

필댐의 안정성 해석 연구(II)

손호웅* · 이대근**

*배재대학교 토목환경공학과 지반조사공학연구소

**세코지오(주) 지반공학연구소

A Study on the Safety Analysis of Rock Fill Dam (II)

Howoong Shon · Dae Keun Lee

요 약

경북 청도군 소재 운문댐의 안전진단을 목적으로 지반조사 및 계측자료의 분석이 수행되었다. 특히, 운문댐은 1998년에 3차례에 걸쳐 댐의 정상부에 함몰현상이 발생되었으며, 이러한 함몰현상이 대해 많은 조사가 이루어졌으며, 이에 따라 CGS보강공법을 2000년에 시행하였다. 댐의 함몰현상의 메카니즘에 대해 많은 의견이 있으나, 누수에 의한 내부침식이 가장 유력하다. 필댐에 있어서의 과대누수는 댐의 안정성의 평가하는데 가장 중요한 변수로 작용하므로, 토질시험, 계측자료 및 시추자료를 통한 댐체의 누수 및 거동분석을 수행하였다. 자료들을 종합해 본 결과, 부실시공, 댐의 응력전이, 수압할렬의 가능성, 누수 취약대 등과 같은 댐의 거동에 대한 여러 가지 정보를 얻을 수 있었다. 또한, 토질시험에서 코아재료의 적합성에 문제가 있었음을 발견하였다. 댐 체체에서도 연약대가 발견되었으며, 여수로 근접한 부분에서 누수의 가능성이 높은 것으로 나타났다. 거동분석에서는 댐 코아의 수압할렬이나 응력전이에 의한 손상이나 유로의 가능성도 배제할 수 없었다.

주요어

토질시험, 계측자료, 시추자료, 거동분석, 응력전이, 수압할렬

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyze the behavior and to study the safety evaluation of the Unmun Dam located in Cheongdo-Gun of Gyeongbuk Province, Korea. For this purpose, soil analyses including boring data, geophysical surveys and monitoring the buried geotechnical gauges, such as pore-pressure gauge, earth-pressure gauge, displacement gauge, multi-layer settlement gauge, leakage flow-meter, were conducted. In addition to these data, numerical analyses of behavior of dam were performed to predict and to compare the data which were obtained from the above methods. Since many defects, such as gravel and weathered rock blocks in the dam core, and lots of amounts of leakage, by boring analyses were found, reinforcement by compaction grouting system (CGS) has been conducted in some range of dam. Some geotechnical gauge data were also used to confirm the effects of reinforcement. Analyses of monitoring the data of geotechnical gauges buried in the dam, such as pore-pressure gauge, earth-pressure gauge, displacement gauge, multi-layer settlement gauge, and leakage flow-meter shows the load transfer of dam and the possibility of hydraulic fracturing. As a conclusion, some problems in the dam found. Especially, the dam near spillway shows the high possibility of leakage. It should be pointed out that only the left side of the dam has not a leakage problem. As a whole, the dam has problems of weakness, because of unsatisfactory construction. It is strongly recommended that highly intensive monitoring is required.

Key words

behavior analysis, soil analysis, geotechnical gauge, load transfer, hydraulic fracturing

1. 서 언

우리 나라의 댐 가운데 많은 부분을 차지하는 필댐에 있어서 댐의 거동 및 누수평가는 안전진단 및 계측자료 분석을 통하여 이루어지고 있다. 특히, 댐의 과다 누수는 안정성에 많은 영향을 미치게 되므로 대부분의 댐에는 누수량을 측정할 수 있는 시스템이 마련되어 있다.

댐의 거동 및 누수는 여러 가지 요인에 의해서 일어날 수 있다. 즉, 건설당시 댐 지반에 불안정한 요소가 내포된 경우, 지하 차수벽의 시공불량, 댐 재료의 부적절한 선정, 다짐함수비율의 여부(임희대 외, 1999), 품질관리 여부, 댐의 지중 및 수압에 의한 인장균열의 발생, 침윤에 의한 내부침식(internal erosion), 존(zone)의 강성차에 의한 아칭(arching)현상과 응력전이(load transfer)에 의한 균열발생, 댐이 담수 될 때의 수압으로 인한 댐 코아가 수평적으로 찢어지는 수압할렬(hydraulic fracturing)에 의한 누수(Sherard, 1985) 등 댐의 거동과 관련된 많은 문제가 발생된다.

댐 붕괴의 예를 살펴보면 1864년 영국 Sheffield지방의 Brafield댐은 댐 상부의 균열, 침식에 의한 붕괴로 238명이 사망하고 800여채의 가옥이 파괴되었다. 이는 시공 결함과 채움재료의 부적합으로 코아가 훼손되었으며, 댐 내부의 세굴과 부수적인 침하가 수반되어 댐 상부(crest)의 침식과 함께 순식간에 파괴되었다. 댐 붕괴의 원인은 누수, 지진에 의한 활동, 집중호우, 시공불량, 균열에 의한 침식 등이 대부분이라 할 수 있다.

필댐(fill dam)의 경우, 수위의 변화에 따라 거동을 하게 되며 이는 여러 계측자료와 재료시험에 의해서 밝혀졌다. 실험결과에 의하면 필댐의 저수에 따른 효과는 다음과 같이 분류된다(Nobari et al., 1972).

- ① 코아(core)에 작용하는 수압에 의한 하류측 및 하향으로의 변위.
- ② 상류기초에 작용하는 수압에 의한 상류측 및 하향으로의 변위.
- ③ 상류측 shell zone에 작용하는 부력에 의한 상향변위 및 댐의 하류방향으로의 회전.
- ④ 상류측 shell zone의 포화붕괴에 의한 하향변위와 댐의 상류방향으로의 회전.
- ⑤ 코아 내부의 간극수압 변화에 따른 변형.

- ⑥ 수침에 따른 필(fill)재료의 변화에 의한 변형 등이다.

댐의 붕괴에는 몇 가지 조건이 필요하다. 첫째, 흙이 잠재적으로 불안정한 구조를 가지고 있을 것. 둘째, 수침에 의해 파괴되는 일시적인 강성을 보유한 구조를 유지하는데 필요한 충분한 흡입력(suction)이 작용할 것. 셋째, 잠재적으로 불안정한 구조를 발현하는데 필요한 높은 외력이 작용할 것 등이다(Barden et al., 1969).

본 연구에서는 상기 내용의 여러 가지 댐의 안정성에 저해되는 여러 가지 조건들을 고려하고 토질시험, 시추자료, 계측자료를 이용하여 댐의 재료평가 및 댐의 누수대 파악, 수압할렬, 응력전이, 전단파괴의 가능성과 이를 통한 댐의 전체적인 안정성 평가에 대해 연구하였다.

1.2 연구지역의 지형 및 지질

본 연구 지역은 경상북도 청도군 사천면에 소재하는 댐으로서, 이곳의 지질은 경산누층계이며 대부분이 화강암과 안산암으로 구성되어 있다(한국자원연구소, 1971, 1973). 댐은 경도 128°55'00" ~ 128°55'30", 위도 35°43'00" ~ 35°43'30"에 위치하고 있으며, 댐 기초의 표고는 107m, 댐 상부의 표고는 155m이다. 댐 전체 길이는 407m이며, 댐 형식은 중심코아형 사력댐이다. 유역면적은 301.34km²이며, 유효저수량은 126, 175,000 m³로서 1급규모의 용수공급 댐이다. 댐의 좌안 끝에는 여수로가, 우안 끝에는 관리소가 있다. 댐 남부 500m지점에 댐 관리단이 위치하며 남서부에 사천면이 위치해 있다.

본 댐의 부지는 화강암과 안산암의 관입접촉대로서, 우안과 하상은 표토 및 충적층이다. 하부에 변질 안산암이 분포하며, 좌안의 표토층 하부에 안산암과 화강암이 관입하고 있다. 전체적으로는 동종의 암석으로 구성되지만 암질상태가 불균질하다. 기초암반의 상태는 우안 하단과 하상의 15m~20m 심도 구간과 좌안의 30m~50m 심도구간이 비교적 불안정한 상태를 보이고 있으며, 특히 25m~49m의 심도구간은 단층의 영향으로 균열대를 형성하고 있다(부산지방국토관리청, 1995).

Table 1 액,소성 한계시험 결과(STA. 10+10)

심도(depth)	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수(%)	분 류(USCS)
1.5m	33	23	10	CL
3.0m	30	21	9	SC
4.5m	32	22	10	CL
6.0m	29	20	9	CL
7.5m	29	19	10	CL
9.0m	30	20	10	SC
10.5m	28	18	10	SC
12.0m	32	21	11	CL
13.5m	30	22	8	SC
15.0m	33	21	12	CL
16.5m	30	21	9	CL
18.0m	31	20	11	CL
19.5m	32	20	12	CL
21.0m	34	24	10	CL
22.5m	32	18	14	CL
24.0m	31	20	11	CL
25.5m	34	24	10	CL
27.0m	36	21	15	SC
28.5m	34	20	14	CL
30.0m	34	21	13	CL
31.5m	31	23	8	GC
33.0m	29	18	11	CL
34.5m	33	19	14	SC
36.0m	32	19	13	SC
37.5m	30	17	13	GC
39.0m	32	23	9	GC
40.5m	28	20	8	GC
42.0m	33	18	15	SC
43.5m	36	22	14	CL
45.0m	33	22	11	CL
46.5m	32	23	9	SC
48.0m	33	24	9	CL
49.5m	34	25	9	SC

기록지 상에서는 기록이 남아있지 않지만, 건설당시의 품질관리자료를 통해 축조당시의 재료적 특성을 알 수 있다. D-3지역의 물성치는 D-2지역과 유사한 것으로 판단된다.

