대수적 재구성법과 2차원 수치모델링 및 역산 집합에 기반한 3차원 자력역산 소프트웨어

고광범¹ · 정상원² · 한경수¹

¹한국광물자원공사 기술연구원 기술사업팀

²(주) 지오메카 이엔지

A 3D Magnetic Inversion Software Based on Algebraic Reconstruction Technique and Assemblage of the 2D Forward Modeling and Inversion

Kwang-Beom Ko^{1*}, Sang-Won Jung², and Kyeong-Soo Han¹

¹Technology Business Team, Technology Research Institute, Korea Resources Corporation

²Geo Mecca Engineering, Co. Ltd.

요약: 본 연구를 통하여 3차원 자력역산 소프트웨어 시제품(KMag3D, 가칭)을 개발하고 개발 시 역점사항을 사용자 매뉴얼 형식으로 소개하였다. KMag3D는 다음 두 가지 사항을 기본 뼈대로 구성되었다. 첫째, 지금까지 자력역산에 일반적으로 적용되는 최소제곱법에 의한 방법 대신 대수적 재구성법에 기반한 알고리즘을 도입하였다. 이는 계산시간과 기억용량을 획기적으로 줄여 3차원 자력역산을 매우 효율적으로 수행한다. 둘째, 대수적 재구성법에 의한 3차원 역산에 필요한 초기모형과 사전정보 모형을 결정하는 데 2차원 수치모델링 및 역산 집합과 주향방향 내삽을 이용하는 방법을 제시하였다. 이는 3차원 역산 알고리즘에 사전정보를 효율적으로 적용하며 특히 매우 실용적임을 보여주었다.

주요어: 3차원 자력역산, 사용자 인터페이스, 최소제곱법, 대수적 재구성법, 2차원 수치모델링, 초기모형, 사전정보 모형

Abstract: In this study, we developed the trial product on 3D magnetic inversion tentatively named 'KMag3D'. Also, we briefly introduced its own function and graphic user interface on which especially focused through the development in the form of user manual. KMag3D is consisted of two fundamental frame for the 3D magnetic inversion. First, algebraic reconstruction technique was selected as a 3D inversion algorithm instead of least square method conventionally used in various magnetic inversion. By comparison, it was turned out that algebraic reconstruction algorithm was more effective and economic than that of least squares in aspect of both computation time and memory. Second, for the effective determination of the 3D initial and a-priori information model required in the execution of our algorithm, we proposed the practical technique based on the assemblage of 2D forward modeling and inversion results for individual user-selected 2D profiles. And in succession, initial and a-priori information model were constructed by appropriate interpolation along the strike direction. From this, we concluded that our technique is both suitable and very practical for the application of 3D magnetic inversion problem.

Keywords: 3D magnetic inversion, graphic user interface, least square method, algebraic reconstruction technique, 2D forward modelling, initial model, a-priori information model

서론

육상이나 항공 자력자료의 역산은 비유일성 문제(Lines and

Treitel, 1983; Jackson, 1972)외에 수평탐사로서의 정보만 가지는 특성으로 인해 자력자료만의 3차원 역산은 단지 지표부근에 집중되는 대자율 분포만을 보여준다. 이런 연유로 통상 지질도나 시추 등의 사전정보를 토대로 다양한 자료처리를 통한 해석(Shin *et al.*, 2012)이나 수치모델링을 통한 분석 등이 해석의 주류를 이루고 있다(Koo *et al.*, 1998). 그럼에도 역산을 통해 보다 효율적이고 정량적인 결과를 얻으려는 연구는 꾸준히 지속되어 왔다(Li and Oldenburg, 1996; Williams, 1999; Lelivre, 2003; Li and Oldenburg, 2003). 이러한 자력역산의 목적은 주로 사전정보를 포함시킴으로써 해의 비유일성을 완화시키는 동시에 지질학적으로 의미가 있는 결과를 구하고자

2012년 12월 11일 접수; 2013년 2월 14일 수정; 2013년 2월 19일 채택

*Corresponding author

E-mail: kwgmbk@gmail.com

Address: 606 Siheung-daero, Dongjak-gu, Seoul, 156-706, Korea

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하는데 있다.

지금까지 자력자료의 역산은 거의 최소제곱법에 의한 방법을 채택하고 있다. 그러나 3차원 역산의 경우 이 방법은 상당한 계산시간과 기억용량이 필요한 행렬의 곱과 역행렬 연산을 포함하고 있으므로 개인용 컴퓨터가 발달한 요즘에도 임의의 조사영역에 대한 3차원 역산은 아직도 부담스러운 것이 현실이다.

