

GIS를 이용한 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템 구축 기법의 개발 및 적용

Development and Application of a Methodology to Build Geotechnical Information System Based on Geo-Knowledge Using GIS Technology

선 창 국¹ Sun, Chang-Guk

정 충 기² Chung, Choong-Ki

Abstract

For the reliable prediction of spatial geotechnical data, a procedure to build the Geotechnical Information System (GTIS) based on geo-knowledge within the frame of GIS technology was developed by introducing a couple of new concepts of the extended area containing the study area and the additional site visit for acquiring surface geological data. To build the GTIS for Gyeongju as the case study of regional model application, intensive site investigations and pre-existing geotechnical data collections were performed and additional site visit was also carried out for acquiring surface geo-layer data in accordance with the developed procedure. Within the GTIS based on geo-knowledge for Gyeongju area, the spatially distributed geo-layers across the extended area were predicted using the geostatistical kriging method and those for the study area were extracted. Furthermore, the spatial distribution maps for the thickness of geo-layers and the depth to bedrock were constructed for the practical use in geotechnical field. It was evaluated that the GTIS based on geo-knowledge developed in this study is superior to the conventional geotechnical GIS in terms of both the standard deviation and the geological expert judgment.

요 지

공간 지반 정보의 합리적 예측 목적으로, 대상 연구 지역을 포함하는 확장 지역 및 지표면 지질 자료 획득을 위한 추가 부지 조사는 새로운 두 개념을 도입하여 GIS 기법 토대의 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템(GTIS) 구축 기법을 개발하였다. 지역적 모범 적용 연구로서의 경주 지역에 대한 GTIS를 구축하기 위하여 개발된 기법에 따라, 기존 지반 조사 자료의 수집과 연구 목적의 지반 조사가 수행되었고 지표 지층 자료 확보를 위한 추가적인 부지 지표 조사가 실시되었다. 경주 지역의 지반-지식 기반 GTIS 내에서 지구통계학적 크리깅 기법을 적용하여 확장 지역에 대한 공간 지층 정보를 예측하였으며, 이로부터 연구 대상 지역의 공간 지층 정보를 추출하였다. 뿐만 아니라, 지반 관련 실무적 활용 목적의 지층 두께 및 기반암 심도의 공간 분포 지도를 구축하였다. 본 연구의 지반-지식 기반 GTIS와 일반적인 지반공학적 GIS와의 비교 결과, GTIS의 우월성을 표준 편차와 지질 전문가적 판단을 통해 확인하였다.

Keywords : Geo-knowledge, Geo-layer, Geostatistical kriging, Geotechnical Information System, GIS, Reliability estimation

1 정희원, 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Earthq. Res. Cent., Korea Inst. Geosci. & Min. Reso., pungsun@kigam.re.kr)

2 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

현대 사회에서는 산업의 급속한 발달에 따라 여러 분야의 다양한 정보가 지속적으로 창출되고 있다. 특히, 사회 기반 시설 확충을 위한 국토 개발 목적으로 수많은 지반 조사가 수행되고 있으며, 그 결과 전 국토에 걸쳐 방대한 양의 지반 조사 자료가 생성 및 축적되고 있다. 지반 조사 자료는 조사 과정중의 인적 또는 기계적 요인들에 의해 신뢰성이 저하될 수 있으므로 이에 대한 종합적 파악과 개선 방안에 대한 노력이 무엇보다도 요구되는 상황이며, 더불어 기존 자료의 활용 방안 극대화를 위한 공학적 기법 연구도 추진되어야 한다. 지반 조사 자료에 대한 신뢰성 평가의 경우 개별적 접근을 통한 제한적 연구 수행보다는 다양한 학문 분야의 여러 전문가들에 의한 체계적 접근이 필요하므로, 본 연구에서는 지반 조사 자료의 합리적 활용 기법을 개발함으로써 기존 자료의 정량적 신뢰성 평가 이후에도 지속적으로 적용할 수 있는 방안을 제안하고자 하였다. 특히, 국내의 경우 지반 조사 자료는 지금까지 그 활용이 극히 제한되어 왔으나, 국토의 지속적이고 합리적인 개발을 위해서는 복합적 속성 형태의 자료를 체계적으로 관리할 수 있는 효율적인 운용 체계가 반드시 필요하다. 이러한 자료 관리 기능을 충족할 수 있는 기법으로서 컴퓨터 기술의 급속한 발달에 힘입어 최근 그 적용성이 더욱 고차원화되고 있는 지리 정보 시스템(GIS, Geographic Information System)이 전 세계적으로 다양한 학문 분야에서 광범위하게 도입·활용되고 있다. 그 중에서도 지반공학 자료의 종합적 관리와 합리적 활용을 위한 GIS 적용 연구는 범국가적 또는 지역적 국토 개발, 시설물 관리, 환경 및 재해 대책 등과 같은 종합 개발 관리 시스템과 결부되어 해외뿐만 아니라 국내에서도 최근 활발하게 수행되고 있다(Kunapo 등, 2005; Sun, 2004; Xie 등, 2003; 건설교통부, 2002; Rengers 등, 2002).

현재까지의 GIS를 이용한 지반공학적 활용 연구는 주로 데이터베이스(DB, DataBase)의 구축을 통한 자료 관리(data management) 및 가시화(visualization)에 집중되어 왔다(Sun, 2004). 즉, 지반공학적 견지에서 미지 지반 정보의 신뢰성 높은 예측이 매우 중요한 관건임에도 불구하고, 합리적 공간 정보 확장 기법의 개발을 통한 기지 자료 토대의 미지 자료의 합리적 예측과 같은 GIS의 적극적 활용 보다는 DB 관리나 기존 보간 기법의 단순 적용 예측과 같은 소극적 활용이 주류를 이루어

왔다. 본 연구에서는 이러한 기존의 지반공학적 GIS 활용 기법 합리화의 일환으로 지역적 지반 정보의 효율적 관리와 더불어 삼차원 공간상에 분포하는 지반 정보의 신뢰성 높은 예측을 위한 지반 정보화 시스템(GTIS, Geotechnical Information System) 구축 기법을 개발하였다. 또한, 국내 주요 내륙 도시인 경주 지역을 대상으로 개발된 구축 기법을 적용하여 차별적이고 종합적인 지역적 지반 정보화 시스템을 구축함으로써 국내 주요 지역에 대한 지반 정보화의 모범적 활용 방안으로 제시하였다.

2. 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템 구축 기법 개발

1950년대 초 도입 당시에는 소규모 자료 관리에 국한된 GIS 활용은 최근에는 대규모 자료 관리가 가능할 정도로 발전되었다(Parsons와 Frost, 2002; Jia, 2000; Holdstock, 1998). 대규모 자료의 대표적 형태인 지반 정보는 지표 및 지하 공간의 삼차원적 분포 특성을 보인다. 이러한 공간 분포의 지반 정보를 효율적으로 관리하고 활용하기 위하여 GIS 기법 토대의 여러 지반공학적 시스템들이 근래에 개발되어 왔으며(건설교통부, 2002; 홍성완 등, 2002; Scott와 Carlton, 1999), 지반 지리 정보 시스템(Geotechnical Geographic Information System, GEOGIS)이나 지반 자료 관리 시스템(Geotechnical Data Management System, GDMS)과 같은 여러 전문 용어로 불리어 왔다(Williams 등, 2002; Geodecisions, 2004). 특히, 도시 지역을 대상으로 지반 자료의 종합 관리와 더불어 지진, 홍수 등의 재해 대책 수립을 위한 기본 방안으로 최근 국내외에서 광범위하게 지반 정보 GIS가 개발·구축되고 있다(Sun, 2004; Lee와 Choi, 2003; 유환희 등, 2002; Rockaway, 1997). 지반 정보는 그 의미와 내용에 있어서 매우 다양한 정보를 포괄하며, 그 중에서도 지반 특성을 파악하기 위해 근본적으로 활용되는 가장 중요한 정보는 지층 정보이다(천성호 등, 2005). 지층 정보의 정확한 예측을 통해 지반 특성의 체계적이고 종합적인 파악이 가능하므로 본 연구에서는 대상 지역 내 지층의 공간적 분포에 대한 합리적 예측 기법을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 공간 지층 정보의 신뢰성 높은 예측을 목적으로 GIS 토대의 지반 정보화 시스템(GTIS)을 개발 구축하였으며, 이러한 GTIS는 지반공학 분야에서 다양한 적용이 가능하다.

2.1 시스템 구축 기법의 개발 환경

지반공학적인 범용 활용 목적의 GTIS의 구현을 위해서는 공간상에 분포하는 지반 특성 정보의 효율적 관리와 공간 기지 자료 토대의 미지 자료에 대한 신뢰성 높은 예측이 가능해야 하고 다양한 형태의 가시적 및 수치적 출력이 가능해야 한다. 이와 같은 복합적 기능의 달성을 위해서는 여러 전문가적 GIS 소프트웨어의 상호 보완적 활용과 더불어 GIS와 연계된 전문가적 분석 기법의 병용이 요구된다(Gangopadhyay 등, 1999). 본 연구에서는 GTIS의 구축을 위하여 전문가적 GIS 소프트웨어로서 미국 CTech 개발사의 EVS-Pro(CTech, 2001)와 미국 Autodesk 사의 AutoCAD LDDT(Autodesk, 2001)를 이용하였으며, 그 외에도 초기 DB 구성을 위한 범용 편집 프로그램을 활용하거나 공간 정보 분석 및 연산을 위한 FORTRAN 코드 기반의 프로그램을 개발하여 이용하였다.

