

計測結果를 利用한 댐體의 舉動分析 (I: 間隙水壓 및 滲水量을 中心으로)

Evaluation of the Behavior of Dam Body by Field Monitoring Results (I : With Emphasis on Pore Pressure and Seepage Water)

송정락¹⁾ : Song Chung Rak 여유현²⁾ : Yeoh Yoo Hyeon 김성인³⁾ : Kim Sung In

¹⁾ 대우엔지니어링 지반공학부 과장, Manager of DAEWOO ENGINEERING Co.

²⁾ 대우엔지니어링 지반공학부 대리, Lead Engineer of DAEWOO ENGINEERING Co.

³⁾ 다산 컨설턴트 차장, Manager of DASAN Consultant Co.

Synopsis :

This study evaluated the behavior of a pumped power storage dam through the pore pressure and seepage monitoring data.

The monitored results showed that there is essentially zero pore pressure at the down stream side of the core. Therefore, it could be supposed that the cut off effectiveness of the core was fair. But there observed almost same pore pressure between the up stream and down stream side of the bed rock which was water tightened by compaction grouting (blanket grouting and curtain grouting). Therefore it could be supposed that the effectiveness of the compaction grouting is not satisfiable. The amount of seepage water was grater than that predicted from numerical analysis. This phenomenon was turned out due to the seepage through bed rock and abutment.

1. 서 론

본 고의 대상 댐은 발전용으로서 총 발전용량은 600 MW (300MW x 2 기)에 이르며 기존 원자력 및 화력 발전소의 잉여 전력을 이용하여 하부 저수지의 물을 상부 저수지로 양수하여 필요시 상부 저수지의 물을 하부 저수지로 낙하시키면서 발전하는 양수발전용 댐이다. 따라서 발전용수를 저장하는 상부댐과 양수용수를 저장하는 하부댐의 2 개 댐으로 구성되어 있다. 상하부댐 모두 중앙차수벽식 사력댐으로 상부댐은 댐마루길이 269 m, 높이 86 m, 저수용량 6,464,000 m³ 이며, 하부댐은 댐마루길이 529 m, 높이 78 m, 저수용량은 10,089,000 m³ 이며, 상부댐과 하부댐 사이의 정격유효낙차는 345 m 이다. 또한 양수발전에 의한 수위 변화는 각각 상부댐의 경우 약 20 m (최대 27 m), 하부댐의 경우 약 10 m (최대 14 m) 이다.⁵⁾

본 댐의 단면은 여유현송정락(1995)에 나타난 바와 같으며, 1985년 준공후 현재까지 정상적인 발전 및 양수작업을 해오고 있으나 댐정상부에서 육안으로 침하가 관측되는 등의 현상이 나타나고 있어 거동 분석을 실시하였다. 본 고에서는 본 댐에 대한 계측결과중 주로 간극수압, 누수량등의 계측기록을 이용하여 댐의 거동을 분석하고자 한다. 댐의 전체적인 간극수압 거동특성은 상하부댐이 유사하므로 본 고에서는 상부댐에 대하여 주로 고찰하고자 한다.

2 간극수압 측정자료의 분석

댐에 매설된 간극수압계는 폴 브리지를 형성한 전기 저항식 간극수압계의 일종인 칼슨(Calson)형이다. 설치 위치 및 수량은 그림 1 과 같이 상부댐 각각 중앙 단면의 기초압반 부분에 2개, Filter층에 6개, 심벽부에 12 개가 설치되어 있다 (상부댐 20 개). 계측은 댐마루에 설치된 Switch Box에서 Readout을 통하여 수행할 수 있으며, 총 20개의 간극수압계중 현재(1991) 13개의 간극수압계가 작동중에 있다.

2.1 간극수압의 경시변화

2.1.1 건설중 간극수압

가. 기반암층에서의 간극수압

간극수압계 UFP-1과 UFP-2는 기반암에 설치되었으며, 그림 2 에서 볼 수 있듯이 댐 축조가 진행됨에 따라 기반암층의 간극수압이 증가되는 양상을 나타내고 있다. 이때 증가율은 성토층 내부에 매설된 간극수압계와 비슷한 정도이다. 이처럼 기반암층에 매설된 간극수압계가 담수 이전 성토하중에 대하여 심벽내부와 유사한 정도의 간극수압을 나타내는 것은 기반암의 압축성 및 포화도에 기인하는 것으로 판단된다.

