

고정밀 LiDAR DEM을 이용한 토공량 계산 프로그램 개발

Development of Earth-Volume Estimation Program using the precise LiDAR DEM

이진녕* 이동하** 이영균*** 서용철****
Jin Nyoung Lee Done Ha Lee Young Kyun Lee Yong Cheol Suh

요약 본 연구에서는 3차원 지형공간정보를 기반으로 한 정밀한 토공량 모델링을 통해 토목 건설공사의 효율성을 향상시키기 위한 토공량 계산 프로그램인 EWS 프로그램을 개발하였다. EWS 프로그램은 LiDAR DEM을 이용한 정확한 토공량 계산과 건설장비의 단위 작업량을 기반으로 한 토공 공정계획 수립이 가능하도록 개발되었다. 또한 계산된 결과를 건설현장에서 보다 직관적인 이해하고 이에 따른 분석 결과를 쉽게 공유할 수 있도록 하기 위해 Google Earth를 이용한 3D 가시화도 지원이 가능하다. 개발된 프로그램의 현장 적용성 검증을 위해 DAS 프로그램과의 토공량 계산 결과 및 토공 이동계획을 비교하였으며, 검증을 위한 대상지역으로 경기도 포천시 신북면 일원의 신포천 변전소 건설현장을 선정하였다. 최종적인 비교 결과, 본 연구에서 개발된 EWS 프로그램을 이용하는 경우 정밀한 3차원 지형공간정보를 통해 정확한 토공량 계산이 가능하며, 보다 합리적인 토량 이동계획 및 토공작업의 수립할 수 있어 건설현장에서의 생산성 향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

키워드 : 토공량 계산, 3차원 지형공간정보, LiDAR DEM, EWS 프로그램, DAS 프로그램

Abstract In this study, EWS (Earth Work System), the earth-volume estimation program was developed in a way that could enhance efficiency of civil engineering construction through precise earth-volume modeling based on the 3D geospatial information. In this program, it is possible to estimate the precise earth-volume using LiDAR DEM and to establish the earth work plans based on the unit workload of the construction equipments. Also, EWS program can support the 3D visualization of the final results through Google Earth in order to understand intuitively or share the results of earth-volume estimation in the construction project. For verifying the possibility of applying EWS program to construction project, the construction site of Shin-Pochun substation in Shinbuk-myun, Pochon-City, Kunggi Province was selected as a study area and the results of earth-volume and earth work plans estimated from EWS program were compared with those of DAS program. As a result of comparison between EWS and DAS program, the more accurate earth-volume can be estimated by using 3D geospatial information and more reasonable earth work plan can also be established when use the EWS program was developed in this study. Thus, EWS program can enables improvement of productivity by establishing efficient construction plan in the construction site.

Keywords : Earth-volume Estimation, 3D Geospatial Information, LiDAR DEM, EWS Program, DAS Program

† 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3111)의 지원으로 수행되었습니다.

* 건국대학교 토목공학과 공학박사 ljny2k@empal.com

** 성균관대학교 공과대학 겸임교수 dhlee.skku@gmail.com

*** (주)엠앤소프트 OEM 개발팀 공학석사 yklee02@naver.com

**** 부경대학교 위성정보과학과 조교수 suh@pknu.ac.kr(교신저자)

1. 서론

토공량은 최적 공사비 산정을 위한 기초 데이터로서 토공량의 정밀도에 따라 공사비 산정에 영향을 미치는 중요한 요소이다[20]. 정확한 토공량을 계산하기 위해서는 계산 시에 크게 2가지의 요소를 고려하여야 하는데, 이는 1) 공사가 수행되는 지형의 형태를 정밀하게 표현할 수 있는 지형자료와 2) 이에 적합한 토공량 계산과정의 적용, 그리고 이를 기반으로 한 3) 효율적 토공계획의 수립 및 시각화로 구분된다. 따라서 현재 이러한 3가지 요소를 고려하여 정확한 토공량을 계산하고, 효율적 토공계획을 수립하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.

최근에는 토공량 계산을 위한 정밀한 지형자료의 취득을 위해 항공 LiDAR, 3D 레이저스캐닝, GPS 및 GIS와 같은 최신의 측량기술 및 자료처리 기술을 이용하고 있는데, 이 중 항공 LiDAR를 이용한 대표적인 연구로 Shan 등[9]은 LiDAR 원시자료를 지면점과 비지면점으로 구분하여 도시지역의 DEM을 제작하였으며, 이동천 등[17]은 항공LiDAR 데이터를 이용하여 수치지형도 제작에 필요한 건물 및 등고선을 추출하기 위하여 항공LiDAR 데이터의 전처리 과정과 단계별 처리과정에 관련된 다양한 조건의 영향과 정확도를 평가한 연구를 수행하였다. 또한 이동천 등[18]은 지형의 특성에 따라 특이점(model keypoints)의 구성조건을 서로 다르게 적용하여 지형도에 필수적으로 포함되는 등고선을 자동으로 생성하고, 그 정확도의 평가를 수행하였으며, 위광재 등[16]에 의해서는 항공LiDAR 데이터를 현지측량 기준점을 사용하여 수평, 수직 성분으로 각각 구분하여 정확도를 제시하는 연구가 수행되었다. 이와 더불어 3D 레이저 스캐닝 기술을 통해 3차원 공간정보를 획득하여 토공량을 산정하는 연구도 다양하게 수행되었는데, Qiang 등[11]은 3D 레이저스캐닝 자료를 취득하여 노천광산의 토공량 계산에 활용하였으며, Kazuhiro[5]은 임도의 설계 시에 3D 레이저스캐닝 기술을 적용하여 노선의 선정과 정확한 토공량 산정에도 적용하였다. 또한 3D 레이저스캐닝 기술을 정밀 GPS 해석기술과 결합하여 산사태 지역의 토공량 결정에 활용한 연구도 수행되었으며[3], 효율적인 토공계획을 위해 GIS 기술을 접목하여 3D 레이저스캐닝 자료에서 DTM을 자동으로 생성하고 이를 통해 절·성토량을 산출해내는 모

델에 관한 연구도 수행되었다[6].

한편 효율적 토공량 계산과정의 적용 및 토공계획 수립을 위한 연구로는 최적합한 토공량 계산과정의 도출과 더불어, 이를 기반으로 토사의 이동 및 장비의 활용을 극대화할 수 있는 효율적인 토공설계에 대한 연구와 설계 결과의 3차원 시각화에 관한 연구가 국내·외적으로 다양하게 수행되어 왔다. 대표적인 연구로 1990년도 이후에는 지형경계를 곡률로 가정하여 각각 한 방향으로 2차, 3차식 그리고 1차와 2차의 조합식으로 토공량의 면적을 구하는 동시에 지형의 격자단면 양방향으로 2, 3차식을 적용하여 면·체적식을 유도하는 연구가 주류를 이루었다. Cheng과 Lu[1]은 토공량 계산을 위한 3차 스플라인식을 개발하였는데, 이 식은 근사 3차 다항식들을 매끈하게 연결한 후 선형 연립방정식으로 해석하여 체적을 구하는 방법이었다[19]. 또한 계산 토공량을 효율적으로 배분하기 위해서는 토공계획시 절성토량의 균형을 고려해야 하며, 동시에 토량 운반거리가 최소화 되도록 해야 한다. 이를 위해 이철규 등[22]은 2차원적인 토량 배분계획에 이용될 수 있는 방법을 제시하여 보다 효율적인 토공계획을 세울 수 있는 연구를 수행하기도 하였다.

최근에 와서는 이러한 개념을 완벽하게 적용한 토공의 자동화 운용을 수행하기 위한 방법론들까지 제시되었는데, 대표적인 연구로 토공에 활용되는 장비의 그룹을 구성하여 각 장비그룹에 속한 장비의 대수를 주어진 작업조건에 의해 자동적으로 재조정하는 장비할당 모델 연구 등이 있다[12]. 또한 현재 국내에서는 효율적인 토공작업을 위하여 지능형 굴삭기 개발을 위한 연구도 진행되고 있는데, 이는 지능형 굴삭기에 적용되는 TPS(Task Planning System) 개발과 첨단 자동센싱 기능을 갖춘 굴삭기 본체의 개발로 구분된다. TPS 개발의 일환으로 작업공간 및 환경을 모델링하여 효과적인 굴삭작업을 위한 영역인식과 분할방법을 제시하고, 숙련된 굴삭기 운전자가 제시하는 효과적인 굴삭작업을 위한 요소들을 파악하여 굴삭기 플랫폼의 이동경로를 설정하여 지능형 굴삭기에 적용하는 연구되었다[13].

하지만, 현재 대부분의 토공설계에서 활용되는 토공량 계산과정 및 프로그램의 경우 도로설계와 단지설계만을 중심으로 개발되어 모든 토목공사의 토공 자동화 운영에는 적용하기 어려운 실정이다. 이 중 현재 대부분의 설계회사에서 사용되고 있는 토

공량 계산 프로그램으로는 LH공사의 DAS[15]가 있는데, 이 프로그램은 단지설계를 위해 개발된 프로그램으로 사용자가 필요로 하는 단지설계를 흐름도에 따라 그래픽 인터페이스를 구현하여 국내에서 시행되고 있는 설계방식(작업순서, 도면작성, 수량산출 등)을 적용한 프로그램으로 단지설계를 위한 토공량 계산 및 토공계획을 수행할 수 있다. 그러나 DAS 프로그램에서는 토공량 계산 및 토공계획을 위해 입력되는 지형자료로 일반적인 수치지형도가 이용된다. 대부분의 경우에 수치지형도는 NGIS 기본계획의 일환으로 항공사진측량에 의해 제작된 DXF 포맷의 수치지형도나 공공기관이나 지자체에서 관련대상지역을 별도로 측량하여 얻는 대축척 수치지형도를 활용하고 있다. 하지만, DXF 포맷의 수치지도를 사용하기 때문에 현재 구축된 3차원 국가공간정보를 직접 적용하기 어려우며, 3D 공간정보를 다시 2D 상태의 등고선으로 변환하여 사용해야 하는 구조적인 한계가 존재하여 토공계획 시 효율적 사용에는 문제점이 있어 왔다. 따라서 국가 3차원 공간정보 추진계획을 통해 제작된 LiDAR 자료, DEM 및 영상정보를 토공설계에 직접 적용할 수 있다면, 지형자료 정확도의 손실을 줄일 수 있어 높은 정확도의 토공량 계산이 가능하며, 3차원 국가공간정보의 활용성을 크게 제고할 수 있는 것으로 알려져 있다[14]. 또한 기존의 프로그램을 개선하여 토공계획 시 현재의 정확한 지형과 공사 이후의 최종 지형현황을 반영하는 3차원 토공설계를 수행할 수 있다면, 토공장비의 이동거리의 계산이 보다 실질적인 값을 얻을 수 있으며, 더불어 실제 현장에 가장 적합한 토공장비를 선정하여 생산성을 향상시키는 것도 가능하다고 알려져 있다[23].

