

GIS 및 지구통계학을 이용한 실시간 통합계측관리 프로그램 개발 Development of Real Time Monitoring Program Using Geostatistics and GIS

한병원¹⁾, Byung-Won Han, 박재성²⁾, Jae-sung Park, 이대형³⁾, Dae-Hyung Lee, 이계춘⁴⁾, Gye-Choon Lee, 김성욱⁵⁾, Sung-Wook Kim

¹⁾ (주)바이텍코리아 기술연구소 연구소장, Chief, Institute of Technology, Baytech Korea Inc.

²⁾ (주)바이텍코리아 계측기술부 과장, Section Chief, Baytech Korea Inc.

³⁾ (주)바이텍코리아 계측기술부 부장, General Manager, Baytech Korea Inc.

⁴⁾ (주)바이텍코리아 계측기술부 상무이사, Director, Baytech Korea Inc.

⁵⁾ (주)바이텍코리아 계측기술부 전무이사, Executive Director, Baytech Korea Inc.

SYNOPSIS : In the large scale recent reclaiming works performed within the wide spatial boundary, evaluation of long-term consolidation settlement and residual settlement of the whole construction area is sometimes made with the results of the limited ground investigation and measurement. Then the reliability of evaluation has limitations due to the spatial uncertainty. Additionally, in case of large scale deep excavation works such as urban subway construction, there are a lot of hazardous elements to threaten the safety of underground pipes or adjacent structures. Therefore it is necessary to introduce a damage prediction system of adjacent structures and others. For the more accurate analysis of monitoring information in the wide spatial boundary works and large scale urban deep excavations, it is necessary to perform statistical and spatial analysis considering the geographical spatial effect of ground and monitoring information in stead of using diagrammatization method based on a time-series data expression that is traditionally used. And also it is necessary that enormous ground information and measurement data, digital maps are accumulated in a database, and they are controlled in a integrating system. On the abovementioned point of view, we developed Geomonitor 2.0, an Internet based real time monitoring program with a new concept by adding GIS and geo-statistical analysis method to the existing real time integrated measurement system that is already developed and under useful use. The new program enables the spatial analysis and database of monitoring data and ground information, and helps the construction-related persons make a quick and accurate decision for the economical and safe construction.

Key words : GIS, Statistical and spatial analysis, Monitoring, Internet

1. 서 론

지반과 관련된 건설공사에서 지반조사, 설계 및 시공 등의 각 단계마다 불확실성으로 인해서 지반의 거동을 정확하게 모사하고 예측하는데 많은 제약이 따른다. 그래서 실질적인 지반거동을 정확하게 파악하기 위해 시공단계에서 계측관리 즉 정보화 시공 기법이 이용되고 있다.

최근 들어서 대단위 매립지 조성사업과 같이 공간적으로 방대한 지역에서 이루어지는 공사에서 한정된 지반조사결과와 계측결과를 이용하여 전체 공사구간 지반의 장기압밀 침하량 및 잔류침하량을 예측, 평가 하는 것은 공간적 불확실성으로 인해 그 결과의 신뢰성에 한계가 따른다. 또한 도심지 지하철공사

와 같은 대규모 굴착공사에서는 인접 구조물이나 기타 매설관의 안정성을 위협하는 요인이 발생할 소지가 많기 때문에 굴착에 따른 인접건물 등의 손상을 사전에 평가할 수 있는 기법의 도입이 필요하다.(유충식 등, 2002) 이와 같이 공간적으로 방대한 지역에서의 공사와 도심지 대형 굴착공사 등에서 계측정보의 정확한 분석을 위해서는 기존에 사용되는 단순한 데이터의 시계열적인 나열에 근거한 도식화보다는 지반정보 및 계측정보의 지리적 공간효과를 고려한 통계적 공간분석이 필요하며 또한 방대한 지반자료 및 계측자료, 수치지도를 DB화하여 통합적으로 관리, 운영할 필요가 있다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존에 연구개발 되어 사용 중인 인터넷을 이용한 실시간 통합계측관리 시스템에 GIS 및 지구통계학적 분석 기법을 도입하여 계측자료 및 지반 정보의 공간적인 분석, DB화가 가능하도록 함으로써 공사 관련자들이 경제적, 안정적 시공을 위한 보다 신속하고 정확한 의사결정을 하는데 도움이 되고자 새로운 개념의 인터넷 기반 실시간 계측관리 프로그램 (Geomonitor 2.0)을 개발하였다.

