

GIS와 ASI 알고리즘을 이용한 광미댐 수문 분석 소프트웨어 개발

최요순^{1)*} · 박형동²⁾ · 권현호³⁾

Software for Hydrological Analysis of Tailings Dam Using GIS and ASI Algorithm

Yosoon Choi*, Hyeong-Dong Park and Hyun-Ho Kwon

Abstract : This paper presents new software for analyzing the hydrological characteristics of drainage systems around tailings dams. The Adaptive Stormwater Infrastructure(ASI) algorithm, which incorporates a priori information on man-made water-handling structures with a Digital Elevation Model(DEM), was modified to consider effective rainfall for grid-based hydrological analysis. The ArcObjects programming using Visual Basic.NET was carried out to implement the software as an extension toolbar in ArcMap(part of ArcGIS software package). Application of the software to the Sangdong tailings dam revealed that the software can analyze surface runoff patterns during rainfall by considering both surface and underground hydraulic structures. The software is superior to a conventional hydrological analysis tool used in previous studies in terms of providing more reasonable hydrological information on a watershed of tailings dam. It is expected that the software can be effectively utilized to support the design of hydraulic structures in tailings dams.

Key words : Tailings dam, Hydrological analysis, GIS, Software, Mine reclamation

요 약 : 본 연구에서는 광미댐 인근 지역의 수문 분석을 위해 사용할 수 있는 새로운 소프트웨어를 개발하였다. 수치지형모델과 인공 수리 구조물에 대한 사전 정보를 결합할 수 있는 ASI 알고리즘을 개선하여 격자 기반의 수문 분석시 지역의 유효 유량 자료도 고려할 수 있도록 하였다. 소프트웨어 구현을 위해 Visual Basic.NET을 이용한 ArcObjects 프로그래밍을 수행하였으며, 그 결과 ArcGIS 소프트웨어의 제품군 중 하나인 ArcMap에서 확장 툴바 형태로 소프트웨어를 활용할 수 있었다. 개발된 소프트웨어를 상동광산 신평광미댐에 적용한 결과 지형 뿐만 아니라 지상, 지하 배수시설을 함께 고려하여 수문 분석을 수행할 수 있으며, 기존 연구에서 사용되었던 일반적인 수문 분석 도구와 비교할 때 보다 합리적인 분석 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 개발한 소프트웨어가 광미댐 배수시설 설계를 지원할 수 있는 도구로서 유용하게 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

주요어 : 광미댐, 수문 분석, 지리정보시스템, 소프트웨어, 광해방지

서 론

광미댐에는 지상 배수로, 수로터널 등과 같이 다양한 형태의 배수시설이 설치된다. 광미댐에 적절한 배수시설을 설치함으로써 적치된 광미와 물의 접촉을 최소화하

고, 지표수 침식에 의한 광미의 유실을 방지하며, 댐의 구조적 안정성을 확보할 수 있기 때문이다. 광미댐의 배수시설을 올바르게 설계하기 위해서는 수문 분석을 통해 강우시 지표수의 유출 특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 그러나 하나의 배출구를 가지는 일반적인 댐과 달리 광미댐의 경우에는 다양한 종류의 지상, 지하 배수시설이 복합적으로 운영되기 때문에 단순히 집수구역 전체의 총 유출량만을 계산하는 것은 배수시설 설계시 큰 도움이 되지 못한다(송영경 등, 2008). 따라서 광미댐의 배수시설을 효과적으로 설계하기 위해서는 지상, 지하 배수시설이 복합적으로 운영되는 광미댐의 특성을 고려할 수 있는 개선된 수문 분석 기법의 도입이 필요하다. 수문 분석을 위해 활용할 수 있는 기법들이 많은 연구

2011년 7월 5일 접수, 2011년 8월 26일 심사완료

2011년 9월 21일 게재확정

- 1) 부경대학교 에너지자원공학과
- 2) 서울대학교 에너지시스템공학부
- 3) 한국광해관리공단 광해사업본부

*Corresponding Author(최요순)

E-mail; energy@pknu.ac.kr; yspower7@gmail.com

Address; Department of Energy Resources Engineering,
Pukyong National University, Busan, Korea

자들에 의해 개발되었다(Fairfield and Leymarie, 1991; Freeman, 1991; Quinn et al., 1991; Costa-Cabral and Burges, 1994; Holmgren, 1994; Desmet and Govers, 1996; Garbrecht and Martz, 1997; Tarboton, 1997; Orlandini et al., 2003; Qin et al., 2007). 특히, 수치지형모델(Digital Elevation Model, DEM)로부터 빗물의 흐름방향, 누적흐름양, 집수구역과 같은 기초적인 수문 정보들을 자동으로 추출할 수 있는 8방향 단일 흐름 알고리즘(deterministic eight-direction (D8) single-flow algorithm)이 O'Callaghan and Mark(1984)에 의해 제안 되었으며, ArcGIS, IDRISI, GRASS, PCRaster 등의 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS) 소프트웨어에 구현되어 널리 활용되고 있다. 그러나 DEM만을 사용하는 기존의 수문 분석 알고리즘들은 자연 지형에 대해서는 효과적으로 적용될 수 있으나 인공적인 배수시설이 설치되어 있는 지역에는 적용하기 어려운 한계가 있다(Choi et al., 2011).