이에 따라 본 논문에서는 정밀한 3차원 국가공간정보를 활용하여 토공량을 계산하고 이를 토대로 한 효율적인 토공계획을 수립할 수 있는 새로운 토공설계 프로그램을 개발하는 것에 그 목적을 두었다. 또한 개발된 프로그램을 통해 토공장비별 이동 및 계획을 위한 정밀한 설계자료를 통합적으로 제공할 수 있게 함으로써, 최종적으로는 시공현장에서의 건설 생산성을 향상시키고자 하였다. 이를 위하여 LiDAR 관측자료를 직접 토공설계에 활용할 수 있는 새로운 프로그램인 EWS(Earth Work System)를 개발하였으며, 이를 실제적인 건설현장(신포천 변전소)에 적용하여 기존의 토공설계 프로그램인

DAS와의 토공량 및 토량 배분방식을 상호 비교·분석하여 개발된 EWS 프로그램의 실제 현장에서의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 토공량 계산 알고리즘

정밀한 토공량 계산을 위해서는 기본적으로 지형의 고도를 표현하는 정확한 수치표고모형(DEM : Digital Elevation Model) 데이터와 토공 수행지역의 계획고를 표현하는 계획 표고데이터가 필요하며, 또한 토공 이동 및 장비조합 산출에 이용되는 토량 환산계수 적용을 위한 암선추정도까지를 필요로 한다. 토공량 산정을 위한 이러한 데이터는 원시데이터(수치지형자료, 계획평면도, 시추데이터)를 처리하여 획득하게 되며 처리된 데이터로부터 알고리즘을 적용하여 각 격자(cell)에서의 절·성토량을 산정하게 된다.

EWS 프로그램에서는 정밀한 LiDAR 관측자료를 이용한 토공량 계산, 토공 장비선정 및 최적 공사비 산정을 하나의 통합적인 프로그램 상에서 일괄적으로 처리하기 위하여, 지형자료를 포함한 각 원시데이터를 격자형태(grid)의 영상데이터 포맷(img, tif)으로 구성하게 된다. 그 후 격자형태로 구성된 데이터를 입력하여 다양한 토공량 계산공식을 적용하여 토공량을 계산한 후 그 결과를 공간 및 속성정보로 표현하는 GIS 데이터 형식인 SHP 포맷으로 최종 출력하게 된다. SHP 포맷으로 출력된 데이터는 공간적으로 격자화 한 형태를 확인할 수 있으며, 레이어 속성 변경을 통하여 다양한 정보를 표현하는 것이 가능하므로 보다 정확하고, 효율적인 토공계획을 수립할 수 있다.

다음의 각 절에서는 EWS 프로그램에 적용된 원시데이터 처리 알고리즘 및 토공량 계산공식에 대하여 간략하게 설명하였으며, 그림 1은 EWS 프로그램에서 수행되는 토공량 계산을 위한 프로세스를 표현하고 있다.

2.1 원시데이터의 격자화 알고리즘

특정한 대상영역에서의 정확한 토공량을 계산하기 위해서는 계산에 활용되는 모든 원시데이터를 격자화하고, 그 후 각 격자에 대해 중첩된 다양한 정보에 적합한 토공량 계산공식을 적용하여야 한다. 원시데이터는 크게 수치지형자료(수치지형도, 표고



그림 1. EWS 프로그램의 토공량 계산 프로세스

점, LiDAR 데이터 등), 계획평면도, 시추데이터로 구분되며, 대부분 원시데이터의 포맷은 백터 혹은 ASCII 파일형태이기 때문에 이를 격자형 데이터로 변환하는 과정이 필요하다.

일반적으로 백터 데이터 및 ASCII 데이터를 격자형 데이터로 변환하기 위해서는 불규칙삼각망(TIN Triangulated Irregular Network), 크리깅(Kriging) 보간법 등의 다양한 보간기법을 활용하게 되는데, 보간기법은 대상지역 내 특성을 조사한 일부의 관측값을 이용하여 관측이 실행되지 않은 영역의 특성값을 예측하는 일련의 과정을 의미한다. 이러한 보간기법의 이론적 근거는 공간에서 함께 근접해 있는 점들이 멀리 떨어져 있는 점보다 유사한 값을 지닌다는 것이다[21].

본 연구에서는 연속적인 지형의 표고를 표현해야 하는 수치지형자료 및 계획평면도의 경우에 불규칙삼각망 데이터 형식으로 변환한 후 격자에 해당하는 삼각면의 고도값을 계산하여 격자형 데이터로 변환하였으며, 시추데이터의 경우 불규칙한 형태로 분포되어 있기 때문에 크리깅 보간법을 활용하여 격자화된 데이터로 변환하였다.

2.1.1 불규칙삼각망(TIN : Triangulated Irregular Network) 보간법

불규칙삼각망 보간법은 수치모형이 지니는 자료의 중복을 줄일 수 있으며, 지형공간정보체계와 자동지도제작, 그리고 등고선 처리 프로그램과 같은 여러 분야에서 다양하게 활용되는 방법이다. 불규칙삼각망은 1970년대 초반에 불규칙하게 배열된 격자점들로부터 지형을 분석해 내는 간단한 방법으로 개발되었으며, 1980년대에 이르러 등고선 처리 프로그램이나 지형공간체계 소프트웨어에서 상업적으로 사용되기 시작했다. 고도 행렬과 달리 불규칙삼각망

은 기복의 변화가 작은 지역에서 결점의 수를 적게 하고, 기복의 변화가 심한 지역에서는 절점의 수를 증가시킴으로서 자료량을 조절한다. 일반적으로 수백개의 격자를 가지는 고도행렬을 100여 개의 절점을 가지는 불규칙삼각망 구조로 나타낼 수 있다. LiDAR 데이터와 같은 조밀한 수치지형자료를 이용하여 불규칙삼각망을 구성하기 위해서는 격자점을 선정 시적절한 연산방식을 적용하여야 하는데, 최근에는 기존의 Fowler & Little 연산법, VIP(Very Important Points) 연산법, 격자점 소거 반복법(Drop Heuristic) 등의 단점을 보완한 델루니 삼각망(delaunay triangulation)이 많이 이용되고 있다.

델루니 삼각망은 점이나 관측점을 삼각망에 따라 연속적인 델루니 삼각형(delaunay triangle)으로 연결하는 방법으로 델루니 삼각형이란 외접하는 원의 내부에 삼각형의 꼭지점 외에 다른 점이 없는 삼각형을 의미한다[2]. 이러한 연산방식을 적용하여 생성되는 불규칙삼각망의 최대 장점은 중요한 위상형태를 필요한 정확도에 따라 해석할 수 있다는 점이다. 따라서 불규칙삼각망은 경사가 급변하는 복잡한 지역의 DEM 생성에 특히 적합하며, 선형침식이 많은 하천지형에도 많이 적용되고 있다. 실제로 격자형 자료구조는 해상력이 낮아질 경우 중요한 정보를 상실할 수 있으며, 해상력 조절의 어려움, 기존 격자축 이외의 방향에 대한 연산의 어려움 등의 문제점을 가지고 있지만 불규칙삼각망 구조는 이러한 문제를 효율적으로 해결할 수 있다. 다음의 그림 2는 불규칙삼각망의 구성 원리를 나타내고 있으며, 불규칙삼각망 보간법을 기반으로 생성되는 DEM의 생성원리는 다음과 같다.

먼저, 각 격자의 중심좌표(X,Y)을 이용하여 각 삼각형을 검색하며, 이를 통해 해당 삼각형의 세점 (Xn, Yn)(n=1,2,3)의 고도값을 획득하게 된다. 그 후

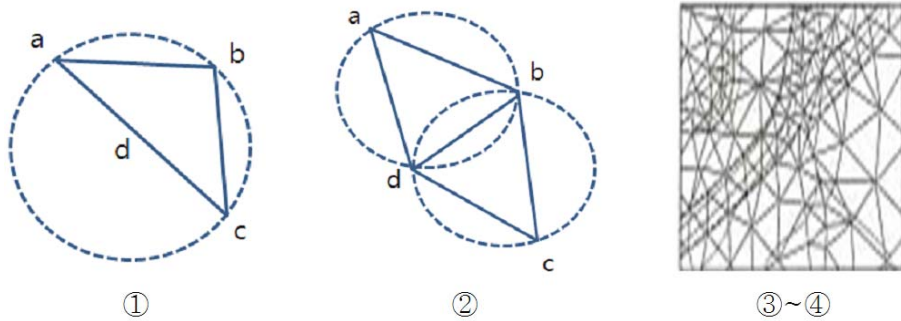


그림 2. 불규칙삼각망 구성 원리

최종적인 격자점의 고도값은 다음의 식에 의하여 계산된다.

$$HV_{wt} = \frac{\sum_{k=1}^3 \left(\frac{Z_k}{D_k^2} \right)}{\sum_{k=1}^3 \left(\frac{1}{D_k^2} \right)} \quad (1)$$

여기서, D_k 는 삼각형의 각 꼭지점에서부터 격자의 중심까지의 거리, Z_k 는 삼각형의 고도값, HV_{wt} 는 격자점의 고도값을 각각 나타낸다.

2.1.2 크리깅(Kriging) 보간법

크리깅 보간법은 원래 지질 통계학적 분야에서 널리 이용되었던 기법으로 현재는 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 이 보간법은 관측점이 불규칙한 경우에 등고선이나 곡면의 보간 등에 유용하다. 또한 크리깅 보간법은 자료의 경향(trend)을 나타낼 수 있다. 크리깅 보간법은 자료의 특성을 분산도(variogram)의 분석으로 나타내기 때문에 적절한 분산도 모형이 설정되어 있으면 보다 향상된 보간 결과를 획득할 수 있다. 크리깅 보간기법에 의한 보간에는 분산도 모형, Drift 모형, Nugget 효과 등이 내포되어 있다.

크리깅 보간기법은 기본적으로 실험 점들에서의 오차가 서로 독립적이지 않고 서로 연관성을 가진다는 가정 하에서 시작된다. 만약, 최소 제곱법에 의한 회귀모형을 생성하였을 경우 추정값 \hat{y} 가 실제값 사이에 큰 오차가 있다면 그 추정값에서 매우 가까운 지점에서의 추정값 또한 실제값 y 와 큰 오차를 가질 것이란 사실을 예상할 수 있을 것이다. 이것은 최소제곱법에 의한 회귀모형 \hat{y} 가 계통적인 오차(systematic error)를 가지기 때문이다. 크리깅

모델에서는 확정론적인 응답을 회귀모형을 포함하는 임의 모델의 구현으로 처리하고 있다[7].