본 연구에서는 이의 대안으로 사영법에 기초한 대수적 재구성법을 이용하는 역산 알고리즘을 제시하였다. 이는 본래 시스템 행렬이 성진(sparse)경우에 적합한 기법으로서 특히 파선토모그래피 분야에 보편적으로 적용되는 방법이다(Dines and Lytle, 1979; Ivansson, 1986). 대수적 재구성법에 의한 역산은 최소제곱법에 의한 것보다 근본적으로 최소의 행렬연산만 필요하므로 3차원 역산에 매우 유리하다.

한편, 대수적 재구성법은 지질학적으로 의미있는 해를 구하기 위한 사전정보 모형과 별도로, 반복적 방법이기 때문에 대자율 초기모형도 요구된다. 역산에 3차원 초기모형 및 사전정보 모형을 포함시키기 위해서는 이를 행렬형태로 구성하는 과정이 필요하다. 그러나 이는 실제적으로 만만찮은 문제이다. 본 연구에서는 2차원 수치모델링 및 역산결과를 각각 집합으로 간주하고 주향방향의 적절한 내삽을 통해 3차원 모형을 구성하는 실질적인 방법을 제시하였다. 이 방법은 3차원 역산을 다수의 2차원 역산의 집합으로 개략적으로 근사하는 것이다. 이때 2차원 축선은 자력이상을 검토하여 가능한 역산영역 내 구조지질적 주향과 수직하게 설정한다. 선정된 2차원 축선집합으로부터 사전정보를 포함시킬 축선들을 발췌한다. 최종적으로 발췌 축선 별 2차원 수치모델링 및 역산 결과를 취합, 적절한 내삽으로 입방체를 도출한다.

본 연구에서는 이상의 두 가지 방법을 기본 뼈대로 하는 3차원 자력역산 소프트웨어 시작품을 개발하였다. 시작품의 명칭을 KMag3D(가칭)로 한다. 본 연구의 최종목적은 두 가지 알고리즘 중, KMag3D의 개발과정에서 특히 역점을 둔, 3차원 초기모형과 사전정보 모형을 구현하는 인터페이스를 사용자 매뉴얼 형식으로 소개하는 데 있다. 이를 통해 우리가 추구한 KMag3D 인터페이스의 사용자 편의성을 중점 강조하고자 한다.

대수적 재구성법에 의한 3차원 자력역산

지구자기장과 지하매질의 대자율, κ 에 의한 자력자료의 역산은 다음의 목적함수, $\Psi(m)$ 에 대한 최적화 문제로 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } \Psi(m) &= \Psi_d(m) + \lambda \Psi_a(m) \\ \text{with constraint } \kappa &\geq \kappa_0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 목적함수 $\Psi_d = \|\hat{W}_d(d - d^{obs})\|^2$ 는 측정자료와 이론자료 간 제곱오차이며 목적함수 $\Psi_m = \|\hat{W}_m(m - m_0)\|^2$ 은 모델변수에

대한 약한 제한(weak constraint)을 주는 Regularization항, λ 는 라그랑지안 곱수이다. 최소제곱법에 의한 식 (1)의 역해는 다음과 같다.

$$\delta\kappa = (\hat{J}'J + \lambda \hat{W}_m'W_m)^{-1} \hat{J}'e \quad (2)$$

여기서 $\hat{J}$ 는 대자율에 대한 자력이상의 변화를 나타내는 자코비안, e 는 측정자료와 이론자료 간 오차벡터이다. 자력탐사의 경우 유도자기장을 H , 대자율 벡터를 κ 로, 수신점과 voxel의 기하학적 관계를 나타내는 함수를 $\hat{g}(r_g, r_{voxel}; I, D)$ 라고 하면 유도자기장은 $H = \hat{g}(r_g, r_{voxel}; I, D) \kappa$ 로 나타낼 수 있고 이때, 유도자기장의 자코비안은 다음과 같다.

$$\hat{J} = \frac{\partial H}{\partial \kappa} = \hat{g}(r_g, r_{voxel}; I, D) \quad (3)$$

복각과 편각(I, D)이 일정하다고 가정할 경우 식 (3)의 자코비안은 오직 기하학적 변수만의 함수로서 선형이나 식 (1)의 부등식 제한을 주는 조건, 즉 음의 대자율을 갖지 않도록 제한을 준다면 식 (3)은 일반적으로 비선형이 된다. 식 (2)의 수치계산을 위해서는 세 번의 행렬 곱과 한 번의 역행렬 연산이 필요하며 역산영역이 커질수록 연산시간과 기억용량이 기하급수적으로 증가한다.

