

수두손실률에 의한 침투류 감시기법 개발

Development of the Seepage Flow Monitoring Method by the Hydraulic Head Loss Rate

임 성 훈¹ Eam, Sung-Hoon

강 병 윤² Kang, Byung-Yoon

김 기 완³ Kim, Ki-Wan

구 자 호⁴ Koo, Ja-Ho

강 신 익⁵ Kang, Shin-Ik

차 흥 윤⁶ Cha, Hung-Youn

정 재 현⁷ Jung, Jae-Hyun

조 준 호⁸ Cho, Jun-Ho

김 기 수⁹ Kim, Ki-Soo

Abstract

In this study, the seepage flow monitoring method by the hydraulic head loss rate was developed for the purpose of application to offshore construction site enclosed by cofferdams in which seepage force varies periodically. The amount of the hydraulic head loss rate newly defined in this graph was in a range between 0 and 1. The zero of the rate means the existence of flow with no seepage resistance. The 1 of the rate means no seepage flow through the ground. The closer to 1 the coefficient of determinant in the hydraulic head loss graph is, the more the ground through which seepage water flows is stable. The closer to 0 the coefficient of determinant in the hydraulic head loss graph is, the more the ground through which seepage water flows was unstable and the higher the possibilities of existence of empty space or of occurrence of piping on the seepage flow pass in the ground is. The hydraulic head loss graph makes it possible to monitor sensitively the situation of seepage flow state, and the graph helps to understand easily the seepage flow state at the specific section on the whole cofferdam.

요 지

본 연구에서는 침투압이 주기적으로 변화하는 연근해 가물막이 시공현장에 적용하기 위해서 수두손실그래프에 의한 침투류 감시기법을 개발하였다. 이 기법에서 새로이 정의된 수두손실율은 0~1 사이의 값으로 나타나며 0이면 완전통수상태, 1이면 완전차수상태를 나타낸다. 수두손실그래프의 결정계수가 1에 가까우면 침투경로상의 지반은 안정된 상태에 있음을 나타내고 0에 가까우면 공동이 존재할 수도 있고 파이핑이 진행 중일 수도 있다. 수두손실그래프에 의한 안전관리기법은 침투상태의 변화를 민감하게 감지할 수 있도록 하며 전체 현장에 적용할 경우 각 위치별 하부지반의 침투상태를 세부적으로 판단할 수 있도록 한다.

Keywords : Cofferdam, Hydraulic head loss, Pore water pressure, Seepage monitoring, Tidal movement

1 정회원, 공주대학교 지역건설공학전공 부교수 (Member, Associate Prof., Major of Rural Construction Engrg., Kongju National Univ., geotechkor@kongju.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국농어촌공사 새만금경제자유구역사업단 과장 (Member, Manager, Saemangeum Free Economic Zone Project Office, Korea Rural Community Corporation)

3 한국수자원공사 조력사업처 대리 (Senior Clerk, Sihwa Tidal Power Plant Construction Dept., Korea Water Resources Corporation)

4 한국수자원공사 물관리센터 대리 (Senior Clerk, Water Resources Operation Center, Korea Water Resources Corporation)

5 한국수자원공사 산업사업처 차장 (Manager, Industrial Estate Development Dept., Korea Water Resources Corporation)

6 한국수자원공사 조력사업처 공사팀장 (Head Manager, Sihwa Tidal Power Plant Construction Dept., Korea Water Resources Corporation)

7 정회원, 지구환경전문가그룹 기술부 부장 (Member, General Manager, Technology Dept., Expert Group For Earth Environment Co., Ltd)

8 지구환경전문가그룹 설계부 이사 (Executive Director, Technology Dept., Expert Group For Earth Environment Co., Ltd)

9 지구환경전문가그룹 기술부 이사 (Executive Director, Technology Dept., Expert Group For Earth Environment Co., Ltd)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

댐이나 가물막이와 같이 침투류가 발생하는 현장에서는 침투에 대한 안정관리를 위해서 댐의 제체 내부나 가물막이의 내외 침투경로 상에 간극수압계를 설치하고 간극수압의 변화를 감시한다. 간극수압을 감시하는 방법으로는 첫 번째로, 과거의 관측값에 대한 통계적인 허용범위를 분석하는 방법이 있다. 허용범위는 과거 관측값의 평균에 표준편차의 일정배수범위를 가감하여 설정한다. 두 번째로, 미리 특정한 한계값을 설정하여 그보다 큰 값이 관측되면 제체 또는 침투경로상에 이상이 있는 것으로 판정하는 결정론적 방법이 있다. 세 번째로, 이상과 같은 두 가지 방법을 함께 사용하는 혼성방법이 있다. 지하수위나 하천수위가 급격하게 변동하지 않는 현장에서 측정되는 간극수압은 일반적으로 시간이 경과하여도 일정한 값을 유지하는 경향이 있으므로 간극수압이 증가하면 이를 탐지하는 것이 용이하고 이상 여부를 즉각적으로 판단할 수 있으므로 결정론적인 방법을 많이 적용한다. 측정값에 많은 잡음이 섞여 있어서 판단이 곤란한 경우에는 통계적인 방법을 적용한다. 마지막으로, 미리 현장조건에 대해서 해석적인 방법으로 간극수압을 예측하고 측정되는 간극수압과 비교하는 방법이 있다. 현장조건이 복잡하면 이론적인 해석이 곤란하므로 단순한 조건에 대해서 적용할 수 있다. 원형셀을 이용한 가물막이 현장에 대해서도 이 방법을 적용한 많은 연구들이 수행되었다. Naveed 등(1975)은 원형셀에 대한 모형시험을 통해서 원형셀 내외부에 수위차가 있는 경우와 없는 경우에 대한 응력변화를 분석하였다. 그러나 외측의 수위는 주기적으로 변하지 않고 일정한 값을 유지하는 것으로 설정하였다. Schroeder 등(1979)도 원형셀에 대한 기존의 설계법을 검토하였으나 외측의 수위는 일정하게 유지되는 조건으로 하였다. 이외에도 다른 많은 연구자들이 비슷한 조건에 대해서 분석하였으며, 비교적 최근의 연구로는 Miura 등(2001)이 가물막이에서 보일링에 대한 해석을 3차원으로 해야 신뢰성이 있다고 하였으며, 역시 외측 수위조건은 일정한 값을 유지하는 경우에 대해서 해석하였다. Mansur 등(2002)은 Ohio강에서 원형셀과 원호셀을 이용한 가물막이에 대해서 다양한 분석을 실시하였으며 강의 수위는 일정하게 유지되는 조건으로 하였다. 이상과 같이 가물막이의 침투안정관리에 대한 많은 연구들이 수행되었으나 기본적으로 침투류의 유입부의 수위는 일정하게 유지되는 조건에 대한 연구들이 수행되었다.

우리나라 서남해안과 같이 간만의 차가 큰 연근해 또는 해안가에서 가물막이를 시공할 경우에도 침투류에 대한 안정관리를 위해서 가물막이 안쪽 침투경로에 간극수압계를 설치하고 침투압의 변화를 감시한다. 침투수압이 조위변동의 영향을 받는 경우에는 측정되는 간극수압이 조위변동과 비슷한 형태의 주기변화를 한다. 측정되는 간극수압이 일정한 값을 유지하지 않고 등락을 반복하므로 간극수압의 변화를 관찰하고 이상 여부를 판단하는 것이 어렵다. 이러한 경우에 단순통계처리방법이나 결정론적 방법보다 효율적인 침투안정관리에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았으며 최근에서야 통계적인 분석법을 변형하여 과거 관측값에 대한 시계열분석을 하거나 다항식 모델에 대한 통계분석을 하여 예측값을 설정하고 실측값과 비교하는 방법 및 인공신경망이론을 적용한 일반회귀분석법이 연구되었다(Huang & Lie., 2009). 그러나 이러한 방법은 자료가 주기적으로 변동하는 경우에 대해서 좀 더 정밀한 회귀분석법을 적용한 것일 뿐이며 침투류가 이동하는 지반의 고유한 물리적 성질을 고려하거나 설명할 수는 없으며, 예측된 값도 예측시간이 길어질수록 편차가 크게 발생하는 경향이 있어서 직전까지의 관측치를 이용해서 다시 회귀분석을 해야 하는 단점이 있다.

