

수두손실률에 의한 방조제 침투류 감시기법 개발

Development of the Seepage flow Monitoring Method by the Hydraulic Head Loss Rate on Sea Dike

임성훈¹⁾, Sung-Hoon Eam, 윤창진²⁾, Chang-Jin Yoon, 김성필³⁾, Seong-Pil Kim, 허준⁴⁾, Jun Heo, 강병윤⁵⁾, Byung-Yoon Kang

- 1) 공주대학교 지역건설공학전공 부교수, Associate Prof of Major of Rural Construction Engrg., Kongju National Univ.
- 2) 한국농어촌공사 농어촌연구원 수석연구원, Principal Research Engineer, Rural Research Institute, Rural Community Corporation
- 3) 한국농어촌공사 농어촌연구원 연구원, Research Engineer, Rural Research Institute, Rural Community Corporation
- 4) 한국농어촌공사 농어촌연구원 연구원, Research Engineer, Rural Research Institute, Rural Community Corporation
- 5) 한국농어촌공사 새만금경제자유구역사업단 과장, Manager, Saemangeum Free Economic Zone Project Office, Korea Rural Community Corporation

SYNOPSIS : In this study, the seepage flow monitoring method by hydraulic head loss rate graph was developed for the purpose of monitoring the seepage flow from the sea side or from the lake on sea dike in which seepage force was varied periodically. The hydraulic head loss rate was defined in this method. The value of the rate is in the range from 0 to 1. the value of 0 means perfectly free flow of seepage. the value of 1 means perfect waterproofing. The value of coefficient of determination in the hydraulic head loss rate graph closer to 1 means that the seepage flow way is stable. The value of coefficient of determination in the hydraulic head loss rate graph closer to 0 means that the hole may exist or the piping may be in the progress. The pore water pressure data measured in Saemangeum sea dike was analyzed with the developed method The result showed that the variation of seepage flow state was detected sensitively by this method and the interception effect of sea dike could be estimated quantitatively.

Keywords : hydraulic head loss rate, sea dike, seepage flow, pore water pressure, coefficient of determination

1. 서 론

방조제가 붕괴될 경우에 그 피해는 매우 극단적인 규모로 나타난다. 이와 같은 중요성에도 불구하고 방조제가 보편적으로 시공되는 지반구조물이 아니고 그 구조가 단순하여 거동을 쉽게 해석할 수 있는 구조물로 인식되었기 때문에 방조제의 안정관리에 관한 연구는 많이 수행되지 않았다. 현재까지 방조제의 안정성을 평가하기 위한 보편적인 방법은 육안에 의한 관측이었다. 근래에는 네덜란드의 방조제나

영국 템즈강 방호벽의 표면에 표지판을 설치하고 인공위성으로 표지판의 변위를 감시하는 기법을 개발하기도 하였으나 기본적으로 육안관측과 동일한 안정관리방법이다 (Ramon F. Hanssen and F. van Leijen, 2008). 최근에는 시공 중이거나 또는 준공된 방조제의 안정성을 감시하기 위해서 경사계, 간극수압계, 층별침하계, 지표침하판 등의 계측센서들이 이용되어왔다. 연약지반 상에 축조된 성토체의 경우에는 경사계 층별침하계 등의 계측센서들로부터 제체의 전단파괴에 대한 안정성을 평가하기에 유용한 자료를 얻을 수 있다. 그러나 견고한 지반 위에 축조된 방조제는 전단거동량이 작으므로 경사계 또는 침하계 등의 계측센서들의 측정값에 큰 변화가 나타나지 않는다. 방조제의 주기능이 해수를 막는 것이므로 제체내부의 침투유로 발달여부가 제체의 안정성을 판단하는 중요한 요소이다. 침투유로가 형성되고 상당한 규모로 확대되어 침투유로 터널이 붕괴되고 제체의 전반적인 파괴가 일어나야 경사계나 침하계 등에 의해서 제체의 전단변형이 탐지된다. 따라서 침투유로형성 초기단계에서 탐지할 수 있는 방법이 필요하다.