D-1지역에는 점토질 자갈층이 분포하여 D-2지역부

터 우선 사용하는 것으로 기록되어 있으나, 실제 시공시의 공사관리자료에 따르면 D-1과 D-2 지역의 재료를 동시에 채취하여 축조한 것으로 보고되어 있다. 1992년 6월 18일 본 댐의 코아에 대한 성토를 시작하였으며, 1992년 8월 22일(EL. 115.7m, GL. -39.3m)

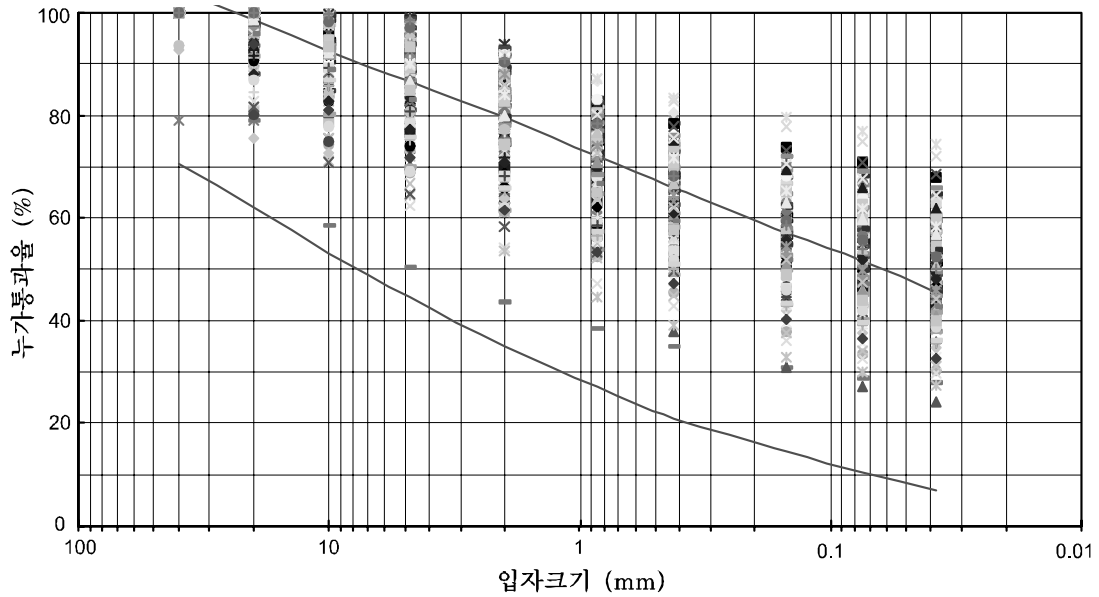


Fig. 2 중심코아의 입도분포곡선

Table 2 댐 코아의 일축압축시험 결과값

시 료 명	일축압축강도(kg/cm ²)	시 료 명	일축압축강도(kg/cm ²)
9+10(12.0m)-1	0.13	11+10(12.0m)	0.20
9+10(12.0m)-2	0.12	11+10(30.0m)-1	0.42
9+10(27.5m)-1	0.31	11+10(30.0m)-2	0.54
9+10(27.5m)-2	0.28	12+10(13.5m)-1	0.97
10+10(18.0m)	0.08	12+10(13.5m)-2	1.17
10+10(44.0m)-1	0.33	12+10(30.0m)-1	0.20
10+10(44.0m)-2	0.44	12+10(30.0m)-2	0.18

Table 3 댐코아의 삼축압축시험 결과값

시 료 명	C' (kg/cm ²)	φ' (°)
9+10(12.0m)	0.160	31.0
9+10(22.5m)	0.200	33.0
10+10(6.0m)	0.050	30.0
10+10(18.0m)	0.035	28.0
10+10(28.5m)	0.045	26.0
11+10(7.5m)	0.000	28.0
11+10(15.0m)	0.000	26.0
11+10(34.5m)	0.010	29.0
12+10(5.0m)	0.000	26.0
12+10(18.0m)	0.260	29.0
12+10(31.5m)	0.020	30.0

Table 4 실내 투수시험에 의한 투수계수값

STA. No.	투수계수 (cm/sec)
9+10(12.0m)	3.00E-06
10+10(18.0m)	0.738E-06
10+10(43.5m)	5.12E-06
11+10(12.0m)	4.03E-06
11+10(45.0m)	5.78E-06
12+10(13.5m)	2.76E-06

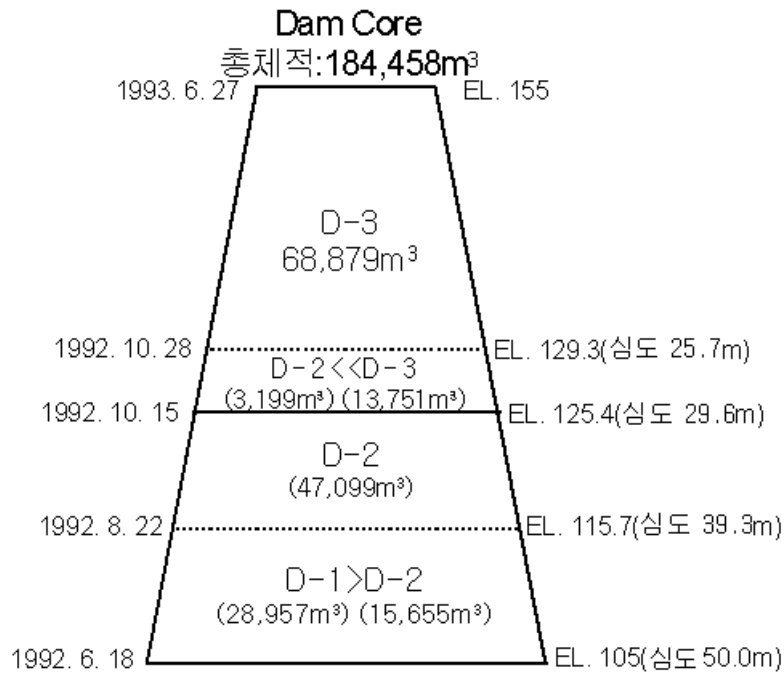


Fig. 3 토취장별 코아재의 축조현황

D-1지역의 재료원이 고갈되었다. 이후 D-2재료만을 가지고 본댐 코어부의 성토를 계속하였으며, D-2지역의 매장량이 당초예상보다 적어 추가적인 D-3 재료원을 개발하였다. D-2 재료만에 의한 성토는 EL. 125.4 m(GL. -29.6m)까지 수행되었으며, 이후 EL. 129.3m (GL. -25.7m)까지 D-2와 D-3재료를 동시에 사용하여 축조하였고, 댐 마루 까지 잔여구간을 D-3재료만으로 성토하였다(부산지방국토관리청, 1995). 시공당시 작성된 품질관리자료는 코어의 성토단계에 따라 일정 성토고에서 토질시험을 수행하였으며, 그 결과에 따른 코어재료의 상태는 댐 코어 전체에서 모두 시방규정을 만족하는 균일한 입도분포를 유지하면서 시공이 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 이 중 D-2, D-3 혼합층(EL. 125.4~129.3m)에서 사용된 D-2재료는 재료원이 고갈되는 시점에서 채취된 시료이며, 품질관리자료의 개수가 많지 않아 입도분포곡선이 대표성을 갖는 자료로 보기에는 무리가 있다. 따라서 D-2, D-3 혼합구간 내에 국부적으로 재료적인 문제점을 내포하고 있는 구간이 존재할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

시공 중의 함수비를 살펴보면 전체적으로 최적함수비의 습윤측으로 다져졌음을 확인할 수 있으나 EL.

107~110m과 EL.129m부근에서는 건조측으로, EL.120~122m구간에서는 습윤측으로 시공되었음을 알 수 있다. 습윤측으로 코어를 다질 때 건조측보다 차수성이 높은 것으로 일반적으로 알려져 있다. 따라서 균열 및 수압할렬의 가능성도 그만큼 감소하게 된다. 하지만 높은 습윤다짐은 건설중에 발생하는 간극수압과 변위에 대한 안정성의 문제를 발생시킬 수 있는 우려가 있다.

2.2.2 필터 재료 평가

댐의 필터재료로서의 기능을 수행하기 위해서는 코어와 필터재료 사이의 배수조건과 piping 조건이 만족되어야 한다. 즉, 필터재료는 보호받는 흙의 입자가 유실되지 않을 정도로 작은 입경과, 물이 용이하게 배수 될 수 있을 정도로 큰 입경의 두 가지 조건을 만족해야 한다. 전자를 piping조건이라 하고 후자를 배수조건이라 하는데, piping 조건은 입도의 상한선을, 배수조건은 입도의 하한선을 나타낸다.

