

계측자료 분석에 의한 필댐의 장기 침투거동 연구

A Study on Long-Term Seepage Behaviour of Fill Dam
by the Monitoring Data Analysis정 규 정¹⁾ · 이 송[†]

Chung, Kyujung · Lee, Song

ABSTRACT : The main objective of this study was to offer informations about long-term seepage behavioral characteristics and to find a leakage safety management method for Juam Dam and Imha Dam, a central cored rockfill dams in Korea by the evaluating the automatically monitored leakage data. In the water leakage monitoring of fill dam, the generation of abnormal water leakage is difficult to directly detect due to the effect of outside factors such as the component of rainfall inherent in the observation value. Therefore, conventionally estimation methods of water leakage quantity were applied by multiple regression analysis considering reservoir water level, rainfall, etc.. However, the estimated error of rainfall component is relatively big in these method. This paper identifies the seepage characteristic of each dams which is not directly affected by rainfall through the hydrograph separation analysis and 3 dimensional analytical method, and thinks a leakage management method. It was noticed that two dams had site specific seepage behaviour features and were in stable state with the decreasing leakage quantity. It was also found that hydrograph separation method might be applicable to leakage safety management method.

Keywords : Fill dam, Piping, Measured leakage quantity, Safety management of dam

요 지 : 본 연구는 중앙심벽형 필댐인 주암댐과 임하댐을 대상으로 자동계측에 의해 연속적으로 생산되는 침투수량 계측자료에 대하여 분석을 통하여 필댐 고유의 특성에 따른 장기 침투특성과 댐의 안전관리 방법을 검토하고자 하였다. 필댐의 침투수량 계측 값에는 내재 하는 강우 성분 등의 외부 요인의 영향으로 직접적으로 이상 누수의 발생을 검출하는 것은 어렵다. 이 때문에, 종래 저수위와 강우량을 고려하는 중회귀분석 등에 의해 누수량을 추정하는 방법이 적용되어 왔으나, 강우 성분의 추정 오차가 상대적으로 크고 정밀도가 불량한 것으로 알려졌다. 본 논문에서는 강우 성분의 분리해석을 통해 직접적으로 강우 성분에 영향을 받지 않는 저수지 수위에 연동하는 댐별 침투거동을 평가함과 아울러 분석대상 댐의 지형적, 수리지질학적 특성을 반영한 3차원 수치해석을 실시하여 계측 침투수량 자료와 비교하였다. 2개 대상댐의 침투거동은 각각의 고유한 특징을 가지고 있으며, 장기적으로 침투수량의 감소를 보여주고 있어 안정적인 상태로 나타났다. 또한, 수문곡선분리법은 침투수 안전관리 방법으로 적용가능한 것으로 판단되었다.

주요어 : 필댐, 파이프, 계측 침투수량, 댐 안전관리

1. 서 론

물을 다스리는 치수사업은 인류문명의 발생과 함께 발전하여 왔으며, 강우량의 계절적인 편중을 극복하기 위하여 건설되는 댐은 5,000년 전부터 존재하여 온 대표적인 치수 방식이다. 국민생활 수준의 향상과 산업사회의 발전으로 수 자원의 수요가 점차 증가함에 따라 지속적으로 댐을 건설하여 왔다(박영목 등, 2004). 2010년 조사된 한국의 댐 및 저수지의 총수는 약 18,000개소에 달하지만, 그 중 대댐 기준에 속하는 댐(높이 15.0m 이상, 높이 10~15m로써 길이가 2,000m 이상 또는 저수용량이 300만³ 이상)은 1,213개소

로 조사되었다(박한규 등, 2005). 이 중 댐형식상 필댐은 1,171개소로 전체의 대부분인 96.5%를 차지하고 있다.

필댐은 댐체를 구성하는 재료를 건설현장 주위에서 쉽게 구할 수 있기 때문에 오랜 기간 동안 많이 축조되어 왔다. 축조 후 장기간이 경과하여 노후화된 댐이 각종 요인에 의해 파괴되는 경우 인적, 물적 피해가 클 것이므로 댐의 체계적인 유지관리와 상시감시시스템 가동을 통하여 댐의 이상 징후를 사전에 감지하여 안전을 확보하는 것이 필요하다.

댐 손상 및 파괴 원인에 대한 최근의 분석 내용(Foster 등, 1998)에 의하면 필댐의 시공이 완료된 이후 공용 중에 붕괴된 사례를 붕괴 원인을 백분율로 나타내면 파이프와 월류가

1) 정희원, 한국시설안전공단 상하수도팀 차장

† 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수(E-mail : scugeo@uos.ac.kr)

각각 48.7%와 47.0%로 전체의 95.7%를 차지하는 주요 요인이며, 사면활동과 지진이 각각 4.3% 및 1.7%로 확인되었다. 이는 댐체 및 기초지반을 통한 누수와 파이핑에 의한 파괴가 큰 비중을 차지하므로 댐의 유지관리 측면에서 가장 비중있게 다루어져야 할 유형임을 나타내는 것이나, 이들에 대한 연구가 미진한 상태이다. 국내 대댐의 관리주체는 누수와 파이핑으로 발생할 수 있는 문제를 사전에 예방하기 위하여 침투수량 계측시스템을 설치하여 운영해 오고 있다(한국수자원공사, 2004). 일반적으로 규정하고 있는 필댐의 침투수량 계측빈도는 담수 이후나 홍수, 지진 이후 1주일간은 1회/일, 그 이후는 1회/주 이상이다(건설부, 1994). 최근에는 계측기 및 통신시설의 발달로 계측자동화에 의한 연속적인 관측자료의 취득이 용이해 지고 있다. 수집한 자료를 활용하여 댐 안전의 이상유무를 판단하기 위해서는 필댐의 특성을 반영한 계측관리 기법과 자료해석이 필요하다. 기존 몇 개의 강우사상을 활용하여 무강우 기간의 댐체 침투수량을 구분하고 선형적인 침투수량 상·하한치를 부여하는 관리 방안을 제시한 바 있다(이규탁 등, 2007; Amano 등, 2005).

정상적으로 기능을 발휘하고 있는 댐에서 누수 및 파이핑을 감시하기 위한 계측항목은 침투수량과 이에 관련되는 영향 요소인 강우량, 저수위 등이다. 측정되는 계측 침투수량에는 댐체를 통한 침투수량, 댐기저를 통한 침투수량, 강우량, 양안부 유입량 등의 다양한 영향 인자를 함께 포함하게 되므로 댐체와 기초지반을 통한 침투수량의 증감여부를 따로 분리하여 파악하는 누수량 관리기법으로 사용하는 것이 용이하지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 침투수량 계측자료에 대하여 댐체와 기초를 통한 침투수량과 기타 영향요소를 구분하는 방법을 적용하여 침투수량 계측장치 특성, 주변 지형특성에 따른 대상 댐별 침투거동 특성을 우선적으로 평가하였

고, 다음으로 영향요소 구분 방법의 댐 침투수량 관리기법으로의 활용 가능성을 검토하였다.

2. 댐 및 계측자료 특성 분석

2.1 대상 댐 특성

본 연구의 대상 댐은 침투수량 계측자료가 양호하게 생산되고 있는 주암댐과 임하댐이다. 주암댐은 1992년 12월에 보성강에 완공된 다목적댐으로 높이는 58m, 길이는 330m이며, 4억5천7백만 m^3 의 저수용량을 가지고 있다. 그림 1에서 침투수 집수벽은 댐의 하단에 옹벽형태로 설치되어 있으며, 침투수량은 옹벽 가운데에 설치되어 있는 V-notch의 수위를 이용하여 자동계측한다. 임하댐은 1993년에 낙동강 지류인 반변천에 완공된 다목적댐으로 높이 73m, 길이 515m의 석괴형 댐으로 총 5억9천2백만 m^3 의 저수용량을 가지고 있다. 그림 2에서 침투수는 댐체 양안의 댐체 내에 설치된 2개 dyke에서 수집되는 것과 댐 하류측 누수집수 옹벽에서 수집되는 것이 다공관을 통해 하류측에 설치된 3개의 V-notch에서 각각 자동계측되게 된다.

