KGS Fall '95 National Conference
28, October, 1995/Seoul/Korea

計測 結果를 利用한 댐體의 擧動分析 (II: 變位 測定資料를 中心으로)

Evaluation of the Behavior of a Dam Body by Field Monitoring Results (II: With Emphasis on Deformation)

여유현[1] : Yeoh Yoo Hyeon 송정락[2] : Song Chung Rak

[1] 대우엔지니어링 지반공학부 대리, Lead Engineer of DAEWOO ENGINEERING Co.
[2] 대우엔지니어링 지반공학부 과장, Manager of DAEWOO ENGINEERING Co.

Synopsis :

This study analyzed the behavior of a pumped power storage dam through the settlement and horizontal deformation monitoring results.

The results showed that dam crest settlement reached nearly 1 % of dam height for upper dam and 0.5 % of dam height for lower dam. Also the trend of settlement curve seems continuously progressing. Regression analysis of settlement data by hyperbolic method showed that the stabilizing time of settlement may exceed 10 years from now.

For the Upper dam, the anticipated total settlement may exceed the allowable settlement in the near future which was given by the designer. Hence, it was suggested that the intensive monitoring and possible reduction of operating water level need to to considered.

1. 서 론

본 고의 대상댐은 총 발전용량 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. 댐체는 발전용수를 저장하는 상부댐과 양수용수를 저장하는 하부댐의 2 개 댐으로 구성되어 있다. 상하부댐은 모두 중앙차수벽식 사력댐으로 상부댐은 댐마루길이 269 m, 높이 86 m, 저수용량 6,464,000 m^3 이며, 하부댐은 댐마루길이 529 m, 높이 78 m, 저수용량은 10,089,000 m^3 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.[6]

본 댐은 1985년 준공후 현재까지 정상적인 발전 및 양수작업을 해오고 있으나 댐정상부에서 육안으로 균열이 관측되는 등의 현상이 나타나고 있어 거동 분석을 실시하였다. 본 고에서는 주로 댐체의 변위자료를 이용하여 댐의 거동분석 결과를 고찰하고자 한다.

2. 침하 측정

S-DAM에는 댐 표면 침하 측정을 위하여 그림 1과 같이 상부댐에는 댐마루 변위 측정점 6개, 사면 변위 측정점 24개의 측점이 설치되어 있으며, 하부댐에는 댐마루 변위 측정점 12개, 사면 변위 측정점 40개의 측점이 설치되어 관리되고 있다.
침하 측정은 댐 인근의 TBM 좌표를 기준으로 측정점의 표고를 관측하여 상대표고를 이용하여 산정하였으며, 수평변위량은 각 측점별로 설치되어 있는 기준점(Reference Point)으로부터 상대위치를 이용하여 산정하였다.

3.측정자료의 분석

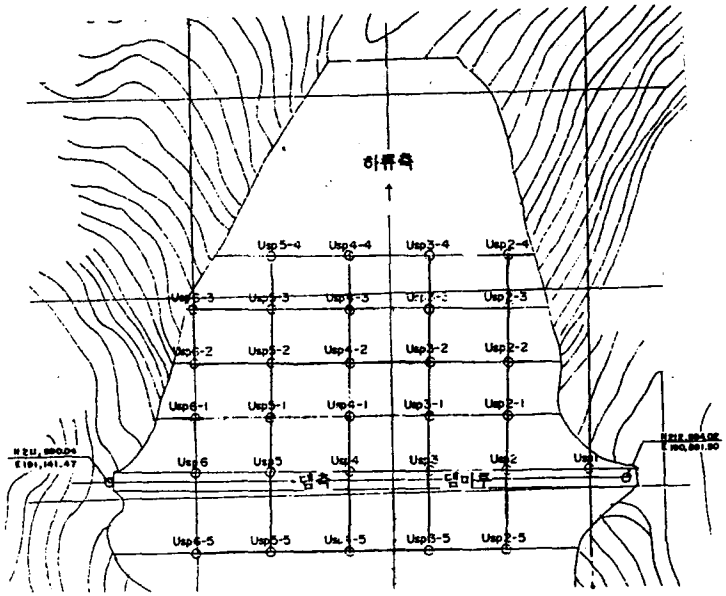
3.1 댐마루 침하의 경시변화

댐 마루 침하 측정점은 심벽 상부에 설치되어 있으므로 댐마루 침하는 심벽의 거동에 절대적인 영향을 받는다. 즉, 댐 시공후 과잉 간극수압의 소산, CREEP과 같은 심벽재의 변형에 영향을 주는 요인이 작용하거나, 댐 기초 지반의 변형 등으로 인하여 심벽이 침하되면 즉시 댐마루 침하가 발생하게 된다. 또한 댐이 완공된 후 과잉 간극수압의 소산이 완료되면 댐마루 침하에 영향을 미치는 요인은 저수위 변화에 의한 유효응력의 변화와 CREEP 압밀에 의한 침하가 발생할 수 있다. 또한 수위 급강하에 의하여 물의 침투력이 커져 댐체의 재료가 유실되어 댐 마루 침하가 유발되기도 한다.

