한국지반공학회논문집 제36권 6호 2020년 6월 pp. 5 ~ 15
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.36, No.6, June 2020 pp. 5 ~ 15

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2020.36.6.5

저수위-간극수압의 상관관계를 통한 필댐 안정성 평가

Assessing the Stability of Fill Dams by Relationship between Water Level and Porewater Pressure

강 기 천[1] Kang, Gichun
김 동 환[2] Kim, Donghwan
윤 석 민[3] Yoon, Sukmin
장 봉 석[4] Jang, Bong Seok
김 지 성[5] Kim, Jiseong

Abstract

This study deals with the use of porewater pressure transducers to evaluate the stability of a fill dam through the correlation between the porewater pressure and water level. As a result of performing principal component analysis on a total of eight porewater pressure transducers installed in the fill dam, they were distributed into three groups. It was found to be distributed as internal, external, and top based on seepage line in the dam body. The correlation coefficient between porewater pressures and water level in group A located inside the seepage line indicated 0.94 to 1.00 and they are showing a strong positive linear relationships. It indicates that maintenance of the dam is required by the porewater pressure transducers of the group A. In addition, a linear regression analysis was performed with the determination coefficients of the group A of 0.89 to 0.99. It was found that the pore water pressure can be predicted and the stability of the dam can be evaluated by comparing it with the currently measured values when the water level is fixed as an explanatory variable.

요 지

본 연구는 필댐에 설치된 간극수압과 댐의 저수위와의 상관관계를 통해 댐의 안정성 평가를 위한 간극수압계의 활용방안에 대해 다루고 있다. 이를 위해 필댐에 설치된 총 8개의 간극수압계에 대해서 주성분 분석을 수행한 결과, 3개의 군집으로 분류되었다. 이는 댐 제체 내에 형성되는 침윤선을 기준으로 내부, 외부, 상단으로 분류된 것으로 나타났다. 침윤선 내부에 위치한 A군집 내 간극수압계와 저수위와의 상관계수는 0.94～1.00로 강한 양의 선형관계를 나타냈다. 즉, 향후 A군집 내에 존재하는 간극수압계에 의해 해당 댐의 유지관리가 필요한 것을 의미한다. 또한, 저수위와 간극수압계에 대한 회귀분석을 수행한 결과, A군집의 결정계수가 0.89～0.99로 선형회귀 모형이 도출되었다. 따라서 저수위가 설명 변수로 고정될 때 간극수압의 예측이 가능하여 현재 계측된 값과의 비교를 통해 댐의 안전성 여부를 판단할 수 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Linear regression analysis, Porewater pressure, Principal component analysis, Seepage line, Water level

1 정회원, 경상대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Gyeongsang National Univ.)
2 비회원, 경상대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Gyeongsang National Univ.)
3 비회원, 경상대학교 공학연구원 학술연구교수 (Research Prof., Engrg. Research Institute, Gyeongsang National Univ.)
4 비회원, K-water 수석연구원 (Head Researcher, K-water Research Institute, K-water)
5 정회원, 전주비전대학교 지적토목학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Cadastre & Civil Eng., Vision College of Jeonju, Tel: +82-63-220-3885, Fax: +82-63-220-3889, kimjs@jvision.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2020 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국가 기반 시설물 중 댐은 생활, 공업, 농업 등 용수공급뿐만 아니라 전력생산 및 홍수조절 등의 중요한 기능을 하고 있다. 우리나라의 댐은 약 18,000여 개로 1960년대 이후로 다목적댐 등 중·소규모의 댐이 건설되어 관리되고 있으며, 일제 강점기부터 시작된 댐건설로 인해 준공 이후 30년이 경과한 1종(다목적댐 등) 및 2종(용수댐 등) 댐이 60% 이상을 차지하고이다. 이러한 댐의 노후는 댐의 구조적 안정성에 영향을 미치고 있다. 이와 관련하여 댐의 사고가 발생하게 되면 막대한 인적/경제적 손실을 일으키게 된다. 따라서 최근에는 댐의 안전 및 유지관리를 위해 댐 계측데이터의 활용에 관한 연구를 빈번하게 수행하고 있다(K-water, 2019).

국제 대댐회에 의하면 전 세계에서의 댐 붕괴 및 사고는 약 150,000건이 보고되었고 12세기 이후에 2,000여 개 이상, 20세기 이후에는 200건 이상의 댐 붕괴 및 사고로 약 238,000여 명 이상의 인명피해가 발생했다고 보고되고 있다(ICOLD, 1995). 국외의 경우 1900년대에 이탈리아, 미국, 프랑스 등에서 약 200개 이상의 댐들이 붕괴하여 11,000명 이상의 인명피해가 발생하였다(Jansen, 1983). 국내의 경우 1961년 전북 남원의 효기리댐 붕괴로 100명 이상의 사망자가 발생하였다(Chang et al., 1998). 경기도 연천군에 있는 연천댐은 1996년과 1998년 여름에 집중된 호우로 댐을 월류하여 2회에 걸친 댐 붕괴사고로 주변 지역뿐만 아니라 파주시, 포천시까지 큰 홍수로 인해 경제적으로 막대한 피해를 초래하였다. 따라서 댐을 관리하는 주체는 댐의 안전의 위협에 대응하기 위해서 각종 계측기기를 설치하여 실시간 또는 주기적인 안정성 평가를 수행하여 댐의 안정성을 평가하고 있다(Kang et al., 2018).

특히, 필댐의 건설 시 설치 운영되는 간극수압계는 침투수량계와 더불어 댐의 차수 역할의 감시를 위한 중요한 계측항목이다. 미국 대댐회(USCOLD, 1975)에 의하면 미국 내에서 발생한 사력댐 붕괴사례 77건을 분석한 결과 댐 제체 또는 기초지반을 통한 누수와 파이핑에 의한 파괴가 44%를 차지하였고 간극수압계는 이러한 파괴유형을 감시할 수 있는 중요한 계측항목이다. 국내에서의 간극수압계는 건설 후 안정적인 차수 역할의 유무 확인에 사용되는데 그치고 있다. 그 사유는 준공 이후 오랜 시간이 지나면, 댐 내부에 매설된 간극수압은 제체 내의 습윤상태로 인한 노후화와 시간 경과에 따른 댐의 변형에 의한 단선 등으로 유지관리가 어렵기 때문에 외부에 설치된 계측기와 비교하여 그 수명이 상대적으로 짧기 때문이다. 하지만 최근 국내외의 계측분야 기술의 발달로 계측기의 설치 및 운영이 안정적으로 이루어지고 있으며 필댐의 주요 계측항목인 간극수압계의 중요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 필댐에 설치된 간극수압과 댐의 저수위와의 상관관계를 분석하여 안정성 평가를 수행하여 향후 댐 안전을 위한 간극수압계의 활용을 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)

2.1 주성분 분석의 목적

주성분 분석은 다변량 분석에서 활용되고 있는 방법의 하나로 높은 차원의 데이터를 낮은 차원의 데이터로 환원시키는 방법을 의미한다. 1900년대에 최초로 주축정리이론과 유사하게 제안되었고(Person, 1901), 향후 Hotelling(1933)에 의해 개념이 정립되었다. 객체간의 거리 행렬만으로 적용 가능한 다차원척도법과 달리(Kwon, 2016), 주성분 분석은 데이터의 축소 이외에 변수의 잠재적 특성 파악과 소비자의 인식이나 선호도의 공간적 표현 또한 가능하다는 장점으로(Kim et al., 2016) 인문학, 경제학, 경영학, 공학 등 다양한 학문에서 널리 활용되고 있다(Kwon et al., 2020).