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (2)$$

식 (2)에서, $y(x)$ 는 최종적인 미지 함수이며, $f(x)$ 는 주어진 데이터를 이용해서 얻어낼 수 있는 전체 설계영역에서의 전역모델(global model)이다. 이러한 전역모델은 반응표면모델과 유사한 다항함수(polynomial function)으로 표현되며 많은 경우에 상수항으로 처리하고 있다[10]. $Z(x)$ 는 평균이 0 이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르며, 크리깅 모델이 각 데이터 점들을 $Z(x)$ 로 보간할 수 있도록 국소적인 변동을 만들어내는 부분으로 응답모델의 불확실성(uncertainty)을 나타낸다. 이를 통하여 n 개의 실험점을 적절하게 보간할 수 있다. 다음의 식 (3)은 $Z(x)$ 의 공분산(covariance)을 나타낸다.

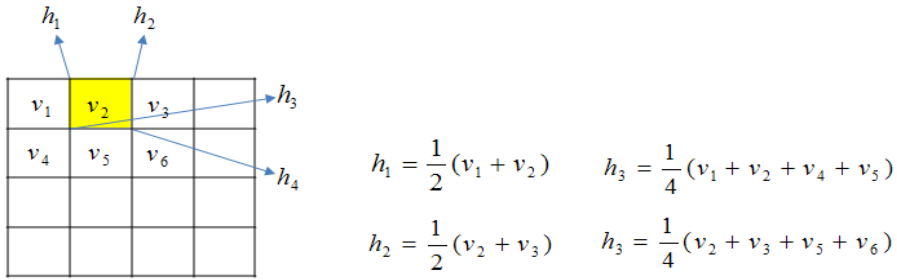
$$Cov[z(X^i), Z(X^j)] = \sigma^2 R([R(X^i, X^j)]) \quad (3)$$

$i, j = 1, \dots, n$

식 (3)에서 R 은 상관행렬(correlation matrix)이며 $R(X^i, X^j)$ 는 실험데이터 내임의의 두 점 X^i 와 X^j 사이의 상관함수이다. R 은 대칭이며, 대각 요소가 모두 1인 $n \times n$ 의 행렬이다. 상관함수는 설계자에 의하여 결정되며, 이에 대한 자세한 내용은 Sacks 등[7]을 참조할 수 있다.

2.2 토공량 계산공식

격자화된 DEM을 통해 토공량을 계산하기 위해서는 대상단면의 체적(A)과 단면 사이의 거리(l)를 이용하는 적절한 토공량 계산공식을 적용하여야 한다. 일반적인 토공량 계산공식으로는 양단면평균법, 중앙단면법, 각주공식 등이 있으며, EWS 프로



v_n : 격자의 표고값
 h_n : 격자 교차점의 표고값

그림 3. 격자 교차점 표고값 계산방안

그림에서는 이러한 각 계산공식을 사용자가 직접 선택하여 사용할 수 있도록 하였다.

양단면평균법에서는 토공량을 구하고자 하는 대상지역의 양단면의 면적을 A_1, A_2 라 하고 그 간격을 ℓ 이라 하면, 최종적인 토공량 V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) \times \ell \tag{4}$$

중양단면법에서는 대상지역의 중앙단면을 A_m 이라 하고 양 단면간의 거리를 ℓ 이라하면, 토공량 V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = A_m \times \ell \tag{5}$$

각주공식에서는 대상지역을 다각형으로 표현하는데, 이때 다각형의 위·아래의 면이 평행이고 측면도 모두 평면으로 된 다각형의 부피, 즉 토공량 V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{h}{6}(A_1 + 4A_m + A_2) \tag{6}$$

대상지역의 최종적인 토공량은 실제 지형에 대해 상기의 토공량 계산공식을 적용하여 계산되는데, 여기서는 수치지형자료를 처리하여 격자형 데이터를 구성하였으므로 각 격자에서의 DEM의 표고값과 계획평면도의 표고값을 비교하여 체적을 산정한 후 격자의 크기를 적용하여 DEM의 각 격자에서의 토공량을 산정하는 방안을 적용한다.

본 연구에서는 격자의 각 교차점에서의 표고값을 추출하고 수치표고모델과 계획 표고데이터의 표고값의 차이를 계산하여 사다리꼴 면적 계산공식에

대입하여 각 격자 단면에서의 면적을 계산하였다. 격자의 교차점에서의 표고값은 표고값의 변화는 선형이라고 가정한 후 다음의 그림 3과 같이 교차점에 인접하는 격자의 표고값의 평균으로 계산한다. 다음의 식 (7)은 격자 교차점에서의 일반적인 표고값 계산과정을 표현한 것이다.

$$h_n = \frac{1}{n}(v_1 + \dots + v_n) \tag{7}$$

여기서, h 는 대상 격자 교차점 표고값, v 는 인접 격자 표고값, n 은 인접 격자의 수를 각각 나타낸다.

수치표고모형과 계획 표고데이터를 구성하는 격자 교차점에서의 표고값을 모두 산출한 후 각 교차점에서의 수치표고모형 격자 교차점 표고값과 계획 표고데이터 격자 교차점 표고값의 차이를 산출하여 사다리꼴 체적 계산공식에 대입하여 면적을 산출한다. 다음의 그림 4는 격자 단면체적 계산과정을 나타내며, 식 8은 그림 4의 격자단면을 통해 적용되는 체적 계산공식을 나타낸 것이다.

$$V = \frac{1}{2} \{ (Dh_1 - Ph_1) + (Dh_2 - Ph_2) \} \times \ell \tag{8}$$

최종적으로는 상기의 식(8)을 통해 격자단면의 체적을 산출한 후 토공량 계산공식인 양단면평균법, 중앙단면법, 각주공식을 각각 적용하여 토공량을 계산하게 된다. 최종적으로 산출되는 토공량은 격자의 크기에 의하여 그 정밀도가 결정되므로, 정밀한 토공량 계산결과를 획득하고자 할 경우에는 입력되는 원시데이터의 격자 해상도를 보다 높게 적용하여야 한다.

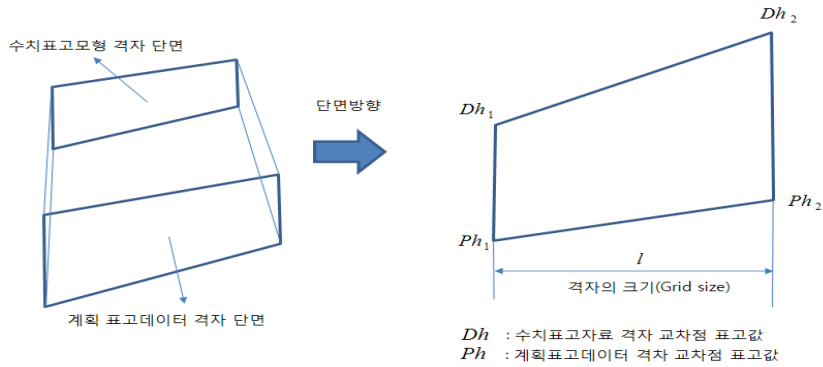


그림 4. 격자단면의 체적 계산과정

2.3 암석 구분에 따른 토공량 계산과정

시추데이터로부터 제작한 암선추정 데이터는 암석 종류에 따라 암석이 배치된 표고값을 나타낸다. 이를 통해 다음의 그림 5에서 나타나는 바와 같이 암석의 깊이를 파악할 수 있으며, DEM과 계획평면도와의 표고값 차이에서 암석의 종류에 따른 비율을 산정할 수 있다.

최종적으로는 계산되어진 암석 비율을 토대로 다음의 식 9와 같이 전체 토공량에 암석 비율을 곱하여 암석별 토공량을 계산할 수 있으며, 이렇게 계산된 암석 구분에 따른 토공량은 향후 토량환산계수를 적용하는 기반 데이터로 사용된다.

$$\text{토사 토공량} : V_t = V \times \frac{h_t}{h_{dp}} \quad (9)$$

$$\text{리핑암 토공량} : V_r = V \times \frac{h_r}{h_{dp}}$$

$$\text{발파암 토공량} : V_b = V \times \frac{h_b}{h_{dp}}$$

여기서, V 는 전체 토공량을 나타내며, V_t , V_r , V_b 는 각각 토사, 리핑암, 발파암의 토공량을 나타낸다.

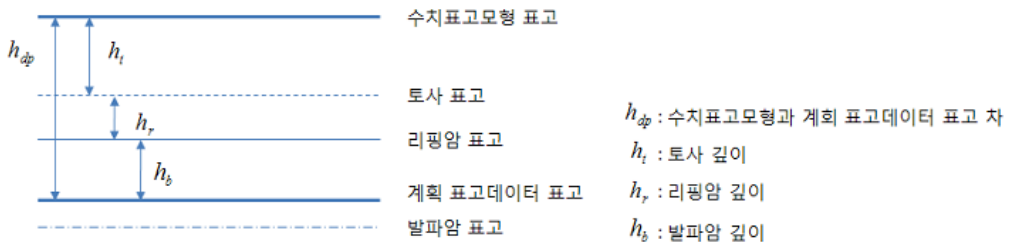


그림 5. 암석 종류 별 비율산정

3. EWS(Earth Work System) 프로그램 개발

본 연구에서는 상기의 토공량 계산과정을 적용하여 기존 2D CAD 기반의 토공량 및 단순 절성토량만을 계산하는 프로그램을 개선하고, 건설현장의 자원을 경제적이고 효율적으로 이용하기 위하여 LiDAR 데이터 등을 이용한 정밀 3D 기반의 토공량 계산, 최적 토공배분 및 일단위 공정표 작성, 토공배분 시뮬레이션, 최종 결과의 3D 가시화 등을 통합적으로 수행할 수 있도록 하는 EWS(Earth Work System) 프로그램을 개발하였다. EWS 프로그램은 고정밀 DEM을 기반으로 계획평면도 및 토사, 리핑암, 발파암으로 구성된 시추주상도 원시데이터를 격자화하여 메쉬(mesh) 기반의 토공량 계산, 토공량 분배, 보고서 출력, 3D 가시화를 지원하며 프로그램 개발을 위한 구성도는 다음의 그림 6과 같다.