Table 5는 여러 학자들이 제안한 필터의 만족조건이다. 재료간의 필터의 조건은 입도관계를 기준으로 제시되어 있으며, 이 중 필터재료의 입도가 상한선만

Table 5 여러 학자들이 제안한 필터의 만족조건

제안자	조건
Terzaghi & Peck(1948)	$D_{15(F)} < 4 \times D_{85(B)}$, $D_{15(F)} > 4 \times D_{15(B)}$
Bertram(1940)	$D_{15(F)} < (6 \sim 9) \times D_{85(B)}$
Sherman(1953)	$CU(B) < 1.5$: $D_{15(F)} < 6 \times D_{85(B)}$, $D_{15(F)} < 20 \times D_{15(B)}$, $D_{50(F)} < 25 \times D_{50(B)}$ $1.5 < CU(B) < 4.0$: $D_{15(F)} < 5 \times D_{85(B)}$, $D_{15(F)} < 20 \times D_{15(B)}$, $D_{50(F)} < 20 \times D_{50(B)}$ $CU(B) > 4.0$: $D_{15(F)} < 5 \times D_{85(B)}$, $D_{15(F)} < 40 \times D_{15(B)}$, $D_{50(F)} < 25 \times D_{50(B)}$
Karpoff(1955)	Uniform filter : $5 \times D_{50(B)} < D_{50(F)} < 10 \times D_{50(B)}$ Well-graded filter : $12 \times D_{50(B)} < D_{50(F)} < 58 \times D_{50(B)}$, $12 \times D_{15(B)} < D_{15(F)} < 40 \times D_{15(B)}$ and parallel grain-size curves

** D_{15} : 재료의 통과백분율 15%에서의 입경(첨자 F : filter, B : base soil)

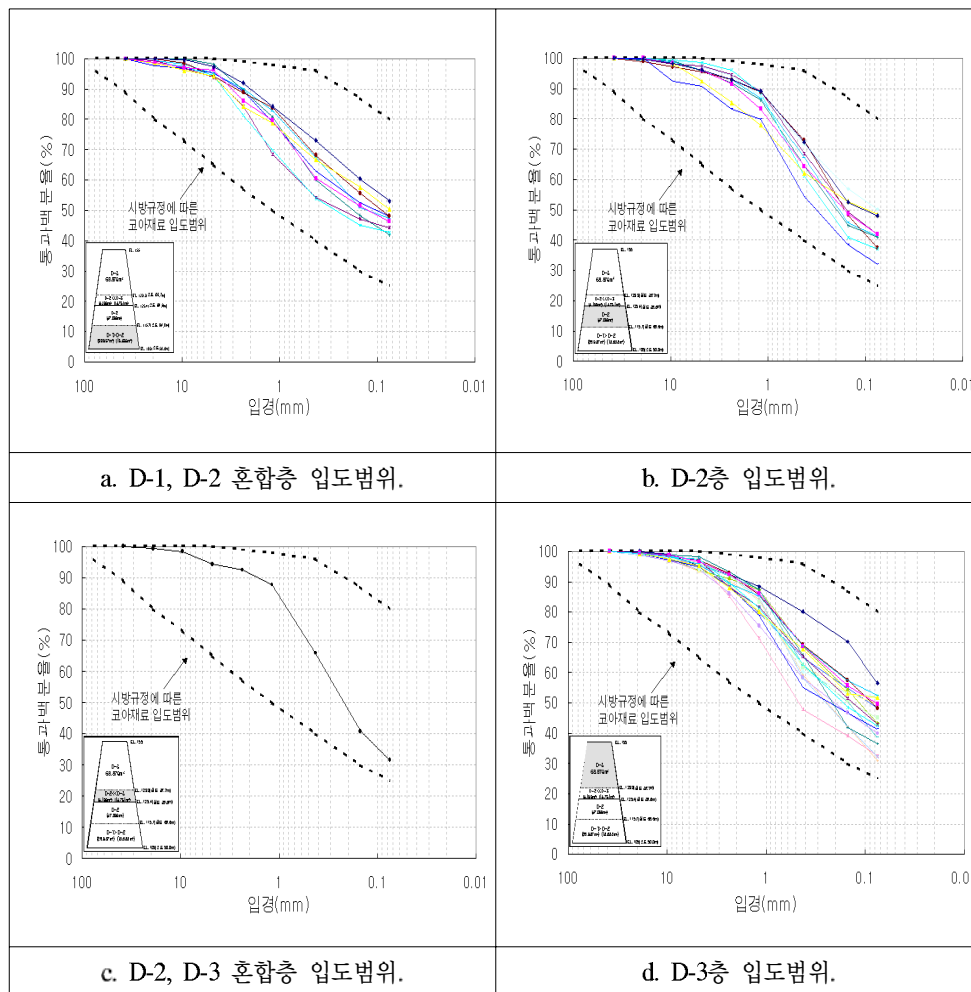


Fig. 4 토취장별 입도분포 범위

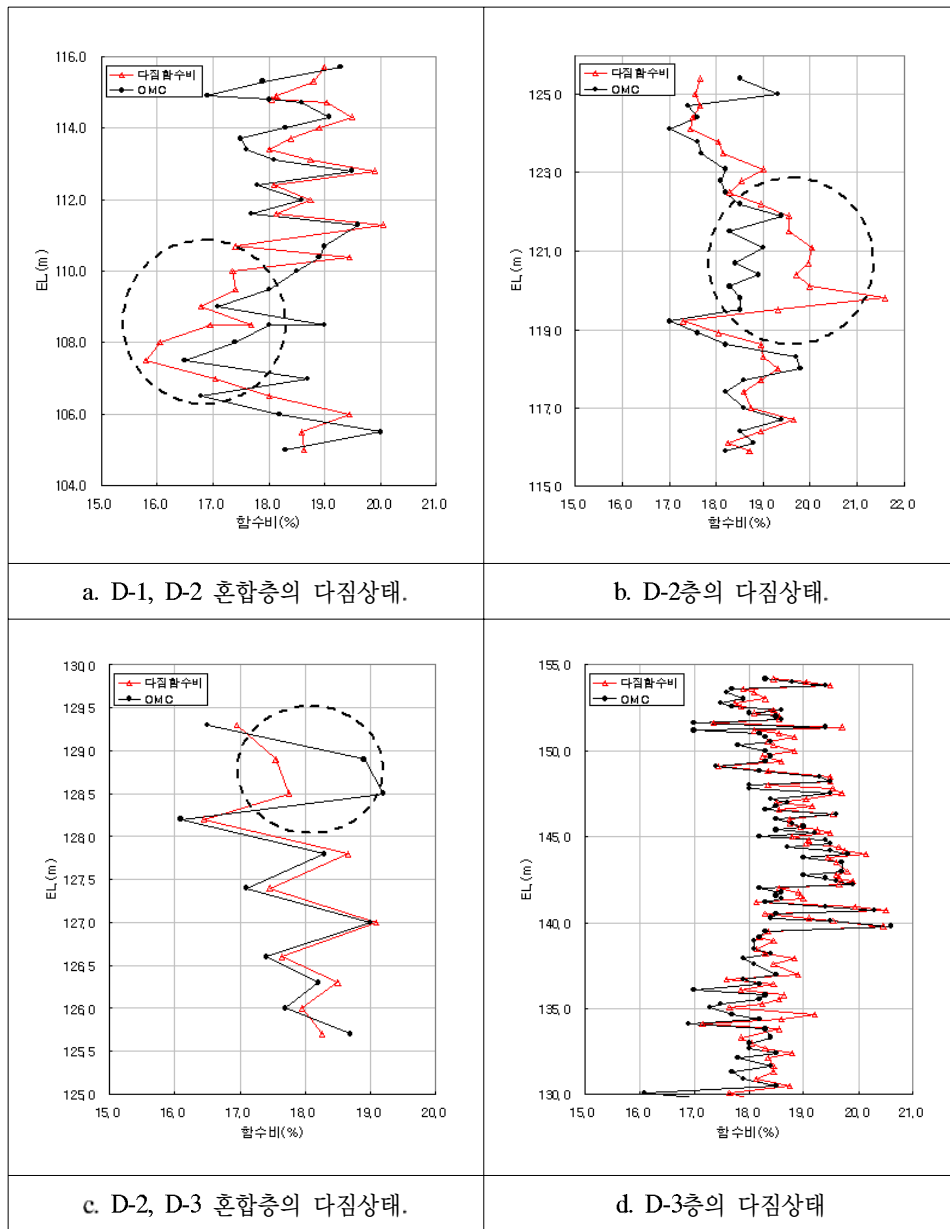


Fig. 5 토취장별 다짐상태

제시되어 있는 조건은 배수조건이 고려되지 않고, piping 조건만이 고려되어 있는 수식이다.