주성분 분석은 독립변수들의 정보손실을 최소화하면서 독립변수들의 선형결합을 이용하여 소수의 종합적인 특성치로 요약하여 분석하는 방법으로 특정 사상의 배경이 되는 요인을 파악하고자 할 때나 특정사상과 그 배경 요인들을 독립적으로 다루기보다는 종합적으로 다루는 그것이 더욱 타당할 때 주로 분석을 하는 기법이다(Gwak and Kim, 2016; Park and Rhee, 2012). 예를 들어, 댐의 안전감시에 사용되는 계측항목을 계측기별로 세부적으로 구분하여 파악하기보다는 이들을 몇 개의 공통요인들로 통합하여 파악하는 것이 더 합리적이고 타당한 경우가 된다.

주성분 분석은 회귀분석과 유사한 선형결합으로 다음과 같은 식으로 표현된다(Lee, 2012; Lee and Nho, 2015, Nho, 2007).

$$z_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... + a_{1p}x_p \quad (1)$$
$$z_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + ... + a_{2p}x_p$$
$$...$$
$$z_n = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + ... + a_{np}x_p$$

여기서, z_n, a_{np}, x_p는 주성분, 주성분 분석계수 및 독립변수이다.

2.2 주성분 산정

회귀분석의 선형결합과 주성분 분석의 선형결합은 유사하다고 할 수 있지만, 회귀분석 선형결합의 경우는 종속변수에 대한 독립변수 선형결합 편차를 최소화하는 선형결합이다. 반면, 주성분 분석의 선형결합은 독립변수들의 선형결합에 따른 편차를 최소화하는 선형결합으로 서로 차이가 있다. 따라서 주성분 편차는 변수들과 선형결합선과 가장 짧은 연결선인 수직선으로 산정되며, 이러한 편차(R)를 최소화하는 선형결합은 식 (2)와 같이 산정되며, 이는 변수들이 가진 정보의 손실을 최소화하는 선형결합으로 해석된다(Lee, 2012; Lee and Nho, 2015, Nho, 2007).

$$R = \frac{|a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... + a_{1p}x_p|}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{12}^2 + ...a_{1p}^2}} \quad (2)$$

주성분 분석에서 정보의 손실 최소화를 위해서는 "$a_{11} + a_{12} + ... + a_{1p} = 1$"의 가정과 라그랑지 함수($\lambda$)로 변화하고, 편차 제곱값에 대한 편미분 값을 zero로 두어 구성한 연립방정식 해를 산정한다. 이에 대한 수식은 식 (3), 식 (4)로 표현된다(Lee, 2012).

$$F = R(a_{11},a_{12},...,a_{1p}) - \lambda(a_{11},a_{12},...,a_{1p}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_{11}} = 0, \frac{\partial F}{\partial a_{12}} = 0, ..., \frac{\partial F}{\partial a_{1p}} = 0 \quad (4)$$

주성분 분석의 정규방정식에서 정보손실 최소화는 라그랑지 함수 λ값으로 산정된다. 즉, 독립변수가 *n*개이면 이를 종합하는 주성분도 *n*개가 된다. 이때 라그랑지 함수 λ값이 최대가 되면 정보손실은 최저치로 나타나고 이는 다음 식 (5)의 관계에 따라 주성분 분산의 최대로 나타나게 된다(Lee, 2012).

[독립변수 분산의 합]
= [정보손실 제곱합/측정수 − 1] + [주성분 분산] (5)

주성분 분석에서 최대고유치 λ_1에 따른 고유벡터 (a_{11}, $a_{12},...,a_{1p}$)의 제 1주성분을 $z_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... + a_{1p}x_p$로 표현하고, 이러한 제 1주성분의 기여율(Proportion)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다(Lee, 2012).

$$P = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + ... + \lambda_p} \quad (6)$$

2.3 주성분의 해석과 주성분 점수

독립변수가 *n*개이면 이를 종합하는 주성분도 *n*개가 되는데, 이때 주성분의 수를 결정하는 방법은 규정화되어 있지 않다. 일반적으로 주성분의 수를 결정하는 기준은 라그랑지 함수의 고유치 값 1.0을 기준으로 하는 경우, 또는 주성분의 최대 기여율로부터 누적하여 주성분의 누적 기여율이 80%가 되는 수준에서 주성분의 수를 결정하는 경우 등으로 구분된다(Lee, 2012). 상관성이 높은 측정변수들을 소수의 주성분으로 요약하기 위하여 수식의 계수를 산정하고 주성분 산정 수식을 구성한 후에 각 측정사례에 대한 주성분 점수를 산정할 수 있다. 그리고 측정사례에 대한 주성분의 해석은 주성분 점수에 따라 수행되고 주성분 i에 대한 주성분 점수 산정 수식은 주성분 계수에 대한 측정변수의 측정값에 따른 함수식과 주성분 계수에 대한 측정변수의 평균값에 따른 함수식으로 식 (7)과 같이 표현될 수 있다(Lee, 2012).

$$Z(x_1, x_2, \cdots, x_p) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \cdots + a_{ip}x_p - (a_{i1}x_1^* + a_{i2}x_2^* + \cdots + a_{ip}x_p^*) \quad (7)$$

여기서, $a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{ip}$는 주성분 분석계수; $x_1^*, x_2^*, \cdots, x_p^*$는 변수들의 평균값을 나타낸다.

3. 연구대상지역

3.1 연구 대상댐

연구대상 댐인 OO댐은 총 저수용량 239만m^3, 높이 35m, 댐연장 108m, 댐 체적은 190천m^3의 중심 코어형 사력댐이다. 사업 기간은 2002년~2007년이고 담수 이후 약 10년이 경과한 댐이다(Fig. 1).

Fig. 1. OO Dam

3.2 계측기기 설치 현황

OO댐의 계측기기는 건설에 따른 시공 중, 준공 후, 담수 시의 안정 및 거동분석을 위해 설치되었고 측정된 계측자료의 분석을 통해 댐의 안정성과 거동변화를 감지하며, 향후 장기간 사용에 있어 댐의 운영 및 유지관리에 활용함이 목적이다. Fig. 2는 OO댐의 계측기기 설치 단면도를 나타낸 것이고 그림에 나타낸 바와 같이 일반적으로 간극수압계(PP), 토압계(EP), 정상침하계(CS)등이 설치된다. 본 연구의 대상인 간극수압계의 경우는 댐 제체 내에 총 8개소가 설치되어 담수 후 수압의 증감을 통해 침투 유출량의 적절성 여부를 판단한다. 계측자료는 담수 이후 2009년 6월 1일부터 자동계측을 수행하였고 본 연구에서는 2019년 6월 10일까지의 약 10년간의 계측자료를 분석하였다.