2. 개발환경 및 구성

2.1 시스템 개발환경 및 구성

본 시스템은 2002년 정기 봄 학술발표에 발표된 인터넷 기반 계측관리 시스템에 관한 연구개발의 연장선상에서 GIS 및 지구통계학적 기법의 모듈이 추가 개발하는 형식을 취하고 있다. 시스템의 개발 환경은 Visual C++ .NET과 Professional User interface suite를 이용하여 개발을 진행하였다.

전체적인 시스템 구성 및 운영프로그램 기능은 다음과 같다.

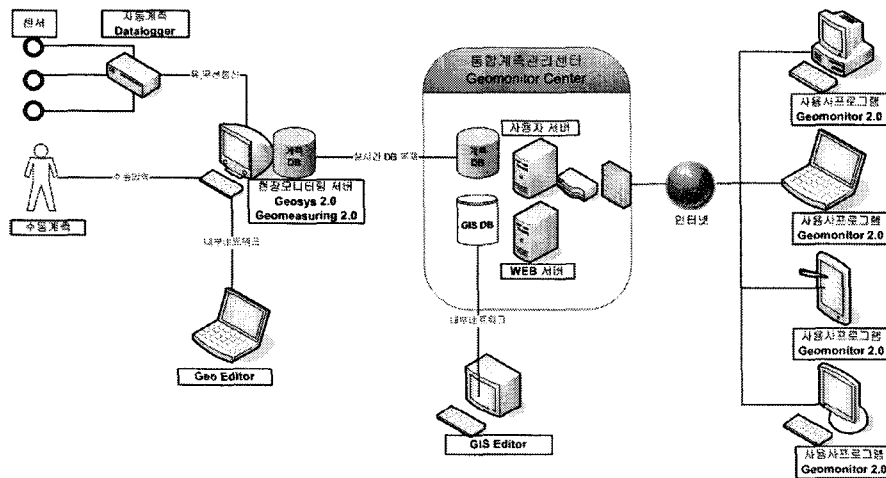


그림 1. 시스템 구성도

표 1. 각 시스템별 운영프로그램 및 기능

구분	시스템	기능
Geomeasuring 2.0 Data logger 제어프로그램	현장모니터링 서버	Datalogger 제어(통신설정, 계측빈도설정, 경보발생 등)
Geosys 2.0 현장 클라이언트 프로그램	현장모니터링 서버	계측센서 및 데이터 관리(센서생성, 수정, 삭제, 계산공식 설정 등)
Giseditor GIS 편집프로그램	통합관리서버	수치지도생성, 지반정보생성, 인접구조물 정보생성, 계측 및 지반정보 위치 Mapping 등
서버프로그램	통합관리서버	사용자프로그램요청에 대한 계측 및 GIS 정보 전송
Geomonitor 2.0 사용자프로그램	사용자 컴퓨터	실시간 계측정보 및 지반정보 열람, 크리깅 분석

2.2 데이터베이스

본 시스템의 계측데이터 및 GIS 데이터의 데이터베이스화는 다음의 그림 3, 4와 같은 스키마에 의해서 구성된다.

계측 데이터베이스 구조는 프로젝트-사이트-단면-센서타입-센서의 5단계로 구성되어 있으며 센서타입 단계에서는 센서종류, 계산공식 등이 DB화 된다. 또한 센서단계에서는 센서위치(X, Y, Z), 계측관리기준치, Gage Factor 등이 DB화 된다. GIS 데이터베이스는 크게 두 가지로 나눌 수 있으며 먼저 지반정보 데이터베이스와 수치지도 데이터베이스로 구분된다. 지반정보 DB에는 시추번호, 시추위치(X, Y, Z), 층깊이, 지하수위, N치 등이 DB화 되었으며 수치지도DB에서는 Layer 별 DXF파일과 객체화된 도형의 속성 정보 예를 들면 연도변 인접건물에 대한 정보 등을(건물명, 주소, 사진, 구조물의 형식, 강성비 등) DB화 된다.