필터재료는 전문가들이 제안한 필터조건의 상한선보다 작은 입경으로 시공되어 있어, 코어와 필터재 사이의 파이핑조건은 만족되고 있음을 알 수 있다. 다만, "Terzaghi & Peck"과 Karpoff의 필터조건 중 배수조건을 나타내는 입경의 하한선과는 잘 맞지 않아서 필터재료에서의 배수조건에는 다소 문제의 가능성이

를 내포하고 있는 것으로 판단된다. 배수조건이 만족되지 않을 경우 필터재료에서 급강하해야 하는 침윤선이 Shell 영역까지 영향을 미치게 되어 필터재료와 Shell 영역간의 필터조건도 고려할 필요성이 있다. 운문댐의 필터재료 입도분포곡선에 의해 전문가들이 제안한 필터조건을 만족시키는 입도분포 범위를 Fig. 6에 나타내었다. 필터재료와 Shell재료간의 필터조건은 비교적 잘 맞는 것으로 나타나고 있어, piping조건

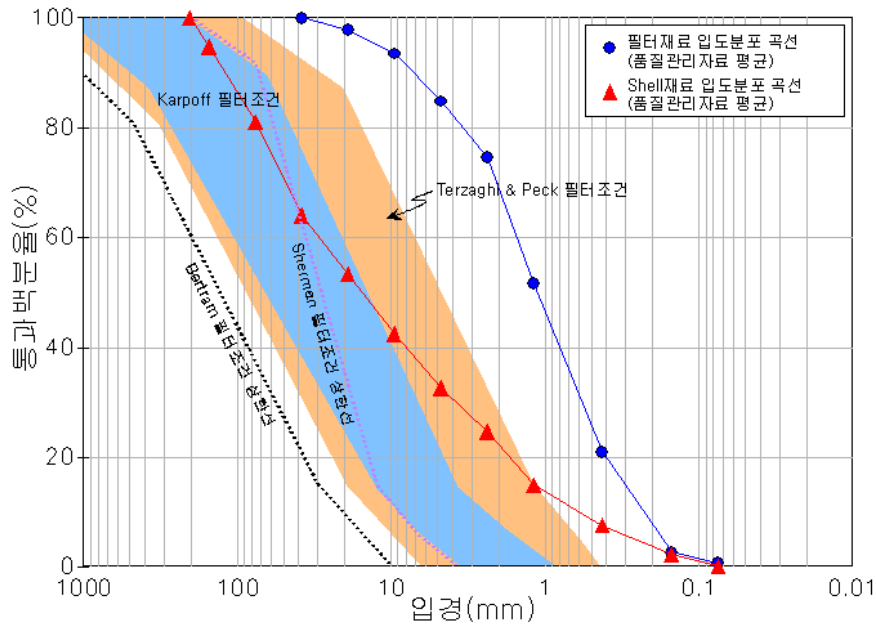


Fig. 6 필터(filter)와 셸(shell)에 대한 필터조건 만족범위

배수조건에 있어서 큰 문제점은 없는 것으로 판단된다.

2.3 보강전후의 시추자료 분석

CGS(Compaction grouting system) 보강구간에 대해서는 1차 안전진단조사시 4공, 2차 안전진단조사에서 3공이 조사되었다. 각 시추공에 대해서 현장투수 시험 및 현장, 실내시험이 시행되어 댐체의 투수계수를 비롯한 현장 N치, 함수비, 액·소성한계 등의 기본 물성치가 검토되었다.

2.3.1 시추조사자료

댐체의 80m 보강구간에 대한 확인시추조사 내용은 보강전후로 총 7공에 대해서 조사를 하였지만 대표적이라 생각되는 한 공을 Fig. 7-8에 나타내었다. 보강 후의 조사에서 시행한 표준관입시험결과를 보면, 3개의 시추공 모두 댐마루를 기준으로 30~45m에서 N치가 50이상으로 높게 나타났으며, STA. No. 11+15공에서는 2~14m에서도 N치가 50이상으로 평가되었다.

시추코어를 육안으로 관찰한 결과, 보강전 조사에서

는 댐마루를 기준으로 32~42m에서 자갈이 분포되어 있는 것으로 나타났다. 보강후 조사결과에 의하면, 자갈이 다량으로 분포된 범위는 30~44m인 것으로 나타나 두 조사의 결과가 비슷하며, 표준관입시험결과와도 일치함을 알 수 있다.

이는 시공당시의 상황을 살펴보면 D-2 건설시 비가 많이 내리는 우기(7, 8월)로서 차량통행에 지장이 많아 자갈을 깔고 회수를 다하지 못하여 나타난 현상이라 판단된다. 따라서 자갈이 D-2 영역에 집중적으로 분포하는 것으로 판단되며, STA. 11+15공에서 N치가 50이상으로 평가된 D-3 영역의 상부층은 소량의 자갈로 인해 N치가 과대하게 평가된 것이라 할 수 있다.

2.3.2 현장투수시험 결과

현장에서의 투수계수는 보강전 현장에서 수행한 투수계수와 비교해 볼 때 10¹order정도 감소한 것으로 판단된다. 그러나 현장투수시험 수행중인 CGS보강 구간 내에 존재하는 STA. 11+15공 시추중 심도 37m 부근에서 유입수가 발견된 후 약 5시간 동안 14m가량 지하수위가 상승하였다. 이러한 현상이 나타난 원인으로서, CGS보강 이전에 댐 코어로 침투했던 물이 보수보강과정 중 코어내에 갇혀 있는 상태였기 때문인

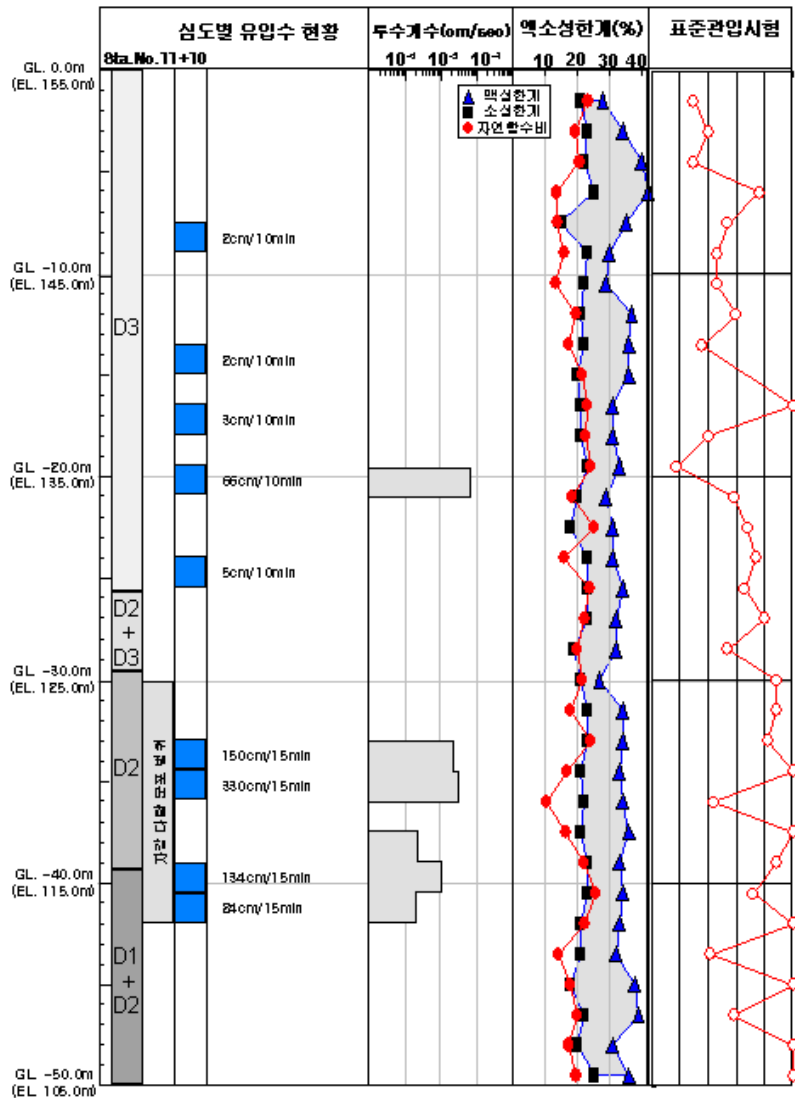


Fig. 7 댐마루에서의 시추조사 결과(보강전, STA. 11+10)

가를 확인하기 위하여 수위안정 후 공내유입수를 시추공 밖으로 배출시킨 다음, 다시 수위회복을 실시한 결과 동일한 수위까지 수위가 상승하는 것을 확인하였다. 이로써 판단할 때 CGS보강 구간내의 코어재료는 보수보강 이전보다 낮은 투수성을 유지하는 것으로 보이나, 국부적으로 투수계수가 큰 지역을 따라 침투유량이 큰 구간이 존재할 가능성을 배제할 수 없다고 판단된다.

2.3.3 액소성 한계시험 결과

조사결과에 따른 심도별 연경도 변화는 보강전후가

모두 비슷하게 나타났다. 즉, 채취된 시료의 함수비는 5~26%의 범위를 나타내며 대부분의 심도에서 소성한계보다 작게 분포하고 있음을 알 수 있다.