지질 및 환경 전문가를 위한 GIS 소프트웨어인 EVS-Pro는 주로 공간 자료의 다양한 출력을 위해 활용되었으며, 삼차원 가시화 및 애니메이션(animation)이 가능하고 DXF(Drawing eXchange Format)나 SHP(SHaPe file)와 같은 여러 GIS 파일 형태 및 고해상도 Image 파일들과의 상호 호환이 가능하다. 또한, EVS-Pro 자체만으로도 DB 구축, 자료 보간과 같은 공간 분석(spatial analysis) 그리고 복합 가시화(visualization) 및 외부 출력이 가능하므로 지질학적 층서 분석이나 지하 오염에 따른 방재 및 정화 기법 관련 의사 결정과 같은 전문 분야에서 독립적으로 활용될 수 있다. 기존 AutoCAD에 다양한 지형 분석 기능을 추가하여 개발된 AutoCAD LDDT는 수치 지형도(digital topographical map)나 부지 자료의 기능적 전처리가 가능하며, 본 연구에서는 이러한 전처리 과정에서 수계, 건물, 도로 등의 지표상 배치 요소(레이어; layer) 및 지형 표고 속성 정보의 지속적 활용을 위한 사전 추출을 수행하였다. 이와 같은 전문가적 GIS 소프트웨어와 더불어 기지 자료를 토대로 미지 공간 지층 자료를 보다 신뢰성 높게 보간 예측하기 위하여 지층 발달(landform) 특성별 베리오그램(variogram) 모델을 차별적으로 적용하는 개선된 지구통계학적 크리깅(sophisticated geostatistical kriging)을 구현할 수 있는 프로그램을 FORTRAN 코드로 작성하고 공간 분석에 활용하였다.

2.2 공간 지층 정보의 보간 예측을 위한 지구통계학적 방법

본 연구의 GTIS 구축 기법 개발의 목적은 확보된 지반 자료에 대한 DB 기반의 정보화 구현 뿐만 아니라 근본적으로 지하 지층 정보의 합리적 예측을 통한 수많은 지반공학 관련 분야에서의 지속적 활용에 있다. 따라서 제한된 불연속 기지 자료를 이용하여 공간에 분포하는 미지 자료를 연속적으로 신뢰성 높게 보간 예측할 수 있는 방법의 적용이 관건중의 하나이다. 불연속 분포 자료를 연속화하기 위한 방법인 공간 자료 보간 기법에는 단순 산술 평균법(simple average method), 삼각형법(triangular method), 거리 반비례법(inverse weighted distance method) 등과 같은 단순 수학적 방법이 적용될 수 있으나, 대상 영역 내의 전체 자료를 수학적 또는 통계학으로 처리하기에는 한계가 있다(김인기 등, 1993). 반면, 지구통계학적 방법(Geostatistical method)인 크리깅(kriging)은 수학적 방법과 통계학적 방법이 결합된 형태이며, 기지 자료간의 상관관계, 기지 자료와 예측될 지점 값의 상관관계, 기지 자료의 경향성 등을 반영할 수 있어서 지질 및 지반공학적인 예측과 같은 넓은 영역의 공간적 보간에 매우 효과적이다(천성호 등, 2005; Oliver와 Webster, 1990).

크리깅은 대상 영역 내 모든 기지 자료들의 거리에 따른 변화 특성을 베리오그램(variogram)으로 정량화 및 수식화하여 대상 영역의 자료를 보간한다. 즉, 개별 기지 자료간 거리(h)에 따라 영향력이 변화하는 양상을 기지 자료를 토대로 분석하여 베리오그램을 설정한 후, 대상 영역내 미지점들의 값을 주위 기지점들의 값(Z)과 베리오그램 근거리 산정되는 거리에 따른 가중치를 토대로 결정하여 보간한다. 베리오그램의 값($\gamma(h)$)은 거리에 따른 자료의 분산 값으로부터 결정되므로 대상 자료점에서 최저이고 멀어질수록 커지며(Chilès와 Delfiner, 1999), 이 과정 중의 분산 정도에 관련된 표준 편차(standard deviation)는 자료 분포 경향에 따른 예측 값의 신뢰도 평가(reliability estimation)에 직접 활용 가능하다. 자료 예측 목적의 가중치를 계산하는 과정에서 베리오그램의 값은 바로 사용되는 것이 아니라 베리오그램을 이용하여 산출된 코베리언스(covariance)의 값($Cov(h)$)인 거리에 따른 반비례의 가중치로 변환되어 활용된다. 코베리언스와 베리오그램간 상호 관계는 아래 식 (1)과 같으며, 그림 1은 베리오그램과 코베리언스의 도식적 관

계를 나타낸 것이다.

$$\gamma(h) = \text{Var}(Z) - \text{Cov}(h) \approx \text{Sill} - \text{Cov}(h) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\text{Var}(Z)$ 는 기지 자료의 최대 분산 값, 그리고 Sill 은 베리오그램의 최대 값을 의미하며, 일반적으로 $\text{Var}(Z)$ 대신에 유효 거리 구간에서의 최대 값인 Sill 을 적용한 간략식을 이용하여 베리오그램 값을 결정한다.

지구통계학적 크리깅의 보간 예측 과정의 베리오그램에는 다양한 모델이 적용될 수 있다. 일반적으로 그림 2에 도식화된 구형 모델(spherical model), 지수 모델(exponential model), 가우스 모델(gaussian model), 삼차 모델(cubic model), 선형 모델(linear model) 등이 사용되며, 일반 코쉬 모델(generalized Cauchy model), 로그 모델(logarithmic model) 등과 같은 다양한 이론적 모델 역시 사용되고 있다(Chilès와 Delfiner, 1999). 그림 2에서 a 는 유효거리로서 Sill 에 도달할 때의 거리이며, 유효거리보다 멀리 떨어진 두 지점은 서로 영향을 주지 않는다. C_0 는 Nugget으로서 기지 자료에 오차가 포함되어 있는 경우 0이 아닌 양수로 나타나며, Nugget을 사용하면 거리에 따른 기지 자료의 영향력으로 인한 변화폭이 작아진다. 예측 시 사용되는 베리오그램과 관련 계수들(Sill , a , Nugget)은 기지 자료들의 거리에 따른 값의 분산 분포를 나타내는 반베리오그램(semi-variogram)으로부터 적합 방법(curve fitting)을 이용하여 구한다. 즉, 그림 3에서와 같이 기지 값의 거리별 불연속 자료인 반베리오그램을 구한 후 시행 착오(trial and error)법, 선형 접선(linear-tangential)법, 최소 자승(least-squares)법, 가우스 뉴턴(Gauss-Newton)법 등의 적합 방법(curve fitting)을 이용하여 실선으로 표시된 이론적인 베리오그램을 계산한다.

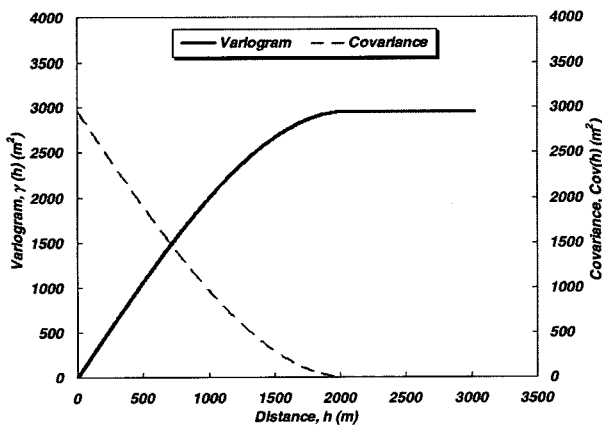


그림 1. 베리오그램과 코베리언스의 관계

위에서 열거된 여러 기본적인 적합 방법 이외에 AIC (Akaike Information Criterion) 기법은 최소 자승법의 일종이며, 반베리오그램과 베리오그램간의 차이를 단순히 최소화하는 것이 아니라, 그 차이에 해당 요소의 측정 자료 값들의 반베리오그램 값에 대한 표준편차를 곱한 값을 최소화한다(Jian, 1996). 이렇게 함으로써 각각의 반베리오그램 값들의 중요도를 보다 우선적으로 고려할 수 있다(천성호 등, 2005). AIC 기법에서는 특정 모델을 적용하여 관련 계수 값들을 적합성 수치와 더불어 쉽게 얻을 수 있다. 따라서 여러 모델을 적용하여 각각의 관련 계수 값들로 표현되는 해당 모델의 베리오그램을 구하고, 이 모델 중에서 적합성 계수의 비교를 통해 가장 적절한 베리오그램을 결정하게 된다(Jian, 1996). 지하 지층의 구조적 구성은 지형과 밀접한 관계가 있다(천성호 등, 2005). 지형은 풍화, 침식, 퇴적 등의 여러 작용에 의해 형성되고, 이 과정 중에 지반의 지표면 하부 여러 지층, 특히 토사 지층의 두께가 결정된다(Birkeland, 1999). 지반을 구성하는 각 지층의 주요 형성 작용이나