4. 계측현황

4.1 저수위

Fig. 3은 OO댐의 시간에 따른 저수위(Fig. 3(a))와 강

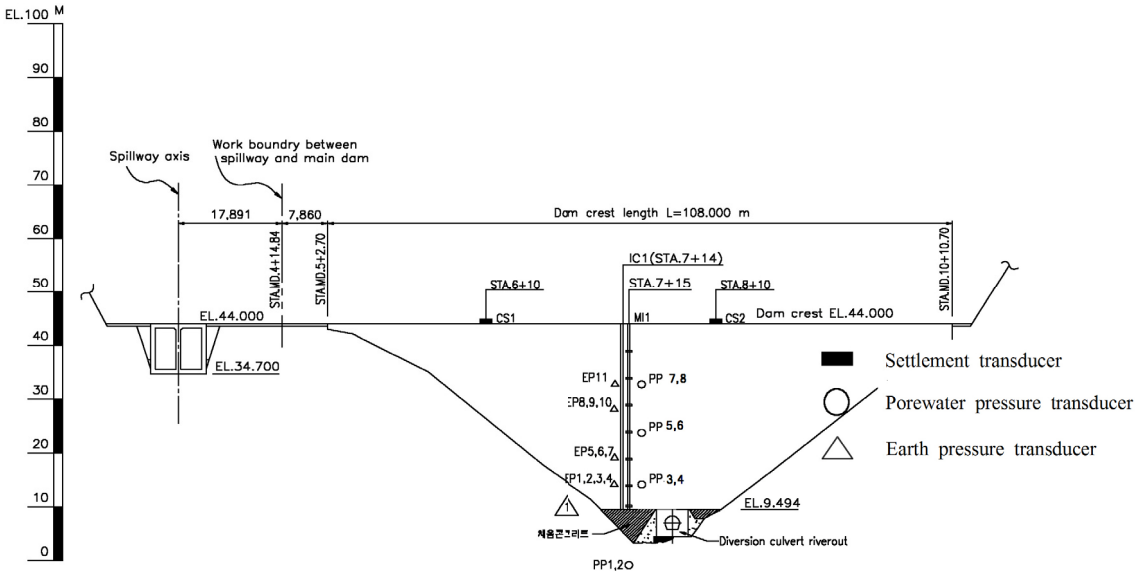
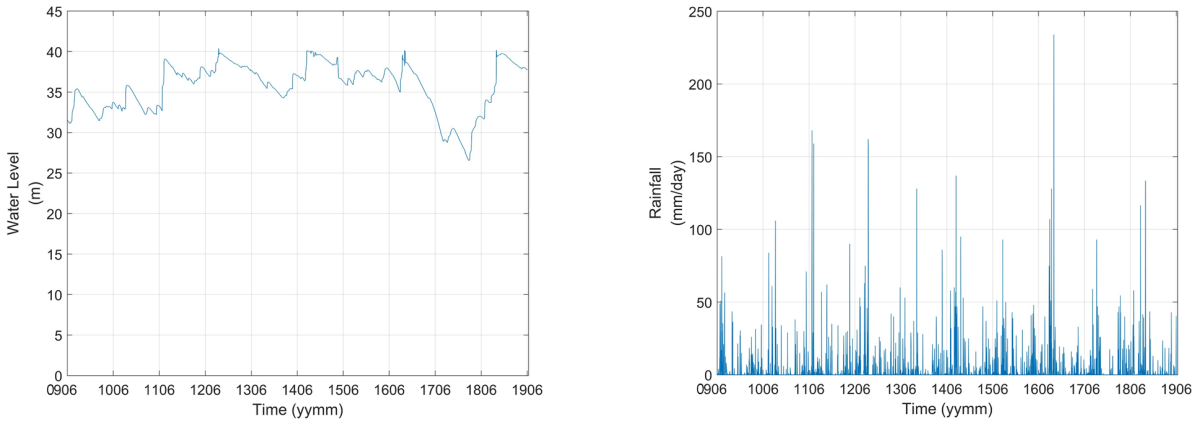


Fig. 2. Cross-sectional plan for instruments



(a) Water Level (b) Rainfall

Fig. 3. Water Level and Rainfall for OO Dam

수(Fig. 3(b))의 변화를 나타내고 있다. 자료수집 기간 저수위의 결측률이 0%로 우수하게 데이터가 관리되고 있다. 그리고 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 강수가 급증할 경우 저수위가 상승되는 것을 알 수 있으며, 상시만수위(EL.40m) 이내로 운영 관리되고 있는 것을 알 수 있다. 저수위계의 평균은 35.68m, 표준편차는 2.97m이고 강수량의 경우 평균강수량은 3.27mm(std 12.13mm)이며 최대강수량은 234mm이었다.

4.2 간극수압

Fig. 4에 나타난 바와 같이 간극수압계는 총 8개소(PP01~PP08)가 댐 코어부에 설치되었고, 2009년 6월 1일부터 2019년 6월 10까지의 계측 결과에 대해서 분석하였다. 자료 수집 기간의 간극수압계의 평균 결측률은 7.5%였고 지점별 결측 빈도는 유사하게 나타났다. Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c), Fig. 5(e)는 각각 댐의 상류측 기초지반, 하류측 기초지반, 상류측 중심부에 설치된 PP01, PP02, PP03, PP05를 나타내며, 각각 평균 330kPa, 250kPa, 170kPa, 50kPa의 수압이 계측되었다. 이는 댐 제체 내부에 형성된 침윤선의 영향으로 가장 하단에 있는 PP01에서의 수두(수압)가 높은 것을 나타내며 코어부 중심부에 위치한 PP05는 상대적으로 낮은 수두(수압)를 나타내고 있다. Fig. 5(d)와 Fig. 5(f)는 댐 코아부 하류측에 설치된 PP04, PP06을 나타내고 있다. PP04의 경우는 담수 초기에 상대적으로 큰 값이 작용되다가 시간에 따라 작아짐을 알 수 있다. 이는 초기 담수시 침윤선이 형성되면서 수압이 작용하였고, 이후 댐이 안정화되어 수압이 낮아진 것으로 판단된다. PP06은 평균 -30kPa의 부의 간극수압이 계측되어 침윤선 상단에 위치하는 것으로 판단된다. Fig. 5(g)와 Fig. 5(h)는 댐 상류측 최상위에 설치된 PP07과 PP08을 나타내고 있다. PP07와 PP08의 경우는 주로 부(-)의 간극수압이 작용된 것으로 나타났다. 이는 저수위 수위 부근에 설치되어 저수위가 낮아졌을 때는 불포화 상태의 지반에 의해 발생하는 부(-)의 간극수압으로 판단된다.