침투수압은 침투유로의 초기형성단계에서도 측정값의 변화를 나타낸다. 그러나 조위변동의 영향을 받는 방조제에서 측정되는 간극수압은 조위변동과 비슷한 형태의 주기적인 변화를 나타낸다. 측정되는 간극수압이 일정한 값을 유지하지 않고 등락을 반복하므로 간극수압의 변화를 관찰하고 이상 여부를 판단하는 것이 어렵다. 이러한 경우에 단순통계처리방법이나 결정론적방법 보다 더 효율적인 침투안정관리에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 방조제에서 간극수압을 측정해서 안정성을 평가하고자 하는 시도 자체가 최근에서야 이루어지고 있으며 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 없다. 예측된 값도 예측시간이 길어질수록 편차가 크게 발생하는 경향이 있어서 직전까지의 관측치를 이용해서 다시 회귀분석을 해야 하는 단점이 있다.

본 연구에서는 침투류의 유입부 쪽의 침투압이 주기적으로 변화하는 방조제에서 기존의 방법보다 효과적으로 실시간 침투안정관리를 할 수 있는 새로운 기법을 개발하고 실시간 계측이 이루어지고 있는 새만금 방조제에 적용하여 적합성 여부를 검증하고자 한다.

2. 수두손실률의 정의(임성훈 등, 2010)

2.1 수두손실률 정의

침투류의 유입부에서 침투압이 주기적으로 변동을 하면 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 변화에 따른 두 지점 사이의 침투수두 손실비율을 수두손실률 a 라고 명명하고 식(1)과 같이 정의하였다.

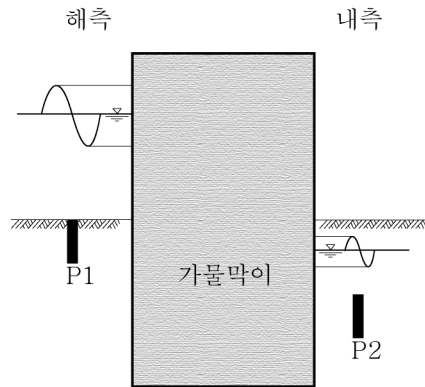


그림 1. 해안에 설치된 차수구조물의 내 외측에 설치된 간극수압계 및 조위변화 모식도

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

2.2 수두손실 그래프의 특징

실시간으로 측정되는 자료로부터 수두손실률을 효율적으로 산출하기 위해서 시간의 경과에 따라 계속되는 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. 이와 같이 나타낸 그래프를 수두손실 그래프라고 명명한다. 완전차수상태이면 P1의 수두가 변화하여도 P2의 수두는 변화가 없으므로 수두손실률 $a=1$ 이 된다.

완전차수상태이므로 침투경로상의 지반도 안정되어 있고 측정되는 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 측정점 사이의 지반은 변화가 없으므로 a 는 일정하게 유지되지만 수두차가 커지므로 수두손실 그래프는 위쪽으로 평행이동을 한다. 그림 2(b)에 이 경우에 대한 그래프가 나타나 있다.

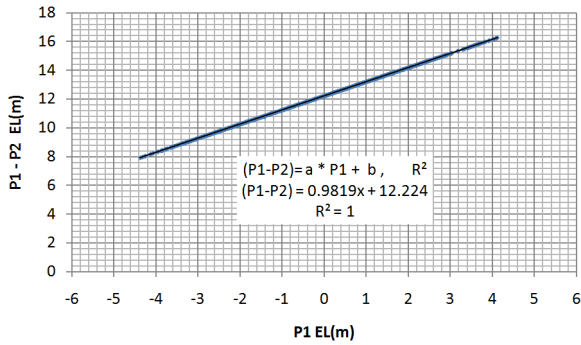
P2쪽의 수위가 상승한 경우에는 두 측정점 사이의 침투 경로상에 세굴에 의한 유로의 확대가 진행되는 경우와 같은 지반의 변화는 없으므로 a 는 일정하게 유지되고 수두손실 그래프는 아래쪽으로 이동하게 된다. P1이 해측 조위인 경우에는 이러한 경우가 발생할 가능성이 희박하므로 수두손실 그래프가 아래쪽으로 평행이동을 하였다면 내측의 수위의 상승 여부를 확인하여야 한다.

