

## 3차원 수치해석에 의한 필 댐의 누수량 평가

### Seepage Quantity Evaluation of a Fill Dam using 3D FEM Analysis

최 병 일<sup>†</sup>

Byoungil Choi

Received: June 5<sup>th</sup>, 2015; Revised: June 15<sup>th</sup>, 2015; Accepted: June 29<sup>th</sup>, 2015

**ABSTRACT** : Using 2D numerical analysis that covers the largest section of the dam body, a process is generally performed when evaluating its stability against seepage. The quantity of seepage is first obtained by assuming that its bottom topography is in the simple form of a rectangle, it is then calculated by reflecting its sectional shape during this process of analyzing the seepage quantity. Considering that various forms of dams are being constructed on various types of ground, thanks to more recent technological advances, it is judged more appropriate to draw a conclusion by means of the results on reflecting the realistic shape and topographical conditions of the dam body through 3D numerical analysis. Therefore, this study intends to present a method designed to carry out safety management by evaluating the correct quantity of water leakage that passes only through the dam body, having excluded other factors that include the amount of rainfall through the 3D FEM analysis.

**Keywords** : 2D numerical analysis, 3D numerical analysis, 3D FEM analysis, Seepage quantity

**요 지** : 침투에 대한 안정성 평가 시 댐체의 가장 큰 단면을 반영해 2차원으로 수치해석을 실시하는 것이 일반적이며, 해석결과를 이용한 침투수량 평가 시 댐체 하부지반을 단순한 직사각형 형태로 가정하여 침투수량을 구한 후 단면형상을 반영해 최종 침투수량을 계산하고 있다. 하지만 최근 기술의 발달로 댐 시공 시 다양한 형태의 지반 위에 다양한 형태의 댐들이 축조되고 있는 점을 감안하면 3차원 수치해석을 통해 댐체의 형상 및 지형조건을 보다 정확하게 반영한 결과를 이용하여 결론을 도출하는 것이 바람직하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 3차원 FEM 수치해석법을 이용하여 강우량을 포함한 다른 기타요인은 배제한 후 댐체로만 통과되는 침투수량 평가를 통해 안전관리를 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

**주요어** : 2차원 수치해석, 3차원 수치해석, 3차원 유한요소해석, 침투수량

## 1. 서 론

필 댐의 안정성은 사면안정, 침투안정 및 지진에 대한 안정성 등으로 평가된다. 특히 필 댐의 침투에 대한 안정성은 필 댐의 안전 여부를 판단하는 중요 요소로서 댐체 하부에 누수량 측정장치를 설치하여 과도한 누수량이 발생하는지 또는 누수에 흙 입자가 포함되어 있는지 등을 상시 감시하고 있다. 그러나 현재의 누수량 측정 방법은 댐 저수지 수위의 영향뿐만 아니라 강우의 영향, 기초지반 및 주변산지 등에서 유입되는 수량 등 모든 요소들을 반영한 누수량 평가가 현실적으로 쉽지 않은 실정이다. 일반적으로 댐의 침투수량을 계산하기 위해서는 댐체의 가장 큰 단면을 반영하여 2차원 수치해석을 실시하고, 침투수량 평가 시 댐체 하부지반 형태를 반영하여 침투수량을 계산하고 있다. 하지만 2차원 수치해석의 경우 댐체 내·외부조건 및 하부 지반의 계곡

형상 등을 정확히 반영하는 데 한계가 있어 정확한 침투수량 평가를 어렵게 한다. 이와 같은 상황을 반영하여 정확한 댐 침투수량평가를 위해서는 댐체 형상, 주변지형 및 지반 조건 등을 보다 현실적으로 반영할 수 있는 3차원 수치해석 방법을 이용하는 것이 바람직할 것이다.

정확한 댐 침투수량 평가를 위해 많은 연구자들이 노력하고 있으며 이와 관련하여 많은 연구가 수행되었다.