이러한 한계를 극복하기 위해 수문 분석시 인공적으로 설치된 배수시설을 고려할 수 있는 알고리즘이 개발되었다. Duke et al.(2003)는 도로 및 배수로에 의해 달라지는 빗물의 흐름방향을 수문 분석시 고려할 수 있는 Road Enforcement(RE) 알고리즘을 개발하였다. RE 알고리즘은 캐나다 앨버타 지역에서 도로 건설로 인해 수문학적으로 고립된 지역들을 분석하는데 효과적으로 활용되었다. Duke et al.(2006)는 Canal Enforcement(CE) 알고리즘을 개발하여 운하 건설에 의한 영향을 수문 분석시 반영할 수 있도록 하였다. RE 알고리즘과 CE 알고리즘은 자연 지형에서의 빗물의 흐름 방향과 인공적으로 설치된 배수시설에서의 빗물의 흐름 방향을 중첩하는 방법으로 수문 분석시 지상 배수시설을 고려할 수 있다. 그러나 배수 파이프, 배수터널 등과 같은 지하 배수시설의 영향은 반영하기 어려운 한계가 있다. Choi et al.(2011)는 지상, 지하 배수시설의 영향을 수문 분석시 복합적으로 고려할 수 있는 Adaptive Stormwater Infrastructure(ASI) 알고리즘을 개발하였다. ASI 알고리즘들은 기존의 알고리즘들과 비교할 때 지상, 지하 배수시설이 함께 설치되어 있는 지역에서 보다 합리적인 수문 분석 결과를 제공할 수 있다. 그러나 ASI 알고리즘들은 수문 분석시 지역의 유효 우량(effective rainfall)을 반영하지 못하며, 소프트웨어로 구현되어 있지 않기 때문에 광미댐 배수시설 설계와 같은 실무 작업에 쉽게 활용하기 어려운 한계가 있다.

본 연구의 목적은 GIS와 ASI 알고리즘을 이용하여 광미댐 배수시설 설계를 지원할 수 있는 수문 분석 소프트웨어를 개발하는 것이다. GIS 소프트웨어에 구현되어 있는 일반적인 수문 분석 알고리즘들이 광미댐 부근의 자연 지형만을 고려할 수 있는 한계를 극복하여 자연 지형

은 물론 지상, 지하 배수시설의 영향까지 함께 반영하여 수문 분석을 수행할 수 있는 소프트웨어를 개발하고자 한다. 본 논문에서는 ASI 알고리즘의 원리와 개선 방법, 소프트웨어의 개발 방법을 설명한 후, 상동광산 신광미댐을 대상으로 개발된 소프트웨어를 적용한 결과를 제시한다.

ASI 알고리즘의 원리

ASI 알고리즘은 배수로, 도로, 배수터널, 맨홀 등 다양한 지상, 지하 배수시설이 빗물의 흐름에 미치는 영향을 격자 기반의 수문 분석 과정에서 고려할 수 있도록 설계되었다. ASI 알고리즘의 자료처리 절차는 8단계로 구성된다(Fig. 1). 첫 번째 단계에서는 다음과 같이 세 개의 격자 기반의 입력 자료들과 한 개의 테이블을 GIS 데이터베이스로부터 입력 받는다.

- DEM: 수문 분석을 수행하기 위해 DEM 자료는 필수적으로 요구된다. 자연 환경에서 함몰된 지형은 상대적으로 적기 때문에(O'Callaghan and Mark, 1984; Tribe, 1992), DEM 상에 함몰된 격자들이 존재한다면 전처리 과정을 통해 제거해 주어야 한다. 단, 함몰된 격자들이 카르스트 지형, 노천광산 등 실제 함몰된 지형을 나타내는 경우는 제거하지 않는다(최요순 등, 2006; Choi et al., 2008; 최요순 등, 2009; 최요순과 박형동, 2011).
- 지상 배수시설을 따라 나타나는 빗물의 흐름 방향:

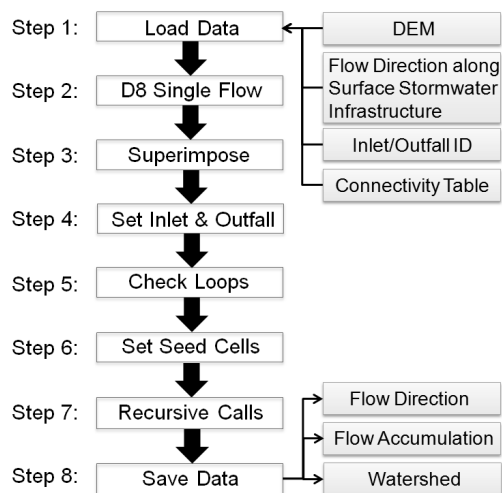


Fig. 1. Procedures of the Adaptive Stormwater Infrastructure (ASI) algorithm.

```

1: Procedure ASI_FUNCTION(x, y, id)
2:   For each D8NEIGHBOR(i, j) draining into the cell
3:     Recursive call of ASI_FUNCTION(i, j, id)
4:     D8ACCUM(x, y) = D8ACCUM(x, y) + D8ACCUM(i, j) + 1
5:   If the cell represents an outfall in the underground stormwater conveyance system
6:     For each INLET(p, q) connecting to the cell
7:       // (option 1) id2 = id
8:       // (option 2) id2 = unique ID of the outfall
9:       // (option 3) id2 = unique ID of the inlet
10:      Recursive call of ASI_FUNCTION(p, q, id2)
11:      D8ACCUM(x, y) = D8ACCUM(x, y) + D8ACCUM(p, q) + 1
12:   D8WATERSHED(x, y) = id
13: End of Procedure

```

Fig. 2. Simplified pseudo-code of the recursive function used in the ASI algorithm. Arrays are shown in italics (Choi et al., 2011).

일반적으로 지상 인공 수리 구조물들은 중력의 힘을 이용하여 물의 흐름 방향을 제어하는 경우가 대부분이다. 따라서 8방향 단일 흐름 알고리즘을 사용하여 지상 배수시설을 따라 나타나는 빗물의 흐름 방향에 대한 정보를 추출할 수 있다(Duke et al., 2006).

- 지하 배수시설의 유입구와 유출구의 위치정보: 각각의 유입구와 유출구에 고유한 ID를 부여하여 격자 기반의 자료로 표현한다.
- 지하 배수시설의 유입구와 유출구들의 연결 관계를 나타내는 테이블: 만약 지하 배수시설에 N개의 유입구와 M개의 유출구가 연결되어 있다면 연결성 테이블은 N개의 행과 M개의 열로 구성된다. 각각의 유출구와 유입구가 연결되어 있다면 연결성 테이블의 값으로 1이 할당되며, 연결되지 않는 경우에는 0이 할당된다.