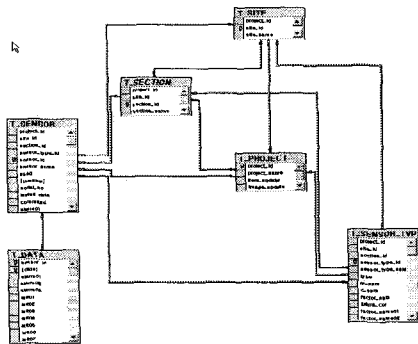


그림 2. 계측Database Schema

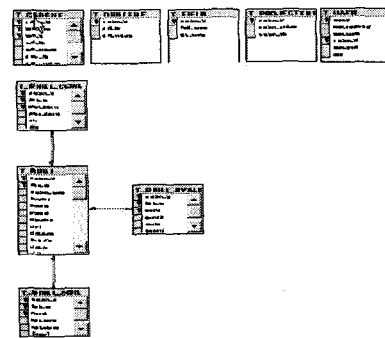


그림 3. GIS Database Schema

3. 지반 및 계측정보의 가시화 방법

3.1 수치지도화

GIS를 이용한 지반 및 계측정보의 가시화를 진행하기 위해서는 먼저 도면 및 지도정보를 수치지도화 하는 작업이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 도면 및 지도정보의 수치지도화는 벡터구조의 한 형식인 DXF 포맷을 사용하였다. DXF 포맷은 CAD도면들에 대한 상호 교환을 위한 포맷으로 개발되었으며 자료의 관리나 사용, 변경이 쉽고 변환 효율이 뛰어나 현재 설계나 엔지니어링, 디자인 분야에서 가장 일반적으로 사용되고 있다. DXF파일의 구조는 그림 4와 같다. 도면 및 지도정보를 수치지도화 하는 과정은 먼저 CAD에서 작성된 도면 및 지도정보를 DXF파일로 변환 시킨다. 변환된 DXF 파일은 별도로 개발된 편집기(Giseditor)에서 layer별로 저장한다. GIS 데이터 구축 순서는 아래 그림 5와 같다.

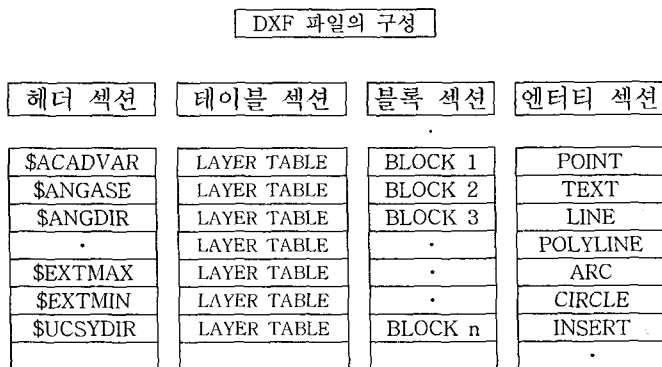


그림 4. DXF의 구조

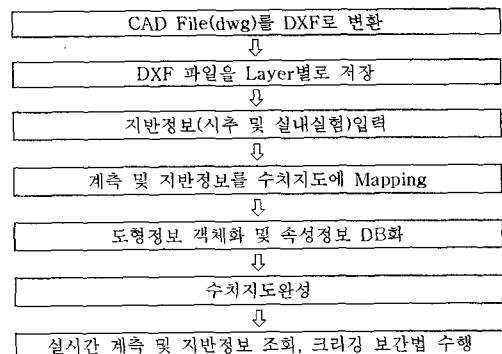


그림 5. GIS 데이터 구축 흐름도

편집기(Giseditor)의 기능을 세부적으로 정리하면 다음과 같다.

- DXF 파일을 layer별로 저장하는 기능
- 계측센서 및 단면위치를 수치지도에 Mapping
- 지반정보(시추정보 및 실내시험정보)를 입력 및 편집하고 수치지도에 Mapping
- 수치지도에서 인접건물 및 구조물의 도형(Polygon)정보를 추출하여 layer로 저장하고 속성정보를 입력