국외에서는 van Genuchten(1980)이 함수특성곡선 이론식의 변수들을 이용하여 투수계수곡선을 제안하였으며, 이는 최근까지도 침투해석에 가장 많이 이용되는 모델 중 하나이다. Chen & Zhang(2006)은 2차원 해석에서의 접합부 누출문제의 위험을 과소평가하는 것에 대하여 사력댐 포화, 불포화 침투이론을 이용한 3차원 해석을 실시하였다.

국내에서는 Chung & Lee(2010)가 중앙심벽형 필 댐을 대상으로 자동계측에 의해 연속적으로 생산되는 침투수량

<sup>†</sup> Korea Infrastructure Safety Corporation (Corresponding Author : bichoi@kistec.or.kr)

계측자료에 대하여 분석을 통해 필 댐 교유의 특성에 따라 장기 침투특성을 검토하였다. Lee & Lim(2007)은 유한요소법에 의한 침투해석과 응력-변형률 해석을 실시하여 각 수위에서 계측된 최대누수량을 기준으로 회귀분석을 실시하여 상관식을 유도하였다.

본 연구에 적용된 A 댐의 정밀안전진단 보고서에서는 ‘누수량 계측은 강우가 많고 수위가 높은 홍수기 이후 일정 기간 동안에만 가능하여 강우 성분의 분리가 곤란’하다고 하였다(한국시설안전공단, 1997). 또한 Cho et al.(1998)에 의하면 ‘집수벽과 연결되는 정수지 우측 벽체 부위는 기초그라우팅이 실시되지 않아 이 부분을 통한 침투량의 손실 가능성이 있다.’고 하였으며, Lee & Lim(2007)은 ‘LW 2에서 계측된 침투량은 댐체를 통한 침투량뿐만 아니라 강우 시 코어존과 집수벽 사이의 댐 사면 강우량이 포함되는 침투량 계측체계의 취약점을 갖고 있다.’고 평가하고 있어, 이는 A 댐의 침투수량 평가가 어려움을 시사하고 있다.

이와 같은 A 댐 누수량계 특성을 고려하여 본 연구에서는 댐체의 형상 및 지형을 정확히 반영할 수 있는 3차원 유한요소해석을 통해 강우량을 포함한 다른 기타요인은 배제하고, 댐체로만 통과되는 정확한 누수량을 평가하여 안전관리가 될 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 수치해석은 지반공학 범용 프로그램인 PLAXIS 3D를 이용해 A 댐 저수지 수위변화에 따른 침투수량에 대해 평가하였으며, 추가적으로 2차원(SEEP/W) 수치해석을 실시하여 결과값과 실 계측 데이터와 비교·분석하였다.

## 2. 3차원 FEM 수치해석 조건

수치해석 대상구조물인 A 댐은 높이 73m, 길이 515m, 총저수량 5억 9,500만<sup>3</sup>의 제원을 가진 안동에 위치한 다목적사력댐이며, 1984년 12월에 착공하여 1993년 12월 31일 준공되었다.

3차원 FEM 수치해석을 위해 상부 댐체, 댐체 주변사면 및 하부지반 형상을 반영하였으며 해석을 위한 댐체 하부 지반을 EL 22m까지 고려하였다. Fig. 1은 5개의 Zone으로 구성된 댐체의 단면 형상을 나타내고 있으며, Table 1은 3차원 침투해석에 필요한 Zone별 투수계수를 나타낸다. 3차원 해석에 적용된 Mesh의 경우 29,173개의 Element와 42,656개의 Node로 구성되었다. Fig. 2는 해석에 적용된 지층형상 및 Mesh의 형상을 나타내고 있으며, 수위별 침투수량 분석을 위해 상류 측 수위를 3단계 1) 상시만수위 163m, 2) 중수위 150m, 3) 저수위 137m를 적용하고, 하류 측 수위는 댐체 하단높이 105m를 적용한 후 van Genuchten Model을 이용하여 수두 차에 의한 침투해석을 수행하였다. 또한 침투수량에 가장 영향이 큰 코어존의 투수계수는 한국시설안전공단(2012)에서 작성한 A 댐 정밀안전진단 보고서를 참고하였으며, 설계치 및 품질시험결과를 적용하여 수위별 침투해석을 수행하였다. 수치해석 대상 범위는 X축으로 482.6m, Y축으로 730m, Z축으로는 댐 사면 높이를 고려한 바닥면(EL.22m)에서 172m를 적용하였으며, X축 방향의 물의 흐름만 허용하였다. 수치해석에 적용한 프로그램은 지반공학 전용 FEM 해석프로그램으