한편, Dines and Lytle (1979)은 의학분야의 CT를 응용하여 파선투과도와 대수적 재구성법에 의한 파선토모그래피를 도입하여 탄성과 속도영상을 성공적으로 구하였다. 대수적 재구성법에 의한 역산 결과는 반복에 의해 식 (3)의 최소제곱 해로 수렴한다고 알려졌다(Van der Sluis and Van der Vorst, 1987). 따라서 대수적 재구성법은 자력자료의 역산에도 유효하다. 이로부터 대수적 재구성법에 의한 매 반복단계에서의 역해는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Van der Sluis and Van der Vorst, 1987).

$$\begin{aligned} \kappa_j^{q+1} &= \kappa_j^q + \frac{\omega}{\gamma_j} \sum_i \frac{J_{ij} e_i^q}{\rho_i}, \quad (0 < \omega < 2) \\ \text{여기서, } \gamma_j &= \sum_i |J_{ij}|^\alpha, \rho_i = \sum_k |J_{ik}|^{2-\alpha}, \quad (0 \leq \alpha \leq 2) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\delta\kappa_j^q$ 는 q 번째 반복에서 j 번째 voxel의 대자율 증분이며 e_i^q 는 i 번째 자료의 측정자료와 이론자료 간 오차벡터이다. 매 반복단계에서 j 번째 블록의 대자율 증분은 결국 모든 i 번째 수신원에 대한 자코비안의 합과 오차벡터에 대한 자코비안의 가중합 형태로 구한다. 본 연구에서는 식 (4)에서 α 를 1로 하여 모든 해를 구하였다. 이때 가장 계산시간이 많이 소요되는 것은 식 (3)의 자코비안 계산이며 이외에는 특별한 행렬연산이 없으므로 계산시간과 기억용량이 현격하게 줄어든다. 이는 식 (2)의 최소제곱법에 의한 역산과 뚜렷이 대비되는 매우 유리한 점이라 하겠다.

한편, 대수적 재구성법에 의한 3차원 자력역산은 기본적으로

로 반복적 방법이므로 3차원 초기모형이 필요하다. 또한 자력 자료는 사전정보를 표현하는 3차원 지질모형이 필요하며 본 연구에서는 이를 3차원 사전정보 모형이라 칭한다. 일반적으로 사전정보는 최소제곱법에 기초한 역산의 경우 식 (2)의 Regularization 항에 라그랑지안 곱수를 통한 약한 제한(weak constraint)이나 두 번째 항과 같은 부등식 조건형태의 강한 제한(strong constraint)조건으로 반영한다(Kim *et al.*, 1999).

본 연구에서는 사전정보의 반영방법으로서 식 (4)의 가중합 수 항, ω 를 공간에 따른 함수로 일반화시키는 방법을 선택하였다. 즉, 이는 매 반복단계에서 식 (4)의 자코비안의 블록마다 각기 다른 가중값을 부여하는 형태를 취한다. 더불어 심도에 따라 감도가 감소하는 것을 보상하기 위한 심도 가중합수, $W(z_j)$ 를 조사영역 입방체의 체적으로 정규화시킨 값으로 도입하였다(Li and Oldenburg, 1996). 따라서 본 연구에서 적용한 최종 대수적 재구성법은 식 (4)로부터 다음과 같이 요약된다.

$$\kappa_j^{q+1} = \kappa_j^q + \frac{W(z_j)\omega_j}{V} \sum_i \frac{J_{ij}g_i^q}{\rho_i}, \quad (0 < \omega_j < 2)$$

$$\text{여기서, } \gamma_j = \sum_i |J_{ij}|, \quad \rho_i = \sum_k |J_{ik}|, \quad (5)$$

식 (5)의 블록 당 가중값, ω_j 는 식 (2)의 Regularization 항 내의 일반적인 가중합수와 동등한 역할을 담당한다. 가중값은 사전정보 모형의 신뢰도에 따라 역산블록 별로 달리 할당되며 할당된 가중값에 따라 역산 결과가 달라지므로 사전정보 자체의 세심한 신뢰도 검토는 매우 중요하다.