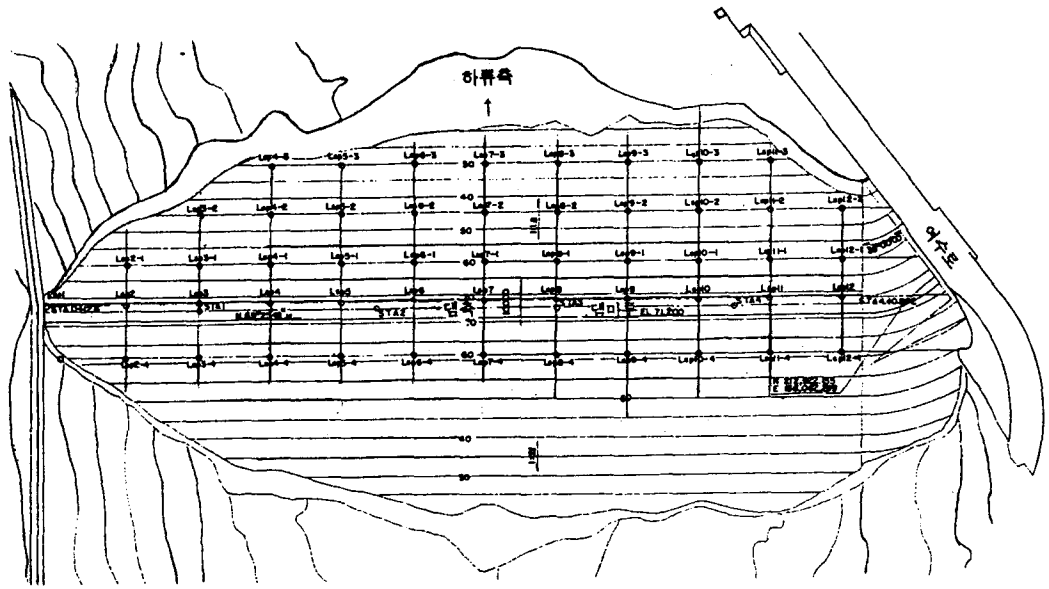
3.1.1 상부댐

그림 2 는 상부댐 댐마루 침하의 경시 변화를 각 측점별로 보여주고 있다. 댐 우안(상류측에서 하류측을 바라볼때 오른쪽)에 위치한 USP-1 측점의 경우 수직 침하는 댐 축조이후 거의 발생되고 있지 않으며, 댐 중앙에 위치한 USP-4 측점의 경우 1991년 10월 현재 약 80 cm 이상의 침하가 발생하였다. 그림 2 에서 댐마루의 전체적인 침하양상을 살펴보면 댐 축조후 1987년 5월까지 침하는 급속하게 발생하였다가(1단계 침하) 1991년 현재 다소 완만해지는 곡선을 나타내고 있으나(2단계 침하) 아직도 침하 기울기는 수렴되고 있지 않으며, 지속적인 침하가 예상되고 있다

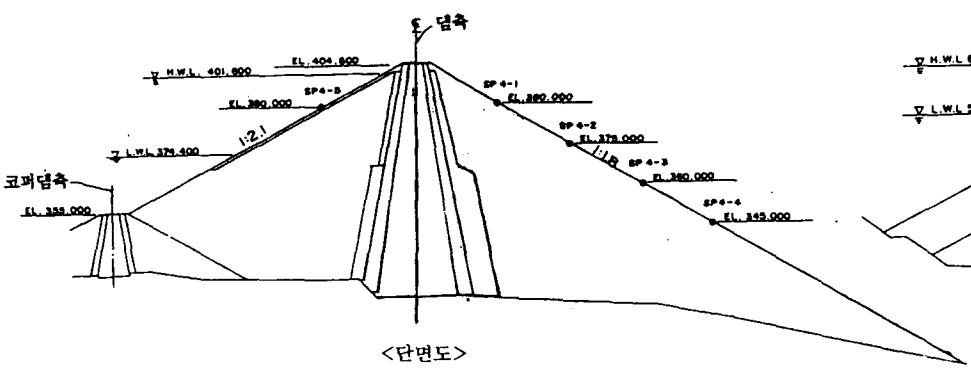
표 1 에는 현재 계측된 침하 자료에 쌍곡선법을 적용하여 예상 최종 침하량을 구하였다. 쌍곡선 법은 침하의 속도가 쌍곡선으로 변한다는 가정에 의해 예상 침하량을 산정하며 성토하중 하부압밀층의 침하량분석에 널리 쓰여온 방법이다[4]. 쌍곡선 법에 의한 해석 결과중 대표적으로 댐 중앙부인 USP-4의 예측 결과는 그림 3에 나타낸 바와 같다. 그림 3으로부터도 아직 침하는 수렴되지 않았으며 이제 막 수렴화 단계에 접어들기 시작한 것으로



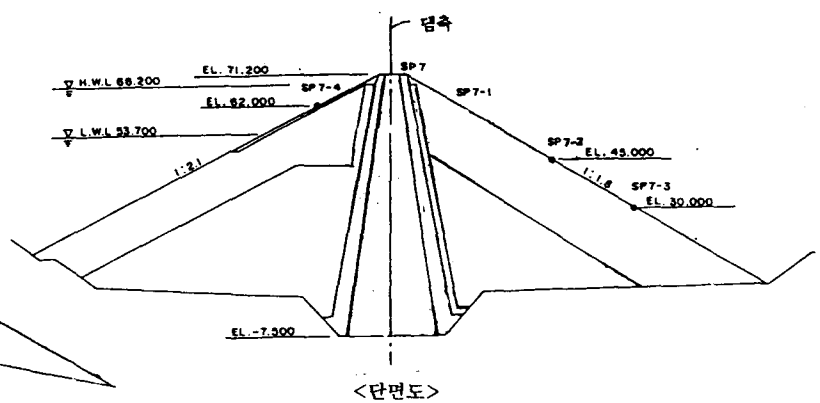
<평면도>



<평면도>



<단면도>



<단면도>

그림 1.a, 상부댐 침하측정점 설치위치도

그림 1.b, 하부댐 침하측정점 설치위치도

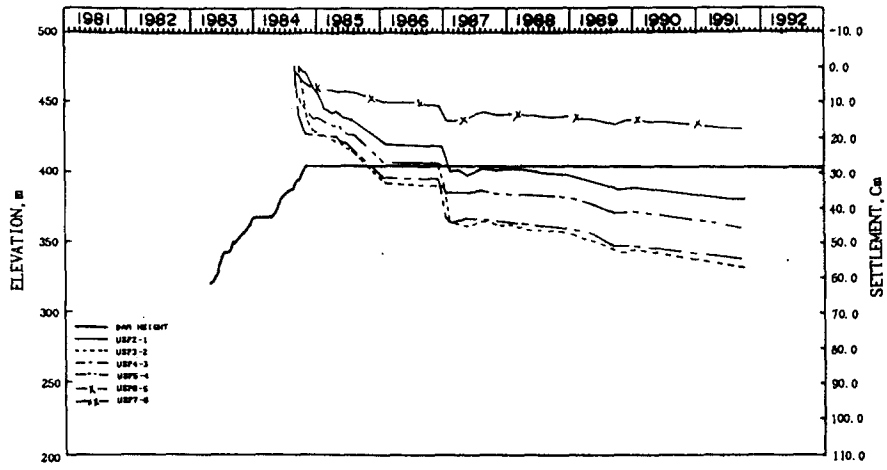


그림 2, 상부댐 댐마루 침하의 경시변화

표 1, 상부댐 댐마루침하량 및 예측치

구 분	실측침하량 (1991.10) (cm)	쌍곡선법에 의한 예상 최종침하량 (cm)	예상되는 추가 발생 침하량 (cm)	비 고
USP-1	2.9	3.30	0.40	
USP-2	50.9	62.66	11.76	
USP-3	69.6	81.02	11.42	
USP-4	81.5	99.28	17.75	
USP-5	57.1	87.94	30.84	
USP-6	30.7	36.24	5.54	