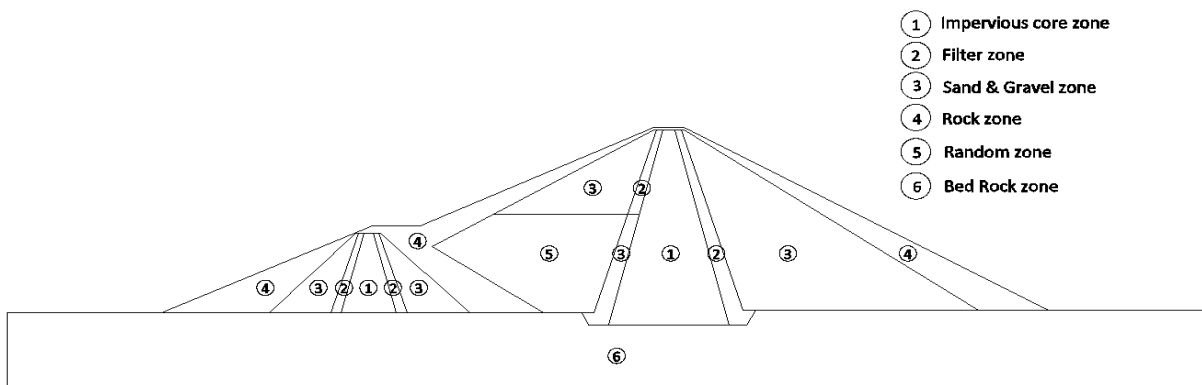


Fig. 1. Sectional shape of the dam body

Table 1. Engineering properties applied

Material	Core	Filter	Sand & Gravel	Rock	Random	Bed rock	Mountain slope
Permeability (m/sec)	$1.0 \times 10^{-7}$ (Design property)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-7}$
	$1.36 \times 10^{-8}$ Quality control test result (Field)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-7}$
	$2.71 \times 10^{-8}$ Quality control test result (Lab)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-7}$

로 3차원 침투해석이 가능한 네덜란드 Plaxis社에서 개발한 Plaxis 3D를 이용하여 2차원 해석과 같이 수두 차를 이용한 물의 흐름을 유도하여 X축 방향의 침투수량만을 평가하였다.

### 3. 수치해석 결과

침투수량 평가의 경우 저수지 수위, 강우량, 댐체 주변 사면에서 흘러들어오는 유입수, 지하수 등 여러 가지 환경적 요인에 의해 침투수량이 결정되지만 본 논문에서는 다른 기타 요인은 제외하고 댐체로만 통과되는 침투수량을 반영하였다. 3차원 수치해석의 가장 큰 장점으로서는 댐 형상과 최대한 유사하게 지반, 주변사면, 댐체를 모델링 할 수 있으며, Fig. 3과 같이 침투 면이 가장 큰 면을 댐 축 방향으로 나눌 수 있다. 그 후 이를 통과하는 침투수량을 측정하여 침투수량을 100% 반영하였다. 이와 다르게 X, Y 축만 존재

하는 2차원 수치해석의 경우 주변사면의 형상을 반영하지 못해 침투수량 해석 결과값에 댐 Y축 방향 길이 515m를 곱하고 댐 주변 사면과 댐체의 지반 형상을 반영한 70%(한국시설안전공단, 2012) 침투수량을 반영한 결과값으로 나타났다.