2차원 수치모델링 및 역해 집합과 주향방향 내삽에 기반한 3차원 초기모형 및 사전정보 모형의 결정

3차원 자력역산에서 초기모형과 사전정보 모형을 3차원으로 구성하는 것은, 해석자의 판단과 손품이 많이 가는, 실제로 만만찮은 과정이다. 만약 구성이 적절하지 못하면 지질학적으로 무의미한 해를 내거나 발산한다. 따라서 초기모형과 사전정보 모형의 중요성을 감안할 때 해석자의 편의와 사전정보의 충실한 반영이라는 두 가지 목적을 달성하기 위한 합리적인 수단을 모색하여야 한다.

본 연구에서는 2차원 수치모델링과 역산결과에 기반하는, 매우 실용적인 구성방법을 제시한다. 그 방법은 다음과 같다. 먼저, 선정한 3차원 역산영역의 자력이상을 검토하여 구조지질적 주향을 결정한다. 주향이 결정되면 이에 수직한 방향을 2차원 축선으로 설정한다. 따라서 주향방향의 2차원 축선의 모임은 곧, 하나의 집합으로서 3차원 역산문제로 간주할 수 있다. 다음으로 각 축선 별 2차원 수치모델링 및 역산을 통해 2차원 사전정보 모형과 초기모형을 구한다. 최종적으로 이 결과를 취합하여 주향방향으로 적절히 내삽하여 3차원 초기모형과 사전정보 모형을 구현한다. 이 과정을 Fig. 1에 모식도로 나타

Fig. 1. Schematic diagram for the setup of both 3D initial and a-priori information model in this study.

내었다.

본 연구에서 제안한 방법은 Fig. 1의 붉은색 점선 내의 영역에 해당한다. 이때 사전정보 모형인 2차원 대자율 모형이나 초기모형인 2차원 역산단면 집합은 3차원 역산영역을 구성하는 전체 축선집합에서 발췌한 것으로 그 간격이 반드시 일정할 필요는 없다. 다만 공간적 변화가 큰 영역은 간격을 좁게, 완만한 영역은 넓게 설정하여 내삽과정에서 구성 모형이 왜곡되지 않도록 하는 조건만 만족하면 된다.

본 방법이 지향하는 핵심은 자력자료의 전통적인 해석기법인 수치모델링과 역산 각각의 장점을 극대화시키고자 하는 동시에 조사지역마다 다양한 종류와 신뢰도를 가져 통합, 일관적인 처리가 어려운 사전정보를 수치모델링을 적용함으로써 효과적으로 반영하고자 함에 있다. 또한 이는 방법론적으로 3차원 역산에 필요한 3차원 사전정보 모형 및 초기모형을 각각의 2차원 수치모델링 및 역산결과와 상호 연관(corelation)시키는 점에 있다. 이 방법의 장점은 첫째, 2차원 대자율 단면집합으로부터 3차원 사전정보 모형을 구성하므로 해석자의 판단 및 적용이 용이한 수치모델링의 장점을 살리는 실질적인 측면과 둘째, 구성된 3차원 초기모형은 이미 해석이 가해진 2차원 역해에 기초하므로 3차원 역산이 국부적 최소로 빠질 우려가 적고 안정적이라는 것이다. 즉, 본 방법에 의해 구성된 3차원 사전정보 모형 및 초기모형은 그 자체로 3차원 역산에 최적화되어 있다.

이론모형을 이용한 KMag3D 사용자 인터페이스 소개

본 연구의 KMag3D의 인터페이스를 소개하기 위해 이용한 3차원 이론모형은 45도 경사의 다이크 모형으로 Fig. 2에 도시하였다(Li and Oldenburg, 1996). 경사진 다이크 모형은 Fig. 2-(a)의 심도 75 m 평면도에서 동쪽좌표 (550 m, 800 m), 북쪽

Fig. 2. Dipping dike model used in this study. Plane view at depth 75 m (a), 375 m (b), vertical section view at 500 m in the north coordinate (c) and 3D perspective view respectively (After Li and Oldenburg, 1996).

Fig. 3. Display of KMag3D main window for the initial execution.

좌표(350 m, 650 m)에, Fig. 2-(b)의 심도 375 m 평면도에서 동쪽좌표(250 m, 500 m)까지 심도에 따라 총 7개의 50 m 두께의 판상체의 집합으로 구성된다(Fig. 2-(c)). Fig. 2-(d)는 이를 KMag3D의 입방체 시각화 도구를 이용하여 나타낸 것이다. 다이크 모형 하부의 2차원 평면도는 입방체의 심도에 따른 속성 값 중 최대값을 하부 평면으로 투영시킨 것이다. 이는 3차원 역산결과인 대자율 입방체의 전반적인 양상을 개략적으로 살펴보기 위한 목적으로 고안되었다.