분석에 이용된 침투수량 계측자료는 주암댐은 그림 3(a)의 1999년 3월 15일~2008년 3월 31일 일평균자료이며, 임하댐은 그림 3(b)의 2003년 1월 1일~2008년 5월 31일 일평균자료이다. 댐 침투수량에 영향을 미치는 강우량, 댐수위 운영자료는 한국수자원공사의 자료를 이용하였다. 그림 3의 침투수량 경시변화값에서 불연속부는 계측기의 고장에 의한 결측기간을 나타낸다. 주암댐 침투수량은 3,315일 자료 중 798일(27.1%)이 결측으로 73.15~4,534.50 m^3/day 의 큰 변동을 보이며, 댐수위는 EL.89.20~109.31m의 변동을 나타낸다. 임하댐 침투수량은 1,978일 자료 중 55일(2.8%)

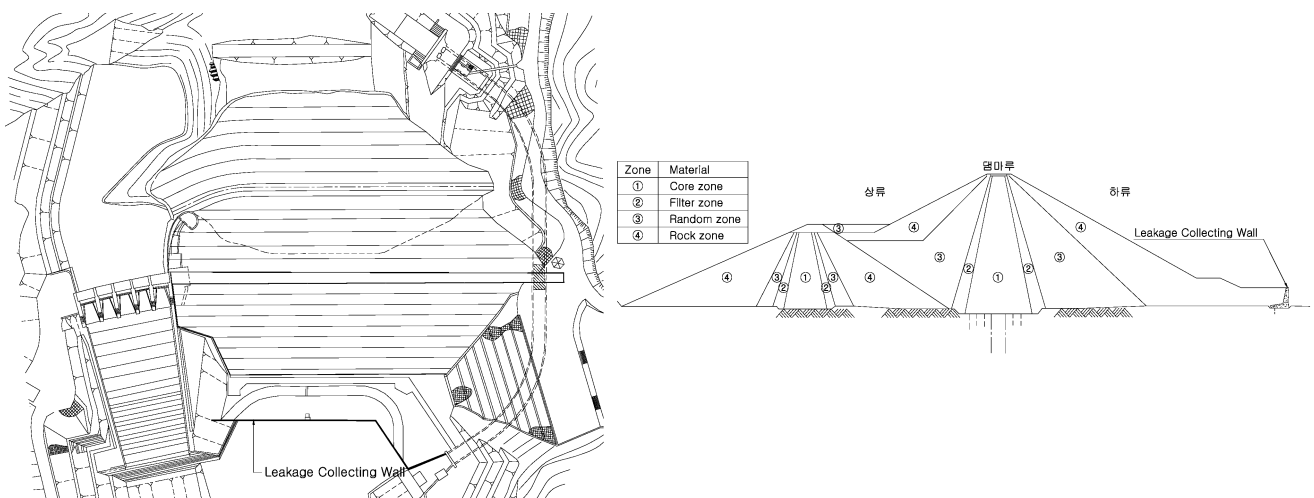


그림 1. 주암댐 침투수량 계측장치

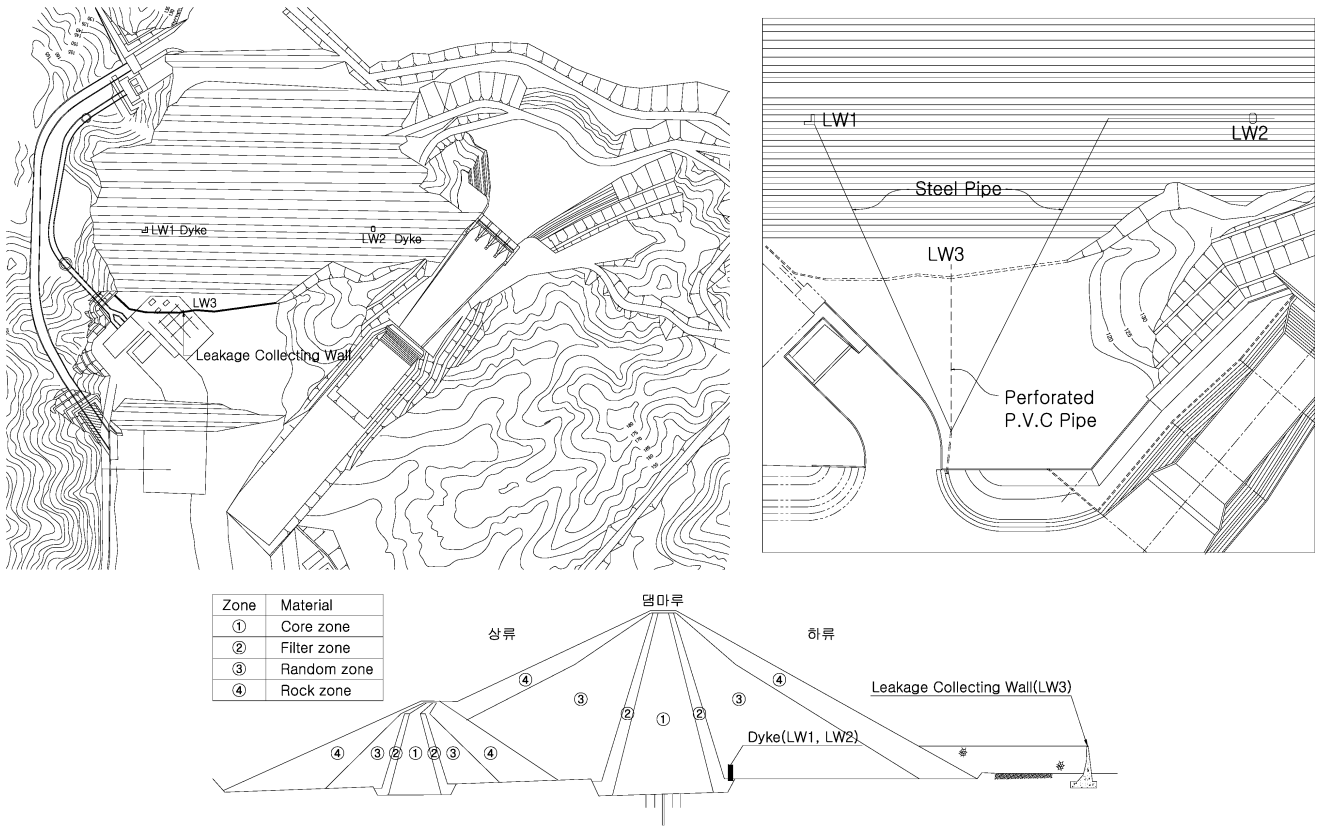


그림 2. 임하댐 침투수량 계측장치

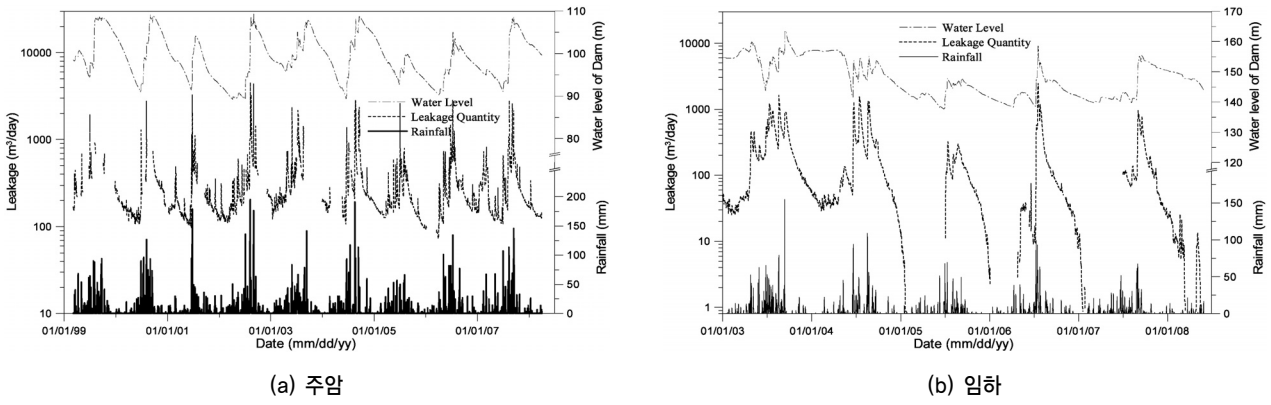


그림 3. 침투수량, 강우량 및 댐수위 계측자료

이 결측으로 0.86~4,615.96m³/day의 변동을 보이며, 댐수위는 EL.137.72~163.61m의 변동을 나타낸다.

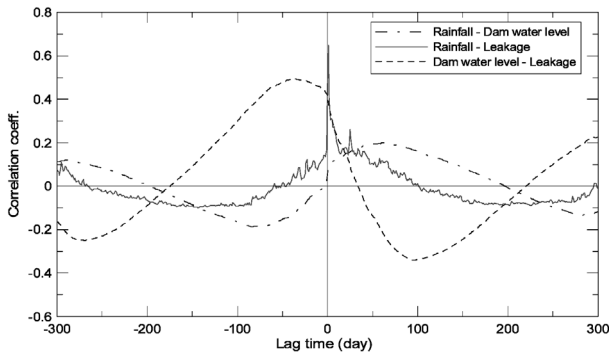
2.2 교차상관관계

강우량, 댐수위, 침투수량 시계열자료의 특성을 분석하기 위하여 교차상관관계 분석을 수행하였다. 교차상관관계는 시계열자료간의 상호영향 또는 의존성을 분석할 때 이용된다. 교차상관관계는 아래 식 (1)과 같다.

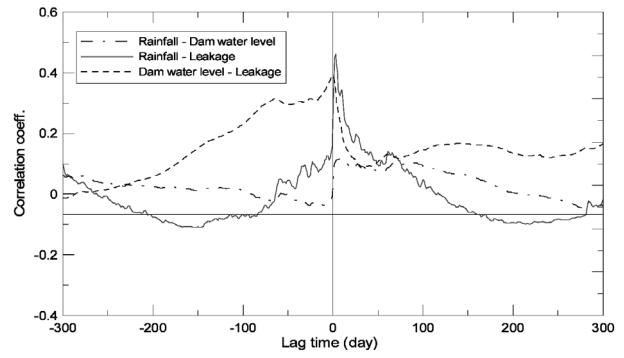
$$\gamma_{xy}(k) = \frac{c_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad c_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \mu_x)(y_{t+k} - \mu_y) \quad (1)$$

여기에서 $\gamma_{xy}(k)$ 는 지체시간 k 에서 교차상관계수, c_{xy} 는 교차공분산함수, μ_x 는 시계열 x_t 의 평균, σ_x 는 시계열 x_t 의 표준편차, x_t 는 시계열자료를 나타낸다(Box 등, 1976). 지체시간은 $k = 0$ 에서 최대 교차상관계수까지의 시간을 의미하며, 입력값과 출력값 간의 반응 시간차를 나타낸다.