수치해석 결과 설계투수계수를 적용한 경우에서만 수위별 2차원 수치해석 결과값이 3차원 해석 값보다 크게 나타났으며, 나머지 경우에는 3차원 수치해석 결과값이 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 댐 설계 시 주변사면에서의 유입수 차단을 위해 그라우팅을 실시하지만 100% 유입을 막을 수는 없으므로 주변사면을 고려하지 못하는 2차원 해석보다 3차원 수치해석 값이 대부분 크게 나타날 것이다. 또한 투수계수가 상대적으로 높은 설계투수계수를 반영한 코어를 통과하는 주변사면의 영향보다 투수계수가 더 낮은 나머지 경우에 주변사면의 영향이 더 크게 나타났다고 판단된다. 결과값은 Table 2와 같이 나타났으며, Fig. 3은 프로그램에

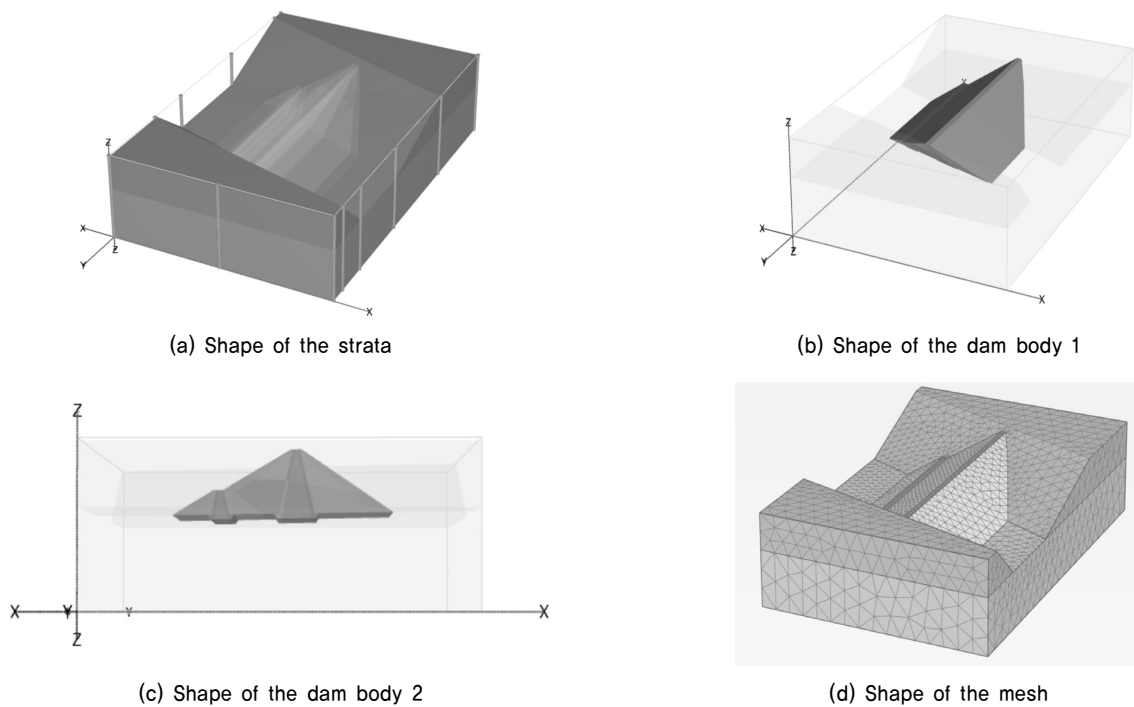
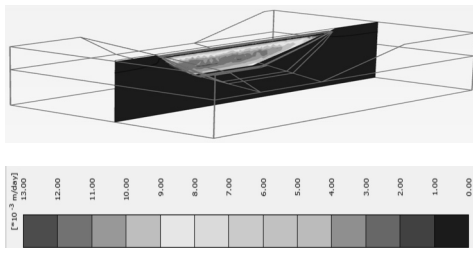