ASI 알고리즘의 두 번째 단계에서는 8방향 단일 흐름 알고리즘과 동일한 방법으로 DEM으로부터 자연 지형에서의 빗물 흐름 방향을 결정한다. 관심 격자보다 주변의 8방향 격자들의 고도가 높아 빗물의 흐름 방향을 결정할 수 없는 경우에는 'undefined' 코드가 할당되며, 이는 카르스트 지형과 같은 실제 함몰된 지형들을 나타낸다. 세 번째 단계에서는 지상 배수시설에 의한 빗물의 흐름 방향을 자연 지형에 의한 빗물의 흐름 방향과 중첩시킨다. 그 결과 지상 배수시설의 영향을 반영한 빗물의 흐름 방향 자료가 생성된다. 네 번째 단계에서는 지하 배수시설의 유입구와 유출구의 위치를 고려한다. 만약 유입구가 존재하는 경우에는 앞서 생성된 빗물의 흐름 방향 값을 'undefined'로 바꿔준다. 이는 유입구에 도달한 빗물은 주변의 자연 지형이 아닌 지하 배수시설을 통해 이

동한다고 가정했기 때문이다.

다섯 번째 단계에서는 빗물의 흐름 방향에 따라 격자를 추적할 경우 무한 루프가 발생하는지 확인한다. 자연 지형에서 빗물 흐름 방향의 무한 루프가 발생하는 경우는 거의 존재하지 않지만, 배수시설이 설치된 경우에는 무한 루프가 발생할 수 있다(Choi et al., 2011). ASI 알고리즘은 빗물의 누적흐름량과 집수구역을 분석하기 위해 재귀적 함수(recursive function)를 호출하기 때문에 빗물의 흐름 방향에 무한 루프가 존재할 경우 오류가 발생한다. 따라서 무한 루프가 존재할 경우에는 무한 루프에 포함된 격자들 중 하나를 무작위로 선택한 후 빗물의 흐름 방향으로 'undefined' 코드를 할당한다. 여섯 번째 단계에서는 재귀적 함수를 최초로 호출할 격자(seed cell)를 선택한다. 격자 기반 자료의 외각 경계(boundary)에 존재하는 유출 지점과 실제 존재하는 함몰 지형들이 재귀적 함수를 최초로 호출할 수 있는 격자들에 해당한다. 일곱 번째 단계에서는 Fig. 2와 같은 재귀적 함수를 호출하여 빗물의 누적흐름량과 집수구역을 분석한다. 빗물의 집수구역을 구분하는 방법으로 ASI 알고리즘은 다음과 같이 3개의 옵션을 제공한다.

- 집수구역의 유출 지점을 기준으로 ID를 할당하여 구분
- 지하 배수시설의 유출구를 기준으로 ID를 할당하여 구분
- 지하 배수시설의 유입구를 기준으로 ID를 할당하여 구분

ASI 알고리즘의 마지막 단계에서는 수문 분석 결과가 빗물의 흐름방향, 누적흐름량, 집수구역의 파일로 출력된다.

ASI 알고리즘의 개선

ASI 알고리즘이 수문 분석시 지역의 유효 우량을 반영하지 못하는 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 ASI 알고리즘의 개선 방안을 Fig. 3과 같이 제안하였다. 지역의 유효 우량 산정 결과를 알고리즘의 입력 자료로 추가하였으며, 지하 배수시설의 유입구와 유출구를 별도의 파일로 구분하여 동일한 격자 내에 유출구와 유입구가 함께 위치할 경우에도 알고리즘을 적용할 수 있도록 하였다. 알고리즘의 일곱 번째 자료처리 단계에서 호출되는 재귀적 함수는 격자 별로 입력된 유효 우량 값을 기준으로 빗물의 누적흐름량을 계산할 수 있도록 Fig. 4와 같이 수정하였다.

Fig. 5는 지하 배수터널이 설치된 지역에서 기존의 ASI 알고리즘과 개선된 ASI 알고리즘을 적용할 경우 출력되는 빗물의 누적흐름량 산정 결과를 비교한 것이다. 기존의 ASI 알고리즘은 실제 유효 우량을 반영하지 않

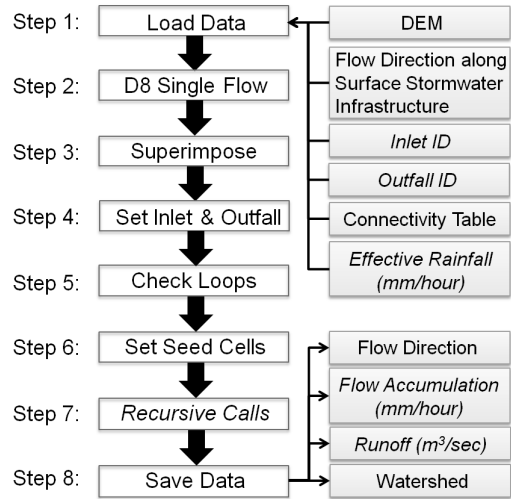


Fig. 3. Procedures of the ASI algorithm modified in this study. Modifications are shown in italics.

```

1: Procedure ASI_FUNCTION (x, y, id)
2:   For each D8NEIGHBOR (i, j) draining into the cell
3:     Recursive call of ASI_FUNCTION (i, j, id)
4:     D8ACCUM(x, y) = D8ACCUM(x, y) + D8ACCUM(i, j) + Effective Rainfall(mm)
5:   If the cell represents an outfall in the underground stormwater conveyance system
6:     For each INLET (p, q) connecting to the cell
7:       // (option 1) id2 = id
8:       // (option 2) id2 = unique ID of the outfall
9:       // (option 3) id2 = unique ID of the inlet
10:      Recursive call of ASI_FUNCTION (p, q, id2)
11:      D8ACCUM(x, y) = D8ACCUM(x, y) + D8ACCUM(p, q) + Effective Rainfall(mm)
12:    D8WATERSHED(x, y) = id
13: End of Procedure
    
```

Fig. 4. Simplified pseudo-code of the recursive function used in the ASI algorithm modified in this study. Modifications are shown in bold.