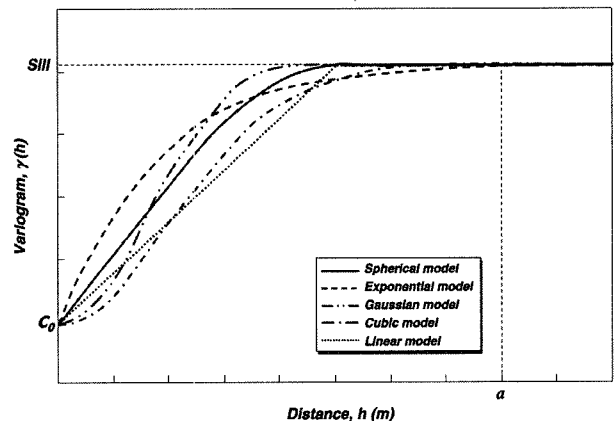


그림 2. 대표적인 베리오그램 모델

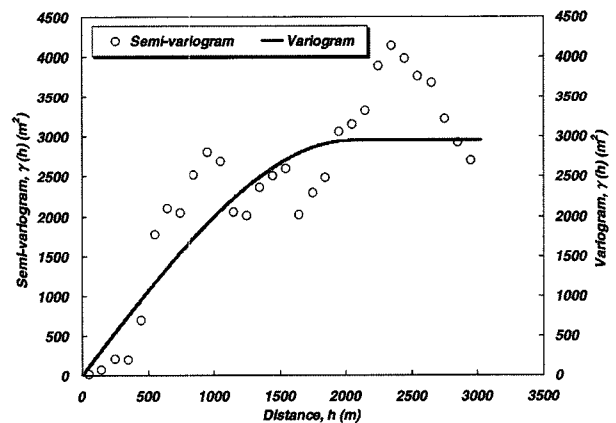


그림 3. 반베리오그램의 적합 방법에 대한 개념

환경은 각 작용의 영향 정도에 따라 다르므로, 본 연구에서는 대상 값의 중요도가 고려되고 조건의 비교 결정이 가능한 AIC 기법을 적용하여 각 지층별 발달 특성을 공간 지층 좌표 값의 보간 예측 과정 중에 차별적으로 고려하였다. 결정된 베리오그램을 이용하여 미지 영역의 자료들을 보간하는 크리깅에는 여러 방법들이 있으며(Chilès와 Delfiner, 1999), 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 정규 크리깅(ordinary kriging)을 적용하였다. 식 (2)에 나타낸 바와 같이 크리깅에서 임의의 평면 좌표 (x_i, y_j) 에 대한 예측 값($Z^*(x_i, y_j)$)은 n 개의 기지 자료 중 α 번째 기지 값(Z_α)과 그의 가중치($w_{ij\alpha}$)와의 조합으로 결정되며, 정규 크리깅의 경우 식 (3)과 같이 예측 대상 지점에 대한 기지 자료들의 총 영향 가중치의 합을 1로 한정한다.

$$Z^*(x_i, y_j) = \sum_{\alpha=1}^n w_{ij\alpha} Z_\alpha, \quad (2)$$

$$\sum_{\alpha=1}^n w_{ij\alpha} = 1 \quad (3)$$

크리깅에는 이 밖에도 기지점들의 미지점에 대한 방향성과 기지점들의 밀집 분포를 고려할 수 있는 screen effect와 declustering의 기능이 있으나, 사전 근거 정보의 부재에 따른 예측 오류 방지를 위하여 본 연구의 지층 정보 보간 예측에서는 적용하지 않았다.

2.3 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템의 구성 및 구축 기법 개발

지반을 구성하는 재료는 그 특성에 따라 여러 층으로 구분될 수 있으며, 이를 지층(geo-layer 또는 geotechnical layer)으로 일컫는다(천성호 등, 2005; Sun, 2004). 지층은 학문적 활용 분야나 전문가적 관점에 따라 분류 방법이나 기준이 매우 다양하다(Sun, 2004). 일반적인 현장 시추 조사에서 지층은 형성 발달 과정과 연경도(軟硬度)에 근거한 기준을 병용하여 구분하게 되며, 경우에 따라서는 현장에서 또는 추가적인 시험과 분석 후 실내에서 각 지층을 내부 구성 재료 특성에 따라 세부적으로 재구분하기도 한다. 본 연구에서는 지반공학적인 견지의 실무적 보편성을 반영하여 지층을 매립토(Fill), 퇴적토(Alluvial Soil 또는 Deposited Soil), 풍화잔류토(Weathered Residual Soil), 풍화암(Weathered Rock), 그리고 기반암(Bed Rock)의 총 5 종류로 구분하였다(선창

국 등, 2005a). 퇴적토는 지질학적 완신세(完新世, the Holocene epoch)의 충적토(alluvial soil)나 그 이전 갱신세(更新世, the Pleistocene epoch)의 홍적토(diluvial soil)와 같이 하천 작용으로 조성된 하적토(fluvial soil), 중력 작용에 의해 경사지의 기부에 형성된 붕적토(colluvial soils), 바람에 의해 조성된 풍적토(aeolian soils), 빙하 이동으로 형성된 빙적토(glacial soil) 등과 같이 이동 및 침전 과정에 의해 생성 발달한 지층을 포괄적으로 의미하며, 기반암은 연암과 그 보다 경질인 보통암, 경암 및 극경암을 포함한다. 대체적으로 지반은 지질학적 형성 과정에 따라 각 지층이 깊이에 따라 특정 순서로 분포하게 되는데, 하부에서부터 기반암, 풍화암, 풍화잔류토, 퇴적토 그리고 매립토의 순서가 일반적이다. 또한, 각 지층의 형성 과정을 살펴보면, 기반암의 풍화 작용에 의해 풍화암과 풍화잔류토가 발달하게 되고(Kim, 2001), 퇴적토의 경우 외부 토사의 유입 퇴적 작용 그리고 매립토의 경우 인위적인 조성에 의해 형성된다. 이러한 각 지층의 생성 및 발달 과정은 공간적 지층 분포의 합리적 예측을 위한 기본 지식으로 활용될 수 있다.

광범위한 대상 지역의 지층 정보와 관련 지반 특성의 합리적 관리 및 공간적 예측을 위하여 본 연구에서 구축한 GIS의 전체 구성은 그림 4와 같으며, 총 3 개의 구성 요소로 이루어져 있다. 이 중 데이터베이스(DataBase) 요소 내에는 일반적인 시추 및 현장 시험 자료와 더불어 한반도 내륙 지역의 층서학적 특성을 고려한 지형 분석 및 현장 답사로부터 추가 확보한 지표 지층 자료로 구성되는 지반-지식(Geo-Knowledge) 자료가 포함되어 있다. 또한, 지표상 배치 요소로 표현되는 시설물이나 지형 특

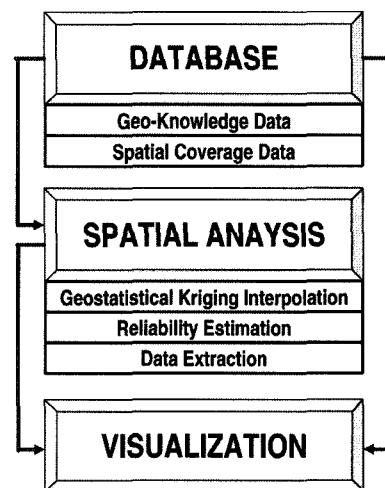


그림 4. 지반 정보화 시스템의 전체 구성

성과 같은 자료(Spatial Coverage Data)도 포함되어 있다. 공간 분석(Spatial Analysis) 요소에서는 이미 언급된 바와 같이 지층 발달 특성별 베리오그램 모델을 차별적으로 구분 적용하는 개선된 지구통계학적 크리깅 방법으로 자료의 공간 영역에 대한 보간 예측을 수행하여, 광범위한 영역에 대한 지반 특성의 공간 정보화 시스템을 구축 가능케 하였다. 더불어 이 요소에서는 크리깅 보간중 연산되는 표준 편차를 이용한 공간 예측 정보의 신뢰도 평가와 보간 자료 추출(Data Extraction)을 통한 정보의 추가적 활용이 가능하다. 가시화(Visualization) 요소는 GIS 기법의 가장 두드러진 기능으로서 정보 기술의 발달에 따라 이차원이나 삼차원뿐만 아니라 시간에 따른 사차원 가시화나 애니메이션도 가능하다.

지반-지식 기반 GTIS 구축시 대상 영역에 대한 공간 지층 정보의 보간 예측에서는 기반암 상부에 존재하는 4 종류 지층(매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암)의 두께를 보간 연산하지 않고, 지표면(surface)과 각 지층간 경계면(interface)을 크리깅 보간 연산하게 된다. 이로부터 결정된 지표면 및 경계면 좌표를 토대로 각 지층의

공간 좌표를 부여하고 가시적으로 출력하게 된다. 그림 5는 본 연구의 GTIS 내에서 공간 지층 정보를 보간 예측하고 가시화하기 위한 지표면 및 지층별 경계면의 구성과 그 과정을 개요적으로 도시한 것이다. 지표 및 지하 지형 변화가 심하거나 자료가 부족한 대상 지역의 경우, 평면 좌표를 기준으로 지층별 두께 자료를 보간 예측하는 방법이 경계면과 같은 표고 자료를 보간 예측하고 지층 두께로 환산하는 방법에 비해 이차원 평면상의 지층 두께 예측에서는 부분적으로 정확도가 높고 추가 환산 과정이 필요 없으므로 효율적일 수 있다(천성호 등, 2005). 그러나 본 연구와 같이 삼차원 공간 자료의 예측을 통한 가시화의 경우 지층 두께 자료를 이용한 보간 예측 방법은 지층 경계면의 절대 표고를 보간 연산의 기지 값과 예측 값으로 하는 방법에 비해 공간 자료 재생성을 위한 추가 연산이 필요하므로, 정해진 대상 영역 내에서 자료 수가 많아질수록 효율성 및 합리성이 떨어진다.