EWS 프로그램은 GIS 엔진 기반의 GUI 프로그램으로 벡터 데이터 처리와 GIS 엔진은 Sharp-Map[8]을 이용하고, 래스터 데이터 처리는 FW-Tools[4]를 이용하였으며, Visual C#.NET V3.5 인

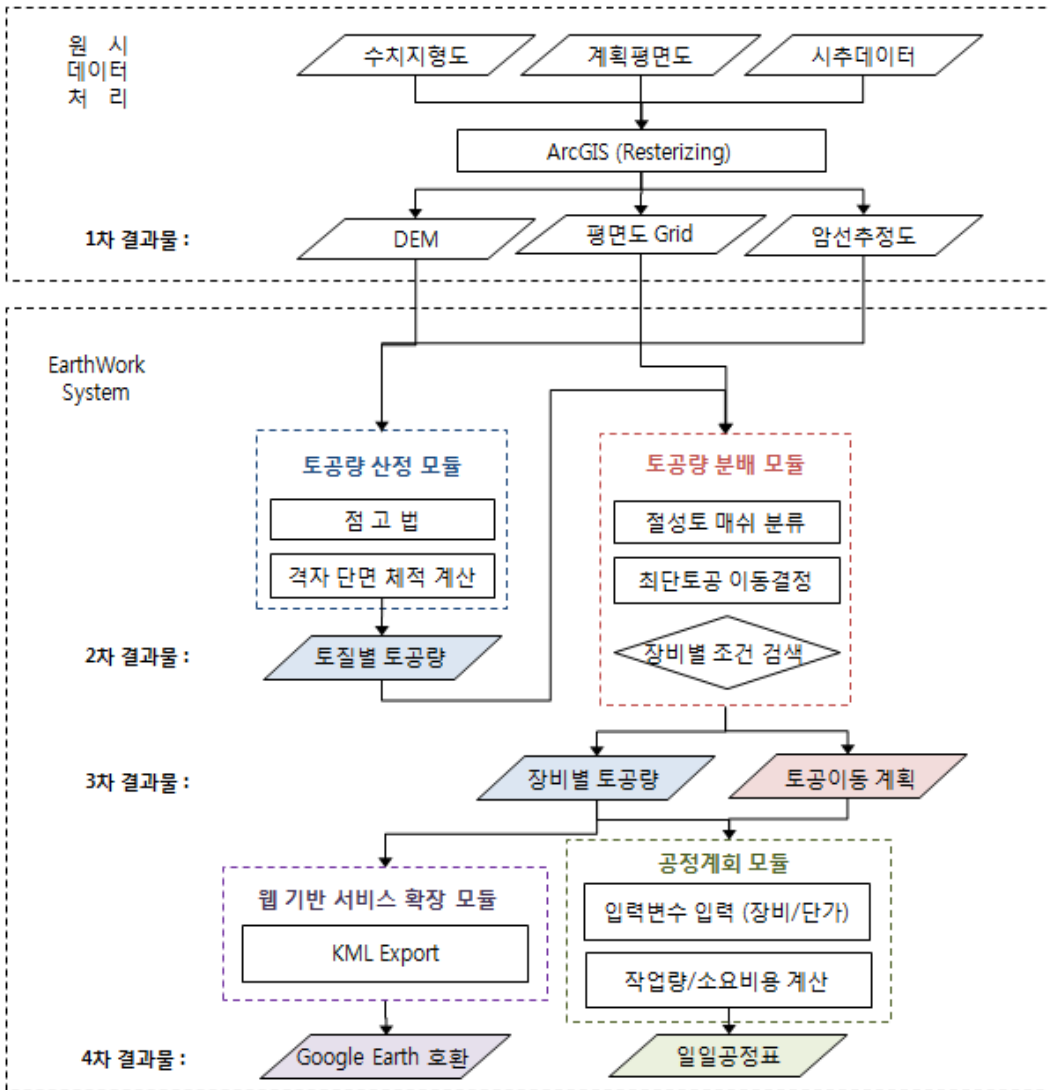


그림 6. EWS 프로그램의 구성도

어를 기반으로 개발되었다.

3.1 입력데이터의 처리

본 프로그램에서는 토공량 계산을 위하여 LiDAR 데이터, 수치지형도 등과 같은 수치지형자료를 통해 생성된 DEM을 활용하게 되며, 각 수치지형자료는 DEM 생성 후의 정확도를 높이기 위하여 적합한 처리과정을 거쳐야 한다[20]. 현재 대부분의 DEM을 획득하는 방법에는 수치지형도의 편집에 의한 방법, 사진측량 및 원격탐사(Remote Sensing) 기법을 이용하는 방법, 지상측량에 의한 방법 및 LiDAR

데이터로부터 직접 DEM을 획득하는 방법 등이 있는데, 정확도면에서는 LiDAR 데이터에서 직접 추출한 DEM을 활용하는 방법이 가장 우수하다[16].

본 연구에서 제안한 LiDAR 데이터를 통해 격자화된 DEM을 생성하는 방법은 상기에 언급한 것과 같이 ASCII 형태의 원시데이터에서 표고값을 나타내는 절점을 추출하고, 이를 이용하여 텔로니 삼각법을 적용한 불규칙삼각망을 구성하는 것이다. 이상의 일련의 과정은 ArcGIS S/W를 이용하여 수행되었으며, 다음의 그림 7은 격자화된 DEM 생성과정을 설명한다.

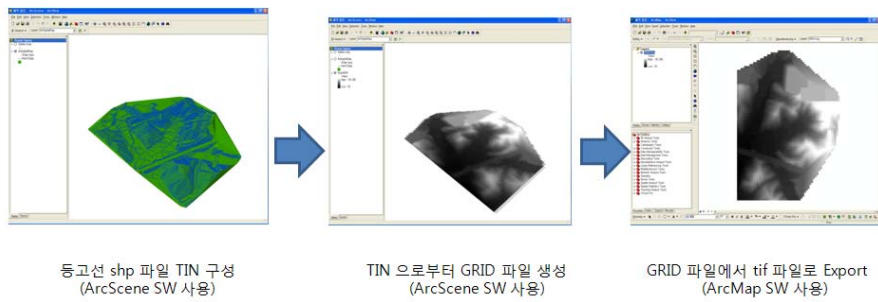


그림 7. 수치지형자료를 이용한 DEM 생성 과정

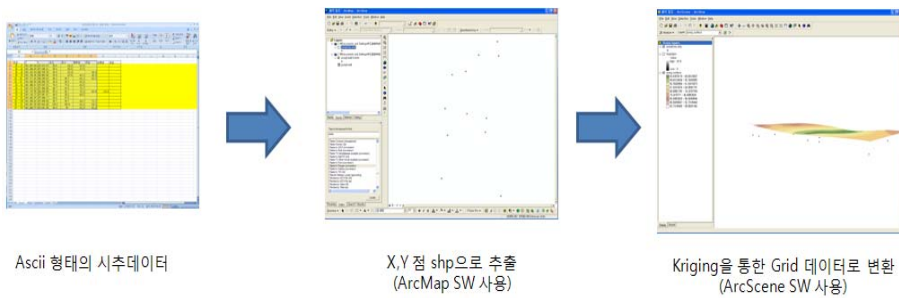


그림 8. 격자형 암선추정 데이터 생성 과정

계획평면도는 토공작업이 완료된 후 기획하는 지형의 형상과 표고를 나타내는 도면으로서 보통 캐드작업을 통해 작성되는데, EWS 프로그램에서는 일괄적이고 효율적인 토공량 계산을 위하여 이를 격자화하여 표고데이터를 구성하여 적용한다. 계획평면도 역시도 DEM과 같이 지형의 표고정보를 표현하므로, DEM을 생성하는 과정과 동일한 프로세스를 거쳐 입력되게 된다.

마지막 원시데이터인 시추데이터는 합리적인 토공장비 선정과 최적 공사비 계산을 위해서 필수적으로 포함되어야 하는 자료로서, 이를 통해 암석 구분에 따른 토량환산 계수를 적용하게 된다. 시추데이터에서는 지반의 특정 지점에서 시추를 통하여 구별되는 암석의 종류와 암석이 차지하고 있는 표고 정보를 획득할 수 있으며, 이러한 데이터는 일반적으로 ASCII 형태로 기록된다. 하지만 시추데이터의 경우 대상지역에 대해 조밀하고, 균등한 분포로 취득되지 않아 공간적인 정보를 효율적으로 획득할 수 없기 때문에 시추데이터를 점(point) 형태의 GIS 데이터로 변환하고, 상기에 언급한 크리깅 보간법을 적용하여 토공량 계산에 이용할 수 있도록 하여야 한다. 다음의 그림 8은 EWS 프로그램에 적용한 격

자형 암선추정 데이터의 제작과정을 나타내고 있다.

3.2 EWS 프로그램의 주요 기능

3.2.1 토공량 계산 기능

공사현장에서의 정확한 토공량 계산 및 토공분배 계획 수립을 위해서는 대상지역을 격자화 하고, 각 격자에서의 토공량을 계산하여야 한다. 이를 위해 격자화 된 영역에서 각 교차점의 높이를 추출하고, 이를 선형으로 추정하여 최종적인 토공량을 계산하게 된다. 본 프로그램에서는 토공량 계산을 위해서 기본적으로 필요한 지형의 고도값의 취득을 위해 LiDAR 데이터를 통한 DEM을 적용할 수 있도록 하였으며, 격자형 계획 표고데이터, 격자형 암선추정 데이터를 함께 적용될 수 있도록 하였다. 최종적인 토공량 계산은 이러한 원시데이터를 처리하여 획득하며, 보다 정밀한 토공량 계산을 위해 각각 처리된 데이터에 최적합한 알고리즘을 사용자가 직접 적용하여 각 격자에서의 절·성토량을 산정할 수 있도록 하였다. 다음의 그림 9는 EWS 프로그램에서 토공량 계산을 위한 입출력 대화상자를 표현한 것이다.

본 프로그램에서는 토공량 계산에서부터 장비선

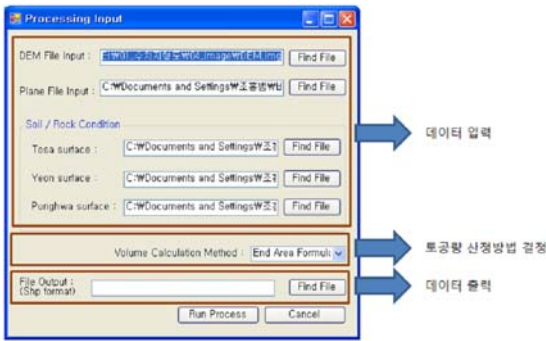


그림 9. 데이터 입·출력 대화상자

정 및 최적 공사비 계산까지 일괄적인 처리를 위하여 데이터 입력을 위한 표준포맷으로 격자형태의 영상데이터 포맷(img, tif)을 적용하였다. 그 후 격자형태로 구성된 데이터를 입력하여 토공량 계산공식을 적용하여 토공량을 계산한 결과의 출력에는 공간 및 속성정보가 결합되어 표현되는 GIS 데이터 형식인 SHP 포맷을 적용하였다. SHP 포맷으로 출력된 데이터는 공간적으로 격자화 한 형태를 확인할 수 있으며, 레이어 속성 변경을 통하여 다양한 정보를 표현할 수 있다. 다음의 그림 10은 EWS 프로그램에서 최종적으로 산출되는 출력데이터를 나타내고 있다.