그림 4, 표 1은 강우량과 댐수위, 강우 성분이 포함된 침투수량 계측자료의 교차상관관계를 보여준다. 주압댐의 경우 강우량과 침투수량의 경우 큰 교차상관성을 보이는데(최대 교차상관계수 0.648) 댐수위와 침투수량의 경우는 지체시간 -39일에 최대교차상관계수는 0.494로 나타나고 있다. 이는 댐수위가 -39일 만큼 침투수량에 후행함을 나타낸다. 임하



(a) 주암



(b) 임하

그림 4. 교차상관관계 그래프

표 1. 일평균자료 교차상관관계

변수	주암댐		임하댐	
	지체시간	최대교차상관계수	지체시간	최대교차상관계수
강우량 - 댐수위	65일	0.202	7일	0.116
강우량 - 침투수량	1일	0.648	3일	0.461
댐수위 - 침투수량	-39일	0.494	0일	0.391

댐의 경우는 강우량-침투수량은 지체시간 3일, 상관계수 0.461로 주암댐과 마찬가지로 침투수량이 강우에 의한 영향을 크게 받고 있음을 나타낸다. 하지만 댐수위-침투수량도 지체시간 0일, 상관계수 0.391로 침투수량에 의한 댐수위 영향이 일정하게 존재함을 보여준다. 강우량-댐수위의 상관관계는 낮게 나타난다. 교차상관관계로 2개 댐을 비교하면 주암댐의 경우가 임하댐에 비해 강우량에 따른 침투수량, 댐수위에 따른 침투수량 관계에서 상관성이 큰 특성을 보여준다.

2.3 시계열 자료의 추세 분석

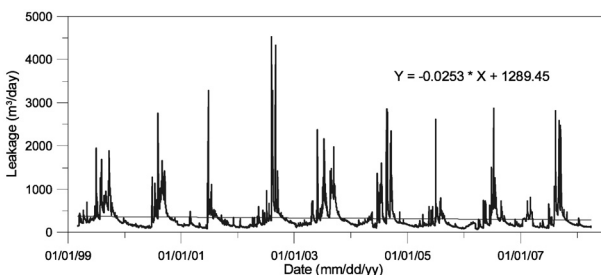
추세분석은 일반적으로 어떤 시계열 자료의 경향성을 파악하는데 활용하는 방법 중에 하나이다. 경향성을 파악하는 방법은 크게 모수적 방법과 비모수적 방법이 있다(이진용 등, 2006). 모수적 방법의 예로는 선형추세분석 혹은 선형회귀분석 등이 있다. 선형추세분석은 어떤 관측자료가 단조증가하거나 혹은 단조감소하는지에 대한 경향성을 판단하기 위해

적절한 직선식에 기울기를 부합시켜 기울기를 보고 평가하는 것이다. 선형추세식은 결정계수(r^2)를 보고 직선이 어느 정도 잘 부합되는지 판단한다. 이러한 선형추세식은 결측값 및 이상값들이 분석결과에 큰 영향을 미칠 수가 있다. 본 연구에서는 모수적인 방법으로 선형추세분석을 이용하였다. 그림 5는 강우 성분이 포함된 침투수량 자료에 대한 선형추세분석 결과로써 계절적인 주기성을 반영하지 못하므로 결정계수(R^2)는 낮게 나타났다. 주암댐의 경우 $-0.0253\text{m}^3/\text{day}/\text{day}$ 의 기울기로 감소하며, 임하댐의 경우는 $-0.1055\text{m}^3/\text{day}/\text{day}$ 의 다소 큰 기울기로 감소하는 것으로 나타났다.