기반암과 심벽층의 포화도가 다를 경우, 간극수압 계수 B 에 영향을 미치게 되어 동일한 성토하중을 받더라도 발생하는 간극수압은 다를 수 있다. 본 경우 기반암층에 설치된 간극수압계는 설치 당시부터 지하수위 이하 조건이므로 완전포화로 가정할 수 있다. 그러나 보통 암반의 경우 완전포화 되더라도 간극수압 계수 B 는 1 보다 훨씬 작은 0.3 - 0.4 정도의 범위를 가지므로 나타나는 간극수압은 일반 토사지반의 경우와 상당히 달라질 수 있다. 댐 심벽의 경우 최적함수비 부근으로 다져지므로 (본 경우는 최적함수비 - 1% - +3% 정도로 다져짐) 완전포화가 되지 않으므로 B<1 이 될 수 있다. 따라서 기반암 및 심벽은 모두 B<1 인 상태인 것으로 추정된다. 이러한 원인으로 기반암에서의 간극수압이 심벽내부의 간극수압과 유사한 것으로 판단된다. 그러나 습윤층으로 다져진 심벽재료는 거의 포화된 상태와 유사한 간극수압 반응을 나타낸다는 일부 자료 (Chem, 1994)를 인정하면, 건설중 기반암층의 간극