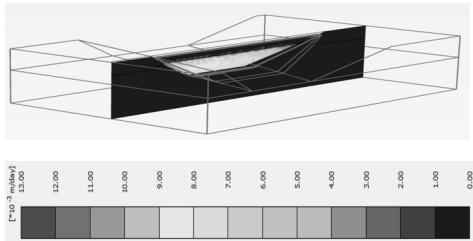
Fig. 2. Shapes applied to numerical analysis

Table 2. Seepage quantities at normal high water level

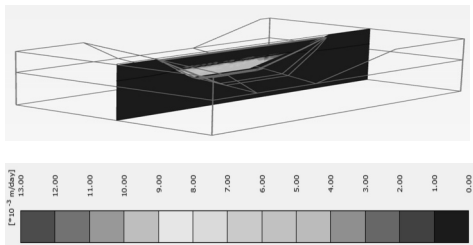
Permeability (m/sec)		Seepage quantity (L/min)		
		163 m	150 m	137 m
$K = 1.0 \cdot 10^{-7}$	3D	126.4583	66.48611	26.91667
	2D	168.70	108.80	49.10
$K = 2.71 \cdot 10^{-8}$	3D	64.54167	34.25	15.07639
	2D	46.89	25.25	14.87
$K = 1.36 \cdot 10^{-8}$	3D	49.54167	27.88194	12.02778
	2D	26.06	13.16	7.87



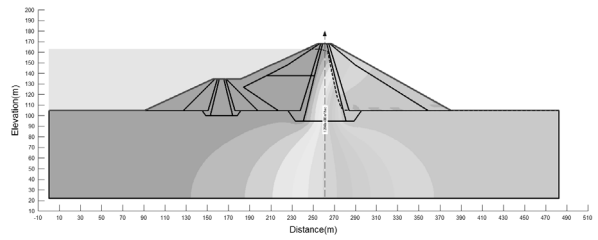
EL. 163 m (3D FEM analysis)



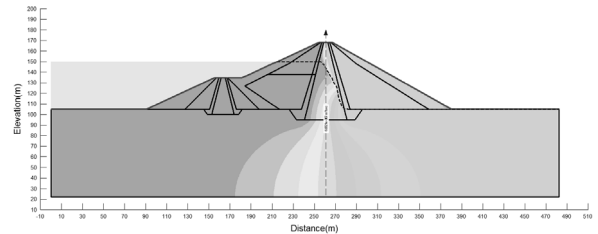
EL. 150 m (3D FEM analysis)



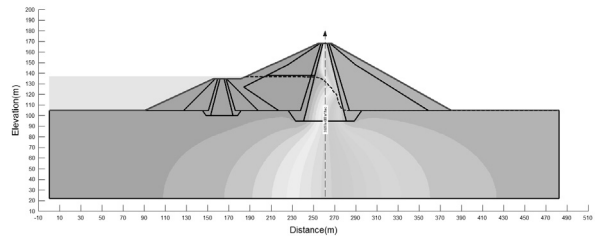
EL. 137 m (3D FEM analysis)



EL. 163 m (2D FEM analysis)



EL. 150 m (2D FEM analysis)



EL. 137 m (2D FEM analysis)

Fig. 3. Seepage analysis results by water level

적용한 수위별 수치해석 결과를 나타내었다.

#### 4. 계측치 분석

제체를 통해 침투되는 누수량을 측정하기 위한 목적으로 댐 제체 하류 Filter zone에 2개소, 상류 Random zone 1개소, 총 3부분에서 유입되는 수량을 측정한다. 수치해석 결과의 정확도 분석을 위해 2011년 11월~2014년 10월 최근 3년간 A 댐에서 계측된 자료와 실제 강우량을 날짜별로 나타내었으며 Fig. 4와 같이 나타냈다. 그림에서 나타났듯이 실제 침투 수량의 경우 댐체 수위뿐만 아니라 강우의 영향도 크게 받고 있는 것으로 나타났다. 설계 누수량 290L/min 이상 발생하는 이상 계측치를 제외하고 저수위별 침투수량 계측결과를 분석하였다. Fig. 5는 수위에 따른 최근 3년간 침투수량을 나타내고 있으며 계측치와 가장 근접한 결과값을 나타내는 설계투수계수를 적용한 2차원 해석 결과값과 3차원 해석 결과값을 함께 선으로 나타냈다. 수치해석 결과값이 계측 값과 차이가 많이 나타나는 이유는 침투수량을 지배하는 요인이 앞서 언급하였듯이 저수지 수위뿐만 아니라 강우 및 지하수 등의 영향도 받기 때문임을 알 수 있다.