역산에 이용한 이론자료는 북쪽을 측선방향, 동쪽을 주향방향으로 하고 측점간격은 50 m로 설정하였다. 북쪽방향으로의 측선간격은 각 50 m로 하였으며 이 경우 3차원 역산에 이용한 자료의 총 개수는 441개이다. 3차원 역산영역의 크기는 동쪽, 북쪽 및 심도방향으로 1000 m × 1000 m × 500 m이며 역산블록 한 번의 크기는 각 50 m로 일정하게 분할하였다. 따라서 역산에 이용한 블록의 총 개수는 4000개이다. 경사진 다이크 모형의 대자율은 SI 단위로 0.06, 지구자기장 50,000 nT, 지구자

Fig. 4. Display of 2D magnetic inversion result when no a-priori information was incorporated.

기장의 복각은 75도, 편각은 +25도로 설정하였는 바, 이는 본 소프트웨어를 개발하면서 Li and Oldenburg(1996)의 결과와 비교, 검증하기 위함이었다.

KMag3D를 이용한 3차원 역산은 먼저, 입력자료 위치에 대한 고도와 각 측선 별 자력자료의 시각화창을 띄우면서 시작한다. 이를 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3에서 세 개의 창을 보여주는데, 이 셋은 상호 동시에 연동하도록 설계되어 있다. 창 A에서는 3차원 자료를 구성하는 주향에 따른 2차원 측선정보를 보여준다. 2차원 측선에 대한 세 개의 항목은 측선번호, 각 측선의 북쪽 측선좌표, 그리고 대자율이나 사전정보 모형의 편집여부를 말해주는 상태 지시자를 의미한다. 상태 지시자는 편집(2차원 수치모델링 혹은 역산)을 하였으면 '1'로, 아무런 편집이 없었으면 '0'으로 상태 정보를 표시한다. 창 A의 맨 윗단의 'Initial model'과 'Weight model' 버튼은 현재 편집을 하고자 하는 것이 2차원 초기모형 혹은 사전정보 모형인지를 지정하기 위한 것이다.

창 B는 창 A에서 선택한 측선에 대응하는 자력자료를 그래프로 도시한다. 여기서는 북쪽 측선좌표 500 m로, 경사진 다이크 모형의 정중앙을 통과하는 자료(검정색 실선)를 보여주고 있다. 창 B는 2차원 수치모델링이나 역산을 통해 구성된 대자율 분포에 대응하는 예측값을 붉은색 원/실선으로 연동하여 도시하도록 설계되었다.

마지막으로 창 C는 2차원 수치모델링의 경우 대자율 분포를 구성하거나 역산의 경우 그 역해를 시각화하는 창이다. 예를 들어 2차원 수치모델링의 경우 창 C에서 마우스로 임의의 다각형을 작도하고 그 영역에 대자율을 할당하는 즉시 그의 예측값을 창 B와 연동하여 시각화한다.

KMag3D는 기본적으로 3차원 자력역산을 수행하기 위해 개

발된 소프트웨어이다. KMag3D의 두 가지 기본 뼈대의 하나로, 2차원 수치모델링 및 역해 집합으로부터 3차원 초기모형이나 사전정보 모형을 구성하기 위해서는 KMag3D에 내장된 2차원 수치모델링 및 역산 모듈과 특히 인터페이스가 매우 중요하다. 이중 2차원 역산 인터페이스를 소개하기 위한 일례로서 별다른 사전정보 없이 자력자료만을 이용하여 2차원 역산을 수행한 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

창 A에서 선정한 2차원 측선은 측선의 위치좌표 500 m임을 지시한다. 이 측선은 경사진 다이크 모형의 중앙부를 가로지른다. 또한 창 A의 세 번째 항의 '1'은 역산 수행완료, 다른 측선은 모두 '0'으로 해당측선만 2차원 역산을 수행하였음을 의미한다. 역산결과는 창 C의 대자율 단면으로 연동하여 시각화되며 동시에 창 B에도 연동하여 대응하는 예측값을 보여준다. 부가하여 측선 후반부에 음의 자력이상 영역에서 자력자료와 예측값이 일치하지 않는 것은 2차원 역산에 3차원 자력자료를 적용하였기 때문이다. 이로 인해 창 C의 후반부 대자율 분포도 다소 왜곡되어 있다.