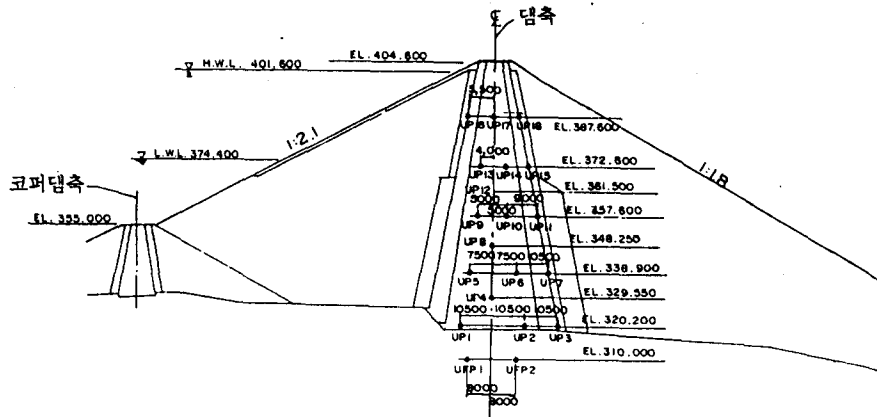


그림 1, 상부댐의 간극수압계 설치 위치도

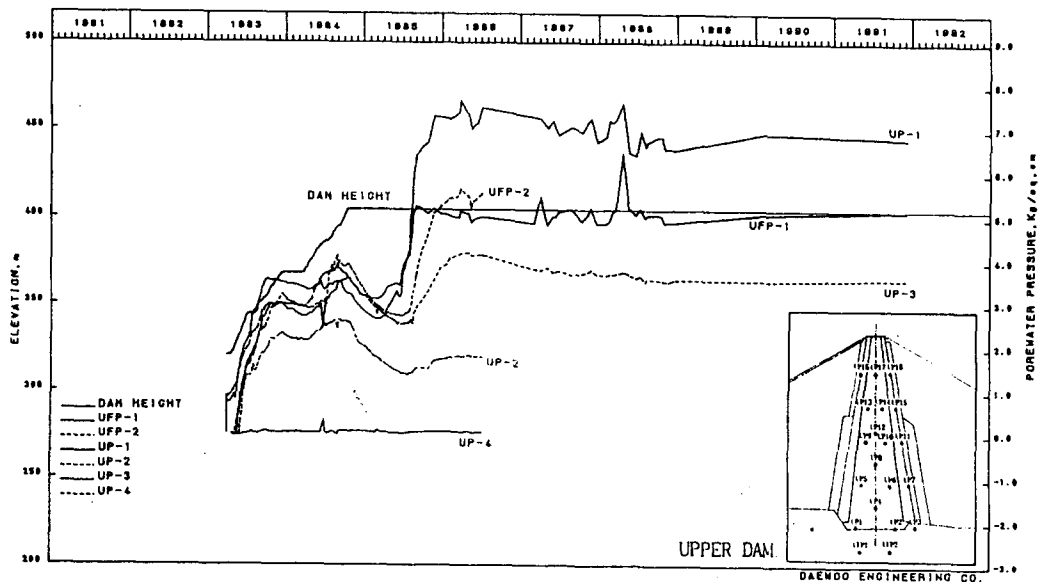


그림 2, 간극수압의 경시변화(1)

수압이 심벽재료의 간극수압과 유사하게 나타나는 현상은 절리면 등을 통한 기반암의 압축성이 비교적 큰 상태일 가능성도 내포하고 있다.

나. 필터층에서의 간극수압

본 댐에는 총 20개의 간극수압계중 6개의 간극수압계가 필터층에 매설되어 있다. 이 중 UP16은 상류측 필터층 속에 위치하며, UP3, UP7, UP11, UP15, UP18은 하류측 필터층 속에 설치되어 있다. 그림 2, 3, 4 는 댐체 성토중에는 간극수압이 거의 발생하지 않았으며, 담수중에는 상류측 간극수압계인 UP16만 이 수위에 따른 간극수압의 증가를 보이고 있다.

또한 하류측 간극수압계인 UP3, UP7, UP11, UP15, UP18은 담수후에도 간극수압의 변화가 거의 보이지 않아 심벽에서의 침투수 차단효과가 양호함을 알 수 있다. 하류측에 매설된 간극수압계중 일부가 (-)의 수치를 나타내는 것은 간극수압계가 침윤선보다 약간 위에 있게 됨에 따른 모세관 현상에 기인한 것으로 판단된다.

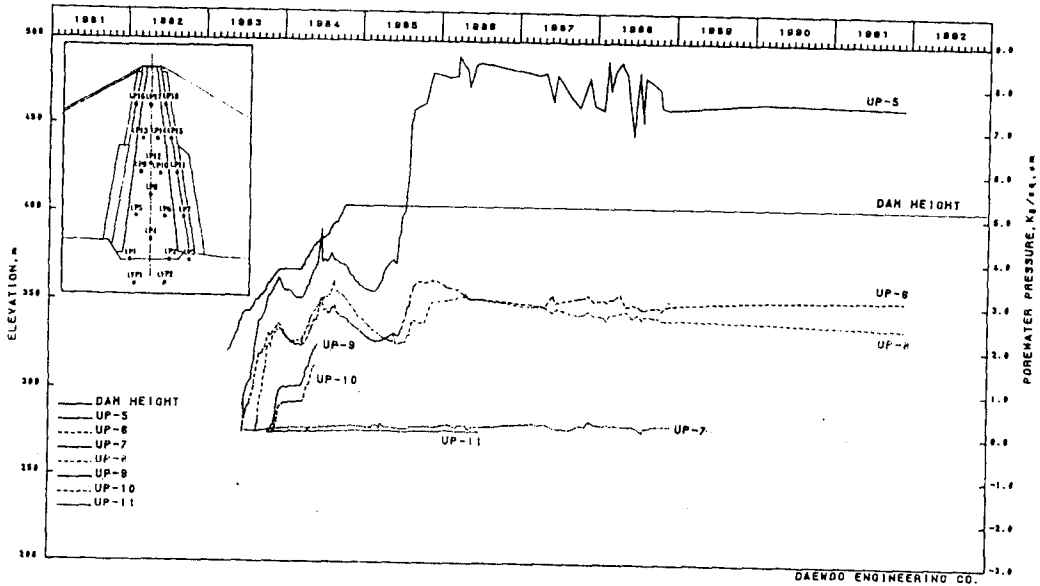


그림 3, 간극수압의 경시변화(2)

다. 심벽에서의 간극수압

상부면에는 총 20개의 간극수압계중 10개(UP4, UP5, UP6, UP8, UP9, UP10, UP12, UP13, UP14, UP17)가 심벽부에 매설되어 있다. 심벽부에서의 간극수압은 그림 2, 3, 4 에 나타난 바와 같이 성토작업중에 서서히 증가하고 있으며, 이때 동일 표고에 위치한 점들의 간극수압 차이가 비교적 심하게 나타나는 것은 시공시 심벽재료 축조시기 또는 다짐 시기 등의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

그러나 댐 축조 완료후 담수 개시까지의 대기 기간중에는 간극수압이 점진적으로 감소하며, 이때 상하류측의 간극수압 소산속도가 비슷한 것은 시공시 함수비 조절이 비교적 균질한것을 나타내는 것으로 판단된다.