본 프로그램에서는 토공량 계산에서부터 장비선정 및 최적 공사비 계산까지 일괄적인 처리를 위하여 데이터 입력을 위한 표준포맷으로 격자형태의 영상데이터 포맷(img, tif)을 적용하였다. 그 후 격자형태로 구성된 데이터를 입력하여 토공량 계산공식을 적용하여 토공량을 계산한 결과의 출력에는

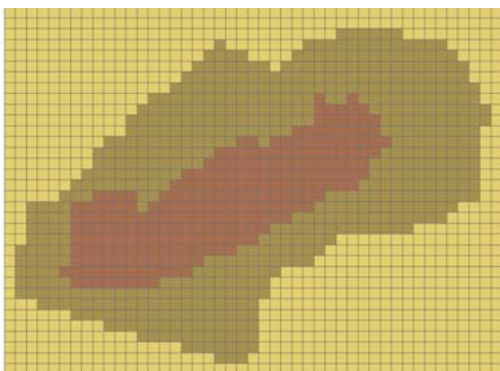
공간 및 속성정보가 결합되어 표현되는 GIS 데이터 형식인 SHP 포맷을 적용하였다. SHP 포맷으로 출력된 데이터는 공간적으로 격자화 한 형태를 확인할 수 있으며, 레이어 속성 변경을 통하여 다양한 정보를 표현할 수 있다. 다음의 그림 10은 EWS 프로그램에서 최종적으로 산출되는 출력데이터를 나타내고 있다.

3.2.2 토공량 분배 기능

토공량 분배는 상기 메쉬 단위로 구성된 토공량측, 절성토량을 최적의 동선으로 이동시키는 방법으로 건설 현장에서 주로 사용되는 백호우, 불도우저, 덤프트럭을 대상으로 한다. 토공량 분배 알고리즘은 먼저 절토 메쉬와 성토 메쉬를 분리하고 각각의 거리를 리스트로 작성한다. 이후 작성된 리스트를 거리 순으로 정렬하고 백호우의 무대 거리 20.0m, 불도우저의 이동 거리 60.0m, 60.0m 이상의 거리는 덤프트럭으로 각각을 리스트로 분류한다.

백호우의 무대 분배부터 최단 거리 순으로 절토에서 성토로 토공 분배를 진행하며 분배가 완료된 메쉬 ID는 각각의 백호우, 불도우저, 덤프트럭 리스트에서 삭제한다. 이때 절토지역과 성토지역으로 구분이 되므로 절토지역당 이동 가능 토량이 결정되므로 각 지역의 이동가능토량만큼은 동일한 조합의 건설장비로 이동하도록 하고, 다른 절토지역으로 장비를 이동하여 계속적으로 작업하도록 한다. EWS 프로그램에서는 상기의 과정을 반복하면서 최단, 최적 토공량 분배 순서를 결정하게 된다.

그림 11은 EWS 프로그램에서 최종적으로 계산된 최단거리 토공이동 결정 결과 및 순차적인 이동



(a) 공간데이터

#	Shape	Cont	Cont	DEM	Plane	DEM	Volume	Cont	Transfer	Transfer	Transfer	Transfer
1	1	20000.000000	42100.000000	8.010000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	2	20000.000000	42100.000000	7.990000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	3	20000.000000	42100.000000	7.970000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	4	20000.000000	42100.000000	7.950000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	5	20000.000000	42100.000000	7.930000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	6	20000.000000	42100.000000	7.910000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	7	20000.000000	42100.000000	7.890000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	8	20000.000000	42100.000000	7.870000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	9	20000.000000	42100.000000	7.850000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	10	20000.000000	42100.000000	7.830000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	11	20000.000000	42100.000000	7.810000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	12	20000.000000	42100.000000	7.790000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	13	20000.000000	42100.000000	7.770000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	14	20000.000000	42100.000000	7.750000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	15	20000.000000	42100.000000	7.730000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	16	20000.000000	42100.000000	7.710000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	17	20000.000000	42100.000000	7.690000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	18	20000.000000	42100.000000	7.670000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	19	20000.000000	42100.000000	7.650000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	20	20000.000000	42100.000000	7.630000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	21	20000.000000	42100.000000	7.610000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
22	22	20000.000000	42100.000000	7.590000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
23	23	20000.000000	42100.000000	7.570000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	24	20000.000000	42100.000000	7.550000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25	25	20000.000000	42100.000000	7.530000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
26	26	20000.000000	42100.000000	7.510000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
27	27	20000.000000	42100.000000	7.490000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
28	28	20000.000000	42100.000000	7.470000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
29	29	20000.000000	42100.000000	7.450000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
30	30	20000.000000	42100.000000	7.430000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
31	31	20000.000000	42100.000000	7.410000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
32	32	20000.000000	42100.000000	7.390000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
33	33	20000.000000	42100.000000	7.370000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
34	34	20000.000000	42100.000000	7.350000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
35	35	20000.000000	42100.000000	7.330000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
36	36	20000.000000	42100.000000	7.310000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
37	37	20000.000000	42100.000000	7.290000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
38	38	20000.000000	42100.000000	7.270000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
39	39	20000.000000	42100.000000	7.250000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
40	40	20000.000000	42100.000000	7.230000	0.010000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

(b) 속성데이터

그림 10. EWS 프로그램의 최종 출력데이터

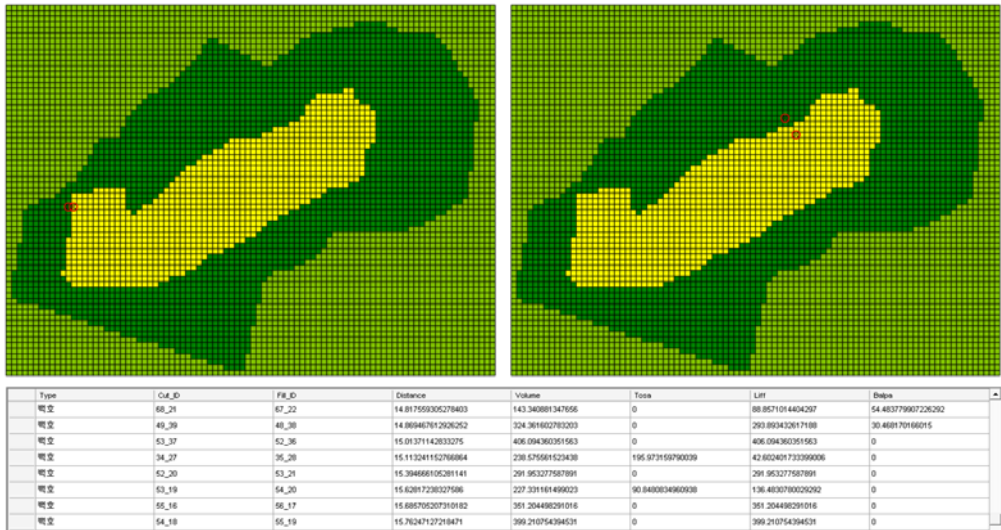


그림 11. EWS를 통해 계산된 최단거리 토공이동 계획(예)

리스트로서, 각 리스트를 선택하면 해당 메쉬들은 이동리스트 중 각각의 경우를 선택하여 지도상에 표현하게 된다.

3.2.3 공정계획 수립 기능

EWS 프로그램에서는 효율적인 토공량 공정계획의 수립을 지원하기 위하여, 대부분의 공사현장에서 토공량 분배를 수행하는 과정인 토량을 백호우를 통하여 절취하고, 불도우저로 운반 및 정지작업을 수행한 후 덤프트럭에 의해 나머지 토량을 운반하는 과정을 적용하여 공정계획 수립 기능을 구현하였다.

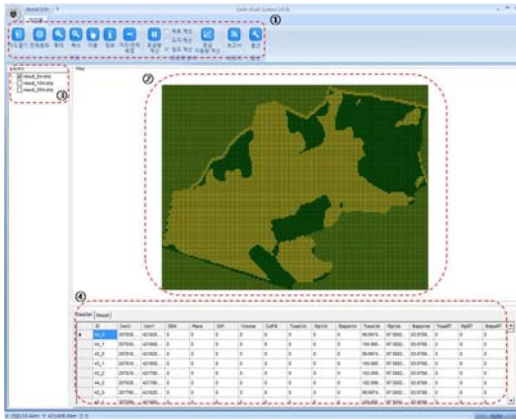
이를 위해 건설장비의 용량과 환산계수, 작업효율 및 사이클 타임 등 작업량에 관계된 모든 요소들을 고려하여 시간당 작업량을 계산하였으며, 하루작업은 평균 8시간으로 가정하여 일일작업량을 산출한 후 건설장비조합과 운반거리를 고려하면 장비별 조합대수가 계산될 수 있도록 하였다. 이 때 무대량은 백호우에 의한 절취비만을 계산하고, 불도우저 운반은 운반량만큼 절취하므로 백호우 절취비를 산정하고 여기에 불도우저 운반비를 합하여 계산하며, 덤프트럭운반도 불도우저 운반과 같이 백호우 절취비에 덤프트럭 운반비를 합하여 계산한다. 장비조합시 각각 상이한 건설장비의 시간당 작업량을 고려하여 백호우와 불도우저는 각 1대씩 조합하고, 백호우와 덤프트럭의 경우 백호우 1대에 덤프트럭 3대를 배치하도록 가정하여 적용하였다. 토공작업을 수

행하는 순서로는 건설장비가 가까운 곳에서 먼 곳으로 작업이 수행되므로 건설장비와 작업공간과의 거리와 일일작업량과의 상관관계를 통해 조합장비별 일일공정을 계획할 수 있게 하였으며, 이를 다시 전체 작업에 반영하여 전체 공정계획을 수행하는 것이 가능하도록 하였다.

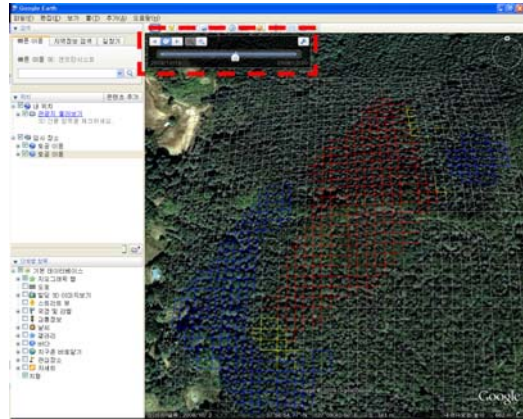
3.2.4 계산결과의 3D 시각화 기능

EWS 프로그램에서 계산된 결과를 보다 직관적인 이해하고, 이에 따른 분석 결과를 쉽게 공유할 수 있도록 최종 결과를 KML 포맷[16]으로 저장할 수 있게 하여, 최종적으로 이를 Google Earth에서 3D 형태로 표현할 수 있도록 하였다. Google Earth는 웹 기반 글로브 뷰어로서 GIS 데이터의 효과적인 3D 가시화를 지원하며, KML 포맷은 Google Earth, Google 지도 및 기타 응용 프로그램에 쓰이는 OGC(Open Geospatial Consortium) 표준 XML 기반의 마크업 언어 스키마로서 지형 정보를 모델링하고 표현하는 역할을 담당한다. EWS 프로그램에서 해석된 토공량 이동 분석 결과는 진행 시간별 이동 현황을 효과적으로 가시화하기 위해, Time-Primitive 태그를 활용하며, 메쉬는 LineList 태그를 이용하여 표현하게 된다.