또한, 소성지수 값도 대부분 16% 이하의 낮은 값을 보이므로, 점토함유율이 작고, 함수비의 변화에 따른 체적변화폭이 작아 압축성이 작다는 것을 간접적으로 알 수 있다. 그러나 함수비에 따른 체적 변화를 비교하는 것은 포화된 시료라고 가정했을 경우에 해당되므로, 연경도에 따른 재료의 특성을 명확히 규정할 수는 없으나, 앞서 언급된 시추조사결과와 연결지어 볼 때, 다량의 자갈이 분포하고 있는 것으로 판단되는 D-2영

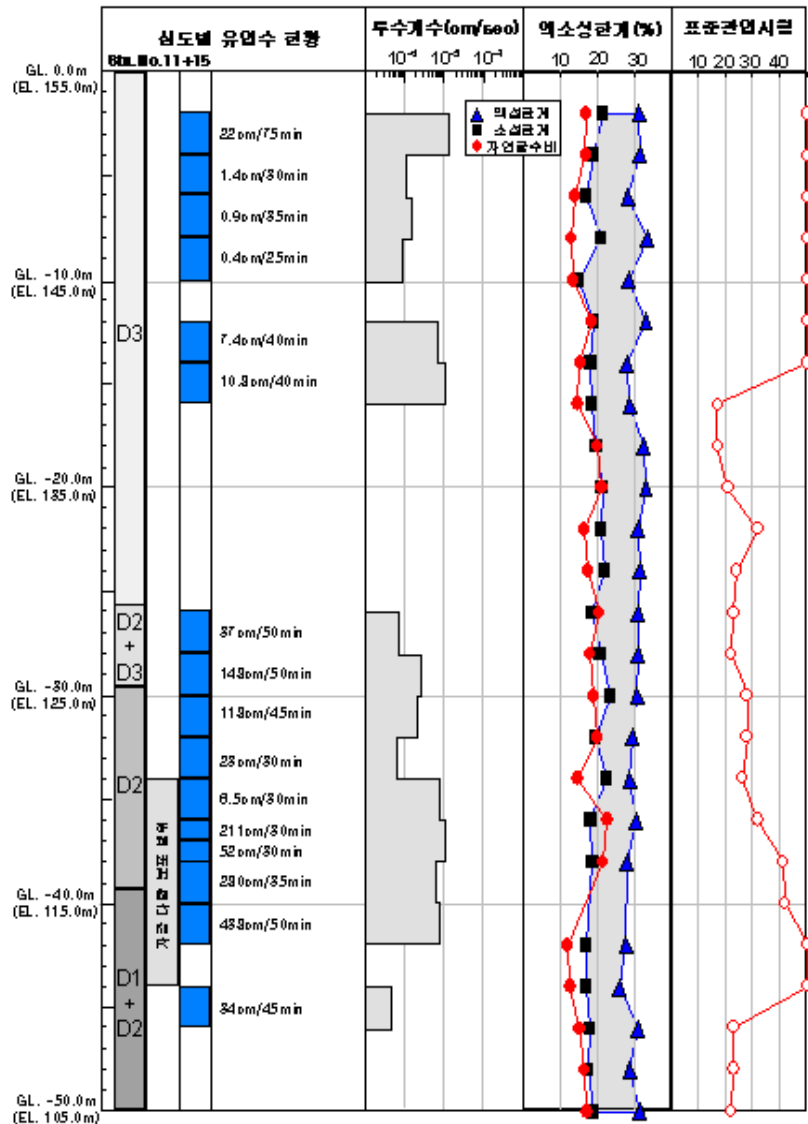


Fig. 8 댐마루에서의 시추조사 결과(보강후, STA. 11+15)

역에서는 세립토 함유율이 낮음으로 인해 자갈사이의 공극을 통한 침투수의 유로 형성가능성을 배제할 수는 없다고 판단된다.

2.4 계측자료 분석

본 연구대상인 댐은 1급규모의 용수댐으로서 그에 따른 여러 가지 계측기가 매설되어 있다. 관리중인 계측기의 종류는 간극수압계(pore pressure meter), 토압계(earth pressure meter), 층별 침하계(multi-layer

settlement meter), 변위계, 하루 누수량 측정장치(leakage measuring device) 등이 있다.

계측자료의 현황을 살펴보면 아래의 Table 6과 같다. 간극수압, 토압, 누수량의 경우에는 자동측정으로, 댐의 상부나 사면의 변위측정은 수동으로 측정했다.

댐 정상의 변위는 기록이 심하며, 이는 관측자의 오차에 인한 것으로 보이며, 사면의 경우에 변위의 변화가 보강전에는 거의 없었다. 보강후에는 사면의 변위를 느낄 수는 있었으나 보강전후의 비교자료를 확보하지 못하였다. 따라서 변위측정 결과는 분석에서 제외

Table 6 매장된 계측기 현황

구 분	계측자료 수집현황		계측 자료 미수집 기간	비 고
	기 간	개월수		
간극수압계	1993.1 ~ 1993.10 1995.1 ~ 2000.10	6년 8개월	설치 ~ '92.12 '93.11 ~ '94.12	자동계측
토 압 계	1993.1 ~ 1993.10 1995.1 ~ 2000.10	6년 8개월	설치 ~ '92.12 '93.11 ~ '94.12	자동계측
층별침하계	1995.11 ~ 1997.10	2년	설치 ~ '95.10	'97.12고장
변위 측정	1998.6 ~ 1999.12	1년 7개월	설치 ~ '98.5	광파측정기
하류집수정 관측유량 측정	1998.3 ~ 2000.12	2년 10개월	설치 ~ '98.2	자동계측

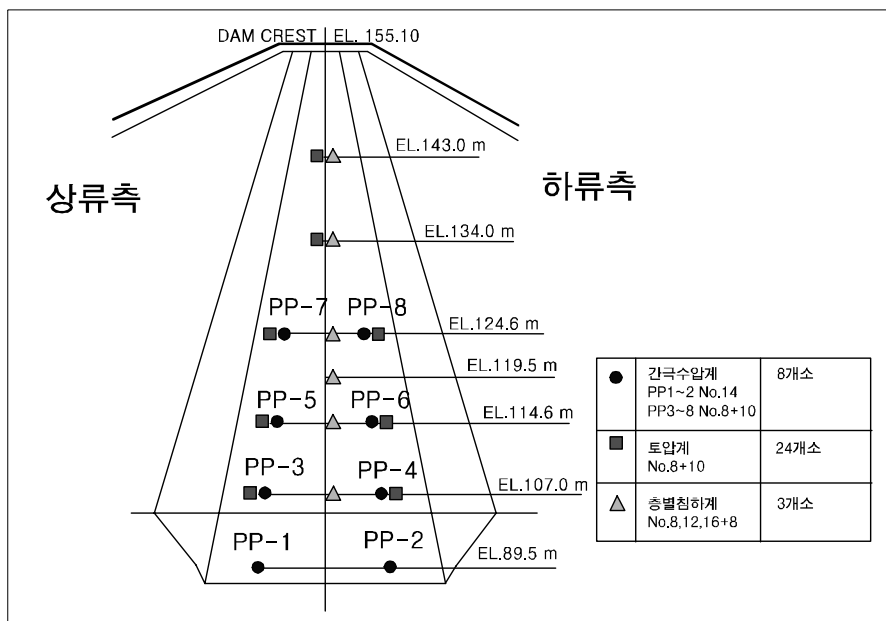


Fig. 9 매설된 계측기 위치도

하였다. 한편, 층별침하계는 댐이 완공된 1995년에 설치하였다. 대부분의 침하가 건설기간중에 발생되는데, 초기자료가 없을 뿐만 아니라, 2년간의 계측된 침하도 미약하며, 침하와 용기가 반복적으로 측정되는 것으로 보아 계측기에 문제가 있는 것으로 판명되었다. 따라서 층별침하 계측자료 역시 분석에서 제외하였다.

Fig. 9는 계측기의 매설현황이다. 누수량(leakage) 관측소는 댐 사면 하단부의 누수지점에 유공관을 설치하고, 종단면에 차수벽을 설치하여 웨어(wier)로 집수

되도록 하였다.

간극수압계는 댐의 기초에서부터 EL. 124m까지 한 단면에 총 8개가 매설됐으며, 토압계는 EL. 108~143m까지 8곳에 매설되어 있는데 1곳 당 수평, 45°, 135°로 3개씩 매설되어 총 24개이다. 계측빈도는 「댐시설 유지관리」 기준의 제1기로 계측을 해오고 있는데, 간극수압계와 토압계는 주 1회 측정, 누수량은 매일 측정되고 있다.

2.4.1 간극수압

초기 간극수압(pore pressure)은 상재하중과 재료의 함수비, 포화도에 영향을 크게 받으며, 담수가 시작되면 저수위의 영향을 받게 된다. 간극수압 P 는 다음과 같이 계산된다. 즉,

$$P = K \times \left(\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T_1^2} \right) \times 10^7 \quad (1)$$

이다. 여기서, P : 간극수압(kg/cm²), K : 계기상수(gage factor), T_0 : 초기 계측치, T_1 : 현재의 계측치이다.

간극수두(piezometric elevation; FE)는

$$FE = P \times 10.0 + \text{각 계기의 매설높이} \quad (2)$$

이며, 간극수압비(pore pressure ratio; FPR)는

$$FPR = \frac{P \times 10.0}{\gamma_t \times h} \times 100(\%) \quad (3)$$

이다. 여기서, γ_t : 성토재료의 습윤단위중량(t/m³), h : 성토고(m)이다.