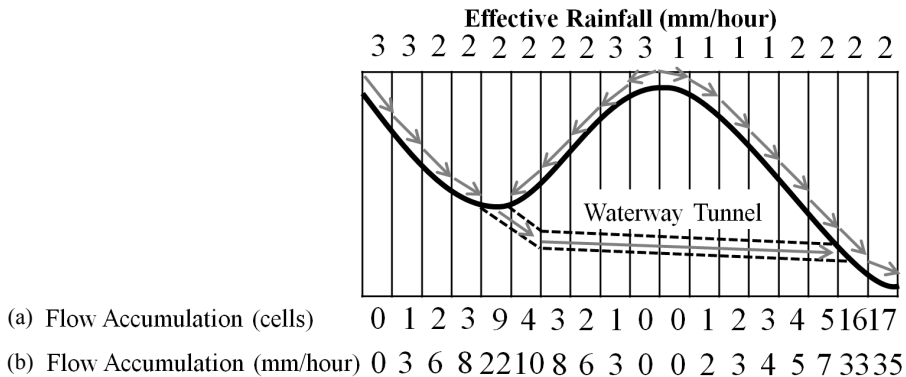


Fig. 5. Comparison of (a) flow accumulation generated by the original ASI algorithm and (b) the one generated by the ASI algorithm modified in this study.

고 격자의 수를 기준으로 누적흐름량을 계산하는 반면, 개선된 ASI 알고리즘은 유효 우량을 반영하여 빗물의 누적흐름량을 산정한다. 따라서 개선된 ASI 알고리즘을 이용하여 소프트웨어를 개발할 경우 광미댐 배수시설 설계에 보다 도움이 되는 수문 분석 결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

소프트웨어 개발

개선된 ASI 알고리즘을 광미댐 수문 분석에 활용할 수 있도록 ArcMap의 확장 툴바 형태로 소프트웨어를 개발하였다(Fig. 6). ArcMap은 ArcGIS 소프트웨어의 제품군 중의 하나로서 2차원 지도 생성과 공간분석을 수행할 수 있는 도구이다. ArcMap은 Component Object Model(COM) 기반으로 개발되었기 때문에, COM을 지원하는 C#, C++, Visual Basic 등을 이용하여 기능을 확장할 수 있다. 본 연구에서 Visual Basic.NET 2008을 이용하여 광미댐 수문 분석 소프트웨어를 개발한 후 ArcMap의 확장 툴바로 추가하였다. 개발된 소프트웨어는 마이크로소프트 윈도우즈 운영체제(i.e., XP, Vista, 7)가 설

치된 PC에서 사용이 가능하며, 입출력 파일 포맷으로 ArcGIS 소프트웨어에서 사용되는 ESRI ASCII Grid 포맷을 사용한다. 지하 배수시설 유입구와 유출구의 연결성 테이블 자료는 Comma-Separated Values(CSV) 파일 포맷을 사용한다.

ArcMap에 추가된 확장 툴바의 버튼(Fig. 6(a))을 클릭하면 광미댐 수문 분석을 수행할 수 있는 사용자 인터페이스가 나타난다(Fig. 6(b)). 사용자 인터페이스를 통해 DEM, 지상 배수시설, 지하 배수시설, 유효 우량, 배수시설 연결성 테이블 자료들을 입력할 수 있으며, 출력될 결과 파일들의 경로와 이름을 설정할 수 있다. 입출력 자료의 설정을 완료한 후 수문 분석 버튼을 클릭하면 개선된 ASI 알고리즘의 절차(Fig. 3)에 따라 자료처리가 수행되며, 그 결과는 지도 형식으로 ArcMap에서 확인할 수 있다.

수문 분석을 수행한 후 배수로 단면설계 버튼을 클릭하면, Fig. 6(c)와 같이 지상 배수로 또는 지하 배수터널의 단면적 크기를 계산할 수 있는 도구가 나타난다. 배수시설의 단면적 계산에는 Manning 공식(홍창선 등, 2002)이 다음과 같이 사용되었다.

$$A' = \alpha \times A \quad (1)$$



Fig. 6. Graphical user interface of the software developed in this study. (a) ArcMap extension toolbar. (b) Hydrological analysis tool. (c) Hydraulic design tool.

$$A = \left(\frac{n \times Q}{R^{(2/3)} \times I^{(1/2)}} \right) \quad (2)$$

여기서 A' 은 배수시설의 단면적(m^2), α 는 안전계수, A 는 유수 단면적(m^2), n 은 조도계수, Q 는 초당 배수량(m^3/sec), R 은 경심(수로의 횡단면에서 물과 접하고 있는 벽면/유수 단면적), I 는 수로의 경사(m/m)를 의미한다.

사례연구

본 연구에서 개발된 소프트웨어를 이용하여 상동광산 신평미담 지역에 대한 사례연구를 수행하였다(Fig. 7). 연구지역의 면적은 $8.22 \text{ km}^2 (2740 \times 3000 \text{ m})$ 이다. 1:5000 축척의 수치지형도를 사용하여 10 m 해상도의 DEM을 생성하였고, 전치리를 통해 불필요한 함몰 격자들을 제거하였다. 연구지역의 지형은 가장 높은 곳의 고도가 해발 1065 m이며 가장 낮은 곳은 480 m이다. 대상지역의 평균 지형 경사는 30도이며 광미가 매립되어 있는 지역은 거의 평지에 가깝다. 평지 지형에 대해서는 빗물의 흐름 방향이 결정될 수 있도록 relief 알고리즘(Martz and Garbrecht, 1992; Garbrecht and Martz, 1997)을 이용하

여 DEM 자료의 전치리를 수행하였다. 연구지역에는 2개의 지상 배수로와 3개의 지하 배수터널이 설치되어 있다(Fig. 7(d)). D8 단일 흐름 알고리즘을 이용하여 지상 배수로를 따라 흐르는 빗물의 방향을 분석하였고, 그 결과를 ESRI ASCII Grid 포맷으로 저장하여 소프트웨어의 입력자료로 사용하였다. 또한, Fig. 7(d)를 참조하여 지하 배수터널의 유입구의 위치, 유출구의 위치, 연결성 테이블의 입력자료들을 생성하였다.