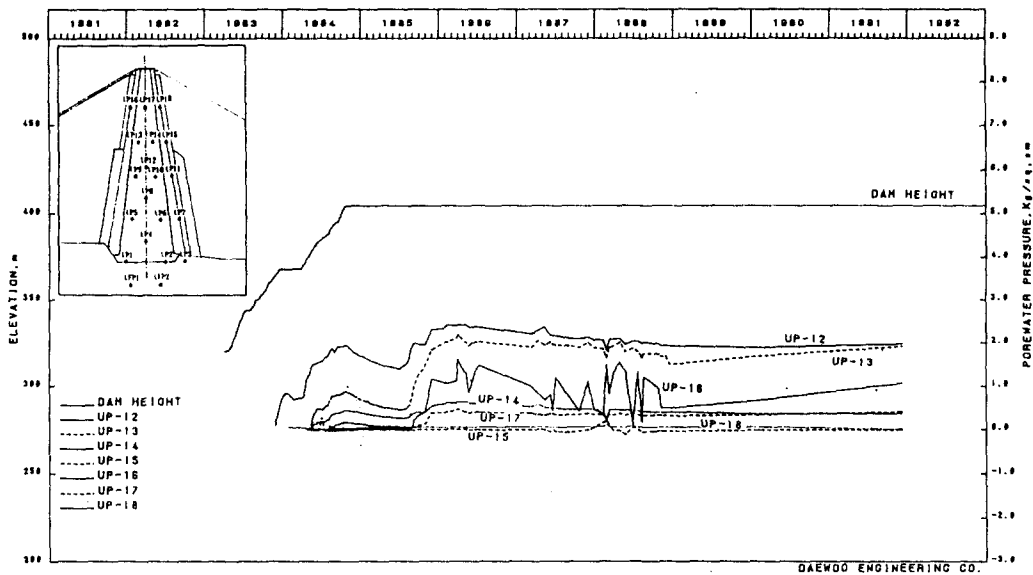


그림 4, 간극수압의 경시변화(3)

2.1.2 담수중 및 담수후의 간극수압

가. 기반암층의 간극수압

상부댐에는 2개의 간극수압계 (UFP-1, UFP-2)가 기반암의 상·하류측에 매설되어 있다. 그림 2 는 담수중에는 상류측 간극수압이 하류측보다 빠른 증가양상을 보여주는 정상적인 경향을 보여준다. 담수 완료후 약 5 - 6개월 동안은 하류측 간극수압이 상류측보다 크게 나타나는 현상을 보여준다.

담수중 및 담수후의 간극수압은 댐의 저수위와 직접 연관이 있는 사항이나 본 댐의 간극수압은 간극수압 측정 시점에서의 수위 기록이 없어 간극수압에 의한 정확한 간극수압 분석에는 어려움이 있다. 즉 상부댐은 1일 1회 정도 약 20 m(최대 27 m)의 수위 변동을 겪게 되며, 이로 인하여 간극수압은 약 2 kg/cm^2 (최대 2.7 kg/cm^2)의 변동을 겪게 된다. 따라서 저수위(貯水位)와 무관하게 기록된 간극수압의 분석에만 의존할 경우 최대 2.7 kg/cm^2 의 오차를 가질 수 있음을 의미한다.

따라서 UFP-1의 경우 1987-1988년 사이에 간극수압의 변화가 매우 심하게 나타나는 현상 및 UFP-2 의 간극수압이 UFP-1의 간극수압보다 일부 큰것은 수위 변화에 상당 부분 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 저수위 변화에 대하여 기반암층의 간극수압이 즉각적으로 변화하는 현상은기반암층의 균열을 통하여 상부의 간극수압이 전달되는 것으로 기반암에서의 밀봉이 충분히 되지 못한 것으로 판단된다.