*USP-1 은 우안, USP-6 은 좌안임

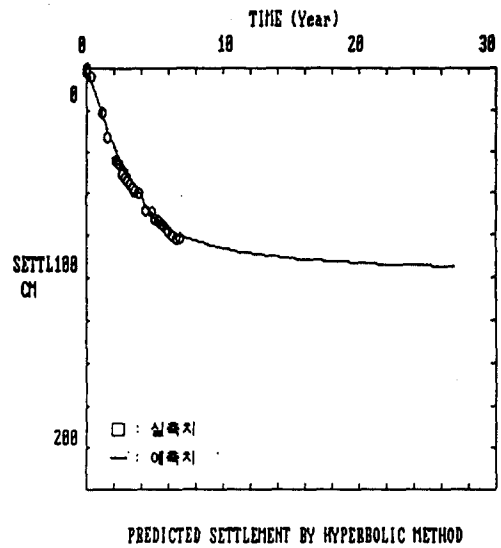


그림 3, 쌍곡선법에 의한 장기 침하예측(상부댐 최대치)

판단된다. 상부댐 댐마루에서의 최대 침하량은 Lawton 과 Leater가 11개의 사력댐을 대상으로 댐마루에서의 수직침하를 분석하여 제시한 경험식 $S = 0.001\ H^{3/2}$에 적용[1),2),3)]하면 $S = 0.001 \times (86)^{3/2} = 79.8$ cm로 현재의 침하량과 유사하나 상부댐의 경우 장차 침하가 더욱 진전되어 99.28 cm 까지도 예상되므로 상부댐 심벽의 예상침하량은 일반적인 경우를 상회하는 것으로 판단된다. 따라서 궁극적으로 댐의 운영수위 조절까지 고려할 필요가 있을 것이다.

그러나 침하량이 침하감안 여유고 (86 cm)[6)]에 도달하기 까지는 아직 어느 정도의 시간이 필요한 것으로 보이고, 누수량등의 기록이 현저한 누수량 증가등을 나타내지 않고 있으며, 그림 3 은 이제 침하가 수렴단계에 막 들어서기 시작한 것을 나타내므로 현재로서는 운영수위 조절보다는 댐체의 거동파악에 보다 주의를 기울이는 것이 보다 바람직 할 것이다.

3.1.2 하부댐

그림 4 는 하부댐 댐마루 침하의 경시변화를 각 측점별로 표시한 것이다. 1985 년 말의 침하량 돌변현상을 보정하면 댐중앙에서의 최대침하는 약 42 cm 로 상부댐보다도 침하량이 매우 작은 것처럼 보인다. 그러나 쌍곡선법에 의한 예상 최종 침하량은 90 cm로서 일반적인 다른 댐에서의 침하량 $S = 0.001 \times (78)^{3/2} = 68.9$ cm 를 상회하고 있으며, 침하가 지속적으로 진행될 것으로 예상된다.

하부댐의 경우 침하를 고려하여 댐 높이의 1 % (78cm)[6)]를 더하여 주었으나 표 2 와 같이 장래 예상 침하량이 90 cm 로서 침하 여유높이를 초과하고 있어 궁극적으로 상부댐과 같이 수위저하 등의 대책이 필요한 것으로 판단된다. 그러나 아직은 침하여유고에 여유가 있으며 특별한 불안 요인을 나타내고 있지 않으므로, 댐체의 거동파악에 보다 주의를 기울이는 것이 필요한 것으로 판단된다.

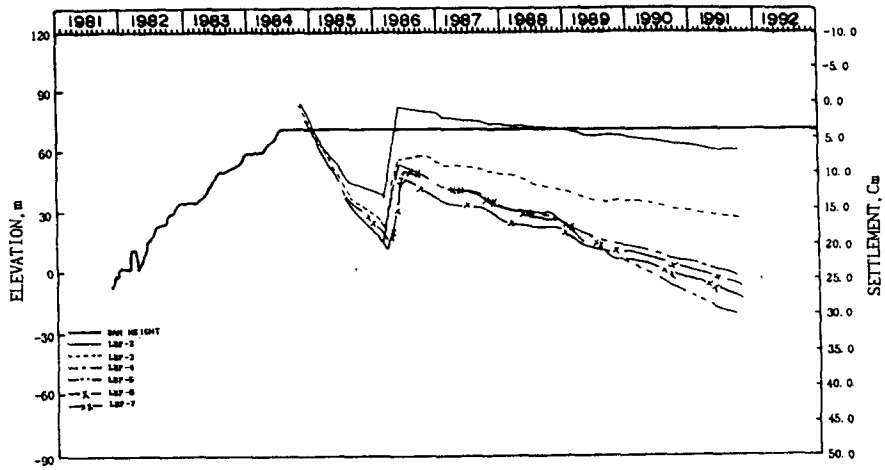


그림 4, 하부댐 댐마루 침하의 경시변화

표 2, 하부댐 댐마루 침하량 및 예측치

구 분	실측침하량 (1991.10) (cm)	쌍곡선법에 의한 예상 최종침하량 (cm)	예상되는 추가 발생 침하량 (cm)	비 고
LSP-2	19.6	23.55	3.95	
LSP-3	26.2	31.96	5.76	
LSP-4	35.3	77.31	42.01	
LSP-5	40.6	88.72	48.12	
LSP-6	36.6	74.23	37.63	
LSP-7	40.5	90.14	49.64	
LSP-8	41.8	82.48	40.68	
LSP-9	33.3	54.04	20.74	
LSP-10	29.5	35.54	6.04	
LSP-11	31.6	57.30	25.7	
LSP-12	26.4	38.63	12.23	

*LSP-1 은 우안, LSP-6 은 좌안임

3.2 댐마루 침하의 종단변화

3.2.1 상부댐

그림 5, 그림 6 은 댐 종축을 기준으로 측점별로 침하량 및 침하율을 표시하였으며, 특징은 다음과 같다.
댐 중앙부의 USP-3, USP-4의 침하량은 댐 양안부의 측정점 USP-1, USP-6에 비하여 상대적으로 큼을 알 수 있다. 이는 사력댐에서 예측할 수 있는 일반적인 양상과 유사한 것으로, 중앙부에서는 압축될 수 있는 댐체 높이가 커 침하가 크게 발생하는 것으로 판단된다.