소프트웨어에 입력될 유효 우량 자료를 생성하기 위해 유출곡선지수(runoff Curve Number, CN)를 사용하는 SCS(U.S. Soil Conservation Service) 방법을 사용하였다. SCS 방법을 이용하면 강우가 발생하기 이전의 선행 토양함수조건과 집수구역을 형성하고 있는 토양의 종류, 토지이용상태, 식생피복의 처리상태, 토양의 수문학적조건 등의 인자들을 고려하여 유효 우량을 정량적으로 산정할 수 있다.

$$Q = \frac{\left\{ P - 0.2 \times \left(\frac{25,400}{CN} - 254 \right) \right\}^2}{P + 0.8 \times \left(\frac{25,400}{CN} - 254 \right)} \quad (3)$$

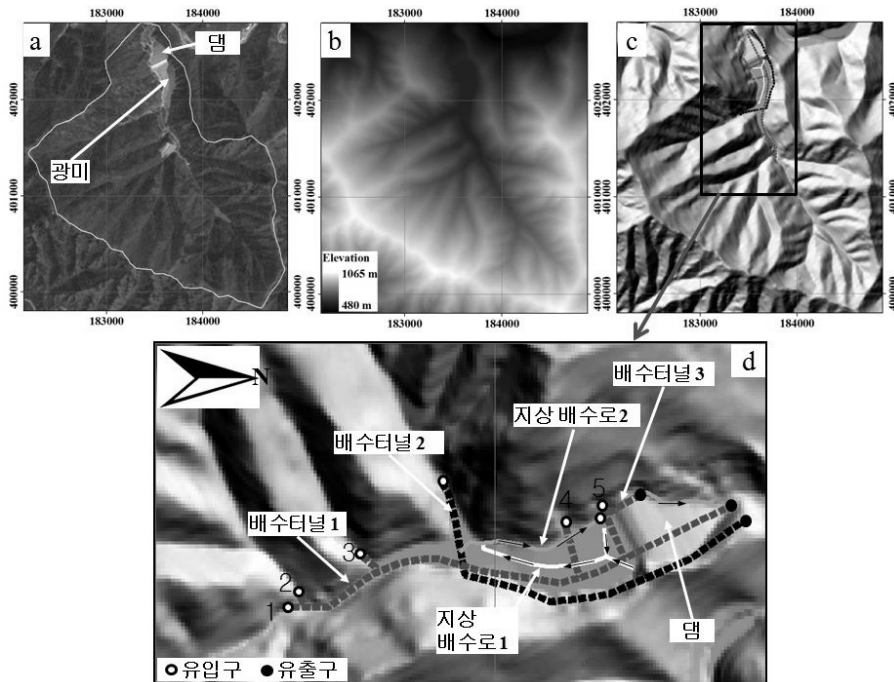


Fig. 7. Study area. (a) Satellite image of the Sangdong tailings dam. The white line indicates the boundary of the watershed containing the tailings impoundment. The unit of reference grid is meters. (b) DEM. (c) Shaded relief map. (d) Enlargement of the area containing ditches and underground waterway tunnels.

여기서 Q 는 유효 우량(mm), P 는 강우량(mm), CN 은 유출곡선지수를 의미한다.

본 연구에서는 송원경 등(2008)이 제시한 상동광산 신광미댐 지역의 유출곡선지수(Fig. 8(a))와 상동지역 100년 빈도 1시간 강우량(80.31 mm)을 이용하여 Fig. 8(b)와 같이 연구지역의 시간당 유효 우량 자료를 생성하였다. 광미댐 배수시설의 단면적을 보수적으로 계산하기 위해 강우의 지속시간이 홍수도달시간 이상으로 충분히 길다고 가정하였다.

연구지역에서 배수시설의 설치 조건에 따라 상이하게 나타날 수 있는 수문 분석 결과를 비교하기 위해 다음과 같이 세 가지 시나리오를 설정하였다(see Fig. 7(d)).

- 시나리오 1: 지상 배수로 1과 2, 배수터널 3이 설치된 경우
- 시나리오 2: 지상 배수로 1과 2, 배수터널 2와 3이 설치된 경우
- 시나리오 3: 지상 배수로 1과 2, 배수터널 1, 2, 3이 설치된 경우

Fig. 9는 세 가지 시나리오에 대하여 연구지역의 초당 유출량을 분석한 결과를 보여준다. 첫 번째 시나리오의 결과(Figs. 9(a), 9(b), 9(c))에서는 사면에서 내려오는 빗물이 모두 지상 배수로 2를 따라 집중되는 것을 볼 수 있다. 배수터널 3은 댐체에 의해 분리된 지상 배수로 2의 상부와 하부를 연결해 주는 역할을 담당한다. 두 번째 시나리오의 결과(Figs. 9(d), 9(e), 9(f))에서는 서쪽 사면에서 내려오는 빗물의 일부가 지상 배수로 2를 따라 흐