기존의 일반적인 지반 정보 GIS는 대상 지역 내 확보된 지반 조사 자료만을 데이터베이스(DB)화하여 지역 전체의 지층 정보를 예측하므로, 자료가 부족한 지역에서는 예측된 지층 정보의 오류가 발생하게 된다. 특히, 대상 지역의 경계부나 자료가 상대적으로 부족한 산지나 구릉지에서는 암반을 토사로 예측하는 경우도 발생할 수 있다. 이와 같은 공간 지반 정보 예측 오류를 최소화하고 신뢰성 높은 지반 정보를 예측하기 위하여 본 연구에서는 지반-지식 기반의 GTIS 구축 기법을 개발하였으며, 개발된 기법의 구축 과정은 표 1에 제시한 바와 같다. 지반-지식 기반의 GTIS 구축 기법에서는 연구 대상 지역을 포함하는 확장 지역(extended area)에 대해 다양한 문헌과 지질 및 지형 특성 분석을 수행한 후, 지반 조사 자료 부족 지역에서의 현장 지표 조사로부터 GPS(Global Positioning System)를 이용한 절대 좌표 기

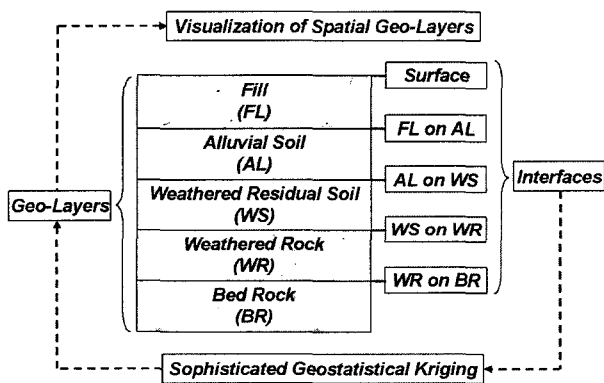


그림 5. 지층에 따른 경계면 구성 및 자료 보간을 통한 공간 지층 정보 가시화 흐름

표 1. 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템 구축 과정

진행단계	단계별 수행 내용
1단계	대상 연구 지역(study area)을 포함하는 확장 지역(extended area) 선정
2단계	확장 지역 내 유용 가능한 현장 지반 조사 자료와 지형, 지질 및 지층 자료의 확보 및 예비 분석
3단계	지형 분석(terrain analysis) 토대의 국지적 지층 발달 특성 결정
4단계	확장 지역의 지질과 지형 특성에 따른 영역화
5단계	연구 대상 지역 내 시추 조사 및 현장 시험 부지 선정
6단계	시추 조사 및 현장 시험 수행
7단계	확장 지역 내 지표면 지층 자료 획득을 위한 추가적인 부지 지표 조사(site visit)
8단계	기존 및 수행된 지반 조사 자료와 추가 획득된 지표면 지층 자료를 이용한 지반-지식 데이터베이스 구축
9단계	확장 지역에 대한 지층 정보의 내삽 및 외삽 보간을 통한 공간 정보 예측
10단계	보간된 확장 지역의 지층 정보로부터 연구 대상 지역의 지층 정보 추출

반의 추가 지표 지층 자료를 획득하여 기존 지반 조사 자료와 함께 지반-지식 DB를 구축하게 된다. 확장 지역 대상의 지반-지식 DB를 토대로 공간 지층 정보를 예측하고, 이로 부터 연구 대상 지역의 지층 정보를 추출하게 된다. 이 과정에서는 확장 지역에 대해 추가 획득한 지표면 지층 자료로 인해 자료 부족 지역에 대한 지층 정보 예측의 신뢰도가 높아질 뿐만 아니라 연구 대상 지역 전체에 대해서는 외삽(extrapolation)에 비해 예측 신뢰성이 높은 내삽(interpolation) 방법만을 적용하여 공간 지층 정보를 예측할 수 있다.

3. 지반-지식 기반 정보화 시스템 구축

개발된 지반-지식 기반 GTIS 구축 기법의 지역적 적용을 위해 국내 내륙의 경주(Gyeongju) 지역을 선정하고, 경주 지역의 지반-지식 관련 자료를 확보하여 사전 분석을 실시하였다. 대상 지역의 기존 자료 중 시추 조사 결과는 깊이에 따라 매립토, 퇴적토, 풍화산류토, 풍화암과 기반암으로 구분하였으며, 사전 분석 결과를 토대로 기존 자료가 부족한 곳에서는 지반 조사를 직접 수행하였다. 또한, 기존 및 수행 지반 자료가 부족한 영역에 대해서는 추가적인 현장 부지 지표면 조사를 통해 지표 지층 자료를 획득하였다. 수집 및 수행된 지층 자료와 추가 획득된 지표 지층 자료를 지반-지식 데이터베이스(DB)로 구축하고 전자 지형도로부터의 지표상 배치 요소들의 DB를 구성함으로써, 대상 경주 지역의 GTIS를 구축하기 위한 기본 구성 항목인 데이터베이스(그림 4 참조)를 구축하였다.

3.1 연구 대상 경주 지역의 지층 자료 분포

경주의 GTIS 구축 대상 연구 지역은 도심지를 포함하는 6km×6km 영역, 그리고 확장 지역은 연구 대상 지역을 포괄하는 확장 영역(7.05km×8.30km)으로 선정하였으며, 확장 및 대상 연구 영역의 평면 좌표 범위는 그림 6에 제시하였다. 본 연구에서는 지반-지식 기반 GTIS 구축 과정에 따라 확장 지역에 대한 지형도, 지질도, 기존 시추 조사 및 지반 관련 시험 자료, 고문헌 등의 지반-지식 관련 자료를 수집 고찰하고, 대상 경주 지역의 전반적인 지형, 지질 및 지반 특성을 파악하였다. 경주의 기반암은 대부분 퇴적암류와 이를 관입한 화강암으로 구성되어 있고, 하천에 인접한 평지와 산기슭에는 퇴적토가 발

달되어 있는 것으로 파악되었다. 또한, 확장 지역의 지형 분석 결과, 경주 지역은 평야와 낮은 구릉 지역에 형성된 시가지와 인근 전답 지역을 주변 산들이 둘러싸고 있는 분지로 이루어져 있으며, 산을 끼고 흘러나온 여러 지천이 중심부의 형산강과 합류하여 흐른다. 특히, 역사 문헌(이강래, 1998)에 의하면 신라의 건국 초기부터 분지를 횡단하는 북천의 잦은 범람으로 인해 민가가 침수되는 피해가 빈번할 정도로 홍수 시에는 경주 분지 대부분이 하천의 대상 유역이었다고 한다. 따라서 전체 경주 지역의 지형 및 지반은 하천에 의한 영향을 크게 받아 퇴적토가 두껍게 발달하고 있을 것으로 보이며, 수집된 기존 시추 자료에서도 두꺼운 퇴적층을 확인할 수 있었다.

지반-지식 관련 자료의 종합 분석 결과를 토대로 산지, 구릉지 및 평야로 지형을 구분하고, 지표 부근 지질 역시 광역적으로 구분하였다. 구분 영역별 기존 시추 및 지반 조사 자료의 존재 여부를 고려하여 본 연구에서 수행할 지반 조사 부지의 위치를 결정하고, 시추 조사 및 지반 특성의 종합적 평가를 위한 현장 탄성과 시험을 실시하였다(선창국 등, 2005b). 기존 시추 조사 자료는 확장 지역 내에서 총 144공이 확보되었으며, 고속 철도 초기 조사 자료와 주변 교량 설계 조사 자료로 구성되며, 형산강변 또는 하천 및 계곡에 주로 분포하고 있다. 본 연구의 지반 조사는 대상 지역의 지형 변화를 고려하여 하천 5개소, 구릉 8개소와 평지 15개소의 총 28 부지에서 수행되었다. 이러한 기존 시추 조사 부지와 수행된 지반 조사 부지의 확장 지역 내에서의 지형 변화에 따른 지리적 위치를 고려하여, 자료가 부족한 영역에 대한 추가적인 현장 부지 지표 조사를 실시하고 지표면의 지층

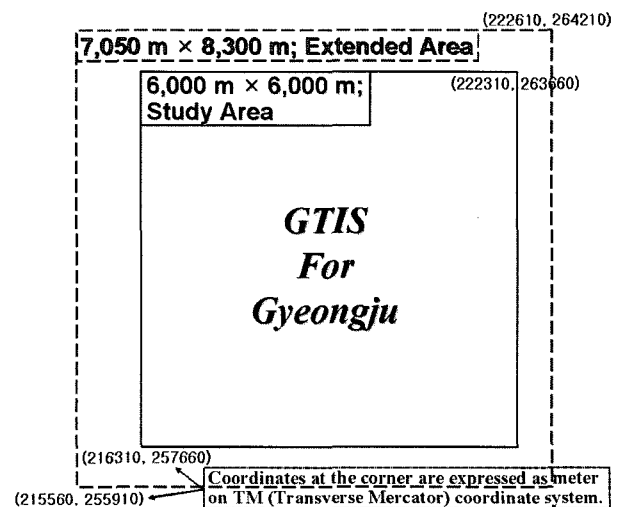
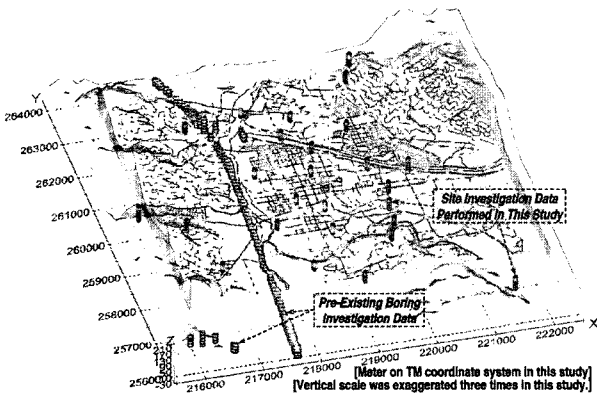