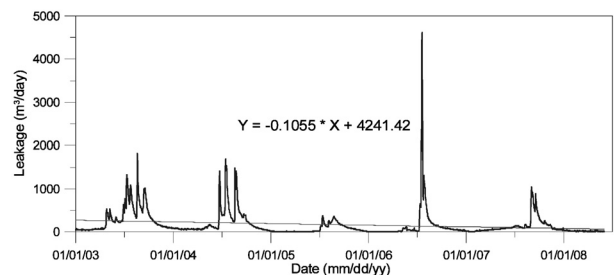
3. 계측 침투수량 강우 성분 분리

3.1 수문곡선분리법에 의한 강우 성분 분리

수문곡선은 유량의 시간에 대한 변화를 나타내는 그래프



(a) 주암



(b) 임하

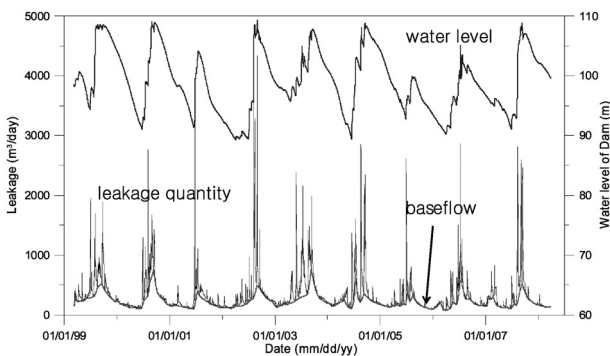
그림 5. 선형추세분석 결과

로 특정 강우사건에 대한 수문곡선은 강우 이전의 유량인 기저유출(baseflow)과 강우로 인한 직접유출로 분리할 수 있다(Linsley 등, 1982). 필댐 침투수량도 수문곡선 형태로 댐체에 내리는 강우에 의한 직접유출과 댐체, 댐기저, 양안부에 의한 기저유출로 구분가능하다. 수문곡선분리법에는 많은 방법들이 있으며 여기서는 USGS의 HYSEP 프로그램 중 부분최소법과 PART 프로그램을 이용하였다(Sloto 등, 1996).

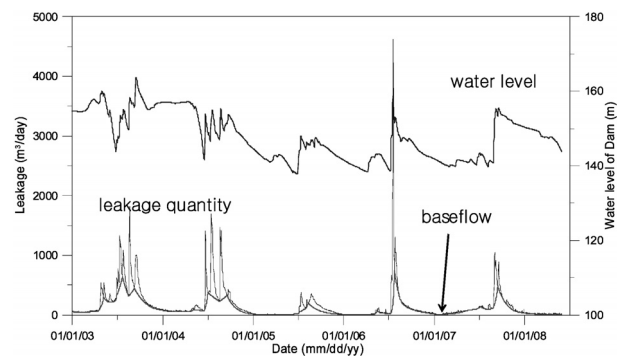
수문곡선분리에 이용되는 직접유출 기간은 하천에서의 방법으로 산정이 불가하므로 유출수량 증가를 발생시키는 유효강우량의 총량을 계산하고 이를 직접유출량 총량과 비교하는 방식으로 수행하였다. 주암댐의 유효강우량은 약 5.5mm로 총 강우량의 93.7%를 나타내고 있다. 그림 6(a)는 HYSEP 프로그램을 이용할 경우 직접유출시간 7.5일인 경우의 수문곡선분리결과로 직접유출량 총량이 유효강우량 총량의 94.0% 정도로 양호하게 나타난다. 직접유출량의 비율은 0~95.2%로, 주로 댐의 수위가 연간 최저점에서 강우에 의하여 급격하게 상승하는 시기에 높게 나타난다. 직접유출량이 제거된 기저유출량(댐체+댐기저+양안)은 73.2~776.7m³/day 구간에서 변동하며, 평균값 225.6m³/day이다. 임하댐의 유효강우량은 8.7mm로 총 강우량의 83.8%로 나

타난다. 그림 6(b)는 직접유출시간 7.5일인 경우의 수문곡선 분리결과로 직접유출량 총량이 유효강우량 총량의 72.0%이다. 직접유출량의 비율은 0~95.1%로 직접유출량이 제거된 기저유출량은 4.9~742.1m³/day 구간에서 변동하며, 평균값 101.4m³/day이다.

계측 침투수량 자료에서 강우 성분이 분리된 자료의 물리적인 특징을 검토하기 위하여 댐수위와 기저유출량 분석 결과를 이용한 교차상관관계를 그림 7에 나타내었다. HYSEP 분리결과와 경우에는 침점의 지체시간이 주암댐 -13일, 임하댐 -2일, 상관계수는 주암댐 0.714, 임하댐 0.474로 나타났으며, PART 분리결과와 지체시간이 주암댐 -13일, 임하댐 3일로 나타났으며, 상관계수는 주암댐 0.740, 임하댐 0.500으로 HYSEP에 비해 약간 높게 나타났다. 두 모델의 결과 모두 상관계수는 양호하게 나타났으나, 지체시간이 음(-)으로 나타나는 문제는 해결되지 못하였다. 지체시간 문제를 해결하기 위해서는 강우의 직접유출기간을 증가시켜야 하지만 이는 직접유출량이 강우량 합계를 넘어서게 되어 불가능하다. 따라서 현재의 분석결과는 비교적 양호하게 평가된 것으로 판단된다.

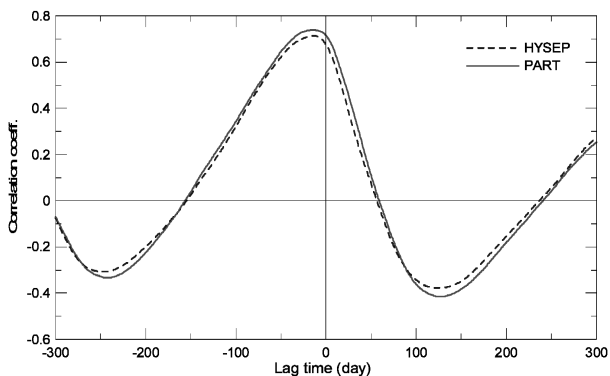


(a) 주암

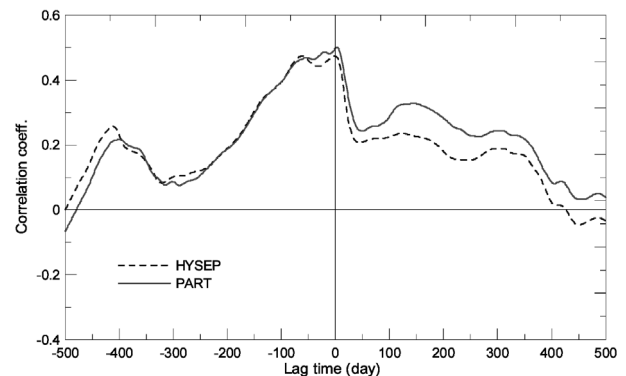


(b) 임하

그림 6. 수문곡선분리법에 의한 강우 성분 분리



(a) 주암



(b) 임하

그림 7. 강우 성분 분리 이후의 교차상관관계

3.2 기저유출량과 댐수위 상관관계

수문곡선분리법에 의해 계산된 기저유출량을 이용하여 댐수위와 기저유출량의 관계를 교차상관관계 분석에서 구해진 주암댐 -13일, 임하댐 3일의 지체시간을 고려하여 그림 8에 나타내었다. 기저유출량은 댐수위의 증가에 단순히 비례하기보다는 지수형태로 증가하고 있으므로 지수식을 이용하여 추세선을 구하였다. 침투수량 중 강우의 직접 유출량을 제거하면 댐체, 댐기저, 양안을 통한 기저유출량 자료를 얻게 되며 이들은 댐의 설계형태 및 주변지역의 수리지질학적 특징에 따라 특정한 범위의 비율 내에서 변하게 되지만 댐체를 통한 침투수량이 절대적으로 많은 양을 차지하게 된다. 따라서 수문곡선분리를 통해 계산된 기저유출량을 그대로 이용하더라도 댐체를 통한 침투수량의 변화나 이상여부를 어느 정도 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 단순상관관계만으로 기저유출량의 변화 및 이상여부를 판단할 수는 없으므로 댐수위 대 기저유출량 상관관계의 차이를 분석하고 또한 추세분석 시의 신뢰구간을 계산함으로써 분석결과를 좀 더 유용하게 활용할 수 있다. 그림 8(a) 주암댐의 경우는 비교적 일관된 관계를 나타내며 좁은 범위에서 변동하고 있어 신뢰구간을 이용하여 통상적인 기저유출량의 변동범위를 계산할 수 있다. 전체기간의 신뢰구간을 벗어나는 경우에는 이상이 발생한 것으로 판단할 수 있을 것이다. 한편, 임하댐의 경우는 신뢰구간의 정량적인 관계 설정에 임의성이 존재하게 되어 댐 안전관리 이용에 한계가 있다. 이러한 한계성을 벗어나기 위하여 저수위 상승 기간과 하강 기간의 분리, 연도별 기간 분리 등의 방법을 통하여 신뢰구간의 재설정 가능성이 가능하며 이상발생 여부를 장기적으로 판단할 수 있다.