그림 6 은 댐마루 침하율(침하량/제체높이, 변형률 개념)의 종단변화를 나타내고 있다. 이로 부터 USP-1 과 USP-2 는 침하량은 비슷하나 침하율은 현저한 차이가 있음을 알 수 있다. 인근한 지역에서 침하율의 현저한 차이는 횡방향 균열(Transverse Crack)의 가능성이 있음을 시사한다. 실제로 현장에서는 USP-1 과 USP-2 사이에서 횡방향 균열이 발생한 사실이 있어 그림 6 으로 부터 예측되는 결과와 잘 일치 하였다. 댐 좌안부의 경우는 중앙부와 침하율이 비슷한 양상을 나타내어 우안부보다 부등 침하 및 균열의 가능성이 보다 양호함을 나타내었다.

댐 좌안부와 우안부에서 발생하고 있는 이러한 침하율의 차이는 댐체가 접합되어 있는 양안부의 형상과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 그림 7 은 상부댐의 우안부는 좌안부 보다 현저한 돌출부가 있는 것을 보여주며, 이로 인한 침하 억제 효과가 상당히 있었는 것으로 판단된다.

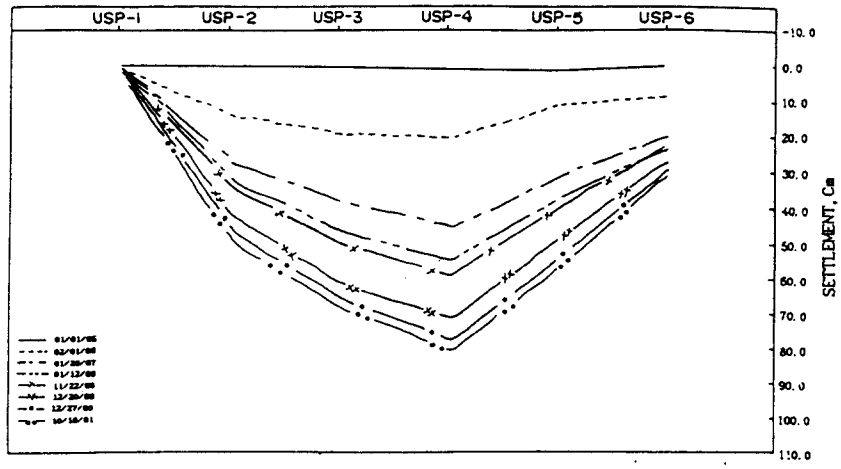


그림 5, 상부댐 댐마루 침하의 종방향 발생양상

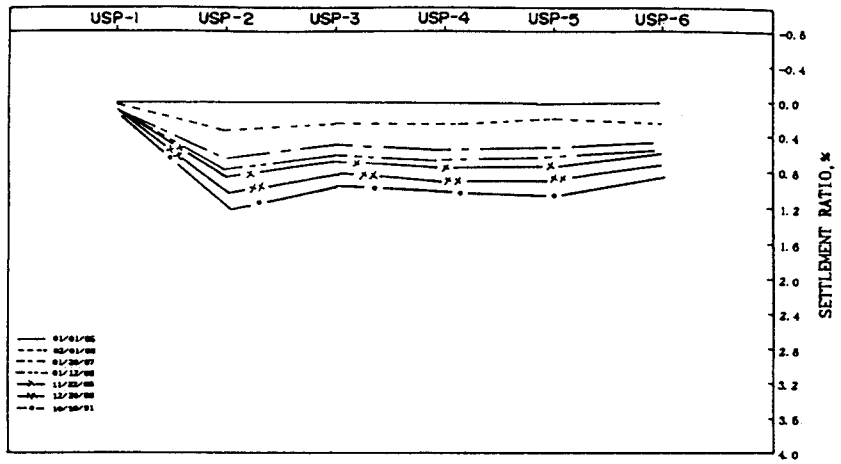


그림 6, 상부댐 댐마루 침하율의 종방향 발생양상

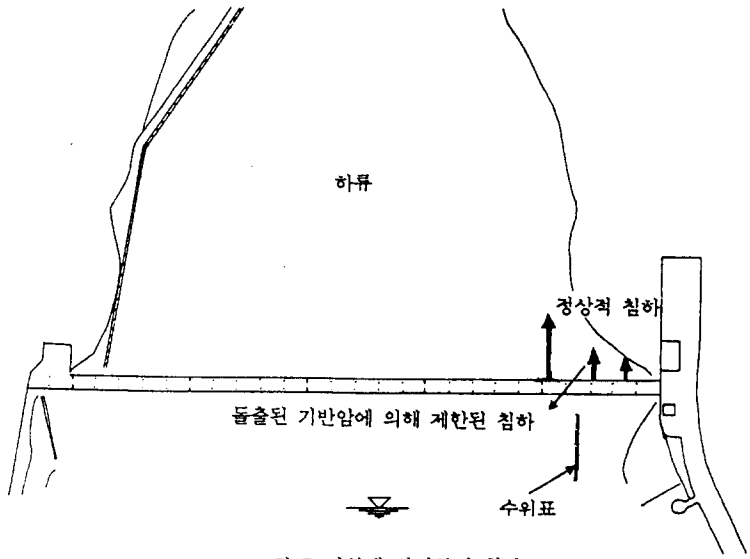


그림 7, 상부댐 양안부의 형상

일반적으로 댐은 그 특성상 오목한 계곡에 축조되는 경우가 대부분이며, 입지조건상 양안부의 일부 돌출부가 있더라도 이를 피하기가 매우 어렵다. Cougar Dam, Matahina Dam, East Branch Dam 등 많은 댐들이 이러한 지형조건에 설치되었으며, 이러한 돌출부에 의하여 본 고의 대상댐과 유사한 거동을 나타난 적이 있는 것으로 보고된 바 있다.(Sherard, 1973)[7]

3.2.2 하부댐

하부댐 댐마루에서의 침하 특성은 그림 8, 그림 9 에 나타낸 바와 같다. 그림 8 로 부터 하부댐의 침하양상은 양안부가 작고 중앙부가 큰 일반적인 양상을 나타내며, 그림 9 의 침하율은 상부댐의 경우보다 완만한 변화를 나타내어 횡방향 균열의 가능성이 상부댐 보다 적음을 알 수 있다. 이러한 현상은 하부댐의 경우 상부댐보다 균열이 덜 빈번히 관측된 현상과 일치한다.