P1 및 P2 사이의 지반에 파이핑이 발생하였다면 수두손실 그래프는 아래쪽으로 이동하고 기울기 a 는 작아진다. 그림 2(c)에는 이러한 경우에 대한 그래프가 나타나 있다.

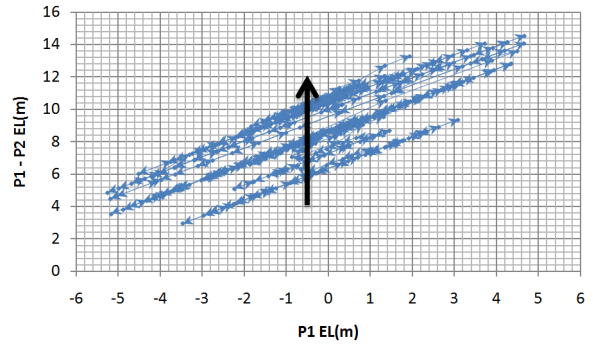
P1과 P2 사이에 공동이 존재해서 P1과 P2 사이에 반응시간의 지연이 존재한다면 수두손실 그래프는 타원궤적을 나타낼 것이다. 수두손실 그래프에 영향을 주는 다양한 요인에 의해서 타원궤적은 시계방향 또는 반시계방향으로 나타날 수 있다. 그림 2(d) 및 (e)에는 각각 시계방향 타원궤적과 반시계방향 타원궤적을 나타내는 수두손실 그래프가 나타나 있다. 타원궤적이 일정하면 공동이 변화가 없는 것을 나타내고 공동이 점진적으로 확장되어 침투류에 흙이 함께 흘러나오는 상태라면 타원궤적은 불규칙적인 형

상을 나타낸다. 침투류가 흐르는 경로에 공동이 존재하면 점차로 공동이 확대되는 경향이 있으므로 타원케적이 규칙적인 케적을 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.

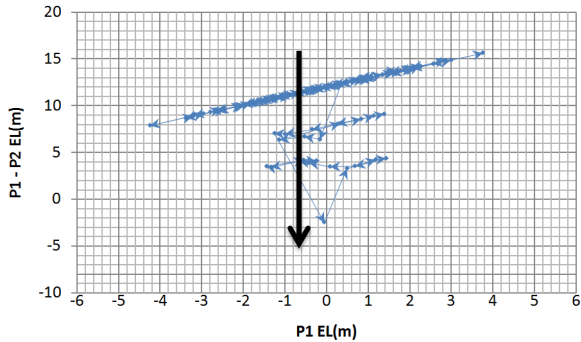
침투경로상의 지반에 공동이 존재하지 않으면 차수상태가 불량한 경우에도 안정적인 상태를 유지할 수 있다. 그림 2(f)에는 유입부 P1의 침투압 변화 및 수두차가 비슷한 경우에도 완전한 차수상태를 유지하며 침투경로상의 지반의 상태도 안정적이어서 a 와 R^2 이 모두 거의 1에 가까운 경우와 차수상태는 불량하여 a 는 약 0.6정도이지만 침투경로상의 지반의 상태는 안정적이어서 R^2 이 1에 가까운 두 가지 경우를 비교한 것이 나타나 있다.