그림 6. 경주의 확장 및 대상 지역의 영역 설정

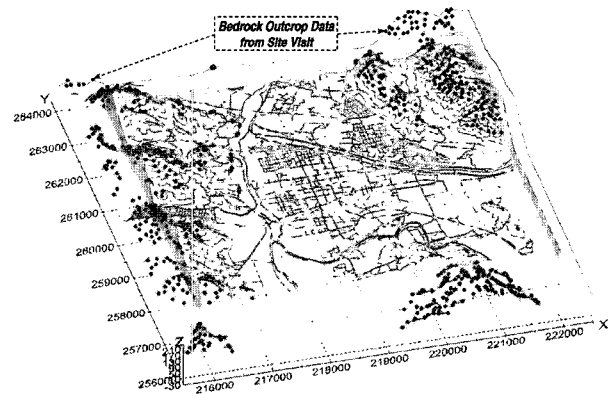
자료를 획득하였다. 추가 부지 지표면 조사에 따른 지표 지층 자료 역시 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암 또는 기반암으로 분류하였으며, 자료 획득 부지의 절대 좌표는 GPS와 수치 지형도를 기반으로 확보하였다. 경주의 확장 지역에 대해 확보된 기존 시추 조사 자료, 수행 지반 조사 자료 및 추가 부지 지표 조사에 의한 지층 자료는 모두 지반-지식 DB의 구성 자료로 활용되었다. 정보화 시스템의 근간을 이루는 자료는 그 개수나 분포 양상에 따라 최종적인 결과의 신뢰성을 좌우할 수 있으므로(Sun, 2004; Rockaway, 1997), 본 연구와 같이 정해진 지역을 대상으로 자료 분포 양상을 전체적으로 파악하고 그에 따라 추가 자료를 확보함으로써 자료의 개수와 분포에 따른 신뢰성을 증진시킬 수 있는 이러한 과정상의 기법은 지반이나 지질 그리고 관련 응용 분야에 매우 유효적절하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 7에는 경주 확장 지역에 대한 지반-지식 DB 구성 자료의 지리적 분포 위치가 제시되어 있으며, GIS 소프트웨어를 이용한 지표 및 지하 지반의 반투명 가시화와 연구 대상 6km×6km 영역에 대한 지표상 배치 요소

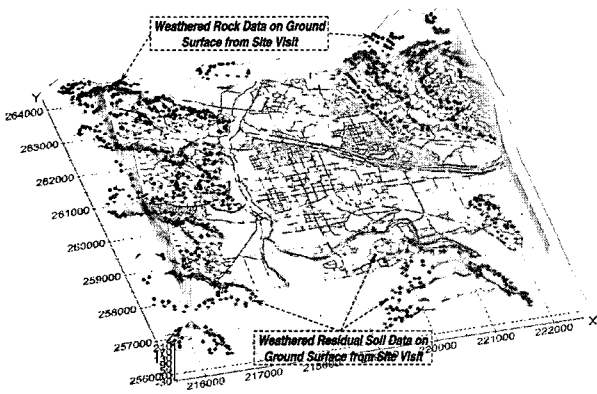
(하천, 도로, 등고선)의 중첩을 통해 자료의 지리 정보 파악을 용이하게 하였다. 일반적으로 특정 도시에 대한 지역적 GIS 활용이나 수치 지형도에서는 TM(Transverse Mercator) 평면 좌표계를 활용하고, GIS 결과에서는 연직 방향 과장을 통해 명확한 가시성을 확보한다. 이에 본 연구의 결과에서도 미터(meter) 단위의 TM 좌표계를 기반으로 자료의 입출력을 처리하고, 출력 결과의 경우 연직 방향에 대해 3배 과장하여 제시하였다. 그림 7(a)는 깊이별 지층 분포 자료의 위치 정보를 가시적으로 제시한 것으로서, 기존 시추 조사 자료(pre-existing borehole drilling investigation data)와 본 연구에서 수행된 지반 조사 자료(site investigation data)로 구성된다. 그림 7(b), 7(c) 그리고 7(d)에는 추가 부지 지표면 조사로부터 획득한 5 종류의 지표 지층 자료(surface geo-layer data)의 위치를 나타냈으며, 각각 기반암 노두 자료, 지표면 부근 풍화암 및 풍화잔류토 자료, 그리고 퇴적토 및 매립토 자료로 구분하여 제시하였다. 대체적으로 산지 내부나 정점 부근에 기반암 노두 자료가, 산지 경사부나 구릉에는 풍화암 또는 풍화잔류토 자료가, 그리고 하천과



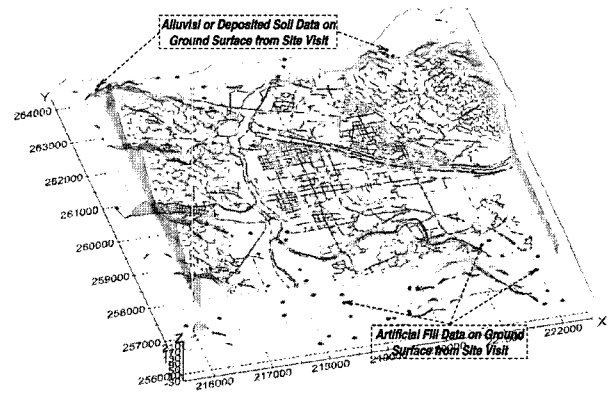
(a) 기존 시추 조사 및 수행 지반 조사 자료



(b) 추가적인 부지 지표 조사로부터 획득한 기반암 노두 자료



(c) 추가적인 부지 지표 조사로부터 획득한 지표면 부근 풍화암 및 풍화잔류토 자료



(d) 추가적인 부지 지표 조사로부터 획득한 지표면 부근 퇴적토 및 매립토 자료

그림 7. 경주 확장 지역에서의 지반-지식 데이터베이스 구축 자료 분포

평지에는 퇴적토 및 매립토가 분포하고 있다.

3.2 경주 지역에 대한 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템 구축

경주 확장 지역에 대해 구축된 지반-지식 DB의 지층 자료를 토대로 확장 지역 전체의 공간 지층 정보를 보간 예측하여 연구 대상 지역의 종합적 지반 정보화 구현을 위한 기초적 정보 시스템을 구축하였다. 자료의 공간적 확장 예측 시에는 AIC 기법을 이용한 최적 베리오그램의 도출 및 적용을 통해 지층별 형성 발달 특성을 고려할 수 있는 개선된 지구통계학적 크리깅을 활용하였으

며(천성호 등, 2005; Sun, 2004; Jian, 1996), 이의 활용은 단일 베리오그램을 적용하는 크리깅에 비해 보다 합리적인 공간 지층 정보를 예측할 수 있게 한다. 경주 지역에 대한 공간 지층 정보는 이미 분류된 5 종류 지층으로 구분하여 보간 예측하였다. 확장 지역을 대상으로 보간된 지층 정보로부터 그보다 작은 영역인 연구 대상 지역의 지층 정보를 추출할 수 있으며, 확장 지역 전체에 고르게 분포하는 지반-지식 자료 토대의 보간 예측 과정 및 이러한 추출 과정을 통해 연구 지역을 대상으로 공간 확장 예측된 지층 정보의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 즉, 정해진 대상 영역 내에 분포하는 기지 자료를 이용하여 대상 영역 전체 미지 공간 자료를 보간 하고자 할

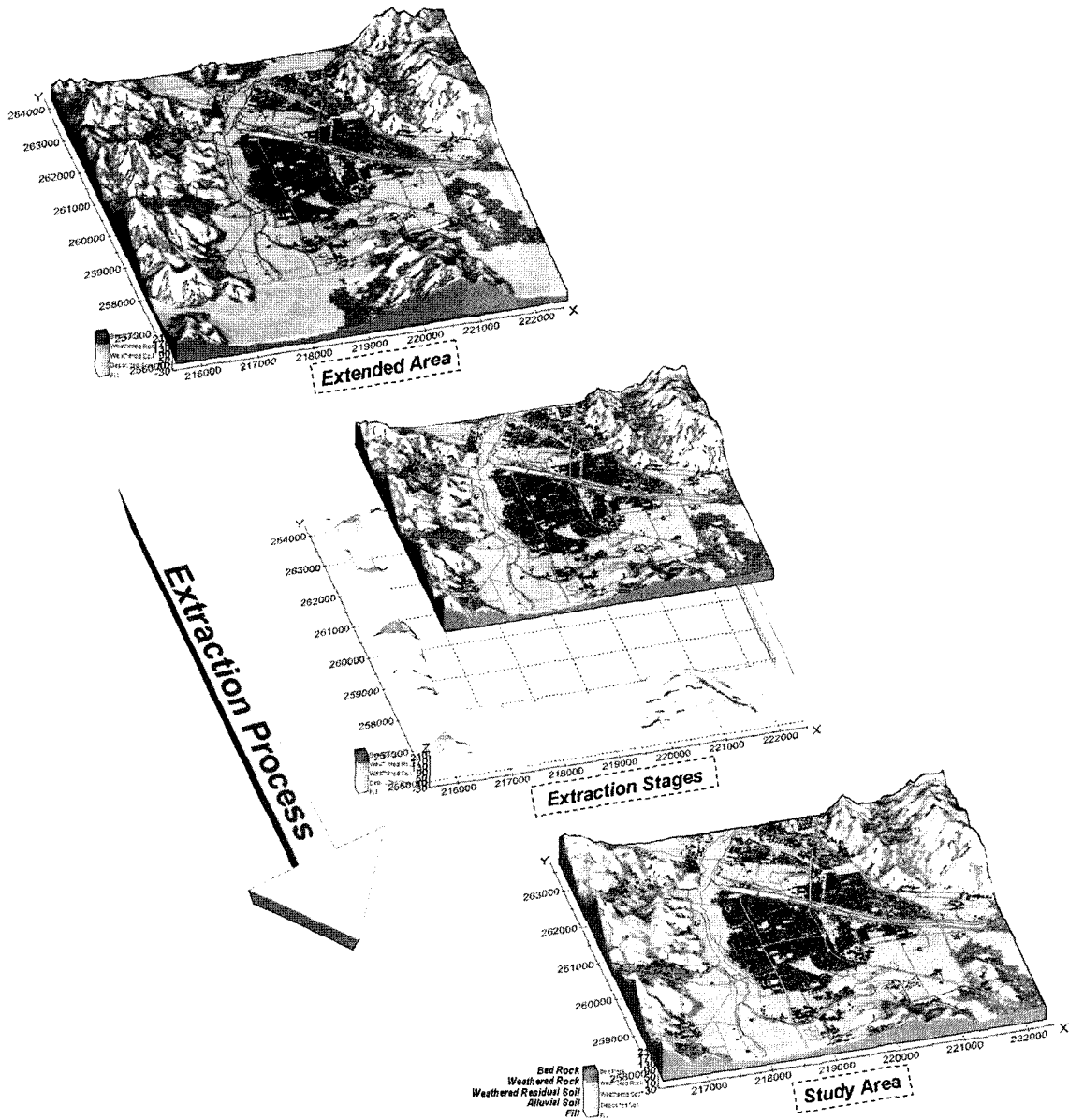


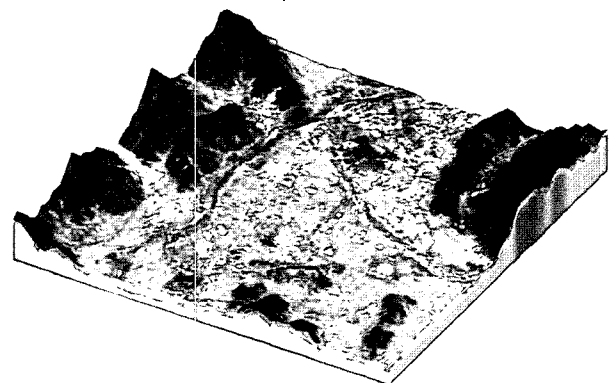
그림 8. 경주의 확장 지역 공간 지층 정보로부터 연구 대상 지역 공간 지층 정보의 추출