침투류의 유입을 유발하는 해측 조위에 의한 침투압이 주기적으로 변동하는 경우에는 해측 침투수압을 측정하여 침투류 안정관리에 활용하여야 한다. 그러나 많은 해상 가물막이 현장에서 전술한 것과 같이 유입부의 침투수압이 일정한 육상에서 실시하는 방식을 그대로 적용하여 이상 여부를 판단하고 있다. 이러한 방식에 의한 침투안정관리는 신뢰성이 낮고 비효율적이므로 현장에서 많은 비용을 지출하여 간극수압측정시스템을 구현해 놓고도 이를 잘 활용하지 못하고 있는 실정이다.

이 연구에서는 침투류의 유입부 쪽의 침투압이 주기적으로 변화하는 가물막이 시공현장에서 기존의 방법보다 효과적으로 실시간 침투안정관리를 할 수 있는 새로운 기법을 개발하고 실시간 계측이 이루어지고 있는 시화호 조력발전소 건설 현장에 적용하여 적합성 여부를 검증하고자 한다.

2. 수두손실률의 정의

2.1 수두손실률 정의

조위의 영향을 받는 연근해나 해안가에서 가물막이를

시공할 경우에 간극수압계를 침투경로에 설치하여 침투류에 대한 안정관리를 한다. 육상에서처럼 가물막이 내측에만 간극수압계를 설치하는 것보다는 내 외측에 각각 설치하여 측정된 값을 비교하는 것이 안정관리를 위해서 더 적합하다. 그림 1은 침투경로의 해측에 설치된 간극수압계를 P1으로 표시하고 내측에 설치된 간극수압계를 P2로 표시하여 나타낸 해안가 가물막이 현장 모식도이다.

침투류의 유입부에서 침투압이 주기적으로 변동하면 침투경로의 간극수압도 주기적으로 변한다. 이러한 조건에서는 침투경로의 변화를 즉각적으로 감지하고 안정성을 판단할 수 있는 기법이 필요하다.

지반에서 서로 떨어져 있는 두 지점을 통과하는 침투류는 흙 입자와 물의 마찰에 의해서 침투압을 손실하게 된다. 유입부에서 침투압이 커지면 침투유속도 증가하고 마찰도 증가하므로 두 지점 사이의 침투압의 손실도 더 커질 것으로 추론할 수 있다. 흙 입자와 물 사이에 작용하는 마찰력은 그 자체로 침투류가 통과하는 지반의 상태를 나타낸다. 지반이 느슨해지거나 유로가 발달하여 파이핑이 진행 중이라면 유입부의 침투압이 증가하여 침투유속이 증가해도 마찰력이 감소하기 때문에 침투압의 손실이 작아질 것이다. 반대로 지반이 다져지거나 형성되었던 유로가 막히면 마찰력이 증가하므로 침투압의 손실도 증가할 것이다.

침투류와 흙 입자 사이의 마찰력의 증감비율은 침투유속에 무관하게 지반이 갖는 고유한 특성이므로 유입부의 침투압이 주기적으로 변화하여도 일정한 상태를 유지할 것이다. 따라서 마찰력의 증감비율에 의해서 나타나는 가물막이 내측 간극수압의 변화를 다음과 같이 산출할 수 있다.

그림 1에서 P1에서 측정되는 간극수두를 H_{P1} 이라고 하고 P2에서 측정되는 간극수두를 H_{P2} 라면 H_{P1} 의 변화

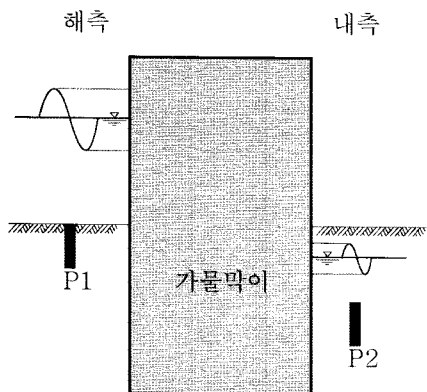


그림 1. 해안가 가물막이 내 외부에 설치된 간극수압계 및 조위변화

에 따른 두 지점 사이의 침투수두 손실비율을 수두손실률 a 라고 명명하고 다음과 같이 정의하였다.

$$a = \frac{\Delta(H_{P1} - H_{P2})}{\Delta(H_{P1})} \quad (1)$$

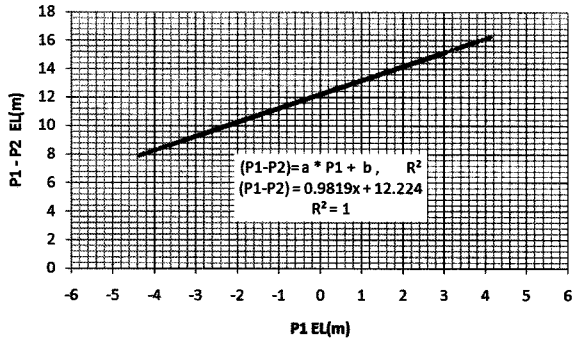
식 (1)은 침투경로상의 유입부에서 침투압의 변화에 대한 유입부와 유출부의 수두손실량의 변화 비율을 나타낸 것이다. 흙 입자와 침투류 사이에 작용하는 마찰력의 변화율을 직접 측정하는 것은 아니지만 유입부의 침투압 변화에 무관하게 지반의 상태변화를 감지할 수 있다. 동일한 침투경로상의 여러 위치에 간극수압계를 설치한 경우에 H_{P1} 을 해측조위로 설정하면 수두손실률 a 는 해수에 대해서 H_{P2} 까지의 전체적인 침투수 차수상태를 분석하게 된다. H_{P1} 과 H_{P2} 를 침투경로상에서 인접한 간극수압계로 설정하면 두 지점 사이의 침투상태를 분석하게 된다.

H_{P1} 이 특정량 만큼 증가할 때 H_{P2} 도 동일한 양만큼 증가하면 두 지점 사이에 유속증가에 의한 마찰손실수두가 없는 상태이므로 $a=0$ 이고 완전 통수상태를 나타낸다. H_{P1} 이 특정량 만큼 증가할 때 H_{P2} 가 변화가 없다면 H_{P2} 지점은 H_{P1} 의 영향을 전혀 받지 않는 상태이므로 $a=1$ 이 되고 완전 차수상태를 나타낸다. 따라서 a 는 0~1 사이의 값으로 나타내고 차수상태를 정량적으로 판단할 수 있다.

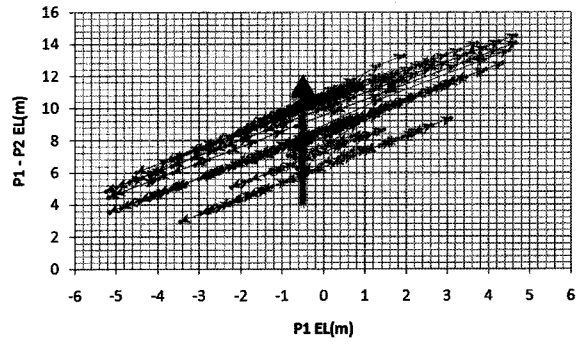
2.2 수두손실 그래프의 특징

실시간으로 측정되는 자료로부터 수두손실률을 효율적으로 산출하기 위해서 시간의 경과에 따라 측정되는 자료로부터 그래프를 작성하고 실시간으로 궤적을 추적하는 것이 효율적이다. 가로축에 유입부(P1)의 간극수두를 나타내고 세로축에 두 측정점사이의 수두차(P1-P2)를 나타내고 회귀직선 및 결정계수를 구하면 그림 2와 같은 그래프들이 된다. 각각의 자료는 그래프 상에 점으로 나타나므로 전체적인 경향 및 상태의 안정성을 정량적으로 나타내기 위해서 회귀직선을 사용한다. 이와 같이 나타낸 그래프를 수두손실 그래프라고 명명한다. 수두손실 그래프에 영향을 주는 다양한 인자들의 변화들을 논리적으로 분석하면 그래프의 형태 및 변화로부터 차수상태에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.