한편, 3차원 자력역산 일례로서 사전정보 없이 3차원 역산을 수행하는 경우를 소개하고자 한다. 이는 Fig. 3의 초기 창에서 KMag3D의 메인메뉴의 '역산' 하부 팝업메뉴에서 3차원 역산을 선택하여 수행된다. 이 경우 KMag3D는 Fig. 3의 창 A에 표시된 21개 전 측선의 자력자료를 묶어서 하나의 입력자료로 간주하도록 설계되었다. 역산 결과는 두 가지로 시각화한다. 하나는 Fig. 5와 같이 각 측선 별 2차원 대자율 단면으로, 동시에 다른 방법으로서 Fig. 6과 같이 새로운 창을 열고 입방체 전체를 시각화한다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 측선 위치좌표 500 m에 대한 3차원 역산결과를 도시한 것이다. 3차원 역산에 의한 창 B의 예

Fig. 5. Display of 3D magnetic inversion result when no a-priori information was incorporated. 2D susceptibility image at 500 m in north direction is shown.

Fig. 6. Display of 3D perspective view of 3D magnetic inversion result by the visualization of cutting plane format. Susceptibility cube was cutted at 500 m in the north direction.

측값은 이론값과 잘 맞으며 Fig. 4의 측선 후반부의 음의 이상도 기대한 대로 잘 예측한다. 재구성된 대자율 단면도 다이크 모형의 원래 경사를 어느 정도 반영하고 있어 3차원 역산의 장점을 잘 보여주고 있다. 하지만 사전정보를 역산에 포함시키지 않은 두 경우 모두 대자율 분포는 지표부근에 집중되는 자력역산의 근본적인 한계 역시 공통적으로 보여주고 있다.

한편, 대자율 입방체는 3차원이므로 내부의 정보를 보기 위한 3차원 시각화 인터페이스가 필요하다. KMag3D는 세 가지 시각화 방법을 내장하고 있는데 첫째, 대자율의 상, 하한을 주

고 그 사이값을 가지는 입방체의 시각화, 둘째, 수평 및 두 방향의 수직 슬라이스 형태의 시각화, 마지막으로 입방체의 방향에 따른 절단에 의한 내부 시각화이다. Fig. 6의 A는 세 번째 경우로 동쪽방향으로 절단한 입방체 시각화 창을 보여주고 있다. 덧붙여 하부 평면의 대자율의 최대값 투영도는 재구성된 대자율 이상체가 서쪽방향 경사를 가지고 있음을 보여주고 있다(Fig. 6의 B).

아무런 사전정보 없는 자력역산은 예외 없이 지표부근에 대자율이 집중되는 공통적인 결과를 보여준다. 이는 수평탐사 정

Fig. 7. Display of steps for establishing the 2D initial model. The 2D finally constructed susceptibility image was shown in the window C.

보만을 가지고 있는 자력탐사의 속성에 기인한다. 일반적으로 자력자료 자체는 비록 무른 자료(soft data)이기는 하나 조사지역의 지질평면도와 같은 역할을 담당한다. 이러한 관점에서 보면, 자력역산을 수행한다 함은 조사지역의 지질단면도 역할을 할 수 있는 대자율 심도단면을 구하고자 하는 노력이라고 볼 수 있다. 그러나 육상이나 항공 자력자료 자체만으로는 지질단면도에 대응할만한 신뢰도를 가지는 역산결과를 제공할 수 없다. 따라서 다른 대안을 강구해야 한다. 고려할 수 있는 대안으로서는 첫째, 구조지질적 정보를 가지는 사전정보를 역산에 포함시키거나 둘째, 시추공 탐사와 같이 심도정보를 가지는 자료를 조합하거나, 마지막으로 타 탐사자료 - 특히 수직탐사 정보를 포함하고 있는 - 와의 복합역산을 들 수 있다.

자원개발분야에서 자력탐사는 광역탐사로서 거의 모든 경우 초기단계에 수행된다. 따라서 기존정보로부터 구축된 지질정보 D/B에 근거하는 해석이 일반적이라 하겠다. 그러므로 사전정보를 최대한 이용하는 자력역산을 우선적으로 고려함이 타당하다. 본 연구에서는 사전정보를 역산에 반영하는 KMag3D의 모듈 및 사용자 편의성을 지향하는 인터페이스 구축에 상당한 노력을 기울였다. KMag3D에서 사전정보를 역산에 포함시키는 과정을 설명하는 인터페이스를 Fig. 7에 도시하였다.