경우, 가장 외부에 위치한 자료와 대상 영역 경계부까지의 미지 공간 자료는 외삽(extrapolation)을 통해 보간 예측하는 반면, 정해진 대상 영역의 경계 외부에 추가적인 자료를 분포시키게 되면 그 경계부까지의 미지 공간 자료는 내삽(interpolation)을 통해 보간 예측한다. 대부분의 보간 예측 시 내삽이 외삽에 비해 그 정확도가 매우 높으며, 이러한 의미에서 연구 대상 지역을 포함하는 확장 지역과 확장 지역 전체에 대한 지표 지층 자료 획득 목적의 추가적인 부지 지표 조사 과정은 본 연구의 지반-지식 기반 GTIS의 가장 중요한 핵심 개념이라고 할 수 있다. 그림 8은 보간 예측된 확장 지역 전체의 공간 지층 정보로부터 연구 대상 지역의 정보를 추출하는 과정을 지반-지식 기반 GTIS 내에서 단계별로 가시화한 경주 지역의 개념적 공간 지층 정보의 흐름이다. 그림 8의 각 단계 공간 지층 정보의 지표면에는 경주 연구 대상 지역의 지리적 영역 경계와 도시 특성 파악을 위한 목적으로 지표상 배치 요소들 중 하천, 도로 및 건물을 중첩 제시하였다.

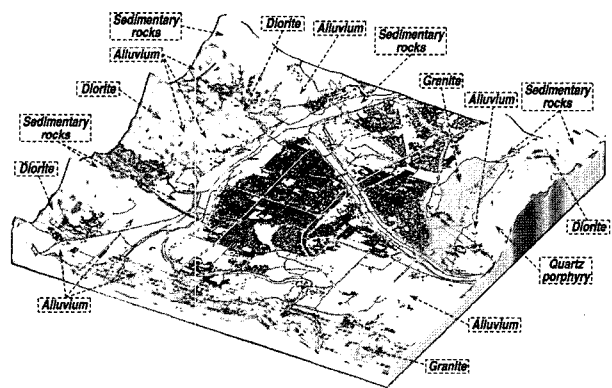
연구 대상 지역의 지반-지식 기반 GTIS 구축을 통해 합리적으로 예측된 전체 대상 영역에 대한 공간 지층 정보는 다양한 지반 관련 분야나 지역적 의사 결정의 근본 매개 자료로 활용 가능하다. 뿐만 아니라 GTIS 내에서는 벡터(vector) 자료인 수치 지형도를 토대로 구현된 삼차원 지형 특성과 기존 레스터(raster) 자료의 복합적 활용을 통한 공간 분석이 가능하다. 이러한 기법을 이용하여 이차원 평면 형태로 생성되어 있는 여러 기존 레스터 자료의 활용성이 다양하게 증진될 수 있을 것으로 보인다. 그림 9는 기존 레스터 자료인 원격 탐사 영상(Remote Sensing image) 자료와 지표 지질도(Surface Geological map) 자료를 벡터 자료 기반으로 구현된 경주 대상 지역의 삼차원 지표면에 중첩하여 가시화한 것으로서, 이를 통해 경주 지역 지형과 지표 지질의 공간적 분포 특성을 파악할 수 있다. 경주의 지형은 이미 묘사된 바와 같이 평지를 산지가 둘러싸고 있는 분지 형상을 보이고 남북으로 주하천(형산강)이 흐르고 분지 내의 평지에서 여러 소하천이 합류 하고 있음을 그림 9(a)로부터 파악할 수 있다. 이와 같은 공간적 지형 분석 결과를 통하여 주변 산지로부터 계곡이나 평지로의 토사 유입, 하천 범람에 따른 퇴적 등과 같은 과거 경주 지역의 지층 발달 환경을 추정할 수 있다. 그림 9(b)에서는 상대적 위치 파악을 위해 지표상 배치 요소들(하천, 도로, 건물)을 지표 지질도 위에 추가적으로 중첩 시켰으

며, 산지 부근에서의 퇴적암류 및 화강암류의 기반암 분포를 확인할 수 있고 평지와 경사지 계곡에서의 퇴적층 분포를 확인할 수 있다. 이러한 공간 지질 분포 파악을 토대로 지표 및 지하 지층 정보를 추정하고 다양한 목적으로 수행되는 지반 조사 위치를 결정할 수 있다.

본 연구의 지반-지식 기반 GTIS 구축 기법은 기본적으로 대상 지역의 삼차원 공간 정보를 합리적으로 보간 예측하기 위하여, 기존에 일반적으로 적용되어 온 단순 자료 기반의 일반적인 지반 정보 GIS와는 구분되는 차별적 기법으로 개발한 것이다. GTIS의 대표적 결과인 삼차원 공간 지층 정보(그림 8 참조)는 GIS 기법 토대 내에서는 가상적 현실성(virtual reality) 및 가시성이 뛰 어날 수 있으나 실무적 활용성에 있어서는 제한적일 수 있다. 즉, 공간 지층 정보의 활용은 좌표 체계 기반의 수치 자료(digital data) 형태나 전문가적 GIS 기법을 통해서만 가능하므로 GIS 관련 비전문가인 건설 및 행정 실무자에게는 접근성이 결여될 수 있다. 이러한 실무적 활용성의 단점을 보완할 뿐만 아니라 공간적 가시성을 확보하기 위한 방법으로서, 본 연구에서는 고전적인 기



(a) 원격 탐사 자료 활용을 통한 지형 특성 파악



(b) 지질도 및 지표면 분포 레이어의 복합 활용을 통한 지질 특성 파악
그림 9. 경주 연구 대상 지역의 레스터 평면 자료 투영을 통한 공간적 지형 및 지질 특성 파악

존 이차원 평면 등고 윤곽(contour) 지도를 대상 지역의 삼차원 지표면에 가시적으로 표현하는 기법을 GTIS 내에서 구현하였다. 지표면 투영 정보는 각 지층의 두께, 여러 조합 지층의 두께 합 또는 기반암 심도이며, 보간 예측된 지표면과 공간 지층 경계면의 좌표 정보를 이용하여 GIS 소프트웨어 내에서 추가적으로 연산하였다. 대상 정보의 위치별 연산 값은 해당 평면 좌표 위치의 지표면에 가시적으로 투영하여 실무적 유용성이 뛰어난 삼차원 지도로 제공되었다. 그림 10은 가능한 여러 대상 정보중 경주 지역의 주요 발달 지층인 퇴적토의 두께 분포를 가시적으로 구현한 삼차원 지도이며, 상대적 위치 파악을 위해 수계 및 도로의 지표상 배치 요소들도 중첩 표현하였다. 그림 10에서 쉽게 확인할 수 있는 바와 같이, 하천이 가로지르는 평야지에서 퇴적토가 두껍게 발달해 있고 최대 36m 두께 정도로 분포하고 있다. 이와 같은 지도 자료는 지반공학적 측면의 침하 분석 또는 다양한 토목 및 도시 관련 의사 결정에 직관적 정보를 제공할 수 있다. 또한, 지반공학 뿐만 아니라 지진공학 측면에서도 매우 중요한 매개 변수로 인지되고 있는 기반암 심도 분포 파악을 위한 삼차원 지도를 그림 11에 제시하였다. 경주 지역 기반암 심도의 전반적인 분포 경향은 퇴적토 두께와 유사하게 나타나고 있으며, 이는 경주의 경우 이미 파악된 바와 같이 기반암 상부 토사의 주요 형성 작용이 기반암의 풍화라기보다는 하천 퇴적 작용이기 때문이다. 경주 연구 대상 지역에서 기반암 심도는 분지내 평지에서 최대 약 49m 깊이 정도로 예측되었고, 국내 내륙 지역의 기반암 심도로서는 비교적 깊은 분포를 보였다(Sun 등, 2005). 본 연구의 지반-지식 기반 GTIS 내에서 구축된 이러한 지층 두께 및 기

반암 심도 분포의 삼차원 지도는 탁월한 가시성이 확보된 자료로서 다양한 지반 관련 분야에서의 효율성 높은 실무적 활용이 가능하다.