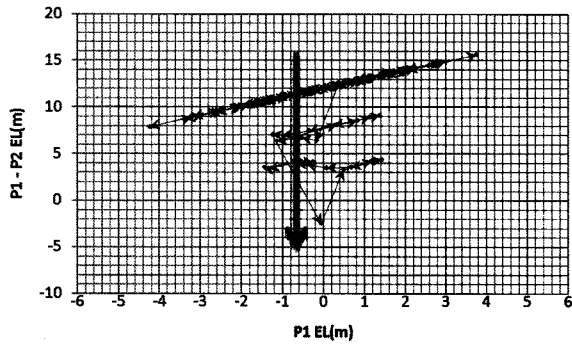
완전차수상태이면 P1의 수두가 변화하여도 P2의 수두는 변화가 없으므로 수두손실률 $a=1$ 이 된다. 완전차수상태이므로 침투경로상의 지반도 안정되어 있고 측



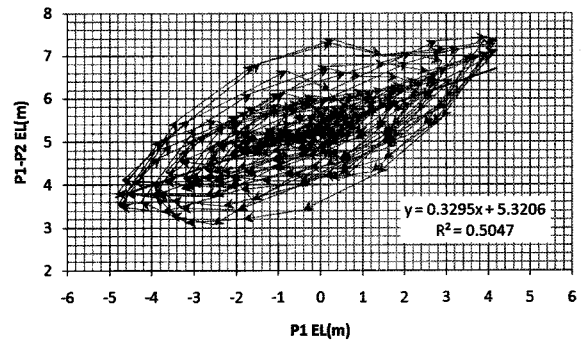
(a) 완전차수상태



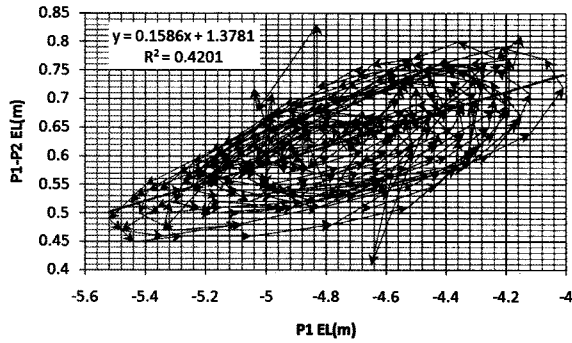
(b) 수두차가 커지는 경우



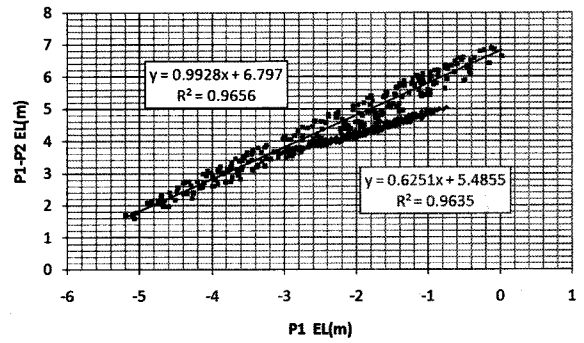
(c) 수두차가 작아지는 경우



(d) 시계방향 타원궤적을 나타내는 경우



(e) 반시계방향 타원궤적을 나타내는 경우



(f) 수두손실률의 비교

그림 2. 수두손실률 그래프의 형상에 따른 침투수의 차수상태

정되는 자료들도 일관성을 나타내게 되어서 그래프 상의 자료는 P1의 주기적인 변동에 따라서 직선궤적을 반복하게 되므로 결정계수 R^2 도 1에 근접한 값을 갖는다. 그림 2(a)에 이 경우에 대한 그래프가 나타나 있다.

P1에는 변화가 없고 P2쪽에서 양수에 의해서 인위적으로 수위를 낮추는 경우에는 두 측점 사이의 지반은 변화가 없으므로 a는 일정하게 유지되지만 수두차가 커지므로 수두손실 그래프는 위쪽으로 평행이동을 한다. 그림 2(b)에 이 경우에 대한 그래프가 나타나 있다. 이러한 변화 자체가 침투안정성이 낮아지는 것을 의미하지는 않지만 두 측점 사이에 침투압이 증가하는 것을 의미하므로 침투압이 지반의 한계를 넘어서 갑작스런 파이

핑이 발생할 우려가 있는 상황이므로 가물막이 시설의 상태를 정밀하게 점검하여야 한다.

가물막이 안쪽에 물이 유입되어 P2쪽의 수위가 상승한 경우에는 두 측점 사이의 침투 경로상에 세굴에 의한 유로의 확대가 진행되는 경우와 같은 지반의 변화는 없으므로 a는 일정하게 유지되고 수두손실 그래프는 아래쪽으로 이동하게 된다. P1이 해측 조위인 경우에는 이러한 경우가 발생할 가능성이 희박하므로 수두손실 그래프가 아래쪽으로 평행이동을 하였다면 가물막이 안쪽 수위의 상승 여부를 확인하여야 한다. P1 및 P2 사이의 지반에 파이핑이 발생하였다면 수두손실 그래프는 아래쪽으로 이동하고 기울기 a는 작아진다. 그림 2(c)에는

이러한 경우에 대한 그래프가 나타나 있다.

P1과 P2 사이에 공동이 존재해서 P1과 P2 사이에 반응시간의 지연이 존재한다면 수두손실그래프는 타원궤적을 나타낼 것이다. 수두손실그래프에 영향을 주는 다양한 요인에 의해서 타원궤적은 시계방향 또는 반시계 방향으로 나타날 수 있다. 그림 2(d) 및(e)에는 각각 시계방향 타원궤적과 반시계방향 타원궤적을 나타내는 수두손실 그래프가 나타나 있다. 타원궤적이 일정하면 공동이 변화가 없는 것을 나타내고 공동이 점진적으로 확장되어 침투류에 흠이 함께 흘러나오는 상태라면 타원궤적은 불규칙적인 형상을 나타낸다. 침투류가 흐르는 경로에 공동이 존재하면 점차로 공동이 확대되는 경향이 있으므로 타원궤적이 규칙적인 궤적을 유지하는 경우보다는 불규칙적인 형태를 나타내는 경우가 많고 이런 경우에는 파이핑이 진행 중이라고 판단 할 수 있다. 그러므로 침투경로 상의 지반에 지속적으로 변화가 있는 경우에는 결정계수 R^2 이 1보다 작게 되고 0에 가까울수록 무작위적이므로 더욱 불안정한 것으로 판단할 수 있다.

침투경로상의 지반에 공동이 존재하지 않으면 차수상태가 불량한 경우에도 안정적인 상태를 유지할 수 있다. 이런 경우는 가물막이 안쪽으로 유입되는 침투유량은 많지만 침투유량이 확장되지 않는 경우이므로 정기적인 양수에 의해서 내측 수위를 유지시킬 수 있고 침투안정성 측면에서는 안정적인 상태라고 할 수 있다. 그림 2(f)에는 유입부 P1의 침투압 변화 및 수두차가 비슷한 경우에도 완전한 차수상태를 유지하며 침투경로상의 지반의 상태도 안정적이어서 a 와 R^2 이 모두 거의 1에 가까운 경우와 차수상태는 불량하여 a 는 약 0.6정도

이지만 침투경로상의 지반의 상태는 안정적이어서 R^2 이 1에 가까운 두 가지 경우를 비교한 것이 나타나 있다.