계측자료의 전체적인 간극수두는 저수위의 변화에 일치하는 반응을 하고 있다. 저수위의 급상승시 간극수압도 급격히 상승함을 볼 때 계측기의 매설이 잘 되어있음을 의미한다. 계측기의 경우 정확한 초기치의 획득은 매우 중요하다. 그러나 간극수압의 초기치로 볼 수 있는 초기 담수시의 자료가 없어서 그 이후의 자료와 비교할 수 없다. 성토중 발생하는 간극수압은 시공함수비, 투수계수, 성토속도 등에 따라서 다르게 나타날 수 있다. 전반적으로 성토중에는 상재하중의 영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 10의 기반암중에 매설된 PP-1과 PP-2는 값의 차이가 확실히 드러나는데, 이는 두 계측기 사이에 설치된 차수 그라우팅(curtain grouting)의 영향으로 보이며, PP-3의 증가는 코아와 기반암의 경계에서 스며드는 물의 영향으로 보인다.

정상댐의 경우 과잉간극수압(excess pore pressure)으로 정상침투까지는 몇 년이 걸린다. 그러나 담수중의 계측자료를 보면 PP-4의 반응이 저수위에 영향을 받는 것으로 보아 정상침투까지의 기간이 짧아서 상류측과 하류측의 계측자료가 거의 동일하게 움직이고 있음을 알 수 있다. 이것은 투수계수가 높으며, 시공

당시 최적함수비(optimum moisture content; OMC) 이상의 습윤다짐을 한 것으로 해석할 수 있다.

상류와 하류의 계측기 자료를 살펴보면 모두 상류에 위치한 계측기의 간극수두가 높은 것을 알 수 있으며, 중심코아에서 그 만큼의 수두손실이 일어났다는 것을 뜻한다. 댐의 상단부와 하단부의 간극수압을 비교해 보면 하단부로 내려올수록 간극수두가 낮은 것을 알 수가 있다. 이러한 사항은 어디선가 그만큼의 수두손실이 발생하고 있다는 뜻이 된다. 한편 PP-6의 경우는 다른 계측기에 비해 수위변화에 민감함 반응을 보이지 않는다. 이는 다른 부분에 비하여 수두손실이 많은 곳으로 분석된다. 수두손실이 많다는 것은 그만큼 누수의 가능성이 크다는 것을 시사한다. 보강시에는 간극수압, 토압값의 편차가 심한 것을 알 수가 있다. 이는 보강위치(STA. 9~13)와 계측기 위치가(STA. 8+10, STA. 14) 가까워 보강시의 진동이나 압력의 변화, 응력의 재분배에 의한 일시적인 계측기 값들의 변동이라 할 수 있다. 그 이후로는 계측기의 값들이 안정된 값을 보이고 있다.

2.4.2 토압

댐체의 변위를 가장 적절하게 평가할 수 있는 것 중의 하나가 토압계이다. 변위는 수평변위와 수직변위로 나눌 수 있으며, 변위를 일으키는 주된 요인으로는 성토재료의 성질, 시공방법, 지반조건, 저수위 변동 등이 있다.

보통 댐 건설 중에는 성토하중에 의한 변위가 대부분이며, 담수 후에는 저수위의 영향을 가장 많이 받는다.

토압(earth pressure; EP)은 다음 식으로 구할 수 있다. 즉,

$$EP = K \times \left(\frac{1}{T_0^2} - \frac{1}{T_1^2} \right) \times 10^7 \quad (4)$$

여기서, EP : 토압(kg/cm²), K : 계기상수(gage factor), T_0 : 초기 계측치, T_1 : 현재의 계측치이다.

토압비(earth pressure ratio; EFR)는

$$EFR = \frac{EP \times 10.0}{\gamma_t \times h} \times 100(\%) \quad (5)$$

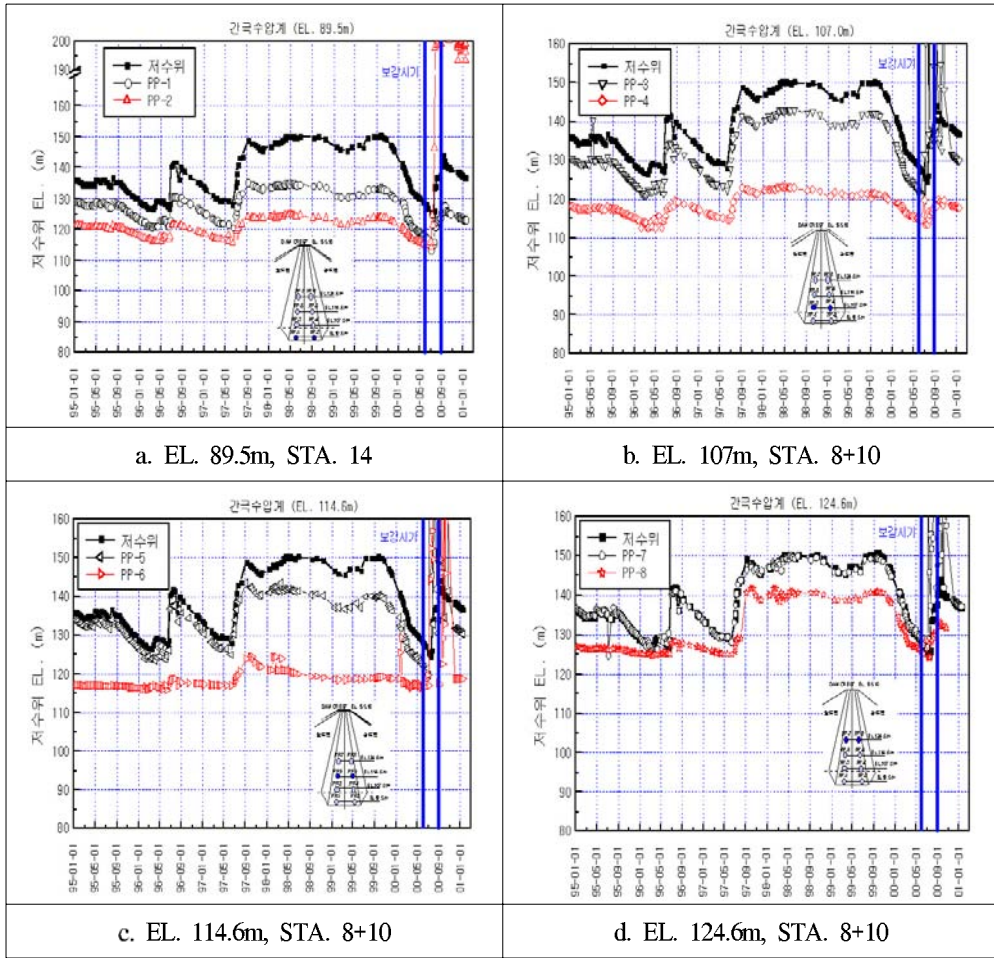


Fig. 10 간극수압계

이며, 여기서 EP : 토압(t/m^2), γ_i : 성토재료의 습윤 단위중량(t/m^3), h : 성토고(m)이다.

Fig. 11의 시간경과와 토압계 매설위치에 따른 변화를 살펴보면 건설기간에는 큰 영향을 보이지 않으며, 성토고에 비례하여 증가하는 모습을 보였다. 또한 동절기 공사중지 기간(93.1~3)에는 토압도 일정하게 유지되었다. a의 코아 하류에서의 토압의 크기가 상류보다 큰 토압을 보이고 있는데, 이는 하단부에서 어느 정도 응력전이(load transfer)가 일어나는 것으로 추정된다. 또한 STA. 8+10의 표고차에 따른 토압분포나 토압비를 비교 분석한 결과, 일정하게 증가하는 추세를 보이지 않았다. 이는 쉘(shell)부분과 코아부분의 강성차이가 부분적으로 크거나, 코아가 부분적으로 불균질하다고 추정할 수 있다.

댐 완공후에는 초기 담수시에 대부분의 토압이 감소하는 현상을 보이고 있다. 이는 초기 담수의 양압력과 과잉간극수압이 소산하는 영향으로 분석될 수 있는데, EL.124.6m의 계측기의 토압은 큰 폭으로 하락했음을 알 수 있다. 이는 담수시작 전에 과잉간극수압이 빠르게 소산되었거나, 강성차이에 의한 응력전이가 많이 일어났다고 볼 수 있을 것이다. 담수가 어느 정도 시작한 후에는 저수위의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 토압의 경우도 간극수압과 비슷하게 EL.107m에서보다 EL.114m의 토압보다 적게 나타남을 알 수 있다.