나. 필터 층에서의 간극수압

상부댐에는 UP16(상류측), UP3, UP7, UP11, UP15, UP18(하류측)의 총 6 개의 간극수압계가 매설되어 있다. 그림 2, 3, 4 는 이중 상류측에 매설된 UP16만이 수위에 따른 간극수압의 변화를 나타내며, 하류측에 매설된 UP3, UP7, UP11, UP15, UP18은 거의 변화가 없으며, 그 값이 매우 작은 상태를 나타내고 있어 심벽층의 양호한 차수성과 필터층의 양호한 투수성을 시사하고 있다.

다. 심벽에서의 간극수압

담수가 진행되는 과정에서의 간극수압은 댐 심벽중앙을 경계로 하여 상류측에서 먼저 상승하고 하류측에서 나중에 상승하는 것이 정상이다. 또한 담수후에는 상류측의 간극수압이 하류측보다 크게 나타나고 수위변화에 대해서도 하류측보다 예민하게 반응하는 것이 정상이다. 이는 저수위에 의한 수두가 차수성이 양호한 심벽부에서 대부분 소멸되기 때문이다.

그림 2, 3, 4 의 간극수압의 계측결과는 UP1 및 UP2의 경우 상류측의 UP1이 보다 빠른 증가를 보여주고 담수 완료후에도 하류측의 UP2보다 높은 간극수압을 나타내고 있다. 또한 저수위 변화에 대하여도 보다 예민한 반응을 나타내어 정상적인 상태를 나타낸다.

UP5 및 UP6의 경우도 UP1 및 UP2의 경우와 같이 정상적인 상태를 나타낸다. UP4는 UP1, UP2 와 UP5, UP6의 중간 표고에 설치되어 있으며, 중간정도의 간극수압을 나타내어 정상적인 것으로 판단된다. UP9, UP10의 경우 간극 수압계의 파손으로 보이며, UP13, UP14의 경우도 UP1, UP2의 경우와 같이 정상적인 상태를 나타낸다. UP12의 경우는 UP13, UP14보다 약간 낮은곳에 위치하고 있어 약간 큰 간극수압을 보여주는 정상적인 현상을 나타낸다. UP17의 경우 UP13, UP14보다 약간 높은 위치에 있으며, 대개의 경우 침윤선보다 상부에 위치하여 실제 측정되는 간극수압은 거의 "0"을 나타내고 있다.

2.2 간극수압의 수직/수평 분포

그림 5 는 담수 완료후 상부댐의 수직적 간극수압 분포로 상부에서는 작고 하부에서는 크게 나타나 대체로 정상적인 분포를 나타낸다.

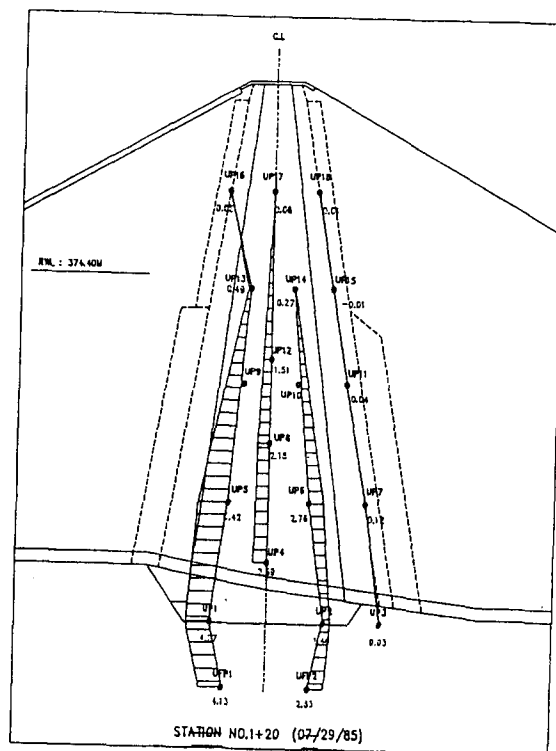


그림 5 상부댐의 간극수압 수직적 분포

그림 6 은 담수 완료후 상부댐의 수평적 간극수압 분포로 UFP1 및 UFP2를 제외하고는 상류측에서는 크고 하류측에서는 거의 0에 가까운 작은 값을 나타내어 정상적인 상태를 나타낸다. 이러한 현상은 상류측의 간극수압이 심벽에 의해 하류측에는 거의 전달되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 심벽으로 인한 손실수두가 매우 크므로 차수효과는 양호한 것으로 판단된다.