최종적으로는 EWS 프로그램에서 계산된 일정계획을 통해 전체 과업일과 작업순서가 결정되면, KML 포맷 변환과정을 거쳐 해당 토공계획을 Google Earth 영상에 표현한 후 절·성토량이 표시된 격자



(a) EWS의 화면구성



(b) EWS 결과의 Google Earth 표현

그림 12. EWS 프로그램의 구성 및 계산결과 표현

를 합성하고 작성된 토공량 이동일정표상의 작업일자를 선택하여 최종적인 작업의 흐름이 영상에 표시되도록 하였다.

다음의 그림 12(a)는 본 연구를 통해 최종적으로 개발된 EWS 프로그램의 화면구성이며, 그림 12(b)는 EWS 프로그램에서 계산된 결과를 Google Earth 상에 표현한 것이다. 그림 12(a)에 표현된 EWS 프로그램의 화면구성은 크게 4가지의 아이콘으로 구성되며, 각각 ①작업툴바와 ②레이어 관리창, ③디스플레이창, ④속성정보 관리창을 나타내고 있다.

4. EWS 프로그램의 적용 및 결과 비교

본 연구를 통해 개발된 EWS 프로그램의 실제 현장 적용 가능성을 분석하기 위하여 경기도 포천시 신북면 갈월리 산 14-1번지 일원에서 수행되고 있는 신평천 변전소 공사현장을 연구대상지역으로 선정하고, EWS 프로그램을 적용하여 대상지역의 토공량, 토공량 분배계획 및 공정계획 등을 계산하였다. 그 후 현재 대부분의 설계회사에서 토공량 계산 및 토공계획 수립을 위해 활용하고 있는 DAS 프로그램과의 토공량 및 토량 배분방식을 상호 비교·분석하여 현장에서의 적용 가능성을 검토하였다.

개발된 EWS 프로그램을 이용한 토공설계 시 실제 공사현장에서의 효율적 활용을 위해서 DEM 취득 시 항공 LiDAR 자료를 활용하는 것이 보다 적합하지만, 본 연구대상지역의 경우 항공 LiDAR 관

측자료의 입수에 어려움이 있어 정밀 DEM 취득을 위하여 지상 LiDAR 관측자료만을 활용하였다. 지상 LiDAR 장비로는 캐나다 Optech사의 ILRIS-3D를 사용하였으며, LiDAR 측정 시 GPS와 T/S (Total Station)으로 기준점 측량을 시행하여 정표고 및 절대좌표 보정하였다. 또한 대상지역이 산지에 위치하기 때문에 레이저스캐닝 시 수목으로 인한 지표의 오차를 최소화하기 위하여 비교적 겨울인 2009년 3월 3일 측량을 시행하였다. 그 후 이렇게 취득된 LiDAR DEM과 격자화된 계획 표고데이터 및 시추데이터를 EWS 프로그램에 입력하여 토공량 계산 및 토공계획을 수립하였으며, 토공량 계산을 위한 최적의 DEM 해상도를 결정하기 위하여 입력 DEM을 1m, 5m, 10m 및 20m 격자로 재구성하여 각각 토공량 계산에 적용하였다.

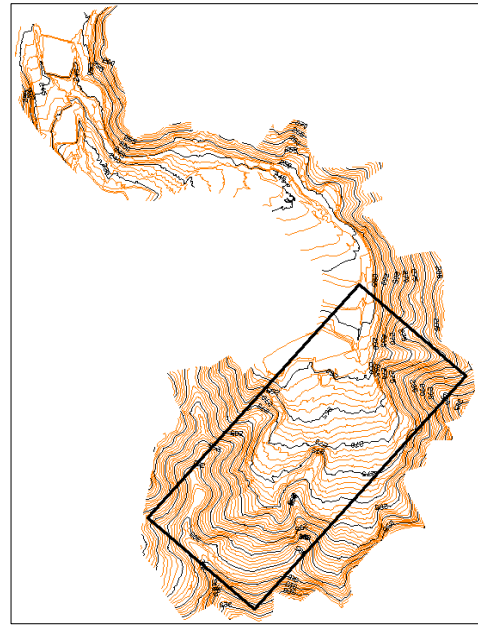
개발된 EWS 프로그램 계산 결과와의 비교를 위한 DAS 프로그램을 이용한 토공설계에서는 지형원시데이터 입력을 위하여 국토지리정보원에서 제작·발행한 1:5,000 수치지형도의 등고선 레이어(주곡선 간격 : 5m)와 지상 LiDAR 측량을 통해 DEM으로부터 추출한 등고선 파일(주곡선 간격 1m)을 각각 적용하였으며, 토공량 계산 시 동일한 계획 표고데이터 및 시추데이터를 적용하였다.

다음의 그림 13은 EWS 및 DAS 프로그램을 이용한 토공량 계산 시 활용한 LiDAR DEM(그림 13(a)) 및 수치지형도 DEM(그림 13(b))을 나타내고 있다.

각 프로그램을 이용한 최종적인 토공계획 및 토공량 계산 시 기존의 토공량 프로그램인 DAS 프로



(a) LiDAR DEM



(b) 수치지형도 DEM

그림 13. 토공량 계산에 활용된 DEM

그램의 경우 프로그램 자체에서 각각의 단계에 따라 수치지형도상에서 등고선관련파일을 추출하고, 평면도상에서 블럭선과 지구경계선 및 도로중심선 등을 추출하게 된다. 또한 시추데이터의 경우 프로그램 상에서 직접 입력하여 최종적인 토공량을 계산하였다.

하지만 EWS 프로그램에서는 기초 원시데이터들은 앞서 언급한 것처럼 ArcGIS 등과 같은 상용 GIS S/W를 활용하여 선처리(pre-processing) 후에 프로그램에 입력하게 된다. 먼저 LiDAR 데이터와 계획평면도의 경우 델루니 삼각법을 통해 불규칙삼각망을 구성하고, 이를 통해 DEM을 해상도별로 제작하였다. 계획평면도의 경우 블럭선에 포함된 고도값을 갖는 3차원 면을 구성하도록 계획하였는데, 이는 도로의 높이를 계획하고 이를 기반으로 블럭의 설계가 수행되었던 기존 프로그램의 설계방식과는 다소 차이가 있다. 시추데이터의 경우에는 ASCII 포맷의 자료를 GIS 데이터로 변환하고 이를 크리깅 보간법을 적용하여 EWS 토공량 산정 프로세스에 적용할 수 있는 격자형 암선추정 데이터로 작성하여 최종적인 토공량을 계산하였다.

토공량 배분과 같은 토공계획 수립의 경우 각 프로그램의 결과가 토공 건설장비를 고려한 실제 토

공설계에 효과적으로 적용될 수 있도록 다양한 종류의 장비 가운데 토공량 이동설계에 많이 활용되는 백호우와 불도우저, 덤프트럭의 제원, 단위 작업량 및 작업단가를 적용한 결과를 도출하였다.

최종적으로 DAS 및 EWS 프로그램에서 공통으로 암종별 토공량과 장비별 토공량이 계산되었으며, EWS 프로그램에서는 추가적으로 일정계획 및 웹기반 시간 흐름에 따른 시각적 표현까지도 수행되었다. 다음의 그림 14는 EWS 프로그램에서 계산된 DEM 해상도에 따른 암종별 토공량의 분포를 나타낸 것이며, 표 1은 EWS와 DAS 프로그램에서 각각 계산된 암종별 토공량을 비교한 것이다.

DAS 프로그램을 이용한 계산 결과, 1:5,000 수치지도의 5m 등고선으로 설계한 토공량이 고정밀 DEM으로부터 추출한 1m 등고선으로 설계한 토공량보다 성토량은 61,782m³(19.59%) 감소하였고, 절토량의 합계 50,694m³(30.42%) 증가하여, 정밀한 등고선으로 설계하여 얻은 토공량과 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 국토지리정보원을 통해 국가 수치지도가 제작·발행되며, 지역의 중요도에 따라서 1:1,000 대축척 수치지도가 발행되기도 하지만 본 연구에 해당하는 대상지역은 도심에서 벗어난 산악 지역으로 그 중요도가 낮은 관계로 1:1,000의 수치

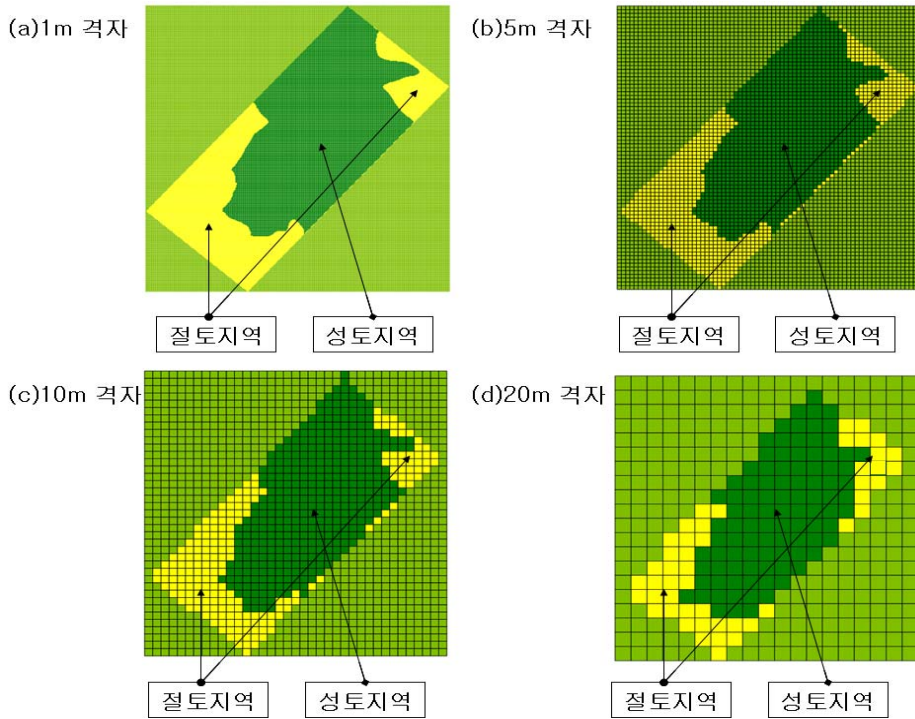


그림 14. EWS 프로그램에서 계산된 암종별 토공량의 분포

표 1. 각 프로그램에서 계산된 암종별 토공량

단위 : m³

구 분		성토량(m ³)	절토량(m ³)			
			토사	리핑암	발파암	계
DAS	1m 등고선	315,403	155,873	10,224	552	166,650
	5m 등고선	253,621 (-15.59%)	206,677 (+32.59%)	10,211 (-0.13%)	455 (-17.57%)	217,344 (+30.42%)
EWS	1m 격자	314,698	155,216	9,405	956	165,577
	5m 격자	315,718 (+0.32%)	157,824 (+1.68%)	9,417 (+0.13%)	1,045 (+9.31%)	168,286 (+1.64%)
	10m 격자	318,347 (+1.16%)	158,126 (+1.87%)	9,536 (+1.39%)	978 (+2.30%)	168,640 (+1.85%)
	20m 격자	321,783 (+2.25%)	165,456 (+6.60%)	9,687 (+3.00%)	1,025 (+7.22%)	176,168 (+6.40%)