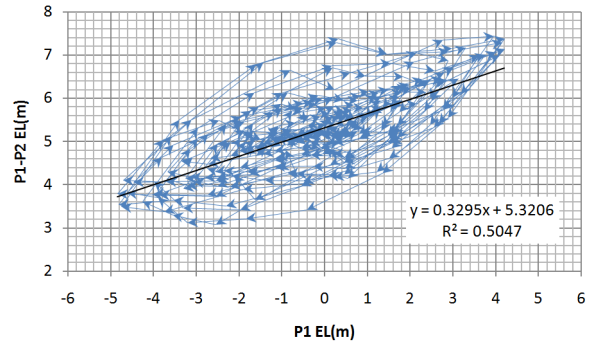
(a) 완전차수상태



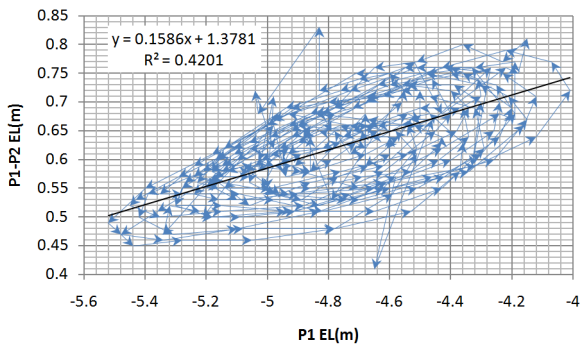
(b) 수두차가 커지는 경우



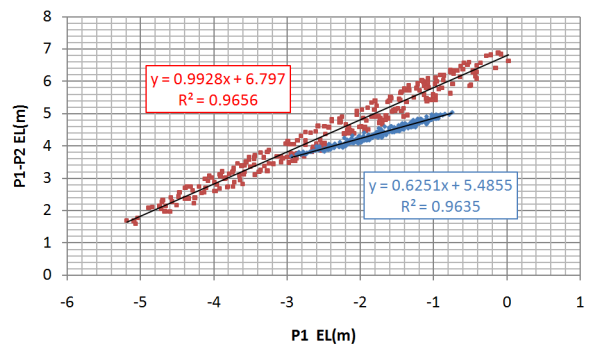
(c) 수두차가 작아지는 경우



(d) 시계방향 타원케적을 나타내는 경우



(e) 반시계방향 타원케적을 나타내는 경우



(f) 수두손실률의 비교

그림 2. 수두손실률 그래프의 형상에 따른 침투수의 차수상태

3. 수두손실을 적용 현장 현황

3.1 새만금방조제 계측시스템 설치현황

새만금 방조제에는 2009년 현재 그림3과 같이 경사계, 층별침하계, 간극수압계, 조위계 등이 설치되어 운용되고 있다. 1호방조제에는 완공 후인 2001년도에 계측기가 설치되어 9년간 지속적으로 운용되어 오고 있다. 4호 방조제에는 방조제가 축조중인 2002년도에 계측기가 설치되어 일정기간동안 시공 중 모니터링이 되었으나 시공과정에 망실되어 새로운 단면에 다시 계측기가 설치되어 운용되고 있다. 2003년도에 연약지반 위에 축조된 3호 방조제에 계측시스템이 설치되어 일부센서들은 작동이 정지되었으나 일부는 현재까지 운용되고 있다. 2호 방조제에는 2007년도에 계측시스템이 구축되어 운용되어 오고 있다. 계측시스템을 9년간 순차적으로 설치 및 운용하면서 시공과정, 방조제변형 등에 의해서 일부 계측기가 망실되어 추가설치가 되었으며 초기에 수동 또는 반자동계측시스템으로 구축되었으나 점진적인 업그레이드를 통해서 현재는 인터넷을 통한 자동화계측이 이루어지고 있다.(한국농촌공사, 2007)



그림 3. 새만금 방조제 자동화 계측관리 현황

3.2 측정된 간극수압의 변화 양상

그림4는 2호방조제에서 약 1년2개월간 측정된 간극수두를 나타낸 것이다. 조위의 영향을 받아서 간극수두는 주기적인 변화를 나타내고 있다. 또한 1년 이상의 기간동안 측정된 전체자료를 보면 2009년도에 분명하게 간극수두가 작아지고 있는 것을 알 수 있으나 실제 운용 중에는 이와 같이 자료가 누적될 때

까지 판단을 유보하는 것은 곤란하지만 특정주기만을 이용해서 분석결과를 제시하는 것도 어려운 상태이다.