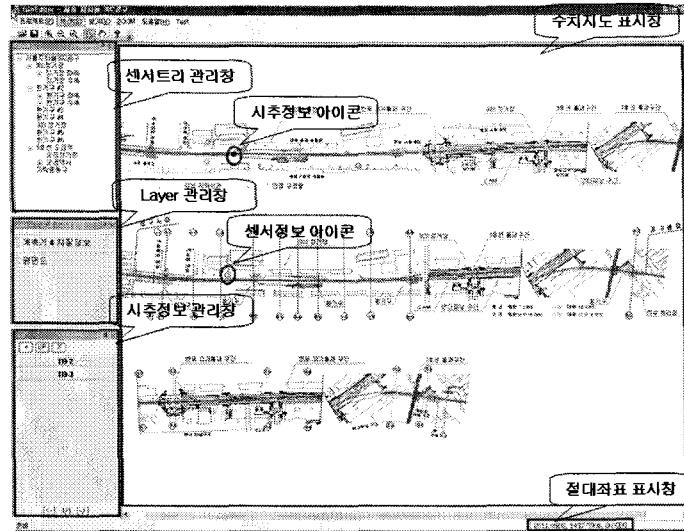


그림 6. Giseditor(편집기) UI 구성 예

3.2 크리깅 보간법

일반적으로 불연속 분포를 연속화 하기 위한 방법 즉, 공간 자료 보간 기법에는 단순 평균법(Simple Average), 삼각형법(Triangular), 거리 반 비례법(Inverse Weighted Distance) 등과 같은 단순 수학적 방법이 적용될 수 있으나, 공간 자료의 경우 위의 방법은 자료값 간의 공간적인 상관관계가 전혀 반영되지 않는 예측 결과를 보인다. 반면 지구통계학적 기법인 크리깅은 다른 방법과 달리 자료점에서 최저이며 자료점으로부터 멀어질수록 커지는 $\gamma(h)$ 로 표현되는 분산 모델을 사용하여 자료값 간의 공간적인 상관성을 고려하므로 공간 자료의 예측에 가장 합리적인 결과를 보인다.(천성호 등, 2001)

크리깅(Ordinary Kriging)기법을 통한 해성점성토층의 분포두께를 분석한 결과, 일반적인 보간 방법보다 그 분포특성이 해안선과 평행한 방향으로 일정한 증가추이를 보이는 것이 뚜렷하게 나타났으며 비교적 지형특성과 부합되게 나타났다.(윤길림 등, 2002) 따라서 본 논문에서는 지구 통계학적 방법 중 많은 분야에서 유용성이 증명된 크리깅보간법을 이용하여 지반정보 및 계측정보의 가시화를 위한 프로그램을 개발하였다.

크리깅 이론은 다음과 같다.

크리깅은 관심 있는 지점에서 특성치를 알기 위해 이미 알고 있는 주위의 값들의 가중 선형조합으로 그 값을 예측하는 지구 통계적 기법이다. 이를 간단히 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

여기서 z^* 는 위치가 알려진 지점에서 크리깅을 이용한 예측치가 되며 z_i 는 이미 그 위치와 값을 알고 있는 주위의 점이고 λ_i 는 사용된 주위의 각 자료의 가중치이며 n 은 크리깅 예측을 위해 사용한 자료의 총 개수이다. 가중치는 거리에 따른 함수이고 예측 값과 참값 사이의 오차가 최소가 되도록 결정되며 많은 경우에 추정 값이 편향되지 않아야 한다는 조건을 추가로 사용하여 그 값을 결정한다.

단순 크리깅은 오차분산을 최소로 하는 가중치를 구하여 주위의 알려진 값들의 선형조합으로 미지의 값을 예측하는 기법이다. 하지만 단순 크리깅 추정식은 편향되어 있어 추정식의 평균이 모집단의 평균과 일치하지 않는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해서 크리깅 추정식이 편향되지 않으면서 오차분산을 최소로 하는 경우의 크리깅을 정규 크리깅(Ordinary Kriging)이라 한다. 편향은 모집단의 인자 평균과 그 모집단의 인자를 예측하기 위한 추정식의 평균의 차이로 정의되고 그 차이가 없을 때 편향되지 않았다고 한다. 식 (2)은 편향되지 않을 조건은 다음과 같다.

$$b_z = E(z) - E(z^*) = E(Z) - E\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i z_i\right) = 0 \quad (2)$$

크리깅 추정식에 사용된 모든 자료는 실제 주어진 자료이므로 동일한 평균값을 가지게 된다. 식 (1)의 크리깅 추정식이 항상 편향되지 않기 위해서는 식 (3)과 같이 가중치의 합이 1이 되어야 한다.

$$1 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3)$$

오차 분산식은 식 (4)과 같다.

