

표준화된 원천세기를 리용한 3차원자기이상해석방법

최영남, 전광철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《앞선 탐사방법을 받아들이는데서 중요한것은 또한 지질탐사에 물리탐사방법의 최신 성과를 받아들이는것입니다.》(《김정일선집》 증보판 제14권 505페이지)

지난 시기 지구물리탐사자료를 해석할 때 잔류자화의 영향을 무시하고 감응자화만을 고려하였다.[1] 한편 잔류자화의 영향을 고려하기 위하여 자화방향의 영향을 받지 않는 물리적량들을 리용하는 해석방법들이 제기되었지만 이 방법들 역시 3차원문제의 경우에는 자화방향에 따라 해석결과가 차이난다.[2]

론문에서는 표준화된 원천세기의 특성을 고찰한데 기초하여 잔류자화의 영향을 고려하는 3차원자기이상해석방법을 제기하고 모형계산실험을 통하여 방법의 믿음성을 검증하였다.

1. 표준화된 원천세기의 특성

몇가지 단순한 자성원천들이 만드는 표준화된 원천세기는 다음과 같이 정의된다.[3]

$$\mu = \frac{qC_m}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^n} \quad (1)$$

여기서 n 은 구조지수, q 는 기하학적인자, \mathbf{r} 와 \mathbf{r}_0 은 각각 관측점과 원천점의 위치벡토르, $C_m = 10^{-7} \text{H/m}$ 이다.

식 (1)에서 보는바와 같이 표준화된 원천세기는 자성원천의 자화방향에는 관계되지 않는 물리적량이다.

일정한 체적을 가진 자기이상체가 만드는 자기마당 B 는 다음과 같이 표시된다.

$$B(\mathbf{r}) = -C_m \nabla_{r_0} \Phi(\mathbf{r}) = -C_m \nabla_{r_0} \int J(r_0) \nabla_{r_0} \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} dV \quad (2)$$

여기서 V 는 자기이상체의 체적, J 는 자화세기, Φ 는 자기스칼라포텐셜이다.

이때 자기구배텐소르는 다음과 같이 표시된다.

$$\Gamma = -C_m \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{xz} & B_{yz} & B_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

원천의 외부에서 Φ 는 라플라스방정식 $\nabla^2\Phi=0$ 을 만족시키므로 자기구배텐소르의 대각선의 합은 령과 같다.

대칭행렬 Γ 를 특이값분해하면 다음과 같다.

$$\Gamma = V\Lambda V^T \quad (4)$$

여기서

$$V = [V_1 \ V_2 \ V_3],$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

은 각각 고유벡토르와 고유값행렬이다.

표준화된 원천세기는 자기구배텐소르 Γ 의 고유값들에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$\mu = \sqrt{-\lambda_2^2 - \lambda_1\lambda_3} \quad (5)$$

식 (5)에서 보는바와 같이 자기구배텐소르 Γ 의 고유값들인 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 을 알면 자화방향과 독립인 표준화된 원천세기를 계산할수 있다.

자화방향에 따르는 표준화된 원천세기의 특성은 그림 1과 같다. 모형계산에서는 지자기마당의 복각 $i_0 = 45^\circ$, 편각 $d_0 = 45^\circ$, 자화세기 $J = 1\,000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 로 설정하였다.

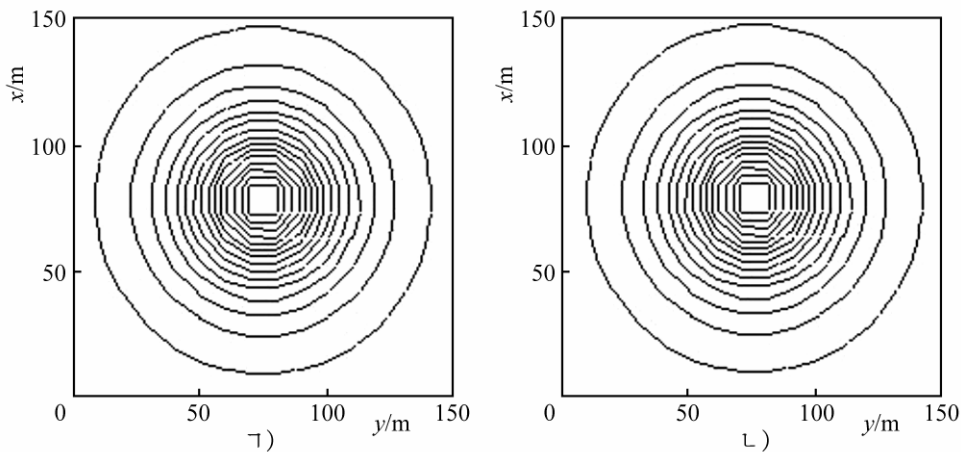


그림 1. 표준화된 원천세기의 특성

ㄱ) $j = 65^\circ, d = 25^\circ$, ㄴ) $j = 25^\circ, d = -65^\circ$

그림 1에서 보는바와 같이 자화방향이 다른 경우에도 표준화된 원천세기의 분포형태는 크게 차이나지 않는다. 이로부터 표준화된 원천세기가 자화방향의 영향을 거의 받지 않는다는것을 알수 있다.