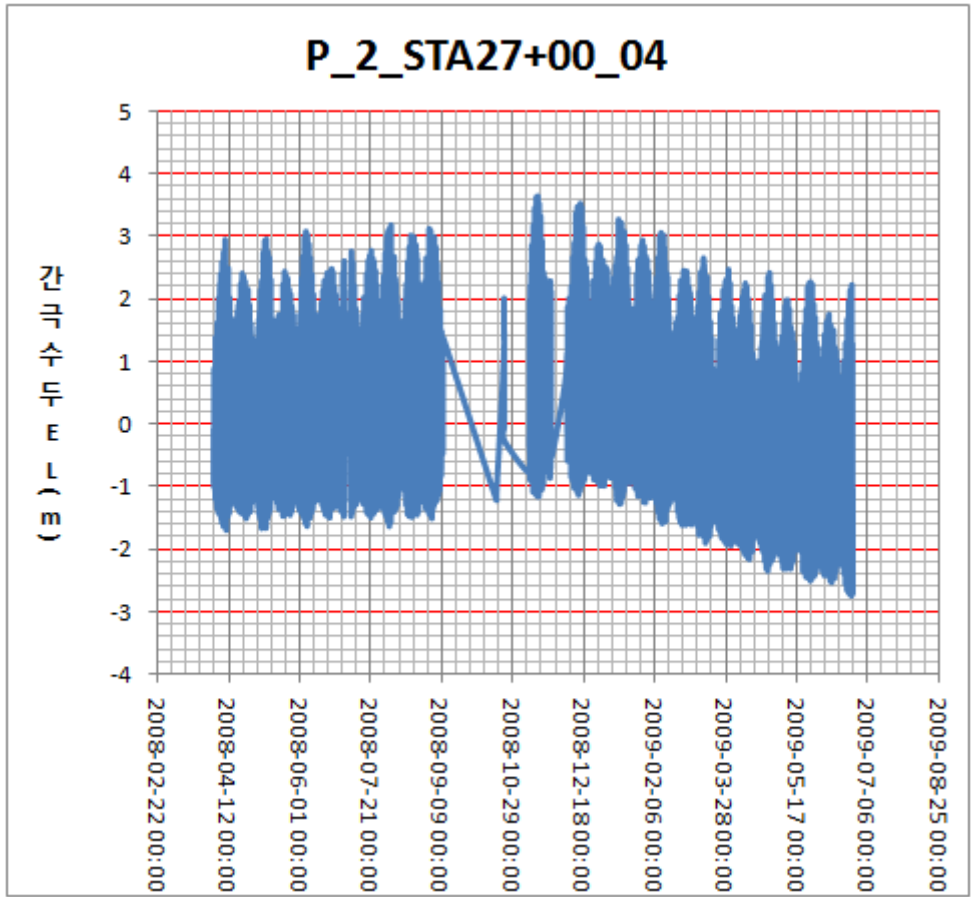


그림 4. 2호방조제 STA 27+00 단면에 설치된 간극수압계 P_2_04의 계측자료

4. 결과 및 고찰

4.1 수두손실 그래프의 민감성 분석

그림5는 그림4에 나타난 계측자료를 월별로 구분하여 수두손실그래프로 분석한 것이다. 2008년도에는 계측이 연속해서 이루어지지 않았고 그림4에 의하면 일관된 변화양상을 나타내지 않아서 11월25일까지 묶어서 분석하였고 2008년 12월부터 1개월별로 분석하였다. 그림6에는 월별로 분석된 수두손실을 및 수두손실그래프의 결정계수의 경시변화가 나타나 있다. 수두손실률은 2008년에는 대략 36%의 차수효과를 나타내었으나 2009년도 점진적으로 29%까지 낮아졌으므로 해수의 차수효과가 약 7%정도 감소하였다고 평가할 수 있다. 결정계수는 2008년도에는 매우 낮다 그림4만을 이용해서 판단을 한다면 이러한 영향이 나타나지 않으므로 비교적 잘 측정된 신뢰할만한 자료로 판단할수도 있으나 그림5에 따르면 2008년도에는 상당한 불규칙성이 도출되어서 자료의 신뢰성이 떨어진다. 2008년 12월부터 분석한 결과에 따르면 결정계수가 비교적 크므로 제체의 큰 변화는 발생하지 않았지만 0.9에서 0.84까지 감소하였다가 다시 0.88로 상승하였으므로 제체에 작은 변화가 일어난 것으로 판단할 수 있다.