지도가 제작되지 않았다. 1:5,000 수치지도의 지형 자료는 토목공사에서 활용할 수 있는 정확도를 제공하지 않으므로, 지형자료를 추출하여 이를 통해 토공량을 산정하는 양적의 비교에 있어 적절한 비교의 대상이 되지 못하였음을 알 수 있었다.

EWS 프로그램을 이용한 계산 결과, 1m, 5m, 10m 및 20m의 DEM 해상도에 따라 설계물량의 해

상도가 작아질수록 절토량 및 성토량이 작아짐을 볼 수 있다. 특히 20m 격자와 1m 격자의 절토량의 차이는 10,591m³(6.40%)로 상당히 증가함을 알 수 있다. 하지만 1m 등고선의 DAS 프로그램 계산 토공량과 1m 해상도의 EWS 설계 토공량은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 또한 DAS 프로그램이 EWS 프로그램 보다 성토량에서 약 705m³(0.22%), 절토량

에서는 약 1,073m³(0.65%) 정도 더 많은 토공량을 보이는 것으로 나타났다.

이와 더불어 절토량의 총량은 1m급 등고선을 적용한 DAS 및 EWS 프로그램의 결과치가 비슷하게 나타났으나, 암종별 토공량의 경우 토사, 리핑암, 발파암의 비율이 서로 상이한 것을 알 수 있었다. 전체적으로 발파암의 값이 EWS 프로그램을 이용한 경우 1,000m³에 근접한 값을 보이는 반면, DAS 프로그램에서는 552m³ 정도로 40%정도 적은 값을 나타내고 있다. 따라서 암종별 토공량 계산 시 DAS 프로그램과 같이 단순히 삼각망의 형성에 의한 추정정보는 EWS 프로그램과 같이 크리깅 보간법을 통해 암선을 추정하는 것이 보다 실제에 근접한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

각 프로그램을 통해 도출된 장비별 토공량은 격자 단위로 계산된 암종별 토공량을 최적의 동선으로 이동시키기 위하여 도출되었으며, 건설현장에서 주로 사용되는 백호우, 불도우저, 덤프트럭만을 대상으로 하였다. 다음의 표 2는 각 프로그램을 통해 계산된 장비별 토공량을 나타낸 것이다.

백호우를 이용한 운반은 무대로 운반하며 20m

거리 이내에만 해당되므로, 격자크기가 20m 이상인 경우는 모든 격자간 거리가 20m 이상이므로 무대운반이 산출되지 않는다. DAS 프로그램에서는 토지이용 기본계획도가 40m 격자로 설계되어 있어, 정확한 무대량이 산출되지 않는 경우가 대부분이다. 그 대신 블럭중단이 20m로 구성되어 있어 40m 격자내부에 절토와 성토가 공존하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 격자내부에서 절·성토가 서로 상쇄되는 경우인 횡방향 토량(1차무대)보다 EWS 프로그램 설계 시 얻어지는 무대량이 더 많이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 DAS 프로그램의 경우 40m 격자를 기준으로 하여 그 내부의 토량의 이동을 고려하였고, EWS 프로그램의 경우 격자의 크기가 작아서 장비의 이동경로가 더 많은 경우의 수를 보이기 때문이다. 결국, 입력데이터 격자의 크기가 작을수록 백호우에 의한 무대이동량이 보다 증가하는 것을 알 수 있었다.

불도우저 운반의 경우 절·성토간 거리 20m 이내에서 백호우에 의한 무대운반을 수행한 후에 60m 거리까지의 절토량을 운반하게 된다. 무대운반은 백호우로 절취가능한 토사의 이동만 가능하지만 불도

표 2. 각 프로그램을 통해 계산된 장비별 토공량

단위 : m³

구 분		토사	리핑암	발파암	계	
백호우	DAS	1m 등고선	19,584	-	-	19,584
		5m 등고선	15,890	-	-	15,890
	EWS	1m 격자	28,326	-	-	28,326
		5m 격자	28,618	-	-	28,618
		10m 격자	25,310	-	-	25,310
		20m 격자	-	-	-	-
불도우저	DAS	1m 등고선	46,385	430	-	46,815
		5m 등고선	41,852	152	-	42,004
	EWS	1m 격자	50,128	1,227	-	51,355
		5m 격자	50,346	1,250	-	51,596
		10m 격자	51,718	1,145	-	52,863
		20m 격자	74,274	1,186	-	75,460
덤프트럭	DAS	1m 등고선	89,904	9,794	552	100,251
		5m 등고선	97,474	9,253	956	107,683
	EWS	1m 격자	76,760	8,178	956	85,894
		5m 격자	78,860	8,167	1,045	88,072
		10m 격자	81,098	8,391	978	90,467
		20m 격자	91,182	8,501	1,025	100,708

우저의 경우 풍화암의 이동도 가능하다. EWS 프로그램을 이용한 설계 시 20m 격자의 이동량이 5m 격자와 10m 격자의 이동량보다 많이 산출되었다. 이는 20m 격자의 경우 모든 격자간 거리가 20m를 초과하게 되어 무대운반의 물량이 전무하여 작은 격자에서 무대로 운반한 토량을 20m 격자에서는 모두 불도우저 운반으로 처리한 것으로 판단되었기 때문이다.

덤프트럭에 의한 운반의 경우 EWS에서는 기본적인 작업공정은 DAS와 동일하게 절토지역의 남겨진 토량을 합산하여 영역을 구분하고, 최단거리를 기준으로 성토지역으로 이동시키는 전체공정을 자동적으로 수행하여 순차적으로 덤프트럭에 의한 운반을 수행할 수 있게 된다.

또한 EWS 프로그램에서는 계산된 암종별, 장비별 토공량을 통해 토공 일정계획까지 추가적으로 수립하는 것이 가능하다. 일반적으로 일정계획은 현장의 다양한 여건을 고려하여 시공업체에서 작성하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 최소한의 조건인 건설장비의 용량과 환산계수, 작업효율 및 사이클 타임 등 작업량에 관계된 모든 요소들을 고려하여 시간당 작업량을 산정하고, 하루작업은 평균 8시간으로 가정하여 일일작업량을 산출하여 일정계획에 반영하여 일정계획을 수립하였다. 이를 통해 보다 건설현장에서 보다 효율적인 토공사의 수행을 지원할 수 있으며, 최종적으로는 건설 생산성 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단되었다.

일정계획 수립을 위한 토공작업 순서는 먼저 백호우를 통하여 암종별 토공량을 절취하고, 불도우저로 운반 및 정지작업을 수행한 후 덤프트럭에 의해 나머지 토량을 운반하도록 계획하였다. 이러한 장비조합 시 각각 상이한 건설장비의 시간당 작업량을 고려하여 백호우와 불도우저는 각 1대씩 조합하고, 백호우와 덤프트럭의 경우 백호우 1대에 덤프트럭 3대를 배치하도록 가정하여 적용하였다. 10m 격자의 입력데이터를 기반으로 EWS 프로그램에서 일정계획을 수립한 결과로 총 14일의 토공사 공기가 산출되었는데, 처음 3일 동안은 백호우 작업을 통한 토사 절취 후 무대작업을 수행하고, 이후 3~9일까지는 불도우저를 이용한 토사이동을 수행한다. 마지막으로 나머지 9~14일까지는 토사절취 및 덤프트럭 운반을 병행하여 토공사를 수행하는 것으로 일정계획이 산출되었다. 또한 EWS 프로그램에서는 이러

한 일정계획과 더불어 이와 관련된 재료비, 노무비, 경비를 포함한 작업비용까지도 함께 산출되어 보다 효율적인 일정계획 지원이 가능함을 알 수 있었다.

다음의 그림 15은 EWS 프로그램에서 작성된 대상지역의 토공 일정계획 및 작업비용을 나타낸 것이다.

Date	Type	Cut_ID	Fill_ID	Volume	Cost
1일	백호	32_8	32_9	100.1922607421875	54704.974365234375
1일	백호	32_8	31_9	238.714599609375	130338.17138671875
1일	백호	31_8	30_9	91.2841796875	49841.162109375
1일	백호	30_7	29_8	13.8580322265625	7566.485595703125
1일	백호	30_8	30_9	38.34228515625	20934.8876953125
1일	백호	29_7	28_8	167.3736572265625	91386.016845703125
1일	백호	28_5	27_4	155.438232421875	84869.27490234375
1일	백호	28_6	27_5	246.0479736328125	134342.19360351563
1일	백호	28_7	27_6	173.0804443359375	94501.922607421875
1일	백호	33_9	32_10	14.4989013671875	7916.400146484375
1일	백호	32_11	31_10	96.3958740234375	52632.147216796875
1일	백호	32_15	31_16	425.5401611328125	232344.92797851563
1일	백호	30_11	30_10	235.308837890625	128478.62548828125
1일	백호	31_11	30_10	288.8336181640625	157703.15551757813
1일	백호	29_11	29_10	116.143798828125	63414.51416015625
1일	백호	30_12	29_13	61.8194580078125	33753.424072265625
1일	백호	30_13	29_14	352.587890625	192512.98828125
1일	백호	29_12	28_11	9.58251953125	5232.0556640625
1일	백호	29_12	28_12	80.5999755859375	44007.586669921875
1일	백호	29_12	28_13	147.83935546875	80720.2880859375
1일	백호	31_14	30_15	311.2274169921875	169930.16967773438
1일	백호	31_15	30_16	85.2996826171875	46573.626708984375
1일	백호	30_14	29_15	66.6259765625	36377.783203125
1일	백호	30_18	30_17	209.503173828125	114388.73291015625
1일	백호	13_14	14_13	55.5908203125	30352.587890625
1일	백호	13_15	14_14	276.2115478515625	150811.50512695313
1일	백호	14_16	15_15	191.461181640625	104537.80517578125
1일	백호	13_16	14_15	92.93212890625	50740.9423828125