초기모형 및 사전정보 모형을 결정하고 속성값을 할당하는 인터페이스는, 그림으로 소개하지는 않았지만, 메인 메뉴의 '모델링' 메뉴와 그 하부의 팝업창에서 담당한다. 팝업창 내 'Edit mode'를 선택하면 편집모드가 활성화되어 창 C에서 초기모형이나 사전정보 모형을 마우스를 이용하여 폐곡선을 구성하고 속성값을 할당할 수 있다. 초기모형을 구성하는 예를 나타낸, Fig. 7의 인터페이스의 실행순서를 설명하면 다음과 같다.

① 창 A의 위 부분의 'Initial model'은 창 C에서 구현하는 모형이 초기모형, 즉 대자율 모형을 결정하기 위한 것임을 의미한다. 토글형식이므로 사전정보 모형을 구현하고자 하면 오른쪽의 'Weight model'을 클릭하면 된다. 할당하는 속성값은 초기모형은 대자율, 사전정보 모형은 식 (5)의 가중값이며 기준값은 1이다.

② 창 A는 위치좌표 500 m 축선을 선택하였음을 의미하며 세 번째 항목의 상태 지시자 '1'은 편집완료를 의미한다.

③ 창 C의 초기모형은 사전정보를 완전히 알고 있다는 이상적 가정하에 모형을 결정짓는 4개의 꼭지점을 마우스로 클릭하여 폐곡선형태로 구성한 것이다. 다음으로 여기에 할당할 속성값, 즉, 대자율을 묻는다. 창 C는 대자율을 입력하여 '편집완료'한 2차원 대자율 초기모형 구성결과를 보여주고 있다.

④ 대자율 초기모형 구성 완료와 동시에 창 B는 해당 축선의 자력자료와 함께 ③에 의한 예측값을 그래프로 도시한다. 이 과정만은 2차원 수치모델링이며 여러 축선에 대한 결과를 취합하는 경우는 곧, 3차원 대자율 초기모형을 구성하는 과정이 된다. 덧붙여 대자율 모형 구성을 Fig. 2의 경사진 다이크 모형과 완전히 동일하게 했음에도 창 B의 예측값은 후반부로 갈수록 어긋나는데 이는 앞서 Fig. 4에서 확인한 바와 같이 근본적으로 3차원 자료를 2차원으로 계산하였기 때문이다.

③ 단계에서 초기모형이나 사전정보 모형을 구성하기 위해서는 최소 4개의 꼭지점 좌표가 필요하다. 그러나 본 연구에서 선택한 모형은 매우 간단한 경사진 다이크 모형임에도 불구하고 이를 미리 알고 있지 못하면 그 구성이 의외로 쉽지 않다. 더욱이 앞으로 부딪칠 실제 사전정보는 말할 것도 없다.

일반적으로 조사영역의 사전정보는 지질평면도나 시추자료가 반영된 지질단면도의 조합으로 나타내는 것이 보통이다. 특

Fig. 8. Display of 2D initial model which is currently under construction. As a a-priori information, dipping dike model was superimposed as background image.

Fig. 9. Display of 3D magnetic inversion result when a-priori information based on that of Fig. 8 with weighting value 1.5 and constant susceptibility was incorporated. Susceptibility image at 500 m in north direction is shown.

히 지질단면도는 자력역산에서 가장 중요한 사전정보로서 시추자료가 하나 이상 존재하여 어느 정도 대표성이 있거나 구조지질적으로 급변하는 곳을 기준으로 작성하는 것이 일반적이다. 주어진 사전정보로부터 3차원 초기모형과 사전정보 모형을 구현하는 것과 그의 신뢰도는 전적으로 해석자 몫이다. 해석자의 부담을 최소화하고 오류를 범하지 않도록 사용자 편의성을 극대화하는 것이 곧, KMag3D의 기본 개발방향이다. 이를 위해 KMag3D는 사전정보를 창 C와 동일한 좌표축척의

그림과일로 받아들이어 적절한 투명도로 중첩 시각화하는 매우 효과적인 방법을 도입한다. 이 방법을 실제 자료에도 적용해 테스트한 결과 사용자가 느끼는 편의성이 대폭 향상되었다. Fig. 8은 Fig. 2의 모형을 중첩, 시각화하고 초기모형을 구성하고 있는 일례를 보여준다.