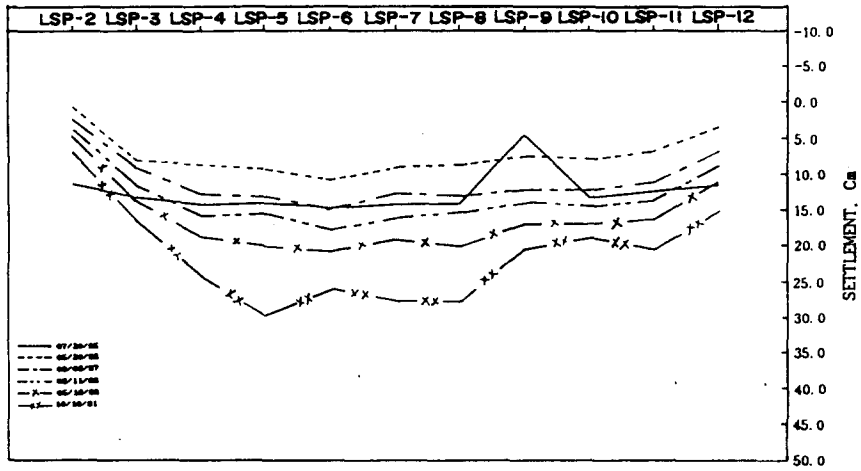


그림 8, 하부댐 댐마루 침하의 종방향 발생양상

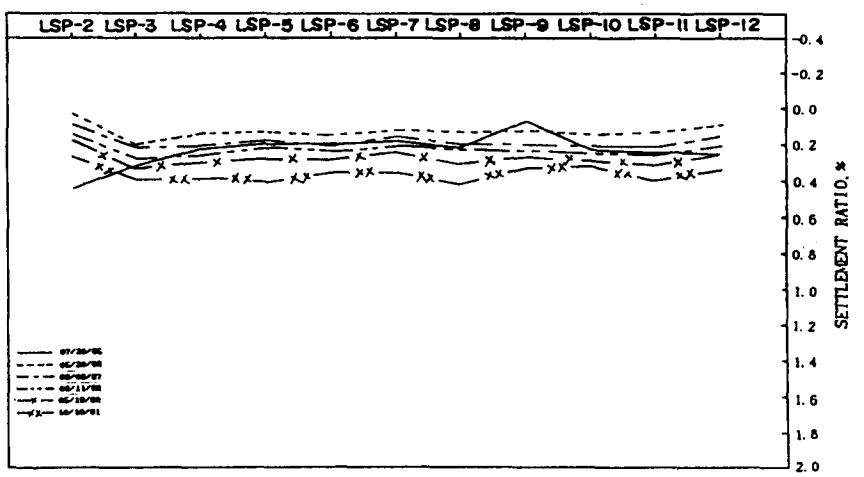


그림 9, 하부댐 댐마루 침하율의 종방향 발생양상

3.3 댐마루부의 수평변위

3.3.1 상부댐

그림 10 에는 상부댐 완공후 측정한 댐마루 침하 측정점에 대한 수평변위의 경시변화를 나타내었다. 댐마루부의 수평변위는 1991년 10월 현재 전체적으로 댐이 하류측으로 이동하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 일반적인 현상과 유사한 것으로서 상류부에서 작용하는 수압 및 기초지반이 하류방향으로 경사진 원인 (본 경우 경사도 약 1V : 10H)에 의한 것[5]으로 평가된다. 그러나 수평변위는 담수초기에 대부분 발생하였으며 7년이 지난 현재로는 거의 증가하지 않고 있어 수평변위에 영향을 주는 인자들에 의한 수평변위는 거의 완료된 것으로 판단된다.

3.3.2 하부댐

그림 11은 하부댐 완공후 측정한 댐마루 변위 측정점에 대한 수평변위의 경시변화를 보여준다.

댐 완공후 측정을 시작한 댐마루부의 수평변위측정 결과에 의하면 담수시 댐마루부는 하류방향으로 이동하였으며, 이때 이동된 양이 현재의 수평변위량의 80-90 %이상을 차지하고 있으며 담수완료후 현재까지 하류방향으로의 수평이동은 미소하게 진행되고 있다. 그러나 댐의 중앙부에 해당하는 LSP - 5, 6, 7, 8 에서는 수평이동이 지속적으로 발생하고 있어, 수직변위가 수렴되지 못한 것과 연관하여 볼 때 댐체는 아직 안정화 단계에 이르지 못한 것으로 판단된다.