5. 간극수압 분석 결과

5.1 결측 자료의 선형 보간

Fig. 6(a)는 PP01의 원시자료를 나타내고 평균 결측률은 7.5%이다. 결측지점은 계측치가 “0”로 기록되어 그림과 같이 0의 값으로 하향곡선을 나타낸다. 그림에서 나타낸 것과 같이 간극수압계의 시계열 분포를 살펴보면 국부적으로 발생되는 극심한 상하 진동 또는 다량의 이상치 발생 등의 특이한 거동이 시계열 분포상에 관측되지 않은 것으로 판단되어 Spline을 활용한 선형 보간을 수행하였다. 즉, 변곡점 분석으로부터 추출된 국소 최고점들을 연결하는 Spline 생성하고 추출된 원시자료와 생성된 Spline을 합성하여 결측 구간에 대해 선형 보간을 수행하였다. Fig. 6(b)는 선형보간 후의 시계열 자료를 나타내고 있다.

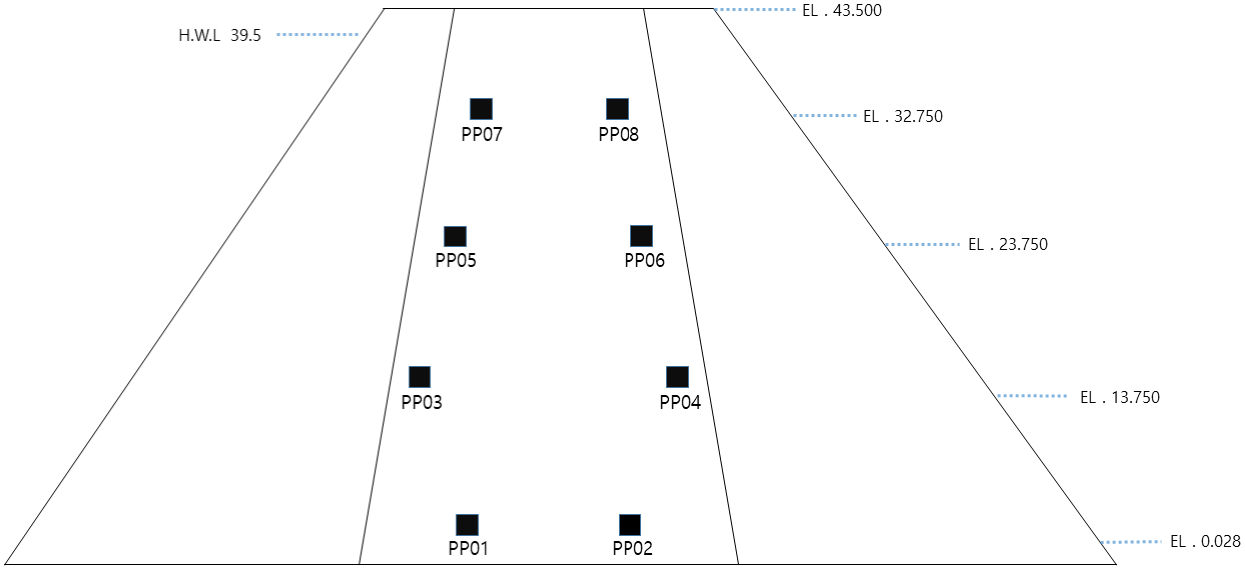
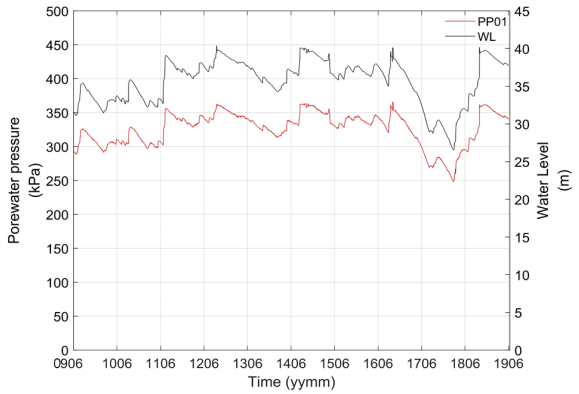
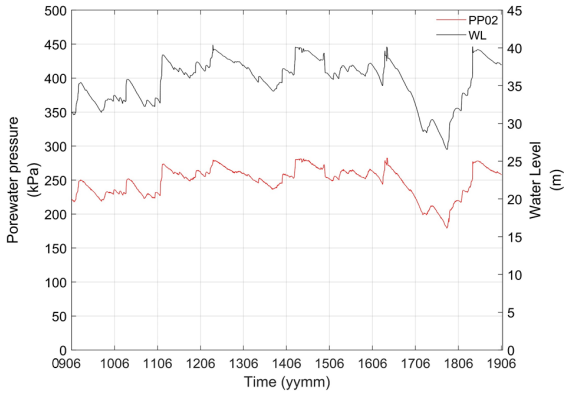


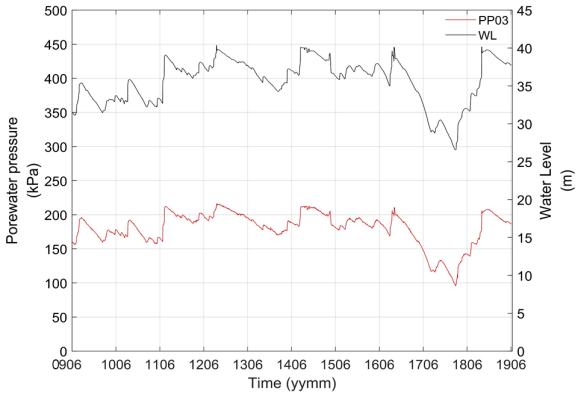
Fig. 4. Location of porewater pressure transducers