3. 수두손실을 적용 현장 현황

3.1 해안가 가물막이 및 간극수압 계측 현황

개발된 수두손실그래프에 의한 침투안정관리기법을 시화호 조력발전소 건설현장에 적용하고자 한다. 한국수자원공사(2005, 2007)에 의하면 가물막이 및 계측현황은 다음과 같다. 해측에는 강널말뚝으로 구성된 29개의 원형셀 및 원형셀 사이를 막아주는 원호셀로 가물막이가 시공되고 호측에는 단순하게 1열의 강널말뚝으로 시공되었다. 해측에 시공한 원형셀 및 원호셀 내부에 모래를 채워서 내 외부의 수위차에 의한 횡압에 저항하도록 하였다. 호측은 시공현장이 기존의 방조제 도로와 접하고 있다. 도로의 호측 수변부에 1열의 강널말뚝을 시공해서 내 외부의 수위차에 의한 횡압을 도로가 지지하도록 하였다. 호측의 강널말뚝은 도로의 양쪽을 횡단하여 원형셀과 연결되어서 가물막이 내 외부를 완전하게 분리하고 있다. 현장에 구현된 실시간 감시 시스템의 일부를 구성하는 다양한 계측센서들 중에서 간극수압계는 19개 측정점에 설치되어 있고 일부 원형셀의 해측에 조위계가 설치되어 실시간으로 조위를 계측하였다. 원형셀과 도로쪽 강널말뚝 차수벽이 접한 가물막이 좌우측 접속부들에는 예상되는 침투류의 흐름 방향으로 강널말뚝의 해측과 내측에 각각 1측점 내지 2측점에 간극수압계를 설치하였다. 원형셀 3번, 6번 및 9번 내측에는

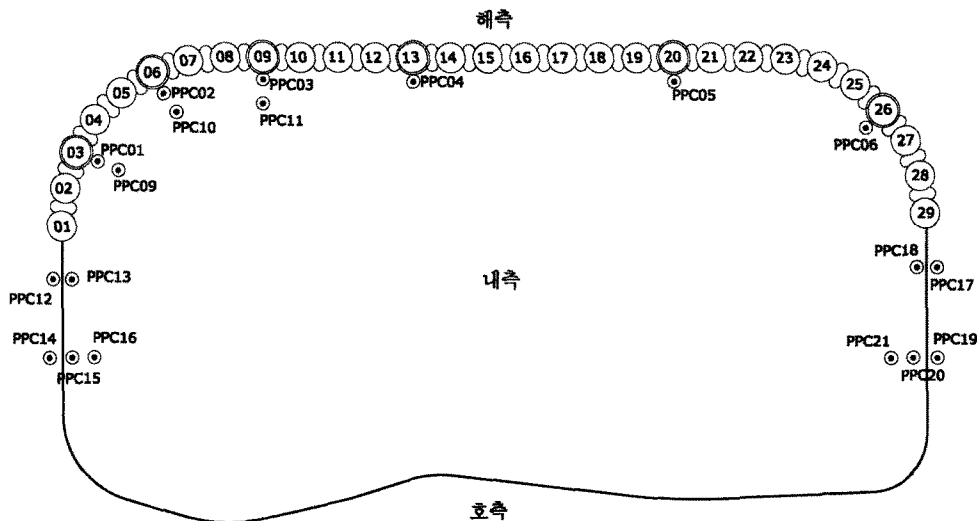
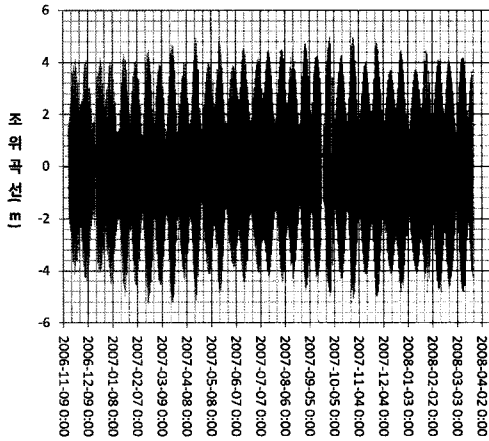


그림 3. 시화호 조력발전소 가물막이 현장의 간극수압계 설치현황

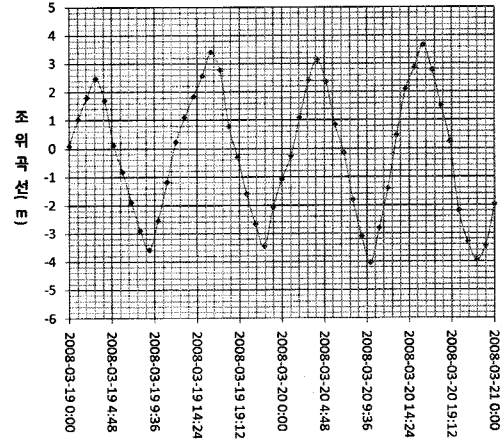
예상되는 침투류 흐름방향으로 2개 측점에 간극수압계를 각각 설치하였으며 원형셀 13번, 20번 및 26번 내측에는 각각 1개 측점에 간극수압계를 설치하였다. 일부 측점에는 매설 심도를 달리하여 2개의 간극수압계가 매설되었다. 그림 3에는 이상과 같은 가물막이 및 간극수압계 설치 현황이 나타나 있다.

3.2 측정된 간극수압의 변화 양상

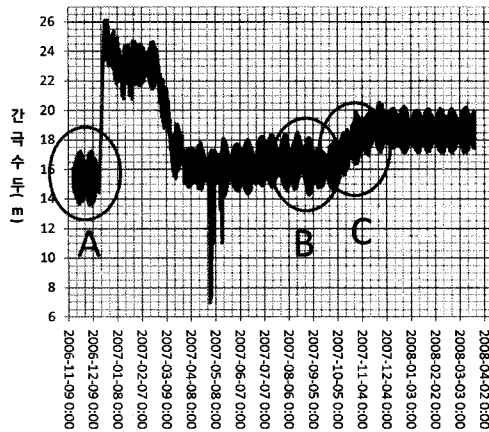
조석은 반일주기, 일주기 등 비교적 단주기 천문조의 주기가 반 달, 한 달, 반 년 및 1년 등의 장주기 천문조의 영향을 함께 받으므로 특정 기간 동안 측정된 조석이 불규칙적으로 보일 수도 있고, 기상의 급격한 변화에 의한



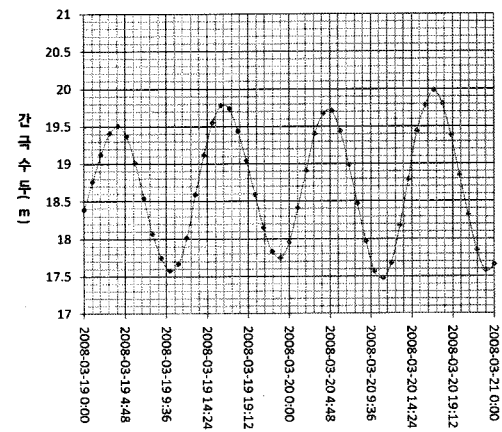
(a) 16개월 동안 계속된 P1 조위



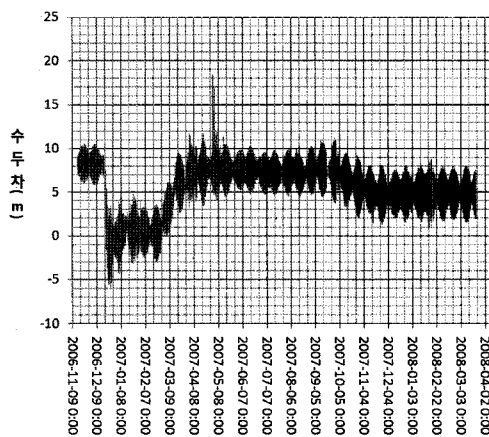
(b) 2일간 계속된 P1 조위



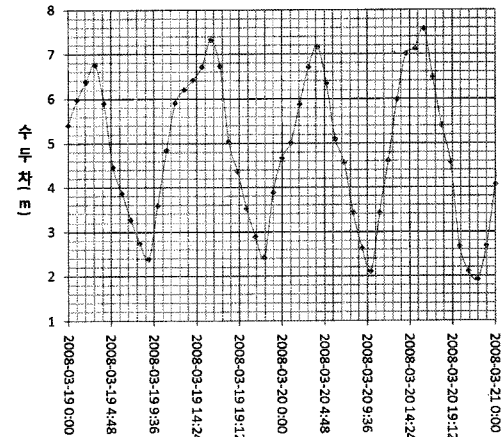
(c) 16개월 동안 계속된 P2 간극수압



(d) 2일간 계속된 P2 간극수압



(e) 16개월 동안 계속된 수두차(P1-P2)