2. 표준화된 원천세기를 리용한 3차원거꿀문제풀이

거꿀문제풀이를 위하여 관측면아래의 해석구역은 요소직6면체들의 모임으로 근사시킨다. 이때 직6면체의 자기구배텐소르성분들의 계산식은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned}
 B_{xx} &= J \left[N \frac{uv}{r(r^2 - v^2)} - M \frac{u}{r(r+w)} + L \frac{v(r+w)(u^2 - rw)}{r[(u^2 + w^2 + rw)^2 + u^2 v^2]} \right] \left[\begin{matrix} u_1 \\ u_0 \end{matrix} \right]_{v_0}^{v_1} \left[\begin{matrix} w_1 \\ w_0 \end{matrix} \right] \\
 B_{xy} &= J \left[-N \frac{1}{r} - M \frac{v}{r(r+w)} - L \frac{u[r(u^2 + w^2) + w(r^2 - v^2)]}{r[(u^2 + w^2 + rw)^2 + u^2 v^2]} \right] \left[\begin{matrix} u_1 \\ u_0 \end{matrix} \right]_{v_0}^{v_1} \left[\begin{matrix} w_1 \\ w_0 \end{matrix} \right] \\
 B_{xz} &= J \left[-M \frac{1}{r} + L \frac{uv}{r(r^2 - v^2)} + N \frac{vw(r^2 - u^2)}{r(r^2 w^2 + u^2 v^2)} \right] \left[\begin{matrix} u_1 \\ u_0 \end{matrix} \right]_{v_0}^{v_1} \left[\begin{matrix} w_1 \\ w_0 \end{matrix} \right] \\
 B_{yy} &= J \left[N \frac{uv}{r(r^2 - u^2)} - L \frac{v}{r(r+w)} + M \frac{u\{v^2(2r+w) - r[r(r+w) - u^2]\}}{r[(r^2 + rw - u^2)^2 + u^2 v^2]} \right] \left[\begin{matrix} u_1 \\ u_0 \end{matrix} \right]_{v_0}^{v_1} \left[\begin{matrix} w_1 \\ w_0 \end{matrix} \right] \\
 B_{yz} &= J \left[M \frac{uv}{r(r^2 - u^2)} - L \frac{1}{r} + N \frac{uw(r^2 - v^2)}{r(r^2 w^2 + u^2 v^2)} \right] \left[\begin{matrix} u_1 \\ u_0 \end{matrix} \right]_{v_0}^{v_1} \left[\begin{matrix} w_1 \\ w_0 \end{matrix} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

여기서 $r = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$, $u_i = x_i - x$, $v_j = y_j - y$, $w_k = z_k - z$, J 는 직6면체의 자화세기, $i, j, k = 0, 1, L$, M, N 은 각각 자화세기 J 의 방향코시누스들이다.

자화세기벡터 J 의 경사각과 편각을 각각 j 와 d 라고 하면 방향코시누스들은 다음과 같이 표시된다.

$$L = \cos j \cos d, \quad M = \cos j \sin d, \quad N = \sin j$$

식 (6)을 리용하여 자기구배텐소르성분들을 결정하고 그것의 고유값을 계산하면 표준화된 원천세기의 정문제풀이모형을 얻을수 있다. 정문제풀이를 진행할 때 자화방향은 임의로 설정한다.

표준화된 원천세기를 리용한 3차원거꾸문제풀이에서 거꾸문제풀이방법으로 SIRT법[1]을 리용하였는데 이때 추정파라미터는 매 요소체들의 자화세기이다.

관측자료로 자기이상완전성분이 주어진 경우에는 푸리에변환을 통하여 주파수영역에서 자기구배텐소르성분들을 구하고 표준화된 원천세기를 결정한다.

우리는 모형계산을 통하여 방법의 믿음성을 검증하였다.

모형계산에서 정상지자기마당의 방향은 $i_0 = 56^\circ$, $d_0 = -8^\circ$, 자성체의 자화방향은 $j = 30^\circ$, $d = 0^\circ$, 자화세기는 $J = 1000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 로 설정하였다. 그리고 관측자료수는 256개, 관측점들사이의 간격은 x, y 축방향으로 각각 10m로 하였다.