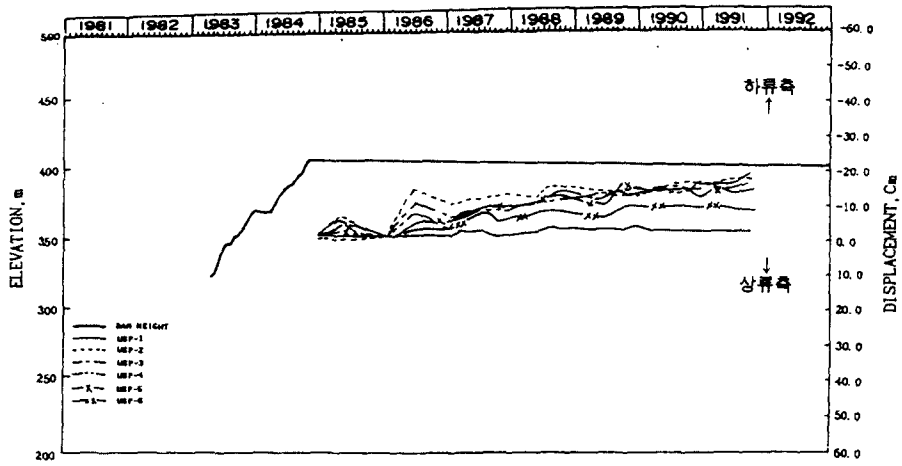


그림 10, 상부댐 댐마루 수평변위의 경시변화

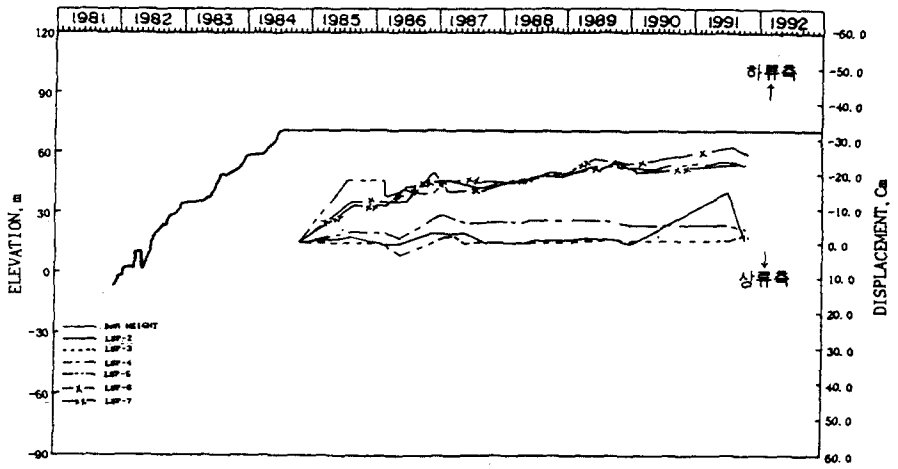


그림 11, 하부댐 댐마루 수평변위의 경시변화

3.4 사면 침하 측정점의 수평, 수직변화

3.4.1 상부댐

그림 12 는 사면 침하의 경시 변화를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 댐 축조시 침하의 속도가 가장 빠르며, 담수기간에도 비교적 빠른 속도의 침하속도를 나타냄을 알 수 있다. 또한 담수 완료후에는 침하가 아주 느리게 진행되고 있어 사면의 침하는 거의 수렴한 것으로 판단된다.

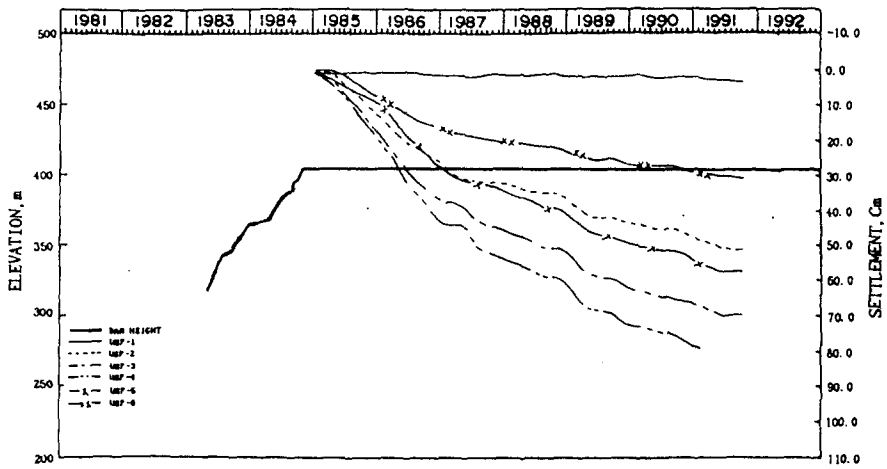


그림 12, 상부댐 댐마루 수평변위의 경시변화

이러한 현상은 침하가 아직 안정되지 않은 정상부 침하와 대조를 이루는 바, 이는 정상부 변위 측정점은 심벽상부에 설치되어 침하특성이 심벽의 거동특성에 주로 영향받으며, 사면침하 측정점은 필터 또는 사력층 상부에 설치되어 침하특성이 사력재의 거동특성에 영향받기 때문인 것으로 판단된다. 그림 13, 그림 14 에는 부등침하현상을 파악하기 위하여 종단으로 침하량 및 침하율을 표시하였다. 그림 13, 14 에서 양안부 지점(USP2-1, USP6-1)에서의 침하량이 댐체의 수직두께에 비하여 크게 발생한 것은(침하율이 큰 것은) 양안부에서 심벽의 (수직)두께가 작아 안정화 기간이 짧게되어 침하가 촉진되는 반면, 상대적으로 중앙부에서는 심벽의 두께 및 깊이가 커 안정 기간이 길고 또 양안부에서의 미끄러짐으로 인하여 댐 축방향으로의 응력이 증가하여 침하가 억제된 때문으로 판단된다.