4. 침투수량 수치해석

4.1 해석방법

필댐 침투수량 중 강우량에 기인하는 것을 제외한 댐체, 기저, 양안을 통한 침투수는 지하 매질을 통하여 이동하므로 지하수 유동 수치모형을 이용하여 계산 및 모의가 가능하다. 따라서 침투수량 분석대상 댐의 지형, 수리지질, 댐의 구조 등을 반영하여 3차원 지하수 수치모형을 구축하여 인자별 기여량을 분석하였다. 해석 프로그램은 지하수 유동에 대한 연구와 수치해석의 발전으로 인해 꾸준히 개발되고 있다. 개발된 프로그램 중 모델러가 모의 규모, 지질 매체의 특성, 현장 조건 그리고 모델링 목적에 따라 적절한 모델을 선택하여 사용할 수 있으며, 현재 지하수 유동 모의를 위한 모델은 MODFLOW가 가장 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 Visual Modflow Pro(ver. 3.0)을 이용하여 지하수 유동 모의를 수행하였다.

주암댐과 임하댐 유출수량 분석을 위하여 댐체를 포함한 유출수의 흐름이 예상되는 지역을 모의영역으로 설정하였다. 주변의 지하수 유동계는 산악과 하천 등 주변 지형에 의해서 일차적인 유동형태가 규정될 수 있다. 따라서 주변 산 능선을 지하수 분수령으로 고려하여 모의 영역을 구성하였으며, 모의영역의 격자망 구성은 모의 영역의 외곽부분에서 댐에 이르는 구간을 가로, 세로 10m로 설정하였고, 유출수의 이동이 예상되는 주변지역을 더욱 세분하여 입력하였다.

모의 영역의 경계는 유역 내 산 능선을 지하수 분수령으로 고려하여 불투수경계로 설정하였고, 그 바깥쪽은 수치모의의 효율성을 높이기 위하여 비활성 격자로 지정하여 수

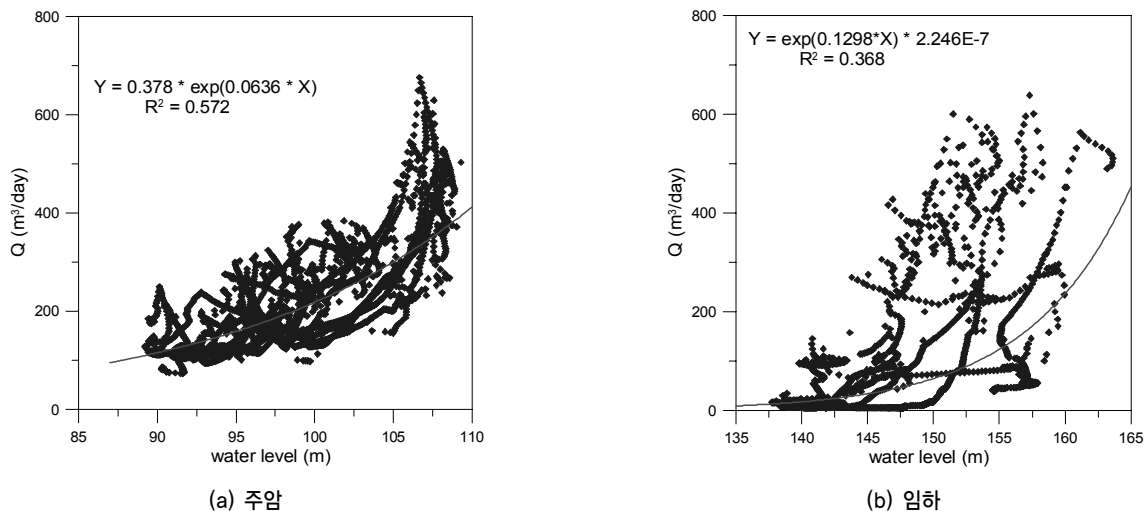


그림 8. 댐수위와 수문곡선분리에 의한 기저유출과의 관계

치 모의 시 계산에서 제외하였다. 유역 내 분포하는 강은 일 정수두경계로, 강으로 합류되는 지류들은 하천 경계로 설정 하였으며, 하천의 고도는 지형의 고도를 반영하였다. 댐체 의 모사는 필댐의 구역 별 수리상수와 수평유동차수막 패키 지를 이용하여 설정하였다. 댐의 유출수를 측정하기 위한 유출수 측정 장치는 배수경계로 설정하였다. 모의에 사용된 수리상수는 복잡한 지질 특성을 합리적으로 반영하기 위하 여 수리지질학적 층서를 층적층, 연암층, 경암층으로 구분 하였으며 강의 고도는 댐체의 각 수위에 맞춰 설정하여 수 리상수를 입력함으로써 수치모델을 통한 댐 수위별 유출수

량의 분석을 그림 9와 같이 모의하였다. 수리전도도와 비저 류계수, 공극율은 댐 공사를 위한 문헌을 참고하여 표 2, 표 3과 같이 입력하였다.

수치해석을 통한 유출수량의 분석은 그동안 댐체 내부의 손상 등으로 인한 물성변화를 고려하지 않은 채 설계값을 그대로 사용하여 정확한 분석값을 도출하지 못하는 오류가 있었다. 이를 보완하기 위해 댐체의 각각의 수위에서 유출 수량 측정 장치를 통해 실측된 자료와 수치해석을 통해 분 석된 유출수량을 비교하여 함양량과 수리상수를 변화시켜 반복수행하였다.