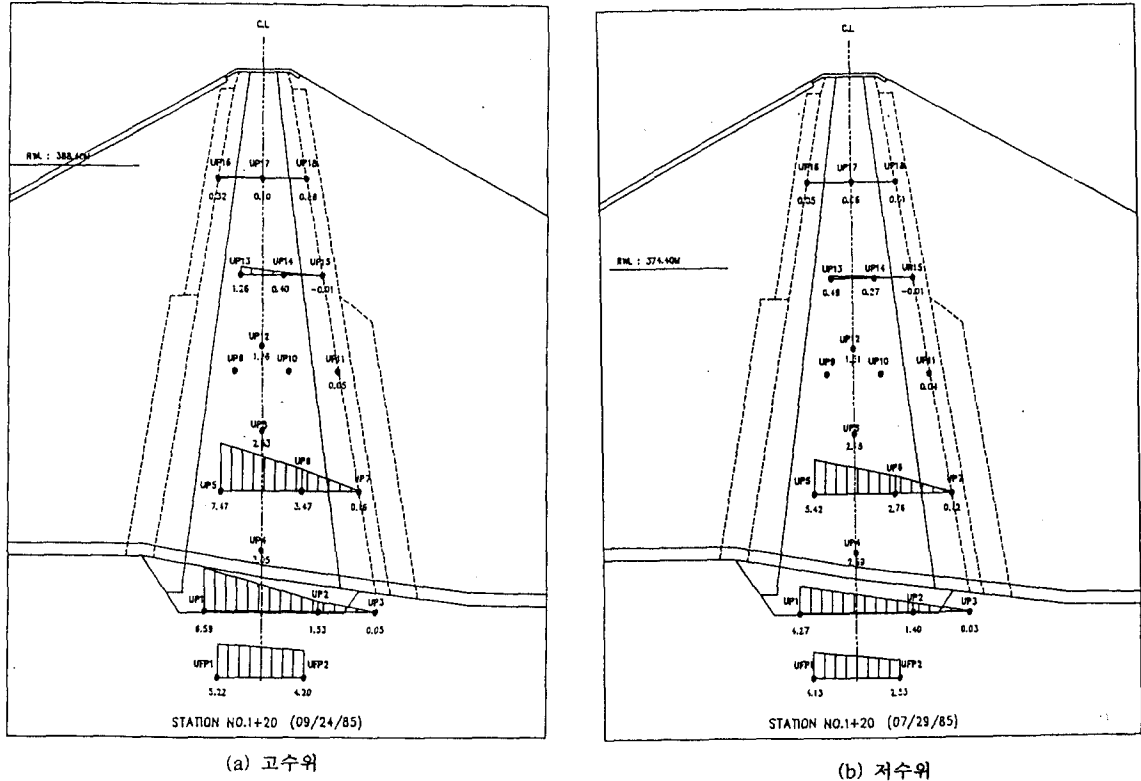


그림 6. 상부댐의 간극수압 수평분포

또한 고수위시 간극수압 측정치인 그림 6(a)와 저수위시의 측정치인 그림 6(b)를 비교하여 보면 심벽 하류측에 설치된 간극수압은 저수위의 변화에 의하여도 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나 심벽의 차수성은 전반적으로 양호한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 수위변화 속도가 크지만 심벽의 투수계수가 낮기 때문에 저수위시에도 심벽내의 수두는 거의 변하지 않아 하류측의 간극수압은 거의 일정한 것으로 판단된다.

그러나 기반암에 설치된 간극수압계인 UFP1 및 UFP2의 경우 그 값이 상하류측에서 서로 비슷한 수준이고, 심벽 저부의 간극수압과 비슷하거나 큰 값을 나타내며, 저수위(貯水位)의 변화에 의한 간극수압 변화가 거의 그대로 나타나 기초지반의 투수성이 비교적 큰 것으로 판단된다.