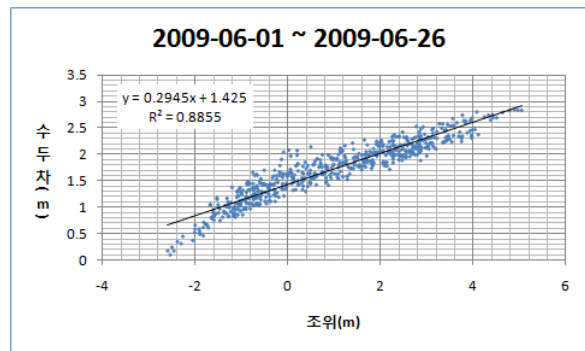
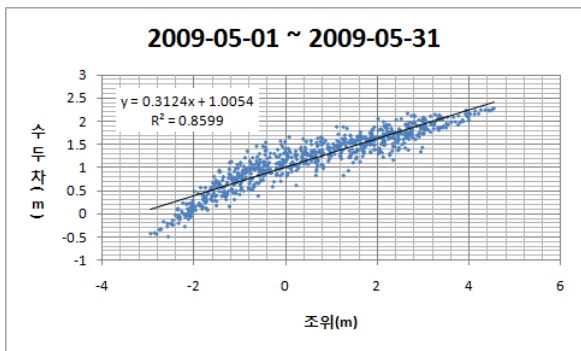
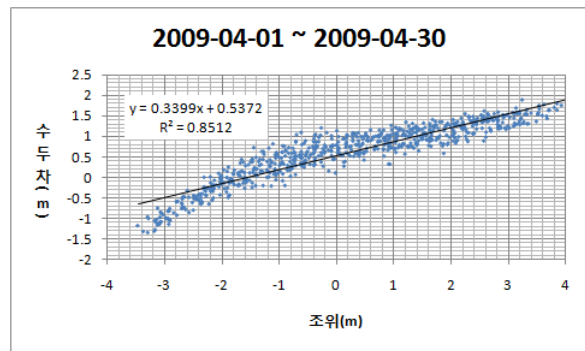
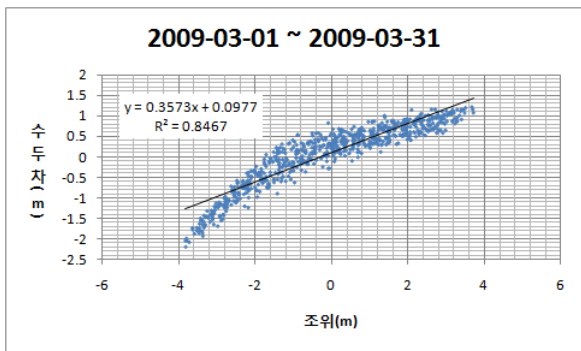
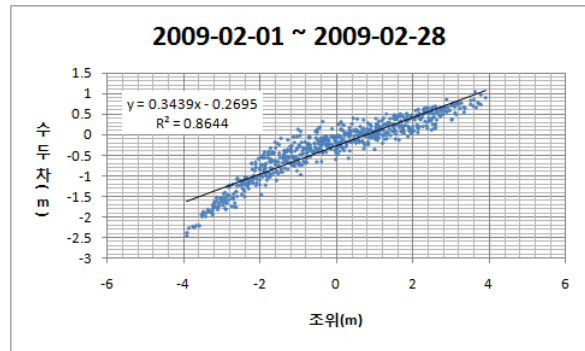
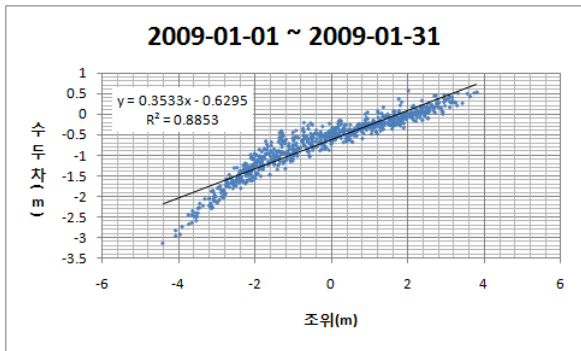
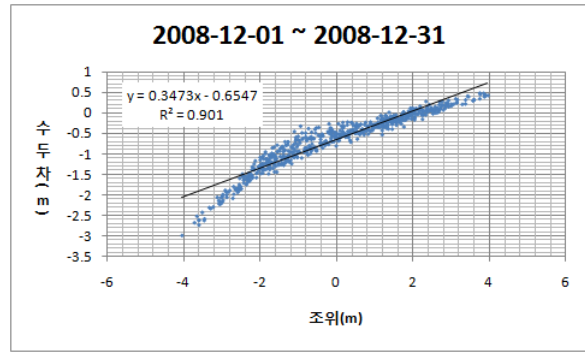
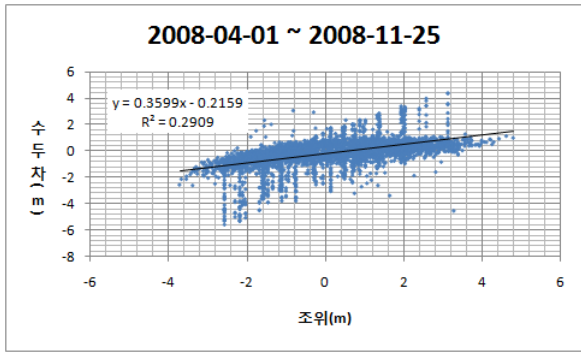