$$\sigma_{ok}^2 = E[(z_0 - z_0^*)] \quad (4)$$

오차분산을 참값과 예측 값의 차이의 제곱에 대한 기댓값으로 정의되며 가중치의 함수임을 알 수 있다. 왜냐하면 참값(z_0)은 지금 알려져 있지는 않지만 하나의 상수이고 예측값(z_0^*)은 가중치의 함수이기 때문이다. 이들 관계식을 구체적으로 알기 위하여 식 (4)을 전개하여 분산과 공분산의 관계식으로 표시하면 식 (5)과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 식 (5)에 구하고자 하는 예측값에 대한 식(1)에 대입하여 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{ok}^2 = \text{Var}(z_0) - 2\text{Cov}(z_0, z_0^*) + \text{Var}(z_0^*) \quad (5)$$

$$\sigma_{ok}^2 = \sigma^2 - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{0i}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \sigma_{ij}^2, \quad \text{제약조건 } 1 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (6)$$

주어진 제약조건 하에서 최대와 최소를 구하는 문제를 라그랑제 인자법을 이용하여 최소화하여야 할 정규 크리깅의 오차 분산식을 수학적으로 표현하면 식 (7)과 같다

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n; w) = \sigma^2 - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{0i}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \sigma_{ij}^2 + 2w(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i) \quad (7)$$

여기서 $L(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n; w)$ 은 라그랑제 목적함수, w 는 라그랑제 인자, 그리고 계수 2는 최종식을 간편하게 유도하기 위해 사용되었다. 식 (7)을 편미분하여 정리하면 다음과 같은 정규 크리깅의 방정식으로 표현된다.

$$\therefore \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{il}^2 - w = \sigma_{0l}^2, \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

식 (8)을 행렬 방정식으로 구체적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \dots & \sigma_{01}^2 & -1 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{2n}^2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \dots & \sigma_{nm}^2 & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{01}^2 \\ \sigma_{02}^2 \\ \vdots \\ \sigma_{0n}^2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

3.3 베리오그램(Variogram)의 모델링

베리오그램은 자료들의 공간적 상관관계와 연속성의 정도를 판단하는 척도로 크리깅 보간법을 수행하기 위해서 반드시 선행되어야 하는 과정중 하나이다. 베리오그램의 의미는 다음과 같은 식 (10)로 표현된다.

$$2\gamma(h) = E[(z(x) - z(x+h))^2] \quad (10)$$

식 (10)에서 정의된 베리오그램의 의미는 일정거리 h 만큼 떨어진 두 자료들 간의 차이를 제공한 것이 기댓값이다. 또한 베리오그램의 기하학적 의미는 그림 7과 같이 표현된다. 주어진 거리 h 에서 $z(x)$ 와 $z(x+h)$ 를 2차원 좌표축에 그리고 각각의 자료들이 기울기가 1인 직선식 $y=x$ 의 직선까지의 거리를 구하면 식 (11)과 같다. 따라서 베리오그램은 일정거리만큼 떨어져 있는 자료들이 평균적으로 얼마나 다른지 나타낸다고 할 수 있다.

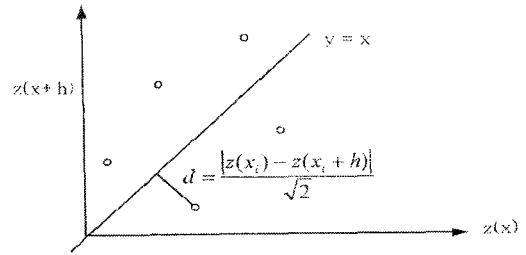


그림 7. 주어진 분리거리에서 베리오그램의 기하학적 의미

$$d = \frac{|z(x_i) - z(x_i + h)|}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

3.4 지반 및 계측정보의 가시화 과정

현장모니터링 서버에 저장된 계측데이터와 Giseditor에 의해 입력된 수치지도 및 지반정보는 통합계측관리 서버에 저장된다. 이 저장된 정보는 사용자 프로그램(Geomonitor 2.0) 이용하여 인터넷을 통해서 실시간 계측 및 지반정보, 수치지도를 열람할 수 있으며 또한 크리깅 보간법을 이용하여 계측정보 및 지층정보를 Visual 하게 등치선도(isarithmic map)를 작성할 수 있다. 아래 그림 12는 지반 및 계측정보를 크리깅 분석을 통해 가시화 하는 과정을 나타내고 있다.