4. 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템과 일반적인 지반 정보 GIS의 비교

최근 Kumar 등(2000)이나 Ferrier와 Wadge(1997)의 해외 지반 정보 관련 연구에서 전문가 지식 기반의 GIS 활용 및 지층 정보 예측이 부분적으로 수행되고 있으나, 현재까지 대부분의 지반 정보 관련 GIS 활용에서는 확보된 지반 조사 자료만을 기초로 DB 구축 및 지반 정보의 보간 예측을 실시해 오고 있다(Sun, 2004). 본 연구의 지반-지식 기반 GTIS는 대상 지역의 지반 조사 자료만을 이용하는 기존의 일반적인 지반 정보 GIS 보다 정보 예측 신뢰도를 더욱 향상 시킬 수 있는 시스템으로 구현되었으며, 근본적으로 확장 영역의 적용과 지반-지식 자료의 추가 획득을 위한 부지 지표 조사의 개념들에 의해 일반적인 지반 정보 GIS와는 차별화 된다. 공간 지층 정보 예측 신뢰도 측면에서 일반적인 지반 정보 GIS에 대한 지반-지식 GTIS의 합리적 우수성을 검증하기 위하여, 본 연구에서는 경주의 연구 지역을 대상으로 두 정보화 기법의 공간적 표준 편차와 보간 예측된 공간 지층 정보를 비교하였다.

정해진 영역에 대한 기지 입력 자료 토대의 공간 정보 예측 신뢰도에 관한 평가는 교차검증(crossvalidation)이나 검증(validation)과 같은 검증 기법(천성호 등, 2005; Barton, 1999) 그리고 크리깅 보간 중 자료 분산 정도에 따라 확인할 수 있는 표준 편차 기법이 주로 이용되어

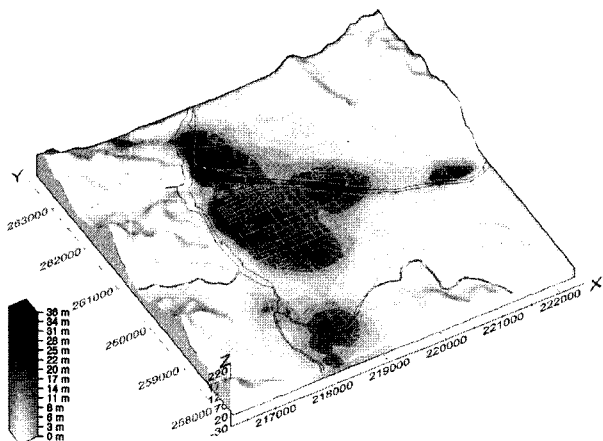


그림 10. 경주 지역의 지하 지층 정보를 이용한 퇴적토 두께의 지표면 투영 분포 정보

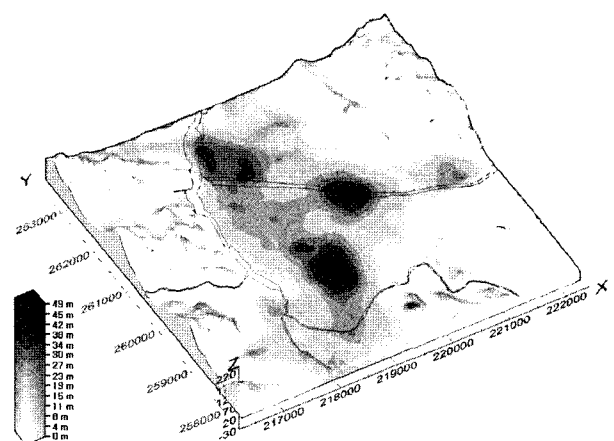
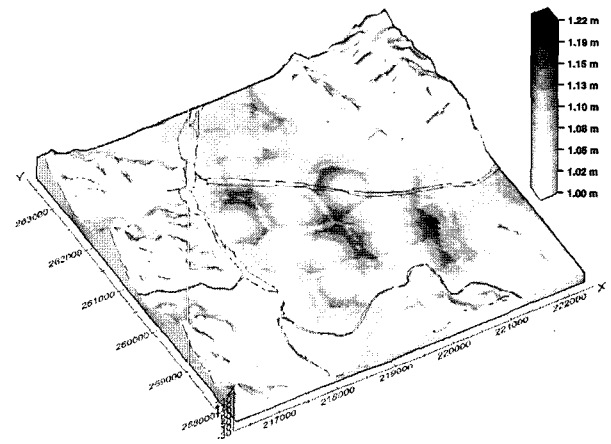


그림 11. 경주 지역의 지하 지층 정보를 이용한 기반암 심도의 지표면 투영 분포 정보

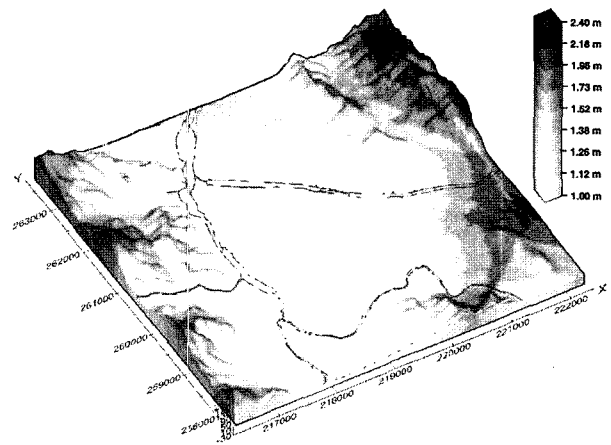
왔다(Sun, 2004; CTech, 2001). 전자인 검증 기법은 예측 정보를 대상으로 하는 블라인드 테스트(blind test)로서, 대상 영역 내 기지 자료 중 한 개 혹은 여러 개의 기지 자료를 미지 자료로 가정하여 나머지 자료를 토대로 가정된 미지 자료를 예측하고, 이 과정을 나머지 모두에 대하여 반복 수행한 후 각각의 기지 값과 예측 값을 비교함으로써 이루어진다(Isaaks와 Serivastava, 1989). 이 기법은 다양한 오차(평균오차, 평균절대오차, 평균자승오차)의 형태로 예측 정확도에 대한 정량적 평가가 가능하지만, 보간 예측 과정 이외의 추가적인 연산 과정이 요구되므로 자료 수가 많아질 수록 효율성이 떨어진다. 이에 반해, 표준 편차 기법은 지구통계학적 크리깅 보간 과정 중 연산되는 자료 분포에 따른 분산 정도의 표준 편차를 이용하므로 추가 연산 없이 효율적으로 예측 신뢰도 평가가 가능하다. 본 연구에서는 다양한 형태의 오차 비교를 통한 공간 지층 정보 예측 신뢰도의 정량적 상세 평가보다는 기지 자료 수가 많은 광범위한 지역의 정보 예측 분산 정도에 따른 신뢰도의 효율적 평가를 목적으로 표준 편차 기법을 적용하여 대상 지역 공간 지층 정보의 예측 신뢰도를 평가하였다. 지반-지식 기반 GTIS와 일반적인 지반 정보 GIS의 공간 지층 정보 예측 신뢰도를 경주 지역 지반을 대상으로 공간적 분포 형태로 구현하였으며, 그림 12에 제시한 바와 같이 비교하였다. 그림 12에 제시된 표준 편차 분포에서는 그 값의 크기가 작을수록 예측 값의 분산 정도가 작으므로, 해당 위치의 공간 예측 지층 정보에 대한 높은 신뢰도를 의미한다. 지반-지식 기반 GTIS(그림 12(a))의 경우 일부 평지의 자료 부족 위치를 제외하고는 대상 지역 전체에 자료가 고르게 분포(그림 7(a)~그림 7(d) 참조)함에 따라 전반적으로 작은 표준 편차(최대 1.22m)를 보였다. 반면, 일반적인 지반 정보 GIS(그림 12(b))의 경우 기존 및 수행 지반 조사 자료가 분포(그림 7(a) 참조)하는 일부 위치에서만 작은 표준 편차를 보였을 뿐 대부분 위치에서 상대적으로 큰 표준 편차(최대 2.40m)를 나타냈다. 이와 같은 두 구축 기법의 표준 편차 비교 결과로부터, 기존의 일반적인 지반 정보 GIS에 비해 본 연구의 지반-지식 기반 GTIS가 공간 지층 정보의 예측 시 예측 값의 분산 정도가 작고 이에 따라 상대적으로 높은 예측 신뢰도를 가짐을 확인하였다.

표준 편차와 같은 지표(index)를 이용한 공간 정보 예측 신뢰도 평가 방법 이외에 보간 예측된 지층 정보의 직접 비교를 통한 전문가적 판단 방법은 가장 광범위하

게 보편적으로 적용되어 왔다(Sun, 2004; Kumar 등, 2000). 이에 본 연구에서도 경주 연구 지역을 대상으로 구축된 지반-지식 기반 GTIS와 일반적인 지반 정보 GIS의 보간 예측된 공간 지층 분포를 직접 비교함으로써, 지반-지식 기반 GTIS의 상대적으로 높은 예측 정확도를 지반 및 지질 전문가적 판단에 따라 가시적으로 확인하고자 하였다. 그림 13은 전문가적 판단을 위한 전형적인 비교 사례로서, 경주 대상 지역의 대표적 동서 단면에 대한 깊이 방향의 이차원 지층 단면들을 비교 제시하였다. 그림 13에서 알 수 있는 바와 같이, 지반-지식 기반 GTIS(그림 13(a))에서 합리적으로 보간 예측한 산지 부근의 기반암 지반을 일반적인 지반 정보 GIS(그림 13(b))에서는 기지 자료 부재로 인해 매립토로 예측하는 오류를 보였고, 그로 인해 이차원 단면의 전체적인 토사 분지 형상도 왜곡되게 예측하였다. 일반적인 지반 정보 GIS의 공간 지층 분포 예측에 있어서 이러한 왜곡 및