3차원자기이상체가 만드는 자기이상완전성분 ΔT (관측자기이상)와 이에 기초하여 계산한 표준화된 원천세기마당의 등값선도는 그림 2와 같다.

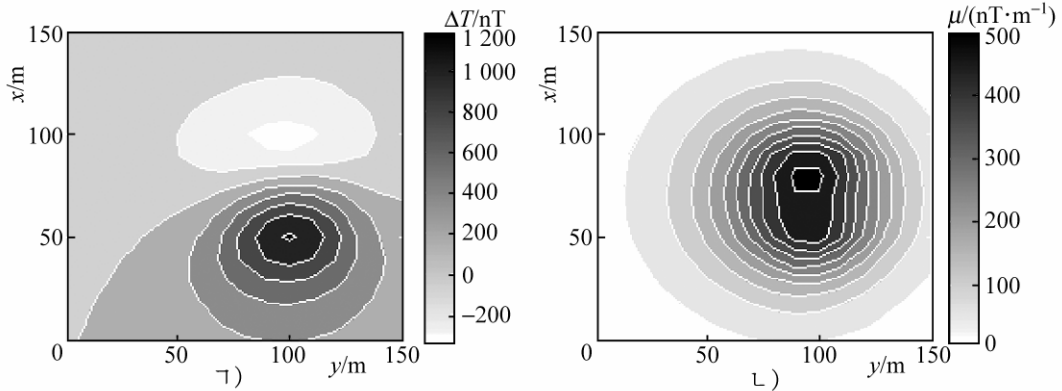


그림 2. 관측자기이상(ΔT)과 표준화된 원천세기(μ)

우리는 거꿀문제풀이를 진행하기 위하여 해석구역을 x , y 축방향으로 각각 16개, z 축방향으로 10개 즉 2 560개의 요소직육면체들로 분할하였다. 이때 요소체의 크기는 $10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m}$ 이다. 그리고 이상체의 자화방향을 모르는것으로 가정하였으므로 요소체들의 자화방향을 정상지자기마당의 방향과 일치시켰다.

표준화된 원천세기를 리용한 거꿀문제풀이결과($x=60\text{m}$)는 그림 3과 같다.

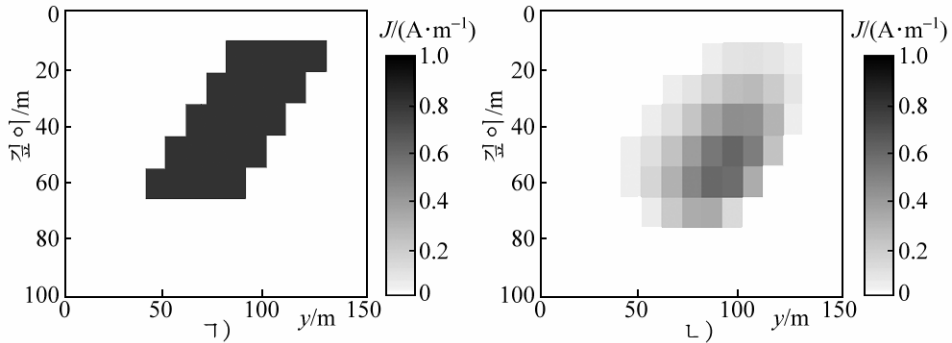


그림 3. 실제모형(J)과 해석자류면(J)

그림 3에서 보는바와 같이 자화방향을 모르는 경우에도 표준화된 원천세기를 리용하여 3차원이상체의 공간적위치와 놓임깊이, 형태를 비교적 정확히 결정할수 있다. 추정된 자화세기의 최대값은 $J=1\ 058 \times 10^{-3} \text{A/m}$ 로서 실제값과 비슷하다.

맺 는 말

표준화된 원천세기를 리용한 3차원자기이상해석방법은 자기이상체의 잔류자화를 고려할수 있는 효과적이면서도 믿음성있는 해석방법이다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 47, 1, 142, 주체90(2001).
- [2] Yaoguo Li et al.; Geophysics, 75, 1, L1, 2010.
- [3] Majid Beiki et al.; Geophysics, 77, 6, J23, 2012.

Three Dimension Interpretation Method of Magnetic Anomaly using Normalized Source Strength

Choe Yong Nam, Jon Kwang Chol

We suggested the 3D interpretation method of magnetic anomaly regarding the remanent magnetization on the basis of the property of normalized source strength and proved the reliability of the method via model calculation.

Key words: normalized source strength, remanent magnetization, magnetic anomaly