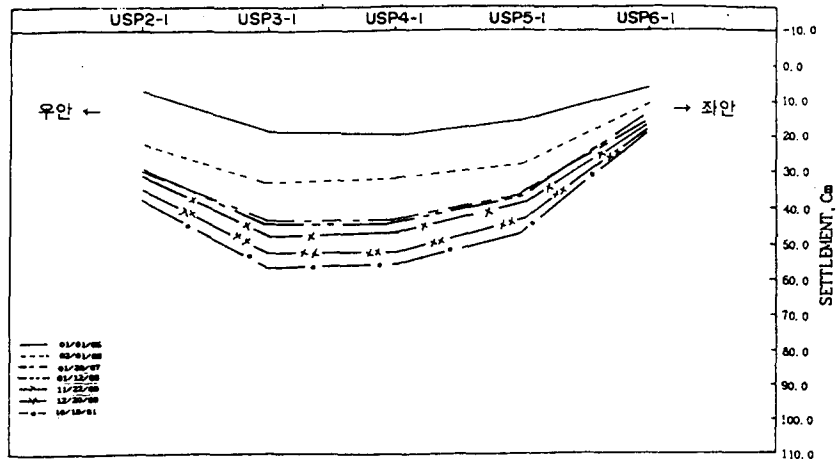


그림 13, 댐사면 침하량의 종방향 발생양상

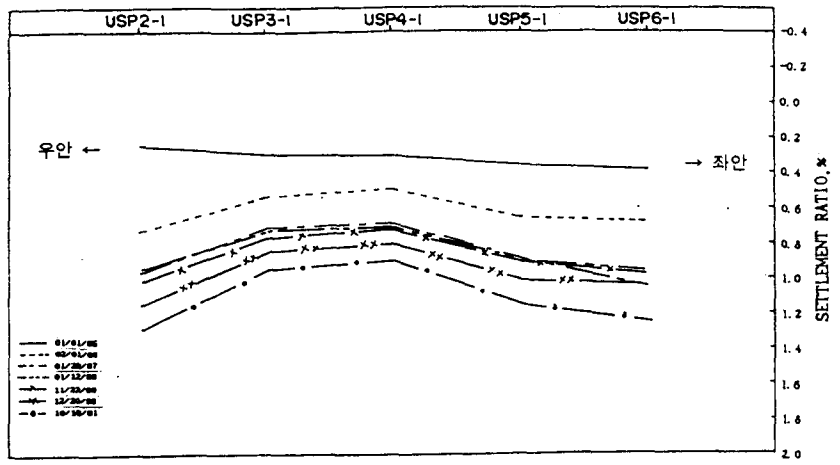


그림 14, 상부댐 댐사면 침하율의 종방향 발생양상

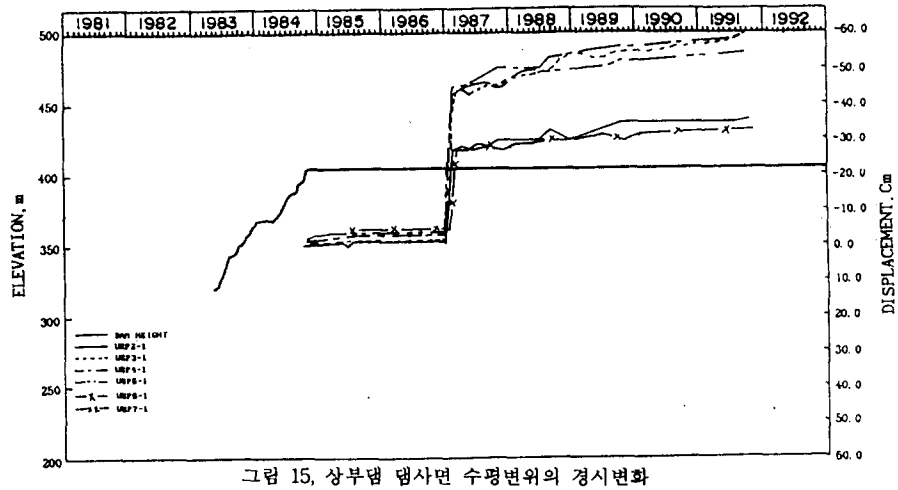


그림 15, 상부댐 댐사면 수평변위의 경시변화

사면 변위 측정점의 시간에 따른 수평이동량은 그림 15 에 나타내었다. 계측오류로 판단되는 수평변위의 돌변현상을 감안한다면 전체적으로 수평변위가 수렴되는 양상을 나타낸다.

3.4.2 하부댐

하부댐의 경우도 그림 16 과 같이 댐 축조기간과 담수진행시 대부분의 침하가 발생하였고 그후 현재까지의 침하는 완만하게 진행되고 있으며, 당분간 계속 발생될 것으로 예상된다. 1985년과 1986년 사이에 갑작스런 융기 현상은 댐마루부에서와 마찬가지로 측정 기준점의 변동에 의한 원인일 가능성이 크며, 종단면으로 침하량을 표시한 그림 17 에 의하면 측정점 LSP10-1 지점에서의 침하가 급격하게 발생한 것을 알 수 있다. 현장여건으로 보아 완공직후 측정점이 위치한 사력부에서 침하가 발생되어 나타난 현상일 것으로 판단된다. 또한 종단면의 변화율을 나타낸 그림 18 을 보면 LSP2-1 점의 침하비가 상대적으로 다른 측점에 비하여 크게 나타나 큰 침하가 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 LSP2-1 및 LSP10-1 부근에서는 횡방향 균열의 가능성을 시사하고 있으며 거동양상은 상부댐과 유사하다.