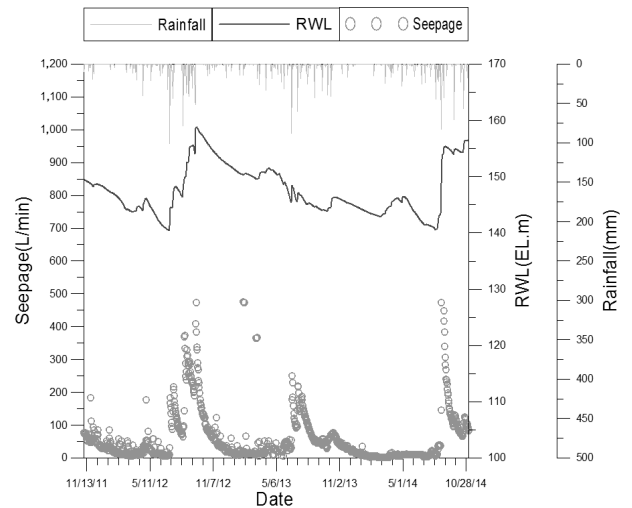


Fig. 4. A time-series graph of the measured seepage quantified of the a dam

저수지 수위 이외에 가장 크게 영향받는 것으로 나타나는 수위 조건을 제외하고 침투수량 수치해석 결과값과 비교하기 위해 Fig. 6과 같이 국내 건기에 해당하는 11월~2월까지 4개월의 계측 값만 수위별로 정리하여 수치해석 결과값과 비교하였다.

그 결과 2차원 수치해석 결과를 나타내는 실선 안에 대부

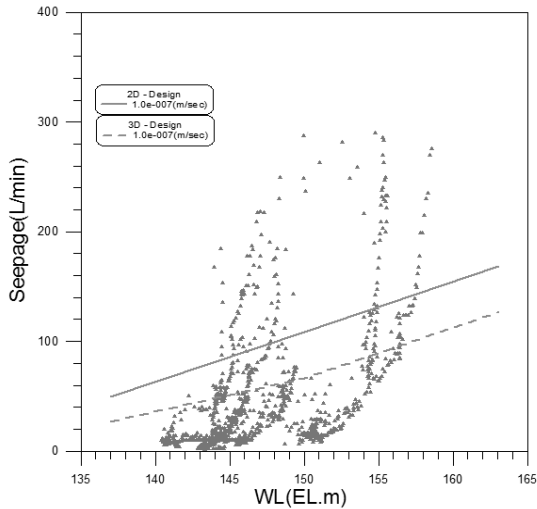


Fig. 5. Seepage analysis results by water level

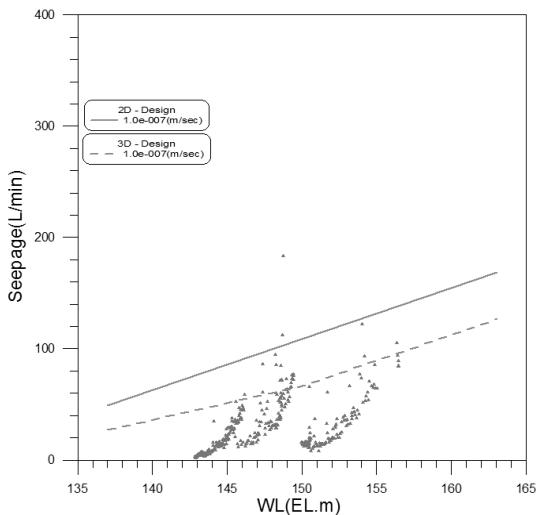


Fig. 6. Seepage analysis results by water level (November ~ December)