(f) 2일간 계속된 수두차(P1-P2)

그림 4. 해안가 가물막이 내 외부에 설치된 간극수압계 및 조위변화

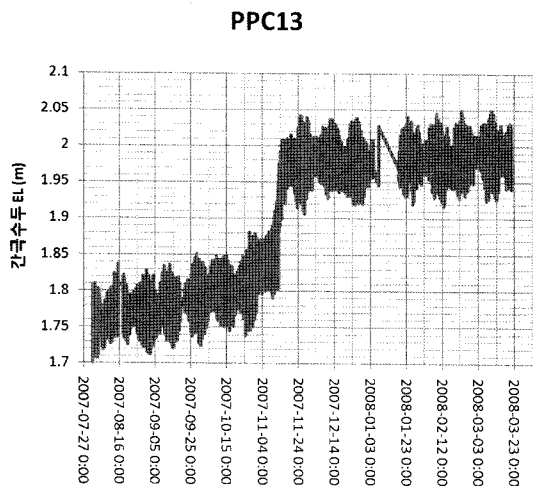
기상조가 발생하면 불규칙적으로 나타난다. 따라서 현장에서 조위를 측정하는 것이 바람직하고 부근의 조위관측소 자료를 활용하는 것은 차선책으로 고려하는 것이 적절하다. 그림 4에는 조위 및 실측된 간극수압을 각각 장기간을 기준으로 감시할 경우와 단기간을 기준으로 감시할 경우의 특징이 잘 나타나 있다. 그림 4의 (a) 및 (c)는 약 6개월 동안 측정된 조위(P1) 및 간극수두(P2)를 나타낸 것이다. 장기간 동안 누적된 기록에서는 장주기의 조위변동에 대한 규칙성과 불규칙성이 동시에 나타난다. 그림 4(c)에서 A로 표시한 영역에서는 간극수두가 급격하게 변화하므로 이상 여부를 즉시 알 수 있다. B로 표시한 영역에서는 간극수두가 월주기에 대해 규칙성을 나타내면서도 점진적으로 감소하고 있다. C로 표시한 영역에서는 간극수두가 월주기에 대해 규칙성을 나타내면서도 점진적으로 증가하고 있다. 이러한 형태를 나타내는 경우에는 수개월 이상을 기준으로 측정결과를 검토해야만 점진적인 변화를 감지할 수 있다. 그림 4(b) 및 (d)는 최근 2일간의 조위와 간극수두 계측결과를 나타낸 것이다. (c)에서 간극수두는 안정 상태를 유지하고 있는 것으로 나

타지만 (d)에서 점점 상승하고 있는 것처럼 나타난다. 그림 4(e) 및 (f)는 간극수두를 해발고도 기준으로 수두를 환산하고 조위와의 차를 나타낸 것이다. 수두차가 양의 값을 나타내므로 침투수가 해측에서 내측으로 흐르고 있다는 것을 알 수 있다. 장기간 동안의 수두차를 나타낸 (e)에서 수두차 역시 일정하지 않고 특정 주기에 대한 규칙성을 나타내고 평균적인 값의 변화 시기는 (c)의 변화 시기와 일치하고 있다. (f)는 2일간의 수두차를 나타낸 것이다. 조위 변동 주기에 일치된 등락의 반복을 나타내지만 각 주기는 정확한 규칙성이 없고 약간씩 왜곡된 형태를 나타내고 있다. 이러한 특징들로 인해서 가물막이 현장에서 침투에 대한 안정관리 목적으로 간극수압을 측정하고도 잘 활용하지 못하고 있다.

4. 결과 및 고찰

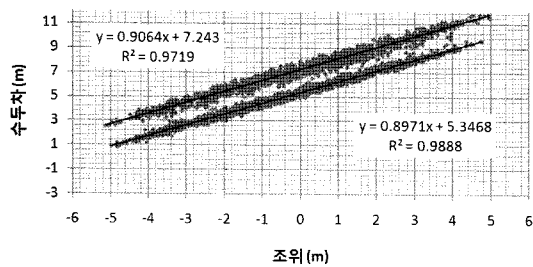
4.1 침투 변화에 대한 수두손실 그래프의 민감성 분석

그림 5는 해측 원형셀과 호측 강널말뚝 벽의 좌측 접

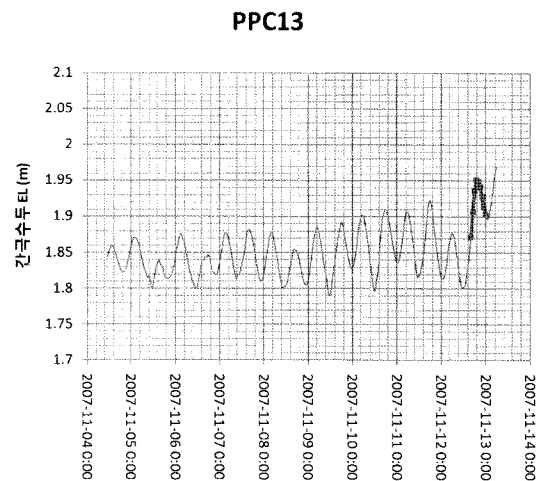


(a) 약 6개월간 측정된 간극수두

2007-08-01 ~ 2008-03-21

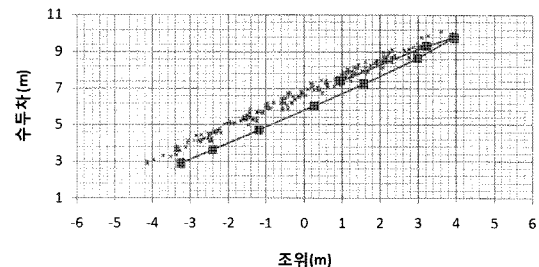


(c) 약 6개월간 측정된 간극수두에 대한 수두손실 그래프 분석



(b) 간극수두 상승 직전의 계측결과

2007-11-12 13:00 ~ 2007-11-13 0:00



(d) 간극수두 상승 직전의 계측결과에 대한 수두손실 그래프 분석

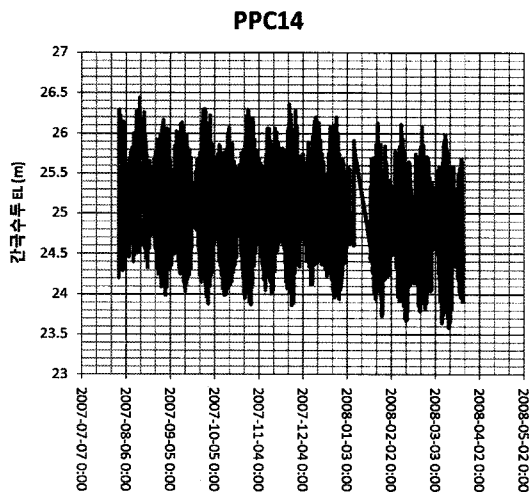
그림 5. PPC13 간극수압계 계측자료를 사용한 침투변화에 대한 수두손실 그래프의 민감성 분석