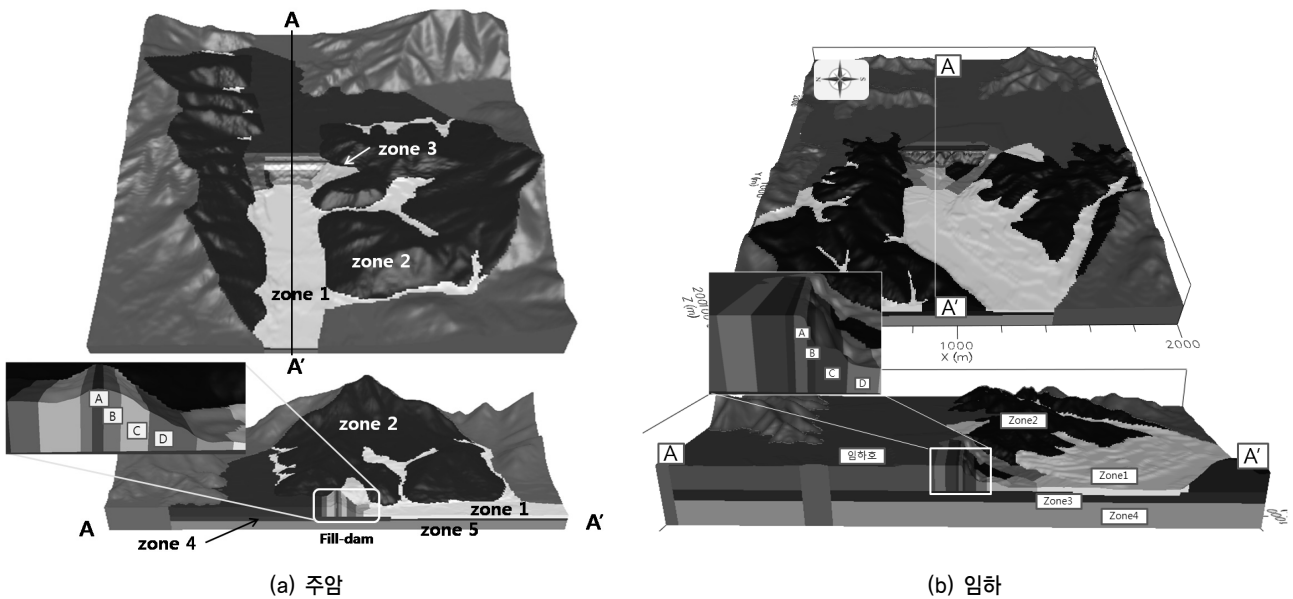


그림 9. 댐 모의영역의 수리지질학적 구성

표 2. 댐 모의에 사용된 수리상수

구분	주암댐					임하댐				
	층서 및 암상	수리전도도(m/s)		비저류계수 (1/m)	공극율	층서 및 암상	수리전도도(m/s)		비저류계수 (1/m)	공극율
		$k_x = k_y$	k_z				$k_x = k_y$	k_z		
Zone 1	층적층	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	0.15	층적층	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	0.15
Zone 2	층적/매립층	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-5}	0.08	연암층	2.0×10^{-8}	2.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}	0.05
Zone 3	연암/풍화암층	3.0×10^{-8}	3.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}	0.05		1.5×10^{-8}	1.5×10^{-9}	1.0×10^{-5}	0.05
Zone 4	연암층	2.0×10^{-8}	2.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}	0.05	경암층	2.0×10^{-9}	2.0×10^{-10}	1.0×10^{-5}	0.02
Zone 5	경암층	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-5}	0.02					

표 3. 댐체의 수리상수

구분	주암댐				임하댐			
	층서 및 암상	수리전도도(m/s)		층서 및 암상	수리전도도(m/s)			
		$k_x = k_y$	k_z		$k_x = k_y$	k_z		
A	Core Zone	7.0×10^{-8}	7.0×10^{-9}	Core Zone	3.0×10^{-8}	3.0×10^{-9}		
B	Filter Zone	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}	Filter Zone	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}		
C	Random Zone	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-6}	Random Zone	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}		
D	Rock Zone	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}	Rock Zone	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-5}		

4.2 침투수량 인자별 영향 분석

4.2.1 민감도 분석

댐체의 침투수량 인자별 분리를 위해 Zone Budget 모듈을 이용하였다. 댐의 하류 영역인 Zone2에 유입되는 지하수량은 거의 대부분이 유출수 측정장치(배수경계로 설정)를 통하여 유출되는 양이므로 유출수의 인자별 기여도는 주변의 영역에서 Zone2로 유입되는 양의 비율과 같다고 간주될 수 있다. Zone2로의 유입수량 기여인자의 분석을 위하여 댐체(Zone3), 좌·우양안(Zone4, Zone5), 댐의 기저(Zone6)를 각각의 새로운 Zone으로 설정하였다.

해석적인 방법에 의한 댐체의 유입수량은 여러 요인에 영향을 받게 되나 주변 매질의 수리상수에 절대적인 지배를 받는 것으로 모사가 되었다. 따라서 댐수위가 주암댐 EL.95m, 임하댐 EL.145m를 기준으로 양안 및 연암층의 수리상수를 $\pm 50\%$ 변화시켜가며 Zone2로의 유입수량의 변화를 비교하였다. 또한 강우의 함양에 의한 유입수량의 변화에 대해서 인근 기상대의 연간 강우량을 기준으로 $\pm 25\%$ 와 $\pm 50\%$ 의 값을 이용하여 민감도 분석을 실시하였다.

수리상수의 민감도 분석결과 연암층의 수리상수가 50% 증가하면, 기저를 통한 유입수량은 증가하며, 댐체는 미약하게 증가, 양안은 미약하게 감소한다. 반대로 연암층 수리상수가 50% 감소하면, 기저를 통한 유입량은 감소하며, 댐체는 미약하게 감소, 양안은 미약하게 증가한다. 양안의 수리상수가 50% 증가하는 경우에 양안을 통한 유입수량이 증가하며, 기저 유입수량이 감소하고, 댐체는 미약하게 감소한다. 반대로 양안의 수리상수가 50% 감소하는 경우에는 양안을 통한 유입수량이 감소하며, 기저 유입수량은 증가하고, 댐체는 미약하게 증가한다. 그러나 양안과 기저층의 수리전도도의 변화에도 불구하고 모든 경우에 전체 유입량 중 댐체(Zone3)를 통한 유입량의 비율은 0.73~0.81의 범위 안에서 변화하는 것으로 나타났다.

함양량의 민감도 분석결과는 함양량이 증가함에 따라 양안 및 기저를 통한 유입수량은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 함양량의 증가에 따른 전체 유입량 중 댐체 통과 유입량은 거의 변화가 없는 것으로 나타났으나, 전체 유입량 중 댐체(Zone3)를 통한 유입량의 비율은 주암댐의 경우 약 83%에서 약 72%까지, 임하댐의 경우 약 86%에서 약 80%까지 감소하는 것으로 나타났다.

4.2.2 댐수위에 따른 유입수량 영향 변화

댐수위에 따른 댐하부 유출수량을 알아보기 위해 댐수위를 5m 단위로 변화시키면서 인자별 유출수량을 분석하였다. 수치모의 결과에 의하면, 댐체를 통한 유입량은 댐수위

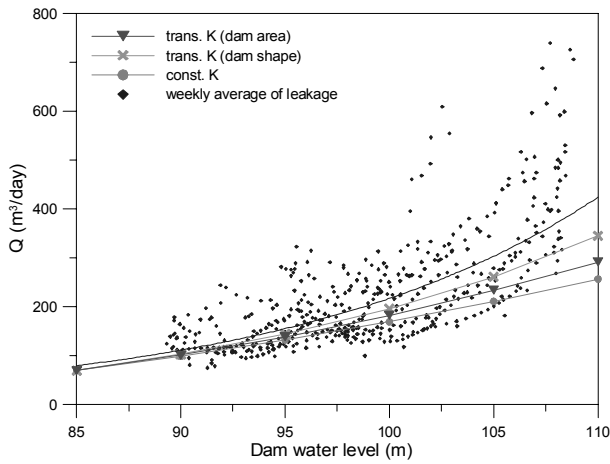
가 증가함에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났으나, 양안과 기저유출을 통한 유입수량의 증가폭은 상대적으로 작게 나타났다. 한편 위 수치모의 결과는 댐체의 수직 단면 두께 및 수리전도도값이 일정하다고 가정하고 댐수위 변화에 따른 유입수량/유출수량을 모의한 결과이다. 그런데 실제 댐체 코어 수직 단면의 두께는 하부쪽이 두껍고 상부가 얇은 사다리꼴 형태이며, 설계도에 의하면 수직증가 : 수평증가 = 1 : 0.2 정도로 되어있다. 따라서 댐수위가 상승하면 평균적인 댐체 단면 두께가 얇아지므로 댐체 통과량은 증가(Darcy's law)하게 되나, 수치모델상 댐체 코어의 단면 두께는 일정하므로 수리전도도 값을 비례하여 증가시켜야 타당하다. 이를 위하여 댐체 침투수(지하수)의 수평적인 흐름을 가정(Dupuit assumption)하고, 단면 두께 감소에 따른 전체 유출수량을 적분형태로 계산하면, 특정한 댐수위에서 동일한 침투수량을 갖는 변환 수리전도도값을 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있으며, 이를 적용한 수치모의도 함께 수행하였다.