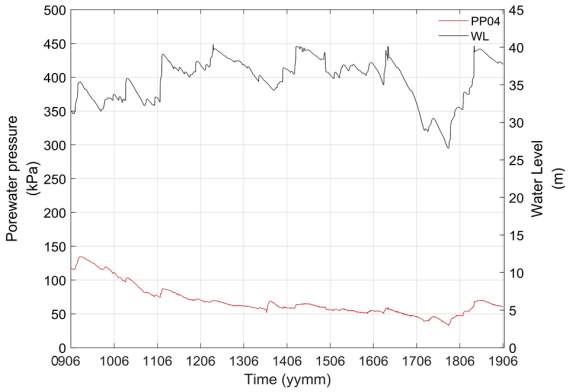
(a) PP01



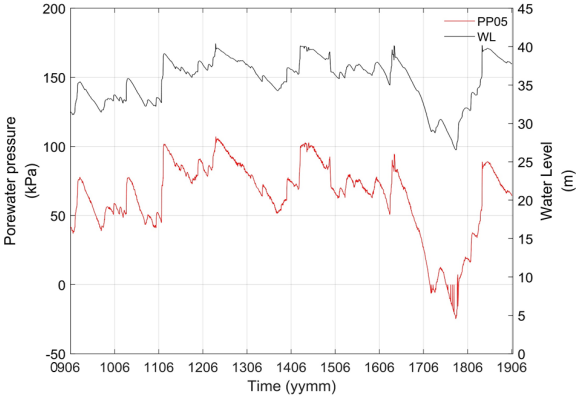
(b) PP02



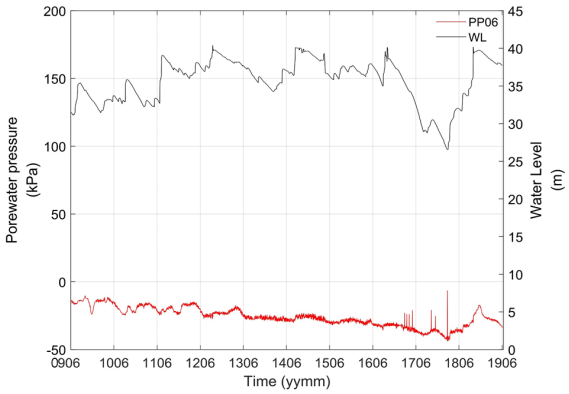
(c) PP03



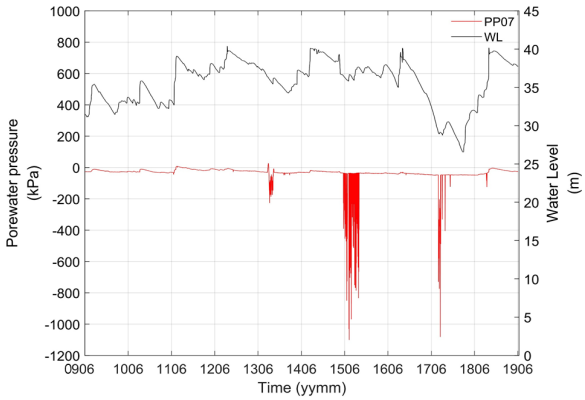
(d) PP04



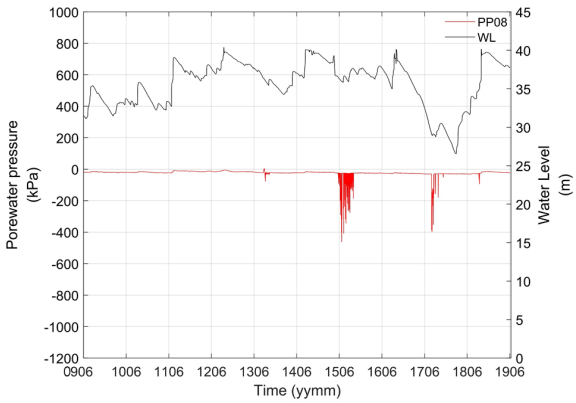
(e) PP05



(f) PP06

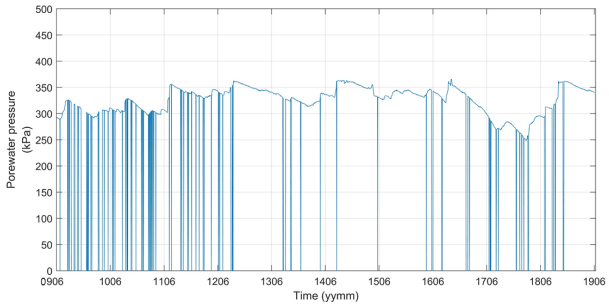


(g) PP07

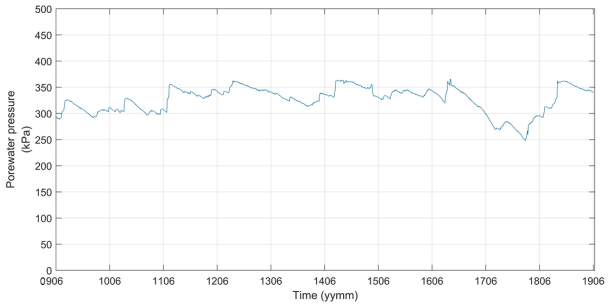


(h) PP08

Fig. 5 Pore water pressure measured in OO Dam



(a) Before



(b) After

Fig. 6. Linear Interpolation for porewater pressure

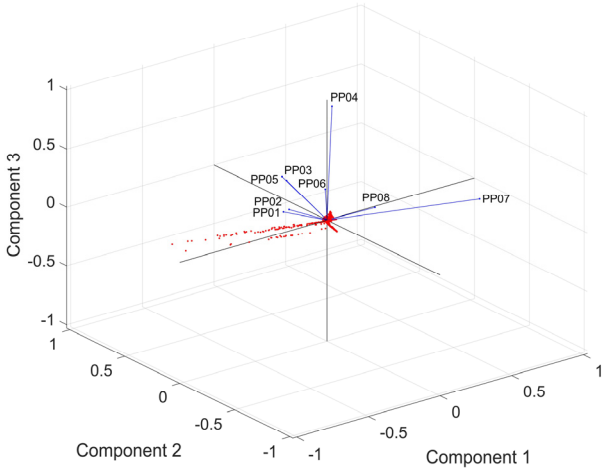


Fig. 7. Results of PCA

Table 1. Latent and Cumulative for PCA

Component	Latent	Cumulative (%)
1	9.79	60
2	4.23	80
3	2.10	90

Table 2. Coefficient matrix for component scores and group distributions for porewater pressures

PP No.	Comp.1	Comp.2	Comp.3	Group
PP01	0.28	−0.23	0.01	A
PP02	0.29	−0.22	0.00	A
PP03	0.31	−0.10	−0.03	A
PP04	0.13	0.41	−0.15	B
PP05	0.31	−0.10	−0.04	A
PP06	0.20	0.33	−0.13	B
PP07	0.09	0.14	0.59	C
PP08	0.11	0.14	0.59	C

5.2 주성분 분석

본 연구에서는 OO댐 제체 내에 설치된 간극수압계들의 통계적 유사성을 기반으로 적정 군집을 결정하기 위해 주성분 분석을 수행하였다. 주성분을 몇 개 까지 채택할 것인가에 대한 기준에 대해서 이론적으로 밝혀진 바가 없으나, 일반적으로 적용되는 분류기준(Lee, 2012)인 ① 상관 행렬 고유치(Latent)가 1 이상일 것과 ② 누적 기여율(Cumulative)이 70~80% 이상일 것을 적용하여(Table 1), 간극수압계를 3개의 주성분으로 요약하였고 Fig. 8은 선택된 3개의 주성분에 따른 성분도표를 나타낸 것이다. 성분점수 계수행렬 결과로부터 수행된 간극수압계 군집분류 결과는 Table 2에 나타낸 바와 같다. Table 2에 나타낸 성분점수로부터 PP01, PP02, PP03,