르지 않고, 배수터널 2의 유입구로 흘러들어간 후 댐체 하부에 위치한 배수터널 2의 유출구로 나오는 것을 확인할 수 있다. 배수터널 1, 2, 3이 모두 고려된 세 번째 시나리오의 수문 분석 결과(Figs 9(g), 9(h), 9(i))에서는 남쪽 사면에서 내려오는 빗물이 배수터널 1의 유입구 1, 2, 3(Fig. 7(d))으로 들어간 후 댐체 하부의 유출구로 나오는 패턴이 나타났으며, 서쪽 사면에서 내려오는 빗물이 배수터널 1의 유입구 4, 5와 배수터널 2의 유입구로 흘러들어 가는 것을 볼 수 있었다. 세 개의 시나리오에 대한 수문 분석 결과들은 공통적으로 지상 배수로 1, 2가 빗물의 흐름에 미치는 영향을 반영하고 있으며, 지하 배수터널의 설치 조건에 따라 배수터널의 유입구와 유출구가 위치한 지점을 중심으로 상이한 유출 패턴을 보인다. 따라서 개발된 소프트웨어가 광미댐 수문 분석시 자연 지형은 물론 지상, 지하 배수시설의 영향을 잘 반영할 수 있음을 알 수 있다. GIS 소프트웨어에 일반적으로 구현되어 있는 8방향 단일 흐름 알고리즘을 적용했을 때의 수문 분석 결과(Fig. 10)는 배수시설의 영향을 전혀 반영하지 못한다는 점을 고려할 때, 본 연구에서 개발된 소프트웨어가 보다 합리적인 광미댐 수문 분석 결과를 제공할 수 있는 것으로 판단된다.

세 가지 시나리오에서 도출된 유출량 자료들을 이용하여 연구지역에 설치된 지상 배수로 1, 2와 배수터널 1, 2, 3의 유입구/유출구 단면적을 산정하였다(Table 1). 배수시설의 조도계수는 콘크리트 관의 값(0.011–0.015) 중에서 배수효율이 가장 낮은 0.015를 적용하였으며, 안전계수는 우수 단면적이 배수시설 단면적의 80%를 차지한다고 가정하여 1.25를 사용하였다. 경심의 경우에는

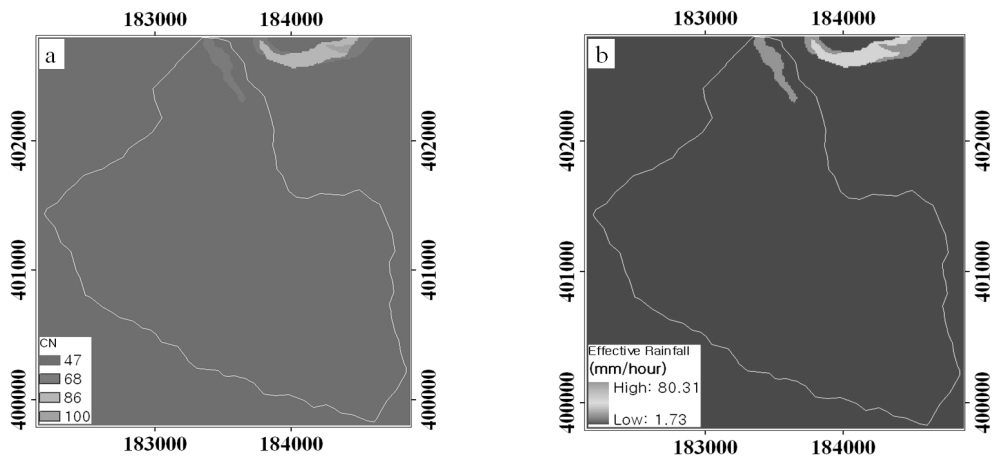


Fig. 8. (a) Runoff curve number(CN) and (b) effective rainfall of the study area. The white line indicates the boundary of the watershed containing the tailings impoundment.