2.4.3 누수량

누수량(leakage) 측정은 댐의 전반적인 누수의 양

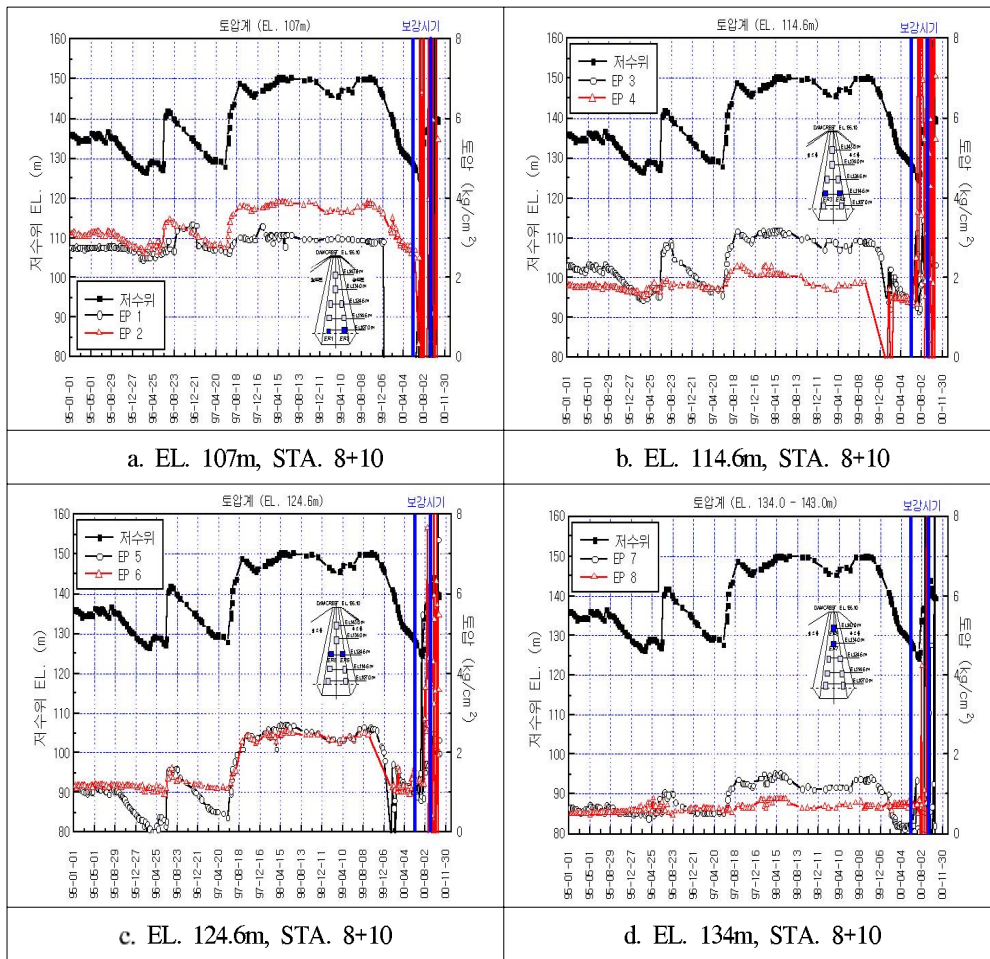


Fig. 11 토압계

을 측정하는 것이다. 그러나 전반적인 계측이므로 어디에서 어느 정도의 양이 세는지는 정확히 알 수 없다. 연구대상인 운문댐의 누수관측소는 94년 9월, 댐 완공 3년후인 97년 12월에 설치되어 이전의 누수량은 알 수가 없다.

Fig. 12는 시간에 따른 누수의 변화를 나타내고 있다. 누수량은 대략 저수위에 비례하여 반응하고 있다. 관측유량을 보면 평균유량이 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 과대하다는 것을 알 수 있으나, 보강후에는 그 양이 80%정도 감소하였다(텐버코리아, 2000). 그러나 그 이전의 과대유량은 댐체 뿐만 아니라 다른 부분에서도 부분적으로 들어왔을 확률이 높다. 또한 보강공사 기간에 여수로의 측구 높이를 5m 낮춤으로써 저수의 상승에 의한 누수량 측정과 보강효과를 비교할 수 없는 관계로, 보

강에 의해 80%정도 감소했다는 주장 자체가 무의미하다. 따라서 이에 대한 철저한 분석이 필요하다. 만일 댐체 코아에 유로가 발생되었다면 관측유량은 저수위가 일정하더라도 증가되는 추세를 보일 것이다. 그러나 그러한 경향은 없는 것으로 보인다.

2.5 기동분석

2.5.1 응력전이

응력전이(load transfer)는 재료들의 강성차에 의해서 경계부근에서 강성이 작은 쪽의 하중을 강성이 큰 쪽에서 부담하여, 강성이 큰쪽은 평균응력보다 큰 응력이 걸리고 강성이 작은 쪽은 평균응력보다 작은 응력이 걸리는 현상을 말한다. 응력전이율(load transfer

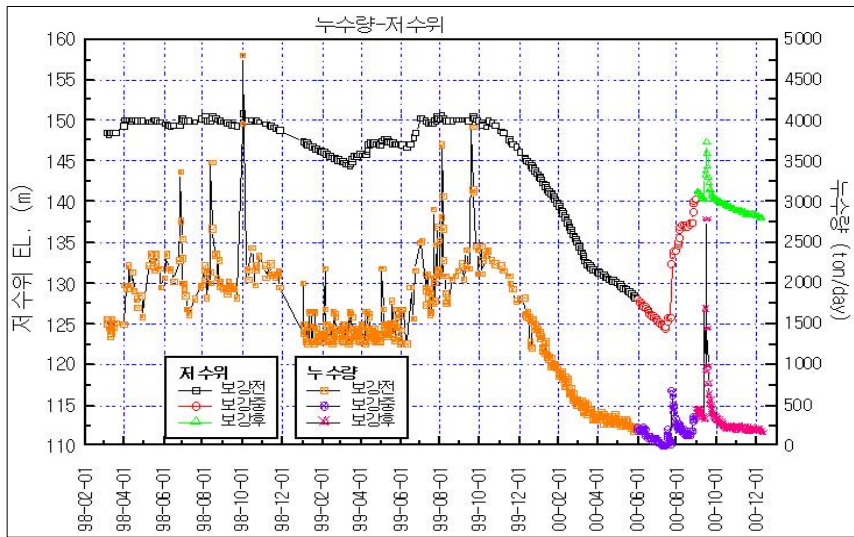


Fig. 12 누수량

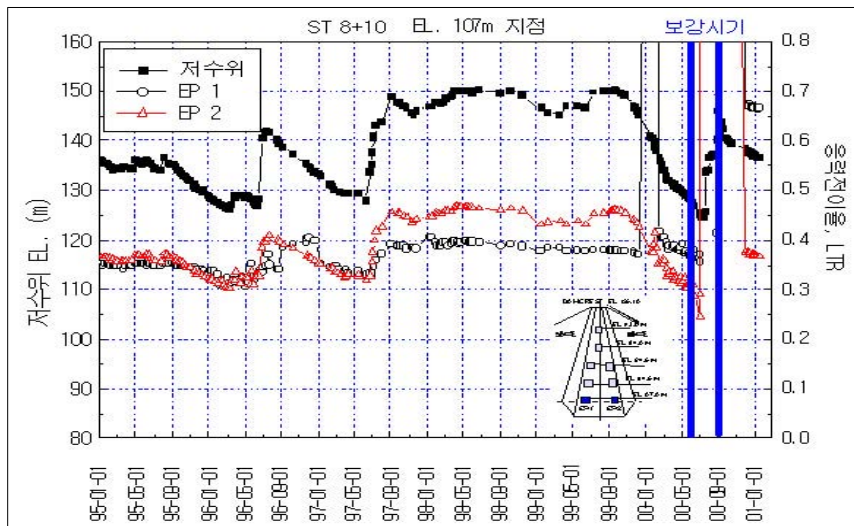


Fig. 13 응력전이율

ratio; LTR)의 계산식(Kulhawy *et al.*, 1967)은 다음과 같다.

$$LTR = \frac{\sigma_1}{\gamma_t h} \quad (6)$$

여기서, σ_1 : 최대 주응력, γ_t : 습윤단위중량, h : 성토 고이다.

다음의 Fig. 13은 STA. 8+10, EL. 107m 지점의 응력전이율을 나타낸 것이다. 응력전이는 주로 초기

담수시나, 최고 만수위, 수위급강하시에 많이 일어난다. 최고 담수시까지는 응력의 재분배에 의해 응력전이는 높게 나타나며, 그 이후로 어느 정도 안정하다가 수위가 급강하하면서 다시 응력전이가 어느 정도 일어남을 알 수가 있다. 자료중에 값이 높고 불규칙한 부분은 보강시의 교란에 의한 것이다.