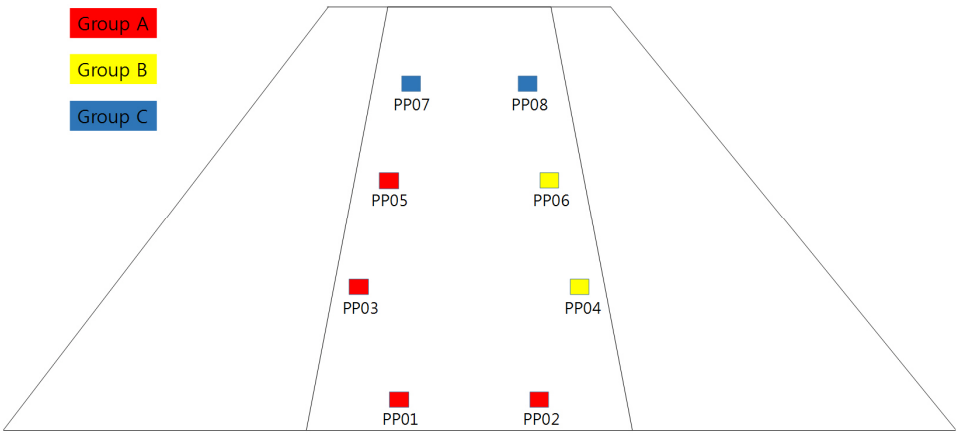


Fig. 8. Distributions of porewater pressure transducers by PCA

PP05는 A군집, PP04와 PP06은 B군집, PP07과 PP08은 C군집으로 분류되었다.

Fig. 8은 주성분 분석을 기반으로 분류된 3개의 군집별 간극 수압계의 위치를 나타내고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 A군집으로 분류된 간극수압계들은 주로 댐 상류부-상/하단부에 위치하며, B군집으로 분류된 간극수압계들은 댐 하류부-중단부 그리고 C군집으로 분류된 간극수압계들은 댐 상류부-상단부에 주로 분포하는 것을 알 수 있다. 이는 댐 제체 내에 형성되는 침윤선을 기준으로 내부, 외부, 상단으로 분류된 것으로 판단된다.

5.3 군집별 상관분석

간극수압계에 대한 상관분석은 군집 내 계측기별 상관분석 그리고 분류된 군집-저수위 상관분석을 수행하였다. A군집(PP01, PP02, PP03, PP05) 내 상관분석을 수행한 결과 Table 3에 나타낸 바와 같이 상관계수는 0.95～1.0의 값으로 강한 양의 상관관계를 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 A군집 내 개별 계측기가 결측 또는 기계적 이상거동을 나타낼 때 서로 상호보완적 관계가 될 수 있을 것으로 판단된다. B군집(PP04, PP06), C군집(PP07, PP08)의 경우는 군집 내 계측기 사이의 상관계수가 각각 0.84와 0.90으로 상대적으로 높은 양의 상관관계를 나타내지만 다른 군집과의 상관관계는 없는 것으로 나타났다. 또한, 간극수압계와 저수위와의 관계는 Table 3에 나타낸 바와 같이 A군집의 경우는 상관계수가 0.94～1.00으로 저수위와 강한 양의 선형관계를 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 저수위와 높은 상관성을 가지며 유사한 거동을 하는 것으로 나타났다. 반면에 B군집과 C군집은 상관계수가 -0.07～0.22로 낮은 상관관계를 나타내어 저수위와의 상관성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 댐 저수위의 변화가 없고 간극수압의 큰 변화를 나타낼 A군집 내 간극수압계로부터 댐 제체 내부의 유로 생성에 따른 파이핑 등에 따른 침투압 증가 등 댐 안전의 위협 요소를 사전에 감지할 수 있을 것으로 판단된다.

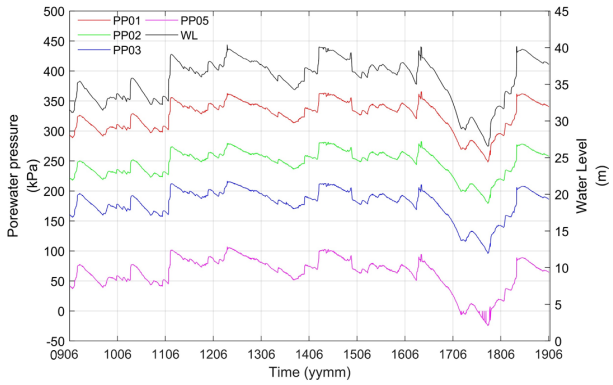
Fig. 9는 각각의 군집별 계측된 간극수압과 저수위의 비교를 나타내고 있다. Fig. 9(a)에 나타낸 바와 같이 군집 내 간극수압의 크기는 설치 위치에 따라 서로 상이하지만 저수위와 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉, Fig. 9(b)에 나타낸 A군집의 z-score 분포도로부터 저수위와 간극수압의 경향이 거의 일치하는 것을 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이 A군집의 경우 군집 내 계측기별 상관관계뿐만 아니라 저수위와의 상관성이 아주 높은 것을 나타내고 있다. 반면에 B군집와 C군집은 저수위와 큰 상관관계를 나타내지 않는 것으로 나타났다.

5.4 회귀분석

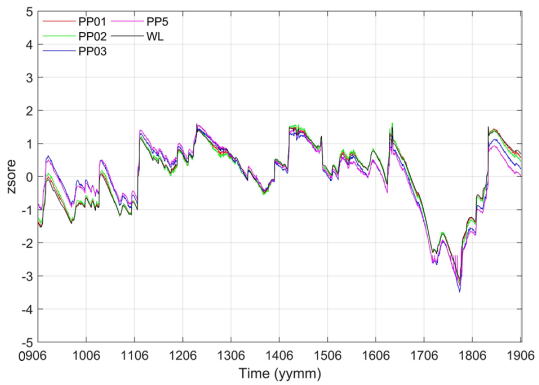
A군집 내 간극수압은 저수위와의 상관계수가 0.95 이상으로 높게 나타났기 때문에 저수위와 간극수압계에 대한 회귀분석을 수행하여 저수위 변화에 따른 간극수압을 예측할 수 있는 모형을 제안하고자 한다. 회귀분석은 저수위를 설명 변수로 하고 각각의 간극수압을 반응변수로 설정한 경우에 대해 수행하였다. Fig. 10은 A군집에 속한 PP01, PP02, PP03 그리고 PP05 지점에 대한 1차 선형회귀 모형 개발 결과를 도시한 것이다. Fig. 10(a) 및 Fig. 10(b)에서 나타낸 것과 같이PP01, PP02의 경우 RMSE는 각각 1.5072, 2.0942이며 개발된 회귀선을 중심으로 각각의 관측값이 안정적으로 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10(c) 및 Fig. 10(d)에