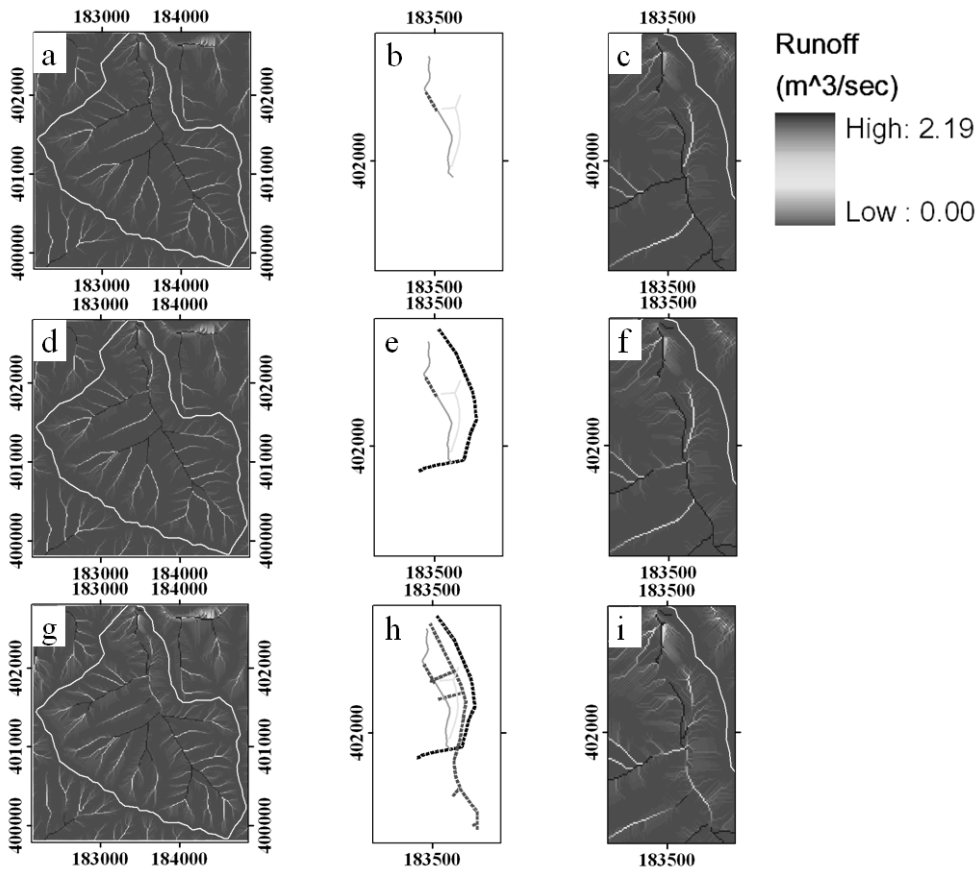


Fig. 9. Scenario 1: (a) surface runoff of the study area, (b) enlargement of the area containing ditches 1, 2 and underground waterway tunnel 3, and (c) surface runoff of the enlarged area. Scenario 2: (d) surface runoff of the study area, (e) enlargement of the area containing ditches 1, 2 and underground waterway tunnels 2, 3, and (f) surface runoff of the enlarged area. Scenario 3: (g) surface runoff of the study area, (h) enlargement of the area containing ditches 1, 2 and underground waterway tunnels 1, 2, 3, and (i) surface runoff of the enlarged area.

배수터널에는 0.45, 지상 배수로 1에는 0.30, 지상 배수로 2에는 0.60을 적용하였으며, 수로 경사는 연구지역의 지형을 고려하여 설정하였다. Table 1의 결과를 살펴보면 배수로 2의 단면적이 시나리오 별로 다르게 산정되는 것을 볼 수 있다. 시나리오 1의 경우에는 빗물이 지상 배수로 2를 따라 집중되기 때문에 보다 큰 단면적의 배수로가 필요하며, 시나리오 3의 경우에는 빗물이 배수터널 1, 2를 통해 분산되어 담체 하부로 흘러내려 가기 때문에 지상 배수로 2의 단면적이 작아진다. Table 1의 결과는 100년 빈도 1시간 강우량(80.31 mm) 조건에서 시나리오 별로 배수시설에 요구되는 최소한의 단면적을 의미한다. 따라서 현장에서의 시공 편의성을 고려하여 최소 단면적 이상으로 배수시설을 설계해야 할 것으로 판단된다.

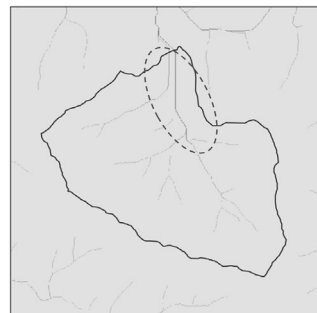


Fig. 10. Surface runoff patterns around the Sangdong tailings dam analyzed by using the D8 single flow algorithm(송원경 등, 2008). Surface runoff patterns due to ditches and underground waterway tunnels are not seen in the dotted ellipse.

Table 1. Section areas of hydraulic structures at different scenarios

시나리오	배수시설	유출량 (m ³ /sec)	경심	관로경사	유수 단면적 (m ²)	단면적 (m ²)	
1	배수터널 3 유입구	1.94	0.45	0.01	0.495	0.619	
	배수터널 3 유출구	1.94		0.01	0.497	0.621	
	지상 배수로 1	0.09	0.30	0.30	0.006	0.007	
	지상 배수로 2	1.99	0.60	0.01	0.420	0.525	
2	배수터널 2 유입구	0.36	0.45	0.02	0.061	0.076	
	배수터널 2 유출구	0.36		0.02	0.061	0.076	
	배수터널 3 유입구	1.58	0.01	0.403	0.504		
	배수터널 3 유출구	1.58	0.01	0.405	0.506		
	지상 배수로 1	0.09	0.30	0.30	0.006	0.007	
	지상 배수로 2	1.63	0.60	0.01	0.334	0.430	
3	배수터널 1 유입구-1*	0.76	0.45	0.03	0.108	0.135	
	배수터널 1 유입구-2*	0.50		0.12	0.037	0.046	
	배수터널 1 유입구-3*	0.08		0.18	0.005	0.006	
	배수터널 1 유입구-4*	0.01		0.18	0.001	0.001	
	배수터널 1 유입구-5*	0.01		0.02	0.002	0.003	
	배수터널 1 유출구	1.36		0.09	0.119	0.149	
	배수터널 2 유입구	0.36		0.02	0.061	0.076	
	배수터널 2 유출구	0.36		0.02	0.061	0.076	
	배수터널 3 유입구	0.23		0.01	0.056	0.073	
	배수터널 3 유출구	0.23		0.01	0.058	0.073	
	지상 배수로 1	0.09		0.30	0.30	0.006	0.007
	지상 배수로 2	0.28		0.60	0.01	0.058	0.073

* IDs of the inlets are presented in Fig. 7(d).

결 론

본 연구에서는 GIS와 ASI 알고리즘을 이용하여 광미댐 배수시설 설계를 지원할 수 있는 수문 분석 소프트웨어를 개발하였다. ASI 알고리즘을 개선하여 지역의 유효우량을 반영하여 수문 분석을 수행할 수 있도록 하였으며, ArcGIS 소프트웨어의 2차원 지도제작 및 분석 도구인 ArcMap의 확장 툴바 형태로 소프트웨어를 구현하여 광미댐 배수시설 설계와 같은 실무 작업에 쉽게 활용할 수 있도록 하였다. 사례연구로서 상동광산 신광미댐을 연구지역으로 설정하고 개발된 소프트웨어를 이용하여 수문 분석을 수행하였다. 지상 배수로와 지하 배수터널의 설치에 대한 세 가지 시나리오를 고려한 결과, 개발된 소프트웨어가 시나리오 별로 지상, 지하 배수시설의 영향을 반영하여 수문 분석을 효과적으로 수행할 수 있음을 확인

할 수 있었다. 동일한 연구지역을 대상으로 수문 분석을 수행했던 기존의 연구(송원경 등, 2008)와 비교할 때, 본 연구에서 개발된 소프트웨어는 자연 지형은 물론 지상, 지하 배수시설을 함께 고려할 수 있으므로 보다 합리적인 광미댐 수문 분석 결과를 제공한다고 판단된다.

