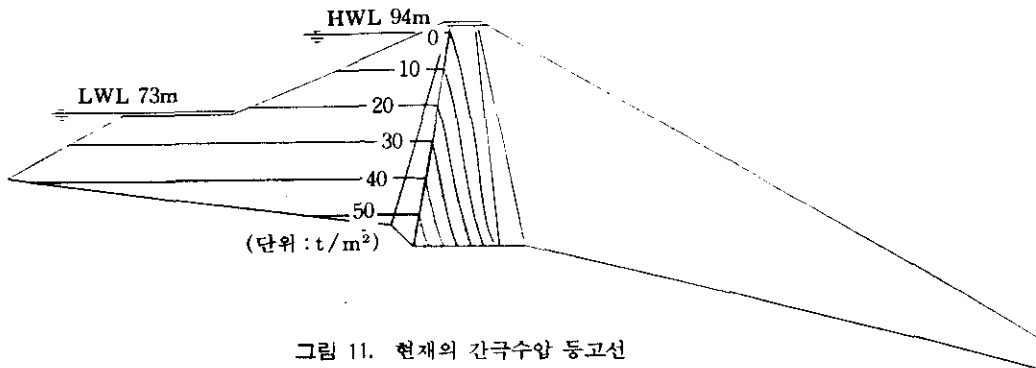


그림 11. 현재의 간극수압 등고선

4.7 침투류 해석결과 종합

전산해석에 의한 침투수량은 표 7과 같다.

표 7에서와 같이 상류사면으로도 수위의 증감에 따라 많은 양의 물이 유출입되고 있다. 즉 수위가 상승할 때에는 비교적 적은 양의 물이 상류에서 유입되다가, 고수위에서는 약 3800 ℓ/min의 수량이 상류사면을 통해 유입되고, 수위가 고수위에서 감소하기 시작하면 상류사면에 유입되어 포화되었던 물이 빠져나가고 이 현상은 수위가 저수위에 이르러서도 계속되어 최대유출량을 기록한다. 즉 수위 상승시를 제외하고는 상대적으로 큰 물의 유출입이 상류사면에서 주로 발생하고 있음을 알 수 있다.

한편 또 하나의 관심사항인 심벽을 통한 침투수량은 57.9~65.0 ℓ/min로 수위변동에 따라 큰 차이를 보이고 있지는 않아, 수위가 하루에 상승 및 하강을 반복하는 동안 심벽은 일정한 포화상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 또 수위 변동시 심벽을 통한 최대침투수량은 고수위에서 저수위로 수위가 하강할 때이며 $2.2421 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}$ 의 값을 갖는다.

또한 정상상태의 해석과 비교하면 고수위시 정상상태에서는 81.7 ℓ/min의 심벽을 통한 누수가 예측되었으나 비정상류 해석에서는 60.0 ℓ/min의 누수량이 산출되어 27% 정도의 차이가 발생하며, 또한 비정상류 해석 결과가 실측치 (42.5 ℓ/min)에 보다 근접하므로, 비정

상류 해석시 결과의 정밀도를 향상시킬 수 있음을 의미한다.

한편 허용 침투수량과 비교하기 위하여는 댐 체 전체를 통한 침투량이 산정되어야 하며, 댐 길이가 290m 이고 단면감소계수를 0.6으로 가정한다면 이론적 1일당 최대 침투수량 Q는

$$Q = 2.2421 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m} \times 0.6 \times 290\text{m} \\ = 3.9013 \text{ m}^3/\text{hr} = 93.63 \text{ m}^3/\text{day} (65 \text{ ℓ}/\text{min}) \text{로 된다.}$$

이는 일반적인 침투수량 기준치인 저수용량의 0.05%(건설부, 1993)인 $2,677,000\text{ton} \times 0.05\% = 1338.85 \text{ (m}^3/\text{day)}$ 보다도 작은 수량이 산출된다. 또한 댐길이 100m당 침투수량은 $2.2421 \times 10^{-2} \times 0.6 \times 100\text{m} = 1.3453 \text{ m}^3/\text{hr} = 0.37 \text{ ℓ}/\text{sec}$ 로서 기준치인 $1 \text{ ℓ}/\text{sec} (60 \text{ ℓ}/\text{min})$ 보다 작다.

따라서 이론적인 침투수량은 일반적인 관리 기준치보다 작으므로 침투수량에 대해서는 안전하다. 또한 실측치와 비교하여 보면 표 8과 같이 이론치가 약간 큰 값을 보이고 있으며, 이론치 및 실측치 모두 다 허용 기준 내에 들어 오고 있다.

이는 일반적으로 이론 침투수량이 실측 침투수량보다 작게 나타나는 현상을 고려한다면 (한국전력공사, 1993), 청평댐의 경우 댐 기초 지반 및 양안부를 통한 누수가 효과적으로 차단되고 있음을 알 수 있고, 또한 실측치와 이론

표 7. 전산 해석에 의한 이론적 침투수량

조 건	침투수량 $\text{m}^3/\text{hr}/\text{m}$ (ℓ/min)	
	심 벽	상류사면
1. 정상상태 해석(고수위시)	2.8190×10^{-2} (81.7)	-
2. 비정상류 해석		
가. 수위변동시		
- 수위상승시	1.9975×10^{-2} (57.9)	1.4474×10^{-2} (42.0)
- 고수위시	2.0706×10^{-2} (60.0)	1.3215 (3832.0)
- 수위하강시	2.2421×10^{-2} (65.0)	1.1801 (3422.0)
- 저수위시	2.2071×10^{-2} (64.0)	1.9410 (5628.4)
나. 현재 상태 (한달간 수위변동후 고수위 유지시)	2.7260×10^{-2} (79.0)	1.9168×10^{-2} (55.6)

치가 큰 차이를 보이고 있지 않으며 현장조사 결과 댐 하류사면 및 하류부 인근 지역의 누수 현상이 발견되고 있지 않아 전산 해석의 결과가 현실성이 있다고 판단된다.