Table 3. Relationships among water level and porewater pressures

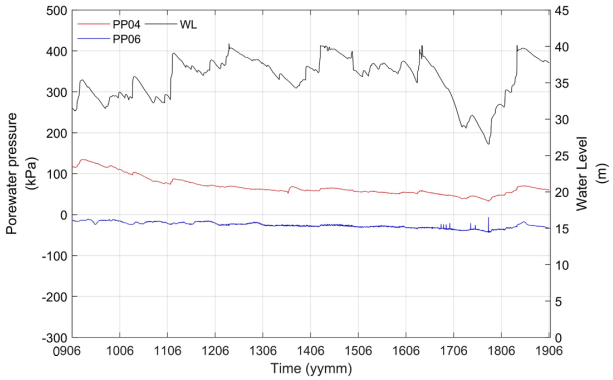
No.	WL	PP01	PP02	PP03	PP04	PP05	PP06	PP07	PP08
WL	1.00								
PP01	1.00	1.00							
PP02	1.00	1.00	1.00						
PP03	0.95	0.96	0.97	1.00					
PP04	−0.07	−0.04	0.00	0.22	1.00				
PP05	0.94	0.95	0.96	0.99	0.21	1.00			
PP06	0.22	0.24	0.26	0.47	0.84	0.48	1.00		
PP07	0.14	0.14	0.14	0.19	0.19	0.18	0.23	1.00	
PP08	0.18	0.19	0.18	0.24	0.20	0.23	0.26	0.90	1.00



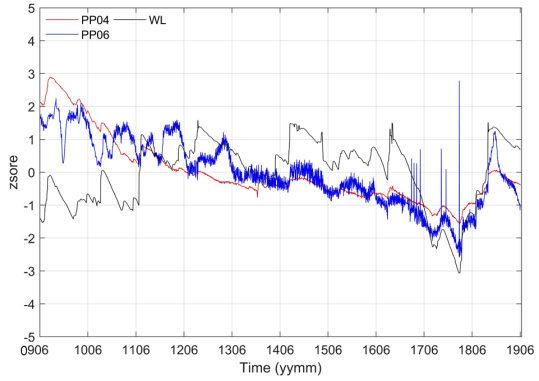
(a) Comparisons with water level and Group A



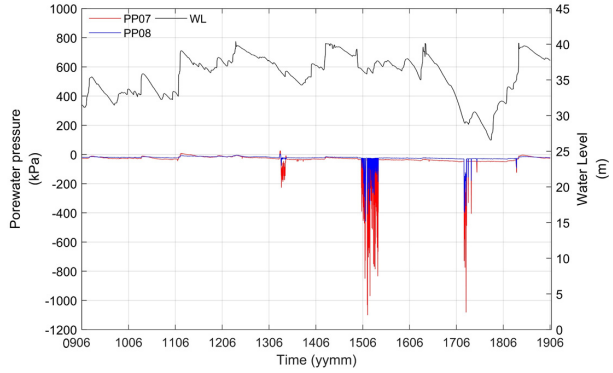
(b) z-score for group A with water level



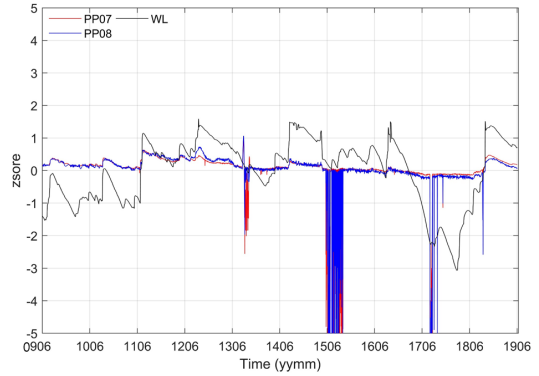
(c) Comparisons with water level and Group A



(d) z-score for group B with water level



(e) Comparisons with water level and Group C

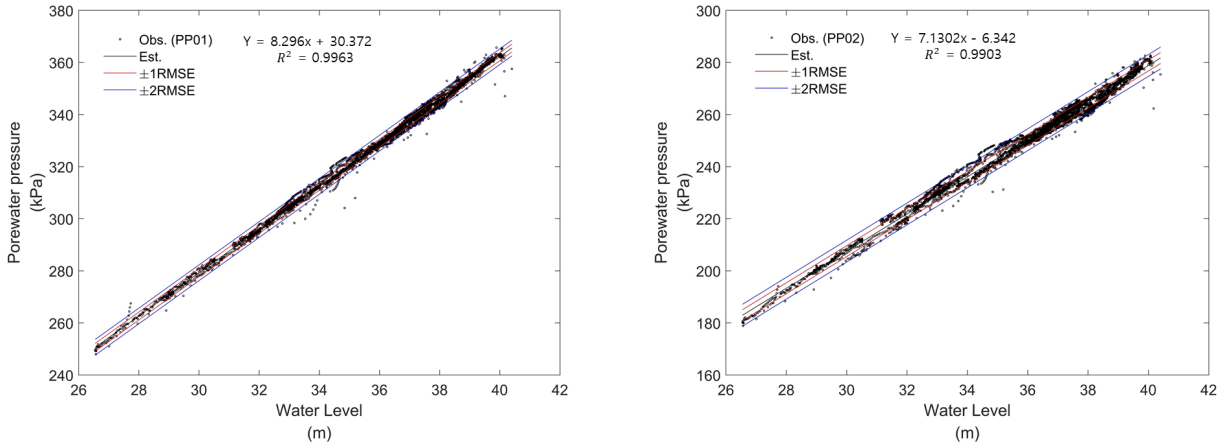


(f) z-score for group C with water level

Fig. 9. Relationships between water level and porewater pressure

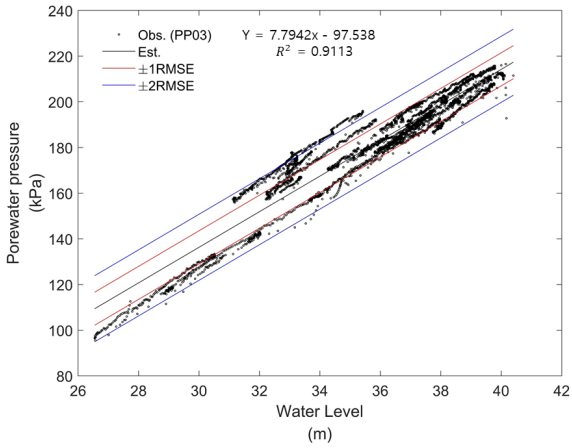
나타낸 바와 같이 PP03과 PP05의 RMSE는 각각 7.2321, 8.8052이며 각각의 관측값들이 ±2RMSE 내에서 분포하지만 저수위 31m~38m 범위에서는 회귀선을 중심으로 상하에서 분포하는 특성을 나타내었다.