2.5.2 국부전단파괴

댐체내에서 토압이 코아의 전단강도를 초과하는 국

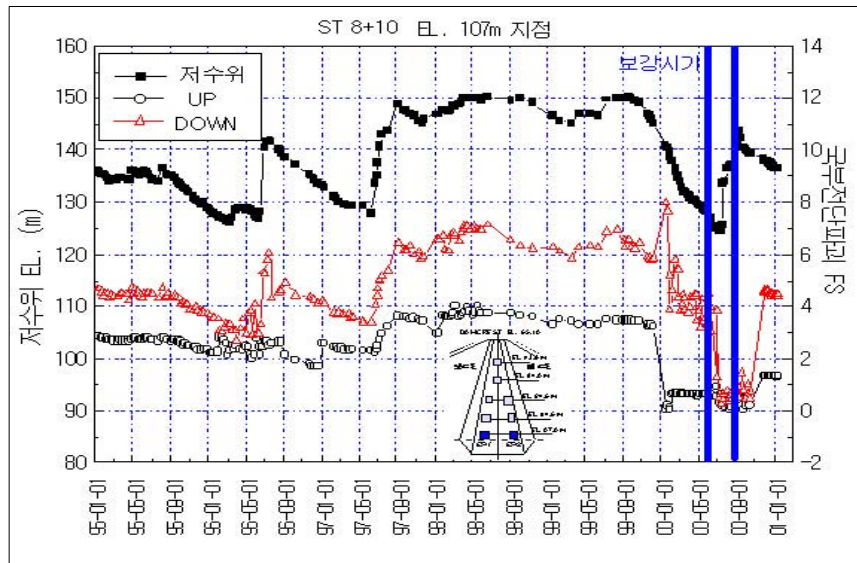


Fig. 14 국부전단파괴율

부적인 전단파괴의 가능성을 알아보기 위하여 전단파괴비를 이용하며, 안전율 계산법은 다음과 같다.

$$SF = \frac{a + (\tan \alpha) \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{\frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})} \quad (7)$$

여기서, $a = c/2$, $\tan \alpha = -\frac{\tan \phi}{2}$, c : 점착력, ϕ : 내부마찰각이다.

안전율이 1보다 작은 경우에 국부적인 전단파괴에 취약하다고 할 수 있다. Fig. 14는 국부 전단파괴의 안전율을 나타낸 것으로서 댐의 상류층의 안전율이 대부분 낮게 나왔으며, 저수위의 급강하시에 안전율이 취약한 것으로 나타났다.

2.5.3 수압할렬

수압할렬(hydraulic fracturing)은 코아와 셸존(shell zone) 사이의 작은 크랙들이 응력전이에 의한 수직응력의 감소에 의해, 수압이 토피하중보다 크게 작용함으로써 점차적으로 크게 발생한다는 이론이다(Kjaernsli and Torblaa, 1968). 수압할렬은 침투로 인한 간극수압이 침투가 발생하기전의 평균 전응력 이상으로 증가할 경우에 발생한다.

Fig. 15는 코아의 수압할렬 가능성을 나타낸 것으로서, 댐의 하부쪽에서는 토피하중보다 정수압이 높아

수압할렬의 가능성이 있음을 알 수 있다.

3. 결론

지금까지 운문댐에 대한 토질분석, 시추자료, 계측 자료를 통하여 댐에 대한 안정성 평가를 실시한 결과 몇 가지의 문제점이 있다는 것을 발견하였다. 운문댐은 댐 상부에서 함몰부가 발생되어 이를 보수보강하고 수위를 낮추어 놓은 상태이다. 함몰부가 발생된 메카니즘은 몇 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 코아내의 유로형성으로 코아재가 유실되고 이로 인한 내부침식에 의한 것과, 두 번째 만수위시의 사이편현상에 의한 상부 코아내의 월류작용으로 일부 shell층의 유실로 인한 현상과, 세 번째 계측기 매설한 후 복구불량에 의한 침식으로 생각할 수 있다. 하지만 지금까지의 조사에서는 모두 어느 정도의 타당성은 가지고 있으나 정확하게 무엇이라고는 판명을 내릴 수는 없었다.

과대누수에 대한 평가도 첫 번째 댐체내의 유로 발생에 의한 누수의 증가와, 두 번째 댐체와 여수로의 접합부에서의 강성차이에 의한 연약부의 발생으로 인한 누수의 발생, 세 번째 댐체가 아닌 다른 곳에서의 누수의 경로가 발생했을 가능성을 들 수가 있다. 앞에서의 조사에 의하면 첫 번째와 두 번째의 가능성은 발견할 수 있었으나 세 번째의 경우 조사가 이루어지

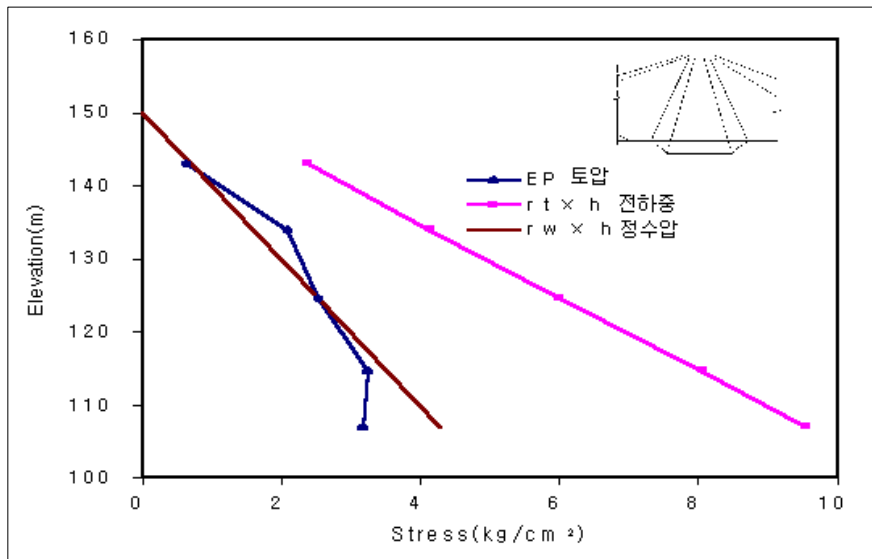


Fig. 15 수압할렬.

지 않아 정확한 경로는 알 수가 없었다.

이번 조사에 의해 다음과 같은 몇 가지의 문제점을 발견할 수 있었다.

1. 댐 재료에 대한 전체적인 입도분포는 양호한 것으로 나타났으나 일부 코아재에서 절손현상이 나타나 침식의 우려가 있는 결과를 보였다.
2. 댐체의 전체적인 다짐은 최적함수비에서 약간의 습윤다짐을 하였는데 일부에서는 건조다짐을 한 경우도 있었다.
3. 시추조사에서 댐 상부와 심도 30-40m에서 자갈이 분포하고 있음을 발견하였으며 이로 인한 누수의 가능성도 큰 것으로 보여지고 있다.
3. 일부구간에서의 시추조사에서 코아내에 물이 많이 함유되어 있는 것으로 보아 유로가 발생하였거나, 발생 후 다시 닫힌 것으로 판단된다.
4. 계측자료의 분석에서도 자갈이 함유된 부근에서 간극수압이 낮게 지적되어 누수의 가능성이 있다는 것을 보여주고 있다.
5. 정확한 현상은 발견되지는 않지만, 여러 조사에 의하면 응력전이 및 수압할렬이 발생했을 가능성은 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구와 조사결과가 나올 수 있었던 것은 (주)유니백의 유태성 박사님과 호서대학교 김상환 교수님의 협조와 자문이 큰 역할을 하였음을 밝힙니다. 한편, 수자원연구원의 지하수·지반연구소장인 김형수 박사님께도 각별한 감사를 드립니다. 각종 탐사 및 계측 자료의 취득과 분석에 도움을 준 배재대학교 토목환경공학과 지반조사연구실 출신의 김상규(한국시설안전기술공단), 이용선(죽립엔지니어링) 및 김영경 군에게 이 자리를 빌어 감사를 드립니다. 본 연구는 한국학술진흥재단의 일부 연구지원비(KRF-2000-DP0434)에 의해 이루어졌다.

참고문헌

부산지방국토관리청, 1995, 경상북도 청도군 운문댐 건설지. 한국건설안전기술원, 수자원공사, 2000, 경북 청도군 운문댐 정밀 안전진단 보고서.
 덴버 코리아, 2000, 운문댐 CGS 보강 최종 보고서.
 영남대학교 방재연구소, 대본엔지니어링, 수자원공사, 2001, 운문댐 안정성 평가 및 보수보강대책에 관한 연구용역 최종보고서.
 임희대, 김태곤, 이영섭, 고근식, 1999, 다짐함수비 변화에 따른

- 필댐의 거동분석, 충남대학교 산업기술연구소 논문집, Vol. 14, No.2.
- 한국자원연구소, 1973, 자인 지질도폭(1:50,000).
- 한국자원연구소, 1971, 경산 지질도폭(1:50,000).
- Barden, L., Madedor, A.O., Sides, and G.R., 1969, Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay, Proc. ASCE 95, SM1, p.33-51.
- Kjaernsli, B., and Torblaa, I., 1968, Leakage through Horizontal Cracks in the Core of Hyttejuvet Dam, Norwegian Geotechnical Institute, Publication No.80, p.39-47.
- Kulhawy, F.H., and Gurtowsky, T.M., 1967, Load Transfer and Hydraulic Fracturing in Zoned Dams, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT9, Sept., p.963-974.
- Nobari, E.S., and Duncan, J.M., 1972, Effect of Reservoir Filling on Stresses and Movements in Earth and Rock fill Dams. Report No. TE-72-1, University of California, Berkeley.
- Sherard, J.L., 1985, Hydraulic Fracturing in Embankment Dams, Seepage and Leakage from Dams and Impoundment, ASCE National Convention, Denver, Colorado, p.115-141.
-