본의 계측 값이 포함되는 것으로 나타나고 있으나 4개월간 자료에도 강우량이 포함되어 있으며 지하수의 영향 등 기타 요인 또한 포함되어 있는 점을 감안하면 3차원 해석 결과값이 계측 값과 상당히 근접한 결과를 제시함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

A 댐 저수위별 적정 침투수량 평가를 위해 댐체, 지형조건, 댐 주변사면 등을 3차원으로 반영 가능한 PLAXIS 3D를 이용하여 침투해석을 실시하였다. 그리고 기존 댐 침투해석에 많이 이용되는 2차원 프로그램인 SEEP/W를 이용하여 동일한 조건에서 침투해석을 실시하였으며 결과값을 3차원 해석 결과값과 비교하였으며, 2차원, 3차원 수치해석 결과값과 A 댐 실 계측치와 비교해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 코어의 투수계수 및 저수위 조건을 달리하여 van Genuchten Model을 적용해 수치해석을 수행하였으며 해석 결과 3차원 결과값보다 2차원 수치해석 결과값이 대부분 크게 나타났다. 이는 해석모델은 동일하지만 프로그램 특성이 달라 결과값의 차이를 보일 수도 있으며 2차원에서 적용한 하부지형 형상 70%가 과도하게 책정된 결과라고도 볼 수도 있다.
- (2) 수치해석 결과값과 계측 값의 비교를 위해 설계 누수량 290L/min 이상 발생하는 이상 계측치를 제외한 최근 3년간 자료를 이용해 저수위별 침투수량 계측결과를 분석하였다. 전체적으로 계측 값과 수치해석 값의 차이가 크게 나타났으며, 이는 침투수량을 지배하는 요인이 저수지 수위뿐만 아니라 강우 및 지하수 등 여러 변수의 영향을 받기 때문이라 판단된다.
- (3) 국내 건기에 해당하는 11월~2월까지 4개월 기간의 계측값만 수위별 데이터를 정리하여 수치해석 결과값과 비교한 결과 3차원 결과값이 계측 값과 상당히 근접한 수치를 나타냄을 알 수 있었다. 저수위, 강우량만을 변수로 A 댐 적정 누수량을 평가하기는 어렵지만, 수치해석 결과를 바탕으로 최소한 건기에 해당하는 시기에는 3차원 해석 값보다 큰 침투수량 계측이 지속적으로 이어진다면 댐체에 이상을 의심해 보아야 될 것이라 판단된다.

## References

1. 한국시설안전공단 (1997), 임하다목적댐 정밀안전진단보고서 (2차), pp. 268~296.
2. 한국시설안전공단 (2012), 임하다목적댐 정밀안전진단보고서 (2차), pp. 360~370.
3. Chen, Q. and Zhang, L. M. (2006), Three-dimensional analysis of water infiltration into the gouhou rockfill dam using saturated-unsaturated seepage theory, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 43, No. 5, pp. 449~461.
4. Cho, J. H., Kim, K. H. and Yoon, Y. H. (1998), A study on the leakage characteristics and management of leakage water in zoned rockfill dam, research institute for industrial science and technology chungbuk national university, Journal of Industrial Science and Technology Institute, Vol. 12, No. 2, pp. 299~309 (in Korean).
5. Chung, K. J. and Lee, S. (2010), A study on long-term seepage behaviour of fill dam by the monitoring data analysis, Journal of the Korea geotechnical Society, Vol. 11, No. 9, pp. 15~25 (in Korean).
6. Lee, K. T. and Lim, H. D. (2007), A study on seepage and crest settlement of central cored rockfill dam-The case of im-ha dam-, Journal of Korea Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 6C, pp. 383~392 (in Korean).
7. van Genuchten, M. T. (1980), A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of on saturated soils, Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5, pp. 892~898.