3. 누수량 측정결과 및 분석

그림 7에 나타난 바와 같이 누수량 측정이 실시된 87.4 - 87.12. 까지의 측정결과를 살펴보면 초기보다 약간 작은 값을 나타낸다. 초기 누수량 측정시 강우의 영향이 있었음을 감안하면 누수량은 거의 일정하게 나타나고 있는 것으로 판단된다. 실측 누수량은 상부댐의 경우 100 l/min, 하부댐의 경우 120 l/min 정도를 나타내고 있다.

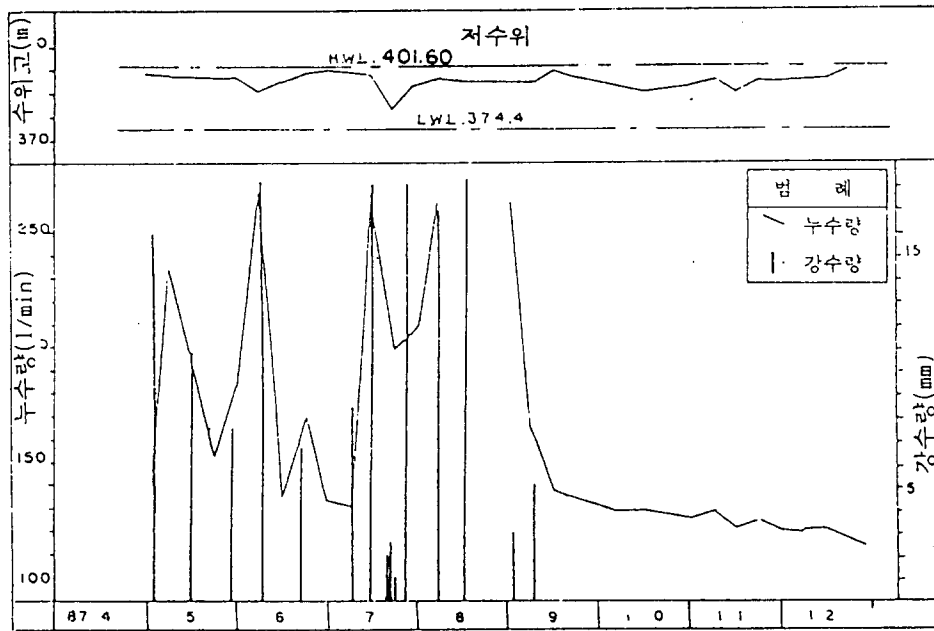


그림 7, 누수량 변화도

누수량이 댐체의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 설계시 추정누수량과 설계시와 시공시 현장투수시험 결과를 구분 입력하여 실시한 수치해석 결과인 추정누수량(침투류 해석용 프로그램: SEEP)을 비교하여 다음 표 1 에 나타내었다.

표 1, 설계 및 검토시 추정침투유량과 실측누수량의 비교

구 분	설계치를 사용할 경우		현장투수시험 결과를 사용할 경우	
사용 투수계수 (k)	1x10 ⁻⁵ cm/sec		3.25x10 ⁻⁶ cm/sec	
설계시 추정누수량 (Casagrande방법)	29.4 l/min (고수위시)		-	
수치해석에 의한 추정 침투유량	고수위	저수위	고수위	저수위
	95.60 l/min	37.08 l/min	31.07 l/min	12.05 l/min
실측 누수량	100 l/min		100 l/min	