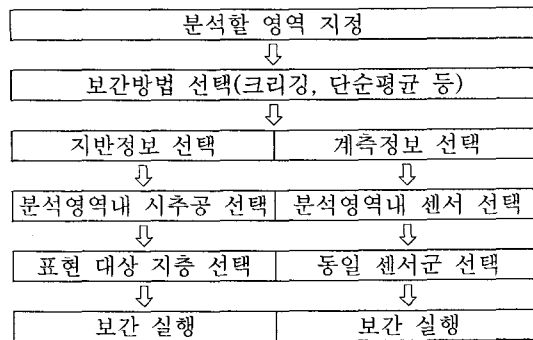


그림 8. 지반 및 계측정보 가시화 과정

지반정보 및 계측정보를 가시화 한 화면은 다음과 같다.

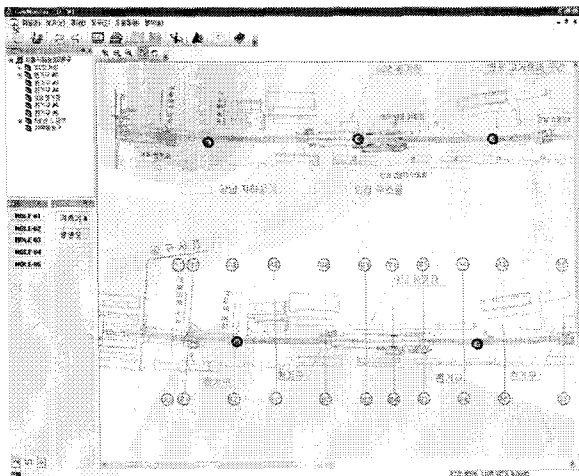


그림 9. 크리깅 분석을 통한 지층 분포

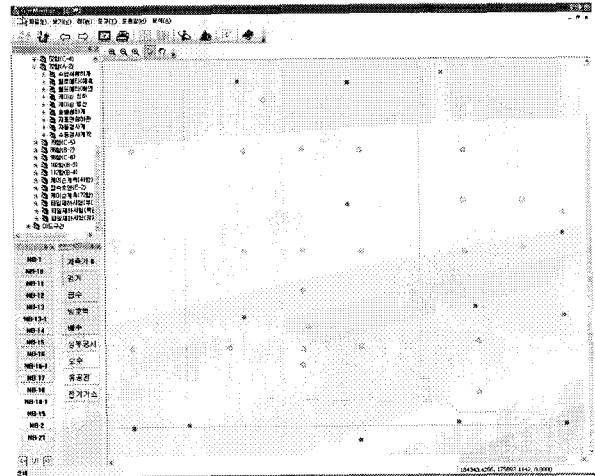


그림 10. 크리깅 분석을 통한 침하량 분포

4. 수치지도의 객체화 방법

지하철이나 고속철도와 같이 도심지에서 대규모 굴착 공사가 이루어질 경우 인접해 있는 지하매설물, 건물 등에 대한 보다 체계적인 관리가 필요하다. 이를 위해서는 수치지도에서 도형을 객체화하고 객체화된 도형에 속성정보를 입력할 수 있는 방법이 도입되어야 한다. 그런데 DXF 포맷구조는 위상구조를 가지고 있지 않을 뿐더러 속성정보를 변환할 수 없기 때문에 공간분석 등을 위한 GIS자료 활용에 적합하지 않는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 DXF 포맷 형식의 수치지도에서 공간정보와 속성정보를 입력할 수 있도록 대상 도형을 객체화 할 수 있는 방법을 Giseditor 프로그램에서 구현하였다.

Giseditor에서 도형(Polygon)을 객체화 하는 방법은 다음과 같다.

Giseditor에서 객체화할 대상(건물, 구조물 등)을 먼저 선택하여 별도의 Layer에 저장한다. 저장된 객체화 대상(도형)에 고유 식별 ID를 부여한다. 그리고 마지막으로 객체화 대상에 속성정보를 입력한다. Giseditor에서 저장된 공간정보 및 속성정보들은 실시간 계측데이터와 함께 인터넷을 통해서 사용자 프로그램(Geomonitor 2.0)에서 열람할 수 있도록 구성되어 있다.