본 연구를 통해 개발된 저수위-간극수압 1차 선형회귀 모형에 대한 통계적 적합도 검정을 위해 결정계수(R^2) 및 F-test를 수행하였으며, 그 결과는 Table 4에 제시하였다. Table 4에 나타낸 것과 같이 PP01, PP02, PP03 그리고 PP05에 대한 1차 선형회귀 모형들의 결정계수의 범위는 0.89~0.99로서 높은 통계적 설명력을 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 각 회귀모형에 대한 적합도 검정을 위해 유의수준 5%하에서 F-test를 수행한 결과 모든 회귀모형들이 적합도를 만족하는 것으로 나타났으며 A군집에서는 저수위의 변화에 따라 간극수압의 예측이 가능할 것으로 판단된다. 즉 설명 변수로 저수위가 고정되어 있을 때 간극수압의 예측이 가능하며 현재 계측된 계측값과의 비교를 통해 댐의 안전성 여부를 판단할 수 있다. 한편, 간극수압계의 설치위치가 기초에서 상부로 갈수록 저수위의 영향으로 인해 계측값의 변동성이 커지는 경향을 보인다. 이는 수위의 상하변동에 따

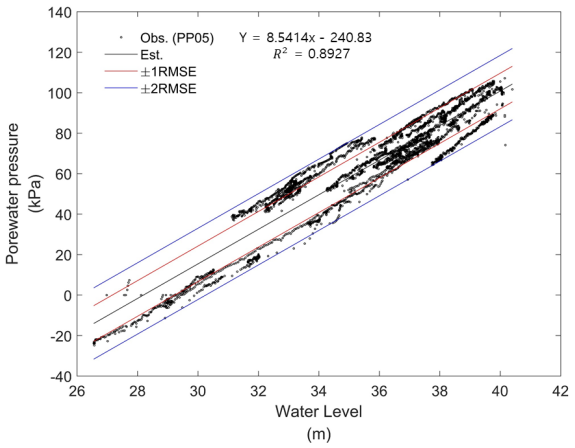


(a) PP01

(b) PP02



(c) PP03



(d) PP05

Fig. 10. Regression Analysis between water level and porewater pressures of group A

Table 4. Regression analysis between water level and porewater pressures

y	x	$y=\alpha+\beta x$		R^2	F-test			±RMSE	±2RMSE
		α	β		F	p-value	Test		
PP01	WL	30.372	8.296	0.996	9.8e+05	0.000	OK	1.5072	3.0144
PP02		−6.342	7.13	0.990	3.75e+05	0.000	OK	2.0942	4.1884
PP03		−97.538	7.794	0.911	3.76e+04	0.000	OK	7.2321	14.4642
PP05		−240.83	8.541	0.893	3.04e+04	0.000	OK	8.8052	17.6104

른 댐체의 침윤선 변화가 계측값에 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 필댐의 누수 및 파이핑의 예측에 활용되는 간극수압계에 대해서 댐 저수위와의 상관관계를 분석하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 간극수압의 결측은 선형 보간을 수행하고 주성분 분석을 수행한 결과 댐 상류부-중/하단부(A군집), 댐 하류부-중부(B군집), 그리고 댐 상류부-상단부(C군집)로 3개의 군집으로 분류되었고 군집 내 존재하는 간극수압계간 유사한 형상을 나타냈다.

(2) 침윤선 내부에 존재하는 것으로 예측되는 A군집인 PP01, PP02, PP03, PP05 사이의 상관분석을 수행한 결과 0.95 이상의 상관관계를 보였고 이는 서로 상호보완적인 관계가 될 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 저수위-간극수압의 유의미한 상관관계를 만족하는 A군집(PP01, PP02, PP03, PP05)에 대한 1차 선형

회귀분석을 수행한 결과 결정계수(R^2)는 0.89~0.99의 범위로써 높은 설명력을 만족하였으며 통계적인 적합도 또한 유의수준 5% 하에서 유의미한 것으로 분석되었다.

(4) 따라서 일정한 댐 저수위에서 간극수압의 변화가 있을 때 제체 내부의 누수 또는 파이핑 등에 따른 댐 안전의 위협 요소의 사전 감지 및 설명 변수로 저수위가 고정되어 있을 때 간극수압의 예측이 가능하므로 현재 계측된 계측 값과의 비교를 통해 댐의 안전성 여부를 판단할 수 있다.

본 연구의 결과로부터 향후 A군집 내 존재하는 간극수압계에 의한 유지관리가 필요하며 댐 안전의 실시간 안전감시를 위해 상기에 도출된 모형식을 활용하여 조기경보시스템의 운영이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌 (References)

1. Chang, P. W., Park, Y. K., and Woo, C. W. (1998), "Evaluation of Degradation and Safety of Small Agricultural Reservoir-Case Study for Kosam Reservoir in Kyungki Provice", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol.40, No.1, pp.49-56.
2. Gwak, B.-R. and Kim, I.-K. (2016), "Characterization of Water Quality in Changnyeong-Haman Weir Section Using Statistical Analyses", *J. Korean Soc. Environ. Eng*., Vol.38, No.2, pp.71-78.
3. Hotelling, H. (1933), "Analysis of a Complex of Statistical Variables into Principal Components", *Journal of Educational Psychology*, Vol.24, No.6, p.417.
4. ICOLD (1995), Bulletin 99, *Dam Failures, Statistical Analysis*, Paris, p.77.
5. Jansen, Robert B. (1983), *Dams and Public Safety*, United States Department of the Interior, p.94.
6. Kang, G.-C., Kim, S.-J., Ryou, M., Ahn, K., and Kim, J. (2018), "Case Study on Real-time Monitoring System of Dam Displacement Based on SAMP(Single Antenna-Multi Point) GPS", *Korean Cadastre Information Association*, Vol.20, No.2, pp.3-13.
7. K-water (2019), A Study on the Combined Analysis Method of Measurement Data for Dam Safety and Maintenance (II).
8. Kim, S. H.(2016), *Multivariate Data Anlysis*, Bob-munsa.
9. Kwon, Y., Kim, S., and Byun, J. (2020), "Cognitive Perception of an Eco-friendly Public Transportation : Using Principal Component Analysis", *The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol.19, No.1, pp.71-82.
10. Kwon, Y., Jang, K., and Jang, I. G. (2016), "Multidimensional Scaling Analysis of Inter-regional Public Transit Services: Focusing on Inter-regional Railways", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.19, No.2, pp.243-250.
11. Lee, J. (2012), *Matlab Recipes for Statistical Analysis*, A-Jin.
12. Lee, H. and Nho, S. (2015), *Advanced Statistical Analysis,* Moonwoo.
13. Nho, H. (2007), *Multivariate analysis for Excel and SPSS*, hyungseul.
14. Park, J. S. and Rhee, K. H. (2012), "Study on Characteristics of Water Quality Variation in the Yeongsan River Using Multivariate Analysis", *J. Korean Soc. Water Sci. Technol.*, Vol.20, No.2, pp.61-72.
15. Pearson, K. (1901), "LIII. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol.2, No.11, pp.559-572.
16. USCOLD (1975). *Lessons of Dam Incidents*, USA.

Received : March 24th, 2020
Revised : June 23rd, 2020
Accepted : June 23rd, 2020