그림 5. 2호방조제 간극수압계 P_2_04 계측자료의 월별 수두손실 그래프

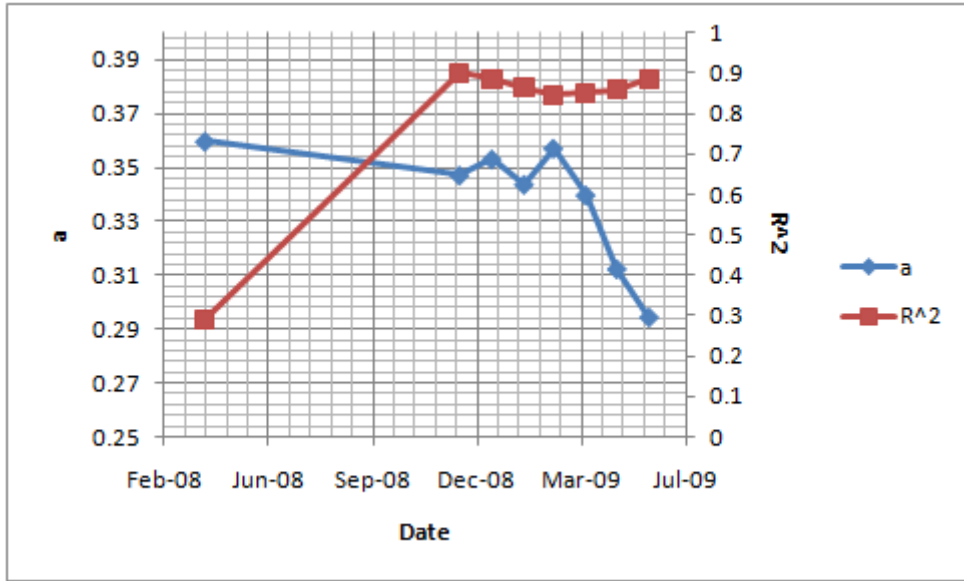


그림 6. 2호방조제 간극수압계 P_2_04 계측자료의 월별 수두손실 및 수두손실그래프 결정계수

4.2 방조제 단면내부의 차수상태분석

전술한 것과 같은 방법으로 전체 9개 단면에서 측정된 모든 공극수압자료를 유입부와 유출부로 조합하여 분석하였다. 그 중에서 2호 방조제 STA No.27+00단면에 대한 1년 2개월간의 전체 측정자료를 분석하여 얻은 수두손실을 및 결정계수를 그림 7에 나타내었다. 해측조위를 유입부의 침투압으로 했을때의 차수효과를 나타낸다. 이 단면은 최종체절구간으로 하부에 바닥보호공을 시공하여 P_2_07에서는 차수효과가 불량하지만 내측 P_2_11에서는 약 85%의 차수효과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 평균해수면보다 낮을수록 차수효과가 낮게 나타나서 해수면보다 낮은 체체영역을 시공할 때에 겪은 다짐의 어려움을 나타내고 있다.

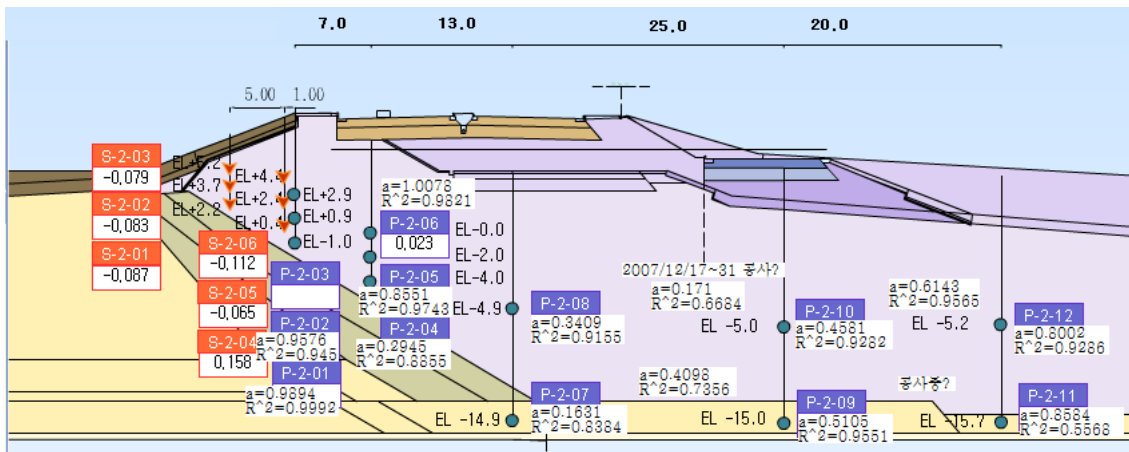


그림 7. 2호 방조제 STA No. 27+00단면 전체에 대한 수두손실그래프 분석결과

5. 결론

효과적으로 실시간 침투안정관리를 할 수 있는 수두손실그래프 기법을 개발하고 새만금방조제 계측 현장에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

간극수압계측자료를 가공하지 않은 상태에서는 명시적인 판단을 하는 것이 곤란하였으나 수두손실률 그래프로 분석한 결과에서는 제체의 경시변화 및 차수효과 등이 정량적으로 제시되어 실시간으로 측정되는 자료에 적용하기에 적합한 것으로 판단되었다.

제체 단면 전체에 대한 수두손실률 분석결과는 국부적인 차수효과까지도 정량적으로 나타낼 수 있기 때문에 제체 유지관리시에 중점적으로 감시해야 할 부분을 제시할 수 있다.

참고문헌

1. 임성훈, 강병윤, 김기완, 구자호, 강신익, 차홍윤, 정재현, 조준호, 김기수 (2010), “수두손실률에 의한 침투류 감시기법 개발”, 한국지반공학논문집, Vol.26, No.5, pp.37-48.
2. 한국농촌공사 (2007), “방조제 계측관리 및 해측사면 거동분석”, 한국농촌공사 농어촌연구원
3. Ramon F. Hanssen and F. van Leijen (2008), MONITORING DEFORMATION OF WATER DEFENSE STRUCTURES USING SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY, Measuring the Changes, Proceedings of the joint symposia, International Federation of Surveyors.
4. 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.