그림 15. EWS 프로그램에서 작성된 토공사 일정계획

5. 결론

본 연구에서는 건설공사 중 토공사의 효율성을 증진시키고 토공계획에서 시공까지의 일관적이고, 효율적인 연결을 위하여, 정밀한 3차원 수치지형자료에 기반한 토공량 모델링을 통해 정밀한 토공설계를 가능하게 하는 새로운 토공설계 프로그램인 EWS 프로그램을 개발하였다. 개발된 EWS 프로그램은 보다 향상된 보간법에 의해 격자화된 원시데이터(LiDAR DEM, 계획평면도, 시추데이터)를 입력하여 정확한 토공량을 계산하고, 이를 공사현장에 직접 활용할 수 있도록 건설장비의 단위 작업량을 기반으로 한 장비별 토공량 산출 및 일정계획 수립이 가능한 프로그램이다. 더불어 계산된 결과를 건설현장에서 보다 직관적인 이해하고, 이에 따른 분석 결과를 쉽게 공유할 수 있도록 하기 위한 Google

Earth를 이용한 3D 가시화까지도 지원할 수 있도록 설계되었다. 이렇게 개발된 EWS 프로그램의 실제 건설현장에서의 적용 가능성을 검토하기 위하여 기존의 DAS 프로그램과의 비교·분석을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, EWS 프로그램에서는 기존의 토공량 계산 프로그램(DAS)에서 제공하지 않은 시간적 정보를 통해 토공이동 계획을 대한 정량화시키고, 이에 대한 3D 가시화를 실현시켜 보다 효율적인 토공사 공정관리가 가능함을 알 수 있었다.

둘째, DAS 프로그램에서는 2차원적인 일반 수치지형도를 통해 토공량을 산출하지만, EWS 프로그램은 LiDAR 데이터 등 3차원 공간정보를 직접 활용할 수 있어 보다 정확한 토공량 산정이 가능한 것을 알 수 있었다.

셋째, EWS 프로그램에서는 토공량 계산을 위한 입력데이터로 다양한 공간정보를 이용하는 것이 가능하며, 이를 통해 효율적인 토공설계가 가능하도록 개발되어, 최종적으로는 현재 국가적으로 추진 중인 3차원 공간정보의 활용성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

넷째, 원시데이터의 입력 시 델루니 삼각법을 이용한 불규칙삼각망 및 크리깅 보간법과 같은 적절한 보간법을 적용한 격자화 데이터를 구성함으로써 보다 정확한 암종별 토공량을 계산할 수 있었으며, 3차원으로 획득된 수치지형자료를 대상으로 현장상황을 반영한 토공량 계산, 공정계획 등을 수행하여 계산된 결과가 시공현장에 바로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

마지막으로, 실제 현장에서의 토공작업의 수행에 있어서 시각화된 토공현황 분석과 정확한 토공량 계산을 통해 합리적인 공사가 진행이 가능해졌으며, 작업일정 측면에서 현실적인 공사계획 수립을 통한 건설 생산성 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

하지만 본 연구에서 개발한 EWS 프로그램이 실제 토공사에서 설계와 시공을 연계하여 실용적으로 사용되기 위해서는 추가적인 현장 적용성 검토가 수행될 필요가 있으며, 이를 위해 다양한 공사지역의 지형특성 및 공정, 다양한 최신 토공장비의 제한 등을 반영하기 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다. 또한 토공량 배분 계획 수립 시 단순히 최단거리의 격자 간 이동만을 고려하여 토공작업의 생

산성에 영향을 미치는 작업특성, 작업현장특성, 장비특성 등이 반영되지 않았으므로, 향후 이러한 특성들을 DB화하여 토공량 배분 계획 시 이를 각각의 가중치로 반영하는 연구도 필요할 것으로 판단된다.

또한 보다 효율적인 실시간 공정관리를 위하여 토공장비에 센서를 부착하여 이를 실시간 통합관리할 수 있는 새로운 시스템의 도입도 필요하며, 이러한 방안을 설계단계에서 고려하여 공정계획과 연계하는 방안에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다. 더불어 본 연구에서는 토공량 운반에 대한 비용요소만 고려하였으므로, 향후에는 절취공정 및 다짐공정 등 모든 토공공정을 고려한 비용계산에 대한 추가적인 연구가 수행된다면 본 EWS 프로그램의 현장 적용성이 보다 향상될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Cheng, and Q. Lu, 2004, "3-D Calculation of Roadway Earthwork Volume," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 19-22.
- [2] P. Cignoni, C. Montani, C. Rocchini, and R. Scopigno, 2003, "External Memory Management and Simplification of Huge Meshes," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol 9, no. 4, pp. 525-537.
- [3] J.C. Du, and H.C. Teng, 2007, "3D Laser Scanning and GPS Technology for Landslide Earthwork Volume Estimation," *Automation in Construction*, vol. 16, no. 5, pp. 657-663.
- [4] FWtools, 2009, URL:<http://fwtoos.maptools.org/>
- [5] A. Kazuhiro, 2005, "Tabu Search Optimization of Horizontal and Vertical Alignments of Forest Roads," *Journal of Forest Research*, vol. 10, no. 4, pp. 275-284.
- [6] O. Moselhi, and A. Hassanein, 2003, "Data Acquisition and Analysis for Highway Construction using Geographic Information Systems," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 30, pp. 533-542.
- [7] J. Sacks, W.J. Welch, T.J. Mitchell, and H.P. Wynn, 1989, "Design and Analysis of Computer

- Experiments,” *Statistical Science*, vol. 4, no. 2, pp. 409-435.
- [8] SharpMap, 2009, URL:<http://www.codeplex.com/SharpMap>
- [9] J. Shan, and A. Sampath, 2005, “Urban DEM Generation from Raw Lidar Data: A Labeling Algorithm and its Performance,” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 71, no. 2, pp. 217-226.
- [10] G. Pan, and S. Wang, 2005, “A Digital Terrain Model and Method of Calculation of Earthwork Volume for a Large Public Green Field,” *China Civil Engineering Journal*, vol. 38, no. 9, pp. 130-132.
- [11] F. Qiang, Y. Zhang, and H. Li, 2009, “The Study on Earthwork Calculation of Open-Pit Mine Based on Three-Dimensional Laser Scanning Technology,” *Image and Signal Processing*, 2nd International Congress on 17-19 Oct., pp. 1-4.
- [12] 김성근, 2004, “원격조정 토공시스템을 위한 GPS 기반의 장비 진로계획법,” *대한토목학회 논문집*, 제24권, 제1D호, pp. 59-66.
- [13] 김성근, 이덕규, 김홍철, 2005, “Contract Net을 이용한 자동화 토공장비 할당 모델,” *대한토목학회 논문집*, 제25권, 제5D호, pp. 727-727.
- [14] 김성준, 이임평, 2008, “라이다데이터와 수치지도를 이용한 도로의 3차원 모델링,” *한국측량학회지*, 제26권, 제2호, pp. 165-173.
- [15] 김성훈, 심희철, 도광민, 이종달, 2007, “GIS기법을 이용한 토공산정의 최적화,” *학술발표대회 논문집*, 한국방재학회, pp. 344-348.
- [16] 우제윤, 구지희, 홍창희, 김태훈, 2001, “수치표고모형(DEM) 구축을 위한 지형별 보간 방법 및 격자크기에 관한 연구,” *한국공간정보시스템학회 논문지*, 제3권, 제2호, pp. 5-19.
- [17] 위광재, 이영균, 이동하, 서용철, 2010, “GIS 기반의 토석류 시뮬레이션 프로그램 개발,” *한국방재학회 논문집*, 제10권, 제1호, pp. 49-55.
- [18] 이동천, 염재홍, 2005, “LiDAR 데이터를 이용한 수치지도의 건물 및 등고선 레이어 생성,” *한국측량학회지*, 제23권, 제3호, pp. 313-322.
- [19] 이동천, 배경호, 유근홍, 2009, “3차원 수치지도 생성을 위한 지형공간 데이터 모델링,” *한국측량학회지*, 제27권, 제3호, pp. 393-400.
- [20] 이동하, 김영섭, 서용철, 2009, “고해상도 항공라이다 DEM 해석을 통한 강원도 일원의 산사태 예측 가능성 분석,” *한국GIS학회지*, 제17권, 제3호, pp. 381-387.
- [21] 이문재, 2003, *토공량결정에 관한 논문*, 석사학위논문, 동의대학교.
- [22] 이진녕, 2010, *3차원 정밀지형자료의 토공계획 활용*, 박사학위논문, 건국대학교.
- [23] 이진녕, 편무욱, 구지희, 박재선, 2010, “3차원 정밀지형자료를 활용한 토공계획 개선,” *한국지형공간정보학회지*, 제18권, 제1호, pp. 63-72.
- [24] 이철규, 김성근, 성영준, 2003, “2차원적인 토공 계획법에 관한 연구,” *대한토목학회 논문집*, 제23권, 제3D호, pp. 349-357.
- [25] 편무욱, 김종화, 김상국, 황연수, 강남기, 2009, “지상 LiDAR 자료의 절토량 산정 실험,” *한국지형공간정보학회지*, 제17권, 제2호, pp. 11-17.

논문접수 : 2010.11.12
수정일 : 2010.12.16
심사완료 : 2010.12.17



이진녕

2010년 건국대학교 토목공학과 공학박사
2003년 측량 및 지형공간정보기술사
2008년~현재 국토지리정보원 심의위원

2010년~현재 인덕대학 건설정보과 겸임교수
관심분야는 토목설계, BIM, LiDAR 측량



이영균

2006년 성균관대학교 토목환경공학과 공학석사
2009년 전문연구요원
2010년~현재 (주)엠앤소프트 OEM 개발팀 대리

관심분야는 GPS, MMS, LBS, Seamless Service



이동하

2008년 성균관대학교 토목환경공학과 공학박사
2010년 측량 및 지형공간정보기술사
2009년~현재 기상청 기상지진기술개발사업단(CATER) 위촉 선임연구원

2009년~현재 성균관대학교 공과대학 겸임교수
관심분야는 지구물리측량, GIS, GPS



서용철

2004년 일본 동경대학교 토목공학과 공학박사
2007년~현재 한국지리정보학회 총무이사
2006년~현재 대한토목학회 학술편집

위원
2005년~현재 부경대학교 위성정보과학과 조교수
관심분야는 웹 GIS, GPS