개발된 소프트웨어를 사용하여 100년 빈도 1시간 강우량(80.31 mm) 조건에서 연구지역의 배수시설에 요구되는 최소 단면의 크기를 계산한 결과, 지상 배수로 1, 2와 배수터널 3이 고려된 첫 번째 시나리오에서는 지상 배수로 2의 단면 크기가 0.525 m² 이상이 되어야 하는 것으로 계산되었다. 반면, 지상 배수로 1, 2와 배수터널 1, 2, 3이 설치되는 세 번째 시나리오에서는 지상 배수로 2의 단면 크기가 0.073 m² 이상으로 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 시나리오에 따라 배수시설의 단면 크기가 상이하게 계산되는 것은 개발된 소프트웨어가 수문 분석

시 지상, 지하 배수시설의 영향을 반영할 수 있기 때문이다. 향후 연구로서 이동길 등(2008)이 제안한 광미적치장의 경제성 분석 기법 등을 접목할 경우 보다 합리적으로 광미댐의 설계를 지원할 수 있을 것이다.

본 연구에서 개발된 소프트웨어는 광미댐 수문 분석을 주요 목적으로 하였으나, 광미댐 뿐만 아니라 지상, 지하 배수시설이 설치되어 있는 지역에 대하여 범용적으로 활용이 가능하다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어가 배수 시설의 설계를 지원할 수 있는 수문 분석 도구로서 유용하게 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

사 사

본 연구는 한국광해관리공단 광해방지기술개발사업(광산 GIS 분야)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 송원경, 허승, 김태혁, 2008, "GIS 기법을 이용한 광미댐 수문 분석," *터널과 지하공간(한국암반공학회지)*, 제18권 5호, pp. 375-385.
- 이동길, 송원경, 정영욱, 정명채, 임길재, 윤석호, 권현호, 2008, "광미적치장의 최적 처리방안 선정을 위한 경제성 분석 연구," *한국지구시스템공학회지*, 제45권 6호, pp. 663-672.
- 최요순, 선우춘, 박형동, 2006, "광해방지를 위한 대규모 석탄 노천광의 배수설계 최적화," *한국지구시스템공학회지*, 제43권 5호, pp. 429-438.
- 최요순, 오승찬, 박형동, 권현호, 윤석호, 고와라, 2009, "폐탄광 지역 산림훼손지 복구를 위한 GIS 기반의 의사결정 지원시스템 개발," *한국지구시스템공학회지*, 제46권 6호, pp. 691-702.
- 최요순, 박형동, 2011, "대규모 노천광산의 채굴적 하단 저수지 설계를 위한 GIS 모델링," *한국지구시스템공학회지*, 제48권 2호, pp. 165-177.
- 홍창선, 백경원, 심우배, 2002, *수문학*, 일진사, 서울, pp. 196-198.
- Choi, Y., Park, H.D. and Sunwoo, C., 2008, "Flood and gully erosion problems at the Pasir open pit coal mine, Indonesia: a case study of the hydrology using GIS," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 67, No. 2, pp. 251-258.
- Choi, Y., Yi, H. and Park, H.D., 2011, "A new algorithm for grid-based hydrologic analysis by incorporating storm-water infrastructure," *Computers & Geosciences*, Vol. 37, No. 8, pp. 1035-1044.
- Costa-Cabral, M.C. and Burges, S.J., 1994, "Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas," *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 1681-1692.
- Desmet, P.J.J. and Govers, G., 1996, "Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies," *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 311-331.
- Duke, G.D., Kienzle, S.W., Johnson, D.L. and Byrne, J.M., 2003, "Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into Digital Elevation Models," *Journal of Spatial Hydrology*, Vol. 3, No. 2, pp. 1-27.
- Duke, G.D., Kienzle, S.W., Johnson, D.L. and Byrne, J.M., 2006, "Incorporating ancillary data to refine anthropogenically modified overland flow paths," *Hydrological Processes*, Vol. 20, No. 8, pp. 1827-1843.
- Fairfield, J. and Leymarie, P., 1991, "Drainage networks from grid digital elevation models," *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 709-717.
- Freeman, T.G., 1991, "Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid," *Computers & Geosciences*, Vol. 17, No. 3, pp. 413-422.
- Garbrecht, J. and Martz, L.W., 1997, "The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models," *Journal of Hydrology*, Vol. 193, No. 1-4, pp. 204-213.
- Holmgren, P., 1994, "Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation," *Hydrological Processes*, Vol. 8, No. 4, pp. 327-334.
- Martz, L.W. and Garbrecht, J., 1992, "Numerical definition of drainage network and sub-catchment areas from Digital Elevation Models," *Computers & Geosciences*, Vol. 18, No. 6, pp. 747-761.
- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M., 1984, "The extraction of drainage networks from digital elevation data," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 28, No. 3, pp. 323-344.
- Orlandini, S., Moretti, G., Franchini, M., Aldighieri, B. and Testa, B., 2003, "Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models," *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 6, p. 1144.
- Qin, C., Zhu, A.-X., Pei, T., Li, B., Zhou, C. and Yang, L., 2007, "An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm," *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 21, No. 4, pp. 443-458.

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O., 1991, "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models," *Hydrological Processes*, Vol. 5, No. 1, pp. 59-79.

Tarboton, D.G., 1997, "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models," *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 309-319.

Tribe, A., 1992, "Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models : a review and a new method," *Journal of Hydrology*, Vol. 139, No. 1-4, pp. 263-293.

최요순

현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 전임강사
(本學會誌 第48卷 第2号 參照)

박형동

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
(本學會誌 第47卷 第4号 參照)

권현호

현재 한국광해관리공단 광해사업본부 본부장
(本學會誌 第47卷 第5号 參照)