속부 내측에 설치된 PPC13 간극수압계에서 약 6개월 동안 측정된 자료를 수두손실그래프를 적용하여 분석한 것이다. 그림 5(a)는 전기간 동안 측정된 자료를 시간에 따른 간극수두로 나타낸 것이다. 간극수두가 점진적으로 증가하다가 개략적으로 2007년 11월 4일~11월 24일 사이에 급격한 증가가 감지되었다. 그림 5(c)에는 같은 기간 동안의 자료를 수두손실 그래프로 분석한 것이다. 그림 5(a)보다 명확하게 두 개의 침투상태를 구분하고 있다. 첫 번째 침투상태는 그래프의 위쪽에 있는 회귀직선으로 분석된 상태이다. 차수상태는 수두손실률 $a=0.9064$ 로 거의 완전한 차수상태에 가깝고 결정계수 $R^2=0.9719$ 로 시간에 따른 침투경로의 변화가 없는 비교적 안정적인 상태를 보여주고 있다. 따라서 그림 5(a)에서 자료의 전반부에서 간극수두가 점진적으로 증가하지만 침투경로상의 지반은 비교적 안정상태를 유지하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 두 번째 침투상태는 아래쪽 회귀직선으로 분석된 상태이다. 수두손실률 $a=0.8971$ 로 첫 번째 상태에 비해서는 약간 작은 값이지만 양호한 차수상태를 나타내고 있다. 결정계수 $R^2=0.9888$ 로 시간의 경과에 대해서 매우 안정적인 상태를 나타내고 있다. 두 가지 상태에서 수두손실률은 매우 비슷한 값을 나타내므로 침투경로상의 지반의 변화는 미미한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 회귀직선의 세로축 절편값이 대략 7.243에서 5.347로 1.896m만큼 내려갔다. 회귀직선이 아래쪽으로 평행 이동하는 원인은 전술한 것과 같이 해측 조위가 내려가고 내측 지하수위는 일정하게 유지되는 경우와 해측조위는 일정하게 유지되고 내측 지하수위

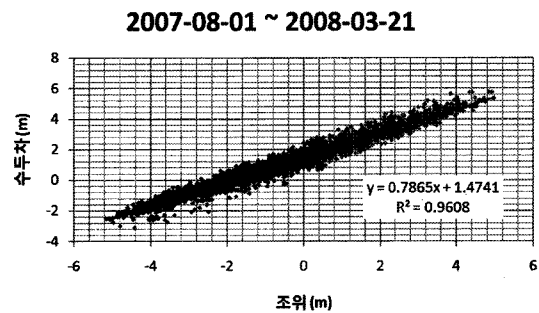
가 상승하는 경우이다. 해측조위가 변했다면 모든 간극수압계 분석결과에서 감지되어야 하지만 일부 간극수압계 분석에서만 감지되므로 간극수압계 부근의 내측의 지하수위가 상승한 것으로 판단된다. 수두손실그래프의 궤적이 아래쪽으로 이동한 시각을 세밀하게 탐색한 결과 그림 5(d)에 나타난 것과 같이 2007년 11월 12일 13시~13일 0시 사이에 침투상태의 급격한 변화가 발생한 것으로 판명되었다. 전체 계측자료를 단순하게 간극수두로 표시한 그림 5(a)에서는 상당한 시간이 경과한 과거에 자료에 대해서 거시적인 변화는 감지할 수 있지만 시간단위의 실시간 감시상태에서는 판단하는 것이 쉽지 않다. 그림 5(b)에 급격한 변화가 감지된 시각으로부터 약 1주일 전까지의 간극수두의 변화를 나타내었다. 단순하게 실시간으로 계측되는 간극수두 만으로 이상 여부를 판단해야 된다면 이 그래프 상태가 된다. 외견상 불규칙적으로 간극수두가 등락을 반복하는 상태에서 마지막 계측값을 보고 상태변화가 진행 중인 것으로 판단하기는 어렵다. 약간 상승한 값을 위험징후로 판단한다면 이미 과거에 수많은 위험징후들이 나타난다. 그러나 그림 5(d) 수두손실그래프에서는 명확하게 궤적이 변경되므로 이상 여부가 직관적으로 감지되어 침투안정 감시를 위한 효율적인 기법으로 판단된다.

4.2 수두손실그래프에 의한 침투경로 측정구간별 차수상태분석

그림 6은 해측 원형셀과 호측 강널말뚝 벽이 연결된

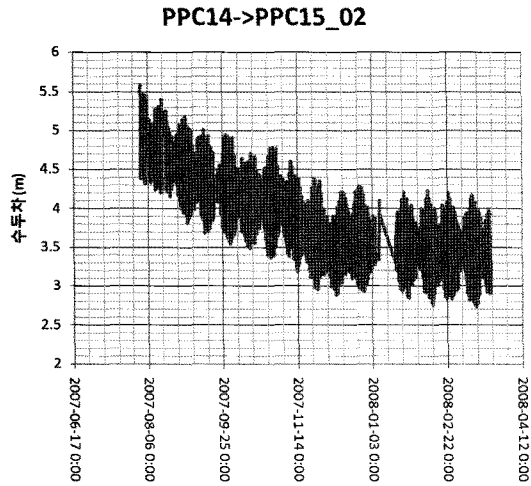


(a) PPC14에서 계측된 간극수두

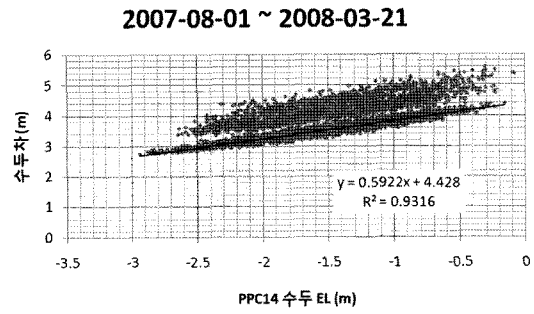


(b) PPC14의 수두손실 그래프

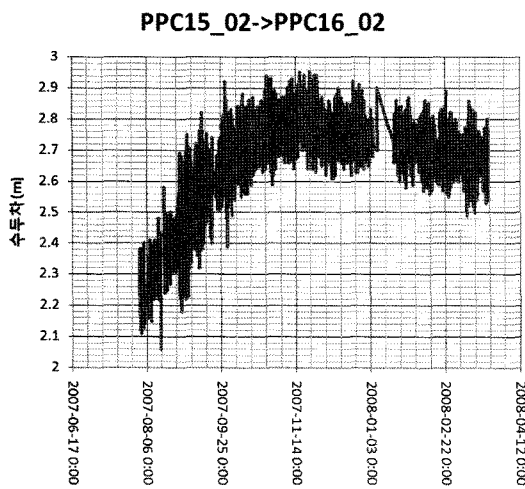
그림 6. 수두손실그래프에 의한 PPC14 → PPC15 → PPC16 침투경로의 차수상태분석



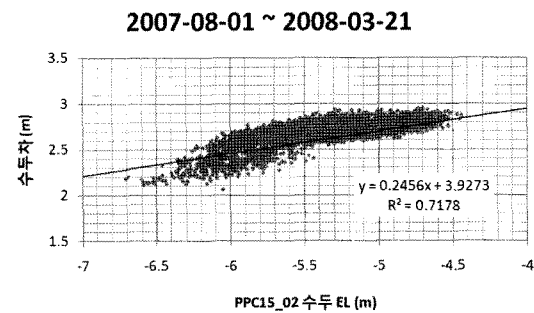
(c) PPC14와 PPC15_02의 수두차



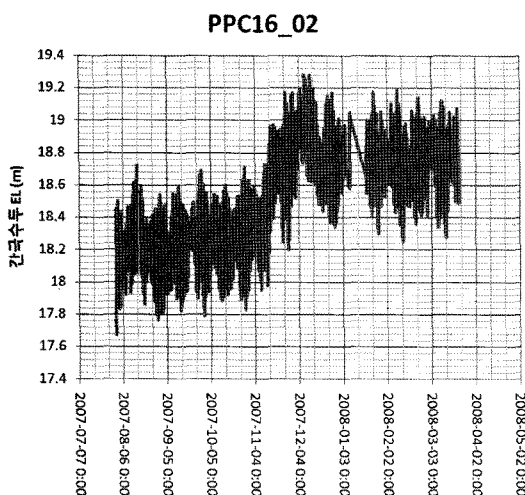
(d) PPC14에 대한 PPC15_02의 수두손실 그래프



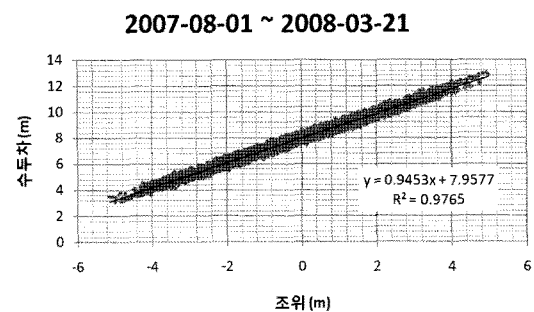
(e) PPC15_02와 PPC16_02의 수두차



(f) PPC15_02에 대한 PPC16_02의 수두손실 그래프



(g) PPC16_02에서 계측된 간극수두



(h) PPC16_02의 수두손실 그래프

그림 6. 수두손실그래프에 의한 PPC14 → PPC15 → PPC16 침투경로의 차수상태분석 (계속)