시공시 현장투수시험 결과의 평균치는 설계시 반영한 투수계수의 약 1/3로 이를 이용한 침투해석에 의한 추정누수량은 실측누수량의 30-50 % 수준이다. 또한 설계 투수계수를 이용하여 수치해석을 수행한 결과는 예상되는 침투수량이 실측 침투수량에 보다 가깝게 나타나는 결과를 보여준다. (본 댐은 양수 댐으로서 1 일 1 회의 수위 상승 및 하강이 발생한다. 본 검토에서는 침투류 해석시 이러한 수위 변동은 고려되지 못하였다. 그러나 댐 수위는 저수위와 고수위 사이에서 변동되므로, 수위 변동을 감안한 침투해석 결과는 본 해석의 고수위의 경우와 저수위의 경우의 사이 값을 가질 것이다.) 그러나 전반적으로 실측 침투수량은 계산에 의한 침투수량보다 크며 이러한 현상은 표 2 와 같이 일반적으로 다른 댐에서도 나타나는 현상이다. 이러한 현상의 원인은 전술한 바와 같이 댐 하부 및 양안부의 기초지반 통한 누수 또는 우수 및 기타 지하수의 유입에 의한 것일 가능성이 큰 것으로 판단된다. 대부분의 경우 설계 및 해석시 이러한 지하수의 침투는 정량적인 산정이 곤란하다.

표 2, 국내의 댐과의 누수량 비교

설계시 구분	투수계수	설계누수량	실측누수량	비 고
소양댐	$1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$	1200.69 t/min	1746.90 t/min	
안동댐	$1 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$	22.56 t/min	188.90 t/min	
대청댐	$5 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$	10.90 t/min	231.00 t/min	
Demir Kopru Dam	-	7380.0 t/min	12000.0 t/min	시공후 8년까지
			43200.0 t/min	8년이후에 급격한 변화

4. 결 론

간극수압 및 누수량을 이용한 댐 거동분석은 장기적 분석 보다는 시공과정 및 단기간의 거동을 분석하는 것으로서 본 고에서는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 성토 종료후 균등한 간극수압 소산을 나타내어 심벽의 함수비 조절은 비교적 균질하게 이루어졌다.
- 2) 필터층에서는 간극수압의 소산이 매우 신속하여 전반적으로 배수성이 양호한 것으로 나타났다.
- 3) 기초 암반은 상하류의 간극수압이 비슷하거나, 수위 변화에 예민하게 반응하는 것으로 나타남, 비교적 투수성이 큰 것으로 판단된다.
- 4) 누수량 측정결과는 설계시의 투수계수를 사용하여 예측한 결과보다 큰 것으로 나타남, 기초 지반, 양안부 등 기타 지역으로의 누수가 있을 가능성이 있는 것으로 판단된다.
- 5) 그러나 누수량의 크기는 통상적인 다른 댐에서 나타나는 정도로서 현재 임박한 불안정 요인은 없는 것으로 판단된다.

5. 참 고 문 헌

1. 산업기지개발공사(1986), "소양강 다목적댐 거동분석 및 안정해석"
2. 산업기지개발공사(1987), "안동 다목적댐 거동분석 및 안정해석"
3. 산업기지개발공사(1988), "대청 다목적댐 거동분석 및 안정해석"
4. Chern, J.C., Kao, H.C., Li, Y.C. and Wang, S. (1994), "Prediction of Embankment Dam Performance During Construction", Proceedings of XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India, pp. 947-950
5. Hong S.W., Sohn J.I., Bae G.J., Na K.J.(1990), "A CASE STUDY ON DIFFERENTIAL SETTLEMENT OF ROCKFILL DAM", pp.98-113, Unpublished report.
6. Knight D.J., Naylor D.J., Davis P.D.(1985), "STRESS-STRAIN BEHAVIOUR OF THE MONASAVU SOFT CORE ROCKFILL DAM: PREDICTION, PERFORMANCE AND ANALYSIS", pp.1299-1325.
7. Lee K.L and Shen C.K.(1969), "Horizontal Movements Related Subsidence", ASCE, Journal of Soil Mechanics, Found Eng., Jan.
8. Nippon Koei Co. (1981), "S - Pumped Storage Power Plant Project, Design Calculations"

9. Penman Arthur & Charles Andrew (1973), "Constructional Deformations in Rockfill Dam", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Feb., pp.139-163.
10. Squier, L. R. (1970), "Load Transfer in Earth and Rockfill Dams", J. of SMFE, ASCE, Vol. 96 No. SM1, Jan., pp213-234
11. Peter A. S., Richard D., Richard S.Ladd, David B. Paul(1992), "ONE - DIMENSIONAL SETTLEMENT ANALYSIS FOR EMBANKMENTS", Stability and Performance of Slopes and Embankments-II,Vol.1, Geotechnical Special Publication No. 31, pp.387-403.