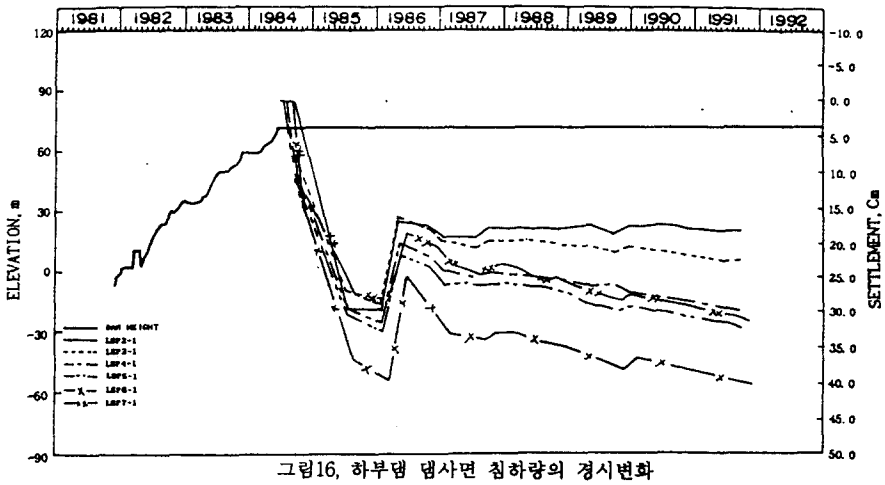


그림16, 하부댐 댐사면 침하량의 경시변화

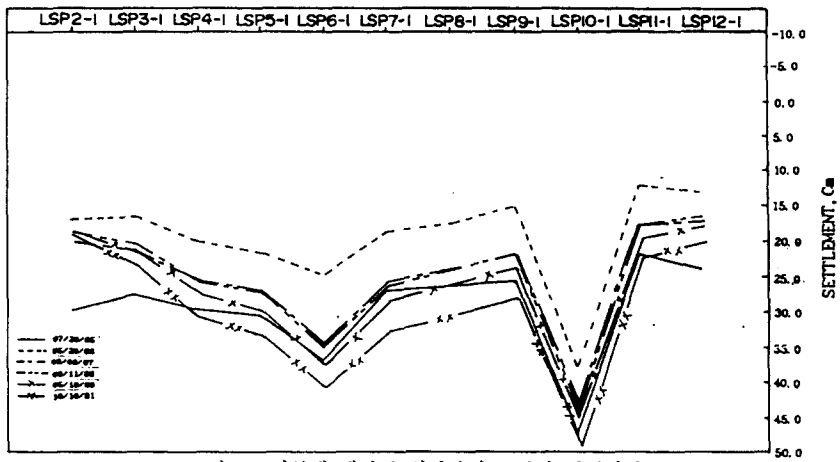


그림 17, 하부댐 댐사면 침하량의 종방향 발생양상

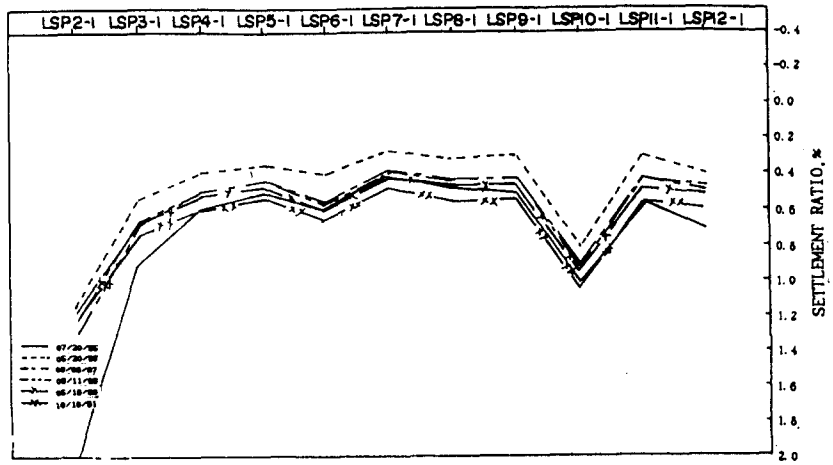


그림 18, 하부댐 댐사면 침하율의 종방향 발생양상

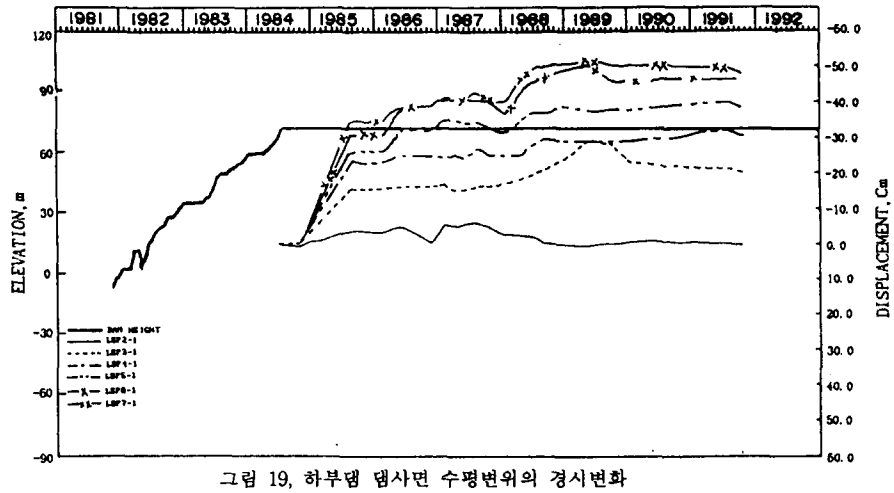


그림 19, 하부댐 댐사면 수평변위의 경시변화

수평변위 측정결과를 보면 양안부측에서 보다는 댐 중앙으로 갈수록 수평 이동량이 큼을 알 수 있다(그림19). 그림19에 나타난 바와 같이 첫번째 측정일인 1985년 7월에 갑자기 크게 발생한 것이 아니고 측정점 설치 이후의 수평변위량이 누적되어 있음을 유의해야 한다. 상부댐의 경우와 마찬가지로 하부댐의 수평변위도 댐축조후에서 담수후까지 대부분 이동되었고 그 이후로는 현재까지 조금씩 진행되고 있음을 나타낸다.

3. 댐 거동에 대한 종합적인 분석 (결론)

침하량 해석결과 댐건설후 7년이 경과한 시점에서도 댐마루부에서의 침하는 수렴되지 않고 지속적으로 침하가 발생하고 있으며 침하측정결과를 이용한 회귀분석 결과 상부댐 댐마루 중앙의 침하 측정점인 LSP-7의 경우 향후 약 50 cm 의 추가 침하가 예상되고 있으며, 댐이 안정화 되기 위하여 추가로 소요되는 시간은 10년 이상일 것으로 예상된다.

일반적 댐의 경우 5 년 정도에 댐체가 대체로 안정적인 (침하등의 변화가 거의 없는 상태) 거동을 하는 것에 비추어 볼때 본 댐은 아직 안정적인 거동을 하는 시기가 아닌 것으로 판단된다. 이는 본 댐이 양수 발전용댐으로서 1 일 1 회의 담수 및 배수를 하는 등 다른 댐과의 근본적인 차이인 때문으로 판단된다. 그러나 현시점에서 누수량 증가 등 임박한 불안정 요인은 찾을 수 없었으며, 다만 안정적인 거동이 나타날 때 까지 강화된 거동파악을 위하여 세밀하고 체계적인 계측관리가 요망되는 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. 송 정락, 여 유현(1991), "Personal Computer를 이용한 침하안정 관리기법", 한국 지반공학회, 가을 학술 발표회, pp.332-347.

5. Lee K.L and Shen C.K.(1969), "Horizontal Movements Related Subsidence", ASCE, Journal of Soil Mechanics, Found Eng., Jan.

6. Nippon Koei Co. (1981), "S-Pumped Storage Power Plant Project, Design Calculations"

7. Sherard L. James (1973), "EMBANKMENT DAM CRACKING", pp. 271-329