좌측 접속부에 예상 침투류 흐름방향으로 3개의 간극수 압계를 1열로 설치하여 계측한 결과들을 분석한 것이다. 해측에 간극수압계 PPC14가 설치되어 있고 내측에

PPC15 및 PPC16이 설치되어 있다. 해측에서 유입된 침투수는 PPC14번을 통과하고 강널말뚝 하부를 통과해서 내측에 설치된 PPC15를 통과하고 마지막으로 PPC16을

통과해서 내측 지하수위를 형성한다. 해수면으로부터 PPC14까지의 침투유로를 경로1이라고 하고 PPC14에서 PPC15까지의 침투유로를 경로2라고 하고 PPC15에서 PPC16까지의 침투유로를 경로3이라고 설정하고 각각의 경로에 대해서 독립적으로 분석을 수행하였다.

그림 6(a) 및 (b)는 경로1에 대해서 분석한 결과이다. 앞의 분석에서와 비슷하게 측정된 간극수두 만으로는 유용한 정보를 얻는 것이 쉽지 않다. 수두손실그래프를 적용해서 분석한 그림 6(b)에서는 수두손실률 $a1=0.7865$ 로 해수에 대해서 78.65%의 차수효과를 발휘하고 있는 것으로 나타났다. 결정계수 $R^2=0.9608$ 로 시간의 경과에 대해서 매우 안정적인 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

경로1에서 유입되는 해수의 침투압 비율을 $SF1=1$ 로 설정하면 경로1을 통과해서 경로2에 유입되는 해수의 침투압의 비율 $SF2$ 는 식 (2)와 같이 된다.

$$SF2 = SF1 \times (1 - a1) \quad (2)$$

$a1=0.7865$ 이므로 $SF2=0.2135$ 이다. 즉 해수침투압 전체를 1로 보았을 때 전체의 78.65%가 경로1을 통과하는 중에 차단되고 21.35%만이 경로2에 유입된다. 동일한 방법으로 경로2를 통과해서 경로3에 유입되는 침투압 비율 $SF3$ 도 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$SF3 = SF2 \times (1 - a2) \quad (3)$$

그림 6(c) 및 (d)는 각각 내측에 설치된 PPC15_02에서 측정된 간극수두 및 수두손실그래프이다. 그래프가 시간의 경과에 따라서 불안정한 상태를 나타내어서 가장 최근의 경향인 아래쪽 안정적인 자료만을 사용해서 회귀직선을 구했고 수두손실률 $a2=0.5922$ 로 분석되었다. 즉 경로2에 유입되는 침투압의 59.22%가 차수되고 40.78%가 통과한다. 해수 전체에 대해서는 유입되는 침투압을 $SF2=0.2135$ 를 적용하여야 한다. 따라서 처음의 해수침투압이 경로2까지 통과해서 경로3에 유입되는 침투압 비율 $SF3=0.0871$ 이다. 즉 전체 해수 침투압의 대부분이 경로1 및 경로2를 통과하면서 차단되고 8.71%만이 경로3에 유입된다.

그림 6(e) 및 (f)는 각각 내측에 설치된 PPC16에서 측정된 간극수두 및 수두손실그래프이다. PPC15와 비슷하게 그래프가 시간에 따라서 불안정하게 나타나서 가장 최근의 일부자료만을 회귀직선을 구하는데 사용하

였고 수두손실률 $a3=0.2456$ 로 분석되었다. 경로3까지 통과해서 내측에 유입되는 해수침투압의 비율을 $SF4$ 라던 동일한 방법으로 식 (4)에 적용하여 $SF=0.0657$ 이다.

$$SF4 = SF3 \times (1 - a3) \quad (4)$$

즉 전체 해수침투압 중에서 모든 경로를 통과해서 최종적으로 내측에 유입되는 침투압의 비율이 6.57%이므로 전체 경로1,2 및 3에 의한 차수효과는 93.43%이다.

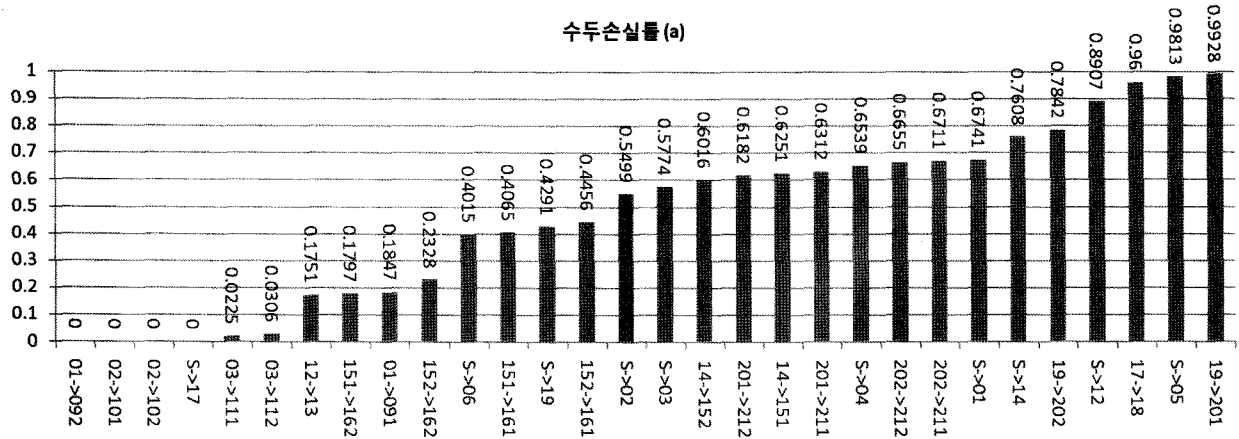
경로1은 강널말뚝 바깥쪽에 사석을 쌓아 놓은 접속부이며 차수효율이 약 79%로 비교적 양호하다. 그러나 강널말뚝 하부를 통과하는 경로2는 차수효율이 약 59%로 시공법을 고려할 때 매우 불량하다. 이러한 원인은 하부 지반이 방조제 최종체절구간으로 잡석이 혼재되어 있어서 강널말뚝의 선단부가 불투수층에 도달할 때까지 관입되지 못했기 때문으로 판단된다. 경로3도 동일한 조건이고 강널말뚝이 시공되지 않았으므로 차수효율은 더 낮아서 약 25% 정도이다.

수두손실률이 차수효율을 나타낸다는 이상과 같은 개념을 검증하기 위해서 앞에서 각 경로를 독립적으로 분석하고 모두 누적시켜서 산출한 차수효율 93.43%를 PPC16 계측자료를 조위에 대해서 직접 분석한 결과와 비교하였다.