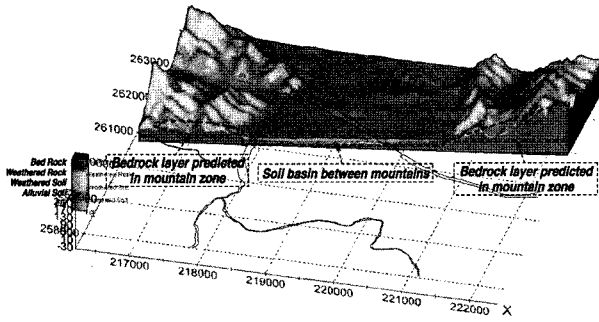


(a) 지반-지식 기반 GTIS

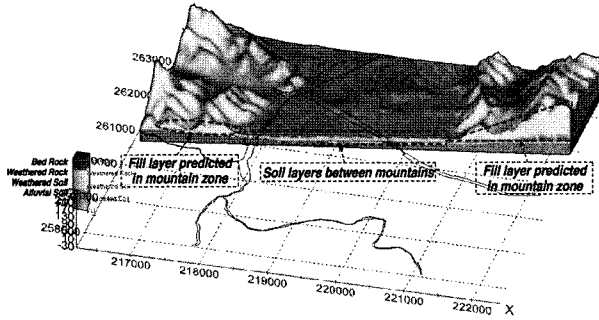


(b) 일반적인 지반 정보 GIS

그림 12. 경주 대상 지역에서의 지반-지식 기반 GTIS와 일반적인 지반 정보 GIS의 공간 표준 편차 비교



(a) 지반-지식 기반 GTIS



(b) 일반적인 지반 정보 GIS

그림 13. 경주 대상 지역에서의 지반-지식 기반 GTIS와 일반적인 지반 정보 GIS의 공간 예측 지층 정보 비교

오류는 연구 대상 지역 내 다른 지층 단면들로부터도 확인되었다. 반면, 동일 단면들의 가시적 확인을 통한 전문가적 판단에 근거해 볼 때, 지반-지식 기반 GTIS는 지층 분포 보간 예측에 있어서 대상 지역에 대해 전체적으로 지형 특성과 결부된 지하 지층 정보를 합리적으로 예측하였다. 따라서 본 연구의 지반-지식 기반 GTIS는 기존의 일반적인 지반 정보 관련 GIS에 비해 지반 정보의 공간 예측 신뢰도가 높은 것으로 확인 되었으며, 주요 지역에 대한 지표 및 지하 지반 정보의 관리와 공간적 예측에 매우 유용하게 활용 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

지반 특성 자료에 대한 종합적 활용의 일환으로, 기존의 일반적인 지반공학적 GIS와는 구분되는 차별적인 지반-지식 기반 지반 정보화 시스템(GTIS)의 구축 기법을 개발하고 경주 지역을 대상으로 적용하였으며, 이러한 연구 과정을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 연구 대상 지역을 포함하는 확장 지역 적용과 깊이 별 지반 조사 자료 부족 영역에서의 지표면 부근 지층 자료의 추가 획득을 위한 부지 지표 조사의 새로

운 방법들을 고안하여 지반-지식 기반 GTIS 구축 기법을 개발 제시하였다.

- (2) 지반공학 실무적 보편성을 반영하여 지층을 5 종류의 매립토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암 및 기반암으로 구분하고, 지반-지식 기반 GTIS 구축시 공간 지층 정보의 신뢰성 높은 보간 예측을 위해서 지층별 최적 베리오그램을 독립적으로 이용함으로써 지층 발달 특성을 고려할 수 있는 개선된 지구통계학적 크리깅 기법을 적용하였다.
- (3) 국내의 경주 지역을 대상으로 기존 및 수행 지반 조사 자료와 지표 지층 자료 토대의 지반-지식 데이터 베이스를 구축하고 공간 지층 정보를 합리적으로 보간 예측하였으며, 가시적으로 출력하여 지반-지식 기반 GTIS를 구축하였다.
- (4) 경주 지역의 지반-지식 기반 GTIS를 이용하여 원격 탐사 및 지표 지질도 자료를 증첩한 현실적 지형 및 지질 분포 특성 파악 목적의 삼차원 공간 분석 지도를 제시하였으며, 지반 관련 실무적 활용 목적의 지층 두께 및 기반암 심도의 지표 투영 형태인 삼차원 공간 분포 지도를 구축 제시하였다.
- (5) 개발된 지반-지식 기반 GTIS 구축 기법의 검증을 위하여 기존의 일반적인 지반 정보 GIS의 예측 지층 정보와 비교해 본 결과, 지반-지식 기반 GTIS의 공간 지층 정보에 대한 높은 예측 신뢰도를 베리오그램 결정시 연산되는 표준 편차와 지반 및 지질 전문가적 판단을 통해 확인하였다. 따라서 지반-지식 기반 GTIS는 지역적 지반 정보의 관리와 종합 활용에 매우 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학 연구센터(KEERC)와 (주)도화지질의 연구 지원과 서울대학교 공학연구소의 연구 협조로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2002), *국토건설종합지반정보 DB 구축 및 활용시스템 개발*.
2. 김인기, 성원모, 정문영 (1993), "수정된 Kriging법을 응용한 다목적지구통계모델의 개발 및 타당성 검토", *대한광산지질학회지*, Vol.26, No.2, pp.207-215.
3. 선창국, 양대성, 정충기 (2005a), "서울 평야 지역에 대한 부지 고유의 지진 증폭 특성 평가", *한국지진공학회 논문집*, 제9권, 4호,

- pp.29-42.
4. 선창국, 정충기, 김동수 (2005b), “국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계 제안”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 6호, pp.101-115.
 5. 유환희, 이민우, 이성민 (2002), “도시홍수재해 관리시스템 구축”, *대한토목학회 논문집*, 제22권, 3D호, pp.561-569.
 6. 이강래 (1998), *삼국사기 I: 김부식*, 한길사.
 7. 천성호, 선창국, 정충기 (2005), “지반 정보화를 위한 지구 통계학적 방법의 적용”, *대한토목학회 논문집*, 제25권, 2C호, pp.103-115.
 8. 홍성완, 배규진, 서용석, 김창용, 김광염 (2002), “지반조사 정보의 3차원 가시화 시스템 개발”, *지질공학*, Vol.12, No.2, pp.179-187.
 9. Autodesk (2001), *AutoCAD Land Development Desktop 2i Manuals and Application Books*, Autodesk, Inc.
 10. Barton, J. M. H., Buchberger, S. G., and Lange, M. J. (1999), “Estimation of error and compliance in surveys by kriging”, *Journal of Surveying Engineering*, ASCE, Vol.125, No.2, pp.87-108.
 11. Birkeland, P. W. (1999), *Soils and Geomorphology*, Oxford University Press, New York, pp.252-283.
 12. Chilès, J. P. and Delfiner, P. (1999), *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, John Wiley & Sons, New York.
 13. CTech (2001), *EVS/MVS Manuals Version 5.1: Main Helps and Visualization Fundamentals, Module Libraries, Work Books and Sample Applications*, C Tech Development Corporation.
 14. Ferrier, G. and Wadge, G. (1997), “An integrated GIS and knowledge-based system as an aid for the geological analysis of sedimentary basins”, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol.11, No.3, pp.281-297.
 15. Gangopadhyay, S., Gautam, T. R., and Gupta, A. D. (1999), “Subsurface characterization using artificial neural network and GIS”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.13, No.3, pp.153-161.
 16. Geodecisions (2004), *Geotechnical Data Management System*, Assessment Report, State of Ohio, Department of Transportation.
 17. Holdstock, D. A. (1998), “Editorial: basics of geographic information system (GIS)”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.13, No.1, pp.1-4.
 18. Isaaks, E. H. and Serivastava, R. M. (1989), *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York.
 19. Jia, X. (2000), “IntelliGIS: tool for representing and reasoning spatial knowledge”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.14, No.1, pp.51-59.
 20. Jian, X., Olea, R. A., and Yu, Y. S. (1996), “Semivariogram modeling by weighted least squares”, *Computers and Geosciences*, Vol.22, pp.387-397.
 21. Kim, B. H. (2001), *Investigation for Shear Wave Velocity and Degree of Weathering of Decomposed Granite Soil in Hongsung*, M.Sc. Thesis, Seoul National University.
 22. Kumar, J. K., Konno, M., and Yasuda, N. (2000), “Subsurface soil-geology interpolation using fuzzy neural network”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.126, No.7, pp.632-639.
 23. Kunapo, J., Dasari, G. R., Phoon, K. -K., and Tan, T. -S. (2005), “Development of a web-GIS based Geotechnical Information System”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.19, No.3, pp.323-327.
 24. Lee, S. and Choi, U. (2003), “Development of GIS-based geological hazard information system and its application for landslide analysis in Korea”, *Geosciences Journal*, Vol.7, No.3, pp.243-252.
 25. Oliver, M. A. and Webster, R. (1990), “Kriging: a method of interpolation for geographical information systems”, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol.4, No.3, pp.313-332.
 26. Parsons, R. L. and Frost, J. D. (2002), “Evaluating site investigation quality using GIS and geostatistics”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 6, pp.451-461.
 27. Rengers, M., Hack, R., Huisman, M., Slob, S., and Zigterman, W. (2002), “Information technology applied to engineering geology”, *Proceedings of the 9th Congress IAEG*, Durban, South Africa, pp.121-143.
 28. Rockaway, T. D. (1997), *Spatial Assessment of Earthquake Induced Geotechnical Hazards*, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
 29. Scott, B. M. and Carlton, L. H. (1999), “Applications and Issues of GIS as Tool for Civil Engineering Modeling”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.13, No.3, pp.144-152.
 30. Sun, C. G. (2004), *Geotechnical Information System and Site Amplification Characteristics for Earthquake Ground Motions at Inland of the Korean Peninsula*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
 31. Sun, C. G., Kim, D. S., and Chung, C. K. (2005), “Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea”, *Engineering Geology*, Vol.81, No.4, pp.446-469.
 32. Williams, T., Szary, P., Thomann, T., Konnerth, C., and Nemeth, E. (2002), *GIS Applications in Geotechnical Engineering*, Final Report, FHWA 2002-06, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
 33. Xie, M., Esaki, T., Zhou, G., and Mitani, Y. (2003), “Geographic information system-based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.12, pp.1109-1118.

(접수일자 2005. 12. 16, 심사완료일 2006. 2. 27)