배경의 사전정보 이미지는 사용자에게 경사진 다이크 모형을 결정짓는 4개의 꼭지점 좌표정보를 이미 시각적으로 잘 전달하고 있다. 동일한 방법으로 사전정보를 가지는 발체 축선

모두에 적용하여 2차원 초기모형 집합을 구성한다. 마지막으로 모형 구성을 생략하여 건너편 측선은 가장 가까운 양측의 모형 간 선형 내삽으로써 최종적으로 3차원 초기모형 및 사전 정보 모형을 구축한다.

Fig. 9와 10은 Fig. 8의 사전정보 모형과 동일하도록 나머지 측선도 일괄 선형 내삽한 사전정보 모형(가중값 1.5)과 일정 대자율(1.10^{-8}) 초기모형을 입력으로 하여 구한 3차원 역산결과이다. 비교를 위해 Fig. 5와 Fig. 6과 동일한 측선과 절단 입방체를 시각화하여 나타내었다. 대략적인 입력값을 주었음에도 중요한 정보인 자력이상체의 경사와 심도 별 분포양상이 모두 괄목할 정도로 향상되었음을 잘 보여준다.

결 론

본 연구를 통하여 3차원 자력역산 소프트웨어 시작품(가칭 KMag3D)을 개발하고 개발 시 역점사항을 사용자 매뉴얼 형식으로 소개하였다. KMag3D는 다음 두 가지 알고리즘을 기본 뼈대로 한다.

① 자력역산에서 일반적으로 적용하는 최소제곱법에 의한 역산 대신 사영법에 기초한 대수적 재구성법에 의한 역산 알고리즘을 도입하였다. 최소제곱법을 이용한 역산과 비교하였을 때, 계산시간과 기억용량을 획기적으로 줄여 3차원 역산에 매우 효율적임을 확인하였다.

② 대수적 재구성법에 의한 3차원 역산은 3차원 초기모형과 지질학적으로 의미있는 해를 구하기 위한 3차원 사전정보 모형이 필요하다. 본 연구에서는 2차원 수치모델링 및 역해를 하나의 집합으로 구성하고 주향방향의 내삽을 통해 3차원 초기모형 및 사전정보 모형을 구성하는 현실적인 방법을 제시하였다. 이 방법은 사전정보의 3차원 역산에의 적용측면에서 합리적이며 특히 매우 실용적이다.

본 연구에서 소개한 KMag3D는 경제적 측면의 수입 대체효과와는 물론 기술적인 관점에서도 장기적으로 국내 자력탐사 기술수준을 높이는 데 힘을 보탬 수 있을 것으로 확신한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지자원기

술개발사업의 지원(과제번호: 2010201030003A)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Sungbon Koo, Taisup Lee, and Yeongsue Park, 1998, Aeromagnetic characteristics of the Samyangjin caldera area, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **1**, 101-109.
- Eunju Shin, Kwangbeom Ko, Youngjune You, and Yeonho Jung, 2012, A case study on the data processing and interpretation of aeromagnetic survey conducted in the low latitude area: Stung Treng, Cambodia, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **15**, 136-143.
- Dines, K. A., and Lytle, R. J., 1979, Computerized geophysical tomography: *Proc. IEEE* **67**, 1065-1073.
- Ivansson, S., 1986, Seismic borehole tomography - Theory and computational methods, *Proc. IEEE* **74**, 328-338.
- Jackson, D. D., 1972, Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **28**, 97-109.
- Kim, H. J., Song, Y. H., and Lee, K. H., 1999, Inequality constraint in least-squares inversion of geophysical data, *Earth Planets Space*, **51**, 255-259.
- Lelievre, P. G., 2003, Integrating geologic and geophysical data through advanced constrained inversions, Ph.D's Thesis, University of British Columbia, Canada.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1996, 3-D inversion of magnetic data, *Geophysics*, **61**, 394-408.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 2003, Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and logarithmic barrier method, *Geophysical Journal International*, **152**, 251-265.
- Lines, L. R., and Treitel, S., 1983, Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems, *Geophysical Prospecting*, **32**, 159-186.
- Van der Sluis, A., and Van der Vorst, H. A., 1987, Numerical solutions of large, sparse linear algebraic systems arising from tomographic problems, in Norlet, G., Ed. *Seismic Tomography*, 49-83.
- Williams, N. C., 1999, Geologically-constrained UBC-GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew-Wiluna Greenstone Belt, Western Australia, Ph.D's Thesis, University of British Columbia, Canada.