$$K_{tran} = aK \frac{L}{(a-c)x} \ln \frac{a}{b_x} \quad (2)$$

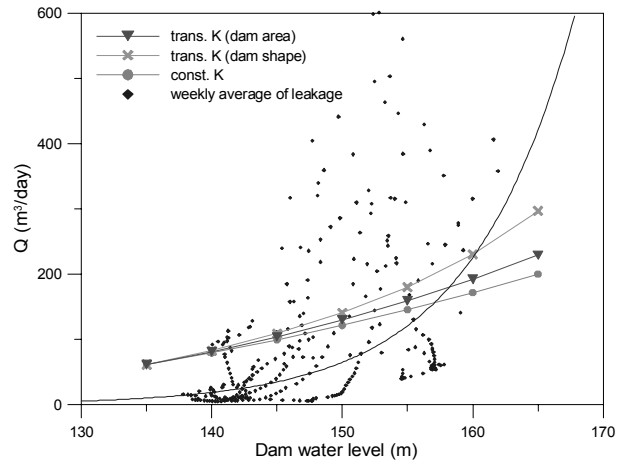
여기에서 K_{tran} 는 변환 수리전도도값, K 는 매질(댐체)의 수리전도도, b_x 는 $a - (a-c) \frac{x}{L}$, a 는 댐체 수직단면 하부 두께, c 는 댐체 수직단면 상부 두께, x 는 증가 댐수위(댐수심), L 는 댐하부에서 댐상부까지의 길이를 나타낸다.

한편 댐수위 상승에 따른 유출수량의 증가와 관련하여 고려될 수 있는 것은 댐의 수평 단면적이다. 실제 댐 수평단면의 길이는 하부에서 상부로 가면서 증가하는 데, 모의에 이용된 수치모델에서는 댐의 수평단면의 길이를 일정하게 가정하였다. 따라서 수치모델의 침투수 통과면적에 댐 단면 길이의 증가에 따른 증가면적을 반영하여야 한다. 침투수에서 유출량은 단면적에 정비례하고 또한 수리전도도 값에 정비례하므로, 단면적의 증가분도 수리전도도 값의 환산을 통하여 반영할 수 있다. 댐의 수평 단면을 단순화하면 하부 길이가 짧고 상부 길이가 긴 사다리꼴 형태가 된다. 댐의 수평 단면적에 해당하는 사다리꼴 넓이는 “(하부길이 + 상부길이) \times 높이”로 계산할 수 있으며 모델에서 고려된 것을 일정한 하부 길이라고 가정하면, 동일한 유출수량을 나타내기 위한 수리전도도 값은 (하부길이 + 상부길이) / (2 \times 하부길이)의 비율로 환산할 수 있으며 변환된 수리전도도값을 이용한 수치모의도 함께 수행하였다.

댐수위에 따라 Zone2의 배수경계를 통한 유입수량과 수문곡선분리법으로 분석한 기저유출량(댐체+기저+양안, 주간평균)을 그림 10에 나타내었다. 댐의 수직단면 형태를 고려한 경우(trans. K(dam shape))와 댐의 수평단면 형태를 고



(a) 주암



(b) 임하

그림 10. 댐 수위에 따른 해석 유입량 및 계측 침투수량

려한 경우(trans. K(dam area))를 비교해보면, 두 경우 모두 일정한 수리전도도값을 이용한 경우(const. k)보다 유출수량 예측결과가 개선되며, 수문곡선 분리의 추세선에 보다 근접한 것은 댐의 수직 단면만을 고려한 경우이다.

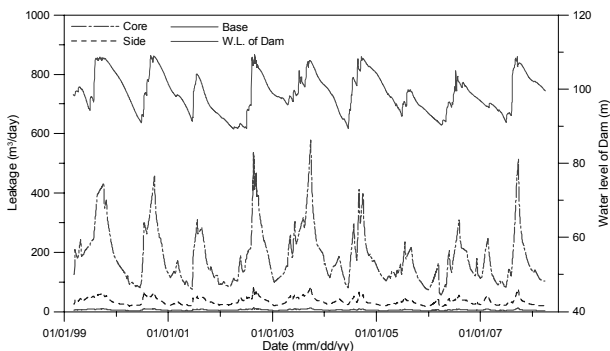
전체적으로 수치모의된 값이 수문곡선분리법으로 분리된 계측 기저유출량의 아래쪽에 편이하여 위치하나 임하댐의 경우 댐수위가 낮을 시에는 전반적인 계산값이 추세선의 상부에 존재한다. 이는 수치모델이 임하댐을 개념적으로 잘 반영하지 못했기 때문이라기 보다는 강우량이 적은 시기에는 계측 침투수량이 지나치게 적게 측정되기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 계측 침투수량의 인자별 분리 및 댐체 침투수량 추세분석

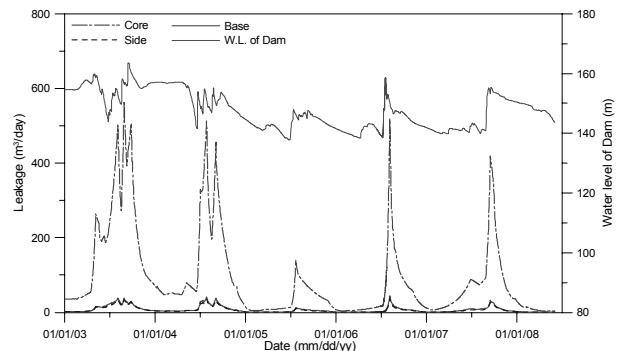
수문곡선분리법에 의해 계산된 기저유출량은 댐체, 양안, 댐기저를 통한 유출수량으로 구분될 수 있으며 이들의 비율은 수치모델링 방법을 통하여 구하였다. 댐수위의 변화에

따라서 각각의 비율은 변화하므로 댐수위의 변화에 따른 댐체, 양안, 댐기저 유출량 비율의 변화를 이용하여 댐체, 양안, 댐기저의 유입량을 시계열 자료로 계산할 수 있다. 수치모델링에서는 댐수위 증가에 따른 수평단면적의 증가를 고려한 모의결과가 수문곡선이 분리된 댐수위 대 기저유출량 상관관계와 가장 근접하므로, 그 결과를 이용하였다. 수치모의 결과인 영역별 유입수량 비율의 변화 그래프를 이용하여 댐수위에 대한 각 성분별 유출수량 추세식을 3차 함수로 나타내면 결정계수가 0.9999 이상으로 나타난다. 각각에 해당하는 식은 다음과 같으며, 이들 식을 이용하여 계산된 비율을 통하여 계산된 각 성분의 유출수량을 수문곡선분리법으로 분리된 기저침투유량에 대입하여 경시적으로 그림 11에 나타내었다.