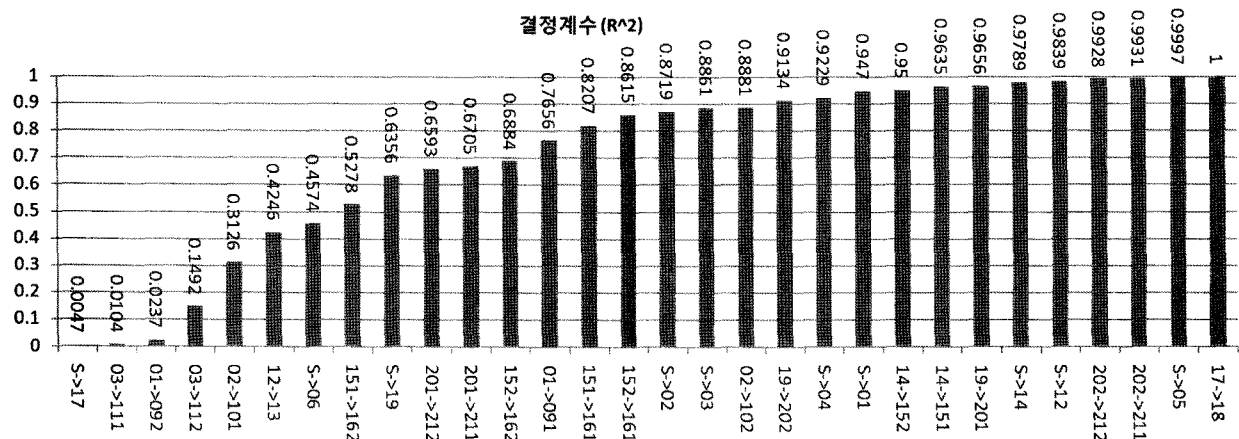
그림 6(g) 및 (h)는 각각 PPC16에서 측정된 간극수두 및 해측 조위에 대해서 분석한 수두손실그래프이다. 수두손실률 $a=0.9453$, 결정계수 $R^2=0.9765$ 로 시간의 경과에 대해서 매우 안정적인 상태인 것으로 나타났다. 해측 조위에 대해서 직접 분석한 차수효율 94.53%는 경로1, 2 및 3의 각각의 독립적인 분석결과를 누적시켜서 산출한 93.43%와 산술적으로 1.1% 차이이다. 독립적인 분석 단계에서 시간의 경과에 대해서 불안정한 자료들을 제외하고 최근의 안정적인 자료를 임의로 선정한 것으로 고려하면 매우 정확한 검증결과로 판단된다.

4.3 가물막이 전체 계측자료에 대한 분석 결과

가물막이 전체에 설치된 간극수압계 계측자료를 수두손실그래프를 적용해서 분석하였다. 그림 7은 분석한 수두손실률 및 결정계수를 나타낸 것이다. 그래프의 가로축에서 → 표시 왼쪽이 침투류의 유입부 쪽에서 측정된 침투압이고 오른쪽이 유출부 쪽에서 측정된 침투압이다. 기호 S는 해측 조위에 의한 수두이다. 세 자리 숫



(a) 전체 독립경로 각각에 대한 수두손실률



(b) 전체 독립경로 각각에 대한 결정계수

그림 7. 가물막이 전체 계측자료에 대한 수두손실그래프에 의한 침투안정 분석결과

자료 된 표기 중에서 앞 두 자리는 PPC 뒤에 붙은 간극수압계 번호이다. 세 번째 자리에 숫자가 있는 경우에는 동일 측점에 간극수압계가 심도별로 2개가 설치되어 있는 경우에 얇은 심도에 설치된 간극수압계가 1번이고 깊은 심도에 설치된 간극수압계가 2번이다. 모든 분석은 각각의 경로별로 독립적으로 분석을 하였다. 그림 6의 분석결과에서와 같이 특정 경로에서 차수효율이 낮게 나타났어도 해측으로부터 내측까지 전체경로에서는 매우 높은 차수효율을 나타내어서 내측 시공현장에 유입되는 해수 침투량은 작은 수량을 유지하고 있다. 경로별 독립분석의 장점은 취약경로를 정확하게 파악할 수 있다는 것이다. 그림 7에서는 03 → PPC111, 03 → PPC112, PPC12 → PPC13, PPC15_1 → PPC → 16_2, PPC01 → PPC09_1, PPC15_2 → PPC16_2 경로가 매우 취약한 것으로 나타났다. 수두손실률이 0으로 표시된 경로들은 수두차가 역전되어 음수(-)로 나타난 경로이다. 즉 침투방향이 내측에서 해측으로 역전된 경로이다.

이러한 원인은 해측 경로보다 내측 경로가 차수효율이 높아서 해측에서 유입된 침투수가 내측 경로를 통과하지 못하고 막혀서 침투선의 상승이 일어난 것으로 판단된다.

결정계수는 대부분 높은 값을 나타내었고 일부 경로에서 작게 나타났다. 결정계수가 낮은 일부 경로에서는 침투경로상에 공동이 존재할 수 있고 파이핑이 진행 중일 수도 있으므로 내측 유출수를 세심하게 관찰하고 추가적인 정밀조사를 하여야 한다.

이상과 같이 수두손실그래프를 적용하면 전체 현장에 대한 침투상태 분석 및 취약구간 판단이 상당히 정밀하게 이루어질 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 침투류의 유입부 쪽의 침투압이 주기적으로 변화하는 연근해 가물막이 시공현장에서 실시

간 침투안정관리를 위해서 수두손실그래프에 의한 안정관리 기법을 개발하고 실시간 계측이 이루어지고 있는 시화호 조력발전소 건설 현장에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 새로이 개발된 수두손실률에 의한 정밀한 침투안정관리기법을 제시하였다. 수두손실률이란 제한된 두 축점의 침투경로에서 주기적으로 등락을 반복하는 유입부 쪽의 간극수두에 대한 두 축점 사이의 수두차의 변화율이라고 정의하였다.
- (2) 제한된 두 축점의 침투경로에서 측정된 간극수두들 중에서 유입부의 간극수두를 가로축에 나타내고 유입부와 유출부의 간극수두차를 세로축에 나타내어 시간의 경과에 따른 불연속적인 점으로 표시하는 방법을 개발하여 수두손실그래프라고 명명하고 수두손실률 산출 및 침투안정관리를 위한 감시기법으로 제시하였다.
- (3) 수두손실그래프에서 회귀직선을 산출하면 직선의 기울기가 수두손실률이다. 자료의 상관성을 나타내는 회귀직선의 결정계수로부터 침투경로상 지반에서 시간의 경과에 대한 변화여부, 공동의 추정, 파이핑의 진행여부를 판단할 수 있는 근거를 얻을 수 있다.
- (4) 수두손실률은 0~1 사이의 값으로 나타난다. 0이면 침투경로의 완전통수 상태를 나타내고 1이면 완전차수상태를 나타낸다.
- (5) 결정계수가 1에 가까우면 침투경로 상의 지반이 시간의 경과에 대해서 변화가 없는 안정적인 상태를 유지하고 있다는 것을 나타낸다. 결정계수가 0에 가까우면 침투 경로상에 공동이 존재하거나 파이핑이 진행 중일 수 있다. 양쪽의 축점이 서로 무관하게 거동하는 완전 차수상태인 경우에도 0에 가까운 결정계수가 나타날 수 있으므로 현장조건을 고려하여 판단하여야 한다.

- (6) 제안된 수두손실그래프를 시화호조력발전소건설현장의 침투안정관리에 적용한 결과 침투경로 상의 지반의 변화를 민감하게 감지할 수 있었으며 전체 현장에 대한 침투안정성을 각각의 세부적인 위치별로 판단할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(331-2008-1-D00778).

이 연구의 후반부는 한국수자원공사 조력사업처에서 제공한 현장계측자료를 이용하였기에 지면을 빌어서 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국수자원공사 (2005), “시화호조력발전소 건설공사 실시설계 보고서”.
2. 한국수자원공사 (2007), “시화호 조력발전소 건설공사 계측 DATA 수치해석 분석 보고서”.
3. Huang, M., and Liu, J. (2009), “Monitoring and analysis of Shanghai Pudong seawall performance”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol.23, No.6, pp.399-405.
4. Mansur, C. I., and Durrett, S. G. (2002), “Dewatering cofferdam for construction of Olmsted Locks”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.6, pp.496-510.
5. Miura, K., Supachawarote, C., Phien-Wej, N., and Lin, D. G. (2001), “Boiling resistant design of cofferdams regarding the 3-D effects of seepage”, *Proceedings of the 14th ICSMGE*, Istanbul, Vol.3, pp.2151-2154.
6. Naveed, K. B., and Richards, R. Jr. (1975), “Photoelastic analysis of a cofferdam”, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.101, No.GT2, pp.129-145.
7. Schroeder, W. L., and Maitland, J. K. (1979), “Cellular Bulkheads and Cofferdams”, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.105, No.GT7, pp.823-837.

(접수일자 2010. 4. 1, 심사완료일 2010. 5. 25)