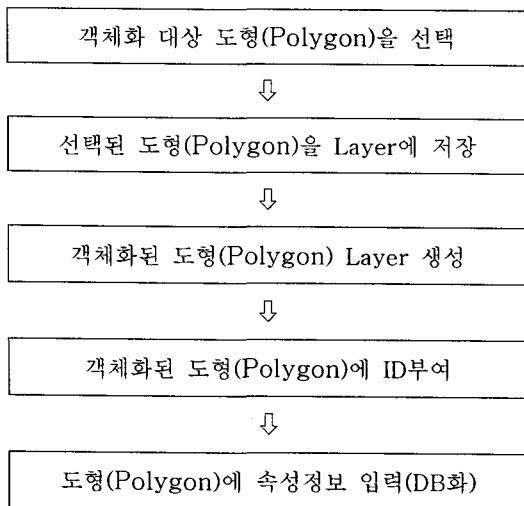


그림 11. 도형의 객체화 및 DB 구축 흐름도

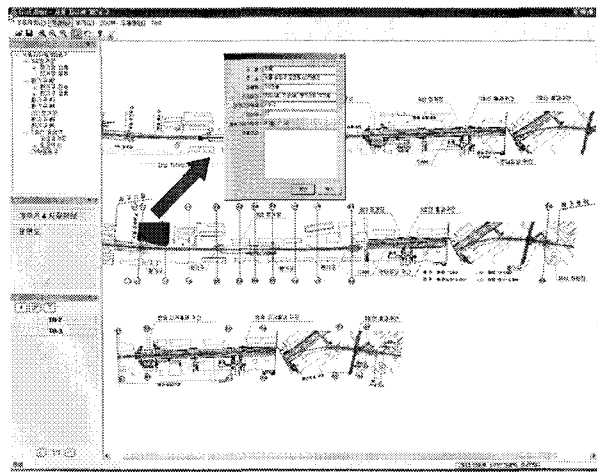


그림 12. 객체화된 도형(Polygon)에 속성정보 입력 화면

5. 결론

GIS 및 지구통계학을 이용한 인터넷 기반 실시간 통합계측관리 프로그램(Geomonitor 2.0)을 개발하였으며 그 특징은 다음과 같다.

- 1) 수치지도위에 계측 및 지반정보를 시각적으로 도식화하므로써 해석 및 분석시 신속하고 직관적인 판단이 가능하다.
- 2) 실시간 인터넷을 통한 계측 및 지반정보를 장소와 시간에 구애 없이 열람할 수 있어서 공사안전에 대한 보다 신속한 의사결정이 가능하다.
- 3) CAD도면들에 대한 상호 교환을 위한 포맷으로 개발되어진 DXF포맷형식을 수치지도의 표준 포맷으로 사용하였기 때문에 CAD도면과의 호환성이 탁월하며 또한 대다수 GIS소프트웨어에서 변환이 가능하다.
- 4) 지반정보 및 계측정보는 크리깅 보간법을 사용하므로써 일반적으로 사용되는 수학적 방법의 보간법에 비해 공간효과를 반영할 수 있어 보다 정확한 결과 값을 도출할 수 있다.
- 5) 도형정보의 객체화 방법 개발로 공간정보 및 속성정보의 DB화 작업이 가능하다.

참 고 문 헌

1. 한병원, 허인욱, 조충봉(2002), “인터넷 기반 계측관리시스템에 관한 연구”, 한국지반공학회, 02 봄 학술 발표회 논문집, pp.635~642.
2. 이동현, 김병희, 한병원, 김성욱(2003), “인터넷 기반 계측관리 시스템의 현장적용사례”, 한국지반공학회, 03 봄 학술 발표회 논문집, pp781~788.
3. 이혁진, 박사원, 유시동, 김홍택(2004), “GIS 및 지구통계학을 적용한 대규모 매립지반의 장기 침하량 및 추가 지반조사 위치의 결정”, 한국지반공학회, Vol. 20, No 2, pp131~141.
4. 윤길림, 이강운, 채영수, 유광호(2005), “지구통계학 크리깅 기법을 이용한 연약지반의 불확실성 분석”, 한국지반공학회, 제21권 3호, pp5~17.
5. 김광염, 김창용, 백승한, 홍성환(2005), “공간통계기법을 활용한 터널 지층정보 GIS 가시화”, 대한토목학회, 05 정기학술대회, pp5567~5570.
6. 김계현(2004), “공간분석”, 두양사, pp37~51.