주암댐 댐체 $y = 2.48E-06x^3 - 0.000821x^2 + 0.0953x - 2.9702$
 양안 $y = -2.27E-06x^3 + 0.000748x^2 - 0.0860x + 3.5477$
 댐기저 $y = -2.11E-07x^3 + 7.38E-05x^2 - 0.00924x + 0.4224$
 임하댐 댐체 $y = 4.76E-07x^3 - 0.000238x^2 + 0.0427x - 1.7983$

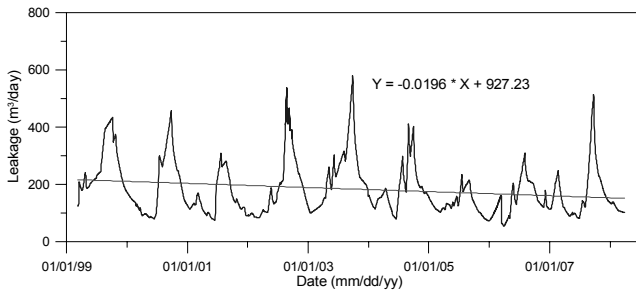


(a) 주암

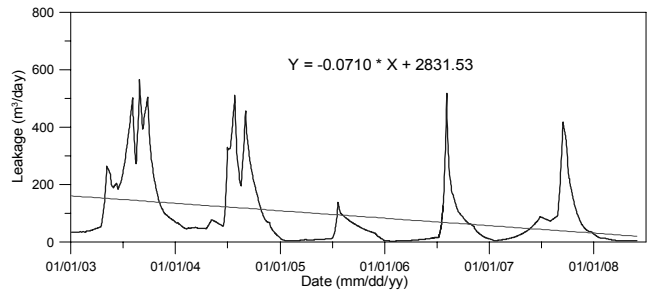


(b) 임하

그림 11. 강우직접유출을 제외한 인자별 유출수량



(a) 주암



(b) 임하

그림 12. 댐체를 통한 침투수량에 대한 선형추세분석 결과

양안 $y = 2.07E-07x^3 - 0.000101x^2 + 0.0153x - 0.6452$
 댐기저 $y = -6.83E-07x^3 + 0.000339x^2 - 0.0580x + 3.4434$

수문곡선분리와 수치해석적인 방법에 의해 계산된 인자별 요소 중 주요한 관심대상인 댐체 침투수량 자료에 대한 선형 추세분석을 수행하였다. 그림 12의 분석결과에 의하면 주암댐의 경우는 기울기가 $-0.020m^3/day/day$ 로 감소하며, 임하댐의 경우는 $-0.071m^3/day/day$ 로 감소하여 임하댐의 댐체를 통한 장기적 침투수량 감소가 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 안정적인 댐체에서는 장기적인 계측 침투수량이 감소하는 것으로 알려져 있다(坂本忠彦, 1998).

5. 결 론

댐 안전성 확보의 목적으로 댐체 내부나 하류측에 침투수 집수 용벽을 설치하고 용벽에 집수된 침투수량을 측정하는 계측시스템을 운영하고 있다. 침투수량 계측의 목적은 댐체 안전성 관련 요소인 댐체와 기초지반을 통한 침투수량의 변동성을 파악하고자 하는 것이나, 계측 침투수량에는 외부의 영향 인자를 포함하게 되어 정량적인 평가를 어렵게 한다. 따라서, 본 논문에서는 서로 상이한 계측시스템 및 지형학적 특성을 가지는 2개 대상댐에 대하여 수문곡선분리법, 수치해석법을 통하여 장기적인 침투거동 특성을 비교 평가하고 댐 침투수량 관리기법을 검토하고자 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 분석 대상댐인 주암댐과 임하댐의 침투수량 계측 자료 분석결과 침투거동 특성에서 구분되는 특성을 보여 준다. 이는 부지 인근의 지형, 지질학적 특성, 댐체의 구조적 특성, 침투수량 측정 방식 등의 다양한 원인에 기인되는 것으로 판단되므로 댐 안전성 평가 시에는 부지 고유의 특성이 고려되어야 한다.
- (2) 본 연구에서 수집, 분석된 자료는 매시간 자료를 일평균

자료로 환산한 것으로, 강우 성분 분리를 통한 정량적인 분석에 기본적 자료로 사용되었다. 따라서 댐 계측 빈도에 대한 관련 규정은 자동계측을 활용하며, 때 시 1회 이상 계측하도록 규정보완이 필요한 것으로 판단된다.

- (3) 수문곡선분리법에 의해 강우의 영향을 제거한 상태에서 댐수위와 기저유출량의 상관관계는 지수형태로 나타나며, 수문곡선분리법은 대상 댐별로 신뢰구간의 설정과 평가기간의 분리·조정을 통하여 장기적인 침투수량 안전관리에 사용 가능한 방안을 알 수 있다.
- (4) 수치해석적인 방법으로 댐별 침투수량을 모의한 결과 해석법 자체가 가지는 한계성은 있으나 주암댐 및 임하댐 공히 댐의 수직 단면형태를 고려한 것이 수문곡선분리에 의한 침투량의 증가형태와 가장 유사하여 실제 조건을 잘 모의한 것으로 판단된다. 다만, 임하댐의 경우 전반적인 모의 침투수량값이 실제 계측값 추세선의 상부에 존재하는데 임하댐에서 집수된 물이 다공관을 통하여 연결함으로써 집수의 효율이 저하되어 계측강수량이 적은 시기에 계측 침투수량이 지나치게 적게 측정된 것에 기인되는 것으로 판단된다. 이는 일평균 계측 침투수량이 주암댐 $302.4m^3/day$, 임하댐 $166.6m^3/day$ 로 댐 규모에 비해 훨씬 작은 점을 함께 고려할 때에도 알 수 있다.
- (5) 수문곡선 분리 전의 침투수량과 수문곡선분리된 댐체 통과 침투수량으로 추세분석한 결과 장기적으로 침투수량이 감소하여 2개 대상댐은 안정적으로 거동하고 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 건설부(1994), *댐 시설 유지관리 기준*, pp. 70~99.
2. 박영목, 우문정, 이영휘(2004), *홍담의 장기침투영향에 관한 실험적 연구*, *대한토목학회 논문집*, Vol. 24, No. 2C, pp. 97~104.
3. 박한규, 장봉석(2005), *국내 대댐의 현황*, *대한토목학회지*, Vol.

- 53, No. 10, pp. 206~218.
4. 이규탁, 임희대(2007), 중앙심벽형 필댐의 침투량 및 침하량에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 27, No. 6C, pp. 383~392.
 5. 이진용, 이명재, 이재명, 안경환, 원종호, 문상호, 조민조(2006), 국가 지하수 관측소 지하수위, 전기전도도 및 수온 자료에 대한 모수적 및 비모수적 변동 경향성 분석, *지하수토양환경학회지*, Vol. 11, No. 2, pp. 56~67.
 6. 한국수자원공사(2004), *댐 계측기기 설치운영관리지침*, pp. 1~10.
 7. 坂本忠彦(1998), *ロックフィルダムの力學挙動と安全性評価に関する研究*, 博士學位論文, 京都大學校, pp. 134~214.
 8. Amano Takuzo, Kikkawa Kazunari and Kadowaki Yuji(2005), New Water Leakage Quantity Management Method of Fill Dam by Component Separation Analysis, *Electric Power Civil Engineering*, Vol. 10, No. 319, pp. 38~41.
 9. Box, G.E.P. and Jenkins, G.M.(1976), *Time Series Analysis Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco, CA, pp. 560~575.
 10. Foster, M.A., Fell, R. and Spangle, M.(1998), *Analysis of Embankment Dam Incidents*, The University of New South Wales, Sydney Australia, UNICIV Report No.R-374, pp. 3~40.
 11. Linsley, R.K., Jr., Kohler, M.A., and Paulhus, J.L.H.(1982), *Hydrology for Engineers (3d ed.)*, McGraw-Hill, New York, pp. 500~508.
 12. Sloto, R.A., Crouse, M.Y.(1996), *HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040, pp. 30~46.

(접수일: 2010. 5. 4 심사일: 2010. 5. 31 심사완료일: 2010. 8. 17)