표 8. 실측치 및 허용치와 비교한 침투 수량

실측치 (4년 평균수량)	이론적 최대치(비정상류 해석, 수위 하강시)	허용치
42.5 ℓ / min	65.0 ℓ / min	104.0 ℓ / min

등간극수압 분포는 자유수면의 형상과 일치하여, 상류부에서는 평행을 유지하다가 코아부 하부로 갈수록 자유수면과 함께 감소한다. 이는 일반적인 댐의 해석사례와 부합하나, 자유수면의 수두손실이 상당히 크게 나타나는 것은 filter 및 rock등 투수계수가 상대적으로 대단히 큰 토층이 해석에 반영되어 침투력이 크게 나타나는 filter층에서 심벽의 물을 빨아 내리는 현상과, 기초지반이 하류쪽으로 경사를 이뤄 커다란 수두차이(자유수면을 하강시킴)를 발생시키고 있는 것으로 추정된다. 등수두선의 형상에서는 하류부로 갈수록 수두손실이 커지며, 최대수두가 작용하는 곳은 코아 상류면으로서 정수압과 같은 크기로 나타나, 해석결과가 타당함을 보여준다.

침투력은 수위의 상승 및 하강에 따라 그 크기와 방향이 변화한다. 코아내부에서는 상류에서 하류방향으로 발생하고, 상방향 침투는 일어나지 않는다. 침투력은 상하류 Rock지역에서 상향, 하향 및 수평방향으로 크게 발생하며 필터에서는 rock 보다는 작은 침투력이 하향으로 발생한다. 따라서 상향의 침투가 발생하는 상류부에서 유효응력이 감소될 가능성이 있다고 보여진다.

수직방향 등수경사는 수위변동과 관계없이 일정하며, 하류부 필터 중앙지역에서 가장 크게 나타나(0.8 정도), toe 부근에서의 piping 가능성은 없다고 보여지며 현재 누수측정용 chamber에 측정되는 누수의 탁도가 맑다는 점은 제체 내부 세립분의 유실가능성이 적은

것으로 판단된다.

5. 결 론

수위변동을 경계조건에 반영한 2차원 비정상류(transient flow) 유한요소해석을 댐 전체 단면을 대상으로 수행하여, 임의의 수위에서의 여러 가지 침투 현상(등수경사, 침투력 벡터, 간극수압 분포, 침투수량)을 규명하고 침투류에 대한 댐의 안정성을 평가하였다.

수위 변동별 침투력 벡터, 등수경사, 등수두선의 해석 결과는 타당하다고 보여지고, 제체의 특별한 위해요인은 발견되지 않아 파이핑 또는 내부 침식 등의 위험은 없다고 판단된다. 특히 침투량은 이론치(65.0 ℓ / min) 및 실측치(42.5 ℓ / min) 가 허용치(104.0 ℓ / min) 에 비해 매우 작은 값을 보이고 있으며, 현장조사 결과 하류사면 지역에 누수 현상이 발견되고 있지 않아, 청평댐은 제체 및 기초지반, 양안 접촉부를 통한 누수는 매우 훌륭하게 차단되고 있어 침투에 대하여 댐은 안전하다고 판단된다. 그러나 본 해석결과와 현재의 안정화된 댐 조건과의 부합성을 구체적으로 입증하려면 무엇보다도 수위변동에 따른 제체내의 간극수압 분포자료가 향후 확보되어야 할 것이다.

한편, 비정상류 해석은 심벽만을 취급하였던 종래의 정상상태 해석에 비해, 실제의 수위변동 조건을 보다 현실적으로 반영할 수 있었으며, 수위 변동별(시간별) 구체적인 침투 양상(침투벡터, 침투수량 등) 이 댐 전체 단면을 통해 파악되는 이점이 있고, 또한 비정상류 해석 결과(고수위시 침투량 60.0 ℓ / min)가 정상상태의 경우(81.7 ℓ / min)보다 실측치(42.5 ℓ / min)에 근접하여, 비정상류 해석시 결과의 정밀도를 향상시킬 수 있음을 의미하므로, 향후 유사한 문제의 해결시 비정상류 해석의 활용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 연구

지원에 의하여 이루어 졌으며, 연구 수행과 관련하여 많은 기술적 도움을 주신 변광욱 과장 (에머랄드 소프트 컨설팅)께 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 한국전력공사(1981), 청평양수발전소 건설지, 한국전력공사, pp. 52~63
2. 한국전력공사(1993), 댐안전도 평가 및 유지관리 방안 연구, 한국전력공사 전력연구원, pp. 183~198(부록I)
3. 건설부(1993), 댐 시설기준
4. Papagianakis, A.T. and Fredlund, D.G. (1984), "A Steady-state Model for Flow in Saturated-Unsaturated Soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol.21, pp. 419~430
5. Lam, L. and Fredlund, D.G. (1984), "Saturated-unsaturated Transient Seepage Model for Finite Elements", Water Resources Conference, Vermont, pp. 18~22
6. Taylor, R.L. and Brown, C.B. (1967), 표 1. 청평양수발전소 상부댐 공사현황 (접수일자 1996. 3. 19)